

상용화제 Poly(styrene-co-maleic anhydride) 첨가에 따른 고충격 폴리스티렌 (HIPS)/Thermoplastic Urethane (TPU) 블렌드의 전기적 특성

이영희 · 이태희 · 김원중 · 김태영 · 윤호규 · 서광석[†]

고려대학교 신소재공학과

(2008년 1월 10일 접수, 2008년 2월 14일 채택)

Electrical Properties of High Impact Polystyrene (HIPS)/Thermoplastic Urethane (TPU) Blend with Poly(styrene-co-maleic anhydride) as a Compatibilizer

Young Hee Lee, Tae Hee Lee, Won Jung Kim, Tae Young Kim, Ho Gyu Yoon, and Kwang S. Suh[†]

Department of Materials Science and Engineering, Korea University,

5-1 Anam-dong, Seongbuk-ku, Seoul 136-701, Korea

(Received January 10, 2007; Accepted February 14, 2008)

초록 : 본 연구는 전자 부품 운반용으로 가장 많이 사용되는 수지인 폴리스티렌에 금속염 화합물과 에스테르계 화합물로 제조된 대전방지제를 혼합하여 대전방지성능, 기계적 강도를 높인 대전방지 재료를 제시하였다. 이를 위하여 상용화제인 poly(styrene-co-maleic anhydride) 내의 MAH 함량을 달리하여 기계적, 열적, 그리고 전기적 특성에 대한 연구를 하였다. HIPS(75 wt%)/TPU(25 wt%) 블렌드의 상용성의 전기적 특성을 확인하기 위해서 잔류 공간전하를 측정된 결과 PS-co-MAH(MAH : 25 wt%)가 첨가된 재료에서 상대적으로 작은 잔류 전하가 발견되었으며, 인장강도도 가장 높은 수치를 보였다. 또한 대전 방지제를 첨가했을 때 상용화제를 첨가하지 않은 재료보다 우수한 정전기 성능을 확인할 수 있었다. 결과적으로 HIPS/TPU 블렌드시 PS-co-MAH가 첨가되어 두 고분자의 계면 결합을 우수하게 하며, 대전방지제의 분산성을 좋게 함을 확인할 수 있다.

Abstract : This study suggested antistatic material which can increase anti-static properties and mechanical strength by mixing polystyrene for conveying electronic stuffs with metal salt and ester compound as a anti-static agent. We studied about mechanical, thermal and electrical characteristics by changing the contents of MAH of poly(styrene-co-maleic anhydride), compatibilizer. As the result of measuring residue space charge of the blends of HIPS(75)/TPU(25)/poly(styrene-co-maleic anhydride) (MAH weight ratio : 25, 32, 43.5 wt%), we could find small residue charge in the blend which MAH(25 wt%) was added and it showed the highest values in tensile strength. Additionally we found out the material to which compatibilizer was added kept better anti-static properties than one to which compatibilizer was not added. In the event we could confirm that the adding of PS-co-MAH enables two polymers were mixed well when HIPS/TPU was blended and anti-static agent made easier dissipative in the blend.

Keywords : blends, compatibility, polystyrene (PS), thermoplastic urethane (TPU), electrical properties.

서 론

고충격 폴리스티렌(HIPS) 수지는 경제적이고 압출, 사출 및 진공 성형성이 좋아 각종 부품 운반용기에 많이 사용되는 고분자이다.^{1,2} 특히 전자 부품 운반 용기로 사용할 경우 부품의 운반 및 취급 시 마찰 또는 접촉에 의해 발생하는 정전기 피해를 줄이기 위해 대전방지 처리되어야 하는데 폴리스티렌 수지에 대전방지성을 부여하는 방법 중에 하나가 금속염 화합물을 수지와 혼합하여 수지 자체에 대전방지

성을 부여하는 방법이다.

전자부품 운반 용기의 이러한 엄격한 정전기 특성을 만족하기 위해서는 금속염 화합물인 IDP (inherently dissipative polymer)라고 불리우는 고분자형 대전방지제를 폴리스티렌(PS)과 혼합하여 블렌드하는데 상기 금속염은 이온 해리하여 이온전도를 나타내는 물질이다. 금속염 화합물인 IDP를 기저 고분자인 PS와 혼합하였을 경우, PS는 비극성 고분자이기 때문에 극성인 금속염과의 화학적 결합에 결합이 생기게 되어 대전방지 특성이 나타나지 않는다. 따라서 금속염 화합물인 IDP가 기저 고분자 내에서 분산이 잘 되게 하고 안정적인 대전방지성을 확보하기 위하여 에테르기 또는 에스테르기 또

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: tery78@korea.ac.kr

는 에테르에 에스터기를 갖는 화합물인 열가소성 엘라스토머(탄성체)를 화합물과 미리 혼합하여 사용할 수 있다.³ 그러나 대부분의 블렌드 상태의 고분자들은 매우 낮은 entropy of mixing과 주로 양(+)의 값을 가지는 enthalpy of mixing 때문에 서로 잘 섞이지 않는다. 그러므로 잘 섞이지 않는 고분자로 이루어진 블렌드, 예를 들어 PE/PS 블렌드는 일반적으로 조잡하고 불안정하며 두 상 간의 약한 계면 점착력을 가지는 상 모폴로지를 나타낸다. 이런 경우에 있어서 계면은 서로 다른 상 간에 매우 약한 화학적 상호 작용에 의해 블렌드에 가해진 응력은 분산된 상으로 전달되지 않는다. 따라서 블렌드의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 고분자 블렌드내 두 상 간의 상용성(miscibility)을 증가시킬 필요가 있으며, 이는 상용화제의 첨가로 향상시킬 수 있다. 상용화제를 사용한 블렌드의 두 상 간의 혼화성을 증가시키는 몇가지 사례로서 LDPE/PS 블렌드에서 상용화제인 poly[styrene-*b*-(ethylene-*co*-butylene)-*b*-styrene](SEBS)을 사용하여 케이블의 수명을 연장하기 위한 재료 내의 수트리 성장률을 억제한 연구 사례가 있다.⁴ 한편, 계면은 기계적 특성에 있어서 뿐만 아니라 전기적 특성을 결정짓는데 있어서 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 직류 응력 조건에 놓여 있다고 가정하면 고분자는 쌍극자배열(dipolar orientation) 및 전극을 통한 전하주입(charge inject)과 같이 다양한 메커니즘에 의해 charge된다. 이때, 전압이 제거되면 주입된 전하(inject charge)는 소멸되고 만약 전하가 이동할 수 있는 hopping site가 있다면 전하가 주입되었던 전극으로 매우 빨리 되돌아간다. 그러나 잘 섞이지 않는 고분자 블렌드는 고분자 사이의 빈 공간이 생기고, 이러한 계면에서는 전하의 이동이 방해 받기 때문에 전압 인가 시 공간 전하(space charge)를 소멸시키기 어렵다. 만약 계면에 두 상을 연결해주는 여러 단계의 tie-molecule이 있다면 이것은 계면을 가로질러 효율적으로 전하가 소멸될 수 있다. 이는 블렌드 내의 전하의 소멸은 고분자 블렌드의 상용화도에 의존한다는 것을 의미한다. 이러한 전기적 성질을 이용하면 miscibility의 측정은 일반적으로 열적, 기계적, 그리고 광학적 분석을 이용한 전통적인 기술과 달리 고분자 블렌드 내의 공간전하 분포를 측정함으로써 가능해질 것이다.^{5,6}

본 실험에 사용된 상용화제는 PS가 가지는 비극성 성질과 maleic anhydride로 인해 극성을 가지는 부분이 공존하는 poly(styrene-*co*-maleic anhydride), cumene terminated(PS-*co*-MAH)를 MAH 함량별(25, 32, 43.5 wt%)로 선정하여 상용화제로 선택하였으며 잘 섞이지 않는 HIPS/TPU 블렌드 시스템 내에서 상용화제가 미치는 상용성 증가의 효과를 확인하기 위하여 공간전하 분포를 측정하여 블렌드 내에 주입된 전하의 decay time을 관찰하였다. 또한 SEM, DSC, 인장강도, 신율을 분석하였으며 마지막으로 전기적 특성을 살펴보기 위하여 금속염 화합물인 IDP를 HIPS/TPU 블렌드에 혼합하여 정전기 성능 평가인 표면저항, 마찰정전기, 감쇄시간을 확인하였다.

실 험

원재료 및 시편제작. 본 연구에서는 high impact polystyrene (HIPS), thermoplastic urethane(TPU) 그리고 cumene terminated poly(styrene-*co*-maleic anhydride) (PS-*co*-MAH)

Table 1. Materials in This Work

Materials	Supplier	Grade	M_w	MAH(wt%)
HIPS	Starex	HR-1360H	200000	-
TPU	Kolon Chemical	K-285ASP	-	-
PS- <i>co</i> -MAH	Aldrich	-	1600	43.5
		-	1700	32
		-	1900	25

가 사용되었다.

Table 1에서 보듯이 HIPS는 스티렌 단량체와 폴리부타다이엔(polybutadiene, PBR)을 공중합시켜 만든 높은 충격강도를 가지는 그레이드로 Starex의 HR-1360H 제품을 사용하였다. TPU는 코오롱사의 K-285 제품을 사용하였으며, 상용화제로 사용되는 poly(styrene-*co*-maleic anhydride), cumene terminated(PS-*co*-MAH)는 Aldrich사의 제품을 사용하였다.

또한, 대전방지로 사용되는 IDP를 제조하기 위하여 lithium(trifluoromethane sulfonyl)imide (Aldrich)와 poly(ethylene glycol) (M_w : 400, Aldrich)를 구입하여 전처리 과정 없이 4/6의 중량비로 혼합한 뒤, 40°의 온도에서 1시간 교반하여 사용하였다.

블렌드를 준비하기 전에 모든 고분자들의 블렌드 내에서 공간 전하 형성에 영향을 미치는 인자 등을 제거하기 위해 48시간 동안 iso-propyl alcohol(IPA)에 추출 후, 40 °C 진공오븐에 48시간 건조시켰다.

실험에 사용된 시편은 Bautech사의 twin screw extruder(BA-11)를 사용하여 180~200 °C에서 60 rpm으로 HIPS/TPU(75/25 wt%)/PS-*co*-MAH with maleic anhydride(25, 32 and 43.5 wt%) 3 phr를 혼합하여 제조한 후 스위트 형태의 시편을 만들기 위해서 hot press(Carver lab. Corp.)를 사용하여 180 °C에서 12 ton의 압력으로 압축 성형하였다.

측정. 전하 분포는 pulsed electro-acoustic(PEA) 방법을 통하여 측정되었다. 측정장치의 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 공간 전하 분포는 전압 40[kV_{dc}/mm]로 30분간 인가한 상태와 short circuit(전압차단) 후 각각 측정하여 크기를 비교하였다. 시료는 hot press를 사용하여 10분 동안 180 °C, 12 ton에서 대략 700 μm 두께로 성형하였으며, 전극과 시료간의 접촉 저항을 줄이기 위해서 반도체 컵과운드 전극을 사용하였다.⁶

블렌드 시료의 모폴로지는 scanning electron microscope(Hitachi S-4300)를 이용하여 관찰하였다. 시료는 hot press 180 °C, 12 ton으로 가압되어진 재료를 표면변형을 최소화하기 위해 액체질소(liquid nitrogen) 분위기에서 파단하였다. 파단된 시편을 sputter coater(Hitachi E-1030)내에 넣어서 백금으로 코팅한 후 SEM을 사용하여 시편의 파단면을 관찰하였다.

블렌드의 유리전이온도(glass transition temperature)는 DSC(differential scanning calorimeter, TA-2910)를 이용하여 분석하였다. 각 시료를 표준 알루미늄 펜에 봉하였고, 열이력(thermal history)을 제거하기 위해 200 °C까지 가열한 후 5분간 온도를 유지한 뒤 시료들은 200~20 °C까지 10 °C/min의 속도로 냉각한 후 다시 200 °C까지 같은 승온 속도로 가열하였다. 또한, 인장강도와 신율을 측정하여 블렌드의 상용성을 판단하였다. ASTM D-638에 따

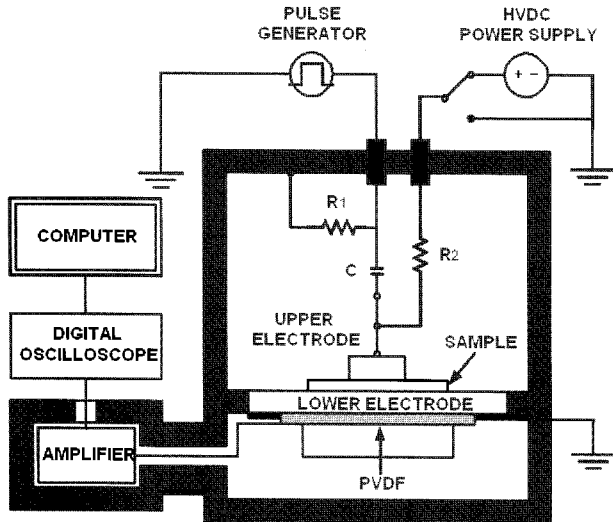


Figure 1. Schematic diagram of the PEA system used in the study.

라 시편은 180 °C, 12 ton의 압력으로 1 mm의 두께로 hot press 후, dumbbell를 사용하여 제조하였으며, 측정 장비는 universal test machine(UTM, shimadzu, model AGS-1000D)을 사용하였으며, crosshead speed는 100 mm/min, load cell은 1000 kgf로 고정하여 측정하였다. 샘플은 각 sample당 12개를 측정하여 최소 및 최대 값을 버리고 나머지 10개의 값을 취하여 평균하였다. 마지막으로, HIPS/TPU 블렌드에 대전방지제로서 IDP를 첨가하여 정전기 성능을 관찰하였다. 각 시편은 HIPS/TPU(75/25 wt%)에 PS-co-MAH(MAH 25 wt%)를 3 phr를 첨가한 시료와 첨가하지 않은 시료로서 측정은 surface resistance meter(PRS-801, Prostat), charge plate monitor(CPM288, Monroe electronics), field meter(FMX-002, SIMCO)를 이용하여 블렌드된 시편의 표면 저항, decay time, 마찰 정전기를 측정하였다.

결과 및 토론

Charge Accumulation. Figure 2는 PS-co-MAH 내의 MAH의 중량비에 따른 75 wt% HIPS/25 wt% TPU / 3phr PS-co-MAH 블렌드의 전압 제거 직후 공간전하를 보여준다. 블렌드 내에서 존재하는 잔류 전하는 PS-co-MAH를 첨가함으로써 감소하는데 PS-co-MAH 내의 MAH함량이 25 wt%일 때 블렌드 내에서 매우 작은 잔류 전하가 발견되었다.

PS-co-MAH를 첨가하지 않은 75 wt% HIPS/25 wt% TPU 블렌드는 잘 섞이지 않은 고분자 블렌드이기 때문에 고분자 사이의 vacancy가 생기고, 이러한 계면에서는 전하의 이동이 방해받기 때문에 전압이 제거되었을 시 space charge를 소멸시키지 않는다.^{6,7} PS-co-MAH는 계면에 두 상을 연결해주는 여러 단계의 tie-molecule의 역할을 수행하며 이것은 계면을 가로질러 효율적으로 전하가 소멸될 수 있는 가교 역할을 한다고 가정할 수 있다.

또한, Figure 3은 PS-co-MAH내의 MAH 함량이 HIPS/TPU/PS-co-MAH 블렌드에서 중요한 요인으로 작용되어지는 것을 보

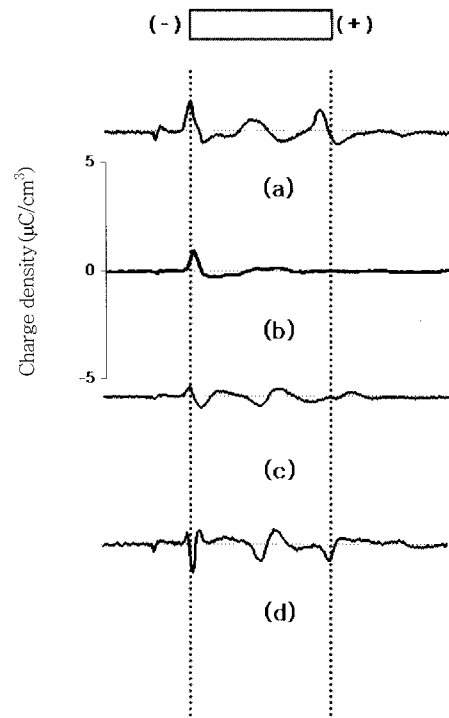


Figure 2. Spatial charge accumulation after short circuit in the 75 wt% HIPS/25 wt% TPU without and with PS-co-MAH blend. (a) 0 phr, (b) 25 wt% MAH-3phr, (c) 32 wt% MAH-3 phr, and (d) 43.5 wt% MAH-3 phr.

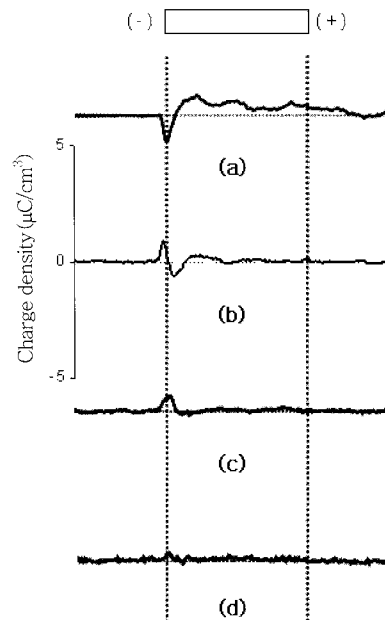


Figure 3. Spatial charge accumulation after short circuit in the 56.5 wt% HIPS/43.5 wt% TPU without and with PS-co-MAH blend (a) 0 phr, (b) 25 wt% MAH-3phr, (c) 32 wt% MAH-3 phr, and (d) 43.5 wt% MAH-3 phr.

여주는데, Figure 2의 결과를 보면 75 wt% HIPS/25 wt% TPU/PS-co-MAH(25 wt%)가 가장 좋은 상용화제라면 56.5 wt% HIPS/43.5 wt% TPU 블렌드에서도 PS-co-MAH(25 wt%)가

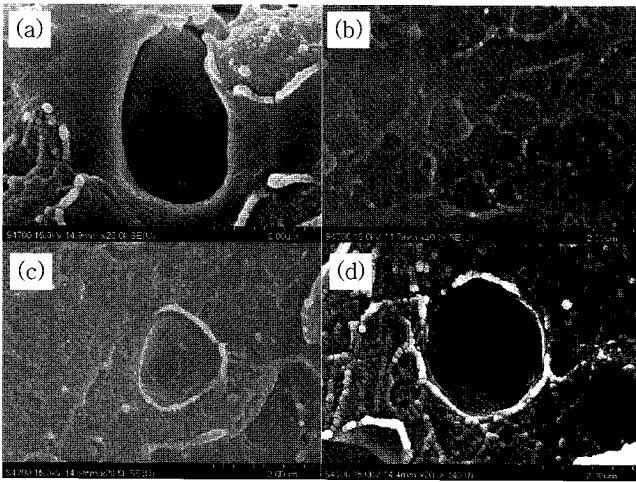


Figure 4. SEM images of 75% HIPS/25% TPU blends without and with compatibilizer. (a) 0 phr, (b) 25 wt% MAH-3 phr, (c) 32 wt% MAH-3 phr, and (d) 43.5 wt% MAH-3 phr (X 20000).

가장 좋은 특성을 나타내야 하지만 56.5 wt% HIPS/43.5 wt% TPU 블렌드에서는 PS-co-MAH내의 MAH함량 43.5 wt%이 가장 좋은 결과를 보였다. 따라서 HIPS/TPU 블렌드 시스템에서 PS-co-MAH 내의 MAH 함량은 상용성에 중요한 요인으로 작용되는 것으로 판단된다.

모폴로지. Figure 4는 75% HIPS/25% TPU 블렌드 내의 PS-co-MAH의 중량비에 따른 interfacial morphology를 보여준다.

SEM에 의해 관찰된 이 블렌드의 미세적인(microscopic) 모폴로지는 HIPS/TPU 블렌드 내의 상용성과 전하 형성의 관계 증명에 중요한 단서를 제공한다.

Figure 4(a)는 PS-co-MAH가 첨가되지 않은 75 wt% HIPS/25 wt% TPU 블렌드이며 Figure 4(b),(c),(d)는 PS-co-MAH 내의 MAH의 중량비를 다르게 하여 블렌드된 시편이다. Figure 4(a)에서는 HIPS 입자와 TPU 사이의 계면이 비어있어서 서로 상용성이 좋지 않음을 볼 수 있다. 그러나 Figure 4(b),(c),(d)는 PS-co-MAH가 두 고분자 상을 연결시켜 주므로 상용화제의 역할을 하고 있다. 결과적으로 75 wt% HIPS/25 wt% TPU/PS-co-MAH(MAH : 43.5 wt%) (Figure 4(d))가 PS-co-MAH 첨가 시 가장 좋지 못한 계면을 보여준다. 하지만 HIPS/TPU의 함량을 조절하여 56.5 wt% HIPS/43.5 wt% TPU/PS-co-MAH(MAH : 43.5 wt%) 3 phr로 블렌드 되어진다면 PS-co-MAH(MAH : 43.5 wt%)가 가장 좋은 상태의 계면을 보인다(Figure 5). 이를 전하분포 실험의 결과와 유추해 보면 TPU 입자와 매트릭스인 HIPS 사이의 계면이 비어있어서 서로 상용성이 좋지 못한 Figure 4(a)는 계면에서 형성된 계면간의 부조화가 전하의 이동을 막는 것으로 생각된다. 그러나 PS-co-MAH가 첨가된 Figure 4(b),(c),(d)는 그 계면이 상용화제의 역할을 하고 있는 PS-co-MAH로 채워져 있어 두 고분자 상을 연결시켜주었음을 확인할 수 있다. 상용화제의 첨가는 층간의 상호 연결을 해주어 전압인가 시 계면에 갇혀버린 전하가 그것이 처음 왔었던 전극으로 돌아갈 수 있도록 한다. 그러므로 블렌드 내의 잔류 전하는 현저하게 감소하게 된다.

Differential Scanning Calorimetry. Figure 6은 PS-co-MAH의

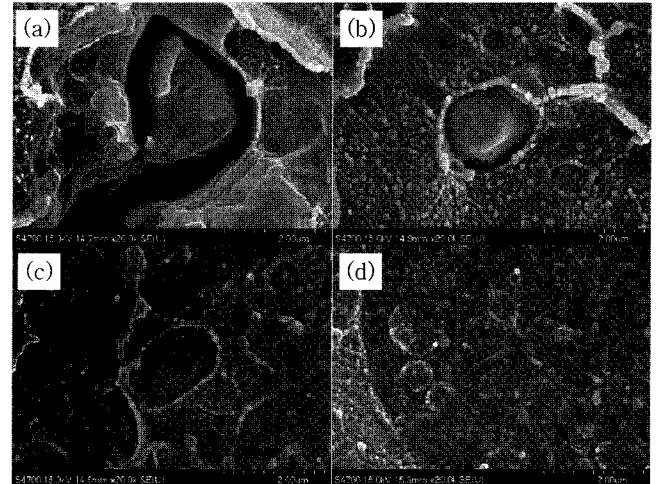


Figure 5. SEM images of 56.5 wt% HIPS/43.5 wt% TPU blends without and with compatibilizer. (a) 0 phr, (b) 25 wt% MAH-3 phr, (c) 32 wt% MAH-3 phr, and (d) 43.5 wt% MAH-3 phr (X 20000).

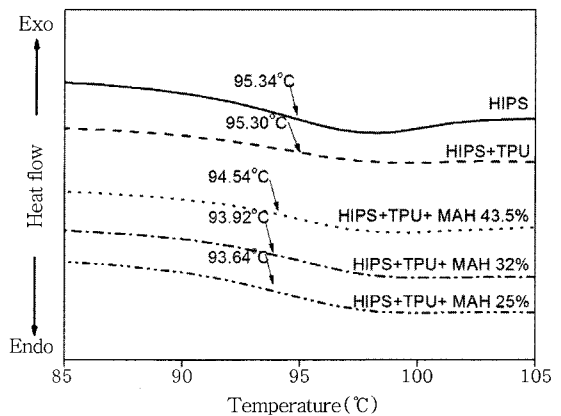


Figure 6. DSC thermograms for 75% PS/25% TPU blends without and with compatibilizer (3 phr).

MAH 함량비에 따른 75 wt% HIPS/25 wt% TPU/PS-co-MAH 블렌드의 유리전이온도(glass transition temperature, T_g)를 보여준다. Figure 6에서 보는 바와 같이 75 wt% HIPS/25 wt% TPU/PS-co-MAH(MAH : 25 wt%)는 HIPS, HIPS/TPU, HIPS/TPU/PS-co-MAH(43.5, 32 wt%)보다 낮은 T_g 를 나타낸다. 일반적으로 블렌드 내의 고분자 상용성이 좋아지면 블렌드된 고분자의 T_g 가 서로 가까워지는데, HIPS의 T_g (95.34 °C), TPU의 T_g (-40 °C)이므로 Figure 6에서 보는 바와 같이 두 고분자가 블렌드되어 서로의 T_g 가 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 PS-co-MAH는 상용화제로서의 효과는 있으며, 75 wt% HIPS/25 wt% TPU 블렌드 내의 PS-co-MAH의 MAH 함량에 따라 상용성에 중요한 영향을 미친다.

인장강도와 신율. Figure 7은 PS-co-MAH 중량비에 따른 75 wt% HIPS/25 wt% TPU/PS-co-MAH 블렌드의 인장강도와 신율을 보여준다. Figure 7에서 보는 바와 같이 75 wt% HIPS/25 wt% TPU/PS-co-MAH 25 wt%는 HIPS, HIPS/TPU, HIPS/

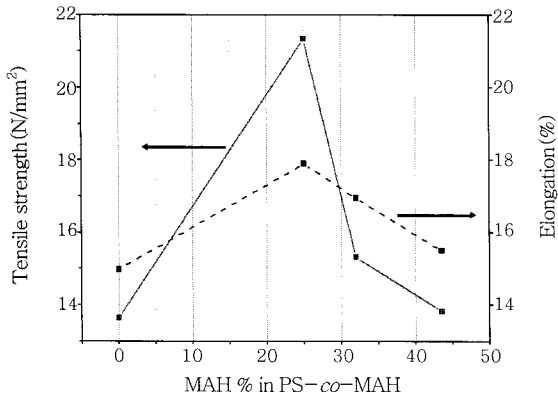


Figure 7. Tensile strength and elongation for 75% PS/25% TPU blends without and with compatibilizer (3 phr).

Table 2. ESD Protection Abilities

HIPS/TPU (75/25)	IDP (phr)	MAH(25 wt%) (phr)	Surface resistivity (ohms/sq.)	Decay (s)	Tribo-voltage (V)
1	1.5	-	insulative	42	470
2	1.5	3	3.16×10^{10}	0.3	60
3	2.0	-	3.98×10^{11}	20	170
4	2.0	3	1.25×10^{10}	0.1	20

TPU/PS-co-MAH(43.5, 32 wt%) 보다 높은 인장강도와 신율을 보였으며 이것은 앞서 언급했던 계면 간의 vacancy가 결합으로 작용하다가 PS-co-MAH의 첨가로 계면이 채워지면서 계면 결합력이 증진된 결과라고 할 수 있다. 결과적으로 상용화제로서의 PS-co-MAH 내의 MAH 함량이 25, 32.5, 43.5 wt%인 PS-co-MAH 전부 효과는 있지만, 75 wt% HIPS/ 25 wt% TPU 블렌드에서는 PS-co-MAH(MAH 25 wt%)가 가장 좋은 효과를 보인다. 이는 PS-co-MAH 내의 MAH 함량이 상용성에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다.

대전방지 성능평가. Table 2는 금속염 화합물인 IDP를 75 wt% HIPS/25 wt% TPU 블렌드에 첨가 시 상용화제인 PS-co-MAH가 3 phr 첨가되어 있는 시편과 그렇지 못한 시편의 대전방지 성능 평가를 보여준다. 결과에 보듯이 상용화제의 첨가에 따라 대전방지 성능의 차이가 남을 알 수 있다. 이는 대전방지제인 금속염 화합물인 IDP는 폴리우레탄과는 잘 혼합되더라도 PS 수지와는 혼련성이 매우 나빠 실제로 이들 성분을 PS와 혼합하면 대전방지 성분과 PS 수지는 서로 별도의 도메인을 형성하여 대전방지성의 구현이 잘 안되거나 또는 대전방지성을 부여하기 위해 많은 양의 금속염 화합물을 혼합해야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 HIPS/TPU 블렌드 시 상용화제인 PS-co-MAH가 첨가되어 두 고분자를 중간 상호 연결을 해주어 금속염 화합물인 IDP가 쉽게 분산될 수 있는 것으로 추측된다.

결론

PEA를 이용한 75 wt% HIPS/25 wt% TPU 블렌드 내에서 PS-co-MAH가 공간전하 분포에 미치는 영향을 실험한 결과 PS-co-MAH(25 wt% MAH)의 첨가는 블렌드에 축적된 공간전하를 현저히 감소시킨 것을 확인할 수 있었다.

SEM을 사용한 interfacial 모폴로지 조사를 통해서 PS-co-MAH가 첨가된 경우 HIPS와 TPU 상을 연결해주는 새로운 층의 형성이 관찰되었고 이것은 축적된 공간 전하의 양과 상관관계를 가짐으로 결국 향상된 phase 모폴로지는 계면에서 쉽게 전하 이동을 허용함을 알 수 있었다. 그러나 단지 PS-co-MAH의 MAH 함량이 증가함에 따라 75 wt% HIPS/25 wt% TPU 블렌드의 성질이 향상되는 것이 아니라 PS-co-MAH의 MAH 함량이 HIPS/ TPU/ PS-co-MAH 블렌드에서 중요한 요인으로 작용되는 것을 실험결과로부터 확인할 수 있다.

PEA를 사용한 공간전하측정 방법이 고분자 블렌드를 전기적 특성으로 상용성을 분석해 낼 수 있으며 이는 상용성을 분석하기 위해 기본적으로 진행되었던 실험인 SEM, 인장강도, 신율, DSC 결과로도 확인할 수 있었다.

마지막으로 HIPS/TPU 블렌드에 금속염 화합물을 수지 자체에 혼합하여 대전방지성을 부여하는 방법으로 혼련성이 매우 나쁜 HIPS와 TPU에 상용화제인 PS-co-MAH를 첨가함으로써 금속염 화합물인 IDP가 두 고분자 블렌드 내에서 수월하게 분산됨을 대전방지 성능평가 실험 결과로부터 확인할 수 있었다.

감사의 글 : 본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

1. H. Ohishi, T. Ikehara, and T. Nishi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **80**, 2347 (2001).
2. S. N. Cassu and M. I. Felisberti, *J. Appl. Polym. Sci.*, **82**, 2514 (2001).
3. Y. Ekstein, U.S. Patent 21, 474 (1999).
4. T. H. Lee, T. Y. Kim, D. M. Kim, W. J. Kim, J. H. Lee, and K. S. Suh, *Macromol. Mater. Eng.*, **291**, 109 (2006).
5. P. S. Theocaris and V. Kefalas, *J. Appl. Polym. Sci.*, **42**, 3059 (1991).
6. T. Y. Kim, D. M. Kim, W. J. Kim, T. H. Lee, and K. S. Suh, *J. Polym. Sci.; Part B: Polym. Phys.*, **42**, 2813 (2004).
7. K. S. Suh, H. J. Lee, D. S. Lee, and C. G. Kang, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **2**, 460 (1995).