

나노유체를 냉각유체로 사용하는 마이크로채널 히트 싱크의 냉각효율

장 석 필[†]

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids

Seok Pil Jang[†]

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Hankuk Aviation University, Goyang 412-791, Korea

(Received March 16, 2005; revision received July 13, 2005)

ABSTRACT: In this paper, the cooling performance of a microchannel heat sink with nano-particle-fluid suspensions ("nanofluids") is numerically investigated. By using theoretical models of thermal conductivity and viscosity of nanofluids that account for the fundamental role of Brownian motion respectively, we investigate the temperature contours and thermal resistance of a microchannel heat sink with nanofluids such as 6nm copper-in-water and 2nm diamond-in-water. The results show that a microchannel heat sink with nanofluids has high cooling performance compared with the cooling performance of that with water, the classical coolant. Nanofluids reduce both the thermal resistance and the temperature difference between the heated microchannel wall and the coolant.

Key words: Nanofluids(나노유체), Microchannel heat sink(마이크로채널 히트 싱크), Thermal resistance(열저항)

기 호 설 명

C_p : 비열 [kJ/kgK]

$C_{R.M.}$: 나노입자의 random 속도 [m/sec]

C_T : 나노입자의 translation 속도 [m/sec]

d : 지름 [m]

D : 특성길이 [m]

D_o : Einstein diffusion 계수 [m²/sec]

f : 부피비

h : 열전달계수 [W/m²K]

k : 열전도도 [W/mK]

k_b : Boltzmann 상수 [J/K]

l : 평균 자유경로 [m]

m : 질량 [kg]

p : 압력 [Pa]

PP : pumping power [W]

Pr : Prandtl 수

q : 열량 [W]

Re : Reynolds 수

T : 온도 [K]

u : x축 방향 속도 [m/sec]

w : 채널 폭과 벽 두께의 합 [m]

wc : 채널 폭 [m]

그리스 문자

β : Kapitza 저항상수

μ : 점성계수 [Nsec/m²]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-300-0112; fax: +82-2-3158-2191

E-mail address: spjang@hau.ac.kr

θ : 열저항 [K/W]
 ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

BF : Base 유체
eff : 나노유체
f : 유체
nano : 나노입자

1. 서 론

나노입자 제조기술의 발달로 1996년 미국 Argonne National Lab에 있는 Dr. Stephen U.S. Choi에 의해서 처음 제시된 나노입자를 사용한 새로운 형태의 열수송 유체인 나노유체에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ Fig. 1은 2004년까지 나노유체의 연구동향을 보여주고 있다.⁽⁷⁾

나노유체란 일반 유체에 나노입자를 균일하게 분산(dispersion), 부유(suspension)시켜서 만든 유체이다.⁽¹⁾ 나노유체에 사용된 나노입자의 크기는 10~50 nm이며 현재까지 사용되는 나노입자의 종류는 Al₂O₃, CuO, Cu, Pt, Au, 단층구조 나노튜브, 다층구조 나노튜브이며 유체에 대한 나노입자의 부피비는 1% 미만을 사용하고 있고 있다.

실험적으로 발견된 나노유체의 열적 특성을 정리하면 다음과 같다. 첫번째는 일반 유체의 부피에 대한 소량의 부피비를 가지는 나노입자를 일반 유체에 첨가하더라도 나노유체의 열전도도가 10% 정도 향상된다는 것이다.⁽¹⁻⁵⁾ 첫번째 현상은

나노유체가 새로운 형태의 열수송 유체로 대두될 것이라는 의견을 뒷받침해 주는 주된 연구결과이다. 두번째는 나노유체의 열전도도가 온도변화에 따라 급격히 상승한다는 것이다.⁽⁴⁾ 이 특성은 나노유체를 냉각유체로 사용할 경우 나노유체의 온도가 증가할수록 열전도도가 증가되어 열전달률을 상승시킬 수 있다는 것이다. 세번째는 나노입자의 크기가 작아질수록 열전도도가 상승한다는 것이다.⁽⁵⁾ 이 결과는 나노크기의 두께를 가지는 박막의 열전도도 특성과는 반대되는 현상이다. 즉, 나노박막에서는 두께가 작아질수록 열전도도가 작아지는데 나노유체에서는 나노입자의 크기가 작아질수록 열전도도가 커진다는 것이다. 마지막 현상은 나노유체의 임계열유속(critical heat flux)이 일반 유체의 임계열유속보다 3배 정도 커진다는 것이다.⁽⁶⁾ 위와 같은 놀라운 현상 때문에 많은 연구자들이 나노유체의 열적 특성에 관한 이론적, 계산적, 실험적 연구들을 진행하고 있으며, 특히 차세대 냉각유체로 사용하기 위한 기본 연구를 진행 중이다.

본 연구는 유체 속에서 나노입자의 브라운 운동을 고려한 나노유체의 열전도도 특성을 예측할 수 있는 Jang and Choi 모델⁽⁵⁾과 미소량의 부피비를 가지는 나노유체의 점성계수를 예측할 수 있는 Einstein 모델,⁽⁸⁾ 그리고 나노유체의 밀도와 비열을 예측할 수 있는 Mixing Theory⁽⁹⁻¹⁰⁾를 이용하여 나노유체의 물질특성을 예측하였다. 그 결과를 이용하여 본 논문은 나노유체를 냉각유체로 사용할 경우 마이크로채널 히트 싱크의 냉각 성능향상에 관한 계산적 연구 결과를 보여준다.

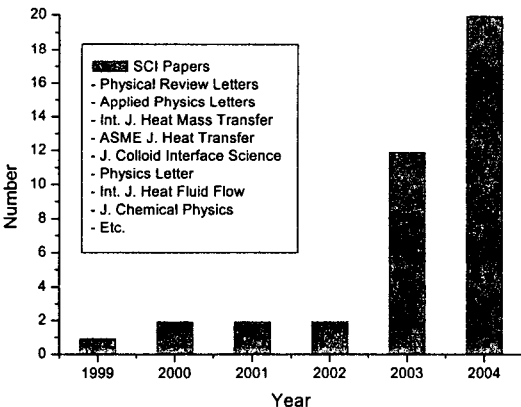


Fig. 1 Research trend for nanofluids.

2. 나노유체의 물질특성

2.1 나노유체의 열전도도

나노유체의 첫번째 특징인 일반 유체에 소량의 부피비를 가지는 나노입자를 첨가하더라도 나노유체의 열전도도가 10% 정도 향상된다는 사실은 많은 연구자들에 의해 실험적으로 검증되어졌다.⁽¹⁻⁴⁾ 하지만 실험적 결과는 기존의 모델인 Maxwell 모델이나 Maxwell 모델을 변형한 모델을 이용해서는 전혀 설명할 수가 없었다.⁽⁵⁾ 최근 Jang and Choi가 일반 유체 속에서 나노입자의 브라운 운동에 의해서 나노유체의 열전도도가 상승한다는

이론을 사용하여 모델을 제시했으며, 그 결과가 기존 실험을 잘 예측하고 있음을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 나노유체의 열전도도를 예측하기 위해서 Jang and Choi 모델⁽⁵⁾을 사용하였으며, 그 결과를 이용하여 마이크로채널의 냉각성능 특성을 평가하였다.

$$k_{eff} = k_{BF}(1 - f) + k_{particle}\beta f + C_1 \frac{d_{BF}}{d_{nano}} k_{BF} Re_{d_{nano}}^2 Pr \quad (1)$$

여기서 $C_1 = 1.8 \times 10^7$ 는 실험상수, d_{BF} , d_{nanb} 는 각각 유체분자의 평균 크기, 나노입자의 지름, k_{BF} , k_{eff} , $k_{particle}$ 는 각각 유체, 나노유체, 나노입자의 열전도도, f 는 부피비를 나타내며 Reynolds 수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re_{d_{nano}} = \frac{C_{R.M.} d_{nano}}{\nu} \quad (2)$$

그리고 $C_{R.M.}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{R.M.} = \frac{D}{l_{BF}} = \frac{2D_o}{l_{BF}}, \quad D_o = \frac{k_b T}{3\pi\mu d_{nano}} \quad (3)$$

여기서 D , l_{BF} 는 각각 Hydrodynamic Coupling Effect를 고려한 Brownian Diffusion 계수, 유체

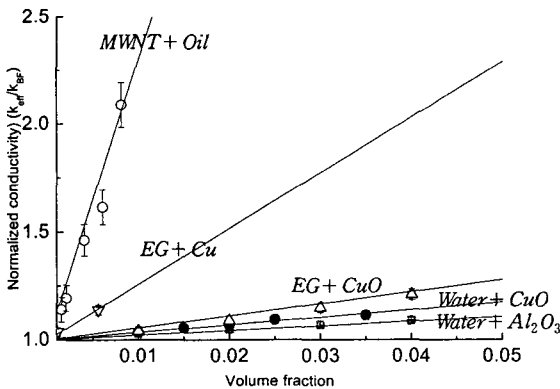


Fig. 2 Comparison of Jang and Choi's model predictions with experimental thermal conductivity data for various nanofluids (MWNT : Multiwalled Carbon Nanotube, EG : Ethylene Glycol).

분자의 평균 자유경로를 나타낸다. 그리고 $k_b = 1.3807 \times 10^{-23}$ J/K는 Boltzmann 상수를 의미한다. Fig. 2은 기존의 실험결과들^(1,2)과 Jang and Choi 모델의 계산결과를 비교함으로써 모델의 타당성을 보여준 것이다.

2.2 나노유체의 점성계수

나노유체의 점성계수에 대한 측정은 많이 이루어지지 않았으며 대부분 나노유체를 만들 때 소량의 부피비, 부피비가 1% 미만의 나노입자를 첨가하기 때문에 점성계수에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 예상하고 있다. Wang et al.⁽¹¹⁾은 Al₂O₃+EG의 나노유체에 대한 점성계수를 실험적으로 측정하였다. 그 결과는 기존의 Einstein 모델⁽⁸⁾인 식(4)와 브라운 운동 효과가 포함된 모델⁽¹²⁾인 식(5)를 비교해 보았다.

Einstein Model⁽⁸⁾

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 2.5f, \quad 0 < f < 0.01 \quad (4)$$

Brownian Motion Effect Model⁽¹²⁾

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 2.5f + 6.17f^2 \quad (5)$$

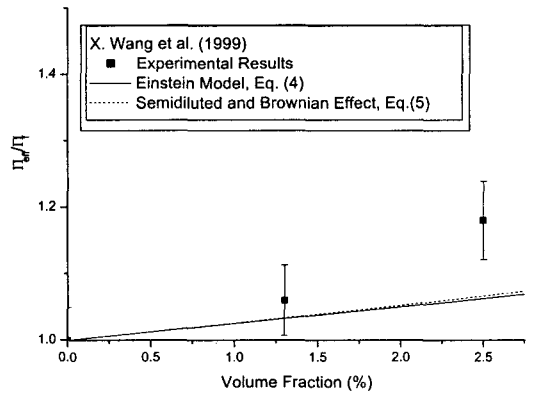


Fig. 3 Effective viscosity of nanofluids.

Fig. 3에서 보듯이 부피비가 1% 정도에서는 실험치를 잘 예측하지만 1% 이상에서는 잘 맞지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1%의 부피비를 가지는 나노유체를 냉각유체로 사용하여 위의 두 모델 중 Brownian Motion Effect Model⁽¹²⁾로부터 계산되어진 점성계수를 사용하고자 한다.

2.3 나노유체의 비열 및 밀도

나노유체의 비열에 대한 실험적 결과는 현재까지 발표되지 않았으며 몇몇 연구자들이 Mixing Theory⁽⁹⁻¹⁰⁾를 사용하여 계산하였다. 따라서 본 연구에서도 나노유체의 비열 및 밀도는 다음과 같이 Mixing Theory를 사용하여 계산하였다.

$$C_{P, eff} = C_{P, f}(1 - f) + C_{P, nano}f \quad (6)$$

$$\rho_{eff} = \rho_f(1 - f) + \rho_{nanof} \quad (7)$$

3. 나노유체를 냉각유체로 가지는 마이크로채널 히트 싱크

3.1 문제정의 및 해석방법

본 연구에서는 차세대 냉각장치로 제시되었던 마이크로채널 히트 싱크에 냉각유체로 나노유체를 사용하였을 경우, 냉각성능을 수치적 방법으로 제시하였다. 마이크로채널 히트 싱크의 크기는 다음과 같다. 밀변은 1×1 cm이며 채널의 높이는 350 μm이고 흰의 두께는 40.7 μm, 그리고 흰과 흰 사이는 40.7 μm로 두고 해석하였다. 그리고

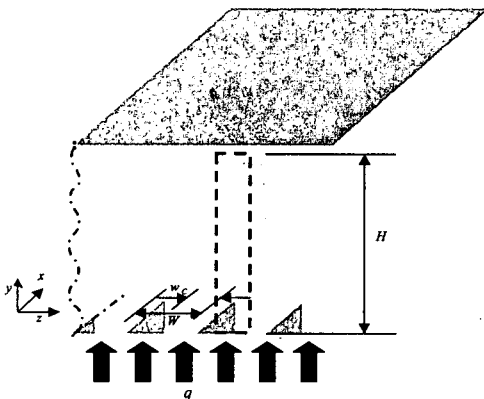


Fig. 4 Schematic of a microchannel heat sink.

마이크로채널 히트 싱크의 재질은 silicon wafer ($k_s=140$ W/mK)로 사용하였다. Fig. 4는 해석영역을 나타내고 있으며, 완전발달 유동이면서 층류유동으로 가정하였다. 그 이유는 마이크로채널의 특정 길이가 매우 작아서 Reynolds 수가 작기 때문이다. 지배방정식은 다음과 같다.

Momentum Equation

$$-\frac{1}{\mu_{eff}} \frac{dP}{dx} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

$$u=0 \quad \text{at } y=0, y=H$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z=0, u=0 \quad \text{at } z = \frac{w_C}{2}$$

Energy Equation

$$\rho_{eff} C_{P, eff} u \frac{\partial T}{\partial x} = k_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

$$T = T_w \quad \text{at } y=0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=H$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z=0, z = \frac{w_C}{2}$$

지배방정식에 사용된 물성치들은 앞에서 설명한 모델들을 사용하여 구하였다.

3.2 수치해석 결과

마이크로채널 히트 싱크의 냉각성능을 예측하기 위해서 수치해석시 사용한 나노유체는 물의 부

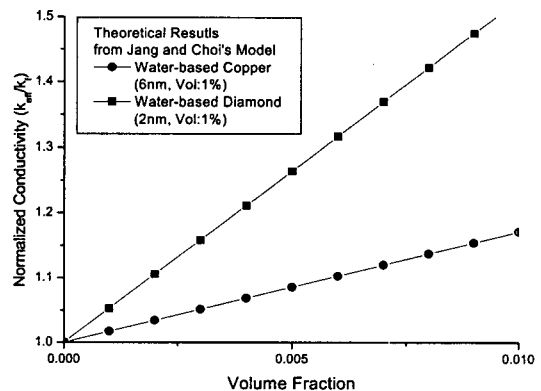


Fig. 5 Effective thermal conductivity of nano-fluids containing copper or diamond.

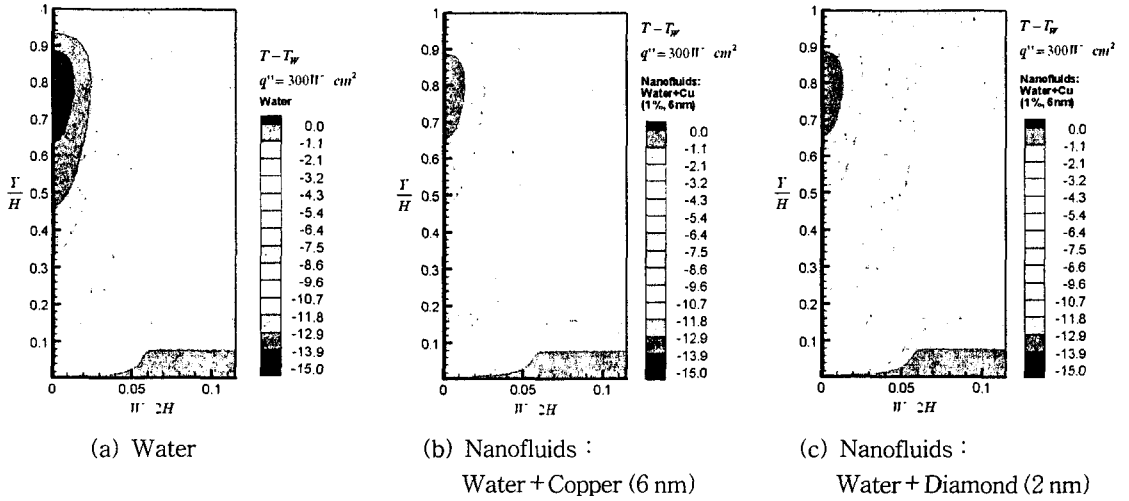


Fig. 6 Temperature contours for cross-sectional area of a microchannel heat sink.

피에 대한 나노입자의 부피비가 1%이며 6 nm 크기인 구리 나노입자를 물에 분산시킨 나노유체와 물의 부피에 대한 나노입자의 부피비가 1%이며 2 nm 크기인 다이아몬드 나노입자를 분산시킨 나노유체를 사용하였다. Jang and Choi 모델에 의하면 두 가지 모두 나노유체의 열전도도가 향상되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 Jang and Choi 모델로 6 nm의 크기를 가지는 구리와 물이 혼합된 나노유체의 열전도도와 2 nm의 크기를 가지는 다이아몬드와 물이 혼합된 나노유체의 열전도도를 계산한 결과를 보여주고 있다. 또한 부피비가 1%일 때 점성계수 증가량은 2.5% 정도이기 때문에 압력특성에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 마이크로채널 히트 싱크의 단면온도분포 결과이다. 나노유체를 사용할 경우 마이크로채널에서 히트 싱크의 밀면온도와 유체의 온도편차가 급격히 줄어들음을 알 수 있다. 즉, 동일 열유속 조건에서 열전달계수가 급격히 증가함을 보여주고 있는 결과이다. 또한 나노유체를 이용한 마이크로채널 히트 싱크의 냉각성능을 평가하기 위해서 동일 Pumping Power 조건에서 다음과 같은 열저항 정의를 이용하여 기존의 냉각유체인 물을 사용하였을 때와 나노유체를 사용하였을 때의 열저항을 비교해 보았다.⁽¹³⁾

$$\theta = \frac{T_{max} - T_{in}}{q} \quad (10)$$

여기서 q , T_{in} , 그리고 T_{max} 는 각각 전체 열량, 나노유체의 입구온도, 그리고 마이크로채널 밀면 최고 온도이다.

Fig. 7에 의하면 나노유체를 가지는 마이크로채널 히트 싱크의 열저항이 기존의 일반 유체인 물을 사용한 마이크로채널 히트 싱크의 열저항보다 작아짐을 알 수 있다. 특히 Pumping Power가 2.25 W일 때 2 nm의 크기를 가지는 다이아몬드 나노입자를 물에다 1% 첨가한 나노유체를 사용할 경우 기존 물을 사용한 것⁽¹³⁾보다 마이크로채널 히트 싱크의 열저항이 10% 이상 감소됨을 알 수 있다.

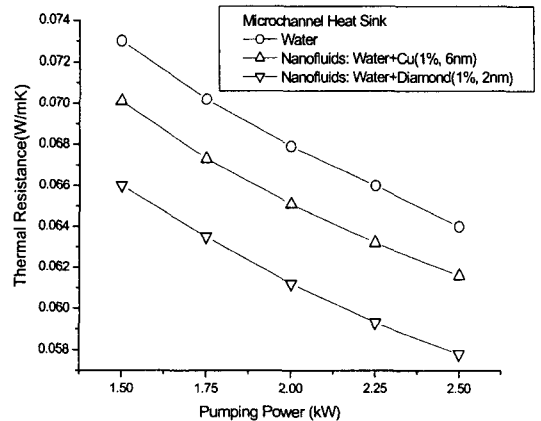


Fig. 7 Thermal resistance of a microchannel heat sink.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 차세대 냉각유체로 대두되고 있는 나노유체의 열적 특성을 소개하였다. 그리고 나노유체의 물성치들을 예측할 수 있는 Jang and Choi 모델, Einstein 모델, Mixing Theory들을 이용하여 나노유체를 냉각유체로 사용하는 마이크로채널 히트 싱크의 냉각성능을 평가하였다. 그 결과 나노유체를 냉각유체로 사용할 경우 마이크로채널 히트 싱크의 단면 온도편차를 줄일 수 있으며, 특히 기존의 일반 유체인 물을 냉각유체로 사용할 때보다 열저항이 10% 이상 감소됨을 수치적으로 보여주었다. 또한 본 해석결과는 향후 차세대 냉각장치 개발에 있어 나노유체의 중요성을 보여주고 있다.

후 기

본 논문은 2004년 한국학술진흥재단의 지원과 제인 신진 연구과제(KRF-2004-003-D00047)에 지원에 의하여 연구되었음을 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S., Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280-289.
2. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Yu, W. and Thompson, L. J., 2001, Anomalous increased effective thermal conductivity of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, pp. 718-720.
3. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E. and Grulke, E. A., 2001, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 2252-2254.
4. Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle base nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 2931-2933.
5. Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2004, Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, pp. 4316-4318.
6. You, S. M., Kim, J. H. and Kim, K. H., 2003, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 3374-3376.
7. Jang, S. P., 2004, Thermal conductivity of nanofluids, *Trans. KSME B*, Vol. 28, pp. 968-975.
8. Einstein, A., 1956, *Investigation on the theory of Brownian movement*, Dover, New York.
9. Smith, J. M. and Van Ness, H. C., 1987, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*, McGraw Hill, New York.
10. Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2004, Free convection in rectangular cavity (Benard Convection) with nanofluids, *IMECE2004-61054*, Anaheim, USA.
11. Wang, X., Xu, X. and Choi, S. U. S., 1999, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixtures, *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 474-480.
12. Davalos-Orozco, L. A. and Del Castillo, L. F., 2002, Hydrodynamic behavior of suspensions of polar particles: in *Encyclopedia of surface and colloid science*, Marcel Dekker, New York, pp. 2375-2396.
13. Min, J. Y., Jang, S. P. and Kim, S. J., 2004, Effect of tip clearance on the cooling performance of a microchannel heat sink, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1099-1103.