

< 논 문 >

전기장하에서의 비등 열전달 촉진에 관한 실험적 연구

오시덕* · 곽호영**

(1995년 8월 28일 접수)

An Experimental Study for Boiling Heat Transfer Enhancement under Electric Fields

Si Doek Oh and Ho Young Kwak

Key Words: Boiling Heat Transfer (비등 열전달), Electrohydrodynamics (EHD : 전기 유체 역학), Heat Transfer Enhancement (열전달 촉진), Bubble Behavior (기포 거동), Electric Field Strength (전기장의 세기), High Voltage (고전압), Electrode (전극), Dielectric Liquid (유전성 액체), Dielectric Breakdown (절연 파괴)

Abstract

Electric field effect on boiling of refrigerants R11, R113, and FC72 has been investigated experimentally. One purpose of the experimental investigation is to determine the effects of the electrode arrangements on electrohydrodynamic boiling of the above mentioned liquids. The test equipment employed in this experiment consists of a shell and tube heat exchanger with six or six and twelve rows of electrode wires around the tube. It has been found that the applied voltage promotes the boiling heat transfer coefficient except FC72. Boiling heat transfer enhancement obtained is about 230% for R11, 280% for R113. It has also been observed that bubbles detached from the tube aggregate at the place where the electrical gradient force balances with the buoyancy one. These aggregated bubbles force to decrease the boiling heat transfer coefficient as well as to reduce the voltage needed to the dielectric breakdown.

기 호 설 명

A : 열교환 면적 (m^2)
 A^* : 식 (2)로 주어지는 값
 C : 식 (5)의 상수
 C_{pi} : 정압비열 (kJ/kgK)
 $F(P_{ri})$: 식 (3)으로 주어지는 값
 g : 중력 가속도, $9.80665m/s^2$
 h : 열전달 계수 (kW/m^2K)
 P : 압력 (bar)

P_{ri} : 식 (4)로 정의되는 값
 Q : 열전달량 (kW)
 Q_w : 가열수의 유량 (l/min)
 q : 열유속 (kW/m^2)
 \dot{m} : 질량유량 (kg/s)
 T : 온도
 T_{as} : 비등표면의 평균온도 ($^{\circ}C$ 또는 K)
 T_s : 실험유체의 포화온도 ($^{\circ}C$ 또는 K)
 T_{wi} : 가열수의 튜브부 입구온도 ($^{\circ}C$ 또는 K)
 T_{wo} : 가열수의 튜브부 출구온도 ($^{\circ}C$ 또는 K)
 ΔT_{ws} : 과열도 ($^{\circ}C$ 또는 K)
 TR_m : 식 (9)로 주어지는 값

*회원, 효성중공업(주) 신규사업팀

**회원, 중앙대학교 기계공학과

하첨자

- c* : 임계값
E : 전압을 걸었을 때의 값
l : 액체상태
o : 전압을 걸지 않았을 때의 값
ws : 과열도

1. 서 론

최근 생활 수준의 향상 및 정보기기의 급속한 도입 등에 따라 에너지의 소비가 급증하고 있다. 그러나 석유, 가스 등 에너지 자원은 유한하고, 화석 에너지의 대량 소비에서 비롯되는 오존층 파괴, 지구 온난화, 이상 기후변동 등의 대기환경 문제가 심각하게 대두되고 있다. 그래서 에너지 절약 기술, 대체 에너지원의 개발 및 환경조화형 에너지 시스템의 개발에 대한 관심이 고조되고 있다. 그런데 이들 연구개발 대상 시스템의 에너지원은 대부분 저열원이고, 저열원 에너지 시스템의 작동유체는 비등점이 낮고, 표면장력이나 열전도도가 작은 유전성 액체(dielectric liquid)를 사용하고 있다. Freon이나 Fluorinert로 대표되는 유전성 액체는 에너지 시스템에서 가장 문제가 되는 비등 히스테리시스 현상을 유발할뿐만 아니라 비등 열전달 계수나 한계 열유속이 물에 비하여 작다. 그러므로 유전성 액체를 사용하는 경우에는 증발기를 크게 설계한다든가 여러 개의 증발기를 사용하여야 하기 때문에 공간 절약, 제작 경비 절감 등과 같은 최근의 제품개발 추세에 역행하게 된다. 따라서 유전성 액체를 열매체로 사용하는 에너지 시스템에서는 물론 이상유동을 수반하는 모든 열교환장치에서 응축 및 핵비등 전열기구에 대한 연구는 최대의 관심사가 되어 왔으나 이들 현상의 복잡성과 불명확성 때문에 기술개발시 최대의 걸림돌이 되고 있다. 그러므로 열전달 향상 기술과 관련하여 이들 현상의 규명 및 열전달 촉진기구에 관한 연구가 현재까지 계속되고 있다.

현재 진행되고 있는 열전달 촉진기구에 관한 연구는 크게 외부로부터의 동력을 요하는 능동적인 방법과 동력을 필요로 하지 않는 수동적인 방법으로 대별할 수 있다. 전자의 대표적인 예는 열전달 표면의 진동 또는 회전, 초음파 등에 의한 유체의 진동, 유체에 전기장 또는 분사 등을 가하여 열전

달을 촉진시키는 방법이 있고, 후자는 열전달 표면의 처리, 주름형 튜브, 표면장력 효과, 첨가제의 첨가 등에 의해 열전달을 향상시키는 방법이 있다.⁽¹⁾

근래에 능동적인 전열촉진 방법 중의 하나인 전기유체역학적(EHD)인 방법을 이용하면 유전력이 큰 유전성 냉매의 비등 열전달에서 열전달 계수를 획기적으로 향상시킬 수 있음이 확인되어 EHD 비등 열전달 향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Cooper⁽²⁾는 DC 전기장하의 로핀 튜브(lo-fin tube)에서 R114에 대한 실험을 통하여 전기장이 비등 히스테리시스 현상을 억제시키며, 약 10배의 비등 열전달 촉진 효과가 있음을 확인하였고, Karayiannis 등⁽³⁾은 DC 전기장하의 셸-튜브(shell-tube)형 열교환기에서의 R114에 대한 실험을 통하여 전기장은 비등 히스테리시스 현상을 억제하며, 과열도 및 전기장의 강도가 클수록 열전달이 촉진됨을 확인하였다. 그리고 Kawahira 등⁽⁴⁾은 R11에 대한 실험에서 열전달이 약 2~3배 정도 촉진됨을 확인한 바 있고, Ohadi 등⁽⁵⁾도 전기장을 걸면 R11의 경우에 170%, R123의 경우에는 450%의 열전달 촉진 효과가 있음을 확인하였다. 또한 Paulter와 Allen⁽⁶⁾ 및 Ogata 등⁽⁷⁾은 EHD 열교환기의 경제성을 확인하여 실용화 연구를 수행하여 왔는데, 특히 Ogata 등⁽⁷⁾은 EHD 증발기를 이용할 경우 통상적인 증발기를 이용하는 경우보다 약 20~30% 정도의 경비를 절감할 수 있다고 보고하고 있다. 국내에서도 곽 등⁽⁸⁾이 열유속을 사용하여 비등 표면의 과열도를 조절하는 방법으로 실험을 수행한 결과 R11에서는 최대 네 배, R123에서는 최대 15배의 열전달 촉진효과가 있음을 확인한 바 있다.

또한 최근에는 고전압 기기, 특히 초전도 코일의 액침 냉각, 불연 변압기 등의 냉각에 유전성 액체를 사용하게 되면서 전기장하의 비등 표면에서 발생한 기포의 거동이 열전달 및 절연과정에 미치는 효과에 대한 관심도 고조되고 있다.^(9,10)

본 연구에서는 가열수의 온도와 유량으로 비등 표면의 과열도를 조정하여 실제의 증발기에서와 유사한 조건에서 실험을 수행하였다. 실험은 전극의 배열 및 냉매의 종류에 따라서 전극에 걸리는 전압 및 비등 표면의 과열도를 변화시켜 가면서 수행하였으며, 일련의 실험을 통하여 전기장이 기포의 거동, 비등 곡선의 특성 변화 및 열전달 촉진에 미치

는 영향을 조사하고, 주어진 조건하에서의 효과적인 전극의 배열에 대하여 검토하였다. 특히 본 연구에서는 다른 연구자들이 실험하지 않았던 10K 이상의 과열도 범위까지 실험을 광범위하게 수행하여 과열도가 큰 범위에서 전기장하의 기포의 거동이 비등 열전달에 미치는 영향을 조사하였다.

인 Freon에 노출되어 있고, 또 내압 및 고전압에 노출되어 있기 때문에 금속의 경우는 스테인리스강 및 동, 비금속의 경우는 내식성, 내압성이 뛰어나며 120°C까지 사용이 가능한 테프론으로 제작하였다. 본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 실험 장치는 실험부인 셀/튜브형 증발기, 시험부 내에 위치한 증발관의 가열용 온수를 만드는 온수조, 온수를 시험부의 증발관 내로 순환시키는 온수 순환계, 시험부 내에서 발생한 실험유체를 응축시키는 응축기, 응축기에 냉각수를 공급하는 냉각수 순환기, 시험부의 전극계에 고전

2. 실험

2.1 실험 장치

실험 장치를 구성하는 모든 기기들은 실험 유체

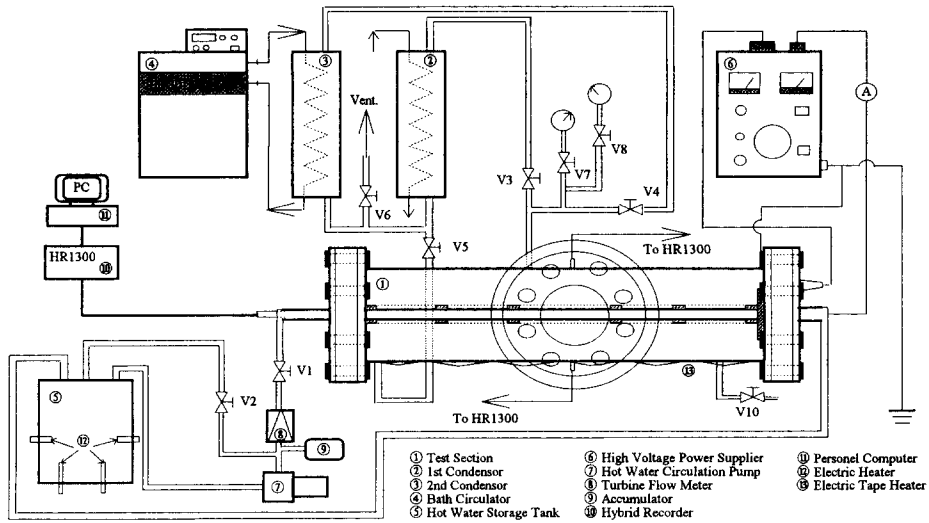


Fig. 1 Schematic diagram of experimental loop for boiling experiment

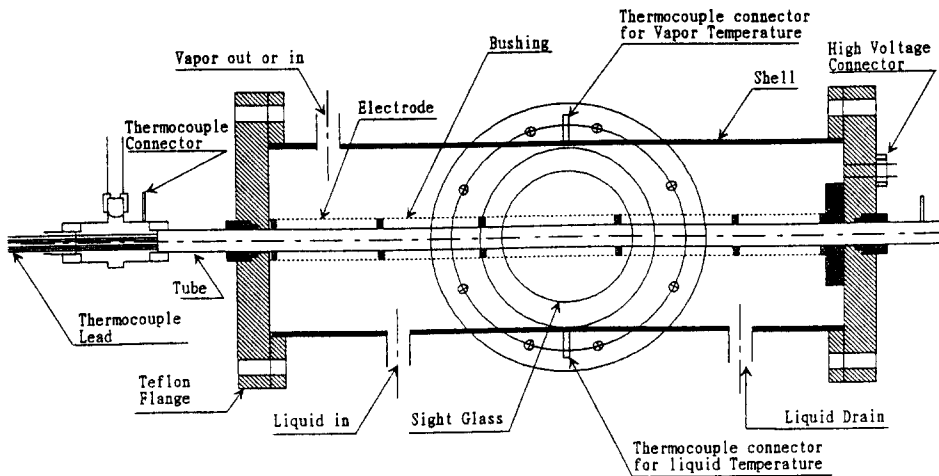


Fig. 2 Sectional drawing of test section

압을 걸어주는 고전압 조정기로 구성되어 있다. 온도의 계측은 자작한 T형 열전대와 YOKOGAWA Hybrid Recorder, HR 1300을, 유량은 KOBOLD사의 배인 유량계인 DF-48을 사용하였고, 고전압의 측정에는 FLUKE사의 고전압 센서, 80K-40과 Multimeter, FLUKE 77을 사용하였다.

본 실험 장치에서 가장 중요한 실험부는 셀(shell)/튜브(tube) 및 전극으로 구성되어 있으며 그 단면은 Fig. 2와 같다. 셀부는 내경이 150mm인 스테인리스강으로 제작하였으며, 셀부에는 작동유체의 출입 배관 및 온도 측정을 위한 다섯 개의 파이프 이음쇠가 용접되어 있고, 전 후면에는 육안 관찰 및 사진 촬영을 위하여 직경이 125mm인 관찰창이 설치되어 있다.

그리고 셀부의 양측의 프랜지는 전극간의 절연을 위하여 테프론으로 제작하였다. 튜브는 Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 호칭 지름(nominal diameter)이 19mm인 동파이프로 전열 길이가 687mm가 되도록 제작하였다. 또한 튜브는 표면 온도의 계측을 위한 열전대를 설치하여야 하기 때문에 납땀 성능이 우수한 황동으로 제작하였다. 열전대는 튜브의 하부에 전열부의 출구측 43.5mm인 지점에서부터 150mm의 등간격으로 5개의 열전대를 설치하였고, 중간 지점의 상부와 측면에 각각 1개씩을 추가로 설치하여 모두 7개의 열전대를 설치하였다. 튜브의 중간 지점에 열전대를 추가로 설치한 것은 수평으로 놓인 튜브 표면의 원주방향 온도가 서로 다르리라고 예상하였기 때문이다. 열전대의 리드

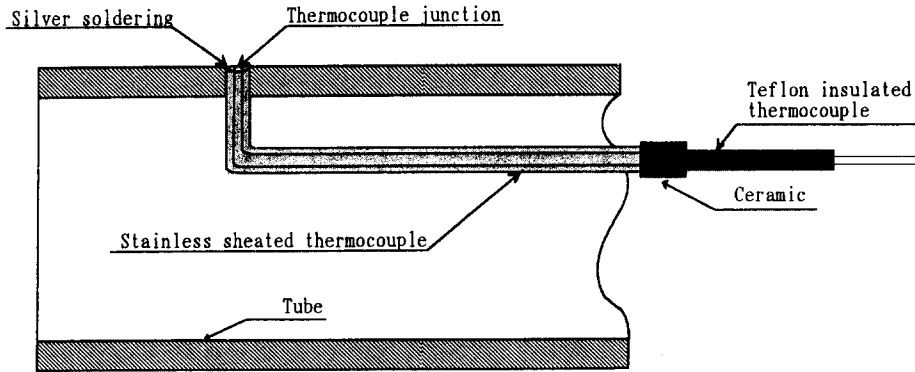


Fig. 3 Configuration of the test tube

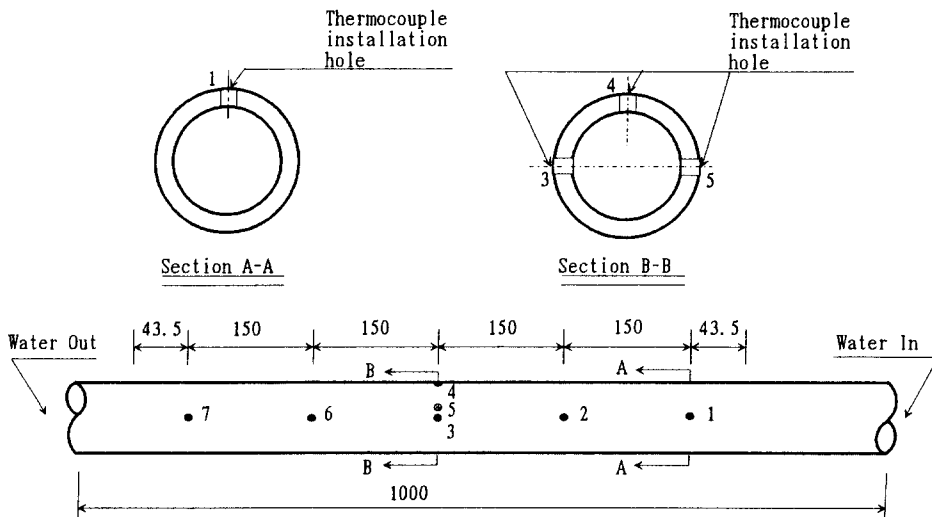


Fig. 4 Thermocouple instrumentation of evaporator tube

(lead)선은 튜브와 전극 사이에 걸리는 고전압의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 4의 열전대 설치 단면도에 나타나 있는 바와 같이 튜브 내부를 통과하도록 제작하였다. 열전대는 튜브내를 흐르는 고온수와 접하고 튜브에 은납용접이 되어야 하므로 OMEGA 사의 산화마그네슘으로 절연되고 스테인리스 스틸로 피복된 T형(magnesium oxide insulation metal sheathed T type) 열전선으로 제작하여 사용하였다. 실험에 사용된 모든 열전대는 YOKOGAWA 2553 DC Voltage/Current Standard 와 257835 Semiconductor Probe를 이용하여 보정하였다. 또 전극은 직경이 0.9mm인 동이 코팅된 용접선을 비등 표면인 튜브 주위에 등간격으로 6개 또는 12개를 길이 방향으로 평행하게 설치하여 사용하였다. 이때 전극간의 틈새가 일정하게 유지되지 않으면 전극의 틈새가 열전달의 촉진에 미치는 영향을 조사할 수 없을뿐만 아니라 전극간의 틈새가 부분적으로 작은 곳이 생기면 실험 범위에서 절연과괴가 일어나서 실험을 수행할 수 없기 때문에 테프론으로 제작된 전극 지지구(bushing)를 전극 사이에 설치하여 전극간의 틈새를 일정하게 유지시켰다.

2.2 실험 방법 및 절차

본 연구에서는 실험 장치의 내압성을 확인하는 내압시험, 실험 냉매의 가열원인 온수의 순환을 확인하는 온수 순환시험, 실험 장치를 구성하는 구성기기의 작동 상태, 계측기의 교정 및 작동 상태, 실험 조건의 조정 및 실험 전압의 확인 등을 포함하는 예비실험을 수행하여 실험 장치의 신뢰성을 확인한 후에 본 실험을 수행하였다. 실험 방법 및 절차는 우선 실험 유체를 거름종이(AHLSTROM #2)가 부착되어 있는 공기 빼기 라인에 설치되어

있는 깔대기를 통하여 시험부에 주입한다. 셀부에 감겨져 있는 선상 히터와 예열되어 있는 가열수를 순환시켜 실험액이 포화온도 이상이 될 때까지 가열한 후 공기 빼기를 반복하여 실험 유체에 포함된 공기를 제거한다. 공기 빼기가 완료되면 고전압 조정기를 조절하여 전극에 걸리는 전압을 실험하고자 하는 전압에 맞춘다. 비등 표면의 과열도는 가열수 순환용 펌프의 토출측에 설치된 조절 밸브와 바이패스 라인을 이용하여 튜브 내를 흐르는 가열수의 유량에 맞춘 후, 수조에 설치된 히터로 가열수의 온도를 조절하면서 조정한다. 그리고 두 개의 응축기에 흐르는 응축수의 유량과 응축수의 온도를 냉각수 순환기로 조절하여 실험하고자 하는 과열도에서의 포화상태로 맞춘다. 포화상태가 유지되고 있음을 확인한 후에 튜브 표면의 온도, 가열수의 입구 및 출구 온도, 가열수의 유량, 실험 유체의 온도 및 시험부의 압력, 전극에 걸리는 전압을 컴퓨터에 저장한다.

실험은 과열도와 전압을 단계적으로 증가시켜 가면서 실험하고자 하는 과열도 및 전압의 범위내에서 위의 과정을 반복하여 수행하면 완료된다. 실험하고자 하는 과열도 및 전압 범위에서 실험이 완료되면 컴퓨터에 저장되어 있는 자료를 이용, 각각의 전압에 대하여 과열도, 열유속, 열전달 계수를 계산한다. 이때 실험 자료인 온도는 각각 2분 동안에 60회를 읽어서 산술 평균하여 사용하였다.

2.3 실험 조건

실험은 냉매의 종류, 전극의 배열 형태에 따라서 과열도 및 전극계에 걸리는 전압을 조절해 가면서 수행하였는데, 실험조건을 요약하여 정리하면 다음의 Table 1과 같다. Table 1에서 전극의 배열란에서 A는 Fig. 5(a)에 나타나 있는 바와 같이 여섯

Table 1 Experimental conditions of boiling experiment

Liquids	Electrode arrangement types	Electrode gap [mm]	No. of Electrode Wire [EA]	Saturation temperature [°C]	Flow rate [l/min]
R113	A, B	5	6	48.5	8
	C	5 & 8	12	48.5	8
R11	B	5	6	25.5	8
FC72	B	5	6	57.5	10

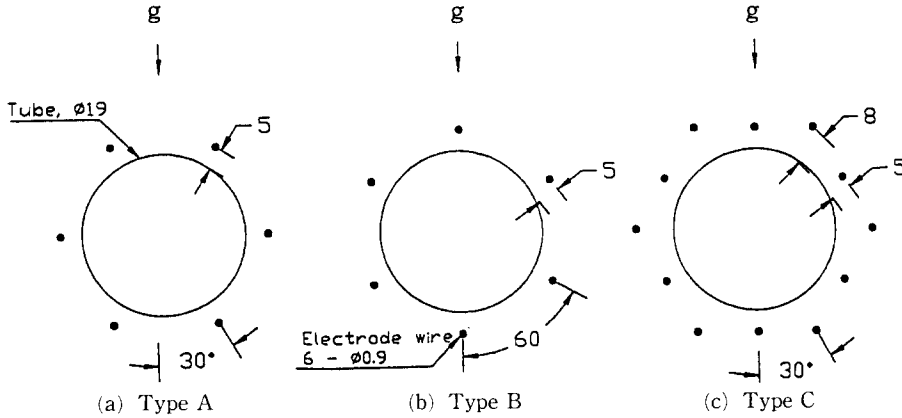


Fig. 5 Electrode arrangement types for boiling experiment

개의 전극선을 튜브의 원주에 튜브와 5mm의 틈새를 유지하면서 튜브 밑면의 중심선에서 30° 떨어진 지점에서부터 등간격으로 배열한 경우이고, B는 Fig. 5(b)에 나타나 있는 바와 같이 여섯 개의 전극선을 튜브의 원주에 튜브와 5mm의 틈새를 유지하면서 튜브 밑면의 중심선에서부터 등간격으로 배열한 경우를 의미한다. 또 C는 Fig. 5(c)에 나타나 있는 바와 같이 전극간의 틈새가 5mm, 8mm인 각 여섯 개, 모두 열두 개의 전극선을 교대로 배열한 경우를 의미한다. 또한 Fig. 5에서 g는 중력 가속도를 나타낸다. 전극의 배열 및 틈새는 전극을 포함하는 셀부를 대상으로 전계 해석을 수행한 결과⁽¹¹⁾를 활용하여 실험중에 15kV~25kV 범위의 전압을 전극에 걸어도 절연파괴가 일어나지 않도록 설계하여 사용였다. 그리고 전열면인 튜브 표면은 #600의 사포(silicon carbide abrasive paper)로 깨끗하게 처리한 후 아세톤으로 세척하였다. 또 비등 표면을 통하여 전달되는 열량은 가열수의 입 출구 온도로 정의되므로 가열수의 유량은 실험적인 측면에서 상당히 중요하다. 따라서 본 연구에서 가열수의 유량은 가열수 순환계의 순환 실험 결과에 따라 R11 및 R113의 경우에는 8l/min, FC72의 경우에는 10l/min으로 실험을 수행하였다. 실험 압력은 실험 유체에 따라서 약간씩 차이가 있으나 응축기의 용량이 허용하는 범위에서 대기압에 가깝게 유지시키면서 실험을 수행하였다.

2.4 실험 결과의 검증 방안

실험적인 연구의 경우, 실험 결과의 신뢰성 검증은 실험 방법의 선택에 못지 않게 대단히 중요한

요소 중의 하나이다. 실험 결과의 검증을 위한 방안으로는 반복 실험을 통한 재현성의 확인, 다른 연구자들의 실험 결과와의 비교, 상관식과의 비교 등이 있을 수 있다. 그러나 실험적 연구의 경우 실험 조건에 따라서 실험결과에 상당한 차이를 나타낼 수 있고, 또 상관식도 서로 다른 조건하에서의 실험 결과를 근거로 하여 유도되는 식이므로 다른 연구자들의 실험 결과와의 비교 및 상관식과의 비교는 실험결과와 신뢰성 확인에 있어 절대적인 의미를 갖는다고는 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 상관식과 실험 결과의 비교, 실험의 재현성(reproducibility)의 확인을 통하여 실험 결과의 신뢰성을 검증하여 보았다.

실험 결과의 검증을 위하여 사용한 식 중의 하나는 Mostinski⁽¹²⁾가 제안한 식으로 비등 표면의 과열도, 실험 압력 및 임계 압력의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$q = (A^*)^{3.33} (\Delta T_{ws})^{3.33} F(P_{rl})^{3.33} \tag{1}$$

여기서 ΔT_{ws} 는 비등표면의 과열도를 나타내고, A^* , $F(P_{rl})$, P_{rl} 은 각각 다음의 식으로 주어지는 값이다.

$$A^* = 0.1011 P_c^{0.69} \tag{2}$$

$$F(P_{rl}) = 1.8 P_{rl}^{0.17} + 4 P_{rl}^{1.2} + 10 P_{rl}^{1.0} \tag{3}$$

$$P_{rl} = \frac{P_l}{P_c} \tag{4}$$

여기서 P_l , P_c 는 각각 실험 압력 및 냉매의 임계압력이다.

다른 하나의 식은 Stephan과 Abdelsalam⁽¹³⁾이 차원 해석을 근거로 하여 액체의 종류에 따라 제안

한 식으로 다음과 같다.

$$q = (C\Delta T_{ws})^{0.255} \quad (5)$$

여기서 C 는 냉매의 종류에 따라 주어지는 값으로 R11인 경우에 0.92, R113의 경우에 1.09의 값을 갖는다.

그리고 실험의 재현성은 앞에서 서술한 세 가지의 전극 배열 (type A, B, C)에서 R113을 대상으로 하고 전극에 전압을 걸지 않고 실험을 수행하여 얻은 결과들을 비교하여 확인하였다.

2.5 열전달 계수의 계산 및 오차 범위

연구의 최종 목적이 전기장이 열전달 계수의 증가에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이므로 열전달 계수의 계산은 대단히 중요하다. 본 연구에서 열전달 계수, h 는 다음의 식에서 계산된다.

$$h = \frac{Q}{A(T_{as} - T_s)} \quad (6)$$

여기서 A 는 비등 표면의 전열 면적으로 본 연구에서는 0.0371m^2 의 값을 가지며, T_{as} , T_s 는 각각 비등 표면의 평균온도와 냉매의 포화 온도이다. 또 Q 는 비등 표면을 통하여 냉매로 전달되는 열량으로 비등 표면인 튜브내를 흐르는 가열수의 양과 가열수의 입 출구의 온도로 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \dot{m}C_{pl}(T_{wi} - T_{wo}) \quad (7)$$

여기서 C_{pl} 은 튜브내를 흐르는 가열수의 입구 온도 (T_{wi})와 출구 온도 (T_{wo})의 평균값, $(T_{wi} + T_{wo})/2$ 에서의 가열수의 정압 비열이다. 그리고 비등 표면의 평균 온도, T_{as} 는 수평 튜브의 단면에서 원주 방향 위치별 온도의 영향을 고려한 식 (8)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{as} = \frac{(T_1 + T_2 + T_3 + T_6 + T_7)}{5} \times TR_m \quad (8)$$

$$TR_m = \frac{(T_3 + 2T_4 + T_5)}{4T_3} \quad (9)$$

여기서 $T_1 \sim T_7$ 은 각각 Fig. 4에 표시된 위치에서의 비등표면의 온도를 의미한다.

본 실험에서 실험 결과의 오차 범위는 계측에 사용되는 계측기의 보정에 사용되는 장비 및 계측기의 오차를 감안하여 추정하면 다음과 같다.

온도의 오차 범위는 기록계 및 열전대의 보정시에 사용된 장비의 오차를 포함하여 $\pm 1.11\%$, 유량

의 오차 범위는 유량계의 오차 범위인 $\pm 2.5\%$ 내에 있게 된다. 따라서 이들 계측된 결과를 이용하여 계산되는 열유속은 $\pm 4.72\%$, 열전달 계수는 $\pm 6.94\%$ 의 오차 범위내에 있다고 추정할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 결과의 검증

본 연구에서는 전술한 바와 같은 이유에서 상관식과의 비교 및 재현성을 확인하여 실험 결과의 신뢰성을 검증함으로써 실험 방법의 타당성을 설명하고자 한다.

Fig. 6, Fig. 7에 각각 R11 및 R113의 실험 결과와 상관식과의 비교를 나타내었다. Fig. 6에 나타나 있는 R11의 경우, 실험 결과가 두 가지의 상관식을 이용하여 계산한 값보다 주어진 과열도에 대한 열유속 값은 크지만 경향은 유사하게 나타나고 있다. 그리고 Fig. 7에 주어진 R113의 경우에는 서로 다른 세 가지의 전극 배열에 대하여 전극에 전압을 걸지 않은 상태에서의 실험 결과와 상관식과의 비교를 나타내고 있는데, 주어진 실험 범위에서 실험 결과는 모두 두 가지 상관식 사이에 위치함을 알 수 있다. 또 세 개의 전극 배열에서 얻은 실험

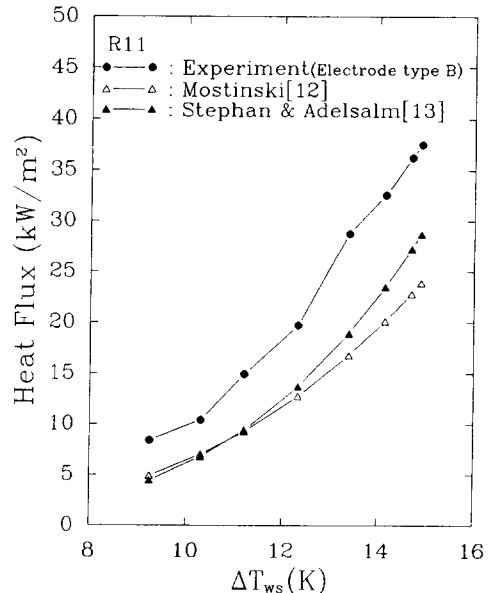


Fig. 6 Comparison of boiling curves for R11 between experimental results and correlations with $Q_w = 8\text{l/min}$ at $T_s = 25.5^\circ\text{C}$.

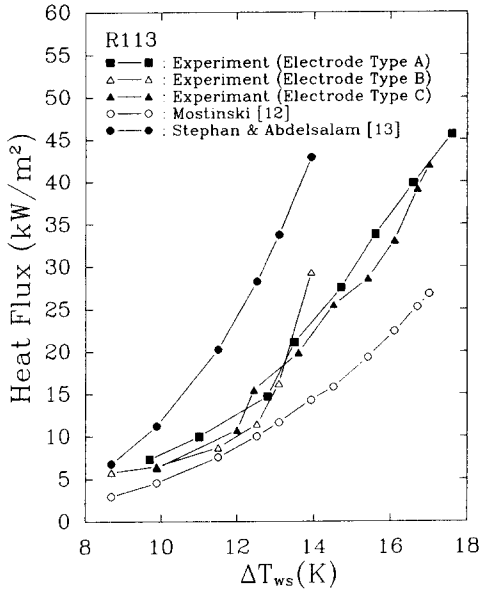


Fig. 7 Comparison of boiling curves for R113 between experimental results and correlations with $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

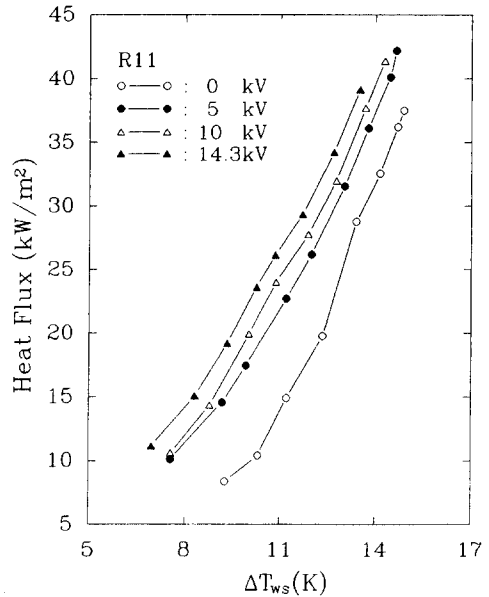


Fig. 8 Boiling curves for R11 with electrode arrangement type B and $Q_w=8l/min$ at $T_s=25.5^\circ C$

결과는 과열도에 따라서 다소의 차이는 있으나 평균값을 기준으로 10~13%의 오차 범위내에서 재현성이 있음을 확인하였다. 여기서 상관식들이 여러 가지 서로 다른 조건하에서의 실험 결과를 근거로 유도된 식이고, 또 전극의 배열이 비등 표면에서 발생하여 이탈하는 기포의 거동에 다소의 영향을 미친다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻은 실험 결과에는 상당한 정도의 신뢰성이 있다고 간주할 수 있다.

3.2 전기장하에서의 비등 곡선

R11에 대하여 여섯 개의 전극선을 튜브의 원주에 튜브와 5mm의 틈새를 유지하면서 튜브 밀면의 중심선에서부터 등간격으로 배열 (type B) 하고, 가열수의 유량을 8l/min, 포화 온도가 25.5°C인 경우의 비등곡선을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타나 있는 바와 같이 전압을 걸어준 경우가 전압을 걸지 않은 경우보다 주어진 과열도에서의 열유속이 크다. 그리고 전압을 증가시키면 주어진 과열도에서의 열유속도 증가하지만 증가폭은 그다지 크지 않으며 전압의 크기에 관계 없이 비등곡선의 경향은 유사함을 알 수 있다.

또한 실험 냉매를 R113, 가열수의 유량을 8 l /

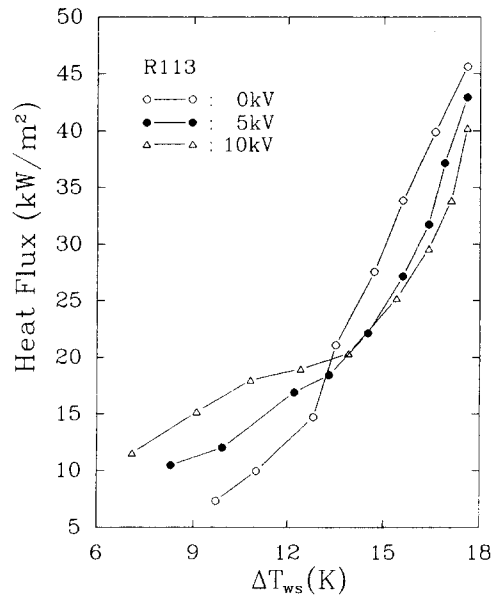


Fig. 9 Boiling curves for R113 with electrode arrangement type A and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

min, 포화 온도가 48.5°C이고, 여섯 개의 전극선을 튜브의 원주에 튜브와 5mm의 틈새를 유지하면서 튜브 밀면의 중심선에서 30° 떨어진 지점부터 등간

격으로 배열 (type A) 한 경우에 대하여 Fig. 9에, 같은 조건에서 전극을 튜브 밀면 중심선에서부터 배열 (type B) 한 경우에 대하여 Fig. 10에 나타내었다. 그리고 같은 조건에서 튜브가 5mm인 여섯 개

의 전극선은 튜브의 밀면 중심선에서부터, 튜브가 8mm인 여섯 개의 전극선은 튜브 밀면 중심선에서 30° 지점부터 튜브의 원주에 등간격으로 배열 (type C) 한 경우는 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 9~11에 나타나 있는 바와 같이 전극의 배열에 관계 없이 주어진 과열도에서 비등 곡선의 기울기가 전극계에 걸리는 전압이 크면 클수록 감소하고, 어떤 과열도 이상이 되면 전극에 걸리는 전압이 높을수록 열유속이 감소함을 알 수 있다. 본 연구에서 전압을 걸었을 때 전극의 배열에 따라서 다소의 차이는 있으나 과열도가 14K 정도 이상의 범위에서 전극에 높은 전압을 걸수록 열유속이 감소하는 경향이 나타남을 확인하였다. 이는 과열도가 증가하면 비등 표면의 밀면에 전계 구배력과 부력이 평형을 이루는 부분에 비등 표면으로부터 이탈된 기포의 정체 영역이 생겨서 비등 표면으로부터의 기포 이탈을 방해하기 때문이라고 여겨진다. 이와 같은 결과는 Hara 등⁽⁹⁾과 Oh 등⁽¹⁴⁾이 수치 해석 및 실험적인 연구에서 전계 구배력과 부력이 평형을 이루어 생기는 기포의 정체 영역이 절연과피와 비등열전달에 영향을 미친다는 주장을 뒷받침하고 있으며, 또 이와 같은 현상은 실험 수행 중에 육안 관찰을 통하여도 확인할 수 있었다. 그리고 앞에서 설명한 세

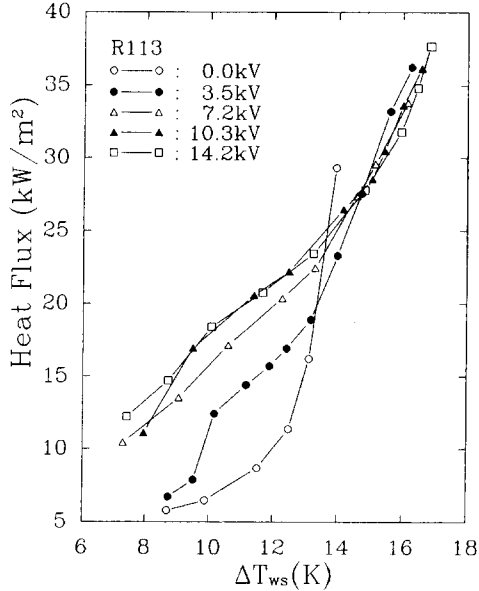


Fig. 10 Boiling curves for R113 with electrode arrangement type B and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

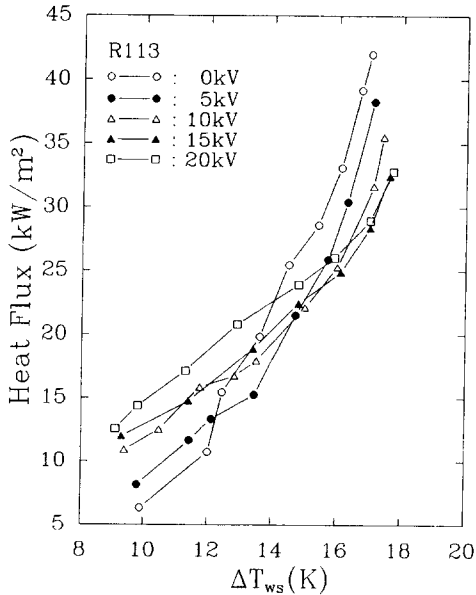


Fig. 11 Boiling curves for R113 with electrode arrangement type C and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

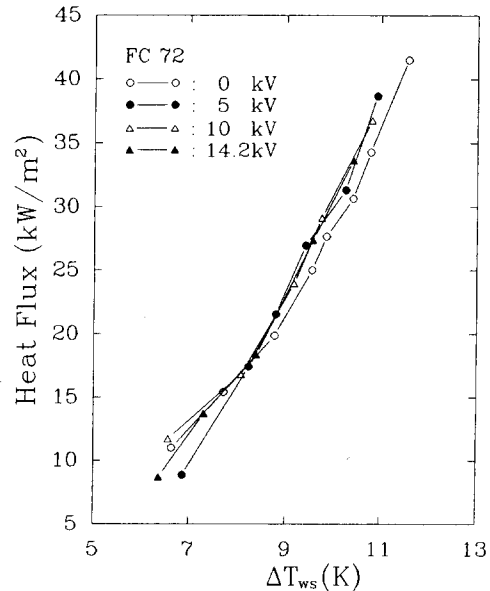


Fig. 12 Boiling curves for FC72 with electrode arrangement type B and $Q_w=10l/min$ at $T_s=57.5^\circ C$

가지의 전극배열에 대한 실험 결과를 비교하여 보면 전체적인 비등곡선의 경향은 유사하지만 주어진 과열도에 대한 열유속값에는 상당한 차이가 있으며, Fig. 10에서 가장 큰 열유속값을 나타내고 있다. 즉 실험을 수행한 세 가지의 전극 배열 중에서는 틈새가 5mm인 여섯 개의 전극선을 튜브의 밀면 중심선에서부터 등간격으로 배열(type B)한 경우가 열전달 촉진의 측면에서 가장 바람직함을 의미한다. 이는 전극의 배열에 따라서 기포에 작용하는 전계 구배력이 달라지기 때문이라고 판단된다.

Fig. 12에는 여섯 개의 전극선을 튜브 밀면의 중심선에서부터 튜브의 원주에 등간격으로 배열(type B)하고, 가열수의 유량이 10l/min, 포화 온도가 57.5°C에서 FC72에 대하여 실험한 결과를 나타내었다. Fig. 12에 나타나 있는 바와 같이 전극계에 전압을 걸어 주어도 주어진 과열도에 대한 열유속의 증가는 거의 확인할 수 없었다.

이들 일련의 실험에서 전기장에 의해 생성된 전하가 주위의 액체 또는 기포에 영향을 주는데 걸리는 시간, 즉 냉매의 유전율(ϵ)과 전기 전도도(σ)의 비로 정의되는 전하 완화 시간이 R11은 1.3sec, R113은 9.7×10^{-12} sec이고, FC72는 1.56×10^{-12} sec임을 고려하면 전하 완화 시간, 전극의 배열에 따라서 달라지는 기포에 작용하는 전계 구배력 등이 전기장하의 기포 거동 및 열전달 촉진과 밀접한 관계가 있는 요소라고 판단된다.

3.3 열전달 계수

냉매의 종류 및 전극의 배열 형태에 따라 전기장이 열전달 계수에 미치는 영향에 대하여 설명해 보기로 하겠다. 여섯 개의 전극선을 튜브의 원주에 튜브와 5mm의 틈새를 유지하면서 튜브 밀면의 중심선에서부터 등간격으로 배열(type B)하고, 가열수의 유량을 8l/min, 포화 온도를 25.5°C로 하여, R11을 실험 냉매로 실험한 경우의 과열도에 대한 열전달계수의 증가비를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 과열도가 작은 경우가 큰 경우에 비하여 전기장의 효과가 크고, 과열도가 9.3K 및 10.3K인 경우에 14.3kV의 전압을 전극계에 걸어주면 최대 2.3배의 열전달 촉진효과를 나타내고 있다.

그리고 실험 냉매를 R113, 가열수의 유량을 8l/min, 포화 온도가 48.5°C이고, 여섯 개의 전극선을 튜브의 원주에 튜브와 5mm의 틈새를 유지하면서

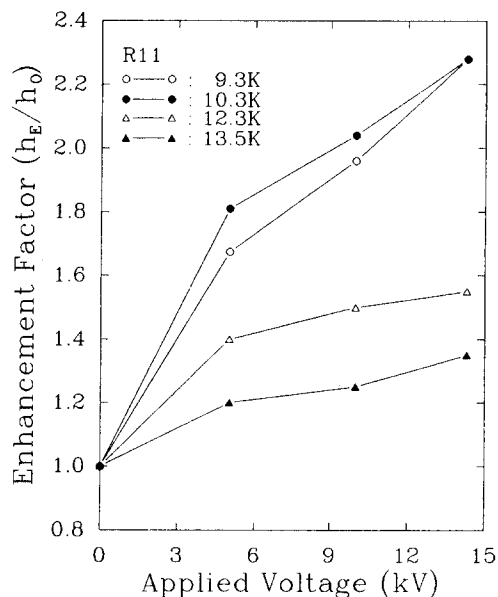


Fig. 13 Variation of heat transfer enhancement factors for R11 with electrode arrangement type B and $Q_w=8l/min$ at $T_s=25.5^\circ C$

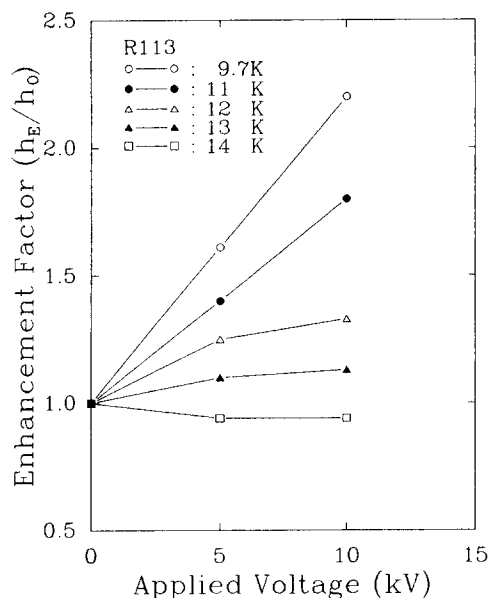


Fig. 14 Variation of heat transfer enhancement factors for R113 with electrode arrangement type A and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

튜브 밀면의 중심선에서 30° 떨어진 지점에서부터 등간격으로 배열(type A)한 경우에 대하여 Fig. 14에 나타내었는데, 과열도가 9.7K에서 최대 2.2배

의 열전달 촉진효과를 나타내고 있으나 과열도가 증가할수록 그 효과가 점차 감소하다가 14K에서는 전압을 걸지 않은 경우 보다도 작아지고 있다. 그

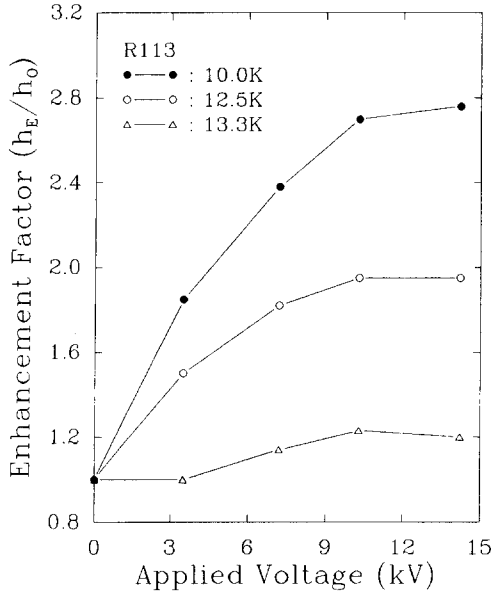


Fig. 15 Variation of heat transfer enhancement factors for R113 with electrode arrangement type B and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

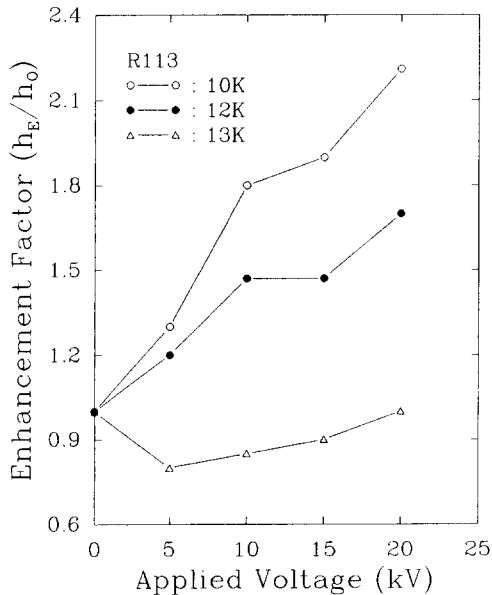


Fig. 16 Variation of heat transfer enhancement factors for R113 with electrode arrangement type C and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

러므로 실제의 증발기 설계시 이와 같은 전극계를 채용하는 경우에는 과열도가 11K 미만의 범위에서 작동되도록 설계함이 바람직하다고 하겠다. 또 Fig. 15에는 같은 조건에서 전극을 튜브 밀면 중심선에서부터 배열(type B)한 경우에 대하여 나타내었다. Fig. 15에 나타나 있는 바와 같이 과열도가 10K인 경우 14.2kV의 전압을 걸면 최대 2.8배의 열전달 촉진효과를 보이고 있으며, 열전달 촉진효과는 비등곡선의 정체 범위에 해당하는 전압인 10 kV 이상에서는 거의 일정하고 과열도가 증가할수록 그 효과는 감소하고 있다. 또 Fig. 16에는 같은 조건에서 튜브가 5mm인 여섯 개의 전극선은 튜브의 밀면 중심선에서부터, 튜브가 8mm인 여섯 개의 전극선은 튜브 밀면 중심선에서 30°지점에서부터 튜브의 원주에 등간격으로 배열(type C)한 경우에 대하여 나타내었는데, 이 경우 과열도가 10 K에서 20kV의 전압을 걸면 최대 2.3배의 전열촉진 효과가 있으며 비등 곡선상의 정체점인 10~15 kV의 범위에서는 열전달 촉진효과도 무시할 정도로 감소하다가 그 이상의 전압을 걸면 다시 상승하고 있다. R11에서의와 마찬가지로 R113의 경우에도 과열도가 작은 범위에서 열전달 촉진효과가 크게 나타나고 있다. 또한 전극의 배열에 따라 절대적인

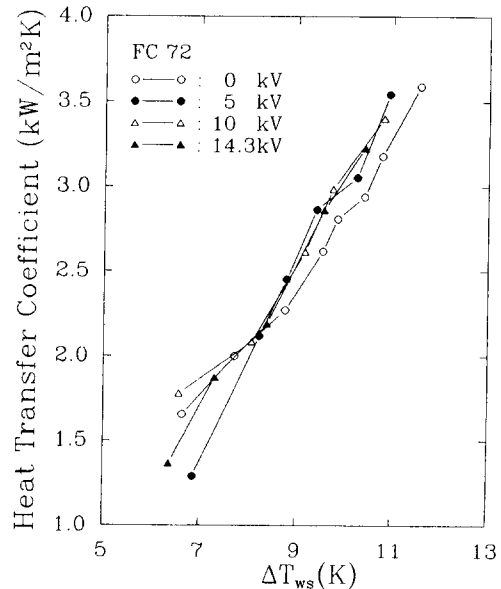


Fig. 17 Variation of heat transfer enhancement factors for FC72 with electrode arrangement type B and $Q_w=10l/min$ at $T_s=57.5^\circ C$

값에는 차이가 있지만 과열도가 약 14K 이상의 범 위에서는 높은 전압을 걸면 걸수록 열전달 촉진효 과가 감소하고 있는데, 이는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 기포에 작용하는 전계 구배력과 부력이 평형을 이루게 되어 생기는 기포의 정체 영역이 비

등표면의 하부에 광범위하게 발달하여 비등표면으 로부터의 기포 이탈을 방해하기 때문이라고 판단된 다. 그리고 위의 세 가지의 전극계 중에서는 전극 간 의 틈새가 5mm인 여섯 개의 전극선을 튜브 밑 면 중심선에서부터 튜브의 원주에 등간격으로 배열

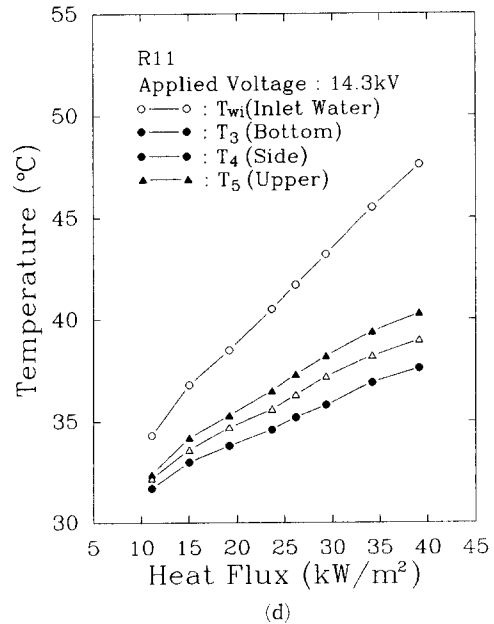
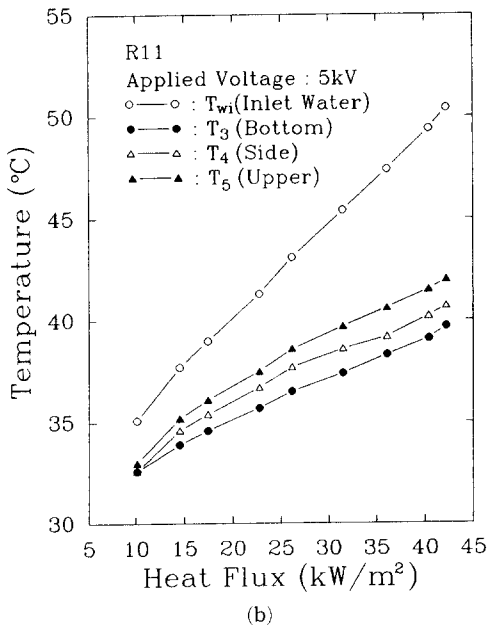
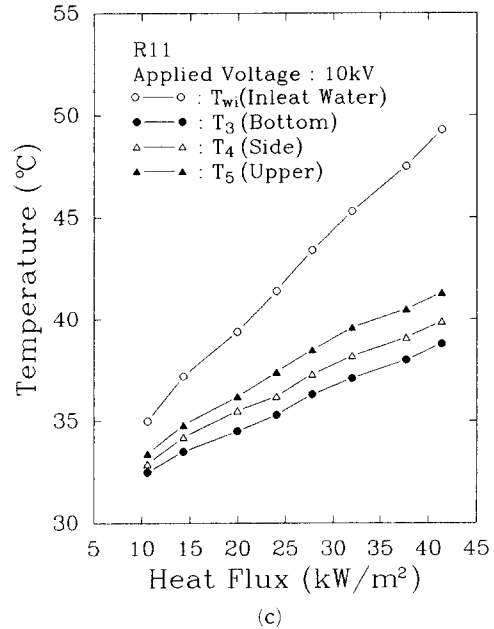
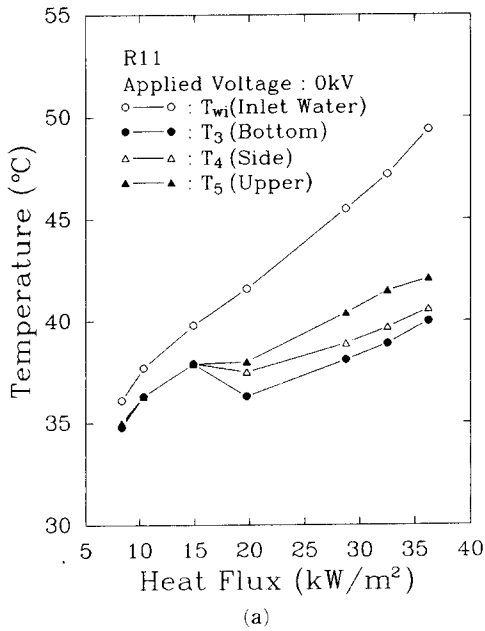


Fig. 18 Variation of tube wall and inlet water temperature for different heat fluxes in R11 with electrode arrangement type B and $Q_w=8l/min$ at $T_s=25.5^\circ C$

(type B)한 경우가 열전달 촉진 및 절연 파괴 방지의 측면에서 가장 효과적임을 확인하였다.

그리고 Fig. 17에는 여섯 개의 전극선을 튜브 밀면의 중심선에서부터 튜브의 원주에 등간격으로 배열한 경우에 가열수를 10l/min로 하고, 포화온도

가 57.5°C인 경우에 FC72를 대상으로 실험한 결과를 토대로 과열도에 따른 열전달 계수를 나타내었다. Fig. 17에 나타나 있는 바와 같이 전압이 열전달 촉진에 미치는 영향은 상당히 적음을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 전하완화 시간

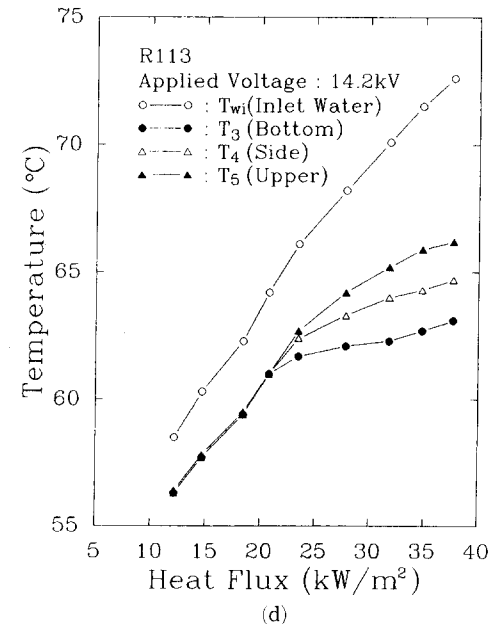
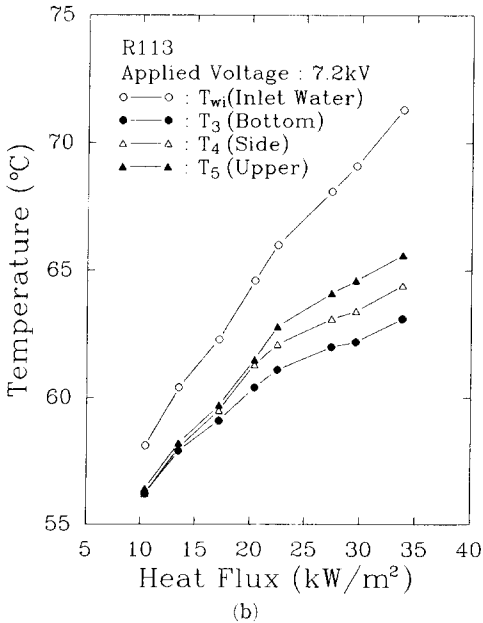
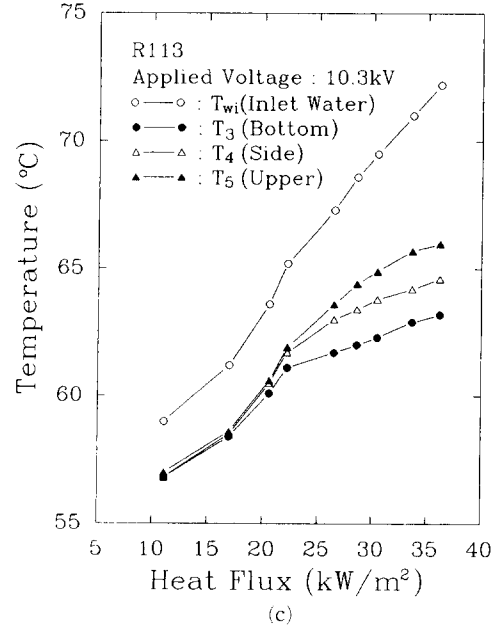
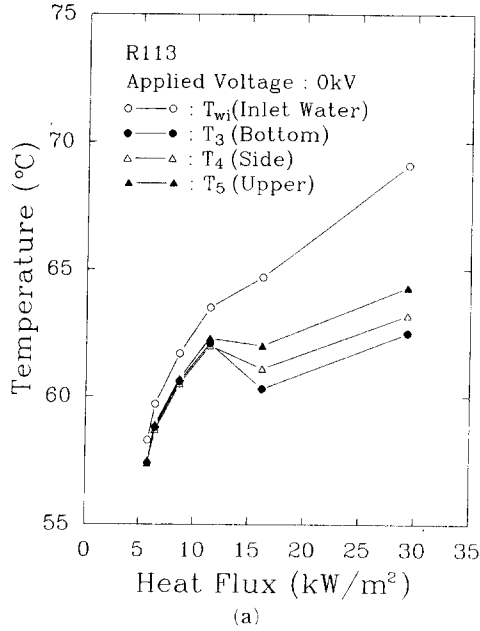


Fig. 19 Variation of tube wall and inlet water temperature for different heat fluxes in R113 with electrode arrangement type B and $Q_w=8l/min$ at $T_s=48.5^\circ C$

이 기포의 이탈 시간 보다 상당히 길어서 비등표면에서 생성되어 이탈한 기포가 전계의 영향이 미치기 전에 상승하기 때문이다. 그런데 다른 경우와는 달리 과열도가 작은 범위에서는 전기장의 효과가 없고, 과열도가 큰 경우에는 적지만 약간의 효과가 있음을 알 수 있는데, 이에 관하여는 지속적인 연구가 필요하다고 여겨진다.

3.4 비등 표면의 온도

비등 표면의 온도는 비등 열전달 실험 결과의 분석에 대단히 중요한 값이다. 즉 비등 표면의 온도를 어느 위치에서 측정하느냐는 물론 어떻게 처리하느냐는 열전달 계수의 산정 결과에 커다란 영향을 주게 된다. 비등 표면의 온도 측정 및 처리 방법에 따라서 이들 값을 기준으로 계산되는 열전달 계수의 절대값에 상당한 차이가 있을 수 있기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 비등 표면인 튜브의 중앙부에 원주 방향으로 열전대를 설치하여 온도를 측정하고, 그 결과를 분석하여 보았다. 그래서 열유속에 대하여 전극에 걸여주는 전압별로 가열수 입구 온도와 비등 표면 중앙부의 위치별 온도를 전극간의 틈새가 5mm 인 여섯 개의 전극선을 튜브 밀면의 중심선에서부터 등간격으로 배열(type B)하고, 가열수의 유량을 8 l/min, 포화 온도를 25.5°C로 하여, R11을 실험 냉매로 하여 전극에 걸리는 전압을 변경시켜 가면서 실험한 결과를 Fig. 18(a) ~ (d)에 나타내었다. Fig. 18(a)에는 전압을 걸지 않았을 때의 결과를 나타내었는데, 열유속이 15kW/m²에서 에너지 시스템에 치명적인 현상인 온도강하 현상, 즉 비등 히스테리시스 현상이 일어남을 알 수 있다. 그러나 전극에 전압을 걸면 Fig. 18(b) ~ (d)에 나타나 있는 바와 같이 Fig. 18(a)에서 볼 수 있었던 비등 히스테리시스 현상이 없어짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 19(a) ~ (d)에는 가열수의 유량을 8 l/min, 실험유체의 포화온도가 48.5°C이고, 전극간의 틈새가 5mm인 여섯 개의 전극선을 튜브 밀면의 중심선에서 부터 등간격으로 배열(type B)한 경우의 실험 결과를 나타내었다. 이들 결과에서도 R11의 경우에서와 마찬가지로 전압을 걸면 전압을 걸지 않았을 때 열유속이 12kW/m²에서 나타났던 비등표면의 온도강하 현상이 사라지며 주어진 과열도에 대한 가열수의 입구 온도 및 비등 표면의 온도는 높은 전압을 걸수록 낮아짐을 알 수 있었다. 이들 실험

결과를 살펴보면 전압을 인가하면 비등 히스테리시스를 억제할 수 있다는 앞서의 연구 결과⁽²⁾를 뒷받침하고 있다. 그리고 수평으로 놓인 튜브가 비등 표면인 경우에는 비등 표면의 하부 온도가 제일 낮고, 상부의 온도가 제일 높음을 알 수 있다. 그러므로 앞서의 대부분의 연구자들이 채택하여 왔던 비등 표면의 어느 한쪽면의 길이 방향 온도를 측정하여 수평관의 열전달 계수 계산에 사용하는 방법에는 상당한 오류가 있을 수 있음을 시사하고 있다. 이들 결과로부터 열전달 계수의 계산에서 이미 설명한 바와 같이 수평관의 원주 방향 표면 온도는 비등 열전달 계수의 계산결과에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 수평관의 열전달 계수는 본 연구에서와 같이 비등 표면의 원주 방향 온도를 고려하여야 계산함이 바람직하다고 판단된다. 그러나 만약에 실험의 여건상 비등 표면의 어느 한쪽면의 길이 방향 온도만을 측정하여 수평관의 열전달 계수를 계산하고자 하는 경우에는 측면의 온도를 측정하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

3.5 전기장하에서의 기포 거동

전계 구배에 의해 생기는 전계력과 중력은 전기장하의 기포 거동에 영향을 준다는 사실은 이미 보

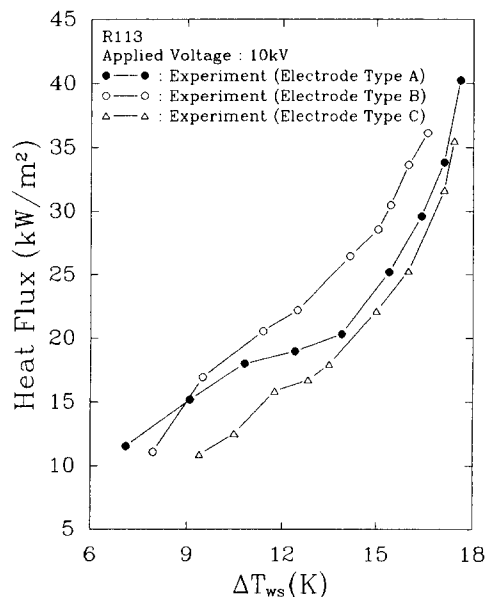


Fig. 20 Effect of different electrode arrangements on boiling curves for R113 with $Q_w=8$ l/min at $T_s=48.5^\circ\text{C}$

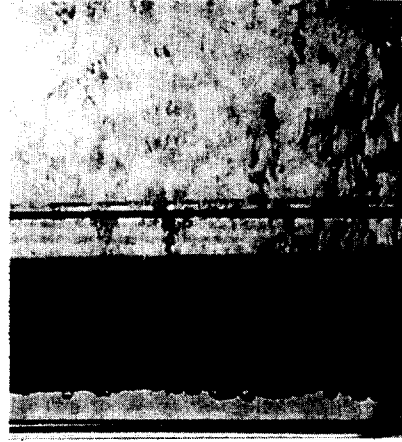
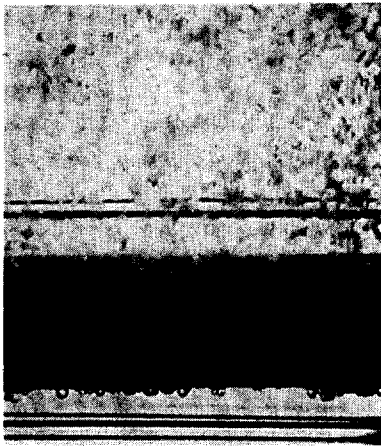
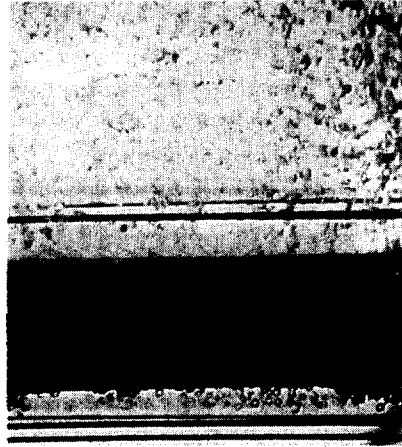
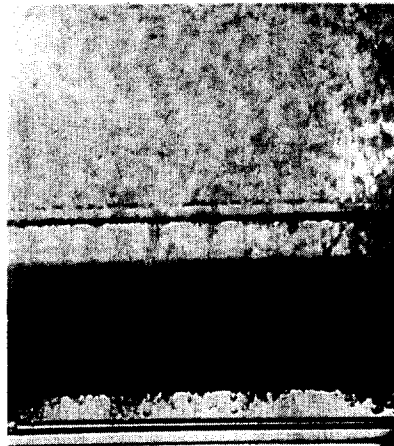
(a) 0kV, $q=33.6\text{kW/m}^2$ (b) 5kV, $q=30.4\text{kW/m}^2$ (c) 10kV, $q=29.5\text{kW/m}^2$ (d) 15kV, $q=28.4\text{kW/m}^2$ (e) 20kV, $q=32.9\text{kW/m}^2$

Fig. 21 Effect of applied voltage on bubble behavior in R113 with electrode arrangement type C and $Q_w=8\text{l/min}$ at $T_s=48.5^\circ\text{C}$

고된 바 있다.^(9,11) 전극의 배열이 바뀌면 전계 구배에 의하여 생기는 전계력이 바뀌기 때문에 전극의 배열은 기포의 거동에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에서는 전기장이 기포의 거동에 미치는 영향의 검토를 통하여 열전달 촉진에 바람직한 전극의 배열에 대하여 설명해 보겠다.

R113을 실험 유체로 하고 배열(type A, B, C)이 서로 다른 전극에 10kV의 전압을 걸었을 때의 실험 결과를 Fig. 20에 나타내었다. Fig. 20에서 알 수 있는 바와 같이 열두 개의 전극선을 튜브의 원주에 등간격으로 배열(type C)하여 전계가 가장 균일하게 형성되는 경우, 즉 Δ 로 표시된 결과가 주어진 과열도에서의 열유속이 가장 작다. 이는 전계의 균일성이 크면 클수록 기포의 거동에 미치는 전기장의 영향이 작기 때문이라고 여겨진다. 그러나 여섯 개의 전극선을 튜브 밀면 중심선에서 30° 떨어진 지점에서부터 원주에 등간격으로 배열(type A)한 \bigcirc 로 표시된 경우는 과열도에 따라 비등곡선의 특성이 상당히 바뀌고 있다. 이는 전극에 전압을 걸면 비등 표면의 밀면에 전계 구배력과 부력이 평형을 이루어 비등 표면으로부터 이탈된 기포가 정체를 하는 영역이 생긴다. 이와 같은 정체 영역은 비등 표면으로부터의 기포 이탈을 방해하기 시작하는 과열도 이상의 범위에서는 과열도가 증가할수록 넓게 발달되기 때문에 열유속도 감소하게 된다. 그러나 여섯 개의 전극선을 튜브 밀면 중심선에서부터 등간격으로 배열(type B)한 경우, 즉 \bullet 로 표시된 결과가 주어진 과열도에서의 열유속이 가장 크게 나타나 있다. 이는 전계 구배력과 부력이 평형을 이루어 생기는 기포의 정체 영역이 상대적으로 적어서 비등 표면에서 부터 이탈하는 기포에 영향을 적게 미치기 때문이라고 여겨진다.

Fig. 21은 틱새가 5mm인 여섯 개의 전극선은 튜브의 밀면 중심선에서부터, 틱새가 8mm인 여섯 개의 전극선은 튜브 밀면 중심선에서 30° 지점에서부터 튜브의 원주에 등간격으로 배열(type C)하고, 가열수의 유량을 8l/min, 포화 온도가 48.5°C 인 조건에서 R113에 대하여 전극계에 걸리는 전압에 따른 기포 거동의 전형적인 예를 촬영한 사진이다. Fig. 21의 (a)~(e)는 전극계에 걸리는 전압을 증가시켜 가면서 실험하는 과정을 촬영한 사진이다. 일련의 사진에서 알 수 있는 바와 같이 전압을 걸지 않은 경우에는 비등 표면에서 발생한 기포가 비등 표면을 따라서 상승하지만 전극계에 전압을

걸면 비등 표면에서 이탈한 기포는 전계 구배력의 영향으로 외부로 끌려나오면서 상승함을 알 수 있다. 그리고 그 경향은 전극계에 걸리는 전압이 클수록 뚜렷함을 확인할 수 있다. 이는 전극에 큰 전압을 걸면 시험부에 생기는 전계의 구배가 커져서 기포에 작용하는 전계 구배력도 커지기 때문이다. 또 전극계에 걸리는 전압이 증가하면 기포의 분열로 기포의 이탈 직경이 작아지고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 열유속 및 전극계에 걸리는 전압이 일정하면 기포의 거동 형태도 균일함을 알 수 있었다. 그러나 이와 같은 현상은 전하완화 시간이 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ sec 정도인 기포의 이탈시간 보다 상대적으로 큰 R11이나 FC72를 대상으로 실험하는 과정 중에는 육안으로 확인할 수 없었다.

4. 결 론

최근에 관심의 대상이 되고 있는 에너지 시스템의 작동 유체 및 고전압 기기나 전자 장치의 냉각용 절연 유체로 사용되고 있는 액체(R11, R113, FC72)를 대상으로 세 가지의 전극 배열에 대하여 전극계에 걸리는 전압 및 과열도를 변경시켜 가면서 실험을 수행하였다. 비등 열전달에 미치는 전기장의 효과를 조사하기 위한 일련의 실험 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전극계의 구조는 기포의 정체 영역이 생겨 비등 표면으로부터의 기포 이탈을 방해하지 않도록 전극선이 튜브 밀면 중심선에 위치하도록 배열(type B)하는 것이 열전달 촉진 및 절연과파 현상 방지를 위하여 바람직하다.

(2) 주어진 조건하에서 R11의 경우 전극에 14.3 kV의 전압을 걸었을 때 과열도가 9.7K에서 최대 2.3배, R113의 경우 전극에 14.2kV의 전압을 걸었을 때 과열도가 10K에서 최대 2.8의 열전달 촉진효과를 얻었으나 FC72의 경우에는 열전달 촉진효과를 확인할 수 없었다.

(3) R113의 경우 전극에 걸리는 전압을 증가시키면 과열도가 14~15K를 경계로 하여 그 이하의 범위에서는 열유속이 증가하고, 이상의 범위에서는 열유속이 감소하는 천이영역이 존재함을 관찰하였는데, 이는 전계 구배력과 부력의 합성력의 작용 형태에 따른다고 여겨진다.

(4) 수평 튜브인 경우에는 튜브의 상부, 측면 및 하부의 비등 표면 온도가 열유속이 증가할수록 차

이가 커지므로 튜브 원주 방향의 온도 구배를 고려하여 열전달 계수를 계산함이 바람직하다고 판단되며, 만약 실험의 여건상 원주방향 온도의 측정이 어려울 경우에는 수평관 측면 온도를 측정하여 열전달 계수를 계산함이 바람직하다고 여겨진다.

(5) 전국에 전압을 걸면 에너지 시스템에서 치명적인 비등 히스테리시스 현상이 사라짐을 관찰하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 '92 핵심전문연구과제(921-0900-014-2)의 일부로써 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Reay, D. A., 1991, "Heat Transfer Enhancement-A Review of Techniques and their Possible Impact on Energy Efficiency in the U. K.," *Heat Recovery Systems & CHP* Vol. 11, No. 1, pp. 1~40.
- (2) Cooper, P., 1986, "EHD Enhancement of Nucleate Boiling," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 458~464.
- (3) Karayiannis, T. G., Collins, M. W. and Allen, P. G. H., 1989, "Electrohydrodynamic Enhancement of Nucleate Boiling Heat Transfer in Heat Exchanger," *Chem. Eng. Comm.* Vol. 81, pp. 15~24.
- (4) Kawahira, H., Kubo, . Y., Yokoyama, T. and Ogata, J., 1990, "The Effect of an Electric Field on Boiling Heat Transfer of Refrigerant -11-Boiling on a Single Tube," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 26, No. 2, pp. 359~365.
- (5) Ohadi, M. M., Paper, R. A., Ng, T. L., Faani, M. A. and Radermacher, R., 1992, "EHD Enhancement of Shell-Side Boiling Heat Transfer Coefficients of R123/oil Mixture," *ASHRAE Trans. Symp.*, pp. 427~434 (BA-92-5-1).
- (6) Paulter, R. and Allen, P. H. G., 1986, "Electro-Hydrodynamically Augmented Heat and Mass Transfer in the Shell/Tube Heat Exchanger," *Proc. 8th Int. Heat Transfer Coef.*, Vol. 6, pp. 2963~2968.
- (7) Ogata, J., Iwafuji, Y., Shimada, Y. and Yamazaki, T., 1992, "Boiling Heat Transfer Enhancement in Tube-Bundle Evaporators Utilizing Electric Fields effects," *ASHRAE Trans. : Symp.*, pp. 435~444 (BA-92-5-2).
- (8) 곽태희, 김주형, 정동수, 차태우, 한창섭, 1994, "Chiller 용 냉매 CFC-11과 대체 냉매 HCFC-123의 전기장을 사용한 핵비등 열전달 촉진에 관한 연구," '94년 공조냉동공학회 하계 학술대회 강연 및 논문집, pp. 61~66.
- (9) Hara, M., Suehiro, J., Nakamura, I. and Saita, K., 1991, "Electrical Breakdown Mechanism of Cryogenic Liquid Coolants," *T. IEE Japan*, Vol. 111-B, No. 4, pp. 352~357.
- (10) Pierce, L. W. and Gearhart, R. E., 1979, "Vaporization Cooled Transformer with Non-flammable Fluid," GE Technical Report, Presented at American Power Conference Chicago.
- (11) 오시덕, 곽호영, 1995, "전기장하에서의 기포의 거동 및 열전달 촉진에 관한 연구," 대한 기계학회 '95년도 열 및 유체공학부문 학술대회 논문집, pp. 84~94
- (12) Mostinski, I. L. 1963, *Teloenergetika*, Vol. 4, p. 63, (English abstract in *Br. Chem. Eng.*, Vol. 8, p. 580, 1963)
- (13) Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1980, "Heat Transfer Correlations for Natural Convective Boiling," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 73~87.
- (14) Oh, S. D. and Kwak, H. Y., 1996 "A Study of Bubble Behavior and Boiling Heat Transfer Enhancement under Electric Field," Will be presented at '96 ASME Mechanical Engineering Congress & Exposition.