Journal of Radiation Industry 3 (2) : 87~92 (2009)

플라스틱 섬광체와 광섬유를 결합한 원격 측정 방사선량계 모형의 성능 시험

서 민 우 · 박 재 우*

제주대학교 에너지공학과

Test of a Remotely Measuring Radiation Dosimeter Model Constructed with Combination of a Plastic Scintillator and Plastic Optical Fiber

Min Woo Seo and Jae Woo Park*

Department of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract − A real-time remotely measuring radiation dosimeter with a high spatial resolution is useful to monitoring radiation doses in a research irradiation chamber or a human phantom for radiation cancer treatment planning. This study presents the results of the performance test of a radiation dosimeter model which was constructed by attaching a small piece of plastic scintillator to one end of a plastic optical fiber and a current-type PMT the other end. The dosimeter model was inserted into an irradiation chamber loaded with about 222 TBq (6,000 Ci) of ^{60}Co to measure the PMT currents at a number of points differently distance from the source. MCNPX simulations were conducted to calculate the energy deposited in the scintillator piece. A Farmer type ionization chamber and Alanine pellet dosimeter were employed to measure the absorbed dose rates at the same positions inside the irradiation chamber. Normalization is made for each data set with respect to the corresponding maximum value. The normalized distribution of the PMT current is compared with those of the calculated energy deposition and the measured dose rates, respectively to evaluate the accuracy of the dosimeter model measuring the dose rate as PMT current. The normalized distribution of the measured PMT current well coincides with those of the MCNPX-calculated deposited energy and the dose rates measured with a Farmer type ionization chamber and Alanine pellet dosimeters. An average calibration factor is obtained from the measured data to convert the measured PMT currents into the absorbed dose rates. When this average calibration factor is applied in the measured dose rate range 47～1180 Gy h^{-1}, the maximum error is estimated to be less than 7%, which is very comparable with deviations between the data measured with commercially available dosimeters.

Key words : Plastic scintillator, Plastic optical fiber, Current type PMT, Remotely measuring radiation dosimeter

* Corresponding authors: Jae Woo Park, Tel. +82-64-754-3645, Fax. +82-64-754-9276, E-mail. jwpark@jejunu.ac.kr

서 론

대단위 방사선 조사시설 등의 초고준위 방사선장에서 방사선량을 측정하는 데는 Fricke 선량계, Alanine 선량계 등이 사용되고 있으나 이들은 실시간 측정을 할 수 없는 단점이 있다. 방사선 준위가 상업용 방사선 조사시설에는 못 미치나 상당히 높은 연구용 방사선 조사실이나 방사선 암치료 환경에서 방사선량을 측정하기 위해서는 공간 분해능이 우수하고 실시간 원격 측정이 가능한 선량계가 필요하다. 이 경우 farmer형 전리함이나 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 등의 반도체 선량계가 이용될 수 있다. 전리함은 다른 선량계에 비하여 정확성은 높으나 미세한 전류를 측정하는 장치여서 외부적 영향에 민감하고, 전부 외국산 제품이어서 고장이 발생하는 경우 제작회사에 보내어 수리해야 하므로 많은 시간이 소요되는 문제가 있다. MOSFET 선량계는 여러 지점의 선량을 동시에 측정하는 데 편리하고, 센서부위가 매우 작아서 공간 분해능이 뛰어나지만 센서의 유효수명이 정해져 있어서 높은 방사선장에서 선량계로 사용하는 데에는 비경제적이다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 섬광체와 광섬유를 결합한 선량계가 효과적인 대안이 될 수 있다. 본 연구진은 무기물 섬광체인 BGO, GSO, CWO와 유기물인 플라스틱 섬광체의 조각을 플라스틱 광섬유에 접합한 방사선량계 모형을 제작하여 각각의 선량계로서의 특성을 분석하였다.

본 연구는 방사선을 감지하는 센서부에 플라스틱 섬광체 (Saint Gobain사, BC-412모델)를 사용하고, 여기에 광전송을 위한 플라스틱 광섬유 (Toray사, PGR FB3000)를 접합한 방사선량계 모형을 제작하여 선량계로서의 특성을 분석하였다. BC-412 플라스틱 섬광체는 주성분이 탄소와 수소이고, 밀도가 1.032 g cm^{-3}으로서 인체와 유사한 물질이어서 인체의 흡수선량 측정하는 데도 편리하다. 섬광체에서 발생한 광은 광섬유를 통해 전류형 PMT에 전달되어 섬광체에 흡수된 방사선량을 PMT 전류로 변환한다. 섬광체와 광섬유를 조합한 선량계는 유연성, 우수한 공간분해능, 제작의 용이성, 원격 측정 등 많은 장점을 가지고 있으며, 현재 이러한 개념의 선량계 모형에 관한 연구가 일부 진행 중이다. Takada 등은 고방사선장에서 광섬유 검출기에 의한 방사선량 분포 측정 연구를 수행하였다. 적외선영역 파장을 내는 섬광체를 광섬유 선단에 접합하고, 광섬유 다발을 CCD 카메라에 연결하였으며 광섬유와 CCD 카메라 사이에는 800 nm 이상의 파장만 통과하는 필터를 부착한 방사선 검출기 모형을 제작하였다 (Takada *et al*. 1998). Nowtny는 방사선진단용 선량측정을 위해서 LiF : W 섬광체 센서에 관한 연구를 수행하였다. 광섬유 선단에 LiF : W 섬광체 조각을 광학시멘트로 접합하고 다른 선단에는 PMT를 연결한 방사선 진단용 센서 모형을 제작하여 자체 방사선 진단용 선량계로 사용하였다 (Nowtny 2004). 장경원 등은 고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 광 측정 및 분석 연구를 수행하였다. 고에너지 전자선 계측시 광섬유에서 발생되는 체렌코프 광은 섬광체 자체 신호의 검출에 방해요소로 작용하는데, 이러한 체렌코프 광을 분석하는 연구이었다 (장 등 2006). Simon 등은 소형 BGO 섬광체와 광섬유를 결합한 센서 모형을 제작하여 섬광체의 크기와 광섬유의 길이에 따른 광전자증배관에 수집되는 섬광량을 분석하였다 (Simon *et al.* 1995).

문헌에 발표된 연구들은 거의 모두 원자번호와 밀도가 높은 무기섬광체를 사용하였으나 본 연구에서는 인체 등가물질인 플라스틱 섬광체를 사용하였으며, 기존 연구는 광섬유의 길이가 2 m 이하였지만 본 연구에서는 원격 측정이 가능한 범위를 넓히고자 광섬유의 길이를 10 m로 하였다. 플라스틱 섬광체인 경우 무기섬광체에 비하여 감마선에 대한 광발생 효율이 낮은데다가, 전송용 광섬유의 길이가 길어짐에 따라 광의 강도가 감소할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 이러한 조건에서도 선량계로 개발 가능한지 여부를 분석하였다.

제작한 선량계 모형은 방사능이 약 222 TBq인 ^{60}Co 감마 선 조사실에 투입하여 고준위 방사선장에서 선원과 센서 간 거리에 따른 PMT 전류 변화를 측정하였다. 측정된 PMT 전류 변화는 MCNPX 코드로 플라스틱 섬광체 부피 안에 흡수된 에너지를 계산하여, 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화를 분석하였다. 선량계 모형으로 측정한 지점에서 상용화된 farmer형 전리함과 Alanine pellet 선량계로 방사선량을 측정하였다. 측정한 PMT 전류와 선량은 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화, PMT 전류와 선량과의 선형성, PMT 전류의 안정성 등을 비교하였다. 측정된 실제 선량 값으로 calibration한 결과 측정한 전류를 흡수선량으로 변환하는 평균 변환상수를 구하여 분석하였다.

재료 및 방법

선량계 모형은 Fig. 1에 보인 바와 같이 센서부인 BC-412 플라스틱 섬광체, 광전송용 플라스틱 광섬유와 PMT로 구성된다. Saint Gobain사 제품인 BC-412 플라스틱

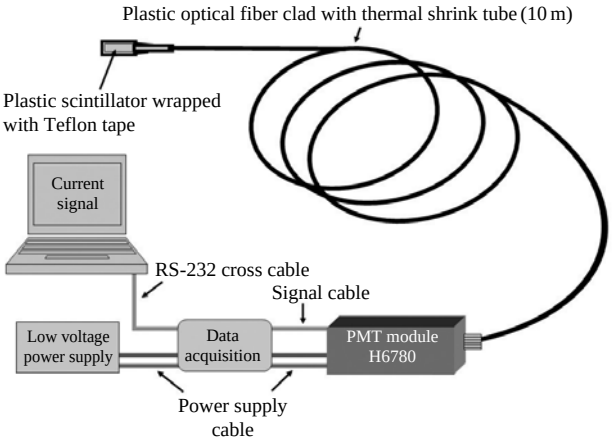

Fig. 1. A schematic of the fiber-optic scintillator dosimeter system.

섬광체는 주성분이 탄소와 수소이고, 밀도가 1.032 g cm^{-3} 이며, 굴절률은 1.58이다. 섬광체의 발광량은 Antrancene 섬광체의 60%이며, 발광 파장영역은 400～520 nm이며 최대발광파장은 434 nm이다. 섬광체는 5×5×20 mm^3 크기로 가공하여 전 표면을 polishing film과 알루미나 파우더로 연마하고, 광 손실을 줄이기 위해 반사체로 테프론 테이프로 감쌌다. 플라스틱 광섬유는 Toray Industies Co.에서 제조한 직경 3 mm (PGR FR3000) 광섬유를 10 m 길이로 잘라서 사용하였다. 광섬유 core의 굴절률은 1.49, cladding의 굴절률은 1.4이고, 광전송 손실은 400～600 nm 빛에 파장에 대해 0.2 db m^{-1} 이하이다. 소재는 범용 수지인 PMMA (Polymethyl Methacrylate)를 원재료로 하여 SI형 (Step index)으로 만들어진 전자재료용 소재로서 경량 대용량 Noise 등에 우수한 특성을 가지고 있다. 그리고 이 섬광체와 광섬유는 외부에서 들어오는 광을 차단하기 위해서 검은색 열수축튜브 (Heat strinkable tube)로 2중으로 피폭하였다. PMT 모듈은 Hamamatsu사 제품으로 전류형 인 H6780-04이고 PMT, 전치증폭기, 고전압 공급회로가 금속 케이스에 일체형으로 내장된 모델이다. 모듈의 응답 파장 영역은 180～800 nm이며 최고 응답 파장은 400 nm이다. 모듈에 공급되는 전압은 저전압인 15 volt로 PMT에 공급되는 실제 전압은 내부의 고전압회로에서 증폭된다. PMT의 gain은 control voltage를 0.25～0.9 volt 사이에서 조정하여 PMT 전류를 10^2～10^6까지 증폭 가능하다. 광섬유와 PMT 모듈은 FC형 커넥터와 아답터로 연결하였다. PMT에서 출력되는 전류는 data acquisition unit (Hamamatsu, C8908) 장치에 수집되고 RS-232 cross cable을 통해 PC로 plotting된다. Data acquisition unit 실험장치는 PC에서 시간간격과 PMT의 증폭을 조절하는 control voltage 입력하여 통제한다.

제작된 선량계 모형은 방사능이 약 222 TBq ^{60}Co Gamma irradiator의 선원과 센서 간 거리를 20, 25, 30, 35, 40, 60, 80, 100, 120 cm로 떨어진 총 9개의 지점에서 측정하였고, 측정 높이는 조사대 지면에서 35 cm이다. 선원은 pencil형이고 반지름이 5 mm, 길이가 30 cm로 guide tube 안에 장착되어 있다. 각 지점마다 1분간 측정한 결과를 평균하여 측정값을 구하였다. 그리고 섬광체에서 발생되는 광을 전송하는 플라스틱 광섬유에서 불필요하게 생겨나는 체렌코프 광을 제거하기 위해서 같은 조건의 dummy fiber를 별도로 제작하였다. Dummy fiber도 같은 지점에서 1분간 측정하고 평균하여 측정값을 구하였다. 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합한 센서에서 측정한 값과 dummy fiber에서 측정한 값을 빼주어 섬광체 안에서만 발생된 광에 측정결과를 도출할 수 있었다. PMT의 control voltage를 0.3 V로 하여 PMT의 gain을 10^3으로 얻었다.

측정 데이터의 정확성을 평가하기 위하여 MCNPX 코드로 계산한 결과와 비교 분석하였다. MCNPX 코드 계산의 경우에 조사실 내부의 각 측정지점마다 섬광체 부피를 하나의 cell로 잡고서 F6 tally option (energy deposition averaged over a cell)을 사용하여 그 cell 내에 단위 질량당 흡수에너지 (MeV g^{-1})를 계산하였다. 계산된 단위 질량당 흡수에너지는 섬광체의 질량을 곱해주어 흡수에너지로 변환하였다. MCNPX 코드의 결과 값의 신뢰도는 상대오차 5% 미만으로 유지하기 위해서 history (N개, nps)를 1×10^7～2×10^8까지 늘려가면서 계산하였다.

제작된 선량계 모형에서 발생하는 전류와 실제 선량 간의 상관관계를 분석하기 위하여, Farmer-type 전리함과 Alanine 선량계로 같은 지점을 선량 측정하였다. 사용한 전리함은 Farmer-type으로 PTW Freiburg사가 제작한 전리체적이 0.6 cc인 자유공기 전리함이다. 이 thimble type 전리함은 내부로 공기가 자유롭게 드나들 수 있기 때문에 온도 및 기압에 대한 보정이 필요하다. 전리함의 ion transit time은 180 ms이고 99.5% 이온 수집 효율의 선량이 2.8 Gy s^{-1}이다. 전리함에서 생성된 전하량의 측정은 전위계 (Electrometer, Cardinal Health Co. model 35040)를 사용하였다. 조사하는 각 지점마다 1분간 3회 반복 측정하고 평균값의 전하량 (nC)을 구하였다. 평균값의 전하량은 방사선에너지에 대한 보정 상수, 측정온도 (T)와 압력 (P)변화에 대한 공기밀도 보정계수 및 물 흡수선량 교정상수 등을 곱하여 물 흡수선량으로 변환하였다. Alanine 선량계는 Bruker Biospin사에서 제작한 선량계이다. 이 선량계는 상대적으로 온도와 습도에 대해 민감하지 않으며, 측정된 선량이 매우 정확하고 낮은 편차 (±2%)를 보여준다. 현재, 이 선량계는 X-ray 조사실이나 전자빔 조사실, 감마 조사실에서 사용되고 있다. 각 지점마다

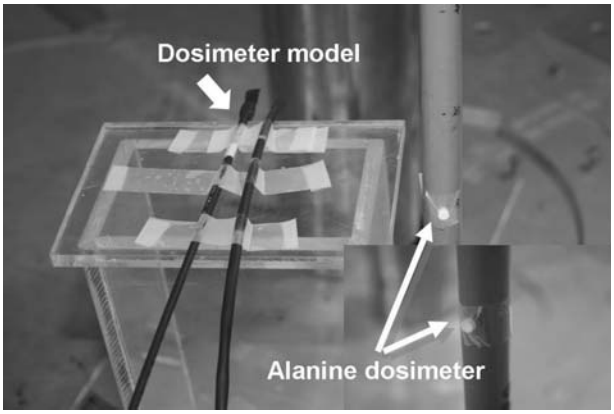

Fig. 2. Figure of the dosimeter measuring the PMT current in the irradiation chamber. Also shown is the Alanine dosimeter measuring the absorded dose.

총 누적선량을 500 Gy 이상으로 하였는데, 이는 Alanine 선량계의 선량 판독을 하는 데 편리하고 정확성을 유지하기 위함이다. 그리고 Alanine 선량계의 선량 판독은 정읍방사선연구소에 의뢰하였다. Fig. 2에서는 약 222 TBq ^{60}CO 감마선 조사실에서 섬광체 센서 모형과 Alanine 선량계로 측정하는 것을 보여주고 있다.

결과 및 논의

측정한 전류 변화가 실제 선량변화와 어느 정도 근접하는지 평가하기 위하여 MCNPX 코드로 계산한 흡수에너지 변화와 비교하였다. 절대량의 비교보다는 상대적인 경향비교가 의미 있으므로 각 측정지점의 데이터를 최고 값으로 나누어 정규화(normalize)하였다. 측정된 PMT 전류와 계산된 흡수 에너지를 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화를 비교 분석하였으며, 측정된 실제 선량과는 선원과 센서 간 거리에 따른 정규화 분포 변화, PMT 전류와 선량과의 선형성, PMT 전류의 안정성을 비교 분석하였다. 전리함 및 Alanine 선량계로 측정된 실제 선량 값을 측정한 전류로 calibration한 결과, 전류를 흡수선량으로 변환하는 변환상수를 구하였다. 변환 상수는 동일한 지점에서 측정된 실제 선량에서 PMT 전류를 나누어 구하였고, 평균 변환 상수는 측정지점마다 구한 변환 상수들을 평균하여 구하였다. 제작된 선량계 모형으로 측정된 전류는 상용 선량계로 측정된 선량 범위에서 평균 변환 상수를 이용하여 선량으로 변환하였다.

Fig. 3은 BC-412 플라스틱 섬광체 센서로 측정한 PMT 전류와 MCNPX 코드로 계산한 흡수 에너지의 정규화

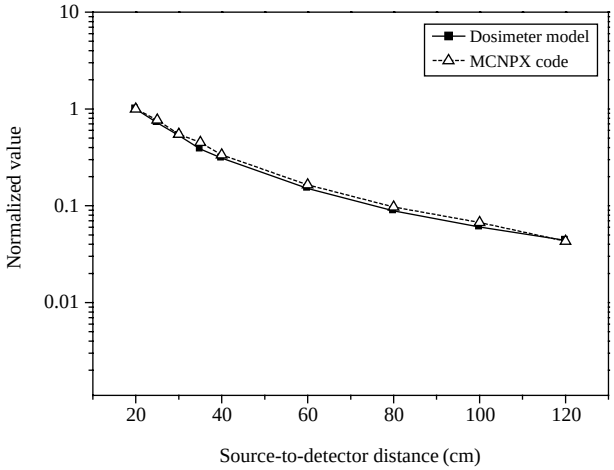

Fig. 3. Normalized distribution of the BC-412 sensor-measured PMT current and MCNPX-calculated deposited energy.

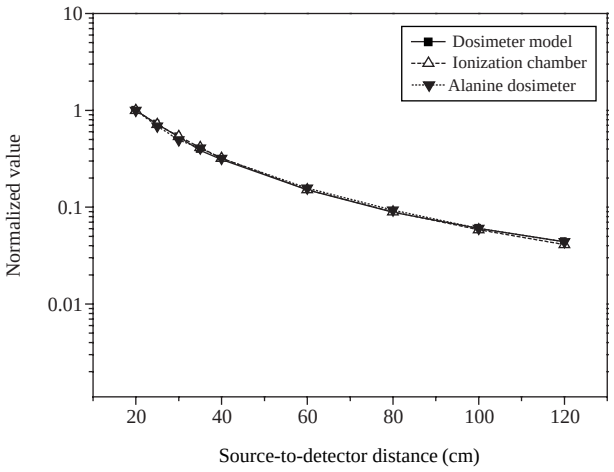

Fig. 4. Normalized distributions of the PMT current and the measured dose rates.

분포를 비교한 그림이고, Fig. 4는 제작한 선량계 모형으로 측정한 PMT 전류와 전리함 및 Alanine 선량계로 측정한 선량률과의 정규화 분포 변화를 나타낸 그림이다. 계산된 결과와 실제 선량과의 정규화 분포는 선원과 센서 간 거리에 따라 측정된 전류의 정규화 분포와 비슷한 양상을 보였다. Fig. 5는 측정된 전류와 Alanine 선량계로 측정한 선량과의 선형적인 관계를 나타낸 그림이다.

Fig. 6은 선원과 센서 간 거리가 20 cm일 때, 선량계 모형으로 측정한 PMT 전류를 50회 반복 측정하여 나타낸 그림이다. 측정된 PMT 전류는 3.8×10^{-7} A로 측정되었으며, 전류의 시간 변동이 용인할 수 있는 수준 이내로서 매우 안정적이었다.

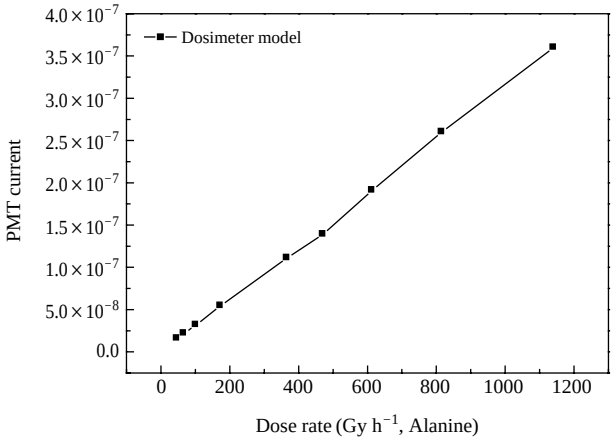

Fig. 5. Linearity of the BC-412 sensor-measured PMT current and dose rate.

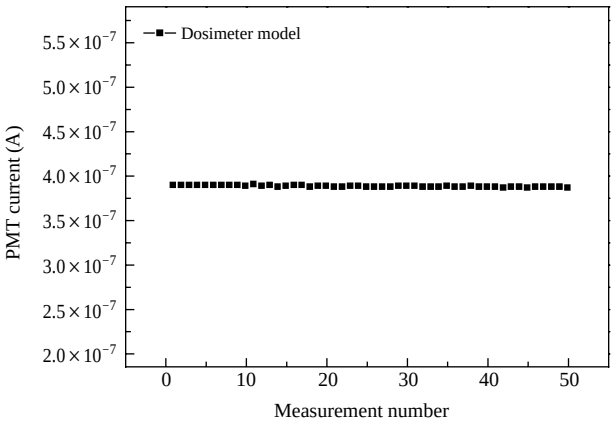

Fig. 6. Time variation of the measured PMT current.

Table 1. Comparison of dose rate measured by ionization chamber and Alanine dosimeter

Distance (cm)	Ionization chamber (Gy h^{-1})	Alanine dosimeter (Gy h^{-1})	Deviation (%)
20	1141	1180	3
25	816	810	1
30	614	585	5
35	471	480	2
40	366	375	2
60	173	185	7
80	102	110	8
100	67	71	7
120	47	52	10

Table 1은 조사실 내부 선원과 선량계의 거리에 따른 전리함과 Alanine 선량계로 측정한 선량들을 비교한 것이다. 측정된 선량범위에서 따른 두 선량계의 편차가 1～10%가 됨을 알 수 있으며 선량률이 낮아질수록 편차가 커짐을 볼 수 있다.

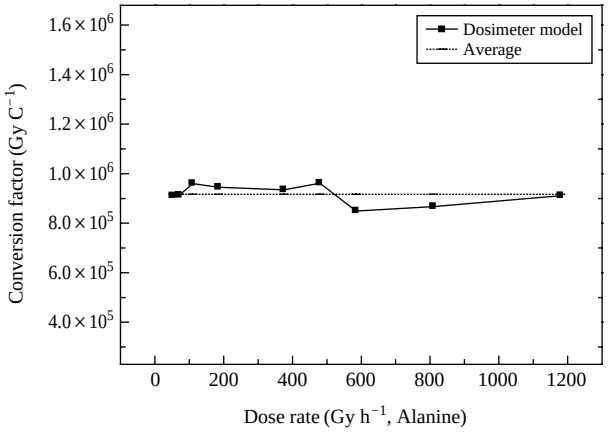

Fig. 7. Conversion factors to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current. The dose rates are measured with the Alanine dosimeter.

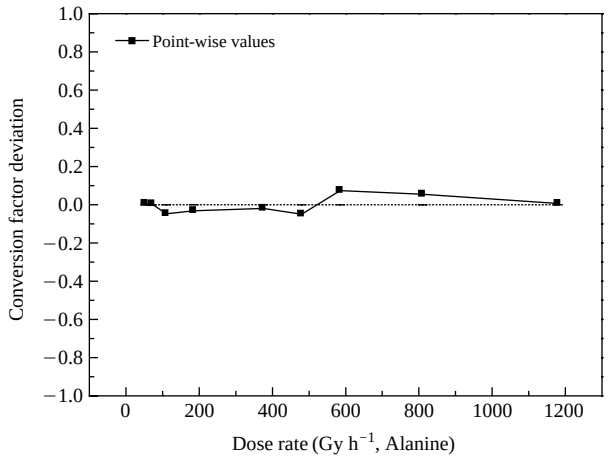

Fig. 8. Deviation from the average of the conversion factors calculated from the Alanine-measured dose rates.

Fig. 7과 8은 제작한 선량계 모형으로 측정한 값을 Alanine 선량계로 측정한 선량 값으로 보정하는 경우에 변환상수와 편차를 나타낸 그림이다. 변환상수는 선량률이 585 Gy h^{-1}일 때 8.5×10^{5} Gy C^{-1}로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 480 Gy h^{-1}일 때 9.6×10^{5} Gy C^{-1}로 가장 높게 나타났다. 평균 변환 상수는 9.2×10^{5} Gy C^{-1}로서 이 값을 사용하여 측정된 전류를 선량으로 변환하는 경우 전체적으로 7% 이내로 편차가 나타났으며, 선량률이 52～480 Gy h^{-1}일 때 5% 이내로 비교적 낮은 편차를 보였다.

Fig. 9와 10은 선량계 모형으로 제작한 선량계로 측정한 값을 farmer형 전리함으로 측정한 선량 값으로 보정하는 경우에 변환상수와 편차를 나타낸 그림이다. 변환상수

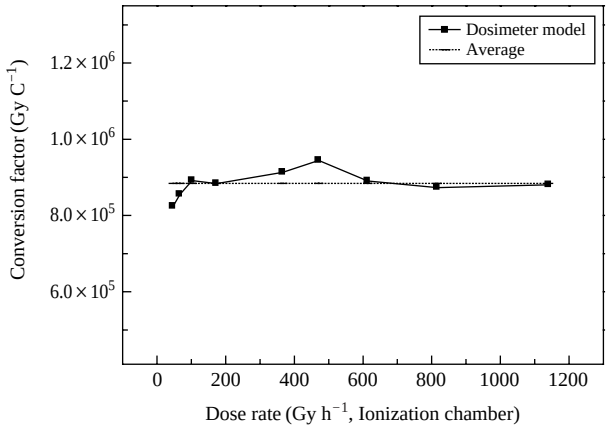

Fig. 9. Estimated conversion factors to gain the absorbed dose rate from the measured PMT current. The dose rates are measured with the ion chamber (IC).

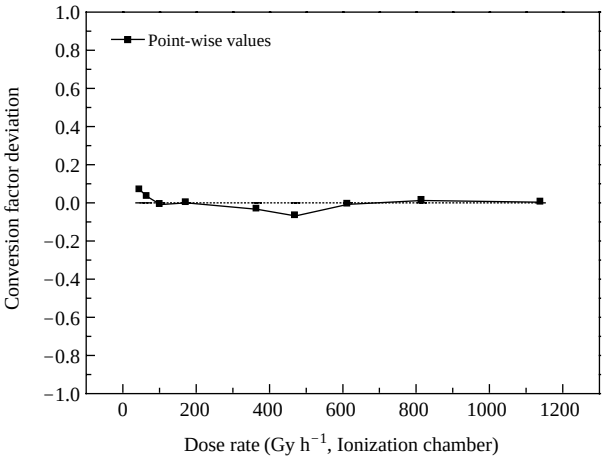

Fig. 10. Deviation from the average of the conversion factors calculated from the IC-measured dose rates.

는 선량률이 47 Gy h^{-1}일 때 8.5×10^5 Gy C^{-1}로 가장 낮게 나타났으며, 선량률이 471 Gy h^{-1}일 때 9.4×10^5 Gy C^{-1}로 가장 높게 나타났다. 평균 변환 상수는 8.8×10^5 Gy C^{-1}로서 이 값을 사용하여 측정된 전류를 선량으로 변환하는 경우 편차는 6% 이내로 비교적 낮게 나타났다.

결 론

감마선 조사실 등의 고준위 방사선장에서 방사선량을 실시간 원격 측정을 하기 위해서 BC-412 플라스틱 섬광체와 플라스틱 광섬유를 결합한 선량계 모형을 제작하고 방사선조사실에 투입하여 선량계로서의 특성을 분석하였다. 제작한 선량계 모형으로 측정한 PMT 전류와 MCNPX 코드로 계산한 값의 정규화 분포 변화는 거의 비슷한 양상을 보였다. 또한 측정한 PMT 전류와 상용 선량계로 측정한 선량과의 정규화 분포도 거의 비슷한 양상을 보였으면, 전류의 시간 변동이 용인할 수 있는 수준 이내로서 매우 안정적이었다. 상용 farmer형 전리함과 Alannine 선량계로 측정한 값에서 제작된 선량계 모형으로 측정한 전류를 calibration한 결과 흡수선량으로 변환하는 평균 변환상수를 구할 수 있었다. 선량계 모형으로 측정한 전류는 이 변환상수를 사용하여 흡수선량으로 변환하는 경우 전반적으로 7% 이내의 편차를 보였다. 이 정도의 편차는 상용화된 선량계 간에도 존재하므로 본 연구에서 도출한 선량계 모형이 상용 선량계로 개발될 수 있음을 확인하였다. 그리고 제작한 선량계 모형은 아직은 섬광체와 광섬유, 광섬유와 PMT의 연결에서 완전하지 못한 상태이므로 이러한 면을 보다 정교하게 보강한다면 상용화된 선량계 못지 않은 정확성을 보일 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 원자력연구기반 확충사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

장경원, 이봉수, 조동현, 김형식, 이정한, 이정환, 김 신, 조효성. 2006. 고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석. 한국센서학회지. **15**(3):186-191.

Cherry SR, Shao Y, Trnai MP, Siegel S, Ricci AR and Phelps ME. 1995. Collection of scintillator light from small BGO crystals. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **42**:1058-1063.

Nowotny R. 2004. LiF : W as a scintillator for dosimetry in diagnostic radiology. *Phys. Med. Biol.* **49**:2599-2611.

Takada E, Kimura A, Hosono Y, Takahashi H and Nakazawa M. 1998. Radiation distribution measurements with optical fibers in high radiation fields. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* **2**:791-795.

Manuscript Received: May 29, 2009
Revision Accepted: June 5, 2009