



폴리에틸렌/폴리프로필렌/페타이어고무분말 복합체의 기계적 특성

최정수·박차철[†]

동서대학교 에너지 생명공학부

접수일(2011년 10월 19일), 수정일(1차: 2011년 11월 1일, 2차: 11월 19일), 게재확정일(2011년 11월 24일)

Mechanical Properties of Polyethylene/Polypropylene/Waste Tire Rubber Powder Composites

Jeong-su Choi and Cha-cheol Park[†]

Department Energy and Bio-engineering, Dongseo University
69, Churae-ding, Sasnga-gu, Busan, 617-716, Korea

(Received October 19, 2011, Revised November 1, 2011, November 19, Accepted November 24, 2011)

요약 : 페타이어고무분말을 재활용하기 위하여 방수시트용 고무분말 복합체를 제조하였으며, 수지 종류와 가교제의 함량이 복합체의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. EPDM이 부가됨에 따라 고무분말 PE 복합체의 신장율이 3배 이상 증가하는 현상을 나타내었다. 고무분말 충전 복합체에 가교제의 농도가 증가함에 따라 복합체의 강도가 증가하였으며, 특히 재생 폴리프로필렌을 사용한 경우 3배 이상 인장강도가 현저하게 높게 나타났다. 따라서 폴리프로필렌 블렌드물로 고무분말 복합체를 제조하는 경우 신재 폴리프로필렌을 사용하는 것 보다 재생 폴리프로필렌을 사용하는 것이 기계적 특성면에서 효과적인 것으로 나타났다.

ABSTRACT : To recycle the waste tire rubber powder, rubber powder composite for waterproof sheet was prepared, and analyzed the effect of the kind of resin and the amount of crosslinking agent on the mechanical property of the composites. The elongation-at-break of the PE composite increased more than 3 times as EPDM was added into rubber composites. As the content of the crosslinking agent increased, the tensile strength of composite increased as well. When recycled polypropylene was used, the increase in composite's tensile strength was more than 3 times. Therefore to use the recycled PP in composite is more effective rather than PP in term mechanical properties.

Keywords : tire, powder, composite, polypropylene

I. 서 론

21세기 들어 산업이 발달되고 자동차 수요가 급증함에 따라 산업폐기물인 페타이어의 양도 급격하게 늘어가고 있는 실정이다. 페타이어는 예전에는 매립이나 소각 등의 방법으로 처리하였으나, 환경문제가 대두되면서 재활용 비율이 늘어나고 있다. 페타이어 재활용 기술로는 초임계유체를 이용한 오일화 방법, 분쇄하여 분말 석탄 등 가연성 재료와 혼합하여 고품재료화하는 방법, 아스팔트 개질에 사용하는 방법, 600-700 °C의 고온에서 열분해시켜 유용성 오일과 카본블랙으로 회수하는 열분해법, 분쇄한 분말을 고분자 수지에 혼합하여 복합체로 사용하는 방법 등이 제시되고 있다.¹⁻³

페타이어 재활용 기술과 관련이 많은 고무분말을 고분자 수지와 혼합하여 복합체로 제조하는 방법은 비교적 단순한 공정 및 우수한 특성 부여 등으로 많은 연구가 진행되고 있

다.^{4,6} 문⁶ 등은 페타이어 고무분말(tire rubber powder, RPD)을 니트릴고무와 혼합하여 고무발포체를 제조하였으며, 고무분말 함량이 증가함에 따라 난연 특성이 증가하는 것으로 보고하였다. 플라스틱에 페타이어분말을 혼합하여 복합체를 제조하는 경우, 수지 매트릭스에 첨가되는 고무분말의 함량이 증가할수록 인장강도나 압축 강도 등의 기계적 특성은 저하되는 것으로 보고하였다.⁷ 페타이어 고무분말을 폴리에틸렌(PE) 수지에 첨가하여 복합체로 제조하는 경우 고무분말의 함량이 증가할수록 기계적 특성은 저하하지만 충격강도는 증가하는 것으로 보고되고 있으며, 고무분말이 첨가됨에 따라 충격강도가 증가하는 현상은 충전된 고무분말이 충격을 흡수하는 충격 완화제 역할을 하는 것에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁸ 페타이어 고무분말을 재생 폴리에틸렌과 신재 폴리에틸렌과 혼합하여 복합체로 제조하는 경우 고무분말 함량이 증가할수록 인장강도는 감소하나 파단신율은 증가하는 것으로, 또한 충격강도는 고무분말 함량이 30%인 경우 가장 높은 값을 나타내고 그 이상의 함량에서는 오히려 감소하는 것으로 보고되고

[†] 대표저자 E-mail: ccpark@dongseo.ac.kr

있다.⁹ 천연고무분말을 고밀도 폴리에틸렌에 첨가하여 열가소성 탄성체를 제조한 경우 천연고무 함량이 증가할수록 인장강도나 탄성을 등의 기계적 특성이 감소하는 것으로 보고되고 있다.¹⁰ 폴리에틸렌과 아크릴로니트릴부타디엔고무(NBR) 분말을 혼합하여 열가소성탄성체로 제조한 경우, 고무함량이 증가할수록 열가소성탄성체의 결정화에너지가 감소하였으며, 인장강도와 탄성이 현저히 감소하는 것으로 보고되고 있다.¹¹ 재생 고무분말과 저밀도 폴리에틸렌으로 열가소성탄성체를 제조하는 경우 고무분말 입자 크기가 840 μm 에서 177 μm 로 작아질수록 인장강도, 인열강도, 신장을 및 영구변형 등 기계적 특성이 향상되는 것으로 보고되고 있다.¹²

페타이어 고무분말을 폴리프로필렌에 혼합하여 복합체로 제조하는 경우에도 열가소성 탄성체 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.^{13,14} 또한 페타이어고무분말을 폴리프로필렌에 첨가하여 복합체로 제조하는 경우 고무분말 표면을 allylamine 이나 말레산무수물 등을 이용하여 화학적으로 개질한 경우 매트릭스인 폴리프로필렌과의 상용성이 증대되어 용융점도와 탄성을 등이 증가하는 것으로 보고되고 있다.^{15,16} 김⁵ 등은 페 에틸렌프로필렌고무(EPDM) 분말과 폴리프로필렌(PP)을 이축압출기로 동적가교를 수행하여 열가소성탄성체(TPE)로 제조하였으며, 이때 압출기의 역 스크류 엘리먼트와 전단력이 증가할수록 동적가교가 증가하는 것으로 보고하였다. 고무분말을 충전한 복합체 제조시 재생 폴리프로필렌을 사용하게 되면, 매트릭스의 가교효율이 증대되어 복합체의 기계적 특성이 향상될 것으로 기대된다. 그러나 열가소성수지에 폐고무분말을 충전 후 매트릭스를 가교하여 복합체로 제조하는 경우, 폴리에틸렌과 재생 폴리프로필렌(recycled polypropylene, RPP) 및 EPDM 등을 매트릭스로하여 제조된 복합체에 대한 연구결과는 보고되지 않고 있다.

Table 1. Melt Index of PE, PP and RPP

Resin	PE	PP	RPP
MI ^{a)}	6.8	14	8.6

a) measured at 230 °C with 2.16 kg.

따라서 본 연구에서는 고무분말 재활용을 위하여, 토목용 방수시트 기재 층으로 사용될 수 있는 고분자수지/고무분말 복합체를 제조하였다. 고분자수지/고무분말 복합체를 제조할 때, 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 재생 폴리프로필렌 및 EPDM 등의 수지와 가교제인 dicumylperoxide(DCP)의 함량이 복합체의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험

1. 실험재료

폴리프로필렌은 Llyondellbasf 제품의 HIFAX cacaoA grade를 사용하였으며, 폴리에틸렌은 Mitsui Chemicals 제품의 DF840 grade를 사용하였다. 재생 폴리프로필렌은 알파텍의 RPP를 사용하였으며, 230 °C에서 2.16 kg의 하중으로 측정된 각 수지의 용융지수는 Table 1과 같다. 가교제인 dicumylperoxide(DCP)는 AKZO nobel사의 시판용 상품을 정제 없이 그대로 사용하였다. 페타이어 고무분말은 국내 크리오텍의 페타이어 고무분말 80메쉬 제품을 사용하였다.

2. 시편제조

페타이어고무분말 충전 복합체는 Table 2에 나타난 바와 같은 다양한 조성으로 제조하였다. 복합시트용 필름제조를 위한 예

Table 2. Formulation of Rubber Powder Composites with Various Plastics

Code	PE (wt%)	PP (wt%)	RPP (wt%)	EPDM (wt%)	DCP (phr ¹⁾)	RPD (wt%)
PE/RPD	60	-	-	-	-	0-40
PP/RPD	-	60	-	-	-	0-40
RPP/RPD	-	-	60	-	-	0-40
PE/PP/RPD	30	30	-	-	-	0-40
PE/RPP/RPD	30	-	30	-	-	0-40
PE/PP/RPD/EPDM	28.75-25	28.75-25	-	2.5-10	-	40
PE/RPP/RPD/EPDM	28.75-25	-	28.75-25	2.5-10	-	40
PE/PP/RPD/DCP	30	30	-	-	0-4	40
PE/RPP/RPD/DCP	30	-	30	-	0-4	40
PE/PP/RPD/EPDM/DCP	27.5-25	27.5-25	-	5-10	0-4	40
PE/RPP/RPD/EPDM/DCP	27.5-25	-	27.5-25	5-10	0-4	40

1) phr: part per hundred resin

비실험결과, 고무분말을 40 wt% 충전하는 것이 적합한 것으로 나타났기 때문에 최대 충전율은 40 wt%로 한정하였다. 폴리에틸렌 및 폴리프로필렌 복합체의 경우, 160 ml 용량의 혼련기에서 30 rpm으로 150 °C~230 °C에서 3분간 균일하게 혼합하였으며, PE의 경우 130 °C, PP의 경우 230 °C에서 혼련하였다. DCP로 가교된 복합체의 경우, 위의 혼련물에 가교제인 DCP를 투입하고 3분간 균일하게 혼련을 한 후 혼련물을 제조하였다. 제조된 혼련물을 두께 1 mm의 150 °C 금형에서 15 Mpa의 압력으로 2분간 성형하여 시트형태의 시편으로 제작하였다.

3. 기계적 물성 시험

인장강도, 신장률 및 인열강도는 KSM 6518에 따라 아령형 3호로 절단하여 물성 측정용 시편을 만능시험기(INSTRON사의 MODEL 4466)를 사용하여 500±25 mm/min의 인장속도로 시편이 절단될 때까지 5회 시험을 하여 인장강도 및 인열강도의 평균 값을 구하였다.

III. 결과 및 고찰

일반적으로 고분자 수지에 고무분말을 첨가하여 복합체로 만드는 경우, 충전된 고무분말의 함량이 증가할수록 복합체의 인장강도 등의 기계적 특성이 저하되는 것으로 보고되고 있다.⁷ 충전된 고무분말의 함량이 많을수록 복합체의 기계적 특성이 감소하는 현상은 매트릭스인 수지와 고무분말 계면에서 인력이 적은 것에 기인하는 것으로 알려졌다. Figure 1에 매트릭스 수지 PE, PP, RPP, PE/PP(50/50) 및 PE/RPP(50/50)에 고무분말을 50%까지 충전하여 제조된 복합체의 인장강도를 나타내었다. 전반적으로 충전된 고무분말의 함량이 증가될수록 복합체의 인장강도는 저하되는 경향을 나타내었으며, 이는 고무

분말 충전 복합체의 일반적인 현상과 일치하는 것으로 이해할 수 있다. PE, PP, RPP, PE/PP(50/50) 및 PE/RPP(50/50)의 매트릭스 수지에 고무분말을 50%까지 충전하여 제조된 복합체의 신장율을 Figure 2에 나타내었다. 고무분말이 충전되지 않은 PE, PP 및 PE/PP(50/50) 수지는 600% 이상의 신장율을 나타내었다. 그러나 RPP는 100%미만의 아주 낮은 신장율을 나타내었으며, PE/RPP(50/50) 수지의 경우에도 신장율은 200% 미만으로 나타났다. 이러한 현상은 RPP의 경우 재생을 위한 열적 가공에서 프로필렌의 분자쇄의 절단 및 일부가교에 의하여 일차적으로 신장율이 저하된 것에 기인하는 것으로 이해할 수 있다. PE, PP 및 PE/PP(50/50) 수지에 고무분말을 충전한 복합체의 경우, 고무분말의 충전량이 증가됨에 따라 신장율이 급격히 저하되는 현상을 나타내었으나, RPP 및 PE/RPP(50/50) 수지 복합체의 경우에는 감소의 정도가 완만한 것으로 나타났다. RPP 및 PE/RPP(50/50) 수지 복합체의 경우에는 감소의 정도가 완만한 현상은 매트릭스 수지 자체의 신장율이 낮기 때문에 충전된 고무분말에 의한 영향이 다소 적게 나타나는 것으로 이해 된다.

PE, PP, RPP, PE/PP(50/50) 및 PE/RPP(50/50)의 매트릭스 수지에 고무분말을 50%까지 충전하여 제조된 복합체의 인열강도를 Figure 3에 나타내었다. 고무분말이 충전된 PE, PP 및 RPP 복합체의 인열강도가 PE/PP(50/50) 및 PE/RPP(50/50) 복합체의 경우에 비하여 다소 높은 인열 강도를 나타내었으며, 이러한 현상은 단독 수지에 비하여 블렌드된 수지는 매트릭스 자체의 블렌딩에 의한 상분리 부분이 존재하기 때문에 인열강도가 낮은 것으로 이해된다.

폴리에틸렌 등의 열가소성 수지에 고무분말을 충전하는 경우 기계적 특성이 저하되며, 이러한 경우 EPDM 등을 부가하여 매트릭스를 개질하면 복합체의 신장율 저하가 감소하는 것으로 알려져 있다. Li 등은 고밀도폴리에틸렌에 고무분말을

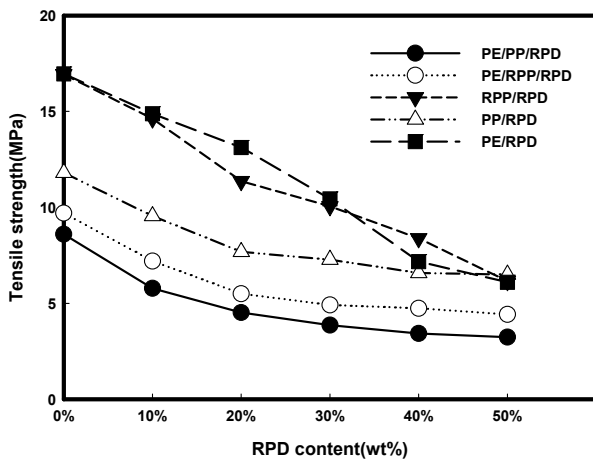


Figure 1. Effect of plastic types on tensile strength of composite filled with RPD.

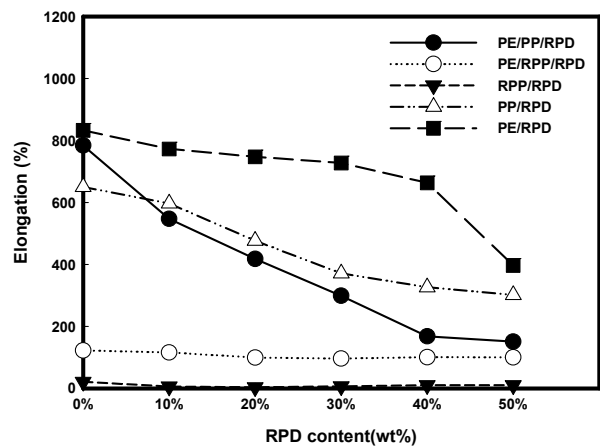


Figure 2. Effect of plastic types on elongation of composite filled with RPD.

충전하여 복합체로 제조한 경우, EPDM을 10% 부가하여 제조한 경우에는 부가하지 않은 경우에 비하여 인장강도는 크게 변화하지 않았으나 신장율은 크게 향상되는 것으로 보고하였다.¹⁷ PE/PP/RPD(30/30/40) 및 PE/RPP/RPD(30/30/40)의 매트릭스 수지에 EPDM을 부가하여 개질한 경우 복합체의 인장강도 및 신장율을 Figure 4 및 5에 나타내었다. 고무분말 복합체에 EPDM을 10%까지 부가하여도 복합체의 인장강도는 크게 변화하지 않았으나 신장율은 EPDM 부가량에 따라 현저히 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 선행 연구자¹⁷들의 연구결과와도 일치하는 현상으로, 부가한 EPDM이 복합체에서 상용화제 역할을 하는 것에 기인하는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 블렌드물을 매트릭스로하여 고무분말 충전 복합체를 제조하는 경우 EPDM이 신장율을 향상시키는 개질제로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

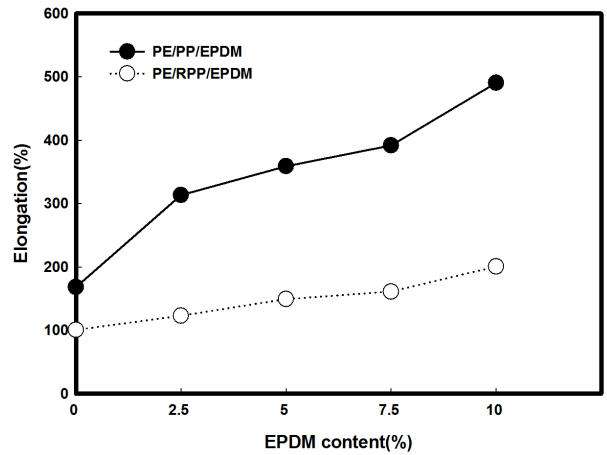


Figure 5. Effect of EPDM content on elongation of PE/PP/RPD and PE/RPP/RPD composite filled with 40% RPD.

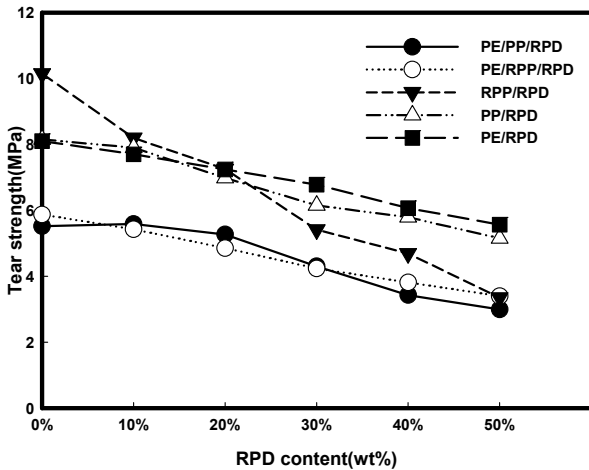


Figure 3. Effect of plastic types on tear strength of composite filled with RPD.

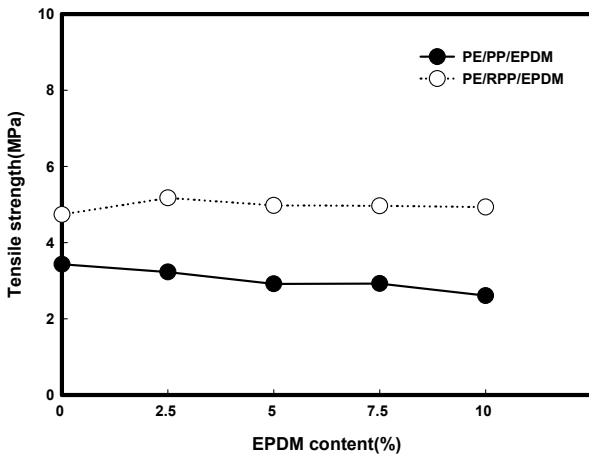


Figure 4. Effect of EPDM content on tensile strength of PE/PP/RPD and PE/RPP/RPD composite filled with 40% RPD.

Figure 1에 나타난 바와 같이 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 혹은 이들 블렌드물에 고무분말을 충전하여 복합체를 제조하는 경우 복합체의 인장강도가 현저히 저하된다. 신재 폴리프로필렌 및 재생 폴리프로필렌 블렌드물을 사용하여 제조한 복합체의 인장강도 등을 증대시키기 위하여 복합체 제조시 DCP를 사용하여 가교한 경우 DCP 농도가 복합체의 인장강도 및 인열 강도에 미치는 영향을 Figure 6 및 7에 나타내었다. 신재 폴리프로필렌을 사용한 PE/PP/RPD(30/30/40) 복합체의 경우, DCP에 의한 가교가 수행됨에 따라 복합체의 인장강도는 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 재생 폴리프로필렌을 사용한 PE/RPP/RPD(30/30/40) 복합체의 경우, DCP가 부가됨에 따라 복합체의 인장강도가 현저히 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 DCP를 2% 부가한 경우에는 인장강도가 3배 이상 증가하는 현상을 나타내었다. 그리고 복합체의 인열 강도도

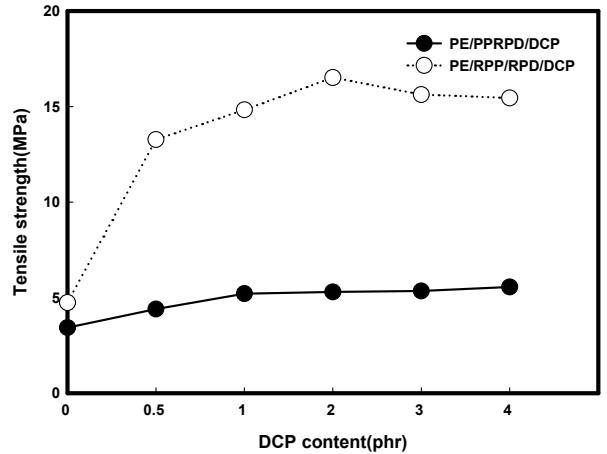


Figure 6. Effect of DCP content on tensile strength of PE/PP/RPD and PE/RPP/RPD composite filled with 40% RPD.

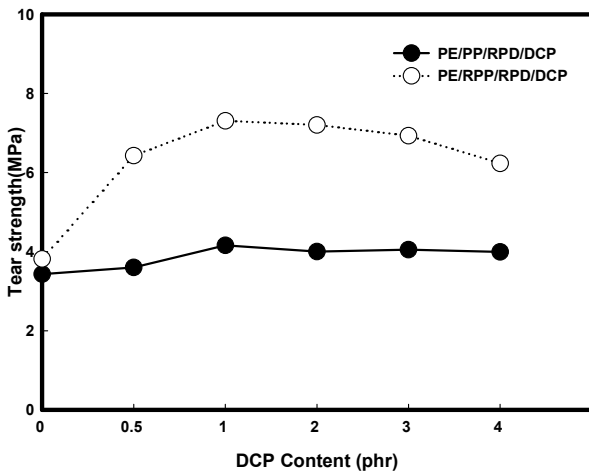


Figure 7. Effect of DCP content on tear strength of PE/PP/RPD and PE/RPP/RPD composite filled with 40% RPD.

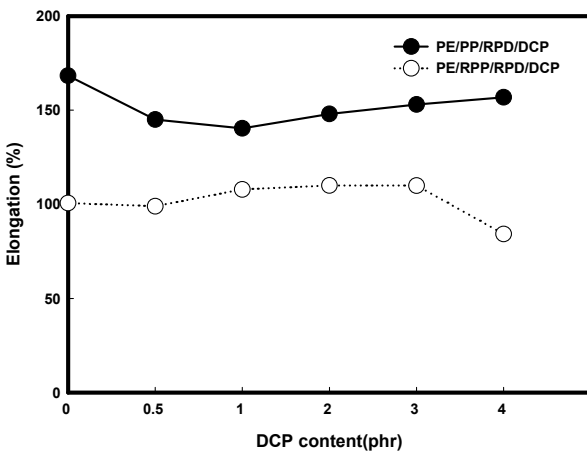


Figure 8. Effect of DCP content on elongation of PE/PP/RPD and PE/RPP/RPD composite filled with 40% RPD.

인장강도와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 블렌드물을 매트릭스로 하여 고무분말 복합체로 제조할 때, 복합체의 기계적 강도가 중요한 경우에는 신재 폴리프로필렌보다 재생 폴리프로필렌을 사용하는 것이 보다 효과적인 것으로 나타났다. DCP로 가교된 복합체의 인장강도가 신재 폴리프로필렌 블렌드물을 사용한 경우 보다 재생 폴리프로필렌 블렌드물에서 현저히 증가하는 현상은 폴리프로필렌 재생 과정에서 열분해에 의해 생성된 이중결합 등에 의해 가교효율이 증대되었기 때문으로 이해된다.

PE/PP/RPD(30/30/40) 및 PE/RPP/RPD(30/30/40) 복합체 제조 시 가교제로 첨가한 DCP가 복합체의 신장율에 미치는 영향을 Figure 8에 나타내었다. PE/PP/RPD(30/30/40) 복합체의 신장율은 가교제인 DCP를 부가하여도 증가하지 않고 오히려 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 DCP에 의해 매

트릭스가 가교되면서 신장율이 다소 감소되는 것에 기인하는 것으로 이해할 수 있다. PE/RPP/RPD(30/30/40) 복합체의 경우, 인장강도는 급격히 증가하였으나 신장율은 크게 변화되지 않는 경향을 나타내었다. 따라서 폴리프로필렌 블렌드물로 고무분말 복합체를 제조하는 경우, 신재 폴리프로필렌을 사용하는 것 보다 재생 폴리프로필렌을 사용하는 것이 기계적 특성면에서 효과적인 것으로 나타났다.

PE/PP/EPDM 블렌드물에 고무분말을 40 wt% 충전한 복합체에 가교제로 DCP를 4%까지 첨가하여 제조한 복합체의 인장강도를 Figure 9에 나타내었다. DCP를 첨가함에 따라 복합체의 인장강도가 증가하였으나 1% 이후에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 개질제로 EPDM을 부가하지 않은 복합체에 비하여 EPDM을 5% 및 10% 부가한 복합체가 높은 인장강도를 나타내었다. 개질제로 사용한 EPDM의 함량에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. PE/RPP/EPDM 블렌드물에 고무분말을 40 wt% 충전한 복합체에 가교제로 DCP를 사용한 복합체의 인장강도를 Figure 10에 나타내었다. 재생 폴리프로필렌을 사용한 복합체의 경우에는, 개질제로 EPDM을 5% 및 10% 첨가한 경우나 첨가하지 않은 경우나 인장강도는 큰 변화를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 재생 폴리프로필렌을 사용한 복합체의 경우, 가교제인 DCP가 부가됨에 따라 복합체의 인장강도가 현저히 증가하는 경향을 나타내었다. 가교제인 DCP 첨가에 따른 복합체의 인장강도 증가폭은 재생 폴리프로필렌의 경우가 신재 폴리프로필렌의 경우에 비하여 현저하게 높은 것으로 나타났다. 그리고 신재 폴리프로필렌으로부터 제조된 복합체에 개질제로 EPDM을 첨가하는 것보다 재생 폴리프로필렌을 사용하는 것이 인장강도 향상 측면에서 보다 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 PE/PP 블렌드물을 기재로 하여 고무분말 충전 복합체를 제조하는 경우, 재생 폴리프로필렌을 사용하는 것이 신재 폴리프로필렌을 사용하는 것보다 효과적인 것으로 볼 수 있다.

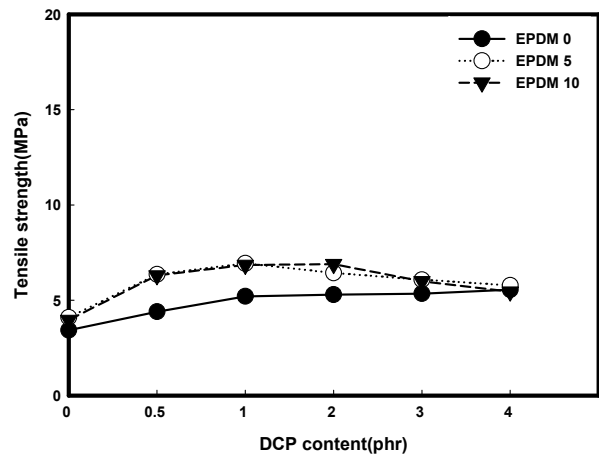


Figure 9. Effect of DCP content on tensile strength of PE/PP/RPD/EPDM/DCP composites filled with 40% RPD.

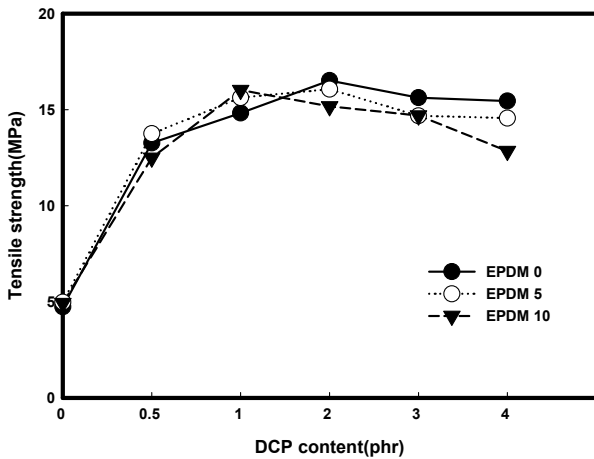


Figure 10. Effect of DCP content on tensile strength of PE/RPP/ RPD/EDPM/DCP composites filled with 40% RPD.

IV. 결 론

페타이어 고무분말을 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 블렌드 물에 첨가하여 복합체를 제조한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다. 폴리에틸렌과 폴리프로필렌 블렌드물을 매트릭스로 하여 고무분말 충전 복합체를 제조하는 경우, EPDM이 신장율을 향상시키는 개질제로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 복합체 제조시 DCP를 부가한 경우, 재생 폴리프로필렌을 사용한 경우가 신재 폴리프로필렌의 경우보다 인장강도가 더 많이 향상되었으며, 특히 재생 폴리프로필렌을 사용한 복합체에 DCP를 2% 부가한 경우에는 인장강도가 3배 이상 증가하는 현상을 나타내었다. 따라서 폴리프로필렌 블렌드물로 고무분말 복합체를 제조하는 경우, 신재폴리프로필렌을 사용하는 것보다 재생폴리프로필렌을 사용하는 것이 기계적 특성면에서 효과적인 것으로 나타났다.

감사의 말씀

본 연구는 중소기업청의 “기업부설 연구소 지원사업”의 연구결과입니다.

참고 문헌

- W. S. Kim, J. K. Kim, I. S. Kim, and P. W. Park, “Liquefaction characteristics in supercritical decomposition and extraction of used automotive tire”, *Elastomer*, **34**, 350 (1999).
- M. Kim, K. Han, and K. Kim, “The study on the pressure-sensitive adhesion property of waste FKM powder and SBS modified asphalt”, *Elast. compos.*, **44**, 282 (2009).
- J. Kim, S. Hwang, J. Jung, and S. Park, “A study on recycling technology of waste tire powder by particle size distribution analysis”, *Elastomer*, **38**, 128 (2003).

- J. Park, D. Kang, S., C. Chung, K. Chung, and Y. Hong, “Friction and wear characteristics of friction material from scrap tire and potassium hexatitanate”, *Elastomer*, **36**, 3 (2001).
- J. Kim, S. Lee, and S. Hwang, “A study on thermoplastic elastomer blend using waste rubber powder(1)”, *Elastomer*, **36**, 8 (2001).
- S. Moon, J. Lee, J. Choi, and B. Jo, “Effect of waste ground tire rubber on flame retardancy and foaming properties of the NBR foams”, *Elastomer*, **38**, 251 (2003).
- Y. Hong, “Mechanical properties of plastic waste/ ground rubber tire composite”, *Elastomer*, **39**, 294 (2004).
- S. Kwak, M. Choi, and S. Lee, “Mechanical properties of composites of HDPE and recycled tire crump”, *Elastomer*, **36**, 22 (2001).
- H. Kye, K. Shin, and D. Bang, “A study on the mechanical and rheological properties of the recycled polyethylene composites with ground waste tire powder”, *Elastomer*, **41**, 97 (2006).
- S. O. Pongdhorn, S. Chakrit, and S. N. Promsak, “Properties and recycleability of thermoplastic elastomer prepared from natural rubber powder and high density polyethylene”, *Polymer Testing*, **29**, 346 (2010).
- S. Thanisrarat, S. O. Pongdhorn, and S. Chakrit, “Mechanical and thermal properties of thermoplastic elastomer based on low density polyethylene and nitrile rubber powder”, *Frontiers in Polymer Science*, **29**, 977 (2010).
- B. C. Guo, Y. Cao, D. Jia, and Q. G. Giu, “Thermoplastic elastomer derived from scrap rubber powder/LLDPE blend with LLDPE-g-(epoxidized NR) dual compatibilizer”, *Macromol. Mater. Eng.*, **289**, 360 (2004).
- H. Ismail and S. Syah, “Polypropylene/natural rubber/recycle rubber powder blends”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, **41**, 833 (2002).
- X. Su, Y. Hua, J. Quiao, Y. Liu, X. Zhang, J. Gao, Z. Song, and F. Huang, “The relationship between microstructure and properties in PP/rybber powder/nano-CaCO₃ ternary blends”, *Macromol. Mater. Eng.*, **289**, 275 (2004).
- A. M. Shanmugaraj, S. Lee, J. Kim, and S. Ryu, “Influence of surface functionalized waste tire powder on the thermal and rheological properties of polypropylene/ waste tire powder composite”, *Elastomer*, **41**, 49 (2006).
- S. L. Zhang, Z. X. Zhang, Z. X. Xin, K. Pal, and J. K. Kim, “Prediction of mechanical properties of polypropylene/waste ground rubber tire powder treated by bitumen composited via uniform design and artificial neural networks”, *Materials & Design*, **31**, 1900 (2010).
- Y. Li, Y. Zhang, and Y. X. Zhang, “Mechanical properties of high density polyethylene/scrap rubber powder composites modified with EPDM, dicumyl peroxide and silicone oil”, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 2020 (2003).