

<원저>

액체 섬광체를 이용한 100 MeV 양성자 빔의 선량 분포 평가

- Dose Distribution of 100 MeV Proton Beams in KOMAC by using Liquid Organic Scintillator -

청주대학교 방사선학과

김성환

— 국문초록 —

본 논문에서는 방사선치료 시 용적 선량 평가에 응용할 수 있는 광 도시메트리 시스템을 구축하고 100 MeV 고 선속 양성자 빔에 대한 특성 평가를 수행하였다. 광 도시메트리 시스템은 액체 유기 섬광체와 카메라 렌즈, 고감도 저잡음 화상(complementary metal-oxide-semiconductor; CMOS) 카메라로 구성되며, 2m 거리에 영상의 화각(field of view; FOV)이 15 cm가 되도록 설계 및 제작하였다. 구축된 광 도시메트리 시스템은 100 MeV 양성자 빔에 대하여 1~40 Gy 선량 범위에서 선량-출력의 직선성을 확인하였으며, 심부선량백분율 데이터와 등선량 곡선을 획득하였다. 본 연구에서는 용매의 인체조직등가성에 제한점이 있지만 광 도시메트리 절차를 확립하였으며, 새로운 용적 선량 평가법의 제안으로 그 의미가 있다.

중심 단어: 액체 섬광체, 양성자, 선량, 브래그 피크, 광 도시메트리

1. 서 론

방사선치료 시 정확한 치료 부위의 재현과 선량 평가는 치료의 성적을 결정하는 매우 중요한 요소이므로[1] 방사선치료 시 시행된 이례 선량 평가의 정확도를 높이기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[2-4]. 특히 컴퓨터의 발전과 더불어 3차원 방사선치료가 수행됨에 따라 종양과 정상 조직의 입체적인 위치 및 형태를 고려한 다양한 방사선 치료가 시행되고 있다[5]. 용적선량(volume dose)은 3차원 방사선 치료에서 치료효과를 평가하기 위한 중요한 물리량으로 사용되고 있으며, 계산된 용적선량 히스토그램(dose volume histogram; DVH)으로부터 방사선 치료 효과를 정량적으로 평가하고 있다[6]. 현재 용적선량 평가는 전산화 방사선 치료계획(radiotherapy planning; RTP)을 이용한 이론적인

계산[7]이나 젤 도시메트리법(gel dosimetry method)[8]이 사용되고 있다. 전산화 방사선 치료계획은 이론적으로 용적 선량을 계산하지만, 그 계산된 결과에 대한 실증적인 검증에 어려움이 있으며, 젤 도시메트리는 실시간으로 용적선량 평가를 할 수 없는 단점이 있다[9]. 최근 용적선량을 실시간으로 측정하기 위하여 광 도시메트리(optical dosimetry)가 제안되었으며[10], 이를 이용한 선량 평가 연구가 일부 시행되고 있다. 광 도시메트리는 플라스틱 섬광체(plastic scintillator)와 같은 유기 섬광체(organic scintillator)를 이용하여 방사선치료 시 발생하는 섬광을 실시간으로 촬영하여 선량을 평가하는 방법으로 Kirov 등에 의해 처음 연구되기 시작하였다[10]. 이후 광 도시메트리를 통한 실시간, 고분해능, 선량 분포 측정 등 여러 연구가 시행되었다[11], 2006년 Fukushima가 양성자 빔에 대한 광 도시메트리 실험을 수행하였고[12],

These investigations have been supported by 2016-2017 Research Foundation of Institute of Health and Medical Science in Cheongju University. Corresponding author: Sunghwan Kim, Cheongju University, 298 Daeseongro, Sangdang-gu, Cheongju, Chungbuk 28503, Korea / Tel: +82-43-229-7992 / E-mail: kimsh@cju.ac.kr

Received 02 November 2017; Revised 28 November 2017; Accepted 10 December 2017

Poenish 등은 광자 빔에 대한 광 도시메트리 연구를 수행하였다[13]. 이들은 주로 인체의 흡수선량을 측정하기 위하여 대형 플라스틱 섬광체를 사용하였는데, 대량의 방사선 조사 시 고가의 플라스틱 섬광체가 착색되어 재사용할 수 없는 단점이 있다.

본 연구에서는 플라스틱 섬광체 보다 교체가 용이하고 가격이 저렴한 액체 유기 섬광체(liquid organic scintillator)를 이용하여 광 도시메트리를 시행할 수 있는 방법에 대하여 조사하였으며, 광 도시메트리를 위해 구성된 액체 섬광체 + 카메라 렌즈 + 고감도 화상 카메라 시스템의 고에너지 양성자 빔에 대한 특성 평가를 통하여 그 활용 가능성을 평가하였다.

II. 대상 및 방법

1. 검출기 제작

에탄올(99.9%, SigmaAldrich Co.)에 액체 유기 섬광체로 울티마 골드(Ultima Gold™, PerkinElmer Co.)를 10 wt% 첨가한 후 크기 80 × 80 × 150 mm의 투명한 폴리프로필렌(polypropylene) 용기에 주입하여 검출기를 제작하였다. 섬광체에서 발생하는 가시광선을 촬영하기 위하여 초점거리 50 mm 캐논 렌즈(f1.8)와 고감도 화상(complementary metal-oxide-semiconductor; CMOS) 카메라 (ASI120MM, ZWO Co.)를 결합하였다. 연구에 사용된 화상 카메라는 1,280 × 960 화소의 원 샷(one shot) 컬러 화상 카메라로 화소 크기가 3.75 μm, 12 bit 아날로그 디지털 컨버터(ADC, analog digital convertor)를 사용하여 조사시간을 64 μs ~ 1,000 s까지 설정할 수 있는 고감도 화상 카메라로 밝기가 어두운 천체 사진을 촬영하기 위하여 오랜 시간 동안 노출할 수 있도록 개발된 카메라이다[14]. 카메라 렌즈는 2 m 거리에서 150 mm 화각(field of view; FOV)을 커버할 수 있도록 초점거리 50 mm/f1.8인 범용 캐논 렌즈를 사용하였다.

2. 양성자 빔 조사

양성자 빔에 대한 광 도시메트리의 가능성을 평가하기 위하여 양성자가속기연구센터(Korea Multi-Purpose Accelerator Complex; KOMAC)의 양성자 빔에 대한 특성평가 실험을 수행하였다. Fig. 1은 양성자 조사 실험을 위한 배치도이다. 양성자 빔의 출구 창으로부터 2 m 거리에 제작된 액체 섬광체 용기를 위치하고, 섬광체에 대하여 수직방향으로 2 m 거리에 초점거리 50 mm 렌즈와 고감도 화상 카메라를 설치하였다. 실험에 사용된

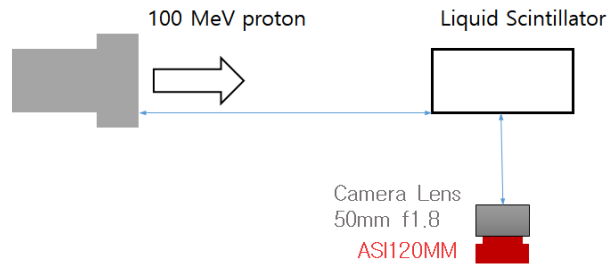


Fig. 1 Block diagram of experimental set up



Fig. 2 Photography of experimental set up at KOMAC

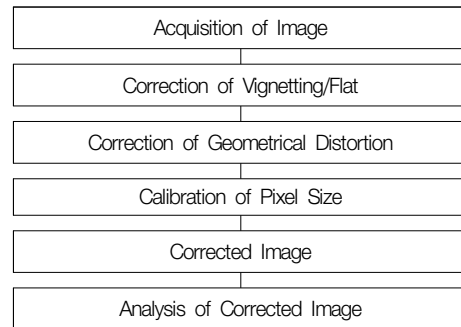


Fig. 3 Processor of image processing

양성자 빔 에너지는 100 MeV이었으며, 선속은 $1.09 \times 10^9 / \text{cm}^2 - \text{pulse}$ 이었다. 액체 섬광체에서 발생하는 가시광선을 카메라로 촬영하기 위하여 방사선 조사실 내부의 모든 광원은 전원을 껐으며, 이때 백그라운드 영상을 측정하여 방사선 조사 시 측정된 영상을 보정하였다. Fig. 2는 양성자가속기연구센터의 조사실 내부의 사진이다. 그림의 왼쪽 부분에서 입사된 양성자 빔의 진행방향을 따라 액체 섬광체를 배치하였으며, 양성자 빔의 진행방향에 대하여 수직방향인 그림의 오른쪽 부분에 렌즈와 결합된 화상 카메라를 설치하였다. 화상 카메라는 게인 300, 노출시간 10 sec로 설정한 후 촬영하였으며, 촬영된 영상은 Fig. 3의 절차를 따라 플랫(flat)/비네팅(vignetting) 및 기하학적 왜곡을 보정하였다. 비네팅은 카메라로 촬영된 영상이 중심에서 외각으로 벗어날수록 어둡게 나타나는 현상이다. 이는 카메라 렌즈가 원형인데 비하여 화상 카메라의 수광 센서

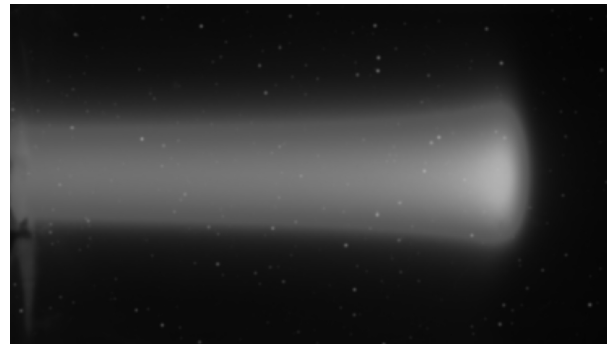
가 사각형이어서 렌즈부터 수광 센서 전면의 거리에 비하여 주변부의 거리가 기함에 따라 광량이 감소하여 발생한다. 비네팅은 플랫 영상을 촬영하여 보정하였다. 한편 촬영된 영상의 실제 크기를 교정하기 위하여 화소 크기를 측정하였으며, 교정된 화소 크기는 7.63 pixel/mm이었다. 영상 보정 및 정량적 평가는 어도브 포토샵(Adobe photoshop CS6 ver. 13.0)과 Image J (ver. 1.50i)를 사용하였다.

III. 결 과

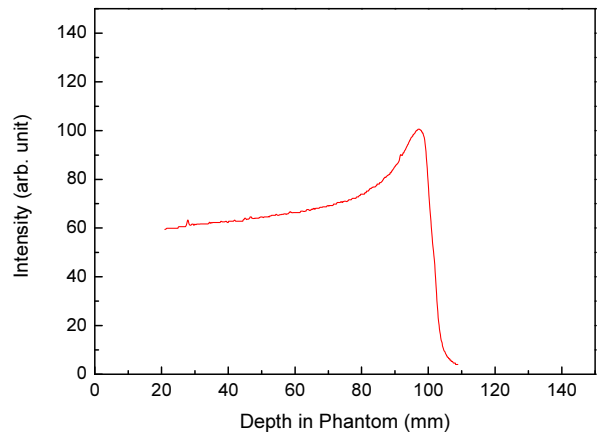
1. 선량백분율(PDD)

Fig. 4(a)는 에탄올을 용매로 액체 섬광체를 희석한 액체 유기섬광체에 대하여 100 MeV 양성자 빔을 조사하였을 때 10초간 노출하여 촬영한 영상이며, 촬영된 영상은 전형적인 양성자 빔의 분포를 보여주고 있다. 입사 양성자의 에너지가 높을 때는 물질과의 상호작용이 감소하여 저지능(stopping power)이 작아지고, 에너지가 감소하면서 급격히 상호작용이 증가하여 저지능이 급격히 증가하므로 비정의 끝부분에 집중적으로 에너지가 흡수되면서 섬광량이 증가하여 밝게 보인다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에서 양성자 빔의 입사방향을 따라 화소값(pixel value)을 Image J로 측정한 깊이선량백분율(percent depth dose; PDD)로서 고에너지 하전입자에서 나타나는 브래그 피크(Bragg peak)를 관찰할 수 있었으며, 에탄올에서 100 MeV 양성자 빔의 최대 비정은 약 103 mm이었다. 이 결과는 SRIM ver.2013 (Stopping and Range of Ions in Matter)으로[15] 계산된 비정과 동일한 결과로 본 실험의 결과를 검증할 수 있었다. 다만, 본 연구에서는 용매를 에탄올로 사용함에 따라 인체의 흡수선량을 직접 측정할 수 없다는 제한점은 있지만, 향후 인체조직등가물질인 물을 용매로 사용하여 이를 보완하여야 할 것이다.

한편 Fig. 4(a) 영상에서 나타난 희색 점들은 긴 촬영 시간에 의해 발생한 열적 잡음과 방사선 조사 시 고에너지 양성자의 의해 발생된 중성자로 인한 노이즈 화소(noise pixel)인 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 화상 카메라는 방사선에 대한 내구성이 낮아서 영상 획득 시 노이즈뿐 아니라 시스템 전체가 많은 영향을 받는다. 실제로 양성자 빔 조사 실험 도중 중성자에 과다 노출되면서 카메라의 동작이 일시적으로 중단되는 현상이 발생하였다. 실험에 사용된 고감도 화상 카메라는 12 bit 아날로그-디지털 변환기를 사용하므로 4,096 그레이 레벨(grey level)을 표현할 수 있으나, 화소 크기가 3.75 μm 로 매우 작아서 감도가 낮아



(a) photography of light emission excited by 100 MeV proton beams



(b) percent depth dose - Bragg peak

Fig. 4 Dose distribution of 100 MeV proton beams in ethanol at KOMAC

저선량 측정 시 제한점이 있었다. 향후 광 도시메트리 시스템 연구에서는 내방사선 특성이 우수하고, 화소의 크기가 커서 검출효율이 높으며, 장시간 노출 시 발생하는 열을 적절히 냉각하여 노이즈를 줄일 수 있는 카메라가 더 효율적일 것으로 판단된다.

2. 선량-화소값 직선성

Fig. 5는 양성자의 선량에 따른 액체 섬광체 출력의 선형성을 평가하기 위하여 양성자의 선량을 1~40 Gy 변화하면서 측정한 브래그 피크의 화소값을 측정한 것으로 1~40 Gy 선량 범위에서 선형적인 경향성을 보였다. 하지만 실험에 사용된 양성자가속기연구센터의 100 MeV 양성자 빔의 선속이 높아서 1Gy 이하의 저선량에서 재현성이 충분한 실험을 수행하지 못하였다.

3. 등선량곡선

방사선치료 시 치료 결과를 예측하고 평가하기 위해서 반

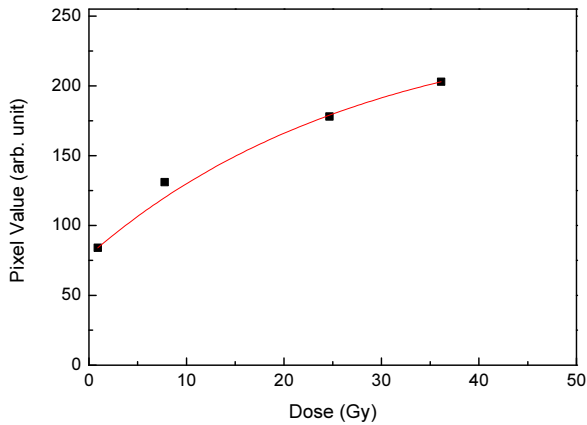


Fig. 5 Linearity between irradiated dose and pixel value

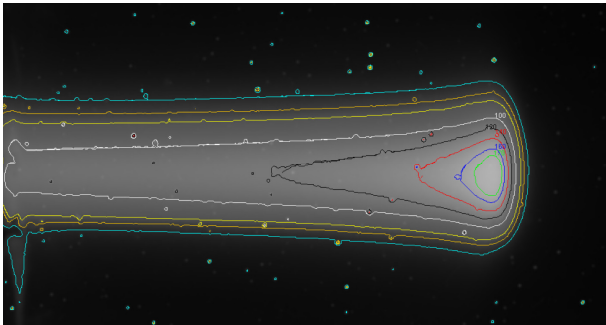


Fig. 6 Isodose curves in liquid organic scintillator for 100 MeV proton beams at KOMAC

드시 등선량 분포도를 평가하여야 한다. Fig. 6은 Fig. 4(a)에서 촬영된 영상을 Image J로 등선량 곡선을 측정함으로써 전형적인 브래그 피크를 보여주고 있다. Fig. 6에서 나타난 작은 원들은 산란 방사선에 의해 발생한 노이즈이다.

IV. 고 찰

광 도시메트리는 방사선 조사 시 섬광체 검출기에서 발생하는 가시광선을 고감도 카메라로 촬영하여 실시간으로 방사선을 모니터링하는 것으로 이를 방사선 치료에 적용하면 방사선량을 실시간으로 모니터링할 수 있다. Glaser 등은 강도변조방사선치료(intensity modulate radiotherapy; IMRT)와 체적조절회전치료(volumetric-modulated arc therapy; VMAT)에 물에서 발생하는 체렌코프(Cherenkov) 빛을 이용하여 광 도시메트리 시스템을 구현하였으며[16], Beddar는 플라스틱 섬광체를 이용한 실시간 모니터링을 구축하였다[17]. 본 논문에서 구현한 액체 섬광체는 체렌코프 빛보다 발광효율이 높아서 Claser의 결과에 비하여 실시간 모니터링에

더 적합할 것으로 판단되며, 손쉽게 액체 섬광체를 교체할 수 있으므로 플라스틱 섬광체에서 발생할 수 있는 방사선 손상에 의해 발생할 수 있는 착색 현상을 쉽게 제거할 수 있는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 방사선 치료에 사용하는 X선 선량평가가 아니라는 점과 인체조직 등가물질이 아닌 에탄올에 대한 광 도시메트리를 시행하였기 때문에 인체선량 평가에는 제한적이다. 이상의 연구 결과로 볼 때 구현된 광도시메트리 시스템은 입체조형치료(conformal therapy), 강도변조방사선치료, 체적조절방사선치료 등에서 실시간으로 용적선량 평가와 정도관리 등에 충분한 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 보다 더 정확한 광 도시메트리를 위하여 인체조직등가 물질의 보완과 더불어 화상 카메라의 감도 향상, 화소수 및 화소 크기 증가, 내방사선 특성 개선 및 노출 시간 증가와 열잡음 감소 등이 요구된다.

V. 결 론

에탄올을 베이스로 광 도시메트리 시스템을 구축하여 양성자가속기연구센터의 100 MeV 빔에 대한 연구를 수행하였다. 일반적인 전리함(ionization chamber)를 이용한 방사선 선량 평가에 비하여 비네팅, 외부 노이즈 광원, 렌즈와 화상 소자의 기하학적 보정 등이 요구되지만, 적절한 보정과 교정 과정을 통하여 방사선치료 시 흡수선량을 실시간으로 평가할 수 있는 의미 있는 결과를 도출할 수 있었다. 본 논문의 결과를 고도로 발달되고 있는 현대 방사선 치료에서 인체의 용적선량을 평가 및 정도관리의 새로운 방법으로서 가능성을 제시한다.

REFERENCES

- [1] Okumus D, Sarihan S, M.D.Gozcu S, Sigirli D. The relationship between dosimetric factors, side effects, and survival in patients with non-small cell lung cancer treated with definitive radiotherapy. *Med Dosim.* 2017; 42(3): 169-176.
- [2] Mazonakis M, Damilakis J. Estimation and reduction of the radiation dose to the fetus from external-beam radiotherapy. *Phys Med.* 2017; In press.
- [3] Shirai K, Fukata K, Adachi A, Saitoh J, Nakano T. Dose-volume histogram analysis of brain stem ne-

- crisis in head and neck tumors treated using carbon-ion radiotherapy. *Radiother Oncol.* 2017; 125(1): 36–40.
- [4] Lee G, Dinniwell R, Liu FF, Fyles A, Han K, Conrad T, et. al. Building a New Model of Care for Rapid Breast Radiotherapy Treatment Planning: Evaluation of the Advanced Practice Radiation Therapist in Cavity Delineation. *Clin Oncol.* 2016; 28(12): 184–191.
- [5] Bridge P, Fielding A, Rowntree P, Pullar A. Qualitative Evaluation of a Novel 3D Volumetric Radiotherapy Segmentation Tool. *J Med Imag Rad Sci.* 2017; 48(2): 178–183.
- [6] Bijl E, Oers R, Olaciregui-Ruiz I, Mans A. Comparison of gamma- and DVH-based in vivo dosimetric plan evaluation for pelvic VMAT treatments. *Radiother Oncol.* 2017; In press.
- [7] Yaparpalvi R, Fontenla D, Tyerech S, Boselli L, Beitler J. Parotid Gland Tumors: A Comparison of Postoperative Radiotherapy Techniques Using Three Dimensional (3D) Dose Distributions and Dose-Volume Histograms (DVHs). *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1998; 40(1): 43–9.
- [8] Silveira MA, Pavoni JF, Baffa O. Three-dimensional quality assurance of IMRT prostate. *Phys Med.* 2017; 34: 1–6.
- [9] Tridimensional dosimetry for prostate IMRT treatments using MAGIC-f gel by MRI. *Radiat Meas.* 2014; 71: 369–373.
- [10] Kirov AS, Piao JZ, Mathur NK, Miller TR, Devic S, et. al. The three-dimensional scintillation dosimetry method: test for a Ru-106 eye plaque applicator. *Phys Med Biol.* 2005; 50(13): 3063–81.
- [11] Beddar S, Archambault L, Sahoo N, Poenisch F, Chen GT, Gillin MT, et. al. Exploration of the potential of liquid scintillators for real-time 3D dosimetry of intensity modulated proton beams. *Med Phys.* 2009; 36(5): 1736–43.
- [12] Fukushima Y, Hamada M, Nishio T, Maruyama K. Development of an easy-to-handle range measurement tool using a plastic scintillator for proton beam therapy. *Phys Med Biol.* 2006; 51: 5927–36.
- [13] Ponisch F, Archambault L, Briere TM, Sahoo N, Mohan R, Beddar S, et. al. Liquid scintillator for 2D dosimetry for high-energy photon beams. *Med Phys.* 2009; 36: 1478–85.
- [14] Specification of ASI120MC-S CMOS camera. Available from: <https://astronomy-imaging-camera.com/products/usb-3-0/asi120mc-s/>
- [15] Interaction of ions with matter: SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter). Available from: <http://www.srim.org/>
- [16] Glaser AK, Andreozzi JM, Davis SC, Zhang R, Pogue BW, Fox CJ4, et al. Video-rate optical dosimetry and dynamic visualization of IMRT and VMAT treatment plans in water using Cherenkov radiation. *Med Phys.* 2014; 41(6): 062102–1 9.
- [17] Beddar S. Real-time volumetric scintillation dosimetry. *J Phys Conf Ser.* 2015; 573: 1–7.

•Abstract

Dose Distribution of 100 MeV Proton Beams in KOMAC by using Organic Liquid Scintillator

Sunghwan Kim

Department of Radiological Science, Cheongju University

In this paper, an optical dosimetric system for radiation dose measurement is developed and characterized for 100 MeV proton beams in KOMAC(Korea Multi-Purpose Accelerator Complex). The system consists of 10 wt% Ultima Gold™ liquid organic scintillator in the ethanol, a camera lens(50 mm/f1.8), and a high sensitivity CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor) camera (ASI120MM, ZWO Co.). The FOV(field of view) of the system is designed to be 150 mm at a distance of 2 m. This system showed sufficient linearity in the range of 1~40 Gy for the 100 MeV proton beams in KOMAC. We also successfully got the percentage depth dose and the isodose curves of the 100 MeV proton beams from the captured images. Because the solvent is not a human tissue equivalent material, we can not directly measure the absorbed dose of the human body. Through this study, we have established the optical dosimetric procedure and propose a new volume dose assessment method.

Key Words : liquid organic scintillator, proton, dose, Bragg peak, optical dosimetry