

## Development of Two-dimensional Prompt-gamma Measurement System for Verification of Proton Dose Distribution

Jong Hoon Park\*, Han Rim Lee\*, Chan Hyeong Kim\*, Sung Hun Kim\*, Seonghoon Kim<sup>†</sup>, Se Byeong Lee<sup>‡</sup>

\*Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, <sup>†</sup>Department of Radiation Oncology, Hanyang University Hospital, Seoul, <sup>‡</sup>Proton Therapy Center, National Cancer Center, Goyang, Korea

In proton therapy, verification of proton dose distribution is important to treat cancer precisely and to enhance patients' safety. To verify proton dose distribution, in a previous study, our team incorporated a vertically-aligned one-dimensional array detection system. We measured 2D prompt-gamma distribution moving the developed detection system in the longitudinal direction and verified similarity between 2D prompt-gamma distribution and 2D proton dose distribution. In the present, we have developed two-dimension prompt-gamma measurement system consisted of a 2D parallel-hole collimator, 2D array-type NaI(Tl) scintillators, and multi-anode PMT (MA-PMT) to measure 2D prompt-gamma distribution in real time. The developed measurement system was tested with <sup>22</sup>Na (0.511 and 1.275 MeV) and <sup>137</sup>Cs (0.662 MeV) gamma sources, and the energy resolutions of 0.511, 0.662 and 1.275 MeV were 10.9%±0.23p%, 9.8%±0.18p% and 6.4%±0.24p%, respectively. Further, the energy resolution of the high gamma energy (3.416 MeV) of double escape peak from Am-Be source was 11.4%±3.6p%. To estimate the performance of the developed measurement system, we measured 2D prompt-gamma distribution generated by PMMA phantom irradiated with 45 MeV proton beam of 0.5 nA. As a result of comparing a EBT film result, 2D prompt-gamma distribution measured for 9×10<sup>9</sup> protons is similar to 2D proton dose distribution. In addition, the 45 MeV estimated beam range by profile distribution of 2D prompt gamma distribution was 17.0±0.4 mm and was intimately related with the proton beam range of 17.4 mm.

**Key Words:** Proton therapy, 2D proton dose distribution, Two-dimension prompt-gamma measurement system

### 서 론

양성자 치료는 기존 방사선 치료와 비교하였을 때 같은 처방선량을 치료 부위에 전달하면서 정상조직의 불필요한 방사선량을 유의하게 줄일 수 있다는 장점이 있다.<sup>1,2)</sup> 하지만 치료 계획 시 CT영상의 Hounsfield unit을 양성자 저지능 (proton stopping power)으로 변환할 때 발생하는 오차, 환자

치료 위치의 불확실성에서 발생하는 오차, 치료 중 호흡에 의한 내부 장기의 위치 변화와 장기적인 치료로 인한 환자 신체 일부의 변화로 발생하는 오차 등으로 인하여 환자 체내의 양성자 빔의 선량 분포 또는 비정의 불확실성이 발생하게 된다. 이렇게 체내 양성자 빔의 선량 분포를 정확하게 알지 못할 경우 치료 계획 시스템에서 계획한 선량을 정확하게 전달할 수 없기 때문에 현재 양성자 치료 시설에서는 환자의 안전을 고려하여 치료 부위 주변에 추가적인 PTV (치료계획목표체적) 마진을 두어 치료를 진행하고 있다.<sup>3)</sup> 따라서 양성자 빔의 장점을 최대한 활용하기 위해서는 치료 중 인체 내 양성자 빔의 선량 분포를 실시간으로 측정하는 기술 개발이 필수적이다.<sup>4)</sup>

양성자 빔은 인체 내에서 완전히 에너지를 전달하고 흡수되기 때문에 양성자 빔의 분포를 출구 선량 측정으로 내부 선량을 예측하는 것은 불가능하다. 이에 인체 내 매질과 양성자 빔과의 핵반응으로 생성된 양전자 방출체에서 발생한 양전자가 쌍소멸하는 위치를 측정하는 방식인 Positron emission tomography (PET) 영상법이 제안되었다.<sup>5)</sup> PET 영

This research was supported by National Nuclear R&D program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education Science and Technology (No. 2014M2B2A4030572, 2012-K001146) and also by ETRI R&D Program (Development of particle beam range verification technology based on prompt gamma-ray measurements, 15ZC1810).

Received 2 March 2015, Revised 12 March 2015, Accepted 18 March 2015

**Correspondence:** Chan Hyeong Kim (chkim@hanyang.ac.kr)

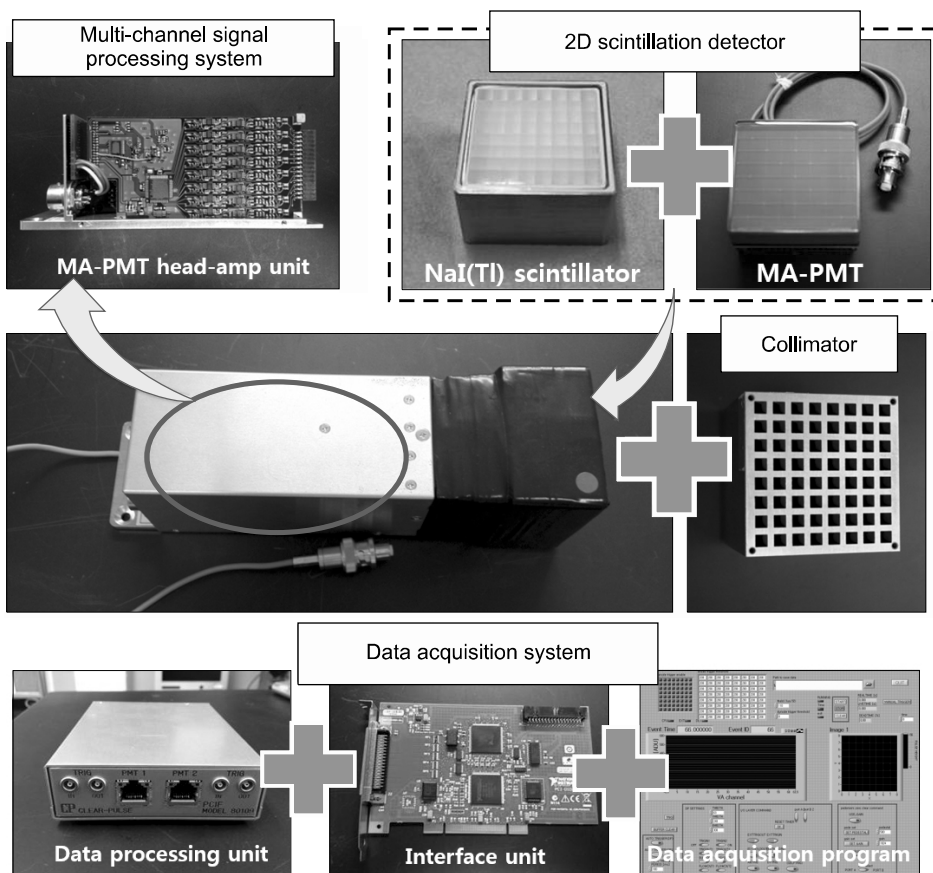
Tel: 82-2-2220-0513, Fax: 82-2-2220-4059

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상법은 양전자 방출체에서 생성된 양전자가 전자와 반응하여 발생한 소멸감마선(annihilation radiation)을 체외에서 검출하여 단층촬영 영상을 만들며, 이 영상을 통해 양성자 빔의 선량 분포를 확인한다. 하지만 핵반응으로 생성되는 양전자 방출체의 반감기가 길기 때문에 PET 영상법을 이용하여 생성 분포를 실시간으로 확인하는 것이 적합하지 않으며, 양성자 빔의 선량 분포와 양전자 방출체의 생성 위치의 연관성이 떨어진다는 문제가 있다.<sup>6)</sup>

다른 방법으로는 양성자 빔과 인체 내 매질과 핵반응하여 발생한 즉발감마선을 측정하여 양성자 빔의 선량 분포를 간접적으로 확인하는 방법이 있다.<sup>7)</sup> 즉발감마선은 양전자 방출체보다 양성자 빔에 의한 선량 분포와 연관성이 크며, 실시간으로 측정이 가능하다는 장점이 있다.<sup>7)</sup> 현재 즉발감마선 분포를 측정하기 위해 집속장치 기법,<sup>8,9)</sup> 컴프턴 산란 기법,<sup>10,11)</sup> Gamma Electron Vertex Imaging (GEVI) 기법<sup>12)</sup> 등을 기반으로 한 측정 장치가 개발되고 있지만 현재까지 임상에 적용되지 못하고 있다. 본 연구팀은 즉발감마선 이차원 분포를 측정하기 위해 지난 연구에서 일차원 중형으

로 배열된 집속장치와 CsI(Tl) 섬광체 검출기로 구성된 시스템을 개발하였으며, 개발된 장치를 이용하여 스캔 방식으로 즉발감마선의 이차원 분포를 측정하여, 양성자 빔의 선량 분포를 모니터링 할 수 있음을 확인하였다.<sup>13)</sup> 본 연구에서는 지난 연구를 바탕으로 즉발감마선의 이차원분포를 실시간으로 측정하기 위하여 이차원 배열의 섬광검출기와 최적화된 평행다공형 집속장치<sup>14)</sup>로 이루어진 측정 시스템을 개발하였다. 개발한 즉발감마선 이차원분포 측정 장치의 성능을 테스트하기 위해 <sup>22</sup>Na와 <sup>137</sup>Cs 감마선원의 에너지 스펙트럼을 측정하였으며 이를 바탕으로 에너지 분해능을 평가하였다. 또한, Am-Be 선원을 사용하여 고에너지 감마선(4.448 MeV)에 대한 측정 장치 성능을 평가하였다. 최종적으로 개발한 측정 장치를 사용하여 45 MeV 양성자 빔이 PMMA 팬텀에서 반응하여 발생한 즉발감마선의 이차원 분포를 측정하는 연구를 수행하였으며, 측정된 이차원분포를 바탕으로 양성자 빔의 비정도 결정하였다.



**Fig. 1.** Development of two-dimension prompt-gamma measurement system consisted of multi-channel signal processing device, 2D array-type NaI(Tl) scintillators, 2D photo sensors, parallel-holes collimator and data acquisition system.

## 재료 및 방법

### 1. 즉발감마선 이차원분포 측정 장치 개발

양성자 빔과 매질과의 핵반응으로 발생하는 즉발감마선의 이차원 분포를 측정하기 위해 평행다공형 집속장치, 이차원 배열의 NaI(Tl) 섬광체, 이차원 광센서, 다채널 신호처리 장치와 데이터 획득 시스템으로 이루어진 즉발감마선 이차원분포 측정 장치를 개발하였다(Fig. 1). 평행다공형 집속장치는 텅스텐 블록 3개를 연결하여  $52 \times 52 \times 150 \text{ mm}^3$  (높이×폭×길이) 크기로 제작하였다. 하나의 텅스텐 블록에는 면적이  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 인 구멍이  $8 \times 8$  배열로 뚫려있으며, 격벽의 두께는 2 mm이다. 이차원 배열의 NaI(Tl) 섬광체는  $6.08 \times 6.08 \times 30 \text{ mm}^3$  크기를 갖는 64개 NaI(Tl) 섬광체(Saint-Gobain, France)를 평행다공형 집속장치와 동일하게 배열하여 제작하였다. 섬광체 내에서 발생하는 빛을 효과적으로 수집하기 위해 광센서와 연결되는 부분을 제외한 섬광체의 표면을 반사 페인트를 이용하여 처리하였다. 이차원 광센서는 Hamamatsu 사의 H8500 모델인 multi-anode PMT (MA-PMT)를 사용하였으며, 이차원 배열의 NaI(Tl) 섬광체와 광결합하여 즉발감마선 이차원분포를 측정하기 위한 검출장치를 제작하였다.

검출장치에서 발생하는 다채널의 신호를 효과적으로 처리하기 위해 multi-anode PMT head-amp unit (80190, Clear-Pulse Co., Ltd., Japan)을 사용하였다. 본 신호처리 장치는 MA-PMT에서 발생하는 64채널의 검출기 신호를 독립적으로 처리하며, 외관의 크기가 MA-PMT의 크기와 같기 때문에 소형화된 측정 시스템 구성이 가능하며 향후 장치의 확장이 용이하다는 장점이 있다. 본 장치는 MA-PMT 각 채널에서 발생한 검출신호를 처리하기 위해 전하 민감형 전치증폭기, 성형증폭기, 샘플 홀드 회로, 트리거 회로, ADC (analog to digital converter, 12 bit)로 구성되어 있으며, 64개의 신호 채널 중 어느 하나의 채널에서 트리거 레벨 이상의 유의한 신호가 발생하면 64개의 검출기 신호를 출력한다.

신호처리 장치에서 발생한 디지털 신호를 PC를 이용하여 획득하기 위해 본 연구에서는 데이터 처리 장치(80109, Clear-Pulse Co. Ltd, Japan), PCI (peripheral component interconnect) 기반의 인터페이스 장치(PCI-DIO-32Hs, National Instruments, USA)와 LabVIEW 프로그램 기반의 데이터 획득 시스템을 구성하였다. 데이터 처리 장치는 PC에 장착된 인터페이스 장치와 다채널 신호처리 장치를 연결해주며, 신호처리 장치 제어 및 검출기 신호를 획득하는 역할을 한

다. PCI 기반의 인터페이스 장치는 데이터 처리 장치에서 획득한 신호를 PC로 전송하기 위한 디지털 I/O 장치로써 32개의 디지털 입력/출력 단자로 구성되며, 최대 샘플링 속도는 20 MHz이고 최대 데이터 전송 속도는 76 MB/s이다. 획득된 디지털 신호로부터 각 검출기 채널에서 측정된 에너지 스펙트럼 정보를 확인하고 이차원 영상을 획득하기 위해 LabVIEW를 사용하여 데이터 획득 프로그램을 구현하였다.

### 2. 즉발감마선 이차원분포 측정 장치 테스트

개발한 측정 장치를 테스트하기 위해 저에너지 감마선원의 에너지 스펙트럼을 측정하였으며, 이를 바탕으로 에너지 분해능을 평가하였다. MA-PMT에서 신호가 충분히 증폭될 수 있도록  $-750 \text{ V}$ 의 바이어스 전압을 공급해주었다. 검출기의 64채널에서 발생하는 신호를 처리하기 위해 아노드 트리거를 사용하였으며, fast shaper의 트리거가 발생하는 시간과 slow shaper에서 발생한 신호의 상승 시간( $5 \mu\text{s}$ ) 차이를 고려하여 트리거 발생 후  $3.44 \mu\text{s}$  이후에 샘플 홀드 회로의 홀드 모드가 활성화되도록 설정하였다.

에너지 스펙트럼과 선원의 위치를 측정하기 위해 사용한 감마선원은  $^{22}\text{Na}$  (0.511, 1.275 MeV)와  $^{137}\text{Cs}$  (0.662 MeV)이었으며, 총 64개의 검출기 중 하나의 검출기에만 감마선이 반응할 수 있도록 평행다공형 집속장치를 이용하였다. 선원의 방사능은  $^{22}\text{Na}$  선원이  $3.15 \mu\text{Ci}$ 였고,  $^{137}\text{Cs}$  선원이  $9.05 \mu\text{Ci}$ 였다. 에너지 스펙트럼은 10분간 측정하였으며, 측정된 선원의 반응 위치를 확인하기 위해 측정된 에너지 스펙트럼에서 하안과 상한 에너지를  $^{22}\text{Na}$ 의 경우 0.5, 1.4 MeV로,  $^{137}\text{Cs}$ 의 경우 0.6, 0.72 MeV로 설정하여 감마선원의 이차원 영상을 가시화하였다. 그리고 저에너지 감마선원뿐만 아니라 고에너지 감마선원에서 측정 장치를 테스트하기 위해 4.448 MeV의 감마선을 발생하는 Am-Be (4.7 Ci) 선원을 사용하였으며, 집속장치가 제거된 측정 장치를 선원에서 30 cm 떨어진 지점에 위치시킨 후 90분 동안 에너지 스펙트럼을 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 4.448 MeV의 감마선에 의해 발생하는 감마선 피크의 에너지 분해능을 평가하였다. 앞서 측정된 저에너지와 고에너지 선원에서 얻은 피크를 사용하여 에너지 교정을 수행하였고, 이를 바탕으로 양성자 빔에서 발생하는 즉발감마선 측정 실험시 중성자 및 배경감마선을 줄이기 위한 검출기의 측정 가능한 에너지를 설정하였다.

하나의 검출기가 아닌 여러 채널의 검출기를 이용하여 선원의 이차원 분포를 가시화하기 위해서는 추가로 각각의

검출기 측정 효율을 고려하기 위한 효율 맵을 만들어야 한다. 본 연구에서는 감마선 카운트를 바탕으로 64채널 검출기를 위한 효율 맵을 만들어 주었다. 먼저, 64개의 검출기에 동시에 동일한 방사선을 조사하기 위해 집속장치를 제거한 후 측정 장치로부터 충분히 멀리 떨어진 50 cm에서  $^{137}\text{Cs}$  선원의 에너지 스펙트럼을 측정하였고, 각 채널에서 측정된 0.662 MeV 피크의 면적을 계산하여 측정 효율 맵을 만들었다.

### 3. 양성자 빔에 대한 즉발감마선 이차원분포 측정 장치 성능 평가

양성자 빔에 대한 즉발감마선 이차원분포 측정 장치 성능을 평가하기 위해 한국원자력의학원의 45 MeV 양성자 빔을 사용하여 즉발감마선의 이차원분포를 측정하는 실험을 수행하였다. 빔 노즐로부터 30 cm 떨어진 지점에 PMMA 팬텀( $30 \times 30 \times 6 \text{ cm}^3$ )을 위치시켰으며, 팬텀 표면에서부터 5 cm 떨어진 지점에 개발한 측정 장치를 위치시켰다. 빔 노즐 쪽에서 발생하는 배경방사선을 줄여주기 위해 빔 노즐 쪽에는 10 cm 두께의 납 벽돌을 이용하여 차폐를 하였으며, 다른 부분은 5 cm 두께의 납 벽돌을 사용하여 배경방사선에 의한 영향을 줄여주었다(Fig. 2). 즉발감마선 이차원분포가 실제 양성자 빔의 선량 분포와 유사한지 확인하기 위하여 EBT 필름을 사용하여 45 MeV 양성자 빔의 선량 분포를 측정하였다.

0.5 nA 세기의 45 MeV 양성자 빔을 PMMA에 전달한 후 발생하는 즉발감마선 이차원 분포를 본 연구에서 개발한

즉발감마선 이차원분포 측정 장치를 이용하여 측정하였다. 먼저 충분한 양성자 빔을 조사하여 측정 장치로 측정된 즉발감마선 분포를 EBT 필름에서 측정된 양성자 빔의 선량 분포와 유사한지 비교하여 두 분포가 유사한지 확인하였다. 이차원분포를 획득하기 위해 필요한 최소 양성자 수를 확인하기 위해  $9 \times 10^{10}$ 의 양성자 수에서 측정된 즉발감마선 이차원 분포를 기준으로 양성자 수를 줄여가면서  $6 \times 10^{10}$ ,  $3 \times 10^{10}$ ,  $1.5 \times 10^{10}$ ,  $9 \times 10^9$ ,  $3 \times 10^9$  양성자 수에 대하여 즉발감마선 이차원 분포를 측정하는 연구를 수행하였다.

측정한 이차원 분포 측정 결과를 바탕으로 양성자 빔의 비정도 결정할 수 있는 지 확인하는 연구를 수행하였다. 양성자 빔의 실제 비정과 즉발감마선 이차원분포 측정 장치를 통하여 얻은 비정을 비교하기 위해  $9 \times 10^9$ 개의 양성자 빔을 조사하여 발생하는 즉발감마선 분포를 측정하는 실험을 10회 반복 수행하였다. 측정된 즉발감마선 이차원분포를 통하여 정량적으로 비정을 결정하기 위해 매 측정 시 얻어진 즉발감마선 이차원분포의 프로파일 분포에 sigmoidal curve fitting을 적용하여 양성자 빔의 비정을 결정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 즉발감마선 이차원분포 측정 장치 테스트

Fig. 3은 선원의 위치를 변화시켜가면서 MA-PMT의 특정한 채널에서 측정된  $^{22}\text{Na}$  감마선원의 에너지 스펙트럼과 이차원 영상을 보여주고 있다. 각 위치에서 10분 동안 에너지 스펙트럼을 측정한 결과, 0.511 MeV 및 1.275 MeV 에너지 피크의 평균 에너지 분해능은 각각  $10.9\% \pm 0.23\text{p}\%$ ,  $6.4\% \pm 0.24\text{p}\%$ 임을 확인하였다. 또한  $^{137}\text{Cs}$  선원도 위의 실험과 같이 위치를 변화시키면서 감마선 에너지 스펙트럼과 이차원 영상을 측정하였다(Fig. 4). 10분 동안 에너지 스펙트럼을 측정하여 에너지 분해능을 계산한 결과 0.662 MeV 피크의 평균에너지 분해능은  $9.8\% \pm 0.18\text{p}\%$ 로 평가되었다. 두 결과에서 각 선원의 위치와 이차원 영상을 보면 이차원 영상과 선원의 위치가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며,  $^{22}\text{Na}$  선원을 측정할 경우  $^{137}\text{Cs}$  선원보다 주변 검출기에서 많은 감마선이 측정되는 것은 1.275 MeV 감마선이 산란되어 주변 검출기에 에너지를 전달하였기 때문이다. 지난 연구에서 개발한 일차원 중형 배열된 집속장치와 CsI(Tl) 섬광체 검출기로 구성된 시스템의 에너지 분해능과 비교하면, 지난 연구에서 개발한 측정 장치의 에너지 분해능은 24.6% (0.511 MeV), 6.5% (1.275 MeV), 22.5% (0.662

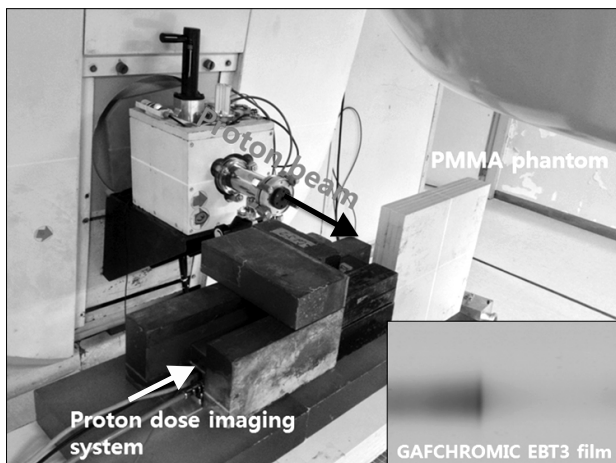


Fig. 2. Experiment setting in 45 MeV proton beam utility facilities.

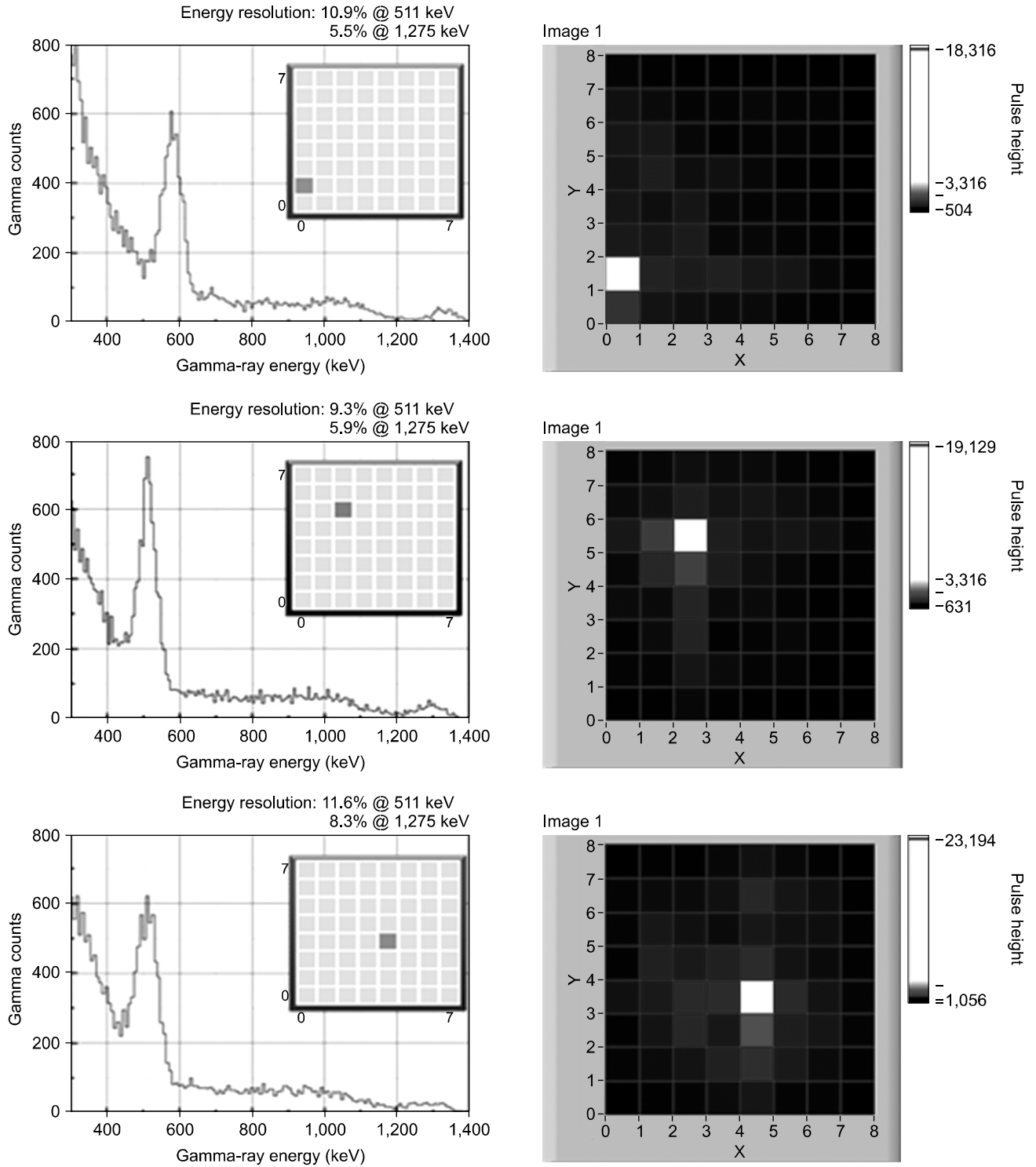


Fig. 3. Energy spectra and position of  $^{22}\text{Na}$  gamma source measured by two-dimension prompt-gamma measurement system.

MeV)<sup>13)</sup>로 본 연구에서 개발한 측정 장치의 에너지 분해능이 더 우수한 것을 확인하였다.

Fig. 5는 양성자 선량 장치를 이용하여 측정한 Am-Be 선원의 에너지 스펙트럼 결과이다. 본 연구에서 사용한 섬광

체는 6.08×6.08×30 mm<sup>3</sup> 크기로 고에너지 감마선을 완전히 흡수하기에는 다소 작기 때문에 4.448 MeV의 감마선의 전 에너지 피크는 확인되지 않았으며, double escape 피크에 해당하는 3.416 MeV 피크만을 확인할 수 있었다. 개발한 측

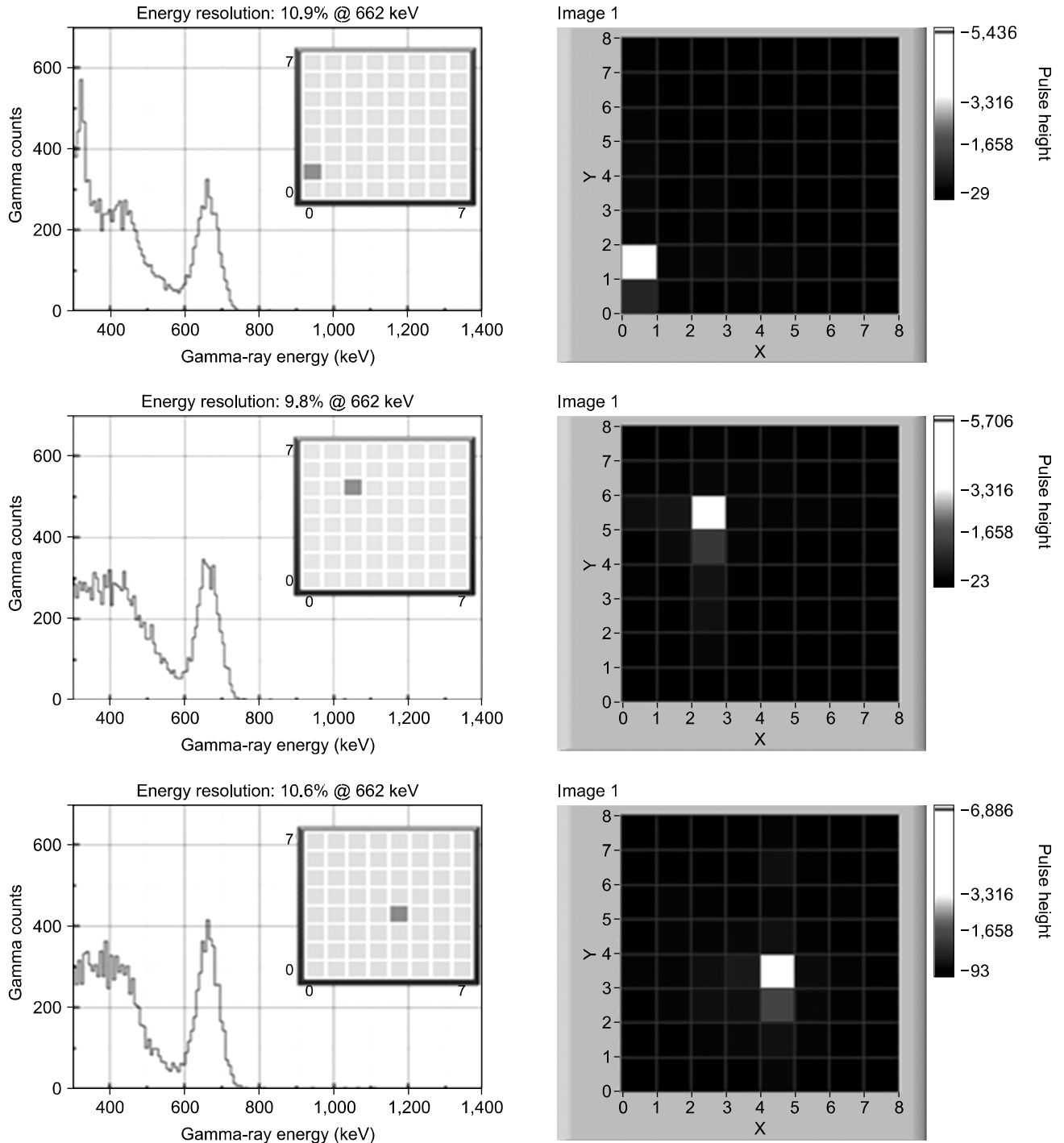


Fig. 4. Energy spectra and position of <sup>137</sup>Cs gamma source measured by two-dimension prompt-gamma measurement system.



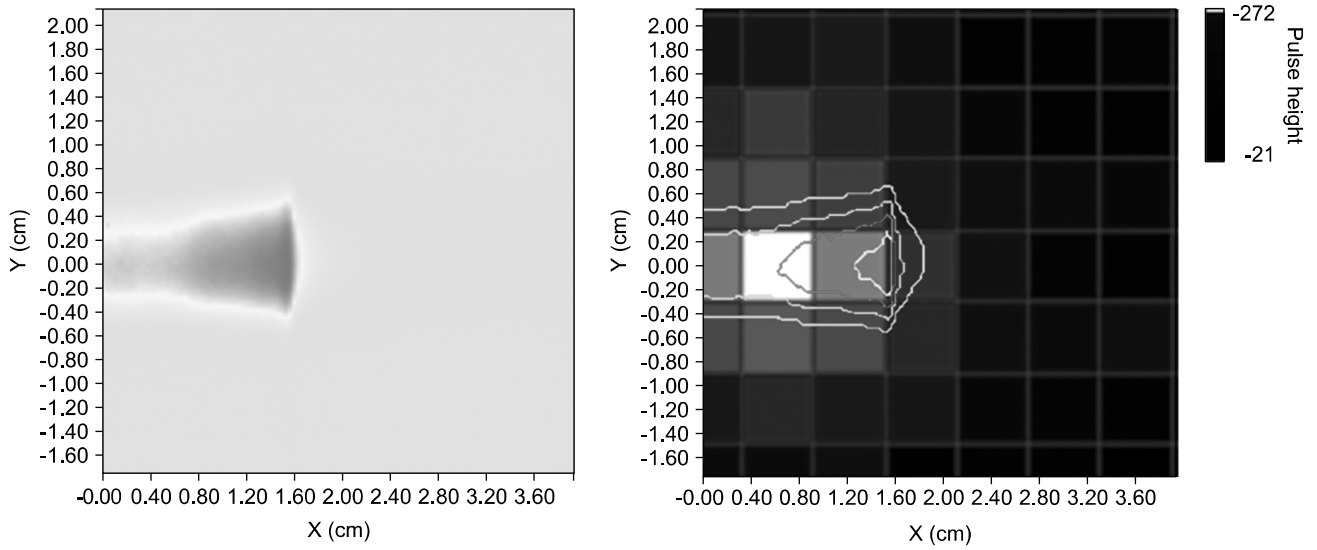


Fig. 7. Proton dose distribution with EBT film (left) and image registration between EBT film result and prompt gamma 2D distribution (right).

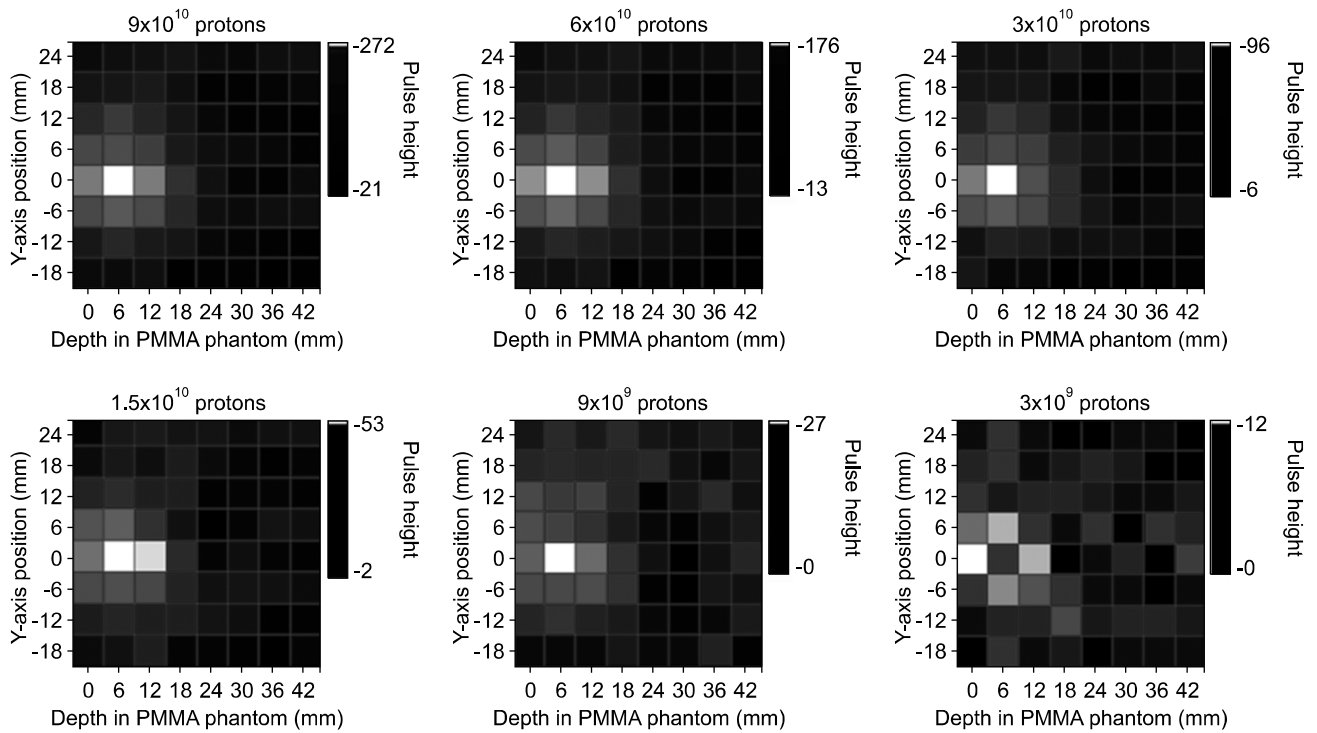


Fig. 8. Two-dimensional images of prompt gamma rays measured by two-dimension prompt-gamma measurement system with 45 MeV proton beam of 0.5 nA.

cent depth dose (PDD)를 정합한 결과이다. 이 때 PDD의 값은 안쪽에서부터 90%, 80%, 70%, 60%이다. 영상 정합의 결과를 보면 EBT로 측정된 양성자 선량 분포와  $9 \times 10^{10}$ 개의 양성자 수가 조사되는 동안 측정된 즉발감마선 이차원분포

가 유사한 관계가 있는 것을 확인하였다. 즉발감마선의 분포가 양성자 빔의 선량 분포보다 앞쪽에서 많이 발생하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 즉발감마선을 발생시키는 핵반응이 일어나기 위해서는 문턱에너지가 필요하기 때문



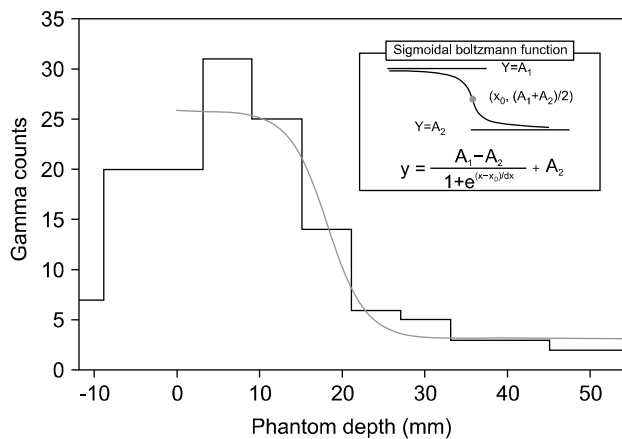


Fig. 9. Prompt-gamma profile distribution with 45 MeV proton beam measured for  $9 \times 10^9$  protons and sigmoidal curve fitting.

에 문턱에너지에 해당하는 만큼 비정의 앞부분에서 즉발감마선이 많이 발생하기 때문이다.<sup>3)</sup> 즉발감마선이 빔의 폭보다 넓게 퍼진 이유는 즉발감마선의 에너지가 높아 집속 장치를 뚫고 다른 검출기에 반응했거나 물 팬텀과 콜리메이터에 의해 산란되어 발생한 위치의 검출기가 아닌 다른 검출기에 반응을 했기 때문이다. 또한, 즉발감마선의 에너지가 높아 섬광체에 완전히 흡수되지 못하고 산란되어 주변 검출기에 영향을 준 것도 그 이유 중 하나이다.

Fig. 8은 시간을 변경해가면서 양성자 빔과 PMMA 팬텀과 반응하여 발생한 즉발감마선의 이차원분포를 측정된 결과이다. 양성자 수를 줄여가면서 측정된 결과  $9 \times 10^9$ 개의 양성자 빔이 조사되어 얻어진 분포는  $9 \times 10^{10}$ 개의 양성자 빔이 조사되는 동안 측정된 결과와 유사한 분포를 갖는 것을 확인하였다.  $3 \times 10^9$ 개의 양성자 빔이 조사되어 측정된 경우에는 측정된 즉발감마선 수가 부족하여 제대로 된 양성자 빔의 선량 분포를 확인할 수 없었다.

Fig. 9는 개발한 즉발감마선 이차원분포 측정 장치를 사용하여  $9 \times 10^9$ 개의 양성자 빔이 조사되었을 때 측정된 즉발감마선 프로파일 분포이다. 이 프로파일 분포에 sigmoidal curve fitting을 적용하여 10회 측정된 데이터의 비정을 평가한 결과 양성자 빔의 평균 비정은 17.0 mm이었으며, 표준편차는 0.4 mm로 평가되었다. PMMA 팬텀에 삽입한 EBT 필름에 의해 평가된 양성자 빔의 실제 비정은 17.4 mm이었다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 양성자 선량 장치가 재현성을 가지고 양성자 빔의 비정도 정확하게 결정할 수 있음을 확인하였다.

## 결론

본 연구에서는 즉발감마선 이차원분포 측정을 통해 양성자 선량 분포를 간접적으로 확인하여 양성자 치료 시 환자의 안전을 제고하고자 즉발감마선 이차원분포 측정 장치를 개발하였으며, 장치의 성능을 평가하기 위해 45 MeV 양성자 빔에서 개발한 측정 장치를 이용하여 즉발감마선의 이차원분포를 측정하는 실험을 수행하였다. 본 연구에서 측정한 즉발감마선 이차원분포와 양성자 빔의 선량 분포가 연관성이 있음을 확인하였으며, 빔의 분포를 실시간으로 모니터링하는 것이 가능할 것으로 기대한다. 또한 측정된 이차원분포 측정 결과를 바탕으로 양성자 빔의 비정을 평가해보았으며, 그 결과 45 MeV 양성자 빔의 비정을 정확하게 결정할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 추후에 치료용 양성자 빔에 대해서도 개발한 측정 장치를 이용하여 빔의 선량 분포를 모니터링하는 동시에 빔의 비정을 결정하는 연구를 수행할 것이다.

## References

1. Schardt D, Elsässer T, Schulz-Ertner D: Heavy-ion tumor therapy: Physical and radiobiological benefits. *Rev. Mod. Phys.* 82:383-425 (2010)
2. Wilson R: Radiological use of fast protons. *Radiology*. 47: 487-491 (1946)
3. Paganetti H: Range uncertainties in proton therapy and the role of Monte Carlo simulations. *Phys. Med. Biol.* 57:R99-R117 (2012)
4. Knopf AC, Lomax A: In vivo proton range verification: a review. *Phys. Med. Biol.* 58:R131-R160 (2012)
5. Oelfke U, Lam G K Y, Atkins M S: Proton dose monitoring with PET: quantitative studies in Lucite. *Phys. Med. Biol.* 41: 177-196 (1996)
6. Moteabbed M, Espana S, Paganetti H: Monte Carlo patient study on the comparison of prompt gamma and PET imaging for range verification in proton therapy. *Phys. Med. Biol.* 56:1063-1082 (2011)
7. Min CH, Kim CH, Youn MY, Kim JW: Prompt gamma measurements for locating the dose fall-off region in the proton therapy. *Appl. Phys. Lett.* 89:183517 (2006)
8. Bom V, Joulaeizadeh L, Beekman F: Real-time prompt gamma monitoring in spot-scanning proton therapy using imaging through a knife-edge-shaped slit. *Phys. Med. Biol.* 57:297-308 (2012)
9. Smeets J, Roellinghoff F, Prieels D, Stichelbaut F, Benilov A, Busca P, Fiorini C, Peloso R, Basilavecchia M, Frizzi T, Dehaes JC, Dubus A: Prompt gamma imaging with a slit camera for real-time range control in proton therapy. *Phys. Med. Biol.* 57:3371-3405 (2012)

10. Mackin D, Peterson S, Beddar S, Polf J: Evaluation of a stochastic reconstruction algorithm for use in Compton camera imaging and beam range verification from secondary gamma emission during proton therapy. *Phys. Med. Biol.* 57:3537-3553 (2012)
11. Kurosawa S, Kubo H, Ueno K, Kabuki S, Iwaki S, Takahashi M, Taniue K, Higashi N, Miuchi K, Tanimori T, Kim D, Kim J: Prompt gamma detection for range verification in proton therapy. *Curr. Appl. Phys.* 12:364-368 (2012)
12. Kim CH, Park JH, Seo H, Lee HR: Gamma electron vertex imaging and application to beam range verification in proton therapy. *Med. Phys.* 39:1001-1005 (2012)
13. Lee HR, Park JH, Kim HS, Kim CH, Kim SH: Two-dimensional measurement of the prompt-gamma distribution for proton dose distribution monitoring. *J. Korean Phys. Soc.* 63(7): 1385-1389 (2013)
14. Lee HR, Min CH, Park JH, Kim SH, Kim CH: Study on optimization of detection system of prompt gamma distribution for proton dose verification. *Prog. Med. Phys.* 23(3):162-168 (2012)

## 이차원 양성자 선량 분포 확인을 위한 즉발감마선 이차원분포 측정 장치 개발

\*한양대학교 원자력공학과, <sup>†</sup>한양대학교병원 방사선종양학과, <sup>‡</sup>국립암센터 양성자치료센터

박종훈\* · 이한림\* · 김찬형\* · 김성훈\* · 김성훈<sup>†</sup> · 이세병<sup>‡</sup>

양성자 치료 시 양성자 빔을 사용하여 정밀한 치료를 수행하고 환자의 안전을 제고하기 위해서는 인체 내 양성자 빔의 선량 분포를 확인하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구팀은 이전 연구에서 1차원 배열형 검출기를 종형으로 배치하여 빔 진행방향으로 이동시켜가면서 2차원적인 즉발감마선 분포를 측정하여 양성자 선량 분포와 유사한 분포를 갖는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 즉발감마선 이차원분포를 실시간으로 측정하기 위해 이차원 평행다공형 집속 장치, 이차원 배열의 NaI(Tl) 섬광체와 MA-PMT로 이루어진 즉발감마선 이차원분포 측정 장치를 개발하였다. 개발한 즉발감마선 이차원분포 측정 장치의 성능을 평가한 결과 <sup>22</sup>Na 감마선원의 에너지 분해능은 10.9%±0.23p% (0.511 MeV)와 6.4%±0.24p% (1.275 MeV)로 평가되었으며, <sup>137</sup>Cs은 9.8%±0.18p% (0.662 MeV)로 평가되었다. 고에너지 Am-Be 선원의 double escape 피크인 3.416 MeV의 에너지 분해능은 11.4%±3.6p%로 평가되었다. 본 측정 장치를 이용하여 45 MeV 양성자 빔을 PMMA에 조사하여 발생한 즉발감마선 이차원분포를 측정한 결과 0.5 nA의 세기의 양성자 빔에서 9×10<sup>9</sup> 양성자 조사 시 양성자 선량 분포와 유사한 즉발감마선 이차원분포를 측정할 수 있음을 확인하였다. 추가로 측정한 즉발감마선 이차원분포의 프로파일 분포를 이용하여 양성자 빔의 비정을 평가해 본 결과 17.0±0.4 mm로 평가되었고, 실제 비정인 17.4 mm과 굉장히 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.

---

**중심단어:** 양성자 치료, 이차원 양성자 선량 분포, 즉발감마선 이차원분포 측정 장치