JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 369-375 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.369

전자선 조사에 의해 제조된 라돈 차폐용 ethylene vinyl acetate/silicone 에멀젼의 물리적 특성 평가

박종석[1,*], 이장건[1], 정성린[1], 전준표[1], 임윤묵[1], 최재학[2], 김갑수[3]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]충남대학교 고분자공학과, [3]한양건설(주)

Evaluation of Physical Properties of Ethylene Vinyl Acetate/Silicone Emulsion for Radon Shielding Prepared by Electron-beam Irradiation

Jong-Seok Park[1,*], Jang-Gun Lee[1], Sung-In Jeong[1], Jun-Pyo Jeon[1], Yoon-Mook Lim[1], Jae-Hak Choi[2] and Kap-Soo Kim[3]

[1]Korea Atomic Energy Research Institute, Advanced Radiation Technology Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea
[2]Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Republic of Korea
[3]Hanyang Construction Co., Ltd. Wonsang-1gil 2, Jeongup-si, Jeollabuk-do 56189, Republic of Korea

Abstract Radon, a carcinogenic substance generated from soil or building materials, have to be fundamentally blocked from entering indoors. In this study, ethylene vinyl acetate (EVA)/silicone emulsions with excellent mechanical and thermal properties and effective blocking of radon gas were prepared by using radiation technology. As the electron-beam irradiation does increased, a partially crosslinked structure was formed in EVA molecular chain, increasing tensile properties and adhesive strength. The EVA/silicone film showed excellent thermal stability without deformation. In addition, the non-irradiated EVA/silicone film showed a radon blocking rate of about a 75%, while the EVA/silicone film irradiated with 3 and 5 kGy showed an excellent radon blocking rate of over 90% due to the formation of crosslinked structure in the EVA molecular chain. These results indicated that the radiation technology can effectively block radon by forming a partially crosslinked structure of EVA/silicone emulsion to improve tensile property, adhesive strength, and deformation stability.

Key words: Radon shielding, EVA emulsion, Radiation crosslinking, Adhesive strength, Silicone

1. 서 론

라돈(Rn)은 우라늄과 토륨이 자연 붕괴되는 과정에서 생성되는 천연 방사성 비활성 가스로 일상생활에서 지속적으로 발생하고 있으며, 인체에 흡입 시 폐 조직을 손상시켜 폐암을 유발하는 주요 원인 물질 중 하나이다[1]. 특히, 공기보다 밀도가 높고 무색, 무취, 무미의 성질을 가지고 있어서 인간의 감각기관으로 감지가 불가능하기 때문에 인체 건강에 치명적인 방사성 발암물질이다[2,3]. 따라서 토양이나 건축자재 등에서 발생한 라돈이 건물의 바닥, 벽면의 미세한 균열이나 틈새를 통해 실내로 유입되는 것을 원천적으로 차단할 필요가 있다[4,5].

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry
***Corresponding author.** Jong-Seok Park
Tel. +82-63-570-3067 Fax. +82-63-570-3079 E-mail. jspark75@kaeri.re.kr
Received 26 October 2023 **Revised** 29 November 2023 **Accepted** 8 December 2023

Ethylene vinyl acetate (EVA) 에멀젼은 내수성, 내약품성, 유연성 및 비극성 소재와의 접착성이 우수하여 건축용 도장재료로 많이 사용되고 있다[6]. EVA는 비닐 아세테이트 단량체(VA)와 에틸렌을 라디칼 중합하여 얻은 공중합 고분자 에멀젼이며 태양 전지, 타이어 및 케이블 피복재 등 광범위한 분야에서 사용되는 유용한 고분자 중 하나이다[7-10]. 또한 기존 석유화학 제품과는 다르게 휘발성유기화합물(VOCs), 내분비 교란물질(환경호르몬) 등의 발생이 적고 독성이 없는 친환경소재이다[11,12].

일반적으로 EVA와 같은 폴리올레핀을 가교시키면 분자 사슬이 서로 연결되어 가교형 분자구조를 형성하여 기계적, 열적 특성이 향상되며 분자 사슬의 운동을 제한하여 점성이 증가한다[13,14]. EVA와 같은 폴리올레핀을 가교하는 방법으로는 화학적 가교법과 방사선 가교법이 있는데, 화학적 가교법은 과산화물 가교제를 이용하여 고온, 고압의 조건에서 교반하여 가교구조를 형성하는 방법으로 공정이 복잡하고 미반응된 독성의 가교재가 잔류하는 등의 문제점이 있다[15-17]. 반면에 방사선을 이용한 가교법은 가교제 사용 없이 상온에서 고에너지의 방사선 조사만으로 가교구조를 형성할 수 있어서 공정이 간단하고 친환경적인 장점을 가지고 있다[18,19].

Silicone 도료는 규소(Si)와 산소(O)가 상호 연결된 siloxane 결합을 골격으로 하여 높은 온도와 낮은 온도에서도 형태 변형 없이 안정된 상태를 유지하며, 분자 사슬에 이중결합이 없어서 내후성, 내산화성이 우수하여 기존 유기계 소재의 단점을 보완할 수 있다[20-23]. 또한, 고무와 같은 탄성을 가지고 있어서 건축물의 외관을 보호하는 도료로 각광받고 있다[24].

본 연구에서는 EVA/silicone 에멀젼에 전자선을 조사하여 우수한 기계적, 열적 특성과 건물의 지반이나 콘크리트 건물과 건축자재로부터 실내로 나오는 방사성 라돈가스를 효율적으로 차단할 수 있는 도막을 준비하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 재료

본 연구에 사용된 EVA 에멀젼은 VINNAPAS® 546 ND (WACKER Co., Germany, Munich)를 사용하였다. 사용된 EVA 에멀젼은 고형분 함량이 54~56%이고 pH가 4.0~6.0이며 약산성이다. Silicone은 (HA690A, polydimethylsiloxan)을 TMB Co., (Chilgok, Korea)에서 구매하여 사용하였다. 계면활성제 sodium dodecyl sulfate (SDS)는 Sigma-Aldrich (St. Louis, USA) 제품을 사용하였다.

2.2. 복합 에멀젼 및 도막 제조

EVA 에멀젼 78 wt%, silicone 20 wt%, 계면활성제 SDS를 2 wt%를 centrifugal mixer (ARE-310, Thinky Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 교반하였다. 제조된 용액은 2.5 MeV 전자선 가속기 (2.5 MeV, UELV-10-105, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup, Korea)를 이용하여 1~10 kGy로 공기 분위기에서 전자선을 조사하였다. 전자선 조사 후 용액을 두께 0.1 cm 크기의 glass frame을 이용하여 casting 방법으로 도막을 제조하였다.

2.3. 특성 분석

2.3.1. 에멀젼의 점도 측정

에멀젼의 점도를 측정하기 위해 BROOKFIELD사의 LVDV-IT+ Digital viscometer 장비를 이용하여 점도를 측정하였다.

2.3.2. FT-IR 측정

시료의 화학적 구조 분석은 FT-IR (Bruker, Texer 37, Germany)을 이용하여 감쇠전반사(ATR)법으로 스캔수 256회, 4,000~700 cm^{-1} 파장대의 스펙트럼을 얻었다.

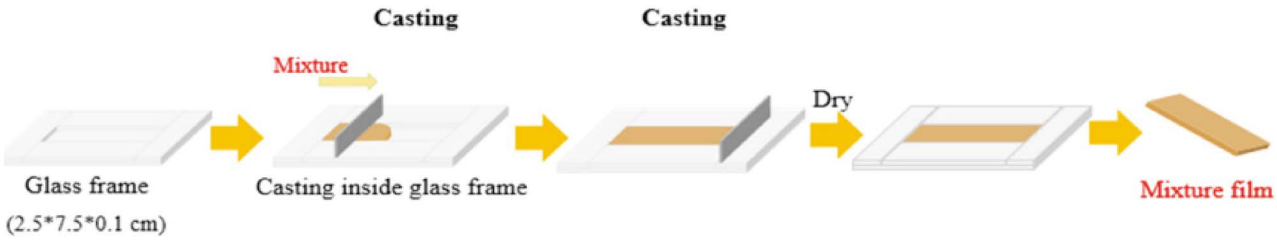


Fig. 1. Preparation of coating film by casting method of EVA/silicone emulsion.

Table 1. The condition of accelerated weathering test

Exposure period	Radiation amount		Black panel temperature	Chamber temperature	Relative humidity
	Wideband (300~400 nm)	Narrowband (340 nm)			
	$W\,m^{-2}$	$W\,m^{-2}\,nm^{-1}$	°C	°C	%
102 min dry	60 ± 2	0.51 ± 0.02	63 ± 3	38 ± 3	50 ± 10
18 min moisture spray	60 ± 2	0.51 ± 0.02	–	–	–

2.3.3. 부착강도 측정

도막의 부착강도 측정을 위해 사용되는 에폭시 접착제 경화 온도는 23 ± 2°C, 습도 50 ± 5°C로 4일 동안 건조하였다. 수지(resin)와 경화제(hardener) 혼합비율을 1 : 1 (무게비)로 혼합하여 도포하였으며, 수동가압식 부착력 측정기를 사용하여 시험속도는 1 MPa s^{-1}로 부착강도를 측정하였다.

2.3.4. 도막의 인장강도

도막의 인장강도를 확인하기 위해 만능시험기(UTM)를 이용하여 측정하였다. 시료는 ASTM D638 규격에 따라 제작하였으며, 100 kN의 로드범위와 50 mm min^{-1}의 조건으로 측정하였다.

2.3.5. 도막의 열안정성 측정

도막의 고온 안정성을 확인하기 위해 철판 위에 가로 5 cm, 세로 5 cm, 높이 0.1 cm의 크기의 틀을 제조하고 casting 방법으로 도막을 제조하였다. 제조된 도막은 60°C의 오븐에 24시간 동안 건조시켜 도막의 수축률을 평가하였다.

$$\text{열 수축률}(\%) = ((\text{가열 전의 길이} - \text{가열 후의 길이})/\text{가열 전의 길이}) \times 100$$

2.3.6. 열적 특성 평가

도막의 열적 특성은 thermogravimetric analyzer (TGA)를 사용하여 측정하였으며 각각의 샘플을 aluminum pan에 담지한 후 질소 상태에서 50°C에서 600°C까지 10°C min^{-1}의 조건으로 측정하였다.

2.3.7. 내후성 평가

필름의 촉진 내후성 실험은 12,000 W Xenon Arc lamp를 이용하여 KS M ISO 16474-2: 2013 규격에 따라서 300시간 동안 Table 1의 조건으로 4회 반복하여 진행하였다.

2.3.8. 라돈 차단율 평가

라돈 차단 성능 평가를 위해 22 L 진공 챔버에 라돈 농도 측정장치 라돈아이(Radon Eye Plus 2)와 라돈 발생량이 많다고 알려진 A시 광산의 토양을 오븐에 건조하여 사용하였다. 백색 메디아 병에 라돈 방출 농도가 높은 흙을 20 g씩 넣어 라돈 발생원으로 사용하였다. 지름 5 mm 크기의 원형 구멍을 갖는 메디아병 뚜껑에 라돈 차단용 소재로 코팅 후 24시간 동안 자연 건조하였다. 건조가 완료된 각각의 메디아병을 라돈 측정장치(Radon eye plus 2)가 장착된 소형 아크릴 챔버에 넣은 후 가스 누출 여부 검사를 통해 완전히 밀폐된 상태를 확인하여 시간별로 라돈 차단율을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 전자선 조사선량에 따른 EVA/silicone의 FT-IR 결과를 나타냈다. EVA의 carbonyl group (C = O stretching) 피크가 1,730 cm^{-1}에서 관찰되었으며, 전자선 선량에 따라서 peak intensity와 파장의 변화는 나타나지 않았다. 또한, EVA의 -CH2, -CH3 bending vibrations peak가 1,457 cm^{-1}과 1,376 cm^{-1} 파장에서 관찰되었으며, -CH stretching vibration peak가 2,800~3,000 cm^{-1}에서 관찰되었다. Silicone의 Si-O stretching peak는 1,050 cm^{-1}에서 관찰되었다.

건물의 바닥이나 벽면 등에서 유입되는 라돈을 효과적으로 차단하기 위해서는 도막의 들뜸 현상 없이 건축자재와 우수한 계면 접착력이 필수적이다. EVA/silicone 에멀

젼을 모타르판에 casting 방법으로 도막을 제조한 후, 2액형 에폭시 수지 접착제를 돌리에 코팅하였다. 수지(resin)와 경화제(hardener)는 1 : 1 (무게비)로 혼합하여 도포하였으며, 온도 23±2°C, 습도 50±5% 조건으로 4일 동안 건조하여 경화시켰고, 시험속도는 1 MPa s^{-1}로 부착강도를 측정하였다(Fig. 3(a)). 전자선이 조사되지 않은 시료의 부착강도는 약 3.2 MPa 정도를 나타냈으며, 1 kGy 조사된 시료는 약 3.5 MPa을 나타냈다. 또한 3 kGy 조사된 시료는 약 4 MPa의 부착강도를 나타내어 전자선 조사 선량에 따라서 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 3(b)). Fig. 3(c)는 전자선 조사선량에 따른 EVA/silicone 에멀젼의 점성을 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 전자선 선량이 증가할수록 에멀젼의 점성이 증가하는 경향을 나타냈다. 이의 결과는 전자선 조사에 의하여 EVA 분자 사슬의 부분 가교구조 형성으로 마찰력이 증가하여 에멀젼의 점도가 증가한 것으로 사료된다. 이는 전자선 조사에 의한 EVA 분자 사슬에 불용성 액체 비율이 증가하였으며, 불용성 액체가 분산상과 연속상 사이에 움직이는데 필요한 에너지가 증가하여 부착강도가 증가한 것으로 사료된다[25].

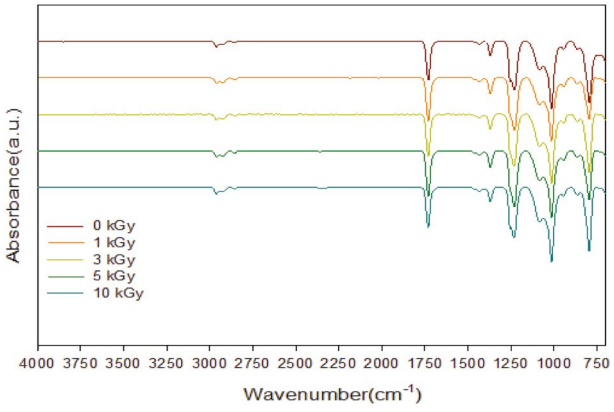


Fig. 2. FT-IR peaks of EVA/silicone with radiation dose.

EVA/silicon 도막의 인장특성을 측정하기 위하여 EVA/silicon 에멀젼을 전자선 가속기로 1~5 kGy 조사 후 casting 방법으로 도막을 제조하였다. 각각의 선량으로 조사된 에멀젼을 가로 10 cm, 세로 5 cm, 두께 0.15 mm의 틀을 이용하여 casting 방법으로 인장 특성 평가용 시편을 제작하였으며, UTM을 이용하여 50 mm min^{-1}의 속도로 인장특성을 평가하였다(Fig. 4(a)). 전자선이 조사되지 않은 시료(0 kGy)의 인장강도는 약 1.7 MPa, 5 kGy 조사된 시료는 약 1.8 MPa을 나타내어 전자선 선량이 증가함에 따라서 인장

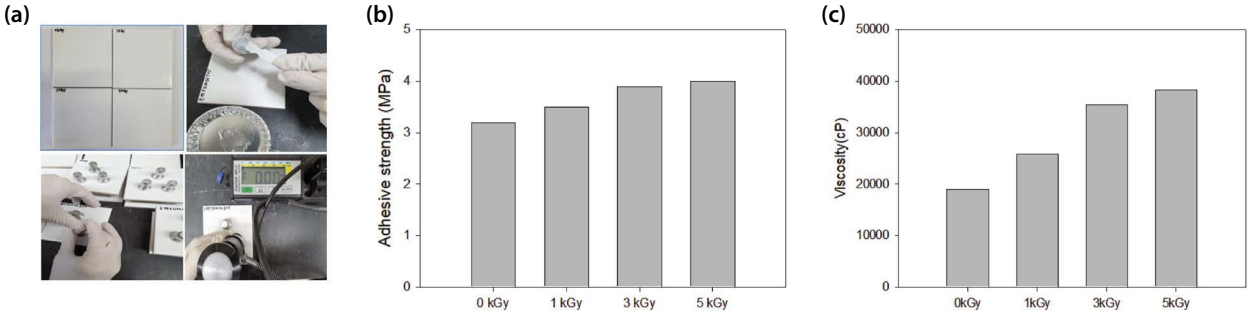


Fig. 3. (a) Image for adhesive property evaluation and (b) adhesive strength of EVA/silicone film, and (c) viscosity of EVA/silicone emulsion with radiation dose.

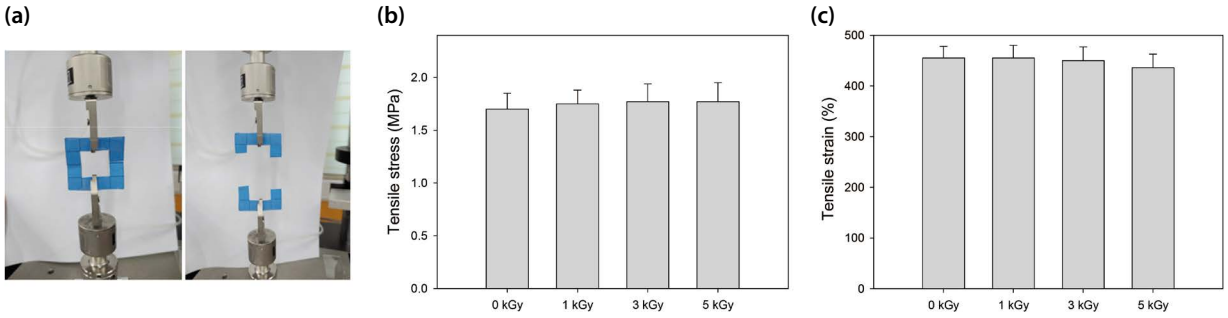


Fig. 4. (a) Image for tensile property evaluation and (b) tensile strength, and (c) tensile strain of EVA/silicone film with radiation dose.

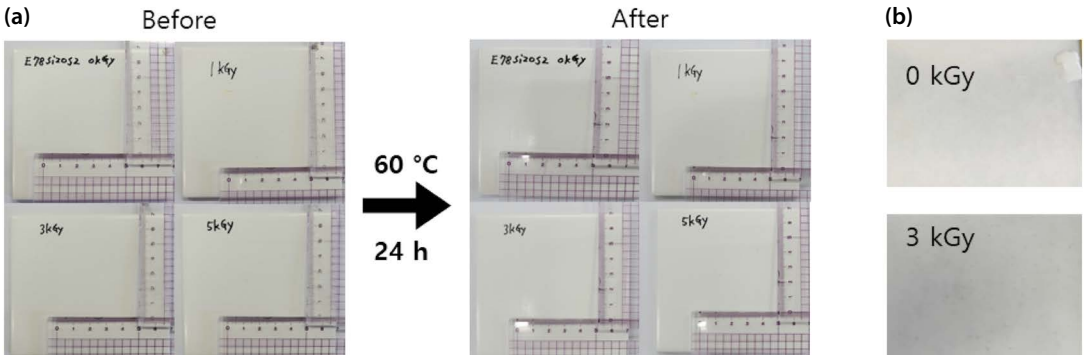
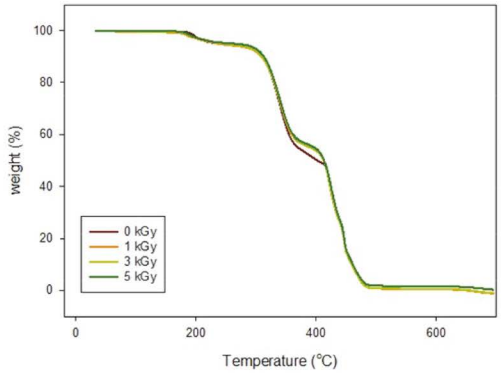


Fig. 5. (a) Thermal shrinkage at 60°C for 24 hr and (b) accelerated weathering test of EVA/silicone film with radiation dose.



	T 40% (℃)	T 50% (℃)
0 kGy	354	401
1 kGy	356	412
3 kGy	359	412
5 kGy	361	413

Fig. 6. TGA curves of EVA/silicone film with radiation dose.

강도는 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4(b)). 반면에 전자선이 조사되지 않은 시료(0 kGy)의 연신율은 약 450%, 5 kGy 조사된 시료는 약 430%를 나타내어 전자선 선량이 증가함에 따라서 인장 연신율은 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4(c)). 이의 결과는 전자선 조사에 의하여 부분 가교구조 형성으로 강도가 증가하였으나, 분자 사슬의 운동성을 제한하여 연신율은 감소된 것으로 사료된다.

건물의 바닥이나 벽면 등에 부착된 도막은 외부의 환경, 특히 실내에서는 열에 의한 뒤틀림이나 수축 현상과 같은 변형 없이 안정된 형태를 유지해야 실내로 유입되는 라돈을 효과적으로 차단할 수 있다. 도막의 열에 의한 형태학적 안정성을 확인하기 위해 철판 위에 가로 5 cm, 세로 5 cm, 두께 0.1 cm의 크기의 틀을 제조하고 casting하여 도막을 제조하였다. 제조된 도막은 60°C의 오븐에 24시간 동안 건조시켜 도막의 수축률을 평가하였다. 모든 시료에서 0.01% 미만의 수축률을 나타내어 60°C의 고온에서 안정한 형태를 유지하였다(Fig. 5(a)). 이의 결과는 siloxane 결합을 골격으로 가지고 있는 silicone의 우수한 내열성에 기인한 것으로 사료된다.

EVA/silicon 도막의 촉진 내후성 실험은 KS M ISO 16474-2: 2013 규격으로 12,000 W의 Xenon Arc lamp를 이용하여, 102분 건조 후 18분 수분 분무를 4번 반복하면서 300시간 동안 수행하였다. 전자선을 조사하지 않은 시료(0 kGy)의 경우 외관의 부풀음 현상 등이 관찰되었으나, 3 kGy 조사한 시료에서는 갈라짐, 부풀음과 같은 형태적 변형이 발생하지 않았다(Fig. 5(b)).

전자선 조사선량에 따른 EVA/silicon 도막의 열분해 특성을 측정하였다(Fig. 6). EVA/silicone 도막의 열분해 곡선은 350°C 부근에서 EVA의 VA 탈아세틸화 반응과 400°C 부근의 ethylene 열분해 반응이 진행되었다[19,26]. 전자선 조사선량이 증가함에 따라 VA의 분해가 시작되는 열중량 40% 감소온도, ethylene 분해가 시작되는 열중량 50% 감소온도가 증가하였다. 이의 결과는 전자선 조사에 의한 부분 가교구조 형성으로 EVA/silicon 도막의 열적 특성이 증가

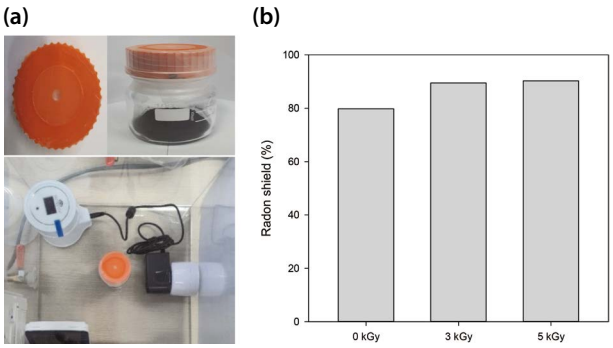


Fig. 7. Image for radon shielding evaluation, and (b) radon shielding rate of EVA/silicone film with radiation dose.

한 것으로 사료된다.

라돈 차단 성능 평가를 위해 22 L 챔버에 라돈 농도 측정 장치와 라돈 발생 토양을 오븐에 건조 후 용기에 담아 실험을 진행하였다. 라돈 챔버는 외부와 공기가 통하지 않도록 기밀 유지가 가능한 구조로 실험 시료의 2배 이상 해당되는 크기를 기준으로 라돈을 흡수 또는 흡착하지 않는 재질인 아크릴 재질을 사용하였다. 라돈 차단 성능 평가 시 사용할 용기를 선정하기 위해 유리병(메디아 병 100 mL)에 라돈 방출 농도가 높은 흙을 20 g씩 넣어 라돈 발생원으로 사용하였으며, 지름 5 mm 크기의 원형 구멍을 갖는 메디아병 뚜껑에 EVA/silicon 에멀젼을 코팅 후 7일 동안 라돈 차단율을 측정하였다(Fig. 7(a)). 전자선을 조사하지 않은 시료(0 kGy)는 약 75%의 라돈 차단율을 나타냈지만, 전자선 조사에 의한 EVA 분자 사슬에 가교구조 형성으로 도막의 형태학적 안정성이 증가하여 3, 5 kGy의 선량에서는 약 90% 이상의 라돈 차단율을 나타냈다(Fig. 7(b)).

4. 결 론

건물의 바닥이나 벽면 등에 부착된 도막은 외부의 환경, 특히 실내에서는 열에 의한 뒤틀림이나 수축 현상과 같은 변형 없이 안정된 형태를 유지해야 실내로 유입되는 라돈을 효과적으로 차단할 수 있다.

본 연구에서는 전자선 가교 기술을 이용하여 우수한 기계적, 열적 특성과 건물의 지반이나 콘크리트 건물과 건축 자재로부터 실내로 나오는 방사성 라돈가스를 효율적으로 차단할 수 있는 EVA/silicone 에멀젼에 관한 연구를 진행하였다.

전자선 조사선량이 증가함에 따라서 EVA/silicone 에멀젼의 점도가 증가하였으며, 가교구조 형성으로 인해서 인장특성과 부착강도 또한 증가하였다. 또한, siloxane 결합을 골격으로 하는 silicone의 특성에 기인하여 60°C의 이상의 고온에서도 우수한 열안정성을 나타냈다. 전자선을 조사하지 않은 시료와 비교하여 전자선으로 3, 5 kGy 조사된 시료는 EVA 분자 사슬에 가교구조 형성으로 도막의 형태학적 안정성이 증가하여 약 90% 이상의 우수한 라돈 차단율을 나타냈다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 방사선안전소재 및 의학기술개발사업(방사선안전소재기술개발사업) (2019MC28A1058044)의 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim IS, Oh HS, Lee KH and Kim CG. 2018. Study of radon management in the environment impact assessment stage. *J. Environ. Impact Assess.* **27**(3):241-250. https://doi.org/10.14249/eia.2018.27.3.241.
2. Kulalı F, Günay O and Aközcan S. 2019. Determination of indoor radon levels at campuses of Üsküdar and Okan Universities. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **16**(9):5281-5284. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02369-5.
3. Al-Zoughool M and Krewski D. 2009. Health effects of radon: A review of the literature. *Int. J. Radiat. Biol.* **85**:57-69. https://doi.org/10.1080/09553000802635054.
4. Hassanvand H, Hassanvand MS, Birjandi M, Kamarehie B and Jafari A. 2018. Indoor radon measurement in dwellings of Khorramabad City. *Iranian J. Med. Phys.* **15**(1):19-27. https://doi.org/10.22038/ijmp.2017.24851.1252.
5. Park HC, Choi HS, Cho SY and Kim SH. 2014. Numerical study on indoor dispersion of radon emitted from building materials. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.* **36**(5):325-332. https://doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.5.325.
6. Hori N, Asai K and Takemura A. 2008. Effect of the ethylene/vinyl acetate ratio of ethylene-vinyl acetate emulsion on the curing behavior of an emulsion polymer isocyanate adhesive for wood. *J. Wood Sci.* **54**:294-299. https://doi.org/10.1007/s10086-008-0951-y.
7. Poljanšek I, Fabjan E, Burja K and Kukanja D. 2013. Emulsion

copolymerization of vinyl acetate-ethylene in high pressure reactor-characterization by inline FTIR spectroscopy. *Prog. Org. Coat.* **76**(12):798-1804. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.05.019.

8. Azizi S, David E, Fréchette MF, Nguyen-Tri P and Ouellet-Plamondon CM. 2018. Electrical and thermal conductivity of ethylene vinyl acetate composite with graphene and carbon black filler. *Polym. Test.* **72**:24-31. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.09.031.
9. Chitra, Sah D, Lodhi K, Kant C, Saini P and Kumar S. 2020. Structural composition and thermal stability of extracted EVA from silicon solar modules waste. *Sol. Energy* **211**(2020):74-81. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.039.
10. Mészáros L, Tábi T, Kovacs JG and Bárány T. 2008. The effect of EVA content on the processing parameters and the mechanical properties of LDPE/ground tire rubber blends. *Polym. Eng. Sci.* **48**(5):868-874. https://doi.org/10.1002/pen.21022.
11. Henderson AM. 1993. Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers: a general review. *IEEE Electr. Insul. Mag.* **9**(1):30-38. https://doi.org/10.1109/57.249923.
12. Rosdi MRH and Ariffin A. 2016. Evaluation of flow ability response in EVA emulsion preparation with different vinyl acetate percentage by intrinsic viscosity measurement. *Procedia Chem.* **19**(2016):455-461. https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.038.
13. Hirschl C, Biebl-Rydlo M, DeBiasio M, Muhleisen W, Neumaier L, Scherf W, Oreski G, Eder G, Chernev B, Schwab W and Kraft M. 2013. Determining the degree of crosslinking of ethylene vinyl acetate photovoltaic module encapsulants - A comparative study. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **116**(2013):203-218. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.022.
14. Zeng F, Guo X, Sun L, Xuelian H, Zeng Z and Liu Z. 2022. Non-isothermal crosslinking of ethylene vinyl acetate initiated by crosslinking agents: kinetic modelling. *RSC Adv.* **12**(2022):15623-15630. https://doi.org/10.1039/d2ra01994a.
15. Kaltenegger-Uray A, Rieß G, Lucyshyn T, Holzer C and Kern W. 2019. Physical Foaming and Crosslinking of Polyethylene with Modified Talcum. *Polymers* **11**(2019):1472. https://doi.org/10.3390/polym11091472.
16. Mbarek M, Abbassi F and Alimi K. 2016. The effect of cross-linking yield of PVK on the vibrational and emissive properties of new copolymer based on vinylcarbazole and phenylene-vinylene units. *J. Mol. Struct.* **1120**(2016):125-131. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.05.023.
17. Kazemi-Najafi S and Englund KR. 2013. Effect of Highly Degraded High-Density Polyethylene (HDPE) on Processing and Mechanical Properties of Wood Flour-HDPE Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* **129**(6):3404-3410. https://doi.org/10.1002/app.39021.
18. Jeong JO, Oh YH, Jeong SI and Park JS. 2022. Optimization of the Physical Properties of HDPE/PU Blends through Improved Compatibility and Electron Beam Crosslinking. *Polymers* **14**(2022):3607. https://doi.org/10.3390/polym14173607.
19. Shin JH, Kim DS, Kim HR, Park JS, Jeong S-I, 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**(3):181-189. https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.181.
20. Zhang Y, Zang C and Jiao Q. 2020. Thermal Stability and Mechanical Property of Vinyl-Functionalized Polyborosiloxane and Silicone Rubber. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1637**(1):012051. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1637/1/012051.
21. Han R, Li Y, Zhu Q and Niu K. 2022. Research on the preparation and thermal stability of silicone rubber composites: A review. *Compos. Pt. C-Open Access* **8**(2022):100249. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100249.
22. Park JS, Jeong JO, Kim YA, Jeong SI and Lim YB. 2020. Effect of the type and content of additives on the physical characterization of poly (acrylic acid)/silicone hydrogel prepared by electron-beam irradiation. *J. Radiat.* Ind. **14**(4):327-333. https://doi.org/10.23042/radin.2020.14.4.327.
23. Fuke CA, Mahanwar PA and Chowdhury SR. 2019. Modified ethylene-propylene-diene elastomer (EPDM)-contained silicone rubber/ethylene-propylene-diene elastomer (EPDM) blends: Effect of composition and electron beam crosslinking on mechanical, heat shrinkability, electrical, and morphological properties. *J. Appl. Polym. Sci.* **136**(29):47787. https://doi.org/10.1002/app.47787.
24. Fresneda M, Trujillo-Cayado LA, Carmen Garcia M, Alfaro-Rodriguez MC and Munoz J. 2020. Production of more sustainable emulsions formulated with eco-friendly materials. *J. Clean. Prod.* **243**(2020):118661. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118661.
25. Kim JI and Kim HD. 2014. Emulsion viscosity with oil polartity and interpretation by organic conceptual diagram. *J. Korean Oil Chem. Soc.* **31**(4):623-627. https://doi.org/10.12925/jkocs.2014.31.4.623.
26. Kim EH and Choi SS. 2015. Comparison of vinyl acetate contents of poly (ethylene-co-vinyl acetate) analyzed by IR, NMR, and TGA. *Elastom. Compos.* **50**(1):18-23. https://doi.org/10.7473/EC.2015.50.1.018.