Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 1, pp. 69-74, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.1.69

Original article

전자빔 조사에 의한 HDPE/주정박 복합재료 제조

김서현[1] · 김해림[1] · 이병민[2,*] · 강찬솔[1,*]

[1]신한대학교 첨단소재공학과, [2]신한대학교 산학협력단

Preparation of HDPE/Distillers Grains Composites by Electron Beam Irradiation

Seohyeon Kim[1], Haerim Kim[1], Byoung-Min Lee[2,*], and Chan Sol Kang[1,*]

[1]Department of Advanced Materials Engineering, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-si 11644, Republic of Korea
[2]Industry-Academic Research Cooperation Foundation, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-si 11644, Republic of Korea

ABSTRACT This study explores the effects of electron beam irradiation on the crosslinking behavior and performance of high-density polyethylene/distillers grains composites. Distillers grains, a bioethanol by-product, were incorporated as a sustainable filler to enhance resource utilization. Composites were fabricated by melt blending and compression molding, followed by irradiation at 50-200 kGy. FT-IR results confirmed irradiation-induced carbonyl formation through oxidative radical reactions while preserving the HDPE backbone. Gel content increased significantly with an absorbed dose, exceeding 90% at 100-150 kGy, indicating the development of a stable three-dimensional network, with a slight decline at 200 kGy due to chain scission. Mechanical properties improved with increasing crosslink density. Thermal analysis revealed decomposition associated with distillers grains and high-density polyethylene, and the maximum decomposition temperature shifted higher after electron beam irradiation, demonstrating enhanced thermal stability. These results confirm electron beam irradiation as an effective method to improve biomass-reinforced polymer composites.

Key words: High-density polyethylene, Electron beam irradiation, Distillers grains, Composite

1. 서 론

주정박(distillers grains, DGs)은 쌀, 옥수수 등의 곡물을 발효하여 주정(에탄올)을 생산한 후 증류 공정을 통해 에탄올을 분리하고 남은 잔류물을 탈수·농축·건조 등의 후처리 과정을 거쳐 얻는 대표적인 에탄올 생산 공정의 부산물이다[1-4]. 곡물의 발효 과정에서 전분이 효모에 의해 에탄올로 전환되기 때문에 주정박은 셀룰로스, 리그닌, 헤미셀룰로스, 단백질, 지방 등으로 구성된 전형적인 바이오매스이다. 이러한 주정박은 단백질을 함유하고 있으므로 일반적으로 가축의 사료 원료로 소비된다[5-7]. 그러나 곡물 기반 에탄올 생산과 함께 주정박의 발생량이 꾸준히 증가하는 반면 사료 원료 용도로 지나치게 편중되고 있으므로 주정박을 농업·식품·산업소재 등 적용 분야의 다양화를 통해 비사료화 및 고부가가치화하여 지속가능한 자원 순환성과 친환경적인 연구 등이 필요하다[8-10].

고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE)은 산업현장과 일상생활 전반에서 가장 많이 사용되는 범용 고분자재료중 하나이다. HDPE는 높은 결정성에 기인한 기계적 물성을 주요 특징으로 우수한 내화학성, 전기 절연성, 저렴한 가격 등의 많은 장점을 가진다. 또한, 용이한 가공성으로 인해 압출, 사출, 블로우 성형 등 다양한 고분자 가공 방법에 의해 제품의 생산이 가능하여 산업과 일상생활에서 각종 용기, 필름, 배관, 전선 등 광범위하게 사용된다[11-13]. 일반적으로 고분자재료의 기계적 물성과 열적 특성을 향상시키는 방법으로 가교(crosslinking)가 있다. 고분자재료는 구조 내 분자 사슬 간 공유결합이 도입된 가교를 통해 3차원의 망상 구조가 형성되어 열에 의한 사슬의 운동, 점탄성

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding authors
Byoung-Min Lee
E-mail : 98bmlee@naver.com
Chan Sol Kang
Tel: +82-31-870-176, E-mail: kangcs@shinhan.ac.kr
Received 23 February 2026 **Revised** 26 February 2026 **Accepted** 26 February 2026

Table 1. Formulation of HDPE/DGs composites

Absorbed dose (kGy)	HDPE (g)	DGs (g)	PE-g-MAH (phr)
0	180	20	3
50			
100			
150			
200			

변형 등이 억제되어 열적 특성과 기계적 물성이 향상된다[14,15]. HDPE의 가교 방법에는 일반적으로 Si-O-Si 결합을 형성하는 실란 가교, 전자선 또는 감마선 등을 이용한 방사선 가교 등이 있다. 방사선 가교는 방사선 조사로 인해 생성된 자유라디칼에 의해 HDPE의 사슬 간 C-C 공유결합이 형성되면서 3차원 망상구조를 이루고, 이에 따라 열적·기계적 물성이 향상된다. 또한 상온에서 단시간에 균일한 가교가 가능하며 첨가제의 첨가가 없으므로 잔류물이 남지 않아 실란 가교 공정과 비교해 볼 때 효율적이고 친환경적이다[16-20].

본 연구에서는 전자빔 가교를 이용하여 HDPE를 기재수지(matrix resin), 주정박 바이오매스를 충진재(filler)로 사용한 HDPE/주정박 복합재료를 제조하였다. HDPE/주정박 복합재료는 여러 가지 전자빔 흡수선량을 조사하여 가교하였고 전자빔 흡수선량에 따른 화학 결합 구조, 겔화율, 인장강도, 굴곡강도, 열적 특성 등을 체계적으로 분석하였다. 분석 결과 주정박 바이오매스는 고분자/바이오매스 복합재료의 충진재로의 소재화를 통해 비사료 사용 분야로의 적용 범위가 확대되며 지속가능한 자원순환성과 경제성을 동시에 제고하고 실제 산업 현장에서의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 재료

기재수지는 HDPE (5305E, melt index: 0.8 g 10 min^{-1}, density: 0.952 g cm^{-3}, 롯데케미칼(주))를 사용하였다. 주정박은 창해에탄올(주)로부터 쌀 주정박을 공급받아 100°C에서 12시간 건조하고 1 mm 이하의 분말로 분쇄하여 사용하였다. 상용화제로 PE-g-MAH (NB 2713A, 우성케미칼)을 사용하였다.

2.2. HDPE/주정박 복합재료 제조

HDPE/주정박 복합재료는 Table 1의 배합비에 따라 용융 혼합기(torque rheometer, Brabender D-47055, Brabender, Duisburg, Germany)를 이용하여 170°C에서 50 rpm으로 20분 동안 용융 혼합한 후 hot-press molder (Mini test Press-10, Toyoseiki, Japan)를 사용하여 170°C에서 10분 동안 압축성형 후 급랭하여 HDPE/주정박 복합재료 시트(sheet)와 시편(specimen)을 제조하였다(Fig. 1). 제조한 HDPE/주정박 복합재료 시트와 시편의 전자빔 가교는 2.5 MeV 선형전자가속기(2.5 MeV, UELV-10-105, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup, Korea)를 사용하여 15 mA의 전류와 5.9 m min^{-1}의 컨베이어 속도, 25 kGy $pass^{-1}$의 선량율로 공기 분위기에서 실시하였고, 이 때 전자빔 흡수선량은 각각 50, 100, 150, 200 kGy이었다.

2.3. 분석

HDPE/주정박 복합재료의 화학결합구조는 적외선 분광기(Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR, Spectrum Two, Perkin-Elmer)로 분석하였다. HDPE/주정박 복합재료의 겔 함량(gel content)은 ASTM D2765 규격에 의거하여 측정하였으며 SUS 망으로 시료(1 g)를 감싸고 140°C의 xylene에서

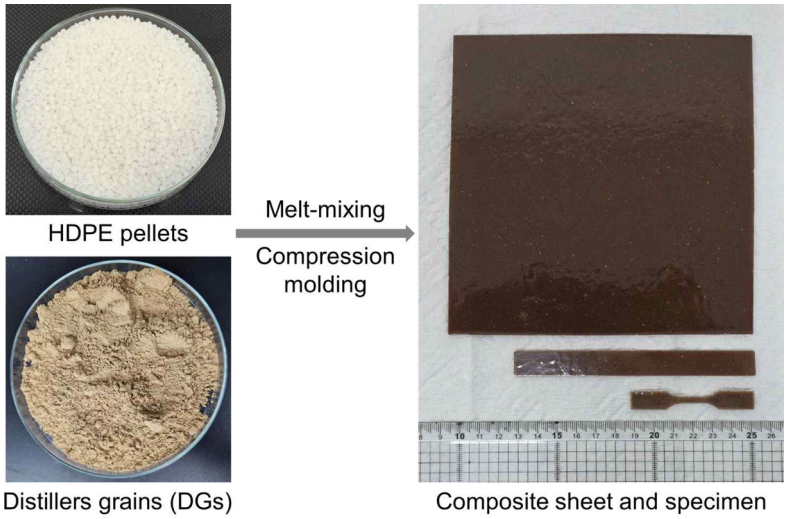

Fig. 1. Digital images of HDPE/DGs composites.

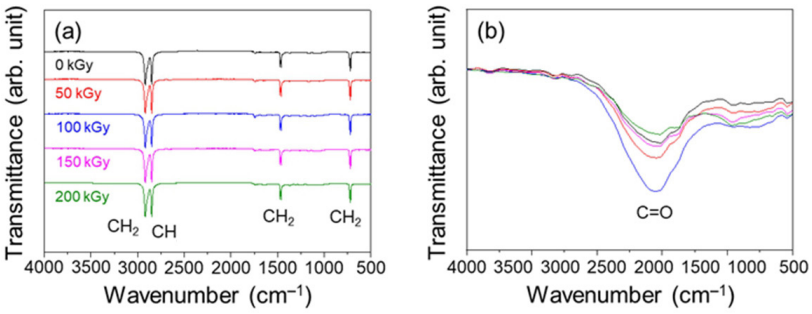

Fig. 2. FT-IR spectra of HDPE/DGs composites.

12시간 동안 교반한 후 진공오븐에서 12시간 동안 건조하였다. 겔 함량은 xylene 추출 전과 후의 시료의 무게로부터 다음과 같은 공식으로 계산하였다.

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

이 때 W_0와 W는 각각 xylene 추출 전과 후의 시료 무게이다.

HDPE/주정박 복합재료의 인장강도는 만능재료 시험기(universal testing machine, UTM, AGX-100KNV, Shimadzu, Japan)를 사용하고 ASTM D638 규격에 따라 IV 타입 시편을 제작하고 50 mm min^{-1}의 cross-head 속도로 측정을 실시하였다. 굴곡강도는 ASTM D790 규격에 따라 시편(127 mm × 12.7 mm × 3.2 mm)을 제조하고 3-point bending 시스템으로 측정하였다. HDPE/주정박 복합재료의 열적 특성은 열중량분석기(thermogravimetric analysis, TGA, TGA 8000, PerkinElmer)를 사용하여 질소 분위기에서 30-800°C의 온도 범위에서 실행하고 시차주사열량계(differential scanning calorimetry, DSC, DSC 4000, PerkinElmer)를 사용하여 질소 분위기에서 30-200°C의 온도 범위에서 10°C min^{-1}로 승온하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

HDPE/주정박 복합재료의 전자빔 흡수선량에 따른 화학결합구조 변화를 FTIR로 분석하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 2915, 1463, 725 cm^{-1}에서 HDPE의 탄화수소 구조인 CH_2 관련 특성 피크, 2845 cm^{-1}에서 CH 관련 특성 피크가 확인되며 이는 전자빔 조사 후 HDPE/주정박 복합재료의 기재수지로 사용한 HDPE의 사슬 절단(chain scission)없이 골격구조(backbone)가 잘 유지가 잘 되고 있음을 의미한다[21]. Fig. 2(b)는 전자빔 조사 시 카보닐 그룹(carbonyl group)의 형성과 관련된 결과로 공기 분위기에서 전자빔 조사 시 HDPE의 사슬 내 생성된 라디칼이 공기 중의 산소와 반응하여 퍼옥시(peroxy) 라디칼을 형성한다. 이 퍼옥시 라디칼은 인접한 다른 사슬의 수소와 반응하여 하이드로 퍼옥사이드(hydroperoxide)를 생성 후 알

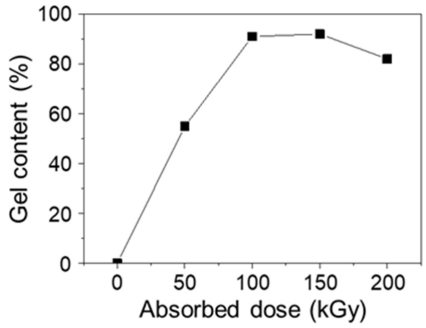

Fig. 3. Gel content of HDPE/DGs composites.

데히드, 카르복실 산 등과 같은 산소를 함유하는 카보닐 기를 형성한다[22]. 카보닐 기의 피크강도는 100 kGy의 전자빔 흡수선량까지 증가한 후 150, 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서 감소하였다. 이는 100 kGy의 전자빔 흡수선량까지는 전자빔 조사에 의해 생성된 HDPE 사슬 내 라디칼이 공기 중의 산소, 다른 사슬의 수소와 반응 후 카보닐 기가 풍부해지지만 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서는 라디칼 재결합에 의한 가교 반응이 우세하여 피크강도가 감소하고 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서는 가교 반응보다 분해 반응이 우세하여 피크강도가 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 전자빔 흡수선량에 따른 HDPE/주정박 복합재료의 겔화율 변화를 나타낸 결과이다. 겔화율은 용매 추출 후 잔존하는 불용성 분율로 정의되며 전자빔 조사에 의해 형성된 가교정도를 의미한다. 전자빔 조사 시 50 kGy의 전자빔 흡수선량에서 겔화율은 급격히 증가하여 55.8% 수준의 겔화율을 보였으며 100, 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 각각 91.2, 92.1%의 겔화율, 200 kGy의 전자빔 흡수선량 조사 후 82.3% 수준의 겔화율을 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 50, 100 kGy의 전자빔 흡수선량에 의해 HDPE/주정박 복합재료의 HDPE 구조 내에 라디칼이 생성되어 3차원의 가교 네트워크 구조가 충분히 형성되었기 때문이다. 또한, 150 kGy의 전자빔 흡수선량 조사 시 겔화율이 변화가 거의 없는 것은 100 kGy의 전자빔 흡수선량에 의해 가교가 충분히 진행되었기 때문에 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서는 HDPE의 가교 구조 내에서 라디칼의 이동이 제한된 것을 의

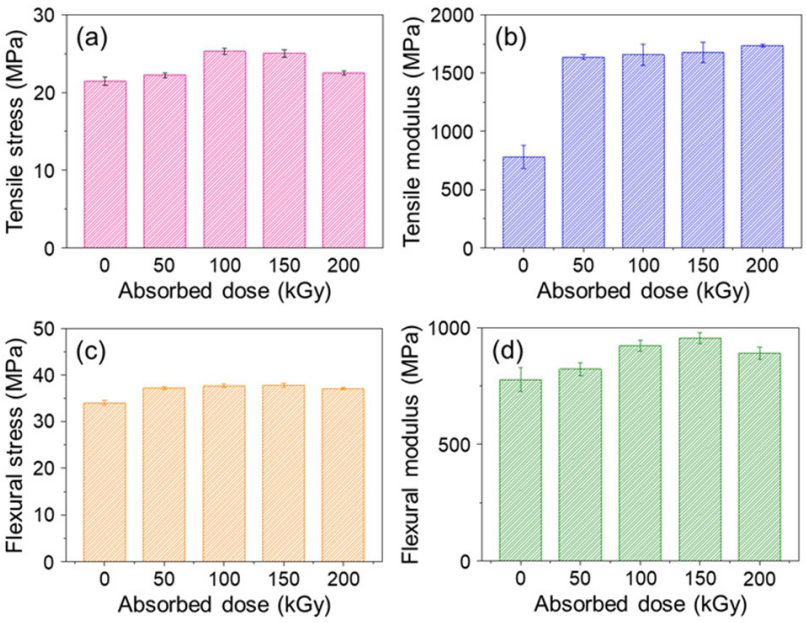

Fig. 4. (a) Tensile stress, (b) tensile modulus, (c) flexural stress, and (d) flexural modulus of HDPE/DGs composites.

미한다. 또한, 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 겔화율이 감소한 것은 산화에 의한 분해 반응이 가교 반응보다 우세하여 HDPE 내 사슬 절단에 의한 분해의 결과로 해석할 수 있다. 겔화율 분석 결과를 바탕으로 전자빔 조사에 의해 HDPE/주정박 복합재료는 높은 겔화율을 가지는 것으로 분석되었고 이는 전자빔 조사가 HDPE/주정박 복합재료의 가교에 효과적인 방법임을 의미한다.

전자빔 흡수선량에 따른 HDPE/주정박 복합재료의 기계적 물성(인장강도, 인장 탄성계수, 굴곡강도, 굴곡 탄성계수)을 측정하여 Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. Fig. 4(a)의 인장강도 측정 결과 전자빔을 조사하지 않은 시편은 21.4 MPa의 인장강도를 보였으며 전자빔 흡수선량이 증가할수록 인장강도는 증가하였다. 50, 100, 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 22.2, 25.3, 25.0 MPa의 인장강도를 보였으며 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서 22.5 MPa의 인장강도를 보였다. Fig. 4(c)의 굴곡강도 측정 결과 전자빔을 조사하지 않은 샘플은 34.1 MPa의 굴곡강도를 보였으며 50, 100, 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 각각 37.2, 37.7, 37.8 MPa의 굴곡강도를 보였고 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서 조금 감소한 37.2 MPa의 굴곡강도를 보여 50, 100, 150 kGy의 전자빔 흡수선량 조사 시 굴곡강도가 증가하였고 200 kGy의 전자빔 흡수선량 조사 시 인장강도와 동일하게 굴곡강도가 감소하였다. 전자빔 흡수선량이 150 kGy까지 증가함에 따라 인장강도와 굴곡강도가 향상된 것은 전자빔 조사에 의해 HDPE/주정박 복합재료의 가교 밀도가 증가하였기 때문이며 전자빔 흡수선량이 200 kGy일 때 인장강도와 굴곡강도가 감소한 것은 가교 반응이 진행됨과 동시에 더 많은 전자빔 흡수선량으로 인해 HDPE의 사슬 절단에 의한 분해 반응이 일부 진행되었기 때문이다. Figs. 4(b, d)의 인장과 굴곡 탄성계수 측정 결과 전자빔 흡수선량에 따른 인장강도와 굴곡강도 측정 결과와 비슷하였으며 Fig. 4(d)의 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서 굴곡 탄성계수는 감소한 결과를 보였으나 이는 오차범위 내에서 비슷한 탄성계수 값을 가지는 것으로 사료된다. 기계적 물성 측정 결과를 토대로 전자빔 조사에 의해 인장과 굴곡강도의 향상은 HDPE/주정박 복합재료의 강성(stiffness)이 증가되었고 이는 HDPE가 높은 가교 밀도를 가지는 3차원의 망상구조 형성으로 인해 사슬의 이동성이 제한된 결과이며 Fig. 3의 91.2, 92.1%의 겔화율 분석 결과와 일치한다.

HDPE/주정박 복합재료의 열적 특성은 TGA와 DSC로 측정하여 Fig. 5에 나타내었고, 분석 결과를 Table 2에 정리하였다. Fig. 5(a)의 TGA curve에서 HDPE/주정박 복합재료의 열분해는 두 단계로 이루어지는 것을 알 수 있는데 첫 번째 단계는 200-350°C의 온도 범위에서 주정박의 열분해, 두 번째 단계는 350-500°C에서 HDPE의 주 사슬의 열분해로 진행이 된다[23]. Fig. 5(b)의 DTG curve에서 HDPE의 주 사슬의 열분해 온도(T_d)는 전자빔 조사 전 425.1°C이었고 전자빔 조사에 의해 증가하여 150 kGy의 전자빔 흡수선량에서 442.2°C이었고 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서는 434.8°C로 감소하였다. 또한, Table 2에서 $T_{5\%}$와 $T_{15\%}$의 값은 HDPE/주정박 복합재료의 중량이 5%와 15%의 각각 감소되는 온도를 의미하며 전자빔 흡수선량이 150 kGy까지 증가함에 따라 $T_{5\%}$는 259.6°C에서 287.5°C, $T_{15\%}$는 259.6°C에서 287.5°C로 증가하였고 Residue 값 역시 3.5 wt%에서 5.5 wt%까지 증가하였다. 이러한 HDPE/주정박 복합재료의 열적 특성의 향상은 Fig. 3의 겔화율 분석 결과에서 나타낸 바와 같이 전자빔 흡수선량이 증가함에 따라 HDPE/주정박 복합재료의 가교 밀도가 증가한 것

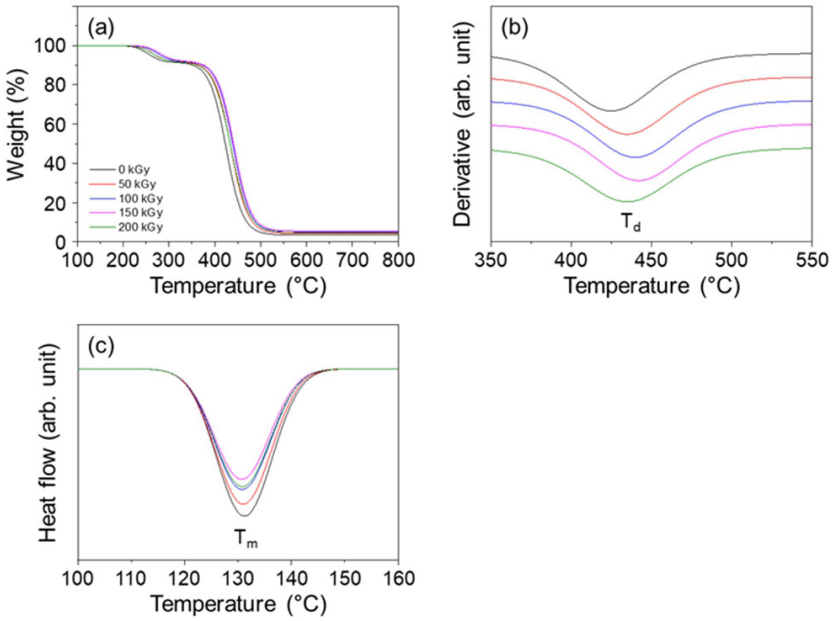

Fig. 5. (a) TGA, (b) DTG, and (c) DSC curves of HDPE/DGs composites.

Table 2. Thermal properties of HDPE/DGs composites

Absorbed dose (kGy)	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{15\%}$ (°C)	T_d (°C)	T_m (°C)	Residue (wt% at 800°C)
0	259.6	379.4	425.1	131.2	3.5
50	270.8	390.2	435.2	130.9	4.3
100	281.7	396.0	439.8	130.8	5.0
150	287.5	398.4	442.2	130.7	5.5
200	271.2	387.9	434.8	130.6	4.8

이 원인이다. 또한, Fig. 5(c)의 DSC 분석 결과에서 전자빔 조사 전 HDPE의 융점(T_m)은 131.2°C이고 전자빔 흡수선량이 증가할수록 감소하여 200 kGy의 전자빔 흡수선량에서 130.6°C로 분석되었고 이는 전자빔 조사 시 HDPE의 사슬 절단에 의한 분자량의 감소와 전자빔 조사에 의해 가교 반응에 의한 가지(branched) 구조가 형성되어 결정 구조를 이루는 선형 구조가 방해되어 결정 영역이 감소한 것에 기인한다[24].

4. 결 론

본 연구에서는 전자빔 가교가 HDPE/주정박 복합재료의 구조적, 기계적, 열적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. FT-IR 분석을 통해 전자빔 조사 과정에서 산소와의 반응에 의해 카보닐기가 형성되었음을 확인하였으며 겔화율 분석 결과 전자빔 흡수선량 증가에 따라 크게 상승하여 100-150 kGy 구간에서 90% 이상의 높은 값을 나타내었으며 이는 3차원 망상구조가 효과적으로 형성되었음을 의미한다. 기계적 물성 평가 결과 가교 밀도의 증가에 따라 인장강도와 굴곡강도가 향상되었으며 이는 HDPE 내 사슬 이동성 제한과 구조적 강성 증가에 기인한 것이다. 열적 특성 분석에서는 전자빔 조사에 따라 HDPE의 열분해 온도가 상승하여 열적 안정성이 향상되었다. 반면 융점은 소폭 감소하는데 이는 가지화 및 사슬 절단에 의해 결정성 형성이 일부 저해된 결과로 사료된다. 분석 결과를 토대로 전자빔 조사를 이용한 HDPE/주정박 복합재료의 가교된 3차원 망상구조 형성을 통해 기계적 강도와 열안정성을 동시에 개선할 수 있는 효과적인 공정임을 확인하였다. 또한 본 연구는 바이오에탄올 부산물인 주정박을 고분자 복합재료의 지속가능한 충진재로 활용할 수 있음을 제시하는 기초연구로 자원순환 기반의 친환경 복합재료 개발과 산업적 응용 가능성을 확대하는 데 전자빔 조사 후 잔존하는 자유라디칼의 종류와 양이 시간에 따른 물성에 미치는 연구 등의 많은 기초 및 응용 연구가 필요하다.

사 사

본 논문은 2025년도 신한대학교 대학혁신지원사업비 및 교내 연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

1. Liu K. 2011. Chemical composition of distillers grains, a review. *J. Agric. Food Chem*. **59**:1508-1526. https://doi.org/10.1021/jf103512z.
2. Chatzifragkou A, Kosik O, Prabhakumari PC, Lovegrove A, Frazier AA, Shewry PR and Charalampopoulos D. 2015. Biorefinery strategies for upgrading distillers' dried grains with solubles (DDGS). *Process Biochem*. **50**:2194-2207. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.09.005.
3. DeRose K, Liu F, Davis RW, Simmons BA and Quinn JC. 2019. Conversion of distiller's grains to renewable fuels and high value protein: integrated techno-economic and life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol*. **53**:10525-10533. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03273.
4. Iram A, Cekmecelioglu D and Demirci A. 2020. Distillers' dried grains with solubles (DDGS) and its potential as fermentation feedstock. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **104**:6115-6128. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496.
5. Kajikawa H, Miyazawa K, Yanase A, Tanabe Y, Tsuchida Y, Mitsumoto Y, Kozato Y and Mitsumori M. 2012. Variation in chemical composition of corn dried distillers grains with solubles in relation to *in situ* protein degradation profiles in the rumen. *Anim. Sci. J.* **83**:299-304. https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2011.00956.x.
6. Swiatkiewicz S, Swiatkiewicz M, Arczewska-Wlosek A and Jozefiak D. 2016. Efficacy of feed enzymes in pig and poultry diets containing distillers dried grains with solubles: a review. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr*. **100**:15-26. https://doi.org/10.1111/jpn.12351.
7. Júnior GFV, Loregian KE and Millen DD. 2025. Distillers grains as alternative feed resources for beef cattle: a comprehensive review. *Anim. Biosci.* Published online. https://doi.org/10.5713/ab.250771.
8. He R, Yang Y, Li Y, Yang M and Yang F. 2023. Recent progress in distiller's grains: chemical compositions and biological activities. *Molecules* **28**:7492. https://doi.org/10.3390/molecules28227492.
9. Dennis E, Gertner D and Erickson G. 2024. Economic research on ethanol feed-use coproducts: a review, synthesis, and path forward. *Animals* **14**:1551. https://doi.org/10.3390/ani14111551.
10. Christopher A, Ostrander J, Mathew J, Sarkar D and Shetty K. 2023. Corn distiller's dried grains with solubles as a target for fermentation to improve bioactive functionality for animal feed and as a source for a novel microorganism with antibacterial activity. *Front. Food Sci. Technol*. **3**. https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1075789.
11. Peacock AJ. 2000. Handbook of polyethylene: structures, properties, and applications. Marcel Dekker, New York, USA.
12. Amjadi M and Fatemi A. 2020. Tensile behavior of high-density polyethylene including the effects of processing technique, thickness, temperature, and strain rate. *Polymers* **12**:1857. https://doi.org/10.3390/polym12091857.
13. Salakhov II, Shaidullin NM, Chalykh AE, Matsko MA, Shapagin AV, Batyrshin AZ, Shandryuk GA and Nifant'ev IE. 2021. Low-temperature mechanical properties of high-density and low-density polyethylene and their blends. *Polymers* **13**:1821. https://doi.org/10.3390/polym13111821.
14. Bahattab MA, Mosnáček J, Basfar AA and Shukri TM. 2010. Cross-linked poly(ethylene vinyl acetate) (EVA)/lowdensity polyethylene (LDPE)/metal hydroxidescomposites for wire and cable applications. *Polym. Bull.* **64**:569-580. https://doi.org/10.1007/s00289-009-0194-0.
15. 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**:922-926. https://doi:10.1016/j.radphyschem.2009.06.013.
16. Sirisinha K, Boonkongkaew M and Kositchaiyong S. 2010. The effect of silane carriers on silane grafting of high-density polyethylene and properties of crosslinked products. *Polym. Test*. **29**:958-965. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.08.004
17. Narkis M, Tzur A, Vaxman A and Fritz HG. 1985. Some properties of silane-grafted moisture-crosslinked polyethylene. *Polym. Eng. Sci.* **25**:857-862. https://doi.org/10.1002/pen.760251311.
18. Zhang L, Li CZ, Zhou Q and Shao W. 2007. Aluminum hydroxide filled ethylene vinyl acetate (EVA) composites: effect of the interfacial compatibilizer and the particle size. *J. Mater. Sci*. **42**:4227-4232. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0630-6.
19. Hippi U, Mattila J, Korhonen M and Seppälä J. 2003. Compatibilization of polyethylene/aluminum hydroxide (PE/ATH) and polyethylene/magnesium hydroxide (PE/MH) composites with functionalized polyethylenes. *Polymer* **44**:1193-1201. https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00856-X.
20. Shin JH, Kim DS, Kim HR, Park JS, Jeong SI, Jung ST, Nho YC and Choi JH. 2022. Preparation and characterization of poly(ethylene-co-vinyl acetate)/high density polyethylene/aluminum hydroxide flame retardant composites by electron beam irradiation. *J. Radiat. Ind*. **16**:181-189. https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.181.
21. Kang KH, Kim HR, Park S, Park JS, Hwang D, Lee BM and Choi JH. 2025. Effect of intumescent flame retardants on the properties of poly(ethylene-*co*-vinyl acetate)/high-density polyethylene blends. *J. Vinyl Addit. Technol*. **31**:356-366. https://doi.org/10.1002/vnl.22175.
22. Murray KA, Kennedy JE, McEvoy B, Vrain O, Ryan D, Cowman R and Higginbotham CL. 2003. The effects of high energy electron beam irradiation in air on accelerated aging and on the structure property relationships of low density polyethylene. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **297**:64-74. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.12.001.
23. Kim DS, Shin JH, Lee BM, Park JS, Jeong SI and Choi JH. 2021. Preparation and characterization of EVA/HDPE composites cross-linked by electron beam irradiation. *J. Radiat. Ind*. **15**:159-165. https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.3.159.
24. Albano C, Perera R, Silva P and Sánchez Y. 2003. Characterization of gamma irradiated PEs using ESR, FTIR and DSC techniques. *Polym. Bull.* **51**:135-142. https://doi.org/10.1007/s00289-003-0206-4.