

Beam Induced Fluorescence 모니터를 이용한 KIRAMS-13 싸이클로트론의 양성자빔 횡단면 측정

남순권* · 김기범†

^a강원대학교 물리학과, 춘천 200-701

^b강원대학교 싸이클로트론연구소, 춘천 200-701

(2009년 10월 13일 받음, 2009년 11월 3일 수정, 2009년 11월 12일 확정)

권역별 싸이클로트론연구소에 설치되어 있는 KIRAMS-13 싸이클로트론에서 안정적이고 최적화된 양성자빔을 인출하기 위해서는 양성자빔의 횡단면 측정이 필수적이다. 빔의 횡단면 측정장치 중 비파괴적인 방법인 BIF(Beam Induced Fluorescence) 모니터는 그 구조가 상대적으로 간단하고 빔의 에너지 손실을 최소화하며 실시간 측정이 가능하다는 장점이 있다. 이 연구에서는 KIRAMS-13 싸이클로트론에서 양성자빔의 횡단면 측정을 위한 BIF 모니터를 설계하고 제작한 후 13 MeV 양성자빔 조사를 통하여 양성자 빔의 중심 및 반경을 측정하였다.

주제어 : BIF 모니터, 13 MeV 양성자빔, 횡단면 측정

I. 서 론

싸이클로트론은 하전입자를 높은 에너지로 가속시키는 장치로써, 인출되는 높은 에너지의 양성자빔을 이용하여 양전자방출 단층촬영(Positron Emission Tomography)을 위한 방사선의약품의 생산, 신종 유전자원 개발 및 돌연변이 해석 연구, 이온빔을 이용한 방사선 치료연구, 신소재개발 및 방사화학응용연구, 고체표적물 조사에 의한 물질구조연구, 중성자 응용연구 등의 의학·생명 과학 및 원자력·방사선 분야의 최첨단 연구를 수행 할 수 있다.

최근 국내에서는 자체적으로 개발된 싸이클로트론을 각 권역에 설치하여 고에너지 양성자빔을 이용한 기초 및 응용 연구를 활성화 하려는 노력을 하고 있다. 양성자빔을 이용한 의학·생명 과학 및 원자력·방사선 분야의 연구 및 교육을 위해서는 안정적인 양성자빔이 인출되어야 하며, 싸이클로트론을 최적화된 조건에서 가동시키고 안정적인 양성자빔을 얻기 위해서는 양성자빔의 횡단면(transverse profile)을 측정하여 빔의 중심 및 반경을 측정하는 것이 필요하다. 빔의 횡단면 측정기는 가속기의 빔 진단장비 중에서 빔 전류 측정기 및 에미턴스 측정기 등과 함께 가장 기본적인 빔 진단 장치로써, 가속기 및 인출되는 빔의 제어

에 중요한 역할을 한다.

GSI(Gesellschaft für Schwerionenforschung, Swiss), SLAC(Stanford Linear Accelerator Center, USA), DESY(Deutsches Elektronen Synchrotron, Germany) 등의 거대 가속기센터에서 가속되는 빔은 높은 에너지와 전류밀도를 갖기 때문에 섬광판(scintillation screen) 등의 파괴적인 방법(destructive method)을 사용하여 빔의 종단면을 측정할 수 없으므로 비파괴적인 방법(non-destructive method)을 사용하여 빔 종단면을 정확하게 측정할 수 있는 장치를 개발하여 사용하고 있고, 더욱 정밀한 빔 진단장비의 개발을 진행하고 있다 [1,2,3].

빔의 횡단면을 측정하는 방법 중 비파괴적인 방법인 BIF 모니터(Beam Induced Fluorescence monitor)는 빔과 가속기의 빔라인에 잔류하고 있는 가스분자의 상호작용에 의해서 발생하는 광자를 측정하여 빔의 횡단면을 측정하는 방법 [4,5]이다. 이 BIF 모니터는 다른 측정기에 비해 구조가 상대적으로 간단하고 빔의 에너지 손실을 최소화하며 실시간으로 빔의 종단면을 측정할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 많은 주목을 받고 있다.

거대 가속기 센터에서는 이러한 비파괴적인 방법인 BIF 모니터를 이용하여 빔과 고진공의 빔라인에 잔류하고 있는

* [전자우편] snam@kangwon.ac.kr

† [전자우편] kkbun@kangwon.ac.kr

가스분자와의 상호작용으로부터 발생하는 광자를 검출함으로써 빔의 횡단면을 측정한다. 그러나 양성자빔을 수 백 MeV 이상 가속하는 경우에 10^{-8} torr 이상의 고진공 [6]의 빔라인에서 발생하는 미량의 광자는 측정하기 어렵기 때문에 광자를 증폭하는 영상증폭관(image intensifier tube)과 고성능 카메라를 이용해야만 측정이 가능하다.

이러한 고성능 BIF 모니터는 13 MeV 양성자빔을 측정하는 장치로서는 적합하지 않으므로 국내에 보급되어 있는 13 MeV 양성자 싸이클로트론인 KIRAMS-13에서 인출되는 양성자빔의 횡단면을 측정할 수 있는 최적화된 측정장치가 필요하다. 본 연구에서는 상용화된 CCD 카메라와 렌즈 시스템을 이용하여 13 MeV 양성자 싸이클로트론인 KIRAMS-13에 의해 가속된 양성자빔의 횡단면 측정이 가능한 경제적이고 반영구적인 BIF 모니터를 개발하였으며, 13 MeV 양성자빔 조사실험을 통하여 양성자빔의 중심 및 반경을 측정하였다.

II. 실험방법

각 권역에 보급되어 설치된 KIRAMS-13을 사용하여 의학·생명과학·방사선·가속기 분야의 연구 및 교육과 단반감기 양전자방출 방사선의약품 생산하기 위한 표적장치에는 싸이클로트론의 진공과 표적물질 분리를 위하여 윈도우로 포일(foil)을 사용한다. 이 포일은 입사되는 양성자빔의 에너지손실을 최소화 하기 위하여 최소의 두께로 제작된다. 그러나 고에너지·고전류 양성자빔이 조사될 경우 단위면적당 높은 열량이 표적장치의 포일에 가해짐으로써 얇은 포일의 기계적강도가 약해지거나 녹아내리고, 또한 고온의 표적물질이 팽창함에 따라서 포일이 파손되어지는 문제점이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 포일을 냉각할 수 있는 표적장치의 구조가 필수적이며, 그 중 이중포일(double-foil)과 냉각가스를 사용하여 포일을 냉각시키는 방법이 많이 사용되고 있다 [7].

양성자빔의 조사에 의해 포일 냉각가스의 분자는 여기(excitation)되며, 여기된 가스분자는 붕괴되면서 광자를 방출한다 [4]. 특히 냉매로 질소가스를 사용할 경우, 여기된 질소분자는 광학적으로 관측 가능한 $390 \text{ nm} < \lambda < 470 \text{ nm}$ 파장영역의 푸른색의 빛을 방출하므로 [8,9] 일반적인 CCD 카메라와 렌즈 시스템을 이용하여 측정이 가능

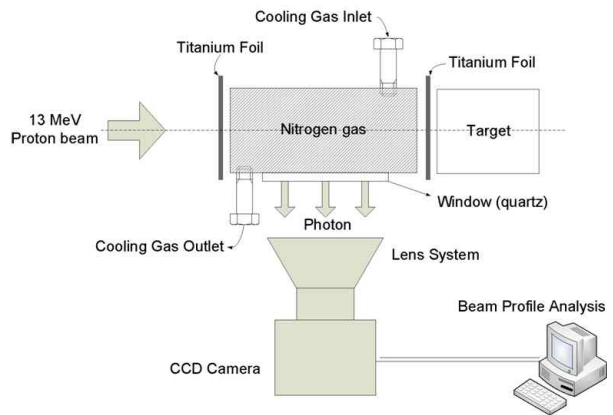


Figure 1. Schematic diagram of Beam Induced Fluorescence monitor in double-foil system.

하다. 또한 여기된 질소분자에서 방출되는 광자의 수명은 약 60 ns으로 아주 짧기 때문에 정확한 양성자의 위치를 측정할 수 있다.

BIF 모니터는 티타늄 이중포일, 질소가스 챔버, 석영 윈도우, 카메라 지지대, 광자를 집속할 수 있는 렌즈, 광자를 측정할 수 있는 카메라 및 횡단면 분석프로그램 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 KIRAMS-13 싸이클로트론에 최적화된 BIF 모니터의 설계 및 제작을 위한 개요도를 나타내고 있다.

티타늄으로 제작된 이중포일 사이의 질소 냉각가스에 13 MeV 양성자빔이 조사되면, 양성자빔과 질소가스의 상호작용에 의해서 발생하는 광자는 렌즈시스템과 CCD카메라에 의해 측정되고, 측정된 데이터 분포를 분석하여 양성자빔의 횡단면을 측정할 수 있다.

KIRAMS-13 싸이클로트론에 최적화된 BIF 모니터를 개발하기 위해서 양성자와 질소가스의 상호작용에 대한 연구를 하였다. 양성자빔과 포일 냉각가스의 상호작용으로부터 발생하는 광자의 발생율은 다음과 같다 [10].

$$N_{ph} \propto \frac{dE}{ds} \Delta s p \frac{f}{h\nu} \frac{\Omega}{4\pi} \frac{I_b}{qe} \quad (1)$$

여기서 dE/ds 는 양성자빔의 에너지 손실율, Ω 는 CCD카메라의 입체각(solid angle), p 는 질소가스의 압력, f 는 양성자빔의 에너지 손실이 광자 $h\nu$ 로 변환되는 비율로써 약 1%의 값을 갖는다. 고에너지 양성자빔과 질소가스의 상호작용은 SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) 코드 [11]를 사용하여 연구였으며, 질소가스에서 양성자빔

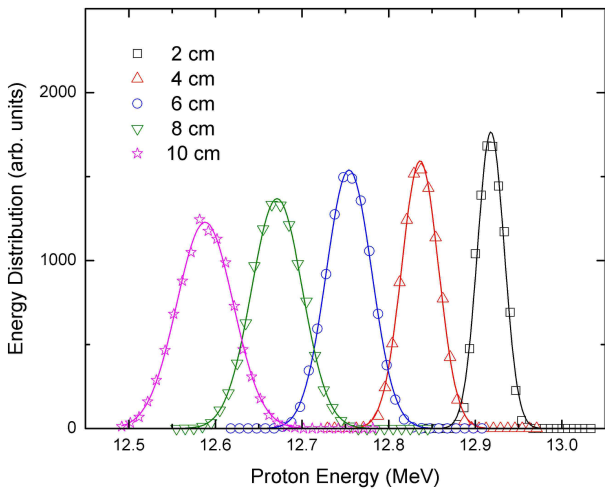


Figure 2. Energy distribution of proton beam in SRIM code simulation and Gaussian fitting curve (solid line) for various depth of nitrogen gas target.

의 투과깊이에 따라서 각각 시뮬레이션하였다. Fig. 2는 13 MeV의 단일 에너지로 입사되는 양성자빔과 1기압의 질소가스의 상호작용에서 양성자빔의 투과깊이에 따른 에너지 분포를 보여주고 있다. 양성자빔의 에너지 분포는 정규분포 함수 $\exp[-(E-E_0)^2/2\sigma^2]$ 를 이용한 회기분석을 통하여 양성자빔의 평균에너지 E_0 와 에너지퍼짐(energy spread) $\sigma = (E-E_0)/E_0$ 를 구할 수 있었다. 양성자빔의 평균에너지는 Fig. 3과 같이 양성자빔과 질소가스의 상호작용에 의해서 감소하는 반면 에너지퍼짐은 증가하며, 1 기압의 질소가스에서 깊이에 따른 13 MeV 양성자빔의 에너지 손실율은

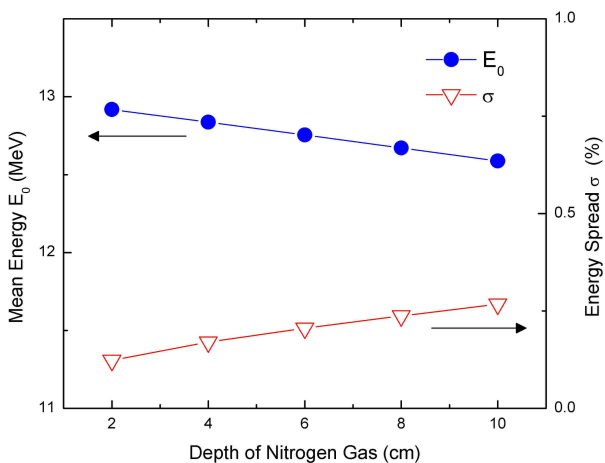


Figure 3. Mean energy and energy spread of proton beam in SRIM code simulation for various depth of nitrogen gas target.

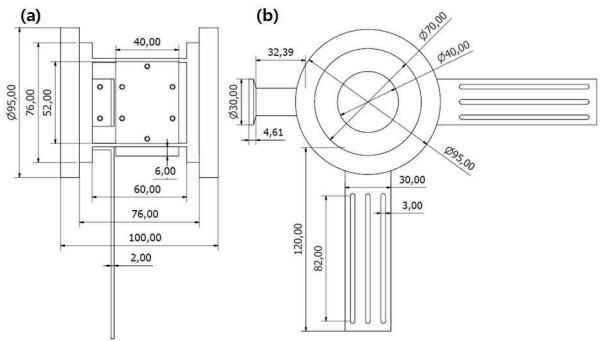


Figure 4. Design of Beam Induced Fluorescence monitor.

$dE/ds=4.1$ keV/mm이다. 이중포일 사이의 간격이 10 mm인 경우에 양성자빔의 에너지 손실은 0.3 %이고 양성자빔 반경은 약 1 μ m 증가하므로, 질소가스에 의한 양성자빔의 에너지 손실과 횡단면의 변화는 무시할 수 있을 정도로 작음을 알 수 있다.

BIF 모니터 본체는 Fig. 4와 같이 Autodesk Inventor를 이용하여 설계되었다. 티타늄 이중포일 사이의 질소가스 챔버는 플랜지 외경 95 mm, 내경 40 mm, 폭 100 mm 크기의 알루미늄으로 제작하였으며, 내부에서 발생하는 광자가 투과할 수 있도록 x축과 y축에 6 mm 두께의 석영으로 제작된 윈도우(40 × 50 mm)를 설치하였다. 또한 석영 윈도우와 CCD카메라 및 렌즈의 거리를 변경할 수 있는 가변 지지대를 설치하였다. Fig. 5(a)는 제작된 BIF 모니터 본체를 보여주고 있다.

양성자에 의해 여기된 질소분자는 가시광선 영역의 빛을 방출하므로, 일반적인 CCD 카메라 및 렌즈 시스템을 사용하여 검출이 가능하다. 발생하는 광자의 검출을 위해서 CCD 카메라, 카메라 렌즈 및 렌즈 확장관(lens extension tube), 컴퓨터 인터페이스 카드 등으로 영상검출시스템(Image acquisition system)을 구성하였다. CCD 카메라는 파장에 따른 상대적인 감광도를 고려하여 발생하는 광자의 파장영역을 충분히 측정할 수 있는 XC-ES50 모델(768×494 resolution, minimum illumination 0.3 lx, Sony)을 선택하였으며, 광자를 집속시키기 위하여 직경 29.5 mm의 렌즈(C2514-M, Pantex)를 사용하였다. 완성된 BIF 모니터는 원자력의학원의 MC-50 싸이클로트론의 빔라인에 Fig. 5(b)와 같이 설치하였다.

영상검출시스템에 의해 검출된 양성자의 위치데이터는 인터페이스 카드(PCI-1405 analogue, National Instruments)

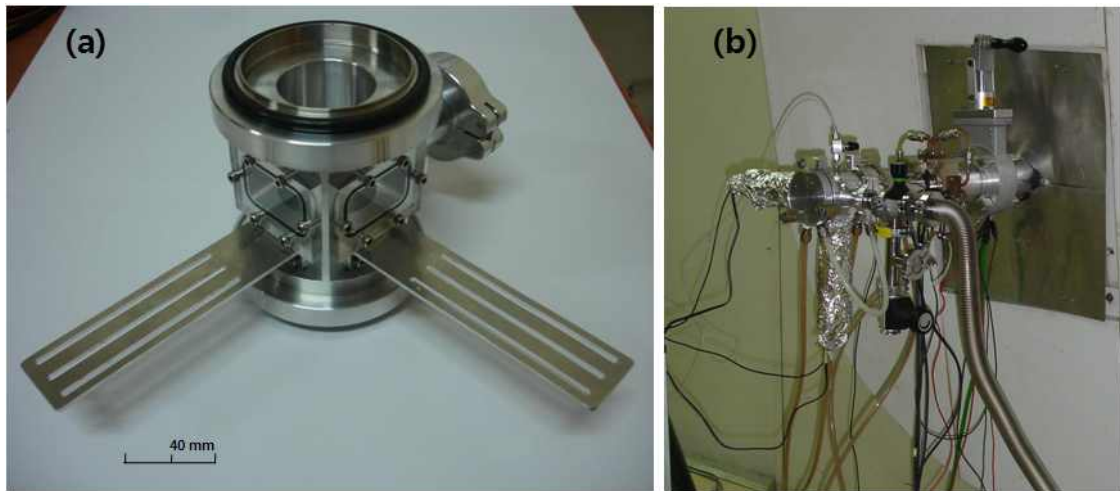


Figure 5. (a) Manufactured BIF monitor body, and (b) installation in MC-50 cyclotron beam line.

에 의해서 컴퓨터에 전송된다. 측정된 데이터를 영상처리 하고 분석하기 위하여 실시간 양성자빔 횡단면 분석 프로그램을 Lab-View 및 NI Vision Development Module를 사용하여 개발하였다. 양성자빔 횡단면 분석 프로그램은 x 축과 y축으로 구분되어 있으며, 각각의 축에는 카메라의 이미지, 지정위치에서의 양성자빔 형상, 3차원 밀도형상 등을 실시간으로 나타낼 수 있다. 또한 실시간으로 측정된 양성자빔 횡단면의 분포는 정규분포함수 $\exp[(r-r_c)^2/2r_b^2]$

를 이용한 회귀분석을 통하여 실시간으로 양성자빔의 중심 (r_c)과 반경(r_b)을 계산하였다.

III. 실험결과

양성자빔 횡단면 측정 실험은 원자력의학원의 MC-50 싸이클로트론에서 인출된 양성자빔을 이용하였다. MC-50

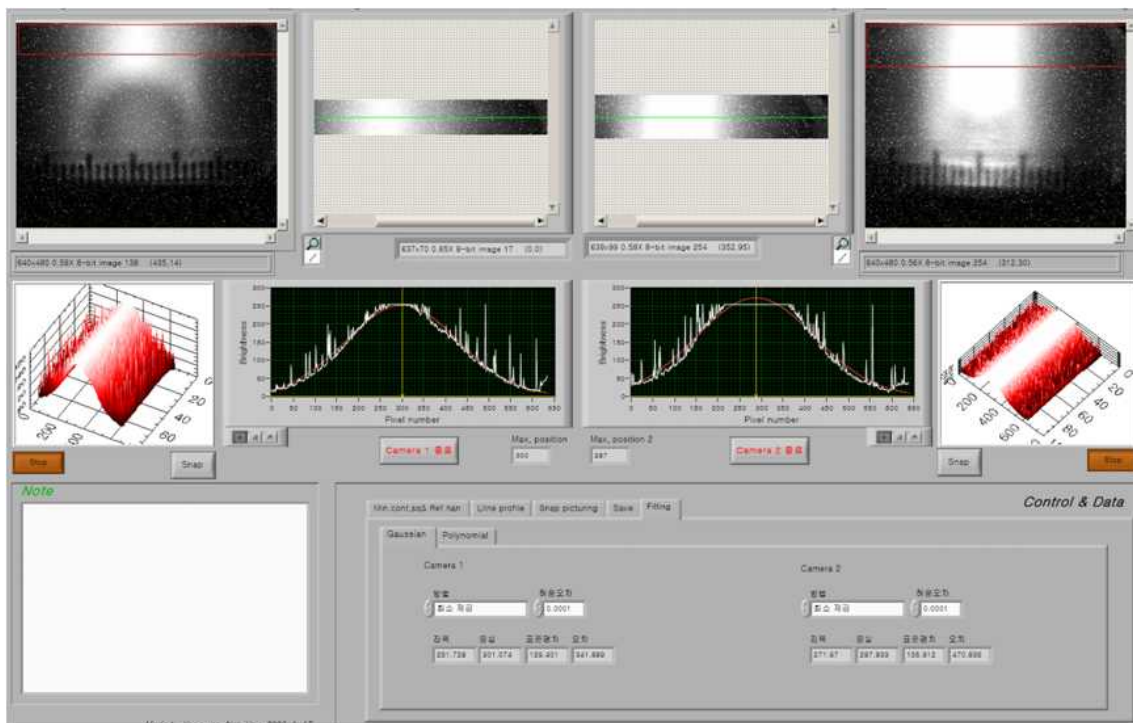


Figure 6. Experiments of beam profile measurement using BIF monitor for $I_b = 5$ mA.

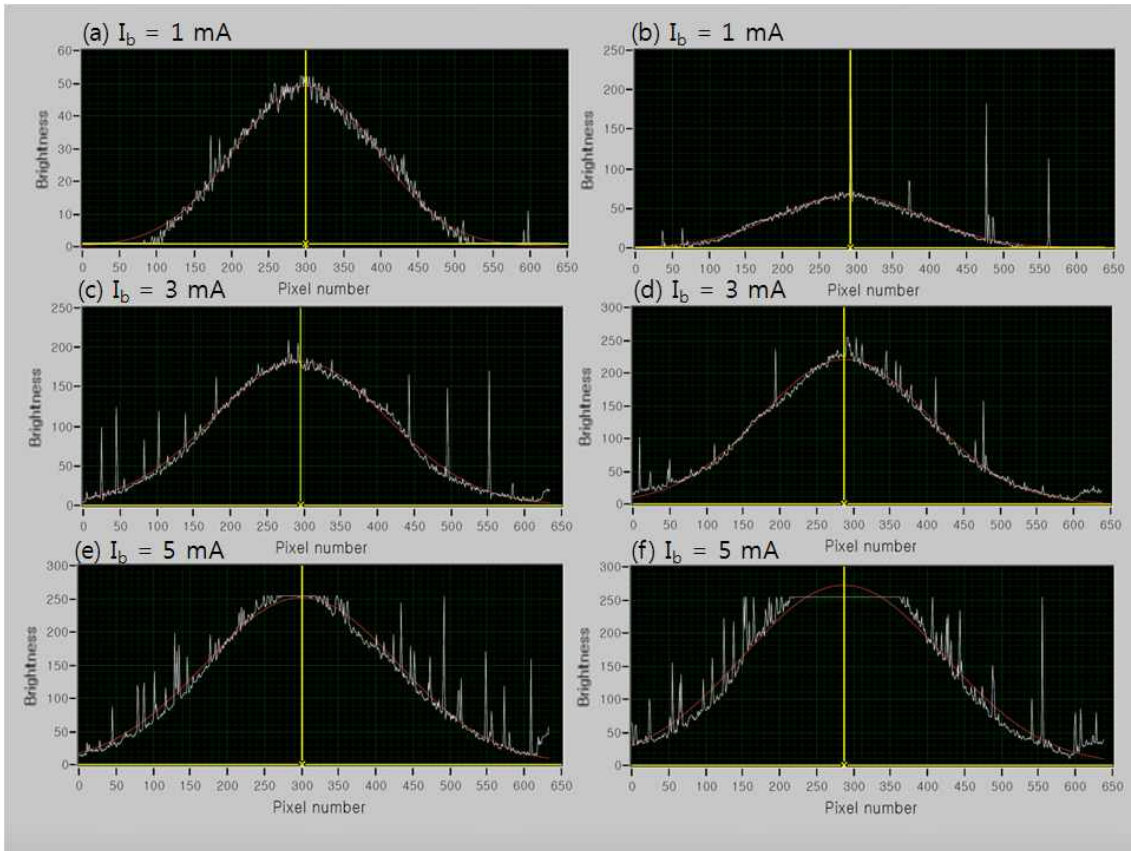


Figure 7. Measurements of proton beam profile at x-axis(a, c, e) and y-axes(b, d, f) for various beam current. Red and yellow lines indicate the Gaussian fitting curve and proton beam center, respectively.

싸이클로트론은 에너지 가변형으로써 20 MeV~50 MeV의 양성자빔의 인출이 가능하며, KIRAMS-13 싸이클로트론

과 같은 조건의 양성자빔 에너지를 얻기 위해서 20 MeV 양성자빔을 사용하였고, 알루미늄으로 제작된 degrader를

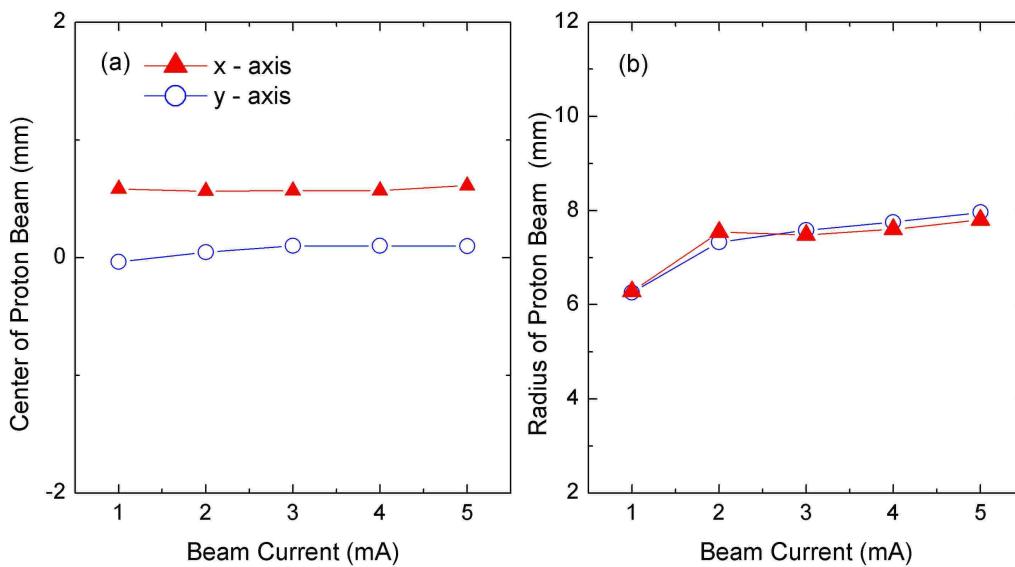


Figure 8. (a) The beam center and (b) beam radius of proton beam for various beam current.

사용하여 13 MeV를 낮추어 실험하였다. Fig. 6은 1 기압 KIRAMS에서 빔 전류가 5 mA인 양성자빔을 조사하였을 경우 이미지의 영상처리 및 양성자빔의 중심과 반경을 측정하기 위한 양성자빔 횡단면 분석용 프로그램의 실행상태를 보여주고 있다.

양성자빔과 질소가스의 상호작용에 의해서 발생하는 광자의 수는 양성자빔의 전류에 선형적으로 비례하므로, 양성자빔의 전류를 50 μ A에서 5 mA로 증가시키며 양성자빔을 조사하였다. Fig. 7은 양성자빔의 전류 변화에 대한 x축과 y축에서 측정된 광자의 분포를 보여주고 있다. 측정된 데이터로부터 정규분포함수를 이용한 회귀분석을 통하여 실시간으로 양성자빔의 중심과 반경값으로 계산되었다. 조리개 수치는 F4로 고정시키고 실험하였으며, 이 경우에 양성자빔의 전류가 2~5 mA 범위에서 정확한 횡단면의 측정이 가능하였다. 양성자빔의 전류가 1 mA 이하인 경우에는 발생하는 광자의 수가 작으므로 조리개 수치를 F2~F1.4로 변환하고, 5 mA 이상의 전류에서는 CCD 카메라의 측정범위 이상의 광자가 발생됨으로 조리개 수치를 F8~F16으로 변환하여 광자의 양을 조절하면 정확한 횡단면 측정이 가능하다.

측정된 픽셀단위의 데이터를 횡방향 위치로 환산하여 양성자빔의 횡단면 중심 및 반경을 구할 수 있으며, Fig. 8과 같이 양성자빔 전류의 변화에 대한 양성자빔의 중심 및 반경을 구하였다. 13 MeV 양성자빔을 이용한 실험결과 측정된 양성자빔의 횡단면 중심은 각각 $x_c \approx 0.6\text{mm}$, $y_c \approx 0.1\text{mm}$ 이고, 반경은 $x_b \approx 7.6\text{mm}$, $y_b \approx 7.7\text{mm}$ 였다.

IV. 결 론

양성자빔의 횡단면 측정은 싸이클로트론의 가동을 제어하고 안정되고 최적화된 양성자빔을 얻기 위해서 필수적이다. 권역별로 보급되어 있는 KIRAMS-13 싸이클로트론에서 양성자빔의 횡단면을 측정하기 위한 최적화된 BIF 모니터를 설계하고 제작하였다. 양성자빔과 질소가스의 상호작용에 대한 기초연구로써, SRIM 코드 시뮬레이션을 이용하여 질소가스에서 양성자빔의 전송특성연구, 양성자빔의 에너지 분포 분석, 질소가스 깊이에 따른 양성자빔의 에너지 감소율 계산 등을 연구하였으며, 이 연구를 기반으로 BIF 모니터를 설계하였다. 또한 발생하는 광자를 계측할 수 있

는 영상계측시스템을 구축하였으며 실시간으로 양성자빔 횡단면 중심과 반경을 측정할 수 있는 분석 프로그램 개발하였다. 13 MeV 양성자빔을 이용하여 실험하였으며, 높은 전류의 양성자빔도 측정이 가능함을 검증하였다.

이 연구에서 개발된 BIF 모니터는 상용화된 CCD 카메라 및 렌즈 시스템이 사용가능한 매우 경제적이고 반영구적인 빔 진단장치이다. 이 BIF 모니터를 이용하여 안정적이고 최적화된 양성자빔을 인출할 수 있으므로, 방사성의약품을 안정적으로 생산·공급 할 수 있으며 생산을 향상에도 기여할 것이다. 또한 고에너지 양성자빔을 이용한 의학·생명과학, 방사선 및 가속기 분야의 연구 및 교육에 기여 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술재단의 원자력연구개발사업으로 지원받았습니다.(연구 과제 관리코드: 2008-01518)

참고문헌

- [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] D. P. Sandoval, Proc. Beam Instr. Workshop BIW 93, Santa Fe, 273 (1993).
- [5] F. Becker, C. Andre, P. Forck, D.H.H. Hoffmann, and H. Iwase, Proc. EPAC 06, Edinburgh, 1013 (2006).
- [6] Y. K. Kim, H. S. Oh, I. J. Lee, J. S. Bak, and W. Namkung, J. Korean Vac. Soc. **2**, 17 (1993).
- [7] J. C. Clark and P. D. Buckingham, *Short-lived Radioactive Gases For Clinical Use* (Butterworth, England 1975).

- [8] R. H. Hughes, J. L. Philpot, and C. Y. Fan, *Phys. Rev.* **123**, 2084 (1961).
- [9] L. W. Dotchin, E. L. Chupp, and D. J. Pegg, *J. Chem. Phys.* **59**, 3960 (1973).
- [10] M. A. Plum, E. Bravin, J. Bossert, and R. Maccaferri, *Nucl. Instrum. Meth. A* **492**, 74 (2002).
- [11] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The stopping and range of ions in solids* (Pergamon Press, New York, 1985).

Transverse Profile Measurement of Proton Beam using the Beam Induced Fluorescence Monitor in KIRAMS-13 Cyclotron

S. K. Nam^{a*} and K. B. Kim^{b†}

^a*Department of Physics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701*

^b*Cyclotron Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 200-701*

(Received October 13, 2009, Revised November 3, 2009, Accepted November 12, 2009)

To get the stable and optimized proton beam in the KIRAMS-13 cyclotron which installed in the regional cyclotron center, it is necessary to measure the transverse profile of proton beam. Beam Induced Fluorescence monitor is one of the non-destructive methods to measure the beam profiles, and it has many advantages such as a simple structure, real-time measurement, and minimum energy loss. The objective of this research is the design and development of Beam Induced Fluorescence monitor to measure the proton beam profiles in the KIRAMS-13 cyclotron.

Keywords : BIF monitor, 13 MeV proton beam, Measurement of transverse profile

* [E-mail] snam@kangwon.ac.kr

† [E-mail] kbum@kangwon.ac.kr