

변압기 나노절연유의 열전달특성에 미치는 분산기술의 영향

송현우, 최철, 오제명
한전 전력연구원

Effect of Dispersion Technique on Heat Transfer Properties of Transformer Oil with Nanoparticles

Hyunwoo Song, Cheol Choi, Jemyung Oh
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI), KEPCO

Abstract : Both Al₂O₃ and AlN nanopowders with diameters from μm to mm were bead-milled and surface-modified by stabilizing agent. The size of bead-milled nanoparticles compared with the primary powder was effectively decreased and was dependent on milling time and bead size. The results of dispersion stability analysis indicated that chemical bonding between nanoparticles and surfactant is more effective than chemical adsorption to prepare the stable transformer oils containing nanoparticles. In this study, the thermal conductivity of the transformer oils containing nanoparticles was measured by transient hot-wire and laser flash methods.

Key Words : Nanofluids, Transformer Oil, Dispersion, Milling, Surface Modification

1. 서론

액상의 유체에 상대적으로 열전도도가 높은 고형입자를 첨가시킨 혼합유체의 열전달 특성 향상에 관한 이론이 1881년 Maxwell[1]에 의해 발표되었다. 하지만 당시의 소재기술로 생산 가능한 미립자의 크기가 너무 조대하여 이러한 혼합유체가 실용화되지 못하였다. 그러나 최근 나노소재분야 기술의 비약적인 발달로 과거 혼합유체에서 보였던 실용상의 문제점을 극복할 수 있게 되었고, 1995년 Choi가 새로운 냉각매체로써 나노유체(Nanofluids)[2]의 개념을 제시하고 고전이론으로 설명되지 않는 획기적인 열특성을 보고한 이래, 미래형 열전달 매체로 관심이 집중되어 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다 [3-5].

본 연구에서는 동일한 고형성분이 첨가되더라도 냉각유체 자체의 열전도도가 낮을수록 열전달특성이 크게 향상되는 나노유체의 특성을 이용하여 초고압 대형 변압기용 절연유를 대체할 수 있는 고효율 나노절연유를 개발하고자 하였다. 절연유의 고유특성인 절연내력에 영향을 미치지 않도록 절연특성이 뛰어난 알루미늄(Al₂O₃)과 질화알루미늄(AlN) 나노분말을 선정하였고, 이들 분말들의 절연유 내에서의 분산안정성을 확보하기 위한 최적의 분산기술을 도출하여 나노절연유를 제조한 후, 분말의 표면개질을 통한 분산조건이 혼합유체의 열전달특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험

나노절연유 제조를 위해 본 실험에서는 기상공정에 의해 합성된 상용 알루미늄과 질화알루미늄 나노분말을 사용하였다(표 1 참조). 조대한 크기의 응집체로 존재하는 기상분말을 분쇄하고자 비드밀 분쇄기를 통해 절연유에

분산제로 NOPCOPLUS DS-203(산노프코)을 첨가한 상태에서 습식 분쇄하여 나노절연유를 제조하였고 n-Hexane에서 안정제로 Oleic acid(이하 OA)를 첨가하여 습식 분쇄한 혼합용액을 60 °C에서 초음파를 조사하며 반응시킨 후, 원심분리를 통해 얻은 분말을 세척 및 건조과정을 거쳐 절연유에 첨가하여 나노절연유를 제조하였다. 이때, 나노절연유를 제조하는 과정은 건조된 분말을 0.5 vol. % 농도로 절연유에 첨가한 후, 초음파 조사와 진공 중 용액내 기포제거를 각각 3회 반복하였다.

표 1. 알루미늄 및 질화알루미늄 나노분말의 종류와 특성.

분말특성	알루미늄			질화알루미늄
	AR03	AK02	AF01	AN01
평균입경 (nm)	27-43 (200-500)	13	2×20-200	<50
비표면적 (m ² /g)	35	100	400	>78
결정 입형	α	-	δ	Hexagonal
순도 (%)	구형	구형	삼유상	구형
순도 (%)	99.5	>99.6	99.9	>99.0
표면특성	친수성	친수성	친수성	친수성

표면개질 전후의 분말 표면상태 변화를 적외선 분광 광도계(FTIR)를 통해 확인하였고, 투과전자현미경(TEM)과 압도분석기(PSA)를 사용하여 분쇄효과에 의한 분말의 크기변화를 조사하였으며, 분쇄 및 표면처리된 분말의 절연유 내에서의 분산거동을 분산안정성 평가장치로 평가하였다. 또한, 나노절연유의 열전도도를 비정상열선법과 레이저성광법으로 측정하였다.

3. 결과 및 검토

n-Hexane에 분말과 OA를 첨가하여 분쇄하며 반응시켜 얻은 분말들은 에스테르화 반응을 통해 입자표면에 OA

분자들이 코팅층을 형성하여 소수성(Hydrophobic)으로 변화된다는 것을 FTIR 분석을 통해 확인하였다. 이 반응은 가역반응이므로 효과적인 코팅층을 형성하기 위해서 반응 중에 생성되는 수분을 제거하면서 정반응을 유도해야 한다. 이를 위해, 반응기 내부를 감압조건하에서 반응시켜 얻은 분말을 첨가하여 나노절연유를 제조하였다. 반면에, 절연유에 분말과 분산제를 첨가한 상태에서 분쇄를 통해 제조한 나노절연유는 분말표면과 분산제간의 흡착에 의해 표면특성이 소수성으로 변화된다.

비드밀에 의한 분쇄효과를 확인하고자 표 1의 분말들을 분쇄하면서 안정제로 표면처리하여 제조한 나노절연유의 PSA 분석결과를 그림 1에 나타냈다.

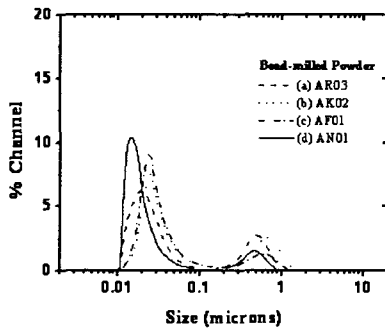


그림 1. 비드밀 분쇄에 따른 Al_2O_3 및 AlN 나노분말의 입자크기 분포.

그림에서 (a), (b) 및 (c)는 세 종류의 Al_2O_3 분말에 분산제의 흡착을 유도하였고 (d)는 AlN 분말을 OA로 코팅한 후 제조한 시료이다. 그림에서 살펴보면, 안정제의 종류 및 결합방식에 무관하게 응집체로 존재하던 초기분말들이 1차 입자수준의 크기로 분쇄된다는 것을 알 수 있다. 이러한 분쇄효과는 분쇄시간 및 분쇄시 사용되는 비드의 크기와 밀접한 관련이 있으며 상대적으로 저에너지 분쇄공정인 볼밀에 의한 효과보다 매우 뛰어나다는 것을 확인하였다.

제조된 나노절연유의 분산거동을 확인하고자 1개월의 분산안정성을 예측, 평가한 결과를 그림 2에 나타냈다.

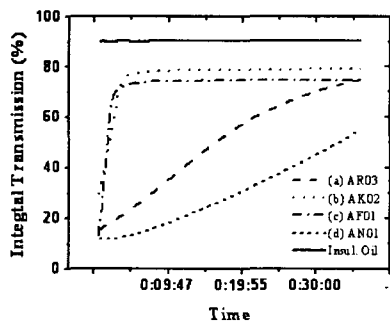


그림 2. 비드밀 분쇄에 따른 Al_2O_3 및 AlN 나노절연유의 분산안정성 비교

그림 2의 각각의 시료는 그림 1의 PSA 분석에 사용한 시료와 동일한 시료이다. 모든 분말들이 미세한 크기로 분쇄되었음에도 불구하고 분산안정성 측면에서는 첨가되는 안정제의 종류 및 결합방식에 따라 현저한 차이를 보이고 있다. 즉, 흡착에 의한 결합방식보다 입자표면에 안정제의 화학결합을 유도하여 제조한 나노절연유가 높은 분산안정성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

제조된 나노절연유의 열전도도를 비정상열선법과 레이저성광법으로 측정하여 순수한 절연유와 비교한 결과, 시료에 따라 5~20%의 향상효율을 보였다. 다만, 분산안정성을 확보하지 못한 시료에서는 시간에 따른 침전이 발생하여 그 효율이 점차 감소하였다. 따라서, 고효율의 열전특성을 갖는 나노절연유를 제조하기 위해서는 분산기술의 확보가 중요하다고 판단된다.

4. 결론

기상합성공정에 의해 제조된 상용 Al_2O_3 및 AlN 나노분말을 이용하여 나노절연유를 제조하고 입도분포와 분산안정성 및 열전도도를 평가한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 조대한 크기의 응집체로 존재하는 기상공정에서 제조된 나노분말들은 고에너지 분쇄공정인 비드밀을 통해 효과적으로 분쇄되었으며, 따라서 미세한 크기의 나노입자가 첨가된 나노절연유를 개발하기에 적합한 공정으로 판단된다.
2. 분쇄된 입자들의 재응집을 방지하고자 첨가되는 안정제는 그 종류 및 결합방식에 따라 절연유내에서의 입자의 분산안정성에 큰 영향을 미쳤으며, 따라서 안정한 나노절연유를 제조하기 위해서는 적절한 표면개질 기술이 요구된다.
3. 우수한 열전특성을 갖는 나노절연유를 제조하기 위해서는 침전이 발생하지 않도록 분쇄 및 표면개질 공정을 통해 장시간의 안정성을 확보할 수 있는 제조방법의 개발이 선행되어야 한다.

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] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li and J. A. Eastman, J. Heat Transfer, Vol. 121, p. 280, 1999.
- [4] Y. Xuan and Q. Li, J. Heat Fluid Flow, Vol. 1(21), p. 58, 2000.
- [5] S. K. Das, N. Putra and W. Roetzel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 46. p.855, 2003.