

## 탄화수소계 냉매의 풀비등 열전달 상관식 개발

박 기 정, 백 인 철, 정 동 수<sup>†</sup>

인하대학교 대학원, \*인하대학교 기계공학과

### Development of Pool Boiling Heat Transfer Correlation for Hydrocarbon Refrigerants

Ki-Jung Park, In-cheol Baek, Dongsoo Jung<sup>†</sup>

Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received October 5, 2005; revision received February 2, 2006)

**ABSTRACT:** In this work, pool boiling heat transfer coefficients (HTCs) of hydrocarbon refrigerants are measured from a horizontal smooth tube of 19.0 mm outside diameter. Tested pure refrigerants are Propylene, Propane, Isobutane, Butane and Dimethylether (DME). The pool temperature was maintained at saturation temperature of 7°C and heat flux was varied from 10 kW/m<sup>2</sup> to 80 kW/m<sup>2</sup> with an interval of 10 kW/m<sup>2</sup>. Wall temperatures were measured directly by thermocouple hole of 0.5 mm out-diameter, 152 mm long and inserting ungrounded sheathed thermocouples from the side of the tube. Tested results show that HTCs of Propane, Propylene are 2.5%, 10.4% higher than those of R22 while those of Butane and Isobutane are 55.2%, 44.3% lower than those of R22 respectively. For pure refrigerants, new correlation can be applied to all of CFCs, HCFCs, HFCs, as well as hydrocarbons was developed. The mean deviation was 4.6%.

**Key words:** Nucleate pool boiling(핵비등), Heat transfer coefficients(열전달계수), Hydrocarbon refrigerants(탄화수소계 냉매), Flammable(가연성)

#### 기 호 설 명

$A$  : 관표면적 [m<sup>2</sup>]  
 $D$  : 직경 [m]  
 $h$  : 열전달계수 [W/m<sup>2</sup>K]  
 $k$  : 열전도도 [W/mK]  
 $L$  : 관길이 [m]  
 $m$  : 지수값

$P$  : 압력 [kPa]  
 $Q$  : 열량 [W]  
 $T$  : 온도 [K 혹은 °C]

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\mu$  : 점성계수 [Pa·s]  
 $\nu$  : 동점성계수 [m<sup>2</sup>/s]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma$  : 표면장력 [N/m]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7320; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: dsjung@inha.ac.kr

## 하첨자

<i>cal</i>	: 계산치
<i>d</i>	: 기포이탈
<i>exp</i>	: 실험치
<i>f</i>	: 포화액체상태
<i>g</i>	: 포화기체상태
<i>pre</i>	: 이론치
<i>r</i>	: 환원값
<i>sat</i>	: 포화상태
<i>th</i>	: 열전대
<i>w</i>	: 열전달 표면

## 1. 서 론

지난 수십 년 동안 CFC는 뛰어난 화학적 열역학적 특성으로 다양한 냉동기에서 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나 1974년 Molina and Rowland가 처음으로 CFC가 오존층을 파괴한다고 제안한 후, 많은 연구가 진행되었고, 급기야 1987년 CFC 폐기에 관한 몬트리얼의정서가 체결되었다.<sup>(1-2)</sup> 몬트리얼의정서에 따라 1996년부터 선진국의 경우 오존층 파괴물질 대신 HFC나 자연냉매 같은 친환경적인 냉매의 사용을 고려해 왔다.

한편, 최근 오존층 파괴와 더불어 지구 환경문제의 또 다른 쟁점은 지구 온난화 현상이다. 지구 온난화 현상을 줄이기 위해서는 첫째로, 기존 냉매를 환경 친화적인 자연냉매로 전환해야 한다. 탄화수소는 기본적으로 구성원자가 수소와 탄소이어서 자연친화적이고, 화학적으로 안정하다. 또, 탄화수소의 대기 중 수명은 매우 짧으며 독성 역시 매우 낮다. 이러한 장점뿐만 아니라, 기존 냉동 유탄유들과의 호환성 역시 뛰어나다. 둘째, 간접적인 영향을 최소화하기 위하여 에너지 변환기기의 효율을 증대시켜야만 한다. 냉동장치의 중요한 요소 중 하나는 열교환기이다. 열교환기 효율을 증대시킴으로써 냉동시스템의 전체효율을 증대시키고 이는 곧 지구 온난화의 감소를 의미한다.

탄화수소들은 오존층 파괴지수가 0이고 지구 온난화 지수가 3 이하로 매우 낮으므로 환경친화적이다. 열역학적 성질 및 수송계수들을 비교해보면 탄화수소계 냉매들은 HFC 및 HCFC계 냉매에 비해 잠열이 크고 증기밀도 및 액체의 점성이 현저히 낮아서 우수한 열역학 및 열전달 성능

을 제공하므로 앞으로 유망한 대체냉매라고 할 수 있다.<sup>(3)</sup>

탄화수소를 냉매로 사용하는 데 가장 큰 문제점은 가연성이지만 기존의 공조/냉동기들의 대부분이 밀폐식 압축기를 채용하고 있으므로 누출 가능성이 적고 또한 가연성에 대비한 설계를 한다면 위험성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 현재 유럽에서는 탄화수소계 냉매를 냉장고에 적용하여 판매하고 있으며 일본, 한국, 인도, 중국 등도 이런 추세를 따라가고 있다. 또한 유럽에서는 가정용 에어컨이나 히트펌프, 그리고 자판기에 탄화수소계 냉매를 넣은 제품이 널리 홍보되고 판매되고 있다. 따라서 앞으로는 환경친화적인 탄화수소계 냉매 사용이 급격히 늘어날 것으로 전망되며 이에 따라 탄화수소 계열 냉매들의 열전달 특성도 연구되어야 할 것이다.

전 세계적으로 자연냉매에 대한 관심이 증가하고 있는 추세임에도 불구하고, 신뢰성 있는 데이터는 부족한 실정이며, 특히 폴리등의 경우는 아직 체계적으로 열전달계수를 측정하지 않았다. 따라서, 냉동산업에서는 증발기 설계를 위한 이러한 데이터들이 필요할 것이다.

본 연구에서는 순수 탄화수소계 냉매인 Propylene, Propane, Isobutane, Butane과 DME에 대한 실험을 수행하여 폴리등 열전달 특성을 살펴보고, 일반냉매와 탄화수소계 냉매에 같이 적용할 수 있는 순수냉매 상관식을 개발하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 상온에서 다양한 증기압을 갖는 냉매들의 폴리등 열전달계수를 안전하게 측정할 수 있는 실험장치의 개략도를 나타내고, Fig. 2는 비등이 일어나는 열전달 튜브를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 실험장치는 Jung et al.<sup>(4)</sup>이 사용한 것과 동일하므로 본 논문에서는 간단하게 실험장치에 대해 설명하려 한다. 관심이 있는 독자는 Jung et al.<sup>(4)</sup>의 논문을 참고하기 바란다. 실험장치는 크게 비등용기와 응축기로 구성되어 있으며 비등용기는 직경 127 mm, 길이 230 mm의 스테인리스 스틸 파이프 및 플랜지를 사용하여 밀폐형으로 제작하였다. 비등이 발생하는 용기 내의 온

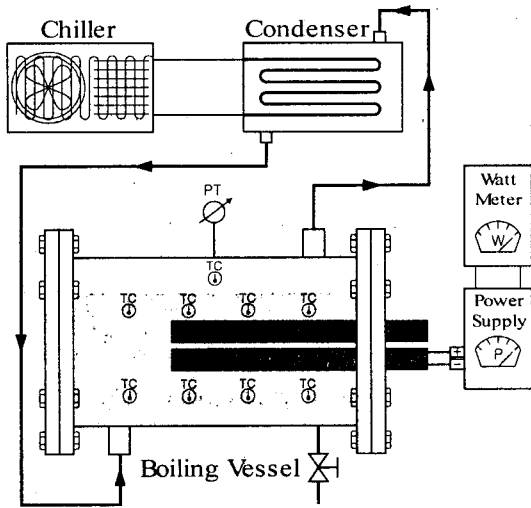


Fig. 1 Schematic diagram of the pool boiling test facility.

도를 정확하게 측정할 수 있는 9개의 열전대를 설치하였다. 그중 8개는 용기 안에 균일하게 설치하였고 나머지 한 개는 용기의 위 부분에 설치하여 기체상의 온도를 측정하였다. 또, 냉매의 과냉 여부를 확인하기 위해 압력을 정확하게 측정할 수 있는 압력 게이지, 그리고 압력 변환계를 설치하였다. 열전대 중 8개는 비등이 발생하는 용기내에 균일하게 응축기는 내부에 설치된 열교환기로 증발된 냉매증기를 액체로 만든 뒤 중력에 의해 다시 비등용기로 순환되도록 설치하였다.

본 연구에서는 카트리지 히터를 증발관에 삽입하여 비등을 발생시키고 열유속을 변화시켰다. 증발관의 표면에 직접 열전대를 부착할 수 없기 때문에 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 두 개의 동관을 접합하여 열전대를 삽입할 수 있도록 증발관을 제작하였다. 액체냉매와 접촉하여 비등이 발생하는 표면의 길이는 152 mm이고 증발관의 양끝에는 외부와의 열전달을 차단하기 위해 열전도도

가 매우 낮은 MC 나일론(Monomer Cast Nylon, MCN)으로 부싱을 만들어 증발관에 끼웠다. 증발관 제작에 대한 보다 자세한 내용은 Lee et al.<sup>(5)</sup>의 연구를 참조하기 바란다.

### 2.2 실험방법

비등 실험에서 무엇보다 중요한 것은 비등용기의 밀폐성 확보와 증발온도 유지이다. 본 실험에서는 질소와 냉매로 비등용기를 20기압까지 충전한 뒤에 할로젠 디텍터로 가스의 누출을 확인하였다. 문제가 없음이 확인되면 진공펌프를 약 두 시간 동안 구동한 뒤 실험할 유체를 충전하였다. 충전이 다 된 후 정밀온도 제어 칩리를 사용하여 냉매의 경우에는 풀 온도를 7°C로 유지하고 카트리지 히터를 조절하여, 열유속 80 kW/m<sup>2</sup>에서 약 한 시간 동안 튜브를 가열하여 튜브 표면의 gas와 불순물을 충분히 제거시킨 후, 열유속 80 kW/m<sup>2</sup>에서부터 실험을 수행한다. 정상상태에서 풀비등 열전달계수를 측정한 다음 열유속을 10 kW/m<sup>2</sup>씩 감소시키면서 최저 열유속 10 kW/m<sup>2</sup>까지 측정한다.

실험이 끝난 후 작동 유체를 빈 용기에 회수한 후 증발관을 분리하고 비등 용기를 분해해 아세톤을 이용해 깨끗이 닦아낸 후 유체를 바꾸어 다시 위의 과정을 반복하여 수행하였다. 또한 비등 열전달계수가 표면 불결 효과의 영향을 크게 받으므로 본 연구에서는 유체를 교체할 때마다 증발관의 표면을 동일한 사포로 균일하게 닦아낸 후 아세톤으로 세척하여 항상 균일한 표면을 유지하며 실험을 수행하였다.

### 2.3 실험데이터의 처리

본 실험의 열전달계수의 계측은 간단한 열역학적인 방법을 사용하여 구하였다. 열전대가 설치된 열전달 표면에서의 국부 열전달계수는 식(1)

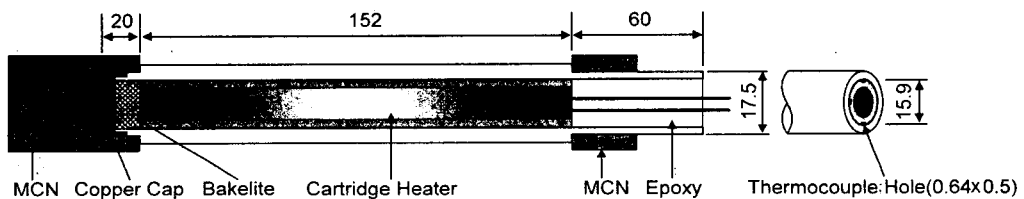


Fig. 2 Cartridge tube specifications (Unit: mm).

에 의해서 결정된다.

$$h = \frac{Q/A}{(T_w - T_{sat})} \quad (1)$$

여기서,  $h$ ,  $A$ ,  $Q$ ,  $T_w$ ,  $T_{sat}$ 는 각각 국부 열전달 계수(W/m<sup>2</sup>K), 열전달 면적(m<sup>2</sup>), 2차 유체인 물이 냉매로 전달한 열량(W), 증발관 표면온도, 그리고 냉매의 포화온도이다. 실제 열전달 튜브의 표면 온도  $T_w$ 는 열전대 삽입구멍으로부터 1 mm 정도 떨어져 있으므로 식(2)와 같은 1차원 열전도방정식으로 보정해 줄 수 있다.

$$T_w = T_{th} - \frac{Q}{2\pi L} \left[ \frac{\ln(D_w/D_{th})}{k} \right] \quad (2)$$

여기서,  $T_{th}$ ,  $L$ ,  $D_w$ ,  $D_{th}$ ,  $k$ 는 각각 열전대로 측정된 온도(°C), 열전달 관의 길이(m), 관의 직경(m), 열전대까지의 직경(m), 증발관의 열전도(W/m·K)이다. 본 실험에서 사용된 열전달 튜브의 재질은 열전도도가 높은 구리로 열전도방정식으로부터 구한  $T_w$ 와 열전대로부터 측정된  $T_{th}$ 의 차이가 거의 없고, 그 값은 열전달계수를 결정하는데 큰 영향을 주지 않으므로 열전대에서 측정된 온도를 실제 열전달 튜브의 벽면온도라고 가정하였다.

본 실험에서 발생하는 실험오차를 계산하기 위해서 Kline and McClintock<sup>(6)</sup>이 제안한 방법을 사용하였다. 오차의 원인은 대부분 정밀도 ±0.1°C인 열전대에서 비롯된 것이며 벽면과 열도가 낮은 저 열유속구간에서는 ±4.3%, 벽면과 열도가 큰 고 열유속구간에서는 ±2.7% 정도의 실험오차를 보여 실험이 매우 정확하게 수행되었음을 알 수 있다. 또한, 실험의 재현율은 5% 이내로 매우 우수하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 순수 탄화수소계 냉매인 Propylene, Propane, Isobutane, Butane과 DME에 대한 평판에서의 풀비등 열전달 실험을 수행하였다. 모든 실험에서 풀 온도는 7°C로 유지하고, 열유속을 80 kW/m<sup>2</sup>에서 10 kW/m<sup>2</sup>씩 감소시키면서 최저 열유속 10 kW/m<sup>2</sup>까지 측정한다. Table 1은 본 연구에서 수행된 5개의 냉매의 물성치를 REFPROP 6.0<sup>(7)</sup>에 의해 구한 값을 나타낸다.

#### 3.1 타 연구자와의 데이터 비교

먼저 실험데이터의 신뢰성을 확인하기 위해 R22의 실험을 수행하였다. Fig. 3은 R22 실험데이터와 Cooper<sup>(8)</sup>와 Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>의 상관식을 각각 비교한 결과를 보여준다. Cooper<sup>(8)</sup>

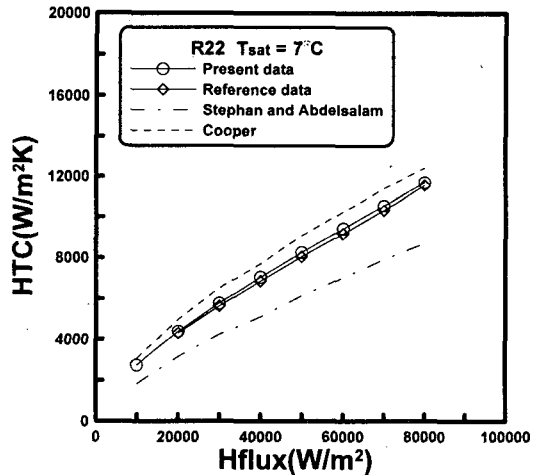


Fig. 3 Comparison of R22 data with Cooper, Stephan and Abdelsalam's correlation.

Table 1 Some properties of tested refrigerants at 7°C

Refrigerant	$P_{sat}$ (kPa)	$P_r$	$T_r$	$k_f$	$k_g$	$\mu_f$	$\mu_g$	$\sigma$ (N/m)
				(W/m·K)		$\times 10^{-6}$ (Pa·s)		
R22	622	0.1245	0.7586	0.0917	0.00991	202.2	11.82	0.01066
Propylene	718	0.1539	0.7663	0.1197	0.01553	124.0	7.286	0.00900
Propane	584	0.1375	0.7575	0.1019	0.01664	117.4	8.041	0.00923
DME	336	0.0626	0.7002	0.1512	0.01518	208.2	7.817	0.01338
Isobutane	199	0.0548	0.6869	0.1036	0.01446	184.1	7.175	0.01220
Butane	134	0.0353	0.6589	0.1140	0.01447	189.0	7.102	0.01397

의 상관식과 실험데이터를 비교해 본 결과, 평균 9.9% 정도 실험데이터를 과대평가하였으며, Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>의 상관식은 평균 27.1% 정도 실험데이터를 과소평가하였다. 본 연구실에서 수행한 과거의 실험데이터와 비교했을 때, 본 실험데이터는 3% 내에서 실험치가 일치하는 것을 확인하고, 이 같은 비교를 통해 실험데이터의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

3.2 평관에서 열전달계수 비교

Fig. 4와 Table 2는 평관에서 열유속에 따른 각 탄화수소계 냉매들의 열전달계수를 나타낸다. 순수 탄화수소계 냉매의 열전달계수도 다른 일반 냉매들과 같이 증기압이 증가할수록 증가하는 전형적인 경향을 보였다. 열전달계수는 증기압이 높은 Propylene과 Propane에서 가장 높게 나왔으며

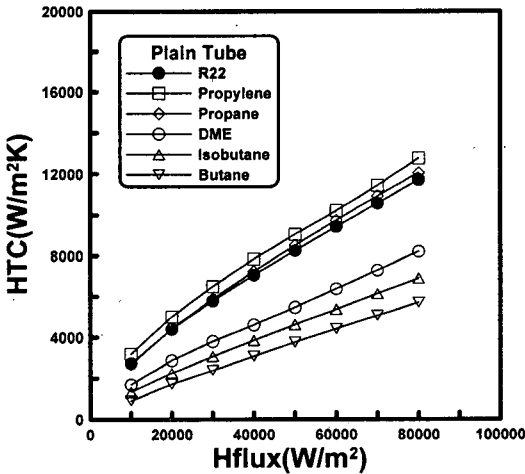


Fig. 4 HTC of tested pure hydrocarbon refrigerants.

R22와 비교하면 Propylene 10.4%, Propane 2.5% 정도 높은 결과를 나타냈다. 반면에 증기압이 낮은 Isobutane과 Butane, 그리고 DME는 각각 44.3%, 55.2%, 32.9% 정도 낮게 나타났다. 이러한 결과로부터 순수냉매의 열전달계수는 포화압력의 영향을 크게 받음을 확인할 수 있었다.

3.3 탄화수소계 냉매에 대한 상관식 개발

본 연구에서는 일반 냉매와 탄화수소계 냉매 모두에 잘 맞는 새로운 상관식을 개발하기에 앞서 기존 연구자의 상관식을 본 연구의 실험데이터에 적용해 보았다. Fig. 5는 Cooper<sup>(8)</sup>와 Stephan and Abdelsalam,<sup>(9)</sup> 그리고 Jung et al.<sup>(10)</sup>의 상관식 결과를 비교한 결과를 보여준다. Cooper<sup>(8)</sup>의 상관식은 모든 탄화수소계 냉매에서 평균 70% 정도 과대평가하였고, Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>

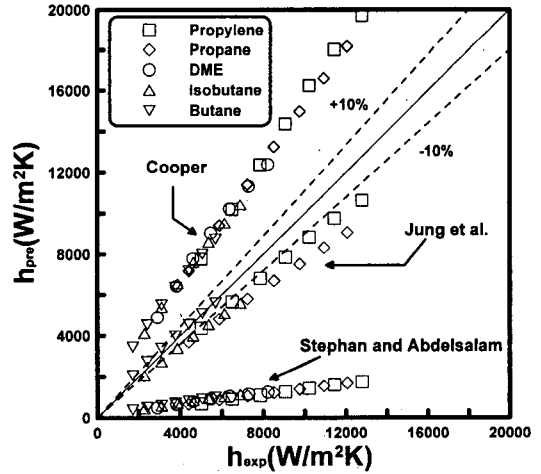


Fig. 5 Comparison between various correlations and the present data.

Table 2 Measured heat transfer coefficients of various refrigerants

Refrigerant	Heat flux (kW/m <sup>2</sup> )							
	10	20	30	40	50	60	70	80
R22	2754	4396	5780	7057	8255	9433	10566	11712
Propylene	3206	5008	6492	7845	9064	10212	11435	12778
Propane	2709	4411	5880	7230	8514	9750	10923	12056
DME	1696	2898	3811	4607	5462	6371	7285	8215
Isobutane	1324	2276	3095	3859	4623	5367	6130	6887
Butane	915	1720	2414	3101	3770	4417	5060	5698

의 상관식은 평균 90% 이내에서 과소평가하였다. 한편, Jung et al.<sup>(10)</sup>의 상관식은 15%의 오차를 나타내었다. Cooper<sup>(8)</sup>와 Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>의 상관식은 현재 매우 보편적으로 사용되고 있으나, 앞으로는 사용할 수 없는 R11, R12, R22 등과 같은 오존층 파괴냉매의 데이터에 근거하여 유도되었기 때문에 장기적으로 관심이 급증하고 있는 탄화수소계 냉매에 대해서는 정확성이 많이 떨어진다. 또한 Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>의 순수 탄화수소계 냉매상관식이 본 연구의 실험데이터를 제대로 예측하지 못함을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 일반 냉매뿐 아니라, 탄화수소계 냉매에도 잘 맞는 새로운 상관식의 개발이 필요하다는 것을 알 수 있다.

식(3)~(5)는 Jung et al.<sup>(10)</sup>의 순수냉매 상관식이다. 일반냉매의 데이터를 기초로 만든 상관식으로 절대 평균 오차 6.5%로 알려져 있다. 그러나, 일반 냉매와 달리 탄화수소계 냉매의 경우 평균 15%의 큰 오차를 나타내었다.

$$h = F(P_r, T_r) \times \frac{k_f}{D_d} \times \left[ \frac{(Q/A)D_d}{k_f T_{sat}} \right]^{m_{cal}} \times \left( \frac{\nu_f}{\alpha_f} \right)^{-0.25} \quad (3)$$

$$F(P_r, T_r) = 10 P_r^{0.1} (1 - T_r)^{-1.4} \quad (4)$$

$$m_{cal} = 0.855 \times \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.309} \times P_r^{-0.437} \quad (5)$$

Jung et al.<sup>(10)</sup>의 상관식은 일반 냉매의 실험데이터를 기초로 만들었기 때문에 탄화수소계 냉매에 대해서는 일반 냉매에 비해서 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

이에 본 연구에서는 탄화수소계 냉매의 경우 일반냉매와 물성치가 비슷하다는 점에 착안하여 본 연구에서는 Cooper<sup>(8)</sup>가 제시한 무차원수와, Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>이 사용한 회귀분석법을 이용하여 일반 냉매와 탄화수소계 냉매 모두에 적용할 수 있는 순수냉매 상관식을 개발하였다. 식(6)~(7)은 새로 개발된 상관식을 나타낸다. 일반냉매 4.7%, 탄화수소계 냉매 3.4%, 평균 4.6%의 절대 평균 오차로 5% 이내에서 정확히 예측함을 확인할 수 있었다. Fig.6은 새로운 상관식에 적용된 결과를 나타내었다.

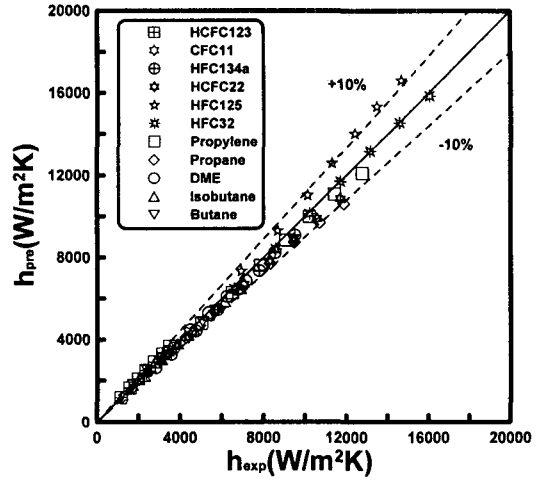


Fig. 6 Comparison of pure data with new correlation.

$$h = 41.4 \times \frac{k_f}{D_d} \times \left[ \frac{(Q/A)D_d}{k_f T_{sat}} \right]^{m_{cal}} \times (-\log P_r)^{-1.52} \times \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.53} \quad (6)$$

$$m_{cal} = 0.835 \times (1 - P_r)^{1.33} \quad (7)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 순수 탄화수소계 냉매인 Propylene, Propane, Isobutane, Butane과 DME에 대한 평판에서의 풀비등 열전달 실험을 수행하여 열전달계수를 측정하였다. 본 실험을 통해 얻은 데이터를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 순수 탄화수소계 냉매의 열전달계수는 증기압이 증가할수록 증가하는 전형적인 경향을 보였다. 특별하게 다른 현상은 본 실험에서 관찰되지 않았다.

(2) 현재 보편적으로 사용되고 있는 Cooper<sup>(8)</sup>의 상관식은 모든 탄화수소계 냉매에서 평균 70% 정도 과대평가하였고, Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>의 상관식은 평균 90% 이내에서 과소평가하였다. 한편, Jung et al.<sup>(10)</sup>의 상관식은 15%의 오차를 나타내었다.

(3) 측정된 열전달계수를 기존 상관식에 적용시켜 비교해 보았고, 새롭게 일반냉매와 탄화수소

계 냉매에 모두 적용 가능한 새로운 순수냉매 상관식을 개발하였다. 먼저 순수 탄화수소계의 경우 기존 상관식에 넣었을 때 평균 15%의 오차가 발생하였으나, Cooper<sup>(8)</sup>의 무차원 변수와 Stephan and Abdelsalam<sup>(9)</sup>의 회귀분석법을 이용하여 만든 새로운 상관식을 적용했을 때 절대 평균 3.4%로 오차가 많이 줄었다. 아울러 새로운 상관식은 기존의 일반냉매에도 적용가능하며 전체적으로 절대 평균 오차 4.6%이다.

## 후 기

본 연구를 위해 지원해 주신 인하대학교와 인하대학교 대학원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozones, *Nature*, Vol. 249, pp. 810-812.
2. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer, 1989, Final Act, United Nations Environment Programme.
3. Kruse H., 1996, The stats of the art of the hydrocarbon technology in household refrigeration, *Proc. of the Int. Conferences on Ozone Protection Technologies*, Washington, DC, pp. 179-188.
4. 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.
5. Lee, J. K., Ko, Y. H., Song, K. H., Jung, D. S. and Kim, C. B., 1998, Pool boiling heat transfer coefficients of alternative refrigerants in enhanced tubes, *Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 22, No. 7, pp. 293-294.
6. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineer*, Vol. 75, pp. 3-8.
7. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, NIST thermodynamics and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures, REFPROP version 6.0.
8. Cooper, M. G., 1982, Correlations for nucleate boiling formulation using reduced properties, *Physico Chemical Hydrodynamics*, Vol. 3, No. 2, pp. 89-111.
9. 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.
10. 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.