

변압기 냉각용 오일 기지 나노유체의 제조조건이 열 및 전기적 특성에 미치는 영향

최철[†] · 유현성 · 오제명 ·

한국전력 전력연구원 전략기술연구소 신소재그룹

Effects of Preparation Conditions on Thermal and Electrical Properties of Oil-based Nanofluids for Transformer Application

Cheol Choi[†], Hyun-Sung Yoo and Jae-Myung Oh

Advanced Materials Research Group, Strategic Technology Laboratory, KEPRI, Taejeon 305-380

(2007년 8월 13일 받음, 2007년 9월 7일 최종수정본받음)

Abstract Oil-based nanofluids were prepared by dispersing nonconducting fibrous Al_2O_3 and spherical AlN nanoparticles in transformer oil. In this study, the effects of wet grinding and surface modification of particles on thermal and electrical properties of nanofluids were investigated. Grinding experiments were conducted with high-speed bead mill and ultrasonic homogenizer and nanoparticles were surface modified by oleic acid and polyoxyethylene alkyl acid ester(PAAE) in *n*-hexane or transformer oil, at the same time. It is obvious that the combination of nanoparticle, dispersant and dispersion solvent is very important for the dispersity of nanofluids. For nanofluids containing 1.0vol.% AlN particles in transformer oil, the enhancement of thermal conductivity was 11.6% compared with pure transformer oil. However, the electric-insulating property of AlN nanofluids was very low due to used dispersant itself. Therefore, the effect of the dispersant on thermal/electrical/physical properties of the transformer oil should be considered before selecting a proper dispersant.

Key words Nanofluid, Transformer oil, Thermal conductivity, Surface modification.

1. 서 론

지금까지 전자/전력/광학/수송 분야를 비롯한 거의 전 산업분야에서 사용되는 열교환기의 효율 향상은 대부분 방열판의 면적을 극대화하는 방열구조 개선 또는 방열판 재질 교체에 의존해 왔는데, 이와 같은 하드웨어적 방법에 의한 열효율 향상은 이제 거의 한계점에 도달했다. 특히 산업이 첨단·고도화되면서 각종 기기 및 부품에 대한 초소형, 경량화 및 고성능 요구가 계속됨에 따라, 핵심부품 및 열교환 장치에 대한 열부하가 급증하고 있으며, 따라서 보다 근본적이고 적극적 방식의 냉각효율 개선방안이 시급히 요구되고 있다.

이에 최근에는, 액상보다 열전도도가 수백~수만배 더 높은 고상 나노분말(<100 nm)을 물과 같은 기존 열전달 매체에 미량 분산시킨 나노유체(Nanofluid)가 유체의 열전도도를 획기적으로 향상시킬 수 있다는 것이 Choi 등¹⁾에 의해 밝혀지면서, 지난 약 10년 동안 전세계적으로 많은 관심과 기대를 불러일으켰다. 즉, 고효율 냉매

혹은 가열매체로서의 나노유체는 열교환기 효율을 대폭 상승시킴으로써 국가적으로 소모되는 막대한 양의 에너지를 혁신적으로 절감시킬 수 있을 뿐만 아니라, 간접적으로는 화석연료 사용량을 절감시킴으로써 온실가스 배출 억제에도 기여하는 미래형 친환경 에너지 매체로 간주되고 있다.

지금까지 제조되고 평가된 나노유체²⁻¹²⁾를 분류해 보면, 오일에서보다 나노분말의 분산이 훨씬 용이한 물과 에틸렌글리콜을 용매로 한 것이 대부분이며, 반면에 절연유와 같은 오일을 기지로 한 나노유체에 대해서는 상대적으로 연구노력이 매우 미흡한 실정이다. 즉, 지금까지 제조된 대부분의 나노유체는 열유체학 관점에서 열전달 매체 연구에 대해 열전도도 측정이 가능한 정도의 분산성만 확보하면 충분했기 때문에, 굳이 나노분말의 분산이 어려운 오일을 용매로 사용하지 않은 것으로 생각된다. 그러나 실제로 각종 생산/수송/전력용 산업설비에서 절연유 및 윤활유와 같은 오일 계통 냉매가 매우 광범위하게 대량 사용되고 있기 때문에 오일 기지 나노유체의 상업성 및 경제적 파급효과는 수용액 기지 나노유체보다 높을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 열전달 특성이 열악한 초고압 변압기용

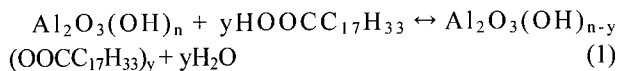
[†]Corresponding author
E-Mail : cchoi@kepri.re.kr (C. Choi)

절연유의 냉각 특성을 향상시키기 위하여 절연유에 전기 절연성의 세라믹 나노분말을 미량 첨가하여 절연유 지지 나노유체(이하 나노절연유)를 제조하였으며, 이 때 나노분말을 안정적으로 오일에 분산시키기 위한 친유성 표면개질 공정이 나노절연유의 물성에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 나노절연유 제조

나노유체의 분산성과 열전달 특성은 유체 속에 분산된 나노입자의 크기가 작을수록 향상된다.²⁾ 따라서 본 실험에서는 평균입도 50 nm 이하의 상용 알루미늄(Al_2O_3) 및 질화알루미늄(AlN) 나노입자를 0.5~1.0 vol.%의 농도로 절연유(1종4호, 동남석유)에 분산시켰다(Table 1). 단, 기상 공정에 의해 제조된 나노분말이 표면에너지 낮추기 위해 인접한 입자와 결합하여 평균입도 수백nm~수 μ m의 조대한 응집체로 존재하기 때문에, 노말hex산(96%, Kanto Chemical) 및 절연유 용매 조건에서 비드밀(UAM015, Kotobuki)을 사용하여 2~4시간 동안 습식 분산하였다. 또한 親水性 표면특성을 가짐으로써 절연유에의 분산이 어려운 세라믹 나노분말의 분산성을 향상시키기 위하여 기계식 교반기를 이용한 사전실험으로부터 결정된 Oleic Acid(이하 OA, 95%, Kanto Chemical) 및 Polyoxyethylene Alkyl Acid Ester(이하 PAAE, 한국산노프코)를 분산제로 미량 첨가하여 친유성 표면개질 하였다(Table 2). 노말hex산에 첨가된 OA는 Al_2O_3 분말 표면과 아래와 같은 에스테르화 화학반응(Esterification)을 일으킴으로써 親油性 피막을 형성한다.¹³⁾



상기 에스테르화 반응은 가역반응이기 때문에 반응에서 생성되는 물과 과잉의 분산제를 제거하지 않으면 역반응이 일어나 시간 경과에 따라 분말의 재응집과 침전

현상이 발생한다. 따라서 한외여과막(UF Membrane)을 이용하여 분말 표면과 반응하지 못한 과잉의 분산제와 물을 제거하였으며, 여과된 시료는 절연유와 1:1 비율로 섞은 후, 진공농축기(NE2001, EYELA)를 이용하여 노말hex산을 휘발, 제거함으로써 나노절연유를 제조하였다. 또한 이와 별도로 절연유에 직접 분말을 분산시킴으로써 여과와 용매치환 공정을 생략할 수 있는 나노절연유 제조 공정을 함께 시도하였다.

2.2 나노절연유 특성평가

합성된 나노절연유는 원심력 방식의 분산안정성 평가 장치(RI16, LUMiFuge)를 이용하여 시료를 강제 침전시키는 방법으로 장기 분산성을 평가하였다. 또한 레오미터(AR550, TA)를 이용하여 온도와 전단속도에 따른 나노절연유의 점도 변화를 평가하였으며, 나노절연유의 전기적 절연성은 절연과괴전압 시험기(DTA100E, Baur)를 이용하여 KS C 2301 규격에 따라 5회 평균한 값으로 결정하였다. 나노절연유의 열전도도는 비정상열선법(Transient Hot-Wire Method)¹⁴⁾을 사용하여 측정하였으며, 가열체 및 저항온도센서로서 25 μ m 직경의 백금열선을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분산매 영향

본 실험에서는 노말hex산과 절연유를 분산매로 사용하여 습식분산 및 표면개질을 수행하였다. 노말hex산을 분산매로 사용하면 나노분말 농도 제거가 용이하고 표면개질시 절연유에 포함된 화학첨가제의 영향을 받지 않는 반면, 표면개질 후에 절연유로 용매를 치환해야 하는 단점을 가진다(Fig. 1). 또한 노말hex산이 절연유와 같은 비극성 용매이므로 진공농축에 의한 용매치환시 절연유로부터 완벽한 제거가 어렵고, 절연유에 미량(<1.0wt.%) 잔존할 경우, 점도가 10% 정도 감소하는 것으로 확인되었다. 반면에, 절연유에 직접 분말을 분산시키는 공정은 필

Table 1. Physical properties of nanopowders.

Chemical Composition	Sample Name	APS (nm)	SSA (m ² /g)	Crystal Structure	Morphology	Purity (%)
Al_2O_3	F3	2(D) 100-1000(L)	307	γ	Fibrous	99.9
AlN	N2	50	35	Hexagonal	Spherical	97.0

Table 2. Physical properties of surfactants.

Name	Density (g/cm ³)	Solubility in Water	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	K (W/mK)
Oleic Acid (C ₁₇ H ₃₃ COOH)	0.895 ~ 0.947	Insoluble	13 ~ 14	360	0.1623
Polyoxyethylene Alkyl Acid Ester	1.03	Soluble	< -20	> 300	0.1634

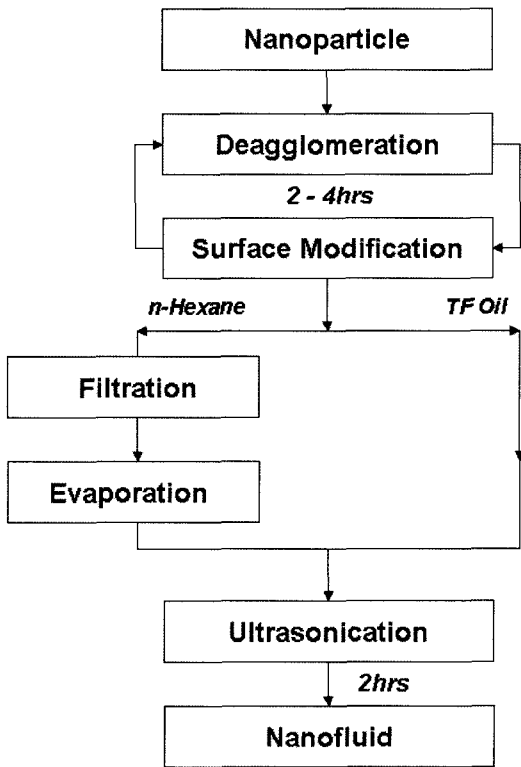


Fig. 1. A schematic flow diagram for nanofluid preparation.

터링 및 용매 치환 공정을 생략함으로써 공정을 단순화할 수 있지만, 절연유 속에 분산된 나노분말 농도 제어가 어렵고 분산제와 절연유에 포함된 화학첨가제 사이의 반응을 억제하기 어려운 문제점을 가진다. 또한, 절연유의 점도(15.4cps@25°C)가 노말헥산(0.3cps@25°C) 보다 50배 이상 높기 때문에 비드밀을 이용한 습식분산 효율이 낮고, 나노분말 첨가에 의한 점도 상승폭이 훨씬 크다. 따라서 절연유에 일정 수준 이상의 분말이 첨가되면 유체의 점도가 급증하여 ZrO₂ 비드가 시료와 함께 방출되기 때문에 비드밀 사용이 제한된다.

3.2 분산제 선정

10여종의 분산제 후보군 중에서 Al₂O₃와 AlN 나노분말의 친유성 표면개질에 적합한 분산제를 선정하기 위해 30분 동안 단순 기계교반하여 나노절연유를 제조한 뒤, 주요 분산제와 분산매에 따른 유체의 분산안정성을 비교하였다(Fig. 2). 그림으로부터 Al₂O₃는 단순 교반에 의해 쉽게 분산되지 못하고 단시간 내에 침전되며, 분산제에 따른 분산성의 차이도 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 기계적 교반과 같은 저 에너지 분산기구가 Al₂O₃ 분말 응집체의 분산에 큰 효과가 없으며, 1차 입자가 아닌 분말 덩어리 상태에서 표면개질 되었기 때문으로 해석된다. 다만 절연유에 직접 분산시키는 것보다는 노말

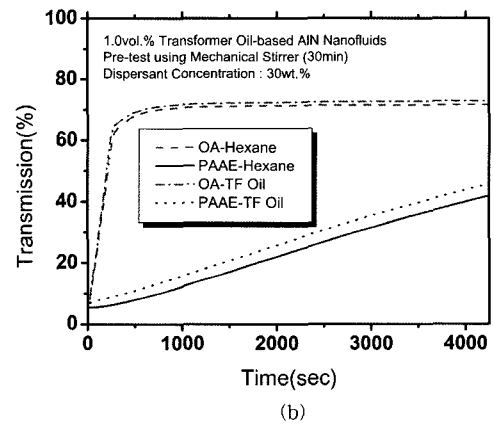
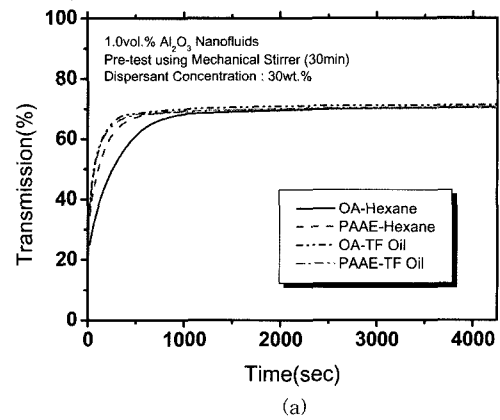


Fig. 2. Dispersion stability curves for (a) Al₂O₃ and (b) AlN nanofluids using *n*-hexane and transformer oil as a surface modification solvent deagglomerated by a mechanical stirrer.

헥산 용매 조건에서, OA를 분산제로 하여 에스테르화 화학반응을 유도했을 때 분산성이 가장 우수할 것으로 예측되었다. 반면에 AlN 나노분말은 적용하는 분산제에 따라 분산성의 차이가 매우 뚜렷하였다. 그러나 분산매에 따른 분산효과 차이는 미미하였으며, 두 가지 분산매 모두에서 PAAE의 분산효과가 가장 우수하고, OA는 가장 열악한 것으로 나타났다. PAAE가 친수기와 친유기의 비율이 1:1로써 상대적으로 친수성이 매우 강하고, 반면에 OA(HLB = 1)는 친유성이 강한 분산제임을 고려하면, 분산제의 친수기가 강할수록 분말 표면에 잘 흡착되어 분산성을 향상시키는 것으로 생각된다. 다만, 노말헥산 용매 조건에서 OA에 의한 분산효과가 AlN 분말에서 매우 저조하게 나타난 것은 Al₂O₃ 분말과 달리 AlN 분말 표면에 OH기의 부족으로 에스테르화 반응이 거의 일어나지 않기 때문으로 해석된다. Fig. 2의 사전실험으로부터 Al₂O₃ 및 AlN 나노절연유를 제조함에 있어서, 최상의 분산성을 확보할 수 있는 분산제로 OA와 PAAE를 선정하였다.

3.3 나노절연유 점도 및 분산성평가

앞에서 결정된 두 가지 분산제와 비드밀을 이용하여 절연유 및 노말렉산 용매 조건에서 나노절연유를 제조하였다. Fig. 3에 나노절연유의 60°C에서의 전단속도 변화에 따른 점도 측정결과를 보였다. 그림으로부터 대략 50 이상의 전단속도에서는 유체의 점도가 일정하게 유지되는 뉴턴유체 거동을 보임을 알 수 있다. 즉, 제조된 모든 나노유체의 분산상태가 비교적 양호한 것으로 판단된다. 그러나 Al_2O_3 나노절연유의 점도는 두 가지 표면개질 공정 모두에서 AIN 나노유체보다 훨씬 높은 점도 상승폭을 보였다. Al_2O_3 나노절연유의 점도가 상대적으로 높은 것은 섬유상 입자 형상의 비대칭성으로 인해 구상 분말보다 분말 사이의 상호작용 즉, 엉킴 및 응집 현상이 훨씬 강하기 때문으로 이해된다. 그러나 노말렉산 용매 조건에서 OA를 첨가하여 제조한 Al_2O_3 나노절연유가 PAAE를 이용하여 Al_2O_3 분말을 직접 절연유에 분산시킨 시료보다 높은 점도값을 가지는 것은 쉽게 설명되지 않는다. OA의 점도(30.9cps@25°C)는 PAAE(201.5cps@25°C)보다 6.5배 낮을 뿐 아니라, 여과공정을 통해 과잉 첨가된 OA가 모두 제거되었다고 판단되기 때문에, OA를 첨가하여 제조한 나노절연유가 높은 점도값을 가지는 것은 분산매에 따라 분산제 분자가 분말 표면에 결합하는 방식과 결합력이 크게 달라지기 때문으로 생각된다. 즉, OA는 분산제의 'tail'부에 해당하는 친유기 부위가 'head'에 해당하는 친수기 부위보다 9배 정도 강하기 때문에, 분말 표면개질층과 절연유 사이의 인력과 점성에 대한 저항성이 상대적으로 큰 것으로 사료된다. 반면에 PAAE는 OA보다 친수성이 매우 강하여 절연유에 분산되기보다 나노분말 표면에 우선 흡착되어 비교적 쉽게 표면개질되지만, 친유성 특성이 약하여 절연유와의 사이에 큰 인력이 작용하지 않는 것으로 생각된다. 또한 Fig. 3에서 Al_2O_3 와 AIN 분말을 혼합한 나노절연유는 상대적

으로 점도 상승률이 높은 섬유상 Al_2O_3 분말이 농도의 절반을 차지하고 있음에도 불구하고, AIN 나노절연유와 거의 비슷한 수준의 비교적 낮은 점도값을 보였다. 이와 같이 표면개질 공정에서 분산매가 분말의 분산성에 큰 영향을 미치는 이유는 노말렉산과 달리 절연유는 많은 첨가제를 내포하고 있으며, 이러한 첨가제가 분말에 우선하여 분산제와 상호작용 하기 때문으로 판단된다. 따라서 절연유보다도 화학 첨가제가 다량 함유된 윤활유나 엔진오일 등을 이용하여 오일 기지 나노유체를 제조할 경우에는, 분산매와 분산제 사이의 화학반응을 고려한 분말/분산매/분산제 최적 조합을 도출해야 할 것으로 생각된다.

Fig. 3에 보인 5 가지 나노절연유의 분산안정성을 Fig. 4(a)에 비교하였다. Fig. 2에서 노말렉산 용매 조건에서 단순 기계교반에 의해 제조한 Al_2O_3 나노절연유는 분산성이 매우 열악하였지만, 비드밀을 이용하여 에스테르화 반응으로 표면개질한 시료는 근적외선 투과도도 높고 분산성도 매우 우수하였다. 그러나 절연유 용매조건에서 PAAE를 이용하여 Al_2O_3 나노절연유를 제조한 경우, 단순 교반장치에서 비드밀로 분산기구가 달라져도 분산성의 뚜렷한 향상이 관찰되지 않았다. 이것은 표면개질에 사용한 PAAE 분산제의 첨가량이 부족했기 때문으로 판단된다. 실제로 비드밀을 이용하여 절연유 용매 조건에서 Al_2O_3 나노절연유를 제조한 경우, 분산제의 농도가 30wt.%를 초과하면 유체의 점도가 급증하여 ZrO_2 비드가 시료와 함께 방출되었다. 따라서 충분한 분산제 첨가가 불가하였으며, 결과적으로 분산제 부족으로 인한 분산성 저하 가능성이 있다고 생각된다. 즉, 섬유상 Al_2O_3 나노분말의 비표면적(307 m²/g)은 AIN 나노분말(35 m²/g)보다 9배 정도 높기 때문에 충분한 표면개질을 위해서는 30wt.%보다 많은 양의 분산제가 필요할 것으로 생각된다. 그러나 다량의 분산제 첨가에 의해 Al_2O_3 나노절연유의 분산성을 향상시킬 수 있다고 하더라도 분산제

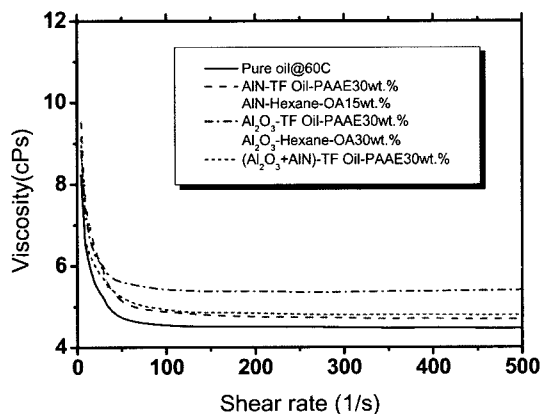


Fig. 3. Viscosity versus shear rate plot for the dispersed fluids with alumina and aluminum nitride particles at 60°C.

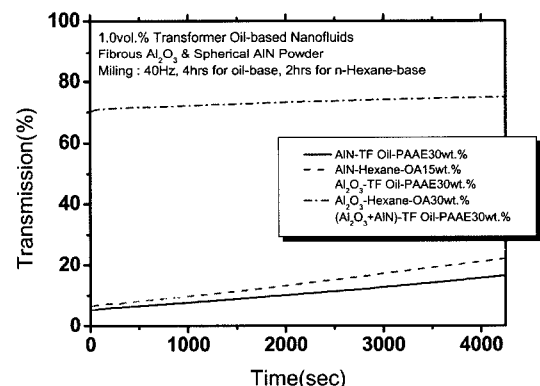


Fig. 4. Transmission-Time curves for nanofluids prepared with different powders, dispersants and surface modification solvents.

Table 3. Thermal conductivities of 1.0vol.% nanofluids.

Test Fluids	Surfactant (wt.%)	Solvent	Thermal Conductivity	
			k (W/mK)	k/k_0
Transformer Oil	-	-	0.1185	-
Transformer Oil	PAAE(30)	Oil	0.1223	1.0321
Transformer Oil	OA(30)	Oil	0.1229	1.0371
Transformer Oil + Al ₂ O ₃	OA(30)	<i>n</i> -Hexane	0.1305	1.1013
Transformer Oil + Al ₂ O ₃	PAAE(30)	Oil	0.1307	1.1030
Transformer Oil + AlN	OA(15)	<i>n</i> -Hexane	0.1268	1.0700
Transformer Oil + AlN	PAAE(30)	Oil	0.1327	1.1198
Transformer Oil + {Al ₂ O ₃ +AlN}	PAAE(30)	Oil	0.1310	1.1055

농도가 너무 높아 이로 인한 다른 악영향이 우려된다. 따라서 Al₂O₃ 분말의 표면개질을 위해서는 노말핵산을 분산매로 에스테르화 화학반응을 유도하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 반면에 AlN 나노절연유는 에스테르화 화학반응으로 제조한 Al₂O₃ 절연유만큼 완벽한 분산성은 확보하기 어렵지만, 분산매에 의해 큰 영향을 받지 않는 비교적 안정된 분산성을 보인다. 특히, Al₂O₃와 AlN을 같은 비율로 혼합한 나노절연유는 점도값이 상대적으로 낮을 뿐 아니라 AlN 나노절연유와 비슷한 수준의 비교적 우수한 분산성을 보임으로써, 실 적용 가능성이 가장 높은 것으로 판단된다.

3.4 나노절연유 열전도도 측정

비정상열선법을 이용하여 상온에서 나노절연유의 열전도도를 측정하였으며, 이를 Table 3에 정리하였다. 순수 절연유의 열전도도는 0.1185 W/mK로 측정되었으며, 다른 모든 나노절연유의 열전도도를 이 값과 비교하여 상승폭을 결정하였다. Table 3에서 나노절연유 제조시 첨가한 분산제와 동일량(30wt.%)의 분산제만을 절연유에 첨가한 시료의 열전도도 값을 함께 보였는데, 액상 분산제의 첨가만으로 절연유의 열전도도가 3% 정도 상승함을 알 수 있다. 분산제 자체의 열전도도(OA : 0.1624 W/mK, PAAE : 0.1634 W/mK)가 순수 절연유보다 약 37% 높기 때문에 이것의 첨가에 의한 절연유의 열전도도 상승 현상은 해석 가능하지만, 분산제 보다 훨씬 높은 열전도도를 가지는 고상 나노입자(Al₂O₃ : 18 W/mK, AlN : 70~210 W/mK)를 첨가한 0.5vol.% 농도의 나노절연유가 액상 분산제의 미량 첨가에 의한 열전도도 상승폭과 비슷한 수준(3~7%)을 보이는 것은 쉽게 이해되지 않는다. 나노유체가 높은 열전달 특성을 가지는 것은 액상 속에서 불규칙한 브라운 운동을 하는 고형 나노입자 표면과 이웃한 액상 분자 사이에서 열전달이 매우 활발하게 일어나기 때문으로 설명된다.^{6,15-18} 그러나 혼합유체의 점도가 증가하면 액상 속 나노입자의 브라운 운동이 제한되어 열전도도가 저하될 것으로 예상되며, 실제 실험결과에서도

시료의 점도가 높을수록 열전도도는 대체로 낮게 나타났다. 따라서 열전달 특성이 우수한 나노절연유 제조를 위해서는 분말 및 분산제 첨가에 의해 점도가 과도 상승하는 것을 억제할 필요가 있다.

Fig. 5에 1.0vol.% AlN 나노절연유의 분산 조건별 열전도도 측정 결과를 나타냈다. 예상과 달리 AlN 나노절연유의 열전도도 값은 AlN 분말을 절연유에 혼합한 뒤, 분산제 첨가 없이 기계적 교반만을 통해 제조한 시료에서 가장 높게 나타났으며, 분산제와 비드밀을 이용하여 제조한 나노절연유는 오히려 이보다 낮은 값을 보였다. 또한 분말만을 절연유에 혼합한 시료에 30분 동안 초음파를 조사한 뒤, 열전도도를 측정하면 OA 분산제를 이용한 나노절연유 수준으로 낮아지지만, 이 시료를 다시 손으로 가볍게 흔들면 열전도도 값이 초기치로 상승하였다. 분말의 습식분산 및 표면개질을 수행하지 않은 시료가 높은 열전도도를 나타내는 것은 절연유 속에 나노분말이 겔(Gel) 상태의 응집체로 존재함으로써 망 구조의 고상 입자를 따라 열이 빠르게 전달되었기 때문으로 판단된다. 또한 초음파 조사에 의해 시료의 열전도도가 낮아지는 것은 겔 상태의 입자 체인이 부분적으로 끊어짐에 따라 고체상을 따른 열전달이 제한되기 때문으로 생

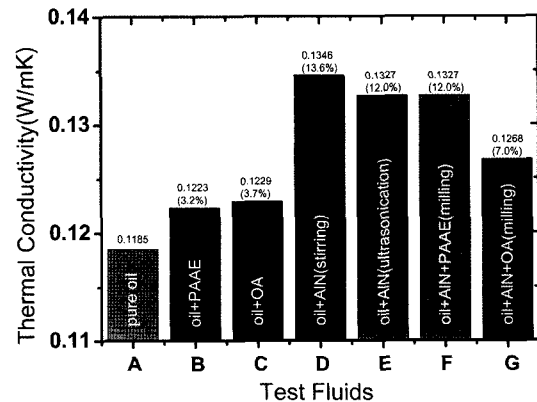


Fig. 5. Thermal conductivities of nanofluids.

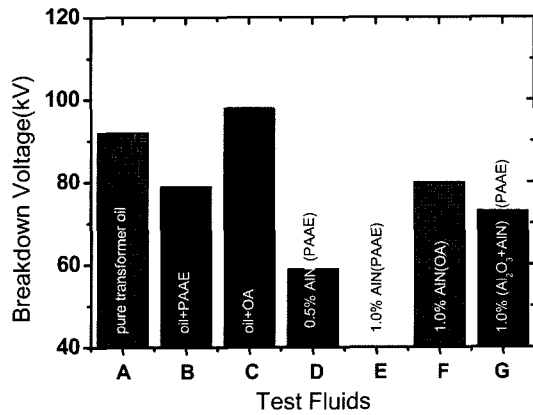


Fig. 6. Breakdown voltages of nanofluids.

각된다. 이처럼 나노분말을 절연유에 단순 혼합시킨 시료는 엄밀한 의미에서 나노유체가 아니며, 비록 높은 열전도도를 가지더라도 나노절연유의 분산성이 제대로 확보되지 못한 상태에서 분말이 침전되기 전의 일시적 현상에 지나지 않으므로 이런 데이터는 무시되어야 한다. 최근 발표된 일부 논문에서 실험 데이터가 서로 크게 다른 것도 이와 전혀 무관하지 않다고 생각된다. 순수 절연유와 비교한 열전도도 상승폭은 1.0vol.% AIN 나노절연유에서 11.64%로 가장 높게 나타났으며, Al₂O₃와 AIN 나노분말을 혼합한 시료는 동일 농도 조건에서 10.23%의 상승폭을 보였다.

3.5 나노절연유 절연내력 특성평가

Table 3에서 AIN 나노절연유의 열전도도는 섬유상 Al₂O₃ 나노절연유와 비교하여 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 벌크 상태에서 AIN(70~210 W/mK)과 Al₂O₃의 열전도도(12~28 W/mK)를 비교해 볼 때, 기대에 훨씬 못 미치는 값이다. 또한 AIN은 벌크 상태에서 전기 절연성이 매우 우수한 것으로 알려져 있지만, AIN 나노절연유는 순수 절연유 및 Al₂O₃ 나노절연유와 비교하여 전기 절연 특성이 상대적으로 열악하였다. Fig. 6에 다양한 분산 조건으로 제조된 나노절연유의 절연내력 값을 비교하여 놓았다. 그림에서 OA는 절연유의 전기절연 특성에 거의 영향을 미치지 않지만, PAAE는 절연유의 전기절연 특성을 다소 낮추는 것으로 확인되었다. 특히 PAAE를 분산제로 이용하여 제조한 AIN 나노절연유는 0.5vol.% 농도 조건에서 절연내력이 순수 절연유 대비 30% 이상 감소하였으며, 1.0vol.% 시료에서는 저전압 조건에서 절연파괴가 일어남으로써 절연유로 사용하기에 부적합한 것으로 판단되었다.

이와 같이 AIN 나노절연유의 절연내력 특성이 낮은 이유는 표면개질에 사용된 PAAE 분산제 자체가 순수 절연유의 전기절연 특성을 일정 수준 떨어뜨렸기 때문으로

판단된다. 실제로 절연유에 AIN 분말만을 분산시키거나 OA 또는 기타 분산제를 적용했을 때는 뚜렷한 절연내력 특성 저하를 확인하지 못하였다. 결국, PAAE 분산제는 AIN 나노절연유의 분산성을 확보하기 위한 목적으로는 적절하지만, 전기절연 특성을 기본적으로 갖추어야 하는 절연유에 적용하기에는 부적합한 것으로 생각된다. 따라서 분산제 선정시에는 시료의 분산안정성 뿐만 아니라 전기절연 특성 등 여러 가지 물성을 동시에 고려해야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

분산기구, 분산제 및 분산매를 달리하여 나노절연유를 제조하고 물성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 일반적으로 분산제의 친수기가 강할수록 절연유에 용해되기보다 분말 표면에 우선적으로 흡착되어 쉽게 표면 개질되는 것으로 나타났다. 그러나 분산제의 친유기가 너무 약하면 분산입자 사이에 인력이 작용하여 재응집 현상이 발생하기 쉬우므로 사용하는 분말과 분산매에 따라 적절한 분산제를 선정하는 것이 매우 중요하다.
2. 동일 분말 및 분산제 조건에서도 분산매에 따라 유체의 분산특성이 크게 달라졌으며, 이것은 노말헥산과 달리 절연유 속에는 각종 화학 첨가제가 다량 내포되어 있으며, 이것이 표면개질을 위해 첨가된 분산제와 일부 반응하기 때문으로 판단된다.
3. 나노분말의 분산성을 충분히 확보하지 못한 상태에서 측정된 열전도도는 오류의 가능성이 매우 높으며, 동일 분산조건에서 유체의 점도가 낮을수록 열전도도가 증가하는 경향을 보인다.
4. AIN 나노절연유의 열전달 특성은 Al₂O₃ 나노절연유보다 우수하였으나, 상대적으로 전기절연 특성은 매우 열악한 것으로 나타났다. 이것은 분말의 순도가 낮아 PAAE 분산제 자체가 전기절연 특성에 악영향을 미쳤기 때문으로 생각되며, 따라서 분산제 선정시에 분산안정성 외에도 유체의 열적 및 전기적 특성에 미치는 영향까지 고려해서 결정해야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 전력기반조성사업센터와 한국전력공사가 지원하는 전력산업연구개발사업(기금-157)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. U. S. Choi, ASME FED 231/MD 66, 99 (1995).

2. J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu and L. J. Thompson, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 718 (2001).
3. S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li and J.A. Eastman, *J. Heat Trans.*, **121**, 280 (1999).
4. X. Wang, X. Xu and S. U. S. Choi, *J. Thermophys. Heat Trans.*, **13**(4), 474 (1999).
5. S. M. S. Murshed, K. C. Leong, C. Yang, *Int. J. Therm. Sci.*, **44**(4), 367 (2005).
6. Y. Xuan and Q. Li, *Int. J. Heat Fluid Flow* **21**, 58 (2000).
7. S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen and W. Roetzel, *ASME J. Heat Transfer*, **125**, 567 (2003).
8. H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai and Q. Wu, *J. Appl. Phys.*, **91**, 4568 (2002).
9. H. Xie, J. Wang, T. Xi and Y. Liu, *Int. J. Thermophysics.*, **23**(2), 571 (2002).
10. H. E. Patel, W. Roetzel and S. K. Das, *Heat Mass Transfer*, **39**, 775 (2003).
11. H. E. Patel, S. K. Das, T. Sundararagan, A. S. Nair, B. Geoge and T. Pradeep, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2931 (2003).
12. S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood and E. A. Grulke, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2252 (2001).
13. Z. Li and Y. Zhu, *Appl. Surf. Sci.*, **211**, 315 (2003).
14. J. Kestin and W. A. Wakeham, *Physica A***92**, 102 (1978).
15. P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi and J. A. Eastman, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**, 855 (2002).
16. W. Yu and S. U. S. Choi, *J. Nanoparticle Research*, **5**(1-2), 167 (2003).
17. J. Koo and C. Kleinstreuer, *Int. Communication Heat Mass Transfer*, **32**(9), 1111 (2005).
18. W. Evans, J. Fish and P. Keblinski, *Appl. Phys. Lett.*, **88**(9), 9316 (2006).