

BSPG 00103-304-2

沿岸防災 施設の 設計基準 算出 研究(II)

Estimation of Extreme Environmental Conditions  
for Coastal Disaster Prevention(II)

1990. 7.

研 究 機 關  
韓 國 海 洋 研 究 所

科 學 技 術 處

# 提 出 文

본 보고서를 “연안방재 시설의 설계기준 산출 연구(II)” 사업의 보고서로 제출합니다.

1990년 7월 일

한국해양연구소

연구책임자 : 강 시 환

연 구 원 : 이동영, 김창식

서승남, 심재설

박광순, 오병철

전기천, 김상익

박경수, 이종찬

정태성

기 능 원 : 박영길, 박승준

김선정

# 요 약 문

## I. 연구제목

연안방재 시설의 설계기준 산출 연구(II)

## II. 연구의 목적 및 중요성

우리나라의 연안지역은 국민생활과 경제 생산활동에 있어 중추적인 역할을 하고 있으며, 앞으로도 국토 이용공간의 확보를 위해 연안개발사업의 확대 추진이 불가피한 실정이다. 그러나 바다와 접한 임해지역에서는 태풍, 폭풍, 그리고 지진해일 등의 자연재해로 인해 많은 인명과 재산피해를 매년 입어 왔으며, 이 지역의 급속한 도시화 및 산업화가 촉진됨에 따라 이러한 재해의 피해 규모도 앞으로 더욱 증대될 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 우리 연근해와 임해지역에서 해양으로부터 연유되는 자연재해의 방지를 위한 제반 해안방재 시설의 축조, 건설에 필수적인 해양 설계자료를 산출하여 적합한 설계기준을 설정하는데 있다.

## III. 연구의 내용 및 범위

본 연구는 제1차년도에 이루어진 연안방재 시설물의 최적 설계를 위한 산출 기법의 보완 및 개선에 중점을 두었다. 특히 파랑산정모델을 개선하였고, 이를 적용하여 그 결과를 분석하였다. 제2차년도에 수행한 연구의 주요 범위는 다음과 같다.

1. 추정조위 산정방법의 검토 및 개선방안
2. 심해파랑의 추정 및 결과분석
3. 천해파랑 추정모델의 개발
4. 파향 스펙트럼의 분석기법과 적용
5. 확률 가중적률(PWM)방법을 이용한 극치통계 분석

#### IV. 연구결과 및 활용에 대한 건의

1. 해면산출을 위해 수로국 검조자료를 분석하였으며, 해일추산 방법도 검토하였다. 해일을 추산하기 위하여 일년간의 검조자료와 계산된 추정조위를 이용하여 해일의 시계열 자료를 만들었다. 이 자료에서는 반일주조의 주기를 갖는 peak들이 많이 나타났고 특히 서해쪽에 위치한 관측소에서 크게 나타났다. 이러한 주기적인 peak의 발생원인은 조석과 해일의 상호작용과 지형적인 영향등의 복합적인 요인에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 앞으로 검조자료의 전산입력이 이루어지면 주기성을 띤 천해분조를 효과적으로 고려하기 위하여 확장조화분석을 실시하고 이로부터 우리나라 주변의 천해분조 특성이 파악되어야 할 것이다.

2. 제주, 거문도, 여수, 충무의 평균해면을 산출하기 위해 매시간의 검조자료를 평균하여 일평균, 월평균, 년평균을 계산하였고, 또한 Doodson Xo-filter를 사용하여 일평균을 산출한 후 이를 산술평균하여 월평균과 년평균을 각각 구했다. 이 두 방법에 의한 결과의 차이는 매우 적은 것으로 나타났다.

3. 심해파 추정을 위한 해상풍 추정은 1985년부터 3년간의 일기도를 매 12시간 간격으로 digitizing하였고 해수면의 온도는 GMS 위성으로부터 관측한 10일 평균값을 위도, 경도 1°의 격자점에서 자료를 구해 사용하였다. 심해파랑을

추정하기 위해 DSA-5 모델을 사용하였다. Cardone 모델과 DSA-5 모델에 의한 해상풍과 파랑의 추정 결과를 일본기상청(JMA)의 MRI모델 결과와 비교하였다. 추정치는 평균적으로 MRI 모델 결과보다 낮게 나타났으나, 바람과 파랑이 큰 경우에는 MRI 결과보다 더 크게 나타났다. 이는 본 모델의 격자가 JMA 격자의 1/2이므로 태풍과 같이 공간적인 변화가 큰 경우에 대해 JMA보다 공간적 분포를 더 세밀하게 나타낼 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 태풍 VERA(1986.8) 시 관측자료와의 비교에서는 DSA-5 모델과 MRI 모델 모두 좋은 결과를 보였다.

4. 천해파의 산정에는 유의파의 천해변형과 불규칙파의 천해변형에 대한 연구가 이루어졌다. 유의파의 경우 마찰이 고려된 일정경사면 위의 파랑변형이 다루어졌다. 이 연구를 통하여 기존 연구결과인 Nielsen(1983)의 에너지 보존식은 잘못 세워진 것으로 밝혀졌으며 입사각이 커질수록 마찰에 의한 감쇠도 커지는 것으로 나타났다. 파랑의 굴절과 회절이 함께 고려된 유의파 변형모델인 “KORDI 89 모델”이 개발되었으며, 이 모델의 특징은 기억장치의 효율적인 사용과 빠른 계산력에 있으므로 PC로도 충분히 계산할 수 있다. 기존 실험치와 모델의 결과를 비교했으며 특히 모델의 회절 현상에 대한 재현 능력이 뛰어난 것으로 밝혀졌다.

5. 유의파를 사용한 굴절 계산결과로부터 인접 격자점 간에 매우 급격한 파고의 변화를 종종 발견하게 되며, 이는 실제 현상과는 부합되지 않는다. 이러한 점을 보완할 목적으로 개발된 불규칙 파랑의 변형에 대한 산정방법이 소개되었다. 불규칙 파랑을 나타내기 위하여 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼이 사용되었고 유한개의 주파수대와 방향으로 나누어 각 구간에 속한 대표주기와 에너지가 각각 계산되었다. 이를 각 구간의 대표 파랑으로 간주하여 유의파 추정방법에 사용한 천해 변형 결과를 계산한 뒤 이를 중첩하여 굴절계수를 계산하는 방법이다. 이 방법에 의해 계산된 굴절계수(또는 파고)는 인접 격자점간에 매우 완만하게 변하게 되며, 따라서 실제 현상에 보다 근접한 결과로 사료된다.

6. 파향스펙트럼의 분석 연구에는 Longuet-Higgins 등의 방법(LHM)과 최대 엔트로피방법(MEP)이 소개되었고 이들이 방향 분포함수를 재현하는 정도를 검토하기 위해 수치실험을 했으며, 그 결과 MEP는 파향의 분해능력이 우수한 것으로 나타났으며, 쌍봉형의 스펙트럼의 경우라도 두 peak의 차이가 큰 경우에는 뛰어난 분해능력을 보여주었다. 특히 MEP는 Delta 함수로 표현되는 방향분포는 원 분포를 그대로 재현하는 것으로 밝혀졌다. 한편, LHM은 계산시간이 빠른 점을 제외하면 MEP에 비해 분해능력이 매우 뒤떨어지는 것으로 나타났다.

7. 불규칙 파동장의 방향성을 나타내는 여러가지 방향파라미터를 소개하였다. Longuet-Higgins의 long-crestedness 파라미터는 파랑의 방향성을 나타내는 지표로 부적합한 경우가 있기 때문에 Goda의 평균분산각을 방향파라미터로 사용하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

8. 극치 통계분석에 사용되는 확률가중적률(probability weighted moment : PWM) 방법이 소개되었으며, 이는 모집단 분포에 대한 파라미터를 추정하는 방법이다. 기존적률(conventional moment)을 사용하는 방법은 변수  $x$ 에  $r$ 승이 가해져  $r$ 값이 커짐에 따라 관측치의 오차가 증폭되나 PWM 방법은 비초과 확률  $F$ 에  $n$ 승이 가해지기 때문에 오차는 크게 증폭되지 않는다. 특히 확률변수가 비초과 확률로 explicit하게 표시되는 경우(즉, 역함수가 존재하는 경우) PWM 방법은 매우 쉽게 적용될 수 있다.

9. 단기간의 관측자료를 극치분석할 때 생기는 오차를 규명할 목적으로 Weibull 분포에 대한 예를 들어 신뢰구간, 관측년수, 관측간격 그리고 분포 형태의 parameter에 대한 변화를 조사하였다. 단기간의 자료로부터 외삽에 의해 발생하는 오차는 재현기간의 제공근에 비례하고 관측기간과 파라미터의 제공근에 반비례하였다.

# SUMMARY

## I. Title of the Study

Estimation of Extreme Environmental Conditions for Coastal Disaster Prevention(II)

## II. Objective and Significance of the Study

Korean coastal areas play an important role in human and industrial activities. Coastal development for further enlargement of the land-use is inevitable due to the limited land. However, the coastal zone has been very vulnerable to natural disasters caused by typhoons, storms, and tsunami. Many lives and damages are claimed by these disasters each year. Furthermore, accelerated urbanization and industrialization of the coastal areas will be threatened by the extent of these damages. Thus, it is necessary to construct proper structures to protect the environment and reduce the damages caused by these natural disasters.

The main objective of this study is to evaluate the extreme statistics of the environmental parameters of threatening disasters of the past decade, and to determine an optimal design criteria for coastal structures to be utilized as disaster prevention measures.

### III. Contents and Scope of the Study

A strong emphasis is placed on supplementing and improving the techniques for an optimal design criteria of coastal preventative structures. Wave model was improved and the results of its application were analyzed. The main scope of the research carried out in this year(second year of 3-year project) are as follows:

1. Evaluation and improvement of computational methods of tidal elevation
2. Estimation of deep sea waves and analysis of the results
3. Development of transformation model for shallow water waves
4. Analysis methods of wave directional spectrum and its application
5. Extreme statistical analysis based on Probability Weighted Moment(PWM) methods

### IV. Results and Recommendations

1. Tide data observed by the Hydrographic Office was analyzed and utilized to extract the storm surge signals. Time-series of storm surges were created using the difference between the raw data and estimated astronomical tides. The data revealed many periodic peaks, especially the data from the tidal stations along the Yellow Sea. The causes of these periodic peaks are considered primarily to be the interaction between the tides and surges, and the effects of the complex bottom topography. When the tide data are logged into a data-based, an extended harmonic analysis is to be carried out to understand the nature of the shallow water components arising from the nonlinear interaction of the tides and the shallow bottoms.



2. Hourly tide data was averaged to calculate the daily, monthly, and yearly averages of the mean sea level at Cheju, Keomundo, Yeosu, and Chungmu. In addition, the daily average from the Doodson Xo-filter was arithematically averaged to obtain a monthly and yearly average. The difference between these two methods was found to be insignificant.

3. To estimate the winds at sea, the daily weather charts (for three years since 1985) were digitized at every twelve hours. Also the surface temperature data of ten-day mean values (observed by the GMS satellite with grid size of  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ) were used as inputs for the model. To estimate the winds and waves in deep waters, numerical models were used, and their results were compared. The models used were the DSA-5, Cardone, and MRI of Japanese Meteorological Agency (JMA). The results of the DSA-5 and Cardone were, on the average, lower than that of the MRI model; however, when the wind and the wave were strong and high, the estimated data was higher. The discrepancy is believed to have occurred because the DSA-5 model used a grid size one half of that of the MRI model. In the cases where spatial changes are large such as in a typhoon, the spatial resolution of DSA-5 model is more fine than that of JMA's. Comparing the observed data from the typhoon, Vera (August, 1986), both the DSA-5 and MRI model showed good results.

4. In the shallow water wave calculation, studies on the transformation of the significant and irregular waves were conducted. The effect of the bottom friction was considered in the transformation of significant waves on the plane slope. It was also found that, as the incident angle increased the energy dissipation due to friction also increased, which is a contrast to so called "energy conser-

vation formula" suggested by Nielsen(1983). An improved model, "KORDI '89 MODEL", which takes refraction and diffraction of wave into account, was developed. Distinctive features of this model is such that it can be used on a PC; the memory allows for an efficient use and fast calculations. In comparing the results with the existing laboratory data and model, it was found that this model's performance in considering diffraction phenomena was outstanding.

5. It was found that the result of refraction calculation from the significant waves showed an abrupt change in wave heights between adjacent grid points. This was certainly not the phenomena in the nature. Calculation methods which reduces these abrupt change in height of irregular waves were developed. Bretschneider-Mitsuyasu spectrum was used to reveal irregular waves. Representative frequency and energy of each finite band of frequency was also calculated. These information regarded as the characteristics of each band was used in the calculation of the significant wave estimation methods. Then, refraction coefficients were calculated by superposition of separate band information. The refraction coefficients(and wave heights) calculated in this method show a smooth change between adjacent grid points and is in close approximation to the real phonemona.

6. In the analysis and study of directional spectrum, the Longuet-Higgins Method and Maximum Entropy Principle were introduced. To examine the ability of these methods to reproduce the directional distribution, numerical testing was conducted. The MEP method was found to have outstanding ability to analyze the wave direction, even in double peak spectrum where two peak had a large difference. The MEP method was good for the directional distribution represen-

ted by a Delta function. LHM method is advantageous in its fast computational speed relative to the MEP, however, MEP performs better with higher resolution in directional distribution.

7. Directional parameters were evaluated to reveal directionality of various irregular wave field. Long-crestedness parameter suggested by Longuet-Higgins was not always adequate as an index to reveal the directionality of waves. It was found that the average spreading angle suggested by Goda was better as the directional parameter.

8. Probability Weighted Moment(PWM) to be used in extreme statistical analysis was introduced. This is a method for estimating the parameter of the mother sample. The conventional moment method is a function of  $x$  to the  $r$ -th power; the error is amplified with an increase in  $r$ . However, in PWM the non-exceeding probability variable,  $F$ , is raised to the  $r$ -th power, thus the error is not amplified. If the probability variable can be explicitly expressed as the non-exceeding probability variable, then the PWM can be easily applied.

9. To examine the cause of the error arising in the extreme analysis of the short-term observed data, variations of Weibull distribution function (confidence limit, length of observation, observation interval, and distribution function parameter) were studied. The error arising from the extrapolation of short-term data analysis is directly proportional to the square-root of the return period and is inversely proportional to the square-root of the observation period and parameter.

# 목 차

요 약 문 .....	3
그림목차 .....	21
표 목 차 .....	25
제1장 서 론 .....	27
제2장 해면산출 .....	31
제1절 고조(폭풍해일)의 발생원인 .....	32
2.1.1. 고조의 현상 .....	32
2.1.2. 고조의 발생원인 .....	34
제2절 해면자료 현황 .....	42
제3절 해일의 추정 .....	45
제4절 평균해면의 산출 .....	66
제3장 파랑산정기법의 검토 .....	71
제1절 심해파 추정 .....	72
3.1.1. 해상풍 모델 .....	72
3.1.2. 파랑모델 .....	75

제2절 천해파랑 추정의 이론적 검토 .....	93
3.2.1. 마찰을 고려한 파고계산 .....	93
3.2.2. 포물형 근사식에 의한 천해파 산정 모델 .....	107
3.2.3. 불규칙파의 천해변형 .....	126
제3절 파향스펙트럼 추정의 이론적 검토 .....	136
3.3.1. LHM과 MEP의 파향스펙트럼 추정식 .....	137
3.3.2. LHM과 MEP의 방향 분해능 검토 .....	141
3.3.3. 파랑의 방향파라미터 .....	152
3.3.4. 관측자료의 분석 .....	162
제4장 극치통계 .....	166
제1절 확률가중적률법 .....	166
4.1.1. PWM법의 내용 .....	167
4.1.2. inverse form이 가능한 분포 .....	174
4.1.3. inverse form이 불가능한 분포 .....	176
제2절 극치파랑통계의 오차 .....	184
4.2.1. 단기간 자료의 외삽에 의한 오차 .....	186
4.2.2. 관측 및 hindcasting 오차 .....	192
4.2.3. 단기간 자료의 부정확한 자료의 결합오차 .....	196
4.2.4. 기후변화에 의한 오차 .....	202
제5장 결    론 .....	205

사 사 .....	209
참고문헌 .....	211
부 록 .....	219

# CONTENTS

Summary .....	7
List of Figures .....	21
List of Tables .....	25
Chapter I. Introduction .....	27
Chapter II. Estimation of sea surface elevation .....	31
Section 1 Generation of storm surges .....	32
2.1.1 Dynamics of storm surges .....	32
2.1.2 Generating forcing to storm surges .....	34
Section 2 Data of sea surface elevation .....	42
Section 3 Prediction of storm surges .....	45
Section 4 Computation of mean sea level .....	66
Chapter III. Review of wave prediction methods .....	71
Section 1 Prediction of deep-water waves .....	72
3.1.1 Wind prediction models .....	72
3.1.2 Wave prediction models .....	75

Section 2 Theoretical review of shallow-water wave prediction .....	93
3.2.1 Computation of wave height including bottom friction .....	93
3.2.2 Shallow-water wave prediction using the parabolic approximation .....	107
3.2.3 Transformation of irregular waves in shallow-water .....	126
Section 3 Theoretical review of directional wave spectrum .....	136
3.3.1 Directional wave spectrum equations of LHM and MEP .....	137
3.3.2 Directional resolutions of LHM and MEP .....	141
3.3.3 Directional wave parameter .....	152
3.3.4 Analysis of observed wave records .....	162
 Chapter IV. Extreme statistics .....	 166
Section 1 Probability Weighted Moment method .....	166
4.1.1 Characteristics of PWM method .....	167
4.1.2 Probability distribution in inverse form .....	174
4.1.3 Probability distribution not in inverse form .....	176
Section 2 Errors in extreme statistics analysis .....	184
4.2.1 Errors due to extrapolation of short-term data .....	186
4.2.2 Errors in observation and hindcasting .....	192
4.2.3 Combined errors due to uncertain short-term data .....	196
4.2.4 Errors due to climate change .....	202
 Chapter V. Conclusion .....	 205



Acknowledgment .....	209
References .....	211
Appendix .....	219

## LIST OF FIGURES

Fig. 2.1. Variation of water level deviation by storm surge. ....	33
Fig. 2.2. Relationship between water surface friction coefficient and wind speed. ....	36
Fig. 2.3. Location of tidal stations of Korea Hydrographic Office. ....	43
Fig. 2.4. Plot of tide observation data for data correction .....	51
Fig. 2.5. Plot of yearly residual for data correction .....	52
Fig. 2.6. Tracks of Typhoon Forrest(1983), Holly(1984), Brenda(1985), Vera(1986), Thelma(1987), Dinah(1987). ....	53
Fig. 2.7. Time series of calculated surge at the Keomundo, Chungmu, Pusan during Typhoon Forrest. ....	54
Fig. 2.8. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Yeosu, Chungmu, Pusan during Typhoon Holly. ....	55
Fig. 2.9. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Yeosu, Chungmu, Pusan during Typhoon Brenda. ....	57
Fig. 2.10. Time series of calculated surge at the Keomundo, Chungmu, Pusan during Typhoon Vera. ....	60
Fig. 2.11. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Chungmu during Typhoon Thelma. ....	61
Fig. 2.12. Time series of calculated surge at the Cheju, Chungmu, Pusan during Typhoon Dinah. ....	62
Fig. 2.13. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Pusan during the winter(1987, 11). ....	63

Fig. 3.1. Numerical grid system for the wind and wave models .....	74
Fig. 3.2. Schematic diagram of the atmospheric structure .....	75
Fig. 3.3. Numerical grid system for the JMA model .....	79
Fig. 3.4. Scatter diagram showing the relation between the Cardone model and JMA wind model. ....	80
Fig. 3.5. As in Fig. 3.4 except between the DSA model and MRI model. ....	82
Fig. 3.6. Comparisons of winds and waves calculated by models with observations at (a) Geomun-do and (b) Geoje-do ; the solid lines denote the JMA model results, the thick lines the results of the Cardone model and DSA model. ....	86
Fig. 3.7. Distribution of wave height with probability of once per one month. ...	88
Fig. 3.8. Distribution of wave height with probability of once per one week. ...	89
Fig. 3.9. Distribution of wave height with probability of once per two day. ....	90
Fig. 3.10. Wave roses of the DSA model results. ....	91
Fig. 3.11. Definition sketch of energy flux conservation. ....	96
Fig. 3.12. Wave height variation due to shoaling, refraction and bottom friction for different incident angles. ....	99
Fig. 3.13. The least square fit and Taylor expansion for $(1-x)^{-0.75}$ . ....	104
Fig. 3.14. Topography for the experiment of Ito et al.(1972). ....	116
Fig. 3.15. Comparison of laboratory data and linear model result for circular shoal. - linear model : ⊙ laboratory data. ....	118
Fig. 3.16. Comparison of laboratory data and nonlinear model result for circular shoal. - nonlinear model : ⊙ laboratory data. ....	119
Fig. 3.17. Topography for the experiment of Berkhoff et al.(1982). ....	121

Fig. 3.18. Comparison of laboratory data and nonlinear model result for elliptic shoal. — nonlinear model : $\circ$ laboratory data. ....	122
Fig. 3.19. Computed amplitude contours for elliptic shoal. ....	125
Fig. 3.20. Cumulative distribution of relative wave energy with respect to angle from principal wave direction (from Goda, 1985). ....	131
Fig. 3.21. Refraction diagram (from Goda, 1985). ....	132
Fig. 3.22. Numerical simulations : Delta functions. ....	145
(a) $\alpha_1=1.0, \theta_1=0^\circ$	
(b) $\alpha_1=\alpha_2=0.5, \theta_1=\theta_2=-30^\circ$	
(c) $\alpha_1=0.2, \alpha_2=0.3, \alpha_3=0.5, \theta_1=\theta_3=-30^\circ, \theta_2=0^\circ$	
(d) $\alpha_1=0.2, \alpha_2=0.3, \alpha_3=0.5, \theta_1=\theta_3=-60^\circ, \theta_2=0^\circ$	
Fig. 3.23. Numerical simulations : Unimodal forms. ....	147
(a) $s=1.0$ (b) $s=2.0$ (c) $s=5.0$	
(d) $s=10.0$ (e) $s=20.0$ (f) $s=100.0$	
Fig. 3.24. Numerical simulations : Bimodal forms with equal peaks. ....	149
( $\alpha_1=\alpha_2=0.05, s_1=s_2=20.0$ )	
(a) $\Delta\theta=60^\circ$ (b) $\Delta\theta=70^\circ$ (c) $\Delta\theta=90^\circ$	
(d) $\Delta\theta=120^\circ$ (e) $\Delta\theta=150^\circ$ (f) $\Delta\theta=180^\circ$	
Fig. 3.25. Numerical simulations : Bimodal forms with unequal peaks. ....	151
( $\alpha_1 N(s_1)/\alpha_2 N(s_2)=0.5, s_1=100.0, s_2=10.0$ )	
(a) $\Delta\theta=60^\circ$ (b) $\Delta\theta=70^\circ$ (c) $\Delta\theta=90^\circ$	
(d) $\Delta\theta=120^\circ$ (e) $\Delta\theta=150^\circ$ (f) $\Delta\theta=180^\circ$	
Fig. 3.26. Directional wave spectrum in wave number space. ....	155
Fig. 3.27. Mean and principal directions in a two-wave system. ....	159
(a) $2\delta < 90^\circ$ (b) $2\delta > 90^\circ$	
Fig. 3.28. Wave directional parameters of a two-wave system as a function of crossing angle. ....	160

Fig. 3.29. Wave directional parameters of a unimodal spreading as a function of spreading coefficient. ....	162
Fig. 3.30. Time series plot for significant wave heights and periods from pressure data at Pusan. ....	163
Fig. 3.31. Frequency spectra from pressure data at Pusan. ....	164
Fig. 3.32. Directional wave distributions for selected frequencies by LHM and MEP. ....	165
Fig. 4.1. Accuracy of prediction as function of record length ....	191
(a) $\Delta t=6$ hours, $r=1.0$	
(b) $\Delta t=6$ hours, $r=1.2$	
(c) $\Delta t=6$ hours, $r=1.4$	
Fig. 4.2. Normalized standard deviation as function of the number of years ....	198
(a) $R= 20$ years, $\Delta t=6$ hours	
(b) $R= 50$ years, $\Delta t=6$ hours	
(c) $R=100$ years, $\Delta t=6$ hours	
Fig. 4.3. Comparison of confidence bands about probability of exceedance curve based on 20years of observations and measurement error $\sigma_M = 0.10$ and 5years of observations and measurement error $\sigma_M = 0.0$ ....	201
Fig. 4.4. Comparison of confidence bands about probability of exceedance curve corresponding to number of years of observations $Y$ and relative measurement error $\sigma_M = 0.0$ ....	202

## LIST OF TABLES

Table 2.1 List of inputted tide data by Hydrographic Office.....	44
Table 2.2 Test of the least square method used for harmonic analysis.....	49
Table 2.3 List of used tide data for surge calculation.....	50
Table 2.4 Monthly distribution for the calculated surge at Pusan, Chungmu, Yeosu, Keomundo, Cheju on 1985.....	64
Table 2.5 Monthly and yearly mean sea levels at Chungmu, Yeosu, Cheju, Keo- mundo(arithmetic mean and mean after Doodson x0-filtering).....	67
Table 3.1 Statistical results of the comparison between the JMA wind model and the Cardone model.....	84
Table 3.2 Statistical results of the comparison between the MRI model and the DSA model.....	85
Table 3.3 Comparisons of wave number calculations.....	101
Table 3.4 Comparisons of numerical and approximate results.....	106
Table 3.5 Comparisons of Nielsen's and present results.....	106
Table 3.6 Representative periods of component waves for refraction analysis (from Goda, 1985).....	129
Table 3.7 Ratio of wave energy in each direction to the total energy (from Goda, 1985).....	132
Table 3.8 Example of random wave refraction analysis (from Goda, 1985).....	133
Table 4.1 Distribution functions.....	175
Table 4.2 Moment expressions.....	175

Table 4.3	Parameter expressions .....	175
Table 4.4	Data duration required as function of return period (confidence level = 90%, uncertainty = 20%). .....	193
Table 4.5	Climatological variations $\sigma^*(R)$ as function of $r$ (assume $\Delta t = 6$ hrs) .....	204

## 제 1 장 서 론

우리나라 연안역은 오늘날 국민생활과 경제생산 활동의 중심지로서 활발히 개발·이용되고 있으며, 특히 좁은 국토와 빈약한 육상의 부존자원을 감안할 때 국토의 이용공간 확대는 물론 자원개발의 측면에서도 앞으로 지속적인 연안개발이 예상된다. 따라서 적절한 연안역 이용과 보존에 국가적인 큰 기대와 관심이 고조되고 있고, 국민의 쾌적한 생활환경 조성과 국가경제발전에 더욱 크게 기여할 수 있도록 우리나라 연안역이 갖는 자연과 인문사회적인 특성이 잘 조화된 개발정책의 수립이 요청되고 있다.

연안역은 바다와 육지가 접한 특수한 지형적 여건으로 인해 태풍, 폭풍, 지질해일 등으로 인한 자연재해로부터 매년 막대한 인명과 재산상의 피해를 입고 있다. 특히 우리나라 연안에서의 자연재해는 강풍에 의한 풍력과 또 이에 의해 생성되는 파랑, 그리고 폭풍과 지진에 의한 이상해면 상승·하강 등에 의해 주로 발생되고 있다. 태풍, 폭풍에 의한 풍파는 항해중이거나 정박중인 선박의 좌초·침몰, 해양구조물의 파괴, 해안선의 침식, 토사의 이동 등 많은 피해를 일으키며, 해면상승은 그 자체가 저지대를 물에 잠기게 하여 피해를 주게 되며, 또 해면상승으로 인해 보통 때는 도달하지 못하던 해안선 부근까지 풍파의 영향이 미치게 되어 큰 피해를 일으키게 한다. 특히 연안매립지와 같은 연안 저지대에서의 도시 및 산업시설 건설 등 경제활동이 증가됨에 따라 이들 지역에서는 적절한 연안방재 시설물이 설치되지 않고서는 앞으로 큰 피해가 예상된다. 비록 빈도는 낮지만 동해에서 일어난 해저지진에 의한 쓰나미에 의해 특히 우리나라 동해안의 항만과 임해지역에 막대한 피해를 유발시켰으며,



남·동해안에 위치한 여러 내만에서는 주로 폭풍의 발생시에 부진동 현상으로 인해 저지대의 침수 또는 항내 계류중인 선박이 동요하여 하역작업에 장애를 주거나 충돌사고가 빈발되고 있다.

이상해면상승, 즉 고조는 태풍이나 저기압에 수반해서 해안에서 해면이 이상하게 높게 되어 육지로 해수가 침입해 오는 현상이다. 이 고조의 원인은 태풍이나 저기압 중심의 기압이 국부적으로 낮음에 의한 해면의 상승(1mb 기압이 하강하면 해면은 약 1cm 상승), 바람의 작용, 폭풍에 의한 파고의 증대 등으로 이와 관련되어 생기는 만내의 부진동에 의한 해면상승이 만조위와 더해지면 대단히 높은 수위상승을 유발케 된다. 이러한 고조에 의한 재해는 1228년 네델란드에 내습한 고조에 의해 10만의 사망자와 많은 재산피해를 냈고, 이것이 기록에 남은 최초의 고조피해이다. 역시 10만 이상의 사망자를 낸 홍수·고조피해는 1228년부터 1980년까지 753년간에 6회를 헤아리며, 1만명 이상의 사망자를 낸 고조피해는 10회이다. 가까운 일본의 경우 고조피해의 실례로써는 1959년 15호 태풍에 의해서 일어난 이세만 재해를 들 수 있는데, 이때 사망 4,645명, 부상 60,441명, 가옥전파 32,629호, 유실 4,666호, 침수 194,041호이다.

한편 우리나라도 매년 여러차례의 태풍, 온대성저기압, 그리고 동계의 강한 계절풍 등으로 인한 해상의 큰 파도와 함께 수반되는 해일을 유발시켜 연안 침수 및 제반 시설물의 붕괴, 유실 등으로 인해 매년 막대한 인명과 재산의 피해를 입고 있다. 지난 10여년간 매년 1,000억원 이상의 재산피해와 많은 인명피해를 입어 왔으며, 이에 대한 복구사업 등으로 인하여 국가의 경제적 손실이 막대한 것으로 나타나 있다. 현재 서해안을 비롯한 전국해안에서는 간척이나 매립 등으로 가장 집약적인 토지이용, 개발이 행해지고 있으며, 이러한 연안개발을 통한 공단·주거시설 조성 및 연근해에 대한 이용과 활동

범위가 증가됨에 따라 앞으로 재해발생에 따른 피해도 크게 늘어날 것으로 전망된다.

이러한 연안방재를 위한 연안개발계획에 필수적인 방재시설물의 최적설계와 건설을 위해 선진외국의 경우 막대한 연구비 투자와 연구개발에 정진하고 있다.

연안재해의 발생요인이 우리나라와 거의 유사한 일본의 경우에는 연안방재를 위해 본격적인 방재사업이 행해진 것은 1949년 이후로써, 일본에서는 전후 고조에 의한 격심한 피해를 입었기 때문에 재해 복구 뿐만 아니라 재해를 미연에 방지하기 위한 개량사업으로 1950년부터 연안제방 개축사업이, 1952년부터 침식대책사업 및 국지개량사업이 각각 국가의 보조사업으로 실시되고 있고, 그후 1956년에 연안법이 제정되어 연안방재사업이 법률에 기초하여 실시되고 있다. 이 법률에 의해 일본의 연안행정은 건설, 운수, 농림수산성의 공동으로 추진되고 있다. 이후 연안사업을 계획적으로 실시하기 위해 1980년부터 제1차연안5개년계획(1980~1984)이 발족되었고, 이후 2, 3차 사업으로 발전하고 있다. 최근 국내에서도 건설부 주관으로 국가적인 자원에서의 종합방재대책, 그리고 이에 따른 중·장기 계획 수립을 위한 연구조사(건설부, 1988)가 이루어졌으며, 이 분야에 대한 국가적인 관심이 고조되고 있음은 다행스런 일이라 하겠으나, 아직도 구체적인 국가정책수립과 함께 장기적인 연구계획이 마련되지 못하고 있는 실정이다.

해양에 있어서의 자연재해 발생은 대부분의 경우에는 발생 그 자체를 예측하거나 방지할 수 없기 때문에, 그 피해 경감을 위해서는 항상 재해발생에 대비하여 방재시설물의 축조, 건설 및 설비강화를 도모하는 것이 최선책이라 하겠다. 그러므로 먼저 재해발생의 빈도가 높은 연안지역의 각종 해양재해인자에 대한 면밀한 조사와 함께 연안시설물의 실시설계기준(설계과, 설계해면

등)이 보다 정확하게 도출되어 설정되어야 할 것이다. 따라서 본 연구는 우리나라 연근해와 임해지역에서 해양으로부터 연유되는 자연재해의 피해절감 내지는 극소화를 위해 보다 효율적이고 안전한 연안방재시설의 축조 및 건설을 위해 필수적인 최적설계 기준치를 산출하는데 그 목적이 있다. 이러한 설계기준의 산출을 위해서는 장기적인 연안관측을 통해서 관측자료가 축적될 수 있도록 보다 효율적인 해양관측시스템이 연구개발 되어야 할 것이다. 이러한 현장관측자료를 토대로 각종 해양수치모델을 연구개발함으로써 Hindcasting기법을 통해 설계기준 자료로서 활용될 수 있는 각종 해양재해요소에 대한 정밀한 자료가 산출될 수 있으며, 이렇게 산출된 방대한 자료는 그 발생빈도 해석과 통계적 처리분석을 통해서 보다 신뢰성 높은 설계기준치의 도출이 가능하게 된다.

금번 2차년도의 연구에 있어서는 우리나라 연안의 검조소의 해면 관측자료를 분석 정리하였으며, 보다 정도 높고 정밀한 연안설계과 추정을 위한 기초연구가 중점적으로 수행되었다. 특히 해안선이 매우 복잡하고 다양한 우리나라의 연안해역에 응용될 수 있는 규칙파의 천해변형에 대한 이론적 전개 및 검증, 그리고 보다 정밀하고 경제적인 설계에 필요한 파향스펙트럼의 천해변형을 보다 정확히 추정할 수 있는 이론과 방법이 검토되었다. 지금까지 우리나라의 연안관측자료의 축적이 매우 빈약할 뿐만 아니라 비록 제한된 관측자료의 경우에도 많은 불확실성을 내포하고 있어 이로부터 정확한 설계치를 산출하는데는 많은 어려움이 있다. 이러한 현실적인 한계를 극복하기 위해서는 보다 고차원적인 극치통계처리방법의 연구 개발이 요구되며, 통계처리된 결과에 대한 오차범위와 한계가 정확히 분석되고 파악되어야만 비로소 신뢰성을 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 정확한 해양설계자료의 산출, 분석방법 뿐만 아니라 단기간의 제한된 기존 관측자료로부터 오차범위가 축소되고 신뢰성 있는 극치설계값을 얻기 위한 통계처리 방법에 대한 연구가 수행되었다.

## 제2장 해 면 산 출

연안지역은 산업의 발전과 더불어 항만, 임해공업단지 건설 등 연안지역에 대한 시설물의 확충이 광범위하게 이루어지고 있다. 또한 해안매립으로 국토 이용의 효율화를 꾀하면서 연안역 이용이 가속화되고 있는 추세이다. 이러한 해안매립지와 연안 저지대에서의 도시 및 산업시설의 건설과 연안역 거주 주민의 인명과 재산을 기상급변에 기인한 해일 등에 의한 연안침수, 연안구조물 파괴 등 과 같은 자연재해로부터 보호하는 대책을 수립하기 위하여 해면산출에 대한 연구가 선행되어야 한다.

해면변화를 일으키는 원인과 그효과에 대해서 알아보고, 우리나라 연안에 설치되어 있는 수로국 검조소의 자료를 이용하여 우리나라 연안지역에 발생하는 이상해면(고조)의 변화와 특징을 살펴보았다. 관측된 자료와 앞으로의 관측자료를 효율적으로 유지·관리하기 위하여 자료의 전산화가 현재 수로국이 주축이 되어 이루어지고 있다. 수로국 검조소 자료의 전산입력에 상당한 시간이 소요되므로 이번에는 남해안의 5개 지점의 5년에서 10년간의 관측자료를 이용하여 과거에 발생한 해일을 추정하였다. 추정한 해일의 계절별, 년별 특성을 지역에 따라 비교하여 살펴보고, 해일의 추정 방법에 대하여 고찰하였다.

각 검조소의 자료로부터 비교적 단기간이지만 평균해면을 산출하여 각 검조소별 해면변화의 특성도 살펴보았다. 장기간의 검조소자료가 전산입력되어 자료이용이 이루어지면 우리나라 전 연안에대한 해일특성과 해면변화를 자세히 살필 수 있으리라 생각된다.

## 제1절 고조(폭풍해일)의 발생원인

해면의 승강은 달과 태양의 인력에 의한 천문조와 바람이나 기압 등의 현상에 기인한 기상조 등이 중복되어 일어나는 현상이다. 평상시에는 기상조는 극히 작고, 주로 천문조가 탁월하다. 따라서 해면의 승강은 천체운동과 같이 규칙적으로 움직이기 때문에 장기간에 걸쳐 조위를 예측할 수 있다. 그러나 태풍이나 발달한 저기압이 통과함에 따라 폭풍과 현저한 기압강하로 인하여 해안에서 예보조위보다 수위가 현저히 상승하는 일이 있는데, 이것을 고조 또는 폭풍해일라고 부르며, 주요 원인은 강풍에 의해 발생하나 기압강하의 효과도 무시할 수 없다.

고조는 외해에서도 발생하지만 실제로 영향은 적고 별로 눈에 띄지 않는다. 고조가 조석의 만조시에 중복하여 일어나면 수위가 매우 높아지므로 방조제를 파괴하고, 연안시설, 가옥, 인명 등에 큰 피해를 끼치기 때문에 고조의 발생 시각과 수위상승량을 정확히 예보하고, 산출하는 것은 매우 중요한 일이다.

### 2.1.1. 고조의 현상

고조는 이론적으로 장파로서 취급되고 있지만 진파(쓰나미)처럼 순수한 파동은 아니다. 열대성 저기압에 의한 고조의 전형적인 한 예로서 시간에 따른 조위편차의 변화를 Fig. 2.1에 나타내었다. 이 그림에서 26일 14시경과 27일 1시경을 경계로 고조가 3단계로 구분되어지고 있다. 이것들을 전구파(forerunner), 주요고조(main surge) 및 말기고조(resurgence)라고 부른다.

전구파는 열대성 저기압이 접근하기 훨씬 전에 일어나며, 천천히 조위가 상승한다. 열대성 저기압의 중심은 해안에서 먼 심해에 있지만 심해에서 발

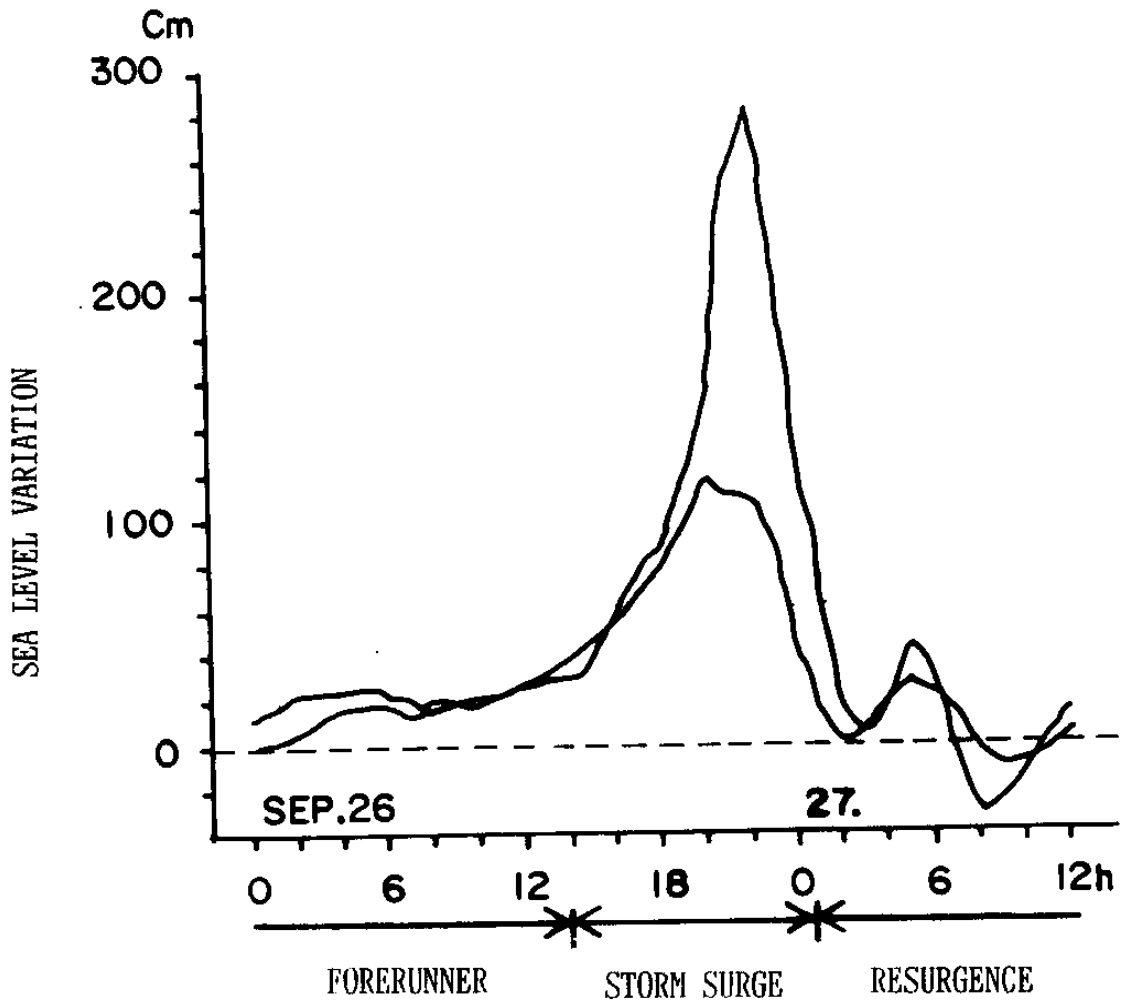


Fig. 2.1. Variation of water level deviation by storm surge.

달된 고조가 열대성 저기압의 이동속도보다 빠르게 밀려와 해안의 수위변동을 일으킨다.

주요고조의 단계에서는 열대성 저기압의 폭풍과 기압하강의 직접적인 작용으로 급속하게 수위가 상승한다. 저기압이 통과하여 먼거리로 빠져나감에 따라 바람과 기압의 작용이 감소하여 수위가 급속히 원상태로 되돌아간다. Fig. 2.1에서 고조peak 15시간 전에 80cm 만큼의 수위가 상승하였고, peak 15시간 후에는 약 70cm 하강하였다. 이 예에서는 주요고조의 기간은 약 0.5일 이고,

고조의 peak는 약 2.8m이다. 그러나 주요고조가 2~3일 연속한 예도 있다. 1961년의 허리케인 Carla 가 멕시코만 서부에 상륙할때 Galveston에 일어난 고조의 peak가 2.7m, 그리고 1.5m이상의 고조기간은 50시간 계속됐다. 주요고조는 인명과 재산 피해의 원인이 되기 때문에 그 성질과 열대성 저기압의 특징과의 관계를 규명하여 조위상승의 공간분포, 발생시간, 연속시간 등을 판별하는 것은 방재 활동상 매우 중요한 일이다.

주요고조 후에는 말기고조의 단계로서 저기압의 직접적 영향은 없이 수위는 서서히 정상상태로 돌아가지만 지형이나 그외의 영향에 의하여 진동현상을 보이고 있으며, 말기고조는 2~3일 계속되기도 한다. Fig. 2.1은 말기고조의 기간에 약 7시간 주기의 현저한 진동이 보이는데, 그것은 관측지점의 지형적인 영향에 의한 것이다.

### 2.1.2. 고조의 발생원인

발달한 열대성 저기압이나 온대성 저기압에 동반하여 고조가 일어나는데서 알 수 있듯이 폭풍과 현저한 기압강하가 고조의 주요한 발생원인이다. 더욱이 해저지형과 해안형상이 고조의 발달을 지배하는 특별한 요인이 된다. 우리나라의 경우 만구가 남쪽이나 서쪽으로 열리고 비교적 수심이 낮은 곳에서 현저한 고조가 빈번히 일어나고 있다. 이것은 해저마찰의 효과가 큰 것을 의미하고 있다. 풍파나 swell의 효과, 기상요란의 이동과 장파의 속도와의 공명형상, 지구자전의 효과, 만의 물의 자유진동 등이 고조의 현상에 복잡하게 영향을 미치고 있다. 또한 조석과 고조의 상호작용이나 강우의 효과가 중요하게 되기도 한다. 이 요인의 탁월한 정도는 지역적으로도 틀리고, 태풍과 저기압의 구조나 진로, 진행속도 등에 대하여 틀리기 때문에 각각의 요인의 특징을 충분히 이해하지 않으면 안된다.

1) 기압효과

바다가 넓고 충분히 깊고 지구자전의 영향을 무시할 수 있을 정도로 해수의 운동이 완만하면 기압변화에 기인한 조위변화량  $\zeta^*$ (cm)는 다음과 같이 표시된다.

$$\zeta^* = 0.997 \Delta P \quad (2.1)$$

여기서  $\Delta P$ 는 기압 강하량(mb)이다. 이 관계는 외해에 접하고 있는 해양이라든지 외딴 섬인 경우에는 좋은 정도로 성립되는 것이 관측으로 증명되어 있다.

기압강하는 태풍이나 허리케인의 경우에 특히 현저하다. 우리나라에서 관측된 최저기압의 기록은 1959. 9. 17에 남해상에서 관측된 951mb이다. 표준기압을 1013mb로 하면 68mb의 하강으로 위식에 의하면 67.8cm의 수면상승을 일으킨다.

2) 바람의 효과

수심이 조위 상승량에 비하여 충분히 깊으면 해저 마찰의 효과는 무시할 수 있다. 지구자전의 효과 및 관성항도 무시할 수 있으면

$$\nabla(\zeta - \zeta^*) = \tau_s / \rho_w g h \quad (2.2)$$

로 되고, 고조는 바람에 의한 밀어올림 효과와 기압효과로 표시된다. 여기서  $\tau_s$ 는 해면에 있어서 바람의 전단응력,  $\rho_w$ 는 해수밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심이다. 문제를 1차원적으로  $x=0$ 에서  $x=L$ 까지의 사이에 바람과 수심이 일정하다면 위식을  $x=0$ 에서  $x=L$ 까지 적분하면

$$\zeta - \zeta^* = \tau_s L / \rho_w g h \quad (2.3)$$



으로 된다. 즉 바람의 밀어올림 효과에 의한 수위상승은 바람의 전단응력과 천해역의 길이에 비례하고 수심에 반비례한다.

수면에서 바람의 전단응력은 풍속의 제곱에 비례한다.

$$\tau_s = C_D \rho_a U^2 \quad (2.4)$$

여기서  $C_D$ 는 마찰계수,  $\rho_a$ 는 공기밀도,  $U$ 는 해면상의 풍속이다.  $C_D$ 는 해면의 조도나 대기 안정도와 관계있다. 이것들은 또 풍속에 의하여 변화하므로 따라서  $C_D$ 도 또한 풍속에 의해 변화한다.  $C_D$ 와 풍속의 관계에 대하여 많은 실험 결과가 있으며, Wu(1980,1982)는 그것들을 종합하여 다음식을 제안하였다 (Fig. 2.2).

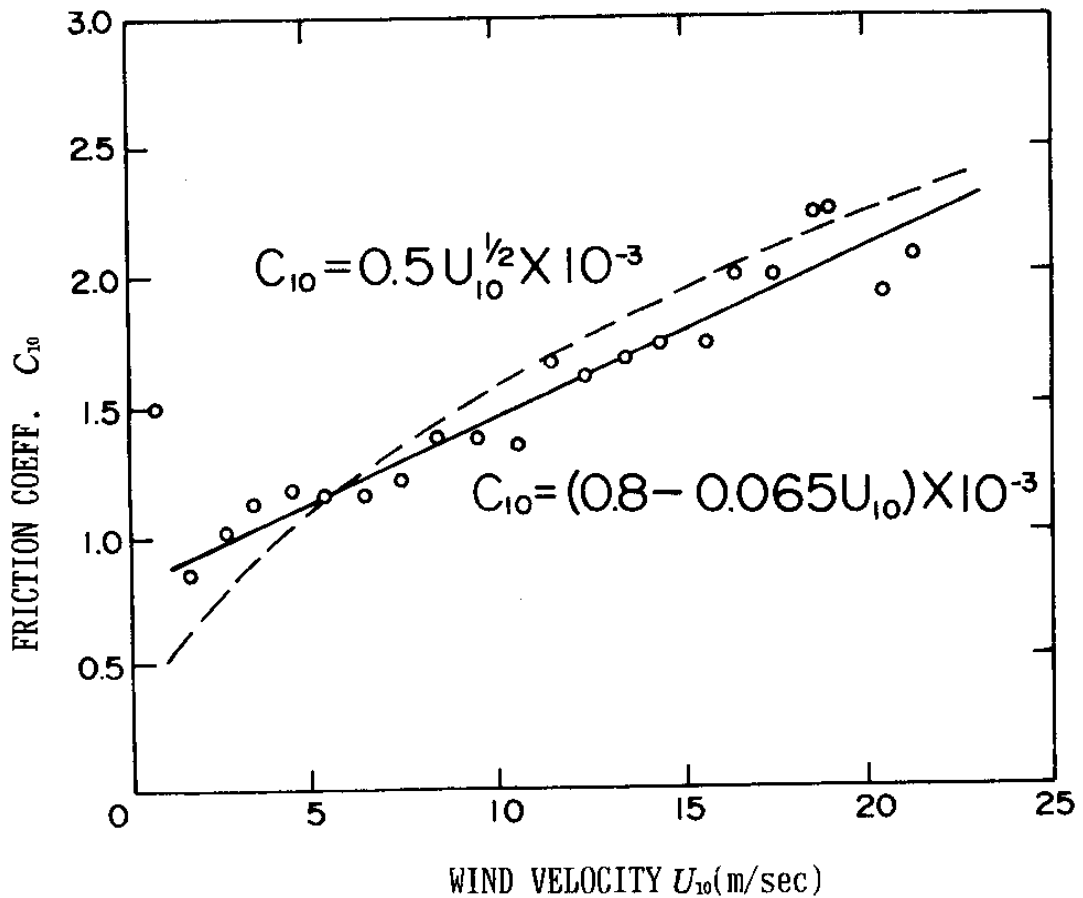


Fig. 2.2. Relationship between water surface friction coefficient and wind speed.

$$C_{10} = (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3} \quad (2.5)$$

여기서  $C_{10}$  과  $U_{10}$  은 각각 10m 고도에서의 마찰계수와 풍속이다. 근사적으로는 수면의 전단응력은 수심에 무관한 것으로 생각해도 좋지만 천해역의 고조에 미치는 효과는 수심에 반비례한다.

### 3) 해저 마찰의 효과

고조에 기인한 흐름이 해저까지 미치고 있으면 해저에서도 전단응력이 작용한다. 해저의 전단응력은 만약 해저에 있어 경계층상의 흐름의 연직 profile이 해면응력이나 그 외의 외적 요인에 의하여 요란되지 않는다면 평균유속의 제곱에 비례한다고 가정할 수 있다. 그러나 고조의 경우에는 해면에 강한 전단응력이 있기 때문에 사정이 다소 변하고 해면부근에서 흐름의 연직구배가 생긴다. 이와 같은 경우 해저마찰의 근사식은 해면의 마찰속도 ( $\sqrt{\tau_s/\rho_w}$ )가 평균 유속  $|\vec{V}|$  보다 훨씬 작은 경우에 대하여 Reid(1957)가 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\vec{\tau}_B = -5 \gamma_b \vec{\tau}_s + \gamma_b^2 \rho_w |\vec{V}| \vec{V} \quad (2.6)$$

여기서  $\gamma_b$  는 해저마찰 계수이다.

식 (2.2)에 해저마찰 효과를 포함시키면

$$\nabla (\zeta - \zeta^*) = n \tau_s / \rho_w g h \quad (2.7)$$

여기서  $n = 1 + \tau_b/\tau_s$  이다. 光易(1981)는 수조실험에 의하여  $n = 1.01$  라는 값을 얻었다. 즉 해저마찰은 일반적으로 해면의 응력에 비례하며, 무시할 수 있을 정도로 적다. 그러나 실제의 고조에서는 그 효과가 누적되어 국지적으로 크게 되는 경우가 있다.

#### 4) 쇄파의 효과

태풍이 멀리 동지나해상에 있을 때 태풍권 내에서 발생한 풍파가 태풍의 접근에 앞서 swell로서 남해 및 서해안에 도달한다. 그 위에 태풍이 접근하면 폭풍을 동반한 거대한 풍파가 해안을 내습한다. 이와 같은 swell이나 풍파가 해안의 천해역을 전파하면서 수심이 파장의 약 1/2보다 낮은 장소에 오면 처음에는 파고가 약간 감소한다. 그리고 나서 처음의 파고로 된 후 급속하게 증가하여 파형구배도 급하게 되고 결국 쇄파점에 달하여 쇄파한다.

또 수심이 파장의 약 1/2보다 낮은데부터 일어나는 특별한 현상으로 굴절이 있다. 파가 천해역에 진입하면 깊은 장소에 있는 파는 낮은 장소에 있는 파보다 빨리 움직인다. 이 때문에 파향이 변하여 해저의 등심선의 형상에 의하여 파에너지가 집중되어 쇄파를 일으키는 장소와 그렇지 않은 장소가 생긴다.

파가 해안에 매우 가까운 곳에서 깨지면 그 파는 다량의 물을 연안에 운반한다. 파가 깨질때 해안으로 향하여 움직인 물입자는 다량의 운동에너지를 가지고 있어 경사진 해빈을 치켜 올라가며, 쇄파전의 파고의 2배가 넘는 높이까지 달하는 것이 있다. 이것이 wave run-up이며, 보통은 고조현상의 하나로 포함시키지 않는다. 일반적으로 검조소는 wave run-up의 효과가 탁월한 곳은 피하여 설치되어 있기 때문에 검조기의 기록에는 나타나지 않는다.

파가 연안에서 충분히 떨어진 장소에서 깨지면 쇄파 에너지는 산란으로 소모되어 run-up은 일어나지 않는다. 그러나 이 경우에 쇄파에 의하여 연안측으로 운반된 물은 외해측으로 급속히 돌아가지 않고 물이 연안측에 퇴적된다. 이 때문에 연안과 외해 사이에 평균수면의 구배가 생긴다. 이 현상을 wave set-up 이라고 부르며, 쇄파대에서 연안측으로의 평균수면의 구배는 다음식으로 주어진다(Longuet-Higgins and Stewart 1962, 1964).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = -A \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.8)$$

여기서  $\zeta$ 는 평균수면의 높이,  $h$ 는 수심,  $A$ 는 정수로 Bowen *et al*(1968)는 다음과 같이 주어졌다.

$$A = [1 / (1 + 8 / (3r^2))] \quad (2.9)$$

여기서  $r = H / (h + \zeta)$ 이고  $H$ 는 파고이다.

검조소의 기록에 의하면 태풍의 접근에 우선하여 전구파에 상당하는 수위상승이 현저히 보여진다. 이것은 먼 앞은 해안에서 swell이 쇄파함에 따라 wave set-up에 의한 수위상승이 일어난 결과인 것으로 생각된다.

#### 5) 기상요란의 이동효과

이동하는 기상요란에 의해 일어난 고조에 대한 이론은 옛부터 많은 연구자에 의하여 발표되어 지고 있다. 무한히 긴 1차원인 수로에서의 강제파는  $(1 - V^2/C^2)^{-1}$ 의 비율로 증폭되고, 2차원인 경우를 고려하면  $(1 - V^2/C^2)^{-1/2}$ 이 된다. 여기서  $V$ 는 요란의 이동속도,  $C$ 는 장파의 속도 즉  $C = \sqrt{gh}$ 이다. 이것으로부터 알수 있듯이  $V = C$ 라는 조건에서는 공명현상이 일어나며, 증폭율은 무한대로 되지만 실제로는 지구자전의 효과나 해저마찰의 효과가 작용하여 그렇게는 되지 않는다.

더욱이 고조는 고립파의 이론에서 유도된  $\zeta_{max} = 0.78h$ 인 극한치를 초과하지도 못한다.

요란의 크기와 해역의 넓이의 관계에 대하여 Reid(1956)가 제안하고 있지만 그것에 의하면 해역의 넓이가 요란의 크기의 1/10 정도에서는 가장 좋은 증폭조건에 있어도 고조는 겨우 1.5배 정도로 증폭될 뿐이다. 일본에서 고조가 탁월한 해만은 모두 태풍의 공간 scale에 비하여 상당히 작기 때문에 가령 태풍의 이동속도가 만내의 평균 장파속도와 일치하더라도 공명효과에 의한 고조는 적다. 미국의 동해안에서는 대륙붕이 광범하게 발달하여 있기 때문에

해안선을 따라 북상하는 허리케인의 경우에 공명의 효과로 고조의 발달이 촉진된다.

#### 6) 지구자전의 효과

지구자전은 북반구에서 흐름에 대하여 우측방향으로 가속도를 발생시킨다. 만약 이 가속도가 해안에 의해 방해를 받는다면 이 가속도는 우측으로 향하는 수위구배와 평형 상태를 이룬다.

해안에 평행하게 불어오는 바람은 해안에 평행한 흐름을 일으키는 것처럼 작용하지만 이 흐름은 지구자전의 효과 때문에 수위를 변화시킨다. 북반구에서는 해안이 흐름의 우측에 있으면 수위는 상승하고 좌측에 있으면 반대로 하강한다.

梶浦(1959)에 의하면 고조에 미치는 지구자전의 효과는 무차원량  $\alpha = fL/C$ 의 대소에 의하여 정해진다. 여기서  $L$ 은 해수운동을 일으키는 해역의 길이,  $C$ 는 장파의 평균속도,  $f$ 는 Coriolis 상수이다. 만약  $\alpha \ll 1$ 이면 지구자전의 영향을 고려할 필요가 없다. 우리나라 영일만의 경우  $L \approx 15\text{km}$ ,  $h = 20\text{m}$ ,  $f = 0.8 \times 10^{-4}$ 으로 하면  $\alpha = 0.086$ 이 된다. 이같은 만에서는 기압이나 바람의 효과가 현저히 크기 때문에 지구자전의 효과는 거의 무시하고 있다. 그러나 외해에 접하고 있는 해안의 고조에 대하여는 중요하다. 사실 대륙붕이 발달한 미국 동해안이나 바다 전체가 얇은 북해에 있어서는 지구자전의 효과가 크다.

#### 7) 지형효과

고조가 전파할 때 지형의 영향을 받으면 현상은 대단히 복잡하게 된다. 수심 변화에 의하여 일어나는 부분반사, 굴절, 회절 등의 효과가 있고 복잡한 해안선에서의 반사효과도 첨가됨에 따라 지형의 영향을 받는 곳에서 고조현상을 논하는 것은 불가능하다. 수치실험의 결과에 의하면 외해에서 자유파로서 만 내로 침입한 고조의 변형은 만 형상의 영향을 받을 뿐만 아니라 침입한 고

조자체의 특징에 따라 크게 다르다(Isozaki, 1971).

장파가 수로를 전파될 때의 파고변형에 대하여는 유명한 Green 공식이 있다. 이것에 의하면 파고는  $b^{-1/2} h^{1/2}$  에 비례한다. 여기서  $b$ 는 수로의 폭,  $h$ 는 수심이다. 단 이 경우에 파의 반사효과를 취급하지 않았기 때문에 실제 적용할 때에는 주의가 필요하다. 고조와 동반하여 만수(만의 물)는 자주 현저한 진동 현상을 일으키고 있는데 이것을 seiche라고 한다. seiche는 보통 조석기록지상에 나타난 진동기록에서 측정되기 때문에 시간규모가 수십분 이하의 것에 주의가 기울여지고 있다.

#### 8) 조석과 하천의 효과

만약 조차가 커서 만조시와 간조시의 수심이 평균수심에 비할 정도의 차이를 보인다면 고조와 조석의 상호작용은 무시할 수 없다. 간조시에 일어난 고조는 만조시에 발생한 고조 보다도 조금 크다. 강한 조류가 있는 장소에서는 조류와의 상호작용도 또한 중요하다. 현실적으로 간조시간 중에 일어난 고조보다 만조시간 중에 일어난 고조가 우리에게 더 많은 영향을 준다. 즉 만조시간 중에 일어난 고조가 절대수위를 보다 높게 하기 때문이다. 그러므로 만조시간 중에 일어난 고조의 최고조위와 출현시간을 예측하는 것은 모두 중요하지만 어려운 문제가 있다.

큰 하천이 흐르고 있는 만에서의 고조는 하천흐름에 의하여 현저히 증대된다. 분명히 고조의 peak와 홍수의 peak가 일치할 때 조위상승은 최고로 현저히 된다. 통상 열대성 저기압에 의하여 생긴 홍수의 peak는 유역에 강우가 집중되어 하천 흐름으로 되기에는 시간이 필요하기 때문에 고조 peak 보다 늦게 일어난다. 그러나 열대성 저기압이 접근하기 전의 초기강우에 의한 하천 유출과 고조 peak가 같은 위상으로 될 가능성이 있다. 외국의 예를 보면 상당히 큰 하천에서는 수주일간 거의 peak 근처까지 수위를 유지하고 있다. 이

때에 연속하여 발생한 열대성 저기압이 내습하면 하천홍수와 고조가 중복되어 큰 재해를 유발시킨다. 감조하천에서의 고조는 상류까지도 역류한다.

## 제2절 해면자료 현황

조석자료는 파랑자료와 더불어 해양연구 및 연안개발을 위하여 가장 중요한 시계열 자료의 하나로서 우리나라는 1910년대에 청진, 원산, 진남포, 인천, 목포항에 단기 조위관측을 실시한 바 있다. 그리고 주요 항만에 위치한 고정검조소에서의 장기연속 관측은 교통부 수로국에 의하여 대부분 1960년대 이후 계속 수행되고 있다. 이와 같은 조위자료는 조석예보, 선박의 안전항해, 각종 기준면의 결정, 연안 수산업 개발을 위한 기초자료로 사용되며, 또한 연안공학적인 측면에서 이 자료는 해면상승에 따른 연안구조물의 설계 특히 방조제 단면 결정에 중요하며, 해면하강시 연안에 건설된 원자력발전소의 취수구 및 조력발전소의 터빈 위치를 결정하는데 필수적인 자료이다.

약 30여년 축적된 이 해면관측자료를 연구사업에 활용하고, 관측자료의 이용과 관리를 극대화시키는 방안으로 조석자료의 전산화 및 data base 구축이 요구된다. 물론 기존에 몇몇 연구자들과 수로국 자체에서 전산입력시켜 많은 성과를 얻었지만 이번에 수로국과 해양연구소가 공동연구사업을 통하여 표준화된 Format에 따라 아직 미 입력된 전 자료를 전산입력하고 기존의 입력된 자료도 표준 Format 으로 변환하고, 또한 입력된 모든 자료에 대하여 여러 방법으로 검증·수정을 실시하여 신뢰도 높은 조위자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 2.3은 현재 수로국에서 운영하고 있는 22개의 고정검조소의 위치를 나타내고 있으며, 지금까지 각 검조소별 매시간 조석관측자료의 전산입력 현황은 Table 2.1과 같다.

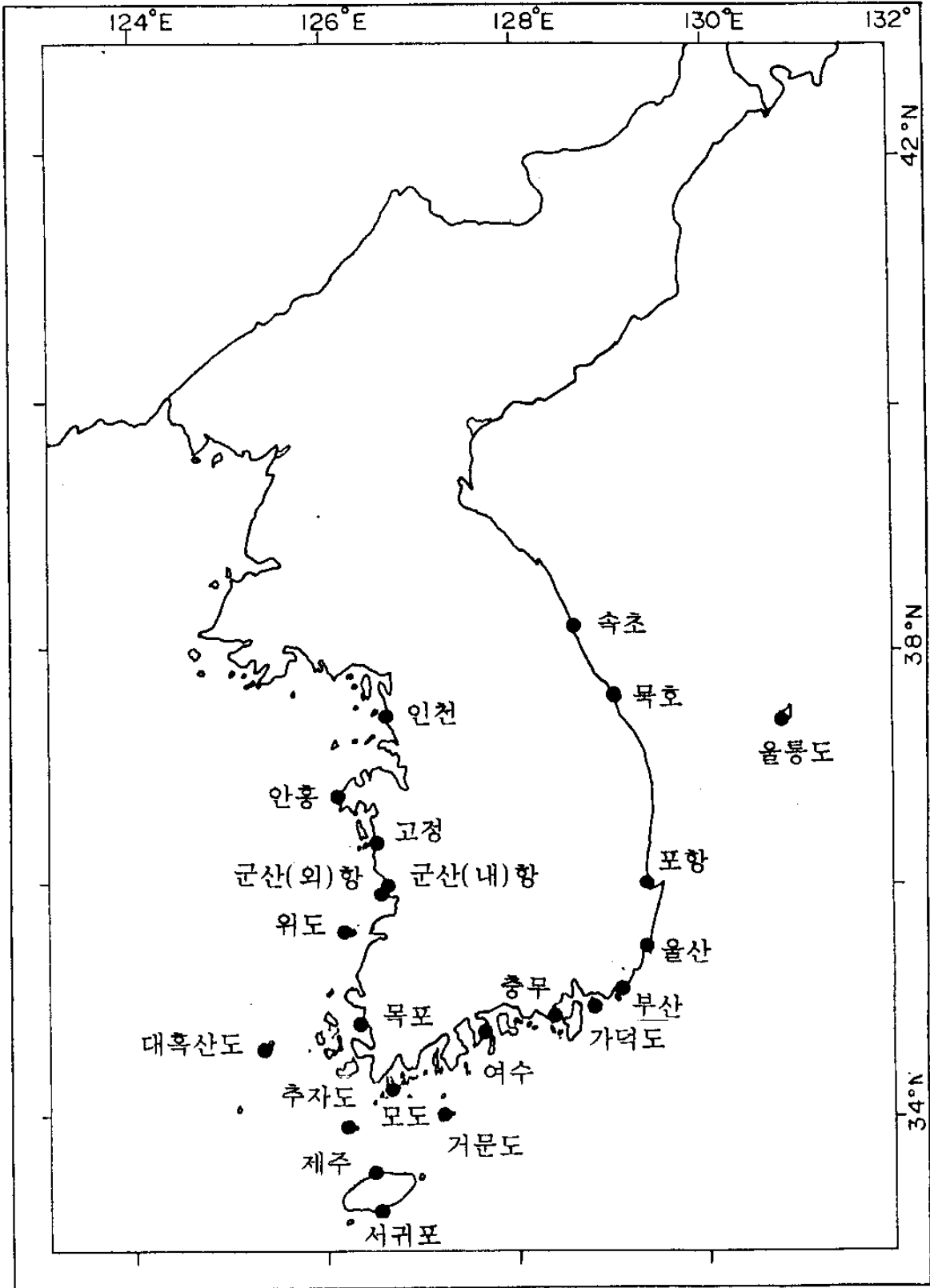


Fig. 2.3. Location of tidal stations of Korea Hydrographic Office.



Table 2.1 List of inputted tide data by Hydrographic Office.

(o: 입력, x: 미입력)

검 조 소 년 도	속	북	포	울	울	부	가	진	충	여	거	완	추	제	서	목	대	위	고	안	군	군	인		
	초	호	항	산	도	산	도	해	무	수	도	도	도	주	포	포	산	도	도	정	홍	내	외	천	
52																	X								
53																	X								
54																	X								
55						X											X								
56						X											X								
57						X		O									X								
58						X		O									O								
59						X		O									O								X
60						X		O									O					O			X
61						O		O									O					O			X
62				X		O		O									O					O			X
63				O		O		O									O					O			X
64				O		O		O					O				O					O			X
65		O		O	X	O		O		X			O		O	X						O			X
66		O		O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
67		O		O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
68		O		O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
69		O		O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
70		O		O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
71		O	X	O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
72		O	O	O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
73	O	O	O	O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
74	O	O	O	O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
75	O	O	O	O	X	O		O		O			O		O	O						O			X
76	O	O	O	O	X	O		O	X	O			O		O	O						O			X
77	O	O	O	O	X	O	X		X	O			O		O	O						O			X
78	O	O	O	O	X	O	O		O	O			O		O	O						O			O
79	O	O	O	O	O	O	O		O	O			O		O	O						O			O
80	X	X	X	X	X	X	X		X	X			O		O	X						X	X		X
81	O	O	O	O	O	O	O		O	O			O		O	O						X	O		O
82	O	O	O	O	O	O	X		O	O	O		O		O	O						X	O		O
83	O	O	O	O	O	O	O		O	O	O	X	X	O		X	X					X	X		X
84	O	O	O	O	O	O	O		O	O	O	X	X	O		X	X					X	X		X
85	O	O	O	O	O	O	O		O	O	O	X	X	O	O	X	X	X	X			X	X		X
86	O	O	O	O	O	O	O		O	O	O	X	X	O	O	X	X	X	X			X	X		X
87	X	X	X	O	X	O	O		O	O	O	X	X	O	O	X	X	X	X	O		X	X		X
88	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
89	O	O	O	O	O	O	O		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		O

### 제3절 해일의 추정

해일의 추정은 관측된 해면자료에서 추산조위를 제거하여 얻는 방법과 모델링 기법에 의한 수치계산법으로 추정하는 방법이 있다. 수치계산법에 의한 해일의 추정방법은 기상자료(태풍의 위치, 중심기압, 주변기압 등)와 대상해역의 해저지형 및 수심자료 등 많은 입력자료를 필요로 하고, 계산이 복잡하므로 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 교통부 수로국검조소에서 관측한 해면자료에서 추산조위를 제거하여 해일을 추정하는 방법을 적용하고, 적용된 결과에 대하여 고찰하였다. 관측된 해면자료에서 추산조위를 구하는 방법은 관측자료를 조화분석하여 각 분조의 진폭과 위상을 계산하고, 다시 합성하여 추산한다. 관측치를 조화분석하여 각 분조의 진폭과 위상을 구하는 방법은 최소자승법을 사용하여 분석하였다. 관측된 해면자료를  $Y_i(t=-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n)$ 라 하고, 이에 대한 Harmonic series를 다음과 같이 나타낸다.

$$Y(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cos w_i t + \sum_{i=1}^k B_i \sin w_i t \quad (2.10)$$

매시간관측치와 식(2.10)을 최소화 시키는 근사식은

$$\mu^2 = \sum_{t=-n}^n (Y(t) - Y_i) = \text{minimal} \quad (2.11)$$

로 표현되며

식(2.11)를 만족시키는 조건( $\mu$ 이 최소가 되는 조건)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mu^2}{\partial A_0} = 0 ; \frac{\partial \mu^2}{\partial A_s} = \frac{\partial \mu^2}{\partial B_s} = 0 \quad (s=1, \dots, k) \quad (2.12)$$

그러므로

$$\sum_{t=-n}^n (Y(t) - Y_t) = 0 \quad (2.13)$$

$$\sum_{t=-n}^n (Y(t) - Y_t) \cos w_s t = 0 \quad (2.14)$$

$$\sum_{t=-n}^n (Y(t) - Y_t) \sin w_s t = 0 \quad (2.15)$$

식 (2.10)은 식 (2.13) - (2.15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\sum_{t=-n}^n (A_0 - Y_t) + \sum_{i=1}^k A_i \sum_{t=-n}^n \cos w_i t + \sum_{i=1}^k B_i \sum_{t=-n}^n \sin w_i t = 0 \quad (2.16)$$

$$\sum_{t=-n}^n (A_0 - Y_t) \cos w_s t + \sum_{i=1}^k A_i \sum_{t=-n}^n \cos w_i t \cos w_s t + \sum_{i=1}^k B_i \sum_{t=-n}^n \sin w_i t \cos w_s t = 0 \quad (2.17)$$

$$\sum_{t=-n}^n (A_0 - Y_t) \sin w_s t + \sum_{i=1}^k A_i \sum_{t=-n}^n \cos w_i t \sin w_s t + \sum_{i=1}^k B_i \sum_{t=-n}^n \sin w_i t \sin w_s t = 0 \quad (2.18)$$

위 식에서  $\sum_{t=-n}^n \sin w_s t = 0$ ,  $\sum_{t=-n}^n \sin w_i t \cos w_s t = 0$  이므로  $\sum_{t=-n}^n \cos w_s t = S(w)$  라고 하면 나머지 항들은 다음과 같다.

$$2 \sum_{t=-n}^n \cos^2 w_i t = N + S(2w) \quad (2.19)$$

$$2 \sum_{t=-n}^n \sin^2 w_i t = N - S(2w) \quad (2.20)$$

$$2 \sum_{t=-n}^n \cos w_i t \cos w_s t = S(w_i - w_s) + S(w_i + w_s) = f_{is} \quad (2.21)$$

$$2 \sum_{t=-n}^n \sin w_i t \sin w_s t = S(w_i - w_s) - S(w_i + w_s) = g_{is} \quad (2.22)$$

$$N = 2n + 1 ; S(x) = \frac{\sin(2n+1)\frac{x}{2}}{\sin\frac{x}{2}}$$

따라서 식 (2.19) - (2.22)를 식 (2.16) - (2.18)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\text{if } S = 0 ; A_0 N + \sum_{i=1}^k A_i S(w_i) = \sum_{t=-n}^n Y_t \quad (2.23)$$

$$\text{if } s = 0 (s=1, 2, \dots, k) ; A_0 S(w_s) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k A_i f_{is} = \sum_{t=-n}^n Y_t \cos w_s t \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^k B_i g_{is} = \sum_{t=-n}^n Y_t \sin w_s t \quad (2.25)$$

식 (2.23) - (2.25) 의  $2k + 1$  개 방정식으로 부터  $A_0, A_i, B_i (i = 1, \dots, k)$ 를 다음과 같은 Matrix를 구성하여 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} N & S(w_1) & \cdots & S(w_k) & 0 & \cdots & 0 \\ S(w_1) & f_{11} & \cdots & f_{1k} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S(w_k) & f_{k1} & \cdots & f_{kk} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & g_{11} & \cdots & g_{1k} \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & g_{k1} & \cdots & g_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_k \\ B_1 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{t=-n}^n Y_t \\ \sum_{t=-n}^n Y_t \cos w_1 t \\ \vdots \\ \sum_{t=-n}^n Y_t \cos w_k t \\ \sum_{t=-n}^n Y_t \sin w_1 t \\ \vdots \\ \sum_{t=-n}^n Y_t \sin w_k t \end{bmatrix}$$

Matrix계산은 Gauss-Jordan pivotal elimination 방법을 사용하여 식 (2.10)에 사용된 변수들의 해를 구하였다. 이 변수들은 평균해면( $a_0$ ), 각 분조에 대한 진폭( $H_i$ ) 및 지각( $\alpha_i$ )에 대하여 다음과 같이 나타낸다.

$$a_0 = A_0, \quad H_i = [A_i^2 + B_i^2]^{1/2}, \quad \alpha_i = \tan^{-1} (B_i / A_i)$$

여기서  $i$ 는 1에서 64개 까지 사용된 조석분조중  $i$ 번째 분조를 나타낸다.

따라서 추산조위( $H_a$ )는 Greenwich 0시에 주어지는 각 분조의 위상( $V$ )과, 진폭과 위상의 18.6년 변화를 고려한 Nodal factor ( $f, u$ )를 계산하여 다음식에 적용하여 추산된다.

$$H_a = a_0 + \sum_{i=1}^{64} f_i H_i \cos [w_i t + (V + u)_i - \alpha_i] \quad (2.26)$$

Table 2.2는 조화분석과 추산조위 산출에 대한 검증으로 각분조의 진폭 및 지각을 임의의 값으로 입력한 후 추산조위를 산출하고, 조화분해를 하였으며 (test 1), 또한 관측치에서 추산치를 뺀 잔여치를 조화분해한 결과도 살펴본 것이다(test 2). test 1, test 2 에서와 같이 1시간간격의 1년간자료를 least square method로 조화분석한 상대오차의 값이 무시할 정도로 작게 나타났다.

조화분석에 사용된 수로국 검조자료는 1시간 간격으로 편집된 제주, 거문도, 여수, 충무, 부산의 관측자료이며 기간은 Table 2.3에 나타나있다. 관측자료에 대한 오차수정은 매시간 자료를 Fig. 2.4와 같이 plot 하여 1시간 간격으로 편집된 수로국자료와 비교하여 일차수정을 하여야 한다. 또한 추산치를 뺀 잔여치(비조석 성분치)를 plot (Fig. 2.5)하여, 극치 및 이상 변화 부분을 판별하여 Analog 원도(조위곡선원도)와 비교하여 오차 수정을 하여야한다. 이러한 방법으로 오차수정을 한 해면자료를 이용하여 조화분석을 실시하여야하나, 현재 자료의 전산화 작업이 실시되는 단계이므로 일차수정을 마친 후 이차수정에서

Table 2.2 Test of the least square method used for harmonic analysis.

NAME	SPEED (deg/hr)	TEST 1				TEST 2
		AMP. (cm)	PHASE (deg.)	AMP. (cm)	PHASE (deg.)	AMP. (cm)
AO		65.000	0.000	65.000	0.000	0.000
SA	.041	12.000	150.000	12.000	150.000	0.000
SSA	.082	5.000	300.000	5.000	300.000	0.000
MM	.544	3.000	100.000	3.000	100.000	0.000
MSF	1.016	.500	60.000	.500	59.993	0.000
MF	1.098	1.500	150.000	1.500	149.999	0.000
2Q1	12.854	1.000	120.000	1.000	120.002	0.000
SIGMA1	12.927	.500	90.000	.500	90.001	0.000
Q1	13.399	1.000	190.000	1.000	190.002	0.000
R01	13.472	1.000	140.000	1.000	140.003	0.000
O1	13.943	5.000	100.000	5.000	100.000	0.000
MP1	14.025	.500	150.000	.500	149.987	0.000
M1	14.492	1.000	210.000	1.000	209.997	0.000
CHI1	14.570	.200	80.000	.200	79.994	0.000
PI1	14.918	.200	130.000	.200	130.173	.001
P1	14.959	7.000	210.000	7.000	209.999	0.000
S1	15.000	.500	230.000	.500	230.016	0.000
K1	15.041	10.000	220.000	10.000	220.000	0.000
PSI1	15.082	.500	90.000	.500	89.958	.001
FI1	15.123	.500	110.000	.500	110.039	0.000
THETA1	15.513	.500	230.000	.500	229.995	0.000
J1	15.585	1.500	240.000	1.500	239.999	0.000
S01	16.057	.200	330.000	.200	330.014	0.000
001	16.139	.500	290.000	.500	290.014	0.000
002	27.342	.500	50.000	.500	49.998	0.000
MNS2	27.424	1.000	250.000	1.000	250.002	0.000
2N2	27.895	3.000	90.000	3.000	89.999	0.000
MU2	27.968	5.000	260.000	5.000	260.000	0.000
N2	28.440	15.000	300.000	15.000	299.999	.001
NU2	28.513	3.000	300.000	3.001	300.001	.002
OP2	28.902	.500	40.000	.503	40.133	.005
M2	28.984	50.000	240.000	50.000	240.000	0.000
MKS2	29.066	1.500	20.000	1.498	19.930	.005
LAMBDA2	29.456	.500	90.000	.500	90.026	.001
L2	29.528	1.000	40.000	1.000	40.013	.001
T2	29.959	2.500	350.000	2.498	350.014	.004
S2	30.000	20.000	150.000	20.000	150.000	.001
R2	30.041	1.000	230.000	.999	230.146	.005
K2	30.082	8.000	350.000	7.999	350.003	.002
MSN2	30.544	.400	320.000	.400	319.977	0.000
KJ2	30.627	.700	190.000	.700	190.015	0.000
2SM2	31.016	.500	30.000	.500	29.996	0.000
MO3	42.927	.200	100.000	.200	99.989	0.000
M3	43.476	1.000	220.000	1.000	220.000	0.000
S03	43.943	.300	170.000	.300	169.989	0.000
MK3	44.025	.100	200.000	.100	200.002	0.000
SK3	45.041	.400	240.000	.400	240.004	0.000
MN4	57.424	.800	130.000	.800	129.998	0.000
M4	57.968	2.500	150.000	2.500	150.001	0.000
SN4	58.440	.200	220.000	.200	219.973	0.000
MS4	58.984	2.000	220.000	2.000	220.001	0.000
MK4	59.066	.700	210.000	.700	210.005	0.000
S4	60.000	.100	320.000	.100	320.016	0.000
SK4	60.082	.300	280.000	.300	280.011	0.000
2MN6	86.408	.300	350.000	.300	350.003	0.000
M6	86.952	.500	360.000	.500	359.998	0.000
MSN6	87.424	.100	30.000	.100	29.985	0.000
2MS6	87.968	.300	10.000	.300	9.980	0.000
2MK6	88.050	.300	340.000	.300	340.012	0.000
2SM6	88.984	.100	100.000	.100	99.998	0.000
MSK6	89.066	.100	40.000	.100	39.996	0.000
M8	115.936	.200	190.000	.200	190.009	0.000
2MSN8	116.408	.200	220.000	.200	219.985	0.000
3MS8	116.952	.200	250.000	.200	250.026	0.000
2(MS)8	117.968	.100	300.000	.100	300.019	0.000

Table 2.3 List of used tide data for surge calculation.

	1976	1977	1978	1979	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
제 주					0	0	0	0	0		0
거문도						0	0	0	0	0	0
여 수					0	0		0	0		
충 무			0	0	0	0	0	0	0	0	0
부 산	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

단시간 변화양상을 보이는 이상peak 부분을 찾아내 추산치와 비교하는 오차 수정을 하였다

Fig. 2.6은 우리나라 부근을 통과한 태풍의 진로도이며, 이 태풍이 내습한 시기의 해일을 그림으로 나타냈다(Fig. 2.7 - Fig. 2.12). Fig. 2.7은 1983년 9월 태풍 FORREST 시기의 해일을 나타낸 것으로 태풍 FORREST는 동지나 해상을 북상하면서 제주도 동남쪽을 통해 일본열도쪽으로 빠져나갔다. 제주에서 32cm, 거문도에서 50cm, 충무 32cm, 부산 26cm 정도가 나타났다. 해일의 변화는 태풍이 직접 우리나라를 통과하지는 않았지만 거문도에서 크게 나타났다.

Fig. 2.8은 1984년 8월 태풍 HOLLY 시기의 해일을 나타낸 그림으로 태풍이 동지나 해상을 경유하여 대한해협을 통과하였기 때문에 전반적으로 크게 나타났다. 여수에서 가장 크게 나타났으며(58cm), 제주, 여수, 거문도의 해일은 발생한 후 급격히 떨어지는 양상이나 충무, 부산의 해일은 급격한 변화가 나타나지 않았다.

Fig. 2.9는 1985년 10월 태풍 BRENDA시기의 해일로 여수에서 최고해일(60cm)이 나타나기 약 12시간전에 음의해일(-38cm)이 크게 나타난 특징을 보였다. 해일의 변화가 제주, 거문도, 여수에서는 급격하게 나타나는데 비해 충무, 부산에서는 비교적 완만한 변화를 보인다.

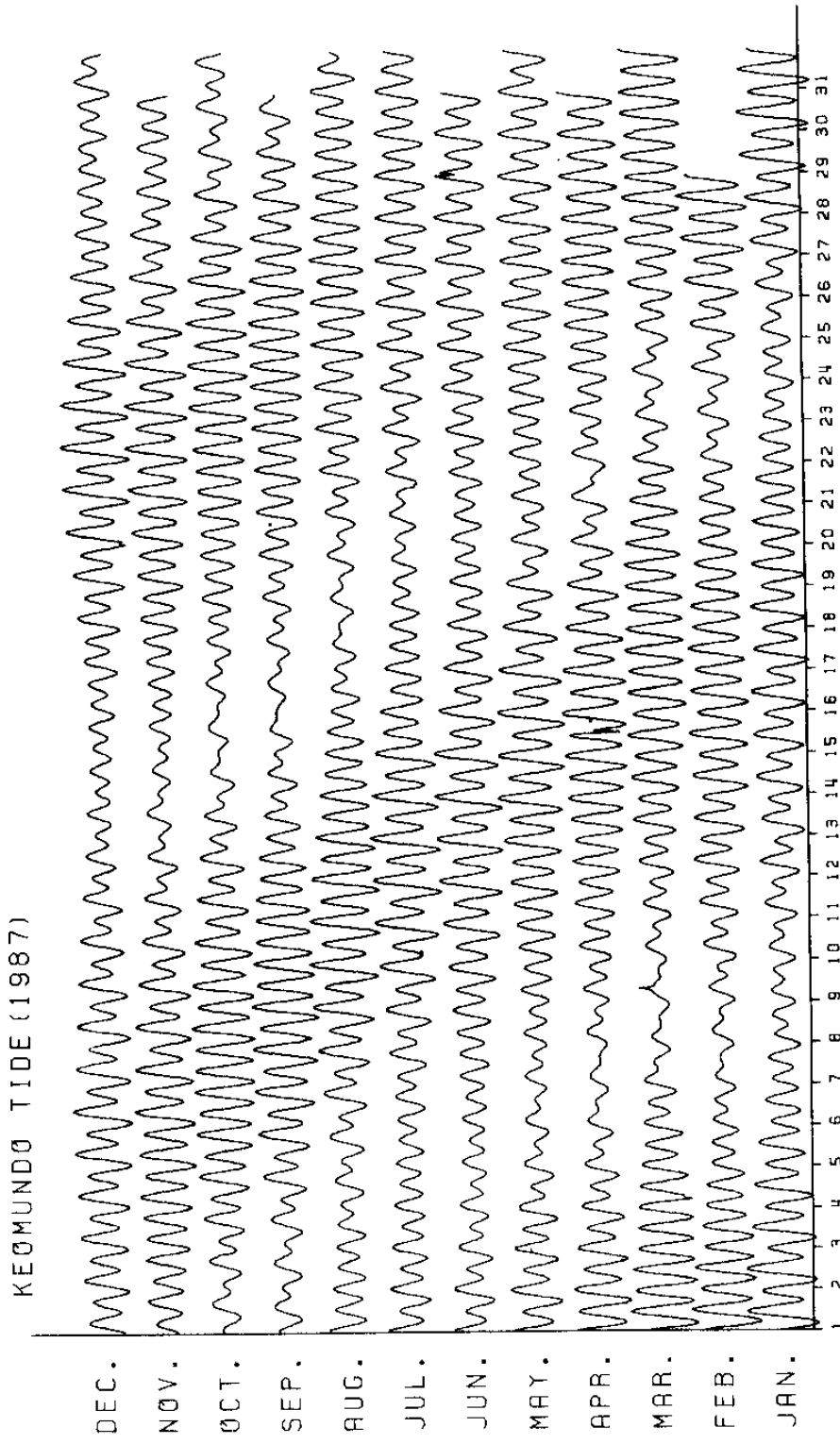


Fig. 2.4. Plot of tide observation data for data correction



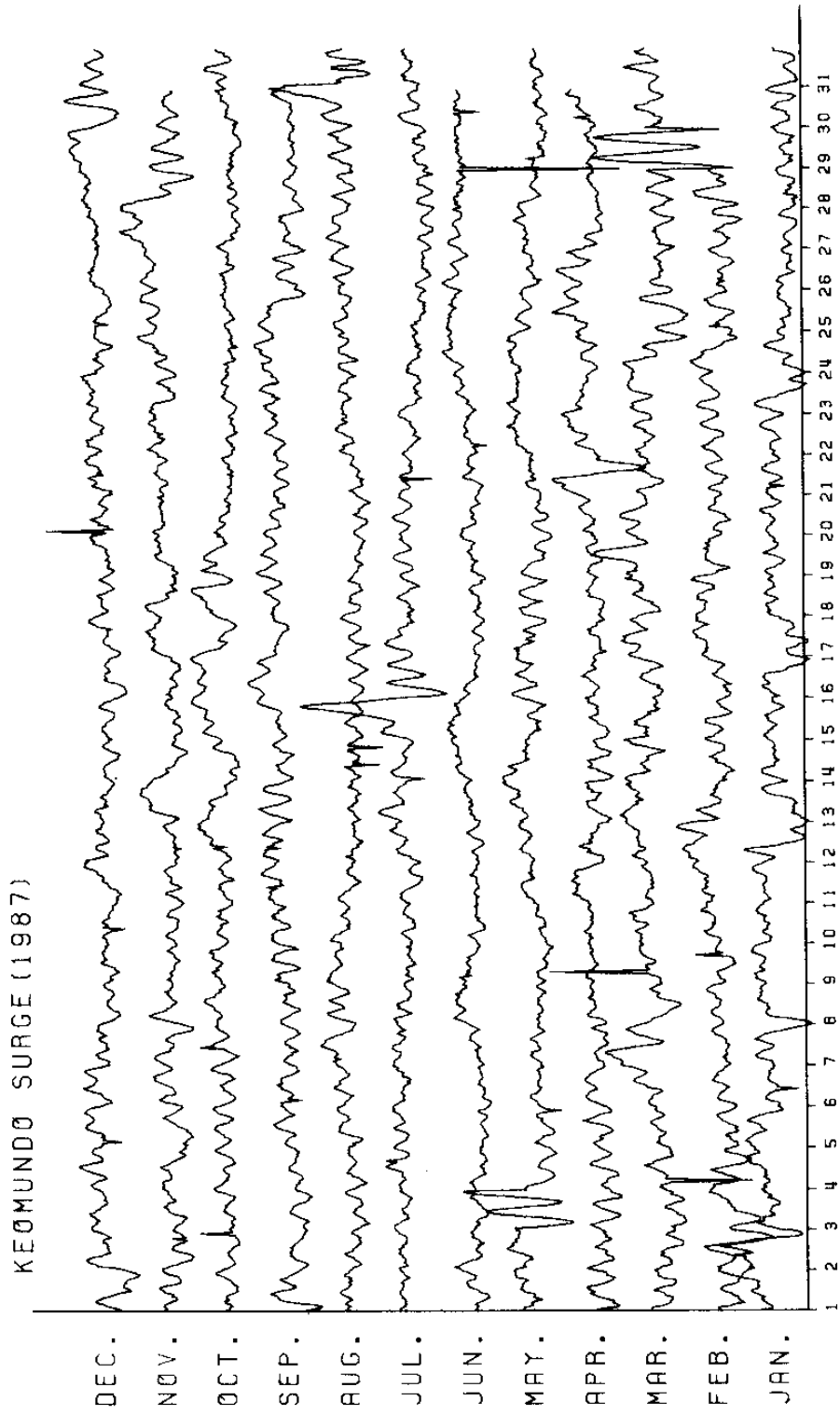


Fig. 2.5. Plot of yearly residual for data correction

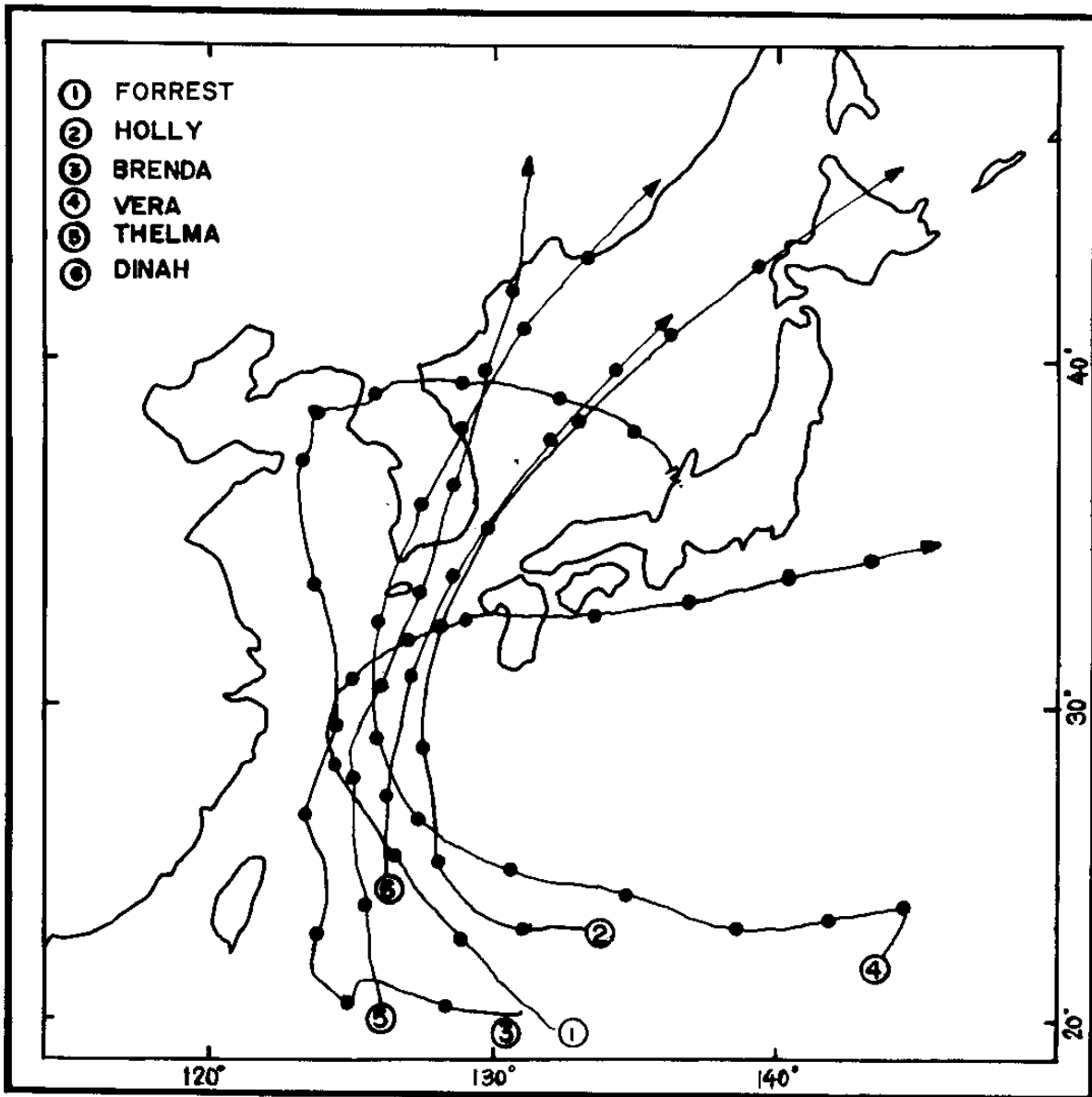


Fig. 2.6. Tracks of Typhoon Forrest(1983), Holly(1984), Brenda(1985), Vera(1986), Thelma(1987), Dinah(1987).

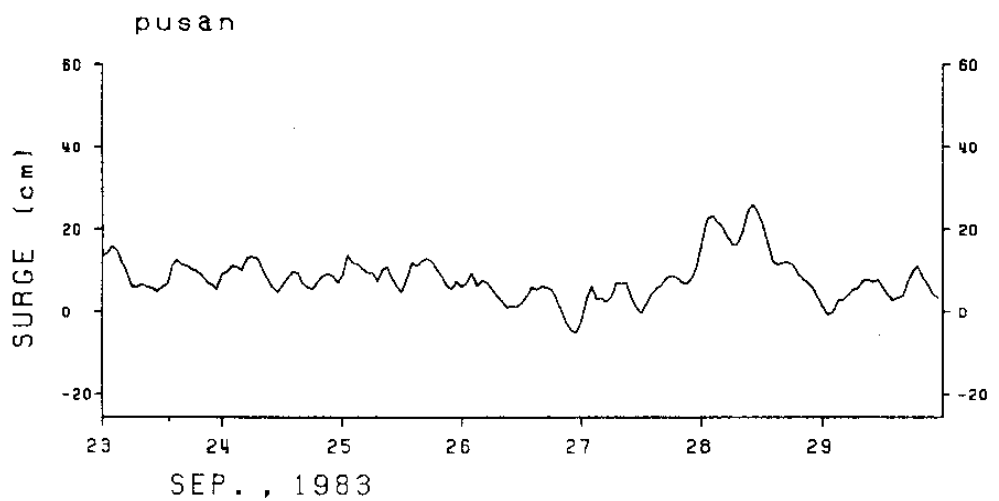
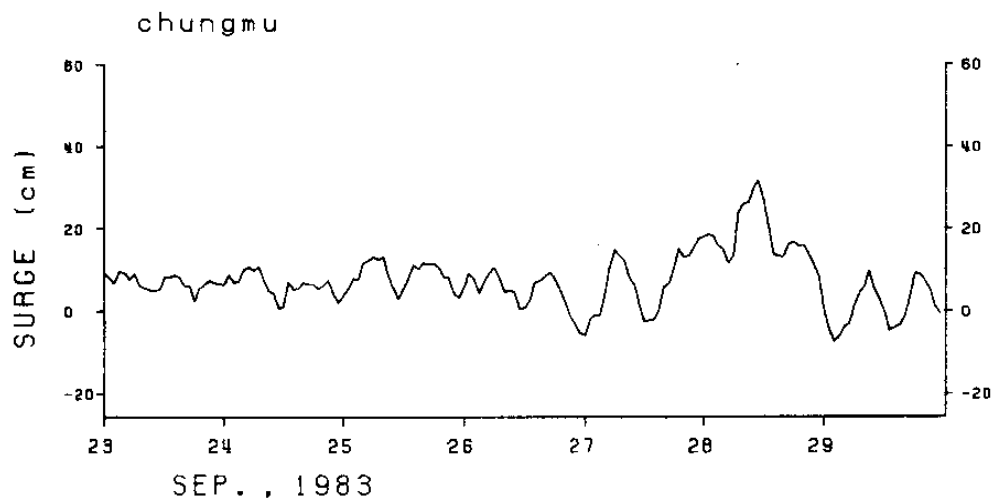
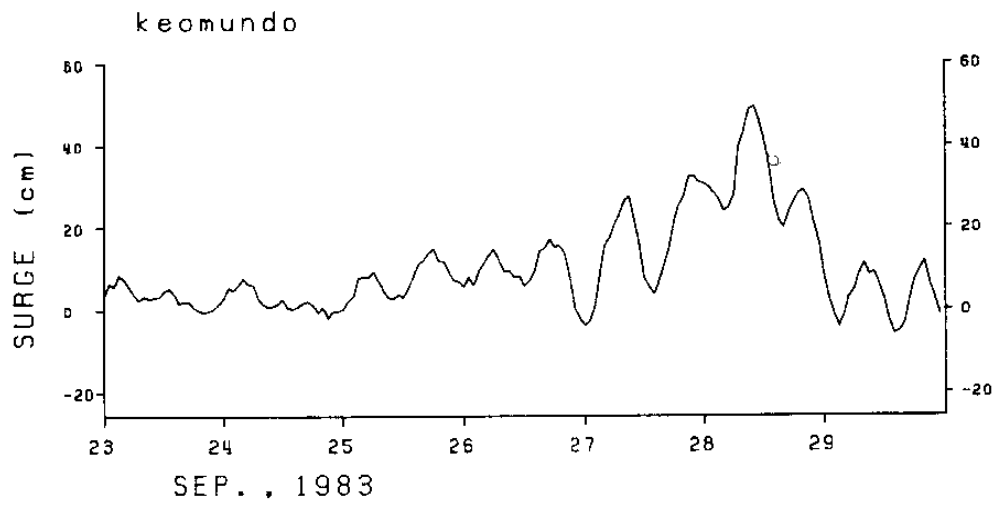


Fig. 2.7. Time series of calculated surge at the Keomundo, Chungmu, Pusan during Typhoon Forrest.

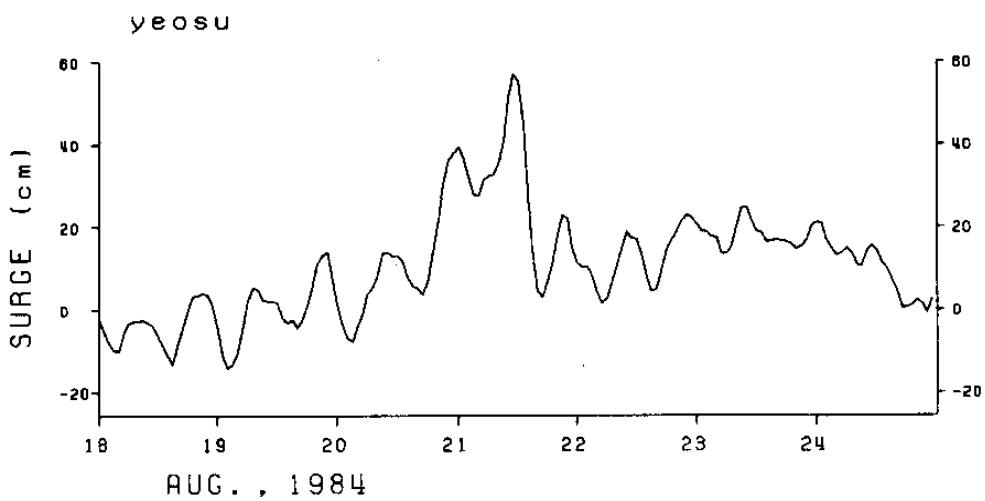
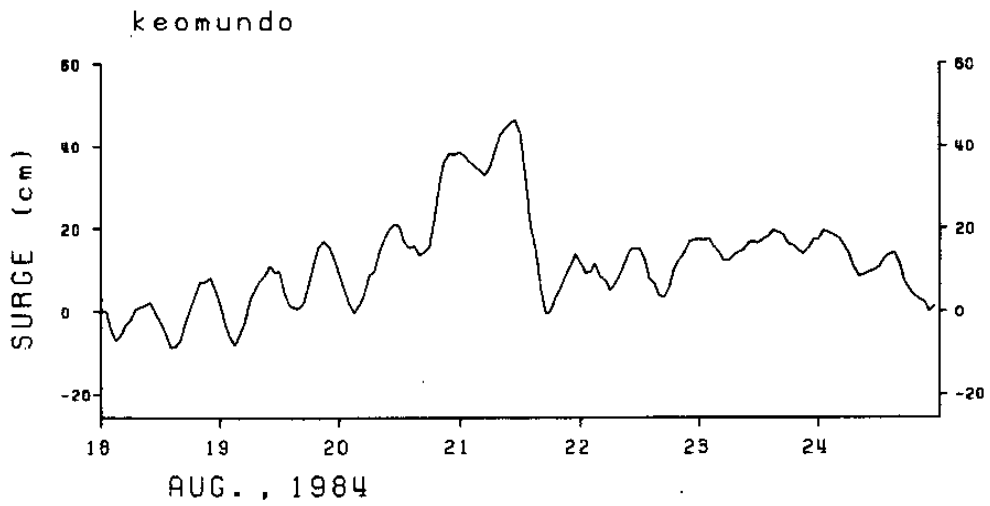
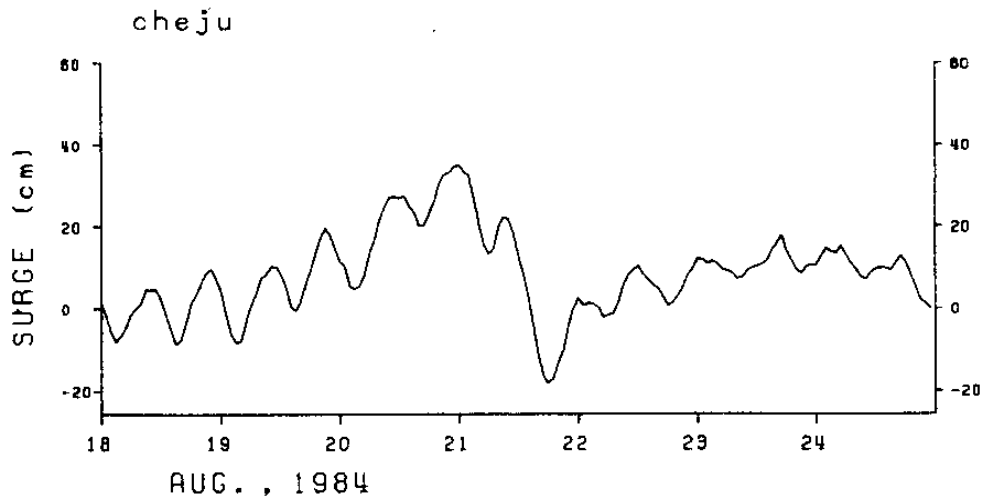


Fig. 2.8. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Yeosu, Chungmu, Pusan during Typhoon Holly.

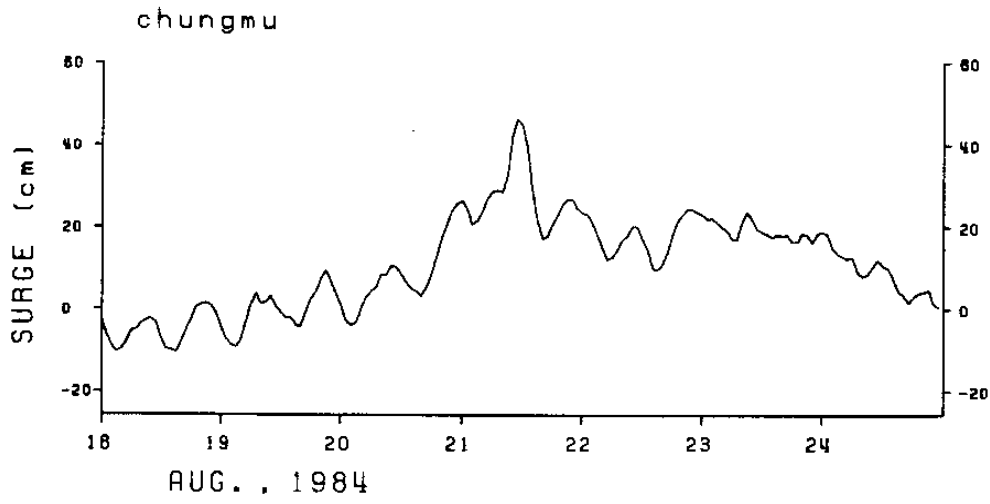


Fig. 2.8. (continued)

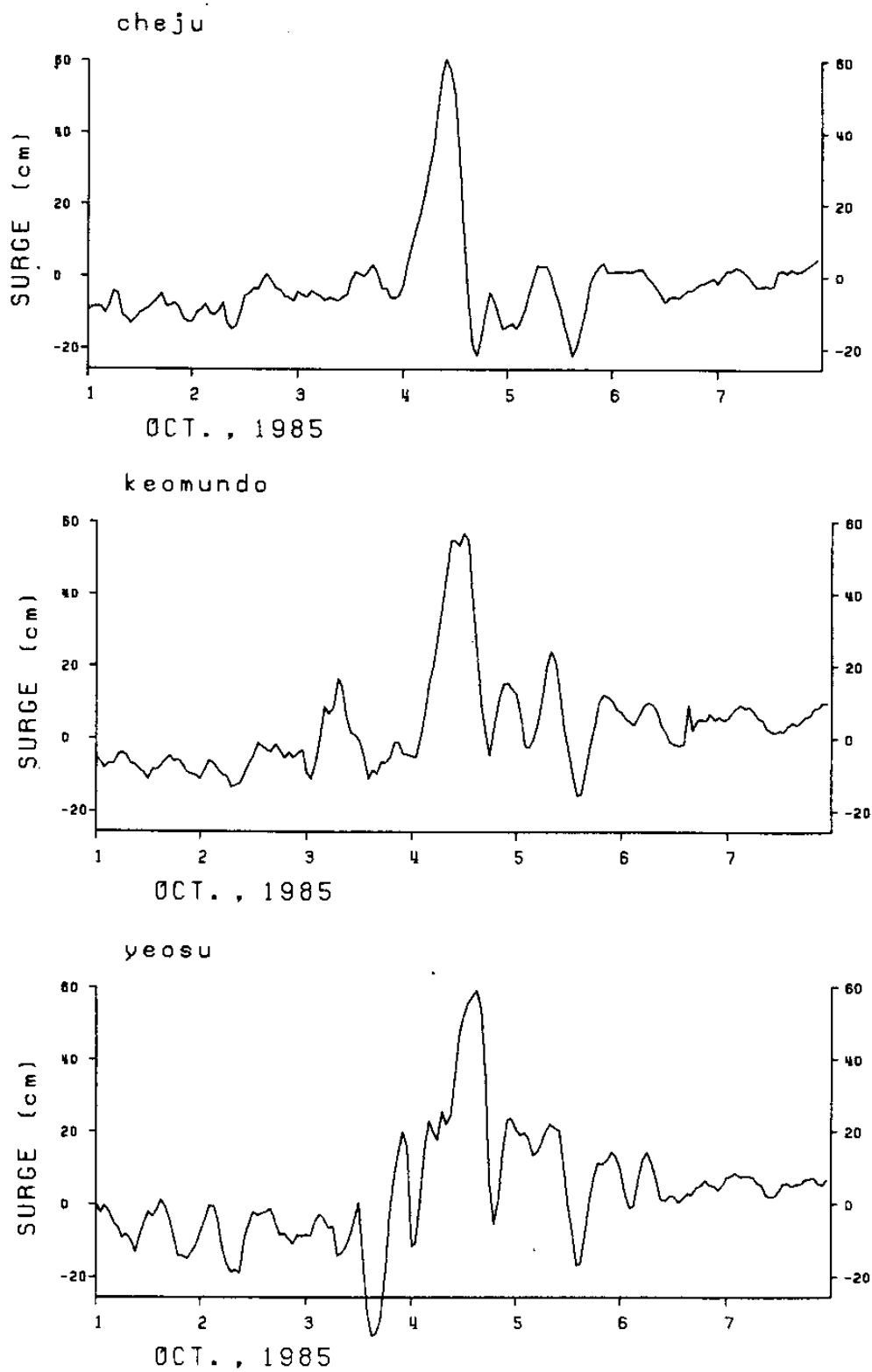


Fig. 2.9. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Yeosu, Chungmu, Pusan during Typhoon Brenda.

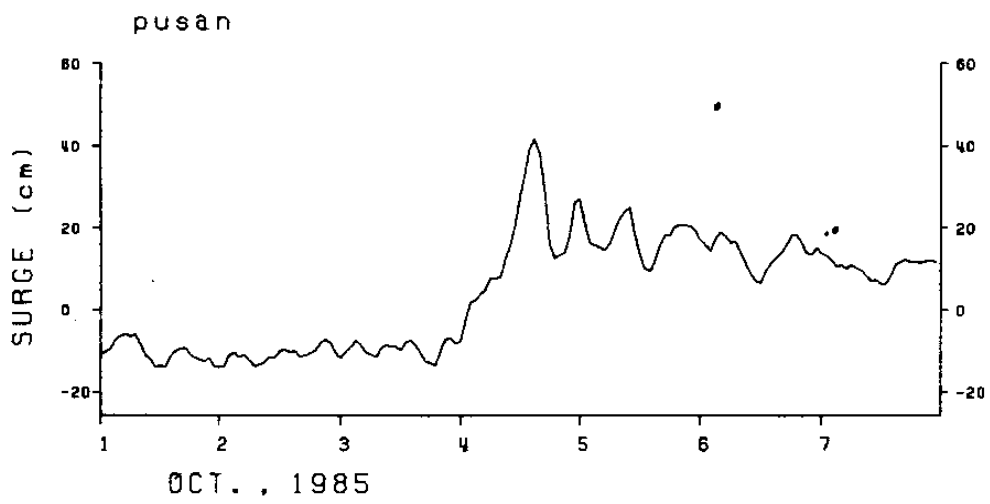
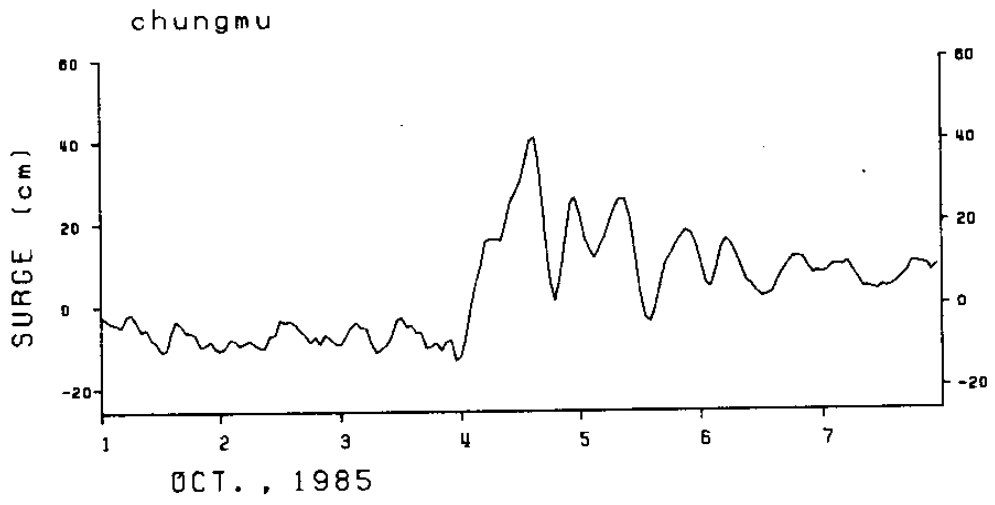


Fig. 2.9. (continued)

Fig. 2.10은 1986년 8월 태풍 VERA 시기의 해일을 나타낸 그림이며, Fig. 2.11은 1987년 7월 태풍 THELMA시기에 나타난 해일이다. 태풍 THELMA는 우리나라 남해안을 상륙하여 동해로 빠져나가면서 막대한 피해를 끼쳤으며, 해일의 변화는 충무에서 75cm로 가장 크고 거문도 65cm, 제주 47cm, 부산 34cm로 나타났다. 해일은 급격하게 증가되었다가 감소하여 음의해일을 나타내는데, 제주에서 -43cm, 거문도에서 -25cm, 충무에서 -20cm로 나타났다.

Fig. 2.12는 1987년 8월 태풍 DINAH시기의 해일을 나타낸 것으로 단시간에 급격한 변화를 나타내며, 제주 50cm, 거문도 45cm, 충무 66cm, 부산 73cm로 나타났다. 보통 태풍이 내습한 경우는 동남해안보다 서남해안의 해일이 크게 나타나는데 정반대의 해일 양상이다. 그리고 태풍이 내습하면 양의 해일이 나타나는데 비해 동계 고기압시기는 음의 해일이 나타나게 된다. Fig. 2.13은 1987년 11월에 나타난 음의 해일로 제주에서 -25cm정도이다. Table 2.4는 추산된 각 지점의 해일에 대한 월별분포를 나타낸다.

각 관측지점별 해일의 변화를 나타낸 그림에서 해일의 변화양상이 약 반일주조의 주기를 갖는 작은 peak가 나타났다. 이 주기적인 peak는 서쪽에 위치한 관측소에서 비교적 크게 나타난다. 조석의 천해역으로 진행하면서 조석과의 비선형효과와 진폭과 지각이 서로다른 조석과들의 합성에 의해 천해분조가 생기게되며 크기는 각각 다르게 나타난다. 이러한 천문영향이 아닌 주기성을 띤 천해분조를 효과적으로 고려하여 최(1980)는 인천항의 조위분석에 확장조화분석(102개 분조의 조화분석)을 실시하여 추산조위를 구하였으며, 이를 실측조위와 비교하여 Doodson의 60개분조를 적용한 결과보다 좋게 나타났다. Heap(1967)는 조석이 강한지역에서 해일은 조석과 비선형 상호작용에 의하여 해일은 조석을 변화시키고, 조석도 해일을 변화시킨다고 하였다. 그러므로 이러한 주기적인 peak가 나타나는 원인은 조석과 해일이 진행되어오면서, 상호



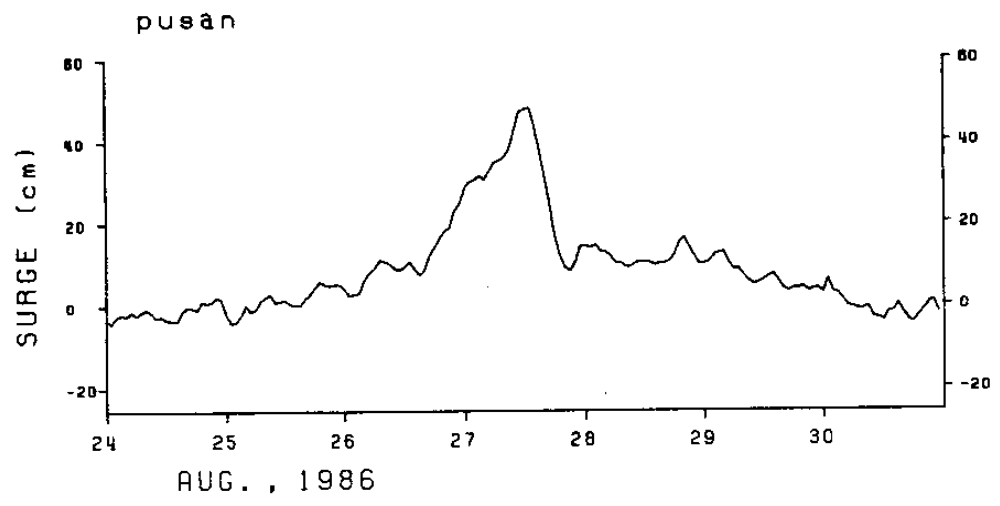
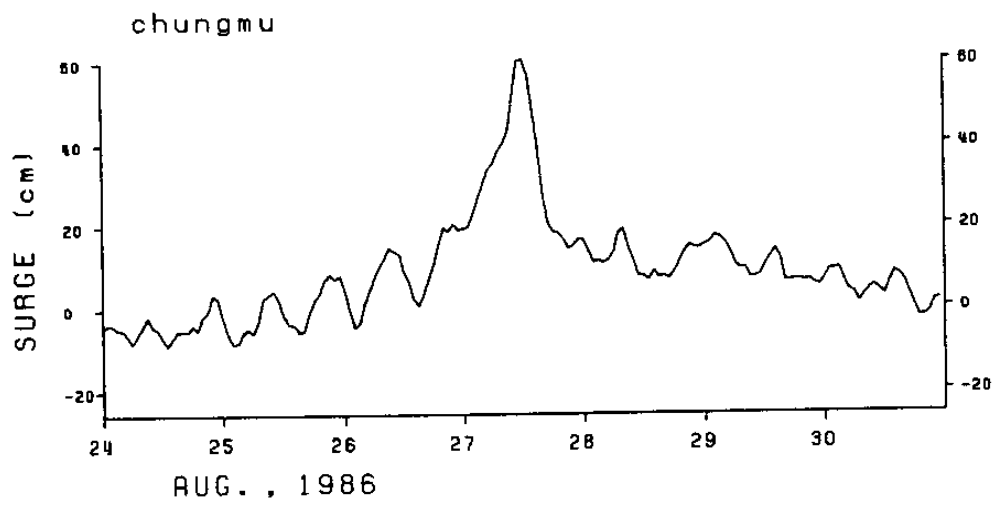
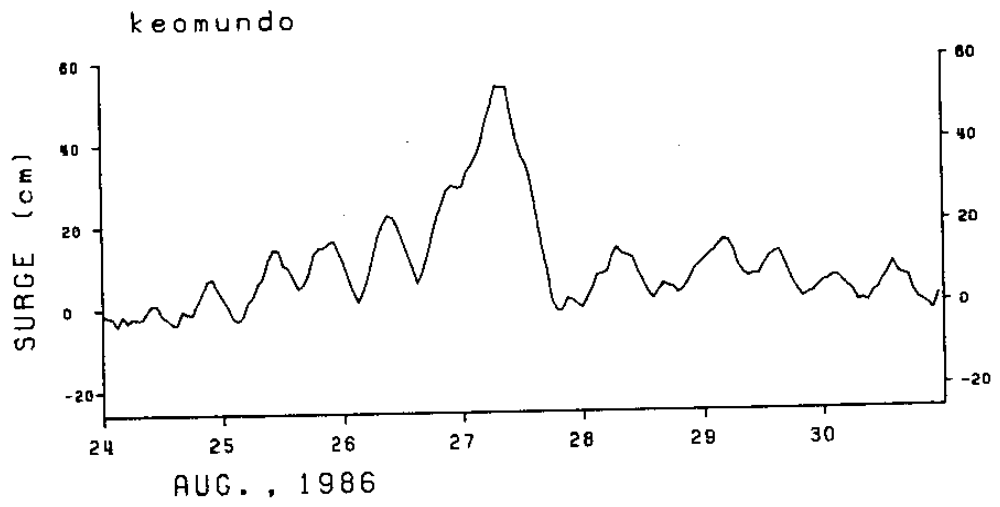


Fig. 2.10. Time series of calculated surge at the Keomundo, Chungmu, Pusan during Typhoon Vera.

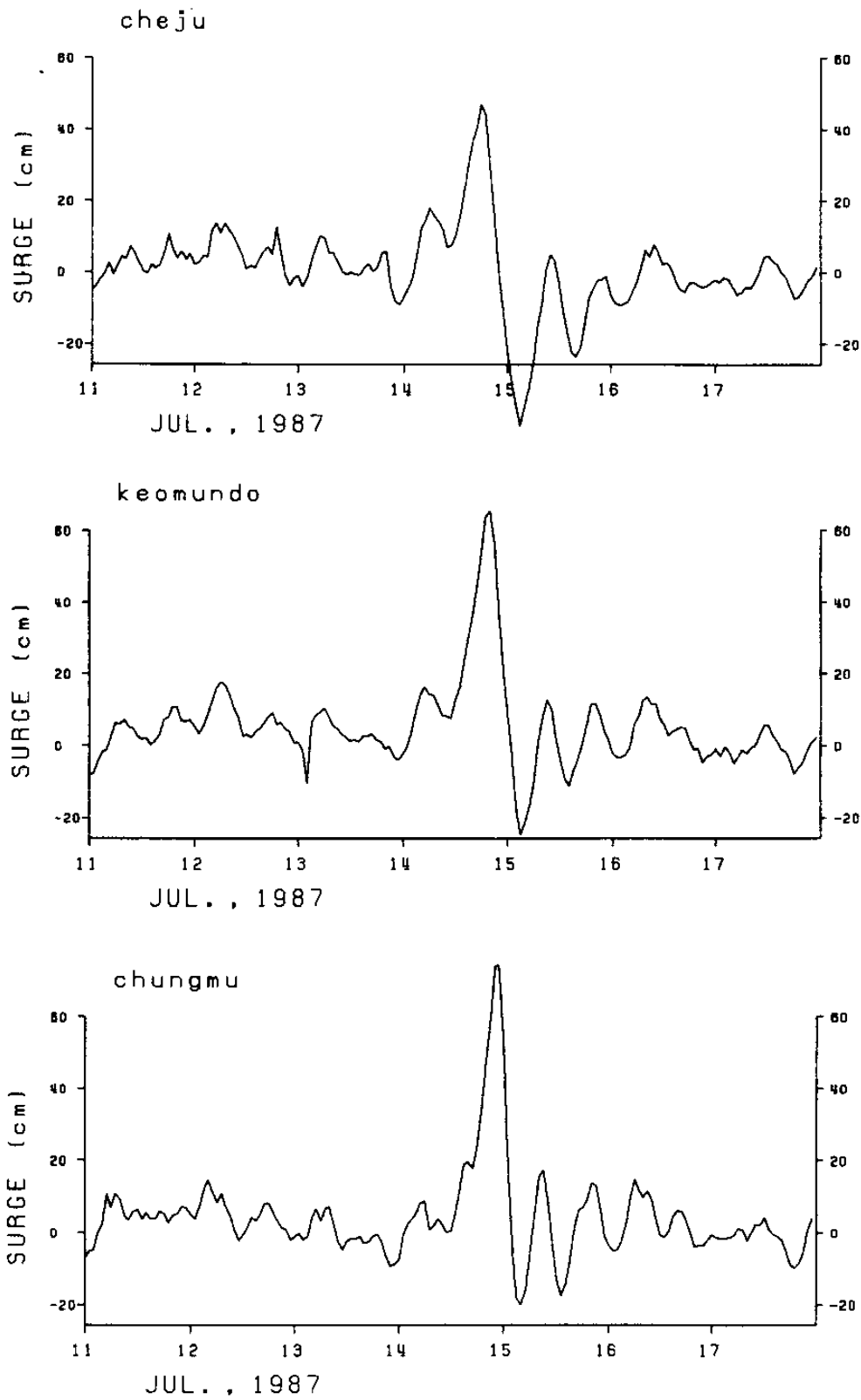


Fig. 2.11. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Chungmu during Typhoon Thelma.

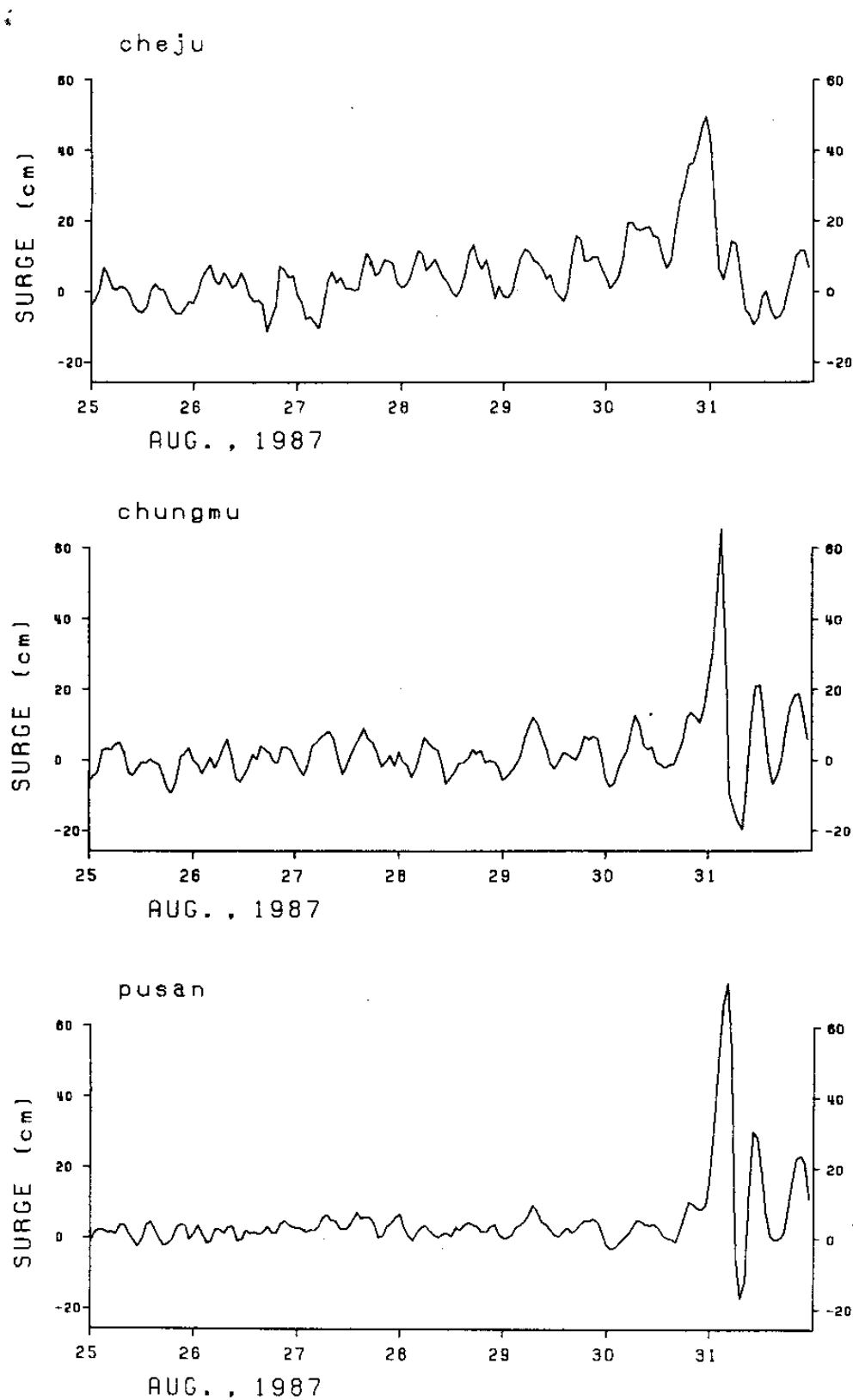


Fig. 2.12. Time series of calculated surge at the Cheju, Chungmu, Pusan during Typhoon Dinah.

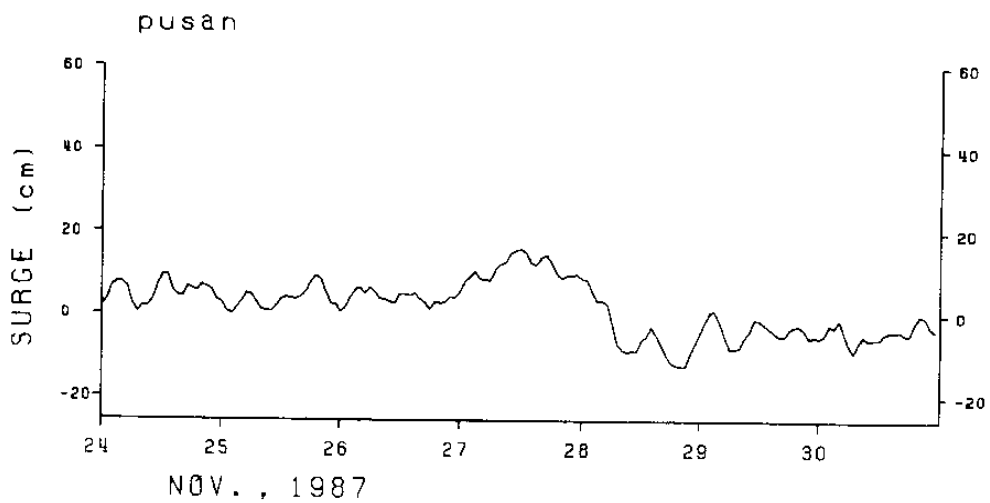
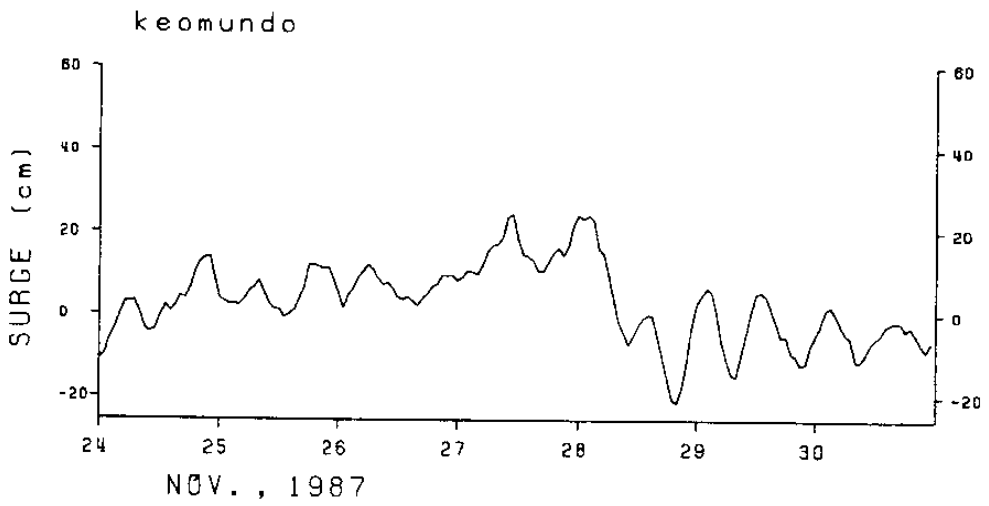
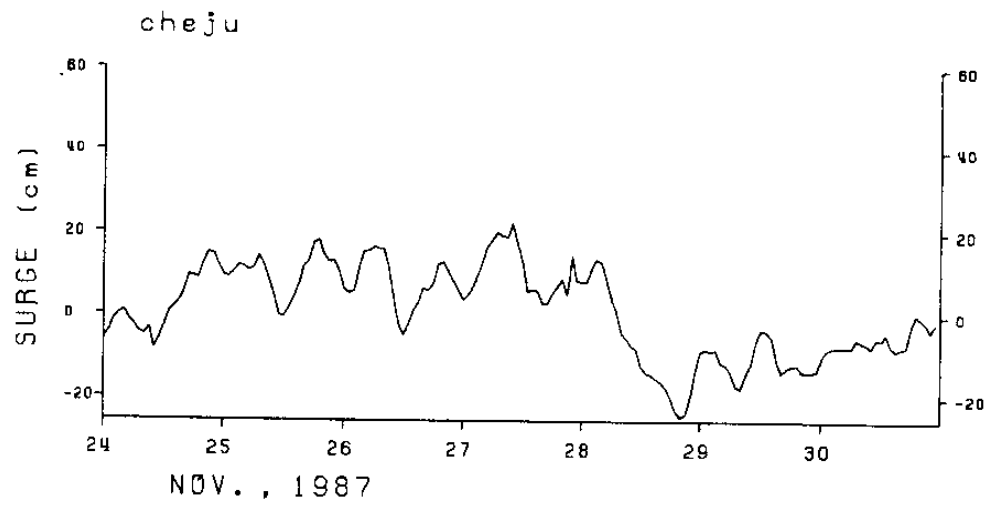


Fig. 2.13. Time series of calculated surge at the Cheju, Keomundo, Pusan during the winter(1987, 11).

Table 2.4 Monthly distribution for the calculated surge at Pusan, Chungmu, Yeosu, Keomundo, Cheju on 1985.

Monthly Surge distribution		Station : PUSAN											1985 (%)
Surge \ Mon I	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOT.
-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-65-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-55-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-45-35 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-35-25 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.0	.0	.0	.0	.0	0.0
-25-15 I	.0	.0	2.7	.4	2.8	.0	.5	.5	.0	.0	.7	2.0	.8
-15-5 I	19.6	2.6	34.0	18.3	24.3	3.6	19.1	24.2	34.2	15.6	19.7	36.6	21.2
-5-5 I	71.1	44.5	47.4	68.8	57.0	62.2	55.8	59.3	57.9	44.6	47.6	52.4	55.9
5-15 I	9.3	47.8	15.6	12.5	15.7	33.5	24.5	15.5	7.2	34.0	20.6	8.1	20.3
15-25 I	.0	5.0	.3	.0	.1	.7	.0	.1	.7	4.6	11.4	.9	2.0
25-35 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.8	.0	.0	.1
35-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.0	0.0
45-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
55-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
65-75 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
85- I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
MEAN (cm)I	-1.1	5.8	-2.6	-.6	-1.3	2.5	.1	-1.0	-2.6	3.0	1.8	-3.4	0.0

Monthly Surge distribution		Station : CHUNGMU											1985 (%)
Surge \ Mon I	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOT.
-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-65-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-55-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-45-35 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-35-25 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	0.0
-25-15 I	1.1	.0	5.1	1.5	3.8	.0	.8	.4	.0	.5	1.4	1.3	1.3
-15-5 I	24.6	3.3	35.9	20.6	23.5	4.9	26.2	26.3	32.2	15.7	17.5	44.8	23.2
-5-5 I	60.2	36.4	44.2	63.8	55.5	57.4	51.6	53.0	61.8	44.1	44.3	45.8	51.7
5-15 I	13.8	51.0	14.0	13.1	16.1	35.8	21.0	18.7	5.4	34.9	27.1	6.6	21.4
15-25 I	.3	8.6	.8	1.1	1.1	1.9	.4	1.5	.6	3.4	9.7	1.1	2.5
25-35 I	.0	.7	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.0	.9	.0	.1	.2
35-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.0	0.0
45-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
55-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
65-75 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
85- I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
MEAN (cm)I	-1.2	6.7	-3.1	-.9	-1.1	3.2	-.6	-.7	-2.6	2.6	2.5	-4.0	0.0

Tab. 2.4. (continued)

Monthly Surge distribution		Station : YEOSU											1985 (%)
Surge \ Mon I	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOT.
-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-65-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-55-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-45-35 I	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.4	.1
-35-25 I	.7	.0	.1	.0	.7	.0	.0	.0	.0	.3	.4	1.1	.3
-25-15 I	4.7	1.4	8.1	3.3	3.6	1.5	5.8	4.3	1.3	1.9	2.5	4.2	3.6
-15-5 I	24.9	7.0	33.2	26.9	23.1	12.4	27.3	21.1	36.9	16.7	17.9	41.9	24.3
-5-5 I	42.9	33.2	42.3	50.0	50.5	47.2	46.9	49.3	49.0	41.4	40.8	42.5	44.8
5-15 I	23.4	43.2	14.1	16.9	15.3	30.7	16.5	22.0	11.7	32.8	29.2	8.3	22.0
15-25 I	3.5	13.4	2.2	2.5	5.1	7.6	3.5	3.0	1.1	5.5	8.9	1.5	4.8
25-35 I	.0	1.7	.0	.3	.9	.6	.0	.3	.0	.3	.3	.1	.4
35-45 I	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.0	.0	.0	.1	.0	.0	0.0
45-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.0	0.0
55-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.0	0.0
65-75 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
85- I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
MEAN (cm) I	-0.6	6.6	-3.2	-1.4	-0.3	3.3	-1.6	-0.2	-2.4	2.7	2.3	-4.5	0.0

Monthly Surge distribution		Station : KEOMUNDO											1985 (%)
Surge \ Mon I	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOT.
-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-65-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-55-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-45-35 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-35-25 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.9	.1
-25-15 I	4.7	.3	7.5	2.2	2.7	.0	.5	1.1	.8	.4	2.1	1.9	2.0
-15-5 I	27.0	7.6	31.9	25.7	23.3	4.4	21.5	21.4	42.4	17.3	18.2	31.2	22.8
-5-5 I	56.3	32.8	44.6	55.8	55.6	61.1	64.5	53.2	50.0	40.6	43.8	58.5	51.6
5-15 I	12.0	41.8	13.8	11.5	16.5	31.5	12.1	22.3	6.8	38.0	24.7	6.1	19.7
15-25 I	.0	15.2	2.2	3.2	1.9	2.9	1.3	2.0	.0	2.4	11.0	1.3	3.6
25-35 I	.0	1.9	.0	1.5	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.3	.0	.3
35-45 I	.0	.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.0	.1
45-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.7	.0	.0	.1
55-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.0	.0	0.0
65-75 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
85- I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
MEAN (cm) I	-2.5	7.2	-3.0	-0.9	-1.1	3.3	-1.1	.2	-3.6	2.8	2.4	-3.1	0.0

Tab. 2.4. (continued)

Monthly Surge distribution		Station : CHEJU											1985	(%)
Surge	Mon I	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOT.
-	-65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-65-	-55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-55-	-45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-45-	-35 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
-35-	-25 I	1.1	.0	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.5	.1
-25-	-15 I	6.0	.0	7.8	2.4	2.3	.0	.1	.0	.6	.9	.0	4.6	2.1
-15-	-5 I	30.4	9.6	28.1	26.0	23.1	8.1	21.9	14.8	42.4	23.0	11.4	32.6	22.7
-5-	5 I	49.5	33.2	46.4	51.3	58.5	64.4	65.3	55.8	51.4	53.4	46.1	52.9	52.6
5-	15 I	12.9	37.5	15.7	14.4	15.1	26.4	12.6	28.2	5.6	20.2	28.5	8.7	18.8
15-	25 I	.1	16.2	1.9	4.2	1.1	1.1	.0	1.2	.1	1.5	14.0	.7	3.4
25-	35 I	.0	3.4	.0	1.8	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.0	.4
35-	45 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.1	.0	.0	0.0
45-	55 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.0	.0	0.0
55-	65 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.0	.0	0.0
65-	75 I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
85-	I	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
MEAN (cm)	I	-3.3	7.0	-2.5	-.4	-1.0	2.0	-.9	1.6	-3.6	.4	4.6	-3.3	0.0

작용과 지형적인 영향 등 복합적인 요인으로 조석의 진폭과 위상의 변화로 생긴다고 볼 수 있다. 그리고 확장조화분석에 의한 추산조위를 산출하여 해일을 추정하는 방법을 조석자료의 전산입력이 완료되면 적용하여 주기적인 peak에 대한 천해분조의 관련성을 알아보는 연구가 필요하다.

#### 제4절 평균해면의 산출

우리나라 남해안에 위치한 검조소의 해면관측자료를 이용하여 비교적 단기 간이지만 평균해면의 변화를 알아보고 각 지점별 해면변화의 특성을 알아보았다. 평균해면의 산출방법은 매시간 관측치를 평균하여 일평균, 월평균, 년평균을 산출하는 방법과, Doodson  $X_n$ -filter를 이용하여 일평균해면을 산출한 후

월평균, 년평균해면은 일평균해면의 합의 평균을 취하였다. Table 2.5는 각검조소 관측자료에 대하여 월평균, 년평균해면을 산술평균(24시간평균)과 Doodson X<sub>0</sub>-filter를 이용하여 산출된 값을 비교하였으며 차이는 미세하게 나타났다.

비교적 단기간의 각검조소의 해면변화를 살펴 보았으나, 해면자료의 전산화 입력이 끝나면 장기해면자료의 분석이 시도될 것이다.

Table 2.5 Monthly and yearly mean sea levels at Chungmu, Yeosu, Cheju, Keomundo(arithmetic mean and mean after Doodson x<sub>0</sub>-filtering).

YEOSU ARITHMETIC MEAN

													(cm)
YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1981	162.1	161.5	167.9	174.3	175.4	190.5	192.2	198.4	199.4	185.6	174.3	155.2	178.1
1982	151.5	152.3	153.7	172.2	179.6	184.7	189.9	194.8	196.9	188.5	173.6	164.0	175.3
1984	167.8	165.0	164.6	170.8	176.6	188.8	193.5	193.8	188.8	188.7	182.1	174.4	179.6
1985	165.9	172.4	165.9	173.0	182.6	194.2	195.5	196.6	190.6	187.7	180.4	166.2	180.9
MEAN	161.8	162.8	163.0	172.6	178.5	189.6	192.8	195.9	193.9	187.6	177.6	164.9	178.5

YEOSU MEAN after Doodson x<sub>0</sub>-filtering

													(cm)
YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1981	161.9	161.4	168.0	174.4	175.2	190.8	192.2	198.7	199.3	185.5	174.0	155.4	178.2
1982	151.5	152.3	154.1	172.2	179.6	184.7	189.9	194.8	196.8	188.3	173.5	163.8	175.3
1984	167.6	165.0	164.6	170.9	176.8	189.0	193.8	194.0	188.6	188.6	182.1	174.6	179.7
1985	165.9	172.5	165.6	173.0	182.4	194.4	195.5	196.8	190.6	187.8	180.2	166.2	181.0
MEAN	161.7	162.8	163.1	172.6	178.5	189.7	192.8	196.0	193.8	187.6	177.5	165.0	178.5



Tab. 2.5. (continued)

CHUNGMU ARITHMETIC MEAN

(cm)

YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1978	133.7	130.6	133.2	135.4	139.4	145.3	150.3	154.4	154.8	149.5	139.1	130.4	141.4
1979	125.8	130.5	134.8	134.2	144.2	147.8	155.5	152.5	155.9	154.6	136.2	132.4	142.1
1981	133.4	133.4	131.8	136.5	138.8	149.0	149.0	159.0	159.1	149.5	140.3	132.4	142.7
1982	129.9	129.6	131.0	139.0	144.7	148.1	151.4	155.5	159.0	150.9	138.0	130.5	142.4
1983	128.5	130.0	136.9	137.4	143.2	156.0	155.9	160.9	163.3	151.5	137.9	134.9	144.8
1984	133.1	130.4	130.3	134.7	142.0	152.0	154.7	156.3	151.4	150.9	144.2	138.7	143.3
1985	130.3	136.2	128.1	134.8	142.9	155.7	158.0	157.4	152.1	150.4	144.9	131.6	143.6
1986	128.2	130.2	138.0	136.8	140.5	150.1	155.6	160.4	156.5	148.7	138.3	145.2	144.1
1987	138.6	134.7	135.2	135.4	141.4	149.1	155.5	156.1	158.5	149.6	143.0	139.3	144.8
MEAN	131.3	131.7	133.3	136.0	141.9	150.3	154.0	156.9	156.7	150.6	140.2	135.0	143.2

CHUNGMU MEAN after Doodson x0-filtering

(cm)

YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1978	133.5	130.5	133.3	135.4	139.4	145.3	150.5	154.2	154.7	149.3	139.1	130.5	141.4
1979	126.1	130.4	135.3	134.1	144.4	147.9	155.5	152.6	155.9	154.2	135.9	132.3	142.2
1981	133.3	133.3	131.8	136.5	138.8	149.1	149.1	159.3	159.1	149.4	140.2	132.5	142.7
1982	130.0	129.6	131.2	139.0	144.7	148.1	151.4	155.5	159.0	150.7	138.0	130.3	142.4
1983	128.6	129.8	137.2	137.3	143.7	156.0	155.9	161.1	163.2	151.4	137.6	134.9	144.8
1984	133.0	130.3	130.2	134.8	142.2	152.2	155.0	156.4	151.3	150.8	144.2	139.0	143.3
1985	130.2	136.3	127.9	134.8	142.9	155.8	158.0	157.6	152.0	150.5	144.7	131.4	143.6
1986	128.3	130.0	138.3	136.8	140.6	150.2	155.5	160.5	156.5	148.4	138.3	145.2	144.1
1987	138.4	134.6	135.3	135.8	141.6	149.3	155.6	156.1	158.4	149.5	142.9	139.2	144.8
MEAN	131.3	131.7	133.4	136.1	142.0	150.4	154.0	157.0	156.7	150.5	140.1	135.0	143.3

Tab. 2.5. (continued)

CHEJU ARITHMETIC MEAN

													(cm)
YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1981	134.0	137.5	135.8	140.1	143.3	157.1	163.3	173.1	170.2	161.1	150.0	135.7	150.2
1982	131.9	131.9	134.5	144.2	151.0	151.9	158.9	166.6	164.4	160.3	145.5	134.7	148.1
1983	131.5	133.7	140.3	141.7	148.1	161.8	164.6	169.3	169.1	155.3	142.1	137.1	149.6
1984	132.0	128.7	132.6	141.0	148.4	159.2	161.8	162.8	156.4	158.6	151.2	141.7	147.9
1985	130.4	138.7	133.1	141.0	150.4	162.4	165.0	167.3	157.8	153.7	150.7	135.6	148.9
1987	138.8	135.5	139.3	141.4	146.5	157.3	163.5	167.8	168.4	159.2	149.9	142.5	150.9
MEAN	133.1	134.3	135.9	141.6	148.0	158.3	162.9	167.8	164.4	158.0	148.2	137.9	149.3

CHEJU MEAN after Doodson x0-filtering

													(cm)
YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1981	133.8	137.7	135.7	140.0	143.4	157.4	163.6	173.5	169.8	160.9	149.8	135.8	150.2
1982	131.9	132.1	134.7	144.2	150.9	151.9	159.0	166.6	164.2	160.2	145.4	134.6	148.1
1983	131.8	133.6	140.6	141.7	148.3	161.9	164.4	169.2	168.8	155.2	141.8	137.2	149.7
1984	132.0	128.7	132.8	141.0	148.7	159.4	162.0	162.6	156.1	158.4	151.2	141.8	148.0
1985	130.4	139.0	132.7	141.0	150.4	162.7	165.2	167.3	157.5	153.7	150.5	135.5	148.9
1987	139.0	135.4	139.5	141.6	146.6	157.5	163.4	167.6	168.3	159.1	149.8	142.6	151.0
MEAN	133.1	134.4	136.0	141.6	148.1	158.4	162.9	167.8	164.1	157.9	148.1	137.9	149.3

Tab. 2.5. (continued)

KEOMUNDO ARITHMETIC MEAN

(cm)

YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1982	164.2	163.3	164.2	174.0	179.2	182.7	187.9	194.5	194.8	187.3	174.1	165.4	177.7
1983	161.3	165.2	172.3	172.5	169.6	182.5	183.7	189.2	192.2	179.1	163.5	160.2	174.3
1984	157.6	154.4	157.1	164.4	169.7	180.7	183.1	185.9	178.5	179.6	172.3	165.1	170.8
1985	157.0	165.0	156.8	162.9	171.2	184.7	187.0	188.5	180.6	179.0	172.1	160.1	172.1
1986	156.2	157.4	166.4	165.2	167.2	177.4	184.9	191.6	185.5	176.5	167.2	174.1	172.6
1987	164.6	161.0	163.5	163.5	168.9	176.6	183.4	185.7	186.7	179.2	170.4	167.3	172.6
MEAN	160.1	161.1	163.4	167.1	170.9	180.8	185.0	189.2	186.4	180.1	169.9	165.4	173.3

KEOMUNDO MEAN after Doodson x0-filtering

(cm)

YEAR	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	MEAN
1982	164.2	163.5	164.4	174.0	179.0	182.6	187.9	194.4	194.6	187.1	174.1	165.3	177.7
1983	161.5	165.1	172.7	172.4	169.9	182.5	183.6	189.3	191.9	178.9	163.3	160.3	174.4
1984	157.5	154.5	157.2	164.4	169.9	181.0	183.3	185.9	178.3	179.5	172.3	165.4	170.8
1985	157.0	165.3	156.5	162.9	171.1	184.9	187.1	188.6	180.3	179.0	171.9	160.1	172.1
1986	156.4	157.4	166.8	165.1	167.0	177.5	184.8	191.6	185.4	176.1	167.1	174.3	172.6
1987	164.6	160.8	163.7	163.8	169.2	176.8	183.4	185.5	186.6	179.0	170.3	167.3	172.7
MEAN	160.2	161.1	163.5	167.1	171.0	180.9	185.0	189.2	186.2	179.9	169.8	165.4	173.4

### 제 3 장 파랑산정기법의 검토

해상구조물의 안정에 가장 큰 영향을 주는 파랑은 파력에 의한 구조물의 파괴 및 붕괴를 일으키는 직접적인 요인이 된다. 또한 해안침식을 일으켜 해안도로의 유실과 가옥의 파괴를 가져오거나 연안표사를 이동시켜 항을 매몰시키므로 항의 기능을 정지시키기도 한다. 이와 같은 파랑에 의한 재해로 인한 고귀한 인명의 손실과 재원의 낭비를 줄이기 위해서 해상구조물은 내습파랑에 대해 잘 견디도록 안전하게 설계되어야 한다. 한편, 연안구조물의 건설에는 많은 시간과 경비가 들게된다. 따라서, 합리적인 설계파의 산출로 과도한 건설로 인한 낭비를 막아야 한다.

연안방재시설의 축조를 위한 설계파 추정은 먼저 심해파의 추정으로부터 시작된다. 천해역의 현안지점의 설계파는 심해파로부터 천해파 변형모델에 의하여 계산된다. 본 장 제1절에는 심해파 추정모델의 기본 입력자료인 해상풍 추정을 위한 Cardone 모델과 심해파 추정의 DSA-5 모델을 수립하였고, 1985년부터 3년간의 추정결과를 요약하였으며, 일본 기상청의 MRI 모델 결과와 비교하였다. 제2절에서는 유의파에 의한 천해파랑 추정방법과 불규칙파랑의 천해변형 문제를 취급하였다. 특히 유의파에 의한 천해파랑 추정방법은 마찰을 고려한 모델과 굴절과 회절을 동시에 고려한 모델이 각각 개발되었다. 제3절에서는 파랑의 파향스펙트럼 추정모델을 수립하였으며 또한 불규칙 파동장의 방향성을 나타내는 방향파라미터에 관하여 기술하였다.

## 제1절 심해파 추정

고도경제성장과 산업화와 더불어 항만 건설, 방파제 축조 등 연안 구조물 건설이 활발히 진행됨에 따라 연안에서의 정확한 해상상태의 정보가 설실히 요구되고 있다. 방파제등 연안 구조물의 축조에는 막대한 건설경비가 소요될 뿐만 아니라 붕괴시에는 인명과 재산상 피해도 막대하다. 그러므로 안전하고 경제성있는 최적설계에 필요한 설계파랑의 결정은 매우 중요하다. 또한 연안 개발에 따른 환경영향평가 등에 파랑의 기후적 특성이 중요한 요소이다.

파랑통계특성과 설계파고의 결정을 위해서는 장기간의 파랑관측자료가 필요하다. 이러한 장기 파랑관측을 실시하고 있는 관측지점은 수 개 지점에 불과하다. 따라서, 모든 연안에 대한 장기 파랑자료를 얻기 위하여는 파랑모델에 의한 파랑추산이 불가피하며, 파랑모델의 입력자료로 해상풍자료가 필수적으로 뒤따르게 된다.

### 3.1.1. 해상풍 모델

해상에서의 기상관측은 관측선이나 관측부이(Buoy)에 의존하므로, 광범위한 해역에서 동시에 관측하기는 거의 불가능한 실정이다. 또한, 바람은 시간적, 공간적인 변화가 크고 국지적인 영향을 많이 받으므로, 몇몇 관측지점의 관측자료로 넓은 지역에 대해 객관분석을 행하기 어렵다. 따라서 기압, 기온 등의 해상풍에 영향을 미치는 기상요소의 종관관측자료로부터 해상풍을 산출하는 방법이 개발되어 왔다. 해상풍 산출방법은 기압자료로 산출된 지균풍과 실제 관측된 해상풍과의 통계적인 관계로부터 해상풍을 지균풍의 함수로 나타내는 경험식을 만들어 내는 방법과 대기경계층의 역학을 이용한 해상풍 수치모델을 사용하는 방법 등이 있다.

본 연구에서는 대기경계층을 지표층과 Ekman층으로 나누고 경도풍을 등압선과 등온선의 교차에 따른 온도풍보정과 기온과 수온의 차로 결정되는 대기안정도에 따라 보정하는 Cardone모델(Cardone 1969)을 사용하였다.

### 1) 입력자료

모델의 입력자료는 해면기압과 기온 및 수온이다. 해면기압과 기온은 일본기상청 발행의 인쇄천기도로부터 매 12시간 간격으로 1985~1987년의 3년간의 일기도를 Digitizing하였으며, 해수면 온도는 GMS위성에서 관측한 10일 평균된 위도, 경도 1도 간격의 격자점 자료를 사용하였다. 해상풍 모델의 결과가 파랑모델의 입력자료로 사용되므로 우리나라 연안을 둘러싸고 있는 광범위한 해역을 포함하여야 한다. 따라서 위도 22°-40°N, 경도 115°-140°E의 해역에 대하여 격자간격 55km의 1813(37×49)개의 격자점을 갖는 격자망을 구성하였다(Fig 3.1). 입력자료를 격자점에서의 자료로 변환하기 위해 Digitizing된 기압 및 기온자료는 객관분석법을 사용하였으며, 수온자료는 Laplace 내삽법을 사용하였다.

### 2) 해상풍 모델의 개요

일반적으로 대기의 운동을 지배하는 기본방정식은 다음과 같다.

$$\begin{matrix} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} & + & \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} & + & f \vec{k} \times \vec{V} & = & - \frac{1}{\rho} \nabla P & + & \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial z} \end{matrix} \quad (3.1)$$

(a)            (b)            (c)            (d)            (e)

여기서  $\vec{V}$ ,  $f$ ,  $\rho$ ,  $P$ ,  $\vec{\tau}$  는 각각 바람벡터, Coriolis 계수, 공기의 밀도, 기압, 바람의 응력을 나타낸다. 이러한 기본방정식의 모든 항을 고려하여 해를 구하는 것은 매우 어려우므로 대기를 여러층으로 나누어 식을 간략화하였다.

대기는 크게 나누어 대기경계층과 자유대기층(free atmosphere)으로 나누며,

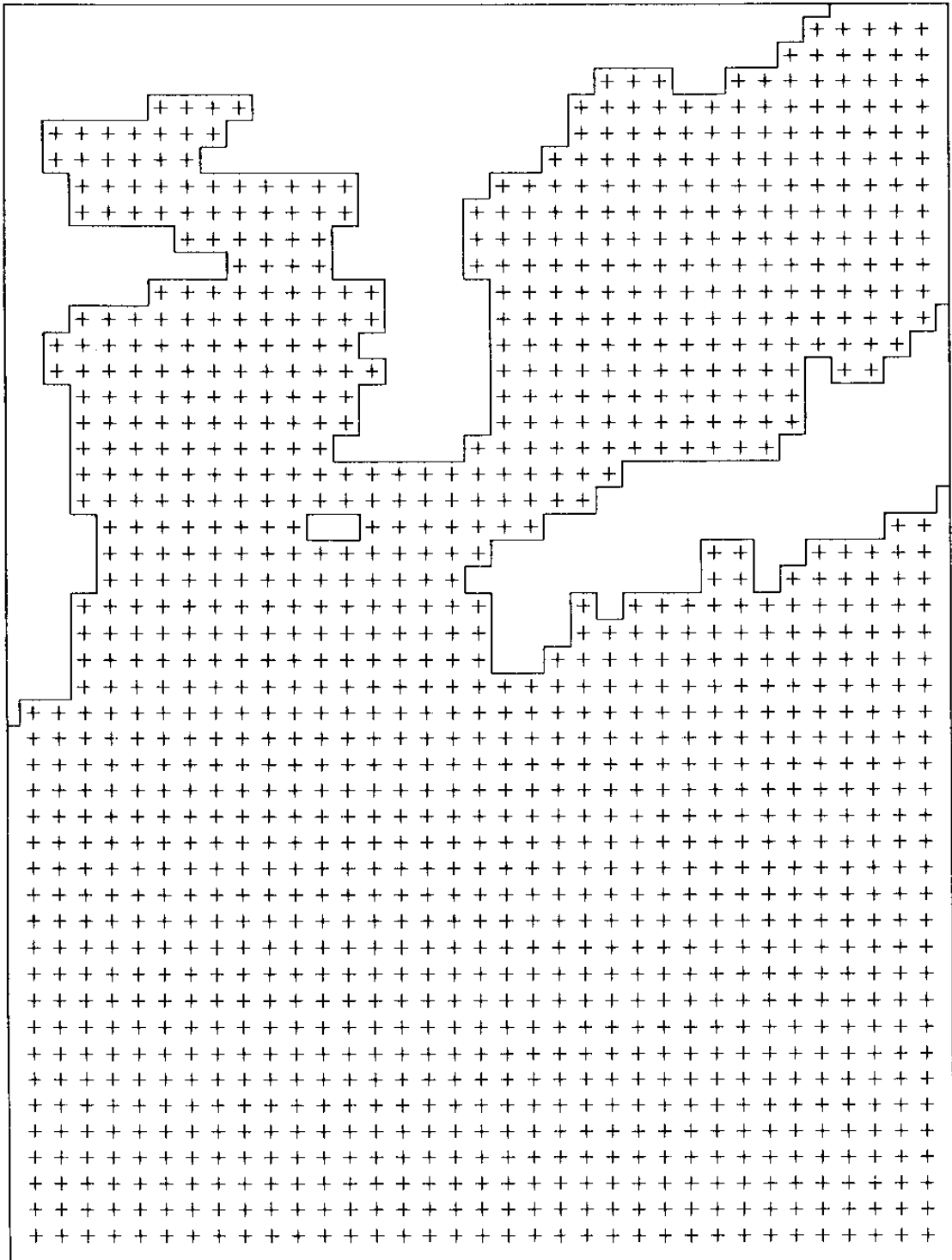


Fig. 3.1. Numerical grid system for the wind and wave models

대기경계층은 다시 Ekman층과 지표층(surface layer)으로 나누어 진다(Fig 3.2). 자유대기층에서는 마찰력을 표시하는 (e)항이 무시되며, 기압계의 이동속도가 빠르고 기압의 시간변화가 큰 태풍과 같은 기압계를 제외하고는 일반적으로 바람의 시간변화를 나타내는 (a)항은 다른 항에 비하여작다. 이러한 경우 (b)항의 원심력, (c)항의 전향력과 (d)항의 기압경도력이 평형을 이루며, 이때의 바람을 경도풍이라 부른다. 일반적으로 대기경계층에서는 경압성이 크므로 경도풍의 고도에 따른 변화를 온도풍을 사용하여 보정하였다. Ekman층에서는 Reynold stress가 고도에 따라 감소하고 난류점성계수는 거의 일정한 반면, 지표층에서는 Reynold stress가 고도에 따라 거의 일정하며 난류점성계수는 선형적으로 증가한다. 지표층에서의 바람의 연직구조는 대기의 안정도에 따라 변화하며, 대기안정도는 기온과 해수면 온도의 차로 결정되어 진다.

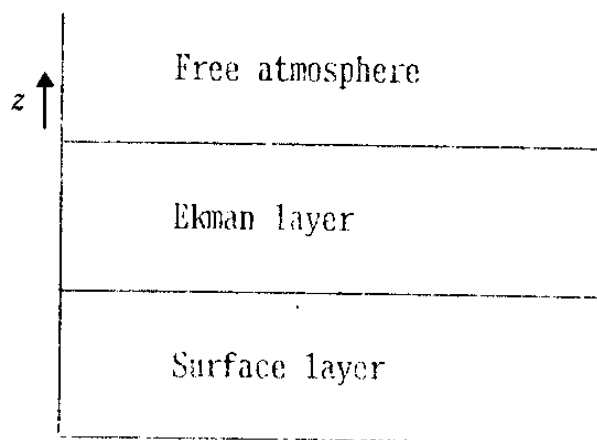


Fig. 3.2. Schematic diagram of the atmospheric structure

### 3.1.2. 파랑모델

파랑추정은 1940년대에 바람이 비교적 일정한 해역에서의 풍속과 파고의 경험적인 관계를 사용하여 처음 시도되었다. Wilson(1961, 1965)은 태풍과 같이



풍향, 풍속의 변화가 심한 해역에서 파랑추산을 시도하였다. 1950년대 해상상태를 보다 포괄적이고 실제적으로 나타낼 수 있는 새로운 개념, 즉 파랑에너지 Spectrum 개념이 정립되기 시작하였으며, Gelci *et al.*(1957)은 최초로 파랑스펙트럼 내의 에너지 평형의 개념을 적용하여 파랑을 수치계산하는 DSA모형을 개발하였다. 북해에서 행해진 JONSWAP 실험결과를 토대로 Gunther *et al.*(1979, 1981)은 너울과 풍파를 따로 계산하여 결합시키는 HYPА모형을 개발하였다. 이 밖에, 네덜란드의 GONO, 일본의 MRI모형등이 개발되어 파랑예보에 사용되고 있다.

본 연구에서는 파랑의 기후적 특성을 밝히기 위해 장기간 파랑추정에 적합하며 신속하고 간편한 DSA-5모형을 우리나라 주변해역에 적용하여, 제한된 관측자료 및 JMA의 MRI모형 결과와 비교하였다.

#### 1) 입력자료

모형의 입력자료는 해상풍과 지형이다. 해상풍자료는 해상풍모형의 매 12시간 마다의 결과를 파랑모형의 시간간격인 1.5시간 간격으로 내삽하여 사용하였다. 모형의 격자망은 해상풍모형과 같은 격자망을 사용하였으며, 지형에 따라 1425개의 격자점을 갖는 실제 계산영역을 설정하였다(Fig 3.1). 또한 모형의 격자망은 일본JMA의 MRI모형 결과와 비교하기 쉽도록 MRI모형 격자망의 1/2의 간격으로 구성된 것이다.

#### 2) 모형의 개요

DSA-5 모형은 프랑스의 Gelci등에 의해 개발된 모형로, 해양의 불규칙한 해상상태를 수많은 성분파의 합으로 보아 파랑에너지의 스펙트럼을 사용하여 표현한다. 파랑의 변화는 에너지 전파와 바람에 의한 에너지 증가 및 점성에 의한 에너지 감소 등 에너지의 변화에 기인하는 것으로 본다. 즉, 파랑 스펙트럼의 변화는 다음과 같은 에너지 평형방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -C_g \cdot \nabla E + I + D \quad (3.2)$$

여기서,  $E$ 는 스펙트럼 에너지,  $C_g$ 는 파랑의 군속도,  $I$ 는 바람에 의한 에너지의 증가,  $D$ 는 점성에 의한 에너지의 감소를 나타낸다. 해상에서 일정방향으로 풍속  $V$ , 풍향  $\phi$ 의 바람이 불 때, 주기  $T$ , 파향  $\theta$ 인 방향 스펙트럼의 바람에 의한 에너지 증가는 파향의 주방향을 중심으로 부채꼴 형태로 분산되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 에너지 증가항  $I$ 는 바람에 의한 순수한 증가항  $\Pi$ 와 방향별 에너지 분산항  $D$ 로 분리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(Gelci 1975).

$$\begin{aligned} \Pi &= \begin{cases} \frac{6.76 T^2 (V - 2T)^3}{V^3} & , T < V/2 \\ 0 & , T \geq V/2 \end{cases} \\ D &= \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \phi) & , |\theta - \phi| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & , |\theta - \phi| \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \\ I &= \Pi \cdot D \quad (3.3) \\ &= \begin{cases} \frac{6.76 T^2 (V - 2T)^3}{V^3} \cdot \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \phi), & T < \frac{V}{2} \text{ and } |\theta - \phi| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & , T \geq \frac{V}{2} \text{ or } |\theta - \phi| \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \end{aligned}$$

또한, 점성에 의한 파랑에너지 감소항  $D$ 는 다음과 같다.

$$D = -\frac{64 \pi^4 \mu}{\rho g^2 T^4} E \quad (3.4)$$

여기서  $\mu$ 는 와동점성계수이며, 총 파랑에너지에 비례한다고 가정된다 (Gelci 1975). 식 (3.2), (3.3), (3.4)를 종합하여, DSA-5모델에서 사용되는 에너지 평형방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -C_g \cdot \nabla E + \frac{6.76T^2(V-2T)^3}{V^3} \cdot \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta-\phi) - \frac{64\pi^4\mu}{\rho g^2 T^4} E \quad (3.5)$$

### 3) 파랑분포도 비교

Cardone모델과 DSA모델에 의한 해상풍과 파랑의 추정결과를 일본기상청(JMA)의 모델결과와 비교하였다. Fig. 3.3은 JMA의 모델 격자망을 나타낸 것이며, 표시된 우리나라 연안의 17개 격자점에 대해 모델간의 상관관계를 분석하였다. Fig. 3.4과 Fig. 3.5는 바람과 파고에 대해 우리나라 연안 격자점에서의 상관 분포도를 나타낸 것이며, Table 3.1, 3.2는 통계분석한 결과를 보인 것이다. 바람의 경우 Cardone모델의 결과는 JMA보다 평균 2.1m/sec 낮게 추정되었으나, 바람이 센 경우는 Cardone추정치가 JMA보다 더 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이것은 JMA모델의 격자간격이 Cardone 모델의 격자간격보다 2배 더 크므로, 태풍과 같이 기압의 공간적 변화가 큰 경우에는 이를 충분히 나타내지 못하기 때문인 것으로 생각된다. 파랑의 경우도 바람과 마찬가지로 DSA모델의 결과가 MRI모델의 결과보다 평균 0.78m 낮게 추산되었으나, 파고가 큰 경우에는 더 높게 나타났다. Fig. 3.6은 태풍 Vera(1986.8)시 거문도와 거제도에서 관측된 파랑자료를 DSA모델과 MRI모델의 결과와 비교한 것이다. DSA와 MRI 모두 성장하는 과정은 잘 재현하나, 소멸단계는 비교적 큰 오차를 보이고 있다. 주기의 경우 MRI는 상당히 좋은 결과를 보여주었으나,

DSA는 전반적으로 과대평가되어 있다. Fig. 3.7 ~ 3.9는 각각 한달에 한번, 일주일에 한번, 2일에 한번 꼴로 나타나는 파고의 분포를 계절별로 나타낸 것이다. Fig. 3.10은 우리나라 연안격자점에서의 파랑장미도를 나타낸 것이다.

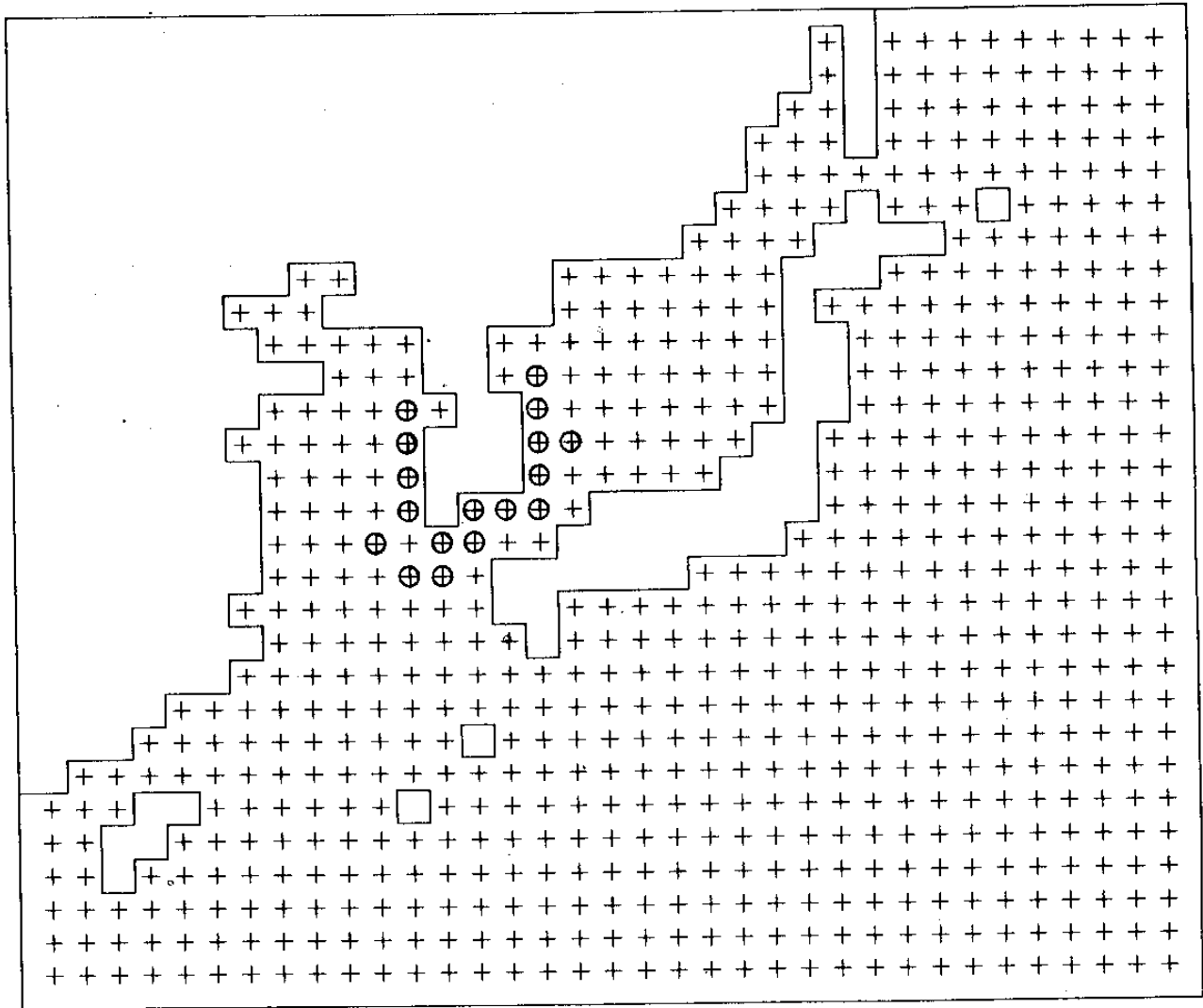


Fig. 3.3. Numerical grid system for the JMA model

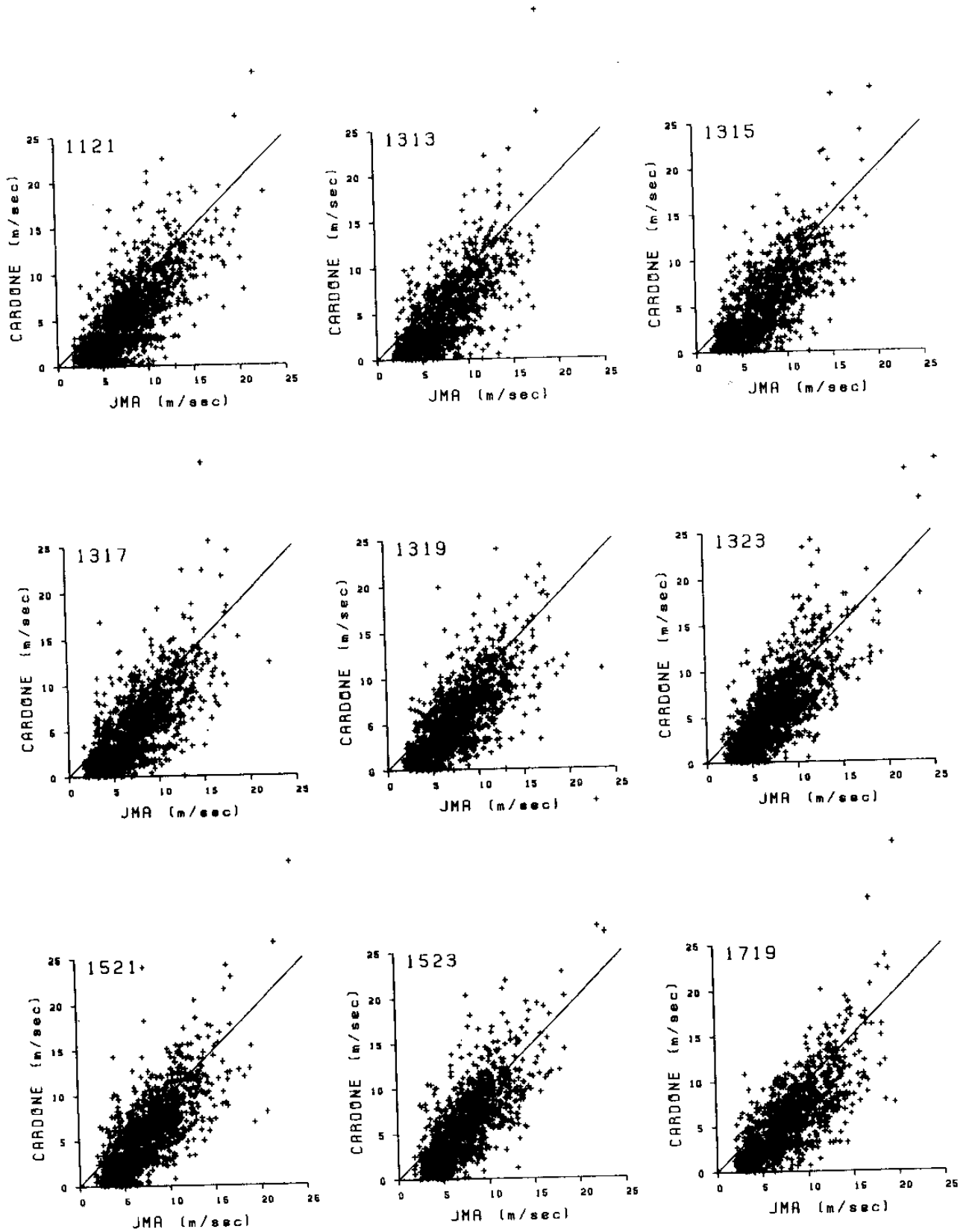


Fig. 3.4. Scatter diagram showing the relation between the Cardone model and JMA wind model.

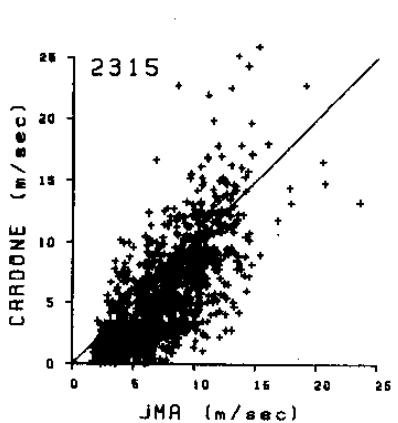
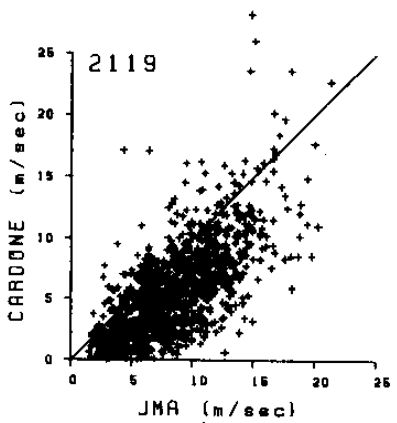
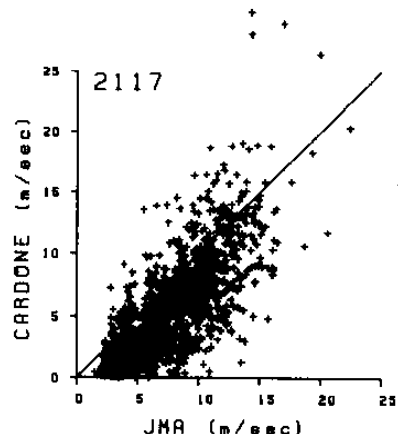
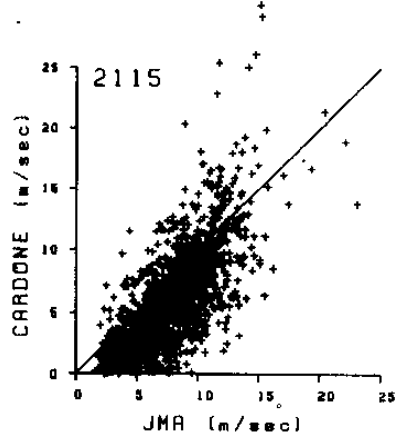
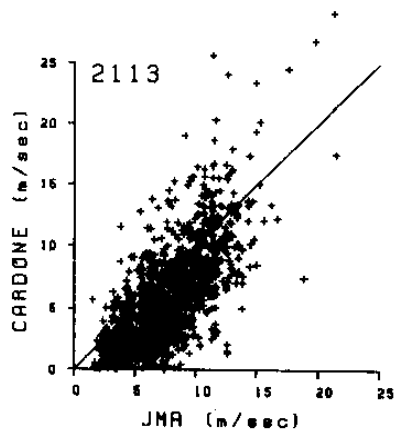
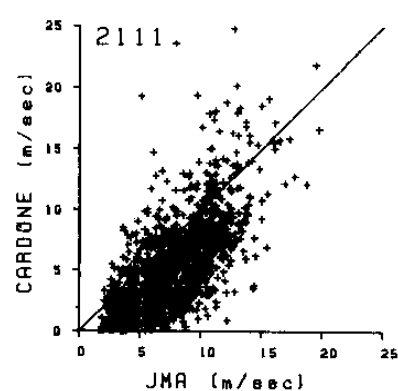
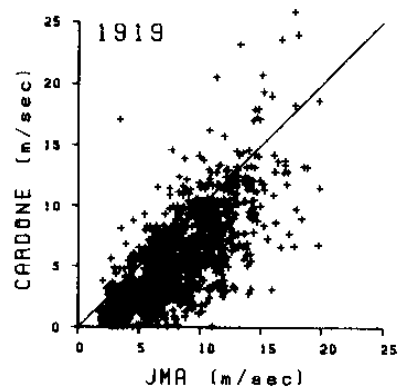
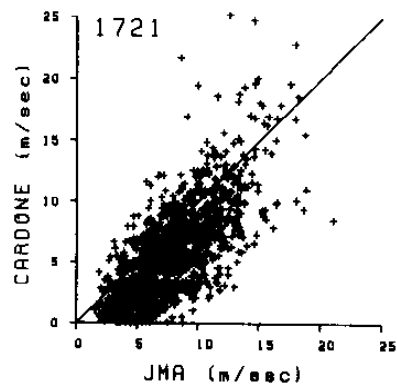


Fig. 3.4. (continued)

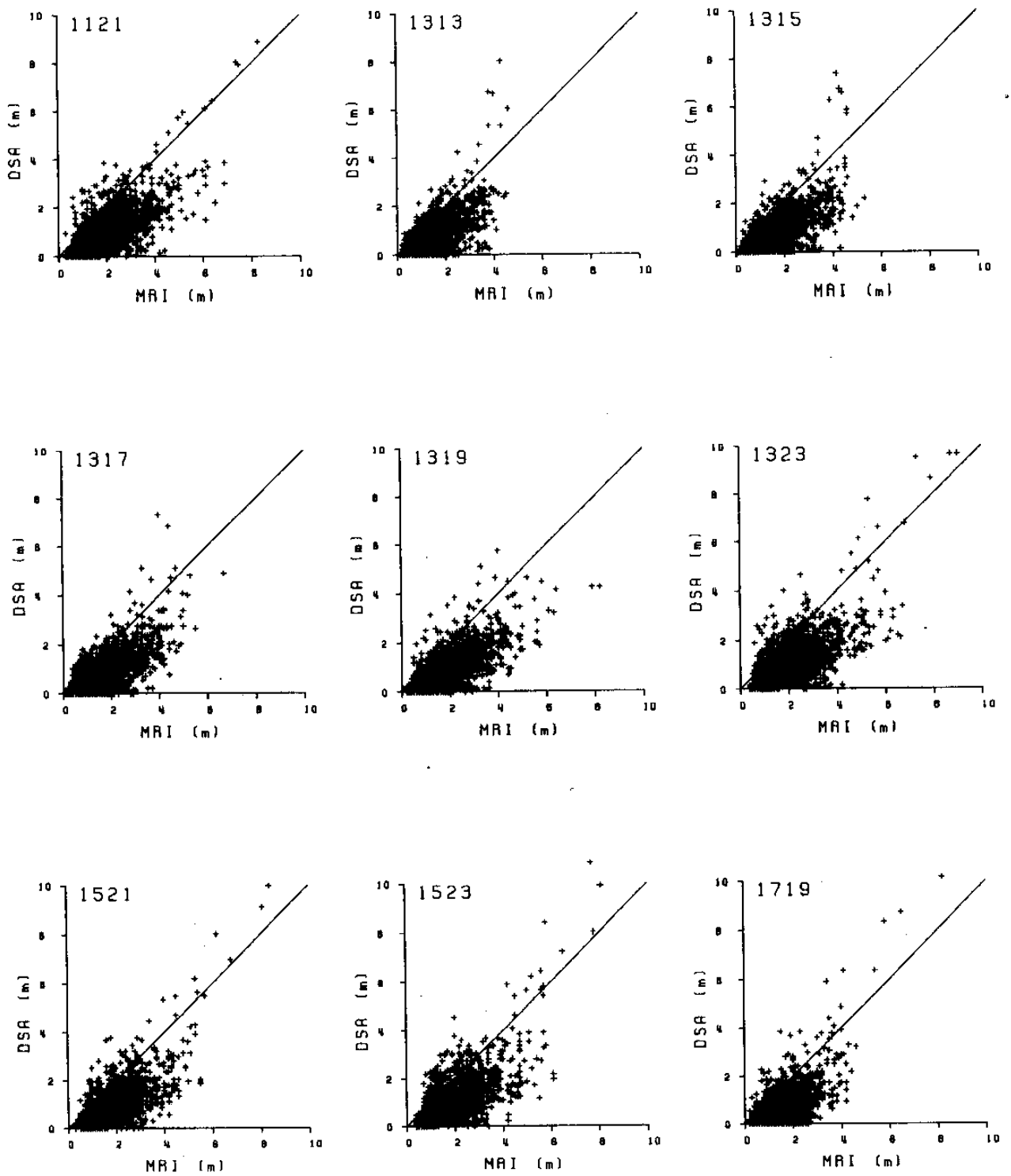


Fig. 3.5. As in Fig. 3.4 except between the DSA model and MRI model.

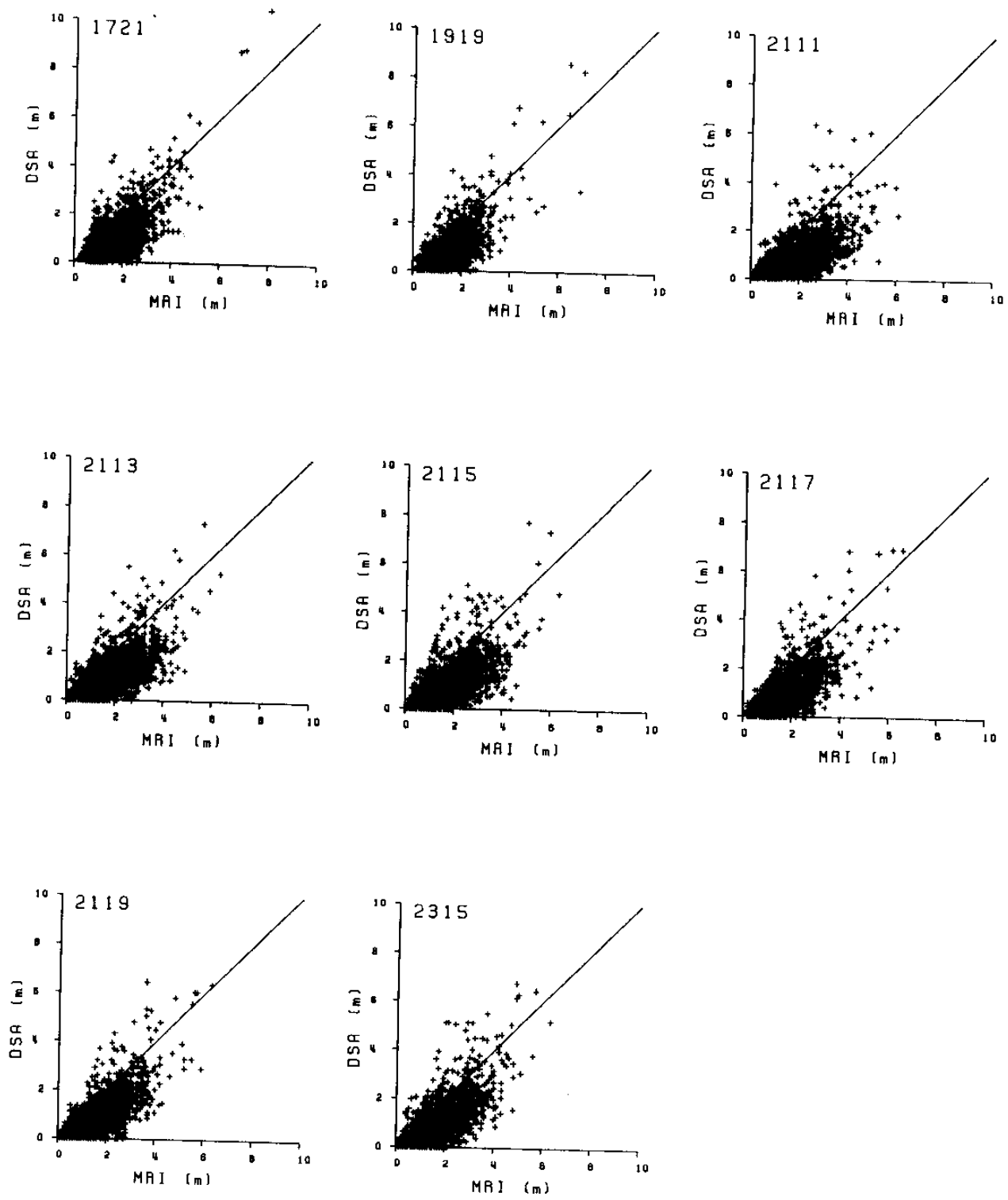


Fig. 3.5. (continued)



Table 3.1 Statistical results of the comparison between the JMA wind model and the Cardone model

Grid Point	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\delta_x$	$\delta_y$	A	B	R	$\overline{Y-X}$	$\sqrt{\overline{(Y-X)^2}}$
1121	7.76	5.43	3.38	4.10	0.87	-1.36	0.7225	-2.34	3.70
1313	7.24	4.71	3.17	3.86	0.86	-1.55	0.7089	-2.54	3.75
1315	7.27	4.93	3.25	3.86	0.86	-1.30	0.7231	-2.33	3.57
1317	7.33	5.23	3.27	3.95	0.86	-1.07	0.7127	-2.10	3.50
1319	7.50	5.36	3.30	3.89	0.84	-0.98	0.7170	-2.14	3.49
1323	7.68	5.89	3.26	4.15	0.94	-1.36	0.7410	-1.79	3.32
1521	7.50	5.73	3.19	3.92	0.89	-0.97	0.7261	-1.77	3.24
1523	7.46	5.92	3.04	4.07	0.99	-1.50	0.7436	-1.54	3.12
1719	7.77	5.59	3.39	3.94	0.87	-1.14	0.7439	-2.19	3.45
1721	7.69	5.63	3.22	3.92	0.89	-1.20	0.7299	-2.05	3.39
1919	7.93	5.46	3.46	3.88	0.82	-1.00	0.7274	-2.47	3.69
2111	7.36	5.13	3.08	3.81	0.87	-1.25	0.7006	-2.22	3.54
2113	7.29	5.40	3.04	4.05	0.97	-1.66	0.7273	-1.89	3.36
2115	7.47	5.60	3.15	4.30	1.01	-1.93	0.7393	-1.86	3.44
2117	7.76	5.46	3.36	4.01	0.87	-1.33	0.7334	-2.30	3.59
2119	8.07	5.23	3.59	3.75	0.75	-0.81	0.7178	-2.84	3.96
2315	7.28	5.42	3.06	3.99	0.91	-1.24	0.7010	-1.86	3.41
Total	7.55	5.42	3.26	3.98	0.88	-1.23	0.7211	-2.13	3.51

Table 3.2 Statistical results of the comparison between the MRI model and the DSA model

Grid Point	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\delta_x$	$\delta_y$	A	B	R	$\overline{Y-X}$	$\sqrt{(Y-X)^2}$
1121	1.73	0.83	0.96	0.81	0.61	-0.22	0.7250	-0.89	1.12
1313	1.26	0.55	0.72	0.66	0.63	-0.24	0.6869	-0.71	0.90
1315	1.40	0.63	0.82	0.69	0.58	-0.19	0.6928	-0.77	0.98
1317	1.41	0.67	0.85	0.71	0.60	-0.18	0.7257	-0.74	0.95
1319	1.59	0.72	0.91	0.71	0.55	-0.16	0.7152	-0.87	1.08
1323	1.82	0.86	0.99	0.84	0.59	-0.21	0.6968	-0.96	1.20
1521	1.65	0.76	0.86	0.77	0.64	-0.29	0.7142	-0.89	1.08
1523	1.75	0.88	0.92	0.84	0.64	-0.24	0.6994	-0.87	1.11
1719	1.41	0.59	0.72	0.68	0.60	-0.26	0.6401	-0.82	1.01
1721	1.54	0.83	0.78	0.80	0.74	-0.31	0.7260	-0.70	0.92
1919	1.36	0.76	0.70	0.71	0.71	-0.20	0.7013	-0.60	0.81
2111	1.58	0.72	0.99	0.73	0.52	-0.11	0.7023	-0.86	1.11
2113	1.52	0.78	0.96	0.77	0.58	-0.10	0.7215	-0.74	1.00
2115	1.54	0.83	0.93	0.80	0.60	-0.09	0.7024	-0.71	0.98
2117	1.53	0.84	0.86	0.78	0.65	-0.15	0.7203	-0.69	0.93
2119	1.56	0.81	0.82	0.74	0.66	-0.21	0.7329	-0.75	0.94
2315	1.58	0.88	0.89	0.82	0.67	-0.18	0.7304	-0.71	0.95
Total	1.54	0.76	0.88	0.76	0.61	-0.19	0.7075	-0.78	1.01

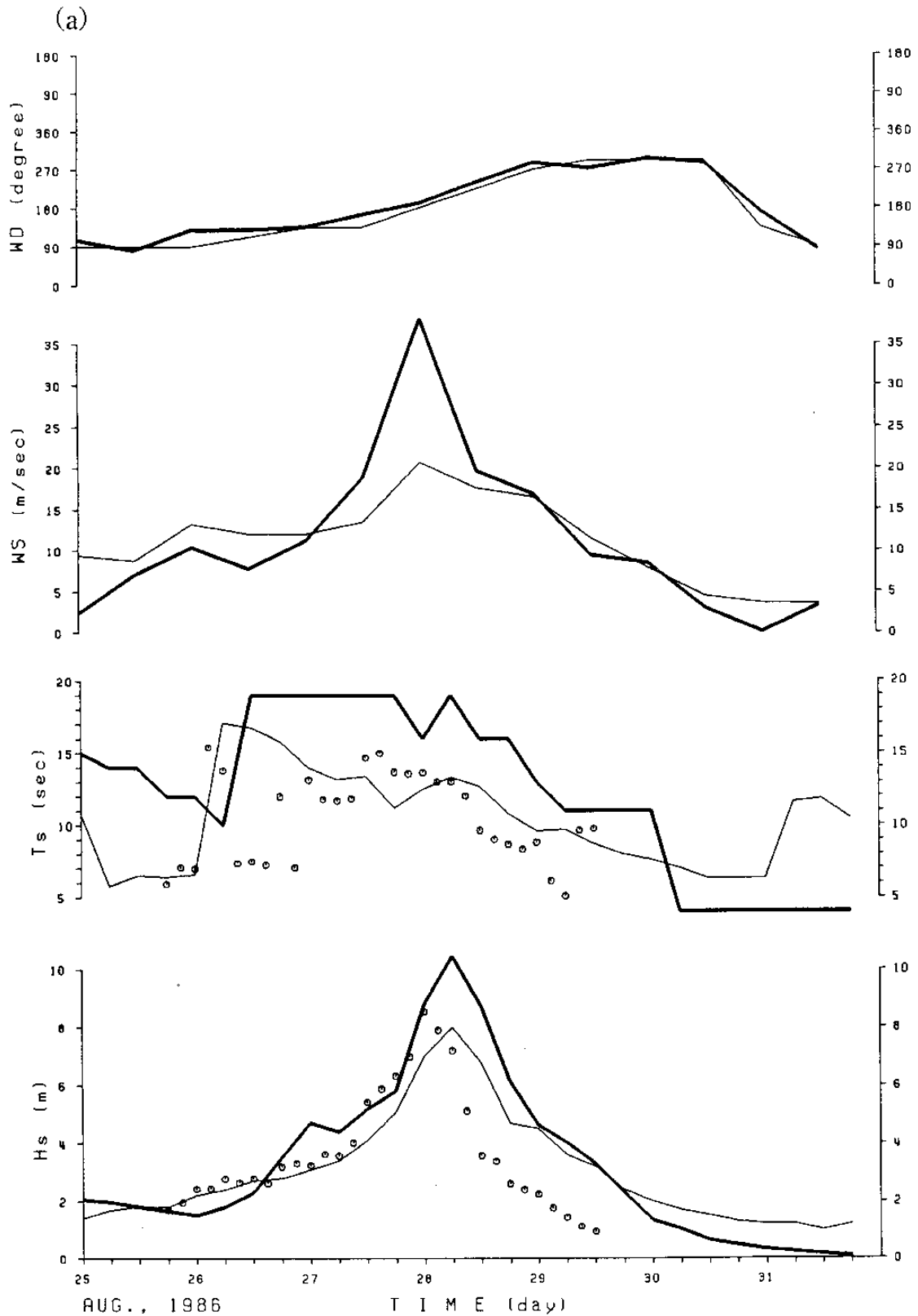
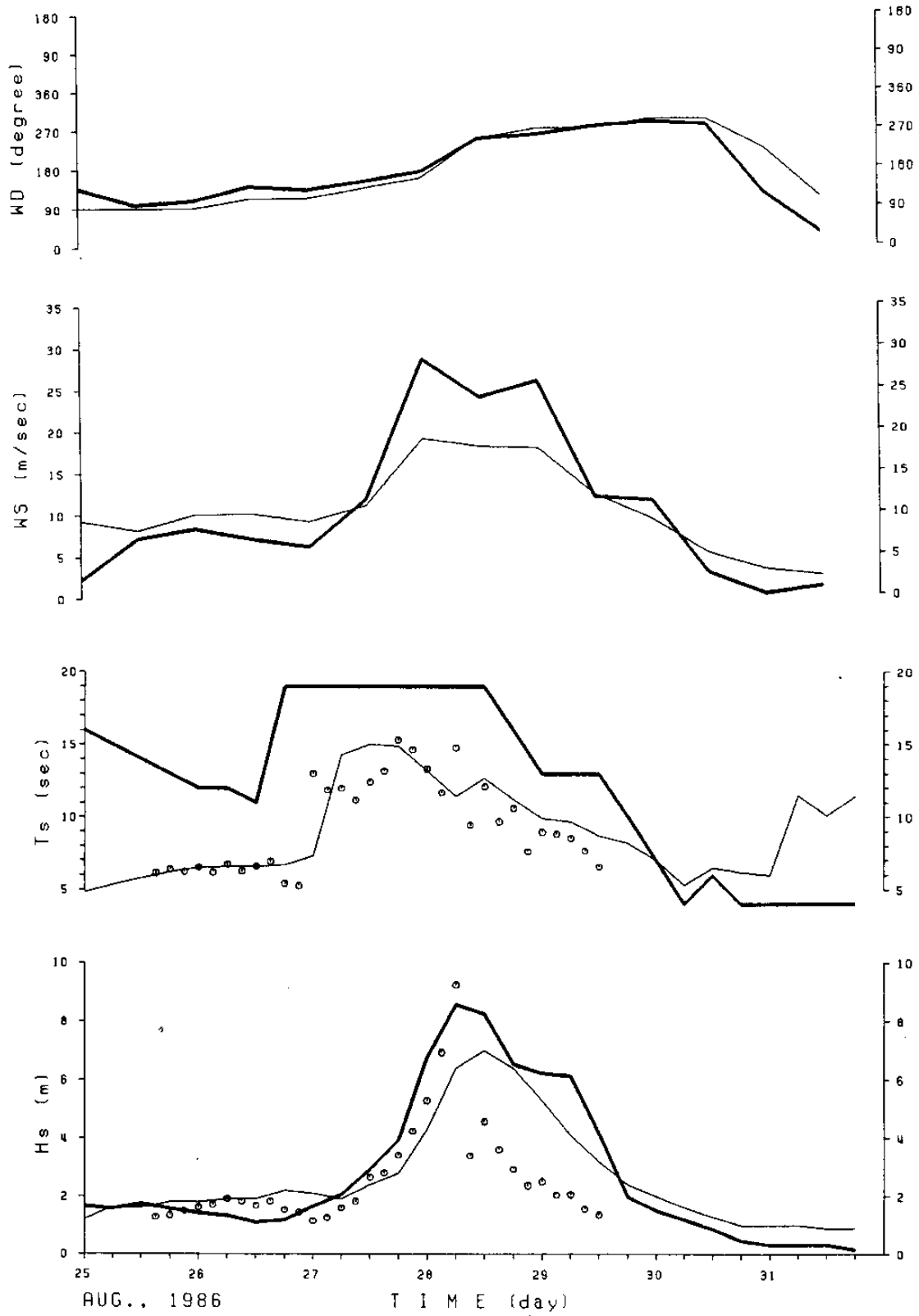


Fig. 3.6. Comparisons of winds and waves calculated by models with observations at (a) Geomun-do and (b) Geoje-do ; the solid lines denote the JMA model results, the thick lines the results of the Cardone model and DSA model.

(b)



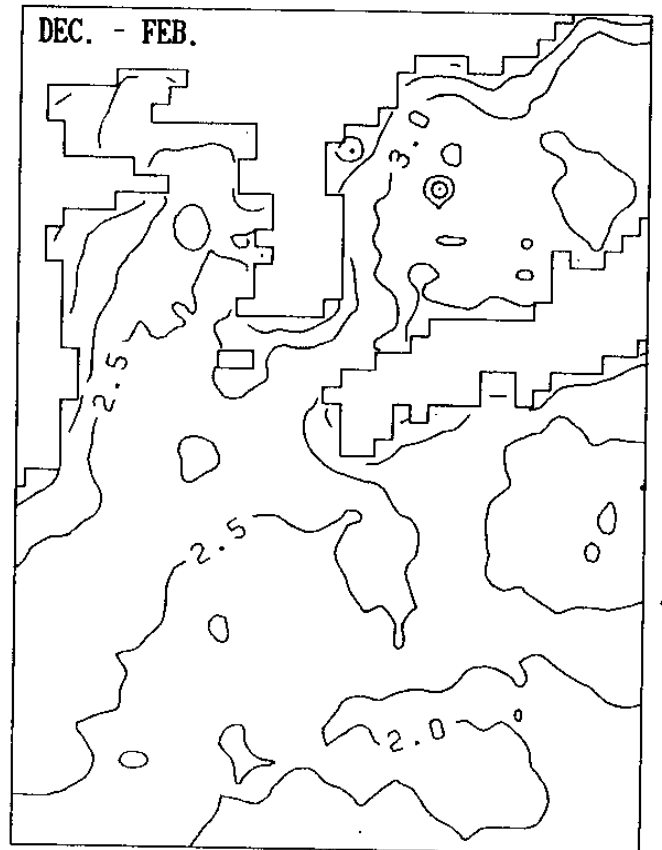
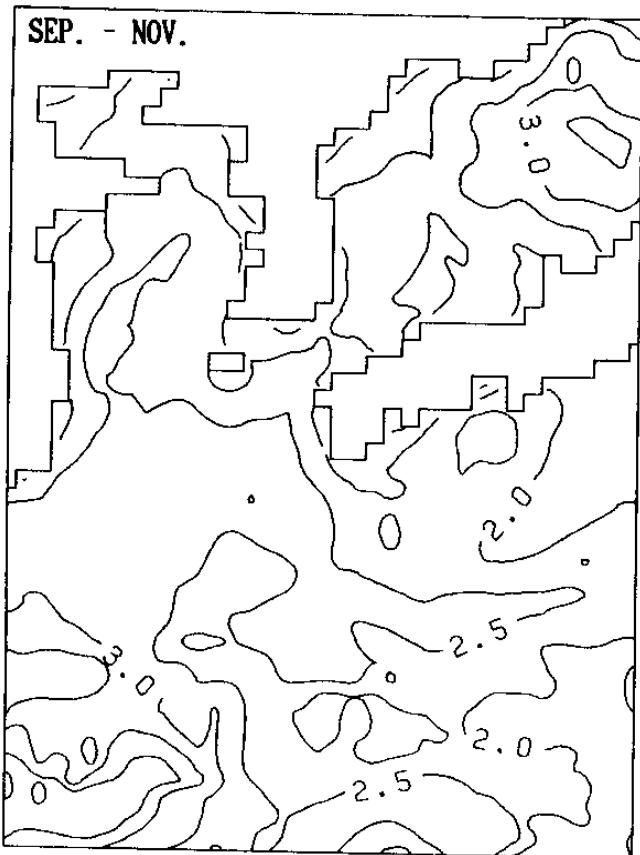
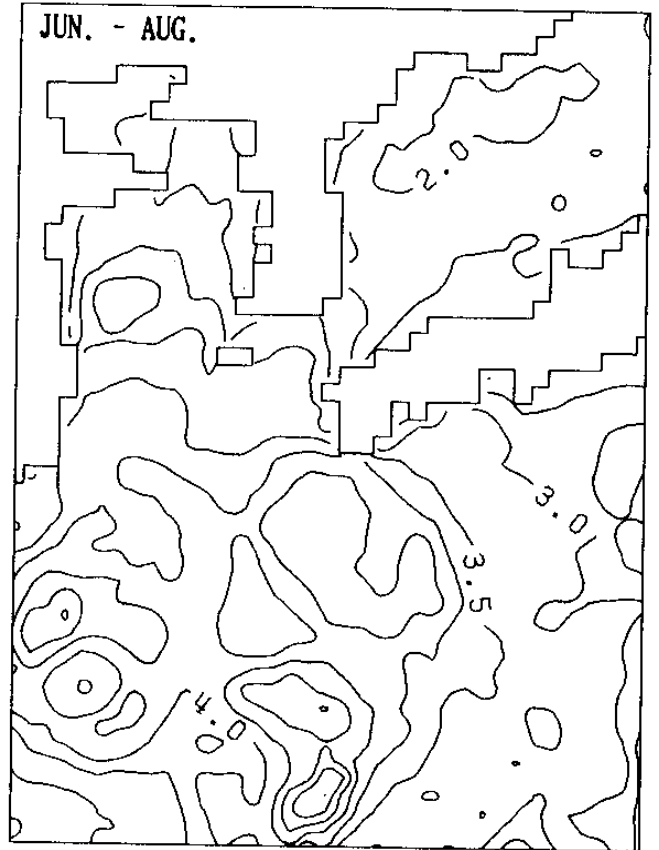
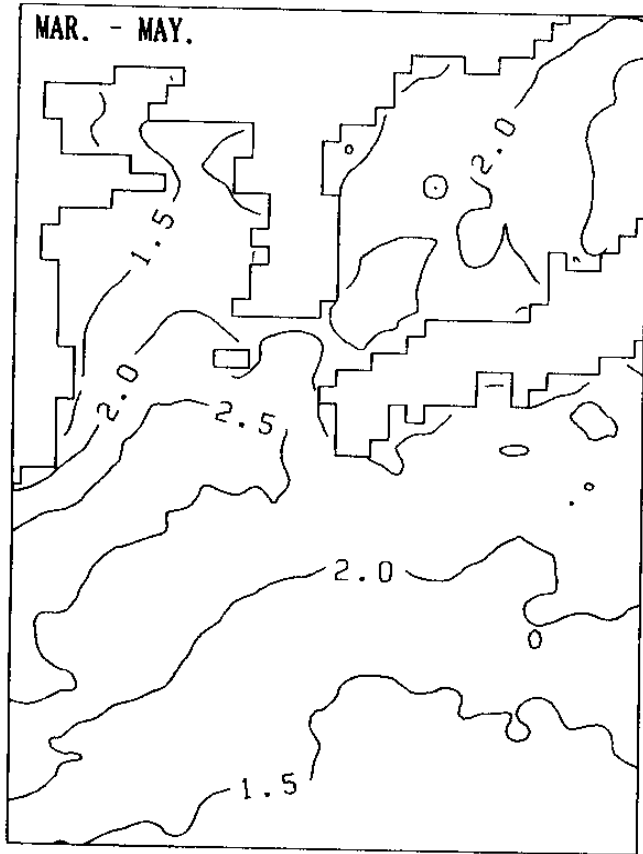


Fig. 3.7. Distribution of wave height with probability of once per one month.

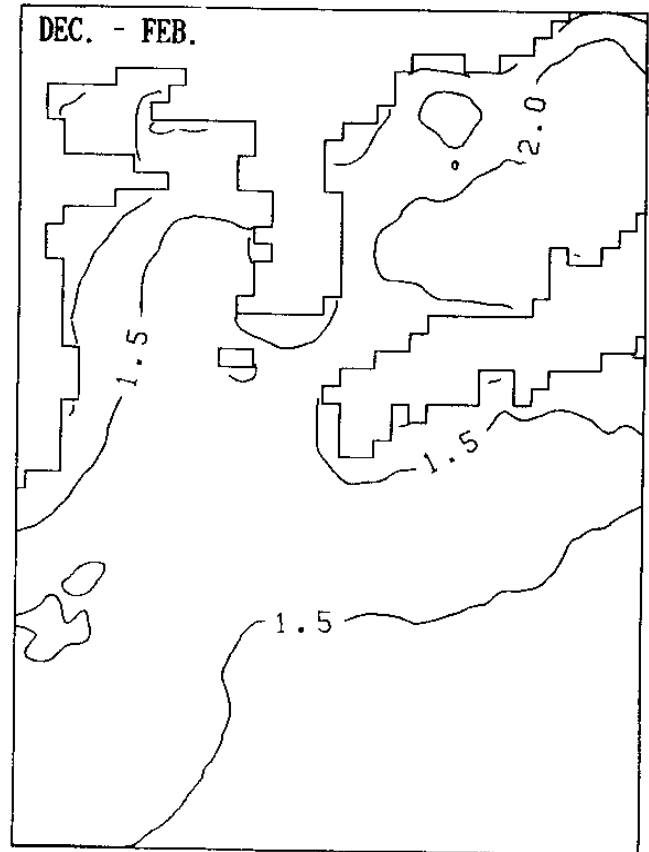
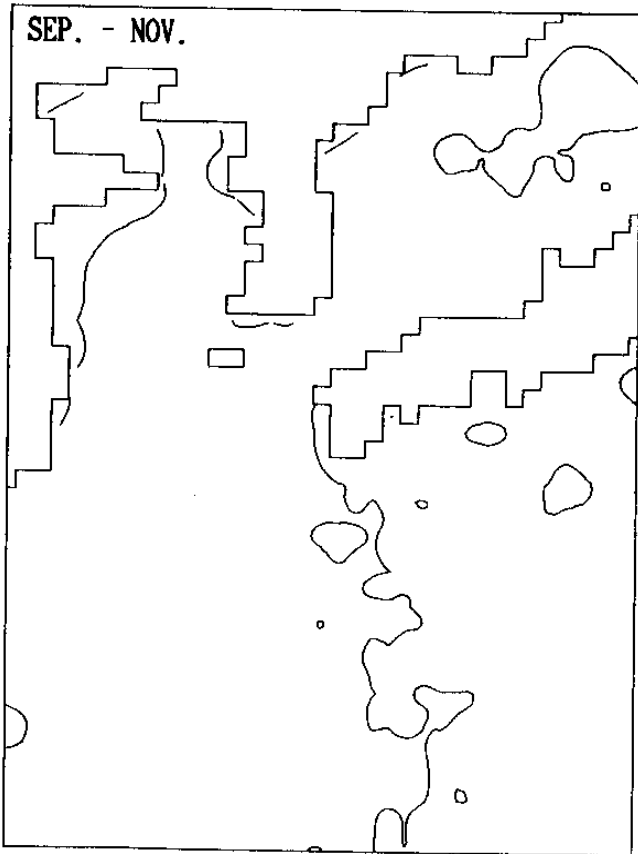
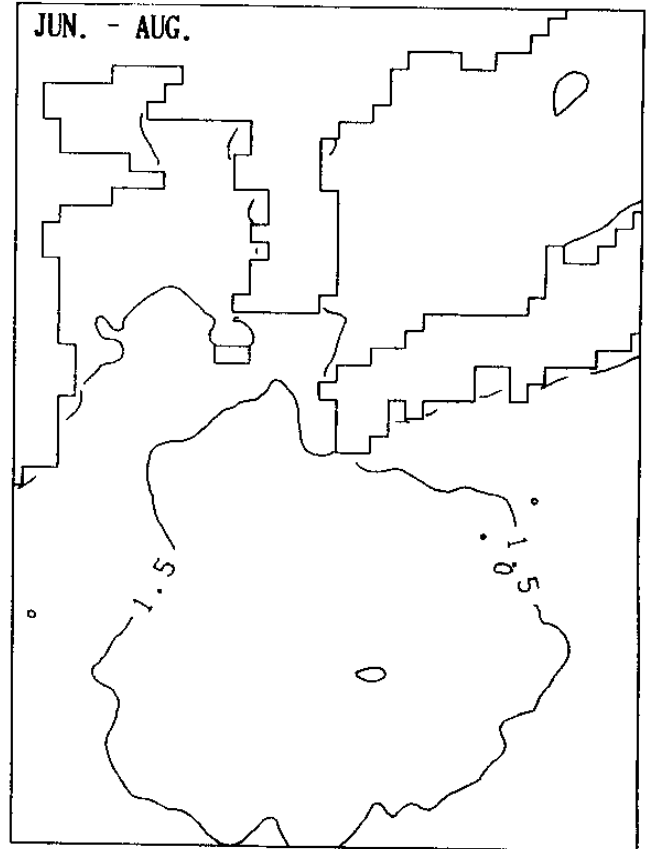
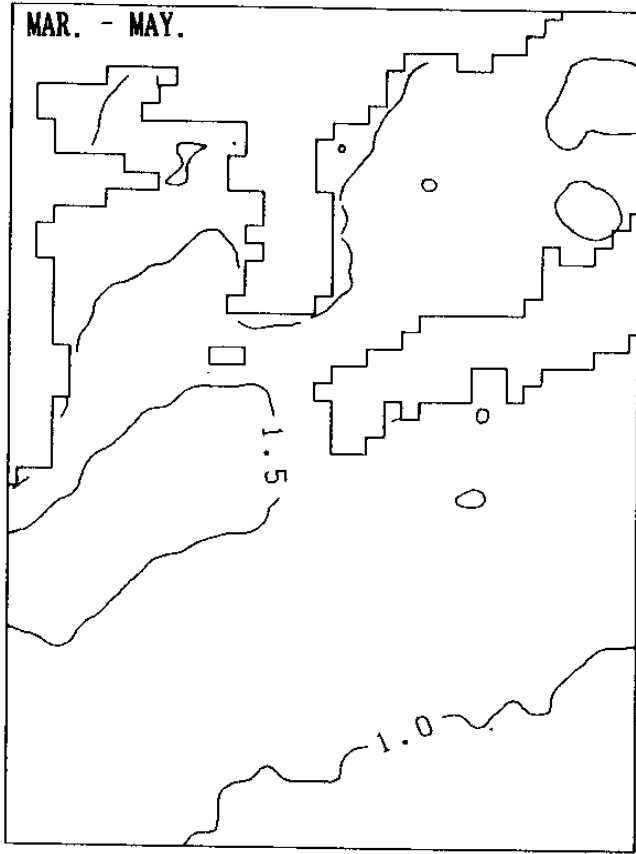


Fig. 3.8. Distribution of wave height with probability of once per one week.

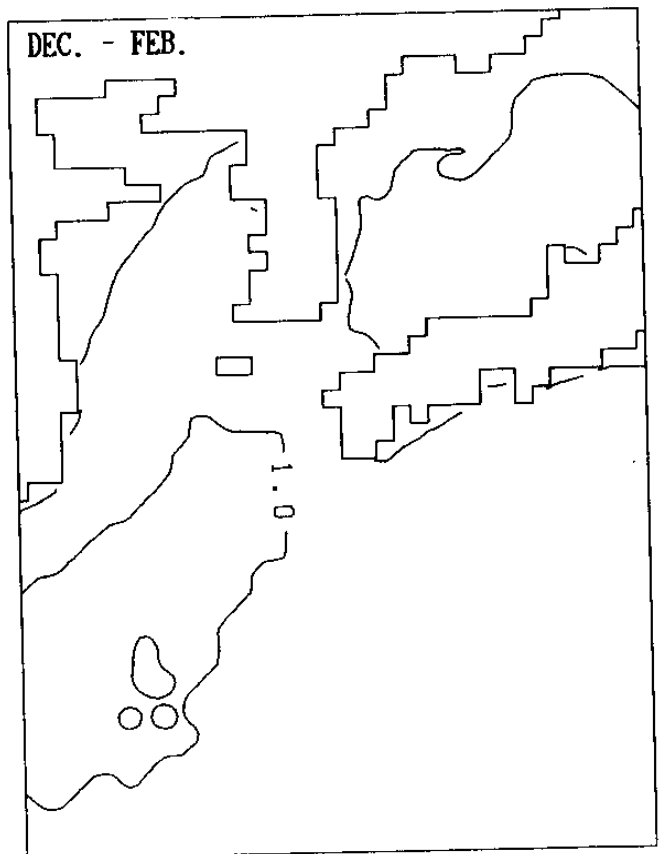
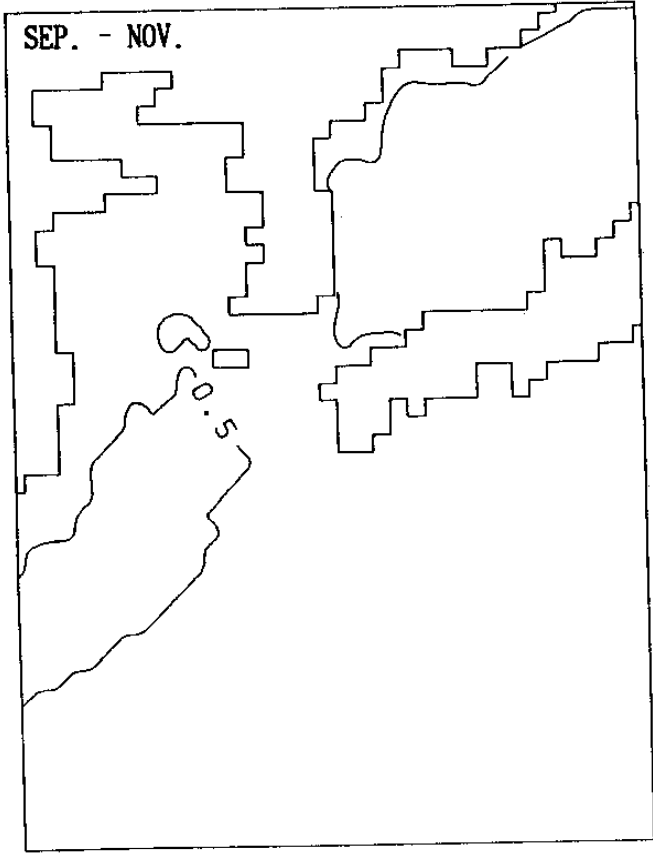
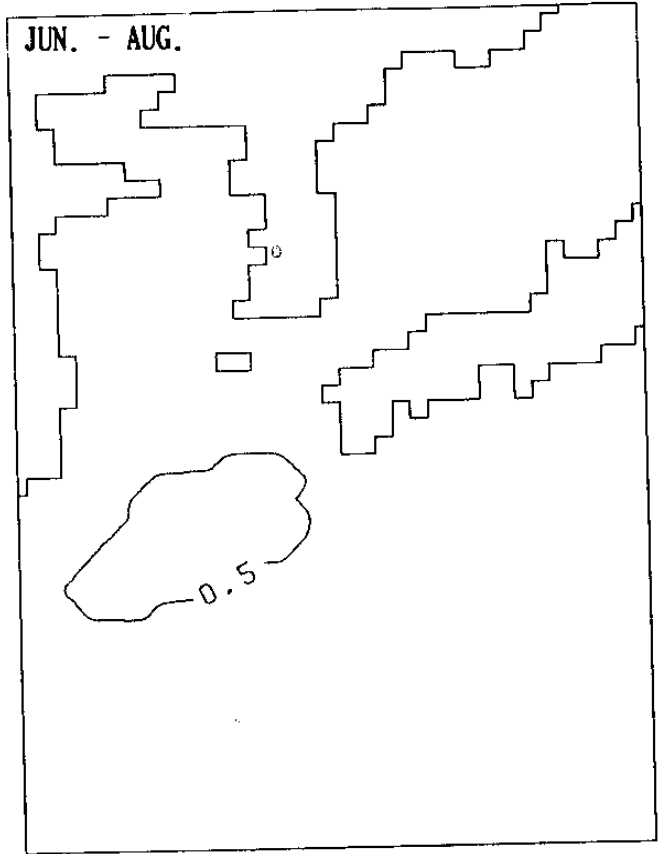
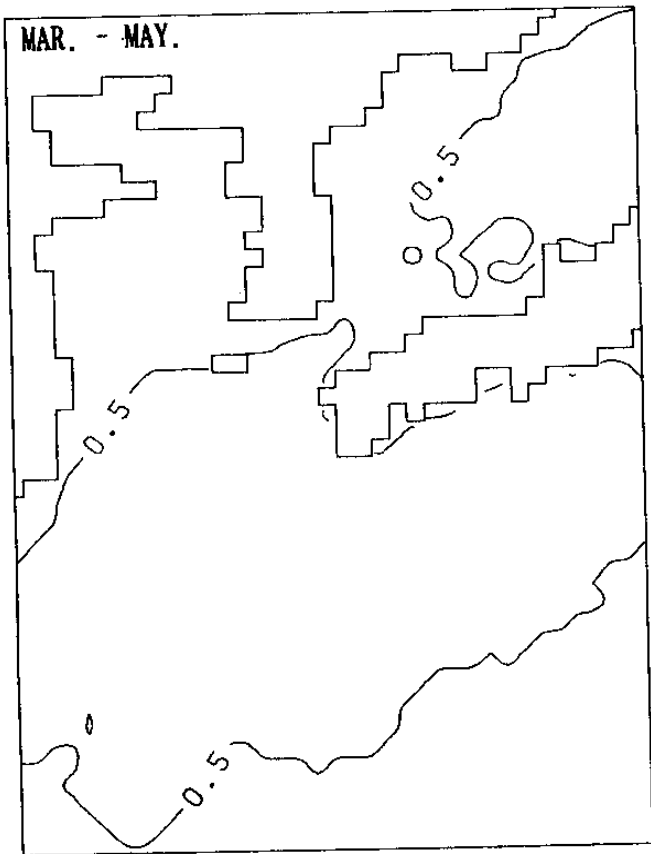


Fig. 3.9. Distribution of wave height with probability of once per two day.

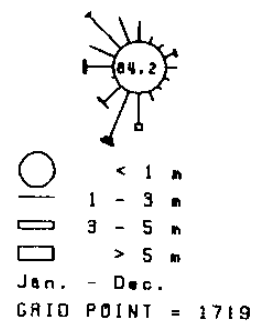
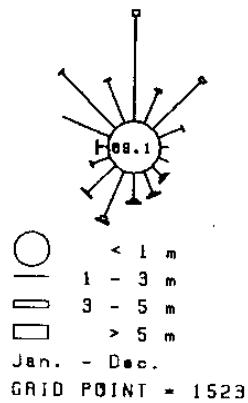
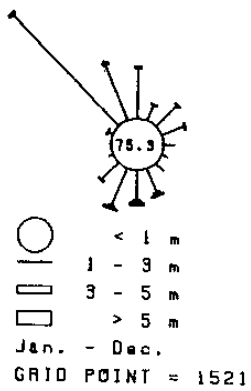
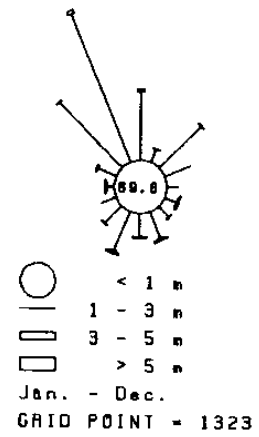
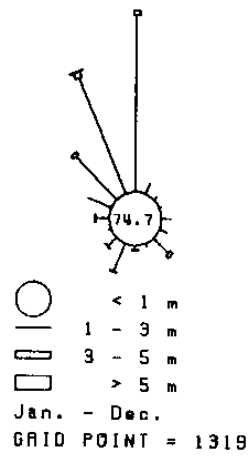
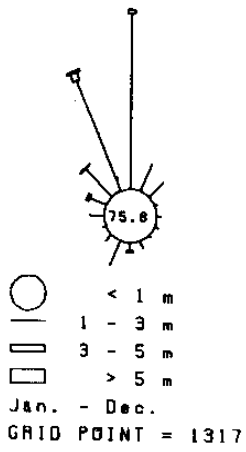
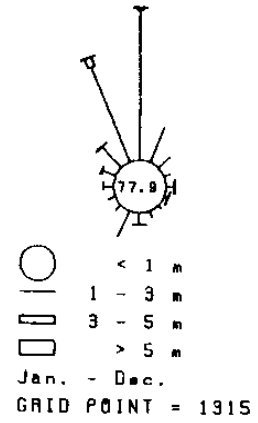
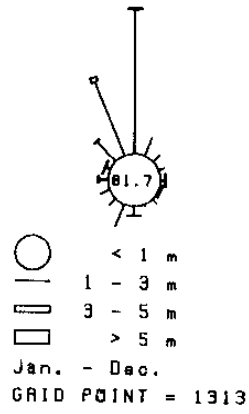
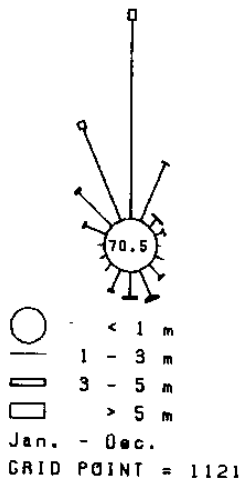


Fig. 3.10. Wave roses of the DSA model results.



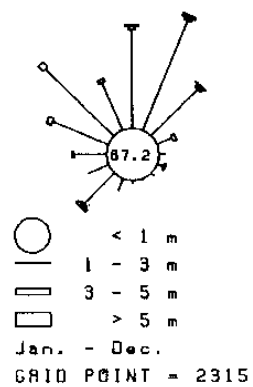
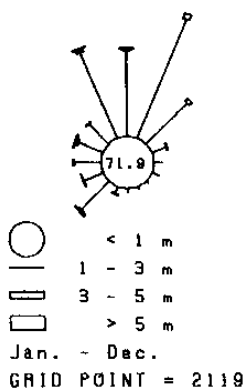
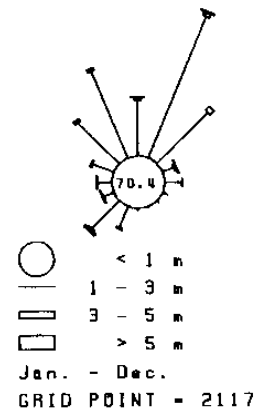
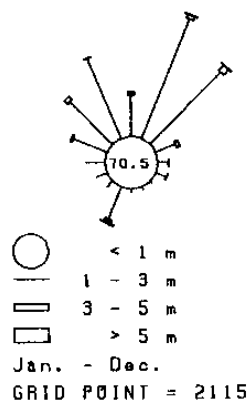
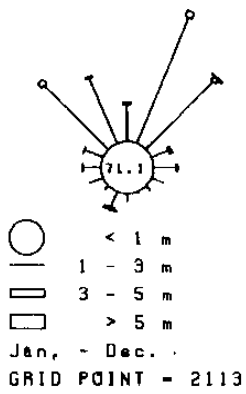
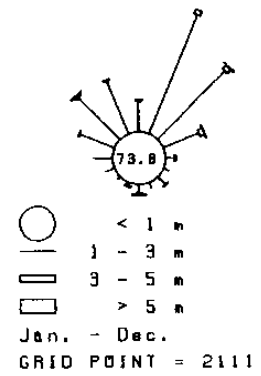
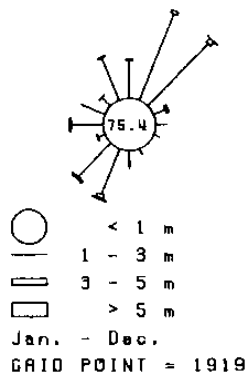
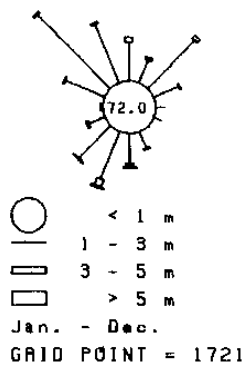


Fig. 3.10. (continued)

## 제2절 천해파랑 추정의 이론적 검토

파랑 이론에 의하면, 파랑운동에 의한 물 입자의 궤적은 수심이 깊어짐에 따라 지수 함수적인 크기의 감소를 보인다. 선형파 이론을 사용하면 수심이 파장의 반에 해당 하는 곳에서 물입자 궤적의 크기는 표층 크기의  $e^{-1}$  로 감소하게 되어 약 4%에 해당하므로 표층운동의 영향이 거의 미치지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 이 수심을 천해파랑을 나누는 경계수심으로 간주한다. 제2절에서는 주어진 심해파로 부터 천해파를 추정하는 방법을 고찰하였다. 3.2.1에서는 일정경사면에서 마찰이 고려된 파고계산 방법이 제시되었고 Nielsen (1983)이 사용한 에너지 보존식은 잘못된 것임을 밝혔다. 천퇴에 의한 파랑의 굴·회절 문제가 3.2.2에 다루어졌으며 분리행렬법에 의해 포물형 근사식이 유도되었고 이를 이용한 수치모델의 결과가 기존 실험결과와 비교되었다. 개발된 굴·회절 모델은 PC에서도 사용할 수 있도록 기억장치를 효율적으로 사용하였고 계산속도가 빠른 장점이 있다. 그리고 굴·회절 현상의 재현 정도에 대한 기존 모델과의 비교결과 현상재현 능력이 매우 우수한 것으로 나타났다. 마지막으로 3.2.3에서는 Goda(1985)가 제시한 불규칙 파랑의 굴절계수 추정법이 소개되었다.

### 3.2.1 마찰을 고려한 파고계산

연안역의 지형은 매우 복잡할 뿐 아니라 그 형태도 다양하여 파랑은 지형에 따른 변형도 심하고, 지역적인 차이도 현저히 나타나게 된다. 이런 복잡한 지형에서의 파랑추정에 주로 수치모델이 사용되고 있다. 수치모델은 파랑변형의 요소들을 도출하여 이를 정량화한 식을 이용하여 만들어지므로 수치모델의 파랑재현정도는 정량화 방법에 의해 크게 좌우된다.

수치모델의 정밀도를 평가하기 위하여 현장 관측자료, 기존모델의 결과 또는 단순한 경우에 존재하는 해석적인 결과와 비교하게 된다. 현장 관측자료에 대한 검증은 파랑변형 과정에 대한 이해의 폭을 넓혀주므로 바람직하나 자료 획득에 많은 시간과 노력이 요구되며 관측결과를 변형 요소에 따라 각기 분리할 수 있는 고도의 기술적인 단계가 이루어져야만 올바른 분석이 나올 수 있다. 한편 해석적인 방법은 결과를 도출해내는데 매우 용이한 반면에 이 방법은 극히 제한된 경우에만 해가 존재하는 제약이 있다.

파랑 추정시 경계조건으로 다음 두가지 조건이 많이 사용된다. 첫째로, 경계 외측의 수심은 등심선이 평행한 것으로 가정하여 Snell의 식으로 경계에서의 파랑을 산정하고, 둘째로 좌우 경계의 수심이 같다고 가정하여 주기조건을 부여한다. 일정 경사면 위를 진행하는 파랑은 Snell의 식으로 산정되며 마찰에 의한 감쇄를 고려한 식을 유도하여 수치모델의 검증 또는 경계조건에 이용하고자 한다. 마찰을 고려한 Snell 식으로는 Putnam and Johnson(1949), Bretschneider and Reid(1954)가 직교입사시의 파고 변형, Nielsen(1983)에 의해 사각입사에 의한 파고변형이 각각 다루어 졌다. 그러나 Nielsen(1983)의 에너지 보존식 식(2)는 올바른 식이 아님을 밝히고 올바른 식에 의한 파고변형관계 식을 제시하고자 한다.

### 1) 파고산정식

선형파이론에 의한 파에너지  $E$ 는 파고  $H$ 의 제곱에 비례하고 에너지 전파 속도는 군속도  $C_g$ 이므로 임의 단면  $S$ 에서 에너지 감쇄  $\epsilon_d$ 를 고려한 에너지 보존식은 다음과 같다(서 등, 1989).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int E ds = - \int E \vec{C}_g \cdot \hat{n} dl - \int \epsilon_d ds \quad (3.6)$$

여기서

$$E = \rho g H^2 / 8$$

$\epsilon_d$  = 단위면적당 에너지 감쇠

$\hat{n}$  = 단위 외향법선 벡터

$ds$  = 미소 면적

$dl$  = 미소 선분

시간에 따른 에너지 증감이 없다면 식(3.6)은 다음식으로 바뀐다.

$$\int \vec{EC}_g \cdot \hat{n} dl = - \int \epsilon_d ds \quad (3.7)$$

Fig. 3.11에 도시된 것과 같이 두 인접파향선과 이에 직교하는 파봉선 ①과 ②에 둘러싸인 미소면적에 대해 식(3.7)을 전개하자. 파향선상의 임의점에서 이 선에 대한 직교방향으로의 에너지 유출입이 없다고 가정하면

$$(EC_g l_0 \cos \theta)_2 - (EC_g l_0 \cos \theta)_1 = - \epsilon_d \Delta s \quad (3.8)$$

미소면적  $\Delta s$ 는 두점선과 파향선으로 둘러싸인 면적으로 근사시킬 수 있으므로  $\Delta s \approx l_0 \Delta x$ 로 되며  $\Delta x$ 가 작으면 이 근사에 의한 오차는 무시할 수 있다. 따라서  $l_0$ 가 상수이므로 식(3.8)은 다음과 같은 미분식으로 표시된다.

$$\frac{d}{dx} (EC_g \cos \theta) = - \epsilon_d \quad (3.9)$$

다른 관점에서 미소면적  $\Delta s$ 를 구하기 위하여 파봉선 ①의 거리를 구하면  $l_0 \cos \theta_1$ 이 되고 파봉선간의 거리는  $\Delta x / \cos \theta_1$ 이므로 마찬가지로 식(3.9)가 얻어진다.

에너지 감쇠율은 전면 전단능력  $\tau_b$ 와 저면 입자속도  $u_b$ 을 곱한 시간평균으로

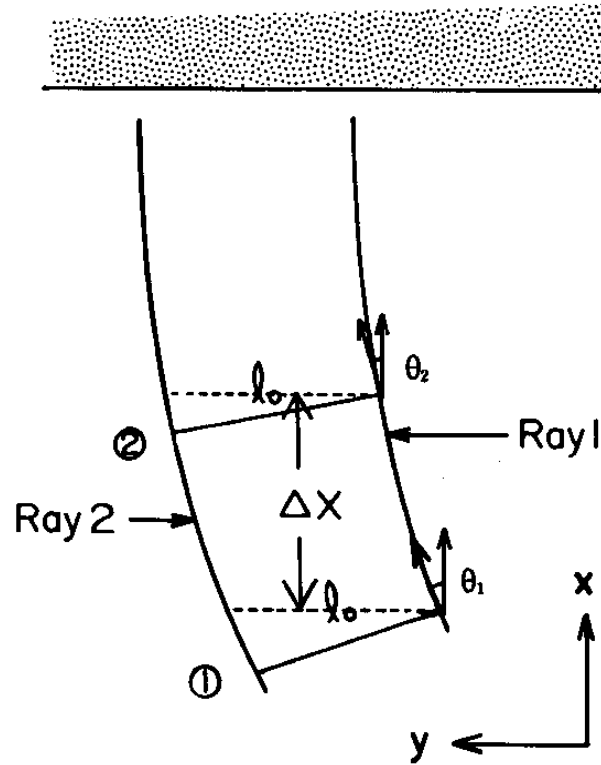


Fig. 3.11. Definition sketch of energy flux conservation.

주어진다. 따라서 파봉선간의 미소거리  $dl$ 에 대해 표시된 Nielsen (1983)의 식(2)는 다음과 같이 표시되어야 한다.

$$\frac{d}{dl} (EC_E \cos \theta) = -\overline{\tau_b u_b} \cos \theta \quad (3.10)$$

또한 식(3.10)은 Svendsen and Jonsson(1982)의 218 페이지에 있는 식(6.4.19)으로 부터 쉽게 유도될 수도 있다.

파고의 관계식을 유도하기 위하여 식(3.9)에 선형파 이론에 입각한 파고 감쇄율을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\rho g H^2}{8} C_g \cos \theta \right) = - \frac{2}{3\pi} \rho f_w \frac{\sigma^2 \cdot H^3}{8 \sinh^3 k h} \quad (3.11)$$

여기서

$f_w$ =마찰계수

$\rho$ =해수밀도

$\sigma$ =각 주파수

$g$ =중력가속도

식(3.11)을 Bernoulli의 미분방정식(Greenberg, 1978) 형태로 바꾸기 위하여 변수변환  $\xi = (H C_g \cos \theta)^{-1/2}$ 를 도입하면

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{f_w}{3\pi g} \frac{\sigma^3}{\sinh^3 k h} \frac{1}{(C_g \cos \theta)^{3/2}} \quad (3.12)$$

일정경사의 수심  $h(x) = -mx$ 와 심해파속  $C_0 = \sigma/k_0 = gT/2\pi$ 을 써서 식(3.12)를  $x_i$ 에  $x_{i+1}$ 까지 적분하면

$$\xi_{i+1} = \xi_i + \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{f_w}{3\pi} \frac{k_0 \sigma}{\sinh^3 k h} \frac{1}{(C_g \cos \theta)^{3/2}} dx \quad (3.13)$$

여기서  $x_i$ 는  $i$ 번째의 격자점을 의미한다. 식(3.13)의 적분은 해석적으로는 구할 수 없으므로 수치적분이나 피적분함수를 근사식으로 표시한 후 이를 적분하여 구한다. 수치적분 방법은 Bretschneider와 Reid(1954)에 의해, 근사식 법은 Nielsen(1982,1983)에 의해 각기 사용되었고 본 연구에서는 두 방법을 모두 적용하여 결과를 비교하기로 한다.

2) 수치적분법

일정경사  $m$ 의 수심을 갖는 단조로운 지형이라도 파수  $k$ 를  $x$ 에 대한 양함수로 표시할 수 없으므로 식(3.13)의 적분을 수치법으로 구하자. 우선, 식(3.13)을 파고  $H$ 에 대한 식으로 나타내면

$$H_{i+1} = H_i \sqrt{\frac{(C_g \cos \theta)_i}{(C_g \cos \theta)_{i+1}}} \left[ 1 + H_i \sqrt{(C_g \cos \theta)_i} \frac{8\pi^2 f_w}{3} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{dx}{g (C_g \cos \theta)^{3/2} T^3 \sinh^3 kh} \right]^{-1} \quad (3.14)$$

여기서 첨자는 격자점에서 계산된 값을 의미한다.

직교 입사의 경우, 굴절이 일어나지 않으므로  $\cos\theta$ 항은 1의 값을 가지며 심해 균속도  $C_{g0}=gT/4\pi$ 를 식(3.14)에 대입하고 적분을  $x_i$ 에 계산된 피적분함수 값에 격자 거리  $\Delta x$ 를 곱한 값으로 근사시키면

$$H_{i+1} = H_i \sqrt{\frac{C_{g_i}}{C_{g_{i+1}}}} \left[ 1 + H_i \frac{32\pi^3 f_w C_{g0}}{3g^2 C_{g_i}} \frac{\Delta x}{T^4 (\sinh^3 kh)_i} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

균속도의  $C_{g0}/C_{g_{i+1}}$ 를 1로 근사시키고 천수계수  $K_s^2=C_{g0}/C_{g_i}$ 와 저면전단응력을  $\tau=\rho f u^2$ 으로 표시하면 Bretschneider와 Reid(1954) 식이 얻어진다. 사각입사의 경우, 파향은 Snell식  $(\sin\theta)_{i+1}=(k\sin\theta)/k_{i+1}$ 로 부터 계산되고 식(3.14)의 피적분함수를  $F$ 라 놓고 trapezoidal 적분법을 쓰면 적분은  $\Delta x(F_i+F_{i-1})/2$ 로 된다. 식(3.14)의 오른쪽 식에서  $H$ 를 제외한 모든 값은 임의 격자점에서 구할 수 있으나,  $H_{i+1}$ 은  $H_i$ 에 의해 단계적으로 계산된다. 따라서, 식(3.14)는 단계적 계산법을 사용하는 파랑모델의 경계조건 계산에 매우 유용한 식임을 알 수 있다.

Fig. 3.12는 앞에서 언급한 trapezoidal 적분법으로 식(3.14)를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이때 사용된 저면경사  $m=1/300$  이고,  $h/L_0=0.2$ 일때 파고  $H=1.397\text{m}$  로 주어졌다. 뒤에 제시된 Table 3.5에서 알 수 있듯이, 직교입사의 결과는 기존 결과와 거의 일치하며, 사각 입사의 결과는 초기 입사각이 커짐에 따라 마찰 감쇄가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. Nielsen(1983)도 입사각이

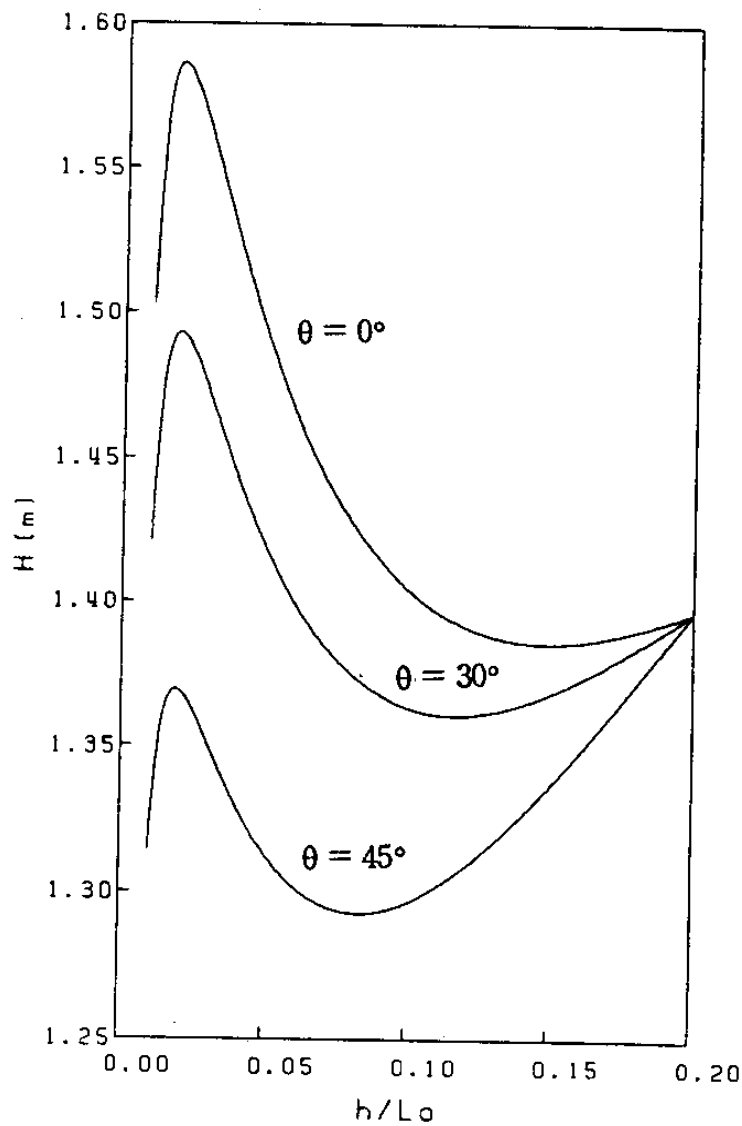


Fig. 3.12. Wave height variation due to shoaling, refraction and bottom friction for different incident angles.



커짐에 따라 마찰감쇄가 증가하는 결과를 얻었으나, 올바른 에너지 보존식이 사용되지 않았으므로 정량적인 값은 본 연구의 결과와 다르다. Fig. 3.12로부터 마찰감쇄효과는 입사각에 민감하다는 것을 알 수 있으며, 이는 두 개의 주어진 수심사이의 파랑진행경로가 입사각에 따라 다르기 때문이다.

### 3) 근사식법

식(3.13)의 피적분함수를 해석적으로 적분가능한 함수로 근사시킨 후 적분하는 방법이 Nielsen(1982, 1983)에 의해 제시되었다. 본 연구에서도 Nielsen이 제시한 방법을 사용하여 식(3.13)의 점근근사식을 유도하였다. 식(3.13)에  $kh = -k_0mx$ 를 대입하여 정리하고 첨자를 바꾸어 표시하면

$$\xi_2 = \xi_1 - \frac{f_w k_0}{3\pi C_0^{1/2} m} I \quad (3.16)$$

$$I = \int_{k_0 h_1}^{k_0 h_2} \frac{C_0^{1.5} (\cos \theta)^{-1.5}}{C_s^{1.5} \sinh^3 kh} d(k_0 h) \quad (3.17)$$

를 얻는다.  $kh < 1$ 인 경우에는 피적분함수를  $kh$ 에 대한 급수로 전개하여 식(3.17)의 근사적분을 구하여도 이로인한 오차는 무시할수 있는 정도로 작다. 식(3.17)의 피적분함수는  $kh$ 의 함수로 표현되어 있으므로 먼저  $kh$ 를  $k_0 h$ 로 나타내어야 하며, 이는 분산관계식으로부터 가능하다. Hunt(1979)는 분산관계식을 Padé form으로 전개하였으나 분수식으로 표시되어 해석적인 적분이 어렵기 때문에 본 연구의 목적에 적합하지 않다. 한편 Nielsen(1982)과 Wu and Thornton(1986)은  $kh$ 를  $k_0 h$ 의 급수로 전개하는 식을 유도하였으며 각각 다음과 같다.

$$kh = \sqrt{k_0 h} \left\{ 1 + \frac{1}{6} k_0 h + \frac{11}{360} (k_0 h)^2 + \frac{17}{5040} (k_0 h)^3 + \dots \right\} \quad (3.18)$$

$$kh = \sqrt{k_0 h} \left\{ 1 + \frac{1}{6} k_0 h + \frac{1}{30} (k_0 h)^2 \right\} \quad (3.19)$$

Table 3.3 은 식(3.18)과 식(3.19)에 의한 파수계산의 결과를 보여준다. 근사계산은 second order 항까지만 계산하였다. "Newton"은 Newton의 반복법으로 구한 해이며 최대절대오차는  $10^{-6}$ 이다. Table 3.3 에서 보는 바와 같이 식(3.18)과 식(3.19)는  $kh$ 가 작은 경우 상대오차는 0.05% 이내이므로, 실용적인 계산에는 어느것이나 충분하다고 생각된다.

Table 3.3 Comparisons of wave number calculations.

$k_0 h$	$kh$				
	Newton	Wu	err(%)	Nielsen	err(%)
0.005	0.07077	0.07077	0.00	0.07077	0.00
0.01	0.10017	0.10017	0.00	0.10017	0.00
0.02	0.14189	0.14189	0.00	0.14189	0.00
0.05	0.22549	0.22549	0.00	0.22549	0.00
0.1	0.32160	0.32160	0.00	0.32159	0.00
0.2	0.46268	0.46272	0.01	0.46267	0.00
0.5	0.77170	0.77192	0.03	0.77143	0.03
0.8	1.03242	1.03277	0.03	1.03118	0.12
1.0	1.19968	1.20000	0.03	1.19722	0.20
1.2	1.36680	1.36712	0.02	1.36273	0.30

그러나 본 연구에서는 보다 정도가 높은 Wu and Thornton의 식을 사용하여 식(3.17)의 점근근사해를 유도하였다. 식(3.19)로부터 다음식을 얻는다.

$$\tanh kh = \sqrt{k_0 h} \left\{ 1 - \frac{1}{6} k_0 h + O(k_0 h)^3 \right\} \quad (3.20)$$

$$\sinh kh = \sqrt{k_0 h} \left\{ 1 + \frac{1}{3} k_0 h + \frac{1}{8} (k_0 h)^2 + O(k_0 h)^3 \right\} \quad (3.21)$$

$$C_g/C_0 = \sqrt{k_0 h} \left\{ 1 - \frac{1}{2} k_0 h + \frac{1}{10} (k_0 h)^2 + O(k_0 h)^3 \right\} \quad (3.22)$$

여기서  $C_0$ 는 심해파의 파속이다. 한편  $(\cos\theta)^{-15}$ 를 계산하기 위하여 삼각등식

$$\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta \quad (3.23)$$

를 이용한다. 여기서 입사파에 대한 값을 첨자 $i$ 로 표시하면,  $\sin\theta$ 는 Snell의 굴절법칙으로부터

$$\sin \theta = \frac{k_i}{k} \sin \theta_i = \frac{C}{C_i} \sin \theta_i \quad (3.24)$$

이므로

$$\cos^2 \theta = 1 - \left( \frac{C}{C_i} \right)^2 \sin^2 \theta_i \quad (3.25)$$

이다. 또한  $C/C_i = \tanh(kh)_i$ 이므로 식(3.20)으로부터

$$\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta_i \frac{k_0 h \left( 1 - \frac{1}{6} k_0 h \right)^2}{k_0 h_i \left( 1 - \frac{1}{6} k_0 h_i \right)^2} \quad (3.26)$$

이며

$$\cos^{-1.5} \theta = 1 + \delta k_0 h + \mu (k_0 h)^2 \quad (3.27)$$

로 표시할 수 있으며

$$\delta = \frac{0.57 \sin^2 \theta_i}{k_0 h_i \left(1 - \frac{1}{3} k_0 h_i\right)} \quad (3.28)$$

$$\mu = \frac{1.55 \sin^4 \theta_i}{(k_0 h_i)^2} - \frac{1}{3} \delta \quad (3.29)$$

로 된다. 식(3.27)의 계산에는

$$(1-x)^{-0.75} \cong 1 + 0.57x + 1.55x^2 \quad (3.30)$$

이 이용되었다. 식(3.30)은 최소자승법으로 유도된 식이며 Taylor 전개는

$$(1-x)^{-0.75} = 1 + \frac{3}{4}x + \frac{21}{32}x^2 + \dots \quad (3.31)$$

이나, Fig. 3.13에서 보는바와 같이  $0 \leq x \leq 0.5$ 의 구간에서는 식(3.30)이 식(3.31)보다 원식에 더 잘 근사함을 알 수 있다. 식(3.21), 식(3.22), 식(3.27)을 식(3.17)에 대입하여 적분하면 다음식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
I = & \frac{4}{5} (k_0 h_1)^{-1.25} \left[ 1 - \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^{1.25} \right] + (1 - 4\delta) (k_0 h_i)^{-0.25} \left[ \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^{0.25} - 1 \right] \\
& + \left( \frac{4}{3} \mu - \frac{\delta}{3} - \frac{67}{360} \right) (k_0 h_1)^{0.75} \left[ \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^{-0.75} - 1 \right] \quad (3.32)
\end{aligned}$$

한편 식(3.16)을 파고에 대한 식으로 나타내면

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{C_{g_1} \cos \theta_1}{C_{g_2} \cos \theta_2}} \left[ 1 - \frac{f_w k_0}{3 \pi m} H_1 \sqrt{\frac{C_{g_1} \cos \theta_1}{C_0}} I \right]^{-1} \quad (3.33)$$

로 된다. 따라서 입사조건이 결정되면 Snell 법칙으로부터  $\theta_2$ 가 구해지고, 식(3.32)로부터  $I$ 가 구해지므로 식(3.33)에 의하여 파고를 계산할 수 있다.

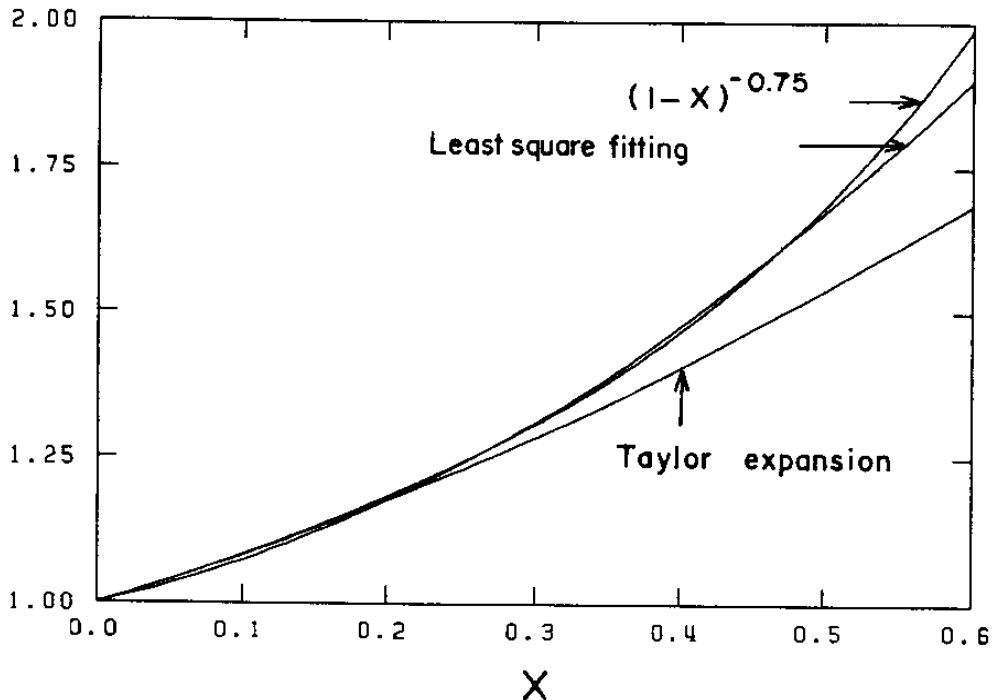


Fig. 3.13. The least square fit and Taylor expansion for  $(1-x)^{-0.75}$

Table 3.4는 식(3.13)과 식(3.33)에 의한 해를 보여준다. “Numer”는 식(3.13)을 수치해법으로 구한 것이며, “Appr”은 식(3.33)에 의한 해를 나타낸다. Table 3.4에서 보는 바와같이 식(3.33)에 의한 해는 식(3.13)에 의한 해와 거의 일치함을 알 수 있으며, 입사각이 커질수록 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 식(3.30) 및 Fig. 3.13에서 알 수 있듯이 입사각이 커지면 식(3.30)의 근사계산에 큰 오차가 생기기 때문이다. 그러나 실제계산에서 이러한 오차의 크기는 무시할 수 있는 정도이므로 식(3.32)와 식(3.33)으로부터 파랑변형 모델의 경계조건을 구하여도 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

Table 3.5는 Nielsen(1983)의 근사식과 본 연구에서 도출된 근사식에 의한 파고변화의 입사각에 따른 변화를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 Nielsen 식은 잘못된 식이며, 이에 의한 파고감쇄가 본 연구에서 제시된 식에 의한 것보다 현저하게 나타남을 알 수 있다. Table 3.5에서 직교입사의 경우 두 방법에 의한 값이 차이가 생기는 이유는 식(3.17)의 적분계산에서 피적분함수의 근사전개에 이용된 식(3.18)과 식(3.19)의 차이에 기인한다.

#### 4) 결 론

파랑 변형에 대한 수치모델의 검증 또는 수치모델의 경계조건 계산을 목적으로 일정경사면 위를 진행하는 파랑이 저면 마찰에 의해 감쇄 될때 파랑의 변화를 나타내는 식이 제시되었다. 파고를 계산하기 위해 Nielsen(1983)이 사용한 에너지보존식이 부적합함을 지적하였고 올바른 에너지 보존식이 재 유도되었다. 이로부터 파고의 식을 나타내기위해 Bernoulli 미분방정식의 형태로 에너지 보존식을 변환시켰다. 이 미분방정식을 적분하여 적분식이 포함된 파고 계산식이 유도되었고 적분식을 계산하기 위해 수치적분법과 근사식을 이용한 방법이 각각 사용되었다.

Table 3.4 Comparisons of numerical and approximate results.

$h/L_0$	$\theta = 0.0$		$\theta = 30.0$		$\theta = 45.0$		$\theta = 60.0$	
	Numer	Appr	Numer	Appr	Numer	Appr	Numer	Appr
0.20	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970
0.15	1.3857	1.3858	1.3681	1.3680	1.3360	1.3355	1.2583	1.2581
0.10	1.4038	1.4039	1.3630	1.3630	1.2964	1.2959	1.1633	1.1634
0.05	1.4917	1.4918	1.4186	1.4190	1.3133	1.3135	1.1361	1.1374
0.01	1.5029	1.5038	1.4211	1.4240	1.3141	1.3180	1.1498	1.1550
rms err		0.0001		0.0007		0.0009		0.0014

Table 3.5 Comparisons of Nielsen's and present results.

$h/L_0$	$\theta = 0.0$		$\theta = 30.0$		$\theta = 45.0$		$\theta = 60.0$	
	Nielsen	Present	Nielsen	Present	Nielsen	Present	Nielsen	Present
0.20	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970
0.15	1.3857	1.3858	1.3681	1.3680	1.3360	1.3355	1.2583	1.2581
0.10	1.4038	1.4039	1.3630	1.3630	1.2964	1.2959	1.1633	1.1634
0.05	1.4917	1.4918	1.4186	1.4190	1.3133	1.3135	1.1361	1.1374
0.01	1.5029	1.5038	1.4211	1.4240	1.3141	1.3180	1.1498	1.1550

수치적분법은 trapezoidal 적분법을 사용하였으며 직교입사의 경우 기존식으로 이끌어내기 위해 본 파고계산식에 부여되어야 할 조건들이 명시되었다. 근사식을 이용한 방법은 Nielsen(1983)이 제시한 방법을 사용하여 피 적분함수를 해석적으로 적분가능한 형태로 바꾸는 방법이 사용되었다.

수치적분의 방법과 근사식의 방법을 여러가지의 입사각에 대해 계산하여 그 결과를 비교하였고, 두 방법의 결과들이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 마찰감쇄는 입사각에 대해 민감하게 변하며 입사각이 커지면 감쇄도 증가하는 것으로 나타났다.

본 수치적분법은 계산이 비교적 간단하고, 적용의 폭도 넓기 때문에 수치모델의 경계조건 계산 및 수치모델의 검증에 유용하게 사용될 수 있다.

### 3.2.2 포물형 근사식에 의한 천해파 산정 모델

천해지역을 통과하는 파랑은 지형에 의해 변형되며, 이러한 변형을 예측하는 기술은 연안구조물 설계에 필수적이다. 따라서, 수많은 예측기법이 개발되었고, 예측기법의 정밀도를 높이기 위한 노력이 꾸준히 이루어지고 있다. 본 연구는 최근 천해파추정에 많이 사용되고 있는 포물형 근사식을 분리 행렬법에 의해 유도하고 이에 대한 수치모델을 제시하고자 한다.

해저 경사가 완만하여 파랑 진행 방향에 대한 파의 변화율이 작은 경우 파랑의 운동을 지배하는 3차원 Laplace 식을 해저면에서 수면까지 적분하여 수심성분을 제거한 2차원 완경사 파랑식으로 근사시킬 수 있다. Berkhoff 등(1982)이 밝힌 바와 같이 완경사파랑식에서 회절을 무시하면 굴절방정식이 얻어지며 이 방법은 비교적 단순로운 해안에서 파랑을 추정할 때 많이 사용된다. 최근 서 등(1989)이 제시한 굴절 모델은 비교적 간단하며 계산속도가 빨라 광범위한 지역의 파랑 추정에 적합한 것으로 보인다. 한편, 파랑의 회



절이 굴절에 건줄 수 있는 경우 회절현상을 고려한 식에 의해 파랑이 추정 되어야 한다. 환경사 파랑식은 굴·회절을 모두 고려한 식이지만 타원형 미분방정식의 형태를 취해 이를 수치모델화 하면 상당히 큰 연립방정식이 구성되며, 이에 따른 기억용량과 계산속도가 모델의 가장 큰 제한 요인이 된다.

파랑이 천퇴위를 지날 때 굴절에 의한 파랑 집중과 급격한 파랑에너지의 집중으로 인한 회절이 동시에 나타난다. 이와 같은 굴·회절 현상을 재현하고, 환경사 파랑식의 단점을 보완하기 위한 시도로 Radder(1979)는 포물형 근사식을 제시하였다. 파랑진행 방향의 회절이 진행직교방향의 회절에 비해 무시될 수 있는 경우 환경사 파랑식으로 부터 포물형 근사식이 유도되며 이 경우의 미분방정식은 형태상 초기치 문제(initial value problem)로 분류된다. 초기치 문제의 단계별 계산법(marching method)을 사용하는 포물형 근사식은 비교적 넓은 지역에 대한 파랑추정에 적합하다. Radder의 포물형 근사식은 파랑이 주 진행방향에 대해 비교적 작은 각으로 진행하는 경우에는 상당히 높은 정밀도를 보이나 진행각이 증가할 수록 오차도 증가하므로 적용에 제한을 받는다. 이와같은 제한을 줄이기 위해 다음과 같은 두가지 방법이 제기되었다. 첫째 방법은 파랑의 주 진행 방향에 맞추어 계산격자를 정하는 방법으로 Tsay와 Liu(1982), Isobe(1986) 그리고 Kirby(1988)에 의해 시도 되었다. 둘째 방법은 주 방향에 비해 비교적 큰 각을 갖는 파랑에도 적용할 수 있는 광각 포물형 근사식을 사용하는 것으로 Booij(1981), Kirby(1986)에 의해 연구되었다.

본 연구에서는 행렬 분리법에 의해 파랑을 진행파와 반사파로 분리하고 반사파가 무시할 정도로 작은 경우에 진행파만을 취한 광각 포물형 근사식을 다음의 1)에서 유도하였다. 2)에서는 유도된 포물형 근사식을 차별화하여 만든 수치모델을 제시하고, Ito *et al.*(1972)의 원형 천퇴실험과 Berkhoff *et al.*(1982)의 타원형 천퇴실험치와 수치모델결과를 비교하였다.

1) 방정식의 유도

단 주기 미소진폭파에 대한 포물형 근사식의 유도는 Berkhoff(1972)의 환경사파랑식으로 부터 시작된다. 각 주파수  $\sigma$ 를 포함하는 시간함수  $\exp(-i\sigma t)$ 를 분리시킨 속도포텐셜을  $\tilde{\varphi}$ 라 표기하면 환경사 파랑식은

$$\vec{\nabla} \cdot (P \vec{\nabla} \tilde{\varphi}) + k^2 P \tilde{\varphi} = 0 \quad (3.34)$$

여기서,  $k$ 는 파수,  $P$ 는  $CC_g$ ,  $C$ 는 파속이며  $C_g$ 는 군속도이다. 식(3.34)를 Helmholtz식으로 변환시키기 위해  $\varphi = \sqrt{P} \tilde{\varphi}$ 를 대입하면

$$\nabla^2 \varphi + \left( k^2 - \frac{\nabla^2 \sqrt{P}}{\sqrt{P}} \right) \varphi = 0 \quad (3.35)$$

2차원 Laplace 연산자를 풀어쓰고 새로운 연산자  $K$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = - \left( k^2 - \frac{\nabla^2 \sqrt{P}}{\sqrt{P}} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi = -K^2 \varphi \quad (3.36)$$

수중의 장애물에 의해 생성된 반사파와 진행파를 분리하기 위해 속도 포텐셜을 진행성분  $\varphi^+$ 와 반사성분  $\varphi^-$ 로 분리한다.

$$\varphi = \varphi^+ + \varphi^- \quad (3.37)$$

그리고, 연안에 도달하는 진행파를 추정하기 위하여 진행 성분만으로 표시되는 지배방정식을 환경사 파랑식(3.34)로 부터 유도하자. 파랑의 주진행 방향을  $x$  좌표축으로 잡고 식(3.37)을  $x$ 에 대해 미분하면

$$\varphi_x = \varphi_x^+ + \varphi_x^- \quad (3.38)$$

장애물에 의해 산란된 파랑이  $\varphi$ 와  $\varphi_1$ 의 식으로 표시된다고 하면

$$\begin{Bmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^- \end{Bmatrix} = T \begin{Bmatrix} \varphi \\ \varphi_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi \\ \varphi_x \end{Bmatrix} \quad (3.39)$$

여기서  $T$ 는 분리행렬이며  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 미지의 연산자로  $T$ 의 인수이다. 식(3.39)에 역행렬  $T^{-1}$ 을 오른쪽에서 곱하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{Bmatrix} \varphi \\ \varphi_x \end{Bmatrix} = T^{-1} \begin{Bmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^- \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

식(3.39)을  $x$ 에 대해 미분한 뒤 식(3.40)을 결과식에 대입하면 식(3.41)이 얻어진다.

$$\begin{Bmatrix} \varphi_x^+ \\ \varphi_x^- \end{Bmatrix} = T_x T^{-1} \begin{Bmatrix} \varphi^+ \\ \varphi^- \end{Bmatrix} + T \begin{Bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_{xx} \end{Bmatrix} \quad (3.41)$$

식(3.41)을 성분파로만 나타내기 위해 식(3.36)과 식(3.40)을 써서 오른쪽 둘째항을 소거하면 결과식은 미지의 연산자  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 의 식으로 표시된다.

이들 미지의 연산자는 성분파가 가장 적게 연계(coupled)되는 조건으로부터 구하여지며 이들에 대한 4개의 식을 세우기로하자. 식(3.39)의 두 식을 더하고 식(3.37)을 이용하면 다음 두 식이 얻어진다.

$$\begin{cases} \alpha + \gamma = 1 \\ \beta + \delta = 0 \end{cases} \quad (3.42)$$

이제 분리행렬  $T$ 를 인수로 나타내고 식(3.42)를 사용하여 식(3.41)을 풀어 정리하면

$$\begin{aligned} \varphi_x^+ &= \left( \alpha_x + \beta_x \frac{\gamma}{\beta} + \frac{\alpha\gamma}{\beta} - \beta K^2 \right) \varphi^+ \\ &+ \left( \alpha_x - \beta_x \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\alpha^2}{\beta} - \beta K^2 \right) \varphi^- \end{aligned} \quad (3.43a)$$

그리고

$$\begin{aligned} \varphi_x^- &= \left( \gamma_x - \beta_x \frac{\gamma}{\beta} + \frac{\gamma^2}{\beta} + \beta K^2 \right) \varphi^+ \\ &+ \left( \gamma_x + \beta_x \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\alpha\gamma}{\beta} + \beta K^2 \right) \varphi^- \end{aligned} \quad (3.43b)$$

식(3.43)이 성분파로 완전히 분리되기 위해서는 식(3.43a)의 오른쪽 둘째항과 식(3.43b)의 오른쪽 첫째항이 없어져야 한다. 이 조건을 엄밀하게 만족시키기 위해서는 또 다른 연립 미분방정식을 풀어야 하는 어려움이 생기므로 이 대신 약간의 연계를 허용하면 다음식을 얻게된다. 즉,

$$\begin{cases} \frac{\alpha^2}{\beta} + \beta K^2 = 0 \\ \frac{\gamma^2}{\beta} + \beta K^2 = 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

식(3.44)의 연립방정식을 풀고 속도 포텐셜의 시간함수  $\exp(-i\sigma t)$ 을 고려하면 다음과 같은 분리행렬이 얻어진다.

$$T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i/K \\ 1 & i/K \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

식(3.45)을 식(3.43a)에 대입하여 진행파의 식을 구하면

$$\varphi_x^* = \left( -\frac{K_x}{2K} + iK \right) \varphi^+ + \left( \frac{K_x}{2K} \right) \varphi^- \quad (3.46)$$

여기서 반사성분  $\varphi^-$ 의 항을 무시하면 진행 성분만의 식이 유도된다.

$$\varphi_x^* = \left( -\frac{K_x}{2K} + iK \right) \varphi^+ \quad (3.47)$$

해저의 경사가 완만하여  $|\nabla P/kP| \ll 1$ 인 경우 연산자  $K$ 는 다음식으로 근사된다.

$$K \simeq k \sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}} \quad (3.48)$$

식(3.48)을  $x$ 에 대해 미분하고  $4K^2$ 으로 나누면

$$\frac{K_x}{2K} = \frac{\frac{k_x}{2k} + \frac{1}{4k^2} \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2}}{1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}} \quad (3.49)$$

한걸음 더 나아가,  $K$ 를 pseudo-operator로 보면 식(3.48), (3.49)은 다음식으로 근사된다.

$$K \simeq k \left( 1 + \frac{b}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (3.50a)$$

$$\frac{K_x}{2K} \simeq \left( \frac{k_x}{2k} + \frac{1}{4k^2} \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} \right) \left( 1 - \frac{a}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (3.50b)$$

여기서  $a, b$ 는 상수이며 이들의 값은 뒤에서 설명하기로 한다. 식(3.50)을 식(3.47)에 대입하면 파랑의 굴·회절 운동을 지배하는 포물형 근사식이 얻어진다.

$$\varphi_x^+ = \left( ik + i \frac{b}{k} \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{k_x}{2k} - \frac{1}{4k^2} \frac{\partial^3}{\partial x \partial y^2} + \frac{a}{2} \frac{k_x}{k} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi^+ \quad (3.51)$$

Radder가 유도한 포물형 근사식은 오른쪽 넷째, 다섯째 항이 없고  $b=0.5$ 인 경우이며 파랑의 방향이 주 진행방향과 거의 비슷한 경우에 좋은 결과를 보이나 두방향의 사잇각이 커지면 상당한 오차를 보이게 된다. 한편, Booij(1981)와 Kirby(1986)이 유도한 포물형근사식은  $a, b$  모두 0.75의 값을 가지며 사잇각이 비교적 큰 경우에도 성립하는 광각 포물형 근사식 또는 고차 포물형 근사식이다. 따라서, 식(3.51)도 광각 포물형 근사식이며 상수  $a$ 와  $b$ 는 일정 경사면위를 진행하는 파랑에 대해 Snell법칙 결과와 식(3.51)의 결과를 비교하여 가장 좋은 조합인  $a=1, b=0.73$ 의 값을 택하였다.

Kirby의 고차 포물형근사식은 지형 뿐 아니라 흐름에 의한 파랑변형을 고려한 식이며 흐름이 없는 경우 식(3.51)과 유사한 식이된다(수산청, 1989). 그러나, Kirby의 식은 변수변환을 하지 않고 완경사 파랑식(3.34)로 부터 직접 유도하여 형태상 더 복잡하며 따라서 더 많은 계산시간이 소요될 것으로 추정된다.

## 2) 수치계산 및 토의

앞에서 언급한 것과 같이 포물형 근사식은 산란 파랑의 방향이 주 진행방향에 가까울수록 그 정확도가 높아진다. 한편 식(3.51)과 같은 광각 포물형 근사식은 두 방향간의 사잇각이 비교적 큰 경우에도 적용 가능하도록 고차의 항이 추가되어있으며, 직교 입사에 가깝도록 수심격자를 만드는 것도 좋은 결과를 가져오게하는 방법이 된다. 그러나, 천해파를 추정하는 대부분의 경우 하나이상의 입사파를 사용하므로 각기 다른 입사파랑에 대해 이에 상응하는

수심격자를 만드는 것은 시간과 노력이 많이 소요되므로 공학적인 측면에서 볼때 바람직한 방법은 아니다. 따라서, 계산결과가 입사각의 영향을 덜 받도록 하기위해 다음 방법을 사용하였다. 즉  $y$ 축에 대한 평균 파수  $k(x)$ 를 갖는 부분  $\psi$  와 변동부분  $\psi$  을 곱한 형태를  $\varphi$  라 하면

$$\varphi^+ = \bar{\psi} \psi = e^{i(\int \bar{l}(x) dx + \bar{m}y)} \psi \quad (3.52)$$

여기서  $l$  와  $m$ 는 각각  $y$ 에 대한 평균수심의  $x, y$  성분파수이며 Snell 법칙으로부터 계산된다.

측면 경계조건으로 완전반사조건 또는 부분반사조건이 사용되어 왔다. 산란 파를 만드는 장애물이 전체 영역에 비해 작은 경우 완전반사 조건으로 인한 오차는 큰 영향을 주지 않은 것으로 밝혀졌다(Berkhoff *et al.*, 1982). 본 연구에서는 사각 입사의 경우를 고려하여 경계선 부근의  $y$  성분파수가 평균 성분파수  $m$  와 같다는 가정에 근거한 부분 반사조건을 사용하였다.

$$\psi_y = 0 \quad (3.53)$$

수치모델의 격자망은  $x$ 축에  $M$ 격자점,  $y$ 축에  $N$ 격자점으로 구성되었고  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 각각  $x, y$ 방향의 격자간격이다. 포물형 근사식은 Crank-Nicolson 방법으로 차분화 하였으며, 차분화로 인한  $y$ 방향의 오차는  $O(\Delta y)^2$ 이다. 차분화식을 변동부분  $\psi(j=1, N)$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$C_1 \psi_{j-1}^{i+1} + C_2 \psi_j^{i+1} + C_3 \psi_{j+1}^{i+1} = d_1 \psi_{j-1}^i + d_2 \psi_j^i + d_3 \psi_{j+1}^i \quad (3.54)$$

여기서  $C, d$ 는 차분화 과정으로 부터 유도되는 계수이다(부록참조). 현단계  $\psi_j^i$ 의 값을 알면 다음단계인  $\psi_j^{i+1}$ 는 식(3.54)로 부터 만들어지는 연립방정식을

풀어 구한다. 처음 단계  $i=1$  은 초기 조건으로 주어지며 경계조건과 위의 단계별 방법에 의해 각 격자점에서의 파고가 구하여 진다.

$y$  방향에 대한 차분화 오차  $O(\Delta y)^2$ 을 고려하여  $j=1$ 에서의 경계조건에 대한 차분 오차도  $O(\Delta y)^2$ 을 갖는 전방차분을 사용했고

$$\psi_y \simeq \frac{-3\psi_1^{i+1} + 4\psi_2^{i+1} - \psi_3^{i+1}}{2\Delta y} = 0 \quad (3.55)$$

그리고  $j=N$ 의 경계조건도  $O(\Delta y)^2$  을 갖는 후방차분을 사용하였다.

$$\psi_y \simeq \frac{3\psi_N^{i+1} - 4\psi_{N-1}^{i+1} + \psi_{N-2}^{i+1}}{2\Delta y} = 0 \quad (3.56)$$

경계조건(3.55)-(3.56)로 인해 3-대각행렬이 파괴되므로  $j=1$ 과  $j=2$  식으로부터  $j=1$ 식의  $\psi_2^{i+1}$  을 소거하고, 이와 비슷한 방법으로  $j=N$ 의  $\psi_{N-2}^{i+1}$  을 소거해 3-대각행렬을 구성하였다. 따라서, 연립방정식을 풀때 3-대각행렬이 갖는 장점인 빠른 계산속도와 기억용량의 절감의 이점을 가진다.

본 모델의 검증을 위해 Ito *et al.*(1972)과 Berkhoff *et al.*(1982)의 실측치와 비교하였다. Ito등의 수리 모형실험은 일정수심 15cm위에 직경 160cm, 중심점의 수심 5cm의 원형천퇴에 의한 파랑변형에 대한 실험이다. Fig. 3.14에 실험장치의 모식도가 도시되었고 입사파의 제원은 다음과 같다.

입사파고 ( $H_i$ ) = 1.04cm

입사파장 ( $L_i$ ) = 40cm

파형경사  $H_i/L_i = 0.026$



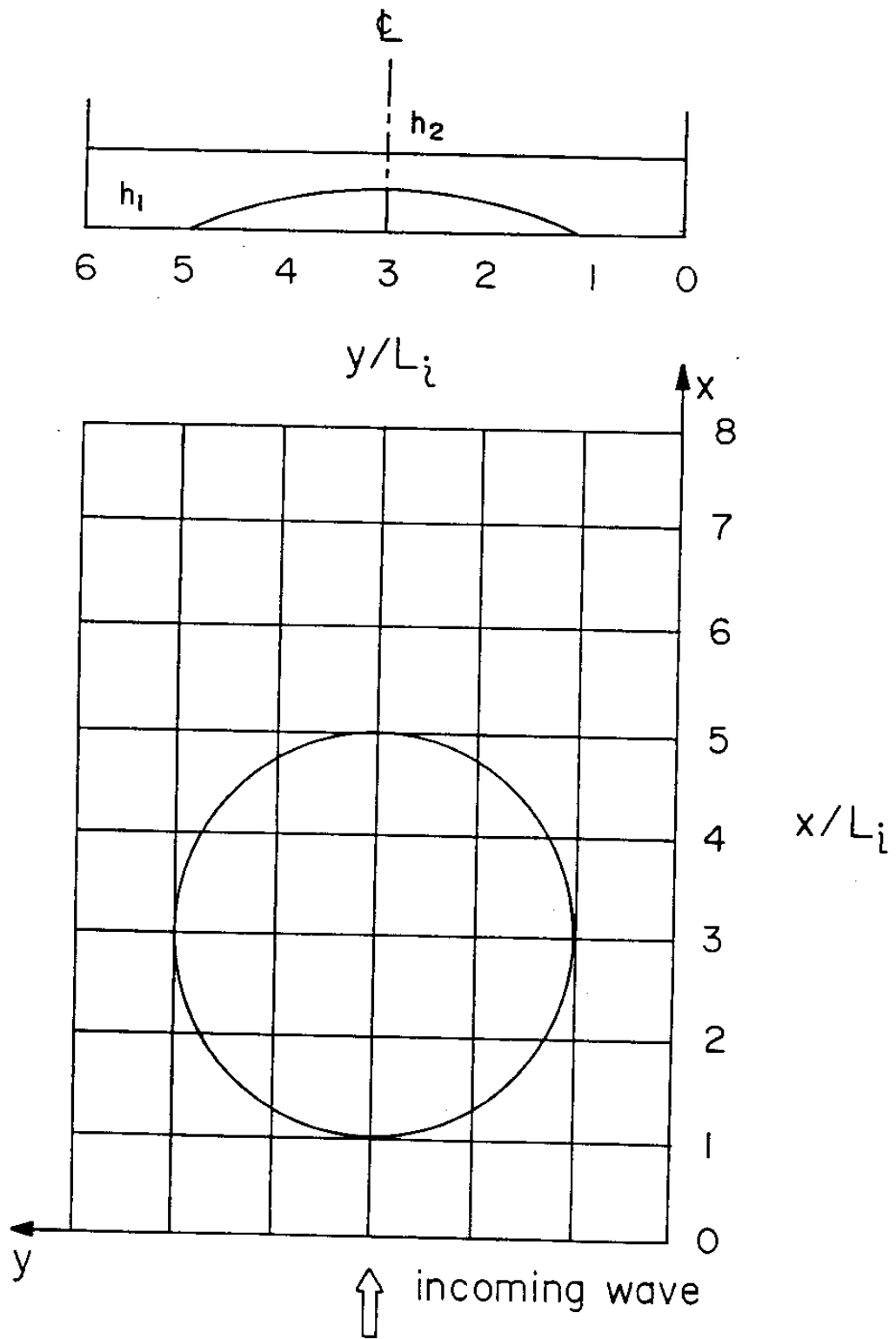


Fig. 3.14. Topography for the experiment of Ito et al.(1972).

수치 모델의 결과는  $\Delta x = \Delta y = 5\text{cm}$ 로 놓아  $65 \times 49$  개의 격자망을 사용하여 얻었으며  $y$ 방향의 두단면 ( $x/L_i = 5.6$ )과 천퇴 중심을 지나는  $x$  방향의 단면 ( $y/L_i = 3$ )에서 실측파고비와 계산파고비의 비교도가 Fig. 3.15에 도시되었다. 계산치는 실측치에 잘 부합되는 것으로 보이며 특히 파고분포의 전반적인 경향을 아주 잘 재현하는 것으로 판단된다. Fig. 3.15(c)로 부터 굴절에 의해 급격히 집중된 파랑에너지가 회절에 의해 서서히 분산되는 것을 알 수 있다.

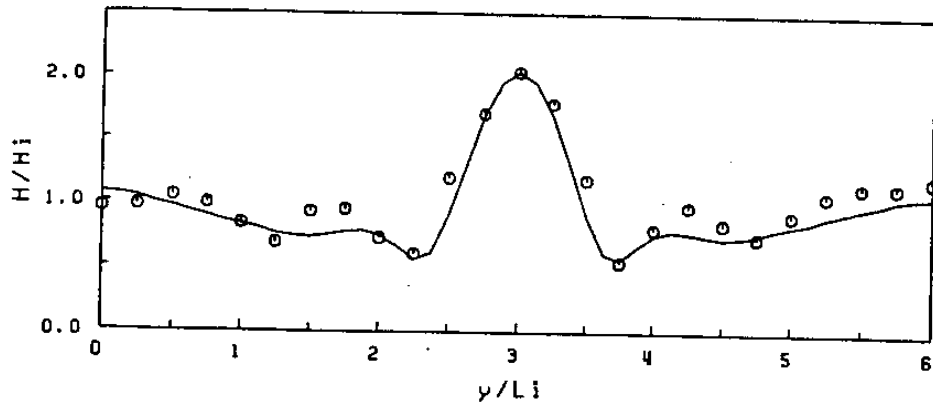
Kirby *et al.* (1984)은 천퇴에 의한 파랑변형에 비선형 효과의 중요성을 지적하였으며 비선형항을 포함하는 포물형 근사식을 유도하였다. 한편 비선형성이 강한 천해파랑의 파속은 파고에 비례하므로 Dingemans *et al.* (1984)은 이를 고려한 변형 파랑분산식으로부터 계산된 파수를 선형 포물형 근사식에 사용하여 비선형성을 고려하였다. Dingemans *et al.*의 방법은 이론적 배경이 약한 문제점을 안고 있는 반면에 사용이 간편한 잇점이있다. Dingemans *et al.*은 이 방법을 타원형 천퇴 지형에 적용하여 비교적 좋은 결과를 얻었다. 따라서, 본 연구에서는 Dingemans *et al.*의 방법과 비슷한 변형 파랑 분산식을 사용하여 파수를 계산하였다.

$$\sigma^2 = gk \tanh \left\{ kh \left( 1 + \frac{H}{2h} \frac{kh}{\sinh kh} \right) \right\} \quad (3.57)$$

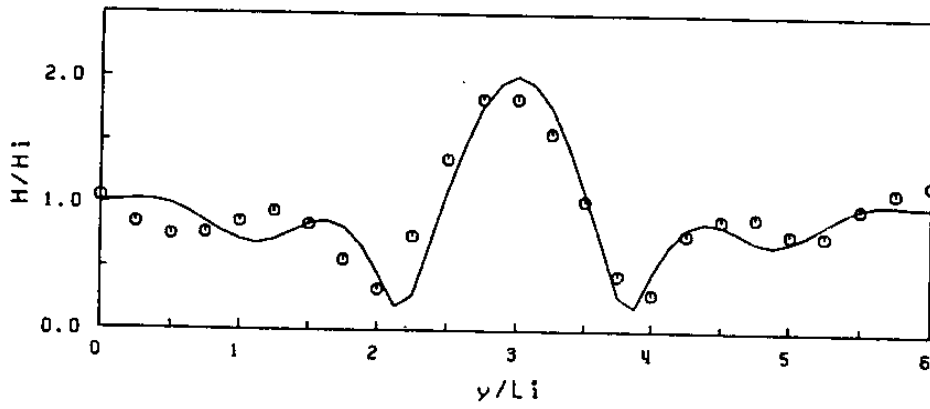
여기서  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심,  $H$ 는 파고를 나타낸다. 식(3.57)로 부터 계산되는 파속은 천해의 경우 고립파의 파속으로, 심해의 경우 미소진폭파의 파속으로 바뀌게됨을 알 수 있다.

Fig. 3.16은 비선형을 고려한 원형천퇴의 파고 비교도이며 Fig. 3.15의 선형 결과보다 약간 작은 값을 보인다. 이와 같이 선형에 비해 비선형 결과가 작게 나타나는 것을 Kirby *et al.* (1984), Dingeman *et al.* (1984) 그리고 이 등(1990)

a)  $x/Li = 5$



b)  $x/Li = 6$



c)  $y/Li = 3$

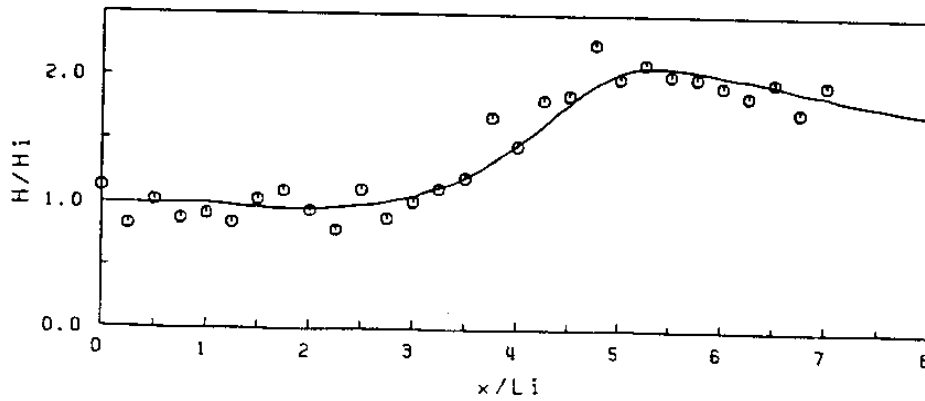


Fig. 3.15. Comparison of laboratory data and linear model result for circular shoal. — linear model :  $\circ$  laboratory data.

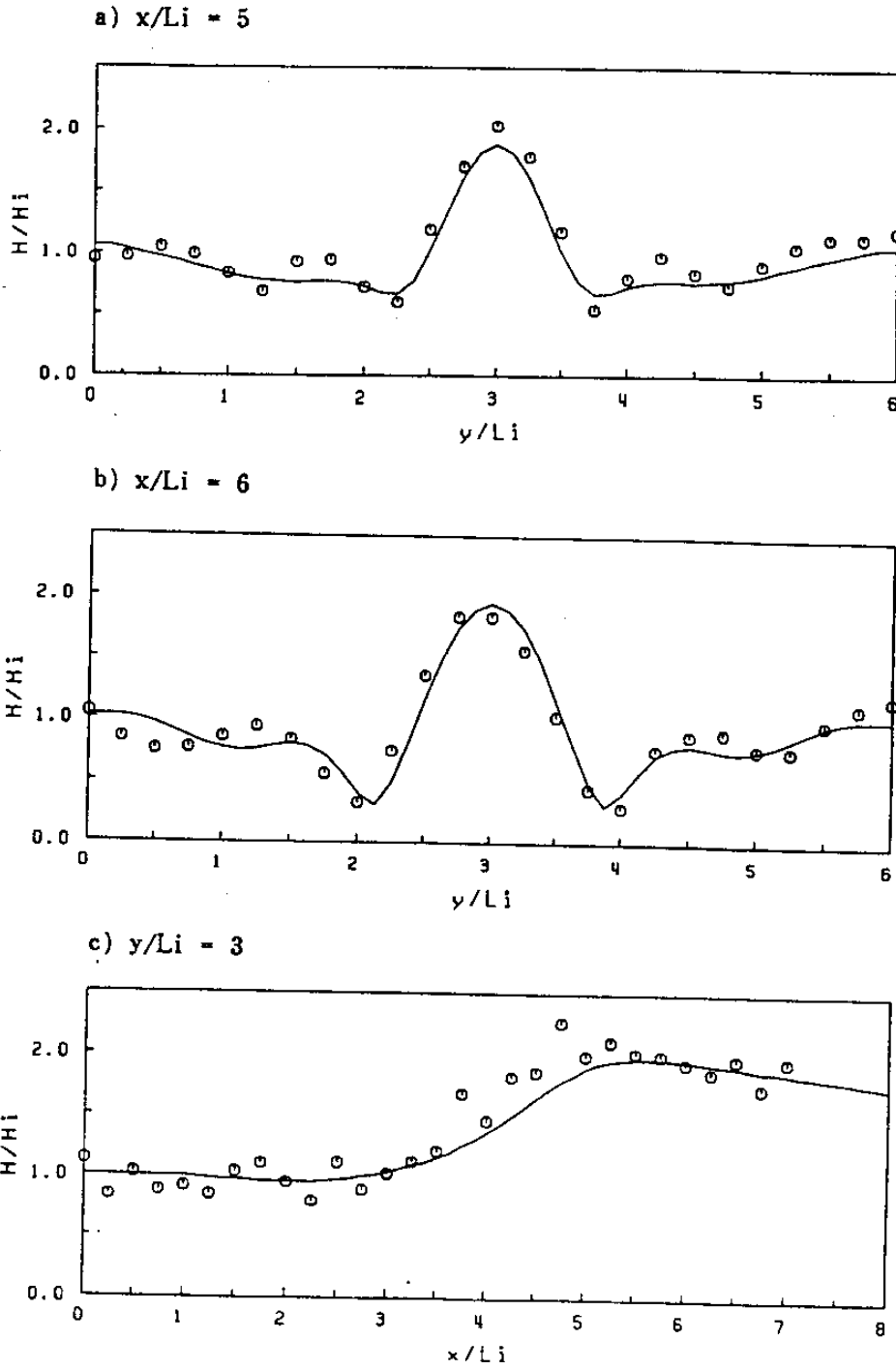


Fig. 3.16. Comparison of laboratory data and nonlinear model result for circular shoal. —nonlinear model :  $\circ$  laboratory data.

에서도 볼 수 있다.

모델의 검증을 위한 두번째 예로 Berkhoff *et al.*(1982)의 수리모형 실험 결과를 사용하였다. Fig. 3.17에 도시된 것과 같이 일정수심 45cm위에 1:50의 경사면이 설치되었고 이 경사면위에 타원형 천퇴가 놓여있다. 경사면은 입사파에 대해 약 20°정도의 각을 가지고 있으며 입사파의 제원은 다음과 같다.

입사주기 : 1 sec

입사파고 : 4.64cm

수치모델의 결과는 격자간격  $\Delta x = \Delta y = 0.25\text{m}$ 로 87×81개의 격자망을 구성하여 얻었고,  $y$  방향의 다섯 단면(단면 1-5)와  $x$  방향의 세단면(단면 6-8)에 대한 파고비가 Fig. 3.18에 도시되었다. 거의 모든 단면의 비교로부터 알 수 있듯이 계산 결과는 실측치에 상당히 가까운 값을 보이고 있다. 특히 천퇴 뒷편에 파랑이 집중되어 회절영향이 강하게 나타나는 단면 4와 5의 결과로부터 본 모델의 현상 재현능력의 우수성을 알 수 있다. 그리고 Kirby *et al.*(1984)이 지적한 것과 같이 선형 모델의 결과는 파랑이 집중된 지역의 파고가 너무 높게 나타났고, 회절에 의한 측면 lobe 들이 실측 자료와 상당한 차이를 보여 그 결과를 도시하지 않았다. 타원형 천퇴에 의한 파랑분포는 굴·회절 및 천수 효과가 모두 생겨 복잡한 양상을 띄고 있으나, 계산 결과를 분석하여 볼때 천수 효과는 상대적으로 약한 것으로 추정되며 굴절에 의해 급격하게 집중된 파랑에너지가 회절에 의해 서서히 분산되어지는 것을 Fig. 3.18와 Fig. 3.19로부터 알 수 있다.

### 3) 결 론

완경사 파랑식으로 부터 분리행렬법을 사용하여 광각 포물형 근사식을 유도하였고 이에 대한 수치모델이 제시되었다. 수치모델의 검증을 위해 원형천퇴와 타원형천퇴에 대한 수리모형 결과를 비교하였고, 수치 결과는 거의 모든

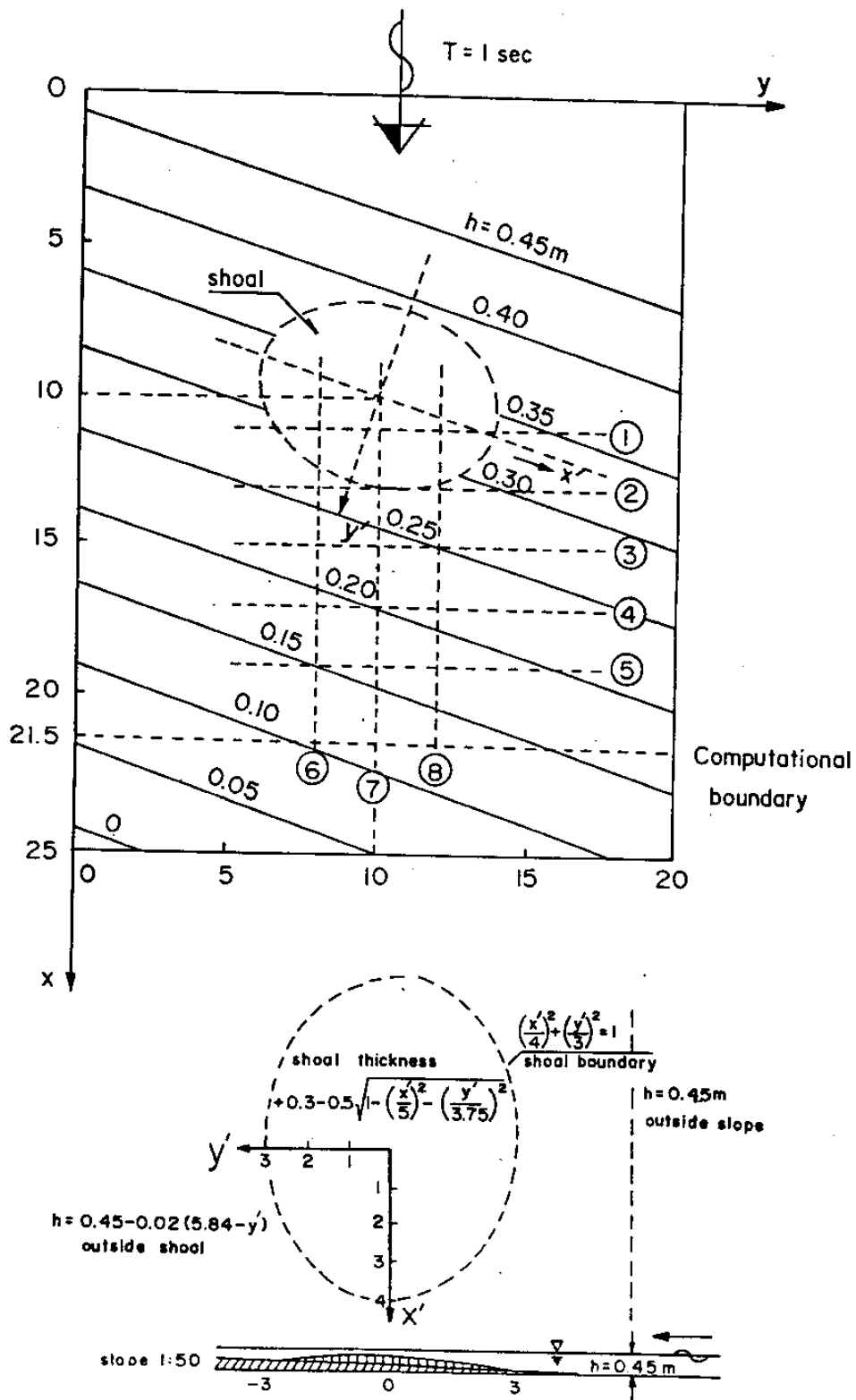
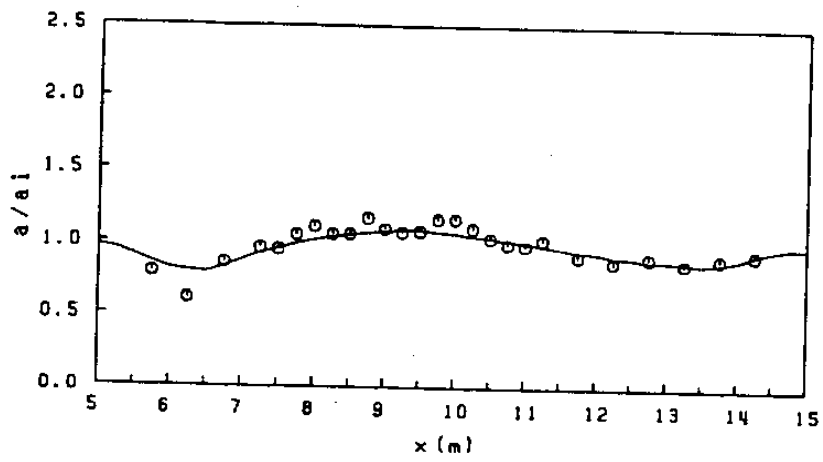
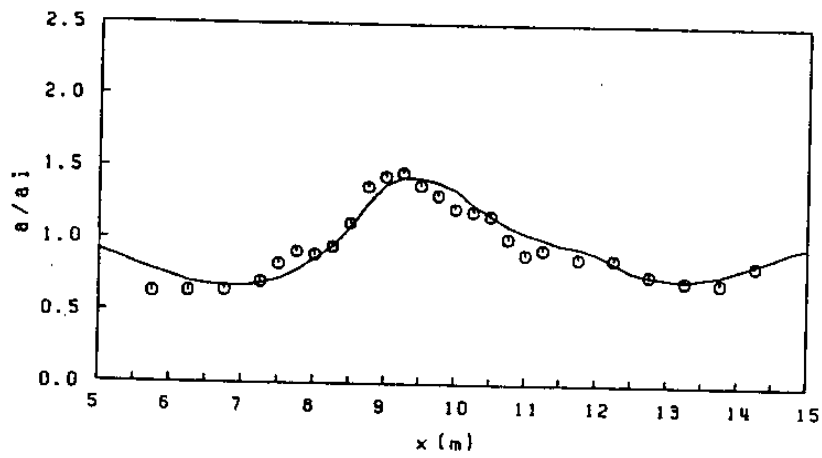


Fig. 3.17. Topography for the experiment of Berkhoff et al.(1982).

a) Section 1



b) Section 2



c) Section 3

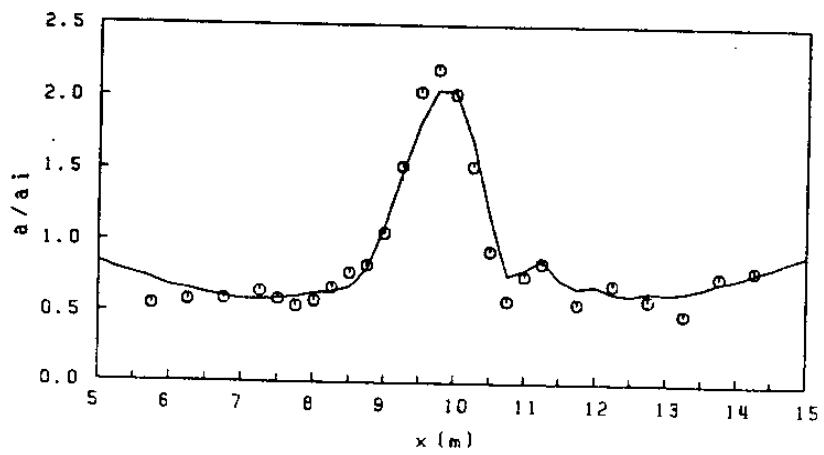
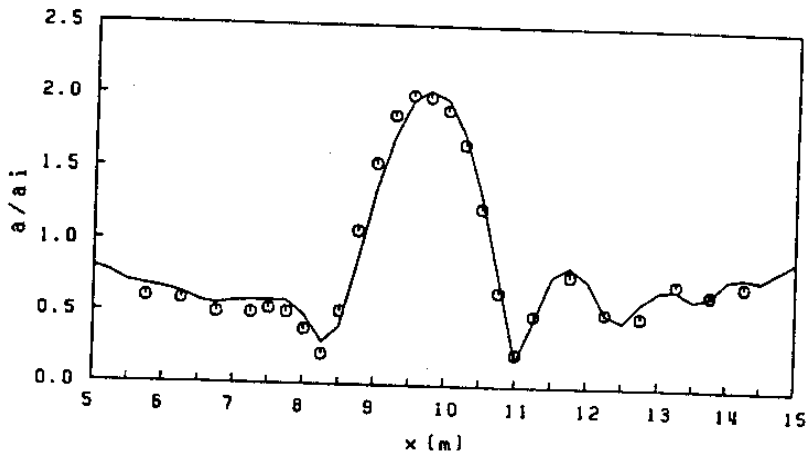
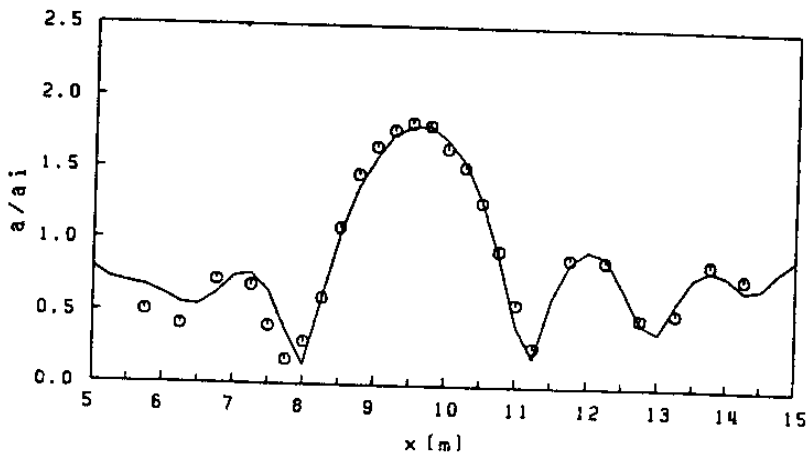


Fig. 3.18. Comparison of laboratory data and nonlinear model result for elliptic shoal. —nonlinear model:  $\circ$  laboratory data.

d) Section 4



e) Section 5



f) Section 6

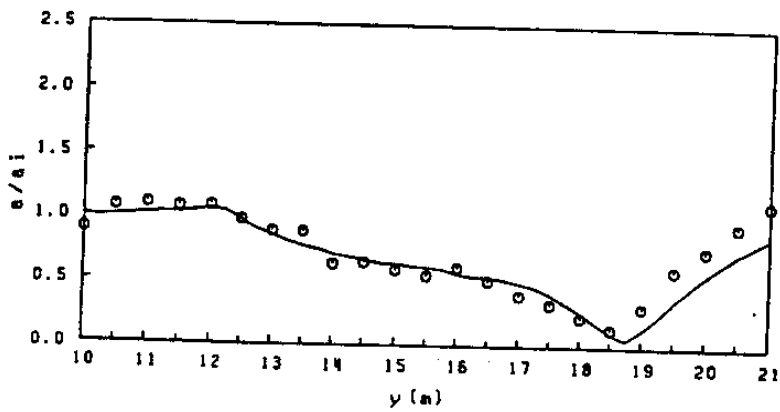
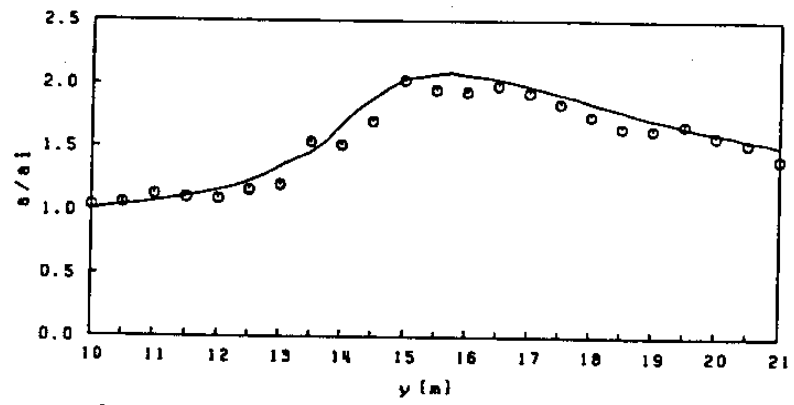


Fig. 3.18. (continued)



g) Section 7



h) Section 8

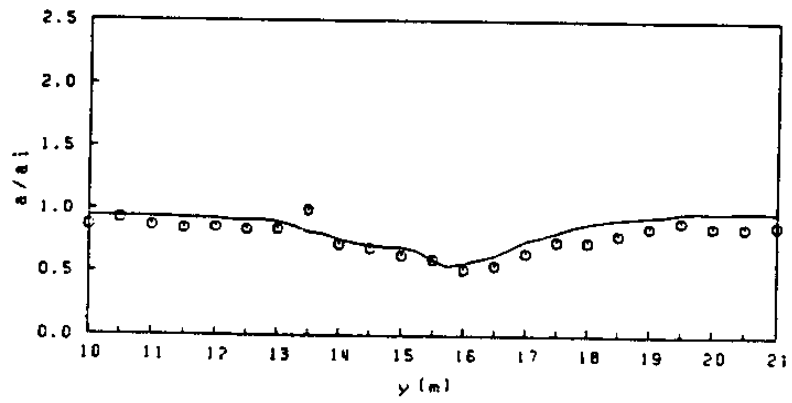


Fig. 3.18 (continued)

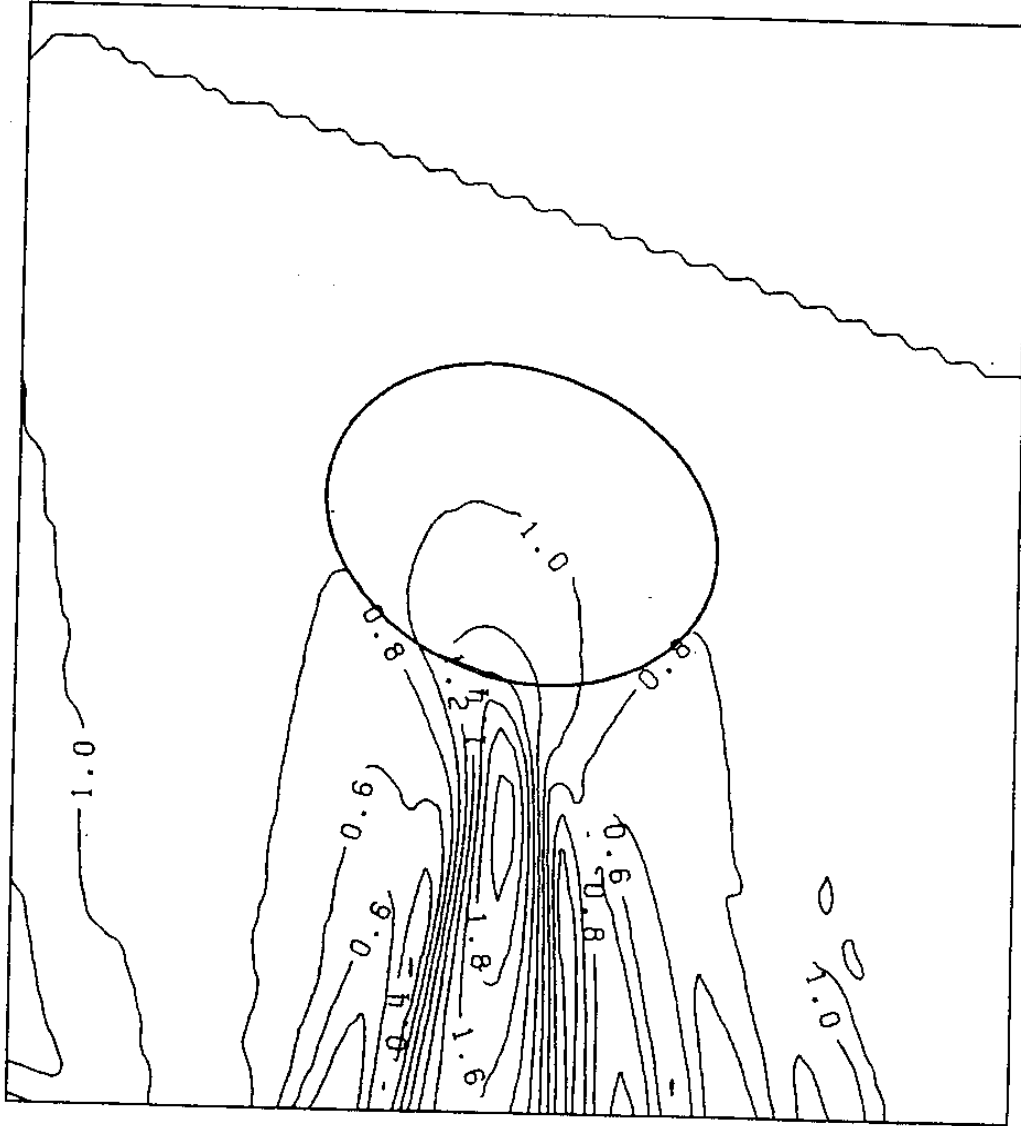


Fig. 3.19. Computed amplitude contours for elliptic shoal.

점에서의 실측치에 좋은 일치율을 보여 주었다.

천퇴에 의한 파랑 변형은 굴절에 의해 천퇴 뒷편에 파랑에너지가 비교적 급속하게 집중되며 이 집중된 파랑에너지는 회절에 의해 서서히 분사된다. 이러한 굴·회절의 과정에 의해 나타난 파랑분포를 본 모델은 비교적 정확하게 재현하여 본 모델의 우수성을 입증하였다. 파랑 집중지역은 파랑의 비선형성이 강해지므로 이를 고려하기 위해 파고를 포함하는 변형 파랑분산식이 제시되었다. 비선형 모델은 변형파랑분산식으로 부터 계산된 파수를 사용한다. 타원형천퇴에 대한 선형모델의 결과는 실측치에 상당한 차이를 보였으며 특히 파랑집중지역의 선형모델에 의한 파고는 비선형결과에 비해 높게 나타났다.

수리모델실험과의 비교로부터 본 모델의 유용성과 정밀도가 높은 것으로 판단되나, 현장자료에 대한 보다 광범위한 검증이 요구된다.

### 3.2.3 불규칙파의 천해변형

고정관측점에서 관측한 파고자료의 기록을 분석하여 보면 동일한 주기를 갖는 파랑은 거의 찾아 볼 수가 없다. 이런 불규칙한 파랑을 적절히 나타내기 위하여 관측된 전체파랑을 수 많은 주기의 성분파랑의 합으로 나타내는 스펙트럼(엄밀히 말하면 주파수 스펙트럼)방법이 많이 쓰이고 있다. 그러나, 실제 파랑은 주기(또는 주파수) 뿐 아니라 파향에서도 불규칙성을 보이기 때문에 주파수-파향 스펙트럼 혹은 파향스펙트럼이라 줄여 부르며 이를 사용하여 불규칙 파랑을 나타내는 것이 가장 일반적인 방법이라 할 수 있다.

유의파는 이러한 수 많은 성분파를 대표하는 파로 흔히 사용되며, 유의파의 천해변형 계산법은 앞에서 소개되었다. 유의파를 사용한 천해변형 계산법은 계산상의 손쉬움과 이론전개의 편리함에 큰 장점을 갖고 있으나 실제 불규칙한 파랑을 나타내는 데에는 많은 제약이 있다. 이절에서는 주어진 주파수

-파향 스펙트럼의 파랑이 천해로 전파될 때 일어나는 굴절 변형을 다루기로 한다.

Goda(1985)가 밝힌 바와같이 굴절에 의한 천해변형 계산방법은 크게 두가지로 구별된다. 첫째 방법은 성분파의 굴절을 계산한 뒤 이를 중첩하여 계산하는 방법 이고 둘째 방법은 주기-파향 스펙트럼으로 표시된 에너지 보존식을 차분화하여 수치적으로 푸는 방법이다. 파향스펙트럼의 에너지 보존식을 사용하는 방법은 연안방재 시설의 설계 기준산출 연구보고서 I(1989)에 기술되었고 본 연구에서는 중첩에 의한 방법을 소개하기로 한다.

이미 언급한 바와 같이, 실제 해상에서 나타나는 파랑은 매우 불규칙하여 수 많은 성분파의 합으로 표시하는 것이 보다 합리적이다. 즉 주파수-파향 스펙트럼을 사용하여 성분파로 분리할 수 있으며, 이는 선형파 이론에 의한 것임을 암시한다. 선형파이론의 중첩원리를 불규칙 파랑의 천해 변형에 적용하여 다음과 같은 굴절계수 산정식을 나타낼 수 있다.

$$(K_r)_{eff} = \left[ \frac{1}{m_0} \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) K_s^2(f) K_r^2(f, \theta) df d\theta \right]^{1/2} \quad (3.58)$$

여기서

$$m_0 = \int_0^\infty \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S(f, \theta) K_s^2(f) df d\theta$$

$S(f, \theta)$  = 주파수-파향스펙트럼

$K_s(f)$  = 천수계수

$\theta_{min}, \theta_{max}$  = 최소, 최대 파향

$f$  =  $1/T$ , 주파수

실제 계산에 식(3.58)을 사용하기는 복잡하므로 보다 계산이 용이한 다음과 같은 근사식이 제안되었다.

$$(K_r)_{eff} = \left[ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\Delta E)_{ij} (K_r)_{ij}^2 \right]^{1/2} \quad (3.59)$$

여기서 천수효과는 작다고 가정하여 무시되었다. 식(3.59)에 표시된 값을 계산하기 위해서는 우선 불규칙파의 연속 스펙트럼을 유한개의 주파수 구간 및 방향으로 나눈다. 즉 주파수는  $i=1, M$ 까지 파향은  $j=1, N$ 까지로 나누면, 식(3.59)에서  $(\Delta E)_{ij}$ 은  $i$ 번째 주파수 구간과  $j$ 번째 파향구간에 속한 에너지와 전체에너지에 대한 비율이 된다.

$$(\Delta E)_{ij} = \frac{1}{m_0^*} \int_{f_i}^{f_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} S(f, \theta) d\theta df \quad (3.60)$$

여기서  $m_0^*$ 는 파향에 무관한 주파수 스펙트럼이다.

$$m_0^* = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (3.61)$$

이제 식(3.60)으로 표시된 구간별 에너지를 대표할 수 있는 파랑을 정하는 방법을 생각하기로 한다. Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하는 경우 각 주파수 구간에 속한 에너지가 일정하도록 주파수 간격을 정하자. 즉

$$\int_{f_i}^{f_{i+1}} S(f) df = \frac{m_0^*}{M} \quad (3.62)$$

여기서  $S(f) = 0.257 (H_{1/3})^2 T_{1/3} \frac{1}{(T_{1/3} f)^5} \exp \left[ - \frac{1.03}{(T_{1/3} f)^4} \right]$

한편, 불규칙파의 통계 이론에 의하면 주파수대의 대표 주파수( $\bar{f}_i$ )로는 2차 스펙트럼모멘트와 다음과 같은 관계를 가질 때 그 구간의 주파수를 가장 잘 나타낼 수 있는 것으로 밝혀져 왔다(Goda, 1985).

$$(\bar{f}_i)^2 \int_{f_{i-1}}^{f_i} S(f) df = \int_{f_{i-1}}^{f_i} f^2 S(f) df \quad (3.63)$$

식(3.62)와 (3.63)에 경계조건  $f_0 = 0$ 을 쓰면  $f_i$ 는 다음과 같이 주어지고

$$f_i = \left\{ T_{1/3} \left[ -\frac{1}{1.03} \ln \left( \frac{i}{M} \right) \right]^4 \right\}^{-1} \quad (3.64)$$

대표주파수  $\bar{f}_i$ 는 Error 함수로 나타내진다.

$$\bar{f}_i = \frac{\sqrt{M}}{T_{1/3}} (1.03\pi)^{1/4} \left[ \operatorname{erf} \left( \sqrt{\ln \frac{M}{i-1}} \right) - \operatorname{erf} \left( \sqrt{\ln \frac{M}{i}} \right) \right]^{1/2} \quad (3.65)$$

여기서  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 이다.

식(3.64)에 의해 계산된 구간별 대표주기가 Table 3.6에 제시되었다.

Table 3.6 Representative periods of component waves for refraction analysis (from Goda, 1985).

Numbers of component waves	T/T <sub>1/3</sub>						
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7
3	1.16	0.90	0.54	—	—	—	—
4	1.20	0.98	0.81	0.50	—	—	—
5	1.23	1.04	0.90	0.76	0.47	—	—
7	1.28	1.11	1.00	0.90	0.81	0.69	0.43

주파수 구간별 에너지가 같기 때문에 위에서 언급한 성분파의 에너지율  $(\Delta E)_j$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$(\Delta E)_{ij} = \frac{D_j}{M} \quad (3.66)$$

여기서  $D_j$ 는 총에너지에 대한  $j$ 번째 파향의 성분파가 갖는 에너지의 비를 나타낸다. 한편, 파향스펙트럼은 총에너지의 방향별 에너지 분포라 볼 수 있으며 누적에너지의 비  $P(\theta)$ 는 다음과 같이 나타내진다.

$$P(\theta) = \frac{1}{m_0} \int_{-\pi/2}^{\theta} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (3.67)$$

여기서  $S(f, \theta) = S(f) G(f; \theta)$

$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2s}(\theta/2)$

$s = \text{spreading parameter}$

식(3.67)에서 파향의 범위는  $[-\pi/2, \pi/2]$ 로 간주되었으며, 이는 주파향에 반대방향으로부터 오는 성분은 공학적인 계산에 의미가 없을 뿐 아니라 그양이 적어 무시될 수 있기 때문이다. 그리고 spreading parameter,  $s$ ,는 peak 주파수,  $f_p$ 에 대한 식으로 표시된다.

$$s = \begin{cases} s_{max} (f/f_p)^5, & f \leq f_p \\ s_{max} (f/f_p)^{-2.5}, & f > f_p \end{cases} \quad (3.68)$$

식(3.68)의  $s_{max}$ 는 풍파의 발생정도에 따라 정해지며 풍속의 함수로 표시되었으나, 공학적인 응용의 편리를 도모하기 위해 다음과 같은 값이 제안되었다.

$$S_{max} = \begin{cases} 10, & \text{풍과} \\ 25, & \text{근거리에서 발생한 너울} \\ 75, & \text{원거리에서 발생한 너울} \end{cases} \quad (3.64)$$

Fig. 3.20에 식(3.67)에 의해 계산된 누적에너지율  $P(\theta)$ 가 도시되었다. 임의구간  $\theta$ 에 속한 에너지량은 구간경계의 파향에 대한 누적에너지율을 읽어 두값의 차이로 표시할 수 있으며,  $D_j$ 도 이러한 방법으로 계산된다. 공학계산에 많이 사용되는 8방위와 16방위에 대한 값들이 Table 3.7에 제시되었다. 마지막으로 불규칙파의 굴절계수를 정하는 방법을 예를 들어 설명하기로 한다. Fig. 3.21에 도시된 것과 같은 지형에 유의파의 주기  $T_w = 12 \text{ sec}$ , 주파향 SSE의 파향이 주어진 경우 계획 지점 A에서의 굴절계수를 구해보자. 우선 주파수를 3구간으로 나누면 Table 3.6의 값을 써서 다음과 같은 주기를 얻게 된다:  $T_1 = 14 \text{ sec}$ ,  $T_2 = 11 \text{ sec}$ ,  $T_3 = 6.5 \text{ sec}$ .

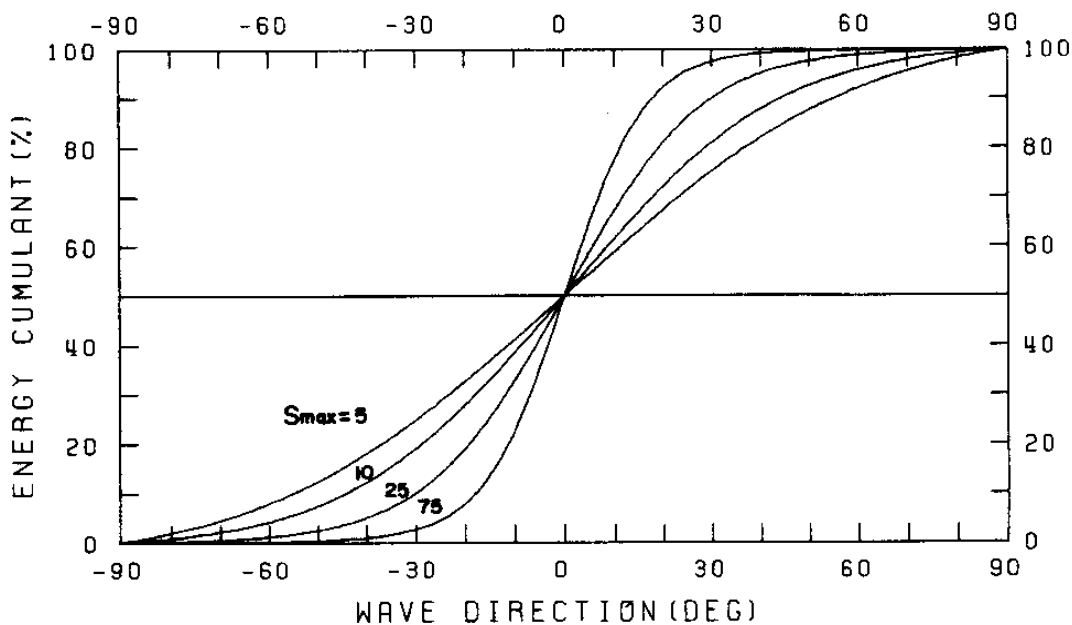


Fig. 3.20. Cumulative distribution of relative wave energy with respect to angle from principal wave direction (from Goda, 1985).



Table 3.7 Ratio of wave energy in each direction to the total energy (from Goda, 1985).

Direction of component waves	16-point bearing			8-point bearing		
	$S_{max}$			$S_{max}$		
	10	25	75	10	25	75
67.5°	0.05	0.02	0	—	—	—
45.0°	0.11	0.06	0.02	0.26	0.17	0.06
22.5°	0.21	0.23	0.18	—	—	—
0°	0.26	0.38	0.60	0.48	0.66	0.88
-22.5°	0.21	0.23	0.18	—	—	—
-45.0°	0.11	0.06	0.02	0.26	0.17	0.06
-67.5°	0.05	0.02	0	—	—	—
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

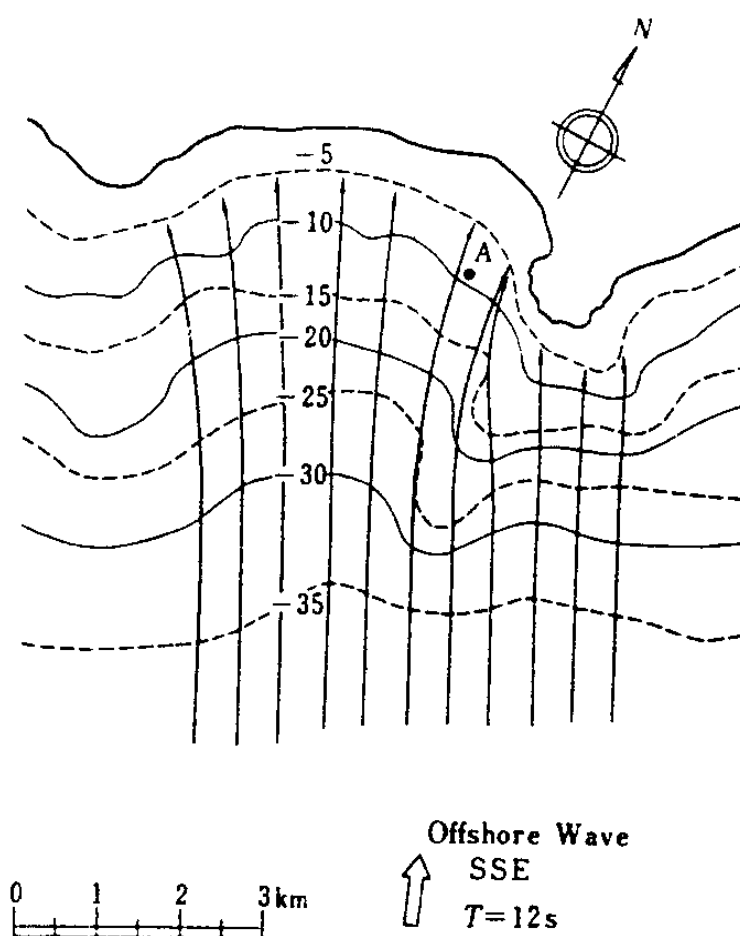


Fig. 3.21. Refraction diagram (from Goda, 1985).

또한 주 파향 SSE를  $0^\circ$ 로 잡고 ( $-90^\circ, 90^\circ$ ) 사이를 8 등분한 16방위제를 사용하고, 비교적 큰거리에서 발생한 너울이라 가정하여  $s_{max} = 25$ 로 취하면 입사파는 총 21개로 구성된다. 이제 각성분파에 대해 A 지점의 굴절계수를 구한다. 이 경우는 유의파의 굴절계수를 정할 때와 같은 방법을 사용하여 정하며, 모든 성분파에 대해 구한 굴절계수가 Table 3.8의 둘째에서 넷째 열에 정리되어 있다. 그 다음 단계는 일정파향에 속한 모든 주파수의 굴절 계수들의 제곱을 구한 후 이들을 합한 값을 다섯째열에 실어 놓았다. Table 3.7의 파향별 에너지율을 제6열에 써 넣었으며, 굴절계수 제곱을 합한 값의 평균값과 에너지율을 곱해 마지막 열에 정리해 넣었다. 이 마지막 열의 값을 합한 뒤 제곱근을 붙이면 구하고자 하는 굴절계수가 얻어진다. 이렇게 구하여진 굴절계수는 주위의 굴절계수들과 비교할 때 비교적 완만한 변화를 보이게 되며, 결과적으로 실제 현상을 보다 잘 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 불규칙 파랑의 굴절계산방법은 일종의 평활화 방법이라 할 수도 있다. 하지만 무엇보다 더 중요한 점은 여러 파랑성분이 정해진 가중치에 의해 곱해지는 합리

Table 3.8 Example of random wave refraction analysis (from Goda, 1985).

Direction of component waves	$K_r$			$\Sigma K_r^2$	$D_r$	$\frac{D_r}{M} \Sigma K_r^2$
	14s	11s	6.5s			
E	0.69	0.60	0.65	1.259	0.02	0.008
ESE	0.90	0.77	0.76	1.981	0.06	0.040
SE	1.07	1.11	0.95	3.280	0.23	0.251
SSE	1.11	0.86	0.95	2.874	0.38	0.364
S	0.64	0.78	0.99	1.998	0.23	0.153
SSW	0.84	0.95	1.02	2.649	0.06	0.053
SW	0.72	0.62	0.76	1.480	0.02	0.010

$$\Sigma \frac{D_r}{M} \Sigma K_r^2 = 0.879, \quad (K_r)_{eff} = 0.938.$$

적인 과정을 거치기 때문에 이 방법에 의해 계산된 값은 보다 현실적인 값을 나타내는 것으로 사료된다.

## 부 록

포물형 근사식(3.51)에 식(3.52)를 대입하여 정리하면 변동부분  $\psi$ 에 대한 식이 얻어진다.

$$C_1 \psi_x = C_2 \psi + C_3 \psi_y + C_4 \psi_{yy} + C_5 \psi_{xy} + C_6 \psi_{xyy} \quad (\text{A.1})$$

여기서  $C_i (i=1, \dots, 6)$ 은 파수의 함수인 상수이다. 식(A.1)을 Crank-Nicolson방법으로 차분화하면  $j$ 열에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \psi_{j-1}^{i+1} \left[ -\frac{C_3^{i+1}}{4\Delta y} + \frac{C_4^{i+1}}{2\Delta y^2} - \frac{C_5^{i+1/2}}{2\Delta x\Delta y} + \frac{C_6^{i+1/2}}{\Delta x\Delta y^2} \right] \\ & + \psi_j^{i+1} \left[ -\frac{C_1^{i+1/2}}{\Delta x} + \frac{C_2^{i+1}}{2} - \frac{C_4^{i+1}}{\Delta y^2} - \frac{C_6^{i+1/2}}{\Delta x\Delta y^2} \right] \\ & + \psi_{j+1}^{i+1} \left[ \frac{C_3^{i+1}}{4\Delta y} + \frac{C_4^{i+1}}{2\Delta y^2} + \frac{C_5^{i+1/2}}{2\Delta x\Delta y} + \frac{C_6^{i+1/2}}{\Delta x\Delta y^2} \right] \\ & = \psi_{j-1}^i \left[ \frac{C_3^i}{4\Delta y} - \frac{C_4^i}{2\Delta y^2} - \frac{C_5^i}{2\Delta x\Delta y} + \frac{C_6^{i+1/2}}{\Delta x\Delta y^2} \right] \\ & + \psi_j^i \left[ -\frac{C_1^{i+1/2}}{\Delta x} - \frac{C_2^i}{2} + \frac{C_4^i}{\Delta y^2} - \frac{C_6^{i+1/2}}{\Delta x\Delta y^2} \right] \\ & + \psi_{j+1}^i \left[ -\frac{C_3^i}{4\Delta y} - \frac{C_4^i}{2\Delta y^2} + \frac{C_5^{i+1/2}}{2\Delta x\Delta y} + \frac{C_6^{i+1/2}}{\Delta x\Delta y^2} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

여기서 첨자  $i+1/2$ 은  $i$ 와  $i+1$ 의 값을 평균한 값을 의미한다.

### 제3절 파향스펙트럼추정의 이론적 검토

파랑의 제원은 연안구조물 설계, 연안침식방지 대책 등 제반 연안공학적 문제의 해결에 있어서 매우 중요한 요소이다. 과거에는 파랑의 특성을 유의파 개념에 의한 단순파로 나타내었으며, 그 후 관측기술, 분석기술의 발달과 더불어 파랑의 에너지를 주파수의 함수로 표현하는 주파수스펙트럼 개념이 사용되어 왔다. 그러나 해양에서 발생하는 파랑은 매우 불규칙한 자연현상으로 방향성에 대한 지식없이 파랑을 정확히 표현한다는 것은 사실상 불가능하다. 이에 따라 파랑에너지의 분포를 주파수와 파향의 함수로 나타내는 파향스펙트럼의 개념이 도입되어 현재 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

Longuet-Higgins et al.(1963)은 각 주파수대에서의 파향스펙트럼을 파향에 대한 Fourier 급수로 전개하여 구하였으며, 이 방법은 파향스펙트럼 추정이론의 기본개념을 제시하고 있다. Panicker and Borgman(1974)은 Longuet-Higgins 방법을 확장하여 실험실의 수조, 원해에서 전파되어 온 너울이 우세한 해역의 파랑에 적용할 수 있는 방법(locked phase analysis)과 풍파에 의해 지배되는 해역에 적용할 수 있는 방법(random phase analysis)을 소개하였다.

Isobe et al.(1984)은 Capon(1969)의 최우도(maximum likelihood method)법을 수면변동 이외의 파동량 즉 수면구배, 수립자 속도 등에도 적용할 수 있도록 확장하였고, Kobune et al.(1986)은 파랑의 방향분포함수를  $(0, 2\pi)$ 에서 정의되는 확률밀도함수로 간주하고 정보엔트로피의 개념을 도입하여 분해능이 우수한 파향추정법을 소개하였으며, 이를 최대엔트로피법(maximum entropy principle : MEP)이라고 명명하였다.

1989년의 1차년도 사업에서 몇가지 파향스펙트럼 추정이론에 대하여 간략히 기술하였으며, Longuet-Higgins 법에 의한 분석 예를 보여주었다. 2차년도 사업

에서는 Longuet-Higgins법(LHM)과 최대엔트로피법(MEP)의 방향분해능에 대한 검토를 하고, 파향스펙트럼의 분포특성을 나타내는 여러 파라미터에 대하여 논의하기로 한다.

### 3.3.1 LHM과 MEP의 파향스펙트럼 추정식

파향스펙트럼과 동일 지점에서 관측된 두개의 시계열(time series)간의 cross 스펙트럼과는 다음의 관계가 성립한다(Kobune *et al.*, 1986).

$$\frac{2 \phi_{mn}(f)}{H_m(f)H_n^*(f) S(f)} = \int_0^{2\pi} G(\theta | f) (\cos \theta)^{\alpha_m + \alpha_n} (\sin \theta)^{\beta_m + \beta_n} d\theta \quad (3.70)$$

- 여기서  $\phi_{mn}(f)$  = two-sided cross spectrum  
 $H(f)$  = transfer function  
 $S(f)$  = one-sided heave spectrum  
 $G(\theta | f)$  = directional spectrum  
 $\alpha, \beta$  = constants determined by wave properties  
 $*$  = complex conjugate

전달함수,  $\alpha, \beta$  등은 1차년도 보고서에 상세히 수록되어 있다. 한편 식(3.70)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_0^{2\pi} G(\theta | f) l_i(\theta) d\theta = m_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.71)$$

여기서  $l_0(\theta) = 1$

$$\begin{aligned}
 l_1(\theta) &= \cos \theta \\
 l_2(\theta) &= \sin \theta \\
 l_3(\theta) &= \cos 2\theta \\
 l_4(\theta) &= \sin 2\theta
 \end{aligned}
 \tag{3.72}$$

관측 파동량이 수면변동( $\eta$ ), 수면구배( $\eta_x, \eta_y$ )인 경우에는  $m_i$ 가 다음식으로부터 구하여진다.

$$\begin{aligned}
 m_0 &= 1 \\
 m_1 &= \frac{Q_{12}(f)}{k C_{11}(f)} \\
 m_2 &= \frac{Q_{13}(f)}{k C_{11}(f)} \\
 m_3 &= \frac{C_{22}(f) - C_{33}(f)}{k^2 C_{11}(f)} \\
 m_4 &= \frac{2 C_{23}(f)}{k^2 C_{11}(f)}
 \end{aligned}
 \tag{3.73}$$

여기서  $k$ 는 파수(wave number)로 분산관계식으로부터 구해지며,  $C_{ij}(f)$ 와  $Q_{ij}(f)$ 는  $(\eta, \eta_x, \eta_y) = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 로 표시할 경우 co-spectrum과 quad-spectrum을 각각 나타낸다. 한편 관측 파동량이 압력(P), 수평유속(U, V)인 경우에는 식(3.73)의  $m_i$ 가 다음식으로 계산된다.

$$m_0 = 1$$

$$m_1 = \frac{K_p C_{12}(f)}{K_u C_{11}(f)}$$

$$m_2 = \frac{K_p C_{13}(f)}{K_u C_{11}(f)} \quad (3.74)$$

$$m_3 = \frac{K_p^2 [C_{22}(f) - C_{33}(f)]}{K_u^2 C_{11}(f)}$$

$$m_4 = \frac{2K_p^2 C_{23}(f)}{K_u^2 C_{11}(f)}$$

여기서  $(P, U, V) = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  이며,  $K_p, K_u$  는 각각 압력과 유속의 응답 계수로 다음식으로 계산된다.

$$K_p = \frac{\cosh k d_p}{\cosh k h} \quad (3.75)$$

$$K_u = 2\pi f \frac{\cosh k d_u}{\sinh k h} \quad (3.76)$$

여기서  $h$  = water depth

$d_p$  = distance between pressure sensor and sea bed

$d_u$  = distance between velocity sensor and sea bed



1) Longuet-Higgins *et al.*의 추정식(LHM)

Longuet-Higgins *et al.*(1963)은 파향스펙트럼을 Fourier series로 전개하여 처음 5개 항으로 나타내었다. 이때 항의 절단(truncation)에 의하여 추정된 스펙트럼은 음의 영역(negative lobes)이 나타나므로 이를 제거하기 위하여 양의 무게함수  $\frac{4}{3\pi} \cos^4 \frac{\theta}{2}$  로 추정스펙트럼을 convolution 하였다. 각 harmonic에 대한 무게계수는 Panicker and Borgman (1974)에 의하여 계산되었다. LHM에 의한 방향 분포함수의 추정식은 다음과 같다.

$$G(\theta | f) = \frac{1}{2\pi} \{ 1 + 2(m_1 \cos \theta + m_2 \sin \theta + m_3 \cos 2\theta + m_4 \sin 2\theta) \} \quad (3.77)$$

$$G(\theta | f) = \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 + \frac{4}{3}(m_1 \cos \theta + m_2 \sin \theta) + \frac{1}{3}(m_3 \cos 2\theta + m_4 \sin 2\theta) \right\} \quad (3.78)$$

여기서  $m_1, m_2, m_3, m_4$ 는 식(3.73)과 식(3.74)로부터 구해진다. 식(3.77)은 negative lobe를 제거하지 않은 식이며, 식(3.78)은 negative lobe를 제거한 식을 나타낸다.

2) MEP의 추정식

주어진 확률밀도함수  $G(\theta | f)$ 에 대한 정보엔트로피는 다음식으로 주어진다 (寒川 등, 1986).

$$H = \int_0^{2\pi} G(\theta | f) \ln \frac{1}{G(\theta | f)} d\theta \quad (3.79)$$

식(3.71)의 제약조건을 만족시키면서 동시에 식(3.79)를 최대로 하는  $G(\theta | f)$ 를 Lagrangian multiplier를 사용하여 추정하면 다음식을 얻는다.

$$\hat{G}(\theta|f) = e^{-\lambda_0 - \sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} \quad (3.80)$$

한편 Lagrangian multiplier는 다음식으로 구해진다.

$$\int_0^{2\pi} \{m_i - l_i(\theta)\} e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} d\theta = 0 \quad (3.81)$$

$$\lambda_0 = \ln \left[ \int_0^{2\pi} e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} d\theta \right] \quad (3.82)$$

여기서  $l_i, m_i$ 는 식(3.72)과 식(3.73) 또는 식(3.74)에서 구해진다.

식(3.81)은 비선형 연립방정식이므로 Newton-Raphson(Press *et al.*, 1986)의 반복법으로 해를 구할 수 있다.

### 3.3.2 LHM과 MEP의 방향 분해능 검토

LHM과 MEP를 현장자료에 적용하기 전에 각 방법에 의한 방향분포함수 추정식이 가정된 방향분포함수를 얼마나 잘 재현시키는가에 대하여 수치 simulation을 통하여 검토한다.

앞에서 논의한 방향스펙트럼 추정법(LHM과 MEP)의 방향분해능에 관한 검토를 하기 위하여 몇개의 방향스펙트럼을 설정하고 이에 대한 각 방법의 결과를 비교 검토하기로 한다. 수치 simulation 순서는 다음과 같으며, 수면변동과 수면구배를 대상파동량으로 한다.

i) 모의 실험에 이용될 방향스펙트럼을 설정한다.

본 검토에서는 방향분포함수로서 Delta 함수와 Mitsuyasu의 함수를 사용하였다.

- ii) 주어진 방향스펙트럼으로부터 수면변동, 수립자의 수평속도간의 cross, power 스펙트럼을 구한다.
- iii) 구해진 cross, power 스펙트럼으로부터 LHM과 MEP에 의한 방향스펙트럼 추정치를 구한다.

1) 수치해법

i) LHM

식(3.73)로부터  $m_i$ 가 구해지면 식(3.77) 및 식(3.78)로부터 파향스펙트럼이 추정된다.

ii) MEP

식(3.81)은 Lagrangian multiplier에 관한 비선형 연립방정식이다. 다변수의 Newton-Raphson법을 사용하여 해를 구할 수 있다. 식(3.81)을 선형화하면 다음식을 얻는다.

$$\sum_{j=1}^4 A_{ij} \delta \lambda_j = B_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.83)$$

여기서

$$A_{ij} = \int_0^{2\pi} \{l_i(\theta) - m_i\} l_j(\theta) e^{-\sum_{k=1}^4 \lambda_k l_k(\theta)} d\theta \quad (3.84)$$

$$B_i = \int_0^{2\pi} \{l_i(\theta) - m_i\} e^{-\sum_{k=1}^4 \lambda_k l_k(\theta)} d\theta \quad (3.85)$$

$$\delta \lambda_j = \lambda_j^{k+1} - \lambda_j^k \quad (3.86)$$

이며,  $k, k+1$ 은 계산 step 이다. 식(3.83)은 잔차  $\vec{\delta\lambda}$ 에 관한 연립1차방정식으로서 초기치( $\lambda_1^0, \lambda_2^0, \lambda_3^0, \lambda_4^0$ )를 주고,  $\|\vec{\delta\lambda}\|_1$ 이 충분히 작아질 때까지 반복계산을 하여  $\vec{\lambda}$ 의 근사해를 구한다. 여기서는 초기치를  $\vec{\lambda} = \vec{0}$ 으로 하고,  $\|\vec{\delta\lambda}\|_1 \leq 1.0 \times 10^{-2}$ 이면 계산을 끝내고 그 때의  $\vec{\lambda}$ 를 식(3.81)의 근사해로 취하였다.

## 2) 방향분해능의 검토

### i) Delta 함수

임의의 주파수에 대한 방향분포함수가 Delta 함수의 합으로 주어진다면 스펙트럼은

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta | f) = S(f) \sum_{i=1}^n \alpha_i \delta(\theta - \theta_i) \quad (3.87)$$

로 주어진다.

여기서

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad \alpha_i \geq 0 \quad (3.88)$$

이다.

식(3.87)로부터  $m_i$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos \theta_i \\ m_2 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin \theta_i \\ m_3 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos 2\theta_i \\ m_4 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin 2\theta_i \end{aligned} \quad (3.89)$$

따라서 식(3.89)를 식(3.77) 및 식(3.78)에 대입하면 방향분포함수의 LHM 추정치를 얻을 수 있다. 한편 식(3.89)를 식(3.81)에 대입하면 Lagrangian multiplier에 관한 다음의 비선형 연립방정식을 얻는다.

$$\int_0^{2\pi} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos \theta_i - \cos \theta \right] e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} d\theta = 0$$

$$\int_0^{2\pi} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin \theta_i - \sin \theta \right] e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} d\theta = 0$$

(3.90)

$$\int_0^{2\pi} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos 2\theta_i - \cos 2\theta \right] e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} d\theta = 0$$

$$\int_0^{2\pi} \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i \sin 2\theta_i - \sin 2\theta \right] e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)} d\theta = 0$$

윗 식을 관찰하면  $e^{-\sum_{j=1}^4 \lambda_j l_j(\theta)}$  가  $\sum_{j=1}^n \lambda_j \delta(\theta - \theta_j)$ 에 비례하는 경우 식(3.90)이 성립함을 알 수 있다. 그러므로 파향스펙트럼의 MEP 추정치는 가정된 스펙트럼과 일치한다.

Fig. 3.22는 Delta 함수로 주어지는 파향스펙트럼에 대한 각 방법의 추정결과를 보여주고 있다. Fig. 3.22에서 화살은 Delta 함수를, 실선은 각각 식(3.77)과 식(3.78)에 의한 추정치를 나타낸다. 종축(ordinate)은 평활화하지 않은 LHM식(3.77)의 최대값으로 normalization한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 평활화하지 않은 LHM 추정곡선은 negative lobe가 발생하며, 이를 평활화한 추정치는 negative lobe가 제거되었음을 알 수 있고, 평활화된 스펙트럼의 peak는 그렇지 않은 것에 비하여 매우 낮음을 알 수 있다. negative lobe는

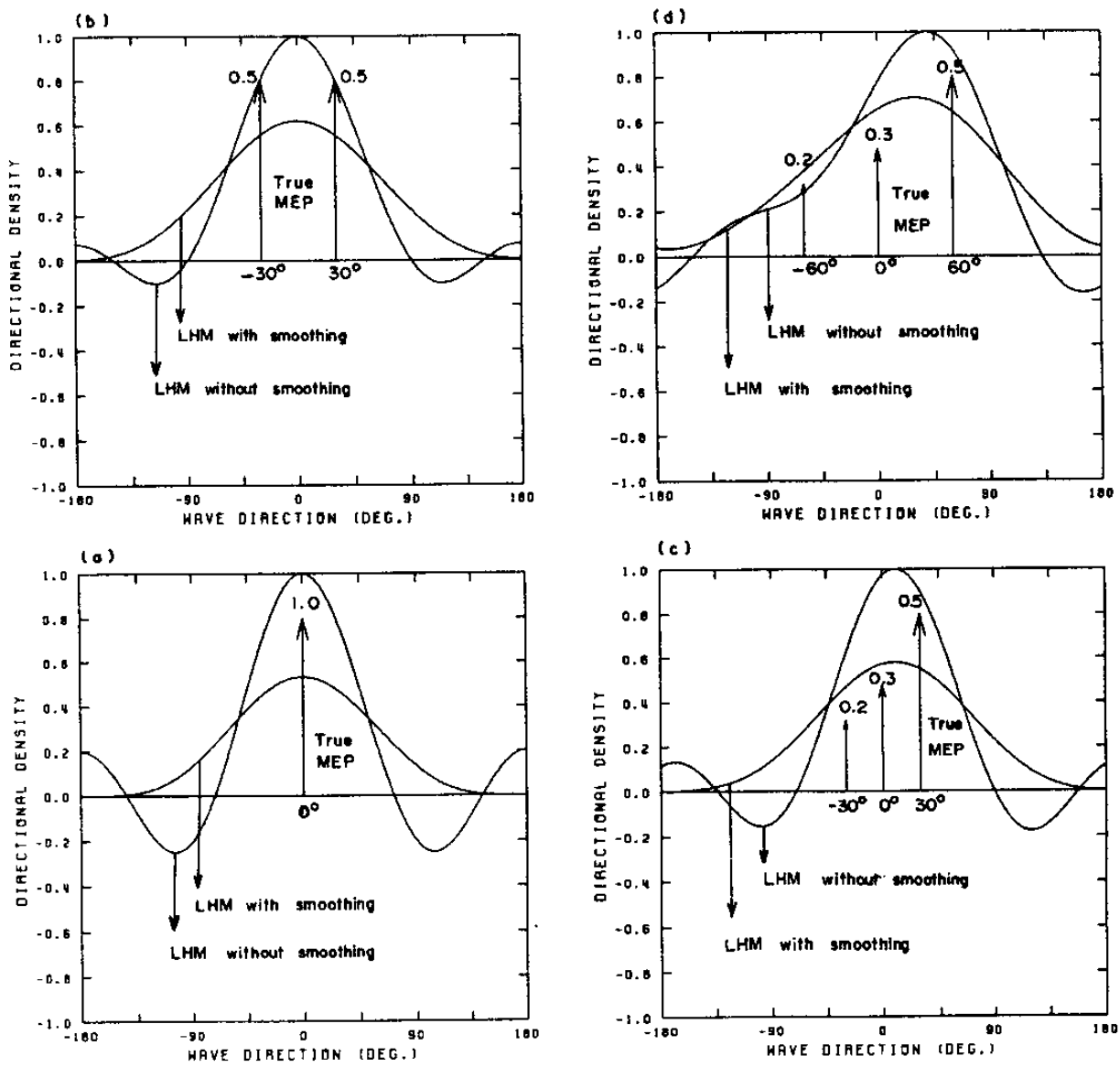


Fig. 3.22. Numerical simulations : Delta functions.

(a)  $\alpha_1=1.0, \theta_1=0^\circ$

(b)  $\alpha_1=\alpha_2=0.5, \theta_1=\theta_2=-30^\circ$

(c)  $\alpha_1=0.2, \alpha_2=0.3, \alpha_3=0.5, \theta_1=\theta_3=-30^\circ, \theta_2=0^\circ$

(d)  $\alpha_1=0.2, \alpha_2=0.3, \alpha_3=0.5, \theta_1=\theta_3=-60^\circ, \theta_2=0^\circ$

무한 갯수의 Fourier series를 second harmonic에서 절단하였기 때문에 나타나는 것으로 생각된다. Fourier 이론에서 주어진 주기함수를 삼각다항식으로 근사시킬 때, 전 제곱오차(total square error)가 최소로 되는 조건은 삼각 다항식의 계수가 대응하는 Fourier coefficient와 일치하는 것이다. 따라서 평활화되지 않은 스펙트럼이 주어진 스펙트럼을 제 2 harmonic 까지의 Fourier series로 전개할 때 전 제곱오차가 최소로되는 추정치이지만 실제로 스펙트럼은 negative의 영역을 포함할 수 없기 때문에 smoothing 함수를 도입하여 negative lobe를 제거하는 것이다.

ii) 단봉형 방향스펙트럼

방향분포함수가 Mitsuyasu 형으로 주어지는 경우이다.

$$G(\theta | f) = N(s) \cos^{2s} \frac{\theta}{2} \quad (3.91)$$

$$N(s) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(S+1)}{\Gamma(2S+1)} \quad (3.92)$$

식(3.91)은 spreading coefficient(s)가 커질수록 방향집중도가 강해짐을 나타내며,  $s \rightarrow \infty$  이면 Delta 함수에 접근한다. Fig. 3.23 (a)–(f)는 각각  $s = 1, 2, 5, 10, 20, 100$  의 경우의 계산예이다. 그림에서 종축(ordinate)은 true spectrum의 최대치로서 normalization 하였다.

Fig. 3.23에서 MEP에 의한 추정치는  $s$  가 증가함에 따라서 정도가 좋아짐을 보여주고 있다. 이는 에너지의 집중도가 강할수록 정도가 좋아지며,  $s$  가 무한히 큰 경우 즉 Delta 함수의 경우에는 MEP 추정치는 true spectrum과 정확히 일치함을 암시한다. 또한  $s \geq 5$  이면 MEP 추정치는 true spectrum과 거의 일치하며,  $s = 1, 2$  의 경우에도 LHM 보다 정도가 좋은 것으로 나타났다.

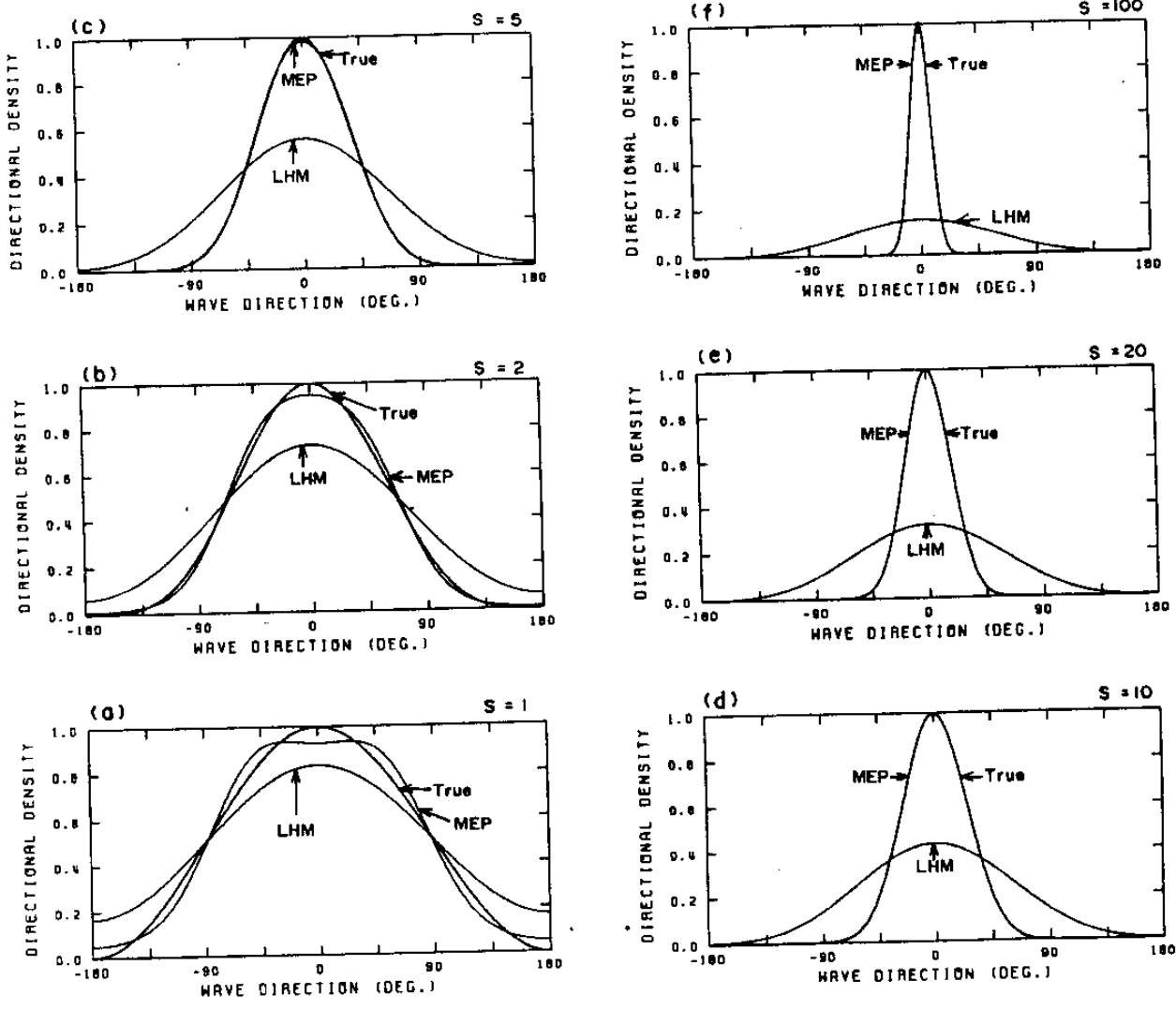


Fig. 3.23. Numerical simulations : Unimodal forms.  
 (a)  $s=1.0$     (b)  $s=2.0$     (c)  $s=5.0$   
 (d)  $s=10.0$     (e)  $s=20.0$     (f)  $s=100.0$



LHM은 peak의 위치는 true spectrum과 잘 일치하고 있으나, 전반적으로 MEP에 비하여 정도가 훨씬 떨어지며, 추정스펙트럼의 형상은 상당히 평활화되어 나타난다.

iii) 쌍봉형 스펙트럼

방향분포함수가 중심이 서로다른 두개의 Mitsuyasu 형의 합성으로 주어지는 경우다. 즉

$$G(\theta | f) = \alpha_1 N(S_1) \cos^{2S_1} \frac{\theta - \theta_1}{2} + \alpha_2 N(S_2) \cos^{2S_2} \frac{\theta - \theta_2}{2} \quad (3.93)$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

A) 동일한 peak( $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, s_1 = s_2 = 20$ )

Fig. 3.24 (a)-(f)는  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5, s_1 = s_2 = 20$ 의 경우  $\Delta\theta = 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 의 경우에 대한 true spectrum과 MEP, LHM 추정치를 보여준다. MEP는 모든 경우에 대하여 스펙트럼의 peak를 잘 식별해 내고 있으며  $\Delta\theta$ 가 증가할수록 true spectrum에 잘 일치하고 있다. 특히  $\Delta\theta$ 가 작은 경우에는 peak의 위치는 잘 일치하고 있지만, 스펙트럼의 peak와 trough 부근에서 약간 평활화되는 경향을 보인다. 그러나 전반적으로 MEP 추정치는 실용적으로 충분한 정도를 갖는다고 사료된다.

LHM은  $\Delta\theta$ 가 작은 경우 두 개의 peak를 평활화하여 하나의 peak로 보여주고 있으며  $\Delta\theta = 150^\circ$ 와  $180^\circ$ 의 경우에서만 미세하게 peak의 위치를 식별하고 있다.

그러나 어느 경우에도 MEP에 비해 정도가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 한편 LHM은 이 그림으로부터  $\Delta\theta = 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ 의 경우에는 first harmonic이,  $\Delta\theta = 150^\circ, 180^\circ$ 의 경우에는 second harmonic이 지배적임을 알 수 있다.

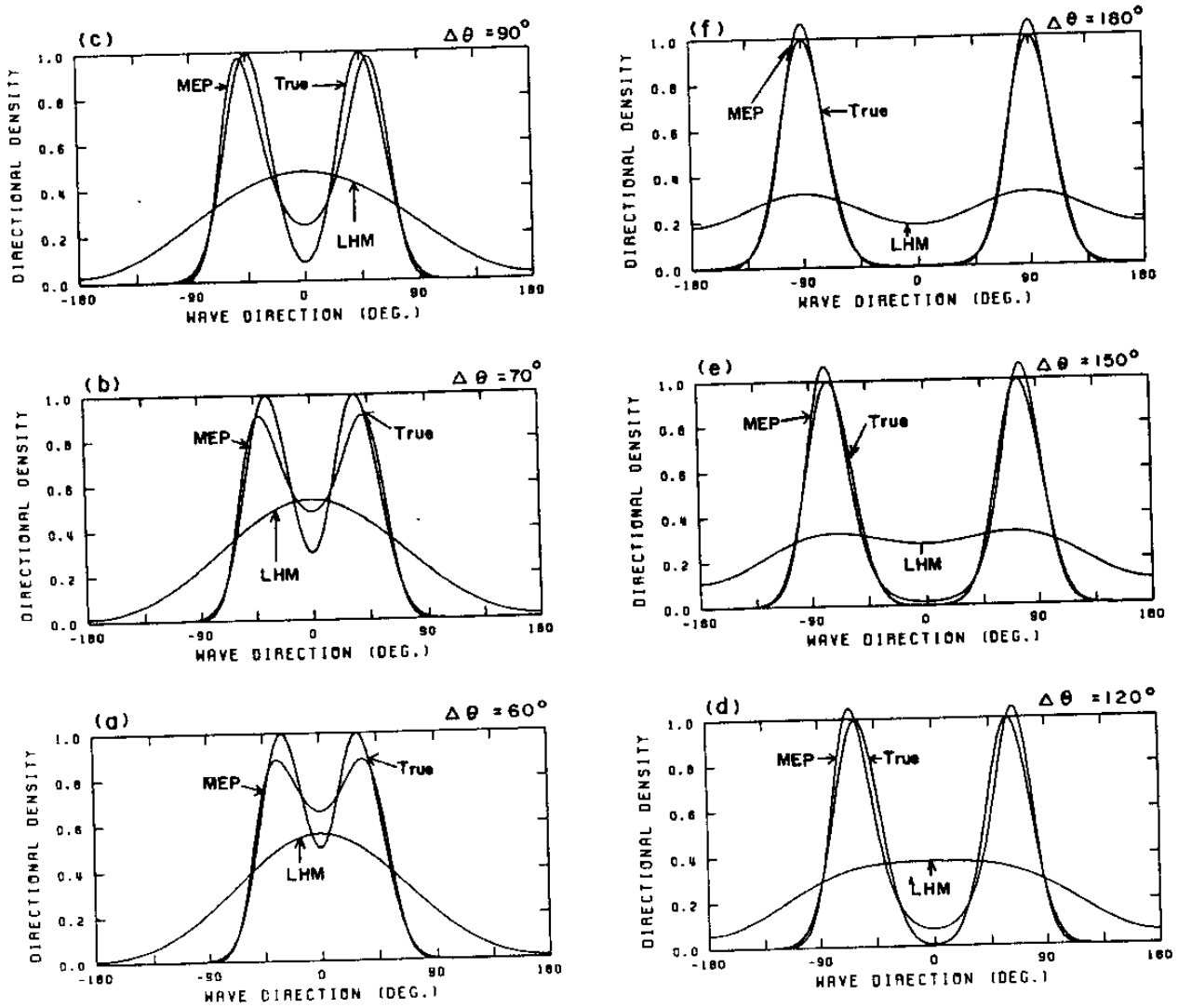


Fig. 3.24. Numerical simulations : Bimodal forms with equal peaks.

$$(\alpha_1 = \alpha_2 = 0.05, s_1 = s_2 = 20.0)$$

$$(a) \Delta\theta = 60^\circ \quad (b) \Delta\theta = 70^\circ \quad (c) \Delta\theta = 90^\circ$$

$$(d) \Delta\theta = 120^\circ \quad (e) \Delta\theta = 150^\circ \quad (f) \Delta\theta = 180^\circ$$

B) 서로다른  $\text{peak}(\alpha_1 N(s_1)/\alpha_2 N(s_2)) = 0.5, s_1 = 100, s_2 = 10$

Fig. 3.25 (a)–(f)는  $\frac{\alpha_1 N(s_1)}{\alpha_2 N(s_2)} = 0.5, s_1 = 100, s_2 = 10$ 에 대한 true spectrum, LHM, MEP 추정치를 보여준다. 너울과 풍파가 공존하는 파동장이 이 경우에 해당된다고 생각할 수 있다.

MEP는 앞의 경우와 마찬가지로  $\Delta\theta$ 가 증가할 수록 정도가 좋아지고 있으며 first peak의 위치는  $\Delta\theta = 150^\circ$ 와  $180^\circ$ 의 경우를 제외하면 true spectrum의 그것과 약간 차이가 있음을 알 수 있다. 한편  $\Delta\theta = 60^\circ, 70^\circ$ 의 경우에 second peak는 식별이 되지 않고 있으며,  $\Delta\theta$ 가  $90^\circ$ 보다 큰 경우에는 명확히 식별되고 있다. 그러나 second peak는 식별되는 경우에도 상당히 평활화되어 있고,  $\Delta\theta$ 가 커질수록 second peak의 에너지의 상당부분이 first peak 쪽으로 옮겨져서 나타남을 보여주고 있으며, 이로부터 풍파와 너울이 공존할 경우 MEP은 너울의 에너지의 일부를 풍파의 에너지의 일부로서 식별하고 있음을 추측할 수 있다. 다시 말해서 MEP은 너울의 에너지는 과소평가하고 풍파의 에너지는 과대평가하는 경향이 있음을 말해준다. 이로부터 방향스펙트럼이 multi-modal(다봉형)인 경우에 첨예도(peakedness)가 큰 쪽이 그렇지 않은 쪽보다 더 많이 평활화(smoothing)된다고 생각할 수 있다. 한편 LHM은 모든 경우에서 second peak를 식별하지 못하며, MEP 보다 정도도 매우 떨어지고 있다. 그러나 first peak의 위치는 true spectrum과 근사하고 있음을 알 수 있다.

종합적으로 MEP는 LHM보다 방향분해능이 훨씬 우수하며, 방향집중도가 클수록 또는 두 peak의 거리( $\Delta\theta$ )가 클수록 정도가 좋아짐을 알 수 있다. 한편 LHM은 쌍봉형의 경우에도 단봉형으로 추정하는 경향이 뚜렷하며, 계산시간이 빠른점을 제외하면 MEP에 비해 매우 뒤떨어진 방법이라 할 수 있다.

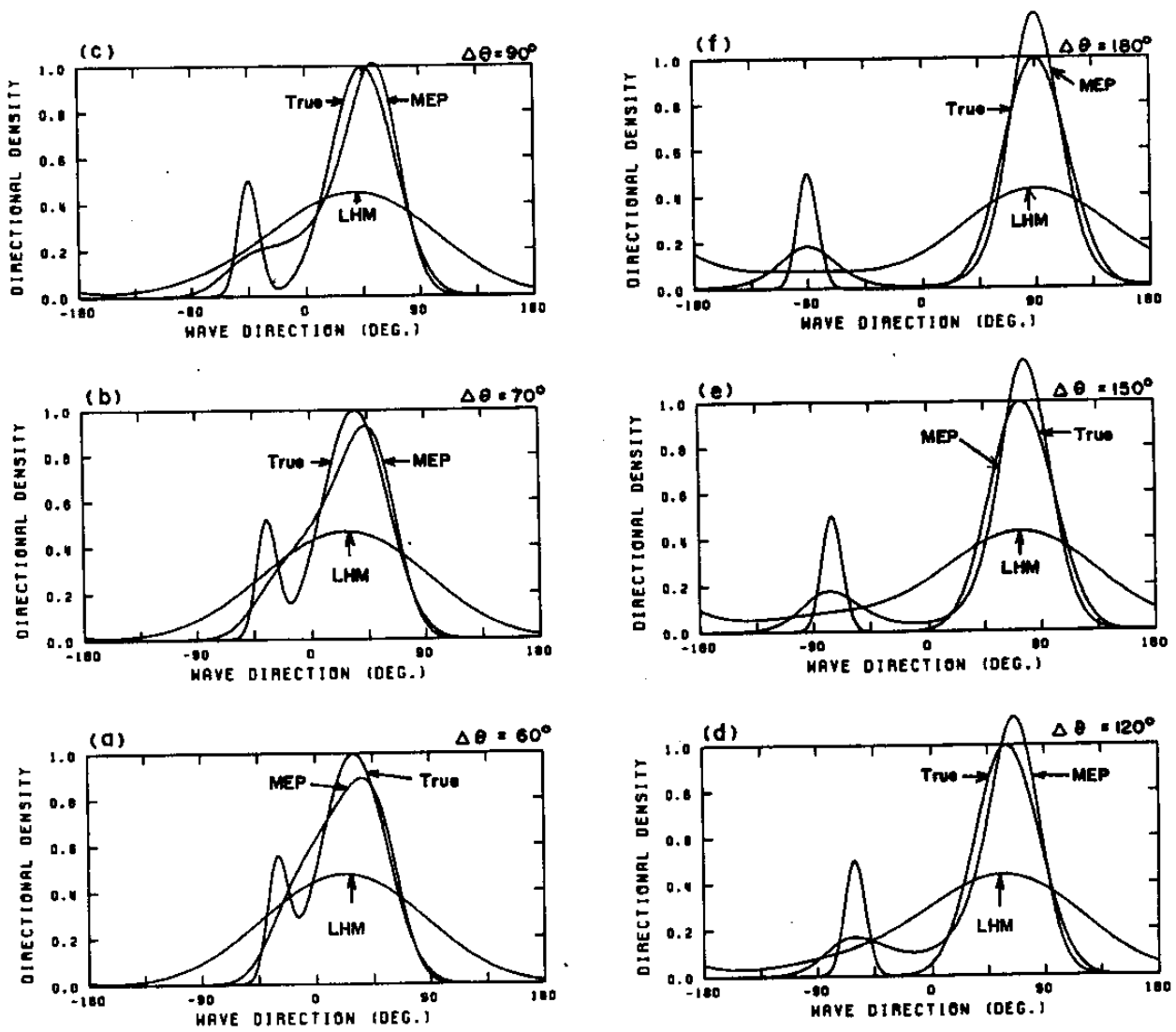


Fig. 3.25. Numerical simulations : Bimodal forms with unequal peaks.

$$(a_1 N(s_1) / a_2 N(s_2)) = 0.5, \quad s_1 = 100.0, \quad s_2 = 10.0$$

$$(a) \Delta\theta = 60^\circ \quad (b) \Delta\theta = 70^\circ \quad (c) \Delta\theta = 90^\circ$$

$$(d) \Delta\theta = 120^\circ \quad (e) \Delta\theta = 150^\circ \quad (f) \Delta\theta = 180^\circ$$

### 3.3.3 파랑의 방향파라미터

앞에서는 파향스펙트럼 추정법과 분해능에 관하여 논의하였다. 따라서 주파수별로 구해진 파향스펙트럼을 통하여 파랑의 방향분포 특성을 파악할 수도 있으나, 이는 매우 번거로운 일이므로 파랑의 방향분포특성을 단순한 파라미터로 나타내어 그것으로부터 방향분포 특성을 근사적으로 파악하는 것이 편리할 것이다. 따라서 본절에서는 지금까지 제안되어 온 파랑의 방향 파라미터(directional parameter)를 소개하고 그 특성을 비교하기로 한다.

#### 1) 방향파라미터(directional parameter)의 정의

Longuet-Higgins et al.(1963)은 식(3.78)로부터 두개의 방향파라미터를 정의하였다.

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left( \frac{m_2}{m_1} \right) \quad (3.94)$$

$$\theta_s = \{ 2(1 - \sqrt{m_1^2 + m_2^2}) \}^{\frac{1}{2}} \text{ (rad)} \quad (3.95)$$

여기서  $\bar{\theta}$ 는 평균파향(mean or peak direction),  $\theta_s$ 는  $\bar{\theta}$ 에 대한 방향분산도(r. m.s. spreading angle)를 나타낸다.

한편 Longuet-Higgins(1957)는 파향스펙트럼을 다음식과 같이 파수벡터 공간에서 표현하였다.

$$E(\vec{k}) = \frac{C_g}{2\pi k} S(f, \theta) \quad (3.96)$$

여기서  $C_g$ 는 군속도(group velocity)를 나타내며

$$\vec{k} = (k \cos \theta, k \sin \theta) = (l, m) \quad (3.97)$$

이다. 스펙트럼 모멘트는 식(3.96)로부터

$$M_{ps} = \int_{\vec{k}} E(\vec{k}) l^p m^s d\vec{k} \quad (3.98)$$

로 정의된다. Longuet-Higgins(1957)는 다음식으로 표시되는 방향파라미터를 도입하였다.

$$\theta_m = \tan^{-1} \left( \frac{\bar{m}}{\bar{l}} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{M_{01}}{M_{10}} \right) \quad (3.99)$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \quad (3.100)$$

여기서  $\theta_m$  = mean wave direction

$\theta_p$  = principal wave direction

한편  $\bar{l}$ 와  $\bar{m}$ 는 방향스펙트럼의 중심좌표로서

$$\bar{l} = M_{10} / M_{00} \quad (3.101)$$

$$\bar{m} = M_{01} / M_{00} \quad (3.102)$$

로 정의되며,  $\theta_m$ 은 원점으로부터 무게중심점의 방향을,  $\theta_p$ 는 r.m.s 파수가 최대가 되는 축의 방향을 나타낸다(Fig. 5.5). 위의 정의로부터  $\theta_m$ 과  $\theta_p$ 의 범위는 각각  $(-\pi, \pi)$ ,  $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 임을 알 수 있다. 또한 Longuet-Higgins(1957)는

불규칙 파랑장(random sea)의 방향분산도를 나타내는 long-crestedness 파라미터를 정의하였다.

$$\gamma = \frac{M_{20} + M_{02} - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}}{M_{20} + M_{02} + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}} \quad (3.103)$$

$\gamma$ 는 주방향과 그에 수직인 방향의 r.m.s. 파수비로 해석되며 방향집중도가 클수록 zero에, 무지향성이 강할수록 1에 가까워진다. 규칙파의 경우에는 평균 파향과 주파향은 일치하며 long-crestedness는 zero 이다.

한편 畠田(1981)은 파수공간에서 원점과 중심을 연결하는 선에 대한 파향 스펙트럼의 자승평균분산 거리(root mean square wave number)를 도입하여 평균분산각(mean spreading angle)을 정의하였다. Fig. 3.26에서 OG에 대한 자승평균 분산거리는

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{1}{M_{00}} \int_{\vec{k}} E(\vec{k}) \bar{PQ}^2 d\vec{k} \\ &= \frac{M_{01}^2 M_{20} - 2M_{01} M_{10} M_{11} + M_{10}^2 M_{02}}{M_{00} (M_{10}^2 + M_{01}^2)} \end{aligned} \quad (3.104)$$

로 표시된다. R은 파수의 차원을 갖고 있으므로 이를 평균파수로 나눈값으로 평균분산각을 다음식으로 정의한다.

$$\theta_k = \tan^{-1} \left( \frac{R}{\bar{k}} \right) = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{M_{00} (M_{01}^2 M_{20} - 2M_{01} M_{10} M_{11} + M_{10}^2 M_{02})}}{M_{10}^2 + M_{01}^2} \right] \quad (3.105)$$

$$\bar{k} = \sqrt{\bar{l}^2 + \bar{m}^2} \quad (3.106)$$

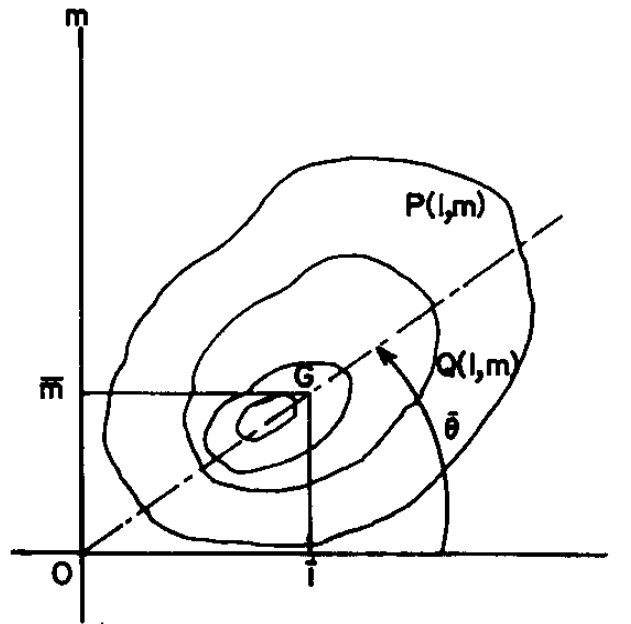


Fig. 3.26. Directional wave spectrum in wave number space.

또한 Isobe(1982)는 다음식으로 표현되는 방향집중도계수(directional concentration coefficient)를 제안하였다.

$$r' = \sqrt{\frac{M_{10}^2 + M_{01}^2}{M_{00} (M_{20} + M_{02})}} \quad (3.107)$$

위에서 언급한 방향파라터를 계산하기 위해서는 먼저 파향스펙트럼이 추정되어야 한다. 실제로 이는 시간이 많이 걸리고 번거로우므로 습田(1981)은 파동량의 시계열자료로부터 식(3.98)로 정의되는 스펙트럼 모멘트를 구하는 방법을 제안하였다.



$$M_{00}^* = E[\eta_t^2], M_{10}^* = E[\eta_t \eta_x], M_{01}^* = E[\eta_t \eta_y] \quad (3.108)$$

$$M_{20}^* = E[\eta_x^2], M_{11} = E[\eta_x \eta_y], M_{00}^* = E[\eta_y^2]$$

$$\tilde{M}_{00} = E[P^2], \tilde{M}_{10} = E[PU], \tilde{M}_{01} = E[PV] \quad (3.109)$$

$$\tilde{M}_{20} = E[U^2], \tilde{M}_{11} = E[UV], \tilde{M}_{02} = E[V^2]$$

여기서  $\eta_t, \eta_x, \eta_y$ 는 각각 수면변동의 시간과  $x, y$ 에 대한 미분이며,  $P, U, V$ 는 각각 압력, 수립자수평속도의  $xy$  성분을 나타낸다. 또한  $E[\cdot]$ 는 기대치를 의미한다. 스펙트럼이 narrow banded이면  $M_{pq}^*$ 와  $\tilde{M}_{pq}$ 로부터 구해지는 방향파라미터는  $M_{pq}$ 로부터 구해지는 방향파라미터에 근사한다.

## 2) 방향파라미터의 비교

이상적인 몇가지 형태의 파향스펙트럼을 설정하고, 이에 대한 각각의 방향파라미터를 구하여 그 결과를 비교하기로 한다.

### i) 규칙파(sinusoidal wave)

이 경우 파향스펙트럼은 다음식으로 주어진다.

$$S(f, \theta) = E_0 \delta(f - f_0) \delta(\theta - \theta_0) \quad (3.110)$$

여기서  $E_0, f_0, \theta_0$ 는 각각 규칙파의 에너지, 주파수, 파향을 나타낸다. 식(3.109)를 식(3.98)에 대입하면

$$M_{pq} = E_0 k_0^{p+q} \cos^p \theta_0 \sin^q \theta_0 \quad (3.111)$$

을 얻는다.

여기서  $k_0$ 는 규칙파의 파수이며 분산관계식으로부터 구해진다.

따라서 방향파라미터는  $\theta_m = \theta_p = \theta_k$ ,  $\gamma = \theta_k = 0$ ,  $\gamma' = 1$ 로 된다.

ii) 두개의 규칙파가 교차하는 경우

방향스펙트럼은 다음식으로 주어진다.

$$S(f, \theta) = E_1 \delta(f - f_1) \delta(\theta - \theta_1) + E_2 \delta(f - f_2) \delta(\theta - \theta_2) \quad (3.112)$$

한편 스펙트럼 모멘트는

$$M_{pq} = E_1 k_1^{p+q} \cos^p \theta_1 \sin^q \theta_1 + E_2 k_2^{p+q} \cos^p \theta_2 \sin^q \theta_2 \quad (3.113)$$

로 되며 방향파라미터는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_m = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_1 + \alpha \beta \sin \theta_2}{\cos \theta_1 + \alpha \beta \cos \theta_2} \quad (3.114)$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sin 2\theta_1 + \alpha \beta^2 \sin 2\theta_2}{\cos 2\theta_1 + \alpha \beta^2 \cos 2\theta_2} \quad (3.115)$$

$$r = \left[ \frac{1 + \alpha \beta^2 - \sqrt{1 + \alpha^2 \beta^4 + 2 \alpha \beta^2 \cos 2 \Delta \theta}}{1 + \alpha \beta^2 + \sqrt{1 + \alpha^2 \beta^4 + 2 \alpha \beta^2 \cos 2 \Delta \theta}} \right]^{1/2} \quad (3.116)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \left[ \frac{\sqrt{\alpha} (1 + \alpha) \beta |\sin \Delta \theta|}{1 + \alpha^2 \beta^2 + 2 \alpha \beta \cos \Delta \theta} \right] \quad (3.117)$$

$$r' = \left[ \frac{1 + \alpha^2 \beta^2 + 2 \alpha \beta \cos \Delta \theta}{(1 + \alpha)(1 + \alpha \beta^2)} \right]^{1/2} \quad (3.118)$$

여기서  $\alpha = E_2/E_1$ ,  $\beta = k_2/k_1$ ,  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 이다.

한편 식(3.114)와 식(3.115)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tan(\theta_m - \theta) = \frac{1 - \alpha\beta}{1 + \alpha\beta} \tan \delta \quad (3.119)$$

$$\tan(2\theta_p - 2\theta) = \frac{1 - \alpha\beta^2}{1 + \alpha\beta^2} \tan 2\delta \quad (3.120)$$

여기서  $\Theta = \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2)$ 로 중앙파향(median wave direction)이며,  $\delta = \frac{1}{2}(\theta_2 - \theta_1) > 0$ 이다. 식(3.119)와 식(3.120)으로부터 평균파향은 항상  $\theta_1 \leq \theta_m \leq \theta_2$ 이나, 주파향은  $2\delta < 90^\circ$ 일때는  $\theta_1 \leq \theta_p \leq \theta_2$ 이며,  $2\delta > 90^\circ$ 일때는  $\Theta - 90^\circ < \theta_p < \theta_1$  또는  $\theta_2 \leq \theta_p < \Theta + 90^\circ$ 의 범위를 갖는 것을 알 수 있다(合田, 1981). 즉 두 파랑의 협각이  $90^\circ$ 보다 커지게 되면 주 파향은 대표파향으로서 부적절하다는 것을 알 수 있다. 이는 주파향이 2차 모멘트로 정의되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 다시 말해서 2차 모멘트로는 파랑의 진행, 역행을 판별할 수 없기 때문이다.

Fig. 3.27(a)는 중앙파향과 주파향이 일치하지만, Fig. 3.27(b)에서는 주파향은 중앙파향과  $90^\circ$ 만큼의 차이가 생긴다. 즉 주파향은 (a), (b) 어느 경우에서나 파봉의 밀도가 최대인 방향을 나타낸다. Fig. 3.28은 교차각(crossing angle)에 대한 각 방향파라미터의 변화를 보여준다. 이 그림에서 파랑에너지 비와 파수 비는 모두 1.0의 경우이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 교차각이  $90^\circ$ 보다 큰 경우에 주파향은 음으로 계산되고 있으며, long-crestedness는 오히려 파향의 분산도가 증가하는 데도 감소하고 있다. 또한 평균분산각은 교차각이  $180^\circ$  부근에서 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 한편 방향 집중도계수는

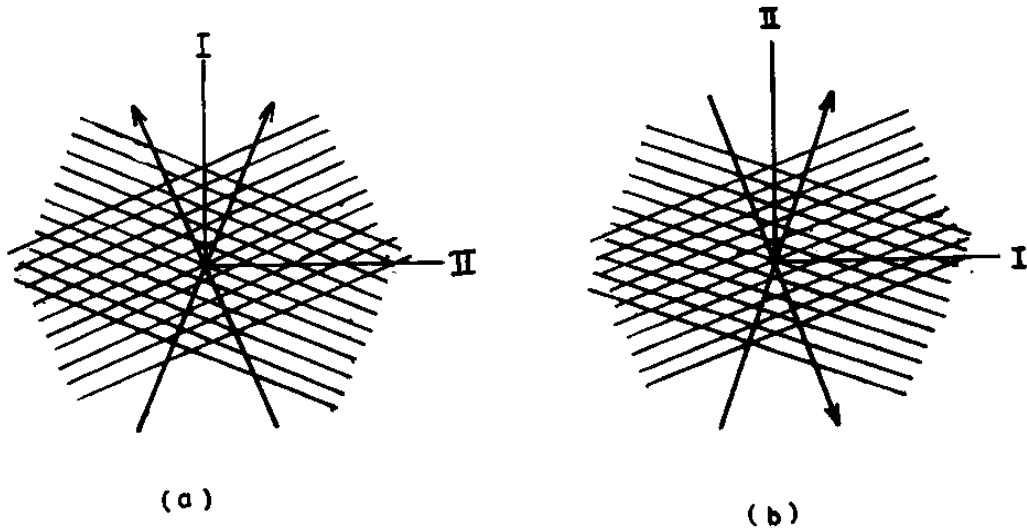


Fig. 3.27. Mean and principal directions in a two-wave system.  
 (a)  $2\delta < 90^\circ$  (b)  $2\delta > 90^\circ$

교차각이 커짐에 따라 단조롭게 감소함을 알 수 있다. 그러므로 이상적인 경우에  $\gamma'$ 가 파랑의 방향분산을 나타내는 지표로서 가장 적당하나, 실제로 수면변동 또는 유속변동으로부터 구하여지는 제1차 모멘트는 noise에 매우 민감하기 때문에 평균과향과 평균분산각으로 파랑의 방향분산도를 나타내는 것이 좋다(Isobe, 1982).

iii) 단봉형 방향분포함수

방향분포함수가 식(3.91)의 Mitsuyasu 형으로 주어지는 경우이다.

$$S(f, \theta) = E_0 \delta(f - f_0) N(S) \cos^{2s} \frac{\theta}{2} \quad (3.121)$$

$$M_{pg} = E_0 k_0^{p+q} N(S) \int_0^{2\pi} \cos^{2s} \frac{\theta}{2} \cos^p \theta \sin^q \theta d\theta \quad (3.122)$$

식(3.122)로부터 방향파라미터를 구하면 다음과 같다.

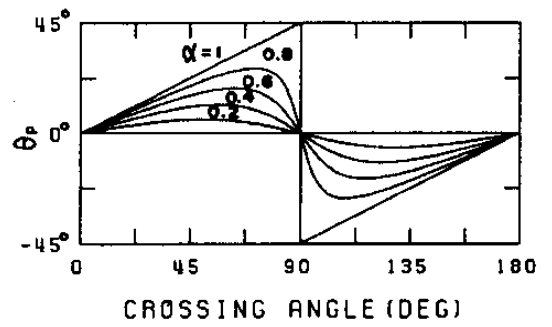
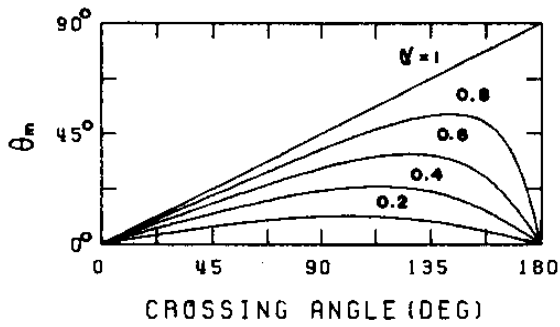
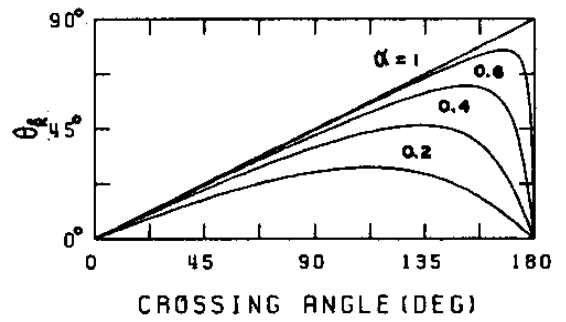
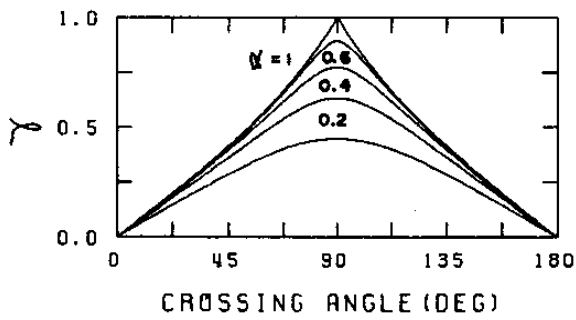
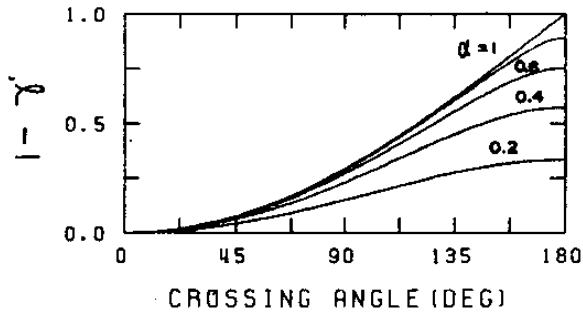


Fig. 3.28. Wave directional parameters of a two-wave system as a function of crossing angle.

$$\gamma = \sqrt{\frac{2s+1}{s^2+s+1}} \quad (3.123)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \sqrt{\frac{(s+1)(2s+1)}{s^2(s+2)}} \quad (3.124)$$

$$\gamma' = \frac{s}{s+1} \quad (3.125)$$

한편  $\cos^{2n} \theta$ 형의 방향분포함수에 대하여는

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2n+1}} \quad (3.126)$$

$$\theta_k = \tan^{-1} \left[ \frac{2n+1}{2\sqrt{2}\sqrt{n+1}} \left\{ \frac{\Gamma(n+\frac{1}{2})}{\Gamma(n+1)} \right\}^2 \right] \quad (3.127)$$

$$\gamma' = \frac{2}{2n+1} \left\{ \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(n+\frac{1}{2})} \right\}^2 \quad (3.128)$$

를 얻는다.

Fig. 3.29는 단봉형 방향스펙트럼의 경우 각 방향파라미터의 방향집중계수에 대한 변화를 보여준다. 이 그림에서 보는 바와 같이  $\gamma'$ 는 다른 파라미터에 비하여 방향집중계수가 증가함에 따라 급격히 변화함을 알 수 있다.

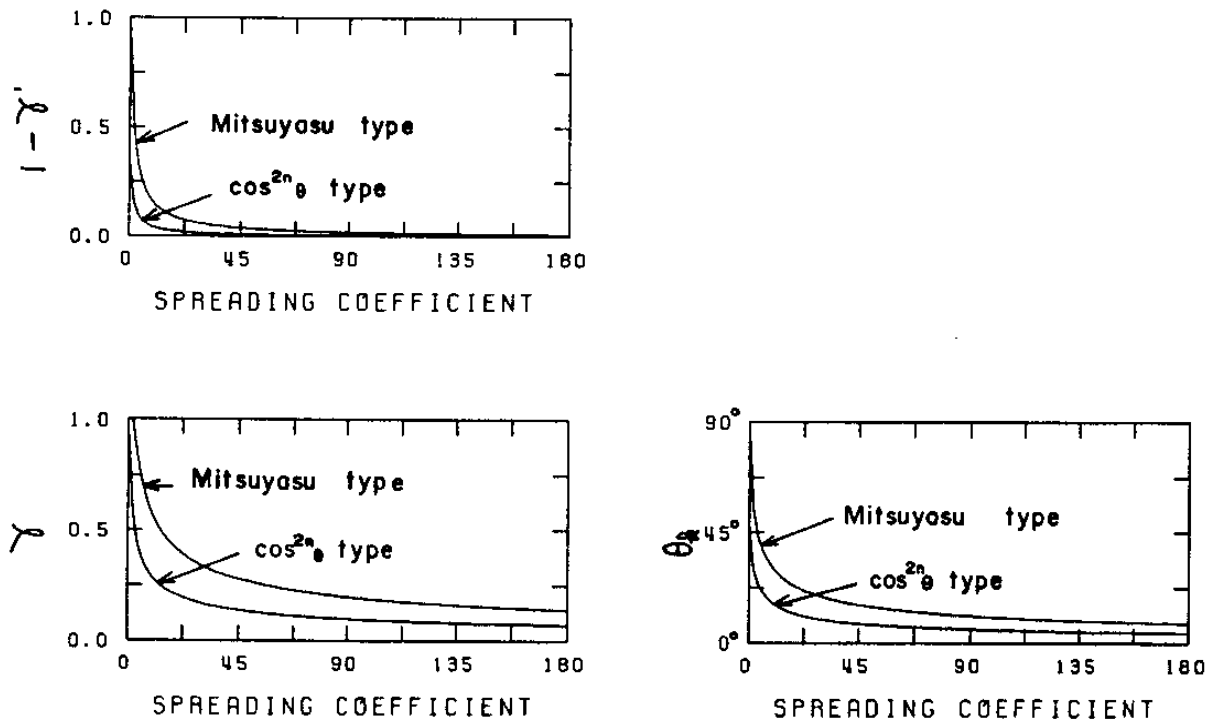


Fig. 3.29. Wave directional parameters of a unimodal spreading as a function of spreading coefficient.

### 3.3.4 관측자료의 분석

앞에서 수립된 두 개의 방향 스펙트럼 추정모델을 현장자료에 적용하였다. 파랑의 관측은 Sea Data사의 PUV 계기를 사용하여 수중 압력(wave induced subsurface pressure fluctuation)과 수립자 속도의 수평성분 (horizontal components of wave induced subsurface velocity fluctuation)을 관측하였다. 관측위치는 부산 직할시 영도구 태종대 앞이다. PUV 관측은 해운항만청에서 실시하고 있으며 관측자료는 on-line system으로 전송되고 있다. PUV 계기는 매 3시간마다 17분간 1.0초 간격으로 관측을 실시한다. Fig. 3.30은 1990.4.11~1990.4.13의 관측자료로부터 유의파고와 스펙트럼 peak 주기를 시계열로 나타낸 것이다. 최대파랑은 4월 12일 21시에 나타났으며, 유의파고는 2.86m, 주기는 8.0sec로 나타났다.

Fig. 3.31은 압력자료로부터 구한 주파수스펙트럼이며, Fig. 3.32는 주기 8.0 sec에 해당하는 파랑에너지의 방향분포를 Longuet-Higgins법과 MEP법으로 추정된 결과이다. Fig. 3.30에서 보는 바와 같이 peak 주기는 5.0 - 8.0sec에 분포하며, 특히 유의파고가 2.0m 이상인 경우에는 8.0sec로 나타났다. 한편 peak 주파수에 대한 방향스펙트럼은 쌍봉형 분포를 보여주고 있으며, 에너지가 최대인 파향은 SW 이다.

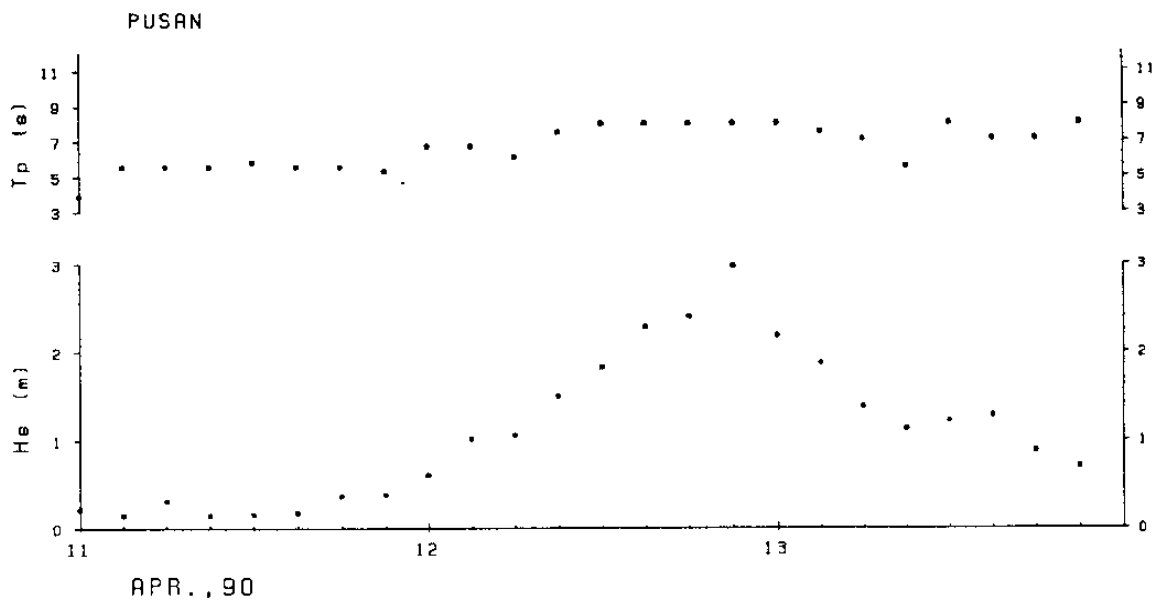


Fig. 3.30. Time series plot for significant wave heights and periods from pressure data at Pusan.

2차년도 사업에서는 1차년도의 LHM 모델 수립에 이어 MEP 모델을 수립하였다. 그러나 이 두 모델은 한 점에서 여러개의 파동량을 동시 관측했을 때는 매우 유용한 방법이나, 여러 지점에 동시 관측한 파동량에는 적용할 수 없는 제한이 있다. 따라서 3차년도에는 이러한 제한점을 극복한 최우도(maximum likelihood method)법과 Bayesian법등에 관하여 연구 검토하고, 이들에 의한 파향스펙트럼 추정 모델을 수립하여 실제 설계에 응용할 수 있는 바탕을 마련하는 방향으로 역점을 두어 추진할 것이다.



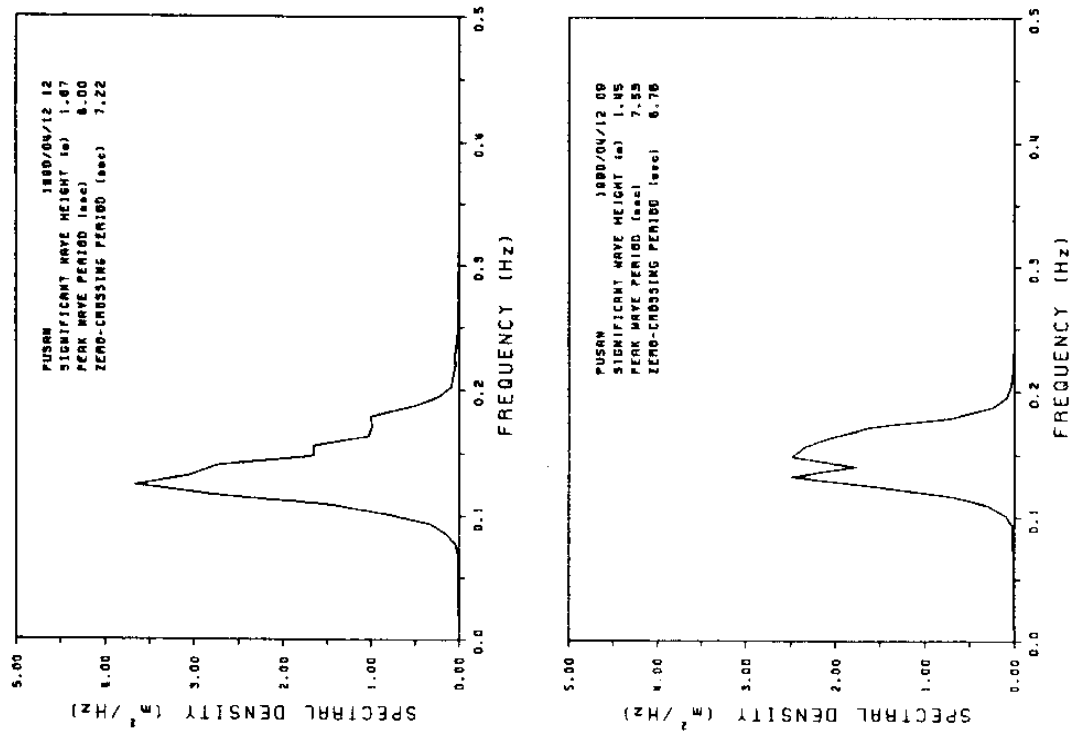
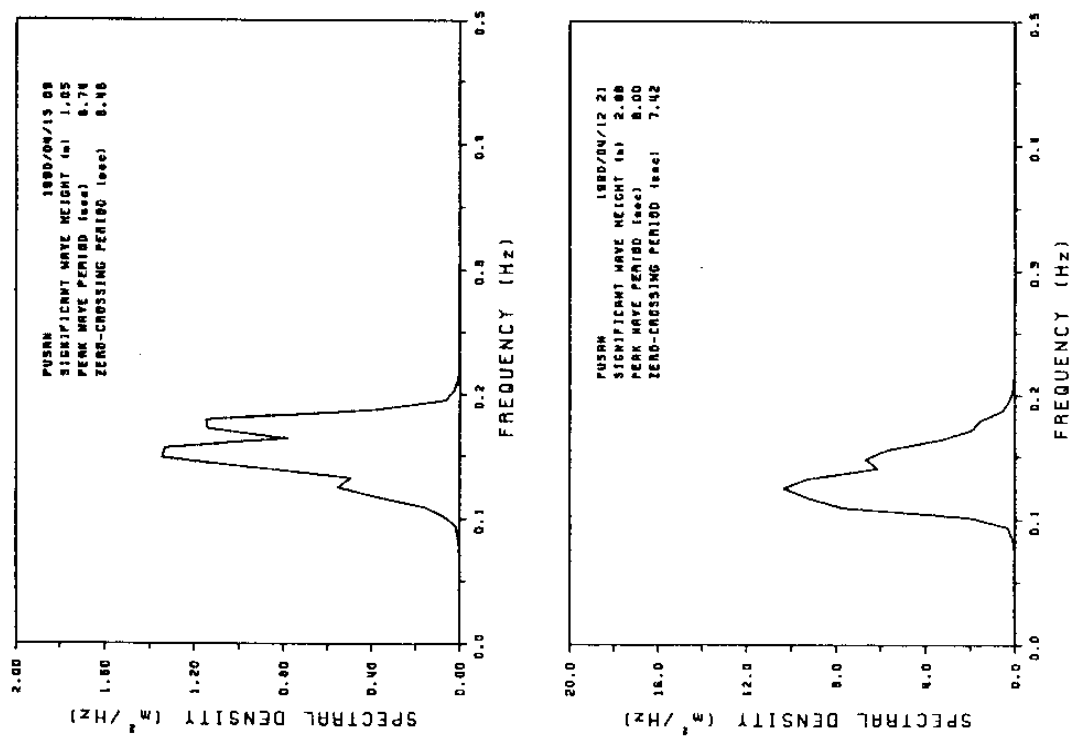


Fig. 3.31. Frequency spectra from pressure data at Pusan.

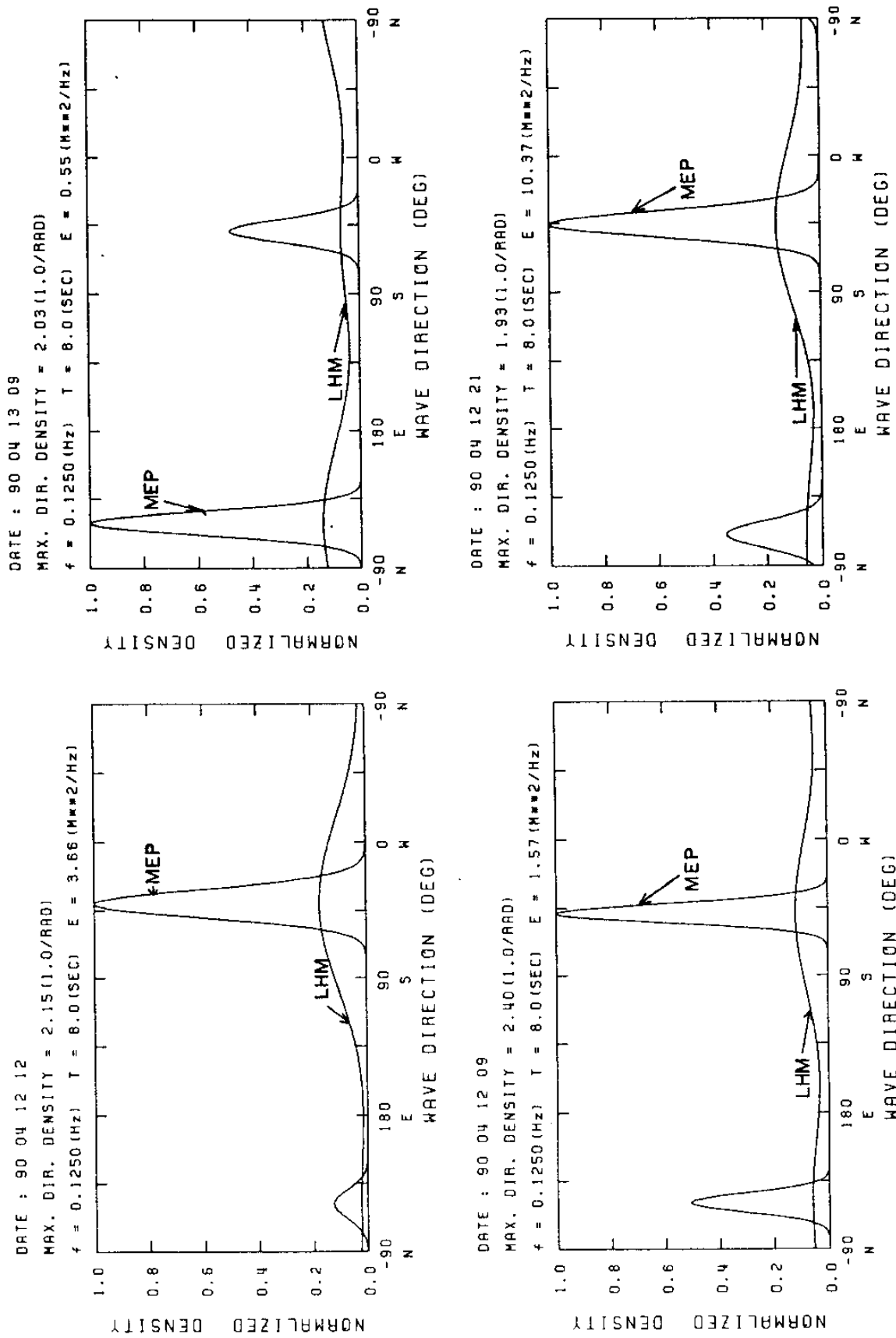


Fig. 3.32. Directional wave distributions for selected frequencies by LHM and MEP.

## 제 4 장 극치통계

### 제1절 확률가중적률법

수공구조물 계획, 설계에 대한 기본량을 정하는 데에는 해당 data를 수집하여 그 data에 확률통계학적 관점에서 일정한 평가를 한 후 소정의 재현기간에 대응하는 확률값을 구해야 하는데, 이와 같이 행하는 것을 빈도해석이라고 부른다. 우선 빈도해석을 실시하기 위하여 data에 적합한 모집단의 분포로서 무엇을 선택해야 하는가와 분포가 선택된 경우에도 그 모수(parameter)를 어떻게 추정해야 하는가가 시계열 해석에 있어 통계수법상의 중요한 문제이다. 다시말하면 data 수가 제한되어 있는 가운데 어떻게 합리적으로 모집단의 확률특성을 추정하는가에 대한 문제라고 할 수 있다. 그 때문에 무엇을 합리적으로 생각하는가에 따라 각종 파라미터 추정방법이 제안되고, 또한 그 해가 생겨나고 있다.

본 절에서는 probability weighted moment(PWM:확률가중적률)법으로 모집단의 분포에 대한 parameter를 추정하는 방법을 설명하기로 한다. PWM법은 1979년 Greenwood 등에 의해 제안된 것으로 parameter 추정기준으로서 통상적률(conventional moment) 대신에 확률로서 가중한 적률(probability weighted moment)을 이용한 새로운 수법이다. 이 방법은 각종의 이점이 있는데 inverse form (확률변수가 explicit하게 비초과 확률로 표시되는 형)으로 표시할 수 있는 분포의 적용은 용이하지만, inverse form으로 표시할 수 없는 분포에는 적용이 곤란한 난점이 있다. 본 보고서에서는 전자에 속하는 대표적인 함수로서 Gum-

bel 분포, Weibull 분포를 취급하였고, 후자에 속하는 함수로서 정규분포, 3모수 대수정규분포에 대하여 그 해와 해의 특징을 설명하였다.

#### 4.1.1 PWM 법의 내용

PWM법은 적률법(moment method)의 일종으로 통상적률이 변수  $x$ 의 원점 또는 평균치에 대하여 모멘트를 취하지만, PWM은 비초과확률  $F(x)$ 의 누승으로 가중한 적률로 다음과 같이 정의된다.

$$M_{l,j,k} = E [X^l F^j (1 - F)^k] = \int_0^1 x^l F^j (1 - F)^k dF \quad (4.1)$$

여기서,  $E$ 는 기대치,  $F(x) = \text{Prob}(X < x)$ 이고,  $l, j, k$ 는 양의 정수이다. 누적분포함수  $F = F(x)$ 의 역함수가  $x = x(F)$ 로 표기 가능할때  $M_{l,j,k}$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$M_{l,j,k} = \int_0^1 \{x(F)\}^l F^j (1 - F)^k dF \quad (4.2)$$

$F$ 에 대상으로 하는 확률분포함수를 대입하면 정해진  $l, j, k$ 의 조합에 대하여 식(4.1), (4.2)의 적분이 가능하며, 적분결과는  $F$ 의 모수에 대한 함수로 표현된다. 따라서 미지 모수와 동등한 수의  $l, j, k$ 의 조합에 대한 PWM을 구하면 미지 모수에 대한 연립방정식이 얻어져 그 해로서 모수를 구할 수 있는데, 이와 같이 모수를 추정하는 방법이 PWM 법이다. 상기 방법을 수행하기 위해서는 우선  $l, j, k$ 의 조합을 결정하지 않으면 안된다. PWM법으로는  $l = 1, j = 0$  또는  $l = 1, k = 0$  어느쪽이든 사용하기 용이한 쪽을 이용한다. 따라서  $x$ 에 대한 차수는 항상 1차이고  $F$  혹은  $(1 - F)$ 의 어느 한쪽은 제외된다.

본 보고서에서는  $j = 0$  이거나  $k = 0$ 의 경우 둘다 이용하여 이론을 전개했는데,  $k = 0$  일때를 설명하면 이용된 PWM의 모수가 2 개일 때는  $j = 0, 1$ 이고 3개일때는  $j = 0, 1, 2$ 로 모수가 증가됨에 따라 PWM을 고차까지 이용하게 된다. 또한  $k = 0$  일때와  $j = 0$  일때 PWM의 표기는 각각

$$M_j = M_{1,j,0} \quad (4.3)$$

$$M_{(k)} = M_{1,0,k} \quad (4.4)$$

로 간략화하는 것이 통례이다. 확률가중적분(PWM)

$$M_j = \int_0^1 x F^j dF \quad (4.5)$$

$$M_{(k)} = \int_0^1 x (1-F)^k dF \quad (4.6)$$

과 통상적분( $M_r$ )

$$M_r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad (4.7)$$

과는 크나큰 차이가 있는데, 그 차이는 식(4.7)의 적분에는 관측치  $x$ 의  $r$ 승 operation이 포함되어 있기 때문에 고차일 때는 관측치의 오차나 이상치를 강조해 증폭되지만, 식(4.5)와 (4.6)의 PWM에서는 그 operation이 비초과확률  $F$ 에 대하여 있기 때문에 오차나 이상치에 대한 sampling error의 증폭이 작게 된다고 말할 수 있다. 그러나 이 효과는 적분의 정의형태로부터 추정된 것으로 그 실체에 대하여 엄밀한 검토는 지금까지 되어 있지 않다.

$j, k$ 가 양의 정수일때  $M_{l,a,k}$ 와  $M_{l,j,0}$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned}
 M_{l,0,k} &= E [X^l (1-F)^k] = \sum_{j=0}^k E \left[ \binom{k}{j} (-1)^j X^l F^j \right] \\
 &= \sum_{j=0}^k \left\{ \binom{k}{j} (-1)^j E [X^l F^j] \right\} \\
 &= \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} (-1)^j M_{l,j,0}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

위와 같은 방법으로

$$M_{l,j,0} = \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} (-1)^k M_{l,0,k} \tag{4.9}$$

가 된다.

더욱 data가 주어진 경우 그 data에 적합한 모수를 추정하기 위해서는 우선 주어진 data로부터 표본의 PWM을 산정한 후 연립방정식에 대입하여 모수를 구하지 않으면 안된다. 즉 PWM에 의한  $M_j$ 의 추정량  $\hat{M}_j$ 나  $M(k)$ 의 추정량  $\hat{M}(k)$ 가 필요하다. 이때 가장 간단한 방법은  $x_i$ 의 발생확률에 적당한 plotting position  $F_i$ 를 가정하여

$$\hat{M}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i F_i^j \tag{4.10}$$

으로 하는 방법이다.

이 경우에 plotting position 공식을 무엇으로 선택하는냐가 중요한 문제이다. 그런데 보다 합리적인 방법으로 아래와 같은 방법을 Landwehr(1979) 등이

유도하였는데, 그것은  $M_{l,j,k}$ 가  $E[X'_{j+1, k+j+1}]$ 에 비례한다는 관계로부터

$$M_{l,j,k} = B(k+1, j+1) E[X'_{j+1, k+j+1}] \quad (4.11)$$

을 이용했다. 여기서  $B(\cdot, \cdot)$ 는 Beta 함수를 나타내고  $X'_{j+1, k+j+1}$ 은  $N(=\infty)$ 개로 된 모집단에서 임의로 추출한  $k + j + 1$  개의 표본에서 크기가 작은 것부터  $j + 1$ 번째 순서통계량의  $l$ 차 적률이다. 위 식(4.11)을 유도하면 다음과 같다.

$$E[X'_{j+1, k+j+1}] = \sum_{i=1}^N x_i^l \frac{{}^{i-1}C_j {}^{N-i}C_k}{{}^N C_{k+j+1}} \quad (4.12)$$

여기서 조합을 순열로 바꿔쓰고( ${}^n C_r = n! / r!(n-r)!$ ), Beta 함수와 Gamma 함수의 다음과 같은 성질을

$$B(j+1, k+1) = \int_0^1 F^j (1-F)^k dF = \frac{\Gamma(j+1)\Gamma(k+1)}{\Gamma(j+k+2)} \quad (4.13)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt = \frac{\Gamma(x+1)}{x}, \quad x > 0 \quad (4.14)$$

$$\Gamma(n) = (n-1)! \quad (4.15)$$

이용하면 위 식(4.12)는 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{B(j+1, k+1)} \sum_{i=1}^N x_i^l \frac{{}^{i-1}P_j {}^{N-i}P_k}{{}^N P_{k+j+1}} \quad (4.16)$$

그런데 식(4.16)과 기대치 정의로부터 각각 다음과 같은 식을

$$E(1) = \frac{1}{B(j+1, k+1)} \sum_{i=1}^N \frac{{}^{i-1}P_j {}^{N-i}P_k}{{}^N P_{k+j+1}} \quad (4.17)$$

$$E(1) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (4.18)$$

얻을 수 있고, 또한 식(4.13)을 이용하면 식(4.19)를 얻는다.

$$B(j+1, k+1) = \sum_{i=1}^N \frac{{}^{i-1}P_j \cdot {}^{N-i}P_k}{{}^N P_{k+j+1}} = \int_0^1 F^j (1-F)^k dF \quad (4.19)$$

따라서 식(4.16)은

$$\begin{aligned} E[X_{j+1, k+j+1}^l] &= \frac{1}{B(j+1, k+1)} \int_0^1 x^l F^j (1-F)^k dF \\ &= \frac{M_{l, j, k}}{B(j+1, k+1)} \end{aligned} \quad (4.20)$$

가 되어 식(4.11)이 얻어진다.

$l=1, j=0$ 일때 위식(4.11)은

$$M_{(k)} = M_{1,0,k} = B(1, k+1) E[X_{1, k+1}] \quad (4.21)$$

과 같고 표본의 크기가  $n$ 이고,  $k$ 가 양의 정수일때  $M(k)$ 는 다음과 같이 구해진다.  $n$ 개의 관측치를 작은 것부터 순서대로 나열하여 가장 작은 값을  $x_1$ , 가장 큰 값을  $x_n$ 으로 하면 이중 크기가  $k+1$ 인 subsample을 형성할 수 있는 총수는

$$S = {}^n C_{k+1} = \binom{n}{k+1}$$



이고,  $S$ 개의 subsample 중 가장 작은 값  $x_1$ 를 포함할 총수는

$$S_1 = \binom{n-1}{k}$$

이다. 마찬가지로  $S$ 개의 subsample 중  $x_2$ 가 가장 작은 값 일때  $x_2$ 를 포함할 총수는

$$S_2 = \binom{n-2}{k}$$

이다. 일반적으로 원래의 sample의 크기  $n$ 으로부터 크기가  $k + 1$  인 subsample을  $S$ 개 추출할 경우 그  $S$ 개 중  $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}$ 은 배제하고  $x_i$ 가 가장 작은 값으로서 이 값을 포함할 총수는 다음과 같다.

$$S_i = \binom{n-i}{k}$$

여기서  $i > n - k - 1$  이면  $S_i = 0$ 이다.

$n$ 개의 sample로부터  $k + 1$  개의 sample 크기를 갖는 subsample을 추출하였을때  $x_i$ 가 가장 작은 값을 갖을 확률은

$$\frac{S_i}{S} = \binom{n-i}{k} / \binom{n}{k+1} \quad (4.22)$$

이고, 따라서  $n$ 개의 sample 크기로부터 추출한 표본의 크기가  $k + 1$ 인 subsample에서 일차 순서통계량(first-order statistic)의 추정은

$$E[X_{1, k+1}] = \sum_{i=1}^n x_i \binom{n-i}{k} / \binom{n}{k+1} \quad (4.23)$$

이다. 그리고 식(4.21)로부터  $M(k)$ 의 추정량  $\hat{M}(k)$ 는 식(4.24)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}\hat{M}(k) &= \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^n x_i \binom{n-i}{k} / \binom{n}{k+1} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \binom{n-i}{k} / \binom{n-1}{k} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} x_i \binom{n-i}{k} / \binom{n-1}{k}\end{aligned}\quad (4.24)$$

또한  $l = 1, k = 0$ 일때는

$$M_j = B(1, j+1) E[X_{j+1, j+1}] \quad (4.25)$$

이 되어, 그 추정량  $M_j$ 를 구하기 위하여는  $E[X_{j+1, j+1}]$  즉  $N(=\infty)$ 개로 된 모집단에서 추출한 임의의  $j + 1$ 개 표본의 최대치에 대한 기대치의 추정량이 필요하다. 여기에서는 크기가  $n$ 인 표본의 순서통계량  $x_1, x_2, \dots, x_n$  중에서 임의의  $j + 1$  ( $n > j + 1$ )개를 추출할때 그 최대치가  $x_i$ 인 확률은  $\binom{i-1}{j} / \binom{n}{j+1}$ 이므로

$$E[X_{j+1, j+1}] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i \binom{i-1}{j} / \binom{n}{j+1} \quad (4.26)$$

인 관계를 이용하면 식(4.25)에서  $M_j$ 의 추정량  $\hat{M}_j$ 는

$$\hat{M}_j = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{(i-1)(i-2)\dots(i-j)}{(n-1)(n-2)\dots(n-j)} & (j \geq 1) \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i & (j=0) \end{cases} \quad (4.27)$$

로 된다.

이와 같이 표본의 크기가  $n$ 개 일때 작은 것부터의 순서통계량  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 을 만들면 식(4.24)로부터  $M(k)$ 의 추정량인  $\hat{M}(k)$ 를 구하거나, 또는 식(4.10) 혹은 식(4.27)로부터  $M_j$ 의 추정량인  $\hat{M}_j$ 를 구해 그것을 모수의 연립방정식에 대입함으로써 모수에 대한 PWM 해가 얻어진다.

#### 4.1.2 inverse form이 가능한 분포

$x = x(F)$ 와 같이 inverse form의 형태로 표현할 수 있는 분포 함수 중 극치통계 분석에 가장 널리 쓰이고 있는 Weibull 분포와 Gumbel 분포에 대해  $F = F(x)$  및  $x = x(F)$ 와 같은 해석적인 형태를 Table 4.1에 나타내었다. 그리고 Table 4.2에 두 분포에 대한 통상적률( $M_{l,n,o}$ )과 확률가중적률( $M_{l,n,k}, M_{l,j,o}$ )을 표시하였고, Table 4.3에 각 분포의 parameter를 모멘트로 나타내었다. Table 4.2에서 보듯이 확률가중적률과 분포의 parameter 간의 관계가 통상적률과 파라미터간의 관계보다 더 간단한 구조를 이루고 있는데, 이는 통상적률이  $x$ 에  $r$ 승을 취하는 반면 확률가중적률은  $x$ 에 1승만을 취하고 있기 때문이다. 그리고 Table 4.2와 4.3에서 보듯이 Weibull 분포의 parameter는 확률가중적률의 함수로서 explicit하게 나타낼 수 있지만 통상적률의 함수로서는 explicit하게 정의될 수 없다. 이 분포의 확률가중적률에 대한 parameter는  $m$ (lower bound)에 따라  $m$ 을 알고 있는 경우와  $m$ 을 모르는 경우로 분류하여 나타낼 수 있다.

Gumbel 분포에서의 확률가중적률에 의한 파라미터 산정은  $M_{l,o,k}$  보다  $M_{l,j,o}$ 의 형태를 취하는 것이 간편하다. 식(4.9)에 의해  $M_{1,1,0} = M_{1,0,0} - M_{1,0,1}$ 로 표현할 수 있기 때문에 Table 4.3에서는  $M(k)$ 의 함수로 나타내었다. Gumbel 분포의 parameter는 통상적률과 확률가중적률의 함수로서 explicit하게 정의될

Table 4.1 Distribution functions

Distribution	$x$	$F$	Range of $x$
Weibull	$m + a[-\ln(1 - F)]^{1/b}$	$1 - \exp\left[-\left(\frac{x - m}{a}\right)^b\right]$	$m$ to $\infty$
Gumbel	$m - a \ln[-\ln F]$	$\exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x - m}{a}\right)\right]\right\}$	$-\infty$ to $\infty$

Table 4.2 Moment expressions

Distribution	Probability Weighted Moments $M_{1,j,k}$ (real $j, k \geq 0$ )	Conventional Moments $M_{l,0,0}$ (integer $l \geq 0$ )
Weibull	$M_{1,0,k} = \frac{m}{1+k} + \frac{a\Gamma(1+1/b)}{(1+k)^{1+1/b}}$	$\sum_{s=0}^l \binom{l}{s} m^{l-s} a^s \Gamma[(b+s)/b]^*$
Gumbel	$M_{1,j,0} = \frac{m}{1+j} + \frac{a\{\ln(1+j) + \epsilon\}}{1+j} \dagger$	$d^l [e^{\theta m} \Gamma(1 - a\theta)] / d\theta^l  _{\theta=0} \dagger$

[주] \* $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma function  
 $\dagger d(\cdot)/d\theta |_{\theta=0}$ 는  $\theta=0$ 에서  $l$ 차 도함수  
 $\dagger \epsilon$ 는 0.5772 (Euler 상수)

Table 4.3 Parameter expressions

Distribution	Parameter	Using Probability Weighted Moments $M_{(k)}$	Using Conventional Moments $M_{l,0,0}$
Weibull	$m = 0$	0	cannot be expressed explicitly
	$a$	$M_{(0)}/\Gamma\{\ln[M_{(0)}/M_{(1)}]/\ln(2)\}^*$	
	$b$	$\ln(2)/\ln[M_{(0)}/2M_{(1)}]$	
	$m \neq 0$	$4\{M_{(2)}M_{(0)} - [M_{(1)}]^2\}/\{4M_{(0)} + M_{(0)} - 4M_{(1)}\}$	
	$a$	$\{M_{(0)} - m\}/\Gamma\left[\ln\left(\frac{M_{(0)} - 2M_{(1)}}{M_{(1)} - 2M_{(2)}}\right)/\ln(2)\right]$	
	$b$	$\ln(2)/\ln\left(\frac{M_{(0)} - 2M_{(1)}}{2(M_{(1)} - 2M_{(2)})}\right)$	
Gumbel	$m$	$M_{(0)} - \epsilon a \dagger$	$M_{1,0,0} - \epsilon a$
	$a$	$\{M_{(0)} - 2M_{(1)}/\ln(2)\}$	$\{6[M_{2,0,0} - (M_{1,0,0})^2]\}^{1/2}/\pi$

수 있다. 그리고 통상적률과 평균( $\mu$ ) 및 분산( $\sigma$ )과의 관계를 이용하여 모멘트법으로 분포의 parameter를 다음식에 의해 산정한다.

$$M_{1,0,0} = \mu \quad (4.28)$$

$$M_{2,0,0} = \sigma^2 + \mu^2 \quad (4.29)$$

#### 4.1.3 inverse form이 불가능한 분포

지금부터는 inverse form으로 표현할 수 없는 분포함수인 정규분포, 3모수 대수정규분포의 PWM 해석해를 제시하기로 한다.

##### 1) 정규분포의 PWM 해

정규분포

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right\} dt \quad (4.30)$$

의 PWM 해는 결론적으로 다음과 같다.

$$\mu = M_0 \quad (4.31)$$

$$\sigma = \sqrt{\pi} (2M_1 - M_0) \quad (4.32)$$

이 공식을 이용하여 정규분포의 parameter  $\mu$ ,  $\sigma$ 를 추정하는 데에는 주어진 표본으로부터 식(4.10) 혹은 (4.27)에 의해  $M_0$ ,  $M_1$ 을 계산한 후 식(4.31), (4.32)의  $M_0$ ,  $M_1$ 에 대입하여 구한 것을  $\mu$ ,  $\sigma$ 로 하면 된다.

$$M_0 = \int_0^1 x dF = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \mu \quad (4.33)$$

으로부터 식(4.31)은 명확하다.

$$M_1 = \int_0^1 xF dF = \int_{-\infty}^{\infty} xF(x) f(x) dx \quad (4.34)$$

여기서  $z = (x - \mu)/\sigma$ 로 놓으면

$$\begin{aligned} M_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} (\sigma z + \mu) \Phi(z) \phi(z) dz = \sigma \int_{-\infty}^{\infty} z \Phi(z) \phi(z) dz \\ &\quad + \mu \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(z) \phi(z) dz = \sigma I_1 + \mu I_2 \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} z \Phi(z) \phi(z) dz = -\phi(z) \Phi(z) \Big|_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} \phi^2(z) dz = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(z) \phi(z) dz = \frac{1}{2} \Phi^2(z) \Big|_{-\infty}^{\infty} = \frac{1}{2} \dots \dots \dots \quad (4.37)$$

따라서

$$M_1 = \left( \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} + \mu \right) / 2 \dots \dots \dots \quad (4.38)$$

로 되어 식(4.33)을 식(4.38)에 대입하면 식(4.31), (4.32)가 구해진다.

여기서  $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포 함수이고,  $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 밀도함수이다.

## 2) 3모수 대수정규분포와 PWM 해

### 3모수 대수정규분포

$$F(x) = \int_m^x \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi} (t-m)} dt$$

$$\cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(t-m) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right\} dt \dots\dots\dots (4.39)$$

의 PWM 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left\{ \Psi \left( \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right) - \frac{1}{3} \right\} / \left\{ \Phi \left( \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right) - \frac{1}{2} \right\} \\ & = \left( M_2 - \frac{M_0}{3} \right) / \left( M_1 - \frac{M_0}{2} \right) \dots\dots\dots (4.40) \end{aligned}$$

$$m = M_0 \frac{\Phi \left( \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right) - (M_1 / M_0)}{\Phi \left( \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right) - 1/2} \dots\dots\dots (4.41)$$

$$\mu = \ln(M_0 - m) - \frac{\sigma^2}{2} \dots\dots\dots (4.42)$$

여기서

$$\Psi(x) = \int_{-\infty}^x 2\Phi \left( \frac{t}{\sqrt{3}} \right) d\Phi(t) \dots\dots\dots (4.43)$$

공식의 이용방법은 정규분포에 대한 경우와 동일하지만 식(4.40)의  $\sigma$ 에 대하여는 explicit하게 주어지지 않기 때문에 그의 추정엔 축차계산 혹은 근사식의 이용이 필요하다.

$F(x) = \Phi((\ln(x-m) - \mu)/\sigma)$  이기 때문에

$$F(x) = \Phi((\ln(x-m) - \mu) / \sigma)$$

$$\begin{aligned} M_j &= \int_0^1 x F^j dF = \int_m^\infty x \Phi^j((\ln(x-m) - \mu) / \sigma) \\ &\quad \cdot \varphi(\ln(x-m) - \mu) / \sigma dx \dots\dots\dots (4.44) \end{aligned}$$

여기서  $z = (\ln(x-m) - \mu)/\sigma$ 로 놓으면

$$\begin{aligned}
 M_j &= \int_{-\infty}^{\infty} (\exp(\mu + \sigma z) + m) \Phi^j(z) \varphi(z) dz \\
 &= \exp(\mu) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \Phi^j(z) \varphi(z) dz \\
 &\quad + m \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^j(z) \varphi(z) dz = \exp(\mu) I_j + \frac{m}{j+1}
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

3모수 대수정규분포의 모수추정에는  $M_0, M_1$  및  $M_2$ 가 필요하므로  $I_0, I_1$  및  $I_2$ 를 순차적으로 구해야 한다.

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \varphi(z) dz = \exp(\sigma^2/2) \tag{4.46}$$

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \Phi(z) \varphi(z) dz \tag{4.47}$$

식(4.47)의 양변을  $\sigma$ 로 미분한다.

$$\begin{aligned}
 \frac{dI_1}{d\sigma} &= \int_{-\infty}^{\infty} z \exp(\sigma z) \Phi(z) \varphi(z) dz \\
 &= -\varphi(z) \exp(\sigma z) \Phi(z) \Big|_{-\infty}^{\infty} \\
 &\quad + \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(z) \exp(\sigma z) \Phi(z) dz \\
 &\quad + \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(z) \exp(\sigma z) \varphi(z) dz \\
 &= \sigma I_1 + \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \varphi^2(z) dz
 \end{aligned} \tag{4.48}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \varphi^2(z) dz = \exp\left(\frac{\sigma^2}{4}\right) / 2\sqrt{\pi} \tag{4.49}$$

따라서  $I_1$ 은 미분방정식



$$\frac{dI_1}{d\sigma} = \sigma I_1 + \exp\left(\frac{\sigma^2}{4}\right) / 2\sqrt{\pi} \quad (4.50)$$

의 해로서 구해진다.

$\sigma = 0$  일때는

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(z)\varphi(z) dz = \frac{1}{2} \quad (4.51)$$

인데, 이것을 경계조건으로 식(4.50)의 미분방정식을 풀면

$$I_1 = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right) \Phi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.52)$$

가 얻어진다.

$I_2$ 에 대해서도 동일하게 미분한다.

$$\begin{aligned} \frac{dI_2}{d\sigma} &= \int_{-\infty}^{\infty} z \exp(\sigma z) \Phi^2(z) \varphi(z) dz \\ &= -\varphi(z) \exp(\sigma z) \Phi^2(z) \Big|_{-\infty}^{\infty} \\ &\quad + \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(z) \exp(\sigma z) \Phi^2(z) dz \\ &\quad + 2 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(z) \exp(\sigma z) \Phi(z) \varphi(z) dz \\ &= \sigma I_2 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \Phi(z) \varphi^2(z) dz \end{aligned} \quad (4.53)$$

여기서

$$N_0 = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\sigma z) \Phi(z) \varphi^2(z) dz \quad (4.54)$$

로 놓으면  $N_0$ 에 대하여 아래와 같은 미분방정식이 성립한다.

$$2 \frac{dN_0}{d\sigma} = \sigma N_0 + \exp\left(\frac{\sigma^2}{6}\right) / \sqrt{3} \pi \quad (4.55)$$

$\sigma = 0$  일때  $N_0$ 는 다음과 같이 구한다.

$$N_0 = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^2(z) \Phi(z) dz \quad (4.56)$$

$$\varphi^2(z) = \frac{1}{\sqrt{2} \pi} \varphi(\sqrt{2} z) \quad (4.57)$$

로부터

$$\begin{aligned} N_0 &= \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \varphi(\sqrt{2} z) \Phi(z) dz \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \varphi(z) \Phi(z / \sqrt{2}) dz \end{aligned} \quad (4.58)$$

여기서

$$N_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \varphi(z) \Phi(s z) dz \quad (4.59)$$

로 놓는다 (결국  $s = 1/\sqrt{2}$ ).  $N_0$ 를  $s$ 로 미분하면

$$\frac{dN_0}{ds} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} z \varphi(z) \varphi(s z) dz = 0 \quad (4.60)$$

로 되어  $N_0$ 는 상수이므로 결국  $s$ 에 의해 변화하지 않는 것을 보여주고 있다. 그래서  $s = 0$ 으로 놓으면

$$N_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(z) dz \quad (4.61)$$

이 되며,  $\sigma = 0$ 이면  $N_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}$  이 된다.

이것을 경계조건으로 하여 식(4.55)의 미분방정식을 풀면

$$N_0 = \exp\left(\frac{\sigma^2}{4}\right) \Phi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{6}}\right) / \sqrt{\pi} \quad (4.62)$$

가 된다. 이  $N_0$ 를 식(4.53)에 대입하면

$$\frac{dI_2}{d\sigma} = \sigma I_2 + \exp\left(\frac{\sigma^2}{4}\right) \Phi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{6}}\right) / \sqrt{\pi} \quad (4.63)$$

이 얻어진다.  $\sigma = 0$  일때

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^2(z) \varphi(z) dz = \frac{1}{3} \quad (4.64)$$

이고, 이것을 경계조건으로 하여 식(4.63)의 미분방정식을 풀면

$$I_2 = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right) \left\{ \frac{1}{3} + \int_0^{\frac{\sigma}{\sqrt{2}}} 2 \Phi\left(\frac{t}{\sqrt{3}}\right) d\Phi(t) \right\} \quad (4.65)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi\left(\frac{t}{\sqrt{3}}\right) d\Phi(t) = \frac{1}{6} \quad (4.66)$$

으로 되며, 여기서

$$\Psi(x) = \int_{-\infty}^x 2 \Phi\left(\frac{t}{\sqrt{3}}\right) d\Phi(t) \quad (4.67)$$

로 놓으면

$$I_2 = \exp\left(\frac{\sigma^2}{2}\right) \Psi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.68)$$

가 얻어진다. 따라서 식(4.45)로부터

$$M_0 = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) + m \quad (4.69)$$

$$M_1 = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \Phi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right) + \frac{m}{2} \quad (4.70)$$

$$M_2 = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \Psi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right) + \frac{m}{3} \quad (4.71)$$

로 되어, 이것을  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $m$ 에 대하여 풀면 식(4.40), (4.41), (4.42)가 얻어진다.

식(4.40)의  $\sigma$ 에 관한 근사식은 다음과 같이 구한다(Takeuchi & Tsuchiya, 1985).

$$C = (M_2 - M_0/3) / (M_1 - M_0/2) \quad (4.72)$$

$$P = 0.5 + (C-1) \sum_{i=0}^2 c_i (C-1)^{2i} \quad (4.73)$$

$$x = -\ln|4P(1-P)| \quad (4.74)$$

$$\sigma = \sqrt{2} \cdot \sqrt{x \sum_{i=0}^{10} a_i x^i} \quad (4.75)$$

$$c_0 = 1.73195$$

$$c_1 = -1.78769$$

$$c_2 = -1.97552$$

$$a_0 = 1.5707962$$

$$a_6 = -0.104527497 \times 10^{-5}$$

$$a_1 = 0.37069879 \times 10^{-1}$$

$$a_7 = 0.83609370 \times 10^{-7}$$

$$\begin{aligned}
a_2 &= -0.83643535 \times 10^{-3} & a_8 &= -0.32310812 \times 10^{-8} \\
a_3 &= -0.22509471 \times 10^{-5} & a_9 &= 0.36577630 \times 10^{-10} \\
a_4 &= 0.68412182 \times 10^{-5} & a_{10} &= 0.69362339 \times 10^{-12} \\
a_5 &= 0.58242385 \times 10^{-5}
\end{aligned}$$

식(4.74), (4.75)는  $P = \Phi\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\right)$  에 대한 역변환이기 때문에 戸田의 근사다항식을 이용하면 적합한 결과를 얻는다. 식(4.72)~(4.75)에 대한 일련의 계산에 의한  $\sigma$ 의 최대 상대오차는  $3.13 \times 10^{-2}\%$  인데, 단 식(4.73)의 유효범위는  $1 < C < 1.247$  이다.

## 제2절 극치파랑통계의 오차

발생빈도가 낮은 극치파랑(extreme wave)를 설정하는데 있어 오차분석은 해양구조물의 설계사 안전계수(safety coefficient)를 결정하는데 많은 도움을 준다. 해양구조물을 설계하는데 가장 중요하고 어려운 결정 중의 하나가 설계파고를 결정하는 것이다. 실제 설계파고의 조그만 차이가 시설경비, 파괴의 위험, 유지보수 등에 크게 영향을 준다. 이와 같은 설계파고는 장기간에 걸친 해양구조물의 안전한 공사를 위해서 필요할 뿐만아니라 구조물의 내용년수에 해당하는 폭풍에 견딜 수 있도록 단기간의 관측자료를 근거로 구해진다.

한정된 모집단의 표본으로부터 통계적 추정자 및 극치사건을 추정함으로써 설계파를 산출할 수 있는데, 이같은 추정의 신뢰성은 표본의 크기와 자료의 질에 달려있다. 즉 data의 질이 좋고 표본이 크면 높은 신뢰성을 주지만 작은 sample이나 저질의 자료에 의한 추정은 큰 오차를 유발시킨다. 예를 들어 만약 100년 동안 관측치가 있으면 재현기간 100년에 해당하는 설계파고의 결정은

손쉽게 할 수 있다. 그러나 실제 1, 5, 10년 정도의 관측치만으로 재현기간 100년까지 외삽(extrapolation)해서 추정해야 하기 때문에 그 추정값에는 많은 오차가 내포되어 있다. 따라서 이 절에서 연구의 목적은 단기간 자료에서 오는 오차, 자료 습득방법에서 오는 오차들을 비교하고, 또한 극치파랑을 예측함에 있어 신뢰대(confidence band)를 설정함으로써 해양구조물 설계시 안전을 도모하는데 그 목적이 있다. 즉 100년 파랑을 결정하는데 신뢰성 있는 계기로 관측한 5년 간의 자료가 25년동안의 선상관측이나, handcasting으로 구한 신빙성이 떨어지는 자료보다 더 좋은가와 같은 실제적인 의문에 해답을 줄 것이다. 이와 같은 설계파고의 결정은 해양에서의 물리적 과정이 통계적으로 stationary이고 ergodic이라는 가정하에 이루어진다. 즉 파랑은 무작위(random)로 발생하지만 그들의 분포는 시간에 무관함으로 다음 100년에 걸쳐 발생한 파고의 분포는 지난 100년 동안에 발생한 파고분포와 동일하다.

트인해역에서 태풍, 북서계절풍, 온대성저기압 등 발생원인에 의해 여러 형태의 파랑이 발생하는데, 이처럼 여러 형태의 발생원인으로부터 장기간 동안 발생한 파랑을 한 분포(Weibull, Gumbel, Log-normal 등)에 적용하는 것은 매우 많이 단순화시키는 것이다. 그러나 태풍과 비태풍시에 발생한 파랑과 같이 발생원인이 전혀 다른 두 모집단을 따로 분리하여 서로 다른 확률분포에 적용하는 것이 바람직하지만 때에 따라서는 서로 합쳐서 한 분포에 적용하는 경우도 있다. 수학적으로 표현된 통계분포의 적합도를 엄밀하게 설명할 수는 없고 다만 사용된 자료를 fitting함으로써 판별할 수 있다. 즉 통계법칙은 참이나 거짓(true or false)으로가 아닌 다만 좋고 나쁨(good or bad)으로 표현할 수 있다. 이 같이 설계치가 외삽에 의해서만 구해질 수 있기 때문에 사용된 data에 의한 곡선 fitting의 범위를 벗어나는 확률에서 채택된 값이 얼마나 좋고 나쁜지를 결정하는데 많은 어려움이 있다. 그리고 단기간의 sample로 낮은

발생빈도의 극치값을 외삽하여 구한 그 설계치는 확률적으로는 발생 가능하나 물리적 현상에서는 발생가능성이 없는 극치사건까지 외삽하여 구하는 모순이 있다. 예를 들면 수심에 따른 쇄파, 에너지 손실 mechanism 등에 의해 천해 역에서는 파고가 제한되지만 극치통계분석에서는 이와 같은 물리적인 현상을 개념적으로 취급하지 않으므로 외삽에 영향을 주지도 않는다.

극치분포함수가 여러개 있지만 본 절에서는 연안공학자들에게 가장 많이 쓰이고 있는 Weibull 분포에 대한 오차를 다루기로 한다. 관측자료로부터 극치파고를 결정하는데 있어 오차를 유발하는 불확실성(uncertainty)은 다음과 같은 3가지 원인에 기인한다 (Le Mehaute & Wang, 1984).

1. 작은 표본으로 낮은 발생빈도의 극치 파랑을 통계적으로 외삽함으로써 발생하는 오차
2. 자료의 관측 및 분석과 파랑모델로 hindcasting할때 입력자료에서 오는 오차
3. 기후 변화(climatological variation)와 분포함수에 대한 지식부족과 잘못된 선정에서 오는 오차

이 절에서 sample 크기와 관측 및 hindcasting 오차에 따른 영향을 고려하여 좀더 정확한 설계치를 설정하기 위하여 신뢰수준(confidence level), 관측년수, 관측간격(sampling interval), 분포의 형상계수(shape parameter) 등에 대하여 도표화하여 정량적으로 나타내었다.

#### 4.2.1 단기간 자료의 외삽에 의한 오차

관측이나 data 자체에 내재되어 있는 부정확성을 무시하고도 작은 sample을 낮은 발생확률까지 외삽함으로써 여러 불확실성(오차)이 내포된다. 첫째 모집단의 정확한 분포를 모르고 또한 정확한 분포가 sample 추정에 의해 정해진

다는 보장도 없다. 따라서 분포에서 조금 다른 계수나 다른 분포를 사용하면 매우 큰 차이의 외삽값이 구해지기 때문에 낮은 확률의 파고를 정확히 추정하는 것은 어려운 일이다. 둘째로 이 같이 작은 sample은 전반적으로 파후(wave climatology)를 대표할 수 없고 주어진 모집단의 분포로부터 편의(bias)되어 있다. 즉 통계학의 기초법칙은 악기상에서 관측을 행한 작은 sample에 기초를 둔 것이 아니고 큰 모집단을 sample로 가정하여 이루어진다. 따라서 여기에서는 위와 같은 오차를 무시하고 분포함수를 Weibull 분포로 가정하였을 때 외삽에 의한 오차를 다루기로 한다.

Weibull 분포의 누적분포함수  $P(h)$ 는 식(4.76)과 같다.

$$P(h) = \text{Prob} ( h \leq x ) = 1 - \exp ( -h^r ) \quad (4.76)$$

$$h = \frac{H - H_0}{\bar{H}} \quad (4.77)$$

여기서,  $H$ : 해상상태를 나타내는 유의파고

$H_0$ : 파고의 하한계를 나타내는 location parameter

$\bar{H}$ : scale parameter

$r$ : 0.75~2.0 까지 변하는 shape parameter

그리고 Weibull분포의 초과확률  $Q(h)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(h) = 1 - P(h) = \exp ( -h^r ) \quad (4.78)$$

작은 sample 크기로부터 야기되는 오차는 주어진  $Q(h)$ 에서의 신뢰대로서 결



정할 수 있으며, 신뢰대의 폭은 어떤 확률수준에서 sample 변량  $h$ 의 표준편차 (standard deviation)로 나타낼 수 있고 그 표준편차( $\sigma_s$ )는

$$\sigma_s(h) = \frac{1}{f(h)} \sqrt{\frac{Q(h)P(h)}{N}} \quad (4.79)$$

으로 되고(Wang & Le Mehaute, 1983),  $f(h)$ 는 확률밀도함수(probability density function)으로서 다음과 같이 구해진다.

$$f(h) = \frac{d}{dh} \cdot P(h) = -\frac{d}{dh} Q(h) \quad (4.80)$$

$h$ 가 무차원이기 때문에  $\sigma_s$ 도 무차원이며, 표준편차의 절대값( $\bar{\sigma}_s$ )은 식(4.77)로부터  $\sigma_s$ 에  $\bar{H}$ 를 곱하여 구한다.

$$\bar{\sigma}_s = \sigma_s \cdot \bar{H} \quad (4.81)$$

sample 크기  $N$ 은 관측년수( $Y$ ), 관측간격( $\Delta t$ : hours)으로 나타낼 수 있으면 식 (4.82)와 같다.

$$N = \frac{Y \times 365 \times 24}{\Delta t} \quad (4.82)$$

여기서  $\Delta t$ 는 인접한 관측 data가 무상관이 되도록 시간간격을 정해야하는데, 이는 파고 뿐만 아니고 관측지점의 지역적인 특성에 따른 함수이기 때문에  $\Delta t$ 를 결정하는 데은 많은 어려움이 따른다. 해석적으로 어느기간 동안 연속해서 관측한 자료로부터 자기상관(auto-correlation)을 구하면 무상관 사이의 시간 ( $\Delta t$ )을 알 수 있다. Takahashi(1959)는 기상자료로부터 기상의 자기상관계

수를 구했는데,  $\Delta t = 24$  시간 일때 자기상관계수는 0.5이고  $\Delta t = 48$ 시간 일때 0인 것을 알아냈다. Goda(1967)는 일본해역에서 파랑의 시계열(time series) 자료로부터  $\Delta t = 24$  시간일때 자기상관계수는 0.3이라는 것을 알아냈고, Lawson and Abernathy(1975)는 호주의 Botany 만에서 같은 24시간에 대하여 0.5의 값을 얻었다. 또한 Harris(1972)는 대서양 연안에서  $\Delta t = 24 \sim 36$ 시간에서 자기상관계수가 0인 것을 밝혔다.

변량  $h$ 에 대한 상대표준편차는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_s'(h) = \frac{\sigma_s}{h} = \frac{\bar{\sigma}_s}{H - H_0} \quad (4.83)$$

식(4.76), (4.78)과 (4.80)으로부터  $Q(h)$ ,  $P(h)$  및  $f(h)$ 를 구하여 식(4.79)에 대입하면 상대 표준편차는

$$\sigma_s'(h) = r^{-1} h^{-r} \sqrt{\frac{[1 - \exp(-h^r)] \exp(h^r)}{N}} \quad (4.84)$$

로 되고,  $\sigma_s(h)$ 가 정규분포 법칙을 따를때 상대표준편차  $\sigma_s(h)$ 에 0.84, 1.28, 1.65, 2.32를 곱한 값이 각각 80%, 90%, 95%, 99%의 신뢰수준에 대응하는 흠어짐의 상한계(upper bound)를 나타낸다. 이 흠어짐의 정도는 그 신뢰수준에서의 예측값에 대한 불확실성의 평균으로 간주할 수 있다. 예를 들어 90% 신뢰수준과 20% 불확실성을 갖는 예측(prediction)은 실제의 사건이 예측값을 20%이상 초과하지 않은 확률이 90%라는 것을 의미한다.

구조물의 설계시 공학자들이 많이 사용하는 재현기간(년)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{\Delta t}{Q(h) \times 365 \times 24} = \frac{1}{Q(h)\nu} \quad (4.85)$$

여기서  $\nu$ 는 매년 관측한 횟수이다.

불확실성 즉 평균편차를 재현기간( $R$ )와 관측기간( $Y$ )로 나타내기 위하여 위 식 (4.84)를 다음과 같이 변환하였다.

$$\sigma_s'(h) = \frac{1}{r \ln \left( \frac{\Delta t}{R \times 365 \times 24} \right)} \left( \frac{R \times 365 \times 24 - \Delta t}{Y \times 365 \times 24} \right)^{1/2} \quad (4.86)$$

신뢰수준 90%로서 20년, 50년, 100년의 재현기간에 대응하는 불확실성을 관측 기간과  $r = 1.0, 1.2, 1.4$ 에 대하여 계산한 후 도시하면 Fig. 4.1과 같다.

이 그림에서 보듯이 단기간의 관측자료로 장기간의 재현기간까지 외삽으로 예측하면 높은 불확실성이 내포되어 있는 것을 보여주고 있다. 재현기간이 20년 이상 되면  $e^{-h}$ 은 매우 작게되어  $1 - Q(h) \approx 1$ 이 되므로 식(4.86)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_s'(h) = \frac{1}{r \ln(R\nu)} \left( \frac{R}{Y} \right)^{1/2} \quad (4.87)$$

이식에서 보는 바와 같이 단기간의 sample로부터 외삽에 의해 예측할 때 발생하는 오차는 재현기간의 평방근에 비례하고 data 관측기간의 평방근에 반비례하며, 또한 기후 파라미터(climatic parameter)  $r$ 에 반비례한다.

$\ln(R\nu)$ 는 재현기간이 길때 거의 상수이다. 예를 들어 100년의 재현기간에 대하여  $\Delta t$ 를 3시간과 6시간으로 하면 이 계수의 변화는 5% 미만이고, 6시간과 24시간을 적용하면 12% 미만으로 변화한다. 따라서 예측의 정확도는 관측간격

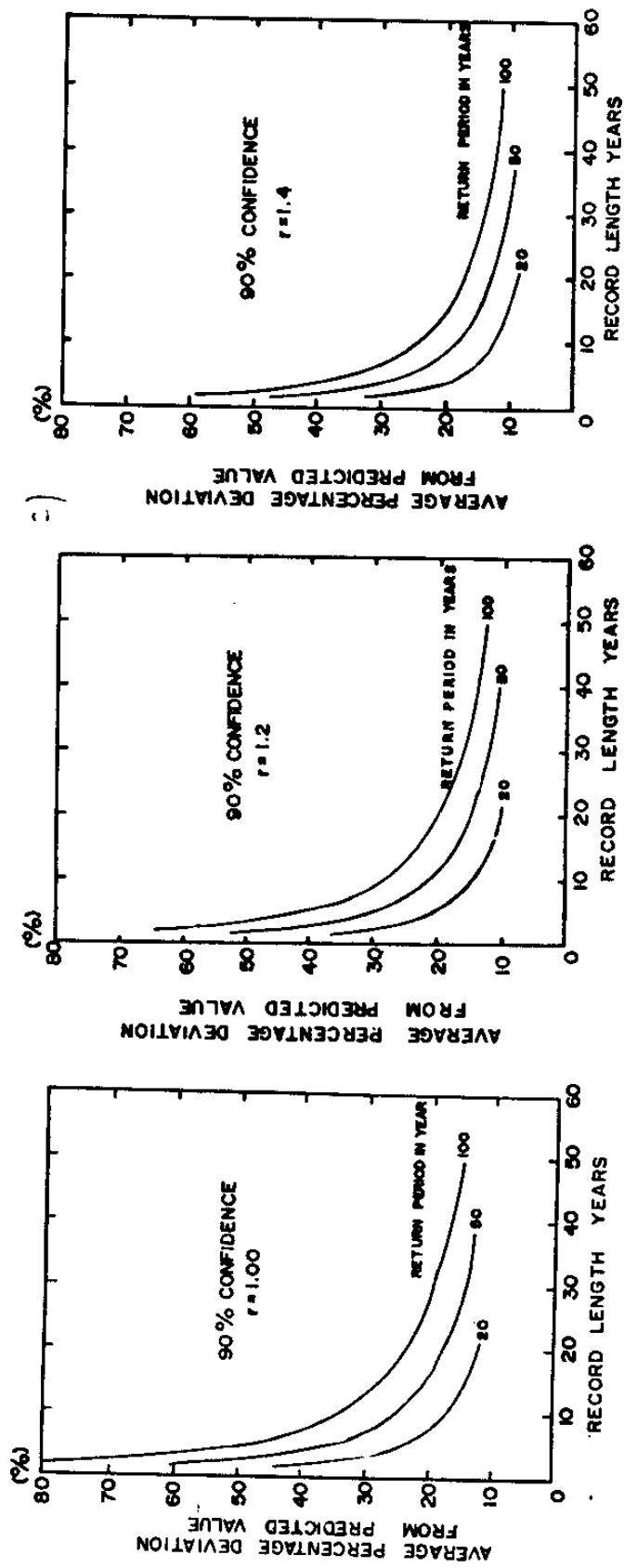


Fig. 4.1. Accuracy of prediction as function of record length

(a)  $\Delta t=6$ hours,  $r=1.0$  (b)  $\Delta t=6$ hours,  $r=1.2$  (c)  $\Delta t=6$ hours,  $r=1.4$

$\Delta t$ 에 많은 영향을 받지 않는 것으로 간주할 수 있다. 90% 신뢰도와 20%의 불확실성이 내포된 재현기간  $R$ 에 해당하는 사건을 예측하기 위하여 요구되는 data 관측기간을 구하면 다음과 같다.

즉  $1.28 \sigma_s(h) < 0.20$ 을 식(4.87)에 대입하면

$$Y \approx \frac{40 R}{[r \ln(R\nu)]^2} \quad (4.88)$$

이 되어 관측기간은 기후파라미터  $r$ 의 제곱에 반비례 한다. 이 파라미터는 지역에 따라 다르기 때문에 요구되는 관측기간도 지역 따라 다르다.

sampling interval  $\Delta t$ 와 기후 파라미터  $r$ 에 대하여 요구되는 관측기간은 Table 4.4에 수록하였다. 이 표에서 보는 바와 같이 요구되는 관측기간은  $\Delta t$  보다는  $r$ 에 더 민감하다는 것을 알 수 있다.

초과확률  $Q(h)$ 를 재현기간으로 변환하는 것은 앞에서 언급했듯이  $\Delta t$ 값에 대한 정보가 부족하기 때문에 논란의 여지가 있지만 실제로 예측의 정확도는  $\Delta t$ 에 그렇게 민감하지 않다. 그리고 관측에는 배터리로 전원을 공급하기 때문에 예측의 정확도를 어느 정도 유지하며 더 긴기간 동안 관측을 수행할 수 있도록  $\Delta t$ 를 길게 하는게 유리하다.

#### 4.2.2 관측 및 hindcasting 오차

앞에서 기술한 분석 내용은 자료가 오차 없이 정확하다는 가정하에 단기 간의 자료를 장기간까지 외삽함으로써 오차가 발생한다는 것에 대하여 기술하였으나, 이 소절에서는 자료오차의 불확실성을 논하기로 한다. 자료를 수집하는데 있어 발생하는 오차는 관측기와 분석과정에 의해 연유된다. 주어진 파고에 대하여 무작위오차(random error)는 정규분포를 이루고 표준편차  $\sigma_M$ 에

Table 4.4 Data duration required as function of return period  
(confidence level = 90%, uncertainty = 20%).

재현기간(년)	$\Delta t$ (시간)	요구되는 관측시간(년)		
		$r = 10$	$r = 12$	$r = 14$
20	3	7	5	3
20	6	8	6	4
20	12	9	6	5
20	24	10	7	5
50	3	14	10	8
50	6	16	11	8
50	12	18	13	9
50	24	21	15	11
100	3	25	18	13
100	6	28	20	15
100	12	33	23	17
100	24	37	26	19

의해 특징지워지며, 기계적인 오차는 정확한 기계와 동시에 관측하여 비교함으로써 구할 수 있는데, 일반적으로  $\sigma_M$ 은 파고의 함수로서 파고가 클때 오차도 크다.

식(4.83)과 같이 자료오차의 상대표준편차도 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{M'} = \frac{\bar{\sigma}_M}{H - H_0} \quad (4.89)$$

여기서  $\sigma_M = \sigma_M \cdot H$  이고 일반적으로  $\sigma_M$ 은 상수(constant)로서 가정된다. 그러나 step식 파고계 의한 파랑관측의 경우는  $\sigma_M$ 보다 오히려  $\sigma_M$ 이 상수의 값을 갖는다. step식 파고계에서 오차는 센서 사이의 거리의 함수이며, wave-rider의 경우 반응은 주기에 의해 영향을 받고 때때로 잘못 design하여 제류할

경우에 갑자기 잡아당김(jerking) 현상에 의해 영향을 받는다.

시간 영역에서 다른 방법으로 구해진 data는 매우 큰 오차를 갖는데, time series로 관측된 파고와 hindcasting으로 구한 파고를 비교하면  $\sigma_M$ 이 약 50% 차이가 나기도 한다(Corson, 1981). 해상상태를 두개의 다른 방법으로 관측한 자료를 time series로 비교하는 대신 두 data를 통계적으로 크기 순으로 순서를 정하여 비교하면 error는 매우 작아진다. 예를 들어 수압식 파고계로 관측한 표면파는 Wave staff gage로 동시에 관측한 표면파와 time series로 비교해 보면 크게 다르지만 전체적인 파고분포는 거의 같다. 이 같은 경우 random error의 대부분은 위상차에 기인한다. 파랑 자료를 얻는데 가장 정확한 방법은 연속식(continuous) wave staff이다. 이 방법에서 발생하는 오차는 파고계의 잘못된 보정과 제한된 자료크기 즉 20분 관측한 자료를 파랑 스펙트럼으로 변환하는 자료분석 과정에서 생긴다. 이 같은 오차는 무시할 정도이고 이 방법은 다른 관측 방법들에 대한 오차를 보정하는데 사용되기도 한다. step식 파고계(step wave staff)는 천해용 파고계로 작은 파고에 대하여 오차를 많이 유발시키고, waverider는 심해에 적합한 파고계로 주파수의 함수로서 적절히 보정만하면 양질의 자료를 제공해 준다. 천해에서 파랑관측의 대부분은 수압식 파고계에 의해 행해지며, 표면파는 선형파이론으로 측정된 압력 signal을 convolution으로 구하는데, 파랑의 비선형 효과와 단주기 파랑에 대한 불충분한 고려등으로 표면파가 실제보다 과소평가되는 결함이 있다. 수압식 파고계로 관측한 data를 좀더 정확하게 분석하기 위해서는 압력기록을 spectrum 분석하여 스펙트럼의 각 주파수마다 보정해야하며, 이 같은 보정과 분석에 의해 관측 오차는 매우 작게 줄일 수 있다. 수압식 파고계로 관측한 자료를 분석하여 크기순으로 정리하면 표준화된 표준편차  $\sigma_M$ 은 5%를 초과하지 않는다(Houma, 1966; Grace, 1970). 선상관측은 일반적으로 널리 사용되어지고 있지만 불행하게

대부분 부정확하고 특히 큰 파고가 발생할 때는 관측이 불가능 할때가 있다. 그러나 관측결과를 sorting하면 계기 관측 data와 차이가 훨씬 작아지는데, 이에 대한 많은 비교가 문헌에 보고되었고 선상관측 data를 보정하기 위하여 꽤 많은 공식이 제안되었다.

hindcasting에 의한 오차는 바람과 해상상태의 관계, 일기도의 부정확성 및 등압선등의 내삽에서 온다. hindcasting에 의한 가장 최근의 평가는 SWAMP 실험(1983)에 행해졌으며, 이 실험에서 7개의 가상 기압장에 대하여 10개의 다른 수학적 모델에 의해 파랑을 재현하여 그 결과를 서로 비교했다. 이 모델들의 결과는 많은 차이를 보였는데 이는 비록 특별한 실험 data에 근거하여 수행되었지만 hindcasting에 의한 파랑추정에는 불확실성이 내포되어 있다는 것을 의미한다. 더욱이 모델의 비교를 기압장이 훨씬 복잡한 실제 해상에 적용한다면 단순한 기압장에 대하여 연구된 것보다 더 큰 오차를 보일 것으로 생각된다. 따라서 일기도의 정확도 부족, 내삽에서 오는 불확실성이 역시 오차발생의 중요한 원인이 된다. 실제로 일기도는 50년 이상의 기상자료를 수집하여 hindcasting으로 파랑을 추정할 수도 있으나, 최근 30년간의 일기도가 신뢰성 있는 자료이므로 이를 사용하여 파랑을 추산하는 것이 적합하다고 생각한다. 아직도 해상에서의 기압관측자료의 부족으로 파랑추산에 어려움을 겪고 있는 실정이며, 같은 조건하에서 태풍과 폭풍(선풍)의 경우가 계절풍의 경우보다 hindcasting으로 파랑추산하는데 오차가 더 많이 내포된다. 평균적으로 hindcasting과 관측자료의 비교해 보면 대개 약 15% 정도의 편차를 보이고 있다.

결론적으로 sample이 크기 순으로 정리되어 있을때 자료오차에 대한 표준화된(상대) 표준편차는 다음과 같이 요약할 수 있다.



직접계기 관측	$\sigma_M = 0.05$ 편의 0.00
선상관측	$\sigma_M = 0.20$ 편의 0.05
hindcasting	$\sigma_M = 0.15$ 편의 0.05

#### 4.2.3 단기간 자료와 부정확한 자료의 결합오차

단기간 자료에 의한 오차와 관측에 의한 random 오차가 정규분포를 이루고 표준화된 표준편차  $\sigma_s, \sigma_M$ 에 의해 각각 특징지워진다. 그리고 이 두 오차가 서로 독립이고 Gaussian 분포를 이루기 때문에 두 오차의 합도 Gaussian 함수의 convolution에 의해 역시 정규분포를 이루며, 분산의 합은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma'^2 = \sigma_M'^2 + \sigma_s'^2 \quad (4.90)$$

Weibull 분포의 경우  $\sigma_s$  은 식(4.84)와 개략적인 식(4.87)로 주어진다. 개략적으로부터 최대 불확실성이  $\varepsilon$ (표준편차)보다 크지 않은 사건을 예측하는데 요구되는 관측 년수  $Y$ 는 식(4.91)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y \geq \frac{R}{[r \ln(Rv)]^2} \frac{1}{\varepsilon^2 - \sigma_M'^2} \quad (4.91)$$

$\varepsilon = \sigma_M$  일때 요구되는 관측년수  $Y$ 는 무한대에 접근하기 때문에 불확실성의 하한계가 일어난다. 재현기간  $R$ , 자료관측년수  $Y$ , 자료오차  $\sigma_M$ 의 함수로서 표준화된 총 표준편차  $\sigma$ 은

$$\sigma' = \left[ \sigma_M' + \frac{1}{[r \ln(R\nu)]^2} \left( \frac{R}{Y} \right) \right]^{1/2} \quad (4.92)$$

로 되고,  $\Delta t = 6$ 시간,  $r = 1.0, 1.4$ ,  $R = 20$ 년, 50년, 100년과 여러  $\sigma_M$ 에 대하여  $\sigma$  를 계산하여 Fig4.2 에 도시하였다.  $\sigma_M = 0$ 의 경우는 90%의 신뢰도를 갖는 계수 1.28을  $\sigma$ 에 곱하면 Fig4.1과 같은 결과를 나타내고 앞에서 설명했듯이  $\sigma$ 의 값은  $\sigma = \sigma_M$ 에 접근한다. 그림에서 보듯이 도함수  $\partial\sigma'/\partial Y$ 은  $Y$ 가 증가함에 따라 오차 즉 표준편차  $\sigma$  은 급격히 감소하는데 이 같은 현상은  $\sigma_M$  이 작을때 보다 클때가 더욱 빨리 감소하며, 관측기간이 길어질수록  $\sigma$ 은 점점 천천히 감소한다.  $\sigma_M = 0.05$ ,  $Y/R \approx 0.4$  (재현기간 100년에 대한 40년간 관측)일때, 표준편차가 16%까지 감소하기 때문에 장기간의 정확한 관측을 실시할 가치가 충분히 있다. 한편 hindcasting 추정이나 선상관측 같은  $\sigma_M = 0.2$ 에 대하여  $Y/R = 0.15$ (재현기간 100년에 대한 15년간 관측) 보다 더 긴 관측자료를 통계분석하여 얻은 확률 값은 더 좋은 정도의 값을 갖지 못한다. 이와 같은 사실은 단기간의 관측자료 ( $\sigma_M = 0.05$ )나 장기간의 hindcasting 자료( $\sigma_M = 0.2$ )로 확률극치값을 추정하는 것은 좋지 못한 결과를 얻는다는 것을 암시하고 있다. 그러므로, 장기간의 hindcasting과 선상관측은 장기간의 파랑관측의 대체수단으로서가 아니라 단지 일시적인 관측으로 여겨져야 한다.  $\sigma_M = 0.05$ 를 갖는 관측은 정확도가 양호하므로 자료오차 보다는 sample 크기(단기간의 자료)에서 오는 오차가 더욱 심각하다. 예를 들어 Fig. 4.2 ( $R = 100$ ,  $r = 1.0$ )에서 보는 바와 같이  $\sigma_M = 0.15$ 인 40년 간의 hindcasting 파랑 자료는  $\sigma_M = 0.05$ 인 정밀한 관측자료 18년과 동일한 표준편차( $\sigma = 2.0$ )를 갖는다.

$h$ 와  $\sigma_s$ 은 초과확률인  $Q$ 로 나타낼 수 있다. 식(4.78),(4.83)으로부터 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

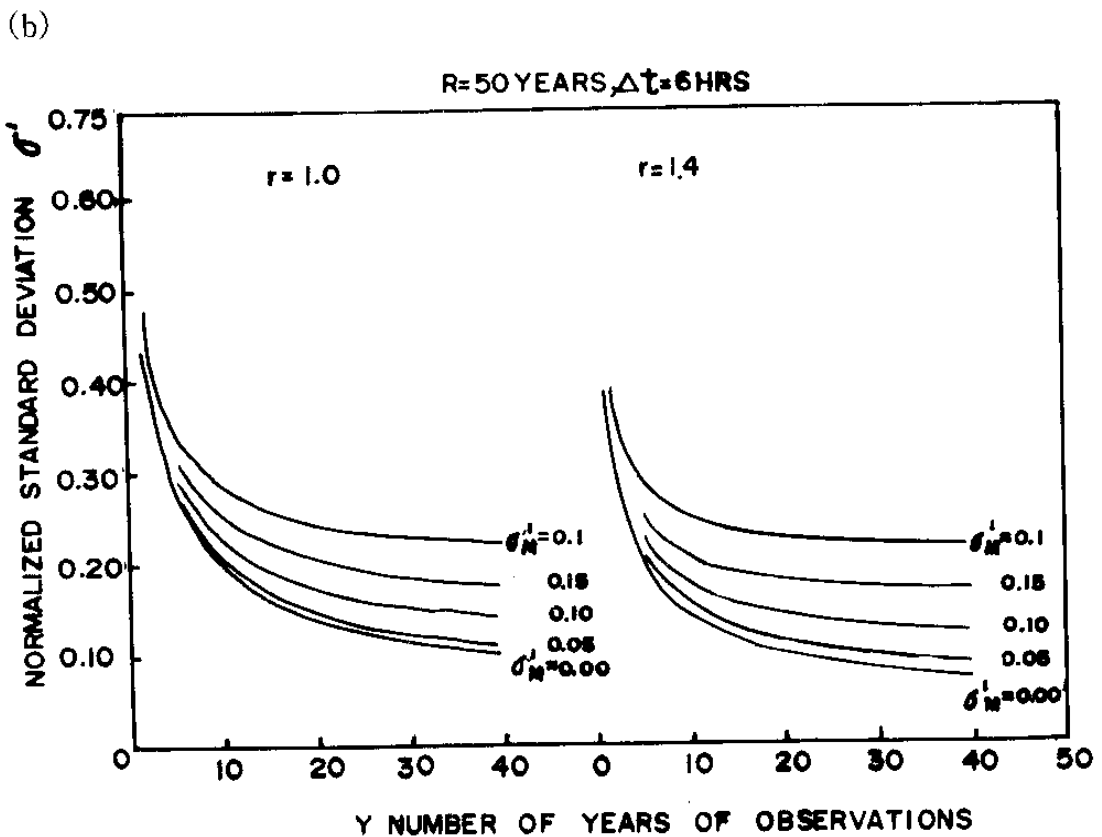
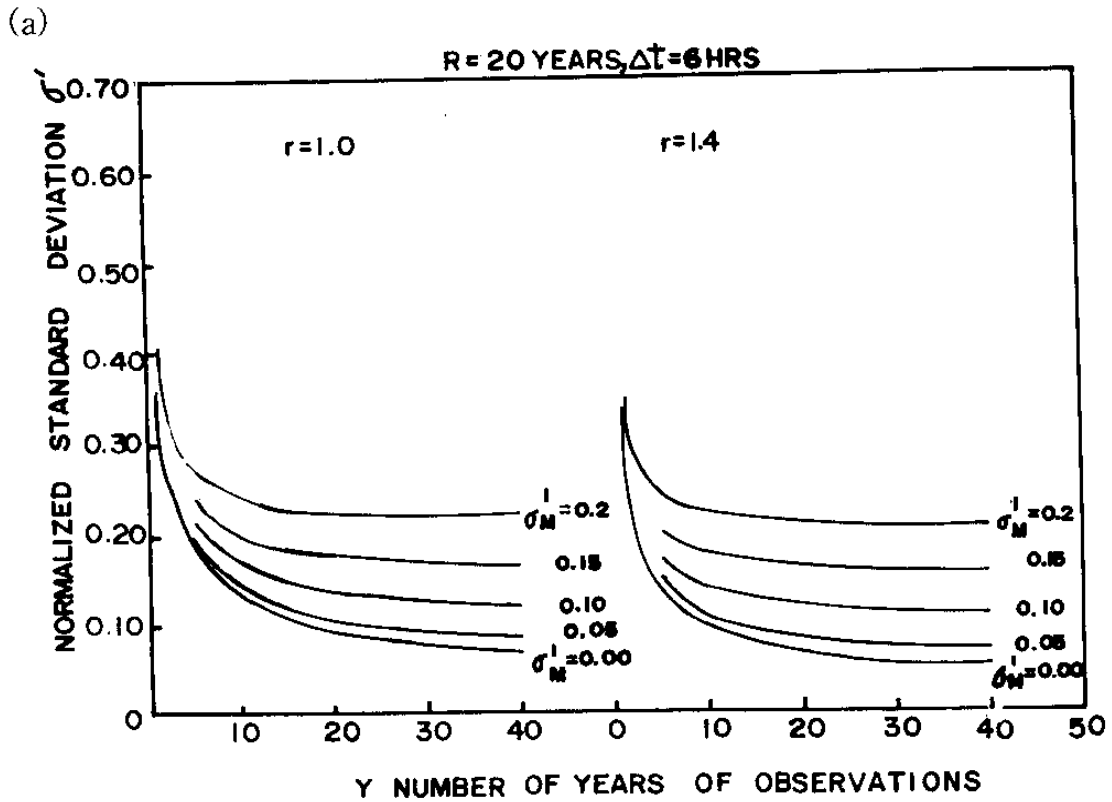
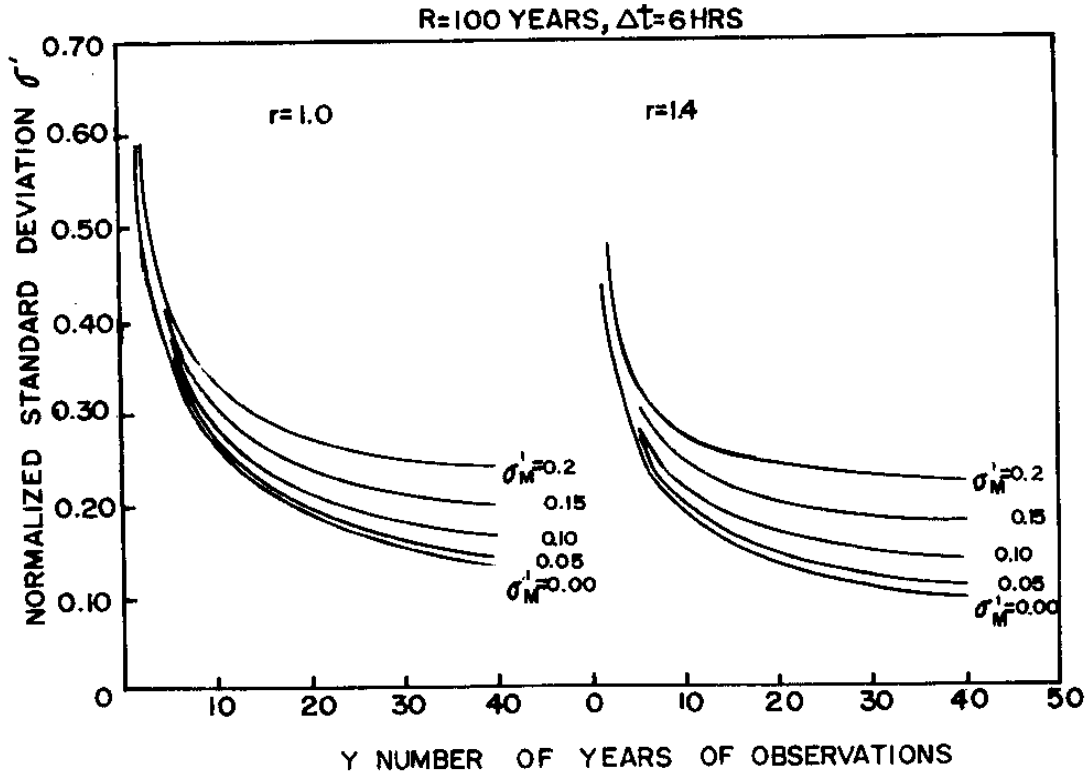


Fig. 4.2. Normalized standard deviation as function of the number of years  
 (a)  $R = 20 \text{ years}, \Delta t = 6 \text{ hours}$     (b)  $R = 50 \text{ years}, \Delta t = 6 \text{ hours}$   
 (c)  $R = 100 \text{ years}, \Delta t = 6 \text{ hours}$

(c)



$$h = [-\ln Q(h)]^{1/r} \quad (4.93)$$

$$\sigma_s'(h) = \frac{1}{-r \ln Q} (\nu Y)^{1/2} \left( \frac{1-Q}{Q} \right)^{1/2} \quad (4.94)$$

그러므로 총 오차  $\sigma^2 = \sigma_M^2 + \sigma_s^2$ 도  $Q$ 의 함수로 정의될 수 있다. 더욱이  $\sigma$ 에 상수  $\alpha$ 를 곱함으로써 여러 신뢰수준에 대응하는 불확실성을 계산할 수 있다. 예를 들어  $\alpha = 0.84, 1.28, 1.65, 2.32$ 는 각각 80%, 90%, 95%, 99% 신뢰수준에 대응한다.  $h$ 에  $\alpha\sigma h$ 를 더하면 주어진 신뢰도에 대응하는 상한계 (upper bound),  $\alpha\sigma h$ 를 감하면 하한계(lower bound)를 구할 수 있다.

결국 상한계는  $h_E(Q)$ 로 정의되는 새로운 초과확률 곡선으로 나타내진다.

$$h_E(Q) = h(1 + \alpha\sigma') = (-\ln Q)^{1/r} \left\{ 1 + \alpha \left[ \sigma_M'^2 + \frac{1}{r^2 (\ln Q)^2} \nu Y \left( \frac{1-Q}{Q} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (4.95)$$

이것은 통계적 불확실성에 의해 상한계로 정의되는 수정된 Weibull 분포의 역함수로서 이 상한계는 관측오차  $\sigma_M$ 과 관측년수  $Y$ 의 함수이다.

여러 신뢰수준에 대한 안전계수를 결정하기 위해서는 이 같은 불확실성의 보정값을 근거로 이루어져야 하며, 결국 해양구조물의 설계에 있어 위험도분석 (risk analysis)도  $h(Q)$ 대신  $h_E(Q)$ 을 기초로 하여 행하는 것이 오히려 합리적이다.

$r = 1.0$ 의 Weibull 분포에 대하여 관측기간  $Y$ 와 관측의 불확실성  $\sigma_M$ 에 의한 결합오차(표준편차)를 Fig4.3에 나타냈으며, 이 그림에서 보듯이 5년간의 정밀한 관측자료( $\sigma_M = 0$ )와 20년간의 덜 정밀한 hindcasting 자료( $\sigma_M = 0.1$ )는 재현기간 5.7년을 예측하는데 동일한 오차를 갖는다. 특히 장기간을 외삽으로 예측하는 데는 덜 정밀한 장기간의 기록이 정밀한 단기간의 자료보다 더 좋은 것으로 나타났는데, 이것은 외삽으로 장기극치 확률값을 산정할때 장기간의 정확한 자료가 가장 좋은 것임은 의심의 여지가 없지만, 현시점에서 이같은 자료를 얻는 것은 불가능하기 때문에 덜 정확한 자료라도 장기간의 자료가 중요하다. 한편 Fig4.4에서 재현기간 23년을 예측하기 위하여 5년간의 양질의 관측자료( $\sigma_M = 0.05$ )는 40년간의 선상관측자료( $\sigma_M = 0.2$ )와 동일하고, 양질의 10년간 자료는 68년을 예측하는데 40년의 덜 정밀한 자료( $\sigma_M = 0.2$ )와 동등한 역할을 한다.

일반적으로 5년, 10년 같은 단기간을 예측하는 데는 의심스러운 20년간의 hindcasting 자료보다 양질의 단기간 관측자료가 우수하다. 현시점에서 30년, 40

년간의 hindcasting 자료는 가능하지만 장기간의 정밀한 관측자료는 축적되어 있지 못한 실정이므로 장기간의 예측을 개선하기 위하여 장기간의 정밀한 관측은 필수 불가결한 문제이며, 아울러 hindcasting에 의한 파랑추정, 극치파랑통계법에 대한 연구가 요구된다.

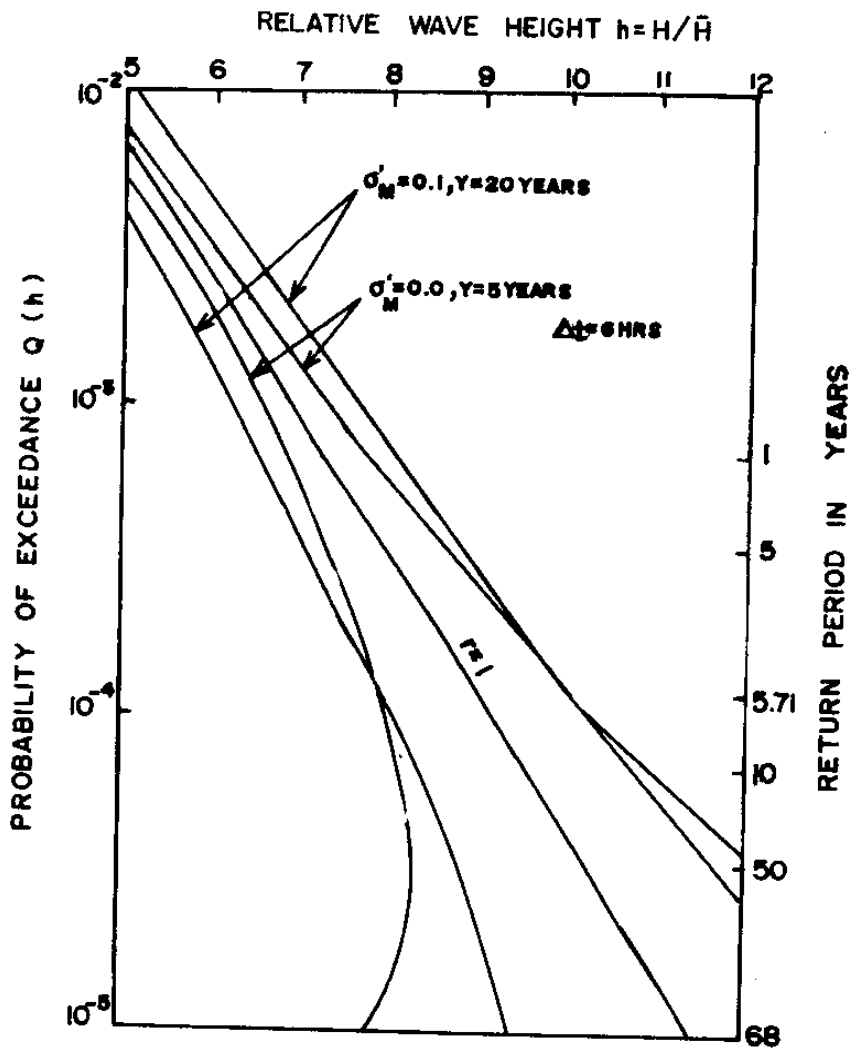


Fig. 4.3. Comparison of confidence bands about probability of exceedance curve based on 20years of observations and measurement error  $\sigma_M = 0.10$  and 5years of observations and measurement error  $\sigma_M = 0.0$

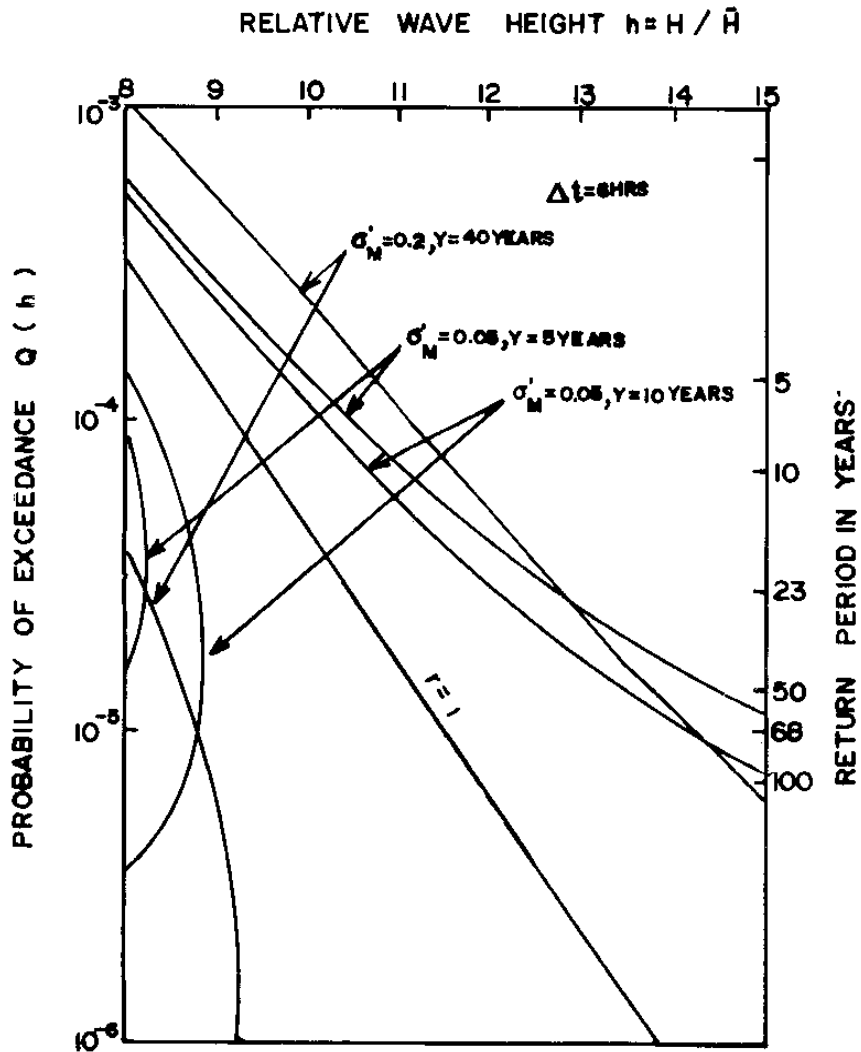


Fig. 4.4. Comparison of confidence bands about probability of exceedance curve corresponding to number of years of observations  $Y$  and relative measurement error  $\sigma'_M = 0.0$

#### 4.2.4 기후 변화에 의한 오차

앞에서는 장기 파랑통계분석을 실시하는데 내포된 두가지 중요한 오차 (단기간의 자료를 외삽함으로써 발생하는 오차, data 자체의 부정확성에서 기인하는 오차)에 대하여 논했다. 관측과 작은 표본의 크기에 의한 결함오차에서 설명했듯이 관측년수에 무관하게 관측오차가 크면 정확한 극치파고의 예측에 많은 영향을 준다. 한편 정밀하게 관측한 기간이 어떤 특징기간 보다 길때

정확한 예측을 위한 개선책은 거의 고려하지 않아도 좋다. 앞의 분석에서 보았듯이 확률 30~40년간의 정밀한 관측자료는 재현기간 100년 극치값을 추정하는데 있어 충분한 자료임을 보여주었다.

통계적 추정은 불확실성의 원인을 줄이므로서 개선될 수 있는데, 현시점에서 감소 원인은 data의 질과 sample 외삽에 국한한다. 전자는 파랑관측장비, 기술 및 자료 분석 문제이고 후자는 파랑통계 법칙에 의하여 지배받는다. 파후의 자연적 변화에 의한 불확실성의 원인을 기술하면 다음과 같다. 자연발생적인 기후를 stationary ergodic으로 가정하고 Weibull 분포의 통계적 법칙을 따르면 식(4.87)로부터 유도된 결과는 주기적인 기후 변화를 결정하는데 이용할 수 있다. 즉  $Y = R$ 로 놓으면 식(4.96)을 얻는다.

$$\sigma^*(R) = \frac{1}{r \ln(R\nu)} \quad (4.96)$$

이론적으로  $\sigma^*(R)$  파라미터는 Weibull 분포에 대한 R년의 기후변화 특성을 나타내고 있다. 특히  $R = 1$ 이면 년기후 변화(annual climatological variation)를 얻을 수 있다.

$$\sigma^*(1) = \frac{1}{r \ln(\nu)} \quad (4.97)$$

이 파라미터는 한 특정지역에서 년기후 변화에 대한 분포의 특성을 나타내는데, 이는 Weibull 분포와  $\Delta t$ 의 가정하에서 유일한 값을 갖는다. Table 4.5에  $\Delta t = 6$ 시간으로 했을 때 R과 r에 따라 이 파라미터의 값을 나타내었다.

이 표에서 보듯이  $\sigma^*(1)$ 은  $r = 1.0 \sim 1.4$ 에 대하여 평균 11% 정도이므로



Weibull 분포에서 매년 표준편차로 11%의 기후 변화가 있다는 것을 알 수 있다. 이값은 10년에 대하여 9%, 100년에 대하여 7%로 감소하므로 Weibull 분포에서 100년 사건을 추정할때 자료의 질이나 자료의 외삽에 의한 오차를 무시하고도 자연의 기후변화에 의해 예측치에 대한 7%의 표준편차가 있다. 그러므로 예측의 정확도는 자연의 기후 변화에 의하여도 제한을 받는다.

Table 4.5 Climatological variations  $\sigma^*(R)$  as function of  $r$  (assume  $\Delta t=6$  hrs)  
(Unit : %)

재현기간(년) 형상계수	1	10	100
$r = 1.0$	13.7	10.4	8.4
$r = 1.2$	11.5	8.6	7.0
$r = 1.4$	8.1	7.4	6.0

## 제5장 결 론

본 연구는 지난 1차년도에 이어 우리나라 연근해와 임해지역에서 매년 막대한 재산피해를 유발하고 있는 큰 파랑과 연안수위의 이상해면상승·하강에 대처하여 연안지역 주민의 인명과 재산 뿐만 아니라 임해지역에 주로 산재한 국가기간산업시설 등을 보호하고, 자연재해 피해의 경감을 위해 필수적인 연안방재시설물의 최적설계자료 산출에 대한 기초연구가 수행되었다.

본 연구의 2차년도에 있어서는 우리나라 검조소 연안 해면관측자료를 분석 정리하였으며, 보다 정도 높고 정밀한 연안설계과 추정을 위한 기초연구가 중점적으로 수행되었다. 특히 해안선이 매우 복잡하고 다양한 우리나라의 연안해역에 응용될 수 있는 규칙파의 천해변형에 대한 이론적 전개 및 검증, 그리고 보다 정밀하고 경제적인 설계에 필요한 파향스펙트럼의 천해변형을 더욱 정확히 추정할 수 있는 이론과 방법이 검토되었다. 지금까지 우리나라의 연안관측자료의 축적이 매우 빈약할 뿐만 아니라, 제한된 관측자료의 경우에도 많은 불확실성을 내포하고 있어 이로부터 정확한 설계치를 산출하는데는 어려움이 많다. 이러한 현실적인 한계를 극복하기 위해서는 보다 고차원적인 극치통계처리기법의 연구 개발이 요구되며, 통계처리된 결과에 대한 오차범위와 한계가 정확히 분석되고 파악되어야만 비로소 신뢰성을 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 정확한 해양설계자료의 산출, 분석방법 뿐만 아니라 단기간의 제한된 기존 관측자료로부터 오차범위가 축소되고 신뢰성 있는 극치설계값을 얻기 위한 통계처리 방법에 대한 연구가 수행되었다.

본 연구의 항목별로 간추린 주요 결론과 제언은 다음과 같다.

해면산출을 위해 수로국 검조자료를 분석하였으며, 해일추산 방법도 검토하였다. 해일을 추산하기 위하여 일년간의 검조자료와 계산된 추정조위를 이용하여 해일의 시계열 자료를 만들었다. 이 자료에서는 반일주조의 주기를 갖는 peak들이 많이 나타났고 특히 서해쪽에 위치한 관측소에서 크게 나타났다. 이러한 주기적인 peak의 발생원인은 조석과 해일의 상호작용과 지형적인 영향등의 복합적인 요인에 의해 발생하는 것으로 사료된다. 앞으로 검조자료의 전산입력이 이루어지면 주기성을 띤 천해분조를 효과적으로 고려하기 위하여 확장조화분석을 실시하고 이로부터 우리나라 주변의 천해분조 특성이 파악되어야 할 것이다.

제주, 거문도, 여수, 충무의 평균해면을 산출하기 위해 매시간의 검조자료를 평균하여 일평균, 월평균, 년평균을 계산하였고, 또한 Doodson Xo-filter를 사용하여 일평균을 산출한 후 이를 산술평균하여 월평균과 년평균을 각각 구했다. 이 두 방법에 의한 결과의 차이는 매우 적은 것으로 나타났다.

심해파 추정을 위한 해상풍 추정은 1985년 부터 3년간의 일기도를 매 12시간 간격으로 digitizing 하였고 해수면의 온도는 GMS 위성으로부터 관측한 10일 평균값을 위도, 경도 1°의 격자점에서 자료를 구해 사용하였다. Cardone 모델과 DSA-5 모델에 의한 해상풍과 파랑의 추정 결과를 일본기상청(JMA)의 MRI 모델 결과와 비교하였다. 추정치는 평균적으로 MRI 모델 결과보다 낮게 나타났으나, 바람과 파랑이 큰 경우에는 MRI 결과보다 더 크게 나타났다. 이는 본 모델의 격자가 JMA 격자의 1/2이므로 태풍과 같이 공간적인 변화가 큰 경우에 대해 JMA보다 공간적 분포를 더 세밀하게 나타낼 수 있기 때문인 것으로 생각된다. 태풍 VERA(1986.8)시 관측자료와의 비교에서도, DSA-5 모델과 MRI 모델 모두 좋은 결과를 보였다.

천해파의 산정에는 유의파의 천해변형과 불규칙파의 천해 변형에 대한 연

구가 이루어졌다. 유의파의 경우 마찰이 고려된 일정경사면 위의 파랑변형을 다루었다. 이 연구를 통하여 기존 연구결과인 Nielsen(1983)의 에너지 보존식은 잘못 세워진 것으로 밝혀졌으며 입사각이 커질수록 마찰에 의한 감쇄도 커지는 것으로 나타났다. 굴절과 회절이 함께 고려된 유의파 변형모델인 “KORDI 89 모델”이 개발되었으며, 이 모델의 특징은 기억장치의 효율적인 사용과 빠른 계산력에 있으므로 PC로도 충분히 계산할 수 있다. 모델의 검증을 위해서 기존 실험치와 본 모델의 결과를 비교했으며 특히 회절 현상에 대한 본 모델의 재현 능력이 뛰어난 것으로 밝혀졌다.

유의파를 사용한 굴절 계산결과로부터 인접 격자점 간에 매우 급격한 파고의 변화를 종종 발견하게 되며, 이는 실제 현상과는 부합되지 않는다. 이러한 점을 보완할 목적으로 개발된 불규칙 파랑의 변형에 대한 산정방법이 소개되었다. 불규칙 파랑을 나타내기 위하여 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼이 사용되었고 유한개의 주파수대와 방향으로 나누어 각 구간에 속한 대표주기와 에너지가 각각 계산되었다. 이를 각 구간의 대표 파랑으로 간주하여 유의파 추정방법에 사용한 천해 변형 결과를 계산한 뒤 이를 중첩하여 굴절계수를 계산하는 방법이다. 이 방법에 의해 계산된 굴절계수(또는 파고)는 인접 격자점간에 매우 완만하게 변하게 되며, 따라서 실제 현상에 보다 근접한 결과로 사료된다.

파향스펙트럼의 분석 연구에는 Longuet-Higgins 등의 방법(LHM)과 최대엔트로피 방법(MEP)이 소개되었고 이들이 방향 분포함수를 재현하는 정도를 검토하기 위해 수치 실험을 했으며, 그 결과 MEP는 파향의 분해능력이 우수한 것으로 나타났으며, 쌍봉형의 스펙트럼의 경우라도 두 peak의 차이가 큰 경우에는 뛰어난 분해능력을 보여주었다. 특히 MEP는 Delta 함수로 표현되는 방향분포는 원 분포를 그대로 재현 하는 것으로 밝혀졌다. 한편, LHM은 계

산시간이 빠른 점을 제외하면 MEP에 비해 방향 분해능력이 매우 뒤떨어지는 것으로 나타났다.

불규칙 파동장의 방향성을 나타내는 여러가지 방향파라미터를 소개하였다. Longuet-Higgins의 long-crestedness 파라미터는 파랑의 방향성을 나타내는 지표로 부적합한 경우가 있기 때문에 Goda의 평균분산각을 방향파라미터로 사용하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

극치 통계분석에 사용되는 확률가중적률(probability weighted moment:PWM) 방법이 소개되었으며, 이는 모집단 분포에 대한 파라미터를 추정하는 방법이다. 기존적률 (conventional moment)을 사용하는 방법은 변수  $x$ 에  $r$  승이 가해져  $r$  값이 커짐에 따라 관측치의 오차가 증폭되나 PWM 방법은 비초과 확률  $F$ 에  $r$  승이 가해지기 때문에 오차는 크게 증폭되지 않는다. 특히 확률변수가 비초과 확률로 explicit하게 표시되는 경우(즉, 역함수가 존재하는 경우) PWM 방법은 매우 쉽게 적용될 수 있다.

단기간의 관측자료를 극치분석할 때 생기는 오차를 규명할 목적으로 Weibull 분포에 대한 예를 들어 신뢰구간, 관측년수, 관측간격 그리고 분포 형태의 parameter에 대한 변화를 조사하였다. 단기간의 자료로부터 외삽에 의해 발생하는 오차는 재현기간의 제곱근에 비례하고 관측기간과 파라미터의 제곱근에 반비례하였다.

## 사 사

본 연구 수행을 위해 도움을 주신 관계기관 여러분들께 깊은 감사를 드립니다. 특히 교통부 수로국, 해운항만청, 중앙기상대, 수산청의 자료 제공과 협조에 깊이 감사드립니다. 또한 일본기상연구소와 국립방재과학기술센터의 자료협조에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 서승남, 오병철, 강시환, 1989. 굴절에 의한 천해파 산정법, 한국해안·해양공학회지 제1권 제1호 : 15-21
- 수산청. 1989. 어항설계 천해파 추정보고서(II).
- 이정규, 이종인. 1990. 파의 굴절 및 회절에 미치는 비선형 효과에 대한 수치해석, 한국해안·해양공학회지, Vol. 2, No.1 : 51-57.
- 중앙기상대. 1984. 한국태풍 80년보(1904-1983).
- 해양연구소. 1989. 연안방재시설의 설계기준 산출연구(I). BSPG 00076--230-2.
- 合田良實, 1981. 二方向波浪系における代表波向の算定について. 第28回海岸工学講演會 論文集 : 163-167.
- 寒川典昭, 荒木正夫, 1983. 水文事象の頻度分析へのMEPの導入について. 土木學會論文報告書, 第335號 : 89-95.
- 宮崎正衝. 1951. 大阪灣沿岸の高朝について. 海洋報告, 2:103-114.
- 光易 恒. 1981. 高朝の發生機構・極値の研究・文部省科學研究費 「高朝の發生機構とその極値に関する研究」, 9-55.
- 梶浦欣二郎. 1959. 高朝について. 海と空, 37:88~95, 125~129.
- Bowen, A.J., et al. 1968. Wave set-up and set-down. J. Geophy. Res.73:2569-2579.
- Bretschneider, C.L. and R.O. Reid. 1954. Modification of wave height due to bottom friction, percolation, and refraction. U.S.Army Corps Eng., Beach Erosion Board Tech. Memo., No.45

- Capon, J. 1969. High resolution frequency wave number spectrum analysis. Proc. IEEE, Vol. 57, No. 8:1408-1696.
- Cardone, V. J. 1969. Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting. New York Univ. school of Eng. and Science, Report GSL-TR 69-1.
- Choi, B.H. 1980. Tidal analysis at Inchon for the years 1962-1972 and 1975-1977. KORDI Report 80-01.
- Corson, W. D. and D. T. Resio. 1981. Comparisons of hindcast and measured deep water significant wave heights. U. S. Army, Corps of Engineers, WES, WIS Report No. 3.
- Dingemans, M. W., M. J. F. Stive, A. J. Kuik, A. C. Radder, and N. Booij. 1984. Field and laboratory verification of the wave propagation model CREDIZ. Proc. Int. Conf. Coastal Eng., 19th, 1178-1191.
- Easton, A.K. 1977. Selected program for tidal analysis and prediction. Computing Report. No. 9, Flinders Univ. South Australia.
- Gelci, R., H. Caxale, and J. Vassal. 1957. Prevision de la houle. La methode des densites spectro-angulaires. Bulletin d'information du Comite Central d'Oceanographic et d'Etudes des Cotes. IX(8).
- Gelci, R., and E. Devillaz. 1975. Le calcul numerique de l'etat de la mer. La Meteorologie. VI eme serie. No. 2.
- Goda, Y. 1967. Note on the presentation and utilization of wave observation data. Report of the Port and Harbour Research Institute, Tokyo, Japan, 39:237-255



- Goda, Y. 1985. Random seas and design of maritime structures. Univ. of Tokyo Press.
- Grace, R. A. 1970. How to measure waves. Ocean Industry, 5:65-69.
- Greenberg, M.D. 1978. Foundations of applied mathematics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Greenwood, J. A., J.M. Landwehr, N.C. Matalas, and J. R. Wallis. 1979. Probability weighted moments. Water Resource Res., 15:1049-1054.
- Gunther, H., W. Rosenthal, T. J. Weare, B. A. Worthington, K. Hasselmann, and J. A. Ewing. 1979. A hybrid parametrical wave prediction model. J. Geophys. Res. 84: 5727-5738.
- Gunther, H., W. Rosenthal, and M. Dunkel. 1981. The response of surface gravity waves to changing wind direction. J. Phys. Oceano. 11: 718-728.
- Harris, D. L. 1972. Characteristic of wave records in the coastal zone. Advanced Seminar on Waves and Beaches, Academic Press, New York, N. Y.
- Heaps, N.S. 1967. Storm surges. Oceanogr. Nar. Biol. Annu. Rev. 5:11-47.
- Horikawa, K. 1988. Nearshore dynamics and coastal process. Univ. of Tokyo Press.
- Houma, M.K. Horikawa, and S. Komori. 1966. Response characteristics of underwater wave gauge. Proc. 10th Coastal Eng. Conf., Tokyo, 99-119.
- Hunt, J.N. 1979. Direct solution of wave dispersion equation. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE, Vol. 105 No. WW4 : 457-459

- Isobe, M. 1982. Long Period field observation on horizontal distribution of waves and currents in the nearshore zone. NERC Rep., No. 17, TR-82-1 : 26-47.
- Isobe, M. 1986. A parabolic refraction-diffraction equation in the ray-front coordinate system. Proc. 20th Intl. Conf. Coastal Eng., Taipei, 306-317.
- Isobe, M., K. Kondo, K. Horikawa. 1984. Extension of MLM for estimation directional wave spectra. Proc. Symp. on description and modelling of directional seas, Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, Paper No. 6, Danish Hydraulic Inst. and Danish Maritime Inst.
- Isozaki, I. 1971. An investigation on the variations of sea level due to meteorological disturbances on the coast of Japanese Islands(VI). Pap. Meteorol. Geophy., 21:421-448.
- Ito, Y. and K. Tanimoto. 1972. A method of numerical analysis of wave propagation-Application to wave diffraction and refraction. Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., 503-522.
- Kirby, J. T. 1986. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves. J. Geophys. Res., Vol. 91, C1: 933-952.
- Kirby, J. T. 1988. Parabolic wave computations in non-orthogonal coordinate systems. J. Waterways Port Coastal and Ocean Eng., Vol. 114, No. 6: 673-685.
- Kirby, J. T., and R. A. Dalrymple. 1984. Verification of a parabolic equation for propagation of weakly-nonlinear waves. Coastal Eng., Vol. 8: 219-232.

- Kobune, K. and N. Hashimoto. 1986. Estimation of directional spectra from the maximum entropy principle. Proc. 5th Int. Offshore Mech. and Arctic Eng. Symp., ASME, Vol. 1 : 80-85.
- Kobune, K., H. Sasaki and N. Hashimoto. 1988. Characteristics of ocean waves off Cape Nojima in the North Western Pacific, measured with a discus buoy. Coastal Eng. in Japan, Vol. 30, No. 2:45-62.
- Landwehr, J. M., N.C. Matalas, and J. R. Wallis. 1979. Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantities. Water Resource Res., 15:1055-1064.
- Lawson, N. V. and C. L. Abernathy. 1975. Long-term wave statistics off Botany Bay. Proc. 2nd Australian Conf. on Coastal and Ocean Eng., Sydney, Australia, 167-176
- Le Mehaute, B. and S. Wang. 1984. Effects of measurement error on long-term wave statistics. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., Houston, 345-361.
- Longuet-Higgins, M.S. 1956. The statistical analysis of a random, moving surface. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A(966), Vol. 249:321-387.
- Longuet-Higgins, M.S., D.E. Cartwright and N.D. Smith. 1963. Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. Ocean Wave Spectra, Prentice Hall Inc., N.J., 111-136.
- Longuet-Higgins, M.S. and R. W. Stewart. 1962. Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to surf beats. J. Fluid Mech., 13 : 481-504.
- Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart. 1964. Radiation stress in water waves, a physical discussion with application. Deep Sea Res. 11:529-562.

- Mitsuyasu, H. and S. Mizuno. 1976. Directional spectra of ocean surface waves. Coastal Eng., ASCE : 329-348.
- Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi. 1975. Observations of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. J. Phys. Oceanogr., Vol. 5, No. 4 : 750-760.
- Nagata, Y. 1964. The statistical properties of orbital wave motions and their application for the measurement of directional wave spectra. J. Oceanog. Soc. Japan. Vol. 19, No.4:169-181.
- Nielsen, P. 1982. Explicit formula for practical wave calculations. Coastal Eng. Vol. 6 : 389 - 398
- Nielsen, P. 1983. Analytical determination of nearshore wave height variation due to refraction shoaling and friction. Coastal Eng. Vol. 7 : 233 - 251
- Panicker, N.N. and L.E. Borgman. 1974. Enhancement of directional wave spectrum estimates. Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE :258-279.
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling. 1986. Numerical recipes. Cambridge Univ. Press.
- Putnam, J.A. and R.S. Arthur. 1948. Diffraction of water waves by breakwaters. Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 29, No. 4 : 481-490
- Radder, A. C. 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation. J. Fluid Mech., Vol. 95: 159-176.
- Reid, R.O. 1956. Approximate response of water level on sloping shelf of a wind fetch which moves forward shore. Tech. Memo. No. 83, Beach Erosion Board.

- Reid, R.O. 1957. Modification of quadratic bottom stress law for turbulent channel flow in the presence of surface wind stress. U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech, Memo., 93p.
- Sea Wave Modelling Project(SWAMP). 1983. An intercomparison study of wind wave prediction models.
- Svendsen, I.A. and I.G. Jonsson. 1982. Hydrodynamics of coastal regions. Tech. Univ. of Denmark
- Takahashi, K. 1959. Weather statistics. Meteorol. Agency, Chyin Stoken Pub., Tokyo, Japan.
- Tang, S. and B. Le Mehaute. 1983. Duration of measurements and long term statistics. J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., ACSE, 109(2): 236-249.
- Tsay, T.-K., and Liu, P. L.-F. 1982. Numerical solution of water wave refraction and diffraction problems in the parabolic approximation. J. Geophys. Res., Vol. 97: 7932-7940.
- Wang, S. and B. Le Mehaute. 1983. Duration of measurements and long term statistics. J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Eng., ACSE, 109(2) : 236-249
- Wilson, B. W. 1961. Deep water wave generations by moving wind systems. ASCE, 87(WW2): 131-141.
- Wilson, B. W. 1965. Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959. Deutsche Hydri-gra-Phische Zeit-Schrift, 18, Heft 3.

- Wu, C.S. and E.B. Thornton. 1986. Wave numbers of linear progressive waves. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 112, No. 4 : 536-540
- Wu, J. 1980. Wind stress coefficients over sea surface near neutral conditions: A revisit. J. Rhy. Oceanogr. 10:727-740.
- Wu, J. 1982. Wind stress coefficients over sea breeze to hurricane. J. Geophy. Res. 87:9704-9706.

# 附 錄

## Harmonic constant for Yeosu(1984)

## Harmonic constant for Yeosu(1985)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	179.69	0.000	1	Zo	0.000000	180.89	0.000
2	SA	0.041069	15.03	150.574	2	SA	0.041069	16.10	134.853
3	SSA	0.082137	1.66	168.973	3	SSA	0.082137	0.86	237.846
4	MM	0.544375	2.53	325.821	4	MM	0.544375	0.38	189.237
5	MSF	1.015896	1.40	30.285	5	MSF	1.015896	0.84	24.017
6	MF	1.098033	1.43	190.343	6	MF	1.098033	1.26	227.475
7	QO1	12.854290	0.14	268.627	7	QO1	12.854290	0.14	108.175
8	SIGMA1	12.927140	0.05	238.734	8	SIGMA1	12.927140	0.18	250.292
9	Q1	13.398660	2.73	126.285	9	Q1	13.398660	2.63	133.362
10	RO1	13.471514	0.55	112.626	10	RO1	13.471514	0.52	136.786
11	O1	13.943040	12.62	148.999	11	O1	13.943040	12.78	150.281
12	MP1	14.025173	0.21	91.802	12	MP1	14.025173	0.46	112.062
13	M1	14.492052	0.55	169.523	13	M1	14.492052	0.54	171.465
14	CHI1	14.569550	0.18	168.511	14	CHI1	14.569550	0.18	228.044
15	PI1	14.917864	0.11	198.190	15	PI1	14.917864	0.28	224.202
16	P1	14.958930	5.91	179.588	16	P1	14.958930	5.92	178.514
17	S1	15.000000	0.89	109.488	17	S1	15.000000	0.72	104.271
18	K1	15.041070	18.85	182.472	18	K1	15.041070	19.01	182.592
19	PS11	15.082140	0.51	73.705	19	PS11	15.082140	0.08	39.400
20	FI1	15.123210	0.32	53.578	20	FI1	15.123210	0.24	83.687
21	THETA1	15.512590	0.21	221.086	21	THETA1	15.512590	0.22	178.784
22	J1	15.585443	1.18	215.077	22	J1	15.585443	1.22	202.867
23	SO1	16.056964	0.50	280.597	23	SO1	16.056964	0.29	287.414
24	OO1	16.139101	0.55	228.337	24	OO1	16.139101	0.64	227.537
25	OQ2	27.341700	0.48	40.913	25	OQ2	27.341700	0.56	18.304
26	MNS2	27.423833	1.44	220.593	26	MNS2	27.423833	1.19	213.850
27	2N2	27.895360	3.34	220.470	27	2N2	27.895360	4.00	243.365
28	MU2	27.968210	4.50	241.999	28	MU2	27.968210	4.68	233.061
29	N2	28.439730	20.42	246.577	29	N2	28.439730	19.98	250.009
30	NU2	28.512582	3.23	250.611	30	NU2	28.512582	3.52	251.122
31	OP2	28.901970	0.34	204.238	31	OP2	28.901970	1.18	114.503
32	M2	28.984104	98.17	259.881	32	M2	28.984104	98.15	260.008
33	MKS2	29.066242	0.53	35.851	33	MKS2	29.066242	0.88	49.558
34	LAMBDA2	29.455630	0.61	243.963	34	LAMBDA2	29.455630	0.90	251.823
35	L2	29.528480	2.18	257.039	35	L2	29.528480	1.75	234.320
36	T2	29.958932	4.12	287.203	36	T2	29.958932	3.43	301.950
37	S2	30.000000	45.86	295.358	37	S2	30.000000	45.97	295.582
38	R2	30.041070	1.10	170.792	38	R2	30.041070	1.68	171.660
39	K2	30.082140	12.25	288.370	39	K2	30.082140	12.46	290.056
40	MSN2	30.544374	0.76	348.935	40	MSN2	30.544374	0.47	314.257
41	KJ2	30.626510	1.00	142.963	41	KJ2	30.626510	0.74	151.913
42	2SM2	31.015900	1.48	49.044	42	2SM2	31.015900	0.84	67.541
43	MO3	42.927140	0.77	174.974	43	MO3	42.927140	1.16	167.571
44	M3	43.476160	2.25	186.814	44	M3	43.476160	2.40	191.538
45	SO3	43.943040	0.69	138.611	45	SO3	43.943040	0.40	144.479
46	MK3	44.025173	0.85	188.281	46	MK3	44.025173	0.67	176.557
47	SK3	45.041070	0.96	186.209	47	SK3	45.041070	1.10	191.467
48	MN4	57.423831	0.81	240.558	48	MN4	57.423831	0.71	247.065
49	M4	57.968210	1.49	246.324	49	M4	57.968210	1.35	253.889
50	SN4	58.439730	0.28	316.023	50	SN4	58.439730	0.31	265.067
51	MS4	58.984104	1.81	285.423	51	MS4	58.984104	1.63	291.677
52	MK4	59.066242	0.52	291.672	52	MK4	59.066242	0.62	293.950
53	S4	60.000000	0.45	23.005	53	S4	60.000000	0.43	28.394
54	SK4	60.082140	0.27	0.083	54	SK4	60.082140	0.31	341.172
55	2MN6	86.407940	0.67	44.585	55	2MN6	86.407940	0.56	50.131
56	M6	86.952320	1.28	71.917	56	M6	86.952320	1.22	79.235
57	MSN6	87.423830	0.42	89.733	57	MSN6	87.423830	0.42	88.025
58	2MS6	87.968210	1.55	112.544	58	2MS6	87.968210	1.50	118.827
59	2MK6	88.050350	0.38	95.425	59	2MK6	88.050350	0.34	108.280
60	2SM6	88.984100	0.46	137.461	60	2SM6	88.984100	0.51	136.475
61	MSK6	89.066240	0.35	131.741	61	MSK6	89.066240	0.26	145.567
62	M8	115.936410	0.11	117.152	62	M8	115.936410	0.10	68.967
63	2MSN8	116.407930	0.08	128.156	63	2MSN8	116.407930	0.08	184.530
64	3MS8	116.952310	0.23	164.715	64	3MS8	116.952310	0.18	168.702
65	2(MS)8	117.968200	0.13	184.911	65	2(MS)8	117.968200	0.10	267.558



## Harmonic constant for Yeosu(1981)

## Harmonic constant for Yeosu(1982)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	178.13	0.000	1	Zo	0.000000	175.22	0.000
2	SA	0.041069	19.63	134.105	2	SA	0.041069	22.01	141.459
3	SSA	0.082137	5.13	336.799	3	SSA	0.082137	3.90	55.868
4	MM	0.544375	2.09	113.133	4	MM	0.544375	1.52	93.996
5	MSF	1.015896	0.67	139.991	5	MSF	1.015896	0.50	252.604
6	MF	1.098033	1.32	156.179	6	MF	1.098033	1.14	149.724
7	ZQ1	12.854290	0.58	114.949	7	ZQ1	12.854290	0.48	144.086
8	SIGMA1	12.927140	0.06	226.685	8	SIGMA1	12.927140	0.44	131.083
9	Q1	13.398660	2.58	128.271	9	Q1	13.398660	2.46	127.986
10	R01	13.471514	0.86	145.990	10	R01	13.471514	0.65	119.821
11	O1	13.943040	12.69	150.528	11	O1	13.943040	12.91	152.089
12	MP1	14.025173	0.24	123.476	12	MP1	14.025173	0.38	86.102
13	M1	14.492052	0.68	163.067	13	M1	14.492052	0.71	177.095
14	CHI1	14.569550	0.05	16.683	14	CHI1	14.569550	0.25	149.371
15	PI1	14.917864	0.39	207.126	15	PI1	14.917864	0.24	183.000
16	P1	14.958930	6.20	178.169	16	P1	14.958930	5.97	180.626
17	S1	15.000000	0.67	88.463	17	S1	15.000000	0.86	93.545
18	K1	15.041070	18.80	182.727	18	K1	15.041070	18.56	183.314
19	PSI1	15.082140	0.39	81.904	19	PSI1	15.082140	0.33	69.319
20	FI1	15.123210	0.24	321.826	20	FI1	15.123210	0.25	3.406
21	THETA1	15.512590	0.50	203.006	21	THETA1	15.512590	0.27	217.159
22	J1	15.585443	1.40	217.626	22	J1	15.585443	1.27	221.596
23	S01	16.056964	0.57	303.358	23	S01	16.056964	0.57	291.014
24	001	16.139101	0.59	210.356	24	001	16.139101	0.52	216.450
25	OQ2	27.341700	1.00	2.134	25	OQ2	27.341700	0.16	88.378
26	MNS2	27.423833	1.19	234.587	26	MNS2	27.423833	0.84	203.271
27	2N2	27.895360	3.32	238.022	27	2N2	27.895360	2.25	236.882
28	MU2	27.968210	5.01	247.825	28	MU2	27.968210	4.67	239.931
29	N2	28.439730	19.67	247.789	29	N2	28.439730	19.92	247.230
30	NU2	28.512582	4.40	250.226	30	NU2	28.512582	2.87	249.097
31	OP2	28.901970	0.40	40.636	31	OP2	28.901970	0.66	83.771
32	M2	28.984104	99.04	259.872	32	M2	28.984104	99.16	260.433
33	MKS2	29.066242	0.59	162.498	33	MKS2	29.066242	0.40	341.573
34	LAMBDA2	29.455630	1.52	254.398	34	LAMBDA2	29.455630	0.55	188.355
35	L2	29.528480	1.18	252.901	35	L2	29.528480	2.43	266.120
36	T2	29.958932	3.03	295.984	36	T2	29.958932	3.69	297.603
37	S2	30.000000	45.64	296.384	37	S2	30.000000	45.89	297.292
38	R2	30.041070	0.99	149.184	38	R2	30.041070	1.18	162.845
39	K2	30.082140	12.88	287.838	39	K2	30.082140	12.69	291.404
40	MSN2	30.544374	0.56	15.221	40	MSN2	30.544374	0.34	41.680
41	KJ2	30.626510	0.50	142.396	41	KJ2	30.626510	0.63	154.525
42	2SM2	31.015900	0.95	50.788	42	2SM2	31.015900	1.01	64.912
43	M03	42.927140	0.88	102.290	43	M03	42.927140	0.82	95.899
44	M3	43.476160	2.29	183.565	44	M3	43.476160	2.11	189.334
45	S03	43.943040	0.58	175.307	45	S03	43.943040	0.50	162.078
46	MK3	44.025173	0.79	169.715	46	MK3	44.025173	0.99	178.696
47	SK3	45.041070	1.24	191.810	47	SK3	45.041070	1.17	183.999
48	MN4	57.423831	1.01	243.099	48	MN4	57.423831	0.67	238.260
49	M4	57.968210	1.91	250.488	49	M4	57.968210	1.73	252.350
50	SN4	58.439730	0.29	300.204	50	SN4	58.439730	0.28	257.962
51	MS4	58.984104	1.81	294.230	51	MS4	58.984104	1.80	282.746
52	MK4	59.066242	0.79	281.385	52	MK4	59.066242	0.56	293.309
53	S4	60.000000	0.48	3.991	53	S4	60.000000	0.44	348.340
54	SK4	60.082140	0.48	4.781	54	SK4	60.082140	0.32	344.967
55	2MN6	86.407940	0.63	44.018	55	2MN6	86.407940	0.65	43.187
56	M6	86.952320	1.29	68.226	56	M6	86.952320	1.30	70.809
57	MSN6	87.423830	0.39	83.750	57	MSN6	87.423830	0.52	79.877
58	2MS6	87.968210	1.58	113.195	58	2MS6	87.968210	1.63	114.037
59	2MK6	88.050350	0.58	82.766	59	2MK6	88.050350	0.48	100.117
60	2SM6	88.984100	0.69	122.836	60	2SM6	88.984100	0.63	134.293
61	MSK6	89.066240	0.44	151.883	61	MSK6	89.066240	0.21	128.059
62	M8	115.936410	0.11	118.610	62	M8	115.936410	0.10	69.156
63	2MSN8	116.407930	0.11	158.377	63	2MSN8	116.407930	0.10	114.874
64	3MS8	116.952310	0.26	155.720	64	3MS8	116.952310	0.20	160.768
65	2(MS)8	117.968200	0.15	203.769	65	2(MS)8	117.968200	0.11	200.083

## Harmonic constant for Pusan(1987)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	66.41	0.000
2	SA	0.041069	9.08	149.151
3	SSA	0.082137	2.97	260.125
4	MM	0.544375	0.71	103.962
5	MSF	1.015896	2.42	221.511
6	MF	1.098033	1.86	215.594
7	ZQ1	12.854290	0.23	121.012
8	SIGMA1	12.927140	0.07	244.071
9	Q1	13.398660	0.28	64.980
10	RO1	13.471514	0.11	77.357
11	O1	13.943040	1.72	104.354
12	MP1	14.025173	0.08	113.874
13	M1	14.492052	0.01	123.254
14	CHI1	14.569550	0.04	94.404
15	PI1	14.917864	0.38	212.480
16	P1	14.958930	1.46	144.615
17	S1	15.000000	0.31	68.780
18	K1	15.041070	4.54	144.979
19	PSI1	15.082140	0.19	248.517
20	FI1	15.123210	0.28	53.041
21	THETA1	15.512590	0.04	204.552
22	J1	15.585443	0.28	200.954
23	S01	16.056964	0.15	292.851
24	001	16.139101	0.13	203.670
25	OQ2	27.341700	0.11	323.105
26	MNS2	27.423833	0.59	210.052
27	2N2	27.895360	0.78	223.591
28	MU2	27.968210	1.71	229.309
29	N2	28.439730	7.43	231.120
30	NU2	28.512582	1.17	235.862
31	OP2	28.901970	0.15	204.426
32	M2	28.984104	39.74	237.508
33	MKS2	29.066242	0.39	275.870
34	LAMBDA2	29.455630	0.62	235.852
35	L2	29.528480	1.22	226.371
36	T2	29.958932	1.54	276.191
37	S2	30.000000	18.34	274.824
38	R2	30.041070	0.88	149.738
39	K2	30.082140	5.20	268.488
40	MSN2	30.544374	0.46	31.541
41	KJ2	30.626510	0.52	123.241
42	2SM2	31.015900	0.40	67.598
43	MO3	42.927140	0.74	89.202
44	M3	43.476160	1.10	162.616
45	S03	43.943040	0.48	91.858
46	MK3	44.025173	0.48	101.653
47	SK3	45.041070	0.54	135.254
48	MN4	57.423831	0.39	200.207
49	M4	57.968210	0.64	207.725
50	SN4	58.439730	0.23	214.458
51	MS4	58.984104	0.65	226.447
52	MK4	59.066242	0.20	220.873
53	S4	60.000000	0.20	268.619
54	SK4	60.082140	0.10	281.872
55	2MN6	86.407940	0.03	351.139
56	M6	86.952320	0.10	79.014
57	MSN6	87.423830	0.11	185.383
58	2MS6	87.968210	0.16	77.764
59	2MK6	88.050350	0.03	167.981
60	2SM6	88.984100	0.12	204.574
61	MSK6	89.066240	0.09	204.900
62	M8	115.936410	0.04	89.329
63	2MSN8	116.407930	0.03	148.463
64	3MS8	116.952310	0.02	14.395
65	2(MS)8	117.968200	0.02	302.492

## Harmonic constant for Chungmu(1987)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	144.79	0.000
2	SA	0.041069	11.53	150.843
3	SSA	0.082137	2.24	267.168
4	MM	0.544375	0.46	64.934
5	MSF	1.015896	1.57	222.157
6	MF	1.098033	1.62	216.720
7	ZQ1	12.854290	0.49	139.511
8	SIGMA1	12.927140	0.19	139.185
9	Q1	13.398660	1.82	129.569
10	RO1	13.471514	0.34	134.979
11	O1	13.943040	9.81	148.676
12	MP1	14.025173	0.37	106.279
13	M1	14.492052	0.48	165.550
14	CHI1	14.569550	0.12	148.184
15	PI1	14.917864	0.48	215.984
16	P1	14.958930	5.05	176.473
17	S1	15.000000	0.41	57.424
18	K1	15.041070	15.05	180.542
19	PSI1	15.082140	0.19	316.932
20	FI1	15.123210	0.14	19.262
21	THETA1	15.512590	0.13	243.534
22	J1	15.585443	0.96	210.854
23	S01	16.056964	0.42	284.088
24	001	16.139101	0.51	232.376
25	OQ2	27.341700	0.17	346.187
26	MNS2	27.423833	1.00	214.078
27	2N2	27.895360	1.39	223.622
28	MU2	27.968210	4.02	234.395
29	N2	28.439730	15.41	243.984
30	NU2	28.512582	2.39	243.931
31	OP2	28.901970	0.44	123.875
32	M2	28.984104	78.05	252.876
33	MKS2	29.066242	0.54	313.924
34	LAMBDA2	29.455630	0.68	239.250
35	L2	29.528480	2.07	241.890
36	T2	29.958932	2.46	292.230
37	S2	30.000000	35.66	288.918
38	R2	30.041070	1.51	166.783
39	K2	30.082140	9.85	281.993
40	MSN2	30.544374	0.56	16.317
41	KJ2	30.626510	0.89	123.375
42	2SM2	31.015900	0.95	63.260
43	MO3	42.927140	1.46	118.413
44	M3	43.476160	1.85	168.476
45	S03	43.943040	0.54	120.147
46	MK3	44.025173	0.76	140.744
47	SK3	45.041070	1.03	159.503
48	MN4	57.423831	0.56	226.729
49	M4	57.968210	1.04	239.922
50	SN4	58.439730	0.31	263.754
51	MS4	58.984104	0.91	273.872
52	MK4	59.066242	0.32	276.380
53	S4	60.000000	0.30	340.299
54	SK4	60.082140	0.20	319.852
55	2MN6	86.407940	0.40	16.843
56	M6	86.952320	0.75	37.982
57	MSN6	87.423830	0.21	56.712
58	2MS6	87.968210	1.00	73.289
59	2MK6	88.050350	0.20	63.506
60	2SM6	88.984100	0.32	110.599
61	MSK6	89.066240	0.20	115.272
62	M8	115.936410	0.08	194.779
63	2MSN8	116.407930	0.08	241.862
64	3MS8	116.952310	0.21	238.124
65	2(MS)8	117.968200	0.12	273.209

## Harmonic constant for Pusan(1985)

## Harmonic constant for Pusan(1986)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	64.38	0.000	1	Zo	0.000000	66.17	0.000
2	SA	0.041069	12.68	138.739	2	SA	0.041069	10.84	142.324
3	SSA	0.082137	1.52	198.852	3	SSA	0.082137	2.44	300.388
4	MM	0.544375	0.65	211.348	4	MM	0.544375	2.04	201.838
5	MSF	1.015896	0.81	39.921	5	MSF	1.015896	0.59	142.926
6	MF	1.098033	1.35	224.109	6	MF	1.098033	1.24	216.129
7	ZQ1	12.854290	0.06	359.911	7	ZQ1	12.854290	0.16	73.301
8	SIGMA1	12.927140	0.13	278.535	8	SIGMA1	12.927140	0.20	199.876
9	Q1	13.398660	0.12	85.001	9	Q1	13.398660	0.12	104.476
10	RO1	13.471514	0.02	138.126	10	RO1	13.471514	0.07	278.690
11	O1	13.943040	1.65	102.032	11	O1	13.943040	1.55	106.394
12	MP1	14.025173	0.18	146.586	12	MP1	14.025173	0.07	247.509
13	M1	14.492052	0.14	142.497	13	M1	14.492052	0.20	155.828
14	CHI1	14.569550	0.10	197.545	14	CHI1	14.569550	0.02	159.443
15	PI1	14.917864	0.18	281.305	15	PI1	14.917864	0.12	148.433
16	P1	14.958930	1.29	144.756	16	P1	14.958930	1.38	153.805
17	S1	15.000000	0.46	68.430	17	S1	15.000000	0.50	66.925
18	K1	15.041070	4.66	142.817	18	K1	15.041070	4.42	144.700
19	PS11	15.082140	0.09	318.120	19	PS11	15.082140	0.19	237.332
20	FI1	15.123210	0.08	128.258	20	FI1	15.123210	0.17	58.958
21	THETA1	15.512590	0.11	167.962	21	THETA1	15.512590	0.07	182.777
22	J1	15.585443	0.27	179.961	22	J1	15.585443	0.35	198.588
23	S01	16.056964	0.38	290.001	23	S01	16.056964	0.41	273.838
24	Q01	16.139101	0.20	201.633	24	Q01	16.139101	0.19	182.540
25	Q02	27.341700	0.23	337.437	25	Q02	27.341700	0.11	310.135
26	MNS2	27.423833	0.59	202.331	26	MNS2	27.423833	0.67	197.185
27	2N2	27.895360	1.34	209.134	27	2N2	27.895360	1.10	223.698
28	MU2	27.968210	1.69	223.047	28	MU2	27.968210	1.76	219.487
29	N2	28.439730	8.01	226.568	29	N2	28.439730	7.66	229.129
30	NU2	28.512582	1.33	227.214	30	NU2	28.512582	1.21	214.407
31	OP2	28.901970	0.16	53.911	31	OP2	28.901970	0.24	60.332
32	M2	28.984104	40.01	236.041	32	M2	28.984104	40.06	236.804
33	MKS2	29.066242	0.12	359.765	33	MKS2	29.066242	0.23	3.011
34	LAMBDA2	29.455630	0.32	213.316	34	LAMBDA2	29.455630	0.20	253.184
35	L2	29.528480	1.15	227.001	35	L2	29.528480	0.93	228.401
36	T2	29.958932	1.57	268.640	36	T2	29.958932	1.34	272.441
37	S2	30.000000	18.99	273.627	37	S2	30.000000	18.79	274.315
38	R2	30.041070	0.58	140.255	38	R2	30.041070	0.79	135.313
39	K2	30.082140	5.37	265.457	39	K2	30.082140	5.30	266.527
40	MSN2	30.544374	0.14	258.099	40	MSN2	30.544374	0.14	44.565
41	KJ2	30.626510	0.37	116.278	41	KJ2	30.626510	0.51	113.140
42	2SM2	31.015900	0.42	61.463	42	2SM2	31.015900	0.21	94.512
43	M03	42.927140	0.53	104.521	43	M03	42.927140	0.74	98.765
44	M3	43.476160	1.20	163.735	44	M3	43.476160	1.25	158.436
45	S03	43.943040	0.44	87.219	45	S03	43.943040	0.52	88.921
46	MK3	44.025173	0.55	102.620	46	MK3	44.025173	0.49	91.939
47	SK3	45.041070	0.42	150.063	47	SK3	45.041070	0.47	147.859
48	MN4	57.423831	0.34	185.247	48	MN4	57.423831	0.39	182.605
49	M4	57.968210	0.55	200.942	49	M4	57.968210	0.62	200.129
50	SN4	58.439730	0.18	214.086	50	SN4	58.439730	0.21	212.897
51	MS4	58.984104	0.63	230.463	51	MS4	58.984104	0.67	235.662
52	MK4	59.066242	0.33	229.108	52	MK4	59.066242	0.25	217.170
53	S4	60.000000	0.17	267.115	53	S4	60.000000	0.17	281.332
54	SK4	60.082140	0.11	278.113	54	SK4	60.082140	0.14	265.908
55	2MN6	86.407940	0.06	51.605	55	2MN6	86.407940	0.07	71.433
56	M6	86.952320	0.17	82.633	56	M6	86.952320	0.09	77.064
57	MSN6	87.423830	0.08	104.803	57	MSN6	87.423830	0.14	134.757
58	2MS6	87.968210	0.17	97.984	58	2MS6	87.968210	0.13	108.992
59	2MK6	88.050350	0.07	93.205	59	2MK6	88.050350	0.05	70.176
60	2SM6	88.984100	0.12	185.826	60	2SM6	88.984100	0.19	203.946
61	MSK6	89.066240	0.09	187.427	61	MSK6	89.066240	0.09	173.053
62	M8	115.936410	0.08	70.632	62	M8	115.936410	0.04	75.880
63	2MSN8	116.407930	0.04	124.929	63	2MSN8	116.407930	0.05	126.678
64	3MS8	116.952310	0.05	143.771	64	3MS8	116.952310	0.01	198.609
65	2(MS)8	117.968200	0.04	199.373	65	2(MS)8	117.968200	0.03	187.461

Harmonic constant for Pusan(1983)

Harmonic constant for Pusan(1984)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	64.29	0.000	1	Zo	0.000000	64.02	0.000
2	SA	0.041069	13.20	135.429	2	SA	0.041069	11.14	146.776
3	SSA	0.082137	2.60	328.853	3	SSA	0.082137	1.65	178.109
4	MM	0.544375	2.14	178.448	4	MM	0.544375	2.19	318.202
5	MSF	1.015896	1.20	131.311	5	MSF	1.015896	0.58	19.289
6	MF	1.098033	0.29	230.500	6	MF	1.098033	1.48	198.114
7	2Q1	12.854290	0.13	157.839	7	2Q1	12.854290	0.18	246.335
8	SIGMA1	12.927140	0.11	194.232	8	SIGMA1	12.927140	0.03	213.342
9	Q1	13.398660	0.15	74.845	9	Q1	13.398660	0.16	77.565
10	R01	13.471514	0.04	86.697	10	R01	13.471514	0.08	39.170
11	O1	13.943040	1.68	104.464	11	O1	13.943040	1.67	100.127
12	MP1	14.025173	0.19	262.988	12	MP1	14.025173	0.10	303.598
13	M1	14.492052	0.12	117.576	13	M1	14.492052	0.14	132.987
14	CH11	14.569550	0.16	107.516	14	CH11	14.569550	0.05	71.790
15	PI1	14.917864	0.16	198.093	15	PI1	14.917864	0.29	222.279
16	P1	14.958930	1.40	142.258	16	P1	14.958930	1.58	150.376
17	S1	15.000000	0.41	87.521	17	S1	15.000000	0.64	87.264
18	K1	15.041070	4.59	143.449	18	K1	15.041070	4.60	141.753
19	PS11	15.082140	0.05	265.460	19	PS11	15.082140	0.20	356.954
20	F11	15.123210	0.19	29.875	20	F11	15.123210	0.13	46.481
21	THETA1	15.512590	0.14	357.682	21	THETA1	15.512590	0.08	194.369
22	J1	15.585443	0.20	188.898	22	J1	15.585443	0.28	198.728
23	S01	16.056964	0.35	268.824	23	S01	16.056964	0.27	290.871
24	001	16.139101	0.20	219.769	24	001	16.139101	0.18	180.656
25	0Q2	27.341700	0.20	127.019	25	0Q2	27.341700	0.16	50.910
26	MNS2	27.423833	0.38	165.963	26	MNS2	27.423833	0.47	202.601
27	2N2	27.895360	0.89	197.721	27	2N2	27.895360	1.07	210.079
28	MU2	27.968210	1.59	218.905	28	MU2	27.968210	1.65	219.607
29	N2	28.439730	7.80	223.731	29	N2	28.439730	8.08	224.493
30	NU2	28.512582	1.33	219.986	30	NU2	28.512582	1.05	220.756
31	OP2	28.901970	0.16	293.524	31	OP2	28.901970	0.44	251.529
32	M2	28.984104	40.33	235.255	32	M2	28.984104	40.17	236.220
33	MKS2	29.066242	0.13	301.419	33	MKS2	29.066242	0.04	164.145
34	LAMBDA2	29.455630	0.45	261.880	34	LAMBDA2	29.455630	0.12	233.078
35	L2	29.528480	0.93	226.371	35	L2	29.528480	1.18	236.799
36	T2	29.958932	1.38	270.937	36	T2	29.958932	1.58	269.504
37	S2	30.000000	18.77	272.761	37	S2	30.000000	18.94	272.465
38	R2	30.041070	0.45	165.672	38	R2	30.041070	0.85	175.374
39	K2	30.082140	5.24	265.757	39	K2	30.082140	5.46	265.641
40	MSN2	30.544374	0.33	342.110	40	MSN2	30.544374	0.43	321.470
41	KJ2	30.626510	0.51	118.040	41	KJ2	30.626510	0.57	126.971
42	2SM2	31.015900	0.29	24.193	42	2SM2	31.015900	0.22	9.419
43	MO3	42.927140	0.53	52.000	43	MO3	42.927140	0.32	87.185
44	M3	43.476160	1.19	171.673	44	M3	43.476160	1.29	161.263
45	S03	43.943040	0.48	84.063	45	S03	43.943040	0.56	92.903
46	MK3	44.025173	0.56	101.321	46	MK3	44.025173	0.51	106.516
47	SK3	45.041070	0.53	146.901	47	SK3	45.041070	0.50	149.774
48	MN4	57.423831	0.42	173.134	48	MN4	57.423831	0.36	193.780
49	M4	57.968210	0.89	186.491	49	M4	57.968210	0.67	198.817
50	SN4	58.439730	0.25	200.992	50	SN4	58.439730	0.14	223.614
51	MS4	58.984104	0.92	225.390	51	MS4	58.984104	0.72	239.115
52	MK4	59.066242	0.36	216.806	52	MK4	59.066242	0.24	226.826
53	S4	60.000000	0.18	287.024	53	S4	60.000000	0.19	288.748
54	SK4	60.082140	0.15	297.637	54	SK4	60.082140	0.14	274.523
55	2MN6	86.407940	0.01	0.883	55	2MN6	86.407940	0.03	51.818
56	M6	86.952320	0.01	349.066	56	M6	86.952320	0.05	71.207
57	MSN6	87.423830	0.04	56.654	57	MSN6	87.423830	0.04	224.318
58	2MS6	87.968210	0.10	71.587	58	2MS6	87.968210	0.13	108.534
59	2MK6	88.050350	0.06	35.607	59	2MK6	88.050350	0.05	116.581
60	2SM6	88.984100	0.03	174.727	60	2SM6	88.984100	0.11	206.067
61	MSK6	89.066240	0.06	108.222	61	MSK6	89.066240	0.09	181.191
62	M8	115.936410	0.03	125.627	62	M8	115.936410	0.05	99.107
63	2MSN8	116.407930	0.03	129.564	63	2MSN8	116.407930	0.04	98.362
64	3MS8	116.952310	0.05	179.520	64	3MS8	116.952310	0.05	155.026
65	2(MS)8	117.968200	0.01	309.066	65	2(MS)8	117.968200	0.05	167.351

## Harmonic constant for Pusan(1981)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	62.02	0.000
2	SA	0.041069	10.08	147.207
3	SSA	0.082137	2.60	314.206
4	MM	0.544375	1.91	129.467
5	MSF	1.015896	1.72	175.923
6	MF	1.098033	1.69	157.929
7	Q01	12.854290	0.06	178.011
8	SIGMA1	12.927140	0.16	233.116
9	Q1	13.398660	0.11	126.470
10	R01	13.471514	0.08	110.747
11	O1	13.943040	1.54	103.815
12	MP1	14.025173	0.09	152.153
13	M1	14.492052	0.14	164.317
14	CHI1	14.569550	0.09	261.892
15	PI1	14.917864	0.16	232.410
16	P1	14.958930	1.36	145.734
17	S1	15.000000	0.59	85.638
18	K1	15.041070	4.36	142.498
19	PSI1	15.082140	0.12	232.830
20	FI1	15.123210	0.01	257.223
21	THETA1	15.512590	0.16	179.288
22	J1	15.585443	0.32	190.185
23	S01	16.056964	0.29	279.931
24	001	16.139101	0.21	215.947
25	OQ2	27.341700	0.15	0.169
26	MNS2	27.423833	0.43	217.146
27	2N2	27.895360	1.21	215.024
28	MU2	27.968210	1.65	228.119
29	N2	28.439730	7.47	224.433
30	NU2	28.512582	1.53	222.141
31	OP2	28.901970	0.10	284.876
32	M2	28.984104	40.08	235.712
33	MKS2	29.066242	0.25	225.962
34	LAMBDA2	29.455630	0.30	232.302
35	L2	29.528480	0.72	231.761
36	T2	29.958932	1.54	273.466
37	S2	30.000000	18.75	272.992
38	R2	30.041070	0.69	145.715
39	K2	30.082140	5.32	267.187
40	MSN2	30.544374	0.16	3.898
41	KJ2	30.626510	0.44	115.568
42	2SM2	31.015900	0.22	53.978
43	MO3	42.927140	0.75	53.366
44	M3	43.476160	1.01	164.102
45	S03	43.943040	0.47	89.815
46	MK3	44.025173	0.64	99.841
47	SK3	45.041070	0.58	142.577
48	MN4	57.423831	0.44	182.971
49	M4	57.968210	0.91	200.068
50	SN4	58.439730	0.17	199.816
51	MS4	58.984104	0.83	234.921
52	MK4	59.066242	0.38	207.093
53	S4	60.000000	0.19	272.938
54	SK4	60.082140	0.13	282.497
55	2MN6	86.407940	0.06	145.142
56	M6	86.952320	0.06	187.396
57	MSN6	87.423830	0.03	329.267
58	2MS6	87.968210	0.03	220.751
59	2MK6	88.050350	0.13	47.147
60	2SM6	88.984100	0.05	91.442
61	MSK6	89.066240	0.09	141.941
62	M8	115.936410	0.02	99.799
63	2MSN8	116.407930	0.03	189.542
64	3MS8	116.952310	0.05	114.145
65	2(MS)8	117.968200	0.03	256.949

## Harmonic constant for Pusan(1982)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	61.75	0.000
2	SA	0.041069	12.19	136.207
3	SSA	0.082137	2.63	351.036
4	MM	0.544375	1.87	114.368
5	MSF	1.015896	1.00	237.012
6	MF	1.098033	1.34	172.282
7	Q01	12.854290	0.12	98.506
8	SIGMA1	12.927140	0.13	238.830
9	Q1	13.398660	0.24	73.532
10	R01	13.471514	0.11	41.020
11	O1	13.943040	1.77	108.847
12	MP1	14.025173	0.09	175.314
13	M1	14.492052	0.09	196.661
14	CHI1	14.569550	0.06	132.373
15	PI1	14.917864	0.15	192.407
16	P1	14.958930	1.56	144.450
17	S1	15.000000	0.43	95.413
18	K1	15.041070	4.49	142.586
19	PSI1	15.082140	0.09	32.969
20	FI1	15.123210	0.12	80.552
21	THETA1	15.512590	0.21	230.268
22	J1	15.585443	0.33	182.144
23	S01	16.056964	0.25	294.408
24	001	16.139101	0.07	179.786
25	OQ2	27.341700	0.18	189.119
26	MNS2	27.423833	0.34	190.706
27	2N2	27.895360	1.02	211.587
28	MU2	27.968210	1.64	225.490
29	N2	28.439730	7.70	224.062
30	NU2	28.512582	1.22	219.368
31	OP2	28.901970	0.32	297.960
32	M2	28.984104	40.81	235.519
33	MKS2	29.066242	0.35	287.783
34	LAMBDA2	29.455630	0.39	232.876
35	L2	29.528480	0.90	234.150
36	T2	29.958932	1.47	268.466
37	S2	30.000000	19.06	273.316
38	R2	30.041070	0.49	173.692
39	K2	30.082140	5.57	266.810
40	MSN2	30.544374	0.14	6.238
41	KJ2	30.626510	0.28	103.560
42	2SM2	31.015900	0.29	57.938
43	MO3	42.927140	0.64	48.240
44	M3	43.476160	1.05	167.566
45	S03	43.943040	0.47	113.147
46	MK3	44.025173	0.65	117.510
47	SK3	45.041070	0.56	141.921
48	MN4	57.423831	0.45	172.473
49	M4	57.968210	0.82	192.380
50	SN4	58.439730	0.25	207.344
51	MS4	58.984104	0.78	223.489
52	MK4	59.066242	0.31	224.046
53	S4	60.000000	0.16	259.076
54	SK4	60.082140	0.12	279.426
55	2MN6	86.407940	0.09	161.499
56	M6	86.952320	0.08	149.082
57	MSN6	87.423830	0.02	129.091
58	2MS6	87.968210	0.20	147.238
59	2MK6	88.050350	0.05	258.680
60	2SM6	88.984100	0.07	156.476
61	MSK6	89.066240	0.07	163.899
62	M8	115.936410	0.04	79.070
63	2MSN8	116.407930	0.03	98.035
64	3MS8	116.952310	0.03	86.801
65	2(MS)8	117.968200	0.02	221.031

## Harmonic constant for Pusan(1978)

## Harmonic constant for Pusan(1979)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	64.25	0.000	1	Zo	0.000000	64.47	0.000
2	SA	0.041069	9.02	137.631	2	SA	0.041069	11.99	130.437
3	SSA	0.082137	2.58	300.812	3	SSA	0.082137	2.36	348.553
4	MM	0.544375	0.92	136.549	4	MM	0.544375	0.84	84.257
5	MSF	1.015896	1.15	324.149	5	MSF	1.015896	0.82	326.180
6	MF	1.098033	0.96	273.485	6	MF	1.098033	1.87	243.910
7	ZQ1	12.854290	0.20	107.916	7	ZQ1	12.854290	0.13	214.166
8	SIGMA1	12.927140	0.14	115.262	8	SIGMA1	12.927140	0.18	157.863
9	Q1	13.398660	0.11	154.850	9	Q1	13.398660	0.11	45.516
10	R01	13.471514	0.02	224.999	10	R01	13.471514	0.07	61.026
11	O1	13.943040	1.69	104.473	11	O1	13.943040	1.62	104.958
12	MP1	14.025173	0.07	238.334	12	MP1	14.025173	0.18	209.040
13	M1	14.492052	0.19	165.510	13	M1	14.492052	0.08	221.744
14	CHI1	14.569550	0.06	55.247	14	CHI1	14.569550	0.10	120.633
15	PI1	14.917864	0.07	150.417	15	PI1	14.917864	0.09	211.101
16	P1	14.958930	1.45	141.456	16	P1	14.958930	1.38	150.285
17	S1	15.000000	0.68	93.992	17	S1	15.000000	0.46	113.600
18	K1	15.041070	4.70	141.505	18	K1	15.041070	4.36	142.271
19	PSI1	15.082140	0.04	355.443	19	PSI1	15.082140	0.09	62.833
20	FI1	15.123210	0.02	88.018	20	FI1	15.123210	0.15	0.666
21	THETA1	15.512590	0.11	70.708	21	THETA1	15.512590	0.11	145.428
22	J1	15.585443	0.35	159.644	22	J1	15.585443	0.41	205.564
23	S01	16.056964	0.38	261.534	23	S01	16.056964	0.24	251.299
24	O01	16.139101	0.19	154.500	24	O01	16.139101	0.18	201.554
25	OQ2	27.341700	0.09	150.450	25	OQ2	27.341700	0.22	71.517
26	MNS2	27.423833	0.48	194.018	26	MNS2	27.423833	0.32	190.378
27	2N2	27.895360	0.98	212.326	27	2N2	27.895360	1.01	202.545
28	MU2	27.968210	1.68	224.340	28	MU2	27.968210	1.56	222.813
29	N2	28.439730	7.59	225.683	29	N2	28.439730	7.38	225.969
30	NU2	28.512582	1.25	218.308	30	NU2	28.512582	1.24	219.397
31	OP2	28.901970	0.34	56.076	31	OP2	28.901970	0.36	5.344
32	M2	28.984104	40.09	235.672	32	M2	28.984104	39.77	235.809
33	MKS2	29.066242	0.50	6.125	33	MKS2	29.066242	0.39	28.152
34	LAMBDA2	29.455630	0.22	242.583	34	LAMBDA2	29.455630	0.19	228.973
35	L2	29.528480	1.12	225.431	35	L2	29.528480	1.12	216.156
36	T2	29.958932	1.60	271.670	36	T2	29.958932	1.58	268.944
37	S2	30.000000	18.63	273.853	37	S2	30.000000	18.69	272.935
38	R2	30.041070	0.67	151.664	38	R2	30.041070	0.63	135.876
39	K2	30.082140	5.06	268.568	39	K2	30.082140	5.03	265.650
40	MSN2	30.544374	0.15	350.524	40	MSN2	30.544374	0.17	348.660
41	KJ2	30.626510	0.40	98.237	41	KJ2	30.626510	0.40	60.088
42	2SM2	31.015900	0.38	45.929	42	2SM2	31.015900	0.18	22.486
43	M03	42.927140	1.12	87.201	43	M03	42.927140	1.07	82.208
44	M3	43.476160	1.08	153.357	44	M3	43.476160	1.12	153.580
45	S03	43.943040	0.63	79.885	45	S03	43.943040	0.41	93.725
46	MK3	44.025173	0.68	85.426	46	MK3	44.025173	0.58	80.439
47	SK3	45.041070	0.68	145.401	47	SK3	45.041070	0.60	145.203
48	MN4	57.423831	0.48	167.158	48	MN4	57.423831	0.44	182.856
49	M4	57.968210	0.88	188.232	49	M4	57.968210	0.83	194.920
50	SN4	58.439730	0.22	216.759	50	SN4	58.439730	0.30	182.305
51	MS4	58.984104	1.04	220.023	51	MS4	58.984104	0.95	221.964
52	MK4	59.066242	0.43	224.299	52	MK4	59.066242	0.33	217.338
53	S4	60.000000	0.17	272.653	53	S4	60.000000	0.19	251.439
54	SK4	60.082140	0.19	312.344	54	SK4	60.082140	0.12	283.729
55	2MN6	86.407940	0.02	330.486	55	2MN6	86.407940	0.03	278.297
56	M6	86.952320	0.03	21.119	56	M6	86.952320	0.08	314.028
57	MSN6	87.423830	0.06	60.972	57	MSN6	87.423830	0.04	72.576
58	2MS6	87.968210	0.15	83.740	58	2MS6	87.968210	0.12	48.804
59	2MK6	88.050350	0.06	6.170	59	2MK6	88.050350	0.13	78.090
60	2SM6	88.984100	0.12	108.529	60	2SM6	88.984100	0.11	92.624
61	MSK6	89.066240	0.03	81.190	61	MSK6	89.066240	0.05	173.779
62	M8	115.936410	0.01	31.923	62	M8	115.936410	0.05	76.656
63	2MSN8	116.407930	0.01	191.391	63	2MSN8	116.407930	0.04	63.606
64	3MS8	116.952310	0.03	115.486	64	3MS8	116.952310	0.02	244.970
65	2(MS)8	117.968200	0.03	42.714	65	2(MS)8	117.968200	0.03	359.678

## Harmonic constant for Pusan(1976)

## Harmonic constant for Pusan(1977)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	67.50	0.000	1	Zo	0.000000	64.64	0.000
2	SA	0.041069	11.80	139.002	2	SA	0.041069	13.54	150.030
3	SSA	0.082137	0.46	301.708	3	SSA	0.082137	2.10	246.506
4	MM	0.544375	1.37	203.004	4	MM	0.544375	0.45	74.987
5	MSF	1.015896	0.64	92.057	5	MSF	1.015896	1.59	258.190
6	MF	1.098033	2.03	206.516	6	MF	1.098033	1.77	231.233
7	Q1	12.854290	0.02	71.534	7	Q1	12.854290	0.06	237.267
8	SIGMA1	12.927140	0.12	171.642	8	SIGMA1	12.927140	0.30	208.879
9	Q1	13.398660	0.05	162.895	9	Q1	13.398660	0.14	56.144
10	R01	13.471514	0.12	181.070	10	R01	13.471514	0.13	77.404
11	O1	13.943040	1.54	105.725	11	O1	13.943040	1.67	104.113
12	MP1	14.025173	0.15	218.563	12	MP1	14.025173	0.14	260.846
13	M1	14.492052	0.20	128.784	13	M1	14.492052	0.30	178.100
14	CHI1	14.569550	0.03	131.550	14	CHI1	14.569550	0.20	188.586
15	PI1	14.917864	0.14	130.989	15	PI1	14.917864	0.29	215.714
16	P1	14.958930	1.18	141.422	16	P1	14.958930	1.35	148.951
17	S1	15.000000	0.65	93.284	17	S1	15.000000	0.56	77.756
18	K1	15.041070	4.50	143.782	18	K1	15.041070	4.39	142.820
19	PSI1	15.082140	0.10	195.977	19	PSI1	15.082140	0.12	117.739
20	FI1	15.123210	0.10	350.891	20	FI1	15.123210	0.17	28.554
21	THETA1	15.512590	0.14	241.427	21	THETA1	15.512590	0.05	303.364
22	J1	15.585443	0.24	205.141	22	J1	15.585443	0.26	227.395
23	S01	16.056964	0.17	320.167	23	S01	16.056964	0.29	265.664
24	001	16.139101	0.01	100.412	24	001	16.139101	0.16	241.470
25	OQ2	27.341700	0.20	317.597	25	OQ2	27.341700	0.25	305.386
26	MNS2	27.423833	0.48	197.014	26	MNS2	27.423833	0.43	212.753
27	2N2	27.895360	1.27	217.716	27	2N2	27.895360	1.11	221.009
28	MU2	27.968210	1.79	218.105	28	MU2	27.968210	1.68	222.337
29	N2	28.439730	7.87	225.656	29	N2	28.439730	7.51	227.558
30	NU2	28.512582	1.28	222.344	30	NU2	28.512582	1.37	218.669
31	OP2	28.901970	0.14	279.812	31	OP2	28.901970	0.30	179.587
32	M2	28.984104	40.01	236.325	32	M2	28.984104	40.03	236.227
33	MKS2	29.066242	0.35	332.422	33	MKS2	29.066242	0.14	342.732
34	LAMBDA2	29.455630	0.20	179.467	34	LAMBDA2	29.455630	0.27	242.041
35	L2	29.528480	0.99	234.898	35	L2	29.528480	1.06	230.038
36	T2	29.958932	1.37	285.185	36	T2	29.958932	1.60	273.343
37	S2	30.000000	18.86	274.395	37	S2	30.000000	18.80	274.609
38	R2	30.041070	0.64	139.804	38	R2	30.041070	0.67	154.826
39	K2	30.082140	5.03	268.121	39	K2	30.082140	5.19	269.055
40	MSN2	30.544374	0.09	318.449	40	MSN2	30.544374	0.24	25.146
41	KJ2	30.626510	0.65	117.208	41	KJ2	30.626510	0.36	121.854
42	2SM2	31.015900	0.26	52.867	42	2SM2	31.015900	0.24	36.600
43	M03	42.927140	0.51	102.560	43	M03	42.927140	0.87	103.719
44	M3	43.476160	1.32	157.531	44	M3	43.476160	1.04	155.217
45	S03	43.943040	0.50	74.601	45	S03	43.943040	0.47	82.521
46	MK3	44.025173	0.58	84.831	46	MK3	44.025173	0.57	90.986
47	SK3	45.041070	0.53	134.078	47	SK3	45.041070	0.56	151.746
48	MN4	57.423831	0.48	171.668	48	MN4	57.423831	0.33	174.570
49	M4	57.968210	1.14	178.032	49	M4	57.968210	0.93	187.784
50	SN4	58.439730	0.32	194.593	50	SN4	58.439730	0.26	193.959
51	MS4	58.984104	1.16	222.786	51	MS4	58.984104	1.03	229.723
52	MK4	59.066242	0.33	214.976	52	MK4	59.066242	0.48	225.883
53	S4	60.000000	0.23	272.966	53	S4	60.000000	0.21	262.463
54	SK4	60.082140	0.19	279.819	54	SK4	60.082140	0.16	298.209
55	2MN6	86.407940	0.05	194.606	55	2MN6	86.407940	0.06	338.974
56	M6	86.952320	0.02	145.550	56	M6	86.952320	0.09	23.359
57	MSN6	87.423830	0.04	141.813	57	MSN6	87.423830	0.06	316.032
58	2MS6	87.968210	0.05	77.564	58	2MS6	87.968210	0.12	82.739
59	2MK6	88.050350	0.02	209.300	59	2MK6	88.050350	0.17	71.307
60	2SM6	88.984100	0.11	62.086	60	2SM6	88.984100	0.08	88.778
61	MSK6	89.066240	0.07	125.469	61	MSK6	89.066240	0.05	187.237
62	M8	115.936410	0.06	154.503	62	M8	115.936410	0.02	118.338
63	2MSN8	116.407930	0.05	211.039	63	2MSN8	116.407930	0.05	99.361
64	3MS8	116.952310	0.04	196.716	64	3MS8	116.952310	0.04	183.887
65	2(MS)8	117.968200	0.03	314.440	65	2(MS)8	117.968200	0.02	337.458

## Harmonic constant for Keomundo(1986)

## Harmonic constant for Keomundo(1987)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	172.57	0.000	1	Zo	0.000000	172.67	0.000
2	SA	0.041069	13.78	145.681	2	SA	0.041069	12.34	150.826
3	SSA	0.082137	2.66	292.814	3	SSA	0.082137	1.95	281.413
4	MM	0.544375	2.51	196.044	4	MM	0.544375	0.11	68.775
5	MSF	1.015896	0.62	103.451	5	MSF	1.015896	1.66	181.850
6	MF	1.098033	0.84	200.488	6	MF	1.098033	1.71	215.056
7	ZQ1	12.854290	0.53	122.763	7	ZQ1	12.854290	0.65	153.329
8	SIGMA1	12.927140	0.37	122.765	8	SIGMA1	12.927140	0.51	101.053
9	Q1	13.398660	3.34	147.170	9	Q1	13.398660	3.28	149.224
10	RO1	13.471514	0.73	146.217	10	RO1	13.471514	0.67	159.206
11	O1	13.943040	16.91	170.601	11	O1	13.943040	16.79	170.443
12	MP1	14.025173	0.64	122.264	12	MP1	14.025173	0.65	113.060
13	M1	14.492052	0.99	175.415	13	M1	14.492052	1.01	186.429
14	CHI1	14.569550	0.11	90.421	14	CHI1	14.569550	0.13	154.080
15	PI1	14.917864	0.17	237.658	15	PI1	14.917864	0.61	228.476
16	P1	14.958930	7.96	197.347	16	P1	14.958930	7.63	194.316
17	S1	15.000000	0.24	142.099	17	S1	15.000000	0.36	73.996
18	K1	15.041070	23.25	202.403	18	K1	15.041070	23.54	202.008
19	PSI1	15.082140	0.09	100.053	19	PSI1	15.082140	0.13	341.019
20	FI1	15.123210	0.52	30.703	20	FI1	15.123210	0.29	39.049
21	THETA1	15.512590	0.30	231.877	21	THETA1	15.512590	0.22	235.962
22	J1	15.585443	1.66	227.875	22	J1	15.585443	1.50	225.541
23	S01	16.056964	0.42	269.164	23	S01	16.056964	0.51	286.933
24	O01	16.139101	0.71	252.212	24	O01	16.139101	0.87	255.396
25	OQ2	27.341700	0.42	355.625	25	OQ2	27.341700	0.34	315.308
26	MNS2	27.423833	1.10	227.582	26	MNS2	27.423833	1.11	214.621
27	2N2	27.895360	2.60	268.644	27	2N2	27.895360	1.87	256.070
28	MU2	27.968210	4.98	240.222	28	MU2	27.968210	5.09	241.283
29	N2	28.439730	19.04	266.885	29	N2	28.439730	18.15	267.933
30	NU2	28.512582	2.75	264.132	30	NU2	28.512582	3.17	270.307
31	OP2	28.901970	0.31	159.897	31	OP2	28.901970	0.47	175.939
32	M2	28.984104	89.62	277.370	32	M2	28.984104	88.83	277.401
33	MKS2	29.066242	0.47	355.944	33	MKS2	29.066242	0.52	338.940
34	LAMBDA2	29.455630	0.23	277.531	34	LAMBDA2	29.455630	0.67	284.771
35	L2	29.528480	1.55	278.314	35	L2	29.528480	1.86	262.736
36	T2	29.958932	2.83	304.177	36	T2	29.958932	2.90	315.782
37	S2	30.000000	40.13	311.005	37	S2	30.000000	39.60	311.265
38	R2	30.041070	1.77	167.083	38	R2	30.041070	1.63	182.644
39	K2	30.082140	11.22	305.316	39	K2	30.082140	10.78	305.475
40	MSN2	30.544374	0.52	2.572	40	MSN2	30.544374	0.44	11.647
41	KJ2	30.626510	1.12	146.750	41	KJ2	30.626510	0.88	136.340
42	2SM2	31.015900	0.42	59.367	42	2SM2	31.015900	0.93	66.499
43	M03	42.927140	0.67	190.389	43	M03	42.927140	0.69	169.091
44	M3	43.476160	1.48	194.702	44	M3	43.476160	1.51	195.778
45	S03	43.943040	0.09	199.339	45	S03	43.943040	0.09	251.320
46	MK3	44.025173	0.21	262.376	46	MK3	44.025173	0.26	256.435
47	SK3	45.041070	0.40	210.159	47	SK3	45.041070	0.51	193.476
48	MN4	57.423831	0.32	92.980	48	MN4	57.423831	0.31	94.106
49	M4	57.968210	0.97	114.252	49	M4	57.968210	0.83	113.693
50	SN4	58.439730	0.08	118.035	50	SN4	58.439730	0.09	236.349
51	MS4	58.984104	0.53	179.148	51	MS4	58.984104	0.41	191.138
52	MK4	59.066242	0.13	126.185	52	MK4	59.066242	0.10	136.495
53	S4	60.000000	0.11	111.251	53	S4	60.000000	0.15	45.208
54	SK4	60.082140	0.07	59.584	54	SK4	60.082140	0.03	4.910
55	2MN6	86.407940	0.07	196.318	55	2MN6	86.407940	0.10	223.990
56	M6	86.952320	0.14	205.208	56	M6	86.952320	0.13	246.357
57	MSN6	87.423830	0.01	225.590	57	MSN6	87.423830	0.07	304.608
58	2MS6	87.968210	0.26	265.338	58	2MS6	87.968210	0.24	277.509
59	2MK6	88.050350	0.11	262.359	59	2MK6	88.050350	0.04	250.236
60	2SM6	88.984100	0.03	311.030	60	2SM6	88.984100	0.08	339.451
61	MSK6	89.066240	0.11	345.904	61	MSK6	89.066240	0.04	353.489
62	M8	115.936410	0.06	321.060	62	M8	115.936410	0.11	324.478
63	2MSN8	116.407930	0.04	29.339	63	2MSN8	116.407930	0.07	340.719
64	3MS8	116.952310	0.16	39.527	64	3MS8	116.952310	0.18	44.950
65	2(MS)8	117.968200	0.12	99.831	65	2(MS)8	117.968200	0.05	74.556



## Harmonic constant for Keomundo(1984)

## Harmonic constant for Keomundo(1985)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	170.84	0.000	1	Zo	0.000000	172.06	0.000
2	SA	0.041069	14.76	146.092	2	SA	0.041069	15.59	138.623
3	SSA	0.082137	1.83	132.349	3	SSA	0.082137	1.85	238.346
4	MM	0.544375	3.02	321.947	4	MM	0.544375	0.34	151.659
5	MSF	1.015896	1.92	54.835	5	MSF	1.015896	0.75	12.335
6	MF	1.098033	1.22	195.111	6	MF	1.098033	1.03	226.037
7	ZQ1	12.854290	0.21	144.841	7	ZQ1	12.854290	0.27	138.408
8	SIGMA1	12.927140	0.29	109.059	8	SIGMA1	12.927140	0.14	53.689
9	Q1	13.398660	3.53	146.443	9	Q1	13.398660	3.60	151.823
10	RO1	13.471514	0.54	144.198	10	RO1	13.471514	0.73	157.667
11	O1	13.943040	16.56	170.279	11	O1	13.943040	16.80	170.209
12	MP1	14.025173	0.47	112.386	12	MP1	14.025173	0.56	120.437
13	M1	14.492052	0.82	189.677	13	M1	14.492052	0.75	187.829
14	CHI1	14.569550	0.28	178.075	14	CHI1	14.569550	0.29	204.993
15	PI1	14.917864	0.33	218.320	15	PI1	14.917864	0.45	255.130
16	P1	14.958930	7.53	197.440	16	P1	14.958930	7.59	197.473
17	S1	15.000000	0.98	144.936	17	S1	15.000000	0.47	167.592
18	K1	15.041070	22.98	201.829	18	K1	15.041070	23.33	201.687
19	PSI1	15.082140	0.39	119.267	19	PSI1	15.082140	0.36	107.550
20	FI1	15.123210	0.38	48.348	20	FI1	15.123210	0.23	24.590
21	THETA1	15.512590	0.32	243.826	21	THETA1	15.512590	0.40	213.424
22	J1	15.585443	1.42	226.509	22	J1	15.585443	1.30	222.490
23	S01	16.056964	0.57	293.438	23	S01	16.056964	0.30	243.968
24	O01	16.139101	0.68	240.737	24	O01	16.139101	0.74	251.900
25	OQ2	27.341700	0.42	39.167	25	OQ2	27.341700	0.46	357.665
26	MNS2	27.423833	1.48	219.561	26	MNS2	27.423833	1.43	219.294
27	2N2	27.895360	3.47	238.761	27	2N2	27.895360	3.68	257.509
28	MU2	27.968210	5.06	241.143	28	MU2	27.968210	4.99	237.900
29	N2	28.439730	19.48	264.178	29	N2	28.439730	19.11	266.125
30	NU2	28.512582	2.56	273.594	30	NU2	28.512582	2.98	266.643
31	OP2	28.901970	0.27	249.739	31	OP2	28.901970	0.10	137.898
32	M2	28.984104	89.50	277.321	32	M2	28.984104	89.40	277.420
33	MKS2	29.066242	0.16	123.178	33	MKS2	29.066242	0.06	174.364
34	LAMBDA2	29.455630	0.40	201.131	34	LAMBDA2	29.455630	0.36	225.639
35	L2	29.528480	1.93	269.713	35	L2	29.528480	1.18	266.621
36	T2	29.958932	3.16	309.350	36	T2	29.958932	3.34	303.598
37	S2	30.000000	40.34	310.325	37	S2	30.000000	40.48	310.715
38	R2	30.041070	1.71	167.290	38	R2	30.041070	1.43	182.865
39	K2	30.082140	11.17	304.764	39	K2	30.082140	11.27	304.882
40	MSN2	30.544374	0.73	354.259	40	MSN2	30.544374	0.40	314.520
41	KJ2	30.626510	0.96	151.558	41	KJ2	30.626510	0.83	149.872
42	2SM2	31.015900	0.69	45.802	42	2SM2	31.015900	0.79	62.458
43	MO3	42.927140	0.48	235.563	43	MO3	42.927140	0.68	211.350
44	M3	43.476160	1.24	193.628	44	M3	43.476160	1.38	199.527
45	S03	43.943040	0.06	170.850	45	S03	43.943040	0.10	220.016
46	MK3	44.025173	0.43	246.898	46	MK3	44.025173	0.30	254.362
47	SK3	45.041070	0.44	209.020	47	SK3	45.041070	0.46	204.799
48	MN4	57.423831	0.33	90.085	48	MN4	57.423831	0.32	70.235
49	M4	57.968210	0.96	113.883	49	M4	57.968210	0.86	113.498
50	SN4	58.439730	0.12	145.317	50	SN4	58.439730	0.10	131.515
51	MS4	58.984104	0.54	179.600	51	MS4	58.984104	0.41	170.342
52	MK4	59.066242	0.14	138.504	52	MK4	59.066242	0.12	135.146
53	S4	60.000000	0.06	139.146	53	S4	60.000000	0.09	113.846
54	SK4	60.082140	0.02	74.665	54	SK4	60.082140	0.02	13.214
55	2MN6	86.407940	0.10	202.798	55	2MN6	86.407940	0.13	239.044
56	M6	86.952320	0.20	227.176	56	M6	86.952320	0.19	223.713
57	MSN6	87.423830	0.11	246.526	57	MSN6	87.423830	0.08	287.079
58	2MS6	87.968210	0.24	269.954	58	2MS6	87.968210	0.31	280.533
59	2MK6	88.050350	0.10	248.610	59	2MK6	88.050350	0.02	148.444
60	2SM6	88.984100	0.12	357.698	60	2SM6	88.984100	0.15	10.952
61	MSK6	89.066240	0.04	319.565	61	MSK6	89.066240	0.09	299.966
62	M8	115.936410	0.10	336.894	62	M8	115.936410	0.12	338.190
63	2MSN8	116.407930	0.11	20.291	63	2MSN8	116.407930	0.09	307.999
64	3MS8	116.952310	0.10	29.390	64	3MS8	116.952310	0.10	61.636
65	2(MS)8	117.968200	0.08	86.797	65	2(MS)8	117.968200	0.04	57.350

Harmonic constant for Keomundo(1982)

Harmonic constant for Keomundo(1983)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	177.67	0.000
2	SA	0.041069	15.72	141.910
3	SSA	0.082137	3.27	3.281
4	MM	0.544375	1.76	83.031
5	MSF	1.015896	0.07	206.728
6	MF	1.098033	1.37	140.935
7	Q01	12.854290	0.58	143.964
8	SIGMA1	12.927140	0.77	111.470
9	Q1	13.398660	3.33	147.757
10	RO1	13.471514	0.75	141.249
11	O1	13.943040	16.93	170.497
12	MP1	14.025173	0.69	120.513
13	M1	14.492052	0.89	185.042
14	CHI1	14.569550	0.10	173.775
15	PI1	14.917864	0.34	230.352
16	P1	14.958930	7.49	196.233
17	S1	15.000000	0.43	168.693
18	K1	15.041070	23.31	201.123
19	PSI1	15.082140	0.43	140.559
20	FI1	15.123210	0.21	30.382
21	THETA1	15.512590	0.26	253.589
22	J1	15.585443	1.49	231.528
23	S01	16.056964	0.32	274.674
24	OO1	16.139101	0.75	240.393
25	OQ2	27.341700	0.04	329.898
26	MNS2	27.423833	1.14	216.851
27	2N2	27.895360	2.06	251.233
28	MU2	27.968210	5.04	237.706
29	N2	28.439730	18.89	262.376
30	NU2	28.512582	2.82	266.223
31	OP2	28.901970	0.59	124.581
32	M2	28.984104	90.80	276.531
33	MKS2	29.066242	0.46	324.245
34	LAMBDA2	29.455630	0.16	277.841
35	L2	29.528480	1.55	290.369
36	T2	29.958932	3.03	308.780
37	S2	30.000000	40.69	310.395
38	R2	30.041070	1.11	168.197
39	K2	30.082140	11.26	306.457
40	MSN2	30.544374	0.10	48.825
41	KJ2	30.626510	0.67	149.989
42	2SM2	31.015900	0.50	35.792
43	MO3	42.927140	0.03	160.484
44	M3	43.476160	1.25	190.201
45	S03	43.943040	0.14	234.082
46	MK3	44.025173	0.42	241.601
47	SK3	45.041070	0.47	203.114
48	MN4	57.423831	0.42	71.083
49	M4	57.968210	0.97	104.307
50	SN4	58.439730	0.10	144.036
51	MS4	58.984104	0.50	161.367
52	MK4	59.066242	0.09	87.116
53	S4	60.000000	0.05	99.797
54	SK4	60.082140	0.10	13.640
55	2MN6	86.407940	0.04	224.017
56	M6	86.952320	0.09	231.705
57	MSN6	87.423830	0.05	316.144
58	2MS6	87.968210	0.20	277.489
59	2MK6	88.050350	0.15	266.034
60	2SM6	88.984100	0.07	346.487
61	MSK6	89.066240	0.11	330.941
62	M8	115.936410	0.13	348.548
63	2MSN8	116.407930	0.12	33.021
64	3MS8	116.952310	0.18	57.018
65	2(MS)8	117.968200	0.09	87.652

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	174.32	0.000
2	SA	0.041069	13.03	129.333
3	SSA	0.082137	6.19	333.658
4	MM	0.544375	0.78	160.890
5	MSF	1.015896	1.54	85.549
6	MF	1.098033	1.00	291.088
7	Q01	12.854290	0.52	135.772
8	SIGMA1	12.927140	0.30	160.117
9	Q1	13.398660	3.16	151.117
10	RO1	13.471514	0.39	171.128
11	O1	13.943040	16.88	170.953
12	MP1	14.025173	0.52	108.452
13	M1	14.492052	0.95	182.437
14	CHI1	14.569550	0.19	202.301
15	PI1	14.917864	0.42	217.554
16	P1	14.958930	7.49	195.702
17	S1	15.000000	0.30	137.963
18	K1	15.041070	23.42	201.827
19	PSI1	15.082140	0.28	166.425
20	FI1	15.123210	0.55	12.536
21	THETA1	15.512590	0.15	25.713
22	J1	15.585443	1.31	224.201
23	S01	16.056964	0.40	271.697
24	OO1	16.139101	0.87	254.183
25	OQ2	27.341700	0.38	138.766
26	MNS2	27.423833	0.82	200.734
27	2N2	27.895360	2.39	233.740
28	MU2	27.968210	4.91	238.553
29	N2	28.439730	19.22	262.763
30	NU2	28.512582	2.95	269.280
31	OP2	28.901970	0.41	147.099
32	M2	28.984104	89.84	276.603
33	MKS2	29.066242	0.20	123.647
34	LAMBDA2	29.455630	0.44	299.664
35	L2	29.528480	1.98	274.086
36	T2	29.958932	3.03	313.635
37	S2	30.000000	40.17	310.684
38	R2	30.041070	0.99	161.382
39	K2	30.082140	11.03	304.524
40	MSN2	30.544374	0.46	1.843
41	KJ2	30.626510	0.72	159.171
42	2SM2	31.015900	0.51	28.819
43	MO3	42.927140	0.24	252.315
44	M3	43.476160	1.26	195.266
45	S03	43.943040	0.16	193.565
46	MK3	44.025173	0.40	253.303
47	SK3	45.041070	0.38	205.469
48	MN4	57.423831	0.26	75.509
49	M4	57.968210	0.78	112.991
50	SN4	58.439730	0.08	94.371
51	MS4	58.984104	0.39	175.343
52	MK4	59.066242	0.14	102.526
53	S4	60.000000	0.03	107.654
54	SK4	60.082140	0.05	122.384
55	2MN6	86.407940	0.15	203.466
56	M6	86.952320	0.12	234.269
57	MSN6	87.423830	0.04	233.119
58	2MS6	87.968210	0.26	273.558
59	2MK6	88.050350	0.03	227.194
60	2SM6	88.984100	0.08	291.277
61	MSK6	89.066240	0.03	353.282
62	M8	115.936410	0.14	350.202
63	2MSN8	116.407930	0.05	339.682
64	3MS8	116.952310	0.14	32.996
65	2(MS)8	117.968200	0.05	111.397

## Harmonic constant for Chungmu(1985)

## Harmonic constant for Chungmu(1986)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	143.51	0.000	1	Zo	0.000000	144.13	0.000
2	SA	0.041069	14.75	139.706	2	SA	0.041069	13.05	143.702
3	SSA	0.082137	1.52	217.078	3	SSA	0.082137	1.99	296.077
4	MM	0.544375	0.56	199.688	4	MM	0.544375	2.03	206.826
5	MSF	1.015896	1.18	34.150	5	MSF	1.015896	0.44	105.553
6	MF	1.098033	1.11	226.789	6	MF	1.098033	1.14	211.827
7	2Q1	12.854290	0.13	107.492	7	2Q1	12.854290	0.39	105.637
8	SIGMA1	12.927140	0.06	270.904	8	SIGMA1	12.927140	0.27	177.327
9	Q1	13.398660	1.92	131.078	9	Q1	13.398660	1.79	126.987
10	R01	13.471514	0.35	133.908	10	R01	13.471514	0.36	123.242
11	O1	13.943040	9.80	148.219	11	O1	13.943040	9.89	148.884
12	MP1	14.025173	0.31	139.006	12	MP1	14.025173	0.24	132.056
13	M1	14.492052	0.46	168.785	13	M1	14.492052	0.68	175.915
14	CH11	14.569550	0.15	216.658	14	CH11	14.569550	0.15	64.747
15	PI1	14.917864	0.23	243.877	15	PI1	14.917864	0.11	179.709
16	P1	14.958930	4.82	177.526	16	P1	14.958930	5.16	179.386
17	S1	15.000000	0.33	62.438	17	S1	15.000000	0.43	55.130
18	K1	15.041070	14.90	179.716	18	K1	15.041070	14.72	180.468
19	PSI1	15.082140	0.08	15.339	19	PSI1	15.082140	0.30	294.413
20	F11	15.123210	0.09	108.155	20	F11	15.123210	0.26	30.174
21	THETA1	15.512590	0.18	197.359	21	THETA1	15.512590	0.17	207.681
22	J1	15.585443	0.88	206.826	22	J1	15.585443	1.15	214.267
23	S01	16.056964	0.41	280.624	23	S01	16.056964	0.52	274.980
24	O01	16.139101	0.56	233.797	24	O01	16.139101	0.46	232.068
25	OQ2	27.341700	0.34	337.560	25	OQ2	27.341700	0.33	331.459
26	MNS2	27.423833	1.15	216.856	26	MNS2	27.423833	0.96	220.676
27	2N2	27.895360	2.94	234.684	27	2N2	27.895360	2.06	245.207
28	MU2	27.968210	3.93	230.215	28	MU2	27.968210	3.87	232.656
29	N2	28.439730	16.05	242.613	29	N2	28.439730	15.90	244.286
30	NU2	28.512582	2.63	241.409	30	NU2	28.512582	2.51	237.877
31	OP2	28.901970	0.28	131.679	31	OP2	28.901970	0.39	115.709
32	M2	28.984104	78.39	252.772	32	M2	28.984104	78.38	252.845
33	MKS2	29.066242	0.11	78.821	33	MKS2	29.066242	0.46	347.435
34	LAMBDA2	29.455630	0.53	225.819	34	LAMBDA2	29.455630	0.60	241.660
35	L2	29.528480	1.67	236.065	35	L2	29.528480	1.66	242.353
36	T2	29.958932	2.72	285.400	36	T2	29.958932	2.51	284.554
37	S2	30.000000	36.32	288.533	37	S2	30.000000	36.18	288.689
38	R2	30.041070	1.19	168.044	38	R2	30.041070	1.43	159.802
39	K2	30.082140	10.33	281.681	39	K2	30.082140	10.14	282.002
40	MSN2	30.544374	0.22	301.066	40	MSN2	30.544374	0.52	12.058
41	KJ2	30.626510	0.82	131.161	41	KJ2	30.626510	0.96	130.643
42	2SM2	31.015900	0.83	65.441	42	2SM2	31.015900	0.66	63.503
43	MO3	42.927140	1.10	136.839	43	MO3	42.927140	1.30	126.044
44	M3	43.476160	1.90	177.048	44	M3	43.476160	2.05	170.491
45	S03	43.943040	0.61	120.852	45	S03	43.943040	0.67	122.159
46	MK3	44.025173	0.79	149.266	46	MK3	44.025173	0.68	146.773
47	SK3	45.041070	0.86	176.592	47	SK3	45.041070	0.90	173.035
48	MN4	57.423831	0.60	224.092	48	MN4	57.423831	0.57	213.827
49	M4	57.968210	1.14	238.651	49	M4	57.968210	1.05	234.314
50	SN4	58.439730	0.21	254.780	50	SN4	58.439730	0.27	257.444
51	MS4	58.984104	1.08	277.184	51	MS4	58.984104	1.02	272.847
52	MK4	59.066242	0.47	264.547	52	MK4	59.066242	0.38	263.726
53	S4	60.000000	0.29	336.602	53	S4	60.000000	0.33	346.301
54	SK4	60.082140	0.26	329.447	54	SK4	60.082140	0.24	327.580
55	2MN6	86.407940	0.34	12.153	55	2MN6	86.407940	0.39	21.504
56	M6	86.952320	0.69	36.654	56	M6	86.952320	0.75	34.465
57	MSN6	87.423830	0.26	52.509	57	MSN6	87.423830	0.28	69.931
58	2MS6	87.968210	0.92	74.750	58	2MS6	87.968210	1.00	74.402
59	2MK6	88.050350	0.25	66.910	59	2MK6	88.050350	0.22	62.648
60	2SM6	88.984100	0.29	105.556	60	2SM6	88.984100	0.32	113.671
61	MSK6	89.066240	0.17	120.149	61	MSK6	89.066240	0.21	117.796
62	M8	115.936410	0.11	142.138	62	M8	115.936410	0.11	152.927
63	2MSN8	116.407930	0.18	228.450	63	2MSN8	116.407930	0.08	189.066
64	3MS8	116.952310	0.28	219.141	64	3MS8	116.952310	0.17	221.913
65	2(MS)8	117.968200	0.14	280.022	65	2(MS)8	117.968200	0.09	253.165

## Harmonic constant for Chungmu(1983)

## Harmonic constant for Chungmu(1984)

NO.	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	144.80	0.000	1	Zo	0.000000	143.34	0.000
2	SA	0.041069	15.95	137.848	2	SA	0.041069	13.20	149.172
3	SSA	0.082137	2.85	343.757	3	SSA	0.082137	1.57	173.273
4	MM	0.544375	1.62	182.629	4	MM	0.544375	2.41	324.991
5	MSF	1.015896	1.01	104.623	5	MSF	1.015896	1.24	34.850
6	MF	1.098033	0.49	280.101	6	MF	1.098033	1.43	192.119
7	ZQ1	12.854290	0.40	126.777	7	ZQ1	12.854290	0.12	207.412
8	SIGMA1	12.927140	0.36	184.054	8	SIGMA1	12.927140	0.11	146.430
9	Q1	13.398660	1.74	132.062	9	Q1	13.398660	1.92	125.923
10	RO1	13.471514	0.17	142.996	10	RO1	13.471514	0.45	112.323
11	O1	13.943040	9.82	149.007	11	O1	13.943040	9.57	146.804
12	MP1	14.025173	0.12	140.052	12	MP1	14.025173	0.13	227.467
13	M1	14.492052	0.59	164.778	13	M1	14.492052	0.48	165.600
14	CHI1	14.569550	0.16	156.656	14	CHI1	14.569550	0.19	163.936
15	P11	14.917864	0.26	197.645	15	P11	14.917864	0.34	207.600
16	P1	14.958930	4.81	176.967	16	P1	14.958930	4.88	176.480
17	S1	15.000000	0.54	51.026	17	S1	15.000000	0.76	80.917
18	K1	15.041070	14.82	180.169	18	K1	15.041070	14.66	180.159
19	PS11	15.082140	0.12	277.661	19	PS11	15.082140	0.25	39.384
20	FI1	15.123210	0.34	9.341	20	FI1	15.123210	0.25	61.629
21	THETA1	15.512590	0.15	25.659	21	THETA1	15.512590	0.16	219.485
22	J1	15.585443	0.84	211.099	22	J1	15.585443	0.92	212.532
23	S01	16.056964	0.53	281.119	23	S01	16.056964	0.50	286.734
24	001	16.139101	0.57	239.731	24	001	16.139101	0.50	227.146
25	OQ2	27.341700	0.26	120.843	25	OQ2	27.341700	0.38	24.217
26	MNS2	27.423833	0.70	206.579	26	MNS2	27.423833	1.22	210.260
27	2N2	27.895360	2.03	213.244	27	2N2	27.895360	2.70	220.183
28	MU2	27.968210	3.88	232.512	28	MU2	27.968210	4.07	231.475
29	N2	28.439730	15.99	239.741	29	N2	28.439730	16.28	240.560
30	NU2	28.512582	2.50	239.519	30	NU2	28.512582	2.39	245.933
31	OP2	28.901970	0.27	137.956	31	OP2	28.901970	0.50	225.968
32	M2	28.984104	78.71	252.276	32	M2	28.984104	78.47	252.706
33	MKS2	29.066242	0.07	25.526	33	MKS2	29.066242	0.02	243.615
34	LAMBDA2	29.455630	0.59	272.635	34	LAMBDA2	29.455630	0.55	223.709
35	L2	29.528480	2.10	249.970	35	L2	29.528480	2.35	241.237
36	T2	29.958932	2.55	290.969	36	T2	29.958932	2.60	285.490
37	S2	30.000000	36.02	288.750	37	S2	30.000000	36.38	287.745
38	R2	30.041070	0.85	161.107	38	R2	30.041070	1.26	169.558
39	K2	30.082140	10.30	281.111	39	K2	30.082140	10.38	281.441
40	MSN2	30.544374	0.51	9.164	40	MSN2	30.544374	0.73	354.612
41	KJ2	30.626510	0.68	127.382	41	KJ2	30.626510	0.83	137.344
42	2SM2	31.015900	0.62	41.936	42	2SM2	31.015900	0.64	45.931
43	MO3	42.927140	0.67	97.609	43	MO3	42.927140	0.74	129.644
44	M3	43.476160	1.74	182.931	44	M3	43.476160	1.90	175.490
45	S03	43.943040	0.62	118.670	45	S03	43.943040	0.88	113.672
46	MK3	44.025173	0.86	149.398	46	MK3	44.025173	0.69	164.480
47	SK3	45.041070	0.93	171.229	47	SK3	45.041070	0.73	176.272
48	MN4	57.423831	0.58	210.460	48	MN4	57.423831	0.60	226.392
49	M4	57.968210	1.30	231.308	49	M4	57.968210	1.18	232.549
50	SN4	58.439730	0.25	246.534	50	SN4	58.439730	0.21	271.218
51	MS4	58.984104	1.26	273.002	51	MS4	58.984104	1.17	274.179
52	MK4	59.066242	0.49	263.690	52	MK4	59.066242	0.35	263.910
53	S4	60.000000	0.37	342.422	53	S4	60.000000	0.36	348.993
54	SK4	60.082140	0.27	334.194	54	SK4	60.082140	0.27	319.159
55	2MN6	86.407940	0.26	356.454	55	2MN6	86.407940	0.36	4.085
56	M6	86.952320	0.57	30.613	56	M6	86.952320	0.62	33.331
57	MSN6	87.423830	0.20	41.180	57	MSN6	87.423830	0.16	41.163
58	2MS6	87.968210	0.74	68.798	58	2MS6	87.968210	0.80	74.007
59	2MK6	88.050350	0.31	55.016	59	2MK6	88.050350	0.21	47.802
60	2SM6	88.984100	0.20	104.109	60	2SM6	88.984100	0.25	106.903
61	MSK6	89.066240	0.17	119.289	61	MSK6	89.066240	0.21	107.147
62	M8	115.936410	0.07	206.964	62	M8	115.936410	0.05	177.519
63	2MSN8	116.407930	0.08	228.683	63	2MSN8	116.407930	0.08	187.948
64	3MS8	116.952310	0.19	242.025	64	3MS8	116.952310	0.23	223.805
65	2(MS)8	117.968200	0.08	290.698	65	2(MS)8	117.968200	0.08	242.730

## Harmonic constant for Chungmu(1981)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	142.71	0.000
2	SA	0.041069	13.26	147.495
3	SSA	0.082137	3.45	324.052
4	MM	0.544375	1.74	128.040
5	MSF	1.015896	0.97	171.177
6	MF	1.098033	1.60	151.022
7	ZQ1	12.854290	0.35	118.493
8	SIGMA1	12.927140	0.13	170.122
9	Q1	13.398660	1.98	128.231
10	RO1	13.471514	0.47	141.262
11	O1	13.943040	9.70	148.934
12	MP1	14.025173	0.29	127.319
13	M1	14.492052	0.61	170.650
14	CHI1	14.569550	0.13	106.307
15	PI1	14.917864	0.25	206.354
16	P1	14.958930	4.93	177.745
17	S1	15.000000	0.56	64.705
18	K1	15.041070	14.68	179.293
19	PSI1	15.082140	0.08	87.649
20	FI1	15.123210	0.21	308.329
21	THETA1	15.512590	0.35	200.455
22	J1	15.585443	1.04	207.195
23	SO1	16.056964	0.50	280.724
24	OO1	16.139101	0.50	221.705
25	OQ2	27.341700	0.38	6.578
26	MNS2	27.423833	0.94	223.456
27	ZN2	27.895360	2.45	234.097
28	MU2	27.968210	3.93	237.099
29	N2	28.439730	15.47	240.855
30	NU2	28.512582	2.97	238.302
31	OP2	28.901970	0.28	163.671
32	M2	28.984104	79.20	252.123
33	MKS2	29.066242	0.29	284.261
34	LAMBDA2	29.455630	0.60	237.483
35	L2	29.528480	1.05	249.280
36	T2	29.958932	2.83	285.452
37	S2	30.000000	36.46	288.129
38	R2	30.041070	1.00	164.016
39	K2	30.082140	10.49	282.814
40	MSN2	30.544374	0.27	3.574
41	KJ2	30.626510	0.87	124.486
42	ZSM2	31.015900	0.55	59.363
43	MO3	42.927140	1.02	86.777
44	M3	43.476160	1.70	169.710
45	SO3	43.943040	0.71	142.201
46	MK3	44.025173	0.94	136.097
47	SK3	45.041070	1.06	170.206
48	MN4	57.423831	0.69	218.124
49	M4	57.968210	1.45	230.649
50	SN4	58.439730	0.20	260.589
51	MS4	58.984104	1.26	273.147
52	MK4	59.066242	0.49	249.986
53	S4	60.000000	0.32	326.559
54	SK4	60.082140	0.30	333.123
55	ZMN6	86.407940	0.18	351.613
56	M6	86.952320	0.58	24.587
57	MSN6	87.423830	0.17	33.594
58	ZMS6	87.968210	0.70	64.776
59	ZMK6	88.050350	0.38	48.726
60	ZSM6	88.984100	0.27	100.874
61	ZSK6	89.066240	0.18	124.216
62	M8	115.936410	0.06	173.664
63	ZMSN8	116.407930	0.10	213.829
64	ZMS8	116.952310	0.16	211.975
65	Z(MS)8	117.968200	0.11	260.683

## Harmonic constant for Chungmu(1982)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	142.36	0.000
2	SA	0.041069	14.05	139.214
3	SSA	0.082137	3.15	7.222
4	MM	0.544375	1.69	97.415
5	MSF	1.015896	0.39	274.060
6	MF	1.098033	1.05	149.191
7	ZQ1	12.854290	0.38	114.443
8	SIGMA1	12.927140	0.35	141.652
9	Q1	13.398660	1.83	129.686
10	RO1	13.471514	0.39	114.970
11	O1	13.943040	9.97	149.585
12	MP1	14.025173	0.32	114.511
13	M1	14.492052	0.58	179.346
14	CHI1	14.569550	0.15	153.012
15	PI1	14.917864	0.15	210.429
16	P1	14.958930	4.91	177.287
17	S1	15.000000	0.50	55.262
18	K1	15.041070	14.67	179.495
19	PSI1	15.082140	0.12	113.485
20	FI1	15.123210	0.10	31.212
21	THETA1	15.512590	0.26	228.919
22	J1	15.585443	0.98	216.658
23	SO1	16.056964	0.41	281.599
24	OO1	16.139101	0.44	232.262
25	OQ2	27.341700	0.10	231.273
26	MNS2	27.423833	0.92	210.888
27	ZN2	27.895360	1.73	230.486
28	MU2	27.968210	4.00	231.815
29	N2	28.439730	15.66	239.867
30	NU2	28.512582	2.43	239.461
31	OP2	28.901970	0.29	81.744
32	M2	28.984104	79.26	252.167
33	MKS2	29.066242	0.34	303.535
34	LAMBDA2	29.455630	0.50	229.065
35	L2	29.528480	1.65	256.440
36	T2	29.958932	2.68	284.290
37	S2	30.000000	36.58	288.570
38	R2	30.041070	0.84	170.141
39	K2	30.082140	10.34	282.301
40	MSN2	30.544374	0.25	40.889
41	KJ2	30.626510	0.68	126.793
42	ZSM2	31.015900	0.69	48.357
43	MO3	42.927140	0.90	85.597
44	M3	43.476160	1.61	175.684
45	SO3	43.943040	0.64	139.367
46	MK3	44.025173	1.03	155.247
47	SK3	45.041070	1.05	168.153
48	MN4	57.423831	0.54	210.141
49	M4	57.968210	1.20	233.019
50	SN4	58.439730	0.27	233.914
51	MS4	58.984104	1.17	267.586
52	MK4	59.066242	0.43	267.968
53	S4	60.000000	0.27	326.704
54	SK4	60.082140	0.26	324.518
55	ZMN6	86.407940	0.24	14.337
56	M6	86.952320	0.63	27.404
57	MSN6	87.423830	0.19	50.613
58	ZMS6	87.968210	0.78	71.397
59	ZMK6	88.050350	0.25	46.205
60	ZSM6	88.984100	0.28	114.600
61	ZSK6	89.066240	0.17	106.964
62	M8	115.936410	0.04	196.162
63	ZMSN8	116.407930	0.07	231.077
64	ZMS8	116.952310	0.18	235.923
65	Z(MS)8	117.968200	0.05	279.369

## Harmonic constant for Chungmu(1978)

## Harmonic constant for Chungmu(1979)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	141.37	0.000	1	Zo	0.000000	142.11	0.000
2	SA	0.041069	12.00	145.002	2	SA	0.041069	14.25	138.132
3	SSA	0.082137	2.69	319.248	3	SSA	0.082137	3.12	1.967
4	MM	0.544375	0.96	126.308	4	MM	0.544375	0.92	76.708
5	MSF	1.015896	1.29	349.414	5	MSF	1.015896	1.25	354.597
6	MF	1.098033	0.76	293.308	6	MF	1.098033	2.03	243.589
7	ZQ1	12.854290	0.40	132.397	7	ZQ1	12.854290	0.16	168.471
8	SIGMA1	12.927140	0.19	125.953	8	SIGMA1	12.927140	0.35	151.092
9	Q1	13.398660	1.76	129.644	9	Q1	13.398660	1.73	122.887
10	RO1	13.471514	0.45	131.551	10	RO1	13.471514	0.26	106.328
11	O1	13.943040	9.92	147.723	11	O1	13.943040	9.72	145.493
12	MP1	14.025173	0.11	121.420	12	MP1	14.025173	0.25	163.012
13	M1	14.492052	0.62	172.049	13	M1	14.492052	0.66	183.378
14	CH11	14.569550	0.04	95.115	14	CH11	14.569550	0.18	195.120
15	PI1	14.917864	0.10	95.020	15	PI1	14.917864	0.21	181.362
16	P1	14.958930	4.97	172.705	16	P1	14.958930	4.82	175.624
17	S1	15.000000	0.55	80.774	17	S1	15.000000	0.49	100.823
18	K1	15.041070	15.19	179.484	18	K1	15.041070	14.83	180.155
19	PSI1	15.082140	0.09	293.175	19	PSI1	15.082140	0.14	190.888
20	F11	15.123210	0.12	336.876	20	F11	15.123210	0.37	31.325
21	THETA1	15.512590	0.23	198.791	21	THETA1	15.512590	0.38	208.311
22	J1	15.585443	0.92	205.737	22	J1	15.585443	1.06	222.906
23	S01	16.056964	0.70	271.360	23	S01	16.056964	0.63	259.883
24	001	16.139101	0.47	231.637	24	001	16.139101	0.95	236.231
25	OQ2	27.341700	0.03	275.207	25	OQ2	27.341700	0.46	97.986
26	MNS2	27.423833	0.85	205.937	26	MNS2	27.423833	0.88	209.891
27	2N2	27.895360	1.94	225.757	27	2N2	27.895360	2.17	219.963
28	MU2	27.968210	3.76	233.255	28	MU2	27.968210	3.85	235.127
29	N2	28.439730	15.87	242.567	29	N2	28.439730	15.39	243.512
30	NU2	28.512582	2.28	241.022	30	NU2	28.512582	2.32	246.926
31	OP2	28.901970	0.62	108.260	31	OP2	28.901970	0.38	289.770
32	M2	28.984104	79.46	252.548	32	M2	28.984104	79.19	252.673
33	MKS2	29.066242	0.95	10.670	33	MKS2	29.066242	0.55	345.919
34	LAMBDA2	29.455630	0.39	248.741	34	LAMBDA2	29.455630	0.55	240.660
35	L2	29.528480	2.12	242.097	35	L2	29.528480	2.41	222.509
36	T2	29.958932	3.22	286.628	36	T2	29.958932	2.71	284.682
37	S2	30.000000	36.52	289.385	37	S2	30.000000	36.34	289.125
38	R2	30.041070	1.07	151.044	38	R2	30.041070	0.99	142.705
39	K2	30.082140	10.05	284.786	39	K2	30.082140	10.30	283.236
40	MSN2	30.544374	0.36	8.204	40	MSN2	30.544374	0.65	11.413
41	KJ2	30.626510	0.70	113.641	41	KJ2	30.626510	0.81	121.265
42	2SM2	31.015900	0.82	55.585	42	2SM2	31.015900	0.73	47.255
43	MO3	42.927140	1.91	111.160	43	MO3	42.927140	1.80	104.129
44	M3	43.476160	1.88	165.671	44	M3	43.476160	1.83	166.918
45	S03	43.943040	0.86	120.281	45	S03	43.943040	0.66	137.700
46	MK3	44.025173	0.76	126.898	46	MK3	44.025173	0.48	135.028
47	SK3	45.041070	1.05	168.571	47	SK3	45.041070	0.89	168.974
48	MN4	57.423831	0.68	204.134	48	MN4	57.423831	0.67	215.374
49	M4	57.968210	1.48	226.627	49	M4	57.968210	1.54	232.324
50	SN4	58.439730	0.28	271.866	50	SN4	58.439730	0.31	240.636
51	MS4	58.984104	1.45	265.476	51	MS4	58.984104	1.40	266.458
52	MK4	59.066242	0.66	275.966	52	MK4	59.066242	0.56	261.800
53	S4	60.000000	0.31	346.585	53	S4	60.000000	0.37	330.885
54	SK4	60.082140	0.28	339.826	54	SK4	60.082140	0.20	313.036
55	2MN6	86.407940	0.22	350.214	55	2MN6	86.407940	0.22	336.649
56	M6	86.952320	0.47	16.018	56	M6	86.952320	0.53	10.177
57	MSN6	87.423830	0.21	41.395	57	MSN6	87.423830	0.14	36.709
58	2MS6	87.968210	0.66	71.435	58	2MS6	87.968210	0.65	61.500
59	2MK6	88.050350	0.20	69.154	59	2MK6	88.050350	0.29	59.570
60	2SM6	88.984100	0.27	114.488	60	2SM6	88.984100	0.25	108.225
61	MSK6	89.066240	0.08	68.164	61	MSK6	89.066240	0.14	102.541
62	M8	115.936410	0.05	277.106	62	M8	115.936410	0.06	184.328
63	2MSN8	116.407930	0.05	230.103	63	2MSN8	116.407930	0.03	217.016
64	3MS8	116.952310	0.13	273.034	64	3MS8	116.952310	0.15	235.714
65	2(MS)8	117.968200	0.09	0.747	65	2(MS)8	117.968200	0.07	303.237

## Harmonic constant for Cheju(1985)

## Harmonic constant for Cheju(1987)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	148.84	0.000	1	Zo	0.000000	150.95	0.000
2	SA	0.041069	17.28	134.978	2	SA	0.041069	15.98	148.926
3	SSA	0.082137	1.35	201.175	3	SSA	0.082137	1.96	306.762
4	MM	0.544375	0.36	186.275	4	MM	0.544375	0.47	245.483
5	MSF	1.015896	1.13	340.171	5	MSF	1.015896	1.79	186.727
6	MF	1.098033	0.79	253.145	6	MF	1.098033	1.83	211.168
7	ZQ1	12.854290	0.31	159.301	7	ZQ1	12.854290	0.61	177.898
8	SIGMA1	12.927140	0.32	53.976	8	SIGMA1	12.927140	0.56	99.720
9	Q1	13.398660	3.64	170.973	9	Q1	13.398660	3.26	170.056
10	R01	13.471514	0.68	175.554	10	R01	13.471514	0.71	191.654
11	O1	13.943040	16.58	190.031	11	O1	13.943040	16.51	191.768
12	MP1	14.025173	0.54	143.016	12	MP1	14.025173	0.55	131.048
13	M1	14.492052	0.67	208.522	13	M1	14.492052	0.95	202.845
14	CHI1	14.569550	0.21	200.140	14	CHI1	14.569550	0.15	239.260
15	PI1	14.917864	0.32	270.131	15	PI1	14.917864	0.37	258.333
16	P1	14.958930	7.16	215.473	16	P1	14.958930	7.12	216.860
17	S1	15.000000	0.50	199.550	17	S1	15.000000	0.26	142.956
18	K1	15.041070	22.42	220.762	18	K1	15.041070	22.77	221.552
19	PSI1	15.082140	0.31	128.712	19	PSI1	15.082140	0.40	240.834
20	FI1	15.123210	0.10	39.216	20	FI1	15.123210	0.36	326.529
21	THETA1	15.512590	0.33	223.940	21	THETA1	15.512590	0.22	265.779
22	J1	15.585443	1.12	244.180	22	J1	15.585443	1.54	242.070
23	S01	16.056964	0.09	292.783	23	S01	16.056964	0.44	319.213
24	001	16.139101	0.72	271.034	24	001	16.139101	0.71	278.047
25	OQ2	27.341700	0.39	16.225	25	OQ2	27.341700	0.24	333.511
26	MNS2	27.423833	1.07	236.649	26	MNS2	27.423833	0.70	239.972
27	2N2	27.895360	3.25	286.783	27	2N2	27.895360	1.28	288.802
28	MU2	27.968210	4.34	251.057	28	MU2	27.968210	4.12	258.361
29	N2	28.439730	15.54	301.063	29	N2	28.439730	14.81	303.865
30	NU2	28.512582	2.50	309.807	30	NU2	28.512582	2.34	324.074
31	OP2	28.901970	0.52	171.062	31	OP2	28.901970	0.90	99.770
32	M2	28.984104	68.93	315.729	32	M2	28.984104	68.44	317.676
33	MKS2	29.066242	0.45	127.287	33	MKS2	29.066242	0.55	231.781
34	LAMBDA2	29.455630	0.35	69.572	34	LAMBDA2	29.455630	0.21	255.857
35	L2	29.528480	1.23	6.699	35	L2	29.528480	0.72	315.048
36	T2	29.958932	2.69	331.797	36	T2	29.958932	2.06	359.167
37	S2	30.000000	28.63	344.740	37	S2	30.000000	27.95	347.131
38	R2	30.041070	0.99	176.441	38	R2	30.041070	1.61	169.867
39	K2	30.082140	7.64	338.149	39	K2	30.082140	7.20	338.079
40	MSN2	30.544374	0.29	316.306	40	MSN2	30.544374	0.62	353.179
41	KJ2	30.626510	0.50	172.760	41	KJ2	30.626510	0.57	174.433
42	2SM2	31.015900	0.70	59.844	42	2SM2	31.015900	0.79	59.455
43	MO3	42.927140	0.33	249.145	43	MO3	42.927140	0.27	182.988
44	M3	43.476160	0.82	217.648	44	M3	43.476160	0.89	220.582
45	S03	43.943040	0.11	182.550	45	S03	43.943040	0.15	186.050
46	MK3	44.025173	0.23	120.916	46	MK3	44.025173	0.26	137.001
47	SK3	45.041070	0.38	221.645	47	SK3	45.041070	0.40	225.522
48	MN4	57.423831	0.96	128.048	48	MN4	57.423831	0.98	136.698
49	M4	57.968210	2.91	152.559	49	M4	57.968210	2.91	157.908
50	SN4	58.439730	0.32	205.561	50	SN4	58.439730	0.41	206.984
51	MS4	58.984104	2.18	208.665	51	MS4	58.984104	2.27	216.441
52	MK4	59.066242	0.38	189.377	52	MK4	59.066242	0.56	192.430
53	S4	60.000000	0.24	268.956	53	S4	60.000000	0.25	298.932
54	SK4	60.082140	0.14	279.004	54	SK4	60.082140	0.21	280.289
55	2MN6	86.407940	0.25	315.782	55	2MN6	86.407940	0.16	331.975
56	M6	86.952320	0.28	335.327	56	M6	86.952320	0.26	18.720
57	MSN6	87.423830	0.23	7.163	57	MSN6	87.423830	0.11	20.866
58	2MS6	87.968210	0.47	350.803	58	2MS6	87.968210	0.23	348.902
59	2MK6	88.050350	0.08	107.754	59	2MK6	88.050350	0.02	330.924
60	2SM6	88.984100	0.30	47.464	60	2SM6	88.984100	0.11	43.614
61	MSK6	89.066240	0.04	43.099	61	MSK6	89.066240	0.07	41.521
62	M8	115.936410	0.13	189.410	62	M8	115.936410	0.14	230.996
63	2MSN8	116.407930	0.14	224.099	63	2MSN8	116.407930	0.13	273.384
64	3MS8	116.952310	0.20	217.960	64	3MS8	116.952310	0.13	289.024
65	2(MS)8	117.968200	0.11	262.541	65	2(MS)8	117.968200	0.10	321.192

## Harmonic constant for Cheju(1983)

## Harmonic constant for Cheju(1984)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	149.62	0.000	1	Zo	0.000000	148.01	0.000
2	SA	0.041069	18.31	135.202	2	SA	0.041069	16.48	145.308
3	SSA	0.082137	3.20	326.451	3	SSA	0.082137	3.24	122.144
4	MM	0.544375	1.31	164.190	4	MM	0.544375	2.80	330.418
5	MSF	1.015896	0.59	79.631	5	MSF	1.015896	1.41	33.429
6	MF	1.098033	1.17	282.761	6	MF	1.098033	0.74	191.804
7	Q1	12.854290	0.54	146.242	7	Q1	12.854290	0.07	184.129
8	SIGMA1	12.927140	0.16	151.957	8	SIGMA1	12.927140	0.54	96.726
9	Q1	13.398660	3.17	168.812	9	Q1	13.398660	3.55	166.524
10	RO1	13.471514	0.42	181.913	10	RO1	13.471514	0.58	177.593
11	O1	13.943040	16.84	190.840	11	O1	13.943040	16.43	189.895
12	MP1	14.025173	0.49	132.710	12	MP1	14.025173	0.74	128.916
13	M1	14.492052	0.96	202.159	13	M1	14.492052	0.76	208.713
14	CHI1	14.569550	0.10	232.399	14	CHI1	14.569550	0.33	201.465
15	PI1	14.917864	0.35	238.250	15	PI1	14.917864	0.34	232.625
16	P1	14.958930	7.34	213.475	16	P1	14.958930	7.25	214.678
17	S1	15.000000	0.10	244.070	17	S1	15.000000	0.74	167.684
18	K1	15.041070	22.64	220.736	18	K1	15.041070	22.31	220.231
19	PSI1	15.082140	0.34	148.748	19	PSI1	15.082140	0.75	118.104
20	FI1	15.123210	0.57	13.290	20	FI1	15.123210	0.33	80.245
21	THETA1	15.512590	0.11	106.447	21	THETA1	15.512590	0.27	266.094
22	J1	15.585443	1.22	238.068	22	J1	15.585443	1.36	239.027
23	S01	16.056964	0.35	323.631	23	S01	16.056964	0.42	340.398
24	O01	16.139101	0.83	273.105	24	O01	16.139101	0.72	261.336
25	OQ2	27.341700	0.34	169.485	25	OQ2	27.341700	0.41	69.847
26	MNS2	27.423833	0.76	208.416	26	MNS2	27.423833	1.15	215.676
27	2N2	27.895360	1.69	262.926	27	2N2	27.895360	2.89	265.513
28	MU2	27.968210	4.26	254.111	28	MU2	27.968210	4.14	250.160
29	N2	28.439730	15.72	296.747	29	N2	28.439730	15.75	297.483
30	NU2	28.512582	2.34	312.664	30	NU2	28.512582	2.47	311.649
31	OP2	28.901970	0.13	166.110	31	OP2	28.901970	0.58	281.098
32	M2	28.984104	69.09	314.200	32	M2	28.984104	69.10	314.538
33	MKS2	29.066242	0.39	227.672	33	MKS2	29.066242	0.23	43.911
34	LAMBDA2	29.455630	0.34	77.072	34	LAMBDA2	29.455630	0.42	105.996
35	L2	29.528480	0.71	328.343	35	L2	29.528480	0.73	25.916
36	T2	29.958932	2.46	340.685	36	T2	29.958932	2.70	334.682
37	S2	30.000000	28.44	344.070	37	S2	30.000000	28.79	343.095
38	R2	30.041070	0.97	179.207	38	R2	30.041070	1.41	210.478
39	K2	30.082140	7.66	336.994	39	K2	30.082140	7.81	339.827
40	MSN2	30.544374	0.38	337.887	40	MSN2	30.544374	0.62	344.511
41	KJ2	30.626510	0.68	185.918	41	KJ2	30.626510	0.70	192.472
42	2SM2	31.015900	0.59	27.854	42	2SM2	31.015900	0.71	38.052
43	MO3	42.927140	0.27	335.973	43	MO3	42.927140	0.29	274.085
44	M3	43.476160	0.76	219.465	44	M3	43.476160	0.75	220.900
45	S03	43.943040	0.19	183.831	45	S03	43.943040	0.10	180.872
46	MK3	44.025173	0.10	139.245	46	MK3	44.025173	0.14	188.991
47	SK3	45.041070	0.15	220.771	47	SK3	45.041070	0.33	235.762
48	MN4	57.423831	0.94	115.603	48	MN4	57.423831	0.93	119.767
49	M4	57.968210	2.84	144.884	49	M4	57.968210	2.71	144.727
50	SN4	58.439730	0.29	156.604	50	SN4	58.439730	0.37	186.410
51	MS4	58.984104	1.98	196.766	51	MS4	58.984104	2.01	204.226
52	MK4	59.066242	0.42	160.404	52	MK4	59.066242	0.60	185.314
53	S4	60.000000	0.09	221.405	53	S4	60.000000	0.25	267.903
54	SK4	60.082140	0.11	248.890	54	SK4	60.082140	0.15	268.789
55	2MN6	86.407940	0.23	286.033	55	2MN6	86.407940	0.17	315.033
56	M6	86.952320	0.33	314.638	56	M6	86.952320	0.25	311.980
57	MSN6	87.423830	0.09	315.481	57	MSN6	87.423830	0.08	317.423
58	2MS6	87.968210	0.43	320.210	58	2MS6	87.968210	0.37	336.838
59	2MK6	88.050350	0.11	289.619	59	2MK6	88.050350	0.09	312.391
60	2SM6	88.984100	0.18	5.723	60	2SM6	88.984100	0.18	20.734
61	MSK6	89.066240	0.09	356.456	61	MSK6	89.066240	0.10	30.260
62	M8	115.936410	0.06	175.147	62	M8	115.936410	0.09	207.799
63	2MSN8	116.407930	0.09	238.270	63	2MSN8	116.407930	0.02	150.488
64	3MS8	116.952310	0.06	276.475	64	3MS8	116.952310	0.10	244.299
65	2(MS)8	117.968200	0.06	296.736	65	2(MS)8	117.968200	0.02	165.252



## Harmonic constant for Cheju(1981)

## Harmonic constant for Cheju(1982)

NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE	NO	NAME	SPEED	AMP.	PHASE
1	Zo	0.000000	150.17	0.000	1	Zo	0.000000	148.06	0.000
2	SA	0.041069	19.03	148.728	2	SA	0.041069	16.92	142.093
3	SSA	0.082137	4.48	321.387	3	SSA	0.082137	3.86	15.592
4	MM	0.544375	2.26	99.358	4	MM	0.544375	1.71	83.780
5	MSF	1.015896	0.59	65.569	5	MSF	1.015896	0.47	259.792
6	MF	1.098033	1.29	164.454	6	MF	1.098033	1.26	164.865
7	2Q1	12.854290	0.82	144.176	7	2Q1	12.854290	0.65	165.500
8	SIGMA1	12.927140	0.43	101.612	8	SIGMA1	12.927140	0.85	124.613
9	Q1	13.398660	3.39	165.569	9	Q1	13.398660	3.24	168.540
10	RO1	13.471514	0.75	171.425	10	RO1	13.471514	0.82	157.041
11	O1	13.943040	16.27	191.895	11	O1	13.943040	16.66	190.777
12	MP1	14.025173	0.69	136.194	12	MP1	14.025173	0.87	141.114
13	M1	14.492052	0.81	206.079	13	M1	14.492052	0.86	193.527
14	CHI1	14.569550	0.22	171.406	14	CHI1	14.569550	0.10	252.723
15	PI1	14.917864	0.17	158.925	15	PI1	14.917864	0.27	255.437
16	P1	14.958930	7.37	215.333	16	P1	14.958930	7.16	216.512
17	S1	15.000000	0.54	227.322	17	S1	15.000000	0.46	236.001
18	K1	15.041070	22.25	221.118	18	K1	15.041070	22.66	220.347
19	PSI1	15.082140	0.66	100.953	19	PSI1	15.082140	0.59	130.697
20	FI1	15.123210	0.28	121.687	20	FI1	15.123210	0.30	64.054
21	THETA1	15.512590	0.49	224.271	21	THETA1	15.512590	0.32	277.292
22	J1	15.585443	1.55	241.300	22	J1	15.585443	1.51	249.355
23	S01	16.056964	0.21	325.075	23	S01	16.056964	0.32	306.719
24	001	16.139101	0.56	291.600	24	001	16.139101	0.63	258.237
25	0Q2	27.341700	0.61	45.395	25	0Q2	27.341700	0.28	20.905
26	MNS2	27.423833	0.98	248.888	26	MNS2	27.423833	0.78	237.941
27	2N2	27.895360	2.85	288.244	27	2N2	27.895360	1.73	295.942
28	MU2	27.968210	4.45	262.959	28	MU2	27.968210	4.53	253.784
29	N2	28.439730	15.04	301.073	29	N2	28.439730	15.48	297.597
30	NU2	28.512582	2.66	302.061	30	NU2	28.512582	2.16	311.332
31	OP2	28.901970	0.60	255.561	31	OP2	28.901970	0.22	16.762
32	M2	28.984104	68.59	317.182	32	M2	28.984104	69.67	314.761
33	MKS2	29.066242	1.29	19.709	33	MKS2	29.066242	0.85	329.748
34	LAMBDA2	29.455630	0.40	81.535	34	LAMBDA2	29.455630	0.44	99.972
35	L2	29.528480	1.09	35.001	35	L2	29.528480	1.02	354.461
36	T2	29.958932	2.67	354.242	36	T2	29.958932	2.57	337.575
37	S2	30.000000	28.28	346.265	37	S2	30.000000	28.89	344.363
38	R2	30.041070	0.92	231.460	38	R2	30.041070	0.98	226.822
39	K2	30.082140	7.91	347.494	39	K2	30.082140	8.11	339.546
40	MSN2	30.544374	0.30	319.055	40	MSN2	30.544374	0.31	0.183
41	KJ2	30.626510	0.66	185.074	41	KJ2	30.626510	0.56	176.783
42	2SM2	31.015900	0.53	26.758	42	2SM2	31.015900	0.52	30.497
43	M03	42.927140	0.15	103.184	43	M03	42.927140	0.29	8.982
44	M3	43.476160	0.69	226.575	44	M3	43.476160	0.66	225.843
45	S03	43.943040	0.23	164.382	45	S03	43.943040	0.05	154.369
46	MK3	44.025173	0.10	189.425	46	MK3	44.025173	0.10	146.426
47	SK3	45.041070	0.39	240.392	47	SK3	45.041070	0.26	223.230
48	MN4	57.423831	0.77	130.549	48	MN4	57.423831	1.08	111.181
49	M4	57.968210	2.59	156.833	49	M4	57.968210	2.87	141.631
50	SN4	58.439730	0.20	213.305	50	SN4	58.439730	0.38	165.123
51	MS4	58.984104	1.86	214.271	51	MS4	58.984104	2.06	195.325
52	MK4	59.066242	0.71	213.695	52	MK4	59.066242	0.54	181.342
53	S4	60.000000	0.07	283.496	53	S4	60.000000	0.17	246.218
54	SK4	60.082140	0.23	295.317	54	SK4	60.082140	0.15	278.200
55	2MN6	86.407940	0.29	343.235	55	2MN6	86.407940	0.20	310.028
56	M6	86.952320	0.44	5.317	56	M6	86.952320	0.32	328.446
57	MSN6	87.423830	0.14	20.319	57	MSN6	87.423830	0.07	339.372
58	2MS6	87.968210	0.32	5.526	58	2MS6	87.968210	0.35	331.692
59	2MK6	88.050350	0.25	353.114	59	2MK6	88.050350	0.21	284.069
60	2SM6	88.984100	0.10	75.820	60	2SM6	88.984100	0.11	18.718
61	MSK6	89.066240	0.07	49.452	61	MSK6	89.066240	0.16	352.472
62	M8	115.936410	0.16	201.108	62	M8	115.936410	0.04	238.871
63	2MSN8	116.407930	0.19	213.653	63	2MSN8	116.407930	0.02	263.045
64	3MS8	116.952310	0.22	246.423	64	3MS8	116.952310	0.07	277.128
65	2(MS)8	117.968200	0.11	297.464	65	2(MS)8	117.968200	0.06	14.587

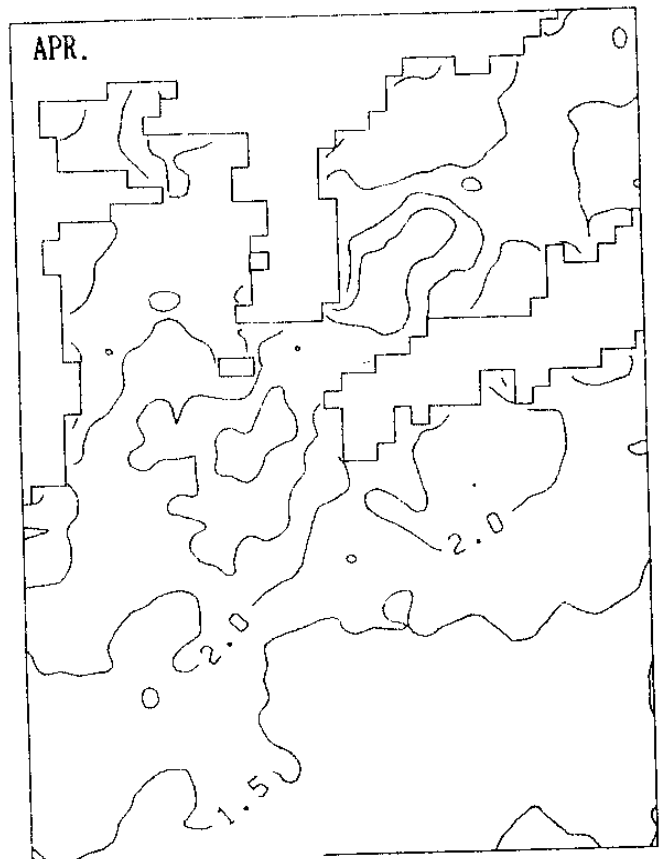
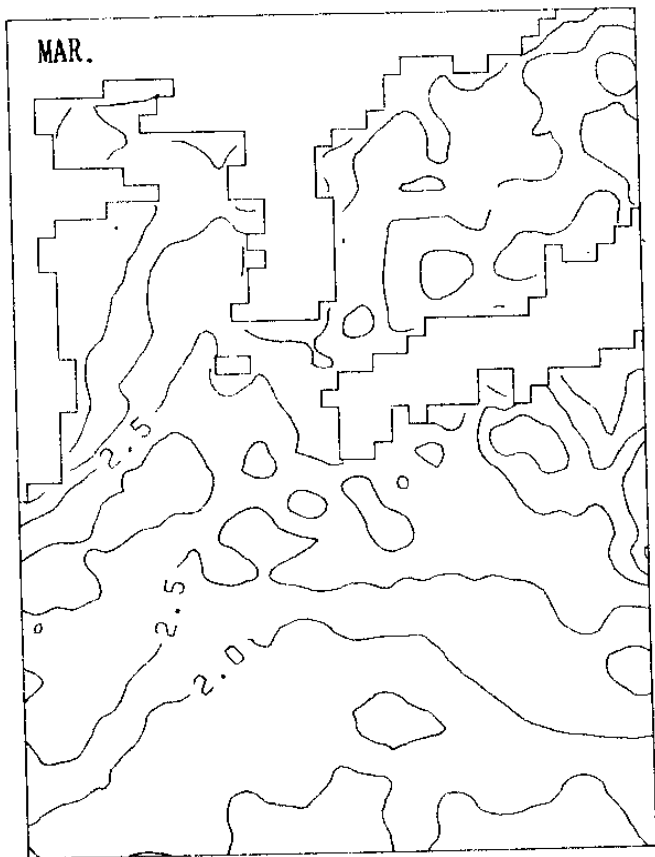
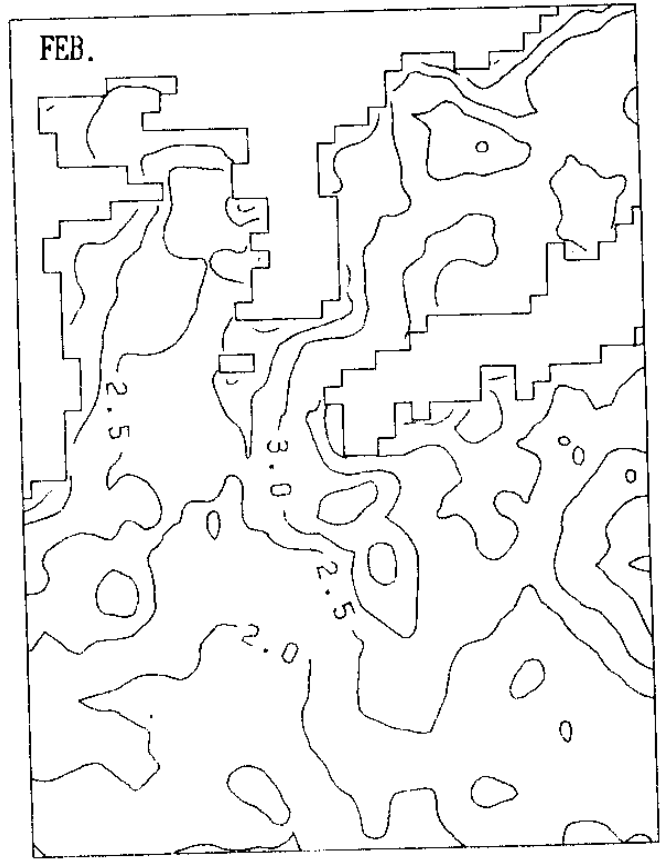
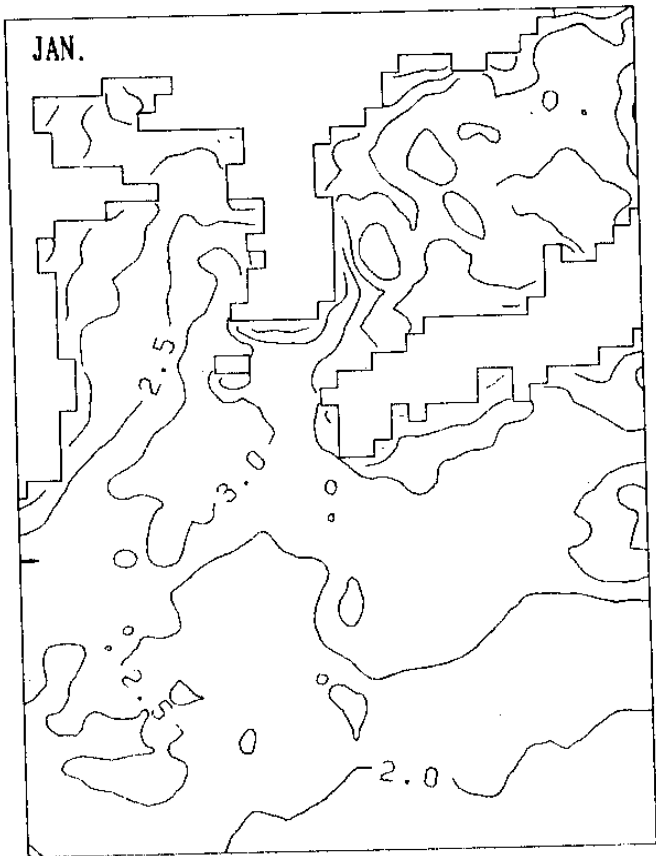


Fig. B.1 Monthly distribution of wave height with probability 0.1 once per one month

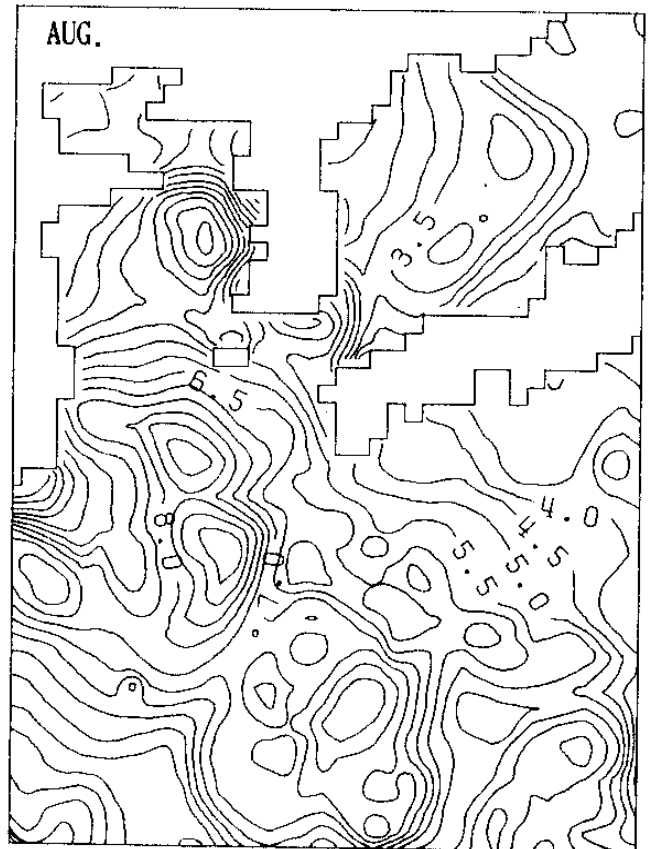
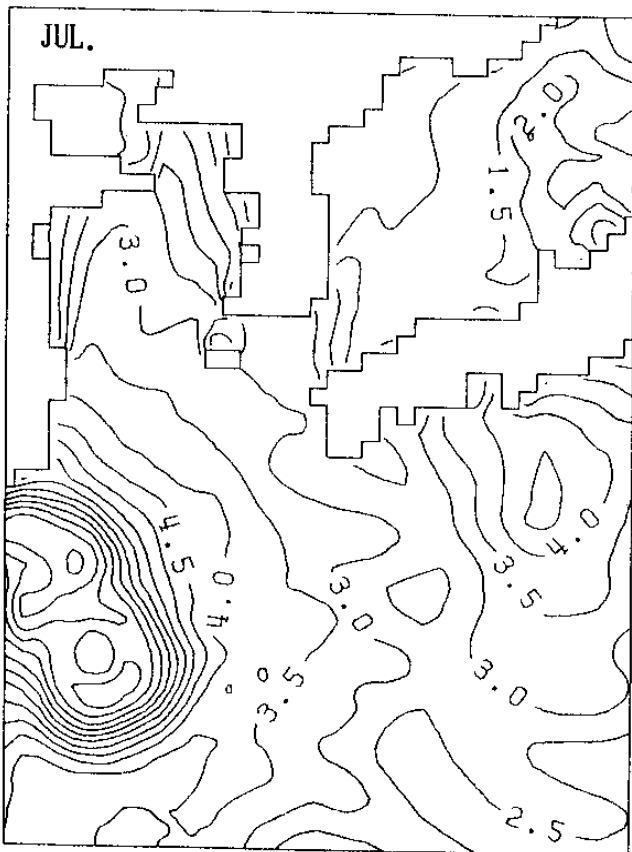
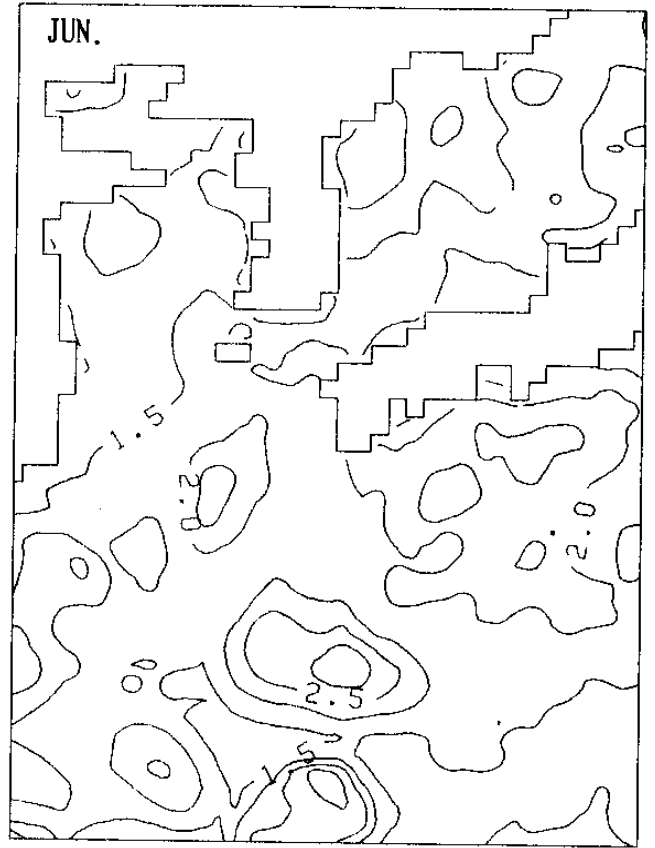
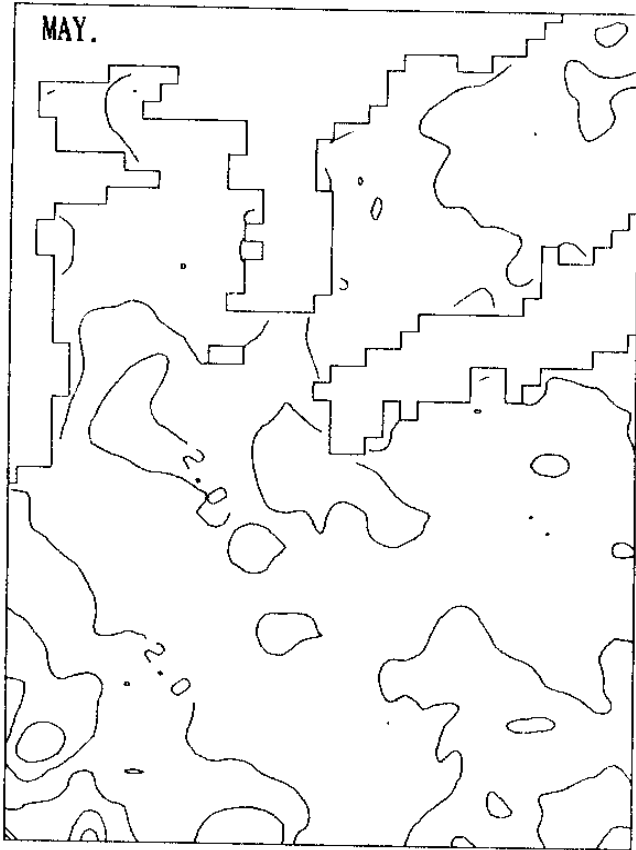


Fig. B.1. (continued)

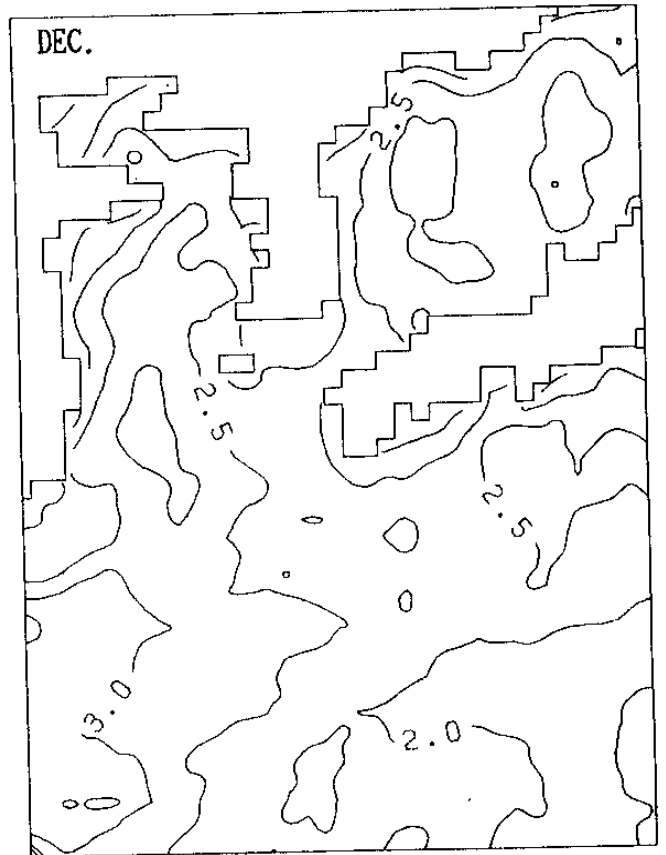
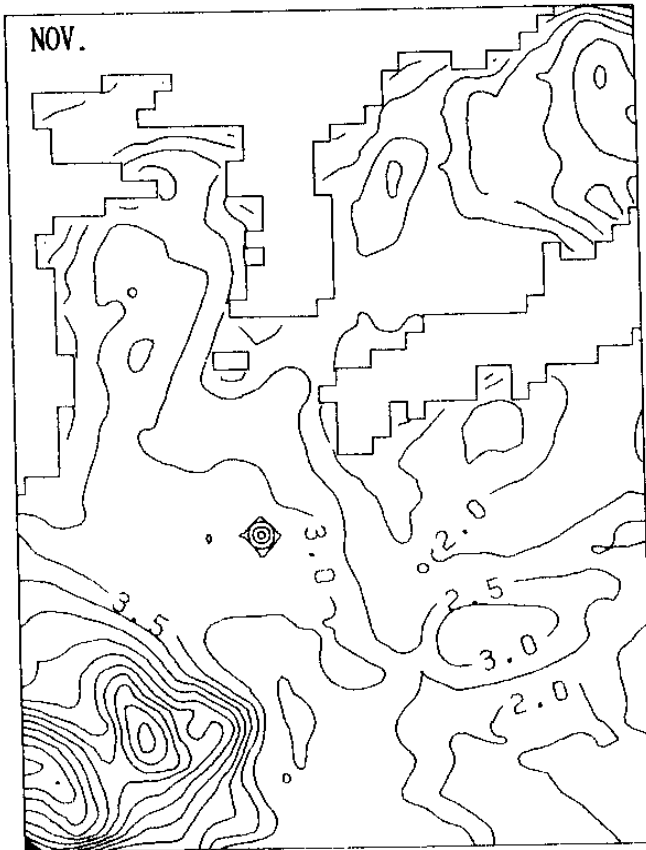
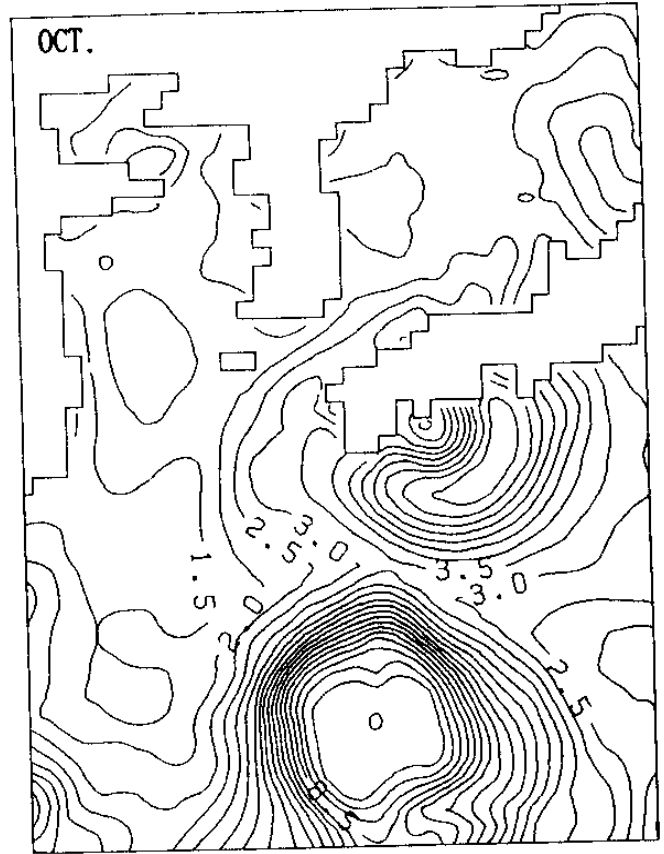
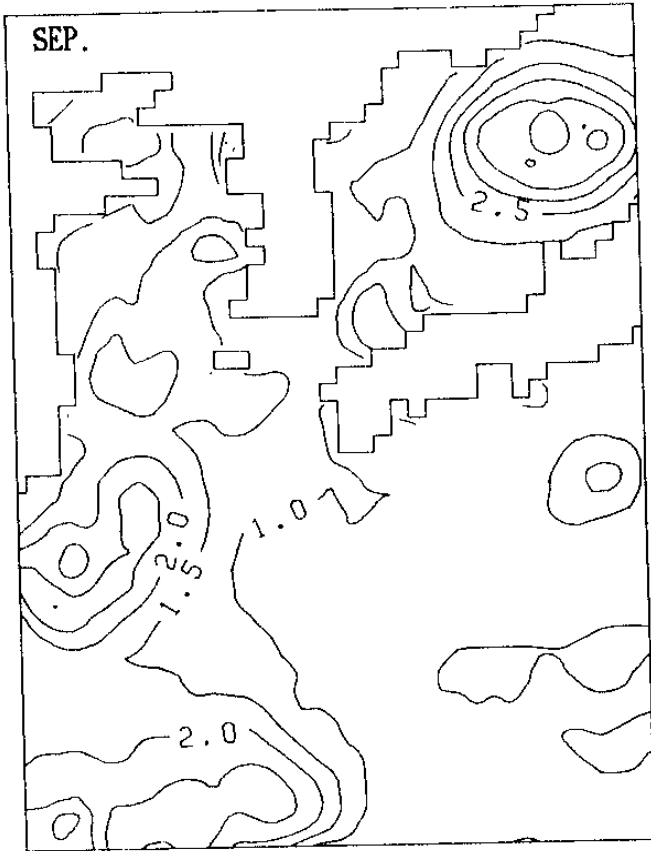


Fig. B.1. (continued)

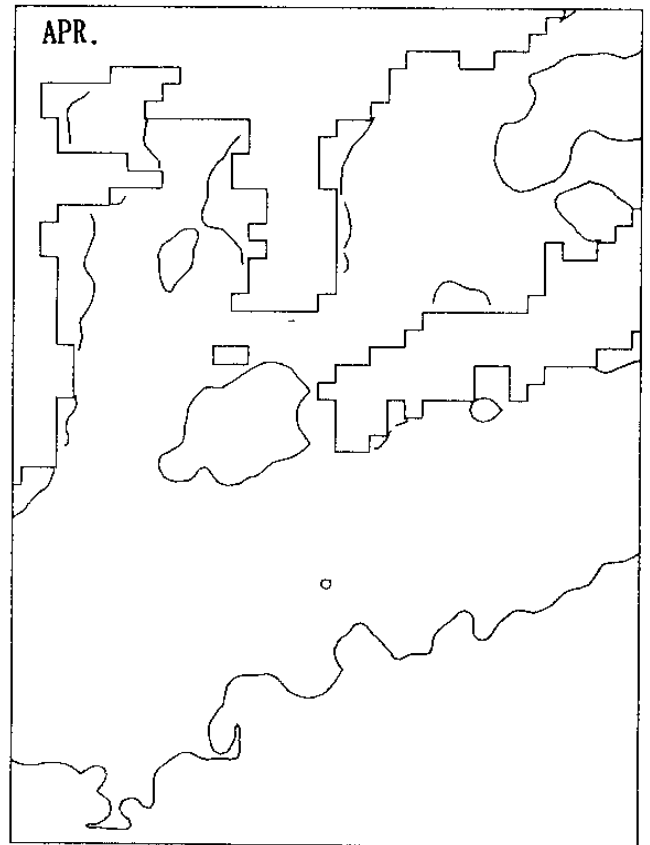
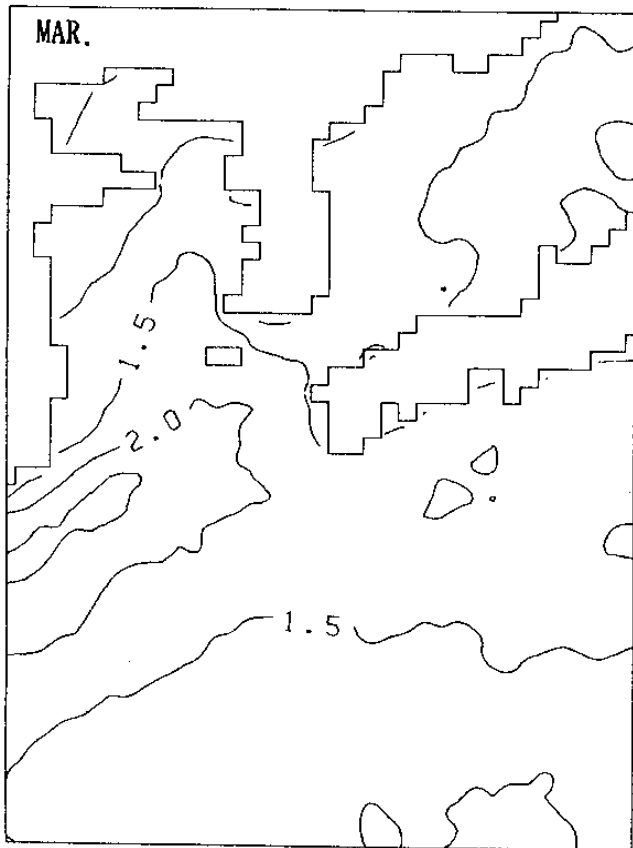
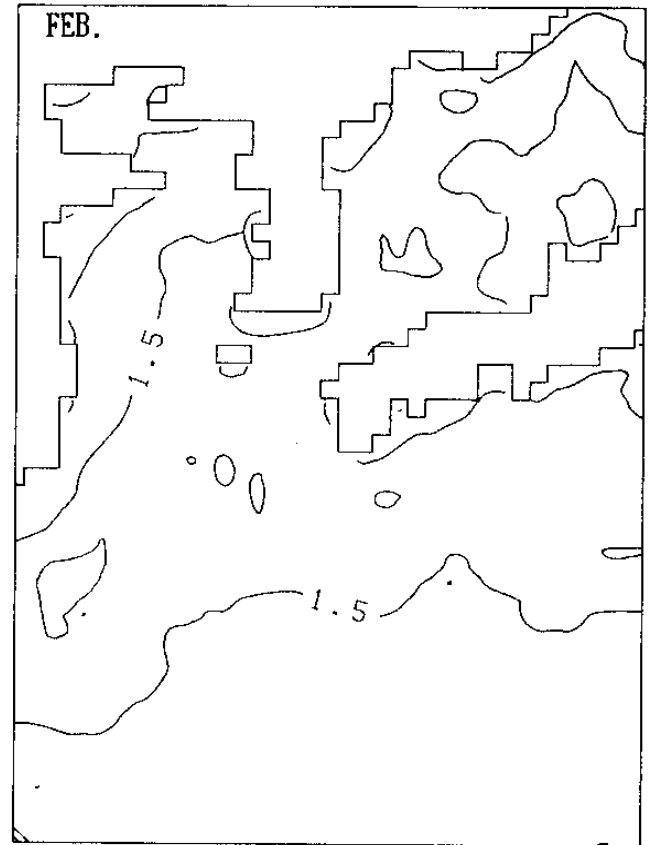
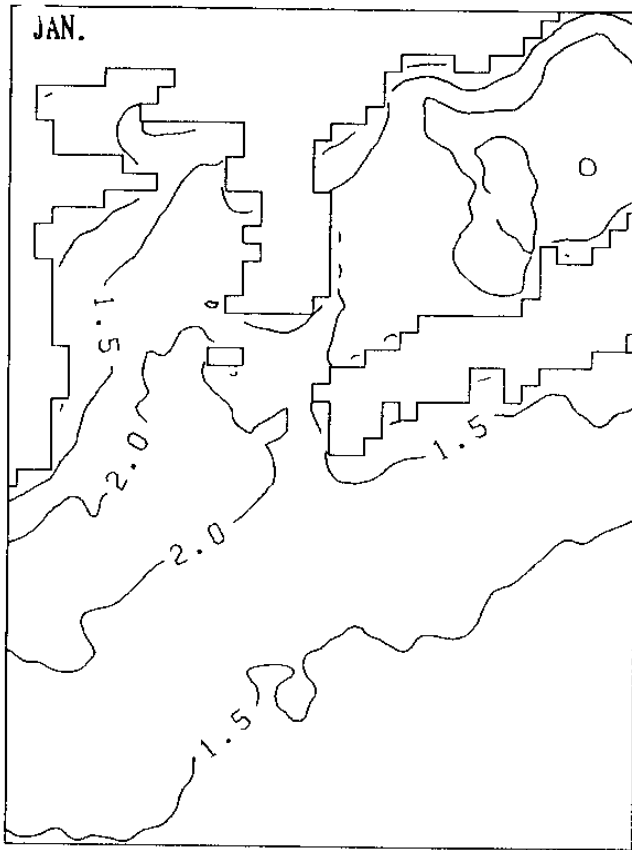


Fig. B.2 Monthly distribution of wave height with probability of once per one week

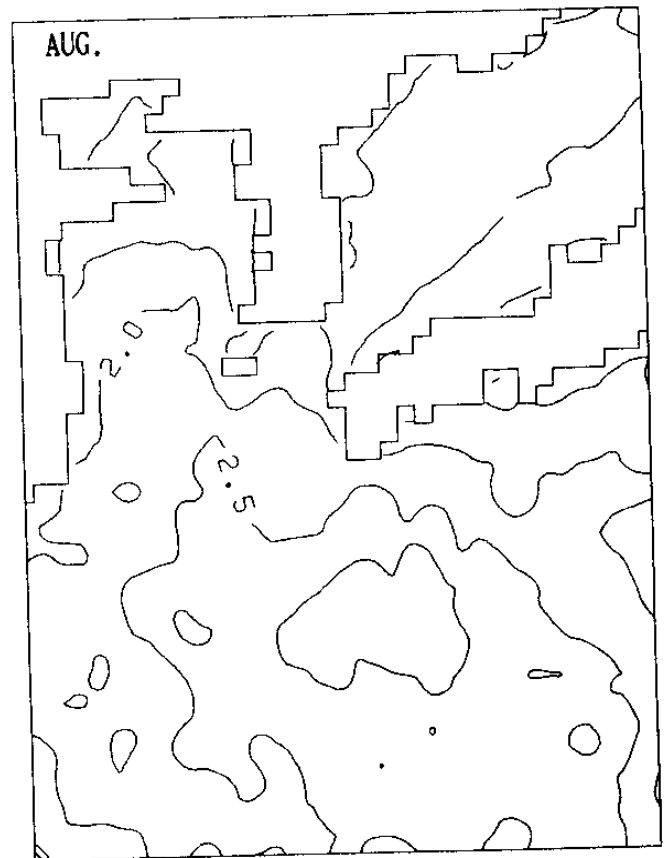
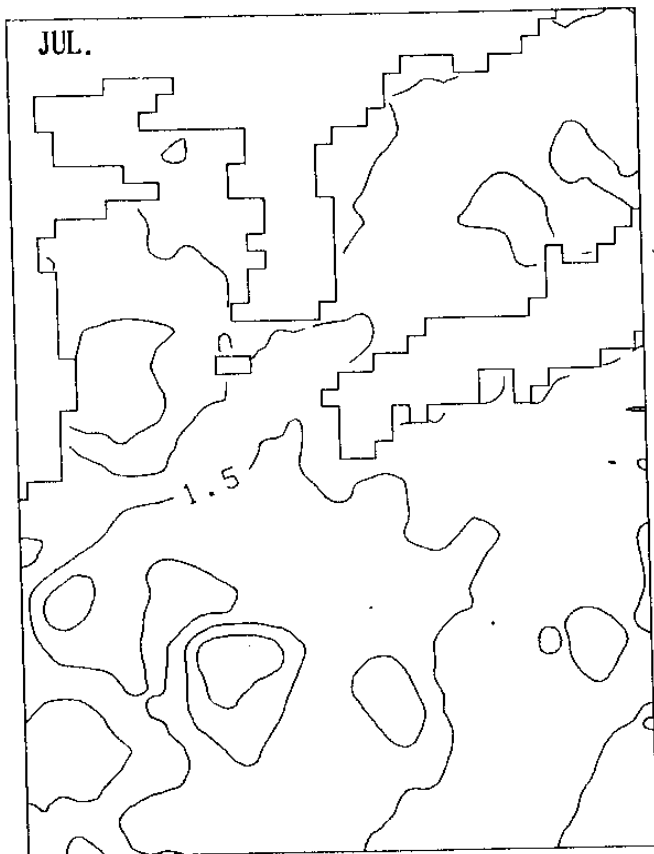
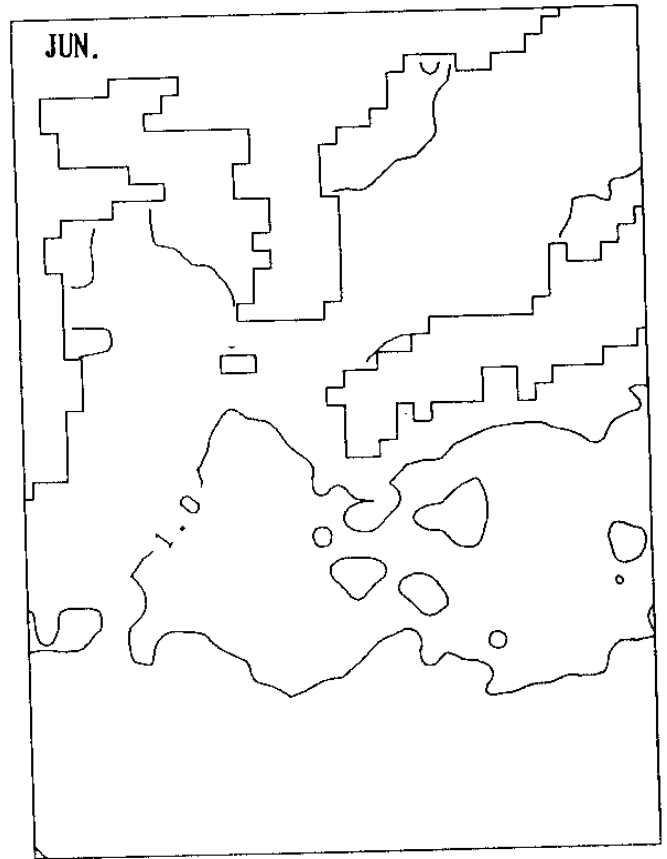
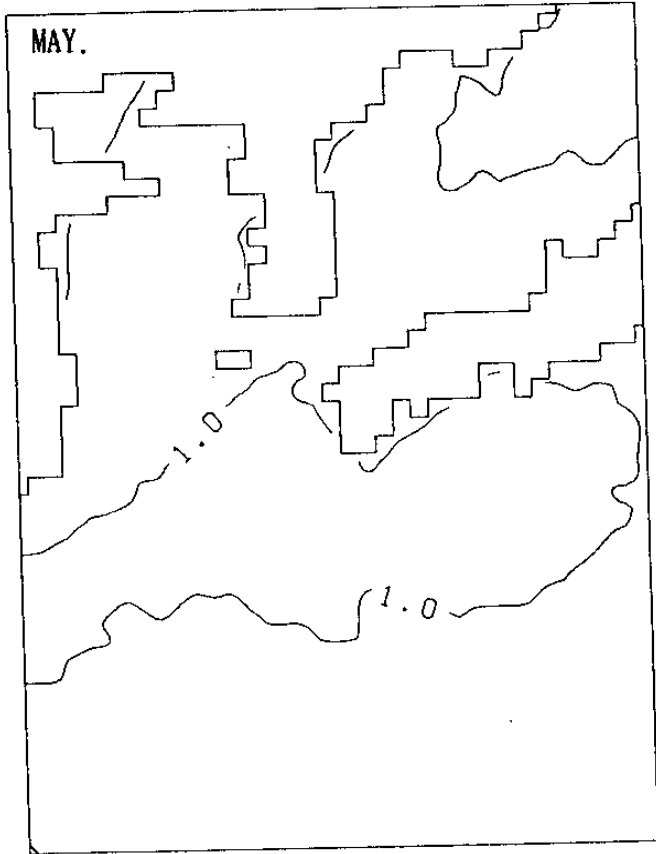


Fig. B.2. (continued)

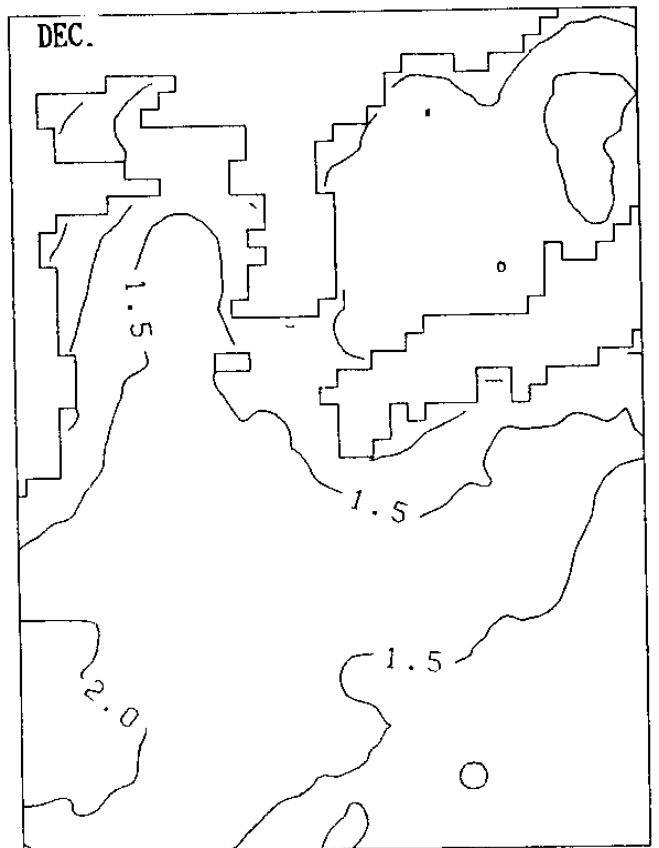
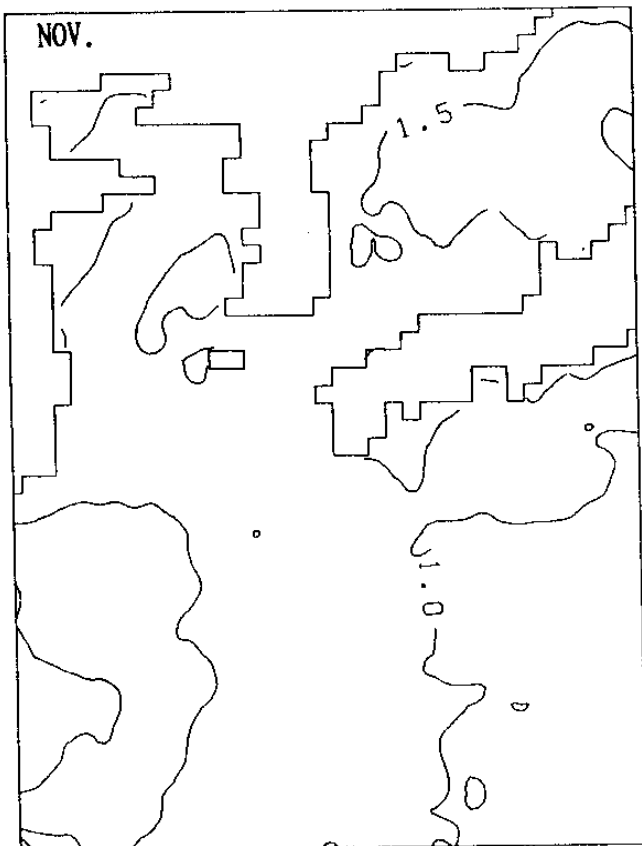
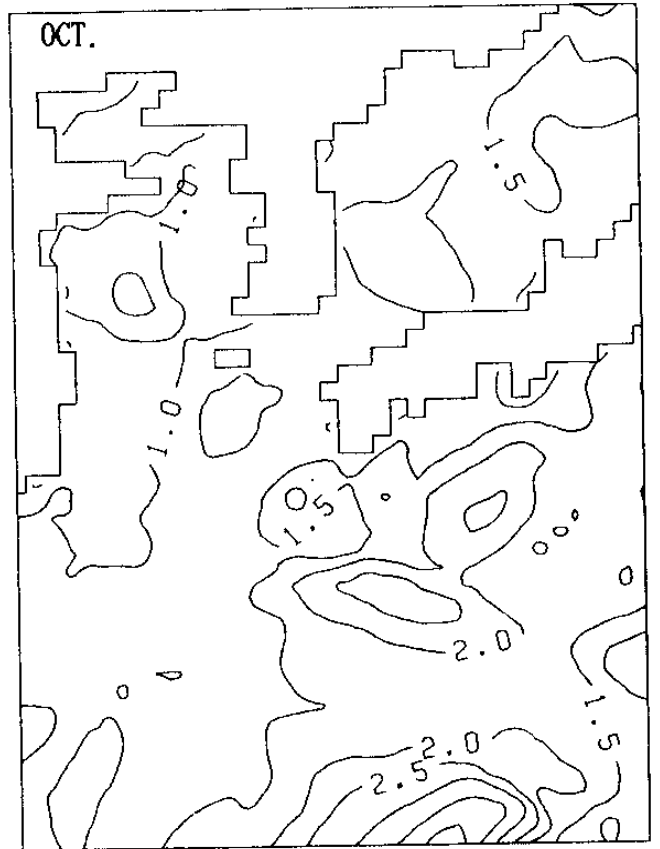
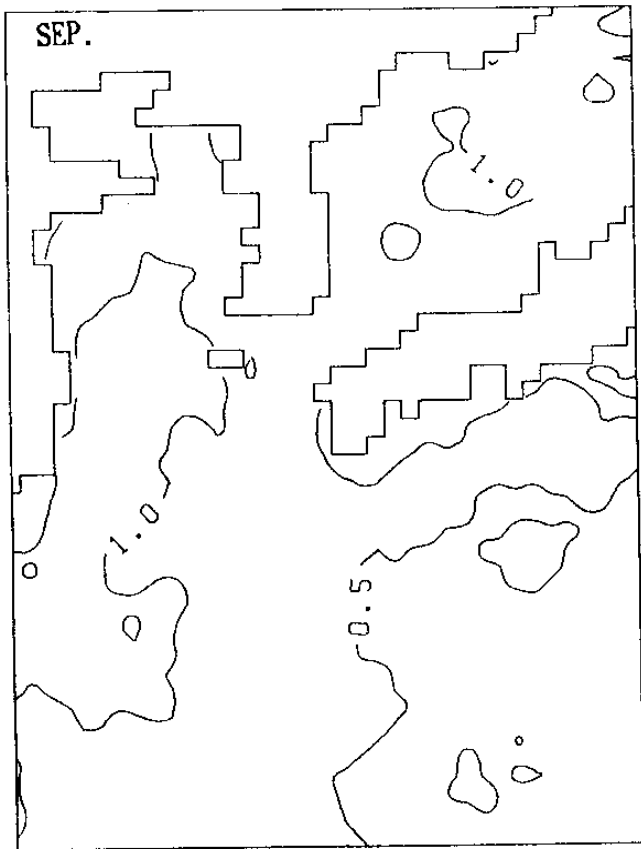


Fig. B.2. (continued)

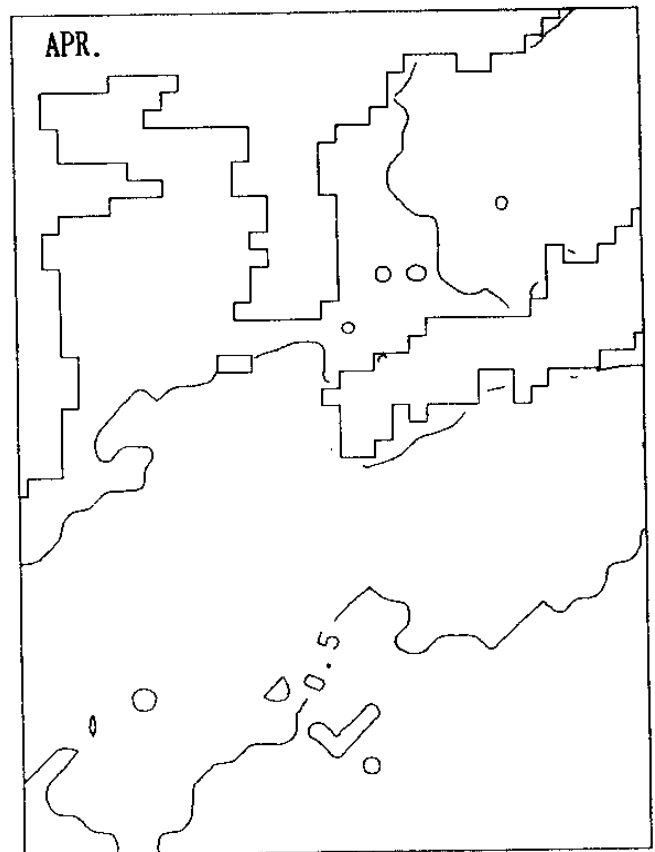
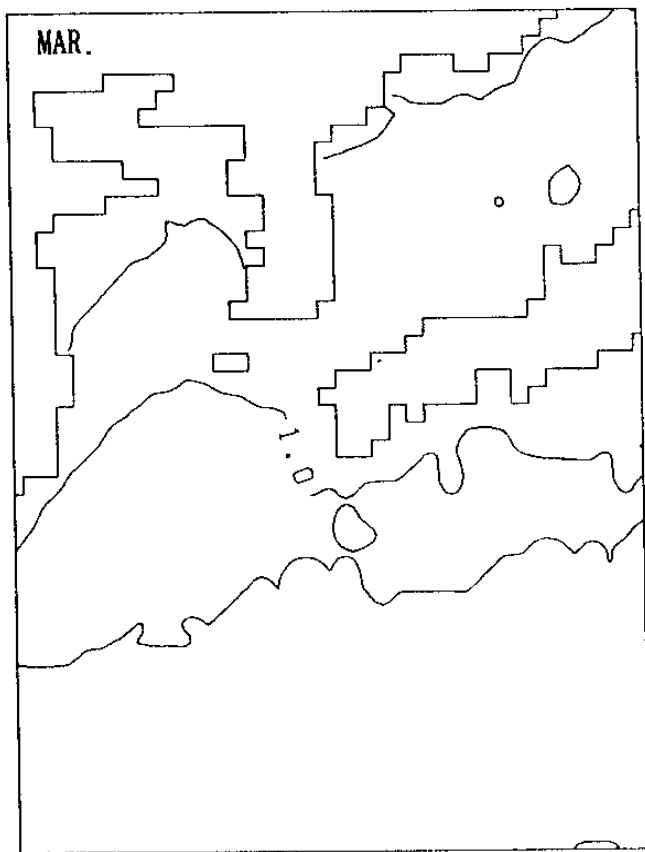
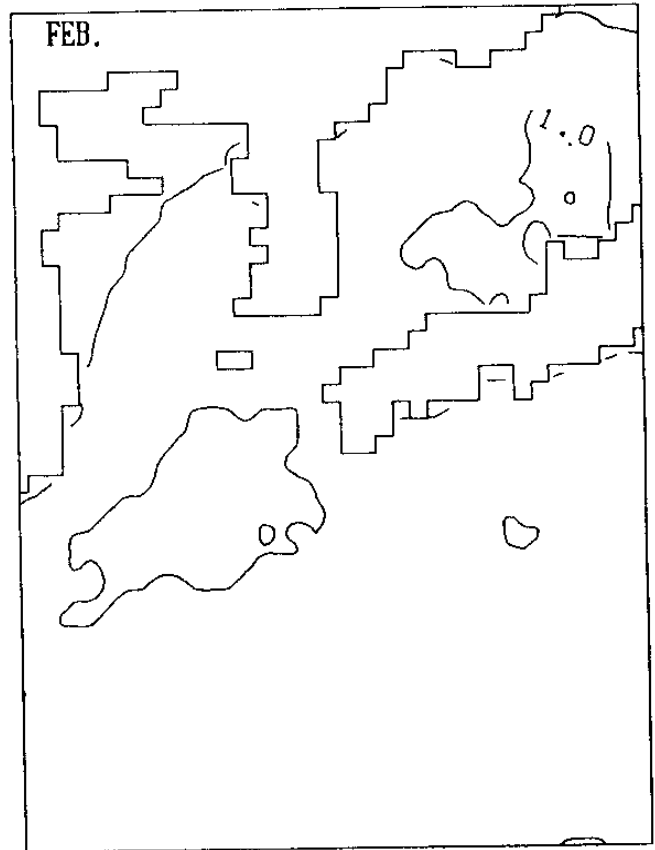
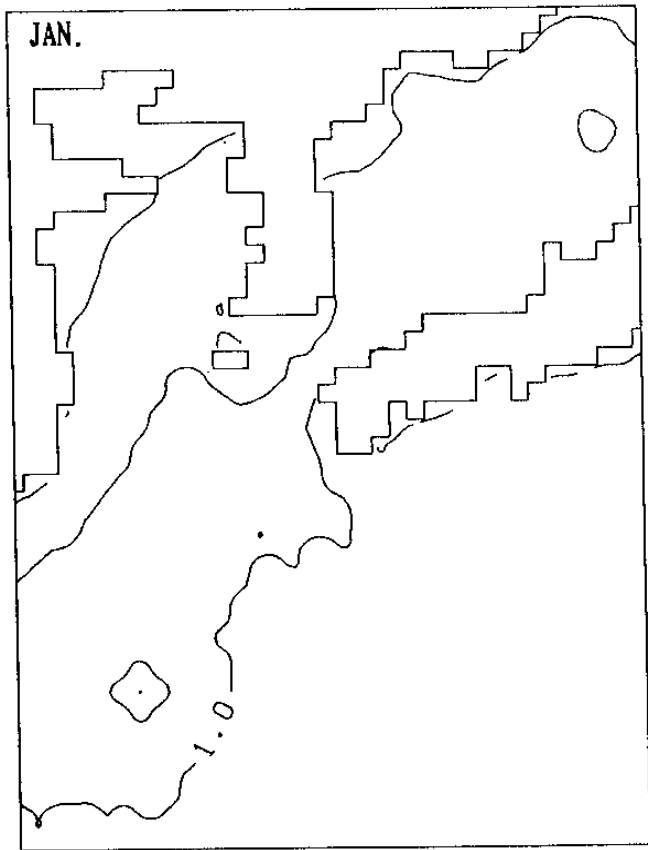


Fig. B.3 Monthly distribution of wave height with probability of once per two week



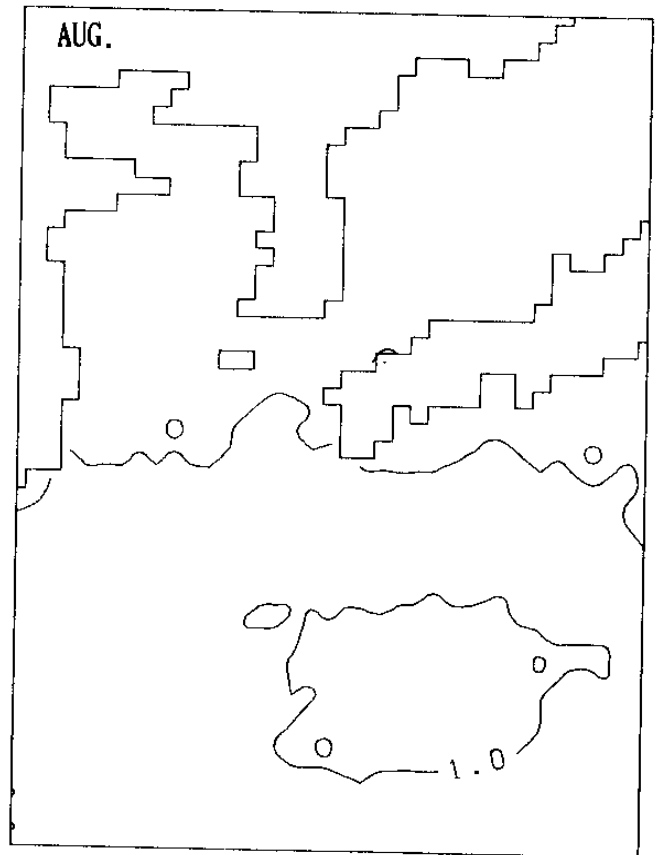
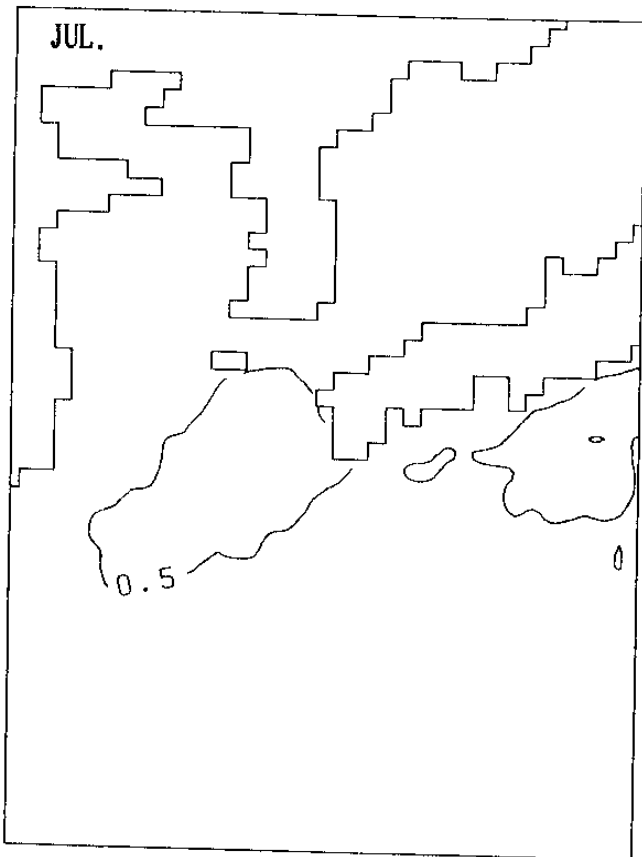
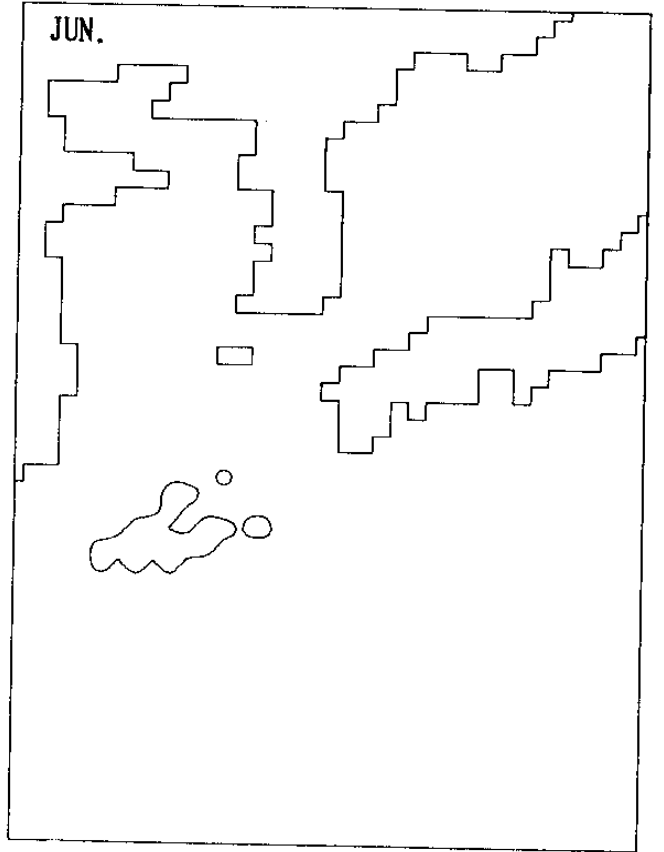
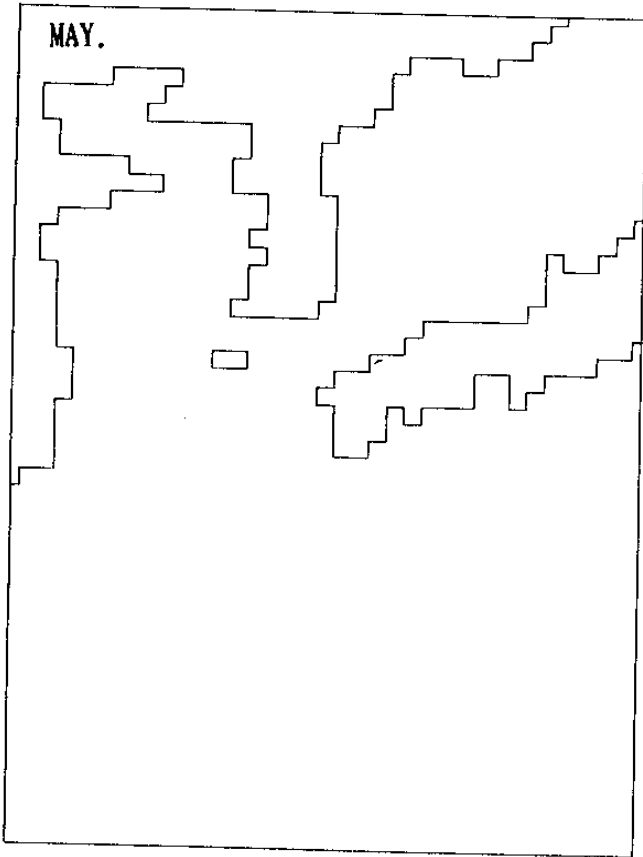


Fig. B.3. (continued)

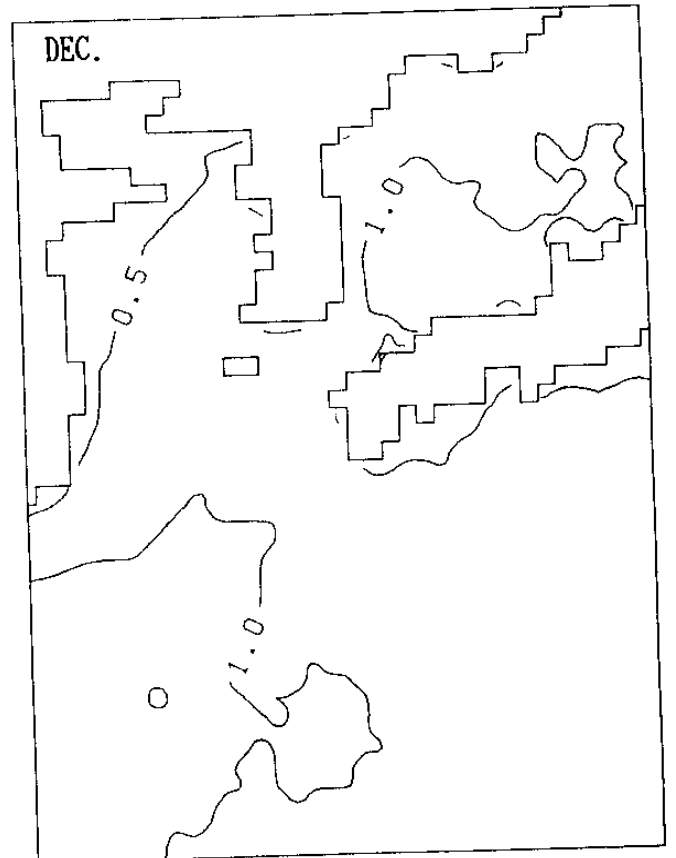
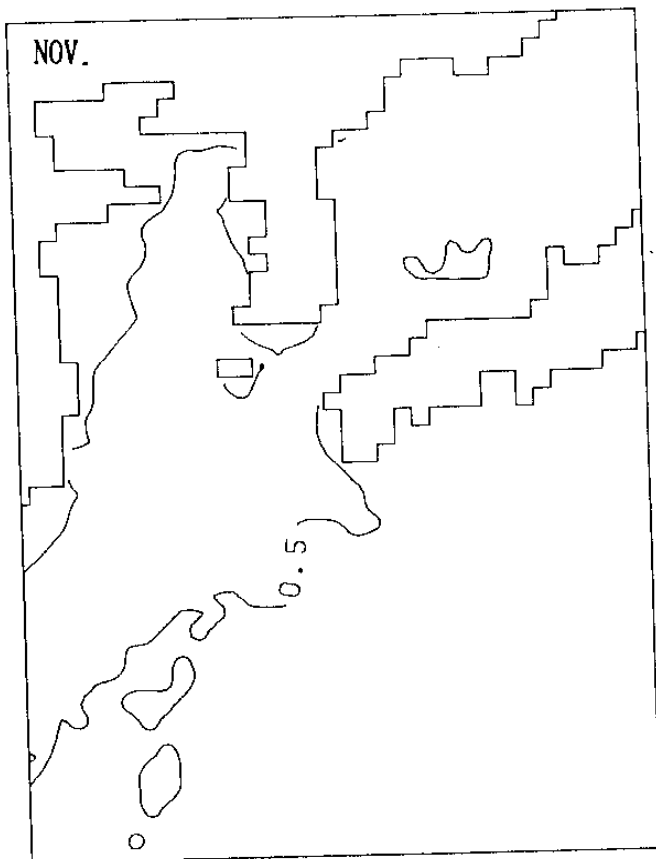
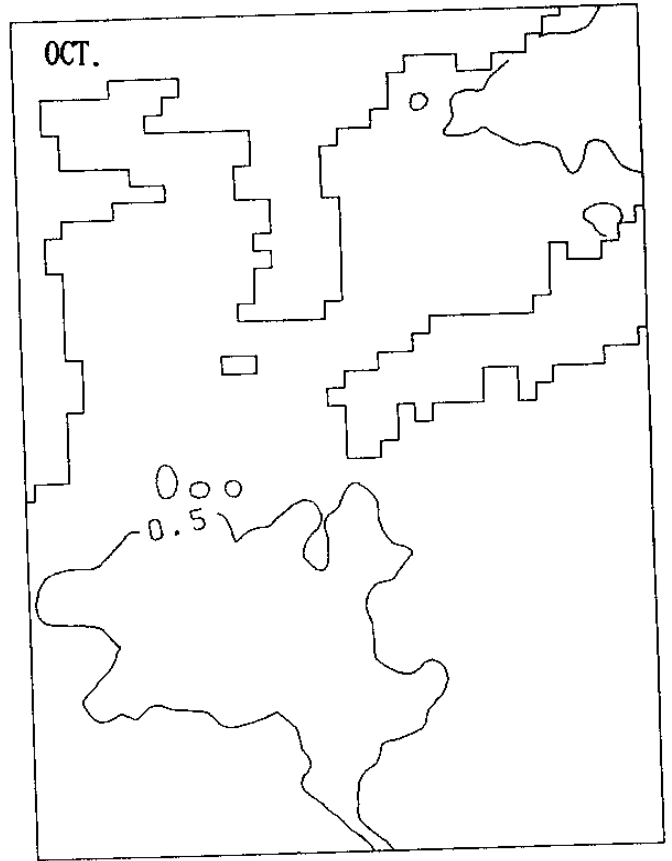
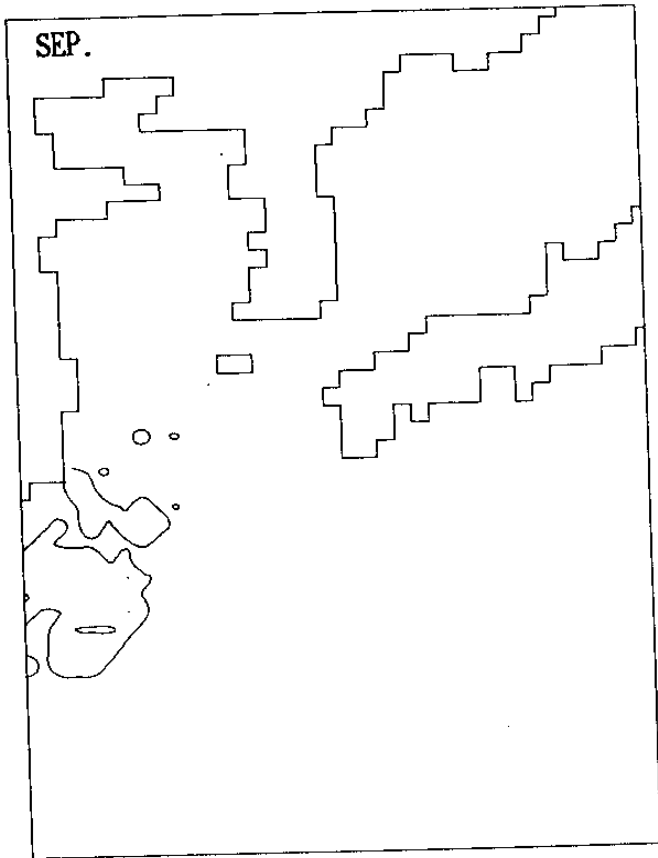


Fig. B.3. (continued)

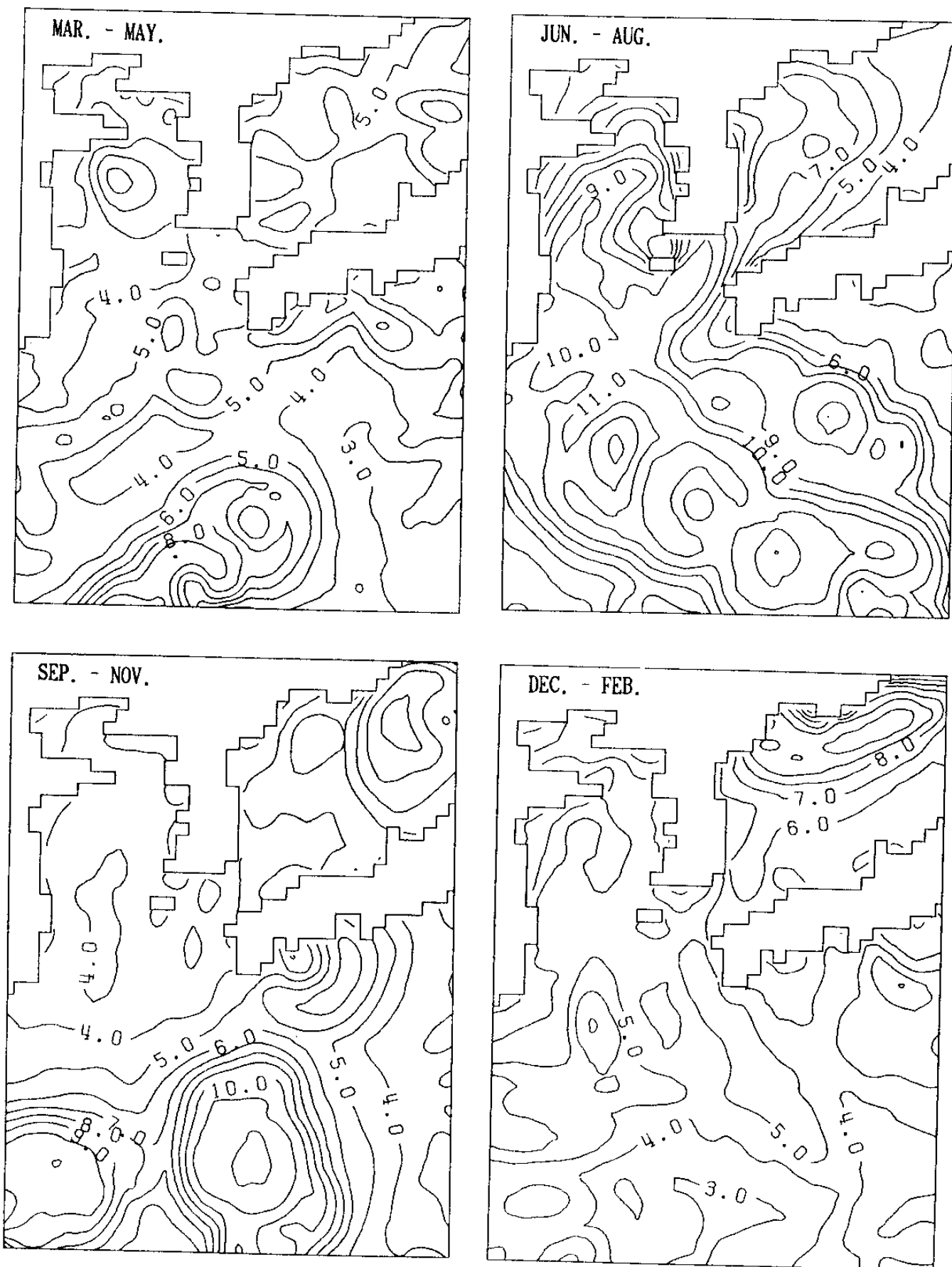


Fig. B.4 Seasonal distribution of maximum of wave height

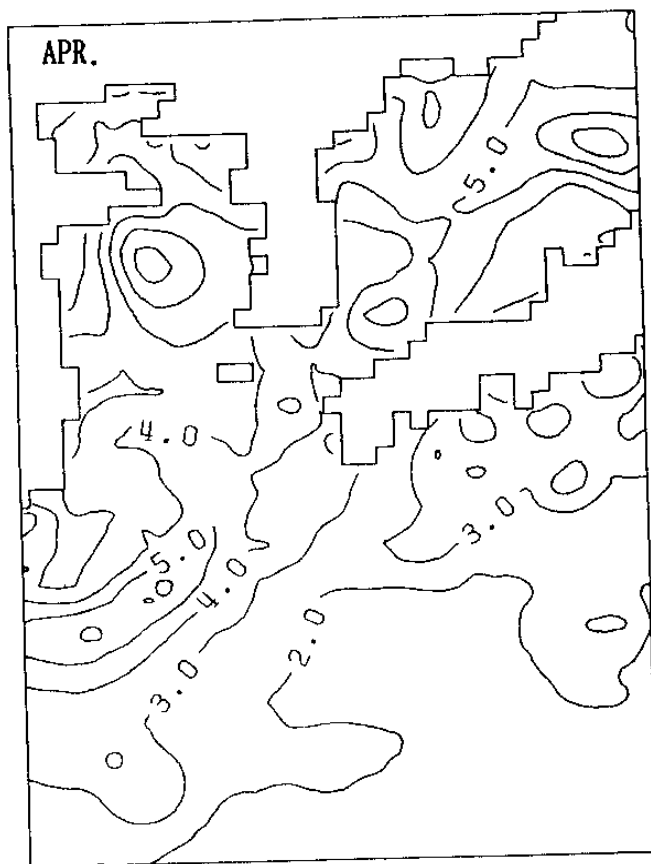
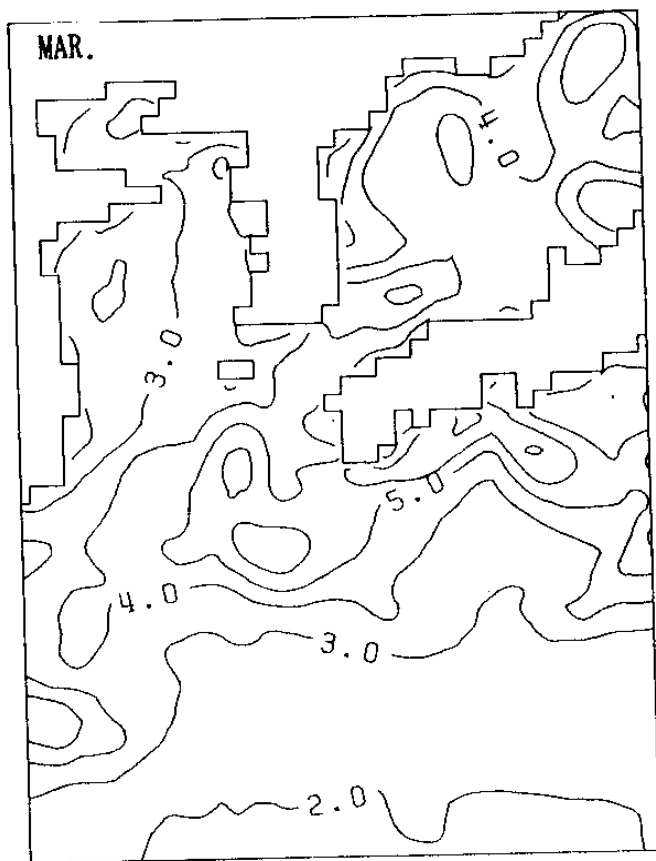
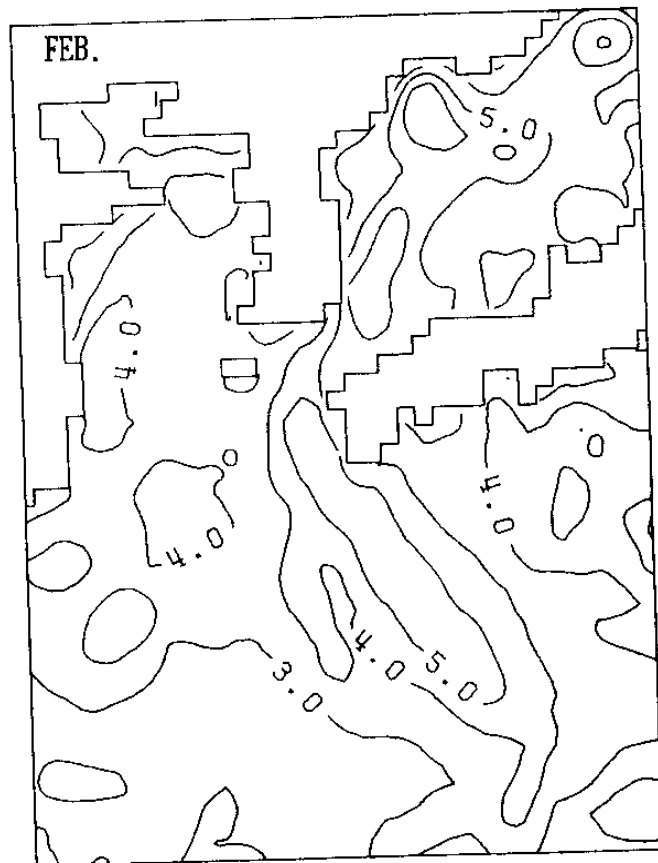
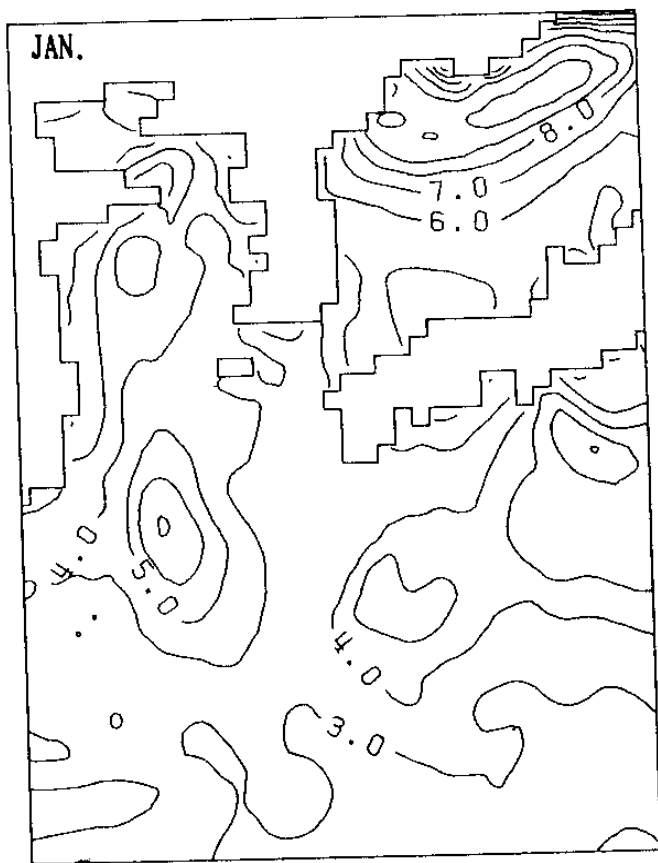


Fig. B.5 Monthly distribution of maximum of wave height

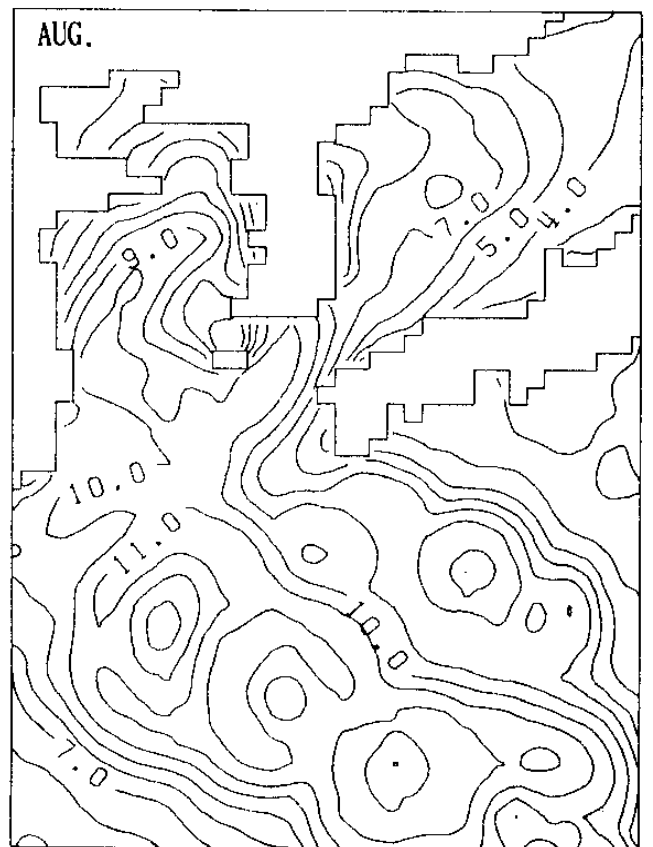
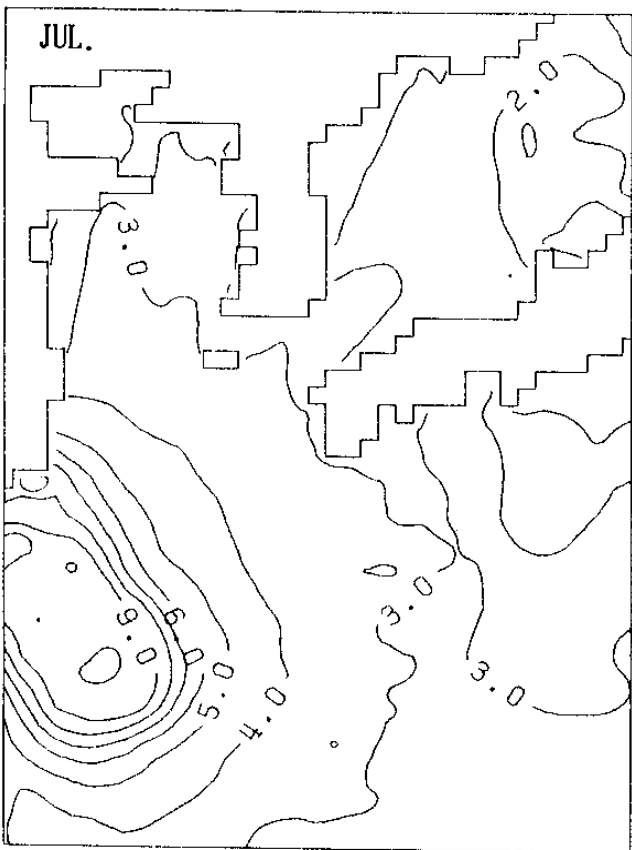
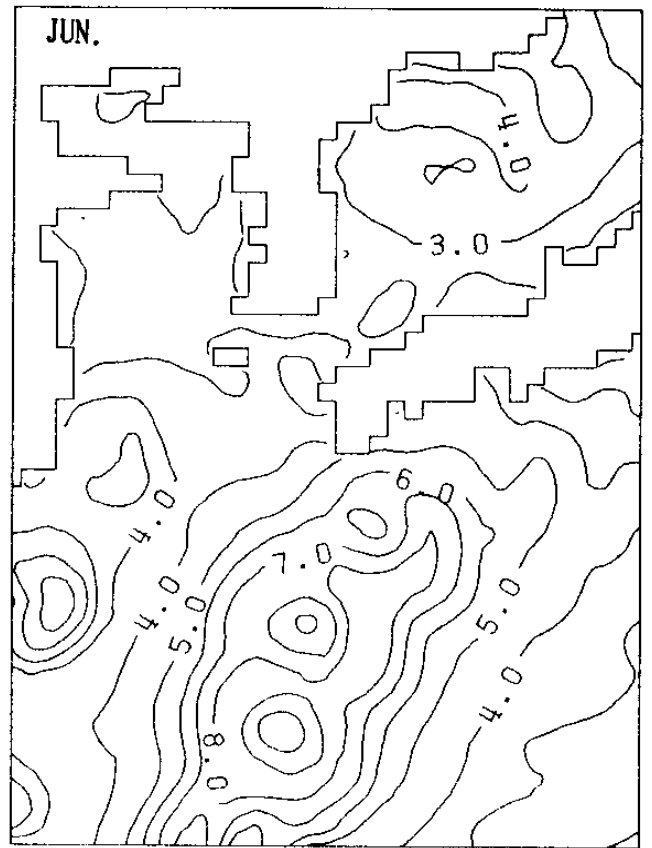
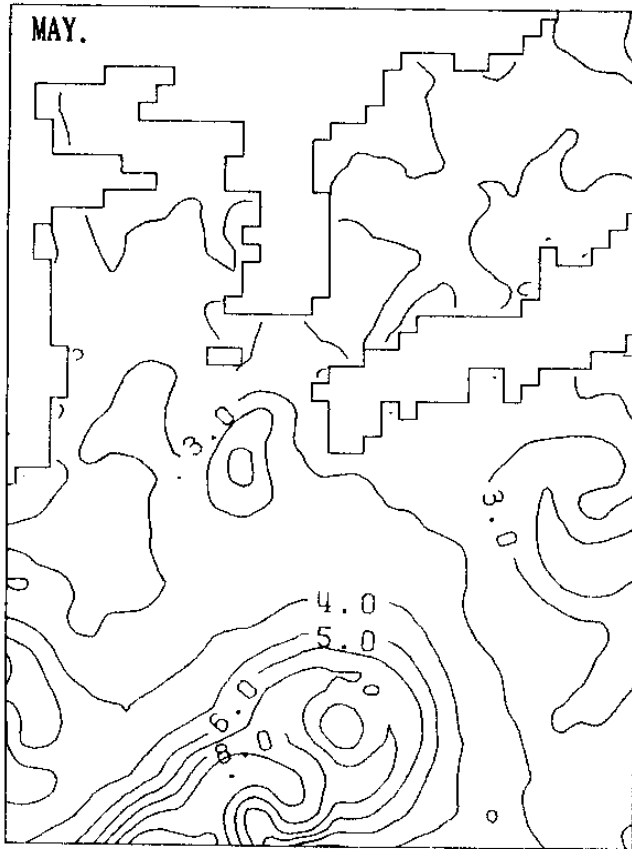


Fig. B.5. (continued)

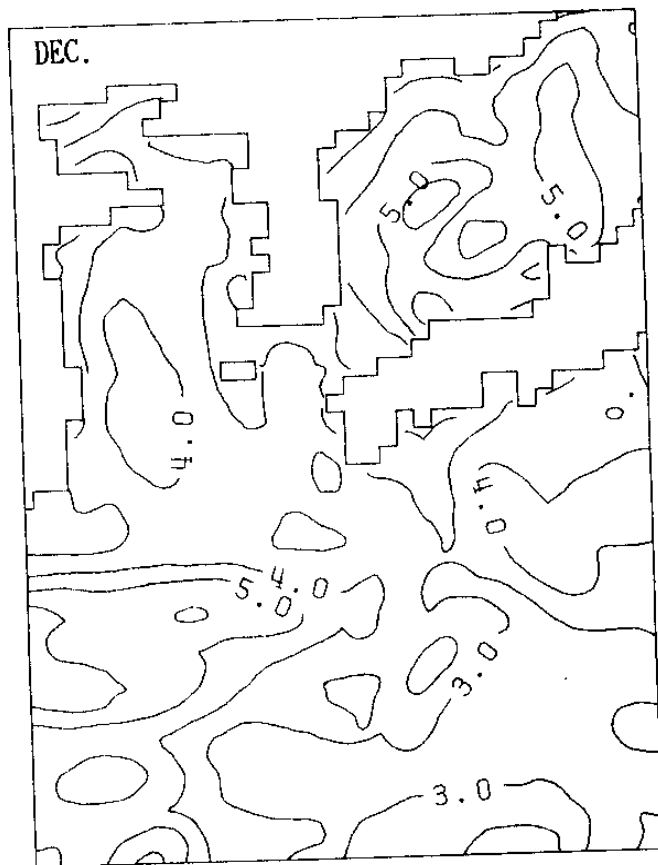
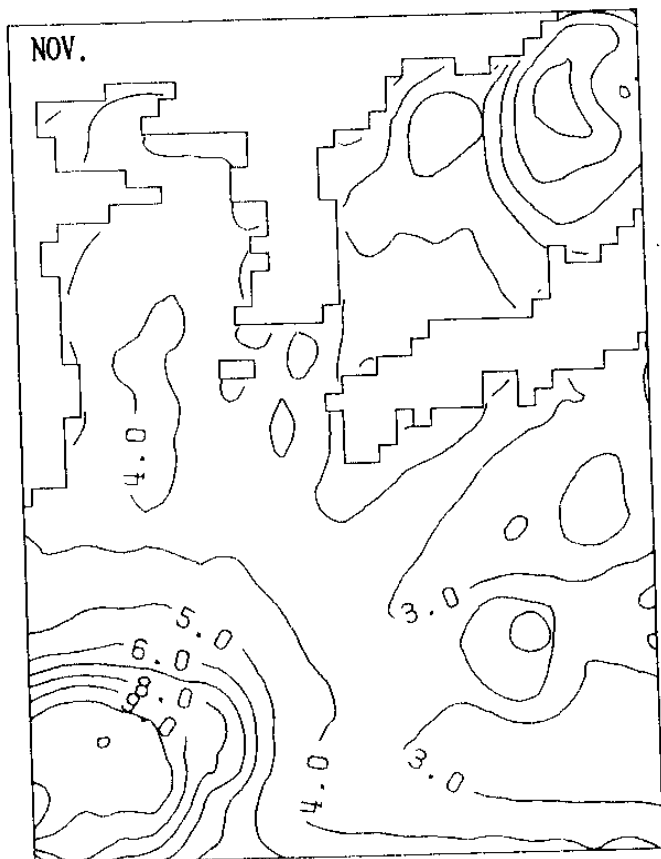
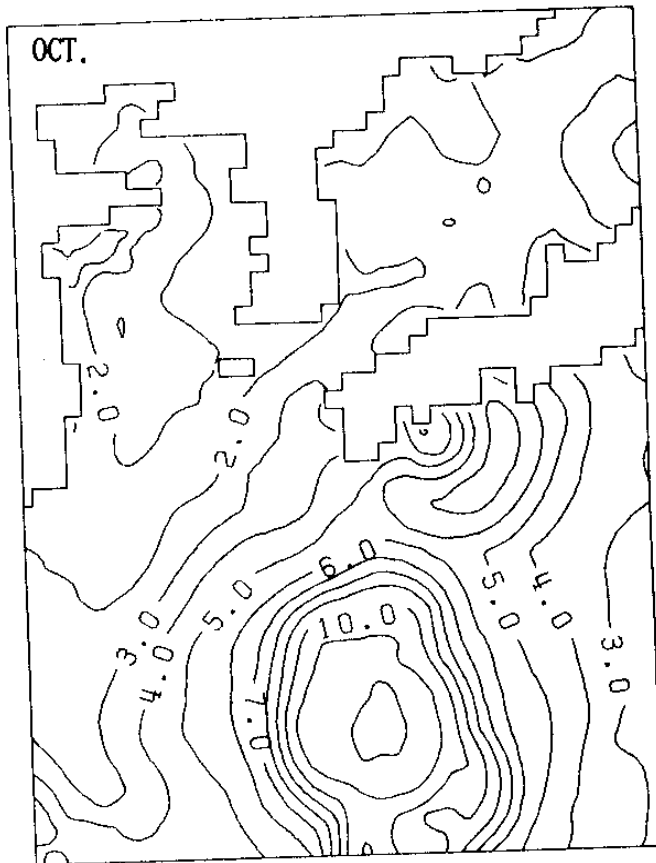
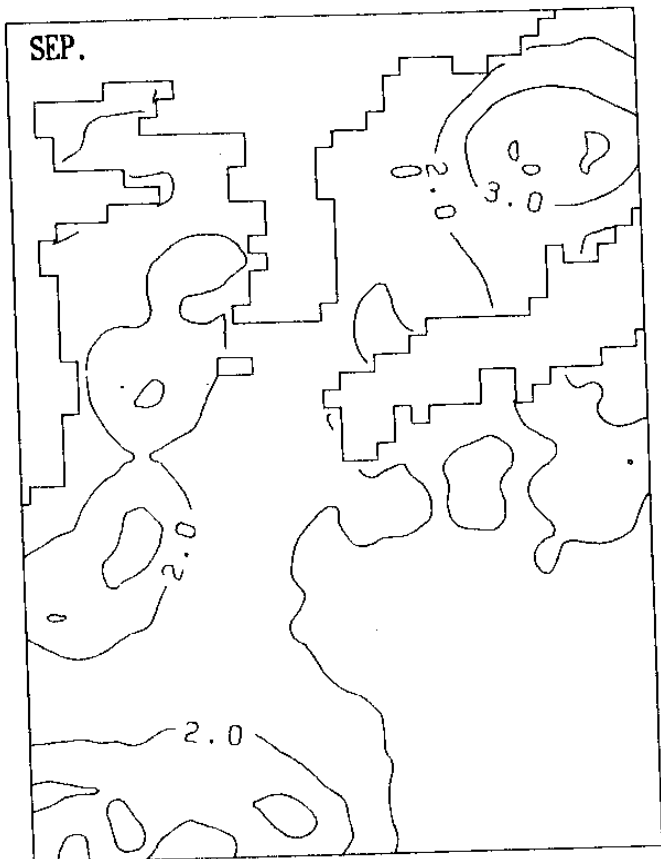


Fig. B.5. (continued)

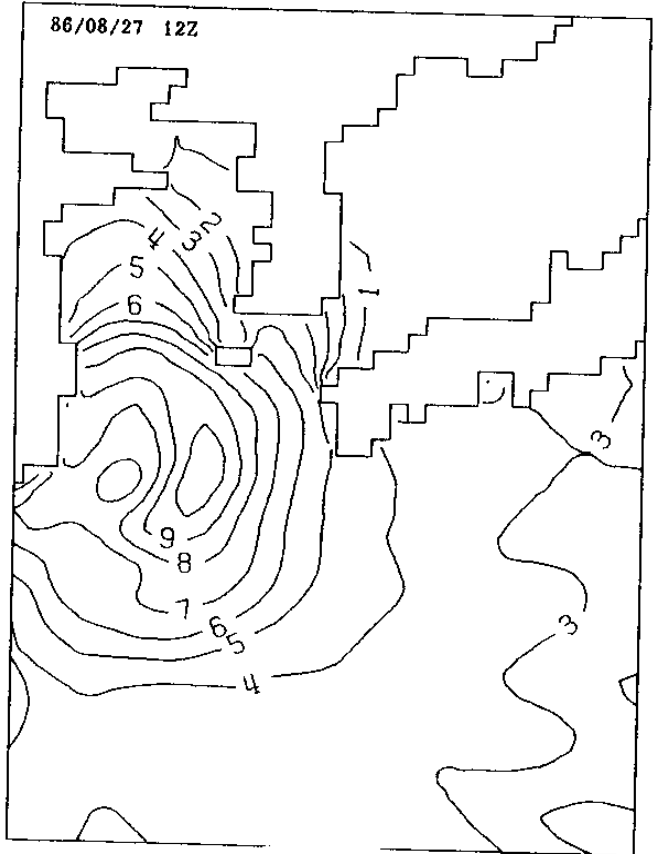
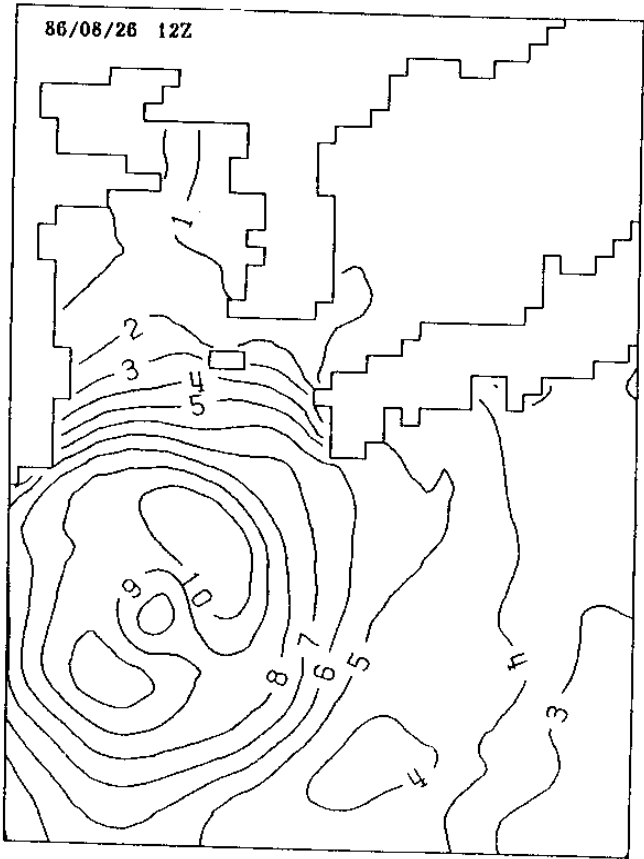
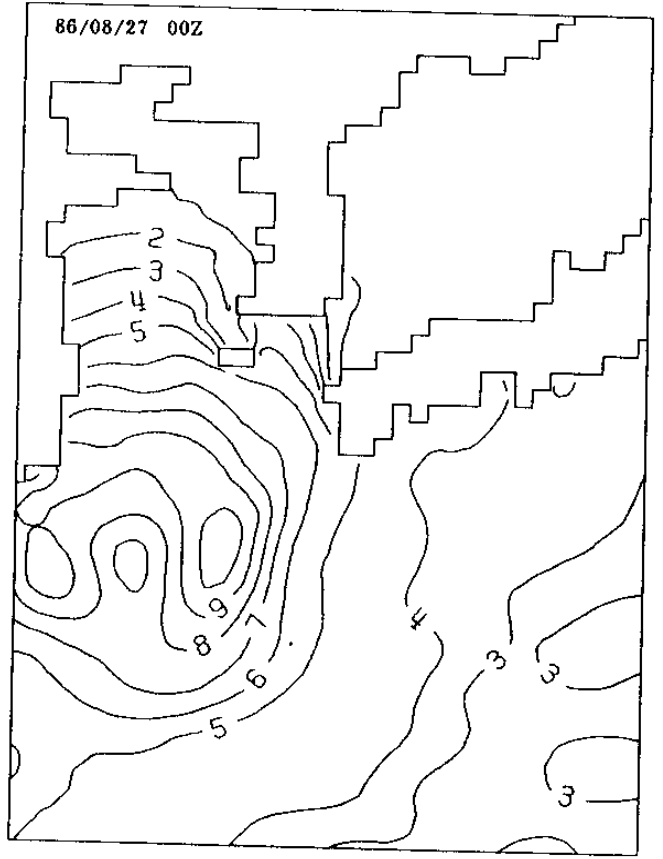
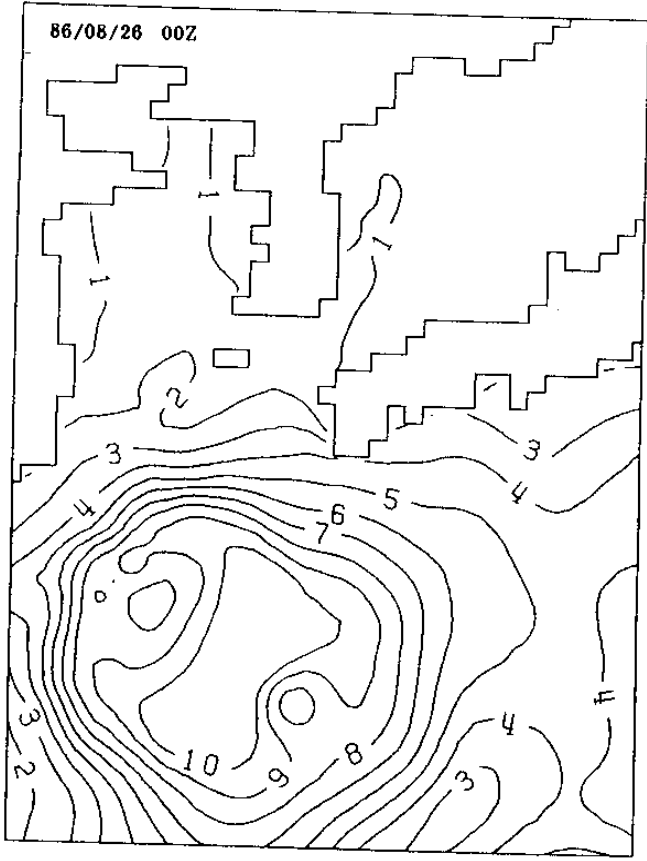


Fig. B.6 Distribution of wave height during Typhoon Vera(1986.8).

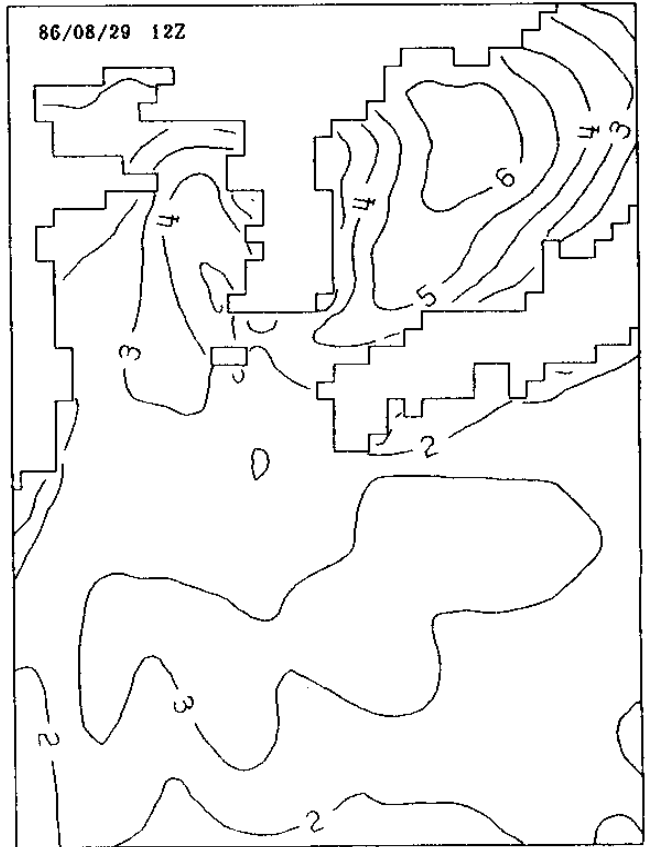
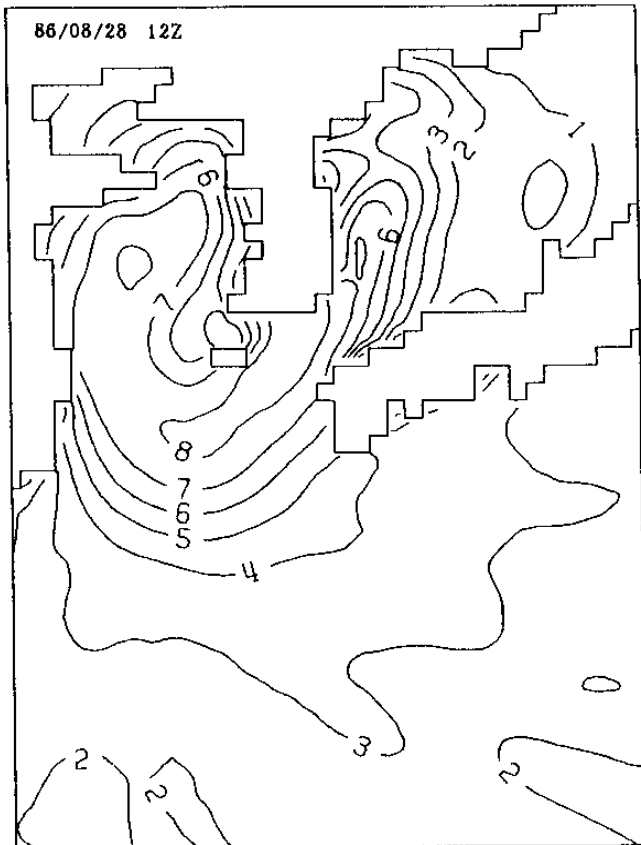
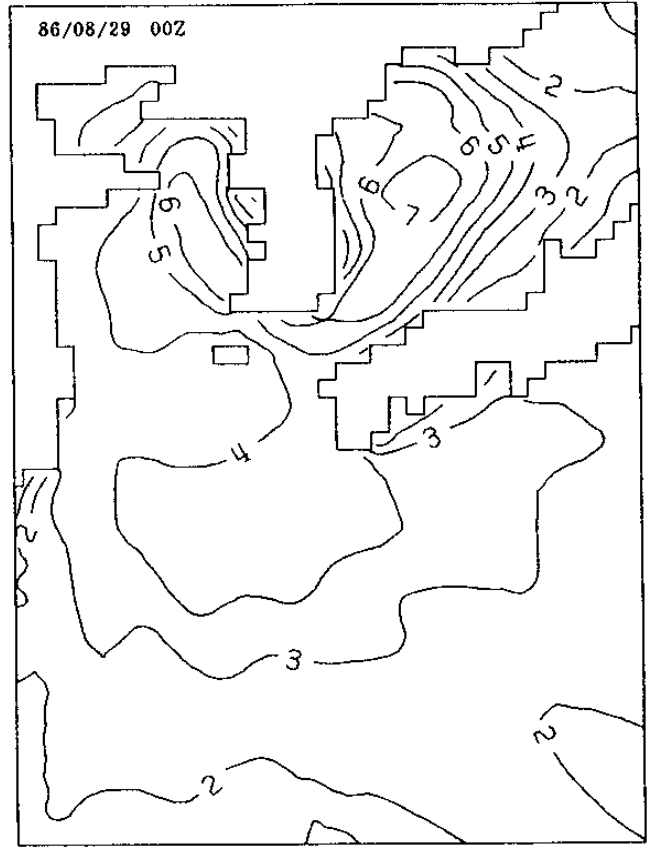
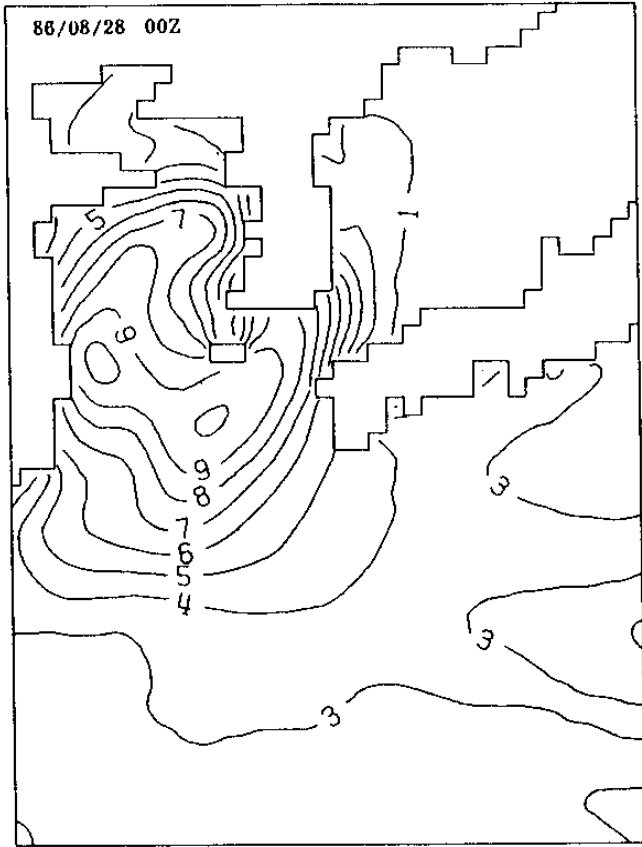


Fig. B.6. (continued)



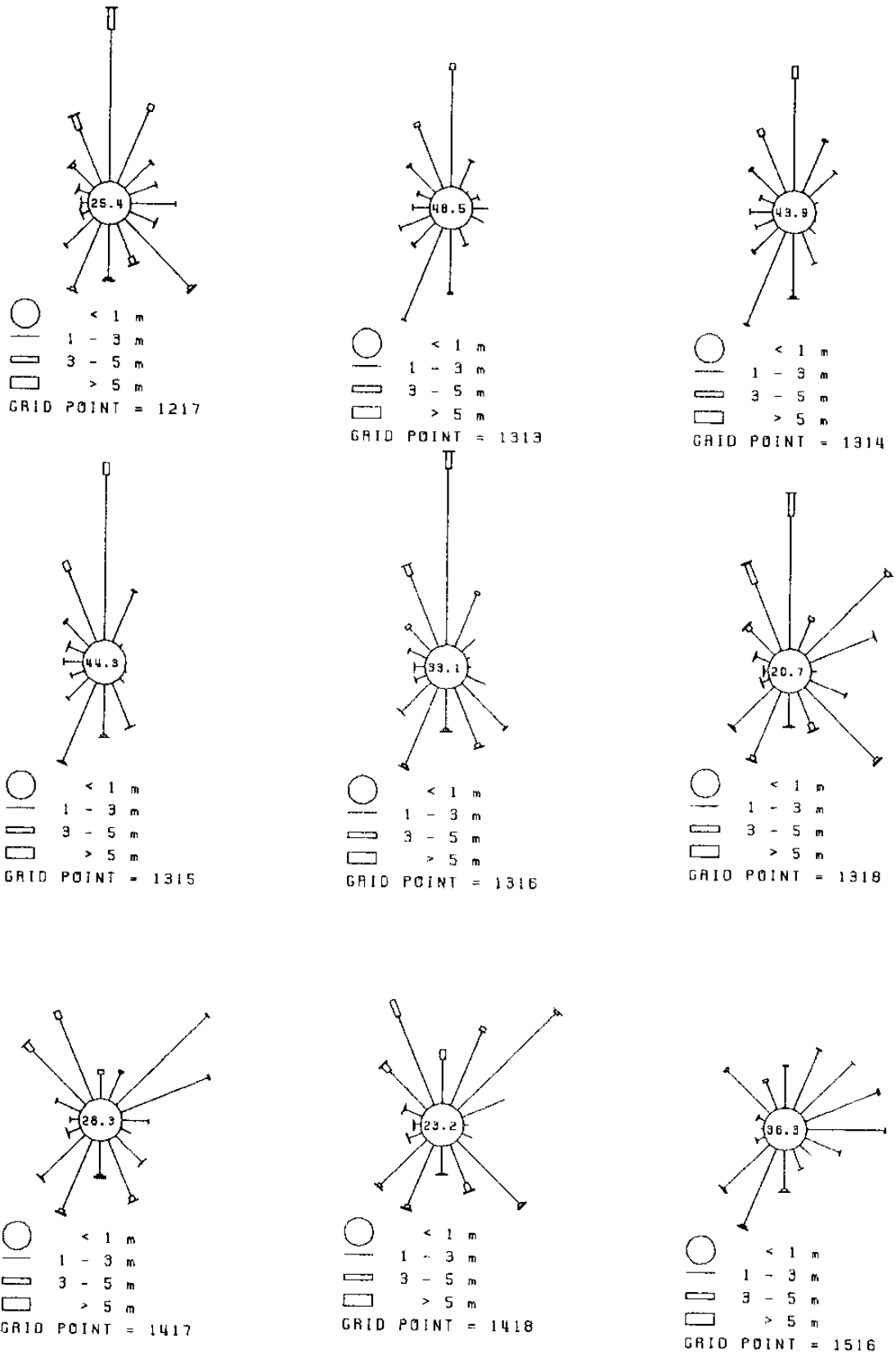


Fig. B.7 Wave roses of the MRI model results

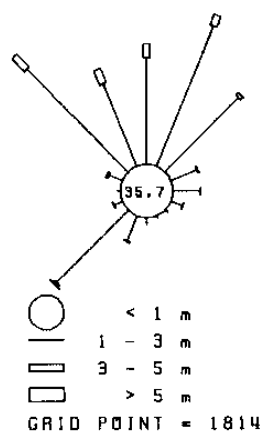
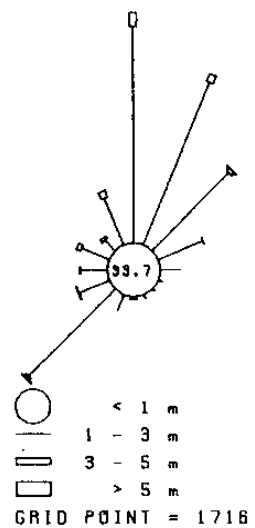
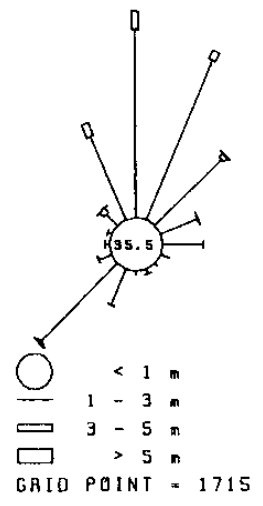
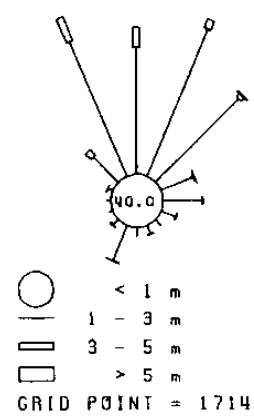
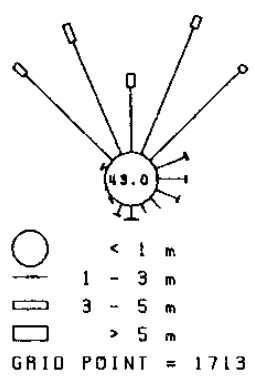
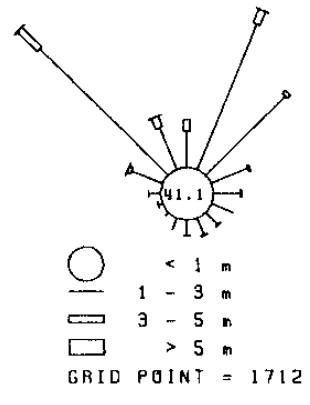
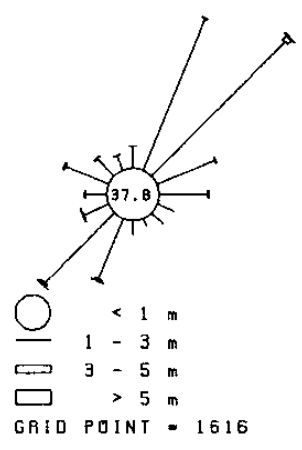
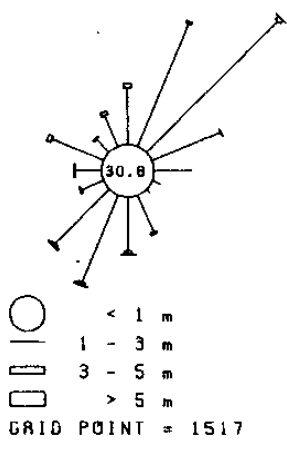


Fig. B.7. (continued)

## 주 의

1. 이 보고서는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 한다.