

실리카 파우더를 이용한 에폭시 복합소재의 열적/기계적 특성

이혜련¹ · 송지혜² · 김대연¹ · 임충선¹ · 서봉국^{1†}

¹한국화학연구원 그린정밀화학연구센터, ²(주)제일화성
(2016년 2월 10일 접수, 2016년 3월 2일 수정, 2016년 3월 10일 채택)

Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Composites Using Silica Powder

Hye Ryeon Lee¹, JeeHye Song², Daeyeon Kim¹, Choong-Sun Lim¹, and BongKuk Seo^{1†}

¹R&D Center for Green Fine Chemicals, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), 45 Jonggaro, Jung-gu, Ulsan 44412, Korea

²Jeil Chemical Corporation Limited, 38-16, Hoehak 3-gil, Onsan-eup, Ulju-gun, Ulsan, 44992, Republic of Korea
(Received February 10, 2016; Revised March 2, 2016; Accepted March 10, 2016)

요약: 에폭시 수지는 취성(brittleness)으로 인한 기계적 강도의 저하가 발생하고 금속 등과 같이 열팽창 계수가 다른 재료와 결합하여 함께 사용하는 경우에 열변형 차이 때문에 부품의 박리나 부분 손상 등이 일어나는 단점이 있다. 본 연구에서는 복합재료의 기계적 강도 및 열안정성을 높이기 위하여 아민기를 가진 실란 커플링제를 이용하여 표면 처리한 실리카 입자를 에폭시 수지에 첨가하여 강화된 복합재료 시편을 제조한 에폭시 복합재료 시편을 대상으로 분산의 적절성을 확인하고 기계적 특성과 열적 물성을 평가하고자 하였다. 함량 변화에 따른 기계적 특성 변화를 UTM으로 인장강도를 측정된 결과 30-50 MPa의 인장강도 값을 보였다. 실리카 입자가 에폭시 수지 내에 함량에 따라 분산된 정도를 비교하기 위해 SEM 및 EDS 분석을 수행하였다. TMA 분석을 통하여 열팽창계수 및 유리전이온도를 확인하였으며 열충격 실험을 통하여 에폭시 복합소재의 내열안정성을 평가하였다.

Abstract: Epoxy composites with concentrations of 5-70 wt% of silica particles were prepared in order to improve mechanical property and poor thermal stability. The mechanical and thermal properties were investigated and compared to the corresponding properties of neat epoxy composite. Furthermore, the effects of silane compound treatment on silica particles were observed by the experimental results of the tensile strength, glass transition temperature, and thermal stability of epoxy composite. Tensile strength of epoxy composites was measured by universal testing machine (UTM) and after that, the structure and morphology analysis of epoxy nanocomposites were analyzed by field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The increased solid content of CA0030 particle improved the tensile strength of epoxy/modified composites to give 30-50 MPa. The thermal expansion coefficients (CTE) of neat epoxy resin and epoxy/silica composites measured with a thermomechanical analyzer (TMA) showed that the incorporation of silica particles was helpful to reduce the CTE of neat epoxy resin.

Keywords: epoxy composites, surface modified silica, mechanical property, coefficient of thermal expansion, thermal shock test

1. 서 론

에폭시 수지는 1940년대에 상업적으로 생산되기 시작한 이래로 우수한 기계적 물성, 전기절연 특성, 내열성, 접착성 등으로 인하여 코팅제, 접착제, 전기나 전자부품 재료, 복합재료 등의 다양한 용도로 많이 소비되고 있는 매우 중요한 공업용 소재이다[1]. 에폭

시 수지는 열경화성 수지로서 사용 목적에 따라 다양한 경화제를 첨가하여 경화시킨 후 사용하는데, 저렴한 가격 및 경화제에 따른 경화속도 제어의 용이성, 내열성 및 경도 등이 우수하다는 장점이 있지만 높은 가교 밀도로 인하여 분자 구조가 강직해져서 취성(brittleness)이 증가하여 외부의 충격에 의해 쉽게 깨지는 단점을 가지고 있다[1-3]. 그렇기 때문에 에폭시 복합재료를 금속 등과 같이 열팽창 계수가 다른 재료와 결합하여 함께 사용하는 경우에 열변형 차이 때문에 부품의 박리나

[†]Corresponding author: BongKuk Seo (bksea@kRICT.re.kr)

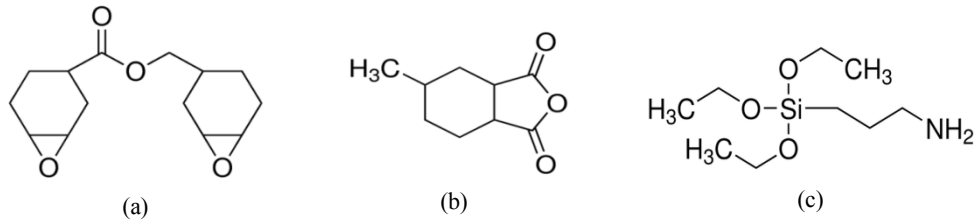


Figure 1. Chemical formula of: (a) C-2021P, (b) hardener and (c) silane coupling agent.

부분 손상 등이 일어날 수 있다. 이러한 이유로 에폭시 복합재료의 내충격성 및 열안정성을 개선하기 위한 다수의 연구가 진행되고 있다. 에폭시 수지에 보다 유연한 물성의 고무, PMMA계(Polymethylmethacrylate) 코어-셸(core-shell), CTBN (carboxyl terminated acrylonitrile butadiene)과 같은 탄성체를 도입하거나[2], 나노클레이(Montmorillonite, MMT)[4], 탄소나노튜브(Carbon Nano Tube, CNT)[5-7], HNT (Halloysite Nano Tube) [8,9], Carbon[10], SiO₂[11-13] 등과 같은 무기 충전제를 첨가하여 나노 복합재료를 제조함으로써 유동성 개선 및 충격 보강 효과를 높이는 연구 등이 많이 수행되고 있다.

이러한 에폭시/무기 입자 시스템에 있어 강화 성분인 무기입자의 분산도는 최종적인 복합재료가 가지는 물성에 중요한 역할을 하며, 분산도가 좋지 못할 경우 유기상과 무기상 간의 불안정한 계면으로 인하여 물성 저하가 유발되고 아울러 분산상의 응집현상으로 훨씬 과량의 강화제가 필요하게 되어 점도 및 밀도 상승 등의 불리한 현상이 나타난다. 이를 극복하기 위해서는 무기입자 표면을 고분자와 상호작용을 하도록 하여야 하는데, 그 대표적인 방법이 실란 커플링제를 이용한 무기입자 표면의 개질이다[11-14].

본 연구에서는 복합재료의 기계적 강도 및 열안정성을 높이기 위하여 아민기를 가진 실란 커플링제를 이용하여 표면 처리한 실리카 입자를 에폭시 수지에 첨가하여 강화된 복합재료 시편을 제작하였다. 실리카 계열은 화학적으로 안정하며, 내식성, 내열성 등이 우수하기 때문에 고분자 매트릭스에 무기 입자로 참가하여 코팅제, 접착제 등 많은 분야에서 복합 소재로 연구가 활발히 진행이 되고 있다. 그러나 실리카는 친수성으로 에폭시 수지의 점도 조절제로 사용되어 왔지만 표면에 silanol기를 가지고 있어 수소 결합으로 인한 실리카 간의 응집으로 인해 분산 및 물성이 저하되는 문제점이 있다. 무기 입자의 응집을 막고 에폭시 수지와와의 친화력을 향상시키기 위하여 실란 커플링제로 실리카의 표면을 유기화시킨 후 제조한 에폭시 복합재료 시편을 대상으로 분산의 적절성을 확인하고 기계적 특성과 열적 물성을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

Figure 1은 본 실험에서 사용한 에폭시 주재, 경화제 및 실란 커플링제의 구조식을 나타내었다. 비스페놀 A 에폭시 수지는 점도 범위가 11,00-12,00 cps, 비스페놀 F 에폭시 수지는 2,500-4,500 cps로 점도가 높아 충전제의 함량을 높이기 어려워 점도 범위가 100-600 cps인 Celloxide 2021P (Daicel Chemical Industries Ltd., Japan)를 선정하였고, 경화제는 methyl hexahydrophthalic anhydride (MHHPA, Polynt, China)로 정제 없이 사용하였다. 실리카 입자의 표면개질을 위한 실란 커플링제는 (3-Aminopropyl)-triethoxysilane (APTES, Sigma-Aldrich Co., USA)을 사용하였다. (주)시벨코리아에서 제공받은 CA0030, CA0140, CA0170N 세 가지 실리카 입자를 무기 충전제로 사용하였다. 입자의 크기는 3-20 μm이며 CA0030의 크기가 가장 작고, CA0170N의 크기가 가장 크다.

2.2. 실리카 표면처리

실리카 입자와 에폭시 수지 간의 친화성을 향상시키기 위하여 실리카 입자의 표면을 아민기를 갖는 APTES로 처리하였다. 충전제를 실란 커플링제로 처리하기 위해 실란 커플링제를 용매에 희석시킨 후 충전제에 결합시키는 습식법을 사용하였다. 1000 mL 반응조에 실리카 파우더 50 g과 메탄올 400 g을 넣고 50°C에서 300 rpm으로 교반시킨다. 메탄올 50 g에 실란 커플링제를 혼합하고 pH 4를 맞추기 위하여 HCl을 넣은 후, 이 혼합 용액을 dropping funnel에 넣고 1 h 동안 dropping하여 3 h 동안 반응시킨다. 반응이 종료되면 미반응된 실란 커플링제를 제거하기 위하여 메탄올로 여러 번 정제 하고, 감압 여과하여 130°C에서 24 h 동안 건조시켰다[15].

2.3. 에폭시 복합소재 제조

에폭시 조성물의 제조는 상·하부가 분리되는 반응조 내에서 이루어졌다. 1차 교반을 위해 500 mL 반응조에 액상 형태인 에폭시 주재와 경화제를 1 : 1 에폭

Table 1. Temperature and Time Condition for Thermal Shock Test

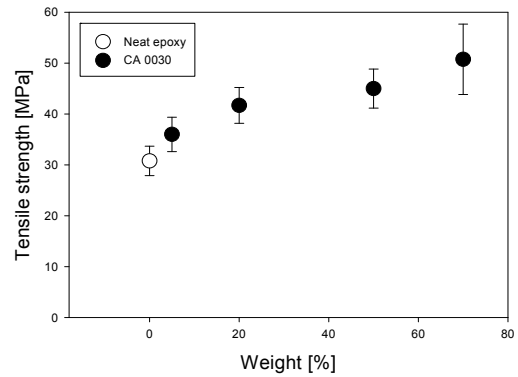
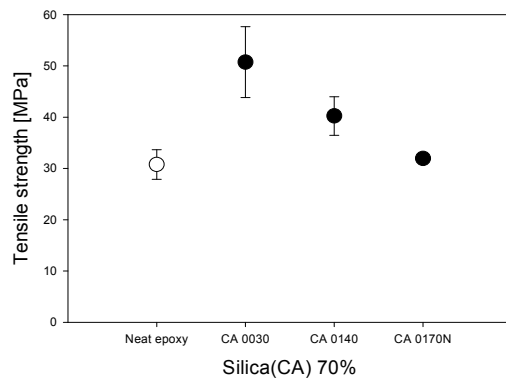
Cycle No.	Temperature/Time	Repeat time
1	105°C 30 min → -10°C 30 min	3
2	105°C 30 min → -20°C 30 min	3
3	105°C 30 min → -30°C 30 min	3
4	105°C 30 min → -40°C 30 min	3
5	105°C 30 min → -55°C 30 min	3
6	130°C 30 min → -55°C 30 min	3
7	150°C 30 min → -55°C 30 min	3

시 당량비로 혼합한 후, 촉매를 첨가하여 상온에서 1400 rpm으로 5 min간 교반하였다. 이어서 고상인 무기입자를 중량비로 75%까지 첨가한 후 동일한 조건으로 30 min간 충분히 2차 교반을 진행한 후에 진공에서 1 h 이상 기포를 제거하였다. 기포를 완전히 제거한 후, 120°C에서 예열된 금형 몰드에 에폭시 조성물을 주입하고 1차 경화를 120°C에서 1 h, 2차 경화를 150°C에서 3 h 행하여 에폭시 복합소재를 제조하였다. 여기서 실리카 나노입자는 CA 실리카와 APTES로 표면처리한 CA 실리카를 사용하여 이들이 도입된 에폭시 수지의 물성을 상호 비교하였다.

2.4. 측정 및 특성 분석

에폭시 복합 소재의 인장강도는 만능 재료 시험기 (universal testing machine, UTM, UTM 5982, INSTRON)를 사용하여 ASTM D 638 규격에 따라 제조한 시편을 이용하여 측정하였다. 시험 속도는 분당 5 mm/min으로 인장 실험을 진행하였고, 한 조건당 5개의 시편을 측정하여 평균값으로 사용하였다. 제조된 에폭시 복합소재의 분산성을 관찰하기 위하여 인장 실험 후 절단된 시편의 파단면은 Field emission scanning electron microscope (FE-SEM, TESCAN, MIRA 3) 분석 및 energy dispersive spectroscopy (EDS, Thermo Scientific, USA) 분석을 행하였다.

재료의 열팽창 거동에 미치는 실리카 입자 크기의 영향을 평가하기 위하여 열기계분석기(Thermomechanical analyzer, TMA, Q400, TA Instruments, USA)를 이용하여 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion, CTE) 및 유리전이온도(Glass transition temperature, T_g)를 측정하였다. 시험편은 시편 연마기를 이용하여 5 mm × 5 mm × 3 mm (길이 × 폭 × 두께)의 크기로 제조하였고, 측정 온도 범위는 공기 분위기 하에서 10 °C/min으로 300°C까지 승온시켜 측정하였다. 에폭시 복합소재의 열충격성을 확인하기 위하여 JIS C-2105/IEC 60455-2 법에 의하여 열충격 시험을 진행하였다. 에폭시 복합

**Figure 2.** Tensile strength of epoxy/silica composites with CA0030 as a function of silica content.**Figure 3.** Tensile strength of epoxy/silica composites at 70 wt% of silica content with different silica.

재료를 원형 틀에 JISB12512 12S 규격의 스프링 와셔와 같이 넣은 후 경화 시켜 시편을 준비한 후 이를 Table 1에 표시한 것과 같이 열충격을 반복하여 그 결과를 확인하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 무기 첨가에 따른 기계적 물성 변화

에폭시 복합소재에서 무기 입자의 함량에 따른 특성 평가를 확인하기 위하여 실리카 함유량을 5, 20, 50, 70%로 증가시켜 연구를 진행하였다. 입자 크기가 가장 작은 CA0030를 표면처리하지 않고 에폭시와 배합하여 제조한 복합소재의 기계적 물성인 인장강도의 변화를 Figure 2에 나타내었다. CA0030 실리카 입자의 비율이 증가함에 따라 인장강도가 증가하는 것을 확인하였다.

에폭시 주재 대비 70%의 중량비로 CA0140, CA0170N을 혼합하여 복합소재를 제조한 후 인장강도를 측정하여 그 결과를 Figure 3에 나타내었다. 입자의 크기가 가장 작은 CA 0030이 가장 높게 나왔으며, 입자가 커질수록 기계적 물성이 저하됨을 알 수 있다. 에폭시

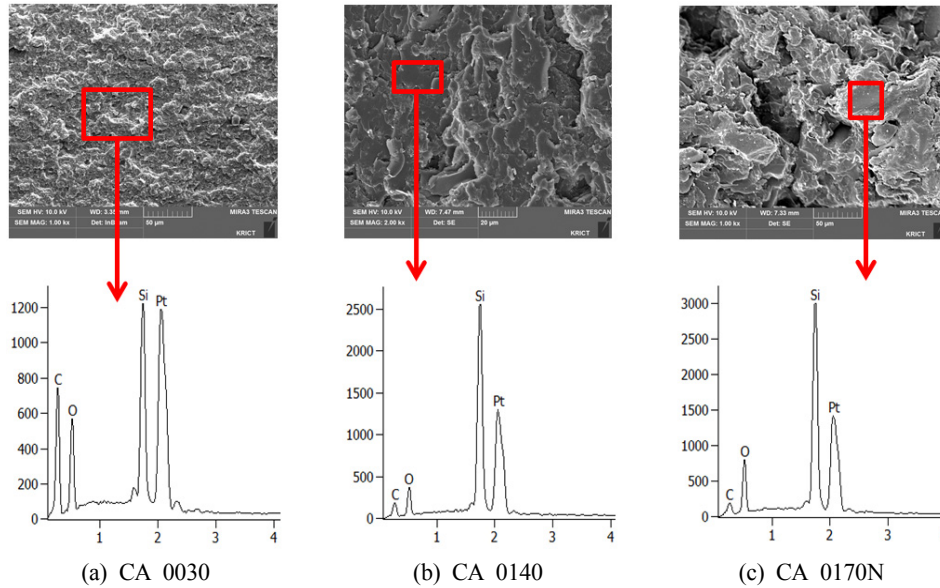


Figure 4. SEM images and EDS analysis of fractured epoxy composite with different silica : (a) CA0030, (b) CA0140, and (c) CA0170N.

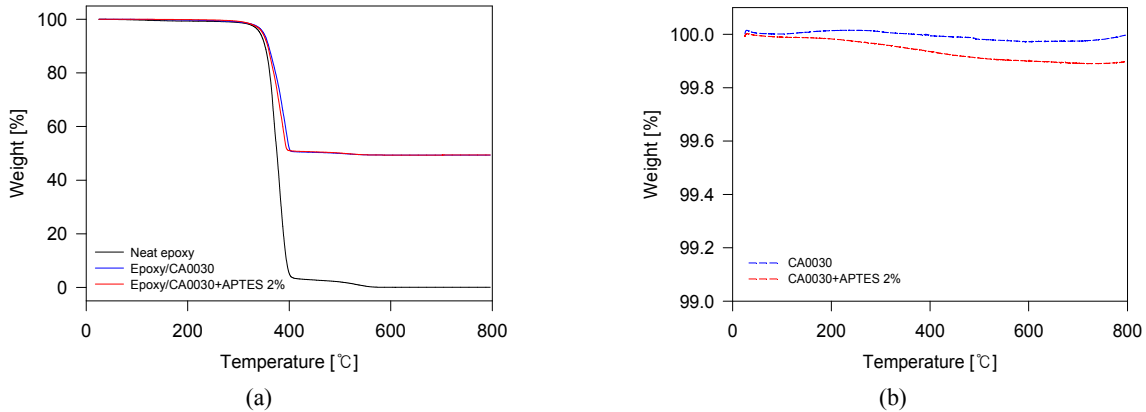


Figure 5. TGA thermograms of (a) neat epoxy and epoxy composite with two type of silica and (b) silica and APTES treated silica.

매트릭스 내의 입자의 분산성을 확인하기 위하여 인장강도 측정 후 파단면의 SEM 및 EDS로 분석한 결과를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4의 SEM 사진에서 보면, 입자의 크기가 커질수록 분산 상태가 좋지 못해 응집된 형태로 존재함을 볼 수 있는데 이로 인하여 기계적 물성도 저하된 것으로 사료된다. SEM 이미지에 표시된 부분을 EDS로 분석한 결과, C, O, Si로 구성되어 있으며, CA0030을 제외하고 Si의 피크가 C 피크보다 크게 나온 것으로 보아 무기 입자가 매트릭스에 분산되지 못하고 뭉쳐져 이로 인하여 기계적 강도를 저하시켰음을 알 수 있다. 그러나 입자 크기가 비교적 작은 CA0030은 상대적으로 덜 응집하였기 때문에 가장 좋은 기계적 특성을 보였다.

3.2. 표면처리 된 실리카를 이용한 에폭시 복합소재

Figure 5에 neat epoxy, epoxy/CA0030_70%, epoxy/CA0030+APTES2%_70%, CA0030, CA0030+APTES 2%를 TGA thermogram을 나타내었다. Figure 5(a)는 복합재료의 열중량 변화를 나타내었고, Figure 5(b)는 에폭시 복합재료에 들어간 두 가지 실리카의 중량 감소를 나타낸 것이다. 실험방법은 앞서 설명한 바와 같은 조건으로 공기 중에서 800°C까지 승온하여 실험을 진행하였다. Figure 5(a)에서 나타난 바와 같이 무기 입자가 첨가되지 않은 neat epoxy의 경우는 약 300°C부근에서 열분해가 시작이 되어 350°C 근처에서는 급격한 열중량 감소를 보였고 거의 100%가 분해되었다. 실리카를 도입한 에폭시 소재는 무기 입자에 의하여 열안

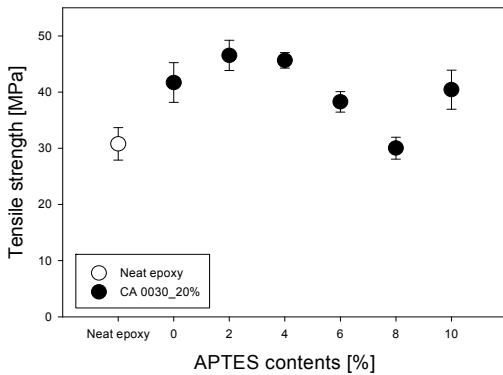


Figure 6. Effect of coupling agent contents on the tensile strength of epoxy/silica composite.

정성이 향상이 되어 무기 입자 70%가 첨가된 복합소재의 경우에는 300°C보다 조금 높은 온도에서 유기물질이 분해가 되었다고 보인다. APTES를 이용하여 표면 처리한 복합소재와 CA 단독으로 제조한 복합재료의 열중량 감소 값은 Figure 5(a)에서는 거의 유사하였다. 복합소재에는 에폭시 이외에 경화제, 촉매가 첨가되기 때문에 이러한 유기물질들이 분해되어 50% 이하의 무기 물질만 남게 된다. Figure 5(b)에서는 에폭시 복합재료에 사용한 CA0030, CA0030+APTES 2%의 중량 감소 값을 자세하게 확인할 수 있다. APTES 유기성분이 열분해가 되었기에 APTES 2%로 표면 처리한 CA0030이 미처리 CA0030보다 열중량 감소 값이 크다고 볼 수 있다.

실란 커플링제의 적절한 비율을 알아보기 위하여 APTES의 양을 변화시켜 개질한 CA0030를 에폭시에 첨가하여 복합소재 시편을 제조한 후 인장강도를 측정하였다. Figure 6에서 보는 바와 같이 APTES의 함량이 2%일 때까지는 커플링제를 사용하지 않을 경우보다 인장강도가 증가하였다. 그러나 4% 이상에서는 오히려 인장강도가 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 커플링제가 실리카 입자와 상호반응에 의해 반응한 나머지 미반응물이 에폭시 수지 조성물에서 불순물처럼 작용하여 전체 에폭시 경화물의 인장 강도를 낮추고 있는 것으로 판단된다.

APTES의 함량이 2%일 때가 가장 우수한 기계적 물성을 나타냈기 때문에 입자 크기가 다른 실리카들 또한 APTES 2%로 표면 처리하였다. Figure 7에서 보는 바와 같이 APTES 2%로 표면 처리한 CA 실리카를 이용하여 제조한 에폭시 복합재료의 인장강도 실험 결과, CA0030과 CA0140의 경우에는 인장강도 값은 거의 변화가 없으나 CA0170N의 경우에는 표면 처리하지 않은 경우는 neat epoxy의 인장강도와 거의 비슷한 값을 보였으나 APTES로 표면 처리한 경우 인장강도가 52.6 MPa로 인장강도 값이 Figure 3에서 31.9

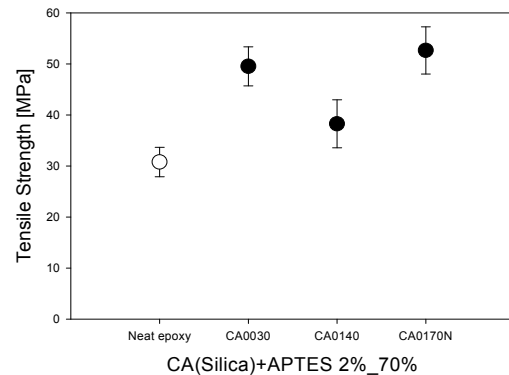


Figure 7. Tensile strength of epoxy composite with modified silica by silane coupling agent.

MPa보다 크게 증가하였음을 알 수 있다.

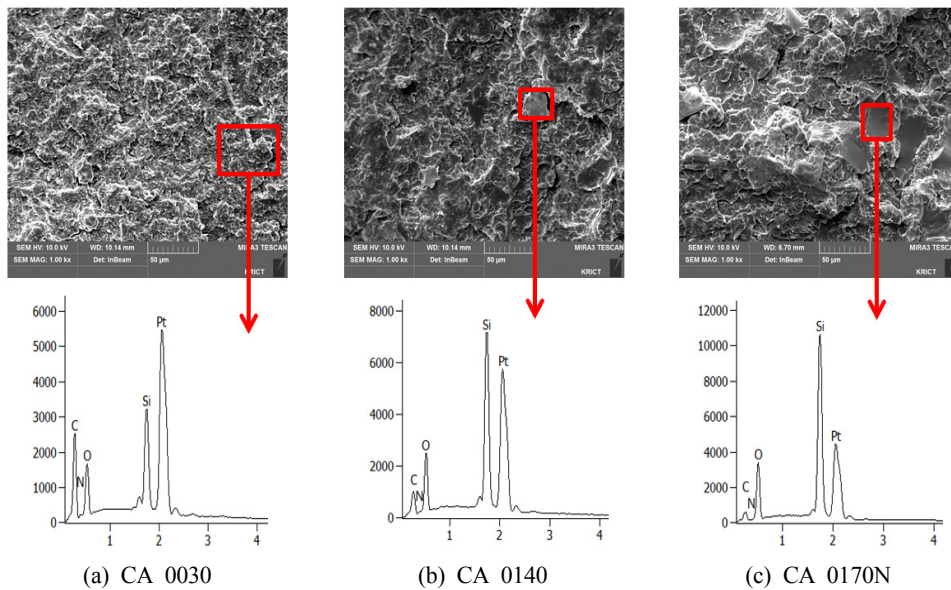
표면개질된 실리카를 이용하여 에폭시 복합소재를 제조하여 Figure 8에 SEM 이미지를 나타내었다. 표면개질을 하지 않았을 경우보다 확실히 응집 현상이 비교적 덜 나타남을 확인하였다. Figure 8의 SEM 이미지에 표시된 부분을 EDS 분석해본 결과, Figure 4에서와 마찬가지로 모두 C, O, Si 피크가 나타났다. 그러나 추가적으로 N 피크가 분석된 것으로 보아 아민기를 함유한 APTES가 실리카 입자와 결합하고 있음을 보여준다. N 피크의 양이 적게 나타난 이유는 APTES가 2%이기 때문으로 사료된다. Figure 4과 Figure 8의 SEM 분석 결과와 비교할 때, 표면 처리한 실리카를 이용하는 경우 무기 입자가 에폭시 매트릭스에 잘 분산되었고 그에 따라 인장강도가 증가하는 결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

3.3. 무기 첨가에 따른 열적 물성 변화

CA0030, CA0140, CA0170N의 열적 특성을 비교하기 위하여 CA 중량비 70%로 제조한 에폭시 복합소재의 TMA 분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 열팽창계수(CTE)는 유리전이온도(T_g)를 기준으로 두 개의 CTE 값을 가지며 T_g 이후 CTE 값이 크게 증가하므로 에폭시 복합수지의 급격한 길이 변형을 확인할 수 있다. 이는 고분자의 가교 결합이 T_g 를 기준으로 변화하였음을 나타내며, T_g 이후 고분자의 가교 결합이 느슨해지는 것을 의미한다. T_g 는 CA0030, CA0140, CA0170N 순으로 157.57, 167.33, 168.64°C로 나타났다. Neat epoxy는 T_g 가 약 220°C이었고, silica를 70% 포함하는 경우에는 150-170°C 사이에서 T_g 값을 보였다. 실리카의 첨가로 인해 에폭시 수지의 free volume이 커져 에폭시 고분자 사슬의 유동성을 커지게 하여 T_g 를 감소시키기 때문이다[13]. CTE는 모두 neat epoxy보다 낮은 값을 보였다. Neat epoxy의 T_g 이하에서의 CTE 값은 82 ppm이며, 무기 입자가 70% 포함된 에폭시 복합소

Table 2. Comparison of Thermal Expansion Coefficient and Glass Transition Temperature for Neat Epoxy and Epoxy/Silica Composite

		CTE ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)			T_g ($^\circ\text{C}$)
		α_1	α_2	α_2/α_1	
Neat epoxy		82.23	170.5	2.07	221.06
CA0030_70%	No treatment	61.93	157.2	2.54	157.57
	APTES 2%	68.98	111.0	1.61	153.31
CA0140_70%	No treatment	32.42	105.3	3.25	167.33
	APTES 2%	46.62	72.5	1.56	160.36
CA0170_70%	No treatment	36.91	97.71	2.65	168.64
	APTES 2%	44.19	104.0	2.35	154.04

**Figure 8.** SEM images and EDS analysis of fractured epoxy composite with modified silica by APTES: (a) CA0030, (b) CA0140, and (c) CA0170N.

제는 82 ppm보다는 작은 값을 나타내었는데 특히 CA0140_70% 중량비로 제조한 복합소재는 32 ppm이었다. 실리카는 에폭시 수지에 비해 약 1/100 수준인 매우 낮은 열팽창계수를 가지고 있기 때문에 실리카의 함유량이 증가함에 따라 복합재료 시편의 열안정성은 개선되어 열팽창계수가 감소하는 것이다[16]. 무기 입자를 에폭시 매트릭스에 분산시키는 경우, 실리카 입자 표면을 APTES로 처리하면 분산 효과를 높일 수 있고, 이로 인하여 인장강도를 증가시킬 수 있다. 그러나 표면 처리하는 경우, APTES의 유기 성분에 의하여 열특성은 다소 감소하는 경우도 발생한다.

Figure 9에 neat epoxy와 epoxy/silica 복합소재의 열충격 시험 결과를 나타내었다. Figure 9(a)는 열충격

시험 전의 시편으로 neat epoxy 시편의 경우 스프링 와셔가 들어간 상태에서 스프링 와셔를 중심으로 크랙이 보였으나 무기 입자가 다량으로 포함된 시편들은 열충격 시험 전에는 크랙이 발생하지 않았다. JIS C-2105/IEC 60455-2 법에 의하여 열충격 시험을 진행한 후의 시편의 이미지를 Figure 9(b)에 나타내었다. Neat epoxy는 열충격 시험 후 크랙 발생 후 좀 더 진행된 형태를 보였으나 나머지 무기 입자가 포함된 에폭시 복합소재는 표면에 변화가 없음을 알 수 있다. 그러므로 무기 입자가 포함된 에폭시 복합소재는 neat epoxy보다 낮은 열팽창계수를 보이며 이로 인하여 내열충격성이 향상이 되었음을 확인하였다.

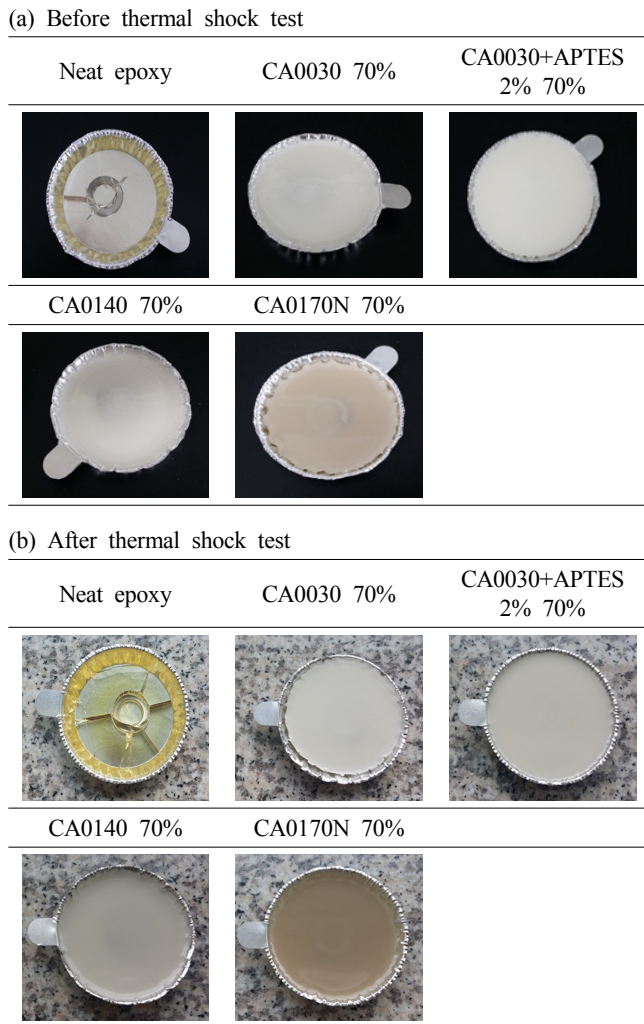


Figure 9. Comparison of neat epoxy and epoxy/silica composite (a) before and (b) after exposure to thermal shock test.

4. 결 론

본 연구에서는 에폭시 수지와 실리카 간의 상용성 향상을 위해 무기 실리카(CA0030, CA0140, CA0170N) 입자의 표면을 APTES로 개질 처리하는 실험을 수행하였으며, 실리카가 에폭시 복합소재의 기계적, 열적 물성에 미치는 효과에 대하여 알아보기 위해 에폭시 복합소재를 제조하고 분석을 실시하였다. CA0030 무기 실리카를 5에서 70% 넣었을 때 인장강도가 35.9에서 50.7 MPa까지 큰 폭으로 증가하여 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 입자의 크기가 큰 무기 실리카의 경우, 고중량비의 복합소재는 실리카가 에폭시 매트릭스 내에서 분산되지 못하고 일부가 뭉침으로서 인장강도 저하를 야기시켰다. 실리카와 에폭시와의 분산성

을 향상시키기 위하여 실리카에 APTES로 아민 처리를 한 후 복합소재를 제조하였는데, APTES는 2%일 때 가장 좋은 성능을 보였으며 APTES의 양이 증가하면 점도 상승으로 오히려 물성을 저하를 보였다. 각각의 실리카에 2%의 중량비로 APTES 처리를 한 후 이를 70% 중량비로 에폭시 복합소재를 제조한 결과 CA0170N의 인장강도는 기존 31.9 MPa에서 52.6 MPa로 64.9% 향상되었으며 이는 파단면의 SEM 및 EDS 분석으로 그 결과를 확인하였다.

실리카가 첨가되지 않은 neat epoxy의 T_g 이하에서의 CTE 값은 82 ppm이며, CA0140_70% 및 CA0170_70%/에폭시 복합소재는 각각 32 ppm/°C, 36.9 ppm/°C의 낮은 열팽창계수 값을 보였다. 에폭시 복합소재의 낮은 열팽창 계수로 인하여 열충격 시험 결과 neat epoxy를 제외한 에폭시 복합소재는 내열충격성이 향상이 되었음을 확인하였다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업 육성사업으로 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

1. T. W. Yoo, J. S. Woo, J. Ji, B. M. Lee, and S. S. Kim, *Biomaterials Research*, **16**, 32 (2012).
2. D. Kim, S. Kim, Y.-I. Park, Y. C. Kim, and C.-S. Lim, *J. Adhesion and Interface.*, **16**, 101 (2015).
3. D. Kim, S. Kim, Y.-I. Park, Y. C. Kim, and C.-S. Lim, *J. Adhesion and Interface.*, **15**, 100 (2014).
4. A. Yasmin, J. J. Luo, J. L. Abot, and I. M. Daniel, *Composites Sci. Technol.*, **66**, 2415 (2006).
5. J. Zhu, S. Wei, A. Yadav, and Z. Guo, *Polymer*, **51**, 2643 (2010).
6. P. Guo, X. Chen, X. Gao, H. Song, and H. Shen, *Composites Sci. Technol.*, **67**, 3331 (2007).
7. D. Sun, C.-C. Chu, and H.-J. Sue, *Chem. Mater.*, **22**, 3773 (2010).
8. M. Liu, B. Guo, M. Du, Y. Lei, and D. Jia, *J. Polymer Res.*, **15**, 205 (2008).
9. S. Deng, J. Zhang, L. Ye, and J. Wu, *Polymer*, **49**, 5119 (2008).
10. S.-C. Shiu and J.-L. Tsai, *Composites: Part B*, **56**, 691 (2014).
11. L. Mascia, L. Prezzi, and B. Haworth, *J. Mater.*

- Sci.*, **41**, 1145 (2006).
12. W. Yu, J. Fu, X. Dong, L. Chen, H. Jia, and L. Shi, *ACS Applied Mater. And Interfaces*, **5**, 8897 (2013).
 13. D. Lee and D. Kim, *Korean Chem, Eng. Res.*, **47**, 332 (2009).
 14. D. S. Lee, S.-Y. Lee, B.-G. Min, Y. S. Seo, B. H. Lee, and S.-J. Park, *Polymer(Korea)*, **38**, 787 (2014)
 15. J.-B. Moon, *Elastomer*, **36**, 237 (2001).
 16. H. S. Jo, H. Y. Kang, and G. W. Lee, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, **39**, 129 (2015).