



Mechanical Properties and Thermal Stability of Waste PVC/HDPE Blend Prepared by Twin-screw Extruder

Rami Lee, Se-Ho Park, Jong-sung Baek, Hyungsan Kye*, Kwang-Hwan Jhee, and Daesuk Bang[†]

School of Science and Engineering of Chemical Materials, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea

**Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University, Daejeon 35349, Republic of Korea*

(Received December 14, 2018, Revised December 18, 2018, Accepted December 21, 2018)

Abstract: Recycling of waste polyvinyl chloride plastics has attracted much attention due to environmental problems, but the poor mechanical properties, low thermal stability, frequent breakage of strands, and melt cracking of the waste plastics have limited their widespread use. To overcome these disadvantages of waste PVC (W-PVC), recycled PVC powder blend was prepared by adding high-density polyethylene (HDPE) and ethylene vinyl acetate (EVA) as a heat stabilizer and compatibilizer, respectively. An intermeshing co-rotating twin screw extruder was used to prepare the blend, and the characteristics of the blend were analyzed by SEM and TGA, and by using a UTM and Izod impact tester. The impact strength was improved as the EVA content increased for the W-PVC/HDPE (80/20 wt%) blend. As the HDPE and EVA contents increased in the W-PVC/HDPE/EVA blend, the impact strength increased. SEM observations also revealed the improved interfacial adhesion for the EVA-containing blend.

Keywords: recycling PVC, blend, ethylene vinyl acetate copolymer (EVA), twin-screw extruder

Introduction

최근 환경에 대한 관심이 증가함에 따라 폐플라스틱의 재활용에 대한 연구가 매우 필요하다. 플라스틱 폐기물의 경우 매립 또는 소각을 통해 처리되고 있는 실정이나, 매립지가 부족하고 소각 시 다이옥신 등 유해 가스가 발생하는 점이 부각되어 환경오염을 유발하는 심각한 문제가 있다. 그리고 범용플라스틱 중 하나인 Polyvinyl chloride (PVC)는 내구연한과 내부식성, 내화학성이 우수하여 파이프, 창틀, 바닥재 및 전선 등 다양한 분야에 이용되고 있으나, 안정제와 가소제 등 다량의 첨가제의 남용으로 활용도에 비해 많은 규제를 받고 있다. PVC는 경질에서 연질까지 다양한 종류가 있어, 열가소성 고분자로 본래의 구조와 특성에 손실 없이 재생산이 가능하다. 이론적인 용점이 220℃로 알려져 있지만 훨씬 낮은 온도인 100℃ 부근에서 열분해가 시작되며 자외선에 의해서도 분해가 일어나 다이옥신과 염화수소 가스가 발생한다. 또한, 가공 시 황변 현상이 심각하고 분해가 일어나면서 염화수소 가스로 인해 물성의 저하뿐 아니라 가공 장비를 부식시키는 단점이 있다.¹ 그러나, 가소제, 활제, 열안정제 등과 같은 첨가제들과 상용성이 있으며, 다른 고분자와 잘 섞이는 편으로 가공범위가 넓은 장점이 있다.

가소제의 함량이 낮은 것(~10%)을 일컬어 경질 PVC라 부르며 파이프가 대표적인 제품이다. PVC 자체는 매우 단단하기 때문에 가공이 불가능하나 가소제를 첨가하여 열가소성을 증가시키면 가공할 수 있다. 연질 PVC는 20~30%의 가소제를 첨가하여 가공한 것으로 유연성과 신장성이 우수하여 랩이나 연신용 필름으로 사용되고 농업용 비닐하우스로도 대량 사용되고 있다.²

PVC를 이용한 연구가 꾸준히 이뤄지고 있는 가운데, 취성의 개선을 위해 다양한 충격보강제 또는 Clay를 첨가하거나^{3,4} T_g 가 높은 고분자와의 블렌드를 통해 열안정성을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다.⁵

본 연구에서는 waste-PVC (W-PVC) 분말이 갖는 단점을 극복하고자 하였다. W-PVC의 단점은 불균일성에 기인하는 낮은 열안정성으로 스트랜드의 잦은 끊어짐과 용융균열로 단단 가공이 어렵다는 점과, 사용 중 안정제와 첨가제의 손실로 증대되는 불안정성을 들 수 있다. 이러한 W-PVC의 단점으로 저하된 기계적 특성을 보완하기 위해 high density polyethylene (HDPE), ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA)를 첨가하여 이축스크류식 압출기로 블렌드를 제조, 이의 모폴로지 및 기계적, 열적 특성을 고찰하였다.

[†]Corresponding author E-mail: dsbang@kumoh.ac.kr

Experimental

1. 재료

본 실험에서 사용한 고분자 매트릭스는 T_g 가 88°C이며, 100°C 부근에서 분해가 시작되는 수명이 다한 반경질 W-PVC로 (주)PPI 평화에서 제공받은 분말을 사용하였다. 열 안정성의 보안을 위하여 무독 안정제인 Ca-Zn 열안정제는 (주)단석산업의 분말을 사용하였다. 충격 특성의 향상을 위해 HDPE를 사용하였고, 고충격 강도의 특성을 지닌 (주)대림산업의 TR144 제품을 사용하였다. HDPE와의 상용성을 부여하기 위한 상용 화제로 (주)한화케미칼의 VA 28%인 EVA를 사용하였다.

2. 블렌드 및 시편 제조

2.1. 압출공정을 통한 블렌드 제조

압출 공정에 앞서 W-PVC와 HDPE, EVA를 40°C 건조오븐에서 8시간 건조시켰다.^{6,7} W-PVC 블렌드의 sample formulation

Table 1. Formulations of Waste-PVC/High Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Blend

Sample No.	W-PVC (wt%)	HDPE (wt%)	EVA (phr)	Ca-Zn heat stabilizer (phr)
1	30	70	1	0.5
2	50	50	1	0.5
3	80	20	1	0.5
4	30	70	5	0.5
5	50	50	5	0.5
6	80	20	5	0.5
7	30	70	10	0.5
8	50	50	10	0.5
9	80	20	10	0.5
10	100	0	0	1
11	100	0	0	10

Table 2. Conditions of Extrusion Process

Extrusion			
Temperature (°C)			
*CY 1	80	Screw speed	100 rpm
CY 2	110		
CY 3	120	Screw configuration	3-kneading-1-reverse block
CY 4	130		
CY 5	140		
CY 6	150	Load	70~80%
CY 7	155		
Head	160		
Die	170		

*CY: Cylinder

Table 3. Conditions of Injection Process

Injection molding			
Temperature (°C)			
*CY 1	110	Injection pressure	60~70 kg/cm ²
CY 2	170		
CY 3	185	Screw rpm	10~170 rpm
CY 4	200	Cooling time	20 s
		Mold temperature	60°C

*CY: Cylinder

은 Table 1에 나타내었다. 블렌드 제조는 modular intermeshing co-rotating twin-screw extruder (LG Machinery, MT-30-S2-42C, L/D=42, Φ30)를 사용하였다. 압출조건은 Table 2과 같이 feeder부터 die까지 80~170°C로 설정하였다. 블렌드를 제조하기 전 W-PVC와 열안정제, HDPE, EVA를 충분히 premixing 하였고, die를 통해 나온 압출물은 pelletizer를 통하여 pellet으로 제조하였다.

2.2. 사출공정을 통한 시편 제조

압출 공정을 통해 제조한 W-PVC 블렌드의 펠렛은 건조 오븐에서 40°C에서 8시간 동안 충분히 건조시켰다. 모폴로지 및 기계적 물성을 측정하기 위해 사출성형기(Pro-WD80, Dongshin Hydraulics Co., Ltd., Korea)를 사용하여 시편을 제조하였다. 사출 조건은 Table 3에 나타난 것과 같이 hopper에서 nozzle까지 110~200°C로 설정하였다. 사출 압력은 60~70 kg/cm²의 조건에서 ASTM (American Society for Testing and Materials) D638 및 D256 규격에 따른 인장 및 충격 시험용 시편을 제조하였다.⁸⁻¹⁰

3. 특성분석

3.1. 모폴로지 특성

W-PVC와 Ca-Zn 열안정제(1, 10 phr) 블렌드, 다양한 W-PVC와 HDPE 혼합(30/70, 50/50, 30/70 wt%), EVA (1, 10 phr)와 Ca-Zn 열안정제(0.5 phr)를 혼합한 블렌드의 모폴로지 특성을 비교, 관찰하기 위하여 주사전자현미경(FE-SEM, JEOL, JSM 6701, Japan)을 사용하였다. 모든 시편은 충격시험 후 파단된 시편을 사용하였으며, 180초 동안 백금 코팅한 후 관찰하였다.

3.2. 인장 시험

인장 특성을 측정하기 위하여 만능시험기(Universal testing machine, UTM, AG-50kNX Plus, Shimadzu, Japan)를 사용하였다. 시편은 ASTM D638 규격에 맞춰 제작하였다. Load cell은 50 kN을 사용하였으며, crosshead speed는 5 mm/min으로 설정하였다. 상온에서 측정한 후 최대값 및 최소값을 제외한 나머지 값의 평균값을 계산하여 인장탄성률, 인장강도 및 연

신율을 측정하였다.

3.3. 충격 시험

W-PVC와 Ca-Zn 열안정제(1, 10 phr) 블렌드, 다양한 W-PVC와 HDPE 혼합(30/70, 50/50, 30/70 wt%), EVA (1, 10 phr)와 Ca-Zn 열안정제(0.5 phr)를 혼합한 블렌드의 충격강도를

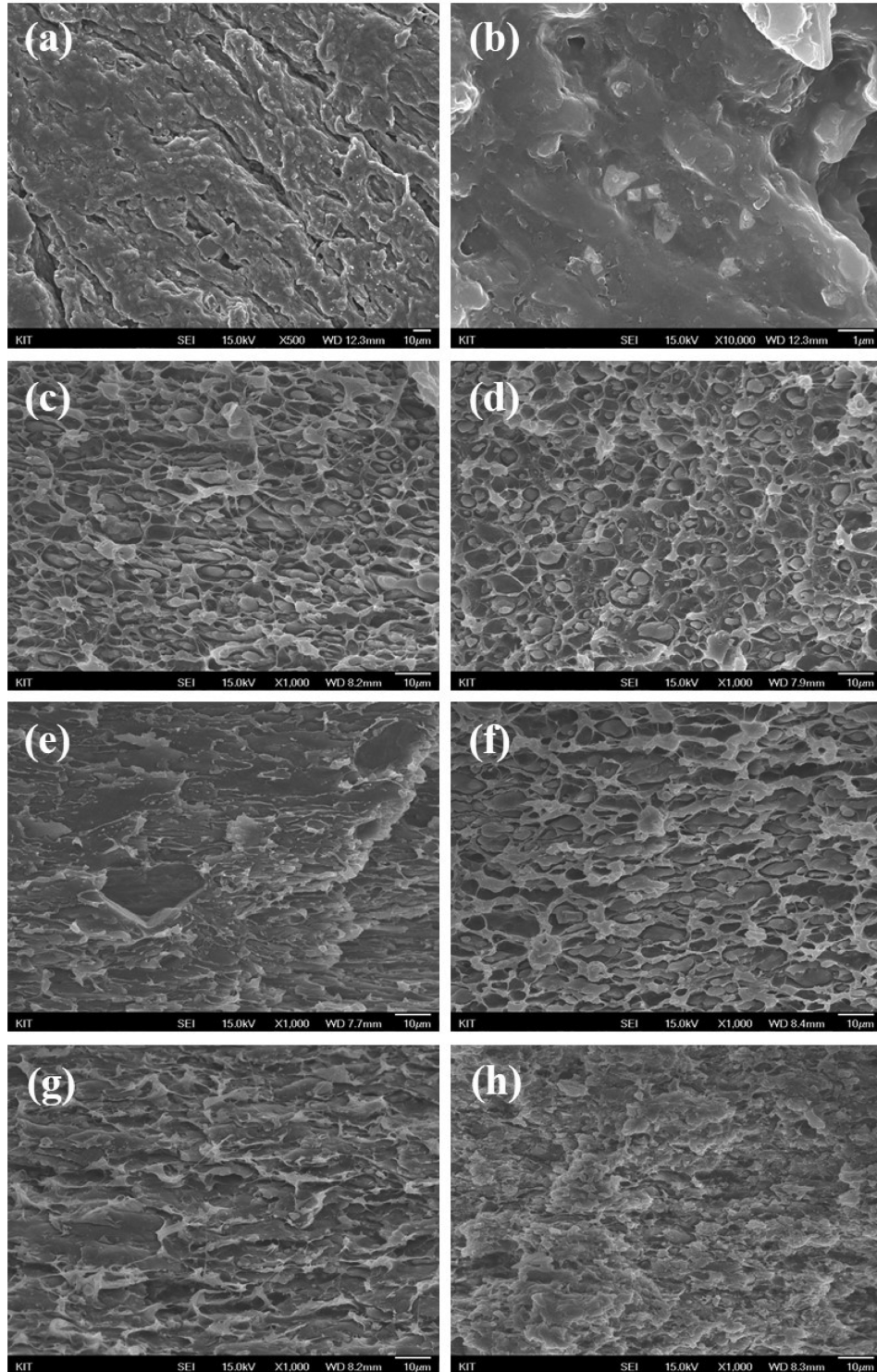


Figure 1. FE-SEM data of waste-PVC containing Ca-Zn heat stabilizer and different amounts of HDPE; (a) waste-PVC containing 1 phr of Ca-Zn heat stabilizer (X500 magnification), (b) waste-PVC containing 1 phr of Ca-Zn heat stabilizer (X10,000 magnification), (c) waste-PVC/HDPE (30/70 wt%) with 1 phr EVA, (d) with 10 phr EVA, (e) waste-PVC/HDPE (50/50 wt%) with 1 phr EVA, (f) with 10 phr EVA, (g) waste-PVC/HDPE (80/20 wt%) with 1 phr EVA, and (h) with 10 phr EVA.

측정하기 위하여 Izod impact tester (Tinius Olsen, Model 892)를 사용하였다. ASTM D256 규격에 따라 시편을 준비하여 중앙 두께가 10.16 ± 0.5 mm가 되도록 notch cutter를 사용하였다. 각 샘플 당 시편을 8회씩 측정하여 최대값, 최소값을 제외한 나머지 값의 평균을 구하였다.

3.4. 열적 안정성 분석

W-PVC와 Ca-Zn 열안정제(1, 10 phr) 블렌드, 다양한 W-PVC와 HDPE 혼합(30/70, 50/50, 30/70 wt%), EVA (1, 10 phr)와 Ca-Zn 열안정제(0.5 phr)를 혼합한 블렌드의 열적 안정도를 확인하기 위해 열분해온도 측정기(Thermo Gravimetric Analyzer, TGA, TA Q500, TA Instruments, France)를 이용하였다. 압출 공정을 통해 얻은 펠렛을 약 16 ± 1 mg으로 준비하여 질소 조건 하에 상온에서 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 승온 속도로 700°C 까지 온도를 증가시켜 시편의 열적 변화를 측정하였다.

Results and Discussion

1. W-PVC 블렌드의 모폴로지 특성

W-PVC에 Ca-Zn 열안정제 1 phr를 첨가한 블렌드의 충격 시편의 파단면을 FE-SEM으로 관찰한 결과, Ca-Zn 열안정제의 함량이 1 phr인 W-PVC 블렌드에서 Ca-Zn 열안정제가 고무 분산되지 않았다(Figure 1a, b). 또한, 1, 10 phr의 EVA 함량으로 배합된 W-PVC/HDPE (30/70 wt%) 블렌드에서는 공통적으로 HDPE 매트릭스에 PVC가 묻쳐 있는 것을 볼 수 있었다(Figure 1c, d). 이는 도메인의 크기가 작아지는 것을 나타내므로 상용성이 증가됨을 의미한다. 1 phr의 EVA 함량으로 배합된 W-PVC/HDPE (50/50 wt%) 블렌드에서는 HDPE가 길게 분포되어 있는 모습을 하고 있으며 파단면이 거칠게 나타났다(Figure 1e). 10 phr의 EVA 함량으로 배합된 W-PVC/HDPE (50/50 wt%) 블렌드에서는 1 phr의 EVA 함량으로 배합된 시편보다 균질화된 표면을 가지므로 상용성이 증가한 것으로 사료된다(Figure 1f). 1 phr의 EVA 함량으로 배합된 W-PVC/HDPE (80/20 wt%) 블렌드에서는 소량의 HDPE가 늘어나 있는 모습을 보이며, 10 phr의 EVA 함량으로 배합된 시편에서는 HDPE의 도메인의 크기가 작아진 것을 확인하였다(Figure 1g, h).

2. W-PVC 블렌드의 기계적 특성

W-PVC 블렌드에 배합된 안정제의 함량이 증가할수록 인장강도, 탄성율, 파단신율, 충격강도가 감소하는 것을 확인하였다. 인장탄성률의 경우, Ca-Zn 열안정제의 함량이 증가(0.5, 1.0, 3.0, 5.0 phr)하더라도 큰 차이를 나타내지 않았으나(2,571, 2,535, 2,442, 2,431 MPa), 인장강도는 0.5 phr과 5.0

phr Ca-Zn 열안정제로 배합된 시편을 비교하면 55 MPa에서 36.1 MPa로 0.66배 감소되었다(Figure 2a, b). 신율의 경우 Ca-Zn 열안정제의 함량이 증가함에 따라 50.8%에서 3.3%까지 감소하였으며(Figure 2c), 충격강도에서는 0.5, 5.0 phr의 Ca-Zn

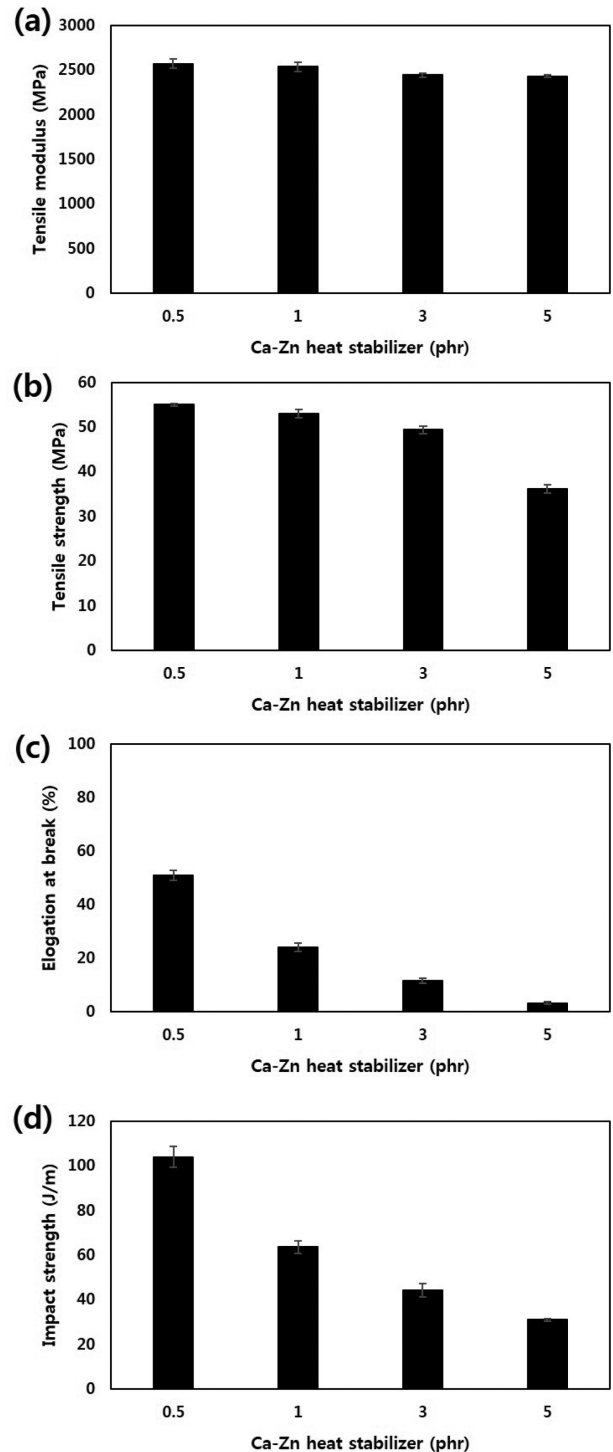


Figure 2. Mechanical properties of waste-PVC containing different amounts of Ca-Zn stabilizer contents; (a) tensile modulus, (b) tensile strength, (c) elongation, and (d) impact strength.

열안정제의 함량이 배합된 시편을 비교하면 104 J/m에서 31 J/m로 약 70.2% 감소하였다(Figure 2d). 위 결과는 Ca-Zn 열안정제의 첨가량이 증가할수록 낮은 기계적 특성을 나타내며, 이는 Ca-Zn 열안정제가 첨가되었을 때 균일하게 배합되지 않았던 W-PVC 블렌드의 파단면에 대한 결과와 일치한다(Figure 1b). 따라서, 본 연구에서는 W-PVC 블렌드의 Ca-Zn 열안정제의 함량을 0.5 phr로 낮게 설정하였다.

다양한 EVA 배합(1, 5, 10 phr)과 W-PVC/HDPE (80/20, 50/50, 30/70 wt%) 블렌드의 인장탄성율의 측정 결과, W-PVC/HDPE (30/70 wt%) 블렌드는 EVA의 함량이 증가할수록 1,263 Mpa에서 1,044 Mpa로 감소되었으며, W-PVC/HDPE (50/50 wt%) 블렌드는 1,345 Mpa에서 1,798 Mpa로, W-PVC/HDPE (80/20 wt%) 블렌드는 1,928 Mpa에서 1,524 Mpa로 감소되었다(Figure 3a). W-PVC/HDPE (50/50 wt%) 블렌드의 인

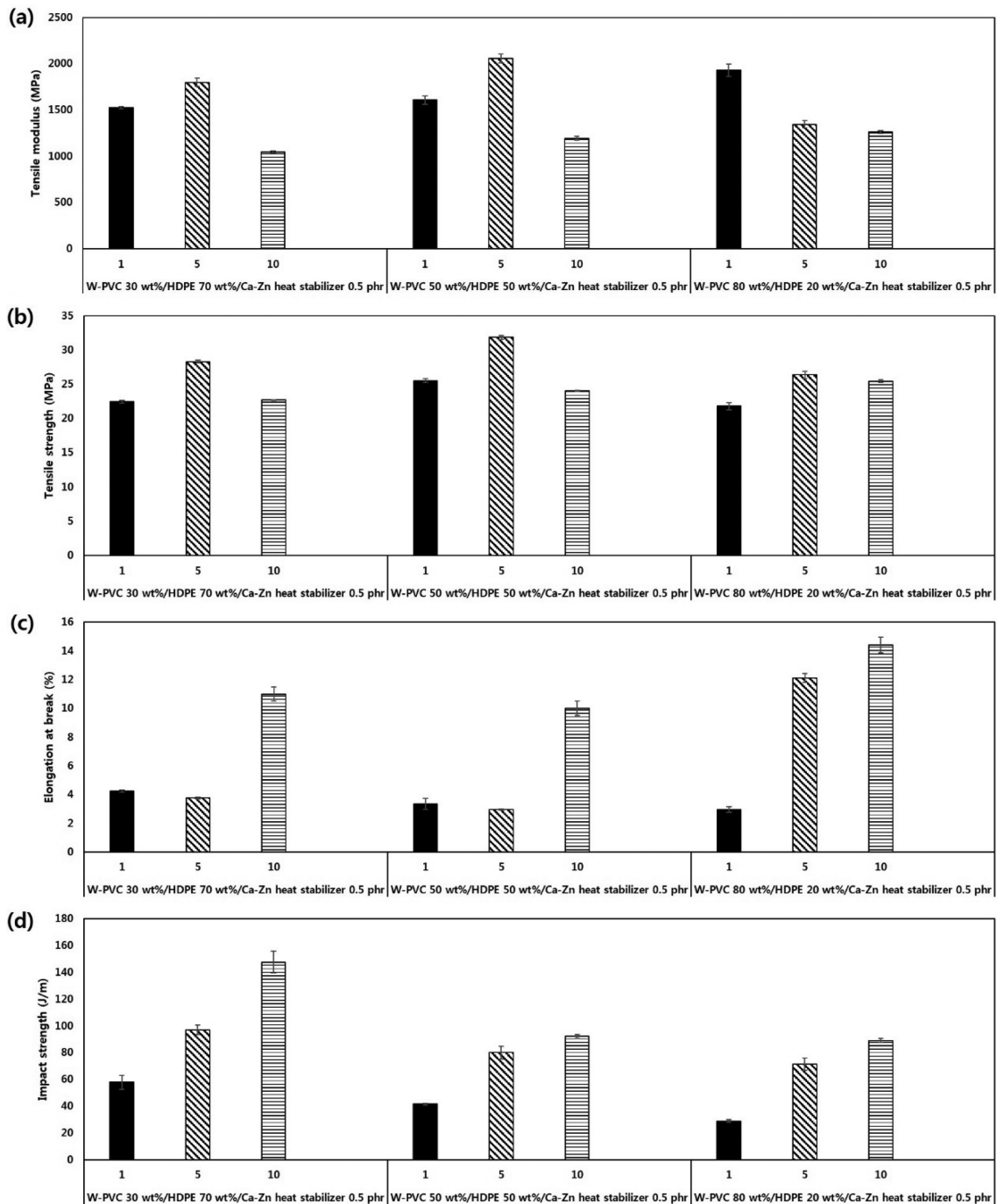


Figure 3. Mechanical properties of waste-PVC containing different amounts of HDPE and EVA; (a) tensile modulus, (b) tensile strength, (c) elongation, and (d) impact strength.

장탄성률이 증가되는 것은 EVA 함량이 1, 10 phr로 배합된 W-PVC/HDPE의 파단면 결과(Figure 1e, f)로 확인할 수 있는데, 1 phr의 EVA 함량으로 배합된 블렌드보다 10 phr의 EVA 함량으로 배합된 블렌드에서 파단면의 표면 균질화가 잘 이루어져 있어 기계적 특성이 증가되는 것으로 사료된다. W-PVC/HDPE 블렌드의 인장강도 측정 결과, W-PVC/HDPE (30/70 wt%)의 경우 EVA의 함량이 증가함에 따라 25.4 Mpa에서 22.6 Mpa로, W-PVC/HDPE (50/50 wt%) 블렌드는 26.3 Mpa에서 28.3 Mpa로 증가하였다. 특히 EVA의 함량이 5 phr 일 때 가장 좋은 인장강도(31.8 Mpa)를 나타내며, 10 phr의 EVA로 배합된 W-PVC/HDPE (50/50 wt%) 블렌드의 경우 인장강도가 감소되었다. 또한, W-PVC/HDPE (80/20 wt%)의 경우 21.7 Mpa에서 22.4 Mpa로 감소됨을 확인할 수 있었다(Figure 3b). W-PVC/HDPE 블렌드의 신율 결과, W-PVC/HDPE 블렌드(30/70 wt%)에서는 EVA의 함량이 증가함에 따라 신율이 2.9%에서 4.2%로 증가하였으며, W-PVC/HDPE 블렌드(50/50 wt%)에서는 12.1%에서 3.7%로 감소하고, W-PVC/HDPE (80/20 wt%) 블렌드는 14.4%에서 11.0%의 신율 감소를 나타내었다(Figure 3c). W-PVC/HDPE 블렌드의 충격 강도 결과, EVA의 함량이 증가할수록 충격 강도 또한 증가하는 경향을 보이며 HDPE의 함량 증가가 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다(Figure 3d). 본 연구 결과에서는 인장 탄성율, 인장 강도는 EVA 함량과 HDPE의 함량에 관계없이 큰 변화를 나타내지 않았으나, 신율의 경우 HDPE의 함량 감소와 EVA의 함량 증가에 따라 증진되었으며, 충격 강도의 경우 HDPE, EVA의 함량 증가에 비례적으로 증진되는 것을 확인하였다. 이는 불균일한 W-PVC/HDPE의 매트릭스를 EVA가 균일화시켜 기계적 물성의 증진을 나타냄을 의미한다.

3. W-PVC 블렌드의 열적 안정성 분석

W-PVC/HDPE/EVA 블렌드의 열분해 거동의 TGA 결과는 Figure 4에 나타내었고, 이의 분석 결과는 Table 4에 나타내었다. 그 결과, W-PVC와 HDPE (30/70 wt%) 블렌드에서 EVA의 함량이 1 phr일 때, 126°C에서 분해가 시작되고, 287~317°C에서 18%의 1차 분해가 일어났다. 441~496°C에서 2차 분해가 일어나 72%의 중량 감소를 나타내었다. EVA의 함량이 10 phr인 경우 182°C에서 분해가 시작되고, 291~376°C에서 1차 분해가 시작되어 1 phr의 EVA 함량의 W-PVC/HDPE (30/70 wt%) 블렌드와 비교하면 열적 안정성이 증가되었다(Figure 4a). W-PVC와 HDPE (50/50 wt%) 블렌드에서 EVA의 함량이 1 phr인 경우의 1차 분해는 282~318°C에서 나타났으며, 2차 분해는 428°C~497°C에서 나타났다. W-PVC와 HDPE (50/50 wt%) 블렌드에서 EVA의 함량이 10 phr인 경우 282~306°C에서 1차 분해가 일어나 W-PVC와 HDPE (50/50 wt%) 블렌드에서 EVA의 함량이 1 phr인 경우와 비교하면 유사한 분

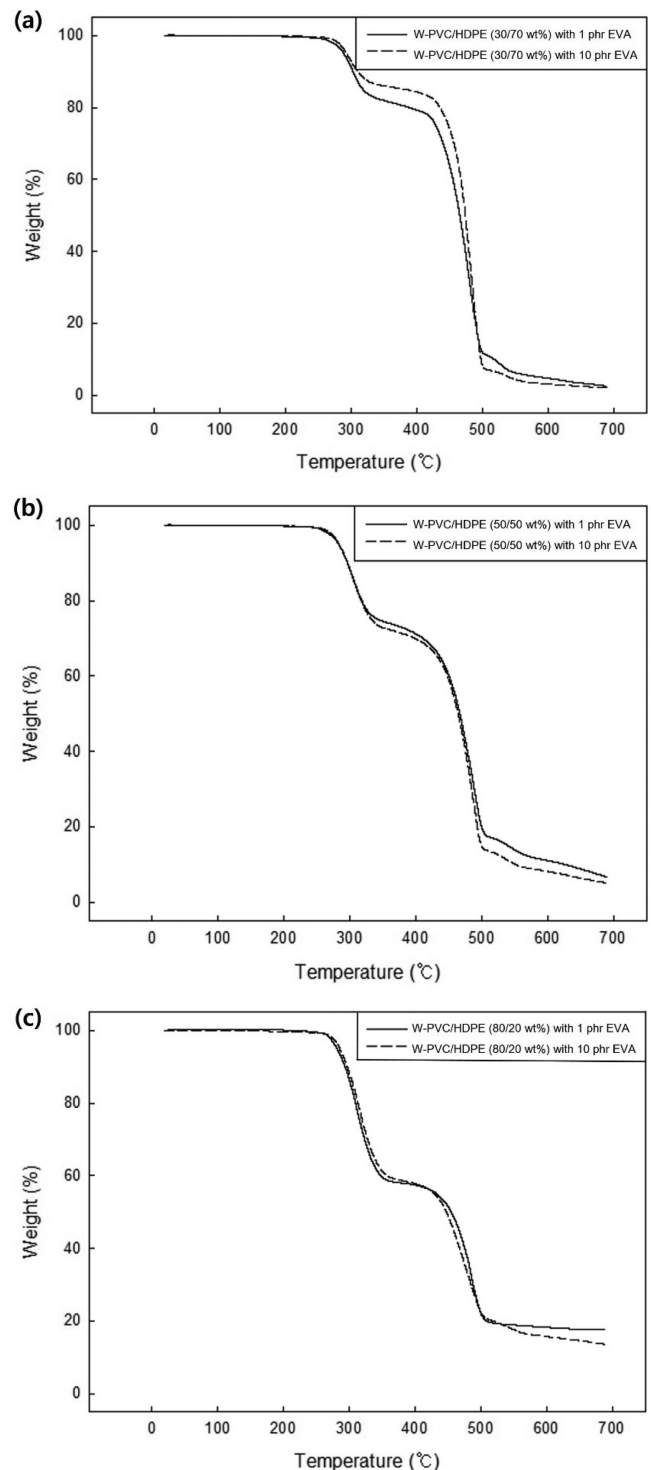


Figure 4. Thermogravimetric analysis of waste-PVC containing different amounts of HDPE and EVA; (a) waste-PVC/HDPE (30/70 wt%) with EVA (1, 10 phr), (b) waste-PVC/HDPE (50/50 wt%) with EVA (1, 10 phr), and (c) waste-PVC/HDPE (80/20 wt%) with EVA (1, 10 phr).

해 거동 경향을 나타내었다(Figure 4b). W-PVC와 HDPE (80/20 wt%) 블렌드에서 EVA의 함량이 1 phr의 1차 분해는

Table 4. Thermogravimetric Analysis of Different Waste-PVC/High Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Blend

Sample	Initial degradation temperature (T _i , °C)	Residue at 650°C (wt%)
W-PVC/HDPE (30/70 wt%) with 1 phr EVA	126	3.39
W-PVC/HDPE (30/70 wt%) with 10 phr EVA	182	2.51
W-PVC/HDPE (50/50 wt%) with 1 phr EVA	119	8.84
W-PVC/HDPE (50/50 wt%) with 10 phr EVA	171	6.39
W-PVC/HDPE (80/20 wt%) with 1 phr EVA	198	19.74
W-PVC/HDPE (80/20 wt%) with 10 phr EVA	207	18.07

290~332°C의 온도에서 나타나고, 455~499°C에서 2차 분해가 나타났다. W-PVC와 HDPE (80/20 wt%) 블렌드에서 EVA의 함량이 10 phr인 경우 292~336°C에서 1차 분해가 일어나 EVA 함량이 1 phr인 W-PVC/HDPE (80/20 wt%) 블렌드와 비교하면 높은 열적 안정성 소재임을 확인하였다(Figure 4c).

Conclusions

본 연구에서는 폐플라스틱의 재활용을 위해 범용 고분자 중 하나인 PVC의 물리적 재활용에 관한 연구를 수행하였다. 폐플라스틱의 낮은 열안정성을 보완하기 위해 Ca-Zn 열안정제를 첨가하고, 기계적 특성의 향상을 위해서는 HDPE를 첨가하였으며, 상용성을 위해서는 EVA를 첨가한 후, 이축스크류식 압출기를 사용하여 블렌드를 제조하였다. 제조한 블렌드를 통해 모폴로지, 기계적, 열적 특성을 측정하였다. 모폴로지 특성은 W-PVC와 HDPE (30/70 wt%) 블렌드에서 다량의 HDPE가 PVC를 감싸고 있는 형태를 이루고 있었으며, EVA의 함량이 1 phr인 경우 도메인의 크기가 매우 크다가 EVA 함량이 증가할수록 도메인의 크기가 작아진 것을 확인하였다. W-PVC와 HDPE (50/50 wt%)에 EVA를 1 phr 혼합한 블렌드에서는 HDPE가 매우 작은 크기로 분포되어 있으나, EVA를 10 phr 혼합한 블렌드에서는 균일화된 PVC 매트릭스가 확인되었으며, HDPE가 부분적으로 분포되어 있음을 알 수 있었다. W-PVC와 HDPE (80/20 wt%) 블렌드에서 HDPE가 부분적으로 분포되어 있었으며, EVA 함량이 증가할수록 입자가 작아지고 거친 표면을 나타내었다. EVA의 함량과 HDPE의 함량이 증가할수록 인장탄성률과 인장강도가 큰 변화를 나타내지 않았으나, EVA의 함량이 증가할수록 충격강도가 증가되므로 EVA가 W-PVC/HDPE의 상용성을 증가시키는 것을 시사한다. W-PVC/HDPE의 열분해 거동은 W-PVC/HDPE (30/70 wt%)에서 EVA의 함량이 증가함에 따라 초기 분해가

일어나는 온도가 126°C에서 182°C로 높은 열적 안정성을 나타내며, 이는 W-PVC/HDPE 블렌드에 배합된 Ca-Zn 열안정제가 균일하게 배합되었음을 시사한다. 특히, W-PVC/HDPE (80/20 wt%) 블렌드에서는 EVA의 함량이 증가할수록 1차 분해되는 온도가 208°C~332°C에서 437~466°C로 증가하여 열적 안정성이 향상되었다. 이는 W-PVC/HDPE 블렌드에 사용된 EVA의 영향으로 Ca-Zn 열안정제가 균일하게 배합되었음을 시사한다.

Acknowledgements

본 연구는 금오공과대학교 연구비에 의하여 연구된 논문이므로 이에 감사드립니다.

References

1. H. Y. Won and I. W. Kim, "Manufacture and processing of PVC straight resin", *Polym. Sci. Technol.*, **4**, 263 (1993).
2. A. C. Shah and D. J. Poledna, "Review of PVC dispersion and blending resin products", *J. Vinyl Addit. Technol.*, **9**, 146 (2003).
3. M. K. Park, Y. S. Choi, S. M. Bahk, and J. S. Yang, "A study on the determination of fracture parameters for rubber toughened polymeric materials using on instrumented charpy impact test", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, **26**, 1520 (2002).
4. S. H. Jang, "A study on morphology and mechanical properties of biodegradable polymer nanocomposites", *Clean Technol.*, **19**, 401 (2013).
5. Q. F. An, J. W. Qian, H. B. Sun, L. N. Wang, L. Zhang, and H. L. Chen, "Compatibility of PVC/EVA blends and the pervaporation of their blend membranes for benzene/cyclohexane mixtures", *J. Membrane Sci.*, **222**, 113 (2003).
6. S. M. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review", *Waste Manage.*, **29**, 2625 (2009).
7. J. L. White, "Twin screw extrusion", ed. by J. L. White, 2nd Ed. p. 308, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2010.
8. C. Rauwendaal, "Polymer extrusion", ed. by C. Rauwendaal, 5nd Ed. p. 950, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2014.
9. W. R. Kim, "Technological trend for polymer injection molding", *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 30 (2009).
10. M. Y. Lyu, "Introduction to plastics processing and its research trend", *Trans. Mater. Process.*, **11**, 651 (2002).