

나노유체를 이용한 열전달 촉진기술

글 ■ 이 신 표 / 경기대학교 기계시스템디자인공학부, 교수

e-mail ■ shinpyo@kuic.kyonggi.ac.kr

나노유체는 기존의 유체가 가지지 못한 높은 열전도율과 부유 안정성을 갖는 기능성유체로서 향후 다양한 산업분야에 응용될 것으로 예상된다. 이 글에서는 나노유체와 관련된 연구내용을 개략적으로 소개함으로써 이 분야의 관심을 높이고자 한다.

나노유체(Nanofluid)라는 용어가 사용되기 시작한 것은 10년이 채 안된 것 같다. 나노유체는 기존에 사용되던 물, 에틸렌그리콜과 같은 전통적인 열전달 유체에 나노미터(nm, 10^{-9} m) 크기의 초미세 금속입자(ultra fine particle)를 소량 혼합하여 제조한 유체를 말한다. 이 경우 열전도율(thermal conductivity)이 높은 금속입자를 포함한 혼합유체의 열전도율은 기존 유체의 열전도율보다 대폭 증가하게 되어(현재의 기술로 약 3배 정도) 열교환 성능향상이 기대된다. 예를 들면, 동일한 냉각부하를 처리하는 열교환기의 크기를 지금보다 작게 만들 수 있을 것이다.

미국 에너지부(DOE : Department of Energy)산하 Argonne 국립연구소의 최웅소 박사(choi@anl.gov)에 의하여 nanofluid라는 용어가 처음 사용되었다. 초기에는 열전도율의 정량적인 측정과 열전달 작동유체로서 나노유체의 잠재적 유용성에 대한 연구가 주로 수행되었다. 그가 나노유체에 대한 연구 주제를 갑자기 제안한 것은 아니며, 실제로 오랜 기간 동안 입자가 혼합된 유체의 열물성변화 즉, 열전달 향상(heat

transfer enhancement)과 저항감소(drag reduction) 등에 대한 연구를 수행해 왔다. 오래 전 그의 학위논문도 혈관 내의 노폐물 형성 과정에 대한 것으로 결국 유체와 입자가 혼합된 모델에 대하여 연구한 것이 흥미롭다.

유체에 입자를 혼합하여 열전달을 향상시키는 기술은 열전달 촉진 기술과 관련된 교재(예를 들면, Principles of Enhanced Heat Transfer)에도 등장한다. 그러나 이 기술이 실용화되지 않은 주된 이유는 혼합되는 입자의 크기가 커서 정적인 상태에서 결국에는 대부분 입자가 침전되어 유로를 막는 문제(clogging)가 발생하기 때문이다. 부수적으로는 장시간 운전시 입자들이 유로의 벽이나 펌프 등의 내벽을 마모시키는 문제(ablation)가 발생하였다. 이전의 연구에서 사용한 입자들의 크기는 대부분 밀리미터 또는 마이크로미터 정도의 크기였는데 과거에는 기술적 제약으로 이보다 크기가 작은 입자를 제조하는 것이 불가능하였다.

입자의 크기가 작아지면 동일 체적기준으로 표면적이 대폭 증가하여 기존의 bulk한 재료가 갖는 성질과는 전혀 다른 특성들이



나타난다. 예를 들면, 소결공정(sintering)으로 제조한 기계부품의 경우 입자의 크기가 작아질수록 기계적 강도가 증가한다. 이외에도 제품의 제조원료로서 나노입자의 전기화학적, 광학적인 특성이 발견되면서 최근엔 나노입자의 제조에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있고 있으며, 상용화된 제품의 구매도 가능하다. Argonne의 재료공학부 연구원들도 나노입자의 제조기술에 대한 특허를 획득하고 회사(Nanophase Technology ; www.nanophase.com)를 설립하여 운영하고 있다. 이와 같은 연구성과에 영향을 받은 최용소 박사는 나노입자를 유체에 혼합하여 사용할 경우 입자의 부유안정성(dispersion stability)이 향상되어 위에서 설명한 문제들을 해결하면서 동시에 열전도율 향상을 기대할 수 있는 기능성 유체의 제조가 가능할 것으로 예상하였고 지금은 어느 정도 그의 예측이 옳다는 것이 실험적으로 증명되고 있다.

필자는 5년 전에 Argonne 연구소의 방문연구원으로 비정상 열선법(transient hot-wire method)으로 유체의 열전도율을 측정하는 장치를 제작하고 나노유체의 열전도율을 처음으로 측정해 볼 기회를 가졌다. 돌아보면 그 당시만 해도 미국이나 한국에서 열공학분야의 나노기술에 대해서는 기초적인 연구가 시작될 시기이고 이 주제가 그렇게 큰 주목을 받지 못하였다. 그러나 최근 DOE에서도 나노유체의 가능성을 인정하여 Basic Science Program의 안정적인 연구 지원을 받아 재료공학, 물리학 등 다양한 분야의 연구자들이 함께 열전도율 향상 메커니즘에 대한 기초 연구를 수행하고 있다. 최근에 국내의 경우에도 필자에게 나노유체의 제조와 열물성치 측정에 대한 문의가 많아졌다. 본인의 경우에는 기존의 비정상 열선법을 변형하여 동시에 두 유체의 열전도율

을 최소의 오차로 비교 측정하는 장치를 구성하고 있으며 실용화의 예로 마이크로채널 열교환기의 내부를 순환하는 나노유체의 열전달 특성에 대하여 연구하고 있다.

나노유체에 대한 연구는 이제 막 시작된 분야로서 열전도율향상에 대한 원리적인 설명도 확립된 것이 없으며, 이것을 실제 시스템에 적용하여 만족할 만한 성과를 얻었다는 보고도 거의 없다. 이것은 학계나 산업계 종사자 모두에게 연구 및 기술적인 영역을 확장할 수 있는 도전의 기회가 될 수 있으며 향후 기존의 전통적인 열전달 방법으로 냉각부하를 처리하는 것이 불가능한 경우에 하나의 기술적 대안이 될 수 있을 것이다.

이 글에서는 열전달 측면에서의 나노유체의 유용성, 나노유체의 열전도율 측정기술과 그 결과, 그리고 현재 진행되고 있는 연구현황에 대하여 개략적으로 소개함으로써 이 분야의 관심을 높이고자 한다.

나노유체의 출현

운송분야, 화학공정, 건물의 냉난방 등 거의 전 산업분야에서 열교환장치가 사용되고 있으며, 소형 경량(small size and light weight)이면서 동시에 높은 냉각부하를 처리하는 고효율 열교환기를 설계하기 위하여 많은 연구가 이루어졌다. 개발된 대표적인 방법으로는 열교환기 표면을 코팅하거나, 표면에 거칠기를 주거나, 관의 외부에 핀과 같은 확장표면(extended surface)을 사용하는 등의 방법을 통하여 대류열전달계수(heat transfer coefficient)를 증가시키는 방법이 주로 사용되었다. 그러나 열교환기의 설계자는 최종적으로 열교환기 내부를 순환하는 열교환유체를 선정해야 한다. 이 경우 대부분 유체의 열전도율이 낮기 때문에 유체선택의 어려움에 부딪히게 되고 기존의

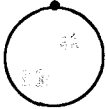


표 1. 고체 및 액체의 열전도율

물질	열전도율(W/m K)
은	429
구리	401
알루미늄	237
실리콘	148
산화 알루미늄	40
물	0.613
에틸렌	0.252
엔진 오일	0.145

유체보다 높은 열전도율을 갖는 유체는 없거나 또는 부가적인 방법으로 기존 유체의 열물성치를 변화시킬 수 있는 방법은 없는가 하는 의문을 갖게 된다.

잘 알려진 바와 같이 상온에서 고체금속의 열전도율은 유체에 대하여 수 백배 정도 크다. 예를 들면 표 1에 나타낸 것처럼 상온에서 구리의 열전도율은 물보다 약 700배 크며, 엔진오일보다는 약 3,000배나 크다.

따라서 열전도도가 매우 높은 고체 금속입자를 기존의 유체에 혼합하여 새로운 유체를 제조한다면 이 유체의 유효열전도율(effective thermal conductivity)은 기존의 유체보다 매우 높을 것으로 예상된다. 역사적으로 살펴보면 약 100년 전에 Maxwell은 혼합물을 이용한 전기저항체 제조에 대하여 연구하면서 동시에 금속입자를 포함하는 유체의 유효열전도율 변화를 예측하는 이론식을 제시하였다. Maxwell은 입자의 체적분율이 증가할수록 유효열전도도가 증가하며, 또한 입자의 체적에 대한 표면 면적의 비가 증가할수록 열전도도가 증가한다고 보고하였다.

최근 초미세 산화금속입자(oxide particles)의 대량 제조에 대한 기술이 확립되었고 순수 금속입자의 연속 제조에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 나노유체에 관한 연구는 처음에는 유체에 초미세 금속입자를 첨가하여 유체 수송시에 발생하는

압력손실을 저감시키려는 의도로 시작되었으나, 유체의 점성변화와 이에 따른 압력강하에는 큰 차이가 없는 대신, 열전도율이 매우 향상되어 이 새로운 유체가 기존의 열교환 유체를 대신하여 사용될 경우 막대한 경제적 이득이 발생할 것으로 예상하고 있다.

열전달 측면에서의 나노유체의 유용성

열전도율이 증가된 나노유체를 열교환기에 적용할 경우 어느 정도의 성능향상을 기대할 수 있는지 대략적으로 고찰해 본다. Dittus와 Boelter가 제시한 파이프 내의 난류 열전달상관식은 대류열전달계수 h 가 $h \sim V^{0.8} k^{2/3}$ 으로 표시되어 속도 V 나 작동유체의 열전도율 k 에 따라 h 가 변화될 수 있음을 보여준다.

이 식을 이용하면 유체의 속도가 동일한 경우 열전도율의 변화에 따라 대류열전달계수가 $h_{eff}/h_0 = (k_{eff}/k_0)^{2/3}$ 의 형식으로 변화함을 알 수 있다. 즉, 열전도율이 10배 증가하면 대류열전달계수는 처음보다 약 4.6배 증가한다. 속도의 효과는 파이프 내의 난류압력강하 관계식에 Fanning의 마찰인자를 도입하면 펌프동력(pumping power)의 형태로 $h/h_0 = (P/P_0)^{0.29}$ 으로 표시할 수 있다. 이것은 펌프동력을 10배 증가시키면 대류열전달계수가 처음보다 약 1.9배 증가함을 의미한다.

위의 내용을 자세히 표시한 것이 그림 1로서 열전달능력을 약 2배 증가시키려면 펌프동력을 약 10배 증가시켜야 하지만, 나노유체를 사용하면 열전도율을 대략 3배 증가시켰을 때 동일한 열전달효과를 기대할 수 있다. CuO, Al₂O₃ 등의 미리 제조된 산화금속입자를 대상 유체에 단순 혼합하여 나노유체를 제조하는 초기의 방법(two-step method)에서는 열전도율을 3배 증가시키는

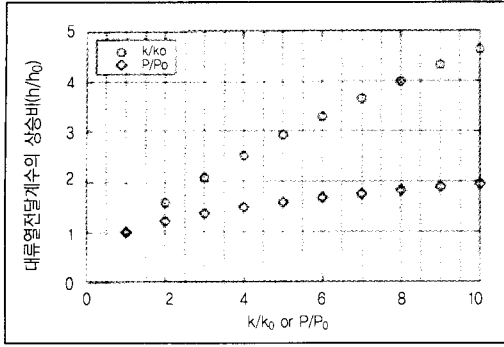


그림 1 열전도율과 펌프동력의 변화에 따른 대류열전달계수

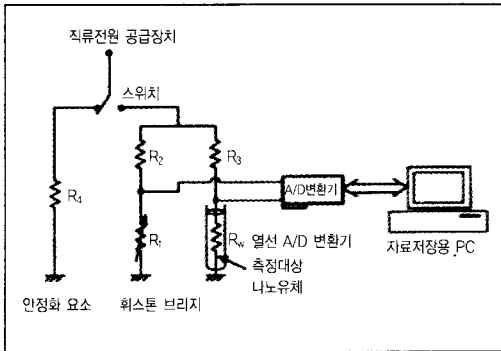


그림 2 비정상 열선법의 대략적 구성도

것이 현실적으로 매우 어려운 것처럼 생각 되었으나, 현재 연구가 진행중인 새로운 나노유체 제조기술(direct one-step method ; 증발된 순수 금속 입자를 냉각시키면서 직접 유체에 혼합하는 방법)을 이용하면 이 정도의 열전도율 향상을 쉽게 얻을 수 있다.

비정상 열선법을 이용한 나노유체의 열전도율 측정

유체의 열전도율 측정에는 예외없이 비정상 열선법(transient hot-wire technique)이 사용된다. 이 방법은 정상상태법(steady state method)에서 문제가 되는 측정유체

내의 대류효과가 나타나지 않고 기초적인 전기지식만 있으면 비교적 간단히 장치를 구성하여 측정을 수행할 수 있다. 다음의 그림 2는 비정상 열선법을 이용한 열전도율 측정장치의 개략도로서 열선의 저항변화를 검출하는 휘스톤 브리지(wheatstone bridge)와 A/D변환기 그리고 데이터 저장을 위한 PC로 구성된다.

그림 2에서 hot-wire라고 표시한 부분이 측정 cell로서 측정 대상유체가 매스실린더에 담겨져 있고 그 중심에 열선센서가 위치하게 된다. 센서로서 사용된 열선은 직경이 약 20 μ m로 가늘어서 대상유체는 열선에 대하여 무한 매질로서 작용한다. 가느다란 열선이 초기에 유체와 동일한 온도를 유지하고 있다가 순간적으로 가열전류가 흐르면(위의 그림에서 switch가 휘스톤 브리지로 전환됨) 열선은 저항체이므로 주열이 발생하게 된다. 발생된 열의 일부는 전도에 의하여 유체 쪽으로 전달되고 일부의 열은 열선의 온도를 상승시키는데 사용된다.

만약 열전도율이 큰 유체와 작은 유체에 놓여있는 열선에 동일한 열량을 순간적으로 발생시키면서 열선온도의 상승을 측정한다면 열전도율이 큰 유체의 경우에는 발생된 열이 대부분 유체 쪽으로 전달되어 열선의 온도상승이 적지만 열전도율이 작은 유체의 경우에는 그 반대의 현상이 나타나게 된다. 따라서 열선의 온도상승의 정보가 유체의 열전도율의 정보를 갖게 된다. 이와 같은 현상의 이론적 해석은 Carslaw와 Jaeger의 열전도 교과서에 잘 설명되어 있다. 그러나 열선의 온도변화는 직접 측정할 수 없고 저항변화를 검출한 후 열선의 온도-저항 관계식을 이용하여 온도로 환산한다.

그림 3은 시간에 따른 열선의 온도변화를 측정한 예로서 대상 유체는 물과 에틸렌그리콜이다. 실제 시간-온도의 데이터는 비선

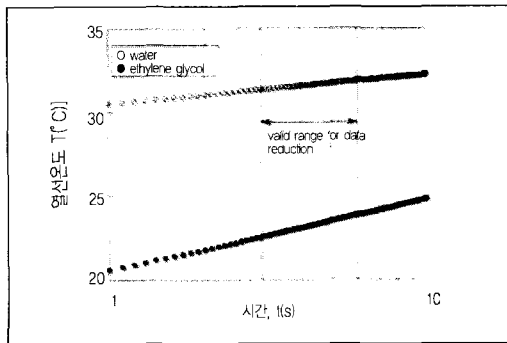
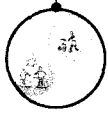


그림 3 물과 에틸렌그리콜에 대한 비정상 열전법 측정예

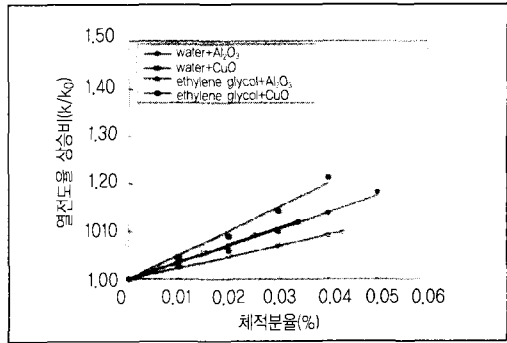


그림 4 CuO, Al₂O₃를 이용하여 제조한 나노유체의 열전도율

형적이나 시간축을 로그스케일로 표시하면 온도상승의 데이터가 직선으로 얻어지고 기울기를 환산하면 각 유체의 열전도율을 알 수 있다. 그림에서 에틸렌그리콜 데이터의 기울기가 물의 경우보다 큰 것을 알 수 있는데 이것은 물의 열전도율이 에틸렌그리콜보다 크다는 것을 나타낸다.

그림 4는 상용화된 CuO와 Al₂O₃ 나노입자를 대상 유체인 물과 에틸렌그리콜에 단순 혼합하는 방법(two-step method)으로 모두 네 가지 종류의 혼합유체를 제조하고 입자의 혼합정도에 따른 열전도율 변화를 나타낸 것으로 이 분야 연구의 초기 결과이다. 전체적으로는 5% 이하의 혼합률에 대하여 약 20% 정도의 열전도율 상승을 보이고 있다. 결과를 보면 나노유체의 열전도율 변화에 입자와 유체의 열전도율이 모두 영향을 준다는 것을 말해준다. 즉, 동일한 입자를 사용하는 경우에는 에틸렌그리콜로 제조한 나노유체가 물로 제조한 유체보다 열전도율이 높았으며, 동일한 유체를 사용하는 경우에는 CuO로 제조한 유체가 Al₂O₃를 이용하여 제조한 나노유체보다 열전도율이 높게 나타났다. 이와 같은 현상은 CuO입자의 크기가 Al₂O₃보다 작고 또한 CuO입자의 제조과정에서 완전한 산화가 일어나지 않아 순수한 금속 Cu입자가 남아 있기 때문으로

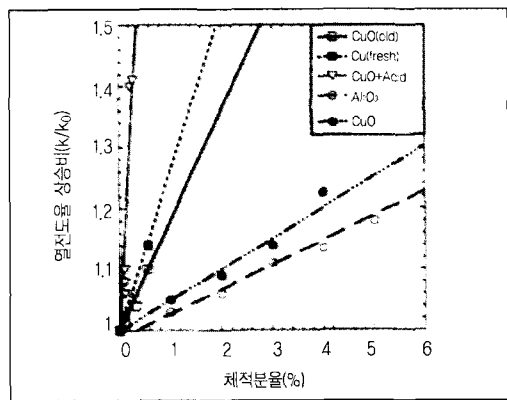


그림 5 순수금속 Cu 입자를 이용하여 제조한 나노유체의 열전도율

추측된다.

그림 5는 모재로부터 증발된 금속입자를 냉각된 대상유체에 연속적으로 접촉시키는 새로운 나노유체 제조방법(one-step method)으로 제조한 에틸렌그리콜-Cu입자 혼합물에 대한 측정결과이다. CuO나 Al₂O₃를 사용한 결과와 비교하면 약 0.3% 정도의 극히 미량의 입자 혼합에도 약 40%의 열전도율 상승이 얻어진다. 이와 같은 대폭적인 열전도율 상승은 입자의 성분과 크기 효과가 무시된 과거의 혼합물 모델관계식(Hamilton과 Crosser의 모델)으로는 설명되지 않는 결과로서 향후 새로운 관계식이 제시될 것으로 기대된다.



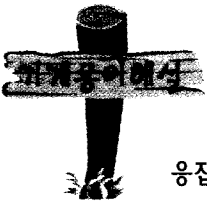
최근에 축적된 실험결과를 바탕으로 열전도율 상승 메커니즘에 대한 이론적 고찰이 이루어졌다. 초미세 입자가 혼합된 유체가 특이하게 빠른 열수송 특성을 갖는 원인으로 1) 유체 내에서 입자의 브라운 운동 2) 입자와 유체사이의 경계에 형성되는 분자층의 효과 3) 나노입자 내의 특이한 열전도 특성, 4) 나노입자들 사이의 가상적 응집에 의한 효과 등이 가능성을 갖는 원인으로 제시되었으며, 향후 이들의 효과를 독립적으로 규명할 수 있는 새로운 실험도 필요하다.

맺음말

향후 보다 효과적인 나노유체 제조방법이 개발된다면 현재보다 더 높은 열전도율을 갖는 유체를 제조할 수 있고 또한 사용자의 의도에 따라 시스템이 요구되는 열전도율을 정확히 갖는 유체의 제조가 가능할 것이다.

나노유체는 기존의 유체가 가지지 못한 높은 열전도율과 부유 안정성을 갖는 기능성 유체로서 향후 다양한 산업분야에 응용될 것으로 예상되는데 실용화 연구가 진행되고 있는 두 가지 제안된 응용분야를 소개하면서 본 글을 마치고자 한다.

자동차와 항공기 등 운송분야에서는 엔진의 냉각수, 엔진오일, 미션오일 등에서의 응용이 예상된다. 성공적으로 기술이 적용될 경우, 엔진의 소형화, 펌프, 방열기의 소형화가 가능하고 이에 따른 에너지 절감도 기대할 수 있다. 마이크로머신 또는 소형기계들은 기능의 집약과 함께 단위체적당 발생하는 열량이 매우 크고 또한 내부가 미세한 유로로 형성되어 있어서 기존의 전통적인 열전달방식을 적용하는 것이 점점 어려워지고 있다. 이 경우에도 나노유체는 유로의 막힘현상이 생기지 않고 향상된 방열능력을 발휘할 수 있을 것이다.



응집과정에서 응집체의 전도체, 부도체 결정(Conductor or Nonconductor in Aggregation Process)

어떤 물질이 전도체인가 부도체인가 하는 문제는 물질의 전기전도도라는 기본물성과 전기적 외부여건에 의존한다. 즉, 하전 입자의 응집과정에서 살펴보면, 전기전도도에 의한 전하의 이완시간보다 입자의 응집이 더욱 빨리 진행된다면 절대적인 전기전도도의 값이 크다고 하더라도 전체적인 응집과정에서 응집체는 전기적으로 부도체의 특성을 보인다고 볼 수 있고, 그 반대라면 전도체로 볼 수 있다. 이것은 입자가 전기적으로 하전되는 과정에서도 적용할 수 있는데, 입자 내부에서 전하가 평행상태까지 도달하는 전하이완시간보다 더 빨리 외부전하가 입자에 부착된다면, 주어진 입자는 하전과정에서 부도체로 볼 수 있다. 따라서 주어진 입자가 전도체인가 부도체인가 하는 문제는 입자의 외부 환경이 전기적으로 평행상태에 있는지 여부를 판단한 후에 정의되어야 한다.