

나노유체의 전자기기 방열분야로의 응용과 미래

이 준 상 (연세대학교 공과대학 기계공학부)

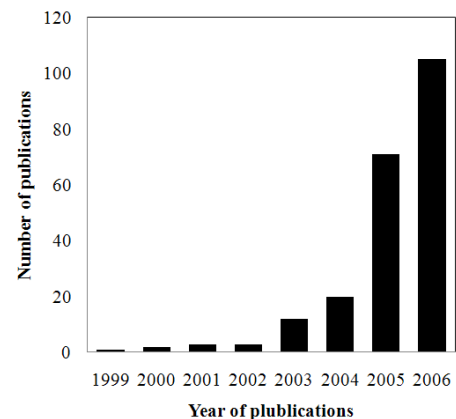
I. 서 론

최근 들어 정밀한 회로나 마이크로프로세서 등의 장치가 급격히 개발됨에 따라 전자 장치에 대한 냉각 문제가 중요해 지고 있다. 특히 이러한 장치의 밀집 정도가 기술 개발에 따라 더 높아짐에 따라 냉각장치 개발은 큰 문제로 대두되고 있다. 최근 ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors)에 따르면 2018년 Integrated semiconductors는 280 제곱 밀리미터 크기의 칩위에 98억 개 이상의 트랜지스터를 수용할 것으로 기대되는데 이는 현재의 40배나 이르는 규모이다 (<http://www.itrs.net/>). 이러한 높은 성능의 프로세서를 갖춘 컴퓨터와 서버는 제곱센티미터당 100-300와트 규모의 출력이 필요하다. 그리고 제곱센티미터당 300와트 규모의 출력이 필요하다고 하였을 때 제곱미터당 10메가와트 이상의 열을 발생시킬 것으로 계산되는데 이러한 수준의 열을 처리할 수 있는 시장가치가 있는 냉각장치는 아직까지 개발되지 않았다. 이러한 장치의 냉각기술에서 현재 주로 사용되는 공기냉각기술은 한계에 도달했고 이 문제를 극복하기 위해 액체냉각기술이 주목받고 있다.

하지만 현재까지 진행된 모든 노력들은 지나치리만큼 유체전달 메커니즘에 묶여있어 왔고(예, 난류, boundary layer modification) 가장 중요한 과학적 원인인 유체, 즉 물은 열을 전달함에 있어서 좋지 않은 특성 (property)을 가지고 있다는 사실에 주의를 많이 기울이지 못한 것이 사실이다. 또한 이러한 효율성 낮은 전도체 (poor conductor)를 개선하기 위해 이용한 이상유동 (macro 또는 micro

particle)들은 지나치게 큰 입자 사이즈로 인해 일정 시간 후 침전을 일으키는 문제를 가지고 있다. 따라서 보다 더 유체에 부유가 (suspension) 잘되는 그리고 보다 더 혁신적인 열전달을 일으킬 수 있는 나노유체 (nanofluid)개발의 필요성이 요구된다.

나노유체란 유체 속에 나노사이즈의 입자가 부유 (suspended)된 형태를 가리키며 열전달률이 기존의 방법보다 최소 40%이상 증가한다는 연구결과가 발표되었다 (Kondaraju et al. ^[1]). 또한 기존의 마이크로유체에서 보여준 침전, 부식, 유체 압력저하 현상, 비뉴턴의 성질 등을 개선할 수 있는 방법으로 상당히 각광을 받고 있다. 위와 같은 혁신적인 발견은 2000년대 많은 양의 나노유체연구를 기계 물리 화학분야 위주로 이뤄내는 성과를 얻었으며 “cooling fluid of the future”라는 별명을 얻게 된다 [그림 1]. 그리고 나노유체의 강한 온도변화에 대한 특성은



[그림 1] 나노유체 관련한 논문수 (Kondaraju ^[2])

[Table 1] Materials of nonparticle and base fluids
(www.kostic.niu.edu/DRnanofluids/nanofluids-Kostic.ppt)

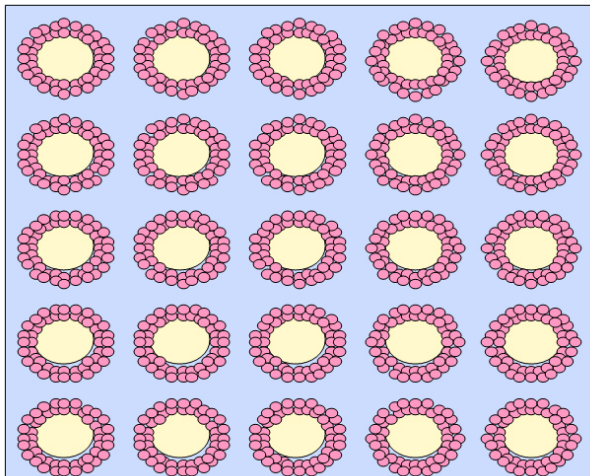
Nanoparticle materials include	Base fluids include
- Oxide ceramics – Al_2O_3, CuO	- Water
- Metal carbides - SiC	- Ethylene-or tri-ethylene-glycols and other coolants
- Nitrides – AlN, SiN	- Oil and other lubricants
- Metals – Al, Cu	- Bio-fluids
- Nonmetals – Graphite, carbon nanotubes	- Polymer solutions
- Layered – Al + $Al_2O_3, Cu + C$	- Other common fluids
- PCM – S/S	
- Functionalized nanoparticles	

“smart fluid”란 영역으로 확대되어 가고 있다.

나노유체는 보통 [Table 1]과 같은 base fluid와 고체입자를 사용한다.

미국 국립기관인 Argonne 연구소의 나노유체의 열전도 향상에 대한 가설에 따르면 고체입자 주변에 액체 분자가 층을 이루며 둘러싸게 되고 이 나노층이 열이 흐르는 가교 역할을 함으로써 고체입자와 액체 사이의 열전도율이 향상된다 라고 설명하고 있다 [그림 2].

사실 유체에 고체입자의 부유 (suspension)를 이용한 열전달 향상 연구는 한 세기 전부터 진행되었다. 19세기에 맥스웰이 유체에 고체 입자를 넣어 열전도 능력을 향상시킬 수 있음을 밝혀냈다. 그 당시 밀리미터 크기의 입



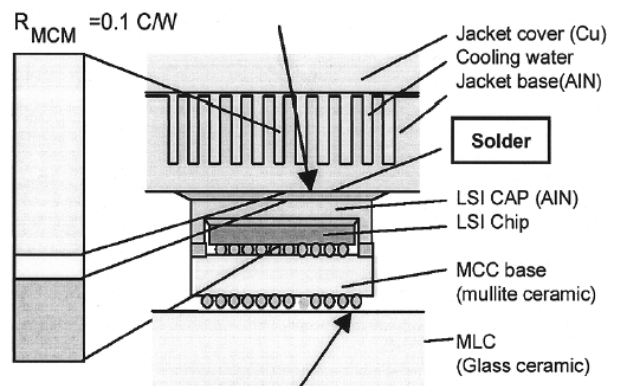
[그림 2] Schematic cross of nanofluid structure consisting of nanoparticles, bulk liquid, and nanolayers at solid/liquid interface (Argonne National Laboratory, www.anl.gov)

자로 시작하였고 오늘날 이르러 입자가 마이크로 수준으로 다루어졌으며 최근 들어 나노크기로 연구되기 시작한 것이다. 마이크로 크기의 입자를 활용한 냉각기술은 마이크로 채널에 사용되면 유체의 흐름이 고체입자로 방해될 수 있어 초소형 냉각 장치 사용에 적합하지 않다. 또한 침전, 부식 그리고 추가적인 압력하강 특히 뉴턴의 특징에서 벗어나는 입자의 운동들이 장애가 되었다. 하지만 100 나노 이하 크기의 나노 입자의 분산에 의한 냉각장치에 있어서 나노유체 기술은 마이크로 입자에 비해 표면적당 당는 입자의 면적이 백만 배 이상 크고 또한 입자들에 미치는 중력의 영향들이 작아 안정화되고 열전도에 있어서 향상된 냉각이 가능하다.

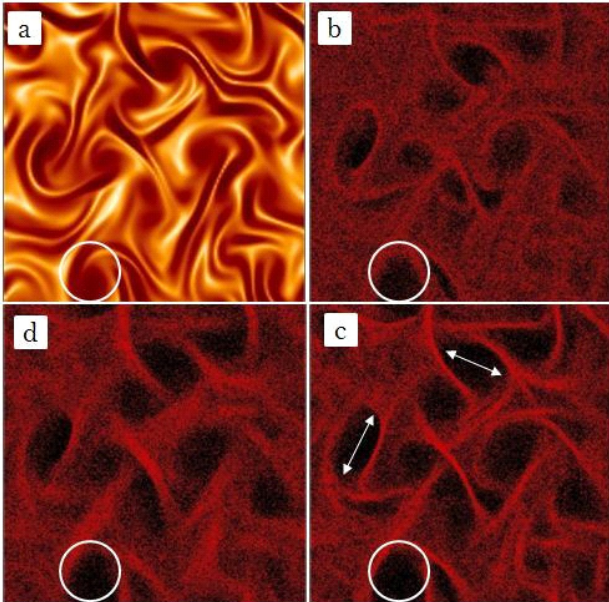
II. 나노 유체의 적용 사례와 유용성

[그림 3]은 마이크로 채널이 사용된 프로세서의 냉각장치이다. 이러한 마이크로 채널을 다루는데 있어서 기존의 마이크로 유체는 채널 내에 침착되고 유체 흐름의 저항을 일으킬 수 있어 채널의 소형화된 설계가 어려웠지만 나노유체를 활용함으로써 열전도율이 향상되면서도 더욱 소형화된 채널설계가 가능하다.

실험과 더불어 모델링 알고리즘 개발도 많은 연구자들이 참여하고 있다. 대표적인 예가 Kondaraju^[2]의 multiphase flow modeling 기법으로 기존에 실험에서 볼 수 없던 나노입자 사이의 역학관계 그리고 나노입자와 유체공동 열



[그림 3] Advanced Package with microchannel technology (Eijkkel andvan den Berg^[3])



[그림 4] (a)Vorticity gradient with dark regions indicating high vortex regions and lighter regions indicating low vortex regions. Spatial distribution of particles at the end of the simulation are shown for (b) $St_i = 1.0$, (c) $St_i = 2.67$ and (d) $St_i = 5.0$. Particle clustering phenomenon correlates with the low vortex zones. High particle clustering is observed for (c) compared to (b) and (d). White lines in (c) indicate the voids present in the spatial distribution, White circle in (a) shows the high vortex region and white circles in (b), (c) and (d) correspond to spaces created at same location (Kondaraju [2])

전달에 이르는 복잡한 현상을 모델링으로 구현했다. [그림 4]는 나노입자크기에 따른 입자특성을 모델링을 통해 보여주고 있다.

III. 현재 냉각기술에 있어서 나노 유체의 과제

나노입자와 base 유체의 분자 사이에서 물리적 화학적 표면 상호작용에 관하여 아직 알려지지 않은 부분이 많이 남아 있다. 복잡한 나노 유체를 효과적으로 더 넓은 범위에서의 응용하기 위해서는 이론적 메커니즘이 규명되어야 할 것이다. 이러한 나노유체의 규명작업에는 새로운 실험 방법이 필요하다. 특히, 나노입자와 base fluid의 분자 사

이에서 물리와 화학 상호작용이 포함되는 현상을 효과적으로 다루기 위해서는 컴퓨터 모델링 개발이 필요하다.

현재 국내에서는 몇몇 대학기관이 중심으로 나노유체의 이론적 적립을 연구하고 있다. 하지만 아직까지 많은 인프라가 없는 관계로 그 연구발전 속도는 미미한 상태이다. 외국은 미국의 아곤 국립연구센터에서 활발히 연구를 시행하고 있으며 수많은 연구소와 학교에서 나노유체의 필요성에 때문에 활발히 연구하고 있는 상황이다.

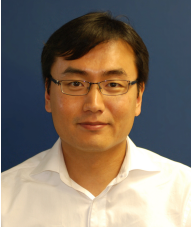
하지만 이런 긍정적인 발견에도 불구하고 아직까지 많은 도전과제가 남아있다. 우선 나노입자의 역학관계 그리고 그 주변의 유동특성 등이 아직 명확히 규명되지 못했고 나노입자의 응집(aggregation)에 대한 보다 더 명확한 해답을 못 얻고 있다. 이러한 이유로 아직까지 나노유체에서의 열전달증가에 대한 과학적 접근이 제한을 받고 있다. 또 최근에 발견된 분야라 아직 많은 분야로의 응용이 떨어지고 있다. 특히 전자기기 분야의 히트싱크(heat sink)방법으로 나노유체 연구자들이 많은 제안을 하고 있지만 아직까지 전자기기 분야와 기계, 물리분야 연구자의 융합연구가 덜 이뤄지고 있어서 기술력 확보를 위해 시급히 시행돼야 할 것이다. 이러한 발전이 이뤄져야 나노유체를 이용한 “cooler future”가 조만간 실현될 수 있으리라 본다.

참고문헌

- [1] S. Kondaraju, E.K. Jin, and J.S. Lee, “Investigation of Thermal Conductivity of Nanofluids using Direct Numerical Simulations,” Int. J. Heat Mass Transf. (Accepted).
- [2] S. Kondaraju, “Analysis of Thermophysical Properties of Nanofluids using Discrete Particle Modeling,” Ph.D. Thesis, Wayne State University, Detroit, MI, USA.
- [3] J. C. T. Eijkel and A. van den Berg, “Nanofluidics: What is it and what can we expect from it?” Microfluid Nanofluid (2005) 1: 249-267.

저 자 약 력

이 준 상



- Education : Iowa State University (Mechanical Engineering), Ph.D. 2004
- Iowa State University (Mechanical Engineering), M.S. 1999
- Iowa State University (Mechanical Engineering), B.S. 1997
- 2009년~현재 : 연세대학교 기계공학부 조교수
- 2004년~2009년 : Wayne State University, Detroit, MI, USA, Assistant Professor
- 2004년 : Iowa State University, Ames, IA, USA, Lecturer
- 2002년~2003년 : Maytag Corp., Amana, IA, USA, Engineer
- 관심분야 : 전산유체, Rheology, bio/nano fluidics