

탄소나노튜브 사용 풀비등 열전달 촉진

박 기 정, 정 동 수*

인하대학교 대학원, *인하대학교 기계공학과

Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer Coefficients with the Use of Carbon Nanotubes

Ki-Jung Park, Dongsoo Jung*

Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

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

(Received September 27, 2005; revision received August 5, 2006)

ABSTRACT: In this study, the effect of carbon nanotubes (CNTs) on boiling heat transfer is investigated. Three refrigerants of R22, R123, R134a, and water are used as base working fluids and 1% of CNTs by volume is added to the base fluids to study the effect of CNTs. All data are obtained at the pool temperature of 7°C for all refrigerants and 100°C for water in the heat flux range of 10~80 kW/m². Test results show that CNTs increase the boiling heat transfer coefficients for all fluids. Especially, large enhancement was observed at low heat fluxes. With increasing heat flux, however, the enhancement was suppressed due to vigorous bubble generations. Fouling was not observed during the course of this study. Optimum quantity and type of CNTs and their dispersion should be examined for their application in pool boiling heat transfer.

Key words: Pool boiling heat transfer(비등 열전달), Heat transfer coefficients(열전달계수), Carbon nanotubes(CNTs, 탄소나노튜브)

기 호 설 명

하첨자

A : 열전달 면적 [m²]
D : 지름 [m]
h : 열전달계수 [W/m²·K]
k : 열전도도 [W/m·K]
L : 관 길이 [m]
P : 압력 [kPa]
q : 열량 [W]
T : 온도 [K 혹은 °C]

avg : 평균값
bottom : 관 아랫면
o : 관 외경
sat : 포화상태
side : 관 옆면
th : 열전대
top : 관 윗면
wall : 관 표면

† Corresponding author

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

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

1. 서 론

21세기에 들면서 화석연료 사용으로 인한 지구

온난화 문제가 기후변화 등과 연계되면서 에너지 효율 증대와 환경 및 에너지 보존이 초미의 관심사로 떠오르고 있다. 지구 온난화를 줄일 수 있는 근본적인 방안 중 하나는 대규모 발전소의 보일러, 냉동/공조기의 증발기, 각종 산업용 및 가정용 열교환기에서 작동유체로 쓰이는 물, 냉매 등의 2상 비등 열전달 향상을 이루는 것이다.

비등 열전달은 효과가 좋기 때문에 지금까지 여러 종류의 열방출시스템에 적용되어 왔고 이에 대한 연구도 많이 수행되어 왔다. 또한 매끈한 표면에서의 비등 열전달을 더욱 향상시키기 위해 몇몇 파동적 비등 열전달 향상기구가 도입되었다. 특별히 낮은 핀관(Low fin tube), Thermo-Excel-E 축진관, Turbo-B 축진관, Turbo-C 축진관 등 여러 종류의 표면형상을 가진 열전달 축진관이 다양한 열교환기에 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 그러나, 이러한 파동적 열전달 향상방법은 이제 더 이상 발전할 가능성이 적으므로 지구 환경문제를 완화시키기 위해서는 파동적 축진관의 성능을 능가하는 새로운 열전달 축진기술을 개발하여야 한다. 이런 방법들 중에서 전기장을 열전달 표면에 적용하여 열전달 촉진을 이루는 EHD(electrohydro-dynamic) 방법이 거론되고 연구가 진행되었으나 단일 튜브가 아닌 실제 열교환기에 전기장을 적용하는 일은 어려움이 많아 상용화되지 못하고 있다.⁽²⁾

이러한 문제를 해결할 수 있는 방안 중 하나로서 지난 10년 동안 나노입자를 사용하는 열전달 촉진방법이 거론되어 왔으며,⁽³⁻⁴⁾ 이런 목적으로 주로 열전도도가 높은 구리나 알루미늄을 기반으로 하는 나노입자들이 개발되었다. 이런 입자들은 주로 물을 유체로 하는 단상유동 열전달에 적용되었으나 실제로 열전달 촉진이 이루어진 결과는 보고되지 않고 있다. 또한 이러한 나노입자를 물의 풀비등 열전달에 적용하여 데이터를 측정할 결과 오히려 이런 나노입자가 표면에 부착되어 표면 불결효과를 일으켜 비등 열전달계수를 감소시키는 것으로 나타났다.⁽⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 기존의 나노입자 대신 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNTs)를 적용하여 물과 몇몇 냉매의 풀비등 열전달 향상을 살펴보려 한다. 탄소원자들이 육각형 벌집 모양의 원통형 분자구조를 가지고 있는 탄소나노튜브는 특이한 분자구조로 인하여 탁월한 기계적, 전기적, 열적, 광학적 성질을 보유하고 이에 미래 소재로서 주목

을 받고 있다.⁽⁸⁻⁹⁾ 탄소나노튜브는 방사체(emitter), 전계방출 디스플레이(field emission display), 2차 배터리, 연료전지, 수소저장, 센서 등의 IT 관련 산업과 메카트로닉스, 나노와이어, 나노캡슐, 나노팁 등의 NT 관련 산업에서 응용이 가능하여 최근 들어 이런 분야에서의 탄소나노튜브 응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁰⁾ 이런 분야에서의 대부분 연구는 나노시스템에 나노물질의 특성을 살리려는 것을 목표로 하지만 본 연구에서는 매크로 시스템에서 나노입자의 특성을 살피는 것을 목표로 한다.

열전달과 관련하여 탄소나노튜브의 중요한 특성 중 하나는 탄소나노튜브의 열전도도가 금의 열전도도의 10배나 되어 열적으로 초전도체라는 점이다.⁽⁸⁻⁹⁾ 본 연구에서는 탄소나노튜브가 기포의 생성에 어떠한 영향을 미치는지 또 표면 불결효과가 발생하여 열전달 성능이 감소하는지 등을 거시적으로 살펴보고 앞으로의 연구방향을 제시하려 한다. 이를 위해 특별히 물과 기존의 냉매기에 사용되는 몇몇 냉매를 작동유체로 선정하여 풀비등 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 상온에서 다양한 증기압을 갖는 냉매들과 물의 풀비등 열전달계수를 안전하게 측정할

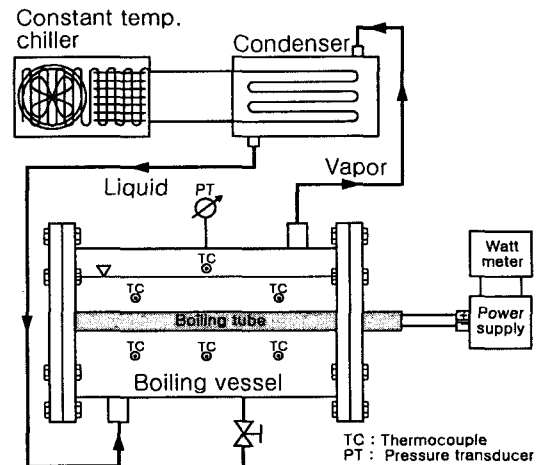


Fig. 1 Schematic diagram of the test facility.

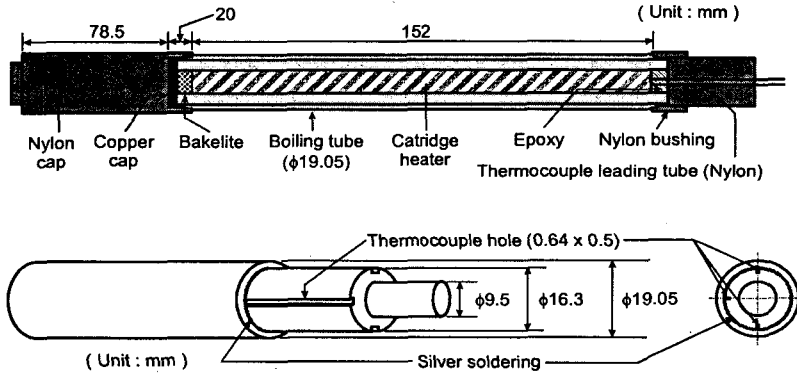


Fig. 2 Cartridge tube specifications.

수 있는 실험장치의 개략도이다. 본 연구에서 사용한 실험장치는 Jung et al.⁽¹¹⁾이 사용한 것과 동일하므로 본 논문에서는 간단하게 실험장치에 대해 설명하려 한다. 관심이 있는 독자는 Jung et al.⁽¹¹⁾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 온도 및 압력을 정확하게 측정하기 위해 6개의 열전대와 압력 게이지, 그리고 압력 변환계를 설치하였다. 응축기는 내부에 설치된 열교환기로 증발된 냉매 증기를 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 열전도도가 매우 낮은 MC 나일론(Monomer Cast Nylon, MCN)으로 부싱을 만들어 증발관에 끼웠다. 증발관 제작에 대한 보다 자세한 내용은 Lee et al.⁽¹²⁾의 연구를 참조하기 바란다.

2.2 실험방법

비등실험에서 무엇보다 중요한 것은 비등용기의 밀폐성 확보와 증발온도 유지이다. 본 실험에

서는 질소와 냉매로 비등용기를 20기압까지 충전한 뒤에 할로젠 디텍터로 가스의 누출을 확인하였다. 문제가 없음이 확인되면 진공펌프를 약 두 시간 동안 구동한 뒤 실험할 유체를 충전하였다. 유체를 충전하기 전에 유체의 충전량을 미리 계산하여 부피비로 1.0%의 탄소나노튜브를 미리 밸브 안에 삽입하여 유체 충전시 같이 충전이 되도록 하였다. 충전이 다 된 후 정밀온도 제어 칩터를 사용하여 냉매의 경우에는 풀온도를 7°C로 유지하고 물의 경우에는 100°C로 유지한 뒤 카트리지 히터를 조절하여, 열유속 80 kW/m²에서 약 한 시간 동안 튜브를 가열하여 튜브 표면의 가스 및 불순물을 충분히 제거시킨 후, 열유속 80 kW/m²에서부터 실험을 수행한다. 정상상태에서 풀비등 열전달계수를 측정된 다음 열유속을 10 kW/m²씩 감소시키면서 최저 열유속 5 kW/m²까지 측정한다.

실험이 끝난 후 작동유체를 빈 용기에 회수한 후 증발관을 분리하고 비등용기를 분해해 아세톤을 이용해 깨끗이 닦아낸 후 유체를 바꾸어 다시 위의 과정을 반복하여 수행하였다. 또한 비등 열전달계수가 표면 불결효과의 영향을 크게 받으므로 본 연구에서는 유체를 교체할 때마다 증발관의 표면을 2,000 ps의 동일한 사포로 균일하게 닦아낸 후 아세톤으로 세척하여 항상 균일한 표면을 유지하며 실험을 수행하였다. 실험의 반복성을 확인하기 위해 본 연구실에서 기존에 R22에 대해서 수행한 실험결과를 이용하였다. 기존에 사용한 것과 동일한 수평관을 이용해 실험을 수행한 후 오차범위 3% 이내의 동일한 결과가 나올 경우에 본 실험을 수행하여 실험 데이터를 취하였다.

2.3 탄소나노튜브 적용

본 실험에서는 다중벽 구조로 된 형태(Multi-walled Carbon Nanotube)로 길이는 1 μm 이고 직경이 20 nm인 탄소나노튜브 사용하여 실험을 수행하였다.

탄소나노튜브를 비등실험에 적용한 사례가 거의 없으므로 어느 정도의 양을 넣어야 할지 예측하기 어려워 작동유체 체적의 1.0%를 넣고 실험을 진행하였다. 탄소나노튜브가 제대로 작동하려면 분산이 제대로 이루어져야 하지만 본 연구에서는 일단 다른 분산첨가제 등을 넣지 않고 단순히 작동유체와 탄소나노튜브만을 섞어서 실험을 수행하였다.

2.4 실험결과와 처리 및 신뢰성

열전대가 설치된 증발관의 국부 열전달계수는 식(1)에 의해 계산된다.

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

여기서 h , A , q 는 각각 국부 열전달계수($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), 열전달 면적(m^2) 그리고 카트리지 히터로부터 전달되는 열량(W)이다. 실제 증발관 표면의 온도 T_{wall} 은 열전대 삽입구멍으로부터 1 mm 정도 떨어져 있으므로 식(2)과 같은 1차원 열전도방정식으로 보정해 줄 수 있다.

$$T_{wall} = T_{th} - \frac{q/A}{2\pi L} \left[\frac{\ln(D_o/D_{th})}{k} \right] \quad (2)$$

여기서 T_{th} , L , D_o , D_{th} , k 는 각각 열전대로 측정된 온도($^{\circ}\text{C}$), 열전달 관의 길이(m), 관의 직경(m), 열전대까지의 직경(m), 증발관의 열전도도($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)이다. 본 실험에서 사용한 증발관은 열전도도가 높은 구리관으로서 보정값 T_{wall} 와 측정값 T_{th} 의 차이가 거의 없으므로 열전대의 측정값을 벽면의 온도라고 가정하여 열전달계수를 결정했다.

최종적으로 평균 열전달계수는 식(1)을 이용하여 위, 아래, 옆면의 국부 열전달계수를 결정한 뒤 식(3)의 산술 평균식으로 평균 열전달계수를 구하였다.

$$h_{avg} = \frac{h_{top} + 2h_{side} + h_{bottom}}{4} \quad (3)$$

본 실험 중에서 발생하는 측정오차를 계산하기 위해 Kline and McClintock⁽¹³⁾이 제안한 방법을 사용하였다. 오차의 원인은 대부분 정밀도 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 인 열전대에서 비롯되었으며 벽면 과열도가 낮은 열유속에서는 $\pm 5.4\%$, 높은 열유속에서는 $\pm 2.0\%$ 의 실험오차를 보였다. 또한 실험의 재현율은 5% 이내로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 평관에 대해서 증기압이 상이한 R22, R123, R134a 냉매와 물에 탄소나노튜브를 1.0% 부피비로 혼합하여 풀비등 열전달 실험을 수행하였다. 모든 시험에서 풀의 온도는 냉매의 경우 7°C 로, 물의 경우 100°C 로 유지하였고 열유속은 $10 \sim 80 \text{ kW}/\text{m}^2$ 사이에서 $10 \text{ kW}/\text{m}^2$ 씩 변화시켜 가면서 열전달계수를 측정하였다.

3.1 실험결과와 상관식의 비교

Fig. 3은 본 실험데이터의 신뢰성을 확인하기 위해 본 실험장치를 이용하여 평관에서 측정된 R22의 열전달계수와 문헌에서 많이 인용되고 있는 Stephan and Abdelsalam,⁽¹⁴⁾ Cooper,⁽¹⁵⁾ 그리고

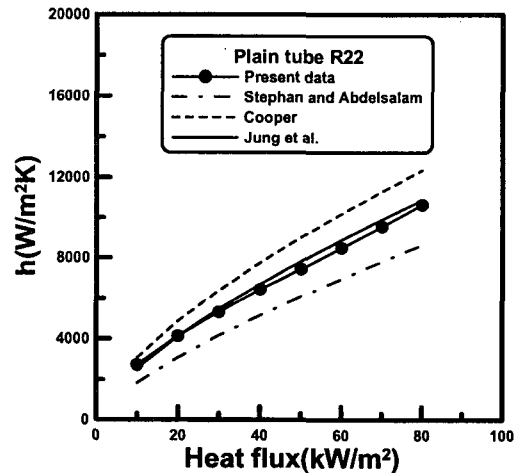


Fig. 3 Comparison of test result for R22 with some correlations.

Jung et al.⁽¹¹⁾의 상관식을 비교한 결과를 보여준다. 본 실험데이터는 20% 내에서 기존 연구자들의 상관식과 일치한다. Jung et al.⁽¹¹⁾은 기존 연구자들의 상관식의 문제점을 확인하고 8개의 순수냉매의 데이터를 취해 이것들을 바탕으로 상관식을 도출하였다. Fig. 3에서 보듯이 R22 데이터와 상관식은 매우 잘 일치하고 있으며 R123, R134a 데이터도 역시 기존 상관식과는 20% 이내에서 Jung et al.⁽¹¹⁾의 상관식과는 5% 이내에서 잘 일치하고 있다. 물의 경우에도 가장 널리 알려진 Stephan and

Abdelsalam⁽¹⁴⁾의 상관식과 9% 내에서 일치하고 있다.

3.2 평관에서의 탄소나노튜브 적용시 풀비등 열전달계수 비교

Figs. 4~7은 본 연구에서 측정한 R22, R123, R134a, 그리고 물의 풀비등 열전달계수와 탄소나노튜브를 부피비로 1.0% 첨가한 경우의 풀비등 열전달계수를 보여준다. Table 1은 열유속이 20,

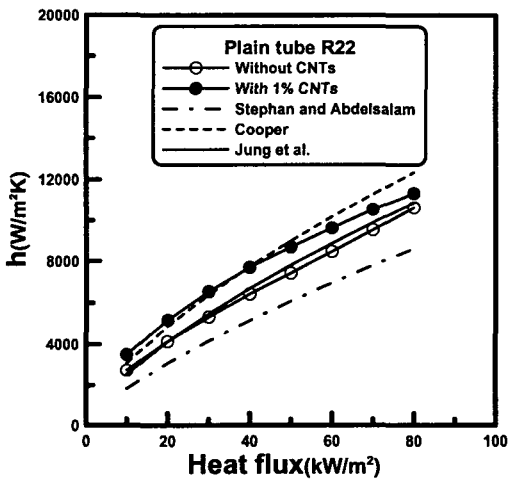


Fig. 4 Boiling heat transfer coefficients with 1% CNTs for R22 on a plain tube.

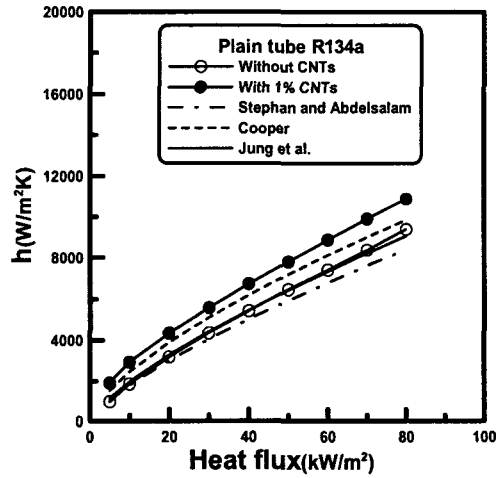


Fig. 6 Boiling heat transfer coefficients with 1% CNTs for R134a on a plain tube.

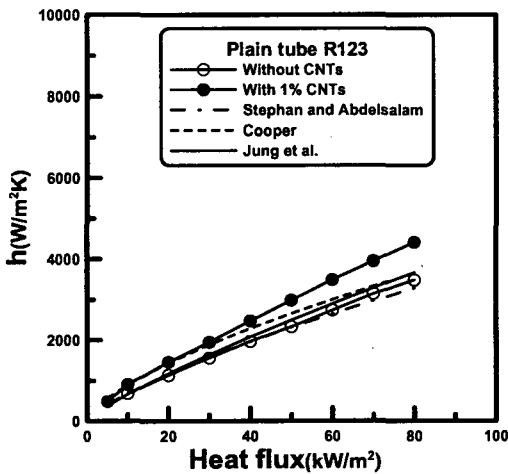


Fig. 5 Boiling heat transfer coefficients with 1% CNTs for R123 on a plain tube.

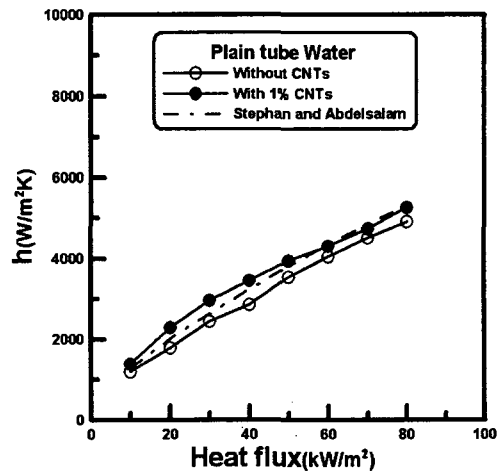


Fig. 7 Boiling heat transfer coefficients with 1% CNTs for Water on a plain tube.

Table 1 Increase in heat transfer coefficients with the use of CNTs for various fluids

Refrigerant	T_{sat} ($^{\circ}\text{C}$)	P_{sat} (kPa)	Heat flux (kW/m^2)	HTCs of pure fluids	HTCs with 1% CNTs	Enhancement (%)
R22	7	621.5	20	4145	5169	24.7
			60	8494	9639	13.5
R123	7	44.5	20	1136	1461	28.6
			60	2747	3493	27.1
R134a	7	374.6	20	3184	4349	36.6
			60	7421	8888	19.8
Water	100	101.3	20	1784	2296	28.7
			60	4049	4302	6.3

60 kW/m^2 일 때 탄소나노튜브를 넣은 경우 각 유체의 열전달 향상률을 보여준다. 모든 유체에 대해 탄소나노튜브를 첨가하면 풀비등 열전달계수가 증가하는 것으로 나타났고, 특별히 낮은 열유속에서는 약 37%까지 크게 증가했다. 그러나 모든 유체에 대해 열유속이 증가하면 열전달 촉진이 줄어들었다. 특별히 이 같은 열전달 촉진 감소현상은 물에서 가장 두드러지게 나타나서 80 kW/m^2 에서는 탄소나노튜브를 사용한 경우 열전달계수가 7% 정도 상승하는 것으로 나타났다.

이것을 종합해 보면 열유속이 낮은 경우 기포의 발생이 적으며 이때에는 열전도도가 높은 탄소나노튜브가 직접 열경계층에 닿거나 경계층을 교란시켜 상당한 열전달 향상을 이루는 것으로 보인다. 반면에 열유속이 증가하면 기포의 발생 빈도가 증가하고 따라서 탄소나노튜브가 직접 열경계층에 닿으면서 열전달 상승을 일으키는 확률이 적게 됨을 알 수 있다. 따라서 냉동/공조기와 같이 실제 열유속이 30 kW/m^2 이하인 경우에는 소량의 탄소나노튜브를 넣었을 때 상당한 열전달 상승이 예상되지만 핵발전소 등과 같이 열유속이 높은 사례에서는 탄소나노튜브로 인한 열전달 상승효과가 그리 크지 않을 것으로 예상된다. Fig. 8은 모든 열유속에서의 평균 열전달계수 향상률을 보여준다. 냉매의 경우 18~35%, 물의 경우 15% 정도 평균적으로 열전달계수가 상승하였음을 알 수 있다.

2003년에 You and Kim⁽¹⁶⁾은 Al_2O_3 나노입자를 물에 첨가하여 물의 임계 열유속을 200% 증대시킬 수 있음을 보였다. 본 실험장치는 임계 열유속에서 실험을 할 수 없으므로 이것을 규명할

수 없었지만 풀비등 결과를 보면 탄소나노튜브의 경우에도 기포가 거의 보이지 않는 막비등(film boiling) 상태의 임계 열유속 근처에서 입자 자체가 열경계층을 교란시킬 것으로 추정되므로 핵발전소의 안전 증대를 위해 이에 대한 연구가 필요하다.

한편 기존의 다른 나노입자와는 달리 탄소나노튜브는 표면 불결현상이 생기지 않는 것으로 드러났다. 몇 차례 동일조건에서 2~3주의 기간 동안 실험을 했으나 열전달계수가 거의 비슷하게 측정되었다. 이것은 탄소나노튜브와 금속 간의 친화성 문제인데 기존의 구리나 알루미늄 나노입자의 경우 금속과의 친화성이 좋아서 입자들이 표면에 달라붙지만 탄소나노튜브의 경우는 그런 친

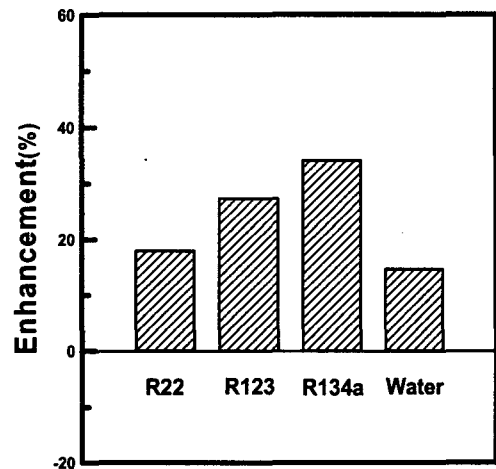


Fig. 8 Heat transfer enhancement with 1% CNTs for various fluids.

화성이 낮아 표면에 침착되지 않은 것으로 보인다. 그러나 실제로 장기적으로 탄소나노튜브가 사용될 때 표면 불결효과가 어떻게 생길지는 장기적인 실험을 통해 살펴보는 수밖에 없다.

마지막으로 탄소나노튜브의 양에 대해서도 열전달 촉진을 일으키는 데 필요한 적정량이 있을 것으로 추정된다. 본 연구에서는 부피비가 1.0%에서 실험을 했으나 부피비가 0.5%에서 실험한 경우에도 거의 차이를 발견할 수 없었다. 따라서 앞으로 체계적인 연구를 통해 최적의 부피비를 찾아내야 한다. 또한 본 연구에서는 탄소나노튜브의 분산에 대해서도 크게 신경을 쓰지 않았다. 그러나 실제로 모든 나노 입자의 경우 열전달 촉진을 일으키는 데 분산이 매우 중요하다. 따라서 이에 대한 연구도 동시에 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 평판에서 증기압이 다른 R22, R123, R134a 냉매와 물을 작동유체로 해서 탄소나노튜브(CNTs)를 부피비로 1.0% 넣은 경우 풀비동 열전달계수가 얼마나 상승되는가를 살펴보았다. 모든 데이터는 냉매의 경우 풀의 온도를 7℃로, 물의 경우 100℃로 유지한 채 수집되었고 열유속은 10~80 kW/m²에서 10 kW/m²로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 본 실험을 통해 얻은 데이터를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 탄소나노튜브를 사용한 경우 모든 유체에 대해 열전달계수가 상승했다. 특히 낮은 열유속에서는 탄소나노튜브를 적용한 경우 열전달계수가 37%까지 향상되었다. 그러나 열유속이 증가하면 열전달계수 상승이 줄어들었다.

(2) 탄소나노튜브의 경우 표면 불결현상이 목격되지 않았지만 상업용으로 쓰일 경우 이에 대한 장기적 연구가 필요하다.

(3) 탄소나노튜브의 최적 양과 분산효과에 대한 연구가 필요하며, 또한 다른 종류의 탄소나노튜브에 대한 연구도 장기적으로 필요하다.

후 기

이 논문은 2005년도 한국 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2005-202-D00066).

참고문헌

1. Webb, R. L., 1994, Principles of enhanced heat transfer, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 293-294.
2. Ohadi, M. M., 1991, Electrohydro-dynamic (EHD) enhancement of heat transfer in heat exchangers, ASHRAE Journal, Dec.
3. Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Thompson, L. J. and Lee, S., 1997, Enhanced thermal conductivity through the development of nano-fluids, Proc., Symposium on Nanophase and Nanocomposite materials II, Materials Research Society, Boston, Vol. 457, pp. 3-11.
4. Lee, S., Choi, U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, ASME J. Heat Transfer, Vol. 121, pp. 280-289.
5. Das, S. K., Putra, N. and Roetzel, W., 2003, Pool boiling characteristics of nano fluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 46, pp. 851-862.
6. Vassallo, P. V., Kumar, R. and D'Amico, S., 2004, Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano fluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 407-411.
7. Bang, I. C. and Chang, S. H., 2004, Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano fluids from a plain surface in a pool, Pro. ICAPP, pp. 1-7.
8. Ajayan, P. M., 1999, Nanotubes from carbon, Chem. Rev., Vol. 99, pp. 1787-1799.
9. Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. and Avouris, P., 2001, Carbon nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications, Eds., Springer, New York, Vol. 80.
10. Baughman, R. H., Zakhidov, A. A. and de Heer, W. A., 2002, Carbon nanotubes - the Route Toward Applications, Science, 297, 787.
11. 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.
12. 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.
13. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineer, Vol. 75, pp. 3-9.
14. Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1980, Heat transfer correlations for natural convection boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 73-87.
15. Cooper, M. G., 1982, Correlations for nucleate boiling formulation using reduced properties, PCH, Vol. 3, No. 2, pp. 89-111.
16. You, S. M. and Kim, J. H., 2003, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, Applied Physics Letter, Vol. 83, pp. 3374-3376.