

고효율 나노유체 기술 개발동향

최 철 | 한국전력 전력연구원 선임연구원
(cchoi@kepri.re.kr)

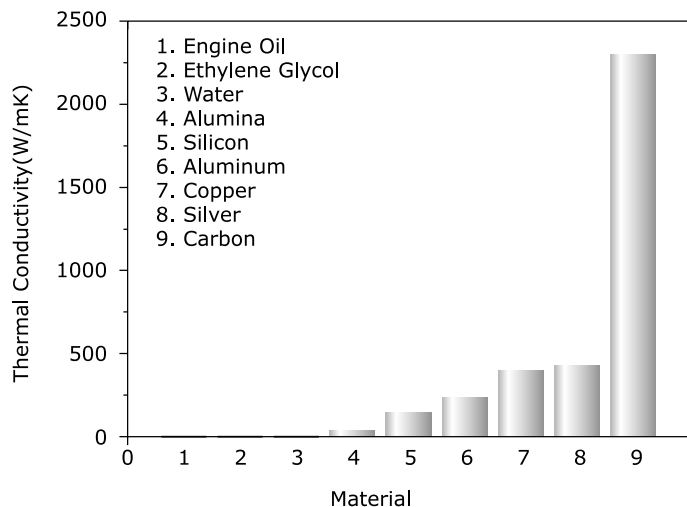
1. 서론

최근에 산업이 첨단·고도화됨에 따라 전 세계적으로 에너지 소비량이 급증하고 있으며, 이에 따라 '에너지를 어떻게 만들 것인가' 뿐만 아니라 '에너지를 어떻게 사용하고 관리할 것인가'도 중요한 문제로 떠오르고 있다. 이런 맥락에서 대부분의 산업에서 주요장치로 사용되고 있는 열교환기(온도가 높은 유체에서 낮은 유체로 열을 전달하는 장치)의 효율은 에너지의 사용, 관리와 직접적인 관련을 맺고 있기 때문에, 이의 효율 향상은 최근에 많은 관심의 대상이 되고 있다. 즉, 1차 에너지의 80~90%가 열교환기를 통해 순환되기 때문에 현재 40% 수준인 열교환기의 효율을 늘릴 수 있다면, 국가적으로 막대한 에너지 절약은 물론 간접적으로 온실가스 배출량 저감에도 도움을 줄 수 있다. 현재 전 산업계에서 가장 많이 사용되고 있는 냉각 시스템은 공랭식이지만, 열효율이 낮기 때문에 급랭을 요하는 설비에는 물을 비롯한 유체가 사용되고 있다. 그러나 이러한 액체도 공기보다는 냉각효율이 높지만, 결정질 고체와 비교하면

열전도도 특성이 매우 낮다. 예를 들어, 상온에서 구리의 열전도도는 물보다 약 650배, 공기보다는 약 15,000배 높다(그림 1 참조). 따라서 이와 같이 낮은 효율의 냉매는 최근의 고집적, 고출력, 대용량 및 소형화 추세의 각종 산업기기 및 전기·전자 부품의 개발에 장애물로 작용하고 있다. 이 때문에 최근 각광을 받고 있는 것이 나노유체이다.

나노유체(Nanofluid)는 액체보다 열전도도가 수백

그림 1. 상온에서의 주요 액체 및 고체 물질의 열전도도 비교



~수만배 뛰어난 고품 나노 입자를 물과 같은 액체 냉매 속에 미량 분산시킨 일종의 혼합 유체로, 최근에는 유체의 열전달 특성뿐만 아니라 금속 마찰부의 윤활 특성까지도 크게 향상시킬 수 있음이 밝혀진 새로운 개념의 열전달 및 윤활 매체이다. 기존의 액체 냉매에 열전도도가 높은 고품입자를 첨가하면 유체의 열전달 특성이 대폭 향상될 수 있다는 이론은 이미 1881년 영국 과학자 맥스웰(Maxwell)에 의해 제시되었다. 그러나 당시에는 제조 가능한 고품입자의 크기가 수 마이크로미터(μm) 수준으로 매우 커서 분말이 쉽게 침전되며, 설사 분말을 순환시켜 침전현상을 억제하더라도 분말에 의한 관 내벽의 마모현상과 관막힘 및 압력 강하 등의 문제를 유발하기 때문에 상용화되지 못하였다. 그러나 최근 소재 성형기술이 눈부시게 발달하면서 50 나노미터(nm) 미만의 나노소재 합성이 가능해짐에 따라 냉매용 혼합 유체 제조 연구가 미국 Argonne National Laboratory(ANL)를 중심으로 다시 활기를 찾게 되었다. 1995년 ANL의 Choi 등은 나노 소재를 분산시켜 제조한 혼합유체를 나노유체(Nanofluid)로 명명하였고, 이것이 기존의 열전달 이론으로는 설명되지 않을 정도의 매우 높은 열전달 특성을 가짐과 동시에, 마이크로 크기 이상의 큰 고품입자를 사용함에 의해 비롯되는 각종 문제점들도 모두 해결될 수 있음을 확인하였다.

나노유체가 매우 높은 열전달특성을 가지는 이유는 대부분 용액 속에 분산된 미세한 고품 입자들의 브라운 운동(Brownian Motion)에서 찾는다. 즉, 크기는 작지만 개수는 상대적으로 많은 나노 입자들이 용액 속에서 불규칙 반복 운동을 하면서 이웃 입자들과 충

돌하게 되고, 그 과정에서 열이 신속하고 효과적으로 전달되기 때문으로 해석된다. 입자의 브라운 운동은 유체의 점도에 큰 영향을 받는데, 일반적으로 점도가 증가하면 입자의 운동이 둔화되고 따라서 열전달 특성이 저하된다. 그러나 이것은 동일 농도에서 점도 변화에 따른 현상일 뿐, 점도가 증가하더라도 분말의 농도가 증가하면 대체로 직선적인 관계로 열전달특성이 향상됨이 여러 실험에서 증명되고 있다. 또한 나노유체의 열특성은 첨가되는 나노 입자의 크기와 형상에 대단히 민감한데, 동일 화학조성의 나노 분말을 함유하더라도 분산된 입자의 크기가 감소할수록 유체의 열특성은 지수함수적으로 급격히 향상되는 경향을 보인다. 이것은 나노 분말의 평균 입도가 감소할수록 열전달에 기여하는 입자 표면층의 원자비율이 매우 높아 신속한 열전달이 가능해지기 때문으로 해석된다. 예를 들어 직경 20 나노미터(nm) 미만의 나노입자는 표면층의 원자 비율이 전체 원자의 약 20%에 해당되므로 열의 흡수와 전달이 매우 효율적으로 이루어진다. 따라서 나노유체를 사용해 냉각매체의 열전도도를 3배 늘리면 냉각수 순환펌프의 소요 동력을 10배 증가시켜 열전달 계수를 2배 향상시키는 것과 동일한 효과를 나타낸다. 이는 동일한 순환펌프 용량에서 열교환기의 소형화가 가능해진다는 얘기며, 자동차와 같은 운송수단에 적용할 경우, 차체 무게 감소와 연비 절감이 가능하게 된다. 또한 최근에 개발되고 있는 각종 전기·전자부품들은 과다한 열의 발생에 의해 제품의 개발이 제한받고 있는데, 나노유체 개념을 이용하여 새로운 초소형 냉각시스템을 개발하면 새로운 첨단 전기·전자부품의 개발을 촉진시킬 것으로 기대된다.

2. 나노유체의 제조

나노유체는 액상 냉매 속에 고상의 나노 입자를 미량 분산시킨 것으로 개념이 매우 간단하기 때문에 첨가할 나노 소재만 개발된다면 제조 공정에 큰 어려움이 없을 것으로 생각된다. 실제로 물이나 에틸렌글리콜 등의 용매에 고히입자를 첨가하여 나노유체를 제조하는 경우에는 충분한 교반과정만 수반되어도 최소 수일~수주의 분산안정성이 확보되지만, 오일을 용매로 하는 나노유체를 제조함에 있어서는 다음과 같은 두 가지 큰 장애물에 직면한다.

첫째, 나노분말의 입자 크기가 감소하면 열전달에 직접 기여하는 표면적이 증가한다는 긍정적 효과도 있지만, 이와 동시에 이웃 입자 사이의 인력(引路)이 증가하여 커다란 분말 응집체를 쉽게 형성하는 부정적 현상이 발생한다. 분말이 서로 뭉쳐서 커다란 덩어리로 존재하면 비표면적이 감소하기 때문에 나노 분말에 의한 우수한 열전달 특성을 기대할 수 없고, 비중이 증가하여 쉽게 침전되는 등의 문제점을 가진다. 따라서 물리·화학적 방법으로 분말 응집체를 낱개의 나노 분말로 쪼개어 주고, 또한 그렇게 분리된 상태가 장시간 유지될 수 있도록 해야 한다. 이를 위하여 나노 분말 제조공정 마지막 단계에서, 합성된 나노 입자를 수거하지 않고 직접 액상 냉매 속에 분산시키는 나노유체 제조법이 개발되었다. 이 공정은 특히 순금속 분말을 사용함으로써 표면 산화가 우려되는 경우에 매우 적절하게 사용될 수 있다.

둘째로, 나노유체 제조에 사용되는 대부분의 나노 분말은 친수성 표면특성을 가지기 때문에 물과 기름이 잘 섞이지 않는 것과 같이 오일에 잘 분산되지 않고 바

로 침전된다.

따라서 분말 표면에 전하를 띄게 함으로써 입자 사이의 정전기적 반발력을 유도하거나, 화학적으로 분자 속에 매우 긴 탄소가지를 가진 분산제를 이용하여 표면 코팅층을 형성함으로써 입자 사이의 응집을 억제하고 용매에 대한 친밀도를 높이기도 한다. 그러나 이러한 분산 방법에도 문제점이 있다. 첫째, 분말 표면에 전하를 띄게 하는 방법은 절연유와 같이 유체의 전기적 특성이 중요하거나 용매의 pH 변화를 억제해야 할 경우에는 사용할 수 없다. 또한 미량이더라도 알칼리 혹은 산 계열의 분산제가 액상 냉매에 첨가되면, 이로 인하여 액체 용매의 물성이 변화하여 원래의 목적으로 사용되지 못할 수 있기 때문에 가급적 첨가를 억제해야 한다.

3. 국내외 기술개발 동향

나노유체에 대한 국내외 연구활동은 크게 나노유체 제조/열전달 특성평가 분야와 나노유체의 뛰어난 열전달 특성을 이론적으로 해석하고 설명하려는 메카니즘 연구 분야의 2가지로 나눌 수 있다. 지금까지 거의 모든 연구에서 나노유체는 분산이 용이한 물 또는 에틸렌글리콜을 용매로 하여 Cu, CuO 및 Al₂O₃와 같은 금속 및 세라믹계 분말을 분산시켜 제조하였기 때문에, 별도의 표면개질 공정이 불필요하였다. 이것은 최근까지의 나노유체 연구가 제조공정 개발에 연구 목적을 두기보다는 나노유체가 기존의 이론으로는 설명되지 않는 높은 열전달특성을 가짐을 검증하고, 그 원인을 찾아서 새로운 이론으로 재해석하고자 하는 시대

표 1. 대표적인 나노유체의 열전도도 실험 결과

Nanoparticles	Base Fluids	Particle Size (nm)	Volume Concentration	Enhancement (%)	Reference
CNF	Synthetic Oil	25nm-50 μ m	1	157	Choi et al
Cu	Ethylene Glycol	10	0,3	40	Eastman et al
Al ₂ O ₃	Water	30-40	4	9	Lee et al
	Ethylene Glycol		5	19	
CuO	Water	20-30	3,4	12	Lee et al
	Ethylene Glycol		4	22	
Al ₂ O ₃	Water	28	3	12	Wang et al
		38,4	4	24	Das et al
	Ethylene Glycol	60,4	5	29	Xie et al
		28	8	40	Wang et al
CuO	Ethylene Glycol	23	14,7	54	Wang et al
	Water	28,6	4	36	Das et al
Cu	Water	100	5	55	Xuan et al
	Transformer Oil	100	7,5	45	

적 요구가 우선했기 때문이다. 이러한 이유로 지금까지 제조된 물성평가용 나노유체에 있어서, 사용된 나노분말의 체적농도는 높은 열전달 특성을 검증하기에 용이한 3~8% 수준이며, 다량의 분말 첨가에 의해 점도가 크게 상승하기 때문에 냉매로서의 실용적 가치는 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 나노유체를 실제 산업 현장에 적용하기 위한 응용연구는 이제부터 시작인 셈이며, 따라서 기존의 물성분석 자료를 기초로 하여 이에 관심을 가지는 대학, 연구소 및 업체의 연구 활동과 관심이 급성장하고 있는 추세이다.

나노유체 연구는 기초물성 연구와 기업 연구소 중심의 산업화 연구로 대별되어 수행되고 있는데, 기초물성 연구는 미국을 중심으로 중국, 인도, 유럽의 대학

및 연구소에서 활발하게 연구되고 있다(표 1 참조). 그 중에서도 미국에서의 연구활동이 가장 주목할만한데 MIT, Vanderbilt, Northern Illinois, Kentucky, UCLA, Lehigh, Purdue 등의 대학과 Argonne과 같은 국립연구소에서 다양한 연구가 수행되고 있다. 기초물성 연구는 나노유체의 열전달 특성 평가방법 개발 및 열전달 메카니즘 규명 등을 주요 과제로 하고 있는데, 더 나아가 최근 MIT 등에서는 원자로 냉각수로 적용할 목적으로의 나노유체 실용화 연구가 진행 중인 것으로 알려지고 있다. 산업화 연구에 관한 것은 구체적으로 알려진 것이 없으나, 미국에서는 에너지부(DOE)의 지원으로 자동차 디젤엔진의 냉각효율을 65% 향상시키기 위한 연구가 이루어지고 있고, GM

및 보잉榜와 같은 수송 분야를 중심으로 비공개적인 고효율 냉매 개발 연구가 수행되고 있는 것으로 알려지고 있다.

또한 최근에는 열전달 매체로서의 나노유체 연구와 는 별도로 나노입자를 첨가한 혼합유체의 순환특성에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 기존의 순환유에 탄소나노튜브와 같은 나노입자를 미량 첨가하면 금속 마찰부의 마찰계수를 크게 낮춰 마찰면의 마모를 억제 하고, 동시에 냉각효율을 상승시키는 것이 확인됐기 때문이다. 이 나노유체의 개념을 순환유에 적용하면 순환유 자체의 열전달 특성이 향상돼 순환유의 온도 상승을 억제하고 산화와 점도 저하도 막을 수 있어 순환기기의 수명을 연장하고 에너지 효율을 향상시킬 수 있다.

현재 국내에서는 나노기술의 기초 연구개발에는 적극 투자하고 있지만 나노유체와 같은 응용 분야에 대한 투자와 관심은 상대적으로 저조한 실정이다. 현재 나노유체에 관한 국내 기술개발은 전력연구원, 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원을 비롯하여 부산대, 고려대, 경기대, 경희대 등의 대학과 일부 열교환/냉각 및 순환기기 업체에서 수행하고 있다.

4. 전망

우리나라는 에너지원의 해외 의존도가 97%에 달하는 에너지 소비국이다. 따라서 에너지를 자체 개발할 수 있는 단계에 이르기까지는 기존 설비의 열효율을 극대화하여 에너지 소모량을 줄이는 것이 필요하

다. 그러나 열교환기의 효율 향상은 새로운 고효율 열매체의 개발 없이는 분명한 한계가 있다. 이러한 관점에서 나노유체의 개발·적용은 분명한 매력을 가진다. 즉, 나노유체를 모든 산업계의 열교환 장치에 이용함으로써 에너지 사용량을 저감하여 에너지 비용을 획기적으로 줄일 뿐 아니라, 화석 에너지 사용으로 인한 대기 오염 및 온실가스 발생을 저감시킴으로써 환경문제 해결에도 큰 도움을 줄 수 있다. 또한 획기적인 순환매체로서의 잠재력을 함께 가지고 있기 때문에 무엇보다 상업적 가치와 실적용 가능성이 매우 높은 장점을 가진다.

이제 나노유체가 소개되고 본격적으로 연구된 지 약 10년의 세월이 흘렀다. 지금까지는 나노유체 분야가 기술도입기에 머물러 있었던 까닭에 전 세계적으로 실적용 예는 많지 않았으나, 이제 기술성장기에 접어들면서 나노유체에 관심을 가지고 이를 적극적으로 연구하려는 대학, 연구소와 업체의 수는 계속 급증하고 있다. 비록 당장은 나노유체의 높은 열전도도 특성에 주목하여 기존의 열교환 시스템에 대체 적용할 목적으로 연구되고 있으나, 이와 별도로 미세관이 사용되는 극소형 열교환 장치 개발을 촉진시킴으로써 전자전기 장비, 슈퍼 컴퓨터나 의료분야에도 도움을 주고, 차세대 순환매체의 개발에도 큰 기여를 할 것으로 기대된다.



- 1990년 연세대학교 금속공학과 학사
- 1993년 포항공과대학교 재료공학과 석사
- 1998년 포항공과대학교 재료공학과 박사
- 1998년 현재 한전 전력연구원 선임연구원