

최종보고서

GOVP 19916937

621.48
737318
v. 2

'98 원자력기초연구사업

**불응축성기체를 함유한 응축열전달 난류
경계층의 미시적 구조에 관한 연구**

Microscopic Structure of Turbulent Boundary
Layer in Condensation Heat Transfer with
Non-Condensable gas

주관연구기관
한국과학기술원

과 학 기 술 부

제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀 하

본 보고서를 “불응축성기체를 함유한 응축열전달 난류 경계층의 미시적 구조에 관한 연구”의 2차년도 최종보고서로 제출합니다.

1999년 7월 7일

주관연구기관명 : 한국 과학 기술 원

주관연구책임자 : 노희천 (한국과학기술원 원자력공학과 교수)

연 구 원 : 최기용 (한국과학기술원 원자력공학과 박사과정)

박현식 (한국과학기술원 원자력공학과 박사과정)

김상재 (한국과학기술원 원자력공학과 박사과정)

문영민 (한국과학기술원 원자력공학과 박사과정)

최성원 (한국과학기술원 원자력공학과 석사과정)

허 선 (한국과학기술원 원자력공학과 석사과정)

요 약 문

I. 제 목

불응축성기체를 함유한 응축열전달 난류 경계층의 미시적 구조에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

경수로에서의 안전해석과 그 밖의 여러 가지 산업적인 응용성을 고려해 볼 때 직접접촉응축 열전달은 근본적으로 중요한 현상이라 할 수 있다. 특히 실제 원자로의 사고해석 시 필요로 하는 실험으로 직접접촉응축 열전달은 경수로의 안정성평가나 다른 산업적 응용에 있어서 기본적으로 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 가상적 냉각재 상실사고 동안, 비상냉각수가 원자로심을 냉각시키기 위해 주입된다.

이러한 과냉수가 스팀으로 가득 차 있는 수평파이프 관을 흐를 때 역방향으로 물과 수증기가 흐르게 되고 스팀의 응축과 함께 성층유동을 형성하게 된다. 국부 응축율과 스팀과 과냉각수간의 상호 움직임은 노심노출의 중요한 판단기준이 된다. 또한 국부 응축열전달 계수는 수격현상 (water-hammer)의 중요한 변수이기도 하다. 그 중에서도 얇은 액막유동의 경우 Segev et al(1981)는 액막유동의 용적온도의 증가율을 가지고 응축열전달계수를 계산하였다. 용적온도(bulk temperature)의 증가는 흐르는 유동의 바닥온도를 측정함으로써 구하였다. 그리고 이것은 얇은 액막유동의 경우 유동의 바닥면의 전단응력이 아주 중요한 액체의 혼합효과를 내는 경우

바닥온도와 용적평균온도(average bulk temperature)는 큰 차이가 없을 거라는 가정을 근거로 한 것이다.

그러나 좀더 정확한 국부 열전달계수를 구하기 위해서는 흐르는 유동에 영향을 주지 않고 온도장을 구함으로써 보다 정확한 열전달계수를 구하는 방법이 필수적이라 할 수 있겠다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 국부 열전달계수 측정

경사진 성층유동에서의 국부 열전달계수를 측정하기 위해 기존의 온도 측정방법이 아닌 열적외선 카메라를 이용하여 측정한 온도를 검증하기 위해 다음과 같은 과정을 진행했다.

- 사각유로의 횡방향의 같은 위치에서 양 벽의 온도를 열전대와 적외선 카메라로 측정하여 정확도를 검증하였다.
- 사각유로의 중앙온도와 벽면 온도를 측정하여 횡단면적의 온도분포가 일정하다는 가정을 쓸 수 있는지를 검증하였다.
- 검증된 온도 방법을 이용하여 벽면에서 측정된 온도분포를 이용하여 bulk mean temperature를 구하였다.

2. 유동조건에 따른 온도분포 측정

유동방향과 순수증기유동과 불용축성 기체를 함유한 유동 그리고 입구의 유량조건을 변경함으로써 각각의 경우에서 온도 분포를 측정하였다.

3. 접경면 부근의 온도장 관찰

불용축성 기체를 함유한 역층유동에서의 접경면 부근의 wave 형태를 온도장을 통해 관찰하였다.

IV. 연구개발결과

수평관내의 성층 난류 액막 유동이 응축에 미치는 영향이 적외선 카메라를 이용해 실험적으로 연구되었다. 평판이나 사각유로에서의 응축 열전달 현상에 대한 실험 중에 경사가 주어진 경우 액막의 두께가 3~4 mm 이하의 얇은 막을 형성하며 흐르는 경우 wave model에 따르면 얇은 막 유동에서는 활발한 난류유동으로 인해 액막의 단면적 전체의 온도가 일정하다는 가정을 사용한다. 그러나 좀더 정확한 국부 열전달계수를 구하기 위해서는 bulk mean temperature를 구하는데 온도분포를 구할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 비접촉식 온도측정 방법인 열적외선 카메라를 이용하여 온도분포를 측정하였다. 그리고 구한 온도분포를 이용하여 mean bulk temperature를 구하였고 이 정보를 이용하여 local heat transfer coefficient를 구할 수 있음을 보였다. 기존의 wave model 이론을 도입하여 얻어진

실험결과와 비교하여 국부 열전달계수가 낮은 값을 보였는데 이것은 기존의 bulk temperature가 유동의 바닥 온도를 택함에 있어 실제 적외선카메라를 이용한 온도분포를 구하여 얻은 bulk mean temperature가 더 높은 값을 나타내므로 두 지점간의 온도편차의 줄어드는 폭이 포화 수증기와의 편차보다 작기 때문에 발생하는 요인이다.

또한 유동의 국부 온도장 정보를 이용해서 물 입구온도 영향, 유동 방향(cocurrent, countercurrent)의 영향과 기울기의 영향이 검토되었다.

기존의 실험에서 입구온도 영향에 대해 상반된 해석을 보인 Segev와 Lim 연구에 대해 본 연구에서는 국부 온도장의 정보를 통해 입구 온도가 높은 경우에 보다 활발한 온도 교환이 물과 증기의 접경면에서 발생함이 나타났다. 그리고 위의 세 가지 유동조건 중에서 interface에 shear stress에 의한 열전달 해석이 최근에 주요 관심사인데 적외선 카메라를 통한 interface 부근에 wave 형태를 유동조건에 따라 관찰 비교한 결과 열전달이 가장 활발하게 이루어지는 경우는 countercurrent에서 입구온도가 60℃ 이상의 높은 경우에 가장 활발한 열교환이 관찰되었다.

그밖에 아주 적은 유량의 steam이 흐르고 같은 방향으로 물이 흐르는 경우 대부분의 열교환이 기존의 연구결과와 마찬가지로 바닥으로부터의 와류가 주요 열교환의 mechanism으로 온도 띠 분석을 통해 확인되었다.

그리고 같은 유동조건이라도 수평보다는 약간의 경사(0.5°)진 경우에 접경면에서의 wave amplitude가 상대적으로 크게 증가하여 surface renewal율이 활발하게 일어남이 온도장 pattern 관찰을 통해 확인되었다.

V. 연구개발결과의 활용 계획

- (1) 기존의 표면 온도측정 방법보다 훨씬 세밀하고 실시간으로 온도장의 정보를 얻을 수 있는 특징을 이용한 CHF실험에서 hot spot을 찾는 실험이나 일정하게 가열된 파이프의 온도분포와 그로 인해 파이프 내면의 유동을 유추해 볼 수 있는 CHF(critical heat flux) 실험에 적용한다.
- (2) 흐르는 유동장의 flow pattern에 따른 온도분포와 온도장의 변화를 통해 기존의 열전달계수를 이용한 열전달율의 경향해석을 벗어나 보다 기초적인 유동의 특성인 온도장의 관찰을 통해서도 유동 특성 해석이 가능하다.
- (3) 본 기초연구를 토대로 경계조건들(관직경, 압력효과, 유동길이, 유동율)을 변화시켜 가면서 추가 실험적 연구를 한다면, 방대한 원시 데이터 베이스를 보유할 수 있다.
- (4) 실험을 통해 얻어진 원시 데이터는 다른 조건에서의 계면 전달현상 해석에 사용될 수 있는 귀중한 기초자료가 되어 국내 기초과학 발전에 기여할 것이다.
- (5) 개발된 측정기술은 측정기술의 고도화 및 다른 실험에 응용의 기본적인 발판이 될 것이다.

여 백

SUMMARY

I. Title

Microscopic Structure of Turbulent Boundary Layer in Condensation
Heat Transfer with non-condensable gas

II. Objectives and Importance

Direct contact condensation is fundamentally important in LWR safety analysis and other industrial applications. Especially, during a postulated LOCA(Loss Of Coolant Accidents), cold ECCW(Emergency Core Cooling Water) would be injected to cool down the reactor core. When the subcooled water is injected into the horizontal pipe filled with steam, the steam flows over the water in the opposite direction and steam condensation occurs in a stratified flow. The local condensation rate and the relative motion of steam and water are important in the determination of core uncover. Furthermore the local condensation heat transfer coefficients are the key parameter of water hammer. (S.J. Kim 1996) Especially, for the case of thin water layer flow, Segev et al(1981) evaluated the interfacial condensation heat transfer coefficient from an increases in the bulk temperature of water flow. They

measured the temperature of the water-side wall surface which were used as a bulk temperature of water flow. And this seems to be reasonable in cases there were not great differences between the bulk temperatures of water flow and the wall surface temperatures for the water flow. However, in order to get the accurate local condensation heat transfer coefficients, it is necessary to measure the temperature profile without any flow disturbance in getting the local heat transfer coefficient.

III. Scope and Contents

3.1 Local heat transfer coefficient

To evaluate the mean temperature and velocity at each vertical position from the bottom to the surface of water layer, the temperature and velocity profiles in the cross-sectionally horizontal direction are assumed as follows:

- (a) The temperature profile is uniform in the cross-sectionally horizontal direction.
- (b) The velocity profile follows the law of the wall in the cross-sectionally horizontal direction.

From the energy balance equation the heat transfer coefficient is defined as follows:

$$h_z = \frac{C_{pL} \cdot W_L(z)}{b[T_G - T_L(z)]} \cdot \frac{dT_L(z)}{dz} . \quad (1)$$

Universal velocity profiles from the law of the wall are as follows:

In order to evaluate the applicability of the IR thermal camera to calculate the heat transfer coefficient, the temperatures measured by thermocouples and the IR thermal camera are compared.

©The first step is the comparison of temperature from the thermocouples and the IR thermal camera one.

©The second one is to compare the center temperatures directly measured by the traversing thermocouple in the water layer with wall one measured by thermocouples installed in the wall.

©The third one is to compare the temperature profile measured by the thermocouple traversing in the water layer with the one measured by IR thermal camera in the same width direction of the wall side of the test section.

Finally, we apply this measurement method to get the bulk temperature profile using the velocity information from the law of the wall. The calculated heat transfer coefficient(HTC) is compared to one produced from the same experimental conditions performed by Choi(1998).

3.2 Visualization of temperature field

Heat transfer phenomena are explained with parameters related to visualization of the temperature field such as temperature difference between the mean temperature and the interface water layer temperature, the clearness of the isothermal boundary line in the thermal picture and the temperature profile gradient such as following flow conditions.

		Co-Current Flow	Counter-Current Flow
Inclination of Test Section (0.45 °, 2 °, 5 °)		Heat Transfer Coefficient Calculation	
Inlet Water Temperature (45°C, 60°C, 70°C)		●	●
Flow rates	water (GPM) (2~6)	●	●
	Steam(kg/hr) (1~70)		
Non-condensable Gas (2~58) %			●

IV. Experimental Results

The inframetrix Model 760 Infrared Thermal Imaging Radiometer is used for the measurement of the temperature profile and the temperature field of the water flow according to the flow conditions at the experimental works. The main findings are as follows:

(a) The temperature difference measured by between the thermocouples and the infrared thermal camera is less than $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ for the same height. So we assume that the temperature profiles are uniform along with width direction of the water layer.

(b) The temperatures measured by infrared thermal camera are calibrated by the thermocouples and the temperature profiles measured by the thermocouples shows almost the same with those measured by the infrared thermal camera. And then the local heat transfer coefficient is calculated by using the bulk temperature profile measured by the infrared thermal camera.

(c) The temperature field patterns especially temperature gradient in the water layer according to the flow conditions such as the flow directions (countercurrent or cocurrent), the inclination degree and the inlet water temperature can be used to understand the interfacial condensation heat transfer characteristics.

In all cases it is found that the temperature profiles become uniform, which means that the wide mixture isothermal layer nearby interface is shown as the inlet water temperature increases. When the ratio of noncondensable gas is increased, the temperature of interface water layer becomes much less than the saturated temperature even though wave amplitude increases. The inclination degree has an important role in increasing wave amplitudes which increase the surface renewal rates.

V. Plans for the application of research results

(1) By using the advantage of being noninvasive, thus allowing measurements without interfering with the phenomenon under investigation and also mapping continuously the entire temperature region of interest, this method can be used for CHF(Critical Heat Flux) experiments looking for hot spot on the heated surface of pipe or plate.

(2) It is expected that the original data bases can be obtained by doing additional experiments with the changes of the flow conditions and those can be used to improve the understanding of overall flow characteristics such as layer structure and concentration effects of noncondensable gas .

(3) The data obtained by using this measurement method will be key to analyze the heat transfer phenomena for the interface of two phase flow with different conditions.

As a result, it will be helpful to contribute to the development of the domestic fundamental research on thermo hydraulics.

(4) The developed measurement method of temperature profiles in the thin water flow will contribute to increase the accuracy and skills of measurement of temperature profiles.

여 백

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Objectives of the present study	2
Chapter 2. Review of the previous work	3
2.1 Experiments using the infrared thermal camera	3
Chapter 3. Experimental work	5
3.1 Experimental apparatus	5
3.2 Measuring parameters and associated instruments	8
3.3 Test matrix	13
3.4 Experimental procedure	18
3.5 Simplified model for wall condensation	19
Chapter 4. Results and discussion	33
4.1 Local heat transfer coefficient	33
4.2 Temperature field visualization	35
4.3 Visualization of temperature field on the wavy region	41
Chapter 5. Conclusion and recommendation for the applications	57
5.1 Conclusion	57
5.2 Recommendation for the applications	59
Chapter 6. Reference	61
Appendix-A Manual for user of IR camera	67
Appendix-B Principle of infrared Camera and temperature measurement	105

여 백

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경	1
제 2 절. 연구개발의 목적	2
제 2장 국내외 기술개발 현황	3
제 1 절 적외선 카메라를 이용한 연구사례 조사	3
제 3장 응축 열전달 실험	5
제 1절 실험장치	5
제 2절 측정인자와 계측기기 및 사양	8
제 3절 실험범위와 Test Matrix	13
제 4절 실험 수행 절차	18
제 5절 벽면근처의 열전달율의 simplified model	19
제 4장 연구개발수행 내용 및 결과	33
제 1절 실험결과	33
제 2절 유동조건에 따른 온도 분포 비교	35
제 3절 집경면 부근의 온도장 분포를 통한 wave의 관찰	41
제 5장 연구개발 결과 및 활용계획	57
제 1절 결론	57
제 2절 연구개발결과의 활용계획	59
제 6장 참고문헌	61
부 록-A 적외선카메라 사용 매뉴얼	67
부 록-B 적외선 카메라 측정원리와 특성	105

표 목차

표 3.1 Test Matrix	13
표 3.2 계면응축 열전달 실험의 범위	14
표 3.3. Zinc Selenide window 사양	14
표 3.4 측정변수들과 사양 정리표(a)	15
표 3.4 측정변수들과 사양 정리표(b)	16
표 4.1 Test matrix for Flow Visualization	35

그림 목차

그림 2.1 실험장치의 개략도	25
그림 2.2 적외선 카메라를 이용한 바닥온도 분포 사진	26
그림 3.1 Experimental facility	27
그림 3.2 Temperature measurement system	28
그림 3.3 Test Section 과 적외선 카메라 설치 사진	29
그림 3.4 Temperature measurement system	30
그림 3.5 Test Section 과 열전대 설치 사진	31
그림 3.6 적외선 온도측정 시스템	32
그림 4.1 Temperature profile calibration	44
그림 4.2 Calculation of heat transfer coefficient	45
그림 4.3 Explanation of infrared picture	46
그림 4.4 Temperature profile of horizontal cocurrent flow(1)	47
그림 4.4 Temperature profile of horizontal cocurrent flow(2)	48
그림 4.5 Temperature profile of horizontal countercurrent flow	49
그림 4.6 Temperature profile of countercurrent flow with noncondensable gas	50
그림 4.7 적외선 카메라 온도 분석기능(1)	51
그림 4.7 적외선 카메라 온도 분석기능(2)	52
그림 4.7 적외선 카메라 온도 분석기능(3)	53
그림 4.8 0.5 °inclined cocurrent flow case with $Q_w=6$ GPM, $Q_s=63$ kg/hr	54
그림 4.9 Horizontal countercurrent flow with $Q_w=6$ GPM, $Q_s=61$ kg/hr, $T_{in}=70^\circ\text{C}$ [1]	55
그림 4.9 Horizontal countercurrent flow with $Q_w=6$ GPM, $Q_s=61$ kg/hr, $T_{in}=70^\circ\text{C}$ [2]	56
그림 1.1 스캐너 내부 구조	95
그림 1.2 콘트롤 패널의 개략도	95
그림 1.3 VTR의 사용	96
그림 1.4 BNC Connectors	96
그림 1.5 데이터 획득(Aquisition) 및 Playback 분석	97

그림 1.6 DC 작동	98
그림 1.7 System Parameter	99
그림 1.8 Measurement Configuration Setup	99
그림 1.9 Processing Parameters Setup	100
그림 1.10 Display Options Setup	100
그림 1.11 저장된 이미지 display	101
그림 1.12 Soft-set 키들	101
그림 1.13 이미지 모드 초기 화면	102
그림 1.14 Point 모드	102
그림 2.1 여로온도에서 파장에 따른 분광복사 휘도	124
그림 2.2 흑체와 보통 복사체의 파장에 따른 분광복사 휘도	125
그림 2.3 이상적인 흑체와 실용적인 흑체의 공동모양	126
그림 2.4 가시형광 고온계의 구조	126
그림 2.5 전복사온도계의 구조	127
그림 2.6 써어미스터를 검출기로 한 볼로미터의 온도측 정회로	127
그림 2.7 열전퇴의 구조 및 모양	128

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

이상유동 경계면에서의 국내외의 기술개발은 이론적인 해석과 시험적인 연구가 병행되어 왔다. 그러나 이론적인 해석은 복잡한 경계면의 조건으로 인해 한계가 있으며, 해석에 사용되는 여러 보조 방정식들은 실험에 의해 제공된다. 그러나 산업계에 적용하기 위한 실용성으로 인해 대부분의 실험들은 거시적 현상에 중점이 두어졌으며, 경계면의 전달현상을 결정하는 메카니즘에 대한 연구는 상대적으로 간과되었다. 거시적 현상에 중점을 둔 실험결과들은 실험이 수행된 범위 내에서만 신뢰성이 높으며, 그 범위를 벗어나면 신뢰성이 급격히 감소한다. 그러므로 기초적인 미시적 현상에 관한 연구가 수행되어 경계면에서의 전달현상 메카니즘을 이해, 규명할 필요성이 있다. 이러한 필요성 중에 실제 원자로의 사고해석시 필요로 하는 실험으로 직접접촉응축 열전달은 경수로의 안정성평가나 다른 산업적 응용에 있어서 기본적으로 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 가상적 냉각재 상실 사고 동안, 비상냉각수가 원자로심을 냉각시키기 위해 주입된다.

이러한 과냉수가 스팀으로 가득 차 있는 수평파이프 관을 흐를 때 역방향으로 물과 수증기가 흐르게 되고 스팀의 응축과 함께 성층유동을 형성하게 된다. 국부 응축율과 스팀과 과냉각수간의 상호 움직임은 노심노출의 중요한 판단기준이 된다. 또한 국부 응축열전달계수는 수격현상의 (water-hammer)의 중요한 변수이기도 하다. 그 중에서도 얇은 액막 유동의 경우 Segev et al(1981)는 액막 유동의 용적온도의 증가율을 가지고 응축열전달계수를 계산하였다. 용적온도(bulk temperature)의 증가는 흐르는

유동의 바닥온도를 측정함으로써 구하였다. 그리고 이것은 얇은 액막 유동의 경우 유동의 바닥면의 전단응력이 아주 중요한 액체의 혼합효과를 내는 경우 바닥온도와 용적평균온도(average bulk temperature)는 큰 차이가 없을 거라는 가정을 근거로 한 것이다.

그러나 좀더 정확한 국부 열전달계수를 구하기 위해서는 흐르는 유동에 영향을 주지 않고 온도장을 구함으로써 보다 정확한 열전달계수를 구하는 방법이 필수적이라 할 수 있겠다.

제 2 절. 연구개발의 목적

대부분의 이상 성층유동의 직접접촉 응축율을 계산하는데 있어서 온도장을 구하기 위해 열전대를 사용하였다. 그러나 얇은 액막 유동의 경우 열전대 자체의 유동장 방해로 인한 정확한 온도 측정의 어려움과 실시간의 관찰과 정보를 얻을 수 없는 한계성을 극복하기 위해 열적외선 비디오카메라를 이용한 비접촉식 온도측정 방법을 적용해 보았다.

따라서 본 연구의 목표는 다음과 같다.

- (1) 얇은 액막 유동의 용적온도분포(bulk temperature profile)를 열적외선 카메라를 이용하여 구한다.
- (2) 국부 열전달계수를 구한다.
- (3) 성층유동 직접접촉 응축 열전달을 보다 잘 이해하기 위해 유동조건에 따른 온도장을 비교하여 열전달 특성을 분석, 이해한다.

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 적외선 카메라를 이용한 연구사례 조사

1. 외국의 경우

최근에 열전달 연구에 있어서 이 기술을 이용된 예로서 공기역학적 heating 의 조사나 경계층유동의 과도 현상에 대한 계측등에 사용되었다. 본 장에서는 매끄러운 평판위로 흐르는 유동에 대해 대류현상을 관찰하는데 열적외선 장비를 사용한 경우에 대해 살펴보겠다.

사각 요철이 설치된 평판 위에서의 대류 열전달 분포를 적외선 카메라를 사용한 연구가 A.H.W. Lee(1993)에 의해 수행되었다. 일정한 열유속 평면을 가진 두 개의 ribbed 평판에 대한 열전달 측정이 적외선 카메라를 사용하여 D. A. ALIAGA. 1993)에 의해 연구되었다.

가열 평판위의 구형 요철이 설치된 경우 열전달 효과를 알아보기 위해 (G. HESTRONI. 1995)가 적외선 카메라를 이용하여 실험하였다.

위의 여러 가지 연구에 사용된 적외선 카메라의 이용목적은 측정대상에 간섭을 주지 않고 실시간으로 측정대상의 원하는 영역을 측정할 수 있다는 이점을 이용한 측정방법이라 할 수 있겠다.

열적외선 카메라를 이용한 기존의 연구 결과 중 본 연구에서 사용된 inframatics 760 기종을 사용한 G. HESTRONI의 실험결과들 중에서 대표적인 실험 사용 예를 살펴봄으로서 본 측정장비의 사용용도에 대해 살펴보겠다.

사각 유로에서 바닥면으로부터 흐르는 물유동으로의 열전달을 연구하는데 사용되었다. 특히 이때의 바닥면의 온도를 측정하기 위해 적외선 카메라를

이용하였다. 적외선에너지의 변화량을 측정하기 위해 관찰하고자 하는 바닥에 국부에 일정한 열유속이 나올수 있도록 히터를 설치하였고 이 가열된 바닥면 위로 흐르는 액막 난류 유동에 의해 바닥의 온도 분포 변화를 관찰할수 있는 원리를 이용하여 바닥 표면의 거칠기를 증가 시킬수 있는 요철을 설치하여 있는 경우와 없는 경우의 바닥의 온도장의 변화를 관찰하는데 사용되었다.

실험장비의 구조에 대해 좀더 살펴보면 유동의 단면적의 모습은 그림 통해 설명될 수 있고 그림 2.1은 바닥면을 일정하게 가열하는 히터의 구조를 보여주고 있다. 다음은 적외선 카메라를 이용하여 얻은 실험결과를 살펴보면 그림 2.2는 물의 레이놀즈 수의 변화에 따른 바닥 벽면 근처의 온도장의 변화를 보여주고 있다. 그림2.2(b)는 바닥면에 요철이 설치된 경우 난류를 유발함에 따라 바닥면 근처의 온도장의 변화를 보여줌으로 그 영향을 보여 주고 있다.

2. 국내의 경우

적외선 카메라를 이용한 계면 이상유동의 미시적 구조에 관한 국내연구는 찾아보기 힘들다.

제 3장 응축 열전달 실험

제 1절 실험장치

간략한 전체 모사시험관 loop의 구성 목표는 증기 발생기로부터 생성된 순수 증기 또는 불응축성기체를 혼합한 증기와 물이 수평 또는 경사진 사각관에 동방향 또는 역방향의 성층유동의 형태로 흐를 때 액막 내부의 온도 분포를 측정하고 국부 평균 온도를 구하여 열전달계수를 도출한다. 또한 액막 내부의 온도분포를 측정하여 자유표면의 파(wave)로 인한 열전달의 특성을 이해하기 위한 실험장치이다.

그림 3.1은 계면응축 열전달 실험을 하기 위해 제작된 실험장치의 개략도이다. 본 실험장치 loop의 주요 구성요소는 수증기/공기 주입장치 및 순환장치와 test section 그리고 각종 계측장치를 포함한 계측계통으로 나뉘어져 있다.

스팀의 최대 파워가 100 kw인 증기발생기로부터 생성된 스팀이 불응축성 기체(공기)를 함유한 스팀 실험 시 사용될 mixer를 통과하여 테스트 section으로 공급된다. 이때 스팀의 온도는 증기 발생기의 설정치에 의해 결정된다. 순수 증기와 물과의 이상유동 실험에서는 초기 생성 steam 온도를 130℃로 유지하여 test section의 입구에 도착했을 때 steam의 열 손실을 보상해 줄 수 있도록 하였다. 그리고 steam flow가 test section에 도착하기 전에 습분 분리기를 통과하도록 하여 순수 steam의 건전성을 유지하도록 하였다. 그렇게 함으로써 test section의 입구에서 순수 증기의 온도가 포화온도 100℃을 유지하도록 하였다.

다음은 불응축 기체를 함유한 수증기와 물의 성층유동의 실험에서는

특별히 설계된 수증기-공기 혼합기가 증기 발생기와 습분 분리기 사이에 설치되어 있다. 공기는 건물의 지하에 설치된 중앙공급 장치에 의해 공급된다. 공기의 유량은 Dwyer 회사의 로타유량계로 측정된다. 스팀과 공기의 혼합되는 실험장치의 구조는 스팀이 혼합기 안쪽에 설치된 수 백여 개의 작은 직경의 공기가 흐르는 파이프를 함께 통과하도록 되어있다. 또한 혼합기가 통과한 불응축 기체를 함유한 수증기가 test section으로부터 10미터 이상 pipe line을 통과함으로써 보다 더 완벽한 혼합이 이루어지도록 하였다. 이때 공기가 수증기와 혼합되기 이전에 연속적으로 연결된 두 개의 히터에 의해 가열되도록 하여 혼합 시 수증기를 응축시키지 않도록 하였다. 공기의 온도는 혼합기의 입구에서 측정되고 수증기보다 약간 더 높은 온도까지 가열하도록 조정하였다. 또한 두 개의 스텐레스 스틸 탱크가 모사시험관의 양단에 설치되어 있으며 탱크 안쪽에 수증기 통로에는 유동 요동을 최소화하기 위한 직경이 작은 스텐레스 스틸 다발이 설치되어 있다 그리고 증기 수조 내에서 찬물과의 직접 접촉으로 인한 증기응축을 최소화하기 위해 유동안내판을 설치하였다.

다음은 물의 공급배관은 주입되는 물의 온도를 일정하게 유지하고 주입 탱크내의 수위가 일정하게 유지되어 중력헤드에 의해 유량이 교란, 변화하는 것을 최소화하도록 제작하였다. 물의 유량조절은 펌프의 rpm을 조절할 수 있는 DC motor drive (0 ~ 3750rpm)를 사용하여 원하는 일정한 물의 유량을 공급하였다. 물의 유량은 측정 범위가, 1 ~ 20 GPM 를 가진 블랙스 플로우 미터로 유량은 측정된다. 본 실험에서 주입구의 물에 온도가 일정하기 위해서는 closed loop의 경우 항온조의 설치를 통해 물이 test section에 통과함으로써 스팀이나 과냉각수간의 열교환을 통해 상승된 물의 온도를 식혀주거나 아니면 실험하기에 충분한 큰 저장조의 물을 실험조건에 맞게끔 외부 열원으로 온도를 올려서 test section을 통과한 후 배수하

는 방법이 있다. 본 실험장치에서는 첫 번째 방법을 사용하려 했으나 순환하는 속도에 비해 냉각율이 비효율적인 관계로 물의 온도를 실험조건에 맞추기 위해 폐쇄 loop에서 스팀과 물이 동시에 흐르는 실험 조건을 통해 큰 저장조의 물에 온도를 서서히 실험 조건의 온도까지 상승시킨 다음 두 번째 방법인, 일정한 온도의 저장조의 물이 test section 을 지나면 배수시키는 방법을 택했다.

테스트 섹션은 총 4개 부분으로 이루어 졌으며 3개의 플렌지로 연결되었다. 여기서 국부 평균 온도를 구하기 위해서는 속도 profile과 온도 profile의 동시 측정이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 속도분포를 구하는데 사용될 pitot tube는 액막의 두께에 비해 유동에 대한 계측장비의 간섭이 너무 크기 때문에 기존의 사각 평판의 얇은 액막 유동에서 널리 사용된 벽법칙을 사용하여 속도 분포를 구하고 T type 열전대와 열적외선 카메라를 이용하여 온도 분포를 구하였다. 강화아크릴을 사용함으로써 유동현상을 눈으로 관찰하고 수위측정 시 육안으로 관찰하기가 용이하게 하였다. 여러 가지 유동 조건에서 올 수 있는 열 충격에 견딜 수 있도록 강도 높은 유리를 사용하였다.

Test section은 강철 구조 지지대 위에 설치되었으며 경사진 경우 유동 실험을 위해 수평에서 90°까지 경사를 조절할 수 있다. 실험 도중에 경사진 각도가 회전축과 연결된 worm 기어를 사용함으로써 쉽게 각도를 조절할 수 있다. 또한 두 개의 강철 disk 가 본 실험 지지대와 지지 frame에 접착되어 실험 시 발생할 수 있는 진동에 의한 각도 변경을 막아준다. 각도의 오차범위는 $\pm 0.2^\circ$ 이고 물이 채워진 투명 튜브를 이용한 측정 각도의 편차는 0.04° 이다.

제 2절 측정인자와 계측기기 및 사양

사각관에서 직접접촉응축 열전달계수를 구하기 위한 몇몇의 변수들은 다음과 같다. 혼합 loop에 대해 혼합유동의 유량과, 온도와 압력은 국부적으로 측정되었다. Test section에서 입구 압력과 온도는 test section의 양 끝단에 부착된 물 수조의 상단 부분에서 측정된다.

1. Data Accusation System

휴렛 팩커드 3852A 기종의 DAU(Data Acquisition Unit)는 전송기의 DC 출력전압을 측정하고 T형 열전대에서 취득한 온도값을 보상해 준다. 교류-직류 전환기는 4~20 mA의 전송기 출력값을 DAU에 1~5 DCV로 변환시켜 준다. 386컴퓨터로 HP3852A DAU를 조작하고 나중에 data 처리를 위해 하드에 저장한다. PC와 H3852A DAU간의 커뮤니케이션이 HP-IB 연결 카드를 통해 이루어진다.

2. 유체 유량계

모사실험관으로 주입되는 물의 유량은 Dwyer사의 rotameter 를 사용하여 측정하였고, 20kW 증기발생기에서 생성되어 실험모사관으로 주입되는 증기의 유량은 control 밸브로 조절하고, vortex 유량계 (VAW1025-C1C1-2111)를 사용하여 계측하였는데, 0.002 ~ 0.02 kg/s의 범위를 $\pm 1.0\%$ 의 정확도로 측정할 수 있는 계측기이다. 이 계측기로는 증기의 체적유량만을 알 수 있기 때문에 증기의 질량유량을 알기 위해서는 증기유량계의 하류 쪽에 압력계와 thermocouple을 설치, 밀도를 측정하여 계산한다.

3. 온도측정 시스템

(가) 적외선 측정장비 특성

표면온도를 측정하는데 선택한 측정방법이 열적외선 카메라이다. 최근에 열적외선 카메라는 열화상 시스템은 표면온도 분포를 측정하는데 아주 뛰어난 실험도구로써 증명되어 왔다. 이 측정장비는 비접촉 측정방법에 장점을 가지고 있으므로 온도를 측정하는 중에 측정대상의 간섭을 주지 않고 측정할 수 있다. 또한 이 장비는 관심 있는 지역에 지속적으로 계측할 수 있다. 따라서 그 결과는 비디오 스크린에 보여질 수 있고 실시간으로 실험결과를 얻을 수 있다. 열화상 측정장비 기술은 전통적인 방법의 열전대 만큼의 정확도를 가지고 있는 것으로 알려진다. 온도의 측정원리는 측정 대상체 표면에서 발생되는 8-12 μm 파장대의 적외선에 너지가 계측기에 감지됨으로써 측정된다. 대상체나 혹은 주변의 실내온도에 대해 spectra energy distribution이 10 μm 파장대의 적외선이 가장 많은 분포를 차지한다. 매우 높은 정확도와 비접촉 온도측정을 위해서는 충분한 양의 복사 에너지가 이 측정장비의 보정에 가능하다. 열화상 측정장비는 하나 또는 몇개의 개별적인 장비의 시그날이 대상면적을 기계적으로 스캐닝 함으로써 작동된다. 이러한 계측기들은 극저온의 온도까지 냉각되어져야 된다. 열화상복사계는 대상체 표면으로부터 복사되는 온도 패턴의 이미지를 보여주는 것 뿐 만이 아니라 여러 가지 형태로 분석 가능한 온도정보를 제공한다. 그리고 이 장비는 다른 열온도 측정장비(liquid crystals)들 보다 훨씬 빠른 응답시간(microsecond vs millisecond)을 가지고 있다. 이 장비는 스캐너와 control/electronics 장비로 이루어졌다. 본 연구에 열적외선 측정장비 모델인 760 스캐너는 수평과 수직 스

캐닝을 수행할 수 있도록 설계되었다. 수평 스캐닝은 4KHz의 resonant 모드의 주기율로 측정된다. 수직 스캐닝은 표준 TV형태를 가진 톱니 형태의 범위로 측정된다. control/electronics 장비는 영상이나 비디오 모니터 처리를 위해 색깔 또는 흑백영상을 위한 적외선 신호를 process, digitize, reformat하는 기능을 가지고 있다. Inframetrics 760 온도측정 영역은 -20 to 1500°C이고 최소 측정 온도편차는 대상체가 30°C일 때 0.1°C이다. 보정을 통해서(G.hetstroni 1993) 열화상복사계는 미소한 Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) 을 보이면서 작은 온도편차 영역에서 매우 높은 온도 정확도를 보여주었다. 열적 분해능은 두개의 변수에(NETD or MDTD.) 의해 판별된다. 여기서 NETD는 한 개의 측정 신호가 시스템의 노이즈에 해당되는 값은 변화를 의미한다. Inframetrics 760 열적외선 비디오 카메라는 대상체의 온도가 30° 일 때 0.2°C미만이라도 설계되었다. 이 열화상 장비의 최소 측정 편차는 표면온도가 30°C는 0.1°C이다. 그리고 수평 해상도는 256 pixels/line. 이다.

위에서 언급한 성능에 대한 특성은, 흑체의 경우에 대한 열생성 표면에 대한 가정이다. 대부분의 경우 (특히 표면의 재질이 금속인 경우) 에 복사율은 1 이하이다. 따라서 우리가 정확한 복사율을 알 수 없는 재질의 온도를 측정할 때 기존의 보편적인 온도측정 방법인, 두께가 1mm.이고 반응시간이 0.5 sec인 열전대를 이용하여 얻은 온도에 맞추어 보정을 함으로써 최소의 불확실도를 갖도록 한다. 열적외선 카메라를 이용한(e. g. Gauffre 1988; Giovanni 1993) 유동장의 온도분포 영상화와 대류 열전달계수를 구하는 최근의 연구에 있어서 몇몇의 좋은 결과를 얻었다. 이런 짧은 측정시간과 정확도의 특성을 이용해 본 연구에 적용하게 되었다.

(나) 적외선 카메라 systems

본 적외선 카메라 "inframetrics 760" 의 특성은 측정하고자 하는 유동장에 영향을 주지 않고 실시간으로 측정할 수 있으며 보조장비의 사용으로 비디오로 열화상을 저장하고 필요한 부분에 대해 다시 온도장을 분석할 수 있는 장점이 있다. 실험시 전체적인 system은 적외선투과용 특수 유리를 통해 나오는 적외선을 적외선비디오 카메라로 촬영을 하고 이때 분석을 요하는 장면을 적외선 비디오 카메라 콘트롤 박스를 통해 모니터링 및 분석을 할 수 있다. 그리고 원하는 화면을 디스켓에 저장하고 실험이 끝난 후에 온도분석 프로그램으로 온도장에 대한 온도정보를 얻을 수 있다. 한가지 아쉬운 점은 본 장비를 대여한 관계로 적외선 비디오 카메라로 촬영한 전 열화상 화면을 온도분석 program으로 분석할 수 없고 필요한 화면을 디스켓으로 저장해서 분석할 수 밖에 없었던 점이다. 이와 같은 순서는 온도장을 얻기 위한 과정이고 또 다른 실험목적인 유동조건에 따른 유동의 특성을 분석하기 위해서는 열화상 정보를 일반 비디오로 저장함으로써 실험 후 다시 유동조건에 따른 열화상의 특성에 대해 분석하고 필요한 비디오 화면은 computer program을 이용해 캡처할 수 있다. 앞의 설명내용은 그림 3.2에 보이는 바와 같다.

(다) 물 유동층의 국부 온도 측정

본 실험은 얇은 액막 유동의 경우 적외선카메라를 이용한 온도분포와 이때 측정된 온도의 정확성을 보정하기 위해 그림 3.2에서 보이는 것처럼 열전대를 사용 하였다. 적외선 카메라는 사각관 옆면의 안쪽벽면의 온도를 측정한 것이고 여기서 얻은 온도가 정확한지를 판단하기 위해서 같은 위치의 맞은편 벽면에 열전대를 설치해 온도를 비교한다.

그리고 이때 한지점이 아닌 액막 표면부터 바닥까지의 온도분포를 검증해야 하므로 기존의 측정방법인 열전대를 유동의 중앙에서 액막 표면으로부터 바닥까지 서서히 움직이면서 온도분포를 구하고 이 얻은 정보를 적외선 카메라를 이용해 구한 정보와 비교하여 최종적으로 측정방법에 대한 검증을 한다. 전체 온도측정 방법의 순서를 간략하게 다시 정리하면

- ①. 적외선카메라를 이용하여 얇은 액막 유동의 옆 벽면에서의 온도분포를 측정한다.
- ②. ①측정방법을 검증하기 위해 같은 위치의 맞은편 벽면에서 열전대를 수직으로 설치하여 온도를 측정한다.
- ③. ①에서 측정한 방법이 유동의 횡방향에서 온도가 일정한지를 검증하기 위해 유동의 중앙에 측정한다.

온도분포와 온도장 visualization을 위해 두 개의 적외선 투과용 특수유리가 모사시험관 안에서 유동장에 영향을 주지 않도록 안쪽 벽면에 평행하게 설치되었다.

첫 번째 적외선 유리는 모사시험관 입구로부터 72cm 떨어져 있고 이 유리는 접경면 부근의 온도 분포를 보다 자세히 관찰하기 위해서 사각모사관의 옆면의 바닥에서 5mm 정도 떠있는 중앙부근에 직경이 2.4mm인 적외선유리를 설치하였다. 두 번째 적외선 유리는 입구에서 122cm 떨어져 있고 바닥에서부터의 온도분포를 관찰하기 위해서 원형모양의 적외선유리를 바닥에 평행하게 변형시켰다. 적외선 카메라를 이용해 얻은 온도 정보를 보정하기 위해서는 기존의 온도측정 방법인 열전대를 이용하여 국부 온도 분포와 물 수위를 측정하기 위한 보조 수단으로 사용했다. 직경이 1mm 인 T 형 열전대를 바닥으로부터 수직 방향으로 0.4mm 간격으로 열적외선 유리가 설치된 마주보는 벽면에 13개를 설치하였다. 설치된 열전대와 적외선 유리의 개략도는 그림3.2와 같다.

제 3절 실험범위와 Test Matrix

실험 영역을 나타내는 표 3.2와 같이 계면응축 열전달 실험은 모두 대기압 상태 ($\sim 0.1\text{MPa}$)에서 수행되었고, 특히 물의 혼합평균 온도는 열적외선 비디오 카메라와 thermocouple을 이용하여 배관의 밑바닥에서 증기와 물의 계면까지 수직 이동하면서 물 유동내의 국부온도 측정하였고, 평판 액막 유동에 널리 사용되는 Law of Wall 을 이용하여 속도 분포를 구하였다. 수행한 실험범위으로써는 국부 열전달계수 실험과 ●표시된 부분은 유동특성에 따른 온도분포 비교와 분석 실험이다. 전체 실험 matrix는 아래 표3.1과 같다.

3.1 Test Matrix

		Co-Current Flow	Counter-Current Flow
Inclination of Test Section (0.45 °, 2 °, 5 °)		Heat Transfer Coefficient Calculation	
Inlet Water Temperature (45°C, 60°C, 70°C)		●	●
Flow rates	water (GPM) (2~6)	●	●
	Steam(kg/hr) (1~70)		
Non-condensable Gas (2~58) %			●

표 3.2 계면응축 열전달 실험의 범위

실험 인자		범 위	비 고
모사실험관	전체 길이	1.83m	
	관의 단면적	가로: 0.040m 세로: 0.120m	
물의 주입온도 (°C)		45, 60 , 72	열전달계수 실험: 62°C
물의 유량 (kg/s)		0.17 ~ 0.38	
증기의 유량(kg/s)		0.002 ~ 0.02	불응축성 기체 함유시 : 1~57 %

표 3.3. Zinc Selenide window 사양

Specifications	
Size tolerance	+0 mm- 0.25mm
Edge finish	Ground and beveled
Clear aperature diameter	80% of central diameter
Material	Optical quality ZnSn
Refractive index	2.40@10.6 μ m
Transmission range	550nm -16 μ m
Hardness(Knoop)	120kg/mm ²
Young's modulus	6.7 × 10 ¹⁰ N/m ²
Thermal conductivity	18W/mK
Thermal expansion coefficient	7.3 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Surface quality	20-10
Flatness	1/40 λ @10.6 μ m
Parallelism	≤30" (0.15 mrad)
Coatings	Uncoated. For coatings

표 3.4 측정변수들과 사양 정리표(a)

	measuring parameters	I.D.	Specification	Remarks (Range)
Loop for mixture	Q_{air}	Q01	Dwyer Rotameter	(100-2400SCFH)
	Q_{mix}	Q02	Vortex flowmeter (Oval,VAW1025)	steam(or mixture) (0-721 kg/hr)
	T_{air}	T01	K-type T/C	inlet of a mixer
	T_{steam}	T02	K-type T/C	S/G
	T_{vor}	T03	RTD	at vortex flowmeter
	$T_{mix, i, o}$	T04-T05	K-type T/C	inlet and outlet of T/S
	P_{air}	P01	Pressure transmitter (Omega,PX425-100GV)	outlet of a rotameter (0-100 Psig)
	P_{vor}	P02	Pressure transmitter (Kornics, PT-3200)	at vortex flowmeter (0-10 bar)
	$P_{mix, i, o}$	P03 - P04	Pressure transmitter (Omega,PX425-100GV)	inlet and outlet of T/S (0-100 Psig)

표 3.4 측정변수들과 사양 정리표(b)

	measuring parameters	I.D.	Specification	Remarks (Range)
Loop for water	Q_{wat}	Q03	Vortex flowmeter (Omega,FV-505L)	water flow rate (0-25 GPM)
	$T_{wat, i, o}$	T06-T07	K-type T/C	inlet and outlet of T/S
Test section	R_t	T 08 - T 13	T-type T/C (Omega,)	Center Temp diameter: 1mm
	R_{bt}	T14 - T18	T-type T/C (Omega,)	Center Temp diameter: 1mm
	T_{bt}	T19 - T28	T-type T/C (Omega,)	side wall temp diameter: 1mm
	T_{sw}	T29 - T41	T-type T/C (Omega,)	side wall temp diameter: 1mm

제 4절 실험 수행 절차

본 연구의 실험은 다음과 같은 절차에 의해 수행되었다.

- ① 실험을 수행할 유동조건을 결정한다. (각도, 유동의 방향, 물 유량의 온도, 불응축성 기체의 비율)
- ② 모든 계측장비를 충분히 warming up(20분 정도) 시킨다.
- ③ 물을 공급하는 수조 속에 보조히터 또는 증기발생기의 증기를 이용하여 주입되는 물을 원하는 온도로 맞춘다.
- ④ 물의 유량을 맞춘다.
- ⑤ 전자 버니아 켈리퍼스가 달린 열전대로 물 유동 수위를 포화온도와 육안으로 비교 검증하여 측정한다.
- ⑥ 스팀의 유량을 맞춘다.
- ⑦ 열적외선 비디오 카메라의 앵글을 맞추어 최상의 화면이 나오도록 한다.
- ⑧ 열화상에서의 물의 높이를 알기위해 바닥에서부터 물의 수면까지의 칸수를 계산한다.
- ⑨ 열적외선으로 측정된 온도와 T형 열전대 온도를 비교한다.
- ⑩ 원하는 열화상 이미지를 저장하고 그때의 온도분포를 열전대로 측정한다.
- ⑪ 다음 실험 단계로 맞추고 ②~⑩을 다시 반복한다.

제 5절 벽면근처의 열전달율의 simplified model

국부 열전달계수는 액막 유동의 온도나 유동의 속도 등과 같은 다른 측정 변수뿐만 아니라 물 유동의 온도 상승율을 이용함으로써 에너지 보존방정식을 이용하여 계산 할 수가 있다.

Karapantsios and Karabelas(1995)는 응축율을 계산하기 위해 "wave model"을 개발하였다. 이때 흐르는 과냉 응축수를 두 영역으로 나누었는데 하나는 접경면 부근의 파동영역(wave region)으로 파동의 효과로 온도 분포가 일정한 영역과 바닥부근의 영역으로 일명 기질영역(substrate region)으로 열전달의 저항이 존재하는 영역이다. 그들은 "wave model"로부터의 유추 가능한 "uniform model"과 매우 흡사하다는 것을 발견하였다. 이러한 이유는 기질영역에서의 유동율이 전체 유동율중에서 매우 적은 부분을 차지한다는 사실 때문이다. 따라서 벽 부근 영역에서의 보다 단순한 열전달 모델이 제시되었다. Bursting 현상을 고려해 볼 때 평균 액막의 두께가 1~3 mm 정도의(1998 . choi)얇은 막의 유동에 대해서는 온도분포가 일정할 것이다,는 가정을 통해서 유동의 바닥 온도가 액체의 평균 국부온도로 사용된다는 이론이다.

1. 국부 열전달계수 측정

본 연구에서는 배관의 한 임의의 지점 (z)에서 매우 작은 거리 (dz) 간에 일어나는 열전달 현상에서 에너지 평형을 고려하였고, 증기로부터 물 유동으로의 열전달에 의한 물 유동내의 온도 증가량 (또는 엔탈피 증가량) 으로부터 증기의 응축된 양과 이에 따른 계면응축 열전달계수를 계산할 수 있는 관계식을 이끌어 내었다. 이때 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- ① 실험모사관내에서 증기는 포화상태에 있고, 증기의 물성치는 일정하다. 따라서 실험모사관을 따라 증기의 열적 물성치는 일정하다.
- ② 증기의 압력은 실험모사관내 모든 곳에서 거의 1기압으로 일정하다.
- ③ 증기 유동측의 벽면으로부터 물 유동측 벽면으로의 전도에 의한 열전달량은 무시한다.
- ④ 물 유동측의 벽면으로부터 대기로 방출되는 대류 열전달은 무시한다.

국부 열전달계수는 그림 3.3에서 보는 것처럼 거시적 에너지 보존 관계식으로부터 얻어질 수 있다. 만약 기체온도가 일정하다고 가정하고 거시적 에너지 평형차이는 다음과 같다.

$$dq = h_z b [T_G - T_L(z)] dz = d[W_L(z) \cdot i_L(z)] = -i_{fg} d[W_G(z)]. \quad (3.1)$$

여기서 액체의 엔탈피는 다음과 같이 정의된다.

$$i_L(z) = C_{pL} \cdot T_L(z), \quad (3.2)$$

그리고 Eq(3.1)을 다시 정리하면

$$h_z b [T_G(z) - T_L(z)] dz = C_{pL} \cdot W_L(z) dT_L(z) + C_{pL} \cdot T_L(z) \cdot dW_L(z) \quad (3.3)$$

식(3.1)을 $z=0$ 에서 임의의 z 까지 적분하면

$$C_{pL} \cdot \int_{W_L(o) \cdot T_L(o)}^{W_L(z) \cdot T_L(z)} d[W_L(z) \cdot T_L(z)] = -i_{fg} \cdot \int_{W_G(o)}^{W_G(z)} d[W_G(z)] \quad (3.4)$$

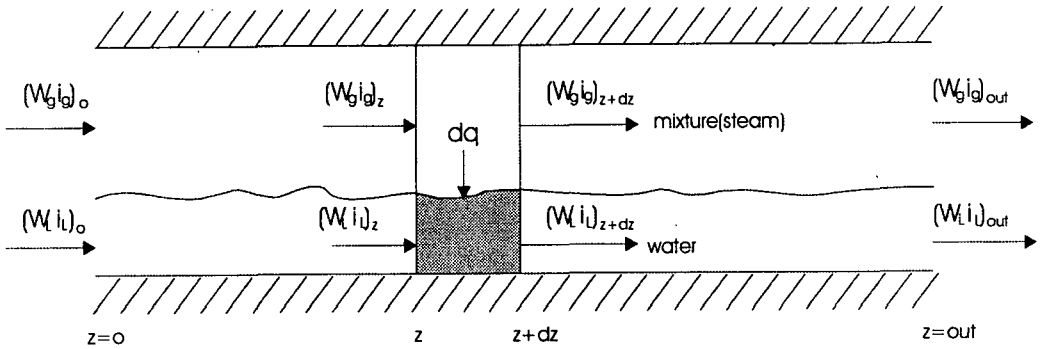


그림 3.3 Energy balance

그리고

$$C_{pL} \cdot W_L(z) \cdot T_L(z) - C_{pL} \cdot W_L(o) \cdot T_L(o) = i_{fg} [W_G(o) - W_G(z)] \quad (3.5)$$

$W_G(z)$ 와 $W_L(z)$ 의 관계는 질량보존법칙에 의해 응축에 의한 증기의 질량유량 감소율은 물의 질량유량 증가율과 같으므로 다음과 같다.

$$dW_L(z) = -dW_G(z) \quad (3.6)$$

Eq.(3.6) from $z=0$ to z 로 적분함으로써, 다음과 같은 관계식이 유도된다.

$$W_L(z) - W_L(o) = W_G(o) - W_G(z) \quad (3.7)$$

식.(3.7) 을 Eq.(3.5)에 대입하면

$$W_L(z) \cdot [C_{pL} \cdot T_L(z) - i_{fg}] = W_L(o) \cdot [C_{pL} T_L(o) - i_{fg}]. \quad (3.8)$$

Arrangement of Eq. (3.8) gives

$$W_L(z) = \frac{W_L(o) \cdot (C_{pL} \cdot T_L(o) - i_{fg})}{C_{pL} \cdot T_L(z) - i_{fg}} \quad (3.9)$$

또는

$$T_L(z) = \frac{1}{C_{pL}} \left[\frac{W_L(o) \cdot (C_{pL} \cdot T_L(o) - i_{fg})}{W_L(z)} + i_G \right]. \quad (3.10)$$

z에 대해서 식.(3.9)를 미분하면

$$\frac{dW_L(z)}{dz} = -\frac{dW_G(z)}{dz} = \frac{-C_{pL} \cdot W_L(z)}{C_{pL} \cdot T_L(z) - i_{fg}} \cdot \frac{dT_L(z)}{dz} \quad (3.11)$$

국부 열전달계수, h_z 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$h_z = -\frac{i_{fg}}{b[T_G - T_L(z)]} \cdot \frac{dW_G}{dz}. \quad (3.12)$$

식.(3.12) 식.(3.11)을 사용함으로써 다음과 같이 쓸 수 있다

$$h_z = \frac{C_{pL} \cdot W_L(z)}{b[T_G - T_L(z)]} \cdot \frac{dT_L(z)}{dz}. \quad (3.13)$$

$W_L(z)$ 는 또한 $T_L(z)$ 의 함수이고, 따라서 국부 열전달계수는 오직 $T_L(z)$ 로 얻어질 수 있다. 국부 열전달계수는 에너지 보존관계식에 의해 얻어질 수 있고 식(3.13)은 국부 온도 기울기와 물의 온도와 유동량에 의해 구해질 수 있다. 바닥으로부터 유동방향에 수직한 국부위치의 평균온도

와 속도를 계산하기 위해서는 횡 방향에 대한 속도와 온도 분포에 대해 다음과 같은 가정을 할 수 있다.

- (a) 유동단면 방향에 같은 높이의 온도분포는 일정하다.
- (b) 유동단면 방향에 같은 높이의 속도분포는 일정하다

물 유동의 두께가 3mm 이하의 얇은 액막의 경우 유속을 측정하기 위해서는 기존의 대표적인 방법인 pitot tube를 이용한 측정방법이 있지만 이처럼 얇은 액막의 경우 유동장에 큰 영향을 줄뿐만 아니라 자체 계측기의 두께로 인해 실질적인 속도측정은 불가능하다. 그 이외 laser를 이용한 측정방법은 열적외선 카메라를 이용한 온도 측정을 위한 여러 가지 시설과의 충돌 문제뿐만 아니라 각도를 맞추거나 작동에 있어서 여러 가지 어려운 상황 때문에 기존의 가장 보편적인 속도 분포 이론을 도용함으로써 이 문제를 해결하고자 했다. 보다 적합한 속도 분포에 관한 문헌을 찾는 것은 추후 필요한 연구 과제라 할 수 있겠다. 벽 법칙의 분포는 낮은 기체유동의 실험에 대해 액체 유동의 평균속도 분포에 매우 가깝다. 벽 법칙으로부터의 평균속도분포는 다음과 같다.

$$u_w^+ = y_w^+ , \text{ for } y_w^+ < 5 ,$$

$$u_w^+ = 5.0 \ln y_w^+ - 3.05 , \text{ for } 5 < y_w^+ < 30 ,$$

$$u_w^+ = 2.5 \ln y_w^+ + 5.5 , \text{ for } y_w^+ > 30 .$$

여기서 무차원 변수들에 대한 정의는 다음과 같다.

$$u_w^+ = \bar{u} / u_\tau , \quad y_w^+ = y_w \cdot u_\tau / \nu , \quad \text{그리고} \quad u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} ,$$

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{c_f u_\infty^2}{2} = u_\tau^2 . \quad \text{그리고}$$

$$c_f \approx 0.0791 \text{Re}_D^{-1/4} \text{ for } 4000 < \text{Re}_D < 10^5 .$$

용적온도(bulk liquid temperature) 는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$T_L = \frac{\int T_{L,\text{mean}}(y) \cdot V_{L,\text{mean}}(y) \cdot dy}{\int V_{L,\text{mean}}(y) \cdot dy} , \quad (3.14)$$

여기서 $V_{L,\text{mean}}(y)$ 과 $T_{L,\text{mean}}(y)$ 는 모사시험관 폭 방향에 대한 평균 속도와 평균온도다. 여기서 $V_{L,\text{mean}}(y)$ 은 벽 법칙의 가정으로부터 계산 되어 질 수 있다. 그리고 중앙에서 측정한 온도와 같은 위치의 벽면에서 측정한 온도가 그림에서 보여주는 것과 같이 표면으로 갈수록 약간의 온도 차가 있으나 얇은 액막의 유동에서는 전체적으로 중앙의 온도와 벽면의 온도가 같다고 볼 수 있으므로 $T_{L,\text{mean}}(y)$ 은 $T_{L,\text{center}}(y)$ 이라고 할 수 있다. 앞에서 말한 관계에 대한 보다 자세한 실험적 결과는 그림4.1에서 볼 수 있다.

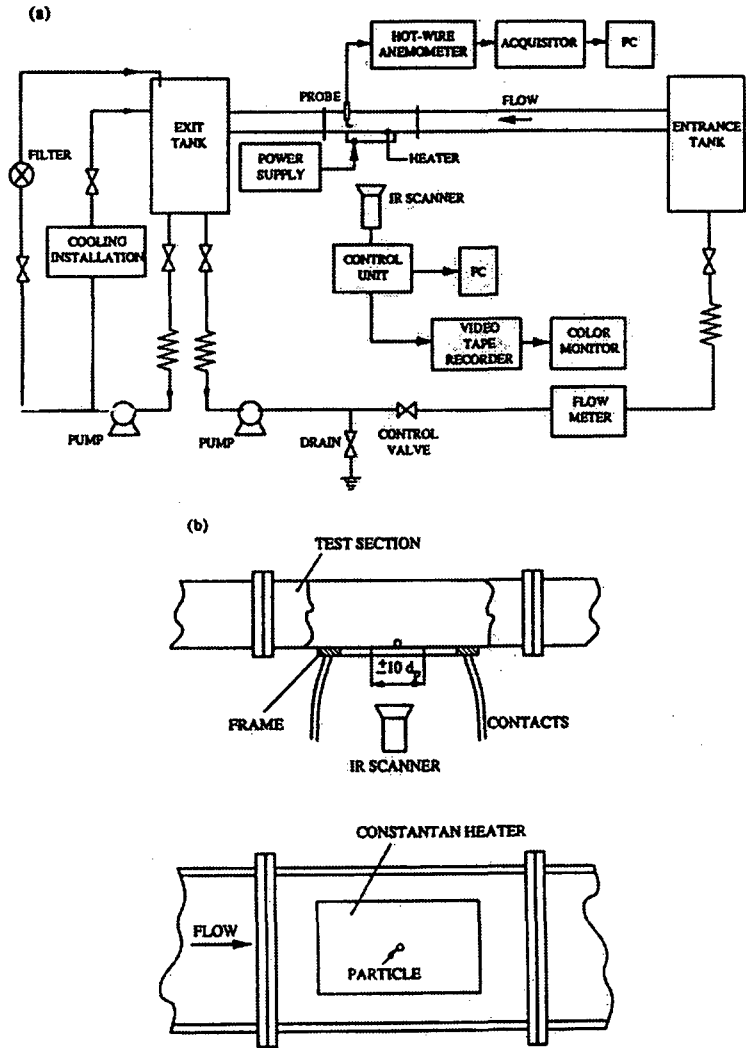
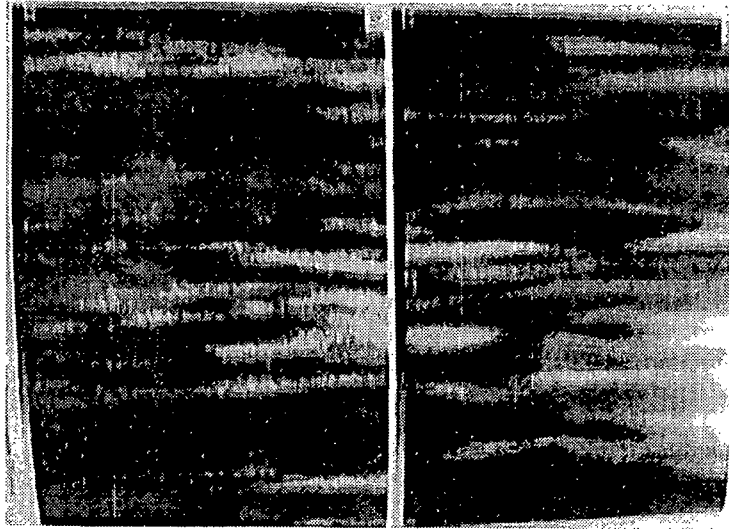


그림 2.1 실험장치의 개략도



(a) 요철이 없는 경우 바닥면의 온도분포

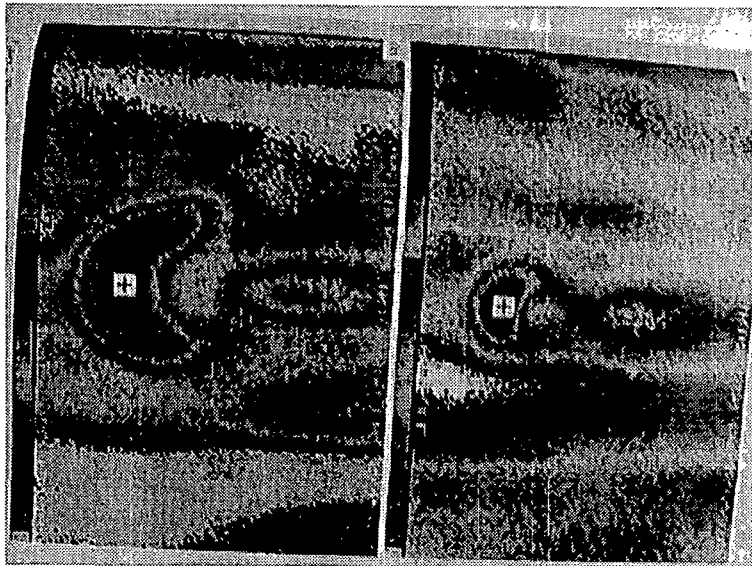


그림 2.2 적외선 카메라를 이용한 바닥온도 분포 사진

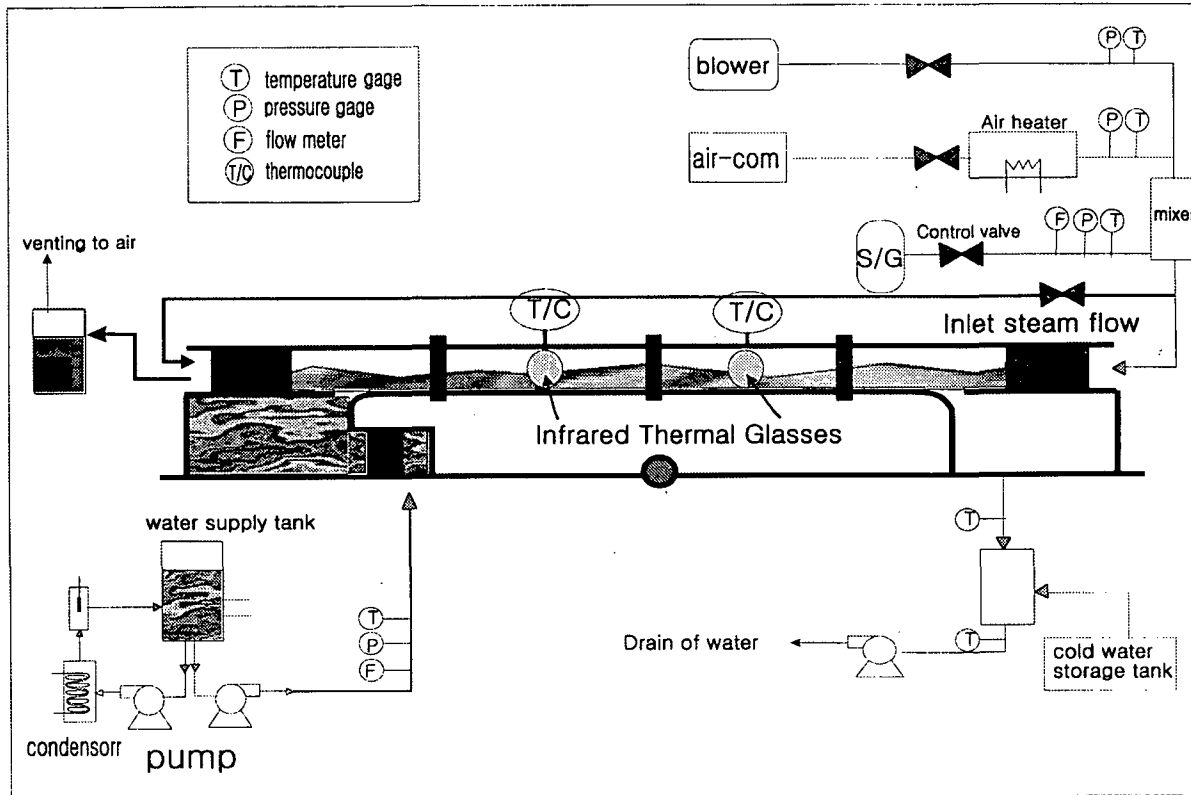


그림 3.1 Experimental facility

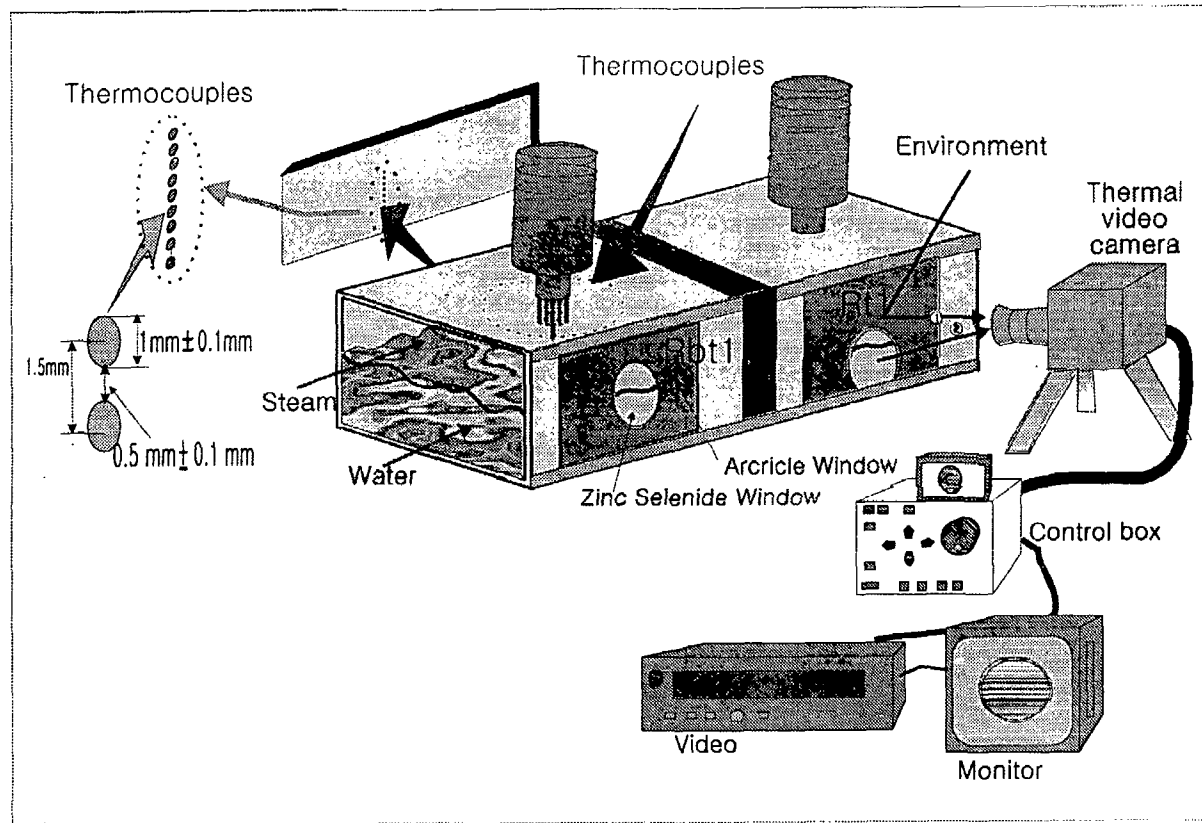


그림 3.2 Temperature measurement system

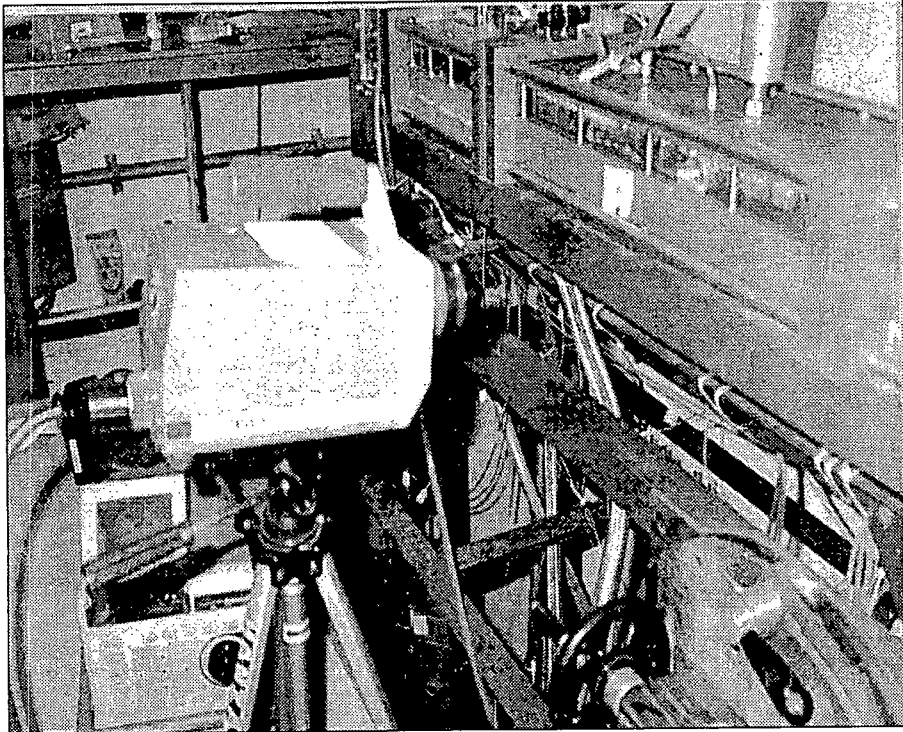


그림 3.3 Test Section 과 적외선 카메라 설치 사진

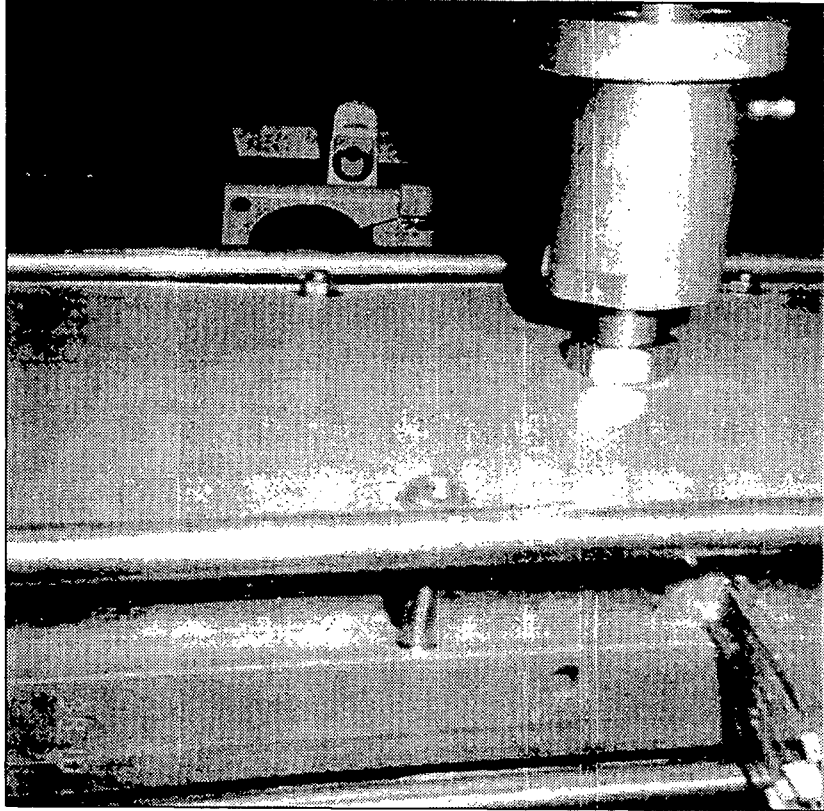


그림 3.4 Temperature measurement system

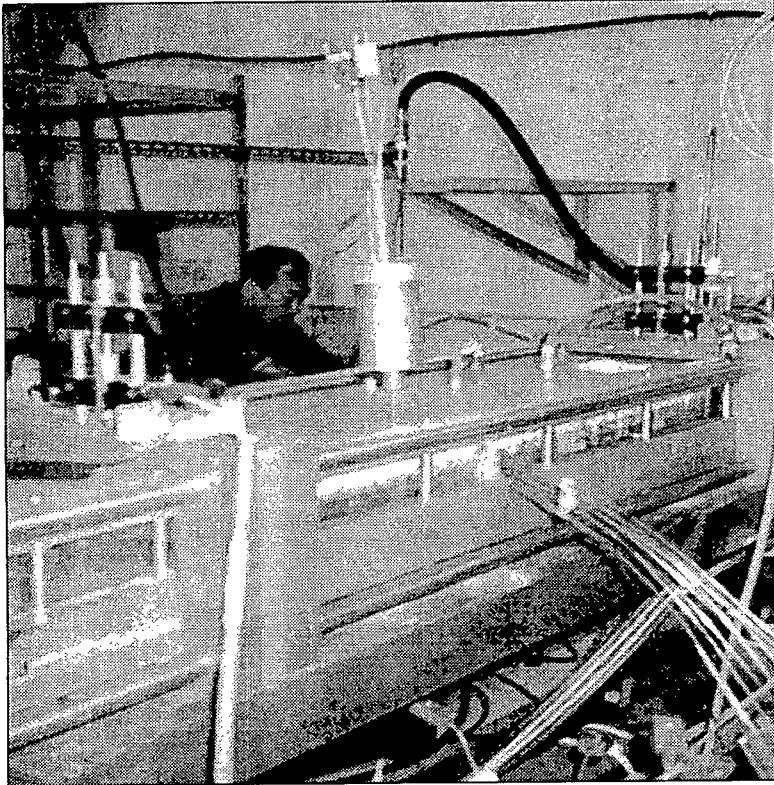


그림 3.5 Test Section 과 열전대 설치 사진

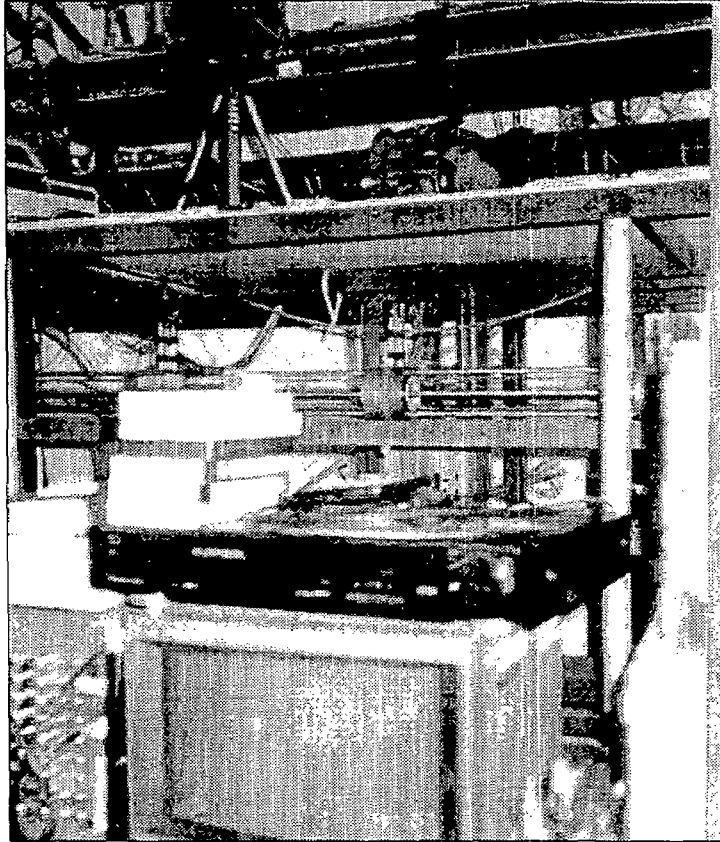


그림 3.6 적외선 온도측정 시스템

제 4장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 실험결과

1. 국부 열전달계수

국부 열전달계수를 구하는데 사용한 열적외선 비디오 카메라의 사용 타당성을 검증하기 위해서 그림 4.1에서 보이는 것처럼 T형 열전대와 열적외선 비디오카메라의 온도를 비교하였다. 첫 번째 검증 순서로 그림 4.1의 결과와 같이 물 유동에 수직한 횡 방향의 같은 높이에 대해서 열적외선 카메라의 온도와 열전대 온도를 비교함으로써 적외선 온도의 정확성을 검증한다. 그리고 두 번째 검증은 과연 벽면에서 측정된 온도가 국부영역에서 대표성을 나타낼 수 있는 평균온도인가를 검증하기 위해 그림 4.1(b)에서처럼 흐르는 물 유동의 중앙에서 열전대를 수직방향으로 이동하면서 온도를 측정된 온도분포를 벽면 온도와 비교하였다. 마지막으로 중앙에서 측정된 온도분포와 벽면에서 열적외선 카메라로 측정된 온도분포를 비교한다. 이때 열전대는 온도측정 시 유동장에 wave를 형성하여 온도측정과 같이 정확히 그 위치에서의 온도라고 할 수 없으므로 5번 정도의 측정된 값을 평균한 값으로 선택하였고 또한 온도측정 시간적인 면에서 보면 열전대는 바닥에서부터 0.5mm 간격으로 유동에 수직한 방향으로 이동하면서 온도분포를 측정하였기 때문에 실시간으로 측정되는 열적외선 측정방법과 비교하여 동시간에 측정된 온도분포가 아니므로 두 측정방법간의 약간의 온도차가 발생되는 요인이라고 할 수 있겠다.

첫 번째 검증방법에서 열적외선 비디오 카메라로 측정된 온도와 열전대를 측정한 온도의 편차가 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며 이것에 관한 실험결과는 그림5 에서 볼 수 있다. 세 번째 온도측정검증의 결과는 그림4.1(b)에서 보여 주듯이 그 편차는 1% 이다.

궁극적으로 우리는 벽 법칙(law of the wall)을 이용하여 얻은 속도분포를 이용하여 열적외선 카메라로 측정한 온도분포와 함께 계산해서 용적온도분포(bulk temperature)를 얻는 것이다. 실험결과에 관한 온도분포의 그림들은 적외선 카메라의 실제 그림을 통해 본 온도분포 모양은 그림4.2(b)이다. 열전대 Rbt1은 입구로부터 69.81cm 떨어져있고 유동의 중앙에서 측정한 것이며 열전대 Rt1은 입구로부터 128.21cm에 위치한 유동의 중앙에서 측정한 것이다. 여기서 열전대와 동시에 온도를 측정하고 바닥부터의 온도장을 측정할 수 있는 곳은 적외선 카메라가 투과용 렌즈가 설치된 곳 중에서 한 쪽만을 선택해야 한다. 따라서 열전대 Rt1과 같은 위치의 벽면을 적외선 카메라를 이용해 온도분포를 구하였다. 이때 유동 조건은 입구에서 물의 온도는 62°C 이고 동방향이며 경도가 5° 인 경우이고 이외의 자세한 정보는 그림4.2(a)에 있다. 이 실험조건의 결과를 비교 검토하기 위해 본 실험 장치에서 같은 조건에서 실험을 하고(Choi 1998) 단지 용적평균 온도를 유동의 바닥온도를 이용하여 열전달계수를 구한 실험 결과와 비교함으로써 그 경향을 이해하고자 하였다. 본 연구에서 얻은 열전달계수 값이 그림 4.2(a)에서 보듯이 기존의 방법(Choi 1998)보다 작은 값을 보였는데 이는 용적평균 온도값(the bulk mean temperature)을 계산하는데 있어서 본 연구에서 구한 방법이 바닥 온도를 용적온도로 사용하는 경우보다 높은 온도값을 갖고 이는 열전달계수 계산에 있어서 보다 낮은 열전달계수를 갖게하는 원인이라 할 수 있다. 따라서 기존의 방법보다는 보다 오차 범위를 축소한 방법이라고 할 수 있다.

제 2절 유동조건에 따른 온도 분포 비교

다음과 같은 실험 matrix로 온도장 분포에 따른 열전달 현상에 대해 관찰해 보았다.

표 4.1 Test matrix for Flow Visualization

<i>effect</i> \ <i>flow direction</i>	<i>Cocurrent Flow</i>	<i>Countercurrent Flow</i>
<i>Inlet water temperature</i>	●	●
<i>Steam flow rates</i>	●	●
<i>Non-condensable gas</i>		●

적외선 카메라로 얻은 온도정보를 통해 열전달율의 크고 작음의 판단기준은 크게 세 가지로 나누어 보았는데 하나는 바닥부분의 온도와 접경면의 온도 차이이고, 두 번째는 입구온도와 평균온도와 온도편차다. 그리고 마지막은 온도분포를 나타내는 등온선의 두께다. 세 번째 방법은 정량적인 데이터가 아니기 때문에 보다 정량적인 비교를 위해서는 첫 번째와 두 번째 방법이 필수적이라 할 수 있다.

열전달이 잘 이루어질수록, 즉 wave model이 제시한 것처럼 얇은 액막 유동의 난류도가 큰 경우 바닥에서 접경면까지의 혼합효과가 크므로 전체적으로 미소한 온도차와 함께 접경면 부근의 온도 기울기도 매우 선형적인 곡선을 그리게 된다. 그러나 그 반대의 경우는 바닥과 접경면과의 온도차가 클 뿐만 아니라 온도 기울기도 접경면 부근에서 급격하게 변하는 것을

관찰할 수가 있다. 또한 입구 온도와 온도분포의 평균온도와의 편차도 상대적으로 적음을 알 수 있다. 그리고 등온선의 두께로도 간접적인 판단을 할 수 있는데 등온 유동층간에 질량교환이 활발하게 이루어지는 경우는 당연히 등온선의 두께가 접경면 부근에 비해 상당히 두껍고 등온선사이의 색깔이 투명하지 못함을 알 수가 있다. 이와 같이 관찰된 판단기준으로 다음에 나올 실험 결과들에 대해 살펴보겠다.

우선 열화상 사진을 보기 전에 적외선 사진에 표시된 여러 가지 부호와 그림을 읽는 법에 대해 그림 4.3에서 간략하게 설명하였다. 그림 4.3(b)는 적외선 카메라가 측정한 온도측정 범위를 색깔이 있는 띠를 통해 보여주고 있고 4.3(f)는 스팀 유동과 물유동이 만나는 접경면일 뿐만 아니라 온도 분포를 측정하는 마지막 지점이고 4.3(i) 이하의 영역은 사각 실험관 바닥의 옆면이다. 4.3(j)는 두 지점 4.3(g) 와 4.3(f) 사이의 직선에 대한 온도 분포를 보여주는 온도 분포 곡선인데 바닥 부근에 온도 분포가 가장 낮지 않고 약간 높은 이유는 유동의 바닥면의 옆으로 설치된 적외선 투과용 유리를 접착하기 위한 접착물이 온도분포 측정에 영향을 준것이지만 그 두께가 0.5mm 이하로 물 유동의 바닥 온도가 0.5mm 높은 곳부터의 온도와 같다는 가정을 쓸 수 있다. 그리고 실시간으로 온도 분포를 측정하는 중에 필요한 화면은 디스켓에 저장하고 inframetrics 760에서 제공하는 그래픽 분석 프로그램을 이용하여 바닥부터 접경면까지의 두 지점 사이의 온도분포와 그 온도분포의 최대, 최소 그리고 평균 온도를 알 수 있다. 온도분포의 측정간격은 높이 0.3mm 간격으로 온도 값을 얻을 수 있고 엑셀과 같은 다른 데이터 분석 프로그램에서도 원시 온도 분포값을 사용할 수 있다.

1. 동층류(cocurrent flow)

(가) 스팀유량의 효과

다음은 기존의 성층 난류 액막 유동의 열전달 실험에서 보여주는 열전달 영향인자에 대해 유동조건에 따른 열화상 사진을 위의 판단 기준을 통해 비교 검증함으로써 온도 분포를 이용함으로써 간접적으로도 열전달 영향 인자에 대한 판단기준으로 사용될 수 있음을 보여주기 위해 실험이다. 판단 기준은 이미 앞에서 설명한 세 가지 기준을 가지고 설명되어진다. 먼저 스팀유동의 영향을 판단하기 위해 같은 유동 조건에서 스팀유량의 변화에 따른 열전달 특성에 대해 관찰하였다. 그림4.4(a)는 스팀이 거의 흐르지 않는 경우에 물 유동층의 온도 분포가 거의 일정함을 보여주고 있고 그림4.4(b)와 4.4(c)는 같은 유동 조건에서 스팀 유량이 크게 증가함에 따라 입구온도와 온도분포와의 온도 편차가 증가하고 온도분포 곡선이 접경면 부근에서 보다 완만한 경사도를 보여주고 있음을 알 수 있고 마지막으로 같은 온도 영역을 나타내는 등온선의 두께가 활발한 열전달에 의해 다소 두껍고 등온선 사이의 경계가 활발한 질량교환으로 인해 훨씬 뚜렷하지 않음을 알 수 있다. 적은 스팀의 유량에서는 접경면에서 전단응력이 상대적으로 크게 작용하지 않으므로 계면도 상대적으로 큰 wave 모양이 관찰되지 않고 그에 따라서 열전달되는 양상도 낮음을 간접적으로 유추할 수 있다. 이와 대조적으로 스팀의 유량이 점차 증가할수록 접경면에서 전단응력이 커짐에 따라 등온층간의 활발한 질량 교환으로 인해 온도 분포 곡선의 굴곡이 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 실험결과에서 스팀유량이 클수록 열전달이 잘된다는 것을 열화상 사진으로도 보다 정량적이고 근본적으로 판단할 수 있다

(나) 입구온도 효과

동향류 수평유동에서 입구온도 효과를 확인하기 위해 그림 4.4(d), 4.4(e)에서 보여주듯이 같은 유동조건에서 물유동의 입구온도가 43℃인 경우와 70℃경우에 대해 관찰해 보았다. 접경면 부근의 온도 분포를 통해 온도입구온도가 낮을수록 온도차에 따른 활발한 열교환으로 기울기가 완만하게 변하지만 높은 입구온도에서는 접경면 근처에서 급격하게 변함을 알 수 있다. 큰 관계로 접경면 부근에서만 얇은 등온선이 보이는 활발한 열교환이 발생하고 바닥 쪽으로 올수록 두꺼운 등온선이 분포한다. 또한 평균온도 증가율을 비교도 입구온도가 낮을수록 더 많은 양의 온도가 증가함을 알 수 있으므로 열전달이 더 활발하게 이루어짐을 알 수가 있다. 여기서 하나 중요하게 여겨야 할 부분은 입구온도가 낮을수록 기존의 "wave model"에 의한 용적온도 값이 본 연구를 통해 구한 온도값과의 편차가 커짐을 알 수 있다.

2. 역층류(counter-current flow) 유동

(가) 증기 유동량 효과

먼저 이번 실험의 경우는 스팀과 물의 유동방향이 역방향이고 수평인 경우에 대해 동방향과 같은 실험조건에서 비교해 봄으로써 유동방향이 영향과 다른 유동조건 특성에 대해 알아보려고 한다. 먼저 스팀 유동량의 효과는 그림 4.5(a)와 4.5(b)에서 보여 주듯이 동방향의 경우와 마찬가지로 평균온도와 입구온도차도 스팀 유량이 커짐에 따라 더욱 큰 편차를 보이며 온도분포 곡선의 기울기도 접경면 부근에서 보다 더 완만해 짐을 알 수 있다. 이와 같은 사실로 보아 스팀 유동량의 영향은 동방향과 마찬가지로 스팀이 증가할수록 열전달이 활발히 일어남을 알 수 있다.

(나) 입구 물의 온도 효과

그림4.5(b), 4.5(c)에서 보여주듯이 입구온도의 영향은 동방향과 마찬가지로 평균온도의 증가율이 입구 온도가 낮을수록 커지고 온도분포 해석도 동방향과 같은 경향을 보여줌으로써 열전달이 더 잘 일어남을 알 수가 있다. 또한 낮은 입구온도인 경우 wave model이 동방향과 마찬가지로 상대적으로 부적합함을 보여주고 있다

(다) 불응축성기체를 함유한 역층유동

불응축 기체의 존재로 인해 상대적으로 전단응력을 증가시키는 역할을 함으로써 경계면에서 파도의 크기가 크고 그에 따른 등온선의 띠의 움직임이 상당히 활발함이 관찰되었다. 이렇게 온도분포곡선의 변화가 상대적으로 커지고 등온선간의 온도 교환이 활발하게 이루어짐에도 불구하고 입구온도와 평균온도와의 편차도 작을 뿐 만 아니라 그림4.6에서 보이는바와 같이 접경면 부근에서 물의 온도가 불응축 기체의 농도가 큰 경우 접경면 부근에서 스팀이 응축되고 그에 따른 불응축성 농도의 증가로 인해 물의 온도가 77.4℃밖에 되지 않음을 알 수가 있었다. 이것은 열전달해석에 있어서 매우 중요한 현상인데 기존의 연구결과에서도 보여 주듯이 불응축성 기체가 접경면 부근에서 열저항 인자로 작용함으로써 열전달율이 크게 감소함을 알 수 있다..

(라) 유동방향의 효과

그림 4.4(d)와 4.5(b)를 통해 온도분포 곡선의 모양을 살펴보면 동향류가 좀더 완만한 기울기를 보일 뿐만 아니라 입구온도와 평균온도와의 편차를 살펴볼 때 역방향류 보다 동방향류가 많이 증가함을 보임으로써 열전달이 동방향이 더 활발하게 일어 난다는 기존의 실험결과를 간접적으로 확인할 수 있었다. 이러한 결과의 원인을 유추해 보면 역방향류인 경우 접경면 부근에서의 전단응력이 WAVE 유동 방향을 방해함으로써 상대적으로 열전달 효과를 감소 할 것이라는 유추를 해 볼 수 있겠다.

제 3절 접경면 부근의 온도장 분포를 통한 wave의 관찰

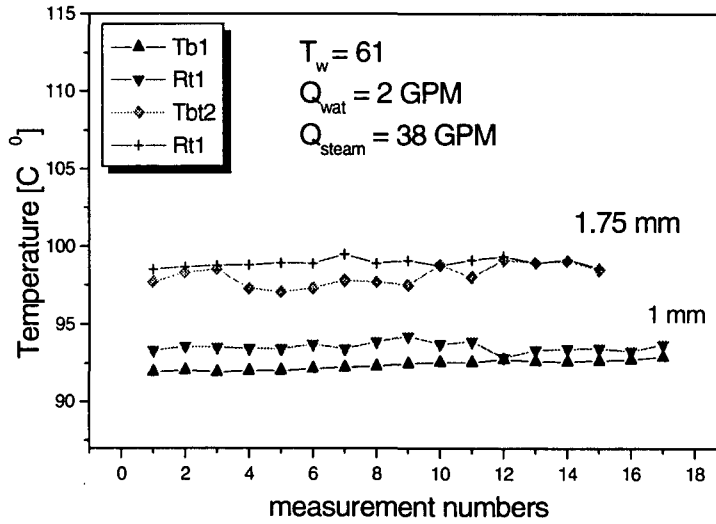
본 장에서는 최근의 이상유동의 열전달 현상을 해석하는데 있어서 접경면 부근의 해석 및 상관식 개발이 큰 관심이 되고 있는데 이러한 연구에 기초가 될수 있는 유동 조건에 따른 온도장 분포를 접경면 부근을 주로 관찰함으로써 정성적인 해석을 하기 위한 기초 연구라고 할 수 있다. 우선 열화상 화면의 구조와 그리고 프로그램을 통한 간략한 분석기능을 설명하겠다. 그림 4.7에서 가운데 도너츠 모양인 환형모양의 두꺼운 띠는 적외선 유리를 지지해 주는 외부 틀(frame)이고 그 환영에 고정 나사 부분 두곳이 좌 우에 나타나 있다. 환영의 좌측 하단의 초생달 모양의 그림자는 적외선 카메라 그림자가 반사되서 나오는 암흑점 인데 측정대상의 금속표면이 반사되는 경우 이같이 암흑점이 발생하여 측정에 어려움을 가중시킨다. 본 실험에서도 초점을 맞춘다는 의미가 이러한 반사체특성으로 인해 생기는 암흑점을 피하기 위해 여러 가지 각도에서 초점을 맞추는데 노력했다. 환영의 안쪽 원은 적외선 렌즈를 통해 얻은 사각유동 안쪽 벽면 온도를 보여주고 있다. 그리고 그 이외의 밑부분 수평 영역은 강화아크릴 제질의 유동 옆면 frame 이다. 그리고 아래 색채 팔레트는 그 위에 쓰여진 온도 범위, 즉 좌측은 최저온도이고 우측은 측정 범위 최고온도에 해당되는 온도 대역을 가장 낮은 검정색부터 가장 높은 온도인 하얀색까지를 표시한 것이다. 열화상 프로그램의 기능은 그림4.7에서 보는바와 같이 다음과 같다.

- (A) 수평과 수직선이 교차하는 지점에 온도를 보여줄 수 있으므로 열화상 화면에서 알고자 하는 위치의 온도를 실시간으로 관찰할 수 있다.
- (B) 관심 있는 부분의 국부 사각영역에 대한 평균온도를 알수 있다.
- (C) 온도 파레트에 선택된 같은 온도를 갖는 point에 대해 하얀색 점으로 보여준다.
- (D) 관심 있는 온도영역을 설정해 줌으로써 영상의 회상도를 조절한다.
- (E, F) 열화상 화면에 수평선을 표시할 수 있으며 수평선에 해당되는 온도분포를 실시간으로 관찰할 수 있다.

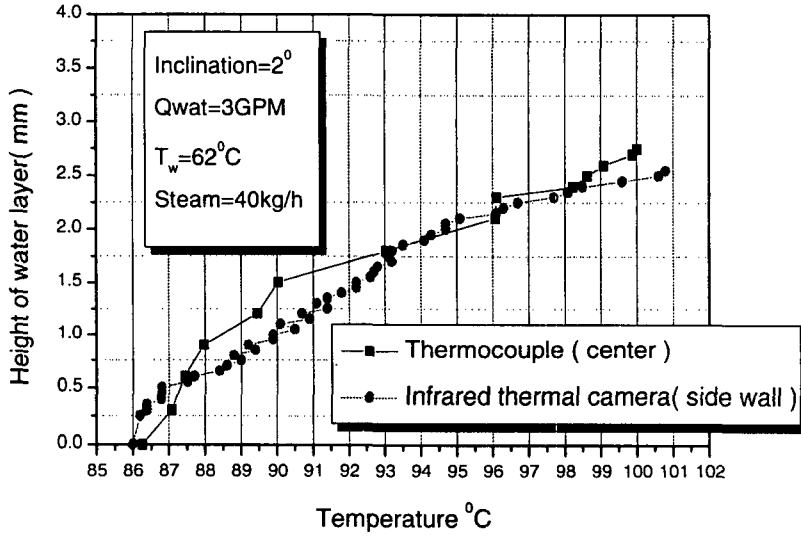
본론으로 들어가면 지금까지는 수평관에 대해서만 관찰하였다. 기존의 연구결과에서 보여주었듯이 경사진 경우 열전달율이 상승된다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. 본 연구는 이런 현상의 원인으로 알려진 접경면 부근의 파도현상이 주요 관심사이고 이때 온도장의 관점에서 접경면에서의 열전달 현상을 관찰하고자 한다. 따라서 수평보다 약간 경사진 경우에 스팀유량의 증가 효과와 물에 유량이 증가하는 경우 계면에서의 파도의 모양이 어떻게 변하는지를 관찰하였다. 상대적으로 적은 유량의 물유동에서는 높은 스팀유량에서도 접경면에서의 큰 변화는 관찰되지 않았지만 그림 4.8에서 보이듯이 물 유량이 클 경우 접경면 부근에 전단응력의 급격한 증가로 인해 roll wave가 형성되면서 전형적인 wave 형태를 보여 접경면 부근의 등온선간의 질량교환이 활발하게 이루어지고 따라서 열전달이 활발하게 이루어짐을 유추할 수 있다.

다음으로 더 큰 wave를 형성하는 경우는 그림 4.9에서 보듯이 수평, 역방향 유동을 하는 경우이다. 여기서도 wave amplitude에 큰 영향을 미치

는 인자는 스팀의 유량보다는 물의 유량이 증가함에 따라 유동층의 두께가 두꺼워지고 따라서 전단 응력의 증가한다. COUNT-CURRENT FLOW LIMIT(C CFL)현상이 일어나기 전까지 표면에서는 WAVE 유동 방향이 스팀의 유동을 따르고 wall 쪽은 물에 유동방향을 보이게 된다. 이러한 현상은 접경면 부근에서 다른 어느 경우보다 큰 wave amplitude를 보여 주었으며 이때 발생하는 roll wave는 surface renewal rate을 증가하는 메카니즘으로 작용하여 접경면 부근에서의 열전달을 향상시키는데 주요한 요인으로 작용함을 유추할 수 있다.

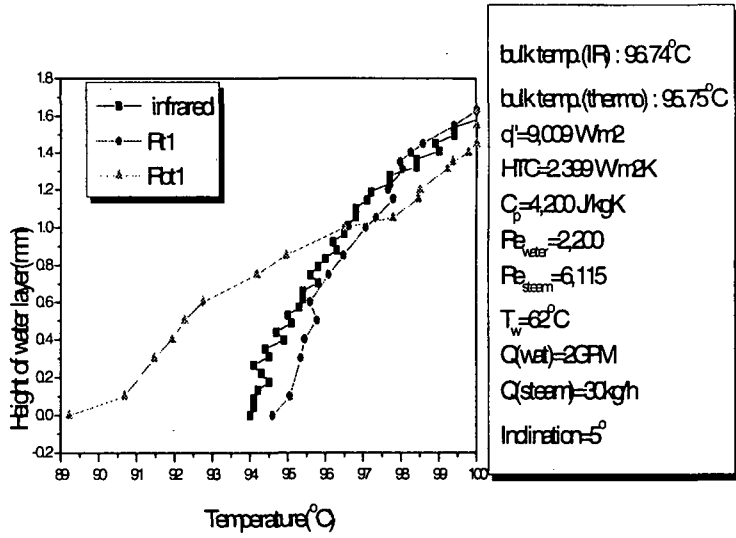


(a)

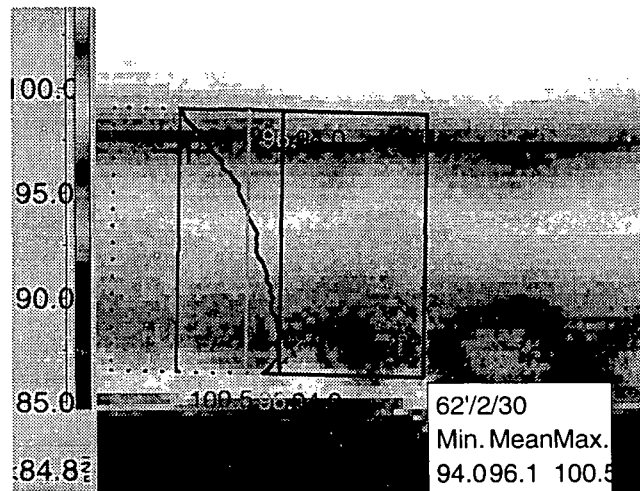


(b)

그림 4.1 Temperature profile calibration

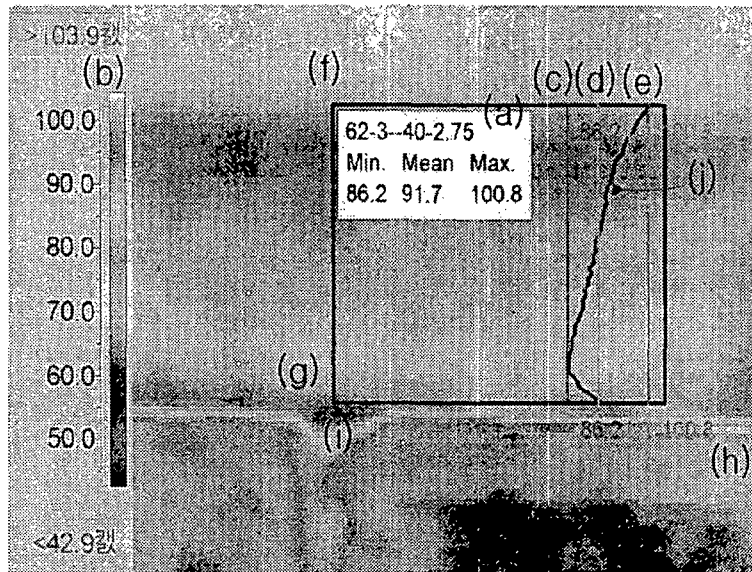


(a)



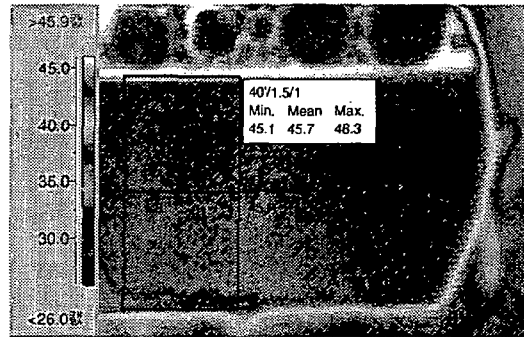
(b)

그림 4.2 Calculation of heat transfer coefficient

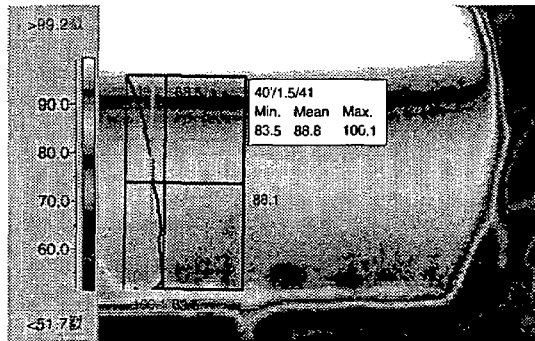


- (a) 63-3-40-2.75 means as follows:
 water layer thickness = 2.75 mm
- (b) Reference temperature bar
- (c) Minimum temperature line
 $T_{f,i,n} = 62^{\circ}\text{C}$, $m_f = 3\text{GPM}$, $M_s = 40\text{kg/hr}$
- (d) Mean temperature line
- (e) Maximum temperature line
- (f) Edge point of temperature profile
- (g) Beginning point of temperature
- (h) Frame of infrared glass
- (i) Position of temperature measurement
- (j) Temperature profile for the line from (f) to (i)

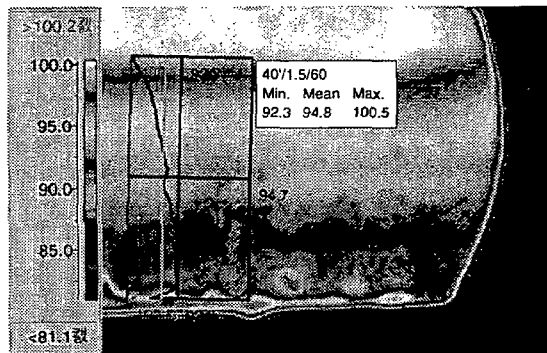
그림 4.3 Explanation of infrared picture



(a)

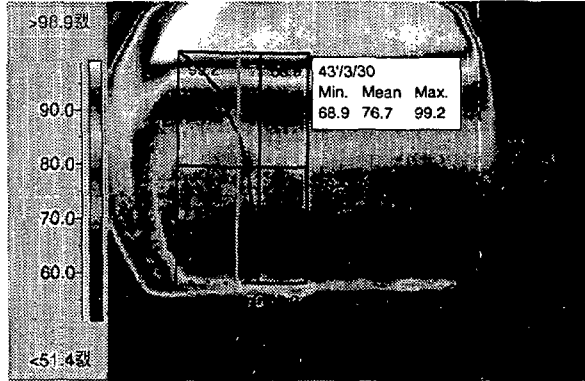


(b)

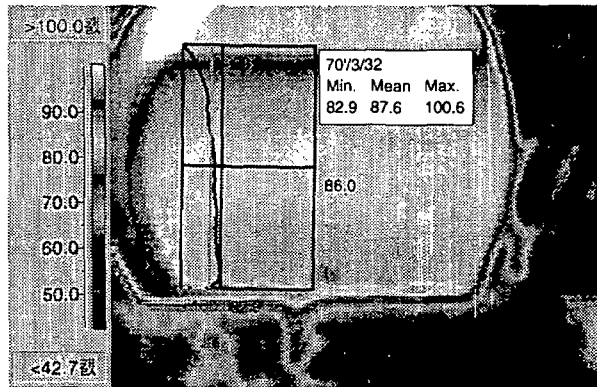


(c)

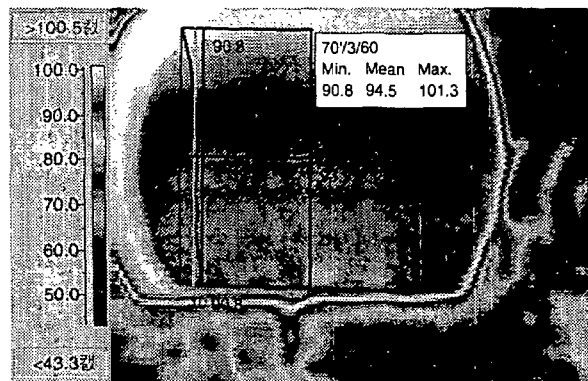
그림 4.4 Temperature profile of horizontal cocurrent flow(1)



(d)

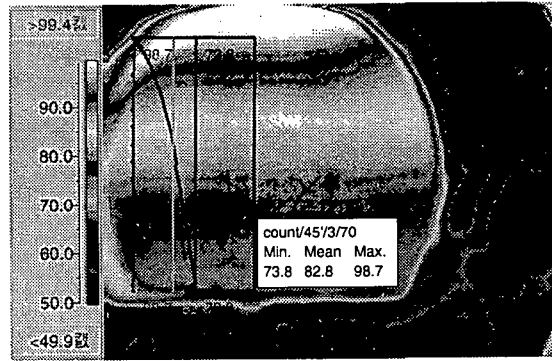


(e)

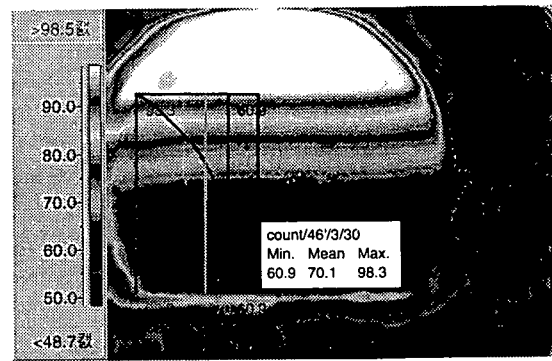


(f)

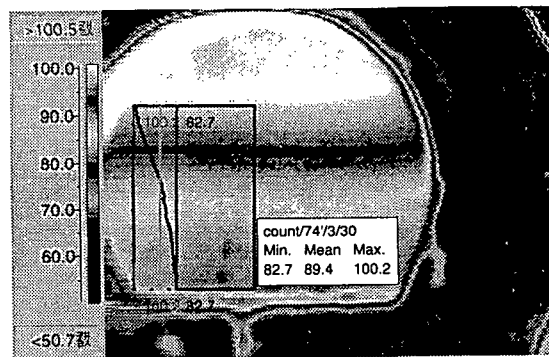
그림 4.4 Temperature profile of horizontal cocurrent flow(2)



(a)

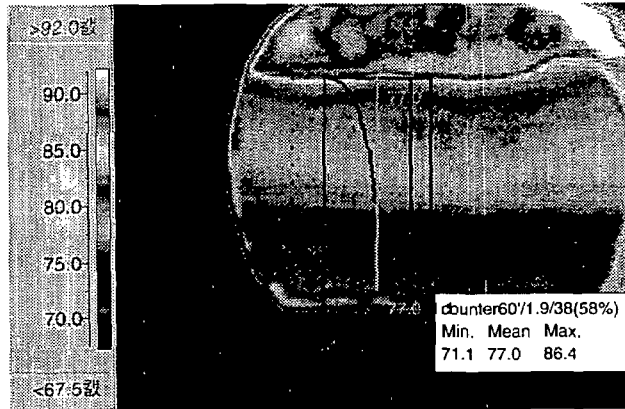


(b)

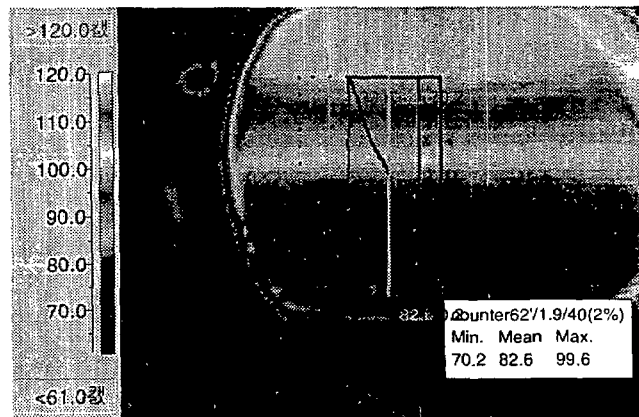


(c)

그림 4.5 Temperature profile of horizontal countercurrent flow

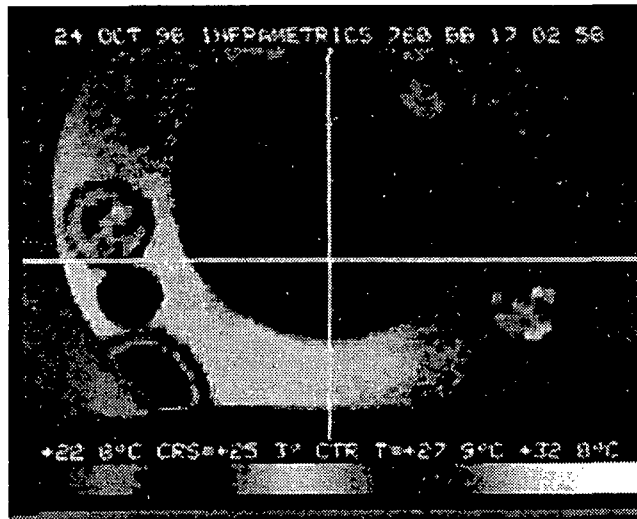


(a)



(b)

그림 4.6 Temperature profile of countercurrent flow with noncondensable gas

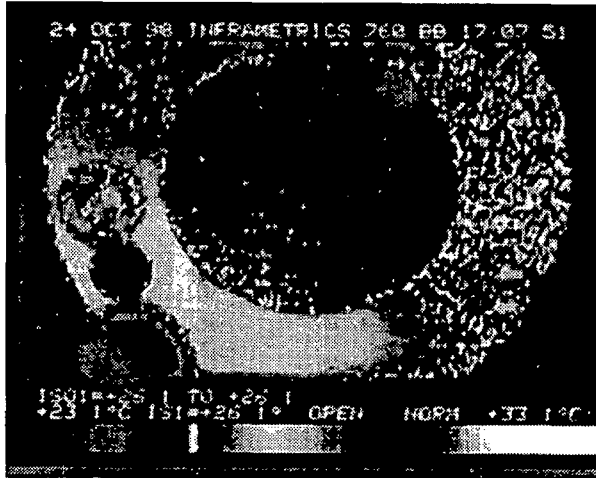


(a) 국부온도 point 관찰기능

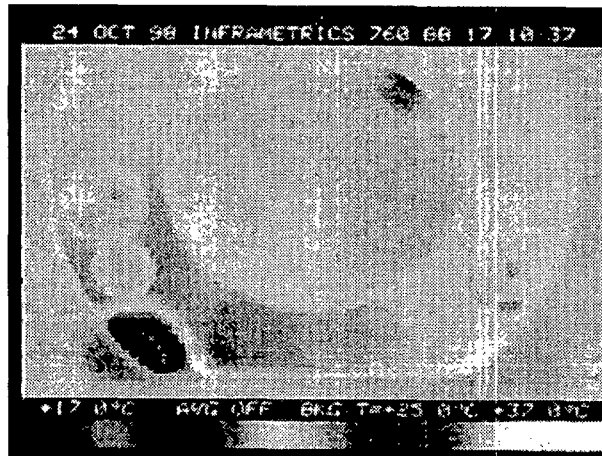


(b) 국부 영역 평균온도 기능

그림 4.7 적외선 카메라 온도 분석기능(1)

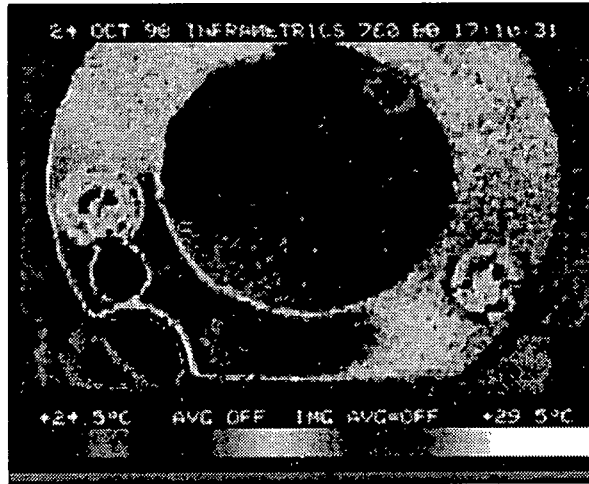


(c) 등은 온도 point 탐색기능

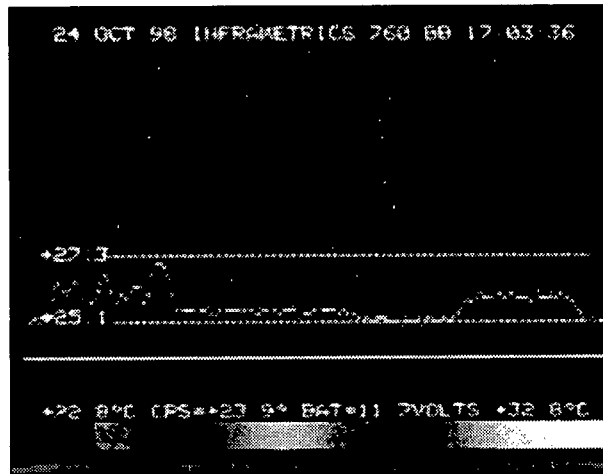


(d) 온도영역 조절기능

그림 4.7 적외선 카메라 온도 분석기능(2)

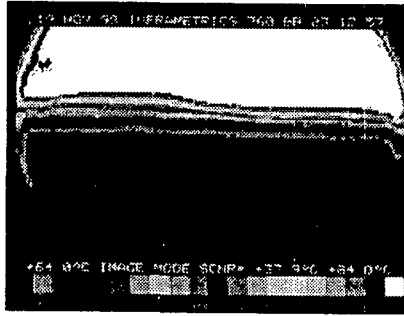


(e) 특정 수평 line 온도분포 관찰 기능

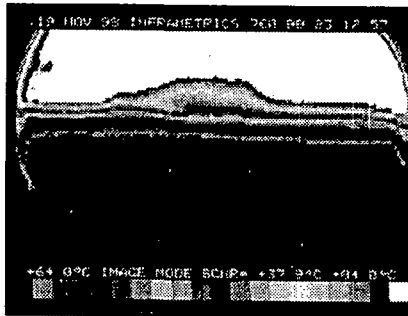


(f) 정량화된 온도 분포 screen

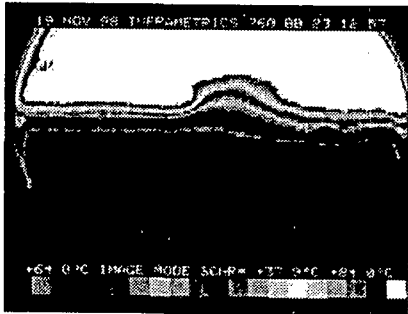
그림 4.7 적외선 카메라 온도 분석기능(3)



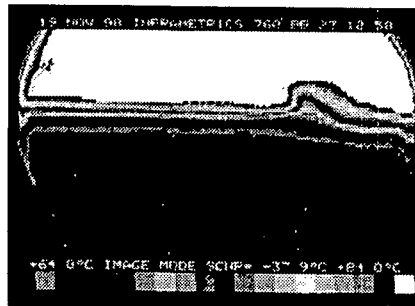
0 sec



0.06 sec

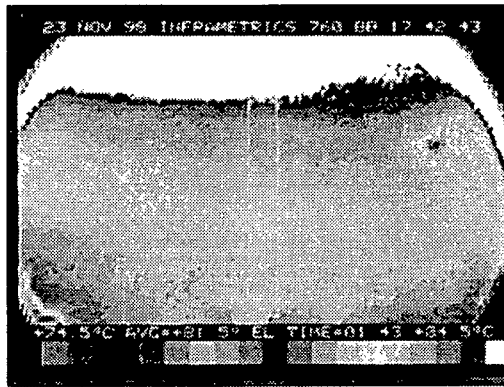


0.12 sec



0.18 sec

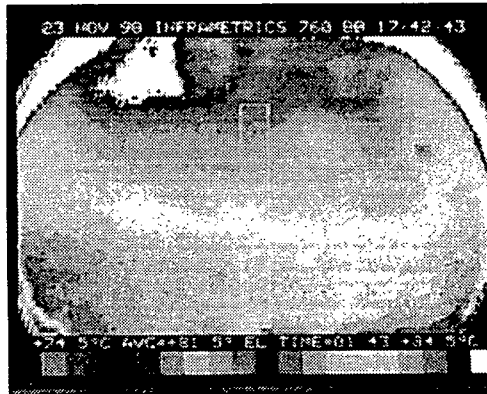
그림 4.8 0.5° inclined cocurrent flow case with $Q_w=6$ GPM
 $Q_s=63$ kg/hr



0 sec

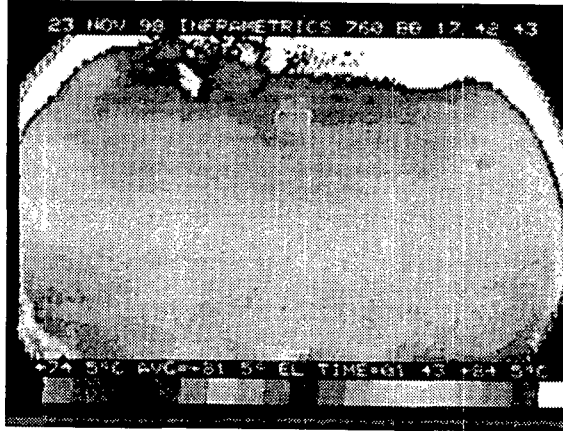


0.3 sec

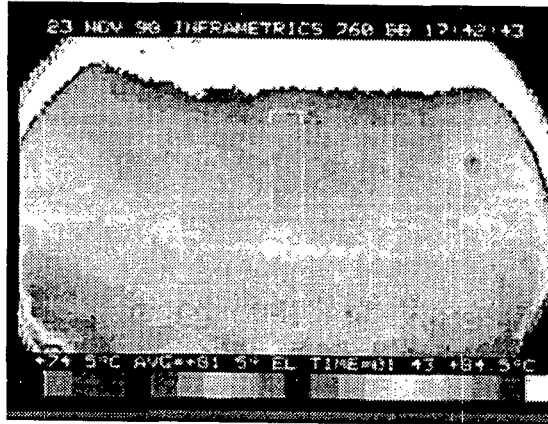


0.6 sec

그림 4.9 Horizontal countercurrent flow with $Q_w=6$ GPM
 $Q_s=61$ kg/hr, $T_{in}=70^\circ\text{C}$ [1]



0.9 sec



1.2 sec

그림 4.9 Horizontal countercurrent flow with $Q_w=6$ GPM
 $Q_s=61$ kg/hr, $T_{in}=70^\circ\text{C}$ [2]

제 5장 연구개발 결과 및 대외 기여도

제 1절 결론

수평관내의 성층 난류 액막 유동이 응축에 미치는 영향이 적외선 카메라를 이용해 실험적으로 연구되었다. 평판이나 사각유로에서의 응축 열전달 현상에 대한 실험 중에 경사가 주어진 경우 액막의 두께가 3~4 mm 이하의 얇은 막을 형성하며 흐르는 경우 wave model 따르면 얇은 막 유동에서는 활발한 난류유동으로 인해 액막의 단면적 전체의 온도가 일정하다는 가정을 사용한다. 그러나 좀더 정확한 국부 열전달계수를 구하기 위해서는 bulk mean temperature를 구하는데 온도분포를 구할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 비접촉식 온도측정 방법인 열적외선 카메라를 이용하여 온도분포를 측정하였다. 그리고 구한 온도분포를 이용하여 mean bulk temperature를 구하였고 이 정보를 이용하여 local heat transfer coefficient를 구할 수 있음을 보였다. 기존의 wave model 이론을 도입하여 얻어진 실험결과와 비교하여 국부 열전달계수가 낮은 값을 보였는데 이것은 기존에 bulk temperature가 유동의 바닥 온도를 택하는 반면에 적외선카메라를 이용하여 얻은 bulk mean temperature는 더 높은 값을 나타낸다. 따라서 포화 수증기와 bulk mean temperature 의 두 지점간의 온도편차가 보다 작아지기 때문에 발생하는 요인이다.

또한 유동의 국부 온도장 정보를 이용해서 물 입구온도, 유량, 유동방향

(cocurrent, countercurrent)의 영향과 기울기의 영향이 검토되었다.

기존의 연구결과에서 입구온도 영향에 대해 상반된 해석을 보인 Segev와 Lim 연구에 대해 본 연구에서 국부 온도장의 정보를 통해 입구온도가 낮은 경우에 보다 활발한 온도 교환이 물과 증기의 접경면에서 발생함이 나타났다. Interface부근에서 shear stress에 의한 열전달 해석이 최근에 주요 관심사인데 위의 세 가지 유동조건 중에서 적외선 카메라를 이용해 interface 부근의 wave 형태를 관찰한 결과 wave 모양이 가장 크고 접경면 부근의 온도장 사이에 질량 유동이 활발하게 이루어지는 경우는 유동 방향의 특성으로 인해 countercurrent에서 물 유동층이 두껍고 입구온도가 높은 경우인 경우에 가장 활발한 것으로 관찰되었다. 상대적으로 아주 적은 유량의 steam이 흐르고 같은 방향으로 물이 흐르는 경우 대부분의 열교환이 기존의 연구결과와 마찬가지로 바닥으로부터 생성된 와류가 주요 열교환의 mechanism임이 온도 띠 분석을 통해 확인되었다.

같은 유동조건이라도 수평보다는 약간의 경사(0.5°)진 경우가 접경면에서의 wave amplitude가 상대적으로 크게 증가하여 surface renewal이 활발히 일어남이 온도장 pattern 관찰을 통해 확인되었다.

제 2절 연구개발결과의 활용계획

- (1) 기존의 표면 온도 측정방법보다 훨씬 세밀하고 실시간으로 온도장의 정보를 얻을 수 있는 특징을 이용해 있어서 CHF 실험에서 hot spot을 찾는 실험이나 일정하게 가열된 파이프의 온도분포와 그로 인해 파이프 내면의 유동을 유추해 볼 수 있는 CHF(critical heat flux) 실험을 적용한다.
- (2) 흐르는 유동장의 flow pattern에 따른 온도분포와 온도장의 변화를 통해 기존의 열전달 계수를 이용한 열전달율의 경향해석을 벗어나 보다 기초적인 유동의 특성인 온도장의 관찰을 통해서도 유동 특성 해석이 가능하다.
- (3) 본 기초연구를 토대로 경계조건들(관직경, 압력효과, 유동길이, 유동율)을 변화시켜 가면서 추가 실험적 연구를 한다면, 방대한 원시 데이터 베이스를 보유할 수 있다.
- (4) 실험을 통해 얻어진 원시 데이터는 다른 조건에서의 계면 전달현상 해석에 사용될 수 있는 귀중한 기초자료가 되어 국내 기초과학 발전에 기여할 것이다.
- (5) 개발된 측정기술은 측정기술의 고도화 및 다른 실험에 응용의 기본적인 발판이 될 것이다.

여 백

제 6장 참고문헌

- A.J. Glass, "Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries," J. Fluid Mech., Vol.50, pp233-255, 1971
- Akira Murata, Eiji Hihara and Takamoto Saito. "Prediction of heat transfer by direct contact condensation at a steam-subcooled water interface", Int. J. Heat Mass Transfer, V.35, No.1, pp101-109, 1992
- B. Horner, U. Viebahn, and K. Dialer, "Mass transfer in a turbulent liquid during absorption," Chem. Eng. Sci. Vol.41, p1723, 1986
- C. Lorencez, M. Nasr-Esfahany, M. Kawaji and M. Ojha, "Liquid turbulence structure at a sheared and wavy gas-liquid interface," Int. J. Multiphase Flow, Vol.23, No.2, pp205-226, 1997
- C. Lorencez, M. Nasr-Esfahany, M. Kawaji, "Turbulence structure and prediction of interfacial heat and mass transfer in wavy-stratified flow," AIChE J. Vol.43, No.6, pp1426-1435
- D. A. Aliaga, J. P. Lamb and D. E. Klein, "Convection heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurements," Int. J. Heat Mass

- Transfer. Vol.37, No.3, pp.363-374,1994
- E.D. Hughes and R.G. Duffey, "Direct contact condensation and momentum transfer in turbulent separated flows," Int. J. Multiphase Flow, Vol.17, No.5, pp599-619, 1991
- G.E. Fortescue and J.R.A. Pearson, "On gas absorption into a turbulent liquid," Chem. Eng. Sci., Vol.22, pp1163-1176, 1967.
- G. Hetsroni, A. Mosyak and L. P. Yarin, "Effect of surface waves on heat transfer in natural and forced convection," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 9, pp. 2219-2229, 1997
- G. Hetsroni, L. P. Yarin and D. Kaftori, "A mechanistic model for heat transfer from a wall to a fluid," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 7, pp. 1475-1478, 1996
- G. Hetsroni, and R. Rozenblit , "Heat transfer to a liquid-solid mixture in a flume," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 20, No. 4. pp. 671-689, 1994
- G. Hetsroni, R. Rozenblit and D. M. Lu, "Heat transfer enhancement by a particle on the bottom of a flume," Int. J. Multiphase Flow Vol.21. No. 6. pp. 963-984, 1995
- G. Hetsroni, R. Rozenblit and L. P. Yarin, "A hot-foil infrared technique for studying the temperature field of a wall," Meas. Sci. Technol. 7 (1996) 1418-1427
- G. Hetsroni, R. Rozenblit and L. P. Yarin, " The effect of

- coarse particles on the heat transfer in a turbulent boundary layer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 9, pp. 2201-2217, 1997
- H.J. Kim, "Local properties of countercurrent stratified steam-water flow," PhD. thesis, Northwestern Univ. Evanston, Illinois, 1983
- H. Kataoka and T. Miyauchi, "Gas absorption into the free liquid surface of water tunnel in turbulent region," *Kagaku Kogaku*, Vol.33, p181, 1969
- H.J. Kim and S.G. Bankoff, "Local heat transfer coefficients for condensation in stratified countercurrent steam-water flows," presented at ASME Winter Annual Meeting, Phoenix, Arizona, 1981
- I. C. Chu, " An Experimental investigation on the interface Condensation Heat Transfer in Steam-Water Countercurrent Stratified Horizontal Pipe Flow," M.S. Thesis, 1996
- I.S. Lim, S.G. Bankoff, R.S. Tankin and M.C. Yuen, "Cocurrent steam/water flow in a horizontal channel," NUREG/CR-2289
- J.C. Lamont and D.S. Scott, "An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid," *AICHE J.* Vol.16, pp513-519, 1970
- J. Karl and T. Weiss, "Measurement of condensation heat transfer coefficients at stratified flow using linear raman

spectroscopy," The 1st Pacific symposium on Flow Visualization and Image Processing, Honolulu, Feb. 23-26, pp479-484, 1997

J. Kim, P. Moin and R. Moser, "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number," J. Fluid Mech., Vol.177, pp133-166, 1987

K.Y. Choi, "Direct-contact condensation heat transfer with noncondensable gases and interfacial shear for co-current stratified wavy flow in nearly-horizontal channels," Ph.D. thesis, KAIST, Korea pp129-165, 1998

L.K. Brumfield, R.N. Houze and T.G. Theofanous, "Turbulent mass transfer at free, gas-liquid interfaces, with applications to film flows," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.18, pp1077-1081, 1975

M. Rashidi and S. Banerjee, "The effect of boundary conditions and shear rate on streak formation and breakdown in turbulent channel flows," Phys. Fluids A, Vol.2, pp1827-1838, 1990

M. Rashidi and S. Banerjee, "Turbulence structure in free-surface channel flows," Phys. Fluids, Vol.31, pp2491-2503, 1988

M. Rashidi and S. Banerjee, "Streak characteristics and behavior

- near wall and interface in open channel flows," *Trans. ASME, J. Fluid Eng.* Vol.112, pp164-170, 1990
- M. Rashidi, G. Hetsroni and S. Banerjee, "Wave-turbulence interaction in free-surface channel flows," *Phys, Fluids A.* Vol.4, pp2727-2738, 1992
- M. Rashidi, G. Hetsroni and S. Banerjee, "Mechanisms of heat and mass transport at gas-liquid interfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.34, No.7, pp1799-1810, 1991
- R. J. Jensen, "Interphase transport in horizontal stratified cocurrent flow," PhD. thesis, Northwestern Univ. Evanston, Illinois, 1982
- S. Banerjee, "Turbulence structures," *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, No. 8 , pp. 1793-1817, 1992
- S. Komori, H. Ueda, "Turbulence structure and transport mechanism at the free surface in an open channel flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 4, pp. 513-521, 1982
- S. Komori, Y. Murakami, and H. Ueda, "The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow," *J. Fluid Mech.*, v.203, pp103-123, 1989
- S. Komori, R. Nagaosa, and Y. Murakami, "Mass transfer into a turbulent liquid across the zero-shear gas-liquid interface," *AIChE J.* Vol.36, No.6, pp957-960, 1990
- S. Komori , R. Nagaosa and Y. Murakami, "Turbulence structure

and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence," J. Fluid Mech. v.249, pp161-183, 1993

S. J. Kim, "Experimental Study on Direct Contact Condensation Heat Transfer in Horizontal Pipes," M.S. Thesis, 1995.

S.J. Kline, W.C. Reynolds, F.A. Schraub, and P.W. Runstadler, "The structure of turbulent boundary layers," J. Fluid Mech. Vol. 30, pp741-758, 1967

S.G. Bankoff, "Some condensation studies pertinent to LWR safety," Int. J. Multiphase Flow, Vol.6, pp51-67, 1980

S.G. Bankoff, R.S. Tankin and M.C. Yuen, "Steam-water mixing studies," Proc. 6th Int. LWR Safety Info. Mtg., Gaithersburg, Maryland, 1978

T.G. Theofanous, "Conceptual models of gas exchange," Gas Transfer at Water Surfaces(Edited by W. Brutsaert and G.H. Jirka), pp271-281, Reidel/North-Holland, Amsterdam, 1984

KSRI-ET-78 정밀측정교재85-005 "온 도" 공업진흥청

Inframetrics Model 760 (IR Imaging Radiometer) 사용 매뉴얼

부록-A 적외선카메라 사용 매뉴얼

1. 스캐너

모델 760 스캐너는 수평 및 수직 주사(scanning)을 하기 위해 전자 기계적 서브(갈바노메타)를 채용하고 있다.

이 스캔 개념은 상용 열화상장치중 가장 빠른 주사속도 또는 frame update rate를 가지므로, 빠르게 움직이는 타겟들도 화면이 일그러짐이 없이 보이게 하는 것이다.

이 스캔개념은 또한 예의적인 신뢰성, 충격에 대한 내구성, 스캐너 작동 중 예의 이미지의 안전성을 보장해 주고 있다.

시스템 작동 중, 전자기파가 폐쇄회로의 전기 콘트롤에 의해 스프링 측에 달려있는 거울(mirror)를 흔들어 준다.(oscillate)

수평주사는 사인파 공명 모우드로 4khz에서 행해진다.

수직주사는 일반 TV와 똑같은 포맷인 톱니형 파형(saw tooth pattern)으로 행해진다.

주사거울들은 효율을 증대시키기 위해 진공상태로 밀봉되어 있다.

회전하고 있는 온도 레퍼런스 타겟은 디렉터가 초당 60번씩 체크하여, 온도의 산술적 측정을 하고 있다.

MCT를 소재로 한(mono)디렉터는 최대한의 감도와 고도의 공간 분해능을 얻기 위해, Inframetrics의 Closed Cycle Microcooler에 의해 77℃에서 냉각된다.

스캐너의 광학적 진로(path)는 그림 1.1에 나와 있다.

전면 렌즈를 통해 진공 주사 모드로 들어간 적외선은 수평 및 수직 주사용 거울에 의해 반사된 후, 두 번째의 윈도우를 빠져 나와 디렉터 렌즈를 통

해 디렉터로 흐른다.

760모델의 콘트롤/전자 유니트는 적외선 시그널을 처리하고 디지털화 한 후, 다시 포맷하여 LCD나 외부의 비디오 모니터 상에 칼라 또는 흑백영상을 제공할 수 있게 한다.(그림1.2)

스캐너의 내부 온도가 바뀌거나, 렌즈(들)가 설치되거나 작동자에 의해 세팅이 바뀌에 따라, 마이크로 프로세서는 내부 캘리브레이션을 시행한다.

마이크로 프로세서는 또한, 각 화소(pixel)들을 체크하여 사용하고 있는 필터/렌즈에 해당하는 캘리브레이션 테이블을 사용하여 온도를 계산한다.

Power supply는 pulse-width modulated 스위치 방식으로 광범위한 DC 입력전압을 받아들임과 동시에 노이즈에 대한 면역이 뛰어나다.

이 마이크로 프로세서를 근간으로 한 디지털의 콘트롤 패널 또는 키보드는 직렬 입출력 포맷의 인터페이스를 통해 전자회로들과 교신(communicate)한다.

키보드는 Center Temp 콘트롤과 (MODE, TEMP SPAN, SOFT SET, FUNCTIONS 그리고 FOCUS라는) 다섯 개 그룹의 키들로 구성되어 있다. CENTER TEMP콘트롤과 기능키들은, 다음에 기술한 바와 같이 바람직한 작동조건으로 시스템을 조절하기 위해 사용된다.

2 콘트롤 패널

모우드 키들

IMAMGE, POINT, AREA 그리고 LINE MODE의 작동은 각각 해당 키들을 누름으로써 선택할 수 있다.

B & W(흑백)- COL(칼라), AVERAGER, ISOTHERM과 AUX모우드 작동은 shift키를 누른 상태에서 원하는 키를(동시에) 누름으로써 선택할 수 있다.

온도폭(span) 조절키

이 키들은 섭씨로 바라는 온도 범위를 설정할 때 사용한다. 만일 확장 온도범위(extended temperature range)를 선택하면 각 키들의 값은 각 키들의 밑줄에 있는 숫자들로 나타난 것처럼 10배씩 늘어난다.

SOFT-SET 키들

이 다섯 개의 키들의 기능은 모드에 따라 달라진다. 더 자세히 알고 싶으면 section 4.3 "operating modes"를 참조한다. IMAGE 모드에서는 다른 여러 모드 에서처럼 MAX/MIN키들이 4:1 Zoom range의 수직 경사 각을 각각 증가시키거나, 감소시킨다.

E- O zoom기능을 사용할 때, 분해능의 크기 (디렉터 사이즈)는 일정하다. (즉, 변하지 않는다)

이미지의 확대(enlargement)는 디렉터의 dwell-time이 증가하므로 그만큼 열감도가 증가한 상태에서 나타난다.

망원렌즈들과 close-up렌즈들 또한 (분해능을 손상시키지 않고) 물체를 크게 하여 보기 위해 사용된다.

FOCUS키들

MEAR/FAR키는 remote콘트롤 옵션을 구입하였을 때 기기의 스캐너 focus를 콘트롤 한다. 이 옵션이 없으면 키는 작동하지 않는다.

CENTER- TEMPERATURE CONTROL

이 광학적으로 코드화 된 로타리식 콘트롤은 중간회색의 강도에 해당하는 온도세팅의 고분해능을 위한 조절에 사용된다.

콘트롤을 돌려 생기는 변화량은 현재의 온도 폭의 세팅에 맞도록 조절한다. 온도 폭(span)이 적은 상태에서도 미세조절이 가능하다.

3. FUNCTION KEYS(기능키들)

여섯 개의 기능키들이 콘트롤 패널의 가장자리를 따라 배치되어 있다. 이들 중 4개의 키는 각각 2가지 기능을 갖고 있다.

첫째, 해당하는 키를 눌러 나타나는 주기능과

둘째, shift키와 동시에 눌러 불러내는 부기능이 그것이다.

SAVE TO DISK 키는 키를 누르는 순간 디스플레이에 나타나는 이미지를 31/2인치 플로피 디스크에 저장한다.

RECALL FROM DISK키는 SAVE TO DISK키로 이전에 디스켓에 저장 하였던 이미지를 불러낸다.

FRZ/WRT/REL/ERSE키는 두가지 기능을 가지고 있다.

760이 average 나 image모드에 있을 때는 이 키는 디스플레이를 freeze 시키든가 freeze됐던 이미지를 release(freeze로부터 풀어냄)한다. 이 모드에서 FRZ는 주 기능이고, REL은 보조기능이다.

760이 Line scan 모드에 있을 때 이 키는 스크린 상에 label 된 온도 측을 만들거나 (write)하거나 지운다.

WRT는 주기능이고 ERSE는 부기능이다.

RCL CFG/SAVE CFG키는 setup 메뉴를 사용해 생성한 setup configuration을 저장하거나 불러낼 때 사용한다.

RCL CFG는 이 키의 주 기능이고 이전에 저장시킨 setup configuration을 불러낸다.

SAVE CHG는 이 키의 보조기능으로서 현재의 setup을 (나중에 불러내기 위해)저장하기 위해 사용한다.

PARAMETER/HELP 키는 시스템 파라메타들(모우드, 광학 Configuration)의 셋업을 볼 때 사용한다. HELP는 이 키의 보조기능으로서, 현재의 작동 모드에 대한 SOFT-SET키들에 대한 기능들을 디스플레이 시키는데 사용한다.

그 다음 아무키나 누르면, HELP 텍스트와 그래픽스를 지우고(clear), (스크린)을 이전의 상태로 회복시킨다.

SETUP/REBOOT키는, 두 번째의 시스템 파라메타들을 세팅시키는 setup 메뉴를 얻는데 (access)사용한다.

4개의 setup메뉴가 있는데 : "Measurement and Configuration Setup", "Processing Parameters Setup", "Display Options Setup", 그리고 "Auxiliary Mode Setup"이 그것이다.

"Auxiliary Mode Setup" 메뉴를 AUX모우드로 선택할 수 있는 모우드를 포함하고 있다.

4개의 메뉴 들 중 각각은 키를 연속하여 (이어서) 누름으로써 얻을 수 (access) 있다.

REBOOT는 SETUP/REBOOT키의 보조기능으로서, 760을 ON/OFF시키지 않고 (처음부터)다시 작동시킬 때 사용한다.

모델 760의 뒷 패널에는 스캐너 유니트를 연결시키기 위한 연결부 (CONNECTOR)와 특별한응용에 필요한 보조장비들을 연결시키기 위한 CONNECTOR들이 있다.

연결부위들의 위치는 그림 1.4에 나타나 있다.

각 연결부위들에 대한(간략한) 설명과 전형적인 응용에 대해서는 다음에 기술하였다.

- LCD 디스플레이 -

760 모델의 LCD 디스플레이는 콤팩트하고 튼튼한 고 분해능의 칼라 모니터이다.

디스플레이는 234(V)×479(H)의 분해능을 갖는 TFT-active matrix LCD 이다.

모니터를 보기 위해서는 앞으로 끄집어 내 바라는 위치에 올 때까지 뒤쪽으로 제끼면 된다. 디스플레이를 콘솔(console)안으로 가두기 위해서는 위의 과정을 역으로 하면 된다.

가장 잘 보이기 위해 이미지를 조절하려면 디스플레이 바로 밑에 있는 밝기 조절나사와 contrast조절나사를 사용한다.

옵션인 sunshield는 야외(옥외)작동을 위해 제공될 수 있다.

모델 760은 31/2인치 플로피 디스켓을 위한 디스크 드라이브를 내장하고 있다.

이미지들은 비디오 메모리로부터 디스켓으로 저장된다. 이 이미지들은 760의 작동 mode들을 사용하여 불러내고, 분석할 수 있다.

4. 디스크(들)을 포맷하기

새 디스크들은 이미지를 저장하기 전에 포맷시켜야 한다.

포맷을 시키면, 디스크 상에 있던 모든 정보가(일단) 지워지므로, 저장하여야 할 이미지들은 담고 있는 디스켓은 포맷팅 시키면 안된다.

디스켓을 포맷시키려면 :

1. 디스크 드라이브로 디스켓을 집어넣고
2. Processing Parameters Setup Menu(page 2)가 나타날 때까지 Setup 기능을 누른다.
(즉 Setup 키를 두 번 누른다.)
3. 수직의 화살표 키들을 사용하여 "FORMAT DISKETTE"를 선택한다.
4. 수평 화살표 키들을 사용해 <YES>상태로 toggle시킨다.

이제 760은 FORMATTING 이라는 메시지를 디스플레이하며 디스켓을 포맷시키고 있을 것이다.

5. 이미지의 저장 및 불러냄

SAVE TO DISK기능키를 사용하여, 플로피 디스켓 1장 당 25개의 이미지를 담을 수 있다.(그림 1.11)

모델 760의 디스크 관리 소프트웨어는 각 이미지가 저장될 때마다 자동으로 번호를 매겨, 불러내기를 쉽게 하도록 한다.

6. 이미지를 저장하기 위하여

1. Image모드에 있을 동안, 바라는 이미지를 모니터에 나타내기 위해 스캐너를 잘 겨냥하고, 초점을 맞춘다.
2. SAVE TO DISK.기능키를 누른다. 그러면 다음과 같은 메시지가 나타난다.

STORE IMAGE NUMBER <1>이미지에 번호를 위해 1에서 25사이의 번호를 입력(enter)시키거나, 또는 시스템이 자동으로(순차적으로)번호를 매기게끔 한다.

좌우 soft -set 키들 또는 center temp control나사를 돌려 번호를 바꿀 수 있다.

SAVE TO DISK단추를 두 번째 누르면 디스플레이상의 이미지가 메모리에 (순간적으로) FREEZE된다. 이미지를 메모리로부터 디스켓으로 저장하는데는 약 25초가 소요된다.

메시지가 사라진 다음, 저장된 것을 확인하기 위해 이미지를 불러 낼 수도 있다. 메시지로 디스플레이 된 숫자는 이 이미지를 불러내는데 쓰는 숫자이다.

7. 이미지를 불러내기 위해서는 :

1. 이미지 모우드로 되돌아가기 위해 IMAGE 모우드 키를 누른다.
2. RECALL FROM DISK기능키를 누른다. 그러면 다음의 메시지가 디스

플레이 될 것이다.

DISK RECALL SELECT <1>

3. 좌우 화살표 키들, 또는 CENT 온도조절나사를 사용하여 해당하는 이미지 번호를 입력한다.

0을 입력하면 이미지 디렉토리가 나올 것이다.

4. RECALL FROM DISK 기능키를 다시 한번 누르면, 약 6초만에 이미지가 나타날 것이다.

이제 이 불러낸 이미지에 대해 line scan, point, area, isotherm 등의 기능을 적용해 분석할 수 있다.

8. 불러낸 Image 모드에서 빠져 나오기(Exit)

불러낸 (recalled) 이미지에서 live 이미지 모우드로 되돌아오기 위해서는 IAMGE키를 한 번 눌러 Point, Area 등의 분석 모우드를 벗어난 후, (live 이미지로 돌아오기 위해)한 번 더 누른다.

Image 키를 세 번째로 누르면 아까 불러냈던 이미지가 다시 나올 것이다. 만약 어떤 특정 분석 모우드에 남아 있으면서 불러낸 이미지와 live 이미지 사이를 왔다 갔다 하려면 (toggle), shift키를 누른 상태에서 가운데의 soft-key를 누른다.

line scan 모우드로부터 line 선택 모우드로 돌아가기 위해서는 LINE 키를 눌러야 한다. 여기에서. Live 이미지 모우드로 들어가기 위해서는 IMAGE 키를 두 번 누른다.

ERROR 메시지나 다른 문제들

만약 시스템이 error 메시지를 디스플레이 하거나 1분 이내에 완전히 저장 내지 불러내기를 끝내지 않는다면, shift REBOOT를 누른 후 다시 시작한다. 그러나, 만약 DISK FULL 메시지가 나타나면 디스켓을 빼어 내오고 새것 또는 빈 공간이 남아있는 디스켓으로 교체하여 사용해야 한다.

9. 시스템 옵션들

광학필터들

광학필터들은 개스, 플라스틱 화염들 같은 특수한 물질들 자체 또는 이들을 통해야만 하는 측정을 최적화 하기 위해 760모델의 적외선 파장대역에 대한 감응도를 맞추는 역할을 한다.

LOW-pass, high-pass, band-pass/reject, (또는 에너지 통과량을 줄이는) at attenuating 필터등이 있다.

스캐너 내부의 메카니즘을 통해 최대 4개까지의 설치 가능한 필터 중 1개가 사용자의 선택에 의해 광학 진로 상에 놓이게 된다.

필터는 나중에 설명하게 될 setup 메뉴에서 그 이름으로 선택하면 자동적으로 광학적 진로 상에 삽입이 된다.

특수한 캘리브레이션 커브가 이 필터에 기인한 변화에 보상을 동시에 하여 준다.

스캐너에 대한 기본 캘리브레이션 커브는 설치한 광학필터들에 대한 특성 곡선과 메모리에는 최대 7가지의 별도의 캘리브레이션 테이블들이 저장될 수 있다.

망원렌즈들

760 모델은 올바른 이미지의 포착을 위해 3가지의 망원렌즈들을 제공하고 있다.

1배 렌즈는 대부분의 응용에 적합하고

3배 렌즈는 시스템의 시야각을 줄여서, 3배의 배율로 확대한다.

렌즈를 부착하면 스캐너에 내장된 홀(hall) 센서들이 망원렌즈의 종류를 식별하여 그 렌즈에 해당하는 transmission 효과에 대해 자동으로 보상할 수 있도록 한다.

Transmission factor는 렌즈 케이스의 위쪽에 명시되어 있는데 이 값은 그 렌즈를 사용하기 전 “Measurement Configuration Setup” 메뉴 상에서 입력시켜야 한다.

클로즈업 렌즈들

다섯 가지의 클로즈업 렌즈들이 6-48인치 사이의 거리에서 고 분해능으로 화면을 얻기 위해 3배 망원경 위에 얹혀 쓰인다.

이중에 가장 초점거리가 짧은 것은 2.25mm의 초점거리를 제공한다. 따라서 상당히 고 .효율의 현미경과 같은 효과를 제공하게 되는 것이다.

10배 망원경

10배 망원경은 10배의 확대효과를 제공하고 있다.

0.5 X 광각렌즈

이 렌즈는 시야각을 2배로 증대시킨다.

10. 데이터 획득 (Acquisition) 및 playback 분석

760모델은 사후분석을 위한 온도 데이터 및 이미지 획득에 아주 이상적으로 적합하다.

Data Acquisition 모우드는 스크린상의 모든 글자를 없애 열화상의 디스플레이가 최대로 되게 한다. 모든 기기의 세팅들, 캘리브레이션 정보, 현재의 시간/날짜 등은 텔레비전 frame 이 보이지 않는 부분에 코드화 된다. 이미지(화상)들을 그림 1.3와 같이 일반 VCR이나 VDR에 연속적으로 기록 된다.

사후분석을 위하여는 흑백화상만이 기록되어야 한다.

사후분석 또는 real time 분석을 위한 연결에 대해서는 그림 1.5와1.6을 참조한다.

Therma GRAM의 열화상 분석 시스템은 IBM PC 또는 호환기종에 근간한 동적/정적 이미지 분석 시스템이다.

숨겨진 캘리브레이션 정보를 풀어냄(decoding)으로써, 시스템은 point 들, line 들, 각 구역들에 대한 온도들을 비디오 테이프, 또는760에 의해 디스켓 상에 저장된 디스켓으로부터 직접 평가하고 디스플레이 하는 것이다.

원래의 기록 (recording)으로부터 시간과 날짜를 끊임없이 디스플레이하며 칼라 파렛트를 사용해 칼라화와 readout 기능을 수행하며 playback 시 방식율이 세팅된다.

스캐너의 바닥면은 스탠다드 1/4-10볼트를 받아들일 수 있게끔 구멍과 나사면이 파져있어 일반카메라 삼각대로도 받칠 수 있게 되어있다.

11. 시스템 작동-

-시스템이 POWERING UP-

760의 뒷 패널에 있는 전원스위치를 켜다.

그러면, 그림 1.12에 보이는 것과 같이 grey scale의 테스트 패턴이 디스플레이 된다. 모니터의 밝기와 contrast를 조절해 모니터 밑의 grey scale한 칸(한 단위), 한 칸이 다 뚜렷이 구별되게 한다.

시스템은 이니셜라이즈 하는데 약 15초가 소요되고, -190°C 이하의 작동온도로 냉각시키는데 5분 이상 걸린다.

그림 4-2에서 보이는 대로 스크린의 위쪽(꼭대기)의 라인을 Inframtrics의 회사이름, 시스템의 파장범위, 시간 등을 디스플레이 한다. 내장된 시계는 최소한 1년간 배터리로 유지된다.

이 라인 밑에는 경고 메시지가 디스플레이 되는 구역이 있다.

grey scale 위에는 최고, 최저온도, 현재의 작동 모우드는, 1.5초마다 update 되는 부 시스템 파라메타 등의 현재의 상태를 알리는 라인이 있다. 모델 760은 7개의 주 작동 모우드와 8번째의 보조(Auxiliary)모우드를 메뉴로부터 선택할 수 있게 되어 있다.

Image, Color, Point, Averager, Isotherm, Line 그리고 Aux가 그것들이다.

두 번째의 시스템 기능들과 함께 시스템의 캘리브레이션에 영향을 미치는 파라메타들은 4개의 SETUP메뉴들로부터 조절한다.

Image mode에 대해 설명한 작동 및 핵심 기능들의 대부분은 다른 작동 모우드에 대해서도 동일하다는 것에 유의한다.

12. IMAGE MODE

유의: 만약 기기를 켜 직후에 이미지 모우드를 선택하면 모니터 스크린은 6-7분간 하얗게 남아 있는데, 이것은 냉각장치가 작동온도에 도달할 때까지 시간이 걸리기 때문이다.

그림 1.13에 보이는 대로 Image 모우드는 모델 760의 기본 작동 모우드이고, Image 키를 누름으로써 선택할 수 있다.

이 모우드에서 SOFT-SET키들은 시야각(FOV)를 조절해 주는 역할을 한다.

이 SOFT 키들의 기능들은 HELP 키 (shift-help)키를 눌러서 (다른 키를 누르면) HELP 메시지를 화면에서 없앨 수 있다.

FOV를 조절할 때 (어떤 작동 모우드에서나), 수평, 수직 시야각을 증가시키거나 감소시킨다.

right/left soft키들은 수직 FOV를 변경하지 않고 수평 FOV를 늘리거나 줄일 수 있다.

가운데(center)키는 수직 FOV를 수평 FOV에 같게 곧 세팅해 정상적인 3:4 aspect율로 되돌아 오게끔 한다.

shift 키를 누르고 SOFT-SET 키들을 누르면, 누른 키들에 따라 수평 또는 수직 FOV값 즉, 최소, 최대를 즉시 세팅시킨다. 예를 들어, shift키를 누르고 MAC 키를 누르면 수직 FOV를 최대로 한 상태에서 이미지가 나타난다.

CENTER TEMP콘트롤을 시계방향으로 돌리면, 이미지가 중간 회색의 강도에 해당하는 온도대로 증가된다. 이것은 (POLARITY 가 white = hot로 세팅한 상태에서), 이미지를 검게 하고 더 뜨거운 타겟 부위를 잘 보여준다. 시계반대방향으로 돌리면 반대로 온도대역을 줄이고 이미지가 밝게 나타난다.

온도 폭(temperature span)키들은 이미지의 full-scale 감도를 선택하게 하

는데, 2가지 range를 선택할 수 있다.

MORMAL range 최대 400℃의 온도폭에 해당하는 감도를 허용한다.

EXTENDED range는 1500℃d[상응하는 타겟 이미지에 해당하는 감도를 줄인다.

EXTENDED range는 “Measurement Configuration Setup메뉴”에서 선택할 수 있다.

칼라 모드

칼라는 shift키를 누른 상태에서 IMAGE/COLOR(모우드)키를 누름으로써 선택하는데 이것을 선택하면 칼라 이미지를 LCD 디스플레이와 칼라 B/W BNC비디오 출력으로 보낸다.

color mode하에서 좌/우 SOFT -SET 키들은 8개의 칼라 파레트 중 하나를 선택하게 해준다. 만약 칼라모우드 하에서 다른 자동모우드를 선택한 경우에는, 파레트는 두 번째의 setup 메뉴로부터 세팅시킬 수 있다.

MIN/MAX 소프트 -SET 키들은 이미지 모우드에 대해 설명한 바와 같이 시야각(FOV) 들을 조절한다.

각각 6에서 20가지 칼라를 포함하는 7개의 칼라 파레트들이 Table 4-3서와 같이 특수 칼라와 흑백 파레트와 더불어 있는데 칼라 모우드 하에서 setup 모우드나 SOFT SET 키들을 사용할 수 있다.

파레트

<u>번호</u>	<u>디스플레이</u>
0	20 - 칼라 무지개
1	20 - 칼라 high contrast
2	10 - 칼라 무지개
3	10 - 칼라 high contrast
4	8 - 칼라 500 시리즈 호환 모우드
5	10 - 칼라 의료(Medical)모우드
6	10 - 칼라 윤곽(검은 경계선)
7	2 칼라 및 흑백 포화 감지(데이터 획득 모우

드)

Point 모드

point 모드(그림 1.14) 하에서 수직, 수평 커서들이 이미지 상에 나타난다.

커서들이 만나는 지점에 대한 온도가 STATUS 라인에 디스플레이 된다.

수직커서의 위치는 좌/우 SOFT-SET 키들에 의해 조정되고, 수평커서의 위치는 MIN/MAX SOFT-SET 키들에 의해 조정된다.

포인트 모드를 벗어난 후에서 커서들의 위치는 그대로 유지된다는 점에 유의한다.

이것은 사용자로 하여금 SETUP 메뉴로부터 시스템 파라미터를 조절하던가 FOV(시야각)이 변경될 수 있는 모드로 들어갔다가, 커서들을 다시 위치시키지 않고 POINT 모드로 다시 들어갈 수 있게끔 한 것이다.

SOFT-SET중앙 키는 커서 2개를 다 중앙의 위치에 다시 세팅시킨다. shift키와 화살표 키는 해당하는 커서를 스크린의 가장자리로 움직인다.

Point 측정은 안전성을 향상시키기 위해 EXPONENTIAL 알고리즘을 사용하여 평균하기 때문에 포인트 위치를 바꾼 후 수치가 안정될 때까지 약 5 초 정도 걸린다.

이 모드에서 Auto-center temperature기능을 사용할 수 있다.

Isotherm Mode (등온 모드)

본문 그림 4.7(c)과 같이, Isotherm 모드에서는 등온(isotherm)표시가 grey scale에 나타난다.

isotherm 과 그 중 isotherm 모드를 활성화시키기 위해서는:

1. SHIFT를 누르고 AREA/ISOTHERM 모드 키들을 누른다.

그림 4.7(b)과 같이 isotherm 디스플레이가 나타난다.

단(single) isotherm 모드에서는 isotherm 표시 1개가 grey scale 상에 나타난다. 이 표시의 위치는 좌/우 SOFT-SET키들에 의해 조정된다.

isotherm 표시와 똑같은 grey scale 레벨 상에 있는 이미지중의 각 화소

(pixel)가 표시가 될 것이다. 또한 이 isotherm 표시에 해당되는 온도가 status 라인에 디스플레이 될 것이다.

이 모드에서 빠져 나가더라도 isotherm 표시의 위치는 그대로 유지된다. 중앙의 SOFT -SET 키는 표시를 grey scale 의 중앙으로 위치시키는데 사용된다.

2. SHIFT를 누르고 AREA/ISOTHERM 모드 키를 다시 누르면 그중 (dual isotherm) 디스플레이가 그림 4.7(f) 같이 나타난다. 그 중 isotherm 에서는 2번째의 등온표시가 나타난다.

ISO 1 과 ISO 2의 폭을 변화시키기 위해서는 :

1. SHIFT 와 AREA/ISOTHERM 키를 다시 누르면 ISO 1이 활성화된다.
2. 위쪽 화살표의 SOFT-SET 키를 누른다. 그러면 표시가 없어진다.
3. 아래쪽 화살표의 SOFT-SET 키를 누른다. 그러면 표시가 좁아진다.
4. SHIFT 키와 AREA/ISOTHERM 모드 키를 다시 누른다.

이제 ISO 2 표시가 나타난다. 이제 그 표시의 폭을 변화시키는 것은 2, 3에서와 동일하다.

모든 등온(isotherm) 디스플레이에서 만약 관심이 되는 부위의 비디오 레벨이 거의 흰색이라면 식별하거나 곤란한 때가 있을지 모른다. 이때는 이미지의 극성(polarity)을 white hot에서 black hot 로 바꾸면 쉽게 식별할 수 있을 것이다.

AREA/ AREA DEFINE 모드

AREA 측정 모드에서 이미지상의 직각모양의 박스 안의 평균온도가 그림 4.7(b)에서와 같이 얻어질 수 있다.

box는 시스템이 켜질 때 정사각형이고 화면이 중앙에 위치하고 있다.

box의 위치는 그림에서처럼 SOFT -SET 키들로 조정된다. 수직 화살표들은 box를 위, 아래로, 수평 키들은 좌우로 움직인다.

AREA 키를 다시 누름으로써 AREA DEFINE 모우드로 되어 BOX 크기를 soft-set 키들을 눌러 조정할 수 있다.

MIN/MAX 화살표 키들은 BOX의 높이를 증가시키던가 감소시키고, 좌/우 화살표 키들은 폭을 변화시킨다.

중앙의 키를 누르면, box는 원래의 지정크기와 위치로 되돌아간다.

AREA키를 다시 누르면 AREA DEFINE(지정)모우드에서 원래의 AREA 모우드로 되돌아 간다.

(span, center temperature, box 위치 등의) 시스템 파라메타가 변할 때마다 status 라인 상에서 온도 디스플레이 지역이 지워지는 것에서 나타나듯이, box 로부터의 온도 데이터의 획들이 다시 시작된다. (re-initialized)

Line Select Mode (라인 선택 모우드)

Line 키는 Line 선택 모우드와 Line Scan 모우드 작동의 선택을 스위치시키는 구실을 한다. 그림 4.7(f)1처럼, Line Scan 모우드에서는 이미지가 사라지고 온도를 대변하는 수평 커서가 디스플레이 된다.

커서의 위치는 SOFT-SET MIN/MAX키들에 의해 조정되고 그 값은 STATUS 라인 상에 디스플레이 된다.

커서와 SCAN 라인의 교차점은 그 스캔 POINT 에서의 온도를 나타낸다. 온도가 표시된(labeled)측은 FRZ/WRT 키를 누름으로써 스크린상의 어떤 위치에다가도 놓을 수 있으며 REL/ERSE 키를 눌러 지울 수 있다.

일단 온도 표시 측이 나타나면 center temperature 가 더 이상 조정되지 않는다.

온도 측들은 Line select 나 Line Scan 모우드를 빠져나가지 않는 이상 그대로 유지된다.

디스플레이의 중앙온도(center temperature)는 Line Select 모우드에서는 변화시킬 수 있으나, Line Scan 이 채용되면 중앙온도에 상응하여 온도측이 변한다는 점에 유의한다.

이 모드에서 빠져나가면, 온도 커서의 위치가 변하지 않는다. SOFT-SET 중앙 키를 누르면 중앙으로 커서가 다시 세팅된다. Line Scan 에 대한 디폴트(default)모우드는 Integration ON 이고 SETUP 메뉴에서 (Integration OFF)로 변경시킬 수 있다.

Line Scan 모우드는 FOCUS 기능이 integration-off 상태에서만 작동한다. Line Scan 모우드에서 좌/우 SOFT-SET 키들은 선택한 라인을 변경시킨다. 선택한 새 라인은 Line Select 모우드로 다시 들어갈 때 보일 것이다. 그래프를 보면서 scan된 라인을 움직이는 것은 조그만 타겟들의 peak 들을 발견할 때 아주 유용하다.

Line Scan 데이터의 지수(exponential)적분이 라인스캔 디스플레이를 부드럽게 (to smooth)하기 위해 자동적으로 시행된다.

적분은 콘트롤을 조정할 때마다 중지되고, 5초 후에 다시 시작된다. 적분 시간 상수는 사용중인 온도범위에 대해 노이즈를 최대로 줄이기에 가장 적합하게 자동적으로 선택된다.

Auxiliary (보조) 모우드

보조 작동 모우드들은 setup 키를 네 번 눌러서 나오는 메뉴로부터 선택한다. 이때 MIN/MAX SOFT-SET 키들은 커서를 움직이기 위해 사용되고, 좌/우 SOFT-SET 키들은 모우드를 선택하는데 사용된다.

13. 상(PHASING)조절

상 조절 보조 모우드는 대상 물체의 수직 끝 부분들의 뒤틀림 (DISTORTION)을 최소로 하는데 사용한다. 여기에서 위 아래의 SOFT 키들은 시야각(FOV)를 조절하고 좌/우의 SOFT 키들은 phasing 파라메타의 값을 조절한다.

이 파라메타를 조절하기 위해서는 위 아래 양끝이 분명한 대상물을 스캐너로 겨냥한다. 관측하는 대상물에 대한 중앙온도(cneter temperature)가 올바른 세팅되었는지 또 초점이 제대로 맞추어졌는지 확인한다. 또한 관심이

바른 세팅되었는지 또 초점이 제대로 맞추어졌는지 확인한다. 또한 관심이 되는 이미지가 제대로(온도에 의해)담겨졌는지(saturated), 즉 타겟의 온도가 잘 잡히도록 온도범위가 잘 잡혔는지 확인한다.

위아래의 양끝이 뒤틀리지 않을 때까지 좌/우 SOFT-SET 키들을 누른다. 이 모우드를 빠져나갈 때,phasing값은 이 다음을 위해 메모리에 저장될 것이다.

이 값은 중앙의 SOFT-SET 키를 누름으로써 저장된다.

Data Acquire(데이터 획득) -그림 1.11에서 처럼 데이터 획득 모우드는 열 화상을 외부적 이미지 처리 시스템으로 분석하거나 사후 분석을 위해 데이터를 기록할 때 사용해야 한다.

이 모우드를 선택하면 여러 가지의 기능들이 수행된다.

1. (Time /Data 와 Status 라인과 같은) 디스플레이가 없어진다.
2. blanking 이 꺼진다.
3. 극성 (polarity)가 white = hot 로 세팅된다.
4. "BLACK/ WHITE ENHANCE" 라고 명명된 7번 파레트가 선택된다. 이 기능은 대상물체의 화상이 온도범위(즉 올바른 span 과 center temperature setting) 에 제대로 들어갔는지 확인하는데 쓰이는 기능이다.

grey scale은 좌측 끝에(조그만) 푸른 부위를 포함하고 오른쪽 끝에는 붉은 부위를 포함하고 그 중간은 연속된 grey scale 로 되어 있다.

푸른색은 underrange를 표시하고 붉은 색은 overrange를 표시한다.

관심이 되는 부위가 푸른색 또는 붉은 색이 되지 않도록RANGE와 CENTER TEMPERATURE를 조절해야 한다. 비디오 레코딩은 흑백 출력만으로 해야 한다. 7번 칼라 파레트로 기록한 이미지를 분석하여서는 안 된다.

왜냐하면 이미지 자체는 칼라를 포함하지 않을지도 모르나 GREY 스케일이 푸르고 붉은 부분에 의해 오염되었기 때문이다.

5. 방사율은 1.0으로 세팅된다. 대상물체의 방사율은 데이터를 분석할 때, 소프트웨어(상)으로 세팅시킨다.

이 모드에서는 soft -set 키들이 FOV를 콘트롤 한다.

MIN/MAX SOFT 키는 수평 및 수직 FOV를 동시에 콘트롤 하고, 좌/우 SOFT 키는 수평 FOV만을 조정한다.

대상물체의 화상이 온도범위(즉 올바른 SPAN 과 CENTER TEMPERATURE SETTING)에 제대로 들어갔는지 확인하는데 쓰이는 기능이다.

Line Scan 데이터 전달- 이 보조 모드의 기능은 라인스캔 데이터를 직렬 I/O 인터페이스를 통해 외부 컴퓨터로 보내는 것이다. 이 모드를 작동시킬 때 Line select 모드와 유사한 디스플레이가 나타날 것이다.

MIN/MAX soft-set 키들은 FOV를 조절한다. 중앙의 soft -set 키는 line 데이터를 직렬 I/O 인터페이스를 보낸다. 데이터는 스크린의 256 화소 폭에 해당하는 256값들로 구성되어 있다. 값들은 선택한 라인의 각 화소의 상대적 진폭에 해당하는 hexadecimal(6진법)의 0에서 FF(즉 0-256)의 값을 말한다. 보내지는 데이터는 16개의 값이 16줄로 되어 있다.

SOFT-SET 키들로 이뤄지는 기능들은 데이터를 받는 컴퓨터로도 수행할 수 있다.

* 이 모드가 작동하기 위해서는 Line Scan Integration이 ON 상태로 있어야 한다,

캘리브레이션 데이터 전달 - 이 모드는 시스템 캘리브레이션 파라메타들을 직렬 I/O 인터페이스를 통해 외부 컴퓨터로 보내기 위해 옵션인 캘리브레이션 소프트웨어와 함께 사용된다.

Fsat Line Scan - 그림 4.7(f)의 Fast Line Scan 보조(AUX)모드는 매우 빠른 열적 현상을 보기 위해 사용된다. 수직 스캔거울은 거의 중간 위치에 서 정지하고, 이 라인은 Grey shades로 디스플레이 된다. single line 에 대한 scan 들이 약 125마이크로 초 간격으로 되어지고, 비디오 테이프 레코딩이나 사후분석을 위해 디스플레이 된다.

좌우의 soft-set 키들은 수평 FOV를 조절한다.

MIN/MAX 키들은 이 모드에서는 아무런 기능도 행하지 않는다.
graphics 는 작동을 하지 않거나 (FAST LINE SCAN)작동을 할 수 있다.
(FAST LINE SCAN W/GRAPHICS)760 이 FAST LINE SCAN 모드에
있을 때, 포화 파레트(NO. 7)은 자동적으로 선택된다.
이 FAST LINE SCAN 모드는 주로 Therma GRAM 이미지 처리 시스
템과 함께 사용된다.

Grey Scale - 흑백 모드에서 즉 grey scale Auxiliary Mode 는 시스템
에 처음으로 전원이 들어올 때, 똑같은 grey scale 패턴을 디스플레이 한
다. 이 디스플레이는 모니터를 조정하거나, 비디오 장비를 체크할 때 유용
하다.

대각선의 라인들은 내부의 Isotherm 과 Fast Line Scan 회로들의 올바른
작동을 가리킨다.
칼라 기능을 선택하면, 칼라 grey scale이 나타날 것이다.

방사율(측정)- 방사율 (emittance)측정 auxiliary mode 는 area 모우드를
통해 타겟 온도를 보는 동안 방사율을 세팅하는데 사용된다.
이것은 방사율을 알고있는 레퍼런스 물체를 방사율과 온도를 모르는 물체
에 부착시켰을 경우 유용하다.
레퍼런스 물체의 온도는 방사율이 입력되면 디스플레이 될 것이다.
얻어질 때까지 방사율을 조절한다. 이때 얻은 방사율은(방사율을 몰랐던)
물체의 방사율이다.
이 기능을 정확히 사용하기 위해서는 background 온도(주변온도)가
"Measurement Configuration Setup 메뉴"에서 세팅되어야 한다.
이 모드에서는 MIN/MAX SOFT-SET 키들이 방사율을 증가시키거나
감소시킨다
좌/우 SOFT-SET 키들은 수직 및 수평 FOV를 동시에 조절한다.

레퍼런스 물체로부터 잘 모르는 물체로 AREA BOX를 옮기려면 스테너를
옆으로 움직이던가 AREA 모우드로 box를 옮긴 후 방사율 측정모우드로
box를 옮긴 후 방사율 측정 모우드를 다시 작동시킨다.
DEFINE AREA 모우드는 다른 사이즈와 모양의 박스를 선택할 때 사용된
다.

이 모우드는 접촉식 온도 측정기와 함께 사용할 수 있다.
이 경우, 사용자는 status 라인에 디스플레이 되는 온도치가 접촉식으로 측정
한 값과 같이 될 때까지, 방사율을 줄이는 것이다.

라인 스캔 데이터 전달- 이 Aux 모우드의 기능은 직렬 I/O 인터페이스를
거쳐 외부의 컴퓨터로 라인 스캔량의 데이터를 보내는 역할을 하는 것이
다.

이 모우드가 작동할 때 라인 스캔 모우드에 유사한 디스플레이가 나타난
다.

MIN/MAX 소프트 세트 키들은 비디오 라인을 선택한다.

LEFT/RIGHT 소프트 키들은 스캐너의 시야각(FOV)을 조절한다. 가운데
의 소프트키는 라인 데이터들을 직렬 I/O 인터페이스로 보내는데 쓰인다.
데이터는 스크린의 256화소(PIXEL) 폭에 해당하는 256개의 값으로 구성되
어 있다.

그 값은 선택한 라인의 각 화소의 상대진폭에 해당하는 6진법의 0에서
FF(즉 10진법에서 0-256)의 범위에 해당된다.

데이터는 각각 16개의 값을 갖는 16줄로 되어있다.

소프트 키들로 작동되는 기능들은 데이터를 받는 컴퓨터로도 작동시킬 수
있다.

유의 : Line scan integration 이 ON 상태가 되어야 이 모우드가 작동할
수 있다.

캘리브레이션 데이터 전달- 이 모우드는 옵션인 캘리브레이션 소프트웨어
와 함께 시스템 캘리브레이션 매개 변수를 직렬 I/O 인터페이스를 거쳐 외
부 컴퓨터로 보내는데 사용된다. 시스템 기능들은 이미지 파일들은 관리하
고 시스템 파라메타들을 세팅시키는데 도움을 준다.

SAVE TO DISK

디스플레이 되는 이미지를 플로피 디스켓이 저장시킨다.

RECALL FROM DISK

디스크 상에 저장된 이미지를 (화면으로) 불러들여 디스플레이 한다.

SAVE CFG/ RECALL CFG

SETUP 메뉴에 세팅된 것들을 저장하거나 불러낸다.

이것은 사용자가 나중에 똑같은 세팅으로 (즉, 예를 들면 온도 폭, 방사율, 중심 온도 등등) 다시 촬영하기를 원할 경우 유용하다.

FRZ/REL

LCD 화면 또는 외부 모니터 상의 이미지를 동결시키거나 또는 이를 해제한다. 이미지를 동결하기 위해서는 가급적 이미지 AVERAGER를 ON시킨 상태에서 동결하는 것이 바람직하다.

WRT/ERS

LINE SCAN 모드에서 한 개 또는 그 이상의 온도 스케일에 대해 label 할 때 사용된다.

PRMTRS/HELP

PRMTRS 키는 현재의 시스템 상태를 2페이지에 걸쳐 디스플레이 하여 준다.

SETUP/REBOOT

SETUP 기능은 4개의 셋업 메뉴를 디스플레이 한다.

REBOOT는 콘트롤 패널로부터 "soft reset"을 하게끔 한다.

14. SYSTEM PARAMETER

시스템 파라메타들의 값은(그림 1.7) “System Parameters”의 1페이지와 2페이지의 두 메뉴로부터 디스플레이 되거나 변경시킬 수 있다. PRMTRS 키를 한 번 누르면 PAGE 1. 두 번째 누르면 page 2가 나타난다.

SETUP MENUS

메뉴 item 들은 MIN/MAX SOFT -SET 키들을 사용해 선택한다. 바라는 매개변수들의 값은 좌우 소프트 키들을 사용해 바꾼다. 이 중에 예외가 하나 있다. 그것은 background 온도를 바꿀 때 CENTER TEMPERATURE 콘트롤로 해야 한다는 것이다.

EMITTANCE

타겟의 방사율은 여기에서 세팅하고 그 범위는 0.1에서 1.0이다. 방사율에 대해서는 부록 A를 참조하라.

BACKGROUND TEMPERATURE

타겟 주위의 (background)의 평균온도는 CENTER TEMPERATURE 콘트롤을 사용해 콘트롤 한다.

TEMP RANGE /FILTER

메뉴상의 이 라인을 현재 사용하고 있는 필터를 디스플레이하고, 옵션의 필터 메카니즘 (최대 4개의 필터)중 한 개 또는 NO FILTER를 선택할 수 있다.

EXTERNAL OPTICS TRANS

이 transmission(투과율) factor 는 계속 사용되며 외부의 광학적 옵션이 설치되어 있지 않은 경우 1.0으로 세팅되어 있어야 한다.

heat shield, window 또는 렌즈 같은 광학적 악세사리는 이 패러미터로 값을 보전해 주어야 한다.

시스템에 전원 공급을 하거나 reset 시키면 자동적으로 이 값은 1.0으로 reset 된다.

5X TELESCOPE TRANS

5X Telescope (즉 2배 광각렌즈)에 표시된 투과율의 값을 입력시킨다.

이 값도 역시 기존의 셋업 메뉴 상에서 Non- Volatile 메모리에 저장된다.

3X TELESCOPE

3배 망원경 케이스에 표시된 투과율을 입력시킨다.

이 값도 역시 기존의 셋업 메뉴상의 Non -Volatile메모리에 저장한다.

IMAGE AVERAGER

평균할 이미지 필드의 수를 선택한다. (1, 2, 4 또는 16) 일단 이들 4가지 숫자 중의 하나를 선택하면 Freeze/unfreeze 기능이 작동할 수 있다.

LINE SCAN(LS) INTEGRATE

line scan 모우드 작동을 integration on 또는 off 상태로 하게끔 한다.

integration on 에서는 연속적인 스캔들이 noise를 줄이기 위해 평균 될 것이다.

그러나 장면이 바뀌는 것에 대한 응답 시간을 integration off 상태에서 보다 느리게 될 것이다.

CENTER TEMPERATURE

manual(Man), locked(LOCK) 또는 auto(AUTO) center temperature 가 이 line 으로부터 선택될 수 있다.

수동 모우드가 디폴트 모우드이고, center temp 콘트롤은 중심온도를 세팅 하는데 사용된다.

locked 모우드에서는 중심온도가 바뀌지 않는다.

자동(auto) center temperature 모우드는 시스템이 최적의 중심 온도로 맞추게끔 한다.

자동 중심 온도 기능이 선택되면, 중심온도는 측정된 point 또는 area 온도를 추적할 것이다. point 모우드를 선택하면 응답속도가 가장 빠를 것이다. Line scan 모우드에 있을 때는 자동 온도 기능을 사용해서는 안 된다.

THERMAL UNITS

섭씨 또는 화씨의 온도 단위를 선택케 한다. 또한 온도단위 대신에 상대적 방사(에너지)단위인 Level 단위(LVL)를 선택할 수도 있다.

TEMPERATURE OUTPUT

point와 area 모우드에서 계산된 온도(들)가 다음의 세 가지 방법 중 하나로 직렬 입출력(I/O)인터페이스를 통해 보내질 수 있다.

1. ON COMMAND : 온도 데이터가 외부 컴퓨터에 의한 명령으로 보내질 수 있다.
2. CONTINUOUS : 온도 데이터가 계산이 이루어질 때마다 보내진다.
3. 0.5 SEC : 0.5초마다 온도 데이터가 전달된다.

FORMAT DISKETTE

새 디스켓을 준비하거나 사용 중이던 디스켓을 재 사용하기 위해 지울 때

사용한다.

ISOTHERM BOUNDARIES

isotherm 모드에 있을 때 isotherm 범위를 status line 에 디스플레이 한다.

POLARITY

이 기능은 ISO 모드에 있을 때 바라는 레벨이 거의 하얀색일 때 특히 유용하다.

통상 강조된 화소들은 WHITE =HOT 모드에서 잘 보이지 않는다. 그러나 black=hot 로 전환하면 잘 보이게 된다.

BLANKING

이 기능은 스크린 메시지를 주변 부위를 까맣게 하여, 스크린 메시지가 잘 보이게 한다.

COLOR PALETTE

COLOR 기능을 선택하였을 때 KFPXM 번호를 선택할 때 사용된다.

FRONT PANEL LIGHTS

앞 패널 단추의 조명을 ON 또는 OFF시킨다.

VCR PLAYBACK

VCR 에 기록된 데이터가 760에 입력되어 LCD 모니터에 디스플레이 되도록 한다.

이 이미지들은 단지 시각적으로 보이기 위한 목적에 playback 되는 것이 지 760에 의해 분석되는 것은 아니다.

TIME/DATE SELECT /SET

시스템내의 날짜와 시간을 세팅한다.

Auxiliary 모드 셋업 메뉴는 그림 1.10에 있는 기능들 중 어느 하나를 control/electronics 유니트의 키보드상의 aux 키에 할당하는데 사용된다.

예를 들어, PHASING ADJUSTMENT를 메뉴에서 선택한 다음 AUX 키 (shift 키를 누른 상태에서 line/aux 키)를 누르면 phasing adjust 모드를 작동시키는 셈이 된다.

Image Averager는 내장된 real-time 디지털 이미지 처리기이다.

IMAGE AVERAGING

평균은 열 화상 시그널의 random noise를 평균한 field 수의 제곱근에 반 비례하여 줄여준다.

칼라 모드 하에서의 예민한 온도범위(폭) (2, 5, 10)에서 타겟 방사율이 낮은 타겟의 경우에는 이미지 평균기능을 작동하는 것과 안 하는 것이 현저히 나타난다.

2°C의 온도 폭에 평균기능을 사용하는 것을 강력히 권한다.

이미지 평균에는 weighted exponential average를 사용한다.

16. 작동 유의 사항들

line scan 분석을 위해서는, line select 또는 Line scan 모우드로 들어가기 전 이미지를 동결(freeze)시킨다. 왜냐하면 FRZ/WRT 와 REL/ERSE 키들은 온도 측 (온도 스케일)을 세팅시키거나 지울 때 다시 재조정되기 때문이다. SAVE CFG는 averager time constant를 포함한 기기의 모든 세팅들을 저장하거나 동결된 이미지 전체를 저장하지는 않는다.

일단 이미지가 동결되면, 이미지는 다시 동결되었던 것이 풀리지(unfreeze) 않는 한 center temperature, range, emittance 또는 다른 real-time 콘트롤에 의해 수정될 수 없다. Data Acquire 모우드라고 명명된 특수 Auxiliary 모우드를 보조(auxiliary)모우드 메뉴에서 선택할 수 있다.

사후 분석을 위해 비디오 테이프에 이미지를 저장할 때, VCR 은 760의 B/W 출력에만 연결시켜야 한다.

내장된 이미지 처리기는 현재 사용중인 렌즈를 결정하기 위해 숨겨진 정보코드를 풀고, Measurement Configuration Setup Menu 에 있는 투과율 (통과율)값을 사용할 것이다.

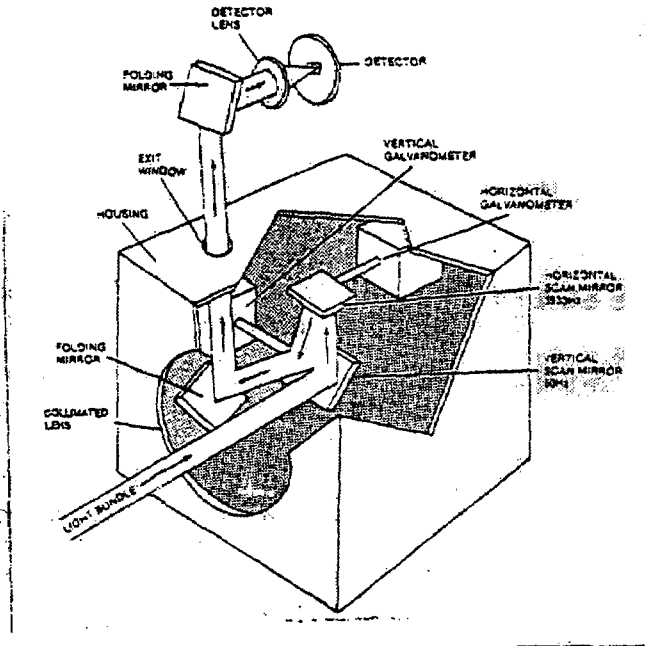


그림 1.1 스캐너 내부 구조

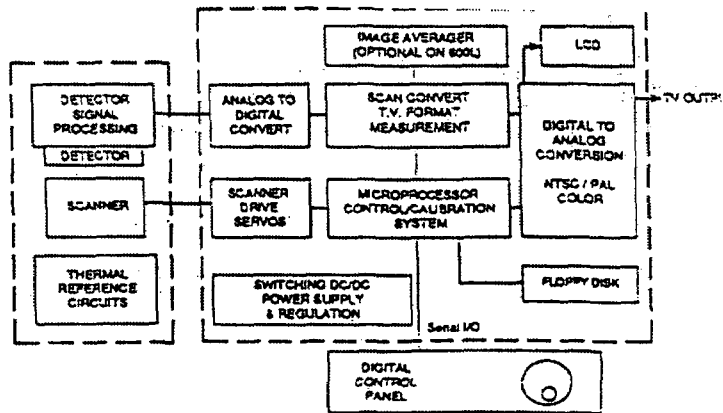


그림 1.2 콘트롤 판넬의 개략도

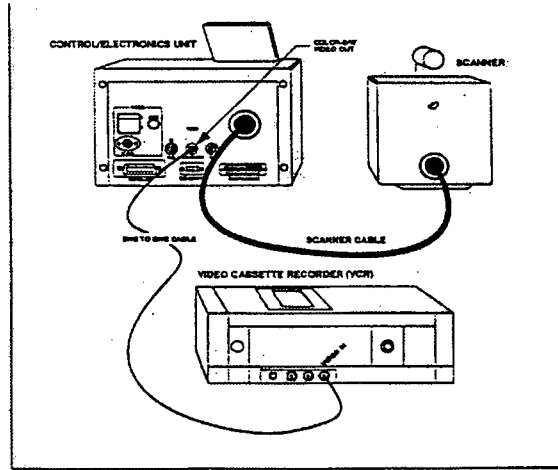
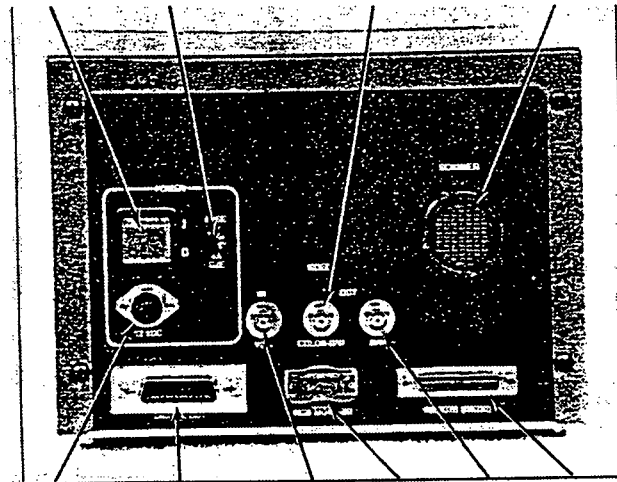


그림 1.3 VTR의 사용

on/off switch 4A 125V LF Fuse Analog Color Video Output Scanner Input



750 Power Connector Digital Video Output VCR In RGB Out B/W Out RS-232 Port

그림 1.4 BNC Connectors

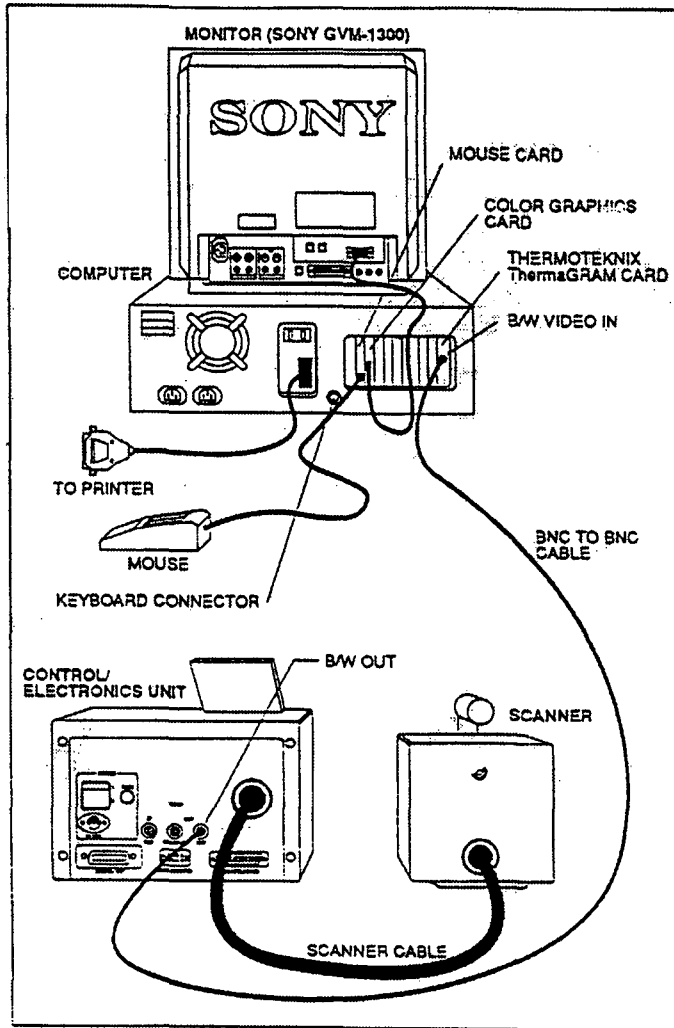


그림 1.5 데이터 획득(Aquisition) 및 Playback 분석

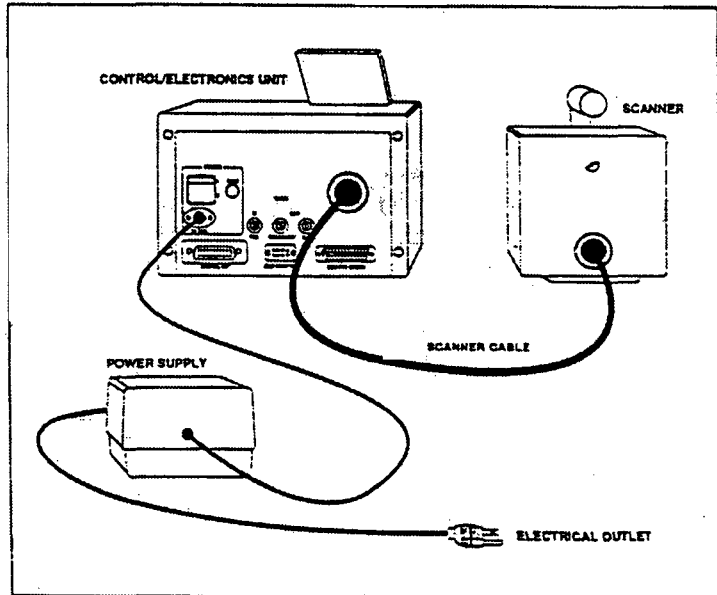
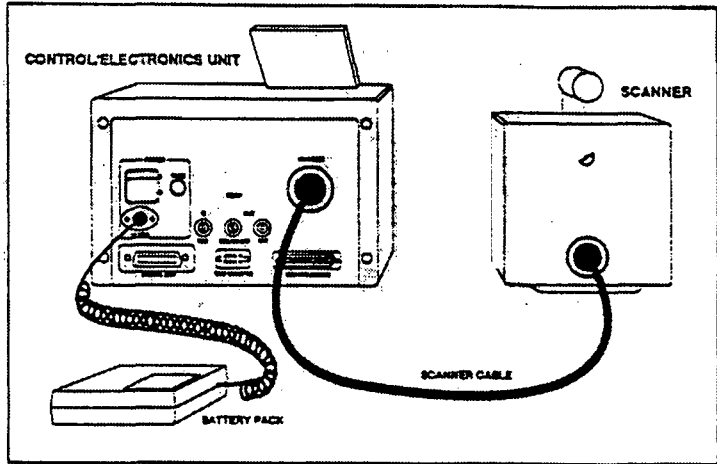


그림 1.6 DC 작동

<u>SYSTEM PARAMETERS</u>	
IMAGE AVERAGER:	1 FRAME
DISK IMAGE NUMBER:	NONE
CENTER TEMPERATURE:	+33.8 °C
CENTER LEVEL:	03004
FILTER/TEMP RANGE:	OPEN NORM
TELESCOPE AND TRANS:	1X 1.0
EXT OPTICS TRANS:	1.0

-1-

FUNCTIONS

SAVE TO DISK	RECALL FROM DISK	FRZ/WRT REL/ERSE	RCL CFG SAVE CFG	PRINTS HELP	SETUP REBOOT
--------------	------------------	---------------------	---------------------	----------------	-----------------

그림 1.7 System Parameter

<u>MEASUREMENT CONFIGURATION SETUP</u>		
➔ TARGET EMITTANCE	< 1.0 >	
BACKGROUND TEMP	< +25.0°C >	
TEMP RANGE/FILTER	< OPEN NORM >	
EXT OPTICS TRANS	< 1.0 >	
.5X TELESCOPE TRANS	< 1.0 >	
3X TELESCOPE TRANS	< 1.0 >	
10X TELESCOPE TRANS	< 1.0 >	

- 1 -

그림 1.8 Measurement Configuration Setup

<u>PROCESSING PARAMETERS SETUP</u>		
➔ IMAGE AVERAGER	< 1 FRAME >	
LINE SCAN INTEGRATE	< OFF >	
CENTER TEMPERATURE	< MANUAL >	
THERMAL UNITS	< CENTIGRADE >	
TEMPERATURE OUTPUT	< DISABLED >	
FORMAT DISKETTE	< NO >	

- 2 -

그림 1.9 Processing Parameters Setup

<u>DISPLAY OPTIONS SETUP</u>		
➔ ISOTHERM BOUNDARIES	< ON >	
POLARITY	< WHITE=HOT >	
BLANKING	< OFF >	
COLOR PALETTE	< 7 >	
FRONT PANEL LIGHTS	< ON >	
VCR PLAYBACK	< OFF >	
TIME/DATE SELECT		
TIME/DATE SET		

- 3 -

그림 1.10 Display Options Setup

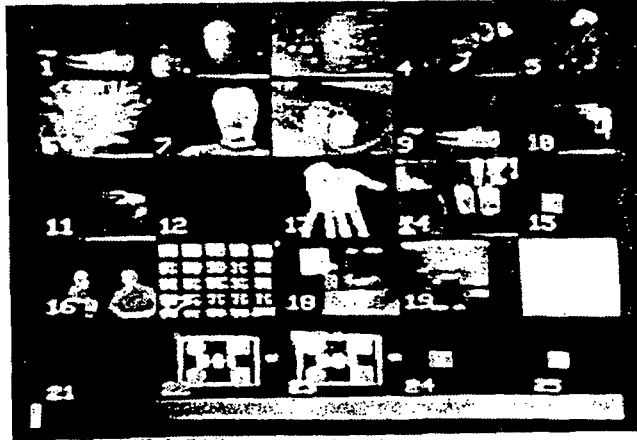


그림 1.11 저장된 이미지 display

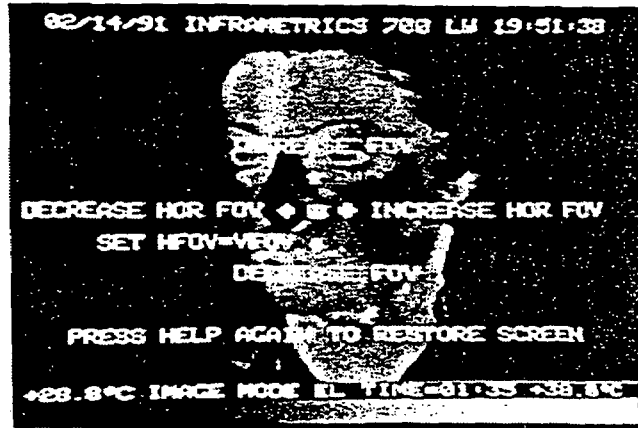


그림 1.12 Soft-set 키들



Minimum
displayed
temperature

Mode

Sequential status

Maximum
displayed
temperature

그림 1.13 이미지 모드 초기 화면

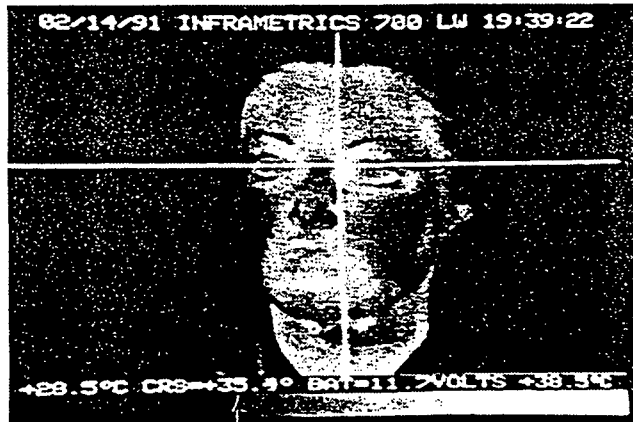


그림 1.14 Point 모드

여 백

부 록-B 적외선 카메라 측정원리와 특성

제 1장 온도측정

온도는 직접 측정될 수 없는 물리량이다. 온도를 측정하기 위해서는 온도변화에 따른 물질의 물리적 변화, 즉 일정한 부피의 용기안에 들어 있는 기체의 압력, 수은주의 깊이, 금속의 전기저항, 소리의 속도등을 측정함으로써 온도를 측정할 수 있다.

온도계는 일차온도계 (Primary thermometer)와 이차온도계 (secondary thermometer)로 나눌 수 있는데 일차온도계는 알려져 있지 않거나 온도에 따라 달라지는 상수를 포함하지 않은 명확한 상태방정식에서 온도를 결정할 수 있는 온도계를 말하며, 그 밖의 모든 온도계는 이차온도계이다. 대표적인 일차온도계는 기체온도계이고 이차온도계에는 백금저항 온도계등이 있다.

제 1절 일차온도계

(a) 기체 온도계

일차온도계로써 기체온도계의 중요성은 많은 기체가 거의 이상기체와 같이 행동하며 이상기체와의 차이는 밀도와 온도의 간단한 함수로 쉽게 알 수 있다는 것과 이론이 잘 정립되어 있다는 점이다.

이상기체에 대해서는 다음 관계식이 성립한다.

$$PV = NRT \dots\dots\dots (1 . 3)$$

여기서 P는 압력, V는 부피, N은 몰로 나타낸 기체의 양이며 R은 기체 상수이다.

실제기체에 대해서는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$PV = NRT \left(1 + B(T) \frac{N}{V} + C(T) \left(\frac{N}{V} \right)^2 + \dots \right) \dots \dots \dots (1.4)$$

이때 B(T) 와 C(T) 는 각각 2차 및 3차 비리알 계수이다.
 이상기체와 실제기체와의 차이를 비리알 계수의 전개로 나타낼 수 있다는 것은 이 비리알 계수가 분자간에 작용하는 힘과 직접적인 관계가 있기 때문이다. 즉 2차 비리알 계수는 두 개의 분자간의 상호작용, 3차는 세 개의 분자간의 상호작용에서 나온 것이고 이 관계는 이론적인 계산이 가능하다. 온도가 아주 높거나 낮지 않으며, 기체의 밀도가 높지 않으면 비리알 전개는 급속히 수렴하기 때문에 3차까지만 고려해주면 충분하다.

기체온도계의 종류에는 압력을 일정하게 유지하는 경우와 부피를 일정하게 유지하는 경우의 두 가지가 있으며 기체의 밀도를 정하기 위하여 유전계수나 굴절율을 측정하는 방법도 사용되고 있다. 선진국의 표준기관에서는 일반적으로 기체온도계를 이용하여 열역학적 온도를 결정하고 있다.

(b) 음향온도계

기체내에서 소리의 속도, w는 다음 식으로 주어진다.

$$W^2 = \gamma \frac{RT}{M} (1 + \alpha P + \beta P^2 + \dots) \dots \dots \dots (1.5)$$

여기서 γ 는 헬륨의 경우 $\frac{5}{3}$ 이며 M은 물질량 (molar mass) , α, β 는 비리알 계수와 온도에 대한 비리알 계수의 미분의 함수이다. 음향 온도계는 저온에서 일차온도계로 사용된다.

(c) 잡음 온도계

잡음 온도계는 금속내의 전자들이 불규칙적으로 움직임으로 해서 생기는 잡음전압 (noise voltage)이 온도와 간단한 관계식을 갖는 현상을 이용한 것이다.

$$\frac{1}{V^2} = 4kT\Delta\nu \dots \dots \dots (1.6)$$

이때 V 는 잡음전압, $\Delta\nu$ 는 측정주파수의 띠폭 (band width)을 나타낸다. 잡음 온도계의 원리는 간단하지만 실질적으로 해결해야만 하는 문제가 많기 때문에 극저온에서만 일차온도계로서의 연구가 계속되고 있다.

(d) 자기 온도계

천이금속이나 희토류원소를 포함한 상자성염의 감수율은 온도에 역비례하는 큐리법칙에 근사하게 맞으나 실제로 감수율을 정확히 계산하기는 매우 어렵다. 이런 점에서 자기 온도계는 엄격한 의미의 일차온도계는 아니지만 몇 개의 상수를 실험적으로 결정해 주면 경우에 따라 내삽 혹은 외삽온도계로서 중요한 역할을 하기 때문에 일차온도계로 취급하고 있다. 자기 온도계는 특히 1 K 이하의 극저온에서 많이 사용된다.

제 2절 이차온도계

위에서 설명한 바와 같이 일차온도계를 제외한 모든 실용적인 온도계는 이차온도계이며 이 책의 나머지 부분은 모두 이차온도계를 이용한 온도측정에 관한 설명이다. 표 1.2에는 상용되는 온도계의 종류와 온도영역, 그리고 정확도의 한계가 나와 있다.

2장에서 광온계를 중심으로 한 복사온도계에 대하여 설명하였으며 3장에는 열전대, 4장에는 저항온도계, 5장에는 유리온도계, 그리고 수은충만식온도계와 바이메탈과 같은 기타온도계에 대하여 6장에 자세히 설명하였다.

표 1.2 상용되는 온도계의 종류, 온도영역 및 정확도의 한계

온도계	온도영역	정확도의 한계
반도체저항온도계	0 - 20 K	± 1 mK
백금저항 온도계	20 - 1000 K	± 1 mK (20 K에서) ± 12 mK(1000 K에서)
열전대	20 - 1300 K	± 10 mK(20 K에서) ± 200 mK(1300 K에서)
유리체온도계	250 - 400 K	± 30 mK
바이메탈	250 - 400 K	± 30 mK
써미스타	250 - 500 K	불확실
광고온계	1000 K 이상	± 0.5 K - 20 K

제 2장 복사 온도계

복사란 고체, 액체 및 기체를 매질로 하는 전도 및 대류와 열의 이동과는 달리, 매질을 통하지 않고 복사선에 의해 열이 방출하는 것을 말한다. 절대영도 (-273.15 °C) 이상의 물체로부터 방출되는 복사에너지는 온도에 따라 그 크기가 다르게 나타나기 때문에, 복사에너지를 측정하면 온도를 알 수 있다. 복사온도계는 그 에너지를 측정하여 온도를 알아내는 비접촉식 온도계를 말한다.

복사에너지를 측정하는 검출기는 가시형 광고온계의 경우 사람이 이 역할을 하며, 광전식 광고온계는 눈대신 광전증폭관이, 복사열온도계는 반도체 소자인 광다이오드, 열전대, 써미스터 및 기타 전기기 및 사용과장에 따라 여러 가지 이름으로 부르고 있으나 본 책에서는 모두를 통칭하여 복사온도계 (pyrometer)로 부르기도 한다.

복사온도계는 접촉방식으로 온도를 측정하는 다른 온도계와는 달리 비접촉방식으로 물체의 온도를 측정하므로 움직이는 물체나 크기가 작은 물체등의 온도측정에 유리하며, 0 °C 이상 4000 °C까지의 열 측정에 사용되고 그 이상의 온도는 다른 방법으로 측정하게 된다.

2.1 측정원리

2.1.1 플랑크의 복사법칙 및 온도측정

복사에너지를 완전히 흡수하는 물체를 흑체라 하며, 이러한 흑체는 완전복사체 역할을 한다. (2.3 절 참조) 열평형 상태에 있는 흑체가 방출하는 복사에너지는 절대온도와 파장에 따라 변하며 (그림 2.1 참조), 이를 식으로 나타내면 다음과 같다. 즉,

$$N_{\lambda} = \frac{C_1}{\pi \lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2.1)$$

이다. 이 식을 플랑크의 복사법칙이라 하며, 여기서

$N_{\lambda(T)}$ = 분광복사휘도

λ = 파장

T = 절대온도

C_1 = 복사제 1 상수

C_2 = 복사제 2 상수 (0.014388 m · K)

이다. 이 식에서 분광 복사휘도란 복사체에서 단위시간당, 단위입체각 복사방향에 수직한 단위 투영 단면적당, 단위 파장당 방출되는 복사에너지로서 $W / sr \cdot m^2 \cdot m$ 로 표시된다.

플랑크의 복사법칙 (2.1 식)은 온도가 낮고 파장이 짧은 영역에서는 빈 (Wien) 의 복사법칙으로 불리는 조금 간단한 식으로 된다. 즉 $\lambda T \ll 1$ 일 때 (2.1)식의 분모중 $e^{C_2/\lambda T}$ 가 1보다 훨씬 커 -1 을 무시할 수 있다. 따라서

$$N_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} - C_2/\lambda T \dots \dots \dots (2.2)$$

이다. 이식은 파장이 가시광선 영역이고, 온도 3000 K이하인 경우, $\lambda T < 0.0021 \text{ m} \cdot \text{K}$ 일 때 플랑크 복사법칙인 (2 .1) 식과 0.1 % 잘 일치한다.

(2 .1)식과 (2 .2)식에서 임의의 파장 (특정한 한 파장을 알고에서 분광복사휘도 $N_\lambda(T)$ 를 정확히 알면 온도를 알 수 있으며, 이를 그림 2 .1에서 보면 임의의 파장에서의 높이를 측정하는 것과 같다. 이와같은 방법으로 측정하는 온도계 중 가시광선영역인 $0.65 \mu\text{m}$ 의 파장을 사용하고 사람의 눈을 검출기로 한 온도계를 가시형광고온계, 광전증폭관을 검출기로 한 온도계를 광전식광고온계로 부른다. 측정파장이 가시광선영역을 벗어난 온도계 특히 적외선영역의 파장을 사용하는 온도계를 적외선복사온도계 또는 좁은대복사온도계라 부르고 있다.

인접한 두 파장에서 복사에너지를 측정하여 온도를 알아내는 온도계를 이색온도계라 부른다. 그림 2 .1에서 전체파장에 대한 분광복사휘도의 합 즉, 복사곡선 아래쪽의 넓이 (2 .1)식을 전파장에 대해 적분함으로써 구할 수 있으며 이를 총복사휘도 $N(T)$ 라 한다. 즉,

$$N(T) = \int_0^\infty N_\lambda(T)d\lambda = \frac{1}{\pi} \delta T^4 \dots\dots\dots (2 . 3)$$

로 절대온도 4승에 비례한다. 이것을 스테판-볼츠만의 법칙이라 부르며 여기서 δ 는 스테판 -볼츠만의 상수로 $5.6686 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot$

deg^{-4} 이다. 위 식에서 총복사휘도 $N(T)$ 나 (2 .3)식의 총복사휘도 $N(T)$ 를 정확하게 측정하기란 쉽지 않으며, 측정한 값의 신뢰도가 나쁘다. 따라서 국제실용온도눈금 -68에서는 금의 응고점 ($1064.43 \text{ }^\circ\text{C}$; 1337.58 K)을 이용한 금점흑체를 기준으로 하여 금점흑체에서의 분광복사휘도와 임의의 절대온도 T_{68} 을 갖는 흑체의 분광복사휘도와의 비를 이용, 온도를 알아내도록 정의(약속) 하였다. 즉,

$$\frac{N_\lambda(T_{68})}{N_\lambda(T_{68}(Au))} = \frac{\exp[C_2/T_{68}(Au)] - 1}{\exp[C_2/\lambda T_{68}] - 1} \dots\dots\dots(2 . 4)$$

이며, 여기서 $N_\lambda(T_{68})$ 과 $N_\lambda(T_{68}(Au))$ 는 각각 파장 λ 에서 온도 T_{68} 금의 응고점온도 $T_{68}(Au)$ 인 흑체의 분광복사휘도이며 C_2 는 복사제 상수이다. (2.4)식은 그림 2.1에서 볼 때 어떤 특정한 한 파장에서 높이비라 할 수 있다. 그러므로 임의의 한 파장을 제외한 모든 파의 복사에너지를 흡수하는 간섭필터를 사용한 복사온도계가 있다고 정하고 먼저 금의 응고점 흑체에서 나오는 에너지를 측정한다면 온도계의 출력을 전압 또는 전류등의 측정하기 쉬운값 (분광복사휘도 절대량은 복잡한 단위로 측정하여야 함)으로 얻어낼 수 있다. 처음 온도를 알고자 하는 임의의 온도 T_{68} 인 흑체에 대해 열복사에너지를 전압 또는 전류등으로 측정하여 먼저 측정한 값과 같이 (2.4)식의 좌변에 대입하면 분광복사휘도의 비를 정확히 알아낼 수 있다. 그러므로 이미 온도가 잘 알려진 금의 응고점 $T_{68}(Au)$ 를 (2.4)식의 변에 대입하면 절대온도 T_{68} 을 계산할 수 있어 정확하게 온도를 측정한 것이 된다.

전복사온도계에 대한 총복사휘도의 비는 (2.3)식으로부터

$$\frac{N(T_{68})}{N(T_{68}(Au))} = \frac{T_{68}^4}{T_{68}(Au)^4} \dots\dots\dots (2.5)$$

가 되므로, 앞의 설명과 같이 두 흑체의 출력값 비를 알면 절대온도 T_{68} 를 알 수 있다. (앞으로 T_{68} 은 T로 쓰기로 한다.)

2.1.2 복사율

같은 물질이라도 흑체가 아닌 보통복사체가 방출하는 복사에너지는 같은 절대온도 T 인 흑체가 방출하는 복사에너지보다 항상 작다.

그림 2.2 는 같은 절대온도 T 인 흑체와 보통복사체의 파장에 따른 분광복사휘도를 그린 것이다. 그림에서 보통복사체, 즉 철판, 주물용 쇠물 등의 복사에너지를 측정하여 온도 (밝기온도 T_B)를 읽을 경우 실제온도 (흑체의 온도 T)보다 낮게 측정됨을 알 수 있다. 따라서 측정한 밝기온도 T_B 를 보정하여 실제온도 T 를 알기 위해서는 밝기온도와 실제온도 간의 보정계수인 복사율 ϵ 을 알아야 한다.

복사율은 두 가지로 구분되는데 특정한 한 파장에서의 복사율은 분광 복사율, 파장에 관계없는 복사율은 총복사율이라 한다.

그림 2.2 흑체와 보통복사체의 파장에 따른 분광복사 휘도

그림 2.2 에서 임의의 한 파장 λ_1 에서 흑체의 분광복사휘도 $N_{\lambda_1}(T)$ 와 보통복사체의 분광복사휘도 $N_{\lambda_1}(T_B)$ 의 비 (높이비)를 분광복사율 $\epsilon_{\lambda_1}(T)$ 이라 하며 다음 식과 같이 표현된다. 즉,

$$\epsilon_{\lambda_1}(T) = \frac{N_{\lambda_1}(T_B)}{N_{\lambda_1}(T)}$$

이 된다. 이 식을 임의의 파장에 대한 일반식으로 쓰면

$$\epsilon_{\lambda}(T) = \frac{N_{\lambda}(T_B)}{N_{\lambda}(T)} \dots\dots\dots (2 . 6)$$

이다. 이식은 분자의 값이 흑체의 분광복사휘도인 $N_{\lambda_1}(T)$ 가 되면 복사율이 1이 되며, 흑체복사율 1과 비교하여 보통복사체들은 1이하의 값을 갖도록 정의한 것이다. 또한 그림 2.2에서 파장이 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 가면서 높이 비가 다름을 알 수 있는데 이는 같은 복사체라도 파장에 따라 분광복사율이 다르게 나타남을 보여주는 것이다. 같은 파장에서 복사체의 절대온도가 바뀌면 분광복사율이 다르게 나타나며 복사체의 종류에 따라 복잡한 양상을 갖고 있다.

총복사율은 그림 2.2에서 보통복사체와 흑체의 복사에너지곡선과 밑면 사이의 넓이간의 비, 즉 총복사휘도 (2.3 식 참조) 의 비로 표현되는데 다음 식과 같다. 즉,

$$\epsilon(T) = \frac{T_B^4}{T^4} \dots\dots\dots (2 . 7)$$

이다. 여기서 흑체의 절대온도 T 를 실제온도라 하며, T_B 는 밝기온도 이므로, 실제온도와 밝기 온도비의 4승이 곧 복사율이다. 앞에서 살핀 분광복사율과 총복사율로부터 어떤 복사체의 실제온도를 알고자 할 경우 복사율을 정확히 알아야 할 필요가 있음을 알았다. 부록 1에 간단한 온도측정에 활용할 수 있도록 각종 복사체의 복사율을 소개하였다.

예제 2.1 : 계란을 부치기 위해 새로 산 반짝이는 구리로 만든 후라이팬을 가열한 후 전복사온도계로 온도를 측정한 결과 100℃였다. 그런데 날계란을 올려놓자마자 타기 시작하였다. 후라이팬이 산화되지 않았다고 가정하면 후라이팬 표면의 실제온도는 얼마였을까? (단, 후라이팬의 총복사율은 부록 1.3 참조, 전온도영역에서 복사율이 같다고 가정)

해 : (2.1)식으로부터

$$\begin{aligned}
 T &= T_B \div [\epsilon(T)]^{-4} \\
 &= (100 + 273.15) \text{ k} \div (0.02)^{-4} \\
 &= 992 \text{ k} = 719^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

2.1.3 유효파장

복사온도계에 유효파장의 개념을 도입하게 되는 이유는 복사선의 어떠한 파장만 투과시킬 수 있는 간섭필터를 만들지 못하기 때문이다. 특정한 파장의 복사선만 통과시키기 위해 복사온도계 내부에 간섭필터를 사용하지만 실제로는 그림 2.2 에서와 같이 일정 띠 폭만큼의 복사선이 통과한다. 유효파장이란 이런 띠 폭의 넓이비가 높기와 같아지는 파장을 말한다. 즉 온도 T_1 과 T_2 인 흑체 ($T_1 > T_2$)에서의 밝기비 R (띠 폭만큼의 넓이비)가 온도 T_1 과 T_2 에서의 분광사휘도의 비 (높이비)와 같아질 때의 파장으로 정의하며 식으로 쓰면 다음과 같다. 즉,

$$R = \frac{\int_0^\infty N_\lambda(T_2) d\lambda}{\int_0^\infty N_\lambda(T_1) d\lambda} = \frac{N_{\lambda e}(T_2)}{N_{\lambda e}(T_1)} \dots\dots\dots (2.8)$$

이다. 여기서 λe 는 유효파장이며, 이식의 $N_{\lambda e}(T_1)$ 과 $N_{\lambda e}(T_2)$ 에 의 근사식 (2.2)식을 대입하면

$$R = \frac{\exp(C_2/\lambda_e T_1)}{\exp(C_2/\lambda_e T_2)}$$

이 된다. 유효파장에 대해 정리하면

$$\lambda_e = \frac{C_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}{\ln R} \quad (2.9)$$

이다. 그러므로 온도 T_1 과 T_2 를 알고 그 온도에서 복사온도계로 정한 값(전류 또는 전압 등)을 알면 R 이 알려지므로 사용하는 온도계의 온도 T_1 에서의 평균유효파장을 알 수 있다. 온도가 달라지면 면적비가 조금씩 달라지며 따라서 달라진 넓이비에 맞는 높이비를 주는 유효파장 값도 조금씩 달라진다. 한마디로 온도에 따라 유효파장이 조금씩 다름을 의미한다. 그러므로 복사온도계에 사용하는 간섭필터의 복사선투과 띠 폭이 좁으면 좁을수록 온도측정의 정확도 그만큼 높아지며 온도에 따른 유효파장의 변화폭도 좁아진다.

복사온도계로 온도를 측정하는 피측정물체는 대부분 흑체가 아닌 보통의 복사체(광고온계 교정시 복사원으로 사용되는 텅스텐 전구 또는 가열된 금속, 쇠물 등)들이므로 앞 절에서 설명한 복사율을 고려하여야 온도를 알 수 있다. (2.8)식에 유효파장을 적용하면 다음과 같은 식이 된다. 즉,

$$N_{\lambda_e}(T_B) = \epsilon_{\lambda_e}(T) \cdot N_{\lambda_e}(T) \quad (2.10)$$

이며, 이 식에 빈의 근사식 (2.2)식을 대입하면

$$\exp(-C_2/\lambda_e T_B) = \epsilon_{\lambda_e}(T) \exp(-C_2/\lambda_e T)$$

이 된다. 이 식을 실제온도 T 에 대해 정리하면

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_B} + \frac{\lambda_e}{C_2} \ln \epsilon_{\lambda_e}(T) \quad (2.11)$$

인 관계식을 얻는다. 따라서 복사율 $\epsilon_{\lambda e}(T)$ 을 알고 있는 어떤 복사체든지 밝기온도 T_B 만 측정해 주면 실제온도 T 는 (2.11)식으로 쉽게 계산해 낼 수 있다. 이식에서 정확한 실제온도 T 를 측정하기 위해서는 복사체의 분광복사율 $\epsilon_{\lambda e}(T)$ 과 사용하는 복사온도계의 유효파장 λe 를 정확히 알아야 함을 알 수 있다.

예제 2.4 : $0.65 \mu m$ 에서 분광복사율이 0.4인 절연브럭을 유효파장이 $0.65 \mu m$ 인 광온계로 온도를 측정한 결과 $1000^\circ C$ 임을 알았다. 이 브럭의 실제온도는 얼마일까?

해 : (2.11)식으로부터

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= \frac{1}{T_B} + \frac{\lambda e}{C_2} \ln \epsilon_{\lambda e}(T) \\ &= \frac{1}{(1000 + 273.15)K} + \frac{0.65 \times 10^{-6} m}{0.014388 m \cdot K} \times \ln 0.4 \\ &= 0.0007441 \end{aligned}$$

$$\therefore T = 1344.0K = 1070.8^\circ C$$

이 결과 브럭의 실제온도와 밝기온도와의 차이는 $70.8^\circ C$ 임을 알 수 있다. 따라서 복사체의 복사율을 모르면 복사온도계로 측정한 온도가 엄청난 오차가 생길 수 있음을 알 수 있다. 정밀한 측정에는 유효파장도 아울러 정확히 알아야 할 것이다.

복사온도계를 유리창이나 기타 투명한 창 및 렌즈를 통해 사용할 경우 복사체와 복사온도계 사이에 가로놓인 창의 투과율을 정확히 알아야 온도를 정확히 측정할 수 있게 된다. 이 때의 투과율 τ 는 (2.11)식의

$\ln \epsilon_{\lambda e}(T)$ 항의 \ln 안에 집어넣어 사용한다.

예제 2.5 : 앞의 예제 2.4에서 측정 중 브릭과 광고온계 사이에 $0.65\mu\text{m}$ 파장의 빛을 90%만 통과시키는 유리창이 놓여 있었다면 브릭의 실제온도는 얼마일까?

해 : (2.11)식은 다음과 같이 변한다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= \frac{1}{T_B} + \frac{\lambda e}{C_2} \ln[\epsilon_{\lambda e}(T) \cdot r] \\ &= \frac{1}{(1000 + 273.15)K} + \frac{0.65 \times 10^{-6}m}{0.014388m \cdot K} \times \ln(0.4 \times 0.9) \\ &= 0.0007394 \end{aligned}$$

$$\therefore T = 1352.5K = 1079.4^\circ\text{C}$$

이 결과 온도계와 피측정체 사이에서 빛이 일부 차단되면 온도측정에 큰 오차를 유발시킴을 알 수 있다. 따라서 가혹한 생산 현장 등에서 복사 온도계를 사용할 때는 이점을 항상 고려하여야 한다.

제 2절 복사원

복사온도계를 이용한 온도측정에는 흑체의 개념이 중요하다. 이상적인 흑체는 그림 2.3의 (가)와 같이 바늘구멍을 통해 입사된 복사선이 다시 빠져 나올 수 없는 완전흡수체를 말하며, 이 흡수체가 이루어졌을 때는 완전복사체가 된다. 그러나 그림 2.3 (가)와 같은 이상적인 흑체의 모양(흑체공동)을 제작해서 사용하기는 쉽지 않다. 그래서 제작하기 쉬운 원통형 흑체공동을 그림 2.3의 (나)와 (다)같이 만들어 온도의 기준점으로 사용하고 있다. 흑체로 사용되는 물질은 흑연이 많이 사용되며, 기타 복사율이 높고 열에 강한 금속을 사용한다. 그림의 흑체들은 빗금친 부분의 온도가

균일해야 하며, 정점흑체와 연속흑체가 사용된다.

그림 2.3 이상적인 흑체와 실용적인 흑체 공동모양

(가) 이상적인 흑체

(나) 실용의 정밀한 흑체

(다) 간단히 응용되는 흑체

정점 흑체는 그림 2.3 의 실선인 껍질 내부의 빗금친 부분에 순도 높은 금속(금과 구리가 주로 사용)을 채워 높은 온도에서 금속을 녹인 후 급냉시키면 과냉각이 일어나면서 응고상태에 도달한다. 응고온도는 순수한 금속일 항상 같은 온도(금의 응고점은 1064.43°C , 그리는 1084.88°C)를 유지시켜주므로 광고온계의 정밀한 교정에 사용된다. 이외에 정점흑체에 사용되는 금속으로는 은(961.93°C), 아연(419.58°C), 알루미늄(660.46°C) 및 안티모니(630.75°C)가 있다.

연속흑체는 그림 2.3 의 빗금친 부분을 흑연이나 내열강등을 사용하여 만들고, 흑체공동의 온도는 열전대나 교정된 광고온계로 읽고 교정하고자 하는 광고온계의 출력을 여러 온도점에서 알아내는데 사용된다. 연속흑체로는 정점흑체보다 정확도는 떨어지지만 사용온도 영역이 넓어 적외선 또는 좁은띠 복사온도계나 전복사온도계의 교정에 많이 이용된다.

생산현장 등에서 복사율을 알 수 없는 피측정물체의 실제온도를 고온계로 직접 측정하려면 피측정물체의 복사율이 1에 가깝도록 그림 2.3 의 (다)와 같이 피측정체 표면에 드릴로 흠을 파고 온도 읽는 방법이 있다. 이때 흠의 깊이는 드릴직경의 5배 이상이면 흑체로써 구실을 할 수 있다. (복사율이 1에 가깝다) 또한 기체나 액체상태인 피측정체의 실제온도 측정을 위해서는 끝이 봉 흑체모양의 원통형 튜브를 액체 등에 넣어 들여다 보이는 입체광고온계로 측정해 준다.

흑체 이외의 다른 복사원으로는 텅스텐전구 및 아크방전등이 사용되고 있다. 텅스텐전구는 700°C 에서 2300°C 까지 사용될 수 있는 것들이 있으며

종류에 따라 정확도, 사용온도 및 전류·전압 특성이 다르다. 전구는 전류 대온도 관계를 알면 쉽게 사용할 수 있어서 가장 많이 사용되는 복사원이다. 따라서 가시형 광고온계나 700℃ 이상에서 사용되는 복사온도계를 많이 보유한 산업체 등에서는 잘 교접, 텅스텐전구를 기준으로 하여 정기적으로 복사온도계의 온도눈금을 점검해 준다면 생산공정 관리에 유용하다. 전구를 사용하는 데는 여러 가지 주의할 사항이 있으므로 사전에 전구의 특성을 잘 알아야겠다.

아크방전을 이용한 복사원은 3000℃ 이상의 온도 기준점으로 사용하나 실용적이지 못한 관계로 잘 사용되고 있지 않다.

2.3 온도계의 종류 및 구조

온도계의 종류는 2.2절에서 이미 언급한 바와 같이 가시형광온계, 광전식광고온계, 적외선 또는 좁은띠복사온도계, 전복사온도계 및 이색온도계가 있다. 이들 온도계들은 온도측정원리로 구분하며 밝기비 맞춤형 광고전복사온계 및 이색온도계로 나눌 수 있다.

복사온도계의 구조는 복사체(피측정체)가 방출하는 광을 한곳에 모으는 집광부와 집광된 복사에너지를 감지하는 수광부로 나눌 수 있다. 집광부는 집광방법에 따라 렌즈를 사용하는 투과형과 거울을 사용하는 반사형으로 나눌 수 있으며 측정가능 거리의 조명여부에 따라 가변축점식과 고정축점식으로 구분된다.

2.3.1 밝기비맞춤형 광고온계

이 방법을 이용한 광고온계는 가시형광고온계, 광전식광고온계 및 적외선복사온도계 또는 좁은띠복사온도계가 있다.

가시형광고온계의 온도검출기는 사람의 눈이며 온도계 내부에 빨강유리를 흡수필터로 사용하여 0.65 μm 의 복사선만 통과하도록 하였다. (그림 2.4 참조) 그림에서 복사원으로부터 방출된 복사선이 대물렌즈에 의해 집광

되고 어퍼처에 의해 크기가 정해진 피측정체의 상이 온도계내부 텅스텐 전구의 필라멘트의 밝기가 같아지도록 전류를 조절하여 같아졌을 때 광고온계의 전구에 흘려준 전류로 온도를 알아내도록 되어 있고 이때 대안렌즈 앞의 적색필터는 $0.65\ \mu\text{m}$ 의 파장만 통과시키는 역할을 한다.

광전식광고온계는 온도검출기가 눈이 아닌 광전증폭관을 사용한 것으로 내부구조는 그림 2.4와 비슷하나 가시형광고온계의 적색필터 대신 $0.65\ \mu\text{m}$ 에서 좁은 띠 폭의 복사선만 투과시키는 간섭필터를 사용한다. 온도측정방법은 처음 복사원으로부터 들어온 복사선이 간섭필터를 통과하여 광전증폭관에 들어오고, 다음 내부에 설치된 텅스텐전구의 빛이 광전증폭관에 입사되어 교대로 들어온 두 값이 같아졌을 때 내부 전구에 흐르는 전류값을 온도로 읽게 되어 있다. 이것 외에 내부에 전구가 없이 광전증폭관에 검출된 미소전류를 전압으로 변환 증폭하여 온도를 읽는 광전식광고온계도 사용되고 있다.

적외선복사온도계 또는 좁은대복사온도계의 구조 역시 그림 2.4의 가시형광고온계와 비슷한 구조를 갖고 있으나 검출기를 실리콘검출 InAs, InSb, PbS 및 HgCdTe의 반도체 소자를 검출기로 사용, 간섭필터도 $0.9\ \mu\text{m}$ 또는 그 이상의 파장을 통과할 수 있는 것을 사용한다. 실리콘검출기는 $0.9\ \mu\text{m}$ 근처의 적외선을 검출하지만 나머지 검출기들은 $2 \sim 20\ \mu\text{m}$ 의 적외선을 검출할 수 있는 것들이다. 이렇게 장파장용 검출기가 사용되는 이유는, 그림 2.1에서 보면 높은 온도의 복사체들은 짧은 파장의 복사선을 방출하지만 낮은 온도의 복사체들은 그렇지 못하며, 특히 온도가 0°C ($273.15\ \text{K}$)인 복사체는 $2\ \mu\text{m}$ 이하의 복사선은 방출하지 못하기 때문에 유효파장이 짧은 복사온도계로는 낮은 온도 측정이 불가능하다. 다시 말해서 800°C 이상에서는 $0.65\ \mu\text{m}$ 의 파장에서 복사에너지의 높이 (분광복사휘도)를 비교할 수 있으나 낮은 온도로 갈수록 파장이 긴쪽에서 복사에너지의 높이(분광복사휘도)를 비교하여야 온도측정이 가능하기 때문에 긴 파장의 복사선을 검출할 수 있는 검출기가 필요하다.

이상의 밝기맞춤형광고온계들로 읽은 피측정체(복사체)의 밝기온도를 실제온도로 환산하려면 플랑크의 복사공식 또는 빈의 복사공식으로 유도된

(2. 11)식을 사용하면 되고, 예제 2 . 4와 예제 2 . 5를 참조하면 된다.

2 . 3 . 2 전복사온도계

전복사온도계의 온도검출기는 열전퇴, 볼로미터 (써어미스터등 저항온도계 사용) 및 바이메탈이 사용되며 가능한 모든 파장의 빛이 통과하도록 광학부를 구성한다. 따라서 전복사온도계의 구조는 거울을 이용한 반사형이 많이 사용되고 있으며, 가시광형광고온계의 구조와 비슷한 형태도 있다. (그림 2 . 5 참조)

그러나 어떤 광학렌즈나 광학부품도 모든 파장의 복사선을 100% 통과시킬 수 없으므로 스테판 - 볼츠만의 법칙인 (2. 3)식에 주어진 T^4 식에 비례하는 값으로 나타난다. 따라서 온도계 특성에 맞게 교정하여 사용하여야 한다.

전복사온도계의 검출기로 가장 많이 사용되는 열전퇴는 열전대를 여러 개 직렬 연결한 것으로 그림 2 . 6 (가) 의 구조를 가지며 실제모양은 그림 2 . 6의 (나)가 한가지 형태다. 그림 2 . 6 의 (가)에서 실온상태에 있는 T_2 와 광고온계 광학부에 의해 집광된 열복사선으로 가열된 T_1 간의 온도차가 생기면 열전퇴에 열기전력이 흐르게 된다. 열기전력대 온도로 주어진 교정값을 이용, 이 값을 밝기온도 T_B 로 읽고, 스테판 - 볼츠만의 법칙으로 주어지는 (2. 7) 식에 대입하면 실제온도 T를 알 수 있다.

볼로미터는 써어미스터등 저항온도계를 사용한 전복사온도계로 써어미스터를 검출기로 한 측정 회로는 그림 2 . 7과 같이 구성된다.

그림에서와 같이 복사원으로부터 입사된 열복사선이 검출써어미스터를 가열하면 써어미스터의 저항이 변하고 실온상태의 기준써어미스터의 저항과 비교된 기전력 e_0 를 측정할 수 있다. 이 값을 밝기온도 T_B 로 환산하여 앞의 수식을 풀어 실제온도를 알 수 있다.

2.3.3 이색온도계

이색온도계는 간섭필터 2개를 사용하여 인접한 두 유효파장에서 복사에너지를 측정하여 온도를 알아내는 것으로 두 유효파장에서 분광복사율이 가능한 같은 물체에 대해 사용하는 것이 좋다. 온도계의 구조는 주로 좁은 띠복사온도계의 구조와 같으며 한 온도계에 간섭필터를 2개 사용한 것이 있으며 2대의 좁은띠복사온도계를 사용하기도 한다.

같은 온도에 있는 복사체를 동시에 두 파장에서 측정한 온도계 출력의 비 (밝기비)는 (2.10)식으로부터 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$R = \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)} \cdot \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \cdot \frac{(e^{C_2/\lambda_2 T} - 1)}{(e^{C_2/\lambda_1 T} - 1)} \dots\dots\dots (2.12)$$

이다. 위 식을 빈의 근사식으로 고치면 -1이 없어지고, 분광복사율 $\epsilon(\lambda_1)$ 과 $\epsilon(\lambda_2)$ 가 같다고 가정하면

$$T_R = \frac{C_2 \left[\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \right]}{\left[\ln \left[R \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right] \right]} \dots\dots\dots (2.13)$$

이 된다. 여기서 온도 T_R 은 분광복사율이 파장 λ_1 과 λ_2 에서 같을 때를 가정한 값으로 다른 온도 표시와 다르게 사용되었다.

이 결과 두 파장법을 사용하는 이색온도계에서는 두 파장에서의 분광복사율이 같을 때 쓰는 것이 좋으며 그렇지 못할 경우 측정오차가 크게 나타난다. 그러나 두 파장에서 복사율이 잘 알려진 피측정체의 온도를 측정할 때는 (2.13)과 (2.14)식을 이용 정확한 온도측정을 할 수 있다.

또한 이색온도계는 두 파장에서의 분광복사율의 차(변화)를 무시할 수

있을 경우 두 파장에서 측정된 실제온도 T_1 과 T_2 로부터 피측정체의 복사율을 직접 계산해 낼 수 있어 복사율 측정용으로도 이용된다.

2.4 측정정확도

복사온도계도 다른 온도계와 마찬가지로 교정하여 사용하면 정확도를 높일 수 있으나 많은 오차요인이 발생한다. 복사온도계가 교정될 때와 사용될 때의 오차요인을 간추려 보면 다음과 같다. 즉,

- 첫째, 복사원의 불정확도(정점흑체, 연속흑체 또는 텅스텐 전구)
- 둘째, 검출기의 안정도 및 재현성
- 셋째, 복사원의 크기효과
- 넷째, 광축배열의 잘못으로 인한 오차
- 다섯째, 계기 자체의 측정오차

등이 있다.

복사원의 불정확도는 광고온계 교정시 정점흑체를 복사원으로 사용할 경우 정점용 금속의 순도 및 흑체의 구조에 따라 발생한다. 응고점으로 사용하는 금속의 순도가 높을수록 정점온도의 재현성이 좋아지며, 흑체의 구조를 복사율이 1에 가깝도록 만들어야 정확한 온도값을 읽을 수 있다. 연속흑체로 복사원으로 사용할 경우 기준 온도는 흑체공동내에 심어진 열전대 또는 교정된 다른 광고온계의 온도눈금을 사용하므로 이때 열전대나 기준광고온계의 정확도가 연속흑체로의 정확도에 영향을 미친다. 또한 연속흑체로도 복사율이 1에 가까운 것을 사용하는 것이 좋다. 복사원이 텅스텐전구일 경우 전구에 흐르는 전류 대 온도관계를 교정하여 사용하므로 정확도가 같은 전구에서도 교정방법 및 부대시설에 따라 다르며, 전구자체의 안정도, 재현성, 전류측정의 정확도 및 전구에 흘려주는 전류의 안정도가 오차요인에 포함된다. 또한 텅스텐전구의 필라멘트는 작은 폭의 띠(텅스텐리본)로 만들어져 있어 텅스텐리본에 온도구배가 생긴다. 그러므로 전구의 텅스텐리본에 광고온계의 어퍼쳐크기(그림 2.4 참조)가 항상 같은 크기로 멎히도록 광고온계와 전구의 거리를 일정하게 맞추고 교정하는 것이 좋다.

검출기의 안정도 및 재현성은 검출기 특성에 따라 다르게 나타나는데.

가시형광고온계의 경우 눈이 검출기이므로 개인간의 측정오차를 줄이기 위해 보통 2명이 측정한 값을 평균하여 사용하며, 광전증폭관이 검출기인 광전식광고온계는 광전증폭관의 성능이 여러 가지이고 가격의 차이가 크므로 사용목적(정확도)에 맞는 검출기의 선택이 중요하다. 광전식광고온계는 일반적으로 가격이 비싸고 산업용으로 사용하기에는 부적당하며 성능이 좋은 것은 표준온도계로 사용된다. 광다이오드를 검출기로 사용하는 온도계는 온도기록, 자동측정 및 조절이 가능하며, 반도체 소자의 눈부신 발전으로 정확도도 비교적 높아 최근 산업용으로 가장 많이 사용되는 온도계 중의 하나이다. 과학과 기술의 발전으로 안정도 및 재현성이 좋은 검출기들이 개발되고 있다.

복사원의 크기효과는 복사온도계의 어퍼처의 크기와 관련된 것으로 어퍼처가 큰 복사온도계를 작은 복사원에 맞추어 교정하거나 온도가 균일하지 못한 피측정물체에 지나치게 큰 어퍼처의 복사온도계를 사용하면 오차가 생긴다. 따라서 교정할 때나 사용할 때 복사온도계의 어퍼처 크기를 고려하여 알맞은 표적크기를 선택하여 교정 또는 측정에 임하여야 한다.

광축배열의 잘못으로 인한 오차는 복사온도계가 비접촉식 온도계이기 때문에 온도계가 측정하고자 하는 복사체와 정확히 정렬되지 못할 일이 생긴다. 복사원의 크기가 작을 경우 특히 광축배열에 세심한 주의가 필요하며, 복사체 표면과 복사온도계 간에 40° 이상의 각도로 온도를 측정할 경우 그 각도에서의 복사율을 적용하여 실제온도를 계측하여야 한다. 왜냐하면 일반적으로 복사율이라 하면 수직복사율(복사체와 광고온계의 각도가 수직)을 의미하며 수직축에서 40° 이상 측정각도가 벗어나면 복사율값도 달라진다. 그러므로 복사체와 복사온도계가 40° 이내의 각도에서 사용되는 것이 바람직하다.

계기자체의 측정오차는 복사온도계의 출력값을 읽는 방법에 따라 다르며 온도눈금으로 되었을 경우 눈금분할에 따라 보기오차가 생기며, 전압 및 전류 출력을 갖는 것은 전류·전압기(멀티미터)의 측정정확도에 따라 다르게 나타나므로 목적하는 정확도에 맞는 멀티미터를 선택하여야 한다.

위와 같이 모든 오차요인을 최소로 하고 잘 교정된 복사온도계로 온도를 측정할 때도 사용하는 온도계의 유효파장, 사원의 피측정체의 복사율, 복사원의 크기효과 및 사용환경이 측정값의 정확도에 크게 영향을 미친다.

따라서 복사온도계를 사용할 때는 사용하고 있는 온도계의 유효파장을 정확히 알아야 하며, 피측정물체의 복사율을 명확히 파악한 후 온도를 측정하는 것이 중요하다. 복사원의 크기효과는 앞에서 일부 설명했듯이 측정조건에 맞는 어퍼쳐 크기를 갖는 복사온도계를 선택하는 것이 좋다. 어퍼쳐의 크기가 작은 것은 복사원의 크기가 작을 때 유리하나 복사원에 이물질이 많이 발생하는 가혹한 현장분위기에서는 어퍼쳐가 큰 온도계가 좋다. 그러나 대부분의 피측정체는 균일한 온도분포를 갖기 힘들므로 어퍼쳐가 지나치게 크면 측정된 온도값의 정확도가 떨어진다.

복사온도계 중 가장 정확도가 높은 온도계는 좁은 띠 폭을 갖는 밝기비 맞춤형광고온계로써, 표준형광전식광고온계는 사용온도 800℃ ~ 3500℃에서 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내의 정확도를 가지며, 좁은띠복사온도계는 450℃ ~ 2000℃ 온도영역에서 1℃ 이내로 정확한 것이 있고, 가시형광고온계중 정밀한 것은 800℃ ~ 1900℃ 온도영역에서 3 ~ 8℃의 정확도를 갖는다. 적외선복사온도계중 넓은 띠 폭을 갖는 것은 측정하는 절대온도의 1%이내의 정확도를 갖고 있다.

전복사온도계와 이색온도계는 사용목적 및 온도계의 구조에 약간의 차이는 있으나 이색온도계의 정확도가 높은 편이다. 전복사온도계가 다른 광고온계 보다 광학부품(렌즈 및 유리창)의 투과율, 피측정체 앞의 가스 및 증기 등에 의한 복사선의 흡수효과가 크게 나며 원래 온도계가 갖고 있는 온도 대 출력 특성이 맞지 않는 경우가 많다. 따라서 이러한 오차요인을 없애 주려면 가스 및 증기가 있는 환경에서는 좁은띠복사온도계를 기준으로 전복사온도계를 교정하여 사용하는 것이 좋다. 전복사온도계의 정확도는 넓은띠복사온도계 정확도와 비슷하나 높은 정확도를 갖는 것이 개발되어 있다. 따라서 온도계의 정확도는 사용한 간섭필터에 좌우되므로 구해서 사용할 성능을 정확히 파악하여야 한다.

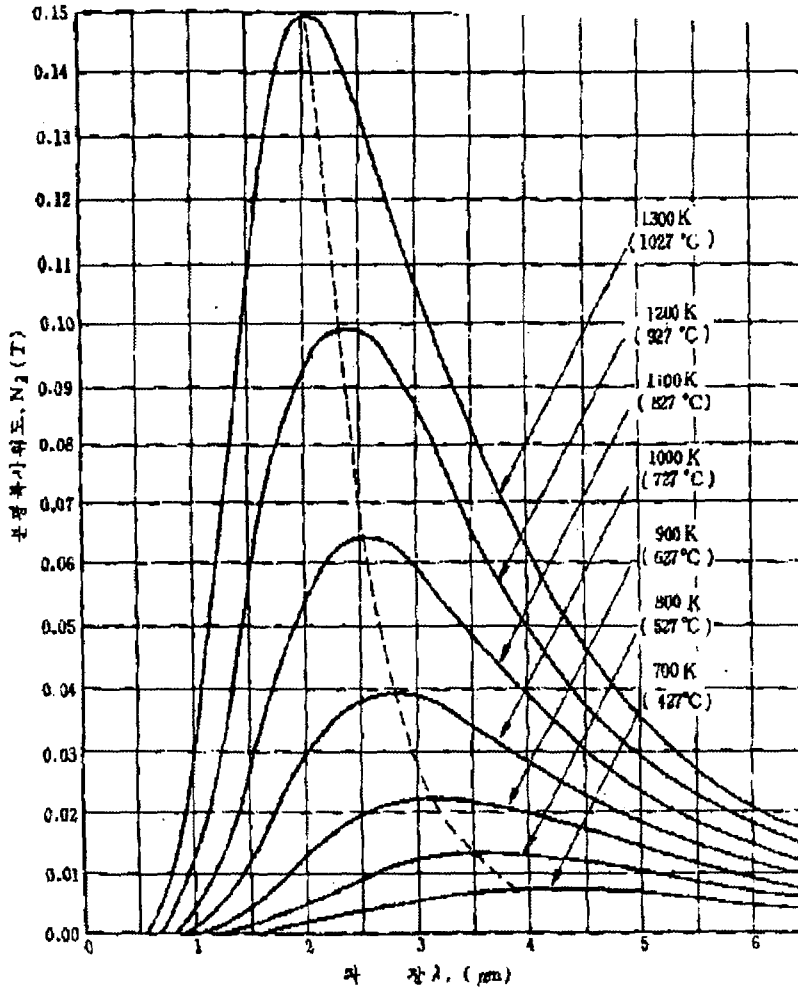


그림 2.1 여러온도에서 파장에 따른 분광복사 휘도
(플랑크의 흑체복사곡선)

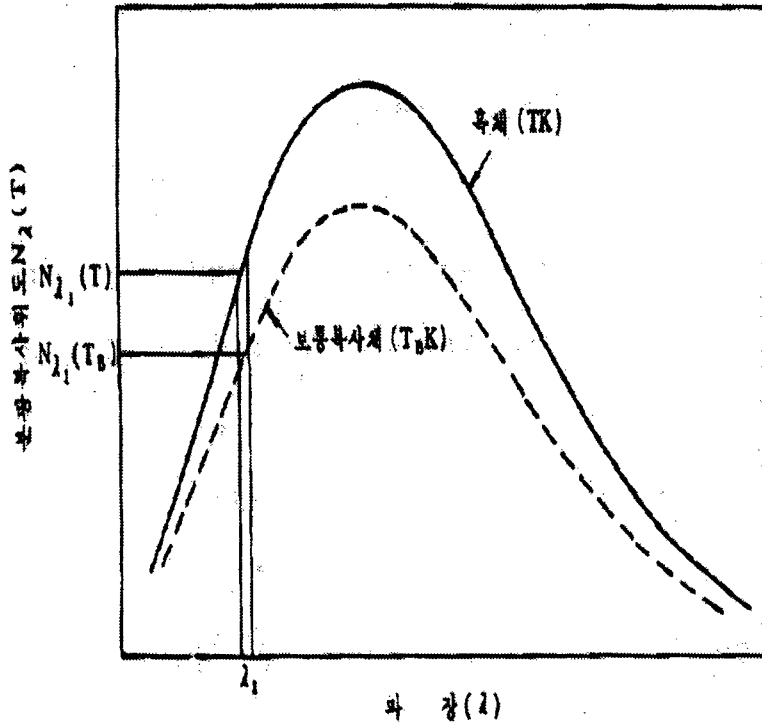


그림2.2 흑체와 보통 복사체의 파장에 따른 분광복사 휘도

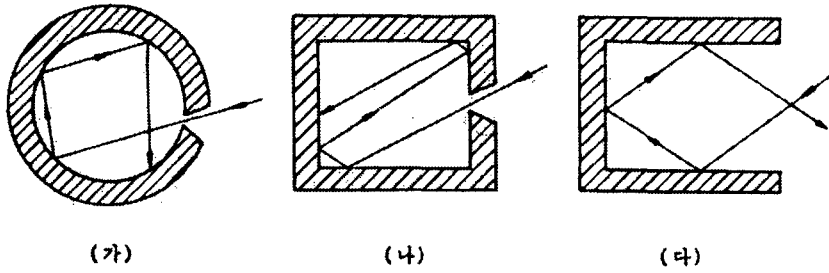


그림 2.3 이상적인 흑체와 실용적인 흑체. 공동모양

- (가) 이상적인 흑체
- (나) 실용의 점밀한 흑체
- (다) 간단히 응용되는 흑체

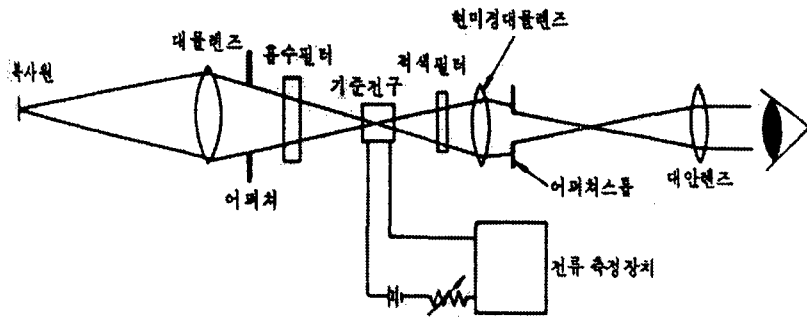


그림 2.4 가시형광 고온계의 구조

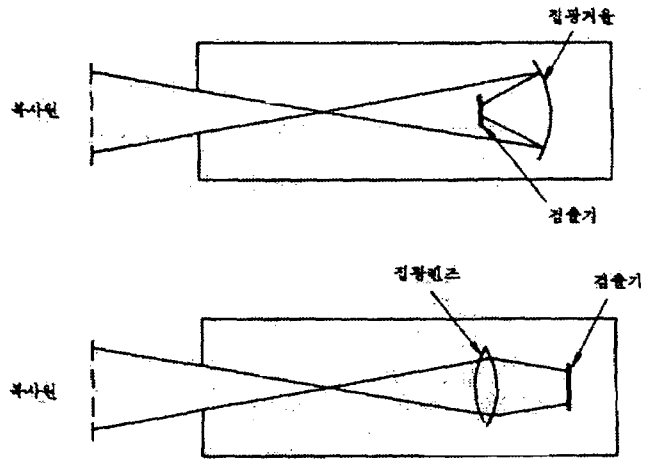


그림 2.5 전복사온도계의 구조

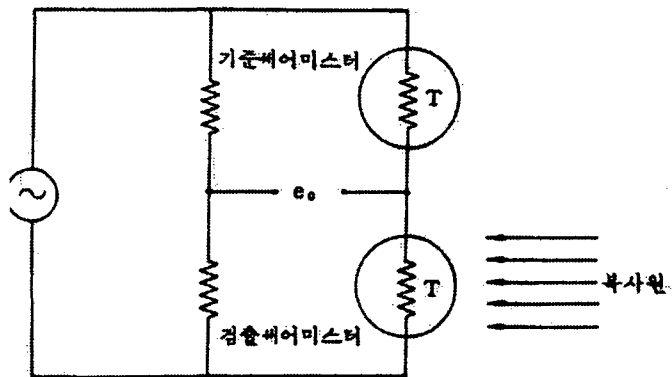
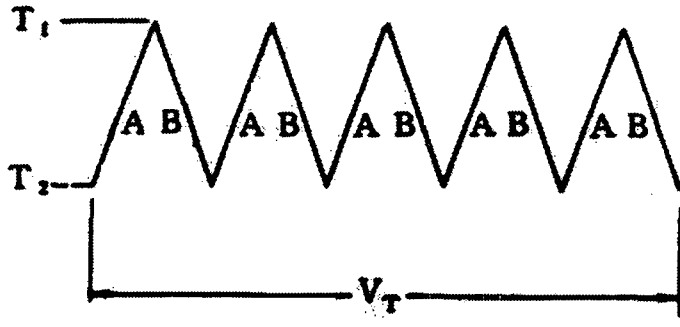
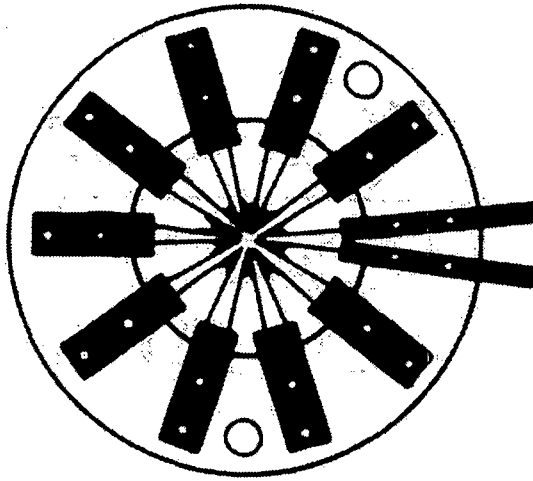


그림 2.6 써어미스터를 검출기로 한 블로미터의 온도측정회로



$$V_T = 5V_{AB}(T_1 - T_2)$$

(가)



(나)

그림 2.7 열전퇴의 구조 및 모양

(가) 열전퇴의 구조

(나) 열전퇴의 모양