Original Article

PROGRESS in MEDICAL PHYSICS Vol. 27, No. 1, March, 2016
http://dx.doi.org/10.14316/pmp.2016.27.1.25

Measurement of Energy Parameters for Electron Gun Heater Currents and Output Dose Rate for Electron Beams from a Prototype Linac

Heuijin Lim, Manwoo Lee, Me Young Kim, Jungyu Yi, Mujin Lee, Sang Ku Kang, Dong Joo Rhee, Dong Hyeok Jeong

Research Center, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences, Busan, Korea

The dosimetric characteristics were experimentally evaluated for electron beams from the prototype linac developed for radiotherapy units. This paper focuses on the electron beam output and energy variations as a function of electron gun heater current. The electron energy was derived from its mean and most probable energies measured by film dosimetry. The electron beam output at the maximum electron energy was measured with the plane parallel ionization chamber in water using TRS-398 dosimetry protocol. The mean energy and the most probable energy of the electron beam were 6.54～3.31 MeV and 5.94～2.80 MeV at electron gun current of 2.02～2.50 A respectively. The output dose rate for an electron beam of mean energy 6.54 MeV was 5.41 Gy/min ±1.5% at the reference depth in water.

Key Words: Electron linac, Gun heater current, Output measurement

서 론

의료용 선형가속기는 전자 가속기를 방사선치료에 사용할 수 있도록 제작한 장치로서 1950년초 최초 개발된 이래로 지속적인 발전을 거듭하고 있다.[1] 당시 의료용 선형가속기는 기존의 코발트 치료기를 대체하기 위한 획기적인 장치로서 1952년 영국의 Hammersmith Hospital에 최초 설치되었고 1953년부터 치료가 시작된 것으로 알려져 있다.[1] 최근 국내에서도 의료용 가속기의 국산화를 위한 연구가 의료용 중입자 가속기와 의료용 선형가속기의 개발 분야에서 활발히 진행되고 있다.[2] 의료용 선형가속기는 중입자 가속기와 같은 대형 시설이 필요하지 않고 소형 전자가속기만으로 제작할 수 있어 대부분의 방사선치료 시설에서 사용되고 있다. 의료용 선형 가속기의 국산화는 미래 고부가가치 의료기기 산업으로 발전할 수 있는 중요한 목적과 함께 가속기를 구성하는 장치들의 국내 생산을 통하여 가속기 응용 산업의 활성화를 유도하는 부가적 효과를 가진다.

본 연구에서는 중장기적 측면에서 의료용 선형가속기의 국산화를 목적으로 전자가속기를 개발하고 또한 성능을 보강하고 있으며 이 때 초기에 개발한 약 4 MeV급 전자가속기의 기본 구조와 출력 특성은 기존의 논문에서 보고된바 있다.[3] 이후에 연구진들은 기존의 전자가속기에서 가속관을 6 MeV급으로 다시 제작하고 고주파 출력을 증가시킨 형태로 성능을 향상시켰으며 현재 최적 전자빔의 발생과 치료기급 성능 확보를 위한 연구에 주력하고 있다.[4] 이 때 전자가속기 부분의 구조와 특성은 가속기 관련 국제 학술회의(ICUBA 2015)에서 발표된바 있다.[4]

전자가속기에서 발생되는 전자선의 물리적 특성은 전자총과 고주파 발생원에 공급하는 전원, 고주파의 주파수와 출력, 가속관의 온도 등 다양한 파라미터에 의존하는 특성을 가지기 때문에 전자가속기의 초기 작동에서 이들의 특성을 분석하기 위한 일련의 시험이 필요하다. 특히 전자선의 에너지는 전자총의 가열 전류에 따라 급격한 변화를 보이기 때문에 최적의 가열 전류를 결정하기 위한 실험적 연구가 필요하다. 본 논문에서는 기존보다 보강된 전자가속

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(DIRAMS) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 50495-2016).
Received 15 March 2016, Revised 23 March 2016, Accepted 25 March 2016

Correspondence: Dong Hyeok Jeong (physics7@empas.com)
Tel: 82-51-720-5813, Fax: 82-51-720-5826

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기의 특성 시험의 일환으로 수행된 일련의 실험중에서 전자총 전류에 따른 선량학적 관점에서 평균에너지와 최빈에너지 그리고 흡수선량 출력 측정 결과를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구용 전자 선형가속기

연구용 선형가속기는 기존에 개발한 4 MeV급 C-밴드형 가속기에서 가속관을 6 MeV급으로 다시 제작하고 펄스전력을 보강하여 다시 제작한 형태를 가진다.[4] 이와 같이 보완된 펄스 전력시스템의 순간 출력은 약 6 MW이며 이를 통해 마그네트론(Magnetron)에서 발생되는 고주파의 출력은 2.5 MW로 평가된다.[4] 이 때 고주파의 주파수는 5712 GHz를 가지며 마이크로파의 C-밴드 대역에 해당한다.

펄스 전원장치에서 공급하는 펄스의 길이는 약 4 μs를 가지며 최대 반복율은 250 pps (pulses per second)이다. 펄스전원시스템은 기존의 시스템과 동일한 PFN (Pulse Forming Network)과 펄스 변압기의 결합 방식으로 작동하며 PFN에 저장된 전기 에너지는 싸이라트론(Thyratron)에 의하여 개폐된다.

2. 전자선 에너지

전자가속관에서 방출된 초기 전자빔은 수 mm의 좁은 크기에 거의 단일에너지에 가까운 특성을 가지며 이러한 초기의 집속된 전자빔에 대한 정확한 에너지 분석은 자기장을 이용한 질량분석기(Magnetic mass spectrometer)로 수행된다.[5] 그러나 전자선의 이용 측면에서 초기 전자선의 에너지보다 산란박과 모니터 전리함 그리고 어플리케이터를 모두 통과하여 팬텀 표면에 도달한 전자선의 에너지를 결정하는 것이 보다 중요하다. 이 때 팬텀 표면에서 전자선은 넓은 면적을 가지므로 이러한 넓은 조사면에 대하여 질량분석기의 적용은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실용적인 측면에서 선량학적 방법으로 평균에너지(Mean energy)와 최빈에너지(Most probable energy)를 결정하였으며 이를 전자선의 에너지 인자로 정의하였다.

국제원자력기구(IAEA)의 TRS-277 (Technical Report Series No. 277) 프로토콜에 의하면 팬텀표면에서 최빈에너지(E_p)와 평균에너지(E_0)는 다음과 같이 주어진다.[6]

$$E_p = 0.22 + 1.98R_p + 0.0025R_p^2 \quad (1)$$

$$E_0 = 2.33R_{50} \quad (2)$$

여기서 R_p는 실효비정(Practical range)이며, R_{50}은 흡수선량이 50%로 줄어드는 깊이이다. E_0가 결정되면 깊이(z)에서 전자선의 평균에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$E_z = E_0\left(1 - \frac{z}{R_p}\right) \quad (3)$$

팬텀속 깊이 z를 따라 결정된 E_z는 전리함을 이용한 물 흡수선량 측정시 물과 공기의 저지능비(Stopping power ratio)와 같은 에너지에 의존하는 인자들을 계산하기 위해 사용된다.[6]

3. 깊이선량율 측정

깊이선량율은 팬텀에 입사되는 전자선의 에너지에 대한 정보를 가지고 있으며, 흡수선량 측정시 선질 인자의 결정에 필요한 자료가 된다. 본 연구에서는 자체 제작한 25×25 cm^2 크기의 어플리케이터(Applicator)를 장착하고 고체팬텀 및 물에서 깊이선량율을 측정하였다. IAEA TRS-277 프로토콜[6]에 따르면 R_{50} 측정에서 적어도 12×12 cm^2 이상의 조사면을 사용하도록 권고하고 있으므로 본 측정에 사용한 조사면 크기는 적절하다.

먼저 전자총 가열 전류의 변화에 따른 에너지의 인자를 결정하기 위하여 고체팬텀에 필름을 삽입하여 간단한 방법으로 깊이선량율을 측정하였다. 이 때 고체팬텀은 Virtual Water™ (StandardImaging, USA)로 알려진 물 등가 플라스틱 그리고 필름은 Radiochromic 필름으로서 GafChromic EBT3 (ISP, USA)을 사용하였다.

전자총에 인가되는 가열 전류를 2.0에서 2.5 A까지 변화시키면서 필름에 방사선을 조사하였다. 필름 판독에는 분석 소프트웨어인 FilmQApro™ (ISP, USA)가 사용되었다. 이 때 상용 6 MV 선형가속기에서 결정한 필름 교정 곡선을 선량 분석에 적용하였는데, Li 등의 연구[7]에 따르면 Radiochromic 필름의 전자선과 Co-60 감마선에 대한 반응이 거의 동등한 것으로 나타났으므로 본 필름 측정에 적용해도 문제가 없을 것이다. Fig. 1은 필름 측정에 사용된 개념도를 보여준다.

필름 측정으로 전자총 가열 전류에 대한 깊이선량율이 구해지면 이로부터 R_p와 R_{50}을 결정하고 (1)식과 (2)식으로 E_p와 E_0를 결정하였다. 출력 흡수선량의 측정은 결정된 E_0 값들 중 최적 E_0에 대하여 수행하였다. 여기서 최적 E_0는 임상적 관점에서 명목상의 에너지 6 MeV와 가장 가까운 에너지를 의미하며 이 부분은 본 논문의 토의에서 다시 다

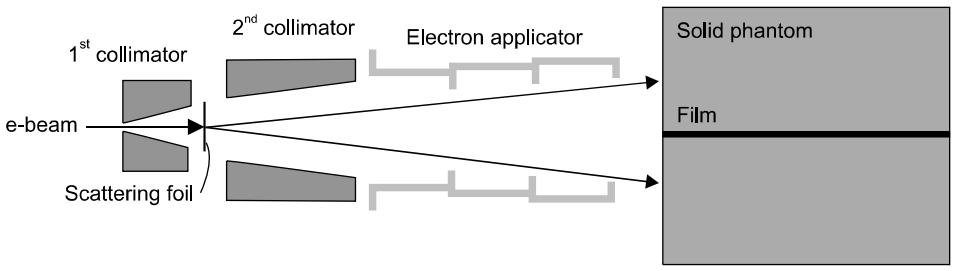

Fig. 1. Schematic description of experimental setup for film measurement.

룬다. 이와 같이 선정된 하나의 선질 E_0에 대하여 정확한 흡수선량을 측정하기 위하여 물팬텀에서 전리함을 이용하여 깊이선량율을 다시 측정하였다.

먼저 깊이에 따른 전하량을 측정하기 위하여 팬텀 입사창으로부터 전리함을 2 mm 간격으로 이동시키면서 각 깊이에서 30초 동안 3회씩 전하를 읽어 평균을 취하였다. 이 때 가속기 출력의 변화를 감지하기 위하여 기준전리함을 별도로 장착하여, 동시에 읽은 후 $R(z)=M(z)/M_{ref}$을 기록하였다. 이 때 $M(z)$는 물속 깊이 z에서 측정된 전하량이며 M_{ref}는 기준전리함으로 읽은 전하량이다. 이와 같이 결정된 깊이 이온 분포를 이용하여 다음과 같이 깊이선량율을 결정할 수 있다.

$$PDD(\%)=100\times\frac{D(z)}{D(z_{\max})}=100\times\frac{M(z)s_{w,air}(z)}{[M(z)s_{w,air}(z)]_{\max}} \quad (4)$$

여기서 $s_{w,air}(z)$는 깊이 z에서 전자선의 평균에너지(E_z)에 의존하는 물과 공기의 질량 저지능비(Mass stopping power ratio)이다. 또한 [ ]속의 값은 각 깊이 z에서 결정한 $M\cdot s_{w,air}$ 중 최대값이며 이 깊이가 $z_{\max}$로 주어진다.

본 연구에서 $s_{w,air}(z)$는 IAEA TRS-398에 수록된 값을 적용하였다.[8] 이와 같이 결정되는 깊이선량율 곡선으로부터 R_p와 R_{50}를 결정할 수 있으며 이에 따라 E_p, E_0, 그리고 E_z를 결정할 수 있다.

IAEA TRS-398 프로토콜에 따르면 전자선의 흡수선량은 선질변수 R_{50}이 주어질 때 기준 깊이, $z_{ref}=0.6R_{50}-0.1$ g/cm^{2}에서 다음과 같이 주어진다.

$$D(z_{ref})=N_{DWQ_0}M(z_{ref})k_{QQ_0} \quad (5)$$

여기서 N_{DWQ_0}는 전리함의 물흡수선량 교정인자이며, k_{QQ_0}는 전리함과 R_{50}에 의존하는 선질보정인자(Quality correction factor)이다.

본 연구에서는 소형 평행평판형 전리함(TM34045, PTW, Germany)과 소형 물팬텀(TM31023, PTW, Germany)을 사용하여 깊이선량율과 출력 흡수선량의 측정을 수행하였다. 또한 독립적인 전자선의 모니터링(Monitoring)을 위한 투과형 전리함(TM34060, PTW, Germany)을 이차 콜리메이터 앞단에 장착하여 매측정시 전하를 측정하였다. 앞서 언급되었듯이 모니터링 전리함의 역할은 측정 전리함과 동시에 측정하여 순간적인 출력변화가 발생할 경우에 깊이 이온 곡선의 변형을 보정한다. Fig. 2는 물팬텀을 이용한 깊이선량율과 출력측정을 위한 장치의 배치 사진을 보여준다.

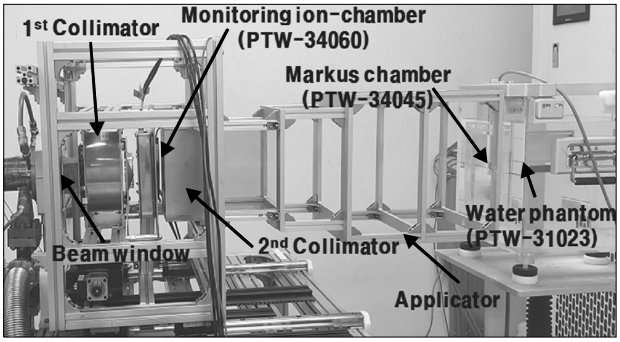

Fig. 2. Experimental setup for depth dose and output measurement for electron beams from a prototype electron linac.

결 과

본 논문의 결과에서는 먼저 필름 측정으로 구한 깊이선량율과 에너지 인자들을 제시하고 이어서 전리함과 물팬텀으로 측정한 결과를 제시한다.

Fig. 3은 전자총 가열 전류별로 측정한 깊이선량율 곡선을 보여준다. 이 그림에서와 같이 전자선에 대한 깊이선량율은 전자총 가열전류의 증가에 따라 팬텀의 표면 쪽으로 이동하고 있으며 이는 가속기 전자선의 평균에너지의 감소를 나타낸다. 이 때 전자총 가열 전류 2.02 A와 2.14 A에서는 깊이선량율의 큰 변화가 없다. 이 결과를 토대로 식 1, 2를 통하여 최빈에너지(E_z)와 평균에너지(E_0)를 구할 수 있

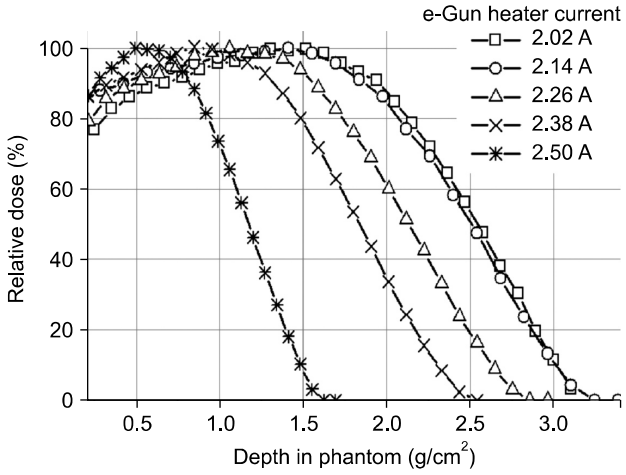

Fig. 3. Measured percentage depth dose curves for electron gun heater currents.

Table 1. Summary of energy parameters for electron gun heater currents.

I_{gh}* (A)	2.02	2.14	2.26	2.38	2.50
R_p (g/cm^2)	3.18	3.15	2.73	2.40	1.56
R_{50} (g/cm^2)	2.55	2.50	2.15	1.83	1.20
E_p (MeV)	4.23	4.47	4.71	4.95	5.19
E_0 (MeV)	7.41	7.34	6.36	5.59	3.63

*Gun heater current.

으며 Table 1과 같이 정리된다.

이 표에서 I_{gh}는 전자총 가열 전류(Heater current)를 나타낸다. 이 결과에서 알 수 있듯이 전자총 전류가 감소할수록 에너지가 증가하는데 2.14와 2.02 A에서 거의 일정한 값을 보이고 있다. 본 연구에서는 최대 에너지를 보이는 2.02 A에 대하여 출력선량을 측정하였다. 이 표에서 깊이의 단위를 g/cm^{2}으로 표시한 것은 사용한 팬텀인 Virtual Water™의 밀도를 물과 동일한 값으로 가정하고 나타낸 것이다. 향후 이 부분에 대한 보정이 필요하다고 생각한다.

한편, 전자총의 전류는 연속적으로 변화되기 때문에 이 결과를 이용하여 전류와 에너지에 대한 경험적 관계식을 수립하는 경우에 전자총의 제어에 직접 이용할 수 있다. 전자총 가열전류의 함수로 결정한 관계식은 다음과 같다.

$$E_p = A + BI_{gh} + CI_{gh}^2 \tag{6}$$

$$E_0 = D + EI_{gh} + FI_{gh}^2 \tag{7}$$

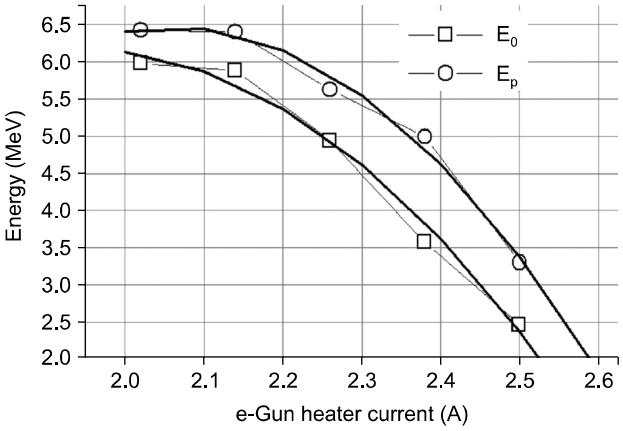

Fig. 4. Polynomial fitting for energy parameters with electron gun heater currents.

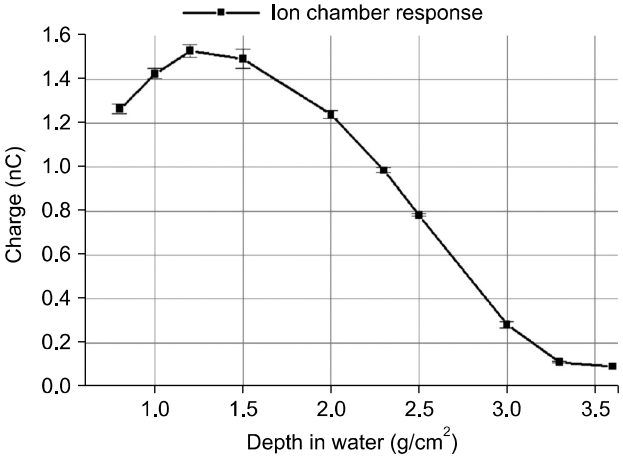

Fig. 5. Depth ionization curves for e-gun heater current of 2.02 A.

여기서 A=−60.61 MeV, B=65.15 MeV/A, C=−15.82 MeV/A^2, D=−39.89 MeV, E=47.41 MeV/A, 그리고 F=−12.20 MeV/A^2이다. Fig. 4는 이 결과를 보여준다.

다음은 전리함과 물팬텀을 이용하여 측정한 결과를 보인다. Fig. 5는 전자총 전류 2.02 A에서 전리함으로 측정한 깊이 이온분포를 보여준다. 이 그림에 나타낸 값들은 1분 동안 측정에 대한 전하로서 3회 측정의 평균값을 표준편차와 함께 나타낸 것이다. 이 때 표준편차는 상대적으로 평가할 때 1~3%를 보였다. 이 값들을 앞의 (4)식과 (5)식을 적용하여 깊이에 따른 흡수선량 또는 깊이선량율을 구할 수 있다. Fig. 6은 그 결과를 보여준다.

Fig. 6과 같이 구해진 물에서 깊이선량율 측정 결과로부터, R_{50}=2.52 g/cm^2 그리고 R_p=3.20 g/cm^{2}를 결정하였다. 이 결과는 동일 전자총 전류(I_{gh}=2.02 A)에 대해서 필름 측정

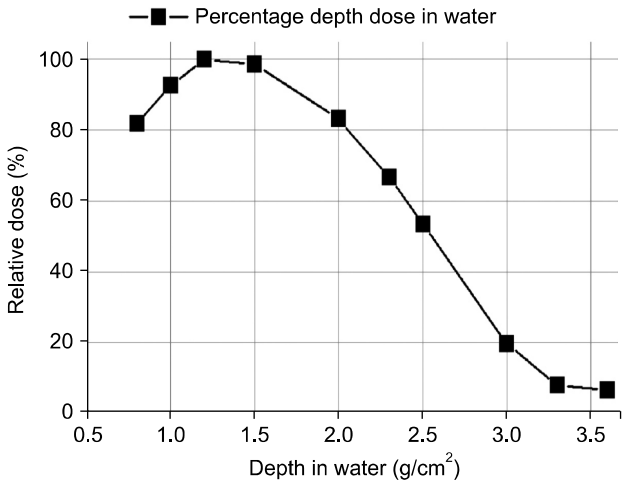

Fig. 6. Determined depth dose curves for e-gun heater current of 2.02 A.

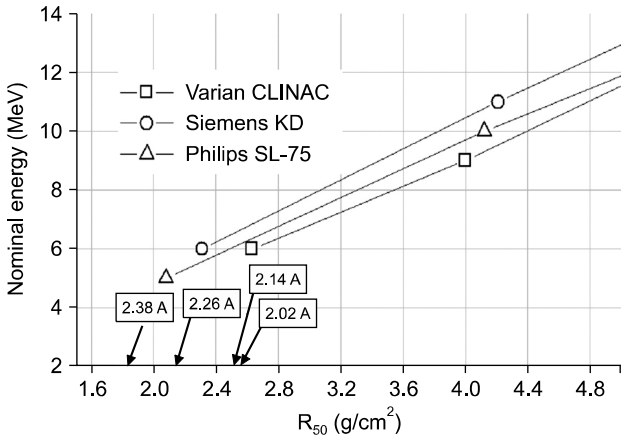

Fig. 7. Relationship between nominal energy and R_{50} values in commercial linacs. The measured R_{50} values for gun heater currents were shown.

에서 결정한 R_{50}=2.55 g/cm^2, R_p=3.18 g/cm^2 (Table 1 참조)와 비교적 잘 일치한다. 이와 같이 결정된 물에서 R_{50}을 적용한 측정 기준 깊이는 z_{ref}=1.4 g/cm^{2}이며, R_{50}에 의존하는 Markus 전리함의 k_{QQ_0}는 0.919로 주어진다. 본 연구에서는 깊이 이온분포 측정결과(Fig. 5)에서 z=1.5 g/cm^{2}에 대한 결과를 이용하여 근사적으로 출력 선량을 결정하였다.

출력 흡수선량의 측정결과, M=1.492±0.04 nC/min으로 나타났으며, 이를 (5)식에 적용한 결과, 출력 흡수선량율은 $D(z_{ref})$=5.41 Gy/min로 나타났다. 이 결과의 합성표준불확도(Combined standard uncertainty)는 3회 반복 측정에 대하여 0.9%, 교정성적서에 주어진 N_{DWQ_0}의 불확도, 그리고 TRS-398에 주어진 k_{QQ_0}의 불확도를 합성할 때 약 1.5%로 평가된다.

토의 및 결론

본 연구에서는 연구용 제작 선형가속기의 특성 평가의 일환으로 전자총의 가열 전류에 따른 에너지 인자들을 결정하고 최적 에너지에서 방사선 출력을 측정하였다. 가열 전류에 따른 에너지의 변화는 전자총 내부 음극(Cathode)의 가열에 따라 전자 방출량의 증가와 이에 따른 빔전류의 증가에 있다. 전자의 가속을 위한 에너지원은 고주파 전력이며 이를 전류와 전압의 곱으로 표현할 때 빔전류의 증가는 가속 전압의 감소를 유도하며 이에 따라 에너지의 감소로 나타난다. 따라서 가열 전류의 적절한 제어는 에너지의 제어 수단으로 사용할 수 있다. 물론 에너지의 조절을 위하여 고주파 세기를 제어할 수 있으나 마그네트론 방식으로 고주파 전력을 생성하는 전자가속기 시스템의 경우에 제어가 어렵다. 본 연구에서는 가열 전류와 에너지의 변화를 단순한 이차 다항식으로 표현하였으며 향후 이 결과를 제어 시스템에 반영할 수 있다.

전자총 전류가 2.5 A에 가까운 경우에 평균에너지는 3 MeV 이하로 낮아지나 전류를 줄일 때 에너지의 증가가 발생하며 약 2.1 A 이하로 줄어드는 경우에 일정한 특성으로 보인다. 이 때 이 때 전자총 전류 2.02～2.14 A 범위는 본 가속관의 최적 작동 범위에 해당한다고 할 수 있다. 이 때 R_{50}은 약 2.5 cm을 가지는데, Fig. 7을 고려할 때 전자총 전류 2.02～2.14 A에서 특성은 명목에너지 6 MeV에 해당됨을 알 수 있다. Fig. 7은 상용 선형가속기 세종류에 대해 명목에너지와 R_{50}의 관계를 간단히 보인 것인데 Zink와 Wulff의 논문[9]에 나타낸 결과를 재구성 한 것이다.

본 연구에서 측정한 전자가속기의 출력은 5.41 Gy/min로 나타났다. 이 결과는 상용 선형가속기의 전자선 출력 범위인 4～10 Gy/min에 해당한다. 전자선의 출력은 인가되는 고주파의 펄스폭과 펄스 주파수에 직접 비례한다고 할 수 있는데, 본 전자가속기의 경우에 최대 펄스 주파수의 10% 이내(<25 Hz)에서 운전하기 때문에 향후 보다 높은 출력을 얻는데 무리가 없을 것으로 예상된다.

이와 같이 정리되는 본 결과는 2015년 초반에 발표된 Kim 등[3]이 보고한 초기 시작품의 보완된 결과이다. 당시의 연구에서는 평균에너지가 약 2.33 MeV를 보였지만 본 결과에서 5.94 MeV로 나타남으로써 상용의 의료용 선형가속기와 유사한 성능을 보였다는 점은 매우 고무적인 결과라고 할 수 있다. 물론 임상적 관점에서 전자선의 성능은 우

선 에너지와 출력의 안정성의 확보가 필요하며 현재 이 부분에 대한 연구가 진행되고 있다.

초기 개발된 전자가속기의 작동에서 전자선의 측정이 중요한 것은 에너지를 직접 결정할 수 있기 때문에 가속기의 운전에 필요한 전기적 인자(고전압, 펄스폭, 주파수 등)의 제어에 유용하기 때문이다. 따라서 전자선 측정을 통하여 가속기의 인자들이 확정되고 이를 통하여 가속기의 제어를 통하여 안정성을 확보하는 것이 필요하다. 향후 치료용 엑스선에 대한 연구도 필요한데 전자가속기의 성능과 제원이 확보되고 제어시스템과 연동으로 충분한 빔 안정도를 확보한 후에 수행하는 것이 타당하다고 본다.

본 연구에서 보인바와 같이 전자선의 에너지가 상용 방사선치료기와 비교할 때 6 MeV급 제원과 동등하기 때문에 의료용 선형가속기 개발을 지속할 수 있을 것으로 보며 이를 위해 앞서 언급한 후속 연구들을 수행해야 할 것이다.

References

1. **David IT, John BT**: Back to the future: the history and development of the clinical linear accelerator. Phys Med Biol 51: R343-R362(2006)
2. www.kirams.re.kr/khima
3. **Kim S, Kang SK, Rhee DJ et al.**: Measurement of Electron Beam Output for the Prototype Compact Linac, Progress in Medical Physics 26(1): 1-5(2015)
4. **Yi J, Lee M, Lee M et al.**: Fabrication and High power RF test of a C-band Standing-wave Accelerating Structure for Medical Application, ICABU(International Conference on Accelerators and Beam Utilizations) Proceeding: 134-134(2015)
5. **Scott EVB**: An Introduction to Mass Spectrometry, Widner University, PA, USA (1998)
6. **TRS-277**: Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice. International Atomic Energy Agency, Vienna (1997)
7. **Li A, Wen D, Chen et al.**: A study of dosimetry characteristics of GAF DM-1260 radiochromic Films, Rad Phys Chem 57: 103-113(2000)
8. **TRS-398**: Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. International Atomic Energy Agency, Vienna (2000)
9. **Zink K, Wulff J**: Monte Carlo calculations of beam quality correction factors k_Q for electron dosimetry with a parallel-plate Roos chamber, Phys Med Biol 53: 1595-1607(2008)

연구용 선형가속기의 전자총 가열 전류에 따른 전자선의 에너지 인자 측정과 출력 측정 연구

동남권원자력의학원 연구센터

임희진 · 이만우 · 김미영 · 이준규 · 이무진 · 강상구 · 이동주 · 정동혁

본 연구에서는 의료용 선형가속기 제작을 위해 개발된 연구용 선형가속기의 전자선에 대한 선량학적 특성을 실험적으로 평가하였다. 본 논문에서는 전자총 가열 전류에 따른 에너지의 변화와 출력 흡수선량 측정 결과를 보고하고자 한다. 전자선의 에너지는 필름 측정법을 써서 평균에너지와 최빈에너지의 관점에서 결정하였다. 출력 흡수선량은 최적 에너지에 대하여 평행평판형 전리함을 사용하여 물속 깊이선량율을 측정하고 TRS-398 프로토콜에 따라 결정하였다. 측정 결과 전자총 가열 전류 2.02~2.50 A에서 평균에너지와 최빈에너지는 5.94~2.80 MeV와 6.54~3.31 MeV로 변화하였다. 그리고 평균에너지 5.94 MeV의 전자선에 대해 물속 기준 깊이에서 출력 흡수선량은 5.41 Gy/min으로 나타났다.

중심단어: 전자가속기, 전자총 가열 전류, 출력측정