

Study on Dosimetric Properties of Radiophotoluminescent Glass Rod Detector

Jeong Eun Rah* · Dong Oh Shin** · Ju Young Hong[†] · Hee Sun Kim[†] ·
Chun il Lim[†] · Hee Gyo Jeong^{††} · Tea Suk Suh*

*Dept. of Biomedical Engineering, College of Medicine, Catholic University

**Dept. of Radiation Oncology, College of Medicine, Kyung Hee University[†]

[†]Radiation Health Research Institute

[†]Radiation Standards Division, Korea Food & Drug Administration

^{††}Medical Devices Standardization Division, Korea Food & Drug Administration

유리선량계의 선량 특성에 관한 연구

라정은* · 신동오** · 홍주영* · 김희선[†] · 임천일[†] · 정희교^{††} · 서태석*

*가톨릭의대 의공학교실, **경희의대 방사선종양학교실, [†]한국수력원자력(주) 방사선보전연구원,

[†]식품의약품안전청 방사선표준과, ^{††}식품의약품안전청 의료기기규격과

(2006년 6월 22일 접수, 2006년 9월 25일 채택)

Abstract - A radiophotoluminescent glass rod detector (GRD) system has recently become commercially available. We investigate the dosimetric properties of the GRD regarding the reproducibility of signal, dose linearity and energy dependence. The reproducibility of five measurements for 50 GRDs is presented by an average of one standard deviation of each GRD and it is $\pm 1.2\%$. It is found to be linear in response to doses of ^{60}Co beam in the range 0.5 to 50 Gy with a coefficient of linearity of 0.9998. The energy dependence of the GRD is determined by comparing the dose obtained using cylindrical chamber to that by using the GRD. The GRD response for each beam is normalized to the response for a ^{60}Co beam. The responses for 6 and 15 MV x-ray beams are within $\pm 1.5\%$ (1SD). The energy response of GRD for high-energy photon is almost the same as the energy dependence of LiF:Mg:Ti (TLD-100) and shows little energy dependence unlike p-type silicon diode detector. The GRDs have advantages over other detectors such diode detector, and TLD: linearity, reproducibility and energy dependency. It has been verified to be an effective device for small field dosimetry for stereotactic radiosurgery.

Key words : radiophotoluminescent glass rod detector, reproducibility, dose linearity, energy dependence

요약 - 본 연구에서는 최근 들어 새롭게 소개되고 있는 유리선량계의 재현성 및 선량의 선형성 그리고 에너지 의존성을 조사하였다. 50개의 유리선량계를 5번 판독한 결과, 재현성은 모두 $\pm 1.2\%$ (1SD)이내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며 ^{60}Co 감마선에서 선량 0.5 Gy부터 50 Gy까지 유리선량계의 반응도를 평가해 본 결과는 0.9998의 선형계수를 확인할 수 있었다. 또한 유리선량계의 에너지의존성은 원통형의 전리함으로 측정된 선량과 비교했을 때 광자선에너지 6, 15 MV 각각에 대해 ^{60}Co 감마선의 반응도로 일반화시킨 결과 모두 $\pm 1.5\%$ (1SD)이내에서 일치하였다. 이는 고에너지 광자선에 대해 열형광선량계와는 비슷한 결과이며 다이오드 선량계와 비교해서 했을 때는 낮은 에너지 의존성을 가지는 것이다. 따라서 유리선량계는 기존의 다른 선량계에 비해 사용 가능한 선량범위가 넓고 고에너지 광자선에서 에너지의존성이 낮으며 유효크기가 작은 장점 등으로 인해 소조사면의 고선량을 사용하는 방사선 수술분야의 선량측정에 적합한 선

량계라는 것을 확인할 수 있었다.

중심어 : 유리선량계, 재현성, 선량 선형성, 에너지의존성

서 론

감마나이프나 사이버나이프를 이용한 방사선수술(SRS; Stereotactic Radiosurgery)의 주요목적은 치료하고자 하는 부위에 고선량의 방사선을 정확하게 전달하면서 동시에 주변 정상조직에 대한 손상을 최소한으로 하는데 있다. 이러한 방사선 수술은 일반 방사선 치료에 비해 고선량을 이용하므로 선량측정 및 기기의 품질관리 측면에서 고 정밀, 정확도가 요구된다. 또한 감마나이프나 사이버나이프의 방사선수술 장비는 15 mm이하의 소조사면(small field)을 이용하므로 유효 체적이 작은 핀-포인트 타입의 이온함(pinpoint ionization chamber)나 다이오드(p-type silicon diode detector), 열형광선량계(TLD; Thermoluminescent Dosimeter) 또는 필름 등을 이용하여 선량측정을 수행하고 있다. 그러나 소조사면의 특성상 전자선 평형상태(electron equilibrium)의 부족으로 인해 선량의 경사도(dose gradient)가 급격하게 떨어지는 부분이 발생하게 되어 선량측정 시 선량계의 작은 위치 변화에 의해서도 측정 결과의 확연한 차이를 보이는 등 이 부분에 대한 정확한 선량을 평가하기에 매우 어렵다[1~3]. 유효 체적이 작은 이온함은 정확한 절대선량을 평가할 수 있으나 상대적으로 작은 신호와 큰 노이즈를 가지는 문제점이 있으며 다이오드는 공간 분해능(spatial resolution)과 방사선에 대한 감도가 뛰어난 반면에 방향 의존성 및 에너지의존성을 가지는 문제점이 있다[4,5]. 열형광선량계는 이온함에 비해 작은 유효체적을 가지며 다이오드나 필름에 비해 낮은 에너지 편차를 보이나 정확한 측정을 위해 각각소자에 대한 교정이 필요하며 조사 후 퇴행(fading) 현상이 나타나는 등의 문제점이 있다[6]. 또한 필름은 다른 선량계와 비교했을 때 가장 뛰어난 공간 분해능을 가지나 현상과정에서 불확도(uncertainty) 요인이 증가할 수 있는 단점이 있다[1]. 이러한 기존 선량계에 대한 문제점들로 인해 최근 들어 새롭게 소개되고 있는 것이 유리선량계(GRD; Glass Rod Dosimeter)이다. 특히 유리선량계는 우편으로도 이송이 가능하여 열형광선량계와 같이 선량보증프로그램에 이용 가능성이 있으며 판독과정 및 취급방법은 열형광선량계에 비해 매우 간단하고 유효크기(effective size) 또한

작아 소조사면에 대한 선량평가에 효과적이라고 알려져 있다[7~9]. 그러나 근래에 상업화되어 보급됨에 따라 기존의 다른 선량계에 비해 특성 및 선량측정의 정확도 등 유리선량계에 대해 알려진 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 유리선량계에 대한 재현성(reproducibility) 및 선량의 선형성(linearity) 그리고 에너지 의존성을 평가하여 기존의 열형광선량계를 대신하여 소조사면에서 방사선 수술장비에 대한 선량평가를 위한 새로운 선량계로써의 가능성을 확인하고자 한다.

재료 및 방법

1. 유리선량계 시스템

본 연구에 사용된 유리선량계(Asahi Technology Glass Corporation, Japan)는 GD-301 모델로 길이가 8.5 mm이고 직경이 1.5 mm인 막대형이며 유리선량계의 조성은 P 31.55%, O 51.16%, Al 6.12%, Na 11.0% 그리고 Ag 0.17%로 구성되어 있다. 또한 유리선량계의 유효 원자번호와 밀도는 각각 12.04와 2.61이다[8]. 유리의 은활성인산염에 전리 방사선이 조사되면 전자와 정공 PO_4 가 생성되고 이때 전자는 유리구조 내의 Ag^+ 에 포획되어 Ag^0 가 되며 정공은 PO_4^+ 에 포획되거나 시간이 경과함에 따라 Ag^0 로 이행되어 Ag^{++} 를 형성한다. 이들 Ag^0 와 Ag^{++} 는 보다 안정 상태가 되고 이것을 radiophotoluminescence (RPL) 중심이라고 부른다[9]. 이들의 중심에 질소 기체에 의해 발생된 펄스화된 자외선이 조사되면 RPL 중심은 여기(excitation)상태가 되고 주황색의 형광이 방출되면서 유리선량계의 RPL 중심은 다시 안정상태로 되돌아오게 된다. 이때 방출되는 RPL 중심의 수는 항상 일정하게 유지되며 판독과정과 주위환경의 영향으로 인해 소멸되지 않으므로 무한히 반복측정이 가능하다. 이것이 한 번의 판독만을 할 수 있는 열형광선량계와 비교했을 때 가장 큰 차이점이라 할 수 있다. 유리선량계에서 방출되는 형광량의 정도는 조사된 방사선량과 비례하며 간단한 열처리 과정(400°C, 1시간)에 의해 축적된 선량이 리셋(reset)되어 재사용이 가능하게 된다. 유리선량계의 선량 판독은 FGD-1000 판독기(Asahi Technology Glass Corporation, Japan)를

이용하여 실시하였다. 유리선량계를 판독하기 위해서는 판독기 내부에서 펄스화된 질소 기체의 세기를 조절하는 기준 유리선량계(reference GRD)와 표준기관에서 ^{60}Co 감마선으로 교정을 받은 표준 유리선량계(standard GRD)가 필요하다. 판독과정을 살펴보면 자외선 필터를 통과한 펄스화된 질소기체는 반사경에 의해 둘로 분리가 되어 하나의 빔은 기준 유리선량계를 통과하고 다른 하나는 판독할 유리선량계를 통과하면서 동시에 측정을 하게 된다. 기준 유리선량계로부터 발생되는 RPL은 자외선 차단(cut-off) 필터를 통해 광다이오드(photodiode)에서 수집되고 판독해야 할 유리선량계의 RPL은 광전자 증배관(photomultiplier)에서 수집된다. 판독에 사용되는 자외선은 337.1 nm의 파장을 가지며 펄스폭은 5 ns이다. 산란된 자외선 및 불필요한 형광스펙트럼은 자외선 차단 필터에 의해 제거된다(Fig. 1). 유리선량계는 선량 측정 시 직경이 2.8 mm이고 길이가 9.5 mm인 플라스틱 홀더에 넣어 사용하며 판독 전에 형광량 신호를 안정화시키기 위해 30분 동안 70°C에서 예열시키는 과정을 거친다. 예열이 끝난 유리선량계는 실온에서 냉각시킨 후 홀더를 제거하고 20개씩 매겨진(magazine)에 장착시킨 다음 판독을 실시하게 된다. 이때 질소기체 레이저 빔의 직경은 1 mm이며 0.6 mm의 판독 창을 통해 발광되는 유리선량계의 RPL를 측정하게 되므로 이 부분이 유리선량계의 판독점(readout area)이 되며 위 모서리로부터 0.7 mm 이 되는 곳이 판독의 중심이 된다(Fig. 2). 따라서 유리선량계의 유효크기는 직경 1 mm이고 깊이가 0.6 mm가 되어 소조사면을 사용하는 방사선수술분야의 선량측정에도 이용이 가능한 것이다[7].

2. 유리선량계의 특성실험

2.1. 재현성 실험

본 연구에서는 ^{60}Co 감마선을 이용하여 50개의 유리선량계에 대해 선량 2 Gy를 조사한 후 판독과정을 5번 반복하여 유리선량계의 재현성을 확인하였고 또한 유리선량계의 판독기에 대한 안정성 유지 및 측정 변수의 영향 등을 확인하기 위해 3일의 간격을 두고 4번에 걸쳐 총 12일 동안 동일한 절차에 따라 유리선량계의 반응도 변화를 측정하여 재현성 평가를 실시하였다. 이때 ^{60}Co 감마선의 선량에 대해 정확성을 확보하기 위해 국내 2차 표준기관인 식품의약품안전청(KFDA; Korea Food & Drug Administration)의 ^{60}Co 조사장치(Eldorado-6, Theratronics, 미국)를 사용하

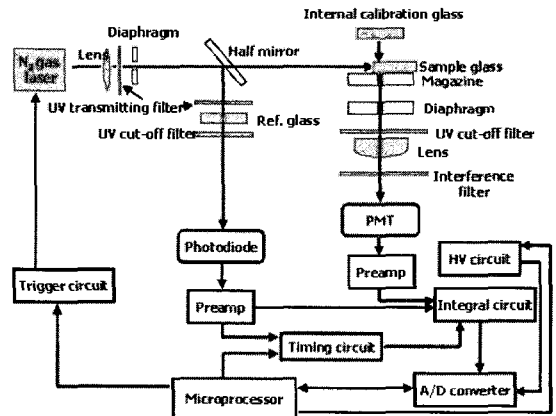


Fig. 1. Block diagram of a radiophotoluminescence(RPL) readout system. When the irradiated GRD is excited by a pulsed N₂ gas laser beam, the RPL light is emitted and captured by the system. The sample reading is corrected by the reference GRD reading.

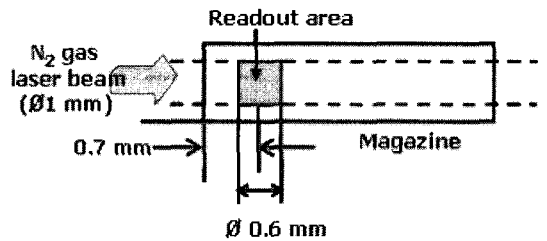


Fig. 2. A schematic diagram of the GRD readout system. The GRD is by the pulsed N₂ gas laser with 1 mm-diameter aperture. The reading of the GRD luminescence is obtained through the readout magazine of a 0.6 mm diameter window.

였으며 기준 선량은 표준측정장비인 원통형이온함(Model 2517, NE, 미국)과 전기계(6517, KEITHLEY, 미국)로 결정하였다. 결정된 선량을 유리선량계에 효과적으로 전달하기 위해 PMMA (polymethylmethacrylate)재질로 된 편평한 판을 제작하여 유리선량계를 부착하여 조사하였으며 측정조건은 선원과 표면간의 거리(SSD; Source to surface distance)가 100cm일 때 조사면 10×10 cm²로 하였다(Fig. 3).

2.2 선형성 실험

유리선량계에 대한 선량의 선형성을 평가하기 위해서 역시 ^{60}Co 감마선을 이용하여 각각 3개의 유리선량계에 0.5 Gy에서 50 Gy까지의 선량을 조사하였으며 5번에 걸쳐 판독을 반복하여 그 결과를 확인하였다.

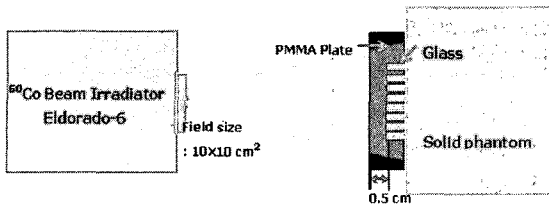


Fig. 3. A schematic diagram of experimental set-up for reproducibility test of the GRD. The GRDs is irradiated using a beam from an Eldorado-6 ⁶⁰Co unit in KFDA.

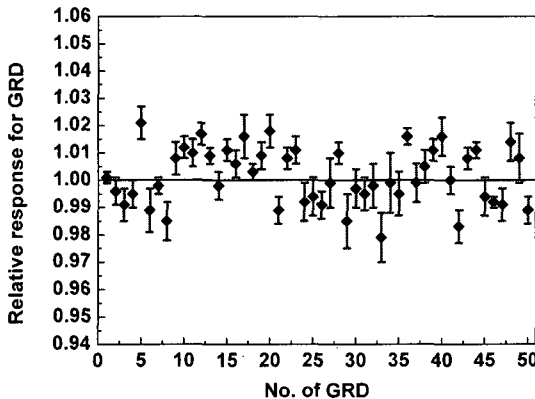


Fig. 4. The reproducibility of the signal measured with 50 GRDs. The relative response of each GRD is normalized averaging signals of 50 GRDs which are measured five measurements. The error bars represent one standard deviation of five measurements.

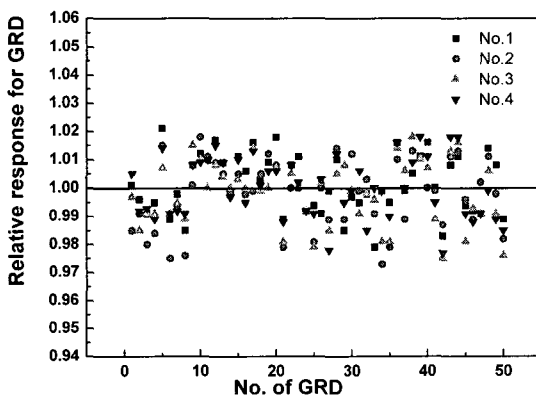


Fig. 5. The relative response of each GRD is normalized to the average signals of 50 GRDs which are measured five times on separate days.

2.3 에너지의존성 실험

에너지 의존성을 평가하기 위해서 선형가속기 (CL 2100C, Varian, 미국)에서 발생하는 광자선 에너지 6 MV, 15 MV 그리고 전자선 에너지 6, 9,

12와 16 MeV에 대해 선량 2 Gy가 되도록 조사하였으며 각 에너지에 대한 유리선량계의 평균 반응도와 ⁶⁰Co 감마선의 평균 판독 반응도를 상호 비교하였다. 이때 유리선량계는 각 에너지에 대해 20개씩을 조사하였으며 10번씩 동일한 판독 과정을 거쳤다. 선형가속기에서 발생하는 광자선 및 전자선에 대한 선량은 프로토콜 IAEA TRS-277의 절차에 따라 원통형 이온함(TN30013, PTW, Germany)으로 결정하였으며 측정조건은 SSD가 100cm일 때 조사면 10×10 cm²로 하였다[10]. 같은 조건하에서 유리선량계는 고체 팬텀을 이용하여 광자선에 대해서는 5 cm 깊이, 전자선은 각 에너지에 대한 최대선량깊이(d_{max})에 위치시켜 조사시켰다.

결과와 논의

Fig. 4는 50개의 유리선량계에 대해 ⁶⁰Co 감마선을 조사하여 판독한 결과를 나타낸 것이며 유리선량계의 반응도는 이온함을 이용하여 얻어진 ⁶⁰Co 빔의 흡수선량을 기준으로 하여 결정하였다. 이때 각각의 유리선량계에 대한 상대적 반응도는 50개의 유리선량계를 5번에 걸쳐 판독한 반응도에 각각의 초기값인 background를 뺀 평균값으로 일반화(normalized)를 시켰으며 예러바는 5번 반복 판독한 것에 대한 표준편차를 나타낸 것이다. 유리선량계에 대한 재현성은 평균에 대한 표준편차가 ±1.0% (1 SD)내로 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 ±2.0% (1 SD)이상의 편차를 보이는 열형광선량계와 비교했을 때 매우 우수한 결과이다[6]. 열형광선량계는 하나의 소자에 한번의 판독만이 가능한 반면에 유리선량계는 판독과정을 거쳐도 신호가 소멸되지 않아 반복판독이 가능하여 측정 데이터의 편차를 줄일 수 있고 이로인해 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 것이 가장 큰 장점이다. Fig. 5에는 같은 50개의 유리선량계에 대해 3일의 간격을 두고 4회에 걸쳐 총 12일 동안 동일한 절차로 유리선량계 판독한 결과를 나타낸 것으로 각각의 유리선량계는 5번에 걸쳐 판독한 것에 대해 평균값으로 일반화를시켰다. 판독을 실시한 첫날과 12일이 경과된 결과 사이에 유리선량계의 재현성은 평균에 대한 표준편차가 ±1.2% (1 SD)내에서 일치하여 한번에 판독을 실시한 결과와 유사하게 나타나 판독기의 안정성 유지 및 측정 변수의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 12일 동안

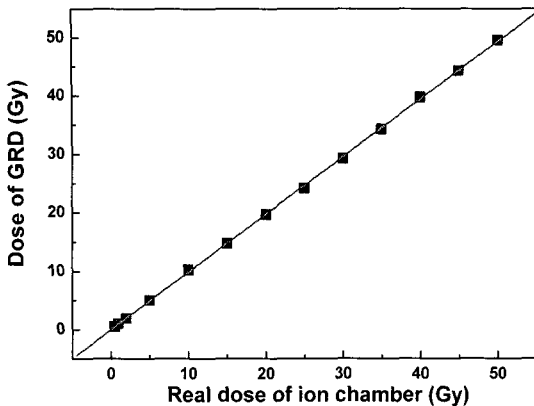


Fig. 6. The dose linearity of GRD. The GRD response is converted into dose, compared to the real dose measured with a Farmer type ionization chamber. Each dose point represents the average value out of 3 GRDs of five measurements.

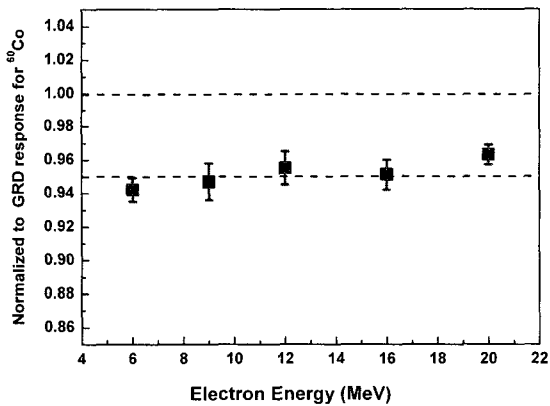


Fig. 7. The energy dependence of the GRD is obtained by comparing the absorbed dose measured with a Farmer type ionization chamber. The GRD response for each beam is normalized to the response for a ⁶⁰Co beam. The error bars represent one standard deviation of five measurements.

만 판독기간을 설정하여 장기간에 걸친 유리선량계의 퇴행율을 확인하지 못하였으나 Araki 등의 연구를 통해 열형광선량계에 비해 유리선량계의 RPL 중심이 비교적 안정되어 퇴행 현상이 거의 보이지 않으며 주변 환경의 온도에도 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다[9].

Fig. 6은 ⁶⁰Co 감마선에 대한 선량범위 0.5 Gy에서 50 Gy까지 유리선량계의 반응도에 대한 측정값을 그래프로 나타내었다. 이때 유리선량계의 반응도는 3개 유리선량계에 대해 5번 판독하여 평균값을 선량으로 환산하여 이온함으로 결정환

선량과 비교하였다. 그 결과 선량 증가에 따른 유리선량계의 선형성을 확인하였으며 0.9998의 선형계수(linearity coefficient)를 얻었다.

유리선량계의 에너지의존성은 선형가속기에서 발생하는 광자선, 전자선에 대한 유리선량계의 반응도를 ⁶⁰Co 감마선의 반응도로 일반화시켜 평가하였다. 이때 광자선 및 전자선의 각 에너지에 대한 유리선량계는 20개씩을 조사하였으며 각각 10번의 판독과정을 거쳤다. 그 결과 광자선 에너지 6, 15 MV에 대한 유리선량계의 반응도는 각각 1.007±0.008과 0.985±0.010로 광자선에 대한 유리선량계의 에너지의존성은 1.5% (1 SD)이내에서 잘 일치하는 결과를 보였다. 이는 다이오드 선량계와 비교했을 때 에너지의존성이 낮은 것이며 LiF:Mg:Ti (TLD-100)와는 비슷한 수준의 에너지의존성을 갖는 것이다[5, 11]. 또한 Fig. 7에는 전자선 에너지 6, 9, 12, 16 그리고 20 MeV에 대한 유리선량계의 반응도를 나타내었다. 이때 각각의 전자선 에너지에 대한 유리선량계의 반응도는 0.942±0.007, 0.947±0.011, 0.955±0.010, 0.951±0.009 그리고 0.963±0.006로 ⁶⁰Co 감마선과 비교했을 때 5.0%정도 낮게 나타났다. TLD-100의 경우, ⁶⁰Co 감마선에 대한 전자선의 반응도의 차이는 약 4.0~5.0%정도로 유리선량계와 비슷한 수준이다 [6,11,12]. 따라서 본 연구 결과로 고에너지 광자선 및 전자선에서 유리선량계와 열형광선량계는 서로 유사한 상호 과정이 발생함을 유추할 수 있었으며 ⁶⁰Co 감마선으로 교정을 받은 유리선량계를 이용하여 전자선에서 선량 측정을 할 때 정확한 결과를 얻기 위해서는 에너지에 대한 보정 정수(correction factor)를 산출하여 선량을 결정해야 함을 확인할 수 있었다

결론

본 연구에서는 유리선량계를 방사선 수술장비의 선량측정에 사용하기 위하여 유리선량계의 재현성 및 선량의 선형성 그리고 에너지의존성 등을 조사하였다. ⁶⁰Co 감마선을 사용하여 50개의 유리선량계의 재현성을 확인한 결과 모두 ±1.2% (1SD)이내에서 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며 ⁶⁰Co 감마선에서 선량 50 Gy까지 유리선량계의 반응도를 평가해 본 결과는 0.9998의 선형계수를 확인할 수 있었다. 또한 유리선량계의 에너지의존성은 광자선 에너지 6, 15 MV 모두 ±1.5% (1SD)이내에서 일치하였다. 이는 고에너지 광자

선에 대해 다이오드 선량계에 비해 에너지의존성은 낮은 것인 것이며 열형광선량계와는 비슷한 결과이다. 그러나 전자선에 대해서는 ^{60}Co 감마선과 비교했을 때 유리선량계의 반응도가 5.0% (1SD)정도 낮게 나타나 고에너지 전자선의 선량 측정 시 정확한 평가를 위해서는 에너지에 대한 보정정수를 산출하여야 할 것으로 생각된다.

유리선량계의 특성 및 선량측정의 정확도를 확인해 본 결과 유리선량계는 열형광선량계에 비해 반복적으로 판독이 가능하여 소자간 재현성이 우수하였고 취급과정이 매우 간단하였으며 다이오드와 비교하였을 때 광자선에 대한 에너지 의존성도 낮은 것으로 나타났다. 또한 기존의 다른 선량계에 비해 유효체적이 작은 장점 등으로 인해 유리선량계가 소조사면을 사용하는 방사선 수술 분야의 선량측정에 적합한 선량계라는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2006년 과학기술부 원자력연구개발 사업 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

- Heydarian M, Hoban PW, and Beddoe AH. A comparison of dosimetry techniques in stereotactic radiosurgery. *Phys. Med. Biol.* 1996;41:93-110.
- Lee HR, Pankuch M, Chu JC, and Spokas JJ. Evaluation and characterization of parallelplate microchamber's functionalities in small beam dosimetry. *Med. Phys.* 2002; 29:2489-2496.
- Kubo HD, and Araki F. Dosimetry and mechanical accuracy of the first rotating Gamma-Knife system installed in North America. *Med. Phys.* 2002;29:2497-2505.
- Rickner G, and Grusell E. Selective shielding of a *p*-Si detector for quality independence. *Acta Radiol. Oncol.* 1985;24:65-69.
- Rickner G. Characteristic of a selectively shield *p*-Si detector in ^{60}Co and 8 and 16 MV x-ray radiation. *Acta Radiol. Oncol.* 1985;24:205-208.
- Mobit PN, Nahum AE, and Mayles P. A Monte Carlo study of the quality dependence factors of common TLD materials in photon and electron beams. *Phys. Med. Biol.* 1998; 43:2015-2032.
- Araki F, Ikegami T, Ishidoya T, and Kubo DH. Measurements of Gamma-Knife helmet output factors using a radiophotoluminescent glass rod dosimeter and a diode detector. *Med. Phys.* 2003;30:1976-1981.
- Tsuda M. A few remarks on photoluminescence dosimetry with high energy x-rays. *Jpn. J. Med.* 2000;20:131-139.
- Asahi Techno Glass Corporation. Explanation material of RPL glass dosimeter: Small element system. Tokyo, Japan. 2000.
- TRS No 277, Absorbed dose determination in photon and electron beams. An International Code of Practice for Dosimetry. IAEA. Vienna: 1983.
- Mobit PN, Mayles P, and Nahum AE. The quality dependence of LiF TLD in megavoltage photon beams: Monte Carlo simulation and experiments. *Phys. Med. Biol.* 1996;41:387-398.
- Mobit PN, Nahum AE and Mayles P. The energy correction factor of LiF thermoluminescent dosimeters in megavoltage electron beams: Monte Carlo simulation and experiments. *Phys. Med. Biol.* 1996;41:979-993.