creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000278869

2020年 2月

碩士學位 論文

10 MeV 전자선가속기의 필름선량계를 통한 해석적 선량평가에 관한 연구

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原子力工學科

吳 世 熙

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

10 MeV 전자선가속기의 필름선량계를 통한 해석적 선량평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Analytical Dose by Film Dosimeter in a 10 MeV Electron Beam Accelerator

2020년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

원자력공학과

오 세 희

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

10MeV 전자선가속기의 필름선량계를 통한 해석적 선량평가에 관한 연구

지도교수 정 운 관

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 2월

조 선 대 학 교 대 학 원

원자력공학과

오 세 희

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

오세희의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 이 경 진 (印)

위 원 조선대학교 교 수 송 종 순 (印)

위 원 조선대학교 교 수 정 운 관 (印)

2020년 2월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

표 목 차 ····· 3
그 림 목 차 ····· 4
ABSTRACT ····· 6
제 1 장 서 론 ····· 8
제 2 장 재료 및 방법 ····· 10
제 1 절 전자선가속기 ····· 10
1. 전자선가속기 ····· 10
2. 전자선과 물질과의 상호작용 ····· 11
3. 구조 및 사양 ····· 14
제 2 절 선량 측정 시스템 ····· 17
1. 선량 측정 시스템 ····· 17
2. B3 필름 선량계 ····· 20
제 3 절 운전 적격성 시험 ····· 22
1. 깊이선량분포 곡선과 전자선 에너지 ····· 22
2. UBC 속도 ····· 25
3. 전자선 보정 팬텀 ····· 25
4. 깊이선량분포 측정 대상 ····· 27
제 3 장 운전 적격성 시험 선량 측정 ····· 29

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 전자선 에너지 측정 ····· 29
제 2 절 UBC 속도와 선량간의 관계 ····· 31
제 3 절 선량 선형성 ····· 32
제 4 절 물질별 깊이선량분포 ····· 33
제 4 장 고찰 ····· 38
제 5 장 결론 ····· 45
참고문헌 ····· 47

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 목 차

Table 1. Electron accelerator specifications ····· 16

Table 2. Characteristics of the investigated film dosimeters ····· 18

Table 3. Measurement target of depth-dose distribution ····· 27

Table 4. Result of the energy measurement ····· 29

Table 5. Dose trend by UBC speed ····· 31

Table 6. Trend of set dose and measured dose ····· 32

Table 7. Measurement results of depth-dose in polyethylene ····· 33

Table 8. Measurement results of depth-dose in acrylic ····· 34

Table 9. Measurement results of depth-dose in polyethylene terephthalate 35

Table 10. Measurement results of depth-dose in polyvinyl chloride ····· 36

Table 11. Measurement results of depth-dose in aluminum ····· 37

Table 12. R_{opt}, R_{50e}, R_{50}, R_p measurement results of various materials ····· 41

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 목 차

Fig 1. High-energy electron accelerator ····· 15

Fig 2. Dose response curve for the CTA film ····· 18

Fig 3. Dose response curve for the LiF(Sunna) film ····· 19

Fig 4. Dose response curve for the PVC film ····· 19

Fig 5. Dose response curve for the B3 film ····· 19

Fig 6. B3 film dosimeter ····· 21

Fig 7. Typical central axis PDD curves in water for a 10 × 10 cm^2 field size and an SSD of 100 cm for (a) electron beams with energies of 6, 9, 12 and 18 MeV and (b) photon beams with energies of 6 and 15 MV. ····· 22

Fig 8. Typical electron beam PDD curve illustrating the definition of R_q, R_p, R_{max}, R_{50}. ····· 23

Fig 9. Aluminum wedge and B3 film dosimeter ····· 24

Fig 10. Electron beam calibration phantom and specification ····· 26

Fig 11. Acrylic plate stack and aluminum plate stack in tray ····· 28

Fig 12. 15 kGy Aluminum wedge depth-dose distribution curve ····· 29

Fig 13. 25 kGy Aluminum wedge depth-dose distribution curve ····· 30

Fig 14. 30 kGy Aluminum wedge depth-dose distribution curve ····· 30

Fig 15. Dose trend by UBC speed ····· 31

Fig 16. Trend of set dose and measured dose ····· 32

Fig 17. depth-dose distribution curve of polyethylene ····· 38

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig 18. depth-dose distribution curve of acrylic ····· 39

Fig 19. depth-dose distribution curve of polyethylene terephthalate ····· 39

Fig 20. depth-dose distribution curve of polyvinyl chloride ····· 40

Fig 21. depth-dose distribution curve of aluminum ····· 40

Fig 22. depth-dose distribution curve of polyethylene in double-sided irradiation ····· 42

Fig 23. depth-dose distribution curve of acrylic in double-sided irradiation ····· 42

Fig 24. depth-dose distribution curve of polyethylene terephthalate in double-sided irradiation ····· 43

Fig 25. depth-dose distribution curve of polyvinyl chloride in double-sided irradiation ····· 43

Fig 26. depth-dose distribution curve of aluminum in double-sided irradiation ····· 44

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on the depth-dose Distribution of Single Energy E-Beam by Material

Se Hee Oh
Advisor : Prof. Chung, Woon-kwan
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

In Korea, despite the increasing number of electronic accelerator systems operated, there is a lack of research results that systematically achieved quality assurance of absorbed dose based on international standards. Unlike γ-ray irradiation using ^{60}Co isotopes, ISO/ASTM 51649 specifies that quality tests are conducted for more process factors, increasing the need for guidelines on the quality assurance procedures for absorbed dose of electron beam accelerators. Operational qualification testing generally includes matters on depth dose distribution and electron beam energy calculation, average beam current, conveyor speed, beam width, beam homogeneity, dose linearity, and process interruption. As the operating range of the accelerators widens, more diverse types of products and materials are being investigated. However, the requirements for dosimetry depend on the nature of the product and the irradiation process. In particular, it is important to find a proper depth because electron rays have a lower penetration depth than γ-rays, so it is necessary to establish the requirements for dosimetry according to the matter of electron rays. Therefore, the purpose of this study is to test possible items within the scope of the operation qualification test and present in detail the dosimetry procedure of OQ given in ISO/ASTM, and to analyze the depth dose distribution of selected target materials under different dose conditions to derive optimal survey conditions by substance. The contents of this study are as follows. Operational qualification tests were conducted by verifying the major

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

factors that could affect absorbed dose quality: electron beam energy, UBC speed and dose linearity. The operational qualification test procedures were performed in accordance with the dosimetry procedures given in ISO/ASTM and the dose measurements were made using the B3 film dosimetry. Electron beam energy was used with Aluminum wedge devices, and UBC speed tests and dose linearity tests with Electron beam calibration phantom. The analysis of depth dose distribution by substance was carried out by the following procedure. After selecting five substances, each substance was prepared in plate form and then layers were stacked to attach a B3 film dosimeter to irradiate the electron beam. In order to derive the optimal irradiation conditions by substance, single-sided irradiation and double-sided irradiation were performed under different dose conditions and the relationship between depth dose and material density was analyzed through the experimental results. Based on the results of the operation qualification test, the electron beam energy averaged 9.71 ± 0.03 MeV and the relationship between UBC speed and dose was verified and dose linearity was verified. In addition, the characteristics of single-sided irradiation and double-sided irradiation were analyzed through the measurement results of depth dose distribution by substance, and the relationship between density in the survey target and depth reaching maximum dose was derived using this analysis.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

1895년 독일의 빌헬름 뢴트겐(Wilhelm Roentgen)은 내부를 열어 보지 않고 물체 내부의 정보를 획득할 수 있는 X선을 발견하였다. X선을 발견한 이듬해인 1896년부터 많은 의학자가 뢴트겐의 X선을 질병의 진단에 활용하였다. 이후 'X선 등의 방사선은 높은 에너지의 입자 빔에서 획득할 수 있다'는 사실을 인지하면서 과학자들은 입자 빔의 에너지를 높일 수 있는 입자 가속기들을 개발하기 시작하였다. 그 중 Cockcroft와 Walton은 1931년에 높은 직류 전위차를 이용하여 정전형 가속기를 개발하였고 같은 해에 미국의 E.O. Lawrence는 Wideroe가 발표한 고주파 공진의 가속 원리를 적용한 사이클로트론을 개발하였다. 세계 2차 대전 후에는 매우 높은 에너지의 전자선을 만들 수 있게 되어 가속기 기술의 발전은 짧은 파장의 X선 장치들이 개발되는 수준까지 이르렀으며 이런 단파장의 고밀도 X선은 암 치료 등에 효과가 좋아서 여러 형태의 장치들이 개발되었다.[1]

고분자물질의 방사선화학 가교에 주로 이용되던 전자선가속기는 현재에 이르러서 반도체 개발에서 오염된 물의 정화에 이르기까지 여러 분야에서 사용되고 있으며 그 응용 범위도 점점 넓혀가고 있다. 국내에는 전선, 타이어 가교, 자동차 발포 내장재, 건축용 내장재, 표면경화처리, 연구용 등으로 20여대 이상이 사용되고 있으며 최근에는 5~10 MeV의 높은 가속에너지로 살균, 멸균을 하는 상업용 가속기로도 이용되고 있다.[2] 특히 의료산업 분야에서는 인체 내 발생한 종양에 대하여 방사선을 조사하여 종양을 치료하는 의료용 선형가속기와 같은 치료기로서 또한 인체에 덜 해로우면서도 선명도가 높은 X선 장치에 사용되고 있으며, 전기·전자 산업 분야에서 IGBT(Insulted Gate Bipolar Transistor), Diode, MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), PWRTR(Pollutant Release and Transfer Register) 등 전력 반도체 소자의 고속 스위칭을 통한 성능향상에도 사용되고 있다. 또한 관리가 쉽고 대용량 처리가 가능한 특징을 가짐으로 의료용품, 위생용품, 식품 포장재 등의 멸균시장 분야에서 사용되고 있다.[3]

이러한 전자선가속기는 ^{60}Co 동위원소를 이용하는 감마선 조사와는 달리 기계·전기적 방법에 따른 전자선 조사는 더욱 많은 공정인자에 대해 품질시험을 실시할 것을 방사선 멸균의 국제표준인 ISO/ASTM 51649에서 규정하고 있다. 그러나 국내의 경우 다양한 분야에서 전자선가속기가 운영되고 있음에도 불구하고 국제표준에 근거하여 흡수선

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

량 품질보증을 체계적으로 달성한 연구결과가 부족한 실정이다.[4] 300 keV와 25 MeV 사이의 에너지에서 방사선 처리를 위한 전자선 시설의 선량 측정 표준지침을 제시하고 있는 ISO/ASTM 51649에서는 OQ(Operational Qualification)의 선량측정에 대해 자세히 기술하고 있어 전자선가속기의 운영 시 흡수선량 품질보증에 대한 중요성을 더욱 강조하고 있다. OQ는 일반적으로 깊이선량분포 및 전자선 에너지 산정, 평균 빔 전류, 빔 폭 및 컨베이어 속도의 함수로서의 선량, 빔 폭, 빔 균질성, 표준물질의 선량 분포, 공정 중단에 대한 사항을 포함한다.[5] 또한 가속기의 운용 범위가 넓어짐에 따라 보다 다양한 종류의 제품 및 재료가 조사되고 있다. 그러나 선량측정의 요건은 방사선 조사 과정과 제품의 특성에 따라 달라진다. 특히 전자선은 감마선에 비해 투과깊이가 낮기 때문에 적정깊이를 찾는 것이 중요하기 때문에 전자선의 물질에 따른 선량측정 요건의 정립이 필요한 시점이다.

따라서 본 연구는 운전 적격성 시험의 항목 중 연구 범위 내 가능한 항목을 시험해 보고 ISO/ASTM에 제시된 OQ의 선량측정절차에 대해 상세히 제시하고자 하였으며 선정된 대상 물질을 여러 선량 조건에서 조사시켜 깊이선량분포를 분석하여 물질별 최적의 조사조건을 도출하는 것이 목적이다. 본 연구의 내용은 다음과 같다. 운전 적격성 시험은 흡수선량 품질에 영향을 줄 수 있는 주요한 인자인 전자선 에너지, UBC 속도, 선량 선형성에 대해 검증하여 운전 적격성 시험을 수행하였다. 운전 적격성 시험 절차는 ISO/ASTM에 제시된 선량측정 절차에 따라 수행하였으며 선량측정은 B3 필름 선량계를 이용하였다. 전자선 에너지는 Aluminum wedge 장치를, UBC 속도 시험 및 선량 선형성 시험은 전자선 보정 팬텀을 이용하였다. 물질별 깊이선량분포 분석 실험은 5가지 물질을 선정하여 각 물질을 판 형태로 준비한 후 적층을 쌓아 B3 필름 선량계를 부착해 전자선에 조사시켰다. 물질별 최적의 조사조건을 도출하기 위하여 여러 선량 조건에서 단면조사 및 양면조사를 수행하였으며 실험 결과를 통해 깊이선량과 물질의 밀도와의 관계를 분석하였다. 이에 대한 자세한 내용은 제2장 재료 및 방법에 자세히 기술되어 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장 제1절에서는 본 연구에 활용된 전자선가속기의 원리와 구조 및 사양에 대해 기술하였고 추가적으로 전자선의 물질과의 상호작용에 대해 논하였으며 제2절에는 선량측정시스템과 본 연구에서 사용된 B3 필름 선량계에 대해 기술하였다. 그 다음 이어지는 내용으로는 진행된 실험 과정에 대해 기술하였으며 결과에서는 운전 적격성 시험 결과 및 물질별 깊이선량분포에 대한 결과를 나열하였고 이를 분석하여 도출된 내용을 고찰에 기술하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 재료 및 방법

제 1 절 전자선가속기

1. 전자선가속기

전자선가속기는 전자를 가속시키는 장치이다. 금속을 높은 온도로 가열하면 속박되어 있던 전자의 운동에너지가 높아져서 진공 중으로 튀어나온다. 이렇게 금속 표면에서 튀어나온 전자는 에너지가 낮아서 느리게 움직이는데 이런 느린 전자에 에너지를 주어 매우 빠른 속도로 움직이게 하는 장치가 전자선가속기이다. 전자를 가속하는 방법 중 가장 쉬운 것은 전압을 인가하여 음(-)의 전하를 가진 전자가 양(+)극을 향해 움직이도록 하는 방법이다. 인가해주는 전압이 높을수록 운동에너지가 높아지기 때문에 양극에 도달한 전자의 속도가 빨라진다. 수 MeV까지는 전극에 높은 전압을 인가하여 가속시키는 정전가속기가 보편적이며 그 이상의 에너지로 가속시킬 때는 고주파(Radio Frequency, RF) 선형가속기를 사용한다.[6]

전자선가속기는 마이크로파를 이용해 가속관 내에서 이동하는 전자들을 고에너지 상태로 가속시킨다. 전자의 가속은 가속관 내에 있는 두 전극의 전위차에 의해 발생하는 전기장에 의해서 이루어지며 전자를 고에너지로 가속시키기 위하여 마이크로파를 이용한다. 또한 마그네트론에서 발생된 마이크로파가 도파관을 따라 가속관에 인가됨과 동시에, 펄스 변조기에서 마그네트론과 전자총에 전압을 인가하여 전자총에서 발생된 전자가 가속관으로 들어가게 된다. 이러한 과정을 거쳐 입사된 전자들은 동일하지 않은 위상에 위치하게 되나 번칭에 의해 좁은 위상폭으로 집중되며 동일하게 좁은 위상으로 모이게 된 전자들은 마이크로파에 의해 가속된다. 이때 파의 진행방향과 수직방향의 자기장성분을 가진 TM파(Transverse Magnetic wave)만이 전자를 가속할 수 있으며 가속관의 양끝이 막힌 원통형 도파관이 공명진동수에서 정상파 형태를 만들기 위하여 사용되고 가속된 전자는 빔윈도우를 지나 사출된다.[7]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 전자선과 물질과의 상호작용

전자는 작용하는 대상도 전자로서 대등한 입자들이 작용하므로 전자의 물질 중에서의 거동은 중하전입자와는 다르므로 전자가 물질의 원자 궤도전자 또는 핵의 방사선장과 반응하게 되면 입사된 전자 자신의 방향도 심하게 영향을 받는다. 높은 에너지에서는 전방 산란이 우세하나 에너지가 낮아지면 후방산란도 자유롭게 일어난다. 따라서 물질에 입사된 전자의 궤적은 직선을 형성하는 것이 아니라 무질서한 브라운운동과 같은 형태를 취한다. 그러므로 전자에게는 비정도 중하전입자처럼 분명하지 않다.

전자가 물질 중에서 에너지를 잃는 과정에는 중하전입자처럼 충돌에 의한 전리 및 여기 외에 복사선을 방출하는 방법이 있다. 이는 전자의 경우 질량이 작아 MeV 단위의 에너지에서 전자의 속도가 상대론적 자용의 영향을 받는 특성에서 기인한다. 따라서 전자의 에너지는 총에너지 E와 운동에너지 T를 분명히 구분하여 적용할 필요가 있다. 총에너지란 운동에너지에 전자의 정지질량(0.511 MeV)를 더한 값이 된다. 전자의 저지능은 식 (1)과 같이 충돌분과 복사분의 합으로 쓸 수 있다.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_c + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_r \tag{1}$$

여기서 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c$를 충돌저지능(collisional stopping power), $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_r$를 복사저지능(radiative stopping power)이라하며 각각 다음의 Bethe식으로 산출할 수 있다.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c^{\pm} = \frac{4\pi e^4 n}{m_e C^2 \beta^2}\left[\log\frac{m_e C^2 \tau\sqrt{\tau+2}}{\sqrt{2}\,I} + F^{\pm}(\beta)\right] \tag{2}$$

여기서 $\tau = \frac{T}{m_e C^2}$ 이고 +는 양전자, -는 음전자를 의미한다. 함수 F는 전자에 대해 식 (3)과 같으며 양전자에 대해서는 식 (4)와 같다.

$$F^{-}(\beta) = \frac{1-\beta^2}{2}\left[1 + \frac{\tau^2}{8} - (2\tau+1)\log 2\right] \tag{3}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$F^{+}(\beta) = \log 2 - \frac{\beta^2}{24}\left[23 + \frac{14}{\tau+2} + \frac{10}{(\tau+2)^2} + \frac{4}{(\tau+2)^2}\right] \tag{4}$$

복사저지능에 대해서는 근사적으로 식 (5)와 같다.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c = \frac{nEZ(Z+1)e^4}{137m_c^2C^4}\left[4\log\frac{2T}{m_eC^2} - \frac{4}{3}\right] \tag{5}$$

충돌저지능과 복사저지능 사이에는 대략 식 (6)과 같은 비율이 성립한다.

$$\frac{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_c} \cong \frac{TZ}{700} \tag{6}$$

여기서 전자 에너지 T는 MeV 단위이다. 위의 식에서 전자의 에너지가 클수록, 그리고 물질의 원자번호가 클수록 전자의 제동복사는 비율이 증가한다. 예를 들어 에너지가 10 MeV인 전자가 Z가 26인 철에 입사하면 위의 식의 비율은 약 1/30이 되어 처음에는 에너지 손실량의 약 25 % 정도가 X선으로 방출된다. 전자가 감속되어 에너지가 줄어들면 위의 식에 따라 제동복사 비율이 변하므로 입사된 전자에너지가 광자에너지로 변환되는 총 비율은 상기 식과는 다르다.

운동에너지 T인 전자의 에너지 손실 중 광자로 변환되는 비율이 식 (7)과 같다면 초기 운동에너지 T_0인 전자의 에너지 중 광자의 에너지로 변화되는 총 비율은 방사율(radiation yield)로 정의하는데 이는 식 (8)과 같다. 이는 다시 근사적으로 식 (9)와 같이 산출할 수 있다. 여기서도 T는 MeV 단위이다.

$$y(T) \equiv \frac{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)} \tag{7}$$

$$Y(T_0) \equiv \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} y(T)dT \tag{8}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$Y \approx \frac{6 \times 10^{-4} ZT}{1 + 6 \times 10^{-4} ZT} \tag{9}$$

고에너지 전자빔을 납처럼 원자번호가 높은 재료로 차폐하는 경우에는 다량의 제동복사 X선이 방출됨에 유의해야 한다. 전자의 경우에는 흡수체가 얇은 경우에도 후방산란으로 인해 검출기에 도달하지 못하는 전자들이 생기므로 처음부터 전자수는 감소 경향을 보이며 꼬리가 길어진다. 흔히 사용되는 비정은 외삽비정 R_e인데 이에 대해서는 다음의 실험식으로 근사하게 구할 수 있다. 여기서 E는 keV 단위이고 비정은 mg/cm^2 단위이다. 또, 베타피폭의 범위를 정할 때 흔히 사용하는 99 퍼센타일 비정 R_{99}는 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$R_e(E,Z) = \exp[-4.2031 + 0.6453\log E + 0.3506\log^2 E - 0.045575\log^3 E + 0.001758\log^4 E] \times (1.1 - 0.0055Z) \tag{10}$$

$$R_{99} = R_e(1.13 + 0.0058Z) \tag{11}$$

위의 두 식에서 보듯이 전자의 비정은 물질의 원자번호 Z에 거의 독립적이다. 인체의 유사 물질로서 관심이 큰 물에 대해서는 비정을 다음 식 (12)와 같이 보다 간단한 Katz-Penfold식으로 근사적으로 얻을 수 있다.

$$R[g \times cm^{-2}] = \begin{cases} 0.412E^{1.27 - 0.0954\log E}, & 0.01 \le E \le 2.5\,MeV \\ 0.530E - 0.106, & 2.5\,MeV < E < 100\,MeV \end{cases} \tag{12}$$

면밀도 단위로 산출하는 식은 물뿐만 아니라 가벼운 원소로 구성되는 다른 물질(공기, 인체조직, 알루미늄 등)에 대해서도 무난히 사용할 수 있다. 이와 같은 비정은 단일 에너지 전자에 적용된다. 베타입자의 경우는 전자의 에너지가 단색이 아니라 0부터 최대 에너지까지 혼합되어 있으므로 일반적으로 관측되는 비정은 최대에너지에 해당하는 전자의 비정보다 짧아진다.[8]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 구조 및 사양

현대에서 사용하는 전자선가속기 중 고주파 선형가속기는 전자를 가속시킬 때 높은 주파수의 전자기파를 사용한다. 가속기의 본체는 전자를 가속시키기 위해서 마이크로파 동력을 발생시키는 클라이스트론, 마이크로파를 가속장치에 전달하는 장치 그리고 가속기의 온도를 안정적으로 유지하며 내부의 열을 분산시키는 역할을 하는 냉각 시스템으로 구성되어있다. 또한 전자선가속기 헤드부분은 전자를 가속시키는 가속장치와 전자를 발생시키는 전자총, 전자를 휘어지게 하는 휨자석, 빔의 형태를 제어하는 필터 등으로 이루어져있다.[9]

전자총은 전자선가속기의 내에서 전자를 발생시키는 역할을 한다. 필라멘트 물질 내의 원자 내에 속박되어 있는 전자는 각 물질마다 정해진 에너지 장벽 이상의 에너지를 공급받으면 원자핵의 속박에서 벗어나 진공 중으로 이탈하게 된다. 이렇게 진공 중으로 나온 전자들은 전자총 내의 가속전극에 의해 가속된 후 고주파 가속관으로 가게 된다. 전자총에서 발생된 전자들은 가속을 위해 고주파 가속관의 내부로 입사된다.

입사된 전자들의 가속관의 내에서 가속되기 위한 에너지를 공급하는 고주파 발생장치의 종류로는 마그네트론(Magnetron)과 클라이스트론(Klystron)이 사용되는데 용도에 따라서 다양한 사양의 장치들이 목적에 맞게 사용된다. 고주파 발생장치에서 생성된 고주파 출력은 도파관을 타고 고주파 가속관으로 간다. 이때 고주파 신호의 역류로 인한 발생장치의 파손을 방지하기 위하여 Circulator가 필요하다. 고주파 발생장치로부터 고주파 신호가 발생하여 고주파 가속관에 전달될 때까지 고주파 전송을 담당하는 부분을 고주파 전송계(RF transmission line)라 한다.

고주파 가속관의 공진 주파수는 운영시의 내·외부의 환경요인에 의해 시시각각 변화하며 고주파 발생장치의 주파수와 일치하지 않게 되면 가속하고자 하는 입자의 가속효율이 떨어질 수 있다. 이것을 보완하기 위해서 AFC(Automatic Frequency Controller)를 존재한다. 이것은 고주파 전송계에 설치된 진행(forward) 및 반사(reflect) 되는 고주파 신호를 측정하여 이를 비교한 뒤 이 정보를 다시 고주파 발생장치로 보내 그 차이를 보정한다.

고주파 전자선가속기는 외부의 환경요인 중에서도 온도변화에 따른 입자의 가속효율 변화에 매우 민감하기 때문에 전체 시스템을 일정한 온도로 유지해 주는 것이 중요하다. 따라서 온도 제어대상의 유량 및 온도 변화를 실시간 모니터링하면서 제어가 가능

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하도록 냉각 시스템이 있어야 한다.

전자선가속기의 모든 부분들이 올바르게 동작하기 위해서는 전체 시스템을 종합적으로 제어할 수 있는 제어시스템이 필요하다. 특히 고주파 발생장치에서 발생되는 고주파 신호는 10 ㎲ 내외의 펄스신호이며 이 신호가 고주파 가속관내에서 전자를 가속시키기 위해 전자총의 전원공급기와 동기화가 되어야 하며 진공 및 냉각 시스템의 모니터링 및 제어도 제어시스템이 담당한다.[10]

본 연구에서 사용된 전자선가속기는 Figure 1과 같다. 본 가속기는 전자총과 이온펌프를 포함하고 있으며 Standing-wave 가속기 구조로 되어있고 기계적 지지대가 설치되어있다. 또한 듀얼 티타늄 창과 고출력 변조기가 장착되어있으며 온도조절이 가능하다. 전자선과 컨베이어 간의 데이터 인터페이스와 시설 안전 시스템과의 인터페이스가 설치되어 있어 작업자가 보다 효율적으로 가속기를 작동시킬 수 있다.

Fig 1. High-energy electron accelerator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1. Electron accelerator specifications[11]

Machine parameter	Specification
Minimum beam energy	9 MeV
Nominal beam energy	10 MeV
Maximum beam energy	11 MeV
Minimum average beam current	0.1 mA
Maximum average beam current	3 mA
Range of pulsed beam current	30 mA - 440 mA
Range of pulse repetition frequencies	30 Hz - 600Hz
Length of electron window in scanning direction	3000 mm
Minimum scan width at electron window (power density)	150 mm
Maximum scan width at electron window (10 % under-scan)	2700 mm
MAximum average beam power at 10 MeV	30 kW

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 선량 측정 시스템

1. 선량 측정 시스템

가속기의 흡수선량 측정의 정확성은 선량 측정 시스템 품질과 직접적으로 연관되어 있다. 선량 측정 시스템에 사용되는 선량계는 표준 계층 위치에 따라 1차-기준-정기 선량계로 분류될 수 있다. 그 중 가장 정상의 위치에 있는 것은 통상 국가 표준 실험실에 의해 설정 및 유지 관리되는 1차 선량계이다. 1차 선량계는 전리실 또는 열량계로 구성되어 있으며 약 ±1 %의 불확실성으로 탄소 또는 금속에 대한 흡수선량을 측정하게 된다. 그 다음 단계는 기준 선량계 계층인데 이것은 일반적으로 방사선 조사 과정과 온도 및 선량 비율과 같은 여타 요소에 대한 반응을 재생할 수 있음과 동시에 체계적으로 특성화할 수 있는 화학적 선량계로 구성되어 있다. 일반적으로 사용되는 기준 선량계로는 세륨 함유 및 중크롬산염 용액과 고체 알라닌이 있다. 통상 전자선 조사 장치용으로 사용되는 기준 선량계는 눈금식 열량계로, 기준 선량계와 관련된 표준 불확실성은 약 ±3 % 수준인 것으로 확인되고 있다. 기준 선량계로 쓰이는 알라닌 선량계는 전자파 자기공명(EPR) 분광법에 의해 측정된 조사 결정체인 알라닌은 광범위한 교정 선량 범위와 환경 및 시간 안정적 특성으로 높은 평가를 받고 있다. 마지막 단계인 정기 선량계는 방사선 멸균 처리 과정에 대한 정기적 감시 및 선량 매핑 실습 과정에 사용하기 적합하도록 만들어 주고 있다. 일반적으로 사용되는 정기 선량계는 몇 밀리미터 두께의 염색 플라스틱 조각이나 아주 얇은 플라스틱 필름 기반의 선량계로서, 불확실성은 ±5 % 수준에 그치는 것으로 확인되고 있다.[12]

특히 필름선량계는 전자선의 선량측정에 중요한 역할을 한다. 전자선의 선량측정의 선량계로 사용될 수 있는 여러 필름선량계는 저마다 장단점이 있으며 사용자의 요구에 가장 적합한 필름을 선택하는 것이 중요하다. CTA 필름의 장점은 선량과 방사선량에 독립적인 사후 신호 변화에 대한 선형 반응이다. 그러나 이온화 방사선에 대한 낮은 민감도는 고선량에 사용하기에는 적합하지 않다. LiF(Sunna) 필름의 광학적 흡수를 이용한 선량측정의 장점은 값싸고 광범위한 분석기기를 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 높은 선량에 대해 낮은 광흡수 온도계수와 작은 post-irradiation 효과까지 사용할 수 있다는 것이다. 그러나 이러한 선량반응의 초경량 특성은 상대적으로 낮은 선량에 대해 사용할 때 적합하다는 것을 의미하기도 한다. 또 다른 종류의 필름선량계인 PVC 필

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

름은 사용할 때 필름의 배치에 따라 선량측정 특성이 변하기 때문에 세심한 취급이 요구되며 신호의 극심한 사후 변화가 가장 큰 문제이다. 정확한 결과를 위해 난방 절차와 측정 시간을 명확하게 표준화해야 한다. 또한 PVC 필름은 보관용으로 사용할 수 없다. 그러나 다른 필름과 비교했을 때 매우 낮은 가격, 방사선에 대한 높은 민감도, 환경 조건(공기 습도, 액체 물, 가시 및 자외선)에 대한 높은 내성을 명확한 장점으로 꼽을 수 있다. 본 연구에서 사용된 B3 필름의 성능은 다른 필름 선량계에 비해 양호하나 자외선에 대한 민감성과 정전기에 의한 취급의 어려움이 있다는 점이 단점으로 꼽힌다.

Table 2. Characteristics of the investigated film dosimeters

Dosimeter	CTA FTR-125	Radiochromic B-3	LiF (Sunna)	PVC
Composition	H, C, O, P	H, C, N	Li, F	H, C, Cl
Thickness [mm]	0.127	0.020	0.245	0.260
λ [nm]	280	556	245	396
Transparency	High	High	Low	High
Post-irradiation thermal treatment	None	5 min, 60 ℃	None	30 min, 70 ℃

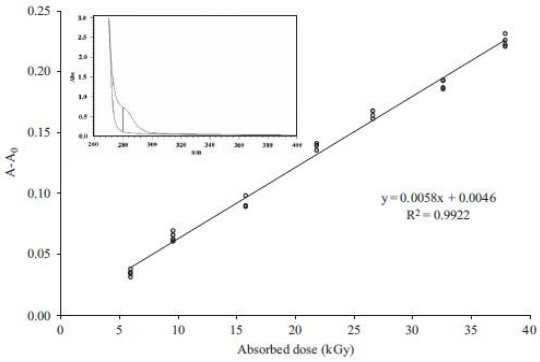

Fig 2. Dose response curve for the CTA film

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

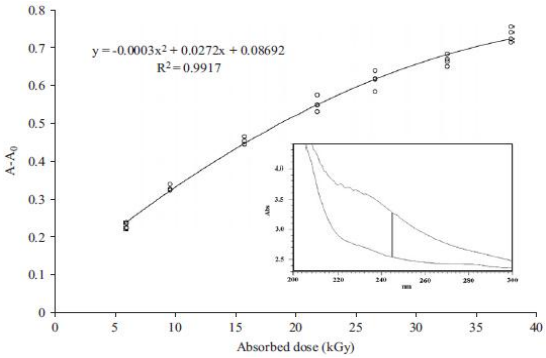

Fig 3. Dose response curve for the LiF(Sunna) film

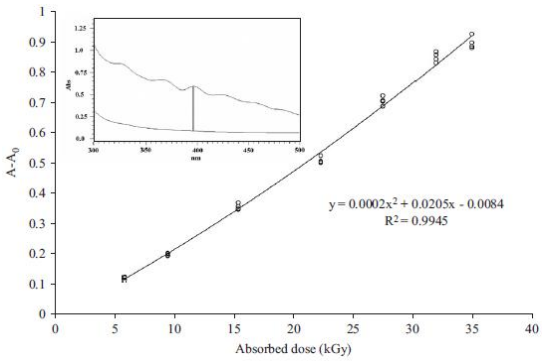

Fig 4. Dose response curve for the PVC film

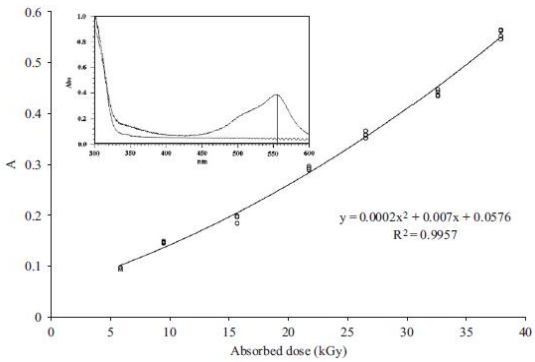

Fig 5. Dose response curve for the B3 film[13]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. B3 필름 선량계

선량 측정 시스템에서 가장 중요한 역할을 하는 선량계는 조사 시 정량적 변화를 겪는 장치로 정의된다. 그 중 B3 라디오크롬 필름은 전리방사선원에 대한 노출 정도에 따라 분홍색 또는 자홍색의 선명한 음영에서 깊은 음영으로 변화가 일어난다. B3 필름은 전리방사선의 선량에 대한 피폭으로 유발되는 색 변화량 또는 후 조사 흡수량 결정을 위한 GEX WINdose Dosimetry System과 마찬가지로 분광온도계를 사용하여 측정한다. 또한 RisøScan 소프트웨어 프로그램에서와 같이 비트 매핑 이미지를 사용하는 광학 기법에 의해 정량적으로 측정될 수 있다. 오늘날 명명된 B3 라디오크롬 필름은 1978년에서 1980년 사이에 Risø 국립 연구소에서 연구가 수행되었으며 그때 다양한 종류의 라디오크롬 필름 소재가 조사되었다. B3 필름의 최종 버전은 polyvinyl butyral(PVB)에 Risø 국립 연구소에서 연구된 paraosaniline 염료를 사용한다. B3 필름에 사용된 염료의 방사선 화학적 수율은 선량률과 무관한 흡수선량과 쉽게 관련되는 색상 변화를 초래한다. 색 변화량은 조사 중 온도에 의해 영향을 받는다. B3 선량계의 최종 색상 변화는 전리방사선의 선량과 조사 과정 중 경험한 온도에 따라 완료하는 데 몇 시간이 걸릴 수 있다. 조사 후 열처리 개입은 색상 개발 과정을 몇 분 안에 완료할 수 있으며, 결과적으로 B3 선량계가 1년 이상 안정적으로 유지된다.

B3 필름의 반응에 영향을 미칠 수 있는 요인은 조사 전 및 조사 중 그리고 조사 후로 나눌 수 있다. 조사 전 B3 필름의 권장되는 저장 시 온도는 15~30 ℃이다. 0~45 ℃의 온도 범위에서 시험하여 출하 및 보관 온도를 시뮬레이션하면 B3 필름의 초기 광학 흡광도 또는 반응에 변화가 없음을 알 수 있다. 45 ℃ 이상의 극한의 온도에서 보관 또는 배송은 B3 필름의 반응에 영향을 미칠 수 있으므로 피해야 한다. B3 필름에 자연적으로 흡수되는 비방사성 백그라운드는 필름 두께 1미크론 당 약 0.0021이므로 선량계 반응을 계산할 때는 평균 배경 값의 추출을 권장하지 않는다. B3 필름은 대부분의 인공 및 자연 광원에 존재하는 UV 구성요소에 민감하며 보관 및 조사동안 또는 방사선 조사 후 밀봉 및 포장되어야 한다. 선량계 측정 영역의 조명 기구와 창은 스펙트럼에서 바람직하지 않은 부분이 없도록 UV 필터 재료로 덮어야 한다. 또한 조사 중 필름에 흡수될 수 있는 수분 함량에도 영향을 받는다. B3 필름의 조사 중의 경우 또한 포장된 상태로 보관해야 한다. 그렇지 않은 경우, B3 필름은 광원에 대한 우발적인 노출로부터 보호되어야 하며 주변 조명 및 습도 변화의 영향도 감시하고 고려해야 한다. 30~70

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

% 사이의 상대습도 영향은 미미하지만 이 범위를 벗어나는 경우는 유의해야 한다. 또한 B3 필름은 복잡한 온도 의존성을 가지며 B3 필름의 모든 배치는 실제 사용과 유사한 프로세스 조건에서 현장 보정되어야 한다. B3 필름 응답은 B3 필름의 색상 변화가 몇 시간 동안 계속되기 때문에 조사 후 시간에 따라 달라진다. 따라서 이를 안정화하기 위해 조사 후 열 처리를 수행해야 한다. B3 필름 취급 시 UV 또는 일광 오염을 최소화할 수 있도록 선량 측정 영역 내에 있는 모든 조명 기구와 창의 자외선은 차단되어야 한다. B3 필름 응답의 안정성은 조사 후 습도에 의존하지 않으며 조사 후 상대습도는 제어할 필요가 없다. 조사 후 열처리된 B3 필름 선량계는 15~30 ℃ 사이의 온도에서 유지될 때 온도의 영향을 받지 않는다.

B3 필름은 일반적으로 550 nm에서 554 nm 사이에 넓은 피크 파장을 가지고 있으며 측정 파장은 554 nm가 권장되고 있다. 각 분광 광도계는 545 nm에서 559 nm까지의 피크에서 스캔하거나 단일 nm 간격으로 이 범위에 걸쳐 개별 측정을 수행함으로써 특정 피크 파장을 결정하기 위해 기준 필름으로 B3 필름 선량계를 사용하여 개별적으로 평가할 수 있다.

Fig 6. B3 film dosimeter[14]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 운전 적격성 시험

1. 깊이선량분포 곡선과 전자선 에너지

전자선의 깊이선량분포 곡선의 일반적인 형태는 광자의 깊이선량분포 곡선의 형태와 다르다. 일반적으로 전자선의 깊이선량분포 곡선은 높은 표면 선량을 나타내며 특정 깊이에서 최대 선량이 나타나게 된다. 최대 선량이 나타나는 특정 깊이를 넘어서면 선량은 급격히 감소하게 되고 Bremsstrahlung tail이라고 불리는 영역이 형성된다.

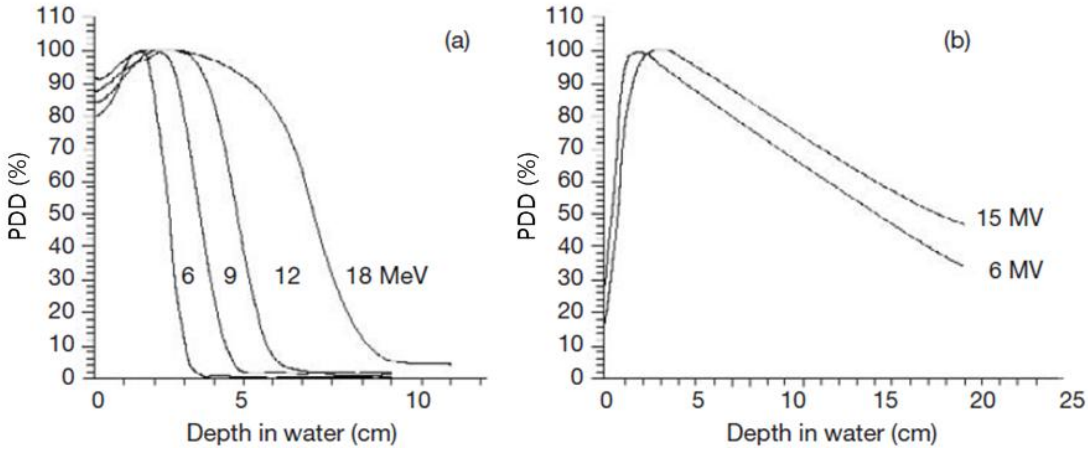

Fig 7. Typical central axis PDD curves in water for a 10 × 10 cm^2 field size and an SSD of 100 cm for (a) electron beams with energies of 6, 9, 12 and 18 MeV and (b) photon beams with energies of 6 and 15 MV.

최대 선량에 100을 곱하여 만든 선량의 비율 곡선을 Percentage Depth-Dose(PDD)라고 하는데 이 PDD 곡선에서 R_q, R_p, R_{max}, R_{50}, R_{90}을 정의할 수 있다. R_p는 깊이선량분포 곡선의 가장 가파른 구간을 통해 표시된 접선이 깊이선량분포 곡선의 꼬리 부분인 Bremsstrahlung tail이 나타나는 영역의 외삽선과 교차하는 깊이로 정의된다. R_{max}는 깊이선량분포 곡선의 꼬리 부분인 Bremsstrahlung tail이 나타나는 영역의 외삽 깊이로 정의되며 전자의 침투 깊이가 가장 큰 부분이다. 또한 R_{50}과 R_{90}은 각각 PDD가 50 %와 90 %의 값에 도달하는 깊이로 정의된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

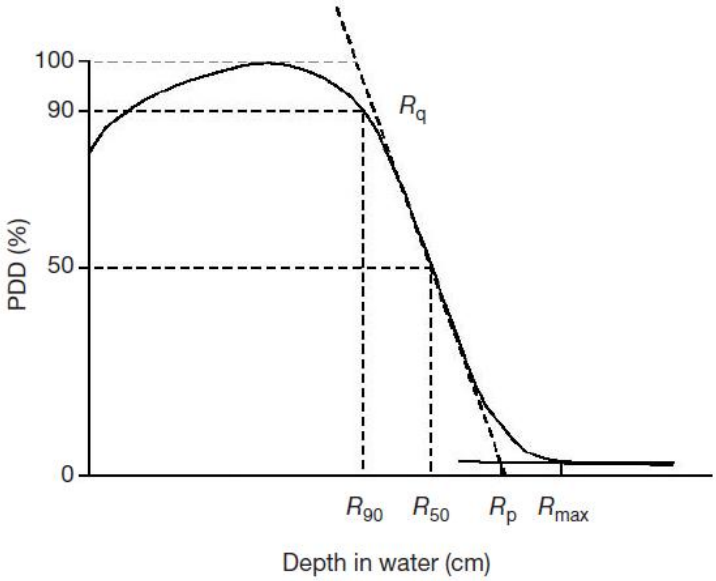

Fig 8. Typical electron beam PDD curve illustrating the definition of R_q, R_p, R_{max}, R_{50}.

전자선은 스펙트럼의 복잡성 때문에 완전히 특정 짓는 단일 에너지 매개변수가 없다. 최빈 에너지 E_p, 평균 에너지 E_a 및 실제 비정 R_p는 몇 가지 매개변수를 적용하여 식 (13), (14)와 같이 설명된다.

$$E_p = 0.22 + 1.98R_p + 0.0025Rp^2 \quad (13)$$

$$E_p = 0.22 + 5.09R_p \quad (14)$$

식 (13)은 물에 대한 식이며 식 (14)는 aluminum에 대한 식이다. 여기서 E_p의 단위는 MeV이며 실제비정을 뜻하는 R_p의 단위는 cm이다. 평균 전자 에너지 E_a는 흡수선량이 최대 선량의 50 %까지 떨어지는 깊이 R_{50}과 관련이 있다.

$$\overline{E_a} = CR_{50} \quad (15)$$

여기서 C는 물의 경우 2.33 MeV/cm이며 알루미늄의 경우 6.2 MeV/cm이다. R_{50}은 IAEA TRS 398에 명시된 전자선 선량측정의 빔 품질 지수이다. R_{50}은 실제 측정된 $R_{50,ion}$에

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서 계산되는데 이는 식 (16), (17)과 같다.

$$\mathrm{R}_{50} = 1.029\mathrm{R}_{50,\mathrm{ion}} - 0.06\,[\mathrm{g/cm^2}]\,(\mathrm{for}\,R_{50,ion} \leq \ 10\,g/cm^2) \tag{16}$$

$$\mathrm{R}_{50} = 1.059\mathrm{R}_{50,\mathrm{ion}} - 0.37\,[\mathrm{g/cm^2}]\,(\mathrm{for}\,R_{50,ion} \leq \ 10\,g/cm^2)^{[15]} \tag{17}$$

일반적으로 알루미늄 웨지는 전자선 에너지를 측정하는데 이용된다. 본 논문에서 사용된 GEX Corporation의 P4701 Risø HDRL 2피스 Aluminum wedge는 조립할 때 가로 12 cm 세로 14 cm 세로 2.9 cm 두께로 공칭 16° 각도를 가진다. Aluminum wedge에 배치하여 사용되는 선량계 웨지 카드 배열은 사용 직전까지 포장을 밀봉하여 환경 조건이 유지되도록 해야 한다. 웨지를 분리한 후 테스트를 실행할 준비가 되면 패키지를 열고 카드 배열을 가장 낮은 번호의 선량계가 아래 부분의 두꺼운 끝 위로 오도록 카드의 방향을 정하고 카드 구멍을 쐐기 핀과 정렬 카드를 금속 위에 대고 아래로 누른다. Figure 9는 Risø 알루미늄 쐐기 위에 웨지 카드의 정확한 방향을 나타낸다.

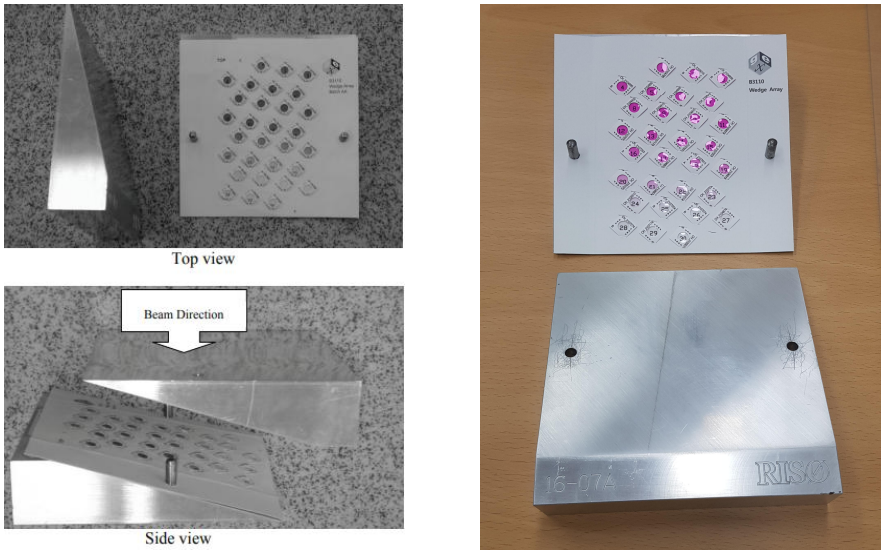

Fig 9. Aluminum wedge and B3 film dosimeter[16]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. UBC 속도

전자선을 조사시켰을 때 물질에 대한 흡수선량은 평균 빔 전류, 빔 폭, UBC(Under Beam Conveyor) 속도 및 전자선 에너지에 따라 달라진다. 그 관계는 식 (18)과 같이 표현된다.

$$D = \frac{(K \times I)}{(V \times W_b)} \tag{18}$$

여기서 D는 흡수선량, I는 평균 빔 전류, V는 UBC 속도, W_b는 빔 폭 그리고 K는 추세선 기울기를 나타낸다. 이 식을 바탕으로 UBC 속도와 1/D 간의 관계에서 선형성을 유지하는 것을 보여주는 것은 시설이 예상대로 작동하고 주어진 전자선 에너지에서 변수를 적절하게 선택하여 선량을 조절할 수 있음을 의미하는 것이다. 또한 측정 반복성 및 운전변수의 안정성을 결정할 수 있도록 주요 변수의 동일한 값에 대해 충분한 횟수로 측정해야 한다.[17] 따라서 본 실험에서는 UBC 속도에 따른 각 3회의 측정결과로 선량의 변화를 확인하고 그 결과를 통해 UBC 속도와 선량간의 관계를 확인해보고자 한다.

3. 전자선 보정 팬텀

전자선 보정 팬텀은 전자선 조사시설에서 선량계의 소내 배치 보정을 수행하는 데 사용된다. 이러한 팬텀은 방사선 선원에 선량계를 일관성 있게 표시하는 방법을 제공하도록 설계 및 제작되었다. 그러나 팬텀 설계만으로는 선량계가 동일한 선량을 받도록 보장할 수 없다. 사용자는 팬텀 영역에 대한 선량 분포가 균일한지 확인해야 하며, 이 균일성을 유지하기 위해 조사 영역에서 팬텀의 최적 배치를 선택해야 한다. 보정 팬텀을 사용하기 위해서는 포장된 선량계를 사용하고 필요한 경우 선량계가 과대 포장되어 있지 않도록 포장 재료를 절단해야 하며 조사 중에 움직이지 않도록 테이프로 제자리에 고정해야 한다.[18]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 논문에서 사용된 GEX Corporation의 P1020 10 MeV electron beam calibration phantom 및 제원은 Figure 10과 같은데 이 팬텀은 알라닌 기준 선량계(디스크 홀더에 둘러싸인 3 mm 알갱이의 형태, 직경 25 mm, 두께 6 mm)와 필름 선량계를 부착한다. 6 mm 두께의 상단 판 없이 사용할 경우 이 팬텀은 4 MeV 이하의 에너지에서도 사용하기에 적합하다.[19]

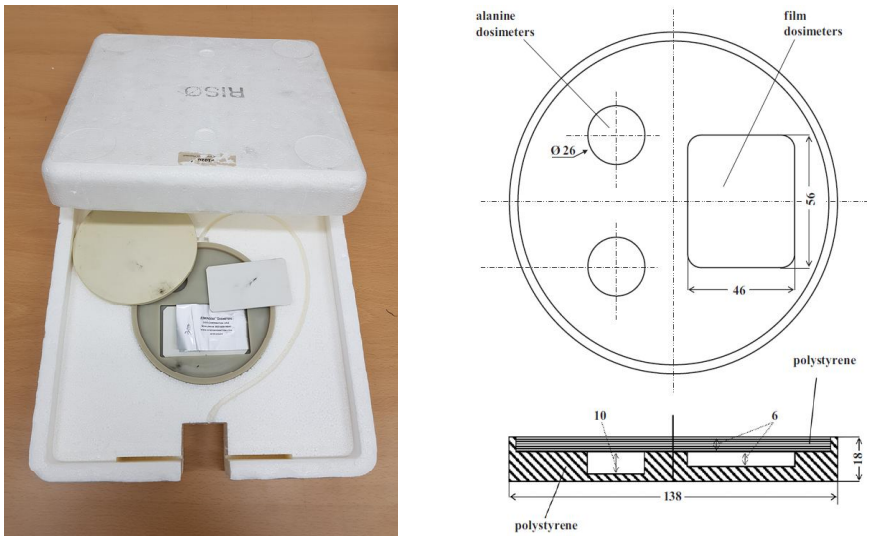

Fig 10. Electron beam calibration phantom and specification[20]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 깊이선량분포 측정 대상

깊이선량분포의 측정 대상물질은 물의 밀도를 기준으로 물의 밀도보다 작은 밀도를 가진 물질과 큰 밀도를 가진 물질 중 대표적인 물질을 대상으로 선정하였다. 선정된 실험 대상의 크기와 무게를 직접 측정하여 Table 3과 같이 규격 및 밀도를 산출하였다. 실험은 각 물질을 판 형태로 준비하여 적층을 쌓아 진행되었다. 적층은 Figure 11과 같이 동일한 크기와 두께를 가진 판자를 쌓아 올리고 적층 중심을 따라 판과 판 사이에 필름선량계를 배치하여 조사시킨 후 선량을 측정하는 방법이다.

깊이선량분포 측정대상을 전자선 조사 시 측정대상은 컨베이어 중앙에 위치되어야 하며 측정대상을 고정하는데 트레이나 작은 통 같은 용기가 사용되는 경우 컨테이너 측면이나 벽에서 멀리 떨어져 있어야 한다. 또한 전자선 조사기와 측정대상 간의 거리는 통상적으로 운용되는 공정 동안의 전자선 조사기와 제품 간의 거리와 동일해야하며 측정대상은 방사 구역을 통해 컨베이어를 일정한 속도로 움직여 조사되어야 한다. 전자선의 입사각은 측정대상 표면에 수직이어야 한다.[21]

Table 3. Measurement target of depth-dose distribution[22][23]

	Polyethylene (PE)	Acrylic	Polyethylene terephthalate (PET)	Polyvinyl chloride (PVC)	Aluminum
Size [mm] (W×D×H)	300×300 ×20	300×300 ×20	300×300 ×20	300×300 ×20	300×300 ×20
Density [g/cm^3]	0.9722	1.2056	1.2889	1.6111	2.6667
Water absorption [%]	0.005 ~ 0.015	0.100 ~ 0.400	0.100 ~ 0.200	0.200 ~ 1.000	-
Thermal conductivity [W/m-K]	0.450 ~ 0.500	0.150 ~ 0.250	0.290	0.160	151

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

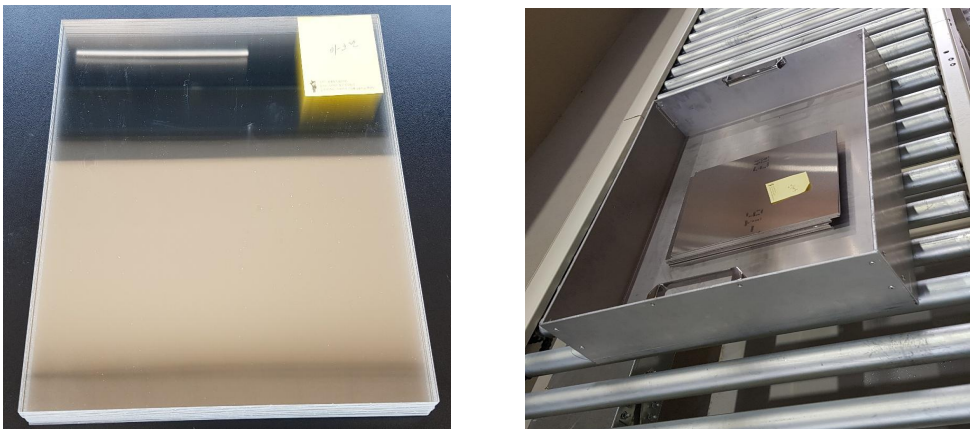

Fig 11. Acrylic plate stack and aluminum plate stack in tray

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 운전 적격성 시험 선량 측정

제 1 절 전자선 에너지 측정

전자선 에너지는 알루미늄 웨지에 B3 필름 선량계를 부착하여 15 kGy, 25 kGy, 30 kGy 조건에서 각각 조사시킨 후 구하였다. Figure 12~14는 알루미늄 웨지의 깊이선량분포 곡선을 나타내고 있으며 Table 4는 깊이선량분포 곡선으로부터 산출된 전자선 에너지이다. 일반적으로 에너지 기준으로 사용되는 E_a는 평균 9.71 ± 0.03 MeV이며 산출된 전자선 에너지는 선량에 따라 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Result of the energy measurement

	15 kGy	25 kGy	30 kGy	Average
R_p [cm]	2.12	2.14	1.93	2.06 ± 0.12
E_p [MeV]	10.88	10.97	9.92	10.59 ± 0.58
R_{50} [cm]	1.58	1.58	1.59	1.58 ± 0.01
E_a [MeV]	9.70	9.69	9.74	9.71 ± 0.03

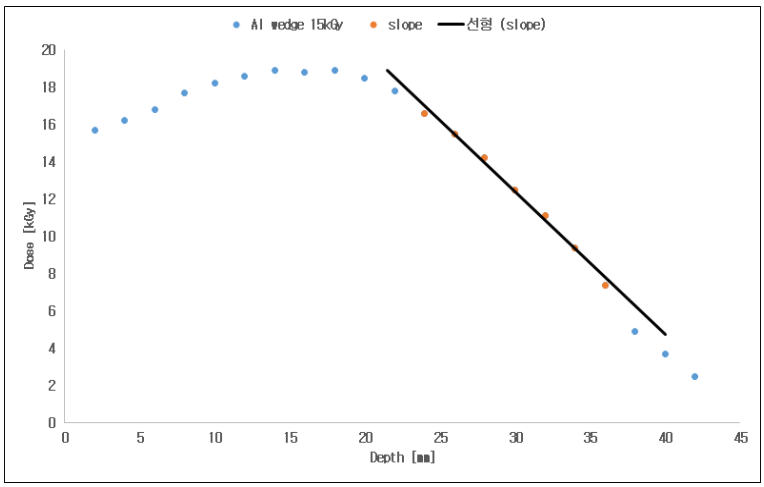

Fig 12. 15 kGy aluminum wedge depth-dose distribution curve

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

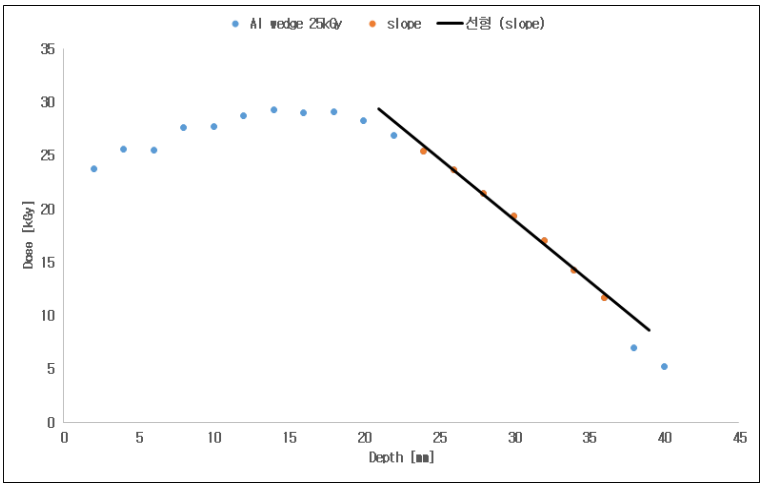

Fig 13. 25 kGy aluminum wedge depth-dose distribution curve

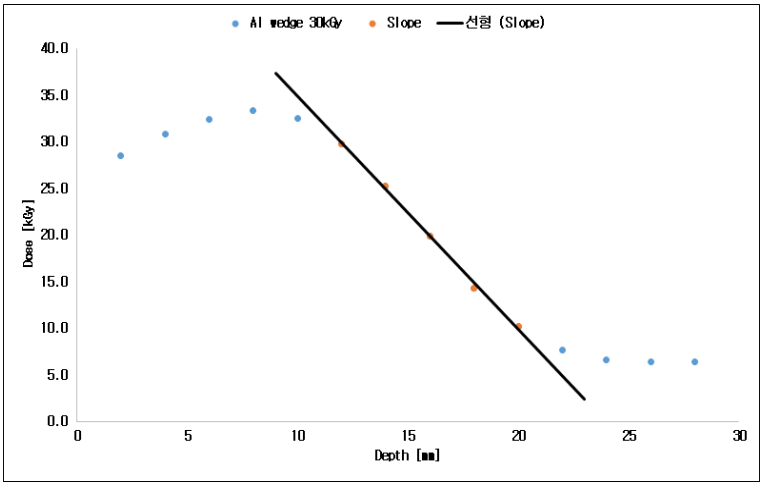

Fig 14. 30 kGy aluminum wedge depth-dose distribution curve

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 UBC 속도와 선량간의 관계

Table 5는 UBC 속도별 선량 측정 결과를 나타내고 있다. 실험은 GEX Corporation의 P1020 10 MeV electron beam calibration phantom을 이용하여 진행되었으며 UBC 속도를 5가지(3 m/min, 2 m/min, 1.5 m/min, 1.0 m/min, 0.5 m/min) 조건으로 나누어 각 3회씩 수행되었다. Figure 15는 시험한 결과에 대해 선형 회귀식을 얻은 그래프이며 결정계수 R^2은 0.9976으로 UBC 속도와 1/D간의 관계는 선형성을 유지하고 있었다.

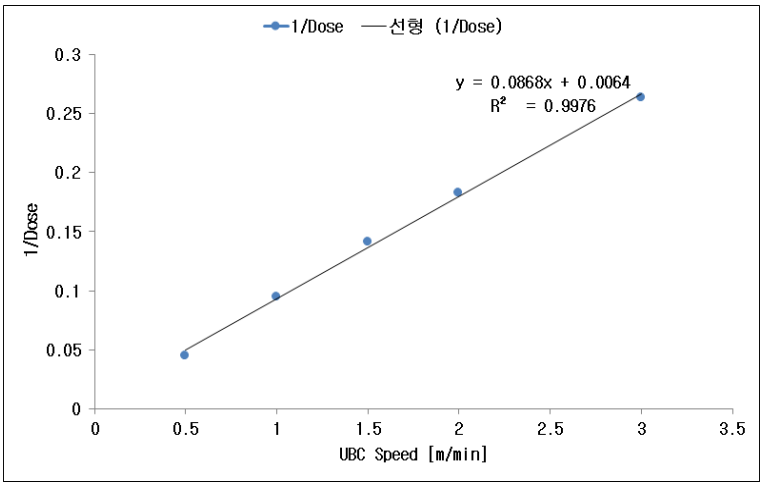

Fig 15. Dose trend by UBC speed

Table 5. Dose measurement results by UBC speed

UBC Speed [m/min]	Dose [kGy]	1/Dose
3	3.80	0.26
2	5.47	0.18
1.5	7.10	0.14
1.0	10.53	0.09
0.5	22.30	0.04

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 선량 선형성

물질별 깊이선량분포를 측정하기 전에 가속기 제어 시스템에서 설정한 선량과 실제 조사된 선량간의 차이를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 선량은 5 kGy, 10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy로 설정하였으며 각 3회씩 진행되었다. UBC 속도와 선량간의 관계를 알아보기 위한 실험과 마찬가지로 GEX Corporation의 P1020 10 MeV electron beam calibration phantom을 이용하였으며 그 결과를 그래프로 나타내었다. 결정계수 R^2은 0.9994로 선형성을 잘 유지하고 있었고 설정한 선량과 실제 조사된 선량간의 차이는 2.67 % 이하로 차이가 미미하다는 것을 알 수 있었다.

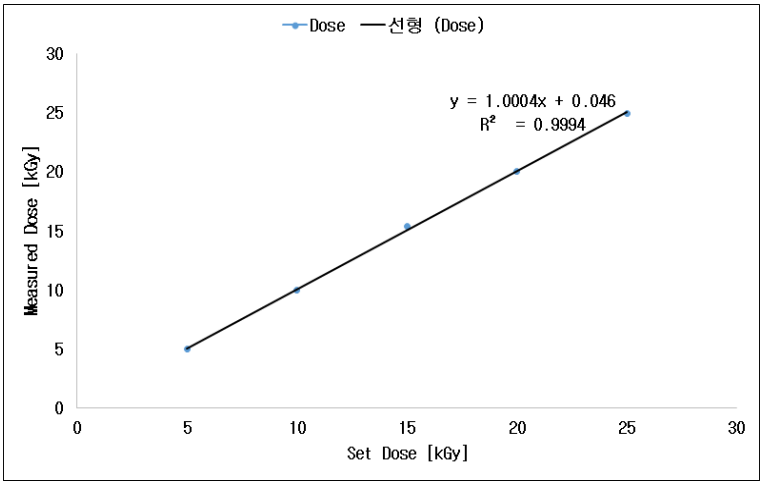

Fig 16. Trend of set dose and measured dose

Table 6. Measurement results of set dose and 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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 물질별 깊이선량분포

물질별 깊이선량분포 측정 실험은 10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy의 4가지 선량 조건에서 진행되었으며 그 결과를 Table 7~11과 같이 나타내었다.

Table 7. Measurement results of depth-dose in polyethylene

Depth [mm]	Set Dose [kGy]			
	10	15	20	25
2	8.60	13.50	17.70	20.90
4	9.20	13.90	18.40	21.00
6	9.40	14.10	18.50	21.20
8	9.70	14.50	18.90	21.80
10	9.80	15.00	19.00	22.40
12	9.60	15.10	19.40	22.85
14	9.90	15.40	20.00	23.40
16	10.20	15.30	20.00	23.70
18	10.00	15.50	20.30	24.10
20	10.40	15.30	20.00	24.30
22	10.40	15.30	19.80	24.00
24	10.40	14.90	19.20	24.00
26	10.00	14.30	18.90	23.60
28	9.80	13.70	17.90	22.60
30	9.30	12.70	17.20	21.30
32	8.60	11.50	15.30	20.35
34	8.10	9.80	13.90	18.55
36	6.80	8.30	11.80	17.25
38	5.90	7.10	9.50	15.00
40	4.80	5.20	7.10	12.90
42	3.70	3.60	5.50	10.70
44	2.70	2.50	3.70	7.80
46	1.80	1.50	2.30	5.40
48	1.20	1.00	1.20	3.20
50	0.70	0.80	0.60	1.70
52	0.30	0.40	0.30	0.70
54	Under Range	0.40	Under Range	0.30
56	Under Range	Under Range	Under Range	0.30
58	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
60	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 8. Measurement results of depth-dose in acrylic

Depth [mm]	Set Dose [kGy]			
	10	15	20	25
2	8.80	13.50	17.40	21.00
4	8.80	13.70	18.30	22.40
6	9.00	14.20	18.70	22.60
8	9.30	14.60	18.90	23.10
10	9.20	14.90	19.20	23.60
12	9.90	14.80	19.40	23.60
14	9.70	15.30	19.70	23.60
16	10.00	15.40	19.90	23.80
18	10.00	15.50	19.90	24.30
20	10.20	15.70	20.10	24.60
22	10.70	15.90	20.00	24.30
24	10.40	16.00	20.10	24.50
26	10.30	16.00	20.50	24.50
28	9.90	15.50	20.30	24.30
30	10.10	15.60	20.30	23.80
32	10.00	15.10	19.80	23.20
34	9.50	14.50	18.90	22.20
36	9.00	13.70	17.90	21.40
38	8.10	13.10	16.60	20.00
40	7.60	11.90	15.10	18.10
42	6.60	10.20	13.50	16.50
44	5.70	9.20	12.30	14.30
46	4.80	7.30	9.80	11.80
48	3.70	5.80	7.80	8.80
50	3.00	4.40	6.10	7.30
52	2.00	3.30	4.30	4.80
54	1.30	2.00	2.90	3.40
56	0.80	1.20	2.60	2.10
58	Under Range	0.70	1.00	1.20
60	Under Range	0.40	0.40	0.60

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 9. Measurement results of depth-dose in polyethylene terephthalate

Depth [mm]	Set Dose [kGy]			
	10	15	20	25
2	9.00	13.70	17.40	21.20
4	9.20	14.30	18.30	21.85
6	9.50	14.20	18.70	22.10
8	9.70	14.50	19.40	23.00
10	9.90	14.90	19.70	23.75
12	10.30	15.40	20.20	24.45
14	10.10	15.40	20.70	24.65
16	10.30	16.10	21.10	24.50
18	10.60	15.90	20.70	24.60
20	10.20	15.80	20.90	24.65
22	10.60	15.70	20.50	24.25
24	10.20	15.60	20.20	23.95
26	9.70	15.10	19.10	23.35
28	9.40	14.40	18.30	21.80
30	8.80	13.10	16.60	19.95
32	7.50	11.60	15.10	17.90
34	6.80	10.30	13.10	15.35
36	5.50	8.40	10.80	12.20
38	4.40	6.30	8.10	9.40
40	3.00	4.60	6.50	6.75
42	2.20	3.10	6.30	4.10
44	1.40	1.80	4.20	2.30
46	0.60	1.10	2.50	1.10
48	0.30	0.60	1.20	0.40
50	Under Range	0.40	0.60	Under Range
52	Under Range	0.40	0.30	Under Range
54	Under Range	0.30	Under Range	Under Range
56	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
58	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
60	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 10. Measurement results of depth-dose in polyvinyl chloride

Depth [mm]	Set Dose [kGy]			
	10	15	20	25
2	9.00	13.90	18.70	22.00
4	9.90	14.70	19.40	24.50
6	10.50	15.90	20.10	26.00
8	11.10	16.80	21.60	27.40
10	11.40	17.60	22.30	28.70
12	12.20	18.50	23.40	29.80
14	12.50	19.80	24.20	31.10
16	12.20	18.80	24.30	30.40
18	11.90	18.30	23.70	30.00
20	11.30	17.90	22.50	28.10
22	10.50	16.20	20.50	25.30
24	9.20	14.50	17.90	21.60
26	7.60	11.50	14.80	17.60
28	6.30	9.50	12.10	13.70
30	4.70	6.90	9.00	10.10
32	3.30	5.50	6.10	6.70
34	2.00	3.20	3.60	3.90
36	1.30	1.80	1.20	2.90
38	0.70	1.10	0.50	1.40
40	0.50	0.70	0.30	0.80
42	0.40	0.50	0.30	Under Range
44	Under Range	0.40	0.30	Under Range
46	Under Range	0.40	Under Range	Under Range
48	Under Range	0.40	Under Range	Under Range
50	Under Range	0.30	Under Range	Under Range
52	Under Range	0.30	Under Range	Under Range
54	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
56	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
58	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
60	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 11. Measurement results of depth-dose in aluminum

Depth [mm]	Set Dose [kGy]			
	10	15	20	25
2	9.30	14.20	18.80	22.60
4	10.60	16.00	20.50	25.50
6	11.70	17.40	22.60	28.60
8	12.40	19.20	25.30	30.20
10	13.00	19.80	25.20	31.00
12	12.30	18.70	24.40	30.00
14	11.00	16.60	21.80	26.30
16	8.70	13.30	17.20	21.10
18	6.10	9.30	12.10	14.70
20	3.70	5.70	7.10	8.60
22	Under Range	2.80	3.50	4.20
24	Under Range	1.10	1.40	Under Range
26	Under Range	0.60	0.90	Under Range
28	Under Range	0.30	0.60	Under Range
30	Under Range	0.40	0.50	Under Range
32	Under Range	0.40	0.60	Under Range
34	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
36	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
38	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
40	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
42	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
44	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
46	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
48	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
50	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
52	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
54	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
56	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
58	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range
60	Under Range	Under Range	Under Range	Under Range

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 고찰

물질별 단면조사 깊이선량분포 곡선의 동향을 알아보기 위하여 4가지 선량 조건(10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy)에서 조사시킨 후 그래프로 도식화하였다. PE의 선량별 깊이선량분포는 표면선량율이 평균적으로 약 86 % 정도로 나타났으며 최대선량은 평균 약 21.5 mm 두께에서 도달하였다. Acrylic은 표면선량율이 PE보다 조금 낮은 정도인 약 84 %였고 최대선량은 약 23 mm 정도에서 나타났다. PET의 결과 역시 PE와 Acrylic과 유사하게 표면선량율은 약 85 % 정도였으나 최대선량은 약 17.5 mm 두께에서 나타나 앞선 두 물질보다 최대선량이 더 낮은 깊이에서 도달했다는 것을 알 수 있다. 비교적 밀도가 높은 물질인 PVC 및 Aluminum은 표면선량율이 각각 약 74 %, 73 %로 훨씬 더 낮은 값을 보였으며 최대선량은 각각 약 14.5 mm, 9.5 mm 부근에서 나타났다. 이로 인해 선량에 따라서 단면조사 시 각 물질의 깊이선량분포 곡선의 형태가 변하지 않는다는 것을 확인하였고 또한 대체로 밀도가 클수록 표면선량율이 낮으며 최대선량에 도달하는 깊이 역시 더 낮다는 것을 알 수 있다.

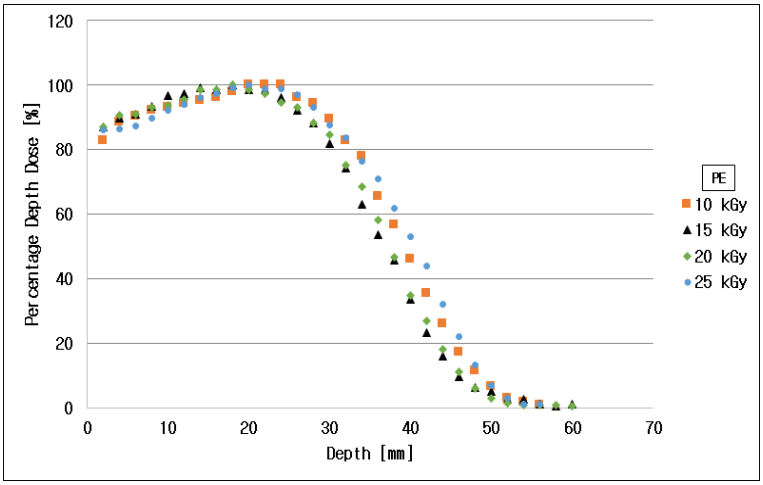

Fig 17. Depth-dose distribution curve of polyethylene

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

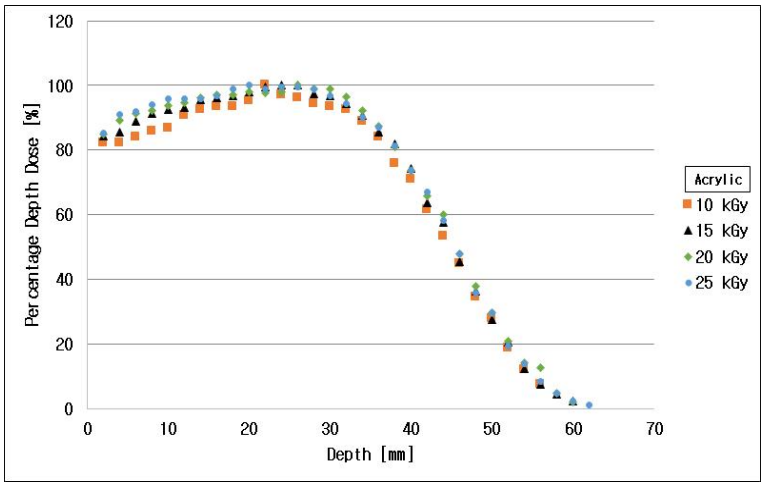

Fig 18. Depth-dose distribution curve of acrylic

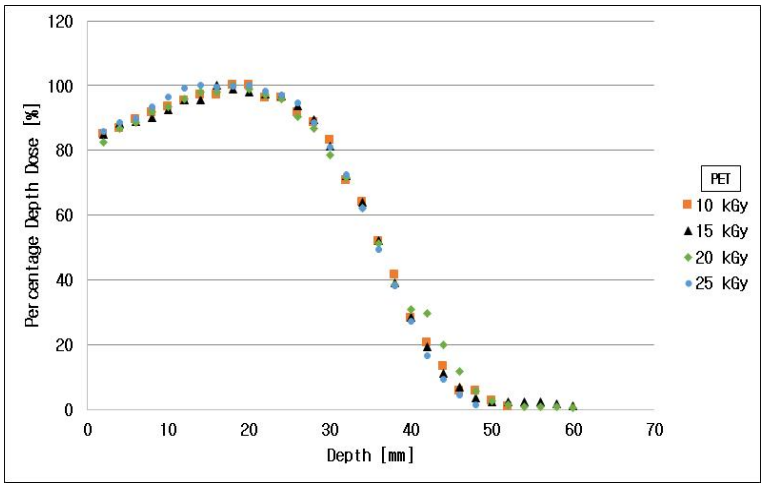

Fig 19. Depth-dose distribution curve of polyethylene terephthalate

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

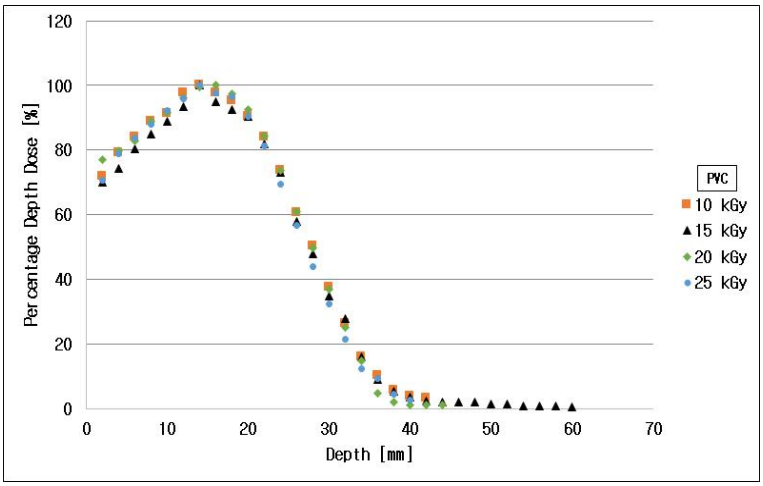

Fig 20. Depth-dose distribution curve of polyvinyl chloride

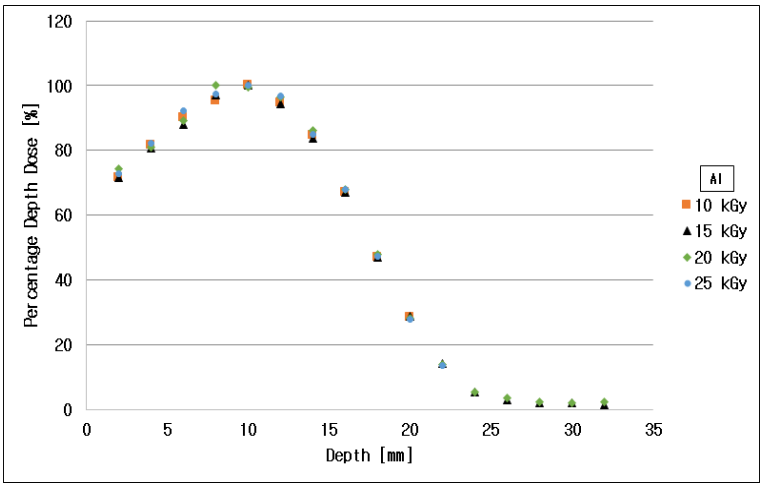

Fig 21. Depth-dose distribution curve of aluminum

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

앞서 수행된 단면조사 실험 결과인 물질별 깊이선량분포 곡선을 통해 R_{opt}, R_{50e}, R_{50}, R_p를 도출하였다. R_{opt}는 깊이선량분포 곡선의 하강 부분에서 표면선량과 같은 선량을 나타내는 깊이로 정의되며 R_{50e}는 깊이선량분포 곡선의 하강 부분에서 표면선량의 50 %에 도달하는 깊이를 뜻한다. 결과적으로 선량 조건에 따라서 비정이 큰 변화를 보이지는 않았으나 대체로 밀도가 큰 물질일수록 비정이 낮은 값을 나타내었다. 이 중 R_{opt}를 기준으로 각 물질의 양면조사를 실시하였다.

Table 12. R_{opt}, R_{50e}, R_{50}, R_p measurement results of various materials

	Dose [kGy]	R_{opt} [mm]	R_{50e} [mm]	R_{50} [mm]	R_p [mm]
PE	10	32.00	41.00	39.18	49.40
	15	28.00	38.00	36.74	46.93
	20	28.00	38.00	39.43	50.17
	25	31.00	42.00	40.43	52.22
Acrylic	10	36.00	47.00	44.64	56.92
	15	36.00	46.00	45.15	56.02
	20	36.00	47.00	45.52	57.04
	25	36.00	47.00	45.42	57.30
PET	10	30.00	38.00	36.28	45.79
	15	30.00	38.00	36.18	45.57
	20	29.00	38.00	36.07	46.49
	25	28.00	37.00	35.90	45.49
PVC	10	24.00	30.00	27.97	36.68
	15	24.00	30.00	27.74	36.74
	20	24.00	30.00	27.90	36.39
	25	24.00	30.00	27.11	35.61
Aluminum	10	16.00	19.00	17.68	23.57
	15	16.00	19.00	17.70	23.67
	20	16.00	19.00	17.87	23.28
	25	16.00	19.00	17.74	23.49

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 22~26은 양면조사 시 물질별 선량에 따른 동향을 알아보기 위해 수행된 실험의 결과이다. PE를 양면조사 했을 경우 약 31.5 mm 깊이에서 최대선량에 도달하였으며 Acrylic은 36 mm, PET는 29.6 mm 깊이에서 최대선량이 나타났고 PVC와 Aluminum은 각각 24 mm, 16 mm 깊이에서 최대선량 값을 확인할 수 있었다. 양면조사의 결과를 통하여 단면조사의 결과와 유사하게 대체로 밀도가 큰 물질일수록 더 낮은 깊이에서 최대선량에 도달한다는 것을 알 수 있었으며 양면조사를 했을 경우에는 단면조사보다 전자선의 투과 깊이가 증가한다는 것을 확인하였다.

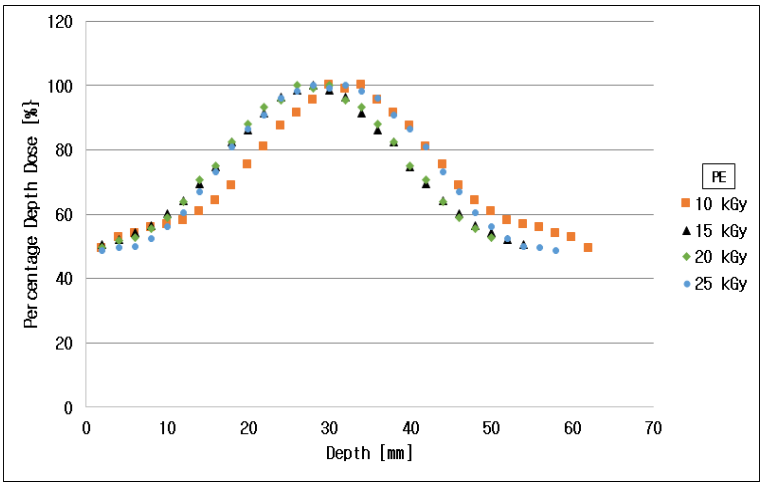

Fig 22. Depth-dose distribution curve of polyethylene in double-sided irradiation

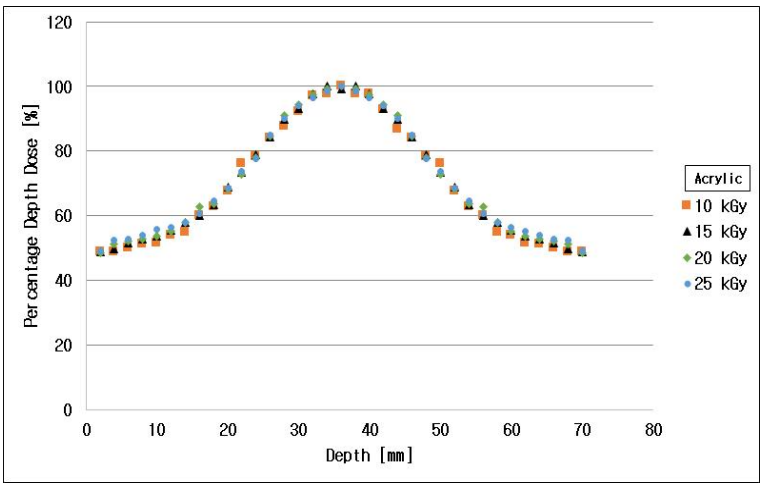

Fig 23. Depth-dose distribution curve of acrylic in double-sided irradiation

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

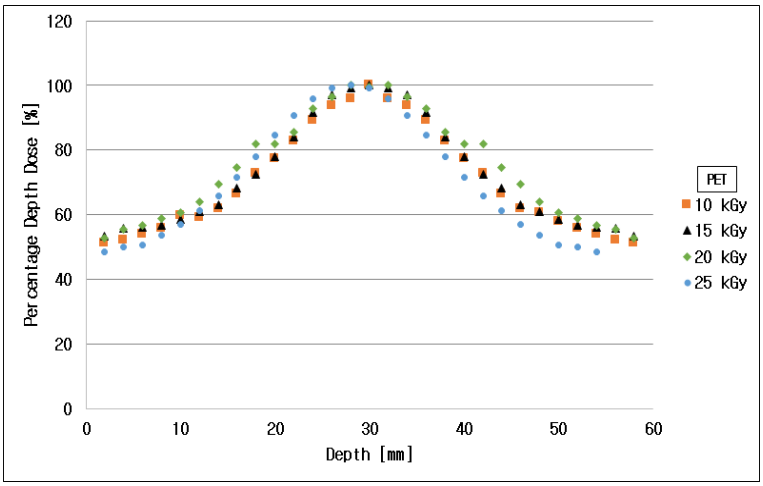

Fig 24. Depth-dose distribution curve of polyethylene terephthalate in double-sided irradiation

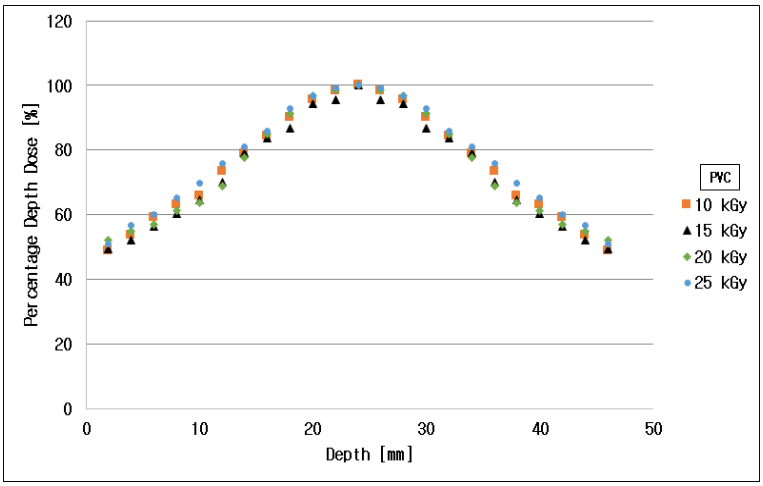

Fig 25. Depth-dose distribution curve of polyvinyl chloride in double-sided irradiation

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

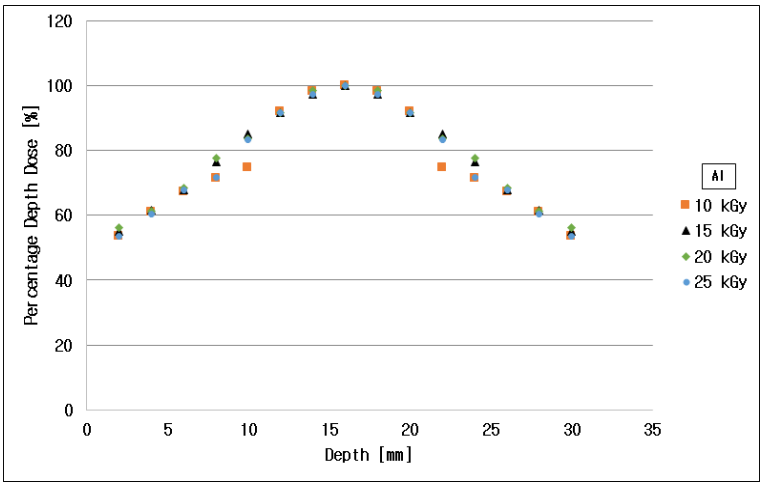

Fig 26. Depth-dose distribution curve of aluminum in double-sided irradiation

각 물질별로 단면조사 및 양면조사를 수행한 결과를 통해 다음과 같이 조사 대상의 밀도와 최대선량에 도달하는 깊이의 관계를 도출할 수 있다.

Single-sided irradiation : $(1/\rho) \times 2 \leq$ Depth in D_{max}

Double-sided irradiation : $(1/\rho) \times 3 \leq$ Depth in D_{max}

따라서 임의의 조사대상에 대해 단면조사 시 두께가 밀도의 역수의 2배 이하일 때 그 물질은 표면부터 바닥까지 선량이 조사될 수 있으며 만일 그보다 더 두꺼운 물질일 경우 양면조사를 실시하는 방안을 고려해야 한다. 또한 양면조사 시에는 물질의 두께가 밀도의 역수의 3배 이하일 때 균일하게 조사될 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결론

본 연구는 운전 적격성 시험의 항목 중 연구 범위 내 가능한 항목을 시험해보고 ISO/ASTM에 제시된 OQ의 선량측정절차에 대해 상세히 제시하였으며 선정된 대상 물질을 여러 선량 조건에서 조사시켜 깊이선량분포를 분석하여 물질별 최적의 조사조건을 도출하였다.

운전 적격성 시험은 흡수선량 품질에 영향을 줄 수 있는 주요한 인자인 전자선 에너지, UBC 속도, 선량 선형성에 대해 검증하였다. 전자선 에너지는 깊이선량분포에 영향을 주고 빔 균질성과 관련이 있어 확인해보았고 UBC 속도와 1/D간의 관계가 선형성을 유지하는 것은 시설이 예상대로 작동하고 있으며 변수를 적절하게 선택하여 선량 조절이 가능함을 의미하므로 이를 검증해보았다. 또한 전자선 보정 팬텀을 이용하여 가속기 제어 시스템에서 설정한 선량과 실제 조사된 선량간의 차이를 분석하여 선량 선형성을 검증하였다. 시험의 절차는 ISO/ASTM에 제시된 선량측정 절차에 따라 수행하였으며 선량측정은 B3 필름 선량계를 이용하였다. 추가적으로 전자선 에너지 측정 시험은 Aluminum wedge 장치를 이용하였고 UBC 속도 및 선량 선형성 시험은 전자선 보정 팬텀을 이용하여 시험을 진행하였다.

물질별 깊이선량분포 분석 실험은 전자선의 선량측정 요건을 정립하기 위하여 5가지 물질을 선정하여 각 물질을 판 형태로 준비한 후 적층을 쌓아 B3 필름 선량계를 부착해 여러 선량 조건에서 단면조사 및 양면조사를 수행하는 절차로 진행되었다. 측정결과를 통해 물질별 최적의 조사조건을 도출하기 위하여 깊이선량과 물질의 밀도와의 관계를 분석하였다.

운전 적격성 시험 결과, GEX Corporation의 P4701 Risø HDRL 2피스 알루미늄 웨지를 이용하여 측정된 일반적으로 에너지 기준으로 사용되는 E_a는 평균 9.71 ± 0.03 MeV이며 산출된 전자선 에너지는 선량에 따라 변화가 거의 없었다. 또한 GEX Corporation의 P1020 10 MeV electron beam calibration phantom을 이용하여 진행된 UBC 속도와 선량의 관계를 확인하기 위한 실험은 UBC 속도를 5가지(3 m/min, 2 m/min, 1.5 m/min, 1.0 m/min, 0.5 m/min) 조건으로 나누어 각 3회씩 수행되었다. 그 결과 결정계수 R^2은 0.9976으로 UBC 속도와 1/D간의 관계는 선형성을 유지하고 있었다. 전자선 보정 팬텀을 이용하여 가속기 제어 시스템에서 설정한 선량과 실제 조사된 선량

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

간의 차이를 확인하기 위해 수행된 실험은 선량 조건을 5 kGy, 10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy로 설정하였으며 각 3회씩 진행되었다. UBC 속도와 선량간의 관계를 알아보기 위한 실험과 마찬가지로 GEX Corporation의 P1020 10 MeV electron beam calibration phantom을 이용하였으며 결과적으로 결정계수 R^2은 0.9994로 선형성을 잘 유지하고 있었고 설정한 선량과 실제 조사된 선량간의 차이는 2.67 % 이하로 차이가 미미하다는 것을 알 수 있었다.

물질별 깊이선량분포 분석 실험은 4가지 선량 조건(10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy) 하에 수행되었는데 그 결과 단면조사의 경우 조사된 선량에 따라 각 물질의 깊이선량분포 곡선의 형태가 변하지 않는다는 것을 확인하였고 또한 대체로 밀도가 클수록 표면선량율이 낮으며 최대선량에 도달하는 깊이 역시 더 낮다는 것을 알 수 있었다. 단면조사 깊이선량분포 곡선을 통해 R_{opt}, R_{50e}, R_{50}, R_p를 도출한 후 R_{opt}를 기준으로 각 물질의 양면조사를 실시하였다. 양면조사의 결과를 통하여 단면조사의 결과와 유사하게 대체로 밀도가 큰 물질일수록 더 낮은 깊이에서 최대선량에 도달한다는 것을 알 수 있었으며 양면조사를 했을 경우에는 단면조사보다 전자선의 투과 깊이가 증가한다는 것을 확인하였다.

각 물질별로 단면조사 및 양면조사를 수행한 결과를 통해 다음과 같이 조사 대상의 밀도와 최대선량에 도달하는 깊이의 관계를 도출할 수 있다.

Single-sided irradiation : $(1/\rho) \times 2 \leq \text{Depth in } D_{max}$

Double-side irradiation : $(1/\rho) \times 3 \leq \text{Depth in } D_{max}$

따라서 임의의 조사대상에 대해 단면조사 시 조사대상의 두께가 밀도의 역수의 2배 이하일 때 그 물질은 표면부터 바닥까지 선량이 조사될 수 있으며 만일 그보다 더 두꺼운 물질일 경우 양면조사를 실시하는 방안을 고려해야 한다. 또한 양면조사 시에는 물질의 두께가 밀도의 역수의 3배 이하일 때 균일하게 조사될 수 있다. 그러나 상기 도출된 관계식은 오차가 있고 필름선량계의 습도 및 자외선 보정이 필요하므로 이를 고려하여 사용하거나 향후 추가적인 실험을 통해 보다 불확도가 적은 관계식을 산출하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] 채종서. 2012. 방사선 산업용 가속기의 현황과 전망. 방사선산업학회지. 6(1):101-110

[2] 이명우. 2009. 전자선 가속기 전자빔 배분장치에 의한 피폭저감. 방사선방어학회지. 23(4):298-299

[3] 김성우. 2015. 선형가속기 시작품의 전자선 흡수선량 측정에 관한 연구. 동아대학교 석사학위 논문

[4] 하태성, 안철, 정평환, 조정희, 이종석, 이혜남, 유병규. 2010. 국제표준에 따른 10 MeV급 전자빔 조사시설의 흡수선량 품질보증에 관한 연구. 방사선기술과학회지. 33(4):387-394

[5] ISO/ASTM 51649. 2015. Practice for dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV

[6] 이병철, 정영욱, 박성희, 한영환, 강희영. 2006. 전자가속기의 산업 이용. 물리학과 첨단기술지. 2006(3):21-28

[7] 김성우. 2015. 선형가속기 시작품의 전자선 흡수선량 측정에 관한 연구. 동아대학교 석사학위 논문

[8] 이재기. 2016. 방사선방호원론

[9] 김정기. 2007. 의료용 선형가속기에서 발생되는 X-선 및 전자선의 특성에 관한 연구. 동아대학교 박사학위논문

[10] 이병노. 2014. 고주파 드라이버 변조 기반 KAERI S-band 고주파 선형 전자가속기의 9/6 MeV 이중에너지 구현. 성균관대학교 박사학위논문

[11] High Power accelerators for research and industry MB10-30

[12] 식품의약품안전청. 2006. 의료기기의 멸균 조사멸균의 유효성 확인 및 일상 관리

[13] Zofia Peimel-Stuglik, Slawomir Fabisiak. 2008. A comparison of the performance characteristics of four film dosimeters in a 10-MeV electron beam. Institute of Nuclear Chemistry and Technology. 2008(66):346-352

[14] GEX Corporation USA. 2010. B3 RADIOCHROMIC FILM DOSIMETRY

[15] International Atomic Energy Agency. 2005. Radiation Oncology Physics: A

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Handbook for Teachers and Students. 273-299

[16] GEX Corporation USA. 2007. E-BEAM ENERGY ESTIMATION USING THE RISø WEDGE

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

[18] GEX Corporation USA. P1020 & P1030 E-Beam Calibration Phantoms

[19] National Physical Laboratory. 2009. Guidelines for the Calibration of Routine Dosimetry Systems for use in Radiation Processing

[20] Zofia Peimel-Stuglik, Slawomir Fabisiak. 2008. A comparison of the performance characteristics of four film dosimeters in a 10-MeV electron beam. Institute of Nuclear Chemistry and Technology. 2008(66):346-352

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

[22] Omnexus The material selection platform. 2019. https://omnexus.specialchem.com

[23] Matweb Material property data. 2019. http://www.matweb.com