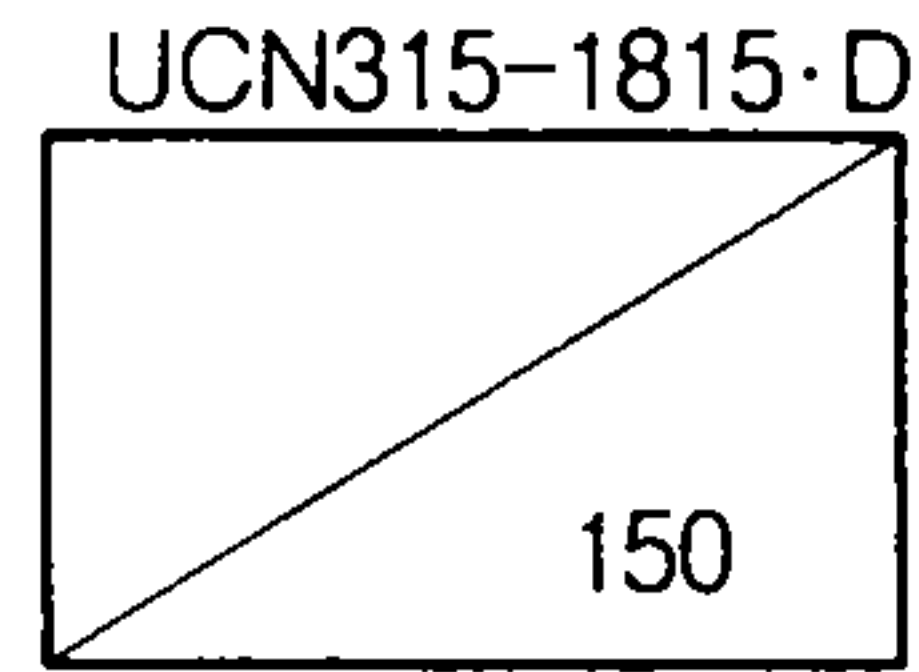


3 차 년 도
최종보고서



파도중 초고속 운항자세제어기술 개발(III)

Development of Attitude Control Technology
of a Super-High-Speed Ship in Waves(III)

1994. 9

研 究 機 關

韓 國 機 械 研 究 院

船 舶 · 海 洋 工 學 研 究 中 心

科 學 技 術 處

제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 “과도중 초고속 운항자세제어기술 개발(III)”의 3차년도 최종 보고서로 제출합니다.

1994년 9월

주관연구기관명 : 한국기계연구원

선박·해양공학연구센터

연구책임자 : 강 창 구
연구원 : 서 상 현
공 인 영
이 창 민
김 연 규
홍 석 원
홍 사 도
공 홍 영
홍 도 식
이 상 천
박 종 무
이 동 환
서 동 복
문 동 찬
엄 덕 용
주 영 열

참여연구기관명 : 삼성중공업

연구책임자 : 주 영 렬
연구원 : 하 문 근
이 태 영

포항공대

연구책임자 : 이 정 목
연구원 : 이 상 준
강 관 형

요 약 문

I. 제 목

과도중 초고속 운항자세제어 기술 개발(Ⅲ)

II. 연구개발의 목적 및 중요성

선진 각 국에서는 21세기의 해상교통수단으로서 복합지형 초고속선을 앞을 다투어 개발하고 있으며, 국내에서도 이의 개발 필요성이 급증하고 있다. 일반적으로 선박은 속도가 증가함에 따라 동요가 증가하기 때문에 운항자세제어 시스템이 없으면 고속운항시 승객의 승선감은 극히 불량해지며, 각종 기기들도 제대로 작동하지 않게 된다. 과도중 운항자세제어 기술은 초고속선 개발의 4대 핵심기술 중의 하나이며, 이는 초고속선 개발의 성패를 결정짓는 중요한 기술이다. 따라서 본 연구에서는 초고속선이 과도중에서 고속으로 운항할 때 심한 동요를 제어할 수 있는 운항 자세 제어 기술을 개발하는 것이 목적이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위 (3차년도)

- 운항 자세 제어 시스템 개념설계
 - ◇ 최적자세제어 시스템 설계 및 시험
 - ◇ 비선형운동 안정성 해석
 - ◇ 쌍동선의 파랑하중 계산

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

가) 연구결과

- ◇ 최적자세제어 시스템 설계
- ◇ 과도중 운항자세제어 시험 수행
- ◇ 과도중 비선형운동 시뮬레이션 결과 프로그램
- ◇ 쌍동선의 파랑하중 계산 프로그램
- ◇ 편에 대한 실험 결과

나) 활용방안

- ◇ 초고속선의 자세제어 시스템 설계에 활용
- ◇ 초고속선의 자세제어 시스템 개발에 활용

S U M M A R Y

I . Subject

Development of Attitude Control Technology of a Super-High-Speed Ship in Waves(III)

II. The object and importance of the project

In the advanced countries, super-high-speed ships with hybrid hull forms are developed and the necessity to develop those in our country is increasing rapidly.

In general, as the ship's speed increases the ship's motion in waves increases. Therefore, the passengers feel bad and the equipments are damaged in high speed operation without automatic attitude control system. The automatic attitude control technology is one of 4 key technologies for the development of super-high-speed ships. The purpose of this research is the development of the automatic attitude control technology to control the motion of a super-high-speed ship in waves.

III. Contents and extent of the project (3rd Year)

- Conceptual design of the attitude control system
 - ◇ Design and test of the attitude control system
 - ◇ Manufacture of the attitude control system for a super-high-speed ship
 - ◇ Test of the attitude control system for a super-high-speed ship
 - ◇ Development of the prediction method of the hydrodynamic forces using a 3-dimensional boundary element method
 - ◇ Stability analysis of nonlinear motion
 - ◇ Calculation of wave forces on a catamaran

IV. Results and Recommendation for Application

A) Results

- ◇ Design of optimal attitude control system
- ◇ Results of attitude control tests of the catamaran

- ◇ Program for nonlinear motion simulation of a catamaran in waves
- ◇ Program for the calculation of wave loads of a catamaran
- ◇ Experimental results for fins

B) Recommendation for Applications

- ◇ Design of the attitude control system of a super-high-speed ship
- ◇ Development of the attitude control system of a super-high-speed ship

목 차

요 약 문	i
SUMMARY (영문요약문)	iii
목 차	v
CONTENTS(영문목차)	vii
표 목 차 (List of Tables)	ix
그림목차 (List of Figures)	xi
제 1 장 서 언	1
제 2 장 최적 자세제어 시스템 설계	3
2.1 수학 모델	3
2.1.1 선체 운동 방정식	3
2.1.2 선형 운동 방정식	4
2.2 최적 제어 이론	6
2.2.1 Linear Regulator Problem	6
2.2.2 최적 제어 이득(Optimal Control Gain)	7
제 3 장 과도중 자세제어 시험	8
3.1 시험 장비 및 준비 과정	8
3.2 실험 결과	12
3.3 결 언	13
제 4 장 비선형 운동 해석	17
4.1 개 요	17
4.2 규칙과중에서의 운동방정식	17
4.3 규칙과중 수중익의 양력	19

4.4	비선형 선체운동 해석	22
4.5	자세제어 계산결과 및 검토	23
4.5.1	대상선박	23
4.5.2	최적제어	25
4.5.3	계산결과 및 검토	25
4.6	결 언	25
제 5 장	쌍동선의 파랑하중 계산	28
5.1	쌍동형 선체에 작용하는 파랑하중	28
5.2	연결갑판 파랑하중의 추정식	30
5.3	동유체력의 추정	34
5.4	계산결과 및 고찰	37
제 6 장	초고속선 Fin의 유입각각의 실험적 추정법	44
6.1	개 요	44
6.2	실험장치	45
6.3	시험방법	46
6.4	결과 및 검토	47
6.5	결 언	52
제 7 장	결 언	79
	참고문헌	81

CONTENTS

Summary(Korean)	i
Summary (English)	iii
Contents (Korean)	v
Contents (English)	vii
List of Tables	ix
List of Figures	xi
Chapter 1 Preface	1
Chapter 2 Design of Optimal Control System	3
2.1 Mathematical Model	3
2.1.1 Equations of Motion of a Ship	3
2.1.2 Linearized Equations of Motion	4
2.2 Optimal Control Theory	6
2.2.1 Linear Regulator Problem	6
2.2.2 Optimal Control Gain	7
Chapter 3 Attitude Control Tests of a Super-High-Speed Catamaran in Waves	8
3.1 Test Equipment and Procedure	8
3.2 Test Results	12

	3.3	Conclusions	13
Chapter 4	Analysis of Nonlinear Motion		17
	4.1	Introduction	17
	4.2	Equations of Motion in Regular Waves	17
	4.3	Lift Acting on a Hydrofoil in Regular Waves	19
	4.4	Analysis of Nonlinear Ship Motion	22
	4.5	Results and Discussions for Attitude Control	23
	4.5.1	Ship Model	23
	4.5.2	Optimal Control	25
	4.5.3	Results and Discussion	25
	4.6	Conclusions	25
Chapter 5	Calculation of Wave Loads for a Twin-Hull Ship ...		28
	5.1	Wave Loads Acting on a Twin-Hull	28
	5.2	Prediction Equation for Wave Loads Acting on the Connecting Deck	30
	5.3	Prediction of Hydrodynamic Loads	34
	5.4	Results and Discussion	37
Chapter 6	Prediction of Incident Angle of Flow onto Fins of High-Speed Vessels by Experimental Methods		44
	6.1	Introduction	44
	6.2	Experimental Equipments	45
	6.3	Experimental Methods	46
	6.4	Results and Discussions	47
	6.5	Conclusions	52
Chapter 7	Concluding Remarks		79
References			81

표 목 차

(List of Tables)

Table 3-1	Principal Dimensions of the Catamaran(KS406)	8
Table 3-2	Characteristics of Control Fins, Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System 1	9
Table 3-3	Characteristics of Control Fins, Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System 2	9
Table 3-4	Test Condition	12
Table 4-1	Principal Dimensions of the Catamaran(KS406)	24
Table 4-2	Characteristics of Control Fins, Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System	24
Table 4-3	Nondimensionalized Control Gains	25
Table 5-1	Main Particulars of the Model Ship	38
Table 6-1	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=0^\circ$	55
Table 6-2	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=5^\circ$	55

Table 6-3	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=10^\circ$	56
Table 6-4	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=15^\circ$	56
Table 6-5	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=20^\circ$	57
Table 6-6	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=-5^\circ$	57
Table 6-7	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=-10^\circ$	58
Table 6-8	Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=-15^\circ$	58
Table 6-9	Lift-Curve Slope ($C_{L\alpha}$) for Various Depth of Submergence (d/c) and Speeds (V)	59

그림 목차

(List of Figures)

Fig. 2-1	Coordinate System	3
Fig. 3-1	Test Arrangement for the Attitude Control System of the Catamaran	10
Fig. 3-2	Block Diagram of Attitude Control System	11
Fig. 3-3	Effect of the Control on the Heave and Pitch Motion of the Catamaran in Regular Waves	14
Fig. 3-4	Experimental Results in Regular Waves($\lambda/L = 2.5$, $F_n = 0.786$)	15
Fig. 3-5	Experimental Results in Regular Waves($\lambda/L = 3.0$, $F_n = 1.014$)	15
Fig. 3-6	Experimental Results in Regular Waves($\lambda/L = 2.0$, $F_n = 0.548$)	16
Fig. 3-7	Experimental Results in Regular Waves($\lambda/L = 3.0$, $F_n = 0.786$)	16
Fig. 4-1	Coordinate Systems	18

Fig. 4-2	Time Histories of Vertical Motions ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)	26
Fig. 4-3	Time Histories of Vertical Velocities ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)	26
Fig. 4-4	Time Histories of Bow Plane and Stern Plane Angle ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)	27
Fig. 4-5	Time Histories of Foil Load ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)	26
Fig. 5-1	Coordinate System and Sign Conversions of the Wave Loads at the Deck	31
Fig. 5-2	Nondimensionalized Vertical Shear at DK for $F_n=0.4$	39
Fig. 5-3	Nondimensionalized Vertical Bending Moment at DK for $F_n=0.4$	40
Fig. 5-4	Nondimensionalized Vertical Bending Moment at DK for $F_n=0.4$	40
Fig. 5-5	Speed Effect on Vertical Shear at DK for $\beta=90$	42
Fig. 5-6	Speed Effect on Vertical Bending Moment at DK for $\beta=90$	42
Fig. 5-7	Speed Effect on Pitch Connecting Moment at DK for $\beta=135$	43

Fig. 6-1 Skech of Strut Configuration	60
Fig. 6-2 Thickness Distribution along The Chord of NACA 0015 Foil	60
Fig. 6-3 Fin, Rods and Loadcell attachment	61
Fig. 6-4 Strut and Fin installed in Circulating Water Channel(CWC)	61
Fig. 6-5 Data Processing Scheme	62
Fig. 6-6 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 0^\circ$	63
Fig. 6-7 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 5^\circ$	63
Fig. 6-8 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 10^\circ$	64
Fig. 6-9 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 15^\circ$	64
Fig.6-10 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 20^\circ$	65
Fig.6-11 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = -5^\circ$	65

Fig.6-12 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = -10^\circ$	66
Fig.6-13 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = -15^\circ$	66
Fig.6-14 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=0.4\text{m/s}$	67
Fig.6-15 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=0.6\text{m/s}$	67
Fig.6-16 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=0.8\text{m/s}$	68
Fig.6-17 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=1.0\text{m/s}$	68
Fig.6-18 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=1.2\text{m/s}$	69
Fig.6-19 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=1.5\text{m/s}$	69
Fig.6-20 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 0.5$	70

Fig.6-21 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 0.8$	70
Fig.6-22 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 1.0$	71
Fig.6-23 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 1.3$	71
Fig.6-24 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 1.6$	72
Fig.6-25 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 2.0$	72
Fig.6-26 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 2.5$	73
Fig.6-27 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 3.0$	73
Fig.6-28 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 4.0$	74
Fig.6-29 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α) for Various Speeds at $d/c = 5.0$	74
Fig.6-30 Lift-Curve Slope versus d/c for Various Speeds	75

Fig.6-31 Free-Surface Configuration for $\alpha=0^\circ$ and $Fr=1.5$ 76

Fig.6-32 Free-Surface Configuration77

Fig.6-33 Free-Surface Configuration for $\alpha=0^\circ$ and $d/c=0.5$ 78

제 1 장 서 언

21세기의 해상교통수단으로 일본을 비롯한 선진각국이 고속선의 개발에 박차를 가하고 있다. 일본은 대량의 화물을 신속하게 운송할 수 있는 시속 50노트급의 고속 화물선(Techno Super Liner, TSL)을 개발하고 있으며, 노르웨이, 미국 등에서도 지금까지 개발된 기술을 바탕으로 고속선 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 국내에서도 최근에 고속선에 대한 관심이 고조되고 있으며 이미 40노트급 고속선을 설계, 건조하고 있다.

고속선은 재래선형과 달리 부력, 공기부양력, 양력 등 각종 지지방법을 적절히 조합한 복합지지형을 택하고 있다. 거친 해상에서 여러가지 교란이 있을 때 종동요, 횡동요와 진동을 일정 수준 이하로 감소시키는 것이 승객과 화물에 필수적이다. 또한 안전한 항해를 위하여 좋은 조종성을 확보할 필요가 있다. 이와 관련하여 전몰 수중익선에 대한 자세제어 기법이 Weist & Michell[1-1]등에 의하여 개발되어 왔으며, 또한 노르웨이에서 개최된 FAST '91에서는 Itoko, et al.[1-2], Saito, et al.[1-3] 등이 TSL 및 제트포일의 자세제어 시스템에 관한 연구를 발표하였다.

본 연구에서는 고속선의 운항자세를 제어하기 위하여 최적제어 이론(Optimal Control Theory)을 이용하여 자동 자세제어 시스템을 구축하였고, 선형은 카타마란 선형을 택한 후, 운항자세를 제어하기 위하여 카타마란선의 선수와 선미부분에 제어판을 장치하였다. 자세제어 시스템으로는 제어판과 제어판 구동장치, 운동 계측장비로 되어있으며, 모형선의 운동을 계측하여 이 계측값으로부터 제어판의 명령 각도를 계산한 후 제어판 구동장치로 구동신호를 보내기 위하여 A/D, D/A 보드를 각각 1장씩 사용하였다. 이 장비를 이용하여 규칙파중의 고속선의 운항자세를 제어하는 시험을 수행하였으며, 실험결과로부터 자세제어 시스템이 작동하지 않을 때와 작동할 때의 차이를 비교하였다. 또한 2종류의 제어판에 대하여 실험을 수행한 후 각 제어판 시스템에 대한 비교를 하였다.

또한, 제4장에서는 STF 스트립 방법을 사용하여 종규칙과중 부가질량, 감쇠 계수, 파괴진력 등을 계산하고, 수중익에 작용하는 힘을 이용하여 비선형 선체 운동을 해석하고 자세제어 시뮬레이션을 수행하였다. 제5장에서는 쌍동선의 연결갑판에 작용하는 파랑하중을 계산하고, 제6장에서는 초고속선 Fin의 유입 양각을 실험에 의해서 추정하였다.

제 2 장 최적자세제어 시스템 설계

2.1 수학 모델

선체는 6 자유도 강체 운동으로 간주하고, 선체는 선수와 선미부에 설치된 제어판에 의하여 제어된다. 제어 시스템은 종동요(Pitch Motion)와 상하동요(Heave Motion)을 제어하도록 설계되어 있으며, 원하는 종동요와 상하동요를 갖도록 외력으로 선수, 선미부에 설치된 제어판을 움직여서 양력(Lift Force)을 가하도록 되어있다.

2.1.1 선체 운동 방정식

운동 방정식은 여러 문헌에 나와 있으며, 선체의 관성축들의 원점은 선체의 무게중심과 일치한다는 가정아래 수정된 형태의 운동 방정식이 얻어진다. Fig.2-1 에 선체에 대한 좌표계가 나타나 있다.

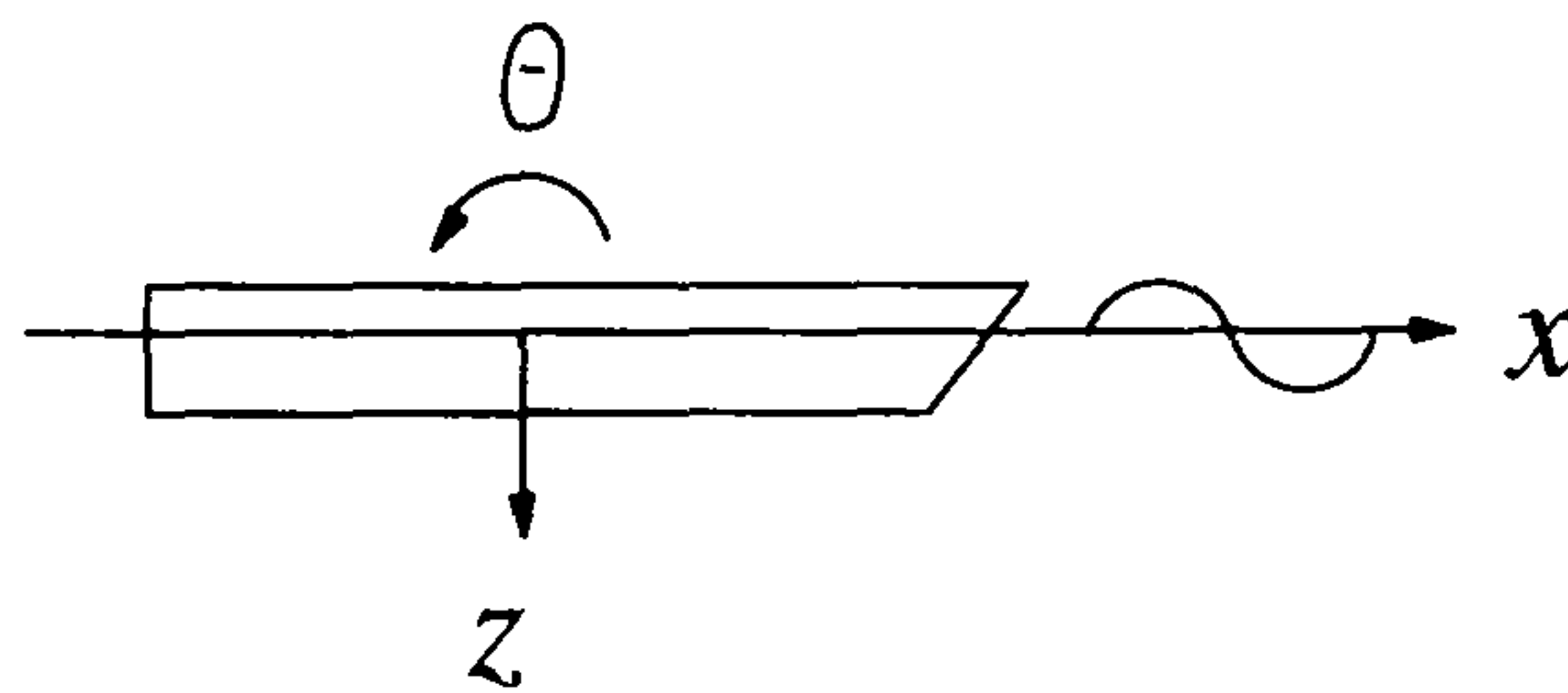


Fig. 2-1 Coordinate System

운동 방정식은 보통 다음과 같이 2가지 형태를 가지며, 각 방정식은 외력항을 포함하고 있으며, 계수들은 일정한 속도로 전진할 경우의 값을 사용하였다.

$$\text{선형 운동 : } \vec{F} = m \vec{z}$$

$$\text{회전 운동 : } \vec{M} = I \vec{\theta}$$

2.1.2 선형 운동 방정식

제어 시스템에 사용되는 운동 방정식은 선형화된 형태이며, 실제로 사용한 운동 방정식은 다음과 같이 w (상하 속도 성분), q (y 축에 대한 각속도 성분)를 포함한 2자유도를 갖는 형태가 된다. δ_b 와 δ_s 는 각각 선수 제어판과 선미 제어판의 각도 변화를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} m - Z_w & 0 & -Z_q & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -M_w & 0 & I_y - M_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ w \\ \dot{q} \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & Z_z & Z_q & Z_\theta \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ M_w & M_z & M_q & M_\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ z \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{\delta_b} & Z_{\delta_s} \\ 0 & 0 \\ M_{\delta_b} & M_{\delta_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_b \\ \delta_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_0 \\ 0 \\ M_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

where

m : mass of ship I_y : inertia about y -axis

z : heave w : heave velocity

θ : pitch q : pitch velocity

Z : vertical force M : moment about y -axis

Z_0 와 M_0 는 각각 속도에 따라 변하는 정상 힘과 모멘트이다.

일반적으로 앞의 선형 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad (2-2)$$

where

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad x = \begin{bmatrix} w \\ z \\ q \\ \theta \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_b \end{bmatrix}$$

실제로 목적하는 값이 0 이 아니기 때문에 Linear Tracking Model(Dockhorn[2-1])을 사용하였으며, 여기에 사용된 reference vector 는 다음과 같다.

$$r = \begin{bmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \\ r_4 \end{bmatrix}$$

$r_2 = \text{ordered heave}$, $r_4 = \text{ordered pitch}$,

$r_2 = \text{const}$, $r_4 = \text{const}$.

다음과 같이 y 와 \dot{y} 을 정의한 후,

$$y = x - r$$

$$\dot{y} = \dot{x} - \dot{r} \tag{2-3}$$

(2-1) 식을 (2-3) 식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{y} = A x + B u - \dot{r} \tag{2-4}$$

$\dot{r} = 0$ 과 $A r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 을 이용하면 (2-4)식은

$$\dot{y} = A [x - r] + B u$$

$$\dot{y} = A y + B u \tag{2-5}$$

으로 쓸 수 있다.

2.2. 최적 제어 이론 (Optimal Control Theory)

2.2.1 Linear Regulator Problem

최소화해야 할 성능평가 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [y^T(t) Q y(t) + u^T(t) S u(t)] dt \quad (2-6)$$

(2-6) 식에서 최종시간 t_f 는 정해져있고 $y(t_f)$ 는 임의이다. Q 는 실 대칭(real symmetric) Positive Semi-definite 가중 행렬이고, S 는 실 대칭 Positive Definite 가중 행렬이다. 이렇게 식 (2-5), (2-6) 으로부터 선형 Regulator Problem 이 도출되었다.

매개변수 최적화의 해법을 따라 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{K}(t) = & -K(t)A + K(t)BS^{-1}B^T(t)K(t) \\ & -Q - A^TK(t). \end{aligned} \quad (2-7)$$

(2-7) 식, 즉 Riccati Equation, 에 대한 해는 2차 성능평가 함수를 근거로 정의된 수학 모형에 대한 최적 매개변수 행렬이 된다. 즉 Riccati Equation 에 의해 K 로 표현되는 제어 벡터 식은 다음과 같다.

$$u^*(t) = -S^{-1} B^T K(t) y^*(t)$$

or

$$u^*(t) = S^{-1} F^T y^*(t) \quad (2-8)$$

여기에서 $F(t) = -K(t)B$ 이고 *는 최적값을 나타내고, $u^*(t)$ 에 대한 최적 이득을 구하는 방법은 다음절에 나타나 있다.

Dockhorn[2-1]으로부터 $K(t_f) = 0.0$ 이고, 행렬 Q 와 S 는 다음의 형태를

갖는다.

$$Q = \begin{bmatrix} qx_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & qx_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & qx_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & qx_4 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

여기에서 qx_i 는 상하동요 속도, 상하동요, 종동요 속도, 종동요의 오차에 대한 가중치이며, s_1 과 s_2 는 제어 입력에 대한 가중치이다. 이 가중치는 실험자가 제어하고자하는 성분에 따라 그 크기를 결정하게 된다.

2.2.2 최적 제어 이득 (Optimal Control Gain)

(2-7) 식에서 행렬 A, B, S, Q 는 상수 행렬이고, 시스템이 제어 가능하다는 가정아래 다음과 같이 놓는다.

$$K(t) \rightarrow K \quad \text{as } t_f \rightarrow \infty.$$

제어간격이 유한하고, 제어간격이 최적 이득의 응답 감소시간에 비해 충분히 길 때는 상수 제어 이득을 사용할 수 있다. (Dockhorn [2-1]).

정상 상태 이득 K 를 얻기위해서는 Riccati Equation (2-7) 을 적분할 수도 있고, 혹은 $\dot{K}(t)$ 을 0 으로 놓고, 대수 Riccati equation

$$0 = -KA - A^T K - Q + KBS^{-1}B^T K \quad (2-10)$$

을 풀어도 된다. 물론 이 제어 이득은 카타마란선의 전진 속도 U 의 함수로 나타날 것이므로, 여러가지 전진속도에 대하여 각각의 제어 이득들이 얻어질 것이다.

제 3 장 파도중 자세제어 시험

3.1 시험 장비 및 준비 과정

파도중의 운항 자세를 제어하기 위한 모형 시험이 KRISO 선형 수조에서 수행되었다. 모형선은 1.8 m 카타마란 선형(Catamaran, KS406)으로 선정하였으며, Table 3-1에 모형선의 주요제원이 나와 있으며, Table 3-2과 3-3에 각각의 자세제어를 위한 제어판, 운동전달 봉, 지지 스트럿 등에 대한 자세한 사항이 실려있다. Table 3-3의 제어판 시스템은 상하동요를 제어하기가 용이하도록 제어판의 Chord를 2배로 키웠고, 종동요시에 제어판이 수면밖으로 노출되지 않도록 위치를 Base Line 아래로 하였다.

Table 3-1. Principal Dimensions of the Catamaran (KS406)

	Full Load
Lpp (m)	1.8
B (m)	0.472
TF (m)	0.1295
TA (m)	0.0570
Δ (ton)	0.01929
LCB (m)	-0.1109

예인 봉(Towing Rod)과 상하지지 봉(Heaving Rod), 운동계측 봉(Motion Guage Rod) 및 가속도계 등으로 이루어져 있는 운동계측 장비들은 Fig.3-1에 자세히 나와있다.

Table 3-2 Characteristics of Control Fins, Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System 1

(Model Scale)

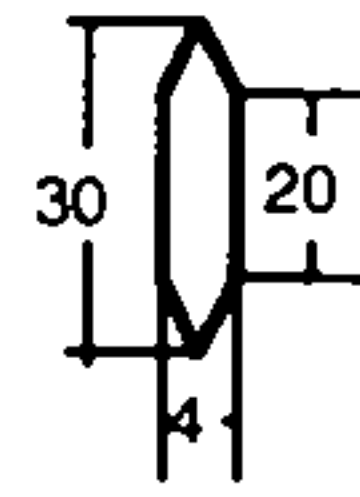

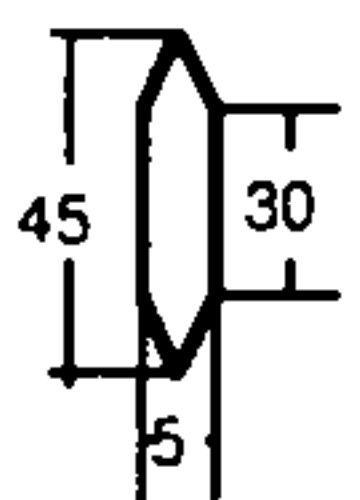

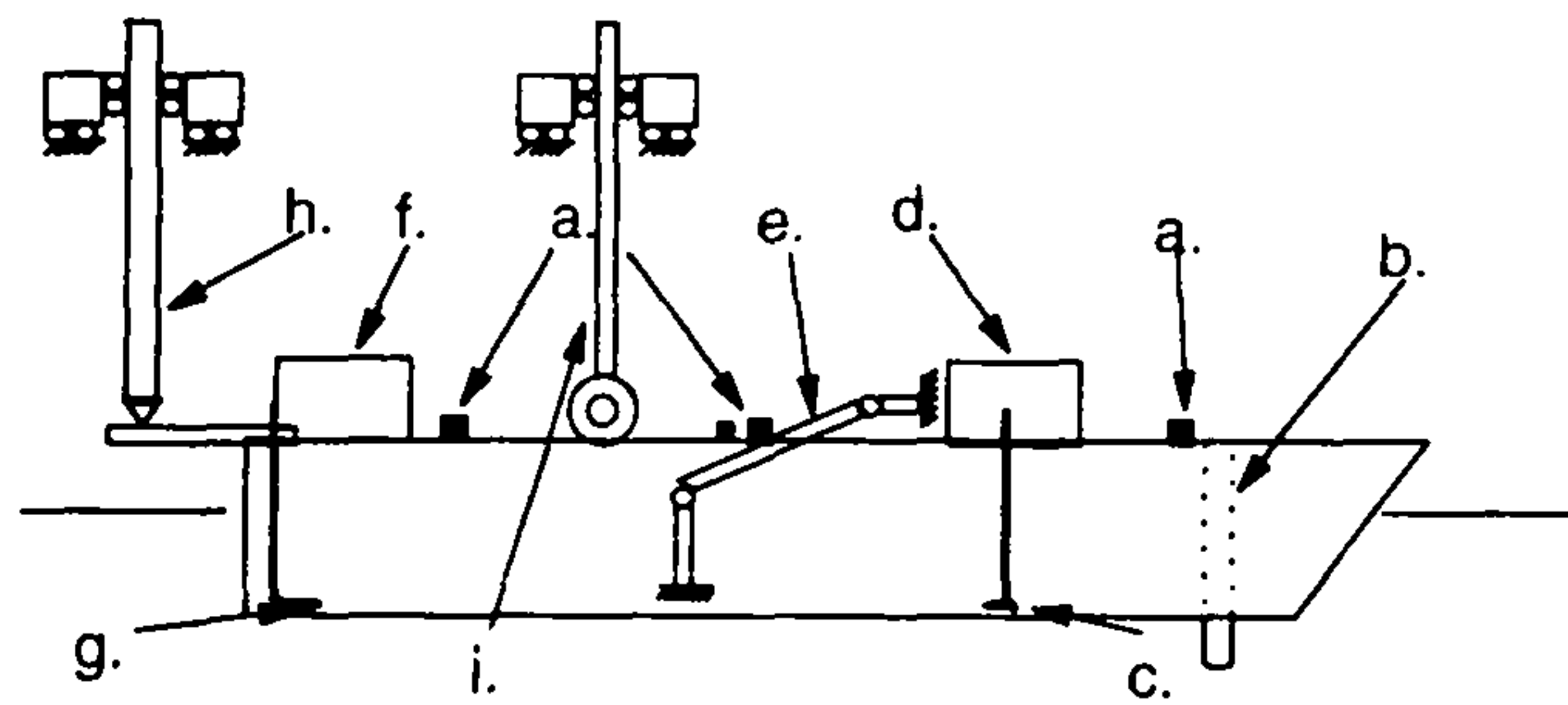
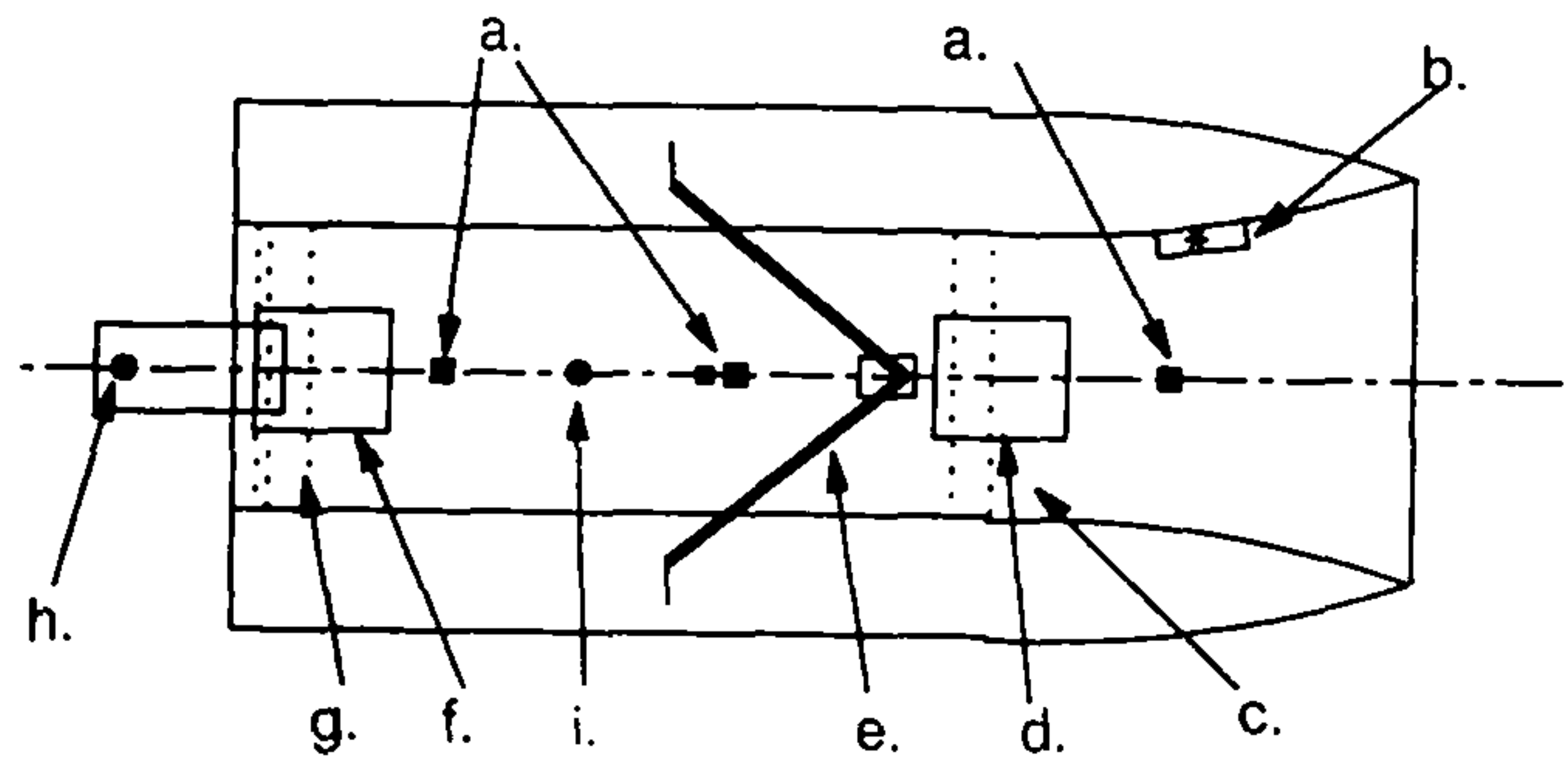
	Section	Fore	Aft
Strut		Height (mm)	
		159.4	112.5
Moving Rod	 D = 4 mm	Height (mm)	
		190.0	143.0
Control Fin	Fore Fin : NACA0020 Chord = 40 mm Aft Fin : NACA0015 Chord = 60 mm Flap Chord = 15 mm	Span (mm)	
		135 X 2	100 X 2
		Station No.	
		7	0.5
		Height from Base Line (mm)	
8	35		

Table 3-3 Characteristics of Control Fins, Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System 2

(Model Scale)

	Section	Fore	Aft
Strut		Height (mm)	
		239.4	192.5
Moving Rod	 D = 5 mm	Height (mm)	
		270.0	223.0
Control Fin	Fore Fin : NACA0015 Chord = 80 mm Aft Fin : NACA0015 Chord = 120 mm Flap Chord = 30 mm	Span (mm)	
		135 X 2	100 X 2
		Station No.	
		7	0.5
		Height from Base Line (mm)	
-80	-80		



- | | |
|-------------------------------|----------------------|
| a. Accelerometer | f. Fin Driving Motor |
| b. Resistance type Wave Probe | |
| c. All Movable Fin | g. Flap type Fin |
| d. Fin Driving Motor | h. Heaving Rod |
| e. Towing Rod | i. Motion Guage Rod |

Fig. 3-1 Test Arrangement for the Attitude Control System of the Catamaran

모형선의 운동계측과 제어판의 구동은 0.055 sec마다 수행되었으며, 시간 간격에 의한 영향은 고려하지 않았다. Fig.3-2에 자세제어 시스템에 대한 구조도가 나타나 있다. 운동계측은 A/D 보드를 사용하여 각 계측장비로부터 계측하고, 제어판의 구동은 서보 모터 시스템(Servo Motor System)에 D/A 보드를

통하여 신호를 보내서 원하는 각도만큼 하였다.

제어판은 모형선의 쌍동선체 사이에 2조가 설치되어 있으며, 선수 제어판은 왼쪽과 오른쪽에 같은 크기의 전가동 핀으로 구성되어있다. 선미 제어판은 왼쪽과 오른쪽에 같은 크기의 플랩(Flap)이 있는 제어판으로 구성되어있고, 플랩의 길이는 전체 길이의 0.25에 해당한다. 선미 제어판의 경우 플랩부분만 움직이며, 선미 제어판의 플랩 및 선수 제어판은 모형선의 운동을 제어하기 위하여 $\pm 15^\circ$ 이내에서 움직이도록 되어있고, 구동장치로는 선체 갑판부에 4개의 DC 모터가 설치되어있으며, 제어판과 운동전달 봉으로 연결되어있다.

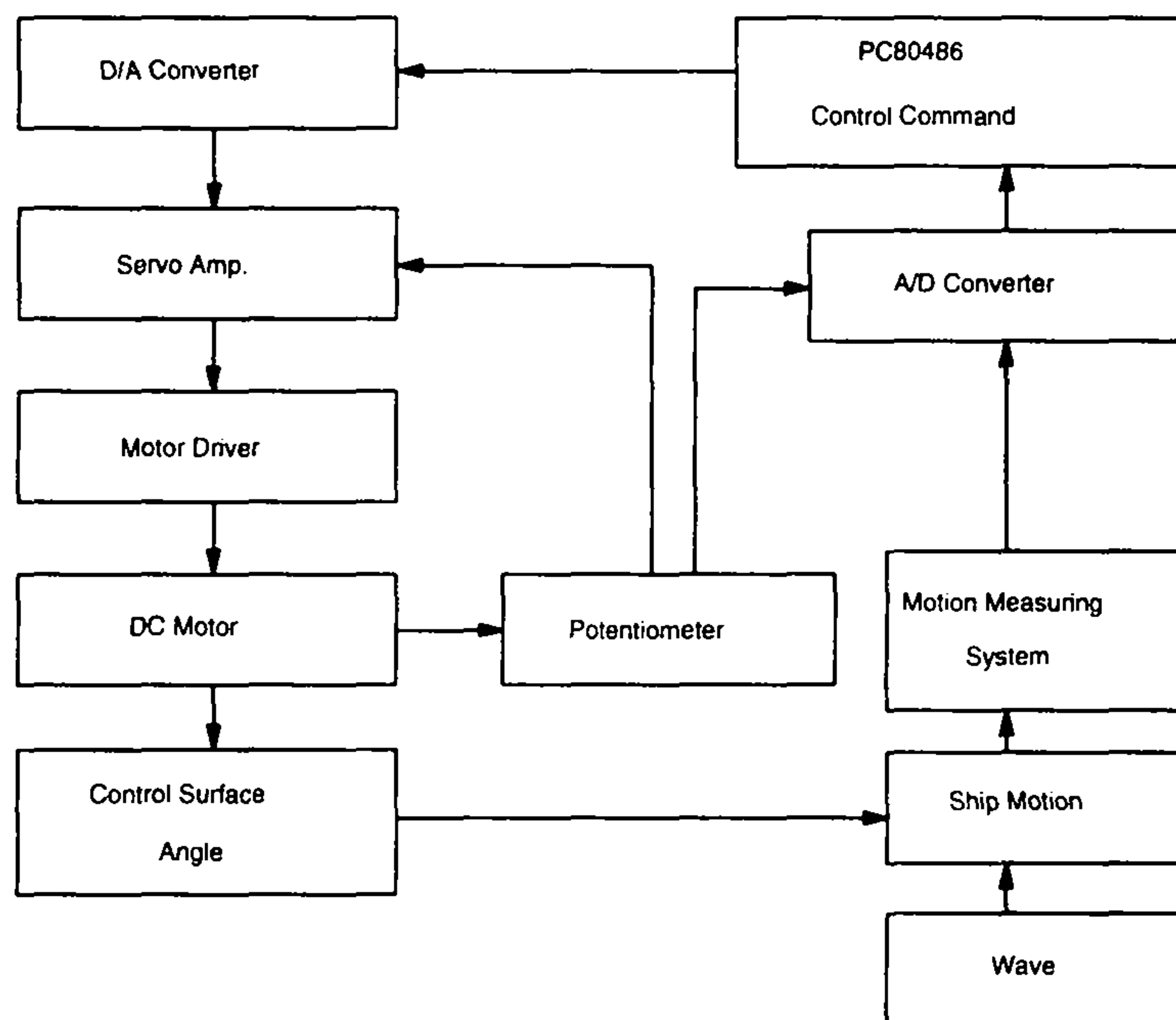


Fig. 3-2 Block Diagram of Attitude Control System

고속선의 운항자세를 제어하기 위하여 사용된 제어판에 의하여 생기는 양력(Lift Force)과 힌지 모멘트(Hinge Moment)는 제어 시스템의 외력항에 해당하는 값이고, 또한 힌지 모멘트의 경우 모터 용량을 결정하는데 사용된다. 그래서 2차원 수중익 이론(2-Dimensional Hydrofoil Theory)을 이용하여 제어판

의 양력과 힌지 모멘트를 계산하였다.(강창구[2-2])

또한 홍도천 등[2-3]에 의하여 개발된 카타마란 선형의 운동해석 프로그램인 SWAMO 를 이용하여 부가질량 계수, 감쇠 계수, 복원력을 계산하였다. 제어이득(Control Gain)을 구하는데 사용된 부가질량 계수와 감쇠 계수는 $\lambda/L = 2.0$, $F_n = 1.014$ 에 대한 것이다.

3.2 실험 결과

실험 조건은 다음과 같다.

Table 3-4 Test Condition

Speed (F_n)	0.548, 0.786, 1.014
Wave Length (λ/L)	1.5, 2.0, 2.5, 3.0

Fig.3-3에는 제어판 시스템 (1)을 사용하여 실험한 것에 대한 종동요와 상하동요에 대한 제어효과가 나타나 있다. 자세제어의 경우 종동요에는 매우 효과적이거나 이 시스템의 경우 상하동요에는 그렇게 효과적이지 못하다. 실험결과를 보면 제어판의 효과는 시험 속도가 커짐에 따라 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 제어판의 양력이 U^2 에 비례하기 때문이다. 그러나 부가질량, 감쇠력, 파랑 강제력은 스트립 이론(Strip Theory)에 의하면 주로 주파수에 대한 함수라고 할 수 있다.(Beck 등[2-4])

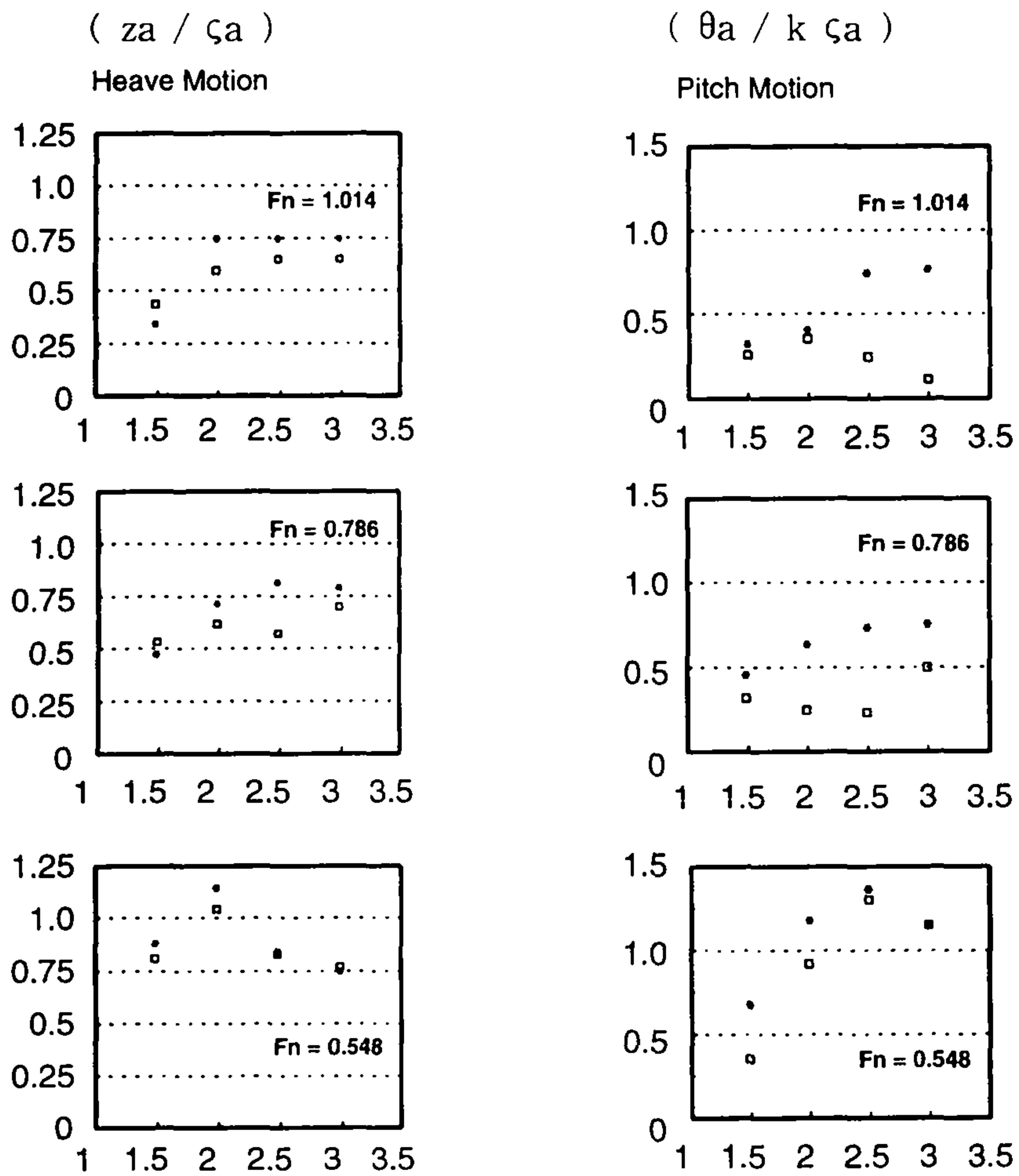
Fig.3-4와 Fig.3-5에 Table 3-2에 있는 제어판 시스템을 사용하여 수행한 규칙파중의 운항자세 실험 결과가 보여져 있으며, 각 그림의 처음 부분은 자세제어를 하지 않은 상태이고, 중간 부분부터 자세제어를 시작하여 그 결과를 비교하였다. 비교 결과 Fig.3-4의 경우 종동요는 약 85% 까지 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Fig.3-6과 Fig.3-7에는 Table 3-2에 있는 제어판 시스템을 사용하여 수행한

규칙과중의 실험결과가 나타나 있는데, Fig.3-6, Fig.3-7을 보면 앞의 Fig.3-4, Fig.3-5의 실험결과와 비교할 때 상하동요가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 제어판이 커지면서 이에 의해 상하동요가 감소한 것으로 판단된다. 종동요를 비교할 경우 감소량이 줄어든 것을 볼 수 있는데 이것은 제어판 시스템이 바뀌면서 종동요에 미치는 불안정 요소들이 커진 것으로 판단된다.

3.3 결 언

본 연구에 의하여 수중익을 갖는 고속 카타마란 선의 파도중의 운항 자세 제어 시스템이 종동요, 상하동요에 대한 선형 방정식을 이용한 최적 제어 이론에 의하여 설계되었다. 이 시스템을 검증하기 위하여 선형 수조에서 모형 시험이 수행되었고, 2종류의 제어판에 대하여 파도중에 실험을 수행한 결과 종동요와 상하동요에 있어서 효과적으로 운동이 줄어드는 현상을 볼 수 있었다. 첫번째 제어판의 경우 종동요는 많이 감소하였으나 상하동요는 그렇지 못하다는 것을 알 수 있었다. 두번째 제어판의 경우 상하동요를 줄이기 위해서 제어판의 Chord를 2배 크게하여 실험을 수행하였다. 그 결과 상하동요는 많이 감소하였으나, 종동요는 그다지 많이 감소하지 않은 것을 볼 수 있었다. 또한 전체 실험 결과를 보면 제어판의 효과는 실험 속도가 증가함에 따라 커지는 것을 알 수 있었는데, 이것은 제어판의 양력이 속도의 제곱에 비례하기 때문이다.



z_a : Heave Amplitude ζ_a : Wave Amplitude

θ_a : Pitch Amplitude k : Wave No.

(* : without control, □ : with control)

Fig. 3-3 Effect of the Control on the Heave and Pitch Motion of the Catamaran in Regular Waves

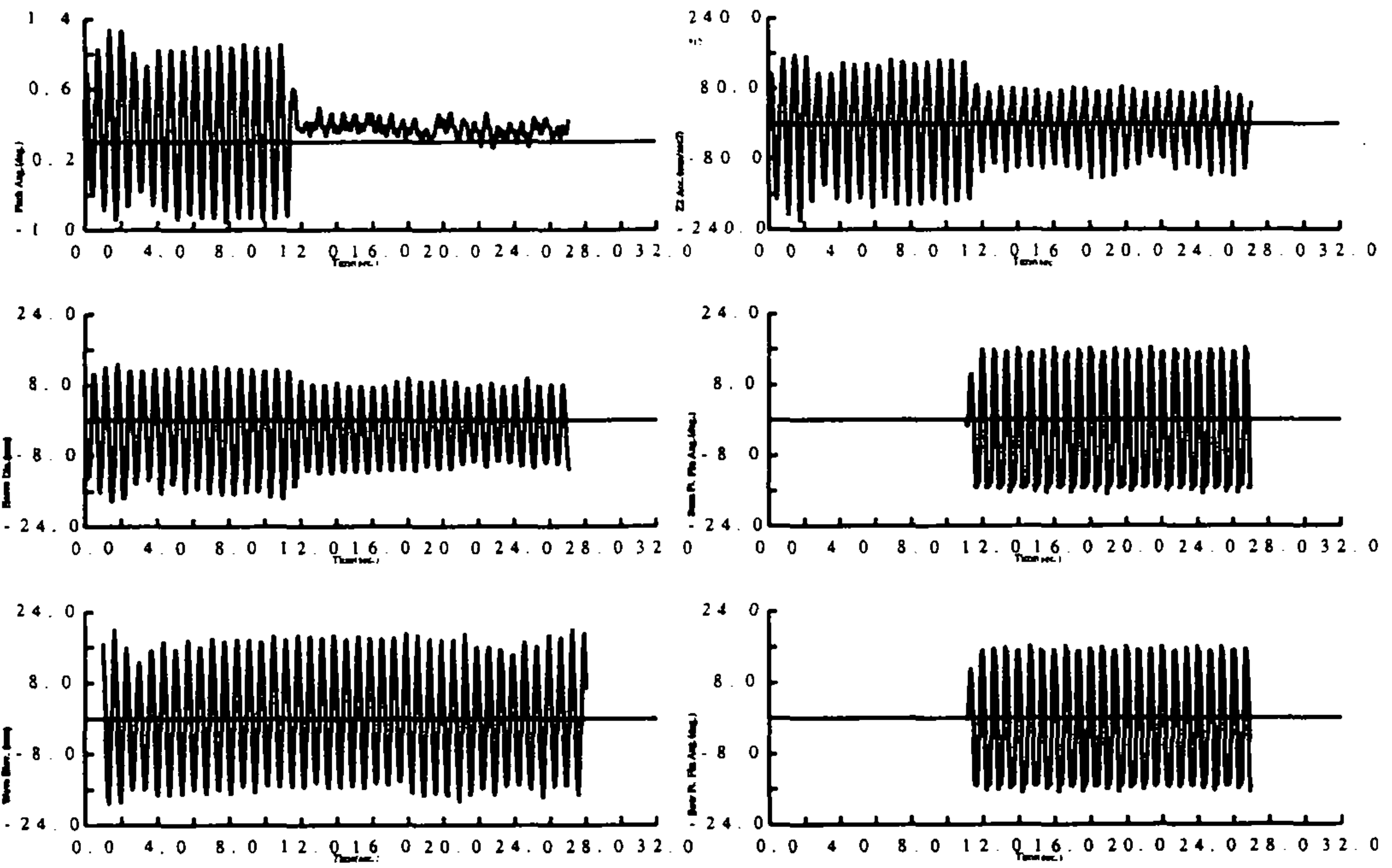


Fig. 3-4 Experimental Results in Regular Waves($\lambda/L = 2.5$, $Fn = 0.786$)

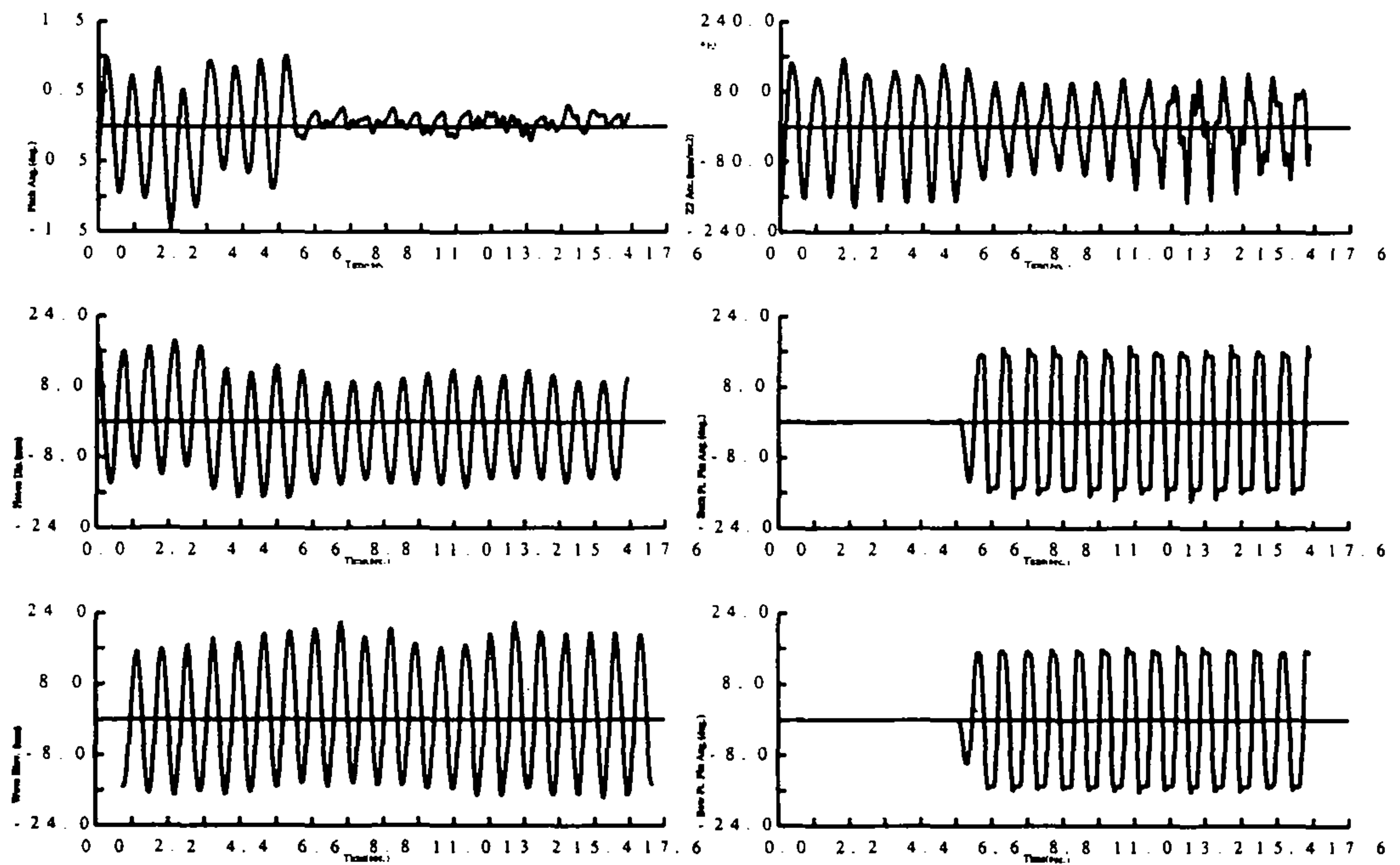


Fig. 3-5 Experimental Results in Regular Waves($\lambda/L = 3.0$, $Fn = 1.014$)

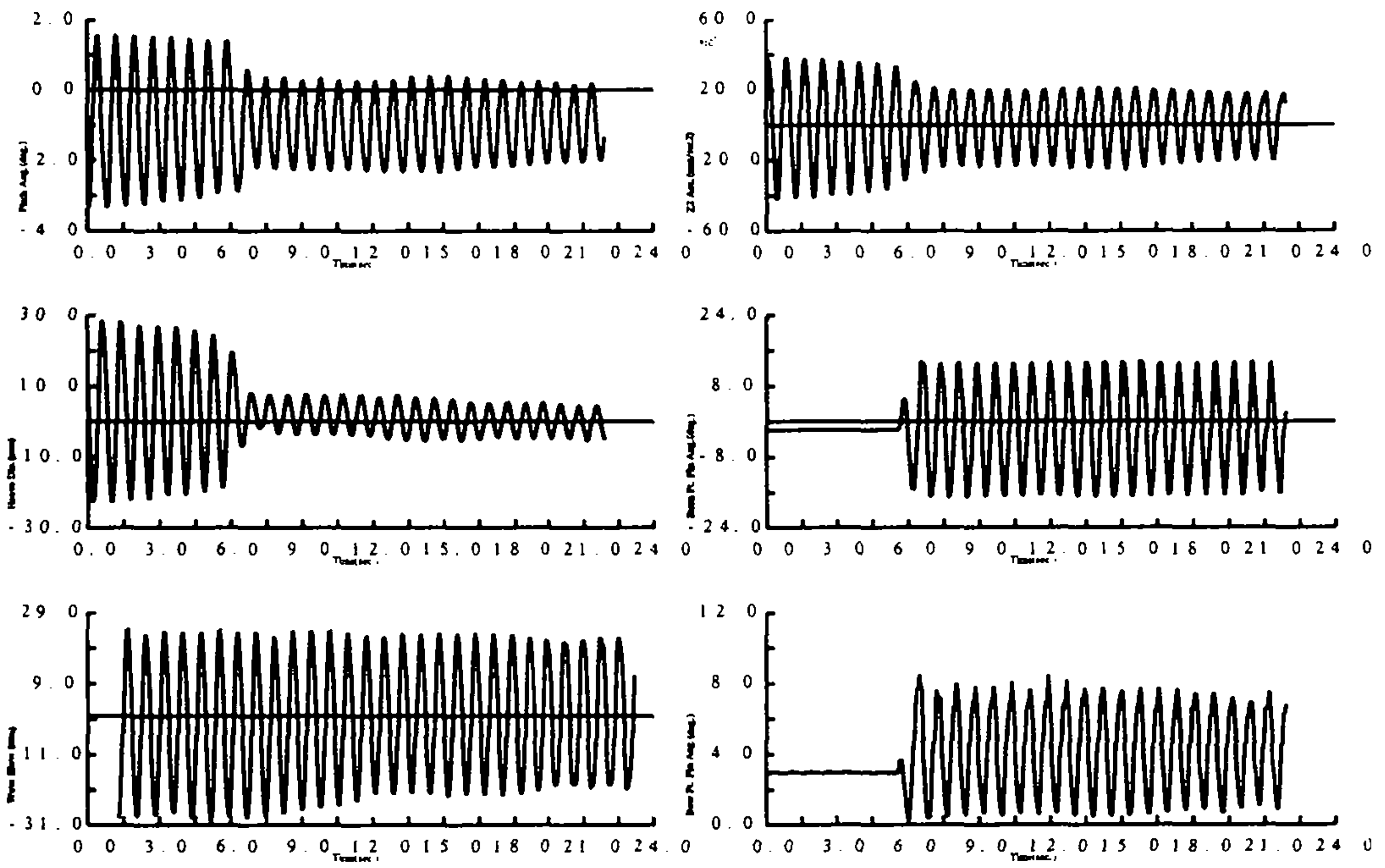


Fig. 3-6 Experimental Results in Regular Waves ($\lambda/L = 2.0$, $Fn = 0.548$)

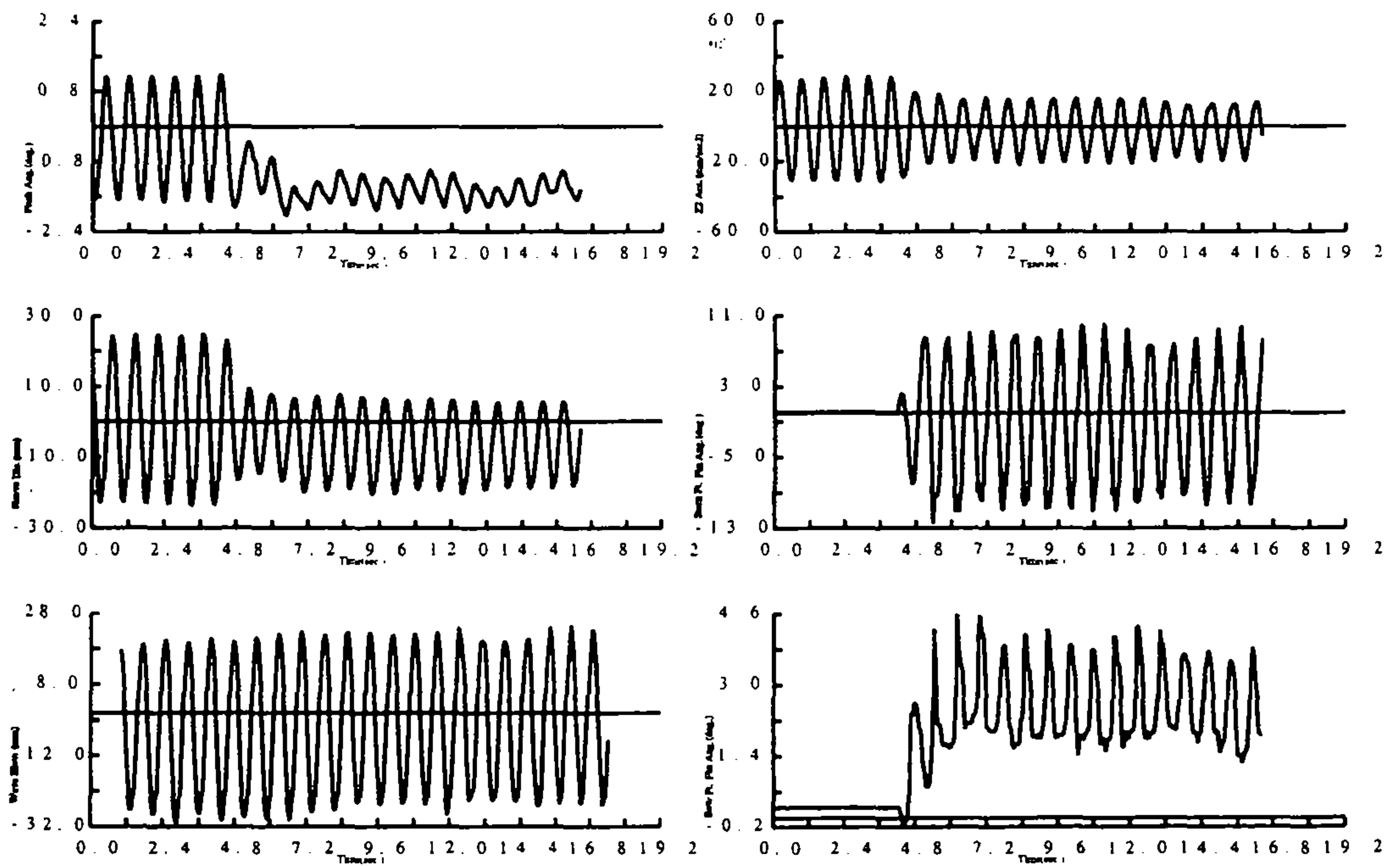


Fig. 3-7 Experimental Results in Regular Waves ($\lambda/L = 3.0$, $Fn = 0.786$)

제 4 장 비선형 운동 해석

4.1 개 요

21세기의 해상교통수단으로서 초고속선의 필요성이 증대됨에 따라 선진조선 각국에서 경쟁적으로 개발에 힘을 쏟고 있다. 일본의 Techno-Super-Liner, SSTH, Superjet-30, Rainbow, 독일의 SUS, 노르웨이 FOILCAT 2900, 프랑스의 AGNES 200 등 각종 복합지지형 초고속선 개발에 노력하고 있으며, 국내에서는 대우조선의 카타마란, 삼성중공업의 SES, 세모의 SES, 현대중공업의 카타마란선이 개발되어 이미 상업운항에 들어간 선박도 있다. 이러한 초고속선은 앞으로 전망되는 남북통일과 극동아시아 경제권의 활성화에 따라 수요가 계속 증가되리라 예측된다.

최근들어 수중익 카타마란선(Hydrofoil Catamaran)이 대형 고속선과 안락한 고속선으로 각광을 받고 있으며, 이에 대한 파랑중 운동응답에 대한 연구가 다수 수행되었으며, 특히 Ohtsubo & Kubota [4-4, 4-8]는 2000톤급 수중익 카타마란 선형에 대한 종규칙파중 종운동 시뮬레이션 계산 및 실험을 수행하였다.

본 장에서는 Salvesen, Tuck, Faltinsen[4-1]의 스트립 방법(STF의 스트립 방법)을 사용하여 종규칙파중 부가질량, 감쇠계수, 파기진력등을 계산하고 Ohtsubo & Kubota가 사용한 방법과 유사한 방법을 사용하여 수중익에 작용하는 힘을 구한다. 선수에 작용하는 충격력(슬래밍력)과 수중익을 고려하여 비선형 선체 운동을 해석하고 자세제어 시뮬레이션을 수행한다.

4.2. 규칙파중에서의 운동방정식

규칙파중에서의 선박의 운동을 계산하기 위해서는 6자유도 운동을 고려해야

하지만 본 연구에서는 운동응답이 가장 큰 종규척파 중에서 운동에 대해서 검토한다. 선체운동에 대해서는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔으며, 일반적으로 강체운동 및 작은 운동을 가정하여 선형운동방정식을 사용한다.

좌표계는 Fig. 4-1에서와 같이 3개 축에 의한 것이 사용된다. (x_0, y_0, z_0) 은 공간고정 좌표계이고, 입사파를 정의하는데 사용된다.

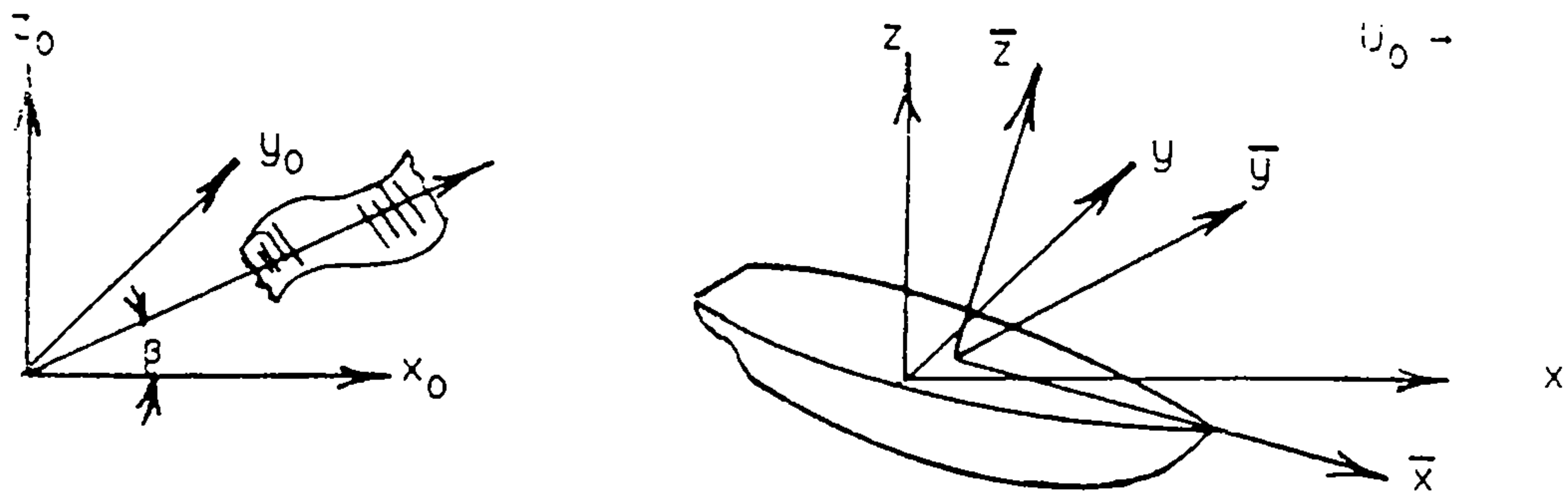


Fig. 4-1 Coordinate Systems

입사파의 속도포텐셜은 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_I(x_0, y_0, z_0)e^{i\omega_0 t} = (iga/\omega_0)e^{-ik(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)} e^{kz_0} e^{i\omega_0 t} \quad (4-1)$$

여기서, a 는 입사파 진폭이고, ω_0 은 파진동수, k 는 파수($2\pi/\lambda$), λ 는 파장, g 는 중력가속도, β 는 파의 진행방향이다.

규척파중에서 선체운동은 Salvesen, Tuck, Faltinsen[4-1]과 Beck[4-2]의 스트립 이론을 사용하여 구할 수 있다. 이에 의한 선형 연립방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1,6} \{-\omega_e^2(M_{jk} + A_{jk}) + i\omega_e B_{jk} + C_{jk}\} \zeta_k = F_j^I + F_j^D \quad j=1,2,\dots,6$$

(4-2)

여기서, ζ_k 는 k방향의 복소운동 진폭, M_{jk} 는 질량 행렬, A_{jk} 는 부가질량행렬, B_{jk} 는 감쇠행렬, C_{jk} 는 정력학적 복원력행렬, F_j^I 는 Froude-Krylov 기진력, F_j^D 는 산란 기진력이다.

부가질량과 감쇠계수는 Frank[4-3]의 쏘오스 분포법에 의한 경계치 해석법으로 구했으며, 기진력은 Haskind관계를 이용하여 구한다.

4.3. 규칙파중 수중익의 양력

고속 카타마란선의 자세제어를 위하여 수중익을 부착하는데 여러가지 형태가 가능하다. Fin stabilizer처럼 양쪽 선체에 핀(Fin)을 설치하는 방법과 양쪽 선체 사이에 전체적으로 수중익을 부착하는 방법이 있다. 양쪽 선체 사이에 전체적으로 수중익을 부착할 때에도 고정부(fixed part)와 가동부(movable part)의 모양이 다양할 수 있다.

본 보에서는 고속 카타마란 선의 양쪽 선체 사이에 전체적으로 부착된 수중익을 이용한 자세제어 성능을 해석하고자 하며 수중익의 단면이 동일할 경우 2차원 수중익 이론을 사용할 수 있다. 2차원 수중익 이론은 이론적으로 잘 정리가 되어 있으며, 실험치와도 대체로 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. Ohtsubo & Kubota [4-4]에서와 같이 규칙파 중 수중익의 양력은 다음과 같은 성분으로 분리될 수 있다.

(1) 정상성분

일반적으로 2차원 수중익이 무한수심의 정수중에서 일정한 속도로 전진할

때 양력계수는 다음과 같다.

$$(C_L)_{std} = 2\pi\alpha + 4\pi m \quad (4-3)$$

여기서, $C_L = L/\frac{1}{2} \rho U^2 c$ 이고, α 는 영각이며, m 은 캠버비(camber ratio)

이다.

플랩이 있는 경우는 Newman[4-5]이나 강창구[4-7]의 방법에 의해서 양력 계수가 구해진다.

(2) 규칙파중에서 궤적운동에 의한 비정상 양력성분

규칙파중에서 전진하는 수중익에 작용하는 파도의 궤적운동에 의한 비정상 양력성분은 선형 비정상 수중익 이론에 의해서 얻어진다. 이것은 Newman [4-5]에 잘 정리되어 있는 거스트(gust)이론으로부터 구해진다.

$$(C_L)_{wav}(t) = |W(k)| \cdot (C_L)_{wamp} \cdot \sin \left[\omega_e t + \arg \{W(K)\} + \frac{\pi}{2} \right] \quad (4-4)$$

여기서, $(C_L)_{wamp} = 2\pi \frac{\omega H_\omega \exp(-kd)}{U}$,

$$W(k) = \left\{ W_1(k) - iW_2(k) + \left(-1 + \frac{2k}{\kappa c} \right) J_1 \left(\frac{\kappa c}{2} \right) \right\},$$

$$W_1(k) = \{1 - F(k)\} J_1 \left(\frac{\kappa c}{2} \right) + G(k) J_0 \left(\frac{\kappa c}{2} \right) \quad (4-5)$$

$$W_2(k) = F(k) J_0 \left(\frac{\kappa c}{2} \right) + G(k) J_1 \left(\frac{\kappa c}{2} \right)$$

여기서, t 는 시간, c 는 수중익의 코오드, ω_e 는 조우 진동수, ω 는 파의 진동수, k 는 파수(wave number)이다. 그리고, U 는 선박의 전진속도이고, d 는 수중익의 몰수깊이이다. $F(k)$ 와 $G(k)$ 는 각각 Theodorsen함수 $T(k)$ 의 실수와 허수

부이다. k 는 reduced frequency이다. 시간 t 에서 선박의 중앙점에서 파도의 높이는 다음식으로 주어진다.

$$h_w(t) = \frac{H_w}{2} \cos(\omega_e t) \quad (4-6)$$

여기서, H_w 는 파고이다.

(3) 선체의 연직운동에 의한 비정상 성분

선체의 연직운동에 의한 비정상 성분에 대해서는 선체운동이 미지의 비정상 운동일 경우 비정상 수중익 이론을 사용하여 순간순간 수중익에 작용하는 유체력을 계산해야 하지만 이 방법은 상당히 복잡하기 때문에 본 연구에서는 종규칙파중 운동을 고려하면 파의 주기와 동일한 주기를 갖는 조화운동으로 가정할 수 있다. 이 경우 Ohtsubo & Kubota[4-4]에서와 같이 2가지 방법에 의해서 취급될 수 있다. 첫째는 선체 운동에 의한 양력의 비정상 성분을 준정상적으로 고려하는 방법이 있고, 두번째는 수중익 뒤로 빠져나가는 보오텍스를 고려한 방법이 있다. 본 보에서는 준정상방법을 사용하였으며, 양력은 다음과 같이 표시된다.

$$(C_L)_{mv}(t) = 2\pi \cdot \{ (\dot{\xi}_3(t) - x_f \dot{\xi}_5(t)) / U + \xi_5(t) \} \quad (4-7)$$

(4) 물수깊이의 영향

수중익이 자유표면에 가까이 접근함에 따라 양력의 정상 및 비정상 성분의 진폭이 감소한다. 본 보에서는 비정상 성분의 위상은 수중익의 물수깊이에 따라서 변하지 않는다고 가정한다. 양력의 감소율을 나타내는 물수깊이 영향 계수 $C_{suf}(d)$ 는 Ohtsubo & Kubota[4-4]의 정상상태에서의 실험결과로부터 얻어진 식을 사용한다.

$$C_{suf}(d) = 1 - \exp(-arg)$$

$$arg = 2.079d/c + 0.1333/(C_L)_{std} \quad \text{for } (C_L)_{std} \geq 0.1 \quad (4-8)$$

$$= 2.079d/c + 1.333 \quad \text{for } (C_L)_{std} < 0.1$$

이상에서 검토한 수중익에 작용하는 전체 양력 $C_L(t)$ 는 다음식과 같이 얻어진다.

$$(C_L)_{total}(t) = C_{mod} \cdot C_{suf}(d) \cdot \{(C_L)_{std} + (C_L)_{\omega av}(t) + (C_L)_{mov}(t)\} \quad (4-9)$$

4.4. 비선형 선체운동 해석

STF(Salvesen, Tuck and Faltinsen)의 스트립 방법을 이용하는 6자유도 운동해석 프로그램을 근간으로 하여 선수에 작용하는 충격력을 포함하는 비선형 선체운동해석 방법을 개발하였다.

2차원 단면의 유체력 계산은 Frank의 쏘오스분포법을 이용하였으며, 먼저, 선형이론에 의하여 일정한 진동수로 운동할 때 정수중에서의 단면에 대한 유체력을 계산하고, 선수 부분에 대해서는 자유표면에서 $\phi=0$ 조건을 사용하고 운동하는 순간마다 자유표면과 물체의 상대위치와 상대속도를 이용하여 경계치 문제를 해석하여 중복되는 부분을 제거함으로써 상대속도의 제곱에 비례하는 충격력을 고려하여 운동방정식을 해석한다. 이렇게 경계치문제를 해석함으로써 선수단면에 작용하는 순간순간의 압력을 계산할 수 있다. 물론, 충격력은 상대속도가 서로 가까워지는 방향일 때만 고려한다.

파고가 아주 작아질 경우 비선형효과가 거의 사라지고 선형이론과 같아지도록 수학모형화 하였다. 즉,

$$\phi_N(\omega) = \phi_L(\omega) - \phi_L(\omega=\infty) + \phi_N(\omega=\infty) \quad (4-10)$$

여기서, 첨자 L은 정수중에서의 단면에 대한 선형이론 계산이고, N은 물체와 자유표면의 상대위치를 고려한 단면에 대한 비선형 유체력 계산이다. 이때, 파고가 아주 작으면 L과 N에 대한 계산결과가 같아지게 된다.

이 방법을 이용하여 충격력, 단면 각 위치에서의 압력 등을 계산함으로써 콘테이너선이나 항공모함 등과 같이 Flare가 큰 선박과 운동중 수선면의 변화가 큰 선박의 파도중 비선형 운동을 해석할 수 있다.

시간에 따른 시뮬레이션을 수행할 때 각 순간에 비선형 슬래밍력(Slamming Force, Impact Force)과 수중익에 작용하는 힘을 계산하였으며, Runge-Kutta 4차 방법에 의하여 시뮬레이션이 수행되었다.

4.5. 자세제어 계산결과 및 검토

4.5.1 대상선박

자세제어 계산에 사용된 선형은 Kang, et al.[4-6]의 자세제어 모형시험에서 사용된 1.8m의 카타마란선을 대상으로 하였다. 이에 대한 주요 제원과 제어판의 특성치들은 각각 Table 4-1과 Table 4-2에 실려 있다.

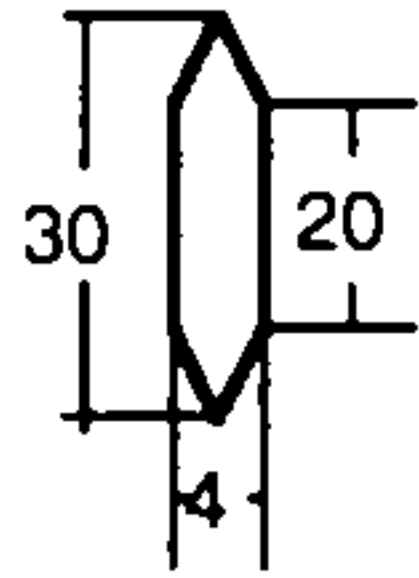

제어판은 모형선의 쌍동선체사이에 2조가 설치되어 있으며, 선수제어판은 왼쪽과 오른쪽에 같은 크기의 전가동 수중익으로 구성되어 있고, 단면형상은 NACA0020이다. 선미제어판은 왼쪽과 오른쪽에 같은 크기의 플랩(Flap)이 있는 제어판으로 구성되어 있고, 플랩의 길이는 전체길이의 0.25에 해당하며, 단면 형상은 NACA0015이다. 선미제어판의 경우 플랩부분만 움직이며, 선미제어판의 플랩 및 선수제어판은 카타마란선의 운동을 제어하기 위하여 $\pm 15^\circ$ 이내에서 움직이도록 되어 있다.

Table 4-1. Principal Dimensions of the Catamaran (KS406)

	Full Load
Lpp (m)	1.8
B (m)	0.472
TF (m)	0.1295
TA (m)	0.0570
Δ (ton)	0.01929
LCB (m)	-0.1109

Table 4-2. Characteristics of Control Fins, Moving Rod and Struts for Tests of Attitude Control System

(Model Scale)

	Section	Fore	Aft
Strut		Height (mm)	
		159.4	112.5
Moving Rod	 D = 4 mm	Height (mm)	
		190.0	143.0
Control Fin	Fore Fin : NACA0020 Chord = 40 mm Aft Fin : NACA0015 Chord = 60 mm Flap Chord = 15 mm	Span (mm)	
		135 X 2	100 X 2
		Station No.	
		7	0.5
		Height from Base Line (mm)	
8	35		

4.5.2 최적제어

본 카타마란선의 최적자세제어를 위한 제어이득은 제2장에 기술되어 있는 방법을 사용하여 구하였으며, 무차원 제어 이득은 다음과 같다.

Table 4-3. Nondimensionalized Control Gains

	$\dot{\zeta}_3$	ζ_3	$\dot{\zeta}_5$	ζ_5	δ_b	δ_s
δ_b	17.2303	38.3751	0.0813	-4.2362	-0.2200	0.1053
δ_s	14.1175	74.9186	0.8052	2.1500	0.1053	-0.2657

4.5.3 계산결과 및 검토

Table 4-1에서 언급된 카타마란선에 대한 종규칙과중 자세제어 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 Fig. 4-2에 변위, Fig. 4-3에 속도, Fig. 4-4에 선수·선미 제어판의 각 변위, Fig. 4-5에는 선수·선미제어판에 작용하는 힘이 도시되어 있으며, Fig. 4-6에는 연직운동의 실험 및 계산결과가 비교되어 있다.

4.6. 결 언

파도중 고속 카타마란선의 자세제어 성능을 해석하기 위하여 STF 스트립 방법으로 부가질량, 감쇠계수, 파 기진력을 계산하고 수중익에 작용하는 힘을 양력이론을 사용하여 구했다. 선수에 작용하는 충격력을 고려한 비선형 선체운동을 해석하고, 수중익에 의한 자세제어 시뮬레이션 기법을 개발하였다. 이것을 이용하여 자세제어 시스템 설계 검증 등이 가능하고, 선체 및 수중익의 구조해석 자료로 이용될 수 있다.

앞으로 이 방법의 수정보완을 통하여 고속 카타마란선의 자세제어 성능 해석 및 설계 고도화를 이룰 수 있을 것이다.

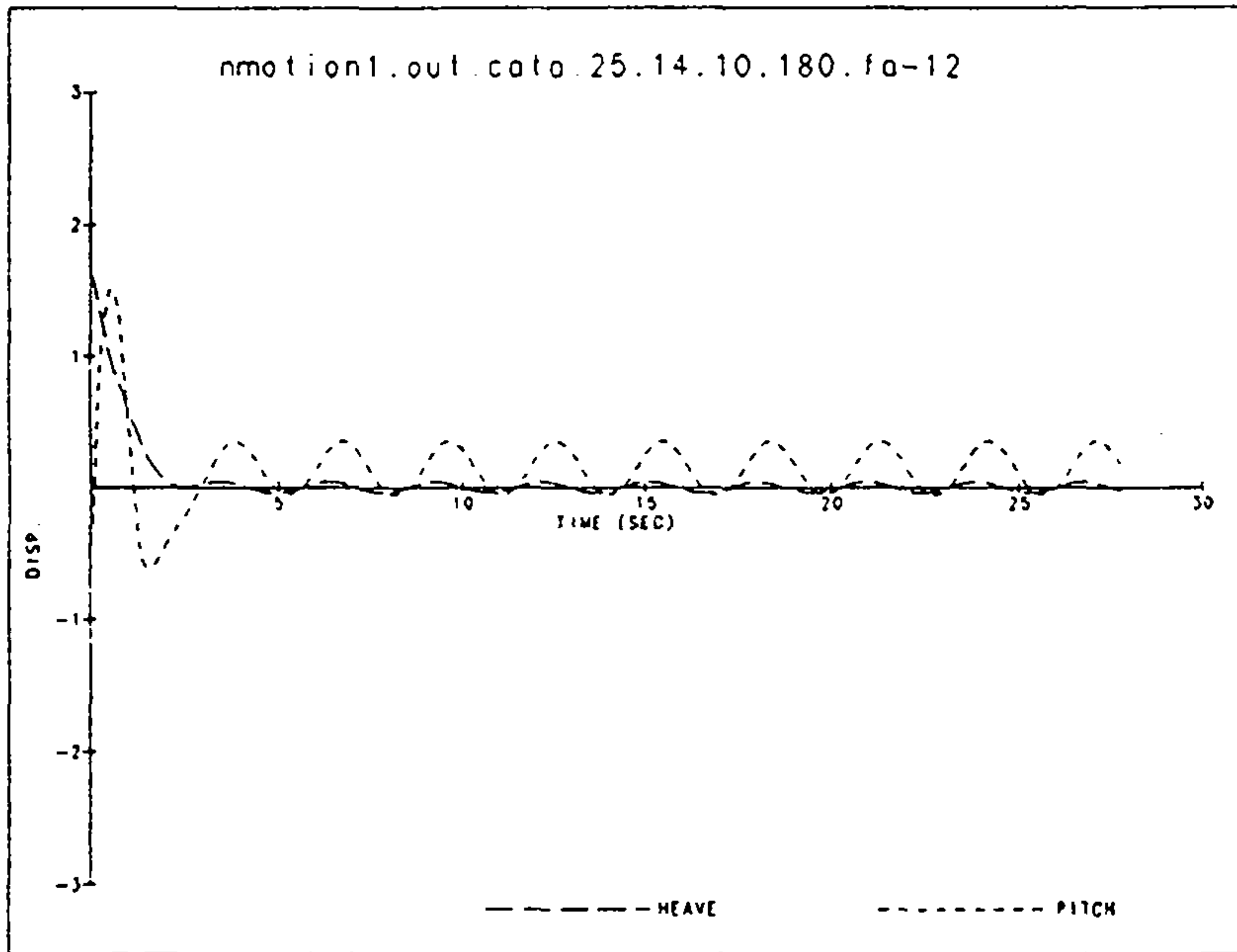


Fig. 4-2 Time Histories of Vertical Motions ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)

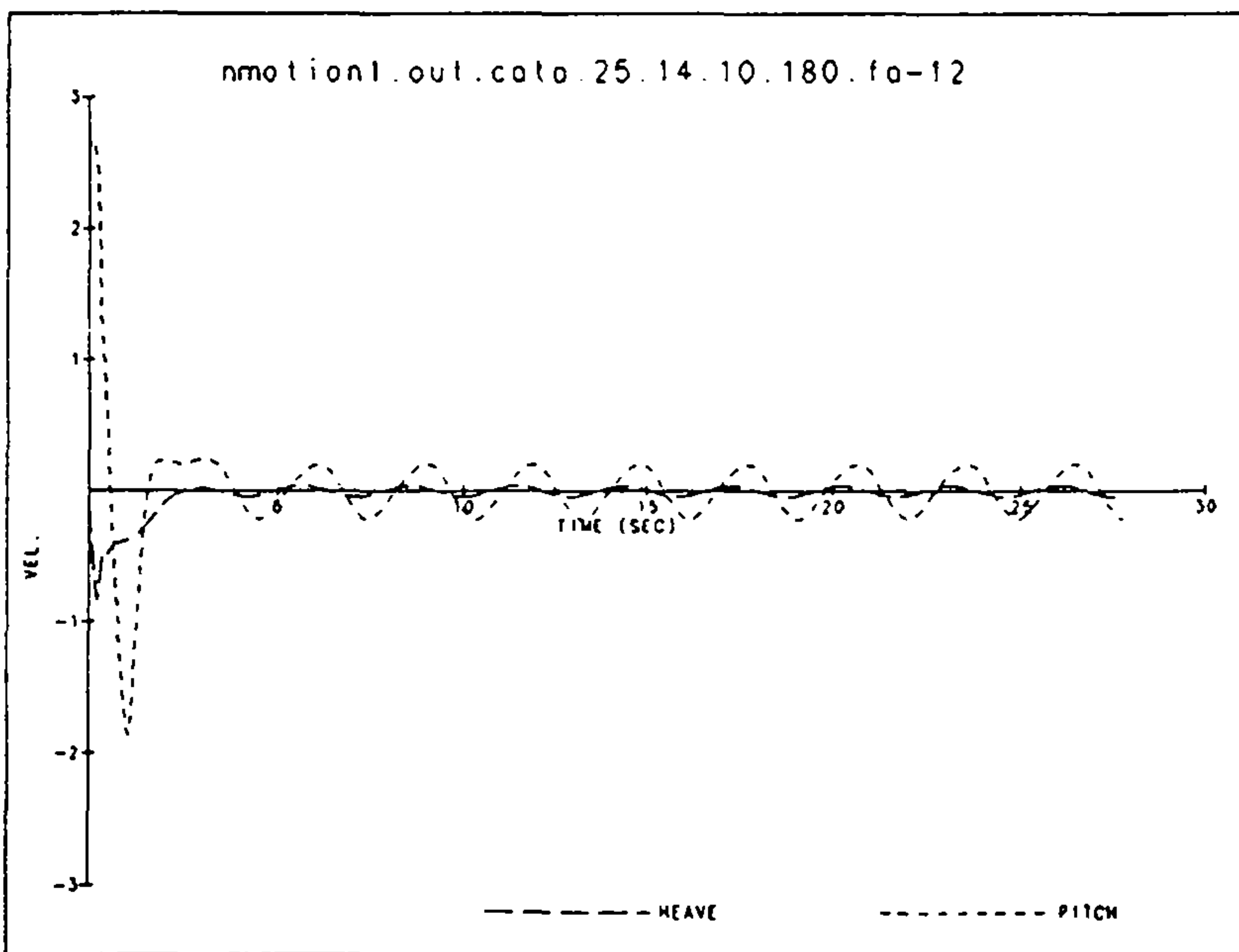


Fig. 4-3 Time Histories of Vertical Velocities ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)

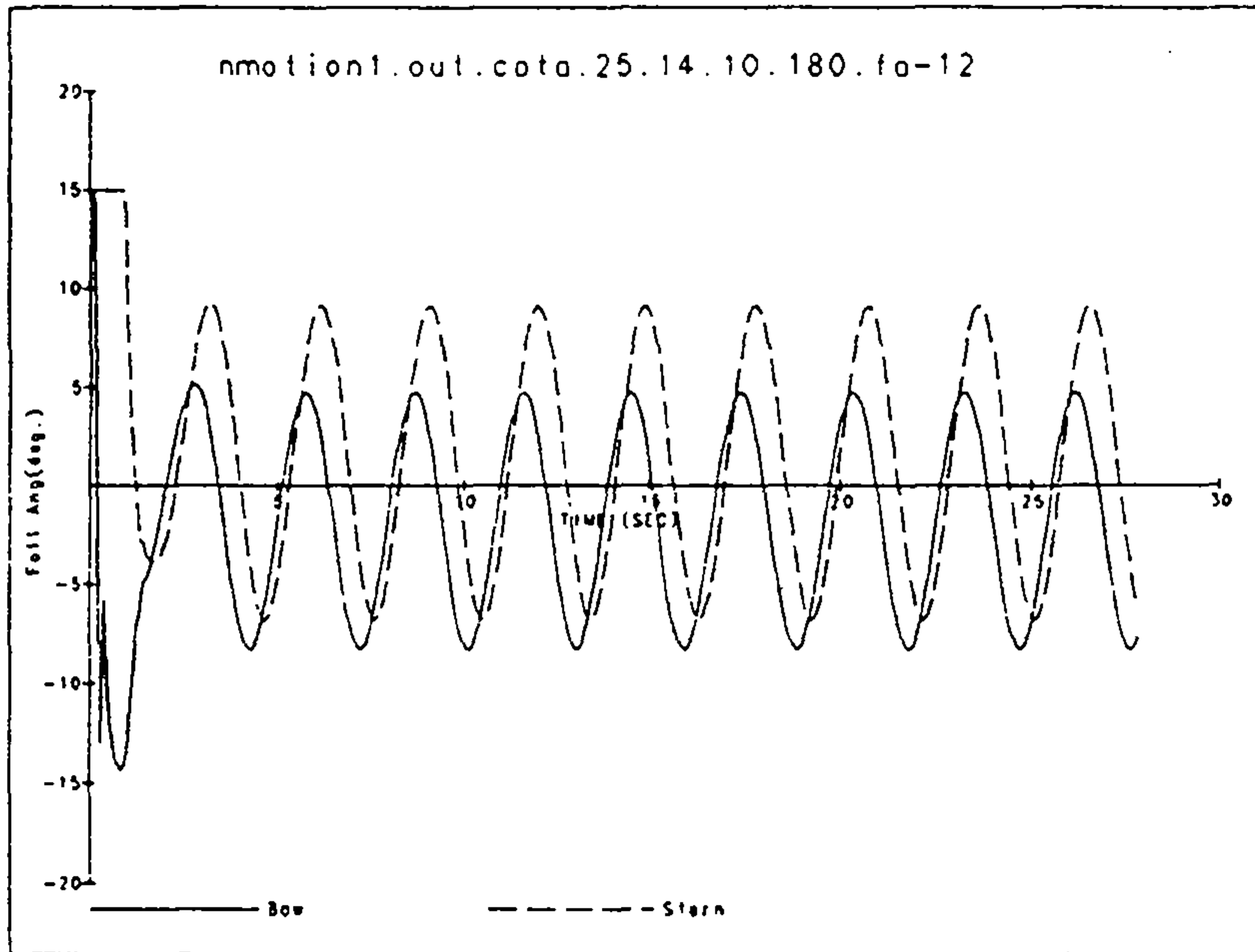


Fig. 4-4 Time Histories of Bow Plane and Stern Plane Angle
($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)

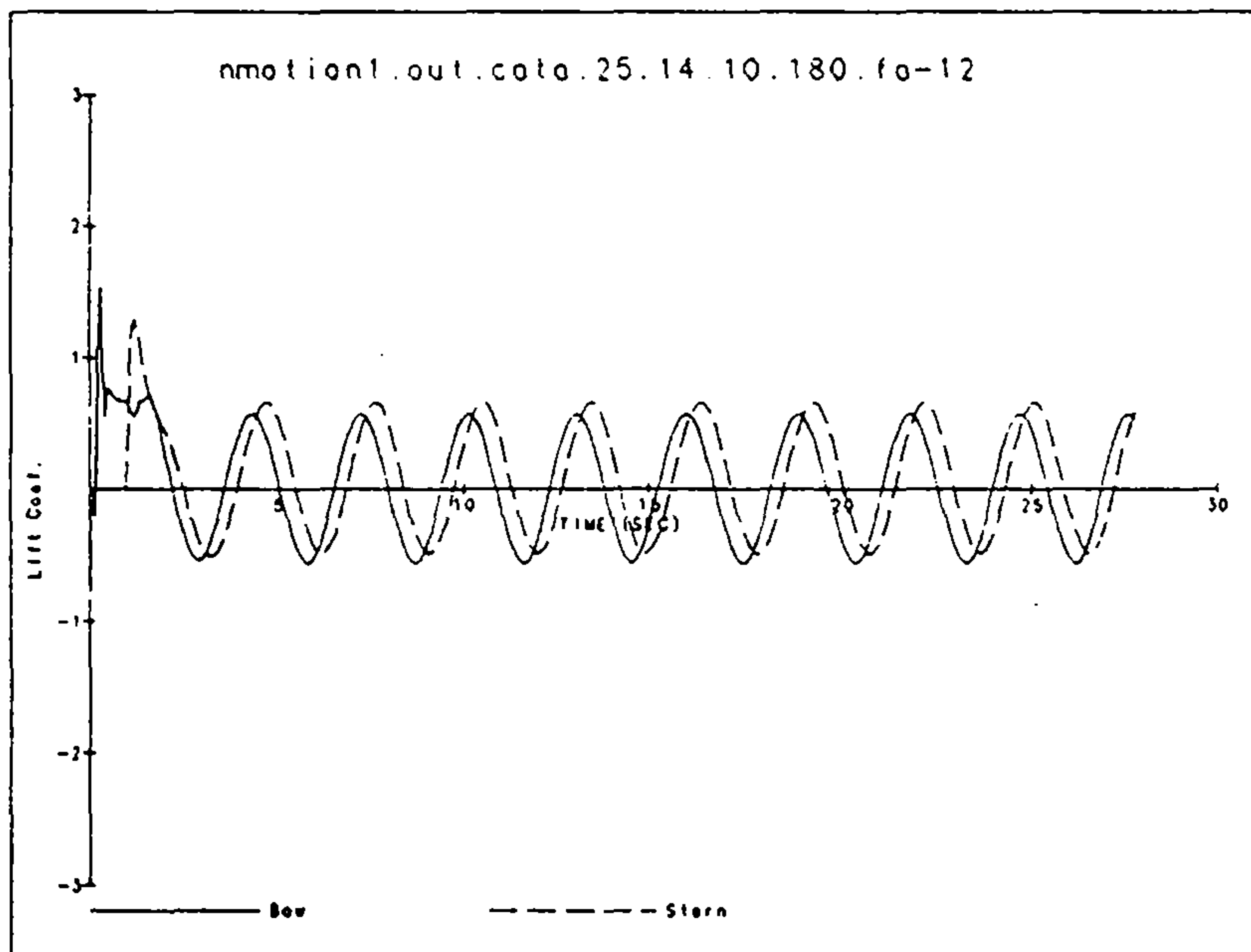


Fig. 4-5 Time Histories of Foil Load ($F_n=1.014$, $H_w=2m$, $\lambda/L=2.5$)

제 5 장 쌍동선의 파랑하중 계산

5.1 쌍동형 선체에 작용하는 파랑하중

현재 활발히 개발되고 있는 초고속 선박의 선형은 대부분 여러 개의 선체로 이루어진 다동형(多胴形)이며 그 중에서도 쌍동형 선형이 주류를 이루고 있다. 이러한 쌍동형 선박의 구조설계시에는 운항중의 선체 안전을 확보하기 위한 파랑하중의 정확한 추정이 절대적으로 필요하다.

일반적인 단동형 선박에서 중요한 파랑하중 요소는 종방향 선체의 각 단면에 작용하는 수직 및 수평 전단력, 수직 및 수평의 굽힘모멘트, 그리고 비틀림 모멘트이며 필요에 따라 국부적인 파랑하중이 설계요소로 검토되고 있다. 현재 단동형 선박의 파랑하중 추정은 주로 종방향 단면에 작용하는 내력을 대상으로 하기 때문에 소위 스트립(strip)이론에 의거하여 이루어지고 있다. 우리 연구소에서도 이에 대한 기법을 개발한 바 있다[5-1]. 단동선의 경우 각단면의 파랑하중은 선체의 끝단으로부터 그 단면까지 선체에 작용하는 힘들의 평형조건으로 주어지며 이에선 선체운동에 의한 관성력, 부력, 파랑기진력, 선체운동에 의한 유체반력이 포함된다.

쌍동형 선체의 경우는 개념상 두개의 선체와 이를 연결하는 연결갑판으로 선체가 구성되므로 좌현 및 우현 각 선체의 종방향 단면에 작용하는 각각의 수직 및 수평 전단력, 수직 및 수평 굽힘모멘트 그리고 비틀림모멘트는 단동선에 대하여 적용한 방법을 그대로 사용하면 구하여 진다. 그러나, 쌍동선의 경우는 단동선체가 연결갑판에 의해 연결되는 형상을 가지므로, 양쪽 단동선체에 작용하는 파력이나 관성력에 위상차가 존재함으로써 갑판에 발생하는 파랑하중이 중요하다. 이들 연결갑판에 작용하는 파랑하중은 작용방향에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다[5-2].

(1) 종방향전단력(Racking Shear Force)

양현에 작용하는 종방향력의 차이에 의한 전단력

(2) 수평전단력(Side Shear Force)

양현에 작용하는 수평방향력의 차이에 의한 전단력

(3) 수직전단력(Vertical Shear Force)

양현에 작용하는 수직방향력의 차이에 의한 전단력

(4) 수직굽힘모멘트(Vertical Bending Moment)

양현에 작용하는 수직방향력의 차이에 의한 모멘트

(5) 수직분할모멘트(Pitch-Connecting Moment)

양현에 작용하는 피칭모멘트의 차이에 의한 수직방향 모멘트

(6) 수평분할모멘트(Yaw-Connecting Moment)

양현에 작용하는 요잉모멘트 차이에 의한 수평방향 모멘트

연결갑판의 파랑하중은 파만남각에 따라 크게 달라지며 수직굽힘모멘트와 수직전단력의 최대치는 횡파중에서 일어나며, 수직분할모멘트의 최대치는 파만남각이 60도 근처가 되는 사파에서 일어나는 것으로 알려져 있다. 한편, 선수파 및 선미파 상태에서는 수직전단력과 수직분할모멘트가 영이 되며 이는 이 파랑하중 성분들은 횡운동(roll)에 가장 큰 영향을 받기 때문이다. 또한, 수직굽힘모멘트는 상하운동(heave) 및 종운동(pitch) 가속도의 영향을 크게 받는다. Kobayashi[5-3]는 3차원 특이점 분포법에 의한 연결갑판의 파랑하중을 계산하고 이를 모형시험 결과와 비교한 바 있다. 한편, Lee등[5-4]은 SWATH선이 횡파중 정지하고 있을 때의 수직전단력과 수직분할모멘트를 계산하는 방법을 제시한 바 있다.

여기서는, 우리연구소가 스트립이론으로 개발하여 보유하고 있는 쌍동형 선체의 파랑중 운동응답을 구하는 프로그램[5-5]을 확장하여 연결갑판의 파랑하중을 구하는 방법을 제시하고자 한다.

5.2 연결갑판 파랑하중의 추정식

전 절에서 열거한 연결갑판의 파랑하중들은 힘의 동적 평형조건으로부터 유도할 수 있다. 즉 연결갑판부를 길이방향으로 절단한 경우 그 절단면에 작용하는 내력과 좌현 또는 우현의 선체에 작용하는 외력 및 운동에 의한 관성력이 평형을 이루어야하는 조건으로부터 내력을 구할 수 있다. 먼저 Fig. 5-1에 표시된 것과 같이 좌우로 분할된 쌍동선체와 갑판구조물을 살펴보자. 각 단동선체에 작용하는 힘은 유체력이외에 상대편 단동선체로부터 전달되는 내력이 있으며 이 내력이 갑판에 작용하는 파랑하중이 된다. 각 단동선체에 대한 운동방정식은 유체력과 내력의 동적 평형조건으로부터 다음과 같이 표시된다.

먼저 좌현 및 우현의 각각의 무게중심의 변위를 (X_{GL}, Y_{GL}, Z_{GL}) 및 (X_{GR}, Y_{GR}, Z_{GR}) 라 하고 선체의 질량을 M 이라하고 쌍동선 전체의 무게중심에 대한 선체운동변위를 각각 η_k ($k=1,2,3,4,5,6$; surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)라 하자. 그러면,

$$\begin{pmatrix} \ddot{X}_{GL} \\ \ddot{Y}_{GL} \\ \ddot{Z}_{GL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\eta}_1 + l_y \ddot{\eta}_6 \\ \ddot{\eta}_2 \\ \ddot{\eta}_3 - l_y \ddot{\eta}_4 \end{pmatrix} \quad (5-1)$$

$$\begin{pmatrix} \ddot{X}_{GR} \\ \ddot{Y}_{GR} \\ \ddot{Z}_{GR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{\eta}_1 - l_y \ddot{\eta}_6 \\ \ddot{\eta}_2 \\ \ddot{\eta}_3 + l_y \ddot{\eta}_4 \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

여기서, l_y 는 선체전체의 좌표중심에서 우현중심까지의 y 좌표이며 편의상 전체좌표중심의 x 방향의 위치는 각각 단동선체의 무게중심의 x 위치와 동일한 것으로 가정한다. 그리고, 전체 무게중심의 z 좌표를 l_z 라 하자.

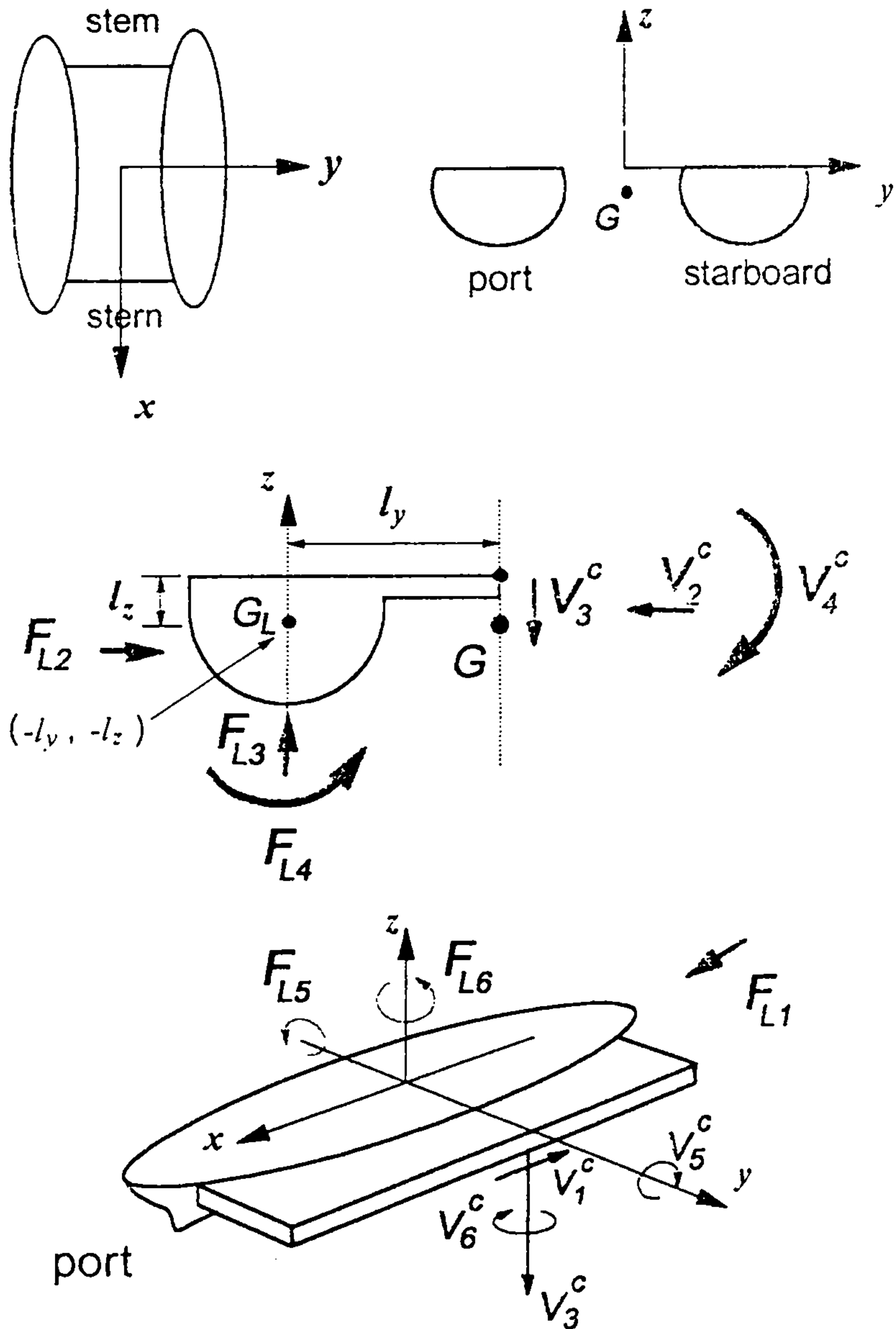


Fig. 5-1 Coordinate System and Sign Conversions of the Wave Loads at the Deck

먼저, 전단력에 대해 살펴보기 위하여 좌현의 단동선체에 대한 힘의 평형조건을 생각하면,

$$\frac{M}{2} \begin{pmatrix} \ddot{X}_{GL} \\ \ddot{Y}_{GL} \\ \ddot{Z}_{GL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{L1} - V_1^c \\ F_{L2} - V_2^c \\ F_{L3} - V_3^c \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

여기서,

F_{Lj} : 좌현선체에 작용하는 $j(=1,2,3)$ 방향 동유체력(radiation, diffraction & restoring force)

V_j^c : 연결갑판의 $j(=1,2,3)$ 방향 전단력

마찬가지로 우현에 대하여 힘의 평형조건을 생각하면,

$$\frac{M}{2} \begin{pmatrix} \ddot{X}_{GR} \\ \ddot{Y}_{GR} \\ \ddot{Z}_{GR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{R1} + V_1^c \\ F_{R2} + V_2^c \\ F_{R3} + V_3^c \end{pmatrix} \quad (5-4)$$

여기서,

F_{Rj} : 우현선체에 작용하는 $j(=1,2,3)$ 방향 동유체력(radiation, diffraction & restoring force)

윗 식에서 밑첨자 L,R은 각각 좌현과 우현의 단동선체에 대한 물리량을 뜻한다.

갑판 중심에 작용하는 전단력 V_1^c, V_2^c, V_3^c 를 얻기 위해 식(5-4)에서 식(5-3)를 빼주면,

$$\begin{aligned} V_1^c &= \frac{1}{2}(F_{L1} - F_{R1} - Ml_y \ddot{\eta}_6) \\ V_2^c &= \frac{1}{2}(F_{L2} - F_{R2}) \\ V_3^c &= \frac{1}{2}(F_{L3} - F_{R3} + Ml_y \ddot{\eta}_4) \end{aligned} \quad (5-5)$$

가 된다.

다음 갑판중심선에 대한 모멘트 과량하중을 구하기 위하여 좌현 단동선체에 대한 모멘트 평형조건을 생각하면 좌표원점 O에 대하여,

$$\begin{bmatrix} I_{44} & I_{45} & I_{46} \\ I_{54} & I_{55} & I_{56} \\ I_{64} & I_{65} & I_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_4 \\ \ddot{\eta}_5 \\ \ddot{\eta}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{L4} - V_4^c + l_y \frac{M}{2} \bar{Z}_{GL} + l_z \frac{M}{2} \bar{Y}_{GL} \\ F_{L5} - V_5^c + l_z \frac{M}{2} \bar{X}_{GL} \\ F_{L6} - V_6^c - l_y \frac{M}{2} \bar{X}_{GL} \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

여기서,

F_{Lj} : 좌현 단동선체의 좌표원점 O에 대한 $j(=4,5,6)$ 방향 동유체력 모우멘트,

V_j^c : 연결갑판의 $j(=4,5,6)$ 방향 모우멘트 과량하중,

I_{jk} : ($j=4,5,6, k=4,5,6$)은 좌현 단동선체의 좌표원점 O에 대한 2차 질량 관성모우멘트이다.

마찬가지로 우현 단동선체에 대한 모우멘트 평형조건을 생각하면 다음이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} I_{44} & -I_{45} & I_{46} \\ -I_{54} & I_{55} & -I_{56} \\ I_{64} & -I_{65} & I_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_4 \\ \ddot{\eta}_5 \\ \ddot{\eta}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{R4} + V_4^c - l_y \frac{M}{2} \bar{Z}_{GR} - l_z \frac{M}{2} \bar{Y}_{GR} \\ F_{R5} + V_5^c + l_z \frac{M}{2} \bar{X}_{GR} \\ F_{R6} + V_6^c + l_y \frac{M}{2} \bar{X}_{GR} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

여기서, I_{jk} 는 좌현선체에 대한 값과 동일하고

F_{Rj} : 우현 단동선체의 좌표원점 O에 대한 $j(=4,5,6)$ 방향 동유체력 모우멘

트 이다. 갑판중심에서의 모멘트과랑하중 V_4^c, V_5^c, V_6^c 를 구하기 위하여 식 (5-7)에서 식(5-6)을 빼주면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} V_4^c &= \frac{1}{2}(F_{L4} - F_{R4}) - I_{45} \ddot{\eta}_5 + l_y \frac{M}{2} \ddot{\eta}_3 + l_z \frac{M}{2} \ddot{\eta}_2 \\ V_5^c &= \frac{1}{2}(F_{L5} - F_{R5}) - I_{54} \ddot{\eta}_4 - I_{56} \ddot{\eta}_6 + l_z l_y \frac{M}{2} \ddot{\eta}_6 \\ V_6^c &= \frac{1}{2}(F_{L6} - F_{R6}) - I_{65} \ddot{\eta}_5 - l_y \frac{M}{2} \ddot{\eta}_1 \end{aligned} \quad (5-8)$$

결국 연결갑판의 과랑하중을 구하기 위하여는 각 단동 선체에 작용하는 동유체력을 계산하여야 한다. 다음 절에서는 이를 구하기 위한 방법에 대하여 기술한다.

5.3 동유체력의 추정

우리연구소에서 개발한 쌍동선의 운동해석을 위한 프로그램을 활용하기 위하여 참고문헌 [5-1]과 동일한 과정으로 동유체력을 해석한다. 이에 의하면 쌍동선 주위의 유동을 속도 포텐셜 Φ 를 도입하여 유체의 유동을 표현하고 이는 다음식으로 주어진다.

$$\Phi = Ux + \phi_S(x, y, z) + \phi_T(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (5-9)$$

여기서 U 는 선체의 전진속도이고, ϕ_S 는 선체의 전진에 의한 조파교란을 나타내는 항이고 ϕ_T 는 선체의 운동 및 입사파에 의한 주기적인 교란을 나타내는 항이다. ϕ_T 는 다음과 같이 여러 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$\Phi_T = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 \eta_j \phi_j \quad (5-10)$$

여기서, ϕ_b , ϕ_D , ϕ_j 는 각각 입사파, 산란파 및 j방향 선체운동에 의한 방사파의 속도 포텐셜을 나타낸다. 입사파의 속도 포텐셜은 다음으로 주어진다.

$$\phi_I = \frac{ig\zeta_a}{\omega} e^{K_0(z - ix \cos \mu + iys \sin \mu)} \quad (5-11)$$

여기서, ζ_a 는 입사파의 파고, K_0 는 입사파의 파수, ω 는 입사파의 원진동수, 그리고 μ 는 입사파와의 파만남각으로 선수파의 경우 180도 이다. 선형이론에 의하면 선체에 작용하는 동유체압력은 다음으로 주어진다.

$$\begin{aligned} P &= -\rho \Phi_t \\ &= \rho \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \Phi_T \end{aligned} \quad (5-12)$$

동유체압력을 선체표면에 대하여 적분하면 각종 동유체력이 구하여 진다. 좌현선체에 대하여 이를 적분하면,

$$\begin{aligned} F_{Lj} &= F_{Lj}^e + F_{Lj}^m \\ &= \rho \int \int_{S_i} n_j \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) (\phi_I + \phi_D) ds \\ &\quad + \rho \int \int_{S_i} n_j \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \sum_{k=1}^6 \eta_k \phi_k ds \end{aligned} \quad (5-13)$$

여기서, S_i 는 좌현선체의 평균수면 아래의 선체 표면이고 F_{Lj}^e 는 입사파와 산란파에 의한 파랑강제력이고, F_{Lj}^m 는 선체의 운동에 기인한 동유체력이다. 그리고 n_1, n_2, n_3 는 각각 선체 안으로 향하는 단위 법선벡터의 x,y,z성분이며

n_4, n_5, n_6 은 다음으로 주어 진다.

$$\begin{aligned} n_4 &= yn_3 - zn_2 \\ n_5 &= zn_1 - xn_3 \approx -xn_3 \\ n_6 &= xn_2 - yn_1 \approx xn_2 \end{aligned} \quad (5-14)$$

우현선체에 대해서도 동일한 과정을 적용하면 우현에 작용하는 동유체력은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_{Rj} &= F_{Rj}^e + F_{Rj}^m \\ &= \rho \int \int_{S_r} n_j \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) (\phi_I + \phi_D) ds \\ &\quad + \rho \int \int_{S_r} n_j \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \sum_{k=1}^6 \eta_k \phi_k ds \end{aligned} \quad (5-15)$$

여기서 S_r 은 우현선체의 수면아래 선체 표면을 나타낸다.

스트립이론에 의한 추정식을 따르면 각 선체에 작용하는 동유체력은 결국 각 2차원단면의 2차원 유체력(좌우운동, 상하운동, 횡요운동에 의한)으로 주어지며 선체의 전후운동에 의한 영향은 무시한다.

이때 좌현선체에 작용하는 동유체력은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} F_{Lj}^e &= \rho \int \int_{S_l} \left[i\omega_e n_j \phi_I + \left(\phi_j^0 - \frac{U}{i\omega_e} \phi_3^0 \delta_{j3} + \frac{U}{i\omega_e} \phi_2^0 \delta_{j2} \right) \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right] ds \\ F_{Lj}^m &= \sum_{k=1}^6 \eta_k \int \int_{S_l} \left(n_j - \frac{U}{i\omega_e} n_3 \delta_{j3} + \frac{U}{i\omega_e} n_2 \delta_{j2} \right) p_k ds \end{aligned} \quad (5-16)$$

여기서,

$$\phi_2^0 : \frac{\partial \phi_2^0}{\partial n} = i\omega_e n_{\bar{2}} \text{를 만족하는 2차원 좌우운동 속도포텐셜,}$$

$$\phi_3^0 : \frac{\partial \phi_3^0}{\partial n} = i\omega_e n \text{를 만족하는 2차원 상하운동 속도포텐셜,}$$

$$\phi_4^0 : \frac{\partial \phi_4^0}{\partial n} = i\omega_e n \text{를 만족하는 2차원 횡요운동 속도포텐셜,}$$

$$\phi_5^0 : -x \phi_3 \text{로 근사되는 종요운동 속도포텐셜,}$$

$$\phi_6^0 : x \phi_2 \text{로 근사되는 선수동요운동 속도포텐셜,}$$

$$p_j : i\rho\omega_e (\phi_j^0 + \phi_j^U) \text{이고,}$$

$$\phi_j^U : \phi_5^U = \frac{U}{i\omega_e} \phi_3^0, \phi_6^U = -\frac{U}{i\omega_e} \phi_2^0, \phi_2^U = \phi_3^U = \phi_4^U = 0$$

가 된다. 우현에 대하여도 동일한 방법을 적용하여 동유체력을 구한다.

5.4 계산결과 및 고찰

좌우 선체에 작용하는 유체력을 스트림이론에 의한 추정된 쌍동형 2차원 단면에 대한 2차원 유체력으로부터 구하는 방법으로 연결갑판에 작용하는 파랑하중을 구하였다. 이때 선체의 운동은 기존의 쌍동선 운동해석 프로그램 SWAMO에 의하여 계산하였다. 계산의 대상으로는 길이 37m의 쌍동선박을 채택하였으며 Table5-1 에 대상선박에 대한 주요 요목과 연결 갑판 파랑하중 계산을 위하여 추가로 필요한 자료가 주어져 있다. 계산조건으로는 선속의 영향을 보기 위하여 2가지 선속(Fn=0.0, 0.4)과 파향의 영향을 보기 위하여 3가지 파향(선수정면파, 선수사파, 횡파)에 대한 계산을 수행하였다.

TABLE 5-1 Main Particulars of the Model Ship

item	value
Length	37.0 m
Breadth	8.6 m
Width of demihull	2.6 m
Displacement	125 ton
l_y (y location of right hull's c.o.g)	$0.17*L/2$
l_z (z location of right hull's c.o.g)	$0.12*L/2$
I45, I56 of left hull	$0.0, -0.0104*M*(L/2)**2$

계산결과에 대한 고찰은 실제로 설계 시에 중요하게 다루어져야 할 하중인 수직전단력 V_3^c , 수직굽힘모멘트 V_4^c , 수직분할모멘트 V_5^c 에 대하여 하기로 한다. 계산결과는 다음과 같이 무차원화 하여 그림으로 보여 주기로 한다.

$$\begin{aligned}
 V_3^{c'} &= \frac{V_3^c}{Mg\zeta_a/L} \\
 V_4^{c'} &= \frac{V_4^c}{Mg\zeta_a} \\
 V_5^{c'} &= \frac{V_5^c}{Mg\zeta_a}
 \end{aligned} \tag{5-17}$$

Fig. 5-2는 $Fn=0.4$ 로 전진하는 경우 파향에 따른 수직전단력의 계산결과를 보여준다. 이는 선수정면파에서는 영이됨을 보여주고 135도 선수사파에서는 $\lambda/L=0.7$ 및 1.4에서 극치를 갖고 있음을 보여준다. 이는 선체의 상하운동이 최대가 되는 파장영역과 좌우 두선체간의 떨어진 거리의 두배와 같은 길이의 파장영역에서 수직전단력이 커짐을 보여주는 것으로 생각된다. 한편 횡파중에

서 최대 전단력이 발생함을 볼수 있으며 $\lambda/L = 0.5$ 에서 최대응답이 발생하였다. 수직전단력은 파향이 횡파중일때 가장 커지며 이는 Kobayashi[5-3]의 결과에서도 나타나고 있다.

Fig. 5-3은 $Fn=0.4$ 로 전진하는 경우 파향에 따른 수직굽힘모멘트의 계산결과를 보여준다. 작은파장 영역에서 한번의 작은 극치를 보이며 파장이 더 긴 영역에서는 값이 증가하여 일정한 값에 수렴함을 보여준다. 수직전단력과 마찬가지로 횡파에서의 응답이 가장크게 나타남을 보여주고 있다.

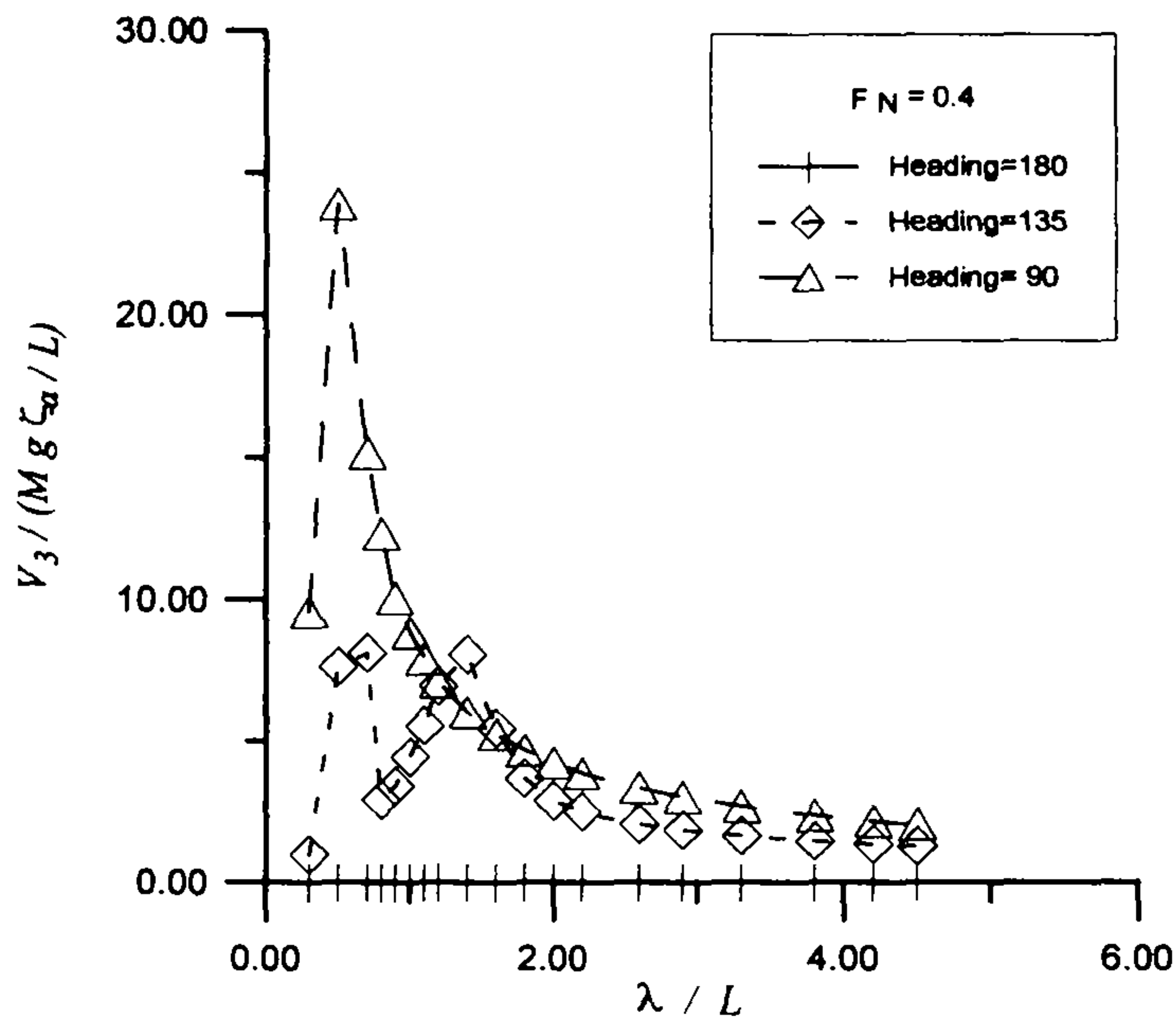


Fig. 5-2 Nondimensionalized Vertical Shear at DK for $Fn=0.4$

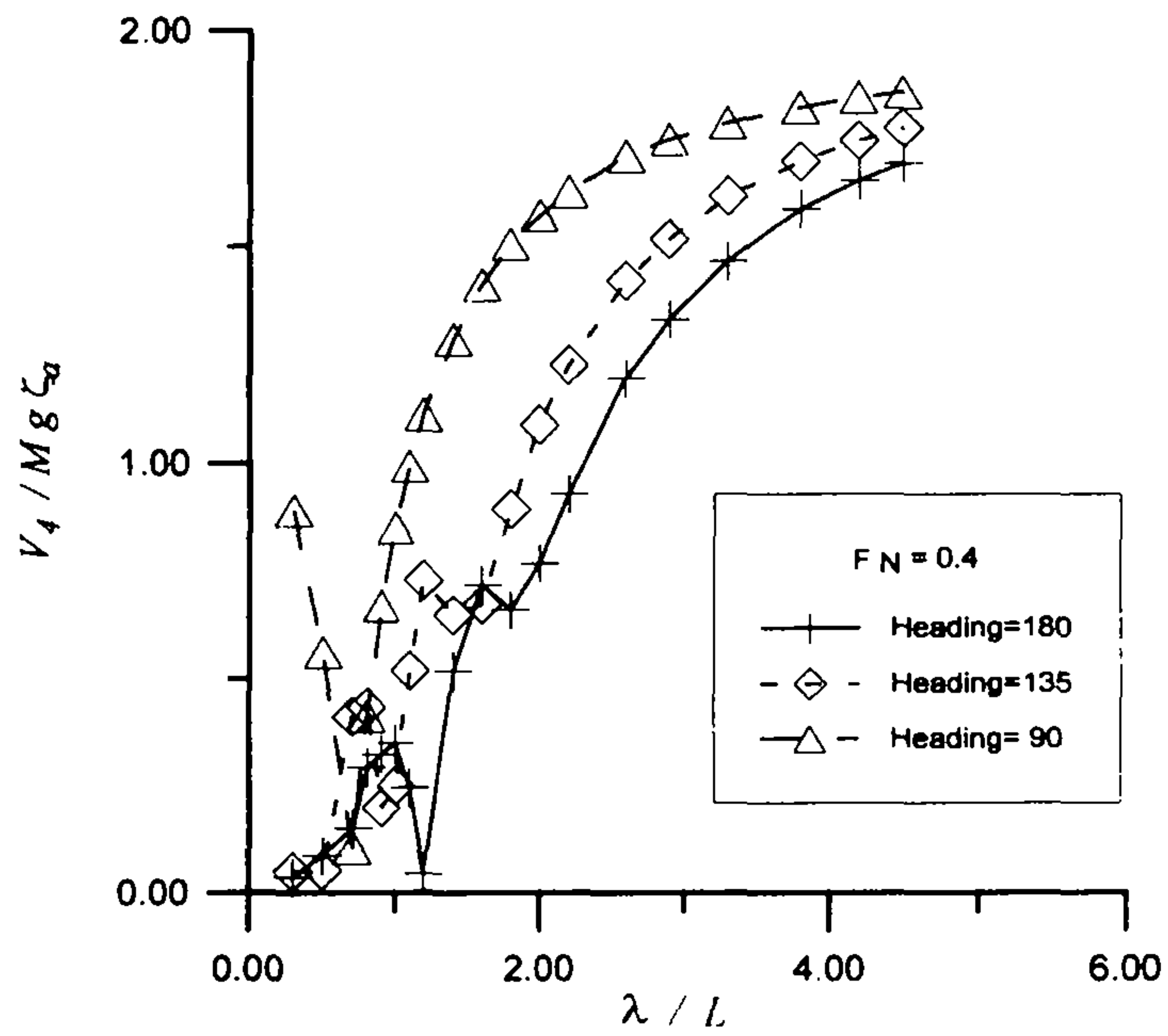


Fig. 5-3 Nondimensionalized Vertical Bending Moment at DK for $Fn=0.4$

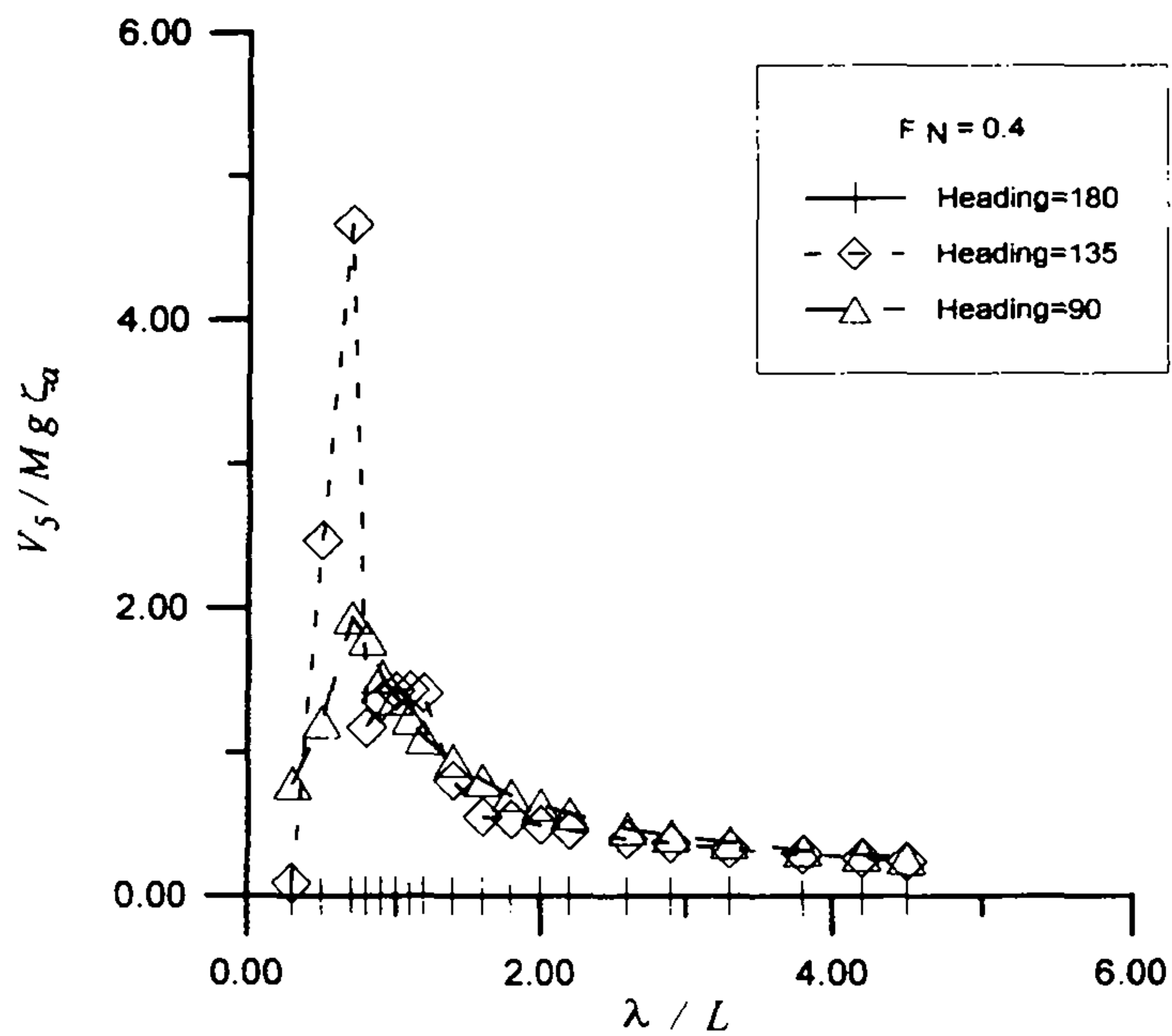


Fig. 5-4 Nondimensionalized Pitch Connecting Moment at DK for $Fn=0.4$

Fig. 5-4는 $Fn=0.4$ 로 전진하는 경우 파향에 따른 수직분할모멘트의 계산결과를 보여준다. 선수정면파에서는 수직전단력과 마찬가지로 영이 됨을 보여주고 135도 선수사파에서 최대응답을 보여주고 극치는 $\lambda/L=0.7$ 에서 발생하였다. 수직전단력과 마찬가지로 $\lambda/L=1.5$ 이하의 매우 좁은 파장영역에서 극치응답이 일어나며 더 긴 파장에서는 응답이 영으로 감소하여 가는 특성을 보인다.

한편 전진속도의 영향을 보기 위하여 파향이 횡파일 때 최대가 응답이 발생하는 수직전단력과 수직굽힘모멘트에 대해서는 횡파중에서, 파향이 선수사파일 때 최대응답이 일어나는 수직분할모멘트는 선수사파중에서 선속이 없을 경우와 $Fn=0.4$ 인 경우의 응답을 비교하여 보았다. Fig. 5-5 및 Fig. 5-6은 횡파중에서 각각 수직전단력과 수직굽힘모멘트에 대한 비교 결과로 선속의 영향이 없음을 보여주고 있다. 횡파중에서는 선체의 운동 특성이나 동유체력에 전진속도의 영향이 작기 때문에 이러한 결과를 보이고 있는 것으로 생각된다. 반면에 Fig. 5-7은 선수사파중 수직분할 모멘트의 비교결과로 선속의 영향을 볼 수 있다. 선속이 커지면 극치의 값이 크게 증가하는 형태를 보여준다.

연결갑판에 작용하는 파랑하중을 구하여 본 결과 선체운동 응답이 최대가 되는 파장영역과 두 단동선체간의 거리를 반파장으로 갖는 파장영역이 중요한 응답 특성이 얻어지는 곳임을 알 수 있었다. 이와 같이 구하여진 파랑하중 특성을 설계에 응용하기 위하여는 각 파랑하중의 연결갑판 길이 방향으로의 분포를 구하여야한다. 이번 연구에서는 이에 대한 연구는 수행되지 않았으나 Kobayashi등[5-3]이 3차원 해석법으로 구하여 본 길이방향 분포를 참고하여 보면 설계에 참고가 될 것이다.

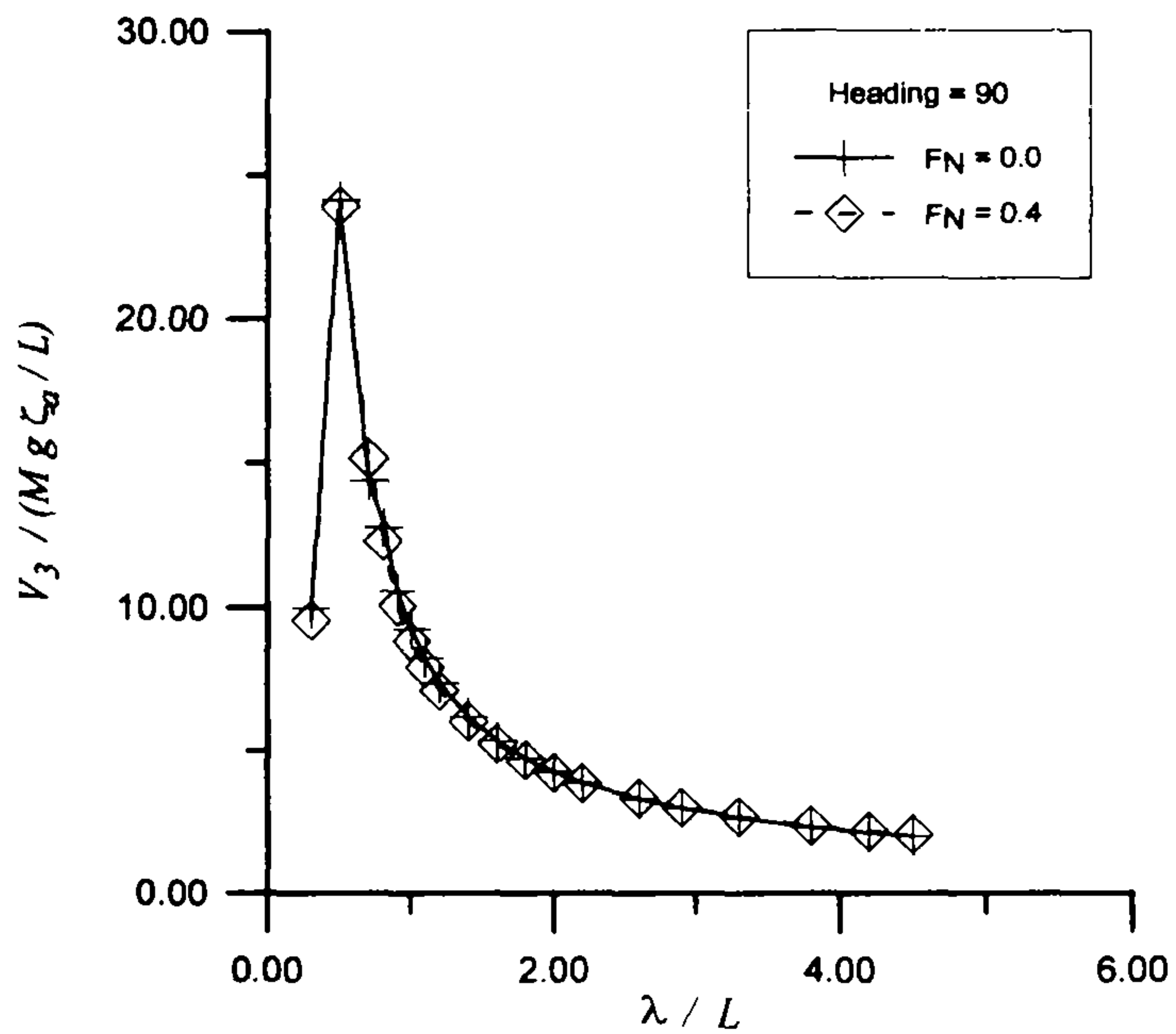


Fig. 5-5 Speed Effect on Vertical Shear at DK for $\beta=90$

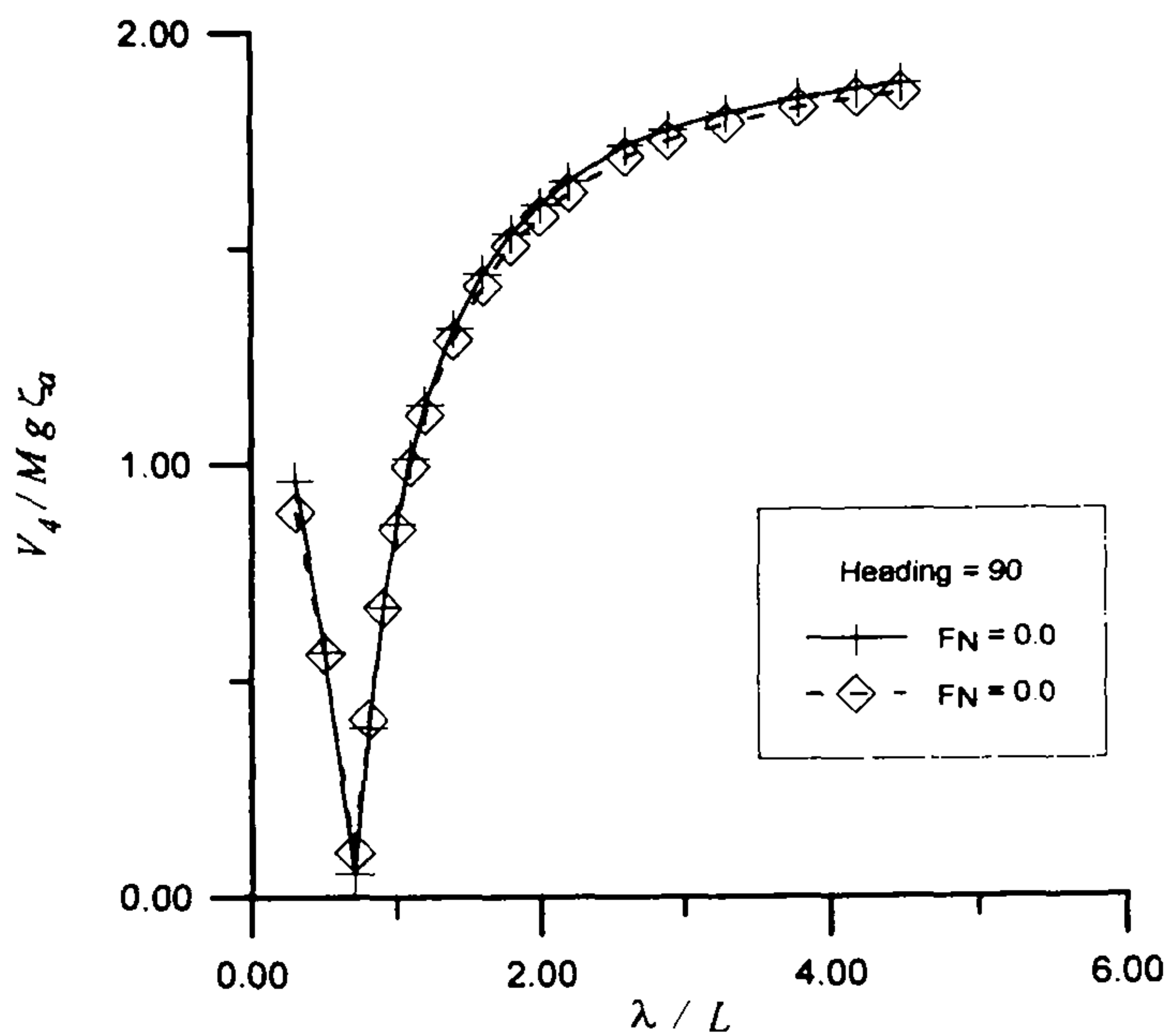


Fig. 5-6 Speed Effect on Vertical Bending Moment at DK for $\beta=90$

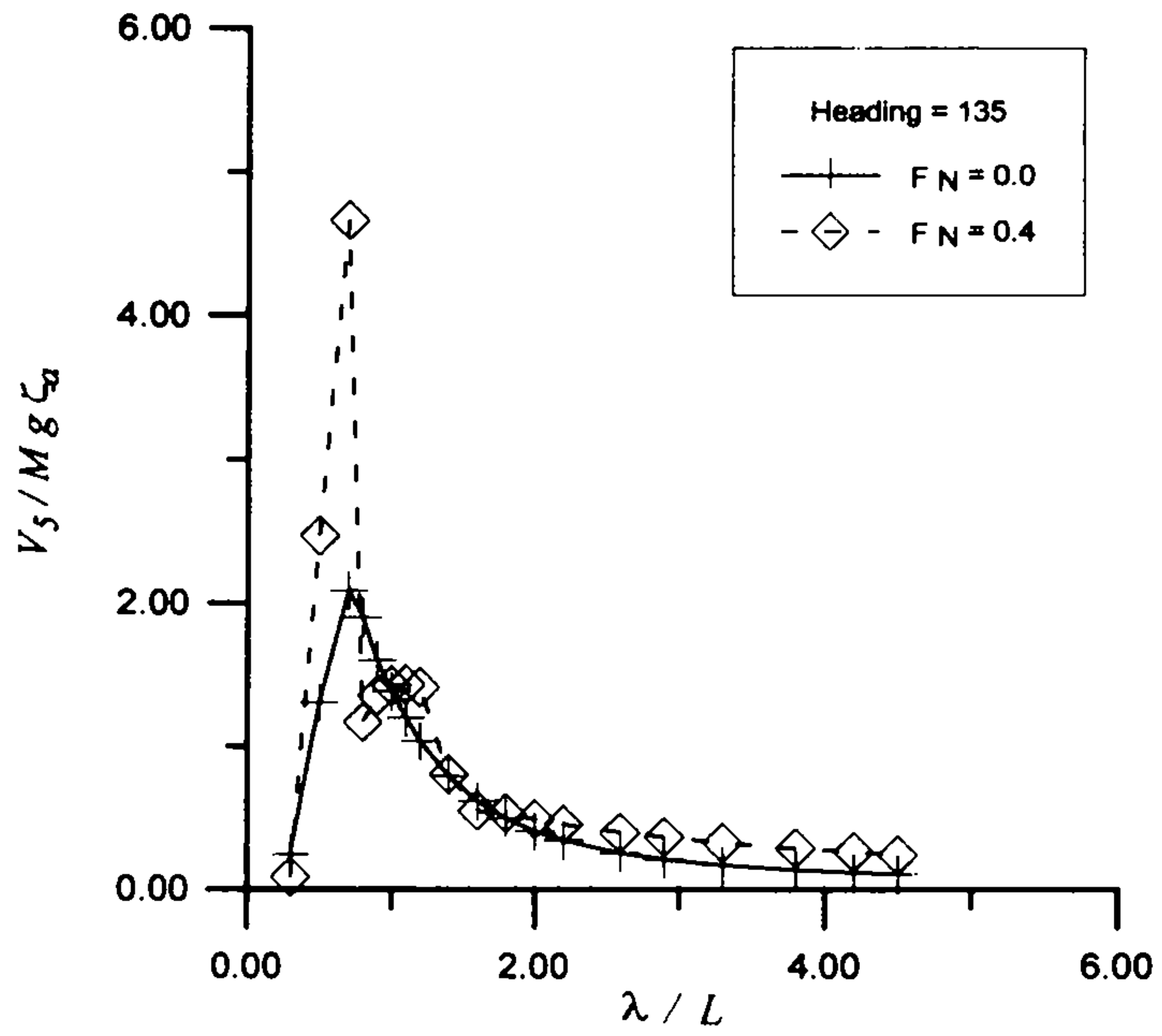


Fig. 5-7 Speed Effect on Pitch Connecting Moment at DK for $\beta=135$

제 6 장 초고속선 Fin의 유입각각의 실험적 추정법

6.1 개 요

시대는 모든 교통수단의 고속화를 요구하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 선박도 초고속화기 진행되고 있다. 초고속선의 기능은 정수중만 아니라 웬만한 파랑상태에서도 고속이 유지될 때만 그 가치를 인정받을 수 있게 된다. 따라서 파랑중 항주시 감속을 피하기 위해서는 파랑으로 인해 야기되는 선체의 운동을 억제할 수 있는 방법이 강구되어야 한다. 이러한 운동의 제어를 위해 사용되는 수단중 종횡비가 작은 날개, 즉, fin이라 불리는 소형의 양력생성의 판이 있다. 이러한 fin은 이미 잠수체에는 오랜기간 활용되어 왔던 바이고 이제는 해상선박중 초고속선에서 활용되기 시작하였다.

잠수체의 fin의 경우는 자유표면의 영향에 대해 특별히 우려해야 할 필요가 없지만 해상선박의 경우는 정수중이면 몰라도 파랑중에서는 선체의 운동에 의해 fin의 몰수깊이가 상당히 변화할 수 있으므로 fin의 양력기능에도 무시못할 영향을 끼칠 수 있는 것이다. 이러한 자유표면의 영향은 반드시 파랑중에서만 일어나는 것이 아니라 정수중에서도 초고속의 항주시 유기되는 trim과 선체의 조파작용때문에 크게 일어날 수 있는 것이다. Fin이란 원래 양력체이기 때문에 유입각각 여하에 따라 그의 양력기능도 결정이 된다. 따라서 초고속으로 인한 무시못할 trim이나 조파는 fin주위에 유동을 충분히 변화시킬 수 있는 것이고 이는 바로 fin에의 흐름의 유입각각을 변화시킴으로써 양력의 크기에 영향을 끼치게 할 수 있는 것이다.

본 장에서는 초고속으로 인한 자유표면의 변형이 여하히 fin의 양력에 영향을 끼치겠는가를 실험에 의해 주사함으로써 앞으로 이 방면의 연구자들을 위한 참고자료를 제공하자는데 목적을 두었다. 과거에 이러한 목적을 염두에 두고 종횡비가 작은 날개에 대해서 자유표면으로부터의 몰수깊이의 영향을 살핀 실험이 Ohmatsu et al.[6-1]에 의해 발표되었었다. 이 연구에서는 SWATH형의

물수체에 fin을 부착시켜서 동체와 fin간의 상호간섭작용의 영향과 자유표면의 영향을 조사하였다. 그러나 이 연구에서는 최소의 fin의 물수깊이가 현장(chord)에 비해 1.1밖에 안되었었다. 본 실험에서는 물수 깊이가 현장에 비해 0.5까지도 고려해 보겠다는 의도였고 또한 앞으로 계산치의 신빙성을 평가할 때 사용될 수 있는 단순한 모형에 대한 실험치를 제공하자는데 목적을 두고 많은 변수를 용이하게 다룰 수 있는 회류수조에서 실험을 수행하였다.

6.2. 실험장치

Fin을 부착시킬 동체는 Fig. 6-1에 표시된 바와 같이 전후부를 장축 대 단축비가 2대 1이 되는 타원의 반부로 fairing을 하고 중간부는 평행중부형(parallel middle body)으로 된 단면을 갖는 지주(strut)로 하였다. 지주의 길이는 130cm, 최고두께는 5cm, 그리고 현장은 50cm로 하였다. 지주의 재료는 알루미늄이다.

Fin은 NACA 0015의 익단면을 갖고 구형의 평면형상을 갖는 종횡비 1.2의 날개를 택하였다. 단면형상과 촌법은 Fig. 6-2에 표시되었다. Fin의 현장은 10cm, 날개길이는 12cm이다. Fin의 재료도 알루미늄이다. Fin과 연결축들의 모양이 Fig. 6-3에 사진으로 전시되었다.

Fin은 지주의 폭중간에 길이방향으로 20mm의 홈을 따라 상하위치를 고정시킬 수 있도록 되어 있고 fin의 양각도 원하는 위치에 고정시킬 수 있도록 되어 있으며 지주 양측에 부착된 fin을 연결하는 축과 직각으로 교차하는 수직축 상단에 load cell을 부착하여 fin에 작용하는 양력을 측정하도록 하였다. 지주와 fin이 부착된 모양을 Fig. 6-4에 사진으로 제시하였다. Load cell은 1축방향의 힘을 20Kgf까지 측정할 수 있는 것으로 공용기업의 제품이다.

본 실험에서 사용된 회류수조는 시험부의 크기가 폭 1m, 깊이 1m 그리고 길이가 4.53m이고 최고유속이 2.2m/s이다. 실험장치가 수조안에 고정되었을

때 blockage의 값은 5%정도이므로 blockage에 의한 유속의 교정은 필요없다고 판단되었다.

6.3. 시험방법

본 실험에서의 변수는 유속(V), fin의 몰수깊이(d) 즉 정수면에서 fin의 mean chordline까지의 깊이, 그리고 fin의 고정양각(α)이다. 실험에서 택한 V, d 및 α 의 치는 다음과 같다.

$$V(\text{m/s}) = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5$$

$$\left(F_r = \frac{V}{\sqrt{gc}} = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5 \right)$$

$$d(\text{cm}) = 5, 8, 10, 13, 16, 20, 25, 30, 40, 50$$

$$d/c = 0.5, 0.8, 1.0, 1.3, 1.6, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0$$

$$\alpha(\text{degree}) = -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20$$

유속의 정확한 값을 알기 위해 지주의 선단전부 1m에 pitot tube를 설치하고 수심 60cm에서 유속을 측정하였다. Fin의 몰수깊이를 조정하기 위해 설치한 상하방향의 홈은 실험시에는 스틸로폼(Styloform)으로 메워 유동을 원활히 하도록 하였다. 금번 실험에서 사용한 load cell은 최저 5g의 힘까지 측정할 수 있는 정확도를 가지고 있어 비교적 미소의 양력까지 측정할 수 있었다.

매회의 실험은 fin의 양각을 고정시킨 다음 주어진 몰수깊이에서 유속을 최저부터 최고까지 변화시키면서 양력을 측정한 다음 몰수깊이를 변경시키고 전 몰수깊이에서 측정이 끝난 다음은 fin의 양각을 변경시켜 측정을 반복하는 순으로 실험을 진행시켰다.

지주가 균일유동장에서 흐름과 평행되게 위치하여 fin의 좌우측의 흐름이

대칭을 이루도록 각별히 주의하였다.

Load cell에서 나오는 전압의 출력은 Fig. 6-5에서 제시한대로 dc 증폭기를 통한 뒤 Data 6100의 정보처리시스템을 거쳐 PC에서 처리된 후 인쇄된 결과를 얻도록 하였다.

실험은 같은 조건하에서의 측정을 가끔 반복함으로써 측정치의 정확도를 확인토록 노력하였다.

6.4. 결과 및 검토

Table 6-1에는 fin의 고정양각(α)이 0일 경우 각 몰수깊이 (d)에 의해 유속을 변화시켰을 때 해당되는 양력을 질량힘 (힘/중력가속도)을 gram으로 나타낸 값을 표시했다. Table 6-2 ~ 8까지는 $\alpha=5^\circ$, 10, 15, 20, -5, -10, -15에 해당되는 질량힘들의 값들이다. 날개형의 양력체는 통상 양력이 양각에 대해서는 1승으로 그리고 유속에 대해서는 2승으로 변한다는게 알려진 사실이다. 그러나 본 실험결과에서 얻은 결과로서는 (Fig. 6-6~13) 이러한 사실이 몰수깊이가 작은 영역에서는 전혀 맞지 않다는 것을 알 수 있다. 몰수깊이가 현장에 비해 4배 이상되는 영역에 가서는 근사적으로 위와 같은 관계에 접근함을 알 수 있다. 이러한 사실은 fin이 부착된 strut가 자유표면에 생성하는 조파작용으로 그 영향이 fin의 양력에 미치고 있음을 증명하고 있는 것이다.

Table. 6-1에서 나온 결과를 살펴보면 fin의 zero-lift angle이 $V \geq 1.2\text{m/s}$ 인 경우는 분명히 0° 보다는 크리라는 것이 짐작되나 이것도 몰수깊이에 따라 그 각도의 크기가 작아지리라는 추측을 할 수 있게 된다. 본 실험에서 제일 작은 몰수깊이대현장비가 $d/c = 0.5$ (실제깊이 50mm)인 경우는 양력의 유속이나 fin의 양각의 변화에 따른 변화는 일정한 추세를 얻기 어려울 정도로 복잡한 결과를 보여주고 있다.

Table 6-1~8에 수록된 값들은 무차원해 도시한 곡선들이 Fig. 6-6에서부터

Fig. 6-29까지 표시되었다. Fig. 6-6의 경우 $d=0$ 일 때 양력계수(C_L) 대 몰수치(=몰수깊이(d)/현장(c))를 각 유속(V)에 따라 표시한 것이다. 여기서 양력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} V^2 A}$$

L = 2개 fin에 작용하는 양력

ρ = 물의 밀도 = 998Kg/m³

V = 유속(m/s)

A = 2개 fin의 평면적 = $2 \times (0.1 \times 0.12) = 0.024\text{m}^2$

따라서 Table 6-1에서 Table 6-8까지에 표시된 값을 m_f 라 하면 $L=m_f g=m_f \times 9.81 \times 10^{-3}$ (N)으로 구할 수 있다.

본 연구에서는 Froude수와 V 의 값이 일치하는데 현장이 0.1m에다 중력가속도 9.81m/s를 곱한 수의 평방근 즉 $\sqrt{0.1 \times 9.81} = 0.99 \approx 1.0$ 기 때문이다.

2400톤급 SWATH선의 fin을 예로 들면 현장이 3.6m이고 최고선속이 35노트인 경우는 이에 상당하는 Froude수는 3.0이고 본 실험에서 택한 최고 Froude수는 1.5이니까 실제선속 약 18노트에 해당되는 경우라 볼 수 있다.

물리적으로 기대할 수 있듯이 몰수깊이 대 현장비 (d/c)가 증가하면서 fin의 양력계수(C_L)는 차츰 무한정 유체중에서의 양력계수에 접근하여야 할 것이다. 이러한 현상은 Fig. 6-6에서 여실히 나타내주고 있다. 이 경우는 fin의 고정양각 (α)이 0인 경우인데 $\bar{d} = d/c = 0.5$ 와 같이 자유표면에 가깝게 fin이 위치했을 때의 C_L 의 유속에 대한 변화는 대단히 크다는 사실을 알 수 있다. 그러나 \bar{d} 의 값이 점차 증가하면서 본 실험에서 택했던 \bar{d} 의 최고치인 5.0에 가깝게 가게 되면 C_L 이 0으로 접근하는 경향을 보이고 있다. 이렇게 fin의 양력계수는 자유표면의 영향을 상당한 몰수깊이에서까지 받고 있다는

사실을 알 수 있다.

α 를 5° , 10° , 15° 그리고 20° 까지 증가시킴에 따라 가장 최저 Fourde수인 0.4의 경우 양력계수의 변화가 두드러진다는 사실과 $\alpha=20^\circ$ 인 경우는 더욱 저속의 유속에서 몰수깊이에 따른 변화가 순조롭지 않다는 사실을 Fig. 6-7~10에서 살필 수 있다. Fig. 6-11~13에는 양각이 부가될 경우 즉 $\alpha=-5^\circ$, -10° 및 -15° 의 경우에 대해 양력계수대 몰수깊이의 결과를 제시하였다. $\alpha=5^\circ$ (Fig. 6-7)의 경우와 비교했을 때 양력계수의 부호가 부의 값으로 대략 상사적인 관계를 보여주고 있다. 몰수깊이가 커짐에 따라 $\alpha=5^\circ$ 인 경우는 $C_L=0.25$ 그리고 $\alpha=-5^\circ$ (Fig. 6-11)인 경우는 $C_L=-0.25$ 에 접근하고 있다는 사실을 알 수 있다. 이러한 α 의 치가 양과부일 때 양력계수의 부호가 대칭이라는 사실은 $\alpha=\pm 10^\circ$ 에서는 잘 성립되지 않고 있음을 그림 8과 12을 비교할 때 곧 알 수 있게 된다. 이러한 경향은 $\alpha=-15^\circ$ (Fig. 6-13)인 경우는 더욱 심해지고 몰수깊이의 증가에 따른 C_L 의 값의 일정치로의 접근은 전혀 기대할 수 없다는 사실을 여실히 보여주고 있다. α 의 치가 양일 때는 $\alpha=15^\circ$ 및 20° 에서는 몰수깊이의 증가에 따른 일정치로의 수렴현상의 경향은 확실한데 부의 양각에서는 그렇지 않음은 흐름의 박리현상이 부의 양각에서는 매우 심한 경향이 있다는 사실을 증명해 주고 있다.

Fig. 6-14~19에는 주어진 유속에서 양력계수 대 몰수깊이를 각 양각을 parameter로 하여 표시하였다. 이 그림들의 종축의 척도는 Fig. 6-6~13에서의 척도보다 작게 택한 이유로 언뜻 살펴기에는 \bar{d} 의 변수에 대한 C_L 변화율이 작게 보이는 인상을 줄 수 있다. 일정한 이 그림들이 시사하는 바는 $F_r \leq 1.0$ 인 때 $\bar{d} > 2$ 인 경우에는 C_L 의 변화가 $\alpha=20^\circ$ 인 경우만 빼놓고 대략 일정치로 접근하는 반면 유속이 $F_r > 1.0$ (그림 18, 19)인 경우 \bar{d} 가 증가함에 따라 C_L 로 상승세를 보이고 있다. C_L 은 물론 양각이 증가할수록 증가하는게 사실임은 Fig. 6-14~19에서도 뚜렷이 살필 수 있다.

좀 더 실용적인 fin의 양력성격은 양력곡선경사치 (lift-curve slope)로 살필 수 있을 것이다. Fig. 6-20~29에 C_L 대 α 의 결과를 각 주어진 몰수치에 대해

유속을 parameter로 하여 제시하였다. 종횡비가 작은 fin에 대해 Whicker 및 Fehlner [6-2]가 일련의 계통적인 실험을 통해 유도한 양력곡선경사치 $C_{L\alpha}$ 는 다음과 같다.

$$C_{L\alpha} = \frac{A_o A_e}{\sqrt{A_e^2 + 4 + A_o/\pi}} \text{ per radian}$$

A_o = 날개의 기본 foil section의 lift-curve slope,

NACA 0015의 경우는 $A_o = 1.8\pi$

A_e = 유효종횡비 = $2 \times \text{Fin}$ 자체의 종횡비 = 2.4

따라서 본 실험에서 사용한 fin의 경우

$$C_{L\alpha} = \frac{1.8\pi(2.4)}{\sqrt{2.4^2 + 4 + 1.8}} = 2.76$$

Fig. 6-20에서는 각 유속에 대한 C_L 의 값은 $\bar{d}=0.5$ 인 경우 α 의 증가에 따라 대개 선형적인 증가의 경향을 보인다. 그러나 C_L 의 절대치는 저속의 경우가 크고 고속의 경우는 작아짐을 볼 수 있다. 이러한 유속의 차이로 인한 C_L 치의 차이는 점차 d/c 가 증가됨에 따라 감소하고 있음을 Fig. 6-21~29에서 살펴볼 수 있다. Fig. 6-29의 경우 가장 물수깊이가 큰 때인데 유속에 의한 C_L 의 차이가 많이 감소되었음을 볼 수 있다.

Fig. 6-20~29에서 $\alpha = \pm 10^\circ$ 사이를 직선으로 best fit에서 얻은 $C_{L\alpha}$ 의 값을 Table 6-9에 표시하였다. 이 표에서 보다시피 $C_{L\alpha}$ 의 값은 대개 2.0에서 3.0사이에 있음을 알 수 있다. 재미있는 결과는 제일 고속인 경우 ($F_r = 1.5$)에 $C_{L\alpha}$ 가 비교적 감소한다는 사실과 d/c 가 1.3 및 1.6일 때가 $F_r > 0.8$ 인 경우 $C_{L\alpha}$ 의 값이 비교적 증가한다는 것이다. Table 6-9에서 얻은 값들을 각 d/c 에 대하여 산술평균치를 구해보면 다음과 같다.

$\bar{d}=d/c$	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
$\overline{C_{L\alpha}}$	2.30	2.65	2.74	2.87	2.81	2.67	2.66	2.75	2.73	2.62

$C_{L\alpha}$ 전체평균치 = 2.68

위의 결과를 분석해보면 $C_{L\alpha}$ 의 값은 \bar{d} 가 작은 차에서 제일 작다가 몰수깊이가 증가하면서 차츰 증가하다가 $\bar{d} = 1.3$ 에서 제일 높은치를 보유하다가 그 후에는 조금씩 오르락내리락하는 경향을 보인다.

Fig. 6-31에는 Fin의 양력을 $\alpha=0$ 으로 고정하고 유속이 최고인 $F_r=1.5$ 인 때 몰수깊이가 $\bar{d}=0.5$ 인 때와 3.0인 때의 자유표면의 변형을 보여주는 사진이 제시되었다. Fin의 존재로 인한 자유표면의 형상의 변화가 있음을 보여주나 다른 경우에 대한 사진들에서 살핀 결과는 fin의 영향이 기대했던만큼 크지 않다는 것을 알았다. 이 그림에서 자유표면의 위치를 확실히 보이기 위해 흑선으로 자유표면을 나타내었다. Fig. 6-32에는 최고양각인 $\alpha=20^\circ$ 를 주었을 때 $\bar{d}=0.5$ 와 3.0인 경우 속도의 변화($F_r=0.4, 1.0, 1.5$)에 따라 자유표면의 형상을 보여주는 사진들을 제시했다. 그림 왼쪽의 $F_r=1.0$ 인 경우 사진에서는 자유표면의 fin의 영향으로 상당한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. Fig. 6-32(b)에서 볼 수 있듯이 지주로 인한 자유표면의 변형이 fin의 자유표면에 가깝게 위치했을 때 상대적인 유입양각을 상당히 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 6-32(c)에서만 보고 판단할 시는 유입양각이 거의 0이 될만큼 영향을 미치고 있음도 엿보인다. 이러한 가시적인 현상이 C_L 의 값에도 나타나고 있음을 Fig. 6-10에서 $V=1.0\text{m/s}$ 및 $d/c = 0.5$ 의 경우에는 확인할 수도 있다고 본다.

Fig. 6-33에서는 fin이 제일 자유표면에 가깝게 위치했을 때 $\alpha=0$ 인 상태에서 유속이 변할 때 자유표면의 수파형성의 양상을 보여주고 있다. 이러한 수면위에서 촬영한 사진에서 살필 수 있는 수파의 형상은 fin의 몰수치에 관계

없이 지주자신이 생성하는 조파가 지배적이라는 것을 알 수 있었다. 이러한 조파양상에서도 좌우대칭의 형상을 보여준 지주가 유입되는 흐름과 평형하게 놓여 있음을 보여주고 있다 하겠다.

6.5 결 언

본 연구는 초고속선의 운동제어 fin의 양력계수 추정을 보다 정확히 예측할 수 있는 방법의 개발에 기여하고자 하는 목적으로 수행되었다.

Fin이란 종횡비가 작은 날개로 양력을 생성하는 수단으로 쓰이고 있다. 초고속선에는 정수중 항주시 trim과 sinkage를 조정하는데 사용될 뿐 아니라 파랑중 항주시 선체의 운동을 억제하는 외력으로 이용해 내항성을 증가시키는데 사용되고 있다. 내항성의 증가란 곧 웬만한 파랑상태에서도 평균속력의 감소 없이 항주할 수 있음을 의미한다. 따라서 양력을 이용한 운동제어를 위한 외력의 공급원으로 사용되는 fin은 양력생성을 위해 가장 효과적인 기능을 발휘하도록 설계되어야 할 것이다. 특히 fin은 선체외부에 부착되어야 하므로 자연히 부가적인 선체의 유체저항을 증가시키는 부작용도 있는 만큼 fin의 형상, 크기 및 부착될 위치에 대해서는 유체역학적으로 각별한 주의가 필요하다고 하겠다.

본 연구에서는 fin의 양력계수 추정시 흔히 자유표면의 영향은 무시된다는 점에 주안점을 두고 이를 보다 체계적으로 규명해 보자는데 관심을 두었다. 이는 특히 선체가 파랑중에서 운동시 선체에 부착된 fin이 선체의 운동으로 상당히 자유표면에 근접할 수 있다는 점과 이러할 때 fin의 양력계수에는 어느정도의 변화가 있을 수 있겠는가를 알고 싶은 바이었다. 원래 fin의 몰수깊이에 의한 양력계수의 변화가 관심사라면 그 원인이 파랑과 선체운동인만큼 fin의 양력계수 추정은 수파중 선체운동과 함께 운동하는 상태에서의 fin의 양력을 측정하는게 직접적인 방법일 것이다. 그러나 이러한 실험은 너무 경비

가 많이 소요되는데 비해 얻을 수 있는 결과는 활용하는데 있어서의 일반성의 결여로 본 연구에서는 시도되지 않았다. 본 연구에서는 주어진 연구비와 시설을 감안할 때 가장 효과적인 방법이 회류수조를 이용하여 수직벽에 부착된 fin이 유속, 몰수깊이 그리고 fin의 기하적인 양각의 변수에 따른 양력계수의 변화를 살피는 실험을 수행하기로 하였던 것이다.

본 연구에서 사용된 회류수조는 시험부의 크기가 길이 4.53m, 깊이 1m, 폭이 1m 그리고 최고유속은 2.2m/s인데 안정된 균일한 흐름을 얻기 위해서는 1.5m/s이 적절한 속도이기에 이를 최고유속으로 택하였다. 수직벽으로 된 strut의 형상은 단면의 크기가 현장은 50cm, 최고두께는 5cm, 그리고 형상은 구형의 선단부와 후단부 10cm는 타원(장축 대 단축비는 10cm 대 5cm)형으로 흐름의 박리를 줄이도록 배려하였다. Strut의 깊이는 잠수되는 부분이 1m이고 전체길이는 1.3m이었다. Strut의 중간부에 부착된 fin의 단면은 NACA0015의 foil을 택했고 fin의 평면은 구형으로 현장 10cm, 길이 12cm로 종횡비가 1.2이었다. 이러한 fin2개를 strut의 좌우측에 부착하였다. 몰수깊이는 strut 중간부에 수직으로 2cm 폭의 홈을 내어 양 fin을 연결하는 평행축과 여기에 연결된 수직축이 상하로 이동할 수 있도록 함으로써 원하는 깊이에 고정할 수 있도록 하였다. 양력은 수직축상단에 고착시킨 load cell에 의해 측정되었다. Fin의 양각은 원하는 위치에 고정시킬 수 있게 하였다. 회류수조의 유속은 strut 전부 1m 그리고 수면하 60cm점에서 pitot tube로 측정하였다.

실험에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Fin의 양력은 몰수깊이대현장비 (\bar{d})가 3.0 이하인 경우에는 상당한 자유 표면의 영향을 받을 수 있다. 자유표면의 영향을 완전히 무시할 수 있는 몰수영역은 $\bar{d} \geq 5.0$ 이라 판단된다.
- 2) 양력계수 (C_L) 는 fin 의 고정양각이 $\pm 10^\circ$ 구간에서는 비교적 양각에 대해 선형으로 변화하고 있다. 이러한 사실은 얇은 두께를 갖는 foil단면의 fin에

도 통용되리라 판단된다.

- 3) Fin의 양력곡선경사치 (lift-curve slope)는 유속이 높은 영역에서는 몰수깊이가 $\bar{d} \leq 1.5$ 인 경우 \bar{d} 의 값이 작을수록 이 값은 작아진다. 본 실험에서는 최고유속인 $F_r = 1.5$ 인 경우 $\bar{d} = 0.5$ 인 경우와 $\bar{d} = 5.0$ 인 경우의 $C_{L\alpha}$ 의 비는 1.3 즉 $\bar{d} = 0.5$ 인 경우가 $\bar{d} = 5.0$ 인 경우에 비해 30%의 감소를 보였다.
- 4) 자유표면의 변형은 strut의 조파현상이 지배적인 역할을 하고 있으나 fin의 몰수깊이가 작을 경우는 fin의 영향도 fin의 양각이 클수록 커진다는 사실을 알았다.

앞으로 본 연구와 연관하여 수행되기를 원하는 연구는 다음과 같다.

- 1) 본 연구결과를 토대로 선체에 부착된 fin의 양력을 구할 수 있는 전산프로그램의 개발
- 2) 본 실험에 사용했던 것과 같은 strut-fin의 모형을 수파중에서 예인하면서 fin에 작용하는 비정상 양력계수의 측정
- 3) 2)항과 같은 조건하에서의 비정상양력계수의 계산기법을 개발하고 실험치와의 비교

Table 6-1 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=0^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	-6	-66	83	-179	-710	-1207
80	-12	-51	59	-124	-654	-1155
100	-4	-17	60	-78	-525	-965
130	-1	0	55	-35	-384	-779
150	-3	1	29	-31	-315	-678
200	1	6	25	-10	-203	-490
250	4	10	23	-7	-152	-403
300	6	13	20	8	-79	-255
400	-3	-7	-8	-23	-63	-200
500	6	16	24	27	3	-59

Table 6-2 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=5^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	54	28	245	33	-398	-677
80	46	89	271	154	-190	-457
100	52	111	281	220	-67	-273
130	49	110	257	263	36	-127
150	53	108	230	253	82	-49
200	46	97	189	238	129	28
250	60	119	209	279	234	184
300	47	102	181	262	261	256
400	55	120	224	352	429	520
500	58	130	221	334	425	573

Table 6-3 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=10^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	130	214	507	383	46	39
80	123	279	627	663	387	336
100	124	283	618	707	479	454
130	120	282	576	788	616	644
150	119	276	554	803	772	790
200	113	265	517	787	849	958
250	108	256	478	745	840	1009
300	112	255	478	772	957	1204
400	115	260	477	766	1046	1455
500	104	243	483	779	1089	1595

Table 6-4 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=15^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	168	274	591	515	303	381
80	147	342	721	830	634	698
100	164	354	703	945	803	912
130	118	321	676	970	950	1133
150	137	331	648	990	1063	1301
200	140	330	607	970	1133	1482
250	134	325	590	907	1152	1563
300	141	326	594	943	1225	1672
400	148	332	605	969	1314	1785
500	132	358	658	1018	1429	2122

Table 6-5 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=20^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	211	355	690	766	648	959
80	176	420	765	1128	1056	1403
100	176	404	750	1289	1260	1622
130	164	383	730	1292	1425	1809
150	167	379	682	1291	1526	2012
200	157	357	652	1191	1550	2087
250	154	350	642	1078	1608	2244
300	168	363	657	1123	1648	2367
400	127	301	623	1026	1443	2529
500	177	385	662	1002	1433	2446

Table 6-6 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=-5^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	-49	-153	-39	-387	-1020	-1738
80	-49	-136	-57	-404	-1010	-1726
100	-49	-134	-89	-395	-989	-1688
130	-49	-121	-123	-388	-923	-1559
150	-39	-105	-135	-343	-812	-1424
200	-39	-98	-150	-304	-662	-1180
250	-33	-88	-148	-271	-558	-1048
300	-46	-110	-190	-321	-577	-1061
400	-44	-111	-193	-308	-494	-892
500	-36	-99	-171	-261	-398	-709

Table 6-7 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=-10^\circ$

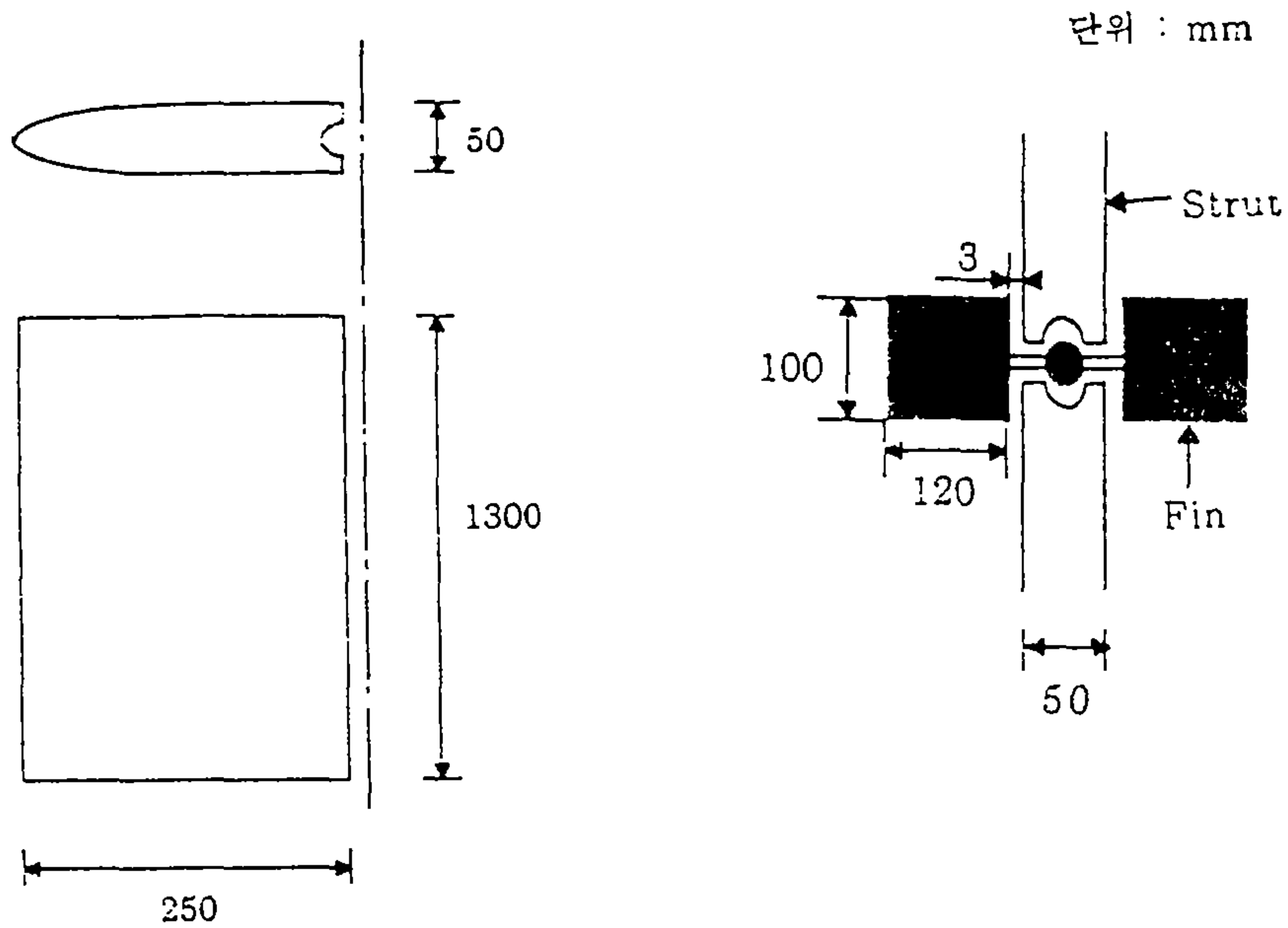
d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	-91	-286	-239	-652	-1329	-2295
80	-94	-239	-265	-699	-1412	-2324
100	-89	-226	-314	-734	-1398	-2291
130	-83	-220	-366	-749	-1380	-2225
150	-88	-228	-396	-761	-1335	-2156
200	-71	-199	-389	-726	-1224	-2021
250	-86	-220	-404	-716	-1159	-1946
300	-84	-228	-418	-717	-1157	-1908
400	-81	-207	-385	-633	-990	-1670
500	-77	-197	-368	-605	-903	-1495

Table 6-8 Lift Force (gram force) versus Various Submergences and Speeds at $\alpha=-15^\circ$

d (mm)	v (m/s)					
	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.5
50	-118	-326	-534	-808	-1437	-2474
80	-157	-333	-551	-841	-1554	-2571
100	-119	-284	-468	-859	-1586	-2531
130	-124	-297	-506	-920	-1568	-2514
150	-115	-257	-507	-886	-1477	-2437
200	-114	-281	-527	-905	-1486	-2417
250	-123	-294	-557	-973	-1511	-2549
300	-112	-315	-578	-957	-1480	-2487
400	-116	-291	-532	-901	-1443	-2581
500	-108	-267	-535	-901	-1366	-2351

Table 6-9 Lift-Curve Slope ($C_{L\alpha}$) for Various Depth of Submergence (d/c) and Speeds (V)

V (m/s)	d / c									
	0.5	0.8	1.0	1.3	1.6	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
0.4	2.789	2.708	2.699	2.580	2.589	2.317	2.462	2.482	2.514	2.333
0.6	2.688	2.869	2.873	2.807	2.779	2.556	2.635	2.680	2.649	2.523
0.8	2.273	2.702	2.860	2.896	2.899	2.754	2.714	2.769	2.740	2.680
1.0	2.040	2.687	2.863	3.049	3.050	2.922	2.842	2.916	2.830	2.754
1.2	1.918	2.512	2.658	2.815	2.905	2.807	2.724	2.880	2.841	2.734
1.5	2.085	2.398	2.513	2.609	2.646	2.609	2.598	2.743	2.790	2.717



a. Strut Cross Section of Side View b. Fin Attachment to Strut, Top View

Fig. 6-1 Sketch of Strut Configuration

x	y
(per cent c)	(per cent c)
0	0
0.25
1	2.367
9	3.268
25	4.443
64	5.25
100	5.853
225	6.682
400	7.172
625	7.427
900	7.502
1600	7.254
2500	6.617
3600	5.704
4900	4.58
6400	3.279
8100	1.81
9025	1.008
10000	0.158
L. E. radius: 2.48 per cent c	

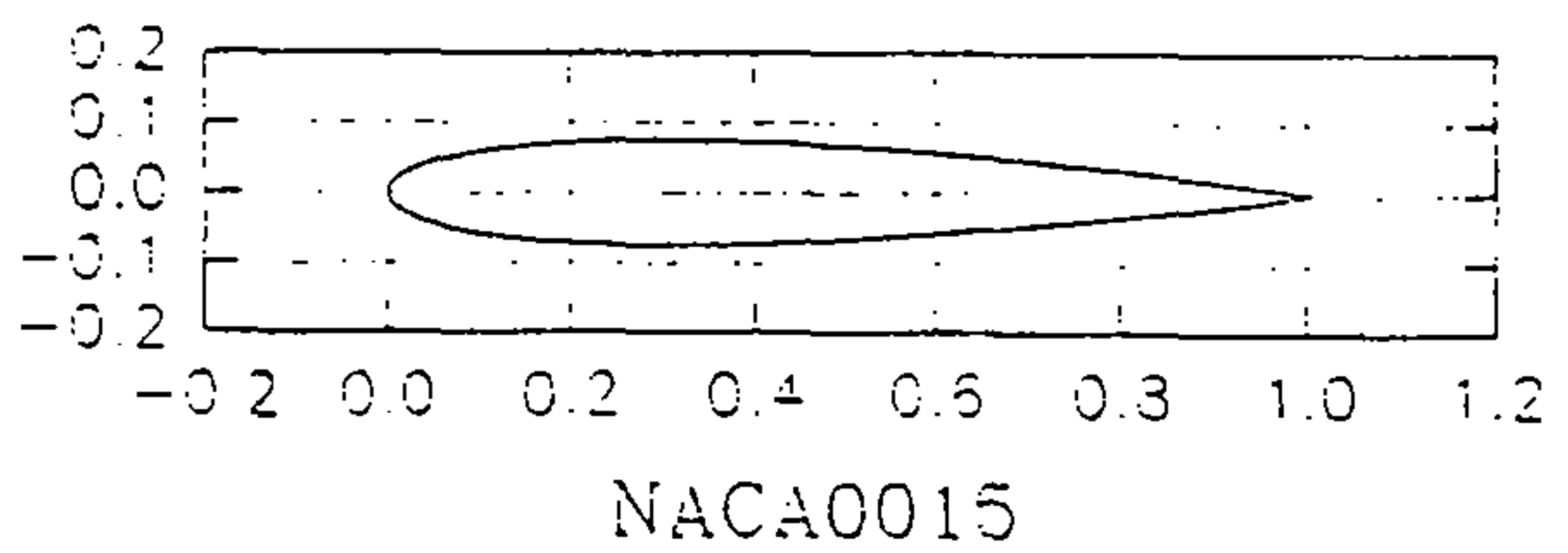
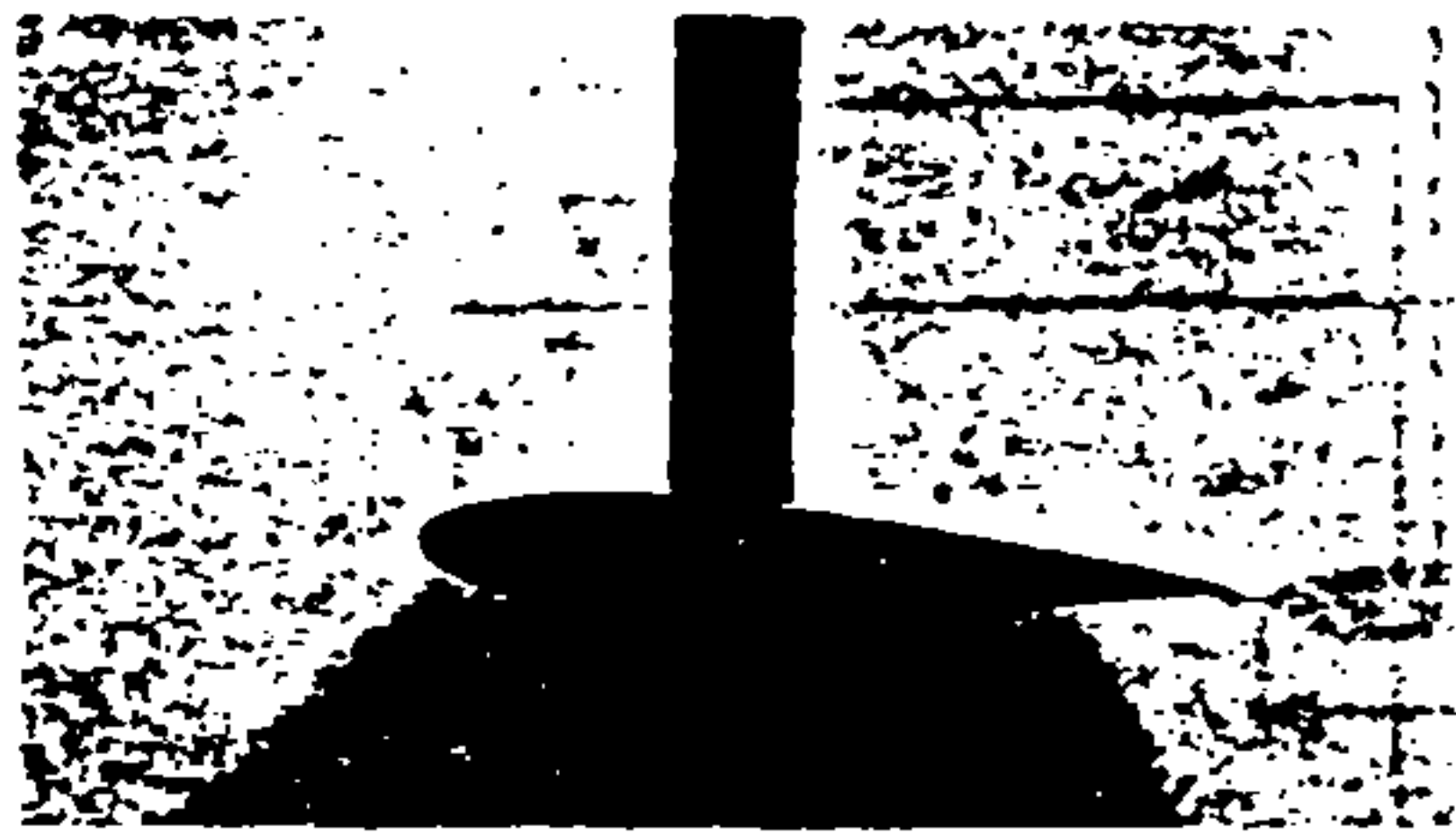


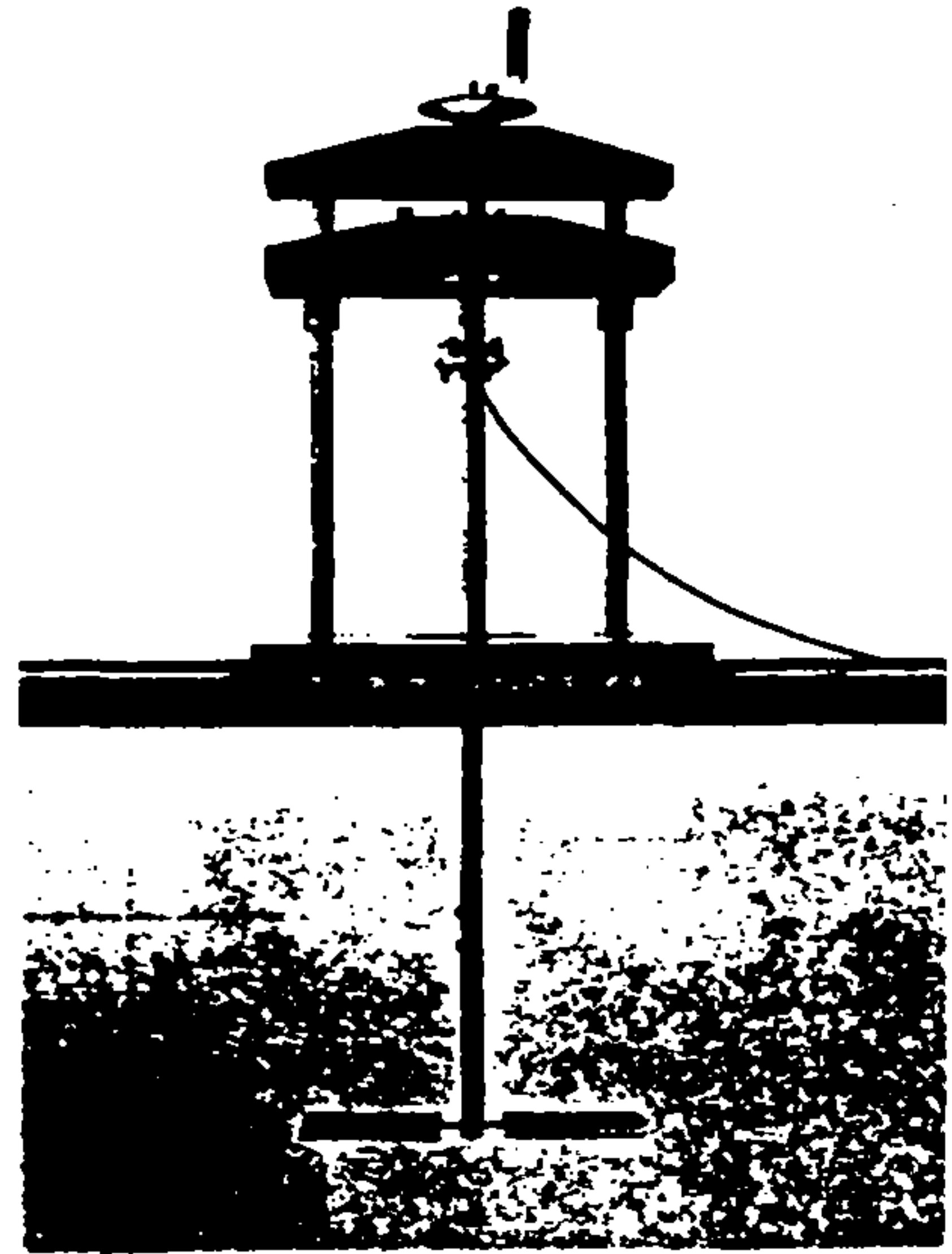
Fig. 6-2 Thickness Distribution along The Chord of NACA 0015 Foil



a. Fin and Connecting Rods

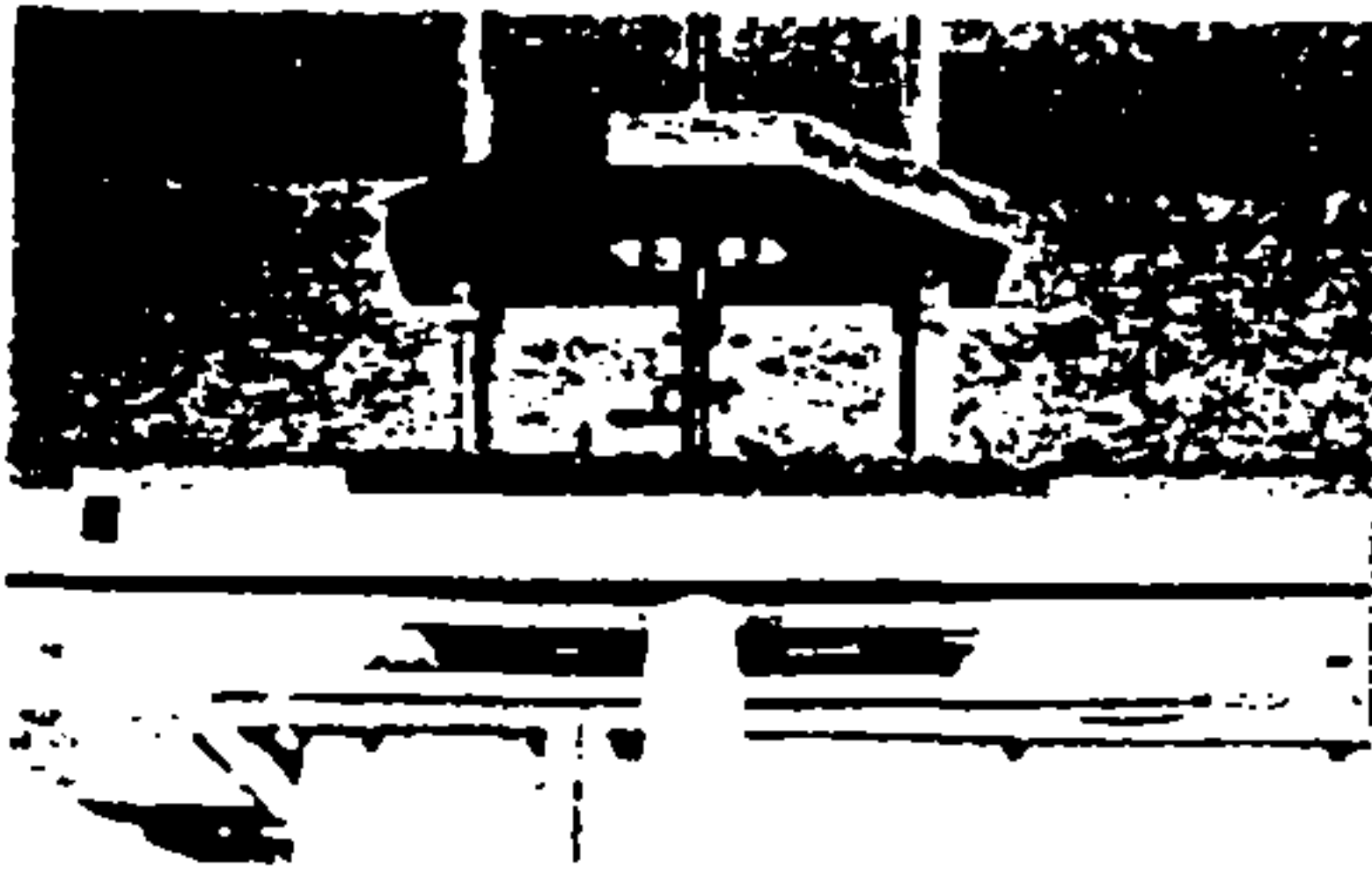


b. Fin Cross Section View



c. Fin and Loadcell Attachment

Fig. 6-3 Fin, Rods and Loadcell attachment



a. Rear View of Strut in CWC



b. Side View of Strut in CWC

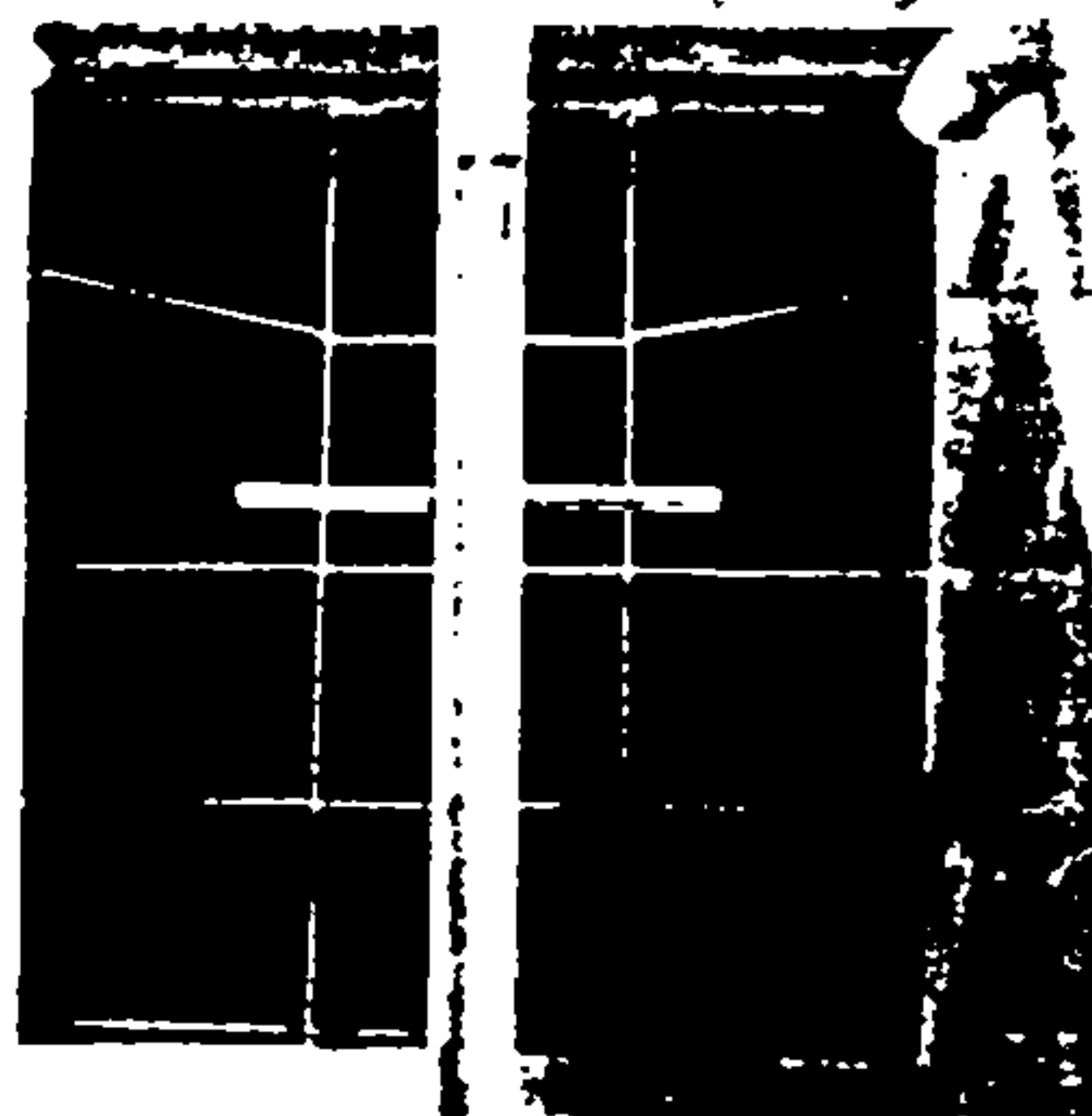


Fig. 6-4 Strut and Fin installed in Circulating Water Channel(CWC)

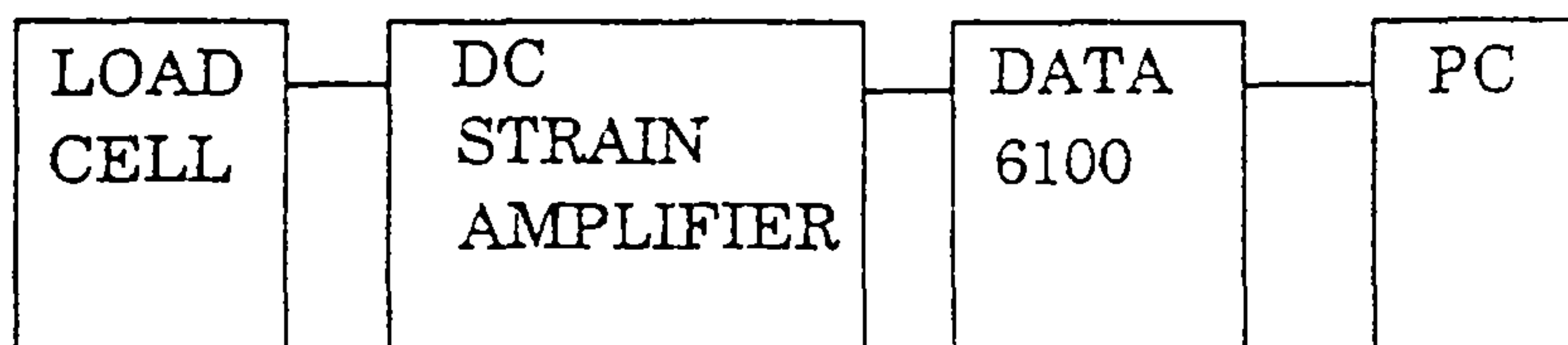
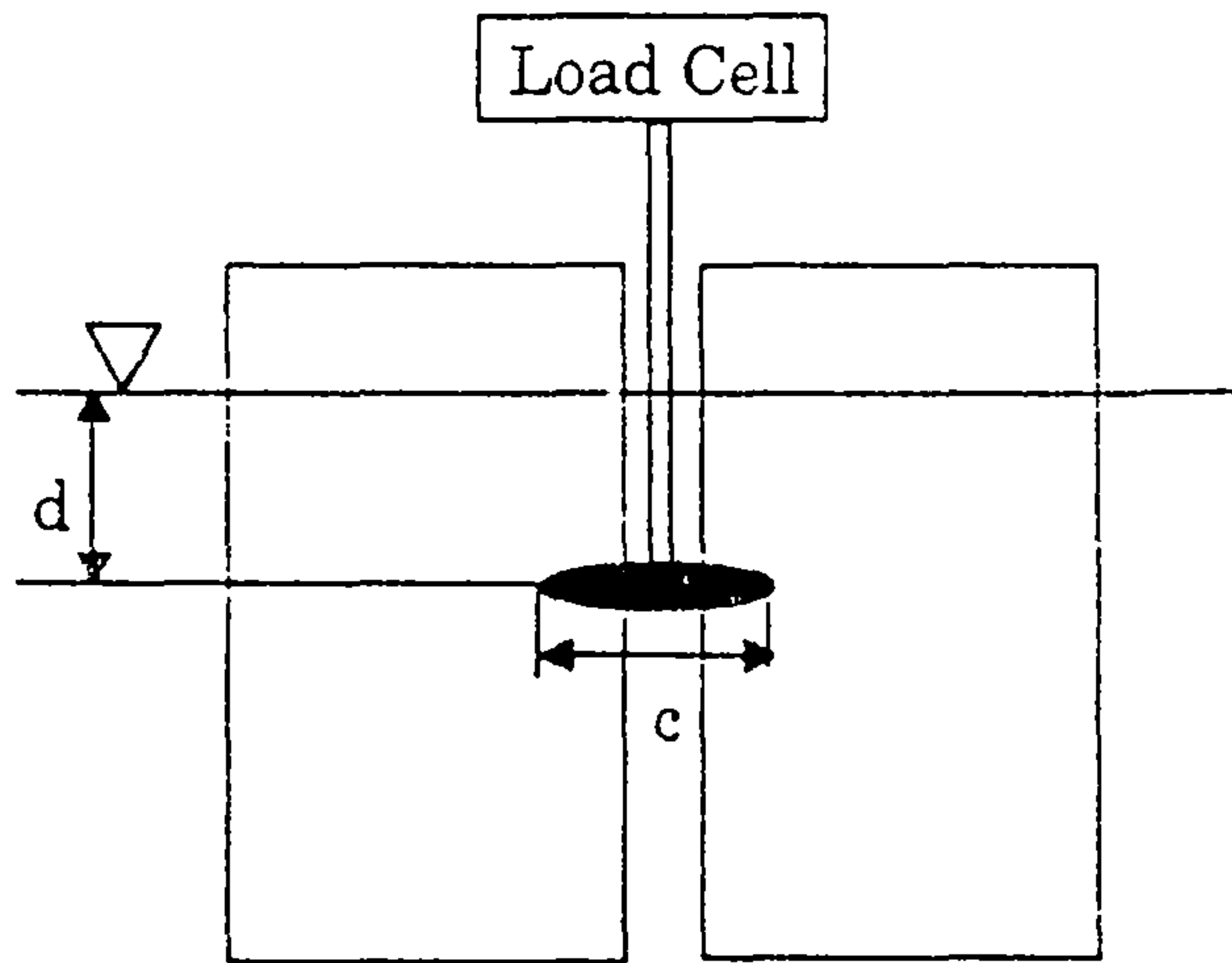


Fig. 6-5 Data Processing Scheme

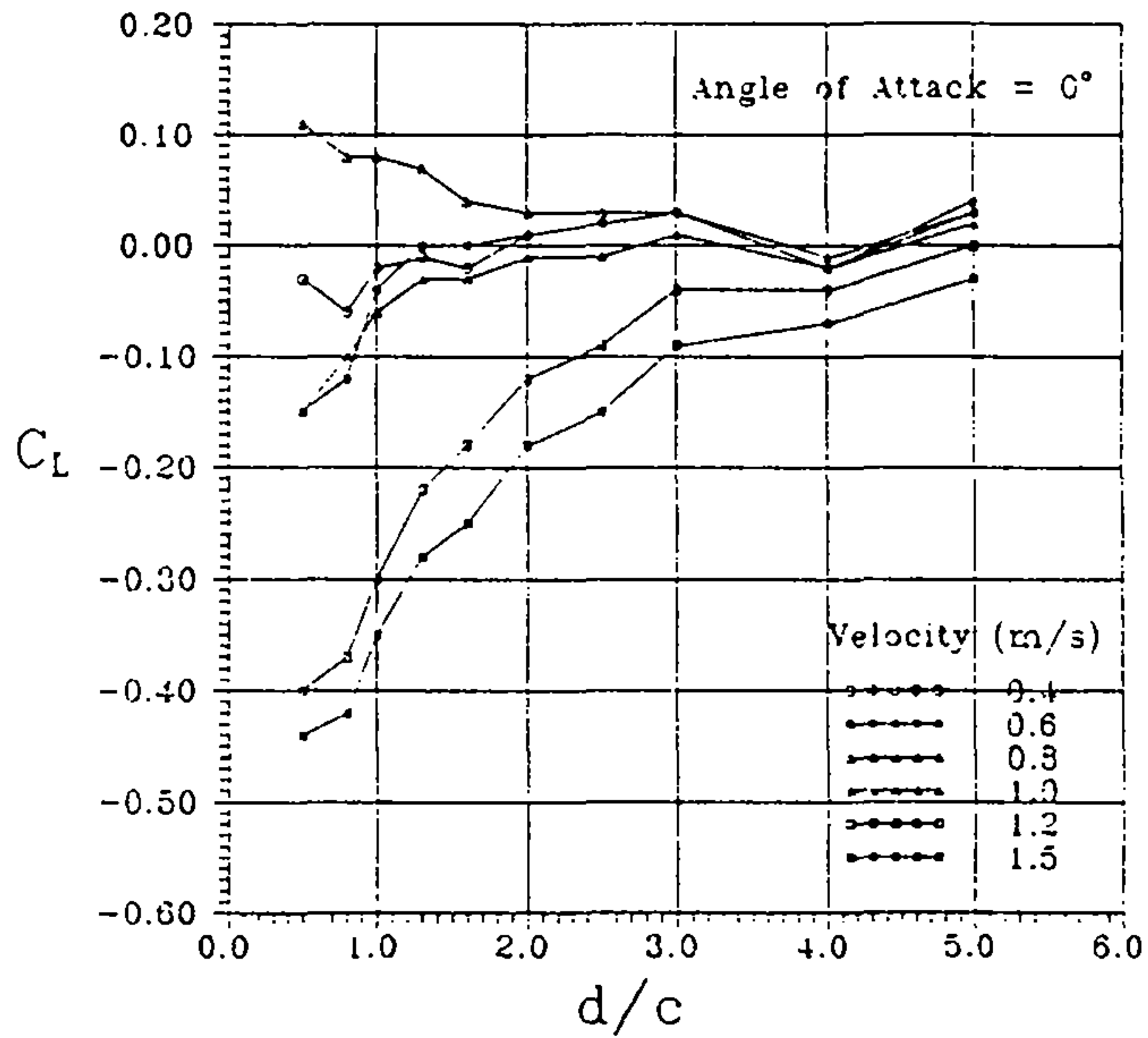


Fig. 6-6 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 0^\circ$

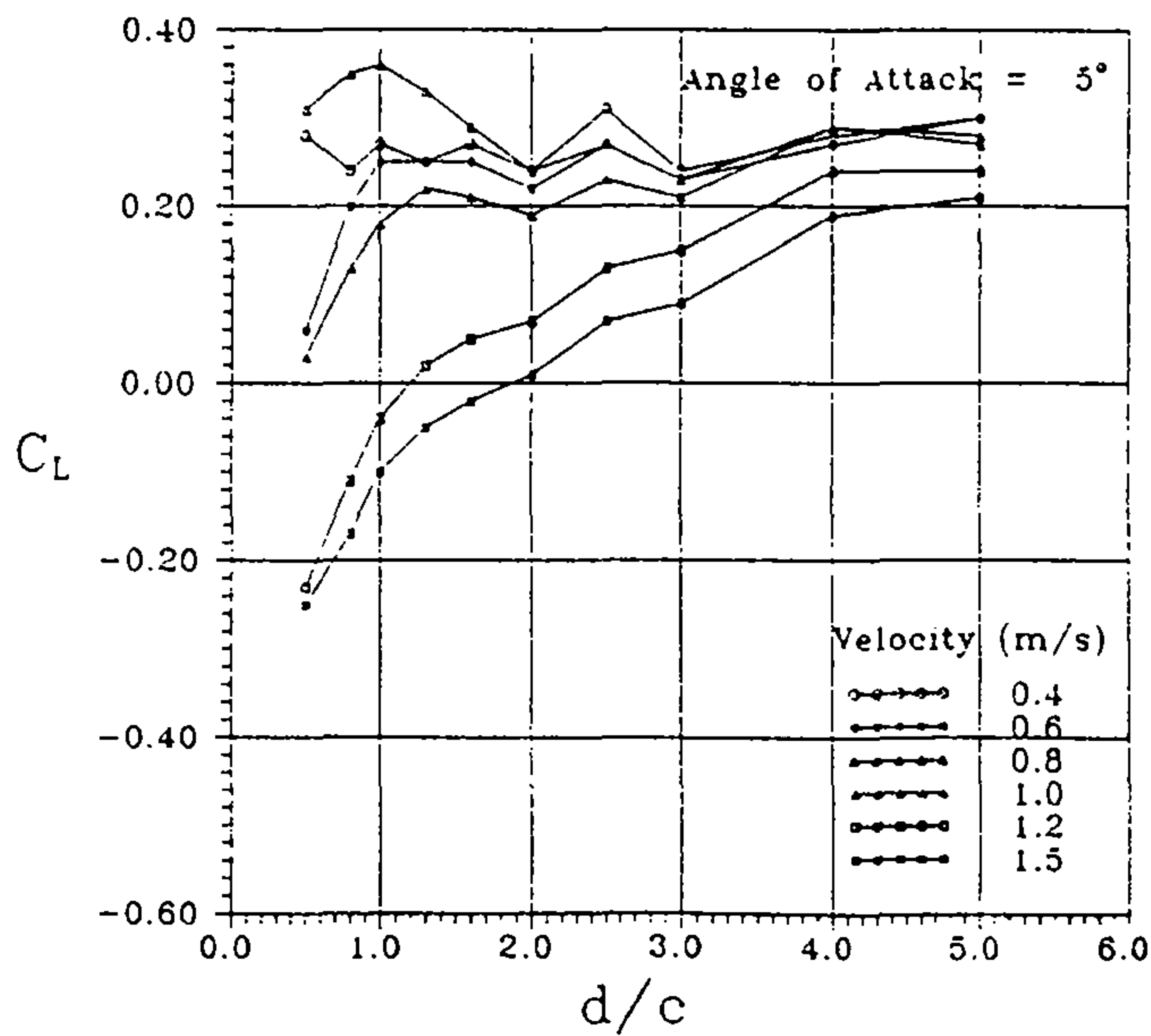


Fig. 6-7 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 5^\circ$

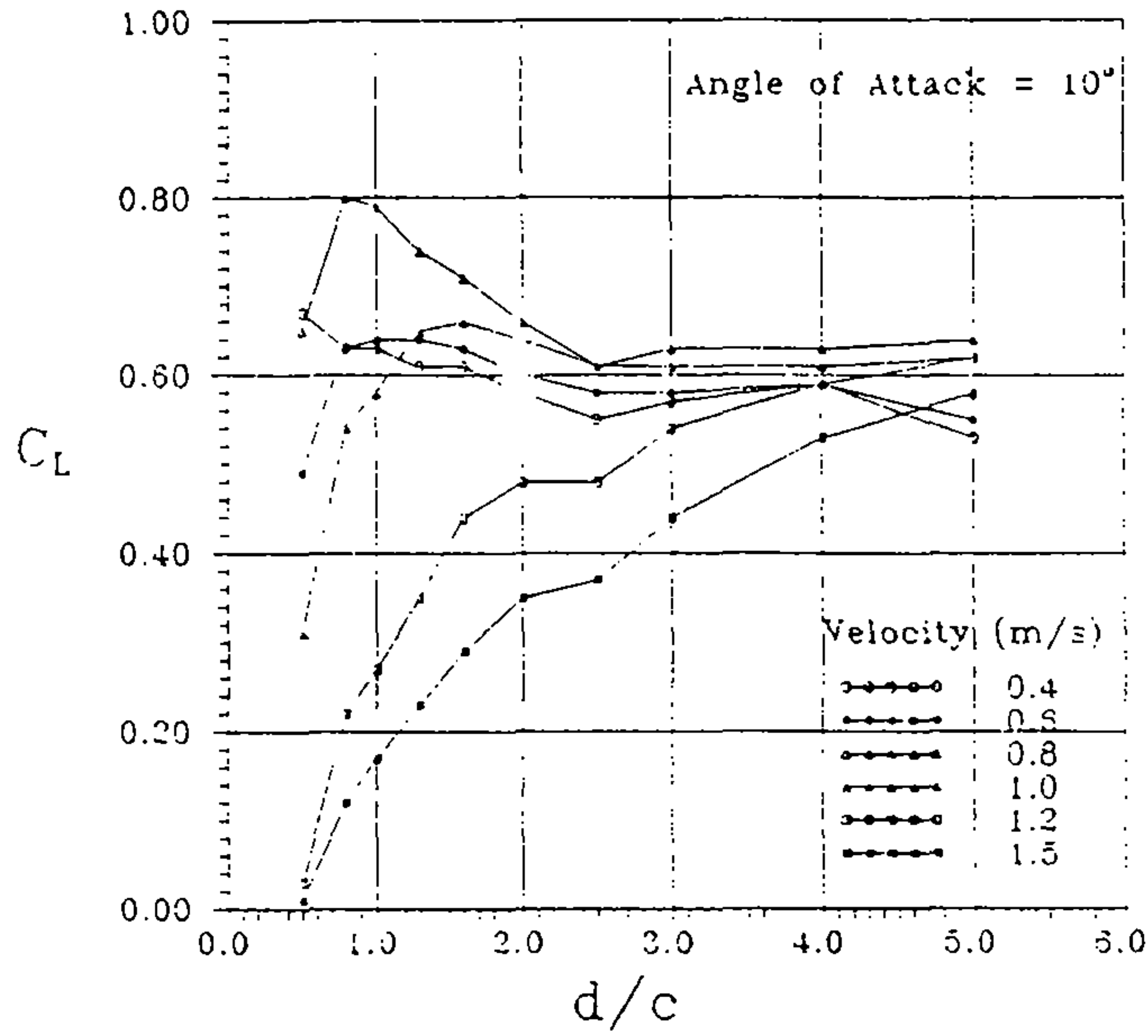


Fig. 6-8 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 10^\circ$

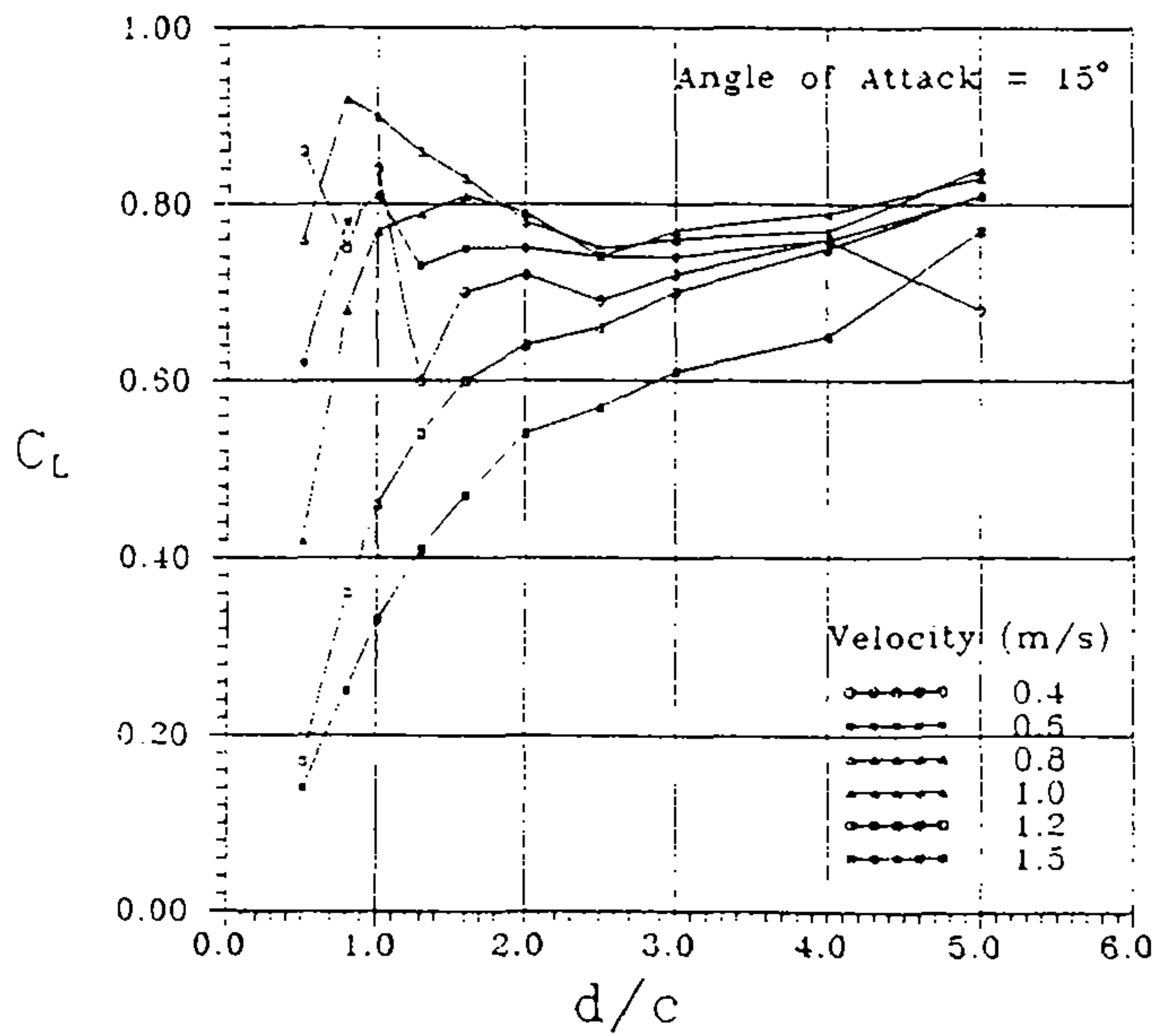


Fig. 6-9 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 15^\circ$

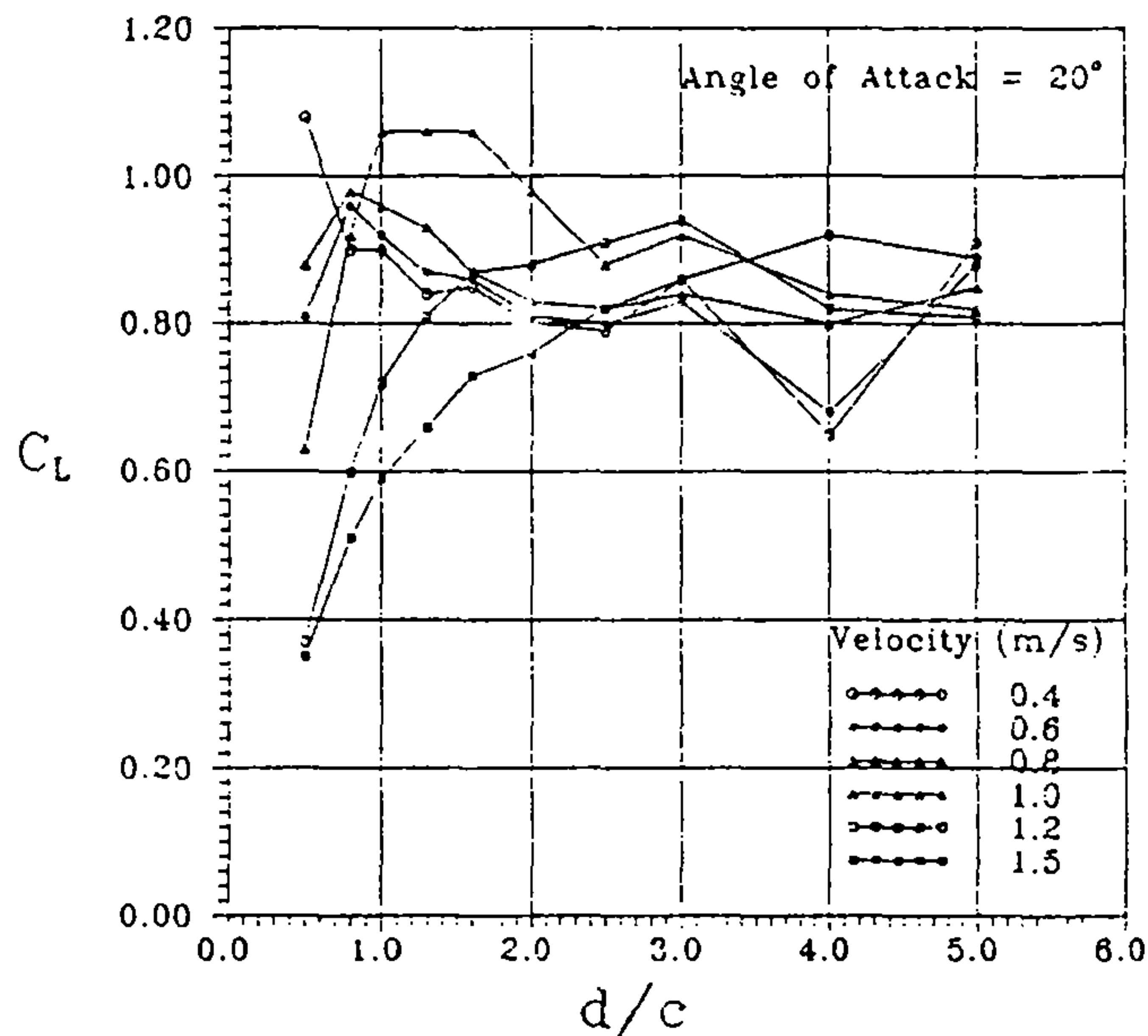


Fig.6-10 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = 20^\circ$

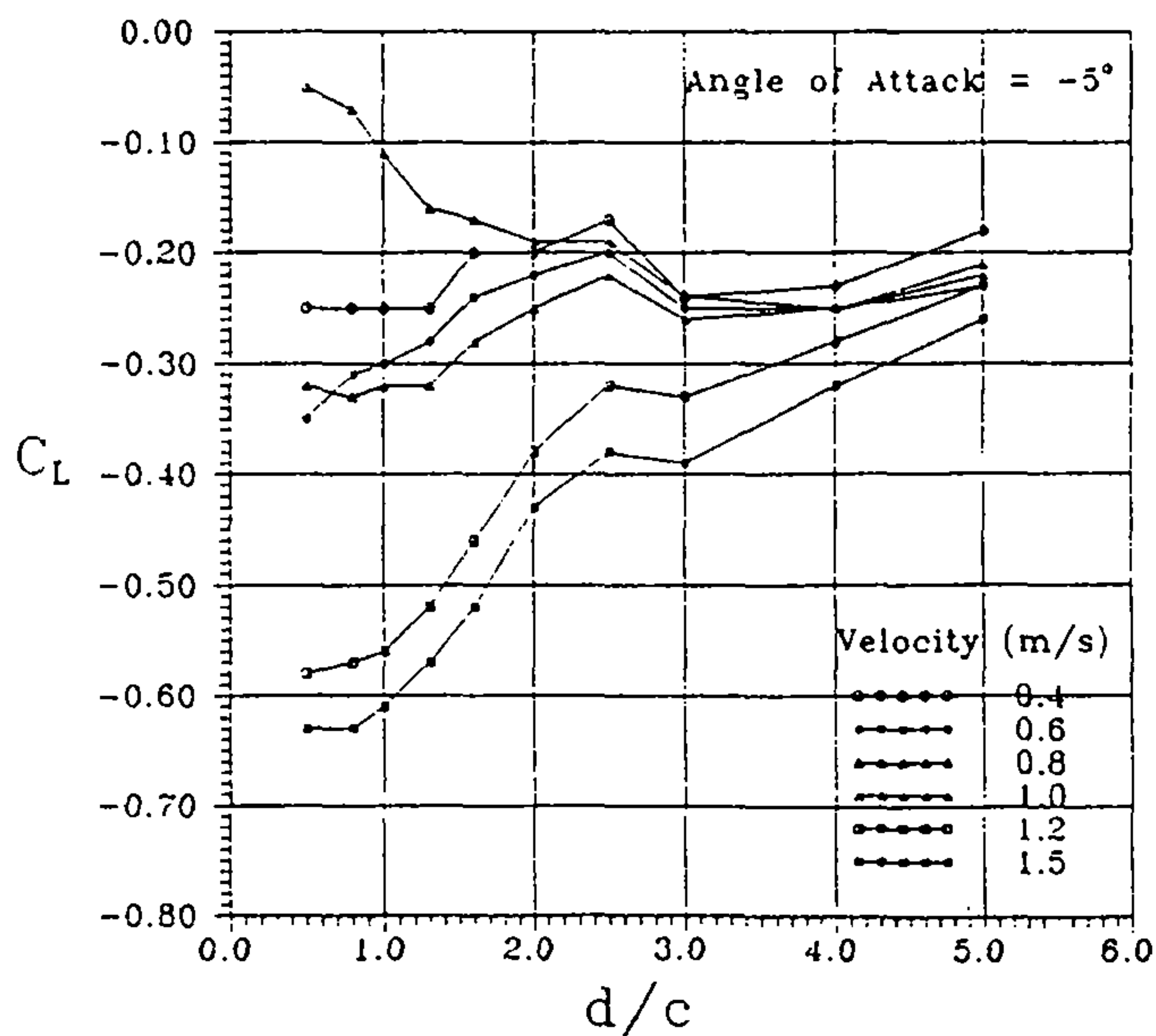


Fig.6-11 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = -5^\circ$

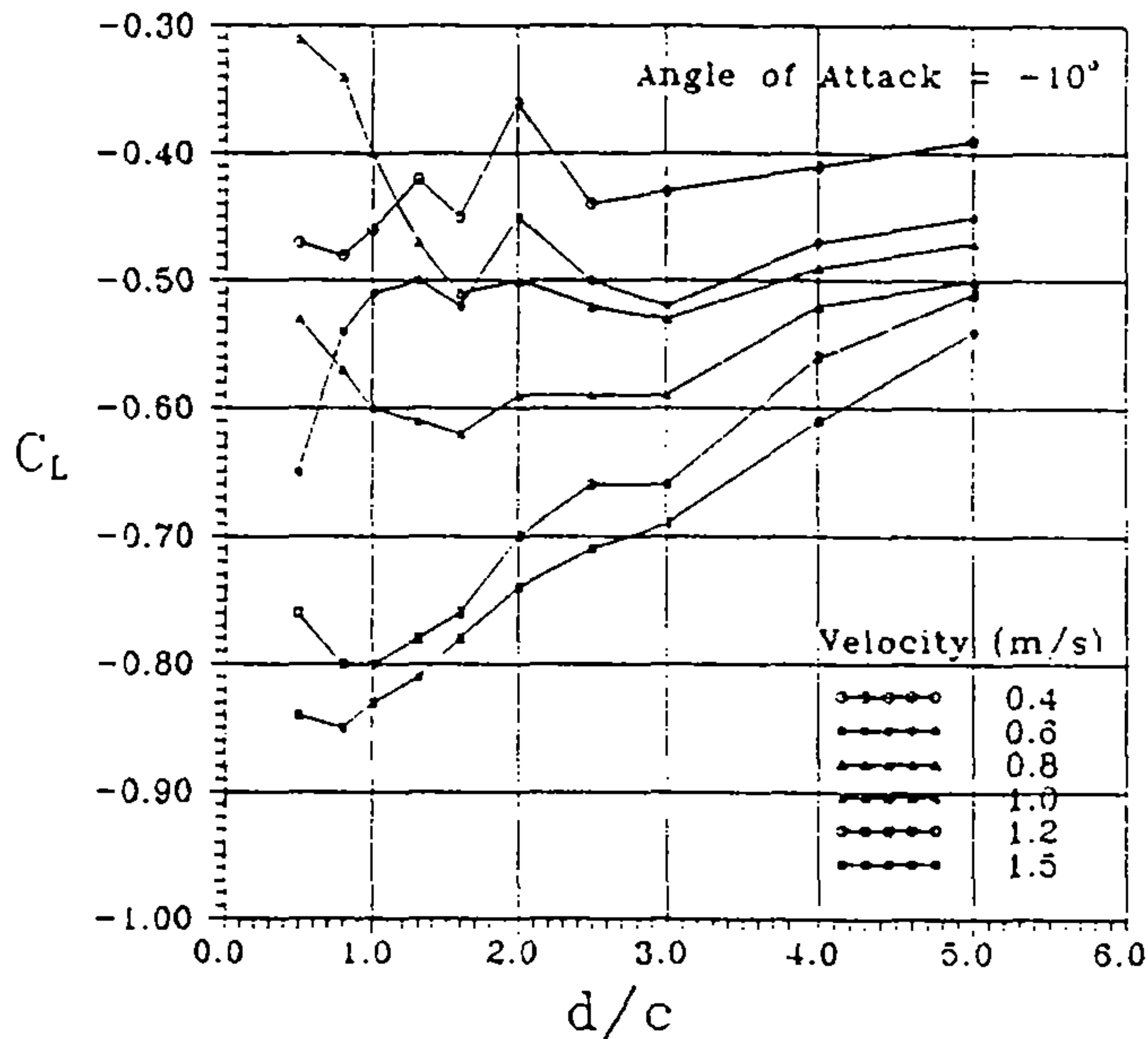


Fig.6-12 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = -10^\circ$

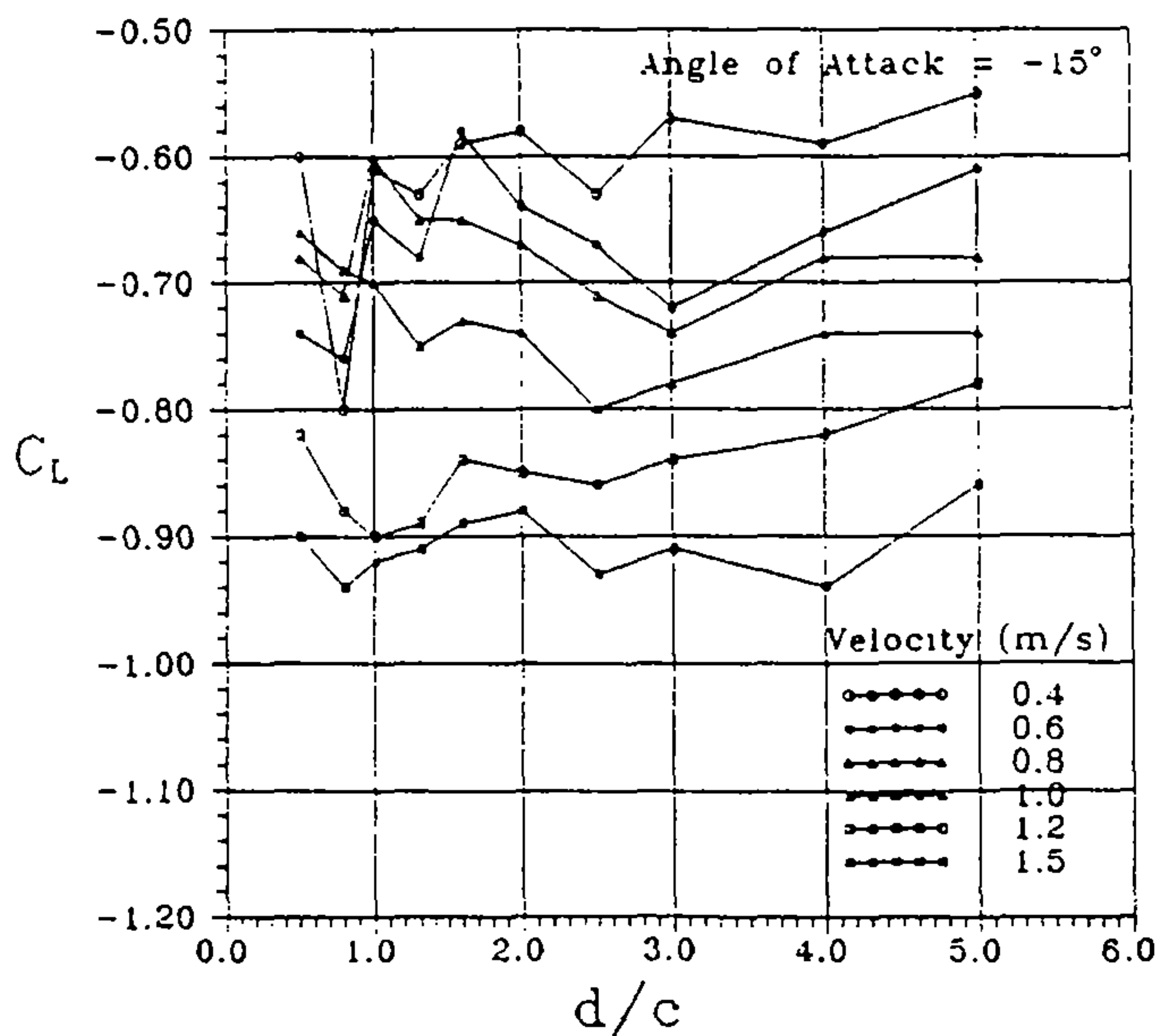


Fig.6-13 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Speeds at $\alpha = -15^\circ$

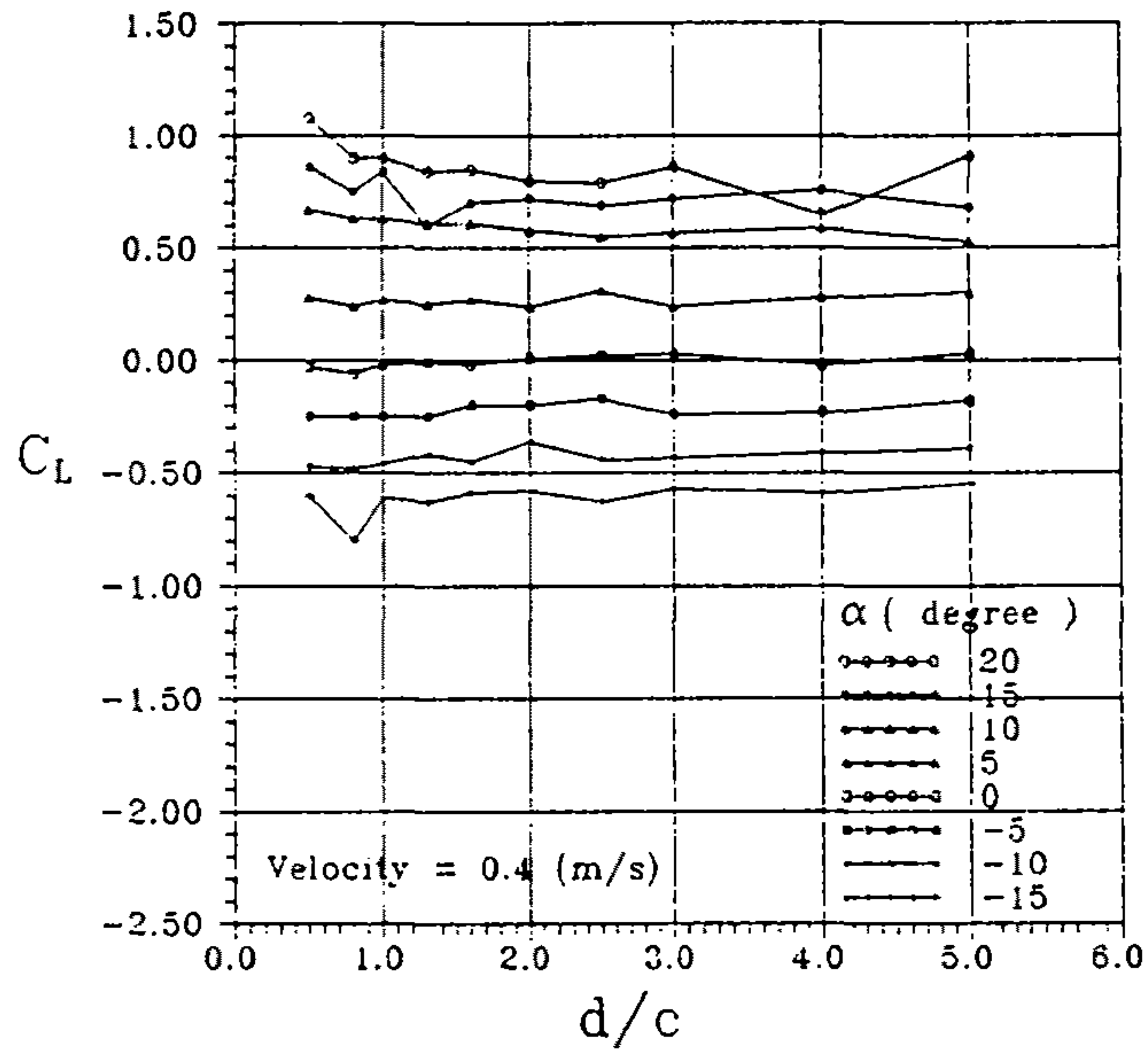


Fig.6-14 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c)
for Various Angles of Attack at $V=0.4\text{m/s}$

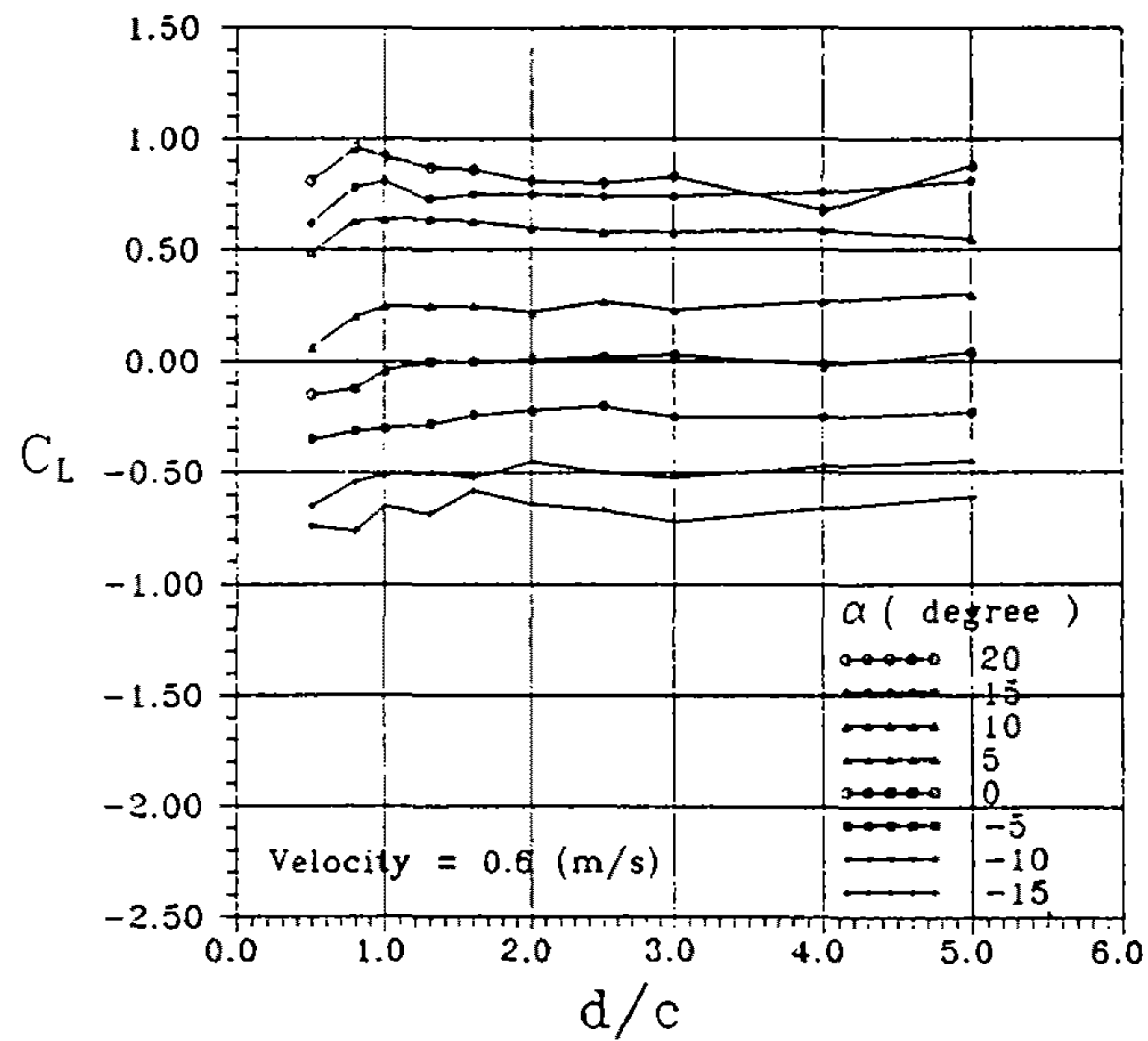


Fig.6-15 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c)
for Various Angles of Attack at $V=0.6\text{m/s}$

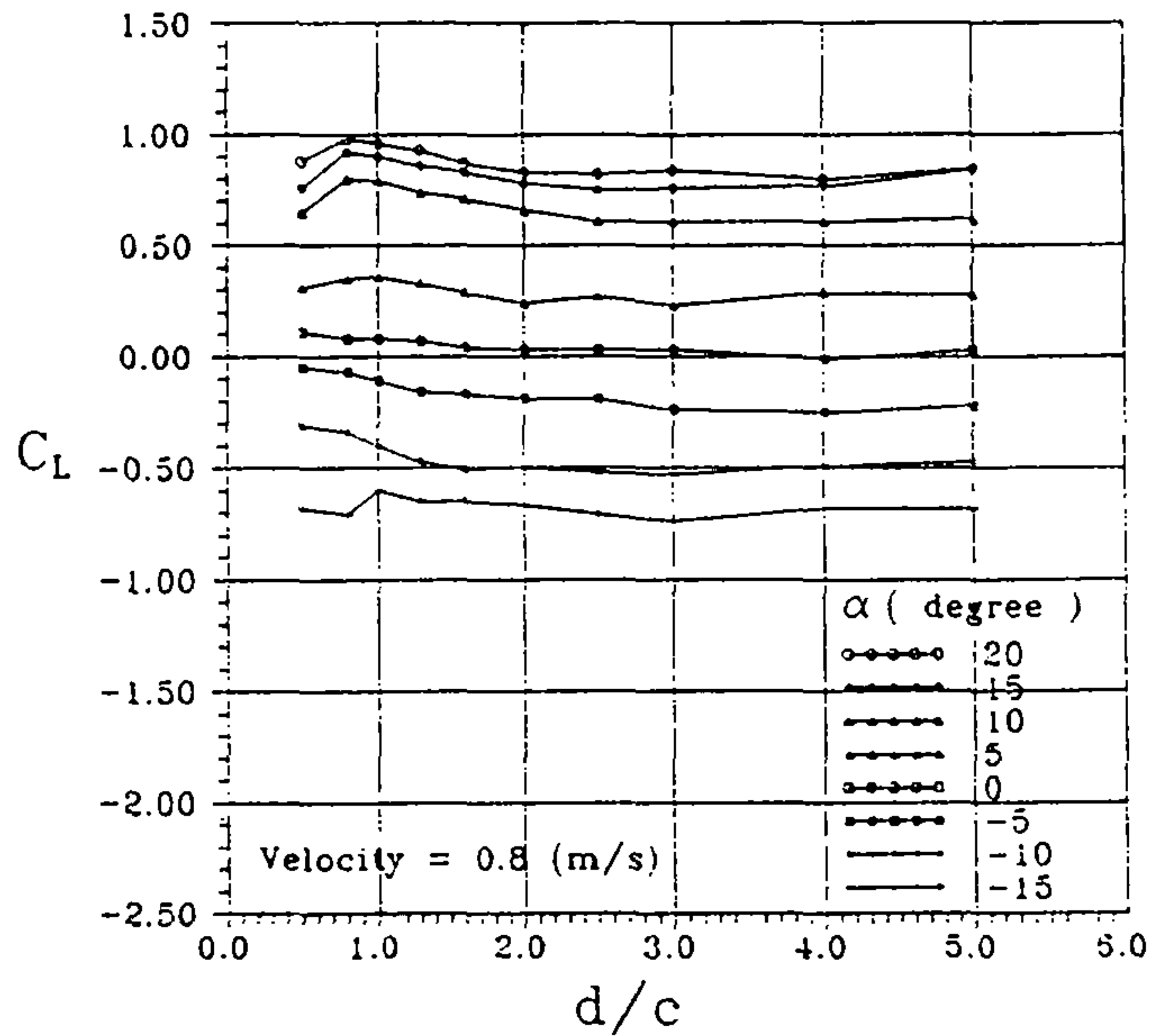


Fig.6-16 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=0.8\text{m/s}$

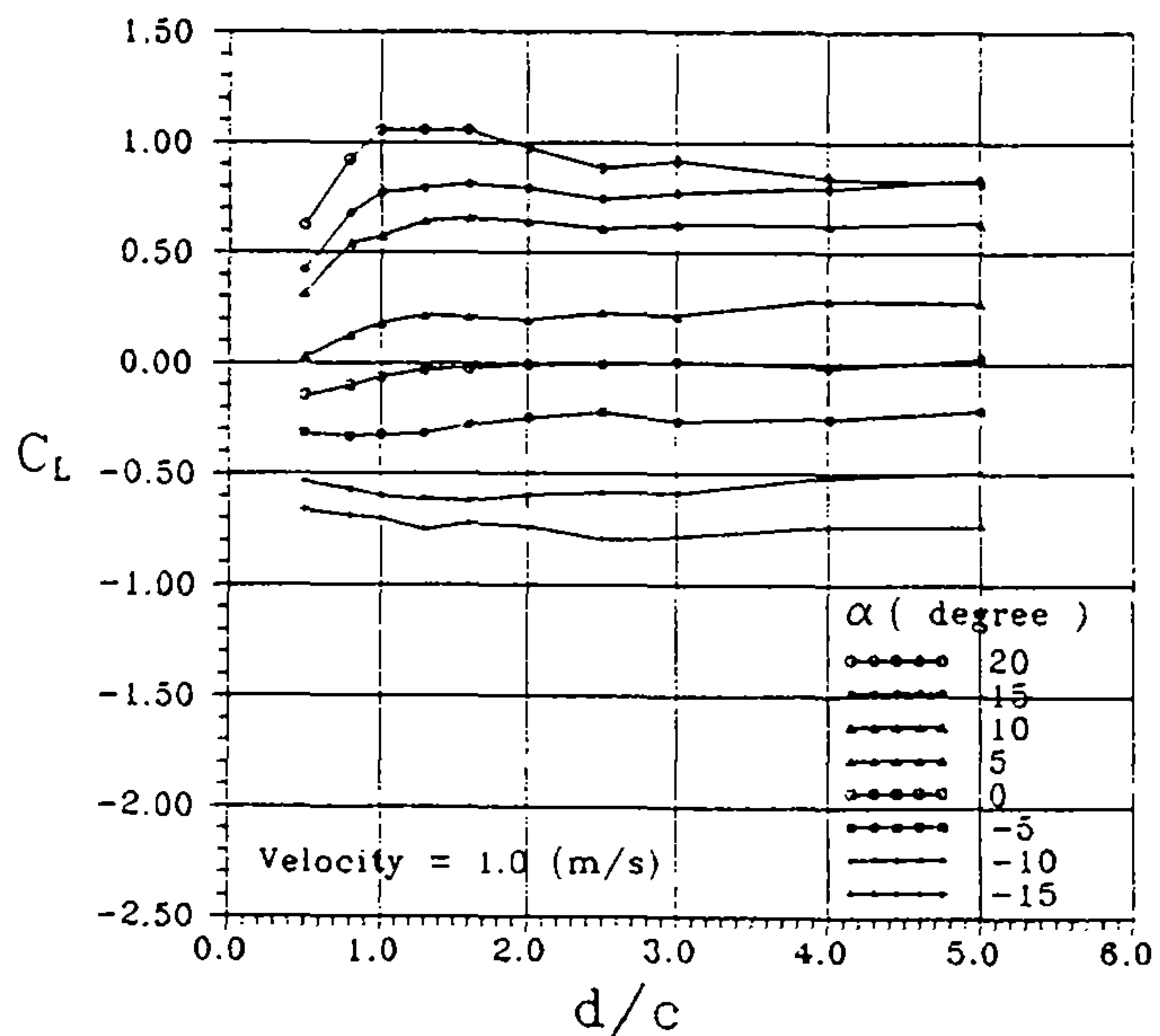


Fig.6-17 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=1.0\text{m/s}$

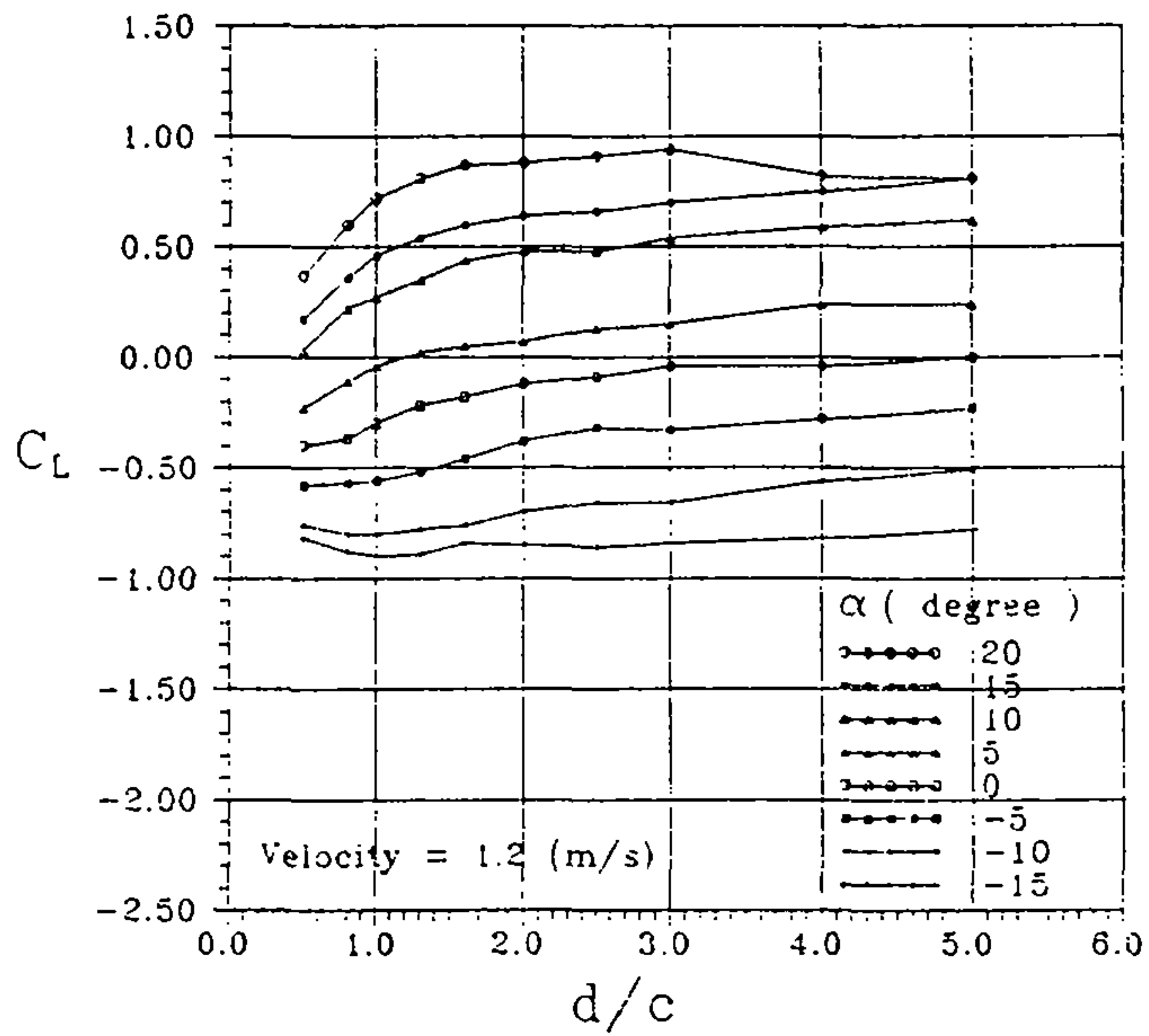


Fig.6-18 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=1.2\text{m/s}$

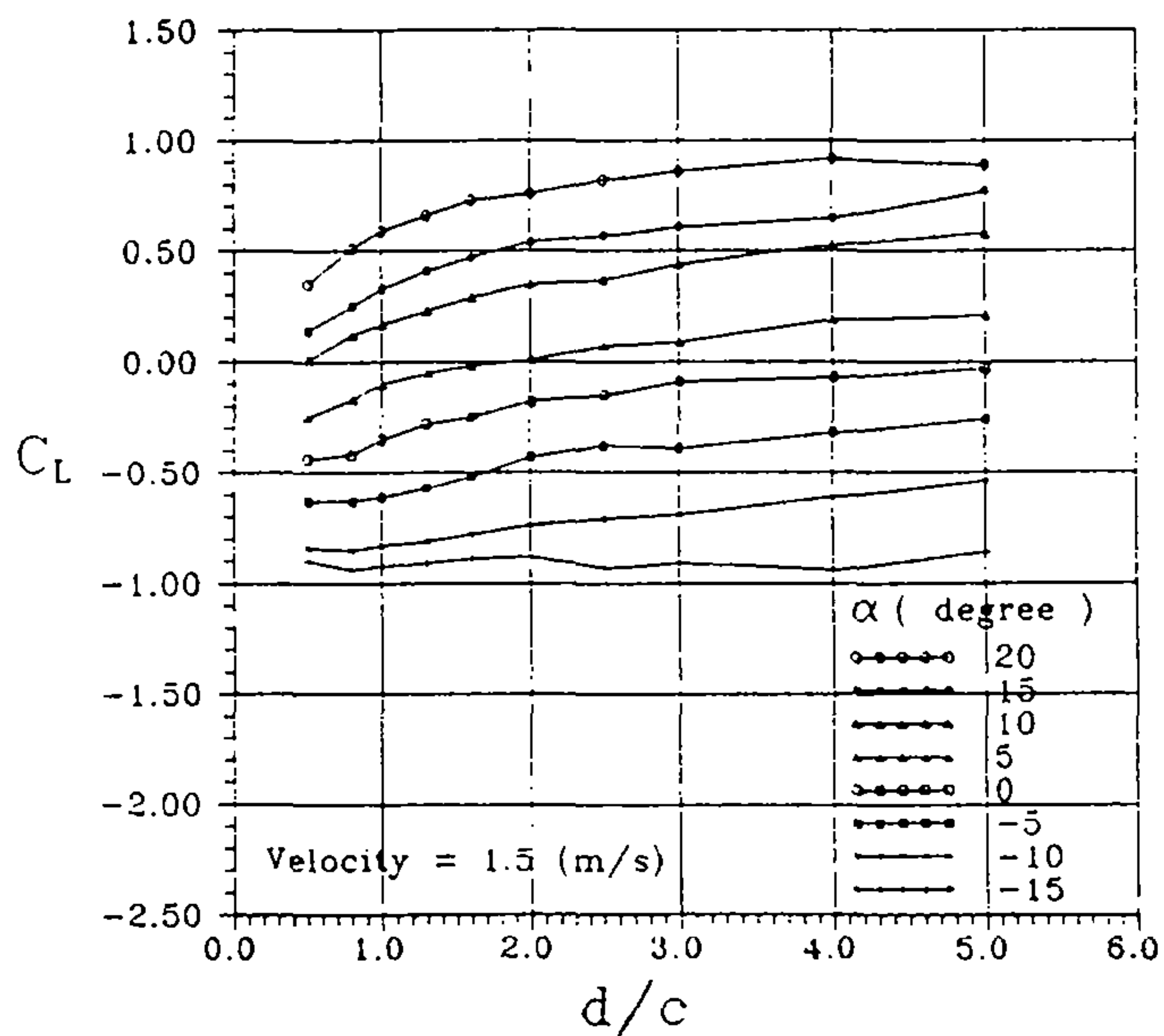


Fig.6-19 Lift Coefficient (C_L) versus Depth of Submergence (d/c) for Various Angles of Attack at $V=1.5\text{m/s}$

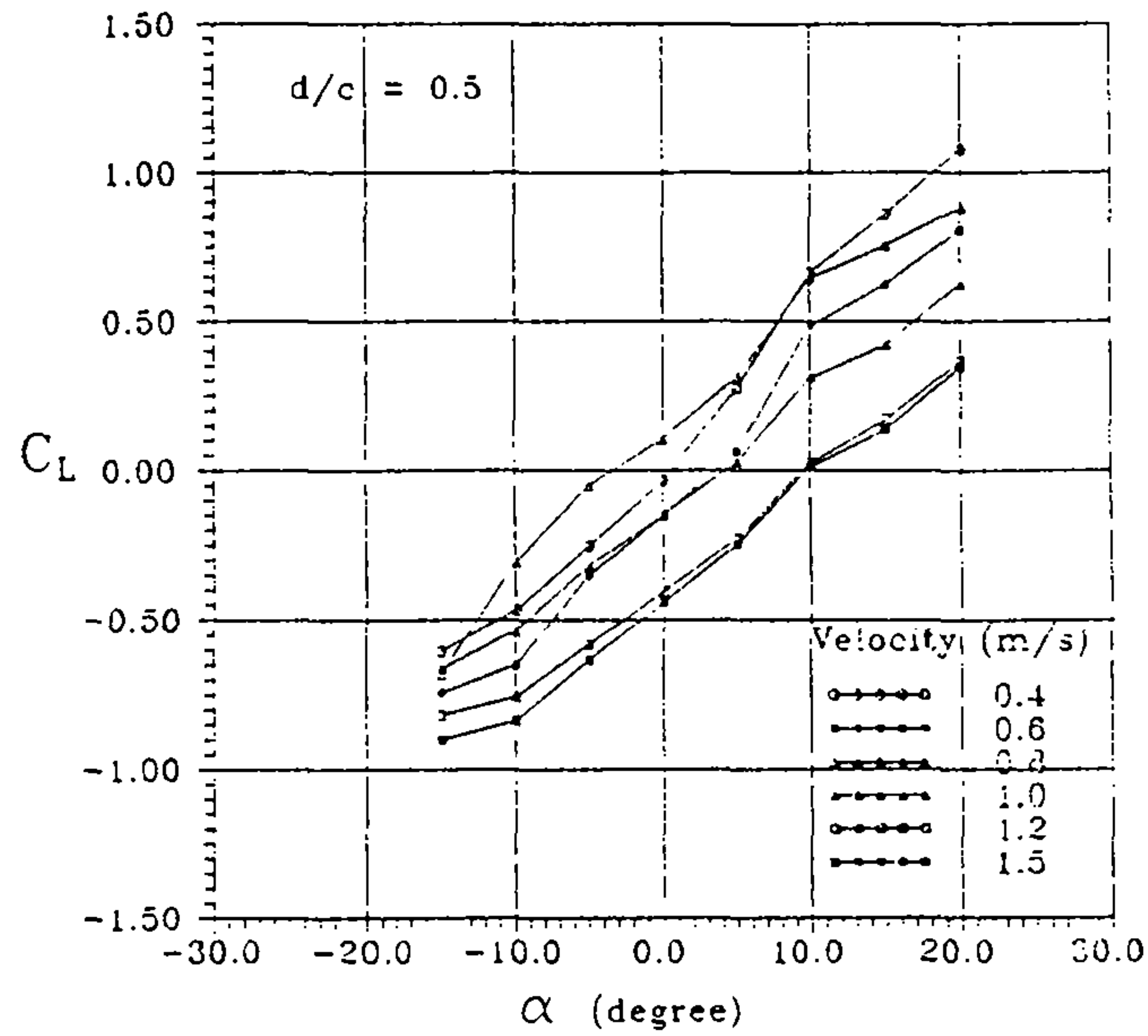


Fig.6-20 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 0.5$

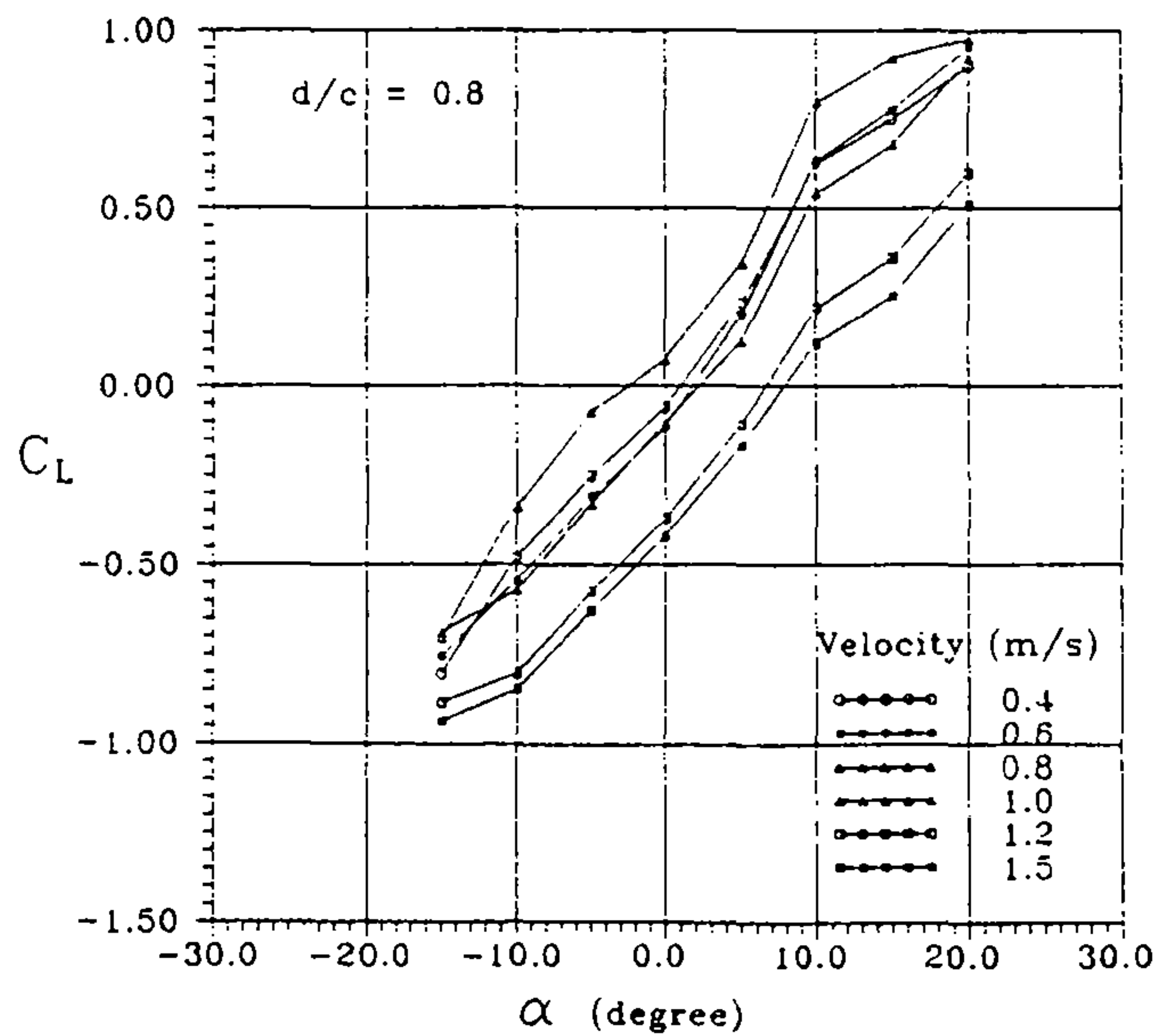


Fig.6-21 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 0.8$

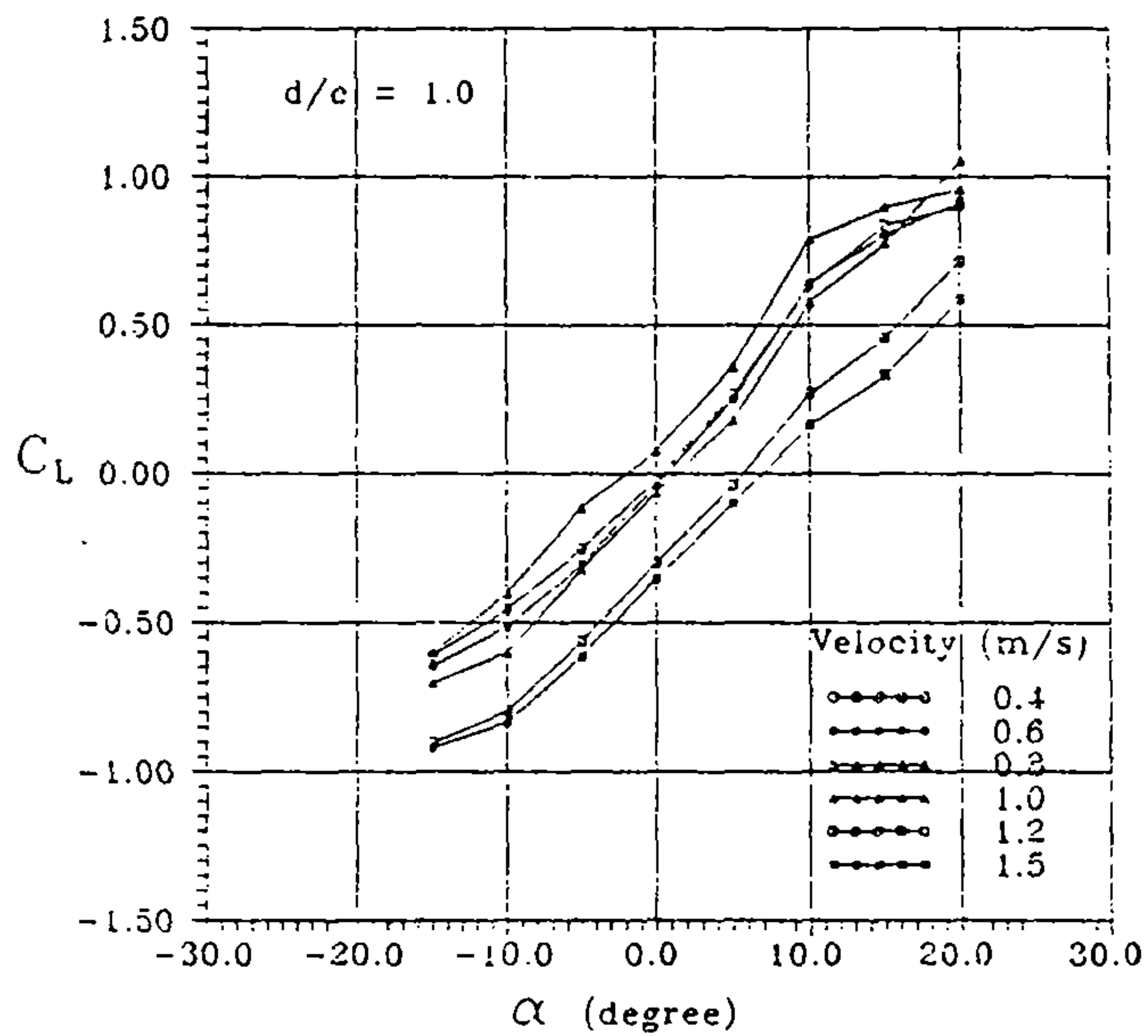


Fig.6-22 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 1.0$

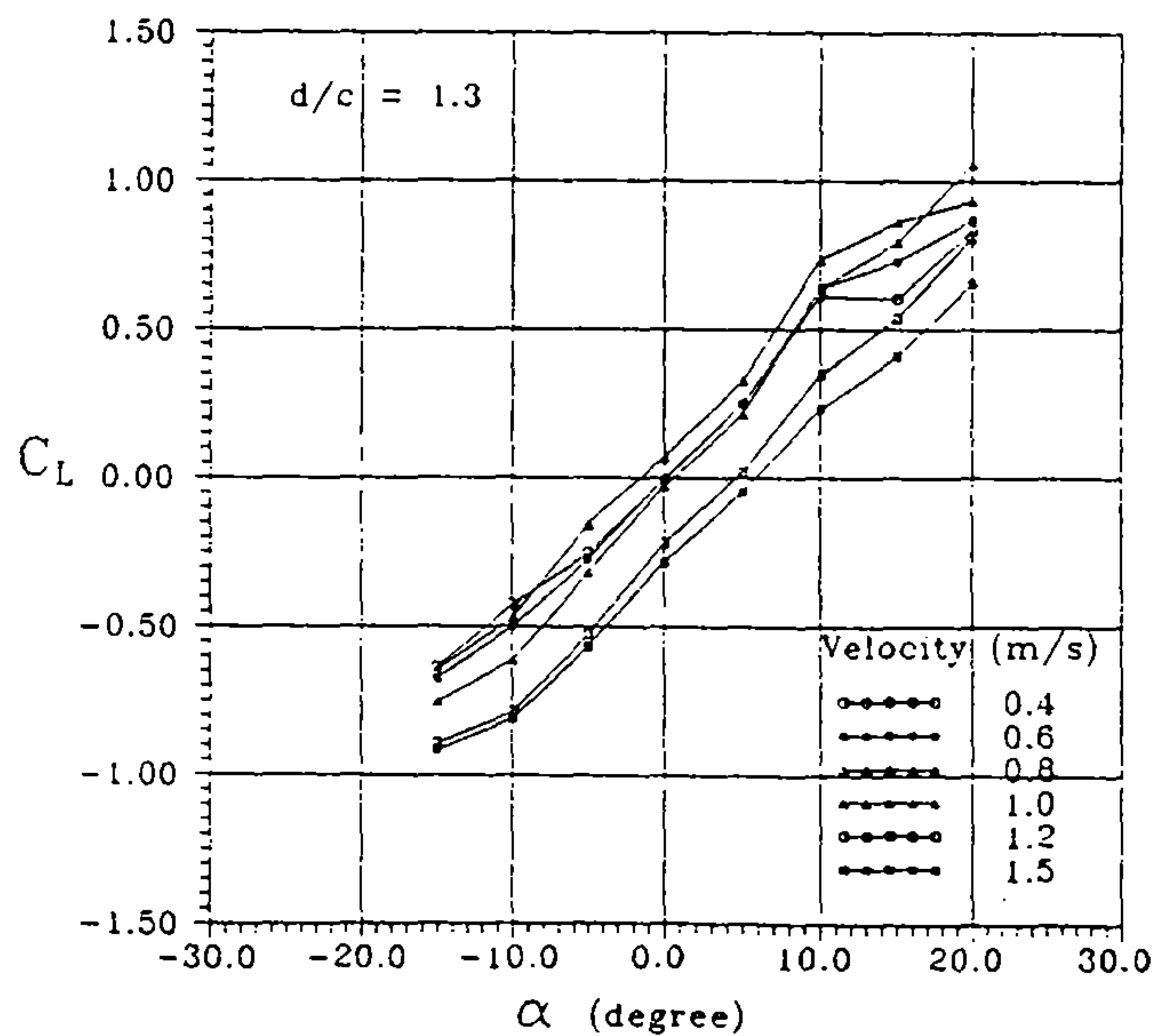


Fig.6-23 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 1.3$

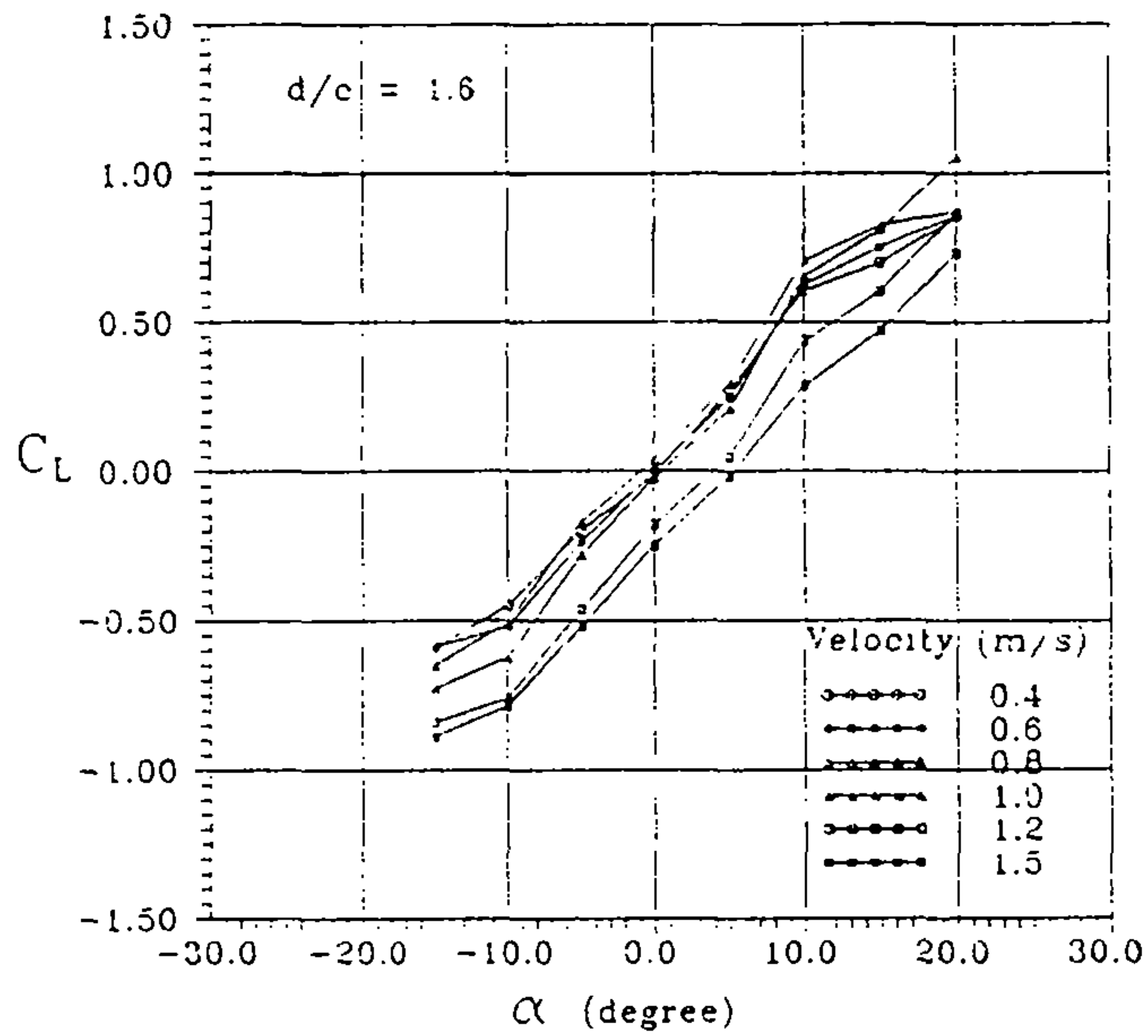


Fig.6-24 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 1.6$

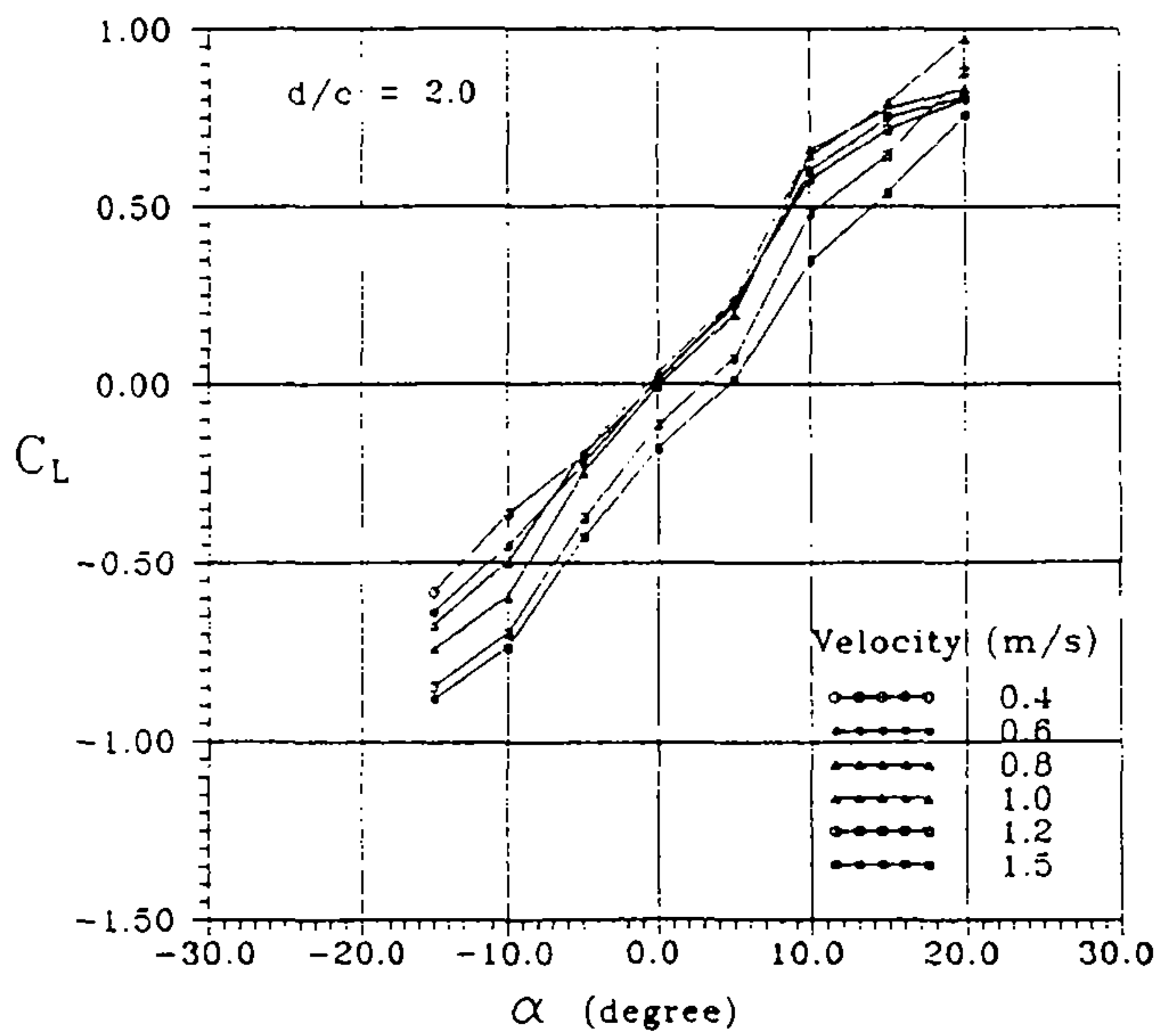


Fig.6-25 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 2.0$

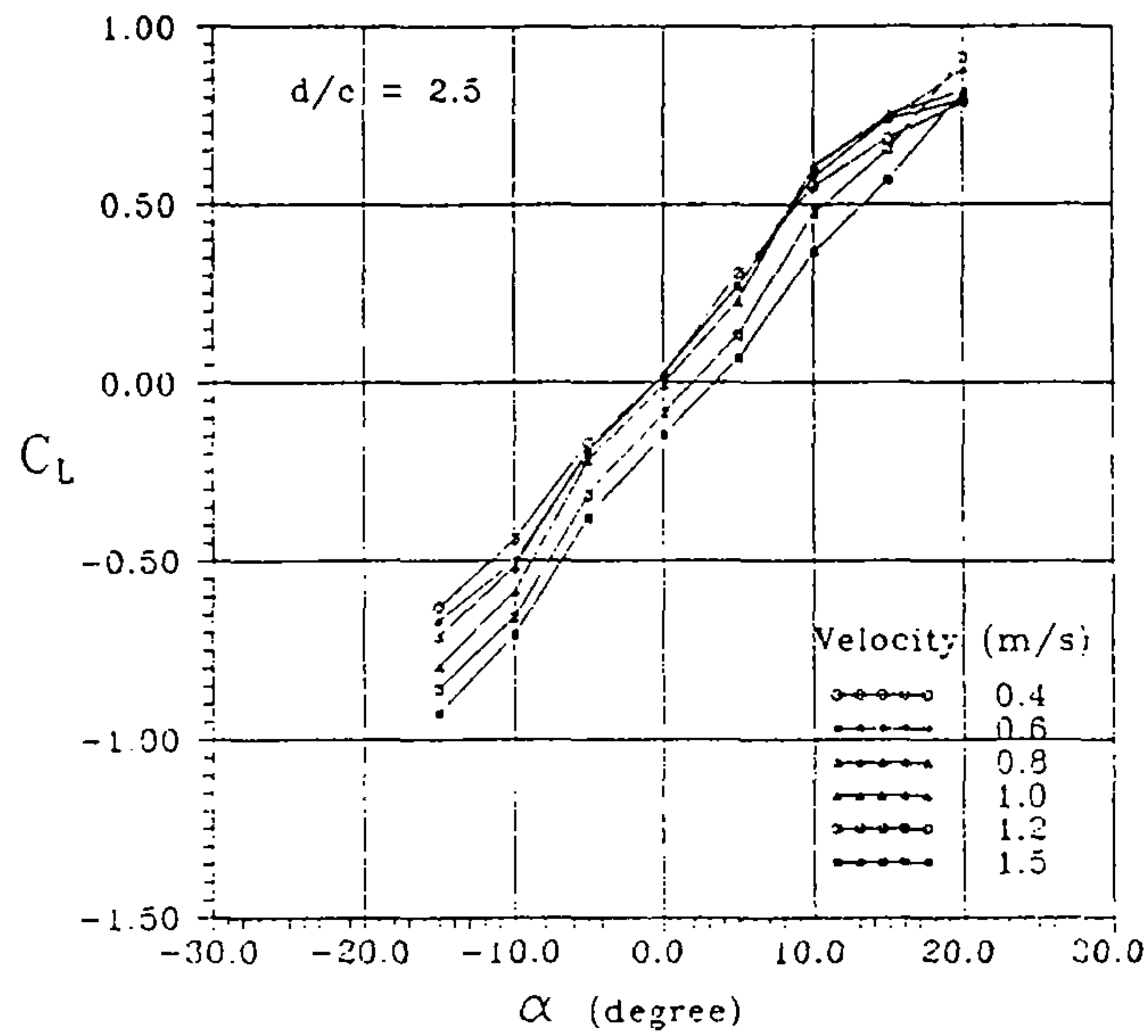


Fig.6-26 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 2.5$

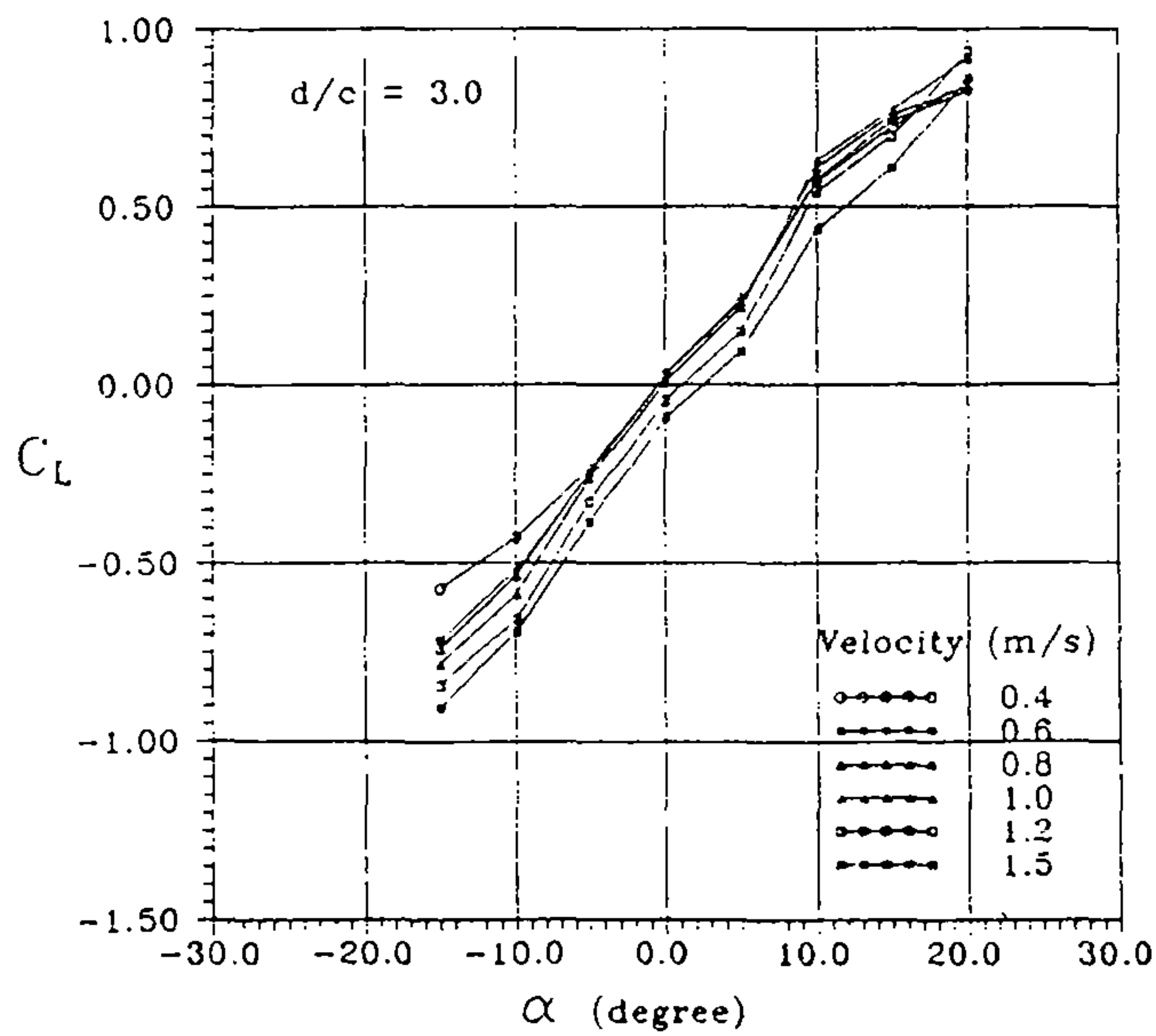


Fig.6-27 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 3.0$

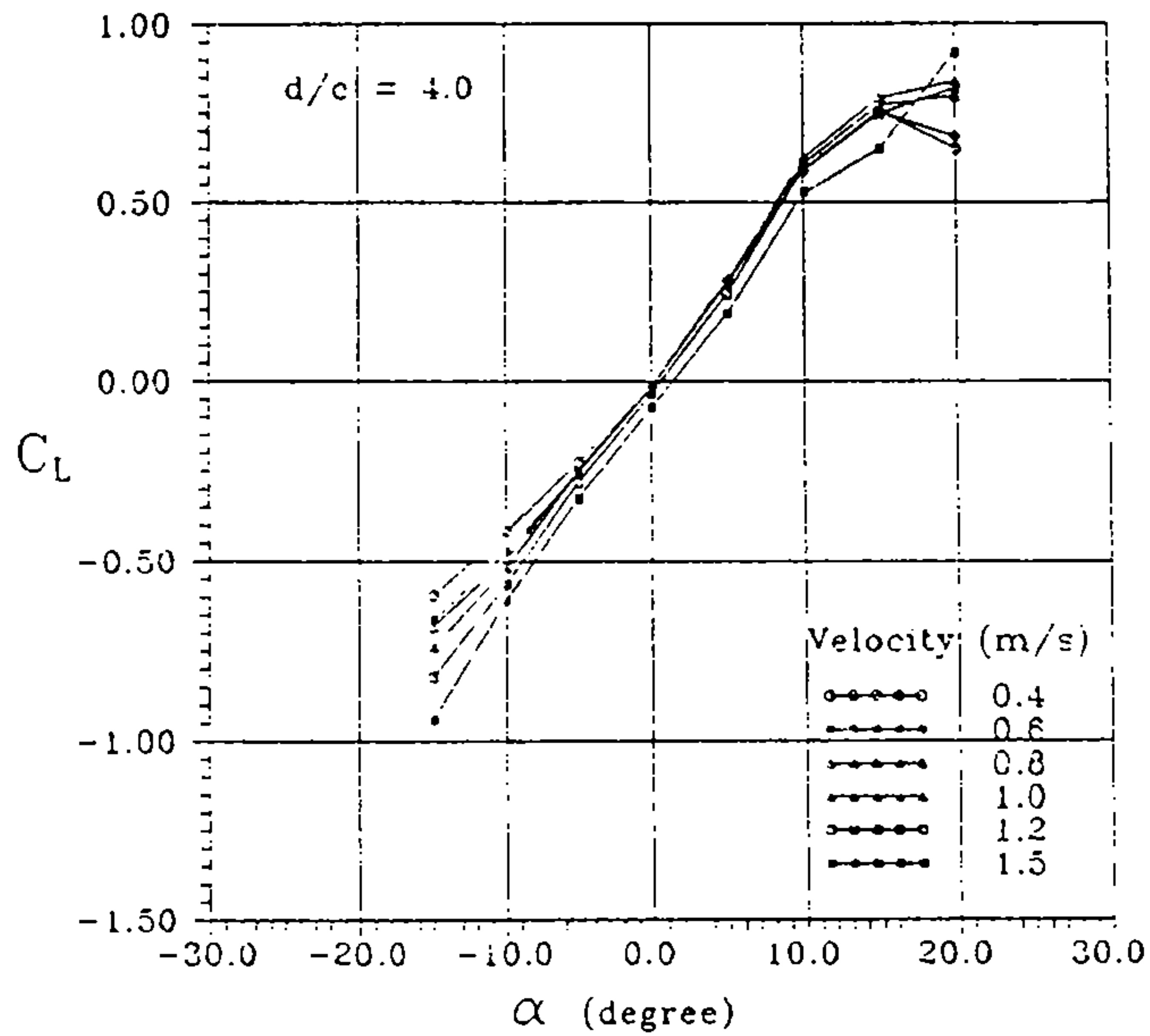


Fig.6-28 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 4.0$

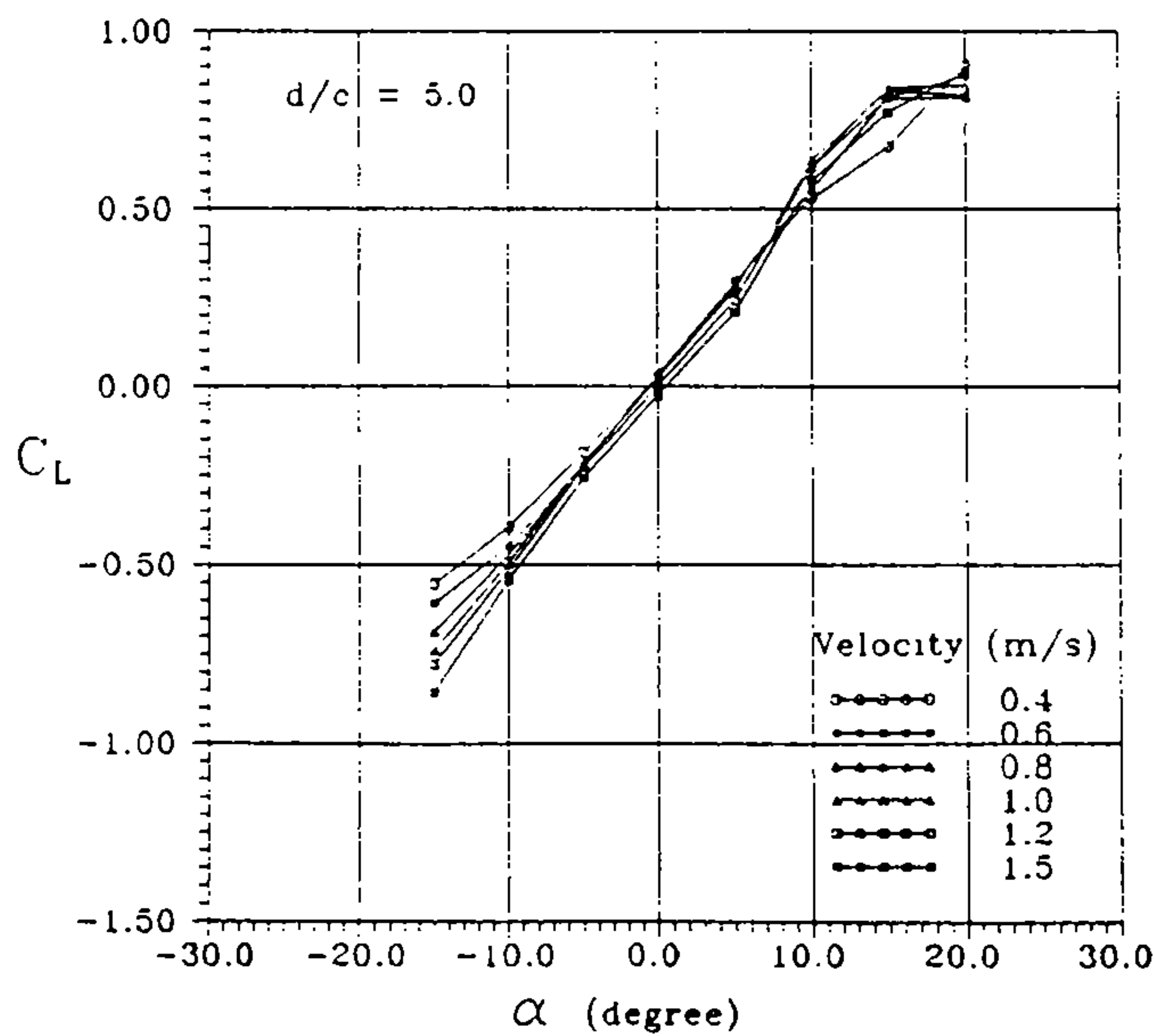


Fig.6-29 Lift Coefficient (C_L) versus Angle of Attack (α)
for Various Speeds at $d/c = 5.0$

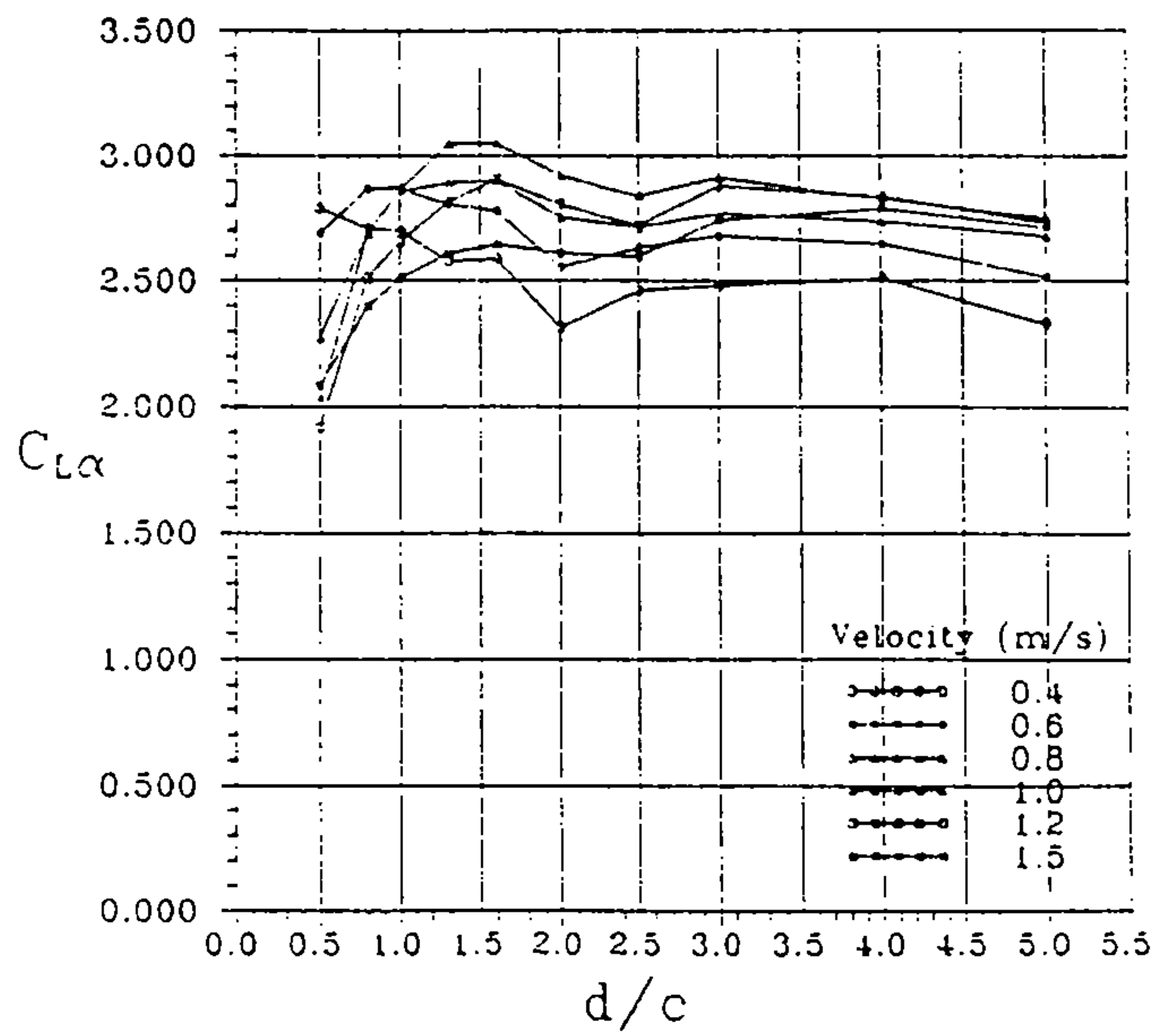
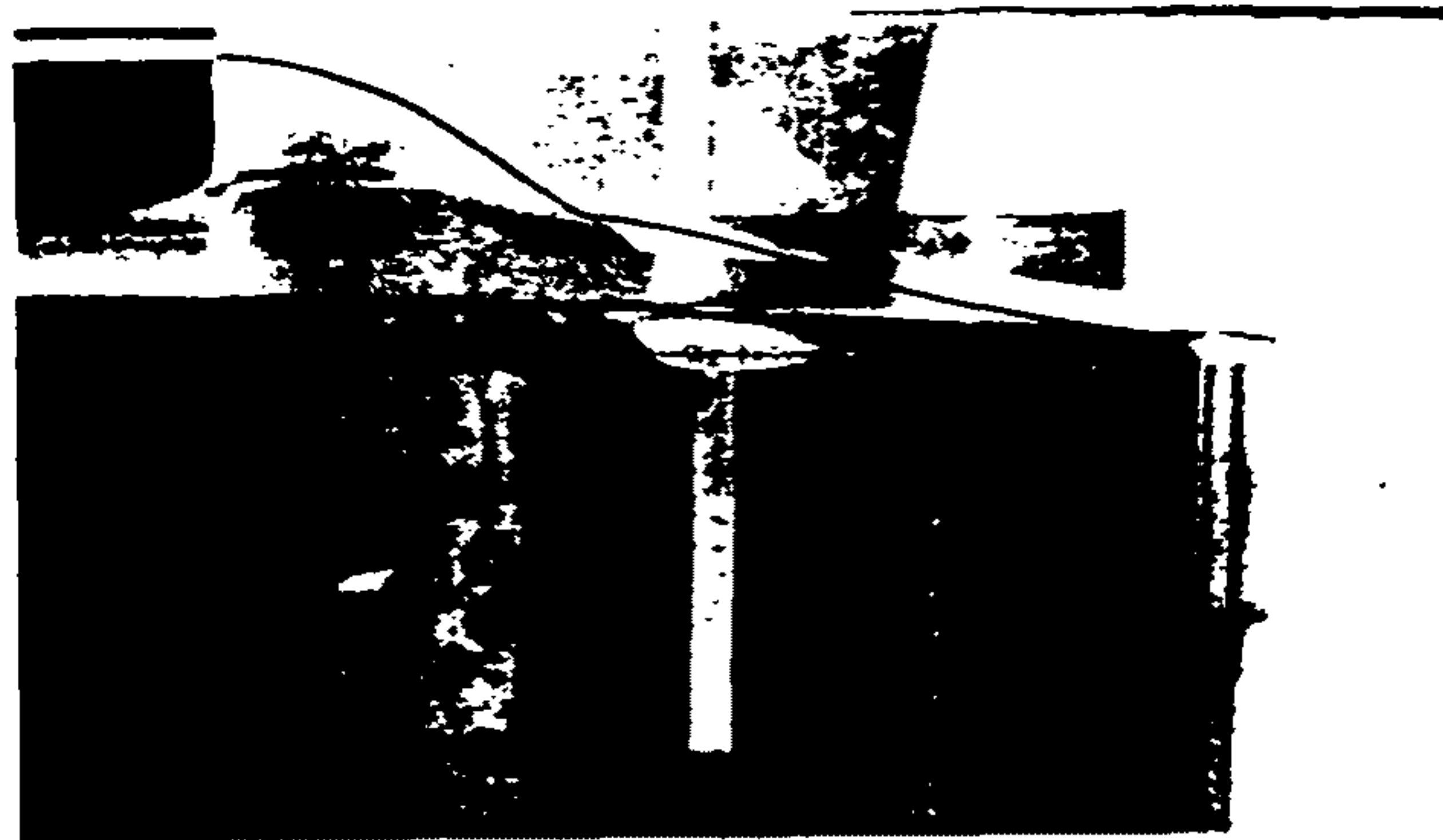


Fig.6-30 Lift-Curve Slope versus d/c for Various Speeds

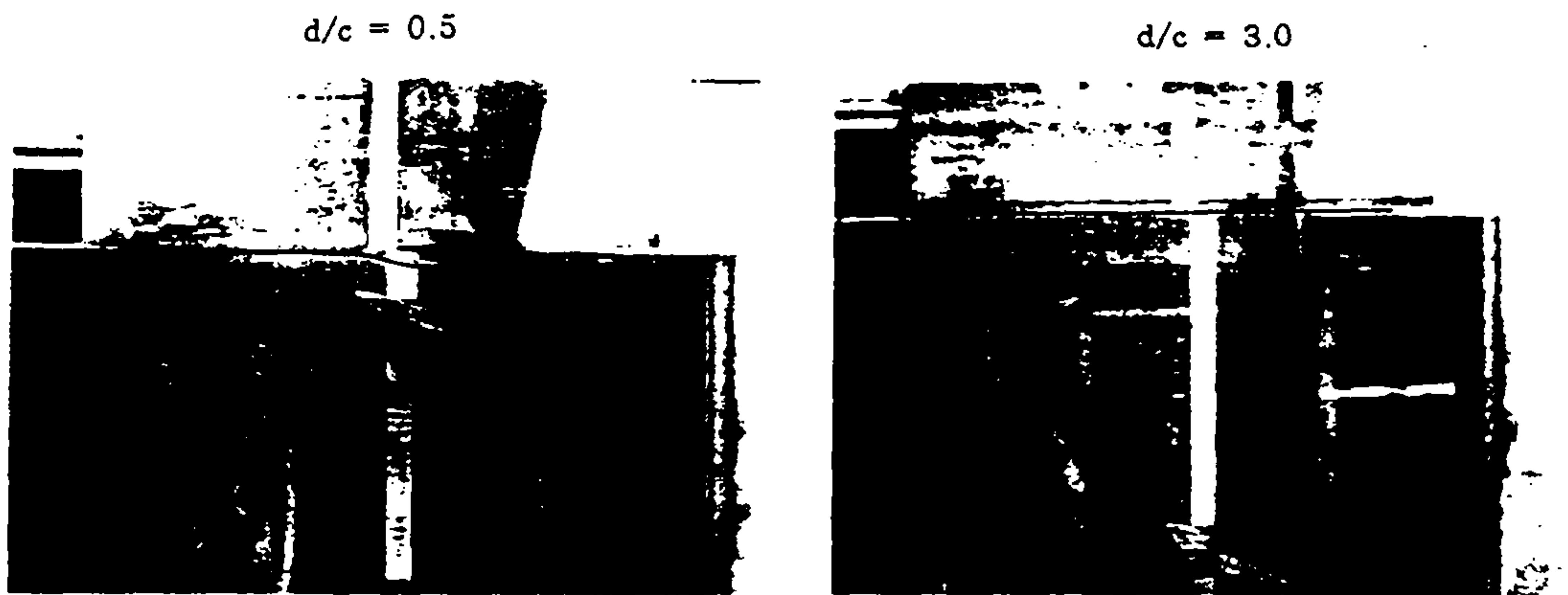


(a) $d/c=0.5$



(b) $d/c=3.0$

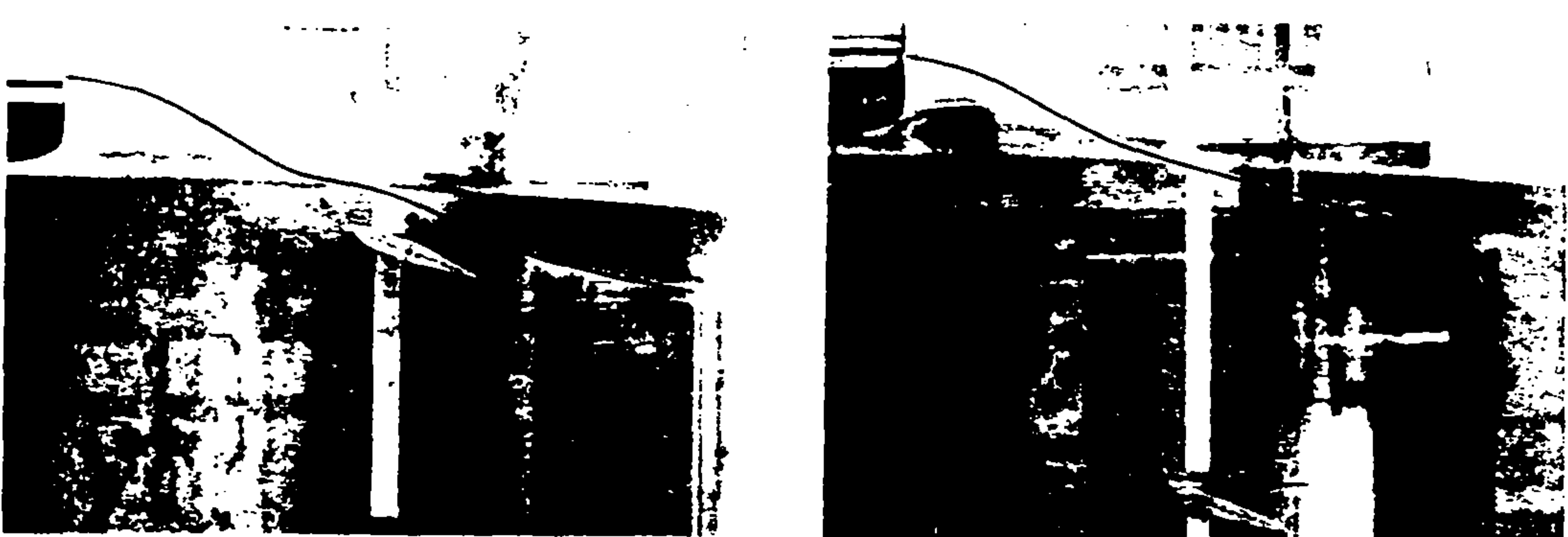
Fig.6-31 Free-Surface Configuration for $\alpha=0^\circ$ and $Fr=1.5$



(a) $Fr = 0.4$

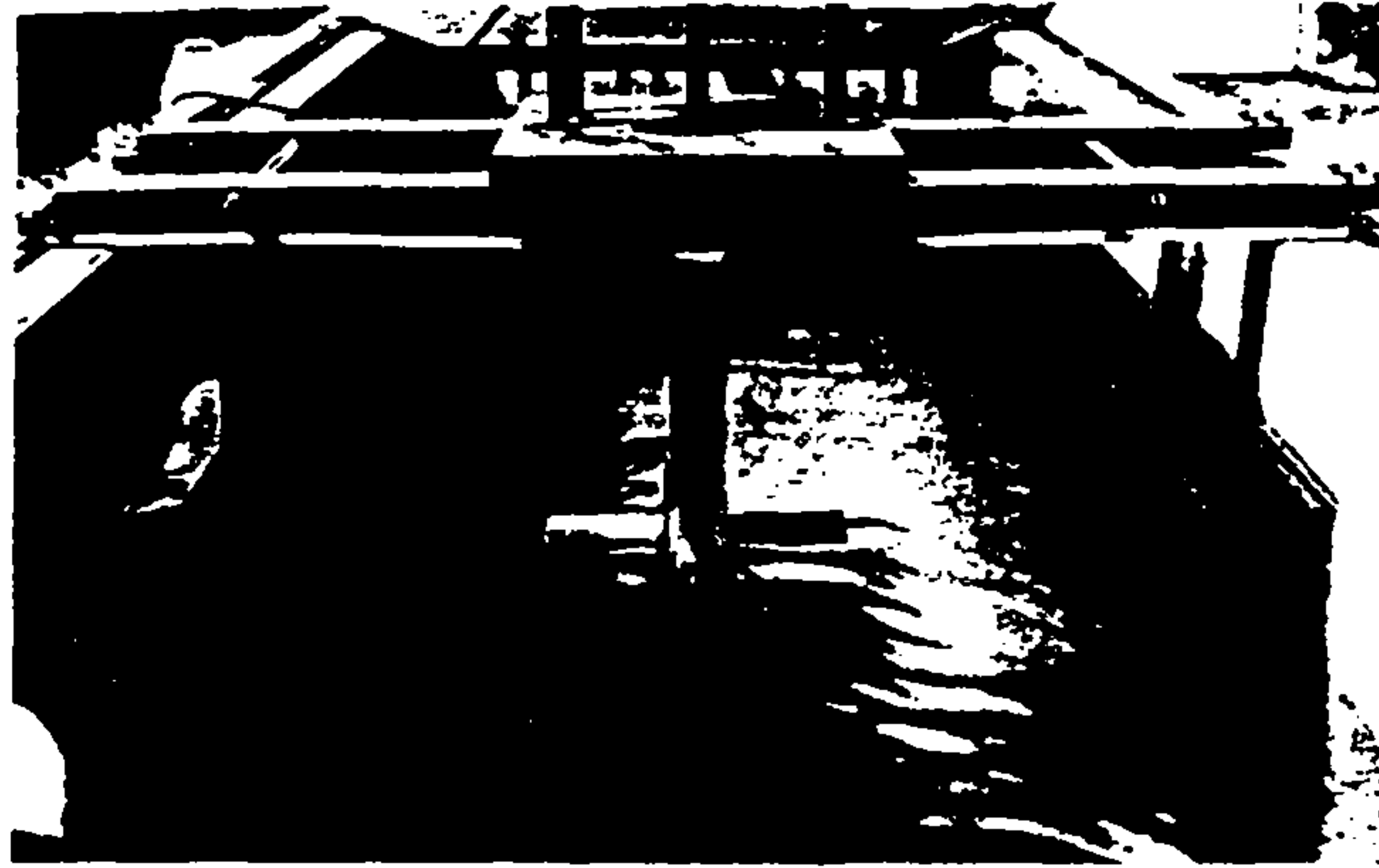


(b) $Fr = 1.0$

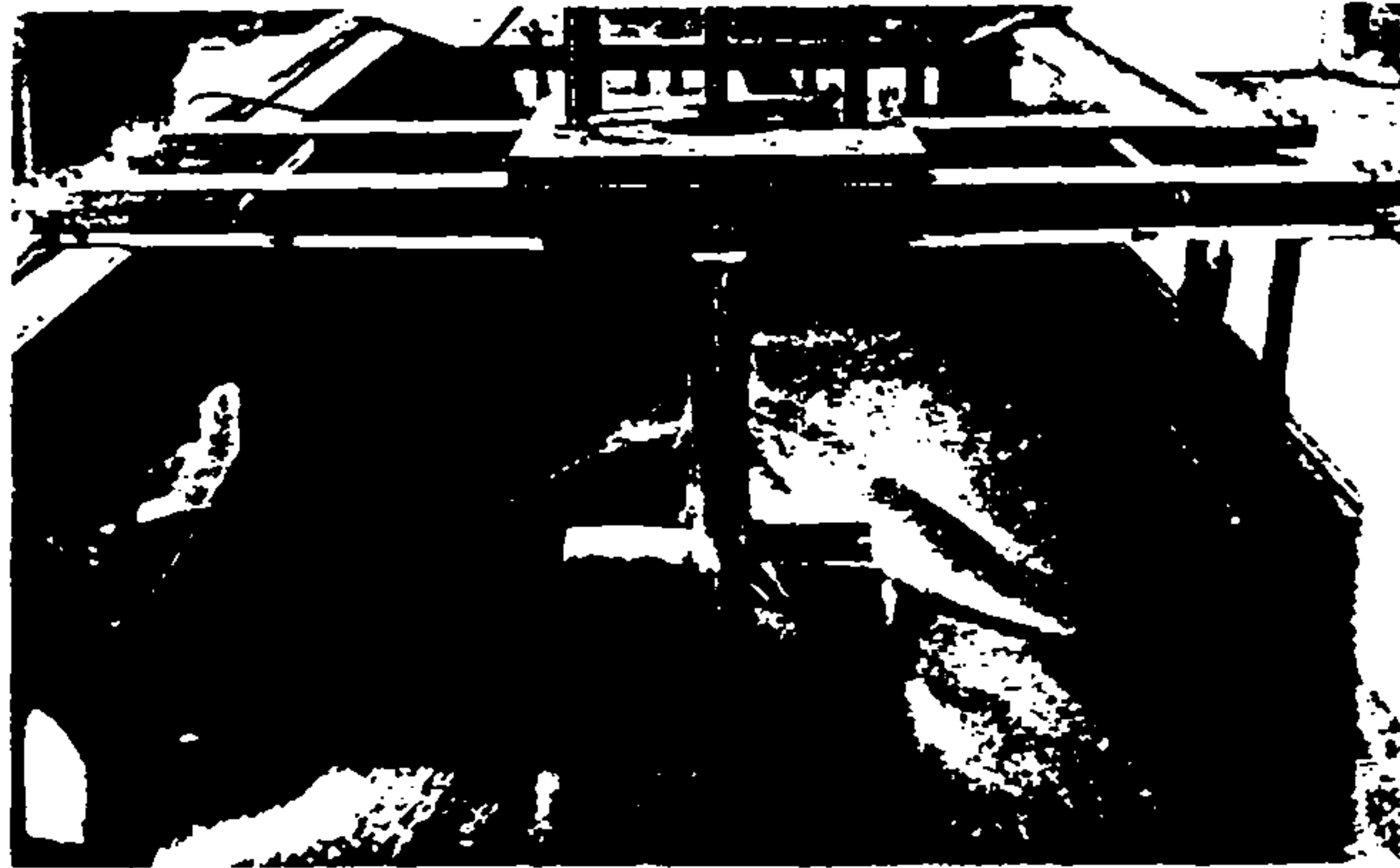


(c) $Fr = 1.5$

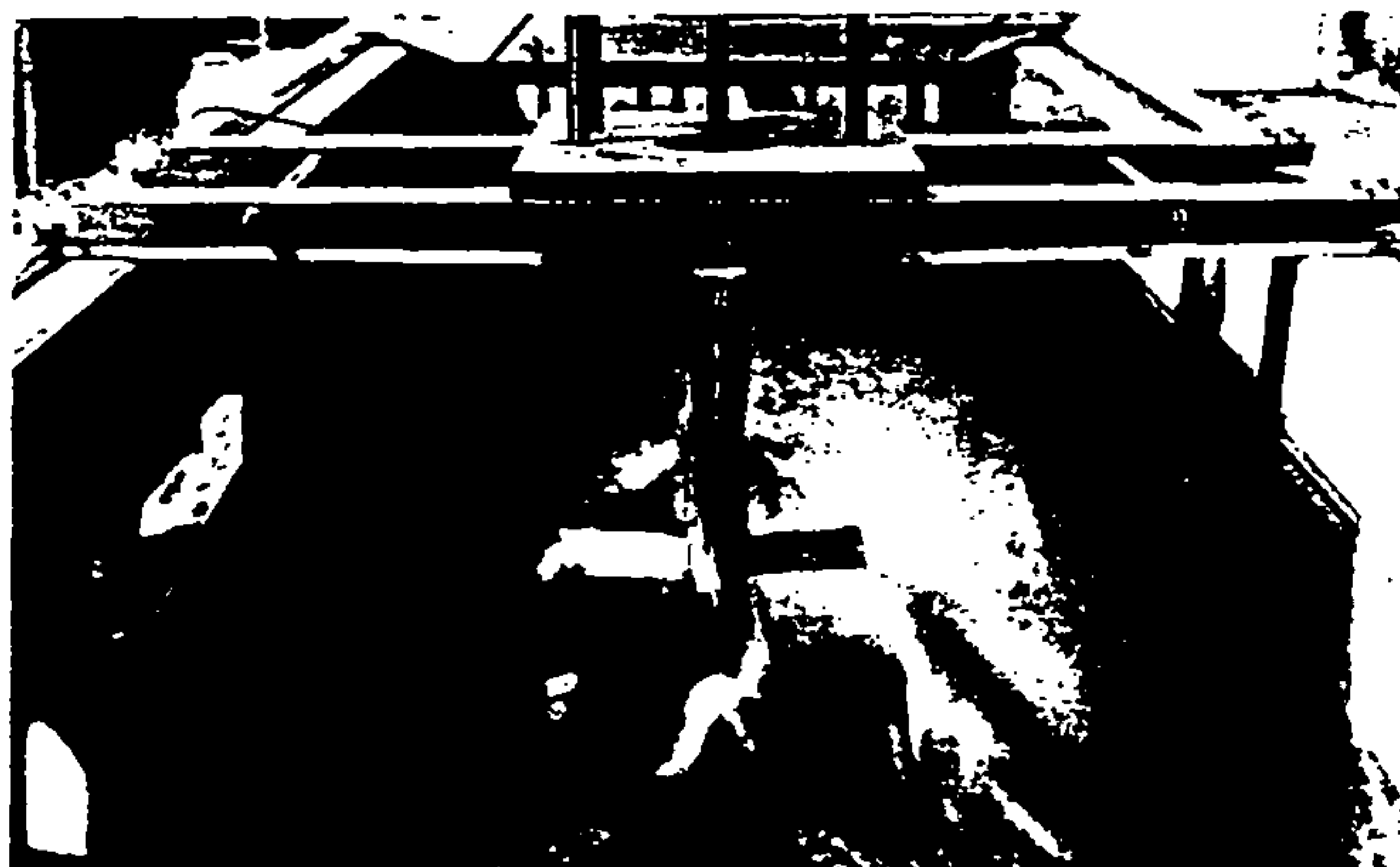
Fig.6-32 Free-Surface Configuration



(a) $Fr = 0.4$



(b) $Fr = 1.0$



(c) $Fr = 1.5$

Fig.6-33 Free-Surface Configuration for $\alpha=0^\circ$ and $d/c=0.5$

제 7 장 결 언

본 연구에 의하여 수중익을 갖는 고속 카타마란 선의 과도중의 운항 자세제어 시스템이 종동요, 상하동요에 대한 선형 방정식을 이용한 최적 제어 이론에 의하여 설계되었다. 이 시스템을 검증하기 위하여 선형 수조에서 모형 시험이 수행되었고, 2종류의 제어관에 대하여 과도중에 실험을 수행한 결과 종동요와 상하동요에 있어서 효과적으로 운동이 줄어드는 현상을 볼 수 있었다.

과도중 고속 카타마란선의 자세제어 성능을 해석하기 위하여 STF 스트립 방법으로 부가질량, 감쇠계수, 파 기진력을 계산하고 수중익에 작용하는 힘을 양력이론을 사용하여 구했다. 선수에 작용하는 충격력을 고려한 비선형 선체 운동을 해석하고, 수중익에 의한 자세제어 시뮬레이션 기법을 개발하였다. 이것을 이용하여 자세제어 시스템 설계 검증 등이 가능하고, 선체 및 수중익의 구조해석 자료로 이용될 수 있다.

그리고 쌍동형 선박의 구조설계에 필요한 파랑하중 예측 프로그램을 개발하였다. 또, 초고속선 Fin의 유입양각을 실험적 방법에 의해서 추정함으로써 Fin 설계자료를 확보하였다.

이상으로 과도중 초고속선의 운항자세제어 시스템 설계기법을 확보하였으며, 이를 바탕으로 앞으로 실험역 시험과 실선적용 등을 통하여 운항자세제어 시스템에 관한 기술의 확보가 가능할 것으로 생각된다.

여 백

참 고 문 헌

- [1-1] WEIST W.R, and MITCHELL W.I. (1976) "The Automatic Control System for the Boeing Commercial 'Jetfoil' ", IEEE National Aerospace and Electronics Conference, Pages 366-375.
- [1-2] ITOKO T., HIGASHINO S., YAMAGAMIY., and IKEBUCHI T. (1991) "The Development of an Automatic Control System for a Submerged Hull and Foil Hybrid Super-High-Speed Liner", FAST '91, Trondheim.
- [1-3] SAITO Y., OKA M., IKEBUCHI T., and ASAO M., (1991) "Rough Water Capabilities of Fully Submerged Hydrofoil Craft 'Jetfoil'", FAST '91, Trondheim
- [1-4] 강창구의, (1992. 6) "파도중 초고속 운항자세제어기술 개발(Ⅰ)", 과학기술처 특정과제 연구보고서
- [1-5] 강창구의, (1993. 8) "파도중 초고속 운항자세제어기술 개발(Ⅱ)", 과학기술처 특정과제 연구보고서
- [2-1] DOCKHORN H.-D. (1976) "Microcomputer Based Pitch and Depth Controller for a Submarine Using Optimal Control Theory", Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- [2-2] 강 창구, "2차원 플랩타의 간극이 양력에 미치는 영향", 대한조선학회 '93년도 춘계연구발표회, 1993. 4.

- [2-3] 홍 도천 등, "Development of a Computer Program for the Analysis of Catamaran-type Ship or Offshore Structure", KIMM 보고서 UCE 244-649.D
- [2-4] BECK R.F., CUMMINS W.E., DALZELL J.F., MANDEL P., and WEBSTER W.C. (1989) *Motions in Waves, Principles of Naval Architecture*, 2nd Revision, SNAME.
- [4-1] Salvesen, N., Tuck, E.O., and Faltinsen, O., (1970), "Ship Motions and Sea Loads", *Trans. SNAME*.
- [4-2] Beck, R.F., (1984) "Section on Regular Wave Motions", *New Edition of Principles of Naval Architecture*, SNAME.
- [4-3] Frank, W., (1967) "On the Oscillation of Cylinders in or below the Free Surface of Deep Fluids", *Technical Note 69, Hydrodynamics Lab., NSRDC*.
- [4-4] Ohtsubo, H. and Kubota, A. (1990), "Vertical Motions and Longitudinal Strength of Large-Sized High-Speed Ships with Hydrofoils(1st report)," *J. of Society of Naval Architects of Japan*, vol, 168.
- [4-5] Newman, J.N., (1977) *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press. (PP. 159-236)
- [4-6] Kang, C.-G., Hong, S.-Y., Suh, S.-H., Lee, C.-M., Kim, Y.-G., and Gong, I.-Y., (1993) "Attitude Control System for a High Speed

Catamaran with Hydrofoils in Waves", FAST '93., Yokohama, Japan.

- [4-7] 강창구, (1993. 4) "2차원 플랩타의 간극이 양력에 미치는 영향", 대한조선학회 '93년도 춘계연구발표회.
- [4-8] Ohtsubo, H. and Kubota A. (1991) "Vertical Motions and Longitudinal Strength of Large-Sized High-Speed Ships with Hydrofoils(2nd report)", J. of Naval Architects of Japan, Vol. 170.
- [5-1] 홍도천외, ' Catamaran형 해양구조물의 운동해석을 위한 전산 프로그램의 개발,' 한국기계연구소 연구보고서 UCE244-649.D, 1985.
- [5-2] M. Kobayashi, and K. Shimada, ' Small-Waterplane-Area Twin Hull Ships,' Proc. 高速船型の耐航性 推定法 Symp. , 1990.
- [5-3] M. Kobayashi, K. Shimada, and K. Nishimura, ' 進速度を有するSSC船型に動く波浪荷重,' 日本造船學會論文集 168호, 1990
- [5-4] C.M. Lee et al., ' Prediction of Motion and Hydrodynamic Loads of Catamarans, ' Marine Tech., Oct., 1973.
- [6-1] Ohmatsu, Shigeo et al, "An Experimental Study on Motion Control of Semi-Submerged Ships," J.Soc.Naval Arc. Japan, Vol. 152, 1983.
- [6-2] Whicker, L.F. and Fehlner, L.F., "Free-Stream Characteristics of a Family of Low Aspect-Ratio, All-Movable Control Surface for Application to Ship Design," DTMB Report933, 1958.