

Developments of Space Radiation Dosimeter using Commercial Si Radiation Sensor

Jong-kyu Cheon¹, Sunghwan Kim^{2,*}

¹Department of Radiological Science, Sorabol University

²Department of Radiological Science, Cheongju University

Received: June 15, 2023. Revised: June 28, 2023. Accepted: June 30, 2023.

ABSTRACT

Aircrews and passengers are exposed to radiation from cosmic rays and secondary scattered rays generated by reactions with air or aircraft. For aircrews, radiation safety management is based on the exposure dose calculated using a space-weather environment simulation. However, the exposure dose varies depending on solar activity, altitude, flight path, etc., so measuring by route is more suggestive than the calculation. In this study, we developed an instrument to measure the cosmic radiation dose using a general-purpose Si sensor and a multichannel analyzer. The dose calculation applied the algorithm of CRaTER (Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation), a space radiation measuring device of NASA. Energy and dose calibration was performed with Cs-137 662 keV gamma rays at a standard calibration facility, and good dose rate dependence was confirmed in the experimental range. Using the instrument, the dose was directly measured on the international line between Dubai and Incheon in May 2023, and it was similar to the result calculated by KREAM (Korean Radiation Exposure Assessment Model for Aviation Route Dose) within 12%. It was confirmed that the dose increased as the altitude and latitude increased, consistent with the calculation results by KREAM. Some limitations require more verification experiments. However, we confirmed it has sufficient utilization potential as a cost-effective measuring instrument for monitoring exposure dose inside or on personal aircraft.

Keywords: Space Radiation, Dosimeter, High LET, Si Sensor, Equivalent Dose

I. INTRODUCTION

우주방사선은 대부분 양성자선으로 태양 기원 우주선(Solar Energetic Particle, SEP)과 은하 중심에서 기인한 우주선(Galactic Cosmic Ray, GCR)으로 나눌 수 있다^[1,2]. GCR은 상대적으로 높은 에너지 양성자로 선속이 시간에 따라 안정적인 것에 반하여, SEP는 낮은 에너지 영역의 양성자로 태양 플레어와 코로나 방출 등 태양활동에 따라 변동한다^[3]. 우주선은 고 LET (Linear Energy Transfer) 방사선으로 인체에 미치는 생물학적 효과가 크고^[4], 비행 시에는 대기와 지구자기장에 의한 차폐효과가 줄어들기 때문에 항공기 승무원이나 승객의 피폭선량

을 증가시킨다^[5]. 특히 항공기 승무원은 장시간 동안 높은 고도에서 근무하므로 우주방사선과 2차 산란 방사선에 더욱 많이 노출된다. 이에 2013년 이후 국토교통부에서 생활주변방사선 안전관리법에 근거하여 항공기 승무원의 우주방사선 피폭을 규제하고 있다^[6]. 우주방사선 선량평가는 우주 기상 환경을 시뮬레이션으로 계산하는 간접방법과 측정기를 이용한 직접방법이 활용되고 있다^[7,8]. 국내의 경우에는 한국천문연구원과 기상청 국가기상위성센터에서 공동 개발한 KREAM (Korean Radiation Exposure Assessment Model for Aviation Route Dose)을 이용하여 항공기 고도에서 날짜별, 항로별 우주방사선 피폭선량을 확인할 수 있다^[9]. 하지만, 시물

* Corresponding Author: Sunghwan Kim E-mail: kimsh@cju.ac.kr Address: 298, Daesungro Cheongju, Choongcheongbukdo

레이션을 이용한 선량 평가법은 실시간으로 변화하는 태양활동을 반영하는데 제한이 있어서, 정확한 피폭선량 평가를 위해서 방사선 측정기로 실제 비행항로에서 직접 측정하는 것이 바람직하다. 대표적인 측정기로 TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter), Liulin 등 능동적 선량계가 활용되고 있지만^[10], 매우 고가이어서 개인이나 항공기별로 활용하기에 제한이 있다. 일부에서는 열형광선량계, 고체비적 검출기 등 비용이 저렴한 수동선량계를 이용하기도 하지만, 상대적으로 정확도가 매우 낮고 실시간 모니터링이 불가능한 단점이 있다.

본 연구에서는 범용 Si 감마 센서와 범용 다중채널과고분석기(MCA; Multichannel Analyzer)를 이용하여 개인 휴대가 가능한 우주방사선 선량계를 개발하고 국제 항공노선에서 우주방사선 선량을 직접 측정하여 KREAM에서 계산된 결과를 비교, 분석함으로써 기내 또는 개인 선량계로서의 가능성을 평가하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

방사선 센서로 Fig. 1-(a)의 GDK-101 감마 센서(FtLab.co.kr)를 사용하였다. 이 센서는 총 10개의 pin photo-diode로 구성되며, 계수모드에서 동작한다. 이 센서는 측정 가능한 선량률 범위가 0.01 ~ 200 $\mu\text{Sv/h}$ 로 항공기 고도에서 선량평가에 적합한 것으로 판단된다. 비록 GDK-101 센서가 계수 모드로 동작하도록 설계되었지만, 입사 방사선 에너지에 비례하는 신호를 출력하고 있음을 실험적으로 확인하였다. 이는 방사선의 에너지 스펙트럼을 측정할 수 있다는 의미이다. Fig. 1-(b)는 에너지 스펙트럼 측정에 사용된 Rhelectronics사의 범용 다중채널과고분석기이다. 총 1024 채널의 PIC18 (Programmable Interrupt Controller) MCA 모듈과 10 bit ADC (Analog to Digital Convertor)로 구성되어 있다. 동작전압은 5~12 V 이며, 128 × 64 LCD (Liquid Crystal Display)로 실시간 스펙트럼 확인이 가능하다. 측정된 데이터는 마이크로SD 메모리에 저장한 후 컴퓨터에서 방사선량측정 결과를 분석하였다.

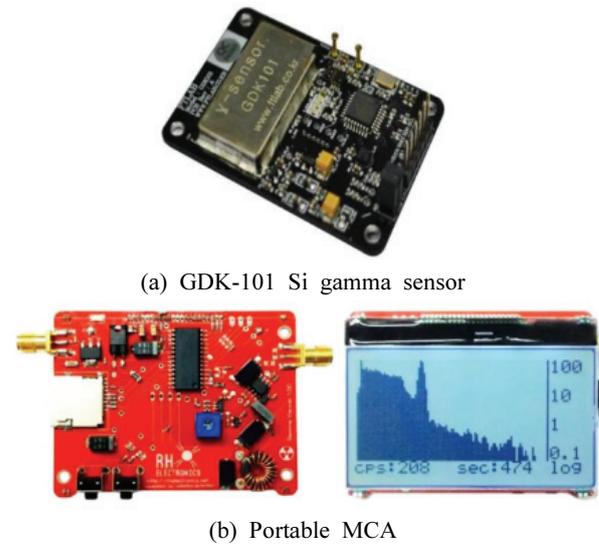


Fig. 1. Pictures of radiation sensor and MCA.

Fig. 2는 측정된 과고 스펙트럼으로부터 등가선량을 결정하는 과정을 나타낸 것이며, 미항공우주국(NASA; National Aeronautics and Space Administration)의 우주방사선 측정기인 CRaTER (Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation) 등가선량 계산 알고리즘을 적용하였다^[11]. Si 센서로 측정된 과고 스펙트럼을 에너지 교정을 통해 Si에 흡수된 선형에너지 스펙트럼으로 변환한다. 이를 Eq. (1)의 Benton 함수를 적용하여 인체 등가(물)의 선형에너지 스펙트럼으로 변환하며^[12]. 흡수선량은 각 채널(i)에 측정된 에너지(E_i)와 해당 채널의 계수값(n_i)을 곱한 값의 합으로 결정할 수 있다. International Commission on Radiological Protection Report 103 (ICRP 103)의 방사선하중계수(radiation weight factor, w_R)를 Eq. (2)와 같이 적용하여 인체에서의 등가선량을 결정하였다^[13].

$$\ln(LET_{H_2O}) = -0.2902 + 1.025 \ln(LET_{Si}) \quad (1)$$

LET: linear energy transfer (keV/ μm)

$$\begin{aligned} w_R &= 1 \quad (LET \leq 10 \text{ keV}/\mu\text{m}) \\ w_R &= 0.32 \times LET - 2.2 \quad (10 < LET \leq 100 \text{ keV}/\mu\text{m}) \\ w_R &= 300 / LET \quad (100 \text{ keV}/\mu\text{m} < LET) \end{aligned} \quad (2)$$

w_R : radiation weighting factor (ICRP 103)

LET: linear energy transfer (keV/ μm)

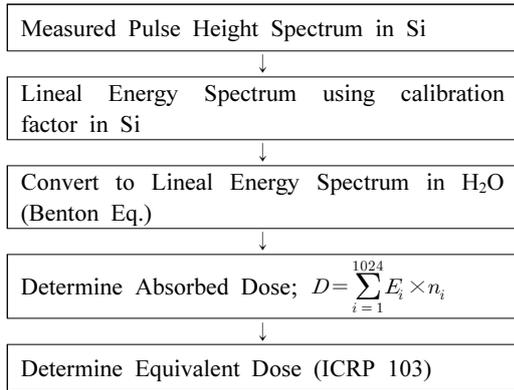


Fig. 2. Process of determine equivalent dose.

III. RESULT AND DISCUSSION

1. 휴대용 우주방사선 검출기 제작

Fig. 3은 GDK-101 센서와 Rhelectronics MCA를 이용하여 제작한 우주방사선 검출기이다. 항공기의 USB(Universal Serial Bus) 전원을 사용하기 위하여 USB-A 포트를 설치하였으며, 측정된 스펙트럼 데이터는 마이크로SD (Secure Digital) 슬롯에 장착된 저장장치에 저장하였다.

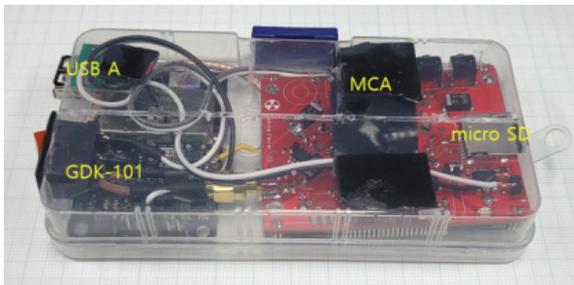


Fig. 3. Pictures of manufactured space dosimeter.

2. 에너지 교정

방사선의 에너지를 측정하기 위하여 Cs-137 662 keV 감마 선원을 사용하여 다중채널과고분석기(MAC)의 채널에 대한 에너지 교정을 시행하였다. GDK-101의 경우 Si 센서의 크기가 작고 원자번호가 낮아서 감마선의 광전피크가 측정되지 않기 때문에 Eq. (3)과 같이 콤프턴 에지를 이용하여 에너지 교정을 시행하였다. Eq. (3)으로 결정한 Cs-137

662 keV 감마선의 콤프턴 에지는 477 keV이다. Fig. 4는 Cs-137 662 keV 감마선을 측정된 파고 스펙트럼으로 콤프턴 에지 채널은 100이었다. 이 결과로부터 에너지 교정정수는 4.77 keV/CH로 결정하였다.

$$E' = E_{\gamma} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2E_{\gamma}}{m_0 c^2}} \right) \quad (3)$$

E' : Compton edge energy (keV)
 E_{γ} : incident γ energy (keV)
 m_0 : rest mass of electron (511 keV)
 c : velocity of light (3×10^8 m/s)

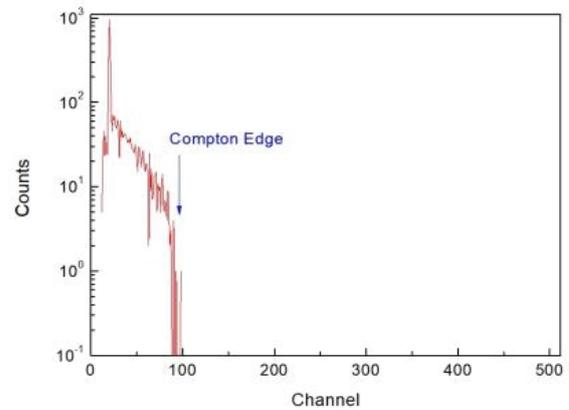


Fig. 4. Cs-137 662 keV γ -ray pulse height spectrum measured by GDK-101 Si sensor.

3. 선량 교정

제작된 선량계는 (주)코라솔 Cs-137 표준 감마선 조사 시설에서 선량 교정 인자를 결정하고 센서의 선량률 의존성을 평가하였다. Fig. 5는 감마선의 선량률을 5, 10, 20 및 50 μ Sv/h로 변화하면서 측정된 선량값이다. R^2 값이 0.99983으로 실험 범위에서 조사 선량 대비 측정값이 매우 우수한 선형성을 보였다.

4. 항공기 고도 우주방사선 측정 실험

Fig. 6은 제작된 우주방사선 선량계의 항공기 고도에서 측정된 선형에너지 스펙트럼이다. 데이터 측정시간은 10분이었으며, 지상에서는 대부분 LET가 낮은 감마선이어서 낮은 채널에서 측정되었지만, 비행 고도에서는 고 LET 방사선이 측정되며,

높은 채널에서 계수값이 증가함을 확인할 수 있다.

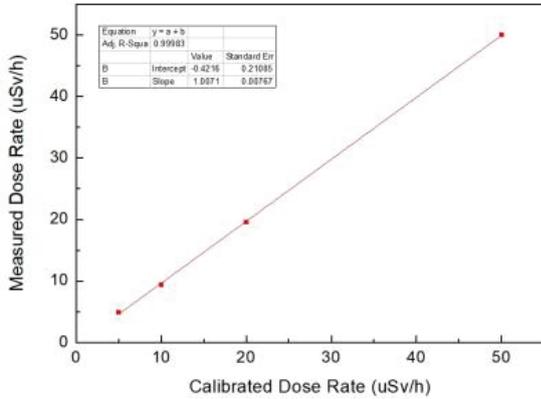


Fig. 5. Linearity between irradiation and measurement dose rate of GDK-101 sensor for Cs-137 662 keV γ -ray in Korasol Co.

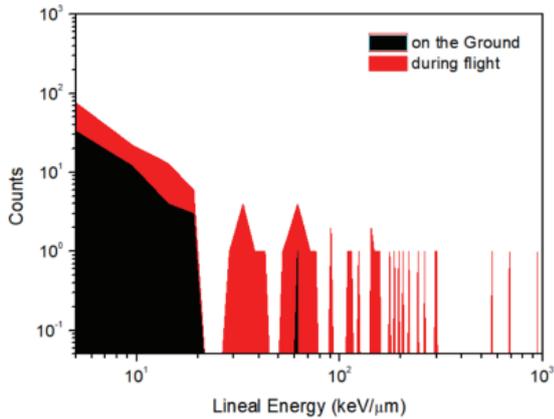


Fig. 6. Lineal energy spectra measured by a GDK-101 sensor and Rhelectronics MCA on the ground(black) and during flight(red) from Dubai to Incheon.

Fig. 7은 제작된 우주방사선 선량계의 항공기 고도에서 활용 가능성을 평가하기 위하여 실제 탑승한 국제선 항공기 내에서 측정된 결과와 KREAM 계산 결과를 비교한 것이다. Fig. 7-(a)는 2023년 5월 13일에서 14일, 두바이에서 인천 공항까지 비행항로를 보여주고 있다. 총 비행시간은 7시간 56분, 비행거리는 7,228 km 였으며, 최대 고도는 12.6 km 이었다.

Fig. 7-(b)는 KREAM에서 계산된 동일 시간, 동일 항로에서의 고도에 따른 선량률 변화와 총 누적선량을 나타낸 것이다. Fig. 7-(c)는 제작된 우주방사선 선량계로 측정된 선량값(빨간색 점)과 KREAM

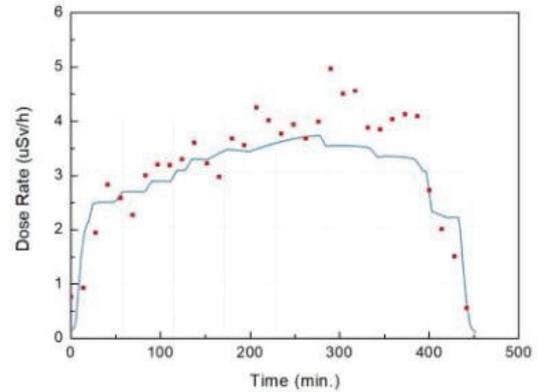
에서 계산된 선량값(파란색 실선)을 비교한 것이다. KREAM에서 계산된 두바이-인천 간 총 누적선량은 24.4 μ Sv이었으며, 제작된 선량계로 측정된 선량은 27.5 μ Sv로 계산 결과 대비 약 12% 정도 높게 나타났다. 우주방사선 선량은 고도뿐만 아니라 지구자기장의 영향으로 위도가 높아질수록 증가하는 것으로 알려져 있다^[14].



(a) Flight path



(b) Calculated total equivalent dose by KREAM



(c) Measured and calculated dose rate

Fig. 7. Measured equivalent dose during flight from Dubai to Incheon at May 13, 2023. (a) flight path from Dubai to Incheon, (b) total dose and dose rate by KREAM, and (c) comparison between calculation by KREAM and measurement by GDK-101 of equivalent dose during flight.

본 논문에서는 항공기 고도에 대한 방사선량 평가가 25°에서 37°의 저위도 영역에서 1회 측정에 그쳤지만, 측정된 선량이 시뮬레이션 결과와 10% 전후의 차이를 나타내었으며, Fig. 7-(c)에서 보는 바와 같이 두바이에서 인천으로 위도가 높아질수록 측정

결과가 계산 결과와 같이 증가함을 확인하였다.

IV. CONCLUSION

우주방사선은 지상과 달리 양성자와 2차 산란선의 고 LET 방사선이 주로 존재하기 때문에 인체에 생물학적으로 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 범용 Si 센서와 다중채널과고분석기(MCA)를 이용하여 우주방사선 선량계를 개발하였다. Cs-137 662 keV 감마선으로 에너지 및 선량 교정을 시행하였으며, 실제 두바이 인천 구간의 국제 항공노선에 측정된 결과 KREAM의 계산값과 비슷한 측정 결과를 확인하였다. 범용 MCA의 특성상 데이터 저장 시간이 길고, Si 센서의 크기가 작아서 상세한 선량률 측정에 어려움이 있었고, 비행 실험이 1회 측정에 제한되었다. 하지만, 충분한 우주방사선 선량계로서의 기내 또는 개인 선량모니터링용으로 가성비 높은 활용 가능성을 보였으며, 추가 실증적 비행 실험을 통해 우주방사선 선량계로서 검증하고자 한다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (NRF-2021R1F1A1059687).

Reference

- [1] L. Rossi, M. Sorbi, P. Spillantini, "A Superconducting Magnetic Lens for Solar Rays Protection in Manned Interplanetary Missions", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 1696-1699, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1109/TASC.2004.831041>
- [2] H. J. Kim, B. U. Chang, J. I. Byun, M. H. Song, J. H. Kim, "Preliminary Study on Applicability of Accumulate Personal Neutron Dosimeter for Cosmic-ray Exposure of Aviators", Journal of Radiation Protection and Research, Vol. 38, No. 1, pp. 44-51, 2013.
<https://doi.org/10.14407/jrp.2013.38.1.044>
- [3] L. I. Dorman, L. A. Pustil'nik, A. Sternlieb et al., "Monitoring and forecasting of great solar proton events using the neutron monitor network in real time", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 4, pp. 1478-1488, 2004.
<http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2004.831738>
- [4] R. J. Jang, "Literature Review on Cosmic Radiation Exposure to Air Craft Cabin Crew", Journal of Radiological Science and Technology Vol. 41, No. 6 pp. 643-649, 2018.
<https://doi.org/10.17946/JRST.2018.41.6.643>
- [5] L. Sihver, S. Kodaira, I. Ambrožová, Y. Uchihori, V. Shurshakov, "Radiation environment onboard spacecraft at LEO and in deep space", 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, pp. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500765>
- [6] J. S. Goo, "The Study on the Safety Management of Radioactive Rays around Living Environment", Environmental Law Review, Vol. 36, No. 3, pp. 1-32, 2014.
- [7] J. A. Hong, J. W. Kwon, J. H. Jung, J. K. Lee, "Calculation of Route Doses for Korean-based International Airline Routes using CARI-6 and Estimation of Aircrew Exposure", Journal of radiation protection and research, Vol. 29, No. 2, pp. 141-150, 2004.
- [8] W. H. Yi, J. Y. Kim, K. I. Jang, "Radiation Dose Measurement and Model Comparison at the Flight Level", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 26, No. 2, pp. 91-97, 2018.
<https://doi.org/10.12985/ksaa.2018.26.2.091>
- [9] J. A. Hwang, J. Y. Kwak, G. B. Jo, U. W. Nam, "Validation of KREAM Based on In-Situ Measurements of Aviation Radiation in Commercial Flights", Journal of astronomy and space sciences, Vol. 37, No. 4, pp. 229-236, 2020.
<https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.4.229>
- [10] T. P. Dachev, J. V. Semkova, B. T. Tomov et. al., "Overview of the Liulin type instruments for space radiation measurement and their scientific results", Life Sciences in Space Research, Vol. 4, pp. 92-114, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.01.005>
- [11] H. E. Spence, A. W. Case, M. J. Golightly et. al., "CRaTER: The Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation Experiment on the Lunar

Reconnaissance Orbiter Mission", *Space Science Reviews*, Vol. 150, pp. 243-284, 2010.
<https://doi.org/10.1007/s11214-009-9584-8>

- [12] E. R. Benton, E. V. Benton, A. L. Frank, "Conversion between different forms of LET", *Radiation Measurements*, Vol. 45, No. 8, pp. 957-959, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.05.008>
- [13] W. Rühm, et. al., "*The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*", ICRP Publication 103, 2007.
- [14] J. A. Hwang, J. J. Lee, K. S. Cho, H. S. Choi, S. R. Rho, I. H. Cho, "Space Radiation Measurement on the Polar Route onboard the Korean Commercial Flights", *Journal of Astronomy and Space Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 43-54, 2010.
<https://doi.org/10.5140/JASS.2010.27.1.043>

범용 실리콘 방사선 센서를 이용한 우주방사선 선량계 개발

천종규¹, 김성환^{2,*}

¹서라벌대학교 방사선학과

²청주대학교 방사선학과

요 약

비행시 승무원이나 승객은 우주방사선과 공기나 비행기 기체와 반응하여 발생한 2차 산란선 등에 의해 피폭을 받게 된다. 항공기 승무원의 경우 우주기상 환경 시뮬레이션을 이용하여 계산된 피폭선량으로 방사선 안전관리를 적용받고 있다. 하지만, 태양활동이나 고도, 비행경로 등에 따라 피폭선량이 가변적이어서 계산법보다는 항로별 측정하는 것이 권고되고 있다. 본 연구에서는 범용 Si 센서와 다중채널과고분석기를 이용하여 우주방사선 선량을 측정할 수 있는 선량계를 개발하였다. 선량계산은 미우주항공국의 우주방사선 측정장비인 CRaTER(Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation)의 알고리즘을 적용하였다. 표준 교정시설에서 Cs-137 662 keV 감마선으로 에너지 및 선량교정을 시행하였으며, 실험 범위에서 선량률 의존성이 없음을 확인하였다. 제작된 선량계를 이용하여 2023년 5월 두바이 인천 구간의 국제선에서 직접 선량을 측정한 결과 국내 우주방사선 선량평가코드(KREAM; Korean Radiation Exposure Assessment Model for Aviation Route Dose)로 계산된 결과와 12% 이내로 비슷하게 나타났으며, 고도와 위도가 높아짐에 따라 계산 결과와 동일하게 선량이 증가하는 것을 확인하였다. 좀 더 많은 실증적 검증 실험이 요구되는 제한점은 있지만, 항공기 내 또는 개인 피폭선량 모니터링에 가성비가 우수한 선량계로 충분한 활용 가능성을 확인하였다.

중심단어: 우주방사선, 선량계, 고 선에너지전이, 실리콘 센서, 등가선량

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	천종규	서라벌대학교 방사선학과	조교수
(교신저자)	김성환	청주대학교 방사선학과	교수