

단일 보너구와 TLD-600 및 TLD-700을 이용한 Cf-252의 중성자 에너지 스펙트럼 평가

김성환^{1,+} · 천종규² · 이재진³ · 남욱원³

Estimation of Neutron Energy Spectrum of Cf-252 using Single Bonner Sphere with TLD-600 and TLD-700

Sunghwan Kim^{1,+}, Jongkyu Cheon², Jae Jin Lee³, and Uk-Won Nam³

Abstract

We designed a single polyethylene bonner sphere with several thermo-luminescence dosimeters (TLD), for measurement of neutron energy spectrum. For the separation of the neutron dosage in the neutron-gamma mixed field, we used 21 ea TLD-600s and TLD-700s, respectively. Because, TLD-600 is sensitive to neutron and gamma rays, and, TLD-700 is sensitive only to gamma-rays, we could determine the each dose by neutron and gamma rays. The neutron response function of the bonner sphere with TLDs was calculated by MCNPX (ver. 2.5.0) Monte Carlo simulation in the energy range from 10^{-1} to 20 MeV. For the Cf-252 standard neutron source in KRISS, we could estimate the neutron energy spectrum by unfolding method using the response function.

Keywords : Bonner sphere, Neutron energy spectrum, Monte Carlo simulation, TLD

1. 서 론

보너구는 넓은 에너지 영역의 방사선에 대하여 측정이 가능하고, 다양한 방사선 검출기에 적용하여 쉬워서, 여러 분야에서 방사선 측정에 응용되어 왔으며, 특히 중성자의 에너지 스펙트럼 측정에 흔히 사용되고 있다[1-3]. 직경이 다른 여러 개의 보너구 내부에 방사선 검출기를 넣고, 보너구 세트에서 측정된 결과를 미리 계산된 반응함수를 사용하여 언폴딩함으로써 통하여 중성자 에너지 스펙트럼을 측정할 수 있다. 하지만, 보너구는 에너지 분해능이 나쁘고, 질량이 무거운 단점이 있다. 더구나 직경이 다른 여러 개의 보너구를 사용

해야 하므로 측정이 번거로우며, 측정시 시간이 많이 걸리는 문제점도 있다[4]. 보너구의 이러한 단점을 보완하기 위하여 여러 연구가 수행되었으며, Toyokawa 등[5]은 단일 보너구와 위치검출기를 결합하여 중성자의 에너지 스펙트럼을 측정할 수 있는 방사선 검출기에 대한 연구를 수행하였다. Kimura 등[6]은 상용 단일 보너구와 He-3 비례계수관에 대한 특성을 평가하였으며, Drake 등[7]은 열중성자에 대한 감도를 높이기 위하여 열중성자 흡수단면적이 큰 봉소를 코팅한 보너구에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 단일보너구를 디자인하고, 방사선 검출기로 열형 광선량(TLD, Thermoluminescence Dosimetry)을 사용하여 중성자 에너지 스펙트럼을 평가하고자 하였다. 중성자와 감마선이 혼합된 방사선장에서 중성자에 의한 성분만 분리 측정하기 위하여 TLD-600과 TLD-700을 사용하였으며, 제작된 단일보너구와 TLD에 대한 반응함수는 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산하였다. 계산된 반응함수를 이용하여 Cf-252 중성자 에너지 스펙트럼을 평가함으로써 단일보너구의 가능성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 단일 보너구의 설계

¹청주대학교 방사선학과(Department of Radiological Scence, Cheongju University)
DORS 8-430, 298 Daesungno, Sandang-gu, Cheongju 360-764, Korea

²서라벌대학교 방사선과(Department of Radiology, Sorabol College)
DOR 302, 165 Choonghyodong, Gyungju 780-711, Korea

³한국천문연구원(Korea Astronomy and Space Science Institute)
KASI, 776 Daedukdaero, Yousung-gu, Deajeon 305-348, Korea

+Corresponding author : kimsh@cju.ac.kr

(Received : May. 6, 2013, Accepted : May. 22, 2013)

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.

본 연구에서 직경 30 cm 폴리에틸렌(밀도 0.97 g/cm^3) 보너구를 설계하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 보너구 내부에 X축 및 Y축에 대하여 2.5 cm 간격으로 TLD-600과 TLD-700을 각각 21개씩 삽입할 수 있게 하였다. TLD-600과 TLD-700은 LiF를 모체로 하는 방사선 선량계로서 유효원자번호가 $Z_{\text{eff}}=8.2$ 이며, 인체의 유효원자번호인 $Z_{\text{eff}}=7.42$ 와 유사하여, 인체의 흡수선량을 직접 측정할 수 있다. TLD-600($^{6}\text{LiF:Mg,Ti}$)은 열중성자 흡수단면적이 큰 ^{6}Li 를 모체로 사용하므로 중성자와 감마선 모두 측정이 가능하며, TLD-700($^{7}\text{LiF:Mg,Ti}$)은 ^{7}Li 를 모체로 하기 때문에 감마선만 측정이 가능하다[8]. 따라서 두 종류의 TLD를 이용함으로써 중성자와 감마선 혼합된 방사선장에서 두 방사선량을 각각 분리하여 평가할 수 있다[9, 10].

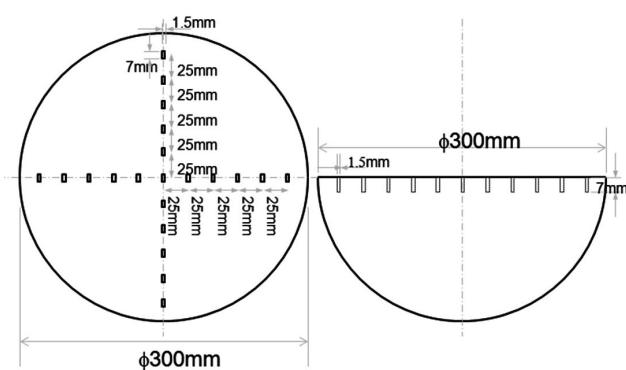


Fig. 1. Designed a single bonner sphere.

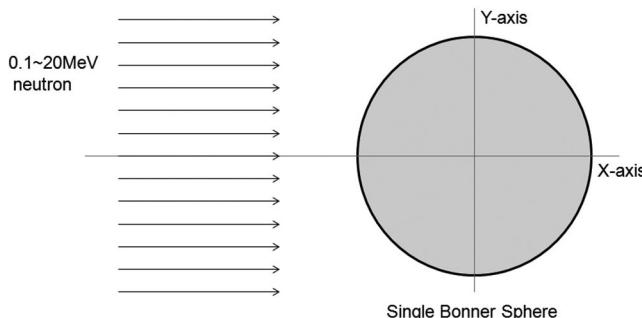


Fig. 2. Block diagram of MNCPX Monte Carlo simulation.

2.2 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 반응함수 계산

중성자의 에너지에 따른 반응함수를 결정하기 위하여 MCNPX(ver.2.5.0)[11]을 이용하여 몬테칼로 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 2는 몬테칼로 시뮬레이션의 개념도이다. 입사 중성자의 에너지는 일반적인 자연 환경에서 나타나는 0.1~20 MeV에 대하여, 1 MeV 간격으로 시뮬레이션을 실시하였으며, 보너구의 재질은

폴리에틸렌(0.97 g/cm^3), 방사선검출기는 직경 1 mm, 길이 5 mm의 LiF($2,635 \text{ g/cm}^3$, $Z_{\text{eff}}=8.2$)로 코딩하였다.

Fig. 3은 단일 보너구에 대하여 몬테칼로 시뮬레이션을 통하여 결정된 TLD의 반응함수이다. 가로축은 입사 중성자 빔과 나란한 X축 방향으로 보너구에서의 깊이이며, 세로축 검출기가 위치한 지점에서 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 검출기의 반응 결과이다. 입사 중성자의 에너지가 낮을수록 표면에 가까운 부분의 선량이 증가하며, 입사 중성자의 에너지가 증가할수록 보너구와 중성자의 상호작용이 감소하면서 모든 깊이에 대하여 반응도가 감소하였으며, 피크의 깊이가 증가하였다. 계산된 반응 함수를 이용하여 입사 중성자의 에너지 스펙트럼을 식(1)로 결정할 수 있다[4].

$$C_i = \Phi \sum_{j=1}^{N_g} R_{ij} \phi_j \Delta E_j \quad (1)$$

여기서 $R_{i,j}$ 는 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산된 반응함수이며, N_g 는 시뮬레이션시 입사 중성자의 에너지 종류의 갯수이며, C_i 는 TLD-600으로 측정한 값에서 TLD-700의 측정값을 뺀 값으로 각 측정 지점에서의 중성자 방사선량에 해당한다, ϕ_j 는 j번째 에너지의 중성자 강도이다.

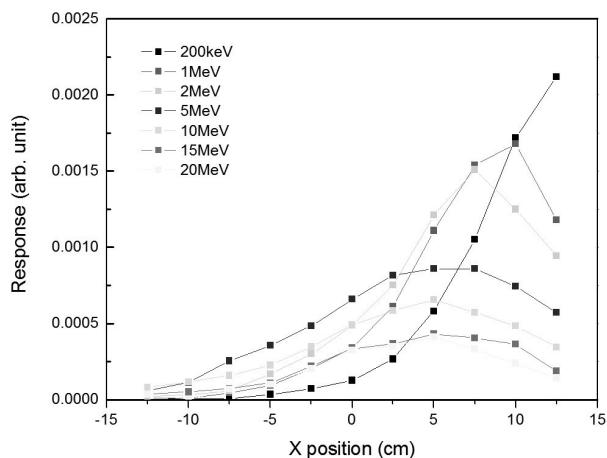


Fig. 3. Calculated response functions of the single bonner sphere.

3. 결과 및 고찰

3.1 중성자선량과 감마선량의 분리

Fig. 4는 본 실험을 위하여 한국표준연구원의 Cf-252 중성자 조사실에서 단일 보너구와 표준선원($2.36 \times 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$, 교정일자: 2012년 11월 9일)을 이용하여 실험하고 있는 그림이다. Cf-252 선

원으로부터 50 cm 지점에 중성자를 측정하였으며, 측정 지점에서 중성자에 의한 선량율은 53.9 mSv/hr 이었다.

Fig. 5는 Cf-252 중성자 표준선원으로부터 50 cm 지점에 2 mSv를 조사한 후 단일 보너구의 중심의 동일한 위치 있는 TLD-600과 TLD-700의 열형광강도를 측정한 그림이다. 열형광 측정은 Neo TL 판독기(Neosys Korea Co.)를 사용하였으며, 가온율은 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 측정 온도 범위는 50–350 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 TLD-600의 열형광강도 곡선은 167, 196 및 219 $^{\circ}\text{C}$ 의 3개의 피크를 보였다. Cf-252는 반감기가 2.65년이며, 최빈 에너지 2 MeV인 중성자 선원으로서 중성자와 동시에 감마선을 방출한다. 하지만 중성자의 의한 선량에 비하여 감마선에 의한 선량이 매우 적어서 Fig. 5와 같이 TLD-700으로 측정된 감마선에 기인한 열형광 강도가 적게 나타났다. TLD-600으로부터 측정된 결과에서 TLD-700으로 측정된 결과를 제거함으로써 중성자만에 의한 선량을 평가할 수 있다.

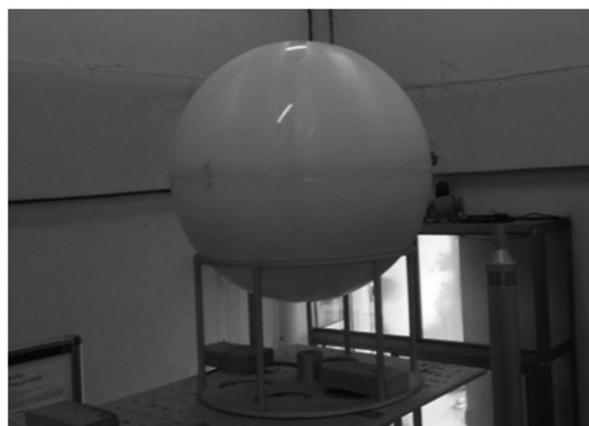


Fig. 4. Photograph of experimental set up.

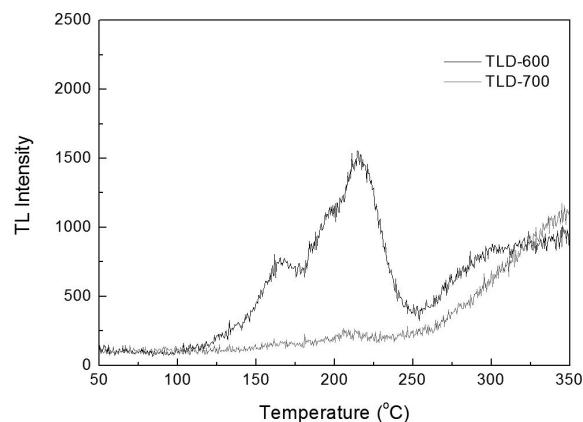


Fig. 5. TL glow curves of TLD-600 and TLD-700 irradiated by Cf-252.

Fig. 6은 Cf-252 중성자 선원으로 조사한 TLD-600의 열형광

강도 곡선의 피크들을 분석한 그림이다. 열형광강도 곡선은 TL/OSL Glow Curve Analyser ver. 1.1.0(by KAERI and GNU)로 분석하였으며, 167 $^{\circ}\text{C}$ (피크 1), 196 $^{\circ}\text{C}$ (피크 2) 및 219 $^{\circ}\text{C}$ (피크 3)의 3개 피크로 구성된다. 피크 1, 2, 및 3의 열형광트랩의 활성화에너지는 각각 1.71, 1.73 및 1.84 eV이었으며, 각 피크들의 주파수인자는 각각 $1.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $5.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 및 $2.3 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 이었다(Table 1).

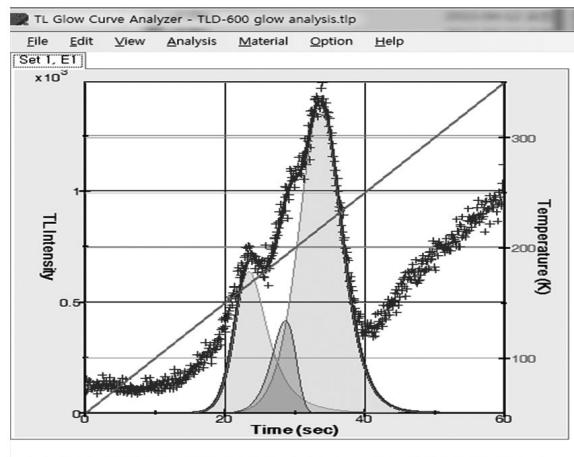


Fig. 6. Analysis of TL glow curves of TLD-600 irradiated by Cf-252 neutrons.

Table 1. Trap parameters of TLD-600 glow peak

Peak Number	Activation Energy (eV)	Frequency factor (s^{-1})
1	1.71	$1.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
2	1.73	$5.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
3	1.84	$2.3 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$

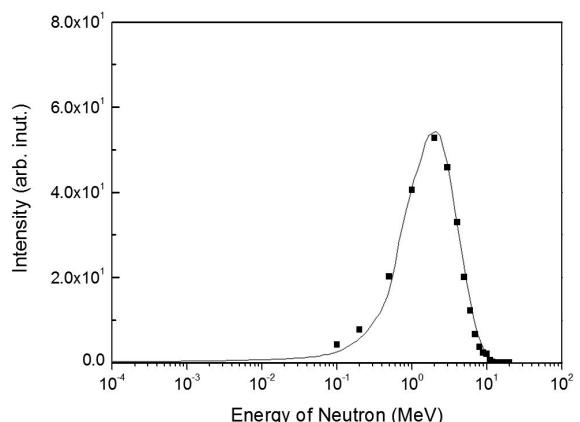


Fig. 7. Comparison between estimated and calibrated neutron energy spectra.

3.2 Cf-252 중성자 에너지스펙트럼

Fig. 7은 한국표준연구원의 Cf-252 중성자 표준선원에 대하여 계산된 반응함수로 언폴딩을 실시한 후 그 결과를 표준선원의 에너지스펙트럼과 비교한 결과이다. Fig. 7에서 실선은 표준 중성자 선원의 에너지 스펙트럼이며, 점으로 표시된 부분은 TLD를 측정한 중성자선량으로부터 반응함수에 대하여 언폴딩으로 계산된 결과이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 중성자 에너지 스펙트럼을 근사적으로 구할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 중성자 에너지 스펙트럼을 평가하기 위하여 폴리에틸렌 단일 보너구를 제작하였다. 제작된 단일 보너구의 내부에 중성자와 감마선을 분리 측정하고, 중성자의 에너지 스펙트럼을 결정하기 위하여 각 21개의 TLD-600 및 TLD-700 선량계를 일정한 간격으로 수직 배치하였다. 중성자 에너지가 0.1-20 MeV에 대하여 몬테칼로 시뮬레이션으로 단일 보너구의 중성자 반응함수를 계산하였으며, 한국표준연구원의 Cf-252 선원에 대하여 계산된 반응함수와 측정된 TLD 선량계의 값으로 언폴딩한 결과 중성자 에너지 스펙트럼 분석에 충분한 활용가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012-0006621)에 기반하였습니다.

REFERENCES

- [1] R. M. Howell, E. A. Burgett, B. Wiegel, and N. E. Hertel, "Calibration of a Bonner sphere extension (BSE) for high-energy neutron spectrometry", *Rad. Meas.*, Vol. 45, pp. 1233-1237, 2010.
- [2] B. Wiegel, S. Agosteo, R. Bedogni, M. Caresana, A. Esposito, G. Fehrenbacher, M. Ferrarini, et. al., "Intercomparison of radiation protection devices in a high-energy stray neutron field, Part II: Bonner sphere spectrometry", *Rad. Meas.*, Vol. 44, pp. 660-672, 2009.
- [3] J. H. Haney, T. E. Barnhart, and C. S. Zaidins, "Extraction of neutron spectral information from Bonner-sphere data", *Nucl. Instr. Meth. Sec. A*, Vol. 431, pp. 551-555, 1999.
- [4] R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, and F. Fernandez, "FRIUT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces", *Nucl. Instr. Meth. Sec. A*, Vol. 580, pp. 1301-1309, 2007.
- [5] H. Toyokawa, A. Uritani, C. Mori, N. Takeda and K. Kudo, "A Spherical neutron counter with an extended energy response for dosimetry", *Rad. Protect. Dosimetry*, Vol. 70, pp. 365-370, 1997.
- [6] T. Kimura, H. Murase, I. Awaya, S. Takagi, T. Hirata, and K. Kawachi, "A commercial single bonner ball neutron energy spectrometer", *Mitsubishi Heavy Industries Tech. Rev.*, Vol. 45, pp. 41-43, 2008.
- [7] P. Drake and J. Kierkegaard, "Use of a boron doped spherical phantom for the investigation of neutron directional properties: Comparison between experiment and MCNP simulation", *Rad. Protect. Dosimetry*, Vol. 81, pp. 271-276, 1999.
- [8] J. L. Kim, J. I. Lee, I. Chang, A. S. Pradhan, S. I. Kim, and B. H. Kim, "TL response of pairs of $^6\text{LiF}:\text{Mg,Cu,Si}$ / $^7\text{LiF}:\text{Mg,Cu,Si}$ and TLD-600/ TLD-700 to 0.1-12 MeV neutrons", *Rad. Meas., In Press*, 2013.
- [9] F. Y. Hsu, M. C. Chiu, Y. L. Chang, C. C. Yu, and H. M. Liu, "Estimation of photon and neutron dose distributions in the THOR BNCT treatment room using dual TLD method", *Rad. Meas.*, Vol. 43, pp. 1089-1094, 2008.
- [10] M.-J. Kuo, F.-Y. Hsu, C.-H. Hsu, C.-H. Lo, et. al., "Dose estimation of the radiation workers in the SK cyclotron center using dual-TLD method", *Rad. Meas.*, Vol. 45, pp. 691-693, 2010.
- [11] J. S. Hendricks, G. W. McKinney, L. S. Waters, et. al., "MCNPX extensions version 2.5.0", *Los Alamos National Laboratory report LA-UR-05-2675*, 2005.