

고효율 나노절연유 제조 및 변압기에의 적용

유현성, 최 철, 오재명

한전 전력연구원 전력기술연구소 신소재그룹

Preparation of High-Efficient Oil-based Nanofluids and Its Application to the Transformer

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

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

Abstract : Oil-based nanofluids are prepared by dispersing spherical and fiber-shaped Al_2O_3 and AlN nanoparticles in transformer oil. Two hydrophobic surface modification processes are compared in this investigation. It is obvious that the combination of nanoparticle, surfactant and surface modification process is very important for the dispersity of nanofluids. For (Al_2O_3+AlN) particles with 1% volume fraction, the enhancement of thermal conductivity and convective heat transfer coefficient is nearly 11% and 30%, respectively, compared to pure transformer oil. The cooling effect of (Al_2O_3+AlN)-oil nanofluids on the heating element and oil itself is confirmed by a natural convection test using a prototype transformer.

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

1. 서론

현재 1차 에너지의 80~90%가 열교환기를 통하여 순환되기 때문에 거의 모든 분야에서 사용되는 열교환기의 효율을 상당 수준 향상시킬 수 있다면 국가적인 에너지 비용절감이 가능할 것으로 기대된다. 지금까지는 유로 구조 및 재질변경, 냉매의 유속 증대 등에 의해 열교환기의 효율을 향상시켜 왔으나, 이제는 기술적 한계점에 도달함으로써 보다 근본적인 효율 향상 대책이 요구되고 있다. 특히 세계 10위의 온실가스 배출국으로서 포스트 교토체제 협상이 본격화되면 온실가스 감축의무 부담 압력이 가중될 것이 분명하기 때문에, 에너지 고효율화에 대한 관심이 더욱 고조되고 있다. 이에 최근에는 나노유체가 이러한 모든 문제를 동시에 해결할 수 있는 가장 효과적인 방안으로 인식되고 있다. 나노유체란 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 Al_2O_3 및 AlN 나노입자를 절연유에 미량 분산시켜 나노절연유를 제조한 후, 이들의 물리적/열적 물성을 순수 절연유의 그것과 비교·평가하였다.

2. 실험

나노절연유 제조를 위하여 기상공정에 의해 합성된 상용 Al_2O_3 및 AlN 나노분말을 0.5~1.0vol.%의 농도로 절연

유에 분산시켰다. 단, 나노분말이 조대한 분말 응집체로 존재하므로 비드밀을 사용하여 1차 입자 수준으로 습식 분쇄하였으며, 절연유에 대한 분산성을 향상시키기 위해 Oleic Acid(OA) 및 Polyoxyethylene Alkyl Acid Ester(PAAE)를 분산제로 하여 분말 표면을 친유성(親油性)으로 개질하였다. 노말렉산을 습식분쇄 용매로 사용하는 경우에는 표면개질 후, 한외여과막을 이용한 여과공정을 수행함으로써 유체 속에 잔존하는 과잉의 분산제와 물을 제거하였으며, 진공농축기를 이용하여 용매를 절연유로 치환하였다. 나노절연유의 열전도도는 비정상열전법을 이용하여 상온에서 측정하였으며, 판상형 열교환기를 이용하여 $100 \leq Re \leq 500$ 범위에서 대류열전달계수를 구하였다. 또한 자연대류에 의한 열전달 특성을 조사하기 위하여 3급 소형 변압기 모사장치를 이용하여 일정 온도 및 입력전력량 조건에서 발열체 및 절연유의 부위별 온도변화를 조사하였고, 소형 배전용 변압기를 이용하여 초고전압 인가 상태에서 나노절연유의 냉각 및 전기특성을 순수절연유와 비교 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

나노분말의 친유성 표면개질은 노말렉산을 용매로 에스테르화 화학반응을 일으켜서 나노분말 표면에서 친수성을 나타내는 -OH기를 친유성으로 치환하거나, 절연유를 직접 용매로 하여 기존의 -OH기에 분산제 분자를 결합시키는 단순흡착 방식의 2가지를 적용하여 비교 평가하였다. 비드밀을 이용한 분말 습식분쇄 및 표면개질 시간이 길어질수록 유체 속에 분산된 입자의 크기가 감소하고 분산성과 투과도는 향상되지만, 점도가 증가하고 열전도도는 감소하는 것으로 확인되었다. 이것은 분산제 반응시간이 경과

함에 따라 나노분말 표면에 형성되는 친유성 코팅층의 밀도가 증가하고, 이윗한 절연유 분자와의 인력이 강화됨에 따른 것으로 생각된다. 즉, 절연유 속에 분산된 나노분말의 운동성(Mobility)이 감소함에 따라 나노유체의 가장 중요한 열전달 기구인 브라운 운동이 잘 일어나지 않기 때문으로 해석된다. 그러나 모든 시료에서 표면개질에 따른 열전도도 특성 변화를 브라운 운동 또는 점도 변화만으로 해석하기 어렵기 때문에, 친유성 tail 부분의 비율이 큰 분산제를 사용하는 경우에는 표면개질층 자체가 열전달의 장애물로 작용할 가능성도 공존하는 것으로 판단된다. 즉, 표면개질에 의해 분말 표면에 형성되는 친유성 코팅층은 분산성 향상 측면에서는 도움을 주나, 점도 및 열전도도에는 나쁜 영향을 주므로 적정 수준을 유지하고, 분산제 첨가량, 친수성/친유성 비율 및 구조를 최적화하도록 제어하는 것이 매우 중요하다.

에스테르화 화학반응과 단순흡착 방식에 의한 친유성 표면개질을 시도하고 그 결과 얻어진 시료의 물성을 비교 평가하였는데, 화학반응에 의한 표면개질은 분산성과 화학적 안정성은 매우 높지만, 공정이 복잡하고 장시간을 요하며 점도가 다소 높게 나타나는 문제점을 가진다. 반면에 단순흡착 방식의 표면개질을 이용하면 상대적으로 열전도도가 높고 점도상승폭이 낮으며 공정이 매우 간단한 장점을 가지지만, 분산성과 화학적 안정성이 다소 낮은 단점을 가진다. 각각의 분산공정마다 최적의 물성을 보이는 분산제가 제각기 다른 것으로 나타났으며, 따라서 분산제와 표면개질 공정의 선택과 조화가 매우 중요한 것으로 판단되었다.

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 절연유에 첨가된 나노분말의 순도 및 비표면적이 높고, 입도가 작을수록 나노유체의 열전달 특성이 높게 나타나는 것으로 확인되었다. Al₂O₃ 분말의 우수한 전기절연성과 AlN 분말의 높은 열전도도 특성을 활용하기 위하여 (Al₂O₃+AlN) 혼합 나노절연유를 제조하였으며, 일정 온도 및 입력전력량 조건에서 자연대류에 의한 열전달 특성을 순수절연유의 그것과 비교하였다. 60W의 전원을 인가했을 때 발열체와 절연유의 온도변화를 조사하였는데, 혼합 나노절연유는 발열체와 상하부 유온을 순수 절연유와 비교하여 각각 1.7℃, 2.3℃, 2℃씩 저하시키는 것으로 확인되었다. 실제로 40리터급 소형 배전용 변압기에 혼합 나노절연유를 첨가하고 6.6kV의 1차 전압을 적용하여 나노절연유의 냉각 및 전기적 특성을 조사하였으며, 그 결과를 표 1에 나타냈다. 표 1.에서

0.5vol.% Al₂O₃ 나노절연유와 1.0vol.% (Al₂O₃+AlN) 나노절연유는 각각 순수절연유와 비교하여 냉각효율이 3.5%, 6.0% 상승하는 것으로 확인되었다. 이것은 유체가 정지된 상태에서 측정된 것이지만, 강제순환 방식으로 절연유가 일정 유속으로 순환되는 경우에는 냉각효율이 보다 상승할 것으로 예상된다.

표 1. 나노절연유의 냉각특성 비교 평가

	일반광유	Al ₂ O ₃ -nanofluid	Al ₂ O ₃ +AlN nanofluid
ΔT(°C)	24.5	25.2	25.8
Q (W)	407.2	421.5(3.5%)	431.6(6.0%)

4. 결론

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

1. 에스테르화 화학반응 방식에 의한 표면개질 방법은 공정이 복잡하고 정도가 높은 단점을 가지지만, 매우 우수한 분산성을 확보할 수 있는 반면에, 단순흡착 방식의 표면개질 공정은 상대적으로 열전도도가 높고 점도 상승폭이 낮으며 공정이 매우 간단한 장점을 가진다.
2. 동일 조성의 나노분말을 사용하더라도 각 분말의 순도, 표면특성 및 입도에 따라 나노유체의 물성이 크게 달라지며, 분말의 선택과 함께 적용한 분산제에 따라 나노유체의 물성이 달라지기 때문에 나노분말, 분산제, 표면개질 공정의 선택이 매우 중요하다.
3. 실제 소형변압기에 나노절연유를 적용한 결과 냉각효율이 6% 상승하는 것으로 확인되었으나, 초고전압 인가상태에서 열전달 특성 외에 우수한 전기절연성 확보를 위해서는 나노소재 및 분산제의 선택과 특성조사에 추가적인 연구가 필요한 것으로 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.