

염화비닐 수지와 투명 ABS 수지에 의한 고분자 합금 II: 기계적 물성

임 정 철* · 민 경 은†

*영남전문대학 섬유과, 경북대학교 고분자공학과
(1996년 2월 27일 접수)

Polymer Alloy of PVC with Transparent ABS Resin II : Mechanical Property

J. C. Lim* and K. E. Min†

*Department of Textile Engineering, Yeungnam Junior College, Taegu 705-037, Korea
Department of Polymer Science, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea
(Received February 27, 1996)

요 약: 인장시험, 굴곡시험 및 충격시험을 통하여 용융혼련법으로 제조된 염화비닐 수지 (PVC)와 투명 ABS 수지 (Tr-ABS) 블렌드의 기계적 물성을 조사하였다. 인장시험 및 굴곡 시험 결과 Tr-ABS가 PVC에 첨가됨에 따라 brittle한 성질이 점차 사라지고 ductile한 성질이 증가됨을 관찰하였으며, shear band와 크레이즈의 생성에 의한 것으로 생각되는 백화현상이 증가함으로써 비편재화 변형기구에 의한 파괴가 일어남을 알 수 있었다. 또한 Tr-ABS가 30~60 중량% 함유된 블렌드의 충격강도는 순수한 Tr-ABS의 충격강도에 비해 현저히 증진되었으며 계에 따라 최고 100% 가까이 증가함을 볼 수 있었다. PVC/Tr-ABS 블렌드의 경우 약 30 중량%의 Tr-ABS가 첨가되면 B-T (brittle-ductile) 전이가 일어나는 것으로 해석되었다.

ABSTRACT: The mechanical properties of poly(vinyl chloride), PVC, and transparent acrylonitrile-butadiene-styrene resin, Tr-ABS, blends were studied for stress-strain, flexural, and impact behavior. The blends was found to be more ductile than Tr-ABS in general, and significant stress-whitening behavior owing to the formation of shear band and craze was observed. The impact strength of the blends containing 50 to 60% of Tr-ABS by weight was almost double to the pure Tr-ABS. It was considered that brittle-ductile (B-T) transition in failure occurs at the blends containing above the levels of 30 wt% Tr-ABS resin.

Keywords: PVC, transparent ABS, polymer alloy, mechanical property, rubber toughened plastics.

서 론

고분자 재료에 있어서 기계적 물성은 기술적, 산업적 측면에서 매우 중요한 성질이며, 기계적 물성을 알아내기 위하여 전통적으로 응력-변형 시험, 충격시험, 굴곡시험 등이 널리 사용되고 있다. 그러나 고분자 재료는 다른 재료와는 달리 화학적 인자는 물론 물리적 인자들에 의한 물성변화의 폭이 크며 시료의

제조과정이나 시편의 형상에 많은 영향을 받으므로,¹ 상기 시험법을 통하여 얻은 결과를 이론적으로 명쾌하게 설명하는 것은 비교적 어려운 일이다. 특히 고분자 블렌드는 구성성분에 따라 분자간에 작용하는 힘이 다르고, 구성성분의 상(phase)의 크기, 분포 등은 가공조건에 따라 변화될 수 있으며, 블렌드의 기계적 물성은 이들의 지배를 받는다.² 일반적으로 불균일계 블렌드는 상 계면간의 접착력이 약하므로 균

일제 블렌드에 비해 물성이 떨어지는 경향이 있으나, 탄성체를 함유하는 몇가지 불균일제 블렌드 중에는 특히 내충격성이 월등히 증진된 것을 얻을 수 있는데 이를 고무강인화 재료(rubber-toughened material)라 부른다.^{3,4}

전보에서 본인들은 PVC와 Tr-ABS의 용융혼련 블렌드를 제조하고 이들의 상용성과 투명성에 관하여 고찰한 바 있다. 이때 용융혼합법으로 제조된 PVC/Tr-ABS 블렌드는 유리상 매트릭스에 고무입자가 골고루 분산되어 있는 구조를 가진 것으로 밝혀졌으며, 구조적 특성상 이는 고무강인화 재료와 유사함을 알았다.⁵ 즉 외부에서 스트레스가 가해지면 연속상의 기질에 분산된 고무입자가 에너지를 흡수함으로써 작은 응력하에서는 쉽게 파괴되지 않는 성질을 보일 조건을 구비하므로, PVC/Tr-ABS 블렌드는 기계적 성질이 우수할 것이 기대되었다. 본보에서는 응력-변형시험, 굴곡시험 및 충격시험을 통하여 상용성을 가진 이들 블렌드의 기계적 물성을 조사하고 고무강인화 재료로서의 가능성을 고찰하였다.

실 험

재 료. 본 연구에서 사용한 고분자 재료는 상품으로 시판되고 있는 것으로서 기본적인 물성은 Table 1에 요약하였다. 투명 ABS(Tr-ABS)는 일본합성고무사 제품으로 SBR 표면에 메틸아크릴레이트를 그라프트 중합시키고 SAN과 에멀전 블렌딩하여 제조된 것으로 부타디엔 고무 함량이 약 10 중량%인 고강도 Tr-ABS 수지이며, PVC는 한양화학 제품으로서 분자량이 서로 다른 두가지 종류를 사용하였다.

시료의 분자량은 THF를 용매로 써서 Waters사의 GPC Model 510로써 상온에서 측정하였고, Tr-ABS는 200 Å의 동공크기를 가진 PTFE 막 여과장치를 써서 고무입자를 제거시킨 후 분자량을 측정하였다.

시편의 제조. 전보에서 상술한 바와 같이 먼저 PVC에 가소제, 내열제, 가공조제 등을 가하여 고속믹서로써 1차 건식 혼련하고, 감압건조된 Tr-ABS를 적정 무게비율로 섞은 후 독일 Automatik사의 2축 압출기로써 용융혼합하여 블렌드를 제조하였으며, 곧바로 냉각시켜 펠렛상태로 절단하였다. 제조된 펠렛을 계습형 건조기를 이용하여 80 °C에서 4시간 동안 건조한 후, 사출성형기로써 ASTM에 규정된 경질 플라스틱의 물성 측정용 시편을 제조하였다.⁶ 시편 제조시 사용한 사출성형기는 일본 Fanuc Auto-shot Model 50으로 실린더 온도 180~200 °C, 금형 온도 20 °C, 계량공급 스크류 회전속도 분당 75회, 사출압력 13.8 bar, 사출속도 40~75 mm, 사출시간 3초, 냉각시간 23초로 조절하였으며, 사이클 타임은 35초로 하였다. 이와같은 방법으로 제조한 시편은 25 °C에서 상대습도 50%를 유지하는 공조실에서 48시간 보관하여 조습한 후 물성을 측정하였다.

기계적 물성 측정. 인장강도와 신도는 Instron Model 4204를 사용하여 crosshead speed를 분당 50 mm로 하고 ASTM D638 규격에 의거하여⁶ 제작한 두께 3.2 mm의 dumbbell형 시편에 대하여 5회 측정하고 그 평균치를 얻었다. 굴곡강도는 ASTM D790 규격의 3점 굴곡시험법에 의거하여⁶ 두께 3.2 mm 막대형 시편을 사용하되, 지지점의 간격(support span)을 50 mm로 하고 crosshead

Table 1. Characteristics of the Polymer Materials Used in this Study

polymer	acronym	molecular weight	T_g (°C)	maker	grade
poly(vinyl chloride)	PVC	\bar{M}_w 144800	84.9	Hanyang Co.	P-1000
		\bar{M}_n 70800			
		\bar{M}_w/\bar{M}_n 2.05			
		\bar{M}_w 109700	83.0		
\bar{M}_n 56800					
\bar{M}_w/\bar{M}_n 1.96					
transparent poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)	Tr-ABS	\bar{M}_w 99400	100.1	Japanese Synthetic Rubber Co.	ABS-58
		\bar{M}_n 44500			
		\bar{M}_w/\bar{M}_n 2.15			

speed를 분당 5.0 mm로 유지하여 수평상태에서 5 mm 이내의 변형(10% 이내 변형)시켰으며 5회 측정치의 평균값을 취하였다. 한편 굴곡탄성율은 변형을 0.5%와 2.5%에서의 secant 탄성률로 계산하였다. 충격강도는 ASTM D256 규격에 의거⁶ 두께 3.2 mm와 6.4 mm 막대형 시편에 notch를 부가하여 Tinius Olsen사의 impact tester로써 Izod 방법으로 10회를 측정된 값의 평균치로써 결정하였다. 이러한 물성측정값의 상한 및 하한값이 평균치와 많은 차이를 보이는 경우에는 이를 에러바로써 표시하였다.

결과 및 고찰

인장강도 및 신도. Fig. 1은 PVC와 Tr-ABS 및 중량비가 서로 다른 몇가지 PVC(P-1000)/Tr-ABS 블렌드들의 대표적인 응력-변형 곡선이다. 여기서 PVC/Tr-ABS 블렌드(B-E)는 순수한 PVC(A)에 비하여 상당히 ductile한 거동을 보이고 있다. 이와 같은 거동은 일반적으로 상용성을 가진 블렌드계에서 가끔씩 관찰되는 현상으로서,¹ 블렌드의 Tr-ABS수지 함량이 40% 이상에서는 brittle한 성질이 사라지고 Tr-ABS의 ductile한 성질이 블렌드의 물성을 지배하는 현상을 보이고 있다. 한편 분자량이 서로 다른 두가지 PVC와 Tr-ABS 수지의 블렌드들이 가지는 인장강도치를 Tr-ABS 조성 변화에 따라 조사하고 그 결과를 Table 2 및 Fig. 2에 나타내었다. 이들에 의하면 PVC의 분자량은 PVC/

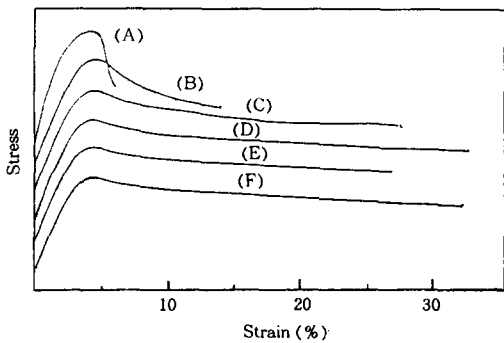


Figure 1. Typical stress-strain curves of PVC/Tr-ABS blends containing. (A) 0 wt%, (B) 20 wt%, (C) 40 wt%, (D) 60 wt%, (E) 80 wt%, and (F) 100 wt% Tr-ABS resin.

Tr-ABS 합금의 인장항복강도나 인장파괴강도에 큰 영향을 미치지 않음을 볼 수 있으며, P-1000과 P-800의 경우 공히 인장항복강도는 Tr-ABS 수지의 함량이 40%에 이르기까지 약 15% 가량 감소하는 경향을 보이다가 일정한 값에 도달하는 경향을 보이고 있는 반면, 인장파괴강도는 Tr-ABS 수지의 함량이 증가함에 따라 조성물의 산술평균치에 근접한 값

Table 2. Tensile Strength of PVC/Tr-ABS Blends

Tr-ABS content(wt%)	P-1000		P-800	
	at yield (Kg/cm ²)	at break (Kg/cm ²)	at yield (Kg/cm ²)	at break (Kg/cm ²)
0	700	329	707	336
10	638	318	629	315
20	624	333	619	314
30	577	328	603	317
40	556	324	595	343
50	554	335	578	337
60	544	344	578	364
70	535	347	567	373
80	536	361	564	329
90	544	390	557	341
100	545	382	545	382

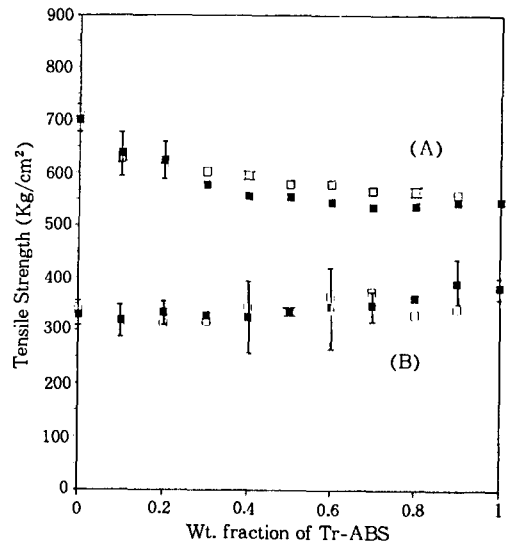


Figure 2. Tensile strength of PVC(P-1000 : ■, P-800 : □)/Tr-ABS blends. (A) at yield and (B) at break.

으로 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 인장항복강도는 재료가 탄성변형을 일으키는 영역에서의 강도의 최고치로 정의되므로, 이러한 경향은 PVC/Tr-ABS 합금에 있어서 Tr-ABS가 첨가됨에 따라 PVC가 가소화되어 쉽게 영구변형을 일으키게 된다는 것을 의미한다.³ 또한 이러한 영구변형은 PVC/Tr-ABS 합금과 같은 고무강화 플라스틱에 있어서 고무입자 주위에 크레이즈의 발생이 많아지는 것이 원인이라고 생각할 수도 있다. 따라서 인장시험시 신도의 변화를 요약하여 Table 3에 나타내고, 조성에 따라 플로트하여 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3과 4에서 인장항복신도는 PVC의 분자량과는 무관한 결과를 보이고 있으나 인장파괴신도의 거동은 분자량과 관련이 있는 것으로 보인다. 즉 P-1000을 사용한 경우에는 Tr-ABS 수지의 함량이 약 30% 수준에 이르기까지 빠르게 증가하여 그 이상에서는 Tr-ABS의 파괴신도와 거의 유사한 값을 갖는 반면, P-800의 파괴신도 및 증가도는 P-1000보다 낮은 것을 볼 수 있다. 인장항복신도가 PVC의 분자량에 영향을 크게 받지 않는 것은 두가지 PVC 수지와 Tr-ABS 수지 각각의 항복신도가 유사하기 때문인 것으로 생각한다. 반면 파괴신도의 경우에는 구성성분 수지간의 파괴신도 차이가 크며 PVC가 Tr-ABS에 비해 보다 brittle한 것으로 보인다. 따라서 보다 brittle한 PVC에 ductile한 Tr-ABS 수지가 첨가됨에 따라 파괴거동은 brittle 파괴거동으로부터 ductile 파괴거동으로 급속히 변화되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 일반적

으로 파괴는 응력하에서 micro-crack이 먼저 형성되고 응력이 증가됨에 따라 macro-crack으로 발전되어 일어나는 현상으로 이해되고 있으므로,¹ PVC/Tr-ABS 합금에 있어서 응력이 작용하면 Tr-ABS 수지가 첨가됨에 따라 증가된 고무입자를 중심으로

Table 3. Elongation of PVC/Tr-ABS Blends

Tr-ABS content(wt%)	P-1000		P-800	
	at yield (%)	at break (%)	at yield (%)	at break (%)
0	5.2	6.3	5.4	9.5
10	4.4	14.1	4.3	15.8
20	4.2	15.2	4.2	17.1
30	4.8	28.4	4.2	20.2
40	4.8	27.4	4.2	18.5
50	4.7	28.7	4.2	18.2
60	4.6	33.0	4.3	20.7
70	4.5	33.3	4.5	18.9
80	4.6	27.1	4.4	26.6
90	4.9	24.3	4.5	21.3
100	4.8	32.7	4.8	32.7

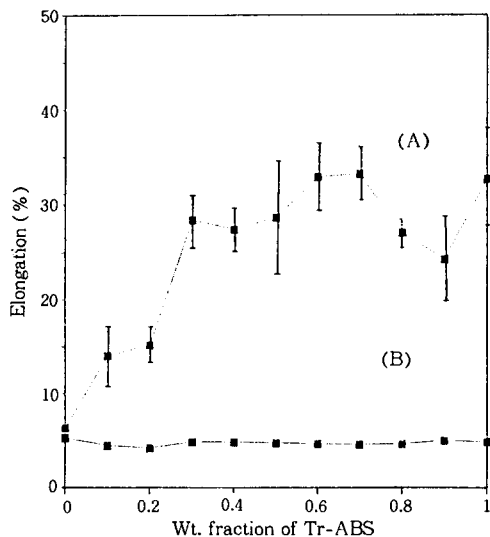


Figure 3. Elongation of PVC(P-1000) and Tr-ABS blends. (A) at break and (B) at yield.

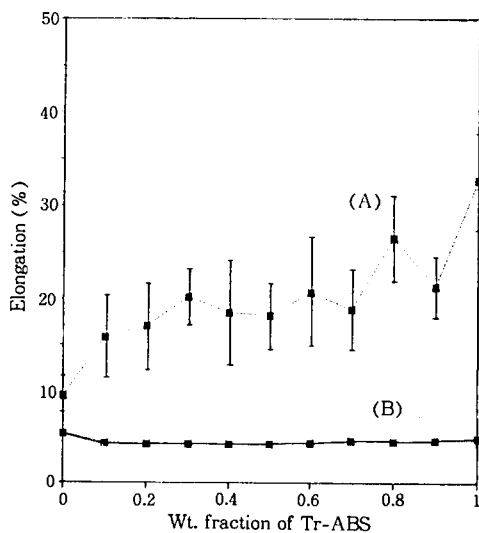


Figure 4. Elongation of PVC(P-800)/Tr-ABS blends. (A) at break and (B) at yield.

크레이즈나 micro-shear band가 많이 생성됨으로써 비국부적 변형(localized deformation)만이 일어나게 될 것이다. Macro-crack 또는 궁극적인 파괴로 발전하려면 더 큰 소성변형 혹은 더 큰 응력이 필요하다. Tr-ABS 수지가 첨가됨에 따라 증가된 소성 변형은 다시 기질변형의 증가로 나타나게 되고 이는 결과적으로 인장파괴신도의 증가로 관찰되는 것으로 생각된다. 한편 Fig. 4에 의하면, P-800은 P-1000와는 달리 Tr-ABS가 첨가됨에 따라 인장파괴신도가 약 20% 정도의 일정한 값을 보이다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 P-800은 분자량이 P-1000에 비해 작은 관계로, 단위부피당 고분자 사슬의 엉킴이 적어 변형이 증가됨에 따라 사슬간의 미끌어짐 현상이 보다 쉽게 나타나기 때문인 것으로 이해된다.⁷ 이를 명확히 확인하기 위하여 인장시험 후의 시편들의 광학사진을 Fig. 5에 나타내었는데, PVC/Tr-ABS 블렌드에서는 응력에 의한 백화 현상이 뚜렷이 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 응력이 작용함에 따라 먼저 수많은 micro-shear band가 생성됨으로써 나타나는 현상으로 생각되며,⁸ 비록 소

량의 Tr-ABS가 첨가되더라도 백화현상의 증가가 관찰되므로 Tr-ABS는 변형기구(deformation mechanism)에 현저한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

굴곡시험. 굴곡시험에서는 시편은 인장과 압축에 의한 두가지 변형을 일으키므로, 다른 시험법에 비하여 해석하기 어려운 점이 있으나, 제품의 기계적 강도를 예측하는데 자주 쓰이는 방법이다.¹⁰ 따라서 굴곡시험 결과를 Table 4에, Tr-ABS 함량에 따른 굴곡탄성율과 굴곡강도를 Fig. 6과 7로 각각 나타내었다. Fig. 6에 의하면 PVC(P-1000)/Tr-ABS 블렌드의 굴곡탄성율은 초기에는 비교적 일정하다가 약 30%의 Tr-ABS가 첨가됨에 따라 급속히 감소하여 그 이상에서는 Tr-ABS의 굴곡강도로 유지되는 결과를 보이는 반면, PVC(P-800)의 경우에는 서서히 감소하다가 Tr-ABS 함량 80% 이상에서 비교적 빠르게 감소하고 있다. 이러한 경향은 Fig. 7에 나타낸 굴곡강도 특성에서도 동일하게 관찰된다. Tr-ABS 블렌드의 이러한 굴곡특성 거동은 파괴신도 거동과 유사한 점이 있다. 즉 Fig. 3과 4에 이미 관찰한 바와 같이 파괴신도가 빠르게 증가한 영역에서 굴곡강도나 굴곡탄성율이 비교적 빠르게 감소하고 있다. 이러한 사실은 보다 brittle한 PVC를 다량으로 함유한 블렌드는 응력하에서 주로 탄성변형에 의한 기구에 의하여 파괴되는 반면, ductile한 Tr-ABS가 첨가됨에 따라 점차 소성변형에 의한 파괴기구로의 전이가

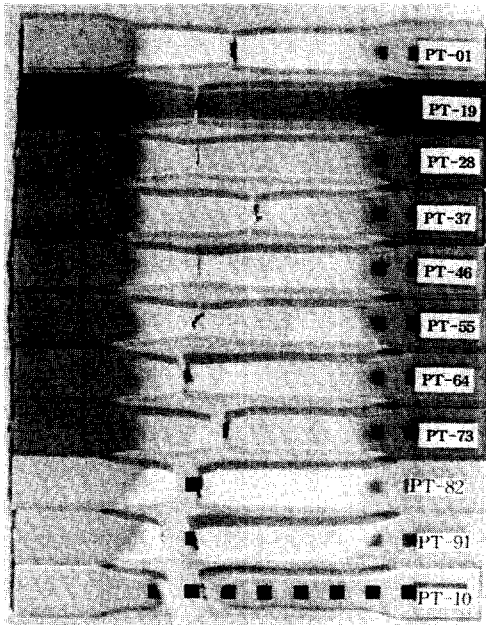


Figure 5. Specimens of PVC/Tr-ABS blends after tensile test.

Table 4. Flexural Strength and Flexural Modulus of PVC/Tr-ABS Blends

Tr-ABS content(wt%)	P-1000		P-800	
	flexural strength (Kg/cm ²)	flexural modulus (Kg/cm ²)	flexural strength (Kg/cm ²)	flexural modulus (Kg/cm ²)
0	1100	33,270	1049	31,930
10	1030	32,830	1003	34,010
20	1010	32,970	959	30,600
30	830	25,500	957	31,850
40	810	24,100	931	29,920
50	810	24,700	916	28,360
60	810	24,500	926	29,560
70	800	24,700	912	28,160
80	810	24,200	940	28,450
90	820	24,700	889	26,740
100	840	24,600	835	24,620

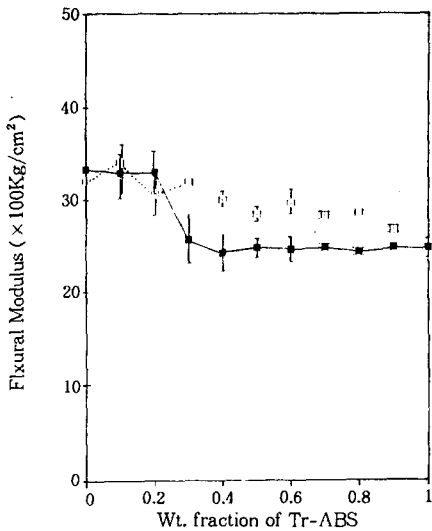


Figure 6. Flexural modulus of PVC(P-1000: ■, P-800: □)/Tr-ABS blends.

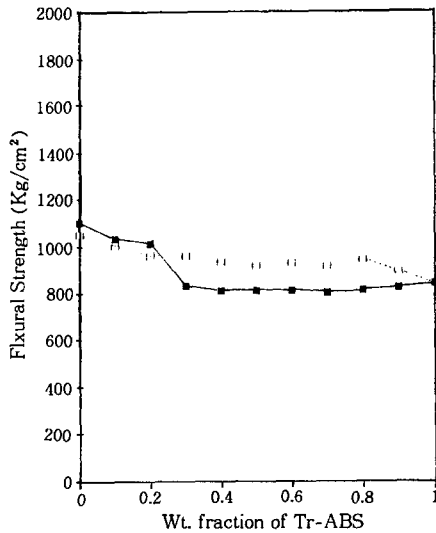


Figure 7. Flexural strength of PVC(P-1000: ■, P-800: □)/Tr-ABS blends.

일어난다는 것을 의미한다.

충격강도. 충격시험은 고속파괴 시험으로서 시편이 파괴되는데 필요한 에너지를 측정하는 것이다. 실험 방법에 따라 다소 차이가 있기는 하지만 충격에 의하여 시편이 파괴되려면 균열을 개시시키는데 필요한 에너지와 균열을 성장시키는데 필요한 에너지가 필요

하다.¹⁰ 통상적으로 전자가 파괴에너지의 약 70% 이상을 차지하는 경우가 많으며, 미리 노치(notch)를 부가하여 실험하는 경우에는 시편의 형상에 크게 영향을 받지않고 재현성이 있는 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 실험에서는 노치가 부가된 시편에 대해 Izod방법으로 충격강도를 측정하였다. 보통 충격강도치는 노치말단의 평활도나 노치 제작시 가해진 응력 등에 크게 영향을 받으므로 편차가 상당히 크며, 수지에 따라서는 노치의 반경이 충격강도치의 편차에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 10개의 시편에 대하여 충격시험을 행하였으며, 측정된 평균치를 Table 5에, 그리고 Tr-ABS 함량에 따른 충격강도를 실험오차 범위와 함께 Fig. 8과 9에 각각 나타내었다. 이들 시험결과에 의하면 Tr-ABS 수지가 50% 이상 함유된 PVC/Tr-ABS 합금에서는 순수한 PVC나 Tr-ABS 수지의 충격강도보다 훨씬 높아 Tr-ABS가 첨가됨으로서 상승효과(synergistic effect)를 일으켰음을 볼 수 있으며, PVC/Tr-ABS 합금은 매우 ductile한 파괴거동을 갖는다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 ductile한 재료는 대부분 시편의 두께가 얇을수록 충격강도가 증가하는 경향을 보이므로¹ 이를 확인하기 위하여 두께 1/8" 시편의 충격강도를 측정하고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 결과는 두께 1/4" 시편(Fig. 8)의 경우와 비교하면 최고치가 나타나는 위치와 충격강도의 절대값들이 약간 상승하는 경향을 보이는 것 외에는 큰 변화가

Table 5. Impact Strength(Notched Izod) of PVC/Tr-ABS Blends

Tr-ABS content(wt%)	P-1000		P-800
	impact strength (Kg cm/cm)		
	1/4"	1/8"	1/8"
0	1.5	1.5	1.1
10	2.0	2.0	1.9
20	2.0	2.0	1.9
30	3.4	2.9	2.4
40	5.1	7.8	3.1
50	10.5	11.5	6.3
60	16.0	18.7	11.7
70	17.0	17.3	15.4
80	14.2	16.6	16.5
90	10.7	12.7	11.6
100	8.7	9.6	9.6

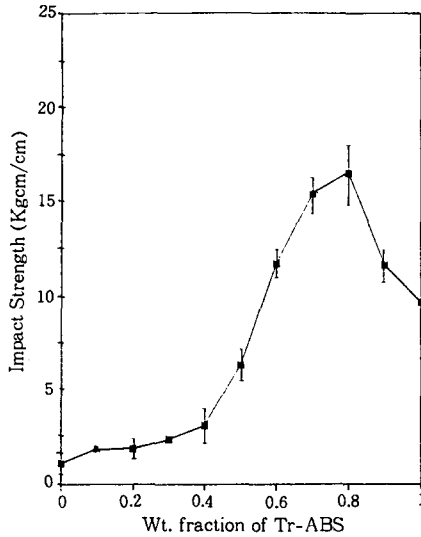


Figure 8. Izod impact strength of PVC(P-1000)/Tr-ABS blends.

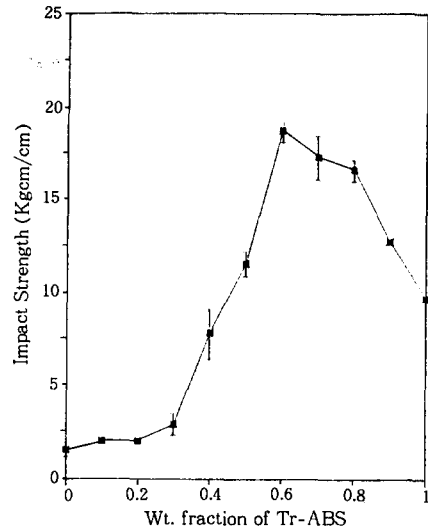


Figure 10. Impact strength of PVC(P-1000)/Tr-ABS blends having 1/8" thickness.

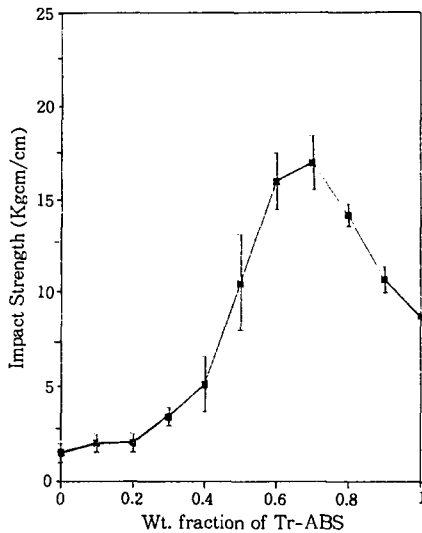


Figure 9. Izod impact strength of PVC(P-800)/Tr-ABS blends.

었다. 따라서 충격강도에 있어서 PVC/Tr-ABS 합금은 두께 의존성이 비교적 작은 것임을 알 수 있다. 이상의 실험결과는 S. N. Maity 등이 수행한 PVC/ABS 블렌드에 관한 연구결과와 비교할 만하다.¹¹ 그들은 고무함량 36.5%의 ABS와 PVC 50:50 블렌드에서 순수한 ABS 수지보다 충격강도가 약 10%

가량 높아지는 것을 관찰하였으며, 고무함량이 30% 이하인 ABS를 사용하는 경우에는 충격강도의 증가 현상이 거의 나타나지 않았다고 하였다.¹⁵ 그러나 본 실험에서는 고무함량이 약 10% 가량인 Tr-ABS 수지가 50% 이상 함유된 블렌드는 충격강도가 거의 100% 가까이 증가되는 것을 볼 수 있었으며, 그 원인을 밝히기 위해서는 지속적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

결론

2축압출기에 의한 용융혼련법으로 제조한 PVC/Tr-ABS 합금의 기계적 물성을 조사하고 다음의 결론을 얻었다. PVC에 Tr-ABS가 첨가되면 Tr-ABS의 함량이 30%에서 60%까지 급격한 충격강도의 증가가 나타나므로 이 영역에서 B-T(brittle-ductile) 전이가 일어남을 알 수 있다. 또한 Tr-ABS 함량이 40% 이상에서는 성분물질의 산술평균치보다 훨씬 큰 충격강도의 상승효과를 관찰할 수 있다. 인장시험 및 굴곡시험에 의하면 Tr-ABS가 첨가됨에 따라 순수한 PVC와는 달리 micro-shear band와 크레이징에 의한 비편재화에 의한 변형기구를 갖는 것으로 보인다. 따라서 얻어진 PVC/Tr-ABS 블렌

드는 높은 충격강도와 인장강도를 우수한 고분자 합금이라고 할 수 있다.

감사의 글: 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. L. E. Nielsen, "Mechanical Properties of Polymers and Composites", Marcel Dekker, New York, 1974.
2. D. R. Paul, "Multicomponent Polymer Materials", ACS, Washington, DC, 1986.
3. P. A. Lovell, J. McDonald, D. E. J. Saunders, M. N. Sherratt, and R. J. Young, "Toughened Plastics I", Eds. by C. K. Riew and A. J. Kinloch, ACS Series 233, Washington, DC, 1993.
4. C. B. Bucknall, "Toughened Plastics", Applied Science, London, 1977.
5. K. E. Min and J. C. Lim, *Polymer(Korea)*, to be appeared.
6. ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, part 27, 1971.
7. Souheng Wu, E. I., *J. Polym. Sci., Polym. Phys.*, **25**, 2511 (1987).
8. A. Aji and H. P. Schreiber, *J. Appl. Polym. Sci.*, **33**, 2493 (1987).
9. H. W. Starkweather, Jr., *J. Appl. Polym. Sci.*, **37**, 1395 (1989).
10. S. T. Wellinghoff and E. Baer, *J. Appl. Polym. Sci.*, **22**, 2025 (1987).
11. S. N. Maity, U. K. Saroop, and A. Misra, *Polym. Eng. Sci.*, **32**, 27 (1992).