Journal of Radiation Industry 14(3) : 219~226(2020)

전선 케이블의 전자선 조사에서 몬테칼로 코드를 이용한 선량 계산

노영창[1,*] · 표성환[1] · 강원구[1] · 정승태[1] · 김유리[1] · 김진규[1] · 박종석[2] · 강창무[1]

[1]이비테크㈜, [2]한국원자력연구원

Dose Measurement with Monte Carlo Codes in Irradiation of Electrical Cables by Electron Beam

Young-Chang Nho[1,*], Seong-hwan Pyo[1], Won-Gu Kang[1], Seung-tae Jung[1], Yu-ri Kim[1], Jin-Kyu Kim[1], Jong-Seok Park[2] and Chang M. Kang[1]

[1]*EB Tech Co., Ltd. 170-9, Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34028, Republic of Korea*
[2]*Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*

Abstract - The reason for crosslinking the insulation polymer in wire and cable by radiation is to improve their performance at elevated temperature, the chemical resistance, toughness, and abrasion resistance to slow crack growth. Radiation process quality depends not only on the dose level but also on homogeneity of the dose distribution in especially circular objects like cables which have different density in core and insulation part, respectively. It is important to optimize crosslinking processes to reduce the operation cost while sustaining adequate quality of the final product. The computer simulation method becomes a very effective tool for optimization process providing necessary information in short time and reducing cost in comparison with conventional approach based on experimental dosimetry. The availability of several Monte Carlo codes for electron and photon transport and the advances in the performances of computing systems, make possible to tackle quantitative dosimetry tasks by numerical simulation. With increased computing speed and decreasing hardware cost, it is expected that Monte Carlo based electron dose calculation algorithms will soon become available for routine electron beam dosimetry. The computer simulation of the dose distributions in electric cables was performed for various process parameters, namely level of electron beam energy, irradiation positions, and density of insulator of cable.

Key words : Radiation crosslinking, MCNP codes, Electron beam, Accelerator, Electric cable

서 론

일반적으로 전선은 도체(conducting wire)와 고분자 절연체로 구성되어 있고, 케이블은 도체와 절연체 외에 sheath로 구성되어 있는 경우가 많다. 절연체나 sheath의 구성 물질인 고분자를 가교하는 이유는 하중이 걸리는 상태에서 온도 상승시 절연체의 성능을 향상시키고자 하는 목적이 있다. 예를 들면 절연체를 가교함으로써 내열성, 강인성, 내마모성, 환경크랙 저항성(environmental stress crack resistance, ESCR) 및 slow crack resistance 등을 향상시킬 수 있다 (Sasaki *et al*. 1979; Ueno *et al*. 1991; Gheysari and Behjat *et al*. 2001; Martin *et al*. 2003; Makuuchi and Cheng 2012; Svoboda 2015).

* Corresponding author: Young-Chang Nho, Tel. +82-42-930-7503, Fax. +82-42-930-7500, E-mail. ycnho@eb-tech.com

고분자 절연체의 가교법으로는 과산화물, 실란 및 전자선, 3 종류로 분류된다. 최근에는 전자선가속기 가격이 낮아지고, 에너지가 높은 가속기(2.5 MeV)가 속속 도입되면서 굵은 케이블의 가교에도 전자선 가교법이 다수 활용되고 있다(Khonakdar *et al*. 1979; Spencer *et al*. 2003; Fabris *et al*. 2004).

전자선 가교법은 고분자와 첨가제가 압출기에서 우선 혼합되고, 이렇게 혼합된 조성물이 도체(conducting wire)의 절연체로 형성되며, 최종적으로 전자선가속기로 조사되어 고분자 절연체가 가교되는 프로세스이다. 전자선 가교하여 생산한 전선 케이블은 다른 가교법으로 제조한 제품보다 성능이 우수하고, 가교 공정이 신속한 특징이 있다.

전자선가속기의 선량률은 수 kGy·초$^{-1}$로 매우 높다. 직경이 작은 전선을 가교하기 위해서는 광폭의 스캔 빔에 여러 번 통과시키는데, 그 이유는 빔의 폭이 좁게 되면 가속기의 인출창을 과열시키고, 또한 국부적으로 과도한 전자빔을 전선/케이블에 조사하게 되어 온도가 상승하는 결과를 가져오기 때문이다. 처리 면적을 넓혀줌으로써 생산성 또한 향상된다.

고분자 절연체를 전자선 조사하면 수소와 같은 저 분자량 기체 부산물이 생성되며, 이것이 재킷을 통해 확산되지 않으면, 방출된 분자는 중합체와 도체 사이의 접착을 방해하여 전선/케이블의 기능성을 손상시킬 수 있다. 금속의 비열은 절연체인 고분자의 비열보다 훨씬 낮기 때문에 방사선 조사 결과로 생성된 열은 금속 도체에서 고분자 절연체로 전달되어 절연 손상을 가져올 수 있다. 일부 금속, 특히 구리는 산화 환원 반응에 매우 민감한 촉매이기 때문에 절연체와 접촉하여, 후속 라디칼 유도 공정을 촉진함으로써 산화 분해를 유발할 수 있기 때문에 전자빔의 파라미터를 제어하고 적절한 케이블 이송 시스템을 구축하여야 한다.

전자선을 이용하여 가교 전선을 제조할 때 전선 피복재(고분자 소재)의 흡수선량을 정확하고 신속하게 계산하면, 전선의 생산속도를 높일 수 있고, 신속한 품질관리가 가능하며, 또한 개발시간을 획기적으로 단축시킬 수 있다. 이런 이유로 전자선이용 전선/케이블 가공 시에 신속하고 정확한 선량측정기술이 점차 중요하게 되었다. 1970년대 Monte Carlo 개발 이래로 Monte Carlo 기술은 상당한 정도의 정확성을 보이고 있고, 최근 컴퓨터 과학의 발전에 따라 일반 선량계의 대안 기술로 자리잡고 있다. 그러나 전자선가속기를 이용한 전선/케이블 가교공정에서는 전자선가속기의 모델이 각각 다르고, 케이블 handling system이 복잡하여 간단치 않다. 더욱이 다양한 종류의 케이블을 처리하여야 하기 때문에 기하학적 형태에 적합한 tool이 필요하다. 일반 선량계 대신에 Monte Carlo 시뮬레이션을 전선/케이블 가교 공정에 적용하여 선량측정을 하는 경우, 수 분에서 수 시간 안에 선량측정이 가능하기 때문에 비용 절감이 가능하고, 전자선가속기를 효율적으로 운영할 수 있으며, 생산성을 높일 수 있다. 앞으로 Monte Carlo 선량측정 알고리즘은 일상적인 선량측정 방법으로 자리잡을 것이다(Kaluskab *et al*. 2007; Zimek *et al*. 2012; Mangiacapra *et al*. 2013; Zimek *et al*. 2014; Kosaentor *et al*. 2017).

본 연구에서는 도체 코아(core)로 구리를 사용하고, 절연체로 폴리에틸렌이 사용된 전선 케이블에 대해 가속에너지, 투과 깊이별 에너지 흡수(energy deposition), 절연체의 밀도(첨가제 종류 및 함량에 의한 차이) 변화에 따른 에너지 흡수 분포 및 다면 조사(multi-phase irradiation) 방식에 따른 흡수선량 분포를 계산하였다.

재료 및 방법

1. 전자가속기 및 케이블 시료

폴리에틸렌 시트에 대한 전자선가속기의 에너지별 투과 깊이를 평가하기 위해 500 KeV, 1 MeV, 5 MeV 가속기를 선택하였다.

MCNP 시뮬레이션을 위해 사용한 전선 케이블(HFIX)의 형태는 코아(구리)와 절연체로 구성된 것으로, 코아의 직경은 2.0 mm였고, 절연체는 폴리에틸렌으로 두께는 0.7 mm, 전선 케이블 직경은 3.4 mm였다(Fig. 1). 폴리에틸렌의 밀도는 0.94 g·cm^{-3}이나 실제 절연체에 무기물이 첨가되어 있어서 절연체의 실제 밀도는 1.3 g·cm^{-3}였다.

2. MCNP simulator 구성

전선 케이블 선량측정을 위한 MCNP Simulator는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 PRE, MCNP, POST, MONITOR의 네 모듈로 구성하였다. PRE와 POST 모듈은 Fortran을 사

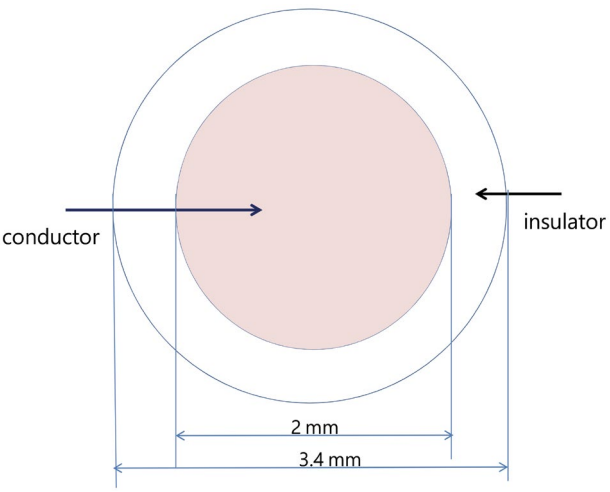

Fig. 1. Structure of a cable used in this experiment.

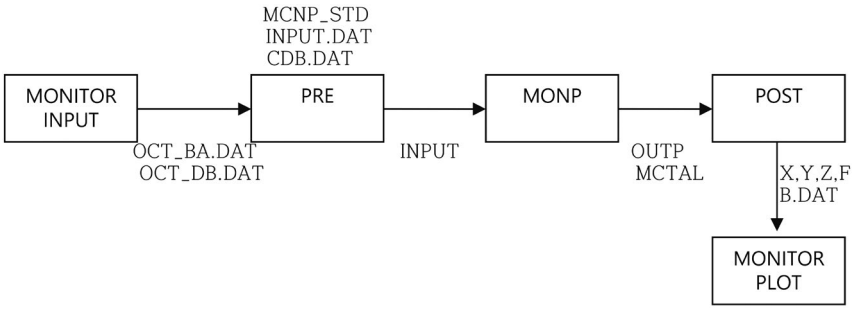

Fig. 2. MCNP simulator.

용하며 프로그래밍하고, MONITOR 모듈은 GNU Octave (Version 4.4)를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 전자선 에너지의 투과 깊이

전자선가속기는 에너지에 따라 사용 영역이 구분되는데, 80 keV~120 keV 사이의 전자 에너지는 잉크 경화, 매우 얇은 필름의 가교 또는 표면 살균에 주로 사용된다. 200 keV~400 keV 사이의 전자 에너지는 작은 전선 및 두꺼운 필름을 가교하는 데 이용된다. 500 keV~5 MeV 사이의 전자 에너지는 두꺼운 케이블, 튜브 및 파이프의 가교, 환경 응용 분야에 적용되고, 또한 두께가 크지 않은 의료품의 멸균에 사용된다. 5 MeV~25 MeV 영역의 에너지는 산업 응용 분야에서 고 에너지 가속기로 분류하며, 의료기기, 식품 멸균에 사용되는 대부분의 산업용 기계는 ISO 11137-1 (2006)에 의해 요구되는 방사능의 유도를 피하기 위해 최대 에너지 10 MeV가 이용된다.

Fig. 3은 고분자 재료의 가교에 많이 사용되는 500 keV~5 MeV 사이의 전자 에너지 중에서 대표적인 500 keV, 1 MeV, 5 MeV 전자 에너지의 폴리에틸렌(밀도 0.94 g·cm^{-3})에 대한 투과 깊이를 시뮬레이션한 것이다. 500 keV 전자 에너지의 투과 깊이는 0.1 cm, 1 MeV 전자 에너지의 투과 깊이는 0.2 cm인 데 반하여, 5 MeV 전자 에너지는 1 cm 이상이 되는 것을 알 수 있다.

2. 케이블에 사용되는 절연체

전자선 가교용 절연체로 폴리에틸렌이 가장 많이 사용되는데, 이유는 가격이 저렴할 뿐만 아니라 전자선으로 가교하는데 상당이 유리하고, 화재 발생시 독성 물질이 가장 적게 발생하기 때문이다. 폴리에틸렌보다 유연성이 더욱더 요구되는 경우에는 폴리에틸렌에 ethylene-propylene copolymer (EPM), ethylene-propylene diene (EPDM)을 혼합하여 사용

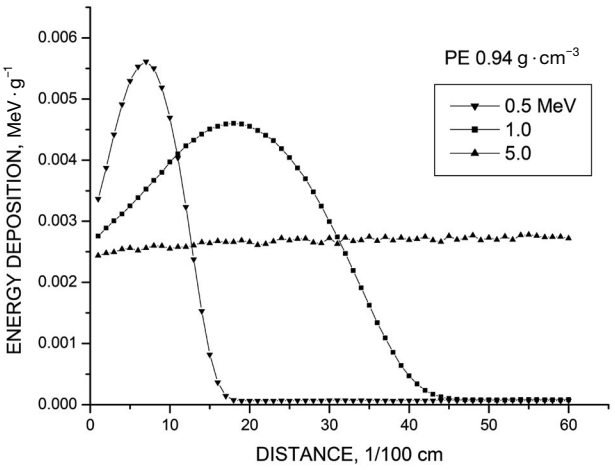

Fig. 3. Relation between electron beam energy and penetration depth.

한다. EPM이나 EPDM을 PE에 혼합하여 사용하면 ethylene vinyl acetate (EVA)나 ethylene acrylate를 PE에 혼합한 것보다 유전 특성이 우수하고 수분을 적게 흡수하는 특징이 있다. 하지만 케이블의 유연성을 높이기 위해서는 EVA를 첨가하는 경우가 많다(Zamore *et al*. 1999; Steven 2001; Iwasaki *et al*. 2017; Abe and Hosoda *et al*. 2018; Pleşa *et al*. 2018; Umit *et al*. 2018; Mizutani *et al*. 2019).

ETFE, PVDF, PVF (polyvinyl fluoride)와 같은 불소계 고분자도 특수 전선 케이블의 절연체로 이용되기도 한다. 이들 특징은 화학안정성, 열안정성, 가공성 등이 좋은 특징이 있지만 용융점 영역의 온도에서 기계적 성질이 낮고, creep, crack이 발생하는 경향이 있어서 전자선 가교를 통하여 기계적 성질과 crack resistance를 향상시킨다.

PVC는 전선 케이블의 절연체로 우수한 재료인데, 공기 중에서 조사하면 분해가 우선하기 때문에 가교제를 첨가하여 가교시키는 것이 일반적이다. 절연재료로 PVC를 사용할 경우, PVC 분자 중에 난연기능을 가진 염소를 내포하기 때문에 전선 케이블 재료로 각광을 받아 왔다. 최근에는 PVC 연소 시 유독가스인 염산가스가 발생하기 때문에 PVC의

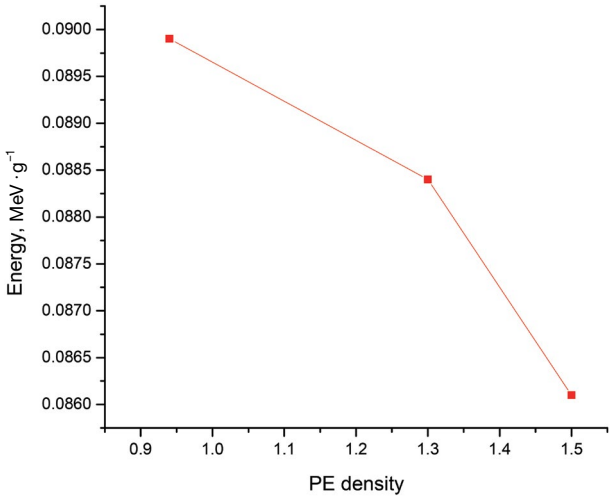

Fig. 4. Relationship between energy deposition and density of polyethylene-based insulator.

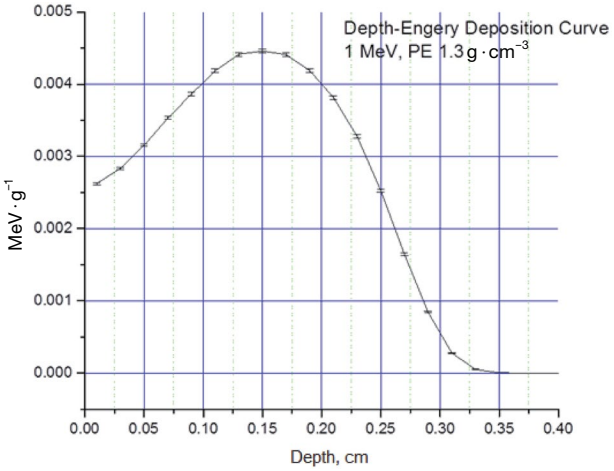

Fig. 5. Energy deposition (electron and photon) of polyethylene slab.

대체재료로 폴리에틸렌에 $Al(OH)_3$, $Mg(OH)_2$ 등의 할로겐 프리(halogen-free) 난연제를 첨가하여 사용한다. $Mg(OH)_2$의 분해온도가 1단계 폴리에틸렌의 열분해 온도와 거의 일치하기 때문에 폴리에틸렌의 난연제로 아주 효과적이다. 이 금속 수산화물은 물 방출에 의한 흡열 분해 후 응축 및 기상 모두에서 작용하여 물질의 온도와 주변 기상을 낮추고 연료 공급을 희석시킨다. 그러나 상기 언급한 무기물을 폴리에틸렌에 첨가하여 vertical flame test (UL VW-1 test)를 통과하기 위해서는 다량의 무기물을 첨가하여야 하는데, 다량의 무기물을 폴리에틸렌에 첨가하면 인장강도가 감소하여 UL 규격(인장강도 10.3 MPa 이상)을 충족할 수 없다. 인장강도와 난연 특성을 모두 만족하기 위해서는 폴리에틸렌과 $Mg(OH)_2$를 결합할 수 있는 반응성 실란 커플링제(silane coupling agent)를 사용한다(Hussain *et al*. 2006; Rong *et al*. 2006; Shokoohi *et al*. 2008; Kango *et al*. 2013).

전선 케이블 절연체로 폴리에틸렌을 사용할 경우($Al(OH)_3$, $Mg(OH)_2$) 등의 무기물을 첨가하여 사용하는데, ($Al(OH)_3$, $Mg(OH)_2$의 밀도는 각각 2.42 $g \cdot cm^{-3}$, 2.34 $g \cdot cm^{-3}$이며, 절연체로 일반적으로 사용되는 폴리에틸렌의 밀도(0.92~0.96 $g \cdot cm^{-3}$)보다 높다. 따라서 전선 케이블의 절연체 밀도는 각종 첨가제 종류와 함량에 따라 다르다. 본 연구에서는 절연체의 밀도 변화에 따라 전자빔의 투과 깊이를 알아 보았다. 절연체 기본 물질인 폴리에틸렌보다 밀도가 높은 무기물의 함량이 증가하면 배합한 절연체 밀도가 증가하여 투과도가 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 4).

3. 전선 케이블 위치별 흡수선량 분포

전자선 가공에 적용되는 수학적 모델에는 Monte Carlo, deterministic, semi-empirical, empirical model로 나뉘고, 전자선 처리에서 Monte Carlo transport codes가 방사선과 물질간의 상호작용에 대한 물리학을 기반으로 각 입자의 궤적(tracks)을 모사하기 때문에 보편적으로 사용된다. 전자나 양자와 같은 입자가 물질 내에서 에너지를 잃어버리는 것을 흡수선량으로 표현하는데, 오늘날 몇 개의 Monte Carlo 프로그램이 산업적으로 이용되고 있다. 예로 EGS, Generation & tracking (GEANT), Integrated Tiger System (ITS), Monte Carlo n-particle (MCNP) 등이 있는데, 이들은 국가기관이나 국제기구가 보급하고 있다.

수학적 모델링기술이 산업적 방사선가공 분야에서 활용되고 있는 배경은 여러 가지가 있는데, 무엇보다도 과학을 기반으로 만들어졌고, 방사선치료나 우주선과 같은 분야에서 성공적으로 활용된 결과로 볼 수 있다. 게다가 Monte Carlo codes는 개인용 컴퓨터를 활용할 수 있고, 필요한 하드웨어가 부담스러운 가격이 아니고, 기본적인 문제를 위해서 처리속도는 충분하다. 1970년대 이후 Monte Carlo (MC)기술이 개발된 이후, 컴퓨터 기술 발전 덕분에 정기적으로 수행하는 선량측정의 대안으로 자리잡고 있다. MC 시뮬레이션은 수 분에서 수 시간 내에 정확한 계산이 가능하기 때문에 실험적 선량측정보다 시간과 비용 면에서 유리하고 모든 가속기 시설에 최적화가 가능하다. 가속기를 가장 효율적으로 운영할 수 있으며, 처리물량을 향상시킬 수 있고, 케이블에 대한 전자선 조사 공정의 정밀성을 향상시킬 수 있다.

전자의 투과 깊이는 피조사물의 재질이 같다면 전자선가속기의 가속전압이 높은 만큼 투과 깊이가 깊어지기 때문에 처리하려고 하는 재료의 두께가 두꺼우면 고전압 출력의 전자선 조사장치가 필요하다. 전자선의 투과 깊이와 흡수선량과의 관계를 depth-dose곡선이라고 부르는데, Fig. 5에서와 같이 피조사물의 표면 가까이에서는 흡수 에너지가 낮고, 어느 정도 깊은 곳에서 흡수 에너지가 최대가 되다가 점차

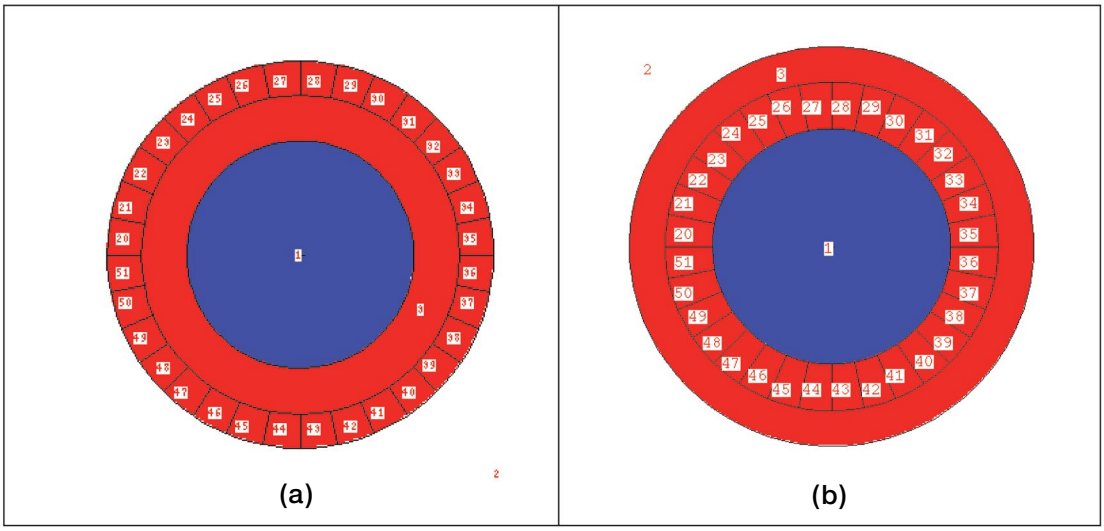

Fig. 6. Division of a cable into 2 sub-layers: (a) outer layer, (b) inner layer.

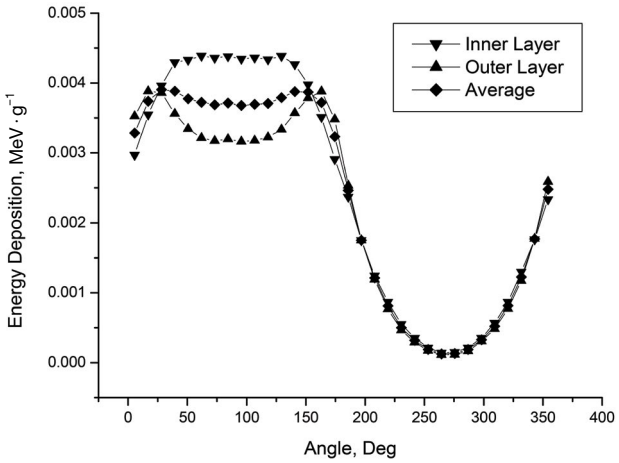

Fig. 7. Circumferential energy deposition in insulator which was divided into 2 sub-layers.

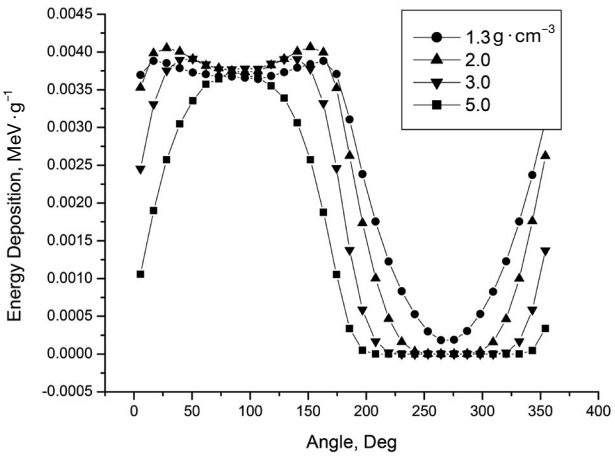

Fig. 8. Effect of density of insulator in a cable on energy deposition.

약화되어 더욱 깊은 곳에서는 선량이 급속도로 작아져서 피조사물의 개질이 충분히 행해질 수 없게 된다. 두께가 2 mm 이상에서 흡수 에너지가 급격이 감소되는 것을 볼 수 있다.

본 MCNP 시뮬레이션에 사용한 케이블은 코아로 구리를 사용하고, 절연체로 폴리에틸렌을 주성분으로 만든 컴파운드로 코팅하여 제조한 것이다(Fig. 1).

케이블 절연체 부분을 외층(outer layer)와 내층(inner layer)으로 나누어 외층과 내층의 에너지 흡수 변화를 계산하여 보았다(Figs. 6, 7). MCNP 시뮬레이션을 위해 사용한 전선 케이블(HFIX)의 폴리에틸렌 절연체 두께는 0.7 mm이기 때문에 외층과 내층을 같은 비율로 반분하면 두께가 각각 0.35 mm가 된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 1 MeV 전자빔의 경우, 에너지 흡수가 최대점이 되는 투과 깊이는 표면에서부터 약 1.5 mm에 위치하기 때문에 외층 절연체의 흡수 에너지는 내층 흡수 에너지보다 낮다.

절연체의 밀도(1.3, 2, 3, 5 g·cm^{-3})를 각각 달리하여 각도별 흡수 에너지 분포를 계산하여 보았다(Fig. 8). 밀도가 높을수록 에너지가 흡수되는 각도 좁아지고, 반대로 밀도가 낮을수록 넓은 각도 범위에서 에너지가 흡수되는 것을 알 수 있다. 조사되는 원주 중심부로부터 좌우 측면으로 갈수록 단위무게당 투과 깊이가 깊어지기 때문에 밀도가 높을수록 에너지 흡수가 작아진다.

전선 케이블의 중심에 구리 코아가 위치해 있으나 구리 코아 위치에도 절연체로 구성되어 있다고 가정하여, 전체가 절연체로 구성되어 있는 것으로 가정한 것과 구리 코아가 있는 케이블의 에너지 흡수 분포를 도시하였다(Fig. 9). 구

Table 1. Energy deposition for a single sided irradiation of HFIX Cable

Node	MeV·g^{-1}	Error	Node	MeV·g^{-1}	Error
1	1.14234×10^{-4}	0.0171	17	4.33765×10^{-6}	0.0747
2	3.30993×10^{-4}	0.0103	18	1.09648×10^{-7}	0.0856
3	5.57050×10^{-4}	0.0081	19	1.09072×10^{-7}	0.1271
4	7.62199×10^{-4}	0.0071	20	1.06588×10^{-7}	0.1363
5	9.17989×10^{-4}	0.0065	21	9.95576×10^{-8}	0.1604
6	1.03536×10^{-3}	0.0062	22	8.49338×10^{-8}	0.1730
7	1.11622×10^{-3}	0.0060	23	9.40966×10^{-8}	0.1762
8	1.16500×10^{-3}	0.0059	24	1.19434×10^{-7}	0.2247
9	1.15893×10^{-3}	0.0059	25	8.81824×10^{-8}	0.1769
10	1.11301×10^{-3}	0.0060	26	8.31180×10^{-8}	0.1464
11	1.03744×10^{-3}	0.0062	27	8.78652×10^{-8}	0.1635
12	9.23945×10^{-4}	0.0065	28	8.98566×10^{-8}	0.2123
13	7.57280×10^{-4}	0.0071	29	8.73409×10^{-8}	0.1856
14	5.56111×10^{-4}	0.0081	30	1.06366×10^{-7}	0.1693
15	3.33464×10^{-4}	0.0103	31	1.62641×10^{-7}	0.1805
16	1.14777×10^{-4}	0.0171	32	4.39654×10^{-6}	0.0736

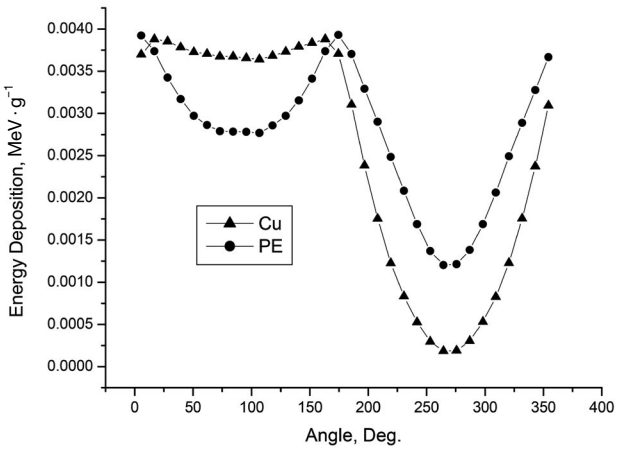

Fig. 9. Variation of energy deposition in a cable in case that Cu core was replaced by the same polyethylene material as insulator.

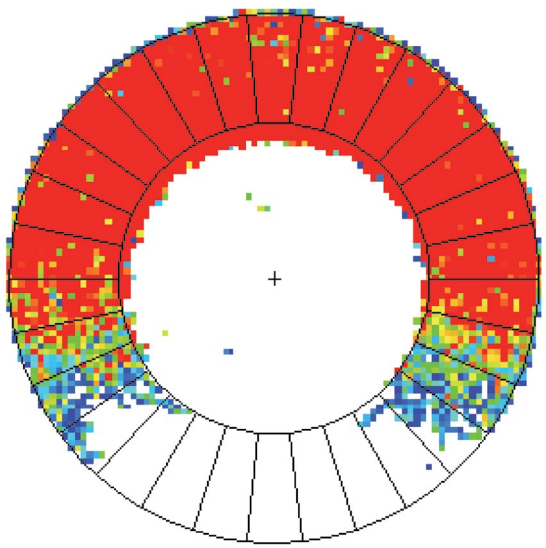

Fig. 10. Energy deposition plot for a single sided irradiation of HFIX Cable.

리 코아가 포함되어 있는 경우, 조사 전면부에서는 구리 코아가 있는 것이 에너지 흡수가 크고, 반대면에서는 구리 코아의 차폐 때문에 전체가 절연체로 구성되어 있다고 가정한 것이 에너지 흡수가 높았다. 코아가 있는 경우 전자의 반대 방향 산란으로 인하여 전면부의 에너지 흡수가 절연체의 경우보다 증가하였다.

케이블을 32개의 등각 cell로 구성하여 1 MeV에너지로 조사한 경우의 흡수 에너지 분포를 색깔로 구분하여 Fig. 10과 같이 도시하였다. 본 실험에서 사용된 전선 케이블의 직경은 3.4 mm이기 때문에 1 MeV 에너지의 투과 한계 때문에 상부에만 조사가 집중되었다(Table 1). 가속전압에 비해 피조사물의 두께가 상당히 두꺼울 경우에는 1면 조사하기 보다는 2, 4, 8, 16면으로 조사할수록 균일하게 조사되는 것을 알 수 있다(Fig. 11).

결 론

도체 코아(core)로 구리를 사용하고, 절연체로 폴리에틸렌이 사용된 전선 케이블에 대해 가속에너지, 투과 깊이별

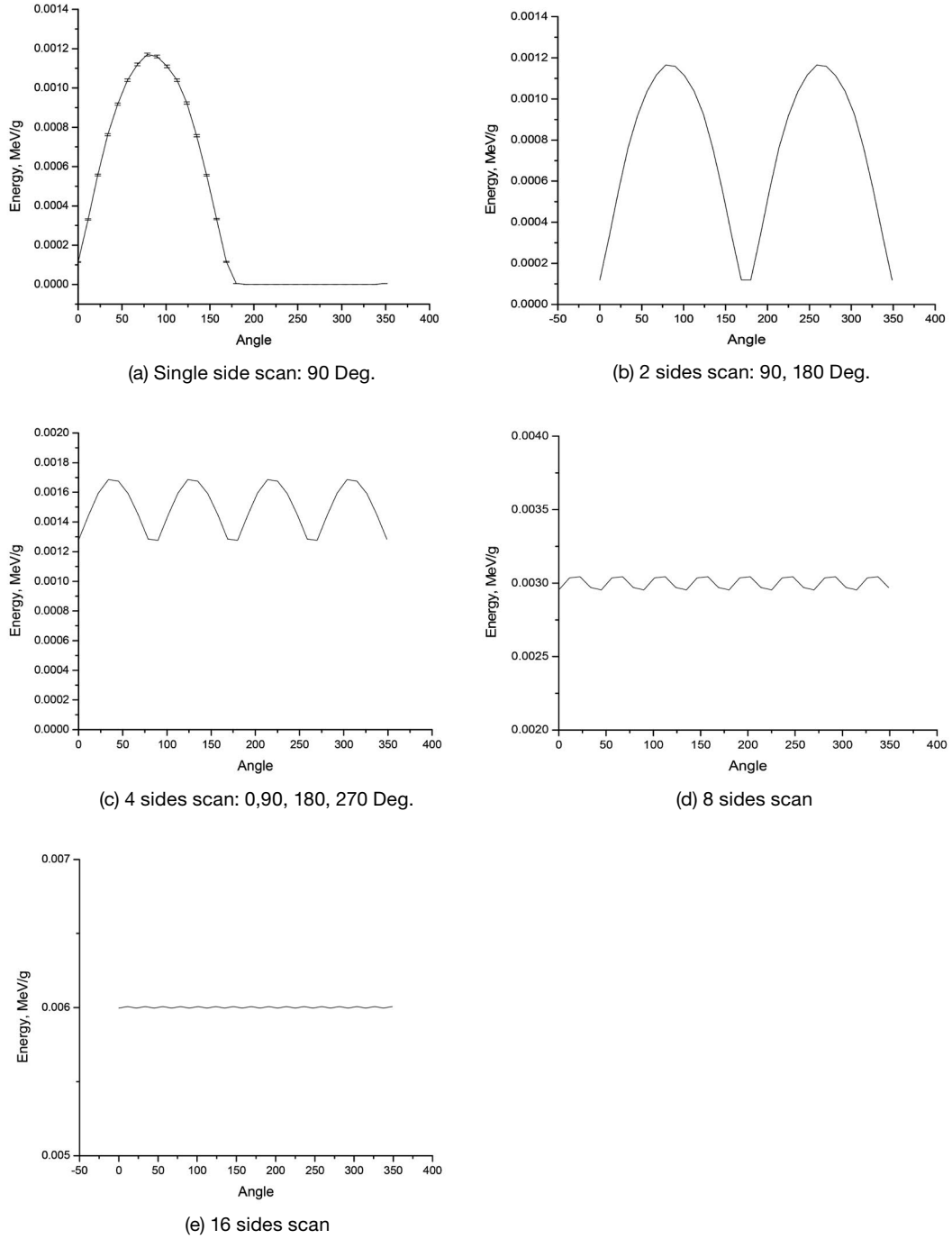

Fig. 11. Energy deposition distribution for single side (a), 2 side (b), 4 side (c), 8 side (d), and 16 side irradiation (e).

에너지 흡수(energy deposition), 절연체의 밀도(첨가제 종류 및 함량에 의한 차이) 변화에 따른 에너지 흡수 분포 및 다면 조사(multi-phase irradiation) 방식에 따른 흡수 에너지 분포를 계산하였다. 절연체의 밀도 변화에 따라 전자빔의 투과 깊이를 분석해 본 결과, 절연체 기본 물질인 폴리에틸렌보다 밀도가 증가하면 투과도가 감소하였다.

구리 코아(직경 2 mm), 절연체 두께 0.7 mm, 직경이 3.4 mm인 전선 케이블을 1 MeV에너지로 단면 조사하는 경우, 투과 깊이의 한계 때문에 상부에만 조사가 집중되었다. 가속전압에 비해 피조사물의 두께가 상당히 두꺼울 경우, 단면 조사보다는 2, 4, 8, 16면으로 조사할수록 균일하게 조사되는 것을 알 수 있었다. 산업적으로는 전선 케이블의 균일 조사를 위해 race track, figure of eight 등 여러 가지 형태의 조사 방법이 채택되고 있는데, 앞으로 MCNP 시뮬레이션을

통해 under beam 장치에 따른 흡수 에너지 분포를 해석하여 전자빔 조사 효율성을 높여나갈 계획이다.

사 사

본 연구의 일부는 과학기술정통부의 재원으로 방사선고부가신소재개발사업(NRF-2020M2D8A1045973)에 의해 수행되었으며, 그 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Abe M and Hosoda T. 2018. Method for producing electric wire, method for producing molded article, and method for producing resin material containing modified fluororesin. US Patent No. 10,144,792.

Fabris FW, Stedile FC, Mauler RS and Nachtigall SMB. 2004. Free radical modification of LDPE with vinyltriethoxysilane. *Eur. Polym. J.* **40**:1119-1126.

Gheysari D and Behjat A. 2001. Radiation crosslinking of LDPE and HDPE with 5 and 10 MeV electron beams. *Eur. Polym. J.* **37**:2011-2016.

Hussain F, Hojjati M, Okamoto M and Gorga RE. 2006. Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application. *An Overview. J. Compos. Mater.* **40**:1511-1575.

Iwasaki M, Kikuchi R and Hashimoto M. 2017. Crosslinkable halogen-free resin composition, crosslinked insulated wire and cable. US Patent No. 9,627,099.

Kaluskab I, Lazurika VT, Lazurika VM, Popova G, Rogova Y and Zimekb Z. 2007. The features of electron dose distributions in circular objects: Comparison of Monte Carlo calculation predictions with dosimetry. *Radiat. Phys. Chem.* **76**:1815-1819.

Kango S, Kalia S, Celli A, Njuguna J, Habibi Y and Kumar R. 2013. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites. *A review. Prog. Polym. Sci.* **38**:1232-1261.

Khonakdar HA, Morshedian J, Wagenknecht U and Jafari SH. 2003. An investigation of chemical crosslinking effect on properties of high density polyethylene. *Polymer.* **44**:4301-4309.

Kosaentor K, Kongmon E, Saisut J, Thongbai C and Rimjaem S. 2017. Monte Carlo simulation of electron beam system for natural rubber vulcanization. Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark. 4747-4749.

Makuuchi K and Cheng S."wire and cable", in radiation processing of polymer materials and its industrial applications. A John Wiley & Sons, Inc. Publication. 2012:147-153.

Mangiacapra L, Ciappa M, Stangoni M, Ott S and Fichtner W. 2013. A new process simulator for the optimization of electron beam crosslinking processes of polymers isolations in electrical cables. *Radiat. Phys. Chem.* **84**:119-125.

Martin CP, Vaughan AS and Sutton SJ. The thermomechanical behaviour of crosslinked polyethylene cable insulation material. In Proceedings of the Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Albuquerque, NM, USA, 19-22 October 2003:88-91.

Mizutani Y, Hashimoto D, Tsuruta S and Kuwahara M. 2019. Wiring harness and connector for electric and hybrid electric vehicles. *SEI Tech. Rev.* **88**:27-31.

Pleşa I, Noţingher PV, Stancu C, Wiesbrock F and Schlögl S. 2018. Polyethylene nanocomposites for power cable insulations. *Polymers.* **11**. 24:1-60.

Rong MZ, Zhang MQ and Ruan WH. 2006. Surface modification of nanoscale fillers for improving properties of polymer nanocomposites. *A review. Mater. Sci. Technol.* **22**:787-796.

Sasaki T, Hosoi F, Hagiwara M, Araki K, Saito E, Ishitani H and Uesugi K. 1979. Development of radiation crosslinking process for high voltage power cable. *Radiat. Phys. Chem.* **14**:821-830.

Shokoohi S, Arefazar A and Khosrokhavar R. 2008. Silane coupling agents in polymer-based reinforced composites. A review. *J. Reinf. Plast. Compos.* **27**:473-485.

Spencer M, Parent JS and Whitney RA. 2003. Composition distribution in poly (ethylene-graftvinyltrimethoxysilane). *Polymers.* **44**:2015-2023.

Steven W. 2001. Radiation curable and cable insulation composition. US Patent No. 6,326,422.

Svoboda P. 2015. Influence of branching density in ethylene-octene copolymers on electron beam crosslinkability. *Polymers.* **7**:2522-2534.

Ueno K, Uda I and Tada S. 1991. Radiation-crosslinked polyethylene for wire and cable applications. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. C Radiat. Phys. Chem.* **37**:89-91.

Umit G, Loeber GH and Brandewiede LJ. 2017. Crosslinkable thermoplastic polyurethane, US Patent No. 9,650,477.

Zamore A. 1999. Irradiation conversion of thermoplastic to thermoset polyurethane. US Patent No. 5,900,444.

Zimek Z, Przybytniak G and Nowicki A. 2012. Optimization of electron beam crosslinking of wire and cable insulation. *Radiat. Phys. Chem.* **81**:1398-1403.

Zimek Z, Przybytniak G, Nowicki A, Mirkowski K and Roman K. 2014. Optimization of electron beam crosslinking for cables. *Radiat. Phys. Chem.* **94**:161-165.

Received: 7 June 2020
Revised: 14 June 2020
Revision accepted: 21 July 2020