

# 고효율 냉각용 나노분말/절연유 분산액의 제조 및 열전달특성

최 철, 오재명

한전 전력연구원 전략기술연구소 신소재그룹

## Preparation and Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-Transformer Oil Dispersions as Advanced Energy-efficient Coolants

Cheol Choi, Je-Myung Oh

Strategic Technology Laboratory, Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

**Abstract :** The purposes of the present study are to produce a high thermal efficient of oil-based nanofluids which can be used as ultra-high voltage transformer oil, and to investigate their thermal and physical properties under static and dynamic conditions. Three kinds of nanofluids are prepared by dispersing  $Al_2O_3$  or AlN nanoparticles in transformer oil. The thermal conductivities of the nanoparticles-oil mixtures increase with temperature, particle volume concentration and thermal conductivity of solid particle itself. It was quite important to eliminate  $H_2O$  as byproducts of esterification and excess oleic acid which did not form stable chemical bonds with powder surface to get high dispersion stability.

**Key Words :** Transformer Oil, Nanofluids, Dispersion, Thermal Conductivity

### 1. 서 론

최근 한전에서는 송전효율을 높이기 위하여 전력용 변압기의 대형화 및 초고압화를 적극 추진하고 있다. 그러나 송전전압 및 변압기 용량이 증대됨에 따라 절연유 온도가 상승하면서 변압기 수명이 단축되는 문제가 발생하고 있다. 지금까지는 유온 상승을 억제하기 위하여 외부에 별도의 방열판과 순환펌프로 이루어진 냉각시스템을 가동시키거나 유로 구조개선 등을 시도하여 왔으나 이것이 근본적인 해결책은 아니며, 무엇보다 열전달 매체인 절연유 자체의 열전달 특성이 크게 향상되어야 할 것으로 인식되고 있다.

이것은 비단 변압기만의 문제가 아니라 모든 분야에 사용되는 열교환기 전체의 문제이다. 실제로 1차 에너지의 대부분(80~90%)이 다양한 형태의 열교환 시스템을 반드시 거치기 때문에, 이러한 열교환기의 효율 향상은 국가적으로 소모되는 에너지를 혁신적으로 저감시킬 수 있는 동시에, 이산화탄소 발생량을 원천적으로 감소시킬 수 있게 된다. 따라서 관련 산업계에서는 오래전부터 대체 냉매의 개발에 투자해 왔으나, 대부분의 대체 냉매는 친환경적이지 못하거나 기기의 생산단가를 높임으로써 상용화되지 못하였다. 그러나 최근 개발된 나노유체(Nanofluids)는 기존의 액상 냉매에 열전도도가 훨씬 높은 고형의 입자를 미량 첨가하여 만든 일종의 혼합유체로서, 열전달 효율이 높은 친환경 냉각 매체로 인식되고 있다.

본 연구에서는 이러한 나노유체의 개념을 이용하여 기존보다 열전달 효율이 30% 이상 향상된 절연유를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 열전도도와 전기절연 특성이 우수한  $Al_2O_3$  및 AlN 나노입자를 절연유에 미량 분산시켜 나노절연유를 제조한 후, 이들의 물리적/열적 물성을 순수 절연유의 그것과 비교평가하였다.

### 2. 실험

나노절연유 제조를 위하여 기상공정에 의해 합성된 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 및 질화 알루미늄(AlN) 나노입자를 0.5vol.%의 농도로 절연유에 분산시켰다. 단, 기상공정에 의해 제조된 나노분말이 조대한 분말 응집체로 존재하므로 비드밀을 사용하여 핵산 상태에서 습식 분쇄하였으며, 절연유에 대한 분산성을 향상시키기 위해 에스테르화 화학반응을 이용하여 분말 표면을 친유성으로 표면개질하였다. 또한 분말 표면과 반응 못하고 시료 내에 잔존하는 과잉의 분산제와 반응 부산물인 물을 제거하기 위하여 필터링을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 실험에서는 비드밀을 이용하여 나노분말 응집체를 분쇄하고, 동시에 에스테르화 화학반응을 이용하여 분말 표면에 친유성 코팅층을 형성하게 함으로써 분말의 응집과 침전을 억제하고 분산성을 향상시켰다. 이 때 사용하는 비드의 직경이 작을수록 분쇄효율이 높아져 분산성이 향상되고, 정도는 감소하기 때문에, 모든 실험에 대하여  $\phi$  0.05mm의 지르코니아 비드를 적용하였다. 또한 분말 분쇄 및 표면개질 시간이 길어질수록 유체 속에 분산된 입자의 크기가 감소하고 분산성 및 투과도가 향상되지만, 반면에 정도가 증가하고 열전도도는 감소하는 것으로 확인되었다. 이것은 본 실험에서 밀링과 표면개질을 동시에 수행함으로써 시간이 경과함에 따라 나노분말 표면에 형성되는 친유성 코팅층의 밀도가 증가하고, 이것이 점도와 열전도도에 악영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 표면개질에 의해 분말 표면에 형성되는 친유성 코팅층은 분산성 향상 측면에서는 도움을 주나, 점도 및 열전도도에는

악영향을 미치므로 적정 수준을 유지하도록 하는 것이 매우 중요한 것으로 판단된다.

표면개질 후에 유체 내에 잔존하는 과잉의 분산제와 에스테르화 화학반응의 부산물로서 존재하는 물은 유체의 분산성을 크게 악화시켰으며, 이들을 제거하기 위해 초미세 멤브레인을 이용한 별도의 여과공정을 도입하였다. 그림 1에 여과공정이 유체의 점도에 미치는 영향을 보였는데, 구상분말 알루미늄 나노절연유 경우, 과잉의 분산제를 제거함에 따라 점도가 순수 절연유 수준으로 낮아짐을 확인할 수 있다.

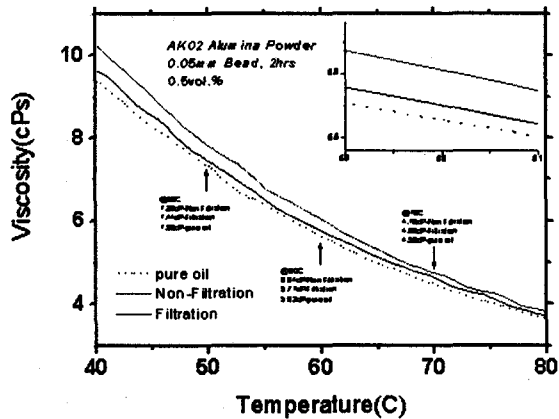


그림 1. 구상 알루미늄(AKO2) 나노절연유에서 여과공정 점도에 미치는 영향

그러나 여과공정이 점도에 미치는 영향은 시료마다 다르게 나타났다. 즉, 섬유상 알루미늄 나노절연유 경우에는 여과를 하면 점도가 오히려 증가했는데, 정확한 원인규명을 위해 추가적인 연구가 요구된다. 이러한 점도의 차이는 열전도도에도 영향을 미쳐서 섬유상 알루미늄 나노절연유는 구상 절연유보다 낮은 열전도도를 보였다(그림 2 참조). 알루미늄 나노절연유는 농도가 증가할수록 비례적으로 열전도도가 상승하였으며, 4vol.%의 농도 조건에서 순수 절연유 대비 약 20%의 열전도도 향상폭을 보였다. 이것은 동일 농도의 (물+알루미늄) 나노유체가 10~12% 정도의 열전도도 향상폭을 보이는 것과 비교하면 약 2배 가까이 높은 향상폭이다. 그러나 나노분말의 농도가 0.5vol.%에서 4vol.%로 증가함에 따라 유체의 점도가 1.5배 이상 증가하기 때문에 실용적 가치는 없어 보인다.

열전도도와는 달리 이중관 및 평판형 열교환기를 사용하여 수행한 대류열전달 실험에서는 섬유상 알루미늄 나노절연유가 구상 절연유보다 높은 열전달 특성을 보였다. 0.5vol.% 섬유상 알루미늄 나노절연유 경우,  $100 < Re < 400$  조건에서 순수 절연유 대비 총괄열전달계수가 11~19%까지 상승하였다. 그러나 질화 알루미늄(AIN) 시료의 경우, 알루미늄 나노절연유보다 훨씬 높은 열전도도 향상폭을 보인 반면, 총괄열전달계수는 섬유상 알루미늄 절연유보다 낮게 나타났다. 따라서 대류열전달 특성은 분말의 조

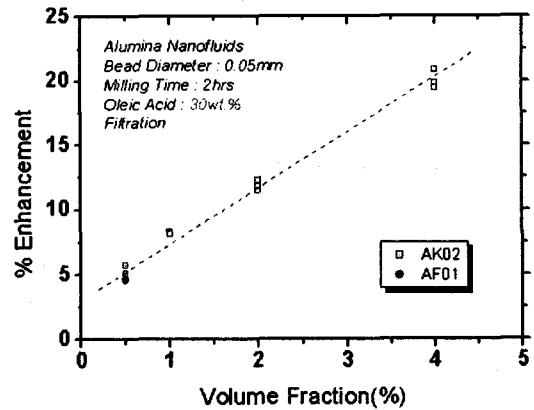


그림 2. 알루미늄 나노분말의 체적분율에 따른 나노절연유의 열전도도 변화

성보다는 분말의 형상에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

나노절연유를 제조하기 위한 나노분말로서 기상합성공정에 의해 제조된 상용 알루미늄 및 질화 알루미늄 세 가지 분말을 선정하여 나노절연유를 제조하고 물성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 분말 표면과 결합하지 못한 과잉의 분산제와 물은 유체의 분산성을 악화시키므로 적절한 여과공정을 통하여 이를 제거할 것이 요구되었다.
2. 분산제 농도가 높거나 반응시간이 길어질수록 분말표면 코팅층 밀도가 증가되면서 점도가 상승하고 열전도도는 저하되므로 적정하게 조절할 필요가 있었다.
3. 섬유상 재료는 구상보다 열전도도는 낮았지만 대류 열전달 계수는 높았으며, 이것은 섬유상 형상이 유체 흐름에 대한 믹싱(Mixing) 효과가 컸기 때문으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사와 전력산업연구개발사업(기금-159)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] J. C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism", Clarendon, Oxford, 1873.
- [2] S. U. S. Choi, ASME FED, p. 99, 1995.
- [3] H. Masuda, A. Ebeta, K. Teramae and N. Hishinuma, Netsu Bussei, Vol. 4, p. 277, 1993.
- [4] H. E. Patel, S. K. Das, T. Sundararajan, A. S. Nair, George and T. Pradeep, Appl. Phys. Lett., Vol. 83, p.2931, 2003