

나노분말이 첨가된 변압기 절연유 제조 및 정적열전특성 평가

송현우, 최철, 최경식, 오제명

한전 전력연구원

Synthesis and Characterization of Transformer Oil containing Nanoparticles

Hyunwoo Song, Cheol Choi, Kyungshik Choi, and Jemyung Oh

KEPRI

Abstract

New hydrophobic alumina nanoparticles were synthesized from alumina powders which were hydrophilic nano-agglomerates with diameters from μm to mm by surface modification. The synthesized hydrophobic alumina nanoparticles which were retreated with Oleic acid were analyzed by Fourier transform infrared spectrophotometer and transmission electron microscopy.

Then transformer oil containing surface-modified alumina nanoparticles were synthesized. The synthesized hydrophobic alumina nanoparticles were well-dispersed in transformer oil. The coefficient of viscosity and dielectric strength of the Nano-transformer oil were investigated with viscometer and high voltage experiment device. In this study, the thermal conductivity of Nano-transformer oil was investigated to reduce the oil temperature of transformer by transient hot-wire method.

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

1. 서론

액상보다 열전도도가 높은 고형 입자를 유체에 첨가함으로써 열전달 특성이 크게 향상될 수 있다는 Maxwell의 이론[1]이 발표된 이후, 이에 대한 많은 연구가 이 이론의 검증 차원에서 진행되어 왔다. 그러나 지금까지 대부분 연구가 모두 마이크로(μm) 수준 이상의 조대한 입자를 대상으로 하였으며[2], 이들은 유체 속에서 쉽게 응집·침전되고 침식, 관막힘, 압력 저하 등의 문제를 야기함으로써 실용적 차원에서 많은 제한 요소를 가졌다.

그러나 최근 나노소재 제조기술이 비약적으로 발달하면서 이러한 나노 입자를 종래의 냉각 매체에 분산시킬 경우, 마이크로 유체의 문제점을 해소할 수 있을 뿐만 아니라 열전달 특성 또한 크게 향상될 것이라는 주장이 Choi 등에 의해 새롭게 제시되었다[3]. 이처럼 다양한 형태의 나노입자(<100nm)

가 분산된 유체를 “나노유체(Nanofluid)”라 하며[3], 실용성 높은 혁신적인 냉각 매체로 인식되어 최근 전세계적으로 다양한 나노유체가 개발됨과 동시에, 뚜렷한 열교환 특성 향상이 증명되고 있다 [4-6].

본 연구에서는 이러한 나노유체의 특성을 이용하여 변압기용 절연유의 냉각 성능 향상을 도모하고자 하였다. 이를 위하여 절연유로서의 고유 특성(절연성 및 점성)은 유지하되, 냉각 특성을 대폭 향상시킬 수 있는 나노절연유를 제조하고 이의 정적 열전특성을 평가함으로써, 향후 변압기용 절연유로서의 실적용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

나노절연유 제조를 위한 분말로써 평균입경 12 nm(AK02)와 35nm(AR03)인, 두 종류의 상용 알루미나(Al_2O_3) 분말을 사용하였다. 표면개질하고자 하는 나노분말 2g을 n-Hexane 170mL와 함께 반응

기에 넣고 교반하면서 Oleic Acid(이하 OA로 표기)를 분말과의 무게비로 10% 단위로, 50%까지 첨가하였다. 원심분리 과정을 통해 반응 용매와 분리시켜 얻은 분말은 세척 후, 진공 챔버에서 30분 동안 용액내의 기포를 제거하고 진공 오븐에서 15시간 동안 건조시켰다. 표면개질된 나노분말은 부피비로 0.5와 1.0%씩 절연유에 첨가하고 교반의 목적으로 30분 동안 초음파를 조사한 후, 진공 중에서 용액 내에 존재하는 기포를 제거하였다.

절연유에 안정하게 분산되도록 하는 OA의 적정 첨가량을 밝히고자 적외선 분광 광도계(FTIR)를 이용하여 표면개질 처리 전후의 나노분말 표면상태 변화를 분석하였고, 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 분말의 미세구조를 조사하였다. 또한, 분말 첨가에 따른 절연유의 물성변화 유무를 확인하기 위해 점점도도와 절연파괴전압을 측정하였으며, 비정상열선법을 이용한 자체 제작된 정적열전특성 평가장치로 열전도율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

기상합성법으로 제조된 분말의 입자 표면을 소수성(Hydrophobic) 작용기로 개질시킨 후, 입자의 표면상태를 표면개질 이전과 비교하기 위하여 FTIR 분석 결과를 그림 1에 나타냈다.

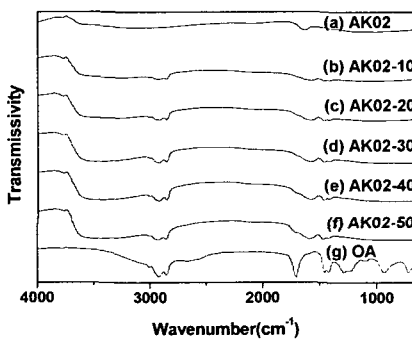
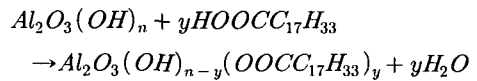


그림 1. OA의 첨가량에 따른 표면개질된 알루미늄 나노분말(AK02)의 적외선 투과 스펙트럼.

그림 1(b-g)에서 2926과 2855 cm^{-1} 의 Vibration Peak는 OA의 긴 알킬체인이고, (g)의 1729 cm^{-1} 피크는 OA의 카복실기(-COOH)에 해당한다. 표면개질 후의 나노분말(그림 1 (b-f))을 표면개질 전

(그림 1 (a)) 및 순수 OA(그림 1 (g))와 비교해보면 OA의 -COOH 피크는 나타나지 않는 대신 긴 알킬체인의 피크가 검출되며, 이와 별도로 -COO-기로 분석되는 새로운 피크(1590 cm^{-1})가 함께 나타났다.

본 연구에서는 OA로 표면개질한 타 실험결과[7]와 같이 -OH(3430 cm^{-1})에 해당하는 피크를 명확히 검출할 수는 없었지만, 다른 피크들의 변화가 동일함을 감안하여 다음과 같은 반응식을 예상할 수 있다.



여기서, $HOCC_{17}H_{33}$ 은 표면개질용 안정제로 쓰인 OA의 분자식이고, 나노 분말과 OA의 계수 n 과 y 는 입자 표면의 모든 -OH가 OA와 반응하지 못함을 의미한다.

한편, 그림 1 (b-f)에서 볼 수 있듯이, -COO- 피크와 긴 알킬 체인에 해당하는 피크의 강도는 OA 첨가량에 따라 증가하였지만, OA의 함량이 30 wt.% 이상 증가하면 더 이상 변화하지 않았다. 이것은 과다하게 첨가된 OA가 나노 분말의 입자 표면과 더 이상 결합하지 못하고 세척 과정에서 제거되기 때문으로 생각된다. 따라서, 알루미늄(AK02) 나노분말의 입자표면을 개질하기 위한 OA의 적정 첨가량은 분말의 30 wt.% 수준이며, 이 이상의 OA는 필요치 않은 것으로 판단된다.

평균입경 35nm의 상대적으로 조대한 알루미늄 나노분말(AR03)에서도 AK02 분말과 유사한 FTIR 패턴을 보였으며, OA의 적정 첨가량은 40 wt.% 수준으로 결정되었다.

표면개질 전후의 분말의 응집상태 변화 및 미세구조를 분석하고자 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 조직사진을 그림 2에 나타냈다. 그림에서, (a-b) 및 (c-d)는 각각 알루미늄 나노분말(AK02)의 표면개질 처리 전과 후의 TEM 조직을 나타낸다. 그림에서 분말은 약간의 응집체를 포함하지만 대체적으로 그림 2 (d)와 같이 입자 개개로 분리된 형태를 가진다.

알루미늄 나노분말의 표면개질 여부를 보다 명확히 하고 절연유내에서의 실제 분산정도를 확인하기 위하여 나노분말을 부피비로 0.5와 1.0%씩 절연유

에 첨가하여 확인한 결과, 샘플 용기 바닥에 그림 2의 (c-d)에 보인 소량의 응집체들로 판단되는 일부 침전물이 관찰되었다. 그러나 이들 침전물을 제외한다면, 알루미늄 나노절연유는 비교적 안정하게 분산된 콜로이드 상태로 존재한다. 즉, 표면개질 실험에서 알루미늄 분말(AK02, AR03) 모두를 완전히 개질시키지 못해 일부 침전물이 존재하지만, 이들을 제외하면 분말 응집체를 개개의 입자들로 효과적으로 분리시키고 동시에 소수성 표면으로 개질시켰다고 판단된다.

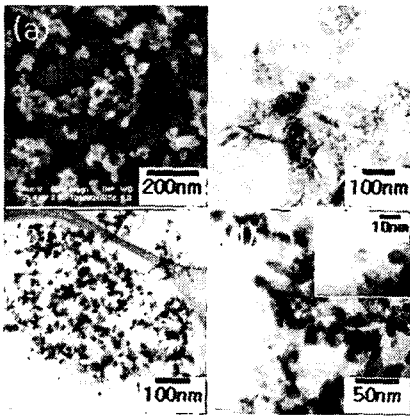


그림 2. 표면개질 전후의 알루미늄 나노분말(AK02)의 투과전자현미경(TEM) 사진.

나노분말 첨가에 따른 절연유의 점성 변화 유무를 확인하고자 각 온도별로 점도도를 측정된 결과, 나노절연유의 점도는 순수 절연유와 비슷한 온도 의존성을 보였다. 이것은 나노 분말이 절연유내에 개개의 입자 상태로 존재하더라도 절연유 자체의 분자 단위보다 크기가 큰 입자인 점을 감안할 때, 첨가된 OA가 절연유와 입자 사이의 계면장력을 충분히 낮추어준 결과라고 판단된다.

절연유에 첨가된 나노분말이 절연내력에 미치는 영향을 조사하기 위해 KS C 2301 방식에 따라 알루미늄(AK03) 나노절연유의 절연내력을 측정된 결과, 순수 절연유와 비교하여 측정오차 범위($\pm 3kV$) 내에서 동일한 값을 보임으로써 알루미늄 분말이 절연내력에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

알루미늄 나노절연유의 열전도율을 분말함량 및 온도에 따라 기존의 절연유와 비교·평가하고자 비정상열선법으로 측정된 결과를 그림 3에 나타냈다.

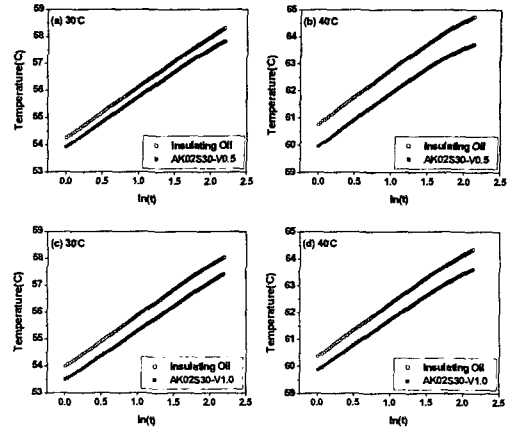


그림 3. 알루미늄(AK02) 나노절연유의 측정시간 $\ln(t)$ 에 따른 열선의 온도(T) 변화.

그림에서 (a-b)는 0.5 vol.% AK02 나노절연유의 30°C와 40°C에서의 측정결과이고, (c-d)는 1.0 vol.% 나노절연유의 열전도율 측정결과이다. 비교를 위해 순수 절연유의 열전도율(30°C에서 0.1366 W/mK, 40°C에서 0.1358W/mK)에 상응하는 기울기를 가지는 순수 절연유의 온도변화 곡선을 함께 나타냈다.

그림에서, 순수 절연유와 비교하여 나노절연유 곡선의 기울기가 보다 완만하게 나타났다. Carslaw와 Jaeger[8]가 제시한 열선의 온도변화에 대한 해석으로부터 시간 t_1 과 t_2 에 대하여 다음과 같은 열전도율에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_2 - T_1}$$

여기서, k 는 유체의 열전도율, q 는 열선의 단위길이 당 공급된 열량, t 는 경과시간, T 는 열선의 온도이다. 즉, 측정된 열량과 열량을 공급하는 시간에 따른 온도변화 기울기(a)로부터 열전도율을 계산할 수 있다. 위의 식에 따르면 온도변화 기울기가 작을수록 열전도율은 증가하게 된다. 따라서 AK02 나노절연유의 열전도율은 순수 절연유보다 6% 이상 향상되었음을 알 수 있다. 각각의 경우에 측정된 k , q , 및 a 값을 표 1에 정리하였다.

분말 부피함량에 따른 나노절연유의 열전도율을 비교해보면 첨가된 부피함량의 차이가 뚜렷한 열전

도울 차이를 가져오지 않는다. 이것은 분산되지 못하고 용기 바닥에 형성된 침전물의 양 차이에서 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 응집체들의 침전으로 인한 용액 내에서의 대류현상을 억제하기 위해 콜로이드 상태의 절연유만을 샘플로 취함으로써,, 실제 각 시료의 나노입자의 함량은 0.5 와 1.0 vol.%에 미치지 못하고, 실제 나노 입자 함유량 차이도 크지 않았기 때문에 사료된다. 한편, 나노절연유의 온도에 따른 열전도율은 온도가 30℃에서 40℃로 증가했을 때 0.5 vol.%와 1.0 vol.% 나노절연유 모두 열전도율이 2배 가까이 향상되었다.

표 1. AK02 분말이 첨가된 나노절연유의 열전도율 (k), 발열량(q), 및 온도변화 기울기(a).

분말	vol. %	온도 (℃)	k (W/mK)	q (W)	a (℃/ln(s))	k/k _{oil} (%)
AK02	0.5	30	0.14232	3.22299	1.80203	3.77
		40	0.14358	3.18824	1.76693	5.97
	1.0	30	0.14171	3.22504	1.81093	3.55
		40	0.14424	3.18999	1.75983	6.25

AR03 나노절연유는 AK02 나노절연유와 비교하여 순수 절연유 대비 열전도율 향상이 낮게 나타났으며, 온도에 따라서도 큰 변화를 보이지 않았다. 이것은 AK02 나노절연유와 다른 열전달 기구를 가지기 때문으로 생각되며, 그 측정결과를 표 2에 정리하였다.

표 2. AR03 분말이 첨가된 나노절연유의 열전도율 (k), 발열량(q), 및 온도변화 기울기(a).

분말	vol. %	온도 (℃)	k (W/mK)	q (W)	a (℃/ln(s))	k/k _{oil} (%)
AK02	0.5	30	0.13918	3.22140	1.84174	2.22
		40	0.13892	3.18791	1.82602	2.30
	1.0	30	0.13918	3.21256	1.83673	2.32
		40	0.13979	3.19361	1.81789	3.14

4. 결론

높은 냉각효율의 나노절연유를 제조하기 위한 나노분말로서 절연성 및 열전도도를 고려하여 알루미늄 분말 두 가지를 선정하였으며, 이에 의한 분산/물리적 특성 변화와 열전특성 향상을 평가하여 다

음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. OA를 이용, 표면개질한 알루미늄 나노절연유는 용기 바닥에 미량의 침전물이 생기기는 했으나 나머지 상층부는 거의 완벽한 콜로이드 상태로 존재하였다.
2. 알루미늄 나노절연유는 OA 함량별로 다소의 차이는 있으나, 분말의 부피함량 1vol.% 이내에서 점도와 절연내력에 큰 영향을 미치지 않았다.
3. 알루미늄 나노절연유는 순수 절연유와 비교하여 정적 열전도도가 40℃에서 6% 이상 향상되었으며, 분말의 함량과 온도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

참고 문헌

- [1] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, Clarendon, Oxford, 1873.
- [2] R. L. Hamilton and O. K. Crosser, I & EC Fundamentals, Vol. 1, p. 187, 1962.
- [3] S. U. S. Choi, ASME FED, p. 99, 1995.
- [4] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae and N. Hishinuma, *Netsu Bussei*, Vol. 4, p. 227, 1993.
- [5] H. E. Patel, S. K. Das, T. Sundararajan, A. S. Nair, B. George, T. Pradeep, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, p. 2931, 2003.
- [6] S. K. Das, N. Putra and W. Roetzel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, p. 851, 2003.
- [7] Z. Li and Y. Zhu, *Applied Surface Science*, Vol. 211, p. 315, 2003.
- [8] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford, 1959.