

오일 기지 알루미나 나노유체의 열적거동 평가

최 철, 유현성, 오제영

한전 전력연구원 전략기술연구소 신소재그룹

Evaluation of Thermal Behavior of Oil-based Al₂O₃ Nanofluids

Cheol Choi, Hyun-sung Yoo, Je-Myung Oh

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

Abstract : Two kinds of alumina nanofluids are prepared by dispersing Al₂O₃ nanoparticles in transformer oil. The thermal conductivity of the nanoparticle-oil mixtures increases with particle volume fraction and thermal conductivity of the solid particle itself. The Al₂O₃ nanoparticles at a volume of 0.5% can increase the thermal conductivity of the transformer oil by 5.7%, and the overall heat transfer coefficient by 20%. From the natural convection test using a prototype transformer, the cooling effect of Al₂O₃-oil nanofluids on the heating element and oil itself is confirmed. However, excessive quantities of the surfactant have a harmful effect on viscosity, and thus it is strongly recommended to control the addition of the surfactant with great care.

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

1. 서 론

최근 송전전압 및 변압기 용량이 증대됨에 따라 절연유 온도 상승에 따른 사고발생 및 변압기 수명 단축 등의 문제가 발생하고 있다. 지금까지는 변압기 유로구조를 개선하거나 외부에 별도의 냉각시스템을 가동시킴으로써 유온 상승 억제에 도모하였으나, 그 효과는 매우 제한적이었다. 특히 외부 냉각시스템에 의한 절연유 냉각방식도 냉각시스템 자체의 장애로 인한 변압기 작동 중지 및 전력소모 과다 등을 우려하여 사용자들의 수요가 점진적으로 줄고 있는 실정이다. 따라서 변압기의 냉각효율을 큰 폭으로 향상시키기 위해서는 근본적으로 절연유 자체의 열전달 특성이 향상되어야 하는 것으로 이해되고 있으며, 이 때문에 최근 나노유체가 큰 관심의 대상이 되고 있다. 나노유체(Nanofluid)는 액체보다 열전도도가 수백~수만배 뛰어난 고형 나노입자를 물과 같은 액체 냉매 속에 미량 분산시킨 일종의 혼합 유체로, 기존의 열전달 이론으로는 설명되지 않을 정도의 매우 높은 열전달 특성을 가진다.

본 연구에서는 이러한 나노유체의 개념을 이용하여 기존보다 열전달 효율이 30% 이상 향상된 절연유를 개발하고자 하였다. 이를 위하여 열전도도와 전기절연 특성이 우수한 Al₂O₃ 나노입자를 절연유에 미량 분산시켜 나노절연유를 제조한 후, 이들의 물리적/열적 물성을 순수절연유의 그것과 비교·평가하였다.

2. 실험

나노절연유 제조를 위하여 기상공정에 의해 합성된 알루미나(Al₂O₃) 나노입자를 0.5vol.%의 농도로 절연유에 분산시켰다. 단, 기상공정에 의해 제조된 나노분말이 조대한 분말 응집체로 존재하므로 비드밀을 사용하여 습식 분쇄하였으며, 절연유에 대한 분산성을 향상시키기 위해 Oleic

Acid를 분산제로 하여 분말 표면을 친유성(親油性)으로 개질하였다. 또한 한외여과막을 이용하여 시료 내에 잔존하는 과잉의 분산제와 반응 부산물인 물을 제거하였으며, 마지막으로 진공농축기를 이용하여 용매를 절연유로 치환함으로써 나노절연유를 제조하였다. 나노절연유의 열전도도는 비정상열선법을 이용하여 상온에서 측정하였으며, 판상형 열교환기를 이용하여 100≤Re≤500 범위에서 총괄 열전달계수를 구하였다. 또한 자연대류에 의한 열전달 특성을 조사하기 위하여 3ℓ급 소형 변압기 모사장치를 이용하여 일정 온도 및 입력전원 조건에서 발열체 및 절연유의 온도변화를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서는 비드밀을 이용하여 나노분말 응집체를 분쇄함과 동시에 에스테르화 화학반응을 이용하여 분말표면에 친유성 코팅층을 형성함으로써 분말의 응집과 침전을 억제하고 분산성을 향상시켰다. 이 때 분말 분쇄 및 표면개질 시간이 길어질수록 유체 속에 분산된 입자의 크기가 감소하고 분산성 및 투과도가 향상되지만, 반면에 점도가 증가하고 열전도도는 감소하는 것으로 확인되었다. 이것은 반응시간이 경과함에 따라 나노분말 표면에 형성되는 친유성 코팅층의 밀도가 증가하고, 이것이 열전달 장벽으로 작용함으로써 점도와 열전도도에 악영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 표면개질에 의해 분말 표면에 형성되는 친유성 코팅층은 분산성 향상 측면에서는 도움을 주나, 점도 및 열전도도에는 나쁜 영향을 주므로 적정 수준을 유지하도록 하는 것이 매우 중요하다.

표면개질 후에 유체 내에 잔존하는 과잉의 분산제와 에스테르화 화학반응의 부산물로서 존재하는 물은 유체의 분산성을 크게 악화시켰으며, 이들을 제거하기 위해 초미

세 멤브레인을 이용한 별도의 여과공정을 도입하였다. 여과공정을 거치지 않은 시료는 초기에는 매우 안정된 분산상을 유지하다가도 시간의 경과에 따라 거의 대부분 침전하는 현상을 보였는데, 이것은 그림 1에 보인 바와 같이 분말 표면과 반응하지 못한 과잉의 분산제가 용액 속에 역미셀(Reversed Micelle)의 형태로 존재하다가 시간이 경과함에 따라 표면에너지 줄이기 위해 미셀의 Ostwald Ripening 현상이 발생하고, 이 때 분리된 분산제가 분말 표면의 분산제 층에 이중결합(Double Bonding)함에 의하여 전체적인 분말의 특성을 다시 친수성으로 복귀시킴에 의한 것으로 판단된다. 또한 본 실험에서 적용한 에스테르화 반응은 용액 속에 물이 존재할 경우, 역반응을 일으키기 때문에 미량의 수분이라도 용액 내에 존재하게 되면 시간이 경과함에 따라 분산성이 악화되므로 이의 제거가 매우 중요하다.

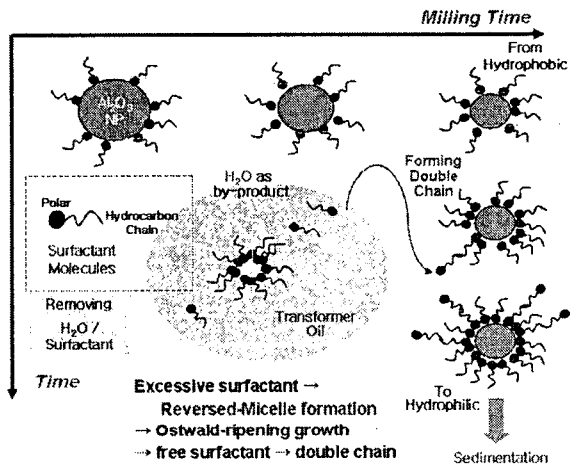


그림 1. 용액 속에 잔존하는 과잉의 분산제 및 물이 나노유체의 분산성에 미치는 영향을 설명한 도식도

Al₂O₃ 나노절연유는 AlN 나노절연유에 비해서 열전달 특성은 다소 낮게 나타났다. 즉, 상온 및 0.5vol.% 농도 조건에서 AlN 나노절연유는 순수절연유에 비해 최대 8%의 열전도도 향상폭을 보인데 반하여, Al₂O₃ 나노절연유는 최대 5.7%의 열전도도 향상폭을 보였다. 그러나 AlN 나노절연유는 분산성, 점도 및 절연내력 측면에서 Al₂O₃보다 물성이 낮게 나타났다. 또한 동일 조성의 나노분말을 사용하더라도 각 분말의 순도, 표면특성 및 입도에 따라 나노유체의 물성이 크게 달라지기 때문에 분말의 선택이 매우 중요하였다. 현재까지는 순도와 비표면적이 높고, 입도가 작을수록 나노유체의 열전달 특성이 높게 나타났다.

Al₂O₃ 나노절연유에 대하여 일정 온도 및 입력전원 조건에서 자연대류에 의한 열전달 특성을 순수절연유의 그것과 비교하여 그림 2에 보였다. 그림에서 100W의 전원을 인가했을 때 발열체와 절연유의 온도변화를 조사하였는데, 구상 알루미늄 나노절연유는 순수절연유와 비교하여 발열체 온도와 절연유 자체의 온도가 각각 8.8℃, 10.2℃씩 낮아짐을 확인할 수 있었다. 다만 이러한 현상은 낮은 입력전원 조건에서는 크지 않은 것으로 나타났다. 예를

들어 60W의 입력전원 조건에서는 절연유의 온도가 70℃ 정도로 상승되어 실제 운전조건과 유사하나, 발열체 및 절연유의 온도저하가 1℃ 이내로 매우 작았다. 따라서 정상적인 운전조건에서보다는 과부하 운전조건에서 나노절연유의 높은 냉각효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

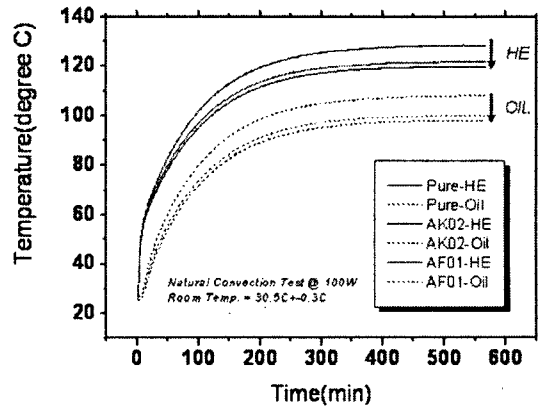


그림 2. 알루미늄 나노절연유의 자연대류에 의한 열전달 특성 비교평가(HE:발열체, Oil:절연유)

4. 결론

나노절연유를 제조하고 물성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 용액 속에 잔존하는 과잉의 분산제와 반응 부산물인 물은 유체의 분산성을 크게 악화시키며, 따라서 적절한 여과공정을 통하여 이를 제거할 것이 요구되었다.
2. 분산제에 의한 분말표면 코팅층 밀도가 증가할수록 점도가 상승하고, 이것이 열전달 장벽으로 작용함으로써 열전도도가 저하되므로 안정된 분산성만 확보될 정도로 분산제 사용을 최대한 억제하는 것이 매우 중요하였다.
3. 강제순환이 아닌 자연대류만에 의한 열전달에 의해서도 나노절연유는 순수절연유에 비해 높은 냉각효과를 보였으며, 특히 정상운전 조건에서보다 과부하 운전조건에서 그 차이가 높게 나타났다.

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.