

# Analysis of Proton Nuclear Reaction-Generated Nuclides for Different Proton Energy

Samyol Lee

Department of Radiological Science, Dongseo University  
Center for Radiological Environment & Health Science, Dongseo University

Received: September 17, 2019. Revised: October 28, 2019. Accepted: October 31, 2019

## ABSTRACT

In this study, we proposed a method for identifying isotopes generated from high-energy proton  $^{nat}\text{Pb}(p, xn)$  nuclear reactions through the difference of gamma rays generated through nuclear reactions using different proton energies. The experiment was performed by using a high energy proton generated from a 100 MeV proton linear accelerator of the Korea Atomic Energy Research Institute. Gamma rays generated by various nuclides generated through proton nuclear reactions were measured using a gamma-ray spectroscopy system composed of HPGe detectors. Gamma-ray standard sources were used for accurate energy calibration and efficiency measurements of HPGe gamma-ray detectors. For the proposed method, 100 and 60 MeV proton energy beams were used for the same natural lead samples. This method was found to be very effective in identifying nuclides produced by comparing gamma rays generated from the same sample with each other. The results of this study are expected to be very effective in obtaining other proton nuclear reaction results in the future.

Keywords: Proton energy, Nuclear reaction, Gamma-ray spectrum, Proton beam

## I. INTRODUCTION

최근 수십 MeV이상의 고에너지 양성자를 이용한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 특히, 우주항공 분야에서의 재료개발, 우주의 고방사선 환경연구, 나노/재료, 에너지/환경, 생명공학, 정보통신, 의료 보건 등 다양한 분야에서의 신기술 연구 개발 활동이 활발히 수행되어 오고 있다.<sup>[1]</sup>

양성자는 양의 전하를 가지고 있는 입자로서 특이한 핵반응 양상을 보인다. 특히 전하를 가지고 있지 않는 중성자와의 상호작용에 의한 핵반응과는 매우 다른데 중성자는 전하가 없어 쉽게  $1/v$ (여기서  $v$ 는 중성자의 속도, m/s) 형태의 반응확률로 핵과 반응한다. 이와는 다르게 양성자는 양의 전하를 가지므로 양의 전하를 가지고 있는 핵과는 서로 쿨롱반발력 때문에 일반적으로 낮은 에너지에서는

핵반응이 일어나지 않는다. 최소한 쿨롱반발력을 이겨낼 수 있는 에너지 이상에서 핵반응이 일어날 수 있다.<sup>[2]</sup> 이 에너지를 임계에너지(Q-value)라고 부른다. 원자번호가 높은 대부분의 핵들은 원자번호에 비례하는 양성자를 가지고 있으므로 짧은 거리에서는 매우 큰 쿨롱반발력을 가지고 있어 작은 양성자의 에너지로 핵반응을 일으키기는 매우 어렵다. 따라서 양성자를 이용한 핵반응은 일반적으로 양성자의 에너지가 수십 MeV 이상의 에너지에서 반응이 일어나게 된다. 한편 수십 MeV 영역에서의 핵반응의 경우는 다양한 핵반응을 일으키게 되고 반응 후 나타나는 다양한 핵반응의 종류 및 생성되는 입자들의 종류를 구분하기가 매우 어렵다. 일반적으로 이때 발생하는 감마선의 에너지에 따라 핵종을 구분하지만 다양한 핵종들로부터 발생하는 감마선을 확인한다는 것은 매우 어렵다.<sup>[3]</sup>

\* Corresponding Author: Samyol Lee

E-mail: samuel@gdsu.dongseo.ac.kr

Tel: +82-51-320-2728

따라서 본 연구에서는 같은 종류의 시료에 서로 다른 에너지의 양성자를 조사했을 때 발생하는 감마선을 분류함으로써 각각의 핵반응에서 발생하는 핵종들을 분류하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 용융점, 강도 및 원자번호가 상대적으로 높은 원소인 천연 납(Pb, lead, Z: 82)과 가속기에서 발생하는 고에너지 양성자와의 핵반응( $^{nat}\text{Pb}(p, nx)$ )을 시도하였다. 천연납은 4가지의 동위원소( $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ )를 포함하고 있어 각각의 동위원소들과의 핵반응 결과 생성되는 동위원소들이 매우 다양하게 나타날 것임이 예상된다.<sup>[4]</sup>

본 연구에서는 우리나라의 한국원자력연구원에 있는 고에너지 양성자 선형가속기에서 발생된 100 MeV와 60 MeV 2가지 양성자의 에너지를 이용하여 핵반응을 시킨 후 발생하는 감마선을 고순도 게르마늄(HPGe)검출기를 이용하여 측정하였다. 측정된 두 핵반응의 결과를 비교 분석함으로써 본 연구에서 제안된 2가지 에너지 양성자빔을 이용한 핵종 분석법의 유용성을 확인하였고 발생된 감마선의 에너지는 Table of Isotopes의 결과와 비교하였다.<sup>[5]</sup>

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 고에너지 양성자를 이용한 시료 방사화

선형가속기를 이용하여 1 Hz의 주기로 60 및 100 MeV의 양성자를 발생시킬 수 있는 빔 조사실 TR 103에서 표적시료에 양성자를 조사하여 방사화시켰다. 빔조사 조건을 Table 1에 나타내었다. 자세한 실험방법에 대해서는 이전 연구 논문에서 상세하게 기술하였다.<sup>[6]</sup>

Table 1. Specifications of the proton irradiation condition parameters in the present measurement.

Proton beam energy (MeV)	100, 60
Average current (mA)	0.1
Repetition rate (Hz)	1
Beam size (mm dia)	300

표적시료의 물리적인 크기와 화학적인 성분비는 Table 2에 자세히 나타내었다. 시료의 크기는 감마선의 기하학적 검출효율의 오차, 양성자 조사 후 감마선의 방사능 감쇄 및 양성자 빔의 시료 내에서의 감쇄 등을 고려하여 제작하였다.

Table 2. Specifications of the sample for  $^{nat}\text{Pb}$ .

Sample	$^{nat}\text{Pb}$
Chemical form	Metal
Chemical purity (%)	$^{204}\text{Pb}$ (1.4)
	$^{206}\text{Pb}$ (24.1)
	$^{207}\text{Pb}$ (22.1)
	$^{208}\text{Pb}$ (52.4)
Size (mm <sup>2</sup> )	10.0 × 10.0
Thickness (mm)	0.1

### 2. 감마선 측정 시스템

고에너지 양성자는  $^{nat}\text{Pb}(p, xn)$  핵반응에 의해서 다양한 동위원소를 생성하며 각각의 동위원소에서 감마선이 발생되게 된다. 고순도 게르마늄(HPGe) 검출기를 이용하여 발생된 감마선을 측정하였고 시스템은 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다. 자연방사능의 영향을 줄이기 위하여 납으로 차폐하였으며 감마선에너지 효율과 에너지 교정은 표준선원을 사용하였고, 이전 연구에 상세히 기술되어 있다.<sup>[6]</sup>

Table 3. Specifications of the HPGe detector system.

Unit	Characteristic
Size (mm dia × mm)	47.5 × 46
Applied voltage (Volt)	-3,500
Energy resolution (keV)	1.8 at 1.333 MeV
Relative efficiency (%)	15

전치증폭기를 통하여 전기적 잡음이 적은 신호를 HPGe 검출기에서 얻어서 선형증폭기인 Fast spectroscopy Amplifier에 입력하여 선형증폭 신호를 얻었다. 이 신호를 Multi-Channel Analyser(8192 Channel)에 입력하여 파고에 따른 에너지 분석을 하고 그 결과를 PC에 저장하였다.



Fig. 1. Gamm-ray measurement spectrometer system (HPGe detector) of gamma-ray from the <sup>nat</sup>Pb sample.

### III. RESULT

#### 1. HPGe 검출기에 의해 측정된 감마선 스펙트럼

양성자 빔(100 및 60 MeV)을 이용하여 <sup>nat</sup>Pb(p,xn) 반응에 의해 생성되는 Bi 동위원소의 여기상태로부터 발생하는 감마선 에너지 스펙트럼을 고순도 게르마늄(HPGe)검출기를 이용하여 각각 얻었고 그 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. 각각의 스펙트럼은 300 sec 동안 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 2의 (a)는 발생한 감마선의 전체 에너지영역(0 ~ 1,200 keV)에 대하여 표현하였고, (b) ~ (d)는 2개의 양성자에너지에 의해서 발생하는 감마선 스펙트럼의 차이를 보이는 임의의 감마선에너지 800 ~ 1,100 keV 영역에 대하여 3개의 영역으로 표현하였다.

#### 2. 감마선 스펙트럼의 비교 분석

일반적으로 핵반응 원리에 따르면 입사되는 양성자의 에너지에 따라 발생할 수 있는 핵반응의 종류는 달라진다. 입사 양성자의 에너지가 클수록 다양한 핵반응을 동반하고 에너지가 낮을수록 핵반응의 종류가 상대적으로 적어진다. 따라서 핵반응을 통해서 만들어지는 동위원소의 종류도 적어져 발생하는 감마선에너지의 종류도 상대적으로 적어짐을 알 수 있었다. 100 MeV 양성자에너지의 경우 60 MeV의 경우보다 전체적으로 방사능이 높음을 알 수 있다. 그 결과를 Fig. 2의 (a)에 나타내었고 감마선 에너지영역 800 ~ 1,100 keV에 대해 Fig. 2 (b) ~ (d)에 그 결과를 나타내었다. <sup>nat</sup>Pb(p,xn) 핵반응에 의해서 생성되는 Bi 동위원소의 질량수는 다양한 것으로 알려져 있다.<sup>[6]</sup>

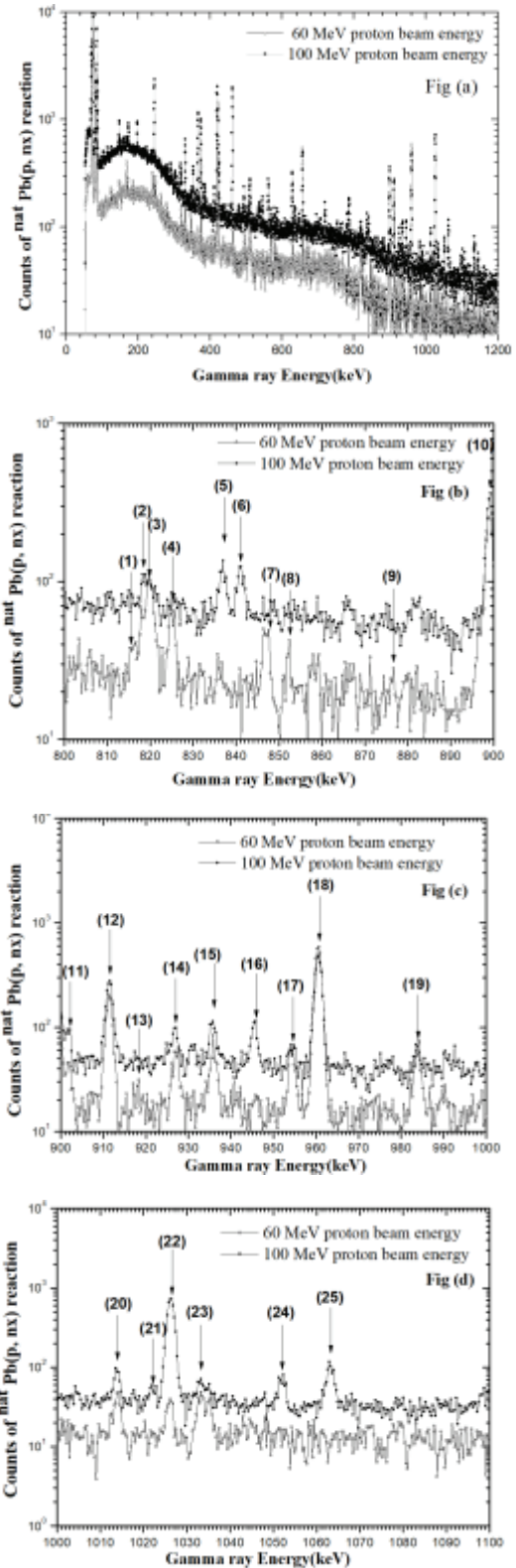


Fig. 2. Gamma-ray energy spectrum from the proton induced <sup>nat</sup>Pb sample by using 100 and 60 MeV proton beam energy.

감마선 에너지영역 800 ~ 1,100 keV에 대해 25개의 분석결과를 Q-value와 함께 Table 4에 나타내었다.<sup>[5,7]</sup> 양성자에너지 60 MeV에 의해 생성된 핵종들은 주로 Q-value가 약 50 MeV 이하에서 이루어졌으며 <sup>203</sup>Bi와 <sup>204</sup>Bi의 일부 핵종들이 관찰되었다. 중성자가 많이 방출되는 핵종인 <sup>198</sup>Bi와 <sup>199</sup>Bi의 경우 Q-value가 약 60 MeV 이상으로 모두 양성자에너지 100 MeV에 의한 반응에 의해서만 생성되는 핵종이었다. 양성자에너지 100 MeV와 60 MeV 사이의 영역들에서도 에너지 차이에 따른 스펙트럼의 차이점이 있다는 것을 확인하였다. 공통으로 발생하는 에너지와 100 MeV와 60 MeV 양성자 에너지에서만 발생하는 감마선들의 특징들을 이용하여 정확한 스펙트럼 분석이 가능함을 확인하였다.

Table 4. list of the gamma-ray energy from proton nuclear reactions.

Peak	Nuclei	Energy (keV)	60 MeV	100 MeV	Q1	Q2	Q3
1	<sup>203</sup> Bi	816.2	○	×	41.4	34.0	27.3
2	<sup>201</sup> Bi	818.5	×	○	57.6	50.2	43.5
3	<sup>203</sup> Bi	820.3	○	×	41.4	34.0	27.3
4	<sup>203</sup> Bi	825.2	○	×	41.4	34.0	27.3
5	<sup>199</sup> Bi	837.4	×	○	-	67.0	60.3
6	<sup>199</sup> Bi	841.7	×	○	-	67.0	60.3
7	<sup>203</sup> Bi	847.3	○	×	41.4	34.0	27.3
8	<sup>202</sup> Bi	852.6	○	×	50.2	42.8	36.1
9	<sup>202</sup> Bi	876.2	○	×	50.2	42.8	36.1
10	<sup>204</sup> Bi	899.2	○	○	34.2	26.8	20.1
11	<sup>201</sup> Bi	902.0	○	○	57.6	50.2	43.5
12	<sup>204</sup> Bi	911.8 912.2	○	○	34.2	26.8	20.1
13	<sup>204</sup> Bi	918.2	○	×	34.2	26.8	20.1
14	<sup>202</sup> Bi	927.3	○	○	50.2	42.8	36.1
15	<sup>201</sup> Bi	936.2	○	○	57.6	50.2	43.5
16	<sup>199</sup> Bi	946.0	×	○	-	67.0	60.3
17	<sup>202</sup> Bi	954.5	○	○	50.2	42.8	36.1
18	<sup>202</sup> Bi	960.7	○	○	50.2	42.8	36.1
19	<sup>204</sup> Bi	984.0	○	○	34.2	26.8	20.1
20	<sup>201</sup> Bi	1014.1	○	○	57.6	50.2	43.5
21	<sup>199</sup> Bi	1022.8	×	○	-	67.0	60.3
22	<sup>200</sup> Bi	1026.5	○	○	-	59.4	52.6
23	<sup>203</sup> Bi	1033.8	○	○	41.4	34.0	27.3
24	<sup>199</sup> Bi	1052.8	×	○	-	67.0	60.3
25	<sup>198</sup> Bi	1063.5	×	○	-	-	69.8

Q1: Q-value of nuclear reaction from <sup>208</sup>Pb

Q2: Q-value of nuclear reaction from <sup>207</sup>Pb

Q3: Q-value of nuclear reaction from <sup>206</sup>Pb

#### IV. DISCUSSION

본 연구에서 제안한 2가지 종류의 양성자 에너지를 이용한 스펙트럼 분석 방법은 핵종분석에 매우 유용한 것으로 확인되었다. 측정된 감마선 에너지를 Table of Isotopes 결과들과 비교 분석하여 최종 핵종들을 확정하였다.<sup>[5]</sup> 생성된 핵종 중 <sup>200</sup>Bi, <sup>201</sup>Bi, <sup>202</sup>Bi, <sup>203</sup>Bi 및 <sup>200</sup>Bi은 60 MeV 에너지의 양성자 범에 의해서도 충분히 핵반응이 일어남을 확인할 수 있었다. 이들 핵종들은 핵반응이 일어날 수 있는 Q-value가 60 MeV 이하의 에너지를 가지는 핵종들로 본 연구에서도 관측이 되었다. 핵반응 후 중성자가 가장 많이 방출되는 핵종인 <sup>198</sup>Bi와 <sup>199</sup>Bi의 경우 가장 높은 Q-value를 가지는 것으로 보인다.<sup>[7]</sup> 이들 핵종들은 100 MeV 양성자 에너지 반응에서만 관측이 되었으며 일반적으로 핵반응의 스펙트럼 분석에 있어서 Q-value뿐만 아니라 양성자에너지 차이에 의한 효과를 고려한다면 매우 정확한 스펙트럼 분석이 가능하다는 것을 확인하였다.

#### V. CONCLUSION

본 연구에서는 양성자핵반응에 의해서 생성되는 다양한 핵종들로부터 발생하는 감마선들을 확인하는 방법으로서 양성자에너지의 차이를 이용하면 매우 유용함을 알 수 있었다. 특히 837.4 와 841.7 keV 감마선 에너지는 100 MeV 양성자와의 핵반응에 의해서 발생된 것으로 확인되었고, 847.3, 852.6 및 876.2 keV 감마선 에너지는 60 MeV 양성자에 의한 핵반응에서 발생된 것을 발견하였다. 앞으로 이 방법을 사용한다면 보다 정확하게 임의의 핵종에서 발생하는 감마선 확인이 가능 할 것으로 보여진다. 또한 핵반응단면적과 같은 핵반응 정보 연구에 유용하게 이용되며 정확한 Q-value를 결정하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 생각되어진다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2019년도 동서대학교 ‘Dongseo Cluster Project’ 지원에 의하여 이루어진 것임(DSU-20190004).

## Reference

- [1] YongHo Jung, YongSup Choi, KyuSun Chung, "Development of a Beam Current and Position Measurement System for the Korea Multipurpose Accelerator," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 44, No. 5, pp. 1067-1070, 2004.
- [2] F. Szelecsényi, G. Blessing, S. M. Qaim, "Excitation functions of proton induced nuclear reactions on enriched  $^{61}\text{Ni}$  and  $^{64}\text{Ni}$ : Possibility of production of no-carrier-added  $^{61}\text{Cu}$  and  $^{64}\text{Cu}$  at a small cyclotron," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 44, No. 3, pp. 575-580, 1993.
- [3] A. K. Lavrukhina, L. D. Revina, V. V. Malyshev, L. M. Satarova, "Reactions of Deep Spallation of Fe Nuclei By 150-MeV Protons," *Journal of Experiment Theoret. Physics*, 44, 1429-1436, 1963.
- [4] Jieun Lee, Jungran Yoon, Taeik Ro, Samyol Lee, "Measurement of the Relative Cross-section of the  $^{208}\text{Pb}(p,x)\text{Bi}$  Reaction by Using a 100 MeV Proton Beam," *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 65, No. 9, pp. 883-887, 2015.
- [5] <https://application.wiley-vch.de/books/info/0-471-35633-6/toi99/toi.htm>
- [6] Jungran Yoon, Jieun Lee, Samyol Lee, "Measurement of natW(p,xn) $^{177,178,179}\text{Re}$  excitation function of natural tungsten by using a 100-MeV proton beam," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 70, No. 1, pp. 47-52, 2017.
- [7] <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>

## 양성자 에너지 변화에 따른 핵반응 생성핵종 분석

이삼열

동서대학교 방사선학과  
방사선보건환경연구센터

### 요 약

본 연구에서 서로 다른 양성자 에너지를 사용하여 핵반응에 의해 생성된 감마선의 차이를 통해 고에너지 양성자  $Pb(p, nx)$  핵반응에서 생성된 동위원소를 식별하는 방법을 제안했다. 한국원자력연구원의 100-MeV 양성자 선형 가속기에서 생성된 고 에너지 양성자를 이용하여 실험을 수행 하였다. 양성자 핵반응을 통해 생성된 다양한 핵종에 의해 생성된 감마선은 HPGe 검출기로 구성된 감마선 분광법 시스템을 사용하여 측정되었습니다. 감마선 표준선원은 감마선 검출기의 정확한 에너지교정 및 효율측정을 위해 사용되었습니다. 제안한 방법을 위하여 동일한 천연 납 시료에 서로 다른 100 및 60 MeV 양성자 에너지빔을 사용하였다. 이 방법은 동일한 시료에서 발생하는 감마선들을 서로 비교함으로써 생성된 핵종들을 확인하는데 매우 효과적임을 알 수 있었다. 이 연구의 결과는 향후 다른 양성자 핵반응 결과를 얻는데도 매우 효과적으로 적용될 것이라 생각된다.

중심단어: 납, 핵반응, 감마선스펙트럼, 양성자빔

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	이삼열	동서대학교 방사선학과	교수