

고전기장을 이용한 도전성 탄소섬유/폴리에틸렌 복합필름의 제조 및 특성 연구 : 고분자 점착하층의 영향

박 민[†] · 김준경 · 임순호 · 고문배 · 최철림 · V. S. Mironov* · 방효재** · 이광희**

한국과학기술연구원 고분자하이브리드센터, *Metal-Polymer Research Institute of Belarus,

**인하대학교 화공·고분자·생물공학부

(1999년 10월 26일 접수)

Fabrication and Properties of Conductive Carbon Fiber/Polyethylene Composite Films Fabricated under High Intensity Electric Fields: Effect of Polymer Sublayer

Min Park[†], Junkyung Kim, Soon Ho Lim, Moon Bae Ko, Chul Rim Choe,
V. S. Mironov*, Hyo Jae Bang**, and Kwang Hee Lee**

Polymer Hybrid Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

*Metal-Polymer Research Institute of Belarus, Gomel, Belarus

**Division of Polymer Science and Engineering, Inha University, Incheon, Korea

[†]e-mail : minpark@kist.re.kr

(Received October 26, 1999)

요약: 고전기장을 이용하여 제조한 도전성 탄소섬유/폴리에틸렌 복합필름에 있어서 고분자 점착하층의 두께가 제조된 필름의 체적비저항과 인장강도에 미치는 효과에 대하여 연구하였다. 탄소섬유(CF) 함량과 CF 층밀도에 따라 제조된 필름의 체적비저항과 인장강도의 점착하층에 대한 의존성의 양상은 복잡하게 나타났다. 이는 점착하층의 증가에 따라서 필름 하층면에 중심부나 위쪽에 비하여 CF 농도가 낮은 절연성 고분자층의 두께가 증가하고 필름 상층면 근처에서는 CF의 함침에 필요한 고분자 매트릭스의 양이 적어져 매트릭스 함침이 불충분하여 기공이 포함된 구조를 형성시키는 효과와 증가된 매트릭스의 유동성을 바탕으로 CF 분산성이 향상되고 동시에 보다 치밀한 구조가 형성되는 두 가지 상반되는 효과의 상대적 기여 정도의 차이를 통하여 설명할 수 있었다. 이들 결과는 전자과 차폐용 고도전성 고분자 차폐필름의 제조에 있어서 전기적 성질과 기계적 성질의 최적화하는데 중요하다.

ABSTRACT: We investigated the effect of polymer sublayer on volumetric resistivity and tensile strength of carbon fiber (CF)/polyethylene composite films fabricated under high intensity electric fields. The dependence of volumetric resistivity and tensile strength of the films on the polymer sublayer thickness or mass part exhibited complex behavior according to CF content and CF layer density in the films. As the thickness of polymer sublayer increases, two groups of processes at thermo-mechanical forming stage would take effects in the properties of the films. The first group comprises the increase of polymer layer thickness having reduced CF content compared with central or upper part of the film and insufficient wetting of CF resulting in the loosened structure near upper film side. The second group, on the other hand, is the improvement of mobility of molten sublayer leading to better distribution of CF throughout the film thickness and the formation of more compact structure. The different degree of contribution of these two competing processes at varied CF content and CF layer density could explain complex dependence of the film properties on the polymer sublayer. These

results are important to optimize the electrical and mechanical properties of highly conductive polymer films, which can be used as electromagnetic interference shielding materials.

Keywords: *Conductive composite films, electroflocking, high intensity electric fields, volumetric resistivity, tensile strength.*

서 론

현재 고분자 복합재료 관련 기술개발은 복합재료의 성능 향상 뿐만 아니라, 저비용화, 기술의 효율성 및 환경친화성의 추구라는 핵심 문제점들에 대한 해결 방안의 모색과 밀접하게 관계되어 있다. 이들 문제점들을 해결하기 위한 효과적인 방법들 가운데 고전기장을 이용한 소위 electron ion technology (EIT)가 최근 유력한 기술로 부각되고 있다.¹⁻³ 고전기장의 영향으로 인하여 화학 반응속도(경화, 그라프트-공중합, 산화공정 등) 및 결정화 거동의 변화, 고분자 매트릭스와 필러간의 전기물리적 활성화 및 이로 인한 계면 접착성 향상 등의 여러 가지 현상이 발생한다.^{1,4-9} 또한 이러한 고전기장 이용 기술은 분산재 재료에 대하여 가장 효과적인데 이는 이들 분산입자들이 고도로 발달된 표면을 갖기 때문이다. 따라서 EIT는 고분자 분말기술, 열성형기술 등과 결합하여 고분자 복합재료 분야에서 그 적용 범위를 점점 확대해가고 있다.^{2,3,10}

고분자 복합재료에 있어서 EIT는 고분자 입자 및 필러와 외부 전기장의 상호작용의 이용을 바탕으로 한다. 이 기술은 고전기장에서의 고분자 분말과 섬유 필러의 대전, 이송, 식모 및 함침 등의 주요 공정들로 구성된다. 이러한 EIT는 이전부터 고분자 분말 코팅 산업에서 이용되어 왔지만 최근에 이르러서야 고분자 복합재료 제조에의 적용이 시도되었다. 특히 지난 10-15년간에 걸쳐 열가소성수지계 고분자 분말과 연속 강화섬유(탄소, 유리, 아라미드 섬유 등)를 바탕으로 한 고성능 섬유강화 복합재료의 개발에서 기술의 긍정적인 경험이 축적되어 왔는데 쉽게 녹지 않는 내열성 분말 고분자 및 연속 강화재(직물, 로빙)를 이용한 적층 플라스틱 제조에 EIT가 이용되었다. EIT는 연속 섬유강화 적층 플라스틱 제조에 있어 용액 함침 및 필름 스택킹 기술에 비하여 물리, 기

계적 특성 뿐만 아니라 내마모성 및 기타 특성의 향상에도 기여한다고 알려져 있다.^{3,10,11}

유망한 EIT 적용 분야 중의 하나가 이를 이용한 배향 분산된 불연속 섬유강화 고분자 복합재료의 제조이다.^{4,12,13} 이들 복합재료는 섬유 배향 방향으로 연속 섬유강화 복합재료에 근접하는 우수한 기계적 물성을 나타내는데 이는 또한 전기전도성과 같은 구조에 민감한 성질에도 중요하다.^{14,15} 불연속 섬유의 강제 배향은 주로 고전기장 혹은 자기장(자성 섬유의 경우)에서의 힘을 이용한다.¹⁶ 특히, 기존의 electroflocking 공정과 고분자 분말기술, 열성형기술 등을 결합하여 불연속 섬유로부터 복합필름을 제조하는 유망한 방법이 제안되고 있다.¹⁷⁻¹⁹ 이러한 강화재가 배향 분산된 필름의 제조에 있어 EIT의 적용은 다기능성 필름 복합재료뿐만 아니라 적층 하이브리드 고분자 복합재료의 제조에 대해서도 매우 흥미로운 시도라 할 수 있다. 즉, 고전기장을 이용하여 고분자 분말로 미리 함침된 유리섬유를 배향시켜 제조한 프리프레그를 적층하여 기존 단방향 연속섬유 프리프레그에 비하여 가공성이 뛰어나면서 기계적 물성은 기존 랜덤 단섬유 복합재료에 비하여 수 배 향상된 적층 섬유강화 플라스틱을 제조할 수 있는 가능성에 대하여 보고되고 있다.^{20,21} 이는 적층 플라스틱 복합재료 제조용 중간재로서 섬유 배향이 제어된 CFRP 필름을 활용하면 기존의 단방향 프리프레그 및 랜덤 매트 에 결여된 가공 특성 및 유연성을 살려 복잡한 형태의 제품화가 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 이러한 전기장을 이용한 분산배향기술은 상업적으로 유용한 고속-저가 복합재료 제조공정으로 발전하여 우주항공, 군수 등의 특수 분야에 제한되어 있는 구조용 고분자 복합재료의 응용분야를 자동차 산업, 건설 부문 및 일반 내구용 소비재 분야 등의 대형 시장으로 확장시킬 가능성이 매우 크다.

한편, 고도정보화시대를 맞이하여 전자파 공해는

인류가 반드시 해결해야만 하는 새롭고도 심각한 환경문제로 부각되고 있다.²² 80년 초부터 미국에서 각종 유해 전자파로부터 정밀 전자기기의 보호 및 이로 인한 오동작의 방지 등을 위하여 시작되었던 전자파 규제는 오늘날 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 대중적 우려에 의하여 그 필요성이 더욱 증폭되고 있다.²³ 지금까지는 도전성 코팅이 유효한 차폐 수단으로 널리 이용되어 왔으나 이 기술이 갖는 경제적·기술적 한계 및 내구성 결여 등의 문제로 플라스틱에 도전성 필러를 충전시킨 도전성 플라스틱 복합재료로의 대체가 강력하게 요망되어 왔다.²⁴ 각종 차폐용 하우징류는 사출 및 압축성형으로 제조되는데 이와 같이 도전성 콤파운드를 바탕으로 하는 제품에 있어서 필러 함량에 따른 전도도의 관계는 퍼콜레이션 현상으로 설명되고 있다.²⁵ 즉, 최종제품 내에 도전성 필러들간의 통전 네트워크의 형성 및 그 연결도의 풍부함이 절연체-도전체 전이 및 전도도를 결정한다. 현재 공업적으로 가장 유효한 어프로치로는 소량의 필러의 혼입을 통하여 통전되도록 하기 위하여 중형비가 큰 섬유상의 필러를 사용하여 이들을 최종제품 내에 가능하면 손상 없이 균일하게 분포시키는 것이다.²⁶ 이들 전기 전도성 섬유로 강화된 고분자 소재는 섬유의 도전성, 함량 및 분산상태에 의하여 결정되는 전도도에 따라 정전분산(ESD, electrostatic dissipation) 및 전자파차폐(EMI, electromagnetic interference)용 유기계 소재로 널리 이용되고 있다.²⁷ 그 중에서도 탄소 섬유강화 고분자(CFRP, carbon fiber reinforced polymers)계 필름은 이중층기법(double layering technique)을 이용하여 차폐용 하우징으로 뿐만 아니라 대면적 대상체의 차폐용도로 적합하고 면상 발열체 및 내부식성/내마모성 재료로의 응용도 가능하다. 그러나 이러한 CFRP 필름을 탄소 단섬유와 수지 혼합물의 압출을 통하여 제조하는 경우 공정 중에 섬유의 손상이 심하고 점도 문제로 고혼입이 불가능하다는 문제점이 있었다.²⁸

본 연구에서는 상기 제조법의 문제점들을 해결하면서 건식 공정이고 재활용 면에서도 이점이 있는 EIT를 이용한 도전성 고분자 복합필름의 제조에 있어서 점착하층의 두께가 제조된 탄소섬유/고밀도 폴리에틸렌 필름의 기계적, 전기적 성질에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

실 험

재료 및 필름 제조. 직경 8 μm 의 모노필라멘트가 12000개 집속된 고강도 탄소섬유 토우(태광산업, TZ-307)를 1 mm 길이로 균일하게 절단한 탄소섬유(CF)를 섬유강화재로 사용하였다. 고분자 매트릭스로는 입경 0.3 mm 이하의 고밀도 폴리에틸렌(유화, Grade M850, MI : 4.7 g/10 min) 분말을 사용하였다. 테프론 코팅된 강판(200×200×3 mm) 기재 상에 자체 설계·제작한 분말 공급기(동성 엔지니어링)를 사용하여 30~350 μm 의 범위에서 일정한 두께로 분말코팅한 뒤 180 $^{\circ}\text{C}$ 의 송풍 오븐에서 10분간 방치하여 점착하층을 형성시켰다. 자체 설계·제작한 브러쉬 롤러가 장착된 섬유공급기(동성엔지니어링)를 이용하여 개별화된 단탄소섬유를 3~4.2 kV/cm 범위의 직류 고전기장 하에서 점착하층에 정전식모하였다. 정전식모 과정과 이 때의 전기 회로도를 Figure 1에 도식적으로 나타내었다. 이 때 수직 식모된 CF 층밀도는 정전식모 시간을 조절하여 10~40 g/m²가 되도록 하였다. 이렇게 형성된 점착하층/CF층 상에 분말 공급기를 이용하여 일정량의 고분자 분말을 전체 필름 내의 탄소섬유 함량이 10 wt% 또는 20 wt%가 되도록 균일하게 가해주었다. 얻어진 점착하층/탄소섬유층/폴리에틸렌분말층으로 이루어진 조성물을 폴리에틸렌 분말층 면에 폴리이미드 필름을 덮고 두 강판 사이에서 압축성형법으로 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 3분간 0.3 MPa의 압력을 가하여서 70~470 μm 두께의 필름을 제조하였다.

필름의 체적비저항과 인장강도 측정. 제조된 도전성 복합 필름의 체적비저항은 접촉저항의 효과를 없애기 위하여 ASTM D991-89에 따른 4 탐침법을 이용하여 측정하였다. 이 때 시편의 길이는 160 mm 폭은 20 mm로 하였으며 전위 전극간의 거리 및 전류 전극간의 거리는 각각 40 mm와 120 mm로 하였다. Figure 2는 체적비저항 측정을 위한 set-up을 도식적으로 나타내고 있다. 안정된 전압은 Type 2553 DC Voltage Current Standard (Yokogawa Electric Works Ltd, Japan)을 사용하여 공급하였고 ammeter로는 3466A Digital Multimeter (Hewlett-Packard, USA), voltmeter로는 6512 Programmable Electrometer (Keithly, USA)를 각

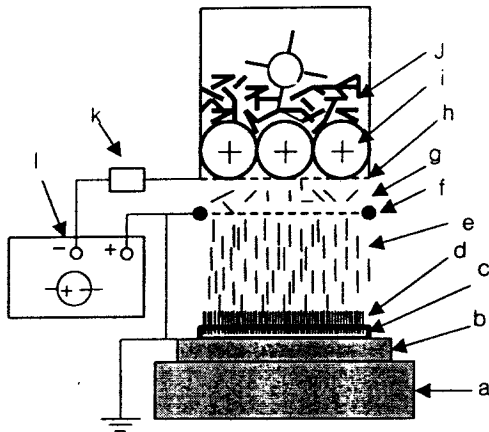


Figure 1. Schematic diagram for electroflocking (a: hot plate, b: teflon-coated metal substrate as a grounded electrode, c: polymer sublayer, d: aligned CF layer, e: CF in main alignment zone, f: main mesh electrode, g: CF in pre-alignment zone, h: ancillary mesh electrode, i: brush rollers, j: agglomerated CF flocks, k: resistor, and l: DC power supply).

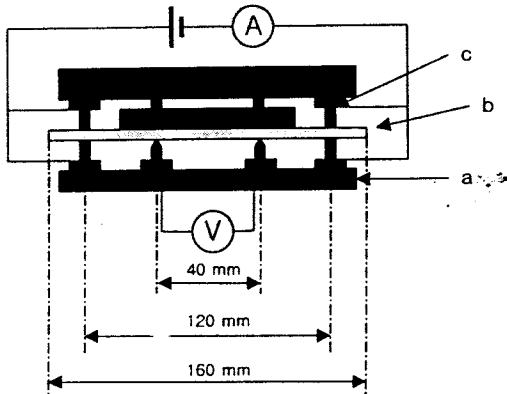


Figure 2. Set up of measuring volumetric resistivity of films using a four-probe method (a: Teflon, b: testing film, and c: metal).

각 사용하였다. 비저항 값은 시편당 5회 실시하였으며 5~7시편에 대한 시험결과와 평균값으로 하였다.

복합 필름의 인장강도는 ASTM D638-89에서 규정하는 표준시편 및 시험법에 따라 측정하였다. 폭 3 mm의 시편을 게이지 길이 10 mm로 하여 MTS 45/G 만능시험기(MTS, USA)를 이용하여 10 mm/min의 crosshead 속도로 시행하였다.

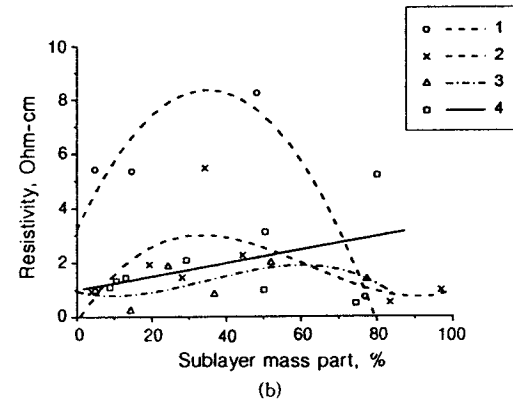
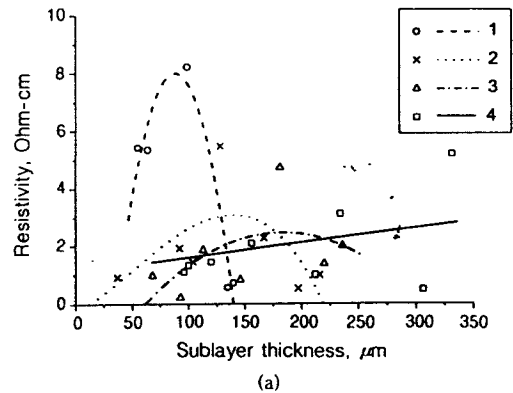


Figure 3. Volumetric resistivity with polymer sublayer thickness (a) and relative sublayer mass part (b) for CF/PE films with CF content of 10 wt% and CF layer density of 10 (1), 20 (2), 30 (3) and 40 g/m² (4).

결과 및 토론

EIT를 이용하여 제조된 고분자 복합필름에 있어서 고분자 매트릭스는 기재 상에 형성된 고분자 점착하층과 점착하층에 정전식모되어 고정된 탄소섬유층 위에 가해진 고분자 분말층의 두 부분으로 이루어진다. 제조된 필름의 성질은 이들 두 부분의 상대적 양에 의하여 영향을 받을 것이다. 한편 실제 응용되는 CFRP 필름의 CF 함량은 10 wt% 이상이므로 본 연구에서는 10 wt%와 20 wt%의 두 가지 CF 함량에 대하여 상이한 CF 층밀도에서 점착하층의 두께가 필름 성질에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

체적비저항. Figure 3과 Figure 4에 각각 10 wt%

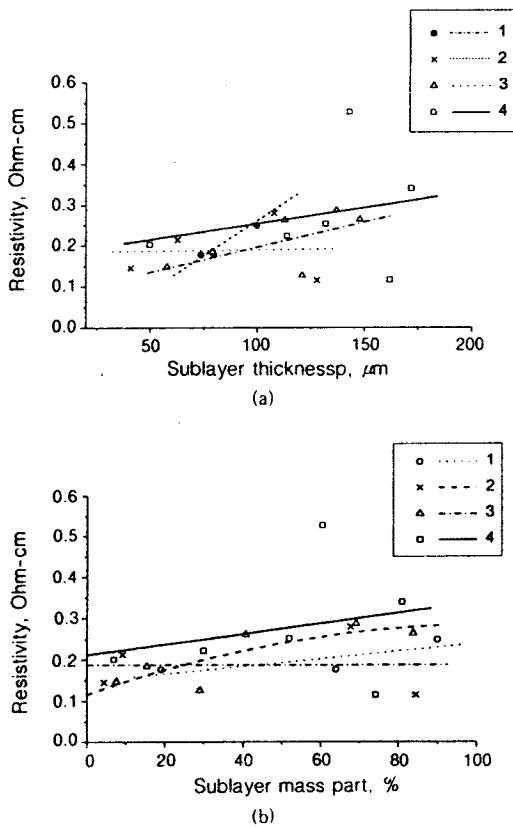


Figure 4. Volumetric resistivity with polymer sublayer thickness (a) and relative sublayer mass part (b) for CF/PE films with CF content of 20 wt% and CF layer density of 10 (1), 20 (2), 30 (3) and 40 g/m² (4).

와 20 wt%의 CF 함량의 필름에 대하여 고분자 점착하층의 두께 (a) 혹은 고분자 점착하층의 전체 매트릭스에 대한 무게 백분율 (b)에 따른 체적비저항을 상이한 CF 층밀도에 대하여 나타내었다. CF 함량이 10 wt%인 경우 (Figure 3), 각 조건에 대하여 체적비저항은 0.23~8.1 Ω·cm 사이 값을 보이고, CF 함량이 20 wt%인 경우 (Figure 4), 0.12~0.55 Ω·cm 사이의 값을 갖는데 이는 이전 연구 결과와 일치하고 있다.^{11,13} 일정 CF 함량에서 체적비저항의 점착하층에 대한 의존성은 점착하층 매트릭스의 무게 백분율에 대한 의존성과 유사한 거동을 하지만, 상이한 CF 함량에 따라서는 매우 다른 의존성을 보임을 알 수 있다. 즉, CF 함량이 10 wt%에서 비교적 CF 층밀

도가 작은 경우 최대값을 갖는 포물선 형태의 의존성을 보이는데 CF 층밀도가 증가함에 따라 그 의존성이 점점 약해지다가 거의 직선형태로 바뀐다. 한편, CF 함량이 20 wt%인 경우에는 모든 CF 층밀도에 대하여 점착하층에 대한 체적비저항의 의존성은 거의 직선적이다. 이 경우 체적비저항의 점착하층에 대한 의존성은 매우 약하여 점착하층의 두께가 40 μm에서 180 μm로 증가함에 따라 (점착하층의 무게백분율 5 wt%에서 90 wt%에 해당) 체적비저항은 약 1.5~3배 정도 소폭 증가에 그치고 있다. 또한 이러한 의존성은 CF 함량 10 wt%의 경우와는 달리 CF 층밀도와 큰 관련이 없다. 이러한 체적비저항 측정 결과로부터 낮은 CF 함량 및 CF 층밀도에서 점착하층이 체적비저항에 미치는 효과가 더 크다는 사실을 알 수 있다. 또한 약간의 예외를 제외하면 일정한 CF 함량에 대하여 대부분의 CF 층밀도에서 점착하층의 두께가 증가할수록 체적비저항도 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

이러한 결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 일반적으로 '점착하층/CF층/고분자 분말층' 조성물의 열성형 단계에서 점착하층의 두께 (혹은 점착하층의 매트릭스 무게 백분율)의 증가에 따라 다음 두 가지 상반되는 효과가 작용하게 된다. 첫째 효과는 점착하층의 두께 증가에 따라서 중심부나 위쪽에 비하여 CF 농도가 낮은 고분자층의 두께가 증가하고 필름 상층면 근처에서는 고분자 매트릭스의 양이 적어져 매트릭스 함침이 불충분하거나 기공이 포함된 느슨한 구조가 형성되며 이는 결과적으로 체적비저항을 증가시킨다. 한편 점착하층의 두께가 증가함에 따라 나타나는 또 다른 효과는 정전식모시 CF와 점착하층의 상호 침투 거리가 증가하고 용융 점착하층의 증진된 유동성으로 인하여 성형시 CF의 유침이 보다 활발해질 가능성이 커진다는 것이다. 특히 이러한 향상된 점착하층의 유동성 효과는 낮은 CF 함량 및 CF 층밀도의 필름에서 더욱 현저하며 이로 인하여 CF의 필름 내에서의 분산이 향상되고 보다 치밀한 구조의 필름이 얻어진다. 결국 이 효과는 CF의 도전성 망상구조의 형성에 도움을 주어 체적비저항을 감소시킨다. 이러한 상반된 두 효과의 영향을 통하여 Figure 3에서의 체적비저항의 점착하층에 대한 포물선적인 의존성을 설명할 수 있다. CF 함량이 20 wt%인 경

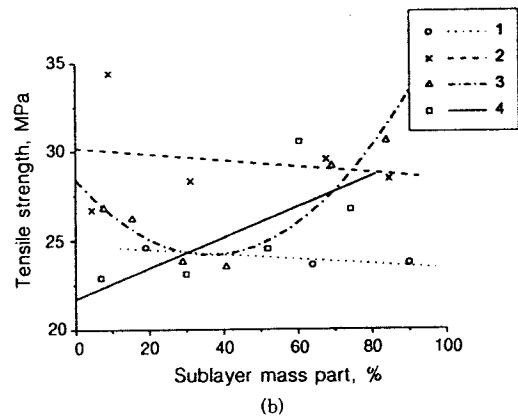
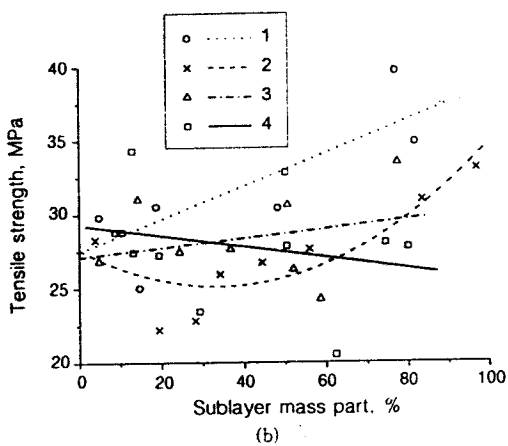
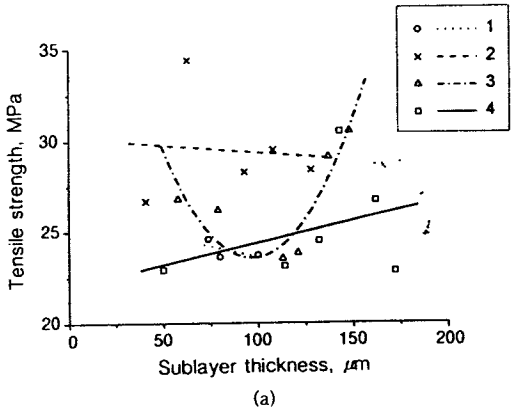
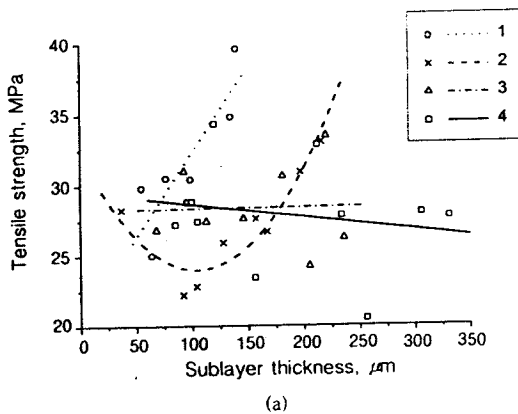


Figure 5. Tensile strength with polymer sublayer thickness (a) and relative sublayer mass part (b) for CF/PE films with CF content of 10 wt% and CF layer density of 10 (1), 20 (2), 30 (3) and 40 g/m^2 (4).

Figure 6. Tensile strength with polymer sublayer thickness (a) and relative sublayer mass part (b) for CF/PE films with CF content of 20 wt% and CF layer density of 10 (1), 20 (2), 30 (3) and 40 g/m^2 (4).

우, 점착하층의 두께의 증가에 따라 필름의 체적비저항이 선형적으로 증가하는 것은 첫번째 효과가 보다 우세하기 때문이라고 생각할 수 있다.

인장강도. Figure 5와 Figure 6은 각각 CF 함량 10 wt%와 20 wt%일 때 상이한 CF 층밀도에 대하여 점착하층의 두께 (a) 혹은 무게 백분율 (b)이 인장강도에 미치는 효과를 나타내고 있다. CF 함량이 10 wt%, CF 층밀도가 10 g/m^2 인 경우 33~39 MPa의 최대 인장강도를 보인다. CF 함량에 따라 인장강도의 점착하층에 대한 의존성은 상이하하며 이는 CF 층밀도에도 영향을 받는다. CF 층밀도가 낮은 경우 (10 g/m^2), 저 CF 함량 (10 wt%)에서는 점착

하층의 두께 (혹은 점착하층의 무게백분율)에 따라 필름의 인장강도는 증가하는데 반하여 (Figure 5의 curves 1), 고 CF 함량 (20 wt%)에서는 약간 감소한다 (Figure 6의 curves 1). 반면, CF 층밀도가 높은 경우 (40 g/m^2)에는 저 CF 함량 (10 wt%)에서는 오히려 감소하고 (Figure 5의 curves 4), 고 CF 함량 (20 wt%)에서는 증가하는 (Figure 6의 curves 4) 반대의 경향을 보인다. 중간 정도의 CF 층밀도 (20, 30 g/m^2)에 대해서는 위의 두 경우의 중간적인 경향을 보인다. 또한 인장강도의 점착하층의 무게 백분율에 대한 의존성과 점착하층의 두께에 대한 의존성과는 약간 다르지만, 그 경향은 유지됨을 알 수 있다. 이들 인장강도에 대한 실험 결과도 체적

비저항의 경우와 마찬가지로 점착하층의 증가에 따른 두 가지 상반되는 효과로서 설명할 수 있다. 저 CF 함량(10 wt%)에서는 필름 성형시 두 번째 효과가 우세하여 점착하층의 증가에 따라 증가된 점착하층의 유동성이 필름 내의 CF 분산성을 향상시키고 보다 치밀한 구조(기공이 없는)의 필름이 제조되며 그 결과 인장강도는 증가한다. 이러한 효과는 특히 낮은 CF 충밀도(10 g/m^2)에서 보다 현저하다(Figure 5(a)의 curve 1). 그러나 CF 충밀도가 커지면(40 g/m^2) 첫째 효과가 우세하게 되어 점착하층의 증가에 따라 인장강도는 감소하게 된다(Figure 5, curve 4). CF 충밀도가 20, 30 g/m^2 인 경우는 중간적인 상황으로 감소하다 증가(Figure 5, curve 2)하거나, 별로 변화가 없는(Figure 5, curve 3) 양상을 보인다.

CF 함량이 20 wt%인 경우, 낮은 CF 충밀도($10, 20 \text{ g/m}^2$)에서는 첫째 효과가 우세하여 점착하층의 증가에 따라 인장강도가 감소한다(Figure 6, curves 1, 2). 하지만 CF 충밀도가 커지면(40 g/m^2) 점착하층의 증가에 따른 인장강도 증가 경향이 커짐을 알 수 있다(Figure 6, curve 4). 이는 둘째 효과에 더하여 점착하층 자체의 강도가 기공을 포함한 느슨한 구조의 CFRP 필름의 강도보다 크다는 사실을 고려하면 점착하층 강도가 전체 필름 강도에 부가적으로 기여한다고 할 수 있다.

결 론

고전기장을 이용한 EIT로 도전성 CFRP 필름을 제조할 때 체적비저항과 인장강도에 미치는 고분자 점착하층의 두께에 대하여 연구하였다. 필름의 CF 함량과 CF 충밀도에 따라 체적비저항과 인장강도의 점착하층에 대한 의존성의 양상은 복잡하게 달라졌다. 제조된 복합필름의 전기적, 기계적 성질의 점착하층에 대한 복잡한 의존성은 점착하층의 증가에 따라서 필름 하층면에 중심부나 위쪽에 비하여 CF 농도가 낮은 절연성 고분자층의 두께가 증가하고 필름 상층면 근처에서는 반대로 필요한 고분자 매트릭스의 양이 적어져 매트릭스 함침이 불충분하거나 기공이 포함된 느슨한 구조를 형성시키는 효과와 증가된 매트릭스의 유동성을 바탕으로 CF 분산성이 향상되고 동시에 보다 치밀한 구조를 형성시키는 두 가지 상반

되는 효과를 통하여 설명할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Y. I. Voronezhcev, V. A. Goldade, L. S. Pinchuk, and V. V. Snezhkov, "Electrical and Magnetic Fields in Polymer Composites Technology", p. 264, Science and Technics, Minsk, 1990.
2. V. I. Popkov, "Higher Electric Fields in Technological Processes: Electron-Ion Technology", p. 238, Energiy, Moscow, 1969.
3. V. A. Dovgialo and O. R. Yurkevich, "Polymer Composites and Coatings Based on Dispersed Polymers", p. 256, Science and Technics, Minsk, 1992.
4. V. S. Mironov, "Electrophysical Activation of Polymer Materials at Frictional and Electrical Treatment", Doctor of Sci. Thesis, p. 335, Metal-Polymer Research Institute, Gomel, 1998.
5. T. Itoh, H. Kohyama, and T. Konishi, *Proc. of IUPAC 32nd Intern. Symp. Macromol.* Kyoto, 736 (1988).
6. M. Hozaca and K. Ando, *Mem. Fac. Eng.*, **18**, 47 (1977).
7. H. Marand and R. S. Stein, *J. Polym. Sci. Pt.B: Polym. Phys.*, **27**, 1089 (1989).
8. S. F. Zhandarov, V. A. Dovgialo, E. V. Pisanova, and V. S. Mironov, *Mechanics of Composite Materials*, **29**, 267 (1993).
9. S. F. Zhandarov, V. A. Dovgialo, and E. V. Pisanova, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **8**, 995 (1994).
10. L. T. Drzal, S. Padaki, M. N. Vyakarnam, and J. F. Fernandes, "Polymer Powder Technology", eds. by M. Narkis and N. Rosenzweig, ch. 18, p. 511, J. Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1995.
11. V. S. Mironov and M. Park, *Composites Science and Technology* (in press).
12. M. N. Vyakarnam and L. T. Drzal, *Plastics Engineering*, January, 35 (1997).
13. V. S. Mironov, O. B. Skryabin, and O. R. Yurkevich, *Proc. Int. Conf. Adv. in Materials & Processing Technol.*, 24-27 Aug., Dublin City Univ., vol. 1, 435, 1993.
14. P. K. Mallick, "Fiber-reinforced Composites", p. 310, Marcel Dekker, N.Y., 1988.
15. V. S. Mironov, "Conductive Polymer Composites: Materials, Technology and Applications", p. 64, BNITL, Minsk, 1991.

16. G. M. Knoblach, *SAMPE J.*, **25**, 9 (1989).
17. E. N. Bershev, "Physical Fundamentals of the Electroflocculation Technology", p. 127, Leningrad State University, Leningrad, 1984.
18. E. N. Bershev, "Electroflocculation(the deposition of a pile in electric field)", p. 229, Light Industry, Moscow, 1977.
19. E. L. Barden, "Flocked Materials, Technology and Applications", p. 294, Noyes Data Corp., Park Ridge, N. Y., 1972.
20. B. G. Braverman, A. I. Surgucheva, T. G. Sorina, T. A. Konikova, and V. S. Korneeva, *Plasticheskie Massy*, **3**, 47 (1978).
21. V. S. Mironov, O. B. Skryabin, V. A. Dovgyalo, and O. R. Yurkevich, *J. Friction & Wear*, **16**, 129 (1995).
22. K. Kozo, *Kogyo Zairyo*, **47**, 39 (1999).
23. Y. Istuo, *Kogyo Zairyo*, **42**, 31 (1994).
24. E. Kiesche, *Plastic Technology*, November, 77 (1985).
25. M. Weber and M. R. Kamal, *Polym. Comp.*, **18**, 711 (1997).
26. M. Sugino, *Kino Zairyo*, **19**(5), 5 (1999).
27. R. P. Kusy, "Metal-Filled Polymers", ed. by S. K. Bhattacharya, chap. 1, Marcel Dekker, New York, 1986.
28. T. Hasegawa, "Recent Advances of Polymer Compounds", p. 14, CMC, Tokyo, 1993.