

탄소섬유 방향성이 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도에 미치는 영향

나두진 · 윤병일* · 강호중†

기능성 고분자 신소재 연구센터, 단국대학교 고분자공학과, *국방과학연구원

(1998년 12월 30일 접수)

Effect of Carbon Fiber Orientation on the Electrical Conductivity of Epoxy/Carbon Fiber Composites

Du-Jin Ra, Bungil Yoon*, and Ho-Jong Kang†

Center for Advanced Functional Polymers

Department of Polymer Sci. & Eng., Dankook University, Seoul 140-714, Korea

*Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, Taejeon 305-600, Korea

†e-mail: hjkang@ns.dankook.ac.kr

(Received December 30, 1998)

요약: 에폭시/탄소섬유 복합재료의 탄소섬유 방향성이 이들의 전기전도도에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 전도도 측정 방향이 복합재료의 탄소섬유와 같은 방향인 경우, 탄소섬유가 일축으로 배향된 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도는 단위 면적당 전기장 방향과 일치하는 탄소섬유의 밀도가 높음에 따라 이축 배향 및 다축 배향된 복합재료에 비하여 높은 전기전도도를 보였다. 전도도의 측정 방향이 탄소섬유와 직각인 경우, 이와는 반대로 다축 배향 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도가 높음을 확인하였다. 또한 graphitic crystallites가 탄소섬유 방향으로 많이 배향된 고탄성 탄소섬유일수록 전기전도도가 높았으며 프리프레그와 프리프레그사이에 전도성 필러를 첨가함으로써 전기전도도를 증가시킬 수 있었다.

ABSTRACT: The effect of carbon fiber orientation on the electrical conductivity of epoxy/carbon fiber composites has been investigated. It was found that the unidirectional (0/0) epoxy/carbon composite has higher longitudinal AC conductivity, the electric vector parallel to the fiber axis, than multidirectional epoxy/carbon fiber composites due to the increase of conducting carbon fiber channels. In case of transverse AC conductivity, the electrical vector is perpendicular to the fiber axis, the opposite tendency was observed. High modulus carbon fiber which has more graphitic crystallites parallel to the fiber axis showed better electrical conductivity. Adding the conductive fillers on the prepreg also enhanced both longitudinal and transverse AC conductivity.

Keywords: electrical conductivity, epoxy/carbon fiber composite, fiber orientation, conductive fillers, EMI shielding.

서론

전도성 고분자 복합재료는 고분자 매트릭스에 금속소재,¹⁻³ 카본 블랙,⁴⁻⁶ 그리고 탄소섬유와⁷⁻⁹ 같은 전기 전도성 보강재를 첨가함으로써 얻어질 수 있다. 이러한 전도성 고분자 복합재료는 전자파차폐 (electro-

magnetic interference shielding)^{10,11} 소재로서 전자기파의 상호 간섭현상 및 전자기파의 인체 유해성을 막아주는 목적으로 사용될 수 있다.

고분자 복합재료의 차폐능은 차폐효율 (shielding effectiveness (SE) factor)에^{7,12,13} 의하여 나타내어지며 이는 전자기파가 고분자 복합재료에 입사할 때

발현되는 반사에너지와 흡수에너지의 합으로 표시되어질 수 있다. 이러한 현상은 차폐재료로 사용되는 소재의 물질상수 즉, 복소유전율 및 복소투자율과 밀접한 관계를 갖는다. 일반적으로 자성체가 첨가되지 않은 고분자 복합재료는 자성을 갖지 않기 때문에 복소투자율은 1의 값을 가지고 따라서 차폐효율은 복소유전율과 밀접한 관계를 갖는다. 특히 복소유전율의 허수 부분은 Maxwell equation으로부터 전기전도도와 밀접한 관계가 있다. 따라서 전도성 복합재료의 전기전도도를 측정함으로써 이들의 차폐효율의 예측이 가능할 것으로 생각된다. 탄소섬유를 전도성 보강재로 첨가한 에폭시/탄소섬유 복합재료의 경우 이들의 전기전도도는 사용 주파수 영역 및 탄소섬유의 함량에 따라 달라지며 또한 전자과의 입사방향과 탄소섬유의 방향과도 밀접한 관계를 갖는 것으로 알려져 있다.¹⁴

본 연구에서는 에폭시/탄소섬유 복합재료의 제조 시 프리프레그의 적층방법에 따라 변화된 보강 탄소섬유의 방향성이 이들의 전기전도도에 미치는 영향을 살펴봄과 동시에 탄소섬유의 종류와 복합재료 제조시 첨가된 전도성 필러에 따른 전기전도의 변화를 살펴 보아 이들의 차폐효율 값을 예측하여 보았다.

실 험

재료 및 라미네이트 제조. 본 연구에서 Toray T-300 탄소섬유를 사용한 한국화이바의 250 °F Carbon UD (HT145/RS1222)와 Toray T-700 탄소섬유를 이용한 선경인더스트리의 실험용 프리프레그를 사용하였다. 두께가 3 mm인 에폭시/탄소섬유 복합재료를 제조하기 위하여 100×100 mm 크기의 22장의 UD 프리프레그를 사용하여 Fig. 1에서와 같이 0/0, 0/90, 0/45/90으로 탄소섬유의 방향을 적층하고 Fig. 2(a)와 같이 제작된 autoclave에서 Fig. 2(b)의 consolidation schedule에 의하여 진공상태에서 3기압으로 분당 2 °C씩 온도를 60 °C까지 올려 진공을 제거한 후, 온도를 다시 130 °C까지 올려 1시간 30분간 유지하고 이를 서서히 냉각시켜 탄소섬유의 무게 분율이 70 wt%인 에폭시/탄소섬유 라미네이트를 제조하였다. 제조된 라미네이트는 5×5×3 mm의 시편으로 잘라 전기전도도의 측정 시편으로 사용하였

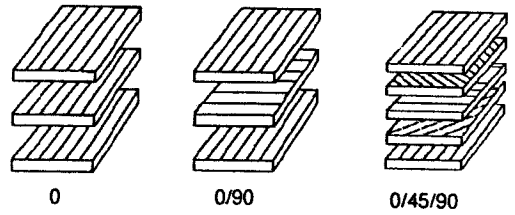
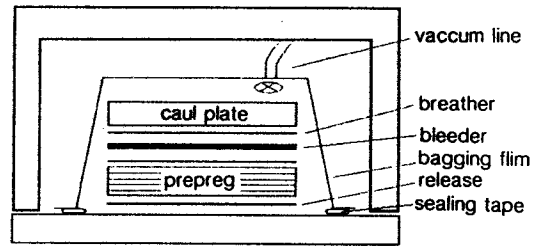
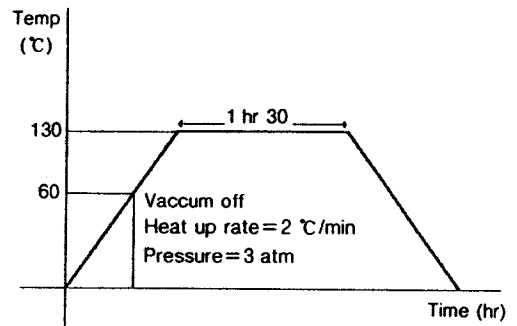


Figure 1. Schematic of prepreg lay up method.



(a)



(b)

Figure 2. Schematics of (a) autoclave and (b) prepreg consolidation schedule.

다. 또한 이들 라미네이트의 전기전도도를 증가시키기 위하여 프리프레그 위에 순도가 99.99%인 대주정밀의 전도성 실버 파우더와 Akzo Chemie Co.에서 제조된 전도성 카본 블랙 Ketjen EC를 각각 5 wt% 및 20 wt%씩 도포하여 같은 방법에 의하여 라미네이트를 제조하였다. 이와 함께 위의 T-300 탄소섬유의 경우, 탄소섬유의 방향성이 없는 라미네이트를 제조하기 위하여 ball mill에 의하여 7일간 분쇄하여 길이가 탄소섬유의 직경 6 μm와 유사한 T-300 탄소섬유 파우더를 만들고 이를 60-80 vol%로 국도화학의 DGEBA 에폭시 혼합 수지인 YD-011/

YD-128 (60/40)에 믹서로 혼합하여 경화제로 다이시안 다이아미드 (DICY)를 개시제로 다이 클로로페닐 다이메틸유레아 (DCMU)를 사용하여 250 °F에서 진공오븐 속에서 경화시켜 제조하였다. 전기전도도 측정 시편은 에폭시/탄소섬유 복합재료와 같은 크기를 사용하였다.

전기전도도 측정. 전기전도도의 측정을 위하여 얻어진 시편 (5×5 mm)의 표면에 silver paste를 바른 후 HP4192A impedance analyzer의 전도도 측정용 백금전극 셀 속에 장착하여 100 Hz-10 MHz 주파수 범위에서 capacitance (C)와 conductance (G)를 구하여 아래 식에 의하여 복소유전율의 실수 부분과 허수 부분을 구하였다.

$$\epsilon' = C t / \epsilon_0 S, \quad \epsilon'' = C t / \omega \epsilon_0 S \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 자유공간의 복소유전율 ($1/34\pi \times 10^{-9}$ F/m), S는 전극의 표면적, t는 시료의 두께, ω 는 angular frequency를 의미한다.

얻어진 복소유전율의 허수 부분을 사용하여 아래의 Maxwell 방정식으로부터¹⁵ 전기전도도(σ)를 계산할 수 있었다. 여기서 H는 자기장 그리고 J는 전류 플럭스를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J + i\omega \epsilon E & (2) \\ &= (\sigma + i\omega \epsilon) E \\ &= i\omega (\epsilon + \sigma/i\omega) E \\ &= i\omega \epsilon^* E \quad (\text{where } \epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'') \\ &= (\omega\epsilon'' + i\omega\epsilon') E \end{aligned}$$

$$\sigma = \omega\epsilon'' = 2\pi f\epsilon'' \quad (3)$$

차폐효율 계산. 복합재료의 이론적인 차폐효율은 아래의 식과 같이 차폐면에 입사한 초기 전계강도 (E_1)와 재료를 통과하여 수신되는 수신 전계강도 (E_2)로써 계산되어질 수 있다.

$$SE(\text{dB}) = 20 \log (E_1/E_2) = A + R + B \quad (3)$$

여기서 A는 흡수손실, R는 반사손실 그리고 B는 다중 반사에 의한 보정항을 의미하여 B는 일반적인

로 차폐효율이 10 dB이상인 경우 무시될 수 있으며 A와 R는 재료의 복수투자율이 1인 경우, 차폐재료의 표피두께 d인 $(2/\sigma\omega)^{1/2}$ 로 표시될 수 있고 따라서 아래의 식과¹³ 같이 전기전도도로서 A와 R값을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= 20 \log (e^{-t/d}) = 8.686 t/d \\ R &= 108 + 10 \log (\sigma/f) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 t는 시료의 두께 그리고 f는 frequency를 의미한다.

결과 및 고찰

탄소섬유의 배향성이 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도에 미치는 영향. Fig. 3는 T-300 탄소섬유 파우더가 함유된 라미네이트의 주파수 및 첨가 탄소섬유의 함량에 따른 전기전도도 변화를 나타내었다. 일반적으로 에폭시의 복소유전율의 유전상수 (ϵ')는 3.0-3.4이며 도전상수 (ϵ'')는 거의 0의 값을 갖는다. 따라서 전기전도성이 없는 부도체의 역할을 한다. 이와는 달리 탄소섬유는 T-300의 연속 섬유인 경우 측정방법에 따라 다소 다르지만 850 S/cm 정도의 높은 전기전도성을 갖는다. 에폭시에 탄소섬유

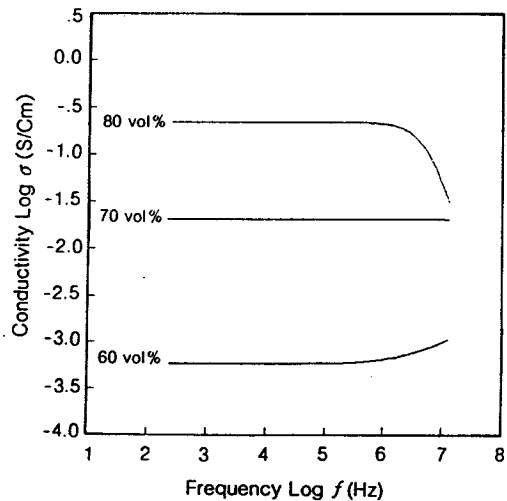
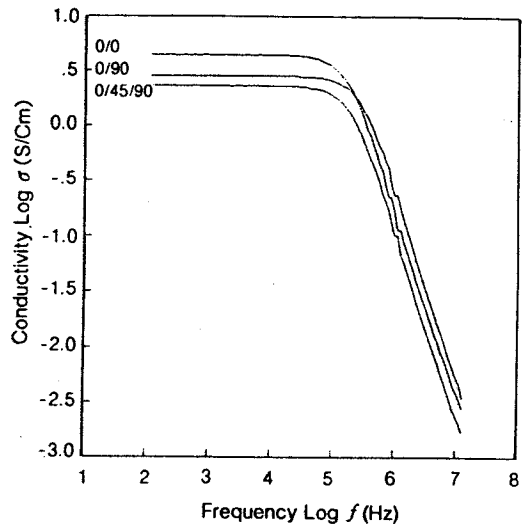


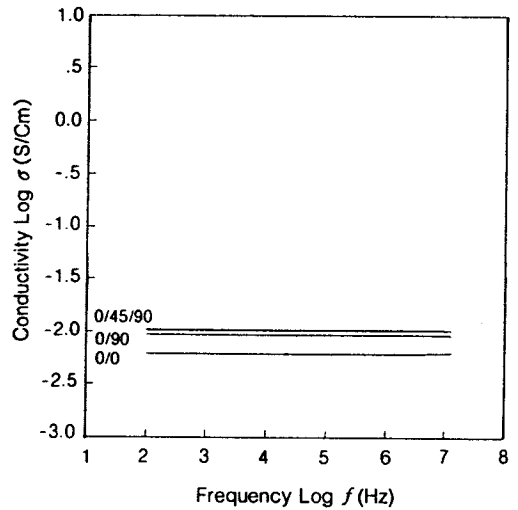
Figure 3. The electrical conductivity of epoxy/chopped T-300 carbon fiber composites.

를 보강한 에폭시/탄소섬유 복합재료는 그림에서 보는 바와 같이 순수 탄소섬유의 전기전도도 보다는 낮지만 에폭시에 비하여 높은 전기전도성을 갖게 된다. 또한 이들 에폭시/탄소섬유 복합재료는 전기전도성이 높은 탄소섬유의 함량이 증가될수록 전기전도도의 증가를 보임을 알 수 있다. 즉 전하가 이동할 hopping site의 밀도 증가에 의한 hopping distance의 감소에 의하여 도전경로의 percolation이 발생되어 그 결과 도전상수(ϵ'')의 증가를 초래하기 때문이다. 또한 Fig. 3에서 보는 바와 같이 1 MHz까지의 주파수 영역에서 전기전도도가 주파수에 의존하지 않음을 알 수 있다. 이는 실험에서 사용된 주파수 영역에선 도전상수가 주파수에 함수가 아니며 따라서 일정한 전기전도도의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

탄소섬유 파우더로 만들어진 라미네이트와는 달리 탄소섬유의 무게 분율이 70 wt%의 연속섬유 탄소섬유를 함유한 라미네이트의 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 전기장의 입사 방향과 탄소섬유의 방향에 따라 다른 전기전도도를 갖는다. 그림에서 보는 바와 같이 전기장의 방향과 탄소섬유 방향이 수평인 경우, Fig. 4(a)와 같이 탄소섬유 파우더 라미네이트에 비하여 상대적으로 높은 longitudinal 전기전도도를 갖는다. 이는 전기장과 탄소섬유의 방향이 평행인 경우 섬유 길이가 방향으로 유기 전류가 커지기 때문이다. 그 결과 도전상수가 커짐에 따라 탄소섬유의 방향이 한 방향으로 배향된 라미네이트(0/0)의 경우 섬유 장축을 통한 도전손실이 증가되고 따라서 높은 전기전도성을 보임을 알 수 있다. 반면 탄소섬유의 방향이 이방성인 0/90과 세 방향인 0/45/90 라미네이트의 경우, 도전손실 역시 이방성을 가지게 되고 그 결과 0/0에 비하여 상대적으로 낮은 전기전도도를 갖는 것으로 사료된다. 이와는 달리 탄소섬유의 방향과 전기장의 방향이 수직인 경우, 같은 탄소섬유 함량을 갖는 복합재료에 있어서 파우더 탄소섬유 함유 라미네이트에 비하여 상대적으로 낮은 transverse 전기전도도를 갖는다. 이는 전장이 탄소섬유와 직교하는 경우 섬유간의 공간전하 분극이 커져 ϵ' 가 증가되고 ϵ'' 를 감소시키기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 이 경우 전기장의 방향이 탄소섬유의 방향에 수평인 경우에서와는 달리 0/90 및 0/45/90과 같이 탄소섬유의 방향이 이방성인 경우 0/0과 같은 한 방향 라미



(a)



(b)

Figure 4. The effect of carbon fiber orientation on electrical conductivity of epoxy/T-300 carbon fiber composites. (a) longitudinal electrical conductivity and (b) transverse electrical conductivity.

네이트보다 높은 전기전도도를 갖는다. 이는 이러한 이방성이 앞에서 발현된 공간전하 분극을 다소간 해소시켜 ϵ'' 가 증가되고 결과적으로 전기전도도의 증가를 초래하는 것으로 사료된다.

Fig. 5에 T-300에 비하여 고탄성 탄소섬유인 T-

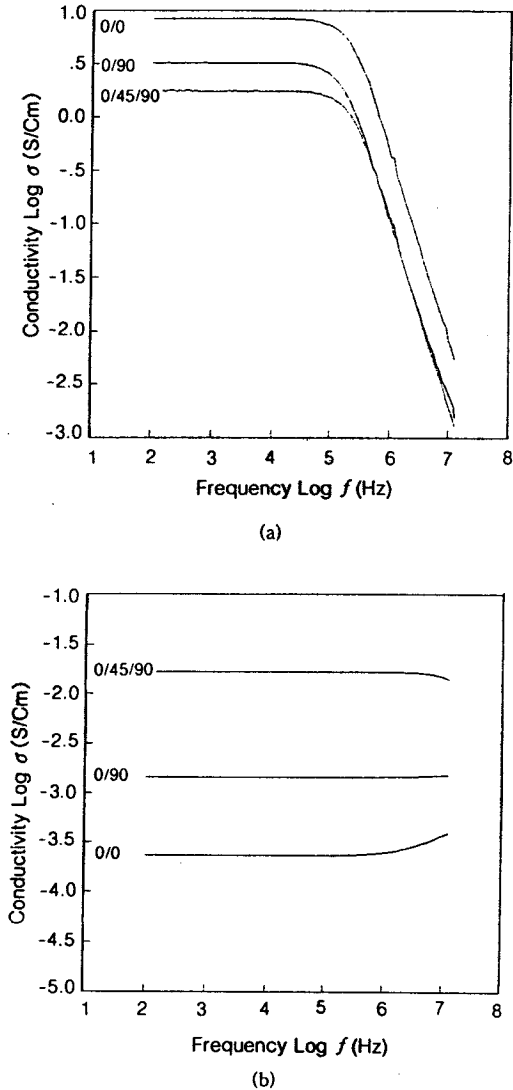


Figure 5. The effect of carbon fiber orientation on electrical conductivity of epoxy/T-700 carbon fiber composites. (a) longitudinal electrical conductivity and (b) transverse electrical conductivity.

700의 탄소섬유의 방향성에 따른 전기전도도를 나타내었다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 전기장이 탄소섬유의 방향과 평행인 경우에는 탄소섬유의 배향성에 관계없이 전기전도도가 증가함을 보인다. 반면 전기장이 탄소섬유와 직각인 경우, 0/45/90을 제외한 즉 탄소섬유의 방향성이 한쪽 방향인 라미네이트에는

상대적으로 낮은 전기전도도를 보임을 알 수 있다. 이러한 특성은 탄소섬유의 구조와 밀접한 관계를 가질 것으로 생각된다. 탄소섬유의 고탄성은 탄소섬유를 구성하고 있는 graphitic crystallite의 탄소섬유 축으로의 배향성에 기인된다. 따라서 고탄성 탄소섬유의 경우 graphitic crystallite의 탄소섬유 축으로의 배향성이 증가되고 그 결과 longitudinal 전기전도도를 증가시키는 결과를 초래할 것으로 생각된다. 하지만 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 transverse 전기전도도의 경우는 이러한 graphitic crystallite의 탄소섬유축으로의 배향이 전기전도도를 감소시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다. 이와 함께 고탄성 섬유는 상대적으로 낮은 impurity를 갖고 있어 graphite의 전기저항이 결정과 intercalated graphite의 bonding에 의한 phonon 저항과 impurity에 의한 defect 저항으로 구성되어진다. 따라서 defect 저항의 감소는 결과적으로 탄소섬유의 전기저항을 감소시켜 전기전도도를 증가시키는 결과를 초래한다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전기장의 방향이 탄소섬유의 방향과 수직인 경우 10^5 Hz 이상의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 전기전도도가 급격히 감소됨을 알 수 있다. Roig와 Schutens가¹⁶ 언급한바와 같이 높은 주파수에서 탄소섬유의 거친 표면으로부터 발현하는 전자의 산란에 의한 ϵ'' 감소의 결과이며 아울러 Grove가¹⁷ 언급한 것과 같이 탄소섬유와 탄소섬유 사이의 magnetic flux 변화에 의한 reactance 증가의 결과로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 Kim과 See¹⁴ 그리고 Walker의¹⁸ 결과와도 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

전도성 필러가 에폭시/탄소섬유 라미네이트의 전기전도도에 미치는 영향. Fig. 6과 Fig. 7에 프리프레그와 프리프레그 사이에 첨가된 실버 파우더 및 전도성 카본블랙이 전기전도도에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 전도성 카본블랙을 5 wt% 첨가한 경우 전기장이 탄소섬유의 방향에 평행인 경우 longitudinal 전기전도도가 증가함을 확인한 반면 전기장이 탄소섬유의 방향에 수직인 경우 크게 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이로 미루어 보아 프리프레그와 프리프레그 사이의 첨가된 전도성 필러는 같이 프리프레그에 함침되어 있는 탄소섬유를 연결시켜주는 역할을 하여 전기전도 channel의 증가를

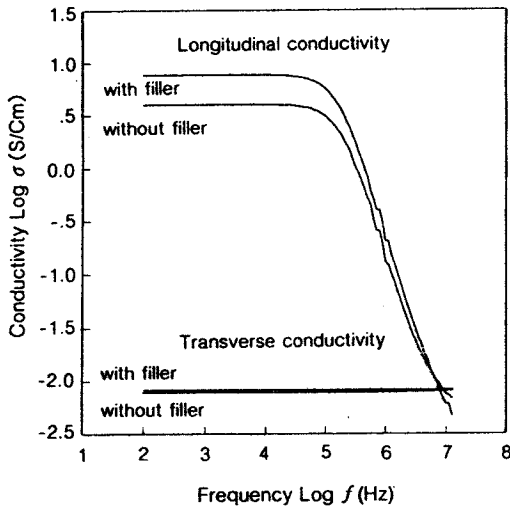


Figure 6. The effect of conductive carbon black on electrical conductivity of 0/0 epoxy/T-300 carbon fiber composites.

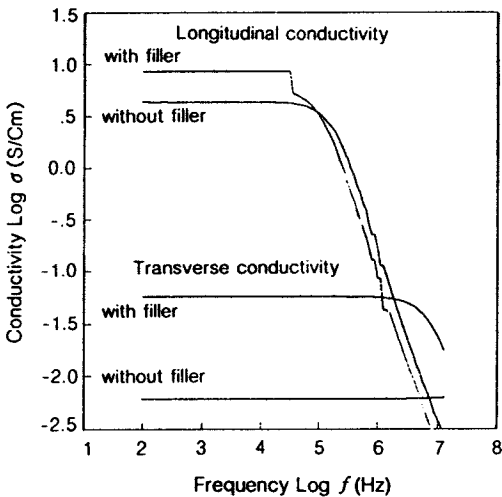


Figure 7. The effect of silver powder on electrical conductivity of 0/0 epoxy/T-300 carbon fiber composites.

초래하여, 즉 percolation 현상에 의하여 섬유 장축을 통한 ϵ'' 가 증가되어 전기전도도를 증가시키는 반면 에폭시 매트릭스와 탄소섬유사이에서 발현한 공간분극의 감소에는 도움을 주지 못함을 알 수 있다. 이 외는 달리 실버 파우더를 20 wt% 첨가한 경우 전기

Table 1. Shielding Effectiveness of Epoxy/Carbon Fiber Composites

carbon fiber	E. M. field	configuration	SE factor (dB)
chopped T-300	⊥ to fiber	random(60 vol%)	67.54
		random(70 vol%)	63.03
		random(80 vol%)	56.32
T-300	// to fiber	0/0	73.21
		0/90	72.41
	⊥ to fiber	0/45/90	71.97
		0/0	60.78
		0/90	61.74
T-700	// to fiber	0/45/90	61.77
		0/0	74.47
	⊥ to fiber	0/90	72.63
		0/45/90	71.44
		0/0	54.58
⊥ to fiber	0/90	58.05	
	0/45/90	62.67	

장이 탄소섬유의 방향에 평행인 경우 실버 파우더의 첨가에 의하여 longitudinal 전기전도도가 증가되며 또한 전기장이 탄소섬유의 방향과 수직인 경우에도 transverse 전기전도도가 증가되는 현상을 보인다. 즉 실버 파우더의 경우는 매트릭스와 탄소섬유 사이에 발현된 공간분극의 감소 즉 프리프레그와 프리프레그의 탄소섬유의 접촉을 증가시켜 공간분극의 감소를 유발함을 알 수 있다. 이는 실버 파우더의 우수한 전기전도성과 함께 카본블랙보다 큰 필러의 입자와 관계가 있을 것으로 사료된다.

에폭시/탄소섬유 라미네이트의 차폐효율. Table 1에 본 연구에서 사용된 에폭시/탄소섬유 복합재료의 10^5 Hz이하에서의 SE factor를 나타내었다. 전기전도도에서 예측한 바와 같이 전기장이 탄소섬유의 방향과 평행인 경우 높은 전기전도도에 의하여 70 dB의 높은 SE factor 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 값은 본 실험에서 사용된 에폭시/탄소섬유 복합재료를 전기장과 평행으로 사용하였을 경우 EMI leakage가 거의 일어나지 않음을 의미한다. 하지만 실제 대부분의 에폭시/탄소섬유 복합재의 차폐재의 경우 전기장이 수직으로 입사하게 되고 transverse conductivity에 의한 SE factor 값이 보다 중요한 의미를 갖는다. Table에서 보는 바와 같이 전기장이 탄소섬유의 방향에 수직인 경우 55-60 dB 정도의

값을 가짐에 따라 longitudinal conductivity에 의한 차폐능보다는 적지만 거의 99.9%의 EMI가 차폐됨을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 에폭시/탄소섬유 라미네이트 제조 시 탄소섬유의 적층 방향이 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도에 미치는 영향에 대하여 고찰하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 전기장이 탄소섬유의 방향과 평행인 경우 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도는 장섬유를 통한 도전 손실에 의하여 전기전도도가 상대적으로 높음을 알 수 있으며 탄소섬유의 적층 방향이 이방성인 경우, 도전손실의 이방성에 의하여 전기전도도가 감소함을 알 수 있었다.

2. 전기장이 탄소섬유의 방향과 수직인 경우 매트릭스 에폭시와 탄소섬유 사이의 공간분극 현상에 의하여 상대적으로 낮은 전기전도도를 가지며 탄소섬유의 적층방향이 이방성인 경우 이러한 공간분극 현상을 감소시켜 전기전도도가 증가됨을 알 수 있었다. 또한 10^5 Hz 이상의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 탄소섬유 표면에서의 전자산란에 의하여 전기전도도가 급격히 감소됨을 알 수 있다.

3. 고탄성 탄소섬유를 사용한 에폭시/탄소섬유 복합재료는 저탄성 탄소섬유를 사용한 경우에 비하여 graphite crystallite가 탄소섬유의 방향으로 잘 배향되어 있고 impurity가 적어 상대적으로 높은 전기전도도를 가짐을 확인하였다.

4. 프리프레그와 프리프레그 사이의 전도성 필러의 첨가에 의한 도전손실의 증가 및 공간분극의 감소로 인하여 에폭시/탄소섬유 복합재료의 전기전도도가 증가됨을 알 수 있었다.

5. 에폭시/탄소섬유 복합재료는 상대적으로 높은 전기전도도에 의하여 SE factor가 높아 전자파 차폐재료로서의 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글: 본 논문의 연구비를 지원해준 국방과학 연구원과 Impedance Analyser 사용에 협조하여 주신 단국대학교 과학교육과 최병규교수에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. Gurland, *Trans. Metall. AIME*, **236**, 642 (1966).
2. D. E. Davenport, *Polymer News*, **8**, 134(1982).
3. S. Reich, *J. Mat. Sci.*, **22**, 3391 (1987).
4. E. K. Sichel "Carbon Black Polymer Composites", Marcel Dekker, New York, 1982.
5. A. I. Medalla, *Rubber Chem. Technol.*, **59**, 432 (1986).
6. S. K. Chung, S. T. Noh, and S. S. Im, *J. Korean Fiber. Soc.*, **28**, 829 (1991).
7. S. M. Rowland and A. R. Blythe, *Antec Technical Paper*, 668 (1991).
8. T. A. Skotheim, "Handbook of Conducting Polymer", Marcel Dekker, N.Y., 1986.
9. W. I. Lee and G. S. Springer, *J. Composite Mat.*, **18**, 357 (1984).
10. D. R. J. White and M. Mardiguian, "Electromagnetic Shielding, A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility", vol. 2, Interference Control Technologies Ind. Gainsville, Virginia, 1988.
11. M. Mardiguian, "Electrostatic Discharge: Understanding, Simulate and Fix Problem", Interference Control Technologies Ind. Gainsville, Virginia, 1986.
12. L. W. Shacklette, N. F. Colaneri, V. G. Kulkarni, and B. Wessling, *Antec Technica Paper*, 665 (1991).
13. Y. Choon, T. W. Kang, and N. S. Chung, *Korea Emi/Emc Society*, **5**, 31 (1994).
14. H. C. Kim and S. K. See, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **23**, 916 (1990).
15. J. C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", Dover, N.Y., 1954.
16. F. S. Roig and J. E. Schoutens, *J. Mater. Sci.*, **21**, 2409 (1986).
17. W. E. Groves, *J. Appl. Phys.*, **24**, 845 (1953).
18. W. F. Walker, *IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, 157, New York IEEE, 1982.