

나노튜브/화학연료의 동축 구조에서 생성되는 열동력 파도를 이용한 전기 에너지 생성[§]

최 원 준^{*†} · 마이클 스트라노^{**}

* 고려대학교 기계공학부, ** MIT 화학공학과

Thermopower Wave in Core-Shell Structures of Carbon Nanotube Chemical Fuels

Wonjoon Choi^{*†} and Michael S. Strano^{**}

* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, USA

(Received January 10, 2013 ; Revised March 11, 2013 ; Accepted March 18, 2013)

Key Words: Nanotube(나노튜브), Carbon nanotube(탄소나노튜브), Thermoelectric(열전기), Thermopower Wave(열동력 파도), Chemical Fuels(화학 연료)

초록: 이전 연구에서 우리는 나노구조와 화학연료의 동축 구조를 제작하여 이를 점화시켰을 때, 축방향으로 매우 빠르게 화학 반응이 전파되며, 이와 동시에 높은 비출력을 가지는 화학-전기 에너지를 생성할 수 있음을 증명하였으며, 이러한 현상을 열동력 파도로 명명하였다. 본 연구에서는 열동력 파도와 관련된 여러가지 물리적인 현상을 심도있게 다루려 한다. 나노구조의 다른 배열 상태에 따라 반응 전파속도, 에너지 생성 정도가 어떻게 달라지는지, 그리고 이와 동시에 발생하는 전기 신호와는 어떤 연관 관계가 있는지를 연구하였다. 또한 이론적으로 온도 변화에 따라 달라지는 나노튜브와 화학연료의 성질, 대류와 복사에 의한 영향을 고려했을 때 열동력 파도의 전파 양상이 어떻게 달라지는지를 규명하였다.

Abstract: There is considerable interest in developing energy sources capable of larger power densities. In our previous works, we proved that by coupling an exothermic chemical reaction with 1D nanostructures, a self-propagating reactive wave can be driven along its length with a concomitant electrical pulse of high specific power, which we identified as a thermopower wave. Herein, we discuss details about many different aspects of a thermopower wave. Different alignment degree in vertically aligned CNT films is evaluated in the reactive wave speed and correlated with its thermal reaction that affects the change in the magnitude of energy generation. The effects of the temperature-dependent properties of chemical fuels and CNTs are evaluated. Furthermore, we explore the convection and radiation portions in this thermal wave as well as the synchronization between the thermal reaction transfer and the oscillation of the electrical signal.

1. 서 론

탄소나노튜브는 얇은 단일 탄소의 단층들이 일차원적인 원통형 배열의 구조로 정렬되었을 때 생성되는 구조이다.⁽¹⁾ 이러한 독특한 구조로 인해 탄

소나노튜브는 열적, 전기적, 광학적, 기계적으로 다른 재료들과 비교하여 더 나은 성질을 가지게 되며, 나노기술, 전기, 광학을 비롯한 다른 여러 분야에 응용될 수 있는 잠재적인 포텐셜을 가지고 있다. 특히 탄소나노튜브는 전기 에너지와 열 에너지의 전달 및 조절에 있어서 많은 가능성을 보여주고 있다. 탄소나노튜브의 축방향으로 향상된 전기,^(2,3) 열 에너지⁽⁴⁻⁶⁾의 전달성을 이용하여 발광 다이오드 (Light-Emitting-Diode), 전계효과 트랜지스터 (Field-Effect-Transistor), 열적 정류기 (Thermal

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, wojchoi@korea.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

Rectifier),⁽⁷⁾ 포논 파동 길잡이 (Phonon Wave Guide)⁽⁸⁾와 같은 소자들의 개발이 진행 중이다. 이러한 전기-열 에너지 성질을 동시에 이용하는, 탄소나노튜브에서의 열전기 현상(Thermoelectric Effect)에 대해서도 활발한 연구가 이루어지고 있다. 열전기 현상은 일반적으로 물질의 양단에 가해진 온도 차이로 인해 전기에너지가 생성되는 현상을 지칭한다. 단일벽 탄소 나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotube)와 다중벽 탄소 나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube)의 열전도성과 지백 계수 (Seebeck Coefficient)의 측정(Yu et al.(2005),⁽⁴⁾ Kim et al.(2001)⁽⁹⁾)은 이러한 연구의 시발점으로 볼 수 있다. 그러나 탄소나노튜브의 전체적인 성능지수(Figure of Merit)는 기존의 열전기 현상에 사용되는 물질들인 bismuth telluride ($287\mu\text{V/K}$),⁽¹⁰⁻¹²⁾ silicon nanowires,⁽¹³⁾ $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ superlattices ($243\mu\text{V/K}$)⁽¹⁴⁾와 비교하면 높은 값을 가지지 않는 것으로 밝혀졌다. 열전기 현상의 응용에서는 높은 전기 전도성과 낮은 열전도성을 유지하는 것이 높은 성능지수를 만들기 위해 이상적이다. 그러나 탄소나노튜브는 높은 전기전도성과 열전도성을 모두 가지고 있어 효과적인 성능지수의 향상을 만들어내기 어렵다. 그리고 대부분의 나노 물질들 또한 동일한 이유로 열전기 현상의 적용에 큰 제약을 가지고 있다.

최근에 제안된 열동력 파도(Thermopower Wave)⁽¹⁵⁾라 불리는 현상은 이러한 제약을 극복하기 위한 새로운 개념의 전기 에너지 생성 방법으로 주목받고 있다. 보조적인 대체 에너지 생성 방법으로 주목받는 열전기 현상과 화학 연료에서 생성 되는 연소 반응을 나노재료 (나노튜브 등)와 연료의 동축구조 (Core/Shell)에 통합하여 큰 비출력의 에너지를 생성할 수 있음이 밝혀졌다.⁽¹⁵⁾ 열동력 파도는 높은 열에너지를 생성할 수 있는 화학 연료를 우수한 전기적, 열적 성질을 가지는 일차원적으로 배열된 나노 물질들에 통합하여 동축 구조를 생성하여 발생시킬 수 있다. 이 구조 안의 연료를 점화 시켰을 때, 나노 물질의 축 방향으로 빠르게 열에너지가 전파되는 화학 반응이 유도되며, 이와 동시에 나노물질과 연료 사이에서 일어나는 열에너지의 상호 작용과 그로 인해 유도되는 전하 운반자의 이동을 통해 나노 물질에서 축 방향으로 직접 전기에너지를 생성할 수 있다. 열동력 파도 현상에서 추출된 전기에너지는 우수한

비출력을 가짐과 동시에 축방향으로 능동적으로, 빠르게 전파되는 열 에너지에 의해 내부적으로 일어나는 열전도에 의한 영향을 최소화 할 수 있기 때문에 탄소나노튜브에서도 효과적으로 전기에너지를 생성할 수 있다. 탄소나노튜브 주변을 TNA (cyclotrimethylene-trinitramine)라는 화학 연료로 코팅한 후 점화 반응을 일으키는 방식으로 최초의 열동력 파도 현상을 생성하였으며 또한 기존의 열전기 현상에서 예측할 수 있는 것보다 더 많은 양의 에너지를 생성할 수 있음을 증명하였다. 열동력 파도 현상의 점화는 연료 층의 활성화 에너지 이상의 에너지를 공급해 줌으로 인해 이루어진다. 전기방전, 레이저, Joule 히팅, 화염접촉 등의 다양한 초기 에너지 공급 방법을 통해 열동력 파도 현상을 일으킬 수 있다. 이 때 나노튜브와 연료의 복합 구조는 초기 활성화 에너지를 크게 감소시켜 점화를 도울 수 있다.

이 논문에서는 주로 열동력 파도 현상의 생성 과정에 관여하는 중요한 요소들이 실제 에너지 전달에 어떠한 영향을 미치는 지를 연구하였다. 첫 번째 부분은 탄소나노튜브의 축 방향을 따른 정렬 정도에 따라 열동력 파도 현상의 전파가 다를 수 있음을 밝혀내었다. 두 번째로 열적 반응으로 인한 온도 변화에 따라 동적으로 달라지는 연료와 탄소나노튜브의 속성이 열에너지 전파에 어떤 영향을 미치는 지를 규명하였다. 세 번째로 동축 구조안에서 대류, 복사 현상등으로 인해 열동력 파도 현상에서 어느정도의 에너지 손실을 가져 올 수 있는 지를 이론적으로 밝혀내었다. 마지막으로 열에너지 전파와 전기 에너지 생성간에 어떤 상관관계가 있는지를 구체적으로 규명하였다.

2. 탄소나노튜브의 정렬에 따른 열동력 파도 현상의 변화

열동력 파도 현상을 위한 나노 구조 형성을 위해 수직으로 정렬되어 있는 탄소나노튜브를 화학 증착 방법을 이용하여 제작하였다. 제작 과정의 차별화로 야기되는 탄소나노튜브 정렬 정도의 차이는 열동력 파도의 축방향을 따르는 전파에 큰 영향을 끼칠 수 있음을 규명하였다. 탄소나노튜브의 정렬 정도를 다르게 하기위해 화학 증착 과정에서 주기적으로 물 거품(Water Bubbles)을 주입하는 방법을 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 물 거품을 주기적으로

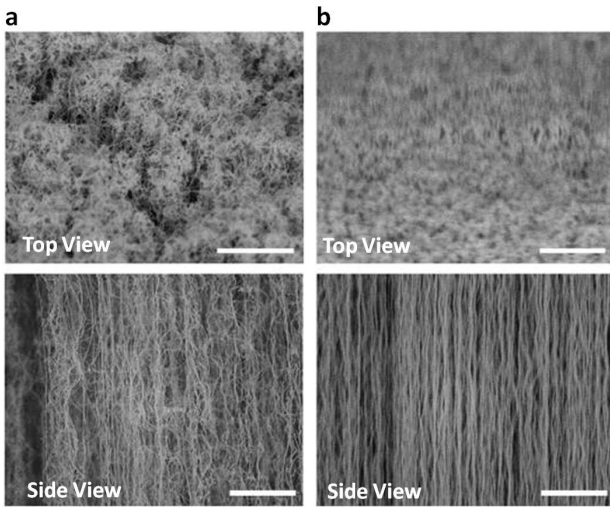


Fig. 1 Scanning electron microscope images of vertically aligned carbon nanotubes without (a) (13 nm-diameter MWNT) or with water-assisted method. (b) (22 nm-diameter MWNT). Scale bars (1 μm)

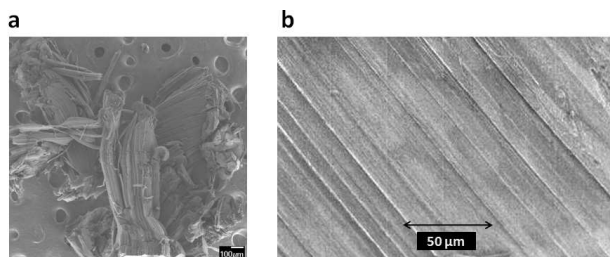


Fig. 2 Scanning electron microscopic images of bulk TNA-MWNT after synthesis (a) and extended TNA-MWNT aligned structures (b)

주입하는 방식은 탄소나노튜브 성장 과정에서 비결정성 탄소를 제거해주고, 성장 길이를 향상시켜 줌과 동시에 정렬 상태를 개선하는 효과를 보일 수 있다. 우리는 탄소나노튜브가 성장하고 있는 중간에 10 분간격으로 물 거품을 주입시켜주는 방법으로 물 거품이 없을 경우보다 정렬 상태가 더 좋은 탄소나노튜브를 제작했다. Fig. 1(a)는 물 거품을 주입시키지 않은 조건으로 생성한 탄소나노튜브의 수직 정렬 구조를 보여주고 있으며, Fig. 1(b)는 물 거품 주입 방법을 사용했을 때의 정렬 상태를 보여주고 있다. 두 그림의 비교를 통해 물거품 주입 방법을 사용했을 때 확인한 정렬 상태의 향상이 나타났음을 보여주고 있다. 그리고 두가지의 탄소나노튜브 정렬 상태를 기본으로 큰 스케일의 나노튜브/연료의 동축 구조들을 형성할 수 있음을 Fig. 2에서 보여주고 있다.

두가지 방식으로 제작된 나노튜브에서 열동력 파도의 전파 속도가 다름이 측정되었다. 물 거품 주입 방법을 사용하지 않은 경우에는 나노튜브의

축방향을 따라 열동력 파도의 전파 속도가 0.05~0.3 m/s 로 측정되었다. 그러나 물 거품 주입 방법으로 정렬 상태를 향상시킨 후에는 전파 속도가 0.05~2 m/s 까지 측정되었다. 이는 결국 탄소나노튜브의 정렬이 일차원 방향으로 효과적으로 배열 되었을때 축방향으로 빠르게 전파되는 열에너지가 바깥 부분을 둘러싸고 있는 화학연료에 효과적으로 전달된다는 것이다. 또한 탄소나노튜브의 지름 차이는 열에너지 전달에 영향을 미칠 수 있다. 22 nm의 경우는 13 nm 경우보다 단면적이 넓으며 이는 동일한 두께로 코팅된 연료에 단위 접촉 면적 당 더 많은 열에너지를 미리 공급할 수 있다. 그리고 이러한 기작들이 열동력 파도의 전파 속도 향상을 가져온 것으로 설명할 수 있다.

3. 온도 변화에 따른 연료와 탄소나노튜브 속성 변화의 영향

열동력 파도가 축방향을 따라 전파되는 동안 탄소나노튜브와 화학연료는 다이내믹한 온도의 변화를 겪는다. 이 과정에서 온도의 분포는 주변 환경의 온도인 25 도에서 연료의 단열 불꽃 온도 (Adiabatic Flame Temperature)인 3000 도까지 광범위하게 분포할 수 있다. 탄소나노튜브와 화학연료는 이러한 온도 변화에 따라 기본적인 성질이 크게 달라진다. 우리는 이전에 발표한 논문에서 화학연료의 에너지 생성 부분을 첨가한 일차원 방향의 에너지 방정식으로 열동력 파도의 전파를 모델링할 수 있음을 보였다.⁽¹⁵⁾ 그 결과에 더하여 열동력 파도 현상의 정확한 예측을 위해서는 모델링 과정에서 이렇게 변화하는 온도에 따라 달라지는 성질을 반영할 필요가 있다. 이를 위해 화학연료로 사용된 TNA 의 비열, 연소열, 열확산도, 무차원화된 연료의 비열과 방출되는 에너지의 계수인 베타 (무차원화된 연료의비열: $\beta = C_p E_a / QR$, C_p : 연료의 비열, E_a : 연료 활성화 에너지, Q : 연료의 열에너지 방출량, R : 이상기체상수) 의 값을 300 K에서 3000 K 까지 다양화하여 모델링 결과에 반영하였다.⁽¹⁷⁻²¹⁾ 또한 다중벽 탄소나노튜브의 비열, 열확산도, 열전도성을 300 K에서 3000 K 까지 다양화한 값을 모델링에 반영하였다.^(9,22-24) 이러한 온도 변화에 따른 성질 변화를 반영하여 열동력 파도 현상의 전파 속도를 계산한 결과가 Figure 3에 나타나 있다. 계산된 반응 전파 속도는 1.3 m/s 로 실제 실험에서 측정된 0.05~2 m/s 의 속도와 그 값이 비슷함을 확인할 수 있다. 실제로 열동력 파도 현상이 진행되는 동안, 온도 분포를 적외선 카메라로 측정해

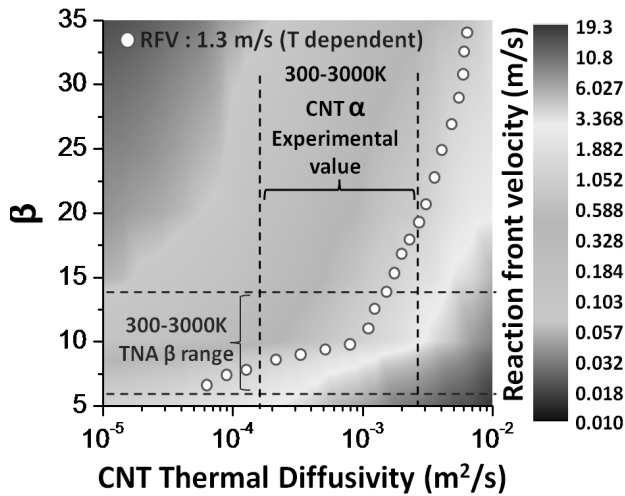
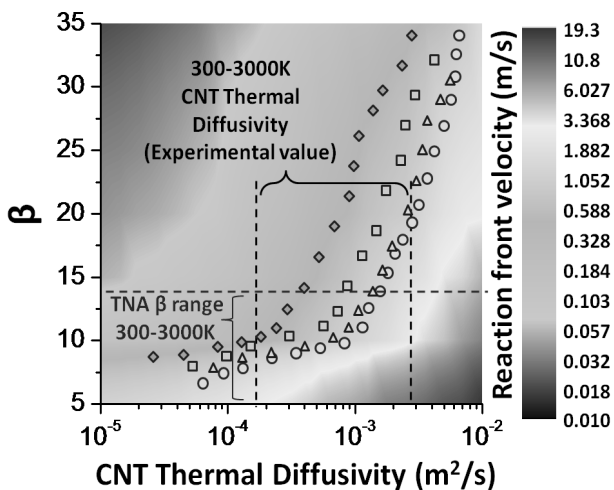


Fig. 3 Reaction front velocity(RFV) using temperature-dependent thermal properties for TNA and CNT



○ $k_0=1.35 \times 10^{18}$, RFV : 1.3 m/s □ $k_0=1.35 \times 10^{16}$, RFV : 1.114 m/s
 △ $k_0=1.35 \times 10^{17}$, RFV : 1.254 m/s ◇ $k_0=1.35 \times 10^{15}$, RFV : 0.5 m/s

Fig. 4 Reaction front velocity(RFV) using temperature-dependent thermal properties for TNA and CNT, as well as convection and radiation

본 결과 탄소나노튜브의 실제 온도는 300 K 에서 1100 K 사이에 분포하였다. 이 온도 범위로 반응 전파 속도를 예측해본 결과 그 값은 대략 1 m/s 의 계산 결과를 얻었다. 이는 화학연료의 반응 부분을 새롭게 첨가한 일차원적인 열에너지 전달 방정식이 열동력 파도의 실제 전파 속도를 잘 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 역으로 나노튜브와 연료 동축 구조에서의 반응 전파 속도를 측정함으로써 탄소나노튜브의 열확산율의 예측이 가능하다.

4. 대류, 복사로 인한 열에너지 손실

온도 변화에 따른 성질을 고려하여 수행한 계산

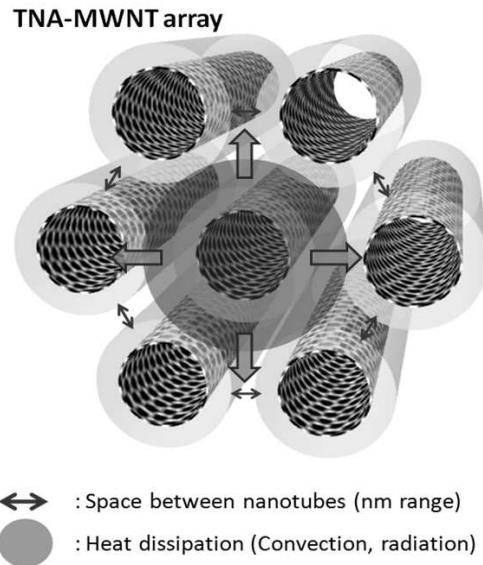


Fig. 5 Illustration of heat transfer of TNA-MWNT array. Heat dissipation blocked among TNA-MWNTs. Heat convection, or radiation from center TNA-MWNT is absorbed by surrounding arrays, and it is canceled each other in the array

의 결과는 화학연료에서 방출되는 에너지 부분을 더한 일차원적인 열전도 방정식 만을 반영했었다. 그렇지만 실제 시스템에서는 나노물질과 화학 연료의 혼합 동축 구조에서 일어날 수 있는 대류, 복사 등의 다른 열전달 모드를 고려해야만 한다. Fig. 4 는 이전에 사용한 열전도 방정식에 대류와 복사로 인한 열손실 부분을 더하여 열동력 파도의 전파 속도가 어떻게 변하는 지를 보여주고 있다. 또한 이 계산 과정에서 우리는 반응 상수의 변화에 따라 전파 속도가 어느정도로 변하는 지를 규명하였다. Fig. 3 과 Fig. 4 의 데이터를 비교했을 때, 대류와 복사로 인해 생기는 열손실의 크기는 전파 속도에 크게 영향을 주고 있지는 않음을 알 수 있다. 이는 대류와 복사로 인해 생성되는 열전달 손실이 인접해있는 다른 탄소나노튜브와 화학연료의 동축 구조에 다시 흡수되어 수직으로 정렬되어 있는 다중 구조를 따라 축 방향으로 전달되기 때문이다(Fig. 5). 이러한 이유로 대류와 복사 열손실은 많은 수의 탄소나노튜브와 화학연료의 동축 구조가 다중 구조로 정렬 되어 있을때는 열동력 파도의 속도를 결정하는 요인에서 작은 부분만을 차지한다는 결론을 내릴 수 있다.

5. 열에너지 전파와 전기에너지 생성의 상관 관계

전파된 열동력 파도는 전기 에너지 생성 과정과

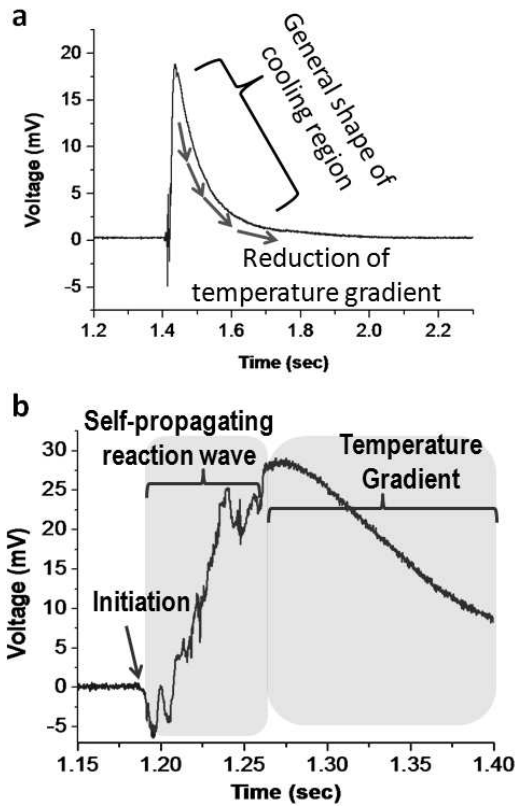


Fig. 6 Thermopower voltage signal in reaction zone and cooling zone (a). Thermopower voltage signal is divided into two regions (b). Oscillation zone indicates reaction time, and smooth zone reflects cooling time (Temperature gradient).

밀접한 연관을 가지고 있다. 열동력 파도 전파 과정과 그 이후에 기록된 전기 신호를 비교해보면 크게 진동하며 전기 에너지 생성이 증가하는 지역과 진동 없이 감소하며 에너지 생성이 감소하는 지역으로 구분할 수 있다.(Fig. 6) 기존의 화학연료 화염 전파 이론에 따르면 전파되는 화염의 가장 앞부분의 이동 속도는 강하게 진동하며 이러한 진동의 주파수는 화학 연료의 종류에 따라 달라질 수 있다.^(25,26) 열동력 파도 현상도 마찬가지로 나노 구조의 물질안에서 화학연료의 화염이 전파되는 것이며 이러한 화염 전파 시간이 전기 에너지 생성 과정에서 진동하는 부분의 시간과 동일함을 측정할 수 있었다. 이는 열동력 파도의 전기 에너지 생성과정은 강하게 진동하는 앞부분의 경우, 실제 화염이 전파되는 과정이며, 그 이후의 감소 과정은 나노물질의 냉각 과정에서의 온도차로 인해 유지되는 전기에너지 생성 과정이라고 예측할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서 우리는 열동력 파도 현상에 대해

구체적인 기작을 보고하였다. 탄소나노튜브의 정렬 구조가 열동력 파도의 전파 속도에 어떤 영향을 미치는지를 규명하였다. 또한 모델링 과정에서 온도 변화에 따른 탄소나노튜브와 화학연료의 성질 변화, 그리고 대류, 복사 등의 열손실이 열동력 파도의 전파에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하였다. 마지막으로 열동력 파도의 물리적 현상이 이 과정에서 생성되는 전기에너지 생성과 어떠한 상관 관계가 있는지를 구체적으로 논의하였다. 위의 연구 내용들은 최근 새롭게 제안된 열동력 파도 현상을 보다 구체적으로 이해하고, 또한 그 효율성에 영향을 미치는 여러 요인들을 고려함에 따라 향후 전기 에너지 생성 및 열전파의 효율성을 높이는데에 기반이 될 수 있다. 이는 Microsystem을 위한 신개념의 에너지원, 기존의 에너지 생성 과정에서 발생하는 잔류연료를 이용하여 전체 효율을 향상시키는 새로운 방법으로 응용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Dresselhaus, M. S. and Avouris, P., 2001, "Introduction to Carbon Materials Research," *Top Appl Phys* Vol. 80, No., pp. 1~9.
- (2) Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Hiura, H., Bennett, J. W., Ghaemi, H. F. and Thio, T., 1996, "Electrical Conductivity of Individual Carbon Nanotubes," *Nature* Vol. 382, No. 6586, pp. 54~56.
- (3) Ando, Y., Zhao, X., Shimoyama, H., Sakai, G. and Kaneto, K., 1999, "Physical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes," *Int J Inorg Mater* Vol. 1, No. 1, pp. 77~82.
- (4) Yu, C. H., Shi, L., Yao, Z., Li, D. Y. and Majumdar, A., 2005, "Thermal Conductance and Thermopower of an Individual Single-Wall Carbon Nanotube," *Nano Lett* Vol. 5, No. 9, pp. 1842~1846.
- (5) Adu, C. K. W., Sumanasekera, G. U., Pradhan, B. K., Romero, H. E. and Eklund, P. C., 2001, "Carbon Nanotubes: A Thermoelectric Nano-Nose," *Chem Phys Lett* Vol. 337, No. 1-3, pp. 31~35.
- (6) Sumanasekera, G. U., Pradhan, B. K., Romero, H. E., Adu, K. W. and Eklund, P. C., 2002, "Giant Thermopower Effects from Molecular Physisorption on Carbon Nanotubes," *Phys Rev Lett* Vol. 89, No. 16, p. 166801.
- (7) Chang, C. W., Okawa, D., Majumdar, A. and Zettl, A., 2006, "Solid-State Thermal Rectifier," *Science* Vol. 314, No. 5802, pp. 1121~1124.
- (8) Chang, C. W., Okawa, D., Garcia, H., Majumdar, A. and Zettl, A., 2007, "Nanotube Phonon Waveguide," *Phys Rev Lett* Vol. 99, No. 4, p. 045901.

- (9) Kim, P., Shi, L., Majumdar, A. and McEuen, P. L., 2001, "Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes," *Phys Rev Lett* Vol. 8721, No. 21, p. 215502.
- (10) Takashiri, M., Takiishi, M., Tanaka, S., Miyazaki, K. and Tsukamoto, H., 2007, "Thermoelectric Properties of n-Type Nanocrystalline Bismuth-Telluride-Based Thin Films Deposited by Flash Evaporation," *J Appl Phys* Vol. 101, No. 7, p. 074301.
- (11) Zhao, X. B., Ji, X. H., Zhang, Y. H., Zhu, T. J., Tu, J. P. and Zhang, X. B., 2005, "Bismuth Telluride Nanotubes and the Effects on the Thermoelectric Properties of Nanotube-Containing Nanocomposites," *Appl Phys Lett* Vol. 86, No. 6, p. 062111.
- (12) Li, L., Yang, Y. W., Huang, X. H., Li, G. H., Ang, R. and Zhang, L. D., 2006, "Fabrication and Electronic Transport Properties of Bi Nanotube Arrays," *Appl Phys Lett* Vol. 88, No. 10, p. 103119.
- (13) Boukai, A. I., Bunimovich, Y., Tahir-Kheli, J., Yu, J. K., Goddard, W. A. and Heath, J. R., 2008, "Silicon Nanowires as Efficient Thermoelectric Materials," *Nature* Vol. 451, No. 7175, pp. 168~171.
- (14) Venkatasubramanian, R., Siivola, E., Colpitts, T. and O'Quinn, B., 2001, "Thin-Film Thermoelectric Devices with High Room-Temperature Figures of Merit," *Nature* Vol. 413, No. 6856, pp. 597~602.
- (15) Choi, W., Hong, S., Abrahamson, J. T., Han, J. H., Song, C., Nair, N., Baik, S. and Strano, M. S., 2010, "Chemically Driven Carbon-Nanotube-Guided Thermopower Waves," *Nat Mater* Vol. 9, No. 5, pp. 423~429.
- (16) Hata, K., Futaba, D. N., Mizuno, K., Namai, T., Yumura, M. and Iijima, S., 2004, "Water-Assisted Highly Efficient Synthesis of Impurity-Free Single-Walled Carbon Nanotubes," *Science* Vol. 306, No. 5700, pp. 1362~1364.
- (17) Parr, T. and Hanson-Parr, D., 1998, "RDX Ignition Flame Structure," *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, Vols 1 and 2* Vol., No., pp. 2301~2308.
- (18) Oyumi, Y., 1988, "Melt phase Decomposition of RDX and Two Nitrosamine Derivatives," *Propell. Explos. Pyrot.* Vol. 13, No., pp. 42~47.
- (19) Liao, Y. C., Kim, E. S. and Yang, V., 2001, "A Comprehensive Analysis of Laser-Induced Ignition of RDX Monopropellant," *Combust. Flame* Vol. 126, No. 3, pp. 1680~1698.
- (20) Volkov, E. N., Paletsky, A. A. and Korobeinichev, O. P., 2008, "RDX Flame Structure at Atmospheric Pressure," *Combust. Explos. Shock* Vol. 44, No. 1, pp. 43~54.
- (21) Richard E. Sonntag, G. J. V. w., 1991, *Introduction to Thermodynamics: Classical and Statistical*. 3rd ed ed., John Wiley & Sons:.
- (22) Begtrup, G. E., Ray, K. G., Kessler, B. M., Yuzvinsky, T. D., Garcia, H. and Zettl, A., 2007, "Probing Nanoscale Solids at Thermal Extremes," *Physical Review Letters* Vol. 99, No. 15, p. 155901.
- (23) Li, C. Y. and Chou, T. W., 2004, "Modeling of elastic Buckling of Carbon Nanotubes by Molecular Structural Mechanics Approach," *Mechanics of Materials* Vol. 36, No. 11, pp. 1047~1055.
- (24) Li, C. Y. and Chou, T. W., 2005, "Quantized Molecular Structural Mechanics Modeling for Studying the Specific Heat of Single-Walled Carbon Nanotubes," *Physical Review B* Vol. 71, No. 7, p. 075409.
- (25) Weber, R. O., Mercer, G. N., Sidhu, H. S. and Gray, B. F., 1997, "Combustion Waves for Gases ($L_e=1$) and Solids ($L_e \rightarrow \infty$)," *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences* Vol. 453, No. 1960, pp. 1105~1118.
- (26) Please, C. P., Liu, F. and McElwain, D. L. S., 2003, "Condensed Phase Combustion Travelling Waves with Sequential Exothermic or Endothermic Reactions," *Combustion Theory and Modelling* Vol. 7, No. 1, pp. 129~143.