

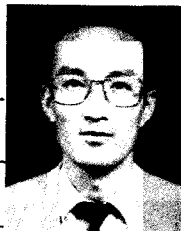
기술 소개 - EHD에 의한 열전달 촉진 기술



김 석 준

(열유체기계실 선임연구원)

- '76.2 서울대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '85.2 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '80.9-현재 한국기계연구원 선임연구원



김 옥 중

(열유체기계실 선임연구원)

- '83.2 아주대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '85.2 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- '85.3-현재 한국기계연구원 선임연구원



이 성 진

(열유체기계실 연구원)

- '88.2 경북대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '91.2 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)
- '91.1-현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 언

일반적으로 열전달 유체 사이의 온도차가 작을 때는 아주 큰 열교환 장치(면적)가 필요하게 되며, 그에 따라 생산비와 설치 공간의 문제가 생기게 된다. 이런 문제는 지열을 이용한 발전소, 해수의 열 에너지 회수 시스템, 태양 에너지 이용 시스템 및 대형의 열펌프 시스템 등에서 매우 중요하다. 예를 들어 뜨거운 폐수를 이용하여 전기를 발생하는 시스템의 경우에 응축기와 증발기를 흐르는 냉각수와 폐수의 작은 온도 차이는 더 크고 더 비싼 열 교환기를 필요로 한다. 그러므로 밀집도가 높은 고효율 열교환기를 제작하는 것이 작은 온도 차이의 에너지 교환 문제 해결을 위한 관건이 된다. 이러한 고효율의 열교환 장치를 개발하기 위한 열전달 촉진에 관한 연구가 차세대 열전달 기술로서 인식되어 매우 활발히 이루어져 왔다. 즉, 열전달 촉진 기술은 1950년대 중반에 고효율의 발전 및 프로세스용 열교환기에 대한 수요 증가와 상업적인 원자력 발전의 출현 및 항공 우주 시스템 등의 요구에 대응해서 개발되기 시작한 이래, 특히 1970년대의 석유 파동 이후 열회수와 대체 에너지 시스템과 관련하여 급속한 발전이 이루어졌다. 그림 1에 나타난 열전달 향상에 관한 기술 논문 등의 출판 상황에서 알 수 있듯이 이 기술과 관련하여 최근 논문, 보고서, 특허 등이 매년 500여개 정도 출판된 것으로 평가되고 있으며 계속해서 증가하고 있다[1].

열전달 촉진 기술은 표 1에 보인 바와 같이 외부적인 동력의 부가가 없는 수동적인(passive) 방법과 동력을 요하는 능동적인(active) 방법으로

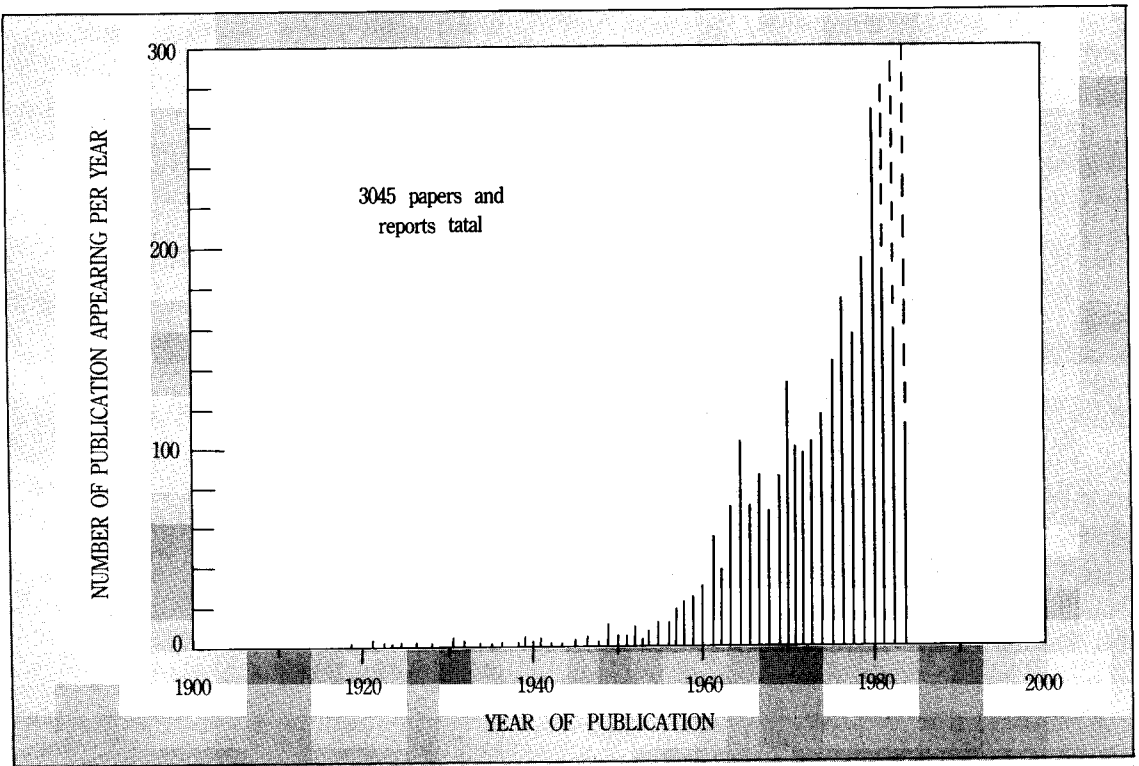


그림 1. 열전달 촉진에 관한 연구 논문 발표 추이

구분되고 있다[2]. 전자는 표면 처리(거칠기), 열 교환 면적의 확장, 선회(swirl), 표면 장력 등에 의해 열전달을 향상시키는 것이며, 후자는 열전달이 발생하는 부분에 진동이나 전장 혹은 자장,

분사 등을 가하여 열전달을 촉진시키는 것이다.

최근 능동적인 열전달 촉진의 한 방법으로 전기 전도도가 매우 작은 유체에 전장을 이용하는 이른바 EHD(Electro-Hydro-Dynamics)에 의한 열전달 향상에 관한 연구가 크게 주목받고 있다. EHD에 의한 열전달 향상 기술은 특히 능동적 제어가 가능하고, 소비 전력이 매우 적으며 기존의 방식에 비해 2~10배까지 열전달이 향상되는 잇점이 있다. EHD에 의한 열전달 촉진에 관한 연구는 Senftleben 등[3]이 기체의 열전달에 전장을 가하여 그 효과를 규명한 것을 시초로 하고 있으며 이후 많은 연구가 진행되었다. 특히 절연 액체의 이상(二相) 열전달 문제를 다룬 Bochirol 등[4]의 실험 이후 증발과 응축, 용융과 응고 등 전반적인 열전달 부분에 매우 활발히 응용되고 있다.

EHD에 의한 열전달 촉진 기술은 현재 미국, 영국 및 일본의 대학과 국립 연구소, 기업에서 매우 활발히 연구되고 있으며 소련, 프랑스, 벨기에 등에서도 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 연구

표 1. 열전달 촉진 방법의 분류

Passive Techniques	Active Techniques
Treated surfaces	Mechanical aids
Rough surfaces	Surface vibration
Extended surfaces	Fluid vibration
Displaced enhancement surfaces	Electric or magnetic fields
Swirl flow devices	Injection or suction
Coiled tubes	Jet impingement
Surface tension devices	
Additives for liquids	
Additives for gases	

기관으로는 미국의 Illinois 대학, Maryland대학, MIT, GE, 영국의 Bristol대학, Imperial College, Cavendish Lab., 그리고 일본의 동경공업대학, 쓰쿠바 대학, 일본기계기술연구소, 토시바 등을 들수 있다. 특히 일본에서는 Moon Light Project하에 개발하고 있는 Super Heat Pump와 같은 고효율, 고집적의 에너지 이용 기기에 직접 적용하기 위한 실용화 연구가 꾸준히 이루어져 현재 거의 마무리 단계에 있다.

2. 이론적 고찰

전장하에 놓인 절연 유체의 거동에 관한 EHD 효과는 이론적으로 운동량 방정식의 체력항에 다음식으로 표현되는 힘이 더해지는 것으로 나타나며, 전장, 유동장 및 온도장 사이에는 그림 2와 같은 상호 작용이 발생하게 된다[5, 6].

$$F^{(e)} = \rho_e E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon - \nabla \left[\frac{1}{2} \rho E^2 \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right) \right]$$

여기서 ρ_e : 자유 전하 밀도(free electric charge of density)

E : 전장의 세기(electric field strength)

ϵ : 절연 계수(dielectric constant)

위의 식에서 첫번째 항은 ρ_e 의 밀도를 갖는 유체 안의 자유 전하들이 균일하거나 불균일한 전장하에서 받는 힘으로 일반적으로 'Electrophoretic force'라 한다. 이 힘은 또한, 유체 안의 자유 전하들과 전기를 띤 전극간의 정전기적 인력(electrostatic attraction)에서 비롯된다고 하여 'Coulomb force'라고도 하며 이 힘은 전장에 의해 유체가 받는 힘중에 가장 강한 힘이다.

두번째 항은 'Dielectrophoretic(DEP) force'라 불리우는데, 이는 음전기와 양전기의 두가지 전기적 성질을 모두 가지고 있는 절연성을 띤 액체나 입자가 불균일한 교류 전장하에 있을 때 받는 힘을 말한다. 또한 극성을 띤 유체와 유체 내에 분산되어 있는 입자들의 분극화에 따른 힘이라 하여 'Polarization force'라고도 한다. 결국 이 힘은 유체나

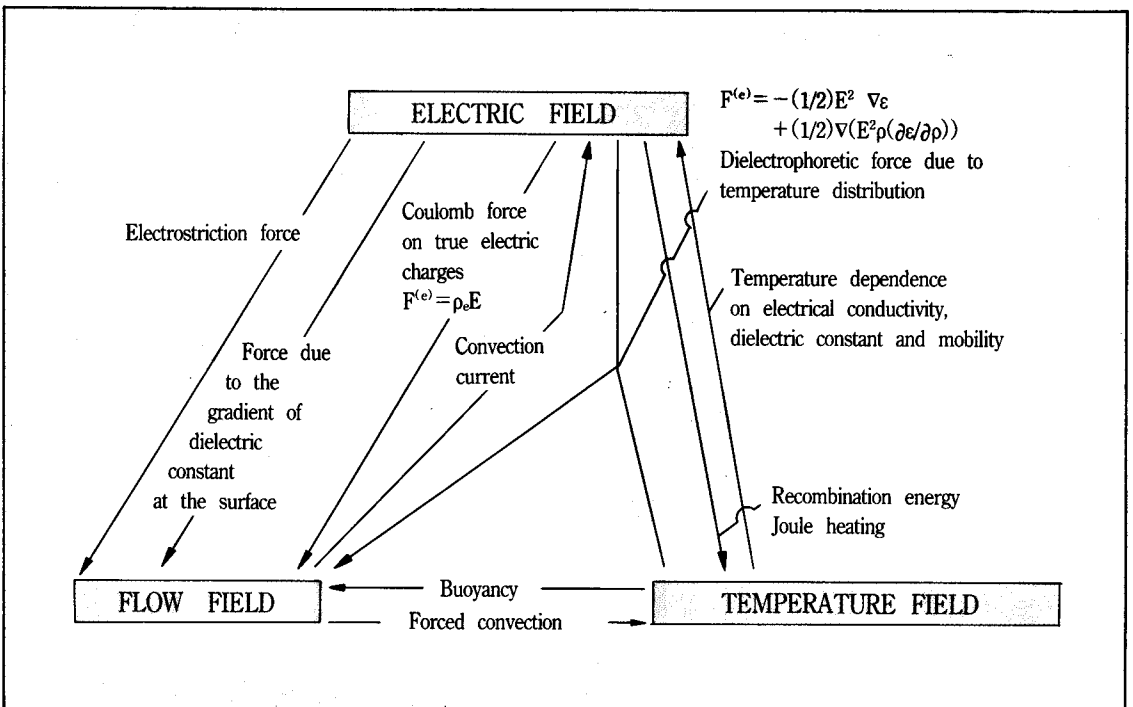


그림 2. 전장, 유동장 및 온도장의 상호 관계

입자가 불균일 전장하에서 분극화되면서 전장의 세기가 큰 쪽으로 움직여가기 때문에 생긴다고 할 수 있다. 그러므로 이 힘은 균일 전장하에서는 유체나 입자에 어떠한 움직임도 가져다 줄 수 없으며, 불균일한 전장하에서만 유체나 입자를 움직이게 되는데, 그 방향은 전장의 방향과는 무관하게 된다. 일반적으로 이 힘은 자유 전하에 의한 첫번째 항보다는 약하게 작용하는 것으로 알려져 있지만, 불균일한 유전율을 갖는 유체가 강한 교류 전장하에 있을 때는 첫번째 항보다 중요한 역할을 하게 된다.

세번째 항은 전장의 불균질(inhomogeneity)에 의해 유체에 작용되는 힘으로 'Electrostriction force'라 불리운다. 이 힘은 유체의 압축성이 중요시 되는 경우에 밀도의 변화에 따른 유전율의 변화로 인해 생길 수도 있다.

한편, EHD를 이용한 여러가지 형태의 열전달에

미치는 중요한 인자는 표 2에 보인 바와 같이 분류되고 있다.

표 2. EHD에 의한 열전달 촉진에 영향을 미치는 중요 인자

전장의 종류	직류 혹은 교류
전장의 구배	균일 혹은 비균일
작동유체의 물성치	전기 전도도, 유전율, 극성도, 열전도도, 점도, 표면장력
실험 조건	가열 표면의 과열 및 과냉도 열전달 면의 크기(직경) 및 표면 조건 전극의 모양 및 열전달 면과의 간극 전장의 세기 온도 및 압력 조건등

표 3. EHD의 주요 기술과 현상

<p>Convection(Gas)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Corona wind generated by corona discharge(~3 m/s)
<p>Convection(Liquid)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Convection generated by electric charge injection of corona discharge in liquids(~0.5 m/s) • Convection and turbulence generated by charge injection from electrode • EHD liquid jet by applying non-uniform electric fields(about 1m/s)
<p>Boiling(Convection in liquid is also effective)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Active movement of boiling bubbles on the heated surface by Maxwell stress • Deformation of boiling bubbles to make the bottom of the bubble spread on the boiling surface by the existence of the thermal boundary layer • EHD promotion effects on Taylor instability to realize the break-up of bubbles into several bubbles
<p>Evaporation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flying of small liquid particles between the heat transfer surface and the opposing electrode by the electrostatic atomization • Increase of heat transfer surface by the EHD extraction phenomenon of liquid
<p>Condensation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Decrease of condensate film thickness by removal of condensate from the condensing surface utilizing EHD extraction phenomenon of liquid • EHD pseudo-dropwise condensation • Dispersion of condensate from the condensing surface by electrostatic atomization

3. EHD에 의한 열전달 향상의 형태와 작동 기구

전장을 이용한 열전달의 촉진은 그 적용 대상으로 크게 두 가지를 들 수 있는데, 하나는 가열면과의 온도차가 크지 않으면서 상분리가 일어나지 않는 대류 열전달이며 다른 하나는 이보다 큰 온도차에서 발생하는 경우로서 상분리를 동반하는 비등 및 응축 열전달이다. 표 3은 열전달 향상과 조절에 응용되고 있는 EHD의 주요 기술과 현상을 보인 것이다.

기체와 관련된 전형적인 EHD 현상은 코로나 wind[7]의 사용에 의한 대류 열전달의 향상이다. 코로나 방전은 그림 3에 보인 바와 같이 일반적으로 바늘 또는 가는 선 전극에 가까운 좁은 지역에서 생기며, 높은 전장에서 가스의 이온화에 의해 이온(ion)이 생성된다. 이 때 전자는 양극(anode)인 전극선에 의해 잡혀지며, 양이온은 Coulomb 힘에 의해 재결합 없이 전극 평판으로 이동하면서 서로의 충돌에 의해 그들의 중성 분자(neutral molecules)쪽으로 운동량을 전달한다. 이로 인하여 그림에서와 같이 중성 분자의 체적 흐름이 발생하며, 이 흐름은 열전달 계수를 증가시키는 강제 대류를 만들게 된다. 이 코로나 wind는 대개 3m/sec 정도의 속도를 갖기 때문에 열전달 계수는 자연대류에 의한 열전달 계수와 비교해 10배 이상 증가시킬 수 있게 되는 것이다. 한편, 기체-액체면이 존재하는 시스템에 전장을 이용하면 액체에서의 열전달 과정에 많은 변화를 일으킨다.

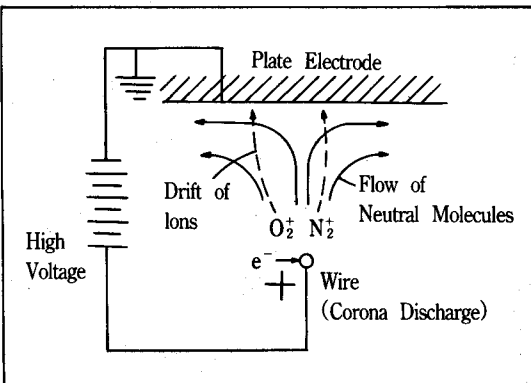


그림 3. Corona 방전에 의한 Corona wind의 발생 현상

Yabe[6] 등은 그림 4에 보인 바와 같이 Ring 전극과 평판 사이에 고전압을 이용하여 실험한 결과 액분사(liquid jet) 현상을 관찰하였다. 이 Jet의 흐름은 평판으로부터 Ring 전극을 향하였으며 R-113과 에탄올의 혼합물인 경우 흐름 속도가 1m/sec 이상인 것을 볼 수 있었다. 이 현상은 EHD에 의해서 발생하는 대류 열전달과 비등 열전달의 증가에 있어서 중요한 작동 기구(mechanism)가 되고 있다.

상변화를 수반하는 열전달의 경우에 대하여 전장을 이용 할 때는 대류 현상 뿐만 아니라 전장에 의한 표면 불안정성이 매우 중요하다. Yabe 등[8]은 그림 5에 나타낸 바와 같은 여러가지 형태의 전극 사이에 액체 기둥을 형성한 후 이를 제거하는 액 추출에 의한 응축 열전달 향상에 대하여 연구하였다. 이러한 EHD 액추출 현상은 다음과 같이 비균일 전장에 의한 표면 불안정화로

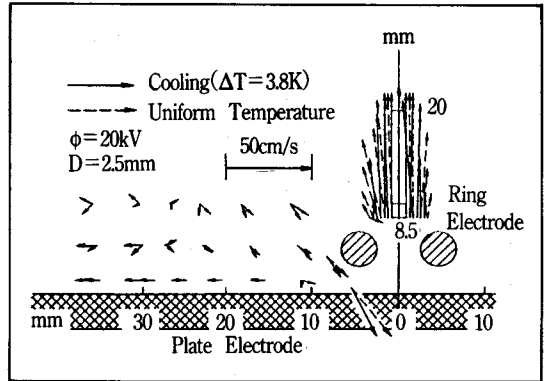


그림 4. EHD에 의한 액분사 현상

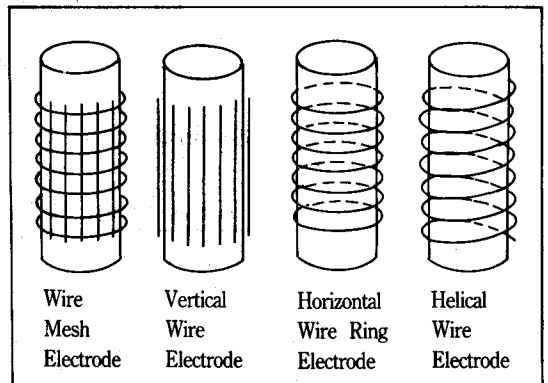


그림 5. 전극의 형상

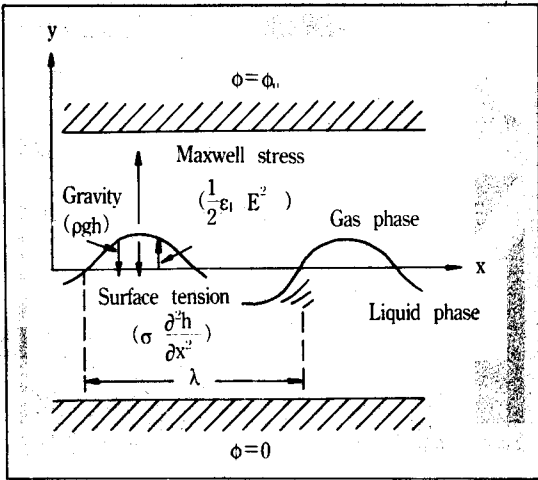


그림 6. EHD에 의한 기체와 액체 경계면에서의 불안정화

설명되고 있다. 대부분의 경우, 기체는 전기 절연체이고 액체는 전기 전도체이다. 따라서 그림 6에 보인 바와 같이 기체와 액체 상태가 공존하는 시스템에 전기적 이완 시간(charge relaxation time)이 긴 전장을 가하면 액체 표면에서의 Maxwell stress는 수평 성분은 거의 없고, 수직 성분은 $\frac{1}{2}\epsilon E^2$ 인 분포를 갖게 된다. 이 힘이 복원력으로 작용하는 중력과 표면 장력보다 커지게 되면 액체면은 전

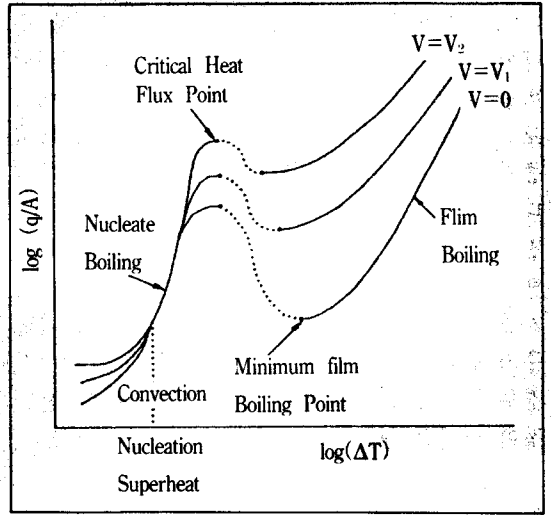


그림 7. 전장의 효과에 의한 풀비등 곡선의 변화($V_1 < V_2$)

극쪽으로 팽창되어 열전달 표면으로부터 멀어지는 불안정화가 일어난다. 앞에서 언급된 연구 결과에 따르면 최적화된 helical wire 전극의 사용에 의해 전체 응축량의 95.8%가 응축 표면으로부터 제거되었으며, 열전달 계수는 전장이 없을 때 보다 2.8배까지 증가하고 있다.

비등에 의한 열전달을 증가시키기 위해 전장을 이용하게 되면 이러한 일반적인 비등 현상과는

표 4. EHD에 의한 열전달 향상의 중요 연구 결과

Source	Max. Reported Enhancement(%)	Test Fluid	Heat Transfer Wall/Electrode Configuration and Process
Fernandez	2,300	Transformer oil	Tube-wire, Forced convection
Ohadi <i>et al.</i>	320	Air	Tube-wire/rod, Forced convection
Levy	140	Silicone oil	Tube-wire, Forced convection
Yabe, Maki	10,000	96%(w.w) R-113 4% ethanol	Plate-ring, Natural convection
Cooper	1,300	90%(w.w) R-114 10%(w.w) oil	Tube-wire mesh, Pool boiling
Ueura <i>et al.</i>	1,400	R-113	Plate-wire mesh, Film boiling
Bologa <i>et al.</i>	2,000	Diethylether R-113, hexane	Plate-plate, Film condensation
Sunada <i>et al.</i>	400 : 600	R-113, R-123	Vertical wall-plate, Condensation
Ohadi <i>et al.</i>	480	R-123	Tube-wire, Boiling

다른 흥미로운 현상이 관찰되는데, 지금까지 수행된 실험 결과들을 종합하여 보면 전장내에서의 비등 현상은 그림 7과 같이 나타난다. 그림에서 보듯이 전장을 이용함으로써 전체적으로 열전달이 증가되는 것을 볼 수 있으며, 비등 형태에 따라 다른 열전달 효과가 나타남을 관찰할 수 있다. 전장에 의한 비등 열전달은 자연 대류 영역 보다는 핵 비등 영역에서 더욱 확실해지며, 이 때에는 가열 표면을 떠나는 기포의 크기가 작아지고, 이탈 주기 또한 짧아지는 것으로 알려져 있다. 막비등의 경우에는 응축시와 마찬가지로 증기막의 불안정이 열전달 향상의 주요 원인으로 알려져 있다.

4. 최근의 연구

표 4는 EHD를 이용한 열전달 향상의 몇가지 결과를 요약해 놓은 것이다[9]. 표에서 알 수 있는 바와 같이 전극의 형상, 작동 유체 등이 매우 다양하게 이용되고 있으며, 경우에 따라서는 최고 100배까지의 열전달 향상의 효과가 있음을 볼 수 있다. 이 밖에도 대체 냉매의 사용에 의해 발생하는

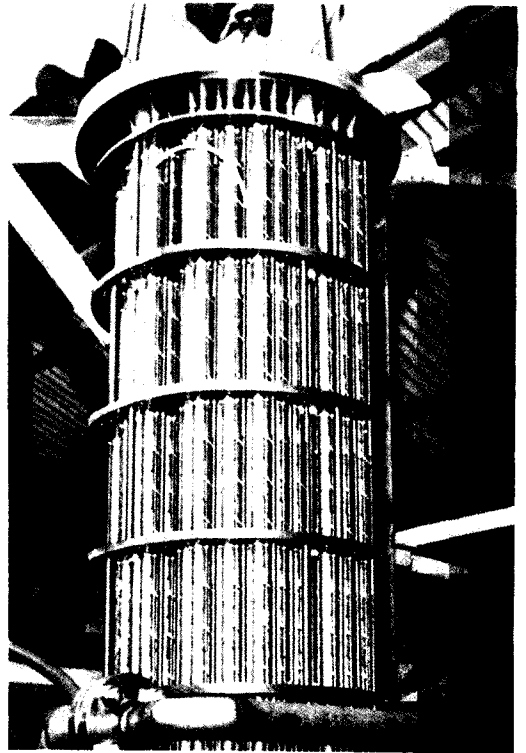


그림 8. Toshiba사에서 개발한 EHD 응축기의 사진

표 5. Toshiba사에서 개발한 EHD 응축기의 주요 사양

항 목	보통관	EHD
전열 면적 (m ²)	8.5	
전열관의 치수 (mm)	19.05φ×1.2'×1400'	
분수 (본×패스수)	17×6	
재질	SUS	
평균 열유속 (W/m ²)	5850.5	
응축 열전달 계수 (W/m ² K)	577.1	1592.4
관내 유속 (m/s)	0.342	
관내의 열전달 계수 (W/m ² K)	3635.4	
총괄 열전달 계수 (W/m ² K)	483.8	1031.4
대수 평균 온도차 (K)	12.09	5.581
응축 온도 (°C)	157.8	152
부하 유체 온도 (°C)	140 → 150	
소비 전력(R-114) (W)		
전압 14 kV 일때	0.9	
16 kV 일때	1.11	
18 kV 일때	1.36	

열전달 저하의 문제를 해결하기 위한 연구등 공조 기기 산업 전 분야에 걸쳐 이를 적용하기 위한 연구 활동이 매우 활발하다. 앞에서 언급된 바와 같이 EHD를 이용한 열전달 촉진 기술의 실용화는 현재 일본이 가장 발달되어 있는데 그 한 예로서 그림 8은 일본의 TOSHIBA사[10]에서 제작하여 성능 시험중인 50kW 용량의 EHD 응축기로서 그 사양은 표 5와 같다. 사양에서 알 수 있듯이 열전달 향상이 약 3배에 이르고 있으며 소비 전력등을 고려할 때 이용할 가치가 매우 높은 것을 알 수 있다. 국내에서는 김등[11]이 R-113을 작동 유체로 사용하여 응축 열전달에 관한 실험적인 연구를 수행하였는데, 연구 결과에 의하면 전장의 세기에 따라 응축막에 wave, stream jet, liquid column, liquid extraction의 현상이 단계적으로 발생하는 것이 관찰되었으며, 최대 1.7배의 열전달 향상 효과가 있음을 보였다.

5. 결 언

EHD에 의한 열전달 촉진 기술은 비교적 짧은 개발 역사를 가지고 있으나 나타난 현상의 복잡성으로 인하여 극히 일부분을 제외하고는 해석적인 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며, 대부분 실험에 의존하고 있다. 그리고 실용화 역시 안전성과 절연의 문제로 인하여 많은 제한을 받고 있다. 그러나 능동적인 열전달 촉진 방법으로서 지니고 있는 장점으로 인하여 최근 더욱 많은 연구가 이루어지고 있으며 각종 열전달 관련 논문 발표회에서 매우 중요한 주제가 되고 있는 상황이다. 따라서 국내에서도 이 분야에 대한 연구 개발 활동이 다각적으로 많이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. E. Bergles, Some Perspectives on Enhanced Heat Transfer-Second Generation Heat Transfer Technology, Transaction of the ASME, Vol. 110, pp. 1082-1096, 1988.
- [2] R. L. Webb, Enhancement of Single-Phase Heat Transfer, Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, Chap. 17, 1987.
- [3] H. Senftleben, Die einwirkung elektrischer und magnetischer felder auf des wärmeleitvermögen von gasen, *Physik Z.* 32, 550, 1931.
- [4] L. Bochirol, E. Bonjour, and L. Weil, Etude de l'action de champs electriques sur les transferts de chaleur dans les liquides bouillants. C. R. Hebd. Seances Acad. Sci(Paris) pp. 76-78, 1960.
- [5] T. B. Jones, Electrohydrodynamically Enhanced Heat Transfer in Liquid-A Review, *Advanced in Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 107-147, 1978.
- [6] A. Yabe, Active Heat Transfer Enhancement by Applying Electric Fields, ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference Proceedings, Vol. 3, 1991.
- [7] A. Yabe, Y. Mori and K. Hijikata, EHD Study of the Corona Wind between Wire and Plate Electrodes, *AIAA J.*, Vol. 16, No. 4, 1978.
- [8] A. Yabe, T. Taketani, K. Kikuchi, Y. Mori and K. Hijikata, 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, 1985.
- [9] M. M. Ohadi, Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers, *ASHRAE J.* December, 1991.
- [10] K. Yamashita, S. Sekita and Y. Watanabe, EHD 促進技術-EHD 凝縮器, *REFRIGERATION(日)* Vol. 65, No. 757, pp. 28-34, 1990.
- [11] 김석준외, EHD에 의한 熱傳達 促進 技術 開發, 과학기술처 보고서 UCN 421-1666·C, 1992.
- [12] K. Yamashita, M. Kuma Gai and A. Yabe, 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(B編)*, 55卷, 510號, pp. 510-516, 1989.
- [13] A. Yabe, Y. Mori and K. Hijikata, Heat Transfer Enhancement Techniques Utilizing Electric Fields, In *Heat Transfer in High Technology and Power Engineering*, pp. 394-405, Hemisphere, Washington, DC, 1987.

[14] P. Cooper, EHD Enhancement of Nucleate Boiling, J. Heat Transfer, 112, pp.458-464, 1990.
[15] P. Cooper and P. H. Allen, The Potential of Elect-

rically Enhanced Condensers, 2nd International Symposium pp.295-309, 1984.