



SWNT 투명박막히터의 열성능 평가를 위한 자유대류 열전달 해석

곽 호 상,^{*1} 이 성 은,² 박 경 석,¹ 김 경 진¹

A COMPUTATIONAL STUDY ON FREE CONVECTION FOR THERMAL PERFORMANCE EVALUATION OF A SWNT THIN-FILM HEATER

H.S. Kwak,^{*1} S.E. Lee,² K.S. Park¹ and K. Kim¹

A computational investigation is conducted on free convection from a thin plate having a surface heat source. The thermal configuration simulates the recently-proposed transparent film heater made of a single-walled carbon nanotube film on a glass substrate. The Navier-Stokes computations are carried out to study laminar free convection from the heater. Parallel numerical experiments are performed by using a simplified design analysis model which solve the conduction equation with the boundary conditions utilizing several existing correlations for convective heat transfer coefficient. Comparison leads to the most suitable boundary condition for the thermal model to evaluate the performance evaluation of a transparent thin-film heater.

Key Words : 박막히터(Thin-film heater), 열해석모델(Thermal Analysis Model), 자유대류(Free Convection), 대류열전달계수(Convective Heat Transfer Coefficient)

1. 서 론

계속 증폭되고 있는 탄소나노튜브에 대한 관심은 이 신물질이 가진 대단히 예외적인 기계적 전기적, 광학적, 열적 성질에 기인한다. 이처럼 뛰어난 탄소나노튜브의 물성을 이용할 수 있는 응용소재 개발이 활발히 이루어지고 있는데 단일벽 탄소나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotubes, 이하 SWNT)로 박막으로 만들어 소재로 활용하는 방안이 연구되고 있다. 낮은 면저항(Sheet Resistance)과 가시영역에서의 광학적 투과성을 가진 SWNT 박막을 투명전도성 도막으로 사용하거나 [1-3] 높은 열전도계수를 가진 SWNT 박막을 전자부품의 열분산을 촉진하는 열계면 물질로 활용하는 방안이 검토되고 있다 [4-8].

최근 SWNT 박막의 전기적 성질과 광투과성 그리고 열적 성질을 모두 이용한 새로운 응용의 가능성이 제시되었다. Yoo 등[9]은 유리 기판에 SWNT 박막을 입히고 여기에 전기

를 흘려 주열열(Joule Heating)이 발생함을 보임으로써 SWNT 박막이 투명발열소자로 기능할 수 있음을 증명하였다. 투명박막히터는 실외용 디스플레이, 항공기용 계기판에 사용되고 있고 향후 자동차 서리제거용 히터로 발전가능한 유망한 응용소자이다. 그동안 투명박막히터의 소재로 주로 사용된 것은 ITO(Indium Tin Oxide) 박막이었으나 이 소재는 낮은 내열성과 느린 반응속도, 복잡하고 비싼 제조공정 등의 약점을 가지고 있다. 이에 비하여 SWNT 박막은 습식 공정을 포함하는 표준화된 일련의 공정으로 제작할 수 있고 내열성과 기계적 강도 면에서 잇점을 가지고 있다. SWNT 박막이 ITO박막을 대체할 수 있는 유력한 대안으로 등장한 것이다.

SWNT 박막을 이용한 투명박막히터는 이제 겨우 기능적 가능성이 확인된 개념정립단계의 제품이다. 개념적 타당성을 현실화하기 위해서는 투명박막히터의 열특성에 대한 이해와 이에 기반한 최적설계가 필요하다. 이미 이러한 작업의 일환으로 비교적 단순한 전도방정식을 해석하는 이론 및 간이해석 모형을 이용하여 개괄적인 투명박막의 열성능을 평가가 시도된 바 있다 [10-11]. 이 연구에서 히터에서 공기로의 열손실을 히터의 길이를 기준으로 정의한 레일리(Rayleigh)수의 함수로 표현되는 간단한 자유대류 열전달 상관식을 이용하여

1 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

2 금오공과대학교 산업기술연구소

* Corresponding author, E-mail: hskwak@kumoh.ac.kr

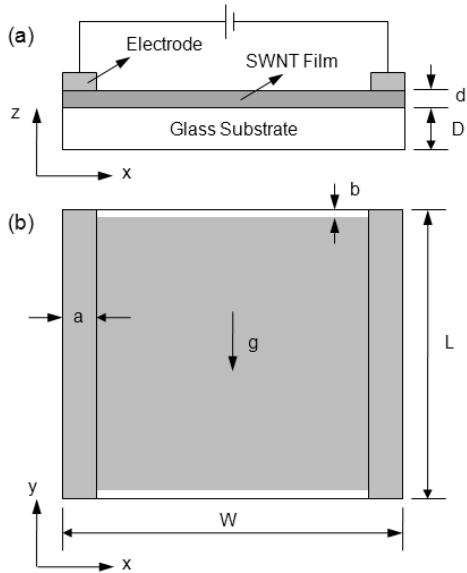


Fig. 1 Configuration of a SWNT transparent film heater. (a) Top view; and (b) front view.

평가하였다. 그러나 수직 가열벽에서 성장하는 경계층의 특성은 중력방향의 좌표와 밀접한 관계가 있기 때문에 정확한 열 성능 예측을 위해서는 히터 표면의 좌표를 고려한 적절한 상관식이 고려되어야 한다[12].

이 연구에서는 투명박막히터의 열적 조건을 모사한 박판형 발열체로부터 대기로의 자유대류 열전달을 다차원 수치계산으로 분석하였다. 연구의 목적은 선행연구에서 사용한 전도방정식 해법에 기반한 설계해석용 간이 모델에서 경계조건으로 사용할 적절한 자유대류 열전달 상관식을 찾는 것이다. 기존에 제안된 여러 가지 자유대류 상관식과 나비에스토크스 방정식의 수치해를 비교하여 실제 히터 조건의 열적 조건을 잘 표현하는 상관식을 탐색하였다.

2. 해석 모델

2-1. 해석 대상

Fig. 1은 SWNT 박막으로 만든 투명박막히터의 기본적인 구조를 보여주고 있다. 크기가 $W \times L \times D$ 인 투명한 유리기판의 한 쪽 면위에 두께가 d 인 SWNT 박막을 입히고 그 위에 동으로 만든 두 개의 전극을 배치한다. 이 전극에 전기장을 걸어 주면 SWNT 박막에서 주열열이 발생하는데 이것이 히터의 열원이다. 차량 유리나 디스플레이의 배치를 모사하기 위하여 히터는 중력방향으로 정렬되어 있다. 히터에서 생성된 열은 히터의 표면에서의 자유대류와 복사를 통하여 온도 T_∞ 인 대

기로 전달된다. 따라서 연구대상은 발열이 되는 수직 평판으로부터 주위로의 자유대류 및 복사의 복합 현상이다.

유리기판과 SWNT 및 전극을 포함하는 박막 히터 내부에서의 온도장과 전기장은 다음과 같은 3차원 지배방정식에 의해 결정된다.

$$\rho_i C_i \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T) + q_i; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\lambda_i \nabla \phi) = 0 \quad (2)$$

여기서 T 는 온도, t 는 시간, ϕ 는 전기 포텐셜, ρ 는 밀도, C 는 비열, k 는 열전도계수, λ 는 전기전도계수이다. 주열열에 의한 체적당 발열율 q 는 다음과 같이 주어진다

$$q_i = k_i |\nabla \phi_i|^2 \quad (3)$$

이로부터 단위 면적당 발열율을 계산하면

$$Q_i'' = |\nabla \phi_i|^2 / R_i \quad (4)$$

여기서 R_i 은 두께가 d 인 판형 구조물의 면저항(Sheet Resistance)으로 $R = 1/d\lambda$ 이다. 위 식에서 하첨자 i 는 히터를 구성하는 물질의 종류를 나타내는 지시자로 $i=G$ 는 유리기판, $i=F$ 는 SWNT 박막, $i=E$ 는 전극을 나타낸다.

방정식 (1)과 (2)를 풀기 위해서는 적절한 경계조건이 필요하다. 방정식 (2)의 경우, 전극에 전원이 연결되는 위치에는 전압조건을 주고 다른 경계조건은 절연조건을 적용할 수 있다. 논의의 초점이 되는 것은 열경계조건이다. 일반적으로 대류와 복사를 고려하면 히터 벽면의 열경계조건은 다음과 같은 열손실과 연계하여 표현할 수 있다

$$k_i \frac{\partial T}{\partial n} = q_{Loss}'' = h(T - T_\infty) \quad (5)$$

n 은 히터표면에서 수직인 외부 방향의 좌표이며 열전달계수 h 는 대류열전달계수 h_C 과 복사열전달계수 h_R 로 나누어지며 ($h = h_C + h_R$), h_C 과 h_R 은 다음과 같이 주어진다

$$h_R = \epsilon \sigma (T^2 + T_\infty^2) (T + T_\infty) \quad (6)$$

$$h_C = (k_{air}/y) Nu_y \quad (7)$$

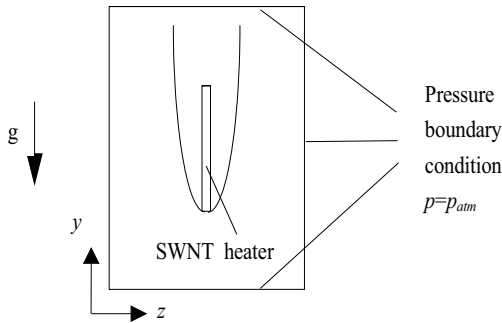


Fig. 2 Schematic diagram showing the domain for computational fluid dynamic simulation

ϵ 는 표면의 방사율이고 σ 는 슈테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수이며 k_{air} 는 공기의 열전도계수이다 Nu_y 는 수직벽의 좌표 y 에서의 자유대류 열전달 정도를 나타내는 무차원수인 국소 누셀(Nusselt)수이다

2.2 간이해석 모델

그동안 수직벽에서의 자연대류 열전달을 예측하기 위한 여러 가지 상관식이 제안되어 사용되고 있다 가장 단순한 열적 조건인 등온 및 등열유속 조건의 수직벽 위에 형성되는 층류 자유대류 경계층에 대해서는 상사해가 잘 알려져 있다 등온 조건과 등열유속 조건에서의 상사해로부터 유도된 상관식이 각각 식 (8)과 (9)이다[12].

$$Nu_y = 0.503 \left(\frac{Pr}{Pr + 0.986Pr^{1/2} + 0.492} \right)^{1/4} Ra_y^{1/4} \quad (8)$$

$$Nu_y = 0.616 \left(\frac{Pr}{Pr + 0.8} \right)^{1/5} Ra_y^{*1/5} \quad (9)$$

여기서 Pr 는 프란틀(Prandtl)수이고 Ra 와 Ra^* 는 각각 벽과 외기의 온도차와 열유속을 기준으로 정의한 레일리(Rayleigh)수이다 즉 Ra^* 는 등열유속 각각 q'' 를 기준으로 속을 기준으로 정의되는 레일리(Rayleigh)수이다 즉, $Pr = \nu/\kappa$, $Ra_y = \alpha g (T_y - T_\infty) y^3 / \nu \kappa$. $Ra_y = \alpha g q'' y^4 / \nu \kappa$. 또한 ν , κ ,

Table 1 The simplified analysis models used in this study

Model	Correlation	Thermal condition at walls
SM1	식 (8)	Constant wall temperature
SM2	식 (9)	Constant heat flux
SM3	식 (11)	Constant wall temperature

그리고 α 는 각각 공기의 동점성계수, 열확산계수, 그리고 열 팽창계수를 나타낸다.

층류 영역에서만 활용이 제한된 위의 상관식과는 달리 층류는 물론 난류 영역에 까지 적용할 수 있는 상관식도 있다 Churchill과 Chu[12]이 제안한 다음의 상관식은 등온벽면의 경우 $10^{-1} < Ra < 10^{12}$ 의 범위에서 활용이 가능하다

$$Nu_H = (0.825 + \beta Ra_H^{1/6})^2 \quad (10)$$

$$\beta = 0.387 / [1 + (0.492 Pr)^{9/16}]^{8/27}$$

그런데 식 (10)은 위치의 함수가 아닌 높이가 H 인 수직벽의 평균 누셀수에 대한 상관식이다 이 식으로부터 좌표 y 에서의 국소 누셀수에 대한 상관식을 구하면

$$Nu_y = (0.825 + \beta Ra_y^{1/6}) (\beta Ra_y^{1/6}) \quad (11)$$

선행연구[10]에서는 SWNT 투명박막히터의 설계해석용 도구로 지배방정식 (1)-(3)와 경계조건 (5)를 만족하는 수치해를 구하는 간이해석 수치모델을 개발하였다 이 모델에서 경계조건을 처리하려면 벽면의 대류열전달 상관식이 필요하다 연구 대상인 투명박막히터의 경우, SWNT 박막에서의 단위 면적당 주출발열은 거의 일정하다 따라서 히터 벽면의 열전달 조건은 등온조건 보다 균일 열유속 조건에 가깝다 하지만 히터의 하단부에서도 히터온도가 외기온도보다 크게 높기 때문에 $y=0$ 에서 $T = T_\infty$ 라는 조건에서 구한 상사해로부터 유도된 식 (9)를 적용하는데 문제가 있다 대안으로 고려할 수 있는 것은 판의 균일온도 조건에서 구해진 상관식(8) 또는 (11)이다. 그러나 이 역시 히터 표면의 온도차가 작지 않기 때문에 적절한 대안이 되지 않는다 따라서 설계해석모형의 신뢰성을 확보하는데 있어서 히터 벽면에서의 대류열전달을 제대로 묘사하는 적절한 상관식을 찾는 것이 중요한 과업이 되고 있다 이 연구에서는 이러한 노력의 일환으로 Table 1에 정리한 것과 같이 세 가지 간이해석모델을 이용하여 수치실험을 수행하여 결과를 비교하였다.

2.3 전산유체역학 모델

간이해석 모델의 적정성을 평가하기 위해서는 기준 자료가 필요한데 연구대상인 투명박막히터의 경우, 특정 위치에서의 온도 점측정결과만 존재하고 신뢰할만한 장측정 결과가 보고되어 있지 않다. 현재 층류 자유대류의 경우 전산유체역학 계산해의 신뢰성이 높게 평가되고 있다 따라서 이 연구에서는 외기를 포함하여 히터 주변의 열전달에 참여하는 전체 유체영역을 대상으로 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 푸

는 전산유체역학 계산을 수행하고 여기서 얻은 히터 벽면의 열전달 결과를 비교 기준으로 사용하였다

전산해석에는 상용 전산유체역학 패키지인 FLUENT 6.2를 사용하였다. Fig. 2는 히터와 히터 주위의 공기를 포함하는 해석영역과 경계조건을 보여주고 있다. 해석영역의 크기는 경계층의 두께보다 충분히 크게 확보하였다. 경계층 내부에 전체 격자의 1/3 이상이 들어갈 수 있도록 히터 벽면에 격자를 밀집시켰다. 히터에서 떨어진 외기의 경계에는 모두 대기압의 압력조건을 적용하였다

FLUENT에서 자유대류 해석에 활용가능한 부력 모델 중에서 부씨네스크(Boussinesq) 모형을 사용하였다. 온도변화에 의한 밀도변화가 기준밀도보다 매우 작다는 가정에서 출발한 이 모형은 일반적인 자연대류에서 가장 많이 사용되고 있는 모형이고 이론적인 상사해를 구하는데 사용된 모델이다 그러나 투명박막히터는 인가전력에 따라 수십도에서 백도이상의 온도차가 발생하기 때문에 이 모델 사용의 적정성에 논란의 여지가 있다. 이에 대해서는 별도의 논문에서 다루기로 한다

SWNT 히터가 80% 이상의 투명성을 갖기 위해서는 SWNT 필름의 두께는 50-60 nm 정도로 유지되어야 한다. 높은 열전도와 얇은 두께를 갖는 SWNT 필름에서 두께 방향으로의 전도가 지배적이므로 이 방향으로의 온도변화는 무시할 만큼 작다고 볼 수 있다. 간이해석 모델에서는 이를 이용하여 필름의 온도는 판방향 좌표만의 함수로 단순화하여 모사하였다. 그러나 FLUENT를 이용하는 경우 경계면이 아닌 계산영역 내의 발열체인 SWNT 박막은 부피가 있는 유한체적이지만 두께가 60 nm에 불과하여 격자로 표현하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 SWNT 필름을 격자로 표현가능한 60 μm 의 두께의 발열체로 모델링하는 대신 열관성과 열전도계수를 1/1000로 줄여 동일한 비정상 과도 거동과 평판방향의 열전달 조건을 모사할 수 있도록 하였다

3. 결과 및 토론

해석을 위한 구체적인 모형으로 높이가 5cm이고 두께가 0.73mm인 히터를 선정하였다. SWNT 박막의 두께는 60 nm이고 면저항은 178 Ω/\square 이다. 직류전원을 조절하여 평균 면적당 발열량이 $Q'' = 0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15, 0.18 \text{ W/cm}^2$ 인 경우에 대하여 간이해석 모델과 FLUENT를 이용하여 계산을 수행하였다.

Fig. 3은 히터의 발열량에 따라 변하는 히터표면의 평균온도와 대기온도의 차 ΔT_B 의 거동을 보여주고 있다. Q'' 가 증가함에 따라 히터의 표면온도가 증가하고 있는데 SM1, SM3 모델을 이용하여 얻은 온도는 NSM(Navier-Stokes Model)을 사용하여 얻은 온도값과 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 실

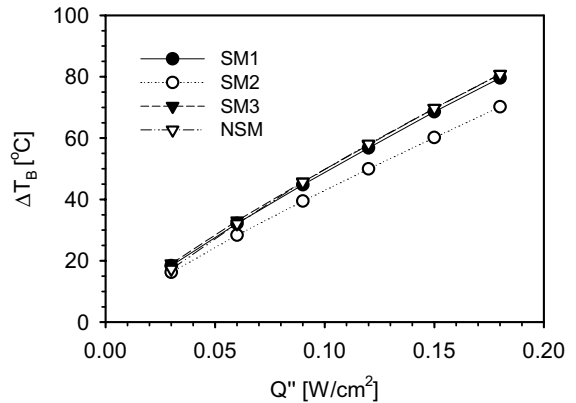


Fig. 3 Mean temperature difference between the SWNT film and ambient air vs. heat generation rate per unit area

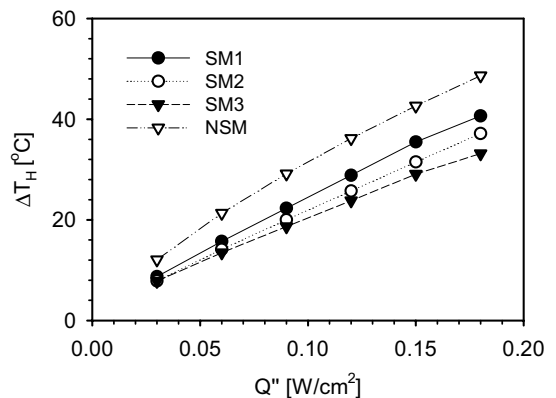


Fig. 4 Maximum temperature difference on the SWNT film surface vs. heat generation rate per unit area

제 박막히터 표면에서의 열전달 환경과 유사한 균일열유속 조건을 적용한 SM2 모델의 경우, 다른 모델을 사용한 결과보다 표면온도를 다소 낮게 예측하고 있다

Fig. 3에서 SWNT 박막표면의 평균온도를 살펴보았으나 식 (8),(9),(11)에서 추론할 수 있듯 박막표면의 온도는 위치의 함수로 표현된다. 다시 말하면 높이 방향으로 온도차가 발생한다. 이를 확인하기 위하여 SWNT 박막 표면의 온도분포에서 가장 높은 온도와 가장 낮은 온도의 차 ΔT_H 를 Fig. 4에 도시하였다. 가열면과 대기의 평균온도차와는 달리 SWNT 표면에서 발생하는 온도차는 사용한 모델에 따라 비교적 눈에 띄는 차이를 보이고 있다. 전체적으로 간이모델의 예측은 NSM 계산결과에 비하여 온도편차를 과소평가하고 있다. 실제 가열 조건과 다른 균일온도 조건의 상관식을 활용한 SM1 모델이 NSM 계산결과에 가장 근접한 예측치를 제공한다는 사실이

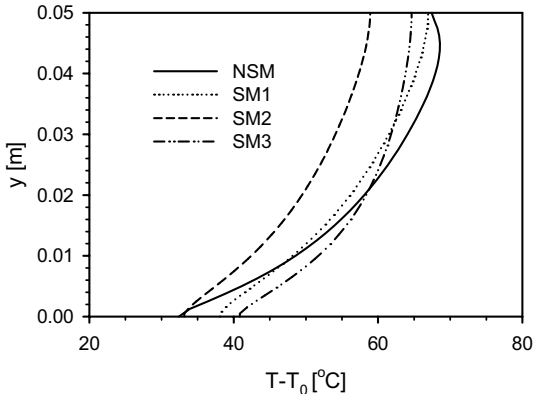


Fig. 5 Vertical temperature profile on the SWNT film surface for $Q=0.12 \text{ W/cm}^2$

흥미롭다.

결과를 좀 더 상세하게 살펴보기 위하여 SWNT 표면에서 높이방향으로 변하는 온도분포를 Fig. 5에 도시하였다 전체적으로 NSM이 표면온도를 가장 높게 예측하고 있으며 균일열유속 조건을 적용한 경우의 상관식을 사용한 SM2이 온도분포를 가장 낮게 평가하고 있다 SM1과 SM3 모델을 사용한 해석이 제공한 온도변동은 NSM 모델이 제공한 수치결과와 비슷한 대역에서 이루어지고 있으며 이것이 Fig. 3에서 나타난 평균온도 예측의 정확성을 설명하고 있다 문제는 이 모델들도 실제 NSM 수치계산 결과에 비하여 높이 방향으로의 온도변동을 작게 예측하고 있다는 것이다

SWNT 박막 표면에서의 열전달 조건은 균일 열유속에 가까운데 왜 실제 균일열유속 조건에서 얻은 상관식보다 균일 온도 조건에서 얻은 상관식이 실제에 가까운 온도분포 예측 결과를 제공하는가? 이에 대한 답의 단초는 식 (9)를 유도한 벽면가열 문제에서 찾을 수 있다 균일열유속 조건의 수직벽에서의 열전달을 해석하는데 있어서 일반적으로 균일열유속이 가해지는 가장 아래 지점을 원점으로 잡으며 이 점에서의 온도는 외기온도와 같다고 가정한다 이러한 가정에서 출발하여 얻게되는 상사해는 원점에서 $T - T_{\infty} = 0$ 에서 시작하여 온도차가 y의 함수로 커지는 함수로 표현하고 있다 그런데 벽면에 부착되지 않고 허공에 떠있는 박막히터의 경우 표면발열이 일어나므로 $y=0$ 에서도 $T - T_{\infty} = 0$ 이 아니다. 다시 말하여 온도는 원점에서 이미 상당한 값을 가지고 있고 y방향으로 진행하면서 온도가 더 상승하게 된다 이러한 결과는 Fig. 5에서 그대로 확인할 수 있다 따라서 실제 표면열전달 조건과 유사한 상관식 (9)가 NSM 수치계산의 결과와 가장 큰 편차를 보이는 예측치를 제공한 것은 바로 이러한 효과를 제대로 반영하지 못했기 때문이라는 것이 이 연구에서의 추론

이다. 따라서 원점에서의 온도차를 고려한 수정된 상관식 모델이 필요하며 이에 대해서는 후속연구에서 다룰 것이다

4. 결 론

이 연구에서는 기판 표면에 SWNT 박막을 입힌 투명박막 히터의 열특성 평가용 간이해석 모델에 사용할 적절한 자유 대류 상관식에 대해서 조사하였다 균일온도 조건과 균일열유속 조건에서 구한 상관식을 채용한 간이해석 모델과 Navier-Stokes 방정식 해를 구하는 수치모델을 채용하여 계산을 수행하고 SWNT 표면의 온도분포 예측성을 평가한 결과 기존의 상관식을 그대로 채용하여 온도분포를 정확하게 예측하는데 한계가 있음을 확인하였다. 특히 실제 박막히터 표면에서의 열전달 조건에 가까운 균일열유속 모델의 예측치가 가장 큰 오차를 유발하는 것은 히터의 발열로 이미 원점에서 크게 발생하는 대기와의 온도차 때문인 것으로 나타났다 이러한 효과를 고려할 수 있는 상관식의 수정은 후속연구과제가 될 것이다.

후 기

이 연구는 21세기 나노프론티어사업, 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다

참고문헌

- [1] 2004, Wu, Z., Chen, Z., Du, X., Logan, Nikolou, M., Kamaras, K., Reynolds, J.R., Banner, D.B., Hebard, A.F. and Rinzler, A.G., "Transparent, Conductive Carbon Nanotubes," *Science*, Vol.305, pp.1273-1276.
- [2] 2005, Zhang, M., Fang, S., Zakhidov, A.A., Lee, S.B., Aliev, A.E., Williamns, C.D., Atkinson, K.R. and Baughman, R.H., "Strong, Transparent, Multifunctional, Carbon Nanotube She," *Science*, Vol.309, pp.1215-1219.
- [3] 2005, Artukovic, E., Kaempgen, M., Hetch, D.S., Roth, S. and Gruner, G., "Transparent and Flexible Carbon Nanotube Transistors," *Nano Lett.*, Vol.5, pp.757-760.
- [4] 2005, Huang, H., Liu, C. and Wu, T., "Aligned Carbon Nanotube Composite Films for Thermal Management," *Adv. Mater.*, Vol.17, pp.1652-1656.
- [5] 2006, Yu, A., Itkis, M.E., Bekyarva, X.F.E. and Haddon, R.C., "Effect of single-walled carbon nanotube purity on the thermal conductivity of carbon nanotube-based composites," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.89, 133102.



- [6] 2007, Kordás, K., Tóth, G., Moilanen, P., Kumpumäki, M., Vähäkangas, J. and Uusimäki, A., "Chip cooling with integrated carbon nanotube microfin architectures," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.90, 123105.
- [7] 2006, Gonnet, P., Liang, Z., Choi, E.S., Kadambala, R.S., Zhang, C., Brooks, J.S., Wang, B. and Kramer, L., "Thermal conductivity of magnetically aligned carbon nanotube buckypapers and nanocomposites," *Curr. Appl. Phys.*, Vol.6, pp.119-122.
- [8] 2007, Itkis, M.W., Borondics, F., Yu, A. and Haddon, R.C., "Thermal Conductivity Measurements of Semitransparent Single-Walled Carbon Nanotube Films by a Bolometric Technique," *Nano Lett.*, Vol.7, p.900-904.
- [9] 2007, Yoon, Y.-H. Song, J.-W., Kim, D., Kim, J., Park, J.-K., Oh, S.-K. and Han, C.-S., "Transparent Film Heater Using Single-Walled Carbon Nanotubes," *Adv. Mater.*, Vol.19, pp.4284-4287.
- [10] 2008, Kwak, H.S., Kim, K., Shon, B.C., Lee, H. and Han, C.-H., "Thermal characteristics of a Transparent Film Heater," Submitted to *J. Nanosci. Nanotech.*
- [11] 2004, Hao, Q., "Analytical heat transfer model of multilayered microdevices," *J. Micromech. Microeng.*, Vol.14
- [12] 1993, A. Bejan, *Heat Transfer*, Wiley, New York.