

ABS-*g*-MAH를 포함한 Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)과 Polycarbonate 고분자 블렌드의 유변학적, 기계적, 형태학적 물성

송기현 · 홍준희 · 송유택 · 김연희 · 한미선 · 윤호규* · 김우년†

고려대학교 화공생명공학과, *고려대학교 신소재공학부

(2006년 12월 22일 접수, 2007년 6월 20일 채택)

Rheological, Mechanical and Morphological Properties of Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)/Polycarbonate Blends with ABS-*g*-MAH

Ki Heon Song, John Hee Hong, Yu Taek Sung, Youn Hee Kim,
Mi Sun Han, Ho Gyu Yoon*, and Woo Nyon Kim†

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University,

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

*Department of Materials Science, Korea University,

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

(Received December 22, 2006; Accepted June 20, 2007)

초록 : Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (ABS)/polycarbonate (PC) (70/30, wt%) 블렌드에 상용화제를 첨가하여 이축 압출기로 시편을 제조하였다. 사용된 상용화제는 ABS에 maleic anhydride(MAH)와 dicumyl peroxide(DCP)를 첨가하여 반응압출을 통하여 그래프트시킨 ABS-*g*-MAH이었다. ABS/PC (70/30) 블렌드에 상용화제를 5 phr 첨가한 경우 인장강도는 큰 증가는 관찰되지 않았으나, 약 52.25 MPa에서 55.03 MPa로 약간 증가하였다. ABS/PC (70/30) 블렌드의 유변학적 물성을 측정된 결과 상용화제 첨가 시 낮은 진동수 영역에서 탄성률의 증가가 관찰되었으며, 이와 같은 탄성률 증가는 손실탄성률보다 저장탄성률에서 더 잘 나타났다. 또한 ABS/PC (70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH를 1~10 phr 첨가 시 분산상인 PC의 크기는 약 1.2에서 1.5 μm 로 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 이상의 연구 결과로서 저장탄성률 증가 및 복소점도 상승 그리고 인장강도의 증가로부터 ABS-*g*-MAH의 양이 5 phr일 때 ABS/PC (70/30) 블렌드에서 효과적인 상용화제로 작용함을 알 수 있었다.

Abstract : Polymer blends containing poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (ABS) and polycarbonate (PC) (70/30, wt%) with compatibilizer were prepared using twin screw extruder. Compatibilizers were prepared by reactive extrusion with the ABS, maleic anhydride(MAH) and dicumyl peroxide(DCP) using twin screw extruder. In the ABS/PC (70/30) blends, tensile strength did not change significantly, but increased from 52.25 to 55.03 MPa when the ABS-*g*-MAH was added in the amount of 5 phr. From the results of rheological properties, storage modulus of the ABS/PC/ABS-*g*-MAH blends at low frequencies showed larger value than that of the ABS/PC (70/30) blend. From the results of the morphological properties of the ABS/PC (70/30) blend, it was observed that the drop size of the PC ranged from 1.2 to 1.5 μm and did not change significantly with the addition of the ABS-*g*-MAH (1~10 phr). From the results of the storage modulus, complex viscosity, and tensile strength of the ABS/PC (70/30) blends, it is found that the ABS-*g*-MAH is an effective compatibilizer in the ABS/PC (70/30) blends when the ABS-*g*-MAH is added in the amount of 5 phr.

Keywords : ABS/PC blend, ABS-*g*-MAH, reactive extrusion, morphology, rheology.

서 론

Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (ABS)/polycarbonate (PC) 블렌드는 ABS와 PC의 장점을 최대한 유지하고 단점을 상호

보완하고자 최근에 널리 연구되어지고 있는 고분자 블렌드이다.¹⁻⁹ 예를 들어서 ABS/PC 블렌드는 ABS의 장점인 유동성, 내화학성, 두께 의존성과 PC의 장점인 기계적 강도, 내열성, 내후성을 동시에 만족하고자 하는 고분자 블렌드이다.

ABS/PC 블렌드는 비상용성을 보이는데 이러한 비상용성을 극복하기 위하여 여러 가지 다양한 반응 상용화(reactive compati-

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kimwn@korea.ac.kr

bilization)와 코어-셸 상용화(core-shell compatibilization) 방법이 사용되고 있다.¹⁰ Methyl methacrylate, styrene 그리고 maleic anhydride(MAH)를 기반으로 한 코어-셸 상용화제 등이 대표적인 예이다. 또한 polyamide, polypropylene 그리고 polyethylene terephthalate 등에 ABS-*g*-MAH를 반응 블렌드(reactive blend)하여 강인성(toughness) 및 충격강도를 향상시키는 연구도 보고된 바 있다.¹¹⁻²⁰ Wildes 등은 ABS/PC 블렌드에 상용제로 amine-functionalized SAN을 사용하였으며,⁶ Balakrishnan 등은 PC에 ABS-*g*-MAH를 직접 첨가하여 연구한 것을 발표하였고,¹² Elmaghor 등은 PC에 ABS-*g*-MAH를 첨가하여 PC가 연속상을 나타내는 블렌드 조성에서 연구한 것을 발표한 바 있다.¹⁷

본 연구에서는 이축 압출기를 이용한 반응압출을 통하여 ABS-*g*-MAH를 제조한 후 이를 역시 이축 압출기로 제조한 ABS/PC와 블렌드하는 실험을 수행하였다. ABS 공중합체에 MAH를 반응압출 방법으로 도입하게 되면 ABS 공중합체는 ABS-*g*-MAH 형태를 이루게 되어 보다 강한 극성을 보여줄 수 있게 된다. 또한 이러한 ABS-*g*-MAH는 PC와의 블렌드 사이의 상용성을 증가시켜 주거나 기계적 강도의 증가 역시 유도할 수 있다고 보고되었다.^{12-14,17} 본 연구에서는 특히 ABS가 연속상을 나타내는 ABS/PC(70/30) 블렌드에 상용화제로 ABS-*g*-MAH를 첨가하여 제조한 시편을 만능시험기(UTM)를 사용하여 기계적 물성을 측정하였고, 상용화제 첨가에 따른 블렌드 단면의 형태학 관찰 및 advanced rheometric expansion system(ARES)를 이용하여 유변물성을 측정하였다. 특히 본 연구에서는 ABS-*g*-MAH를 첨가 양에 따른 기계적 물성과 유변물성 결과에 대한 상호 연관성을 나타내었다.

실 험

재료. 본 연구에서 사용된 고분자인 ABS와 PC는 상업용 제품이며, 분자량에 관한 내용을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 상용화제는 ABS-*g*-MAH 공중합체로서, 상용화된 제품이 없어서 반응압출방법을 통하여 실험실에서 제조하여 사용하였다. 상용화제 제조 시 사용된 MAH와 dicumyl peroxide(DCP)의 조성은 Table 2에 나타내었다. ABS-*g*-MAH에서 ABS 100 g에 대한 MAH, DCP의 상대적 함량비율은 각각 5 wt%와 0.3 wt%이다. ABS와

PC의 중량비율은 70 : 30이며, ABS/PC 블렌드에 상용화제인 ABS-*g*-MAH는 ABS/PC 블렌드 전체에 대하여 1, 3, 5, 7 그리고 10 wt%를 첨가하였다.

시편 제조. 고분자 재료인 ABS와 PC는 진공 오븐으로 70 °C와 90 °C에서 각각 12시간 동안 건조시킨 후 블렌드하였다. 상용화제인 ABS-*g*-MAH를 제조하기 위하여 ABS와 MAH 그리고 DCP를 동방향 이축압출기(내경 : 11 mm, L/D=40, Bautek Co.)로 압출하였으며, 압출 시 반응시간을 충분히 하기 위하여 스크류의 속도는 20 rpm으로 하여 압출기 내에서의 체류시간을 길게 하였다. 고분자 블렌드 공정은 역시 이축압출기를 사용하였으며, 호퍼부분은 180 °C, 배럴부분은 240 °C로 설정하고, 스크류의 속도는 50 rpm으로 고정하여 실험하였다. 압출기를 통해 제조된 블렌드는 70 °C의 진공 오븐에서 12시간 동안 건조시킨 후, 사출성형기를 통해 인장, 충격 그리고 광택실험용 시편으로 제조하였다. 광택실험용 시편 제조시에는 표면이 특수 코팅된 몰드(mold)를 사용하였다. 또한 고온 프레스트기를 통해 240 °C에서 ARES용 동전시편(지름 : 25 mm)을 제조하였다.

적외선 분광법(FT-IR). 반응 압출을 통한 ABS-*g*-MAH 제조 시, MAH가 ABS에 그래프트되었는지 확인하기 위하여 적외선 분광법(FT-IR, Perkin Elmer, Spectrum GX1)을 사용하였다. ABS-*g*-MAH를 chloroform에 녹여 액체 상태로 측정을 하였다.

주사 전자 현미경(SEM). 상용화제 첨가 시 블렌드의 미세 단면 구조를 관찰하기 위하여 SEM을 이용하였다. 블렌드를 액체질소로 냉각하여 절단한 후 그 단면을 30~50 Å 두께로 백금 코팅하여 30 Kv의 가속 전압으로 조사하였으며, 사용된 SEM의 모델은 Hitachi S-4300였다. 상용화제 첨가 시 분산상의 형태를 좀더 명확히 관찰하기 위하여 분산상인 PC를 sodium hydroxide(NaOH) 수용액으로 에칭하였다.

기계적 물성 측정. 만능시험기(Instron 4467)를 사용하여 가공된 고분자 블렌드의 인장강도를 측정하였다. 실험은 ASTM D-638에 의거하여 cross-head 속도는 5 mm/min로, 게이지 길이는 50 mm로 설정하여 측정하였다. 충격강도를 측정하기 위하여 ASTM D-256에 의거하여 아이조드 임팩트 테스트기(Izod impact tester, McVan instruments, ITR2000)를 사용하여 상온에서 측정하였다.

유변물성 측정. 블렌드의 유변학적 성질을 advanced rheometric expansion system(ARES, TA Instruments)을 이용하여 측정하였다. 지름 25 mm의 블렌드 시편을 parallel plate fixture를 사용하여 0.1~100 rad/s의 주파수 범위 내에서 4%의 변형을 주고 240 °C의 온도에서 dynamic frequency sweep 테스트를 하여 저장탄성률(storage modulus, G'), 손실탄성률(loss modulus, G'') 그리고 복소점도(complex viscosity, η^*)를 측정하였다.

결과 및 토론

반응압출에 의한 그래프트 특성 분석. Figure 1은 ABS와 ABS-*g*-MAH의 FT-IR 그래프이다. ABS-*g*-MAH의 그래프에서 보면 1780 cm^{-1} 의 파수(waveumber)에서 새로운 피크(탄소와 산소의 이중결합, C=O)가 생성됨을 알 수 있다. 이는 ABS의 부타디엔 부분과 MAH가 반응하여 생성된 피크로 ABS에는 존재하지 않으며

Table 1. Characteristics of Materials Used in This Study

Samples	Molecular weight (M_w)	Material description	Supplier
ABS	160000	RS650	LG Chem.
PC	28000	300 10	LG-DOW Chem.
MAH	98.06	M188	Aldrich
DCP	270.37	Luperox	ATOFINA Chem.

Table 2. Polymer Blend Compositions Used in This Study

Polymer blends	Weight percent (wt%)
ABS/PC	70/30
ABS/PC/ABS- <i>g</i> -MAH	70/30 with 1, 3, 5, 7 and 10 phr ABS- <i>g</i> -MAH

이로 인해 MAH가 ABS에 성공적으로 그래프트되었다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 ABS의 butadiene과 MAH가 DCP 존재 하에서 반응하여 ABS-*g*-MAH를 얻을 수 있다고 보고된 바 있다.¹⁷

기계적 물성 분석. 본 연구에 사용된 블렌드의 기계적 물성을 측정하여 그 결과를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2에서 보면 ABS-*g*-MAH의 조성이 5 phr까지 증가할수록 인장강도가 큰 증가는 없으나, 약 52 MPa에서 55 MPa로 약간 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 계속하여 ABS-*g*-MAH를 10 phr까지 증가하더라도 더 이상 인장강도는 증가를 나타내지 않아 ABS-*g*-MAH의 조성이 5 phr 일때가 적당하다고 판단된다. 이와 같이 인장강도의 증가는 ABS에 MAH가 그래프트된 ABS-*g*-MAH가 ABS/PC(70/30) 블렌드에서 강인성을 향상시키는 역할을 하기 때문이다. 그 결과 ABS/PC/ABS-*g*-MAH 블렌드는 인장강도는 증가하지만 ABS/PC(70/30) 블렌드보다 깨지기 쉬운(brittle) 성질을 갖게 되어 ABS-*g*-MAH의 첨가가 ABS/PC 블렌드의 충격강도에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

유변물성 분석. ABS/PC(70/30) 그리고 ABS/PC/ABS-*g*-MAH 블렌드의 유변학적 성질을 ARES로 관찰하였다. Figure 3은 ABS/PC 블렌드에 ABS-*g*-MAH의 조성이 1, 3, 5, 7 그리고 10 phr인 블렌드의 저장탄성률(G')을 주파수에 따라 나타낸 것이다. Figure 3을 보면 ABS/PC/ABS-*g*-MAH 블렌드의 G' 은 ABS/PC 블렌드의 G' 보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 특히 낮은 주파수 영역(0.1~10 rad/s)에서 차이가 더 많은 것을 알 수 있다.

Figure 4는 ABS/PC(70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH의 조성

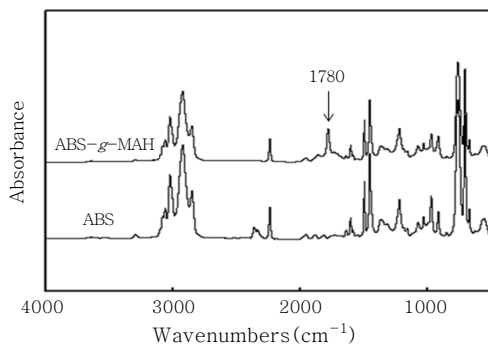


Figure 1. FT-IR spectra of the ABS and ABS-*g*-MAH.

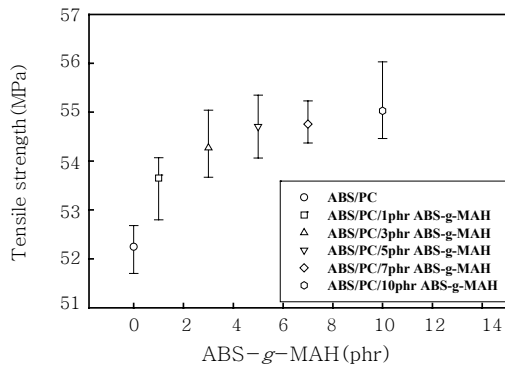


Figure 2. Tensile strength of the ABS/PC(70/30) blends with ABS-*g*-MAH.

이 1, 3, 5, 7 그리고 10 phr인 블렌드의 손실 탄성률(G'')을 역시 주파수에 따라 나타낸 것이다. G' 과 마찬가지로 ABS-*g*-MAH가 첨가된 블렌드에서 탄성률이 증가한 것을 관찰할 수 있다. 역시 낮은 주파수 영역에서 그 차이가 더 크게 관찰된다. 하지만 증가폭은 G' 에 비해 덜한데 이는 측정 구간의 주파수 영역에서는 블렌드의 점탄성 성질중에 G' 에 더 큰 영향을 미치는 영역이기 때문이다.

복소점도(η^*) 역시 Figure 5에서 알 수 있듯이 ABS-*g*-MAH가 첨가된 블렌드가 더 큰 값을 갖는 것으로 관찰되었다. 이와 같은 탄성률의 증가와 점도의 증가는 첨가된 ABS-*g*-MAH가 ABS/PC(70/30) 블렌드에 상용화제로 사용되어 modulus를 증가시켰기

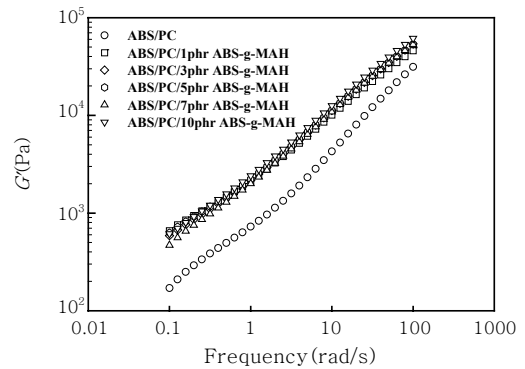


Figure 3. Storage modulus of the ABS/PC(70/30) blends with ABS-*g*-MAH.

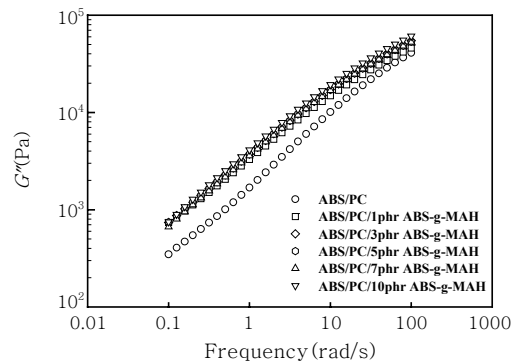


Figure 4. Loss modulus of the ABS/PC(70/30) blends with ABS-*g*-MAH.

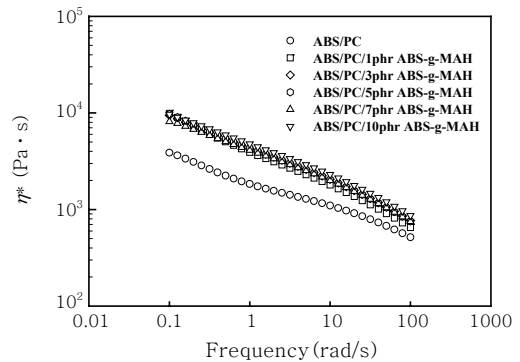


Figure 5. Complex viscosity of the ABS/PC(70/30) blends with ABS-*g*-MAH.

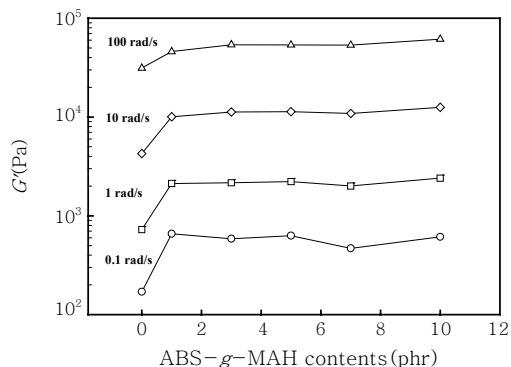


Figure 6. Storage modulus vs. ABS-*g*-MAH of the ABS/PC (70/30) blends with frequency.

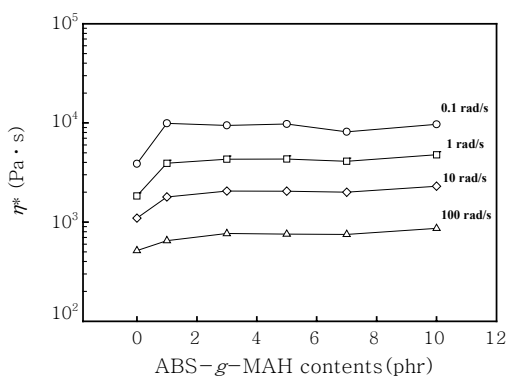
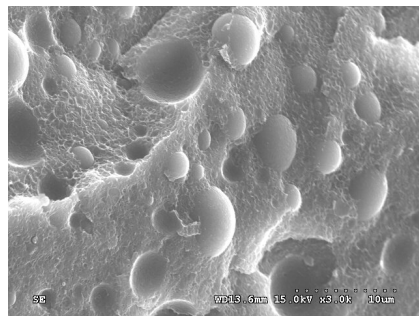


Figure 7. Complex viscosity vs. ABS-*g*-MAH of the ABS/PC (70/30) blends with frequency.

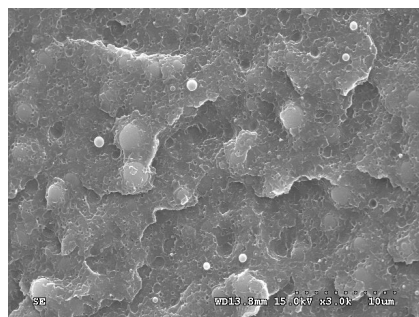
때문이라고 사료된다.

Figure 6은 ABS/PC (70/30) 블렌드에서 ABS-*g*-MAH 양에 따른 저장탄성률(G')을 주파수에 따라 나타낸 것이다. Figure 6에서 보면, ABS-*g*-MAH 양이 증가함에 따라 G' 값이 증가함을 알 수 있으며, 특히 주파수가 0.1 rad/sec에서는 ABS-*g*-MAH 양이 1, 3 그리고 5 phr인 경우 G' 값이 증가하다가 7과 10phr에서는 더 이상 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Figure 7에 나타난 복소점도에서도 같은 현상을 볼 수 있는데, 이는 고분자 블렌드의 유변학적인 성질, 특히 낮은 주파수에서의 저장탄성률(G')은 고분자 블렌드의 계면에서 일어나는 성질을 잘 반영하는 것으로 알려져 있다.²¹ 이상과 같이 ABS/PC (70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH를 5phr 이상 첨가 시 유변물성이 더 이상 증가하지 않는 것은 Figure 2에 나타난 인장강도 결과와 유사한 것으로 과량의 ABS-*g*-MAH 첨가는 ABS/PC 블렌드에 가소효과를 초래할 수 있다고 사료되며, 적정 ABS-*g*-MAH 양은 5 phr로 판단된다.

형태학적 분석. 압출기를 이용하여 제조된 ABS/PC (70/30) 블렌드와 ABS/PC/ABS-*g*-MAH 블렌드의 미세 단면 구조를 SEM으로 관찰하였다. Figure 8에는 ABS/PC (70/30) 블렌드와 ABS-*g*-MAH가 5 phr 첨가된 ABS/PC/ABS-*g*-MAH 블렌드의 미세 단면 구조를 각각 나타내었다. 연속상인 ABS와 분산상인 PC의 상 분리가 관찰되었으며 이로부터 ABS와 PC의 블렌드는 상용성이 없음을 알 수 있다. 그러나, Figure 8(b)에서 ABS/PC



(a)



(b)

Figure 8. SEM morphology of the (a) ABS/PC (70/30) blend and (b) ABS/PC/ABS-*g*-MAH (70/30/5 phr) blend.

블렌드에 ABS-*g*-MAH가 5 phr 첨가된 경우, ABS와 PC 두 상 사이의 계면이 smooth하게 되어서 상용성이 증가된 것을 알 수 있는데, 이는 ABS-*g*-MAH가 ABS/PC 블렌드에서 상용화제로 작용하였기 때문으로 사료된다.

Figure 9는 분산상인 PC의 크기 변화를 관찰하기 위하여 ABS/PC/ABS-*g*-MAH 블렌드의 단면을 수산화나트륨으로 에칭하여 분산상인 PC부분을 제거한 SEM 모폴로지 결과이다.

각 조성에서 분산상인 PC의 크기는 ABS/PC (70/30) 블렌드의 경우 1.3 μm 이고, ABS-*g*-MAH가 1, 5 그리고 10 phr 첨가된 경우 분산상인 PC의 형태가 구형이 아니어서 측정 시 약간의 오차가 발생할 수 있으나, 1.2, 1.2, 그리고 1.3 μm 로 각각 관찰되어 ABS-*g*-MAH 첨가 양에 따라 PC의 크기 차이가 없음을 알 수 있는데, 이와 같이 ABS-*g*-MAH 첨가에 따라 분산상인 PC의 크기 차이가 관찰되지 않는 것은 분산상인 PC의 크기 자체가 1 μm 내외로서 그리 크지 않기 때문으로 사료된다.

또한, Figure 9(a)에서 보면, ABS-*g*-MAH가 첨가되지 않은 ABS/PC 블렌드의 경우 에칭된 PC의 모양이 구형을 이룬 것을 관찰할 수 있다. 하지만 ABS/PC (70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH가 각각 1, 5 그리고 10 phr 첨가된 Figure 9(b)–(d)의 경우 에칭된 부분의 모양이 구형을 이루지 않는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 ABS-*g*-MAH가 ABS와 PC의 계면에 녹아 들어가서 각각의 상용성을 증가시켜 계면을 부분적으로 에칭시킨 것으로 사료된다.

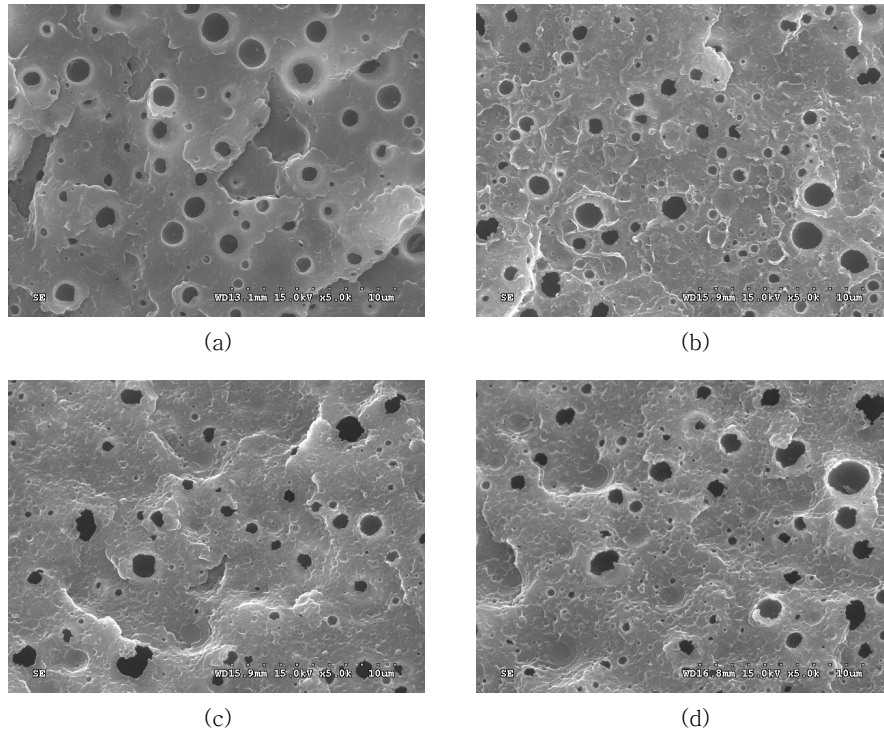


Figure 9. SEM morphology of the ABS/PC (70/30) blends with ABS-*g*-MAH: (a) 0, (b) 1, (c) 5, and (d) 10 phr, The blends etched by an aqueous NaOH solution.

결론

반응압출을 통해 제조된 ABS-*g*-MAH를 FT-IR을 사용하여 측정된 결과 ABS에는 존재하지 않았던 1780 cm^{-1} 의 피크(waveumber)에서 새로운 피크(탄소와 산소의 이중결합, C=O)가 생성됨을 알 수 있다. 따라서 ABS에 MAH가 효과적으로 그래프트되었다는 사실을 알 수 있다.

또한 반응압출에 의해 제조된 ABS-*g*-MAH를 상용화제로 사용하여 비상용성 물질인 ABS와 PC를 동방향 이축 압출기로 블렌드한 ABS/PC(70/30) 블렌드의 기계적 물성 측정 결과 ABS-*g*-MAH가 5 phr 첨가된 경우 큰 증가는 관찰되지 않았으나 블렌드의 강인성이 향상되어 인장강도가 52.25 MPa에서 55.03 MPa로 약간 증가하였다.

유변학적 물성 결과에서 ABS-*g*-MAH가 첨가된 경우 탄성률과 복소점도의 증가가 관찰되었으며, 손실탄성률보다 저장탄성률의 증가 폭이 더 크게 관찰되었다. 또한 낮은 주파수영역에서 변화값이 더 크게 나타나 저장탄성률(G')은 고분자 블렌드의 계면에서 일어나는 성질을 잘 반영하는 것으로 알 수 있다.

ABS/PC(70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH를 5 phr 이상 첨가 시, 특히 낮은 주파수에서의 유변물성이 더 이상 증가하지 않는 것으로 나타났는데, 이는 인장강도 결과와 유사한 것으로 과량의 ABS-*g*-MAH 첨가는 ABS/PC 블렌드에 가소효과를 초래할 수 있다고 사료되며, 적정 ABS-*g*-MAH 양은 5 phr로 판단된다.

SEM을 이용한 모폴로지 측정 결과 ABS/PC(70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH가 5 phr 첨가된 경우, ABS와 PC 두 상 사이의 경

계면이 smooth하게 되어서 상용성이 증가된 것을 알 수 있는데, 이는 ABS-*g*-MAH가 ABS/PC 블렌드에서 상용화제로 작용하였기 때문으로 사료된다. 또한, ABS/PC(70/30) 블렌드에 ABS-*g*-MAH가 각각 1, 5 그리고 10 phr 첨가된 경우 에칭된 부분의 모양이 구형을 이루지 않는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 ABS-*g*-MAH가 ABS와 PC의 계면에 녹아 들어가서 각각의 상용성을 증가시켜 계면을 부분적으로 에칭시킨 것으로 사료된다.

이상의 기계적, 유변학적 그리고 형태학적 물성 결과로부터 ABS-*g*-MAH는 ABS/PC(70/30) 블렌드에 효과적인 상용화제로 작용하였음을 알 수 있으며, 적정 ABS-*g*-MAH 상용화제의 양은 5 phr로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단(Korea Science and Engineering Foundation : KOSEF)에서 지원하여 고려대학교에 설립된 유변공학연구센터(Applied Rheology Center : ARC)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. D. R. Paul and J. W. Barlow, *J. Macromol. Sci. Rev. Macromol. Chem.*, **18**, 109 (1980).
2. W. N. Kim and C. M. Burns, *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 1115 (1988).
3. L. A. Utracki, *Polymer Blends and Alloys: Thermodynamics and Rheology*, Hanser, Munich, 1989.
4. D. W. Jin, K. H. Shon, and H. M. Jeong, *Polymer(Korea)*,

- 20, 775 (1996)
5. C. G. Cho, T. H. Park, and T. S. Kim, *Polymer*, **34**, 4687 (1997)
6. G. S. Wildes, T. Harada, H. Keskkula, D. R. Paul, V. Janarthanan, and A. R. Padwa, *Polymer*, **40**, 3069 (1999).
7. G. Wildes, H. Keskkula, and D. R. Paul, *Polymer*, **40**, 7089 (1999).
8. J. P. F. Inberg and R. J. Gaymans, *Polymer*, **43**, 2425 (2002).
9. J. P. F. Inberg, A. Takens, and R. J. Gaymans, *Polymer*, **43**, 2795 (2002).
10. V. Dobrescu and V. Cobzaru, *Polym. Symp.*, **64**, 27 (1978).
11. C. H. Lee, S. G. Lee, S. Kang, S. Yun, J. H. Kim, and S. Choe, *Polymer(Korea)*, **23**, 98 (1999).
12. S. Balakrishnan, N. R. Neelakantan, D. Nabisahed, and J. P. Jog, *Polymer*, **39**, 5765 (1998).
13. R. Qi, J. Qian, and C. Zhou, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**, 1249 (2003).
14. R. Qi, J. Qian, Z. Chen, X. Jin, and C. Zhou, *J. Appl. Polym. Sci.*, **91**, 2834 (2004).
15. S. C. Park and S. J. Choe, *Macromol. Res.*, **13**, 297 (2005).
16. J. H. Park, W. N. Kim, H. Kye, S. S. Lee, M. Park, J. Kim, and S. Lim, *Macromol. Res.*, **13**, 367 (2005).
17. F. Elmaghor, L. Zhang, R. Fan, and H. Li, *Polymer*, **45**, 6719 (2004).
18. J. H. Park, Y. T. Sung, W. N. Kim, J. H. Hong, B. K. Hong, T. W. Yoo, and H. G. Yoon, *Polymer(Korea)*, **29**, 19 (2005).
19. B. H. Jeon, H. Yoon, S. S. Hwang, J. Kim, and S. M. Hong, *Polymer(Korea)*, **29**, 127 (2005).
20. L. W. Kim, S. H. Yoo, and C. K. Kim, *Polymer(Korea)*, **31**, 8 (2007).
21. D. Herrera, J.-C. Zamora, A. Bello, M. Grima, E. Laredo, A. J. Muller, and T. P. Lodge, *Macromolecules*, **38**, 5109 (2005).