

논문 20-7-4

세라믹 분말을 이용한 오일 기지 나노유체의 열적거동 평가

Evaluation of Thermal Behavior of Oil-based Nanofluids using Ceramic Nanoparticles

최 철^{1,a}, 유현성¹, 오제명¹

(Cheol Choi^{1,a}, Hyunsung Yoo¹, and Jemyung Oh¹)

Abstract

Oil-based nanofluids were prepared by dispersing spherical and fiber shaped Al₂O₃ and AlN nanoparticles in transformer oil. Two hydrophobic surface modification processes using oleic acid (OA) and polyoxyethylene alkyl ester (PAAE) were compared in this study. The dispersion stability, viscosity and breakdown voltage of the nanofluids were also characterized. (Al₂O₃+AlN) mixed nanofluid was prepared to take an advantage of the excellent thermal conductivity of AlN and a good convective heat transfer property of fiber shaped Al₂O₃. For (Al₂O₃+AlN) particles with 1 % volume fraction in oil, the enhancement of thermal conductivity and convective heat transfer coefficient was nearly 11 % and 30 %, respectively, compared to pure transformer oil. The nanofluid, containing Al₂O₃+AlN, successfully lowered the temperature of the heating element and oil itself during a natural convection test using a prototype transformer.

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 억제를 도모하였으나, 이와 같은 소극적 해결방식에 의한 냉각효율 향상은 이제 한계에 도달했다. 특히 외부 냉각시스템에 의한 절연유 강제순환 방식은 냉각시스템 자체의 장애로 인한 변압기 운전 정지, 설치면적 증대 및 전력소모 과다 등을 우려하여 사용자들의 수요가 점진적으로 줄고 자연대류 방식을 선호함에 따라, 보다 근본적인 열효율 향상 방

안이 필요한 실정이다. 결국 변압기의 냉각효율을 획기적으로 증대시키기 위해서는 무엇보다 절연유 자체의 열전달 특성이 크게 향상되어야 할 것으로 판단되며, 이 때문에 최근 Choi 등이 제안한 나노유체(Nanofluid)가 새로운 친환경 고효율 냉각매체로서 많은 관심을 모으고 있다[1].

나노유체는 액체보다 열전도도가 수백~수만배 높은 고형 나노입자를 물과 같은 기존 냉매 속에 미량 균일 분산시킨 일종의 혼합 유체로, 기존의 열전달 이론으로는 설명되지 않는 매우 높은 열전달 특성을 가진다[2,3]. 지금까지 제조되고 평가된 나노유체는 대부분 분말의 분산이 용이한 물과 에칠렌글리콜을 용매로 하였으며, 반면에 절연유와 같은 오일 기지의 나노유체에 대해서는 상대적으로 연구활동이 매우 미흡한 실정이다[4-7]. 오일 기반 나노유체에 대해 발표된 논문을 살펴보면, Wang[6]은 엔진오일에 28 nm 직경의 Al₂O₃ 분말을 7.5 vol.% 농도로 첨가하여 만든 나노유체가 30 % 정도의 열전도도 향상폭을 보였으며, Xie[8]는 60.4 mm 직경의 Al₂O₃ 나노분말을 펌프오일에 5

1. 한국전력공사 전력연구원 전략기술연구소 신소재그룹
(대전시 유성구 문지동 103-16)

a. Corresponding Author : cchoi@kepri.re.kr

접수일자 : 2007. 3. 6

1차 심사 : 2007. 5. 22

심사완료 : 2007. 6. 11

vol.% 첨가했을 때 열전도도가 약 40 % 상승한다고 보고하였다. 그러나 이들이 오일에 첨가한 나노분말의 양이 5 % 이상으로 점도가 매우 높아 실제 적용 가능성이 낮을 뿐만 아니라, 발표자마다 열전도도 수치가 서로 달라 데이터의 신뢰성이 낮은 문제점을 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 순수절연유의 그것과 비교·평가하였다.

2. 실험

나노절연유 제조를 위하여 기상공정에 의해 합성된 구상 및 섬유상 알루미나(Al_2O_3)와 구상 질화알루미늄(AlN) 나노입자를 0.5~1.0 vol.%의 농도로 절연유에 분산시켰다(표 1 참조). 단, 기상공정에 의해 합성된 나노분말이 대기중에서 쉽게 응집체를 형성하기 때문에 $\Phi 0.05 \text{ mm}$ 지르코니아(ZrO_2)비드를 사용하는 비드밀을 사용하여 습식분쇄하였으며, 절연유에 대한 분산성을 향상시키기 위해 Oleic Acid(이하 OA) 및 Polyoxyethylene Alkyl Acid Ester(이하 PAAE)를 분산제로 하여 분말 표면을 친유성(親油性)으로 개질하였다. 나노분말 습식분쇄 및 표면개질시 사용한 용매는 *n*-Hexane(Kanto Chemical, 96.0 %) 또는 절연유(1종4호, 동남석유)였으며, *n*-Hexane을 용매로 사용한 경우에는 에스테르화 화학반응에서 생성된 물과 과잉 첨가된 분산제를 제거하기 위한 필터링 및 절연유로 용매를 치환하기 위한 진공농축 공정을 부가적으로 수행하였다.

나노절연유의 열전도도는 비정상열선법[4]을 이용하여 상온에서 측정하였으며, 이중관 및 판상형 열교환기를 이용하여 $100 \leq \text{Re} \leq 500$ 범위에서 대류열전달계수를 구하였다. 또한 정적 상태에서 자연대류에 의한 열전달 특성을 조사하기 위하여 3 ℥급 소형 변압기 모사장치(그림 1 참조)를 이용하여 일정 챔버 외기온도 및 입력전력량(60~100 W) 조건에서 발열체 및 절연유의 부위별 온도변화를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

분말의 친유성 표면개질 전에 수백 nm~수 μm 수준의 분말 응집체를 1차입자 수준으로 분리시키기

표 1. 세라믹 나노분말의 특성.

Table 1. Properties of ceramic nanopowders.

분말특성	Al_2O_3		AlN
	AS	AF	NS
평균입도 (nm)	13	2(D) 100~1000(L)	50
비표면적 (m^2/g)	100	206~307	35
결정	<i>a</i>	γ	HCP
형상	구상	섬유상	구상
순도 (%)	99.6	99.9	97.0

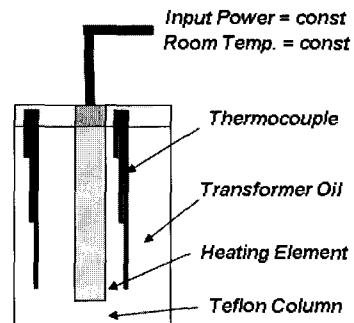
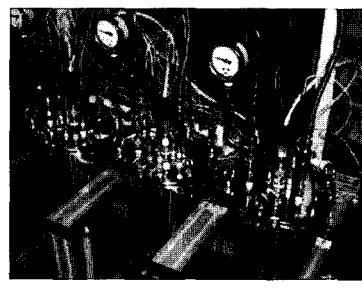


그림 1. 자연대류 열전달 평가장치 도식도.

Fig. 1. Schematics of apparatus for natural convection heat transfer test.

위하여 비드밀(Bead Mill)을 이용한 습식분쇄 공정을 수행하였다. 이것은 볼밀(Ball Mill)과 같은 저에너지 공정[9]과 비교하여 50 nm 미만 크기의 극미세 나노분말을 초기 입자화 하는데 충분한 에너지를 가지며, 사용하는 비드 크기가 감소할수록 분쇄 효과가 증가하는 것으로 나타났다. 나노분말의 친유성 표면개질에는 크게 두 가지 방법을 사용하였다. 첫째는 *n*-Hexane에 나노분말과 OA를 함께 첨가한 혼합시료에 초음파를 조사하면서 60 °C에서 에스테르화 화학반응을 일으키는 것이고[9,10],

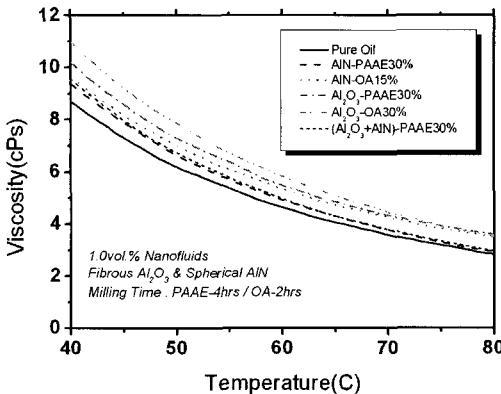


그림 2. 알루미나 및 질화알루미늄 나노분말을 분산시킨 나노절연유의 온도에 따른 점도 비교.
Fig. 2. Viscosity versus temperature curves for the dispersed fluids with alumina and aluminum nitride particles.

둘째는 절연유에 나노분말과 PAAE를 직접 첨가하여 분산제가 분말표면에 단순흡착되는 방식으로 표면개질하는 것이다. 습식분쇄와 친유성 표면개질은 각각의 반응용기 사이를 일정한 유속으로 시료가 순환하도록 함으로써, 동시에 수행하였다.

그림 2는 두 가지 표면개질 방법으로 제조된 나노절연유의 40~80 °C 온도영역에서의 점도변화를 나타낸 것이다. 동일한 분산제 투입량에 대하여 PAAE를 첨가한 시료가 OA를 이용하여 표면개질한 시료보다 낮은 점도값을 나타내며, 섬유상 Al₂O₃ 보다는 구상 AlN 나노절연유의 점도가 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. PAAE로 표면개질한 AlN 나노절연유의 경우, 40 °C에서는 7.7 %, 80 °C에서는 3.5 %의 점도 상승률을 보인다. 일반적으로 섬유상 분말은 구상 분말보다 분말 사이의 응집 및 영김 현상이 강하여 높은 점도와 낮은 분산성을 보이기 때문에, 그림에서 Al₂O₃ 나노절연유가 AlN 보다 높은 점도값을 가지는 것은 분말의 형상 차이에 주로 기인하는 것으로 판단된다. 구상 AlN과 섬유상 Al₂O₃ 분말을 1:1 비율로 혼합하여 만든 혼합 나노절연유는 AlN 나노절연유와 비슷한 수준의 점도를 유지할뿐 아니라, 온도가 상승할수록 순수 절연유의 점도값과 거의 일치한다. 반면에, 섬유상 Al₂O₃ 나노절연유 및 OA로 표면개질한 AlN 나노절연유는 고온에서도 순수절연유보다 20 % 이상 높은 점도값을 보인다. 즉, 절연유에 첨가되는 나노분말의 형상이 점도에 매우 큰 영향을 미치며, 동일한 분산제라도 분말의 조성 및 표면특성에 따라 그 효과가 달라질 수 있음을 알 수 있다.

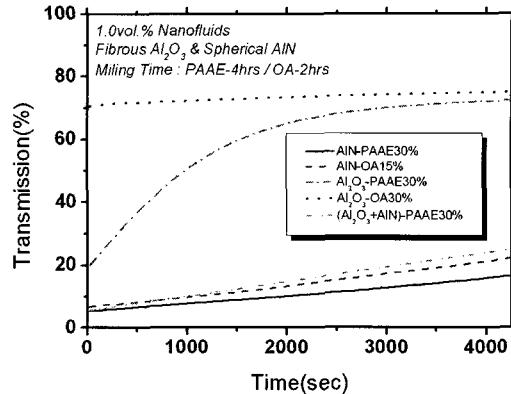


그림 3. 알루미나 및 질화알루미늄 나노분말을 분산시킨 나노절연유의 시간에 따른 분산성 비교(분당 회전수 : 3300 rpm).
Fig. 3. Transmission-time curves for nanofluids prepared with alumina and aluminum nitride particles at rotation speed 3300 rpm.

그림 3은 원심분리 방식으로 나노절연유에 분산된 나노분말을 강제 침전시키면서 유체의 장기적 분산안정성을 평가한 결과이다. 그림에서 OA로 표면개질한 섬유상 Al₂O₃ 나노절연유는 시료의 투과도가 높고 분산성이 매우 우수하였으나, 분산제로 PAAE를 첨가한 Al₂O₃ 나노절연유는 투과도가 낮아 불투명하고 분산성도 매우 열악하였다. 이것은 섬유상 Al₂O₃ 분말의 표면개질에 PAAE 분산제 또는 단순흡착 방식의 표면개질 공정이 적합하지 않음을 의미한다.

이와 함께 절연유에 직접 OA를 첨가하여 단순흡착 방식의 표면개질도 시도하였지만 Al₂O₃ 및 AlN 나노절연유 모두에서 만족할만한 분산성을 얻지 못하였다. 따라서 섬유상 Al₂O₃ 나노절연유를 제조할 경우에는 에스테르화 화학반응에 의한 표면개질이 보다 바람직한 것으로 판단된다. 반면에, AlN 분말은 OA와 PAAE 분산제 모두에 대하여 비교적 양호한 분산특성을 보였으며, 그 중에서도 PAAE를 사용하여 표면개질한 시료에서 보다 높은 분산안정성이 관찰되었다. 특히 혼합 나노절연유는 AlN 나노절연유보다는 약간 낮은 분산성을 보였으나, 동일한 분산제로 표면개질한 섬유상 Al₂O₃ 나노절연유와 비교하면 분산성이 매우 양호하였다.

그림 4에 비정상열선법으로 측정한 나노절연유의 열전도도 데이터를 기 발표된 국내외 실험결과와 비교하여 놓았다. 동일 조성 및 농도의 나노분말을 첨가한 경우, 나노절연유의 열전도도 상승폭은 물이나 에칠렌글리콜 기지의 나노유체보다 훨씬

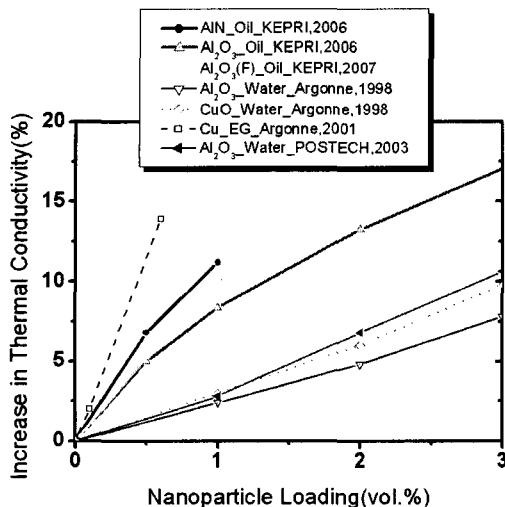


그림 4. 나노유체의 열전도도 비교.

Fig. 4. Comparison of experimental data on thermal conductivity of nanofluids.

더 높게 나타난다. 이것은 액체 용매 자체의 열전도도가 낮을수록 나노분말 첨가에 의한 열전도도 향상 효과가 높아진다는 기준의 발표내용과 잘 일치한다[8].

그러나 오일 기지 나노유체는 미량의 나노분말 첨가에도 점도 상승 경향이 매우 강하기 때문에 물 또는 에칠팬글리콜 기지의 나노유체와 비교하여 첨가할 수 있는 분말 농도에 제한이 있다. 즉, 본 실험에서는 최대 4.0 vol.% 농도의 나노절연유를 제조하여 21 %의 열전도도 향상을 얻었지만, 실적용 가능성 측면에서 1.0 vol.% 이상의 고농도 시료는 점도가 크게 상승하여 냉각용 순환매체로 사용하기에 적합치 않다고 판단된다. 또한 상온에서 벌크 상태의 AlN 열전도도(70~210 W/mK)는 Al_2O_3 (18 W/mK)보다 훨씬 높지만, 그림에서 AlN 나노절연유와 Al_2O_3 나노절연유의 열전도도 차이는 예상만큼 크지 않았다. 이것은 AlN 분말의 입도(50 nm)가 Al_2O_3 (13 nm)보다 크며, 순도(97 %)가 낮은데 주로 기인하는 것으로 판단된다. 물과 에칠팬글리콜 기지의 나노유체에서는 분말 농도가 증가할수록 열전도도 상승폭이 더욱 증가하는 경향을 보이지만, 절연유 기지의 나노유체에서는 농도가 증가함에 따라 열전도도 상승폭이 조금씩 둔화하는 경향을 보인다. 이것은 나노분말이 첨가됨에 따라 유체의 점도가 상승하여 나노유체의 가장 주요한 열전달 기구로 생각되는 입자의 브라운 운동이 억제됨으로써, 나노절연유의 열전도도 특성이 저하되는 것으로 판단된다. 또한, 절연유와 같은

표 2. 나노분말 비표면적과 열전도도 상관관계.

Table 2. Relationship between nanoparticle surface area and thermal conductivity of nano-fluids.

테스트 시료 (0.5 vol.%)	비표면적 (m ² /g)	열전도도 (W/mK)
Pure Oil	-	0.1185
Oil+ Al_2O_3 (S) (구상)	100	0.1244
Oil+ Al_2O_3 (F1) (섬유상)	206	0.1224
Oil+ Al_2O_3 (F2) (섬유상)	273	0.1239
Oil+ Al_2O_3 (F3) (섬유상)	307	0.1248

오일은 물 또는 에칠팬글리콜과 비교하여 나노분말 첨가에 따른 점도 상승 효과가 매우 뚜렷하기 때문에, 나노분말 첨가에 의한 열전도도 상승폭에 일정 한계가 있을 것으로 생각된다. 그러나 입자의 브라운 운동만으로 나노유체의 열전달 기구를 완벽하게 설명할 수 없으며, 따라서 보다 정확한 해석을 위하여 표면개질을 위해 첨가된 분산제가 유체의 열전도도에 미치는 영향 등도 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.

섬유상 Al_2O_3 나노절연유는 사용한 Al_2O_3 분말의 비표면적에 따라 열전도도의 큰 차이를 보였는데, 일반적으로 비표면적이 증가할수록 열전도도가 증가하였다. 0.5 vol.% 농도 기준으로 섬유상 분말의 비표면적이 206 m²/g인 경우에는 구상 Al_2O_3 보다 낮은 열전도도를 보였으나, 비표면적을 307 m²/g로 증가시킨 경우에는 표 2에서와 같이 구상 Al_2O_3 나노절연유보다도 높은 열전도도를 보였다.

알루미나 구상분말이 섬유상보다 비표면적이 작음에도 불구하고 이를 이용한 나노절연유가 상대적으로 높은 열전도도 특성을 보이는 것은, 분말의 크기와 절연유 속에서의 분말 분산상태가 서로 다르기 때문에으로 해석된다. 그림 4에 보인 바와 같이, 열전도도는 AlN 나노절연유에서 가장 높게 나타나지만, AlN은 절연내력 특성이 낮은 단점을 가진다(표 3 참조). 즉, 0.5 vol.%의 AlN 나노절연유는 절연내력 규격을 만족했으나, 1.0 vol.% 시료는 40 kV 미만에서 절연파괴가 발생하였다. 이것은 AlN 분말의 완전한 절화처리가 용이하지 않고 합성과정에서 C 등이 불순물로 혼입될 가능성이 있으며, 첨가된 분산제가 전기절연 특성에 악영향을 미쳤기 때문으로 생각된다. 반면에 ($\text{AlN}+\text{Al}_2\text{O}_3$) 혼합 나노절연유는 1 vol.% 농도에서 11 %의 열전도도 향상폭을 보일뿐만 아니라, 비교적 높은 절연내력 특성(73 kV)을 가진다.

표 3. 나노절연유의 절연내력 특성.

Table 3. Breakdown voltages of nanofluids.

테스트 시료 (vol.%)	분산제 (wt.%)	절연내력 (2.5 mm,kV)
Pure Oil	-	92
Oil+Al ₂ O ₃ (S) (0.5)	OA(25)	88
Oil+AlN(S) (0.5)	PAAE(30)	59
Oil+AlN(S) (1.0)	PAAE(30)	Fail
Oil+(Al ₂ O ₃ (S)+Al ₂ O ₃ (F)) (1.0)	OA(30)	76
Oil+(Al ₂ O ₃ (S)+AlN(S)) (1.0)	PAAE(30)	73

이중관 및 평판형 열교환기를 이용하여 나노절연유의 대류열전달계수(h)를 측정하여 그림 5에 나타냈다. 1 vol.% ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{AlN}$) 혼합 나노절연유는 평판형 열교환기를 이용하여 실험한 경우, 순수절연유와 비교하여 대류열전달계수가 $100 \leq \text{Re} \leq 500$ 영역에서 유속에 따라 $25.8 \sim 34.3\%$ 증가하였는데, 비교 대상 나노절연유의 농도가 0.5 vol.%인 것을 고려하면 농도 증가에 따른 열전달계수 증가폭이 비교적 적었다. 특히, 이중관 열교환기를 이용한 열전달 실험에서는 빠른 유속 조건에서 0.5 % AlN 나노절연유보다도 낮은 열전달특성을 보였다. 이것은 나노분말의 농도가 증가함에 따라 유체의 점도가 증가하여 브라운 운동 및 분산성이 감소하고, 이것이 나노유체의 대류열전달 특성에 부정적인 영향을 미친 것으로 생각된다.

일반적으로 유체의 열전도도는 측정 시간이 매우 짧기 때문에 장기적 분산성이 확보되지 않아도 측정 가능하다. 그러나 분산성이 열악하면 초기 열전도도 값이 높아도 대류열전달계수는 낮게 나타난다. 혼합절연유의 경우, 시간 경과에 따라 일부 분말의 침전현상이 발생하더라도 유체 흐름에 의해 쉽게 재분산이 가능하므로 그림 5의 현상을 설명하기 위한 부가적인 실험이 필요한 것으로 판단된다. 또한 그림 5에서 섬유상 Al_2O_3 는 그림 4의 열전도도 실험과는 달리 비표면적($206 \text{ m}^2/\text{g}$)이 작아 열전도도가 상대적으로 낮은 분말($k/k_0=1.0327$)을 사용했음에도 불구하고, 구상 Al_2O_3 분말($k/k_0=1.0496$)과 비교하여 비슷하거나 오히려 높은 h 값을 보였다. 이것은 섬유상 형태의 나노분말이 유체의 흐름 속에서 와류를 유도하여 관 내벽면의 느린 속도의 유동과 관 중심의 빠른 유동이 잘 섞이도록 하고 열전달 경계층 폭을 줄임으로써 구상 시료보다

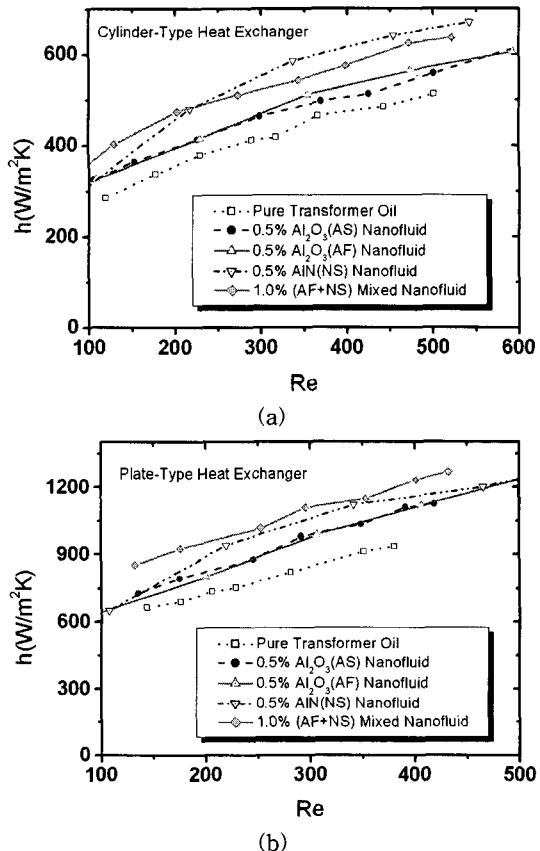


그림 5. (a) 이중관 및 (b) 평판형 열교환기를 이용하여 측정한 나노절연유의 대류열전달 계수.

Fig. 5. Plot of convection heat transfer coefficient versus Reynolds number for oil-based nanofluids using (a) cylinder-type and (b) plate-type heat exchanger.

우수한 열전달 특성을 보인 것으로 생각된다. 그러나 평판형 열교환기를 사용한 대류열전달 실험에서는 섬유상에 의한 열전달 향상 효과가 분명하게 나타나지 않았는데, 이것은 이중관형 열교환기에 비하여 평판형 열교환기의 유로가 매우 복잡하여 섬유상 나노소재에 의한 와류발생 효과가 큰 역할을 하지 않은 것으로 생각된다.

챔버 외기온도($31.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$)와 입력전력량(60 W, 100 W)을 일정하게 유지한 상태에서 혼합 나노절연유의 자연대류에 의한 열전달 특성을 순수절연유의 그것과 비교하여 그림 6에 보였다. 이를 위하여 변압기의 철심 역할을 하는 발열체를 이용하여

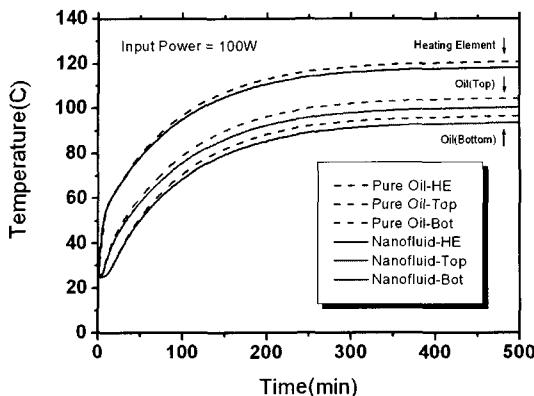


그림 6. 일정 입력전력량(100 W) 및 챔버 외기온도 조건에서 혼합 나노절연유의 자연대류 열전달 시험 결과.

Fig. 6. Natural convection test results of ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{AlN}$)-transformer oil nanofluid at constant input energy(100 W) and room temperature condition.

챔버 내 유온 변화가 거의 없는 포화 시점까지 온도 상승 시험을 하면서, 절연유와 발열체의 부위별 온도변화를 조사하였다. 그 결과, 100 W 입력전력량 조건에서 혼합 나노절연유는 발열체, 상부 유온 및 챔버 상하부 유온 차이를 각각 2.5 °C, 4.1 °C, 0.9 °C씩 저하시킴을 확인하였다. 다만 이러한 냉각효과는 입력전력량이 작아질수록 감소하였는데, 60 W 조건에서는 각각 1.7 °C, 2.3 °C, 0.3 °C씩 낮아졌다. 이와 같은 나노절연유의 자연대류 열전달 특성치는 유체의 열전도도에 비례함으로써, 열전도도가 높은 유체일수록 높게 나타났다. 그러나 나노절연유는 절연유의 부위별 온도를 낮추는데는 효과가 있어도 상하부 유온차를 줄이는는데는 큰 기여를 하지 않았다. 이것은 절연유 속에 분산된 나노분말이 자연대류에 의한 열전달보다 전도 방식 혹은 브라운 운동에 의한 마이크로 대류현상이 열전달에 보다 큰 영향을 주기 때문으로 생각된다. 본 실험에서 나노절연유에 의한 발열체 및 절연유 온도 강하 효과는 비교적 작았지만, 실제 크기의 변압기에서는 이보다 큰 냉각효과가 예상된다. 실제로 정격용량 30 kW급 초소형 배전용 변압기 (6600~210 V)를 사용하여 ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{AlN}$) 혼합 나노절연유의 실증시험을 실시한 결과, 변압기 외벽을 통해 빠져나가는 방열량이 순수절연유와 비교하여 5.3 % 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 실증시험은 절연유의 평균 온도가 53 °C 정도 올라가는

정상운전 조건에서 실시한 것으로, 실제로 절연유의 냉각특성이 더욱 중요한 과부하 운전조건이나 절연유 강제순환 방식의 변압기에서는 그 효과가 더욱 증대될 것으로 생각된다.

4. 결 론

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

1. 나노분말의 조성과 표면특성 등에 따라 최적의 분산제와 표면개질 공정이 달라질 수 있음을 실험적으로 확인하였다.
2. 나노절연유의 열전달특성은 나노분말 농도에 따라 점진적으로 증가하였으나, 나노분말 첨가량이 증가할수록 유체의 점도가 상승하고 분산성이 저하되므로 실적용 가능성을 고려한 나노분말 최적농도는 1 vol.% 이하로 판단된다.
3. AlN 나노절연유의 열전달 특성은 Al_2O_3 나노절연유보다 우수하였으나 전기절연 특성이 열악한 것으로 나타났다. 이것은 나노절연유 제조에 사용한 AlN 분말의 순도가 낮기 때문으로 생각되며, 따라서 고순도 AlN 확보를 위한 분말 합성 공정 개선이 요구된다.
4. 나노절연유는 절연유 온도가 높게 상승하는 과부하 운전 조건일수록, 발열체 및 절연유의 부위별 온도를 크게 낮춤으로써 순수절연유에 비해 탁월한 냉각효과를 보였다.
5. 열전도도, 분산성, 점도 및 절연내력 특성을 모두 고려하여 1 vol.% (섬유상 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{구상 AlN}$) 혼합 나노절연유를 제조하였으며, 물성평가 결과 열전도도는 11 %, 대류열전달계수는 30 % 이상 증가됨으로써 고효율 절연유로서 실제 적용 가능성성이 높은 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 전력기반조성사업센타와 한국전력공사의 연구비 지원(기반기금-159)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] S. U. S. Choi, "Enhancing Thermal Conductivity

- of Fluids with Nanoparticles", *Developments and applications of non-Newtonian flows*, ASME FED 231/MD 66, p. 99, 1995.
- [2] P. Kebelinski, J. A. Eastman, and D. G. Cahill, "Nanofluids for Thermal Transport", *Materialstoday*, p. 36, 2005.
- [3] X. G. Wang and A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 46, p. 1, 2007.
- [4] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", *J. Heat Trans.*, Vol. 121, p. 280, 1999.
- [5] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, and S. Lee, "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids", *Materials Society Symposium-Proceedings*, Vol. 457, MRS, p. 3, 1997.
- [6] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture", *J. Heat Transfer*, Vol. 121, p. 474, 1999.
- [7] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO_2 -water based nanofluids", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 44, p. 367, 2005.
- [8] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, and Q. Wu, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles", *J. Appl. Phys.*, Vol. 91, p. 4568, 2002.
- [9] 송현우, 최철, 최경식, 오제명, "알루미나 나노분말을 함유한 변압기 절연유의 분산기술", *전기전자재료학회논문지*, 19권, 3호, p. 233, 2006.
- [10] Z. Li and Y. Zhu, "Surface modification of SiO_2 nanoparticles with oleic acid", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 211, p. 315, 2003.