Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 19, No. 3, p. 233, March 2006.

논 문 19-3-5

알루미나 나노분말을 함유한 변압기 절연유의 분산기술

Dispersion Technique of Alumina Nanoparticles in Transformer Oil

송현우[1,a], 최 철[1], 최경식[1], 오제명[1]
(Hyunwoo Song[1,a], Cheol Choi[1], Kyungshik Choi[1], and Jemyung Oh[1])

Abstract

Two different nanofluids were prepared by dispersing Al_2O_3 nanoparticles in transformer oil after hydrophobic surface modification. The agglomerated alumina nanoparticles with diameters from ㎛ to ㎜ were ball-milled and then treated with surfactants such as lauric acid, stearic acid and oleic acid. The surface characteristics of modified nanoparticles were examined by FTIR spectroscopy. It showed that the hydrophobicity of nanoparticles was caused by esterification between hydroxyl groups on the particle surface and functional groups of surfactant. The shape and size distribution of ball-milled particles were analyzed by TEM and PSA. The results compared with the primary particles indicated that the size distributions of nanoparticles were dependant on milling times. The dispersion stability of modified nanoparticles dispersed in oil was highly dependent on the composition and amounts of surfactants.

Key Words : Nanofluids, Transformer oil, Dispersion, Surface modification

1. 서 론

열전도도가 낮은 액상의 열전달 매체에 상대적으로 열전도도가 높은 고형입자를 첨가시킨 혼합유체의 열전달 특성 향상에 관한 이론이 1881년 Maxwell[1]에 의해 발표되었다. 하지만 당시의 소재기술로 생산 가능한 미립자는 ㎛ 크기 이상으로 조대하였기 때문에 이를 이용한 혼합유체는 열교환기 내부에서 입자 침전으로 인한 관막힘 및 내부 구조물의 침식 문제 등을 야기함으로써 실용화되지 못하였다. 그러나 최근 소재 기술의 비약적인 발달로 인해 50 ㎚ 미만 크기의 분말 제조가 가능해짐에 따라, 입자의 크기효과(size effect)에서 기인하는 나노소재의 새로운 물리화학적, 전기적, 광학적 특성 등이 많은 분야에서 보고되고 있다[2-4]. 특히, 열교환 분야에서는 1995년 Choi가 최초로 나노유체(Nanofluids)[5]의 개념을 제시하고 종래의 열매체보다 훨씬 뛰어난 열전달특성을 보고한 이래, 나노유체의 높은 열효율을 이용한 새로운 냉각매체의 개발에 전세계적인 관심이 집중되고 있다[6-10]. 나노유체는 과거 ㎛ 혹은 ㎜ 수준의 조대한 입자를 첨가한 혼합유체가 보였던 모든 실용상의 문제점들을 해소함으로써 초소형 전기전자 부품의 냉각매체로 활용 가능하며, 벌크(bulk) 재료에 대한 고전적 열전달 이론으로는 설명되지 않는 획기적인 열전특성을 보이는 것으로 보고되고 있다[11-13].

나노유체의 열전달 특성은 첨가되는 나노입자의 화학조성, 크기 및 농도에 크게 의존하며, 특히 용매(base fluid) 자체의 열전도도가 낮을수록 상승하는 것으로 알려져 있다[14-18]. 따라서 나노유체의 개념을 변압기용 절연유에 적용할 경우, 상대적으로 열전도도가 높은 물이나 에틸렌글리콜에 적용하는 경우보다 열전달 특성이 크게 향상될 것으로 예상된다. 냉각능이 대폭 향상된 새로운 절연유를 적용하여 변압기 내 유온상승을 억제하게 되면, 변압기의 수명을 연장할 뿐만 아니라 절연유 순환펌

1. 한국전력공사 전력연구원
(대전시 유성구 문지동 103-16)
a. Corresponding Author : hwsong@kepri.re.kr
접수일자 : 2005. 9. 13
1차 심사 : 2006. 1. 17
심사완료 : 2006. 2. 6

프의 소형화를 통한 에너지 절감이 가능하게 된다.

본 연구에서는 초고압 변압기용 절연유를 대체할 목적으로 고효율의 나노절연유를 개발함에 있어, 가장 문제가 되는 절연유에 대한 알루미나(Al_2O_3) 나노분말의 분산안정성을 확보하기 위한 최적 제조조건을 도출하고자 하였다. 이를 위하여, 분말 응집체를 볼밀 분쇄한 후 친유성(hydrophobic)으로 표면개질 처리하였으며, 분말의 초기 상태 및 표면처리 조건이 분산안정성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실 험

나노절연유 제조에 사용된 알루미나 분말(표 1 참조)은 기상공정에 의해 합성된 미국 Nanostructured & Amorphous Materials社의 NNA-35 (27-43 ㎚, 99.5 %)와 독일 Degussa社의 Alu-C (13 ㎚, 99.6 %) 상용분말이고, 절연유는 초고압 변압기용으로 사용되는 1종 4호 광유(동남석유공업)를 사용하였다. 분말의 표면개질 실험에 사용한 시약들은, 반응용매로써 *n*-Hexane(Kanto Chemical, 96.0 %), 안정제로써 Lauric acid, Stearic acid 및 Oleic acid(Kanto Chemical, 95.0 %)의 3가지 시약을 사용하였다.

미세한 크기의 알루미나 분말이 분산된 나노절연유를 얻기 위하여 분말 표면개질 전에 볼밀 분쇄기를 이용하여 조대한 분말 응집체를 분쇄하였다. *n*-Hexane에 분말과 안정제를 첨가하여 습식방식으로 100 rpm 조건에서 각각 5, 10, 20시간동안 기계적 연마하였다. 이때, 안정제의 첨가량을 분말에 대한 무게비로 변화시키며 그 영향을 조사하였다. 볼밀 분쇄처리 후, 혼합용액을 60 ℃로 가열하면서 4시간동안 초음파를 조사하여 반응시켰다. 이때, 반응용기 내부 분위기를 상압 및 감압상태에서 각각 반응시키고 조건에 따른 시료 특성의 변화를 조사하였다. 반응이 끝난 용액을 원심분리를 통해 용매인 *n*-hexane과 과잉으로 첨가된 안정제를 1차 제거시킨 후, 60 ℃ 오븐에서 1시간 건조하여 얻은 분말을 에탄올과 초순수로 반복 세척하면서 과잉의 분산제를 2차 제거시키고 다시 80 ℃ 오븐에서 10시간 건조하여 분말로 회수하였다. 표면처리된 각각의 분말을 절연유에 0.5 vol.% 농도로 첨가하고 초음파 조사와 진공상태에서 기포제거를 3회 반복하여 나노절연유를 제조하였다.

적외선 분광 광도계(Thermoelectron, Nexus)를 이용하여 표면처리 전후 나노분말의 표면상태 변화를 조사하고 안정제의 적정 첨가량 및 과잉의 안정제 존재 여부를 확인하였다. 투과전자현미경(JEOL, JEM 3000F)과 입도분석기(Microtrac, U1895)를 이용하여 볼밀 분쇄처리 전후 나노분말의 형상과 크기분포를 조사하였다. 또한, 절연유내에서 볼밀 분쇄 및 표면개질된 분말의 분산거동을 확인하고자 원심력을 이용한 분산안정성 평가장치(LUMiFuge, R116)를 통해 나노절연유의 장기적인 분산안정성을 평가하였다.

표 1. 알루미나 나노분말의 특성.

Table 1. Properties of alumina nanopowders.

분말특성	NNA-35	Alu-C
평균입경 (㎚)	27-43 (200-500)	13
비표면적 (m^2/g)	35	100
결정	*a*	-
입형	구형	구형
순도 (%)	99.5	99.6
표면특성	친수성	친수성

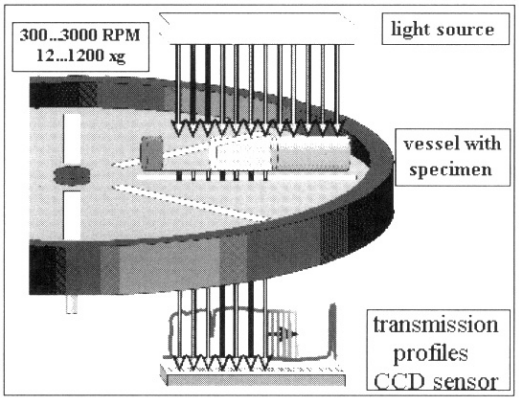

그림 1. 분산안정성 평가장치의 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of dispersion stability analyzer.

3. 결과 및 고찰

10시간 볼밀 분쇄하고 Oleic acid(이하 OA)를 사용하여 친유성(hydrophobic)으로 표면개질시킨 NNA-35 알루미나 분말의 FTIR 분석결과를 그림 2에 나타냈다.

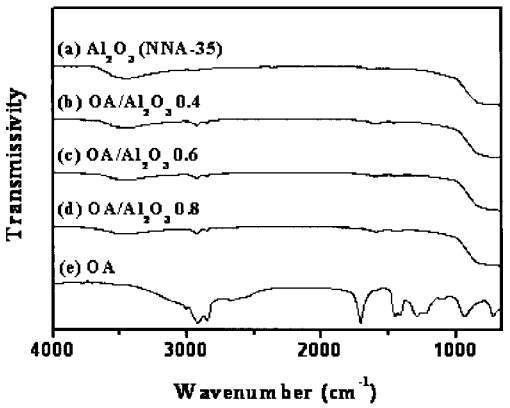

그림 2. 표면개질된 알루미나(NNA-35) 나노분말의 OA/Al_2O_3 함량별 적외선 투과 스펙트럼 변화 : (a) 표면개질 전, (b)-(d) 표면개질 후의 NNA-35 분말 및 (e) OA의 투과 스펙트럼.

Fig. 2. FTIR spectra of alumina powders (NNA-35) at different proportion of OA to Al_2O_3 powder : (a) Non-modified, (b)-(d) OA-modified Al_2O_3 powders and (e) OA.

그림 2에서 (a)는 표면처리 이전의 초기분말이고 (b)~(d)는 OA의 첨가량을 변화시키면서 표면처리된 분말이며 (e)는 순수한 OA의 적외선 투과 패턴에 해당한다. 그림에서 보면, 표면처리된 분말의 경우 OA의 긴 알킬체인(alkyl chain)에 해당하는 흡수피크(2926과 2855 cm^{-1})가 나타나면서 분말의 친수성 표면특성을 유도하는 OH 피크(3430 cm^{-1})가 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한, OA의 -COOH에 해당하는 피크(1729 cm^{-1})는 나타나지 않는 대신 -COO-기로 분석되는 새로운 흡수피크(1590 cm^{-1})가 검출되었다. 따라서 다음과 같은 반응식을 예상할 수 있다.

$$Al_2O_3(OH)_n + yHOOCC_{17}H_{33} \rightarrow Al_2O_3(OH)_{n-y}(OOCC_{17}H_{33})_y + yH_2O \quad (1)$$

여기서, $HOOCC_{17}H_{33}$은 안정제로 사용된 OA의 분자식이다. 반응식으로부터 알 수 있듯이, 분말의 친유성 표면특성은 분말 표면의 -OH와 OA의 작용기인 -COOH 사이의 에스테르화 반응을 통해 유도된다.

한편, 그림 2의 (b)~(d)에서 볼 수 있듯이 OA의 알킬체인과 COO-기에 해당하는 흡수피크는

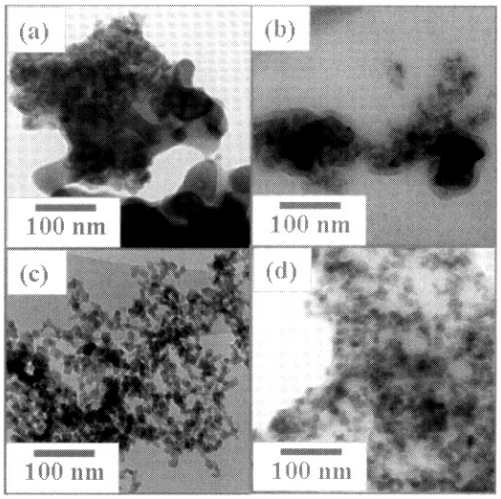

그림 3. 볼밀 분쇄 전후의 알루미나 시료의 투과전자현미경 조직 : 볼밀 전의 (a) NNA-35, (c) Alu-C 조직, 10시간 볼밀 후의 (b) NNA-35, (d) Alu-C 조직 사진.

Fig. 3. TEM photographs showing the particle size and morphology of the agglomerated Al_2O_3 powders : (a) NNA-35 before ball-milling, (c) Alu-C before ball-milling, (b) NNA-35 after 10 hrs ball-milling, (d) Alu-C after 10 hrs ball-milling.

첨가되는 OA의 함량에 따라 증가하다가 일정 첨가량 이상에서는 더 이상 변화하지 않았다. 또한 일정 첨가량 이상에서 미약하나마 -COOH에 해당하는 피크가 검출되었는데, 이것은 과잉 첨가된 OA가 입자표면과 화학결합하지 못하고 원심분리를 통해 분말로 회수될 때 미량 잔존하기 때문으로 판단된다. 이러한 흡수피크의 변화를 통해 첨가되는 OA의 적정 첨가량을 결정하였다.

평균입경 13 ㎚의 Alu-C 분말의 FTIR 분석결과에서도 그림 2와 유사한 패턴의 투과 스펙트럼을 확인하였으나, NNA-35 분말보다 OA의 적정 첨가량이 다소 증가하는 차이를 보였다. 이것은 Alu-C 분말이 NNA-35 분말보다 미세한 입자들로 구성되어 상대적으로 큰 비표면적을 가지기 때문으로 판단된다.

볼밀분쇄 및 표면개질 전후 분말의 형상과 크기 변화를 확인하고자 TEM을 통해 관찰한 조직사진을 그림 3에 나타냈다.

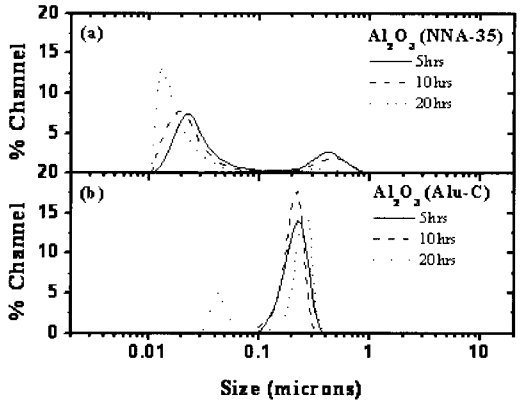

그림 4. 볼밀 시간에 따른 (a) NNA-35, (b) Alu-C 알루미나 분말의 절연유내에서의 입자크기 분포.

Fig. 4. Particle size distribution for (a) NNA-35, (b) Alu-C alumina nanoparticles which are dispersed in transformer oil with different ball-milling time.

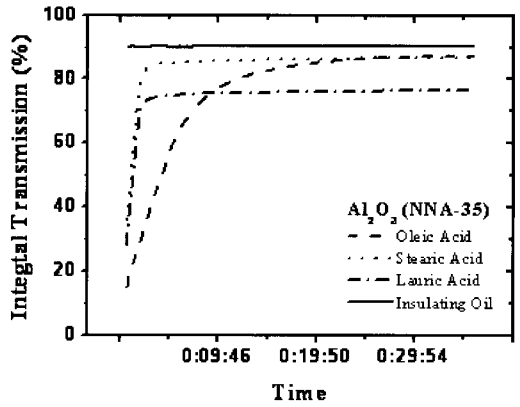

그림 5. 표면개질 안정제에 따른 NNA-35 알루미나 나노절연유의 분산안정성 데이터 비교.

Fig. 5. Dispersion stability data of transformer oil-based NNA-35 alumina nanofluids with different surfactants.

그림 3에서 (a)와 (c)는 각각 분쇄 및 표면처리 이전의 NNA-35와 Alu-C 분말의 TEM 사진이고 (b)와 (d)는 각각 10시간 볼밀분쇄 후 OA로 표면처리한 NNA-35와 Alu-C 분말의 TEM 사진이다. 볼밀분쇄 전후의 TEM 분석결과를 살펴보면, 두 분말 모두 볼밀처리 후에 응집체의 분쇄효과가 나타나고 있지만 그 효과가 미미하다는 것을 알 수 있다. 이것은 볼밀분쇄 공정에 사용했던 ZrO_2 볼의 크기와 밀접한 관련이 있다고 사료된다. 즉, 0.5와 1.0 ㎝ 직경의 볼을 사용하여 수백 ㎚ 크기의 응집체를 1차 입자 수준으로 분쇄한다는 것은 분명한 한계가 있다고 판단된다. 즉, 분말 응집체의 효과적인 분쇄를 위해서는 보다 작은 크기의 볼을 사용하면서도 볼밀보다 강력한 회전력의 분쇄장비가 필요한 것으로 판단된다.

그림 3의 (b)와 (d)에서 알 수 있듯이, 두 분말 사이의 결과를 상호 비교해 보면 NNA-35 분말이 Alu-C 분말보다 분쇄효과가 상대적으로 뚜렷하게 나타나고 있다. 동일한 조성의 알루미나 분말임에도 불구하고 이와 같이 분말간의 분쇄정도가 다르게 나타나는 것은 분말의 제조공정 및 합성조건에 따라 제조 단계에서 결정되는 분말 응집체의 응집력 차이에 주로 기인하는 것으로 판단된다. 표 1에 보인 바와 같이, NNA-35 분말의 경우, 미량 포함되어 있는 200~500 ㎚ 크기의 조대입자를 제외한 27-43 ㎚ 크기의 미세분말 응집체는 볼밀과 같은 저에너지 분쇄기구에 의해서도 효과적으로 분쇄될 수 있는 반면, Alu-C 분말은 입자들 사이에 보다 강한 결합력이 작용함으로써 볼밀 후에도 잘 분쇄되지 않고 상대적으로 큰 응집체로 존재하는 것으로 생각된다. 따라서 분산안정성이 우수한 나노절연유를 제조하기 위해서는 가능한 미세하고 저응집 경향의 분말을 사용해야 할 것으로 판단된다.

한편, 볼밀 과정에 안정제로 첨가된 OA는 응집체의 분쇄정도와 무관하게 두 분말 모두에서 분쇄된 나노분말이 재응집되지 않도록 충분한 척력을 제공하는 것으로 판단된다.

볼밀시간에 따른 분말의 분쇄효과를 확인하고자 각각의 분말을 절연유내에 분산시킨 후, PSA 분석을 하였고 그 결과를 그림 4에 나타냈다.

그림 4에서 (a)와 (b)는 각각 분쇄시간에 따른 NNA-35 분말과 Alu-C 분말의 절연유내에서의 입도분포를 나타낸다. 각각의 분말의 분쇄시간에 따른 입도분포는 TEM 관찰 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 즉, NNA-35 분말의 경우에는 볼밀시간에 따른 분쇄효과가 나타나지만, Alu-C 분말에서는 뚜렷한 효과가 관찰되지 않는다.

친수성 표면의 알루미나 분말을 절연유내에 분산시키기 위한 안정제로써 OA 외의 다른 분산제의 효과를 비교평가하기 위해 10시간 볼밀처리된 NNA-35 분말을 대상으로 Lauric acid(이하 LA)와 Stearic acid(이하 SA)를 이용하여 동일 방법으로 표면개질한 후, 각각의 분말을 절연유에 분산시키고 시간에 따른 분산안정성을 평가하였으며, 그 결과를 그림 5에 나타냈다.

그림 5를 살펴보면, 동일한 표면개질 방법을 적

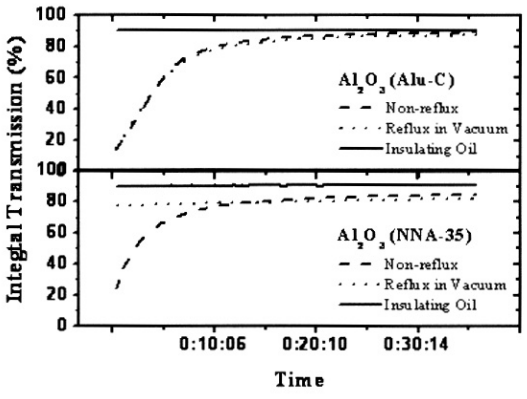

그림 6. 표면개질 방법에 따른 알루미나 나노절연유의 분산안정성 데이터 비교.

Fig. 6. Dispersion stability data of transformer oil-based alumina nanofluids with different surface modification method.

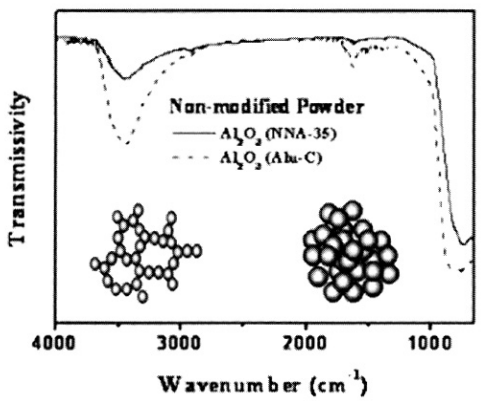

그림 7. 표면개질 이전의 (a) NNA-35, (b) Alu-C 알루미나 분말의 FTIR 스펙트럼.

Fig. 7. FTIR Spectra of non-modified alumina powders.

용하더라도 표면개질된 분말들의 절연유 내 입자 거동은 안정제의 종류에 따라 크게 달라진다는 것을 알 수 있다. FTIR 분석결과, LA와 SA 또한 OA와 마찬가지로 에스테르화 반응을 통해 분말 표면특성을 친유성으로 변화시킨다는 것을 확인하였다. 세 종류의 안정제 모두 물에 대한 용해도가 없는 카르복실산(carboxylic acid)임에도 불구하고 이와 같이 분산안정성에서 큰 차이를 보이는 것은 각각의 유기물 분자구조 차이에 기인하는 것으로 생각된다. LA와 OA를 비교해 보면 알킬체인(alkyl chain)이 6개 더 많은 OA가 LA보다 광유계 오일인 절연유에 알루미나 분말을 분산시키는데 더욱 효과적이고, 알킬체인의 수가 동일한 SA와 OA를 비교해 보면 알킬체인 중간이 시스(cis-)형 구조로 존재하여 상온에서 액상으로 존재하는 OA가 고상으로 존재하는 SA보다 더욱 효과적인 것으로 나타났다.

분말표면의 -OH기와 안정제의 작용기(-COOH) 사이의 에스테르화 반응은 가역반응이기 때문에 반응 부산물로 생성되는 수분(H_2O)을 생성 즉시 제거시켜 역반응을 억제하고 정반응을 유도해야 한다. 이를 위해 반응용기 내부를 감압하면서 용매인 *n*-hexane을 환류(reflux)시키는 과정에서 수분을 응축 제거하였고, 이를 수분제거 과정 없이 표면개질한 분말과 절연유내에서 분산안정성을 비교하였다(그림 6 참조).

그림 6으로부터 NNA-35 분말과 Alu-C 분말 모두 상압에서 반응시켜 얻는 분말보다 감압 하에서 수분을 제거하며 표면개질한 분말이 절연유내에서 더욱 안정한 분산성을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 에스테르화 반응에서 정반응이 유도되고 역반응이 효과적으로 억제되어 분말표면의 친유성 특성이 더욱 강화된다는 것을 의미한다. 또한, 반응 중에 생성되는 수분을 적절히 제거하지 못할 경우, 이러한 수분이 반응에 참여하지 않은 OA와 흡착을 통한 역미셀(reverse-micelle)을 형성하여 원심분리 후에 분말과 같이 회수되게 된다. 그 후, 분말과 함께 절연유내에 역미셀이 첨가되면 친유성 특성의 분말 표면에 역미셀을 형성했던 OA 분자들이 이중 코팅됨으로써 표면특성이 다시 친수성으로 바뀌게 되고 분산안정성이 저하되는 것으로 판단된다.

Alu-C 분말이 NNA-35 분말보다 반응조건에 따른 안정성의 차이가 현저하게 나타나는 것은 그림 3의 TEM 사진에 보인 바와 같이 초기 분말의 응집형태에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 보다 미세한 크기의 겔(gel) 형태의 응집구조인 Alu-C 분말이 조밀한 형태의 응집구조인 NNA-35 분말보다 상대적으로 큰 비표면적을 가지기 때문에 더 많은 -OH기가 존재한다. 따라서 보다 친수성 표면특성을 갖는 Alu-C 분말이 그림 2의 FTIR 분석결과에서 확인했던 것처럼 NNA-35 분말보다 첨가되는 OA의 적정량이 다소 증가하게 되고, 그림 3의 TEM과 그림 4의 PSA 결과를 통해 알 수 있었던 것처럼 NNA-35 분말보다 볼밀에 의한 분쇄효과는 없지만 오히려 OA와 반응하여 친유성 표

먼으로 변화되기 용이하며, 반응시 생성되는 부산물인 수분의 제거 여부에 따라 안정성에서 큰 차이를 보이게 된다.

두 분말 초기상태의 친수표면특성 차이를 확인하기 위하여 FTIR 분석을 하였고, 그 결과를 그림 7에 나타냈다.

그림 7에서 두 분말의 -OH기에 해당하는 피크(3430 cm^{-1})를 비교해보면, Alu-C 분말이 NNA-35 분말보다 피크의 크기가 현저하게 크다는 것을 알 수 있다.

본 실험에서 사용한 기상공정에 의해 합성된 알루미나 나노분말을 상호 비교한 결과, Alu-C 분말이 NNA-35 분말보다 OA와의 에스테르화 반응을 통해 절연유내에서 보다 안정적인 분산상태를 유지한다는 것을 알 수 있었다. 이로부터 제조사에 따른 분말의 표면 및 응집특성의 차이가 표면개질 과정에서 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었고, 따라서 분말의 표면특성이 친수성일수록 친유성 안정제로 표면개질시키기 용이하며, 분말의 초기상태가 보다 미세할수록 절연유 내 분산에 더욱 유리한 것으로 판단된다.

4. 결 론

나노절연유를 제조하기 위한 나노분말로서 기상합성 공정에 의해 제조된 두 종류의 상용 알루미나 분말을 선정하여 다양한 친유성 표면개질 방법을 적용하고 절연유내의 분산안정성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 에스테르화 반응시 정반응을 유도하는 반응조건이 분말의 소수화도에 큰 영향을 미쳤고 카르복실산(carboxylic acid) 중에서 OA가 친수성 표면특성을 가지는 알루미나 분말을 절연유에 분산시키기에 가장 효과적인 분산제로 판단된다.

2. 동일한 조성의 알루미나 나노분말이라 하더라도 초기 분말의 응집 및 표면특성이 분쇄 및 표면개질 과정에 큰 영향을 미치게 되고, 이후 절연유내에서의 분산거동이 큰 차이를 보였다. 따라서 분산성이 우수한 나노절연유를 제조하기 위해서는 보다 친수성 표면특성을 띠면서 미세한 응집구조를 가지는 분말이 선정되어야 한다.

3. 1차 입자수준의 미립자가 첨가된 우수한 열전특성의 나노절연유를 제조하기 위해서는 가능한 작은 크기의 비드(bead)를 사용하면서 볼밀보다 충분한 에너지를 제공할 수 있는 강력한 회전력의 분쇄장비가 요구된다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] J. C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism", Clarendon Press, Oxford, UK, p. 435, 1881.

[2] G. Jiang, H. Zhuang, J. Zhang, M. Ruan, W. Li, F. Wu, and B. Zhang, "Morphologies and growth mechanism of aluminum nitride whiskers by SHS method-Part I, II", J. Mater. Sci., Vol. 35, p. 57, 2000.

[3] D. S. Ginger and N. C. Greenham, "Charge injection and transport in films of CdSe nanocrystals", J. Appl. Phys., Vol. 87, p. 1361, 2000.

[4] S. V. Kershaw, M. T. Harrison, A. L. Rogach, and A. Kornowski, "Development of IR-emmiting colloidal II-VI quantum-dot materials", IEEE J. Selected Topics in QE, Vol. 6, No. 3, p. 534, 2000.

[5] S. U. S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, p. 99, 1995.

[6] S. Lee and S. U. S. Choi, "Application of metallic nanoparticles suspensions in advanced cooling systems", Recent Advances in Solid/Structures and Application of Metallic Materials, ASME, PVP 342/MD-72, p. 227, 1996.

[7] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, G. Soyez, L. J. Thompson, and R. J. Di Melfi, "Novel thermal properties of nanostructured materials", Mater. Sci. Forum, Vol. 312, p. 629, 1999.

[8] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids", Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 21, p. 58, 2000.

[9] S. K. Das, N. Putra, and W. Roetzel, "Pool boiling characteristics of nano-fluids", Int.

J. Heat Mass Trans., Vol. 46, p. 851, 2003.

[10] H. Zhu, U. Lin, and Y. Yin, "A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids", J. Coll. Int. Sci., Vol. 277, p. 100, 2004.

[11] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", ASME J. Heat Trans., Vol. 121, p. 280, 1999.

[12] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma, "Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra fine particles(dispersions of γ-Al_2O_3, SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles)", Netsu Bussei(Japan), Vol. 4, p. 227, 1993.

[13] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, p. 718, 2001.

[14] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", Exp. Heat Transfer, Vol. 11, p. 151, 1998.

[15] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, and F. Ai, "Thermal conductivity of suspension containing SiC particles", J. Mater. Sci. Lett., Vol. 21, p. 193, 2002.

[16] 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.

[17] Y. Xuan and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", J. Heat Trans., Vol. 125, p. 151, 2003.

[18] H. Kumar, H. E. Patel, V. R. Rajeev Kumar, T. Pradeep, and S. K. Das, "Model for heat conduction in nanofluids", Phys. Rev. Lett., Vol. 93, No. 14, p. 144301-1, 2004.