eISSN 2384-1168 ISSN 2288-3509
Journal of Radiological Science and Technology, 40(2), 297-302 http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2017.40.2.16

<원저>

의료용 선형가속기의 Flattening Filter Mode와 Flattening Filter Free Mode 간에 광중성자 선량 평가

- A Study on the Photoneutron Dose Estimation in Flattening Filter Mode and Flattening Filter Free Mode for Medical Linear Accelerator -

[1)]목포과학대학교 방사선과·[2)]한서대학교 방사선학과

양오남[1)]·임청환[2)]

— 국문초록 —

본 연구에서는 최신형 선형가속기 TrueBeam을 대상으로 10 MV FF mode와 FFF mode간 광중성자의 발생량을 평가하였고, FFF mode에서 10 MV, 15 MV 에너지 변화에 따라 발생되는 광중성자의 발생량을 평가하였다. 발생된 광중성자는 13개 측정점에서 평가하였으며, 발생된 광중성자 수집을 위해서는 한국천문연구원에서 개발한 조직등가비례계수기(KTEPC)를 이용하였다. 10 MV FF mode와 FFF mode 간 측정결과에서 10 MV FF mode가 모든 측정 점에서 높게 측정되었으며, Superior 방향에서 0.455 mSv와 0.152 mSv로 가장 많은 차이를 보였으며, FF에서 33% 이상 많은 광중성자가 발생하였다. FFF mode에서 10 MV, 15 MV 에너지에 따라서는 15 MV에서 모든 방향에서 높게 평가되었고, 방향 기준으로는 Superior 방향에서 0.402 mSv로 가장 높게 평가되었으며, 전체 평균 6.9%로 높게 측정되었다.

중심 단어: 의료용선형가속기, 광중성자, 조직등가비례계수기, 선속평탄 여과판

Ⅰ. 서 론

의료의 발전과 과학의 발달은 방사선치료분야에 많은 변화와 개발이 진행되고 있다. 최신형 암 치료기인 TrueBeam은 2013년부터 국내에 처음 도입을 시작하여 현재에는 7대가 가동되고 있으며, 암환자 증가와 더불어 TrueBeam의 기능이 매우 우수하여 보급은 증가할 것이다.

TrueBeam은 삼차원입체조형치료, 세기조절방사선치료, 영상유도방사선치료, 호흡동조방사선치료 등의 특수치료법을 효율적으로 시행할 수 있으며, 특히 치료시간 단축과 정확성을 향상시킨 치료기다.

의료용으로 사용되는 선형가속기는 전자를 가속하여 타깃(target)에 충돌시켜 X선을 발생시키게 되는데 기하학적인 구조상 중심부의 선량이 강하여 뿔 형태의 선량분포도를 나타나게 되는데 이를 평탄화하기 위해서 선속평탄 여과판(flattening filter; FF)을 사용하여 종양에 균등한 선량이 조사될 수 있도록 설계되어 있다. TrueBeam의 가장 큰 특징은 Flattening Filter mode와 Flattening Filter Free (FFF) mode를 선택적으로 사용할 수 있는 Dual mode로 설계되었다. 의료용 선형가속기의 조사 두부는 가속된 전자가 외부로의 유출을 방지하기 위해 납으로 쌓여 있고, 구성으로는 타깃, 선속평탄 여과판, 산란박, 이온전리함, 콜리메타, 다엽콜리메타 등으로 구성이 되어 있으며, 이들은 대부

This paper partly quotes a doctorate treatise and modifies it to my context (Hanseo University doctoral dissertation, 2016).
Corresponding author: Cheong-Hwan Lim, Department of Radiological Science, Hanseo University, 46, Hanseo1-ro, Haemi-myun, Seosan-si, Chungcheongnam-do, 31962, Korea / Tel: +82-41-660-1056 / E-mail: lch116@hanseo.ac.kr
Received 27 April 2017; Revised 26 May 2017; Accepted 5 June 2017

분 원자번호가 높은 납(Pb)이나 텅스텐(W)의 재질로 되어 있어 발생된 광자와의 상호작용을 통하여 광중성자를 발생하는 것으로 알려져 있다[1]. 10 MV 이상의 고에너지는 폐암이나 복부, 골반부 등 심부에 발생한 종양 치료 시 피부에 반응은 줄이고, 암세포에만 선량을 집중할 수 있어 많이 활용되지만 불필요한 광중성자를 일으키게 되어[2], 조사야 외 정상조직에 피폭선량으로 작용하는 단점이 있다.

선형가속기 두부의 구성품의 재질인 납과 텅스텐은 광자와의 상호작용으로 광핵반응이 일어나게 되는데, 이 현상은 6 MV를 시작으로 10 MV에서 급증하고, 15 MV 전·후로 최대를 이루게 된다[3,4]. 이러한 일반적인 사항은 NCRP 79에서 논의된 바 있고, 이에 대한 관심이 고조됨에 따라 많은 연구자들에 의해 꾸준하게 연구가 이루어지고 있다[5-7]. 방사선치료 과정에서 발생된 광중성자가 치료실 내 환자에게 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있고[8], 광중성자를 비롯한 광핵반응에 의해 생성되는 입자들에 의한 선량을 평가한 바도 있다[9].

광중성자는 고유의 특성상 치료실 내 뿐만 아니라 시설 밖의 일반인 구역에도 일부 영향을 줄 수 있어 시설을 설비함에 있어 차폐계산 시 중요하게 고려되는 사항이며, 관계기관인 한국원자력안전기술원으로 부터 엄격한 관리와 규제를 받고는 있지만 보다 많은 영향이 미치는 치료실 내 환자에 대해서는 의료과정에서 이익이 크다는 이유로 환자에 대한 안전관리에는 소극적인 것이 현실이다[10].

중성자의 방사선가중인자는 에너지에 따라 알파(α)입자와 비슷한 수준으로 높다고 정의하고 있으며(ICRP 60), 방사선가중인자가 높다는 것은 동일한 선량을 인체에 조사할 경우에 위해(危害) 정도가 증가할 수 있음을 시사하고, 확률적 영향을 고려한다면 암 발생확률도 증가할 수 있음을 시사한다[11].

기존의 선형가속기의 단점을 보완하고 암 치료의 효율성을 높인 의료용 선형가속기 TrueBeam의 수요는 증가할 것이 분명하며, 여러 가지 변화 중 특히 선속평탄 여과판을 사용하지 않는 것이 큰 변화라 할 수 있어 FF mode와 FFF mode 간 광중성자의 평가는 다각적으로의 많은 연구가 이루어져야 할 것이며, 국내에서는 이러한 변수에 대한 선량평가를 시행한 바 있다[12]. 또한 광중성자는 2차 암 발생확률에 영향을 미칠 수 있으므로[13] 여러 가지 방사선치료과정에서 작용하는 치료변수의 변화에 따라 발생되는 광중성자의 정량적인 평가를 통하여 피폭을 최소화 할 수 있는 치료법을 제안하여 암 치료를 받는 환자들의 이중고의 해소와 삶의 질 향상에 기여하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1.연구재료

본 연구의 재료는 미국 Varian사에서 제작한 선형가속기 TrueBeam stx(varian, USA) model을 대상으로 하였으며, 이는 60쌍의 HD 120 MLC를 장착하여 정밀도가 높고, 최대 조사야는 40 ㎝ × 22㎝이며, 다양한 X선과 전자선을 선택적으로 사용할 수 있다. 특히 6 MV X선에서는 1,200 MU/min, 15 MV에서는 최대 2,400 MU/min의 선량률로 조사가 가능해 정확성은 물론 치료시간도 단축시킬 수 있는 특징이 있다.

발생된 광중성자 수집을 위해서는 한국천문연구원에서 개발한 조직등가비례계수기(Korea Tsssue Equivalent Proportional Counter; KTEPC)를 사용 하였으며, 이는 우주 개발에 따른 우주승무원 피폭관리와 원자력발전소 등에서 활용 되고 있고, 고에너지 방사선치료 시 발생되는 광중성자를 평가하기 위해 국내 연구자에 의해 사용된 바 있다. 또한 A-150 조직등가물질을 이용한 비례계수기로서, 미소선량(microdosimetry) 측정용으로 개발된 검출기이며, 미소체적에 전달된 에너지를 측정하여 선에너지부여(lineal energy transfer; LET) spectrum을 측정할 수 있기 때문에 인체의 등가선량을 직접 평가할 수 있는 특성이 있다. KTEPC 검출기의 측정범위는 0.01 ≤ LET ≤ 500 keV/μm로 저에너지 광자선 부터 고에너지 하전입자의 광중성자를 측정할 수 있으며, 증폭률을 조절하면 최대 1,000 keV/μm까지도 측정이 가능하다. 또한 저 LET와 고 LET 모두 측정이 가능하고 직접 등가선량을 평가할 수 있으며, KTEPC의 모형(Fig. 1), 측정원리는 (Fig. 2)와 같다.

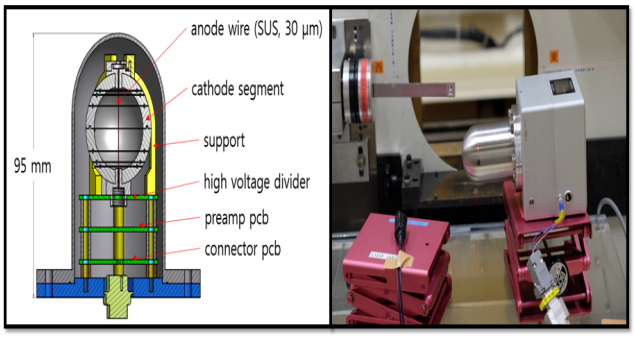

Fig. 1 Structure of KTEPC

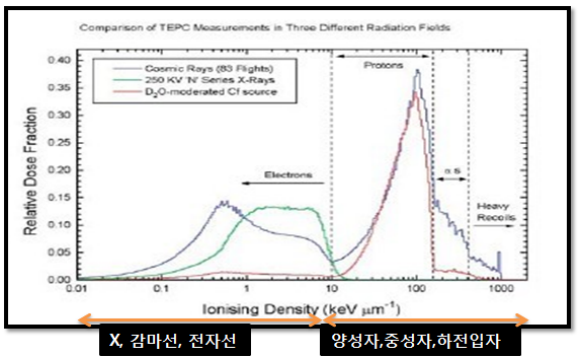

Fig. 2 Measurement a theory of KTEPC

2. 연구방법

선형가속기의 겐트리 각도는 0°로 위치한 후 SSD 100 cm, 조사야 10 cm × 10 cm, 선량률은 300 MU/min, 선량은 2 Gy를 각각 조사하였으며, 측정 점은 8개의 방향의 13개 지점(Inferior 100 cm, Rt. 100 cm, RPO 100 cm, RAO 100 cm, Superior 100 cm, LAO 100 cm, Lt. 100 cm, LPO 100 cm, Inferior 150 cm, RPO 150 cm, Rt. 150 cm, Lt. 150 cm, LPO 150 cm)에서 광중성자의 양을 측정하였고 변수로는 10 MV FF mode와 10 MV FFF mode간 평가, 10 MV FF mode와 15 MV FF mode간 평가, 1순으로 평가하였다(Fig. 3).

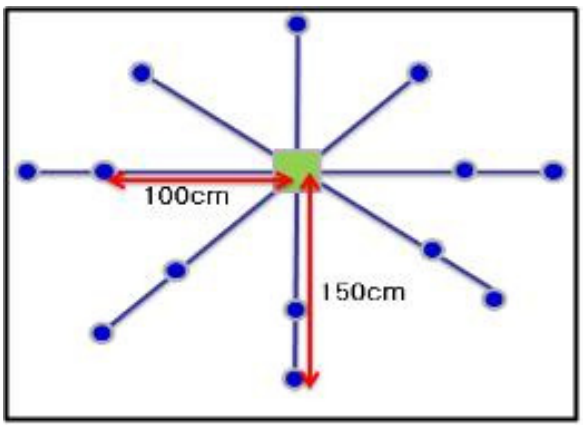

Fig. 3 Measurement a theory of KTEPC

III. 결 과

1. 10 MV FF mode와 FFF mode간 광중성자 선량 평가

10 MV FF mode, 10 MV FFF mode간 평가에는 10 MV FF mode가 모든 측정 점에서 높게 평가되었으며, 8개 방향에 따라서는 Superior 방향에서 10 MV FF mode는 0.455 mSv와 10 MV FFF mode는 0.152 mSv로 33.4%의 가장 많은 차이가 나타났으며, 10 MV FF mode에서 전체 평균 7% 이상 많이 발생하였고 동일한 방향에서는 조사두부에서 가까울수록 높게 나타났다(Fig. 4).

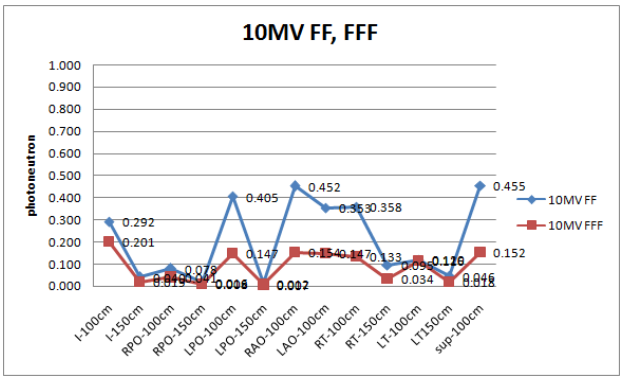

Fig. 4 Evaluation of photoneutron dose 10 MV FF mode and FFF mode

2. FF mode에서 10 MV와 15 MV 에너지에 따른 광중성자 선량 평가

15 MV FF mode와 10 MV FF mode간 광중성자에 대한 측정 결과, 전반적으로 15 MV FF mode에서 높게 평가되었고, 방향 기준으로는 겐트리 방향 Superior에서 0.402 mSv로 가장 높게 평가되었으며, 15 MV FF mode가 전체 평균 6.9%가 높게 발생되었고, 동일한 방향에서는 조사두부에서 가까울수록 높게 나타났다(Fig. 5).

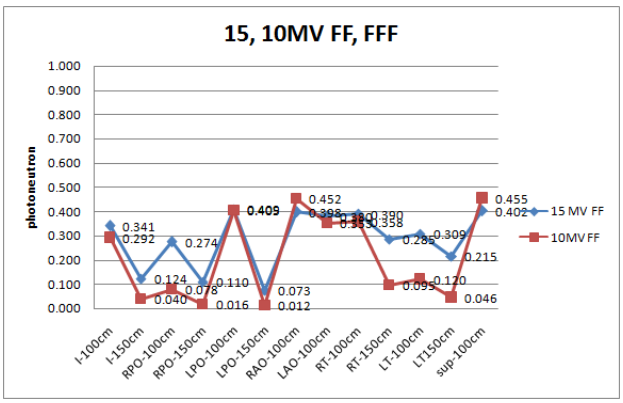

Fig. 5 Evaluation of photoneutron dose according to 10 MV and 15 MV energy in FF mode

3. 15 MV FF mode와 10 MV FF mode, FFF mode간 평가

10 MV FF, 10 MV FFF, 15 MV FF mode 모두 Superior 방향에서 높게 평가되었으며, 동일한 방향에서는 조사야 중심으로부터 거리가 멀어질수록 비례적으로 감소하는 것으로 평가되었다(Fig. 6).

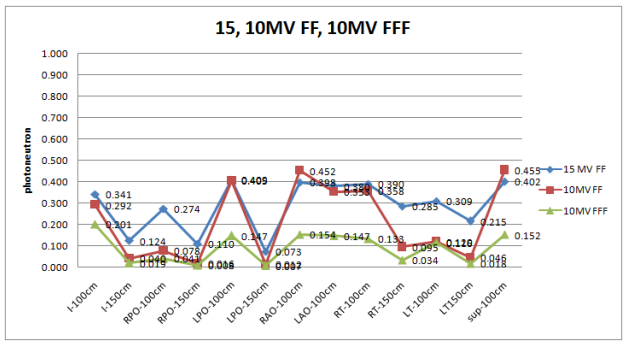

Fig. 6 Evaluation between 15 MV FF mode, 10 MV FF mode and FFF mode

Ⅳ. 고 찰

본 연구에서는 암 방사선치료분야에서 각광 받고 있는 의료용 선형가속기 중 TrueBeam을 대상으로 그 핵심인 FFF mode와 FF mode 간 발생되는 광중성자의 양을 평가하였으며, 부가적으로 10 MV와 15 MV 에너지에 따라서도 광중성자를 평가하였다.

연구 방법으로는 겐트리를 0°에 위치하고 SSD는 100 cm로 조사야 중심으로부터 8개의 측정방향의 13개 지점(Superior 100 cm, RAO 100 cm, Rt. 100 cm, Rt. 150 cm, RPO 100 cm, RPO 150 cm, Inferio 100 cm, Inferio 150 cm, LPO 100 cm, LPO 150 cm, Lt. 100 cm, Lt. 150 cm, LAO 100 cm)에서 평가를 하였으며, 조사 조건으로는 선량률 300 MU/min, 선량은 2 Gy를 조사하였으며, 측정을 위한 선량계는 조직등가비례계수기(KTEPC)를 사용하였다.

10 MV FF mode와 FFF mode 간 측정결과, 10 MV FF mode가 모든 측정 점에서 높게 평가되었으며, Superior 방향에서 0.455 mSv와 0.152 mSv로 가장 많은 차이를 보였으며, 평균 20% 이상 많이 발생했다. 또한 동일한 방향에서는 조사야 중심에서 거리가 멀어질수록 감소함을 확인할 수 있었다.

FF mode에서 10 MV와 15 MV 에너지 변화에 따라서는 15 MV가 모든 방향에서 높게 평가되었으며, 방향 기준으로는 Superior 방향에서 0.402 mSv로 가장 높게 평가되었으며, 전체 평균 14% 이상 발생되었다. 이 역시 조사야 중심으로부터 거리가 멀어짐에 따라서 광중성자의 발생량도 비례적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

10 MV FF, 10 MV FFF, 15 MV FF mode 모두 Superior 방향에서 높게 평가되었으며, 동일한 방향에서는 조사야 중심으로부터 거리가 멀어질수록 비례적으로 감소하는 것으로 평가되었다.

이를 종합해보면 10 MV 에너지에서 FFF mode와 FF mode 간에는 FFF mode에서 30%이상 광중성자의 발생량이 감소하였고, FF mode에서 10 MV와 15 MV 에너지 변화에 따라서는 15 MV에서 전반적으로 높게 평가되었다. 또한 10 MV FF mode, 10 MV FFF mode, 15 MV FF mode 간 평가에서는 15 MV FF, 10 MV FF mode, 10 MV FFF mode 순으로 10 MV FFF mode에서 광중성자의 양이 가장 낮은 것으로 평가되었다. 이는 2 Gy을 1회 조사한 결과의 양으로 극히 적을 수는 있겠으나 일반적으로 암 방사선치료에 사용되는 총 선량과 총 횟수를 고려한 측면에서 본다면 결코 무시할만한 선량은 아닐 것이다. 중성자는 에너지에 따라서 방사선가중인자가 에너지에 따라서 양성자나 광자에 비해 수배로 높은 특성이 있다. 방사선가중인자가 높다는 것은 동일한 선량을 인체에 조사하더라도 위해정도가 높을 수 있음을 시사하고 확률적 영향 측면에서는 2차 암 발생확률도 높음을 의미한다.

일본 후쿠시마 원전사고로 인하여 방사선 안전에 대한 사회적 인식의 변화와 규제기관의 규제가 날로 엄격해지고 있는 것이 현실이다. 방사선은 우리 사회에 여러모로 도움을 주고 있지만 또한 이로 인한 피해도 발생할 수 있는 만큼 원자력법에서 정한 규정을 반드시 준수해야 한다. 특히 고에너지 방사선발생장치나 방사성동위원소를 이용한 암 방사선치료에서 여러 가지 사고로 이어진다면 그 피해는 상당히 크게 된다. 이를 이용한 의료행위 및 방사선을 이용함에 있어서 원자력법에서 정한 바 진료를 위해 불가피하게 사용하더라도 피폭을 사회·경제적으로 고려해 합리적으로 달성 가능한 수준까지 낮춘다는 ALARA(As Low As Reasonably Acceptable) 원칙에 따라 운영, 건설되고 있다. 물론 방사선치료 시설과 방사선종사자에 대한 관리는 철저히 되고 있지만 암 방사선치료를 받는 방사선치료실 내 환자에 대해서는 의료의 득이 크다는 이유로 안전관리에 소극적이 것이 현실이다. 암 환자는 자신이 암 환자라는 이유만으로도 충분히 고통스럽고 또한 여성 환우들 경우 우울증에 시달리기도 한다. 그리고 암의 방사선치료는 수회로 끝나는 것이 아

니고 최소 2개월 정도가 소요되어 시간적, 경제적, 육체적 측면에서도 많은 어려움이 따른다. 여기에 방사선치료로 인한 부작용과 제 2차 암이 발생할 수도 있다는 확률이 더해진다면 방사선치료를 받는 암 환자는 이중고에 처해질 수도 있는 현실이다. 선형가속기의 물리적인 특성상 광중성자의 발생을 원천적으로 차단하기가 쉽지는 않겠지만 이러한 사실을 충분히 인지하여 문제점 해결에 힘써야 할 것이며, 또한 암 방사선치료 관계 종사자는 정상조직에 불필요하게 조사되는 광중성자에 대한 차폐의 필요성에 대해 인지하고 여러 가지 인자를 고려할 때 피폭의 저감화를 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

V. 결 론

TrueBeam은 삼차원입체조형치료, 세기조절방사선치료, 영상유도방사선치료, 호흡동조방사선치료 등의 특수치료법을 효율적으로 시행할 수 있으며, 특히 치료시간 단축과 정확성을 향상시킨 치료기로 현재 학계에서 각광을 받고 있으나 기존의 선형가속기와 구조가 비슷하여 이 역시 광중성자를 발생시킨다.

선형가속기의 구조적 특성상 광중성자의 발생을 원천적으로 차단하기는 어렵겠지만 관계 종사자는 이러한 연구자들의 연구 결과를 토대로 치료의 효율성은 물론 암 치료를 받는 환우들의 정상조직 보호에도 각별한 주의와 관심을 가지고 치료계획을 수립해야 할 것이며 치료부위 외 정상조직의 차폐에도 많은 관심을 가져야할 것이다. 광중성자의 발생이 최소화 되는 FFF mode의 활용을 적극 검토해야할 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Ing H, Nelson WR, Shore RA: Unwanted photon and neutron radiation resulting from collimated photon beams interacting with the body of radiotherapy patients, Med. Phys, 9(1), 27-33, 1982
2. Lakosi L.: Photoneutron interrogation of low-enriched uranium induced by bremsstrahlung from a 4MeV linac", Section B, Beam interactions with materia ls and atoms, Nuclear Instruments & methods in physics research. Vol.266, No.2, 295-300, 2008
3. Jung jae ho, Kim Hong Suk, Park Yoon Hwan, Lee Jae Ki: Evaluation of dose by photoneutron generated from medical linear accelerator, Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society, 01, 296-296, 2004
4. McGinley P. H.: Photoneutron Production in the Primary Barriers of Medical Accelerator Rooms, Health physics, 62(4), 359-362,1992
5. Nath R, Epp ER, Laughlin JS, Swanson WP, Bond VP: Neutrons from high-energy X-ray medical accelerators: an estimate of risk to the radiotherapy patient, Medical Physics, 11(3), 231-241, 1984
6. Fatemeh Torabi, S. Farhad Masoudi, Faezeh Rahmani: Photoneutron production by a 25MeV electron linac for BNCT application, Annals of Nuclear Energy, 54, 192-196, 2013
7. Difilippo, F., Papiez, L., Moskvin, V., et al.: Contamination dose from photoneutron processes in bodily tissues during therapeutic radiation delivery, Medical physics, 30(10), 2849-2854, 2003
8. Eun-Tae Park: Evaluation of Photoneutron Dose in Radiotherapy Room Using MCNPX, The Journal of the Korea Contents Association, 15(6), 283-289, 2015
9. ICRP 74: Conversion coefficients for use I nradiological protection against external radiation, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 74, 1996
10. ICRP 60: 1990 Recommendations of the Internaitonal Commission on Radiological Protection, Internaional Commission on Radiological Protectin, ICRP Publicaton 60, 1991
11. Cho Woong, Park Jeong-Hoon, Jung Won-Gyun Suh Tae-Suk: Development of a Beam Source Modeling Technique for a Flattening Filter Free (FFF) Beam, Machine Learning and Applications and Workshops, 10th International Conference,.2, 215-219, 2011
12. Chang Si-Young, Kim In-Gyoo: Developments in Radiation Health Science and Their Impact on Radiation Protection, Journal of radiation protection and research, 23(3), 185-196, 1998
13. Radiation Protection & Safety : Chung-ku Publisher, 185, 2014

•Abstract

A Study on the Photoneutron Dose Estimation in Flattening Filter Mode and Flattening Filter Free Mode for Medical Linear Accelerator

Oh Nam Yang[1)]·Cheong Hwan Lim[2)]

[1)]*Department of Radiology, Mokpo Science University*
[2)]*Department of Radiological Science, Hanseo University*

In this study, the generation of photoneutrons between the 10 MV FF mode and the FFF mode was evaluated and the amount of photoneutrons generated by the 10 MV and 15 MV energy changes in the FFF mode was evaluated. The generated neutrons were evaluated at 13 measurement points and the KTEPC was used to collect the generated neutrons. 10 MV FF mode was measured at 10 MV FF mode and FFF mode at all measurement points. In the superior direction, 0.455mSv and 0.152mSv were the largest, and more than 33% optical neutron was generated in FF. 10 MV in FFF mode, 15 MV in 15 MV, and 0.402 mSv in the direction of Superior, and 6.9% in the direction.

Key Words : Medical Linear Accelerator, Photoneutrons, Korea Tsssue Equivalent Proportional Counter(KTEPC), Flattening Filter