

# 기관고유연구사업 결과보고서

(과제번호 : 0610610 )

방사선 생의학 및 공학 실험을 위한 마이크로 입자빔  
조사장치에 관한 연구

Studies on the microbeam irradiation system for radiation  
biomedical and engineering experiments.

과제책임자 : 김종원

국 립 암 셴 터

# 기관고유연구사업 결과보고서

(과제번호 : 0610610 )

방사선 생의학 및 공학 실험을 위한 마이크로 입자빔 조사장치에  
관한 연구

Studies on the microbeam irradiation system for radiation  
biomedical and engineering experiments.

과제책임자 : 김종원

국립암센터

(뒷면)

(측면)

|  |   |
|--|---|
| <p data-bbox="279 1099 1093 1200">1. 이 보고서는 국립암센터 기관고유연구<br/>사업 결과보고서입니다.</p> <p data-bbox="279 1279 1093 1440">2. 이 보고서 내용을 인용할 때에는 반드시<br/>국립암센터 연구사업 결과임을 밝혀야<br/>합니다.</p> <p data-bbox="643 1682 722 1760">↑<br/>6cm ↓</p> | <p data-bbox="1206 405 1262 528">↑<br/>5cm<br/>↓</p> <p data-bbox="1206 640 1238 775">과<br/>제<br/>명</p> <p data-bbox="1206 1402 1238 1637">국<br/>립<br/>암<br/>센<br/>터</p> <p data-bbox="1206 1704 1262 1827">↑<br/>3cm<br/>↓</p> |
|--|---|

1. 이 보고서는 국립암센터 기관고유연구사업 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 인용할 때에는 반드시 국립암센터 연구사업 결과임을 밝혀야 합니다.

# 제 출 문

국립암센터 원장 귀하

이 보고서를 기관고유연구사업 “방사선 생의학 및 공학 실험을 위한 마이크로 입자빔 조사장치에 관한 연구” 과제의 결과보고서로 제출합니다.

2008. 1.

국립암센터

과 제 책 임 자 : 김종원

연 구 원 : 윤종철

” : 김도균

” : 윤민영

# 목 차

## < 요약 문 >

(한글)

(영문)

1. 연구사업의 최종목표
2. 연구사업의 내용 및 결과
  - 2.1 마이크로 빔라인 설계
  - 2.2 마이크로 빔 형성
  - 2.3 빔 에너지 측정
  - 2.4 4중극 전자석 설계
  - 2.5 전원제작
3. 연구결과 고찰 및 결론
4. 연구성과 및 목표달성도
5. 연구결과의 활용계획
6. 참고문헌

## < 요약 문 >

|                  |  |   |        |
|------------------|--|---|--------|
| 연구분야(코드)         | C-4                                      | 과제번호                                      | 061061 |
| 과제명              | 방사선 생의학 및 공학 실험을 위한 마이크로 입자빔 조사장치에 관한 연구 |   |        |
| 연구기간/연구비<br>(천원) | 합계                                       | 2006년 9월 일 ~ 2007년 12월 31일                | 73,100 |
|                  | 1차년도                                     | 2006년 9월 일 ~ 2006년 12월 31일                | 23,100 |
|                  | 2차년도                                     | 2007년 1월 1일 ~ 2007년 12월 31일               | 50,000 |
|                  | 3차년도                                     | 년 월 일 ~ 년 월 일                             |        |
| 과제책임자            | 성명                                       | 김종원                                       | 주민등록번호 |
|                  | 전화번호                                     | 031-920-1727                              | 전자우편   |
| 색인단어             | 국문                                       | 마이크로 빔, 입자검출기, 양성자 빔                      |        |
|                  | 영문                                       | microbeam, particle detector, proton beam |        |

### ◆ 연구목표

#### <최종목표>

- 양성자 실험실내 마이크로 빔 조사장치 설치 및 응용연구.
- 입자 빔 에너지 및 2D 분포 측정 장치개발 및 측정 기술 습득.

#### <당해년도 목표>

- 마이크로 빔 라인 설계
- 빔 에너지 변환관련 장치설계 및 제작.
- 양성자 빔 에너지 측정
- 마이크로빔 형성 및 관측을 위한 장치설계.
- 사용자를 위한 타겟 장치 설계.

### ◆ 연구내용 및 방법

- 암센터 양성자치료시설의 실험실내 빔 특성조사.
- TRANSPORT 등 빔 광학 프로그램을 사용하여 마이크로 빔 라인 설계.
- 치료 빔 에너지인 70-230 MeV로부터 20-50 MeV로 빔의 감속 및 빔 크기 조절을 위한 장치 설계를 위한 몬테카를로 모의시험 실시.
- Time of flight 방법을 사용한 양성자 빔 에너지 측정.
- 빔 크기조절을 위한 4중극 전자석을 POISSON 프로그램을 사용하여 설계.
- 100 ppm 이하의 높은 안정도를 가지는 40A/20V 전원제작.
- CR39 플라스틱 및 CCD 카메라-섬광체 시스템을 사용하여 마이크로 빔의 track 및 2D 분포 측정.
- 슬릿을 사용하여 마이크로 빔을 형성하는 장치를 제작한 후 원자력의학원의 40 MeV 양성자 빔을 사용하여 테스트.

◆ 연구성과

-정량적 성과

| 구분        | 달성치/목표치 | 달성도(%) |
|-----------|---------|--------|
| SCI 논문 편수 | 1/2     |        |
| IF 합      | 0.98/3  |        |
| 기타 성과     | 논문발표    |        |

-정성적 성과

입자 빔을 이용한 마이크로 빔 형성 장치에 대한 연구를 국내에서 첫 번째로 시도하고 제작된 장치일부가 PIXE (proton induced X-ray emission) 실험 등에 유용하게 사용됨.  
 마이크로 빔 장치에 대하여 방사선생물 그룹에서의 관심을 표명함. 실제 사용은 실험인력 등의 제한으로 이루어지지 않았으나 필요할 경우 추후에 가능할 것임.

◆ 참여연구원

(최종연도 참여인원)

성 명

김중원, 김도균, 윤중철, 윤민영

주민등록번호

※ 요약문의 총분량은 2page 이내로 제한함



## Project Summary

|  |   |
|--|---|
| <b>Title of Project</b>  | Studies on the microbeam irradiation system for radiation biomedical and engineering experiments. |
| <b>Key Words</b>   | microbeam, particle detector, proton beam   |
| <b>Project Leader</b>  | Jong-Won Kim  |
| <b>Associated Company</b>  |   |
| <p>○ The NCC proton therapy facility can deliver proton beams in the therapy energy range of 70–230 MeV to the experimental area, while the energy range for a microbeam is 20–50 MeV. A goal of this project was to install a beam line in the experimental area, which can form micro-size beams for various users. An energy degrader is used to reduce the beam energy. We plan to use the initial beam energy of 100–150 MeV for microbeams considering transmission efficiency and beam current available. The usual choice of degrader material is Be or graphite, but first it was made of acryl for testing. A large increase of the beam emittance was observed as predicted by simulations when the beam energy is degraded from 100 MeV to 20 MeV.</p> <p>○ The design of micro-beamline for the experimental area was studied using the beam optics codes TRANSPORT and TURTLE. We chose a simple configuration in forming a microbeam: an energy-degrader followed by two sets of slits and a quadrupole triplet to focus the beam. The first slit is to reduce the beam divergence, and the second slit to define emittance. We chose a quadrupole triplet as the focusing element, which can better control the beam size in transverse planes compared to a quadrupole doublet. The quadrupole was designed using POISSON code, but was not manufactured due to funding constraints. But two sets of highly stable power supply for the quadrupole magnets were first produced and tested to be well below required stability of 100 ppm over 10 hours.</p> <p>○ We devised a slit system to form a microbeam, whose opening can be controlled as small as 10 μm. The beam test of the slit was performed using a 40 MeV proton beam at the Korea Cancer Center Hospital. Monte Carlo simulations have also been performed and compared with measurements to check variations of the beam size as functions of the opening size and the distance from the exit of the slit.</p> |   |

○ The microbeam system should deliver the prescribed dose on the defined area. To calibrate the system for the absolute dose, it is needed to know the energy and profile of a beam. We have first tried to measure the beam energy directly using a CsI or plastic scintillation detector, but background radiation hindered measurements. A successful method was to measure the time of flight of a beam using two sets of plastic scintillator. On the other hand measurement of the beam profile is a difficult task for a microbeam. The beam profile was first measured using a CR39 plastic, which can visualize the beam tracks. Such a system is accurate and well established, but has disadvantage of confirming the profile away from the site. A CCD camera-scintillator system together with a microscope was tested to locate and observe the 2D profile of a beam. Calibration of the absolute dose requires a calibrated ionization chamber having good spatial resolution.

## 1. 연구사업의 최종목표

- 양성자 실험실내 마이크로 빔 조사장치 설치 및 응용연구.
- 입자 빔 에너지 및 2D 분포 측정 장치개발 및 측정 기술 습득.

## 2. 연구사업의 내용 및 결과

양성자 빔 치료에 사용되는 70-230 MeV 양성자 빔을 [1] 야간 및 주말에는 실험실에 제공하여 내부 및 외부의 이용자들이 빔 실험을 할 수 있도록 하는 것은 외국의 양성자 치료시설에서도 종종 이루어지고 있다. 국내의 경우 지금까지는 원자력의학원의 약 50 MeV 양성자 빔이 가장 높은 에너지였고 사용자 프로그램이 형성되어 있다. 보다 높은 에너지인 50- 230 MeV 빔에 대한 수요를 확인하기 위하여 수년전 수요조사를 실시하여 표1을 얻었다.

본 과제에서는 수 mm 이하의 정밀한 빔 및 20-50 MeV의 낮은 에너지 양성자 빔을 제공하는 장치를 실험실에 설치하여 보다 다양한 빔 사용이 가능한 포괄적인 실험시설을 설치하기 위함이다. 다양한 장치를 구상할 수 있으나 현 설계에서는 가장 간단한 장치의 이용을 선택하였다.

표 1: 2003년 양성자실험실 수요조사.

| 실험 대표자 | 소속기관             | 연구테마  |
|--------|------------------|---|
| 지세 환   | 한국원자력연구소         | Radiation damage in nuclear materials         |
| 이철의    | 고려대학교            | 저도 및 심체계의 수소결합에 대한 양성자 조사효과 연구                |
| 신관우    | 광주과학기술원          | Surface modification by irradiation of proton |
| 조남인    | 선운대학교, 전자정보통신공학부 | 양성자 빔 감지기 제조                                  |
| 조성오    | 한국과학기술원          | 태양전지의 고에너지 양성자에 대한 조사손상효과                     |
| 배창유    | 국립순천대학교          | 식물기관 및 배양세포의 양성자조사에 의한 번이유발과 해석               |
| 김귀년    | 경북대학교            | 고에너지 양성자 및 중성자장에서의 반도체 장비의 SEU/MBU 실험 등       |
| 한인식    | 이화여자대학교          | 핵실험   |
| 김우영    | 경북대학교            | 검출기   |
| 이춘식    | 중앙대학교            | 핵실험, 검출기                                      |
| 방형찬    | 서울대학교            | 핵실험   |
| 윤민영    | 서울대학교            | 질량분석  |
| 민경욱    | 한국과학기술원          | Radiation damage by space radiation           |
| 김홍균    | 한국원자력연구소         | 검출기 검사  |
| 김지용    | 원자력의학원           | 동위원소이용  |

### 2.1 마이크로 빔라인 설계

마이크로 빔 장치는 양성자치료시설의 실험실에 설치되어 사용자시설로 사용될 수 있다. 수 mm 이하 크기인 빔의 경우 생물체 정밀조사 등에 필요하여 [2-5] 본 연구과제에서 개발하는 장치는 치료시설 내 빔 실험실이외에도 필요한 기술이다. 그림 1은 실험실의 위치를 표시하였고 치료 에

사용되는 70-230 MeV 범의 실험실 사용은 현재로도 가능하나 마이크로 빔으로 사용하기 위해서는 50 MeV 이하로 에너지감소가 필요하다.

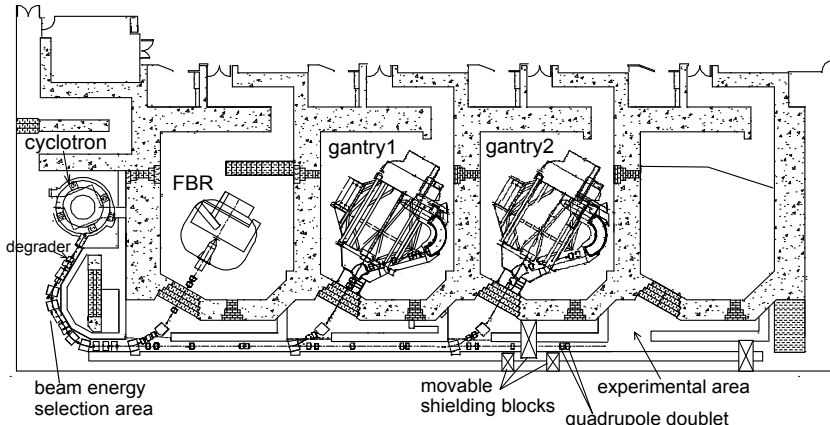


그림 1: 양성자 치료시설의 배치도 및 실험실의 위치.

사이클로트론에서 가속되는 빔 에너지는 고정되어 있어서 빔 에너지변환에는 energy degrader를 사용해야 한다. 그림2는 실험실에 설치된 테스트 degrader로 아크릴로 만들어져 있으나 실제 사용을 위해서는 그래파이트나 Be로 만들어진 것이 다중산란효과의 감소에 유리하다. 또한 산란에 의한 빔 손실을 최소화하기 위해서는 degrader에 입사되는 빔이 최대한 focusing 되어야 한다[6].

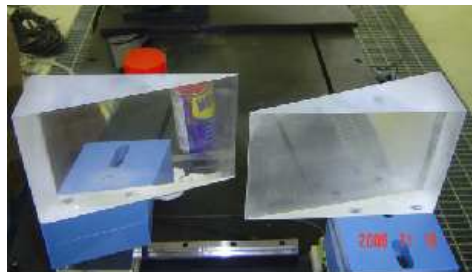


그림 2: 실험실에 설치한 아크릴로 제작된 energy degrader.

가속기로부터 실험실 입구까지의 양성자 빔 전달은 기존의 치료 빔에 대한 전자석 setting을 이용할 수 있다. 그림 1에 보이는 두 번째 갠트리실로 빔을 구부리는 2중극 전자석까지는 치료 빔의 빔 전달 setting을 사용하고 이후에 놓여있는 3대의 4중극 전자석을 사용하여 실험실에 조절된 크기의 빔을 전달할 수 있다.

그림3은 빔 전송프로그램인 TRANSPORT[7]를 사용하여 빔이 실험지역에 전달될 때를 가정하고 계산한 빔 envelope 결과이다. 위아래의 envelope는 각각 수평 및 수직면에 대한 것이고 운동량 분산은 빔 에너지 변환장치 (Energy Selection System)이후 없어지도록 설계되어 있다. 이때 빔 에너지는 180 MeV 이고 빔 envelop 계산의 시작점은 ESS의 첫 번째 요소인 energy degrader의 출구이다.

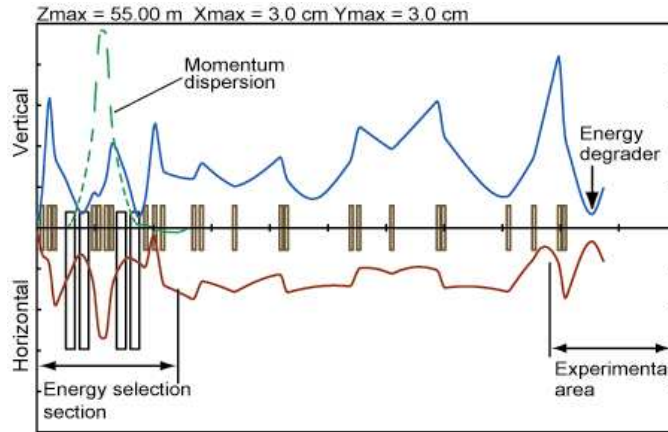


그림 3: 빔 envelope 계산 결과. 실험지역에 전달된 빔은 X-Y 양 방향에 대해 집중됨. 계산의 시작지점은 사이클로트론에서 추출된 빔이 energy degrader에서 나온 이후이다.

Degrader에 의해 에너지가 조절된 빔은 ESS를 통과하는 과정에서 2중극 전자석 및 슬릿시스템에 의해 정확한 에너지가 선택되게 된다. 그림 4는 230 MeV의 빔이 에너지변환 과정을 통과한 이후 사용되는 효율을 에너지의 함수로 그린 것으로 약 80 MeV로 에너지를 줄일 경우 투과효율은 수 %에 불과하다.

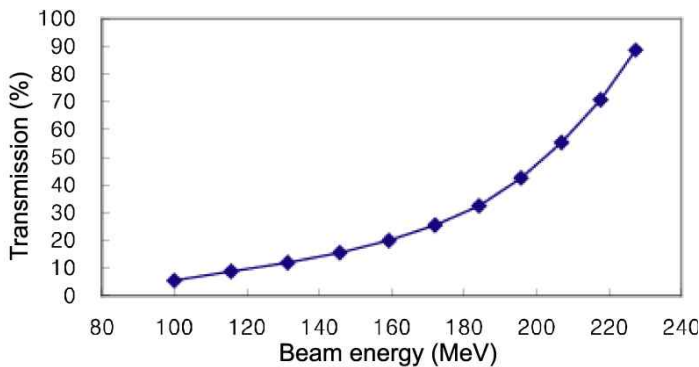


그림 4: 빔 에너지에 따른 빔 전송효율 (transmission efficiency). 낮은 에너지에 도달하기 위해서는 두꺼운 energy degrader를 통과하여야 하고 결과로 전송효율이 감소한다.

실험실의 마이크로 빔 라인은 실험실에 설치된 energy degrader로부터 시작된다. 실험 빔 라인은 사용자의 필요에 따라 여러 형태가 될 수 있으나 본 과제에서는 degrader이후 2중극 전자석을 사용하지 않고 4중극 전자석 3대 (triplet)를 사용하는 방법을 채택하였다. 그림 5는 degrader 이후의 빔 광학을 TRANSPORT 및 TURTLE 프로그램 [8]을 사용하여 계산한 것이다. degrader투과 이후 두 곳에서 slit을 사용하여 빔 emittance를 줄인 다음 triplet으로 빔을 focal point에 집중하는 방법으로 doublet을 사용하여서도 집중이 가능하나 x-y 대칭을 얻기 힘들다.

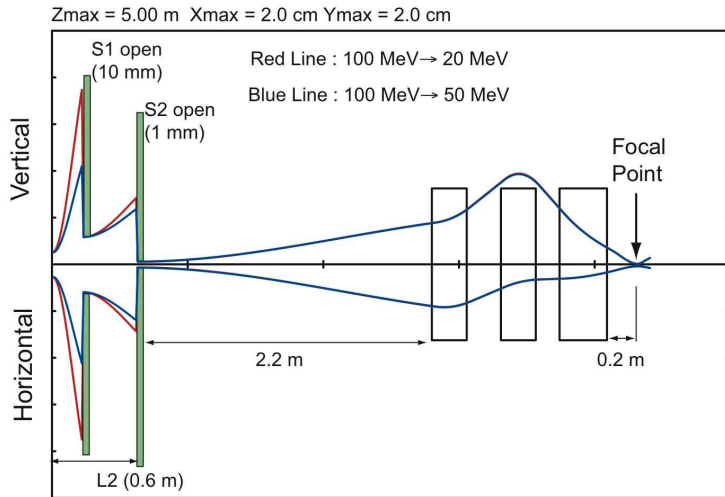


그림 5: 실험실에 설치된 energy degrader를 통과한 이후의 빔 envelope 계산 결과.

그림 5의 계산에 사용된 100 MeV 빔의 위상공간은 그림 6과 같다. 또한 그림 6에서 degrader에 전달된 100 MeV 빔이 투과 후 50 MeV, 20 MeV로 변환될 때 빔 위상공간의 변화를 볼 수 있다. 특히 20 MeV로 감속될 때 빔의 각도 분산이 급격히 증가함을 알 수 있다.

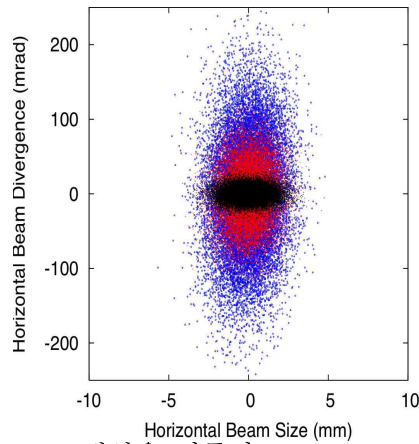


그림 6: 실험실에 전달된 빔이 X-Y 대칭을 이루며 energy degrader 통과 전후의 transverse 위상공간. 중심부의 검은 색은 전달된 100 MeV의 위상공간이고 붉은색은 투과 빔의 에너지가 50 MeV 일때 푸른색은 20 MeV로 변환될 경우이다.

집속지점에서의 transverse 위상공간은 그림 7에 보이는 것과 같이 S2 슬릿 (1 mm 열려있는 경우)에 의해 형성된다. 그 후 집속지점에서는 4중극 전자석 triplet의 demagnification factor에 기인하여 빔 크기가 작게 집속됨을 알 수 있다. 이때 빔에 포함되어 있는 운동량 분산에 의한 요소가 빔 크기결정에 중요 요소가 된다. 특히 위상 공간내 beam divergence가 큰 경우 빔 크기가 분산되는 효과는 이러한 운동량분산에 의한 것으로 계산된다.

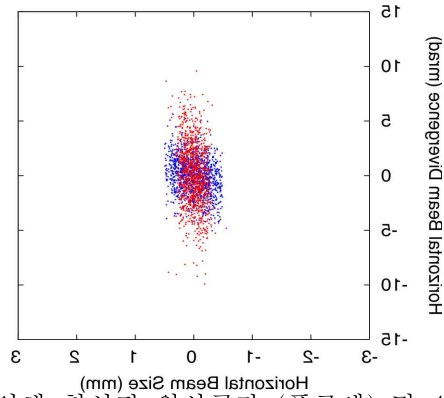


그림 7: 두 번째 슬릿(S2)에 의해 형성된 위상공간 (푸른색) 및 4중극 전자석에 의해 집속된 지점에서 위상공간 (붉은색).

그림8은 S1이 10 mm 열려있을 때 S2 열림을 조절하여 집속되는 빔 크기를 계산한 것이다. S2의 열림이 0.5 mm까지 감소해도 빔 크기가 선형으로 감소함을 알 수 있다. 이때 빔의 크기는 빔의 공간 분포가 Gaussian임을 가정할 때  $\pm 1\sigma$ 로 정의했다. 여기서

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

빔 크기를 0.2 mm이하로 집속할 때 투과효율이 급속히 감소하여 이용할 수 있는 빔 전류가 10 pA이하로 감소한다.

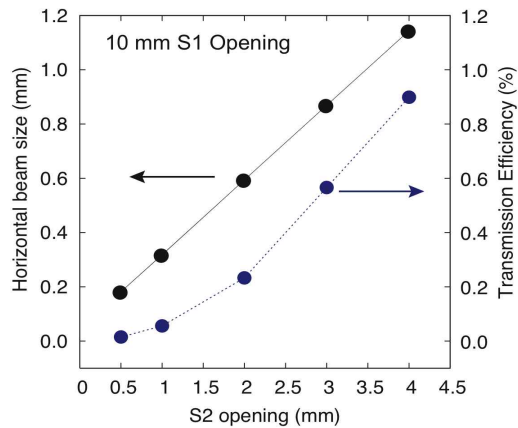


그림 8: 집속요소 앞쪽에 슬릿을 사용함에 의해 형성되는 빔 크기 및 빔 전달효율. S2 슬릿을 작게 함으로써 0.1 mm 이하의 빔 크기를 얻을 수 있으나 빔 전달효율 또한 급속히 감소한다.

그림 9는 S2 슬릿에 의해 결정된 빔 크기가 빔 에너지 변환 path에 따라 변함을 보여준다. 간단하게 표현하면 에너지 감소가 적어 빔 운동량의 분산이 적을 수록 작은 크기의 빔을 만들 수 있음을 보여준다. 또한 빔의 longitudinal phase space가 energy degrader를 투과한 후 어떻게 변화하는지 보여주는데 S1/S2 슬릿이 에너지 분산을 일부 감소시켜줄 수 있다.

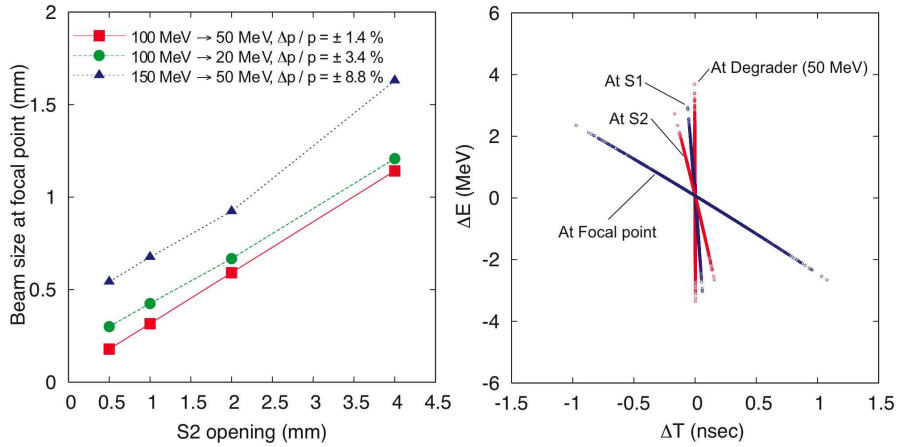


그림9 (왼쪽) S2 열림에 따른 빔 크기 변화를 빔 에너지 변환 path에 따라 그린 것임. 감소되는 에너지가 작을 때 즉 빔 내 운동량분산이 적을수록 빔 크기를 작게 할 수 있음을 알 수 있다. (오른쪽) 실험실내 degrader를 통과한 빔의 longitudinal 위상공간의 변화를 각 단계에 대해 보여 줌. 여기서 S1,S2 slit이 운동량 분산을 줄여줌을 알 수 있다.

이상의 마이크로 빔라인 설계에 관련된 내용은 참고문헌 [9]에 좀 더 자세히 기술되어 있다.

## 2.2 마이크로 빔 형성

마이크로 빔 형성은 크게 두 가지 방법으로 가능하다: 1) 빔 집속지점 부근에 slit을 설치하여 빔 크기 조절, 2) 빔 집속이전에 slit을 사용하여 빔 크기를 정한 이후 빔 집속장치를 사용하여 빔을 demagnification 하여 빔 크기를 조절. 첫 번째 방법이 간단한 대신 빔 조사 대상 근처에서 빔을 대량 손실함으로써 중성자 감마선 등의 주변 방사능 영향이 강하다. 반면 두 번째 방법을 사용하기 위해서는 수 m 이상의 길고 정밀하게 조정된 빔 라인 및 강력한 빔 집속요소가 필요하여 고가의 조사장치가 된다. 2.1절에서 설계된 빔 라인의 경우 수 백  $\mu\text{m}$  크기의 빔까지는 방법 2)로 가능하나 더욱 크기를 줄이기 위해서는 방법 1)이 필요할 것으로 사료된다. 이는 사용하는 전자석의 aberration, alignment error 등의 영향 때문이다.

그림 10은 X-Y 두 slit이 밀착해 있고 각각의 slit opening 크기를 슬릿 판 사이에 일정한 두께의 shim을 위치시킴으로써 약 10  $\mu\text{m}$ 까지 조절할 수 있는 slit 장치이다.

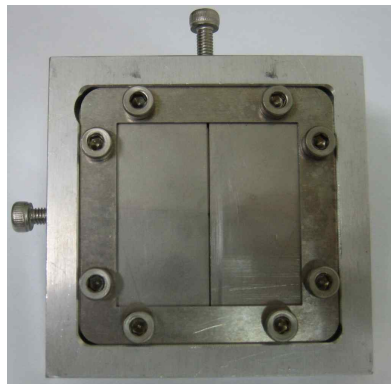




그림 10: 마이크로빔을 형성하기 위한 슬릿 시스템. X-Y slit 두 장이 겹쳐있다. 두 개의 볼트 및 일정한 두께의 shim을 사용하여 슬릿의 열린 크기를 조절할 수 있다.

그림 11은 원자력의학원 40 MeV 양성자 빔 포트에 위치시킨 slit 시스템을 보여준다. 슬릿 뒤쪽에 플라스틱 섬광체로 빔 에너지를 측정하기 위한 셋업이다. 슬릿 뒤쪽의 흰 물체는 1cm 직경의 섬광체 검출기를 둘러싸고 있는 플라스틱으로 중성자 배경 복사에 의한 소음을 줄이기 위함이다.

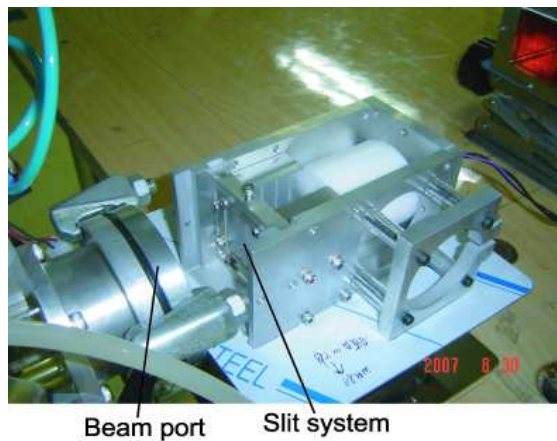


그림 11: 슬릿 시스템을 사용하는 마이크로 빔 형성 실험을 위한 장치설치.

마이크로 빔의 경우 크기측정이 중요한 요소이다. 그림 12는 CR39 플라스틱을 [10,11] 사용한 빔 트랙측정으로 빔 조사 이후 산을 사용한 수 시간 동안의 에칭이 필요하다. 이와 같이 특수 플라스틱의 방사선손상 (radiation damage)을 이용하는 경우는 정확한 빔 선량측정은 가능하나 이는 빔 발생장치가 정밀하게 calibration 되었을 때 편리하고 현재 사이클로트론으로부터의 양성자 빔 경우는 조사 이전 정확한 선량 setting을 보장하기 어려운 점이 있다. 그리고 빔 크기가 1 mm 이상이 되면 Gafchromic film (Gafchromic EBT)과 같이 현상 없이 대략적인 빔 크기를 직접 볼 수 있는 필름을 사용할 수 있으니 빔이 보다 작을 경우 판독이 불분명 해진다.

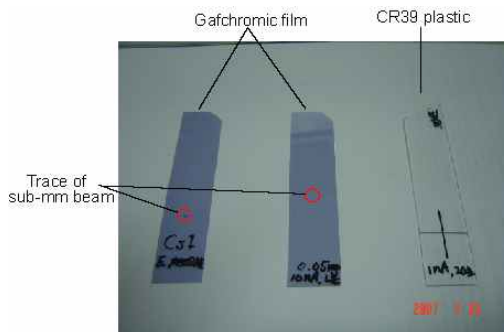


그림 12: 양성자 빔 트랙을 볼 수 있는 CR39 플라스틱 및 방사선조사의 QA (quality assurance) 용으로 비교적 널리 사용되는 Gafchromic 필름을 사용한 빔 profile 측정.

그림 13은 CR39 플라스틱에 측정된 양성자 빔의 트랙으로 빔 전류는 1 nA, 조사시간은 10 sec로 고정되어 있고 트랙의 겹침이 많아 좀 더 정밀한 측정을 위해서는 입사되는 총 양성자 수를 줄여야 함을 알 수 있다.

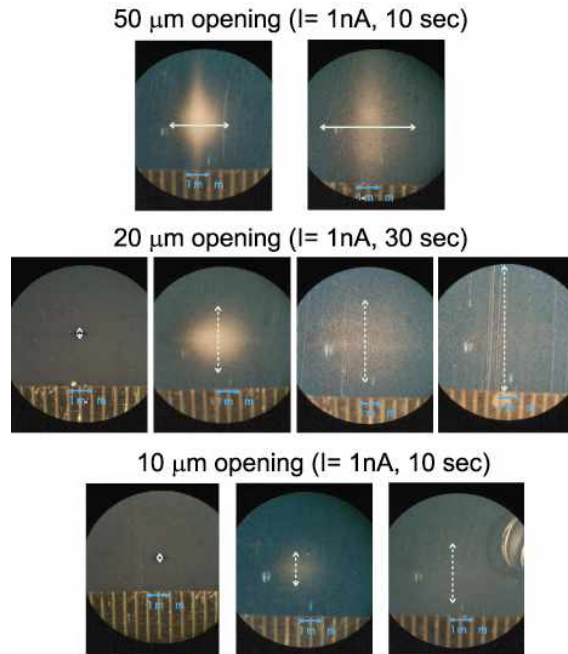


그림 13: CR39 플라스틱에 측정된 양성자 빔의 track.

슬릿을 사용하여 빔 크기를 변화하는 장치에 대한 몬테카를로계산을 GEANT3 [12] 프로그램을 사용하여 수행하였고 그림 14에서 측정값과 비교하였다. 특히 측정이 공기 중 또는 진공에서 이루어질 때의 차이를 비교하여 빔 크기가 작을 때 공기에 의한 산란이 미치는 영향을 조사하였는데 투과 공기 영역이 1-2 cm 이상일 경우 산란이 급격히 커짐을 알 수 있다. 실제 실험의 경우 빔 크기가 계산에 의한 것 보다 수 배 이상 클 수 있는데 이는 마이크로 빔 형성 장치가 잘 고정되어 있지 못하고 빔 또한 상당한 움직임이 보이며 슬릿에서의 빔 산란효과가 이상적인 경우의 계산보다는 크기 때문일 것으로 추정된다. 10 μm 슬릿을 사용하고 거리가 5mm 떨어져 있을 때 빔의 전체크기는 약 1.5 mm 였다.

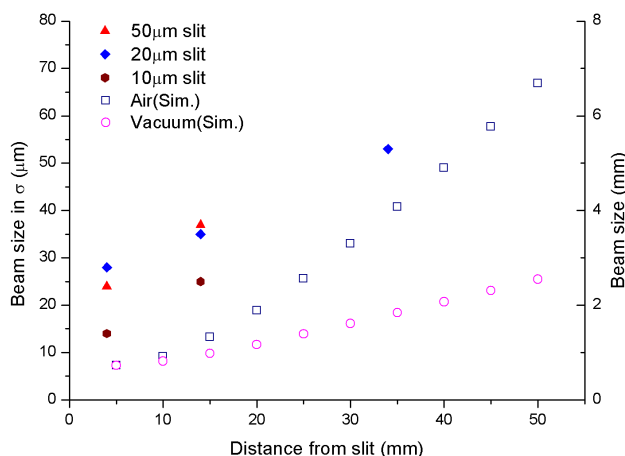


그림 14: slit으로 부터의 거리에 따른 빔 크기 변화의 측정 값 및 계산 값과의 비교. 모의계산의

경우는 왼쪽의 빔 크기좌표, 측정은 오른쪽의 빔 크기좌표를 따른다.

CR39를 사용한 빔 분포측정에 조사 후 산을 사용한 에칭 등이 필요한 점은 현장에서의 측정 및 빔 크기조절에 도움이 되지 않는다. 이러한 문제점을 덜기 위해서는 조사와 함께 빔 선량을 계산할 수 있는 장치가 필요하다. 이전의 기관고유사업 등을 통해 개발된 CCD camera-scintillator 시스템 [13] 및 현미경을 사용하여 현장에서 측정하는 시스템을 그림 15와 같이 제작하였다.

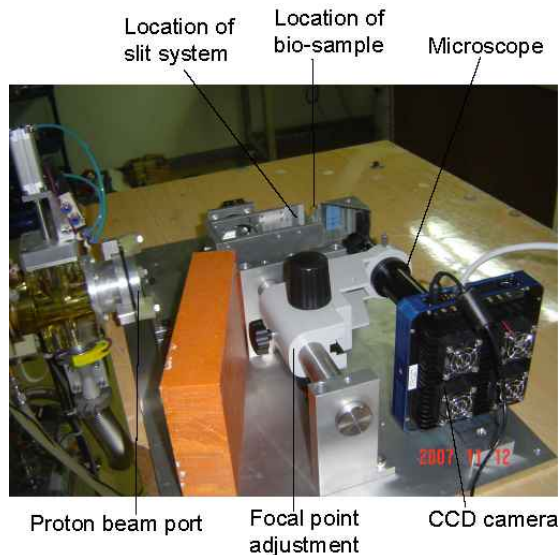


그림 15: CCD 카메라-섬광체 스크린을 사용하여 빔의 2D 분포를 측정할 수 있는 장치설치. 카메라는 현미경에 연결되어 빔을 확대 측정한다.

CCD 카메라 시스템으로 측정한 빔 프로파일은 그림 16과 같다. 정확한 빔 크기를 알기 위해서는 정확한 현미경의 배율 등이 필요하여 CCD 영상의 치수를 쉽게 calibration할 수 있는 장치를 고려 중이다. 또한 섬광체를 이용한 2D profile과 실제 빔의 조사량과의 관계를 알기 위해서는 calibration된 이온챔버와 빔 전류와의 관계를 알아야 한다. 이러한 calibration은 고정된 장치에 대한 측정이 필요하여 실제 cell에 대한 조사가 필요할 때 수행해야 한다.

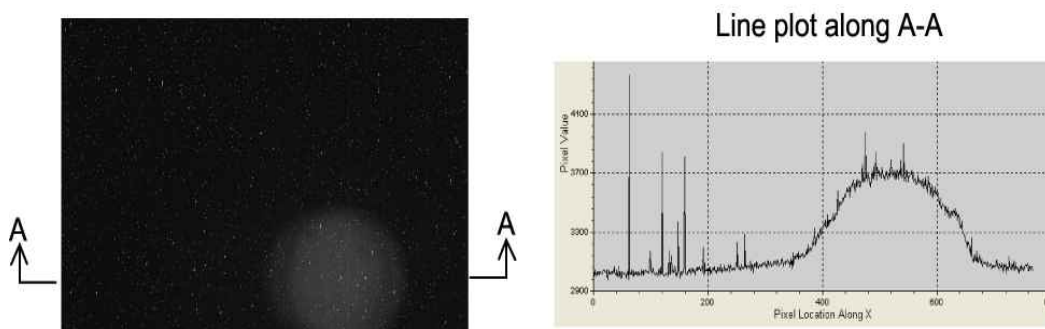


그림 16: CCD 카메라에 의한 빔 영상 및 빔의 중심부를 따라 그린 beam profile. 오른쪽 그림의 날카로운 피크들은 CCD 칩에 입사된 중성자 등에 의한 것으로 필터링 등을 통하여 제거할 수 있다.

### 2.3 빔 에너지 측정 (Time of flight method)

입자 빔 전류를 충분히 줄일 수 있고 주위에 중성자 및 감마선이 많지 않을 때는 입자 빔을 섬광 검출기에 직접 입사하여 에너지를 측정할 수 있다 [14]. 초기에는 이러한 방법을 시도하였으나 빔 조사실내 주변 방사선량이 높아 실제로 양성자 빔에 의한 peak를 관찰 할 수 없었다.

이러한 문제점을 피하고 빔 에너지를 측정하기 위하여 그림 17과 같이 앞쪽에 얇은 플라스틱 검출기로 빔의 도착시간을 측정하고 뒤쪽에서 두꺼운 검출기로 빔 도착시간 및 에너지를 측정하여 초기에너지를 측정하는 time of flight (TOF) 방법을 사용하였다.

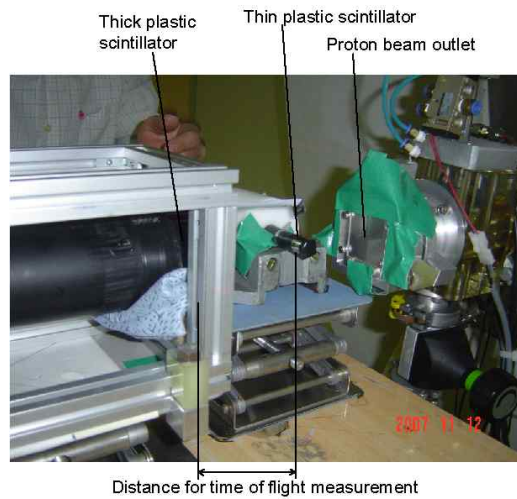


그림 17: Time of flight 방법을 이용하여 양성자 빔의 에너지를 측정하기 위한 검출기 설치.

측정을 위한 장치의 전자회로 연결도는 그림18과 같다.

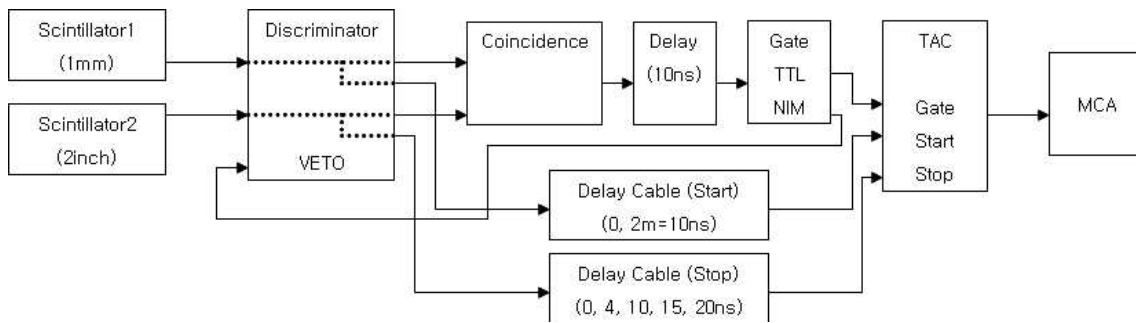


그림 18: TOF 측정을 위한 전자장치의 연결도.

양성자 빔이 두 개의 플라스틱 검출기에 도착한 시간을 오실로스코프에 포착한 신호들은 그림 19과 같다. 앞쪽 검출기에 포착된 신호에 비해 뒤쪽 신호의 폭이 상대적으로 넓은 것은 scintillator 두께 차이에 기인한다.

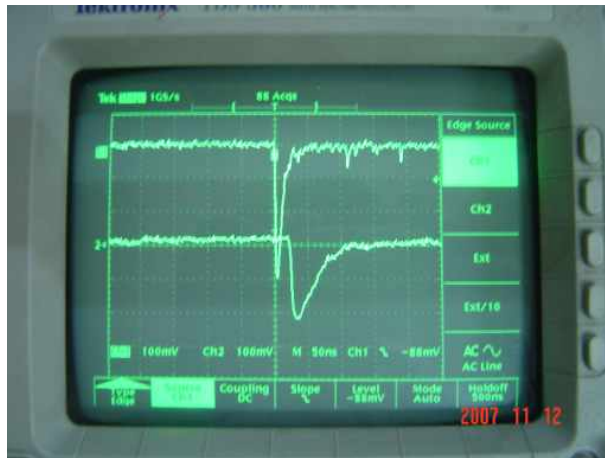


그림 19: 앞쪽 및 뒤쪽의 검출기에 측정된 양성자 빔의 신호. 두 신호의 차이가 양성자 빔의 속도 즉 에너지와 관련됨.

측정된 TOF는 TAC(Time Amplitude Converter)를 거친 후 MCA (Multi Channel Analyzer) channel상에 시간의 함수로 그림 20과 같이 표시된다. 이때 channel과 flight time과의 정확한 관계는 알려진 길이를 가진 delay 선을 이용하여 측정하였다..

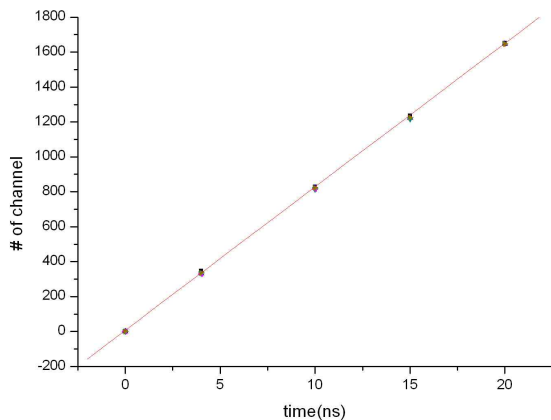


그림 20: MCA의 채널과 시간과의 관계의 측정.

그림 20 결과를 위해 여러 delay선을 사용할 때의 실제 측정값은 표2와 같다.

표2: delay선을 사용했을 때 피크의 위치변화를 채널수로 표시.

| delay time (ns) | 7.5cm 1st peak | 58cm 1st peak | 58cm 2nd peak | 108cm 1st peak | 108cm 2nd peak | 평균    |
|-----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------|
| 0               | 0              | 0             | 0             | 0              | 0              | 0     |
| 4               | 346            | 333           | 333           | 332            | 329            | 334.6 |
| 10              | 828            | 824           | 824           | 816            | 816            | 821.6 |
| 15              | 1236           | 1223          | 1224          | 1217           |                | 1225  |
| 20              | 1651           | 1644          | 1646          |                |                | 1647  |
| ch/time(1ns)    | 82.16          | 81.91         | 82.01         | 81.05          | 81.57          | 82.03 |
| time(ps)/ch     | 12.17          | 12.21         | 12.19         | 12.34          | 12.26          | 12.19 |

\*1ns에 해당하는 channel수는 82.03ch이고, 한 channel에 해당하는 시간은 12.19ps이다.

표2의 TOF 측정결과를 사용하여 계산한 빔 에너지는 표3과 같다. 여기서 energy loss에 의한 효과는 포함되지 않았고 분리하여 계산하였다. 양성자 속도 (v)와 에너지 (K)의 관계는 상대성을 포함하여 아래와 같이 표시된다.

$$K=m_0c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}-1\right), \text{ 여기서 } m_0c^2=938.3 \text{ MeV}, \beta=\frac{v}{c}.$$

표3: TOF를 이용하여 추정된 빔 에너지 값들 (Scintillator 1을 통과한 후의 에너지)

| flight path        | TOF(ns) | v(10 <sup>7</sup> m/s) | β     | K(MeV) |
|--------------------|---------|------------------------|-------|--------|
| 7.5cm~58cm         | 6.136   | 8.23                   | 0.275 | 37.6   |
| 58cm~108cm         | 7.356   | 6.80                   | 0.227 | 25.2   |
| 7.5cm~108cm        | 13.49   | 7.45                   | 0.248 | 32.2   |
| 7.5cm~108cm(S0,D0) | 13.58   | 7.40                   | 0.247 | 32.0   |

이와 같은 time of flight 방법이 높은 에너지의 입자 빔에서는 매우 정확하나 수 십 MeV 양성자 빔의 경우 첫 번째 검출기 등 통과하는 물체에서의 에너지 손실을 보다 정확히 알아야한다. 예를 들어 본 실험에서 빔 라인 끝에 있는 Kapton window와 첫 번째 섬광체 검출기 (둘러싸고 있는 Al 호일 포함)를 통과할 때의 에너지 손실은 약 2.5 MeV, 공기 중에서 1m 를 날아가는 동안의 에너지 손실이 약 2 MeV 이다.

각 물질에서의 빔 에너지손실 계산과정을 도식으로 아래에 표시하였다.

|                 |               |            |            |           |            |            |            |                 |                 |                 |             |
|-----------------|---------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|
| 33.1MeV         | <b>Kapton</b> | E1:        | <b>Air</b> | E2:       | <b>Al</b>  | E3:        | <b>Air</b> | E4:             | <b>Scinti.1</b> | E5:             |             |
| Proton          | ----->        | 33.067     | ---->      | 32.883    | ----->     | 32.815     | ---->      | 32.806          | ----->          | 31.991          |             |
|                 | 12.5μm        | T1:        | 10cm       | T2:       | 18μm       | T3:        | 0.5cm      | T4:             | 0.5mm           | T5:             |             |
|                 |               | 0          |            | 1.291     |            | 0          |            | 0.065           |                 | 0.007           |             |
| <b>Scinti.1</b> | <b>E6:</b>    | <b>Air</b> | <b>E7:</b> | <b>Al</b> | <b>E8:</b> | <b>Air</b> | <b>E9:</b> | <b>Scinti.2</b> | <b>E10:</b>     | <b>Scinti.2</b> | <b>E11:</b> |
| ----->          | 31.158        | ---->      | 31.148     | ----->    | 31.077     | ---->      | 30.932     | ----->          | 20.988          | ----->          | 0           |
| 0.5mm           | T6:           | 0.5cm      | T7:        | 18μm      | T8:        | 7.5cm      | T9:        | R/2             | T10:            | R/2             | T11:        |
|                 | 0.007         |            | 0.068      |           | 0          |            | 0.997      |                 | 0.074           |                 | 0.113       |
|                 |               |            |            |           |            | <b>Air</b> | <b>E9:</b> | <b>Scinti.2</b> | <b>E10:</b>     | <b>Scinti.2</b> | <b>E11:</b> |
|                 |               |            |            |           |            | ---->      | 29.942     | ----->          | 20.336          | ----->          | 0           |
|                 |               |            |            |           |            | 58cm       | T9:        | R/2             | T10:            | R/2             | T11:        |
|                 |               |            |            |           |            |            | 7.770      |                 | 0.071           |                 | 0.109       |
|                 |               |            |            |           |            | <b>Air</b> | <b>E9:</b> | <b>Scinti.2</b> | <b>E10:</b>     | <b>Scinti.2</b> | <b>E11:</b> |
|                 |               |            |            |           |            | ---->      | 28.935     | ----->          | 19.681          | ----->          | 0           |
|                 |               |            |            |           |            | 108cm      | T9:        | R/2             | T10:            | R/2             | T11:        |
|                 |               |            |            |           |            |            | 14.584     |                 | 0.067           |                 | 0.104       |

에너지 손실을 포함한 TOF로 계산된 빔 에너지는 표4와 같다. 결과에서 알 수 있듯이 40 MeV의

비교적 낮은 에너지에서 TOF 측정방법이 정확하지는 못한 것으로 추정되고 확인을 위해서는 추가 실험 등이 필요하다.

표4: 에너지손실을 포함하여 계산된 빔 에너지.

|                    | TOF(ns) | Incident beam energy(MeV) |                |
|--------------------|---------|---------------------------|----------------|
|                    |         | energy loss 고려하지 않음       | energy loss 고려 |
| 7.5cm~58cm         | 6.136   | 37.6                      | 39.7           |
| 58cm~108cm         | 7.356   | 25.2                      | 29.2           |
| 7.5cm~108cm        | 13.49   | 32.2                      | 33.5           |
| 7.5cm~108cm(S0,D0) | 13.58   | 32.0                      | 33.1           |

이상의 계산에는 아래식과 같은 측정 오차가 포함되어 있다:

$$\delta K = m_0 c^2 \frac{1}{(1 - \beta^2)^{3/2}} \frac{\beta^2}{t} \delta t$$

예를 들어 7.5cm ~ 108cm (start delay 0 ns, stop delay 0 ns)인 경우를 보면 그림 21과 같이 도착신호가 분포로 이루어져 있다:  $\sigma(7.5) = 23.94 \text{ ch} = 291.8 \text{ ps}$ ;  $\sigma(108) = 29.12 \text{ ch} = 355.0 \text{ ps}$ ,  $t = 13.58 \text{ ns}$ , 이고  $\delta t = 459.5 \text{ ps}$ ,  $\beta = 0.247$ 로 측정/계산된다. 이상의 내재된 오차를 고려했을 때 timing peak의 분산에 의한 빔 에너지 측정오차인  $\delta K = 2.13 \text{ MeV}$  이다. 결과로 7.5cm (Delay 0)와 108cm(Delay 0)만을 고려했을 때의 측정된 입사양성자의 에너지 (K)는:  $33.1 \pm (2.1+a) \text{ MeV}$ 로 표시될 수 있다.

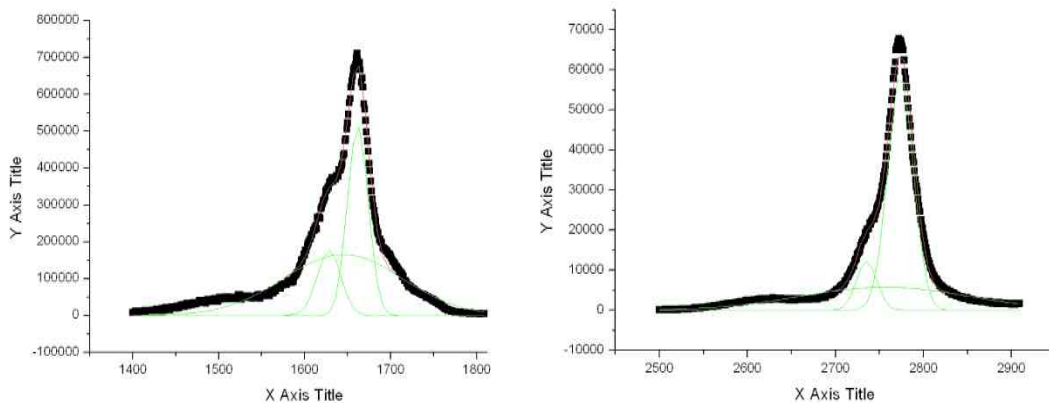


그림 21: (왼쪽) 7.5 cm 지점에서 측정된 스펙트럼에 대한 Gaussian fitting, (오른쪽) 108 cm 지점에서 측정된 스펙트럼에 대한 Gaussian fitting. 이때 start delay, stop delay 모두 0 ns이다.



## 2.4 4중극 전자석 설계

현재 설계된 빔 라인에서 마이크로 빔을 형성하기 위해서는 4중극 전자석 3대가 필요하다. 빔 라인의 최대에너지는 약 50 MeV이고 그림 22는 50 MeV 빔 라인을 가진 원자력의학원의 빔 라인에 사용하기 위해 주문 제작된 제품으로 40 A에서 15.5 T/m의 field gradient를 가진다. Bore 직경은 6.01 cm, pole의 길이는 19.0 cm 이다.

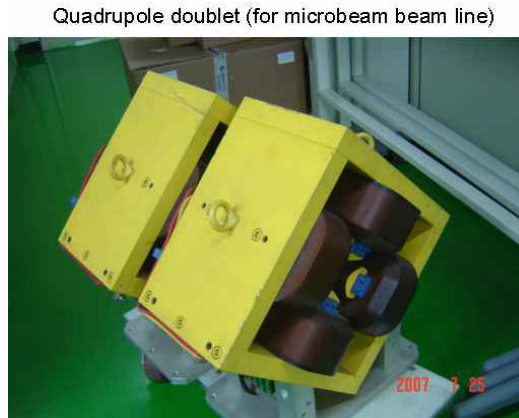


그림 22: 마이크로 빔라인에 사용되는 사양을 가지는 기존의 4중극 전자석.

기존의 전자석에 기초하여 먼저 전자석설계를 수행하였다. 그림 23은 POISSON 프로그램 [15]을 사용하여 계산한 자기장의 flux density를 표시한 것이다. 코일을 포함한 전자석의 치수는 기존 전자석의 치수와 거의 동일하게 계산하였고 이러한 치수들이 적절히 최적화되어 있는지 확인하였다.

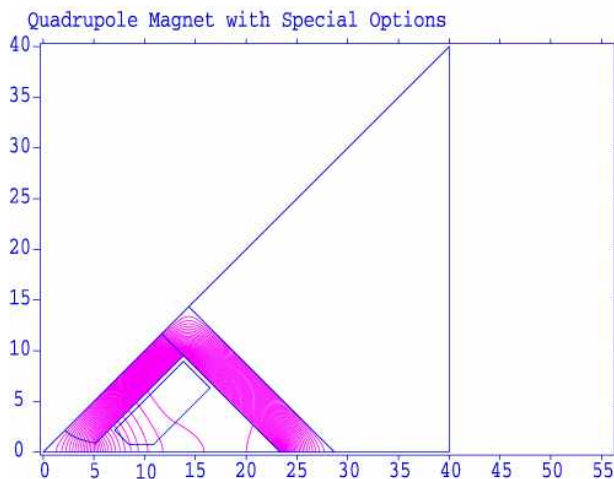


그림 23: POISSON 프로그램으로 계산한 4중극 전자석의 magnetic flux 선들의 plot.

빔 공간에 대해 계산된 자기장 및 빔 집속강도를 표시하는 field gradient의 계산결과가 그림 24에 보인다. 3 cm의 반경 내에서 빔 집속력이 충분히 일정함을 알 수 있다. 선형에서 벗어날 경우 집



속지점에 오차가 발생하여 focal 지점에서의 빔 크기가 계산에서 도출한 값보다 커진다.

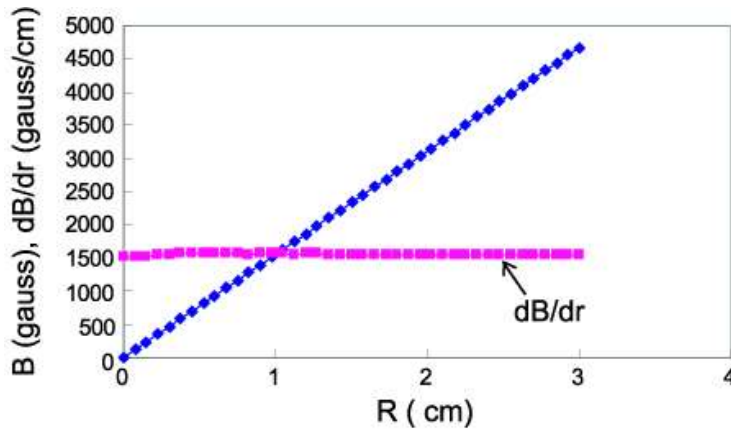


그림 24: 4중극 전자석의 중심에서부터 거리에 따른 자기장 강도 변화 및 빔의 집속 강도를 결정하는 field gradient의 계산 결과. 전자석의 aperture 반경은 3.01 cm이다.

## 2.5 전원 제작

마이크로 크기의 빔인 경우 빔의 안정도가 빔 크기가 큰 경우와 비교하여 더욱 중요하다. 대체로 수 마이크로 이하 크기의 빔인 경우 약 10 ppm의 안정도를 유지해야 하나 현재 고려된 장치로 가능한 최소 크기인 10-20  $\mu\text{m}$ 의 경우는 100 ppm 정도에서도 가능할 것으로 추론되었다. 전원의 사양은 40A/20V 이다.

요구되는 안정도가 전원제작의 중요 조건이다. 즉 안정도에 따라 전원의 가격이 급속히 증가하고 특히 외국 제품의 경우 고가이고 국내에서는 고안정도 전원의 제작업체가 없어 개발의 조건으로 포항가속기연구소 및 중소기업체와 협력하여 제작하였다.

그림 25는 제작된 전원의 모습 및 약 10시간동안 측정된 안정도로 제작조건을 충족함을 알 수 있다.

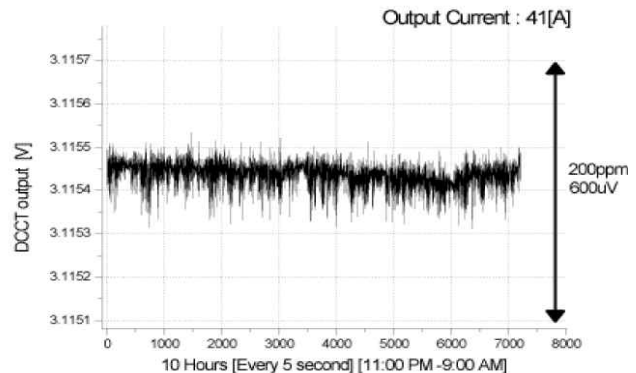
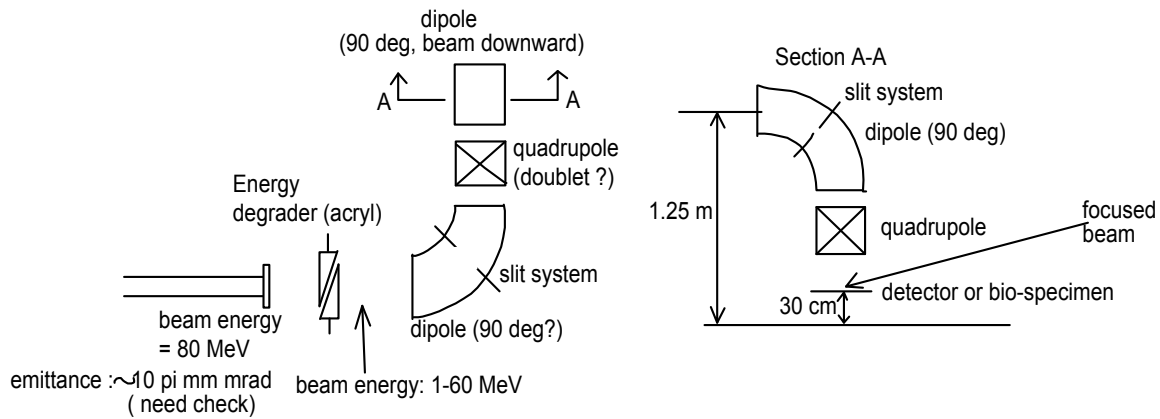


그림 25: 제작된 전원 및 약 10시간 측정된 전원의 안정도.

### 3. 연구결과 고찰 및 결론

- 양성자 빔 에너지 20-230 MeV의 경우 국제적으로도 치료시설이외에는 보통 사용하지 않는 에너지 범위이다. 또한 국내 기존 시설의 최대 에너지가 50 MeV 임을 고려하면 양성자 빔 실험실의 효과적인 사용은 국가 과학기술 기반시설로써의 사용으로도 중요함.
- 현재 설계된 마이크로 빔 라인과 직접비교할 수 있는 다른 예는 없으나 비용대비 효과가 높은 방향으로 설계함.
- 정밀한 빔 에너지를 요구하는 실험 및 세포와 같이 수직조사가 필요한 경우에는 아래 그림과 같이 최소 2개의 2중극 전자석이 필요한 등 복잡한 빔 라인이 요구됨.



- 마이크로빔의 계측장치는 기존 사용되고 있는 CR39이외에 이전의 기관고유사업을 통해 개발한 CCD카메라-섬광체 시스템에 현미경을 부착하는 방법의 사용이 적용될 수 있음을 확인함.
- 전자석 없이 slit만을 사용하여 약 20 μm의 빔 크기는 얻을 수 있음을 확인함. 보다 작은 빔은 slit이외에도 시스템전체의 진동 등이 영향을 미쳐 일반적인 빔 라인에서는 얻을 수 없을 것으로 추정함.
- 설계된 빔 라인에 사용되는 전자석의 대략적인 설계는 준비하였으나 제작에 필요한 예산이 확보되지 못하는 못하였다. 전원의 경우 고안정도를 가지는 제품을 제작하는 국내업체는 없고 해외제품의 경우 고가이다. 다행히 고안정도 전원제작을 시도하고 있는 포항가속기연구소 그룹 및 중소기업체와 계약을 통해 수십 ppm의 안정도를 가지는 제품의 제작을 완료하였다.

#### 4. 연구성과 및 목표달성도

##### (1) 연구성과

가. 국내 및 국제 전문학술지 논문 게재 및 신청

| 논문명  | 저자<br>(저자구분) | 저널명(IF.)                          | Vol(No)Page | 구분     | 과제<br>관련성 |
|--|--------------|-----------------------------------|-------------|--------|-----------|
| A beam optics study of the biomedical beam line at a proton therapy facility | 교신           | Nuclear Instruments and Methods B | 263, p513   | 국외 SCI | 상         |
|  |              |                                   |             |        |           |

※저자구분 : 교신, 제1, 공동

※구분 : 국내, 국내 SCI, 국내 SCIE, 국외, 국외SCI, 국외SCIE 등

※과제관련성 : 상(Acknowledgement 가 있는 경우), 중, 하

나. 국내 및 국제 학술대회 논문 발표

| 논문명   | 저자          | 학술대회명  | 지역 | 과제<br>관련성 |
|---|-------------|--|----|-----------|
| Uses of the experimental area of a proton therapy facility for applied physics research | 김종원,<br>윤종철 | 한국물리학회<br>추계학술대회   | 국내 | 상         |
| Use of the experimental area of a proton therapy facility for biomedical experiments    | 김종원,<br>윤종철 | International Conf, on<br>Cyclotron and their<br>applications. | 국외 | 상         |

※지역 : 국내, 국외

다. 산업재산권

| 구분 | 특허명 | 출원인 | 출원국 | 출원번호 |
|----|-----|-----|-----|------|
|    |     |     |     |      |
|    |     |     |     |      |

※구분 : 발명특허, 실용신안, 의장등록 등

라. 저 서

| 저서명 | 저자 | 발행기관(발행국, 도시) | 쪽수 | Chapter 제목, 쪽수<br>(공저일 경우) |
|-----|----|---------------|----|----------------------------|
|     |    |               |    |                            |
|     |    |               |    |                            |

마. 연구성과의 정부정책 기여

| 보고서명 | 정부정책 | 기여내용 |
|------|------|------|
|      |      |      |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|--|--|--|

바. 기타연구성과

**(2) 목표달성도**

가. 연구목표의 달성도

| 최종목표 | 연차별목표 |                                 | 달성내용                                  | 달성도(%) |    |
|------|-------|---------------------------------|---------------------------------------|--------|----|
|      |       |                                 |                                       | 연차     | 최종 |
|      | 1차년도  | 마이크로 빔라인 설계                     | 빔 전송, 몬테카를로프로그램 등을 이용하여 최적의 빔 라인 설계.  | 98     | 30 |
|      | 2차년도  | 양성자 실험실내 마이크로 빔 조사장치 설치 및 응용연구. | 마이크로 빔 형성 장치 테스트, 4중극 전자석설계 연구, 전원제작  | 92     | 94 |
|      |       | 입자 빔 위치 정밀측정 기술 회획.             | 50-30 MeV 양성자 빔을 사용하여 빔 측정 장치를 테스트 함. |        |    |
|      | 3차년도  |                                 |                                       |        |    |
|      |       |                                 |                                       |        |    |

나. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

| 평가의 착안점            | 자 체 평 가 |
|--------------------|---------|
| 핵심장치 설계/개발 및 빔 테스트 | 65/70   |
| 논문, 학회발표 등         | 25/30   |

## 5. 연구결과의 활용계획

### (1) 연구종료 2년후 예상 연구성과

-제작된 마이크로 빔 형성 및 검출 장치를 완성하고 생물 또는 물리용 조사 실험에 사용할 경우 추가 결과가 도출될 수 있다.

-양성자 치료시설의 실험실내 조사장치 설치에는 추가 연구비가 필요하다. 빔 광학 및 설치에 필요한 기본 장비들에 대한 테스트는 이미 수행하였고 필요에 따라 비교적 적은 노력으로 설치를 추진할 수 있을 것임.

| 구 분       | 건 수 | 비 고  |
|-----------|-----|--|
| 학술지 논문 게재 | 2   | J. of Applied Physics<br>(SCI, IF2.316)<br>J. of Korean Phys. Soc.<br>(SCI IF1.328 ) |
| 산업재산권 등록  |     | 특허 등록 예상 국가,<br>예상 특허명 등   |
| 기 타       |     |  |

### (2) 연구성과의 활용계획

-사용자 시설을 완비하여 빔을 제공하기 위해서는 전자석 제작 등에 대한 추가연구비 및 프로그램을 유지하기위한 지속적인 투자가 필요함.

-본문에서 언급한 것처럼 국내에서 유일하게 20-230 MeV 에너지 범위에서 높은 질의 양성자 빔을 제공할 수 있어 사용자확보에는 문제가 없고 높은 수준의 연구결과도 창출될 것으로 사료됨.

-본 연구결과는 추후 유사한 치료시설 또는 빔 이용 시설설치가 시도되고 방사선 생물학 등 다양한 양성자 빔의 활용이 요구될 때 유용한 참고자료가 될 수 있음.

## 6. 참고문헌

1. J. Kim, Proton therapy facility project in National Cancer Center, Korea, J. of Korean Phys. Soc., 43 (2003) S50.
2. C. Reder, et. al., Studies of physiology and the morphology of the Cat LNG following proton irradiation, Int. K. Radiation Oncology Biol., Phys. V46 (2000) 1247.
3. D. Slatkin, et. al., Microbeam radiation therapy, Med. Phys. 19 (1992) 1395.
4. M Fukuda et al., Proc. of 2004 Conf. of Cyclotrons and Their Applications (2004) 133.
5. T. Sakai, et. al., JAERI Takasaki in-air micro-PIXE system for various applications, Nucl. Instru. Meths B190 (2002) 271.
6. V. Anderov, Energy degrader optimization for medical beam lines, Nucl. Instru. Meths A 496 (2003) 222.
7. PSI Graphics Transport Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERNILAB version by K. Brown et al., TRANSPORT, a computer program for designing charged particle beam transport systems CERN 73-16, (1973).
8. PSI Graphics Turtle Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERNILAB version by K. Brown et al, K. Brown, Ch. Iselin, D. Carey:DECAY TURTLE CERN 74-2, (1974).
9. C. Yun, J. Kim, A beam optics study of the biomedical beam line at a proton therapy facility, Nucl. Instru. Meth B263 (2007) 513.
10. CR39 plastic is a product of Track Analysis Systems Ltd., UK.
11. S. Peng et al., Measurements of the targeting accuracy of the Gray Laboratory charged-particle microbeam, Nucl. Instru. Meth B179 (2001) 145.
12. R. Brun, F. Ruyant, M. Maire, A. McPherson, P. Zanarnit, GEANT3-detector description and simulation tool, CERN (1994).
13. J. Kim et al., Charge Coupled Device Camera-Scintillator System for two dimensional proton dose measurements, Japanese J. of App. Phys. V45 (2006) 5297.
14. E. Cascio, J. Sisterson, B. Gottschalk, S, Sarkar, Measurements of the energy spectrum of degraded proton beams at NPTC, IEEE Tran. on Nucl. Sci. (1994).
15. Los Alamos Accelerator Code Group, Los Alamos National Laboratory (2006).