

〈論 文〉

전장을 이용한 수평관 주위에서의 응축 열전달촉진에 관한 실험적 연구

유갑증* · 추홍록** · 배정석** · 김석준*** · 이성진***

(1994년 2월 3일 접수)

Experimental Study on the Enhancement of Condensation Heat Transfer on a Single Horizontal Tube Utilizing EHD

K. J. Riu, H. L. Choo, J. S. Bae, S. J. Kim and S. J. Lee

Key Words : Condensation Heat Transfer(응축 열전달), Electro Hydro Dynamics(EHD : 전기 유체역학), Lipid Film(액막), Liquid Extraction(액체추출), Electrode(전극)

Abstract

Condensation heat transfer on a single horizontal tube with electric fields (Electro-Hydro-Dynamics, (EHD)) has been studied experimentally. Results are presented for EHD enhanced condensation of R-113 on a single horizontal tube using several electrode geometries. Especially, its attention was focused on the effects of electrode geometry, electric field strength and the gap of the electrode. In this study, single wire, helical, ring and mesh electrode were used. The range of the imposed voltage was 0~20 kV. As the voltage was increased the surface of liquid became an unstable wave, stream jet, liquid column and then liquid extraction in sequence. Among the various kinds of electrodes, the single wire electrode is suitable for practical application.

기 호 설 명

C_p : 냉각수의 비열 (KJ/kg K)	P : 압력 (kPa)
D : 응축관의 외경 (m)	Pr : 프란틀수
d : 응축관의 내경 (m)	Q : 냉각수의 유량 (m^3/s)
g : 중력 가속도 (m/s^2)	q : 냉각수가 받은 열량 (W)
h : 열전달계수 (W/m^2K)	Re : 레이놀즈수
h_{fg} : 작동유체의 응축 잠열 (KJ/kg)	t : 냉각수 온도 (K)
K_c : 응축관의 열전도도 ($W/m K$)	T : 작동유체 온도 (K)
K_L : 작동유체의 열전도도 ($W/m K$)	$\overline{\Delta T_m}$: 대수평균 온도차 (K)
K_w : 냉각수의 열전도도 ($W/m K$)	U : 열관류계수 (W/m^2K)
L : 유효 응축부분의 응축관 길이 (m)	v : 냉각수의 속도 (m/s)
\dot{m} : 냉각수의 질량유량 (kg/s)	그리스문자
Nu : 누셀트수	ν_w : 냉각수의 동점성계수 (m^2/s)
	ρ : 밀도 (kg/m^3)

*정회원, 경북대학교 기계공학과

**정회원, 경북대학교 대학원

***정회원, 한국기계연구원 열유체 시스템 연구부

하첨자

E : 전장을 가한 상태

g : 기체상태
 in : 입구
 L : 액체상태
 m : 평균
 o : 전장을 가하지 않은 상태
 out : 출구

1. 서 론

열전달촉진 기술은 외부적인 동력의 부가가 없이 표면처리(거칠기), 열교환면적의 확장, 선회(swirl), 표면장력 등에 의해 열전달을 증가시키는 수동적인(passive) 방법과 열전달이 발생하는 부분에 외부적으로 동력을 부가하여 진동이나 전장, 분사 등을 이용하여 열전달을 촉진시키는 능동적인(active) 방법으로 구분되고 있다.⁽¹⁾

최근 능동적인 열전달촉진의 한 방법으로서 전기 전도도가 매우 작은 유체에 전장을 가하는 EHD(electro-hydro-dynamics)에 의한 열전달 증가에 관한 연구가 활발히 진행중이다. EHD에 의한 열전달증가 기술은 능동적 제어가 가능하고, 소비 전력이 매우 적으면서 기존의 방식에 비해 2~10배까지 열전달이 증가되는 장점이 있으나 전장장치의 추가 및 전기절연 등이 여전히 해결될 문제로 남아 있다. EHD에 의한 열전달증가 기술은 크게 대류, 비등, 응축, 용융 및 응고 등의 분야에서 응용되고 있다. EHD에 관한 초기의 연구는 주로 대류 열전달과 비등 열전달 쪽으로 행해졌으나 최근에는 응축 열전달에 관한 연구가 많이 수행되고 있다.

EHD를 이용한 열전달증가에 있어서 전기장의 효과를 가장 먼저 제시한 연구는 Senftleben 등⁽²⁾이 가열된 와이어(wire)를 이용하여 다양한 가스에서의 자연대류 열전달에 비균일한 전기장이 미치는 영향을 연구한 것으로서 이를 시초로 하여 이후 많은 연구가 행해졌다. 특히 EHD에 관한 응축 열전달로서는 Velkoff 등⁽³⁾이 단일 와이어 알루미늄 전극을 사용하여 강한 전기장에 의한 수직 평판상의 R-113 응축에 대한 연구를 수행하여 평균 열전달계수가 100~200% 증가됨을 밝혔다. Didkovsky 등⁽⁴⁾은 판 전극 또는 흠불이 전극을 이용하여 매끈한 수직관에서 발생하는 Diethylether의 응축 열전달효과를 연구하였다. 그 결과 매우 얇은 액막에서 응축액이 분무처럼 튀어 나왔으며, 이때 10배가 넘

는 열전달계수를 얻었다. Yabe 등⁽⁵⁾은 매끈한 수직 동관의 응축 열전달특성을 실험적으로 연구하였다. 그들은 최적화한 헬리컬와이어(helical wire) 전극을 이용하여 수직관으로부터 응축량을 제거하는 방법과 전극수, 나선각, 전극의 단면 구조, 동관과의 간극 및 가한 전압의 세기의 영향에 대하여 조사하였다. 결과적으로 열전달계수는 전장을 가하지 않았을 때보다 2.8배 정도 더 높게 나타났으며, 실험적으로 최적화된 헬리컬와이어 전극의 사용으로 응축량의 95.8%를 응축표면으로부터 제거할 수 있었다. Choi⁽⁶⁾는 직경이 다른 세 종류의 봉 전극을 사용하여 R-113이 수직관 안벽에서 응축될 때 응축 경계면에 반경방향으로 비균일 직류전장을 가하여 그 효과를 관찰하였다. 그의 가시적 관찰에 의하면 전장을 가할 때 응축막이 동적으로 불안정하게 되고, 불안정한 막의 정점이 응축액의 흐름 방향과 평행하게 이차원 파형모양으로 발생하였다. 또한 전장의 세기가 커질수록 파형이 더욱 불안정해져 물방울과 같은 형태가 발생하는 것을 관찰하였다. 결과적으로 전장을 가한 경우에 열전달계수는 크게 증가하였으며, 이를 액막 경계면에서의 액막의 불안정과 관련되어 평균 액막두께가 감소하여 나타나는 특성으로 해석하였다. Yabe 등⁽⁷⁾은 대기압하에서 세 가지의 전극을 사용하여 수직 응축관에서의 EHD효과를 실험적으로 고찰하여 응축 열전달계수가 3~4.2배 정도 증가함을 밝혔다.

이상과 같은 응축 열전달에 관한 연구들에서는 응축기의 구조가 주로 수직, 수평평판의 경우나 수직관의 경우들에 한정되어 있다. 반면, 수평 응축관인 경우에 대한 연구로서는 Cooper와 Allen⁽⁸⁾이 직류전장을 이용하여 수평관과 핀 튜브에서의 R-114와 R-12의 응축에 관하여 실험적으로 연구한 바 이외에는 이에 관한 연구가 매우 부진하다. 그들에 의하면 EHD에 의한 열전달계수는 매끈한 수평관의 경우 2.5배 증가하였다. 또한 그들은 전극형상, 증기 포화압력, 튜브표면의 중요성을 설명하고 EHD에 의해 발생하는 열전달증가를 지배하는 가장 중요한 변수는 불안정한 응축막의 파장이 아닌 진폭임을 주장하였다. 그러나 그들이 사용한 전극의 형상은 메시(mesh)와 평판이 조합된 매우 복잡한 형태로서 관속 형태의 응축관에 적용할 경우에 구조의 복잡성과 전극의 설치 및 절연문제에 있어서 많은 한계점을 내포하고 있다. 결국 수평관 주위에서의 EHD를 이용한 응축 열전달촉진에 있

에서 전극의 형상을 단순화하면서도 열전달효과를 최대한 높일 수 있는 구조가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 수평 응축관 주위의 EHD에 의한 응축 열전달에 있어서 단일 와이어전극, 헬리컬전극, 링전극, 메시전극과 같은 다양한 형태의 전극을 사용하여 수평관 주위에서 발생하는 응축현상 및 열전달특성을 온도측정 및 가시화를 통한 실험적 방법으로써 구명하여 최적의 열전달 조건을 제시하고자 한다. 특히 본 연구에서는 전극의 형상뿐만 아니라 전압의 변화, 전극과 응축관 표면과의 간극, 전극의 위치에 따른 열전달 특성도 동시에 파악하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다.

실험장치의 구성은 고전압 발생장치, 작동유체를 증기로 만들기 위한 보일러, EHD 응축기, 각각의 부분을 연결하는 배관과 밸브 및 각종 측정장치로 이루어져 있다.

EHD 응축기는 열전달관, 전극, 외부 케이싱으로 구성되며 수평으로 설치하였다. 응축관으로는 외경 16 mm, 내경 10 mm의 매끈한 동관을 사용하였다. 응축관에서 응축 열전달의 유효길이는 600 mm이며, 그 내부로는 2.5 m 높이의 시스테인(cistern)

에서 공급되는 냉각수가 흐르게 하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 4종류의 전극 즉, 단일 와이어전극, 헬리컬전극, 링전극 및 메시전극의 형상을 각각 나타낸 그림이다.

케이싱 내부에 전극을 설치할 때 이들 전극은 응축관의 직상부에 평행하게 위치하도록 하였고, 응축관과의 간극 조절이 가능하도록 하였다. 본 실험에서 사용된 전극들은 모두 비균일 전장을 발생시키는 것이다. 이때 사용된 전장은 직류전장이다. 기존의 결과에 의하면 응축 열전달의 경우 전장의 종류가 열전달효과에 미치는 영향은 없는 것으로 보고되었다.⁽⁸⁾

전원 공급장치로는 전압을 미세하게 조절할 수 있는 직류 50 kV, 3 mA 용량의 고전압 동력공급기를 사용하였다. 응축기의 외부 케이싱은 두께 1 mm, 직경 130 mm의 스테인레스 파이프로 제작하였으며, 증기가 응축기 내부에 고르게 분포되게 하여 특정한 부위에서 강하게 나타나는 강제대류 현상을 막기 위하여 케이싱의 상단부에 길이방향으로 증기가 공급되는 입구 3개를 설치하였다. 또한 측면으로의 열전달을 차단하고 전기적 절연을 위하여 teflon으로 제작된 플렌지를 케이싱의 양측에 설치하였으며, 전극 및 열전달관의 교환이 가능할 수 있도록 하였다. 또한 육안 관찰과 가시화를 위한 사진촬영을 위하여 두께 12 mm의 강화 유리로 제작된 사이트글라스(sight glass)를 응축기의 앞면과 뒷면에 부착하였으며, 케이싱의 외부는 유리섬유와

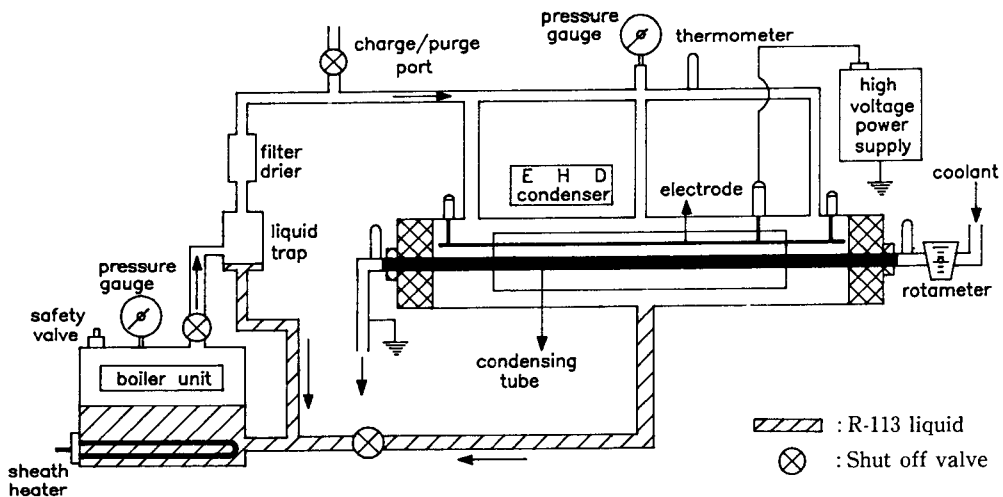


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

보온 단열재로 보온하여 외부로의 열손실을 최대한으로 줄이고자 하였다.

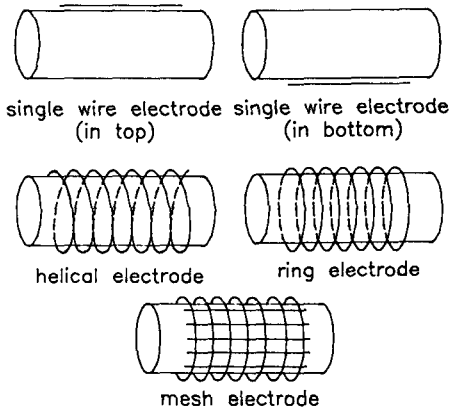
보일러에서는 최대 가열용량 1.5 kW의 전기 피복가열기 (sheath heater)로써 작동유체를 가열하였으며, 보일러에 입력되는 열량은 슬라이더스 및 전력계 (Yokogawa, Type 2509)를 이용하여 조절하였다.

배관에 있어서는 보일러로부터 응축기에 이르는 동안에 발생하는 응축물을 증기와 분리시키기 위하여 액체트랩 (liquid trap)을 설치하였으며, 냉매속

에 녹아있는 수분을 제거하기 위하여 여과 건조기 (filter drier)를 부착하였다. 모든 배관은 외경 16 mm의 동관과 내압 강화호스를 사용하였으며, 외부로의 열손실을 최대한 막기 위하여 보일러를 비롯한 모든 부분을 발포 단열재로 단열시켰다.

측정장치로서는 먼저 응축관내에 흐르는 냉각수의 온도를 정확하게 측정하기 위하여 정밀도가 우수한 봉상온도계를 사용하였다. 이는 전장을 가하여 실험을 수행할 때 물이 비교적 전기적 전도성이 우수하여 열전대로의 소음 (noise)이 매우 심해 냉각수 입·출구 온도의 정밀한 측정이 불가능하기 때문이다. 보일러와 EHD 응축기에서 작동유체의 증기압은 복합 부르돈 압력계를 사용하여 각각 측정하였다. 냉각수의 유량측정은 교정된 로터미터 (rotameter, Flowcell, 0~0.4 m³/h)를 사용하였으며, 작동유체로는 전기 전도도가 작고, 비등점이 대기압하에서 비교적 낮은 R-113을 사용하였다.

Electrode	Specification
Wire electrode	φ2mm Copper wire
Helical electrode	φ1mm Copper wire, pitch: 30mm, helix angle: 25°, ID: φ32mm, φ38mm
Ring electrode	ID: φ32mm, OD: φ35mm, L: 3mm, pitch: 25mm, 50mm
Mesh electrode	ID: φ32mm, OD: φ35mm, L: 3mm, φ1mm Copper wire (mesh size 80mm×5mm)



Electrode	Specification
Wire electrode	φ2 mm Copper wire
Helical electrode	φ1 mm Copper wire, pitch : 30 mm, helix angle : 25°, ID : φ32 mm, φ38 mm
Ring electrode	ID : φ32 mm, OD : φ35 mm, L : 3 mm, pitch : 25 mm, 50 mm
Mesh electrode	ID : φ32 mm, OD : φ35 mm, L : 3 mm, φ1 mm Copper wire (mesh size 80 mm×5 mm)

- Single wire electrode (in top)
- Single wire electrode (in bottom)
- Helical electrode
- Ring electrode
- Mesh electrode

Fig. 2 The shape of electrodes

2.2 실험방법

실험전에 먼저 진공펌프를 가동하여 응축부와 증발부에 존재하는 불응축가스를 제거하여 응축 사이클 내부를 충분한 진공으로 만든 후 모든 실험을 수행하였다. 실험은 실험장치 내를 충분한 진공상태로 만든 후 입력 열량을 일정하게 하여 전기 가열기로 작동유체를 가열하였으며, 보일러에서 발생시킨 증기를 거의 응축시킬 수 있을 만큼의 냉각수를 유동시켜 실험장치 내의 온도 및 압력이 정상상태가 되도록 하였다. 본 연구에서는 보일러와 응축기내의 압력과 온도가 변하지 않고 일정한 값을 유지하면 정상상태에 도달한 것으로 간주하였다. 이때 시스템 전체가 정상상태에 도달하는데는 약 5시간정도가 소요되었다.

2.3 실험범위

실험은 전압을 가하지 않은 경우에 대해 먼저 행하고, 각각의 전극에 가하는 전압을 2.5 kV씩 상승시켜 최대 20 kV까지 실험을 행하였다.

단일 와이어전극의 경우에는 전극의 위치가 응축관의 직상부인 경우와 직하부인 두 경우에 대해 관찰하였다. 또한 전극과 응축관과의 간극은 단일 와이어인 경우는 8 mm, 6 mm, 4 mm, 링전극의 경우는 8 mm, 헬리컬 전극의 경우는 8 mm, 11 mm, 메시전극의 경우에는 8 mm로서 다양하게 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응축현상의 가시화

Fig. 3은 단일 와이어전극의 응축관의 상부로부터 6 mm 떨어진 곳에 위치할 때 0~20 kV까지 전압을 가한 경우 응축관 주위에 나타나는 응축현상을 가시화한 사진이다. 사진에서 상부의 가늘고 검은부분은 전극을 나타내고, 하부의 굵고 검은부분은 응축관을 나타낸다.

(a)는 전압을 가하지 않은 경우로써 응축은 관 표면에 얇은 액막을 형성하고, 대부분의 응축 드레인 중력은 의하여 이루어진다. 반면 전압을 가하면, 5 kV 미만에서는 전압을 가하지 않은 경우와 유사한 현상으로 나타나다가 5 kV인 (b)일 경우에는 액막에 파장이 긴 파동이 나타나 매우 불안정한 액막이 형성된다. 또한 응축관 표면에서는 파형액막의 정점부로부터 전극을 향하여 제트가 분출되듯이 튀어 올라가는 스트림제트(stream jet)가 약간 발생한다. 이러한 임계전압(critical voltage)은 실험조건에 따라 달리 나타나며, 전극의 간극이 커지면 증가한다. 전압을 더욱 증가시킨 (c)의 10 kV인 경우에는 (b)의 경우에 비해서 파의 파장이 더욱 짧아지고, 진폭도 커지며 아주 많은 스트림제트

가 발생한다. 전압이 15 kV인 (d)의 경우에는 스트림제트가 액막을 파괴하여 액주(liquid cloumn)를 형성한다. (e)의 17.5 kV인 경우에는 응축관과 전극의 전 표면에서 액주는 아주 조밀하게 골고루 분포하며, 응축관 표면으로부터 전극쪽으로 추출된 응축물이 전극에서 외부로 미세하게 분무된다. 전압이 20 kV로 증가된 (f)의 경우는 액체가 응축관 표면으로부터 전극쪽으로 추출되어 전극에서 제트 모양으로 아주 활발히 비산된다. 이는 전압이 가해짐으로써 Maxwell 응력이 파동을 발생시키며, 더욱 강한 전압이 가해짐으로 인해 Maxwell 응력이 더욱 강해져 응축액을 전극으로 비산시키는 것으로 생각된다. 이러한 응축액이 응축표면으로부터 효과적으로 제거되는 현상을 액체추출현상이라 하며, 이런 현상의 주된 원인은 강한 전압에서는 Maxwell 응력이 더욱 커져 응축액을 추출하는데 절대적인 영향을 미치기 때문이다. 이러한 액체추출현상은 EHD에 의하여 응축 열전달이 향상되는 매우 중요한 요인이 된다.

Fig. 4는 단일 와이어전극이 응축관의 하부로부터 8 mm 떨어진 지점에 위치한 경우의 가시화 사진이다.

전압을 가하지 않은 경우의 응축 현상은 Fig. 3 (a)와 동일하지만 5 kV의 전압을 가한 (b)의 경우

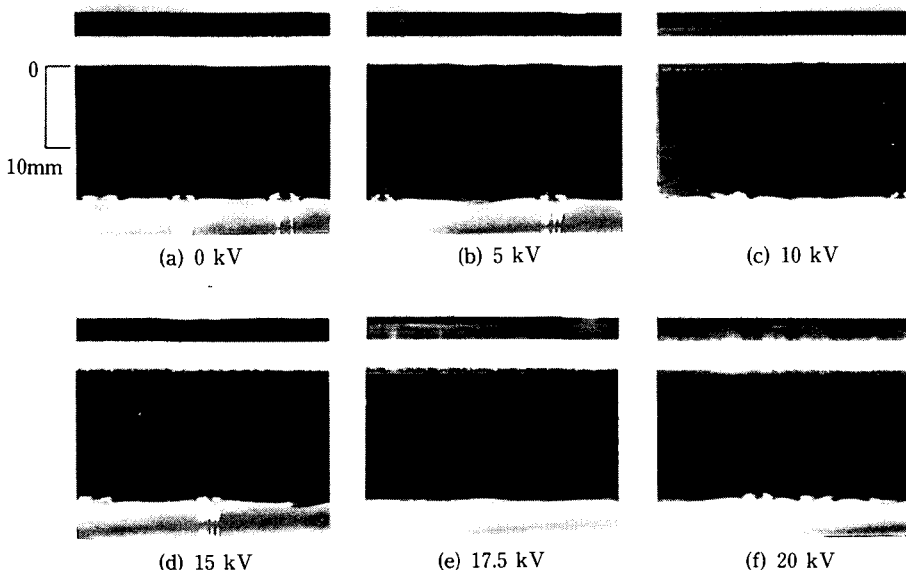


Fig. 3 Photographs of EHD condensing phenomena with increasing voltage for single wire electrode (in top)

는 응축관 하부에 두껍게 형성된 응축액이 불안정하게 되어 파동이 나타나고, 이 파동의 정점으로부터 전극쪽으로 응축액이 빨려 오는 스트림제트가 형성되어 전극에서 중력에 의해 드레인 된다. 10 kV의 전압을 가한 (c)의 경우 응축관 하부로부터 전극쪽으로 스트림제트가 더욱 많이 생기고 전극으로 추출된 응축액은 전극에서 동일 간격의 기둥형태로 드레인 된다. 또한 응축관 상단부에서는 응축관면에 얇게 형성된 액막으로부터 국소적으로 응축액이 미약하게 분무로 분출된다. 15 kV의 전압을 가한 (d)의 경우 응축관 하부에서 전극쪽으로 액체추출이 활발히 일어나고, 전극으로 추출된 응축액은 기둥이 파괴되어 미립화된 형태로 전극으로부터 분출된다. 또한 응축관의 측면 및 상부에서는 균일하게 응축액이 분무로 분출된다. 17.5 kV를 가한 사진 (e)인 경우에는 15 kV의 전압을 가한 (d)에서 나타난 현상이 더욱 활발해진다. 20 kV의 전압을 가한 (f)의 경우는 응축관 하부에서의 응축액의 추출이 더욱 활발해져 응축관 하부의 응축액막이 아주 얇아지고, 응축관의 측면 및 상부의 전 표면에서는 응축물이 더욱 미세한 안개형태로 아주 균일하게 분무되고 있다. 이러한 활발한 액체추출을 일으키는 원인은 Maxwell 응력이 중력과 반대 방향으로 작용하는 Fig. 3과는 달리 Maxwell 응력

이 중력과 같은 방향으로 작용하여 기체-액체 경계면에서 더욱 큰 힘으로 응축액을 추출하기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 나선각 25°, 피치 30 mm, 간극이 8 mm인 헬리컬 전극을 사용하여 0~20 kV까지 전압을 가한 경우의 응축현상을 가시화한 사진이다.

전압을 가하지 않은 (a)의 경우는 Fig. 3(a)와 동일한 응축상태로 나타나고, 5 kV의 전압을 가한 (b)의 경우는 응축관 하부와 전극의 피치점 사이에 스트림제트가 발생하고, 나선각에 의한 전압의 영향으로 인해서 전극에서는 특정한 각도로 미약한 액체추출이 일어난다. 10 kV의 전압을 가한 (c)의 경우 응축관 하부와 전극의 피치점 사이의 스트림제트가 더욱 많아져 전극으로부터 더욱 활발한 액체추출이 일어난다. 전극의 피치점 중간지점의 응축관 하부에서는 수직의 액주가 형성되고, 피치점 부근의 응축관 하부에서는 나선각의 점선방향으로 액주가 형성된다. 또한 응축관의 직상부와 전극의 피치점 사이에서는 미약한 스트림제트가 발생한다. 15 kV의 전압을 가한 (d)의 경우는 전극의 피치점과 응축관 하부 사이 및 전극의 피치점과 응축관 상부 사이에서 스트림제트와 액체추출이 매우 활발해지고, 피치점 사이의 응축관 하부에는 액주의 굵기가 미세하게 되어 점차 균일한 분포를 나타낸다.

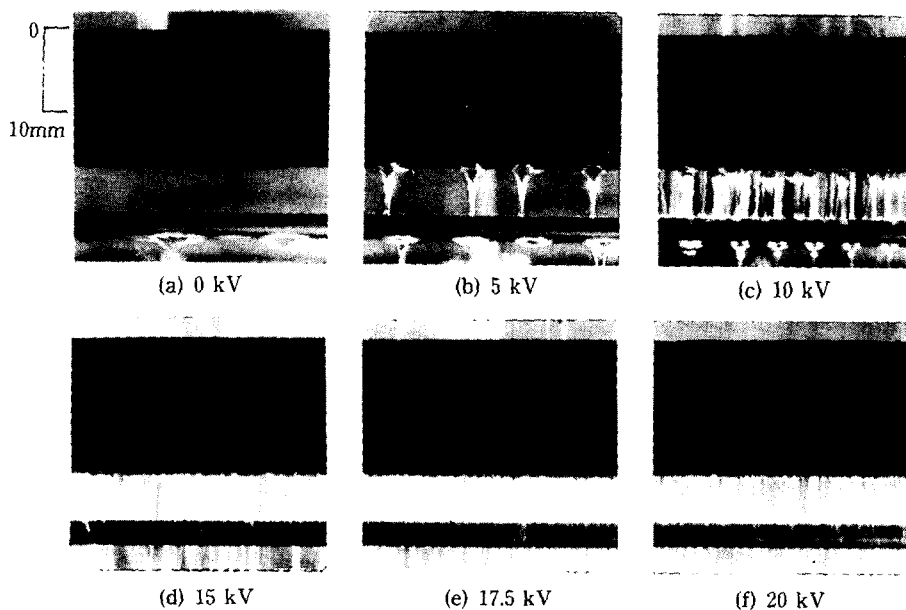


Fig. 4 Photographs of EHD condensing phenomena with increasing voltage for single wire electrode (in bottom)

(e)의 17.5 kV 및 (f)의 20 kV의 전압을 가한 경우 (d)에서 나타난 현상이 더욱 강하게 나타난다. 이러한 헬리컬전극에서 매우 활발한 액체추출을 일으키는 원인은 피치를 갖는 3차원 나선구조의 전극으로 인해 액체추출이 응축관의 전 표면에 걸쳐 일어나고, 응축관 하부의 전극 피치점에서 중력과

Maxwell 응력의 조합으로 인해 나타난 현상으로 생각된다.

Fig. 6은 간극이 8 mm, 피치가 25 mm인 링 전극을 사용하여 0~20 kV까지 전압을 가한 경우 응축관 주위의 응축현상을 가시화한 사진이다.

전압을 가하지 않은 경우는 Fig. 3(a)와 동일한

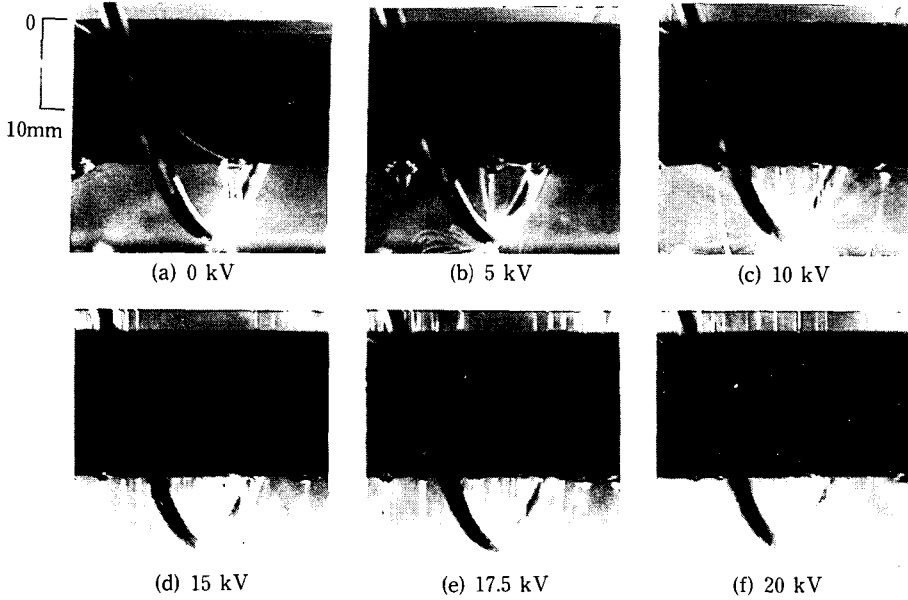


Fig. 5 Photographs of EHD condensing phenomena with increasing voltage for helical electrode

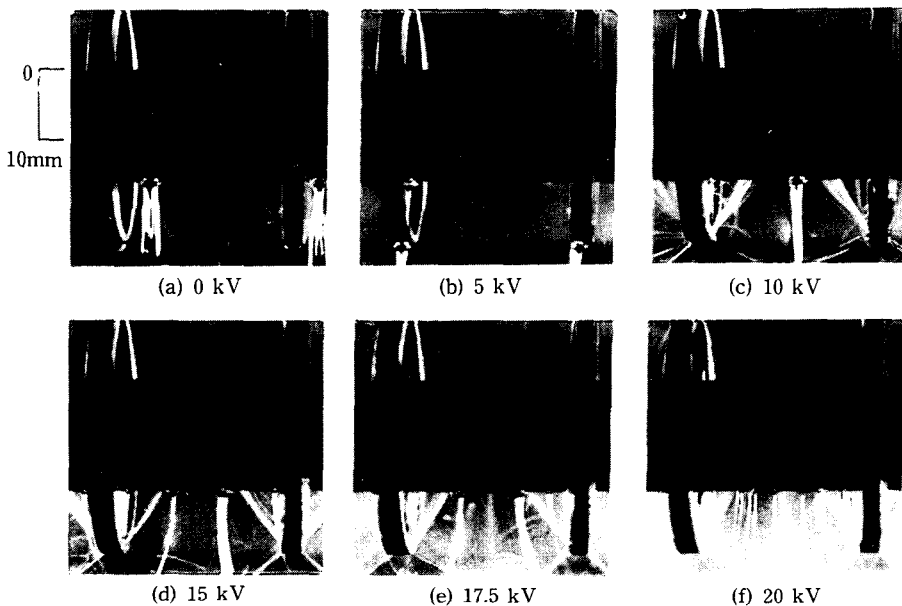


Fig. 6 Photographs of EHD condensing phenomena with increasing voltage for ring electrode

상태를 나타낸다. 5 kV의 전압을 가한 (b)의 경우 링 전극과 응축관 하부에서만 응축액이 드레인된다. 10 kV의 전압을 가한 (c)의 경우 응축관 하부에서 전극쪽으로 추출된 응축액이 전압에 의해 특정한 궤도로 사방으로 분사되며 그 일부는 전극 하부로 재분사되어 응축관에 부착된다.

전극의 피치 중간부분에서는 응축관의 하부에 수직의 액주가 발생한다. (d)의 15 kV인 경우 전극에서 X자 모양의 재분사현상과 응축관으로의 부착 현상이 더욱 강해지고, 전극의 피치 중간부분에서는 응축관 하부의 액주가 가까운 전극쪽으로 휘어진다. 전압이 17.5 kV인 (e)의 경우 (d)에서 나타난 현상들이 더욱 강해진다. 20 kV의 전압을 가한 (f)의 경우는 전극에서 X자 모양의 분사 밀도가 아주 균일해지고, 전극의 피치 중간부분에서 응축관 하부의 액주는 굵기가 점차 미세하여 균일한 분포를 나타낸다.

링전극에서는 피치의 존재로 인하여 Fig. 5의 헬리컬전극의 경우와 유사한 경향으로 나타나지만 응축관 하부의 전극 피치점에서는 응축관 쪽으로 추출된 응축액이 재분사되는 특이한 현상이 나타난다. 이는 링 전극 주위에서 발생된 X자 모양의 Maxwell 응력에 의해 나타나는 현상으로 사료된다.

Fig. 7은 간극이 8 mm인 메시전극을 사용하여 0~20 kV까지 전압을 가한 경우의 응축현상을 가시화한 사진이다.

전압을 가하지 않은 경우는 Fig. 3(a)와 동일한 현상이다. 5 kV의 전압을 가한 (b)의 경우 응축관 하부에 두껍게 형성된 응축액이 파동의 형태로서 불안정하게 된다. 10 kV인 (c)의 경우 응축관 하부에서 전극쪽으로 액주가 형성된다. (d)의 15 kV인 경우는 응축관 하부에서 전극쪽으로 액주가 균일하게 나타나고, 전극에서 외부로의 액체추출현상이 나타난다. 17.5 kV의 전압을 가한 (e)의 경우는 상기의 현상이 점차 강해져 스트림제트 상태의 액체추출이 활발해지며, 응축관의 상부에서도 미약한 스트림제트가 발생한다. (f)의 20 kV인 경우는 응축관 하부의 액체추출현상이 더욱 강해져 응축관 하부의 전체에 걸쳐 균일하게 나타나고, 응축관의 상부에서는 응축관 하부에 비해 다소 미약하지만 활발한 액체추출현상이 발생하고 있다. 이와같이 메시전극은 링전극과 와이어전극의 조합으로서 링전극 및 와이어전극에서 나타난 현상들이 각각 나타난다. 이는 단일 와이어전극에서 발생된 수직성분의 Maxwell 응력과 링전극에서 발생된 X자 모양의 Maxwell 응력의 조합으로 인해 상당히 복잡한 형태의 전장이 형성되기 때문으로 사료된다.

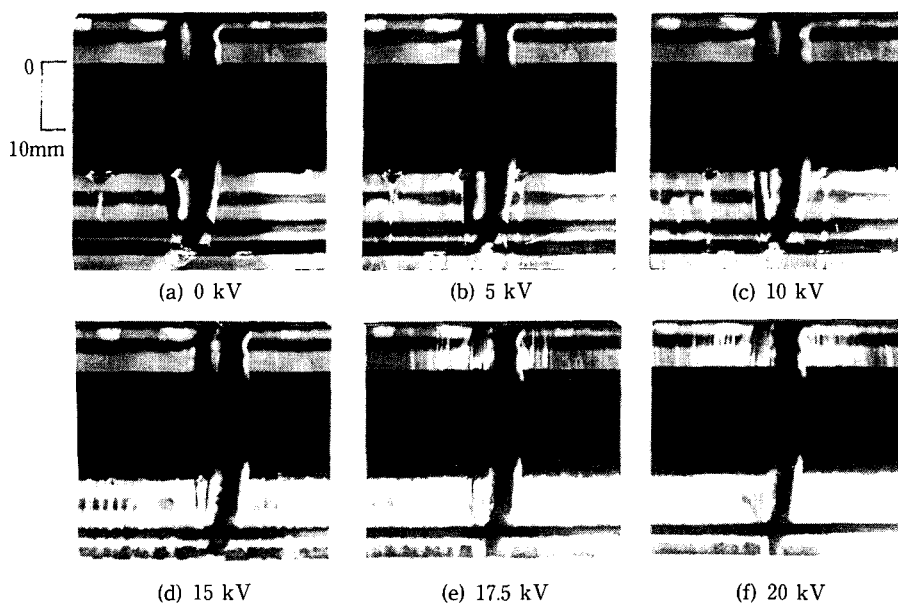


Fig. 7 Photographs of EHD condensing phenomena with increasing voltage for mesh electrode

3.2 열전달계수

본 연구에서 열전달률 향상에 대한 계산은 응축관 표면의 평균 열전달계수를 각각 구하여 비교하였다. 이때 응축관 표면온도의 직접적인 측정을 통한 응축관 표면의 열전달계수의 계산은 실험적으로 불가능하였다. 이는 실험시에 응축관 표면온도를 열전대를 이용하여 측정하는 경우 전장의 영향에 의해 열전대로의 소음(noise)이 심해 정밀한 온도 측정이 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서 평균 열전달계수의 계산은 기존의 응축 열전달에 관한 연구에서 많이 이용하는 아래의 식들을 사용하여 다음과 같은 가정하에 수행하였다.

- (1) 열 및 액막의 흐름은 정상상태이다.
- (2) 모든 열역학적 성질은 온도의 함수이다.
- (3) 발생증기는 완전가스이다.
- (4) 운동에너지와 위치에너지는 무시한다.
- (5) 관표면에서 일정한 대류 열전달계수를 갖는다.

위의 가정을 통하여 본 연구에서 사용한 식들은 아래와 같다.

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{U} - \frac{D}{dh_i} - \frac{d}{2K_c} \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (1)$$

$$q = \dot{m}C_p(t_{out} - t_{in}) \quad (2)$$

$$U = \frac{q}{\pi DL \Delta T_m} \quad (3)$$

$$\Delta T_m = \frac{t_{out} - t_{in}}{\ln\left[\frac{(T - t_{in})}{(T - t_{out})}\right]} \quad (4)$$

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (5)$$

$$Re = \frac{Dv}{\nu_w} \quad (6)$$

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$h_i = \frac{NuK_w}{d} \quad (8)$$

$$h_m = 0.725 \left[\frac{g\rho_L(\rho_L - \rho_g)K_L^3 h_{fg}}{\mu_L(T_{sat} - T_s)D} \right] \quad (9)$$

여기서, q 는 단위 시간당 냉각수로 전달되는 작동유체의 응축열로서 냉각수 입구와 출구의 온도차와 냉각수 유량 및 비열로 계산된다. U 는 기체상태의 작동유체로부터 응축관 내부의 냉각수로의 열관류계수, v 는 냉각수의 유속, Re 는 냉각수의 레이놀즈수를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 전장을 가했을 경우와 가하지 않았을 경우의 열전달계수의 증가비로써 열전달증가의 특성을 나타내고자 하였고,

또한 냉각수가 충분한 난류유동으로 관내를 유동하기 때문에 누셀트수는 Dittus-Boelter의 상관식(6)을 사용하여 계산하였다.^(7,9) 이로써 강제 대류 열전달계수(h_i)를 구하였다. 또한 열평형을 취함으로써 응축 열전달계수(h_o)를 구하였다.

Fig. 8은 본 실험에 대한 신뢰성을 확인하기 위한 예비 실험결과 전압을 가하지 않은 일반적인 응축의 경우에 작동유체의 포화온도와 응축관 표면의 온도차에 따른 평균 응축 열전달계수를 식(1)을 사용하여 계산한 실험결과와 수평관 외부에서 응축이 일어날 때 가장 대표적인 응축 열전달 계산식인 식(8)의 누셀트 이론식⁽⁹⁾으로 계산한 값을 비교한 결과이다. 여기서, T_{sat} 는 작동유체의 포화온도, T_s 는 응축관의 표면온도를 나타낸다. 실험적 결과와 이론적 결과들이 최대오차가 평균 10%이내로 잘 일치하여 본 실험에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 단일 와이어전극이 응축관의 직상부에

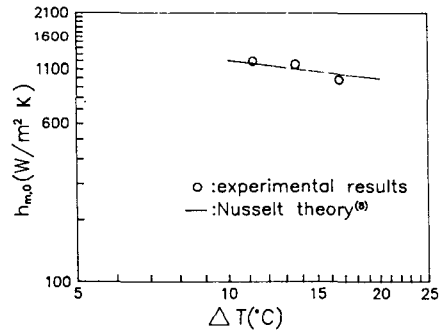


Fig. 8 Comparison of experimental results with Nusselt theory⁽⁸⁾

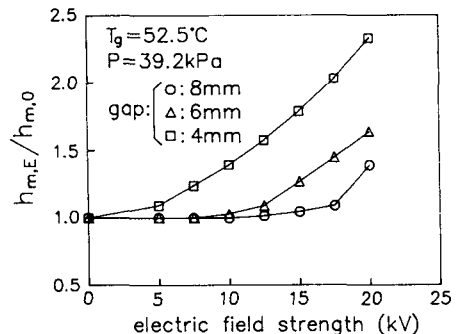


Fig. 9 Relations between the electric field strength and the ratio of the mean heat transfer coefficient for single wire electrode (in top)

위치한 경우 전압의 세기에 따른 평균 열전달계수비의 변화를 나타낸 그림이다. 여기서, $h_{m,E}$ 와 $h_{m,0}$ 는 각각 전압을 가한 경우와 가하지 않은 경우의 평균 열전달계수를 각각 나타낸다.

간극이 8 mm인 경우에 평균 열전달계수비는 임계전압(10 kV) 이하에서는 전압을 가하지 않은 경우와 거의 동일한 값을 나타내다가 전압이 커짐에 따라 평균 열전달계수비는 완만히 증가한다. 이는 전압이 가해짐으로 인해 응축관의 표면에서 파의 불안정성(wave instability)이 발생하여 이로 인해 응축액막이 얇아져서 열전달계수가 증가된 것으로 사료된다. 17.5 kV의 전압에서 열전달계수비가 급격하게 증가하는 이유는 전극 쪽으로 스트림제트가 발생하기 때문이다. 간극이 6 mm인 경우에는 7.5 kV 이하에서 평균 열전달계수비의 변화는 거의 없다가 그 이상의 전압이 가해질 때 파의 불안정성으로 인해 평균 열전달계수비의 완만한 증가가 일어난다. 12.5 kV의 전압이 가해진 경우 스트림제트에 의한 평균 열전달계수비의 급격한 증가로 인해서 20 kV의 전압이 가해질 때까지 거의 선형적인 증가를 나타낸다. 12.5 kV에서 급격한 열전달계수비의 증가는 응축관 표면에서 전극쪽으로 추출된 응축액이 다시 전극에서 외부로 활발한 액체추출을 일으키기 때문으로 생각된다. 간극이 4 mm일 때 전압이 증가함에 따라 평균 열전달계수비의 급격한 증가가 나타난다. 이러한 급격한 열전달 향상의 원인은 간극이 작아짐에 따라 전압이 약간 증가하여도 응축 열전달에서 열저항으로 작용하는 액막이 더욱 불안정하게 되고, 이로 인해 액체추출이 활발히 일어남으로써 액막이 효과적으로 파괴되어 제거되기 때문으로 사료된다. 이상과 같이 와이어 전극의 경우 열전달계수는 간극이 작을수록, 전압이 증가할수록 커지게 된다. 또한 20 kV 전압이 가해졌을 때 평균 열전달계수비는 전압을 가하지 않은 경우에 비해 간극이 8 mm, 6 mm, 4 mm일 경우 각각 최고 1.3배, 1.6배, 2.4배의 증가를 나타낸다.

Fig. 10은 단일 와이어전극이 응축관의 직하부에 위치하고, 간극이 8 mm일 때 전압의 세기에 따른 평균 열전달계수비를 나타낸 그림이다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 7.5 kV 이하의 전압에서는 응축관 하부에 두껍게 형성된 응축액막의 파의 불안정성에 의해 평균 열전달계수비가 약간 증가하지만 그 이상의 전압에서는 전극에서 액체추출을 일으킴으로 인해서 평균 열전달계수비는 급격

히 증가한다. 그러나 12.5 kV에서 17.5 kV까지는 평균 열전달계수비가 거의 증가하지 않다가 17.5 kV 이상의 전압이 가해질 때 다시 약간 증가한다. 이와 같이 전압의 세기가 증가함에도 불구하고 열전달계수가 거의 증가하지 않는 것은 전압의 능력이 응축관 표면에서의 응축물의 추출을 일으키는데 어느 정도 한계에 도달함을 의미하고, 전압의 세기가 매우 강해져 이 한계를 극복하게 되면 다시 열전달계수가 증가할 것으로 예측된다. Fig. 9와 비교해 볼 때 간극이 8 mm로 동일한 경우일지라도 전극이 응축관의 직하부에 위치할 때 평균 열전달계수비의 증가가 더욱 커진다. 이는 중력과 전장에 의한 Maxwell 응력의 합력이 응축관 표면으로부터 응축물을 신속히 제거하여 응축액막이 얇아짐으로 인해 결국 열저항이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 11은 나선각이 25°, 피치가 30 mm인 헬리

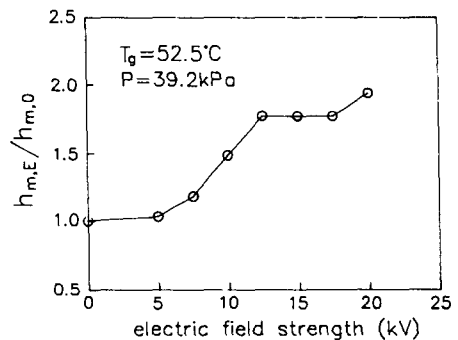


Fig. 10 Relation between the electric field strength and the ratio of the mean heat transfer coefficient for single wire electrode (in bottom)

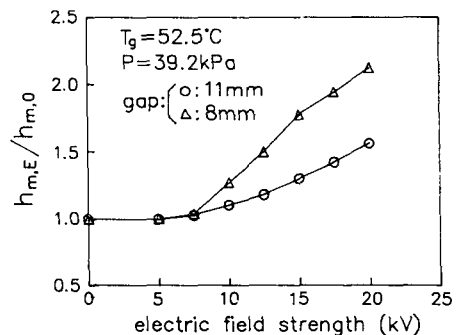


Fig. 11 Relations between the electric field strength and the ratio of the mean heat transfer coefficient for helical electrode

컬 전극을 사용하여 응축관 표면과 전극과의 간극을 변화시켰을 때 전압의 세기에 따른 평균 열전달계수비를 나타낸 그림이다.

간극이 11 mm일 때 5 kV 이하에서는 평균 열전달계수비는 거의 일정하다가 이 이상의 전압이 가해짐에 따라 응축액막에서 파의 불안정성 및 액체 추출이 일어나서 평균 열전달계수비는 꾸준히 증가한다. 간극이 8 mm일 경우에도 5 kV이하에서는 평균 열전달계수비의 증가에 아무런 변화가 없으나 7.5 kV이상의 전압이 가해졌을 때 급격하게 증가한다. 이는 5 kV의 전압에서 응축액막에 나타난 파의 불안정성이 7.5 kV 이상의 전압이 가해질때 액체추출현상으로 바뀌어짐에 따라 평균 열전달계수가 급격히 증가하는 것으로 생각된다. 단일 와이어전극에서 살펴본 바와 같이 전극의 형상이 달라지더라도 평균 열전달계수비의 증가에 간극이 상당히 큰 영향을 미치게 된다. 20 kV의 전압이 가해질때 간극이 11 mm인 경우는 1.6배, 8 mm인 경우는 2.2배 정도로 평균 열전달계수가 증가한다.

Fig. 12는 간극이 8 mm인 링전극의 경우 피치를 변화시킬 때 전압의 세기에 따른 평균 열전달계수비를 나타낸 그림이다.

피치가 50 mm인 경우에는 전압이 증가함에 따라 응축액의 활발한 추출에 의해 평균 열전달계수비의 증가율이 점차 커지나, 전압이 12.5 kV에서 17.5 kV까지는 전압의 세기가 증가함에도 불구하고 평균 열전달계수비가 증가하지 않는다. 또한 17.5 kV 이상의 강한 전압이 가해지면 다시 급격한 상승을 나타낸다. 이와같은 부분적인 정체현상은 Fig. 10의 단일 와이어전극의 경우에서와 같은 현상으로 인해 나타나는 결과로 생각된다. 피치가 25

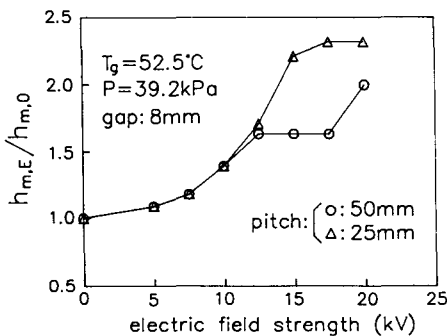


Fig. 12 Relations between the electric field strength and the ratio of the mean heat transfer coefficient for ring electrode

mm인 경우 10 kV의 전압이 가해질때까지는 피치가 50 mm인 경우와 거의 동일한 평균 열전달계수비의 증가를 보이고 있으나, 이 이상의 전압이 가해지면 조밀한 링 피치에 의해 응축관 전체에 훨씬 조밀한 전장이 형성되어 평균 열전달계수비가 더욱 급격하게 증가한다. 15 kV의 전압이 가해지면 평균 열전달계수비는 완만하게 증가하다가, 17.5 kV의 경우에는 거의 증가하지 않는다. 이는 피치가 50 mm인 경우에 12.5 kV에서 나타난 정체현상이 이 경우에는 17.5 kV에서 나타난 것으로 사료된다. 링전극에서 간극이 8 mm로 동일한 경우 피치가 작을수록 평균 열전달계수비가 더욱 증가한다. 이는 피치가 작을수록 조밀한 전장에 의해 Maxwell 응력이 증가하기 때문이다. 20 kV 전압이 가해졌을때 링 피치가 50 mm, 25 mm인 경우 각각 2배, 2.33배의 평균 열전달계수비의 증가가 나타난다.

Fig. 13은 내경 32 mm의 메시전극을 사용한 경우 전압의 세기에 따른 평균 열전달계수비를 나타낸 그림이다.

이 경우 Fig. 12의 피치가 25 mm인 링전극의 경우와 비슷한 성향으로서 전압이 증가함에 따라 평균 열전달계수비는 급격히 증가한다. 그리고 17.5 kV 이상의 전압이 가해졌을때 앞의 경우와 같은 정체현상에 도달한다. 이는 메시전극이 와이어전극과 링전극의 조합으로 구성되기 때문에 와이어전극과 링전극에서 나타나는 정체현상이 메시 전극에서도 나타나는 것으로 생각된다. 20 kV의 전압이 가해질 때 평균 열전달계수비는 전압을 가하지 않은 경우에 비해 최고 2배의 증가를 나타낸다.

Fig. 14는 전극과 응축관 표면과의 간극이 8 mm로서 동일한 경우 각각의 전극형상에 따른 평균 열

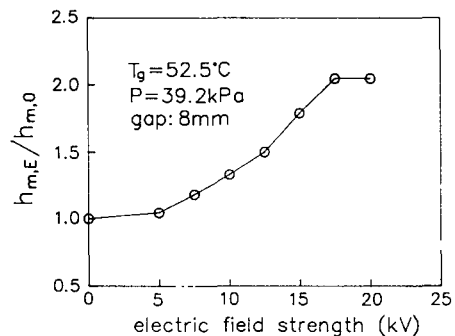


Fig. 13 Relation between the electric field strength and the ratio of the mean heat transfer coefficient for mesh electrode

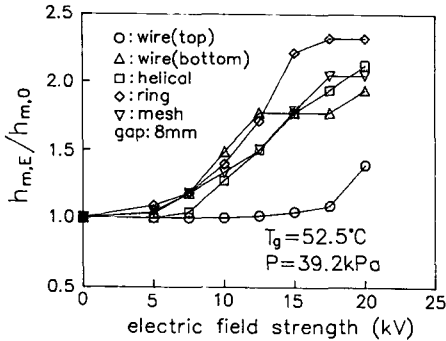


Fig. 14 Relations between the electric field strength and the ratio of the mean heat transfer coefficient for various electrode

전달계수의 비를 나타낸 그림이다.

평균 열전달계수비는 실험범위의 최대 전압인 20 kV의 전압에서 링전극인 경우에 가장 큰 증가를 나타내며, 헬리컬전극, 전극이 응축관의 하부에 위치한 단일 와이어전극, 메시전극, 전극이 응축관 상부에 위치한 단일 와이어 전극순으로 나타난다. 그러나 이보다 낮은 전압에서 평균 열전달계수비의 증가순서는 각각 다르게 나타난다. 이상과 같은 결과에서 실제 응축기에의 응용 및 전극 제작의 어려움, 전극형상의 복잡화 등을 고려해 볼때 평균 열전달계수비는 다소 작지만 응축관의 하부에 위치한 단일 와이어 전극이 가장 최적화된 전극으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평 응축관 주위의 EHD에 의한 응축 열전달에 있어서 단일 와이어전극, 헬리컬전극, 링전극, 메시전극과 같은 다양한 형태의 전극을 사용하여 수평관 주위의 응축 열전달특성을 실험적 방법으로써 구명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전극의 형상 및 간극에 관계없이 임계전압 이상이 되면 액막이 불안정해지며, 전압이 증가함에 따라 파의 불안정성, 스트림제트, 액주, 액체추출이 단계적으로 발생한다. 그리고 링전극에서는 전극으로 추출된 응축액이 다시 응축관 쪽으로 재분사된다.

(2) 전장에 의한 열전달 향상은 전극과 응축관 표면과의 간극이 작을수록 그 효과가 크며, 전압이

증가함에 따라 열전달계수비는 급격히 증가한다. 단, 링전극, 메시전극, 단일 와이어전극의 경우 전압이 증가함에도 불구하고 부분적으로 열전달계수비가 증가하지 않는 정체구간이 나타난다.

(3) 전극제작의 어려움 및 전극형상의 복잡화로 인해 실제 응축기에의 응용은 전극이 응축관의 하부에 위치한 단일 와이어전극인 경우가 단순하면서도 비교적 좋은 성능을 보여 가장 최적의 조건으로 판정되었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 열유체 시스템 연구부의 도움으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사료를 드립니다.

참고문헌

- (1) Webb, R. L., 1987, "Enhancement of Single-Phase Heat Transfer, Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer," Chap. 17.
- (2) Senftleben, H., 1931, "Die Einwirkung Elektrischer und Magnetischer Felder auf des Wärmeleitvermögen von Gasen," Physik Z. 32, 550.
- (3) Velokoff, H. R. and Miller, J. H., 1965, "Condensation of Vapour on a Vertical Plate with a Transverse Electrostatic Field," *J. of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C, Vol. 87, No. 2*, pp. 197~201.
- (4) Didkovsky, A. B. and Bologna, M. K., 1981, "Vapour Film Condensation Heat Transfer and Hydrodynamics under the Influence of an Electric Field," *Int J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, No. 5*, pp. 811~819.
- (5) Yabe, A., Taketani, T., Kikuchi, K., Mori, Y. and Hijikata, K., 1985, "Augmentation of Condensation Heat Transfer around Vertical Cooled Tubes Provided with Helical Wire Electrodes by Applying Nonuniform Electric Fields," *Proc. Int. Symposium on Heat Transfer, Peking, China*.
- (6) Choi, H. Y., 1968, "Electrohydrodynamic Condensation Heat Transfer," *J. of Heat Transfer* 90, pp. 98~102.
- (7) 矢部彰外 5人, 1989, "ヒートポンプ用高性能凝

- 縮器の研究-EHD凝縮器の實用化研究,” 日本機械學會論文集, 55卷, , 510號, pp. 510~516.
- (8) Cooper, P. and Allen, P. H., 1984, “The Potential of Electrically Enhanced Condensers,” *2nd International Symposium*, pp. 295~309.
- (9) Ozisik, M. N., 1985, *Heat Transfer*, McGraw Hill Book Company, New York.