Journal of Radiation Industry 15(3) : 159~165(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.3.159

전자빔에 의하여 가교된 EVA/HDPE 복합재료의 제조 및 평가

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

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

Preparation and Characterization of EVA/HDPE Composites Crosslinked by Electron Beam Irradiation

Dong-Seop Kim[1], Jae-Hwan Shin[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 - The preparation and characterization of poly(ethylene-co-vinyl acetate)/high-density polyethylene (EVA/HDPE) composites crosslinked by electron beam irradiation were investigated in this study. Matrix resins (EVA and HDPE) and additives, such as flame retardant, antioxidant, and lubricant, were melt-mixed and then were compression molded in a hot-press molder to obtain the sheet-type samples. The prepared sheets were electron beam-irradiated at various absorbed doses of 50~200 kGy in air. The gel contents, mechanical and thermal properties, and flame retardancy were evaluated. As a result, the gelation content, flame-retardancy, thermal, and mechanical properties were found to be increased by electron beam irradiation. These results indicate that electron beam irradiation is a powerful tool to prepare high-performance polymer composites due to its advantages such as no use of toxic chemicals, simple, controllable, and fast process.

Key words : EVA, HDPE, Flame retardancy, Crosslinking, Electron beam irradiation

서 론

Poly(ethylene-co-vinyl acetate) (EVA)와 high density polyethylene (HDPE)과 같은 폴리올레핀(polyolefin)은 가격이 저렴하고 기계적 물성, 전기 절연성, 가공성 등이 우수하여 전선, 케이블 등의 절연 재료로 일상생활과 여러 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 기재 수지인 폴리올레핀의 내열성과 난연성 등을 개선하기 위하여 가교제, 난연제 등을 첨가하여 고분자 복합재료로 제조하여 사용해야 한다(Lu *et al*. 2004; Bahattab *et al*. 2010). 내열성과 난연성이 우수한 고분자 복합재료를 제조하기 위한 난연제로 할로겐화 화합물, 안티몬계 화합물 등을 사용하지만 이들은 연소 시 독성, 산성가스의 배출 등으로 안전과 환경 문제가 발생하므로 난연 효율이 높고 친환경적인 난연제를 사용해야 한다(Wang *et al*. 2014).

고분자 복합재료에 사용하는 대표적인 금속 수산화물 난연제인 aluminium hydroxide ($Al(OH)_3$)와 magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$)은 인화성을 감소시키는 동시에 무독성이며 연소가스를 억제시켜 준다(Witkowski *et al*. 2012). 금속 수산화물은 연소 시 흡열 반응을 통해 고분자의 표면 온도를 낮

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

추어 주며 생성된 물 분자는 가연성 가스를 희석하는 원리를 이용하여 고분자 복합재료에 난연 특성을 부여해 준다. 그러나 고분자 복합재료 내 금속 수산화물의 함량이 적을 경우 난연 효율이 낮으므로 60% 이상의 많은 함량을 포함해야 하는 단점이 있다. 또한 유기물과 무기물 계면의 상용성(compatibility)이 나쁘기 때문에 금속 수산화물의 함량이 많으면 고분자 복합재료의 기계적 물성이 저하되므로 난연성과 기계적 물성의 향상을 위해 적절한 양의 난연제를 사용하는 것이 중요하다(Oyama *et al*. 2011; Ma *et al*. 2017).

전자빔 조사를 이용한 고분자 복합재료의 화학구조와 물성 변화에 대한 연구가 많이 발표되고 있다. 전자빔 조사 시 고분자 내 가교와 사슬 절단 반응이 동시에 일어난다. 사슬 절단반응이 가교 반응보다 우세하면 고분자 주사슬의 분해로 분자량이 감소하는 반면에 가교 반응이 사슬 절단 반응보다 우세하면 자유 라디칼 생성으로 인해 고분자의 주사슬이 가교되어 분자량이 증가하고 기계적 물성과 열적 특성 등이 향상된다(Gheysari *et al*. 2001; Murray *et al*. 2012; Bee *et al*. 2014c). 이러한 전자빔 조사를 이용한 고분자 재료의 가교는 기존의 화학 가교와 열 가교 방법과 비교하여 친환경적이고 잔류물이 없고 고체 상태 및 저온에서 가교 반응이 가능한 장점들이 있다(Im *et al*. 2010; Chowhury *et al*. 2015).

본 연구에서는 EVA와 HDPE를 기재 수지로 사용하고 난연제와 첨가제 등을 사용하여 시트 형태의 EVA/HDPE 복합재료를 제조하였다. EVA/HDPE 복합재료의 가교는 다양한 흡수선량의 전자빔을 조사하여 진행하였고 전자빔 흡수선량에 따른 EVA/HDPE 복합재료의 기계적 물성, 열적 특성, 난연성 등을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 시약 및 재료

본 실험에서 기재 수지로 EVA (VC 640, VA 15 wt%, density: 0.935 g·cm^{-3}, 롯데케미칼)와 HDPE (5305E, density: 0.952 g·cm^{-3}, 롯데케미칼)을 사용하였고 난연제로는 stearic acid surface modified $Al(OH)_3$ (OL-104C, Martinswerk)와 silane surface modified $Mg(OH)_2$ (HV-6F, Konoshima Chemical), 가교제로는 trimethylopropane trimethacrylate (TMPTMA, Sartomer)를 사용하였다.

2. EVA/HDPE 복합재료 제조

EVA/HDPE 복합재료는 Table 1에 나타낸 배합으로 melt mixer를 이용하여 170°C에서 50 rpm으로 20분간 용융 혼합한 후 hot-press molder에서 170°C에서 15 MPa의 압력으로 약 10분간 압축한 후 급랭하여 두께 2 mm의 시트 형태 (100 mm×100 mm)의 시편을 제조하였다. 시트 형태의 EVA/HDPE 복합재료는 2.5 MeV 전자빔 가속기 (EB-Tech, Daejeon, Korea)를 사용하여 공기 분위기에서 18.4 mA의 전류밀도와 25 kGy·scan^{-1}의 선량율로 조사하였다. 전자빔 흡수선량은 50, 100, 150, 200 kGy이고 전자빔 조사 시간은 각각 6, 12, 18, 24초였다.

Table 1. Formulation of EVA/HDPE composites

Component	Specification	Amount (g)
EVA	Matrix resin (15% VA)	80
HDPE	Matrix resin	20
$Mg(OH)_2$	Silane modified flame retardant	75
$Al(OH)_3$	Stearic acid modified flame retardant	50
TMPTMA	Crosslinking agent	4

3. 분석

EVA/HDPE 복합재료의 겔화율은 ASTM D2765에 따라 시편을 120°C의 xylene에 12시간 동안 용해하고 50°C의 진공오븐에서 건조 후 다음과 같은 수식을 사용하여 측정하였다.

$$\text{Gel content (\%)} = \frac{W_1}{W_0} \times 100$$

이때 W_0는 xylene 처리 전 원래 시료의 무게, W_1은 xylene 처리 후 건조된 시료의 무게이다.

기계적 물성은 만능 시험기 (universal testing machine, UTM, QM100TM, Qmesis)를 사용하여 ASTM D638에 따라 시편을 제조하고 50 mm·min^{-1}의 cross-head 속도로 측정하였다. 열적특성은 열중량분석기 (thermogravimetric analysis, TGA, TGA 8000, PerkinElmer)를 사용하여 30~800°C, 시차주사열량계 (differential scanning calorimetry, DSC, DSC 4000, PerkinElmer)를 사용하여 30~200°C까지 질소 분위기에서 10°C·min^{-1}의 속도로 측정하였다. 난연성은 한계 산소지수(limiting oxygen index, LOI)를 사용하여 ASTM D2863에 따라 100×10×2 mm^{3}의 시편을 제조하여 질소, 산소 혼합기체에서 연소되는 최소한의 산소농도를 다음과 같은 수식을 사용하여 측정하였다.

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

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

결과 및 고찰

전자빔 조사를 이용하여 가교한 EVA/HDPE 복합재료의 겔

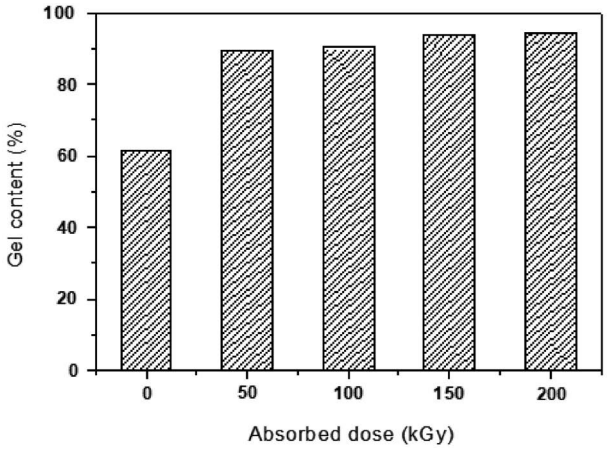

Fig. 1. Gel content as a function of absorbed dose.

화율 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 전자빔 조사에 의한 가교 반응은 기재 수지의 무정형 영역에서 전자빔 조사로 형성된 라디칼에 의해 초기 가교 반응이 진행되며 결정 영역에서 전자빔 조사에 의해 형성된 라디칼은 이동성이 상대적으로 낮아서 더 오래 남아있으므로 나중에 무정형 영역으로 이동하여 가교 반응에 참여하면서 진행된다(Dadbin *et al*. 2005; Sabet *et al*. 2010). EVA/HDPE 복합재료의 겔화율은 전자빔 흡수선량이 증가할수록 증가하였고 흡수선량이 50 kGy일 때 89.2%, 100 kGy일 때 91.9%, 150 kGy일 때 94.2%, 200 kGy일 때 94.5%로 150 kGy 이상의 흡수선량에서는 비슷한 수준의 겔화율을 보이는 것으로 판단되며 특히 50 kGy의 낮은 전자빔 흡수선량에서 90%에 가까운 겔화율을 보이고 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 94% 이상의 높은 겔화율을 보이는 것은 EVA/HDPE 복합재료의 전자빔 가교가 매우 효과적인 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 전자빔 흡수선량에 따른 EVA/HDPE 복합재료의 기계적 물성(인장강도, 탄성계수, 연신율)의 변화를 나타내었다. Fig. 2(a)의 인장강도의 결과에서 알 수 있듯이 전자빔 조사 전 EVA/HDPE 복합재료의 인장 강도는 7.2±0.1 MPa의 값을 가지고 있으나 전자빔 조사 시 50 kGy의 흡수선량에서 10.1±0.5 MPa, 100 kGy일 때 11.6±0.5 MPa, 150 kGy일 때 12.5±0.3 MPa로 증가하며 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 인장강도는 최대 72.6% 정도가 향상되었다. 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 인장강도가 증가한 것은 전자빔 조사에 의해 EVA/HDPE 복합재료의 가교 밀도가 증가하였기 때문이며 전자빔 흡수선량이 200 kGy일 때 인장강도가 12.1±0.9 MPa로 약간 감소한 것은 전자빔 조사에 의해 가교 반응이 진행됨과 동시에 더 많은 전자빔 흡수선량으로 인해 기재 수지의 사슬 절단에 의한 분해반응이 일부 진행되었기 때문이다. Fig. 2(b)에서 전자빔 흡수선량에 따른 EVA/HDPE 복합재료의 탄성계수 측정 결과를 나타내었다. 전자빔 조사 전 EVA/HDPE

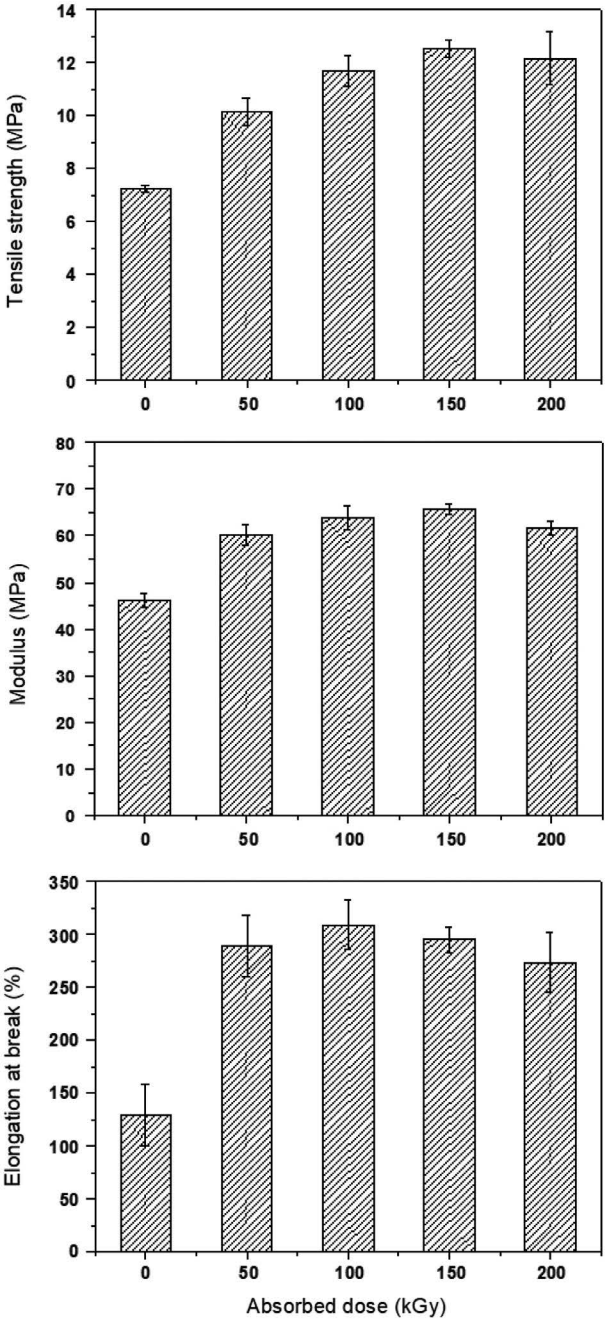

Fig. 2. Tensile strength (a), modulus (b) and elongation at break (c) of EVA/HDPE composites as a function of absorbed dose.

복합재료는 46.0 MPa의 탄성계수를 보였으나 50 kGy의 전자빔 흡수선량에서 60.2 MPa로 탄성계수가 크게 향상되었으며 전자빔 흡수선량이 100, 150 kGy로 증가할수록 탄성계수는 최대 65.6 MPa까지 증가하였다가 200 kGy에서 61.5 MPa로 약간 감소하는 것으로 보아 인장강도와 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 EVA/HDPE 복합재료의 전자빔 흡수선량에 따른 인장강도와 탄성계수 변화는 Fig. 1의 겔화율이 증가하는 경향과 비슷하게 분석할 수 있으

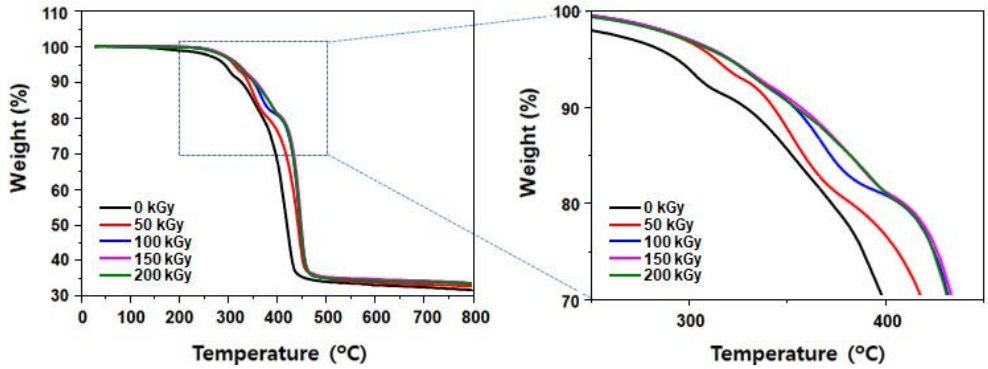

Fig. 3. TGA thermograms of EVA/HDPE composites as a function of absorbed dose.

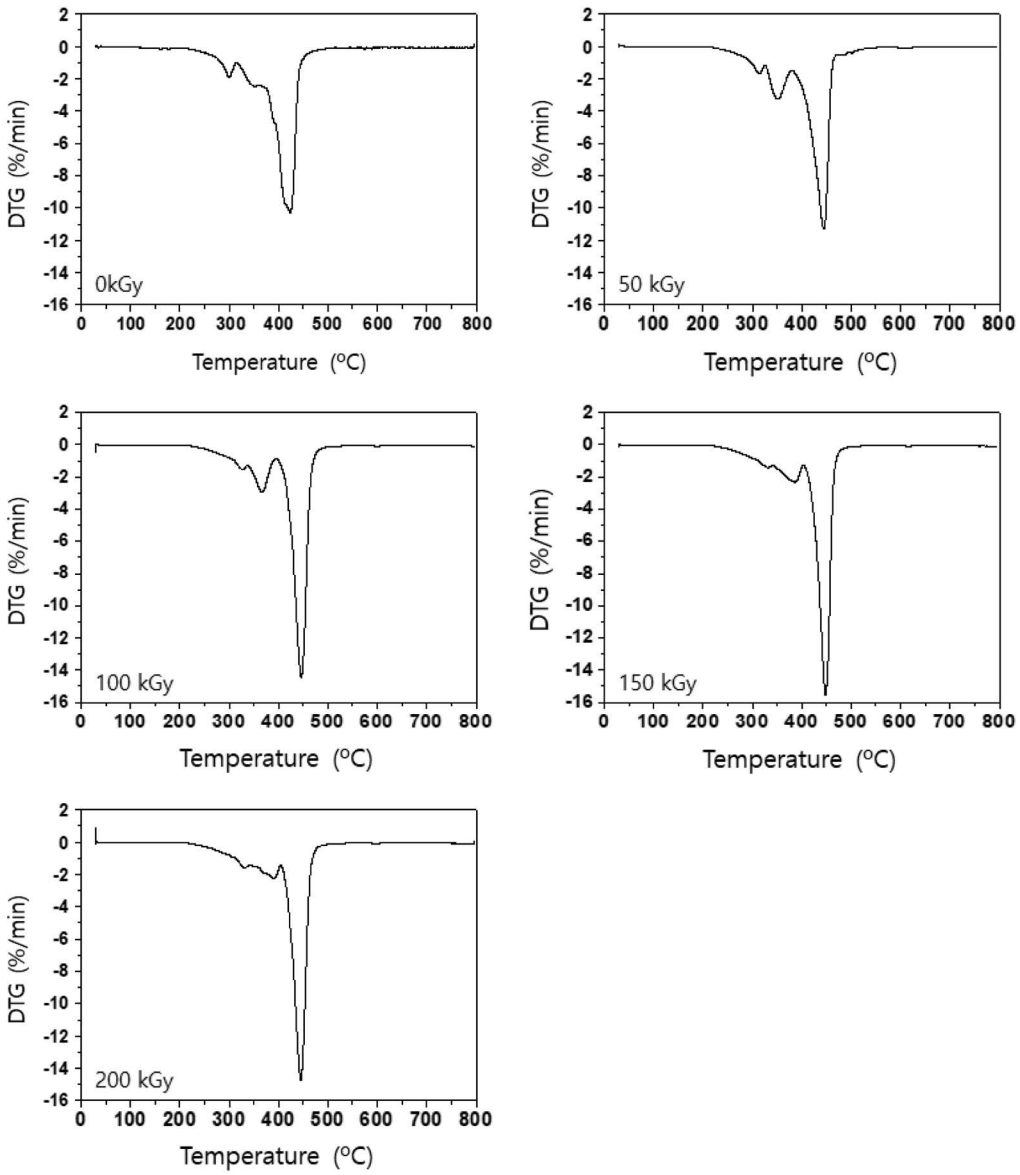

Fig. 4. DTG thermograms of EVA/HDPE composites as a function of absorbed dose.

며 전자빔 조사에 의한 EVA/HDPE 복합재료의 가교 반응과 연관하여 기계적 물성을 예측할 수 있다. Fig. 2(c)의 연신율은 전자빔 흡수선량이 100 kGy까지 증가할수록 최대 309% 향상되었고 이후 더 높은 흡수선량에서는 감소하는 것을 확인하였다. 인장 강도와 연신율은 기재 수지와 첨가제 사이의 계면 접착력, 가교 정도 등에 따라 달라진다. 흡수선량 100 kGy까지는 거대한 네트워크 구조의 형성과 기재 수지와 난연제 입자 사이의 계면 접착력이 강화되어 연신율이 증가하는 반면, 더 높은 흡수선량에서는 이미 가교된 거대 분자 사이에 추가 가교가 형성되어 더 복잡하고 밀집된 네트워크 구조를 가지게 된다. 이는 고분자 사슬의 이동성을 제한하여 스트레칭 중 서로 미끄러지는 것을 방해하여 연신율이 감소한 것으로 판단된다(Datta *et al*. 1996; Ismail *et al*. 2010; Bee *et al*. 2014b).

Fig. 3에서 EVA/HDPE 복합재료의 전자빔 흡수선량에 따른 열적 특성을 TGA로 분석하여 나타내었다. EVA/HDPE 복합재료의 열분해는 여러 단계로 이루어지는 것을 알 수 있는데 첫 번째 단계는 280~310°C에서 $Al(OH)_3$의 dehydration과 EVA의 deacylation, 두 번째 단계는 330~370°C에서 $Mg(OH)_2$의 dehydration과 EVA의 deacylation, 세 번째 단계는 390~430°C에서 HDPE와 EVA의 주 사슬의 분해로 진행이 된다(Cardenas *et al*. 2008; Liu *et al*. 2009; Sabet *et al*. 2013; Cao *et al*. 2017). 또한, HDPE와 EVA의 주 사슬의 열분해 온도는 전자빔 조사 전 394°C였으나 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 증가하여 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서 429°C를 나타내었다. Fig. 4의 DTG 곡선에서 알 수 있듯이 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 최대 피크가 나타내는 온도 또한 증가하였으며 전자빔 조사 전에는 423°C였으나 200 kGy에서 445°C로 피크가 이동한 것을 확인하였다. 이러한 EVA/HDPE 복합재료의 열적 특성의 향상은 Fig. 1의 겔화율 결과에서 확인한 바와 같이 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 EVA/HDPE 복합재료의 가교도가 증가하였기 때문이다. 또한, Fig. 5의 DSC 결과에서 전자빔 조사 전 HDPE의 용융점은 124.83°C를 보이고 전자빔 흡수선량이 증가할수록 119°C로 낮아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 전자빔 조사 시 사슬 절단에 의한 분자량 감소에 의한 것과 전자빔 조사에 의해 가지구조나 가교 구조를 형성하여 결정화를 이루는 선형 구조를 방해하여 결정영역을 감소시키기 때문이다(Albano *et al*. 2003).

Fig. 6에서 전자빔 흡수선량에 따른 산소 한계 지수(LOI) 분석 결과를 나타내었다. LOI는 산소와 질소 혼합기체에서 수직으로 세운 시편을 하향 연소하여 산소 농도가 감소함에 따라 연소가 중지될 때까지 시료의 연소를 기록하여 재료의 난연성을 평가하는 분석방법이다(Suzanne *et al*. 2014). EVA와 HDPE의 LOI는 각각 19%, 17.5%의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Sabet *et al*. 2012; Xu *et al*. 2016). EVA/HDPE 복합재료에 난연제를 첨가함으로써 전자빔 조사전의 경우 27.5%의 값을 가졌으며 전자빔 흡수선량이 증가할수록 LOI

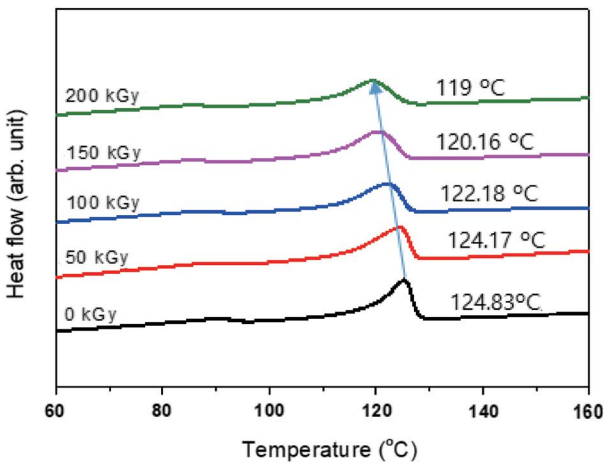

Fig. 5. DSC curves of EVA/HDPE composites as a function of absorbed dose.

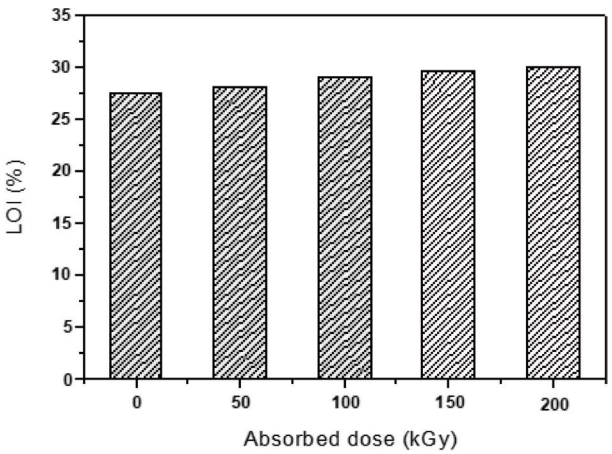

Fig. 6. LOI values of EVA/HDPE composites as a function of absorbed dose.

값이 증가하여 200 kGy에서 최대 30%의 값을 가지는 것을 확인하였다. 난연제 $Al(OH)_3$와 $Mg(OH)_2$는 고온에서 물과 금속 산화물을 생성하여 냉각 작용 및 열전달에 대한 장벽 효과로 EVA/HDPE 복합재료의 외부 표면을 보호하여 온도 상승을 지연시켜준다(Sabet *et al*. 2020). 또한 전자빔 조사에 의한 가교 구조 형성은 연소 과정을 억제하여 더 높은 흡수선량에서 가교 밀도가 증가하여 난연성이 향상된 것으로 판단되고 이는 앞서 언급한 Fig. 1의 겔화율의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다(Bee *et al*. 2012; Bee *et al*. 2014a).

결 론

본 연구에서는 기재 수지로 EVA와 HDPE를 사용하고 친환경 비할로겐계 난연제인 $Al(OH)_3$와 $Mg(OH)_2$ 그리고 기타

첨가제를 용융 혼합하여 전자빔 조사를 이용한 EVA/HDPE 복합재료를 제조하고 기계적 물성, 열적 특성 및 난연성을 평가하였다. 전자빔 조사에 의해 EVA/HDPE 복합재료의 가교도가 증가하여 기계적 물성, 열적 특성 및 난연성이 많이 향상된 것을 알 수 있었다. 이러한 결과들로부터 고내열 난연 전선용 EVA/HDPE 복합재료의 제조에 전자빔 조사는 친환경적이고 매우 효과적인 방법이라는 것을 확인하였다.

사 사

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

참 고 문 헌

Albano C, Perera R, Silva P and Sánchez Y. 2003. Characterization of gamma irradiated PEs using ESR, FTIR and DSC techniques. *Polym. Bull.* **51**(2):135-142.

Bahattab MA, Mosnáček J, Basfar AA and Shukri TM. 2010. Cross-linked poly (ethylene vinyl acetate) (EVA)/low density polyethylene (LDPE)/metal hydroxides composites for wire and cable applications. *Polym. Bull.* **64**(6):569-580.

Bee ST, Hassan A, Ratnam CT, Tee TT and Sin LT. 2012. Effects of montmorillonite on the electron beam irradiated alumina trihydrate added polyethylene and ethylene vinyl acetate nanocomposite. *Polym. Compos.* **33**(11):1883-1892.

Bee ST, Hassan A, Ratnam C, Tee TT and Sin LT. 2014a. 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.

Bee ST, Hassan A, Ratnam CT, Tee TT, Sin LT and Hui D. 2014b. Dispersion and roles of montmorillonite on structural, flammability, thermal and mechanical behaviours of electron beam irradiated flame retarded nanocomposite. *Compos. B. Eng.* **61**:41-48.

Bee ST, Ratnam CT, Sin LT, Tee TT, Wong WK, Lee JX and Rahmat AR. 2014c. Effects of electron beam irradiation on the structural properties of polylactic acid/polyethylene blends. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **334**:18-27.

Cao R, Deng ZL, Ma YH and Chen XL. 2017. Effect of EVA on thermal stability, flammability, mechanical properties of HDPE/EVA/$Mg(OH)_2$ composites. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **213**(1):012002.

Cárdenas MA, García-López D, Gobernado-Mitre I, Merino JC, Pastor JM, Martínez JD, Barbeta J and Calveras D. 2008. Mechanical and fire retardant properties of EVA/clay/ATH nanocomposites - Effect of particle size and surface treatment of ATH filler. *Polym. Degrad. Stabil.* **93**(11):2032-2037.

Chowdhury SR, Sharma BK, Mahanwar PA and Sarma KSS. 2015. Tensile, flexural and morphological properties of electron beam-crosslinked LDPE-EPDM blends. *Plast. Rubber Compos.* **44**(10):440-448.

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, Behjat A and Haji-Saeid M. 2001. The effect of high-energy electron beam on mechanical and thermal properties of LDPE and HDPE. *Eur. Polym. J.* **37**(2):295-302.

Im JS, Sohn JY, Shin J, Lim YM, Choi JH, Kim JS and Nho YC. 2010. A study on characterization of polyethylene separators irradiated at various electron beam current conditions. *Polym.-Korea* **34**(1):74-78.

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.

Lu H, Hu Y, Kong Q, Cai Y, Chen Z and Fan W. 2004. Influence of gamma irradiation on high density polyethylene/ethylene-vinyl acetate/clay nanocomposites. *Polym. Adv. Technol.* **15**(10):601-605.

Liu H, Fang Z, Peng M, Shen L and Wang Y. 2009. The effects of irradiation cross-linking on the thermal degradation and flame-retardant properties of the HDPE/EVA/magnesium hydroxide composites. *Radiat. Phys. Chem.* **78**(11):922-926.

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.

Murray KA, Kennedy JE, McEvoy B, Vrain O, Ryan D and Higginbotham CL. 2012. The effects of high energy electron beam irradiation on the thermal and structural properties of low density polyethylene. *Radiat. Phys. Chem.*

81(8):962-966.

Oyama HT, Sekikawa M and Ikezawa Y. 2011. Influence of the polymer/inorganic filler interface on the mechanical, thermal, and flame retardant properties of polypropylene/magnesium hydroxide composites. *J. Macromol. Sci. Part B-Phys*. **50**(3):463-483.

Sabet M, Hassan A, Wahit MU and Ratnam CT. 2010. Mechanical, thermal and electrical properties of ethylene vinyl acetate irradiated by an electron-beam. *Polym.-Plast. Technol. Eng*. **49**(6):589-594.

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.

Sabet M, Hassan A and Ratnam CT. 2013. Electron-beam irradiation of low density polyethylene/ethylene vinyl acetate blends. *J. Polym. Eng*. **33**(2):149-161.

Sabet M, Soleimani H and Hosseini S. 2020. Thermal stability and flame-retardant characteristic of irradiated LDPE and composites. *Bull. Mat. Sci*. **43**(1):1-8.

Suzanne M, Delichatsios MA and Zhang JP. 2014. Flame extinction properties of solids obtained from limiting oxygen index tests. *Combust. Flame* **161**(1):288-294.

Wang B, Hong N, Shi Y, Wang B, Sheng H, Song L, Tang Q and Hu Y. 2014. Comparative study on the effect of electron beam irradiation on the physical properties of ethylene-vinyl acetate copolymer composites. *Radiat. Phys. Chem*. **97**:284-291.

Witkowski A, Stec AA and Hull TR. 2012. The influence of metal hydroxide fire retardants and nanoclay on the thermal decomposition of EVA. *Polym. Degrad. Stabil*. **97**(11):2231-2240.

Xu ZS, Yan L and Chen L. 2016. Synergistic flame retardant effects between aluminum hydroxide and halogen-free flame retardants in high density polyethylene composites. *Procedia Eng*. **135**:631-636.

Received: 23 July 2021
Revised: 2 September 2021
Revision accepted: 6 September 2021