

나노유체의 분산특성 및 응용

Dispersion Stability of Nanofluids and Its Application

이효숙 · 서용재

H. S. Lee and Y. J. Suh

1. 서론

20세기말부터 우리를 둘러싼 과학 기술은 정보통신(IT), 생명공학(BT)을 중심으로 눈부신 변혁과 진전을 계속하고 있지만, 21세기에 들어와서 산업을 지지하는 차세대의 기술로써 나노 기술(NT)이 주목을 끌어들였다. 나노 기술에 대한 관심의 1차적인 이유는 현존하는 여러 생산물의 성능은 올리면서 가격은 내릴 수 있는 가능성 때문이며, 2차적인 이유는 현재 존재하지 않는 새로운 기능을 가진 생산품의 제조가 가능하기 때문이다.

나노 기술을 지지하는 기반 기술은 초미세 가공기술, 단원자·분자 조작, 바이오 나노 기술 등을 말할 수 있는데, 나노 재료는 다양한 나노 기술의 공통된 핵심 기반으로써 중요성이 더욱 더 높아지고 있다고 할 수 있다.

특히 최종 생산물의 고성능화, 복합화 및 경박단소화에 따라 제조 공정의 나노화와 함께 핵심적으로 사용하는 원료 입자의 초미세화가 요구되고 있다. 이에 따라 고기능성 혹은 신기능성을 가진 초미립자의 제조 방법에 대한 관심은 더욱 높아지고 있으며, 기상·액상에 있어서의 나노 입자의 합성 방법이 이미 상당히 개발되었거나 개선되고 있다.

그러나, 합성된 나노 입자는 큰 표면적에 의한 입자간 응집력으로 나노 입자가 가진 고유의 본래 기능 및 특성을 제대로 발휘할 수 없는 문제가 있다. 따라서 나노 입자의 분산 기술은 나노입자를 응용하기 위한 기반기술로서 그 중요성은 매우 크다. 특히 기존 기술의 한계를 극복하면서 새로운 기능의 창출이 가능한 나노 기술, 즉 기능성 나노 입자의 분산 안정화기술은 나노기술의 핵심기술이라 할 수 있다. 따라서, 본 해설에서는 나노 입자의 분산성과 나노유체(Nanofluids) 응용에 관하여 소개하고자 한다.

2. 왜 나노입자의 분산 안정성이 중요한가?

최근 에너지 환경문제가 심각해짐에 따라 에너지

소비 절감 및 에너지 이용 효율화를 위한 나노소재 기술개발이 부각되고 있다. 이에 부합하는 나노소재 중의 하나가 열전도성 나노유체이다.

열효율 향상을 위한 열전도성 나노유체는 1993년 미국 Argonne National Laboratory (ANL)의 Choi¹⁾에 의해 처음으로 개발된 나노소재이다.

Choi에 의해 개발된 나노소재는 액체보다 열전도도가 수백배 뛰어난 고체 나노입자를 일반유체에 미량 균일하게 분산하고 안정적으로 부유시킴으로써 기존의 유체가 가지지 못한 높은 열전도율(Thermal conductivity)을 갖는다고 발표되었다. 높은 열전도율을 갖는 나노유체를 열에너지설비에 적용할 경우 에너지 효율을 증가시킬뿐 아니라, 열교환기 자체의 경량화, 소형화, 고효율화가 가능하여 최근 나노유체에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

이제까지 나노유체를 이용하여 에너지효율 향상에 관한 대표적인 연구결과를 정리하면 Table 1 과 같다.

Table 1의 결과는 열전도성이 비교적 높은 Cu, Au, Fe, MWNTs, SWNTs 또는 분산성이 높을 것으로 예상되는 Al_2O_3 , CuO, TiO_2 , 등의 나노입자를 물 혹은 에틸렌글리콜 과 같은 유체에 초음파, Homogenizer를 사용하여 기계적으로 분산시켜 제조한 나노유체의 열특성이다. Table 1에서 보는 바와 같이 나노입자 종류, 분산량 및 유체종류에 따라 열특성 변화는 각각 다르고 뚜렷한 경향을 보이고 있지 않고, 시간에 따라 열특성은 변화하였다. 이러한 원인은 나노입자 분산 안정성이 좋지 않은 것에 기인한다고 생각한다.

3. 나노입자의 분산안정성

입자를 용액 중에 안정하게 분산하는 메카니즘은 크게 정전기에 의한 안정화(electrostatic stabilization)와 입체 보호작용에 의한 안정화(steric or polymeric stabilization)로 설명할 수 있다.

Table 1 Thermal conductivity of various nanofluids

Author	Nano particles	Base fluid	Particle size(nm)	Volume concentration(%)	% Enhancement of Thermal Conductivity	
Estman et al[1997] ²⁾	Al ₂ O ₃ /CuO/Cu	Water/ He-200oil	33/36/18	5 vol%	60	
Park and Cho[1998] ³⁾	Al ₂ O ₃	Water	13	2.78 vol%	75	
	TiO ₂		27			
Lee et al[1999] ⁴⁾	Al ₂ O ₃	Water	30-40	4	9	
		Ethylene glycol		5	19	
Estman et al[2001] ⁵⁾	Cu	Ethylene glycol	10	0.3	40	
Xie et al[2001] ⁶⁾	SiC	Water	φ26	4.2	15.8	
			600	4	22.9	
Choi et al[2001] ¹⁾	MWNT _s	Transformer oil	φ25×50μm	1.0	250	
Xie et al[2002] ⁷⁾	Al ₂ O ₃	Water/EG/PO	12.2-302	5	30	
Xuan and Li[2003] ⁸⁾	Cu	Water	~100	2	39	
Das et al[2003] ⁹⁾	Al ₂ O ₃	Water	38	4	9 at 20°C	24 at 50°C
Xie et al[2003] ¹⁰⁾	TCNT _s	Water	φ15×30μm	1.0	19.6	
		Ethylene glycol			12.7	
		Decene			7.0	
Choi et al[2003] ¹¹⁾	SWNT _s	Epoxy	φ20-30×200	3 wt%	300	
Wen et al[2004] ¹²⁾	CNT _s	Water	φ20-30×200	0.84	23.7 at 20°C	31 at 40°C
Wen and Ding [2004] ¹³⁾	Al ₂ O ₃	Water	27-56	1.6	47	
Hong et al[2005] ¹⁴⁾	Fe	Ethylene glycol	10	0.55	18	
Murshed et al[2005] ¹⁵⁾	TiO ₂	Water	φ10×40	5	33	
			φ15	5	30	
Assel et al[2005] ¹⁶⁾	MWNT _s /DWNT _s	Water	φ130×10μm	0.6	34	
Liu et al[2005] ¹⁷⁾	CNT _s	Ethylene glycol	φ20-30	1.0	12.4	
		Engine oil	φ20-30	2	30	
Li and Peterson [2006] ¹⁸⁾	Al ₂ O ₃ / CuO	Water	36/29	10(Al ₂ O ₃)/ 6(CuO)	27 at 34.7°C	
Hwang et al[2006] ¹⁹⁾	MWCNT	Water	φ10-30× 10-50μm	1	11.3	
Hwang et al[2007] ²⁰⁾	MWCNT	Oil	φ10-30× 10-50μm	0.5	8.7	
	Fullerene	Oil	~10	5.0	6	
He et al[2007] ²¹⁾	TiO ₂	Water	20	1.1 vol%	40	
Chen et al[2008] ²²⁾	Titanate nanotube	Water	φ10×100	2.5 wt%	25	

정전기 안정화는 입자를 용액 중에 안정하게 분산시키기 위해서 입자사이에 작용하는 반데르발스(van der Waals)인력을 극복할 척력을 발생시켜 입자가 응집하는 것을 방지하는 것이다. 가장 잘 알려진 척력 발생법으로 계면 전기이중층에 의한 정전 상호작용이 있다. 고체상 입자가 극성 용액이나 전해질을 가진 용액 중에 존재하면 입자 표면이 하전을 띄게 되고, 표면전위와 반대부호인 용액안의 이온(일반적으로 쌍이온이라함)이 정전기적으로 표면에 끌린다. 이렇게 모인 이온은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 확산하는 층 즉 계면전기이중층(electrical double layer)이 형성된다. 인접한 입자끼리 전기이중층이 겹치게 되면 입자 사이에는 전하밀도가 높아져서 증가한 이온 농도만큼 침투압과 같은 압력이 생겨 입자사이에 척력이 생긴다. 계면전기이중층에 의한 척력과 반데르발스 인력의 관계가 DLVO이론이다. DLVO 이론에 따르면 입자사이에 작용하는 위치에너지는 전기적 반발력의 위치에너지와 반데르발스인력의 위치에너지의 합으로 구할 수 있다.

정전기적인 입자의 분산안정성은 용액의 pH 및 전해질의 농도에 따라 입자 표면의 전위가 달라지고 표면전위에 따라 입자끼리의 반발력 즉 입자의 분산안정성이 매우 민감하게 영향을 받기 때문에 응용성 측면에서 많은 제약을 가진다.

입자를 용매중에 안정화시키는 메카니즘으로 입자 표면에 계면활성제나 고분자를 물리적으로 흡착(adsorption)시키거나 화학적으로 접착(graft) 시켜 인접한 입자끼리 서로 고분자에 의해 인력을 방해하는 입체장애 안정화이다. 입체적인 반발력은 반데르발스 인력보다 크기 때문에 입체적으로 안정화된 분산계는 열역학적으로 안정할 수 있다.

입체적인 안정화 메카니즘은 엔트로피 안정화와 엔탈피 안정화로 설명되어진다. 2개의 인접한 입자들이 각각 고분자 혹은 계면활성제로 이루어진 흡착층이 있고, 그들의 흡착층이 겹칠 때까지 접근하는 경우를 생각하면 흡착물층에 있는 고분자 분자 배열의 수는 인접한 입자의 존재 때문에 감소하게 된다. 이것을 부피제한 또는 엔트로피 안정화라고 한다. 또한 고분자의 농도가 인접한 입자끼리 겹쳐진 범위에서 높아지게 되어 삼투압이 생기고 이로 인해 입자들은 서로 밀어낸다. 이것을 삼투압안정화 또는 엔탈피 안정화라고 한다. 이 안정화는 온도와 용매에 매우 크게 영향을 받는다. 그러나 용매의 전해질 농도에 민감하게 반응하지 않기 때문에 응용적인 측면에서 장

점을 가진다. Table 2에 정전기적 혹은 입체장애효과에 의한 입자의 안정화를 비교하였다.

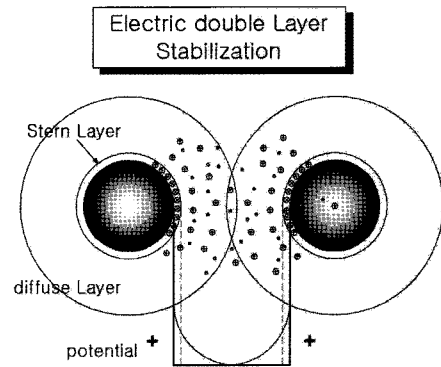


Fig. 1 Distribution of electrical potential in the double layer region surrounding a charged particle

나노입자를 안정하게 분산시키기 위해서 표면전위의 일부인 제타 전위를 올려 전기적 반발력을 높인다든지, 분산제의 종류를 바꾸는 것만으로 나노 입자를 분산하는 것은 부족하다. 나노입자는 부피대피 표면적이 크므로 서로 응집력이 매우 강하고 정전기적인 반발을 일으키기에는 대전되는 면이 너무 작다.

Table 2 A Comparison of the Electrostatic and Steric Stabilization

Electrostatic stabilization	Steric stabilization
Kinetic stabilization Applicable to dilute particle systems Sensitive to electrolyte Unsuitable to multiple phase system	Thermodynamic stabilization Applicable to high concentration possible Insensitive to electrolyte Suitable to multiple phase system

용액 내에서 나노입자의 경우 전기 이중층의 겹침에 의한 분산 안정화가 어떻게 변화하는가를 보면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2는 표면전위를 88.5mV, 쌍이온 농도를 1.0mM에 고정하고 입자 지름에 의한 포텐셜 곡선의 변화를 나타낸 결과이다. 입자의 크기가 100nm에서는 응집에 따른 위치에너지 장벽이 kT의 20배를 넘어서 표면전위 88.5mV, 쌍이온 농도 1.0mM에서는 분산하는 것을 보이고 있다. 그러나 입자지름이

20nm인 경우에는 피크가 극히 적고, 그 표면전위에서는 분산을 유지할 수 없다는 것을 알 수 있다. 또한 나노입자에 표면전위를 177mV 로 하지 않으면 kT 의 20배가 되지 않는다. 그리고 이온농도가 높은 경우에는 표면전위를 200mV 이상으로 해도 분산이 어려운 것을 나타내고 있다. 이렇게 높은 표면전위를 달성하는 것은 이온계의 계면활성제를 흡착시켜도 달성이 어렵다.

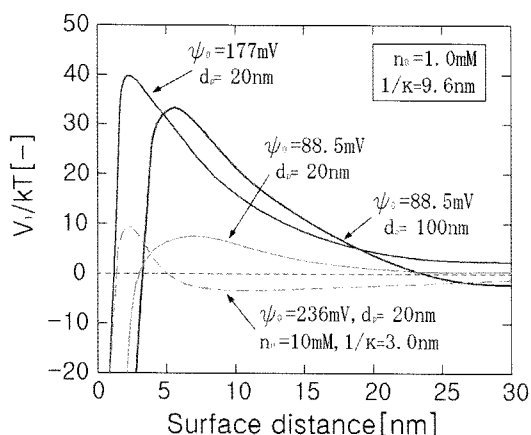


Fig. 2 Calculated potential between the nearest particles by DVLO theory

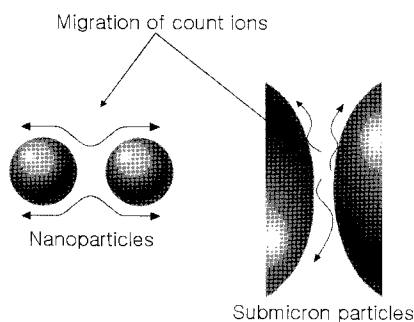


Fig. 3 Difference on the steric stabilization of particles depending on the particles sizes

입자의 크기가 매우 작아지면 분산 안정성이 낮아지는 이유를 개념적으로 Fig. 3에 나타내었다. 입자의 지름이 큰 경우에는 입자사이 존재하는 하전 이온에 대해 입자 표면은 대단히 큰 평면이 되기 때문에 이온은 입자 사이에서 빠져나오는 것이 쉽지 않아 입자 표면에 침투압에 해당하는 압력을 주게 된다. 그러나, 나노입자에서는 이온 사이즈와 입자 표면의 곡률이 거의 비슷하기 때문에 사이에 끼워진 이온은 비교적 쉽게 입자사이에서 빠져 나올 수 있다. 이로 인해 동일한 표면전위에서도 나노입자끼리의 척

력은 약해진다. 따라서 나노입자를 분산시키려면 보다 더 높은 표면전위를 발생시켜 더욱 많은 이온쌍의 농도를 높게 할 필요가 있다.

그러나, 나노입자의 미세 특성 때문에 단순히 정전기적인 반발력에 의한 방법으로 나노입자를 단분산 형태로 분산시키는 것은 어렵고 특히 고농도가 될수록 그 경향은 더 심해진다. 이에 따라 고분자에 의한 입체장애효과에 의한 분산이 중요하다. 따라서, 고분자 분산제나 계면활성제 선택은 매우 중요하며, 고분자 분산제의 분자량이 커지면 사슬의 길이가 수~10 nm 정도가 되어 나노입자 사이에 효과적으로 침투할 수 없기 때문이다.

결론적으로 나노입자는 일단 응집을 일으키면 교반, 초음파 등의 기계적인 분산법으로는 나노입자 사이로 분산제의 효과적인 침투가 어려워져 재분산은 대단히 어렵다. 그러므로 나노입자는 입자핵 생성단계에서 입자 성장을 억제하며 분산시켜 나노입자 사이에 분산제를 효과적으로 침투할 수 있는 나노 분산기술개발이 필요하다. 이때 나노입자 크기와 종류에 따른 분산제를 변화시켜 분산안정성에 대한 체계적인 기술개발이 요구된다.

4. 자성유체의 분산안정성

자성유체는 나노 자성분말을 분산시킨 나노유체이다. 자성유체의 분산안정성은 나노입자가 가지는 반데르발스 인력 이외에 자기적 인력이 작용하기 때문에 분산은 더 어렵다. 따라서, 나노 자성입자가 충분한 척력을 갖기 위한 조건이 검토되어야 한다.

강자성체를 충분히 작게 미세화하면, 내부에 자벽이 없을 때가 안정하므로 단자구 구조를 이룬다. 따라서 각각의 미립자는 다음 식과 같은 자기 모멘트 m 을 갖는 영구자석이 된다.

$$m = VI_0 = 1/6\pi d^3 I_0 \tag{1}$$

- 식 (1)에서 사용한 기호는 다음과 같다.
- I_0 : 미립자를 구성하는 물질의 포화자화
- V : 미립자 체적
- d : 미립자 직경

이러한 2개 미립자 사이의 정자기 Potential 즉 쌍극자 상호 작용 Potential Φ_M 은 다음 (2) 식과 같다.

$$\Phi_M = \frac{1}{4\pi\mu_0 r^3} \left\{ (m_1 \cdot m_2) - 3 \frac{(m_1 \cdot r)(m_2 \cdot r)}{r^2} \right\} \tag{2}$$

식 (2)에서 사용한 기호는 다음과 같다.

m_1, m_2 : 미립자 1 과 2의 자기 모멘트

\mathbf{y} : 미립자 1 과 2 의 벡터

μ_0 : 진공에서 투자율

m_1, m_2 의 자기모멘트가 평행이고 직선상에 병행할 때 인력은 최대가 된다.

$$\Phi_M = - \frac{1}{2\pi\mu_0} \frac{m^2}{r^3} \quad (3)$$

여기서 $m_1 = m_2 = m$, 계면활성제 피복층의 두께를 ε 라 하면, 2개의 입자가 가장 근접해 있을때 정자기 포텐셜 Φ_M 은

$$\Phi_M = - \frac{1}{2\pi\mu_0} \frac{m^2}{(d+2\varepsilon)^3} \quad (4)$$

이 된다.

이의 정자기적인 상호작용이 열에 의해 활발히 움직여 미립자가 응집하지 않기 위하여는

$$\Phi_M \leq kT \quad (5)$$

가 되어야 한다. 여기서 k 는 Boltzman 상수, T 는 절대온도이고, 식의 조건으로부터 미립자계가 안전하게 분산할 미립자의 한계 직경 d_c 를 구할 수 있다. Table 2는 여러 가지 강자성 재료에 관한 계면활성제 피복 두께 ε 을 가정했을 때 d_c 의 값을 나타낸다.

Table 2 The limited diameter of magnetic powder to avoid cohesion

	I_s (RT)	d_c [nm]	
		$\varepsilon = 2$ nm	$\varepsilon = 4$ nm
Fe_3O_4	6030	10	12
Fe	21500	5	7
Co	17600	6	7
Ni	6090	10	12

Table 2 에서 Fe, Co 와 같이 포화자화가 큰 강자성 금속입자를 사용한 금속계 자성유체는 미립자 직경이 Fe_3O_4 보다 훨씬 작아야 함을 알 수 있다. 직경이 10 nm 인 Fe_3O_4 미립자에 분자사슬길이가 2 nm인 계면활성제분자로 피복할 경우, 안정하게 분산된 자성유체 제조가 가능함을 의미한다. 그러나 그 한계 직경을 초월한 큰 입자가 섞여 있으면 이것을 핵으

로 하여 다른 입자들이 응집하여 큰 cluster를 만들어 자성유체는 불안정하게 된다.

5. 나노유체의 기능 발현과 응용

나노유체는 기능성 나노입자를 안정하게 분산시킨 균일한 유체로 나노유체의 응용은 나노입자의 기능 발현에 따른 응용분야가 다양하며 Table 3 과 같다.

Table 3 Application fields of nanofluid

Fields	Industry
Heat Exchanger	- Power plant - Air conditioning
Electronics	- Fuel cell cooling - CPU cooling
Vehicles	- Coolant - Exhaust Catalysts - Shock Absorbers - Lubricant
Environment /Energy	- Catalyst - Electrolyte
Bio/Health	- Nano therapy - Cosmetics - MRI contrast agent
Chemical	- Magnetic fluids - Nano ink - Nano paint

나노유체로 이미 상용화된 자성유체는 1963년 미국 NASA에서 S. Pappel²³⁾이 자철광을 계면활성제와 함께 불빛에서 1000시간 정도 분쇄하여 제조한 것이 최초의 개발이었다.

NASA에서 개발한 자성유체는 우주복의 관절부분의 씰링, 무중력상태에서 로켓의 연료공급용으로 사용하기 시작하였다.

그 후 1972년 일본 Shimoizaka²⁴⁾의 공침법에 의한 10~20nm 크기의 산화철(magnetite) 제조기술 개발로 자성유체의 개발과 응용은 급속히 발전되어 현재 상용화 되는 있는 자성유체의 종류는 약 70여 종에 이른다.

현재 국내 자성유체 수요는 하드디스크 드라이브의 방진 씰, 스피커의 댐퍼, 자기기록 매체의 자구패턴 검사 등에 사용되고 있으며, 본 연구자는 이러한 자성유체 제조 및 응용에 관하여 발표한 바 있다.^{25,26)} 국내 자성유체의 수요는 매년 크게 증가하는 추세를 보이고 있지만, 일본 수요량의 1/200 수준이다. 자성

유체의 수요가 첨단기술 개발의 척도에 비유되기도 하는데 그 이유는 자성유체의 용도가 정보전자산업, 생명과학, 나노기술 등을 망라한 복합적인 첨단기술의 결정이기 때문이라고 생각한다.

자성유체를 이용한 댐퍼(Shock absorbers)를 델피라는 회사에서 “Magneride”란 상표로 생산하고 있다.

자성유체 댐퍼는 2007년부터 아우디의 최고급 스포츠카인 R8과 TT에 탑재되고 있다. 자성유체를 댐퍼오일로 사용할 경우, 자성유체 안의 자성 나노입자들이 작은 전기적 신호로 정렬(line up)하는 방향에 따라 댐퍼의 성능을 조절할 수 있다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 자성유체의 나노입자들이 수직형으로 배열시키면 수직으로 움직이는 피스톤에 있는 orifice에 저항이 덜 걸리므로 소프트한 댐퍼가 되고, 반대로 나노 자성입자들을 수평으로 배열시키면 피스톤의 orifice에 많은 저항이 걸리게 되어 하드한 댐퍼가 된다.

자성유체를 이용한 댐퍼는 승차감을 운전자에 따라 조절이 가능하여 모든 차종에 적용될수 있지만 아직은 페라리 599 피오라노, GM 캐딜락 STS, 시보레 콜벳 과 같은 최고급 세단과 스포츠카에만 적용되고 있다.

그밖에 자성유체를 이용한 고진공 씰이 개발되어 고진공을 요하는 반도체 제조장비, 광섬유, 레이저, X-선 기기, 열처리기기, 결정성장기기, 항공전자공학, 컴퓨터 하드디스크 방진씰 및 초전도발전기 등에 사용되고 있다.

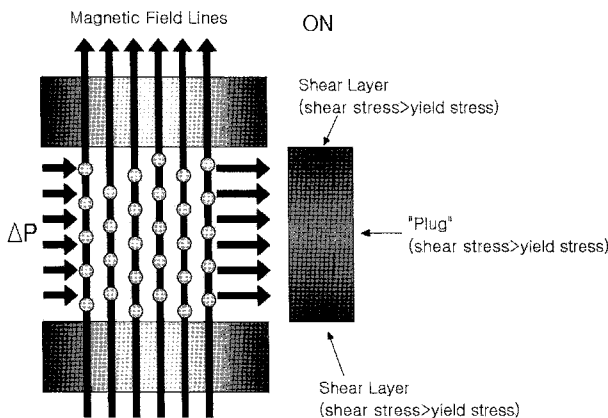


Fig. 5 Application of magneticfluid for shock absorber

6. 결 언

나노기술은 가까운 장래 우리 산업에 대단히 큰

이익을 가져올 것이 틀림없다. 예를 들어 백금 촉매를 이용하면 촉매효율은 50% 이상 향상되고 소비의 양은 현저히 줄어들어 비용을 크게 절약할 수 있기 때문이다. 나노기술을 산업적으로 응용하기 위해 나노입자 생산기술과 나노입자의 분산기술이 핵심기술이다.

나노입자는 표면특성 때문에 서로 강하게 응집하므로 나노입자를 제조한 후 기계적인 혹은 물리적 방법으로 단분산 상태의 분산체를 얻는 것은 매우 어렵다. 그러므로, 분산안정성이 우수한 나노유체를 제조하기 위하여 나노입자의 핵생성을 만듦과 동시에 성장을 억제하면서 유체에 분산시킬 수 있는 제조 기술개발이 이뤄져야 할 것으로 기대된다. 또한 나노입자의 분산특성을 이해하고 체계적인 나노유체 제조 기술개발이 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 1) S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood and E. A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions", Applied Physics Letter, Vol. 79, pp. 2252~2254, 2001.
- 2) J. A. Eastman, U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson and S. Lee, "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids", Materials Research Society Symposium- Proceedings, Vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, USA, Boston MA, USA, pp 3~11, 1997.
- 3) B. pak and Y. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", Experimental Heat Transfer, Vol. 11, No. 2, pp. 151~170, 1998.
- 4) S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li and J. A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", Journal of Heat Transfer Vol. 121 pp. 280~289, 1999.
- 5) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu and L. J. Thompson, "Anomously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", Applied Physics Letters, Vol. 78, pp. 718~720, 2001.

- 6) H. Xie, J. Wang, T. Xi and Y. Liu, "Study on the thermal of sic nanofluids", Journal of the Chinese Ceramic Society, Vol. 29, pp. 361~364, 2001.
- 7) H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles", Journal of Applied Physics Vol. 91, pp. 4568~4572, 2002.
- 8) Y. Xuan and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer of nanofluids, Journal of Heat Transfer", Vol. 125, pp. 151~155, 2003.
- 9) S. K. Das, N. Putta, P. Thiesen and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids", ASME Trans. J. Heat Transfer Vol. 125, pp. 567~574, 2003.
- 10) H. Xie, H. Lee, W. Youn and M. Choi, "Nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities", Journal of Applied Physics, Vol. 94, pp. 6034~6039, 2003.
- 11) E. S. Choi, J. S. Brooks, D. L. Eaton, M. S. Al-Haik, M. Y. Hussaini, H. Garmestani, D. Li and K. Dahmen, "Enhancement of thermal and electrical properties of carbon nanotube polymer composites by magnetic field processing", Journal of Applied Physics, Vol. 94, pp. 6034~6039, 2003.
- 12) D. Wen and Y. Ding, "Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids)", Journal of thermophysics and Heat transfer, Vol. 18, pp. 481~485, 2004.
- 13) D. Wen and Y. Ding, "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 24, p. 5181, 2004.
- 14) T. K. Hong, H. S. Yang and C. J. Choi, "Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids", Journal of Applied Physics, Vol. 97, pp. 1~4, 2005.
- 15) S. M. S. Murshed, K. C. Leong and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids", International Journal of thermal Scienced, Vol. 44, pp. 367~373, 2005.
- 16) M. J. Assael, I. N. Metaxa, J. Arvanitidis, D. Christofilos and C. Lioutas, "Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled and double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants", International Journal of thermophysics, Vol. 26, pp. 647~664, 2005.
- 17) M. S. Liu, M. Ching-Cheng Lin, I. T. Huang and C. C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 32, pp. 1202~1210, 2005.
- 18) C. H. Li and G. P. Peterson, "Experimental investigation of temperature and volume fractions on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)", Journal of Applied Physics, Vol. 99, p. 084314, 2006.
- 19) Y. J. Hwang, Y. C. Ahn, H. S. Shin, C. G. Lee, G. T. Kim, H. S. Park and J. K. Lee, "Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids", Current Applied Physics, Vol. 6, pp. 1068~1071, 2006.
- 20) Y. Hwang, J. K. Lee, C. H. Lee, Y. M. Jung, S. I. Cheong, C. G. Lee, B. C. Ku and S. P. Jang, "Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids", Thermochemica Acta, Vol. 455, pp. 70~74, 2007.
- 21) T. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Chng and H. Lu, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe", International Journal of Heat and Mass transfer, Vol. 50, pp. 2272~2281, 2007.
- 22) H. Chen, W. Yang, Y. He, Y. Ding, L. Zhang, C. Tan, A. A. Lpkin and D. V. Bavykin, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles(nanofluids), Power Technology", Vol. 183, pp. 63~72, 2008.

- 23) S. S. Pappel, "US Patent 3215572", Nov, 1965.
- 24) J. Shimoizaka and K.Nakatsuka, "J. of Japan Society of Powder and Powder Metallurgy", Vol. 19, No. 5, pp. 189~193, 1972.
- 25) 이효숙, 유재광, "자성유체의 스피커 댐핑 효과에 관하여", 대한자기학회지, 제8권, 제2호, pp. 93~98, 1998.
- 26) 이효숙, "하드디스크 드라이브 모터의 방진설용 자성유체 제조방법", 대한민국특허 0256850, 2000

[저자 소개]



이효숙(책임저자)

E-mail: hslee@kigam.re.kr

Tel: 042-868-3603

1996년 와세다대학교 공학박사, 현재 한국지질자원연구원 책임연구원, 한국화학회, 한국금속학회, 한국공업화학회, 한국재료공학회, 나노기술연구협의회, 한국자기학회 회원

[저자 소개]



서용재

E-mail: aumsuh@kigam.re.kr

Tel: 042-868-3570

1996년 한국과학기술원 기계공학박사, 현재 한국지질자원연구원 선임연구원, 한국지구시스템공학회, 나노기술연구협의회, 한국입자에어로졸학회, 한국화학공학회, 한국

자기학회 회원