Journal of Radiation Industry 14(1) : 1~7(2020)

B3 선량계 기반 투과깊이선량 분포의 해석적 방법을 통한 10 MeV 전자가속기 공정의 균일성 평가

김신애[1,2] · 오세희[3] · 정윤선[2] · 정성린[1] · 이윤종[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]한양대학교 원자력공학과,
[3]조선대학교 원자력공학과

Evaluation of Uniformity of 10 MeV Electron Beam Processing through Analytical Method of Penetration Depth Distribution Based on B3 Dosimeter

Shin Ae Kim[1,2], Se-Hee Oh[3], Yoonsun Chung[2], Sung In Jeong[1] and Yunjong Lee[1,*]

[1]*Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 1266, Sinjeong-dong, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*
[2]*Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, Republic of Korea*
[3]*Department of Nuclear Engineering, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Republic of Korea*

Abstract - The demand for industrial using through accelerators is increasing. There are various methods to measure the absorbed dose of the sample irradiated with electron beam, but among these, a comparatively easy and simple method is used to evaluate the B3 film dosimeter developed by the Riso Institute of Denmark. Accordingly, the B3 dosimeter was used to check the Penetration Depth Distribution (PDD) for each medium and determine the optimal dose according to the experiment. After verifying the linearity of the dose according to the conveyor speed in order to secure the reliability of the results and confirm the stability of the operation, the experiment was conducted based on ISO / ASTTM 51649, which is known as a guideline for dose evaluation in the field of radiation processing. The PDD graph was respectively checked on the Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Acrylic, Polyvinyl chloride (PVC) and Aluminum plate with density of 0.722, 1.206, 1.289, 1.611, and 2.667 g·cm^{-3}. The optimal depth was reached at about 34 cm for low density materials and about 17 to 24 cm for high density. It was verified through experiments that it was dominant in density, but it was found that in the case of acrylic, about 5 cm of thickness was required to reach the optimum depth compared to PET with low density. Through this, in addition to physical factors such as density, the mechanism according to the binding state of the polymer material should be identified and will be studied in the future work.

Key words : Electron beam processing, Dosimetry, Film dosimeter, Penetration depth dose distribution, Measurement, Uniformity

* Corresponding author: Yunjong Lee, Tel. +82-63-570-3068,
Fax. +82-63-570-3259, E-mail. yjlee@kaeri.re.kr

서 론

선형가속기는 1928년 WiderÖe와 1931년 Lawrence and Sloan를 통해 개발되었으며(Lee *et al*. 2006; Chai 2012), 오래 전부터 의료 분야 중심으로 큰 발전을 이루었다. 최근에는 산업 및 연구 용도로 전자가속기의 역할이 주목을 받고 있다. 국내에는 전선, 타이어 가교, 그라프트와 같은 연구 용도(Choi *et al*. 2007)로 20여 대 이상이 사용되고 있으며 최근에는 0.2 MeV와 같은 저에너지 가속기를 이용한 대기 환경(Han and Kim 2003) 처리 분야에 관심이 높아지는 등 방사선을 이용한 신사업 연구개발에 보탬이 되고 있다.

이러한 산업용 전자가속기를 이용한 사업은 국내 기업 및 연구소에 위치하여 권역별 연구 인프라를 구축하여 성장하였으며 대표적으로 이비테크, 그린피아기술(주)이 수행해왔다(Byun and Yook 2003). 2018년 한국원자력연구원 첨단방사선연구소에 방사선 처리 공정이 가능한 전자가속기 시설이 완공되었으며 이는 연구실 규모에서 개발한 방사선 응용기술들을 산업화시킬 수 있는 실증 연구 기반이 되었다. 본 시설에 가동되고 있는 10 MeV의 전자가속기의 경우 너비 2 m, 길이 20 m의 대형 컨베이어가 탑재되어 있어 대형 물체가 방사선으로 처리가 가능하며 동일한 조건에서 여러 물체를 연속적으로 처리할 수 있게 되었다.

전자가속기에서 인출되는 빔을 확인하는 방법으로 실제 전자총에서 발생되는 전자의 개수를 측정하는 법(Lim *et al*. 2016)을 포함한 다양한 방법이 있지만 조사 서비스를 신청하는 이용자의 입장에서는 조사받은 샘플이 선량을 얼마나 받았는지에 대한 직관적 확인이 필요할 수 있다. 비교적 쉽고 간단한 방법으로 덴마크 리소 연구소에서 개발한 B3 필름선량계를 통해 방사선 가공 분야에서 선량평가를 시행하고 있다(Ha *et al*. 2010). 산업적 분야에서 전자선이 균일하게 조사되었는지 확인하는 방법으로 다양한 선량계를 이용했지만, 대표적으로 덴마크 리소 연구소에서 개발한 B3 선량계, 알라닌, 코닥에서 개발한 CTA 필름으로 행해져 왔다(Benny *et al*. 2013). 본 실험에서는 재질에 따른 깊이별 선량 분포와 직선성을 확인하기 위하여 B3 필름선량계를 사용하였다. 실험에 사용된 필름선량계는 2016년 서울방사선서비스(주)를 통해 교정을 받았기 때문에 선량을 최대로 받은 지점에서의 선량을 정규화시킨 후 Percent Depth Dose (PDD)로 나타내기 위해 100을 곱하여 경향을 확인하였다. 밀도가 각각 다른 대상 물질로 Polyethylene (PE), Polyethylene terephthalate (PET), Acrylic, Polyvinyl chloride (PVC), Aluminum plate로 각각 선정하여 선량 측면에서 각 재료별 특성을 알아보고 최대의 선량을 받는 지점까지 도달하기 위해 필요한 두께 및 선량을 고려하여, 양면조사 시 균일한 조사를 위해 선량 최적화에 대해 기초 연구를 진행하였다.

재료 및 방법

본 연구는 첨단방사선연구소 내 전자선 실증 연구동 건물에 설치된 10 MeV 전자선 가속기를 대상으로 수행되었다. 이 기기의 모델명은 MB10-30이고, 제작사는 캐나다 Mevex 사에서 제작되었고, 2018년 10월에 개관하였다. 전자빔 특성화 결과를 얻기 위해 ISO/ASTM 51649에 기술된 절차에 따라 성능검사를 완료하였다(Lee *et al*. 2019).

성능검사가 완료된 이후에도 균일한 방사선 공정을 유지하기 위해 선량 평가작업이 필요하다. 선량 평가는 공인된 절차인 ISO/ASTM 절차서에 따라 진행되며 본 논문은 매질의 깊이선량을 알아보기 위해 ISO/ASTM 51649를 기반으로 진행하였다. 방법은 동일한 크기, 밀도의 판을 약 25개 쌓아 올린 후, 전자선 조사 시 측정 대상의 중심에 B3 선량계를 고정시켜 컨베이어 중앙에 위치시켜 진행하는 적층 방법을 선택하여 진행하였다(ISO/ASTM 51649, 2015).

먼저 필름선량계는 덴마크 리소 연구소에서 제작한 B3 선량계를 이용하였다(Miller *et al*. 1988). B3 선량계는 PVB 재질의 필름선량계로 자외선이나 방사선을 쪼이면 투명했던 필름이 색깔이 변하여 보라색으로 변하게 되는데 이러한 색 감지에 의해 육안으로도 쉽게 방사선의 조사 유무를 확인할 수 있는 장점이 있다. B3 선량계를 이용하여 각 재질별 투과 깊이 특성을 파악하기 위한 재질은 전자선의 물리적 특성상 입사 에너지의 절반 정도 투과하지 못하는 점을 고려하여 밀도가 1과 비슷한 PE, PET, Acrylic, PVC, Al plate를 선택하였다. 실험에 사용된 재질의 밀도는 Table 1과 같다.

ISO/ASTM 51649에서 기술되어 있는 각 매질별 투과깊이선량분포 확인을 위한 방법에 따라 일정한 두께 및 면적의 판을 25개를 적층하였으며, 각 층의 선량을 각각 확인하기 위해 판과 판 사이 중앙에 B3 선량계를 위치시켰다.

1. 선량 선형성 확인

1.1 B3 선량계의 선량 반응곡선

먼저 본 실험에 앞서 성능검사(Performance Qualification: PQ)를 마친 전자가속기 제어 시스템에서 설정한 선량과 실제 조사된 선량 간 차이를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 아직 국내 B3 선량계에 대한 소급성이 체계적으로 구축되지 않아 서울방사선서비스에서 덴마크 리소 연구소에 직

Table 1. Density of material used in experiment

	PE	PET	Acrylic	PVC	Al
Density ($g \cdot cm^{-3}$)	0.9722	1.2056	1.2889	1.6111	2.6667

접 의뢰하여 교정받은 선량 환산 프로그램을 통해 검증하였다. GEX사의 P1020 10 MeV Electron beam calibration phantom을 이용하여 진행되었으며 조사하지 않은 투명한 B3 선량계를 투입하고 선량은 5, 10, 15, 20, 25 kGy로 설정하여 각 3회씩 조사하였다.

1.2 컨베이어 속도에 따른 선량 반응성 확인

전자선 조사 시 물질이 받는 흡수선량은 다음과 같이 표현된다 (ISO/ASTM 51649, 2015).

$$D = \frac{(K \times I)}{(V \times W_b)} \quad (1)$$

식 (1)에 의하면, D는 흡수선량, I는 평균 빔 전류, V는 컨베이어 속도, W_b는 빔 폭 그리고 K는 추세선 기울기를 나타낸다. 이 식을 바탕으로 컨베이어 속도(Conveyor Speed)와 $1/D$의 관계에서 선형성을 유지하는 것은 시설이 의도한대로 작동하고 주어진 전자선 에너지에서 변수를 적절하게 선택하여 선량을 조절할 수 있음을 의미하는 것이다. 컨베이어 속도를 각 3, 2, 1.5, 1.0, 0.5 $m \cdot min^{-1}$으로 설정한 후 선량계를 이용하여 UBC 속도에 따른 선량 반응성을 확인하였다.

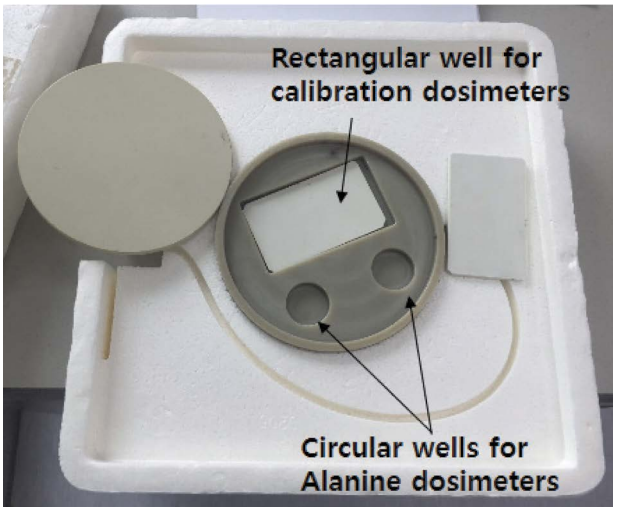

Fig. 1. Picture of 10 MeV calibration phantom allowing alanine dosimeters and thin-film routine dosimetry system dosimeters to be irradiated at the same position on the depth-dose curve.

2. 매질별 깊이선량 분포 확인

본 실험은 Fig. 2와 같이 적층하여 실험을 진행하였다. 각각 밀도가 다른 PE, PET, Acrylic, PVC, Al plate (크기, 두께, 밀도)를 25장씩 적층하여 선량 확인을 위하여 필름선량계를 각 층마다 데이터 신뢰성을 확보하기 위해 각각 두 장씩 놓고 각각 5, 10, 15, 20, 25 kGy 전자선 조사를 하였다.

전자선 조사는 Fig. 2와 같이 컨베이어 중앙에 위치하여 빔 인출 부위에 수직이 되도록 고정시키고 컨베이어 속도를 조절하여 각 선량을 조사하였다. Fig. 2에 나타나 있는 것처럼 두께 t만큼을 갖는 각각의 층이 모여 선량 분포를 확인할 수 있는 적절한 길이 이상의 총 두께 T가 확보되어야 하며 각 판의 면적 역시 측방 산란에 의한 영향을 피하기 위해 실용 비정의 3배 이상 큰 길이를 가져야 한다고 기술되어 있다. 또한 실험에 사용한 B3 선량계의 경우, 두께가 얇은 필름형태여서 선량계로 인해 추가로 발생되는 공간에 의한 선량 측정의 불확도를 배제할 수 있었다.

전자선을 포함한 방사선 및 자외선에 노출되면 투명한 필름이 보라색으로 변하는데 이때 분광 강도에 따라 명도가 다르게 나타난다. 조사된 방사선량에 비례한 B3 필름선량계의 판독은 Thermo사의 Genesys 2-Spectroscopy에 의해 측정하였다. 분광광도계로 얻은 선량 값은 Origin Pro 8.0

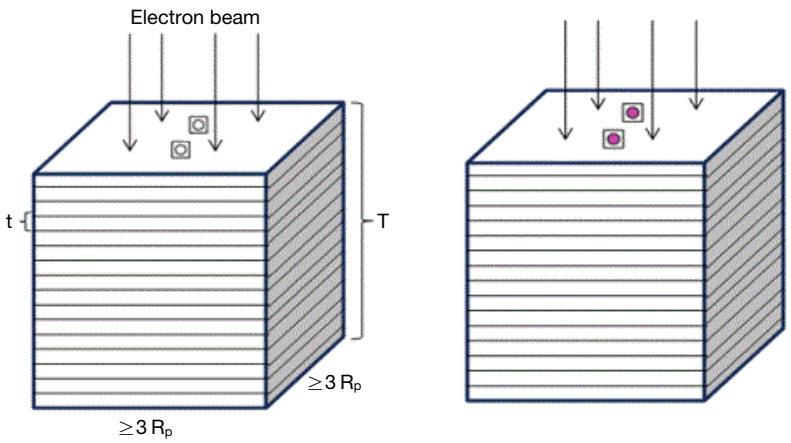

Fig. 2. Preparation for stack method described in the ISO/ASTM 51649 (t: Thickness of each layer, T: Total thickness of stacked plate, R_p: Range of practical).

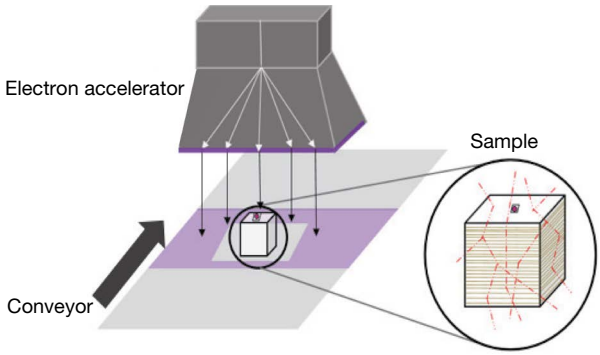

Fig. 3. Schematic diagram of measuring depth dose via electron beam.

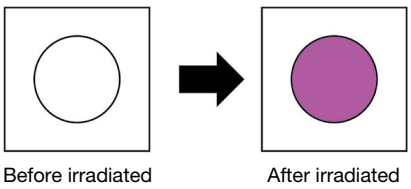

Fig. 4. A film dosimeter made of transparent PVB turns purple when irradiated.

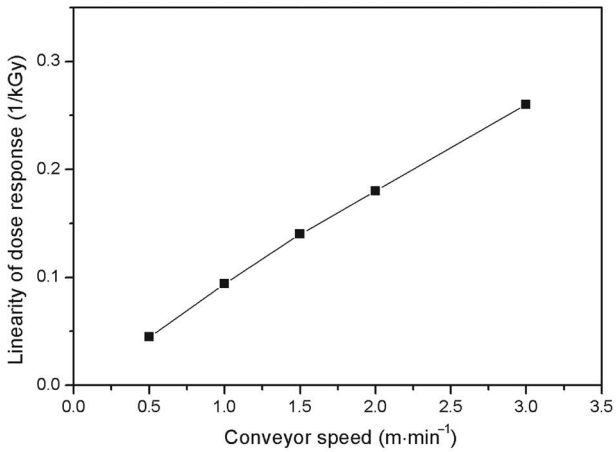

Fig. 5. Inverse function of dose to verify dose linearity according to conveyor speed.

Program을 이용하여 그래프로 표현하였다.

3. 양면조사 기준 각 재질별 최적 깊이 결정

실험을 진행한 각 재질별 R_{50}, R_{opt}, R_{max} 지점에서의 두께를 기준으로 양면조사 시, 물체가 받는 선량의 최대/최소 비율을 비교함으로써 양면조사에서의 각 재질별 최적 깊이를 결정하였다. 이를 통해 샘플의 균일한 흡수선량 확보를 위한 최적화가 이루어지게 된다. 이때 평가기준으로 사용한 R_{50}은 입사된 에너지의 절반을 잃을 때까지의 거리를 의미하고, R_{opt}, R_{max}는 각각 초기 입사한 선량과 동일한 선량을 받는 지점까지 도달하는 거리, 입사된 에너지를 모두 잃을 때까지의 거리를 의미한다.

Table 2. Deviation between the set dose value and the measured dose

Set dose [kGy]	Measured dose [kGy]	Difference [%]
5	4.97	−0.60
10	9.93	−0.70
15	15.40	2.67
20	20.03	0.15
25	24.93	−0.28

결과 및 고찰

1. 선량 선형성 확인

1.1 B3 선량계의 선량 반응곡선

Control Room에서 입력한 선량 설정값과 실제 선량 측정값 차이는 Table 2와 같이 계산되었으며, 그 결과 결정계수 R^2이 0.9994로 선형성을 잘 유지하고 있었으며 설정 및 실제 측정된 선량 차이 또한 2.67% 이하로 나타나 선량 직선성에 있어서 가속기 운용 안정성은 확보가 되어있음을 확인하였다.

1.2 컨베이어 속도에 따른 선량 반응성 확인

컨베이어 속도에 따른 선량이 일정하게 변동되는지 확인하기 위해 선량 5, 10, 15, 20, 25 kGy를 각각 3, 2, 1.5, 1.0, 0.5 $m \cdot min^{-1}$로 설정하였다. 이를 통해 얻은 결과를 선량 직선성 지표로 활용하기 위해 선량의 역수로 표현해보니 0.9976으로 컨베이어 속도에 따라 선량 값을 조절할 수 있음을 확인하였다.

2. 매질별 깊이선량 분포 확인

2.1 선량별 매질에 따른 투과깊이선량 분포 곡선

동일한 두께, 밀도를 가진 매질의 선량별 투과깊이선량 분포를 알아보고자 5, 10, 15, 20, 25 kGy를 조사하였다. 그 결과, 선량에 따른 선량 분포 곡선은 뚜렷한 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 선량에 대한 의존성보다 에너지 의존성이 더 크게 작용한 것으로 생각된다. 이를 통해 입사하는 방사선의 세기는 동일하고 방사선에 노출된 시간에 대해서만 변화하였기 때문에 크게 변동하지 않았음을 실험을 통해 검증하였다.

Fig. 6은 25장의 PE plate를 적층하여 선량계를 통해 얻은

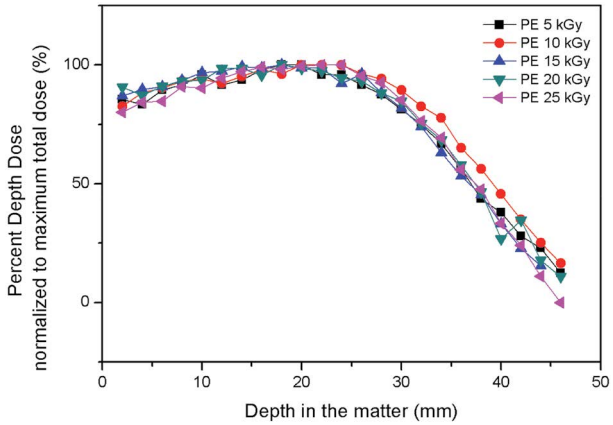

Fig. 6. PDD normalized to maximum total dose in polyethylene sheet.

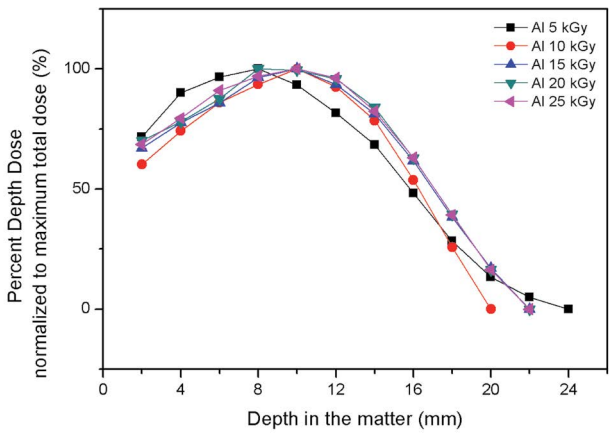

Fig. 7. PDD normalized to maximum total dose in aluminum sheet.

그래프이다. 초기 선량 지점에서 최대 선량 지점까지 도달하는 Build up region을 뚜렷하게 관찰하기 위해 최대 지점을 1로 두고 정규화시켜 PDD 그래프로 나타내기 위해 100 (%)을 곱하였다. PE의 경우, 약 20 mm에서 최대 선량 지점을 나타냈고 이를 통해 전자 비정의 중간 지점에 해당하는 열 번째 층에서 최대 선량을 준 이후부터 급격하게 선량이 감소가 되었음을 확인하였다. 전자의 투과 분포는 광자와는 다르게 전자 평형이 도달하기 전까지는 선량이 증가하다 전자평형이 도달하고 나서는 선량이 감소하는 특성이 있는데 전자 평형 두께를 고려한 개념이 전자평형모자(Build-up cap)이다. 추후 전자선 조사하는 샘플의 도달하고자 하는 이상적인 두께에 원하는 선량을 조사하기 위해서는 빔 서비스 이용자들은 조사하기 전, 방사선 공정설계 및 시설 운용 담당자와 협의하여 전자평형을 고려한 두께를 추가하여 선량을 계획할 필요가 있겠다.

동일한 재질의 Al plate을 선량을 다르게 하여 5, 10, 15, 20, 25 kGy 조사하였다. 그 결과, 선량에 따른 변화는 앞서 서술한 PE의 결과와 같이 선량에 따른 차이가 뚜렷하지 않았지만 알루미늄의 경우 밀도가 2.6667 g·cm^{-3}으로 PE보다 밀도가 높기 때문에 전자선이 물체를 투과할 때 앞서 서술한 PE보다 짧은 거리 동안 더 많은 반응을 일으켜 20 mm에서 전자선이 소실한 것으로 해석된다. PE의 경우, 50 mm까지 진행된 반면 알루미늄의 경우 그의 절반 정도 약 25 mm까지만 진행되었음을 그래프를 통해 확인할 수 있었다. 이를 통해 Al의 경우 원자번호에 지배적인 Build up region이 더 빠르게 나타났음을 실험을 통해 확인하였다. 동일한 밀도, 재질을 적층함으로써 얻은 그래프를 통해 피사체의 전반적인 선량 분포를 확인하였다.

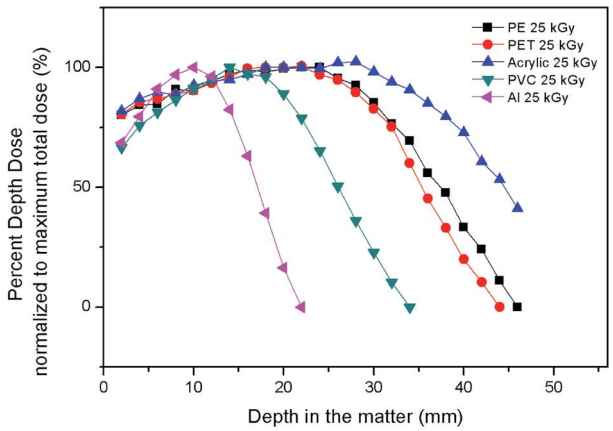

Fig. 8. PDD normalized to maximum total dose in subjected material.

2.2 매질별 선량에 따른 투과깊이선량 분포 곡선

여러 재질에 대한 선량 분포를 비교해보고자 동일한 선량을 조사한 각각의 재질별로 그래프를 다시 구성하였다. 초기 선량에서 최대지점까지 도달하는 깊이는 Acrylic을 제외하고 밀도가 높은 순서대로 짧게 나타났다. 각 재료별 밀도를 나타낸 표를 보면, Al > PVC > PET > Acrylic > PE 순서로 밀도가 크다. 밀도가 큰 물질은 작은 물질보다 전자선이 물질을 투과하면서 잃는 속도의 차이가 커지게 된다. Fig. 8을 보면 Al의 경우 10 mm 깊이에서 최대 지점이 나타나는데 밀도가 작은 다른 물질보다 급격하게 선량분포곡선이 나타남을 알 수 있었다. 그리하여 Acrylic plate의 투과깊이선량 분포를 통해, 물리적인 인자 이외에 이온 결합 형태 및 수소 작용기의 개수 등과 같은 화학적 구조에 따라서도 방사선량 분포가 달라질 수 있음을 고찰하였다(Hisada 2009). 고분자가 방사선에 조사되면 일반적인 반응 상황으로 고려했을 때 크게 가교가 되거나 붕괴가 된다. 폴리에틸렌 계열 재질의 경우, 방사선에 노출될 경우 수소 원자가 이탈하여 밀도가 증가하는 현상이 나타나며 반대로 아크릴과 같

Table 3. Evaluation of double-sided irradiation uniformity in terms of reach rage until optimum and maximum and half of initial energy are lost

	PE	PET	Acrylic	PVC	Al
Double (R_{opt})	1.163	1.144	1.167	1.444	1.501
R_{max}	2.329	1.93	2.213	2.803	2.823
R_{50}	1.65	1.356	1.477	1.724	1.501

은 PAN 계열은 조사를 받으면 밀도가 감소한다. 이렇게 고분자와 방사선에 대한 매커니즘 연구는 활발하게 이루어지고 있으나 이를 선량학적으로 증명하며 정확하게 밝혀내지는 못하였으므로 추후 연구도 이러한 방향으로 진행할 예정이다.

3. 양면조사 기준 각 재질별 최적 깊이 결정

실험을 진행한 각 재질별 R_{50}, R_{opt}, R_{max} 지점에서의 두께를 기준으로 양면조사 시, 물체가 받는 선량의 최대/최소 비율을 비교함으로써 양면조사에서의 각 재질별 최적 깊이를 결정할 수 있었다.

전자선 공정 시 한 방향(One-direction)의 조사만으로 균일성을 얻지 못하는 물체의 경우, 양면조사를 고려해야 하는데 이때 고려해야 할 부분이 Table 3과 같다. R_{opt}까지 도달하기까지의 지점을 앞서 언급한 Build-up region이라고 부르며, 현상적으로 말하면 전자선이 물체에 통과했을 때 초기 입사 선량과 동일한 선량이 나타나는 지점까지의 도달거리이다. R_{opt}를 기준으로 양면조사할 경우 Table 3과 같이 R_{max}, R_{50}을 기준으로 할 때보다 균일도가 1에 가까운 것을 확인할 수 있다.

$$DUR = \frac{D_{max}}{D_{min}} \tag{2}$$

식 (2)에 의하면, D_{max}, D_{min}은 각각 물체가 받는 최대 선량과 최소 선량을 의미하며 선량의 균일도(DUR, Dose of Uniformity)는 1에 가까울수록 양면조사 시 선량을 최대로 받는 지점과 최소로 받는 지점의 차이가 작아져 균일도가 높아지는 것을 의미한다. R_{opt}의 경우 R_{max}보다 2배 정도 균일하다고 볼 수 있다. PE, PET, Acrylic과 같이 밀도가 낮은 재질은 전자가 물체를 통과하면서 감쇠가 되지 않지만 PVC나 Aluminum과 같이 밀도와 원자번호가 높은 재질은 편차가 R_{opt} 기준 1.4~1.5로 나타나 앞서 언급한 저밀도의 재질보다 균일도가 낮게 보일 수 있지만, 이는 원자번호에 의한 영향으로 균일도를 높이기 위해서는 입사 에너지를 높이거나 적절한 보상체(Compensator) 혹은 Wedge system을 이용한 효율적인 조사 기법을 적용할 필요가 있겠다.

결 론

(1) 성능검사를 통과한 전자가속기를 이용하여 조사한 물체의 선량 분포를 확인하기 위하여 밀도가 각각 다른 5개의 재질을 선정하여 실험을 진행한 결과, 전자와 충돌하는 물체의 밀도, 원자번호와 관련된 제동 복사가 발생하는 확률 공식에 의해 밀도가 가장 지배적인 인자임을 확인하였다.

(2) 실험 결과에 따르면 실험에 사용된 5개의 재질 중 PE, PET, Acrylic의 경우, 밀도 이외에 화학적 구조와 같은 결합 상태가 선량 분포에 영향을 주었을 것이라고 잠정적으로 가설을 내릴 수 있게 되었고 이를 반영하여 추후 연구를 할 계획이다.

사 사

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (Ministry of Science and ICT) (NRF-2017M2A2A6A01019324).

참 고 문 헌

Benny PG, Palani S and Khrapov SS. 2013. Comparison of graphite calorimeter dosimetry system with Monte Carlo simulation at an industrial electron beam accelerator. *Nucl Instrum. Methods Phys. Res. A.* **703**:98-101.

Byun MW and Yook HS. 2003. Internal and External Situation of Irradiation Technology Utilization in the Food and Public Health Industry. *J. Kor. Phys. Ther.* **10**(1):106-123.

Chai JS. 2012. The Status and Prospects of Accelerators in Radiation Industries. *J. Radiat. Ind.* **6**(1):101-110.

Choi JH, Lee Y, Lim YM, Kang PH, Shin JH and Nho YC. 2007. Radiation Processing of Polymeric Materials. *Polym. Sci. Technol.* **18**(3):253-258.

Ha TS, Ahn C, Jung PH, Cho JH, Lee JS, Lee HN and Yoo BG. 2010. The Research Relating to QA of the Absorbed Dose in the 10 MeV E-beam Facility in Accordance with the International Standards. *J. Radiol. Sci. Technol.* **33**(4):387-394.

Han DH and Kim BN. 2003. Industrial Application of Electron Beam Accelerator. News & Information for Chemical Engineers. *Korean J. Chem. Eng.* **21**(4):484-490.

Hisada K. 2009. Industralization of fabric processing through electron-beam grafting. *J. Fiber Sci. Technol.* **65**(3):373-376.

ISO/ASTM. 2015. Standard Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies Between 300 keV and 25 MeV.

Lee BC, Jung YY, Park SH, Han YH and Kang HY. 2006. Industrial Use of Electronic Acclerator, Physics & high technology. *J. Korean Phys. Soc.* **15**(3):21-28.

Lee YJ, Yun JM, Lim YM, Kim BN and Lee SY. 2019. Performance Qualifications for the Beam in a 10 MeV Electron Accelerator. *J. Radiat. Ind.* **13**(4):333-338.

Lim HJ, Lee MW, Kim MY, Yi JG, Lee MJ, Kang SK, Rhee DJ and Jeong DH. 2016. Measurement of Energy Parameters for Electron Gun Heater Currents and Output Dose Rate for Electron Beams from a Prototype Linac. *Prog. Med. Phys.* **27**(1):25-30.

Miller A, Batsberg W and Karman W. 1988. A new radiochromic thin-film dosimeter system. *Radiat Phys Chem.* **31**:491-496.

Received: 4 December 2019
Revised: 3 January 2020
Revision accepted: 28 January 2020