

피치 코팅된 유리섬유의 탄화가 에폭시 복합재료의 열전도도에 미치는 영향

범승원* · 이슬이* · 이지한* · 박상희** · 박수진*†

Carbonization of Pitch-coated Glass Fibers on Thermal Conductivity of Epoxy Composites

Seung-Won Beom*, Seul-Yi Lee*, Ji-Han Lee*, Sang Hee Park**, Soo-Jin Park*†

ABSTRACT: In this work, pitch-carbonized glass fibers were prepared for reinforcement of composites. The influence of acid functionalization of the fibers on the morphological, mechanical, and thermal properties of fiber-reinforced epoxy matrix composites was investigated. The acid functionalization of the fibers led to 10 and 150% increases in the mechanical and thermal properties, respectively, as compared to carbon fiber-reinforced composites. This can be attributed to the superior orientation of fiber structures and good interfacial interactions between fillers and epoxy matrix, resulting in enhanced degree of dispersion and formation of thermally conductive paths in the functionalized composites.

초 록: 본 연구에서는 탄소재료의 우수한 열적 특성을 이용하여 에폭시 수지의 열전도도 특성을 향상시키기 위해 Pitch 탄화유리섬유를 제조하고 산처리 기능화 방법을 수행하여 형태학적, 기계적, 및 열전도 특성을 관찰하였다. 그 결과, 산처리 기능화된 Pitch 탄화유리섬유는 에폭시 수지 내에서 분산성 및 계면결합력이 향상됨에 따라 기계적 물성 및 열전도 특성이 증가함을 확인하였다. 특히, Pitch 탄화유리섬유 복합재료 내의 Pitch 탄화유리섬유의 함량이 증가함에 따라 기계적 물성 및 열전도 특성이 증가하여, 탄소섬유 복합재료보다 기계적 물성은 10%, 열전도 특성은 150% 향상됨을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제조된 Pitch 탄화유리섬유의 우수한 구조배향성 및 계면결합력은 에폭시수지내의 분산성을 향상시키고 열전도성 경로를 형성하여 에폭시수지의 우수한 기계적 및 열전도 특성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Key Words: 에폭시(epoxy), 유리섬유(glass fibers), 탄소섬유(carbon fibers), 피치 탄화유리섬유(pitch-coated carbonized glass fibers), 열전도도(thermal conductivity)

1. 서 론

최근 전자산업의 급격한 발전으로 전자제품의 속도향상과 기능화로 인한 전력소모가 증가함에 따라 발생열을 효과적으로 방출해주는 문제가 중요하게 대두되고 있다. 전

자기기내에 발생한 열은 전자기기의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 수명을 단축시키는 문제를 야기하기 때문에 이를 해결할 수 있는 고풍열 재료의 개발이 필수적이다[1-3].

초기 방열재료는 열전도도가 낮은 열가소성 고분자를 주로 이용하였으나, 열가소성 고분자의 0.2 W/mK 이하의 낮

Received 27 June 2013, received in revised form 18 October 2013, accepted 23 October 2013

*인하대학교 화학과

*†인하대학교 화학과, Corresponding author (E-mail: sjpark@inha.ac.kr)

**GS칼텍스(주)

은 열전도도 및 고유특성상 열팽창계수와 같은 열안정성 문제가 대두됨에 따라 고분자의 열전도도를 높이기 위하여 금속이나 세라믹 필러들을 첨가하는 방법이 연구되고 있다[4]. 열전도도 향상을 위해 사용되는 필러인 Silicon(SiC), Aluminum Nitride(AIN), Boron Nitride(BN) 등은 고함량을 필요로 하기 때문에 최종적으로 기계적 물성을 약화시키는 단점이 있어 새로운 대체 필러의 연구가 다양하게 진행되고 있다[5-7].

최근 이러한 필러의 특성을 극복할 수 있는 대체재로 탄소소재들이 각광받고 있다. 탄소섬유는 크립(Creep) 저항성, 피로, 부식, 마찰, 마모특성 및 화학적 안정성이 우수하며 열전도도가 상온에서 1,100 W/mK 정도로 구리나 은과 같은 전도성 금속보다 우수하다고 알려져 있다[8,9]. 하지만, 고분자를 매트릭스로 사용하는 탄소재료에서의 열전도는 고분자 내의 포논(Phonon)의 진동현상에 의해 이루어지는데, 이때 열전도도 향상을 위해서는 매트릭스 내에서의 포논의 산란 최소화과 균일한 분산이 요구된다[4,10-12]. 이는 격자점을 중심으로 이루어지는 원자의 진동에 따른 원자간의 상호작용에 따라 나타나는 현상으로서, 열전도를 저해하는 요소로 포논-포논 산란, 경계면 산란, 고분자 매트릭스와 필러간의 계면결함에 의한 산란 등이 있다. 따라서 높은 열전도도 특성을 지니는 고분자 복합재료를 얻기 위해서는 고분자 내에서 포논의 원활한 이동 뿐만 아니라 포논의 산란을 최소화하여 열전도성 경로(Thermally Conductive Path)의 형성을 극대화하는 것이 중요한 인자로 알려져 있다[13].

따라서, 본 연구에서는 Pitch 코팅된 탄화유리섬유를 제조하고 이를 필러로서 에폭시 수지 내에서 불연속적으로 분산시켰으며, 복합재료화할 때 에폭시 매트릭스와 Pitch 코팅된 탄화유리섬유 사이의 계면에서의 분산력, 기계적 특성, 및 열전도 특성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시약 및 재료

에폭시 수지는 국도화학의 이관능성 액상수지인 Diglycidyl Ether of Bisphenol A(DGEBA, (주)국도화학: YD-128)를, 경화제로는 이미다졸 타입의 2E4MZ(2-Ethyl-4-Methyl Imidazole, Shikoku Chem. Co., Japan)를 사용하였다. 각각의 화학구조식은 Fig. 1에 나타내었다. GS칼텍스(주)에서 공급받은 Pitch계 탄소섬유와 Pitch (Petroleum), 및 유리섬유(평균직경: 7µm)는 제공받은 것을 1 mm로 자른 후 사용하였다.

Pitch 코팅을 위한 혼합용매로는 퀴놀린(Quinoline, 1-Benzopyridine, Sigma Aldrich Co., USA)을 Pitch 코팅된 탄화유리섬유의 표면기능화를 위한 시약으로는 질산(Nitric acid, Samchun Co., Korea)을 별도의 정제처리 없이 그대로 사용하였다.

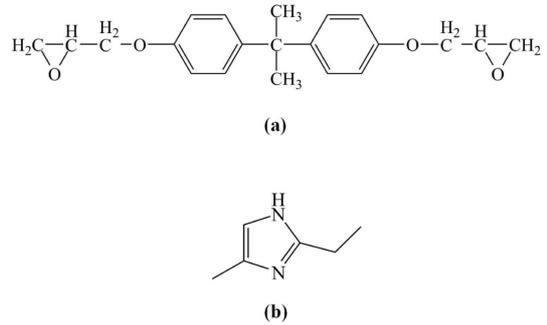


Fig. 1. Chemical structures: (a) DGEBA and (b) 2-ethyl-4 methyl imidazole

2.2 Pitch 코팅된 탄화유리섬유의 제조 및 산처리 기능화

퀴놀린과 Pitch를 10:1의 질량비로 혼합하여 상온에서 약 2 h 동안 교반하여 Pitch 코팅용액을 준비한 다음 유리섬유 표면에 균일하게 코팅한다. 그리고 Pitch용액이 균일하게 코팅된 유리섬유는 70°C의 건조오븐에서 12 h 이상 건조한 후, 불활성분위기의 튜브형 퍼니스를 사용하여 승온속도 4°C/min으로 하여, 800°C에서 5 min간 열처리하였다. 열처리 후 얻어진 Pitch 코팅된 탄화유리섬유(Pitch-coated Carbonized Glass Fibers; PCGFs)는 표면에 잔존하는 불순물을 제거하기 위하여 증류수를 이용하여 수차례 세척한 후, 80°C의 건조오븐에서 12 h 이상 건조하였다.

PCGFs의 표면기능화는 PCGFs 1 g에 60 wt.%의 질산용액 200 mL에 5 h 동안 교반시킨 후, 증류수 및 에탄올로 세척하여 잔존물을 제거하는 방법으로 이루어졌으며, 기능화된 PCGFs (aPCGFs)는 80°C의 진공오븐에서 12 h 이상 건조한 후 사용하였다. 유리섬유 및 Pitch계 탄소섬유 샘플도 같은 방법으로 산처리 기능화하여 준비하였다.

2.3 Epoxy 시편제조

본 연구에서 제조된 PCGFs와 산처리 기능화된 aPCGFs 및 산처리된 유리섬유(aGFs)와 Pitch계 탄소섬유(aCFs)를 각각 에폭시에 1 phr 첨가하여 원심혼합기(Planetary Centrifugal Mixer, ARE-310, THINKY Inc., USA)를 이용하여 에폭시 내의 잔류 유기용매 및 기포 등을 제거하였다. 에폭시 혼합물들에 경화제로는 2E4MZ를 에폭시 수지 대비 4 phr을 첨가하여 2차 교반하여 몰드에 채운 후, 상온으로 24 h 동안 가경화하였다. 이렇게 얻어진 가경화된 에폭시 혼합물들은 경화오븐에서 4°C/min의 승온속도로 120°C에서 2시간, 140°C에서 2시간 경화하여 최종적으로 시편을 제조하였다. 더불어, 제조된 aPCGFs의 1, 3, 및 5 phr 함량에 따른 aPCGFs/에폭시 시편도 동일한 방법으로 제조하였다.

2.4 분석

필러 및 에폭시 시편들의 형태학적 특성을 알아보기 위하여 PCGFs, aPCGFs, aGFs, 및 aCFs 필러 및 각각의 에폭

시 시편들의 파단면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, S-4300SE, Hitachi)을 사용하여 확인하였으며, 산처리 기능화 후의 필러들의 표면 화학적 조성변화는 X-선 광전자분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS, K-Alpha, Thermo Scientific)을 이용하여 분석하였다.

각각의 필러와 에폭시 혼합물이 경화거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimetry, DSC, DSC200, NETZSCH)를 사용하여 질소분위기 하에서 승온속도는 10°C/min, 측정범위는 30~250°C의 온도범위에서 실행하였다.

각각 제조된 에폭시 시편들의 파괴인성은 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM, LR5K, LLOYD)를 이용하였으며, 기계적 강도 측정에 널리 사용되는 삼중점 테스트(Three Point Bending Test)를 통한 기계적 물성인자를 5회 측정하였고, 최고값과 최저값을 제외한 중간값을 평균내어 사용하였다. 이때의 물성은 single edge notched bending (SENB) 시편을 ASTM D5045 규격에 준하여 노치의 깊이는 두께의 1/2, cross-head speed는 0.75 mm/min, 및 span-to-depth ratio는 4:1로 고정하여 분석하였다.

또한, 시편들의 열전도도는 열전도도 분석기(Laser Flash Diffusivity Analyzer, LFA, LFA 447, NETZSCH)를 이용한 레이저섬광법을 이용하였으며, 시편은 두께 1 mm 및 지름 10 mm로 제작하여 측정하였고, 5회 이상 측정하여 평균값을 사용하였다.

이 레이저섬광법은 현재 복합재료의 열적확산을 측정하는데 가장 널리 사용되고 있는 방법으로서 측정원리는 1961년 Parker[14]에 의해 처음 소개되었으며, 시료표면을 에너지 밀도가 균일한 Laser Flash로 가열하고, 시간에 따른 시료배면에서의 온도를 계측하여 시료두께와 열의 확산에 필요한 시간으로부터 열확산계수를 산출하는 방식이다[15]. 시료표면을 Laser Flash로 균일하게 가열하면, 시간에 따른 시편 배면에서의 온도상승을 간단하게 식 (1)로 표현할 수 있다[16].

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-n^2 \pi^2 \alpha t d^2) \quad (1)$$

여기서 α 와 d 는 열확산계수와 시편의 두께이며, ΔT 는 시간에 따른 시편배면에서의 온도상승이고, ΔT_{\max} 는 시편배면에서 온도상승의 최대치이다.

펄스가열 후 시편배면에서의 온도상승(ΔT)이 최대치 ΔT_{\max} 의 1/2에 도달했을 때의 시간을 half time($t_{1/2}$)이라 하며, 열확산계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{식 (1)에 } w = \frac{\pi^2 \alpha t}{d^2} \text{ 을 대입하면,}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-n^2 w) \quad (2)$$

식 (2)에 있어서 시편배면에서의 최대온도 상승이 최대값(ΔT_{\max})의 1/2($\Delta T/\Delta T_{\max} = 1/2$)에 도달할 때의 시간을 half time($t_{1/2}$)이라고 하면 w 는 1.37이 되고 열확산계수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1.37 d^2}{\pi^2 t_{1/2}} = \frac{0.138785 d^2}{t_{1/2}} \quad (3)$$

따라서, 열확산계수는 두께 d 와 시편배면에서의 $t_{1/2}$ 을 측정함으로써 계산할 수 있으며 이 열확산계수와 시편의 밀도, 비열을 통해서 열전도도를 구할 수 있다.

3. 결과 및 토론

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 다양한 필러들의 SEM 사진을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 유리섬유이고, Fig. 2의 (b)와 (c)는 Pitch 코팅된 유리섬유의 고온열처리(탄화) 전후를 섬유형태 및 표면 모폴로지를 나타낸 사진이며, Fig. 2(d)는 Pitch 코팅된 탄화유리섬유의 산처리 기능화한 샘플을 나타낸 것이다. 유리섬유는 7 μm 의 균일한 평균직경 및 매끄러운 표면을 가지는 반면 Pitch 코팅된 유리섬유의 경우 표면의 Pitch 코팅에 의해 직경이 상당히 증가하고 불균일한 표면을 보이는 것을 확인하였다. Pitch 코팅된 탄화유리섬유의 경우는 고온의 열처리과정을 통한 탄화가 이루어지면서 Pitch에 함유되어있는 유기물의 가수분해 및 산화반응에 의해 상대적으로 매끈한 표면을 가지며 섬유직경이 다소 감소함을 확인할 수 있었다. 더불어, aPGCFs의 경우 산처리 과정동안 구조와 표면의 붕괴없이 매끈한 표면을 유지하였음을 확인하였다.

산처리 기능화에 의해 표면에 도입된 산소관능기의 함량을 확인하기 위하여 XPS를 측정하였으며, 그 결과를 Table

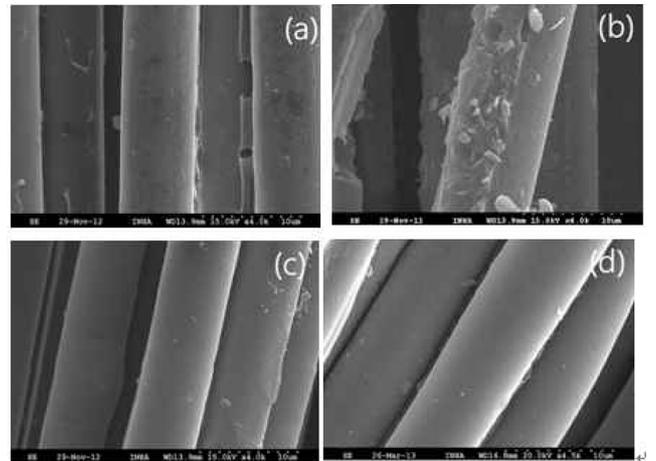


Fig. 2. SEM images of the various fillers used in this work; (a) glass fibers (GFs), (b) pitch-coated glass fibers (PGFs), (c) pitch-coated carbonized glass fibers (PCGFs), and (d) Acid-treated pitch-coated carbonized glass fibers (aPCGFs)

Table 1. Chemical compositions and O_{1s}/C_{1s} ratios obtained by XPS measurements (wt.%)

Specimens	O_{1s}	C_{1s}	O_{1s}/C_{1s}
aGFs	66.73	30.59	2.218
aCFs	21.95	76.49	0.287
PCGFs	21.94	75.65	0.290
aPCGFs	31.92	65.21	0.489

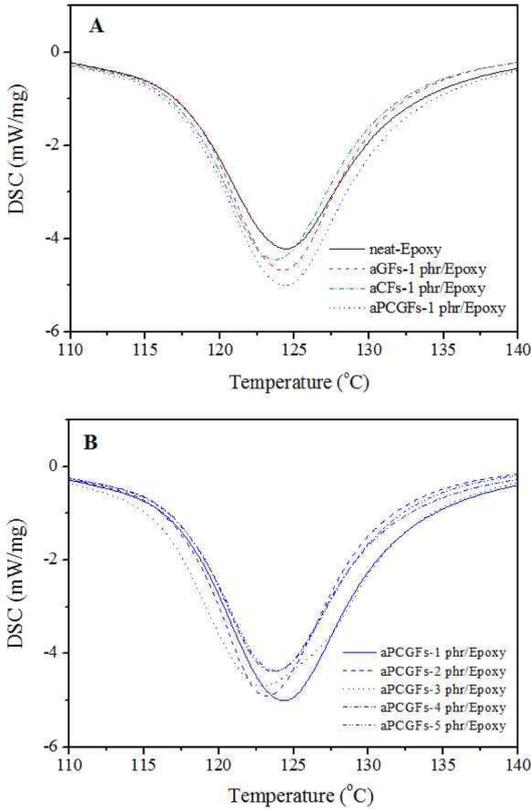


Fig. 3. DSC thermograms of (A) Epoxy composites according to the different fillers and (B) aPCGF/Epoxy composites with aPCGF amounts

1에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 화학적 표면처리 후 aPCGFs 표면의 산소함량이 미처리 PCGFs에 비하여 10 wt.% 더 향상되었음을 확인하였으며, 이러한 산소함량의 증가는 aPCGFs의 표면에 수산화기(Hydroxyl), 카르보닐기(Carbonyl), 및 카르복실기(Carboxyl) 등의 산소관능기가 표면에 도입되었음을 의미한다[17-20].

Fig. 3은 필러의 첨가 유무 및 종류에 따른 에폭시 혼합물의 경화거동에 대하여 나타낸 그래프이다. aGFs, aCFs, 및 aPCGF를 각각 1 phr을 첨가하였을 때, neat-Epoxy와 비슷한 경화거동을 보였으며, 이는 필러로 사용된 aGFs, aCFs, 및 aPCGFs는 경화거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. aPCGFs를 1~5 phr의 함량으로 첨가하여도 에폭시 혼합물의 경화가 모두 유사한 거동을 보였으며, 함량의 증가에도 경화거동에 영향을 주지 않음을 확인하였다[21,22].

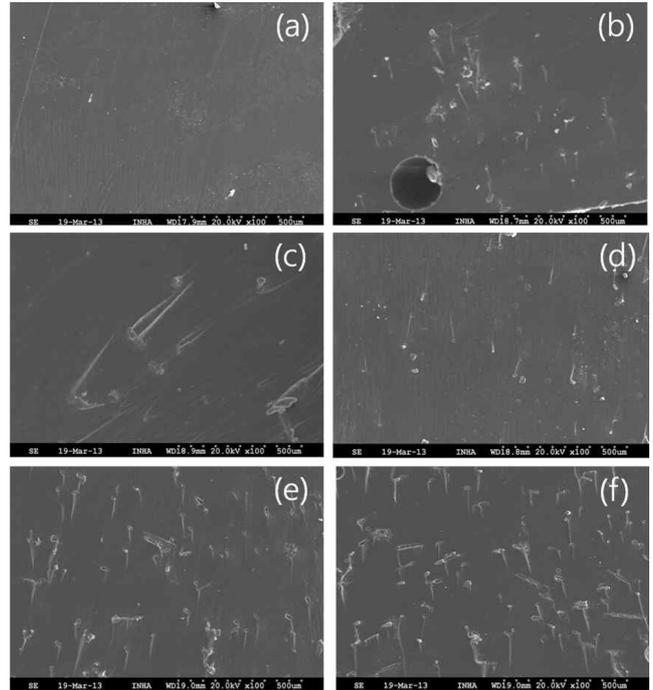


Fig. 4. SEM images of Epoxy composites according to the different fillers and their amounts in Epoxy resin; (a) neat-Epoxy, (b) aGFs-1 phr/Epoxy, (c) aCFs-1 phr/Epoxy, (d) aPCGFs-1 phr/Epoxy, (e) aPCGFs-3 phr/Epoxy, and (f) aPCGFs-5 phr/Epoxy

Fig. 4는 제조된 에폭시 시편의 다양한 필러의 종류 및 함량에 따른 에폭시 수지 내 분산성을 상세히 확인하기 위하여 주사전자현미경을 사용하여 각각 100배로 확대한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(b)는 aGFs가 1 phr 첨가된 에폭시 시편의 파단면인데 aGFs가 에폭시 내에서 다소 응집된 분포를 보이는 것을 확인하였다. 반면, aCFs(Fig. 4(c)) 및 aPCGFs (Fig. 4(d))가 각각 1 phr 첨가된 에폭시 시편은 매트릭스 내에 고르게 분산되어 있음을 확인하였고, 이는 aCFs와 aPCGFs의 산처리 기능화에 따른 표면 산성관능기 그룹의 증가로 인한 필러와 매트릭스 수지간의 계면결합력 개선에 의한 것이라고 판단된다[23,24]. 또한, Fig. 4(e)-(f)에서도 보듯이, 에폭시 수지내의 aPCGFs의 함량이 증가하여도 섬유의 응집현상이 고르게 분포되었음을 확인하였다.

제조된 에폭시 시편의 기계적 물성은 삼중점 테스트(Three Point Bending Test)를 통해 구한 값을 Fig. 5에 나타내었다. 첨가된 필러의 종류에 따른 에폭시 시편의 굴곡강도(Flexural strength)를 살펴본 결과(Fig. 5(a)), aGFs를 1 phr 첨가한 경우에는 다소 감소하였지만, aCFs 및 aPCGFs를 각각 1 phr씩 첨가한 경우는 소폭 상승하는 것을 확인하였다. 일반적으로 복합재료는 매트릭스 내에 필러를 고함량 첨가할 시 필러의 밀도증가로 인하여 기계적 물성이 감소하지만, 소량 첨가할 경우에는 필러표면의 반응성 작용기들에 의한 계면접착력 향상으로 인해 물성이 증가한다. 이는 매트릭

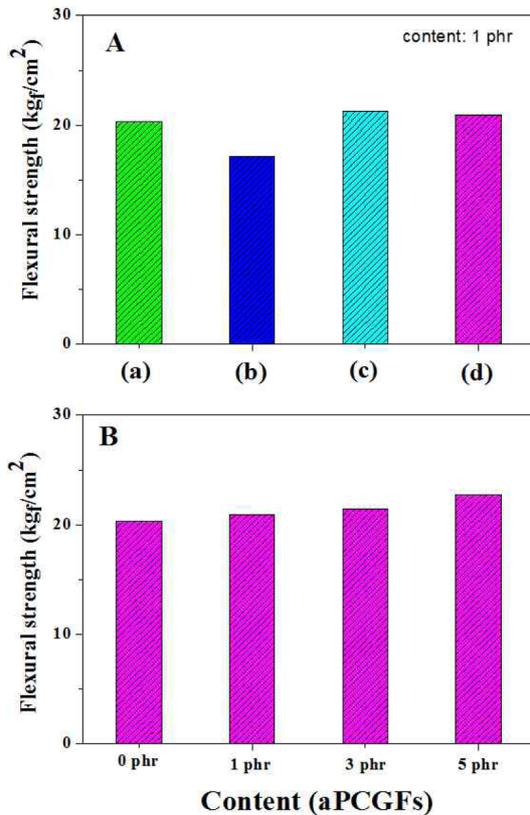


Fig. 5. Mechanical properties of (A) Epoxy composites according to the different fillers; (a) neat-Epoxy, (b) aGFs/Epoxy, (c) aCFs/Epoxy, and (d) aPCGFs/Epoxy; (B) aPCGF/Epoxy composites with aPCGFs amounts

스 내에 필러가 잘 분산되기 때문으로 사료된다[25,26]. 이 결과를 통해 본 연구에서 제조된 aPCGFs/Epoxy 시편의 기계적 물성 향상을 확인하고 이에 따라 필러 함량에 따른 굴곡강도 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. aPCGFs의 함량이 증가함에 따라 aPCGFs/Epoxy 시편의 기계적 물성이 꾸준히 증가함을 관찰할 수 있었고, 5 phr 첨가시 neat-Epoxy (20.5 kgf/cm²)에 비해 1.25배 정도 향상된 25.6 kgf/m²을 나타냄을 확인하였다.

Fig. 6은 다양한 필러를 함유한 에폭시 시편의 열전도도를 평가하기 위하여 필러를 첨가하지 않는 neat-Epoxy 시편과 aGFs, aCFs, 및 aPCGFs를 각각 1 phr 첨가한 에폭시 시편의 열전도도를 비정상법의 대표적인 측정법인 레이저섬광법(LFA)을 사용하여 측정한 결과이다. 첨가된 필러의 종류에 따른 에폭시 시편의 열전도도(Thermal Conductivity)를 관찰한 결과, neat-Epoxy 시편에 대비하여 유리섬유(aGFs)를 제외한 탄소섬유(aCFs) 및 Pitch 코팅된 탄화유리섬유(aPCGFs)의 열전도도가 각각 1.34배(0.39 W/mK) 및 1.2배(0.35 W/mK) 향상됨을 확인하였다. 이는 탄소섬유가 지니는 액정상, 비등방성, 및 배향성 특성이 매트릭스에 고르게 분산되어 열전도성 경로를 형성하는 것을 유도하여 열전

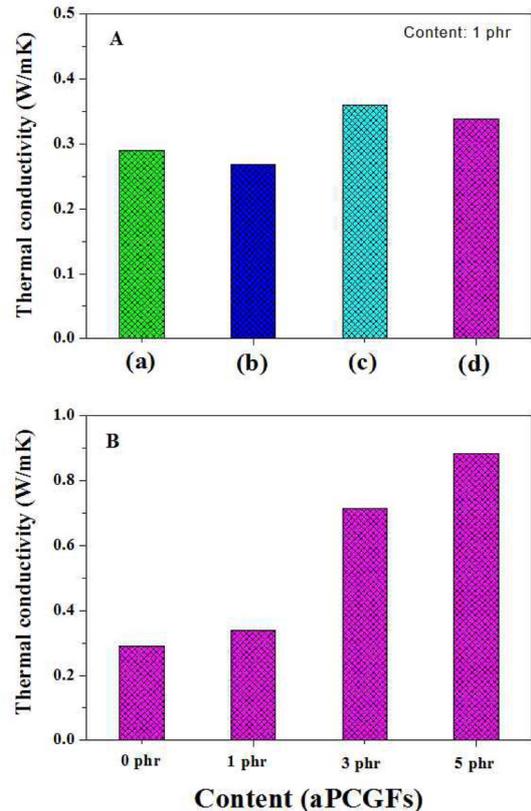


Fig. 6. Thermal conductivities of (A) Epoxy composites according to the different fillers; (a) neat-Epoxy, (b) aGFs/Epoxy, (c) aCFs/Epoxy, and (d) aPCGFs/Epoxy; (B) aPCGF/Epoxy composites with aPCGFs amounts

도도에 영향을 미치는 것으로 사료된다[27]. 더불어, 본 연구에서 제조된 aPCGFs/Epoxy 시편의 열전도도 특성은 aCF/Epoxy 시편에 비해 다소 낮은 값을 보이는데, 이는 필러로 사용된 탄소섬유의 순도가 높을수록 열전도도 값이 크게 향상되고 무정형 탄소비율이 높을수록 열전도도의 상승폭이 감소하기 때문으로 판단된다[28,29]. 하지만 Fig. 6(b)에서 보듯이, aPCGFs/Epoxy 시편의 열전도도 특성은 필러 함량이 증가함에 따라 열전도도가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 특히, 3 phr을 첨가하였을 때, 0.71 W/mK로서 neat-Epoxy 시편에 비해 2.4배, 5 phr을 첨가하였을 때 0.88 W/mK로서 3배 이상 향상되는 것을 확인하였다. 이는 Pitch 코팅된 탄화유리섬유가 매트릭스 내에 첨가될 때, 유리섬유의 로드구조에 따른 배향성이 유리섬유 표면에 탄화코팅된 Pitch 계면 상호작용에 영향을 미치고, 그에 따른 aPCGF와 에폭시 사이의 계면에 의한 포논산란이 감소하여 열전도도 특성을 향상시키는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Pitch 코팅된 탄화유리섬유(PCGFs)를 제

조하고 에폭시 매트릭스와 복합화하여 Pitch 코팅된 탄화 유리섬유의 에폭시 복합재료 내에서의 분산성, 계면결합력, 기계적 물성, 및 열전도 특성 향상에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 산처리 기능화한 aPCGFs는 표면에 도입된 산성관능기에 의해 에폭시 매트릭스 내에서의 계면결합력 향상 및 분산성을 증대시켜 aPCGFs/Epoxy 복합재료의 기계적 물성을 향상시켰다. 더불어 유리섬유의 로드구조에 따른 우수한 구조배향성 및 유리섬유 표면에 탄화코팅된 Pitch의 계면상호작용은 aPCGFs의 에폭시 복합재료 내에서의 분산성 및 계면상호작용을 향상시켜 aPCGFs가 열전도성 경로형성을 유도하여 최종적으로 에폭시 복합재료의 열전도도 향상에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 카본밸리구축사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Park, S.J., Oh, J.S., and Lee, J.R., "Effect of Anodized Carbon Fiber Surfaces on Mechanical Interfacial Properties of Carbon Fibers-reinforced Composites", *Composites Research*, Vol. 15, 2002, pp. 16-23.
- Kim, J.W., Im, H.G., and Kim, J.H., "The Effect of Surface Modification on the Dispersibilities and the Thermal Conductivities of Single-Walled Carbon Nanotube (SWCNT)/Epoxy Composites", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 22, 2011, pp. 266-271.
- Choi, W.K., Kim, B.J., Min, B.G., Bae, K.M., and Park, S.J., "Effects of Sizing Treatment of Carbon Fibers on Mechanical Interfacial Properties of Nylon6 Matrix Composites", *Elastomer*, Vol. 45, 2010, pp. 2-6.
- Lee, H.L., Ha, S.M., Yoo, Y.J., and Lee, S.G., "Current Trends in Thermally Conductive Polymer Composites", *Polymer Science and Technology*, Vol. 24, 2010, pp. 30-37.
- Zhou, T., Wang, X., Liu, X., and Xiong, D., "Improved Thermal Conductivity of Epoxy Composites using a Hybrid Multi-walled Carbon Nanotube/Micro-SiC Filler", *Carbon*, Vol. 48, 2010, pp. 1171-1176.
- Sohi, N.J.S., Bhadra, S., and Khastgir, D., "The Effect of Different Carbon Fillers on the Electrical Conductivity of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer-based Composites and the Applicability of Different Conductivity Models", *Carbon*, Vol. 49, 2011, pp. 1349-1361.
- Choi, J.R., and Park, S.J., "A Study on Thermal Conductivity and Fracture Toughness of Alumina Nanofibers and Powders-filled Epoxy Matrix Composites", *Polymer Korea*, Vol. 37, 2013, pp. 47-51.
- Zhu, S., and Chung, D.D.L., "Theory of Piezoresistivity for Strain Sensing in Carbon Fibers Reinforced Cement under Flexure", *Journal of Materials Science*, Vol. 42, 2007, pp. 6222-6233.
- Bae, K.M., Seo, M.K., and Park, S.J., "A Study on Rheological Behavior of MWCNTs/Epoxy Composites", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 16, 2010, pp. 337-339.
- Aliev, A.E., Lima, M.H., Silverman, E.M., and Baughman, R.H., "Thermal Conductivity of Multi-walled Carbon Nanotubes Sheets: Radiation Losses and Quenching of Phonon Modes", *Nanotechnology*, Vol. 21, 2010, pp. 035709-035720.
- Wang, Z.J., Kwon, D.J., Gu, G.Y., Park, J.K., Lee, W.I., and Park, J.M., "Improvement of Interfacial Adhesion of Plasma Treated Single Carbon Fiber Reinforced CNT-Phenolic Nanocomposites by Electrical Resistance Measurement and Wettability", *Journal of Adhesion and Interface*, Vol. 12, 2011, pp. 88-93.
- Seo, M.K., and Park, S.J., "Studies on Thermal and Dynamic Viscoelastic Behaviors of Multiwalled Carbon Nanotubes-reinforced Epoxy Matrix Composites", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 43, 2005, pp. 401-406.
- Hong, J.H., and Shim, S.E., "Trends in Development of Thermally Conductive Polymer Composites", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 21, 2010, pp. 115-128.
- Parker, W.J., Jenkins, R.J., Butler, C.P., and Abbot, G.L., "Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity", *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, 1961, pp. 1679-1684.
- Abdalla, M., Dean, D., Theodore, M., Fielding, J., Nyairo, E., and Price, G., "Magnetically Processed Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites: Morphology, Thermal, and Mechanical Properties", *Polymer*, Vol. 51, 2010, pp. 1614-1620.
- Cao, B.Y., Li, Y.W., Kong, J., Chen, H., Xu, Y., Yung, K.L., and Cai, A., "High Thermal Conductivity of Polyethylene Nanowire Arrays Fabricated by an Improved Nanoporous Template Wetting Technique", *Polymer*, Vol. 52, 2011, pp. 1711-1715.
- Park, S.J., and Kim, K.D., "Adsorption Behaviors of CO₂ and NH₃ on Chemically Surface-Treated Activated Carbons", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 212, 1999, pp. 186-189.
- Moon, C.W., Jung, G., Im, S.S., Nah, C.W., and Park, S.J., "Effect of Anodic Oxidation of H₂SO₄/HNO₃ Ratio for Improving Interfacial Adhesion between Carbon Fibers and Epoxy Matrix Resins", *Polymer Korea*, Vol. 37, 2013, pp. 61-65.
- Meng, L., Fan, D., Zhang, C., Jiang, Z., and Huang, Y., "The Effect of Oxidation Treatment by KClO₃/H₂SO₄ System in Intersurface Performance of Carbon Fibers", *Applied Surface Science*, Vol. 268, 2013, pp. 225-230.
- Zhang, G., Sun, S., Yang, D., Dodelet, J.P., and Sacher, E., "The Surface Analytical Characterization of Carbon Fibers Functionalized by H₂SO₄/HNO₃ Treatment", *Carbon*, Vol. 46, 2008, pp. 196-205.
- Jang, S.J., and Kim, H.S., "Performance Improvement of Glass Fiber-Poly(henylene sulfide) Composite", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 60, 1996, pp. 2297-2306.
- Heo, G.Y., and Park, S.J., "Effect of Substituted Trifluoromethyl Groups on Thermal and Mechanical Properties of Fluorine-containing Epoxy Resin", *Macromolecular Research*, Vol. 17, 2009, pp. 870-873.
- Lee, J.U., Jo, W.H., Lee, W.O., and Byun, J.H., "Preparation and

- Characterization of Water-Soluble Polyaniline/Carbon Nanotube Composites”, *Composites Research*, Vol. 24, 2011, pp. 1-6.
24. Kim H.S., “Processing-Interlaminar Shear Strength Relationship of Carbon Fiber Composites Reinforced with Carbon Nanotubes”, *Composites Research*, Vol. 24, 2011, pp. 34-38.
 25. Park, S.J., Lee, E.J., and Kwon, S.H., “Influence of Surface Treatment of Polyimide Film on Adhesion Enhancement between Polyimide and Metal Films”, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, Vol. 28, 2007, pp. 188-192.
 26. Moon, C.W., Jung, G., Im, S.S., Nah, C.W., and Park, S.J., “Effect of Anodic Oxidation of $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ Ratio for Improving Interfacial Adhesion between Carbon Fibers and Epoxy Matrix Resins”, *Polymer Korea*, Vol. 37, 2013, pp. 61-65.
 27. Young, T., Hyun, B.S., and Jang, T.S., “Study on the Thermal Radiation Performance of the Multi-functional Structure Made of the Carbon Fiber Composite Material”, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 40, 2012, pp. 157-164.
 28. Bright, A.A., and Singer, L.S., “The Electronic and Structural Characteristics of Carbon Fibers from Mesophase Pitch”, *Carbon*, Vol. 17, 1979, pp. 59-69.
 29. Yu, A., Itkis, M.E., Bekyarova, E., and Haddon, R.C., “Effect of Single-walled Carbon Nanotube Purity on the Thermal Conductivity of Carbon Nanotube-based Composites”, *Applied Physics Letters*, Vol. 89, 2006, pp. 133102-133104.