

의료용 양성자선 계측을 위한 광섬유 방사선량계의 제작 및 최적화

*건국대학교 의학공학부 의공학실용기술연구소, †국립암센터 양성자치료센터

장경원* · 조동현* · 유욱재* · 서정기* · 이봉수* · 황의중[†] · 신동호[†] · 박성용[†]

본 연구에서는 치료용 양성자선 계측을 위한 광섬유 방사선량계 개발을 목적으로 최적화 과정의 기초연구를 통하여 광섬유 방사선량계를 제작하였다. 양성자선 계측의 최적화를 위해 유기섬광체의 종류에 따른 섬광량 및 브래그 피크의 피크/플래투를 측정하여 가장 효율이 뛰어난 섬광체를 선별하였고, 유기섬광체의 직경에 따라 물 팬텀의 각 깊이에서 손실되는 양성자선의 에너지에 대해 유기섬광체에서 발생하는 섬광량을 측정하여 유기섬광체의 직경에 따른 선형성을 도출하고 최적의 섬광체 직경을 선택하였다. 또한 양성자선의 조사각도에 대해 유기섬광체의 길이에 따른 섬광량 및 섬광량의 표준편차를 측정하여 입사각 의존도를 판별하고 최적의 섬광체 길이를 결정하였다. 최적화 과정을 통하여 제작된 센서 성능평가의 일환으로 양성자 가속기의 선량률 및 모니터 유닛에 따른 광섬유 방사선량계의 섬광량을 측정하였다.

중심단어: 방사선량계, 광섬유, 유기섬광체, 양성자선

서 론

방사선 치료의 목적은 환부 주변의 정상조직에 피해 없이 암조직에 정확한 양의 방사선을 전달하는 것이다. 특히 방사선 치료 중 양성자선을 이용한 치료는 브래그 피크(bragg peak)에 의해 말단부의 상대선량이 급격히 상승되었다 감소되는 형태(distal fall-off)를 가지고 있으므로 일반적인 X-선 치료에 비해 정상조직의 피해를 크게 줄일 수 있다. 그러나 작은 오차에도 정상조직에 치명적인 손상을 입힐 수 있으므로 양성자선의 품질관리가 매우 중요하다.

현재 품질관리에 사용되고 있는 방사선량계들은 이온전리함(ionization chamber), 필름(film), 다이오드(diode), 그리고 열형광선량계(TLD: thermo luminescent dosimeter) 등이 있으나, 각 선량계 센서부(sensing probe)의 구성 물질이 물이나 인체 조직과 등가(water or tissue-equivalence)가 아니므로 복잡한 보정작업을 필요로 하며 또한 큰 부피를 가지고 있기 때문에 고 분해능을 요구하는 양성자선 계측에 부적합하다. 이에 반해 현재 개발되고 있는 광섬유 방사선량계

(fiber-optic dosimeter)는 물 혹은 인체 조직과 등가인 유기섬광체를 사용함으로써 복잡한 보정작업 없이 정확한 선량 측정이 가능하며 센서부의 부피가 작으므로 고 분해능의 측정이 가능하다.¹⁻³⁾ 그리고 플라스틱 광섬유를 이용하여 섬광체에서 발생하는 광신호를 측정하므로 실시간 계측이 가능하며, 계측 정보의 전달 과정에서 전자기와 장애로부터 간섭을 받지 않는다. 또한 원거리 계측이 가능하며 시험체(phantom)와의 재질의 상이성으로 인한 보정작업을 최소화할 수 있다.^{4,5)}

본 연구에서는 치료용 양성자선 계측을 위한 광섬유 방사선량계 개발을 목적으로 최적화 과정의 기초연구를 통하여 광섬유 방사선량계를 제작하였다. 양성자선 계측의 최적화를 위해 유기섬광체의 종류에 따른 섬광량 및 브래그 피크의 피크/플래투(peak/plateau)를 측정하여 가장 효율이 뛰어난 섬광체를 선별하였고, 유기섬광체의 직경에 따라 물 팬텀의 각 깊이에서 손실되는 양성자선의 에너지에 대해 유기섬광체에서 발생하는 섬광량을 측정하여 유기섬광체의 직경에 따른 선형성을 도출하고 최적의 섬광체 직경을 선택하였다. 또한 양성자선의 조사각도에 대해 유기섬광체의 길이에 따른 섬광량 및 섬광량의 표준편차를 측정하여 입사각 의존도를 판별하고 최적의 섬광체 길이를 결정하였다. 최적화 과정을 통하여 제작된 광섬유 방사선량계 성능평가의 일환으로 양성자 가속기의 선량률(dose rate) 및 모니터 유닛(MU: monitor unit)에 따른 광섬유 방사선량계의 섬광량을 측정하였다.

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D01252).
이 논문은 2009년 11월 25일 접수하여 2009년 12월 28일 채택되었음.
책임저자 : 이봉수, 충북 충주시 단월동 322
건국대학교 의료생명대학 의공학부
Tel: 043)856-0976, Fax: 043)851-0620
E-mail: bslee@kku.ac.kr

재료 및 방법

실험에 사용된 광섬유(SH4001, Mitsubishi)는 계단형의 굴절률(step index)을 갖는 플라스틱 멀티모드 광섬유로써 직경은 1 mm이며 클래딩(cladding)의 두께는 0.01 mm이다. 또한 코어(core)와 클래딩의 굴절률(refractive index)은 각각 1.492, 1.402이고, 개구수(NA: numerical aperture)는 0.510이며 감쇄율(attenuation rate)은 650 nm 파장의 빛에서 0.20 dB/m 이하이다. 이러한 플라스틱 광섬유는 3.5 kGy의 흡수 선량까지 그 수명이 보장된다고 보고되어 있다.⁶⁾ 센서부로 사용된 섬광체는 원자번호가 낮은 물질로 구성된 유기섬광체(BCF-10, BCF-20, BCF-12 and BCF-60, Saint-Gobain)로써 BCF-10과 BCF-20의 경우 최대 방출 파장이 각각 432 nm, 492 nm이며 감쇠시간(decay time)은 2.7 nsec이다. BCF-12는 435 nm의 최대방출파장을 가지며 3.2 nsec의 감쇠시간을 갖는다. 세 유기섬광체들은 모두 1 MeV의 에너지를 갖는 하전입자에 대하여 약 8,000개의 광자를 방출한다. BCF-60의 경우 최대 방출파장이 530 nm로서 네 가지 유기섬광체 중에서 가장 길며 잔광시간은 7 nsec, 1 MeV 하전입자 당 방출되는 광자 수는 약 7,100개이다. 유기섬광체들은 모두 원통형으로 직경은 0.5~1 mm며 길이는 1~50 mm를 사용하였다. 이러한 유기섬광체들의 수명은 1.0 kGy로 보고되어 있다.⁷⁾

실험에 사용된 양성자선은 현재 국립암센터(National cancer center)에서 방사선치료에 사용하고 있는 사이클로트론(IBA Proteus 235 cyclotron)에서 발생되는 180 MeV의 양성자선을 이용하였고, 양성자선의 선량율은 0.5~3 Gy/min, 모니터 유닛은 50~100 MU이다.

Fig. 1은 치료용 양성자선에 광섬유 방사선량계의 최적화를 위한 실험구성을 보여주고 있다. 유기섬광체와 광섬유의 양 끝 단은 여러 종류의 폴리싱 패드(polishing pad)를 이용하여 연마하였으며 광학용 에폭시를 사용하여 광섬유와 유기섬광체를 결합하였다. 섬광량 계측을 위한 광 검출장치로는 광증배관(PMT: photomultiplier tube)을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 광증배관(H7546, Hamamatsu photonics)의 측정 파장의 범위는 300~650 nm이며 420 nm에서 최대 민감도를 가지고 암전류(dark current)는 보통 3 nA, 최대 50 nA이다. 광증배관에서 발생하는 전기신호를 증폭하기 위해서 별도로 제작한 증폭기(amplifier) 시스템을 사용하였다. 광섬유 방사선량계에 양성자가 조사되면 섬광체에서 발생된 섬광빛은 15 m 길이의 광섬유를 통해 광증배관-증폭기 시스템으로 전달되고 최종신호는 LabVIEW DAQ board에 의해 컴퓨터로 전송된다.

결 과

Fig. 2는 양성자선을 조사하였을 때, 직경 0.5 mm, 길이

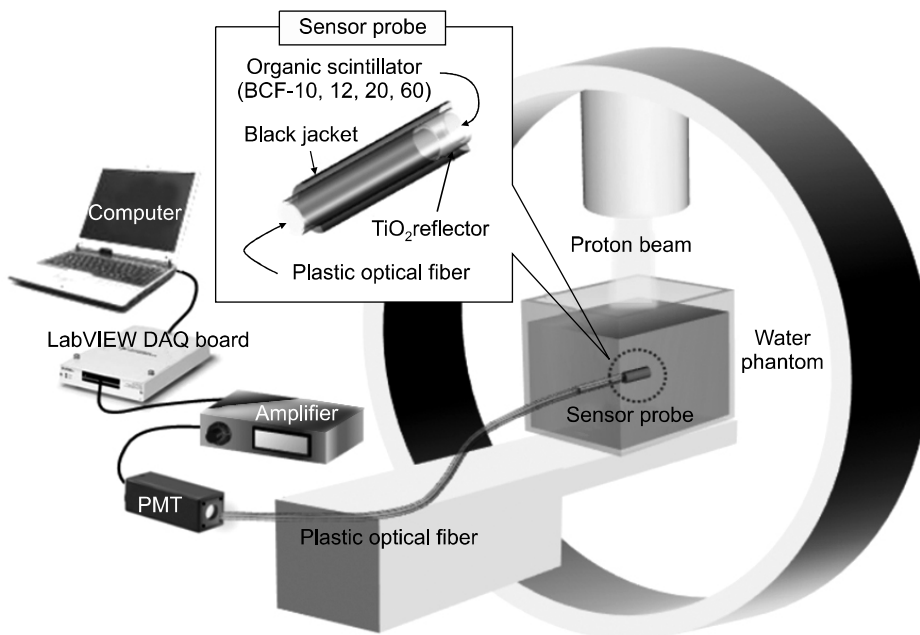


Fig. 1. Experimental setup for optimization of fiber-optic dosimeter in proton therapy.

10 mm 유기섬광체의 종류에 따른 섬광량 측정 결과와 브래그 피크의 피크/플래투 측정결과를 보여주고 있다. Fig. 2a에서 BCF-10, BCF-20, BCF-12는 특성상 1 MeV의 에너지를 갖는 하전입자에 대하여 약 8,000개의 광자를 방출하므로 같은 입사선 에너지에 대해 같은 양의 섬광량을 방출해야 한다. 그러나 실험결과를 살펴보면 BCF-12의 섬광량이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 그 이유로는 첫째, 방사선의 종류에 따라 섬광체들의 섬광 효율이 틀리기 때문이며, 둘째로는 광증배관의 특성에 의한 것으로 계측과장이 가시광선 영역일 경우 짧은 파장에서 더욱 민감하게 반응하기 때문이다. BCF-12의 경우 최대방출파장이 짧아 광증배관에서 더욱 민감하게 계측되었고 최대방출파장이 비슷한 BCF-10과 비교하였을 때 양성자선에 대하여 섬광효율이 높다는

것을 알 수 있다.

Fig. 2b는 양성자선의 특성인 브래그 피크의 최대 선량분포 지점을 피크로 놓고 표면부를 플래투로 놓았을 때 그 비율을 보여주고 있다. 하전입자가 섬광체를 통과할 때, 저지능(stopping power)이 작을 경우는 하전입자에서 손실되는 에너지에 비례하여 섬광체에서 섬광량이 발생하지만, 저지능이 클 경우는 섬광량이 포화상태에 가까워진다. 이러한 것은 소광효과(quenching effect)에 의한 것으로 저지능이 클 경우는 섬광량이 하전입자에서 손실되는 에너지에 비례하지 않게 된다. 같은 양성자선에 대해 섬광체의 종류 및 두께에 따라 그 저지능이 다르므로 저지능이 가장 작은 섬광체를 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는 섬광체의 상대적 저지능을 알아보는 방법으로 피크/플래투를 측정하였다.

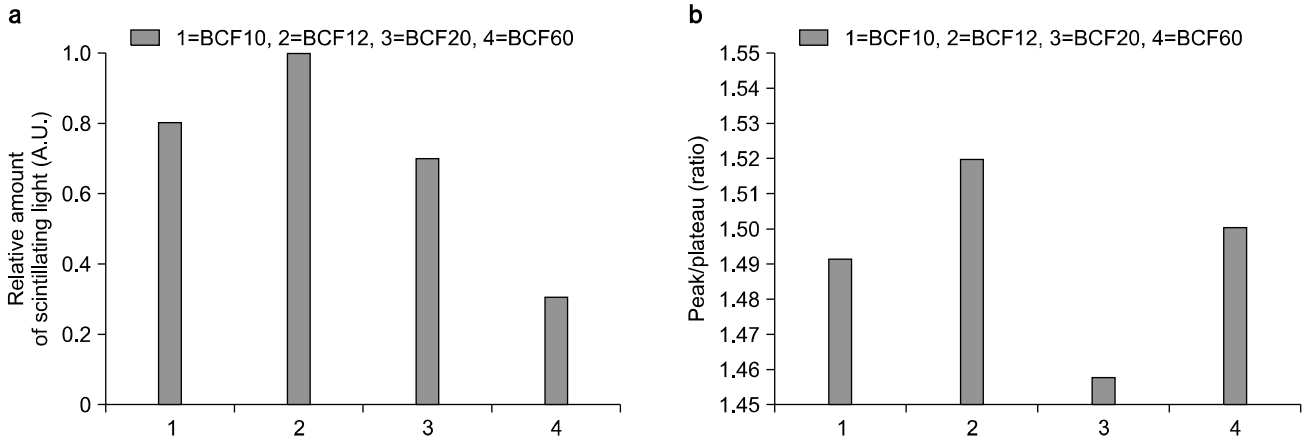


Fig. 2. Measurements of scintillating lights and peak/plateau according to scintillator types ((a) amount of scintillating light, (b) peak/plateau ratio).

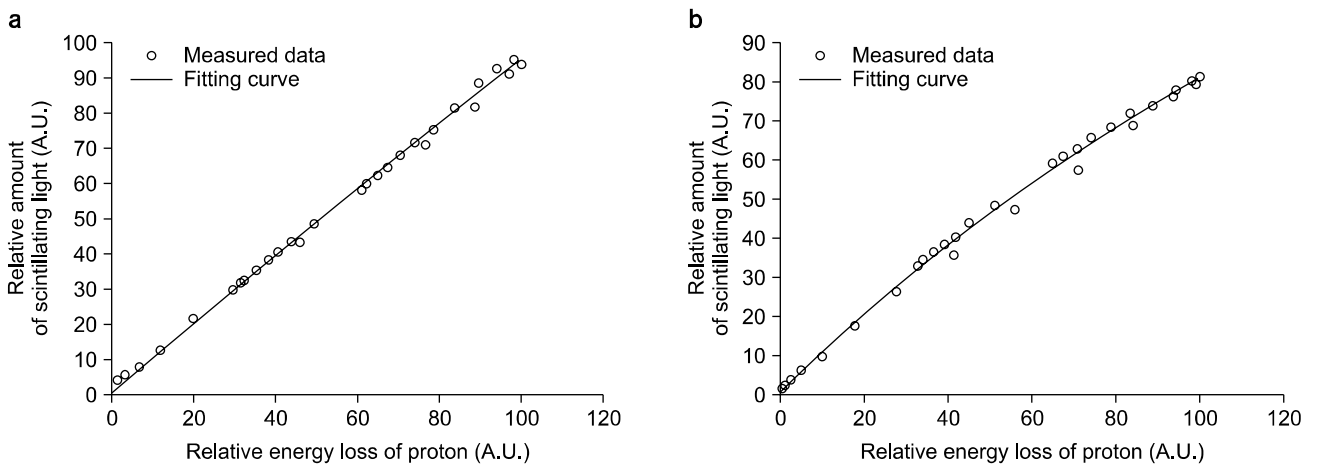


Fig. 3. Measurements of scintillating lights and energy losses of proton particles according to depth of water phantom ((a) 0.5 mm BCF-12, (b) 1 mm BCF-12).

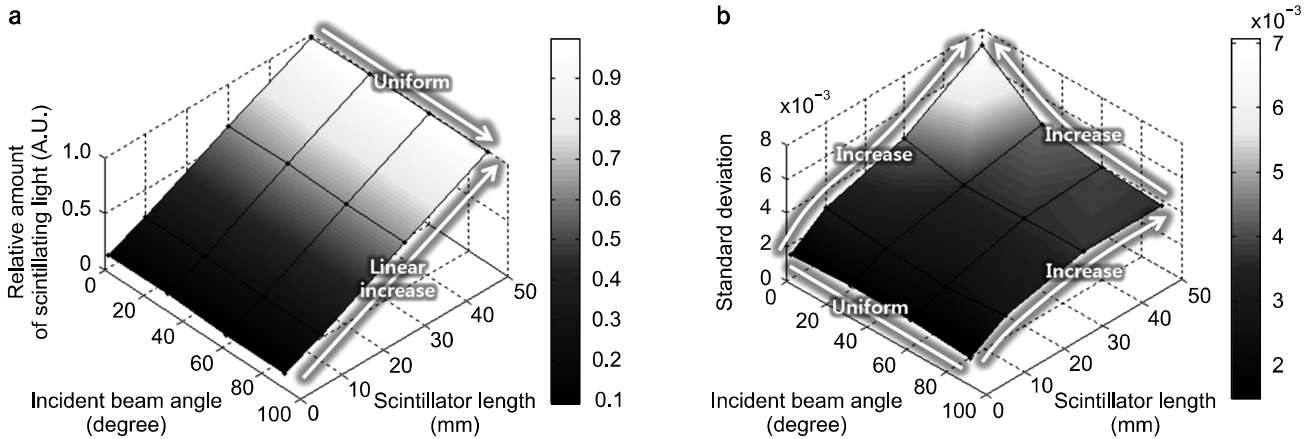


Fig. 4. Measurements of scintillating lights and standard deviation according to BCF-12 lengths and proton beam angle ((a) measurements of scintillating lights, (b) measurements of standard deviations).

본 결과에서는 피크/플래투의 비율이 높을수록 손실되는 에너지에 더 비례한다는 것을 뜻하며 실험결과에서 BCF-12가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 이후의 실험에서는 계측효율이 가장 높은 유기섬광체 BCF-12를 이용하여 실험을 진행하였다.

Fig. 3은 유기섬광체 BCF-12의 직경에 따라 물 팬텀의 각 깊이에서 손실되는 양성자선의 에너지에 대해 유기섬광체에서 발생하는 섬광량을 측정된 결과이다. 본 실험에서 물 팬텀의 깊이에 따른 광섬유 방사선량계의 섬광량은 양성자선의 브래그 피크 영역(140~161 mm)에서 1 mm단위로 측정하였으며, 그 외의 구간(0~140 mm)에서는 10~20 mm 단위로 측정하였다. 또한 각 깊이에서 손실되는 양성자선의 에너지는 이온전리함(Markus chamber)을 이용하여 측정된 결과이다. 결과를 살펴보면 0.5 mm 직경의 유기섬광체가 손실되는 양성자선의 에너지에 대해 더 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 단위 길이당 하전입자의 에너지 손실과 유기섬광체의 섬광량과의 관계를 나타낸 벌크의 수식(Birk's formula)은 다음과 같다.^{8,9)}

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \times \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (1)$$

여기서 dL/dx 은 단위 길이 당 유기섬광체의 섬광량을 나타내고, S 는 섬광효율, kB 는 소광계수, dE/dx 는 단위 길이당 하전입자의 에너지 손실을 뜻한다.

수식(1)에서 소광계수가 작아질수록 dL/dx 과 dE/dx 는 더

선형적인 관계를 갖게 된다. 위 수식을 토대로 0.5 mm 유기섬광체와 1 mm 유기섬광체의 소광계수를 계산한 결과, 각각 0.0005, 0.0034로 계산되었다. 본 연구를 바탕으로 이후 연구에서는 소광계수가 작은 0.5 mm 직경의 섬광체를 사용하였다.

Fig. 4a는 양성자선을 조사하였을 때, 유기섬광체 BCF-12의 길이 및 양성자선의 조사각도에 따른 섬광량 측정결과를 보여주고 있다. 본 실험에서 유기섬광체 BCF-12의 길이는 1, 10, 30, 50 mm이며, 양성자선의 조사각도는 0°, 30°, 60°, 90°이다. 유기섬광체의 길이가 일정길이까지 길어질수록 섬광체에서 발생하는 섬광량이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 유기섬광체의 길이가 길어지면 섬광량 증가로 인해 계측효율은 증가하지만, 공간분해능이 감소하게 되며 조사영역의 선량 분포 및 조사선의 각도에 대한 의존성이 커지게 되는 tradeoff 관계를 갖게 된다. 본 실험은 공기 중에서 측정된 것으로 조사 각도에 따른 섬광량은 큰 차이를 보이지 않지만, Fig. 4b와 같이 길이가 길어질수록 조사각도에 따른 표준편차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공기 중이라 할지라도 유기섬광체의 방향이 조사방향과 평행하게 위치했을 때, 섬광체가 위치한 공간마다 양성자선과의 반응율이 상이한 것에 기인한다. 본 연구에서는 조사선의 방향 및 조사영역의 선량 분포에 대한 의존성 최소화에 역점을 두었고, 이후의 연구에서는 1 mm 길이의 유기섬광체를 이용하여 제작한 광섬유 센서부를 사용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 양성자가속기의 선량을 및 모니터 유닛에 따른 광섬유 방사선량계의 응답을 보여주고 있다. 치료용 선형

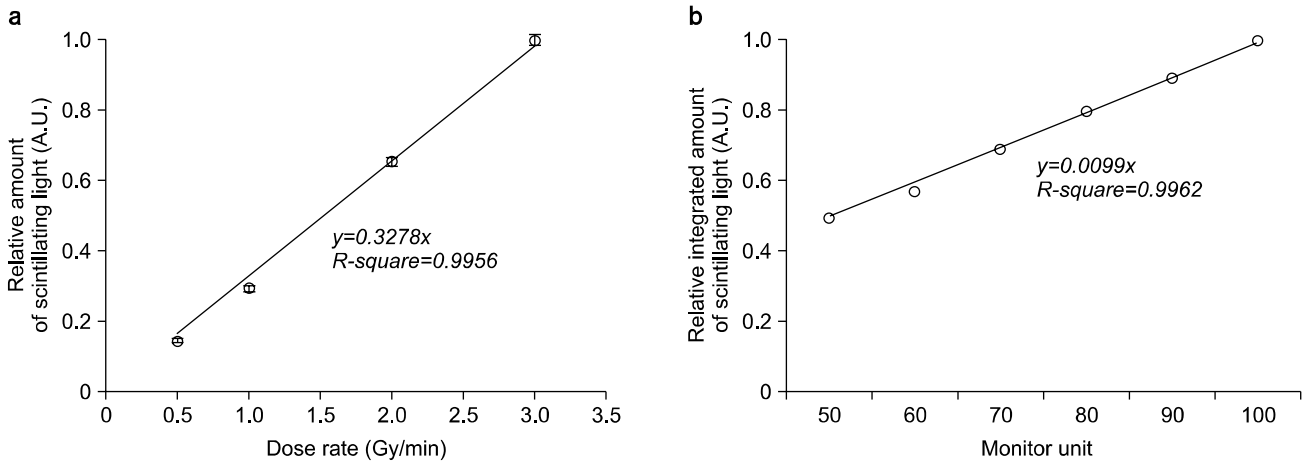


Fig. 5. Responses of fiber-optic dosimeter according to dose rates and MUs of proton beam ((a) responses according to dose rate, (b) responses according to MUs).

가속기와는 달리 양성자가속기의 펄스주기는 10 Hz로 고정되어 있다. 양성자 가속기의 선량율을 증가시키면 양성자선의 선속이 증가하게 되고, 그에 따라 선량은 선형적으로 증가하게 된다. Fig. 5a에서 보는 것과 같이 양성자 가속기의 선량율이 증가함에 따라 광섬유 방사선량계의 섬광량이 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 그래프에서 추세선식의 R-square값은 0.9956으로 계산되었다. Fig. 5b는 양성자가속기의 모니터 유닛에 따른 광섬유 방사선량계의 응답을 보여주고 있다. 양성자가속기의 동일한 조건에서 모니터 유닛이 증가하게 되면 조사시간이 증가하게 되고, 그에 따라 광섬유 양성자선 센서에 조사되는 선량이 선형적으로 증가하게 된다. 그림에서 추세선식의 R-square값은 0.9962로 계산되었다.

결 론

양성자선 치료는 기존 X-선에 비해 정상조직에 피해를 크게 줄일 수 있다. 그러나 작은 오차에도 정상조직에 치명적인 손상을 입힐 수 있기 때문에 환자시술에 앞서 양성자선에 대한 정확한 품질관리를 하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 양성자선 품질관리의 일환으로 치료용 양성자선 계측을 위해 광섬유 방사선량계를 제작하였고, 유기섬광체의 종류에 따른 섬광량 및 브래그 피크의 피크/클래투를 측정하여 최적의 섬광체(BCF-12)를 선별하였다. 또한 BCF-12의 직경에 따라 물 팬텀의 각 깊이에서 손실되는 양성자선의 에너지에 대해 유기섬광체에서 발생하는 섬광량을 측정하여 유기섬광체의 직경에 따른 선형성을 도시하

고, 섬광체의 직경(0.5 mm)을 선택하였다. 마지막으로 BCF-12의 길이에 따른 입사각 의존도를 판별하기 위해 양성자선의 조사각도에 대해 BCF-12의 길이에 따른 섬광량 및 섬광량의 표준편차를 측정하여 최적의 길이(1 mm)를 결정하였다. 최적화 과정을 통하여 제작된 광섬유 방사선량계 성능평가의 일환으로 양성자 가속기의 선량율 및 모니터 유닛에 따른 광섬유 방사선량계의 섬광량을 측정하여 선형성을 확인하였다.

앞으로의 연구 방향은 현재 사용 중인 타 방사선량계들과 비교실험을 통하여 광섬유 방사선량계의 특성을 평가할 것이며, 특히 조사영역의 경계면에서 반영(penumbra) 측정을 통하여 타 계측장비와 공간분해능 비교실험을 수행할 계획이다. 또한 양성자선의 선량분포를 실시간으로 계측할 수 있는 다차원의 광섬유 방사선량계를 제작할 계획이다. 지속적인 연구를 통하여 개발될 광섬유 방사선량계는 보다 정확하고 경제적으로 치료용 양성자선 계측에 사용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Frelin AM, Fontbonne JM, Ban G, et al: Spectral discrimination of Cerenkov radiation in scintillating dosimeters, Med. Phys 32:3000-3006 (2005)
2. White TO: Scintillating fibers. Nucl Instr Phys Res A 273: 820-825 (1988)
3. Beddar AS: Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy. Radiation Measurements 41:S124-S133 (2007)
4. Beddar AS, Kinsella TJ, Ikhlef Colin A, et al: A miniature "Scintillator-Fiber-optic-PMT" detector system for the dosimetry

- of small fields in stereotactic radiosurgery, IEEE Trans. Nucl Sci 48:924-928 (2001)
5. Archambault L, Beddar AS, Gingras Colin L, et al: Water-equivalent dosimeter array for small-field external beam radiotherapy. Med Phys 34:1583-1592 (2007)
 6. Laguesse M, Bourdinaud M: Characterization of fluorescent plastic optical fibers for X-ray beam detection. SPIE 1592:96-107 (1991)
 7. Blumenfeld H, Bourdinaud M, Stirling AV: Ageing of scintillating fibers, natural and otherwise. Nucl Instrum Meth A 279: 281-284 (1989)
 8. Torrasi L: Plastic scintillator investigations for relative dosimetry in proton-therapy. Nucl Instrum Meth B 170:523-530 (2000)
 9. Knoll GF: Radiation detection and measurement. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York (1999), pp. 227

Fabrication and Optimization of a Fiber-optic Dosimeter for Proton Beam Therapy Dosimetry

Kyoung Won Jang*, Dong Hyun Cho*, Wook Jae Yoo*, Jeong Ki Seo*, Bongsoo Lee*, Eui Jung Hwang[†], Dongho Shin[†], Sung-Yong Park[†]

*School of Biomedical Engineering, Research Institute of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Konkuk University,

[†]Proton Therapy Center, National Cancer Center, Seoul, Korea

In this study, we have fabricated a fiber-optic dosimeter for a proton beam therapy dosimetry. We have measured scintillating lights with the various kinds of organic scintillators and selected the BCF-12 as a sensor-tip material due to its highest light output and peak/plateau ratio. To determine the optimum diameter of BCF-12, we have measured scintillating lights according to the energy losses of proton beams in a water phantom. Also, we determined the adequate length of organic scintillator by measuring scintillating lights according to the incident angles of proton beam. Using an optimized fiber-optic dosimeter, we have measured scintillating lights according to the dose rates and monitor units of proton accelerator.

Key Words: Dosimeter, Optical fiber, Organic scintillator, Proton beam