

차세대 냉각 및 운할매체용 나노유체 개발 동향

최 철 선임연구원 (한전 전력연구원 전력소재그룹)

1. 서론

최근 전 세계적인 유가 급등 및 급속한 지구 온난화 현상은 이제 '에너지를 어떻게 확보하고 생산할 것인가' 뿐만 아니라 '생산된 에너지를 어떻게 사용하고 관리할 것인가' 까지 중요 문제로 부각되게 하고 있다. 이런 맥락에서 대부분의 산업에서 핵심 장치로 사용되는 각종 열교환기 및 운할기기의 에너지 효율 향상에 많은 관심이 모아지고 있다. 즉, 1차 에너지의 80~90%가 각종 열교환기/운할기기를 통해 순환되기 때문에 현재 40% 수준인 에너지 효율을 대폭 향상시킬 수 있다면, 국가적 차원에서 에너지 절약은 물론이고 온실가스 배출량 감축에도 상당 수준 기여가 가능하다. 이에 따라 최근 차세대 열전달 및 운할매체로 전 세계적 주목을 받고 있는 것이 나노유체(Nanofluid)이다.

나노유체는 액체보다 열전도도가 수백~수만 배 뛰어난 고상 나노입자를 액체 냉매 속에 미량 분산시킨 것으로, 최근에는 유체의 열전달 특성뿐만 아니라 급속/급속 마찰부의 운할특성까지도 대폭 향상시킬 수 있음이 밝혀진 새로운 개념의 열전달 및 운할매체이다. 액체 냉매에 열전도도가 뛰어난 고형입자를 첨가하면 유체의 열전달 특성이 대폭 향상될 수 있다는 이론은 이미 1881년 영국 과학자 맥스웰(Maxwell)에 의해 제시됐다. 그러나 당시에 제조 가능한 최소 고형입자 크기가 수 μm 수준으로 매우 커 침전, 마모, 관막힘, 압력 강하 등의 많은 문제를 일

으켰고, 이 때문에 상용화되지 못했다. 그러나 최근 50 nm 이하의 나노 소재 합성이 가능해짐에 따라, 미국 Argonne 연구소의 Dr. Choi 연구팀은 1999년 세계 최초로 일반 열유체에 나노입자를 미량 분산시킨 나노유체(그림 1)를 제조하고, 이것의 열전도도가 자신들의 이론적 예측과 같이 대폭 향상됨을 발표하였다 [1]. 이와 같이 제조된 나노유체는 기존의 혼합유체가 가졌던 각종 실용상 문제점들을 일거에 해결함으로써 실적용 가능성이 매우 높을 뿐만 아니라, 각종 냉각시스템의 고효율화, 소형화 및 경량화를 가능케 함으로써 새로운 기기/부품 개발을 촉진하고, 마찰/운할 및 바이오 분야에도 응용됨으로써 무한한 성장 잠재력을 가진 미래 기술로 인식되고 있다. 다만 나노유체 제조공정에 대한 관심 부족, 각 연

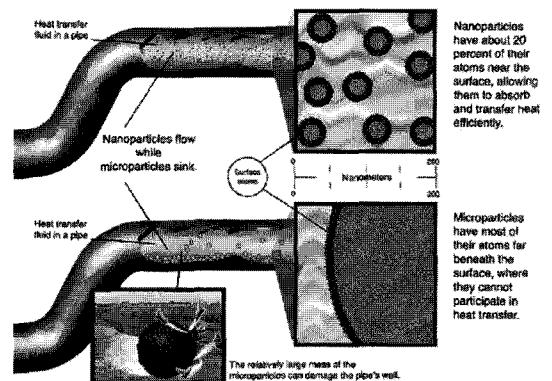


그림 1. 나노유체와 마이크로 유체의 비교.



구자마다의 실험결과 불일치, 유체 물성에 대한 정확한 평가 및 열전달/유티 메커니즘의 이론적 이해의 부족 등으로 인하여 나노유체 상용화가 지연되고 있어, 이에 대한 보다 적극적인 관심과 투자가 요구되고 있다.

2. 나노유체 제조기술

나노유체는 물이나 오일과 같은 기존 냉매 또는 유티매체에 나노분말을 미량 분산시킨 일종의 혼합 유체이다. 기본 개념이 이처럼 매우 간단하기 때문에 나노유체 제조를 물에 커피 타는 것으로 비유하기도 하지만, 실제로 나노유체는 단순한 고/액 혼합체가 아니며 특별한 분산처리를 필요로 한다. 즉, 나노분말을 물이나 오일에 균일하고 안정되게 분산시키는 것은 매우 어려워서 나노유체 개발에 있어 핵심 기술로 이해되고 있으며, 동시에 가장 큰 장애물로 작용하고 있다. 이것은 나노분말의 표면적이 질량과 체적에 비해 매우 커서 표면에너지를 줄이기 위해 이웃 입자들과 결합하여 조대한 응집체(Agglomerates)를 형성하기 때문이다. 일반적으로 나노유체 제조에 사용되는 나노분말은 10~50 nm 크기를 가지지만, 분말 응집체는 수백 nm ~ 수십 μ m 수준으로 과거 마이크론 분말이 보였던 침전과 같은 문제점들을 똑같이 가진다. 액상 용매 속의 나노분말이 침전되면 더 이상 나노유체가 아니기 때문에 냉각 또는 유티특성도 액상 용매 수준으로 감소하며, 침전된 나노분말은 더 이상 첨가물이 아닌 불순물로 인식된다. 따라서 장기적으로 안정된 분산상의 나노유체를 제조하기 위해서는 가장 먼저 나노분말 응집체를 1차 입자 수준으로 다시 분리시키는 작업이 필요하며, 이것을 습식분산(Wet-Dispersion) 공정이라고 한다. 나노유체 연구 초기에는 단순 교반이나 초음파세척기를 이용하여 나노분말을 분산시켰으나, 나노분말 응집체 구조를 깨뜨리는데 큰 효과가 없어서 대부분 시료에서 수일 내에 침전이 발생하였다. 최근에는 보다 효율적인 습식분산을 위해 비드밀(Bead Mill), 초음파분산기(Ultrasonicator), 고압균질기(Homogenizer)와 같은 고에너지 분산

기구를 주로 사용하고 있다.

이러한 기기들을 적정 조건에서 사용하면 분말 응집체를 1차 입자 수준으로 분리시킬 수는 있으나, 시간이 경과하면 분말 사이에 작용하는 반데르발스 인력에 의해 재응집 현상이 발생한다. 따라서 분말 사이에 작용하는 인력 대신에 척력이 작용하게끔 분말 표면을 제어할 필요가 있다. 나노분말의 표면특성은 계면활성제(Surfactant) 등을 이용하여 화학적으로 변화시킬 수 있는데, 이러한 과정을 표면개질(Surface Modification)이라고 한다. 대표적인 방법은 용매의 pH값을 변화시키거나 분산제를 사용하여 분말 표면전하에 의한 정전기적 반발력(Electrostatic Repulsion)을 유도하거나, 긴 탄화수소 체인을 가진 분산제를 분말 표면에 흡착시켜서 분말 사이의 직접 접촉을 억제하는 입체장애효과(Steric Hindrance)를 이용하는 방법이 있다. 다만 표면개질 과정에서 첨가되는 계면활성제는 주로 나노분말과 액상 분산매 특성에 따라 선정되며, 나노유체를 고온에서 장기간 사용하여도 화학적 변화를 일으키지 않아야 한다.

상기 방법은 크게 나노분말의 합성과 표면개질을 포함한 분산공정의 2단계로 나눌 수 있어, 흔히 Two-Step Method라고 한다. 이에 반하여 미국 Argonne 연구소 연구팀은 나노입자의 제조와 분산 공정을 한꺼번에 처리할 수 있는 Single-Step Method를 개발하여 높은 열전도도와 분산특성을 동시에 얻을 수 있다고 보고하였다 [2]. 이것은 액상 분산매와 분산시키고자 하는 나노소재를 진공 챔버 속에 함께 넣고 나노소재를 기화시키자마자 분산매에 응축시킴으로써 나노입자의 형성과 유체 속 분산 공정을 동시에 행하는 방법이다(그림 2). 이 방법을 순금속 소재에 응용할 경우, 분말의 응집을 최소화하고 분말 표면에 대한 공기의 접촉을 배제함으로써 산화층 형성을 억제할 수 있다는 장점을 가지지만, 낮은 증기압 유체에 대해서만 적용 가능하고 공정이 복잡할 뿐만 아니라 장시간이 소요됨에 따라 현재는 많이 사용되고 있지 않다.

나노유체의 분산성은 대체하고자 하는 순수 유체가 사용되는 조건에 따라서 확보해야할 수준이 달라질 수 있다. 예를 들어 주스와 같은 식음료품은 유티

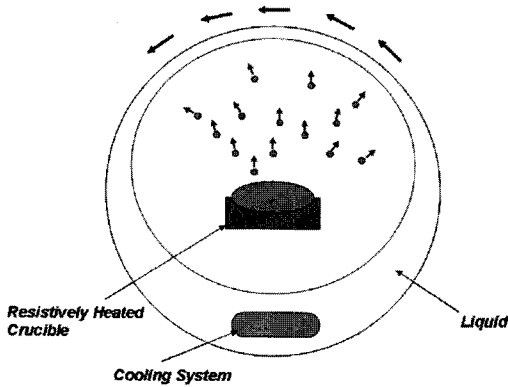


그림 2. Single-Step 나노유체 제조장치 도식도.

기간 내에서만 뚜렷한 침전이 발생하지 않으면 되는 것과 같다. 지금까지 나노유체의 분산성은 시간 경과에 따른 분말의 침전 정도를 육안으로 관찰하는 정도였으나, 최근에는 대기압은 물론이고 원심력 작용 조건에서 다중광산란 (Multiple Light Scattering) 방식으로 근적외선의 투과 또는 반사 정도로써 분산성을 정량적으로 평가하는 기술이 사용되고 있다 (그림 3). 원심력 작용 하에서 분산성을 평가하면 사용 기간이 수년 이상 장시간인 시료에 대하여 장기 분산성을 예측할 수 있지만, 시간 경과에 따라 시료 내부에서 화학적 반응이 발생하거나 대기압에서는 장시간 유지하여도 침전이 발생하지 않지만 원심력

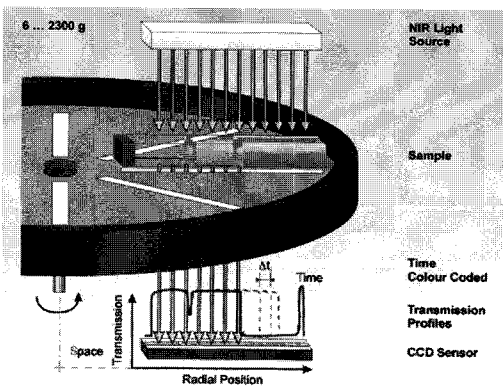


그림 3. 근적외선을 이용한 분산안정성 평가 원리 도식도.

을 가하면 바로 침전되는 시료도 존재하기 때문에 정확한 예측이 힘들다. 또한 탄소나노튜브와 같은 탄소 소재 및 일부 금속분말을 이용하여 제조한 나노유체의 경우, 유체 자체가 매우 불투명한 흑색을 띠며 빛을 흡수하는 특성을 가지기 때문에 근적외선으로도 정확한 분석이 어려운 단점을 가진다.

분산성 확보 외에 나노유체를 제조함에 있어서 특히 주의해야 할 것은 점도 (Viscosity)의 유지이다. 이것은 대부분의 나노유체가 정적인 상태가 아닌 순환펌프에 의해 계속적으로 움직이는 동적 상태에서 사용되기 때문이다. 즉, 나노분말을 첨가함에 의해 유체의 점도가 증가하면 그만큼 순환펌프의 부하가 상승하고 그 결과 기기의 전력소모량이 증가하는 문제를 가진다. 따라서 나노유체 적용에 따른 냉각/유회 효율 증가는 점도 상승률보다 훨씬 높아야만 실용적 가치를 가진다. 물이나 에틸렌글리콜과 같은 저점도 액상 용매에서는 다량의 분말을 첨가하여도 점도가 크게 상승하지 않지만, 오일과 같은 고점도 용매에서는 분말 첨가량에 비해 점도 상승폭이 상대적으로 크기 때문에 분말 첨가량이 수 vol.% 이내로 제한된다 (나노분말의 True Density 적용 기준). 나노유체의 냉각특성은 분말의 농도에 비례하여 증가하는 경향을 가지므로, 이런 측면에서만 보면 고점도 물질에 대해서는 냉각특성 향상폭이 일정 수준 이하로 제한된다고 볼 수 있다. 또한 유체의 점도가 증가하면 그 속에 분산된 분말의 브라운 운동도 제한되기 때문에, 열전도도 및 대류열전달계수 상승폭도 상대적으로 감소한다.

이처럼 대부분의 냉각/유회매체가 동적 상태에서 사용되기 때문에 한편으로는 나노유체가 완벽한 분산성을 가질 필요가 없다고 생각할 수 있다. 즉, 순환시스템에 의해 유체 유동조건이 계속 유지된다면 분말의 침전 문제는 일정 부분 무시할 수 있으며, 또한 간헐적으로 순환시스템이 정지할지라도 재가동시에 침전된 분말의 재분산이 쉽게 일어난다면 약간의 침전은 문제가 되지 않는다. 그러나 동일 농도의 나노분말이 분산된 나노유체도 분산 정도에 따라서 점도와 기타 물성이 다르게 나타나기 때문에, 유체의 분산성 확보는 여전히 중요한 문제로 남는다 [3]. 결국 고효율 나노유체를 제조하기 위해서는 높은 분



산성과 점도의 유지(또는 가능하다면 강하)가 함께 요구된다고 말할 수 있다.

3. 냉각용 나노유체

전기/전자, 기계, 화학 등 대부분 산업에서 가장 중요하고 빈번하게 발생하는 문제점은 날로 심각해지는 핵심 기기 및 부품의 발열문제이다. 최근 각종 기기 및 부품의 고성능 멀티기능화, 슬림화 및 고집적화가 가속화되면서 이들 발열부의 온도는 전기저항, 화학반응, 마찰 등 다양한 이유로 인해 급상승하고 있으며, 그 결과 신제품 개발에 큰 장애물로 작용하고 있다. 따라서 보다 고효율/초소형 냉각 시스템을 개발하기 위한 노력이 시급히 요구되고 있다 [4]. 과거에는 냉각 시스템의 냉각효율 증대를 위해 유로 구조 개선 및 방열면적 극대화와 같은 설계변경을 시도하였으나, 이러한 방식의 열전달 효율 증대는 이미 한계에 도달한 것으로 판단되고 있다. 따라서 현재는 냉각매체 자체의 열전달 효율 증가 없이는 더 이상의 효율 향상이 불가하다는 인식이 확산되고 있으며, 최근 개발된 나노유체는 이러한 문제 해결에 가장 효율적으로 대처할 수 있는 차세대 냉각매체로 판단되고 있다. 즉, 나노유체는 첨가되는 나노분말의 크기가 50 nm 미만으로 대단히 작아 이들이 액상분자와 같이 거동하기 때문에, 관막힘/마모 등의 문제가 없어 고집적 에너지가 발생하는 초소형 열교환 장치에 냉매로 사용할 수 있다. 또한 냉각 목적으로 나노유체를 사용함에 있어 가장 큰 장점 중의 하나는 나노유체의 열효율이 유체의 온도가 상승할수록 오히려 증가한다는 데 있다 [5]. 따라서 하절기 또는 과부하가 걸려 유체의 온도가 급상승할 경우, 순수 유체에 비해 훨씬 높은 냉각 성능을 보이게 된다.

나노유체의 열특성은 첨가되는 나노 입자의 크기와 형상에 대단히 민감하다 [6]. 즉, 동일 조성의 나노분말을 함유하더라도 분산된 입자의 크기가 감소할수록 유체의 열특성은 지수 함수적으로 증가한다 [3]. 따라서 나노유체 제조를 위해 첨가되는 분말은 대부분 50 nm 미만의 극미세 분말을 대상으로 하며

평균입도 10~20 nm의 것이 가장 많이 사용된다. 이것은 나노분말의 크기가 작아질수록 입자의 비표면적이 증가하며, 비표면적이 클수록 열전달이 보다 효율적으로 일어나기 때문이다. 예를 들어 직경 20 nm 미만의 나노입자는 표면층의 원자 비율이 전체 원자의 약 20%에 해당되므로 열의 흡수와 전달이 매우 효율적으로 이루어진다. 따라서 나노유체를 사용하여 냉각매체의 열전도도를 3배 증가시킬 수 있다면, 이것은 냉각수 순환펌프의 소요 동력을 10배 증가시켜 열전달 계수를 2배 향상시키는 것과 동일한 효과를 가진다 [7]. 이것은 동일한 순환펌프 용량에서 열교환기의 소형화가 가능함을 의미하며, 자동차와 같은 운송수단에 적용할 경우에는 차체의 무게 감소에 의한 연비 절감까지 기대할 수 있게 된다.

초기 나노유체에 관한 대부분의 연구와 논문에서는 주로 나노유체의 제조, 열전도도 평가 및 나노유체의 열전달 특성을 설명할 수 있는 이론적 메커니즘 제시 등이 다루어졌다. 이 중에서도 가장 비중 있게 다루어진 분야가 열전도도 측정 분야인데, 고체와 달리 나노유체와 같은 액상 물질의 열전도도를 정밀하게 측정하는 것은 대단히 어렵고 측정오차도 매우 크다. 따라서 나노유체의 열전도도 측정 자체가 독립적인 연구 대상이 되고 있다. 현재 사용되고 있는 방법은 비정상열선법 (Transient Hot-Wire Method), 레이저섬광법 (Laser Flash Method), 비정상면열원법 (Transient Plane Source Method), 정상평판법 (Steady-State Parallel-Plate Method) 및 온도진동법 (Temperature Oscillation Method) 등이 있으나, 동일 시료에 대해 각각의 방법으로 얻은 데이터가 잘 일치하지 않아 열전도도 데이터의 객관성을 확보하기가 매우 어려운 실정이다. 또한 동일 방식의 열전도도 측정 장치를 사용하여도 실험자와 세부적인 측정방법에 따라서 데이터가 수십 %씩 달라지기 때문에 실험결과와 재현성과 신뢰도가 매우 낮다. 주요한 액상 열전도도 측정방식을 비교·평가한 결과, 현재로서는 비정상열선법이 데이터의 재현성 및 정확성 측면에서 가장 신뢰할 수 있는 것으로 판단되고 있으며, 또한 현재 가장 범용으로 사용되고 있다.

지금까지 가장 많이 제조되고 평가된 나노유체는



Bearing) 역할을 하거나 화학적 코팅층 형성, 또는 마찰 표면 요철부 또는 손상부를 평탄하게 메워, 원래의 형상으로 복원 재생함으로써 마찰과 마모를 50% 이상 혁신적으로 감소시킨다(그림 6)[10]. 이것은 이미 엔진오일 첨가제 등의 이름으로 중소기업을 중심으로 일부 상용화한 기술이지만, 윤활특성에 효과를 보이는 나노분말의 조성과 크기가 하중 조건별로 제각기 다르게 나타나므로 목적하는 분야에 맞게 나노분말을 선정하는 것이 매우 중요하다. 또한 냉각용 나노유체와 달리 나노윤활유에서는 밀도가 상대적으로 큰 금속분말을 많이 사용함으로써 최소한의 분산성 확보가 매우 중요한 과제로 인식되고 있다. 따라서 일부 고밀도 금속분말을 풀러렌(Fullerene, C₆₀) 구조화하여 밀도를 줄이고 유체에 대한 분산성을 향상시키려는 노력이 윤활유 첨가제 회사를 중심으로 이루어지고 있다. 현재는 주로 시장성이 가장 큰 자동차 엔진오일을 중심으로 연구가 이루어지고 있으나, 고가의 초대형 기어가 사용되는 대형펌프/팬을 중심으로 기기의 고장예방, 수명연장 및 에너지 효율을 증대시키기 위한 목적으로 기어오일에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.

Nano Lubrication

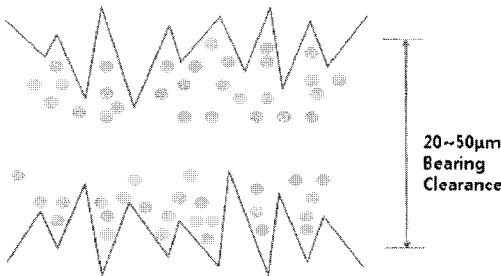


그림 6. 나노분말에 의해 베어링 마찰 손상부가 복원되는 도식도.

5. 나노유체 국외 개발 동향

현재 나노유체 연구는 미국, 중국 및 인도 등에서

대학을 중심으로 활발하게 수행되고 있다. 미국에서의 나노유체 연구는 표면적으로는 미국 에너지부(DOE) 등의 연구비 지원을 받으면서 MIT, Vanderbilt, Northern Illinois, Rensselaer Polytechnic Institute, UCLA, Lehigh, Purdue 등의 대학과 일부 국립연구소를 중심으로 이루어지고 있지만, 비공식적으로는 GM, 포드, 보잉사와 같은 운송업체와 Valvoline과 같은 윤활유/윤활유 첨가제 회사 등을 중심으로 냉각 및 윤활시스템의 에너지 효율을 증대시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 대학 중에서는 MIT가 나노유체 연구센터(Center for Nanofluids Technology)를 설립하여 가장 활발한 연구활동을 보이고 있는데, 원자력발전소 가압경수로 1차 측 냉각수를 나노유체로 대체하기 위한 연구를 집중 수행하고 있다. 또한 MIT는 자동차 회사와 공동으로 그림 7에 보인 것과 같은 다양한 부위에 나노유체를 적용하기 위한 연구도 함께 수행 중이다. Vanderbilt 대학은 테네시 전력회사와의 공동연구에서 다이아몬드 나노분말을 이용하여 순수 절연유 대비 열전도도가 약 70% 향상된 나노절연유 개발에 성공했다고 보고하였으며, Rensselaer Polytechnic Institute 연구진들은 나노유체에 전기장을 가할 때 액적의 형상과 접촉각(Contact Angle)이 변하는 성질을 확인함으로써, 소형 카메라 렌즈, 휴대폰 액정 장치 및 기타 마이크로 유체기기(Microscale Fluidic Device)의 작동유체로써 활용 가능성이 매우 높다고 보고하였다. 나노유체의 실 적용 예는 전기전자 분야에서 가장 많이 찾아볼 수 있는데, 애플 컴퓨터사는 최근 출시된 매킨토시 G5 모델의 냉각매체로 나노유체를 적용하여 CPU 및 그래픽카드를 효과적으로 냉각하고 있다. 또한 민간 분야와 별도로 군사 분야에서 특수 무기시스템을 위한 고효율 냉각/윤활매체로 나노유체를 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다.

중국에서도 대부분의 나노유체 연구는 대학을 중심으로 이루어지고 있으며, 그 중에서도 난징과학기술대학, 중국과학기술대학, 중국과학원, 청도과학기술대학, 산둥대학, 남중국기술대학과 인민군사학교 등에서 연구가 활발하다. 난징과학기술대학의 경우, 달착륙선 냉각시스템의 소형화 및 고효율화를 위하

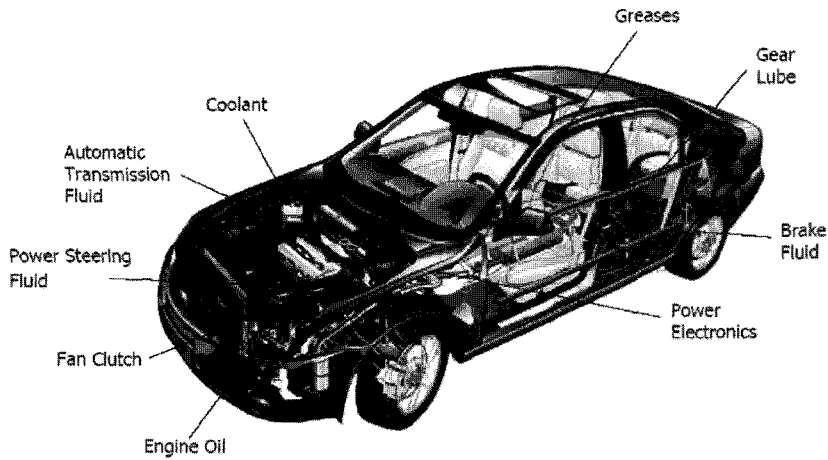


그림 7. 자동차에서 나노유체 적용이 가능한 부위.

여 나노유체를 냉매로 적용하기 위한 연구를 수행하였으며, 실제로 최근 자체 발사된 달착륙선의 냉매로 나노유체를 적용했다고 전해진다. 또한 금속/세라믹 복합소재를 이용한 자동차용 나노윤활유를 개발, 장거리 버스에 시범 적용함으로써 에너지 효율을 크게 상승시킨 바 있다. 이밖에 인도 IIT (Indian Institute of Technology)에서는 나노유체의 비등현상, 열전달특성 평가 및 열전달 메커니즘 연구를, 영국 Leeds 대학에서는 열전달 및 유동현상 연구를 집중적으로 수행하고 있다.

6. 나노유체 국내 개발 동향

나노기술 분야에 대한 연구와 투자는 90년대 후반 이후, 정부의 적극적인 지원에 힘입어 활발히 이루어지고 있지만 대부분 나노분말 합성과 같은 기초 연구개발에 집중되고 있으며, 나노유체와 같은 응용 분야에 대한 연구와 투자는 미미한 실정이다. 그러나 1999년 미국 Argonne 연구소에서 나노유체 연구 결과를 발표한 이후, 이에 대한 관심이 점차 증가하면서, 관련 특허출원이 2000년 전후 15건 정도에서 2006년에는 288건으로 6년 만에 20배 정도의 증가폭을 보였다. 현재 나노유체에 관한 국내 기술개발은 Argonne 연구소로부터 관련 기술을 획득한 신진연

구자들을 중심으로 전력연구원, 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원을 비롯한 연구소와 부산대, 경기대, 고려대, 경희대, 항공대와 같은 대학에서 나노유체 제조, 평가 및 메커니즘 규명 등의 연구가 수행되고 있다.

산업계에서는 벤처 및 중소기업체를 중심으로 전기전자 부품의 냉각매체 또는 대형 기어박스용 윤활매체를 개발하는 상용화 연구가 이어지고 있다. LG전자는 '탄소나노튜브(CNT) 나노유체를 적용한 냉각 시스템을 장착하여 기존 방식보다 CPU와 그래픽카드 온도를 2~3℃ 이상 낮춘 초박형 노트북 PC인 'X 시리즈'를 출시했고, 벤처기업 티티엠에서도 CNT를 이용해 평판 디스플레이나 소형 모바일 기기, 컴퓨터 서버 등에 활용할 수 있는 MTRAN이라는 평판형 냉각시스템을 개발해 주목을 받았다. 윤활 부문에 있어서도 나노윤활유의 적용 사례가 점차 늘고 있는 가운데, POSCO에서는 제철소 대형 기어박스에 다이아몬드 나노윤활유를 적용함으로써 기계마찰과 에너지 소모량을 줄이고 기계수명을 연장하는데 성공하였으며, 중소기업체인 엔바로테크에서는 탄소계 나노윤활유를 개발하여 대형 기어박스에 시험 적용 중에 있다. 이 밖에도 한화나노텍과 나노기술에서도 나노유체 분야에의 진출을 검토 중에 있는 등, 산업계에서의 관련 움직임도 매우 활발하다.



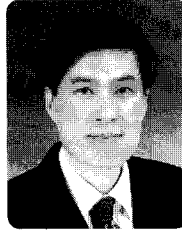
7. 결론

최근 급격한 유가폭등은 에너지원의 해외 의존도가 97%에 달하는 우리나라에 큰 경제적 부담을 안겨주고 있다. 또한 자원확보 경쟁이 날로 심화되고 온실가스 배출량이 세계 10위권인 우리나라에 향후 기후변화협약 제2차 공약기간 중 실질적인 온실가스 감축의무가 부과될 것이 예상되는 만큼 에너지 효율 향상을 위한 대책이 시급히 요구된다. 나노유체는 이에 대한 좋은 해답이 될 수 있다. 즉, 나노유체를 1차 에너지의 80~90%가 순환되는 산업/수송/가정용 냉각/회전운환 계통에 적용한다면 효율 증대에 의해 에너지 비용을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐 아니라, 화석 에너지 사용으로 인한 대기오염 및 온실가스 발생을 저감시킴으로써 환경문제 해결에도 큰 기여를 할 것이 예상된다. 따라서 나노유체 개발에 대한 범국가적 관심과 지원이 요망된다.

참고 문헌

- [1] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li and J.A. Eastman, J. Heat Trans., 121, 280 (1999).
- [2] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, L.J. Thompson and S. Lee, MRS Symposium Proceedings, vol. 457, Pittsburgh, PA, USA, pp. 3-11 (1997).
- [3] X. Wang, X. Xu and S.U.S. Choi, J. Thermophys. Heat Trans., 13, 474 (1999).
- [4] P. Keblinski, J.A. Eastman and D.G. Cahill, Materials Today, 8, 36 (2005).
- [5] S.K. Das, N. Putta, P. Thiesen and W. Roetzel, J. Heat Trans., 125, 567 (2003).
- [6] S.M.S. Murshed, K.C. Leong and C. Yang, Int. J. Thermal Sci., 44, 367 (2005).
- [7] S.U.S. Choi, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-vol.231/MD-vol.66, 99 (1995).
- [8] X.Q. Wang and A.S. Mujumdar, Int. J. Thermal Sci., 46, 1 (2007).
- [9] J. Philip, P.D. Shima and B. Raj, Appl. Phys. Lett., 91, 203108 (2007).
- [10] Y.Y. Wu, W.C. Tsui and T.C. Liu, Wear, 262, 819 (2007).

저자약력



성명 : 최철

◆ 학력

- 1990년 연세대 금속공학과 공학사
- 1993년 포스텍 대학원 재료공학과 공학석사
- 1998년 포스텍 대학원 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 1998년 - 현재

한전 전력연구원 전력소재그룹 선임연구원

