

論文

팽창흑연/탄소섬유 혼합 보강 전도성 고분자 복합재료의 특성 평가

오경석*, 허성일*, 윤진철*, 한경섭**

Study on Mechanical and Electrical Properties of Expanded Graphite/Carbon fiber hybrid Conductive Polymer Composites

Kyung-Seok Oh*, Seong-Il Heo*, Jin-Chul Yun*, Kyung-Seop Han**

ABSTRACT

Expanded graphite/carbon fiber hybrid conductive polymer composites were fabricated by the preform molding technique. The conductive fillers were mechanically mixed with a phenol resin to provide an electrical property to composites. The conductive filler loading was fixed at 60wt.% to accomplish a high electrical conductivity. Expanded graphites were excellent in forming a conductive networking by direct contacts between them while it was hard to get the high flexural strength over 40MPa with using only expanded graphite and phenol resin. In this study, carbon fibers were added in composites to compensate the weakened flexural strength. The effect of carbon fibers on the mechanical and electrical properties was examined according to the weight ratio of carbon fiber. As the carbon fiber ratio increased, the flexural strength increased until the carbon fiber ratio of 24wt.%, and then decreased afterward. The electrical conductivity gradually decreased as the increase of the carbon fiber ratio. This was attributed to the non-conducting regions generated among the carbon fibers and the reduction of the direct contact areas between expanded graphites.

초 록

본 연구에서는 팽창흑연/탄소섬유 혼합 보강 전도성 고분자 복합재료를 2단계 성형 공법으로 제조하였으며, 탄소섬유의 첨가가 전도성 고분자 복합재료의 전기적, 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 전도성 충전재들은 고분자 수지와 기계적으로 혼합되었으며 이를 통하여 복합재료가 전기적 특성을 가지도록 하였다. 팽창흑연은 입자 간 접촉 면적이 넓기 때문에 복합재료 내 전도성 네트워크의 형성에 매우 유리하지만, 팽창흑연과 고분자 수지만을 사용하여 상기 공정으로 복합재료를 제조할 경우 우수한 기계적 강도를 얻기가 어렵다. 따라서 이를 보완하기 위하여 탄소섬유를 복합재료에 첨가 하였으며 전기적 기계적 물성을 바탕으로 탄소섬유의 혼합 비율을 최적화 하였다. 굽힘 강도는 탄소섬유의 충전 비율이 증가할수록 섬유에 의한 강화 효과에 의하여 증가 하지만, 32wt.% 이상에서는 오히려 감소하였다. 이는 여분의 탄소섬유들이 공극을 발생시켜 응력집중이 발생하기 때문으로 판단된다. 전기 전도도는 탄소섬유의 비율이 증가할수록 전도성 공백이 발생하고 팽창흑연의 전도성 네트워크가 저해되기 때문에 계속 감소한다.

Key Words : 팽창흑연(Expanded Graphite), 전도성 고분자 복합재료(Conductive Polymer Composites), 전기 전도도(Electrical Conductivity), 굽힘 강도(Flexural Strength)

1. 서 론

복합재료는 유리섬유 강화 플라스틱이 처음 개발된 이후

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과(E-mail:kshan@postech.ac.kr)

현재까지 여러 기술 분야에서 주목을 받았으며, 다양한 산업 분야에 적용되어 왔다. 높은 기계적 성능을 가진 섬유와 개발과 그에 적합한 기지재의 발달로 인하여 우주 항공, 자동차 등 운송체 분야, 건물, 다리 등 기간산업 분야, 골프 용품, 보트 외판 등의 스포츠 산업 분야까지 여러 분야에서 꾸준히 응용이 이루어지고 있다. 최근에는 전자기, 열, 생체 분야 등에 적용하기 위하여 다양한 성질을 동시에 가지는 기능성 복합재료에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[1-3].

전도성 고분자 복합재료는 기능성 복합재료 중 하나로서 전기가 통하지 않는 플라스틱에 전기적 성질을 가진 다양한 충전재를 첨가하여 소재가 전기적 성질을 가지도록 하는 재료이다. 전도성 고분자 복합재료에 대한 연구는 다기능 소재로서 전자파 차폐, 서미스터, 열 및 전류 센서 등에 활용하기 위하여 오래전부터 활발히 진행되어 왔다. 기존의 연구들에서 사용된 전도성 충전재로는 흑연 입자, 탄소 섬유, 카본 블랙, 탄소나노튜브 등이 주를 이루고 있다[4]. 전도성 고분자 복합재료의 전기적 특성 연구 대상은 전도성 충전재의 충전 비율에 따라 다른 경향을 보이고 있다. 충전재의 비율 30wt.% 이하(마이크로 입자: 20~30wt.%, 나노 입자: 1~5wt.%)에서는 전기 전도도의 비선형성에 관련된 퍼콜레이션(percolation) 현상과 그에 관련된 이론적 접근에 집중되어 있다[5,6]. 충전재의 비율이 60wt.% 이상인 복합재료는 수십~수백 Scm^{-1} 에 이르는 매우 높은 전기 전도도를 나타내고 있어 높은 전기 전도도가 필요한 연료전지 분리판 등의 분야에 적용이 가능하여 많은 주목을 받고 있다. 하지만 고비율로 충전된 전도성 복합재료를 산업 분야에 적용하기 위해서는 전기적 특성뿐만 아니라 기계적 특성 역시 매우 중요하기 때문에 충전재의 비율 및 종류에 따른 복합소재의 전기적, 기계적 성능 평가 및 제조 방법이 주된 연구 대상이 되고 있다[7-9].

흑연입자를 고분자 수지에 고비율로 혼합하여 압축성형법으로 제조한 전도성 고분자 복합재료의 경우, 전도성 충전재의 비율이 높아질수록 전기 전도도는 증가하지만 기계적 강도는 증가 이후 감소한다고 알려져 있다[10]. 일반적으로 단일 입자 보강 보다는 입자와 섬유가 혼합 보강된 복합재료의 기계적 강도가 우수하다고 알려져 있기 때문에 흑연 입자와 탄소섬유가 혼합 보강된 복합재료가 연구되었지만, 기계적 강도가 향상되는 동시에 전기 전도도가 저하된다는 결과가 보고되었다[11,12]. 이와 같이 전기 전도도와 기계적 강도가 모두 우수한 복합재료를 제조하기 위해서 다양한 소재 및 혼합 비율 등에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 복합재료의 제조 효율성을 높이기 위한 사출 성형, 예비 성형 등의 제조공법 개발 역시 소재연구와 맞물려 이루어지고 있다[13-15].

이를 바탕으로 본 연구에서는 팽창흑연/탄소섬유 혼합 보강 복합재료를 2단계 성형 공정으로 제조하였으며, 탄소섬유의 혼합 비율에 따른 제조 상태 및 전기적 기계적 특성 변화를 연구하였다. 이를 통하여 전도성 고분자 복합재료 내 탄소섬유의 치밀화 거동을 관찰하였으며, 전기적 기계적 물성이 최적화된 혼합 비율을 도출하였다.

2. 실험

2.1 소재

본 연구에서는 복합재료의 기지재로써 25 μm 페놀 수지 분말(Kolon Chemical, Korea)을 사용하였다. 페놀 수지는 열경화성 고분자로써 경제성이 뛰어나고 낮은 수축률, 높은 내부식성과 기계적 강도를 갖기 때문에 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있는 수지이다.

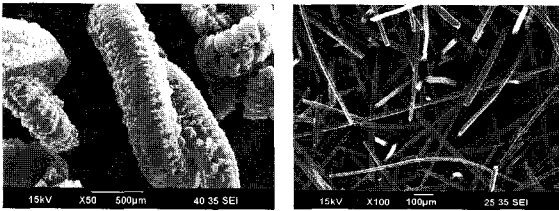
복합재료의 전도성 충전재로는 팽창흑연(Hyundai-kish, Korea)과 직경 14 μm , 길이 200 μm 인 탄소섬유(M-102S, Krecra, Japan)를 사용하였다. 충전재의 기본 물성과 형상은 Table 1과 Fig.1에 각각 나타나있다. 팽창흑연은 판상흑연을 화학 처리하여 만든 GIC(graphite intercalate compound)를 산성 환경에서 급속 가열하여 제조한다[16]. 이렇게 제조된 팽창흑연은 아코디언과 유사한 형상을 하고 있어 낮은 압력에서 바인더가 없어도 서로 잘 엉기는 성질을 가지고 있다. 또한 고압으로 압축될 경우 표면적이 넓은 판상 형태가 되기 때문에 전도성 네트워크가 뛰어나다[17]. 하지만 팽창흑연은 입자 자체에 미세 공극이 많기 때문에 팽창흑연과 고분자 수지의 혼합물만으로 제조된 전도성 고분자 복합재료는 높은 기계적 물성을 얻기 어렵다. 따라서 기계적 물성 보강을 위한 다른 소재의 첨가가 필요하다고 판단되었고, 전도성 소재이면서 기계적 강화효과가 우수한 탄소섬유가 추가로 사용되었다[18].

2.2 제조 방법

본 연구에서는 예비성형과 주성형으로 이루어진 2단계 성형 공정으로 복합재료를 제조하였다. 예비성형은 페놀수지가 약간 경화된 상태의 예비성형체를 저압에서 제조하는 단계이며, 주성형은 예비성형체를 고온, 고압에서 성형하여 분리판을 제조하는 단계이다[15].

복합재료의 제조 순서는 다음과 같다. 전도성 충전재와 페놀수지를 실험하고자 하는 비율로 섞은 후 교반기를 이용하여 균일한 혼합물을 얻는다. 앞서 준비한 혼합물을 예비성형용 금형에 고르게 분산시킨 후 Tetrahedron 사의 Hot press MTP-14를 이용하여 100 $^{\circ}\text{C}$, 0.28MPa에서 5분 동안 예비성형을 한다. 예비성형이 끝나면 예비성형체를 예비성형용 금형에서 분리한 후 주성형용 금형에 넣는다. 준비된 금형을 고압프레스에 넣고 잠시 예열을 한 후에 150 $^{\circ}\text{C}$, 10MPa에서 3분 동안 주성형을 한다. 주성형이 끝나면 배출 봉으로 탈형을 하여 팽창흑연/탄소섬유 혼합 보강 고분자 복합재료를 얻는다.

본 실험에서는 페놀수지 비율을 40wt.%로 고정하고, 팽창흑연과 탄소섬유의 비율을 각각 54~18wt.%와 6~42wt.%로 변화시키면서 실험을 실시하였다. 탄소섬유 비율이 42wt.%를 초과한 경우는 과도한 섬유로 인해 시편 내에 기포가 많이 발생하여 실험 범위에서 제외하였다.



(a) Expanded Graphite (b) Carbon Fiber

Fig. 1 Shape of Conductive Fillers.

Table 1 Basic Properties of Materials

		Diameter (μm)	Length (μm)	Density (gcm^{-3})
Filler	EG	500	5000	0.015
	Carbon fiber	14	200	2.0
Resin	Phenol	25	-	1.07

2.3 실험 방법

탄소섬유의 첨가 비율에 따른 복합재료의 제조 상태를 알아보기 위하여 주사 전자 현미경(SEM)으로 미세 구조를 관찰하였다.

탄소섬유의 첨가에 따른 복합재료의 치밀화 정도는 상대밀도를 계산하여 분석하였다. 상대밀도는 시편의 측정밀도를 이론밀도로 나눈 무차원 값으로 나타내어지며, 측정밀도는 아르키메데스 원리(ASTM D792-00)를 이용하여 측정하였다. 모든 데이터는 측정값 세 개의 평균값으로 나타내었다. 이론밀도는 구성 소재들의 밀도에 중량 비율을 곱한 값을 선형적으로 합하여 계산하였다. 탄소섬유와 페놀분말의 이론밀도는 압축 하중을 받아도 본래의 값이 변하지 않기 때문에 제조사에서 제공된 자료를 그대로 사용하였다. 하지만 팽창흑연은 입자 자체에 공극이 많기 때문에 외부 압력을 받으면 자체의 밀도가 변하게 된다. 압축을 전혀 받지 않은 상태에서 팽창흑연의 밀도는 0.015gcm^{-3} 이지만, 압축이 진행되면 처음에는 입자들이 금형의 빈 공간 내에서 재배열되다가 임계압력(rigidity threshold)을 넘어서면 입자의 부피가 감소하기 시작하여 2gcm^{-3} 정도까지 밀도가 증가한다[19]. 이는 팽창흑연이 압축을 받으면 입자내 공극과 입자간 공극이 모두 감소하기 때문이다. 따라서 주성형 압력인 10MPa에서 소재 내부와 외부 공극의 감소 정도를 고려한 실험을 통하여 팽창흑연의 이론 밀도 값을 계산하였고, 그 결과 10MPa로 압축한 상태에서 팽창흑연의 밀도는 1.822gcm^{-3} 이었다[16,19].

전기 전도도는 4단자법(4 point probe technique)으로 측정하였다. 4단자법은 시편의 양 끝단에 전류를 흘려준 뒤 그 사이의 전압을 측정하여 저항(R)을 구하고 시편의 치수(A: 시편 측면의 단면적, L: 전압 접촉부 사이의 거리)와의 관계를 이용

하여 다음과 같이 전기 전도도(σ)를 구하는 방법이다.

$$\sigma = \frac{1}{R} \times \frac{L}{A} \tag{1}$$

저항의 측정은 Multimeter 34401A(Agilent)를 이용하였으며, 시편의 규격은 $80 \times 12.7 \times 2.5\text{mm}^3$ 이다.

굽힘 강도와 굽힘 탄성계수는 UTM(Shimadzu, 5ton)을 이용한 3점 굽힘 실험(ASM D-790)으로 계산하였다. 하중점과 지지대는 직경 10mm의 원통 형태이며, 지지대 사이의 간격(L, span length)과 시편두께(t)의 비(L/t)는 16 이다. 시편은 $80 \times 12.7 \times 2.5\text{mm}^3$ 의 규격을 가지고, 전기 전도도를 측정할 시편을 동일하게 사용하였다. 실험을 통하여 얻은 변위와 하중 그래프에서 파괴 시 최대 하중(P)과 초기 기울기(M)을 계산하고, 아래의 식으로 굽힘 강도(FS)와 굽힘 탄성계수(FM)를 구한다. 이때 W는 시편의 폭이다.

$$\text{Flexural strength} = \frac{3PL}{2Wt^2} \tag{2}$$

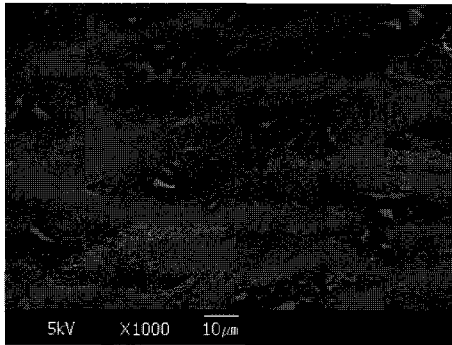
$$\text{Flexural modulus} = \frac{L^3M}{4Wt^3} \tag{3}$$

3. 결과 및 토의

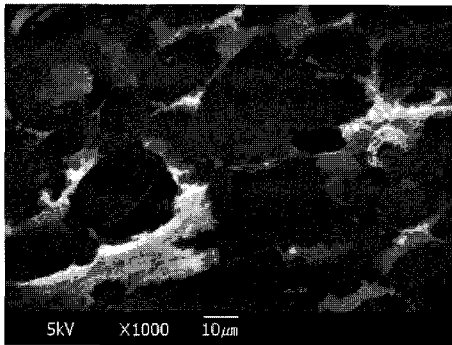
본 연구에서의 실험 변수는 탄소섬유의 중량 비율이다. 사용 소재의 전체 질량은 21g로, 그 중에서 페놀수지의 비율은 40wt.%로 고정시켰다. 탄소섬유의 비율에 대한 복합재료 구성 소재의 조성은 Table 2에 나타나 있다.

3.1 제조 상태 분석

Fig. 2는 탄소섬유 비율이 24, 36wt.%인 복합재료의 측면을 SEM으로 촬영한 사진이다. 탄소섬유 비율이 24wt.%인 사진을 보면 탄소섬유가 팽창흑연 사이에 존재하면서 팽창흑연들을 서로 엮어주고 있는 것을 알 수 있다. 높은 압력에서 압축이 된 팽창흑연은 넓은 표면의 유연한 판상 형태가 되는데 탄소섬유의 바인딩 효과가 팽창흑연의 기계적 특성을 강화시킬 것으로 생각된다. 탄소섬유 비율이 36wt.%인 사진을 보면 역시 탄소섬유가 팽창흑연들을 서로 엮어주고 있지만, 섬유들이 응집된 부분에서 공극이 발생하는 것을 볼 수 있다[12]. 기계적 물성 측면에서 볼 때 앞에서 발생한 공극은 응력 집중의 원인이 되어 복합재료의 굽힘 특성을 저하시키고, 전기적 물성 측면에서는 전도성 네트워크의 전도성 공백으로 작용하게 되어 복합재료의 전기 전도도를 떨어뜨릴 것으로 판단된다.



(a) Carbon Fiber Ratio of 24wt.%



(b) Carbon Fiber Ratio of 36wt.%

Fig. 2 SEM Image of Polished Side Surface.

Table 2 Weight Composition of Materials.

No.	EG (wt.%)	Carbon fiber (wt.%)	Resin (wt.%)
EG54-F06	54	6	40
EG48-F12	48	12	40
EG42-F18	42	18	40
EG36-F24	36	24	40
EG30-F30	30	30	40
EG24-F36	24	36	40
EG18-F42	18	42	40

3.2 밀도

Fig. 3은 탄소섬유의 비율에 대한 측정밀도와 상대밀도의 변화를 나타내는 그래프이다. 측정밀도와 상대밀도 모두 탄소 섬유 비율 24wt.%까지는 비슷한 값을 유지하다가 그 이상이 되면 감소하는 경향을 보이고 있다.

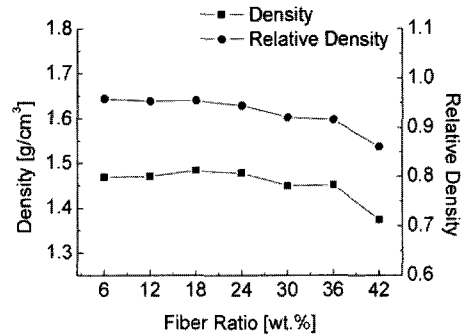


Fig. 3 Measured and Relative Density According to Carbon Fiber Ratio.

측정밀도의 경우, 탄소섬유의 밀도가 팽창후연의 밀도보다 크기 때문에 탄소섬유의 비율이 증가할수록 증가해야한다. 하지만 실험 결과에서는 24wt.%까지 거의 변화가 없다가 그 이후에 감소하고 있는데, 이는 밀도가 높은 섬유의 비율이 증가하여도 그만큼 공극 발생이 증가하여 서로 상쇄 작용을 하기 때문이라고 생각된다. 또한 30wt.% 이상의 경우에 밀도가 급격하게 저하되는 이유는 공극 발생에 의한 밀도의 감소 정도가 섬유에 의한 증가 정도보다 크기 때문이라고 판단된다.

상대밀도의 경우 탄소섬유 비율 24wt.%까지는 미세하게 감소하다가 30wt.% 이상이 되면 크게 떨어지고 있다. 이 점 역시 측정밀도의 경우와 같은 이유라고 판단되며, 전체적으로 볼 때 탄소섬유의 증가는 복합재료의 치밀도를 저하시키고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 탄소섬유 비율 24wt.%까지는 치밀도의 저하 정도가 미미한데 반하여 그 이후에는 크게 떨어지기 때문에 탄소섬유의 첨가 비율은 24wt.% 이내로 하는 것이 적합하다. 후연 입자 보강 전도성 복합재료에 관한 기존의 연구결과를 보면, 복합재료의 상대밀도는 0.98 정도로 알려져 있다[10,12]. 하지만 본 연구에서 제조된 복합재료는 탄소섬유 비율 6~24wt.%에서 0.96 정도의 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있는데, 이는 탄소섬유가 첨가된 경우에는 팽창후연의 입자 내 공극이 충분히 감소하지 못하기 때문으로 판단된다.

3.3 굽힘 특성

Fig. 4는 탄소섬유의 비율에 대한 굽힘 강도와 굽힘 탄성계수의 거동을 나타내는 그래프이다.

굽힘 강도의 경우, 탄소섬유 비율 24wt.%까지는 계속 증가하다가 그 이상이 되면 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 탄소 섬유 비율 6wt.%에서 이미 50MPa 이상의 값을 가지며, 탄소 섬유 비율이 24wt.%가 되면 58MPa 정도의 높은 값을 나타낸다. 따라서 일정 비율까지는 탄소섬유에 의하여 복합재료의

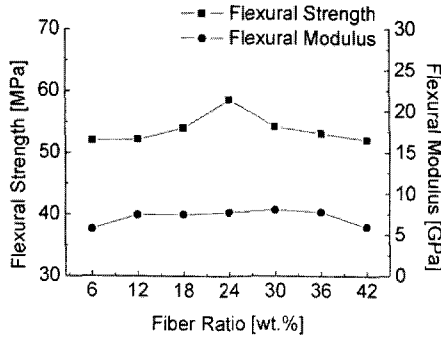


Fig. 4 Flexural Strength and Modulus According to Carbon Fiber Ratio.

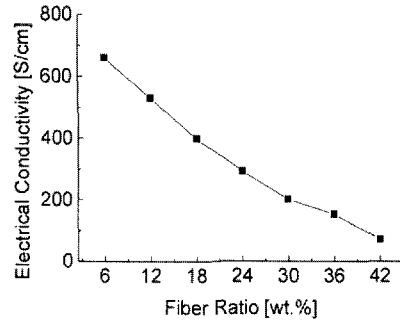
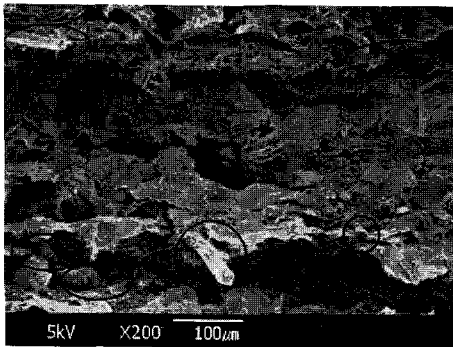
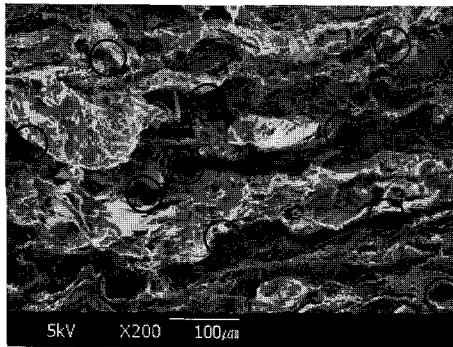


Fig. 6 Electrical Conductivity According to Carbon Fiber Ratio.



(a) Pulled Fiber



(b) Remained Hole

Fig. 5 SEM Image of Broken Side Surface.

강도가 강화되고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 탄소섬유 비율이 32wt.%를 넘어서면 오히려 강도가 약화되고 있는데, 이는 상대밀도 분석에서와 마찬가지로 섬유들이 응집된 부분에서 발생한 공극에서 응력 집중이 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서 기계적 강도의 측면에서 볼 때 탄소섬유의 첨가 비율은 18~30wt.% 정도가 적합하다.

굽힘 탄성계수는 탄소섬유 비율에 상관없이 전체적으로 6~8GPa

정도의 낮은 값을 유지하고 있다. 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 시편이 파괴될 때 탄소섬유가 분리되는 현상(fiber pull out)이 발생하기 때문이라고 판단된다. 즉, 탄소섬유가 팽창흑연과 분리되면서 오랫동안 많은 하중을 견디게 되는 것이다.

3.4 전기 전도도

전도성 고분자 복합재료의 전기 전도도는 전도성 충전재의 전도성 네트워크로 결정이 되며, 전도성 네트워크는 입자간 네트워크와 입자내 네트워크로 구분된다. 압축된 팽창흑연은 넓은 표면의 판상 형태를 가지기 때문에 입자간 입자내 전도성 네트워크가 모두 우수하다. 탄소섬유 역시 전도성 소재이지만 팽창흑연에 비해 전도성 네트워크에 대한 기여 정도가 상대적으로 매우 낮기 때문에, 팽창흑연과 탄소섬유가 혼합 보강된 복합재료의 전도성 네트워크는 오직 팽창흑연에 의해 결정된다고 판단된다.

Fig. 6을 보면 탄소섬유의 비율이 낮은 경우에는 600Scm^{-1} 이상의 높은 전기 전도도를 보이지만, 비율이 점점 증가할수록 전기 전도도가 급격하게 감소하여 100Scm^{-1} 미만으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 탄소섬유 비율이 증가할수록 팽창흑연의 절대량이 감소하고, 섬유에 의해 팽창흑연의 상호 접촉면이 감소하며 또한 섬유 사이에서 발생한 공극이 전도성 공백으로 작용하여 전체적인 전도성 네트워크가 저하되기 때문으로 판단된다.

3.5 주성형 압력의 영향

탄소섬유가 첨가된 복합재료를 압축 성형으로 제조할 경우 치밀화가 충분히 이루어지기 위해서는 10MPa 이상의 높은 압력이 필요하다고 알려져 있다[12]. 따라서 이전 실험에서 얻은 최적화된 혼합 비율(팽창흑연/탄소섬유/페놀수지 36:24:40wt.%)에 대하여 다른 성형 조건들은 모두 이전 실험과 동일하게 하고

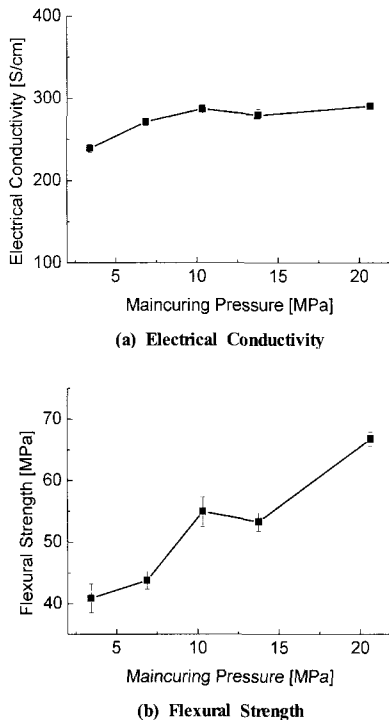


Fig. 7 Material Properties According to the Maincuring Pressure.

주성형 압력을 3.5~20.7MPa로 변화시키면서 실험을 하였다. Fig. 7a는 주성형 압력에 대한 전기 전도도와 굽힘 강도의 거동을 나타낸 그래프이다.

전기 전도도의 경우, 주성형 압력 10MPa 까지는 계속 증가하다가 그 이후에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 팽창흑연의 입자간 전도성 네트워크는 10MPa에서 충분히 이루어지며 그 이상의 압력 증가는 의미가 없다고 판단된다. 하지만 Fig. 7b에서 볼 수 있듯이, 굽힘 강도는 주성형 압력이 증가할수록 계속 상승하여 20.7MPa의 성형 압력에서 65MPa 이상의 값에 도달하는 것을 볼 수 있는데, 이는 섬유가 첨가된 복합재료의 경우 주성형 압력을 더욱 증가시키므로써 보다 우수한 굽힘 강도를 얻을 수 있음을 의미한다. 따라서 추후 압력의 증가에 따른 복합재료의 기계적 물성을 추가로 연구하여 보다 향상된 물성을 갖는 복합재료를 제조할 수 있을 것이라고 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 전도성 충전제로써 팽창흑연과 탄소섬유가 혼합 보강된 전도성 고분자 복합재료를 제조하고, 충전재의

조성 변화에 따른 전기적, 기계적 특성을 연구하였다. 이를 통해 얻어지는 결론은 다음과 같다.

- 1) 2단계 성형 공정을 이용하여 팽창흑연/탄소섬유 혼합 보강 전도성 고분자 복합재료를 제조하였으며, 충전재의 조성에 대한 물성 최적화를 통해 전기 전도도($>250 \text{ Scm}^{-1}$)와 굽힘 강도($>55 \text{ MPa}$)가 우수한 전도성 복합재료를 개발하였다.
- 2) 굽힘 강도는 탄소섬유의 비율이 높아질수록 증가하다가, 24wt.% 이후에는 감소하였다. 이는 탄소섬유의 비율이 너무 높으면 다수의 섬유에 의해 발생한 공극에서 응력 집중이 일어나기 때문으로 판단된다.
- 3) 전기 전도도는 탄소섬유의 비율이 높아질수록 감소하였다. 이는 전도성 네트워크를 이루는 팽창흑연의 절대량이 감소하고, 탄소섬유에 의해 입자간 전도성 네트워크가 저하되었기 때문으로 판단된다.
- 4) 성형 압력을 증가시킨 결과, 보다 우수한 굽힘 강도($>65 \text{ MPa}$)를 얻을 수 있었으며, 향후 성형 압력 증가 및 수지비율 변화를 통해 소재의 물성을 향상시키고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 수소·연료전지사업단 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) M. Willinger, "Industrial Development of Composite Materials: Toward a Functional Appraisal," *Composite Science and Technology*, Vol. 34, 1989, pp. 53-71.
- 2) D.J. Wang, J. Qiu, Z.L. Gui and L.T. Li, "Design for High-performance Functional Composite Thermister Materials by Glass/ceramic Composing," *Journal of Material Research*, Vol. 14, No. 7, 1999, pp. 2993-2996.
- 3) Franklin T. Moutos, Lisa E. Freed and Farshid Guilak, "A Biomimetic Three-dimensional Woven Composite Scaffold for Functional Tissue Engineering of Cartilage," *Nature Materials*, Vol. 6, 2007, pp. 162-167.
- 4) J.F. Tressler, S. Alkoy, A. Dogan and R.E. Newnham, "Functional Composites for Sensors, Actuators and Transducers," *Composites: Part A*, Vol. 30, 1999, pp. 477-482.
- 5) M.Q. Zhang, G. Yu, H.M. Zeng, H.B. Zhang and Y.H. Hou, "Two-Step Percolation in Polymer Blends Filled with Carbon Black," *Macromolecules*, Vol. 31, 1998, pp.

- 6724-6726.
- 6) Wenge Zheng and Shing-Chung Wong, "Electrical Conductivity and Dielectric Properties of PMMA/expanded Graphite Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 225-235.
 - 7) D. N. Busick and M.S. Wilson, "Low-cost Composite Material for PEFC Bipolar Plates," *Fuel cells Bulletin*, Vol. 2, No. 5, 1999, pp. 6-8.
 - 8) Richard H. J. Blunk, Daniel J. Lisi, Yeong-Eun Yoo and Charles L. Tucker III, "Enhanced Conductivity of Fuel Cell Plates through Controlled Fiber Orientation," *AIChE Journal*, Vol. 49, No.1, 2003, pp. 18-29.
 - 9) Hitoshi Yamada, Kazuki Morimoto, Katsuya Kusuno, Shiuichiro Wada and Kazuo Nishimoto, US patent 6500893, 31 December 2002.
 - 10) S.I. Heo, J.C. Yun, K.S. Oh and K.S. Han, "Influence of Particle Size and Shape on Electrical and Mechanical Properties of Graphite Reinforced Conductive Polymer Composites for the Bipolar Plate of PEM Fuel Cells," *Advanced Composite Materials*, Vol. 15, 2006, pp. 115-126.
 - 11) S.W. Jung, J.H. Lee, J.B. Nam, H.W. Nam, and K.S.Han, "Analysis of Strengthening Mechanism in Hybrid Short Fiber/Particle Reinforced Metal Matrix Composites," *Key Engineering Materials*, Vols. 183-187, 2000, pp. 1297-1302.
 - 12) 허성일, 윤진철, 오경석, 한경섭, "흑연입자/탄소섬유 혼합 보강 전도성 고분자 복합재료의 전기적, 기계적 특성 연구," *한국복합재료학회지*, Vol. 19, No. 2, 2006, pp. 7-12.
 - 13) A. Müller, P. Kauranen, A. von Ganski and B. Hell, "Injection Moulding of Graphite Composite Bipolar Plates," *Journal of Power Sources*, Vol. 154, 2006, pp. 467-471.
 - 14) B.D. Cunningham, J. Huang and D.G. Baird, "Development of Bipolar Plates for Fuel Cells form Graphite Filled Wet-lay Material and a Thermoplastic Laminate Skin Layer," *Journal of Power Sources*, Vol. 165, 2007, pp. 764-773.
 - 15) S.I. Heo, K.S. Oh, J.C. Yun, S.H. Jung, Y.C. Yang and K.S. Han, "Development of Preform Molding Technique using Expanded Graphite for PEM Fuel Cell Bipolar Plates," *Journal of Power Sources*, Vol. 171, 2007, pp. 396-403.
 - 16) A. Celzard, J.F. Mareche and G. Furdin, "Modelling of Exfoliated Graphite," *Progress in Materials Schience*, Vol. 50, 2005, pp. 93-179.
 - 17) A. Celzard, J.F. Mareche and G. Furdin, "Surface area of Compressed Expanded Graphite," *Carbon*, Vol. 40, 2002, pp. 2713-2718.
 - 18) Mahlon S. Wilson and Deanna N. Busick, US Patent 6,248,467, 19 June 2001.
 - 19) A. Celzard, S. Schneider and J.F. Mareche, "Densification of Exfoliated Graphite," *Carbon*, Vol. 40, 2002, pp. 2185-2191.