

고체비적검출기를 이용한 500 MeV/u 철 이온의 선에너지전이 교정

김성환⁺

LET Calibration of Fe 500 MeV/u Ions using SSNTD

Sunghwan KIM⁺

Abstract

In this study, LET (Linear Energy Transfer) calibration of CR-39 SSNTD (Solid State Nuclear Track Detector) was performed using 500 MeV/u Fe heavy ions in HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator) for high LET radiation dosimetry. The irradiated CR-39 SSNTD were etched according JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) etching conditions. And the etched SSNTD were analyzed by using Image J. Determined dose-mean lineal energy (\bar{y}_D) of 500 MeV/u Fe is about 283.3 keV/um by using the CR-39 SSNTD. This value is very similar result compare to the results calculated by GEANT4 Monte Carlo simulation and measured with TEPC active radiation detector. We confirmed that the CR-39 SSNTD was useful for high LET radiation dosimetry such as heavy iron ions.

Keywords: high LET, CR-39, Fe ion, SSNTD, Equivalent dose

1. 서 론

방사선이 인체에 미치는 영향은 선량뿐만 아니라 방사선의 선 에너지전이 (LET; lineal energy transfer)에 크게 의존하기 때문에 국제방사선방호위원회 (ICRP; International Commission on Radiological Protection)에서는 피폭 방사선의 LET에 따른 방사선중계수를 적용한 등가선량 개념을 도입하여 인체의 방사선 방호에 활용하고 있다[1]. 특히 원자력발전소의 원자로 부근이나 우주 공간에서는 X선이나 감마선이 주로 존재하는 지상에 비하여 고LET 방사선이 다수 존재하기 때문에 인체에 더 큰 생물학적 영향을 끼칠 수 있다. 이처럼 고LET 방사선이 혼합된 방사선장에서 등가선량 측정의 목적으로 열형광선량계, 고체비적검출기 등의 수동형 검출기와 조직등가비례계수기 등의 능동형 검출기들이 이용되고 있다[2-4]. 능동형 검출기들은 실시간으로 등가선량을 평가할 수 있는 반면, 가격이 고가이므로 일반적인 개인 피폭선량 평가에는 수동형 검출기들이 주로 사용된다.

본 연구에서는 대표적인 수동형 검출기인 CR-39 고체비적 검출기(SSNTD; solid state nuclear track detector)를 사용하여 고 LET 방사선 측정을 위한 기초 연구를 수행하였다. CR-39 고체비적 검출기는 방사선에 의해 검출기 표면에 나타난 트랙을 측정하여 등가선량을 측정하는 검출기로서 인체조직과 구성 성분이 유사하여 인체 흡수선량을 직접 평가할 수 있고, 경량, 소형으로 가격이 저렴할 뿐만 아니라 전원이 불필요한 장점을 가진다[2-4]. 반면 측정된 결과를 실시간으로 확인할 수 없고, 후처리 과정에 따라 측정 결과의 오차가 나타날 수 있다. 또한 검출기 표면에 나타난 트랙을 측정하여 선량을 평가하기 때문에 저 LET 방사선 측정에 적합하지 않아서 10 keV/um 이상의 방사선 측정에 주로 응용되고 있으며[5,6], 라돈 선량에 흔히 사용되고 있다[7,8]. 본 연구에서는 다양한 방사선이 존재하는 혼합장에서 고 LET 방사선에 대하여 CR-39 고체비적검출기를 활용하여 등가선량을 평가하기 위해 일본 중이온가속기 연구소의 500 MeV/u Fe 이온에 대하여 교정을 시행하고, 그 결과를 검증하여 활용 가능성을 살펴보았다.

청주대학교 방사선학과(Department of Radiological Science, Cheongju University)
08-430, Cheongju University, 298 Daesungno, Cheongwon-gu, Cheongju 28503, Korea

⁺Corresponding author: kimsh@cju.ac.kr

(Received : Dec. 24, 2015, Accepted : Jan. 25, 2016)

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.

2. 연구 방법

2.1 고체비적검출기와 화학적 에칭조건

수동형 검출기로 CR-39 (C₁₂H₁₈O₇, Baryotrak Lot. 130131-25) 고체비적 검출기를 사용하였다. 실험에 사용된 CR-39 검출기의 크기는 가로 7 cm, 세로 2 cm, 두께 0.9 cm 이었으며, 선정된



Fig. 1. Experimental setup of CR-39 in HIMAC.

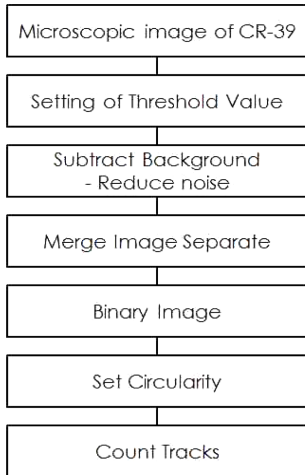


Fig. 2. Image analysis process of 500 MeV/u Fe ion irradiated CR-39 SSNTD.

CR-39 검출기에 대하여 일본 중입자가속기연구소(HIMAC; Heavy Ion Medical Accelerator)에서 500 MeV/u Fe 이온을 조사한 후 측정된 파고스펙트럼으로부터 입사 방사선에 대한 LET 교정을 시행하였다. Fig. 1은 일본 중입자가속기연구소의 Fe 이온 조사 시스템의 사진이다. 알루미늄 윈도우를 통하여 조사된 Fe 이온은 1.6 mm Pb 필터, 0.215 mm Ta 필터 및 바이너리 필터를 거쳐 CR-39 검출기에 조사되며, 바이너리 필터(binary filter)의 두께를 조절하여 입사 Fe 이온의 에너지를 조절할 수 있다. 본 연구에 교정에 사용된 Fe 이온의 선속은 170 particles/cm²-s 이었으며, 바이너리 필터가 없을 때와 30.5 mm 바이너리 필터를 사용하였을 때 LET 교정을 시행하였다.

고체비적검출기는 고 LET 방사선에 의해 손상된 검출기 표면의 트랙을 계수함으로써 방사선을 측정하는 검출기이다. 방사선에 의해 발생된 트랙의 크기가 너무 작기 때문에 적절한 화학적 에칭을 통하여 트랙의 크기를 확대하고, 확대된 트랙을 현미경으로 관찰하여 트랙의 크기와 단위면적당 트랙의 수를 파악함으로써 방사선량을 평가할 수 있다. 이때 에칭 조건에 따라 방사선량 측정의 차이가 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 일본 우주항공연구개발기구 (JAXA; Japan Aerospace Exploration Agency)에서 제시한 표준 에칭 조건을 사용하였다[9]. 500 MeV/u Fe 이온이 조사된 CR-39 고체비적검출기는 7.0 N 농도의 수산화나트륨 수용액에서 70°C로 19시간 에칭한 후 후지 디지털

현미경을 사용하여 형성된 트랙의 디지털영상을 확대 촬영하고, 촬영된 영상은 미국 국립보건원(NIH; National Institute of Health)의 Image J (ver. 1.48)을 이용하여 분석하였다[10]. Fig. 2는 에칭된 CR-39고체비적 검출기의 트랙을 촬영하고, 촬영된 영상을 해석하는 절차를 보여주고 있다. 배경과 방사선에 의해 형성된 트랙을 분리하기 위하여 역치값을 설정한 후 노이즈를 감산하여 트랙의 모양과 크기를 Image J에서 분류하였다. 분류된 트랙의 크기와 계수치로 파고스펙트럼을 측정하였으며, 측정된 파고스펙트럼으로부터 500 MeV/u Fe 이온의 LET 교정을 시행하였다.

2.2 몬테칼로 시뮬레이션 및 조직등가비례계수기를 이용한 교차실험

측정 결과의 신뢰도를 평가하기 위하여 Geant 4 (ver. 10.1.1)를 이용하여 몬테칼로 시뮬레이션을 시행하였으며[11], 아울러 한국천문연구원(KASI; Korea Astronomy and Space Science Institute)의 조직등가비례계수기(TEPC; tissue equivalent proportional counter)를 활용하여 교정결과를 교차 평가하였다. 조직등가비례계수기는 직접적으로 방사선의 LET 스펙트럼을 측정하여 인체 등가선량을 결정할 수 있는 능동형 방사선 계측기로서 한국표준과학연구원(KRISS; Korea Research Institute of Standards and Science)에서 Cf-252에 대하여 교정을 시행하였다[12].

Geant 4(ver. 10.1.1) 시뮬레이션시 QGSP BIC HP 물리 모델을 사용하였으며, GPS General Particle Source) 모듈을 사용하여 Fe 이온입자가 생성되도록 하였고, 각 실험조건에 대하여 각각 10⁶개의 입자를 생성하도록 하였다. Fig. 3은 몬테칼로 시뮬레이션을 위해 코딩된 중이온 가속기연구소의 Fe 이온 조사 장치의 기하학적 조건이다. 가속기에서 가속된 500 MeV/u Fe 이온은 Al 윈도우를 통하여 조사된 이후 1.6 mm Pb 필터와 0.215 mm Ta 필터를 거친 후 약 6 m 거리를 지나 고체비적검출기에 조사된다. 이때 바이너리 필터의 두께를 선택하여 입사 방사선의 LET를 조절한다. 본 연구에서는 바이너리 필터가 없을 때와 30.5 mm의 물 등가 폴리에틸렌 바이너리 필터를 사용하였을 경우에 대하여 몬테칼로 시뮬레이션을 시행하고, 계산된 결과를 CR-39 검출기로 측정된 결과와 비교 평가하였다.

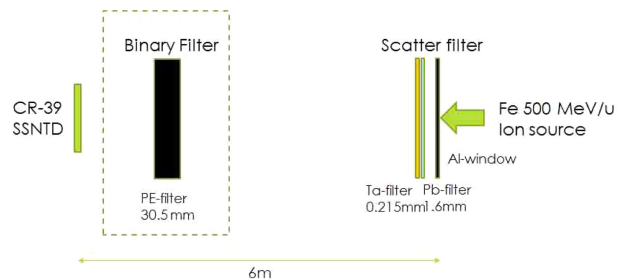


Fig. 3. Geometry for Monte Carlo simulation using GEANT4 (ver. 10.1.1) in HIMAC experiment.

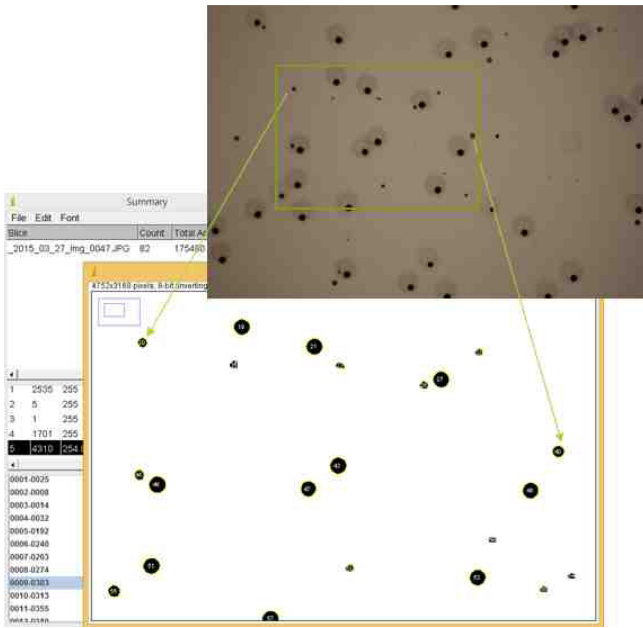


Fig. 4. Analysis of etched tracks on CR-39 surface using Image J (ver. 1.48).

3. 결과 및 고찰

3.1 CR-39 및 몬테칼로 시뮬레이션에서 결정된 선형에너지스펙트럼

Fig. 4는 500 MeV/u Fe 이온을 조사한 후 화학적인 에칭을 거친 다음 확대 촬영된 CR-39 고체비적검출기의 디지털 영상과 이를 Image J로 분석한 것이다. 화학적으로 확대 에칭된 트랙의 크기와 수는 Image J에서 자동적으로 분류하여 계수하였다. LET가 높은 방사선일수록 검출기 표면에 손상을 크게 주게 되므로 촬영된 디지털 영상에서 직경이 큰 트랙으로 검출되며, LET가 낮은 방사선은 작은 직경의 트랙으로 검출된다. 트랙의 크기에 따른 트랙의 수를 측정하여 파고스펙트럼을 결정할 수 있다. Fig. 5는 CR-39 고체비적검출기에 측정된 트랙의 크기와 트랙의 크기별 계수치를 나타낸 파고 스펙트럼이다. 조사된 Fe 이온이 단일 에너지이므로 약 280 keV/um 부근에서 피크를 보이고 있다. 이때 에칭률(F)은 측정된 파고스펙트럼으로부터 Somogy 식으로 결정할 수 있다[13].

$$F = \frac{d^3N}{dAd\Omega dLET} = (2\pi A \cos^2 \delta_{cut})^1 \frac{dN}{dLET} \quad (1)$$

여기서, A는 CR-39 검출기에서의 트랙을 스캔한 면적이며, dN은 검출된 트랙의 수, δ_{cut} 은 형성된 트랙의 파여진 각도로 검출기의 검출효율을 결정해준다. 또한 선량은 결정된 에칭률(F)과 파고스펙트럼으로부터 다음 식으로 결정할 수 있다[13].

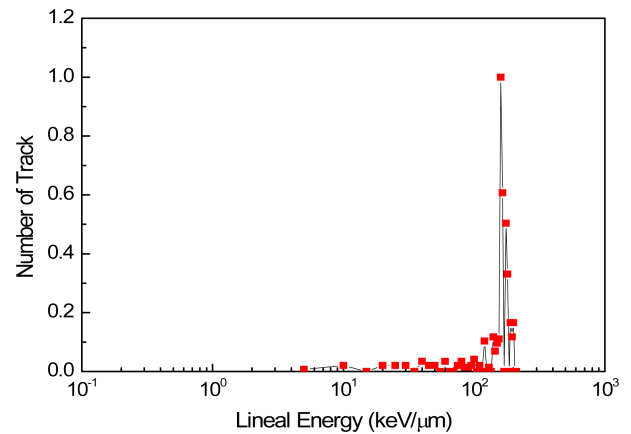


Fig. 5. Pulse height spectrum of 500 MeV/u Fe ions by using CR-39 SSNTD.

$$Dose = 4\pi \times 1.6 \times 10^9 \times LET \times F \quad (2)$$

또한 측정된 파고 스펙트럼으로부터 frequency-mean lineal energy (\bar{y}_F), dose-mean lineal energy (\bar{y}_D) 및 ICRP 103에 근거하여 평균 선질계수 (beam quality factor) Q값을 다음 식으로 결정할 수 있다[14].

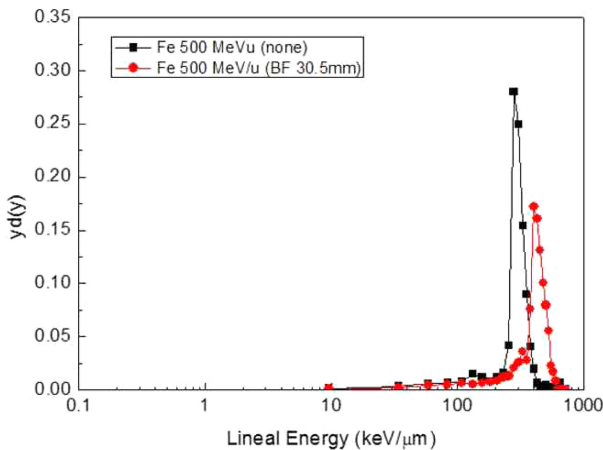
$$\bar{y}_F = \frac{\sum_{i=1}^n y_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (3)$$

$$\bar{y}_D = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 N_i}{\sum_{i=1}^n y_i N_i} \quad (4)$$

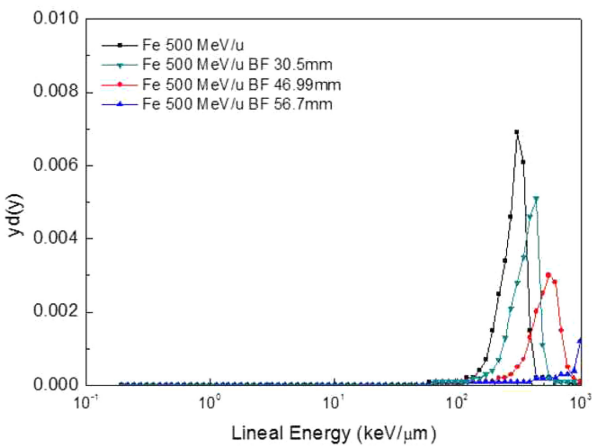
$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q(y_i) N_i}{\sum_{i=1}^n y_i N_i} \quad (5)$$

여기서, y_i 는 i 채널의 선형에너지이며, N_i 는 i 채널의 계수값, Q_i 는 i 채널에 해당되는 방사선의 선질계수 (radiation quality factor)이다.

Fig. 6(a)는 측정된 트랙의 분포로부터 결정된 교정 방사선의 선형에너지 스펙트럼 (lineal energy spectrum)이며, Fig. 6(b)는 바이너리 필터에 따른 선형에너지 스펙트럼을 몬테칼로 시뮬레이션으로 계산한 결과이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 바이너리 필터를 사용하지 않았을 때와 30.5 mm 바이너리 필터를 사용하였을 때 CR-39로 결정된 선형에너지 스펙트럼이 몬테칼로 시뮬레이션 결과와 매우 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 이때 500 MeV/u Fe 이온의 $\bar{y}_D = 283.3$ keV/um, 선질계수 Q는



(a) Measured by CR-39 SSNTD



(b) Determined by Monte Carlo simulation

Fig. 6. Determined lineal energy spectra of 500 MeV/u Fe ions according to binary filters.

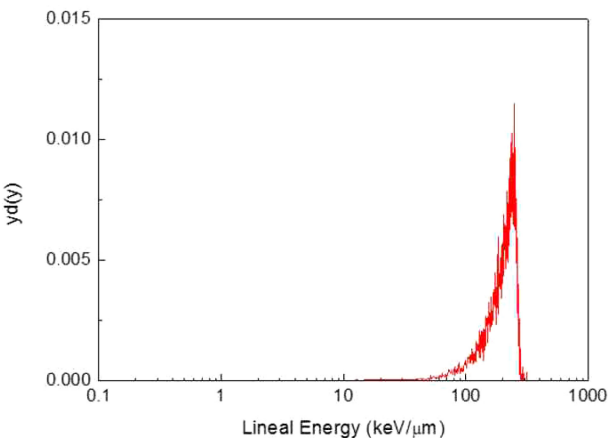


Fig. 7. Lineal energy spectrum of 500 MeV/u Fe ions in HIMAC using TEPC.

16.3 이었으며, 30.5 mm 바이너리 필터를 사용하였을 때 $\bar{y}_D = 325.0$ keV/um, 선질계수 Q는 15.1이었다.

3.2 조직등가비례계수로 측정한 500 MeV/u Fe ion의 선형에너지 스펙트럼

Fig. 7은 조직등가비례계수기로 측정한 500 MeV/u Fe 이온에 대하여 바이너리 필터를 사용하지 않았을 때의 선형에너지 스펙트럼이다. 이 스펙트럼은 Fig. 6(a)에서 CR-39 고체비적검출기로 측정한 선형에너지스펙트럼과 매우 유사한 모양을 보이며, 계산된 dose-mean lineal energy, $\bar{y}_D = 278.2$ keV/um로 CR-39에서 측정된 결과와 유사한 의미 있는 결과를 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 수동형 방사선검출기로 흔히 사용되는 CR-39 고체비적검출기를 활용하여 고 LET 방사선의 등가선량을 평가하기 위하여 500 MeV/u Fe 이온에 대한 CR-39 검출기의 교정을 시행하였다. CR-39의 교정 실험 결과를 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 계산치 및 표준 조직등가비례계수기로 측정한 측정치와 비교한 결과 고LET 방사선 모니터링에서 CR-39 고체비적검출기의 유용성을 확인할 수 있었다. 향후 다양한 고LET 방사선에 대한 교정을 추가한다면 보다 더 복잡한 방사선 혼합장에서의 선량 평가에 충분히 활용할 수 있을 것으로 사려된다.

감사의 글

이 논문은 2014-2015학년도에 청주대학교 보건의료 과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

REFERENCES

- [1] <http://www.icrp.org/publications.asp> (Ann. ICRP 37 (2-4), 2007).
- [2] Lanh, Ngoc-Tu, An, Se-Young, Suh, Sang-Hee and Kim, Jin-Sang, "High Performance of SWIR HgCdTe Photovoltaic Detector Passivated by ZnS", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 13, No. 2, pp. 128-132, 2004.
- [3] J. A. Caffrey and D. M. Hamby, "A review of instruments and methods for dosimetry in space", *Adv. in Space Res.*, Vol. 47, pp. 563-574, 2011.
- [4] D. Zhoua, E. Semonesa, M. Weylanda and E. R. Bentonc, "LET calibration for CR-39 detectors in different oxygen environments", *Rad. Meas.*, Vol. 42, pp. 1499-1506, 2007.
- [5] J. L. Kim, J. W. Ha and Y. C. Yoon, "Energy and Angular Response of CR-39 Neutron Track Detector", *J. Korean Nucl. Soc.*, Vol. 20, No. 2, pp. 71-79, 1988.
- [6] V. Kumar, R. G. Sonkawade and A. S. Dhaliwal, "Optimization of CR-39 as a Neutron Detector", *Indian J. Pure & Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 466-469, 2010.
- [7] J.M.C. Brown, S. Solomon and R.A. Tinker, "Development

- of an energy discriminate CR-39® nuclear track etch dosimeter for Radon-220 gas measurements”, *J. Environ. Rad.*, Vol. 102, Issue 10, pp. 901-905, 2011.
- [8] N.F. Santos, P.J. Iunes, S.R. Paulo, S. Guedes and J.C. Hadler, “CR-39 alpha particle spectrometry for the separation of the radon decay product ^{214}Po from the thoron decay product ^{212}Po ”, *Rad. Meas.*, Vol. 45, Issue 7, pp. 823-826, 2010.
- [9] A. Nagamatsu, K. Murakami, K. Kitajo, K. Shimada, H. Kumagai and H. Tawara, “Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo”, *Rad. Meas.*, Vol. 59, pp. 84–93, 2013.
- [10] <http://imagej.nih.gov/ij/> (retrieved on Oct. 2, 2012).
- [11] <https://geant4.web.cern.ch/geant4/> (retrieved on Dec. 4, 2015).
- [12] U. W. Nam, W. K. Park, J. J. Lee, J. H. Pyo, B. K. Moon, M. K. Moon, C. H. Lim, S. H. Lee and S. H. Kim, “Development and Characterization of Multi-Segmented Tissue Equivalent Proportional Counter for Microdosimetry”, *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 24, No. 2, pp. 101-106, 2015.
- [13] D. Zhou, E. Semones, S. Guetersloh, N. Zapp, M. Weyland and E. R. Benton, “The experimental and simulated LET spectrum and charge spectrum from CR-39 detectors exposed to irons near CRaTER at BNL”, *Rad. Meas.*, Vol. 45, pp. 916-922, 2010.
- [14] David R. Farrar, “Microdosimetric measurements of shielding effects for iron particles at 500 MeV/nucleon incident upon aluminum and polyethylene”, Colorado State University, pp.14-16, 2007.