

제 2 차년도  
최종 보고서

GOVP1199414771

시 공간 분해능을 갖는 연소진단 및  
연소장 제어시스템 개발

A Study on the Combustion Diagnostics and Control  
System having Temporal and Spatial Resolutions

연 구 기 관  
한 국 과 학 기 술 원

과 학 기 술 처

# 제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 "시 공간 분해능을 갖는 연소진단 및 연소장 제어시스템 개발" 과제의 2차년도 보고서로 제출합니다.

1994. 7. 31

주관 연구 기관 : 한국과학기술원

총괄연구책임자 : 신 현 동

## 요 약 문

연소를 동반하는 유동장은 강한 비선형성을 갖는 화학반응을 유체역학적 유동과 분리하여 고려, 해석할 수 없어 그 상태의 정확한 해석 및 진단이 어렵다. 최근에 들어 공해물질 규제등의 환경문제와 관련하여 연소상태의 보다 정밀한 진단 및 제어가 요구되고 있다. 현재까지는 연소상태를 주로 연소장의 국소, 시간 평균 정보와 경험에 의존하여 제어하고 있으나 연소상태의 정밀한 진단을 위해서는 시 공간 분해능을 갖는 연소장 정보가 필요하다.

본 연구에서는 연소장의 이차원 영상을 매우 짧은 노출시간을 가지고 포착할 수 있는 이차원 영상 Imaging System 을 구축하고 이를 통하여 얻어진 영상으로부터 시 공간 분해능을 가지는 연소장 정보(밝기 분포, 온도 분포, 농도 분포, ...)를 획득하는 방법에 관하여 연구를 수행하고자 한다. 최종적으로 이들 정보를 이용하여 연소상태의 진단과 제어를 위한 기술을 개발하고자 한다.

본 연구의 주요 내용을 연도별로 간추리면

1차년도 (1992. 9 - 1993. 6)

- . 이차원 영상 Imaging System 구축
- . 실험용 선회 연소기의 제작 및 운용

2차년도 (1993. 7 - 1994. 6)

- . Imaging System 개선
- . 이차원 영상 Image 로부터 연소장 정보(온도, 농도, ...)를 얻는 방법에 관한 연구

- . 영상 정보와 연소기 출력과의 상관 관계 연구
- . 분무 연소기의 설계, 제작, 특성 파악

3차년도 (1994. 7 - 1995. 6)

- . 분무 연소기의 연소 특성 파악
- . 2차년도 연구 결과의 분무 연소기에의 적용
- . 관련 software의 개발
- . 시제품 제작

본 2차년도 연구기간에는 이차원 영상 Imaging System을 개선 운용하였고 이를 이용하여 선회 화염의 구조를 파악하였으며 화염의 이차원 정보를 획득할 수 있는 방법들에 대한 연구를 수행하였다. 또한 실제 산업 현장에서 적용 가능한 분무 연소기를 설계 제작하여 그 특성을 파악하였다.

## Summary

It is very difficult to analyze and to diagnose the combustion field accurately because the flow field is coupled with the chemical reaction having the strong nonlinearity. In recent years, more refined combustion diagnostics and control technique have been needed strongly for the environmental problems such as pollutant reduction. It has been depended on the spartial and time averaged informations and on the manual experiences to diagnose and control the combustion phenomena, but informations having the temporal and spatial resolution must be needed for more refined combustion diagnostics and control.

We want to find the way to diagnose and control the combustion system with the informations obtained from temporal and spartial resolved image of combustion field.

We have the following time schedule for this purpose.

1st year ( 1992. 9 - 1993. 6 )

- . Establishment of the 2-dimensional imaging system
- . Operation and design the swirl combustor for experiment

2nd year ( 1993. 7 - 1994. 6 )

- . Upgrade of the 2-dimensional imaging system
- . Research on the correlation of image and combustion information
- . Design and setup of spray combustion system

3rd year ( 1994. 7 - 1995. 6 )

- . Research on the characteristics of spray combustion system
- . Application of the 2nd year's results in the spray combustion system

. Development of related software

. To make the prototype

## **Contents**

Summary ( Korean )	2
Summary ( English )	4
Contents ( English )	6
Contents ( Korean )	8
Nomenclature	10

### **Chapter 1. Introduction**

1.1 Background

1.2 Objectives

1.3 Previous works

1.4 Contents

### **Chapter 2. Imaging system and swirl combustor**

2.1 Imaging system

2.1.1 Input optics

2.1.2 Image intensifier

2.1.3 CCD camera

2.1.4 Frame grabber

2.1.5 Drive circuit device

2.2 Combustor

2.2.1 Swirl combustor

2.2.2 Flow system

2.2.3 Flow rate calibration



#### 2.2.4 Variables of swirl combustor

### Chapter 3. System assessments

#### 3.1 Imaging system

#### 3.2 Swirl flame imaging

#### 3.3 Processing of combustion information

### Chapter 4. Characteristics of Y-jet Nozzle

#### 4.1 Introduction

#### 4.2 Experiment

##### 4.2.1 Experimental setup

##### 4.2.2 Nozzle and parameters

##### 4.2.3 Measurement system

#### 4.3 Results and discussion

##### 4.3.1 Flow pattern of mixing port

##### 4.3.2 Atomization mechanism

##### 4.3.3 Mean drop size

#### 4.4 Conclusions and future work

### Chapter 5. Conclusions and future work

References

Figures and Table



# 목 차

국문 요약	2
영문 요약	4
영문 목차	6
국문 목차	8
기호 설명	10

## 제 1 장 서 론

- 1.1 연구의 배경
- 1.2 연구 목표
- 1.3 기존의 연구
- 1.4 연구 내용

## 제 2 장 Imaging System 과 실험용 선회연소기

### 2.1 화염 영상 Imaging System

- 2.1.1 입력 광학계
- 2.1.2 Image intensifier
- 2.1.3 CCD 카메라
- 2.1.4 Frame grabber
- 2.1.5 Drive circuit device

### 2.2 연소기

- 2.2.1 선회 연소기
- 2.2.2 유로계
- 2.2.3 유량검정

## 2.2.4 선회 연소기 변수의 정의

### 제 3 장 System 평가

#### 5.1 Imaging system

#### 5.2 선회 화염 Imaging

#### 5.3 연소장 정보의 취득 방법

### 제 4 장 Y-jet 노즐의 특성 파악

#### 4.1 서론

#### 4.2 실험 장치 및 방법

##### 4.2.1 실험 장치

##### 4.2.2 노즐 및 측정 항목

##### 4.2.3 측정 장치

#### 4.3 결과 및 고찰

##### 4.3.1 혼합관 내부 유동형태

##### 4.3.2 미립화 기구

##### 4.3.3 평균 입경에 대한 실험식

#### 4.4 결론 및 향후 연구계획

### 제 5 장 결론 및 향후 연구계획

참고 문헌

그림과 표

## 기호 설명

### 영문자

C	:	실험상수
$D_{32}$	:	Sauter 평균직경(m)
$D_{v,0.5}$	:	질량중심직경(m)
d	:	관 직경(m)
U	:	속도(m/s)
$U_R$	:	출구속도(m/s)
W	:	질량유량(kg/min)
We	:	웨버 수
Z	:	오네소계 수

### 그리스 문자

$\rho$	:	밀도(kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	:	표면장력(N/m)
$\mu$	:	점도(kg/m s)

### 상첨자

-	:	평균
---	---	----

### 하첨자

c	:	특성길이
e	:	외기
f	:	액체공급관 혹은 액체
g	:	기체공급관 혹은 공기
i	:	노즐내부
m	:	혼합관 혹은 단면평균
s	:	액막(liquid sheet)

# 제 1 장. 서 론

## 제 1 절. 연구의 배경

연소는 강한 비선형성을 갖는 화학반응이 유체역학적 현상과 couple되어 있어, 즉 유체역학적 유동과 연소 반응에 의한 발열반응을 분리하여 고려, 해석할 수 없어 그 상태의 정확한 진단이 어렵다.

연소 상태의 해석을 위하여 많은 이론적 실험적 연구가 수행되어 왔으나 아직까지는 그 현상의 복잡성으로 인하여 현장에 제대로 적용이 되지 못하고 있는 실정이다. 현재까지는 연소상태를 주로 경험에 의해 제어하고 있으나 연소기의 종류와 용량 그리고 개체수가 폭증하고 있는 상태이고 최근들어 emission 규제등의 환경문제등과 관련하여 보다 정밀하고 체계적인 제어가 요구되고 있다. 그러나 현재의 산업용 연소기에서는 그의 제어를 위한 정보를 출구 조건과 연소장의 시간평균정보로부터 얻고 있으나, 비정상 상태의 화염이나 소화(extinction)의 조건과 같은 정밀한 연소상태의 진단과 특히 공해물질의 배출에 대한 제어에는 연소현상의 강한 비선형성과 공해물질 생성의 순간 기구로 인하여 이러한 국소 부분의 정보와 시간평균 정보만으로는 매우 불충분한 상태이다. 이러한 정밀한 연소 상태의 진단을 위해서는 연소 반응의 짧은 시간 스케일을 frozen할 수 있는 짧은 순간의 연소장의 3차원적인 정보가 연속적으로 필요하나 현재의 기술로는 불가능하다. 현재 이러한 요건을 어느정도 충족시킬 수 있는 짧은 노출시간을 가지는 연소장의 이차원 정보를 얻고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 그러나 국내의 여건은 이러한 노력이 실험실 수준에서 이루어지고 있을 뿐 실제 산업 현장에서는 이를 위한 노력이 거의 이루어 지지 못하고 있다. 따라서 산업 현장에



서 응용될 수 있는 경제적인 연소 상태 진단기술과 새로운 제어 시스템의 개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

## 제 2 절. 연구 목표

본 연구에서는 위에서 언급한 필요성을 충족시키기 위하여 연소장의 이차원 영상을 매우 짧은 노출시간을 가지고 포착할 수 있는 이차원 영상 Imaging System을 구축하고 얻어진 영상으로부터 시공간 분해능을 갖는 각종 연소장 정보( time and spatial distribution of luminosity, temperature, concentration of species, ... )들을 추출해 내는 방법에 관한 연구를 수행하고 이러한 연구들의 결과를 토대로 연소 현상의 진단과 제어를 위한 기술을 개발하고자 한다.

연소기의 제어에는 연소기로의 입력과 출력의 상관 관계가 중요한 요소인데 종래의 제어에는 연소 제어 입력 인자(가스 조성, 유체역학적 변화,...)의 변화에 따른 출력(발열량, 배기가스 농도,...)의 관계를 구하고, 실제 연소기 운전시 출력의 변화를 감지하여 이 결과를 순환시켜 입력 조건들을 변화시키는 방법이 사용되었다. 그러나 이 방법은 출력의 결과를 감지하는데 비교적 많은 시간이 요구되고 입력 조건과 출력사이의 상관관계가 간접적이라는 단점을 가지고 있어 실시간 제어와 정밀한 진단 및 제어에 문제점을 발생시킨다.

그러므로 본 연구에서는 출력조건과 연소장의 이차원 영상과의 직접적인 상관관계를 조사하고, 입력조건의 변화에 따른 연소장 영상의 변화를 조사하여 이 결과로부터 연소장의 영상으로부터 연소기의 진단 및 제어를 실시간에 정밀하게 할 수 있는 System의 개발을 목적으로 하고 있다.(fig.1) 구체적인 최종 목표를 살펴 보면

1. 전체 연소장의 시 공간 분해능이 높은 Image ( Luminosity, 온도 분포, ...)로부터 실시간 최적 연소장 제어시스템 개발
2. 측정된 화염장 전체의 영상 상태와 공해 물질 ( CH, CO, Soot 등 )과의 상관관계 데이터 제시
3. 연소장 제어를 위한 각종 유체역학적 현상 ( Swirl, 난류 등 )의 적용 한계 및 효과에 대한 평가 연구
4. 위의 측정 방법과 연소장 제어 기술을 도입하여 실제 분무 연소기를 설계 제작함과 동시에 연소장 제어의 hardware 부분과 software 부분을 정립
5. 화염장 전체의 Image와 공해물질과의 상호 관계를 연구하여 금 후 공해물질 배출기준의 강화에 영향을 받을 다른 연소기 ( 자동차 엔진 등 )에 이를 적용하는데 부차적 목표가 있음

### 제 3 절. 기존의 연구

연소 상태의 정확한 이해와 이를 통한 새로운 연소 상태 진단 및 제어를 위하여 연소장 정보의 획득을 위한 많은 노력들이 이루어져 왔으나 측정 방법과 측정 장비의 미비로 연소 상태의 해석을 위한 충분한 정보를 얻을 수 없었다. 1980년대 들어 Laser를 비롯한 각종 광학적 측정 장비의 발달, 광학적 영상의 detecting을 효과적으로 수행하는 전자 장비의 발달과 영상의 Digital Image Processing 기법의 개발로 인하여 시공간적으로 적분된 정보가 아닌 시 공간 분해능을 가지는 연소장 정보를 획득하기 위한 노력이 이루어져 왔다. 특히 연소장 전체의 단면 또는 3차원 정보를 획득하기 위한 연구의 활성화가 이루어졌다.

S. S. Penner [1] 등은 80년대 들어 연소장에 적용된 Laser를 이용한 이러한 연구들을 종합적으로 정리 소개하고 있다. 그는 연소장에 적용된 Laser를 이용한 방법들을 유형별로 정리하여 관련된 연구 논문들의 list를 보여주고 아울러 각각의 방법이 지니는 장 단점을 지적하고 있다.

대표적인 방법이 Laser를 이용한 Rayleigh Scattering, Raman Scattering과 연소장의 Fluorescenc를 이용한 방법인데 [2], 80년대 들어 국소 부분의 측정이 아닌 2차원 단면의 정보를 획득하는데 Laser Sheet와 Electrical Framing Camera를 이용한 광학적 측정 방법으로 위의 방법들이 사용되고 있다. Hanson,R.K. [3]는 이러한 2차원 단면 계측에 관한 기법을 소개하고 있으며 이를 이용하여 많은 연구자들이 연소가 없는 유동장뿐 아니라 연소가 있는 연소장의 2차원 온도분포 및 2차원 농도 분포를 성공적으로 계측하고 있다.

최근에 들어 이차원 여러 단면의 Imaging을 통한 계측을 통하여 위의 연구들을 3차원으로 확대시키는 연구들이 계속 수행되고 있으며 대표적으로 M.B.Long [4] Group은 time scale이 작은 3차원 연소장의 온도와 농도 분포를 성공적으로 계측하고 있다.

이러한 광학적 계측 방법의 대표적인 실례가 CARS ( Coherent Anti-Stokes Ramman Scattering ) System [5]인데 System을 구성하는데 경비가 많이 든다는 단점을 가지고 있으나 연소장의 온도와 농도를 정밀하게 계측하기 위하여 널리 사용되고 있다.

Mizutani [6]는 2차원 영상 가시화와 이 영상의 해석을 통하여 연소장의 온도 분포와 농도 분포, mixing ratio, concentration of molecules and radicals, reaction rate 등을 계측해내는 방법과 이의 현재 상황을 종합적으로 소개하고 있다. 그러나 위의 연구들은 주로 Laser와 고가의 전자 장비를 이용하기 때문에 아직까지는 경제성을 갖추지 못하여 주로 실험실



에서 응용되고 있는 실정이다.

Laser를 이용한 단면 계측과는 다른 방법으로 간단한 계측과 수학적 계산을 통하여 연소장의 공간 정보를 알아내기 위한 연구들이 수행되고 있다. 대표적인 방법이 원하는 대상물을 가로지르는 많은 line-of-sight의 point 계측에 의한 2차원 Image 를 재구성하는 CT (Computed Tomography) [7] 에 의한 연소장의 농도와 온도 분포의 계측이다. CT 기법을 이용하여 원하는 대상물의 임의의 tomographic layer 에서의 2차원 물리 정보의 분포를 재 구성할 수 있다. CT는 의학적 진단을 비롯하여 fluid flow 등 여러곳에서 널리 사용되고 있는 기법인데 그 알고리즘 (Algorithm) [8] 은 이미 70년전부터 개발 발전되어 오고 있다. 이 방법의 원리는 X-ray 나  $\gamma$  - ray, ultrasound 등에 적용되어 왔다. 최근에는 적외선 (infrared emission) 과 음파 (sound wave) 를 이용한 CT 방법이 연소장의 온도 및 농도 분포를 계산하는데 이용되고 있다. 근래에 많은 line-of-sight의 point 계측을 대신하여 CCD 카메라에 의한 이차원 영상을 포착하여 CT 방법을 이용하여 화염의 이차원 온도 분포를 재 구성하는 시도가 이루어졌다.[9]

또한 Two color method를 이용하여 이차원 온도 분포를 구하려는 노력들이 많이 이루어져 왔다. 대표적으로 Kawamura [10] 등은 Image Intensifier을 갖춘 TV 카메라를 이용하여 2 color method 를 통하여 엔진 내부의 온도 분포를 계측하는 연구를 수행하여 이 방법이 연소 진단의 적합한 수단으로 이용될 수 있음을 보였다.

일본에서는 최근에 들어 대용량의 산업용 석탄 연소기와 oil 연소기의 연소 상태를 TV 카메라와 화염의 spectrum analysis 를 이용하여 진단 제어하려는, 실제 산업용 연소기에 응용되는 연구를 활발히 수행하고 있다.

山中孝友 [11] 등은 TV 카메라를 이용하여 취득한 화염 Image data 를 processing하여 각각의 burner에 적합한 연소 조건을 얻어내는 연소 monitoring system을 개발하여 이를 Power Plant에 적용하였다. 그들은 화염의 Image로부터 two color method에 의하여 얻은 온도 분포와 화염의 transmissivity등의 정보를 토대로 flame detection과 low NO<sub>x</sub> 와 low excess O<sub>2</sub> operation을 위한 연소 조건을 제어하는 방법을 소개하고 있다. 또한 K.Tama-ogi 등[12]은 화염으로부터 나오는 radiation을 분광기 (Monochromater) 를 이용하여 해석하는 spectroscopic analysis를 사용하여 NO<sub>x</sub> emission, flame stability, ignition delay등을 진단 제어하는 연소 진단 system을 소개하고 있다.

#### 제 4 절. 연구내용

본 연구의 목적을 달성하기 위해서는 크게 3단계의 과정이 필요하다.

먼저 연소장의 이차원 영상을 짧은 노출시간을 가지고 포착하고 이를 조작할 수 있는 Hardware의 개발과 입력조건의 변화를 제어할 수 있는 연소기의 제작을 들 수 있다.

다음으로는 시 공간 분해능을 갖는 이차원 영상으로부터 연소 진단에 유용한 연소장 정보를 추출해 내는 방법에 관한 연구이다. 이를 토대로 입력조건의 변화와 화염의 이차원 영상 정보와의 상관관계, 그리고 이차원 영상 정보와 출력과의 상관관계를 조사하여 연소 진단 및 제어를 위한 data base를 구축하는 작업을 진행시킬 수 있다.

마지막으로 위의 Hardware와 상관관계 정보를 적용할 수 있는, 입력조건의 변화가 자유로운 실제 연소기를 제작 운전하여 그 타당성을

검증하는 일이다.

이 중 일차년도에서는 관련 Hardware의 개발과 실험용 연소기의 제작을 완료하였으며 본 2차년도에는 개발된 Hardware의 보완과 평가 및 운용, 연소장 정보를 추출해 내는 방법에 관한 이론적 조사, 그리고 실제 산업용 연소기로 주로 쓰이는 분무 연소기를 위한 Y-jet type 분사 노즐의 설계 제작과 이의 특성 파악을 목표로 연구를 수행하였다.

자세한 연구 내용을 연차별로 정리하면

### 1. 1차년도(1992.8.1-1993.6.30)

- .실험용 연소기의 설계 제작 (선회 연소기)
- .이차원 영상 Imaging System 구축
- .연소장 제어에 관한 유체역학적 현상 도입
- .연소장의 이차원 연소정보의 계측에 관한 기초 조사

### 2. 2차년도

- .Imaging system의 보완과 평가
- .실험용 분무 연소기의 설계 제작 및 분무 특성 파악
- .이차원 영상을 통한 화염의 특성 파악
- .화염의 Image와 연소장 정보와의 상관관계 연구

### 3. 3차년도

- .분무 연소기 실험
- .분무 화염 Image와 연소 생성물과의 상관 관계 조사
- .관련 software 의 개발 및 적용

## .시작품 제작

본 보고서의 제 2 장에서 관련 Hardware의 구성과 실험용 선회 연소기의 제작을 다루었고, 제 3 장에서는 관련 Hardware의 평가와 이를 이용한 선회 화염의 구조와 연소장 정보의 취득 방법을 다루었다. 제 5 장에서는 산업용 연소기를 모사하기 위한 분무 연소용 분사 노즐의 설계 제작과 동작 특성을 다루었다.



## 제 2 장. Imaging System과 선회연소기

### 제 1 절. 화염 영상 Imaging System

본 연구의 목적인 시 공간 분해능을 가지는 이차원 영상의 포착을 위해 개발된 Imaging System의 구성을 fig.2 에 나타내었다.

화염 영상의 Imaging을 위해서는 화염에 초점을 맞춘 입력 광학계와 입력된 영상을 증폭하는 Image Intensifier, 그리고 화염의 Image를 전기 영상 신호로 바꾸어주는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라가 필요하다. 입력광학계에는 화염 영상의 밝기와 과장폭을 제어하기위한 ND (Neutral Density) filter와 간섭 (Interference) filter 를 부착할 수 있다. 또한 영상으로부터 연소장 정보를 추출하는데 필요한 각종 입력 광학계를 장착할 수 있다.

시간적으로 적분된 정보가 아닌 시간 분해능을 갖는 정보를 얻기 위해서는 짧은 노출시간의 미약한 빛(또는 간섭 filter를 통과한 미약한 빛)을 증폭하여주는 Image Intensifier가 필수적이다. 본 연구를 위하여 본 실험실에서 도입한 Image Intensifier는 이득율 (gain) 이  $10^4$  이고 Shutter time이 최고 100nsec인 Electrical Shutter를 채용한 MCP (Multi Channel Plate) 이다. Image Intensifier에서 전기적인 신호로 바뀌어 증폭된 화염의 Image 신호는 Intensifier 후반부의 Phosphor Screen 에서 다시 빛의 정보(Intensity)로 바뀐다. 이 증폭된 화염 Image는 CCD 카메라에서 복합 영상 아날로그 신호(NTSC)로 바뀌어 Video 출력이나 Image processing을 위해 A/D conversion 기능을 가진 Image Board로 전송된다. 위의 System 구성에서는 Image intensifier의 주파수 특성과 CCD의 감마

특성이 실제 Image와 출력 Image 사이의 관계를 결정하는 인자가 된다.

CCD 출력은 Image Processing을 위해 A/D Conversion이 필요하다. 이를 위해 Image Board (DT2853-60Hz, Data Translation CO, LTD)를 사용하였다. Image Board에서 영상은 Computer Memory 상에 1 pixel당 256 gray level의 값으로 변환 저장된다. 사용된 Image Board는 1초당 30 frame을 conversion 할 수 있다.

### 2.1.1 입력 광학계

영상을 포착하기 위한 입력 광학계는 filtering을 위한 부분과 렌즈로 구성되어 있다. 초점거리 55mm, F Number 2.0 인 Objective 렌즈를 사용하였으며 lens mount는 상용의 C mount를 채용하였다. 본 연구의 목적 달성을 위하여 입력 광학계에는 가시광 영역을 20nm 간격으로 filtering할 수 있도록 Interference filter를 부착할 수 있도록 하였으며 입사광의 강도를 조절할 수 있도록 Neutral Density filter를 또한 부착할 수 있도록 하였다.

또한 차후의 연구 목적을 달성할 수 있도록 하기 위해서 입력 광학계에 Image separator 를 준비하였는데 이는 화염의 매연 입자로부터 나오는 복사광의 파장별 강도를 조사하여 Two color method를 이용하여 화염의 온도 분포를 구할 수 있도록 하기 위해서이다.

### 2.1.2 Image Intensifier

시공간 분해능을 가지는 영상 Imaging System을 구축하기 위해서는 짧은 노출시간을 가지고 미세한 광량의 영상을 포착할 수 있어야 하

는데 이를 위해서는 짧은 시간동안 입사되는 미약한 빛을 증폭하여주는 장치가 필수적이다. 이의 목적을 위하여 보통 광전관( Photo Multiplier Tube )이 쓰이는데 이의 원리를 2차원 영상에 응용한 것이 Image Intensifier이다. 본 연구에서는 Multi Channel Plate (MCP)를 사용하였는데 이의 대략적인 구조는 fig.3에 나타내었다. 입력 광학계를 통하여 입사된 영상은 Photocathode에서 전자의 정보로 바뀐다. 광전관과 같은 원리로 영상의 정보는 MCP에서 증폭되며 원하는 만큼 증폭된 영상의 전자 정보는 MCP 후단의 Phosphor Screen에서 다시 빛의 Intensity 정보로 바뀌게 된다. 이때 MCP에 공급하여주는 전압의 시간을 통하여 Image Intensifier의 Shutter time이 결정되고 전압의 크기에 의하여 Image Intensifier의 증폭률 (gain)이 결정되게 된다. 본 연구에서는 최고 증폭률  $10^4$ , 최소 Shutter time 100 nsec의 MCP를 채용하였다. MCP의 사양중 주의하여야 할 사항은 영상 정보를 전자 정보로 바꾸어 주는 Photocathode와 반대로 전자정보를 다시 빛의 정보로 바꾸어 주는 Phosphor Screen의 Spectral Response와 Phosphor Screen의 Decay Time이다. 이러한 이유로 Image Intensifier는 영상의 파장별 감응도를 가지게 되는 것이다. 본 연구에서 사용된 MCP는 Photocathode 물질로 S20를 Phosphor Screen 물질로는 P20을 사용하였다. 이 물질들의 Spectral Response와 Decay Time은 fig.4와 fig.5에 나타내었다.

Image Intensifier는 Drive circuit Device로부터 동기 신호를 받는 controller에 의하여 shutter time과 gain이 조절된다.

### 2.1.3 CCD( Charg Coupled Device ) 카메라

입력광학계와 Image Intensifier를 통하여 증폭된 영상은 CCD 카메라



라에 의하여 포착된다. CCD 카메라는 이 영상을 복합 영상신호 (NTSC 영상신호) 로 출력하는데 이 영상신호를 처리하여 화염의 영상정보를 실험자가 취할수 있게 된다. CCD 카메라는 일반적으로 광학적 영상을 4단계로 아날로그 전자영상으로 전환하여 준다.

- 1) 2차원 배열의 광전소자(고체촬상 소자)에 입사된 빛 에너지에 비례하는 광전하로 전환한다.
- 2) 각 광전소자의 광전하를 MOS형 축전기에 저장한다.
- 3) MOS형 축전지에 집적된 전하를 순차적으로 전송단자로 전송한다.
- 4) 전송단자에 도착한 광전하를 이에 비례하는 전압의 변화로 전환하여 증폭한 후 복합 영상신호로 순차적으로 전송한다.

CCD 카메라는 여러 특성을 가지는데 이를 간략히 살펴보면

- . 감마 ( $\gamma$ ) 특성 (fig.6) : 입력되는 광의 강도와 변환되는 전하의 수(출력 신호의 크기)의 관계를 나타내는 특성으로 입사광과 출력신호가 비례관계에 있을때 감마값을 1로 표현한다. 상용의 CCD 카메라는 TV monitor의 감마값이 2.2이므로 사람이 감마값을 1로 인지하게 하기 위해서 0.45로 조정되어 있다.
- . Spectral Response : CCD 소자의 입력광의 파장에 대한 감응 특성을 나타내는데 일반적으로 가시광 영역과 근 적외선 영역에 감응한다.
- . NTSC 복합 영상신호 [13] : 일반적인 TV 주사방식으로서 이 신호를 통하여 CCD 카메라는 1초에 30 frame을 출력한다.

- . Electrical Shutter : 입사광 신호를 광전 변환하는 시간을 조작함으로써 CCD 카메라의 Shutter Time을 조정할수 있는데 보통 1/30 초에서 수천분의 1초까지 조정할 수 있다.

본 연구에서는 상용의 CCD 카메라 (東芝 CCD 카메라 IK-536) 를 사용하였으며 감마값은 0.45, Electrical Shutter는 1/30 초로 하였다. 본 연구에서 사용된 CCD카메라의 Spectral Response는 fig.7 에 일반 사양은 table.1 에 나타내었다.

#### 2.1.4 Frame Grabber

CCD 출력은 NTSC 아날로그 영상신호로 나타나기 때문에 영상의 정보를 실험자가 직접 조작할 수 없다. 영상신호를 실험자가 직접 조작하기 위해서는 CCD출력의 A/D Conversion이 필요하다. 또한 많은 영상 정보를 처리하기 위하여 고속의 자체 연산기능을 보유하여야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 고속 영상처리가 가능하도록 2개의 frame memory를 보유하고 자체 연산 처리기를 탑재하고 있으며 상용으로 쓰이는 Image Board중의 하나인 DT2853 - 60Hz (Data Translation CO. LTD)를 사용하였다. 이는 IBM 호환 Personal Computer에 장착하여 그 기능을 쉽게 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다. DT2853 - 60Hz Frame Grabber의 Hardware 구성을 fig.8에 나타내었다.

##### 가. 영상신호 입력

DT2853 - 60Hz Frame Grabber는 RS-170 단색 신호뿐 아니라 NTSC 복합 영상 신호를 흑백신호로 받아들일 수 있으며 입력의 동기신호를

조정할 수 있다.

#### 나. A/D 변환기

영상 Imaging System에서 가장 중요한 것은 아날로그 영상을 디지털 영상으로 바꾸어 어느 한 지점 (pixel) 에서의 밝기의 정도를 얼마나 정확하게 표시할 수 있느냐가 큰 관건이 된다. 이는 그 지점에서의 밝기의 정도를 나타내는 계조 (Gray Level) 로 표시하는데 아날로그-디지털 변환기 (A/D Converter) 의 분해능에 의하여 결정된다. DT2853 frame grabber는 8bit의 A/D Converter를 탑재하여 영상의 밝기를 256 gray level로 구분할 수 있다. 변환은 실시간에 이루어지며 변환 능력은 30 frame/sec이다.

#### 다. 메모리(Memory)

A/D Conversion된 영상 정보는 영상처리 전용의 고속 메모리에 저장되어 이후 영구 기억장소에 저장되거나 영상처리를 행할 수 있도록 한다. 기본적으로 자체 영상처리를 고속으로 수행하기 위하여 2개의 frame memory를 탑재하고 있으며, 다수의 영상을 연속적으로 입 출력 및 저장하기 위하여 개인용 컴퓨터의 RAM 메모리를 사용할수 있다. 이 때 영상의 크기는 256 KByte (512\*512\*8bit) 이며 2개의 자체 frame 메모리는 real time( 30msec )으로 영상의 취득 및 저장이 가능하며 RAM 메모리에는 frame당 약 0.25sec 간격으로 저장할 수 있다.

#### 라. 연산 처리 장치

DT2853 frame grabber는 영상의 각 화소의 밝기값을 읽어 목적하는 처리를 수행한 후 frame 메모리에 이를 다시 저장한다. 또한 Main



CPU를 거치지 않고 영상 처리 속도를 향상시키기 위하여 자체 부동소수점 연산기 ( Floating Point Mathcoprocessor ) 가 탑재되어 있어 2개의 frame 메모리상의 영상 정보에 대하여 실시간 영상처리가 가능하다.

### 2.1.5 Drive Circuit Device

위의 영상 Imaging System은 16bit 개인용 컴퓨터에 연결되어 종합적으로 control된다. 개인용 컴퓨터에는 Image Intensifier의 Mechanical Shutter와 Electrical Shutter의 timing과 동기를 조절할 수 있는 control circuit을 설치하였다. control circuit에서는 4개의 Channel을 통하여 TTL positive 5V, 50 $\Omega$  trigger 신호를 delay time 을 외부로 전송하여 Electrical Shutter와 기타 외부 event들을 동기 시킬 수 있다. Electrical Shutter는 control circuit으로부터 trigger 신호를 받아 구동되며 rising time 30nsec의 pulse로 50Hz의 반복주기를 가지고 최고 100nsec 까지 조정할 수 있다.

## 제 2 절. 연소기

본 연구에서는 Imaging System의 구축과 그의 평가를 위하여 실험용 연소기를 제작하였다. 실험용 연소기의 설계에서 연소장의 변화를 유발할 수 있는 연소기 입력 변수와 연소기의 기하학적 단순성을 고려하였다.

본 연구에서는 실험의 편이를 위하여 주위에 개방된 연소기를 고려하였고 일반적인 연소기의 입력 조건인 연료와 공기의 유량 이외에 다른 유체역학적 변수를 고려할 수 있도록 하였다. 이 목적을 위하여 본 연구에서는 연료에 동축으로 분류되는 주위 공기류의 선회(swirl)를

연료의 유량과 함께 연소기의 입력 변수로 삼았다.

선회는 연료와 산화제의 혼합, 화염구조, 화염의 안정성 및 공해 물질의 생성을 제어하는 수단으로 많은 형태의 연소기에 사용되고 있다. 선회화염의 재순환 영역은 Torroidal Vortex의 형태를 취하고 열과 반응성이 강한 화학종의 저장고로 작용하여 화염 안정화의 중요한 역할을 한다.[14] 실제로 많은 연소기에 선회가 이용되고 있으나, 선회 난류 제트의 공기역학적인 특성에 따른 선회 화염의 복잡한 구조로 인하여 선회화염의 구조에 대한 해석은 충분히 이루어지지 못하고 있으며 선회 연소기의 설계는 주로 실험과 경험에 의존하고 있다.

본 연구를 위한 실험 장치는 이러한 선회화염을 효과적으로 만들 수 있는 가변블럭형 선회연소기와, 연소기에 공기와 연료를 공급하는 유로계로 이루어져 있다.

### 2.2.1 선회 연소기

본 연구에서는 선회도를 자유로이 조절할 수 있고 강 선회를 얻는데 무리가 없는 가변블럭형 선회연소기를 사용하였다. 연소기의 재질은 두랄루민이고 그 기하학적 형상은 fig.9 와 fig.10에 나타내었다.

가변블럭형 선회 연소기는 Ijmuiden에서 실험 연구용으로 제작 사용되었는데 [15], 이런 형태의 선회 연소기는 선회 발생에 필요한 공기의 압력이 비교적 낮고 보다 높은 선회도를 얻을 수 있으며 연소기를 가동하는 중에도 선회도를 연속적으로 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 Ijmuiden 형의 연소기를 개량하여 보다 높은 선회도를 얻을 수 있도록 하였다.

연소기의 하단에 있는 8개의 공기 유입기로 같은 유량의 공기가

유입되어 선회발생 블럭 1,2를 경유하면서 선회류가 되어 공기 노즐 4를 통하여 수직방향으로 분출된다. 선회 블럭은 가변블럭 1 과 고정블럭 2로 되어 있으며 가변블럭의 회전으로 선회의 강도를 조절할 수 있다. 공기 노즐은 노즐내에서 화염의 형상을 볼 수 있도록 내경 30mm의 파이렉스 유리로 제작하였다.

연료 노즐에는 축방향, 판상 축방향, 확대 다공 노즐 등 여러가지가 있으나 이 가운데 선회류에 비교적 영향을 적게 미치는 단순 축방향 제트노즐을 채택하였다. 연료 노즐 3은 스테인레스 튜브로 제작하였으며 내경은 2.5mm이다. 이 연료 노즐을 통하여 연료인 상용 프로판 가스가 분출된다.

### 2.2.2 유로계

유로계는 연소용 공기와 연료의 유로계로 이루어져 있고 그 개괄도가 fig.11 에 나타나 있다. 공기압축기(comprssor)와 연료탱크로부터 나온 공기와 연료는 각각 압력 조절기와 유량 검정용 orifice를 지나고 수분을 제거하기 위해 설치된 수분 제거기를 통과한후 유동의 변동성분을 제거하기 위한 저장탱크로 유입된다. (필요에 의하여 연소장에 particle 을 띄우기 위해 만들어진 particle generator를 통과한 후) 연료는 연료 분사노즐을 거쳐 분출되고, 공기는 선회 연소기에 균일한 유량을 분배하기 위한 공기 분배기를 거쳐 선회 발생기로 유입되고 공기 노즐을 통과하여 분출된다.

### 2.2.3 유량 검정



본 연구에서 시험 제작한 선회 연소기에 공급될 연료와 공기의 유량 검정은 연료의 경우 유량이 많지 않으므로 Bubble Meter를 이용하여 수행 되었다. 내경 66mm인 파이렉스 유리관으로 만들어진 Bubble Meter는 얇은 비누거품을 형성하고 있고 Bubble Meter로 유입된 연료가 비누거품을 끌고 올라간다. 이때 비누 거품의 속도를 측정하면 유량을 정확히 측정할 수 있다. Bubble Meter는 구조상 유량 측정에 한계가 있으므로 유량이 매우 많은 경우에는 사용할 수 없다. 유량이 많은 공기의 경우에는 유량계와 마이크로텍터 (microtector)를 사용하여 검정하였다. 유량 검정은 유로계의 orifice 양단에 연결된 마노미터의 수두차를 읽으며 수행되었다.

#### 2.2.4 선회연소기 변수의 정의

##### 가. 선회도 ( Swirl Number : S )

선회류에 사용되는 가장 중요한 상사 기준은 선회도 S 이다.[16]

$$G_{\phi} = \int_0^R W r \rho U (2\pi r) dr$$

$$G_x = \int_0^R U \rho U (2\pi r) dr + \int_0^R P (2\pi r) dr$$

여기에서  $G_{\phi}$  와  $G_x$  는 각각 각 운동량과 선형 운동량의 축방향 플럭스 (axial flux) 이고 R은 연소기 공기 노즐의 출구 반경이다. 이때 선회도는 다음과 같이 정의된다.



$$S = \frac{G_{\phi}}{R G_x}$$

실험적으로 구한 선회도와 선회 발생기의 기하학적 형상에서 계산된 선회도는 잘 일치한다고 알려져 있으므로[14], 선회도는 선회 발생기의 기하학적 형상 (fig.10) 으로부터 결정할 수 있고 이 때의 정압항은 생략될 수 있다.  $\sigma$ 를 선회 발생기 출구에서의 평균 접선 방향 속도 성분과 반경 방향 속도 성분의 비로 정의하면 가변 블럭형 연소기의 경우 각 운동량  $G_{\phi}$ 는 선회 발생기의 기하학적 차원  $\xi/\xi_m$ 의 함수로 표시되는  $\sigma$ 로 나타낼 수 있다.[17] 이 때

$$\sigma = \frac{2\pi}{Z\xi_m} \sin \beta \frac{\cos \beta [1 + \tan \beta \cdot \tan (\xi/2)] (\xi/\xi_m)}{\{1 - [1 - \cos \beta (1 + \tan \beta \cdot \tan (\xi/2))] \xi/\xi_m\}^2}$$

$$(0 < \xi < \xi_m)$$

선회도  $S$ 는  $\sigma$ 와 선회 연소기의 공기노즐의 반경  $R$  및 연소기의 연료 노즐의 반경  $R_h$ 에 의해 나타내 진다.

$$S = \frac{G_{\phi}}{R G_x} = \sigma \frac{R}{2B} \left[ 1 - \left( \frac{R_h}{R} \right)^2 \right]$$

여기에서  $B$ 는 선회 발생기의 높이로 본 연소기에서는 그 값이 8 mm 이다.

#### 나. 당량비 (Equivalence Ratio: $\phi$ )

당량비  $\phi$ 는 실제의 연공비와 이론 연공비의 비로 정의된다.

$$\phi = \frac{(G_f/G_a)}{(G_f/G_a)_{stoich}} = \frac{(Q_f/Q_a)}{(Q_f/Q_a)_{stoich}}$$

본 연구에서는 연료로써 상용 프로판을 사용하였는데 편의상 그 조성이 LPG ( $C_3H_8$ )로만 구성되어 있다고 가정하였다.

#### 다. 연소기의 기하학적 형상

일반적으로 선회 화염은 강선회에서 안정된 I형과 V형, 그리고 천이 형태인 O형으로 구별된다.[18] 이러한 화염의 형태에 가장 영향을 미치는 것은 연소기의 기하학적 형상이다. 이는 연료가 공기에 대해 상대적으로 어느 위치에서 분사되느냐 하는 문제인데, 본 연구에서는 이 상대적 분사 위치를 연료 노즐과 공기노즐 출구의 상대 거리 ( $L_{EX}$ )로써 고려하였다. 즉 공기 노즐의 길이를 변화시킴으로써 이를 연소기의 입력 변수로 하였다.

## 제 3 장. System의 평가

앞 장에서 기술한 Imaging System은 각 구성 부분의 특성들에 기인하는 여러 변수들을 갖는다. 이들을 나열하면

- . Input Optics의 초점거리, F Number
- . Interference filter, ND filter
- . Image Intensifier
  - Gain, Shutter Time
  - Photocathode 물질 ( Spectral Response를 결정 )
  - Phosphor Screen 물질 ( Spectral Response를 결정 )
- . CCD 카메라
  - 감마( $\gamma$ ) 특성 ( 1 또는 0.45 : 0.45로 고정 )
  - CCD 소자의 Spectral Response
  - Electrical Shutter Time

본 연구에서는 Input Optics에서는 렌즈 System에서 오차의 원인이 되는 Aberrations ( spherical aberration, astigmatism, coma, ... )은 따로 고려하지 않았으며, ND filter는 10% 투과율의 filter를 반복 사용하여 1/10, 1/100, .. 의 밝기를 조정할 수 있게 하였으며 구비된 Interference filter는 400 - 800 nm까지 평균 20nm 간격으로 파장대역을 가지고 최대투과율 30 - 50 %, 반폭이 10 - 20 nm 인 filter들이다. 또한 추후에 화염대의 정보를 얻기 위한 Chemiluminescence를 위하여 OH, CH, C<sub>2</sub> radical의 자발광 영역의 파장에 상응하는 Interference filter를 구비하였고 2-color method를 위해 Image separator를 구비하였다.

본 장에서는 구축된 Imaging system의 성능을 측정하기 위하여 Image Intensifier에 공급되는 전압을 측정하였으며 구축된 system을 이용하여 선회연소기의 조건들을 변화시키며 영상을 획득하였다. 또한 획득된 영상을 처리하는 간단한 예를 보였다. 이를 통하여 본 연구에서 구축된 Imaging system이 매우 짧은 특성길이와 특성 시간을 갖는 연소장에서 정보를 획득하는데 유용하다는 것을 보여 준다.

## 제 1 절. Imaging system

화상을 증폭하는 Image intensifier 때문에 포착된 영상은 쉽게 포화될 수 있다. 이는 Image Intensifier에 입사되는 영상의 Intensity가 너무 강하여 증폭된 영상이 CCD 카메라에서 포화되기 때문이다. 이를 방지하기 위해서는 ND filter의 투과율을 낮게 조정하거나, Image Intensifier의 증폭 시간 (shutter time) 이나 CCD 카메라의 광 전환 시간 (shutter time) 을 짧게하여 영상의 밝기를 제한 하여야 한다. 그러나 이 방법만으로는 문제를 모두 해결할 수 없다. 왜냐하면 CCD 카메라는 CCD 소자의 자체 감응 강도가 있어 특정한 강도 영역의 영상에만 감응하기 때문이다. 즉 위의 방법으로 영상의 포화를 방지할 수는 있어도 영상의 많은 낮은 Intensity 부분의 영상에 CCD 카메라가 감응하지 못하여 그 부분의 영상을 인식하지 못하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 CCD 카메라의 감마 ( $\gamma$ ) 특성 (입력 강도와 출력 전하의 관계, fig.6)을 0.45에서 1로 변화시켜야 한다. 감마 ( $\gamma$ ) 특성이 0.45인 경우에는 출력이 포화되는 부분에 대부분의 영상이 집중되기 때문이다.

Imaging system의 성능을 조사하기 위하여 각각의 shutter time별로 Image intensifier에 공급되는 전압 pulse의 질을 조사하였다. Computer 의



control circuit에서 영상을 취득하라는 trigger 신호가 shutter controller에 들어가면 shutter controller는 이 신호를 받고 미리 조정되어진 시간의 pulse 폭을 가진 전압을 Image intensifier에 공급하게 된다.

전압 pulse의 형태는 1:1000 probe를 통하여 oscilloscope로 관찰된다.(fig.12) Fig.12 에서 같은 신호에 대한 두개의 전압 신호가 보인다. 폭이 넓은 신호는 정해진 Shutter time에 대하여 상응하는 전압 신호의 형태를 보여준다. 그림의 좌 하단에 있는  $\Delta t$ 는 해당하는 신호에 표시된 두 화살표 사이의 시간 간격을 나타낸다. 그러므로 이 시간 간격과 신호를 비교하여 보면 정해진 Shutter time에 해당하는 전압 pulse의 상태를 알 수 있다. 100 microsec 와 1 microsec의 신호는 정해진 시간동안의 전압을 보여주고 있고 rising time도 양호한 반면 10 microsec와 100 ns의 신호는 그렇지 못함을 알 수 있다. 폭이 좁은 신호는 10ms/div 으로 신호의 시간에 따른 변화를 보이는 것이다. 모든 신호에서 정해진 시간의 pulse를 나타낸 후 긴 decay time을 가진다는 것을 알 수 있다. 특히 1 microsec와 100ns 의 신호는 원하는 pulse가 나타난 후 큰 역 전압이 걸린 이후 decay 하는 것을 볼 수 있다. 이 결과로 부터 1 microsec 의 shutter time 까지는 본 장치가 잘 작동하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.13 에서는 전압 pulse 연속적인 거동을 보여주고 있다. 7개의 연속된 신호는 3 Hz의 주기를 갖는 폭 100 microsec의 전압을 Image Intensifier에 공급하고 있다. 폭이 넓은 두 신호는 첫번째 신호와 마지막 신호의 확대된 모습을 보여 주고 있다. 이 결과는 전압 pulse의 형태가 주기를 가지고 형상이 변하지 않으면서 Image intensifier 에 공급됨을 알 수 있다. 즉 일정한 주기를 가지고 같은 조건의 영상을 포착할 수 있다.

## 제 2 절. 선회화염 Imaging

본 연구의 목적을 위해 구성된 Imaging System과 선회 연소기의 성능을 평가하기 위하여 아래와 같은 내용의 실험을 수행하였다. 본 실험에서 fig.9의 연소기의 기하학적 형상 변수  $L_{ex}$  값은 -10mm 이었으며 선회수( Swirl Number : 축방향 운동량에 대한 각방향 운동량의 비에 관계되는 변수)는 0과 1.8까지 연속적으로 변화 시켰다.

Fig.15 - fig.18에서는 위의 조건들에 대해서 포착된 영상을 상용 Image Processing Software 인 Image Pro II 를 사용하여 전체 영상의 Intensity histogram과 영상의 반경방향 Intensity profile등 영상의 여러 정보들을 관찰 하였다. Image Pro II 를 이용한 영상 해석을 위해서는 Image Intensifier의 shutter를 개방한 상태 즉 노출시간이 CCD 자체 Shutter의 값인 1/30 sec 인 상태에서 영상을 포착하였다.

Fig.14에 연료 유동의 조건이  $Re=3600$ 인 선회화염과 선회가 없는 화염의 영상을 나타내었다. 영상의 외형적 결과만을 보이기 위해 Image processing후의 결과를 보면 선회에 의하여 연소장의 구조가 크게 바뀌고 있음을 알 수 있다. 가시적으로 화염의 길이가 크게 줄어들고, 폭이 늘어나고 있음을 볼 수 있다. 또한 화염이 공기노즐 안으로 강하게 빨려 들어가고 있음을 볼 수 있다. 이는 선회류의 중앙에서 발생하는 강한 역류 때문인데 선회류의 이 특성때문에 연소기의 입력 조건의 변화로 선회를 택하는것이 효과적이다.

Fig.15에는 연료 유동의 조건이  $Re=500$ 인 층류 화염의 filtering된 영상을 나타내었다. (a)는 400nm Filter (중심값 : 401.2nm, 반폭 : 18.8nm, 최대 투과율 : 0.423) 를 통과한 영상이고 (b)는 600nm Filter (중심값 : 602.1nm, 반폭 : 11.1nm, 최대 투과율 : 0.429) 를 통과한 영상이다. 400nm



영상이 600nm 영상보다 어두운 것을 알 수 있다. 이는 연소에 의하여 생기는 빛이 주로 soot radiation에 기인하기 때문이다.

Fig.16 와 fig.17은 Imaging System에 포착된 영상의 밝기 분포를 보여주는 그림이다. 이 결과는 상용 Image processing software인 Image Pro II의 line profile 명령을 이용한 결과이다. 본 System은 포착된 영상의 결과가 A/D Conversion되어 컴퓨터의 memory에 기억되어 있기 때문에 여러가지 조작을 할 수 있다. 이 그림들은 화염의 반경방향 Intensity 분포를 보여주고 있다.

Fig.18 은 위의 결과들을 digital data로 받아서 영상의 정보를 재구성한 그림을 나타내고 있다. 편의상 화염이 선명하고 짧은 층류화염의 filtering 된 영상을 예로 들었는데 같은 화염의 400 nm 영상과 600 nm 영상의 관심 영역에서의 Intensity 의 통계값 ( mean, standard deviation ) 과 노즐로부터 떨어진 여러 축 상의 반경 방향 Intensity profile을 나타내고 있다. 이러한 결과는 추후에 연소장의 영상으로부터 연소장 정보 (농도, 온도 분포 등) 를 얻을 수 있는 방법, 예를 들면 Two color method나 Computed Tomography 에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

Fig.19 - fig.22 에서는 Imaging System의 노출시간의 변화에 따른 여러 화염의 영상을 나타내고 있다. 각각의 그림에서 두 영상은 각각 노출시간 10 ms 와 100 microsec 의 영상이다. Fig.19 는 선회가 없는 일반 난류 jet 화염이며 fig.20 은 부상 화염을 보여주고 있다. Fig.21 과 fig.22 는 선회 화염의 대표적 형상을 보여주고 있다.[18] Fig.21은 선회 화염 중에서 type I 이라고 일컬어지는 화염이다. 이 화염은 재순환 영역이 중심부의 연료 노즐과 연료 제트를 구근상으로 둘러싸서 연소 지역에 점화 너지를 공급함으로써 전체 화염을 안정화 시킨다. 이때 연료 제트의 운동량이 재순환 영역을 관통하여 주변의 공기와 혼합하면서 2차 연



소지역을 형성한다. Fig.22는 type V의 선회화염인데 선회에 의한 재순환 영역의 세기가 강하여 연료 제트가 재순환 영역을 관통하지 못할 때 형성되며 뒤집어 놓은 원뿔 형태의 푸르고 강렬한 화염이다.

위의 각각의 영상에서 노출 시간이 짧은 경우와 긴 경우는 매우 큰 차이를 보인다. 노출 시간이 긴 경우에는 시간적으로 적분된 상이 잡히게 되는데 연소장의 특성 시간이 매우 짧기 때문에 이로는 연소장 해석에 유용한 정보를 제공하지 못한다. 특히 fig.21과fig.22를 보면 이러한 사실이 명확히 나타난다. 시간적으로 안정하게 보이는 화염들이 매우 비정상적인 거동을 보이고 있다. 이러한 비정상 거동이 적분되어 노출시간이 긴 영상을 구성하고 있음을 알 수 있다. 광량을 증폭시키는 Image Intensifier의 채택으로 이러한 비 정상 거동을 포착할 수 있었다.

### 제 3 절. 연소장 정보의 획득 방법

연소장의 이차원 영상으로 부터 온도, 농도 등에 관련된 정보를 획득하는 방법들에 대한 연구들이 수행되어 왔다. 본 절에서는 이러한 연구들중 경제성을 가지고 본 연구에 이용된 Imaging system 에 적용 가능한 방법을 고찰하고자 한다.

화염에서 방사되는 빛은 연소 상태와 관련된 여러 정보를 가지고 있다. 연소장에서는 화학 반응시 나타나는 여러가지 중간 생성물인 radical 들이 생성되는데 이들은 그들 고유의 진동수를 가진 빛을 방출 (Chemiluminescence) 한다.[19] 연소장에서 주요 관심사가 되는 radical 들로는 OH, CH, C<sub>2</sub> 등이 있는데 OH기는 306.4, 306.8, 309.0, 312.2 nm 의 중심 파장을 가진 빛을 내고 연소장의 고온 영역에 넓게 분포하고 있다. CH기는 432.2 nm의 중심 파장을 가진 빛을, C<sub>2</sub> 기는 516.5 nm 의 중

심 파장을 가진 빛을 방출한다. 이 두 radical 들은 주로 화학 반응대에 분포하고 있어 reaction zone의 indicator 로써 사용된다.

그러므로 해당 영역에 해당하는 Interference filter를 사용하여 이들의 이차원 공간 분포를 관찰하면 연소장에서의 반응대에 관한 정보를 도출할 수 있는데, 이 때 문제가 되는 것이 이들이 내는 광량이 미약하다는 것과 연소장에서 생성된 soot의 blackbody radiation에 의한 신호의 왜곡이다. 이중 전자는 Image Intensifier를 가진 영상 취득 장치로 해결할 수 있으며 (OH radical 이 내는 빛은 자외선 영역이므로 수광부의 optics를 자외선 용으로 해야한다.) 후자는 soot의 blackbody radiation을 고려한 보정이 필수적이다.

soot가 생성되지 않는 예혼합 화염의 경우와 발광 영역에서 soot의 blackbody emission이 미약한 OH radical의 경우 이러한 보정은 큰 문제가 되지 않는다. 그렇지 않은 경우에는 해당 영역 좌우의 파장 대역에서의 soot의 blackbody emission을 측정하여 이들의 값을 가지고 보정하여야 한다. 이런 경우 원하는 화염대의 정보를 얻기 위해서는 원 영상과 좌우 파장 대역의 두 영상, 즉 세 영상이 필요하게 된다. 그러나 세장의 영상을 동시에 얻는 것은 불가능하므로 비 정상 유동에 대하여 적용이 불가능 하다. (정상 유동의 경우에는 시간 간격을 두고 3세장의 영상을 취하는 것이 가능하다.) 즉 정상 상태의 유동과 예혼합 화염에는 위의 모든 방법이 적용 가능하며 비정상 상태의 유동에는 OH radical의 chemiluminescence를 이용하여 화염대에 관한 정보를 취득할 수 있다.

연소장의 온도를 측정하는 방법으로는 일반적으로 thermocouple이 사용된다. 그러나 이 방법은 유동에 교란을 주는 삽입식 측정 방법이고 한 지점에 대한 측정 방법이므로 시 공간 분해능을 갖는 온도 측정 방



법으로는 부적합 하다. 온도의 공간적 분포를 짧은 노출 시간을 가지고 측정하는 방법으로 Laser 를 이용한 여러 방법이 있으나 [20], 아직까지는 경제적, 기술적 문제점 때문에 쉽게 적용하기는 어렵다.

경제성을 가지고 온도의 이차원 온도 분포를 측정하는 방법으로 2-color method 에 의한 측정방법이 있다.[10] 이 방법은 연소장에서 생성되는 soot의 radiation이 온도에 대한 정보를 가지고 있다는 점을 이용하여 서로 다른 두 파장 대역의 Intensity 를 비교하여 온도를 구하는 방법으로 광 축을 따라 적분된 온도를 측정한다는 단점을 지니고 있으나 이차원 온도 분포를 경제적으로 취득할 수 있다는 장점을 갖는다. 주로 적외선 파장 대역과 가시광선 파장대역이 이 방법에 이용되는데 적외선을 이용하는 방법은 주로 낮은 온도에 대한 정보가 필요할 때이고 일반적으로는 가시광선 파장 대역을 이용한다. 2-color method 를 이용하여 측정된 온도는 광축을 따라 온도가 균일하지 않게 분포하여 있을 경우 (대부분의 화염)에 적외선 영역을 이용한 방법은 광 축상의 평균 온도를, 가시광 대역을 이용하면 광축상의 최고 온도를 측정하는 것으로 알려져 있다. 주로 사용되는 파장 대역은 529 nm, 548 nm, 738 nm, 750 nm, 2300nm, 3980nm 등인데 이 파장 대역에서는 연소 중간 생성물인 radical 의 영향이나 CO<sub>2</sub> 나 H<sub>2</sub>O 에 의한 absorption 과 emission 을 피할 수 있기 때문이다.

이 방법을 이용하기 위해서는 파장 대역이 다른 두 영상이 필요한데 이는 Image separator를 써서 원 영상을 두개로 나누어 각각의 파장 대역에 해당하는 interference filter 를 통과시켜 한 영상에 두 파장 대역의 영상을 함께 얻음으로써 해결할 수 있다. Image separator를 사용하여 2 - color method를 본 연구의 Imaging system 에 응용하면 Image intensifier의 화상 증폭 기능으로 인하여 매우 짧은 특성 시간을 갖는

연소장내의 온도 분포를 freeze 시킬 수 있다는 장점을 갖는다.



## 제 4 장. Y-jet 노즐의 특성 파악

### 제 1절. 서 론

2-유체노즐의 일종인 Y-jet 노즐은 내부혼합형(internal mixing type) 노즐로서 미세한 분무입경을 얻을 수 있는 잇점이 있기 때문에 주로 산업용 보일러나 연소로등의 연소기기에서 액체연료분무에 사용되고 있다. 이 노즐은 fig.23에서 보는 것과 같이 분무촉진용기체(공기 혹은 수증기, atomizing fluid)를 공급하는 기체공급관(gas port)과 액체연료를 공급하는 액체공급관(liquid port) 및 이들 공급관으로 부터 공급된 기체와 액체연료가 서로 혼합되는 혼합관(mixing port)으로 구성되어 있다. 이와 같은 노즐구조 때문에 Y-jet노즐의 내부유동은 단상유동과 2상유동이 혼재된 매우 복잡한 형태를 갖게 된다. 이 복잡한 유동형태는 노즐의 설계나 작동에 관한 내부유동 및 미립화기구 등을 이해하는데 애로사항이 되고 있어 이를 해결하고자 하는 연구들이 최근에 수행되고 있다.

이 Y-jet 노즐과 관련하여 초기에 수행된 연구들은 주로 노즐의 제원 (각 공급관의 직경, 액체공급관과 기체공급관 사이의 각도, 혼합관 길이와 직경의 비 등)에 따른 입경의 크기를 비교하여 설계에 관련된 제한조건들을 제시하는 것이었다. 이런 연구의 예로는 Mullinger와 Chigier[21]가 실험연구를 통하여 분무노즐설계에 관련된 기본적인 방법을 제시한 것과 Prasad[22]가 서로 다른 Y-jet노즐과 연료들을 사용하였을 때 나타나는 입경을 비교하여 설계기준을 설정한 것 등이 있다. 이들 두 연구결과에서 주목할 사항은 입경의 크기에 미치는 혼합관길이의 영향에 대하여 서로 상반된 견해를 제시하고 있다는 점이다. 즉 혼합관 내부유동형태를 단순히 환상-분무류(annular-mist flow)형태라고 생각한

Mullinger와 Chigier[21]의 결과에서는 혼합관길이가 길 수록 입경이 감소한다고 하였으나, Prasad[22]는 기체와 액체연료간의 운동량전달에 필요한 혼합관길이만 확보되면 길이의 증가가 액적의 크기를 감소시키지 못한다고 하였다. 이처럼 상반된 견해를 제시하게 된 것은 혼합관 길이와 기체/액체의 질량비 등에 따라 달라지는 내부유동형태를 고려하지 않았기 때문이다. 설계기준을 제시하는 연구를 탈피하여 분사압력이 주어졌을 때 기체와 액체연료의 유량을 예측하고자 한 연구가 Hurley와 Doyle[23]에 의해 이루어 졌으며, 이들은 Mullinger와 Chigier[21]의 연구 결과 및 그들의 실험결과들을 기준으로 하여 기체공급관과 액체공급관을 통한 유량계수와 혼합점압력에 대한 실험식들을 제시하였다. 이들의 혼합점의 압력에 대한 실험식은 기체 및 액체공급관의 단면적의 합과 혼합관의 단면적의 비의 함수로 표현되었으며 혼합관내에서의 유동특성을 고려하지 않고 있다.

이처럼 Y-jet 노즐과 관련된 초기의 연구들은 혼합관내부유동의 형태에 대한 고려없이 분무특성(특히 액적의 크기의 변화)을 설명하고자 하였으나 최근의 연구들은 분무특성(입경의 분포, 액적크기)과 혼합관 내부유동과의 관련성을 찾는 데 주력하고 있다. 그리고 노즐 분무특성인 입경을 예측하는 실험식도 다른 종류의 2-유체노즐에 적용되는 Wigg의 식[24]을 수정없이 그대로 사용[21,22]하였으나, 이에 대해서도 혼합관 내부에서의 유동과 관련시키고자 하는 연구들이 수행되었다. 내부유동특성 및 분무특성에 관한 대표적인 연구결과들은 다음과 같다. 우선 액체연료가 층류유동(laminar flow)형태로 Y형분지관에 공급되는 경우에 액체가 빠른 공기의 흐름과 만나는 지점에서 액적으로 분열이 격렬하게 일어나고 이 때의 혼합관내 유동형태는 환상-분무류라고 Graziadio 등[25]에 의해 제시되었다. 이 결과를 근거로 De Michele 등



[26, 27] 및 Andreussi 등[28]의 ENEL그룹은 혼합점압력과 혼합관에서의 압력강하를 해석하기 위해 혼합관내 유동을 일차원 압축성유동으로 가정하였다. 여기서 그들(ENEL그룹)은 혼합관내의 2상유동 마찰계수를 액체/기체의 질량유속비 및 혼합관 길이에 대한 직경의 비의 함수로 나타내었다. 그리고 ENEL그룹의 입경에 관한 실험식은 Lefebvre가[29] 2-유체노즐에서의 입경을 나타내는데 사용한 실험식을 수정하여 노즐내부에서의 공기의 질량유속과 평균밀도의 함수로 나타내었다. 그러나 이들 ENEL그룹의 입경관계식에서는 기체/액체의 질량유량비의 영향을 고려하지 않으므로서 혼합관 내부유동은 액체와 기체의 운동량의 비에 따라 달라지며, 이 때문에 입경의 크기와 분포가 변한다[27]는 그들의 결과를 실험식에 나타내지 못하였다. 이상의 연구결과들과는 달리 이론적인 해석방법으로 Y-jet노즐의 내부유동특성을 찾고자하는 연구가 Lee 등[30]과 인왕기 등[31]에 의해 수행되었다. 이들은 혼합관내의 유동을 환상류(annular flow) 및 환상-분무류로 가정하고 혼합점에서 두 유체의 혼합에 의한 상호작용(막힘효과)과 혼합관내에서의 액적의 유입을 고려하는 수력학적 모델을 제시하였으며 이를 이용하여 기체와 액체의 질량유량을 예측하고자 하는 연구를 수행하였다. 그리고 송시홍과 이상용에 의해 Y-jet에서의 혼합관 길이가 내부유동특성 및 분무특성에 미치는 영향에 대한 실험연구[32,33]가 수행되었으며 그 결과를 이용하여 저점도액체가 Y-jet노즐에서 분무될 때의 유량 및 입경에 관한 실험식이 제시[34]되었다.

이러한 혼합관 내부유동특성과 분무특성에 관련된 대부분의 기존 연구들은 혼합관내의 유동을 단순히 환상-분무류의 형태[21,25,31]로 가정하고 있거나 혹은 공기의 주류에 액체가 혼합된 압축성유동[26, 28]으로 가정하고 있다. 그러나 기존연구결과[26, 27]로 부터 혼합관내의 유동

상태는 단순한 축대칭 형태의 환상-분무류로만 한정되는 것이 아니라 액체와 기체의 운동량의 비(혹은기체/액체의 질량유량비) 및 혼합관길이에 의해서 다른 형태의 유동형태를 보인다는 것을 추측할 수 있다. 또한 Y-jet노즐에서의 분무특성은 혼합관내의 2상유동상태와 밀접한 관계가 있다는 것도 알 수 있다. 따라서 Y-jet노즐로 부터 분무된 입경의 크기 및 분포상태를 보다 정확하게 파악하고 그에 대한 보다 일반화된 실험식을 제시하기 위해서는 혼합관길이 및 기체/액체의 질량유량비에 따른 혼합관 내부유동형태와 그에 상응하는 미립화기구(atomization mechanism) 등의 변화를 살펴 볼 필요가 있다.

그래서 본 연구에서는 실제노즐과 유사한 Y자형태의 가시화노즐을 이용하여 혼합관내의 2상유동형태(two-phase flow pattern)를 관찰하고자 한다. 특히 기체와 액체의 공급량(운동량)과 혼합관 길이에 대한 유동형태변화를 제시하고 이를 이용하여 Y-jet노즐에서의 미립화기구를 설명하고자 한다. 또한 혼합관 길이가 각기 다른 여러개의 Y-jet노즐들을 이용하여 기체(공기)/액체(물)의 질량유량비를 변화시켜 가면서 혼합관 길이가 내부유동특성(분사압력과 유량과의 관계) 및 분무특성(입경의 크기와 분포 등)에 미치는 영향을 살펴 본 실험결과[32,33]와 가시화노즐 및 실제노즐을 통하여 확인한 미립화기구로 부터 Y-jet노즐의 입경에 관한 실험식에 기체/액체의 질량유량비의 영향을 포함시켜 보고자 한다.

## 제 2 절. 실험장치 및 방법

### 4.2.1 실험 장치



본 실험연구에서는 Y-jet 노즐의 분무특성 및 내부유동특성을 살펴보기 위해 사용한 실험장치는 fig.24에 나타낸 것과 같다. 이 때 분무유체로서 공기와 물을 사용하였다. 액체(물)는 펌프에 의해 가압된 후 필터를 거쳐 압력변동을 방지하기 위해 설치된 완충기(accumulator)로 공급된다. 완충기에 공급된 물은 다시 유량계를 거쳐 Y-jet 노즐의 액체공급관에서 분사된다. 그리고 분무촉진용 기체는  $5.0\sim 6.3\times 10^5$  Pa의 압력으로 건물에 공급되는 공기를 사용하였으며, 공기는 정압기(regulator)에 의해 실험압력으로 조절된 후 완충기 및 유량계를 거쳐 공기공급관에서 분사된다.

#### 4.2.2 노즐 및 측정항목

본 실험에서 Y-jet노즐의 내부유동을 가시화 하기 위해 사용한 가시화용 노즐은 fig.25에 나타낸 것과 같다. 이 가시화용 노즐은 혼합관 및 기체/액체공급관이 가공되어 있는 4mm 두께의 황동판(brass)에 내부유동을 살펴볼 수 있도록 양면을 10mm 두께의 유리판으로 구성되어 있다. 혼합관 길이의 변화에 대한 내부유동특성을 살펴보기 위하여 혼합관 길이가 각각 7, 14, 21mm인 3종류의 노즐을 제작하였다. 또한 혼합관 길이가 21mm인 가시화용 노즐에는 내부압력을 측정할 수 있는 압력측정구(pressure tap)를 제작(5군데)하여 기체/액체의 유량변화에 대한 압력강하 특성 및 압력변동(pressure fluctuation)을 측정할 수 있도록 하였다.

Fig.24에 나타낸 실험장치와 가시화노즐 이용하여 수행한 실험범위는 물분사압력이 최대  $6.4\times 10^5$  Pa (유량은 약 3.4 kg/min)이고, 공기의 분사압력과 최대유량은 각각  $4.0\times 10^5$  Pa, 0.19 kg/min이다.

### 4.2.3 측정 장치

#### 1. 유량 및 압력측정

노즐로 공급되는 물과 공기의 유량은 부유식(float type) 유량계 (FL105, Omega)를 사용하였으며 노즐 각부에서의 압력은 압력변환기 (pressure transducer, P22-AB, Trans metrics )을 사용하였다. 이들 측정기 기들은 사전에 보정실험을 통해 정확도를 확인하였다.

#### 2. 혼합관 내부 가시화장치

가시화노즐의 내부유동 형태를 살펴보기 위한 실험장치 및 관련장비는 fig.26에 나타낸 것과 같다. 가시화광원으로는 발광시간이 25 nano-second인 nanopulser(Model 437B, Xenon corp.)를 사용하였다. 이 때 광원앞에 초점거리 65mm인 렌즈를 설치하여 빛의 강도(intensity)가 감소하는 것을 억제하였다. 노즐내부유동에 대한 사진은 Canon F-1 사진기를 사용하여 얻었으며 이 때 영상확대비율을 가능한 한 크게 하기 위하여 접사링(extension ring)과 망원렌즈를 사용하였다.

### 제 3 절. 결과 및 고찰

#### 4.3.1 혼합관 내부유동형태

Y-jet노즐의 혼합관은 기체 및 액체공급관으로 부터 공급된 기체

와 액체가 2상유동(two-phase flow)하면서 혼합되는 관이다. 이 혼합관에서의 2상유동형태(flow pattern)는 기체/액체의 공급에 영향을 미치는 혼합관내 압력강하를 결정할 뿐만 아니라 혼합된 기체/액체가 노즐밖으로 분사된 후에 나타나는 입경분포(drop size distribution)와도 밀접한 관계가 있다. 따라서 혼합관내부유동형태를 파악하는 것이 곧 Y-jet 노즐의 유동특성 및 분무특성을 이해하는데 도움을 줄 것으로 사료되어 그에 대한 실험연구를 수행하였다.

본 연구에서는 가시화용 노즐(fig.25)들을 이용하여 혼합관내 유동형태를 살펴 보았으며 그 결과를 fig.27에 나타내었다. 이 결과는 혼합관 길이가 가장 짧은 Y1-N1노즐에서 얻은 결과이다. 이 사진들을 통하여 다음 세가지의 중요한 현상을 알아낼 수 있다.

그 첫째는 공기/물의 질량유량비가 감소할 수록 액체공급관에서 혼합관으로 분사된 물이 액체공급관 맞은편의 혼합관 벽쪽으로 중심부분을 가로질러 이동한다는 것이다. 이처럼 공기/물의 질량유량비에 따라 물이 공기유동상에 침투(penetration)정도가 달라지는 것은 물과 공기의 상대적인 운동량에 기인하는 것으로 추측된다. 즉 공기/물의 질량유량비가 큰 경우( $W_g/W_f = 0.330$ )에는 액체(물)의 운동량(momentum)이 상대적으로 작기 때문에 액체공급관에서 분사된 물은 맞은편 벽면에 직접 접촉하지 못하고 액체공급관이 있는 벽면을 따라 두꺼운 액막(liquid film)을 형성하면서 흐르게 된다. 액체의유량(운동량)이 증가하면( $W_g/W_f = 0.083$ ) 물은 액주(liquid colume)의 형태로 공기유동중심부까지 침투하고 공기의 주 흐름(main stream)상에 노출되어 격렬한 분열현상이 혼합점부근에서 발생하게 된다. 이 때 액체의 유량을 더욱 증가시켜 공기/물의 질량유량비를 감소시키면( $W_g/W_f = 0.060$ ) 마침내 물은 액체공급관이 있는 맞은편 벽면에 다다를 수 있게 된다.



둘째는 기체공급관 출구부에서 혼합점까지의 영역(예혼합부 (premix zone) 혹은 예혼합길이(premix length)[21])에서의 유동형태가 공기/물의 질량유량비에 따라 서로 다른 형태를 보이고 있다는 것이다. 이를 좀 더 상세히 설명하면 공기/물의 질량유량비가 큰 경우는 공기흐름상에 유입된 액적과 벽면에 형성되는 복잡한 형태의 액막파동(wave)을 볼 수 있으나 공기/물의 질량유량비가 감소하면 예혼합부에 나타나는 액적의 유동과 액막파동은 상대적으로 덜 복잡한 형상을 보인다. 이와 같은 현상은 급확대부에서 공기의 재순환(recirculation)유동발생시 공기의 역방향속도와 액체(물)의 분사속도의 비 및 물의 침투정도에 따라 달라지는 재순환영역의 형태와 관련이 있는 것으로 추측된다. 이 현상과 관련된 개략도를 fig.28에 나타내었다. 이 재순환유동에 의해 액체공급관(liquid port)으로 부터 혼합관으로 분사되는 물의 일부가 예혼합부의 벽면을 따라 급확대벽(즉 공기공급관 출구벽면)쪽으로 이동하게 된다. 또한 액막 및 액주와 빠른 속도의 공기와의 직접충돌(direct colliding)에 의해 분열된 액적의 일부도 재순환영역으로 유입된다(fig.28 (a)). 재순환 유동에 의해 벽면을 타고 이동한 물과 액적은 다시 기체공급관에서 분사되는공기의 주유동(main stream)에 노출됨으로서 액적의 형태로 공기유동상에 유입된 채 혼합관 하류로 이동하게 된다. 공기/물의 질량유량비가 상대적으로 큰 경우에는 물분사속도( $U_p$ )가 느리므로 혼합관으로 공급되는 물의 일부가 상대적으로 쉽게 공기의 역방향속도에 의해 예혼합부의 벽면을 타고 흐르게 된다. 그러나 공기/물의 질량유량비가 감소하며 물의 액막 및 액주가 공기흐름을 방해하게 되어 재순환영역이 짧아 질 뿐만 아니라 물분사속도도 증가하기 때문에 재순환영역으로 유입되는 액체의 양은 감소한다.(fig.28(b)) 따라서 fig.27에서 보는 것처럼 공기/물의 질량유량비가 감소할 수록 예혼합부에서의 액적



및 액막존재에 의한 파동운동이 상대적으로 덜 복잡해 진다.

마지막으로 물이 공기의 흐름을 가로 질러 액체공급관이 있는 혼합관 맞은편 벽면에 도달할 수 없는 조건(물의 운동량이 상대적으로 작은 조건)임에도 불구하고 그 벽면에도 액막이 형성되고 있다는 것이다. 그리고 이 액막의 두께는 액체공급관이 있는 혼합관 벽면에서의 액막 두께보다 상대적으로 얇다. 그 이유는 혼합점 부근에서의 직접충돌에 의한 분산된 액적들의 재부착(deposition) 및 공기의 재순환유동(recirculation)에 의해 이동된 물과 원주방향의 벽면을 따라 이동되어 온 물에 의해 액막을 형성되기 때문이다.

Fig.29는 Y1-V1노즐에서의 혼합관내 액막(liquid film)거동의 진동(oscillation)과 관련된 사진이다. 혼합관 길이가 짧은 Y1-V1노즐에서 물 유량이 어느 정도 이상 증가하면 액체공급관이 있는 맞은편 혼합관벽면에서의 액막형태가 동일한 기체/액체 유량조건임에도 불구하고 서로 다른 형태를 보이고 있음을 알 수 있으며 이는 공기의 압축성에 기인하는 것으로 생각된다. 이 현상에 대해서는 좀 더 구체적인 연구, 즉 액막진동에 대한 주기성의 파악과 유량변화 및 혼합관길이의 영향 등, 가 필요하다고 생각된다. Y-jet노즐의 내부유동에서의 액막이 진동한다는 것에 대해 이미 발표된 연구결과가 없어서 액막거동의 주기성에 대해서 확신할 수는 없지만 내부혼합형(internal mixing) 2-유체노즐에서의 혼합부(mixing chamber)에서의 유동형태를 관찰한 Sakai 등[35]의 결과에서 그 가능성을 찾아 볼 수 있다. 그들은[35] 내부혼합형 2-유체노즐의 혼합부 내벽에 형성되는 공기-물의 혼합물(mixture)의 높이가 주기적으로 유동함을 제시하였으며 이 때의 노즐을 통한 분사형태는 간헐적인 분무형태(intermittent jet)를 보인다고 하였다. 이 간헐 유동은 액체공급시스템(pumping system)에서 발생하는 서어징(surging)현상과 비슷하며 발생요

인은 공기/물의 질량 혹은 부피변화에 의해 노즐목부(nozzle throat)에서의 저항(resistance)이 변하기 때문이라고 추측하고 있다. 또한 액체유량이 증가하고 노즐직경이 감소하면 공기/질량유량비 및 혼합부압력에 대하여 넓은 범위에서 간헐유동이 발생하고 혼합부의 길이가 길어지면 발생영역이 좁아진다고 하였다. 본 실험에서도 이와 유사한 현상을 찾아볼 수 있었다. 즉 혼합관 내부에서의 액막의 진동은 혼합관 길이가 짧은 경우에 쉽게 일어나고 또한 혼합관으로 공급된 액체가 공기유동중심부로 침투되거나 혹은 맞은편 벽면에 도달하는 조건(공기의 유로가 액체에 의해 상당히 축소되는 조건)에 이르러서야 발생하는 경향이 있다. 그리고 이와 같은 유동형태는 혼합관 길이가 증가할 수록 완화됨을 알 수 있었다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 Y-jet노즐에서의 혼합관 내벽에 형성되는 액막의 거동뿐만 아니라 이 현상과 관련하여 노즐에서 분사된 후의 액체 미립화에 대해서도 별도의 연구가 필요하다고 생각한다.

Fig.30은 혼합관길이 변화가 내부유동형태에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 공기/물의 질량유량비가 작은 경우(fig.30(a))에는 혼합관 길이에 따른 영향이 구체적으로 나타나지 않으나 혼합관 길이가 긴 노즐(Y2-v2)의 결과를 보면 액체공급관이 있는 혼합관벽면에 형성되어 있던 액막이 하류로 유동하면서 그 두께가 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 액막두께가 감소하는 이유는 원주방향으로의 물의 이동과 빠른 공기유동에 의해 액막으로부터 액적이 이탈되기 때문이라고 생각된다. 이렇게 액막에서 이탈된 액적들은 공기유동에 유입(entrainment)되어 이동하고 유입된 액적들 중 일부는 혼합관벽면에 재부착되고 나머지는 공기와 같이 노즐밖으로 분사된다. 이 유동조건에서는 액적이 액막으로부터 이탈되는 양이 부착되는 양보다 크게 된다. 그러나  $W_g/W_f$ 가



작아지면(fig.30(b)) fig.27에서 설명한 바와 같이 액체의 운동량이 상대적으로 증가하게 되어 액체공급관에서 분사된 물은 액체공급관 맞은편의 혼합관 벽쪽으로 중심부분을 가로질러 이동한다. 이 때 물은 공기의 흐름에 다량으로 노출됨으로서 혼합점 근처에서 상당한 부분이 액적으로 이탈된다. 이와 같은 조건에서 노즐의 혼합관 길이가 짧으면 공급된 액체가 혼합관내부에서 완전히 분열되지 못하고 액주(liquid colume)의 형태로 노즐밖으로 분사되어 분열하는 형상을 보인다. 그러나 Y2-V2노즐의 결과에서 보는 것과 같이 혼합관 길이가 길어지면 혼합관의 중심부로 공급된 물은 혼합관내에서 완전히 액적으로 분열되고 이처럼 액적으로 분열된 액체의 일부가 혼합관 벽면에 재부착하여 액막의 두께를 점차 증가시키는 역할을 한다. 그리고 혼합관 길이가 길수록 액적들이 부착이 용이하고 아울러 벽면을 타고 흐르는 물의 원주방향으로 이동하는데 필요한 길이가 확보되므로 액막의 두께는 혼합관내벽에 걸쳐 거의 균일해 진다. 이와 같이 혼합관 내부에서의 액체거동과 액적이탈/부착 및 두께의 비대칭성은 혼합관 내부에서의 압력강하뿐만 아니라 노즐밖에서의 입경분포에도 영향을 미치게 된다.[27,28,32,33] 특히 액적이 액막으로 부터 공기흐름상에 주로 유입되는 내부유동 조건(fig.30(a)인 경우처럼  $W_g/W_f$ 가 클 때)이면 혼합관길이가 길수록 액막의 두께가 감소하므로 노즐 밖에서의 입경은 전반적으로 작아질 것이다. 반면, 혼합점 근처에서 액체가 공기의 유동과 직접충돌하여 다량의 액적으로 분열하고 이 분열된 액적들이 재부착하는 조건(fig.30(b)와 같은 조건)에서는 혼합관 길이가 길 수록 액막의 두께가 혼합관 전단면에 걸쳐 균일해지고 또한 두꺼워지므로 입경분포는 상대적으로 대칭성을 보이게 될 것이다.

#### 4.3.2 미립화기구(atomization mechanism)

Y-jet노즐에서의 미립화기구는 혼합관 내부유동형태로 부터 Andreussi 등[28]이 제시한 것과 같이 혼합관내부에서 공기의 유동에 의해 액체가 액적으로 분열되는 것과 벽면에 형성되어 있던 액막이 노즐 밖으로 분사되어 분열되는 두가지의 경우로 나누어 생각할 수 있다. Fig.31은 노즐내부와 외부에서의 미립화기구를 개략적으로 나타낸 것이다. 이를 앞서 언급한 혼합관내부유동형태와 연계하여 좀더 상세하게 설명하면, 우선 노즐내부에서의 액적형성과 관련된 미립화기구는 액체가 혼합관으로 공급될 때 혼합점근처에서 기체와의 직접충돌에 의한 것 (direct colliding zone, A부분)과 액체가 혼합관내부를 유동하면서 벽면 전체에 걸쳐 환상액막(annular film)을 형성하고 이 액막의 일부가 공기에 의해 액적으로 이탈되는 미립화기구(annular-mist zone, B부분)로 구분된다. 그리고 노즐외부에서는 혼합관내부에서 액적으로 이탈되고 남은 액체가 혼합관내벽에서 액막의 형태를 유지하며 흐르다가 노즐밖으로 분사되어 액적으로 분열된다.(liquid film disintegration zone, C부분) 물론 내부유동에 의한 미립화정도는 공기/물의 질량유량비 및 혼합관길이에 따라 달라진다. 그리고 혼합관 내부에서 액막이 진동하는 유동특성을 보인다고 하였는데 이 형태의 유동 또한 노즐밖에서의 액막미립화에 영향을 미칠 것으로 추측된다. 이상의 결과는 가시화노즐을 통하여 얻은 혼합관 내부의 유동형태로 부터 유추한 결과이다. 따라서 실제 노즐에서의 미립화기구를 살펴 볼 필요가 있다.

우선 실제 Y-jet노즐에서의 액적형성과 관련된 미립화기구를 살펴 보기 위해 N3노즐[32,33]출구에서의 액체의 거동을 살펴보았으며 그 결과는 fig.32와 같다. 이 사진을 통하여 Y-jet노즐에서의 미립화기구는 앞서 설명한 가시화노즐의 유동형태로 부터 유추한 미립화기구와 잘 일치



하고 있음을 알 수 있다. 즉 노즐내부에서의 미립화에 의해 형성된 액적들은 상대적으로 작고 혼합관중심부의 공기흐름에 유입된 채 노즐밖으로 분사되기 때문에 분무축상의 중심부에 상대적으로 작은 액적들이 모여 있게 된다. 그리고 혼합관내벽면에 형성되어 있던 액막은 일단 그 대로 노즐밖으로 분사된 다음에 액막파동기구(wavy surface mechanism) [29]에 의해 액적으로 분열하고 있음을 사진으로 부터 알 수 있다. 이 파동기구는 액막(liquid sheet)표면에 불안정한파(instability wave)가 형성되고 이에 의해 액막이 액주(ligament)와 액적으로 분열됨을 말한다. 그리고 액체의 유량이 증가하면 노즐벽면에 액막을 형성하는 액체의 양도 따라서 증가하며 아울러 분무단면상의 액적의 크기도 증가하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.3.3 평균입경에 대한 실험식

Y-jet노즐에 대한 단면평균입경의 실험결과[32,33]로 부터 공기/물의 질량유량비에 따라 혼합관 길이의 영향이 상반되게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그런데  $W_g/W_f$ 가 큰 구간(실제로 연소기등에 사용되지 않는 구간)에서는 평균입경에 대한 혼합관 길이의 영향은 상대적으로 미미하다. 반면에 실제로 연소기 등에서 사용되는  $W_g/W_f$ 가 작은 구간(즉,  $W_g/W_f$ 가 5%내외에 해당하는 구간)에서는 혼합관길이에 따라 평균입경의 변화가 보다 심하게 나타난다. 이는 혼합관의 길이 및 공기/물의 질량유량비에 따라 달라지는 노즐내부의 유동과 연관이 있으므로 본 연구에서는 기존연구결과 및 앞서 언급한 미립화기구(fig.31, 32)를 근거로 하여 입경관계식을 제시하고자 한다.

우선 2-유체 노즐에서의 입경의 크기를 나타내는 실험식들은 살

펴보면, 대부분의 실험식은 웨버수(Weber number,  $We$ )와 오네소계수(Ohnesorge number,  $Z$ )로 나타내고 있다. 이들 식에서의 웨버수(Weber number,  $We$ )는 액체의 점성이 작은 경우에 미립화 기구(혹은 액적크기)를 결정하는데 기여하는 표면장력(surface tension)과 공기역학적 저항력(aerodynamic force)의 비를 의미하며 입경에 액체점도의 영향을 나타내는 것이 오네소계수(Ohnesorge number,  $Z$ )이다. 이 무차원 수들을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$We = \frac{\rho_g U_g^2 l_c}{\sigma} \quad (1)$$

$$Z = \frac{\mu_f^2}{\sigma \rho_f l_c} \quad (2)$$

이들 무차원수를 Y-jet노즐에 적용하는데 있어서 특성길이  $l_c$ 는 혼합관직경  $d_m$ 으로 취하는데 무리가 없다. 다만 식(1)에서 입경에 영향을 미치는 기체의 밀도( $\rho_g$ )에 대해서는 2-유체노즐에 관한 실험식을 제시한 Lefebvre[29]도 구체적으로 언급하고 있지 않고 있기 때문에 Y-jet노즐에서는 기존연구결과들과는 다른 형태의 정의가 필요할 것으로 사료된다. 한편 Andreussi 등[28]은 위의 식(1)과 (2)의 무차원수를 이용하여 Y-jet노즐에서의 질량중심입경(massmedian diameter,  $D_{v,0.5}$ )을 나타내었으며 이때 액적크기에 영향을 미치는 공기의 밀도를 혼합관 내부 기체평균밀도로 대치하였다. 이들[28]이 제시한 Y-jet노즐에 대한 입경실험식에서는 2-유체노즐에서의 실험식들[29]과는 달리 기체/액체의 질량유량비의 영향을 고려하지 않고 있는 것이 특징이다. 그러나 Y-jet노즐에서의 입경은 실험결과에서도 언급한바와 같이 액체와 기체의 질량유량비( $W_g/W_f$ )의 영향을 크게 받으므로 입경관계식에서는  $W_g/W_f$ 도 함께 고려되어야

만 할 것이다.[34]

이상과 같은 기존 연구를 토대로 본 연구에서는 액체의 점도가 낮은 경우(즉 오네소계수가 무시될만한 상태)에 대해서 Y-jet노즐에서의 미립화기구를 근거로 하여 공기/물의 질량유량비를 포함하는 입경관계식을 재구성하여 보았다. 앞서 언급한 미립화기구들에 의해 액막이 모두 액적으로 분열된 분무단면에서의 입경을 살펴보면, 분무중심부에는 작은 액적들이 존재하고 가장자리에서는 큰 액적들이 존재하는 분포를 보이게 된다. 그 이유는 노즐내부에서 미립화되어 공기흐름에 유입되어 이동된 액적들 대부분이 분무중심부에 존재하게 되고 가장자리에는 액막으로 부터 분열된 액적들이 존재하기 때문이다. 따라서 Y-jet노즐의 분무에 의한 분무단면평균입경( $D_{32,m}$ )은 노즐내부에서의 미립화된 입경( $D_{32,i}$ )과 노즐외부 액막으로 부터 분열된 입경( $D_{32,s}$ )이 가중되어 산출된다고 생각할 수 있다. 즉,

$$D_{32,m} = C_1 D_{32,i} + C_2 D_{32,s} \quad (3)$$

이며, 식(3)의 우변 첫항은 노즐내부 혼합관내의 액막으로 부터 공기의 흐름에 의해 액적이 이탈되는 미립화기구에 의한 것이다. 이를 Kelvin-Helmholtz 불안정현상에 의한 것으로 보면 환상유동에서의 액적의 크기를 나타낸 Tatterson 등[36]의 결과를 다음과 같이 기본형태로 이용할 수있을 것이다.

$$\frac{D_{32,i}}{d_m} \propto \left( \frac{\bar{\rho}_{gm} \bar{U}_g^2 d_m}{\sigma} \right)^{-0.5} \quad (4)$$



Tatterson 등[36]이 제시한 원래의 식에서는 매끈한 벽면의 마찰계수를 포함하나 식을 간략화하기위해 이를 상수로 처리하였다. 이 식에서는 기체밀도와 기체속도도 혼합관내의 평균밀도( $\bar{\rho}_{gm}$ )와 평균기체속도( $\bar{U}_g$ )로 대체하여 적용하였으며 기본적으로 식(1)과 같다. 뿐만아니라 액체분류와 기체분류의 직접충돌에 대한 입경을 나타낸 실험식형태도 위의 식(4)와 같다고 알려져 있다.[37] 따라서 노즐내부의 직접충돌에 의해 형성되는 액적의 입경과 혼합관내부 액막에서 이탈되는 액적의 입경은 모두 위와 같은 식의 형태로 제시할 수 있을 것이다.

또한 Y-jet노즐 외부에서 액막이 분열되어 형성되는 입경을 Lefebvre[29], Tsai와 Viers[38]가 제시한 파동기구를 기준으로 나타내면 식(3)의 우변 두번째 항은

$$\frac{D_{32,s}}{d_m} \propto \left( \frac{\rho_e U_R^2 d_m}{\sigma} \right)^{-0.5} \quad (5)$$

여기서 물의 노즐출구에서의 속도(출구속도)  $U_R$ 은 2상사이의 충분한 운동량교환에 의해 공기의 출구속도와 같아진다고 가정한 것이다. 이 때 노즐로 공급된 액체는 모두 액막의 형태로 분사된다고 가정(실제 이 가정은 최종단계에서 수정된다.)하여 혼합관 내부와 외부에 대한 운동량보존식으로 부터 출구속도  $U_R$ 을 혼합관 내부에서의 액체와 기체의 속도인  $U_f$ 와  $U_g$ 의 함수로 나타내고, 이를 혼합관 길이에 따른 평균치  $\bar{U}_f$ 와  $\bar{U}_g$ 로 취하면 속도비( $\bar{U}_f / \bar{U}_g$ )는 기체/액체의 질량유량비의 역수 ( $W_f / W_g$ )와 혼합관내 기체의 평균밀도와 액체밀도의 비( $\bar{\rho}_{gm} / \rho_f$ )의 곱에 대략 비례한다고 가정할 수 있다. 이들 가정과 함께 식(5)에 대입하여 정리하면 액막으로 부터 분열된 액적의 입경은 다음과 같이 표시된다. [34,39]

$$\frac{D_{32,s}}{d_m} \propto \left( \frac{\rho_c \bar{U}_g^2 d_m}{\sigma} \right)^{-0.5} \frac{\left( 1 + \frac{W_f}{W_g} \right)}{1 + C_3 \left( \frac{\bar{\rho}_{gm}}{\rho_f} \right) \left( \frac{W_f}{W_g} \right)^2} \quad (6-1)$$

그러나 실제 Y-jet노즐에서의 액체는 모두 액막상태로 분출되지 않고 혼합관 내부에서 액체의 일부가 이미 액적으로 이탈되므로 위의 식(6)의  $C_3(\bar{\rho}_{gm}/\rho_f)(W_f/W_g)^2$  항에 이를 고려하면 식(6)은 다음과 같이 표시할 수 있을 것이다.

$$\frac{D_{32,s}}{d_m} \propto \left( \frac{\rho_c \bar{U}_g^2 d_m}{\sigma} \right)^{-0.5} \frac{\left( 1 + \frac{W_f}{W_g} \right)}{1 + C'_3 \left( \frac{\bar{\rho}_{gm}}{\rho_f} \right) \left( \frac{W_f}{W_g} \right)^n} \quad (6-2)$$

그런데 식(4)와 식(6)에서의 혼합관내부의 평균공기속도( $\bar{U}_g$ )는 직접 구할 수 없으므로 혼합관내부의 기체 질량유속  $G_{gm}(=4W_g/\pi d_m^2)$ 에 대체로 비례한다고 가정하고 무차원 수인 웨버수를

$$We_m = \frac{G_{gm}^2 d_m}{\rho_{gm} \sigma} \quad (7)$$

과 같이 정의하면 Y-jet노즐에서의 단면평균입경은 식(3), (4), (6) 및 (7)로 부터

$$\frac{D_{32,m}}{d_m} = We_m^{-0.5} \left( C_1 + C_2 \left( \frac{\rho_e}{\rho_{gm}} \right)^{-0.5} \frac{\left( 1 + \frac{W_f}{W_g} \right)}{1 + C_3' \left( \frac{\bar{\rho}_{gm}}{\rho_f} \right) \left( \frac{W_f}{W_g} \right)^n} \right) \quad (8)$$

과 같이 표현된다. 식(8)의 우변 첫째 항은 노즐내부에서 기체와 액체의 직접충돌에 의해 형성된 액적 및 노즐내부 액막흐름으로 부터 이탈된 상태로 분출하는 액적들의 입경을 나타내고 둘째항은 액막상태로 분출된 후 이의 분열과정을 거쳐 형성된 액적들의 입경을 나타낸다.

실제 실험결과[32,33]를 이용하여  $C_1, C_2, C_3'$  및  $n$ 를 구하면 평균 입경에 대한 실험식을 최종적으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{D_{32,m}}{d_m} = We_m^{-0.5} \left( 0.057 + 0.078 \left( \frac{\rho_e}{\rho_{gm}} \right)^{-0.5} \frac{\left( 1 + \frac{W_f}{W_g} \right)}{1 + 11.0 \left( \frac{\bar{\rho}_{gm}}{\rho_f} \right) \left( \frac{W_f}{W_g} \right)^{1.6}} \right) \quad (9)$$

식(9)는 점도가 낮은 물의 경우에 대해서 유효한 것이므로 기존연구들에서 제시하고 있는 입경실험식들[26,28],[29]에서 점도(즉 오네소계수)의 영향을 무시한 경우와 기본적으로 유사한 형태이나 노즐 내 외부에서의 액체 미립화기구를 고려하고 아울러 혼합관 내부의 기체평균밀도(결국은 혼합관길이의 영향을 포함한다.)와 질량유량비를 포함하도록 좀더 일반화한 것이다. 식(9)의 결과를 실험에서 얻은 단면평균입경의 측정결과와 비교한 것이 fig.33에 나타나 있다. 이 그림을 보면 식(9)는 혼합관 길이가 서로 다른 Y-jet노즐에서 나타나는 액적의입경을 15% 범위내에서 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.



#### 제 4 절. 결론 및 향후연구내용

본 연구에서는 Y-jet 노즐에서의 공기/물의 질량유량비의 변화 및 혼합관 길이에 따른 혼합관 내부유동형태와 Y-jet노즐에서의 미립화기구에 대해 살펴 보았다.

가시화노즐을 이용하여 Y-jet분지관에서의 혼합관내부유동을 살펴 본 결과 액막은 모든 실험조건에서 기본적으로 혼합관 전체벽면에 형성되고 있음을 알아낼 수 있었으며 특히 공기/물의 질량유량비가 큰 경우에는 물과 공기의 직접충돌에 의한 액적과 예혼합부에서의 공기의 재순환유동에 의한 물의 이동이 혼합관 전체 벽면에 액막형성을 촉진시키고 있음을 알 수 있었다. 물의 운동량이 상대적으로 큰 조건(공기/물의 유량비가 작은 조건)에서 물은 공기흐름의 중심부로 쉽게 이동하고 이 때 공기와의 직접접촉면적이 증대되면서 다량의 액적이 혼합관 중심부에서 형성됨을 알 수 있었다. 또한 혼합관 길이의 변화에 따른 혼합관 내부 유동형태를 살펴본 바에 의하면, 혼합관 길이가 짧은 분지관에서는 혼합관 내부에서 액체공급관으로 부터 공급된 액주가 완전히 액적으로 분열되지 못하고 외기로 분사되는 형태를 보이나 혼합관길이가 길어지면 혼합관내부에서 액주가 완전히 분열되고 이 때 생성된 액적들은 혼합관 내를 유동하면서 재부착에 의해 액막의 두께를 증가시키고 균일하게 하는데 기여함을 알 수 있었다.

이상의 가시화노즐에서 얻은 결과로 부터 Y-jet노즐에서의 미립화기구를 노즐내부에서의 미립화와 외부에서의 미립화기구로 구분하였으며 내부미립화기구를 공기과 물의 직접충돌에 의한 것과 액막으로 부터 공기의 흐름에 의해 이탈되는 액적 미립화로 구분하였다. 또한 외부에

서의 액막미립화는 액막표면에 형성되는 파에 의한 액막파동기구임을 아울러 제시하였다.

그리고 입경의 크기를 나타내는 실험식에서는 Y-jet노즐에서의 미립화기구로 부터 노즐내부의 미립화에 의한 영향과 노즐외부에서 액막이 액적으로 분열하는 미립화기구(2-유체노즐의 미립화기구인 파동기구)의 영향을 모두 고려하여 공기/물의 질량유량비에 따라 입경의 크기가 심하게 변하는 Y-jet노즐의 특성을 나타낼 수 있도록 하였다.

향후 이 Y-jet노즐과 관련된 연구과제로는 노즐내부의 유동형태에 대한 정량적인 구분을 통하여 혼합관 내부의 유동에 대한 해석이 필요하다. 또한 위의 결과들은 점도가 낮은 물에 대한 분무특성을 나타낸 것으로 액체의 점도변화에 대한 특성이 고려되지 않았다. 따라서 액체 점도에 따른 내부유동특성 및 분무특성에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 제 5 장. 결론 및 향후 연구 계획

본 2차년도에의 주요 결론은 아래와 같다.

- 1) 시 공간 분해능을 갖는 연소 진단 및 연소장 제어 시스템 개발을 위한 Imaging System을 구축하였다.
- 2) 연소장의 이차원 영상은 시 공간 분해능을 갖으며 이 영상을 이용하여 관심 영역의 평균 Intensity, 파장별 영상, Intensity profile 등의 유용한 정보를 획득할 수 있다.
- 3) 구축된 Imaging System의 보완과 포착된 영상의 후 처리를 통하여 원하는 연소장 정보(온도, 화염대의 위치 등)를 파악할 수 있다.
- 4) 분무 연소기에 쓰일 Y-jet type의 노즐을 설계 제작 하였으며, 이의 실험을 통하여 Y-jet type의 노즐의 분무 특성을 파악하였다.

2차년도에서는 관련 Hardware의 보완과 평가, 이차원 영상으로부터 온도와 화염대의 분포를 계측하는 방법 그리고 분무 연소용 분무 노즐의 설계 제작 및 성능 확인이 이루어 졌다. 그 결과 연소장의 이차원 영상을 시 공간 분해능을 갖는 정보로 환원할 수 있음을 보였다. 추후 분무 연소기의 연소 특성을 파악하고 Imaging system으로부터 획득된 시 공간 분해능을 갖는 영상에 연소장 정보를 획득하는 방법을 적용하여야 한다. 이를 통하여 시 공간 분해능을 갖는 연소 진단 및 연소장 제어 기술을 확립할 수 있을 것이다.



## 참고 문헌

- [1] Penner,S.S., Wang,C.P. and Bahadori,M.Y., Laser Diagnostics Applied to Combustion System, Twentieth Symposium ( International ) on Combustion, pp. 1149-1176, 1984
- [2] Eckbreth,A.C., Bonczyk,P.A. and Verdick,J.E., Combustion Diagnostiocs by Laser Raman and Fluorescence Techniques, Prog. Energy Combust. Sci, Vol.5, pp. 253-322, 1979
- [3] Hanson,R.K., Combustion Diagnostics: Planar Imaging Techniques, Twenty First Symposium ( International ) on Combustion, pp. 1677-1691, 1986
- [4] Yib.,B., Schmitt,R.L. and Long,M.B., Instantaneous Three-Dimensional Concentration Measurements in Turbulent Jets and Flames, Opt.Lett., Vol.13, p.96, 1988
- [5] Boedeker,L.R. and Dobbs,G.M., CARS Temperature Measurements in Sooting Laminar Diffusion Flames, Combustion Science and Technology, Vol.46, pp. 301-323
- [6] Mizutani,Y., Visualization and Image Analyses of Combustion Field, JSME International Journal Series II, Vol.32, No.1, p.1, 1989
- [7] Santoro,R.J., Semerjian,H.G., Emmerman,P.J. and Goulard,R., Optical Tomography for Flow Field Daignostics, Int.J. Heat and Mass Transfer, Vol.24, pp. 1139-1150
- [8] Cho,Z.H., General View on 3-D Image Reconstruction and Computerized Transverse Axial Tomography, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-21, pp.44-71
- [9] 하광순, 단층진단법을 이용한 축대칭 확산화염 영상의 해석에 관한

연구, 한국과학기술원 석사학위 논문, 1993

- [10] Kawamura,K., Saito,A., Yaegashi,T. and Iwashita,Y., Measurement of Flame Temperature Distribution in Engine by Using a Two-Color High Speed Shutter TV Camera System, SAE Technical Paper Series 890320
- [11] 山中孝友, 飯田政巳, 井手雄一, 迷岳正二, 星野光伸, 徳田君代, 다기능 감시 카메라 (OPTIS - II) 의 개발 技報HVol.29, p.236, 1992
- [12] Tama-ogi,K., Matuda,H., Kotani,T., Miyamae,S., Hashimoto,H. and Makino,K., Development of Support System Evaluating Pulverized Coal Combustion on #2 Unit of SAJOH Power Station, 火力原子力發電, Vol.43, P.71, 1992
- [13] 화상처리기술의 모든것, pp.9-18, 도서출판 세운
- [14] Beer,J.M. and Chigier,N.A., Combustion Aerodynamics, Chap.5, Applied Science Publishers, London, 1972
- [15] Leuckel,W. and Fricker,N., The Characteristics of Swirl-Stabilized Natural Gas System, Part 1 : Different Flame Types and Their Relation to Flow and Mixing Patterns, J.Inst.Fuel, Vol.49, pp.152-158, 1976
- [16] Beer,J.M. and Chigier,N.A., Velocity and Static-pressure Distribution in Swirling Air Jets Issuing from Annular and Divergent Nozzles, Trans. ASME, Vol.86, pp.788-796, 1964
- [17] Leukel,W., Swirl Intensities, Swirl Types and Energy Losses of Different Swirl Generating Devices, Doc. No. GO2/a/16, Intemation Flame Research Foundation, Ijmuiden, Holland, 1969
- [18] 윤재건, 명현국, 신현동, 선회화염의 구조에 따른 CO 및 THC 생성 특성에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제 8권, 제3호, pp.210-216, 1984

- [19] Mizutani, Y., Nakabe, K., Matsumoto, Y., Saeki, T., and Matsui, T., Processing of Luminescent Radical Images for Flame Diagnostics, JSME International Journal, Series II, Vol.32, No.3, p455, 1989
- [20] Laurendeau, M.N., Temperature Measurements by Light-Scattering Methods, Prog. Energy and Comust. Sci., Vol.14, No.2, pp147-170, 1988
- [21] Mullinger, P. J. and Chigier, N. A., 1974, "The Design and Performance of Internal Mixing Multijet Twin Fluid Atomizers," Journal of the Institute of Fuel, Vol.47, pp.251-261.
- [22] Prasad, K. S. L., 1982, "Spray Characterisation of Air Blast Atomisers," Proc. ICLASS-82, pp.123-130.
- [23] Hurley, J. F. and Doyle, B. W., 1985, "Design of Two-Phase Atomisers for Use in Combustion Furnaces," Proc. ICLASS-85, pp.1A/3/1-1A/3/13.
- [24] Wigg, L. D., 1964, "Drop-size Prediction for Twin-fluid Atomizers," Journal of the Institute of Fuel, Vol.37, pp.131-136.
- [25] Graziadio, M., Andreussi, P., Tognotti, L. and Zanelli, S., 1987, "Atomization of Coal-Water Fuels by a Pneumatic Internal Mixing Nozzle: Part I - Two-Phase Flow Inside the Nozzle," Atomization and Spray Technology, Vol.3, pp.187-208.
- [26] De Michele, G., Graziadio, M., Novelli, G., Andreussi, P. and Giacomelli, A., 1989, "Scaling Problems of H.F.O Y-jet Atomizers," Proc. 9th Members Conference, IFRF, Noordwijkernout, The Neterlands.
- [27] De Michele, G., Graziadio, M., Morelli, F. and Novelli, G., 1991, "Characterization of the Spray Structure of a Large Scale H.F.O Atomizer," Proc. ICLASS-91, Gaithersburg, MD, U.S.A., pp.779-786.
- [28] Andreussi, P., Tognotti, L., De Michele, G. and Graziadio, M., 1992,



"Design and Characterization of Twin-Fluid Y-Jet Atomizers," *Atomization and Sprays*, Vol.2, pp.45-59.

- [29] Lefebvre, A. H., 1980, "Airblast Atomization," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.6, pp.233-261.
- [30] Lee, S. Y., Park, B. S. and In, W. K., 1992, "Study of Flow Characteristics inside a Y-Jet Twin-Fluid Atomizer," *Proc. of the 2nd JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Kitakyushu, Japan*, Vol.2, pp2/199-2/204.
- [31] 인왕기, 이상용, 송시홍, 1993, "Y-jet 2-유체 분무노즐 내부유동의 모델링," *대한기계학회 논문집*, 제17권, 제7호, pp.1871-1850.
- [32] Song, S. H. and Lee, S. Y., 1994, "An Examination of Spraying Performance of Y-jet Twin-fluid Atomizers --- Effect of Mixing Port Length," *Proc. ICLASS-94, Rouen, France*, pp. 616-623.
- [33] 송시홍, 이상용, 1994, "Y-jet노즐에서의 혼합관길이 변화에 따른 분무 분무특성연구," *대한기계학회 논문집* 제출.
- [34] 송시홍, 이상용, 1994, "Y-jet노즐분무의 유량 및 입경관계식의 도출," *대한기계학회 '94년도 춘계학술대회논문집(II)*, pp368-371.
- [35] Sakai, T., Kito, M. Saito, M. and Kanbe, T., 1978, "Characteristics of Internal Mixing Twin-fluid Atomizer," *Proc. ICLASS-78, Tokyo, Japan*, pp.235-241.
- [36] Tetterton, D. F., Dallman, J. C. and Hanratty T. J., 1977, "Drop Sizes in Annular Gas-Liquid Flows," *AIChE Journal*, Vol.23, No.1, pp.68-76.
- [37] Bayvel, L. and Orzechowski, Z., 1993, "Liquid Atomization," *Taylor & Francis*, pp.362-363.
- [38] Tsai, S. C. and Viers, B., 1992, "Airblast Atomization of Viscous Newtonian Liquids using Twin-fluid Jet Atomizers of Various Designs," *Tran. ASME*,

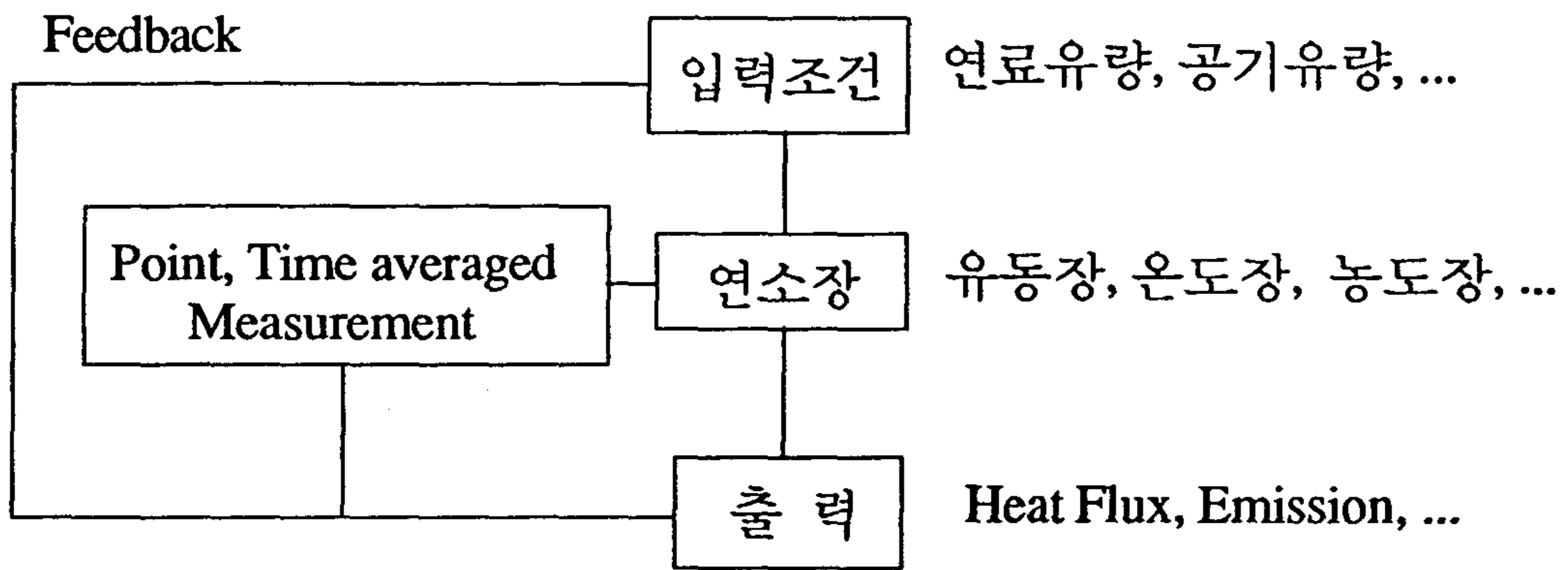
J. Fluids Engineering, Vol.114, pp.113-118.

- [39] 송시홍, 이상용, 1994, "Y-jet노즐을 통한 저점도 액체의 유량 및 입경예측에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 제출

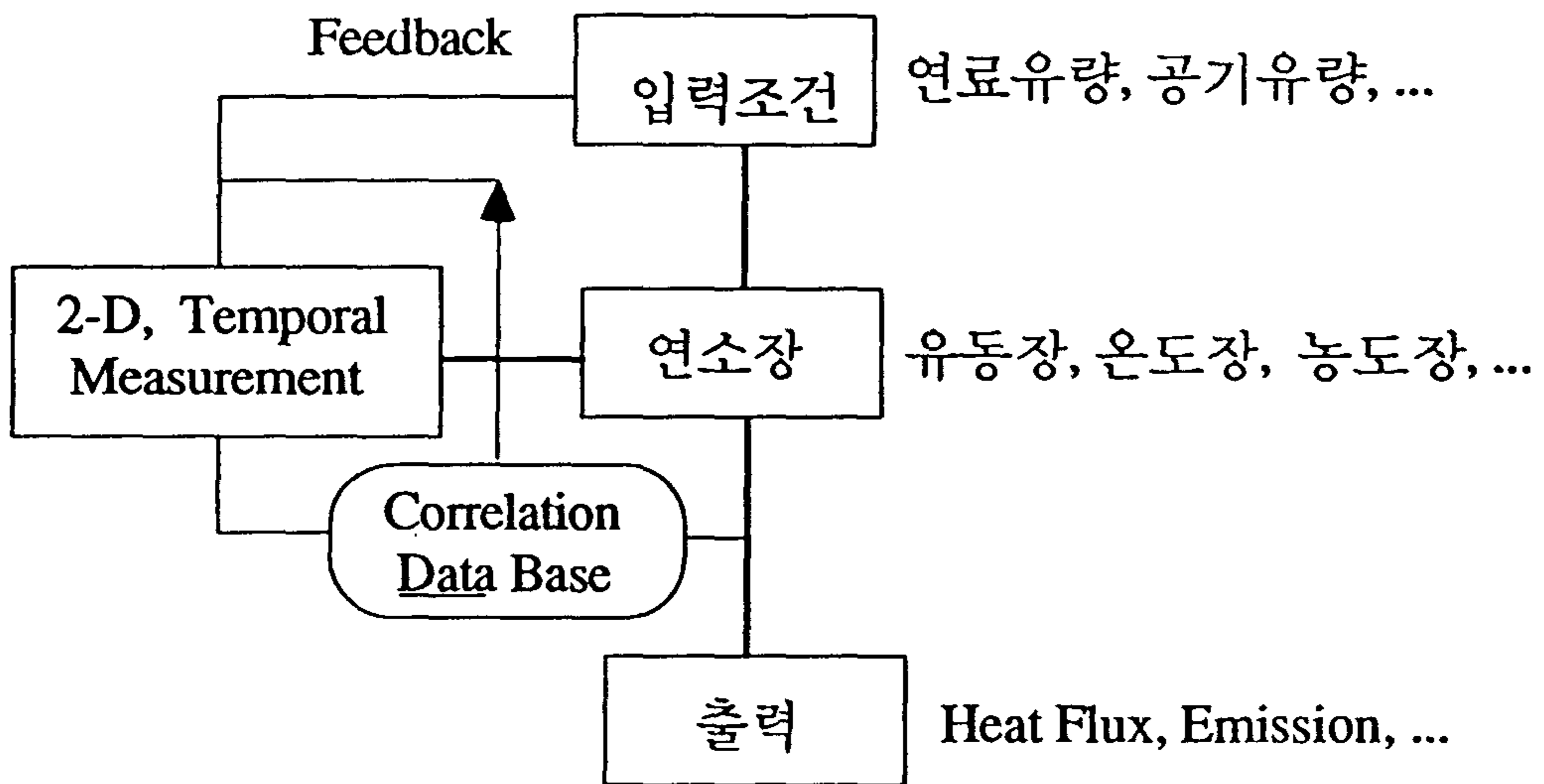
제 품 명	東芝 CCD 카메라 IK-536
전 원	AC 100V ( +10%, -10% ) 50/60 Hz
소 비 전 력	6.2W
촬 상 면 적	6.55 (H) * 4.87 (V) mm
유 효 화 소	682 (H) * 492 (V)
주 사 방 식	2:1 Interlace
주사 주파수	15.734KHz (H), 59.94Hz (V)
동 기 방 식	Internal or external switchable automatically
해 상 도	500 TV本 이상 (H), 400 本 이상 (V)
표준피사체조도	10Lux
최저피사체조도	0.3Lux
S / N	50 dB
영 상 출 력	VS 1.0 V <sub>pp</sub> NTSC 방식
출 력 임피던스	75Ω
동 작 온 도	-10 °C - 50 °C
동 작 습 도	30 % - 90 %
A G C 회 로	내장
중 량	700 g
Lens Mount	C - Mount
외 형	62(W) * 60(H) * 128(D) mm
예 비 기 능	감마(γ) 값 : 0.45/1, 출하시 0.45 고속전자 Shutter : 1/30 - 1/4000, 출하시 1/30 Field/Frame Mode , 출하시 Frame Mode

table.1 CCD 카메라의 사양





a) 기존의 제어 방식



b) 새로운 제어 방식

fig.1 연소시스템의 제어

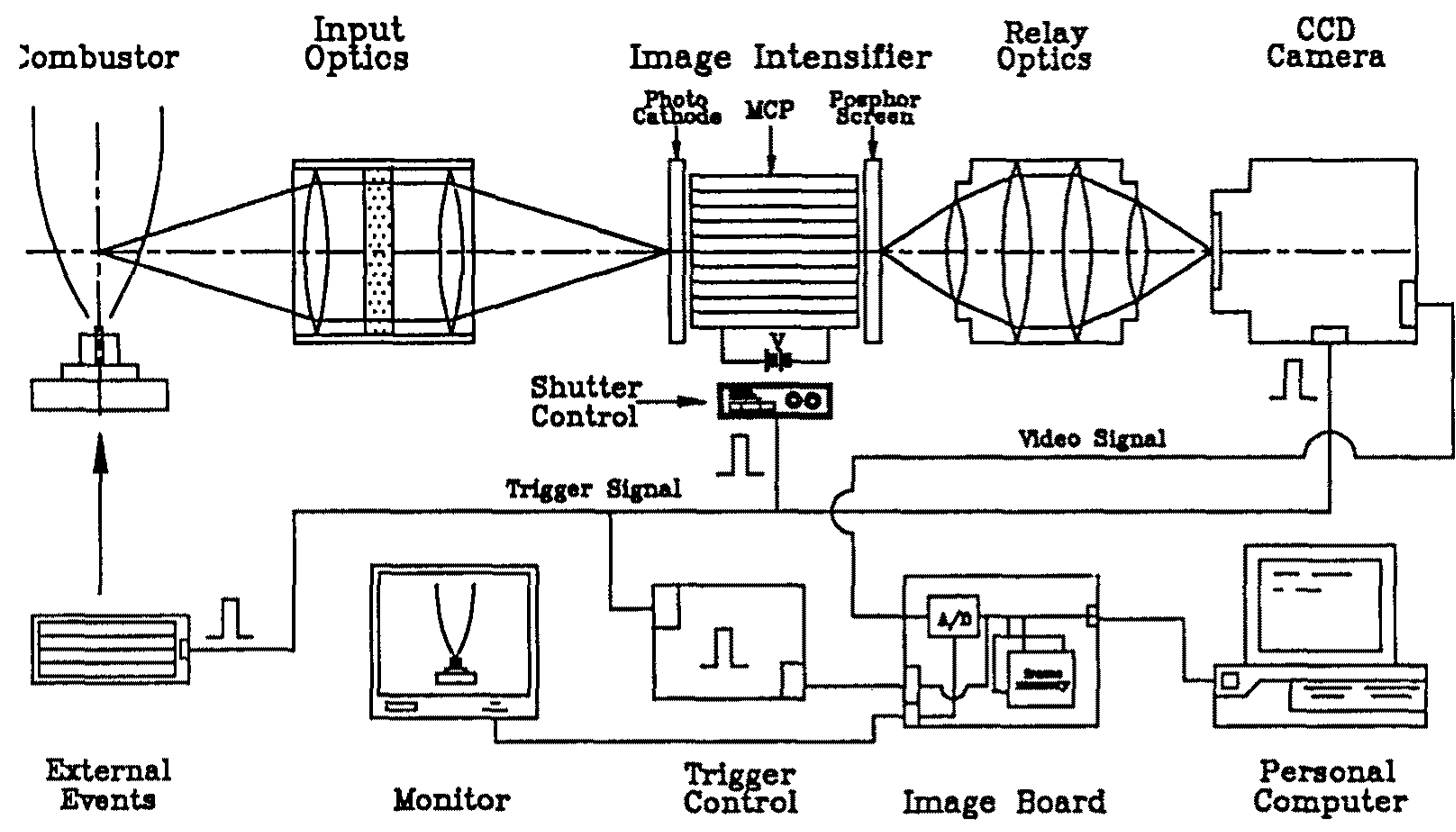
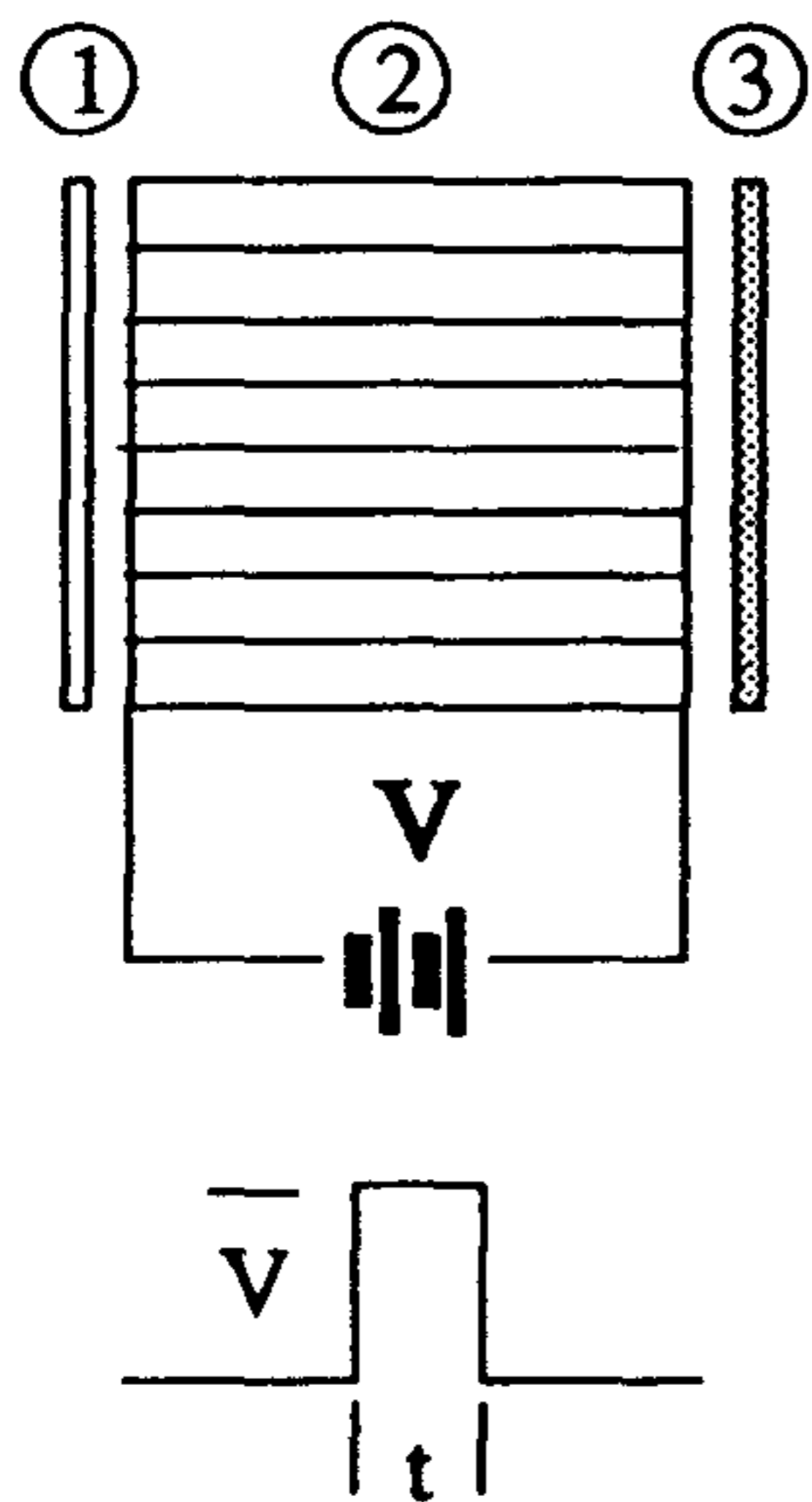


fig.2 화염영상 Imaging System



- ① photocathode (s-20)
- ② Multi Channel Plate (Intensifier)
- ③ phosphor screen (p-20)

V : Gain control

t : Shutter time control

fig.3 Multi Channel Plate



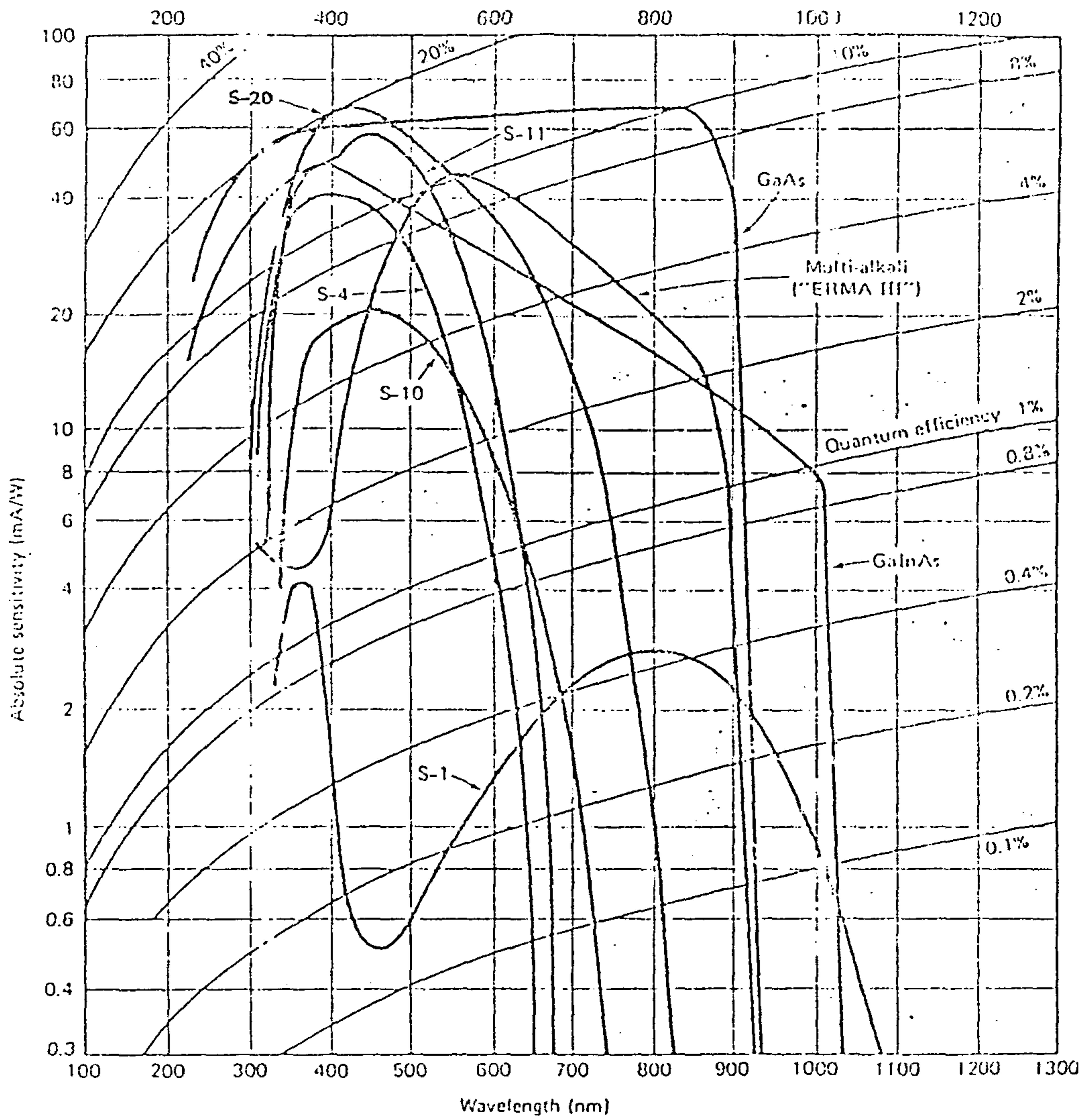


fig.4 Spectral response of photocathode

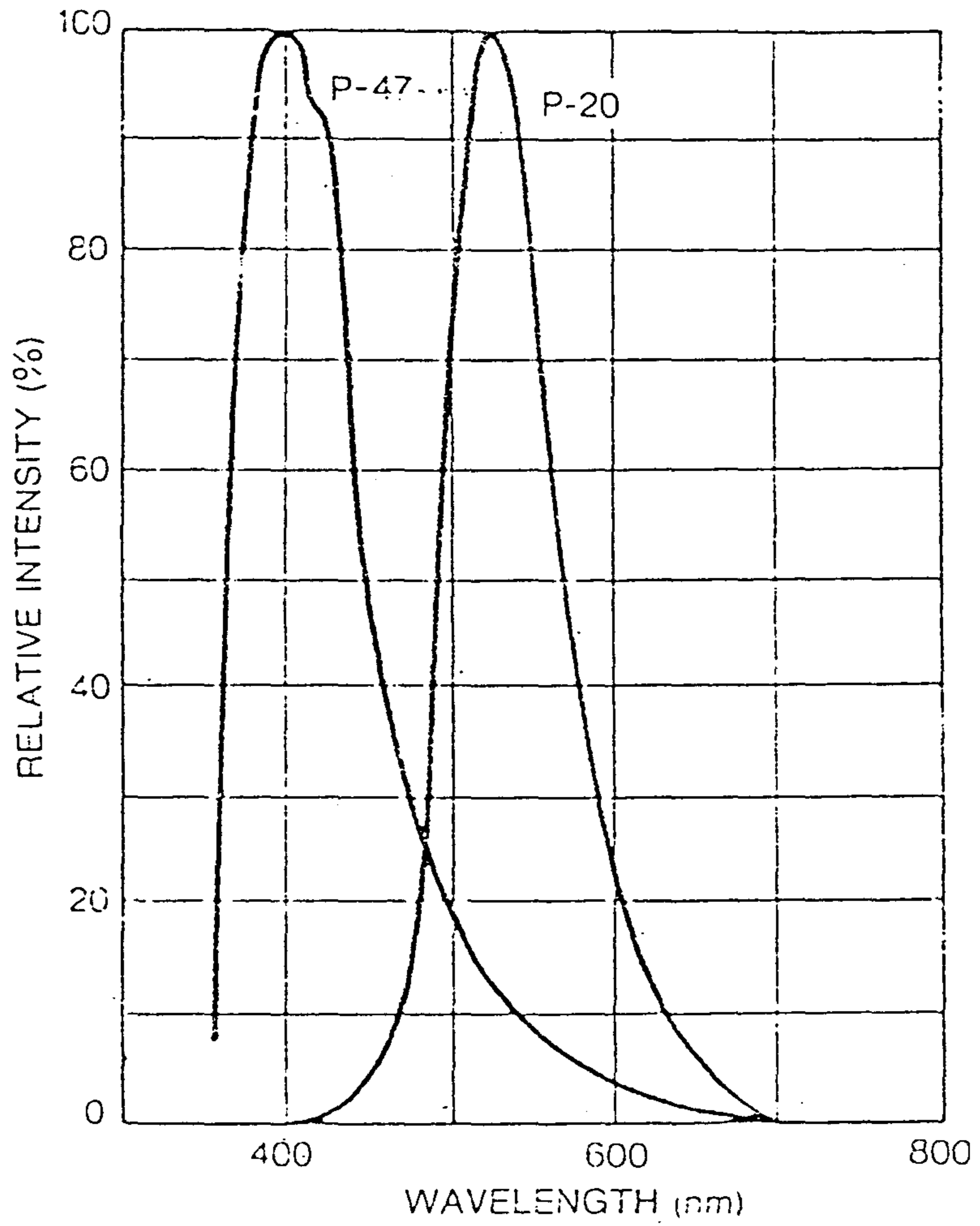


fig.5-1 Spectral response of phosphor screen

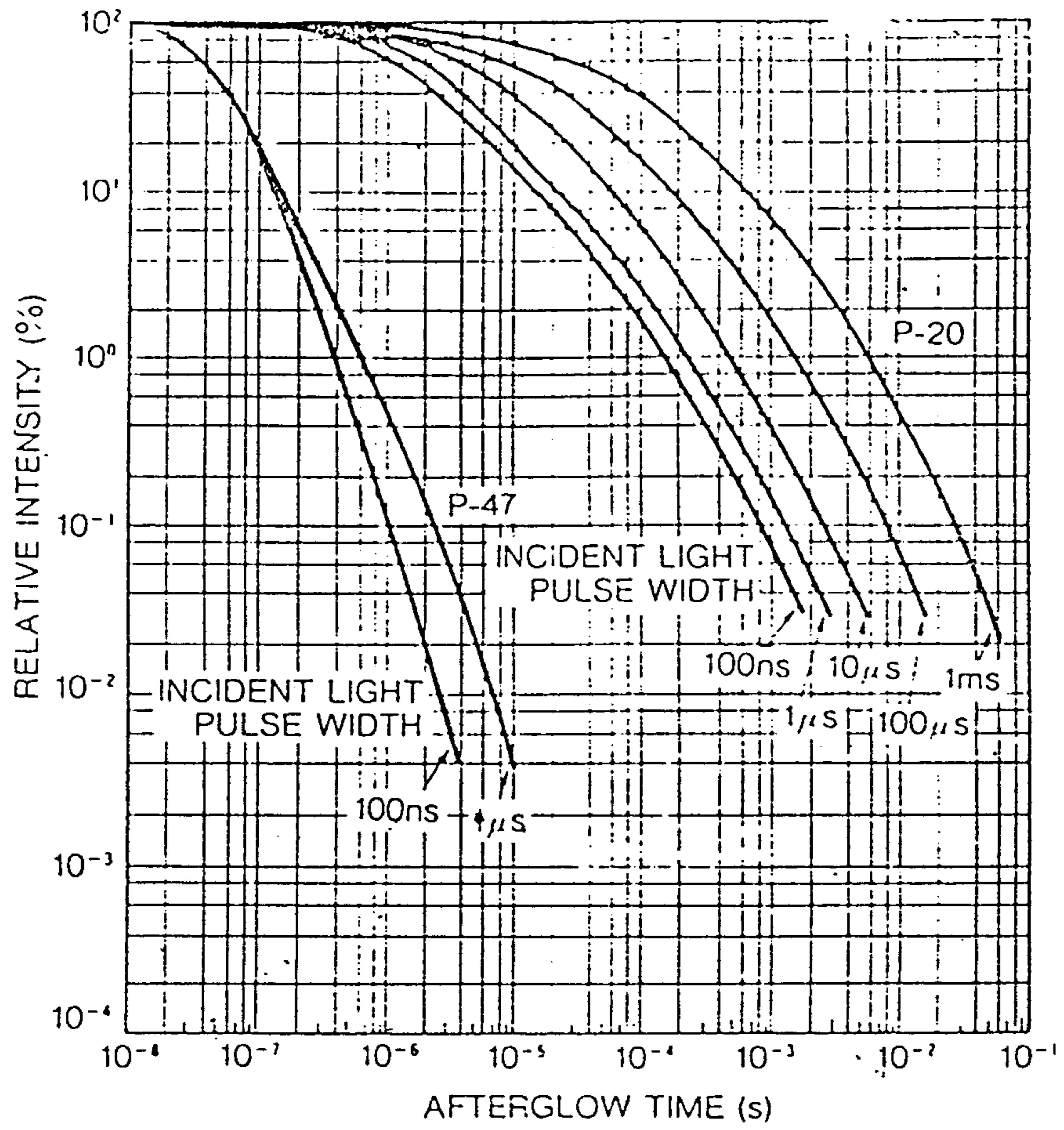


fig.5-2 Decay time of phosphor screen



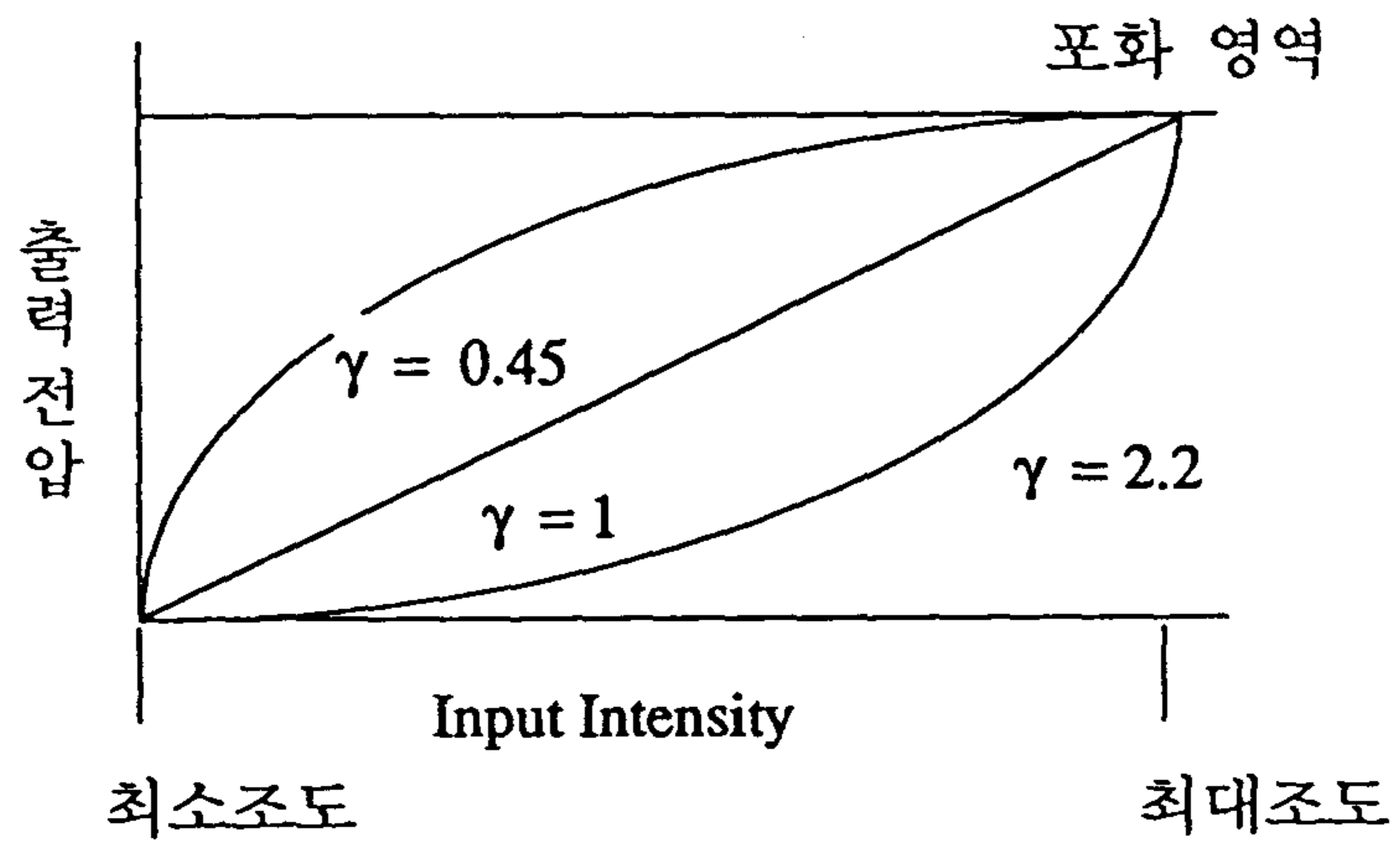


fig.6 CCD 카메라의 감마( $\gamma$ ) 특성

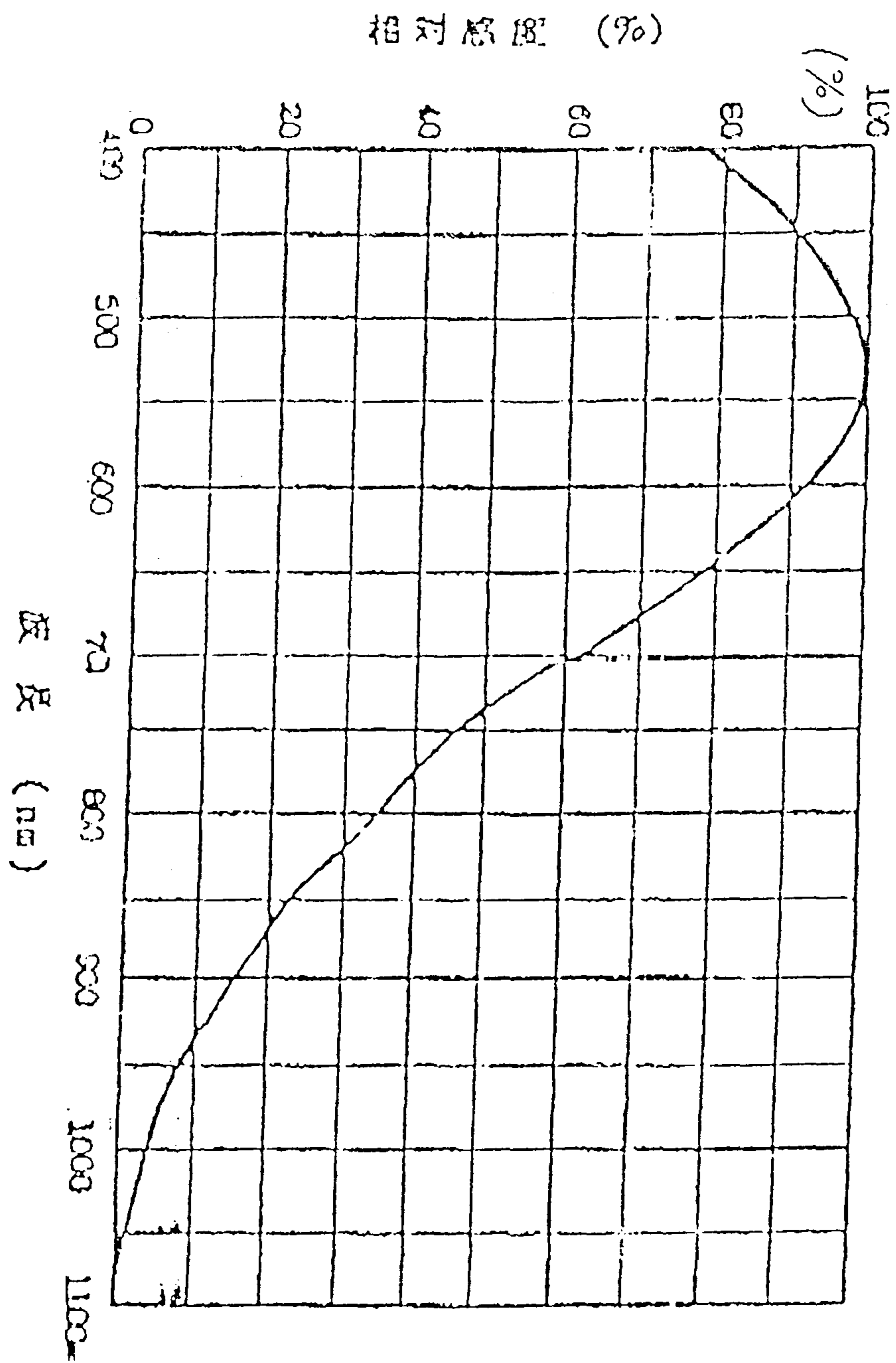


fig.7 Spectral response of CCD Camera

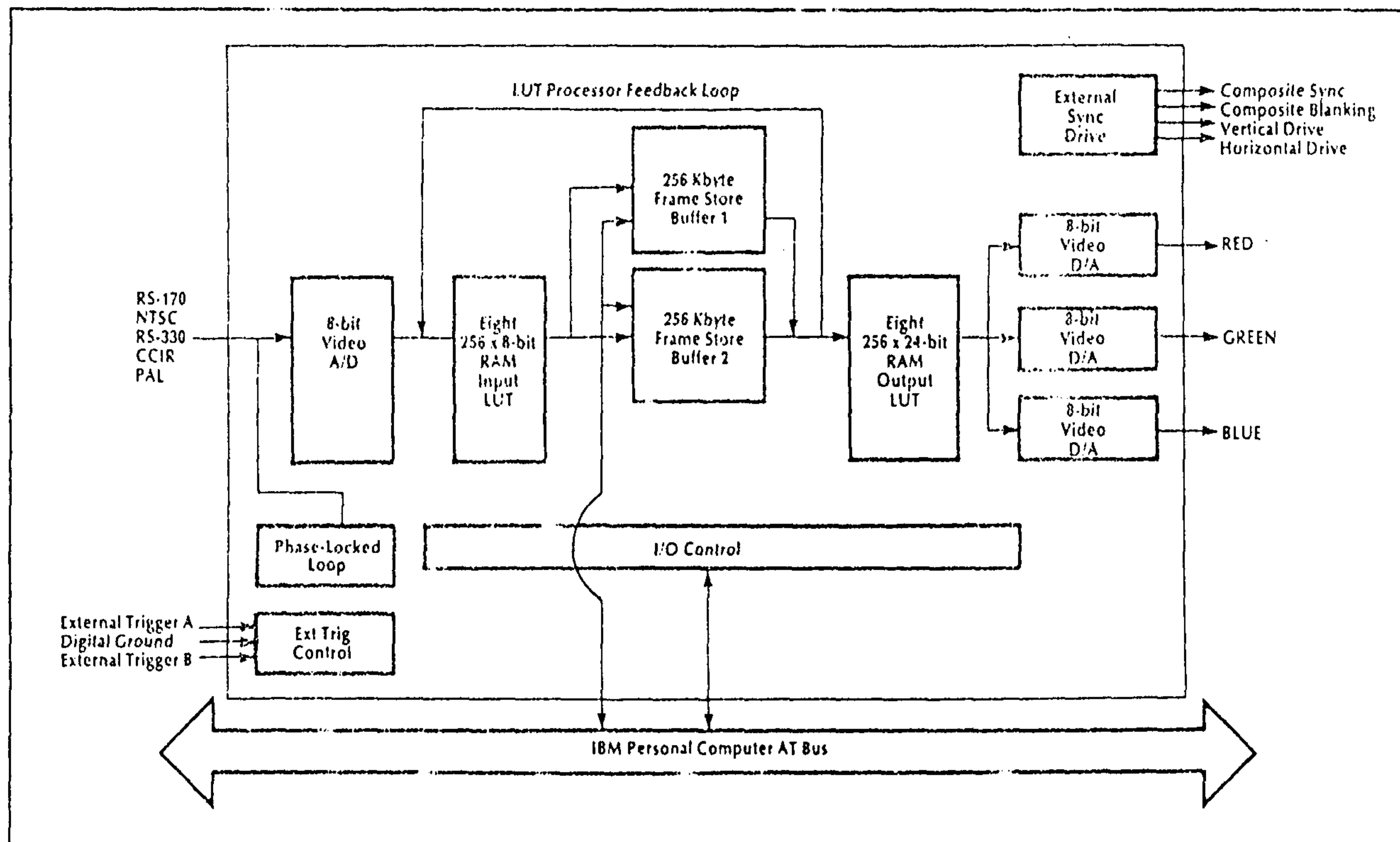
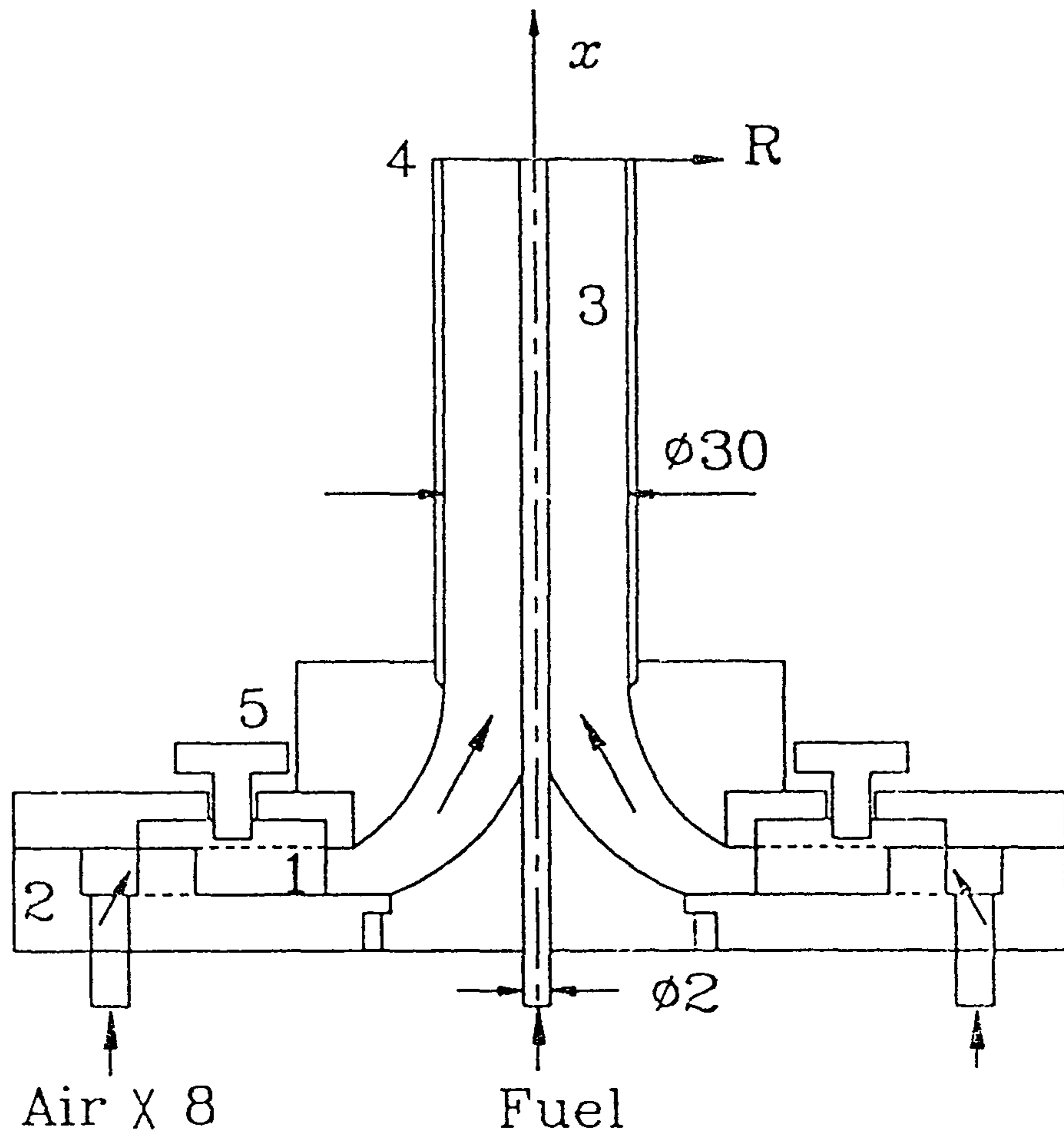


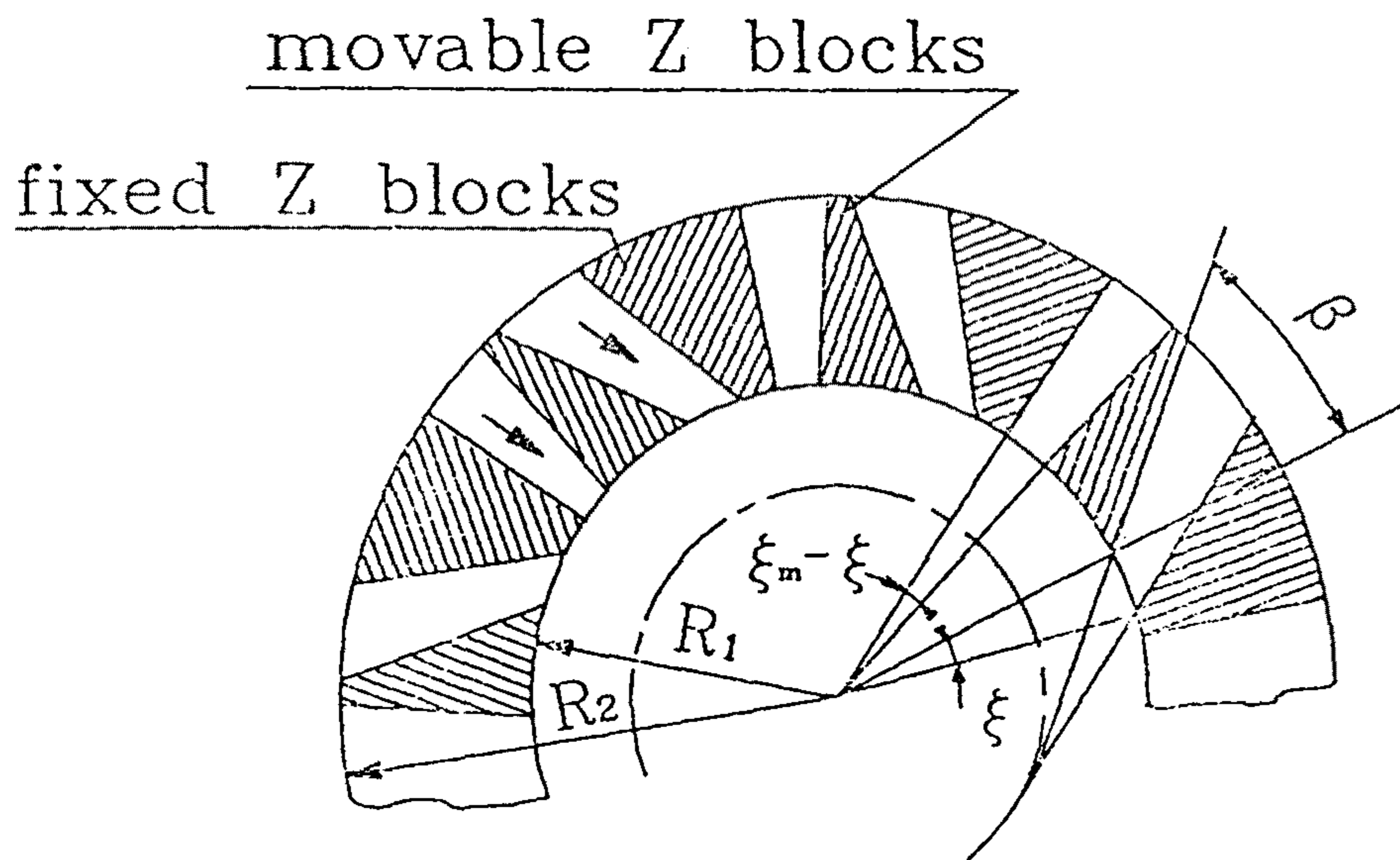
fig.8 DT2853 frame grabber - block diagram





- |                     |                |
|---------------------|----------------|
| 1. movable block    | 2. fixed block |
| 3. fuel nozzle      | 4. air nozzle  |
| 5. swirl controller |                |

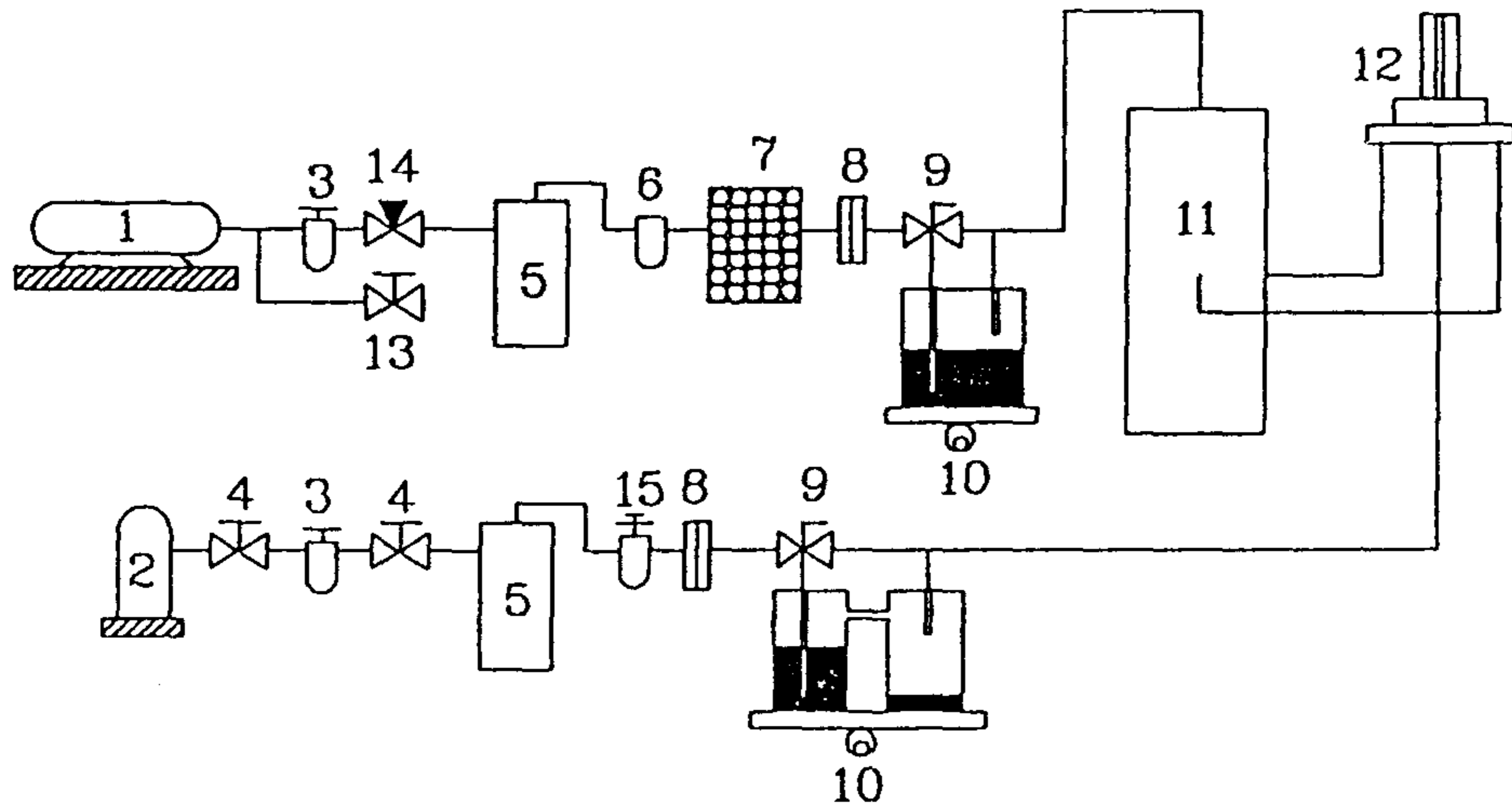
fig.9 선회 연소기



Block parameters of swirl burner

$\beta$	$\xi_m$	Z	B	$R_1$	$R_2$
$41^\circ$	$22^\circ$	8	8	35	55

fig.10 선회 블럭의 기하학적 구조



- |                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| 1. Air compressor        | 2. Fuel tank           |
| 3. Flow regulator        | 4. On-off valve        |
| 5. Surge tank            | 6. Air filter          |
| 7. Silicagel tank        | 8. Orifice             |
| 9. 3-way valve           | 10. Particle generator |
| 11. Air distributor      | 12. Swirl burner       |
| 13. By-pass valve        | 14. Needle valve       |
| 15. Regulator with valve |                        |

fig.11 Flow system

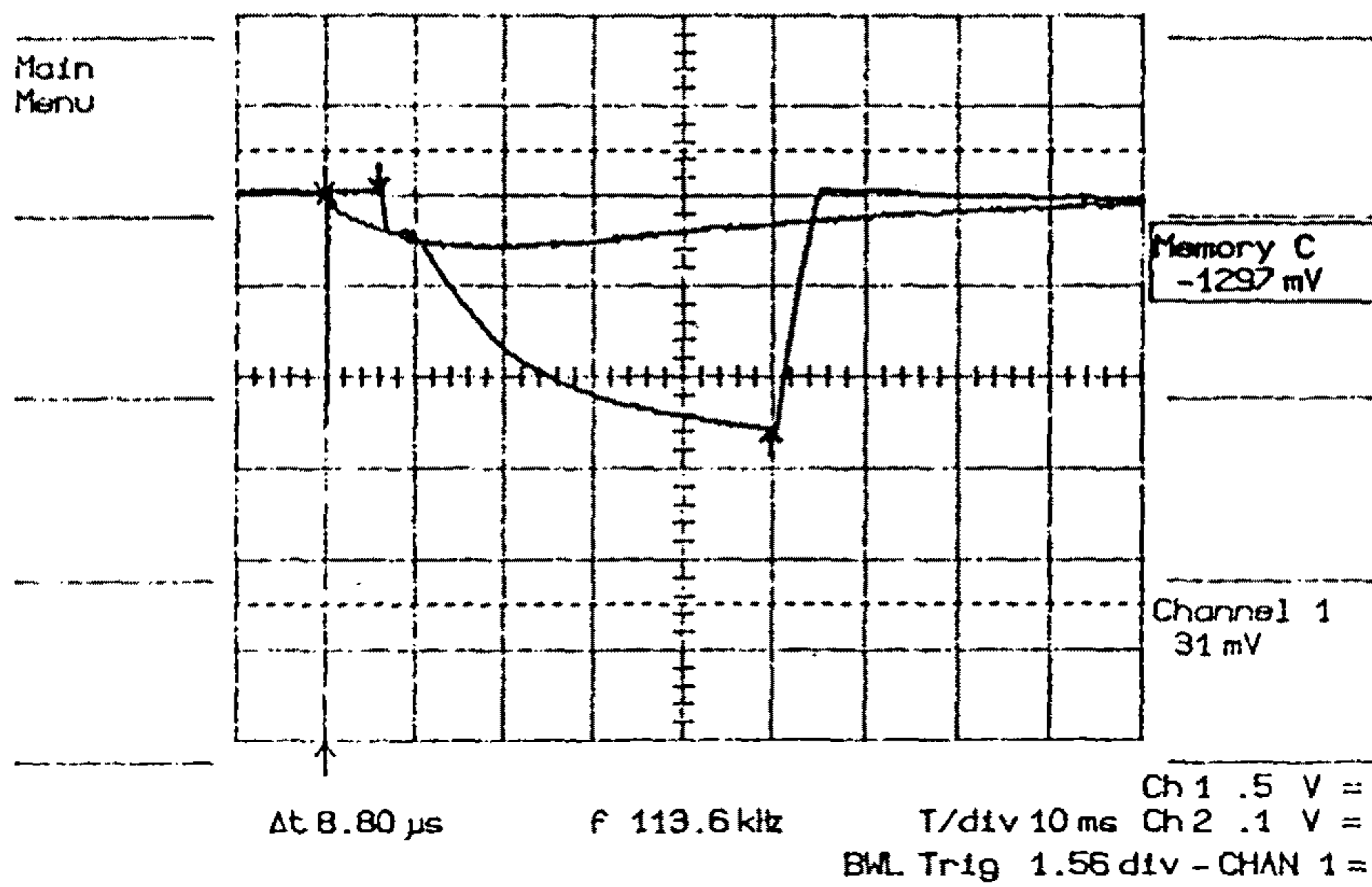
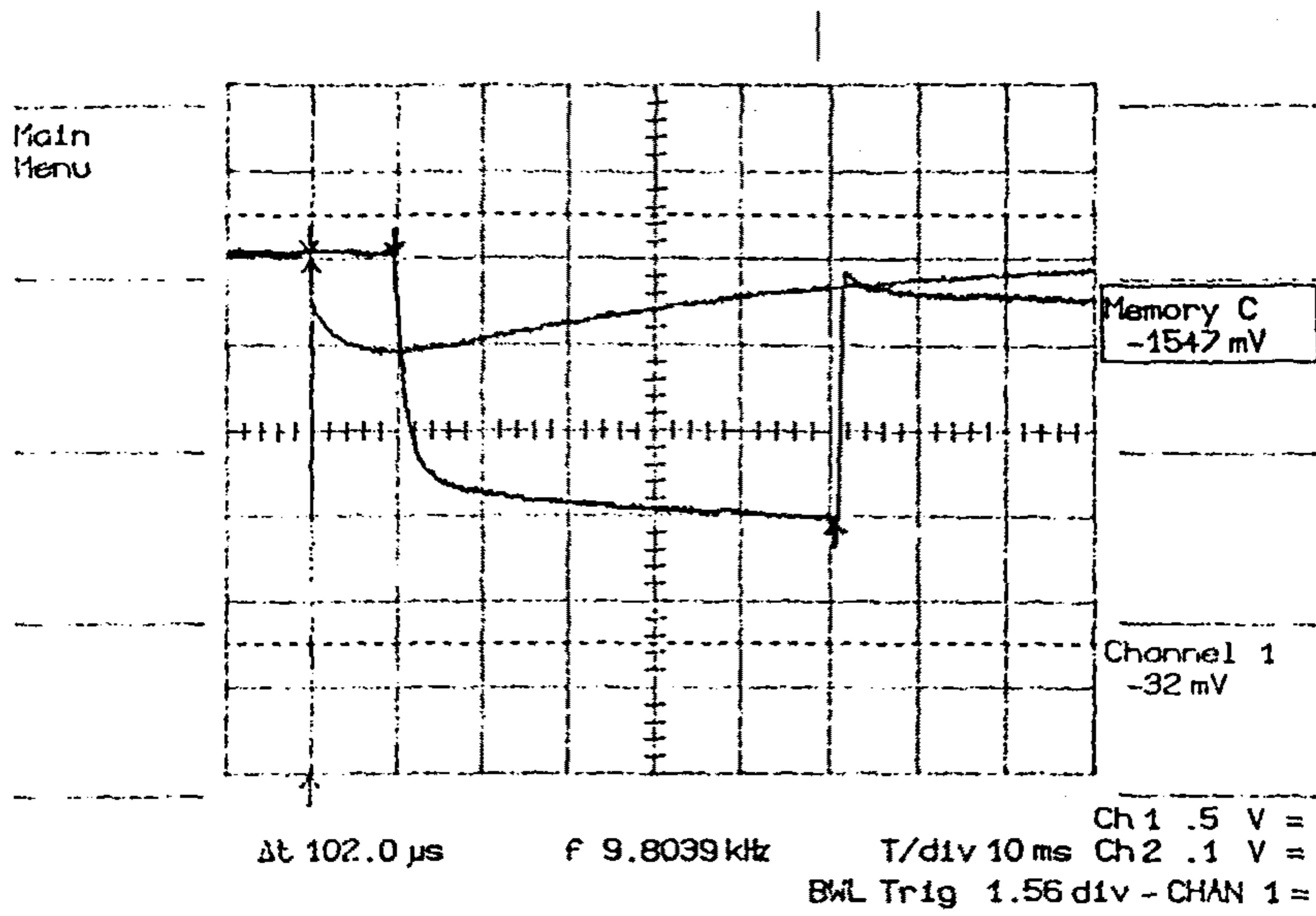


fig.12 Image intensifier 에 공급되는 전압 pulse  
( 위 ; 100 microsec, 아래 ; 10 microsec )



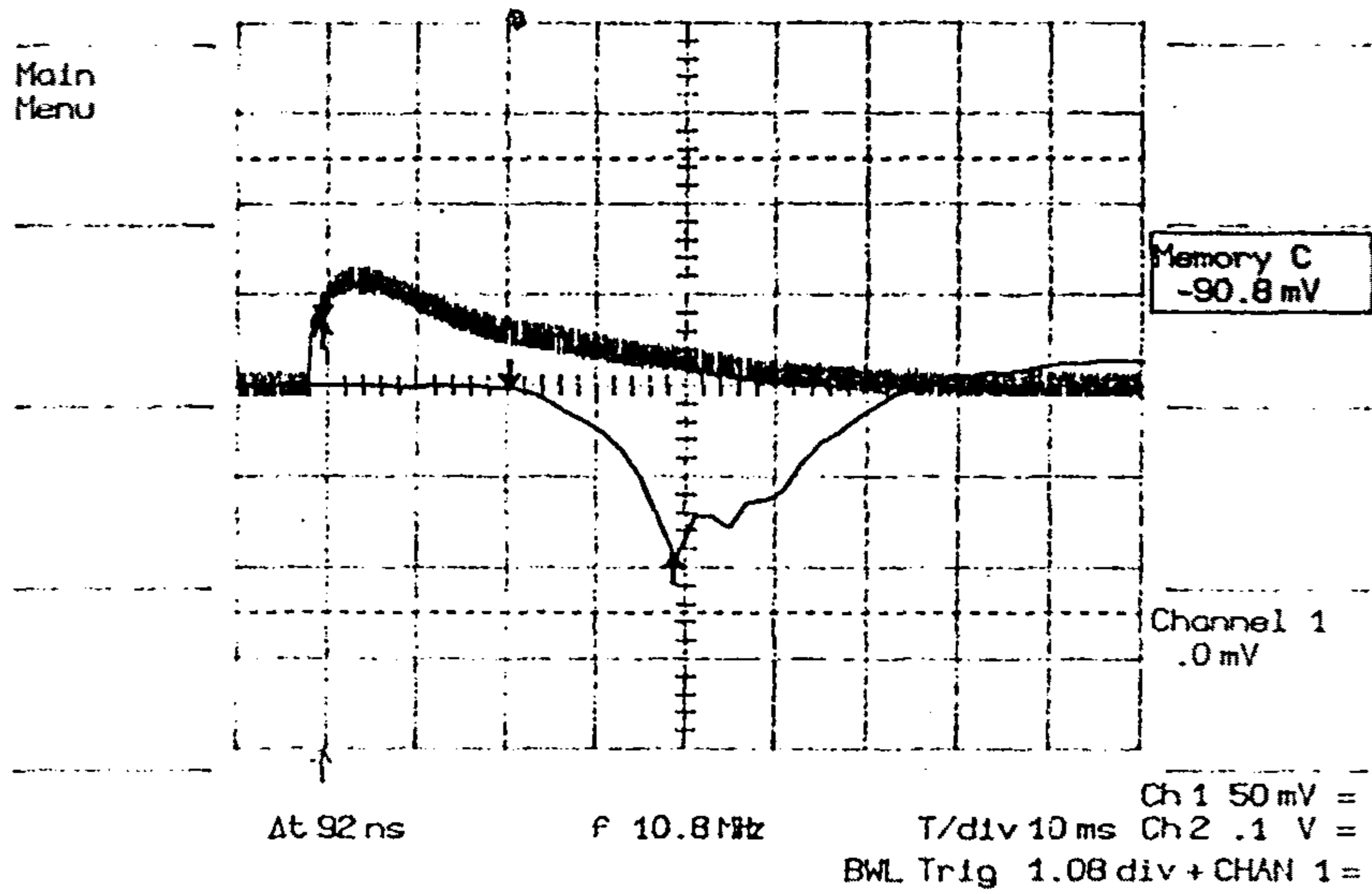
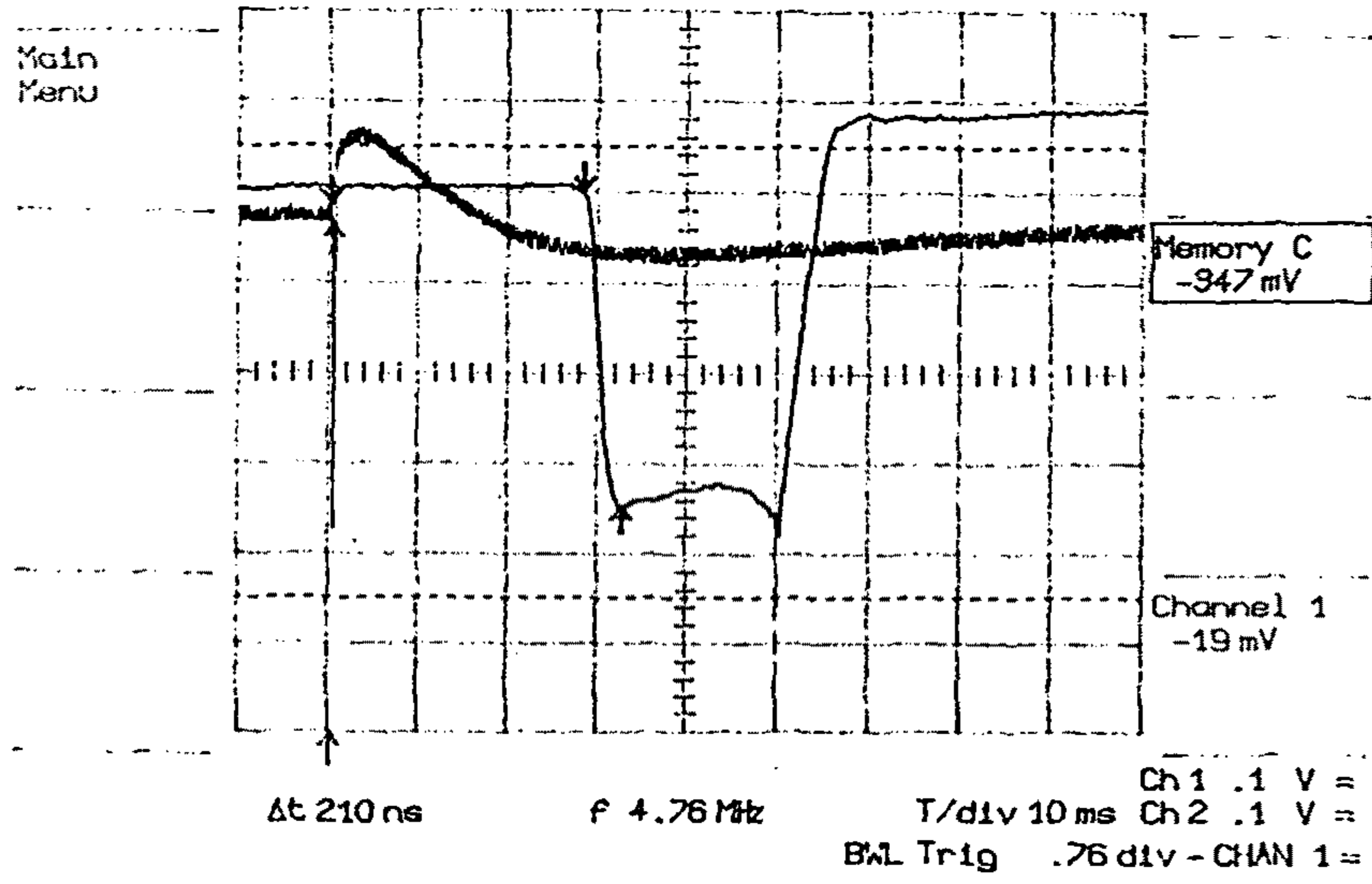


fig.12 Image intensifier 에 공급되는 전압 pulse  
( 위 ; 1 microsec, 아래 ; 100 nanosec )

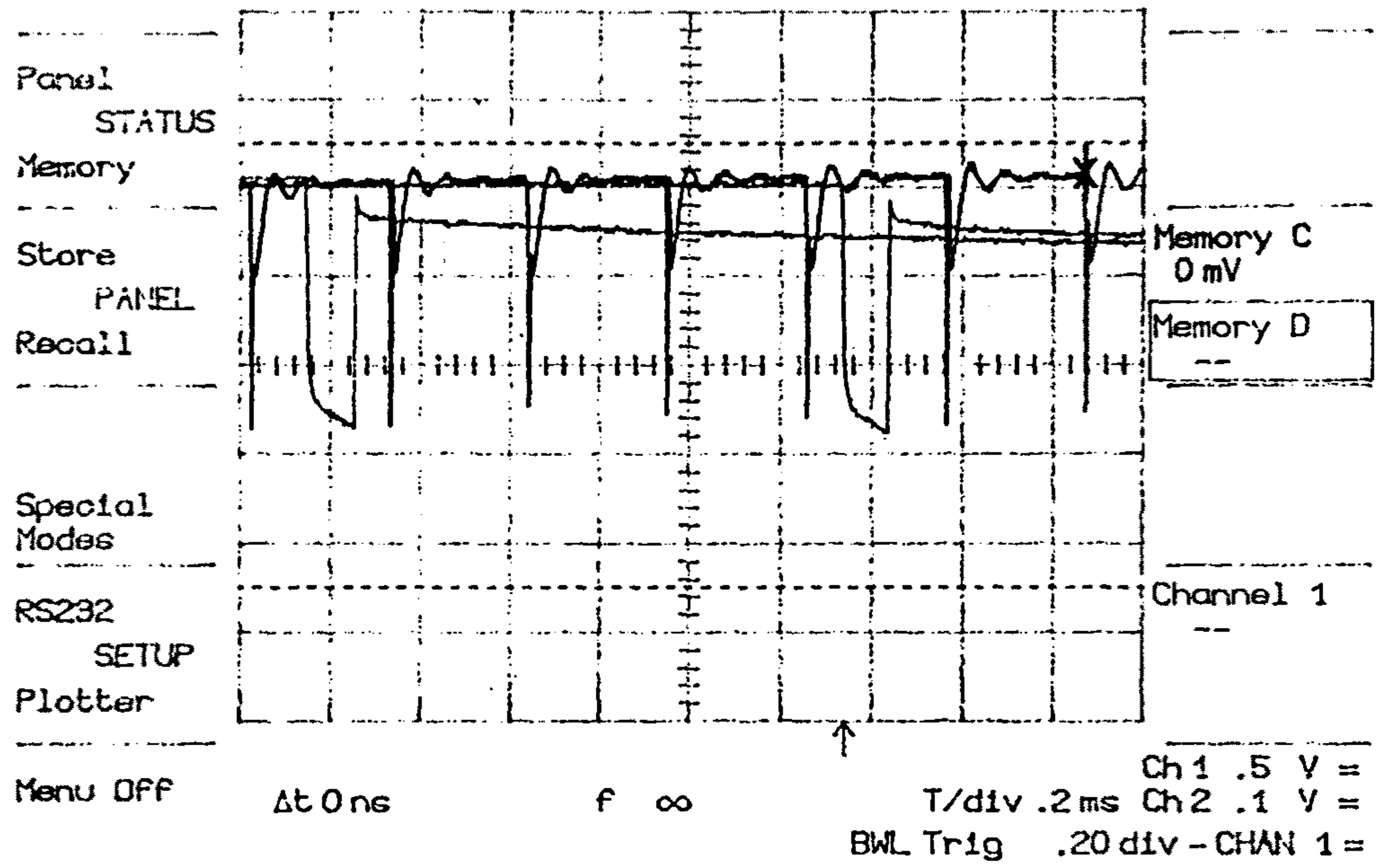


fig.13 Image intensifier 에 공급되는 주기 전압 pulse

노즐위치



(a)

(b)

(c)

fig.14 연소장의 이차원 영상 (선회 의 영향)  
( $Re=3600$ , 선회강도=1.8, 공기유량 : a=0., b=80, c=150l/min)



(a)

Mean : 66  
Std Dev : 84.65

(b)

Mean : 93  
Std Dev : 95.28

(a) 400nm (b) 600nm

fig.15 층류화염의 statistical information



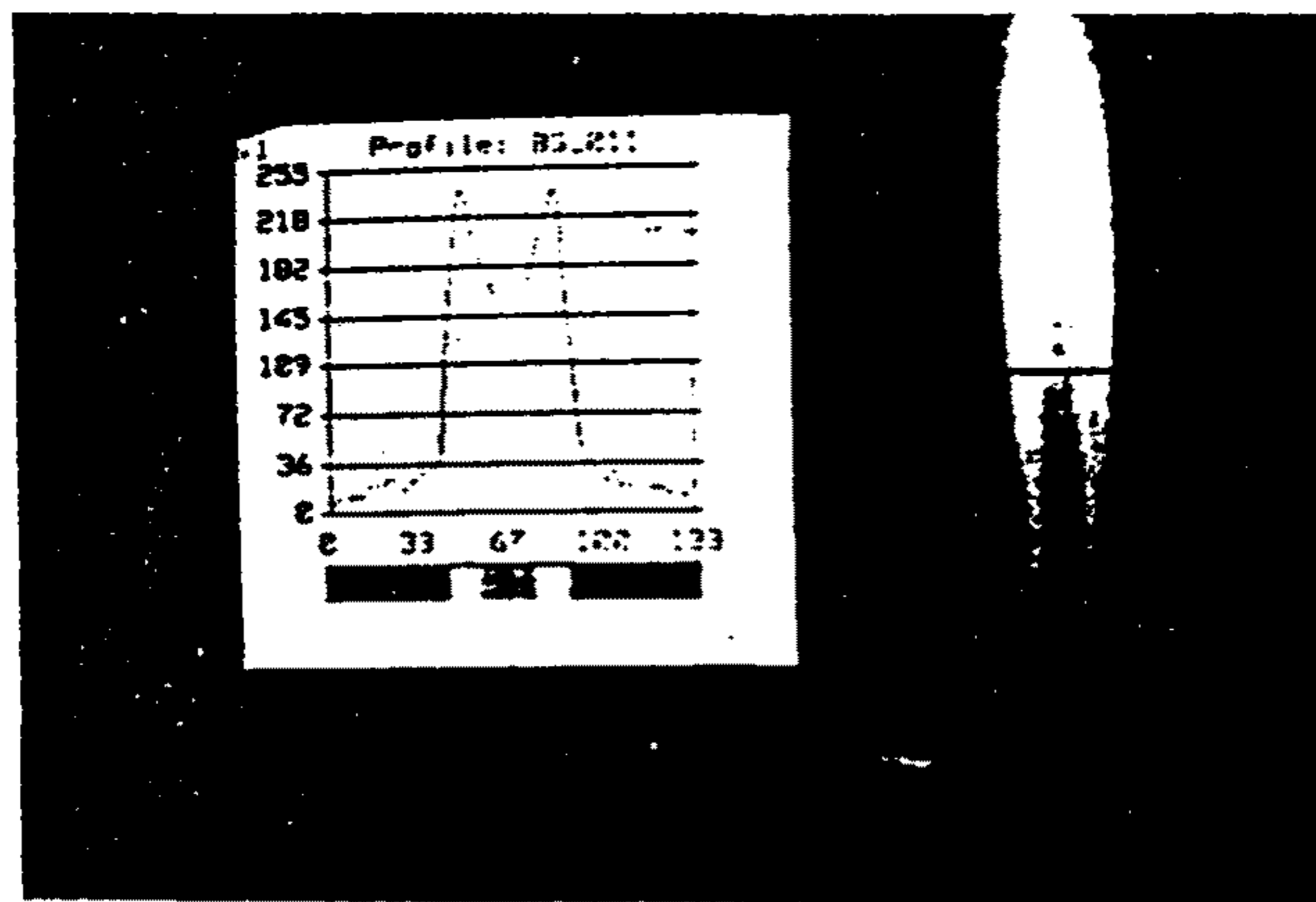


fig.16 층류화염의 영상 해석 (radial intensity pro

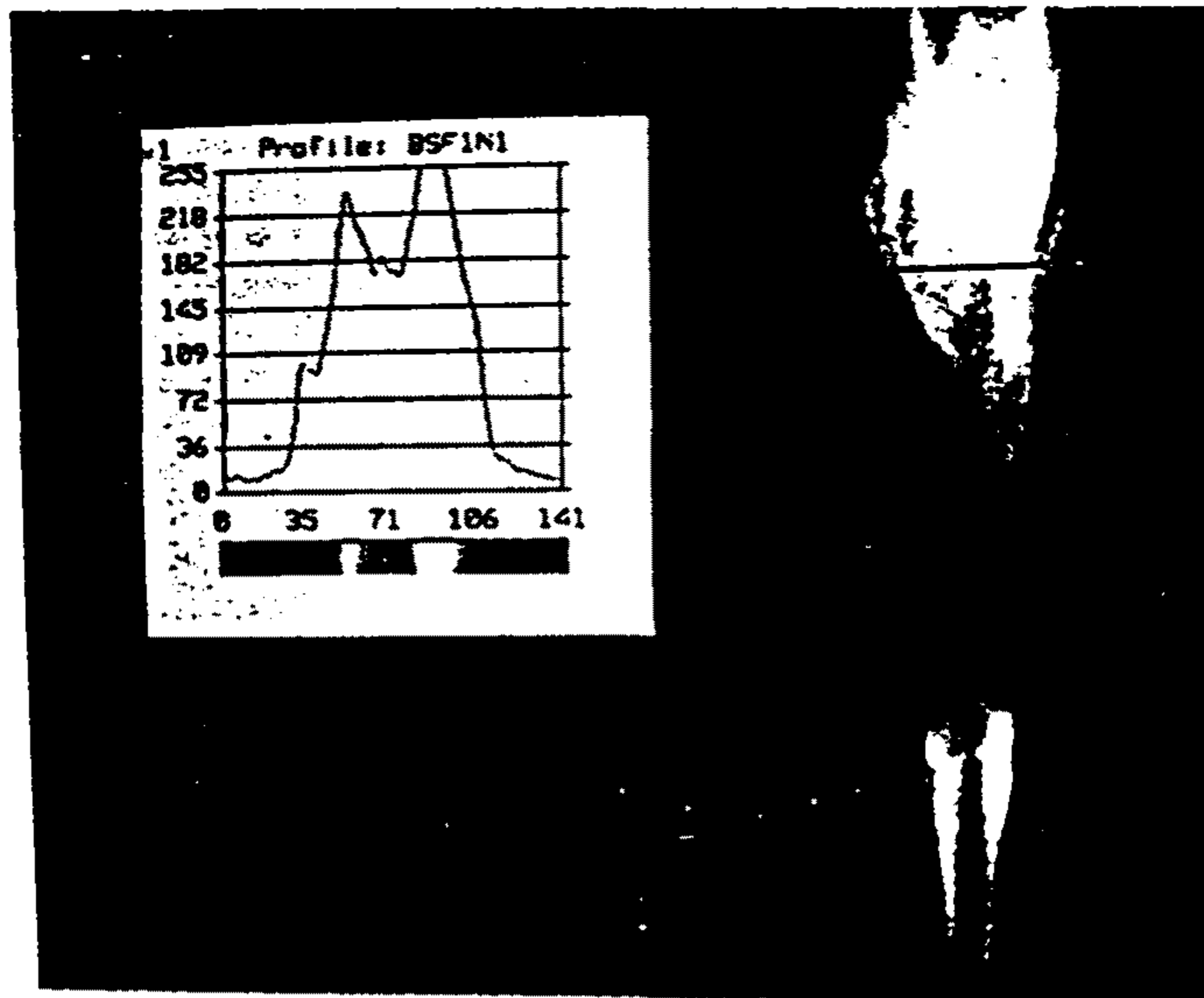
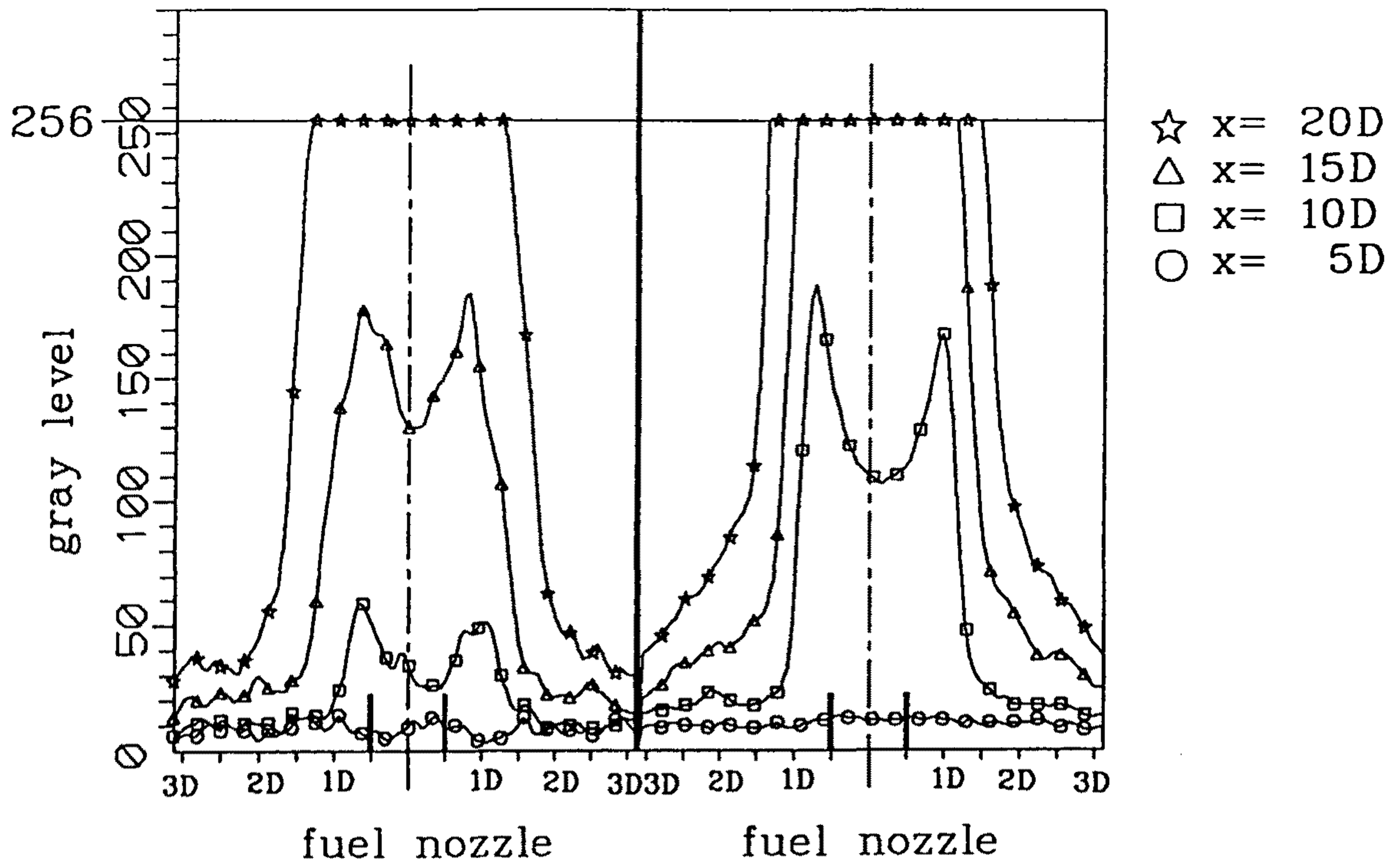


fig.17 선회화염의 영상 해석 (radial intensity profile)



(a) 400nm Image (b) 600nm Image

fig.18 층류화염의 radial intensity distribution

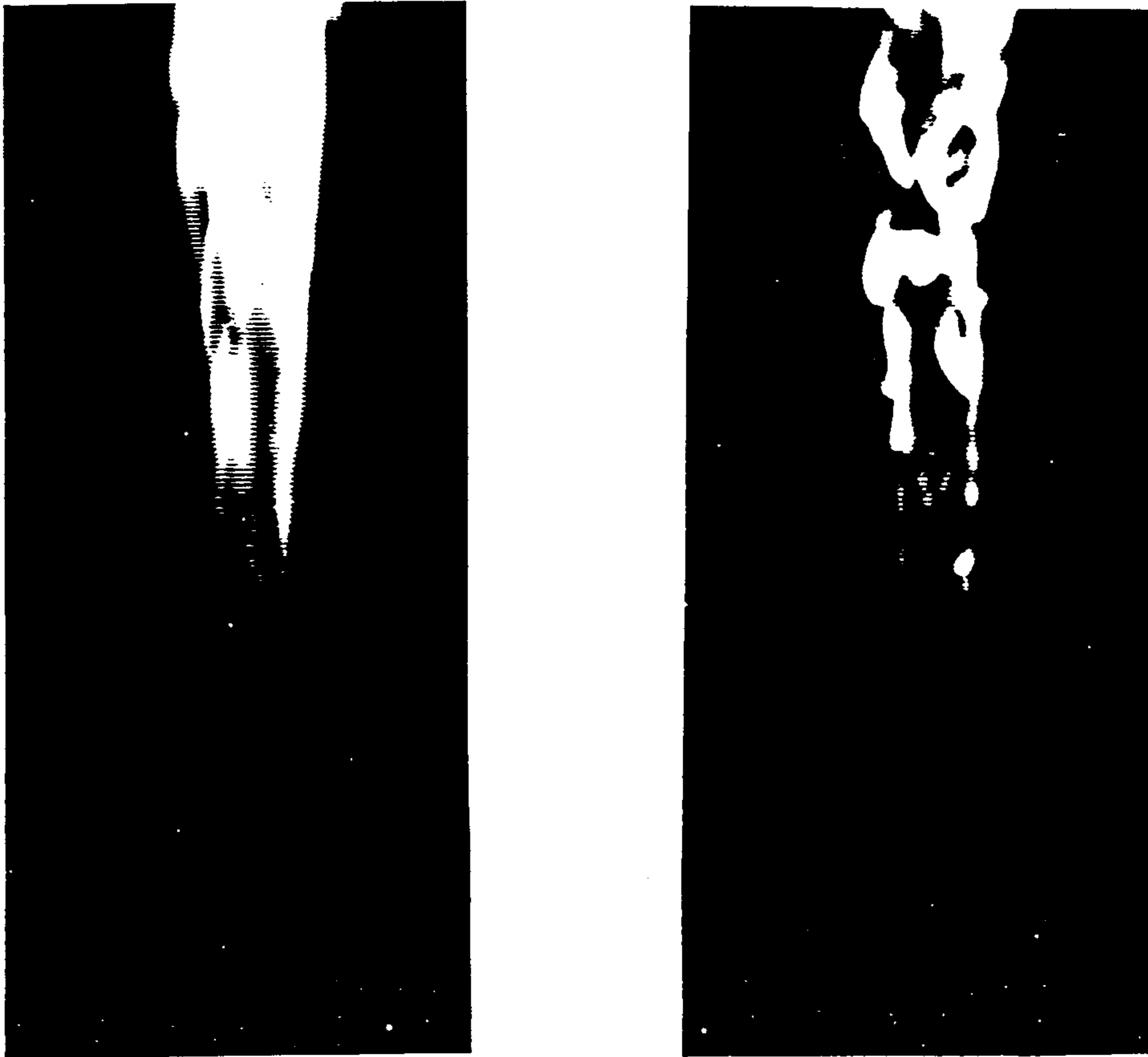


fig.19 난류 jet 화염의 영상  
(노출시간: 좌 - 10 msec, 우 - 100 - microsec)



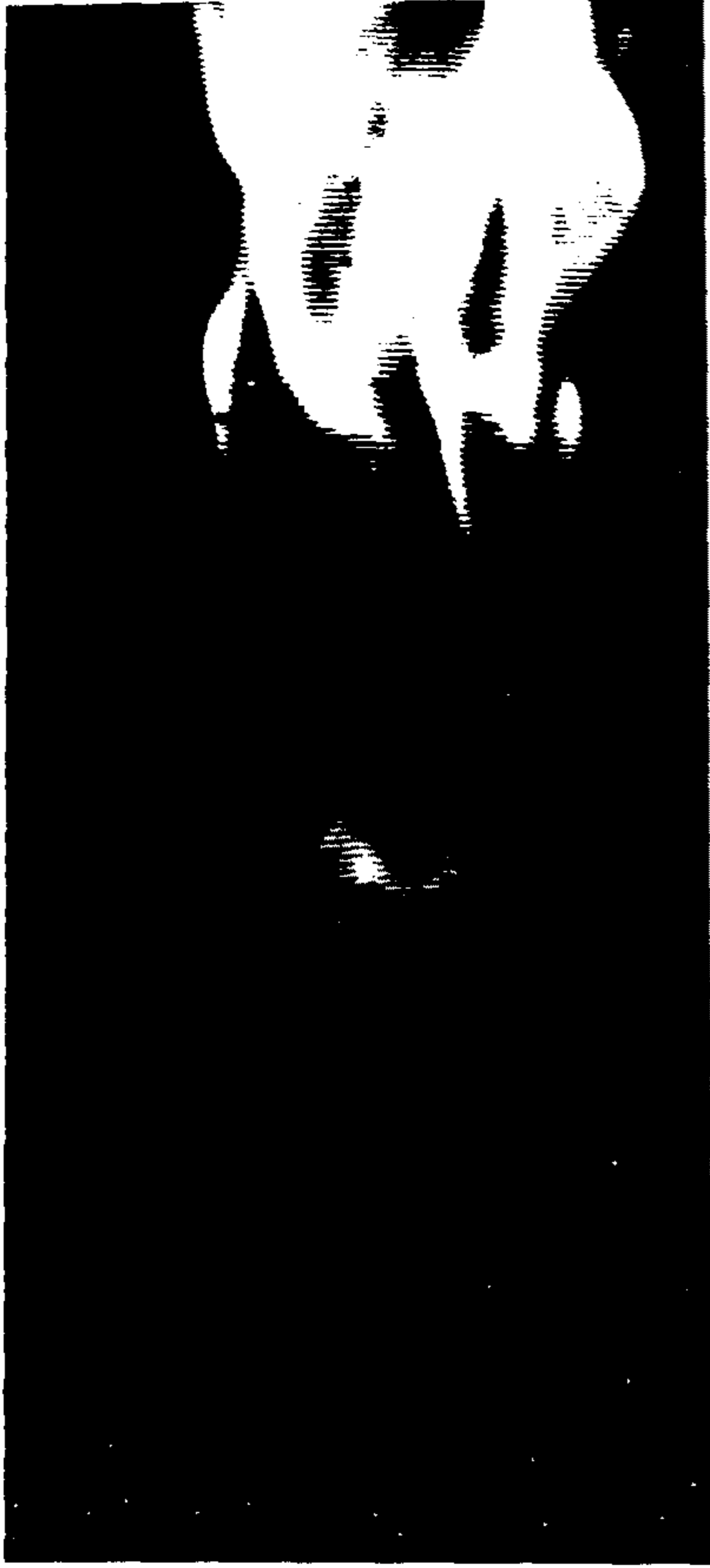


fig.20 부상 화염의 영상  
(노출시간: 좌 - 10 msec, 우 - 100 - microsec)



fig.21 선회 화염 (type I)의 영상  
(노출시간: 좌 - 10 msec, 우 - 100 - microsec)

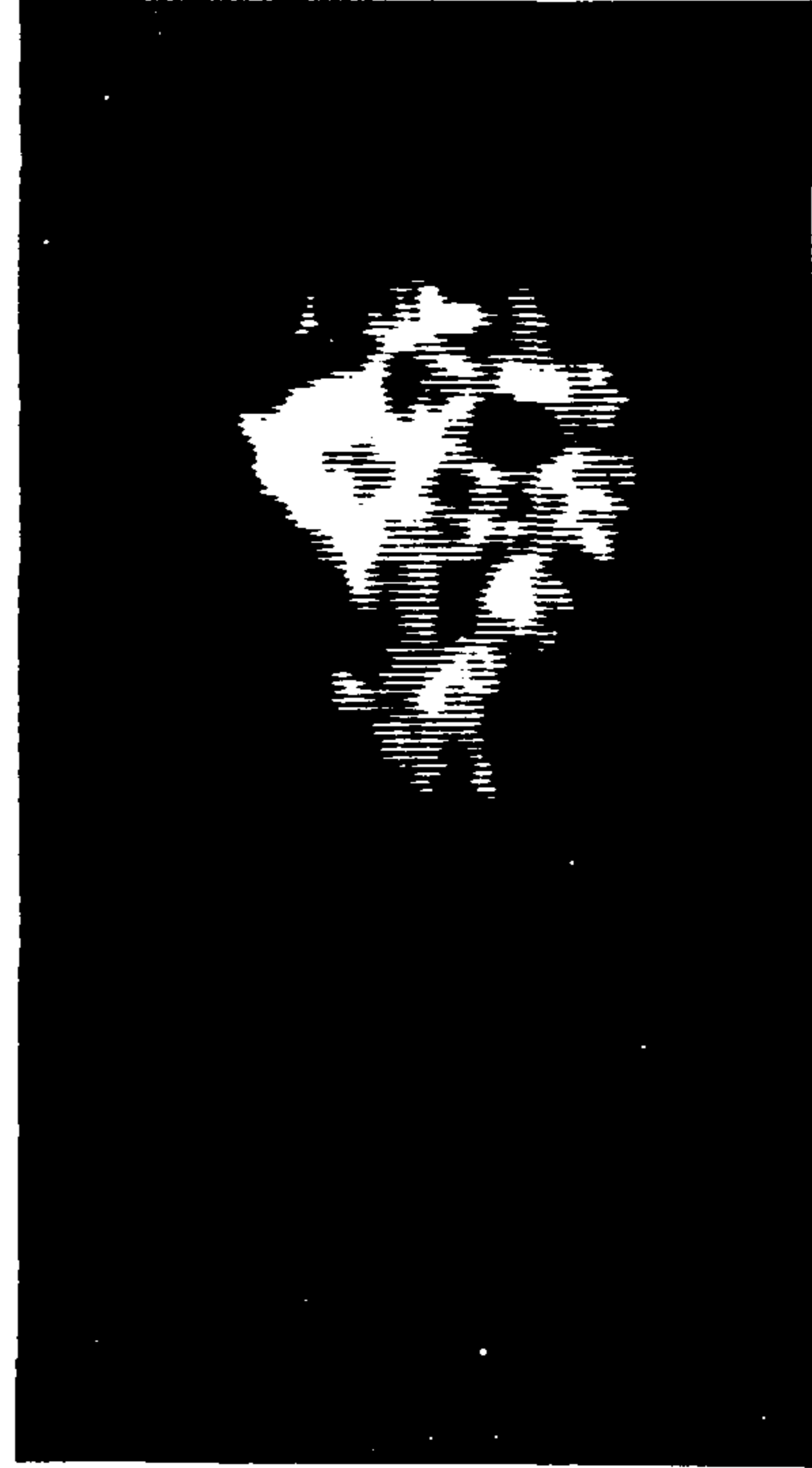
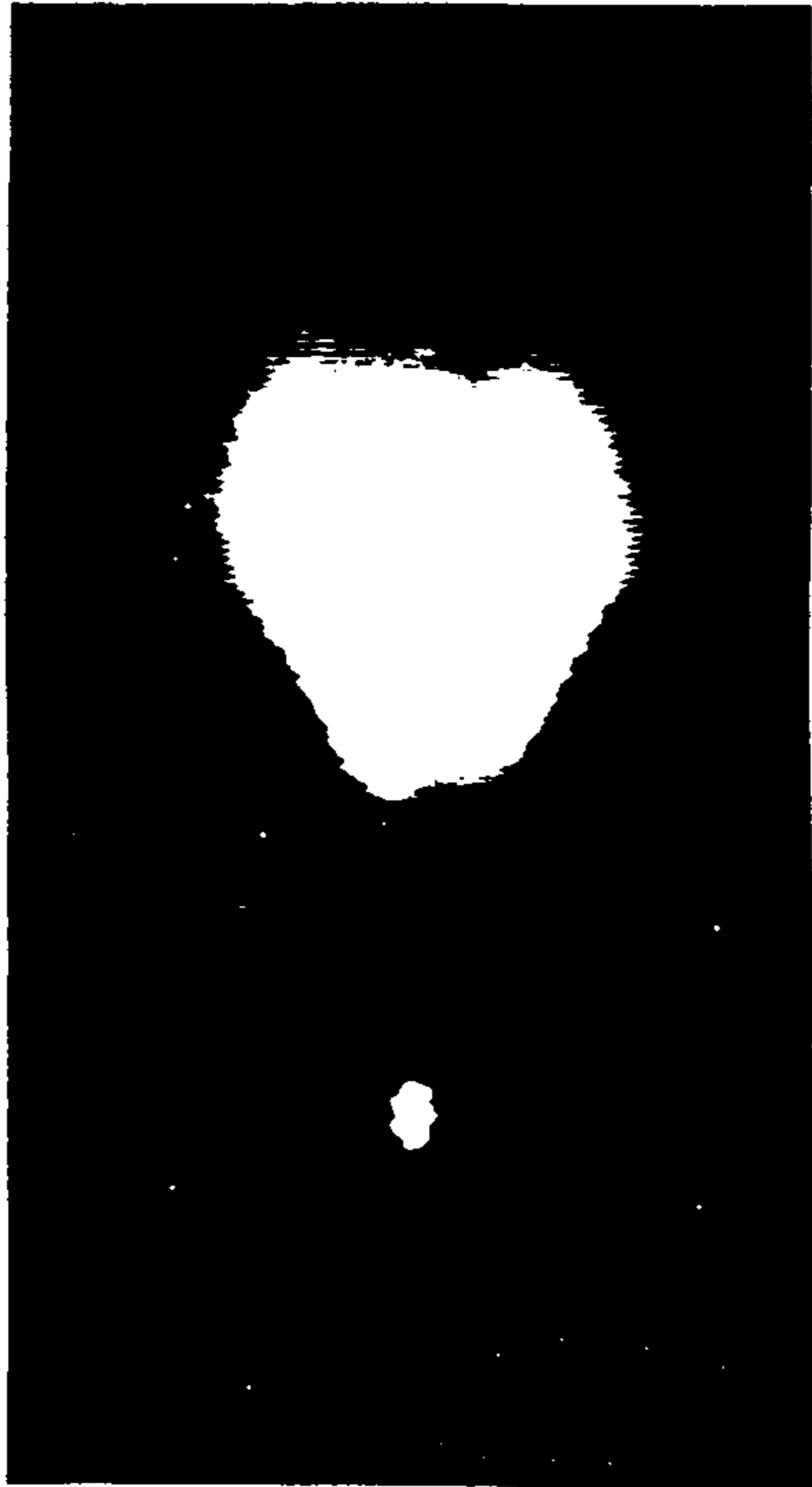


fig.22 선회 화염 (type V)의 영상  
(노출시간 : 좌 - 10 msec, 우 - 100 - microsec)

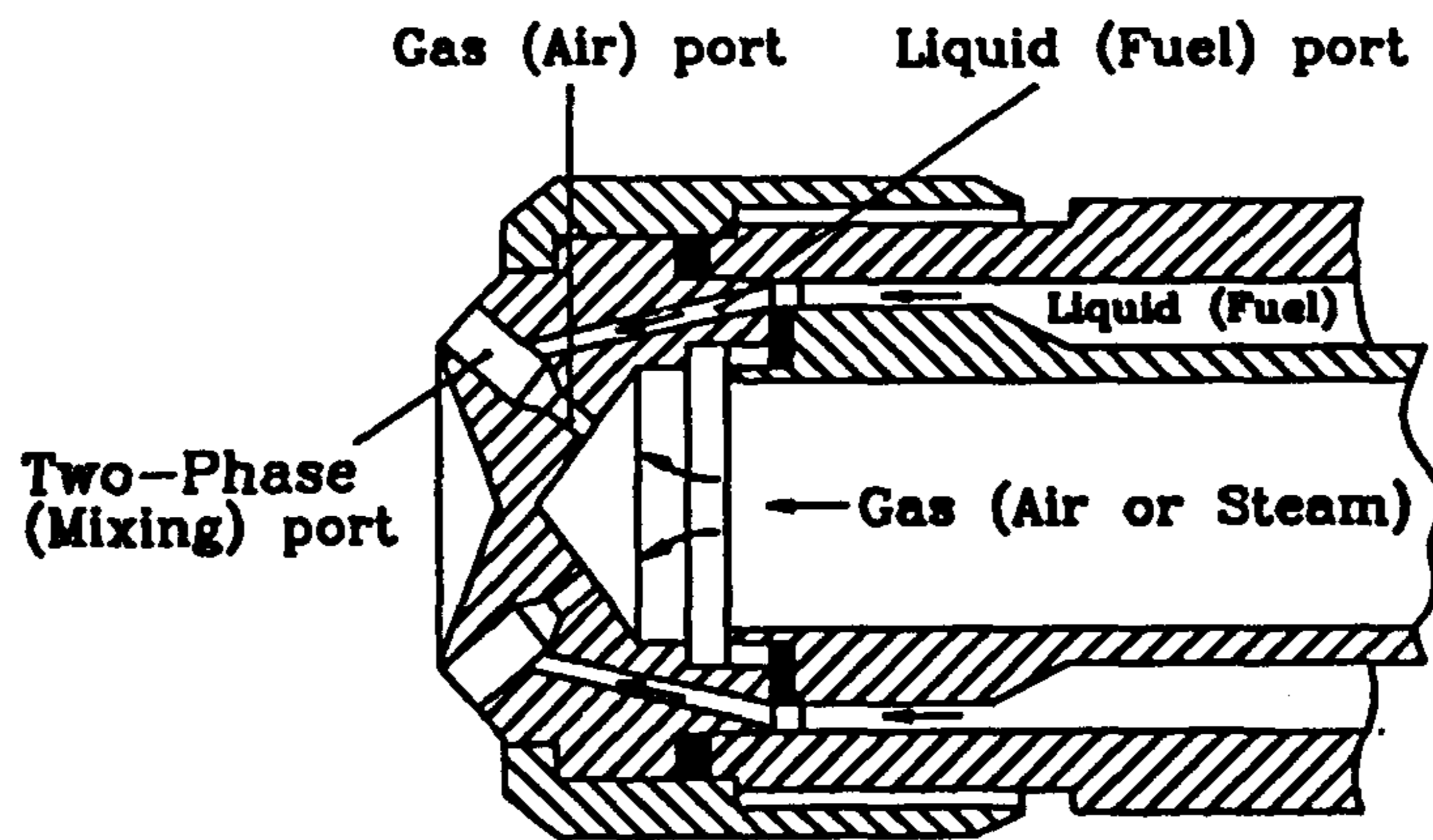


fig.23 Y-jet Atomizer



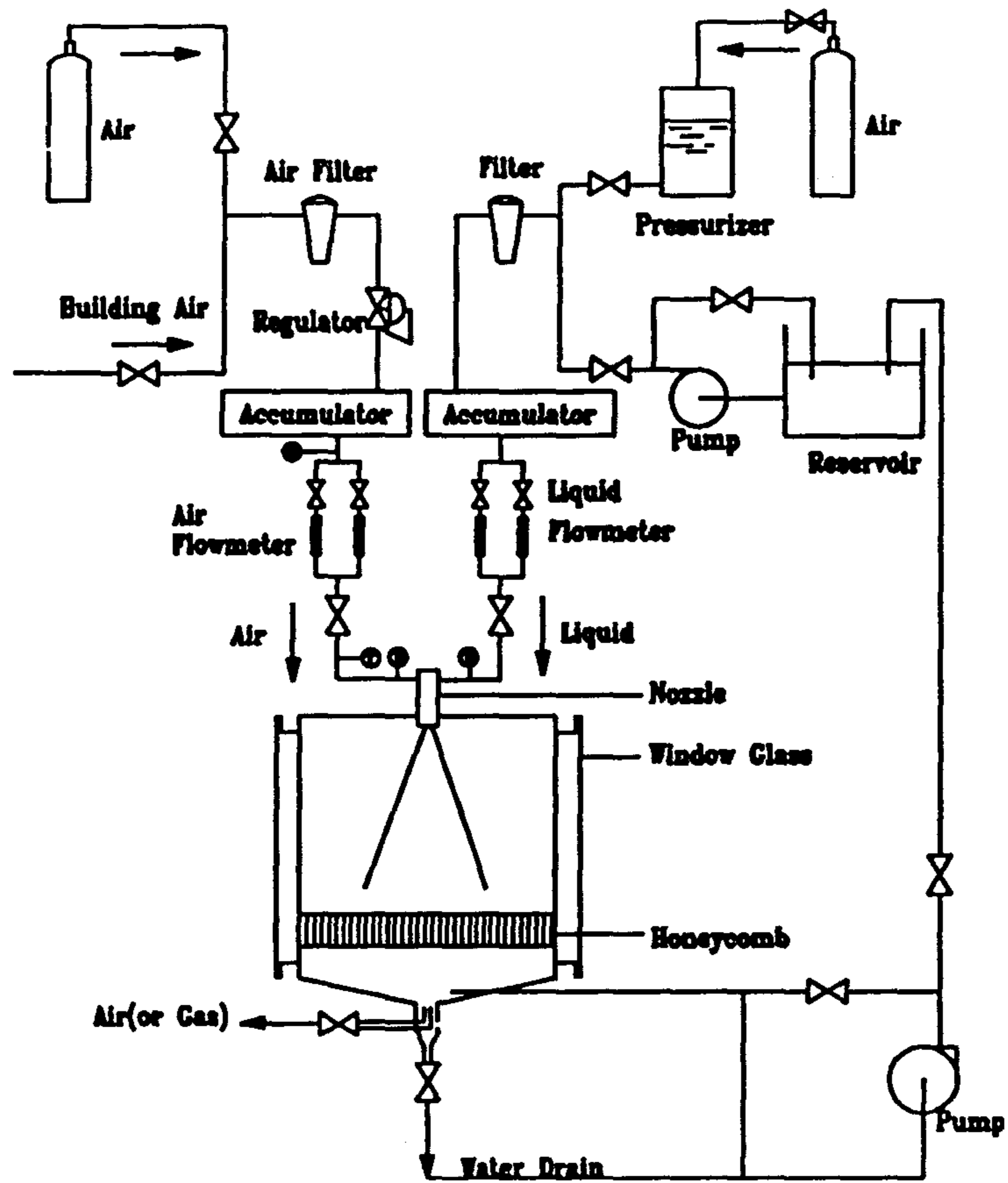
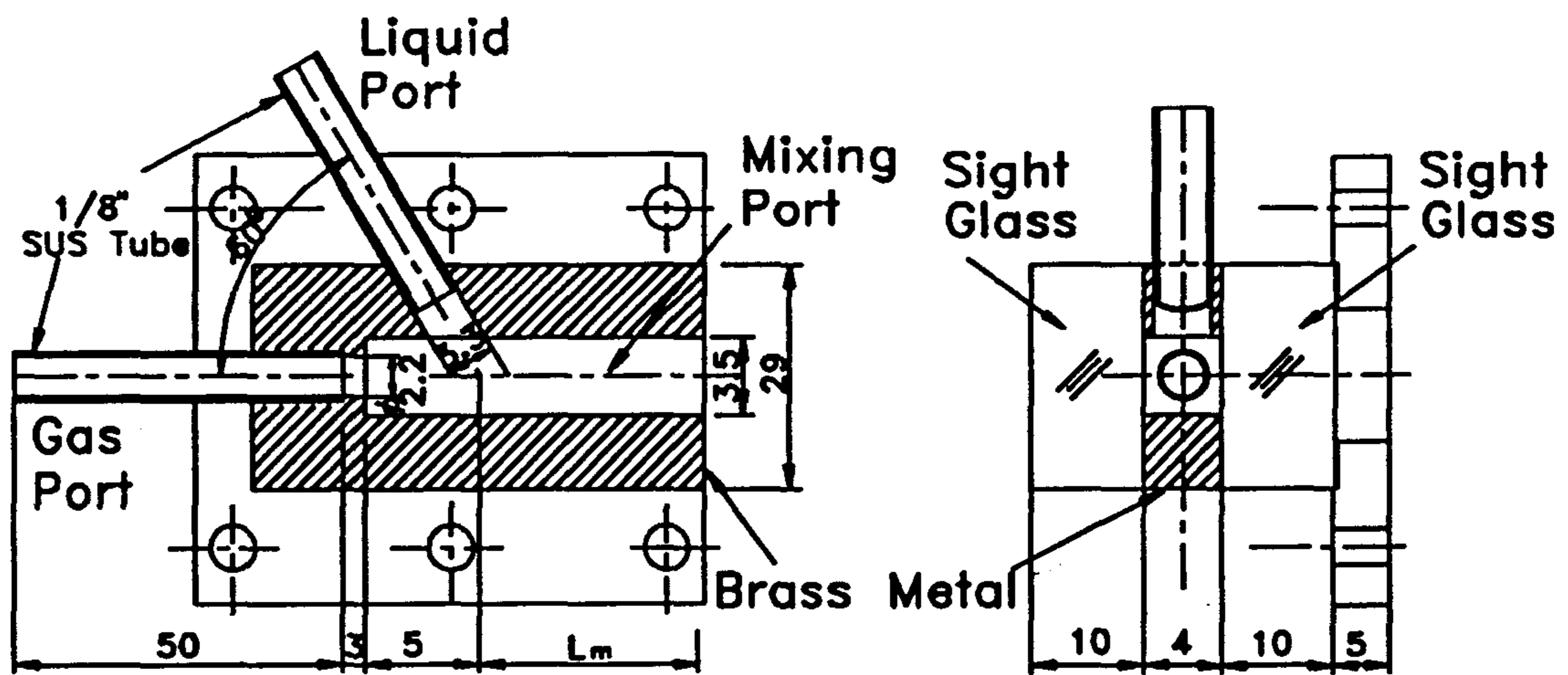


fig.24 Experimental set-up



Unit : mm

Atomizers	Y1-V1	Y2-V2	Y3-V3
Mixing Port Length ( $L_m$ )	7.0	14.0	21.0

fig.25 Configuration of transparent atomizer

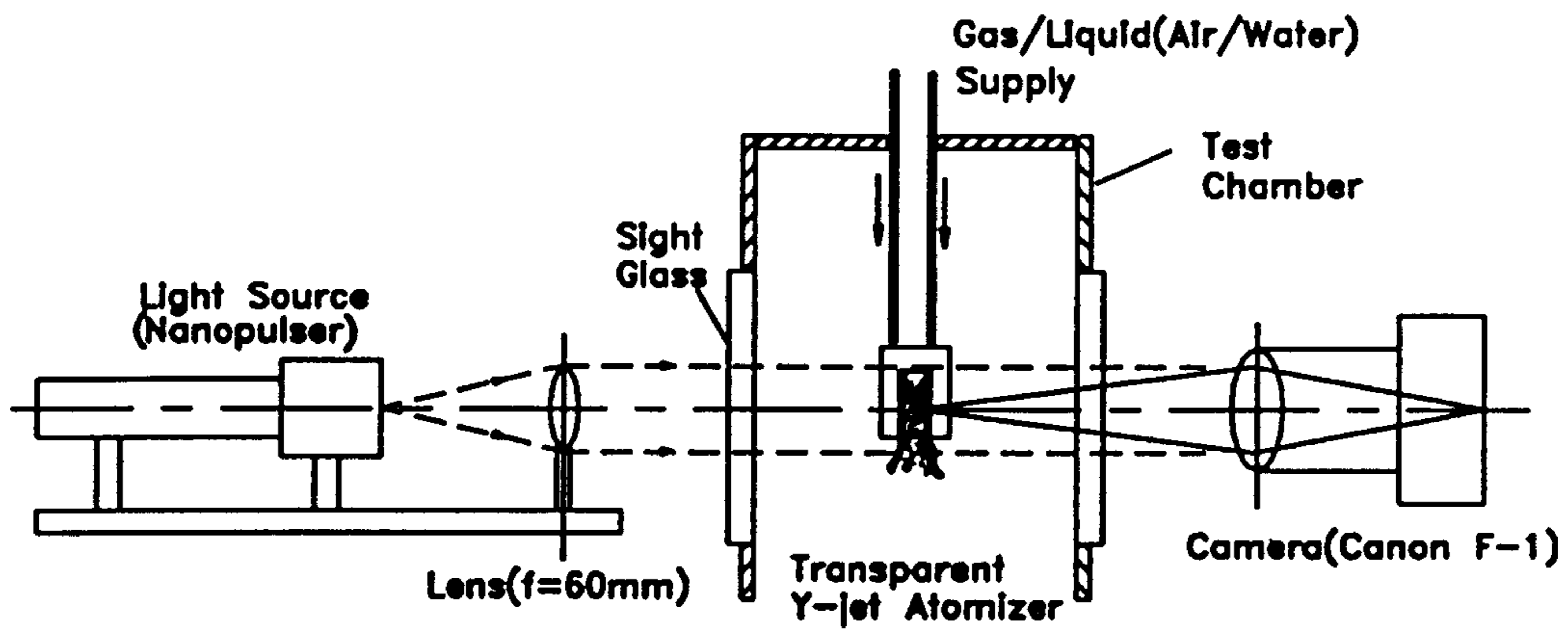
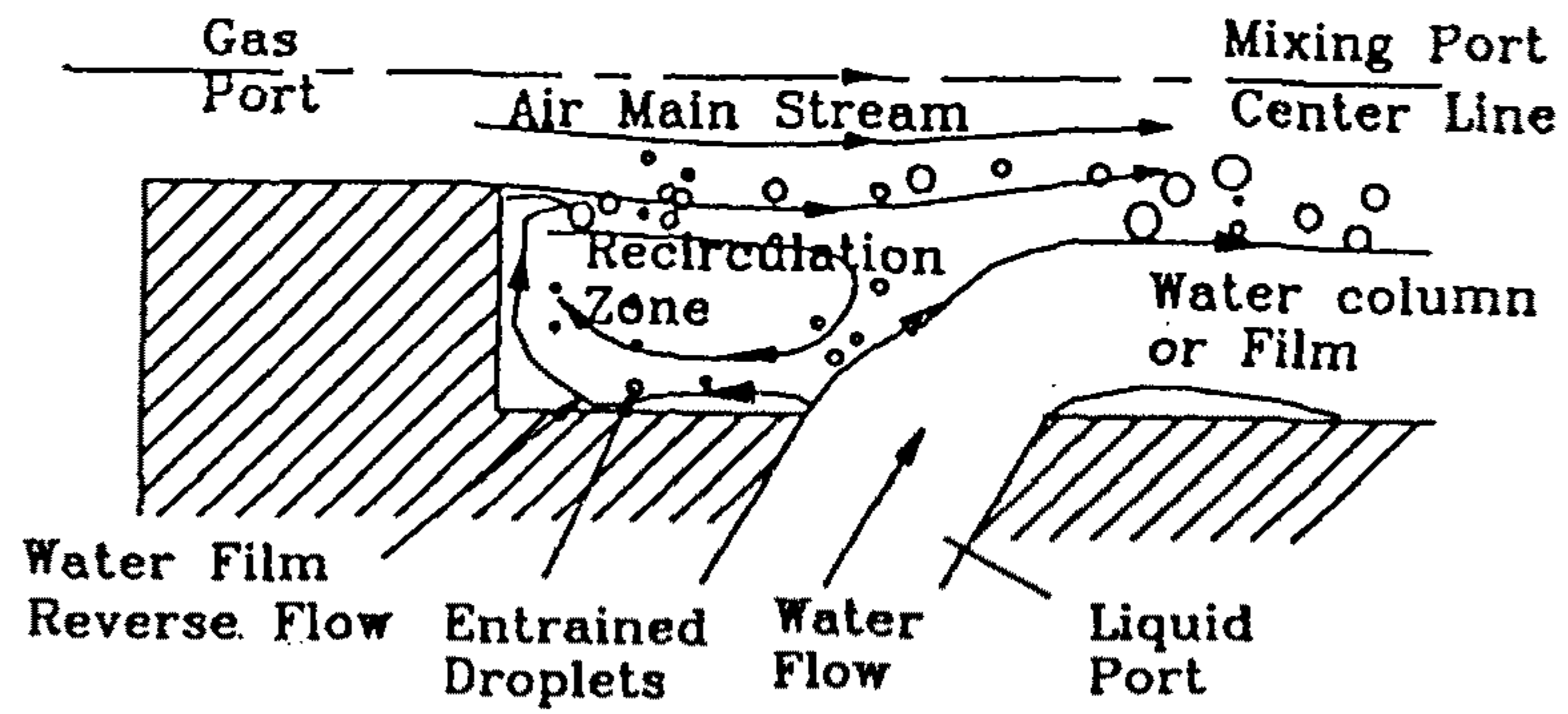


fig.26 Experimental set-up for visualization of internal flow pattern within Y-jet flow passage

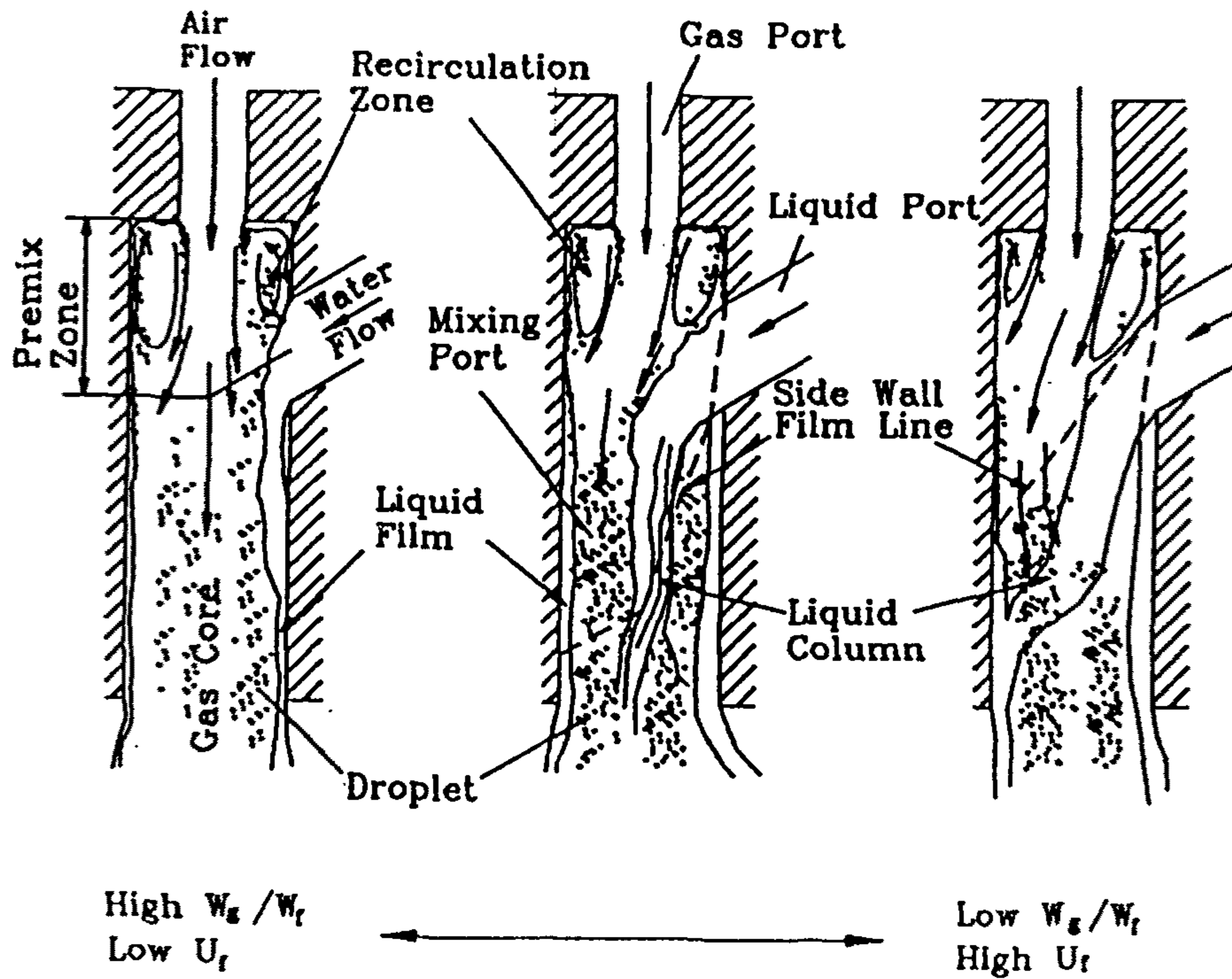


fig.27 Flow patterns within the mixing port with variation of air/water massflow rate ratio (Y1-V1 Atomizer)





(a) Schematic Illustration of Recirculation Zone



(b) Flow Pattern within Y-shaped Port

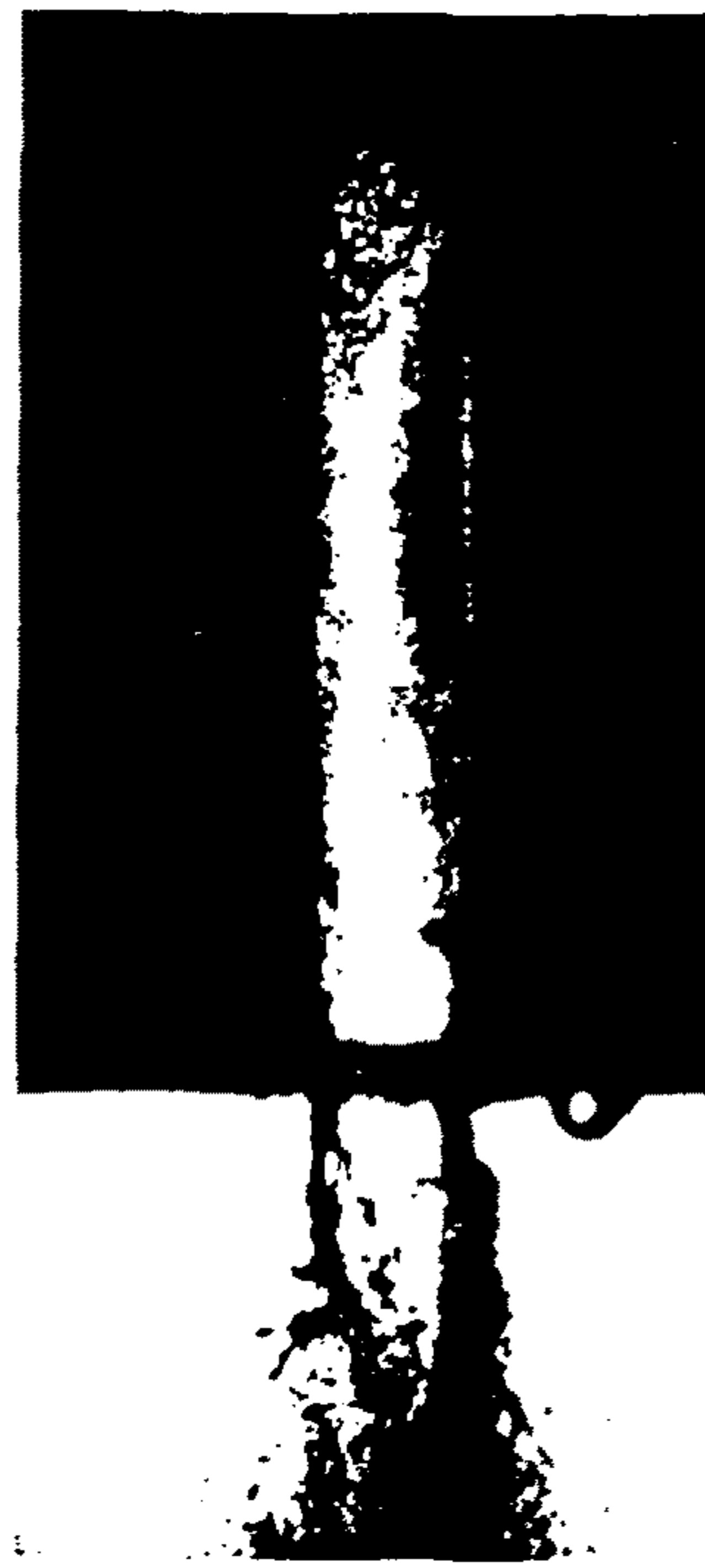
fig.28 Schematic illustration of recirculation zone and flow pattern within Y-shaped port



fig.29 Oscillation of the Liquid Film in Y1-V1 Atomizer  
( $W_g/W_f = 0.185/2.386$ )



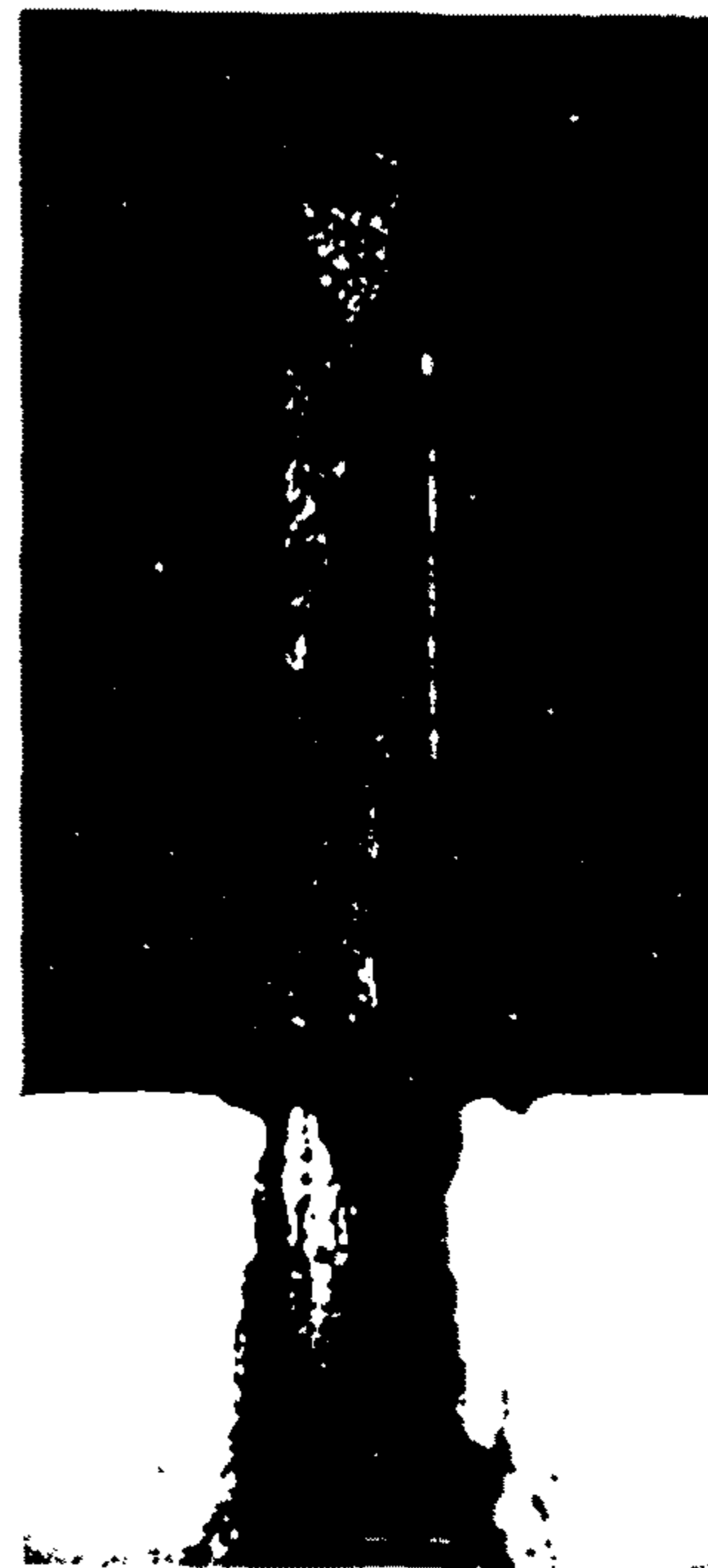
Y1-V1



Y2-V2



Y1-V1

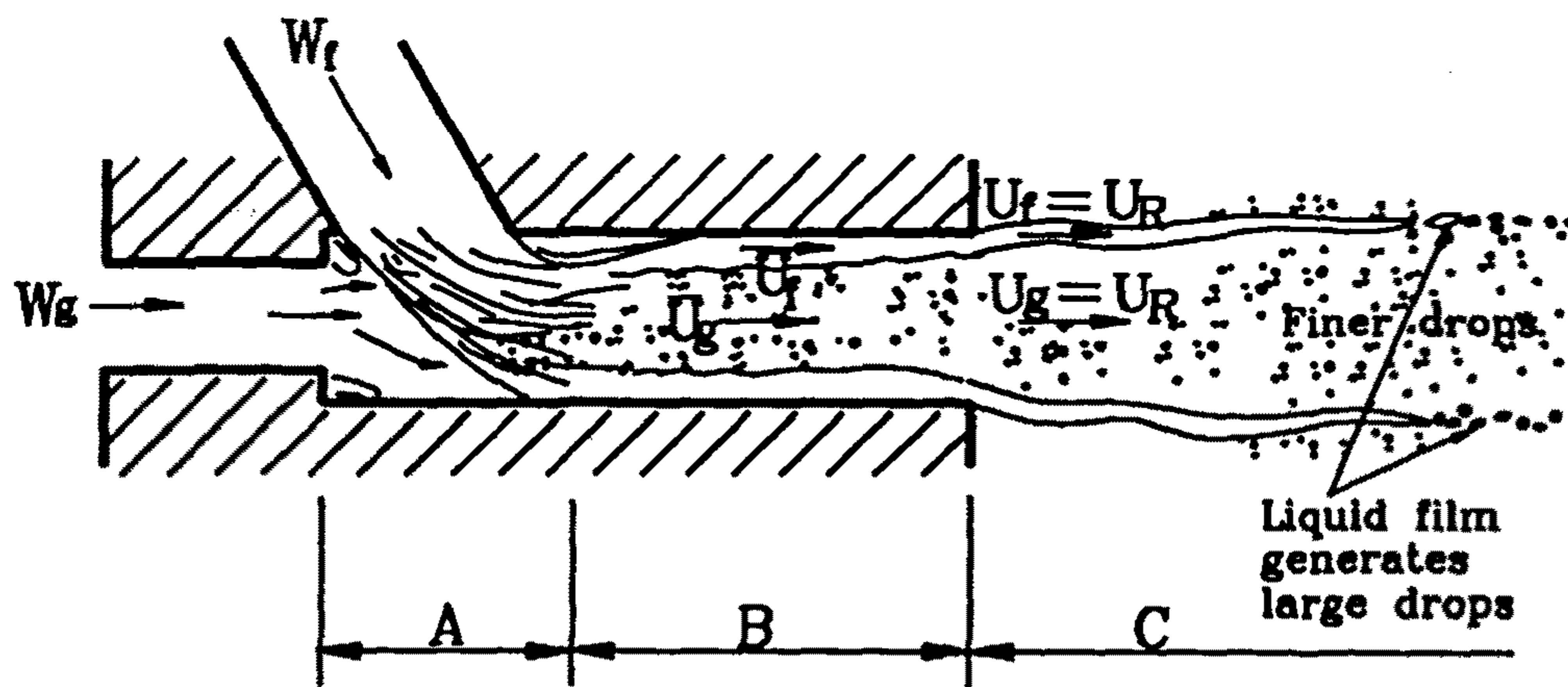


Y2-V2

fig.30 Flow pattern within the mixing port with various Mixing port lengths and air/water mass flow rate ratios

위 : High Air/Water Mass Flow Rate Ratio ( $W_g/W_f = 0.187/0.560$ )

아래 : Low Air/Water Mass Flow Rate Ratio ( $W_g/W_f = 0.187/2.077$ )



<b>A</b>	<b>Direct Colliding Zone</b>	-Liquid collide with atomizing fluid
<b>B</b>	<b>Annular-mist Flow Zone</b>	-Annular liquid film is formed -Droplets are generated and entrained into gas core
<b>C</b>	<b>Liquid Film Disintegration Zone</b>	-Liquid film disintegrates into droplets outside the nozzle by wavy surface mechanism

fig.31 Schematic illustration of atomization mechanism in Y-jet atomizer



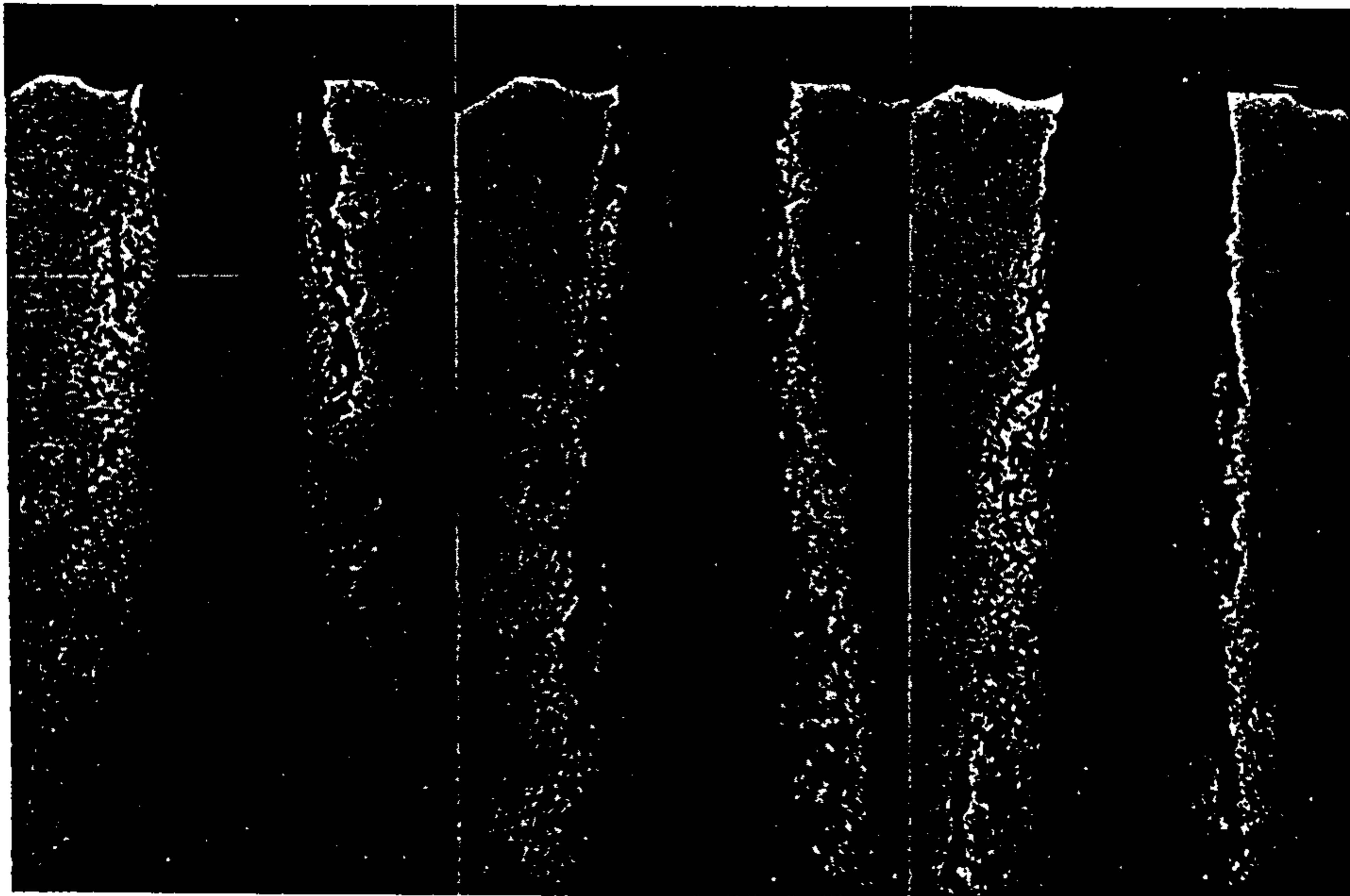


fig.32 Typical example of atomization mechanism in Y-jet atomizers  
(N3 Atomizer,  $W_g = 0.13$  kg/min)

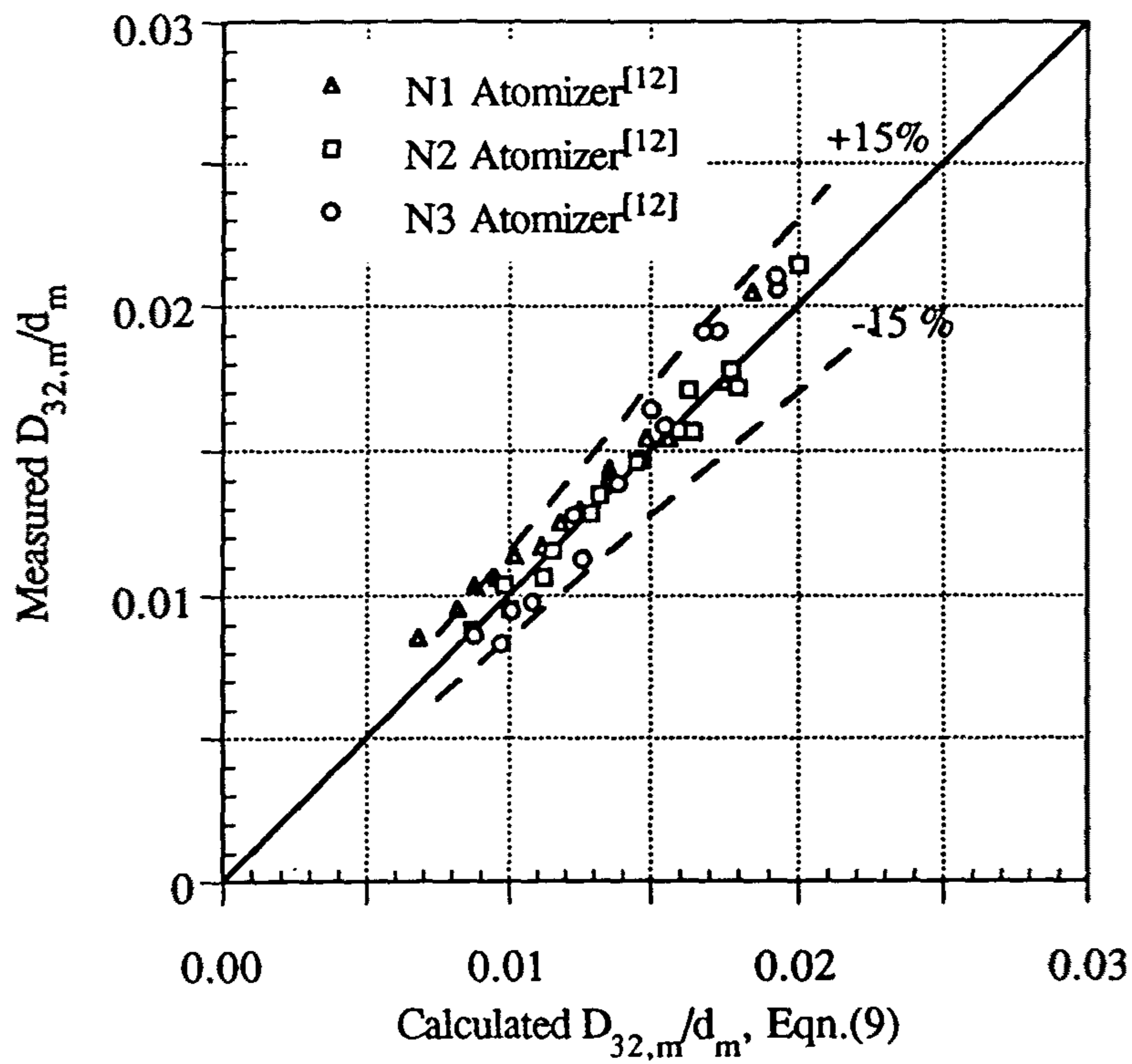


fig. 33 Comparison between measured with calculated dimensionless mean drop size