

전자빔가속기를 이용한 펄스감마선 출력특성 분석용 빔프로파일링 장치개발

황영관* · 이남호

The Development of Beam Profiling System for the Analysis of Pulsed Gamma-ray Using the Electron Accelerator

Young-Gwan Hwang* · Nam-Ho Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

요 약

전 세계적으로 비핵화를 추구하고 있으나 북한의 계속되는 핵실험 등으로 핵폭에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 핵 폭발 또는 우주환경에서의 발생하는 펄스형 감마선은 매우 짧은 시간동안 고에너지를 전달하기에 전자소자에 큰 피해를 줄 수 있다. 이러한 전자소자의 피해정도를 확인하기 위한 연구를 수행하려면 핵폭 또는 우주환경에서 발생할 수 있는 펄스형 감마선 조사시설이 필요하다. 본 논문에서는 펄스형 감마선 탐지 장치를 개발하고, 감마선 변환장치를 통해 펄스형 감마선을 생성한 후 그 출력을 분석하였다. 핵폭과 유사한 조건을 갖추기 위하여 포항가속기 연구시설의 전자빔가속장치를 이용하여 출력을 실험하였고, 그 결과 감마선 변환장치와 전자빔을 통해 생성한 펄스형 감마선의 방출과 그 출력특성을 확인하였다. 본 논문의 결과는 펄스감마선을 이용해야 하는 연구의 안정성과 정확성을 향상시키는데 기여할 것이다.

ABSTRACT

Recently, most countries in the world have pursued a denuclearization. So it has been of interest to increase to Nuclear weapon in such as North Korea's continued nuclear test. Pulsed gamma rays produced in the nuclear explosion and the space environment can give the big damage to the electronic device in a very short period of time. To confirm the extent of damage of these electronic devices, pulsed gamma irradiation facility that can occur in nuclear weapon or space environment are required. In this paper, we implemented the pulsed gamma-ray detection module and analyzed output of the irradiation test. We have experimented using an electron beam accelerator research facilities in Pohang Accelerator similar conditions to equip and Nuclear weapon. As a result, we confirmed that the pulsed gamma rays emitted by the gamma radiation and electron beam conversion device. The results of this paper will contribute to improve the reliability and accuracy of studies for utilizing pulsed gamma rays.

키워드 : 펄스형 감마선, 즉발 감마선, 전자빔 가속기, 감마선 프로파일링

Key word : Pulsed Gamma-ray, Prompt Gamma-ray, Electron Linear Accelerator, Gamma-ray Profiling

Received 30 September 2016, Revised 06 October 2016, Accepted 12 October 2016

* Corresponding Author Young-Gwan Hwang(E-mail:yghwang@kaeri.re.kr, Tel:+82-42-868-2245)
Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2016.20.12.2410>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

전 세계적으로 핵무기에 대한 제재에도 불구하고 핵무기를 보유하고, 발사체인 탄도미사일 등에 대한 개발로 북한의 핵에 대한 관심이 증가하고 있다. 선진국에서는 핵 무기에 대한 방호시스템을 이미 갖추었지만 국내에서는 핵폭발에 의한 영향에 대한 연구가 이제 시작단계에 있다. 핵무기가 폭발하거나, 이에 준하는 에너지를 갖는 우주방사선의 경우 동위원소와 같이 연속적으로 방출되는 방사선과는 달리 매우 짧은 순간 고에너지, 고선량의 펄스감마선 (즉발감마선 : Prompt gamma-ray)를 발생시킨다. 이처럼 일시적으로 발생하는 펄스감마선은 전자소자에 과도선량효과를 발생시켜 전자장비의 기능을 상실시키게 된다[1-7].

선진국에서의 핵무기 방어에는 다양한 방법이 있지만 전자부품에 대한 핵무기 방어에서는 즉발펄스감마선에 대한 방호가 필요하다. 전자부품을 펄스감마선으로부터 보호하기 위해서는 펄스감마선을 탐지하여 회로를 보호하기 위한 방법 등이 적용되고 있다.

이와 관련된 연구를 수행하기 위해서는 핵폭을 모사한 시험시설을 구축해야 하며 이에 적합한 국내 시설로는 포항가속기 시설의 선형 전자빔 가속기가 가장 적합하다. 선형 가속기를 이용하여 텅스텐 타겟을 통해 펄스감마선을 발생시킬 수 있으며 이를 활용하여 핵폭에 대한 모사실험이 가능하다. 그러나 텅스텐 타겟을 통해 방출되는 빔이 정량, 정형화 되어 있지 않기 때문에 안정적인 핵폭 모사 실험을 위해서는 펄스감마선의 출력빔에 대한 프로파일링이 필요하다.

본 논문에서는 선형 전자빔 가속기에서 텅스텐 변환체를 통해 변환된 펄스감마선의 출력특성을 분석하기 위하여 빔 프로파일링 장치를 개발하였다. 또한 펄스감마선을 발생시켜 출력되는 빔의 특성을 확인하였고 이를 통해 핵폭모사를 위한 선형 전자빔 가속기의 빔 특성을 분석하였다.

II. 펄스감마선 및 전자빔가속장치

고선량의 펄스감마선발생을 위해서는 고출력의 전자빔 가속장치를 이용하여 텅스텐 타겟을 통한 감마선 변환이 필요하다. 전자빔을 방출하기 위한 전자빔 가속

장치는 포항가속기연구소(PAL)의 Test LINAC 시설을 이용하였다. Test LINAC 시설은 60MeV의 에너지로 약 200mA의 빔전류 출력이 가능한 시설로서 안정적인 출력을 발생시킬 수 있는 시설이다. 그림 1은 Test LINAC의 내부구조를 나타내며 표 1은 전자빔가속기의 주요사양을 나타낸다.

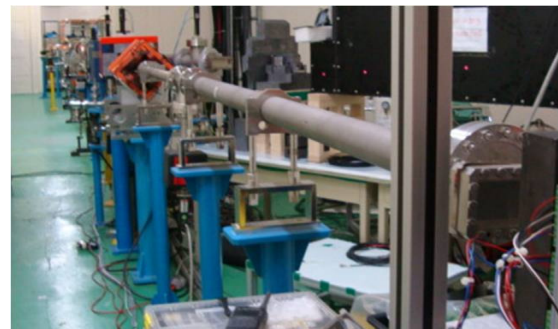


Fig. 1 Test LINAC Facility

Table. 1 Test LINAC facility specification

Specification	
Beam Voltage	60MeV
Beam Current	200mA
Beam Energy	14 Joule
Pulse width	2us

전자빔 가속기를 통해 최적의 변환효율을 갖는 감마선 변환장치를 제작하기 위해서는 사용하는 전자빔의 조사조건과 표적(텅스텐)의 매질 및 두께에 따른 제동복사에 의한 방출에너지 스펙트럼에 대한 분석이 필요하다.

Table. 2 Simulation results for Doserate with the variation of tungsten thickness

Back location Tungsten thickness	Target irradiation Dose rate	Target irradiation Dose
1.5mm	8.92×107rad(si)/sec	178rad
3.0mm	2.63×108rad(si)/sec	526rad
4.5mm	4.28×108rad(si)/sec	856rad
6.0mm	5.75×108rad(si)/sec	1,150rad
7.5mm	5.02×108rad(si)/sec	1,003rad

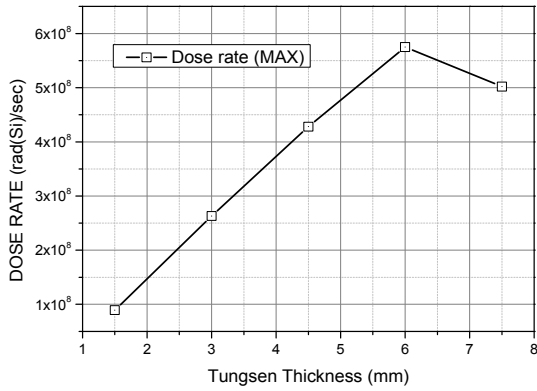


Fig. 2 The variation of maximum gamma-ray dose rate according to the thickness of tungsten



Fig. 3 6mm Tungsten target

전산모사코드를 이용하여 텅스텐의 두께에 따라 변환된 감마선의 총 누적선량 및 선량률을 분석한 결과는 표 2에 나타내었다. 그림 2의 결과는 텅스텐의 두께에 따른 최대 감마선 변환 선량율을 나타낸 결과이며, Test LINAC에서 전자빔을 펄스감마선으로 변환하기 위해 6mm로 제작된 텅스텐 타겟은 그림 3에 나타내었다.

III. 펄스감마선측정용 Pin Diode

감마선을 탐지하기 위해 일반적으로 반도체기반의 소자를 사용한다. 상용센서의 경우 높은 선량률로 펄스 감마선을 조사할 경우 내부에서 발생하는 광 전류가 포화되어 고선량에 대한 탐지가 불가능 하다. 감마선 탐지를 위한 Pin Diode를 설계 제작 하였다[8-9].



Fig. 4 Pin diode for gamma-ray detection

펄스감마선 측정용 Pin Diode의 구조는 1.2mm × 1.0mm × 1.0mm의 크기를 갖으며 그림 4와 같은 형태로 제작 하였다. Pin Diode의 설계조건을 이용하여 센서와 펄스감마선 선량률 변화에 따른 광전류 변화에 대해서 전산모사를 통해 획득한 결과를 그림 5과 같이 나타내었다. 이를 통해 고선량 펄스감마선 신호 측정에 적합함을 확인하였다.

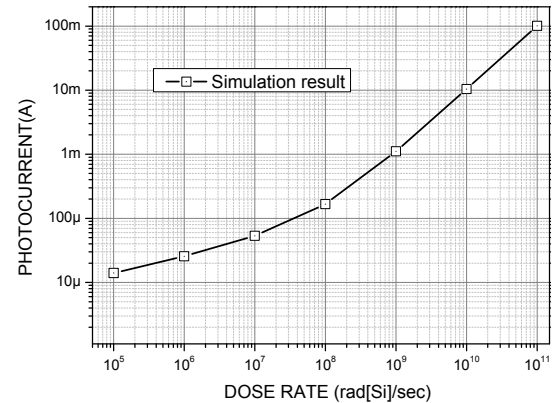


Fig. 5 The simulation result for PIN Diode and Pulsed radiation dose rate

IV. Beam Profiling 신호측정 장치

포항가속기 시설의 선형 전자빔의 빔을 분석하기 위해서 Beam Profile을 위한 신호측정 장치를 제작하였다. 측정장치는 크게 3가지로 구분한다. 먼저 전자빔을 직접 센싱하는 센서부, 그리고 센서부의 신호를 획득하고 처리 하기 위한 멀티채널 신호측정부 그리고 위치를 제어하며 신호를 측정하기 위한 모션제어 및 시스템 운

용부로 나뉜다.

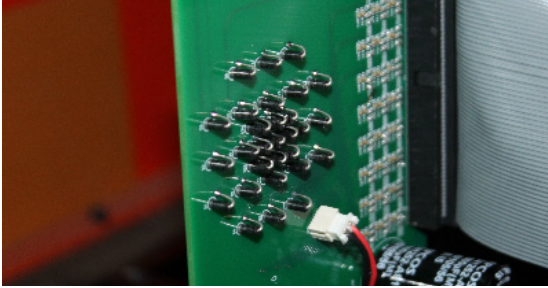


Fig. 6 2-Dimension array pin diode sensor

먼저 전자빔 가속기를 통해 방출된 전자빔은 텅스텐을 통해 감마선을 방출하게되는데, 변환된 감마선의 분포의 변화를 측정하기 위해서는 검출 센서를 이용하여 다양한 위치에서의 신호측정이 필요하다. 그림 6은 Pin Diode 29개를 이용하여 2차원 배열로 구성된 센서보드를 나타낸다.

그림 7은 최대 32채널의 Pin Diode의 신호를 동시에 측정할 수 있도록 구현한 Beam Profiling 모듈을 나타낸 것이다. 각각의 채널은 센서부와 케이블에 의해 일대일로 연결되며 임피던스를 맞추기 위한 회로를 구성하였다. 이후 저잡음의 증폭회로를 통해 센서의 신호를 증폭시키며 최대전압을 탐지하기 위한 회로를 구성하고 이 신호를 ADC(Analog Digital Converter)를 통해 변환하여 신호를 측정하였다. 펄스감마선의 펄스는 2us 이하의 펄스폭을 갖기 때문에 32개 채널의 신호를 동시에 측정할 수 있도록 회로를 구성하였다.

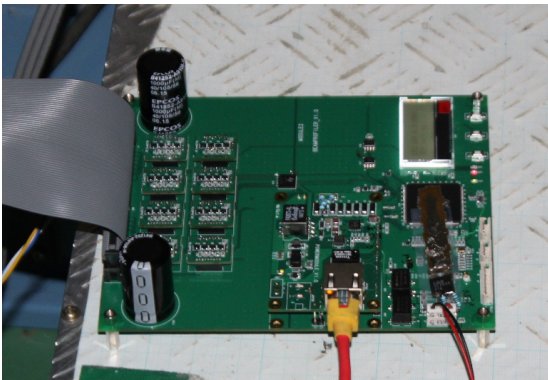


Fig. 7 Multi channel signal processing module

마지막으로 신호측정 장치를 운용하며 센서보드를 부착한 DUT의 위치 제어를 위해 XYZ 모션 스테이지를 두어 위치제어를 가변할 수 있도록 구성하였다.

그림 8은 센서부의 Pin Diode를 통해 획득한 신호를 처리하기 위한 신호측정 모듈의 블록다이어그램을 나타낸다. 탐지센서의 최대 Peak 전압은 60V이며 각각의 센서에서 최대 전압을 측정할 수 있도록 모든 센서에 Peak Hold 회로를 두었고 이 값을 읽을 수 있도록 ADC(Analog Digital Converter)를 사용하였다. 측정된 신호는 50m 떨어진 원격제어장치실로 전송하기 위해 Ethernet 통신을 사용하여 전송하도록 구현하였다.

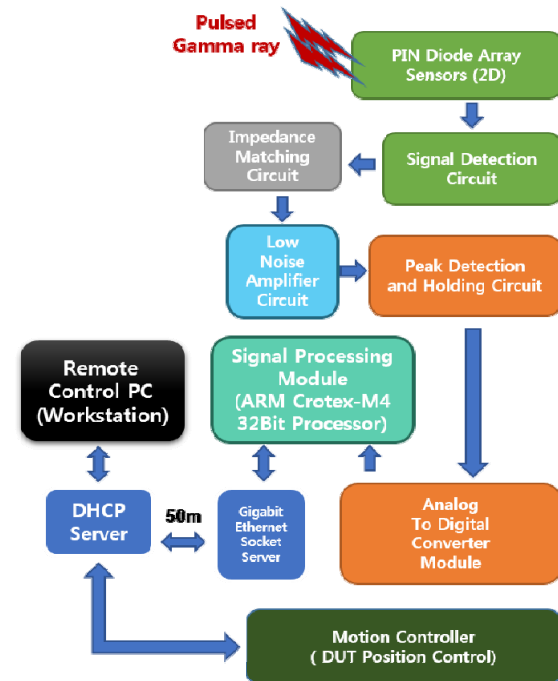


Fig. 8 The blockdiagram for beam profiling module

V. 펄스감마선 조사시험 및 분포분석

전자빔 가속기를 이용한 펄스감마선의 출력 특성을 확인하기 위해 그림 9와 같이 전자빔 조사구 앞에 텅스텐 변환체, 기준이 되는 Pin Diode, 2차원 배열된 Pin diode Array 센서보드 그리고 센서보드를 이동시키기 위한 DUT Motion Stage를 구성하였다.

전자빔 출력포트에서 텅스텐 타겟까지의 거리는 약 10cm로 설정하였고, 직경 4cm인 텅스텐 타겟을 설치하였다. 전자빔은 2 μ s의 펄스폭을 갖는 60MeV, 200mA로 조사하였다.

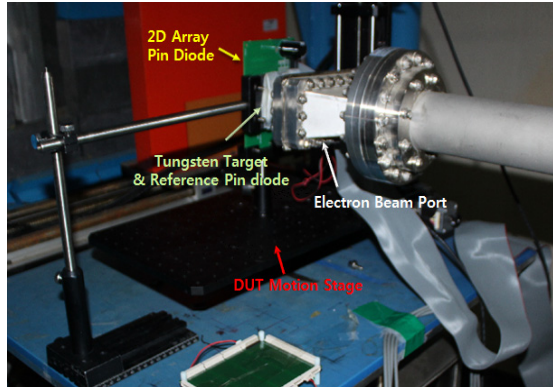


Fig. 9 Test setup for beam profiling at LINAC

전자빔 가속기의 경우 펄스형태의 전자빔 조사시 전자빔의 출력이 균일하게 조사되지 않고 매회 조사할 때마다 출력의 차이가 발생한다. 그러나 동일 조건의 빔 출력에 대하여 공간상의 분포를 측정하기 위해서는 동일한 크기의 전자빔에 대한 Beam Profing을 해야 하므로 같은 세기의 전자빔 출력을 기준으로 데이터를 비교해야 한다. 이를 위해서 텅스텐 타겟을 기준으로 고정된 위치에 감마선량 값을 측정하는 기준센서(Ref. Pin Diode)를 설치하고 그 값을 측정하였다.

텅스텐 타겟에 조사하는 전자빔의 크기는 직경이 약 1cm로 설정하였고, 텅스텐의 크기는 직경 4cm의 원형이며, 2차원 센서 배열은 4cm \times 4cm의 영역을 탐지할 수 있도록 구성하였다. 펄스감바선의 출력분포 측정은 2차원(x, y) 센서보드를 통해 신호를 측정한 후 DUT Motion stage를 통해 z축에 해당하는 조사빔으로부터 멀어지도록 이동시키며 센서의 값을 측정하였다. 펄스빔위 출력 형태를 확인하기 위하여 센서 보드는 텅스텐으로부터 1cm부터 최대 20cm 까지 이동하며 데이터를 측정하였다. 센서 보드는 앞서 제작한 Beam Profiling 모듈과 연결하도록 구성하였고, Beam Profiling 모듈의 측정 데이터는 Ethernet 케이블을 통해 제어실의 PC로 전송된다.

그림 10은 텅스텐과 가장 가까운 1cm의 위치에서 2

차원 센서보드를 통해 측정된 개별 센서 데이터를 이용하여 해당하는 위치별 데이터를 도식화 한 결과이다. 2차원 배열의 중심점을 각각 X축과 Y축의 원점으로 설정하고 X, Y축에 대해 ± 2 cm의 영역을 도식화하였다.

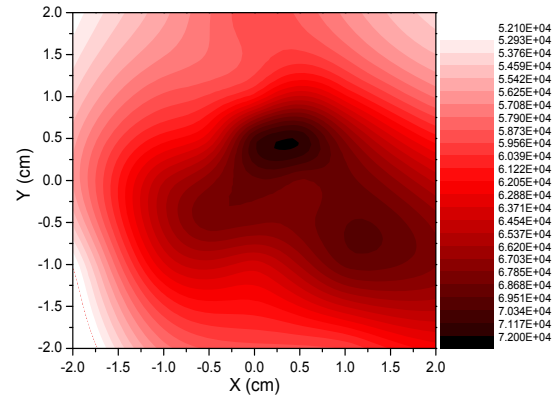


Fig. 10 Beam profiling results : 1cm @ X, Y axis

그림 10의 탐지 결과를 볼 때 조사된 빔은 중심에서 조금 벗어나지만 X, Y축에서 각각 0.5cm의 중심위치에서 가장 센 72V의 전압이 탐지 되었으며 주변으로 퍼지는 결과를 확인하였다.

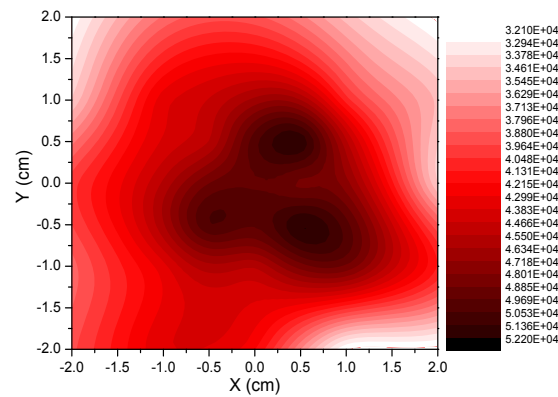


Fig. 11 Beam profiling results : 20cm @ X, Y axis

그림 11은 20cm 거리에서의 측정된 결과를 나타낸다. 측정 결과에서 최대값은 52V를 나타내며 중심부의 위치는 입사시 최대값을 나타내는 위치와 동일함을 알

수 있고, 넓은 영역으로 분산된 전압값이 측정됨으로서 멀어질수록 Beam이 퍼지는 경향을 알 수 있다.

그림 12는 펄스감마선을 Z, Y축에 대하여 도식화 한 결과이다. 가로축을 Z축 방향인 텅스텐 타겟으로부터 멀어지는 정도로 나타내고, X축의 0.5cm 지점에 대하여 Y축의 변화를 나타내었다.

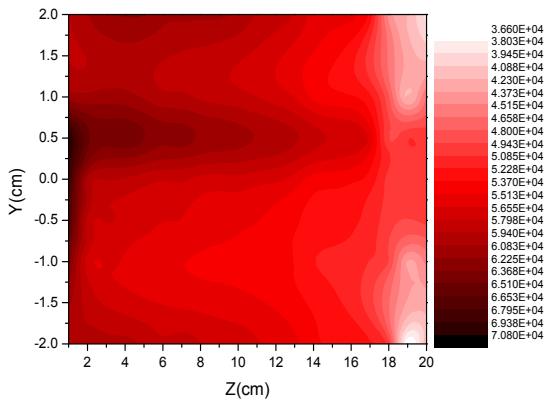


Fig. 12 Beam profiling results : @ X=0.5, Z, Y axis

또한 그림 13은 X축과 Y축의 중심점에 대하여 Z축 방향으로 멀어질 때 측정된 데이터를 나타낸 것이다. 측정 결과에서 볼 수 있듯이 조사된 감마선은 공간상의 한 위치를 통과하며 선량의 세기가 감소하고, 직진성을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 거리가 멀어질수록 빔이 중심부에서 퍼지며 세기가 감소함을 알 수 있다.

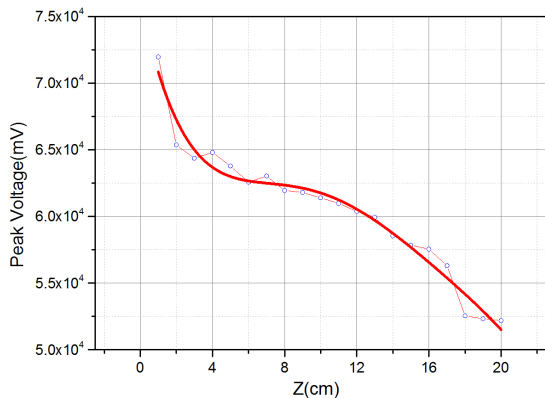


Fig. 13 Beam profiling Results : @ X, Y = 0.5cm

VI. 결론

본 논문에서는 국내 유일한 펄스감마선 조사시험이 가능한 포항가속기시설의 전자빔 가속장치를 이용하여 펄스감마선을 발생할 때 방출되는 펄스방사선의 분포를 측정하기 위한 Beam Profiling 시스템을 개발하고 측정결과를 분석하였다. 이를 위해 전자빔 가속기를 통해 최대 선량 발생이 가능한 텅스텐 타겟을 제작하고, 펄스감마선을 탐지하기 위한 검출센서와 펄스감마선의 출력형태를 탐지하기 위한 센서보드 그리고 멀티채널 신호측정 모듈을 개발하였다.

펄스감마선의 출력형태를 탐지하기 위해 개발된 장치의 성능확인을 위해 펄스감마선 조사시험을 진행하였고, 개발된 탐지장치를 통해 시험한 결과 텅스텐 변환체를 통해 변환된 감마선은 편향되지 않고 직진성을 갖는 출력형태를 나타내었으며, 텅스텐 타겟에서 멀어짐에 따라 감마선의 분포가 분산되는 결과를 확인하였다.

출력되는 감마선의 세기를 측정한 결과 10cm위치에서 최대선량을 기준으로 약 15% 감소하였으며, 20cm 위치에서 27% 감소하는 결과를 얻었다. 분석된 결과를 볼 때 포항가속기시설의 선형가속기를 통한 펄스감마선의 Beam 품질은 고선량률의 펄스감마선 조사시험을 하기에 적합함을 알 수 있었으며, 또한 펄스감마선 조사시험 시 시험대상이되는 대상체에 조사해야할 기준값 설정과 조사위치 선정을 위한 중요한 자료로 활용될 것으로 판단된다.

본 논문의 결과는 향후 핵폭모사와 같은 펄스감마선 실험의 안정성 및 정확성을 향상시키는데 기여할 것이라 본다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by the Core Technology R&D program through the Defense Industry Technology Center

REFERENCES

- [1] J. S. An, "Effects of Nuclear Explosion," Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, Technical Report TR044, 2010.
- [2] S. Glasstone, and Philip J. Dolan, *The Effects of Nuclear Weapons*, 3th ed. Washington, D. C., United States Department of Defence and the Energy Research AND Development Administration, 1977.
- [3] G. C. Messenger, "Transient Radiation Effects on Electronics," *IEEE Transactions Nuclear Science*, vol. 33, no. 5, pp. 1125, Oct.1986.
- [4] S. H. Jeong, N. H. Lee, M. S. Lee and S. I. Cho, "A Study of CMOS Device Latch-up Model with Transient Radiation," *The Transactions of The Korean Institute Electrical Engineers*, vol. 63, no. 3, pp. 422-426, Mar. 2012.
- [5] S. C. Oh, N. H. Lee and H. H. Lee, "The study of transient radiation effects on commercial electronic devices," *The Transactions of The Korean Institute Electrical Engineers*, vol. 61, no.10, pp.1448-1453, Oct. 2012.
- [6] N. H. Lee, "Implementation of the Radiation Protection Module for Electronic Equipment from Pulsed Radiation and Its Function Tests," *The Transactions of The Korean Institute Electrical Engineers*, vol. 62, no.10, pp.1421-1424, Oct. 2013.
- [7] L. W. Ricketts, *Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment*, Malabar, Florida, Robert E. Krieger Publishing Company, 1986.
- [8] E. Fretwurst, F. Honniger, G. Kramberger, G. Lindstrom, I. Pintilie and R. Roder, "Radiation damage studies on MCz and standard and oxygen enriched epitaxial silicon device" *Nuclear Instruments and Methods, A*, 583, pp, 58-63, Aug. 2007.
- [9] N. H. Lee, "A Parametric Study of Pulsed Gamma-ray Detectors Based on Si Epi-Wafer," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no.7, pp.1777-1783, Jul. 2014.



황영관(Young-Gwan Hwang)

2006년 수원대학교 전자공학과 학사 졸업,
2008년 수원대학교 전자공학과 석사 졸업,
2014년 충남대학교 정보통신공학과 박사 졸업,
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 연구원
※관심분야 : 방사선 센서, 영상처리, 방사선 카메라



이남호(Nam-Ho Lee)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업,
1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업,
2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업,
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 책임연구원
※관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템