

〈論 文〉

# 막응축 열전달에서 공기-수증기 혼합기체의 속도 및 온도분포

강희찬\* · 김무환\*\*

(1994년 1월 25일 접수)

## Velocity and Temperature Profiles of Steam-Air Mixture on the Film Condensation

Hie Chan Kang and Moo Hwan Kim

**Key Words :** Temperature Profile(온도분포), Velocity Profile(속도분포), Two-Phase Flow(이상유동), Condensation Heat Transfer(응축 열전달), Boundary Layer(경계층), Mass Transfer(물질전달), Measurement(측정), Laser Doppler Anemometer(레이저유속계), Interface(계면), Stratified Flow(층상흐름), Flush-Wire Probe(프러시 와이어 검침)

### Abstract

A study has been conducted to provide the experimental information for the velocity and temperature profiles of steam-air mixture and to investigate their roles on the film condensation with wavy interface. Saturated gas mixture of steam-air was made to flow through the nearly horizontal(4.1°) square duct of 0.1 m width and 1.56 m length at atmospheric pressure, and was condensed on the bottom cold plate. The air mass fraction in the gas mixture was changed from zero( $W=0$ , pure steam) to one( $W=1$ , pure air), and the bulk velocity was varied from 2 to 4 m/s. Water film was injected concurrently to investigate the effect of wavy interface on the condensation. The velocity and temperature profiles were measured by LDA system and thermocouples along the three parameters; air mass fraction, mixture velocity and film flow rate. The profiles moved toward the interface with increasing steam mass fraction, mixture velocity and film flow rate. The Prandtl and Schmidt numbers were near one in the present experimental range, however there was no complete similarity between the velocity and temperature profiles of gas mixture. And the heat transfer characteristics and interfacial structure were coupled with each other.

### 1. 서 론

막응축현상(film condensation phenomena)은 응축기 등의 열교환기와 원자력발전소에 관련된 중요

한 문제 중의 하나이다. 특히 원자력발전소에서 경수로 사고(예; loss of coolant accident)가 발생한다고 가정할 경우, 일차적인 관심사는 격납용기(containment building)의 안정성을 확보하는 것이다. 이와 같은 사고에 대처하기 위하여 격납용기내에 여러가지 능동적장치(active system)가 설치되어 있다. 이들의 능동적인 장치가 정상적으로 작동

\*정회원, 군산대학교 기계설계학과

\*\*정회원, 보령공과대학 기계공학과

되지 않을 경우 최후의 수단인 피동적 장치(passive system)로써, 격납용기 내벽면과 내부 구조물에서 일어나는 응축 열전달이 원자력발전소의 안정성을 유지하는데 결정적인 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 이 과정에서 응축 열전달의 형태는 격납용기 내벽면에서의 막응축(film condensation)이 주가 될 것으로 예측된다. 그 중에서도 격납용기내에 이미 존재하는 비응축 기체인 공기와 다량의 응축액(condensate)에 의한 파형액막의 역할에 대한 관심이 집중되어 왔으며, 이에 관련하여 최근 10여년 전부터 국내외적으로 연구가 단계적으로 진행되어 왔다.

막응축에서 열저항은 크게 두가지로 분류된다. 응축액막(condensate film)내에 존재하는 열저항과 액막의 경계면과 응축 기체 사이에 존재하는 열저항이다. 순수증기(pure vapor)의 응축에서는 응축액막만이 중요한 열저항으로 작용하고 순수 증기내에서의 열저항은 무시될 수 있다. 그러나 증기에 소량이라도 비응축 기체가 존재할 경우 열전달은 크게 감소된다고 알려져 왔다.<sup>(1~15)</sup> 그 이유는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 응축액막의 경계면 근처에서는 응축기체만이 선택적으로 응축됨에 따라 응축 기체의 부분압력은 낮아지는 반면에 비응축 기체의 부분압력은 높아진다. 이로 인하여 혼합기체 내에서 새로운 경계층이 형성되고, 물질전달 및 응축은 확산기구(diffusion mechanism)에 의하여 이루어진다. 따라서 이 경계층이 응축 열전달의 중요한 열저항으로 작용하게 된다. 혼합기체가 정체되어 있지 않고 응축면 위를 흐를 경우에는 이 경계층 두께는 얇아지며 열전달은 촉진된다. 이에 관련하여 전례의 연구자들은<sup>(1~8)</sup> 응축열 전달계수를 예측하는데 혼합기체층에서의 열, 물질, 운동량경계층이 상사한다는 가정하에 연구를 수행하였다.

막응축에서 응축량이 많아짐에 따라 응축액의 임계유량 이상에서 응축 경계면은 파형으로 변화된다. 이 응축액막에 형성된 파형경계면은 순수증기의 응축은 물론이고, 비응축기체가 존재할 경우에도 열전달을 촉진시킨다고 알려져 왔다.<sup>(7,8,14~16)</sup> 그 원인은 다음과 같이 예상할 수 있다.

(a) 파형에 의하여 응축액막내의 속도분포가 변화되고, 이로 인하여 응축액막의 두께가 감소하여 열전달이 촉진된다.

(b) 파형이 형성되면 그 기저부보다 전열면적이 넓어져서 열전달이 촉진된다.

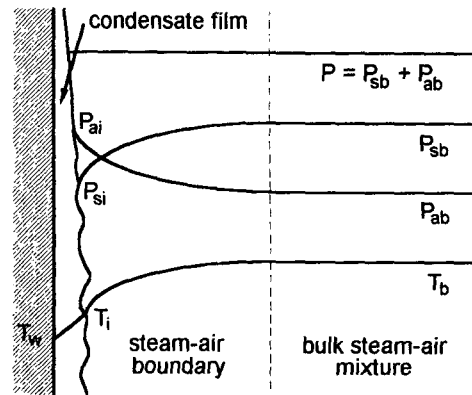


Fig. 1 The boundary layers in the presence of non-condensable gas on the film condensation

(c) 응축액막내의 유동양식이 변화함에 따라 응축액이 잘 혼합되어 열전달이 증가한다.

(d) 응축경계면 연속적인 운동에 의하여 경계면 바로 인접부에 위치한 순수증기 또는 혼합기체의 혼합조건 또는 난류강도를 증가시켜 열전달이 촉진된다.

순수증기의 응축에서는 (a), (b)와 (c)항의 역할이 중요하고, 비응축기체가 존재할 경우에는 (d)의 역할이 추가될 것으로 예측되고 있다. 소량의 비응축기체가 존재하더라도 응축액막내의 열저항이 상대적으로 적으므로 (d)항이 응축 열전달에 결정적인 영향을 줄 것으로 예측되고 있다. 이러한 현상을 이해할 수 있는 중요한 실마리는 기체층의 온도 및 속도분포에 대한 실험적 측정결과라 할 수 있다. 그러나 이에 대한 연구는 국내외적으로 거의 없으며 응축액막이 매끄러운 경우에 제한된 실험<sup>(10,11)</sup>과 이론 연구<sup>(12,13)</sup>가 수행된 바 있다.

본 연구에는 막응축 열전달에서 비응축 기체가 존재하고, 또한 응축 경계면이 파형인 경우 혼합기체의 온도와 속도분포에 대한 실험결과를 도출하는데 목표를 두었다. 대상기체로 수증기-공기의 포화 혼합기체(saturated gas mixture)를 사용하여 대기압하에서 근사수평 평판 위에서 응축이 일어나도록 하였다. 파형 경계면의 효과를 상사적으로 실험하기 위하여 별도의 응축수를 주입하였다. 이 응축수는 폐회로로 구성하여 열적으로 정상 상태조건을 만족하도록 하였다. 이 위를 흐르는 수증기-공기의 혼합기체에 대한 온도와 주흐름방향의 평균속도 및 난류강도분포를 측정하였다. 특히 열전달에 중요한 영향을 미치는 비응축기체의 질량분률과 주입 응축

수량 따라 혼합기체의 온도 및 속도분포를 열전대 및 레이저유속계로 각각 측정하여 비교하였다. 본 연구의 실험결과는 열 및 물질전달과 유동특성을 규명하고 전달현상의 기구를 이해하기 위한 기초 자료로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 주실험부, 증기발생기, 송풍기, 공기예열기, 이차 응축기 및 응축수 주입회로로 구성되어 있다. 실험장치를 제작하기 위한 기본 목표는 (a) 혼합기체의 유동이 이차원 평판위의 유동에 근접하도록 하고, (b) 응축 열유속의 측정이 가능하고, (c) 액막의 육안관찰, 광학기구 및 측정기구의 장치가 가능하며, (d) 주실험부의 기울기의 변화가 가능하도록 하는데 두었다.

응축증기인 수증기는 100°C, 1기압에서 106 kg/hr의 증기를 발생시킬 수 있는 용량이 72 kW인 전기가열형 증기발생기(Reimers, RH-72)로 공급하였다. 증기발생기의 여러조건은 기본적으로 ON/OFF 방식으로 제어되어 약 10분 간격으로 유량이 변동하였다. 시간에 따른 일정한 유량을 얻기 위하여

압력변환기, 게이트밸브, 직류모터, 모터구동회로(PWM)와 IBM-AT로 구성된 별도의 공기유량 자동 조절장치를 제작하여 사용하였다. 비응축 기체인 공기는 1.5 kW 용량의 송풍기로 유입시켰고, 공기유량은 송풍기 모터의 회전수 제어장치로 조절하였다. 수증기와 공기는 혼합기에서 혼합하여 주실험부에 유입시켰다. 혼합기의 상류에 설치된 공기에열기와 자동 온도조절기로 혼합전의 공기 온도를 조절하여 공기-수증기의 혼합기체가 포화조건이 되도록 하였다. 수증기와 공기의 유입관은 각각 내경이 47.4 mm와 107.2 mm인 스테인레스관을 사용하였다. 공기와 증기의 유량은 D and D/2형의 오리피스를 BS규격<sup>(17)</sup>에 따라 제작하여 측정하였다. 오리피스에서의 차압은 공기측과 증기측에 각각 Furness FCO-012와 Kyowa PD 100GA 압력변환기와 Keithley 데이터 처리장치로 측정하였다.

Figs. 3과 4는 각각 주실험부의 측면과 단면을 개략적으로 표시한 그림이다. 주실험부는 폭 150 mm, 높이 98.4 mm, 길이 1700 mm인 사각덕트로 구성하였다. 주실험부의 양 측면과 상단은 고온의 수증기에 견딜수 있는 투명한 Polycarbonate로 제작하였다. 주실험부의 상부판과 하부판에서 자라나는 속도경계층이 주실험부의 출구에서도 겹치지 않도록 주실험부의 높이를 결정하였다. 응축벽면인 사각덕트의 하부는 냉각 및 일정온도를 유지하기 위하여 유효길이가 1520 mm, 폭이 150 mm, 유효

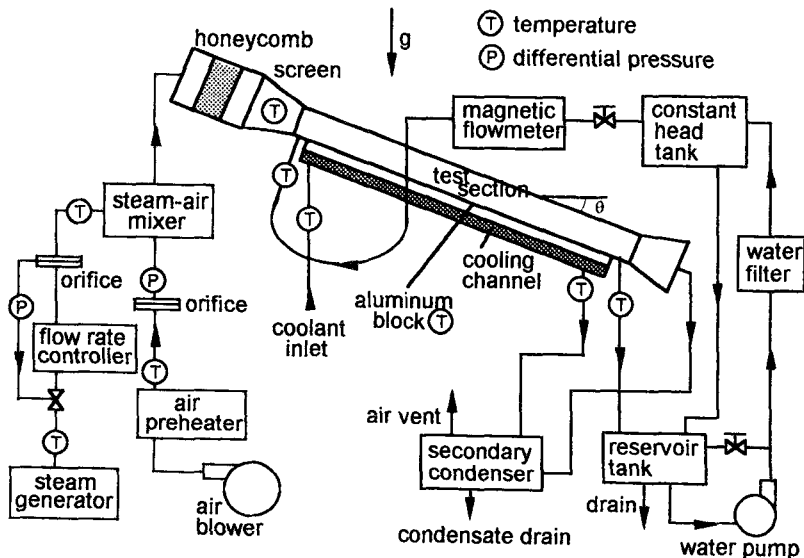


Fig. 2 Schematic diagram of experimental facility

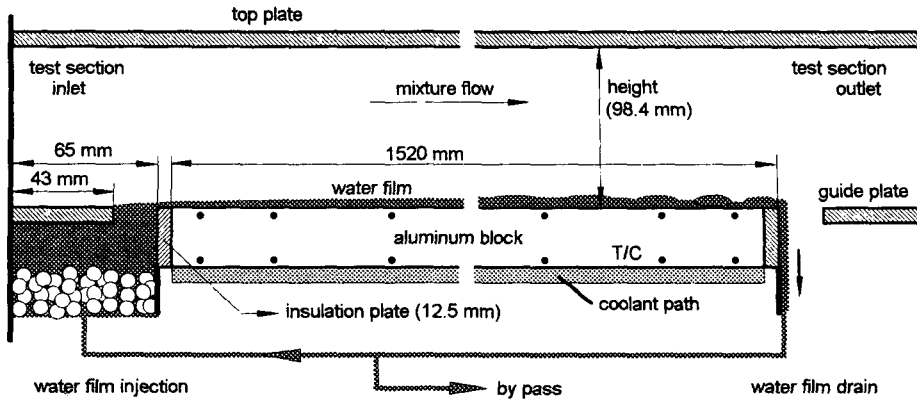


Fig. 3 Side view of main test section and water film feeding loop

두께가 25 mm인 알루미늄으로 만들었다. 응축벽면인 알루미늄판의 뒷면은 1000번의 사포로 매끈하게 가공하였다. 알루미늄판의 아래는 높이가 6 mm인 냉각유로를 만들었다. 이 냉각유로를 통과한 물은 이차응축기에서 잔류증기를 응축시키는데 재사용하였다. 주실험부 입구에 8°의 기울기를 갖는 수축부 및 완충부에 No. 20의 스크린 2장과 직경 3 mm 두께 25 mm의 하니콧을 설치하여 주실험부에서 좋은 유질을 형성하도록 하였다. 주실험부를 통과하고 남은 수증기는 이차 응축기에서 증기는 응축되고, 잔류 공기는 방출시켰다.

응축액막이 파형을 형성하기 위해서 Figs. 2와 3에 도시한 바와 같이 별도의 액막주입 회로를 구성하였다.\* 본 연구에서는 실제조건과 같은 응축액막이 열적정상상태를 형성하기 위하여 주입액막은 폐회로를 구성하였다. 저장탱크로부터 응축액의 유량은 일정수두탱크와 응축액의 주입구 사이에 있는 게이트밸브로 조절하였다. 응축액의 유량은 마그네틱유량계(Omega, EMG-84)로 측정하였고, 일정수두탱크를 사용함으로써 시간에 따른 유량을 일정하게 유지하였다. 주실험부에서 추가로 응축된 응축액과 함께 주실험부의 출구에서 유출되어 저장탱크로 재순환되었다. 주실험부에서 추가로 응축된 양은 Fig. 3에 도시한 바와 같이 외부로 방출시켰다. 다양한 형태의 파형을 형성시키기 위하여 예비실험

을 토대로 주실험부는 4.1°기울였고, 혼합기체와 주입액막은 같은 방향으로 흘러내리도록 하였다.

정상상태의 운전조건에서 응축을 방지하기 위하여 수증기 및 공기의 주입관과 주실험부 등의 전표면은 유리솜과 스티로폼으로 단열하였다. 초기의 실험시 수증기 및 공기 유입관에서 응축이 일어나 정상운정에 지장을 주므로 4개의 응축 수배출구를 설치하였다.

### 2.2 측정방법

본 실험의 측정요소인 온도분포와 속도분포는 각각 열전대와 레이저유속계로 측정하였고 개략적인 측정방법을 Fig. 4에 도시하였다. 온도분포 측정을 위한 열전대는 직경이 0.125 mm인 T형(copper-constantan)을 사용하였다. 온도분포는 주실험부

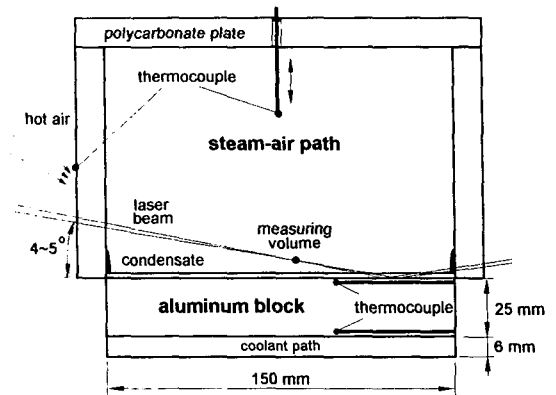


Fig. 4 Cross sectional view of main test section, laser trajectory to measure mixture velocities and method to remove condensate at inside of test section

\*막응축에서 상류의 응축액은 하류방향에 따라 누적된다. 응축액막이 파형을 형성하기 위해서는 실험장치가 수십미터 정도로 매우 길어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 조건을 모사하기 위하여 별도의 액막 주입회로를 설치하였다.

Table 1 Conditions of data acquisition in the present experiment

Measuring property	Location from film inlet	Sampling time or number	Average number
Temperature profile	1210 mm	120 s	2~4
Velocity profile	1320 mm	#300~#500/point	4~6
Film thickness	1225 mm	1 ms, #2049	1
Heat flux	1305 mm	120 s	3

의 입구로부터 1210 mm 후류에서 최소 이송간격이 0.01 mm인 정밀이송대에 열전대를 장착하여 15개 정도의 지점에서 응축벽면에서 수직방향으로 왕복 이송하며 양방향으로 측정하였다. 이러한 과정을 각 지점마다 120초씩 2~4회 Keithley 데이터처리 장치로 읽어 평균값을 취하였다.

수증기-증기 속도의 측정은 DANTECH 이차원 레이저유속계로 측정하였다. 본 실험에서는 주 흐름방향의 속도성분만을 측정하였다. 레이저광은 2~4 W의 488 nm, 초점거리는 310 mm로 하였고, 후방산란방식(backward scattering method)을 택하였다. 실험시 주실험부를 단열하더라도 내벽면에 물방울이 맺혀서 레이저유속계에 의한 속도 측정이 어려웠다. 이를 극복하기 위하여 주실험부의 외벽면을 뜨거운 공기로 내벽면의 온도보다 10~20°C 높게 가열하여 내부 벽면에 생긴 물방울을 제거하였다. 그러나 차가운 응축벽면 근처의 내벽면에서는 물방울이 완전히 제거되지 않아서 Fig. 4와 같이 레이저광을 응축벽면에 대하여 4~5° 기울였고, 측정체적부가 주실험부의 중앙평면에 위치하도록 하였다. 레이저유속계는 전체를 삼차원이송대에 장착하였고 벽면 수직방향으로 이송하면서 속도분포를 10~15개의 위치에서 측정하였다. 혼합기체의 속도분포 측정시 별도의 입자는 사용하지 않았고 혼합공기에 자발적으로 생긴 작은 물방울을 속도측정을 위한 입자로 사용하였다. 측정회수는 각 지점마다 약 500개의 속도신호를 취하였고 이를 4~6회 반복하였다.

응축액막의 주입시 파형액막을 측정하기 위하여 본 연구진이 개발한 전기전도 검침인 flush-wire probe를 사용하였다. 입력신호는 20 V, 100 kHz로 하고 이를 응축벽면인 주실험부의 알루미늄판에 인가하였다. 외경이 0.05 mm인 백금선을 측정전극으로 사용하여 파형액막의 윗쪽에서 삽입하였다. 액막두께에 따른 전류량을 별도의 전기회로를 통과하

여 전압으로 변환한 후 파형신호를 데이터처리장치로 읽었다. 측정전극의 액막두께에 따른 보정곡선은 액막의 존재확률을 매개변수로 하여 구하였다. 측정장치, 방법 및 전자회로의 구성은 강희찬<sup>(14)</sup>과 Kang과 Kim<sup>(18,19)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

응축열 전달량을 측정하기 위하여 Figs. 3과 4에 표시한 바와 같이 주실험부의 알루미늄판의 상하부면에 흐름방향을 따라 16지점에 열전대를 설치하였다. 알루미늄판의 상하면에서의 온도를 측정하고, 이 온도차와 알루미늄의 열전도율을 가지고 국부열유속을 응축벽면온도와 혼합기체의 온도로 환산하였다. 구체적인 열전달률 측정방법은 강희찬<sup>(14)</sup>과 Kang과 Kim<sup>(15)</sup>에 자세히 기술되어 있다. 본 연구에서 온도분포, 속도분포, 액막두께 및 열전달률의 측정에 관한 제반조건은 Table 1에 정리하였다.

레이저유속계를 검증하기 위하여 측정체적부를 주실험부 입구에서 흐름방향으로 1320 mm 하류의 단면중심에 위치시키고 측정체적부 바로 뒤에 피토크관(pito tube)을 설치하였다. 공기에 담배연기를 주입하여 측정한 결과, Fig. 5에 도시한 바와 같이 양 유속계의 평균오차가 1.2%이었다. 주 실험부의

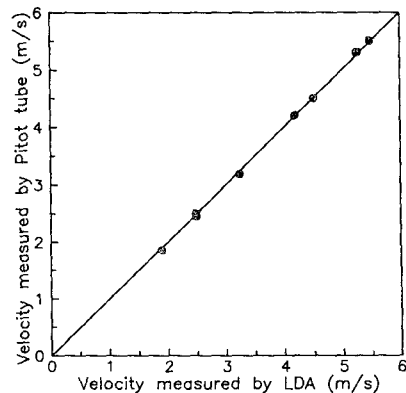


Fig. 5 Verification of LDA system with Pitot tube

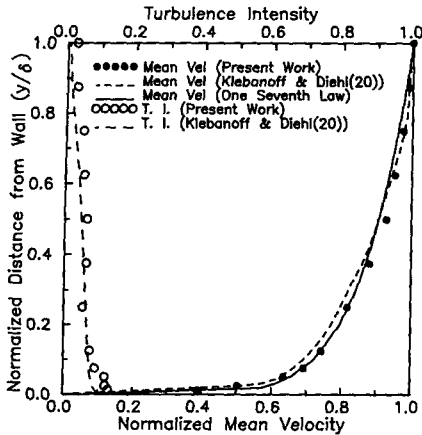


Fig. 6 Comparison of the measured velocity profiles in the present test section by LDA system with the previous results

입구조건 및 유동상태를 검증하기 위하여 주실험부 입구에  $5.2 \text{ m/s}$  ( $Re_g = 4.53 \times 10^6$ )로 공기를 유입시키고 속도분포를 측정하여 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 비교한 바와 같이 본 실험장치에서의 속도분포는 Klebanoff와 Diehl<sup>(20)</sup> 및 one-seventh power law의 속도분포와 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 본 실험장치의 주실험부는 응축현상이 수반되는 평판유동의 연구에 비교적 신뢰할 만하다고 할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 실험의 범위와 비교 요소

막응축 열전달은 혼합기체의 상태(비응축기체의 질량분율, 과포화정도), 유동조건(층류와 난류, 속도)과 응축막의 상태(경계면의 상태, 층류와 난류), 기하학적 조건(기울기, 동류와 반류) 및 응축벽면의 상태(벽면온도, 거칠기, 열유속)에 따라서 그 형태가 매우 다양하고 많은 경우 상사(similarity)가 유지되지 않는다. 실험에 관련한 인자가 많음에 따라서 개개의 인자를 독립적으로 제어하고 조합하는 것은 매우 어려웠다. 본 연구에서 실험이 용이한 실험조건의 배열을 Table 2와 같이 결정하였다. 또한 유동 및 열전달 특성을 상호 비교하기 위하여 혼합기체 및 액막의 Reynolds수( $Re_f$ )와 국부 열전달계수( $h_x$ )를 함께 표기하였다. 표에서 혼합기체의 Reynolds수( $Re_g$ )는 주실험부의 입구에서의 유입속도( $U_{in}$ )와 속도 측정위치에서의 거리( $x$

$= 1320 \text{ mm}$ )를 기준으로 계산한 것이다. 액막 Reynolds( $Re_f$ )는 주입액막의 유량( $m_{f,in}$ )과 열전달 율로부터 환산한 응축량을 합하여 추정 액막온도\*\*의 물성치로 계산하였다. 열전달계수는 온도와 속도분포의 측정위치 근방에서의 국부 열전달계수를 나타낸다.

본 연구에서는 크게 주실험부에서 응축액막을 주입하지 않는 실험과 액막을 주입하여 과형액막의 효과를 조사하는 실험으로 분류할 수 있다. 전자에서는 주로 비응축 기체의 효과 및 혼합기체의 속도의 영향을 고찰하였다. 후자에서는 액막과형에 의한 혼합기체의 유동 및 열적특성을 고찰하는데 목적을 두었다. 응축경계면의 온도와 속도는 정확한 측정이 곤란하여 이후의 온도분포의 그림에서 혼합기체의 온도( $T$ )는 자유흐름과 응축벽면의 온도( $T_m, T_w$ )로 정규화였고, 속도분포는 혼합기체의 측정속도( $U$ )를 자유흐름의 속도( $U_{max}$ )로 정규화하여 표시하였다. 별도로 응축경계면의 평균액막두께는 그림하단에 표시하였다.

#### 3.2 비응축 기체의 영향

Figs. 7과 8은 각각 주실험부의 입구에 포화온도가  $70^\circ\text{C}$ (공기의 질량분율,  $W=0.78$ )와  $90^\circ\text{C}$  ( $W=0.41$ )의 혼합기체 및  $100^\circ\text{C}$ 의 순수증기(pure steam;  $W=0.0$ )가 같은 속도인  $2 \text{ m/s}$ 로 유입된 경우, 온도분포, 주 흐름방향의 평균속도 및 난류강도를 비교한 것이다. 이 실험에서 주실험부의 입구에 응축액막은 주입하지 않았고, 막응축은 하부벽면에서 일어나지만 응축액막의 두께가 매우 얇아서 거의 평평한 경계면을 갖는다. 두 그림에서 자유흐름내의 혼합기체에서 비응축 기체인 공기의 질량분율이 감소할수록 열 및 속도경계층의 두께 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 혼합기체의 공기의 질량분율이 감소함에 따라 응축 열전달 및 물질전달이 증가하고, 이로 인하여 응축벽면으로 흡입 효과가 증대되는 것에 기인한다. 또한  $100^\circ\text{C}$  순수증기( $W=0.0$ )의 온도분포는 측정구간내에서 거의 자유흐름의 온도와 같은 일정한 온도분포를 보이고 있어 순수증기의 경우 기체층에서의 열저항이 거의

\*\*응축 열전달량과 액막두께로부터 경계면의 온도( $T_f$ )를 추정할 후, 벽면온도( $T_w$ )로부터 Minkowycz와 Sparrow<sup>(2)</sup>의 이론에 근거하여 액막온도( $T_f$ )는 다음과 같이 구하였다.

$$T_f = T_w + 0.31(T_i - T_w)$$

Table 2 Test conditions in the present experiment

Inlet air mass fraction	Inlet mixture temperature	Inlet mixture velocity	Inlet film flow rate	Local wall temperature	Local gas Reynolds number	Local film Reynolds number	Local heat transfer coefficient
$W$ ( $m_a/m_{tot}$ )	$T_{in}$ ( $^{\circ}C$ )	$U_{in}$ (m/s)	$m_{f,in}$ (kg/m.s)	$T_w$ ( $^{\circ}C$ )	$Re_g$ ( $U_{in}x/\nu_g$ )	$Re_f$ ( $4m_f/\mu_f$ )	$h_x$ (kW/m $^2$ °C)
0.00	100	2	0.00	58.8	$1.29 \times 10^5$	460	1.584
0.00	100	2	1.11	62.1	$1.29 \times 10^5$	11,976	1.989
0.41	90	2	0.00	25.0	$1.30 \times 10^5$	41	0.131
0.78	70	4	0.00	21.9	$2.72 \times 10^5$	24	0.174
0.78	70	4	0.44	23.1	$2.72 \times 10^5$	2,249	0.235
0.78	70	4	1.11	24.0	$2.72 \times 10^5$	6,089	0.267
0.78	70	2	0.00	21.6	$1.36 \times 10^5$	12	0.064
0.78	70	2	0.44	21.5	$1.36 \times 10^5$	1,988	0.103
0.78	70	2	1.11	24.1	$1.36 \times 10^5$	5,850	0.213
1.00	25	2	1.11	25.0	$1.67 \times 10^5$	4,975	-

없음을 보여주고 있다. 또한 Table 2에 나타낸 바와 같이 다른 조건이 같은 경우 공기의 질량분율이 감소함에 따라 열전달계수는 급격하게 증가함을 알 수 있다. 속도분포의 경우에도 다량의 수증기가 응축되면서 응축벽면 방향으로 속도경계층이 이동하여 속도경계층이 아주 얇아짐을 보이고 있다. Fig. 8에서 공기의 질량분율이 0.78인 혼합기체의 난류강도는 응축경계면 근처인 ( $5\text{ mm} < y < 10\text{ mm}$ ) 구

간에서 크게 나타났다. 같은 구간에서 공기의 질량분율이 0.41, 0.0인 혼합기체와 순수수증기의 난류강도는 모두 2~3% 정도이었다. 이 값이 적은 이유는 응축 경계면으로 물질전달에 의하여 응축벽면 방향의 유동 때문으로 생각된다.

기존의 이론 연구<sup>(1-8)</sup>에서는 열, 물질 및 속도경계층이 서로 상사한다고 가정하여 응축 열전달률을 예측하였다. 그러나 본 실험적 연구의 결과는 전례

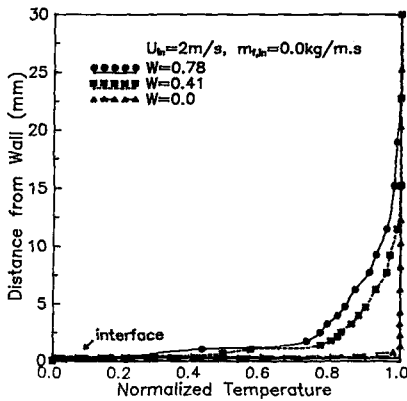


Fig. 7 Effect of air mass fraction on temperature profile of 2 m/s gas mixture

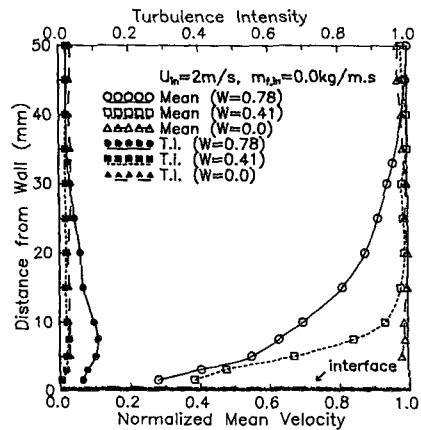


Fig. 8 Effect of air mass fraction on mean velocity and turbulence intensity profiles of 2 m/s mixture gas

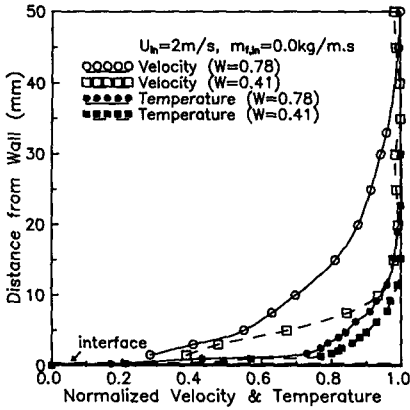


Fig. 9 Comparison of onormalized velocity and temperature profiles of gas mixture when the interface is smooth

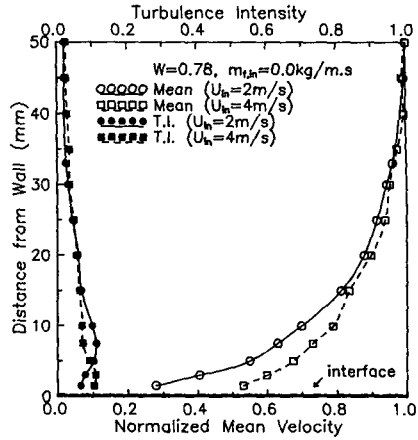


Fig. 11 Effect of mixture velocity on mean velocity and turbulence intensity profiles of gas mixture when air mass fraction is 0.78

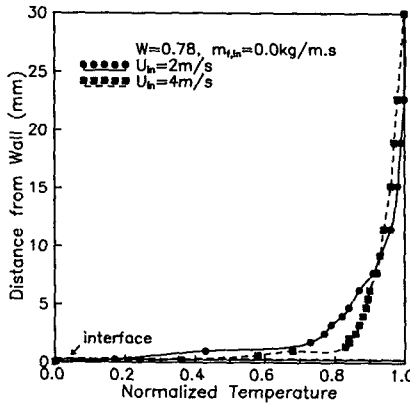


Fig. 10 Effect of mixture velocity on temperature profiles of gas mixture when air mass fraction is 0.78

우 급함을 보이고 있다. 이러한 현상은 전례의 연구자<sup>(10-12)</sup>에서는 관찰되지 않은 것인데 그 주된 원인은 응축벽면의 온도에 기인한 것으로 생각된다. 본 연구에서는 응축벽면의 온도가 낮아서 응축경계면 윗부분에서 수증기는 과포화상태(supersaturated state)가 되며 핵(nucleus)이 형성되고, 이 핵이 흐름방향으로 이동하면서 자라나는 현상을 생각할 수 있다. 이 혼합기체내의 상변화과정 중에 잠열이 방출되고 그 잠열로 인하여 국부 혼합기체의 온도가 상승하기 때문으로 생각된다. 실제의 실험에서 혼합기체중에 낮은 농도의 안개(fog)가 육안으로 관찰되었다. 이러한 과정을 자세히 고찰하기 위해서는 별도의 세밀한 이론 및 수치적인 연구가 병행되어야 할 것으로 기대된다.

의 연구와는 상이한 결과를 보였다. Fig. 9는 앞에서 서술한 바와 같이 응축액막을 주입하지 않고 혼합기체만을 흘렸을 경우에 대한 온도 및 속도분포를 정규화하여 비교한 것이다. 그림에서 두가지의 질량분율 모두에 대하여 Prandtl수와 Schmidt수가 1에 가까와서 ( $Pr=0.7$ ,  $Sc=0.6$ ) 운동량, 열 및 물질전달은 계면과 유체사이에서 상사하므로 무차원 온도분포와 속도분포는 서로 유사할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 본 실험결과에서는 두 분포가 서로 다른 결과를 보이고 있다. 속도분포는 기존의 평판유동을 고려할 때 경계층의 두께가 예측할만 하지만 온도분포의 경우 응축경계면 근처에서 만족되는 정도가 아주 심하며 온도의 기울기가 매

### 3.3 혼합기체 속도의 영향

Figs. 10과 11는 각각 액막이 주입되지 않고, 공기의 질량분율이 0.78인 혼합기체의 주실험의 입구에서 속도만을 2m/s에서 4m/s로 증가시켰을 때, 속도의 증가에 따른 온도, 평균속도 및 난류강도의 분포를 비교한 것이다. 이 경우에도 별도의 응축액막을 주입하지 않았으므로 차가운 하부벽면에서 자발적인 막응축이 일어나며 그 두께는 매우 얇고 거의 평평한 경계면을 형성하였다. Fig. 10에서 온도 분포는 혼합기체의 속도가 증가함에 따라 벽면방향으로 더욱 만족되었다. 이로부터 혼합기체의 속도의 증가에 따라 Table 2에 표시한 바와 같이 물질 전달과 더불어 열전달도 크게 증가하였다. Fig. 11



에서 입구의 혼합기체의 속도가 증가되면 기존의 경계층이론과 유사하게 속도경계층의 두께가 감소하는 경향을 보였다. 특기할 만한 것은 응축경계면 근처에서의 주 흐름방향의 속도분포가 응축벽면으로 이동되는 만큼 난류강도도 이동되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12와 13은 혼합기체의 공기의 질량분율이 0.78일 때 주실험부의 입구에서 주입한 응축액막의 유량에 따라 온도와 주흐름방향의 평균속도 및 난류강도의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 평균액막두께는 온도 및 속도분포에 대응하는 실선 및 점선으로 표시하였다. 이 실험에서 응축액막의 온도는 액막 주입구에서 일정한 온도분포로 유입되나 하류로 이동하면서 경계면에서 응축이 일어나며 액막 주입구에서 약 1 m 하류에 이르면 완전히 발달된 흐름에 근접하는 정상상태의 온도분포와 속도분포를 갖는다.

Fig. 12에서 주입액막의 유량이 증가함에 따라 열경계층의 두께는 거의 비슷하나 응축경계면 바로 위영역에서는 혼합기체의 온도의 기울기가 급해지는 것을 보이고 있다. 이는 응축 열전달과 더불어 대류열전달 효과도 무시할 수 없음을 암시한다. Table 2에 나타낸 바와 같이 혼합기체 ( $W=0.78$ )에서 경계면이 파형인 경우에 매끄러운 경계면보다 열전달은 50~230% 이상 증가되었다. 반면에 순수증기의 경우 ( $W=0.0$ )에는 주입유량이 증가하더라도 열전달의 증가량이 25% 정도로 미미함을 보이고 있다. 이는 혼합기체인 경우 순수증기보다 기체층에 대하여 응축경계면의 역할이 중요하다는 것을

의미한다.

Fig. 13에서 혼합기체의 질량분율이 0.78로 같은 경우, 액막을 주입하지 않을 때보다 액막을 주입하여 파형경계면이 형성되면 속도경계층의 두께는 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 같은 그림에서 파형경계면이 형성하더라도 경계면 바로 위영역에서 혼합기체의 난류강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 8과 11에서와 같이 물질전달의 증가와 파형경계면의 상호작용에 의한 영향으로 생각된다. 파형경계면의 역할만이 정성적으로 고찰하기 위하여 같은 그림에 공기만을 유동기체로 사용하여 응축이 일어나지 않는 경우의 속도 및 난류강도의 분포와 비교하였다. 물질전달이 없는 공기만을 유동기체로 사용한 경우에 평균속도 분포는 물질전달

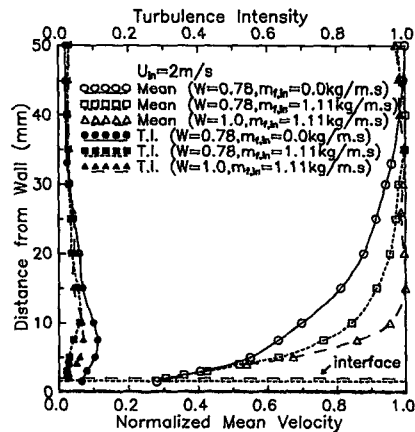


Fig. 13 Effect of wavy interface on mean velocity and turbulence intensity profiles of 2 m/s air and gas mixture

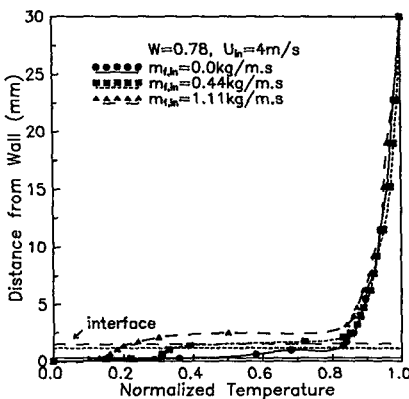


Fig. 12 Effect of film flow rate on temperature profile of 4 m/s gas mixture when air mass fraction is 0.78

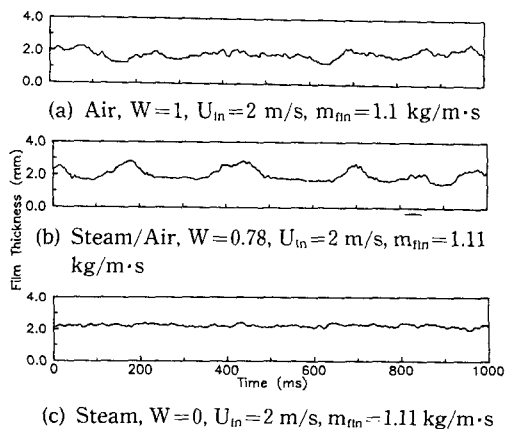


Fig. 14 Variation of film thicknesses along the air mass fraction in the gas mixture

이 있는 경우보다 경계면 방향으로 만곡되었으며 난류강도는 더욱 감소하였다. 따라서 응축경계면이 파형을 형성하고 물질전달이 있는 경우에는 경계층에 파형 및 물질전달의 두 요소가 복합적으로 작용하며 각 요소의 중요성을 판별하기 위해서는 좀 더 세밀한 실험이 이루어져야 할 것이다.

응축현상과 액막파형과의 관련성을 검토하기 위하여 Fig. 14에 혼합기체의 속도와 입구액막유량이 같은 조건에 대하여 시간에 따른 액막두께의 변화를 도시하였다. 그림에서 물질전달이 수반되면(Fig. 14(b)) 물질전달이 없을 경우(Fig. 14(a))보다 일부의 파형은 소멸하고 긴 파장의 파형이 주로 관찰되었다. 또한 물질전달이 매우 큰 경우(Fig. 14(c))에는 대부분의 파형이 사라지는 현상이 관찰되었다. 이는 같은 유량이라도 액막의 온도에 따른 물성치의 변화를 고려할 수 있으나 물질전달 및 응축경계면에서의 전단응력의 증가와 파형액막 사이의 상호작용에 의한 복합적인 원인으로 생각된다. 결론적으로 물질전달, 파형액막, 운동량수송 등은 상호간에 영향을 주고 서로 복잡하게 작용한다고 생각된다. 이를 구체적으로 검토하기 위해서는 이론적 연구와 더불어 좀 더 세분화되고 많은 실험결과와 축적이 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 결 론

막응축현상에서 비응축 기체와 파형 응축경계면의 역할을 규명하기 위하여 실험장치를 구성하였다. 대상유체로서 수증기와 공기를 사용하였고, 대기압 정상포화상태에서 비응축 기체의 질량분율( $W=0\sim 1$ ), 혼합기체의 속도( $2\sim 4$  m/s)와 응축경계면의 파형조건( $0\sim 1.11$  kg/m.s)에 대하여 실험하고 실험결과로부터 다음과 같이 정리하고자 한다.

레이저유속계 및 열전대를 이용하여 평판상의 공기와 수증기의 혼합기체 및 액막의 유동조건에 따라 온도분포, 평균속도, 난류강도 및 열전달계수에 대한 정량적인 실험 결과를 도출하였고, 액막을 주입한 경우에 대하여 액막두께의 변화를 측정·비교하였다. 응축액막이 매끄러운 경우 수증기-공기의 혼합기체내에서 공기의 질량분율이 감소할수록, 혼합기체의 속도가 증가할수록 속도 및 열전달계수 두께는 얇아지고 열전달계수는 증가하였다. 혼합기체 조건이 같을 때 응축액막이 파형을 형성하면 경계면이 매끄러운 경우보다 경계면 근처에서의 속도

및 온도분포는 응축경계면 방향으로 만곡되었다. 본 연구조건에서 막응축 열전달에서 온도 및 속도 분포는 유사하지 않고, 혼합기체층의 거동과 파형액막은 열 및 물질전달에 서로 상호 연관작용이 있음을 관찰하였다.

본 연구의 실험에서 관련한 인자가 많고 또한 각 인자들 간에 상호작용이 있어서 그 현상이 매우 복잡하므로 현상을 보다 확실하게 이해하기 위해서는 실험결과를 토대로 체계적이고 구체적인 이론 및 수치적 연구가 지속되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌다.

#### 참고문헌

- (1) Sparrow, E. M. and Gregg, J. L. 1959, "A Boundary-Layer Treatment of Laminar Film Condensation," *J. Heat Transfer*, Series C., Vol. 83, pp. 13~27.
- (2) Minkowycz, W. J. and Sparrow, E. W., 1966, "Condensation Heat Transfer in the Presence of Non-Condensibles, Interfacial Resistance, Superheating, Variable Properties and Diffusion," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1125~1144.
- (3) Sparrow, E. W., Minkowycz, W. J. and Saddy, M., 1967, "Forced Convection Condensation in the Presence of Non-Condensibles and Interfacial Resistance," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 1829~1845.
- (4) Hijikata, K. and Mori, Y., 1973, "Forced Convective Heat Transfer of a Gas with Condensing Vapour around a Flat Plate," *Heat Transfer-Jap. Res.*, Vol. 2, pp. 81~101.
- (5) Asano, K., Nakano, Y. and Inaba, M., 1979, "Forced Convection Film Condensation of Vapors in the Presence of Noncondensable Gas on a Small Vertical Plate," *J. of Chem. Eng. of Japan*, Vol. 12, pp. 196~202.
- (6) Corradini, M. L., 1984, "Turbulent Condensation on a Cold Wall in the Presence of a Noncondensable gas," *Nuclear Technology*, Vol. 64, pp.

- 186~195.
- (7) Chen, S. L., Gerner, F. M. and Tien, C. L., 1987, "General Film Condensation Correlations," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 1, pp. 93~107.
- (8) Kim, M. H. and Corradini, M. L., 1990, "Modeling of Condensation Heat Transfer in a Reactor Containment," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 118, pp. 193~212.
- (9) Rauscher, J. W., Mills, A. F. and Denny, V. E., 1974, "Experimental Study of Film Condensation from Steam-Air Mixtures Flowing Downward over a Horizontal Tube," *J. Heat Transfer*, Vol. 96, pp. 83~88.
- (10) Dallmeyer, H., 1970, "Stoff-und Wärmeübertragung bei der Kondensation eines Dampfes aus einem Gemisch mit einem Nichtkondensierenden Gas in Laminarer und Turbulenter Strömungsgrenzschicht," *ForchHft. Ver. Dt. Ing.*, Vol. 539, pp. 4~24.
- (11) Desequelles, F. L. and Foch, B. P., 1986, "Heat and Mass Transfer with Condensation in laminar and Turbulent Boundary Layers along a Flat Plate," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 95~105.
- (12) Jones, W. P. and Renz, U., 1974, "Condensation from a Turbulent Stream onto a Vertical Surface," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 17, pp. 1019~1028.
- (13) Fox, R. J., Nagasaki, T. Hijikata, K. and Peterson, P. F., 1993, "Heat Transfer and Stability Phenomena in Gas Loaded Condensers," *Proceedings of Sixth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics held at France*, Vol. 2, pp. 1033~1041.
- (14) 강희찬, 1992, "증상흐름에서의 계면구조 및 막응축 현상에 관한 연구," 포항공과대학, 박사학위논문.
- (15) Kang, H. C. and Kim. M. H., 1994, "Effect of Noncondensable Gas and Wavy Interface on the Condensation Heat Transfer in a Horizontal Plate," *Nucl. Engng. Des.*, (in press).
- (16) Bach, P. and Villadsen, J., 1984, "Simulation of the Vertical Flow of a Thin, Wavy Film Using a Finite Element Method," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, pp. 815~827.
- (17) British Standard Institution, 1964, Method for the measurement of Fluid Flow in Pipes Part 1 : Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes, British Standard 1042.
- (18) Kang, H. C. and Kim M. H., 1992, "The Development of a Flush-Wire Probe and Calibration Method for Measuring Liquid Film Thickness," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 11, pp. 423~438.
- (19) Kang, H. C. and Kim. M. H., 1992, "Measurement of Three Dimensional Wave Form and Interfacial Area in a Air Water Stratified Flow," *Nucl. Engng. Des.*, Vol. 136, pp. 347~360.
- (20) Klebanoff, P. S. and Diehl, Z. W., 1952, "Some Features of Artificially Thickened Fully Developed Turbulent Boundary Layers with Zero Pressure Gradient," *NACA Rep.*, 1110.