

## 임계 열유속 근방까지의 풀 비등 열전달계수

박 기 정, 정 동 수<sup>\*†</sup>  
 인하대학교 대학원, \*인하대학교 기계공학과

### Pool Boiling Heat Transfer Coefficients Upto Critical Heat flux

Ki-Jung Park, Dongsoo Jung<sup>\*\*</sup>  
 Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea  
<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea  
 (Received March 19, 2008; revision received August 18, 2008)

**ABSTRACT:** In this work, pool boiling heat transfer coefficients(HTCs) of 5 refrigerants of differing vapor pressure are measured on horizontal smooth square surface of 9.52 mm length. Tested refrigerants are R123, R152a, R134a, R22, and R32 and HTCs are taken from 10 kW/m<sup>2</sup> to critical heat flux of each refrigerant. Wall and fluid temperatures are measured directly by thermocouples located underneath the test surface and by thermocouples in the liquid pool. Test results show that pool boiling HTCs of refrigerants increase as the heat flux and vapor pressure increase. This typical trend is maintained even at high heat fluxes above 200 kW/m<sup>2</sup>. Zuber's prediction equation for critical heat flux is quite accurate showing a maximum deviation of 21% for all refrigerants tested. For all refrigerant data up to the critical heat flux, Stephan and Abdelsalam's well known correlation underpredicted the data with an average deviation of 21.3% while Cooper's correlation overpredicted the data with an average deviation of 14.2%. On the other hand, Gorenflo's and Jung et al.'s correlation showed only 5.8% and 6.4% deviations respectively in the entire nucleate boiling range.

**Key words:** Nucleate pool boiling(핵 비등), Heat transfer coefficients(열전달계수), Critical heat flux(임계 열유속), Electronic cooling(전자 쿨링)

기 호 설 명	
$A$	: 관표면적 [m <sup>2</sup> ]
$h$	: 열전달계수 [W/m <sup>2</sup> K]
$h_{fg}$	: 증발 잠열 [kJ/kg]
$g$	: 증력가속도 [m/s <sup>2</sup> ]
$I$	: 전류 [A]
$k$	: 열전도도 [W/mK]
$L$	: 관길이 [m]
$Q$	: 열량 [W]

$q''$	: 임계 열유속 [kW/m <sup>2</sup> ]
$T$	: 온도 [K 혹은 °C]
$V$	: 전압강하 [V]

그리스 문자

$\rho$	: 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: 표면장력 [N/m]

하첨자

<i>bonding</i>	: 본드 접착
<i>CHF, Zuber</i>	: Zuber의 임계 열유속 예측식

† Corresponding author  
 · Tel.: +82-32-860-7320; fax: +82-32-868-1716  
 E-mail address: dsjung@inha.ac.kr

<i>exp</i>	: 실험치
<i>f</i>	: 포화액체상태
<i>g</i>	: 포화기체상태
<i>pre</i>	: 이론치
<i>sat</i>	: 포화상태
<i>silver soldering</i>	: 은납 접착
<i>th</i>	: 열전대
<i>w</i>	: 열전달 표면

## 1. 서 론

비등 열전달은 잠열에 의한 열전달과 부력에 의한 대류 현상으로 인해 상의 변화가 없는 단상 열전달보다 훨씬 큰 열량을 전달할 수 있다. 화력 및 원자력 발전소의 보일러 설계를 위해서는 물을 작동 유체로 해서 낮은 열유속부터 임계 열유속에 이르기까지 전체 핵 비등 영역에서의 데이터가 필요하다. 반면에 냉동/공조기의 증발기 설계를 위해서는 냉매를 작동유체로 하여 대개  $50 \text{ kW/m}^2$  이하의 낮은 열유속에서의 데이터가 있으면 충분하다. 이런 이유로 물에 대해서는 핵 비등 영역 전체에 걸친 데이터가 존재하지만 냉매 군에 대해서는 대개  $50 \text{ kW/m}^2$  이하에서 취한 데이터만 존재한다. 최근 들어 IT 산업이 발전하면서 소규모 전자 칩이나 컴퓨터 등에서 발생하는 많은 양의 열량을 수송하기 위해 전자 쿨링에 대한 관심이 높아졌는데 이 경우에는 냉매 종류와 같은 화학물질을 작동 유체로 해서 낮은 열유속부터 임계 열유속 부근까지 취한 핵 비등 데이터가 필요하다.

플 비등의 경우 표면이 충분히 과열되면 많은 양의 기포가 발생하고 액체와 기체가 뒤섞이면서 매우 복잡한 열유체 이동 현상이 발생한다. 이런 현상은 열을 필요로 하며 따라서 작동 유체의 열역학적 성질들에 의해 영향을 받게 된다. 유체와 표면의 상관관계, 상변화, 유동의 복잡성 등으로 인해 플 비등 현상은 대개 실험실에서 소규모의 실험 장치를 통해 관찰되고 이해되어 왔다. 한편 산업체에서는 비등 현상 중에 발생하는 열을 계산하기 위해 실험 자료에 근거한 상관식을 이용해 왔다. 이런 면에서 관련 산업계의 부품 설계 엔지니어들에게는 무엇보다도 비등 열전달 상관식이 중요하다. 이처럼 중요한 핵 비등 상관식을 개발하기 위해서는 기포의 성장과 이탈에 의한 미소층

에서의 열의 이동과 낮은 열유속에서 중요한 인자로 작용하는 자연대류 등에 대한 열역학적 고찰이 필요하다.<sup>(1-2)</sup> 지난 몇 십 년간 핵 비등 열전달 실험이 많이 진행되어 비등 현상에 대한 이해가 많이 진척되었고 이를 근거로 몇몇 실험식이 제시되고 있지만 대부분의 상관식들은 상관식 개발에서 사용된 특정 유체나 표면 조도, 열전달 표면의 형상, 압력, 열유속 범위에서만 적용되는 한계를 가지고 있다.

1980년에 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>은 여러 연구자가 다양한 범위에서 측정한 5000여 개의 실험 데이터를 이용하여 회귀분석법을 통해 플 비등 열전달 상관식을 발표했다. 이들은 물, 탄화수소, 초저온 유체, 냉매 등 네 개의 그룹에 대해 상관식을 개발하였고 네 개 그룹의 전체 유체에 적용되는 단일 상관식도 개발하였다. 각 그룹에만 적용되는 개별 상관식의 오차는 대개 11~14%였고 전체 그룹에 대한 단일 상관식의 오차는 22.3%였다. 지금까지 이들의 상관식은 사용하기가 간편해서 많은 사람들에 의해 이용되고 있다. 그러나 이들의 상관식이 임계 열유속 근방까지 신뢰성 있게 데이터를 예측할 수 있는지는 의문이다.

한편 1984년에 Cooper<sup>(4)</sup>는 광범위한 작동유체 데이터를 가지고 환원 물성치(reduced property)를 사용하는 간편한 방정식을 발표하였다. Cooper<sup>(4)</sup>는 열전달계수에 대한 열유속의 지수 값을 유체에 상관없이 모두 동일하게 한 상수로 고정하고 유체의 특성을 나타내는 물질량을 사용해서 다양한 유체에 적용할 수 있는 상관식을 유도했다. 이 상관식 역시 단순함과 정확성 등으로 인해 여러 분야의 설계 엔지니어들에 의해 사용되고 있다. Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>의 상관식과 마찬가지로 Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식 역시 임계 열유속 근방까지 신뢰성 있게 데이터를 예측할 수 있는지는 알려져 있지 않다.

한편 1984년에 Gorenflo<sup>(5)</sup>는 비등 열전달계수를 기준 열유속에 대한 함수로 유도해서 비교적 정확한 상관식을 유도했다. 그러나 이 식은 상관식 유도를 위해 사용된 데이터가 열유속  $100 \text{ kW/m}^2$  이하로 제한되어 있고 또한 몇몇 작동유체에만 적용할 수 있는 한계를 가지고 있다. 이 식은 주로 냉매의 플 비등 열전달계수를 예측하는 데 사용되고 있다. 2004년에 Gorenflo et al.<sup>(6)</sup>은 열유속  $100 \text{ kW/m}^2$  범위에서 6가지 HFC 냉매-R32, R125,

R134a, R143a, R152a, R227ea-와 2가지 탄화수소계 냉매-Propane, *i*-butane-에 대하여 풀 비등 열전달계수를 측정하였고 그 결과를 기존에 제시한 상관식과 비교하여 상관식의 정확성을 재확인하였다.

2003년에 Jung et al.<sup>(7)</sup>은 포화온도 7 °C에서 열유속 100 kW/m<sup>2</sup> 범위에서 다양한 증기압을 가지는 여러 냉매들-R123, R11, R142b, R134a, R12, R22, R125, R32-에 대해 풀 비등 실험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>과 Cooper<sup>(4)</sup>가 제시한 방법 및 이론을 이용하여 새로운 상관식을 제시하였다. 또한 그들은 2004년에 다섯 가지의 가연성 냉매에 대한 데이터를 취해 수정된 상관식을 제시하였다. 이렇게 제시된 상관식은 상관식 개발에 사용된 모든 냉매 데이터에 대하여 5.3%의 절대 오차를 가진 것으로 나타났다.<sup>(8)</sup> Thome<sup>(9)</sup>과 Gorenflo<sup>(10)</sup>는 냉매의 풀 비등에 대해 최근까지의 자료를 잘 정리해서 보여주고 있다.

최근까지 가정용 및 산업용 냉동/공조 분야에서 널리 사용되어 오던 염화불화탄소(CFC) 및 수소화염화불화탄소(HCFC)가 대기에 누출될 경우 오존층 붕괴와 지구 온난화를 유발시키는 환경오염물질로 판명되면서 이런 냉매들의 생산 및 무역 그리고 사용에 대해 규제가 가속화되고 있다.<sup>(11)</sup> 이러한 환경 보호 움직임에 따라 기존의 냉매들을 환경 친화적인 냉매들로 새로 대체하는 것이 필요하게 되었다. 기존의 상관식 중에 비교적 정확하게 예측되었던 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>과 Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식은 CFC, HCFC 등의 오존층 파괴와 지구 온난화물질을 함유한 작동유체를 근거로 유도되었기 때문에 새로운 대체냉매에 대한 예측에는 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 비교적 최근에 알려진 Gorenflo<sup>(5)</sup>의 상관식도 기존의 실험된 냉매에 대해서는 매우 정확한 것으로 알려져 있다. 그러나 증기압과 열적 특성이 다른 새 대체 냉매들의 비등 열전달 특성을 예측하기 위해서는 다양한 범위의 데이터가 필요하고 동시에 기존 상관식에 대한 검증도 요구된다.

특히 최근에는 반도체 기술이 급격하게 발전함에 따라 전자 부품들이 소형화, 고집적화 되면서 고효율 열교환기의 개발이 중요하게 대두되고 있다. 차세대 마이크로 프로세서와 전자부품 경우에는 300 kW/m<sup>2</sup> 정도의 고열유속으로 열을 방출해

야 하는 부품도 늘고 있다. 이와 같은 고열유속 열전달 문제는 기존의 냉각 방식으로 쉽게 해결할 수 없다. 열전달 기기의 운전 과정에서 가열면의 열유속이 임계 열유속(Critical heat flux, CHF)을 초과하게 되면 순식간에 막 비등 영역으로 넘어가면서 시스템의 물리적 파괴 현상이 발생되게 된다. 이는 전열 표면에 형성된 기체막을 통한 열전달과정이 원활히 이루어지지 않아 전열 표면의 온도가 급속히 높게 상승하기 때문이다. 따라서 시스템을 보호하면서 성능을 극대화시키기 위해서는 임계 열유속 향상이 필수적이며 이를 위해서는 임계 열유속 근방까지의 데이터를 취하고 기존의 상관식과 비교해 보는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 전자 쿨링 적용을 염두에 둔 채 증기압이 상이한 CFC, HCFC 그리고 HFC 계열의 대표적인 냉매 5개-R123, R152a, R134a, R22, R32-를 이용해 임계 열유속 근방까지 핵 비등 데이터를 취하고 실험에서 얻은 데이터를 기존의 상관식들과 비교 검토하려고 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 상온에서 다양한 증기압을 갖는 냉매들의 풀 비등 열전달계수를 안전하게 측정할 수 있는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

실험 장치는 크게 비등 용기와 외부 응축기로 구성되어 있는데 비등 용기는 직경 120 mm, 길이 170 mm의 스테인리스 스틸 파이프와 양 끝단의 플랜지를 사용하여 밀폐형으로 제작하였다. 비등이 발생하는 용기 내의 온도를 정확하게 측정하기 위해 T-type 열전대 2개를 설치하였으며 비등 용기 위쪽에는 실험에 사용한 유체의 과냉 여부를 확인하기 위한 압력 게이지와 압력 변환계를 설치하였다. 비등 용기에서 열을 받아 증발된 증기는 외부 응축기에 의해 액체로 응축된 뒤 중력에 의해 다시 비등 용기로 순환되도록 하였다. 증기의 응축에 필요한 냉각수는 독립된 정밀 항온조에 의해 정밀하게 온도가 제어되어 외부 응축기의 열교환기로 순환된다. 또한 비등 용기 내부에 응축기를 설치하여 실험 유체와 직접 열교환을 통해 온도를 실험 조건에 맞게 유지하도록 하였고 비등 용기 내부의 하단에 카트리지 히터를 설치하여 실

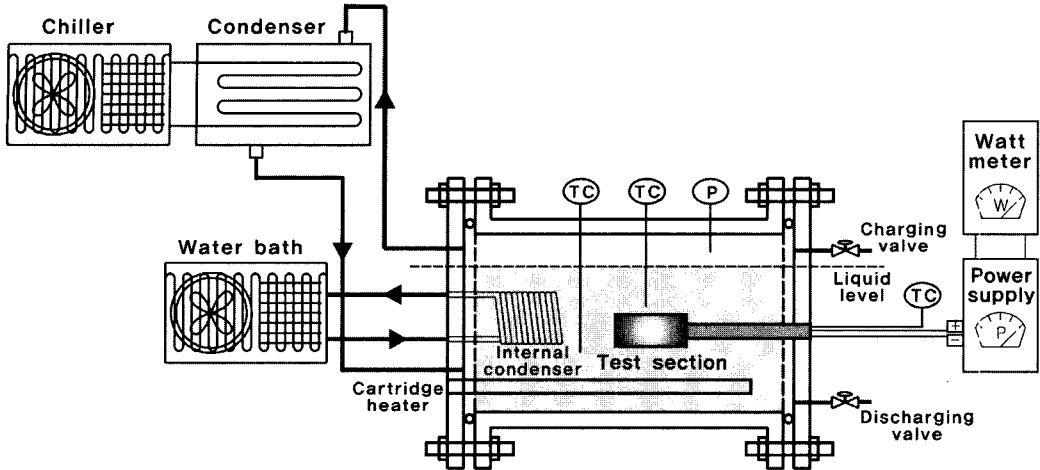


Fig. 1 Schematic diagram of pool boiling test facility.

힘 조건의 온도를 유지하기 위해 추가적으로 필요한 열을 주입하도록 하였다. 비등 용기 내의 실험 유체의 높이는 열전달 시험관의 표면에서 약 50 mm 위에서 유지되도록 하였다. 또한 본 연구에서 사용되는 실험 히터가 작기 때문에 외부로의 미세한 열손실도 비등 열전달계수에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 비등 용기와 외부 응축기 및 연결 배관 등에 20 mm 두께의 단열재를 붙여 철저하게 단열하였다.

본 실험에서 요구되는 고열유속을 균일하게 내기 위해 열전달 시험부 내에 삽입된 열전달 히터에 전원을 공급하는 직류 전원 공급기(Agilent 6030A, 200V, 17A)를 사용하여 열유속을 조절하였다. 또한 열전달 시험부에 들어가는 열량을 측정하기 위하여 셉트 저항(Yokogawa 221509, 50mV, 20A)을 이용하여 열전달 시험부에 들어가는 전류와 전압 강하를 측정하였다.

$$Q = IV \quad (1)$$

여기서  $Q$ ,  $I$ ,  $V$ 는 각각 직류 전원 공급기에서 열전달 시험관에 공급한 열량(W), 셉트저항을 통해 측정된 전류량(A), 열전달 시험관에서의 전압 강하(V)를 나타낸다.

### 2.2 열전달 시험부 제작

본 연구에서는 임계점 부근의 높은 열유속에서도 비등 열전달계수를 측정할 수 있도록 작은 크

기의 평면 열전달 시험부를 제작하였다 Fig. 2는 본 연구에서 제작한 열전달 시험부(9.52 mm × 9.52 mm)를 나타낸다. 열전달 시험부는 크게 비등이 일어나는 구리 판과 그 판에 열을 공급하는 히터로 구성되어 있다. 열전달 히터는 안에 20옴의 니크롬선이 삽입되어 있어 약 3800 kW/m<sup>2</sup>의 열유속까지 낼 수 있는 것으로 선정했다(CGI사, CCR-375-1 모델). 열전달 히터를 직접 액체 냉매에 접촉시킬 수 없기 때문에 본 실험에서는 열전달 히터와 같은 크기의 구리 판(9.52 mm × 9.52 mm × 4 mm)을 제작하였다. 이렇게 열전달 시험부를 만들기 위해 구리 판과 히터를 선정한 뒤 처음에는 열전도도가 높은 것으로 알려진 오메가 본드(Omega Bond 200,  $k \sim 1.4$  W/mK)를 이용하여 구리 판과 히터를 접착하였다. 그러나 나중에는 히터 표면에 은 납을 대고 가열하여 히터와 구리 판을 직접 접합하였는데 이 두 가지 방법에 따라 열전

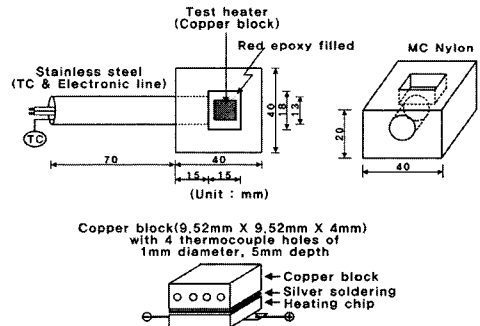


Fig. 2 Test heater specification.

달계수의 차이가 났고 이는 실험 결과에서 밝혀려 한다.

열전달계수를 정확히 측정하기 위해서는 열전달 표면에서의 온도를 정확하게 측정해야 한다. 용접이나 전기 도금의 방법 등으로 열전달 표면에 직접 열전대를 부착시키는 경우에는 표면 조건의 변화로 인해 실제 매끈한 표면에서의 비등 열전달 계수를 측정하기 어렵다. 따라서 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 열전달 표면에 변화를 주지 않고 표면 온도를 정확하게 측정하기 위해서 열전달 히터 위에 부착한 구리 판에 드릴을 이용하여 직경 1.0 mm, 깊이 5.0 mm의 구멍 네 개를 동일한 간격으로 뚫고 그 안에 T-type 열전대가 들어갈 수 있도록 하였다. 이렇게 4개의 열전대를 각각 구멍 안에 넣고 구멍을 은 납으로 채워 넣어 빈 공간이 생기지 않게 하였다.

열전달 히터에서 발생하는 열이 구리 판 쪽으로만 가도록 하기 위해서 열전도도가 매우 낮은 MC 나일론(Monomer Cast Nylon, MCN)으로 단열 블록(40 mm × 40 mm × 20 mm)을 제작하였다. MC 나일론 블록의 위쪽에는 가로 18 mm, 세로 15 mm, 깊이 6 mm의 사각형 부위를 만들어 열전달 시험 부를 넣을 수 있게 하였고 블록의 옆면에 직경 13 mm, 깊이 15 mm의 구멍을 내어 스테인리스 스틸 관을 꽂을 수 있게 하였다. 그 뒤에 열전달 히터 어셈블리를 MC 나일론 블록 안의 사각형 부위에 넣고 어셈블리 양 끝단에 전선을 달고 은 납을 이용하여 이것을 직류 전원 공급기와 연결되게 하였다. 이렇게 연결된 전선과 4개의 열전대는 MC 나일론 블록의 옆면에 연결된 스테인리스 스틸 관을 통해 MC 나일론 블록 밖으로 빼내어 비등 용기 내의 실험 유체와 닿지 않도록 하였다. 또한, 전선과 열전대 등을 밖으로 내는 작업을 마친 뒤 MC 나일론 블록의 사각형 부위와 스테인리스 스틸관 주변을 냉매와 전혀 반응하지 않는 에폭시(Red Epoxy)를 이용하여 막음으로써 작동 유체가 스며들지 못하게 하였다.

### 2.3 실험방법

비등 실험에서 무엇보다 중요한 것은 비등 용기의 밀폐성 확보와 증발온도 유지이다. 본 실험에서는 질소와 냉매로 비등 용기를 20기압까지 충전한 뒤에 할로젠 디텍터로 가스의 누출을 확인하

였다. 문제가 없음이 확인되면 약 두 시간 동안 진공 펌프를 구동한 뒤 실험할 유체를 충전하였다. 충전이 다 된 후 정밀온도 제어 항온조를 사용하여 풀 온도를 7℃로 유지하고 열유속 10kW/m<sup>2</sup>에서부터 실험을 수행하였다. 주어진 열유속에서 정상 상태가 유지되면 풀 비등 열전달계수를 측정하고 다시 열유속을 10kW/m<sup>2</sup>씩 증가시키면서 높은 열유속까지 데이터를 측정하였다. 일반적으로 풀 비등 실험은 비등의 히스테리시스(Hysteresis)를 고려하여 열유속을 감소시키면서 데이터를 측정한다. 그러나 본 연구에서는 잘 알려지지 않은 임계열유속 근방까지의 데이터를 측정하기 위해 열유속을 증가시키면서 실험을 수행하였다.

위에서 언급된 바와 같이 냉매의 경우에는 대개 낮은 열유속에서만 데이터를 취한 사례가 많았고 그 결과 높은 열유속에서의 데이터가 부족하여 열전달 상관식을 만들기가 어려웠다. 이에 본 연구에서는 히터가 망가지지 않는 범위 내에서 가능한 높은 열유속까지 열량을 중대시켜가며 데이터를 취하였다.

실험에 앞서 실험을 수행할 수 있는 열유속 범위를 결정하기 위해 Zuber<sup>(12)</sup>가 제시한 임계 열유속 예측 식을 이용하여 실험에서 사용한 냉매들의 임계 열유속을 계산하였다. 실제로 임계 열유속 부근에 도달하면 유동이 안정적으로 되지 못하고 순식간에 막 비등으로 넘어가서 히터가 망가지게 되므로 본 연구에서는 히터 표면의 온도를 2초마다 측정하여 온도가 60℃ 이상이 되면 자동으로 히터의 전원이 차단되도록 하였다.

실험이 끝난 뒤에는 작동 유체를 빈 용기에 회수한 후 열전달 시험부를 비등 용기에서 분리하고 비등 용기를 분해해서 아세톤 등의 세정제를 이용해 깨끗이 닦아내고 유체를 바꾸어 다시 위의 과정을 반복하여 실험을 수행하였다. 또한 비등 열전달계수가 표면 불결 효과의 영향을 크게 받으므로 본 연구에서는 유체를 교체할 때마다 열전달 시험관의 표면을 동일한 2000번 사포로 균일하게 닦고 아세톤으로 세척하여 표면 조건을 항상 균일하게 유지하면서 실험을 수행하였다.

### 2.4 실험 데이터의 처리

본 실험에서 열전달계수는 간단한 에너지 방정식을 사용하여 구하였다. 열전대가 설치된 열전달

표면에서의 국부 열전달계수는 식(2)에 의해서 결정된다.

$$h = \frac{Q/A}{(T_w - T_{sat})} \quad (2)$$

여기서  $h$ ,  $A$ ,  $T_w$ ,  $T_{sat}$ 는 각각 열전달계수(W/m<sup>2</sup>K), 열전달 면적(m<sup>2</sup>), 열전달 시험부 표면 온도 그리고 실험 유체의 포화온도이다. 실제 열전달 튜브의 표면은 열전대 삽입 구멍으로부터 2mm 떨어져 있으므로 식(2)의 온도  $T_w$ 는 측정된 온도  $T_{th}$ 를 식(3)에 있는 1차원 열전도 방정식으로 보정하여 결정할 수 있다.

$$T_w = T_{th} - \frac{Q}{A} \left[ \frac{L}{k} \right] \quad (3)$$

여기서  $T_{th}$ ,  $L$ ,  $k$ 는 각각 열전대로 측정된 온도(°C), 열전달 시험부에서 열전대 홈까지의 두께(m), 열전달 시험부의 열전도도(W/m·K)이다. 식(3)을 이용하여 열전달 시험부 표면 온도를 보정한 결과 열유속이 200 kW/m<sup>2</sup> 이상일 경우에는 온도차가 1°C 이상 차이가 나므로 열전달계수를 결정하는 데 크게 영향을 미쳐 무시할 수 없음을 알 수 있다.

본 실험에서 발생하는 실험 데이터의 불확실성을 결정하기 위해 Kline and McClintock<sup>(13)</sup>이 제안한 방법을 적용하였으며 모든 냉매에 대하여 2.1~5.4% 정도로 나타났다. 또한, 한 유체에 대해 여러 차례 반복 실험을 한 결과 실험 데이터의 재현율은 5% 이내로 나타났다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 증기압이 다양한 5개 냉매에 대해 임계 열유속 근방까지 열유속을 증대시켜 가며 7°C에서 풀 비등 열전달계수를 측정하였다.

#### 3.1 히터 접합 방법에 따른 편차

실험 데이터를 제시하기 전에 먼저 주 실험부에서 구리 판과 열전달 히터를 접착시키는 방법에 따른 편차를 살펴보는 것이 중요하다. 실험 장치에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 오메가 본

드와 은 납을 사용하여 구리 판과 히터를 접착시켰다. Fig. 3은 오메가 본드를 사용하여 접착시킨 경우와 은 납을 사용하여 접착시킨 경우에 발생하는 편차를 보여 준다. 결과에서 볼 수 있듯이 두 방법에 따른 편차는 평균 10%이고 R134a 같은 경우에는 무려 15%나 된다. 물론 은 납을 사용하여 금속 접합을 한 경우에 열전달 저항이 감소하여 열전달계수가 크게 나타났다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 히터와 구리 판을 은 납으로 접합해서 취한 데이터만을 제시하려 한다.

#### 3.2 냉매들의 임계 열유속

앞에서도 언급했듯이 냉매들의 경우 고열유속에서 취한 데이터는 많지 않다. 특히 전자 쿨링 적용을 염두에 둔다면 임계 열유속 근방까지 데이터를 취해야 한다. 순수유체 풀비등 실험의 경우 임계 열유속을 예측하기 위하여 다음과 같이 Zuber<sup>(12)</sup>가 제시한 예측식이 가장 많이 사용된다.

$$q''_{CHF, Zuber} = \frac{\pi}{24} h_{fg} \rho_g^{1/2} [g\sigma(\rho_f - \rho_g)]^{1/4} \quad (4)$$

Table 1은 Zuber<sup>(12)</sup>가 제시한 임계 열유속 예측식을 이용하여 계산한 임계 열유속과 각 냉매에 대한 실험 한계 열유속을 보여 준다. 이 표에서 볼 수 있듯이 Zuber<sup>(12)</sup>의 상관식은 R123, R152a, R134a 같은 중저압 냉매의 경우 매우 정확하게

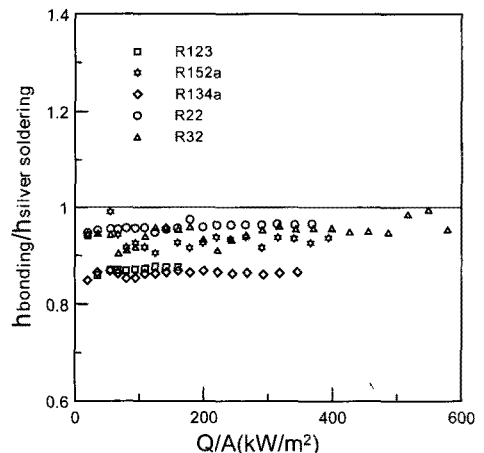


Fig. 3 Comparison of heat transfer coefficients between bonding and silver soldering.

Table 1 Predicted CHF and experimental range of tested refrigerants at 7 °C

Refrigerant	$q''_{CHF, Zuber}$ (kW/m <sup>2</sup> )	Experimental range (kW/m <sup>2</sup> )
R123	161.9	160
R152a	414.8	400
R134a	365.3	360
R22	450.9	370
R32	654.1	580

임계 열유속을 예측했지만 R22, R32 같은 고압 냉매의 경우 실험치보다 13~21% 정도 높게 예측했다. Zuber<sup>(12)</sup>의 임계 열유속 상관식은 여러 인자 중 포화증기 밀도( $\rho_g$ )에 의해서 매우 큰 영향을 받는다. 본 연구에서 사용한 R22와 R32 같은 고압 냉매의 포화증기 밀도는 같은 온도에서 R123, R152a, R134a 등의 중저압 냉매에 비해 상대적으로 크며 그 결과 Zuber<sup>(12)</sup>의 상관식이 R22와 R32의 임계 열유속을 20% 정도 과대 예측하는 것으로 판단된다. 그러나 핵 비등 열전달계수 예측식이 대개 20% 정도의 오차를 보임을 고려할 때 이 정도의 오차는 수용할 만한 것으로 판단된다.

### 3.3 평판에서의 열전달계수 비교

먼저 실험 데이터의 신뢰성을 확인하기 위해

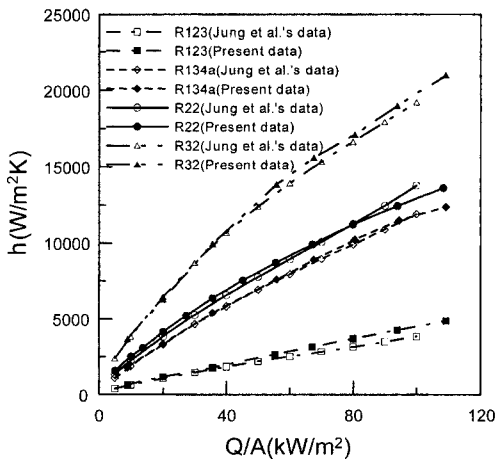


Fig. 4 Comparison of test result with Jung et al.<sup>(7)</sup>

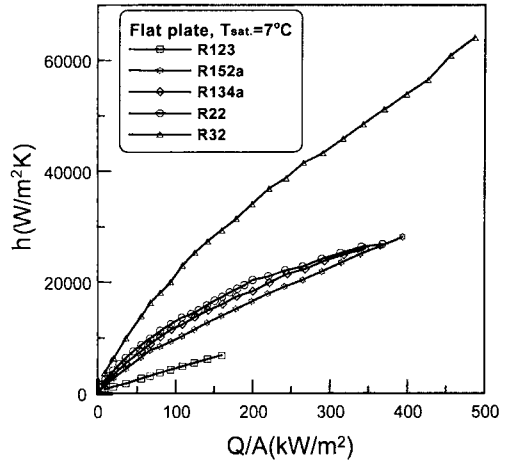


Fig. 5 Heat transfer coefficients of tested fluids.

본 연구실에서 수행한 과거의 실험 데이터와 비교하였다. 이 비교는 열유속 100 kW/m<sup>2</sup>의 낮은 열유속 구간과 임계 열유속까지의 전체 구간에 대해 이루어졌다. Fig. 4는 열유속 100 kW/m<sup>2</sup>의 낮은 열유속 구간에서 Jung et al.<sup>(7)</sup>의 실험 결과와 본 연구에서 얻은 R123, R134a, R22와 R32의 데이터를 보여 준다. 과거에 Jung et al.<sup>(7)</sup>은 냉동/공조기 설계에 응용될 데이터를 구하기 위해 외경 19.0 mm, 길이 250 mm의 구리 관에 카트리지 히터를 삽입하여 100 kW/m<sup>2</sup>의 낮은 열유속 구간에서 열전달 실험을 수행하였다. 반면에 본 실험에서는 가로, 세로 각각 9.52 mm의 구리 평판에서 데이터를 취하였다. 실험 결과를 비교해 보면 조그만 구리 평판에서 취한 본 실험 데이터와 Jung et al.<sup>(7)</sup>의 구리 동관 데이터는 5% 내에서 일치함을 알 수 있다. 이 같은 비교를 통해 실험 데이터의 신뢰성을 확인할 수 있었으며 또한 시험부의 형태가 달라지더라도 시험부 표면의 조건, 열유속, 온도 조건 등이 같다면 동일한 비등 열전달계수를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 임계 열유속까지의 전체 구간에서 열유속을 변화시켜가면서 취한 냉매들의 열전달계수를 나타낸다. 높은 열유속에서도 열전달계수는 증기압이 증가할수록 증가하는 전형적인 경향을 보였다. 열전달계수는 증기압이 높은 R32에서 가장 높게 나왔으며 반면에 증기압이 낮은 R123의 열전달계수가 가장 낮게 측정되었다. 이러한 결과로부터 순수냉매의 열전달계수는 포화압력의 영향을 크게 받을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 열유속

Table 2 Deviations of various correlations against the present data

Range	Fluid	Stephan and Abdelsalam <sup>(3)</sup>		Cooper <sup>(4)</sup>		Gorenflo <sup>(5)</sup>		Jung et al. <sup>(8)</sup>	
		Avg.	Mean	Avg.	Mean	Avg.	Mean	Avg.	Mean
0~100 kW/m <sup>2</sup>	R123	-2.9	5.9	13.5	14.2	-0.3	2.6	2.2	3.0
	R152a	-17.9	17.9	49.8	49.8	-6.4	6.4	-2.1	3.9
	R134a	-14.4	14.4	6.9	8.7	-6.2	6.2	-6.1	7.0
	R22	-24.9	24.9	16.2	16.2	-2.9	3.0	-0.7	2.4
	R32	-50.8	50.8	10.6	10.6	-8.5	8.5	-7.8	9.2
	All	-22.2	22.8	19.4	19.9	-4.9	5.4	-2.9	5.1
All	R123	-7.4	9.3	5.0	12.6	-2.0	3.4	0.6	2.7
	R152a	-19.4	19.4	33.2	33.2	-6.1	6.1	-2.9	3.6
	R134a	-11.7	11.7	1.8	4.1	-2.4	4.4	-4.4	5.0
	R22	-17.6	17.6	16.6	16.6	5.8	8.2	3.2	4.5
	R32	-48.3	48.3	4.3	4.5	-7.0	7.0	-16.0	16.3
	All	-20.9	21.3	12.2	14.2	-2.3	5.8	-3.9	6.4

$$\text{Average deviation} = \frac{1}{n} \sum_1^n \left[ \frac{(h_{pre} - h_{exp}) \times 100}{h_{exp}} \right]$$

$$\text{Mean deviation} = \frac{1}{n} \sum_1^n ABS \left[ \frac{(h_{pre} - h_{exp}) \times 100}{h_{exp}} \right]$$

이 크게 증가 하더라도 임계 열유속이 되기 이전의 범위에서는 열전달계수가 낮은 열유속에서와 같이 전형적인 경향을 가짐을 알 수 있다. 이 결과로 기존의 100 kW/m<sup>2</sup> 이하의 조건에서 개발된 상관식이 고열유속에서도 열전달계수를 잘 예측할 것으로 판단된다.

### 3.4 타 연구자와의 상관식 비교

다음 단계로 본 연구에서는 증기압이 다양한 5 가지 냉매에 대하여 임계 열유속까지의 전체 구간에서 취한 실험 결과와 기존 연구자들의 상관식들을 비교해 보았다. Fig. 6~Fig. 9와 Table 2는 Stephan and Abdelsalam,<sup>(3)</sup> Cooper,<sup>(4)</sup> Gorenflo<sup>(5)</sup> 그리고 Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식과 실험 데이터를 비교한 결과를 보여 준다. 0~100 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에서 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>의 상관식은 모든 냉매의 열전달계수를 평균 22.8% 정도 과소평가하였고, Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식은 평균 19.4% 정도 과대평가하였다. 또한, 가장 최근에 발표되어 냉매에 잘 맞는 것으로 알려진 Gorenflo<sup>(5)</sup>와 Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식은 각각 5.4%와 5.1%의 절대 오차를 나타내었다. 한편 임계 열유속까지의 전체 구간에서 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>의 상관식은

모든 냉매의 데이터를 평균 21.3% 정도 과소평가하였고 Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식은 평균 14.2% 정도 과대평가하였다. 반면에 Gorenflo<sup>(5)</sup>와 Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식은 각각 5.8%와 6.4%의 절대 오차를 나타내어 가장 신뢰성이 큰 것으로 나타났다.

현재 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>과 Cooper<sup>(4)</sup>의

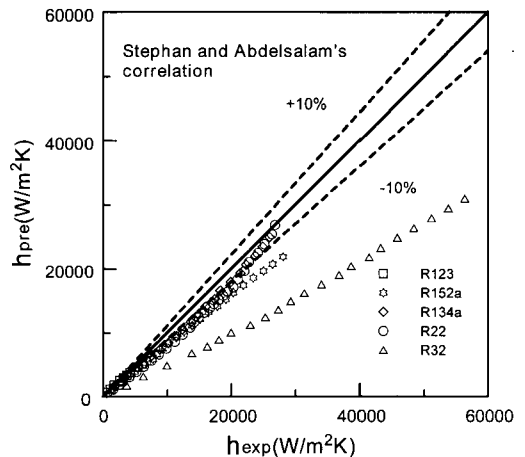


Fig. 6 Comparison of Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>'s correlation against experimental data.



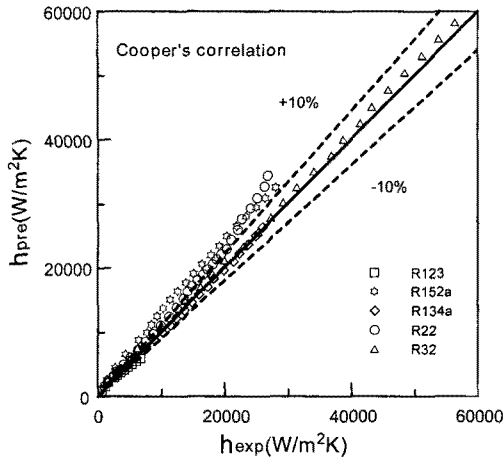


Fig. 7 Comparison of Cooper<sup>(4)</sup>'s correlation against experimental data.

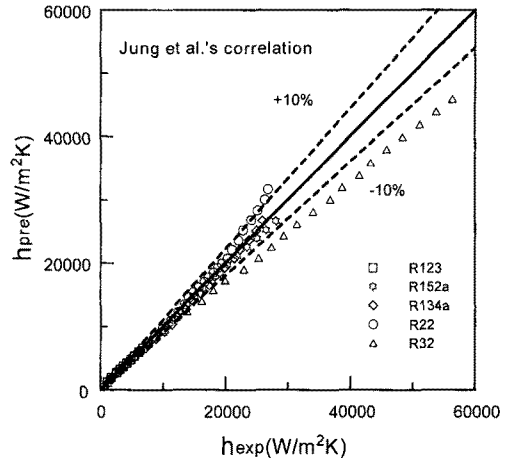


Fig. 9 Comparison of Jung et al.<sup>(8)</sup>'s correlation against experimental data.

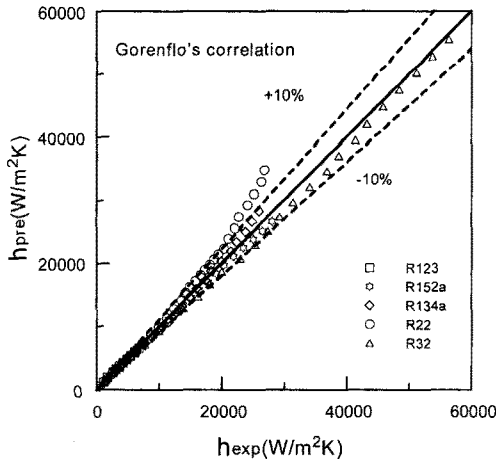


Fig. 8 Comparison of Gorenflo<sup>(5)</sup>'s correlation against experimental data.

상관식이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 최근 관심이 늘고 있는 임계 열유속 근방까지의 실험 결과는 이들의 상관식이 개발될 당시에 사용된 데이터들의 한계로 인해 상대적으로 큰 오차를 나타냄을 보여 준다. 따라서 냉매를 작동유체로 하는 경우 높은 열유속에서는 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>과 Cooper<sup>(4)</sup> 등의 상관식은 실험 데이터와 큰 차이를 보인다. 그러나 Gorenflo<sup>(5)</sup>와 Jung et al.<sup>(8)</sup> 등의 상관식은 비록 100 kW/m<sup>2</sup> 이하의 낮은 열유속 범위에서 취한 데이터를 근간으로 개발되었음에도 불구하고 전체 열유속 구간의 데이

터를 비교적 정확하게 예측하였다.

앞에서 비교한 네 개의 상관식이 열전달계수를 예측하는 데 있어서 큰 차이를 보이는 이유는 풀 비등 열전달계수 상관식에 포함된 중요한 파라미터인 열유속의 지수를 결정하는 방법이 다르기 때문으로 판단된다. Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>과 Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식에서는 열유속의 지수를 작동 유체와 관계없이 모든 유체에 대해 하나의 상수로 고정하여 다양한 유체의 물성치를 반영하지 못한다. 반면에 Gorenflo<sup>(5)</sup>와 Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식은 열유속의 지수를 환원 압력에 대한 함수로 나타내어 증기압이 다양한 여러 유체의 물성치를 잘 반영한 것으로 판단된다. 그 결과 이들의 상관식은 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>과 Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식보다 훨씬 더 정확하게 열전달계수를 예측하는 것으로 사료된다. 상관식에 대한 자세한 분석은 2004년에 Gorenflo et al.<sup>(6)</sup>가 본 연구에서 비교한 네 개의 상관식을 포함해 최근에 잘 알려진 7개의 상관식을 자세하게 비교 분석하여 정리 하였으므로 참고하기 바란다.

이 결과는 높은 열유속에서도 비등 열전달계수가 100 kW/m<sup>2</sup> 이하의 낮은 열유속에서와 비슷하게 전형적인 추세를 나타내기 때문에 여러 물성치의 조합으로 개발된 상관식들이 높은 열유속에서도 비교적 정확하게 데이터를 예측함을 보여 준다. 따라서 반도체 산업 등에서 요구되는 고열유속 냉각 부품 설계 시 Gorenflo<sup>(5)</sup>와 Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식을 사용해도 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 임계 열유속 근방까지 실험을 수행할 수 있는 실험 장치를 제작하여 증기압이 상이한 CFC, HCFC, 그리고 HFC 계열의 대표적인 냉매 5개를 이용해 7 °C에서 풀 비등 열전달 실험을 수행하였고 실험을 통해 얻은 데이터를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 순수 냉매의 열전달계수는 열유속이 증가할수록, 증기압이 증가할수록 증가하는 전형적인 경향을 보였다. 특히 200 kW/m<sup>2</sup> 이상의 고열유속에서도 전형적인 경향이 유지되었다.

(2) Zuber<sup>(12)</sup>의 상관식은 냉매들의 임계 열유속을 21% 이내의 오차 안에서 비교적 정확하게 예측하였다.

(3) 임계 열유속 근방까지의 전체 열유속에서 현재 매우 보편적으로 사용되고 있는 Stephan and Abdelsalam<sup>(3)</sup>의 상관식은 모든 냉매의 열전달계수를 평균적으로 21.3% 과소평가하였고, Cooper<sup>(4)</sup>의 상관식은 평균적으로 14.2% 과대평가하였다. Gorenflo<sup>(5)</sup>와 Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식은 각각 5.8%와 6.4%의 평균 오차를 나타내었다. Jung et al.<sup>(8)</sup>의 상관식은 100 kW/m<sup>2</sup> 이하의 낮은 열유속에서 취한 데이터를 근간으로 만들어졌음에도 불구하고 6.4%의 오차 범위 내에서 임계 열유속까지의 전체 구간에서 모든 냉매의 데이터를 비교적 잘 예측하였다.

#### 후 기

본 연구는 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 특정기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-20055-0).

#### 참고문헌

- Hsu, Y. Y. and Graham, R. W., 1976, Transport Processes in Boiling and Two-Phase System, Hemisphere Publishing Company, Washington, D. C.
- Van Stralen, S. J. D., 1968, The Growth Rate of Vapor Bubbles in Superheated Pure Liquids and Binary Mixtures, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11, pp. 1467-1512.
- Stephan, K., and Abdelsalam, M., 1980, Heat Transfer Correlations for Natural Convection Boiling, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, pp. 73-87.
- Cooper, M. G., 1982, Correlations for nucleate boiling formulation using reduced properties, Physico Chemical Hydrodynamics, Vol. 3, No. 2, pp. 89-111.
- Gorenflo, D., 1984, Pool Boiling. In : VDI Heat Atlas, Chapter Ha.
- Gorenflo, D., Chandra, U., Kottoff, S. and Luke, A., 2004, Influence of thermophysical properties on pool boiling heat transfer of refrigerants, Int. J. of Refrigeration, Vol. 27, No. 5, pp. 492-502.
- Jung, D., Kim, Y., Ko, Y. and Song, K., 2003, Nucleate boiling heat transfer coefficients of pure halogenated refrigerants, Int. J. of Refrigeration, Vol. 26, No. 2, pp. 240-248.
- Jung, D., Lee, H., Bae, D. and Ohc, S., 2004, Nucleate boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants, Int. J. of Refrigeration, Vol. 27, No. 4, pp. 409-414.
- Thome, J. R., 1996, Boiling of new refrigerants : a state-of-the-art review, Int. J. of Refrigeration, Vol. 19, No. 7, pp. 435-457.
- Gorenflo, D., 2001, State of the art pool boiling heat transfer of new refrigerants, Int. J. of Refrigeration, Vol. 24, No. 1, pp. 6-14.
- Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes : chlorine atom catalyzed destruction of ozones, Nature, Vol. 249, pp. 810-812.
- Zuber, N., 1959, Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer, AEC Report no. AECU-4439, Physics and Mathematics.
- Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineer, Vol. 75, pp. 3-8.