

나노층상실리케이트 에폭시-나노복합재료 열전도 특성연구

박재준, 조희수, 박용범
 중부대학교 전기전자공학과

Thermal Conductivity Characteristics of Epoxy-Nanocomposites for Several Types Nano Layered Silicate

Jae-Jun Park, Hee-Su Cho, Young-Bum Park
 Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University

Abstract - 에폭시-층상실리케이트 나노복합재료의 여러 가지 특성인 전기적, 기계적, 구조적 특성에 대해서 많은 연구가 진행되었고, 그에 대한 특성향상을 가져왔다. 그러나 절연성능에 대한 평가는 우수하지만 열적특성 중 열전도에 대한 영향은 그리 부족한 상태였다. 열적특성은 열적열화의 원인이 되어 신뢰성에 크게 영향을 준다. 여러종류Organoclay(10A,15A,20A,30B,93A)의 에폭시-층상실리케이트 나노복합재료 Tg 분석결과 10A의 경우 우수한 열적특성을 나타내었다. DMA 점탄성 및 기계적 손실측정에서도 10A의 경우 고온부(140℃) 탄성계수 및 기계적손실 피크가 가장작고, 고온으로 이동되어 발생된 경우로 열적 특성이 우수함을 알 수 있었다. 열전도 측정결과 강력초음파를 적용한 경우와 미적용의 경우 열전도측정으로 볼 때 전반적으로 초음파 적용 경우 열전도향상이 크게 증가된 결과를 얻었다. 향후 몰드 및 합침절연의 전력기기 적용시 유용한 자료로 이용이 가능하며, 더욱더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Hitachi Co. Ltd) 전기절연부분(capacitors, resistors, magnetic coils, transformers, current transformers, bushing, epoxy resin insulators, wiring parts, motor armatures and stators)의 응용에서 광범위하게 이용된 것으로 Vacuum casting 또는 Impregnation이 비교적 고온에서 HN-2200의 손실이 없기 때문에 보이드 없는 몰드제품에서 사용된 경화제를 본 연구에서 사용하였다.

본 연구에 사용된 Nanoclay는 Southern Clay Products로부터 구입된 제품으로 Cloisite®10A, 15A, 20A, 93A, 30B는 5종류를 사용하였으며, 천연의 몬토릴로나이트(montmorillonite:MMT)를 정제하여 Quaternary ammonium cations이 MMT Clay 표면에 NA+로 치환시켜 이온교환작용(Ion exchange reaction)으로 생산된 제품이다.

DGEBA / Organoclay(2MBHT:10A,이하 5가지) nanocomposites 을 균일한 혼합(Homogeneous Mixtures)위해 수지를 90℃로 예열하여 점도를 아주 낮게 하였고, Nanoclay은 100℃에서 10시간동안 내부에 존재하는 미량의 수분을 제거 후 Nanoclay Powder를 중량비 5wt%의 비율로 혼합 후, "Planetary Centrifugal Mixer"를 이용하여 1차 혼합(Mixing)과 탈포(Defoaming)과정을 12분/2000rpm, 8분/2000rpm으로 실시하여 충분히 분산과 intercalate 과 exfoliate가 되도록 교반시켰다.

고압절연물에 사용될 Nanocomposites 시편을 제작하기위해서 Epoxy Resins과 Hardener의 비율을 1:0.8로 혼합한 후 2차 교반/탈포 과정을 1차과정과 동일과정으로 다시 실시하였다. 완전히 탈포된 혼합물의 점도가 크게 떨어진 상태에서 예열된 금형(95℃)으로 혼합물을 주입하였다. 금형에 주입된 혼합물의 기포 제거를 위하여 3차 과정으로 진공 탈포를 실시하였다. 진공오븐(1 torr)에서 몰드금형내의 기포를 충분히 제거한 후 고온 오븐에서 150℃×2시간 동안1차 경화, 2차 경화 3시간동안 후경화를 하였다. 경화된 Nanocomposites는 초음파 세척 후 건조하여 다음과정의 실험을 실시하였다.

에폭시-Organoclay_10A 나노복합재료를 강력초음파 적용을 통하여 60분 동안 가진 경우를 상기과정의 교반과 탈포과정을 통하여 제작된 나노복합재료를 샘플로 사용하였다.

2.2. DSC (Differential Scanning Calorimeter : Tg)

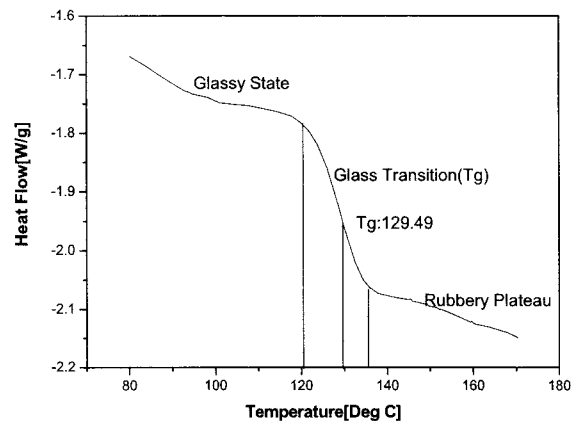


그림 1. 에폭시 원형수지의 DSC 특성

그림1은 원형 에폭시 수지의 경화거동을 보여주고 있다. 경화의 시작은 Glassy 상태에서 유리전이온도로 변화가 되는 120℃ 근방에서 시작되어 고부 안정상태(Rubbery Plateau)로 이행되어 170℃에 마지막 반응을 나타내는 그래프이다. 측정 자료에 의하면 원형에폭시수

1. 서 론

근래에 점진적으로 증가하는 전력 수요로 인한 전력망의 초고압화로 인하여 전력기기의 신뢰성 증대와 소형화 및 경량화 그리고 고성능화가 요구되고 있다. 이런 이유로 종래에 사용되는 절연재료로는 소형화 및 경량화 그리고 고신뢰성에 많은 문제를 갖고 있다. 이런 문제점 즉, 마이크로 크기의 충전제를 에폭시수지에 충전한 몰드형 절연 또는 합침절연 등으로 사용된 microcomposites는 종종 충전입자와 수지사이 계면들이 약점으로 되는 경향을 갖기에 절연에 치명적인 영향을 주는 경향이 있다. 또한 몰딩된 권선내부에서 발생된 주울 열과 같은 발생된 열에너지가 원활히 외부로 전송될 수 있다면 즉, 절연과 동시에 우수한 열전도를 갖는 나노복합재료의 개발 즉, F중 절연재료가 사용될 전력기기의 성능향상 및 신뢰성에 크게 기여할 것으로 본다.

본 연구에서는 이와같은 문제점인 절연과 열적인 성능향상을 위해, 에폭시 기반 Organoclay 나노복합재료를 전력설비 절연시스템인 고압 전동기, 발전기 고정자권선(Stator Winding) 몰드 및 합침절연재료, 권식타입 물딩변압기, CT/PT전력기기 성능을 향상시키는 데 필수불가결한 것이다. 이처럼 전력설비의 동작동안 절연은 전기적 스트레스뿐만 아니라 기계적 스트레스 즉, 발전기 고정자 권선의 경우 발전기 운전 중 발생하는 전자기력에 의한 가진 주파수인 120Hz 부근에 고유 특성이 분포되어 권선 공진의 가능성이 비교적 높게 나타나며, 이는 발전기 운전에 따른 진동에 의한 권선을 구속하고 있는 절연체들의 구속력이 감소되어 강성이 저하된 점이 주원인으로 보고하고 있다[1]. 이와 같이 절연재료에는 다중스트레스가 일어난다. 그렇지만 고분자 매트릭스 자체만으로는 이와 같은 다중로드를 견디어야 하는 어려움이 있다. 또한 전류가 이동하는 도체에 의해 발생된 열을 잘 방출시킬 수 있고 고온에 양호한 절연을 가질 수 있는 나노복합절연재료의 개발이 필요한 실정이다. 이와 같은 이유로 절연재료의 열적인 특성향상을 위해 강력초음파를 에폭시-Organoclay 나노복합재료 합침변화에 따른 열전도 특성, 강력초음파를 적용하지 않고 Centrifugal 교반과 탈포과정을 통한 여러종류 나노복합재료의 열전도를 포함한 열적 특성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 Materials and Preparation of Nanocomposites

Diglycidyl ether of bisphenol-A의 Epoxy resins (DGEBA, EPOKUKDO_Y D_128, KUKDO. Chem. co, Korea)와 산무수물계(Hardener of Acid Anhydride : HN-2200) 경화제를 사용하여 경화하였다. Epoxy Resin 특성 중 EEW(g/eq)는 184-190, Viscosity는 11,500-13,500 (cps at 25℃), Specific Gravity는 1.17 (at 20℃)의 범용적인 기본 수지를 사용하였다. HN-2200은 Cycloaliphatic Anhydride Hardener로서(분자식: C₈H₁₀O₃, MW:166,

지의 유리전이 온도는 129.49℃이다.

그림15에서는 5가지 종류 Epoxy/Organoclay 중요한 열적특성 중 하나인 유리전이온도(Tg)의 측정된 특성을 나타내고 있다. 에폭시-나노복합체의 총상실리케이트는 10A,15A,20A,93,30B 다섯 가지의 나노복합체이다. 10A의 유리전이온도는 140.7[℃], 15A에서는 138.3[℃], 20A는 137.7[℃] 그리고 93A에서는 133.2[℃], 30B는 129.3[℃]로 측정되었다. 그 중 가장 우수한 Tg값을 나타내는 나노복합체는 Organoclay_10A로서 원형에폭시수지와 비교하여 볼 때 11.2[℃] 향상된 열 특성을 갖고 있다. 그러나 나머지 나노복합체도 원형에폭시 수지에 비하여 8.8, 8.2, 3.7등 다소간의 차이는 있지만 대체적으로 향상된 Tg 값을 가지고 있다. 유리전이온도의 향상은 나노복합체의 물성뿐만 아니라 모든 재료에 물성의 변화가 시작되는 분기점이다. 유리전이온도는 화학적 구성 그리고 가교도 또는 분자상호관계에 의존하는 고분자 특성이다. 유리전이온도는 명확하게 정의하면, 에폭시 시스템에서 가교정도의 측정으로 사용되어 진다. 유리전이온도가 상온에서 존재하게 되면 고무처럼 항상 유연성을 유지하게 되며 열에 취약한 특성을 나타낸다. 그러나 고온에서 유리전이온도가 존재 하게 되면 내부적으로 고분자 주 체인들이 강한 결합을 이루고 있어 열에 대한 저항성이 우수하다는 평가를 받는다. 본 연구의 결과로서 Tg값은 X-RD의 경우에서 d-spacing의 효과와는 관계가 없게 보인다. 이와 같이 유리전이온도는 기계적 강도, DMA 특성, 유전특성, 그리고 고온에서의 전류특성에 영향을 주는 중요한 요소이다.

Tg값이 원형 epoxy에 대해서 각기 다른 이유에 대해서 아직도 명확하지 않다. 분자량[2],자유체적밀도[3],에폭시와 Organoclay사이 계면의 접착[4], 다양한 이유를 가지고 있다.

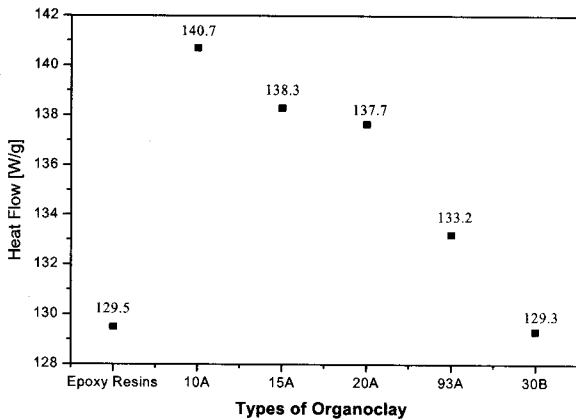


그림2. 여러종류의 에폭시-Organoclay 나노복합체의 DSC 특성

그림3에서는 여러 종류의 Epoxy/Organoclay Nanocomposites의 점탄성을 측정하여 가장 우수한 특성을 갖는 나노복합체 종류를 선정하는 것이다. 총상실리케이트 충전함량은 5wt%로 일정하게 하였다. 점탄성의 열적 의존성에서 storage modulus(E'), loss

modulus(E'') 그리고 $Tan(\Delta) = \frac{E''}{E'}$ 이 2-Point Bend인 DMA를

이용하여 측정되어졌다. 측정주파수는 120Hz의 주기적인 스트레스를 주었고, 온도범위는 30℃~190℃까지 측정하였다. 탄성계수의 측정된 결과를 보면 40℃의 상태는 유리상태로서 탄성도 높은 유리상으로 존재하게 된다. 유리전이온도 이상에서는 점성도가 높은 고무상(Rubbery Plateau)형태로 존재하게 된다. 따라서 유리전이온도 이전(40℃)에서의 경우 원형에폭시수지와 여러 종류 나노복합체를 비교하면 유리상태에서는 30B의 나노복합체가 가장 우수한 결과를 나타내었고, 고무상태인 140℃에서는 30B의 경우 원형에폭시수지에 비하여 현격하게 떨어지는 탄성계수 즉 -177[MPa]를 나타내었다. 그러나 10A의 경우 189[MPa]가 향상되는 탄성계수를 나타내었다. 또 다른 나노복합체도 50~112[MPa]가 향상되는 특성을 나타내었다. 이와같이 고온부인 고무상태에서 탄성계수는 유리전이온도에 지배적인을 알 수 있다. 10A의 유리전이온도는 140.7[℃], 15A에서는 138.3[℃], 20A는 137.7[℃] 그리고 93A에서는 133.2[℃], 30B는 129.3[℃]로 측정된 결과와 비교 검토를 하면 10A가 가장 높은 탄성계수를 30B의 경우는 유리전이온도가 원형에폭시 수지보다 낮은 측정으로 볼 때 현격한 감소를 나타내었다. 종류별 탄성계수의 편차는 크지 않았고, 유리상태의 경우는 원형에폭시와 유사한 탄성계수를 갖고 있음을 알 수 있었다. 총상실리케이트의 많은 양은 그들의 응집에 기여하여, 나노복합체 특성 향상에 장애가 된다. 또한 탄성계수의 증가는 고분자 체인의 완화 이동도는 에폭시 총상 실리케이트 계면에서 제한되는 효과로 기인된다[2]. 따라서 외부에너지 즉, 온도와

주파수에 대한 각각의 나노복합체의 탄성계수 변화에서 총상실리케이트의 10A 첨가는 원형에폭시수지에 뿐만 아니라 다른 함량의 나노복합체에 비하여 고온에서 열적, 기계적으로 우수함을 나타내는 중요한 증거가 된다.

그림2 기계적손실 특성은 온도 변화에 따른 120Hz인 주기적 스트레스를 시편에 주어질 때 발생하는 기계적 손실을 나타내고 있다. 기계적 손실 피크는 여러종류 나노복합체 중 10A가 가장 낮은 손실 값을 나타내었고, 발생하는 온도도 가장 높은 170.51℃에서 기계적 손실을 나타내었다. 손실크기의 감소는10A의 경우가 0.1246만큼 감소되었고, 피크 발생온도 역시 8.72℃높은 온도에서 발생됨을 알 수 있었다. 기계적 손실의 경우도 전반적인 나노복합체가 원형에폭시 수지에 비하여 대체로 낮은 손실 값을 보여주고 있다. 이와같이 나노복합체가 유리전이온도를 넘는 고무상태에서 기계적 손실이 작은 결과를 통하여 나노복합체가 열적, 기계적으로 우수한 절연 재료임을 입증시키고 있다.

표 1. 여러종류의 Epoxy/Organoclay Nanocomposites 온도변화에 따른 탄성계수 특성표

종류별	40℃		140℃	
	Storage Modulus	증감(MPa)	Storage Modulus	증감(MPa)
Epoxy Resins	2424	0	1795	0
Epoxy/Organoclay_10A	2438	+14	1984	+189
Epoxy/Organoclay_15A	2460	+36	1845	+50
Epoxy/Organoclay_20A	2424	0	1899	+104
Epoxy/Organoclay_93A	2407	-17	1907	+112
Epoxy/Organoclay_30B	2531	+107	1618	-177

표 2. 여러종류의 Epoxy/Organoclay Nanocomposites 온도변화에 따른 기계적 손실 특성(Tan(Delta)) 표

종류별	Tanδ Amplitude	Peak Temperature (℃)	Tg
Epoxy Resins	0.9731	161.79	155
Epoxy/Organoclay_10A	0.8485	170.51	163
Epoxy/Organoclay_15A	0.8448	168.29	159.76
Epoxy/Organoclay_20A	0.8708	168.25	159.75
Epoxy/Organoclay_93A	0.9095	160.52	155.61
Epoxy/Organoclay_30B	0.8621	164.52	158.25

고압전동기 고정자권선 절연과 건식용 몰딩변압기와 같은 전기기기 절연재료는 각각의 소전에서 발생하는 전류에 의하여 열이 발생 된다. 발생된 열이 내부에서 발생되면 절연체 내부와 외부의 온도차가 생긴다. 이런 온도차가 열의 흐름을 형성하게 된다. 이때 발생된 열의 흐름이 열류로서 열전달의 기본원리가 된다. Laser flash 기법을 이용하여 열확산(thermal diffusivity)과 비열용량(specific heat capacity)은 다음 방정식으로 샘플재료의 벌크밀도에 대한 부가적 정보 측정을 추가시켜 열전도도를 계산 할 수 있다. 방정식은 다음과 같다.

$$K = \rho \cdot C_p \cdot \dots \dots \dots (1)$$

여기서 K는 열전도도, ρ는 벌크밀도, C_p는 비 열용량이다. 측정에 사용된 샘플은 8×8×2[mm] 평판 형태로 확산을 얻을 수 있었다.

열전도 특성은 절연재료 및 도전성재료 등의 물질연구에 있어서 뿐만 아니라 고압전력설비 시 절연 설계 시 중요한 특성 중 하나이다. 열전도도가 낮으면 결국 내부 및 외부환경에서 발생된 열에너지로 인하여 열적 열화 가속 원인이 되어 진다.

표3에서는 Epoxy 매트릭스에 Organoclay_10A를 직접 함량별로 혼합하여 원심분리기법을 적용하여 분산시켜 제조된 샘플과 1차 원심분리기법으로 교반과 탈포공정을 통해 분산시켜 얻은 나노필러의 충전 함량별로 혼합된 분산 체를 강력초음파(Sonics & Materials Inc , Power:750Watt , Frequency:20kHz)에 적용하여 1시간동안 분산시켜 제조된 Nanoconposites 샘플의 열전도의 측정결과를 나타내었다. Organoclay_10A 충전 함량을 증가시킨 복합체의 열전도 결과 강력초음파의 적용 유. 무에 따라 큰 차이를 볼 수가 있었다. 전반적인 경향으로 충전함량 증가에 따라 원형수지에 비교하여 볼 때 전반적으로 증가하는 결과를 나타내었다. 초음파를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우 비교에서 충전 함량 증가에 따라 초음파 적용 시 상당히 큰 증가폭으로 열전도 향상을 가져왔으며, 온도가 증가할수록 증가 폭이 더욱 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한 전반적으로 열전도는 온도에 강한 의존성을 나타내고 있으며, 30℃와 150℃의 경우를 비교하여 볼 때 고온부 열전도 특성이 특히 양호한 결과를 나타내었다. 이에 대한 결과를 표3에 나타내었다.

이에 대한 결과를 검토 하여 볼 때

Epoxy/Organoclay_10A의 에폭시 매트릭스에 총상실리케이트의 분산으로 층간 d-spacing의 증가는 TEM, XRD를 통해서 증가되어짐

을 볼 수 있었다. 층상실리케이트가 적층형상으로 열적 박리된 경우 평균 층상실리케이트의 자유 경로와 전송로가 높게 만들어지게 되어 초음파 적용 시 열전도의 향상을 가져오는 것으로 사료되며[5], 층진 함량의 증가에 따라 열전도의 증가는 상온에서보다 고온으로 갈수록 열전도의 향상은 저온인 30°C에서 열전도가 낮게 나타난 경우를 분자의 주쇄나 측쇄의 이동이 둔화되고 고온으로 이동할수록, 열용량은 분자나 체인전동의 정도 측정으로 이루어질 수 있으며, Thomas K.-K. Yang[6], Pendent 기의 진동과 Skeletal 두 가지에 의해 결정된다 보고하고 있으며, 실내용도에서 고분자에 대해서 열용량의 독특한 역할은 분자사이 것보다 오히려 분자 내 진동에 의해 작용되기 시작하여 고분자 backbone내로 더욱 빠르게 열에너지 전송이 이루어지기 때문으로 보고하였다. 그러나 상대적으로 미량인 1wt%의 층상실리케이트를 층진 한 경우 오히려 원형수지보다 낮은 열전도를 볼 수가 있다. 또한 균질분산과 비 균질분산에서 비 균질인 경우 오히려 열전도가 저하되는 하나의 원인이 될 수가 있다. 결과적으로 볼 때 향후 열전도 향상을 위해서 근본적인 에폭시수지의 향상을 통해서 달성될 것으로 본다. [6]H. Pernot,[7] Y. Takezawa(참고문헌),[8] Keiji Fukushima(참고문헌) 에폭시수지는 만일 mesogen이 나노미터의 고도의 배열이 되면 더욱더 높은 열전도를 나타내고 있다. mesogen들은 그들 자체의 어셈블리(모임)를 통하여 고도로 배열되어지고 그리고 스캐터링(scattering)의 감소에 의하여 열적 전도도가 향상된다.

표3. Epoxy/Organoclay_10A 나노복합체의 층진 함량별 열전도 특성

열전도	Epoxy Resins	1wt%		3wt%		5wt%		9wt%		
		측정	증감 (%)	측정	증감 (%)	측정	증감 (%)	측정	증감 (%)	
30도	초음파 미적용	0.162	0.153	-5.9	0.164	1.2	0.17	4.9	0.174	7.4
	초음파 적용		0.169	4.2	0.186	14.8	0.181	11.7	0.177	9.2
70도	초음파 미적용	0.181	0.171	-5.8	0.187	3.3	0.19	4.9	0.197	8.8
	초음파 적용		0.184	1.6	0.196	6.5	0.202	11.6	0.199	9.9
110도	초음파 미적용	0.199	0.185	-7.56	0.2	0.5	0.201	1	0.203	2
	초음파 적용		0.194	-2.5	0.211	6	0.211	6	0.229	15
150도	초음파 미적용	0.21	0.208	-0.96	0.232	10.4	0.235	11.9	0.24	14
	초음파 적용		0.216	2.8	0.236	12.3	0.243	15.7	0.247	17.6

3. 결 론

초음파를 적용하여 분산시킨 Epoxy/Organoclay_10A 나노복합체의 함량별 분석결과 및 여러종류 에폭시-Organoclay 나노복합체의 열적특성에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 여러종류 에폭시-Organoclay 나노복합체의 DSC 특성

10A의 유리전이온도는 140.7[°C], 15A에서는 138.3[°C], 20A는 137.7[°C] 그리고 93A에서는 133.2[°C], 30B는 129.3[°C]로 측정되었다. 그 중 가장 우수한 Tg값을 나타내는 나노복합체는 Organoclay_10A로서 원형에폭시수지와 비교하여 볼 때 11.2[°C] 향상된 열 특성을 갖고 있다.

2. 여러종류 에폭시-Organoclay 나노복합체의 DMA 특성

Organoclay 10A가 가장 높은 탄성계수를 30B의 경우는 유리전이온도가 원형에폭시 수지보다 낮은 측정으로 볼 때 현격한 감소를 나타내었다. 종류별 탄성계수의 편차는 크지 않았고, 유리상태의 경우는 원형에폭시와 유사한 탄성계수를 갖고 있음을 알 수 있었다. 층상실리케이트의 많은 양은 그들의 응집에 기여하여, 나노복합체 특성 향상에 장애가 된다. 또한 탄성계수의 증가는 고분자 체인의 완화 이동도는 에폭시 층상 실리케이트 계면에서 제한되는 효과로 기인된다.

기계적손실 특성은 온도 변화에 따른 120Hz인 주기적 스트레스를 시편에 주어질 때 발생하는 기계적 손실을 나타내고 있다. 기계적 손실 피크는 여러종류 나노복합체 중 10A가 가장 낮은 손실 값을 나타내었고, 발생하는 온도도 가장 높은 170.51°C에서 기계적 손실을 나타내었다. 손실크기의 감소는 10A의 경우가 0.1246만큼 감소되었고, 피크 발생온도 역시 8.72°C 높은 온도에서 발

생됨을 알 수 있었다. 기계적 손실의 경우도 전반적인 나노복합체가 원형에폭시 수지에 비하여 대체로 낮은 손실 값을 보여 주었다. 이와같이 나노복합체가 유리전이온도를 넘는 고온상태에서 기계적 손실이 작은 결과를 통하여 나노복합체가 열적, 기계적으로 우수한 절연재료임을 입증시키고 있다.

3. Epoxy-Organoclay_10A 나노복합체의 강력초음파 처리와 미처리에 따른 열전도 특성연구

Laser flash 기법을 이용하여 에폭시-Organoclay 나노복합체의 강력초음파 적용 시와 미적용 시에 대한 열전도 특성을 연구한 결과 원형에폭시 수지에 비하여 강력초음파를 60분 적용한 나노복합체가 전반적인 결과에서 향상된 결과를 얻었다. 측정온도(30,70,110,150°C) 및 함량(1,3,5,7,9wt%)에 따라 열전도의 결과 온도의 증가와 함께 열전도 증가에 비례성을 갖고있고, 함량의 변화에 따라 열전도의 비례성은 발생하지 않았다. 그러나 150°C 환경하에서는 층진함량의 증가에 따라 비례하여 증가하는 결과를 얻었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발(R-2005-7-297) 연구비 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 김희수, 배용체, 이두영, 김연환, 이현, 발전기 운전애 따른 고장자 권선의 진동 특성 변화, 한국소음진동공학 회 2006년 춘계학술대회논문집
- [2] Y. Sun, Z. Zhang, K. Moon, C.P. Wong, J Appl. Polym. Sci.:Part B:Polym. Phys.42(2004)3849.
- [3] X.F. Yao, H.Y. Yeh, D. Zhou, Y.H. Zhang, J. Compos. Mater. 40(2006)371-381.
- [4] Janis M. Brown, David Curlss and Richard A.Vaia, "Thermoset-Layered Silicate Nanocomposites. Quaternary Ammonium MM T with Primary Diamine Cured Epoxies," Chem.Mater., Vol.12 ,p p3376-3384,2000
- [5] Bryan Debelak, Khalid Lafdi, "Use of exfoliated graphite filler to enhance polymer physical properties", Carbon 45 (2007) 1727-1734
- [6] Thomas K.-K. Yang, Stanley H.Y.Tsai, Sea Fue Wang, Chung-Chin Juan, "Dielectric and Thermal studies of inorganic micro fillers on polymer microwave substrate metallocene cyclo olefin copolymer (COC)", Composites Science and Technology 62(2002) 655-661
- [7] Y.Takezawa, M.Akatsuka and C. Farren, "High Thermal Conductive Epoxy Resins with Controlled High Order Structure", I EEE 7th ICPADM, pp.1146-1149, 2003.
- [8] Keiji Fukushima, Hiroyuki Takahashi, Yoshitaka Takezawa, et al, "High Thermal Conduction Resin Composites with Controlled Nanostructure for Electric Devices", IEEJ Trans. FM, Vol 126, No.11, 2006