

## 직접 제조한 나노유체의 유변물성 연구

정강민, 김규성, 박선희, 김성현\*  
고려대학교 화공생명공학과  
(kimsh@koea.ac.kr\*)

### Study on Rheological Properties of Prepared Nanofluids

Kang-min Jung, Kyu-sung Kim, Sun Hee Park, Sung Hyun Kim\*  
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University  
(kimsh@koea.ac.kr\*)

#### 서론

나노유체란 수 내지 수십 나노미터 크기의 입자가 용매 안에 안정적으로 분산되어있는 유체를 말한다. 1995년 Choi 등은 유체의 혁신적인 열전달 성능 향상을 일으킬 수 있는 물질로서 나노유체를 제안했다. 그 이후 Koblinski 등 많은 연구자들이 새로운 열교환 매체로서 나노유체의 가능성에 깊은 관심을 가지고 연구를 진행하고 있다. 그리고 열전달 장치의 실용화와 연료전지, MEMS 등의 장치에 나노유체를 사용하기 위해서 나노유체의 물질 전달 특성에 대한 연구도 함께 요구된다. 이와 관련하여 Ha 등은 액막형 흡수기에서 나노유체를 이용해 암모니아의 흡수 성능 향상을 보고한 바 있고, Kim 등은 기포형 흡수기에서 나노유체를 이용해 암모니아의 흡수 성능 향상을 보고하였다. 그러나 나노유체에 대한 연구는 아직 초기단계이다. 묽은 마이크로 크기의 입자가 분산된 현탁액은 이미 Einstein 과 Bechelor 의 연구로 유변학적 성질이 많이 알려져 있는 반면, 나노유체의 유변학적 성질은 많이 밝혀지지 않았다. 나노유체는 단일상 물질이 아닌 기본유체에 나노입자가 분산되어 있는 현탁액이기 때문에 나노유체의 흐름과 관련된 특성을 이해하기 위해서 유변학적 특성을 측정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 물성을 띠는 나노입자와 기본유체를 이용하여 여러 종류의 나노유체를 제조하고, 각각의 유변학적 특성을 관찰하였다.

#### 실험

다양한 종류의 나노유체를 제조하기 위해 다이아몬드, 은, 알루미늄 나노입자를 분산재료로 선택하였다. 그 중에서 알루미늄은 입자의 형태 및 표면 성질이 유변학적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 AK, AR, AF 알루미늄을 사용하여 나노유체를 제조하였다. AK, AR, AF 알루미늄 나노입자는 각각 서로 다른 특성을 띠는데, AK 알루미늄은 구형의 소수성 입자이고 AR 알루미늄은 구형의 친수성 입자이며 AF 알루미늄은 길이-지름비(aspect ratio)가 50~200인 막대형의 친수성 입자이다. 이들 나노입자를 분산시킬 기본유

체로는 이온 제거수(deionized water), 에틸렌글리콜, 절연유를 선택하였다. 다이아몬드 나노입자와 물, 은 나노입자와 물, 알루미늄 나노입자와 절연유, 다이아몬드 나노입자와 에틸렌글리콜을 각각 혼합한 뒤, 3시간 동안의 초음파 처리(Cole-Parmer v-04711-60 model, Power density 750w, frequency 20 kHz)를 함으로써 나노입자 간의 뭉침을 방지하여 안정한 나노유체를 제조하였다. 나노입자의 분산안정도는 ELS-8000 기기를 이용하여 나노유체의 제타전위를 측정함으로써 확인하였다.

나노유체의 유변학적 특성은 일정한 온도(25°C)에서 cone-cup geometry가 장착된 점도계(Brookfield DV II+ LV)와 이중 Couette geometry가 장착된 유변물성측정기(Rheometric Scientific, ARES)를 이용하여 0.1/s에서 1000/s 범위의 전단속도 조건하에서 측정하였다. 측정하기 전에 나노유체를 20분 정도 교반하여 나노유체 내의 나노입자가 균일하게 분산되도록 하였다.

### 결과 및 고찰

여러 종류의 나노입자를 기본유체에 분산시켜 다이아몬드/물, 은/물, 알루미늄/절연유, 다이아몬드/에틸렌글리콜 총 4가지 종류의 나노유체를 제조하였다. 이 중에서 다이아몬드/물 나노유체의 제타전위를 측정한 결과, 38.83 mV의 제타전위 값을 얻었는데, 제타전위의 절대값이 35mV 보다 크면 입자가 안정하게 분산되어 있다고 판단할 수 있기 때문에 직접 제조한 나노유체는 입자가 안정하게 분산되어 있다고 할 수 있다.

다이아몬드/물, 은/물 나노유체의 전단속도에 따른 점도값을 입자의 농도별로 Fig. 1 (a) 와 Fig. 1 (b) 에 각각 나타내었다. 나노입자의 농도가 매우 낮은 경우를 제외하고, 낮은 전단속도에서 전단속도가 증가함에 따라 나노유체의 전단담화 (shear thinning) 현상이 나타났다. 이러한 나노유체의 비뉴턴성 현상은 나노입자 사이의 상호작용과 단일상 유체와는 다른 나노유체의 유체역학적 성질 때문에 발생한다고 생각된다. 그리고 높은 전단속도에서는 입자의 농도와 무관하게 나노유체가 일정한 점도를 가지는 반면, 낮은 전단속도에서 입자의 농도가 높을수록 점도가 높아지는 현상 또한 관찰하였다. 이는 상대적으로 약한 전단속도에서는 유체력(hydrodynamic force)이 약하고 입자사이에 작용하는 힘이 지배적이어서 나노유체의 점도가 입자의 농도에 의해 결정되기 때문이다.

나노입자의 표면성질 또는 형태에 따른 점도 변화는 Fig. 2 에 나타난 결과와 같다. 먼저 나노입자의 표면성질이 점도에 미치는 영향을 알아보기 위해, AK 알루미늄 입자와 AR 알루미늄 입자 데이터를 살펴보면 AK 알루미늄 입자가 절연유에 분산된 나노유체는 AR 알루미늄 입자가 분산된 나노유체보다 점도가 높게 나타났다. 소수성을 가진 AK 알루미늄 입자가 친수성을 띠는 AR 알루미늄 입자보다 절연유에 분산이 잘 되어 점도가 높아지는 것으로 생각된다. 그리고 AR 알루미늄 입자와 AF 알루미늄 입자 데이터를 통해 입자형태가 점도에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. 실험한 모든 전단 속도 범위에서 AF 알루미늄 입자의 점도가 AR 알루미늄 입자의 점도보다 높게 나

타났다. 막대모양의 AF 알루미나 입자가 구형의 AR 알루미나 입자보다 입자의 뭉침이 잘 일어나 점도가 높게 나타난 것으로 이해할 수 있다. 그리고 앞서 확인했던 순수한 절연유의 점도보다 나노입자가 포함된 나노유체의 점도가 높다는 사실을 Fig. 2 에서도 관찰할 수 있다.

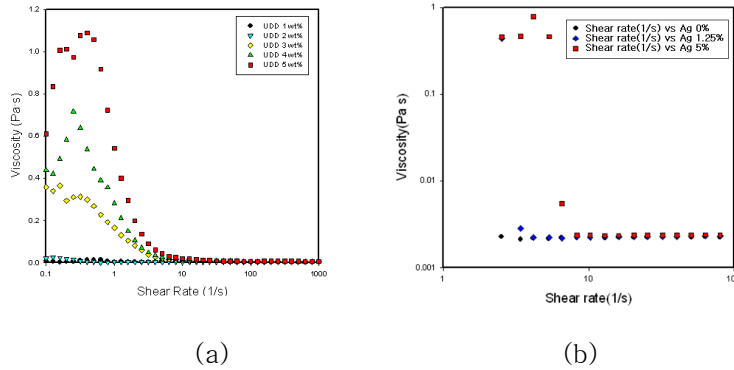


Fig. 1. Viscosity of diamond/water nanofluid (a) and silver/water nanofluid (b) with particle fraction as a function of shear rate

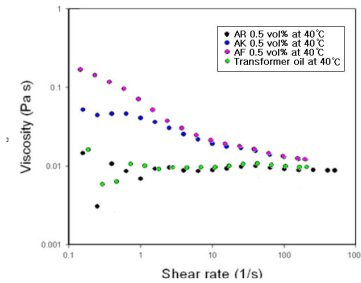


Fig. 2. Viscosity of alumina/transformer oil nanofluid as a function of shear rate

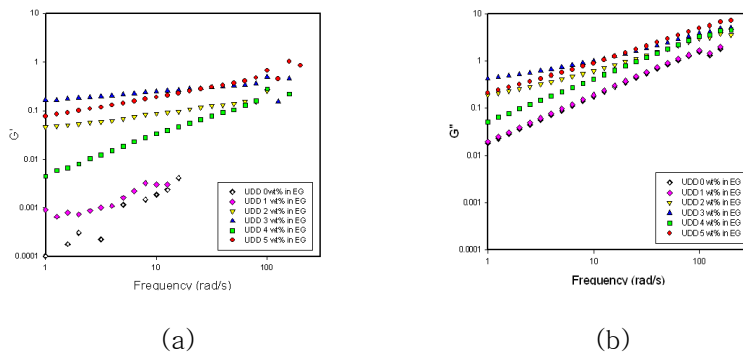


Fig. 3. Storage (a) and loss modulus (b) function of diamond/ethylene glycol nanofluid

다이아몬드/에틸렌글리콜 나노유체의 점탄성 특성은 Fig. 3 을 통해 관찰할 수 있다. 다양한 나노입자 농도에서 진동수에 대한 저장탄성률과 손실탄성률을 각각 나타내었다. 저장탄성률과 손실탄성률 모두 진동수가 증가함에 따라 증가하였다. 그리고 저장탄성률의 기울기는 손실탄성률의 기울기보다 작았고, 실험 진동수 범위 내에서 저장탄성률은 손실탄성률보다 작았다. 이러한 결과를 통해 나노유체의 점성이 탄성보다 우세하다는 사실을 확인할 수 있다.

### 결론

본 연구에서는 여러 종류의 나노입자와 기본유체를 섞은 뒤 초음파 처리를 하여 나노유체를 제조하였고 그것의 제타전위를 측정하여 분산안정성도 함께 확인하였다. 그리고 나노유체의 흐름과 관련된 특성을 이해하기 위해서 나노유체의 유변학적 성질을 관찰하였다. 나노유체는 나노입자의 농도가 매우 낮은 경우를 제외하고 비뉴턴성 거동을 나타내었다. 나노입자의 표면특성과 형태에 따라 점도가 달라지는 사실도 확인하였는데, 소수성 입자가 포함된 나노유체가 친수성 입자가 포함된 나노유체보다 점도가 높았고 막대형 나노입자가 포함된 나노유체가 구형 나노입자가 분산된 나노유체보다 점도가 높았다. 그리고 나노유체의 점탄성 특성도 관찰하였는데 저장탄성률이 손실탄성률보다 작다는 결과를 통해 나노유체의 점성이 우세하다는 사실을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Choi, S.U.S., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Development and Application of Non-Newtonian Flows, FED-Vol, 231/MD-Vol. 66. ASME, New York, 99-105.
- [2] Keblinski, P., S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles, Int. J. Heat. Mass. Tran. 45 (2002) 855-863.
- [3] Ha, J.J., Characteristics of Heat and Mass transfer properties by using silica nanoparticles in ammonia-water system, MA thesis, (2002) Korea university, Korea
- [4] Kim, J.K. , J.Y. Jung, J.H. Kim, M.G. Kim, T. Kashiwagi, Y.T. Kang, The effect of chemical surfactants on the absorption performance during  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  bubble absorption process, Int. J. Ref. 29 (2006) 170-177.
- [5] A. Einstein, Investigations on the Theory of the Brownian Movement, New York, Dover (1965)
- [6] G.K. Batchelor, Effect of Brownian motion on bulk stress in a suspension of spherical particles, J. Fluid Mech., 83 (1977) 97-117