

빔 출력 특성 개선을 위한 빔 프로파일 모니터링 시스템 개발

안영준¹ · 허민구² · 양승대² · 신대섭³ · 이동훈^{1*}

The Development of a beam profile monitoring system for improving the beam output characteristics

Young-jun An¹ · Min-goo Hur² · Seung-dae Yang² · Dae-seob Shin³ · Dong-hoon Lee^{1*}

^{1*}Department of Electronic Information and Communication Engineering, TongMyong University, Busan 608-711, Korea

²Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongup, Korea

³Department of Electronic Engineering, Incheon University, Korea

요 약

방사선 진단에 사용되는 방사성동위원소 중 사이클로트론을 이용해 생산되는 방사성동위원소는 사이클로트론에서 인출된 양성자 빔이 타겟에 조사될 때 빔의 크기와 모양, 조사되는 위치에서 빔 균일 정도에 따라 생산 수율에 영향을 받는다. 이에 본 논문에서는 사이클로트론 빔 라인에서 빔의 단면을 측정할 수 있는 BPM(Beam Profile Monitor)장치를 개발하였다. LabView로 BPM장치를 원격 제어할 수 있도록 구성하였으며 BPM 프로그램을 이용하여 X축과 Y축으로 텅스텐 와이어를 스캔하면서 얻은 빔의 수치 정보를 2차원 그래프와 3차원 빔 분포 그래프로 표시하여 해석을 쉽게 모니터링 할 수 있도록 하였다. 빔을 측정하는 데 걸리는 시간은 스텝 모터 구동 속도가 2000pps일 때 37초가 걸린다는 것을 확인 할 수 있었다. 측정된 빔 분포정보를 기반으로 빔 재조정을 통해 빔 분포를 최적화함으로써 방사성동위원소 생산 수율을 극대화 시킬 수 있고 공급 안정화에도 기여하리라 본다.

ABSTRACT

Radioactive isotopes which are manufactured using a cyclotron in a radioisotope used for radiation diagnosis is affected by the production yield according to size and shape of the beam and beam uniform degree from irradiated location when the proton beam investigated the target by cyclotron. Therefore, in this paper developed the BPM(Beam Profile Monitor) device capable of measuring the beam cross-section at the cyclotron beam line. It was configured so as to be able to remote control the BPM device in LabView and used the BPM program it was to be able to easily monitor and display to analyze the graph of two-dimensional graph and a three-dimensional beam distribution numerical information of the beam obtained while scanning the tungsten wire to the X and Y axis. The time it takes to measure the beam can be confirmed 37seconds when step motor driving speed was 2000pps. Through a beam readjusted based on the measured beam distribution information by optimizing the beam distribution it can be made to maximize the RI production yield and contribute supply stabilization.

키워드 : 사이클로트론, BPM(Beam Profile Monitor), 랩뷰, 빔 전류

Key word : Cyclotron, BPM(Beam Profile Monitor), LabView, Beam Current

Received 01 August 2015, Revised 03 September 2015, Accepted 18 September 2015

* Corresponding Author Dong-Hoon Lee (E-mail:ldh5522@tu.ac.kr Tel:+82-51-629-1342)

Department of Electronic Information and Communication Engineering, TongMyong University, Busan 608-711, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.11.2689>

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

최근 국내에서는 자체적으로 개발된 사이클로트론을 각 권역에 설치하여 고에너지 양성자 빔을 이용한 기초 및 응용 연구를 활성화 하려는 노력을 하고 있다. 양성자 빔을 이용한 의학·생명 과학 및 원자력·방사선 분야의 연구 및 교육을 위해서는 안정적인 양성자 빔이 인출되어야 하며, 사이클로트론을 최적화된 조건에서 가동시키고 안정적인 양성자 빔을 얻기 위해서는 양성자 빔의 횡단면(transverse profile)을 측정하여 빔의 중심 및 반경과 빔 강도를 측정하는 것이 필요하다[1-3].

초기 입자 가속기는 입자를 높은 에너지로 가속하여 다른 원자핵 구조를 바꾸거나, 원자핵의 결합력에 대해 연구하는 것이 주목적인데 대표적인 가속기로는 사이클로트론(Cyclotron), 싱크로트론(Synchrotron) 등이 있다[4]. 그 중에서 1931년 Lawrence와 Livingston에 의해 개발된 사이클로트론은 지름 4.5 인치(11.43cm)에서 양성자를 80keV로 가속할 수 있었다[5]. 이후 고전 사이클로트론부터 빔 에너지, 빔 인출 등을 개선하기 위해 여러 세대에 걸쳐, AVF사이클로트론, 싱크로사이클로트론, 분리형 사이클로트론 등으로 발전해왔다[6-9].

2006년 국제원자력기구(IAEA) 보고서에 따르면 전 세계적으로 약 350여대의 사이클로트론이 운영 중에 있다. 이중 10 ~ 20MeV급 사이클로트론은 1975년 양성자방출단층촬영(PET)의 개발과 더불어 암 예방 및 조기 진단 의료기 시스템으로 사용되어 빠른 속도로 보급되고 있다. 또한 20 ~ 30MeV급 사이클로트론은 단일광자방출단층촬영(SPECT)용 방사성 동위원소 생산용으로 보급되고 있다. 이와 같이 전 세계에 보급된 사이클로트론의 약 75%가 의료 및 치료용으로 사용되고 있다[10, 11]. 그 뿐만 아니라 최근에는 LiI 섬광검출기 기반의 보너구 스펙트로메터를 이용하여 MC-50 사이클로트론에서 발생하는 중성자스펙트럼을 측정하고 있으며 또한 MC-50 사이클로트론으로 3차원 마이크로 구조물을 가공하는 등 다른 용도에도 활용하고 있다[12, 13]. 이러한 방사성동위원소의 생산수율은 사이클로트론에서 인출되는 양성자 빔에 의해 영향을 받기 때문에 양성자 빔 인출 시 동위원소 생산용 타겟으로 집속되는 빔의 분포가 균질하여야 한다. 그렇지 않고 일부로 편향된다면 타겟의 손상과 함께 핵반응의 부족으

로 인한 방사성동위원소의 생산 수율이 저하된다. 또한 빔라인에서의 불필요한 방사화로 인해 작업 시 피폭 가능성이 증가된다[14].

본 연구에서는 사이클로트론에서 인출된 양성자 빔의 분포 상태를 정확히 파악하여 빔 손실을 개선, 조정하기 위한 빔 분포 측정 시스템인 BPM(Beam Profile Monitor)을 개발하였다.

II. 개발된 BPM 빔 측정시스템 장치 분석

2.1. BPM 빔 측정시스템

그림 1(a)은 개발된 BPM 빔 측정 시스템의 하드웨어 모습으로 그림의 위쪽부분이 사이클로트론 빔 라인에 장착될 BPM장치로 X축과 Y축의 빔 분포를 측정하기 위해 2대의 스텝핑 모터를 사용하였다. 각각의 모터 축에는 0.3mm의 텅스텐 와이어가 장착되어 빔의 단면을 직각으로 각각 또는 동시에 스캔하도록 구성하였다. 그림의 아래쪽은 모터 컨트롤러부분으로 각각의 모터 구동 시 램프를 통하여 구동상태를 표시하고 응급 시 정지할 수 있는 정지버튼 등으로 구성되어 있다.

그림 2(a)는 소프트웨어 부분으로 미세 빔 전류 계측기인 피코암미터기 등 BPM 하드웨어가 정상 접속되어 통신되고 있는지 확인한다. 그림 2(b)에서 빔 측정간격과 측정거리를 설정하고 실행시키면 그림 2(c)와 같이 2차원 및 3차원 모니터링 그래프로 빔 측정값을 표시하게 할 수 있으며 최종적으로 그림 2(d)에서 수치정보를 엑셀 파일로 저장할 수 있도록 구성하였다.

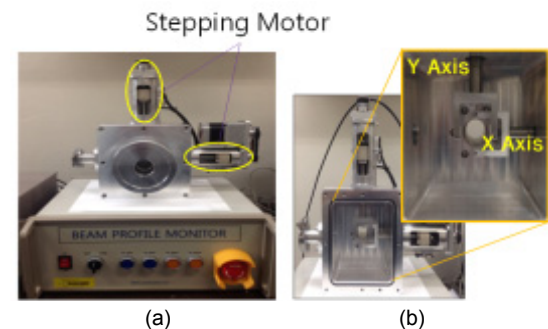


Fig. 1 Hardware part of developed BPM beam measuring systems (a) BPM Device & Motor Controller (b) Enlarged appearance of BPM Device

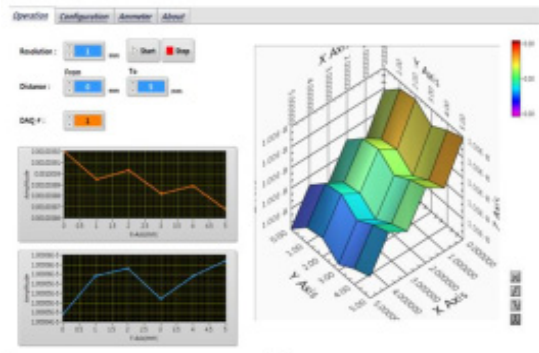
빔 출력 특성 개선을 위한 빔 프로파일 모니터링 시스템 개발



(a)



(b)



(c)



X축 위치	0	1	2	3	4	5
X축 전류	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03
Y축 위치	0	1	2	3	4	5
Y축 전류	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-05
	0	1	2	3	4	5
	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
	1	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
	2	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
	3	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
	4	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
	5	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08

(d)

Fig. 2 Software part of developed BPM beam measuring systems (a) Check exility beam current meter & Communication (b) Setting resolution & distance (c) Expressed as monitoring graph (d) Expressed as numerical data

2.2. BPM 하드웨어의 특성

2.2.1. 가상 빔 전류 공급부 제작

원래는 사이클로트론에서 빔 조사와 동시에 빔 분포 측정이 이루어져야 하나 빔 라인 설치 전 제작된 BPM 시스템의 성능 테스트를 위해 가상적으로 빔 전류 값을 공급해 주기 위한 전류원을 제작하여 $1nA \sim 1\mu A$ 까지 공급할 수 있도록 그림 3과 같이 구성하였다.

2.2.2. BPM(Beam Profile Monitor) 장치

BPM은 그림 4와 같이 수직으로 교차하여 이동하도록 X축과 Y축 방향으로 2대의 스텝핑 모터를 장착하였고 각각의 모터 축에는 용접이 높은 0.3mm의 텅스텐 와이어를 빔 방향에 수직으로 스캔할 수 있도록 장착하였다. 양성자 빔이 텅스텐 와이어에 조사되면 빔 전류가 발생하고 이를 피코암피터기를 통하여 측정할 수 있도록 하였다. 사이클로트론에서 양성자 빔을 조사할 때에는 낮은 빔 전류 값으로 조사하면서 빔 분포를 측정해야 텅스텐 와이어가 녹는 것을 방지할 수 있다. 수직으로 이동하는 와이어의 위치 정보와 각 위치에서의 빔 전류 값을 이용하여 빔의 강도 및 크기와 형태를 알 수 있다. 그림 5는 X축과 Y축으로 장착된 텅스텐 와이어의 내부모습을 보여주고 있다.

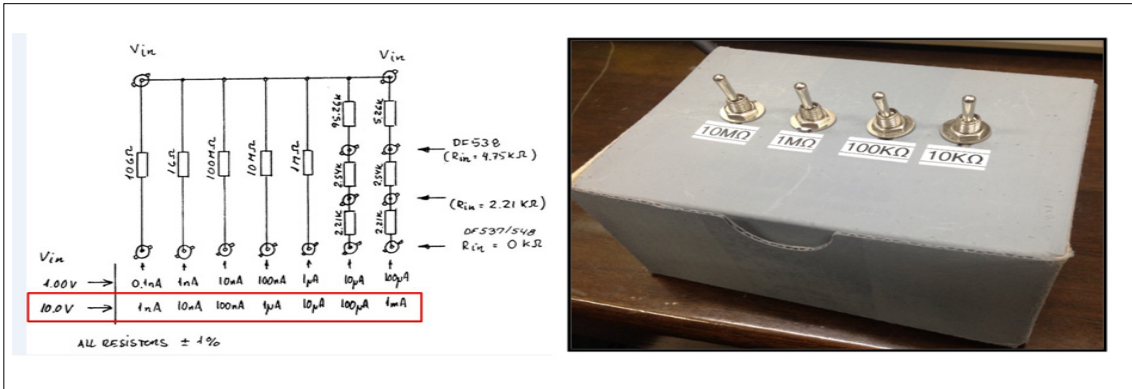


Fig. 3 Exility current source circuit for virtual beam current supply



Fig. 4 BPM device and controller

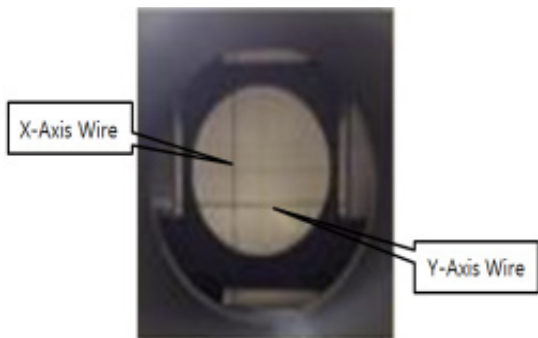


Fig. 5 Wire inside position of X-Axis and Y-Axis

2.2.3. 빔 측정위치 표시
 텅스텐 와이어의 위치는 결국 빔의 위치가 되므로 외부에서 텅스텐 와이어의 위치를 표시할 수 있도록 구성하였다. 그림 6은 내부 텅스텐 와이어의 위치를 볼 수 없기 때문에 외부에 와이어와 연동되는 표시자에 모눈 종이를 붙이고 어느 지점인지 알 수 있게 X축과 Y축 외부 지시 계를 통해 표시하도록 하였다. 각각의 외부 지시 계에서 X축은 맨 왼쪽 그리고 Y축은 맨 아래쪽을 원점으로 설정한 후 빔 측정을 시작하도록 하였다.

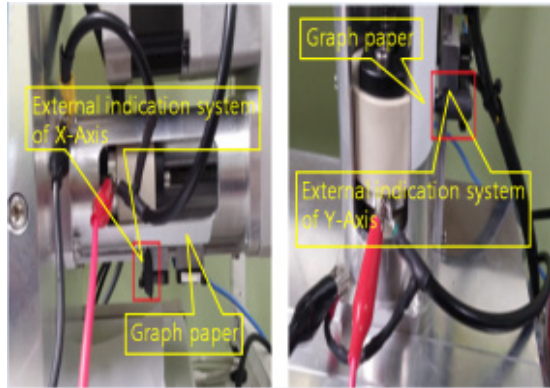


Fig. 6 Example for beam measurement location indication of X-Axis and Y-Axis (a) X-Axis (b) Y-Axis

2.3. BPM 소프트웨어의 특성

2.3.1. BPM 소프트웨어 프로그램 동작 예

LabView 프로그램으로 X축과 Y축 모터를 원격제어한 후 X축과 Y축 와이어를 통해 흐르는 미세전류를 측

정하여 각각의 측정 위치마다 빔 전류 값을 그래프로 표시하도록 하였다. 그림 7은 X축과 Y축으로 스캔하면서 얻은 빔의 수치 정보를 2차원 그래프와 3차원 빔 분포 그래프로 전환하여 결과 해석을 쉽게 모니터링 할 수 있도록 구성한 화면을 보여주고 있다.

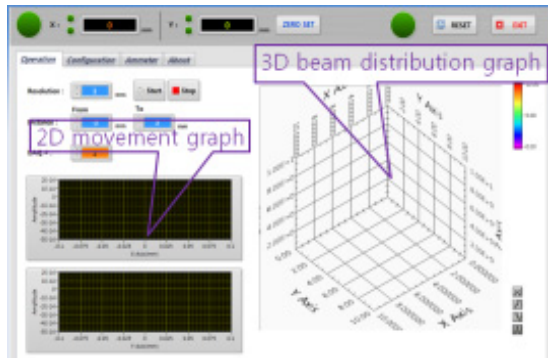


Fig. 7 Monitoring system for beam measurement

빔 측정 간격을 설정하는 Resolution과 빔 측정거리를 나타내는 Distance가 있다. 그림 8은 빔 측정 간격이 1mm이고 빔 측정거리가 -2mm에서 2mm까지의 빔 측정 예시이다. 처음 Start 버튼을 누르게 되면 먼저 X축과 Y축 둘 다 From 구간인 -2mm로 이동하게 된다. X축부터 먼저 이동하게 되는데 빔 측정 간격이 1mm로 설정하였기 때문에 1mm씩 이동하게 된다. 측정 후 원점이 0이기 때문에 2에서 다시 원점인 0으로 돌아간다. Y축도 마찬가지로 동작하게 된다.

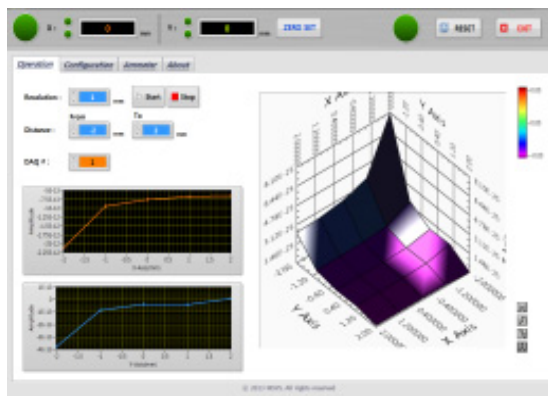


Fig. 8 Example of beam measurement(Resolution: 1mm, Distance: -2 ~ 2mm)

III. 실험방법 및 결과

3.1. 실험방법

먼저, BPM 모니터링 화면에서 X축과 Y축의 텅스텐 와이어를 측정하고자 하는 시작점으로 이동 후 원점으로 설정한다. 다음에 측정자가 측정간격, 측정구간은 Resolution과 Distance를 통하여 설정한다. X축과 Y축이 이동하는 동안 각각에 가상 전류원을 사용하여 전류 값을 텅스텐 와이어에 부여한 후 전류 값의 변화여부를 측정하였다. 전류원의 사용전원은 10V로 설정하였다. 그 후 측정한 거리까지 와이어가 도달하면 2차원 그래프와 3차원 빔 분포 그래프로 전환하게 되며 빔 분포 측정값은 수치화 된 엑셀 파일로 저장하도록 하였다. 그림 9는 빔 측정 실험 개략도이다.

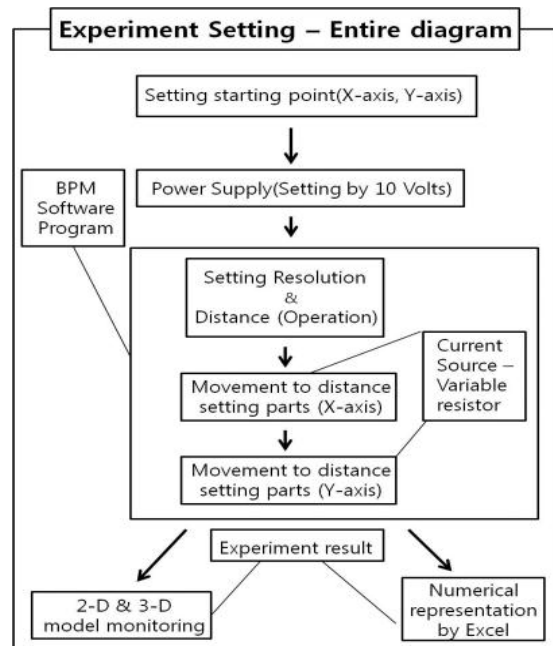


Fig. 9 Schematic for beam measurement experiment

3.2. 실험결과

양성자 빔의 활용도가 산업분야, 의학·생명 분야 등 다양하기 때문에 다양한 사용자가 빔을 사용하기 위해서는 신속한 빔 측정 시스템을 요구한다. 실시간으로 빔 분포를 측정하는 것이 바람직하지만 본 시스템으로 빔 분포측정은 빔 튜닝 중 초반에 일부분만 사용하는

장치이기 때문에 다소 시간이 걸리더라도 국산화된 시스템으로 빔 분포측정의 역할을 담당할 수 있는 것으로 의미가 있다고 하겠다. Positioning Method에서 원점부터 X축, Y축 각각의 한계점까지 스텝핑 모터의 속도가 500 ~ 2000pps 일 때 걸리는 스캔시간을 표 1과 같이 측정하였다.

Table. 1 Scan time measurement results by the X-Axis and Y-Axis speed of the stepping motor

pps (Pulse Per Second)	scan time
500	150sec
1000	75sec
1500	50sec
2000	37sec

측정 한 결과 표 1과 같이 2000pps 일 때 속도가 37초로 가장 빠른 것으로 나타났다. pps가 500일 때 2분 30초(150초), 1000pps 일 때 1분 15초(75초)가 나왔는데 즉, pps가 2배 증가하면 time은 2배 감소하였다. 따라서 pps와 time은 서로 반비례하는 것을 확인할 수 있다. 이 때 스캔 거리는 원점에서 30mm로 하였다.

3.2.1. 가상 빔 전류 고정 시 측정결과

그림 10은 전류원 값을 $10\mu A$ 고정 했을 때의 빔 측정 가상 테스트 결과이다. 빔 측정 간격을 1mm로 설정하였고 빔 측정거리를 0mm에서 5mm로 설정하였으며 X축, Y축의 측정시간은 6초가 소요되었다.

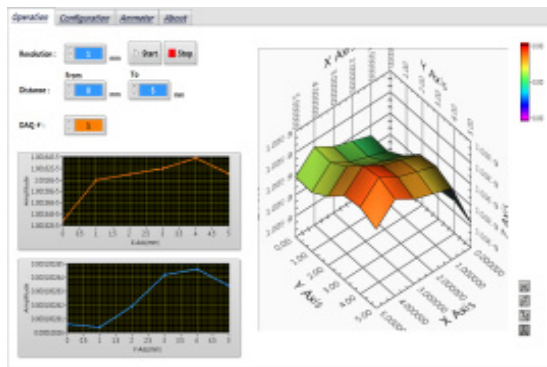


Fig. 10 Beam measurement virtual test results when current source value fixed

3.2.2. 가상 빔 전류 변화 시 측정결과

그림 11은 전류원의 값을 변화 했을 때의 빔 측정 가상 테스트 결과이다. 이번에는 빔 측정거리를 0에서 10mm로 설정하였다. 처음에 0 ~ 3mm는 전류원 $1\mu A$, 4 ~ 7mm는 $10\mu A$ 그리고 8 ~ 10mm는 $1\mu A$ 로 변화시키면서 측정을 하였으며 측정 시간은 12초가 소요되었다.

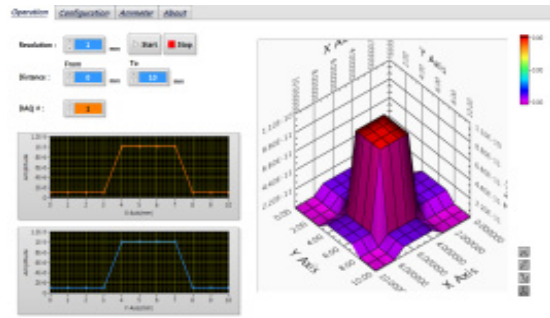


Fig. 11 Beam measurement virtual test results when current source value changed

그림과 같이 2차원 그래프와 3차원 그래프로 빔의 크기, 빔의 전류 값이 강도 및 빔 단면 모양을 파악할 수 있었다.

3.2.3. BPM 측정 데이터 엑셀 파일로 저장

그림 12는 X축, Y축의 빔의 분포 량과 빔의 위치를 확인할 수 있는 엑셀 파일이다. c와 d가 $1.00424E-09$ 로 같은 값이 나왔는데 이 값이 빔의 강도인 측정 전류 값을 의미한다. 위의 함수를 보시면 $E2*D5$ 라고 적혀있다. 즉 X축(a)은 3mm이고 Y축(b)은 2mm인 것이다. 따라서 가로가 Y축이고 세로가 X축인 것이다.

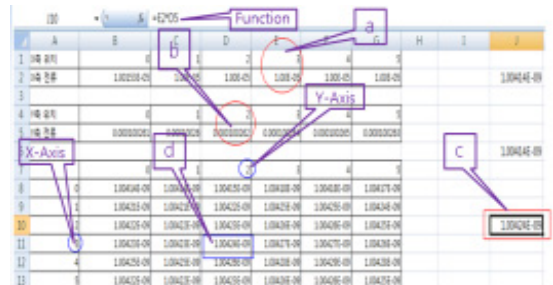


Fig. 12 Significance for Excel save file format

IV. 결 론

본 연구는 빔 분포를 측정하여 빔 손실을 개선, 조정하여 최적화된 빔의 분포를 타겟에 공급하기 위해 개발한 시스템이다. 외산에 의존하던 빔 분포 측정 시스템을 국산화 시켜 빔 분포를 측정할 결과, 빔 측정하는데 걸리는 시간은 구동속도가 500pps 일 때 2분 30초, 구동속도가 2000pps 일 때 37초가 걸린다는 것을 확인 할 수 있었다.

이로 인해 방사성동위원소의 생산 수율을 극대화 시킬 수 있고 동위원소 공급 안정화에도 기여하리라 본다. 또한 빔 튜닝을 최적화하여 빔 누수로 인한 불필요한 방사화를 줄임으로써 방사선작업 종사자의 피폭을 최소화 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) (no.2014 M2B2A4031650) grant founded by the Korea government (MSIP)

REFERENCES

[1] P. Forck and A. Bank, *Proc. Euro. Part. Acc. Conf. EPAC 2002*, Paris, 1885 (2002)
 [2] A. Bank and P. Forck, *Proc. Diagn. Instrum Part Acc. Conf. DIPAC03*, Mainz 137 (2003)

[3] S. H. Kim, Y. J. Park, W. H. Hwang, J. Y. Huang, Y. Honda, and Y. Inoue, *J. Korean Vac. Soc.* 15, 331 (2006).
 [4] W. K. H. Panofsky and M. Breidenbach. Accelerators and detectors. *Rev. Mod. Phys.*, 71(2):S121-S132, Mar 1999.
 [5] Rui Dilao and Rui Alves-Pires. *Nonlinear Dynamics in Particle Accelerator*. World Scientific, 1996. p. 11.
 [6] D. J. Clark. Departed cyclotron pioneers. In *Cyclotrons and Their Applications 2001*, pages 471-473, 2002.
 [7] Keith R. Symon. Mura days. In *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*, 2003.
 [8] Eric Baron. World trends in cyclotron developments for nuclear physics and applications. In *Nucleonika*, volume 48(Supplement 2), pages S3-S11, 2003.
 [9] T. Stambach. Introduction to cyclotrons. In S. Turner, editor, *Proceedings of the CERN Accelerator School(CAS): Cyclotrons, linacs and their applications*, number 96-02, pages 113-138, 1994.
 [10] Technology trends information network, *PET technology development trends*, 2003, p. 1.
 [11] IAEA. *Directory of cyclotrons used for radionuclide production in member States*. IAEA, 2006.
 [12] W. H. Ha, S.Y. Park, J. R. Yu, S.W. Yoon, S. S. Lee, J. H. Kim, J. K. Kim, "Measurement of neutron spectra in MC50 cyclotron using Bonner sphere spectrometer with LiI scintillation detector", *Journal of Radiation Protection*, Vol. 38, no. 3, pp. 143-148, Aug. 2013.
 [13] S. G. Lee, W. T. Kwon, "Manufacturing of Three-dimensional Micro Structure Using Proton Beam", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 39, no. 4, pp. 301-307, Apr. 2015.
 [14] TongMyong University, "The measurement of Beam Distribution in Cyclotron Beam line by using a BPM".



안영준(Young-Jun An)

2015년 2월: 동명대학교 의용공학과 학사 졸업
 2015년 3월 ~ 현재: 동명대학교 전기전 자정보통신공학과 석사과정
 ※관심분야 : 의공학, 생체계측



허민구(Min-Goo Hur)

1996년 2월 경희대학교 기계공학과(학사)
1998년 2월 경희대학교 기계공학과(석사)
2006년 8월 : 경희대학교 기계공학과(공학박사)
2002년~2006년 한국원자력학회원 선임연구원
2006년~현재 한국원자력연구원 방사선기기연구부 책임연구원
※관심분야 : 방사성동위원소 생산, 사이클로트론, RI 자동합성장치



양승대(Seung-Dae Yang)

1985년 2월 서울대학교 화학과(학사)
1997년 8월 동국대학교 화학과(석사)
2002년 2월 동국대학교 화학과(이학박사)
1985년~2005년 한국원자력학회원 선임연구원
2005년~현재 한국원자력연구원 방사선기기연구부 책임연구원
※관심분야 : 방사성동위원소 생산, 방사성의약품 개발, 사이클로트론, 분석화학



신대섭(Dae-Seob Shin)

1996년 호원대학교 전자공학과 학사
1998년 인하대학교 전자공학과 석사
2014년 한양대학교 전기공학과 박사
2015년~현재 인천대학교 전자공학과 산중교수
※관심분야 : 임베디드제어공학, 의용공학, 방사선 원격진단 드론로봇



이동훈(Dong-Hoon Lee)

1987년 인하대학교 전자공학과(공학사)
1993년 인하대학교 전자공학과(공학석사)
2001년 인하대학교 전자공학과(공학박사)
1988년 ~ 2006년 원자력학회원 책임연구원
2006년 ~ 현재 동명대학교 의용공학과 교수
※관심분야 : 바이오메트리칼시스템, 의료방사선기기, HMI