



## 폐 EPDM을 이용한 고무 복합 소재 개발

박동규 · 홍여주 · 정극민 · 김진국<sup>†</sup>

경상대학교 나노·신소재공학부 고분자공학과

접수일(2012년 5월 11일), 수정일(2012년 5월 22일), 게재확정일(2012년 5월 25일)

### Development of Rubber Composite Materials Using Waste EPDM

Dongkyu Park, Yeojoo Hong, Keukmin Jeong, and Jinkuk Kim<sup>†</sup>

Polymer Science and Engineering, School of Materials Science and Engineering,  
Gyeongsang National University

(Received May 11, 2012, Revised May 22, 2012, Accepted May 25, 2012)

**요약** : 제대로 재활용되지 못하고 있는 폐 EPDM 즉, 자동차 Weather strip이나 세탁기 가스켓 등에서 재생한 폐 EPDM 분말을 적합하고 경제성있는 Polyolefin계 Elastomer와 수지(Binder), 그리고 Filler 및 기타 첨가제를 선정하여, 다양한 배합조건으로 고무 복합소재를 압출 제조하였다. 본 실험에 유익한 기초 실험으로서, 폐 EPDM의 초음파처리 효과, 폐 EPDM복합소재의 페타이어 복합소재와의 물성 비교, Virgin EPDM과 Devulcanized EPDM과의 비교, 그리고 12 축압출기로 압출한 재료의 물성에의 영향을 고찰하였다. 폐 EPDM을 이용하여 인조잔디 충전재와 카매트용 복합소재를 2 축압출기를 사용하여 압출한 후, 인장시편을 사출하여 인장강도, 신율, 경도의 세가지 물성을 주요 평가지표로 삼고 경제적인 배합처방을 개발하였다.

**ABSTRACT** : Waste EPDM(W-EPDM) collected from the automotive weather strip and the gasket of a laundry machine has not been effectively recycled. Using this W-EPDM powder and other ingredients, i.e., binder(polyolefin resin, polyolefin elastomer, etc.), filler and additives, various economic rubber composites were made by extrusion. In advance of main experiments, the effects of ultrasonic treatment of W-EPDM on the property of rubber composites, comparison in the property of the composites of W-EPDM with those of virgin and devulcanized EPDM, and waste tire rubber were investigated. Also, the properties of the rubber composites extruded with a 12-screw extruder were compared with those extruded with twin-screw extruder. Various W-EPDM composites for synthetic turf filler and car mat were extruded and injection molded, and 3 main properties of tensile strength, elongation and hardness were investigated to develop economical and proper recipes of the rubber composites.

**Keywords** : waste EPDM, car mat, synthetic turf filler, 12-screw extruder

### I. 서 론

전 세계가 지구 온난화와 환경문제, 그리고 고유가 시대에서 석유화학제품의 재활용에 대해서 관심이 고조되고 있다. 고무 제품은 가교되어 있어 일반 플라스틱에 비해 재활용이 상대적으로 어려워 대부분이 소각연료로 사용하거나 매립 처분되고 있고, 고무산업 생산현장에서 발생하는 폐 고무의 처리문제로 제조업자의 부담거리가 되기도 한다. 페타이어는 발생량이 많아 이의 재활용에 대해서는 많은 관심과 연구가 이루어졌지만,<sup>1-13</sup> 폐 타이어에 이어 발생량이 많은 폐 EPDM의 재활용에 대해서는 연구가 거의 없는 상태이다. 폐 EPDM은 자동차

Weatherstrip, Hose, 세탁기 가스켓 등에서 주로 발생하는데, 일본의 TOYOTA사는 자동차 Weatherstrip의 폐고무를 연속압출 기술로서 재사용되고 있는 정도다.

이번 시험에서는 폐고무 복합소재의 기초적인 인장물성 결과를 얻기 위해서 Polypropylene과 폐 EPDM의 비율을 달리하여 개략적인 시험의 방향을 잡았다. 또한 Virgin EPDM과 Devulcanized EPDM도 참고 자료로 재생 EPDM과 비교 하기 위하여 인장물성실험을 하였다. 폐자동차 Weatherstrip에서 재생한 검정 EPDM분말과 세탁기 가스켓에서 재생한 회색 EPDM 분말을 주 원료로 하고, 여기에 여러 폴리올레핀계 수지 또는 Elastomer를 Binder로 하였으며, 기타 첨가제로서 Filler, Processing Oil, 피톤치드 등을 사용하였다.

본 폐고무 복합소재의 우선의 용도는 인조잔디 충전재와

<sup>†</sup>Corresponding Author. E-mail: rubber@gnu.ac.kr

카메트이다. 인조잔디 충전재는 운동장, 공원, 테니스장, 놀이터 등 인조잔디가 설치되는 곳에 함께 적용되는 것으로서, 그 사용량이 매년 현저히 증가하는 경향을 보이고 있다. 카메트의 경우, 형태별로 All-weather mat와 합포매트의 2가지 종류가 있는데, All-weather mat는 고무나 TPE의 단일 쉬트로 이루어졌으며, 합포매트는 PVC나 고무 쉬트에 카메트를 부착한 형태로 이루어졌다. All-weather mat는 한국에서 주로 택시와 트럭용으로만 적용되고 있으며, 대부분 합포매트를 많이 적용하고 있다. 그러나 미국, 유럽 등에서는 All-weather mat도 많이 사용하고 있다.

배합처방은 적정물성과 경제성에 주안점을 두었으며, 다양한 원료와 Composition으로 2 축압출기와 12 축압출기를 이용하여 압출 Pellet화 했으며 이들 압출기의 영향도 비교 고찰하였다. 물성은 주로 인장강도, 신율, 경도, 비중을 측정 비교하여 적정 처방을 선택했다.

## II. 시험 및 결과

### 1. 폐 EPDM/PP 기초물성 시험

폐 고무 소재로는 Weather strip에서 발생하는 폐 EPDM 과 플라스틱 수지로는 범용 수지인 PP와 PE를 선정하여 기초 실험하였다. 기초 data로서 플라스틱과 고무의 비율에 따른 물성의 특성을 알아보고자 폐 EPDM(W-EPDM)과 PP Copolymer를 사용하여 그 조성을 W-EPDM/PP의 비율을 30/70~70/30으로 변경하면서 실험을 하였다. 사용한 재료에 대한 상세사항은 Table 1에 나타냈다. 2 축 압출기를 이용하여 실험 하였으며, 압출조건은 PP의 용융 온도에 맞추어서 노즐부터 호퍼까지 200, 210, 210, 210, 200, 190, 180, 160 °C 으로 설정하여 압출하였다. 압출한 샘플을 펠릿화 한 후 사출기를 이용하여 실험분석 할 수 있는 샘플 시편을 제작하였으며, 폐 EPDM과 PP의 조성에 따른 물성 비교를 위해 인장 강도와 신율, 경도를 측정하여 비교하였으며 Figure 1에 비교 그래프를 나타냈다. 예상한 바와 같이 인장강도와 경도는 플라스틱 성분이 많을수록, 신율은 고무 함량이 많을수록 증가하였다.

### 2. EPDM 종류에 따른 물성

자동차 Weather strip 주성분은 EPDM으로서, 폐 EPDM을 이용하여 폐 고무 복합소재 제품에 응용하기 전에 Virgin EPDM(V-EPDM)과 Devulcanized EPDM(D-EPDM)을 비교하여 폐 EPDM(W-EPDM)의 제품의 응용가능성과 적절성에 대하여 알아보기 위해 물성을 비교하여 보았으며, 배합비는 EPDM 60 : PP 40으로 하여 압출하였다. Figure 2 에 인장강도와 신율을 비교하여 나타냈다.

인장강도는 각각의 EPDM재료에 대해 거의 비슷한 물성을

Table 1. Information about materials used in the test

Materials	Grade
W-EPDM (Black Powder)	Recycled Weatherstrip (BLACK)
W-EPDM (Grey Powder)	Recycled Laundry Machine Gasket (GREY)
SEBS	Tiwan LCY 9551
LDPE	LG Chemicals MB9205 (MFR 24, Density 0.916)
LLDPE	Honam Petrochemicals UL814 (MFR 20, Density 0.924)
Co-PP	Honam Petrochemicals SB520 (MFR 1.8, Density 0.9)
POE 1	Polyolefin elastomer
POE 2	Polyolefin elastomer
POE 3	Polyolefin elastomer
CaCO3	Woojin Chemicals BC3000
Processing -oil	Keukdong KD P 150
WAX	PP based

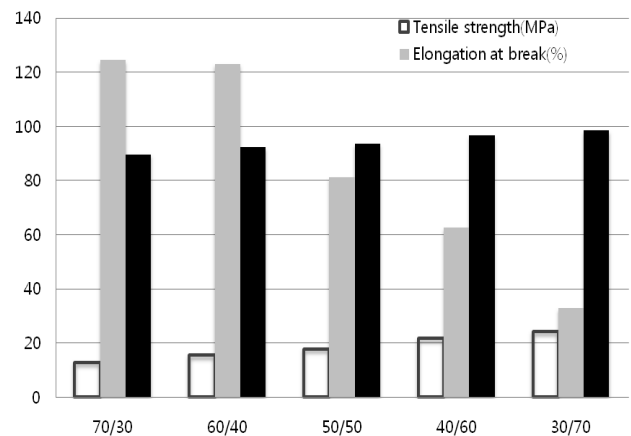


Figure 1. Tensile strength, elongation and hardness of W-EPDM/PP composites with different ratio.

보였으며, 신율은 V-EPDM이 200%로서 가장 높았으며, W-EPDM도 120~130% 정도로 양호하여, 폐 EPDM을 이용한 폐 고무 복합소재 제품 제조에 적합함을 알 수 있다. 그러나 D-EPDM은 신율이 50%로서 너무 낮아 폐고무 복합소재로서 부적합할 것으로 생각된다.

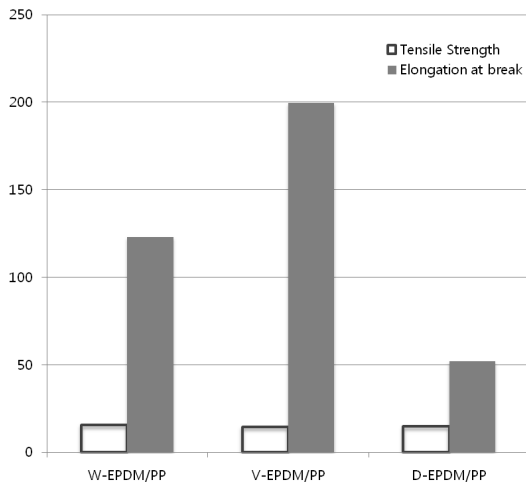


Figure 2. Tensile properties of different kinds of EPDM.

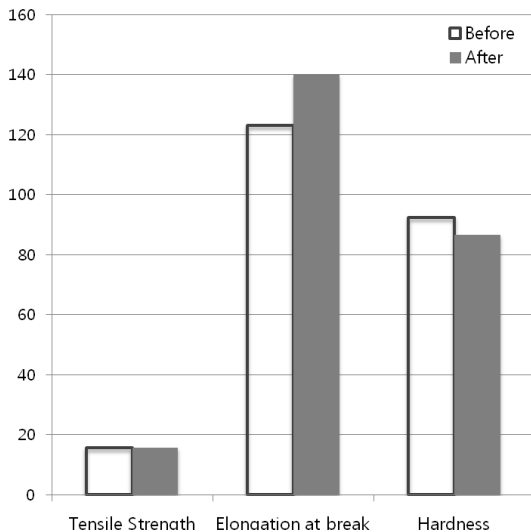


Figure 3. Effect of ultrasonic treatment of W-EPDM on tensile properties and hardness of W-EPDM/PP(60/40) composite.

### 3. 폐 EPDM의 초음파 처리 영향

폐 EPDM은 가교가 된 상태이므로 고무 복합소재로서 재활용하기에 문제점이 따른다. 이를 보완하기 위해 폐 EPDM을 아주 작은 수 Micrometer수준의 파우더 형태로 가공을 하여 재활용 하는데, 이렇게 미세 분말화 된 입자와 바인더 역할을 하는 수지와의 상용성 또는 접착력을 향상시키기 위하여, 폐 EPDM 파우더에 초음파 처리를 하여 그 문제점을 해결하고자 하였다. 폐 EPDM과 수지로는 PP를 사용하여 2축 압출기에서 노즐부터 호퍼까지 200, 210, 210, 210, 200, 190, 180, 160 °C로 온도 설정을 하여 실험을 하였다. 폐 EPDM/PP의 조성

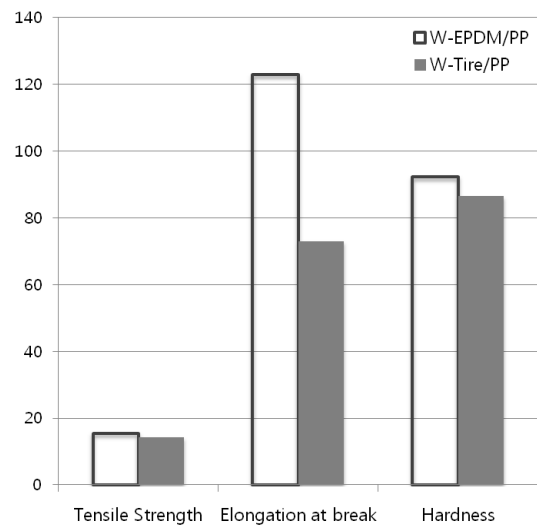


Figure 4. Comparison in tensile properties and hardness for W-EPDM/PP and W-Tire/PP composites with the same ratio of 60/40.

비율은 Figure 1에서 물성이 양호한 조성 즉, 폐 EPDM/PP=60/40으로 실험하였다. 사용한 초음파 처리기는 메이크텍 MT-2000이며, 용량은 2000 W, 20 KHz이다. 초음파 처리 방법은 폐 EPDM을 먼저 인터널믹서에서 초음파로 150 °C에서 약 10분간 초음파 처리한 후 압출기에서 PP와 블렌딩 한 후 분석을 하였다. 분석은 인장강도와 신율, 경도를 측정하였고, 초음파 처리의 효과를 비교하는 그래프를 Figure 3에 보였다. 초음파 처리 한 EPDM을 사용한 경우, 인장강도는 변화가 없었으나 신율은 상당량 늘어났으며, 경도는 낮아지는 것을 볼 때, 초음파 처리한 폐 EPDM의 경우 미처리 한 것에 비해 고무 복합 소재로서 더 향상된 물성을 보였다.

### 4. 페타이어와 폐 EPDM의 비교

기초 실험으로 가장 리사이클이 활발한 페타이어와 비교하기 위하여 실험하였다. 조성 실험을 통해 인장물성이 가장 양호한 W-EPDM/PP(60/40) 조성비를 선정하여, 페타이어/PP(60/40)도 동일한 비율로 블렌딩 한 후 분석하였다. 앞의 실험과 동일하게 2축 압출기를 이용하여 압출하였으며 노즐부터 호퍼까지 200, 210, 210, 210, 200, 190, 180, 160 °C으로 온도를 조절하였으며, 사출을 통해 시험샘플을 만든 후 인장강도와, 신율, 경도를 비교 분석하였다. Figure 4에 나타난 그래프처럼 폐 EPDM은 페타이어에 비해 인장강도는 별 차이가 없었으나 신율이 눈에 띄게 증가 했으며, 경도는 더 낮은 것으로 나타났을 때, 폐 EPDM이 페타이어보다 더 유연한 물성을 가진 것을 알 수 있다.



재 용 재료에서는 비슷한 결과를 보이고, 카매트용 재료에서는 증가하는 결과를 보이는 등 일정한 경향을 보이지 않지만, 신율과 경도는 두 가지 재료 모두에서 일정한 경향을 보였다. 즉 신율은 눈에 띄게 향상됨을 알 수 있고, 경도도 현저히 낮아

지는 양호한 결과를 보였다. 이는 12 축압출기의 경우, 2 축압출기의 경우보다 재료에 전단력을 더 많이 부여할 수 있어 Mixing 효과가 더 좋아져 균질의 물성을 보이는 것으로 추정된다. Figure 6과 7에서와 같이, 12 축 압출기의 샘플은 표면이

Table 3. Composition of the rubber composites for car mat

Materials	CM#1	CM#2	CM#3	CM#4	CM#5	CM#6	CM#7	CM#8	CM#9	CM#10	CM#11	CM#12	CM#13	CM#14	CM#15	CM#16	CM#17	CM#18	CM#19	CM#20
W-EPDM (Black)	50	50	50	50	50	60	70	70	80	70	70	70	60	60	60	60	60	55	60	60
LLDPE	50	40	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LDPE	-	-	-	-	50	25	20	15	15	-	25	10	20	20	15	-	15	15	15	-
Co-PP	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
POE1	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
POE2	-	-	10	20	-	15	10	15	5	30	5	20	20	15	20	20	15	20	18	20
POE3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	5	3	-	15
P-oil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	2	2	2	5
Wax	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	-	3	5	5	-
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Remarks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12-screw	-	-	-	-

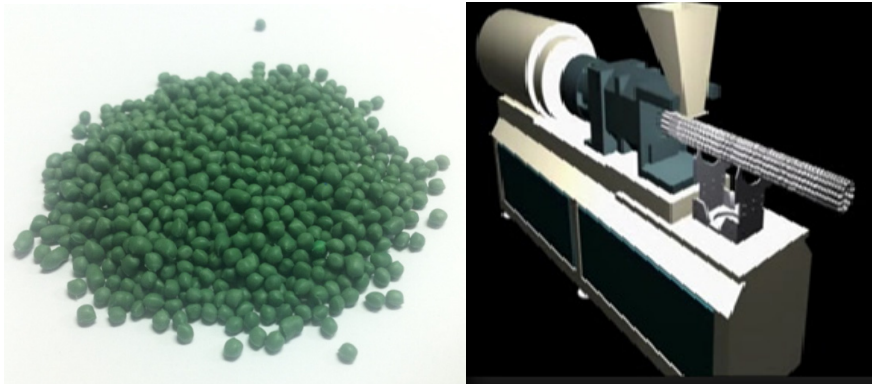


Figure 6. Synthetic turf filler(or pellets) extruded from the 12-axis extruder.



Figure 7. Pellets extruded from the 2-axis extruder.

매끄럽고 페 EPDM의 분산이 잘 되어 플라스틱 재료와 블렌드가 잘된 모습이며, 2축 압출기로 블렌드 한 샘플은 페 EPDM과 플라스틱재료의 혼합과 분산이 잘 되지 않아서 표면이 다소 거칠고 플라스틱 재료와 혼합이 잘 안 된 것을 확인할 수 있다. 경도가 낮고 신율이 좋은 것은 인조잔디 충전재와 카매트에서 요구하는 바람직한 물성으로 볼 수 있다. 왜냐하면, Filler는 딱딱하고 저렴하여 경제성을 위해 더 많이 넣을 수 있기 때문이다.

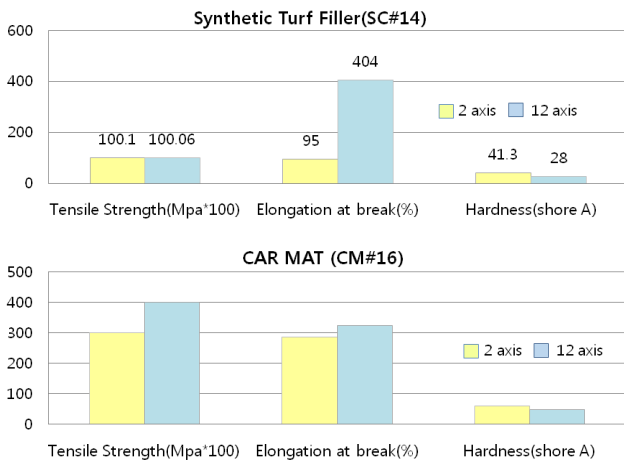


Figure 8. Comparison in tensile strength, elongation and hardness between twin screw extrusion and 12-screw extrusion (The test samples were SC#14 and CM#16).

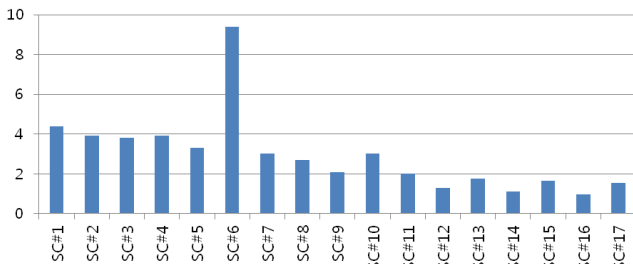


Figure 9. Tensile strength of various rubber composites for synthetic turf filler (Unit: MPa).

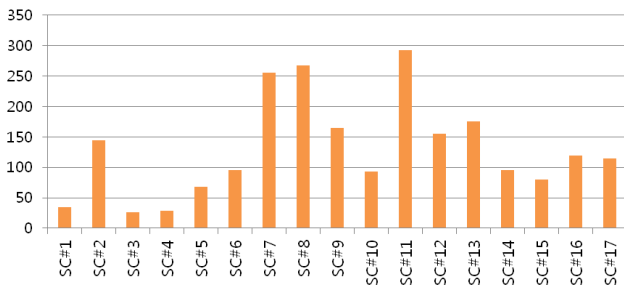


Figure 10. Elongation at break of various rubber composites for synthetic turf filler (Unit: %).

### 6. 인조잔디 충전재 용 복합소재

이 실험은 페 EPDM에 초음파 처리를 하지 않은 것으로 2축 압출기에서 시행되었으며, 페 EPDM은 수 마이크로 사이즈로 미세 분말화 된 상태를 사용하였다. 압출 온도 조건은 PP의 용융온도에 맞추어 노즐부터 호퍼까지 220, 220, 230, 220, 210, 200, 180, 160 °C 으로 맞추어 각각 압출하였다. 압출된 블렌드물은 펠렛화 한 후, 사출기를 이용하여 인장시편을 만들었으며, 이 시험 샘플을 이용하여 인장실험, 경도, 비중을 측정하였다. 17 가지의 Recipe에 대한 인장강도, 신율, 경도, 비중의 측정 결과를 Figure 9, 10, 11, 12에 각각 나타냈다. 시험에 사용한 각각의 재료에 대한 정보는 Table 1에 정리 해 놓았다.

인조잔디 충전재 용 복합소재의 원료 선정과 배합비율은 Table 2에 정리했다. 인장강도 측면에서 특별히 요구하는 정량적 목표치는 없지만, 1 MPa이상을 기준으로 봤을 때, SC#16을 제외하고는 모두 괜찮은 것으로 보이며, CaCO<sub>3</sub>의 50 wt%에서 W-EPDM의 함량이 20 wt%를 초과하면 너무 낮은 물성을 보인다. SEBS를 다량(20 wt%) 처방한 SC#6의 경우 인장강도가 월등히 높은 것을 보인다. SEBS는 상대적으로 저렴한 Processing Oil을 많이 함유할 수 있기 때문에 장점이 있지만, 고가이기 때문에 5 wt% 이상 첨가는 경제성 측면에서는 바람직하지 않다.

인조잔디 충전재 용 소재의 요구 신율은 100%이상으로, CaCO<sub>3</sub>와 페 EPDM의 함량이 비교적 많은 SC#1, 3, 4, 5, 6, 10, 14, 15가 100%이하의 낮은 신율을 보였다. CaCO<sub>3</sub>와 페 EPDM의 함량에 대체적으로 반비례며, POE2의 함량이 증가할수록 유리한 것으로 판단된다. 따라서 CaCO<sub>3</sub>와 페 EPDM의 함량이 비교적 작고, POE2가 적당량 함유한 SC#7, 8, 9, 11,

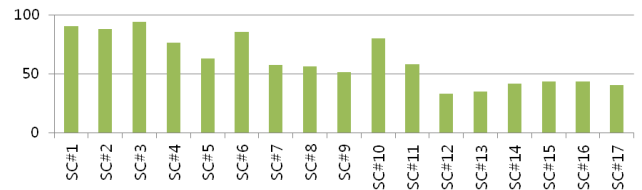


Figure 11. Hardness (shore A) of various rubber composites for synthetic turf filler.



Figure 12. Specific gravity of various rubber composites for synthetic turf filler.

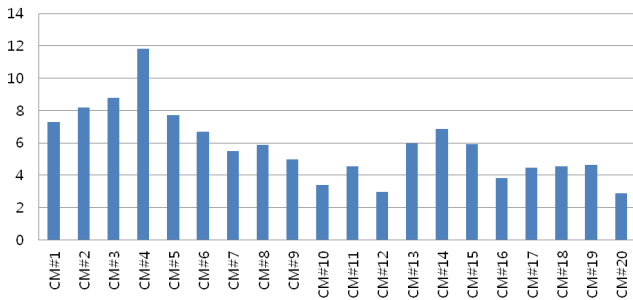


Figure 13. Tensile strength of various rubber composites for car floor mat (Unit: MPa).

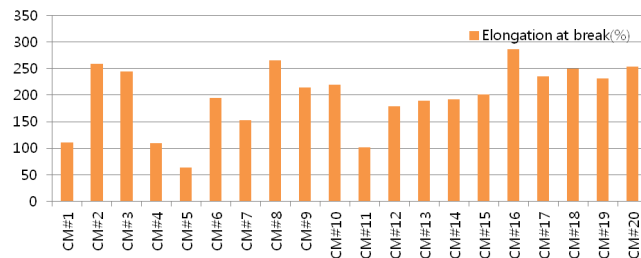


Figure 14. Elongation at break of various rubber composites for car floor mat (Unit: %).

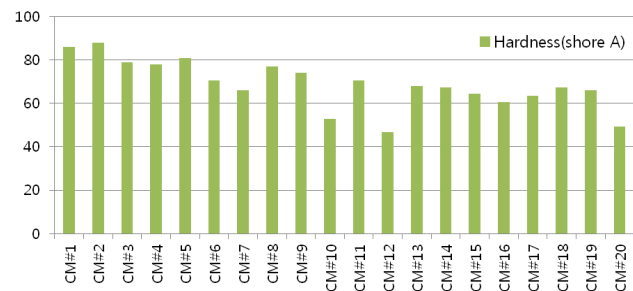


Figure 15. Hardness(Shore A) of various rubber composites for car floor mat.

12, 13, 16, 17이 양호한 결과를 보였다.

경도는 Shore A 기준 요구 물성이 60 이하로서, 폐 EPDM이 많이 함유할 수록 유리하며, CaCO<sub>3</sub>와 PP, PE 등의 수지가 증가할수록 높아짐을 알 수 있다. 그래프(Figure 11)에서 보는 바와 같이 SC#7-9, 11-17이 양호한 결과를 보였다.

비중의 요구물성은, 물에 뜨지 않아야 하므로 1.0 이상이면 된다. Filler의 함량이 높을수록 높은 값을 보이며, 모든 처방에서 양호한 결과를 보였다.

상기 4가지 물성을 고려할 때, 경제적이면서 적절한 물성을 보인 SC#12와 SC#17이 가장 적합한 것으로 판단된다. 이들 Recipe는 폐 EPDM의 종류가 다르고, 대부분 같은 조성을 가진 것으로서, SC#12는 Weather strip을 재생한 검정색 EPDM을 사용한 것이므로 밝은 색을 요구하지 않는 용도에, SC#17은 세탁기 가스켓을 재생한 회색 EPDM을 사용한 것이므로 밝은

색을 요구하는 용도에 적합할 것으로 생각한다. SC#17은 SC#12에 비해 인장강도는 더 높지만 신율이 낮고 경도가 높은, 좀더 딱딱한 물성을 보이는 것은 냄새제거와 항균력 향상을 위한 첨가제의 영향 때문으로 추정된다. 또한 SC#17은 냄새제거와 항균성을 향상시킨 것으로서 보다 고품질의 것이다. SC#13은 폐고무가 들어가지 않은 것으로서 SC#17보다도 더 친환경적이고 고급화한 것이다.

## 7. 카매트 용 복합소재

카매트 용 복합소재의 원료 선정과 배합비율은 Table 3에 정리했다. 카매트의 재료 규격은 GM사의 Elastomeric Floor Mat 규격 중 기본적인 물성인 인장강도, 신율, 경도 항목을 기준으로 시험하였다. 인조 잔디 충전재와 달리 물성 요구치가 높기 때문에 Filler를 사용하지 않고 Polyethylene(PE) 계통의 Elastomer를 주로 사용했으며, 최종제품은 사출가공으로 제조하기 때문에 흐름성을 중요하게 생각했으며, 또한 저렴한 재료선택도 중요한 고려사항이었다. 시험 방법은 인조잔디 충전재에서와 같이 동일하게 초음파처리를 하지 않은 폐 EPDM을 사용하였고, 2 축 압출기에서 온도 조건을 노즐부터 호퍼까지 190, 190, 200, 190, 190, 170, 160, 150 °C 으로 PE의 용융 온도에 맞추어서 실험을 진행하였다. 압출한 블렌드물을 펠렛화한 후, 사출기를 이용하여 인장시편을 제작하여 비교 분석하였다.

인장강도의 결과는 Figure 13에 보인 바와 같이 요구 규격은 3 MPa 이상에 모든 시험 샘플이 합격수준이다. 예견 했듯이, Binder 역할을 하는 LLDPE, LDPE, POE가 많이 들어갈수록 인장강도는 높아지며, 반대로 폐 EPDM이 많이 들어갈수록 약해지는 것으로 나타났다.

신율은 요구 물성이 150% 이상으로서, 역시 폐 EPDM이 많이 들어갈수록 약해지며, PP 보다는 PE나 POE를 첨가한 것이 양호한 결과를 보였다(Figure 12 참조). CM#16과 20은 같은 Recipe로서 12 축압출기로 가공한 제품이 양호한 물성을 보였다. 그러나 MI가 500인 POE3를 첨가했기 때문에 사출 흐름성과 신율은 좋은데, POE3가 너무 고가이므로, 경제성을 고려하면 배합 재료로서 적합하지 않은 재료로 볼 수 있다. CM#15, 17, 18, 19의 경우, 모두 신율이 200% 이상이며, P-Oil이나 왁스를 사용했으므로 사출 흐름성도 좋을 것으로 판단된다.

경도에 대한 결과는 Figure 13에 나타냈으며, GM 규격 내 (55-65)에 들어오는 샘플은 CM#15, 16, 17밖에 없다. CM#18, 19의 경우 경도가 규격보다 약간 높는데 이를 낮추려면, 고무의 함량이 고정된 상태에서, LDPE 양을 조금 줄이고 대신 POE양을 조금 늘이는 방법이 좋을 것으로 본다.

카매트의 경우, 폐고무의 60 wt%의 고정된 함량에서 인장강도와 신율은 규격에 쉽게 만족시킬 수 있지만, 경도는 그렇

지 않다. 시험한 샘플 중에서 가장 적합한 재료로 하나를 고른다면, 경도의 규격에 합격하면서 경제적인 Recipe인 CM#15라고 판단된다.

### III. 결 론

폐 EPDM을 이용한 복합소재를 개발하기 위해서 다양한 기초 실험을 하였다. Waste EPDM은 Virgin EPDM보다는 인장물성이 뒤떨어지지만 Devulcanized EPDM보다는 양호했으며, 초음파처리 고무가 미처리 고무보다 신율이 좋고 경도도 낮은 좋은 배합물성을 보이는 것을 확인했다. 또한 페타이어 복합소재보다 폐 EPDM 복합소재의 인장물성이 양호했으며, 2축 압출기에 비해 12축 압출기의 배합물의 인장물성이 좋고 경도가 낮은 균질의 물성을 얻을 수 있음도 확인했다. 인조잔디 충전재 용 폐고무 복합소재는 물성이 양호하고 경제적인 Recipe를 개발했지만, 실제 인조잔디에 적용하여 실시하는 Field Test를 추가로 거쳐야 할 것이다. 카메트 용 폐고무 복합소재의 경우는 인장물성과 경도가 자동차회사의 규격에 들어오는 경제적인 처방을 개발했지만, 이 또한 다른 시험항목 즉, 노화시험, 연소성시험, 냄새시험 등의 추가적인 검증을 받아야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속유용자원재활용기술 개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.(과제번호: 11-D26-OD)

### 참 고 문 헌

1. A. M. Shamugharaj, Sung Hyo Lee, Jin Kuk Kim, and Sung Hun Ryu, "표면기능화된 페타이어 분말이 PP/페타이어분말 복합체의 열 및 유변학적 성질에 미치는 영향" *Elastomer*, **41**, 49 (2006).
2. Jin Kuk Kim, Sung Hyo Lee, and Maridass Balasubramanian, "A Comparative Study of Effect of Compatibilization Agent on Untreated and Ultrasonically Treated Waste Ground Rubber Tire and Polyolefin Blends", *Polimeros: Ciência e Tecnologia*, **16**, 263 (2006).
3. Jin Kuk Kim, Sung Hyo Lee, Marisa A. Paglicawan, and Maridass Balasubramanian, "Effects of Extruder Parameters and Compositions on Mechanical Properties and Morphology of Maleic Anhydride Grafted Polypropylene/Waste Tire Blends", *Polym.-Plast. Tech. and Eng.*, **46**, 19 (2007).
4. Zhen Xiu Zhang, Shu Ling Zhang, Zhen Xiang Xin, and Jin Kuk Kim, "Polypropylene/Waste Ground Rubber Tire Powder Foams: A Study of the Relationship between processing and structure Using Supercritical Carbon Dioxide" *e-Polymers*, No.132 (2007).
5. A. M. Shamugharaj, Jin Kuk Kim, and Sung Hun Ryu, *J. of Appl. Polym. Sci.*, **104**, 2237 (2007).
6. Sung Hyo Lee, Maridass Balasubramanian, and Jin Kuk Kim, "Dynamic Reaction inside Co-Rotating Twin Screw Extruder. II. Waste Ground Rubber Tire Powder/ Polypropylene Blends", *J. of Appl. Polym. Sci.*, **106**, 3209 (2007).
7. Maridass Balasubramanian, Marisa A. Paglicawan, Zhen Xiu Zhang, Sung Hyo Lee, Zhen Xiang Xin, and Jin Kuk Kim, "Prediction and Optimization of Mechanical Properties of Polypropylene/Waste Tire Powder Blends Using a Hybrid Artificial Neural Network-Genetic Algorithm(GA-ANN)", *J. of Thermpl. Comp. Materl.*, **21**, 51 (2008).
8. Zhen Xiu Zhang, Sung Hyo Lee, Jin Kuk Kim, Shu Ling Zhang, and Zhen Xiang Xin, "Preparation and Characterization of Polypropylene/Waste Ground Rubber Tire Powder Microcellular Composites by Supercritical Carbon Dioxide", *Macromol. Resrch*, **16**, 404 (2008).
9. Zhen Xiu Zhang, Shu Ling Zhang, and Jin Kuk Kim, "Evaluation of Mechanical, Morphological and Thermal Properties of Waste Rubber Tire Powder/LLDPE Blends", *e-Polymers*, **061**, 1 (2008).
10. Zhen Xiu Zhang, Shu Ling Zhang, Sung Hyo Lee, Dong Jin Kang, Dae-Suk Bang, and Jin Kuk Kim, "Microcellular Foams of Thermoplastic Vulcanizates(TPVs) based on Waste Ground Rubber Tire Powder", *Materl. Letters*, **62**, 4396 (2008).
11. Zhen Xiu Zhang, V. Sridhar, and Jin Kuk Kim, "Polypropylene- Waste Ground Rubber Tire Powder Microcellular Composites: Effect of processing Variables on Morphology and Physico-Mechanical Properties", *Elast. Comp.*, **129**, 1276 (2008).
12. Sung Hyo Lee, Zhen Xiu Zhang, Deng Xu, David Chung, Gil Jong Oh, and Jin Kuk Kim, "Dynamic Reaction Involving Surface Modified Waste Ground Rubber Tire Powder/ Polypropylene", *Polym. Eng. and Sci.*, **49**, Issue1, 168 (2009).
13. Sung Hyo Lee, Sung Hyuk Hwang, Marianna Kontopoulou, Zhen Xiu Zhang, Deng Xu, and Jin Kuk Kim, "The Effect of Physical Treatments of Waste Rubber Powder on the Mechanical Properties of the Revulcanizate", *J. of Appl. Polym. Sci.*, **112**, 3048 (2009).