Journal of Radiation Industry 15 (3) : 173 ~ 179 (2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.3.173

다양한 함량의 수산화 마그네슘 난연제를 포함하는 EVA/HDPE 블렌드의 전자빔 조사의 영향

신재환[1] · 김동섭[1] · 이병민[1] · 박종석[2] · 정성인[2] · 최재학[1,*]

[1]충남대학교 공과대학 고분자공학과, [2]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Effect of Electron Beam Irradiation on EVA/HDPE Blends Containing Various Amounts of Magnesium Hydroxide Flame Retardant

Jae-Hwan Shin[1], Dong-Seop Kim[1], Byoung-Min Lee[1], Jong-Seok Park[2], Sung-In Jeong[2] and Jae-Hak Choi[1,*]

[1]*Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea*
[2]*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*

Abstract - In this study, effect of electron beam irradiation on the mechanical, thermal, and flammability properties of poly (ethylene-co-vinyl acetate)/high-density polyethylene (EVA/HDPE) blends containing magnesium hydroxide (MDH) as a flame retardant was investigated. The gel content increased with an increasing absorbed dose due to the formation of crosslinked newtork structures. Although the flame retardancy of the blends improved with increasing the content of MDH, the mechanical properties of the blends deteriorated significantly. However, the mechanical property, thermal stability, and flame retardancy of the blends improved by electron beam irradiation due to the formation of crosslinked 3-dimensional network structures. These results indicate that electron beam irradiation is an effective method to improve the thermal stability, mechanical properties, and flame retardancy of polyolefin blends containing flame retardants.

Key words : EVA, HDPE, Electron beam irradiation, Flame retardant, Magnesium hydroxide

서 론

최근 친환경 에너지의 관심의 증가로 인해 전기 자동차 시장이 급성장하고 있으며 이에 따라 전기 자동차용 전선의 수요가 증가하고 있다. 기존 전선 피복용 기재 수지로는 poly (vinyl chloride), 난연제로는 할로겐계 난연제가 많이 사용되고 있다. 이러한 전선 피복재는 우수한 기계적 물성과 난연성 등의 장점을 가지고 있으나, 연소 시 다량의 독성 가스를 발생시키는 문제점이 있다(Jang *et al*. 2009). 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 폴리올레핀계 기재 수지와 비할로겐계 난연제를 이용한 전선 피복재 제조와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(Ulutan *et al*. 2000; Wei *et al*. 2006; Haurie *et al*. 2007; Zhang *et al*. 2015). 다양한 폴리올레핀계 기재 수지 중 poly (ethylene-co-vinyl acetate)/

* Corresponding author: Jae-Hak Choi, Tel. +82-42-821-6664, Fax. +82-42-821-8910, E-mail. jaehakchoi@cnu.ac.kr

high density polyethylene (EVA/HDPE) 블렌드는 우수한 전기 절연성, 기계적 특성 및 가공성 등으로 인하여 전선용 피복재로 많이 이용되고 있으나, 난연성이 나빠 다양한 난연제를 첨가시켜 난연성을 향상시키고 있다. 비할로겐계 난연제 중 무기계 난연제인 수산화 마그네슘 (magnesium hydroxide, $Mg(OH)_2$, MDH)는 무독성이며 연소 시 생성되는 물을 통해 난연 효과를 얻고 냉각 작용을 통해 연소를 방지한다. 그러나 난연 효과를 충분히 얻기 위해서는 MDH의 함량을 증가시켜야 하지만 무기물과 유기물 계면의 상용성 (compatibility)이 나쁘기 때문에 MDH를 60 wt% 이상 첨가하게 되면 기계적 물성이 급격하게 저하된다 (Huang *et al*. 2006; Ma *et al*. 2017).

이러한 물성 저하 현상을 개선하기 위하여 과산화물 가교 혹은 전자빔 가교 방법을 이용한 연구들이 진행되고 있다. 전자빔 가교 방법은 과산화물 가교와 비교하여 상온에서 진행되며 빠른 시간 안에 가교 반응이 진행되어 대량생산에 매우 적합한 것으로 알려져 있다. EVA/HDPE 블렌드의 경우 전자빔 조사에 의하여 가교 구조가 형성된다. 이들 재료에 전자빔 조사 시에 생성되는 자유 라디칼에 의하여 분자 간 결합이 형성되어 3-D 네트워크 구조가 형성되며, 따라서 폴리올레핀의 기계적 물성, 열적 특성, 난연성 등이 증가하게 된다. Liu 등은 EVA와 HDPE에 MDH를 첨가하고 150 kGy의 전자빔 흡수선량을 조사하여 전자빔 조사 유무와 MDH 함량에 따른 물성 변화를 비교하였다. 전자빔 조사 후 인장강도와 모듈러스 등 기계적 물성과 난연성이 향상되었지만 난연제 함량이 증가함에 따라 인장강도, 연신율이 감소하고 한계 산소 지수 값이 커지는 것을 확인하였다 (Liu *et al*. 2008). Bee 등은 EVA/LDPE에 무기계 난연제인 aluminum trihydroxide ($Al(OH)_3$, ATH)와 motomrillonite (MMT)를 첨가하고 전자빔을 조사하여 가교시켜 난연제 함량에 따른 기계적 물성, 열적 특성 등을 연구 결과들을 발표하였다. EVA/LDPE/ATH blend는 전자빔을 조사함에 따라 가교가 일어나 인장강도와 연신율이 증가하는 것을 확인하였고 난연제의 함량이 증가함에 따라 LOI 값이 증가하는 것을 확인하였다. (Bee *et al*. 2014).

본 연구에서는 다양한 함량의 MDH를 함유하는 EVA/HDPE 블렌드를 제조하고 MDH 함량 및 전자빔 조사 조건에 따른 물성을 평가하기 위하여 겔화율, 인장강도, 파단신율 및 난연성을 평가하였다. MDH 함량이 증가함에 따라 난연성은 향상되었으나, 기계적 물성은 크게 나빠졌다. 그러나 전자빔 조사에 의한 가교 네트워크 구조의 형성으로 기계적 물성, 내열성, 난연성 등이 모두 향상될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 전자빔 가교 방법을 이용하여 제조된 MDH 함유 EVA/HDPE 블렌드는 전선 피복재료 사용 가능함을 확인하였다.

재료 및 방법

1. 시약 및 재료

EVA (VC640, 15 wt% vinyl acetate, melt index: 6 g 10 min^{-1}, density: 0.935 g·cm^{-3})와 HDPE (5305E, melt index: 0.8 g 10 min^{-1}, density: 0.952 g·cm^{-3})는 롯데케미칼(주)에서 구입하여 사용하였다. 난연제는 Konoshima Chemical사의 MDH (silane-modified MDH, average particle size: 1 μm)를, 가교제는 Sartomer사의 trimethylolpropane trimethacrylate (TMPTMA)을 각각 사용하였다.

2. EVA/HDPE 블렌드 제조

EVA/HDPE 블렌드는 수지 50 g (EVA : HDPE = 90 : 10)에 다양한 함량의 MDH (0, 50, 75, 100 phr), 가교제 (4 phr)를 용융 혼합기 (melt mixer, 이스턴엔지니어링(주))를 이용하여 170℃의 온도에서 20분간 50 rpm의 속도로 혼합한 후, 핫프레스 (hot press, Qmesys, Korea)에서 170℃의 온도에서 10분간 압축한 후 급랭하여 시트 형태 (100 mm × 100 mm × 2 mm)의 샘플을 제조하였다. 제조된 EVA/HDPE 블렌드에 2.5 MeV 선형 전자빔 가속기 (EB-Tech, Daejeon, Korea)를 이용하여 18.4 mA의 전류밀도에서 25 kGy·$scan^{-1}$의 선량율로 공기 분위기에서 전자빔을 조사하였다.

3. 분석

겔화율 (gel content)은 고분자 재료의 가교 정도를 나타내는 척도로 이용되며 주로 용매추출법을 이용하여 측정된다. 전자빔 조사된 시편 ~1.0 g을 SUS 망 (200 mesh)으로 잘 감싼 후 125℃의 크실렌 (xylene) 용매에서 8시간 동안 미가교된 부분을 추출하였다. 추출 후 진공 오븐에서 50℃에서 12시간 동안 건조하였으며, 추출 전후의 측정된 무게를 이용하여 다음과 같은 식을 통해 계산하였다 (Wang *et al*. 2012).

$$\text{Gel content}\,(\%) = (S - \Delta W)/S \times 100$$

위 식에서 S는 시료의 무게 ΔW는 감소한 무게 변화이다. 인장강도 (tensile strength)와 파단신율 (elongation-at-break)은 ASTM D638에 따라 인장 시편을 제조하였으며 universal testing machine (UTM, Qmesys, Korea)을 사용

Table 1. Formulation of EVA/HDPE blends

Component	Specification	Amount (g)
EVA	Matrix resin (15% VA)	90
HDPE	Matrix resin	10
$Mg(OH)_2$	Flame retardant	0, 50, 75, 100
TMPTMA	Crosslinking agent	4

하여 ASTM D1822에 따라 cross-head 속도를 50 mm·min^{-1}으로 측정하였다. 열적 특성은 열중량분석기(thermogravimetric analyzer, TGA, TGA 8000, PerkinElmer)와 시차주사열량계(differential scanning calorimeter, DSC, DSC 4000, PerkinElmer)로 분석하였다. TGA는 5 mg의 시료를 10°C·min-1의 승온 속도로 상온에서 800°C까지 질소 분위기에서 실시하였다. DSC는 2.5 mg의 시료를 10°C·min^{-1}의 승온 속도로 상온에서 200°C까지 질소 분위기에서 측정하였다. 한계 산소 지수(limited oxygen index, LOI, Oxygen Index Tester, Fire Testing Technology)는 ASTM D2863에 따라 100 mm × 10 mm × 2 mm의 시편을 제조하여 산소는 3.25 bar, 질소는 2.75 bar로 공급하여 총 혼합기체의 유량을 18.8 L·min^{-1}으로 하였다. 시료가 30초 안에 점화가 되고 180초 동안 지속되는지를 관찰하였으며, 연소 시 필요한 최소한의 산소의 농도를 다음 수식을 사용하였다.

$$\mathrm{LOI}\,(\%) = \frac{[O_2]}{[N_2]+[O_2]} \times 100$$

이때 [O_2]는 산소 가스의 체적, [N_2]는 질소 가스의 체적이다.

결과 및 고찰

MDH 함량에 따른 EVA/HDPE 블렌드의 전자빔 가교 효과를 알아보기 위하여 겔화율을 측정하고 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 전자빔을 조사하지 않은 샘플의 경우 기재 수지는 고온의 자일렌에 완전히 용해되어 겔화율 값이 0이지만 전자빔 흡수선량이 증가할수록 겔화율은 증가하였다. 이는 전자빔 조사에 의하여 기재 수지 및 가교제에 생성된 자유 라디칼들의 결합에 의하여 3차원 네트워크 구조가 형성되었기 때문이다(Chmielewski *et al*. 2004). 또한 MDH 함량이 증가함에 따라 겔화율이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 전자빔 조사에 의하여 가교된 기재 수지 내에 MDH가 포획되었기 때문으로 판단된다. 200 kGy 조사된 샘플의 경우 MDH 함량에 따른 겔화율은 MDH 함량이 0으로부터 50 phr로 증가함에 따라 75.05에서 85.75%로 크게 증가하였으나, 그 이상에서는 50에서 100 phr로 증가함에 따라 약 2.75%만큼 증가하였다. 이는 MDH 50 phr까지는 용매에 대한 저항성이 있는 MDH의 첨가에 의하여 겔화율이 크게 차이나는 것으로 판단되고, 그 이상에서는 매트릭스 수지의 대부분이 가교되어 불용화되었기 때문에 크게 차이나지 않는 것으로 판단된다(Sabet *et al*. 2012; Bee *et al*. 2014; Sabet *et al*. 2014).

Fig. 2는 EVA/HDPE 블렌드의 MDH 함량 및 전자빔 흡수선량에 따른 인장강도 및 파단신율을 측정한 결과이다. MDH 함량 증가에 따라 인장강도 및 파단신율이 모두 감소하였으며, 그 이유는 앞서 언급한 바와 같이 MDH와 EVA/HDPE와

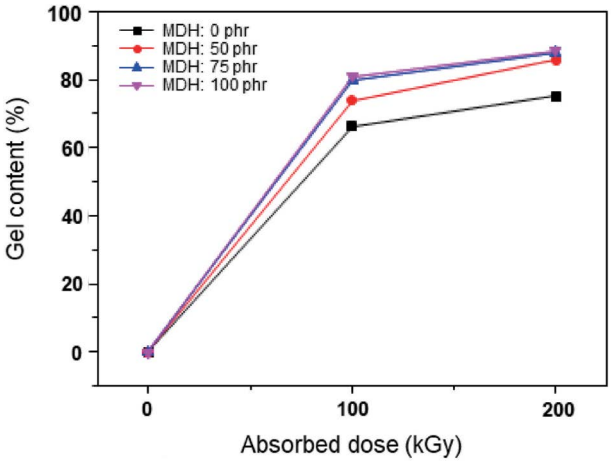

Fig. 1. Gel content of EVA/HDPE blends containing various amounts of MDH (0, 50, 75, and 100 phr) as a function of absorbed dose.

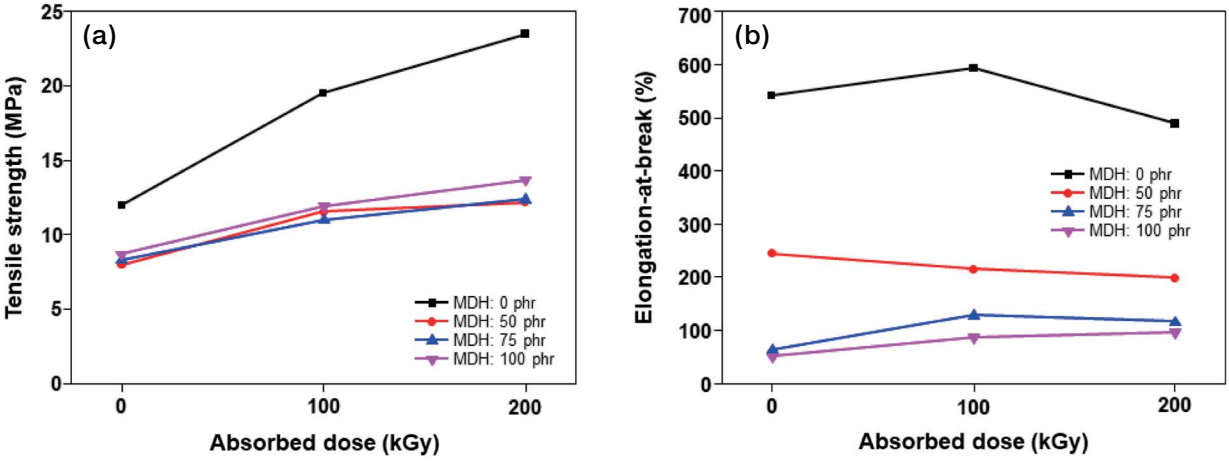

Fig. 2. Tensile strength (a) and elongation-at-break (b) of EVA/HDPE blends containing various amounts of MDH (0, 50, 75, and 100 phr) as a funtion of absorbed dose.

의 상용성이 나쁘기 때문으로 판단된다. Fig. 2a에서 보는 바와 같이, MDH 함량에 상관없이 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 인장강도는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전자빔 조사에 의하여 3차원 네트워크 구조가 형성되었기 때문으로 Fig. 1의 겔화율 측정 결과와 일치한다. Fig. 2b에서 보는 바와 같이, 파단신율의 경우 전자빔 조사 후에 파단신율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 전자빔 조사에 의한 네트워크 구조의 형성 시에 기재 수지, 가교제 및 MDH 간에 화학결합이 형성되어 파단신율이 개선되는 것으로 판단된다 (Datta *et al*. 1996; Ismail *et al*. 2010; Sabet *et al*. 2012; Bee *et al*. 2014).

Fig. 3과 Table 2는 난연제 함량별로 100, 200 kGy의 전자빔 흡수선량을 조사한 EVA/HDPE 블렌드를 질소분위기에서 10°C·min^{-1}로 승온하여 상온에서 800°C까지 측정한 TGA 그래프와 분해 온도(T_d) 측정 결과이다. 난연제 함량과 전자빔 흡수선량과 관계없이 모든 EVA/HDPE 블렌드의 열분해는 190~380°C와 380~500°C의 범위에서 두 단계로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 단계인 190~380°C의 온도에서 무게 감소는 EVA 주사슬의 열분해(decomposition)와 MDH의 탈수반응(dehydration)에 의한 것이고, 두 번째 단계인 380~500°C의 온도에서 무게 감소는 HDPE 주사슬의 열분해로 인한 것으로 해석할 수 있다(Gheysari *et al*. 2002). Fig. 3과 Table 2에서 보는 바와 같이 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 T_d가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 열

Table 2. Decomposition temperature (T_d) of EVA/HDPE blends containing various amounts of MDH (0, 50, 75, 100 phr)

Absorbed dose		T_d (°C)			
		MDH: 0 phr	MDH: 50 phr	MDH: 75 phr	MDH: 100 phr
0 kGy	1st decomposition	330	345	353	354
	2nd decomposition	427	461	457	458
100 kGy	1st decomposition	338	360	361	363
	2nd decomposition	447	464	465	466
200 kGy	1st decomposition	341	369	378	379
	2nd decomposition	452	469	469	469

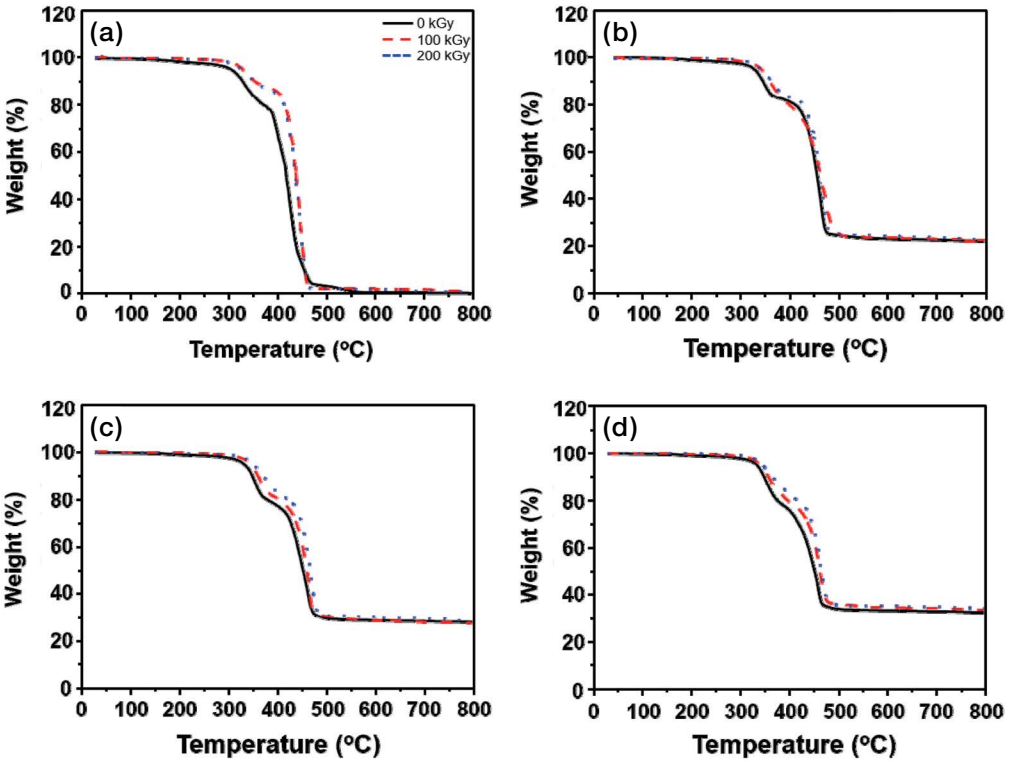

Fig. 3. TGA thermograms of EVA/HDPE blends of various amount of MDH: (a) 0, (b) 50, (c) 75, and (d) 100 phr.

적 특성 향상은 겔화율 결과 Fig. 1을 통해서 확인한 바와 같이 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 가교도가 증가했기 때문이다(Liu *et al*. 2004).

Fig. 4는 전자빔 조사하지 않은 샘플의 무게 변화율을 비교한 TGA 그래프이다. MDH를 첨가하지 않은 샘플의 경우 EVA와 HDPE가 모두 분해되어 500°C 이후에 잔량이 없는 것으로 확인되었다. MDH를 첨가한 샘플의 경우, MDH 함량이 증가함에 따라 500°C 이후에서 50 phr에서는 22.2%, 75 phr은 28.2%, 100 phr은 32.5%로 잔량이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 MDH의 열에 의한 탈수반응에 의해서 MgO가 생성되었기 때문으로 판단된다.

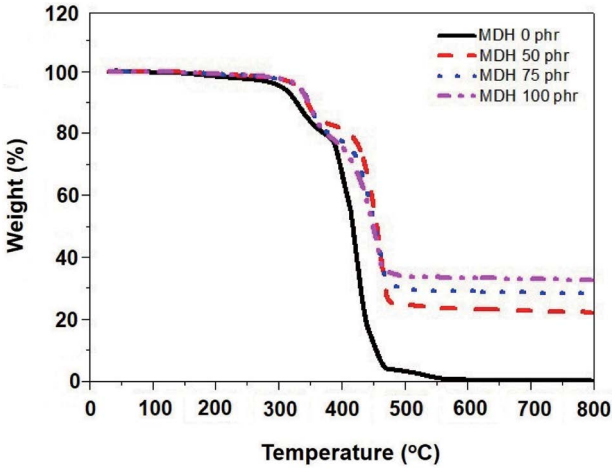

Fig. 4. TGA thermograms of non-irradiated EVA/HDPE blends containing various amounts of MDH.

전자빔 조사한 EVA/HDPE 블렌드를 난연제 함량별로 질소 분위기에서 10°C·min^{-1}로 승온하여 측정한 DSC 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 전자빔을 조사하지 않은 EVA/HDPE 블렌드에서 85~90°C의 온도에서 나타나는 피크는 EVA의 녹는점이고, 121~126°C의 온도에서 나타나는 피크는 HDPE의 녹는점이다. EVA와 HDPE의 녹는점은 전자빔 흡수선량이 증가할수록 약간 감소하는데 이는 비정질영역과 결정영역의 계면에서 전자빔 조사에 의한 가교로 인해 결정영역이 손상되어 결정의 크기가 감소함과 함께 분자량의 감소 때문으로 판단된다(Dadbin *et al*. 2005).

MDH의 함량에 따른 EVA/HDPE 블렌드의 난연성은 LOI로 평가하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. LOI는 널리 사용되는 난연성 시험 방법으로서 점화 후 표본의 연소를 유지하기에 충분한 산소/질소 혼합물에서 산소의 최소 분율로 정의된다(Zhou *et al*. 2015). Fig. 6에서 보는 바와 같이 EVA/HDPE 블렌드의 LOI 값은 MDH의 함량이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 EVA/HDPE 블렌드의 연소 시 MDH의 함량이 증가할수록 MDH에서 방출되는 물의 양이 증가함과 동시에 흡수하는 열도 증가하기 때문에 LOI 값이

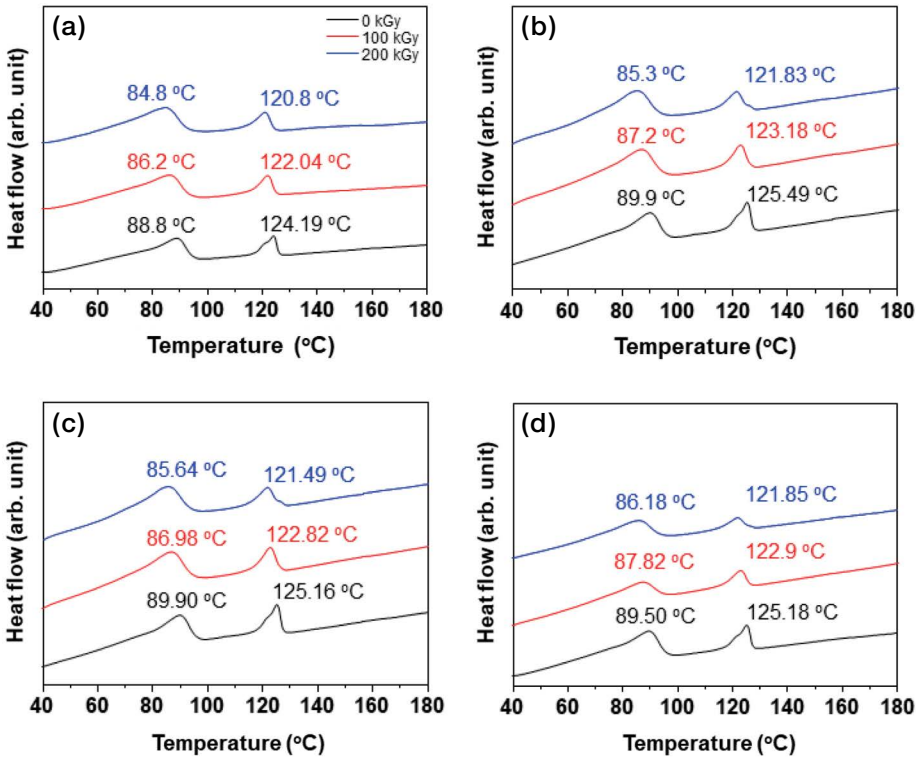

Fig. 5. DSC curves of EVA/HDPE blends of various amount of MDH: (a) 0, (b) 50, (c) 75, and (d) 100 phr.

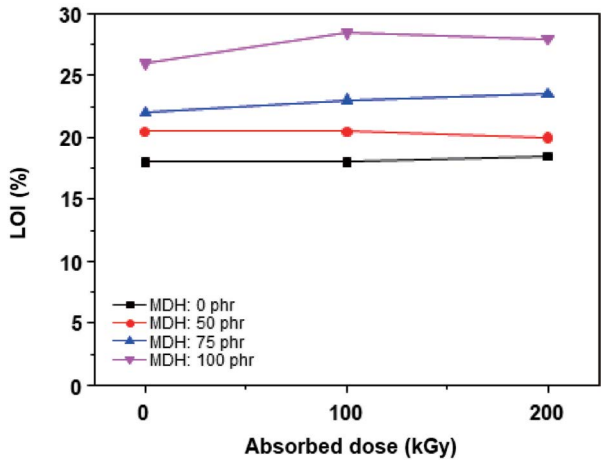

Fig. 6. LOI values of EVA/HDPE blends containing various amount of MDH as a function of absorbed dose.

증가하는 것이다. 또한, 같은 MDH 함량일 때 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라서 LOI 값이 약간 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 가교를 통해 3차원 네트워크 구조를 형성하기 때문에 난연 특성이 증가하는 것으로 판단된다(Li *et al*. 2004).

결 론

본 연구에서는 무기계 난연제인 MDH를 포함하는 EVA/HDPE 블렌드를 제조하였으며, MDH 함량 및 전자빔 조사 조건에 따른 물성을 평가하였다. 전자빔 흡수선량이 증가할수록 EVA/HDPE 블렌드의 겔화율은 증가하였다. MDH 함량이 증가함에 따라 난연성은 향상되었으나 기계적 물성은 크게 저하되었다. 그러나 전자빔 조사에 의한 3차원 가교 네트워크 구조의 형성으로 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 기계적 물성 및 내열성이 향상될 수 있음을 확인하였다. 또한 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 LOI 값이 약간 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과들로부터 EVA/HDPE 블렌드 제조 시 전자빔 조사를 이용한 가교에 의해 기계적 물성, 내열성 및 난연성을 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 제조된 블렌드는 전선용 피복재로 사용 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 방사선고부가신소재개발사업(NRF-2020M2D8A1045981)과 한국원자력연구원 기관고유사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

남진호, 박도현, 신은미, 임화준, 이건주. 2006. 친환경 전선 개발 동향. 전기의세계. **55**(1):54-6.

Beyer G. 2001. Flame retardant properties of EVA-nanocomposites and improvements by combination of nanofillers with aluminium trihydrate. *Fire Mater*. **25**(5):193-197.

Bee ST, Hassan A, Ratnam C, Tee TT and Sin LT. 2014. Effects of irradiation on the mechanical, electrical, and flammability properties of (low-density polyethylene)/(ethylene-[vinyl acetate] copolymer) blends containing alumina trihydrate. *J. Vinyl Addit. Technol*. **20**(2):91-98.

Chen Y, Zou H, Liang M and Cao Y. 2014. Melting and crystallization behavior of partially miscible high density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (HDPE/EVA) blends. *Thermochim. Acta*. **586**:1-8.

Chmielewski AG and Haji-Saeid M. 2004. Radiation technologies: past, present and future. *Radiat. Phys. Chem*. **71**(1-2): 17-21.

Dadbin S, Frounchi M and Sabet M. 2005. Studies on the properties and structure of electron-beam crosslinked low-density polyethylene/poly[ethylene-co-(vinyl acetate)] blends. *Polym. Int*. **54**(4):686-691.

Datta SK, Chaki TK and Khastgir D. 1996. Effect of electron beam radiation on mechanical and electrical properties of poly (ethylene-co-vinyl acetate). *Die Angew. Makromol. Chem*. **238**(1):105-117.

Gheysari D and Behjat A. 2002. The effect of high-energy electron beam irradiation and content of ATH upon mechanical and thermal properties of EVA copolymer. *Eur. Polym. J*. **38**(6):1087-1093.

Haurie L, Fernández AI, Velasco JI, Chimenos JM, Cuesta JML and Espiell F. 2007. Thermal stability and flame retardancy of LDPE/EVA blends filled with synthetic hydromagnesite/aluminium hydroxide/montmorillonite and magnesium hydroxide/aluminium hydroxide/montmorillonite mixtures. *J. Appl. Polym. Sci*. **92**(6):1082-1087.

Huang H, Tian M, Liu L, Liang W and Zhang L. 2006. Effect of particle size on flame retardancy of Mg $(OH)_2$-filled ethylene vinyl acetate copolymer composites. *J. Appl. Polym. Sci*. **100**(6):4461-4469.

Ismail H, Munusamy Y, Mariatti M and Ratnam CT. 2010. The effect of trimethylol propane tetraacrylate (TMPTA) and organoclay loading on the properties of electron beam irradiated ethylene vinyl acetate (EVA)/natural rubber (SMR L)/organoclay nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci*. **117**(2):865-874.

Jang BN and Choe JH. 2009. Research trends of flame retardant and flame retardant resin. *Polym. Sci. Technol*. **20**(1):8-15.

Li Z and Qu B. 2004. Effects of gamma irradiation on the pro-

perties of flame-retardant EVM/magnesium hydroxide blends. *Radiat. Phys. Chem.* **69**(2):137-141.

Liu H, Alkadasi NAN, Zhu Y, Tong LF, Fang ZP and Wang YC. 2008. Electron beam irradiated HDPE/EVA/$Mg(OH)_2$ composites for flame-retardant electric cables. *Front. Mater. Sci.* **2**(4):426-429.

Liu J and Zhang Y. 2011. Effect of ethylene-acrylic acid copolymer on flame retardancy and properties of LLDPE/EAA/$Mg(OH)_2$ composites. *Polym. Degrad. Stabil.* **96**(12):2215-2220.

Ma Y, Chen M, Liu N, Dang P, Xu Y, Chen X, Wang Z and He J. 2017. Combustion characteristics and thermal properties of high-density polyethylene/ethylene vinyl-acetate copolymer blends containing magnesium hydroxide. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* **30**(10):1393-1413.

Sabet M, Hassan A and Ratnam CT. 2012. Electron beam irradiation of low density polyethylene/ethylene vinyl acetate filled with metal hydroxides for wire and cable applications. *Polym. Degrad. Stabil.* **97**(8):1432:1437.

Salehi SMA, Mirjalili G and Amrollahi J. 2004. Effects of high-energy electron beam on low-density polyethylene materials containing EVA. *J. Appl. Polym. Sci.* **92**(2):1049-1052.

Ulutan S and Gilbert M. 2000. Mechanical properties of HDPE/magnesium hydroxide composites. *J. Mater. Sci.* **35**(9):2115-2120.

Wang B, Wang X, Shi Y, Tang G, Tang Q, Song L and Hu Y. 2012. Effect of vinyl acetate content and electron beam irradiation on the flame retardancy, mechanical and thermal properties of intumescent flame retardant ethylene-vinyl acetate copolymer. *Radiat. Phys. Chem.* **81**(3):308-315.

Wei P, Han Z, Xu X and Li Z. 2006. Synergistic flame retardant effect of SiO2in LLDPE/EVA/ATH blends. *J. Fire Sci.* **24**(6):487-498.

Zhang Y, Peng RQ, Zhou GD, Fang ZP and Li XN. 2015. Flammability characterization and effects of magnesium oxide in halogen-free flame-retardant EVA blends. *Chin. J. Polym. Sci.* **33**(12):1683-1690.

Zhou R, Ming Z, He J, Ding Y and Jiang J. 2020. Effect of magnesium hydroxide and aluminum hydroxide on the thermal stability, latent heat and flammability properties of Paraffin/HDPE phase change blends. *Polymers.* **12**(1):180.

Zhou S, Ning M, Wang X, Yan Z, Guo D, He Q and Hu Y. 2015. The influence of γ-irradiation on the mechanical, thermal degradation, and flame retardant properties of EVA/LDPE/ATH blends. *J. Therm. Anal.* **119**(1):167-173.

Received: 30 August 2021
Revised: 16 September 2021
Revision accepted: 23 September 2021