

최종보고서

중대사고시 노심용융물-냉각수 반응의 열유동  
모델 개발 및 검증

Development and Verification of Thermal-hydraulic Models of  
Fuel-Coolant Interactions in Reactor Severe Accidents

연구기관  
한국해양대학교

과 학 기 술 처

# 제 출 문

과 학 기 술 처 장 관 귀하

본 보고서를 “중대사고시 노심용융물-냉각수 반응의 열유동 모델 개발 및 검증”의 최종보고서로 제출합니다.

1998. 3. 31.

주관연구기관명: 한국해양대학교

주관연구책임자: 방 광 현

연 구 원: 도 덕 희

연 구 조 원: 박 익 규

연 구 조 원: 최 성 환

연 구 조 원: 김 기 용

연 구 조 원: 이 경 중

연 구 조 원: 조 성 화

# 여 백

# 요 약 문

## I. 제 목

중대사고시 노심용융물-냉각수 반응의 열유동 모델 개발 및 검증

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

원자로 중대사고의 관리 및 완화 전략상 노심용융물과 냉각수의 접촉은 필수적이며, 따라서 이러한 고온 노심용융물-냉각수 반응에 대한 해석모델의 개발 및 검증이 필요하다. 본 연구에서는 중대사고시 노심용융물-냉각수 반응의 열유동 모델 개발 및 검증을 위하여 다상 열유동 실험기법 개발, 개별 상관식 개발 및 검증 및 노심용융물-냉각수 반응 해석코드 보완 및 검증을 최종 목표로 하였다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 지금까지 연구된 노심용융물-냉각수 반응의 해석모델을 정리하였으며, 물의 복사열 흡수 특성 이론 및 막비등열전달 상관식을 조사 정리하였다. 주요 중점 연구 내용으로 다상유동에서의 구형체 막비등 실험 장치를 제작하여 2상유동에서의 막비등열전달계수를 측정하였으며, 다상유동의 PIV 측정 기법을 개발하여 기액2상유동의 속도장 측정 및 미세 유동구조의 관찰을 수행하였다.

#### IV. 연구개발결과

본 연구에서는 지금까지 연구된 노심용융물-냉각수 반응의 해석모델을 정리하였으며, 물의 복사열 흡수 특성 이론 및 막비등열전달 상관식을 조사 정리하였다. 주요 중점 연구 내용으로 다상유동에서의 구형체 막비등 실험 및 다상유동의 PIV 측정 기법 개발을 수행하였다.

고온의 용융물-냉각수 반응에서 주요 열전달 모드인 2상유동에서의 막비등열전달계수를 측정하기 위해 실험장치를 제작하였으며, 본 실험의 특징은 기존의 연구가 정지상태의 구형체에 유체가 흐르는 경우에 반해 정지상태의 물에서 수증기가 흘러 오르는 풀에 구형체를 낙하시키는 방법을 택하였다. 구의 낙하속도와 수증기 발생량을 조절하면서 실험한 결과, 기존의 실험결과와는 상이하게 구의 낙하속도가 증가할수록 열전달계수가 감소하는 결과를 얻었다.

PIV계측시스템은 기액2상유동의 속도분포를 시간적으로 잘 재현할 수 있으며, 이는 기존의 열선유속계나 레이저도플러유속계등의 계측기로서는 불가능했던 비정상유동장의 물리기구의 해명에 도움을 줄 것이다. 또한 본 계측시스템은 AOM(Acousto-Optical Modulator)을 적용한 PIV계측법이므로 고속류의 계측에도 적용이 가능하며, 본 계측법은 현재 3차원계측법으로의 확장 완성된 단계이며, 이를 3차원성이 중요시되는 유동장의 계측 및 해석에 적용할 예정이다.

#### V. 연구개발결과의 활용계획

다상유동 측정기법 및 복사열 흡수에 대한 모델은 앞으로 이에 대한 계속적인 실험연구의 기초로 활용 예정이다. 강제대류 막비등열전달 실험장치는 고온용융물-냉각수 반응의 상관식 개발에 활용 예정이다. PIV계측기법은 유동장 변화의

물리적 기구 해석 및 3차원 계측기법 개발과 다상유동 열전달 및 Jet 유동장 측정에 활용 예정이다. 이러한 실험기법 및 열유동 모델은 TRACER-II 전산코드 개선에 활용될 예정이며, 코드 검증을 통해 용융물-냉각수 반응 해석용 전산코드를 확립한다.

# SUMMARY

## I. Title

Development and Verification of Thermal-Hydraulic Models of Fuel-Coolant Interactions in Reactor Severe Accidents

## II. Research Objectives and Background

In reactor severe accident management and mitigation strategies, the contact of molten core and coolant is necessary and unavoidable. For this reason, an appropriate analytical tool for evaluating the fuel-coolant interactions is in need. The objectives of the present research are to develop experimental methods for multiphase thermal-hydraulics and constitutive relations and to improve and verify the computer code for fuel-coolant interactions.

## III. Research Scope

Computer codes for fuel-coolant interactions are reviewed and thermal radiation absorption model in liquid layer and film boiling heat transfer correlations are reviewed. As the major work of the present research, film boiling heat transfer on a sphere in two-phase flow is experimentally studied and the technique of particle imaging velocimetry (PIV) is developed for two-phase flow measurement and flow microstructure observation.

#### IV. Results

First, computer codes for fuel-coolant interactions are reviewed and thermal radiation absorption model in liquid layer and film boiling heat transfer correlations are reviewed. As the major work of the present research, an experiment of film boiling heat transfer on a sphere in two-phase flow is performed and particle imaging velocimetry (PIV) is developed for two-phase flow.

To measure film boiling heat transfer coefficients of a sphere in two-phase flow, an experimental apparatus is designed and constructed. The present experiment is unique in making the heated sphere fall through the water-steam two-phase pool while the previous experiments were performed with stationary sphere in flowing fluid. The falling speed of the sphere and the steam generation rate are controlled. The results show that the forced convection film boiling heat transfer coefficient decreases as the sphere speed is increased, which is a contradicting trend to existing data or correlations.

The PIV system developed here successfully measures transient velocity fields of liquid-gas two-phase flows. This new technique is useful in studying the structures of transient flow field which was not possible with the conventional thermal anemometers or laser doppler anemometers. Also the PIV system employs the AOM(Acousto-Optical Modulator) and this makes it possible to apply to high-speed flows and three-dimensional flow fields.

#### V. Proposed Applications of the Results

The experimental techniques for multiphase flow and the thermal radiation model will be used as the basis for continuing research in these areas. The experimental facility and the data will be used in developing a correlation of film boiling heat transfer under steam-water two-phase flows. The PIV technique will be applied to the study of flow field transition mechanisms, three-dimensional flow field and jet flows. Such experimental techniques and thermal-hydraulic models will be applied to the improvement of the TRACER-II FCI code and verification.

# CONTENTS

Summary .....	vi
Contents .....	ix
Chapter 1. Introduction .....	1
Chapter 2. Literature Review .....	4
Section 1. Vapor explosions .....	4
1. Introduction .....	4
2. Computer codes .....	7
3. Film boiling heat transfer .....	13
4. Radiation heat transfer .....	15
Section 2. PIV (Particle Imaging Velocimetry) .....	25
1. Introduction .....	25
2. PIV basic principle .....	27
3. PIV system .....	28
Chapter 3. Research Scope and Results .....	36
Section 1. Film boiling heat transfer in two-phase flow .....	36
1. Introduction .....	36
2. Experimental apparatus .....	37
3. Results and discussions .....	38
Section 2. Two-phase flow measurement using PIV .....	53
1. Hardware and experimental method .....	53
2. Preprocessing .....	54
3. Main- and postprocessing .....	54
4. Results and discussions .....	60

Section 3. Conclusions and future work .....	74
Chapter 4. Achievement and Contribution .....	76
Chapter 5. Proposed Application of the Results .....	77
Chapter 6. References .....	78

# 목 차

제출문 .....	i
요약문 .....	iii
Summary .....	vi
Contents .....	ix
목차 .....	xi
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	4
제 1 절 증기폭발 연구 .....	4
1. 서론 .....	4
2. 증기폭발 해석코드 .....	7
3. 막비등열전달 .....	13
4. 복사열전달 .....	15
제 2 절 PIV (Particle Imaging Velocimetry) .....	25
1. 서론 .....	25
2. PIV 기본원리 .....	27
3. 구축된 PIV system .....	28
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	36
제 1 절 2상유동 막비등열전달 .....	36
1. 서론 .....	36
2. 실험장치 .....	37
3. 결과 및 고찰 .....	38
제 2 절 PIV에 의한 기액2상류 실험계측 및 결과 .....	53
1. Hardware 구성 및 실험방법 .....	53

2. 전처리 과정 .....	54
3. 본처리 과정 및 후처리 과정 .....	54
4. 계측결과 및 토론 .....	60
제 3 절 결론 및 향후계획 .....	74
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	76
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	77
제 6 장 참고문헌 .....	78

# 제 1 장 서론

원자력발전소는 만약의 사고시 방사능물질이 발전소 격납용기 외부로 유출될 경우 그 위험이 다른 산업재해에 비해 크기 때문에 이러한 예상사고(설계기준 사고: DBA)에 대비한 안전계통을 충분히 갖추어 설계되어 있으나, 1979년에 있었던 미국 TMI-2 원전 사고[1-1] 이후 원자력 발전의 안전성 재고는 기존의 설계기준사고를 넘어서 노심의 손상까지 초래되는 중대사고에 노력이 집중되어 오고 있다.

중대사고 연구분야는 가동 원전의 중대사고에 대한 안전성 평가 및 만약의 발생시 사고 완화 및 대처 방안에 관한 기술을 개발하는 분야로서, 현재 운전중인 발전소의 안전성 재고 및 대처는 물론 안전성이 획기적으로 향상되어야 할 신형경수로 및 고속로 등 미래원전 개발시에 적용될 안전계통 개발을 위해서 매우 중요한 분야이다. 새로운 원전의 설계에 중대사고 예방 및 완화 방안을 고려함으로써, 중대사고에 대한 안전하고 효율적인 대처가 가능하도록 하는 방안의 개발 연구가 매우 필요하다. TMI-2 사고를 통하여 사회적으로 원자력 안전성에 대한 의구심이 증폭됨에 따라 원전에 대한 신뢰성의 확보는 현재 각국의 원자력 분야의 중점 과제로 추진되고 있으며, 외국의 경우 중대사고 정책 및 안전성 목표 설정 등 국가적인 원자력 정책 수립을 위한 다각적 노력이 이루어지고 있다. 국내의 경우도 가동중 원전 뿐만 아니라 새로 건설될 원전의 안전성을 입증할 수 있는 체계적인 노력이 이루어져야 한다.

중대사고시 노심 용융물에 대한 다중 방호의 대상은 크게 압력용기, 원자로 공동 및 격납용기로 볼 수 있으며, 압력용기 및 원자로 공동에서는 노심 용융물의 충분한 냉각을 유지시키는 방안의 확보가 필수적이다. 특히, 노심 용융물의 냉각을 위해서는 노심 용융물과 냉각수의 접촉이 반드시 필요하며 이때 용융물-

냉각수간의 혼합 및 폭발적 반응((Fuel-Coolant Interactions, 증기폭발) 현상은 노심 용융물 냉각에 대한 초기조건의 결정 및 폭발현상으로 인한 원자로용기 또는 원자로 공동을 포함한 격납용기의 건전성을 위협하는 주요 인자로서, 현재 이에 대한 현상학적 이해 및 해석 모델의 개발이 국내외적인 주요 중대사고 연구동향이다.

노심용융물-냉각수 반응 현상에 대한 각국의 연구 결과를 보고하고 앞으로의 연구방향을 검토하는 목적으로 OECD/CSNI 주관으로 1997년 5월 일본에서 노심 용융물-냉각수 반응 현상에 대한 전문가 회의가 있었다[1-2]. 최근, 선진 각국에서 수행하고 있는 노심용융물-냉각수 반응 현상에 대한 실험연구는 QUEOS, MAGICO-2000, PREMIX, RIT, ZREX, SIGMA-2000 등과 같은 개별효과실험과 FARO, KROTOS, WFCI, ALPHA 등의 대규모 종합실험이 있다. 특히, 유럽연합 산하의 Ispra 연구소에서 수행하고 있는 FARO 및 KROTOS 실험은 실제 노심물질을 사용하여 중요한 실험 데이터를 만들고 있으며, 이 자료는 세계 여러 기관에서 해석코드의 검증에 활용중에 있다. 노심용융물-냉각수 반응 현상에 대한 해석코드로는 혼합 (Mixing) 해석에 PM-ALPHA, CHYMES, VESUVIUS, COMETA, MC3D, IKEJET이 있으며, 폭발전파 (Explosion Propagation) 해석에 ESPROSE.m 및 CULDESAC이 있으며, TEXAS-V, IFCI 및 TRACER-II는 혼합 및 폭발전파를 모두 해석하는 코드이다.

노심용융물-냉각수 반응 현상에 대한 연구는 지난 20여년 동안 많은 기초현상실험 및 대규모 실증실험과 해석코드의 개발이 국제적으로 수행되어 왔으나, 현재 원자로 안전해석 및 중대사고 대처 설계에 활용하기에는 많은 불확실성이 남아있다. 이는 주로 현상자체가 다른 산업기술에서는 경험이 부족한 고온 (~3,000K) 용융물 및 다상유동의 복잡한 특성을 가지고 있는 데 기인한다고 볼 수 있다. 최근의 OECD/CSNI FCI 전문가회의에서 제안된 바와 같이 앞으로의 연구방향은 크게 노심물질에 대한 실험자료의 보완과 기존의 해석코드의 체계적인

검증이라고 볼 수 있다. 해석코드의 검증을 위해서는 우선 각 현상모델 또는 상관식의 개발 및 개별효과실험을 통한 검증을 통해 전산코드의 체계적인 검증작업이 요구되며, 궁극적으로 종합실험데이터를 활용해 최종 검증하는 단계가 필요하다. 개발 및 검증이 필요한 주요 현상모델 또는 상관식으로는 Jet breakup model, Drop fragmentation model, 고온 다상유동에서의 Drag, 복사열전달 및 대류 열전달, Eulerian 방식의 수치해법 등이다.

본 연구에서는 중대사고시 노심용융물-냉각수 반응의 열유동 모델 개발 및 검증을 위하여 다상 열유동 실험기법 개발, 개별 상관식 개발 및 검증 및 노심용융물-냉각수 반응 해석코드 보완 및 검증을 최종 목표로 하였으며, 이를 위하여 1차년도 연구내용으로 다상유동에서의 구형체 막비등 실험, 물의 복사열 흡수 특성 이론 연구, 다상유동의 PIV 측정 기법 개발을 수행하였다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 증기폭발 연구

#### 1. 서론

증기폭발이란 고온의 용융물질과 냉각수와 같은 저온의 액체가 접촉 또는 혼합되었을 때 급속한 열전달 및 이로 인한 고압의 증기생성으로 폭발적인 반응을 보이는 현상으로, 제강산업 등 이러한 조건을 갖을 수 있는 분야에서 안전문제로 오랫동안 관심을 보여 왔다. 특히, 핵연료의 용융이 발생하는 원자로 중대사고의 경우 이러한 증기폭발(또는 노심용융물-냉각수 반응)의 발생이 가능하며, 1979년에 있었던 미국 TMI-2 원전 사고 이후 원자력 발전의 안전성 재고는 기존의 설계기준사고를 넘어서 노심의 손상까지 초래되는 중대사고에 노력이 집중되어 오고 있으며, 특히 노심용융물-냉각수 반응 현상(Fuel-Coolant Interaction: FCI)은 현재 국제적인 중대사고 쟁점현상중의 하나로 국내는 물론 선진국 각 규제기관 및 연구기관에서 연구를 계속하고 있다.

원자력발전소 중대사고시(냉각재 상실사고와 긴급냉각수주입 실패), 핵분열생성물의 붕괴열로 인하여 원자로 노심이 용융되어 원자로용기 하부플레넘으로 이동될 경우 여기에 남아있는 냉각수와 상호 접촉하여 증기폭발을 가능케 한다. 이러한 경우 매우 큰 압력의 발생으로 고속의 비사체(용융물, 냉각수 기상과 액상의 혼합체)가 생성되어 원자로용기 뚜껑을 때릴 수 있다. 이때 충격량이 매우 커서 원자로용기 상하부덮개 접합볼트가 부수어지고 원자로용기 상하부덮개가 격납용기를 향해 발사될 경우 격납용기의 건전성을 위협하게 된다( $\alpha$ -mode Failure).

용융물과 냉각재가 상호 접촉하는 유형에 따라서 증기폭발이 일어나는 메커니즘은 달라지는데, 이러한 유형은 일반적으로 3가지로 나뉜다. 첫 번째가 -비교적 관측되기 쉬운- 용융물이 냉각재 내부에 투입되는 경우이며 다음은 냉각재가 용융물내부로 투입되는 경우이다. 그리고, 세 번째는 용융물과 냉각재가 성층을 이루는 경우이다. 원자력발전소 중대사고시 예상되는 증기폭발의 대부분은 용융물이 냉각재 속으로 떨어지면서 발생할 것으로 예상되며 만약 성층을 형성한 이후에는 냉각의 과정을 거칠 것으로 판단된다. 따라서, 이 분야의 연구는 대체로 용융물이 떨어지면서 혼합되고 기폭되어 폭발하는 첫 번째의 경우에 대해서 집중되어 왔다고 볼 수 있다. 또한 폭발이 진행되는 공간적인 범위에 따라 소규모 증기폭발과 대규모의 증기폭발로 나눌 수 있다. 소규모의 증기폭발이란 용융물과 냉각재의 부피비가 크고 폭발력이 작은 것을 말한다. 이에 반해 대규모의 증기폭발의 두 액체의 부피비가 거의 같으며 강력한 폭발력으로 넓게 진행된다.

증기폭발 현상은 열전달, 상변화, 압력전파 등의 다양한 현상을 내포하고 있으며 그 거동이 최소한 2차원적이고 매우 빠른 천이현상이라는 점에서 매우 복잡하나, 실험적 관측을 통하여 대규모 증기폭발의 경우는 뚜렷이 구분할 수 있는 4단계 -혼합, 기폭, 전파, 팽창(Premixing, Triggering, Propagation, Expansion)- 를 거치는 것으로 알려져 있다[2-1]. 따라서 예전에는 이렇다할 기준이 없었던 증기폭발에 대한 연구 또한 이러한 구분에 의해 각각의 단계별로 연구가 세분화되어 진행되어 왔다. 그림2.1에는 용융물이 투입된 이후 용융물과 냉각재가 폭발을 일으키는 4단계의 개념도가 제시되어 있다.

먼저, 용융물이 냉각재 내부에서 적절한 크기의 알갱이로 쪼개져서 냉각재의 안정된 막비등으로 비교적 그 현상의 timescale이 큰( ~1초) 혼합단계(Premixing)가 있다. 혼합단계는 증기폭발 연구의 절반을 차지할 만큼 많은 연구가 수행되었는데 이는 이 단계에서의 혼합물의 상태가 최종의 에너지 발생

과 밀접한 관계가 있기 때문이다. 다음으로 이 안정된 상태가 어떠한 불확실한 원인으로 인하여 부분적인 막비등 파괴로 급격한 열전달과 증기발생으로 인한 압력파를 형성하는 기폭단계(Triggering)가 있다. 실제로 이러한 기폭현상은 그 현상의 관측이 매우 어렵지만, 일단 혼합단계에서 형성된 혼합물이 기폭이 되었다면 그 기폭의 복잡한 현상은 압력파가 진행하며 성장하는데는 어떠한 영향도 주지 않을 것이라는 것이 신뢰성을 주고 있다.

그리고 기폭 후 압력이 매질을 진행해가면서 계속적으로 용융물을 부수고 열전달, 상변화를 일으키는 전파단계(Propagation)가 있다. 이 단계는 용융물 분쇄, 열전달, 상변화 등 복잡한 과정이 아주 짧은 시간(수십  $\mu\text{s}$ 의 timescales)에 일어난다. 마지막으로 고압의 혼합체가 팽창하면서 주위에 기계적 에너지를 전달하는 팽창단계(Expansion)가 있다. 이 단계는 실제로 주위 구조물에 물리적인 손상을 주는 과정이다.

이처럼 복잡하게 진행되는 증기폭발의 현상을 이해하고 이를 해석하기 위해서 많은 실험 및 해석적 연구가 진행되어왔다[2-1]. 증기폭발 실험은 그 모사 스케일에 따라 크게 소규모실험(small scale)과 대규모(large scale)실험의 두 가지로 나눌 수 있다. 이 스케일의 구분은 명확한 것은 아니며 단지 사용된 용융물의 무게가 몇g이나 혹은 몇 kg이나에 따라 나눈 것이다. 소규모 실험은 주로 용융물과 냉각재 반응을 고속촬영 등을 통하여 증기폭발의 기폭이나 용융물분쇄 등을 관찰할 목적으로 실행된다. 이에 반하여, 대규모실험의 경우는 강력한 증기폭발의 증거 확보, 증기폭발의 공간적 진행, 열에너지로부터 생성되는 기계적 에너지의 양 평가, 스케일효과 등을 목적으로 수행된다. 과거 많은 실험을 통하여 증기폭발은 스케일에 따라 그 폭발 거동이 다르며, 대규모실험일지라도 이를 원자로의 경우에 바로 적용하는데는 한계가 있다고 볼 수 있다.

## 2. 증기폭발 해석코드

노심용융물-냉각수 반응을 해석하는 것은 예로 그림2.2와 같은 다상 혼합물의 열 및 유동을 수학 및 수치해석적으로 모사하는 것으로, 현재 노심용융물-냉각수 반응 현상에 대한 해석코드로는 혼합(Mixing) 해석에 PM-ALPHA, CHYMES, COMETA, IKEJET이 있으며, 폭발전파(Explosion Propagation) 해석에 ESPROSE.m, CULDESAC 및 IDEMO가 있으며, 혼합 및 폭발전파를 모두 해석할 수 있는 코드는 TEXAS, IFCI, MC3D, JASMINE 및 TRACER-II가 있다. 이들 코드의 특징을 정리하면 표2.1과 같다.

해석코드를 구성하는 주요 모델의 특징으로는 우선 다상유동의 지배방정식과 수치해법상에서 용융노심을 Eulerian과 Lagrangian으로 다루는 차이가 있으며, 기하학적 차원에서 1차원에서 3차원까지 다양하다. 냉각수(물,증기)는 Eulerian으로, 용융노심은 Lagrangian으로 다루는 것이 바람직하나 수치해법상 물과 증기와의 coupling 문제상 Eulerian으로 다루는 것이 용이하며, 이 경우

표 2.1. 주요 증기폭발 해석코드

Code	Country	Dim.	Fluids	Fuel	Remarks
CHYMES	영국	2	3	E	premixing
COMETA	EC	1	5	L	premixing, FARO
CULDESAC	영국	2	3	E	explosion
ESPROSE.m	미국	2	3	E	explosion
IFCI	USA	2	4	E	premixing, explosion
IKEJET/IDEMO	독일	1	3	E	premixing, explosion
JASMINE	일본	3	3	E	premixing, explosion
MC3D	프랑스	3	4	E	premixing, explosion
PM-ALPHA	미국	2	3	E	premixing
TEXAS	미국	1	3	L	premixing, explosion
TRACER-II	한국	2	3	E	premixing, explosion
(주) E: Eulerian, L:Lagrangian					

area transport equation을 고려하여 용융노심을 Eulerian으로 다루는 문제점을 보완하고 있다. 기하학적 차원은 적어도 2차원 이상이 필요하며, 현재 원자로의 구조 및 관련 상관식의 적용 범위상 2차원 모델이 적절하다고 볼 수 있다.

용융물 분쇄(Melt Breakup) 모델은 혼합과정에서 매우 중요한 부분으로 현재 크게 (a) semi-empirical correlations, (b) Rayleigh-Taylor instability, (c) Kelvin-Helmholtz instability의 현상으로 구분된다. 실험상관식은 이용하기에 용이하나 실험데이터의 부족으로 적용범위가 검증되지 않고 있으며, instability에 대한 자세한 모델들은 현상학적으로 더 자세히 묘사하고 있으나 이의 복잡한 관계식 및 해를 구하는 방법에 의해 해석코드에 적용하는데 어려움이 많다.

증기폭발과정에서 기계에너지변환률 예측에 매우 중요한 melt fragmentation rate에 대한 모델들은 현재 주로 상관식 형태이며, 실험데이터의 부족으로 아직 검증되지 못하고 있으며, 주로 해석결과와 종합실험결과와 비교함으로써 타당성 여부를 판단하고 있다. UC-Santa Barbara의 SIGMA-2000 실험[2-2]에서 체계적인 데이터를 만들고 있으나 아직 상사물질(Sn, Al, oxide)에 관한 데이터에 국한되고 있다. 다상유동 해석에서 상간의 열 및 운동량교환에 관한 관계식은 어느정도 정리되어 있으나 이들이 주로 원자로 물질 및 조건이 아닌 대상에 근거하고 있어 적용성 여부가 아직 체계적으로 검증되지 않고 있다.

#### 가. CHYMES/CULDESAC

Fletcher와 Thyagaraja[2-3]는 가압경수로에서 용융노심과 냉각수의 혼합을 모사하기 위하여 천이상태, 2차원적, 2상 유동 모델(용융물과 냉각재)-CHYMES-를 개발하였다. 이 모델에서는 냉각재를 열적평형상태(포화상태)

로 보아 유동장에 따른 복잡한 교환항이 무시되었다. 최근 CHYMES의 계산은 작은 직경을 가진 불 집합체의 냉각수내로의 분사에 대한 모사를 실시하였는데, 이 계산은 옥스퍼드대학에서 실시된 실험결과와의 비교가 이루어졌다[2-4]. 이 결과 CHYMES는 투입속도 등에서 비교적 잘 들어맞으나, 반경방향의 분포가 실험에 비해 낮게 평가되는 것으로 나타났다. Fletcher는 구형 불의 부상력이 난류로 인한 2차류에 의해 크게 지배됨을 지적하고 이를 개선하기 위해서는 혼합모델에 난류를 적절히 모사하는 것이 중요하다고 하였다.

Fletcher[2-5]는 실제적인 증기폭발 전파과정 예측보다는, 주로 수치적인 해를 구하고 민감도 분석에 주안점을 두고 천이상태, 1차원적, 3상 유동(용융물, 용융과편, 냉각재)의 CULDESAC 모델을 개발하였다. 따라서, 이 모델에 수록된 질량, 운동량, 에너지 상관식은 비교적 복잡한 형태를 피하고 있으며, 특히 냉각재는 기상과 액상을 따로 구분하지 않고 있어 유동장에 따른 어떠한 현상도 고려되지 않고 있다. Fletcher는 증기폭발에 있어서 가장 적절한 용융물분쇄모델은 경계층박탈에 의한 용융물분쇄라고 보았다.

#### 나. IFCI

SNL의 Young[2-6]은 IFCI라고 불리는 증기폭발 모델을 개발하였다. IFCI의 목적은 용융물-냉각재의 반응을 가능한 한 기계적인 방법(Mechanistic Method)으로 풀고자 하는 것이었다. IFCI는 경수로에서 가상 노심용융사고를 분석하기 위해서 고안된 MELPROG/MOD1 모델중의 FLUIDS라는 모듈로부터 개선된 것이다. 이 모델은 2차원적이며 냉각재기상과 냉각재액상, 용융물과 고화된 용융물 등의 4상으로 구성된 모델이다. 이 네 개의 각상은 각기 질량, 운동량, 에너지 보존식을 가지고 있다. IFCI는 이들 보존식을 SETS법을 이용하여 해를 구하고 있는데, SETS법에서는 각 구성물에 대한 질량, 운동량, 에너지보존식의 한 세트를 field로 본다. 이들 field사이의 질량, 운동량, 에너지

교환은 이들 방정식 세트에 결합된 항들을 말한다.

IFCI는 주로 혼합단계를 해석하는데 주로 사용되어 왔다. 이 코드는 FITS 실험을 분석하는데 사용되었다. 계산결과, 최종 용융물의 크기 분포와 용융물을 투과하는 압력전면의 전파속도 등이 실험결과와 잘 일치함을 보여주었다. 현재 IFCI 코드는 증기폭발의 전파단계까지 모사할 수 있도록 확장되어 있지만 이에 대한 체계적인 검증은 아직 제시되지 않고 있다.

#### 다. PM-ALPHA/ESPROSE.m

Theofanous 등은 증기폭발의 혼합 및 전파과정을 해석하기 위하여 2차원적, 3유체의 거동을 모사하는 두 개의 컴퓨터 모델을 개발하였다. PM-ALPHA[2-7,2-8]와 ESPROSE-m[2-9,2-10]가 각각 혼합, 전파과정을 모사하기 위한 컴퓨터 모델이다. PM-ALPHA모델은 혼합과정을 해석하기 위한 천이상태, 2차원적, 3유체 컴퓨터 모델이다. 이 모델에서는 운동량 및 에너지 교환항이 각각 유동장의 형태에 따라서 기술되어있다. 운동량교환모델의 경우 용융물의 부피분율이 0.3이하의 경우 냉각수의 기공율에 의거하여 Bubbly, Churn-turbulent, Droplet 유동으로 나누고 Bubbly, Churn-Turbulent인 경우에는 냉각수를 연속체로 간주하고 용융물과 증기를 Dispersed Phase로 보아 주로 마찰력에 의거한 운동량 교환항을 도출했다. 용융물의 부피분율이 0.3이상일 경우는 다공성유동에 따라 이를 기술하였다. 에너지교환모델에서는 냉각수의 기공율 0.7을 기준으로 그이하의 경우는 용융물 주위로 막비등에 의한 열전달 메커니즘이 이루어지며, 그 이상일 경우는 증기연속체 속에 용융물과 냉각수가 산재되어 있어 주요 열전달 메커니즘은 용융물로부터 증기로의 대류 및 냉각수로의 복사이다.

ESPROSE-m 모델의 가장 큰 특징은 순간적 Bond수로 표시된 용융물분쇄 모델과 m-유체(냉각수 증기와 용융파편 그리고 Entrained된 냉각수)의 개념의

적용이다. 기존 ESPROSE-a모델이 용융과편으로부터 모든 열이 모든 냉각수에 주어진 반면, m-유체 개념은 용융과편으로부터의 모든 열이 일부냉각수에만 전달된다는 개념에서 시작된다. 그러나 m-유체로 유입되는 냉각수의 양의 결정에 있어서 정량화문제 등을 해결해야 할 과제가 남아있다.

#### 라. TEXAS

TEXAS 모델은 원래 LMFBR 안전성 관련 쟁점을 해결하기 위한 용융물-냉각재 반응 실험을 계획하고 분석하기 위하여 개발된 인자적 모델이었다. Chu와 Corradini[2-11]는 동력학적인 용융물 분쇄모델과 계면 질량, 운동량, 에너지 수송에 관한 상관식을 도입함으로써 용융물-냉각재반응의 혼합과정 해석모델 TEXAS-II를 개발하였다. 이를 다시 Tang과 Corradini[2-12]가 증기폭발시 전과과정까지 모사할 수 있도록 확장하였다(TEXAS-III).

TEXAS-III는 증기폭발의 혼합 및 전과과정의 일련의 완전한 증기폭발을 모사할 수 있는 천이상태, 일차원적, 3상 유동모델이다. 이 모델에서는 냉각재의 기상과 액상의 열적 기계적 비평형을 허락하고 있으며, 좀 더 현실적인 열전달현상을 모사하기 위하여 유동영역천이를 다룰 수 있게 하였다. 이 모델의 가장 큰 특징은 냉각재의 액상과 기상은 Eulerian모델인데 반해서 용융물은 Lagrangian 모델을 사용하고 있다는 것이다. 따라서, 용융물은 각기 방울 형태를 이루게 되어서 그 운동을 각기 추적 가능하게 된다. 따라서, 용융물이 제트형태이거나 Bulk 형태일 경우 실제상황에 맞는 처리를 하기는 힘들지만, 용융방울이 천이현상을 거치면서 쪼개지고 이동하는 현상(용융방울 분쇄)을 비교적 쉽게 처리할 수 있다. 혼합단계에서의 용융물 쪼개짐 모델은 수력학적 불안정(Rayleigh-Taylor Instability)에 기본을 두고있다.

Chu와 Corradini는 액체방울의 다단계 쪼개짐 원리를 기본으로 하여 용융방울이 형태가 변형되고 동력학적으로 명확하게 몇 개의 작은 용융방울로 쪼

개지는 가정 하에 동력학적 쪼개짐 모델을 개발하였다. 쪼개짐 모델에는 Taylor 불안정성만이 고려되었으며 수평방향의 속도차에 의한 전단력(Shear Force)은 무시되었는데, 이는 증기막의 존재로 인해 이들 효과가 작다고 본 때문이다.

전과과정에서 용융물분쇄모델은 Kim[2-13]의 모델을 기본으로 하여 개발되었다. Kim의 모델은 열적 수력학적 효과를 고려한 4단계로 이루어진 모델이다. 먼저, 용융방울은 막비등으로 둘러싸여 있다. 외부 압력펄스에 의해 증기막과 냉각재 액상사이에 불안정성과동이 야기되고, 구형의 형태를 가진 Rayleigh-Taylor 불안정성에 의해 냉각재액상제트가 용융물 쪽으로 생성된다. 용융물 속에 갇힌 냉각재는 용융물로부터의 열전달로 인해 빠르게 기화하면서 용융물의 표면이 팽창하게 되고 용융물은 분쇄된다. Tang과 Corradini는 위 Kim 모델에서 용융물분쇄율은 용융방울의 표면적과 평균제트속도에 비례한다는 반-경험적 모델을 개발하였다.

TEXAS-III는 용융물을 Lagrangian으로 처리함으로써 혼합단계의 동력학적 인 용융물 쪼개짐 현상 연구에 유리하며 전과단계까지 해석할 수 있게 보강됨으로써 증기폭발현상의 유기적인 해석이 가능하다. 그러나 증기폭발실험은 대부분 용융물을 제트나 Bulk 형태로 유입하고 있어 이를 처리하는데 적합하지는 않다. 또한 1차원적 계산에 그치고 있어서 용융물의 반경방향의 분포를 모사하지 못하는 것은 큰 단점으로 보인다.

#### 마. TRACER-II

최근 국내에서 개발된 증기폭발 해석코드인 TRACER-II는 Bang and Park[2-14]에 의해 개발되었다. TRACER-II는 2차원, 3유체 지배방정식으로 증기폭발의 혼합 및 폭발전과를 모두 해석할 수 있는 모델로, 2차원 2유체 모델인 K-FIX[2-15]를 기초로 하여 개발된 코드이다. 국외의 기존 해석코드에

비해 최근에 개발되어 지금까지 개발된 많은 상관식 및 용융물 분쇄 및 파쇄 모델을 참고로 하여 개발되었으며, 특히 냉각수 액상과 기상은 각각 과열 (superheated), 과포화(supersaturated) 상태가 허용되어야 하므로, 냉각수 액상과 기상의 비평형 상태에 적합한 물의 상태방정식을 개발하였다.

#### 라. 해석코드간 비교 (ISP-39)

OECD/CSNI의 요청으로 EC Ispra의 주관으로 수행한 International Standard Problem 39 (ISP-39)에서 이러한 증기폭발 해석코드의 상호비교를 FARO L-14 실험에 대해 해석하여 비교한 결과 코드간에 많은 차이를 보였으며, 특히 실험용기내의 압력, 혼합체 내의 냉각수 온도, 혼합체 높이, melt로부터의 총 에너지전달양 등에서 많은 분산을 보였다. 그림2.3은 FARO L-14 실험의 용기내 압력상승에 대한 각 코드의 예측치를 실험결과와 함께 표시한 그림이다 [2-16].

1997년에 있었던 OECD/CSNI FCI Specialist Meeting 등에서 제시된 앞으로 개선을 요구하는 주요 모델로는 (a) Eulerian 수치해법상의 numerical diffusion, (b) breakup 모델, (c) fragmentation 모델, (d) thermal radiation 모델, (e) 상간의 열 및 운동량교환 상관식 등이다.

### 3. 막비등열전달

막비등(film boiling)은 액상과 고온의 표면의 온도차가 매우 클 경우 주로 작용하는 열전달 현상으로 극저온 공학, 금속공학 등의 분야에서 주로 관여되는 열전달 모드이다. 이러한 막비등열전달은 최근 원자로 중대사고 분야에서 관심이 증대되었으며, 이는 고온의 노심용융물과 냉각수간의 열전달이 증기폭발 현상의 주요 변수이기 때문이다. 고온의 노심용융물이 냉각수 풀로

이동될 때 대략 구형의 알갱이로 분쇄되는 용융물은 냉각수 내에서 주로 막비등 열전달에 의해 증기를 생성시키며, 생성된 증기는 용융물-냉각수-증기의 다상유동을 형성한다. 여기서 이러한 다상 혼합물의 증기 분율은 증기폭발의 강도를 결정하는 중요 인자로서, 증기폭발 현상을 정확히 해석하기 위해서는 막비등열전달에 대한 정확한 모델이 필요하다. 여기서 구형의 용융물이 속해 있는 유체가 액상-증기 2상유동의 특징을 보이며, 냉각수는 포화상태 또는 과냉각 상태이다.

지금까지 막비등 열전달 분야에서는 주로 포화상태 또는 과냉각 상태의 액상만의 유체(단상)에서 풀비등 또는 강제대류 막비등 열전달에 대한 실험 또는 이론적 모델이 연구되었다[2-18]. 그러나, 2상유동 하에서의 막비등 열전달에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다. 이러한 이유로 최근 Lui-Theofanous 연구팀에서 2상유동 막비등열전달 실험과 이론적 고찰이 시도되었다[2-19]. 표2.2에는 구형체에 대한 막비등열전달 상관식을 정리하였다. Lui-Theofanous에 의해 제안된 상관식을 이용하여 단상 포화의 경우와 2상유동의 경우에 대해 액상의 속도에 대한 막비등 열전달계수를 표시하면 그림2.4와 같다. 여기서 2상유동 상관식은 bubbly flow의 경우에 해당하며, 액상의 속도는 액상의 superficial velocity와 기공율을 이용하여 다음과 같이 계산된 값이다.

$$U_l = \frac{V_l}{1-\alpha} \quad (2.1)$$

단상과 2상유동의 경우를 비교하면 액상 속도 0.6 m/s 이하에서는 2상유동의 경우 단상유동보다 막비등 열전달계수가 크며, 이보다 큰 액상속도에서는 단상의 경우가 더 큼을 볼 수 있다. 그러나, 이 상관식을 냉각수 풀에서 강하하는 용융물에 대해 적용할 경우 적절한 액상 속도의 선택이 문제일 수 있다.

#### 4. 복사열전달

고온의 노심용융물과 냉각수가 혼합되어 있을 때 주요 열전달 모드는 막비등이며, 이 때 용융물로부터 냉각수로의 복사열전달은 증기생성량 및 냉각수의 가열에 주로 기여한다. 여기서 복사열에 의한 증기생성량은 증기와 액상의 경계면에 흡수되는 복사열에 의해 지배되며, 따라서 복사열의 액상 냉각수에서의 흡수정도는 증기생성량을 크게 좌우한다. 노심용융물과 냉각수 반응을 해석하는 모델에서는 이에 대한 자세한 모델보다는 복사열이 전부 증기생성에 소요되거나 아니면 모두 액상에 흡수되는 bounding 예측이나 또는 일정비를 적용하여 분리하는 parametric 접근을 많이 시도하여 왔다.

액막에서 복사열의 통과비(transmittance),  $T(d)$ 는 일반적으로 다음과 같이 표현된다[2-25].

$$T(d) = \frac{2 \int_0^1 \mu_1 \left[ \int_0^\infty \pi i_\lambda(0) \{1 - \rho(\mu_1)\} \tau_\lambda(d, \mu_2) d\lambda \right] d\mu_1}{\int_0^\infty \pi i_\lambda(0) d\lambda}$$

$$\mu_1 = \cos \theta_1$$

$$\mu_2 = \cos \theta_2$$

$$\tau_\lambda(d, \mu_2) = \exp\left(-\frac{a_\lambda d}{\mu_2}\right)$$

$$i_\lambda = \frac{2C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.2)$$

$$a_\lambda = \text{absorption coefficients}$$

$$d = \text{layer thickness}$$

$$C_1 = 0.59544 \times 10^{-16} W \cdot m^2$$

$$C_2 = 14,388 \mu m \cdot K$$

여기서 Snell의 법칙에 따르면,

$$\mu_2 = \cos\left(\frac{n_1}{n_2} \sin^{-1}\theta_1\right) \quad (2.3)$$

$\theta_1$  = incident angle at water surface

$\theta_1$  = refracted angle

$n_1, n_2$  = refraction index for medium 1 and 2

다음으로 반사비(reflectance),  $R(d)$ , 는 다음과 같다.

$$R(d) = \frac{2 \int_0^1 \mu_1 \left[ \int_0^\pi \pi i_\lambda(0) \rho(\mu_1) d\lambda \right] d\mu_1}{\int_0^\infty \pi i_\lambda(0) d\lambda} \quad (2.4)$$

따라서 흡수비(absorptance)는 다음과 같이 계산된다.

$$A(d) = 1.0 - T(d) - R(d) \quad (2.5)$$

이상의 모델을 근거로 Kim[2-26]은 복사열원의 온도에 대해 물의 액막깊이 따른 복사열의 흡수비를 계산하였으며, 그 결과는 그림2.5와 같다. 이 그림에서 물의 두께 0.1 mm에서 35-40%, 1 mm에서 60-70%의 복사열이 흡수되는 것을 볼 수 있다.

Jacobs et al.[2-27]은 이러한 복사열 흡수에 대해 Fletcher의 이론적 결과를 사용하기 쉬운 간편한 식으로 다음과 같이 표현하였다.

$$A(d) = a \ln(d^b + 1) \quad (2.6)$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 curve fitting에서 결정된 값으로 복사열원 온도의 함수이

다. 그림2.6은 이 관계식에 의한 복사열 흡수비를 보여주고 있다. 위의 Kim의 결과와 비교하면 유사한 흡수비를 나타낸다. Jacobs 등은 실제 용융물이 구형체로 막비등열전달 모드에 있으므로 주위에 증기막이 물과 사이에 놓여 있는 경우에서 복사열이 반사, 통과 및 흡수되는 과정을 기하학적 view factor를 고려하여 해석하였으며, 이 경우 용융물이 2300 K일 경우 23% 정도의 복사열이 증기-물 경계면에서 흡수됨을 제시하였다. 이 증기-물 경계면에서 흡수된 복사열은 바로 증기생성에 기여한다고 볼 수 있다.

표 2.2. 구형체의 막비등 열전달계수 상관식

Regime	Correlation	Constant	Reference
Saturated pool	$Nu = C_o(Ar/Sp)^{1/4}$	0.62 0.586 0.8	Frederking(1963) Dhir(1978)
Subcooled pool	$Nu = C_o(Ar/Sp)^{1/4} Mc^{1/4}$ $Nu/(1+2/Nu) = C_o(Ar/Sp)^{1/4} Mc^{1/4}$	0.696 K(d)	Michiyoshi(1988) Theofanous(1995)
Saturated forced convection	$Nu = C_o Re_i^{1/2} (\mu_l / \mu_v) (KR^4/Sp)^{1/4}$	0.393 0.553/1.11 0.5	Kobayasi(1966) Epstein(1980) Theofanous(1995)
Subcooled forced convection	$Nu = Nu_s + C_o Re_i^{1/2} (\mu_l / \mu_v) (Sc/Sp)$ $Nu = C_o Re_i^{1/2} Pr_i^{1/2} (\mu_l / \mu_v) (Sc/Sp)$ $Nu = Nu_s + C_o Re_i^{0.77} Pr_i^{1/2} (\mu_l / \mu_v) (Sc/Sp)$	0.8 0.977/2.0 0.072	Dhir(1978) Epstein(1980) Theofanous(1995)
Two-phase flow (bubbly flow)	$Nu = C_o Re_i^{0.2} (\mu_l / \mu_v) (KR^4/Sp)^{1/4} (U_i = V_l / (1 - \alpha))$	12.5	Theofanous(1995)

$Nu = hd/k_v$ ,  $Re_i = \rho_l U_i d / \mu_l$ ,  $Pr = \mu c_p / k$ ,  $Ar = g(\rho_l - \rho_v) d^3 / (\rho_v \nu_v^2)$ ,  $K = \rho_l / \rho_v$   
 $R = [(\mu_l \rho_l) / (\mu_v \rho_v)]^{1/2}$ ,  $Sc = c_{p,l} \Delta T_{sub} / (h_{fg} Pr_l)$ ,  $Sp = c_{p,v} \Delta T_{sup} / (h_{fg} Pr_v)$   
 $Mc = E^3 / [1 + E / (Sp Pr_l)] / (R Pr_l Sp)^2$   
 $E = (A + CB^{1/2})^{1/3} + (A - CB^{1/2})^{1/3} + (1/3) Sc$ ,  
 $A = (1/27) Sc^3 + (1/3) R^2 Sp Pr_l Sc + (1/4) R^2 Sp^2 Pr_l^2$ ,  
 $B = (-4/27) Sc^2 + (2/3) Sp Pr_l Sc - (32/27) Sp Pr_l R^2 + (1/4) Sp^2 Pr_l^2 + (2/27) Sc^3 / R^2$   
 $C = (1/2) R^2 Sp Pr_l$

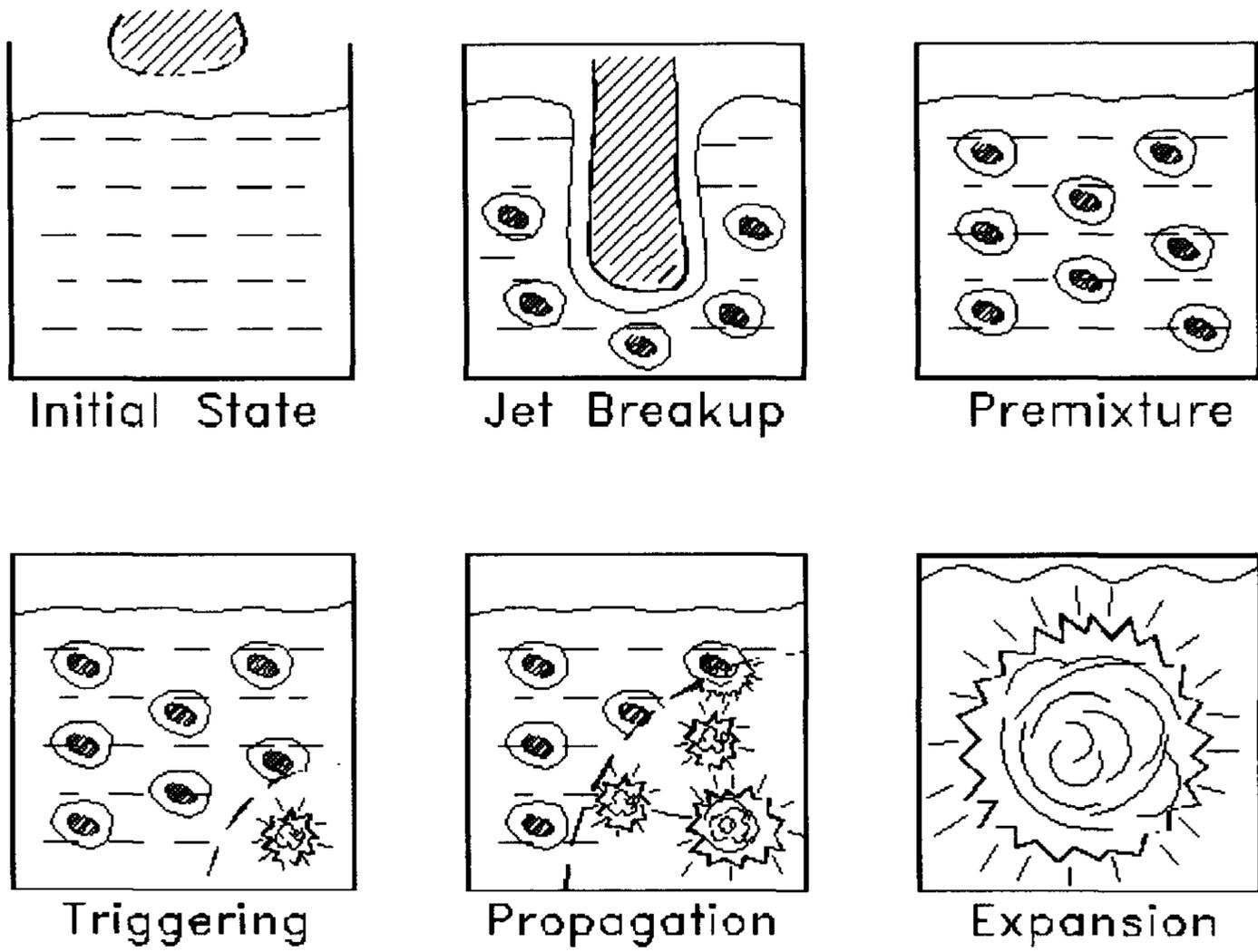
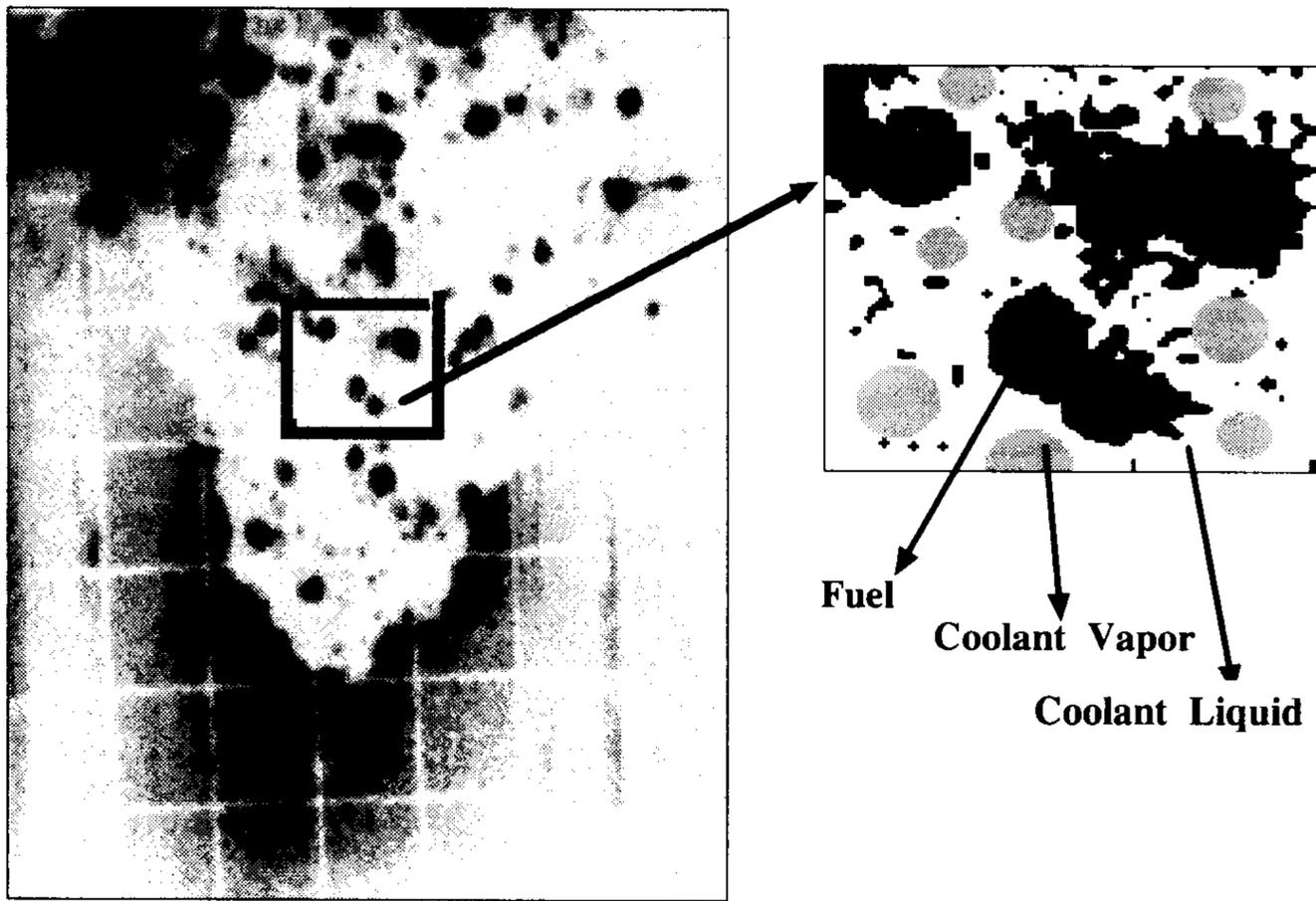


그림 2.1. 증기폭발 현상의 일반적 진행 과정



ALPHA Test [2-17]

그림 2.2. 증기폭발 현상의 개념도

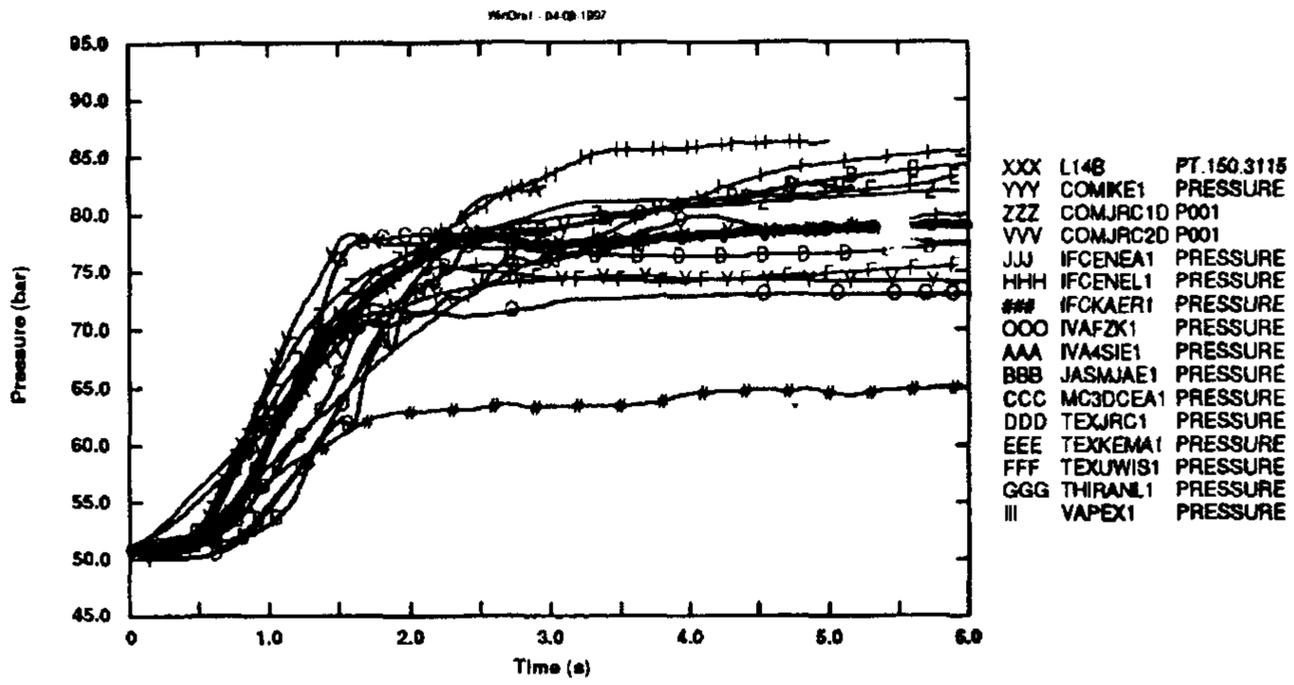


그림 2.3. FARO L-14 실험에 대한 전산코드의 해석결과 비교 (ISP-39)

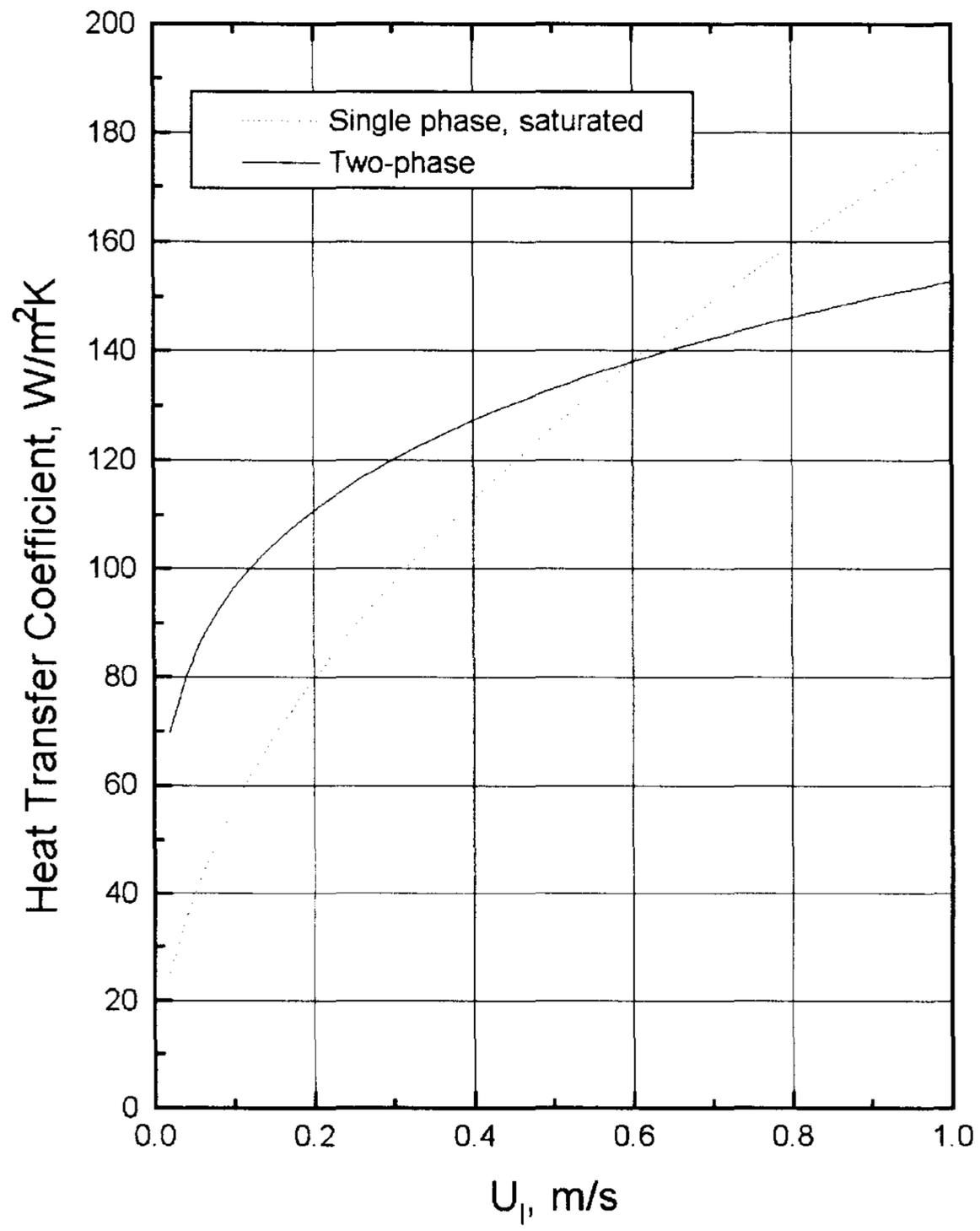


그림 2.4. Lui-Theofanous의 2상유동 막비등 열전달계수 상관식

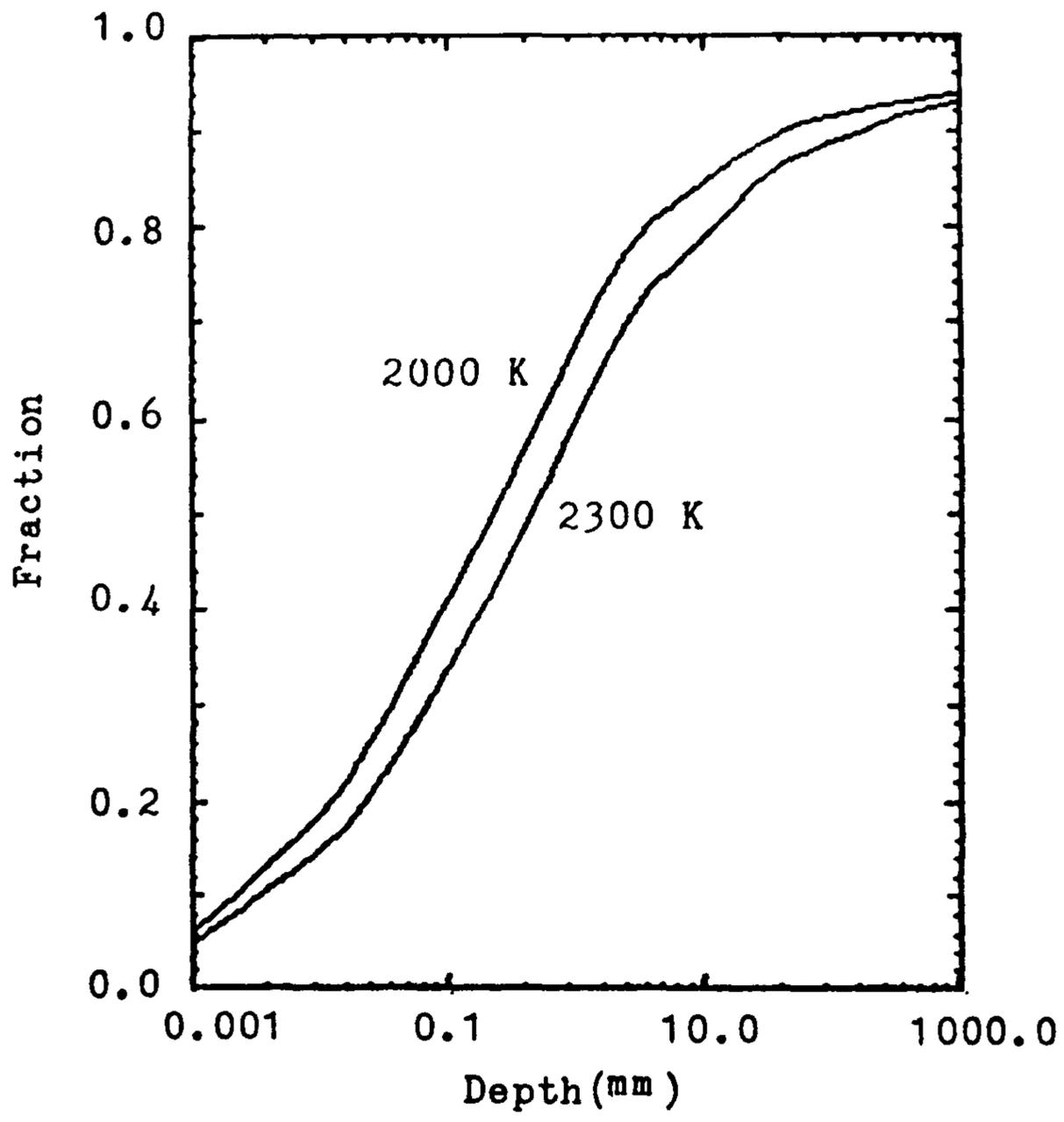


그림 2.5. 액상 물에서의 깊이에 따른 복사열 흡수율 [2-26]

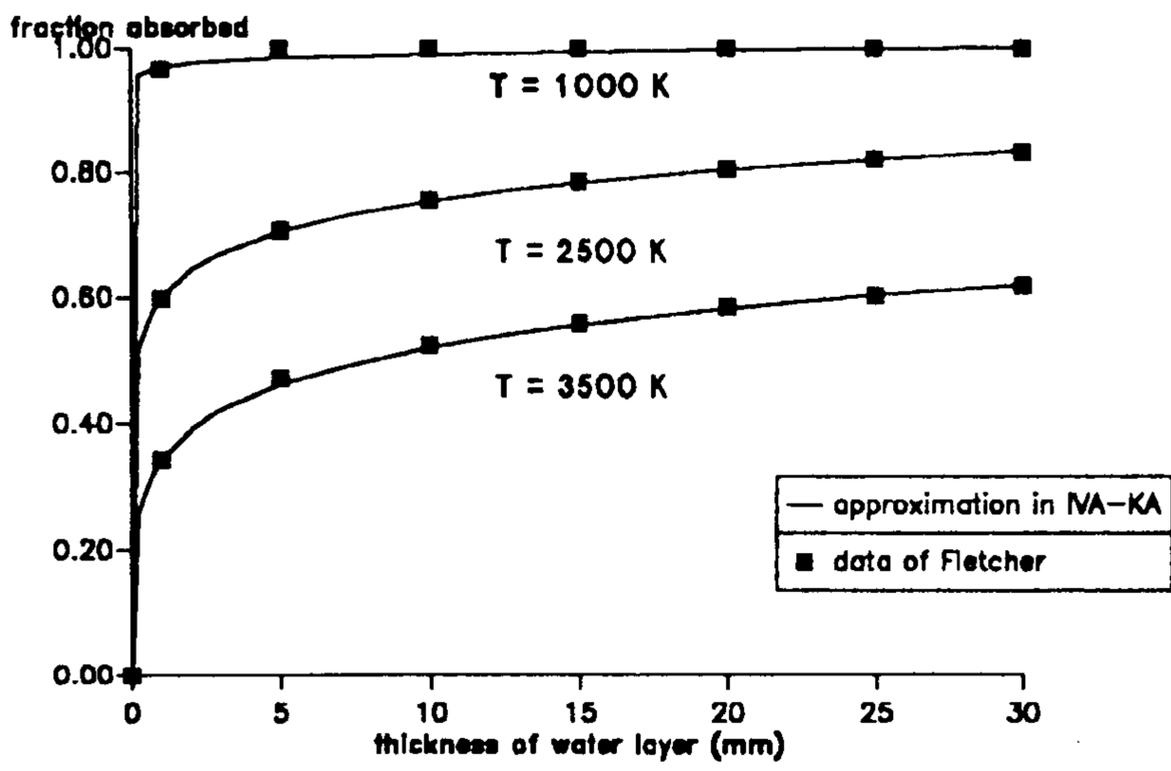


그림 2.6. 액상 물에서의 깊이에 따른 복사열 흡수율 [2-27]

## 제 2 절 PIV (Particle Imaging Velocimetry)

### 1. 서론

열유체유동의 해석을 위해서는 연속방정식과 세 방향의 운동방정식 그리고 열역학적 에너지방정식으로 구성되는 지배방정식의 해를 해석적으로 구하여 다섯 가지의 물리량( $u, v, w, p, T$ )을 구하는 것을 궁극적인 목표로 하고 있다. 이들 물리량들을 구하기 위해서는 수치계산에 의한 방법(CFD: Computational Fluid Dynamics)과 실험에 의한 방법을 들 수 있다.

일반적으로 실험적 해석을 위한 유체의 속도계측방법으로는 피토관, 열선유속계(hot wire), LDV(Laser Doppler Velocimetry)등이, 압력계측방법으로는 프로브(probe)등이, 그리고 온도계측방법으로는 열전대(thermo-couples)등이 사용되고 있으나 이들 계측방법들로부터 얻어낸 정보는 정량적이기는 하지만 점계측에 의한 것이기 때문에 유동장 전체의 거동을 해석에는 도움을 주지 못할 뿐 더러 특히 기액2상류의 경우는 기포로 인하여 속도나 압력계측이 어려운 실정이다.

이를 보완하기 위한 실험적 방법이 유동가시화(flow visualization)방법이다. 유동가시화는 유동현상을 직접 관찰함으로써 유동장 전체에 걸쳐서 정성적 특성을 해석할 수 있는 가장 기본적인 실험기법이다. Dye tracer, hydrogen bubble, smoke 등을 이용한 고전적 유동가시화 방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만, 정확한 유동해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있어 왔다. 이를 달성하기 위하여 많은 연구가 다양하게 진행되어 왔는데[2-28,29,30] 최근의 급속한 화상매체기기의 발달에 힘입어 지금까지는 원리적으로만 가능하였던 기법들이 실용화단계에 이르렀다. 특히, 컴퓨터와 디지털화상처리기술(digital image processing)의 발달은 유동장에 투입된 가시화용 추적입자들의 거동을 정량화 할 수 있게 하였는데 이를 근간으로 한 유동장의 속도계측법이 PIV(Particle

Imaging Velocimetry)이다. 이 방법은 원리적으로 3성분의 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속으로 측정할 수가 있으며 이 값들을 NS(Navier-Stokes)방정식에 대입하여 압력구배항을 공간 적분하면 벽면의 정압 까지를 포함한 순시의 압력장을 구할 수가 있다. 또한 감온액정입자(thermo-sensitive liquid crystal particle)를 추적입자로 이용하면 공간의 온도분포까지도 동시에 구해질 수 있다[2-31]. 이와 같이 PIV는 전술한 5종류의 기본물리량( $u, v, w, p, T$ )을 한꺼번에 측정할 수 있으므로 가까운 장래에는 전산유체역학에 대응할 수 있는 유일한 측정기법으로 인식되고 있다.

국내의 경우 화상처리기법을 이용한 유동장 해석연구는 거의 초기단계이며, 그 유용성이 널리 알려져 있지 않다. 최근 선진국에서는 화상처리를 이용한 속도장 측정의 정확도와 측정 가능한 속도범위를 확대시키기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 또한 측정오차가 적고 효율적인 algorithm의 개발연구와 더불어 복잡한 난류유동의 측정도 시도되고 있다.

선진국에서도 현재 활발히 연구중인 이와 같은 첨단 실험기법을 자체적으로 개발함으로써 여태까지 해석이 거의 불가능하였던 3차원 유동현상을 해석에 박차를 가하고 있으며, 공학적인 실제문제의 진단 및 유체역학적 성능해석에도 기여를 더해가고 있다. 그러나, 지금까지 PIV를 이용한 유동장의 해석대상이 액체 유동에 관한 연구가 대부분이었으며[2-32,33,34], 최근에 들어와서는 기체유동장 뿐만 아니라 기액2상류 등의 혼상류의 PIV연구에 관한 연구가 보고되고 있지만 미미한 실정이며 아직도 실험대상에 따라서 다양한 기법을 개발하고 있는 단계에 있다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 PIV 가시화 측정기술을 기액2상류에 대해서도 정량적 측정을 할 수 있는 비접촉식 측정기법을 개발하는 것을 목표로 한다.

## 2. PIV 기본원리

유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소시간간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉, 주어진 측정시간( $\Delta t$ ) 동안 움직인 유동입자(particle)들의 변위정보를 CCD(charge coupled device)카메라와 같은 화상입력장치를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위(S)를 측정하는 것이다. 이때 사용되는 추적입자의 비중은 유체의 비중과 동일한 것을 사용하여야 한다.

유동화상(flow image)으로부터 정량적인 속도장을 구하는 데에는 입자변위 S를 구하는 방법에 따라 다음과 같은 여러 가지 방법들이 있다. 정량적인 속도장 측정의 초기단계에서 개발된 PSV(Particle Streak Velocimetry)[2-28,29]는 카메라의 노출시간을 길게 함으로써 형성된 입자궤적을 이용하여 속도를 구하는 방법으로 매우 간단하지만 대부분 film을 사용함으로써 실시간 처리가 불가능하고 입자밀도가 높을 경우 궤적(streak)이 서로 겹치는 문제가 발생하며 추출된 속도의 방향 결정에 어려움이 있다. PIV(Particle Imaging Velocimetry)[2-37,38]란 원래 유동화상의 조사구간(interrogating window)내 산란입자들의 강도분포에 대한 Fourier변환이나 직접적인 상관계수 계산으로부터 조사구간의 평균속도를 구하는 방법이다. 다중 노출된 화상(multiple-exposed image frame)을 이용할 경우에는 렌즈를 통하여 광학적으로 Fourier변환시킨 후 카메라의 초점에 형성된 Young's fringe를 컴퓨터에서 분석하여 속도를 얻거나 Young's fringe를 한번 더 렌즈를 통과시킴으로써 조사구간내 입자화상들의 자기상관함수(auto-correlation)를 광학적으로 처리하여 속도를 구할 수 있다. 일정 시간간격으로 얻어진 두개의 화상을 이용할 경우에는 조사구간사이의 상호상관함수(cross-correlation)를 계산하고 그 값이 가장 큰 점을 평균변위로 간주함으로써 속도를 구한다. PIV는 입자밀도가 매우 큰 경우에 보통 적용되며 조사구간내의 평균속도를 추출함으로써 제한된 공간분해능을 지닌

다.

PTV(Particle Tracking Velocimetry)[2-39,40]는 연속적으로 획득된 여러 장의 화상으로부터 각 입자위치를 추출한 후 그 입자 하나 하나를 추적함으로써 입자의 변위를 결정하는 방법이며 입자가 매우 빠르게 움직이는 부분과 매우 느리게 움직이는 부분이 공존할 경우에는 입자추적의 제한이 따를 수 있다.

PIV와 PTV의 분류는 Adrian[2-30]에 의하면 일반적으로 Low particle density PIV를 PTV로 보고 있다. 즉, High density PTV를 PIV로 보면 된다. PIV를 분류하는 기준에 따라 여러 가지로 정의될 수 있으나 지금까지의 연구성과들을 정리하여 속도벡터의 추출 알고리즘에 따른 분류를 해보면 속도벡터의 추출에 이용되는 particle 개별입자의 중심을 이용해서 입자속도벡터를 구해내는 방법과 입자군들의 분포에 대한 상관관계로부터 속도를 구하는 PIV로 구분될 수 있다. 또한 개별입자추적 PIV는 일명 PTV(전술한 Particle Tracking Velocimetry)라고도 하는데 단일화상(single frame)에 간헐적인 조명으로 코드화해서 얻은 입자들을 추적해서 속도를 얻어내는 PIV방법과 연속 혹은 단일조명과 두 장 이상의 화상으로부터 얻은 입자화상들을 추적해서 속도를 얻어내는 PIV방법으로 나누어 질 수 있다. 한편 입자분포상관 PIV는 자기상관 PIV와 상호상관 PIV로 대별될 수 있겠는데 자기상관 PIV는 이중 혹은 복수조명을 주사하여 얻어진 단일 화상에 자기상관계수를 구하여 속도를 구하는 방법이며 상호상관 PIV는 연속 혹은 단일조명을 주사하여 얻어진 두 장의 화상에 대하여 상호상관계수를 구하여 속도를 구하는 방법이다. 본 연구에서 개발하고자 하는 방법은 이 방법에 해당한다.

### 3. 구축된 PIV system

#### 가. 계조치상호상관법

그림2.7은 계조치상호상관법(Grey level cross-correlation method)의 원리를 설

명하기 위한 것이다. 미소시간동안 유동장의 화상의 계조패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하면 제1프레임(1st image frame)에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소 시간후의 제2프레임(2nd image frame)에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서, 제1프레임의 임의의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관 계수 값을 구하여 비교하여 그 중 가장 큰 값을 동일입자군의 이동위치로 간주할 수 있다. 컴퓨터 상에서 이와 같은 계산을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심 입자군 속도(속도벡터의 시점)에 대하여 이동벡터의 종점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임간의 상관계수는 다음의 식으로 구한다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i) (g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n^2} (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^{n^2} (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (2.7)$$

여기서  $f_i$ ,  $g_i$  는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며  $(\bar{\quad})$ 는 연속화상에 대한 시간평균을 의미한다.

#### 나. PIV Hardware 구성

그림2.8은 본 연구에서 개발된 low Reynolds 유동장 및 high Reynolds 유동장의 속도벡터를 구하고자 할 때의 계조치상호상관법의 하드웨어 구성 도를 나타낸다. PIV를 구성하기 위한 기본적인 하드웨어는 다음과 같이 나누어 질 수 있다.

- . 광원(레이저 혹은 이에 상당하는 광원)
- . 화상의 입력 및 저장장치

- . 화상처리장치 (Computer 혹은 이미지 프로세서)
- . 기타 (카메라 control 장치)

(1) 광원

2차원의 속도계측을 위해서는 두께 1-3mm전후의 sheet light가 필요하다. 광원으로서 2차원의 sheet light를 제공하기 위한 가시광레이저(본 연구에서는 6 Watt Ar-Ion 레이저를 사용)가 효과적이다. 저속액체 유동장의 경우(1.0m/sec이하, 유동장 크기 150mm x 150mm)에는 500mW 전후의, 고속기체유동장의 경우(10-40m/sec, 유동장 크기 150mm x 150mm)에는 5W 전후의 레이저를 사용할 수 있으나 저속액체의 경우에는 광원용의 조명 열에 의하여 자연대류의 발생의 우려가 있으므로 유의하여야 한다. 고속유동계측의 경우에는 미소시간간격을 확보하기 위하여 조명의 펄스제어가 필요하며 속도벡터의 추출알고리즘과 직접적인 관계가 있다.

본 연구에서는 AOM(Acousto-Optical Modulator)이라는 음향광학조절장치를 사용하여 조명을 펄스 제어함으로써 유동장의 속도가 비교적 빠른 유동 장에도 계측이 가능한 시스템으로 구축하였다.

그림2.9는 카메라와 조명을 펄스제어하기 위한 AOM (Acousto-Optical Modulator)신호와의 상관관계를 나타낸다. 한 장(1 frame)의 이미지는 두 개의 필드(field)이미지로 나누어 질 수 있으며 그 필드이미지 와 AOM신호와의 상관관계는 그림과 같다. AOM과 같은 광학조절장치를 쓰게되면 조명시간의 조절이 가능하게 되므로 그림2.9의 T1이라는 시간간격을 마음대로 조절이 가능하게 되므로 그 시간 간격을 미소시간으로 줄인다면 그 시간사이에서의 물리적 변화가 거의 없다고 볼 수 있다. 결국은 각 field image에서 한 펄스씩 T1이라는 시간간격으로 짧게 조명이 되었다면 모든 field image의 시간간격은 T2로 볼 수 있으며 또한 그 field image들이 담고 있는 화상정보는 동일 시각에서 찍힌 정보로 볼 수 있다.

## (2) 화상의 입력장치 및 저장장치

화상입력장치는 PIV의 속도추출기법에 따라서 결정되며 대표적인 입력장치로서 미캐니컬스캐너, CCD카메라, Hi-8mm cam coder, 고속도 비디오카메라 등이 있다. 입력신호의 종류는 NTSC composite, NTSC component(RGB component), S-VHS(Y/C)방식이 있는데 본 연구에서는 NTSC composite 방식이다.

화상입력의 형태는 유동장의 실시간 정보를 직접 입력하는 경우와 사진으로 먼저 유동장의 정보를 수록한 후 미캐니컬스캐너 등에 의해 입력하는 경우로 나눌 수 있다. 비디오카메라는 미캐니컬카메라에 비하여 분해능은 떨어지지만 가격, 변환성 및 조작성 등의 면에서 우수하고 유동 장으로부터의 정보를 직접 받아들인다는 이점을 갖는다. 시간 분해능은 카메라의 프레임속도(일반 CCD카메라는 1/30sec)에 의존하는데 최근에는 고속카메라가 시판되고 있으며 또한 고해상도를 갖춘 HDTV(High Density TV)카메라, Digital 카메라도 보급되고 있어 시·공간의 해상도문제는 점차 해결되어 가고 있다.

화상저장장치는 입력장치의 해상도를 그대로 유지하여야 하며, VCR(Video Cassette Recorder), LVR(Laser Videodisk Recorder)등이 있으며 최근에는 DVD(Digital Video Disk)가 실용화단계에 있다. 하드디스크와 같은 컴퓨터관련 저장장치는 대용량의 데이터를 저장하기 위하여 압축복원기술(Motion-JPEG, MPEG1,2)을 사용하는 장치가 필요하나 화질의 손상을 고려해야 한다. 최근에는 PCI방식으로서 PC의 RAM에 직접 화상을 받을 수 있는 이미지보오드가 나와 있다. 본 연구에서는 화상의 저장장치로서 VTR(Sony SLV-RS1)을 사용하였다.

## (3) 화상처리장치(이미지보오드)

화상처리장치는 입력화상데이터를 임시 보관하는 이미지메모리와 메인 프로세서 및 연산유니트를 갖추고 있다. 전용의 화상처리장치는 복수의 화상데이터를 비교, 또는 논리연산, 아핀변환, 고속푸리에변환 등 많은 자체명령어를 이용하여 고속으로 필요한 처리를 행할 수 있으나 개인용 컴퓨터를 이용하여 전용 화상처

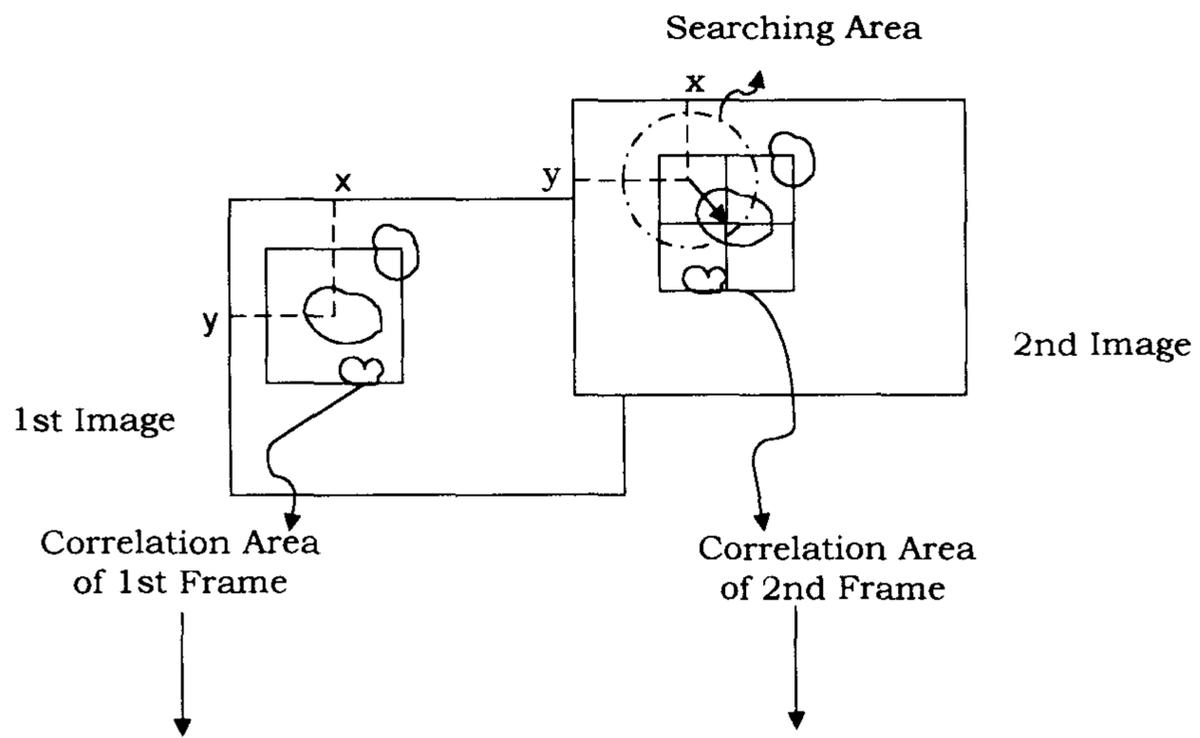
리장치의 소정의 명령어만을 이용하는 경우에는 이미지보오드 및 소프트웨어를 운용하기 위한 별도의 처리기법의 개발을 요한다. 이미지보오드가 제공하는 기본명령어를 효과적으로 활용하여 고속으로 화상처리를 행하기 위한 일련의 알고리즘을 확립하는 것이 요구되나 본 연구에서는 화상의 입력에 필요한 명령들만을 이용하고 속도계측에는 자체 개발한 소프트웨어를 쓰고 있다.

이미지보오드는 TV, CCD카메라 등과 같은 영상매체를 통해 나타나는 신호(아날로그신호)를 샘플당 정의된 비트로 디지털화하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주고 산술, 논리연산 및 화상처리조작을 행하여 정오를 분석하기 위한 하드웨어이다. 이미지보오드는 프레임그래버(frame grabber)라고도 하며 프레임그래버는 대개 고해상도용 비디오프레임의 두 필드를 모두 디지털화 하며 필드(field)그래버는 비디오프레임을 구성하는 두 비디오필드 중의 하나만을 디지털화 한다.

이미지보오드의 구성은 입출력 LUT(Look-Up Table)와 자체 이미지메모리 그리고 입출력을 위한 A/D 및 D/A컨버터, 외부트리거 및 외부 동기신호를 위한 포트가 구성되어 있다. 본 연구에서는 이미지보오드로서 Coreco사의 ODX(자체메모리 2M)를 사용하였다.

#### (4) 기타

기타 PIV를 수행하기 위하여 필요하게 되는 video synchronizer(TBC:time base corrector) 등과 같이 화상신호개선용 장비들이 필요할 경우가 있다. 본 연구에서는 별도의 장비를 쓰지 않아도 된다.



$f(1,1)$	.	.	.	$f(M,1)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$f(1,N)$	.	.	.	$f(M,N)$

$f(1,1)$	.	.	.	$f(M,1)$
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$f(1,N)$	.	.	.	$f(M,N)$

Principle Design of Correlation Area

그림 2.7. Principle of Grey Level Cross-Correlation

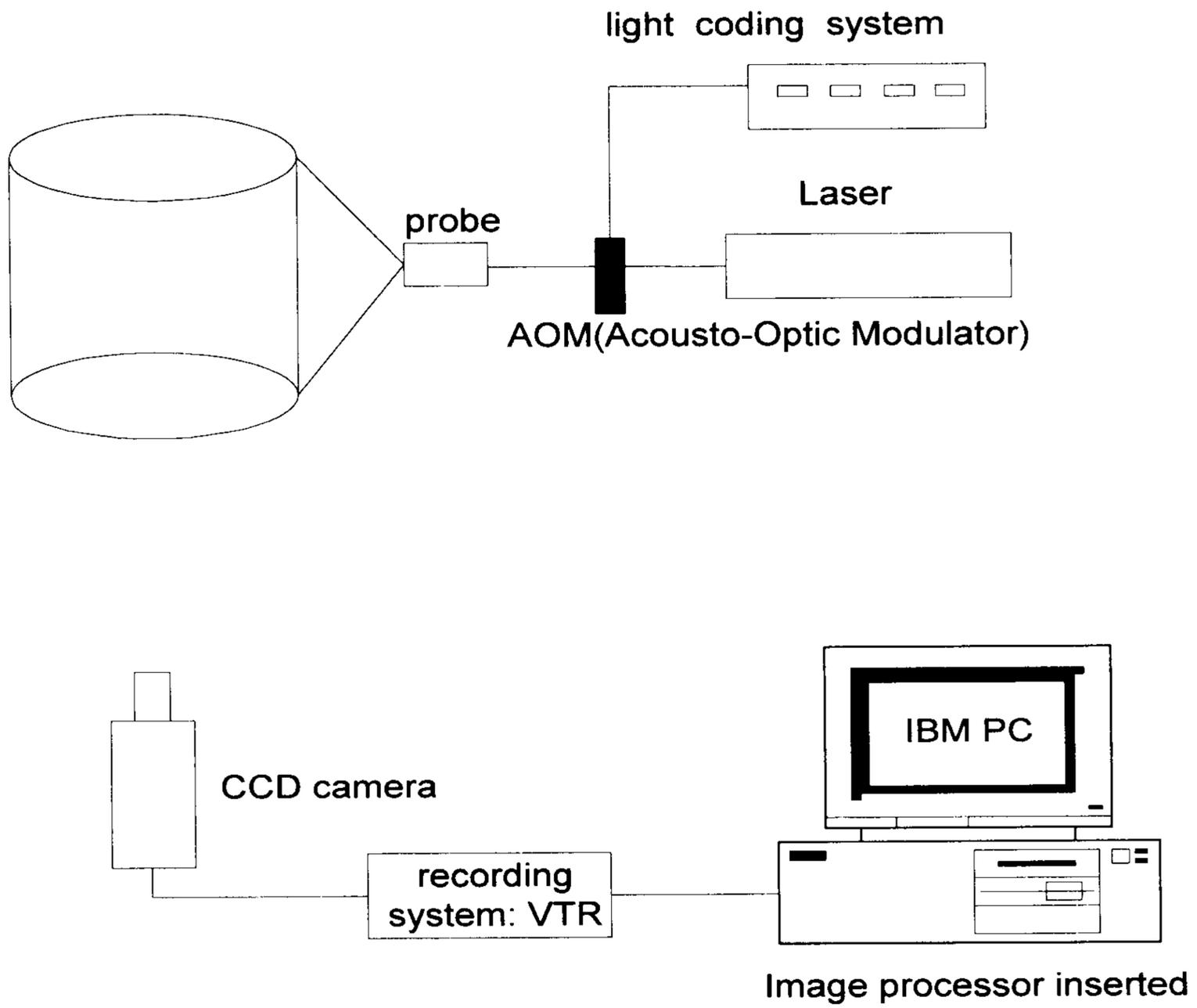


그림 2.8. Constructed PIV System

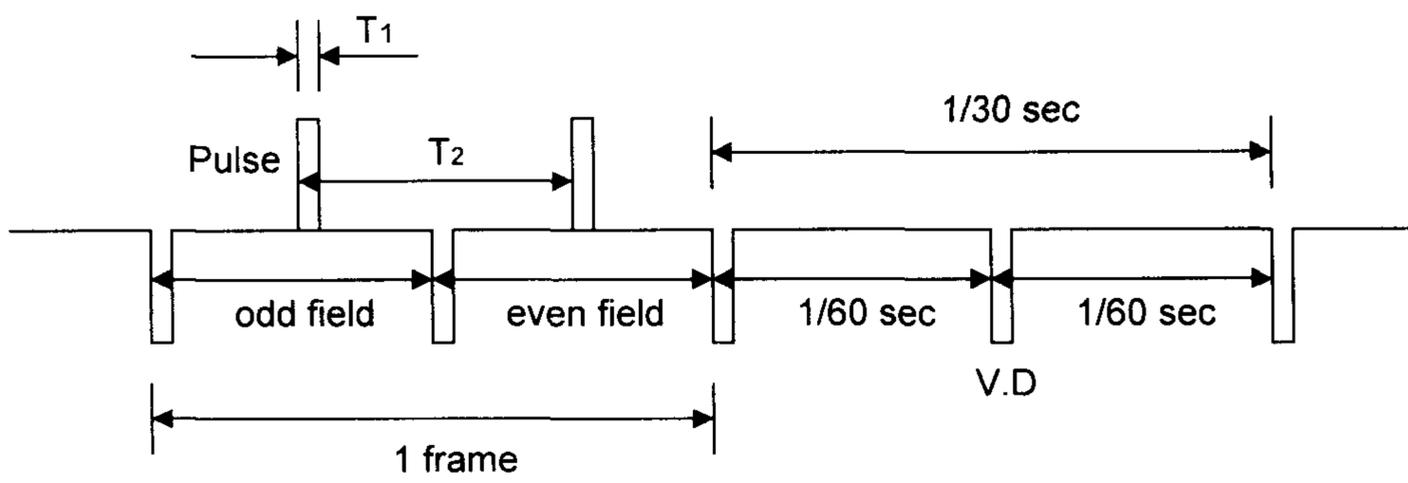


그림 2.9. NTSC (CCD camera signal) Signal and AOM Signal

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 2상유동에서의 막비등열전달

#### 1. 서론

구형체의 2상유동 하에서의 막비등 열전달계수를 측정하기 위하여 실험 장치를 제작하였다. 막비등 열전달의 선행 연구자들이 주로 정지된 실험부로 유체를 흘려보내는 방법으로 강제대류 열전달 실험을 수행한 반면, 본 연구에서는 실제 노심용융물-냉각수 반응 현상에서처럼 구형체 실험부를 유체 풀 속으로 수직 강하시키는 방법을 선택하였다. 액상의 유체는 겉보기 측면에서 정지상태이며, 풀 하부에서 발생한 증기는 수직 상승속도를 갖는다.

본 실험에서는 실험부 하부의 전기히터에 의해 증기를 발생시켜 물-수증기 2상유동장을 형성하였다. 이러한 방법은 물과 별도로 준비한 수증기를 혼합하는 방법보다 증기의 중간 손실이 없기 때문에 증기 유동량을 정확히 예측할 수 있는 장점이 있다고 볼 수 있다. 이러한 2상유동장에 미리 일정한 온도까지 가열한 구형체 실험부를 낙하시키며, 낙하 속도는 유체저항을 변화시키는 방법으로 조정하였으며, 증기 발생량은 히터 발열량의 조정으로 변화시켰다.

구형체의 중심부에 삽입 설치된 열전대로 중심부의 온도를 시간에 대해 측정하여 1차원 열전도 해석 및 Lumped capacitance 방법의 두가지 방법을 이용하여 시험부의 낙하 시간동안의 평균 열전달계수를 산출하여 비교하였다. 본 실험에서 실험변수는 구형체의 낙하속도와 증기속도이다.

## 2. 실험장치

실험장치는 크게 전기가열로, 수직관, 실험구 및 Data acquisition 장치로 구성된다. 실험장치의 개략도는 그림3.1과 같다. 전기가열로는 1 kW 용량의 실린더형 복사열 방식 히터로, 열전대 및 온도조절기 사용으로 최대 1,000°C 까지 가열할 수 있다. 고온의 경우 실험부 가열시 구형체 실험부 표면의 부식을 최소화할 목적으로 전기로 측면에서 아르곤 가스를 주입할 수 있도록 하였다. 이 전기가열로에서 실험부는 해당 초기온도까지 가열된다.

수직관은 물-수증기 2상유동장을 형성하여 실험구가 낙하하는 부분으로 내경 83 mm 스테인레스 관으로 제작하였으며, 800 mm 길이 두 개를 플랜지로 연결하여 전체 길이는 1,600 mm이다. 수직관 하부 플랜지에는 물 가열 및 수증기 발생을 위해 2 kW 용량 전기히터를 설치하였으며, 하부에서 실험구가 낙하후 정지할 수 있도록 스프링을 설치하였다. 수직관 상부에서 200 mm 지점에 수증기 발생에 따른 overflow drain 관을 설치하였으며, 물의 온도는 수직관 중간부분에서 T-type 열전대로 측정하였다. 수직관 내에서 실험구 낙하시 실험구의 낙하속도를 측정하기 위하여 수직관 외부 4 지점에 wire coil을 설치하였으며, 실험구에 부착된 영구자석이 이 4개의 coil 들을 각각 통과할 때 생기는 전기신호를 증폭, 측정함으로써 실험구의 속도를 산출하였다. Coil의 설치 간격은 위에서부터 200, 400, 300 mm이다.

실험구는 직경 22 mm SS304 구를 중심까지 드릴링하여 외경 3.2 mm, 스테인레스로 피복된 K-type 열전대를 삽입하고 외부를 용접으로 밀봉하였으며, 이 열전대로 구의 중심부 온도를 측정하여 열전달계수 산출에 이용하였다. 그림3.2는 실험구의 개략도이다. 열전대가 장착된 구는 외경 80 mm 실린더 모양의 지지대에 부착하여 수직관 내부에서 수직강하하기 용이하도록 하였으며, 낙하속도를 측정하기 위하여 영구자석을 부착하였다. 이 영구자석은 수직

관이 스테인레스이어서 자장을 차단하지 않으므로 수직관 외부에 설치된 wire coil을 지날 때 전기신호를 발생시킨다. 한편, 실험구 지지대 단면에 직경 12 mm 나사구멍을 8개 만들어 이들의 개폐 개수를 조정하여 낙하시 유체 저항의 변화로 실험구의 낙하속도를 조절하였다.

Wire coil의 전기신호와 2개의 열전대 시스날은 Keithley사 System 500과 PC 및 Labtech사의 NOTEBOOK.pro 소프트웨어를 이용하여 취득, 저장되었다. 증기발생용 히터의 전력은 트랜스포머를 이용하여 조정하였으며, 디지털 전려계를 사용하여 전력량을 측정하였다. 수직관내 2상유동의 기공율(void fraction)은 수증기 발생으로 인해 수직관에서 넘치는 물량을 측정하여 평균기공율로 하였다.

실험순서는 (1) 전기로를 실험구의 초기온도로 설정하여 맞추고, 수직관의 전기히터를 작동하여 물의 온도를 비등점까지 올린다. (2) 전기로의 설정 온도가 도달되면 전기로에 아르곤 가스를 주입하고 실험구를 전기로 내에 장착하여 구의 온도를 관찰한다. (3) 구의 온도가 설정 초기온도에 도달되면, 원하는 증기발생량에 해당하는 수직관 히터의 전력을 조정한다. (4) 전기로에서 실험구를 꺼내어 빠른 시간에 수직관 상부로 옮겨 낙하시킨다. 이 때, 미리 설정된 Data acquisition system이 작동하여 coil pickup signal 및 열전대 신호를 취득, 저장한다.

### 3. 결과 및 토의

증기발생용 히터의 전력( $Q_h$ )에 따른 수직관내 평균기공율( $\alpha$ )은 overflow 된 물의 부피( $V_{\text{overflow}}$ )를 측정하여 산출하였으며, 증기발생량( $m_s$ )은 수직관에서의 열손실( $Q_{\text{loss}}$ )을 예측하여 전력량에서 열손실을 감한 열량을 물의 증발잠열( $h_{fg}$ )로 나누어 산출하였다.

$$\alpha = V_{\text{overflow}} / V_{\text{tube}} \quad (3.1)$$

$$m_s = (Q_h - Q_{\text{loss}}) / h_{fg} \quad (3.2)$$

$$V_s = m_s / \rho_s A_c \quad (3.3)$$

수직관의 열손실의 예측을 위해 히터의 전력을 미세조정하면서 물의 온도가 비등온도에서 감소하지 않으면서 증기도 발생하지 않는 전력량을 측정하였으며, 이렇게 측정한 열손실량은 178 W 이었다. 전력량에 따른 수직관내 평균기공율 및 증기의 superficial velocity( $V_s$ )는 표3.1과 같으며, 도표로 그림 3.3 및 그림3.4에 나타낸 바와 같다. 본 실험에서 최대 기공율은 24.5%, 최대 steam superficial velocity는 0.233 m/s 이다. 따라서 기공율로 볼 때 유동장은 Bubbly flow 영역이라고 볼 수 있다.

수직관내 실험구의 낙하속도를 측정하기 위한 pickup coil의 전기신호를 증폭하여 40 Hz 속도로 취득한 데이터는 그림 3.5와 같다. 영구자석이 coil을 통과할 때 마다 그림에서 처럼 파형이 형성되며, 따라서 이 파형을 분석하면 실험구가 coil 위치를 통과하는 시간을 얻고, 인접 coil간의 거리를 시간차로 나누면 이 구간내의 평균 속도를 얻는다. 그림3.6은 시그날을 분석하여 각 coil의 위치에 실험구가 지나간 시간을 표시한 예이다. 이러한 방법으로 유체 저항 조절용 나사의 개수에 따른 낙하속도를 표시한 그림이 그림3.7이다. 8개의 나사를 모두 채웠을때가 최저속도, 모두 열었을 때가 최대속도이다. 두 번째와 세 번째 coil의 구간 및 세 번째와 네 번째 coil 구간별 속도를 비교할 때 거의 차이가 없음을 알수 있다. 그림3.7은 기준되는 속도이고, 실제 속도는 매번 실험마다 측정된 시그날을 분석하여 해당 속도를 정확히 산출하였다.

실험에서 측정한 실험구의 중심온도의 변화는 그림3.8과 같은 모양이다.

초기온도 500°C로 가열된 후 수직관 내에서 낙하되는 동안은 그림에서 점선으로 표시한 구간 8.41초 동안이며, 그 후는 하부의 스프링 위에 정지되어 있는 풀비등 상태이다. 온도 시그날에서 보듯이 초기 막비등으로 계속되다 천이비등을 거쳐 물 온도 100°C까지 냉각됨을 알 수 있다. 강제대류 막비등열전달계수는 실험구가 낙하되는 시간에 대해 구하였으며, 따라서 실험구의 낙하거리는 0.9 m이다.

구형체 내에서의 온도 분포는 1차원 천이 전도열전달로 가정할 경우 다음의 식에 의해 지배된다.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.4)$$

이 식의 무차원온도의 해는 무차원 변수 Biot 수와 Fourier 수로 표시된다.

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{T - T_w}{T_i - T_w} = f(\eta, Bi, Fo) \\ \eta &= r/R \\ Bi &= \frac{hR}{k} \\ Fo &= \frac{\alpha t}{R^2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

측정된 실험구 중심온도 및 시간을 무차원 온도  $\theta_0$  및 Fo 수로 계산하여 이 값을 만족하는 Bi 수를 찾으면 위 식에서 보듯이 열전달계수는

$$h = kBi/R \quad (3.6)$$

이다. 전도방정식의 해는 Mills[3-1]의 계산 프로그램을 이용하였다.

또한 Bi 수가 1 보다 작을 경우 Lumped capacitance 모델로 가정하여 열전달계수를 구할수 있다.

$$m c_p \frac{(T_i - T)}{\Delta t} = hA(T - T_w) \quad (3.7)$$

해석 결과 본 실험에서는 Bi 수가 0.1 보다 작아 전도방정식의 해에 의한 방법과 lumped capacitance 방법의 결과가 거의 동일함을 볼 수 있었다.

수증기 발생량에 따른 막비등열전달계수의 변화는 그림3.9와 같다. 실험구의 속도는 세가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 실험 오차를 감안하면 수증기량에 따른 열전달계수의 변화는 그 영향이 적음을 볼 수 있다. 그림 3.10은 실험구의 낙하속도에 따른 열전달계수의 변화이다. 실험구 속도가 증가할수록 열전달계수가 크게 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 Lui-Theofanous[2-18]의 결과와 반대 경향을 보이고 있다 (그림2.4 참조). 대부분의 막비등열전달 상관식은 유체의 속도가 증가할수록 열전달계수가 증가하는데, 여기서 주시할 사항은 이들의 실험이 정지상태의 구에 유체를 흘려 측정된 결과이다. 그러나 본 실험에서는 정지한 유체에 구를 낙하시켰다. 속도 차원에서는 구가 움직이나 유체가 움직이나 같은 조건으로 볼 수 있지만, 본 연구에서는 용융물-냉각수 반응을 직접적으로 모사하는 낙하하는 구형체에서의 막비등열전달 실험을 수행하였다. 그러나 결론적으로 이 두방법에서 열전달계수의 속도에 대한 경향이 반대로 나타난 것은 주목할 만 하다.

표 3.1. 히터 전력에 따른 수직관내 평균기공율 및 증기발생율

Power (W)	Overflow (L)	Average void fraction (%)	Superficial steam velocity (m/s)
1,869	1.78	24.5	0.233
1,535	1.48	20.4	0.187
1,250	1.27	17.5	0.147
990	1.02	14.0	0.112
768	0.795	10.9	0.081
557	0.545	7.5	0.052
250	0.129	1.8	0.010
178	0.0	0.0	0.0

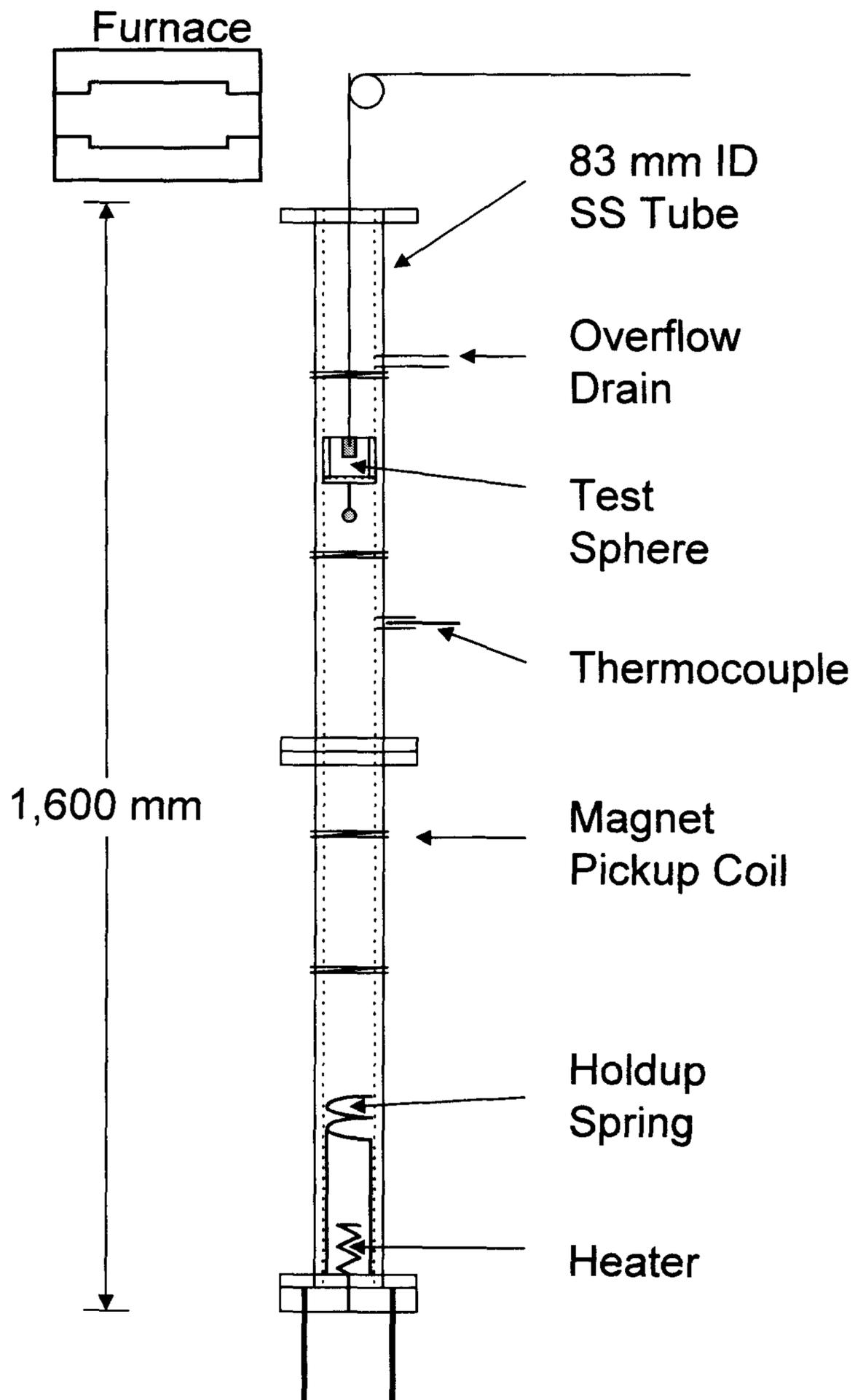


그림 3.1. 2상유동 막비등열전달 실험장치 개략도

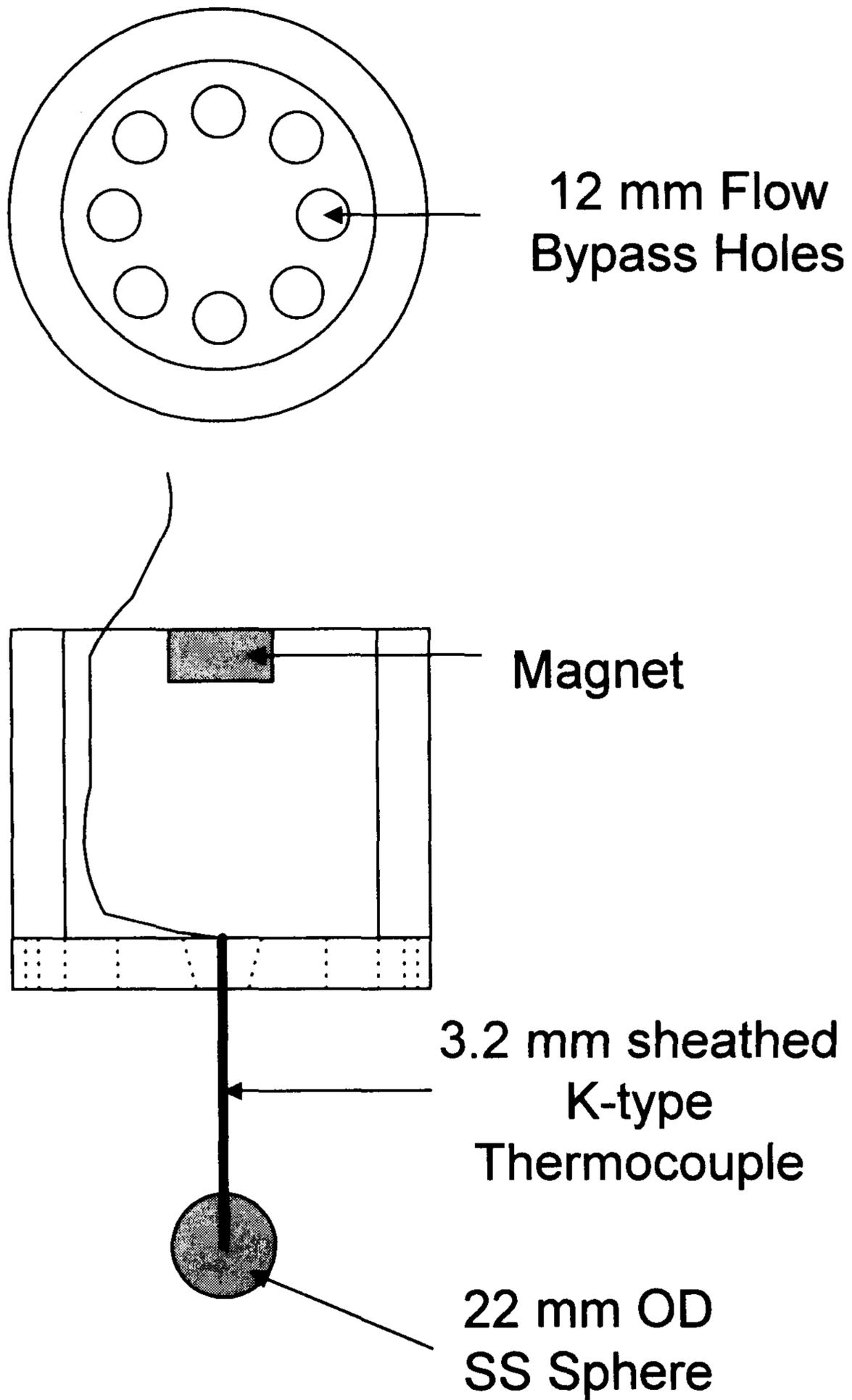


그림 3.2. Test Sphere 구성 개략도

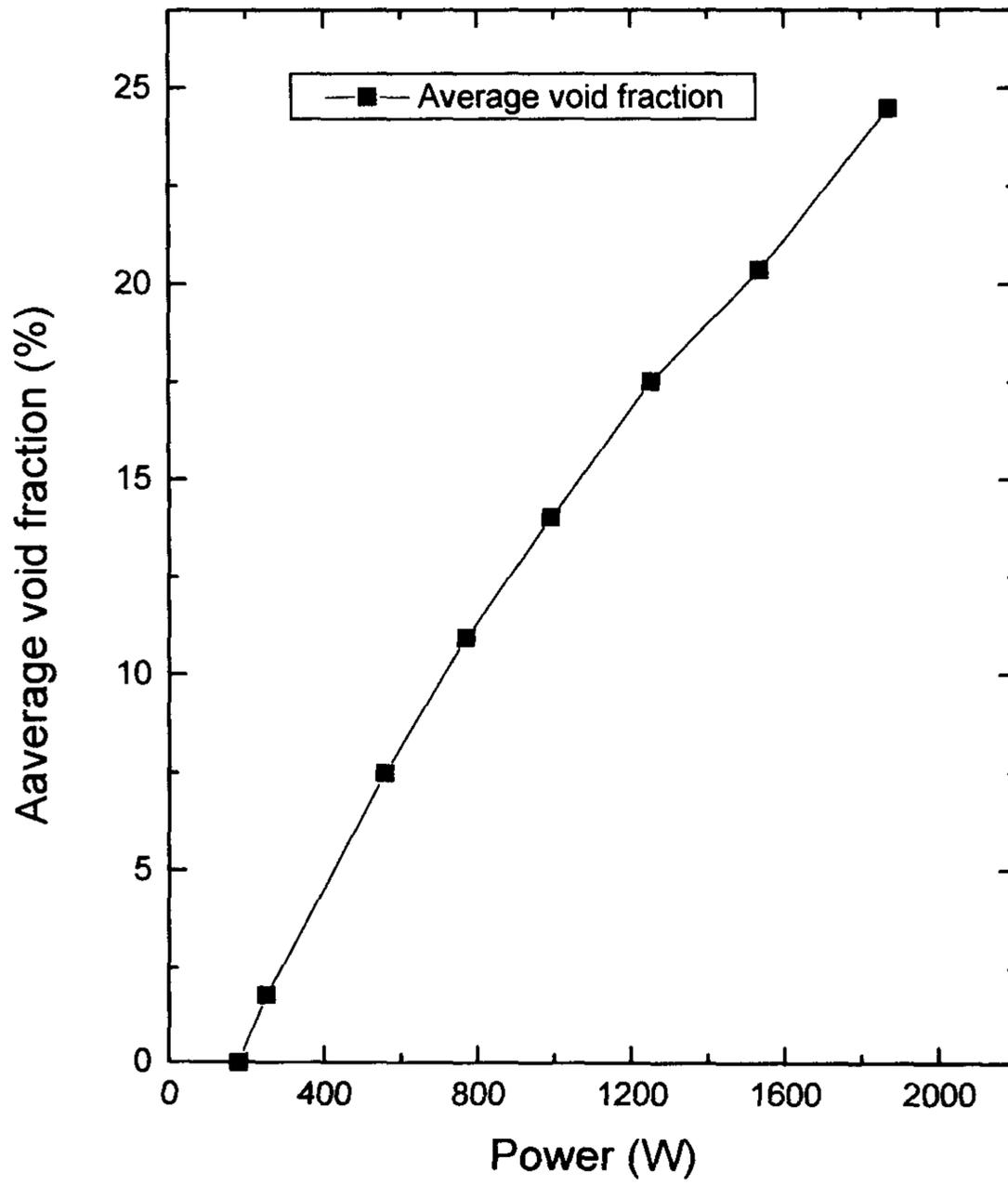


그림 3.3. 히터 전력에 따른 수직관내 평균기공율

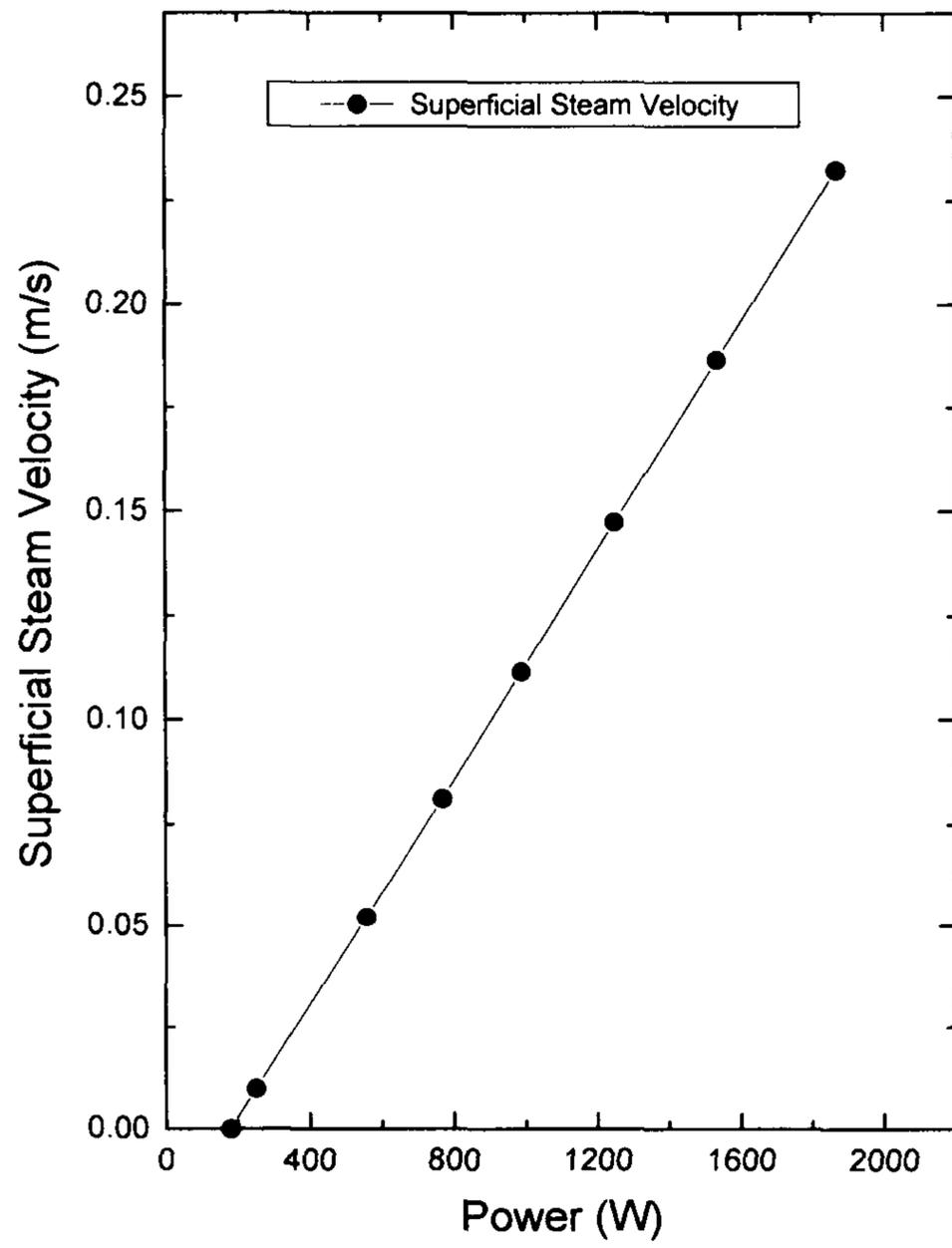


그림 3.4. 히터 전력에 따른 수직관내 증기발생율

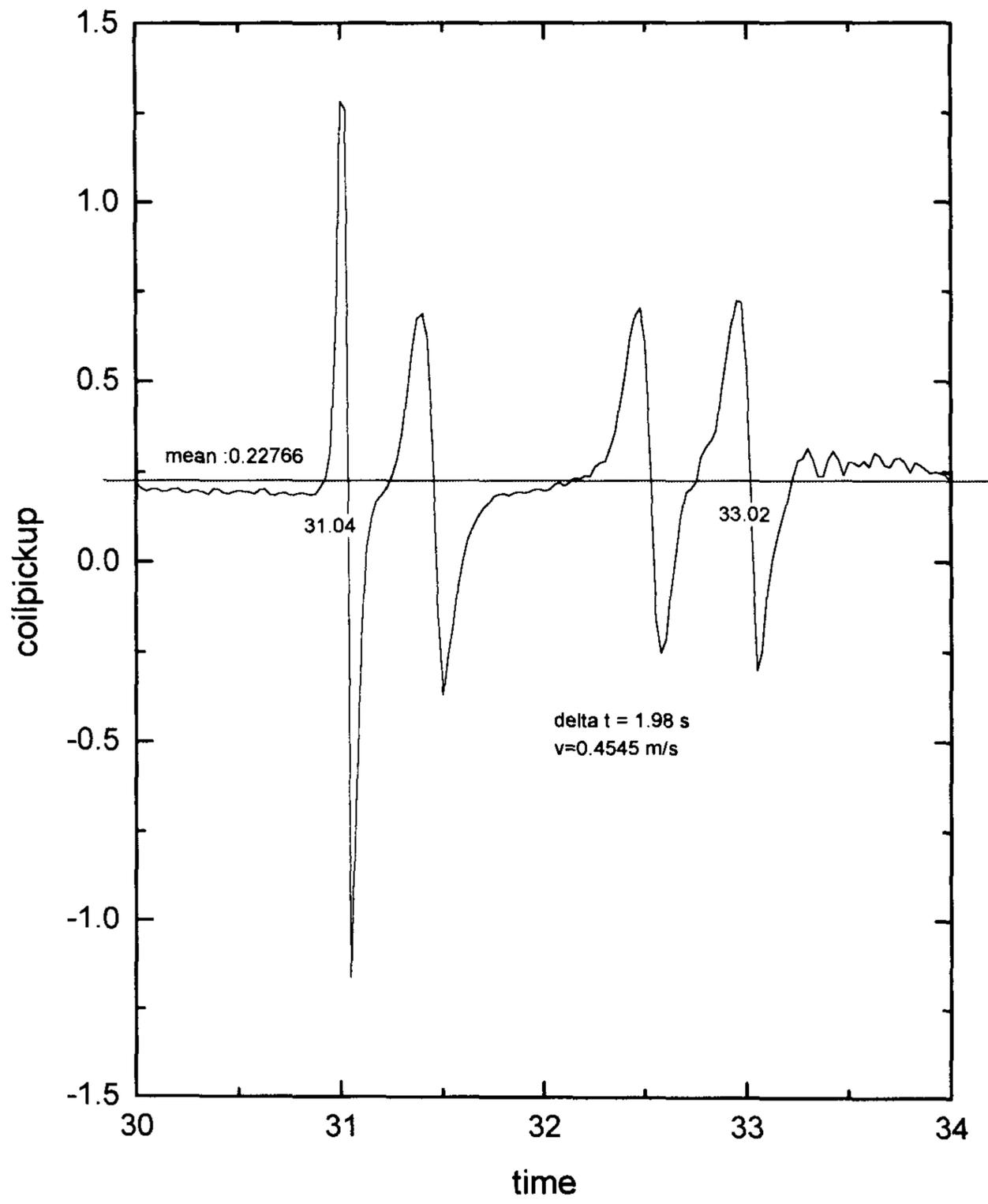


그림 3.5. Coil Pickup 시그날의 예

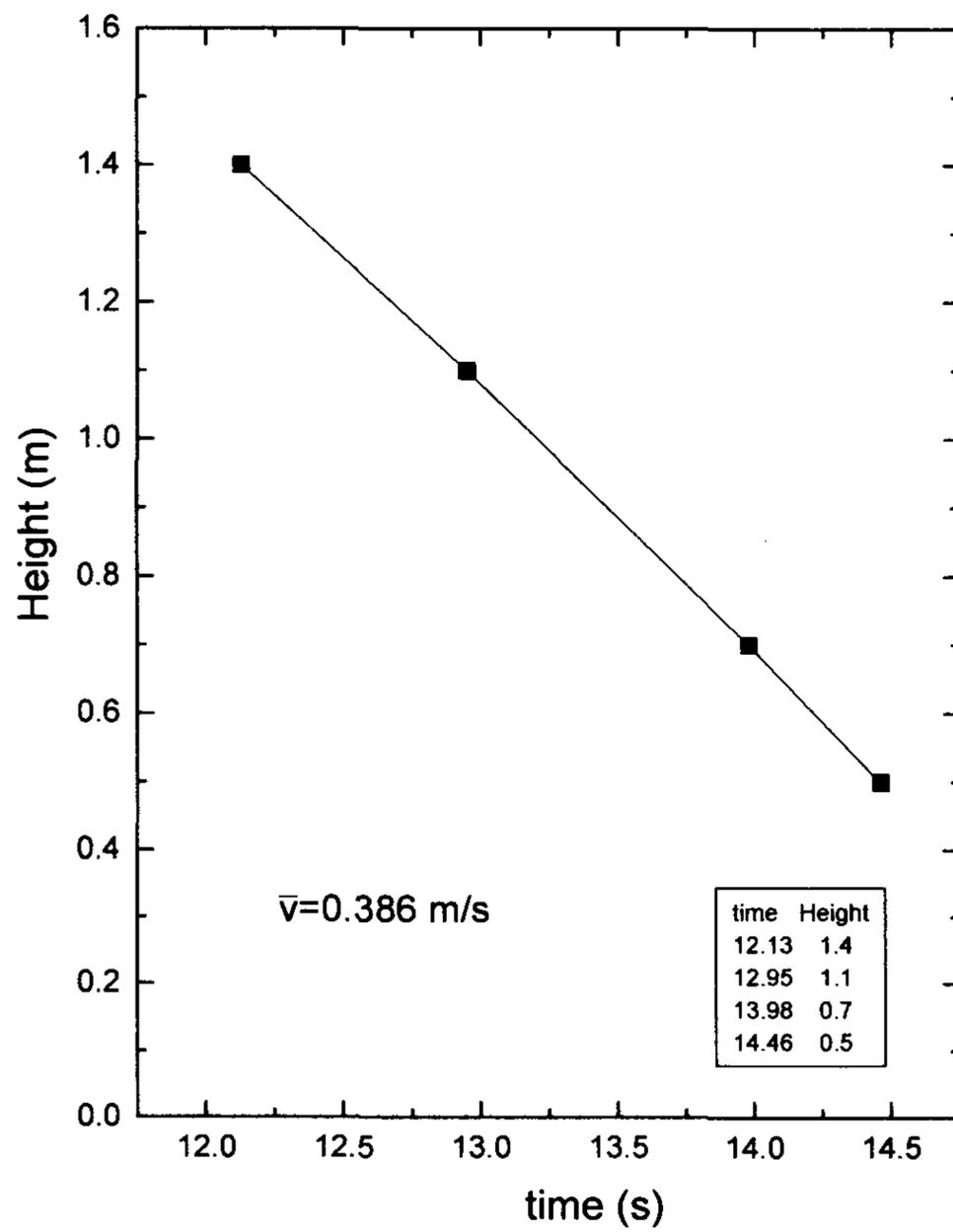


그림 3.6. Coil Pickup 시그널로 예측한 실험구 낙하

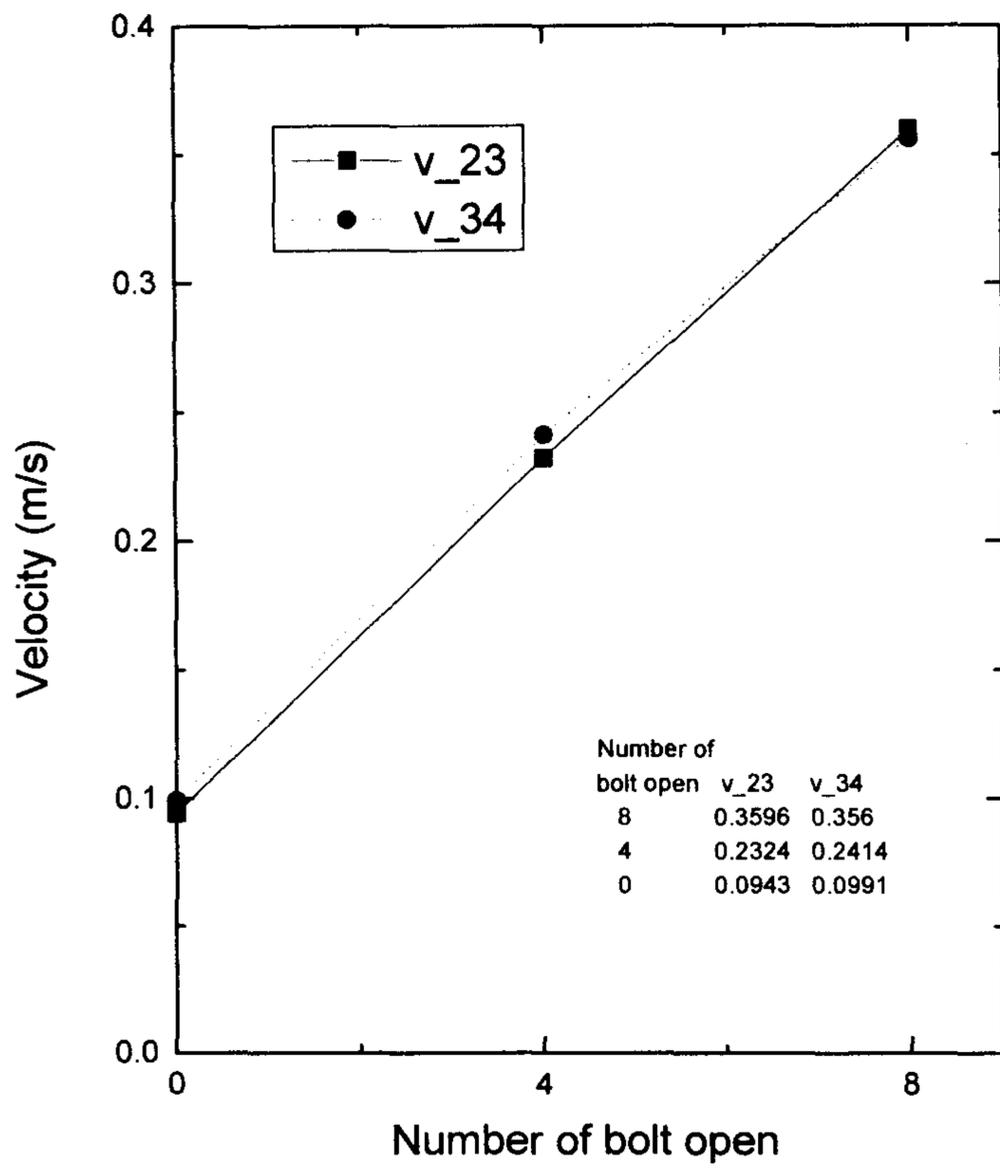


그림 3.7. 실험부의 유로차단에 따른 낙하속도 변화

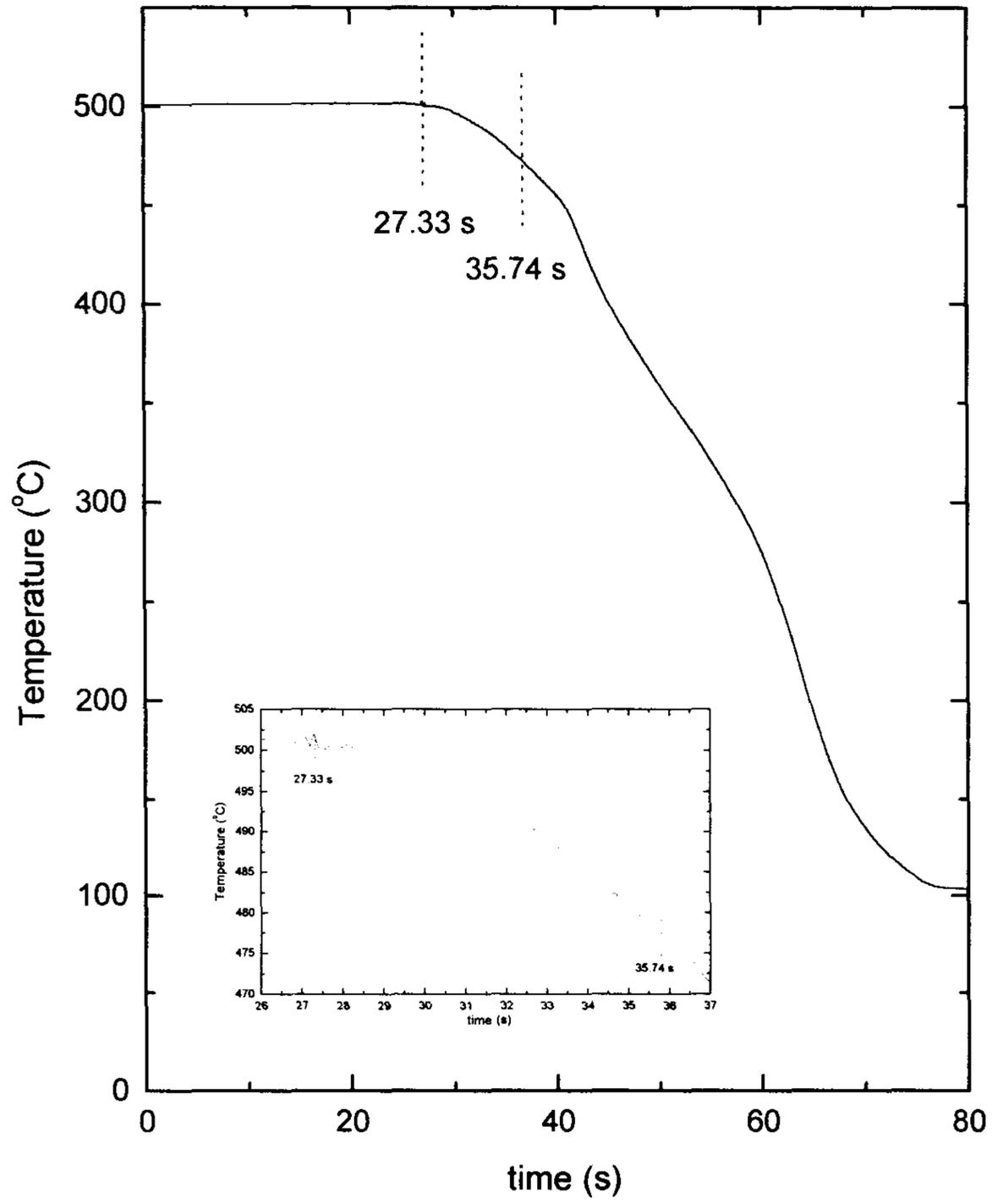


그림 3.8. 막비등 실험에서 실험구 중심온도 변화의 예

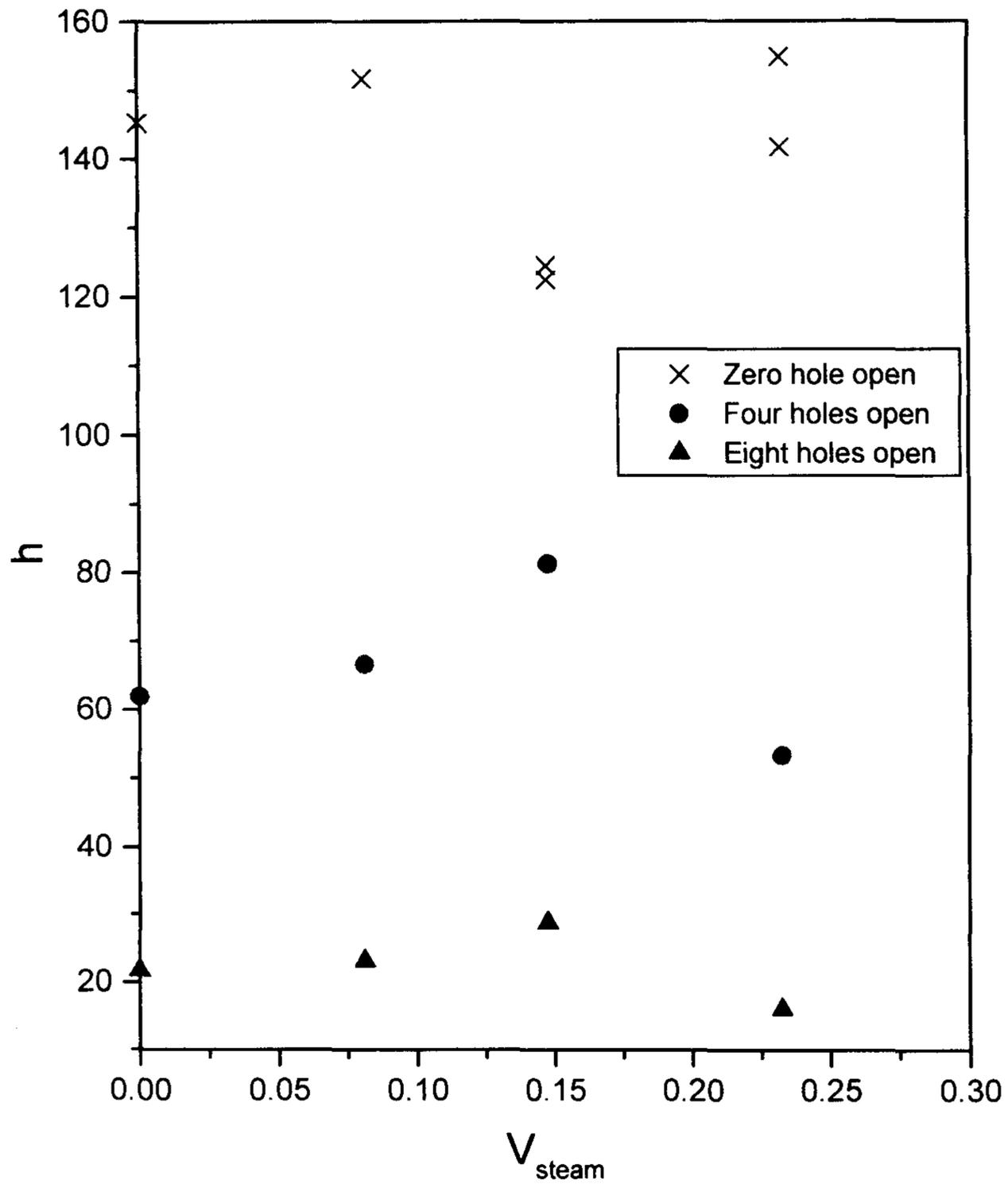


그림 3.9. 수증기 Superficial Velocity에 따른 막비동열전달계수의 변화

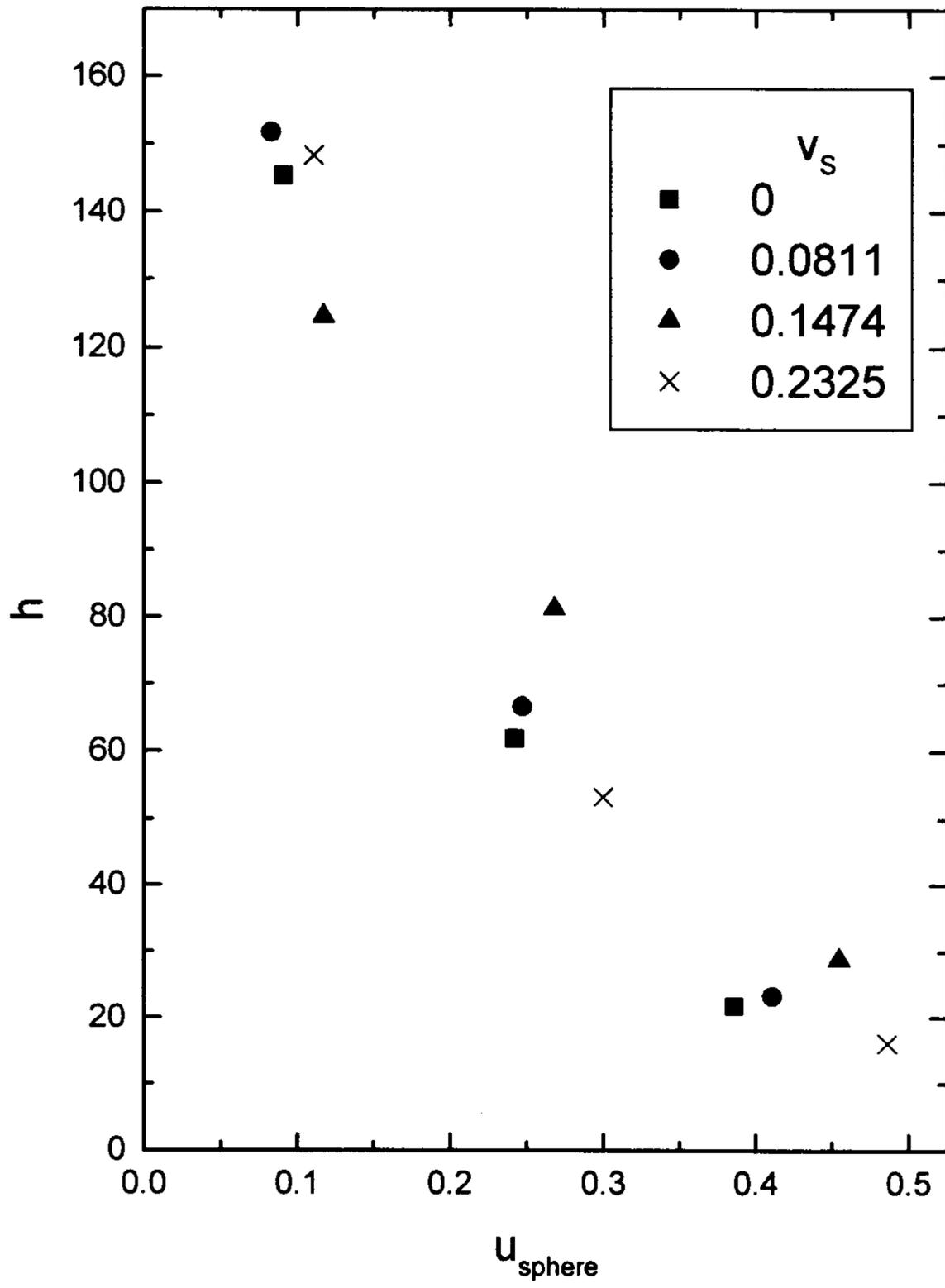


그림 3.10. 실험구의 낙하속도에 따른 막비등열전달계수의 변화

## 제 2 절 PIV에 의한 기액2상류 실험계측 및 결과

### 1. Hardware 구성 및 실험방법

본 연구에서는 단 한 장만의 입력화상만으로 기액2상류의 유동장을 동시다점으로 계측 할 수 있는 PIV계측시스템을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 방법은 새로운 개념의 PIV방법으로서 AOM(Acousto-Optical Modulator:음향광학변조기)과 일반 CCD Camera 시스템을 이용하여 기체유동의 High Reynolds 유동까지도 계측할 수 있는 방법으로서 최신 첨단계측방법이다. 본 계측시스템은 한 장의 가시화된 frame입력화상으로부터 두장의 field화상을 형성시킨 후 이들 두장의 화상에 대하여 계조치상호상관계수(grey level cross-correlation coefficient)를 찾아냄으로써 속도벡터를 추적하는 방법이다.

그림 3.11은 본 연구에서 개발된 계측법을 적용한 원통형탱크의 모형을 나타내며 이 탱크의 하부 중심부로부터 공기가 공급되도록 되어 있다. 이 탱크가 그림 2.8의 원통과 대치되었다고 생각하면 된다.

본 연구의 경우에 유동장의 속도계측을 하기 위해서는 다음과 같은 순서로 실험을 하였다.

1. 유동장에 유체와 동일한 밀도의 가시화용 입자를 투입한 후 기포를 수조 하부로부터 공급한다. 이때 하부의 공급은 전자밸브를 컴퓨터 제어함으로써 기포 발생의 시간을 알 수 있다. 추적입자는 나일론12입자(비중 1.02, 직경 0.5mm)를 투입하여 수조에 주입하였다.

2. 측정 대상의 유동장을 레이저광원(Spectra Physics, 500mW)으로 가시화 한다.

3. CCD TV카메라(SSC-M370)로 가시화된 유동장을 촬영한다.

4. 촬영된 화상을 VTR(Sony SLV-RS1)에 기록한다.

5. 기록된 화상을 이미지보오드(Coreco, ODX)에 입력하여 디지털화상을 만든

다.

6. 이 화상에 대하여 전술의 계조치상호상관법을 적용하여 속도분포를 계측한다.

## 2. 전처리 과정

전처리는 화상의 질을 개선하거나 화상을 특정한 목적에 알맞도록 변환시키는 등의 화상처리를 말한다. 유동장의 정보는 위치좌표와 그 농도치로서 주어지게 된다. 이와 같이 저장된 정보에 대하여 필요에 따라서 잡음제거, 조명의 강약의 보정 등의 화질개선이 필요하게 된다. 화질개선에 이용되는 기법으로서 contrast를 강화하기 위하여 pixel의 출현빈도가 전계조치에 분포하도록 변환하는 계조변환, 흐릿한 화상에 있어서 물체의 테두리를 또렷하게 드러나도록 입력화상을 개선하는 첨예화, 화상을 입력시키는 기계장치와 입력과정 등에서 발생하는 잡음을 제거하는 평활화, 계조치를 갖는 농담화상을 역치(threshold value)에 의해 0과 1의 2치화상으로 변환하는 2치화 등이 있다. 2치화는 유동장의 해석에 있어서 2치화상으로 취급하는 편이 용이한 경우가 많아 전 처리로서 빈번히 행해지고 있다. 이때 될 수 있는 대로 원화상이 갖는 성질이나 특징을 보존하도록 유의해야 한다. 역치의 결정은 보통 경험적으로 정하나 원 화상의 농도히스토그램의 형상으로부터 정하는 경우도 자주 있다. 이와 같은 화질개선을 거친 후에 필요한 유체량을 추출하기 위한 본 처리인 화상해석단계로 가게 된다. 본 연구에서는 얻어진 화상이 좋은 관계로 특별히 전처리 과정을 거치지 않았다.

## 3. 본처리 과정 및 후처리 과정

본 처리 과정에서는 속도벡터의 계산을 위한 모든 과정을 행하며 후처리과

정에서는 에러벡터처리, 보간 처리를 구하는 과정을 포함한다.

속도벡터의 결정 알고리즘은 전술의 계조치상호상관법을 적용하였으며 상관법을 적용하기 위하여 두 장의 화상이 필요하게 되는데 이때 두 장의 화상은 원래 그림 3.12와 같은 한 장의 frame화상을 두 개의 field 화상(odd field와 even field)으로 나눈 뒤에 odd field화상에 대하여 비어 있는 even field부분을 상하 odd field 화상으로 평균 보간하고 even field화상에 대하여서는 비어 있는 odd field부분을 상하 even field 화상으로 평균 보간 하여 두 장의 full frame 화상을 만들었다. 전술한 알고리즘으로 속도벡터를 구하는 과정에서 가끔씩 에러벡터가 검출되는데 이를 극복하기 위하여 유체의 연속의 식에 근거한 에러벡터 검출법을 도입하였으며 다음과 같이 진행된다.

#### 가. PIV에 있어서 오류벡터의 검출

PIV를 사용한 속도계측에 있어서 잘못된 동일입자추적 및 입자의 소멸 등으로 인하여 얻어진 속도벡터는 반드시 오류벡터가 존재한다. 이와 같은 속도벡터의 계측결과를 보정하고 올바른 속도벡터를 얻기 위해서는 오류벡터를 검출하는 알고리즘이 불가결하게 된다. 이 문제의 해결책으로서 현재 유전적 알고리즘(GA) 등의 최적화기법을 도입하여 오류벡터를 검출하는 방법이 제안되고 있다[3-2]. PIV에서 계산된 속도벡터에는 대부분 오류벡터가 포함되어 있다. 이러한 속도벡터를 가지고 후처리를 행하면 오류가 주변으로 전파된다. 따라서 여기에서는 PIV에 의해 계산된 속도벡터분포에 주목하여 국소적인 흐름의 연속성을 기본으로 한 간단한 알고리즘을 사용하여 연속하여 존재하는 오류벡터를 정도 높게 검출할 수 있는 방법을 적용하였다[3-3].

“속도벡터가 이상치(outlier)라면 국소적인 흐름이 연속성이 파괴된다.”라는 전제조건 하에 주목하고 있는 격자점 근방영역의 속도정보로부터 속도의 공간변화량을 고차정도의 차분식으로 계산하고 이 값을 이용하여 오류벡터를 검출한다.

대상으로 하는 격자점  $P(i,j)$  주변의 흐름에 대하여 2차정도의 편측차분식으로 근사한 연속의 식을 사용하여 표현한다. 전진차분과 후퇴차분을 사용하면  $x, y$  방향의 속도의 변화량은 다음 식으로 표현된다. 단  $u$ : $x$ 방향속도,  $v$ : $y$ 방향속도,  $\Delta x, \Delta y$ :  $x, y$ 방향의 격자간격을 나타낸다.

$$\text{전진차분 } \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f = \frac{-3u(i,j) + 4u(i+1,j) - u(i+2,j)}{2\Delta x} \quad (3.8)$$

$$\left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f = \frac{-3v(i,j) + 4v(i,j+1) - v(i,j+2)}{2\Delta y} \quad (3.9)$$

$$\text{후퇴차분 } \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_h = \frac{u(i-2,j) - 4u(i-1,j) + 3u(i,j)}{2\Delta x} \quad (3.10)$$

$$\left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_h = \frac{v(i,j-2) - 4v(i,j-1) + 3v(i,j)}{2\Delta y} \quad (3.11)$$

#### (1) 검출방법 1

그림 3.13에 나타낸 4영역의 속도발산치( $D1 \sim D4$ )를 계산하고 이러한 4개의 정보를 이용하여 오류벡터의 판정을 행한다. 각 발산치는 다음 식으로 계산된다.

$$D1 = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| \quad (3.12)$$

$$D2 = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| \quad (3.13)$$

$$D3 = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right| \quad (3.14)$$

$$D4 = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f \right| \quad (3.15)$$

### 판정조건

점 P의 속도가 이상치라면 점 P에 대하여 대칭인 2조의 영역속도발산치 (D1,D3) 혹은(D2,D4)는 임의의 역치 DM을 초과하게 된다. 역으로 점 P이외의 속도가 이상치이고 점 P 및 다른 쪽의 대각선상의 속도가 동시에 정상인 경우에는 역치를 넘지 않는다. 즉 그림 3.14의 조건을 만족할 때 오류벡터라고 판단한다.

### (2) 검출방법 2

방법1에서는 유동장에 존재하는 오류벡터를 정도 높게 검출할 수가 있다. 그러나 판정조건인 성질상 복수의 정보를 이용하기 때문에 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- 오류벡터에 인접하는 정상벡터를 이상치로 오판해버리는 경우가 있다.
- 와류가 발생하는 부분 등과 같이 흐름의 변화가 큰 곳에는 정상벡터를 이상치로 오판할 가능성이 높다.

상기의 문제점을 해결하기 위하여 방법1을 개량하여 방법2에서는 단지 한 개의 판정조건만으로 오류벡터를 검출시켜 오판정을 될 수 있는 대로 줄인다. 즉 그림3.13에 나타낸 4영역중에서 속도의 변화량이 최소로 되는 영역만을 고려하고 이 영역이 흐름의 연속성을 만족하는지의 여부를 판정한다. 단 D의 값은 “속도의 발산치”가 아니라 “x, y 방향속도의 변화량의 절대치의 합”을 나타내며 이하의 방법으로 계산한다.

$$x\text{방향} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} = \text{Min} \left\{ \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_f, \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_b \right\}, \quad (3.16)$$

$$y\text{방향} \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} = \text{Min} \left\{ \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_f, \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_b \right\} \quad (3.17)$$

$$\therefore D(i, j) = \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{\min} + \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_{\min} \right| \quad (3.18)$$

### 판정조건

점 P의 벡터를 포함함으로써 흐름의 연속성이 만족되지 않는 경우 즉, D의 이 역치 DM을 넘는 경우 점P의 속도벡터는 오류벡터로 판단한다. 즉 그림 3.15의 조건을 만족할 때 오류벡터라고 판단한다.

일반적으로 역치를 한 개의 값만으로 판정할 경우에는 유동장의 흐름상태 혹은 오류벡터의 존재에 따라서 속도의 발산치가 변화하기 때문에 2개의 유동장에 대하여 단지 1개의 역치만으로는 충분한 처리결과를 얻기가 곤란하며 처리결과가 역치의 값에 따라서 크게 좌우된다. 따라서 주변흐름의 상태로부터 이곳에서의 역치를 결정하면 흐름의 변화에 따른 가변 값을 설정하는 것이 유리하다. 이 방법은 대상으로 하는 격자점 P의 벡터의 근방벡터의 정보(점P를 제외한다)를 파라미터로 하여 격자위치 P에 있어서 속도의 변화량을 나타내는 역치값을 함수로서 구한다. 즉 그림 3.16과 같이 역치값에 폭을 준다.

역치값은 4차정도의 중심차분을 개량하여 구하는데 그 식은 다음과 같이 표시된다.

$$\left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{DM} = \left| \frac{u(i-2, j) - 8u(i-1, j)}{12\Delta x} \right| - \left| \frac{u(i+2, j) - 8u(i+1, j)}{12\Delta x} \right| \quad (3.19)$$

$$\left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_{DM} = \left| \frac{v(i, j-2) - 8v(i, j+1)}{12\Delta y} \right| - \left| \frac{v(i, j+2) - 8v(i, j+1)}{12\Delta y} \right| \quad (3.20)$$

$$\therefore DM(i, j) = \left\{ \left| \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \right]_{DM} \right| + \left| \left[ \frac{\partial v}{\partial y} \right]_{DM} \right| \right\} + \delta \quad (3.21)$$

흐름이 연속해 있는 곳에서는 2차정도와 4차정도의 차분식은 거의 같은 값으로 되며, 점P를 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우의 속도의 변화량에 차가 생기지 않는다. 따라서 양자를 비교하여 판정하는 것은 곤란하다. 따라서 다음의 방법으로 미소량  $\delta$ 를 고려하여 오류벡터만을 검출시킨다. 역치 DM은  $[D_L, D_H]$ 사이에서 0.05간격으로 설정한다.

<예>  $DM(i,j)=0.422156$ 의 경우  $DM=0.45$ ( $\delta =0.027844$ )로 한다.

단,  $D_L$  : 역치의 하한치(명백히 정상)

$D_H$  : 역치의 상한치(명백히 정상)

그림 3.17은 오류벡터검출의 절차를 나타낸다. 우선 명백히 오류벡터를 검출하기 위하여 제 1단계로서  $DM=D_H$ 로 처리를 행하고 수렴조건을 만족할 때까지 반복한다. 제1단계에서는 각 루프에 있어서 4근방의 벡터가 모두 이상치로 판정되는 경우 그 중심격자의 벡터는 무조건 오류벡터라고 판정하는 조건을 부가한다. 그 후 제 2단계로서  $D \leq DM \leq D_H$ 로 다시 수렴할 때까지 처리를 반복하고 오류벡터를 검출함과 동시에 속도벡터분포를 보정한다.

#### 나. PIV에 있어서 보간방법

입자추적 PIV(PTV)에서 얻어지는 속도벡터는 유동장에 불규칙하게 분포하고 있으며 이들의 속도값으로 보간을 행하여야 한다. 또한 계조치 PIV에서는 최대상관계수의 위치를 산정하는데 있어서 sub-pixel에서의 해상도 확보가 매우 중요하며 이것은 계측 dynamic range의 확보에 결정적인 역할을 한다. 이 경우에 등고선의 형태로 표현되는 상관계수의 분포도에서 산꼭대기에 해당하는 최대 값의 위치를 찾아내기 위해서는 정도 높은 보간 방법이 요구된다. 또한 모든 종류의 PIV

에서 필연적으로 발생하는 속도벡터의 이상치(outlier)의 제거에도 이들의 자리를 보충하기 위한 보간이 반드시 필요하게 된다. 이와 같이 PIV에서는 어느 경우에도 데이터의 보간이 매우 중요하며 최종적인 결과의 신뢰도에 대해 커다란 영향을 미치게 된다. 한편 정도 높은 보간 기법은 PIV에서만 필요한 것이 아니며 입자의 추종성을 면밀히 검토하여야 하는 혼상류의 Lagrangian CFD 해석이나 가상 입자의 궤적, 유적선 또는 타임라인(time line) 등의 후처리 기법에도 필수적이다. 이 때에는 PIV와 반대로 격자상의 주어진 값으로부터 랜덤한 위치에서의 미지의 값을 보간 하여야 하므로 반대의 보간 원리가 적용되어야 한다.

지금까지 PIV 관점에서 보간 기법을 언급한 연구는 소수이다[3-4,5,6]. 본 연구에서는 에러벡터 검출시에 보간을 해야 하는 경우가 생기게 되는데 이때에는 식 (3.3.11)와 나타낸 바와 같이 거리의 역수보간법을 적용하였다[3-7].

$$U_p = \frac{\sum \frac{U_i}{R_i}}{\frac{1}{R_i}} \quad (3.22)$$

여기서  $R_i$ 는 격자상의 각 속도벡터  $U_i$ 와 보간되어야 할 벡터  $U_p$ 와의 거리이다.

#### 4. 계측 결과 및 토론

그림 3.18은 수조하부중심부에서 10 l/min 공기유량으로 공급이 되었을 때 약 1초 후에 생성된 수조내부의 유동장을 가시화한 사진이다. PIV 계측을 위해서는 시간차를 가진 두 장의 이미지가 필요하게 되는데 시간차가 5msec 일 때의 사진이 그림 3.19이다. 이들 두 사진에 대하여 전술한 계조치상관법을 적용하여서 구한 속도분포가 그림 3.20이다. 그림 3.21은 그림 3.20에서의 각 단면에서의 속도

프로파일을 나타내고 있다. 또한 그림 3.22는 그림 3.18의 계측시작 시각( $t=0$  sec로 함)으로부터 1초후(기포공급 시간후로부터 2초후)에 계측한 속도벡터의 분포를 나타내며, 그림 3.23부터 그림 3.30은 각각 3초후, 5초후, 7초후, 9초후, 11초후, 13초후, 15초후, 17초후에 있어서의 속도분포를 나타낸다.

이들 그림들로부터 알 수 있는 것은 정체되어 있던 유동장이 기포가 탱크중심하부로부터 발생하고 나서 약 1초 후에 유동장전체가 기포의 상승으로 인하여 교란을 받아서 운동량교환이 일어나고 있음을 알 수가 있다. 또한 1초 후(기포발생시간으로부터 2초 후)에는 탱크상부의 유동은 기포의 상승으로 인한 운동량의 교환이 충분히 이루어져 가고 있음을 알 수 있다. 3초 후에는 상반부는 이미 운동량교환이 잘 이루어져 유동장전체가 정상적으로 발달되어 가고 있음을 알 수가 있다. 5초 후에는 유동장 전체가 거의 정상적으로 발달되어 가고 있는 것을 알 수가 있다. 시간이 약 15초가 지나면 유동장은 완전히 발달되어가고 있음을 알 수 있다. 또한 탱크중심부의 유동장은 기포의 상승으로 인하여 주위보다 속도가 상대적으로 빠름을 알 수 있다. 그림 3.31은 60이미지프레임에 대한 순간속도장들을 시간 평균한 속도분포를 나타낸다. 이 그림으로부터 알 수 있는 것은 유동장이 충분히 발달되더라도 대칭이 되지 않음을 알 수 있다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 개발한 PIV계측시스템은 기액2상유동의 속도분포를 시간적으로 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 열선유속계나 레이저도플러유속계등의 계측기로서는 불가능했던 비정상유동장의 물리기구의 해명에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 계측시스템은 AOM(Acousto-Optical Modulator)을 적용한 PIV계측법이므로 고속류의 계측에도 적용이 가능하므로 시간스케일이 작은 경우의 물리적해석에도 도움이 될 것으로 사료된다. 본 계측법은 현재 3차원계측법으로의 확장 완성된 단계이며 이를 3차원성이 중요시되는 유동장의 계측 및 해석에 적용이 된다면 한층 더 본 계측법의 가치를 더할 것으로 사료된다.

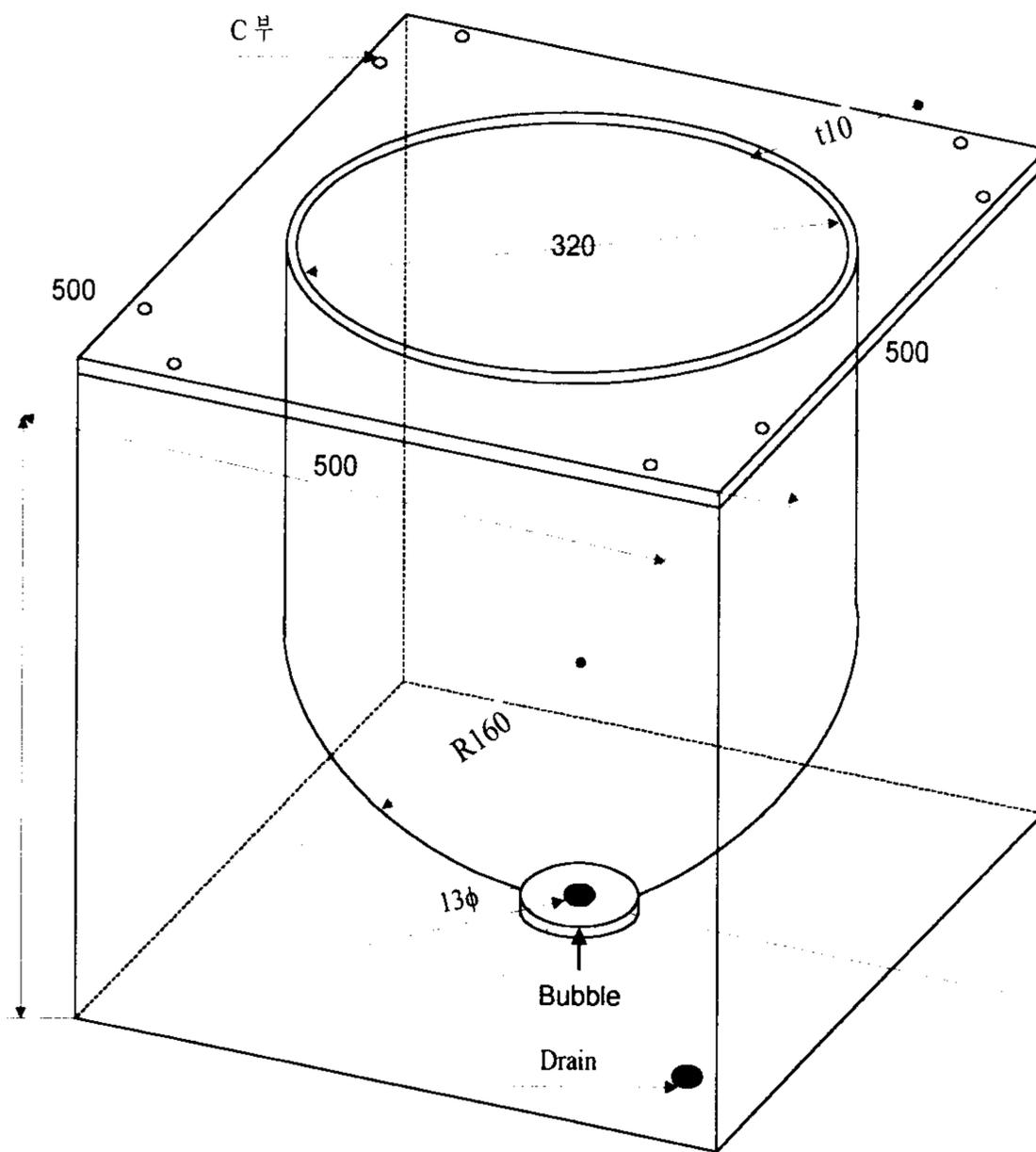


그림 3.11. Used water tank

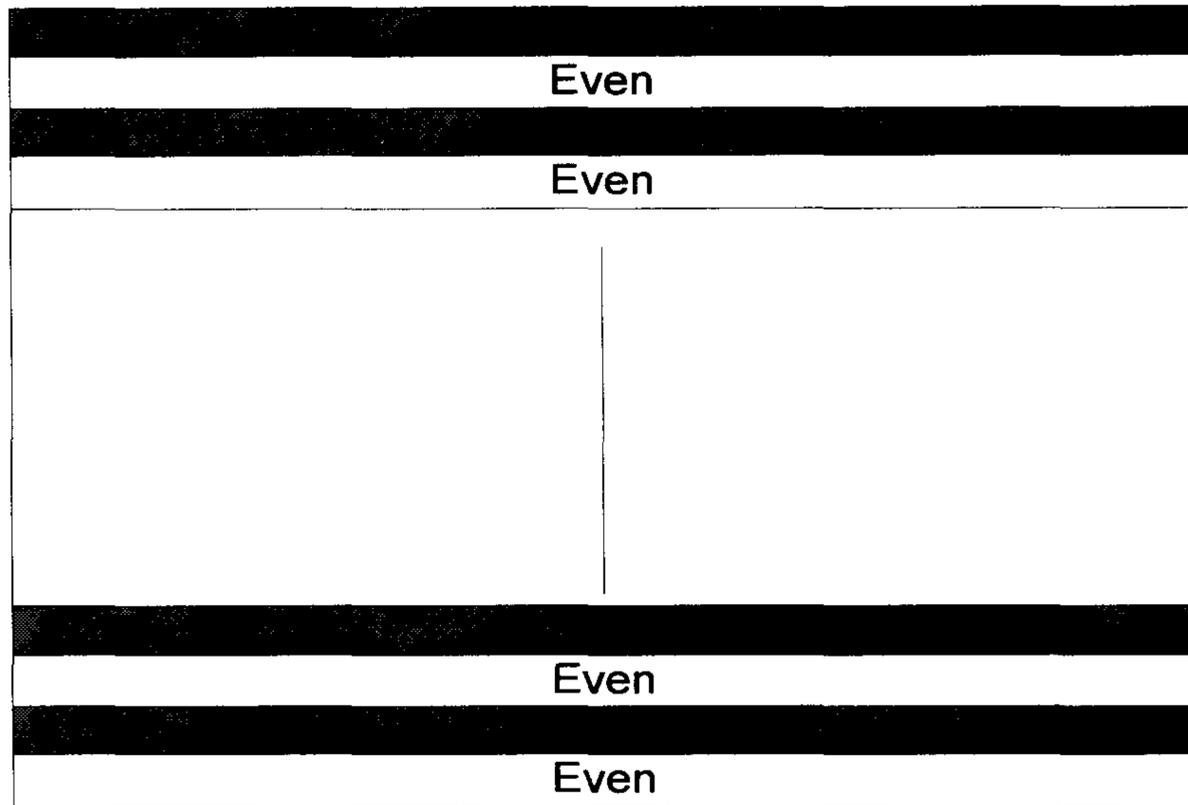


그림 3.12. Frame and field relation.

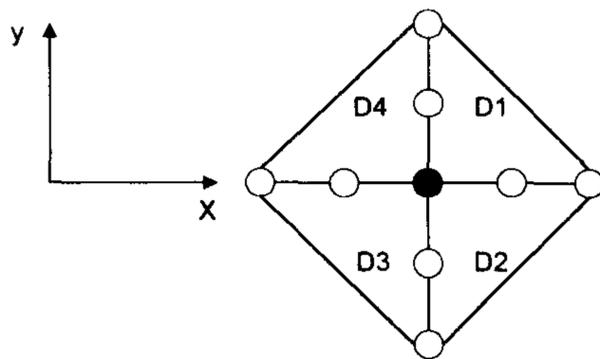


그림 3.13. Calculation Area

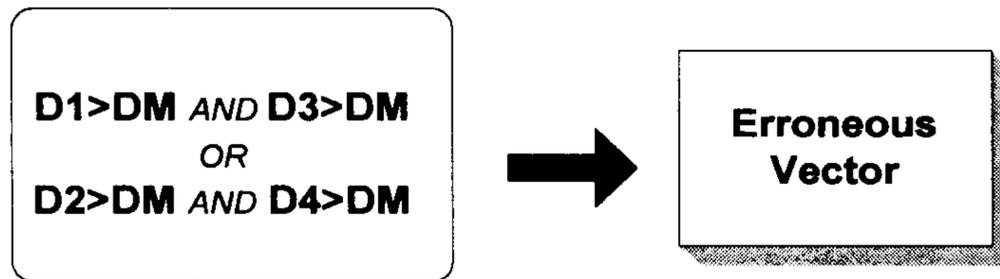


그림 3.14. Error detection condition 1

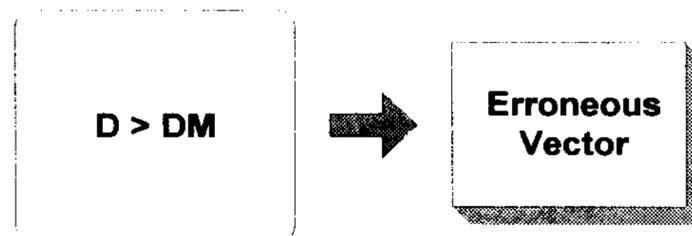


그림 3.15. Error detection condition 2

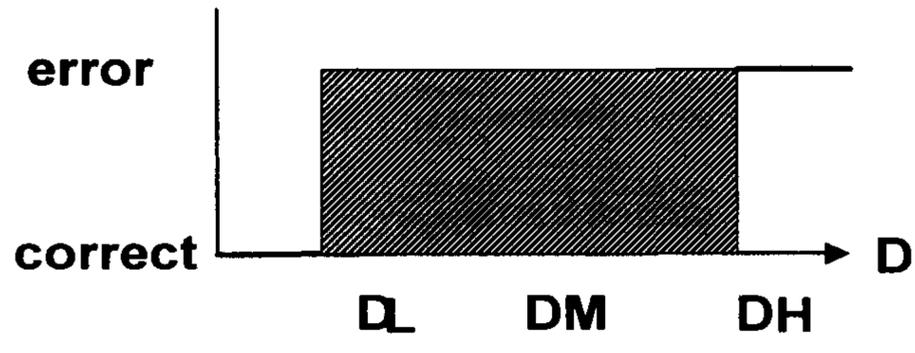


그림 3.16 Variable threshold values

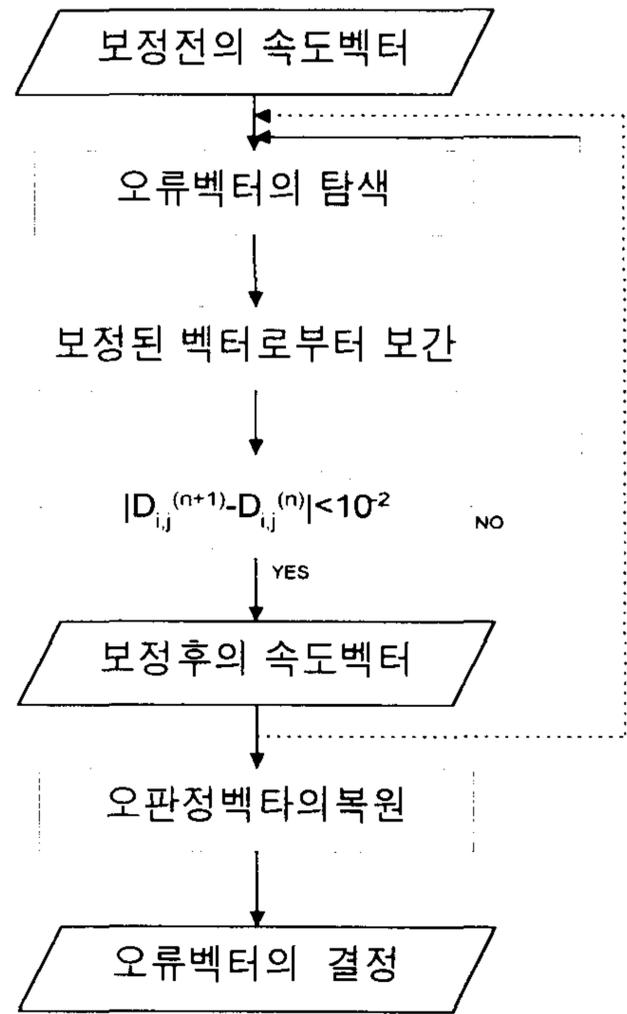


그림 3.17 Procedure of error

detection

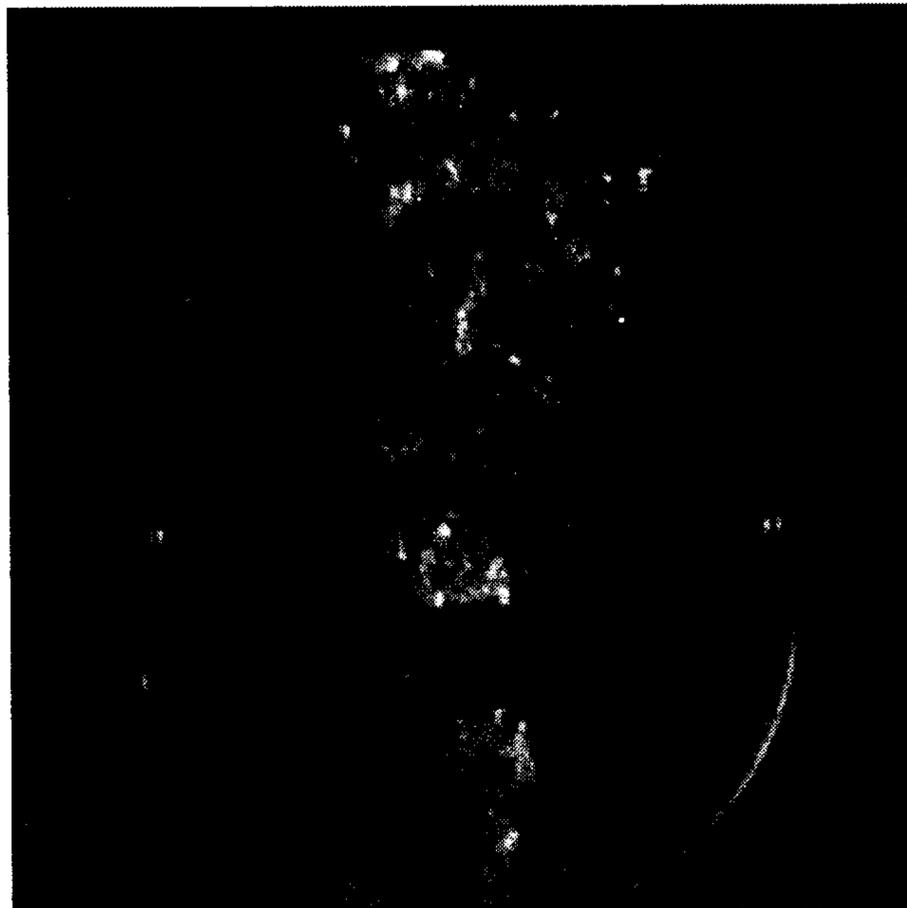


그림 3.18. Original image at the time of  $t=0$ .

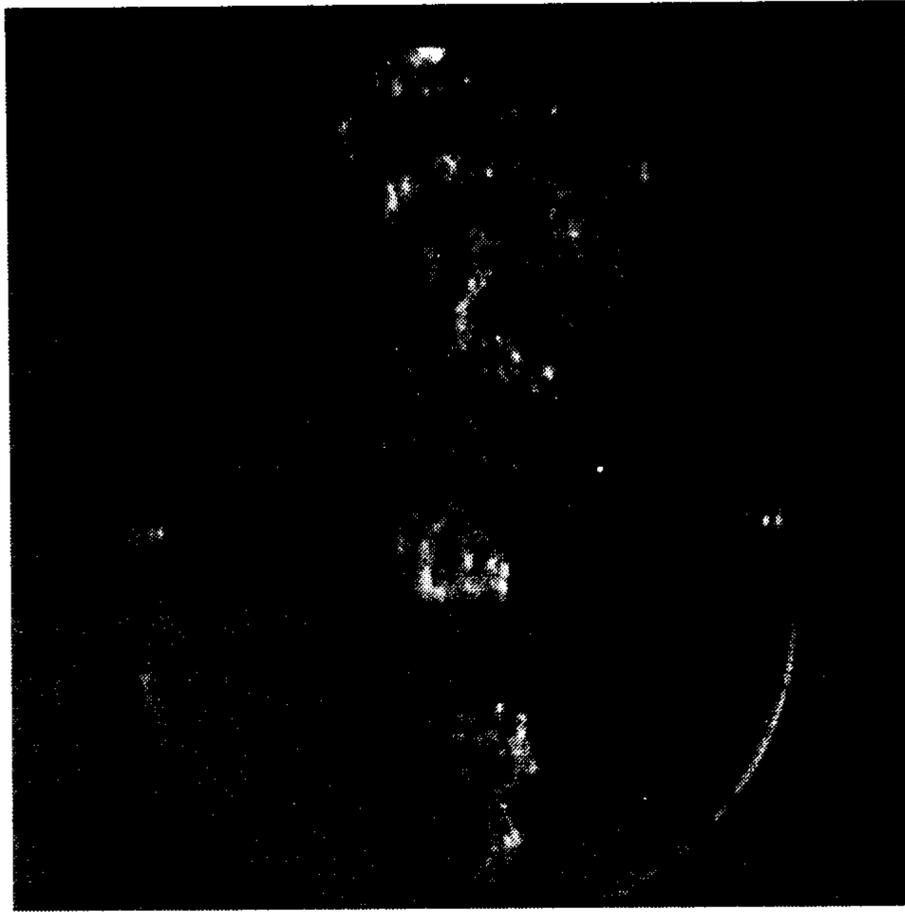


그림 3.19. Original image at the time of  $t=5\text{msec}$

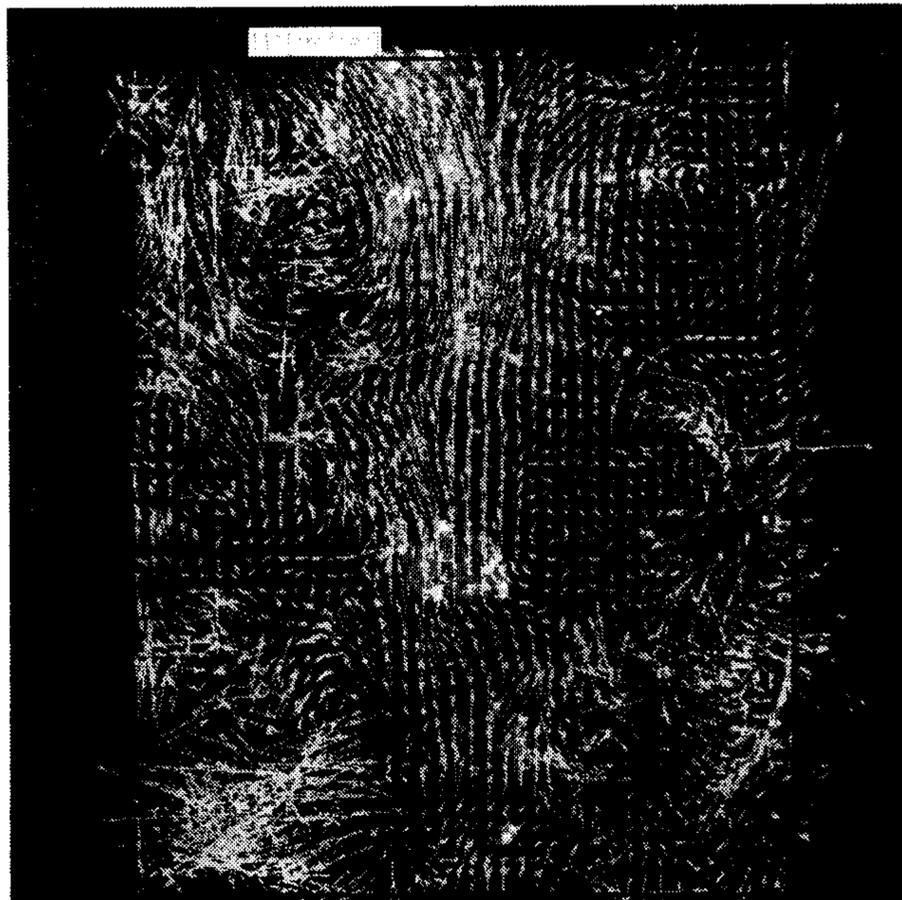


그림 3.20. Velocity vectors measured by PIV.

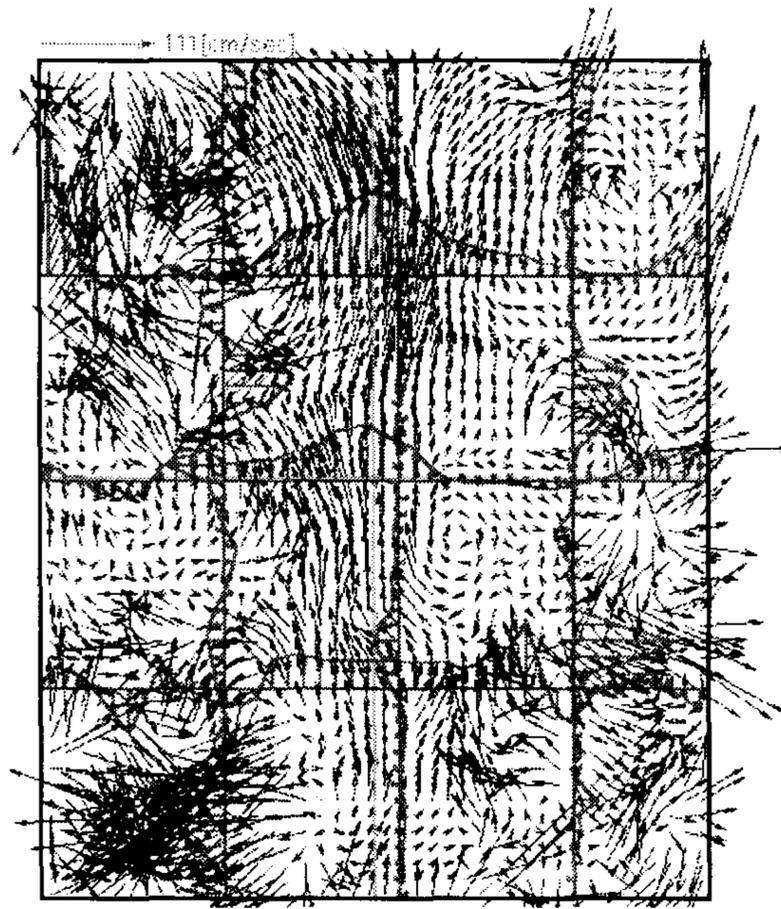


그림 3.21. Velocity vector distribution at the time of t=0

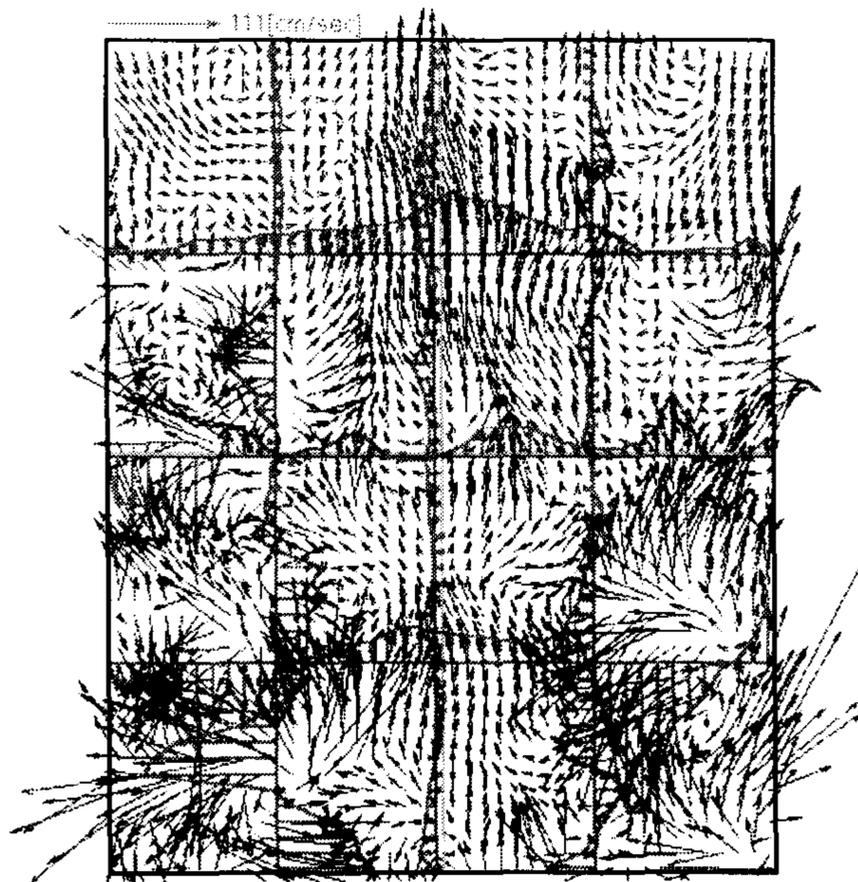


그림 3.22. Velocity vector distribution at the time of t=1 sec.

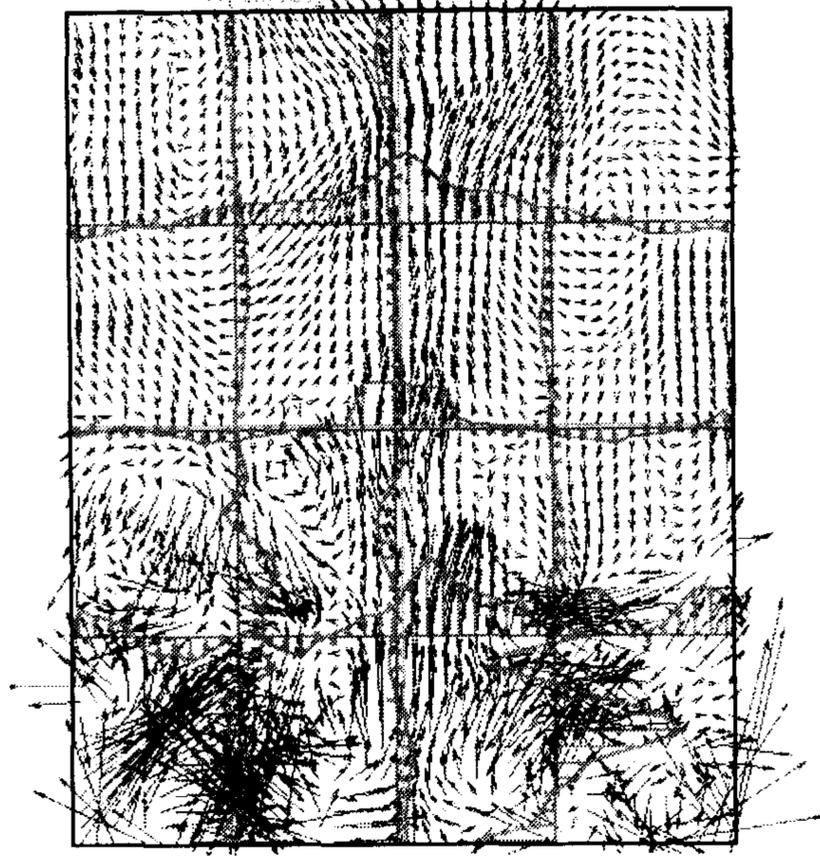


그림 3.23. Velocity vector distribution at the time of  $t=3$  sec

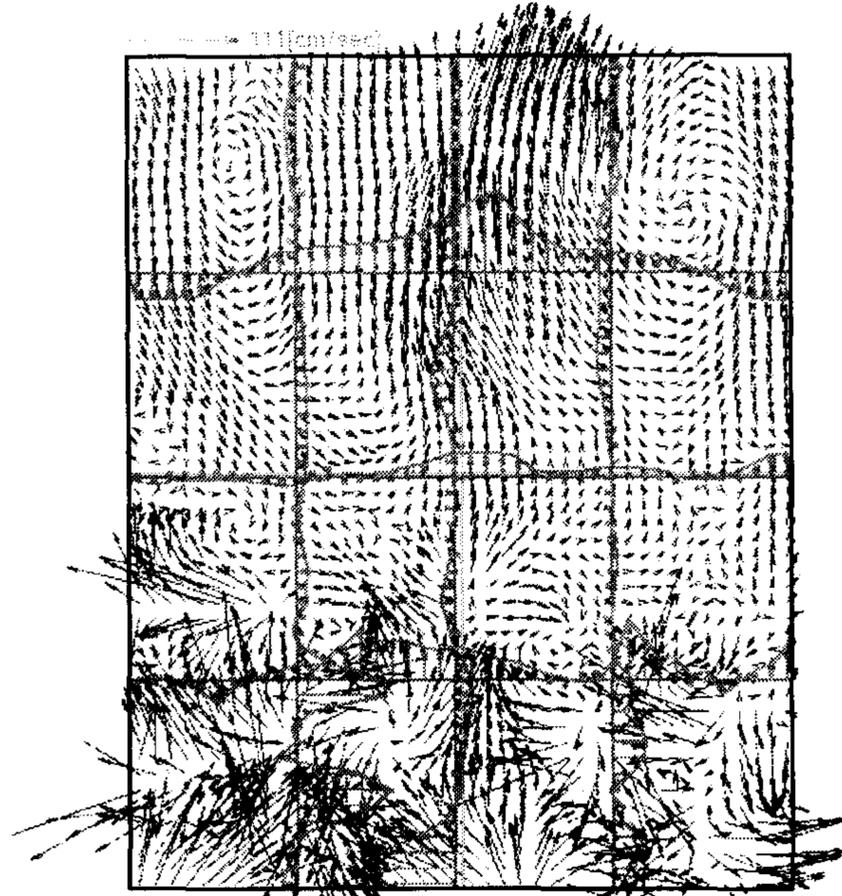


그림 3.24. Velocity vector distribution at the time of  $t=5$  sec.

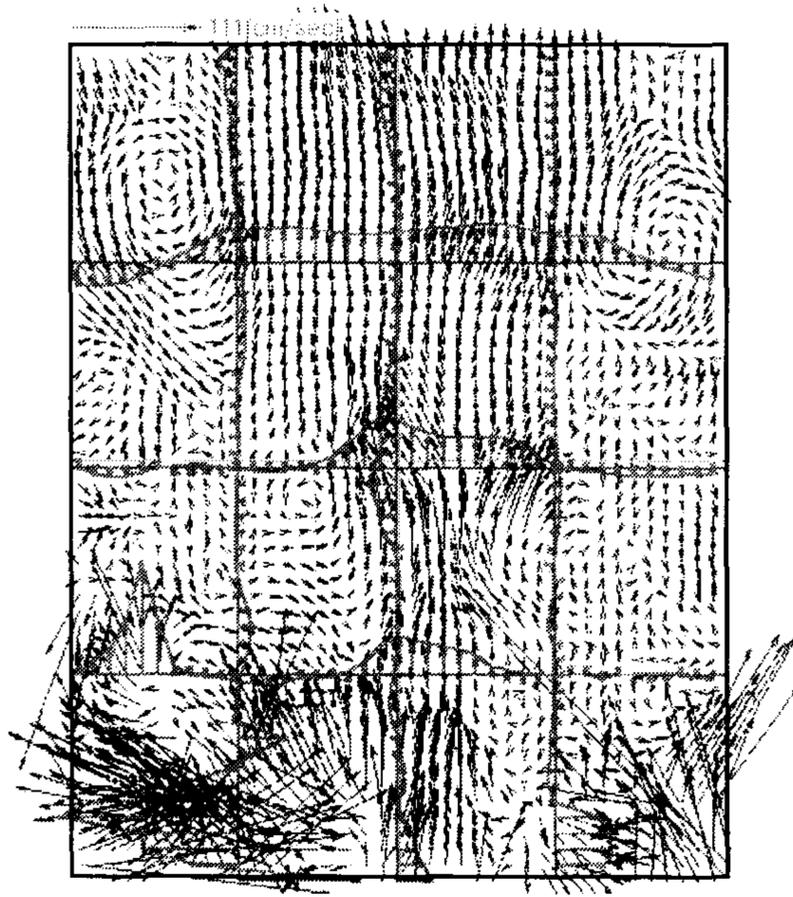


그림 3.25. Velocity vector distribution at the time of  $t=7$  sec

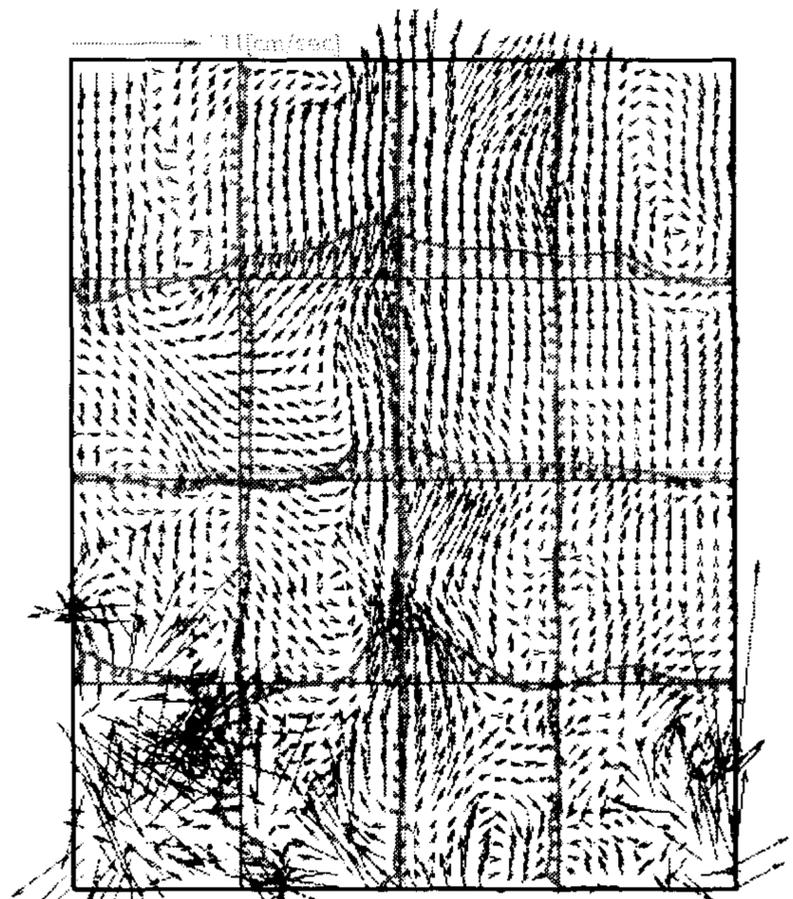


그림 3.26. Velocity vector distribution at the time of  $t=9$  sec

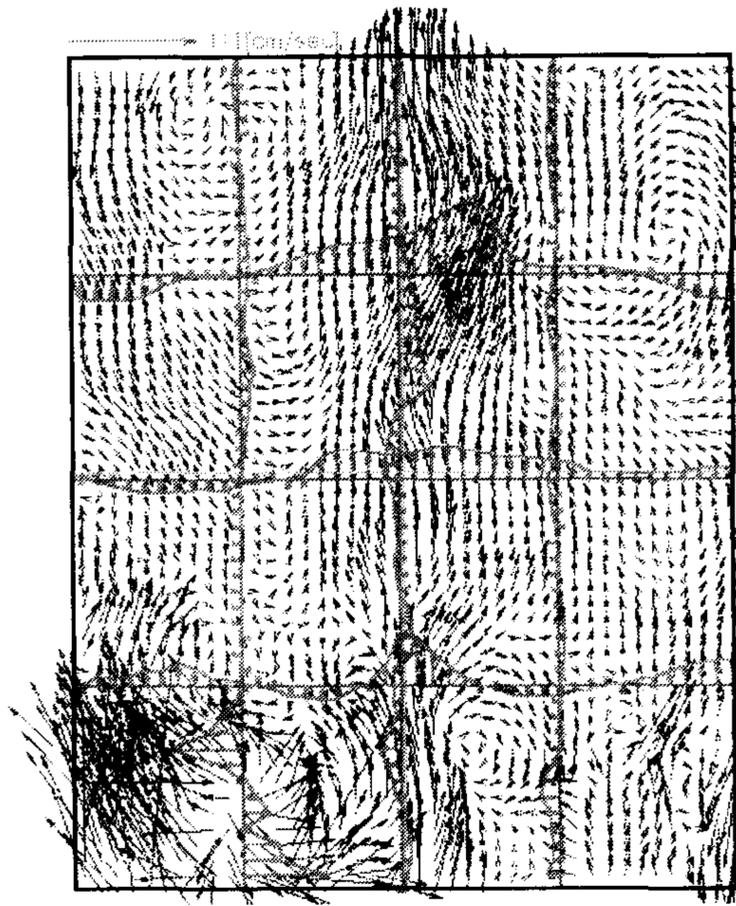


그림 3.27. Velocity vector distribution at the time of  $t=11$  sec

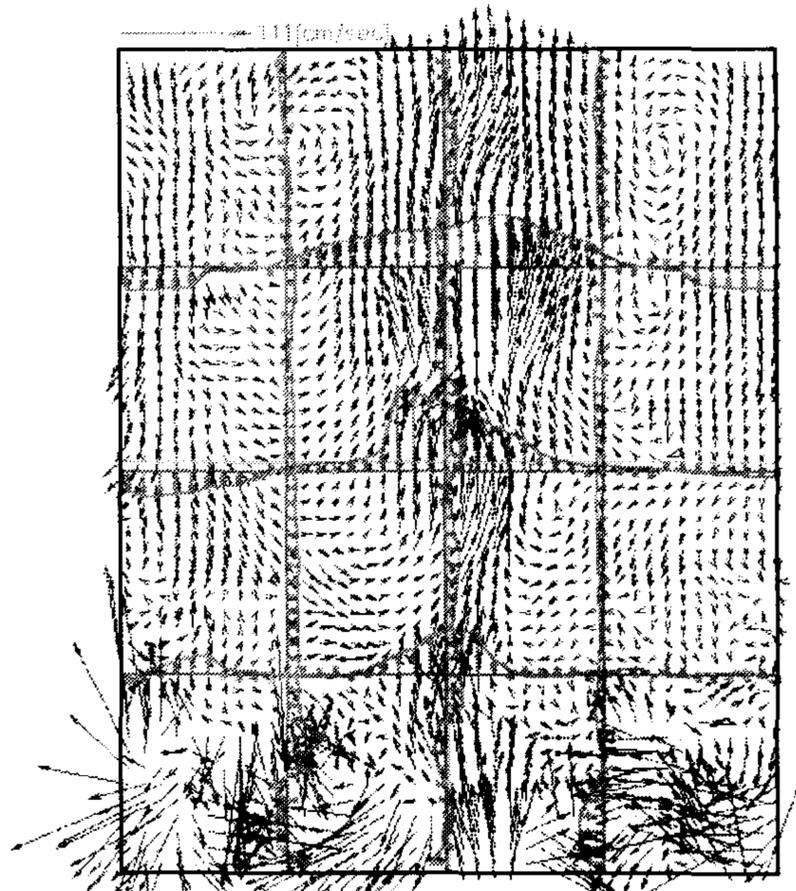


그림 3.28. Velocity vector distribution at the time of  $t=13$  sec.

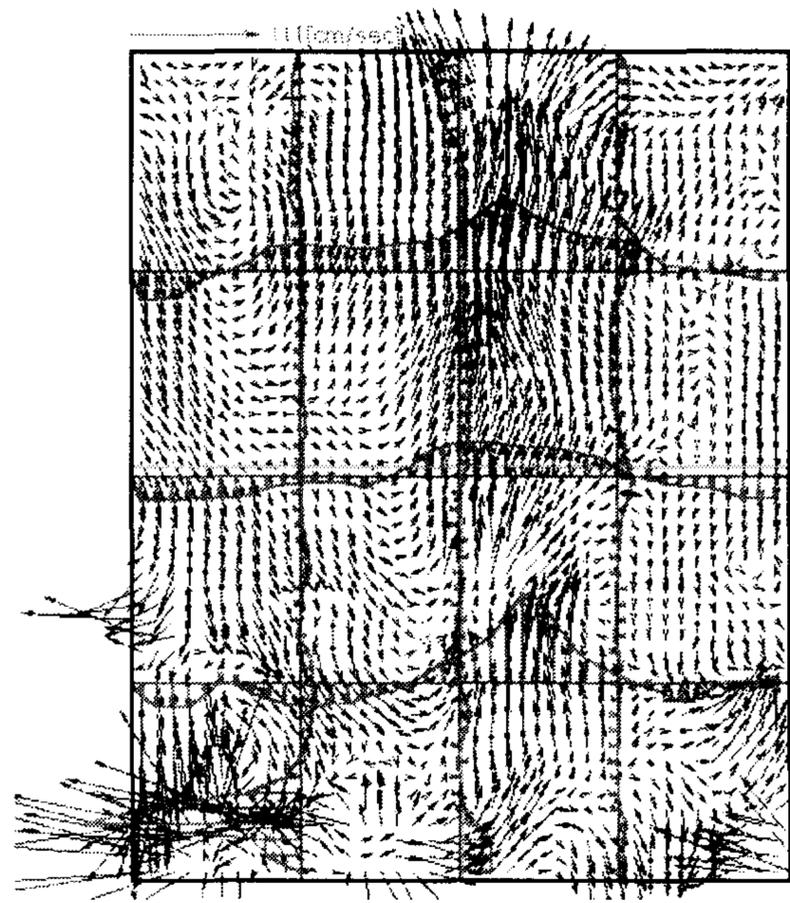


그림 3.29. Velocity vector distribution at the time of  $t=15$  sec

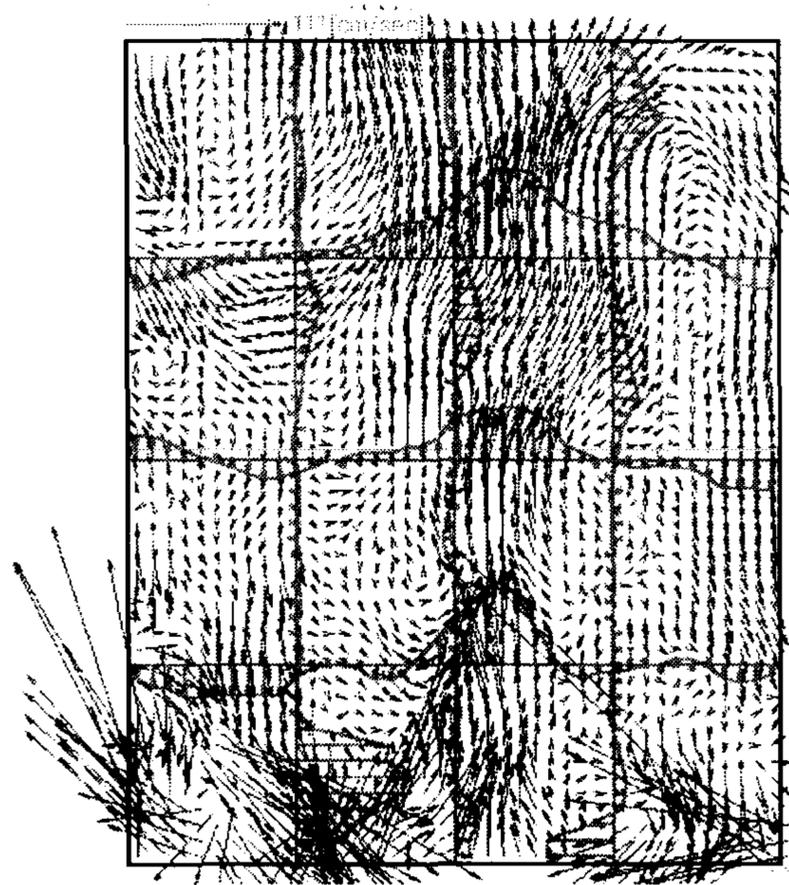


그림 3.30. Velocity vector distribution at the time of  $t=17$  sec

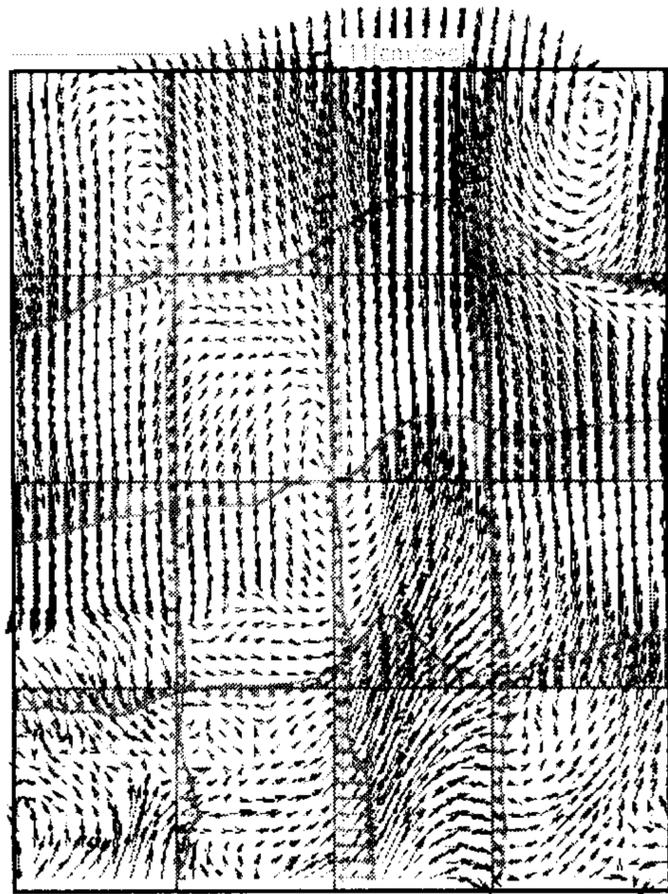


그림 3.31. Average velocity vector distribution

### 제 3 절 결론 및 향후계획

본 연구에서는 중대사고시 노심용융물-냉각수 반응의 열유동 모델 개발 및 검증을 위하여 다상 열유동 실험기법 개발, 개별 상관식 개발 및 검증 및 노심용융물-냉각수 반응 해석코드 보완 및 검증을 최종 목표로 하였으며, 이를 위하여 지금까지 연구된 노심용융물-냉각수 반응의 해석모델을 정리하였으며, 물의 복사 열 흡수 특성 이론 및 막비등열전달 상관식을 조사 정리하였다. 주요 중점 연구 내용으로 다상유동에서의 구형체 막비등 실험 및 다상유동의 PIV 측정 기법 개발을 수행하였다.

고온의 용융물-냉각수 반응에서 주요 열전달 모드인 2상유동에서의 막비등열전달계수를 측정하기 위해 실험장치를 제작하였으며, 본 실험의 특징은 기존의 연구가 정지상태의 구형체에 유체가 흐르는 경우에 반해 정지상태의 물에서 수증기가 흘러 오르는 풀에 구형체를 낙하시키는 방법을 택하였다. 구의 낙하속도와 수증기 발생량을 조절하면서 실험한 결과, 기존의 실험결과와는 상이하게 구의 낙하속도가 증가할수록 열전달계수가 감소하는 결과를 얻었다. 이는 실험 방법의 상이한 점에 기인하는 것으로 볼 수 있지만, 용융물-냉각수 반응에서 중요한 열전달 데이터이므로 앞으로 이에대한 지속적인 연구가 필요하다.

한편, 본 연구에서 개발한 PIV계측시스템은 기액2상유동의 속도분포를 시간적으로 잘 재현할 수 있으며, 이는 기존의 열선유속계나 레이저도플러유속계등의 계측기로서는 불가능했던 비정상유동장의 물리기구의 해명에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 계측시스템은 AOM(Acousto-Optical Modulator)을 적용한 PIV계측법이므로 고속류의 계측에도 적용이 가능하므로 시간스케일이 작은 경우의 물리적해석에도 도움이 될 것이다. 본 계측법은 현재 3차원계측법으로의 확장 완성된 단계이며 이를 3차원성이 중요시되는 유동장의 계측 및 해석에 적

용이 된다면 한층 더 본 계측법의 가치를 더할 것으로 사료된다

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 연구에서는 중대사고시 고온의 노심용융물과 냉각수간의 반응을 해석하는 모델의 열유동 모델을 개발하고 검증하기 위한 실험 기법의 개발에 목표를 두고, 노심용융물과 냉각수간 반응의 국내외 해석코드를 조사 정리하였으며, 주요 현상모델인 막비등열전달 및 복사열전달에 대한 자료를 정리, 분석하였다. 2상유동하에서의 막비등열전달 연구를 위해 실험장치를 제작, 수행하였으며, 2상유동에 입자영상추적속도측정법 (PIV)을 적용하여 2상유동장을 측정할 수 있는 기법을 개발하였다.

2상유동에서의 막비등열전달계수 실험의 특징으로 기존의 연구결과가 정지상태의 구형체에 유체가 흐르는 경우에 반해 정지상태의 물에서 수증기가 흘러 오르는 풀에 구형체를 낙하시키는 방법이다. 구의 낙하속도와 수증기 발생량을 조절하면서 실험한 결과, 기존의 실험결과와는 상이하게 구의 낙하속도가 증가할수록 열전달계수가 감소하는 결과를 얻었다. 이는 실험 방법의 상이한 점에 기인하는 것으로 볼 수 있지만, 용융물-냉각수 반응에서 중요한 열전달 데이터이므로 앞으로 이에대한 지속적인 연구가 필요하다.

PIV계측시스템은 기액2상유동의 속도분포를 시간적으로 잘 재현할 수 있으며, 이는 기존의 열선유속계나 레이저도플러유속계등의 계측기로서는 불가능했던 비정상유동장의 물리기구의 해명에 이용될 것이다. 또한 본 계측시스템은 고속류의 계측 및 3차원계측에 활용이 가능하다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

중대사고시 노심 용융물에 대한 다중 방호의 대상은 크게 압력용기, 원자로 공동 및 격납용기로 볼 수 있으며, 압력용기 및 원자로 공동에서는 노심 용융물의 충분한 냉각을 유지시키는 방안의 확보가 필수적이다. 특히, 노심 용융물의 냉각을 위해서는 노심 용융물과 냉각수의 접촉이 반드시 필요하며 이때 용융물-냉각수간의 혼합 및 폭발적 반응((Fuel-Coolant Interactions, 증기폭발) 현상은 노심 용융물 냉각에 대한 초기조건의 결정 및 폭발현상으로 인한 원자로용기 또는 원자로 공동을 포함한 격납용기의 건전성을 위협하는 주요 인자로서, 이에 대한 현상학적 이해 및 해석 모델의 개발이 필요하다.

노심용융물-냉각수 반응 현상에 대한 연구는 지난 20여년 동안 많은 기초현상실험 및 대규모 실증실험과 해석코드의 개발이 국제적으로 수행되어 왔으나, 현재 원자로 안전해석 및 중대사고 대처 설계에 활용하기에는 많은 불확실성이 남아있다. 이는 주로 현상자체가 다른 산업기술에서는 경험이 부족한 고온(~3,000K) 용융물 및 다상유동의 복잡한 특성을 가지고 있는 데 기인한다고 볼 수 있다. 해석코드의 검증을 위해서는 우선 각 현상모델 또는 상관식의 개발 및 개별효과실험을 통한 검증을 통해 전산코드의 체계적인 검증작업이 요구되며, 궁극적으로 종합실험데이터를 활용해 최종 검증하는 단계가 필요하다.

본 연구에서 개발한 실험기법 및 열유동 실험데이터는 이러한 노심용융물-냉각수 반응의 열유동 모델 개발에 활용될 것이며, 현재 국제적으로 주요 현상으로 개발 및 보완의 필요를 공동 인식하고 있는 Jet breakup model, Drop fragmentation model, 고온 다상유동에서의 Drag, 복사열전달 및 대류열전달 분야의 연구에 기여할 것이다.

## 제 6 장 참고문헌

- 1-1. J.R. Wolf and J.L. Rempe, "TMI-2 Vessel Investigation Project," Idaho National Engineering Laboratory Report, TMI V(93)EG10, 1993.
- 1-2. M. Akiyama, N. Yamano, and J. Sugimoto, ed., Proceedings of OECD/CSNI FCI Specialists Meeting, Tokai-Mura, Japan, May 1997.
- 2-1. M.L. Corradini, B.J. Kim and M.D. Oh, "Vapour Explosions in Light Water Reactors: A Review of Theory and Modeling," Prog. Nucl. Energy, Vol. 22, pp. 1-117, 1988.
- 2-2. X. Chen, W.W. Yuen and T.G. Theofanous, "On the Constitutive Description of the Microinteractions Concept in Steam Explosions," Proc. of 7th Int. Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, pp. 1586-1606, Saratoga Springs, New York, Sept. 1995.
- 2-3. D.F. Fletcher and A. Thyagaraja, "The CHYMES Coarse Mixing Model," Prog. Nucl. Energy, 26, pp. 31-61, 1991.
- 2-4. D.F. Fletcher and M.K. Denham, "Validation of the CHYMES Mixing Model," Nuclear Engineering and Design, Vol. 155, 85-96, 1995.
- 2-5. D.F. Fletcher, "Propagation Investigation using the CULDESAC Model," Nuclear Engineering and Design, 155, pp. 271-287, 1995.
- 2-6. M.F. Young, "IFCI: An Integrated Code for Calculation of All Phases of Fuel-Coolant Interaction," NUREG/CR-5084, 1987.
- 2-7. W.H. Amarasoonriya and T.G. Theofanous, "Premixing of Steam Explosions: A Three-Fluid Model," Nuclear Engineering and Design Vol.126, 1991.
- 2-8. T.G. Theofanous, W.W. Yuen, and S. Angelini, "The Verification Basis of the PM-ALPHA Code," Proc. of OECD/CSNI FCI Specialists Mtg., Tokai-Mura,

- Japan, pp. 219-268, May 1997.
- 2-9. W.W. Yuen and T.G. Theofanous, "The Prediction of 2D Thermal Detonations and Resulting Damage Potential," *Nuclear Engineering and Design*, 155, 289-309, 1995.
- 2-10. T.G. Theofanous, W.W. Yuen, K. Freeman, and X. Chen, "The Verification Basis of the ESPROSE.m Code," *Proc. of OECD/CSNI FCI Specialists Mtg.*, Tokai-Mura, Japan, pp. 287-362, May 1997.
- 2-11. C.C. Chu and M.L. Corradini, "One-Dimensional Transient Model for Fuel-Coolant Interaction Analysis," *Nucl. Sci. Eng.* 101, pp. 48-71, 1989.
- 2-12. J. Tang, "Modeling of the Complete Process of One-Dimensional Vapor Explosions," Ph.D Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1993.
- 2-13. B. Kim and M.L. Corradini, "Modeling of Small-Scale Single Droplet Fuel/Coolant Interactions," *Nucl. Sci. Eng.*, 98, 16-28, 1988.
- 2-14. K.H. Bang, I.G. Park, and G.C. Park, "TRACER-II: A Complete Computational Model for Mixing and Propagation of Vapor Explosions," *Proc. of OECD/CSNI FCI Specialists Mtg.*, Tokai-Mura, Japan, pp. 804-816, May 1997.
- 2-15. W.C. Rivard and M.D. Torrey, "K-FIX: A Computer Program for Transient, Two-dimensional, Two-fluid Flow," LA-NUREG-6623, 1977.
- 2-16. C. Addabbo, A. Annunziato, and D. Magallon, "Synopsis of the Results of ISP-39 on FARO Test L-14," *Proc. of OECD/CSNI FCI Specialists Mtg.*, Tokai-Mura, Japan, pp. 493-508, May 1997.
- 2-17. J. Sugimoto, N. Yamano, Y. Maruyama, A. Hidaka and K. Soda, "Fuel-Coolant Interaction Experiments in ALPHA Program," *Proc. of 5th Int. Topical Mtg. on Reactor Thermal Hydraulics*, Salt Lake City, Utah, Sept. 1992, pp. 890-897.
- 2-18. K.H. Bang, "Numerical Prediction of Forced Convection Film Boiling Heat

- Transfer from a Sphere," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 2415-2424, 1994.
- 2-19. C. Liu and T.G. Theofanous, "Film Boiling on Spheres in Single and Two-phase Flows. Part I: Experimental Studies," *ANS Proceedings, National Heat Transfer Conf., Portland, August*, pp. 34-47, 1995.
- 2-20. T.H.K. Frederking and J.A. Clark, "Natural Convection Film Boiling on a Sphere," *Adv. Cryog. Eng. Vol. 8*, pp. 501-506, 1963.
- 2-21. V.K. Dhir and G.P. Purohit, "Subcooled Film Boiling Heat Transfer from Spheres," *Nucl. Eng. Design*, Vol. 47, pp. 49-66, 1978.
- 2-22. I. Michiyoshi, O. Takahashi, and Y. Kikuchi, "Heat Transfer and the Low Limit of Film Boiling," *Proc. 1st World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Dubrovnik, Yugoslavia*, pp. 1404-1415, 1988.
- 2-23. K. Kobayasi, "Counter-Comment to Hesson & Witte's Comment on 'Film Boiling Heat Transfer around a Sphere in Forced Convection'," *J. Nucl. Sci. Technology*, Vol. 3, No. 10, pp. 449-450, 1966.
- 2-24. M. Epstein and G.M. Hauser, "Subcooled Forced Convection Film Boiling in the Forward Stagnation Region of a Sphere or Cylinder," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 197-189, 1980.
- 2-25. R. Siegel and J.R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd ed., Hemisphere, 1992.
- 2-26. B.J. Kim, "Heat Transfer and Fluid Flow Aspects of a Small-Scale Single Droplet Fuel-Coolant Interactions," *Ph.D Thesis, University of Wisconsin-Madison*, 1985.
- 2-27. H. Jacobs, L. Vaeth, and K. Thurnay, "Constitutive Relations for

- Multiphase Flow Modeling," Proc. of OECD/CSNI FCI Specialists Mtg., Tokai-Mura, Japan, pp. 205-218, May 1997.
- 2-28. Kobayashi, T., Ishihara, T. and Sasaki, N., 1983, "Automatic Analysis of Photographs of Trace Particles by Microcomputer System", Flow Visualization 3, pp.231-235.
- 2-29. Kobayashi, T., Saga, T. and Segawa, S., 1986, "Some Considerations on Automated Image Processing of Pathline Photographs", Flow Visualization 4, pp.241-246.
- 2-30. Adrian, R.J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
- 2-31. Doh, D.H., 1995, "A Study on 3-Dimensional Particle Imaging Thermometry and Velocimetry using Liquid Crystal", Tokyo Univ., PhD. Thesis.
- 2-32. Buchhave, P., 1992 "Particle Image Velocimetry-Status and Trends," Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.5, pp.586-604.
- 2-33. Shigeru, M. and Hiroshi, S., 1992, "Measurement of Unsteady Separated Flows on Blunt Plate by a Fourier Transform Method", Flow Visualization 6, pp.710-714.
- 2-34. Tokumoru, T. and Dimotakis, P.E., 1995, "Image Correlation Velocimetry", Exp. in Fluid, Vol.19, pp.1-15.
- 2-35. Yamamoto F., Iguchi M., Ohta J., Koketsu M., 1995, "Measurement of Bubbling Two-Phase Flow using 3-D PTV Based on Binary Image Cross-Correlation Method", FED-Vol209, Flow Visualization and Image Processing of Multiphase Flow Systems, Proc. of the ASME/JSME Fluids Engineering and Laser Anemometry Conference and Exhibition, August 13-18,

pp.131-136.

- 2-36. Hassan Y. A., Schmidl W. D., 1995, "Three-Dimensional Bubbly Flow Measurement using PIV", Proc. of 2nd International Workshop on PIV'97-Fukui, July 8-11, Fukui, Japan, pp.1-12.
- 2-37. Keane, R.D. and Adrian, R.J., 1991, "Cross-Correlation Analysis of Particle Image Fields for Velocity Measurement", ASME-FED-Vol.128, pp.1-8.
- 2-38. Willert, C.E. and Gharib. M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry", Exp. in Fluids, Vol.10, pp.181-193.
- 2-39. Kasagi, N. and Nishino, K., 1991, "Probing Turbulence with Three-Dimensional Particle-Tracking Velocimetry", Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol.4, pp.601-612.
- 2-40. Kobayashi, T., Saga, T. Haeno, T., and Tsuda, N., 1991, "Development of a Real-Time Velocimetry Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design", ASME FED-Vol.128, pp.1220-1227.
- 3-1. A.F. Mills, Heat Transfer, Irwin, 1992.
- 3-2. 木村, 中見, 1993, "遺傳的Algorithmによる速度場の過誤Vector判定", 可視化情報關西講演會論文集, pp.107-110.
- 3-3. Imaichi, K. and Ohmi, K., 1983, "Numerical Processing of Flow-Visualization Pictures-Measurement of Two-Dimensional Vortex Flow, JFM Vol. 129, pp.283-311.
- 3-4. Augi, J. and Jimenez, J., 1987, "On the Performance of Particle Tracking", JFM Vol. 185, pp.447-468.
- 3-5. Speeding, G. and Rigot, E., 1993, "Performance Analysis and Application of Grid Interpolation Techniques for Fluid Flows, Exp. in

Fluids, Vol. 15, pp.417-430.

- 3-6. Malik, N., Dracos, Th. and Papantoniou, D., 1993, "Particle Tracking Velocimetry(PTV):Technique and Image Processing Algorithms, Exp. in Fluids, Vol. 15, pp.279-294.
- 3-7. 流れの可視化Handbook, 流れの可視化学習編輯, 朝倉書店, pp.413.