

기관고유연구사업 결과보고서

(과제번호 : 0810030-1)

생명공학용 초고감도 가속기질량분석시스템에 이용되는 소형
사이클로트론 설계연구

Design study of a minicyclotron for ultrasensitive accelerator
mass spectrometry for biomedical research

과제책임자 : 김종원

국 립 암 센 터

제 출 문

국립암센터 원장 귀하

이 보고서를 기관고유연구사업 “생명공학용 초고감도 가속기질량분석시스템에
이용되는 소형 사이클로트론 설계연구” 과제의 결과보고서로 제출합니다.

2008. 12. 31.

국립암센터

과 제 책 임 자 : 김종원

연 구 원 : 윤종철

 " : 윤민영

 " : 임희중

목 차

< 요약 문 >

| | | |
|--------------------------|-------|----|
| (한글) | ----- | 1 |
| (영문) | ----- | 3 |
| 1. 연구사업의 최종목표 | ----- | 4 |
| 2. 연구사업의 내용 및 결과 | ----- | 4 |
| 2.1 AMS 사이클로트론 전자석 설계 | ----- | 6 |
| 2.2 사이클로트론 가속장치 설계 및 테스트 | ----- | 11 |
| 2.3 빔 라인 설계 | ----- | 13 |
| 2.4 양이온 AMS 사이클로트론 | ----- | 17 |
| 3. 연구결과 고찰 및 결론 | ----- | 19 |
| 4. 연구성과 및 목표달성도 | ----- | 20 |
| 5. 연구결과의 활용계획 | ----- | 21 |
| 6. 참고문헌 | ----- | 22 |
| 7. 첨부서류 | ----- | 23 |

< 요약 문 >

| | | | |
|---|--|---|-------------|
| 연구분야(코드) | A-5 | 과제번호 | 0810030-1 |
| 과제명 | 생명공학용 초고감도 가속기질량분석시스템에 이용되는 소형 사이클로트론 설계연구 | | |
| 연구기간/연구비 (천원) | 합계 | 2008년 1월 1일 ~ 2008년 12월 31일 | |
| | 1차년도 | 2008년 1월 1일 ~ 2008년 12월 31일 | |
| | 2차년도 | 년 | 월 일 ~ 년 월 일 |
| | 3차년도 | 년 | 월 일 ~ 년 월 일 |
| 과제책임자 | 성명 | 김종원 | 주민등록번호 |
| | 전화번호 | 031-920-1727 | 전자우편 |
| 색인단어 | 국문 | 가속기질량분석, ECR 이온소스, 사이클로트론, 탄소연대측정 | |
| | 영문 | Accelerator Mass Spectrometry (AMS), ECR ion source, cyclotron, carbon dating | |
| <p>◆ 연구목표</p> <p><최종목표></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 생명공학에 사용할 수 있는 초고감도 질량분석 시스템을 사이클로트론 가속기 제작. ○ 소형 사이클로트론을 사용하는 AMS 실용화. <p><당해년도 목표></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 음이온 탄소를 이용하는 질량분석 사이클로트론 설계. ○ 양이온 탄소를 사용하는 질량분석용 소형 사이클로트론의 타당성 및 실용성 평가. | | | |
| <p>◆ 연구내용 및 방법</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 전자기장 및 radio-frequency 분석 프로그램 등을 사용하여 적절한 음이온 탄소가속 AMS 사이클로트론 구조 등 결정. ○ 빔 궤도 분석 프로그램 등을 사용하여 방사선 탄소와 유사질량 분자들이 사이클로트론 내 가속을 통하여 분리 될 수 있는지 확인. ○ 기존 설계 및 제작된 음이온 AMS 사이클로트론의 문제점 등을 분석하고 최신 기술을 통한 극복 가능성 등 평가. ○ rf 가속구조 등 주요 부분품에 대해 원형 제작 및 테스트를 통해 실제 제작 및 성능에 대한 검증. ○ 설계된 빔 전달 장치에서 사이클로트론에 빔 입사가 효율적으로 이루어지는지 빔 광학 프로그램 등을 사용하여 확인. ○ 질량분석에 적절한 음이온 ion source 및 ECR ion source가 설계된 사이클로트론과 효과적인 matching이 되는지 분석. | | | |

- 양이온 방사선탄소를 분리할 수 있는 사이클로트론 시스템을 대략적으로 설계하고 가능성 검증.
- 기존의 탄뎀 AMS와 경쟁에 필요한 요소들에 대한 분석.

◆ 연구성과

-정량적 성과

| 구분 | 달성치/목표치 | 달성도(%) |
|-----------|-----------------|--------|
| SCI 논문 편수 | 1/2 | 50 % |
| IF 합 | 1.2/2.5 | 48 % |
| 기타 성과 | 1 ¹⁾ | |

1) 2009년도 미국 AIP Conference Proceedings 지에 수록이 확정됨.

-정성적 성과

미국 버클리 연구소 방문 및 국외 학회에서 관련 연구자 등을 통해 사이클로트론 AMS가 국외에서도 관심이 있음을 알 수 있었음.

◆ 참여연구원
(최종연도 참여인원)

| | |
|--------|--------------------|
| 성명 | 김종원, 윤종철, 윤민영, 임희중 |
| 주민등록번호 | |

Project Summary

| | |
|--|--|
| Title of Project | Design study of a minicyclotron for ultrasensitive accelerator mass spectrometry for biomedical research |
| Key Words | Accelerator Mass Spectrometry (AMS), ECR ion source, cyclotron, carbon dating |
| Project Leader | Jongwon Kim |
| Associated Company | |
| <p>Accelerator mass spectrometry (AMS) is an ultra sensitive method for isotope analysis. Muller at the Lawrence Berkeley Lab (LBL) in 1977 first suggested using a particle accelerator to measure ^{14}C and ^{10}Be. But it was electrostatic accelerators rather than cyclotrons that were eventually successful. The adoption of negative ions, which is needed to separate ^{14}N from ^{14}C, made Tandem the most appropriate AMS device. On the other hand AMS cyclotrons have been first tried at LBL and later in Shanghai until the middle of 90's, but it was not fully developed to compete with well established commercial Tandem AMS systems. The main shortcoming was poor transmission efficiency, which asked for a few times longer analysis time for each sample compared to Tandem AMS, whereas mass resolution of the AMS cyclotron was demonstrated to be high enough to accurately measure the ratio of ^{14}C relative to ^{12}C.</p> <p>We are trying to design a cyclotron AMS system, which has comparable transmission to that of the Tandem system. The beam line has a saw-tooth rf buncher to bunch the beam for better matching to the longitudinal acceptance of the cyclotron, and flat-topping rf system by adding a third harmonic component is to be employed to enlarge the longitudinal phase acceptance. Extraction efficiency from the cyclotron can be increased by using an off-centering injection at the center. The cyclotron parameters were determined considering the design parameters of cyclotrons previously constructed. We plan to first design and construct a cyclotron test-stand to test various cyclotron conditions with varying magnetic field strengths and rf frequencies to look for highest transmission efficiency. An AMS cyclotron was designed using 3D electromagnetic analysis and beam optics programs already well proven. The beam optical designs of the injection line on the other hand were made using TRANSPORT, TURTLE and TRACE3D programs. The cyclotron cavity was designed and prototyped to confirm cavity performances and rf driving circuit. We expect to extend our design efforts for one more year to detail the adequate AMS system design before starting with actual construction.</p> | |

1. 연구사업의 최종목표

- 생명공학에 사용할 수 있는 초고감도 질량분석 시스템용 사이클로트론 가속기 제작.
- 소형 사이클로트론을 사용하는 AMS 실용화.

<당해연도목표>

- 음이온 탄소를 이용하는 질량분석 사이클로트론 설계.
- 양이온 탄소를 사용하는 질량분석용 소형 사이클로트론의 타당성 및 실용성 평가.

2. 연구사업의 내용 및 결과

방사선탄소를 분리하는 탄소연대 측정방법이 1940년대 말에 개발되었고 [1] 상당기간 경과 후 Accelerator Mass Spectrometry (AMS) 사용이 1970년대에 제안되었다 [2]. 사이클로트론을 사용하는 방법이 처음에는 제안되었으나 ^{14}C 를 ^{14}N 로부터 분리하기위해서 음이온 탄소를 사용하는 탄담 정전압가속기가 보편적인 도구로 정착되었다 [3]. 하지만 탄담은 비교적 대형이고 시설운영을 위해 전문기술 인력이 필요한 등의 제약으로 빠르게 보급되지는 못했고 단순화된 형태인 single stage 고전압 장치가 사용되고 있으나 분해능이 떨어진다. 최근 AMS에 사용되는 핵종이 ^{10}B , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{129}I 등으로 확장되고 있으며 적용되는 학문분야도 늘어나고 있어 소형 AMS 장치가 개발되면 새로운 시장이 개척될 수 있을 것으로 예측된다.

BAMS (Biomedical AMS)는 고유의 초고감도 분석능력에 따라 신약개발, 임상실험 등에 크게 기여할 수 있는 기술로 자리 잡고 있다 [4]. 미국 Lawrence Livermore National Lab의 Center for Accelerator Mass Spectrometer에서는 1990년경부터 BAMS 개발을 시작하여 생의학 응용연구에 가장 앞서있으면 8종류의 동위원소를 사용하여 연간 10,000개 이상의 시료를 분석하고 있다 [5]. 유럽과 미국에서는 신약개발에 필요한 시료분석이 상용화 되어가고 있고 국내 제약회사의 시료들도 국외시설에 분석을 의뢰하는 실정이다.

국내에서는 서울대학 공동기기연구원에 1990년 후반 3 MV Tandetron 정전압 가속기가 설치되어 주로 탄소연대 측정에 사용되어오고 있으며 [6,7] 2007년에는 지질자원연구원에 1 MV급 탄담이 설치되어 사용되고 있다. 특히 서울대학에서는 BAMS에 대한 연구과제를 수행하였고 장치 BAMS 연구영역이 확대될 것으로 보고하였다.

사이클로트론 AMS의 경우 미국 Berkeley 연구소 [8] 및 중국의 상하이 응용물리연구소등에서 [9,10] 80-90년대에 시도하였으나 지속적인 개발이 되지 못한 반면 미국 및 유럽 업체에서 개발한 탄담 가속기가 시장을 주도해왔다. 최근 생의학 연구에 AMS 사용이 늘어남에 따라 소형화가 중요하게 되었고 사이클로트론 관련부품의 안정도가 높아져서 낮은 빔 투과효율 등 이전의 기술적인 문제점을 해결할 경우 생의학 용도로의 사이클로트론 AMS 사용가능성은 높아졌다.

고려하고 있는 사이클로트론 AMS 장치의 개요도는 그림 1과 같다. 이온원에서 추출된 빔은 빔 전달장치를 통해 사이클로트론에 입사되고 가속된 이온빔은 사이클로트론의 내부에서 또는 외부로 인출되어 검출하게 된다. 탄담의 경우 보통 수 MV의 정전압을 이용하고 가속된 빔을 기체 stripping 장치를 통하여 방해요소인 분자 빔을 제거한 후 분석용 이중극 전자석을 사용하여 방사성탄소이온을 일반 탄소로부터 분리하는 방법을 사용한다. 반면 사이클로트론의 경우 등시성 자장

(isochronous field)을 사용하고 가속을 위한 rf 주파수를 ^{12}C , ^{14}C 를 순차적으로 가속하도록 조정함으로써 그 비율을 측정할 수 있다. 이러한 이유로 사이클로트론의 경우 같은 탄뎀과 같은 투과 효율에서도 두 배의 시간이 걸리는 단점이 있다.

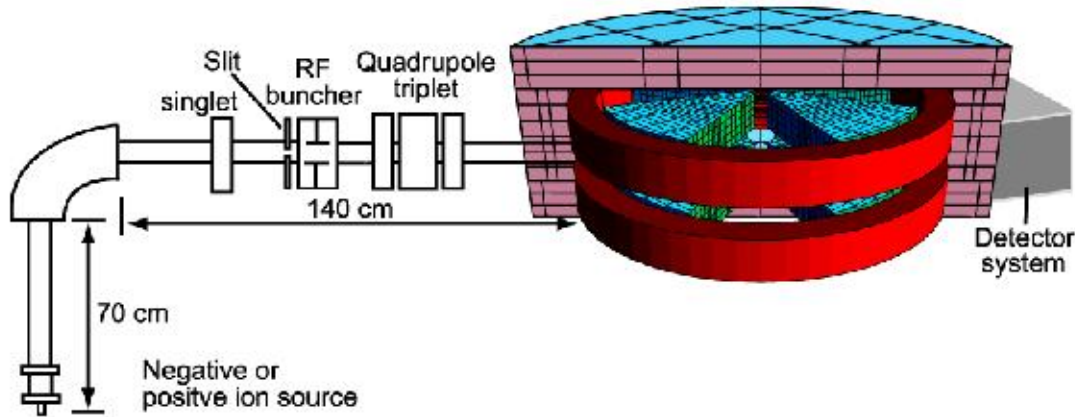


그림 1: 사이클로트론을 기반으로 하는 AMS 시스템의 개요도.

사이클로트론의 질량분해능은 다음 식에 의해 대략적으로 결정된다. 즉 사이클로트론 내 빔의 총 회전수 및 사용하는 rf 의 하모닉 (h) 수가 높을수록 분해능이 증가한다 [11].

$$B = \frac{Am \omega}{qh}$$

$$\omega = k \frac{qB}{Am}$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta B}{B} - \frac{\Delta \phi}{\phi} \approx \frac{\Delta \phi}{\phi}$$

$$\phi_{total} = 2\pi kN$$

대표적인 질량분석 이온인 ^{14}C 의 경우 ^{14}N 그리고 분자이온과의 질량차이는 다음과 같다:

$m/\Delta m = 83,000$ ^{14}C between ^{14}N , 그리고 $=1900$ ^{14}C between ^{13}CH .

사이클로트론 가속 만으로 질량분해능을 20,000 이상으로 높이는 어렵기 때문에 ^{14}N 의 경우 탄뎀 AMS와 마찬가지로 음이온을 사용하여 제거하고 사이클로트론의 분해능을 2000 이상으로 제작함으로써 다른 분자이온을 분리하게 된다.

AMS 에 사용되는 각 요소에 대해 중요 연구내용을 정리하였다.

2.1 AMS 사이클로트론 전자석 설계

80년대 후반 미국 버클리연구소에서 제작한 AMS 사이클로트론은 AMS 전용으로 설계된 것이 아니고 기존의 전자석을 수정하여 제작한데 반해 상하이 응용물리연구소에서는 처음부터 AMS용으로 설계함으로써 빔 투과효율을 10배 이상 향상시킬 수 있었다. 본 연구에서는 이전에 제작된 사이클로트론 설계에 바탕을 두었지만 최신 설계기술을 적용하였고 성능 향상을 위해 필요한 요소를 도입하였다. 설계 대상은 최적화된 사이클로트론의 주요 상수를 확인하기 위한 테스트 사이클로트론이다.

선택한 사이클로트론의 주요상수는 표 1과 같다. 전자석의 전체크기는 상하이 사이클로트론과 비교하여 줄였고 결과로 rf 가속 주파수 등도 변화하였다. 특히 표에서는 자기장 및 rf 주파수의 변화 범위를 표시하였는데 결정된 값이라기보다는 가능한 범위를 대략적으로 표시한 것으로 자기장을 미세조정하기 위한 트림코일 시스템의 가변 영역 등을 고려하여 최종범위가 결정될 수 있다. rf 주파수의 경우 필요한 rf 앰프의 최대출력이 높지 않은 점을 고려하면 최근 개발되고 있는 solid-state형 앰프를 사용할 경우 쉽게 광대역 변환이 가능하다.

표 1: AMS 사이클로트론의 주요 상수.

| Parameters | Values |
|-----------------------|-----------------------------|
| Bavg | 5.48 kG (3 - 9 kG variable) |
| f0 (¹⁴ C) | 0.59 MHz |
| frequency (rf amp) | 5-80 MHz |
| Harmonics | 10-30 |
| Injection, ext radii | 13.5 cm, 23.6 cm |
| Weight | 1.1 ton |

RADIA program [12]을 사용하여 3차원 자기장 모델링 및 계산을 수행하였고 설계된 자석의 단면도는 그림 2와 같다. 단면상 pole이 반경방향으로 4개로 나누어진 이유는 각 부분 내 pole 간격을 다르게 조절하였기 때문이다. 낮은 가속에너지로 등시성 자장의 반경에 대한 분포가 거의 평평하기 때문에 바깥쪽 pole 간 간격을 좁혀주어 등시성 자장을 얻었다.

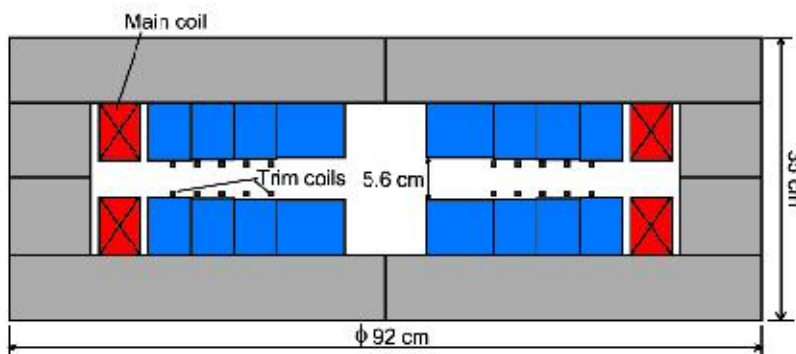


그림 2: AMS 사이클로트론의 단면도. 트림코일의 위치가 표시되어 있다.

전자기장계산에 있어 주요 요소 중 하나는 사용하는 철의 B-H 분포로 탄소성분 및 이물질의 함량에 따라 결정되고 실제 제작되는 철에 대한 측정값을 최종계산에 사용한다. 본 계산에서 사용한 철의 B-H 분포는 그림 3과 같고 탄소 성분이 약 0.1% 정도인 철을 가정하였다.

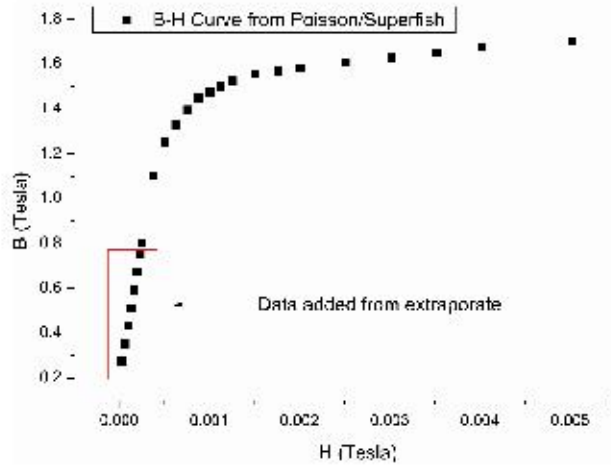


그림 3: 전자기장 계산에 사용된 철의 B-H 곡선.

RADIA 계산의 정확도를 확인하기 위해 잘 증명된 2D 전자기장 계산 프로그램인 POISSON [13] 결과와 비교하였고 이때 동일한 B-H를 사용하는 것이 중요하다.

등시화된 자기장에 대한 빔의 광학적 특성을 계산하였다. 그림 4는 Equilibrium Orbit 프로그램을 사용하여 ^{14}C 이온에 대한 수평 및 수직 방향의 빔 집속 tune을 계산한 결과이다. 자기장 계산에 사용된 한정된 mesh에 의하여 자기장의 noise에 민감한 수직 방향 tune의 경우 비교적 부드럽지 않게 연결되고 있다. 분명한 4 sector의 hill-valley 구조에 의한 flutter로 충분한 수직방향 빔 집속력을 확보하였고 AMS 분석에 필요한 수십 μA 의 빔 전류에 대한 가속에서 공간전하 등에 의한 빔 투과 효율 감소는 없을 것으로 판단된다.

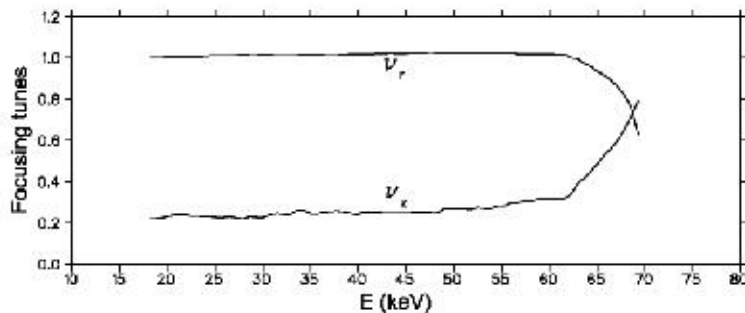


그림 4: 사이클로트론의 수평 및 수직 방향에 대한 빔 집속 tune들.

표 1에 표시한 것과 같이 자기장의 강도를 변화시키며 다양한 이온 및 빔 에너지에 대한 테스트를 통해 최적의 AMS 사이클로트론 설계를 확인할 수 있다. 그림 5는 코일의 전류변화를 통해 얻어지는 평균자장 분포와 등시성자장과의 차이를 보여준 것으로 이러한 차이는 트림코일에 의해 보정되어야한다. 생성 가능한 최대 자장의 경우 트림 코일의 냉각능력등 기계적 설계에 의해 결정된다. 트림코일의 대략적인 위치는 그림2에 표시되어 있고 실제 필요한 코일 수는 대략 10개 정도로 추정된다. 보다 최적화된 트림코일의 수는 주 자기장과 각각의 트림코일 자기장을 포함하는 등시성 자기장 형성계산을 least square fitting 방법으로 수행함으로써 얻을 수 있다.

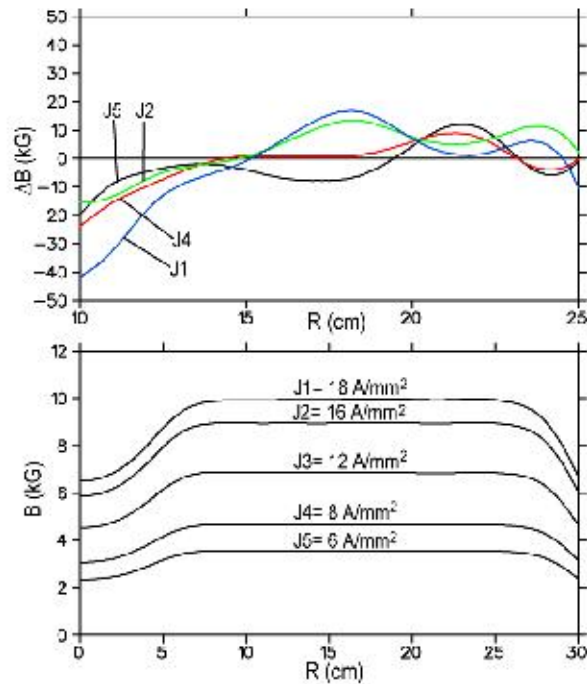


그림 5: 다른 전류에서의 평균자기장 분포 및 등시성자기장과와의 차이 분포. 이러한 차이는 트림코일에 의해 보상되어야 한다.

AMS 사용에 고려중인 대표적인 이온 및 빔 에너지 등을 표 2에 표시하였다. 부분적으로 표시된 것으로 실제 변경될 수 있는 자기장의 범위를 고려하면 변화범위는 표2 보다 넓은 것이다. ²⁶Al 및 ¹⁰Be의 경우 양이온 가속을 표시하였는데 특히 ²⁶Al의 경우 질량분해능이 6000 이상일 경우 분리 가능하여 좋은 테스트 이온이 된다.

표 2: 다른 종류의 이온을 가속할 때 필요한 사이클로트론 조건 및 추출된 빔 에너지.

| Ions | E_{in} (keV) | B (kG) | h | f (MHz) | E_{out} (keV) |
|----------------|----------------|--------|----|---------|-----------------|
| $^{14}C^-$ | 20 | 5.85 | 15 | 9.65 | 68 |
| $^{26}Al^+$ | 20 | 7.97 | 15 | 7.08 | 68 |
| $^{10}Be^+$ | 20 | 4.94 | 15 | 11.4 | 68 |
| $^{14}C^-$ | 29 | 7.09 | 20 | 15.6 | 100 |
| $^{26}Al^{2+}$ | 29 | 4.83 | 30 | 17.1 | 100 |
| $^{10}Be^{2+}$ | 29 | 3.00 | 30 | 27.7 | 100 |

가속된 빔의 효율적인 추출을 위해서는 추출되는 빔의 궤적이 이전궤적으로부터 최대한 떨어져야 한다. 이러한 조건을 효과적으로 만들기 위해서는 입사되는 빔이 완전한 centering을 이루는 입사 조건으로부터 수 mm 떨어진 지점에 빔을 입사하는 off-centering injection 방법을 사용할 수 있다. 결과로 빔 추출지점에서는 빔의 수평 집속 tune이 1에 보다 근접함으로써 precession을 하게 되고 적절한 위상을 선택함으로써 추출되는 지점에서 빔의 분리를 확대할 수 있다. 그림 6은 각 turn의 반경 증가분을 turn의 함수로 표시한 것으로 2.5 mm off-centering 입사의 경우 1 mm 이상의 분리가 가능함을 보여준다.

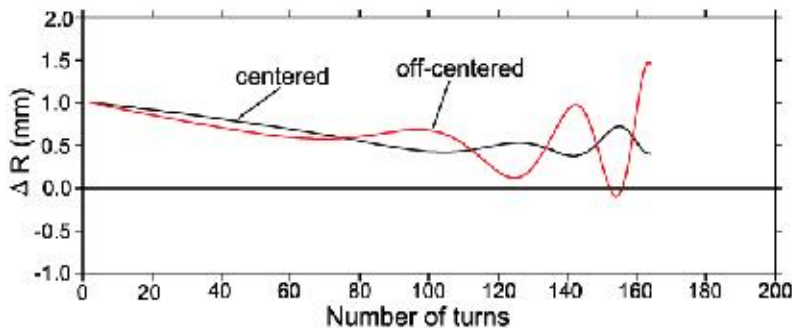


그림 6: 빔이 centering 되었을 때 그리고 off-centering 되어 입사될 때 빔의 반경증가를 회전수의 함수로 표시.

사용한 RADIA 프로그램의 경우 계산의 정확도에 대한 신뢰도가 높지 않아 보다 정확한 계산결과가 가능한 2D POISSON 프로그램 결과와 현재 고려하는 사이클로트론과 비슷한 전자석에 대하여 결과를 비교하였다. 그림 7은 사용된 계산 모델을 보여주는 것으로 실질적으로 2D인 전자석을 3D로 계산하여 비교해 보았다. 표 3은 코일 내 다른 전류를 사용할 경우 계산된 reference 지점에서의 자기장 값을 비교한 것으로 대체로 낮은 전류 즉 철 성분은 의해 자기장이 결정될 때 차이가 컸다. 실제 3D모델의 mesh 등에 따른 효과를 완전히 고려하지 않은 결과로 정밀한 mesh를 사용할 경우 1% 이내의 차이를 보이는 것이 일반적이다. 좀 더 검증된 3D 자기장 계산 프로그램인 TOSCA를 [14] 사용하여 추후 정확도에 대한 추가 확인을 계획하고 있다.

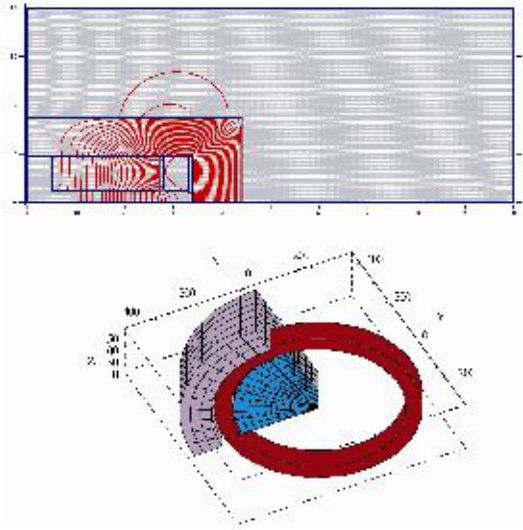


그림 7: (위쪽) POISSON 계산을 위한 모델 및 계산된 자기집속 분포, (아래쪽) POISSON과 비교하기 위한 3D 모델. pole 등 모든 부분이 4중 대칭을 가짐으로 단면은 POISSON 모델과 일치한다.

표 3: 두 종류의 프로그램을 사용하여 다른 전류 밀도에 대해 계산한 자기장 결과 비교.

| Current density | RADIA(kG) | POISSON(kG) |
|-----------------------|-----------|-------------|
| 1500A/mm ² | 15.136 | 15.035 |
| 1000A/mm ² | 12.780 | 12.750 |
| 750A/mm ² | 11.169 | 11.246 |
| 500A/mm ² | 8.298 | 8.598 |
| 300A/mm ² | 5.037 | 5.244 |

AMS 사이클로트론의 주요 필요조건 중 하나는 전자석의 높은 안정도로 상하이 사이클로트론의 경우 100 ppm 정도의 자기장 변화로 측정에 큰 어려움이 있음을 보고했다. 최근 전원의 경우 수 ppm의 안정도를 가진 제품이 상용화되었고 중형 사이클로트론의 경우에도 수 시간이상 동안 수 ppm의 안정도를 유지할 수 있는 제어시스템이 실증되었다 [15].

2.2 사이클로트론 가속장치 설계 및 테스트

빔 가속을 위한 rf 시스템의 경우 요구되는 가속전압이 낮아 일반적인 사이클로트론에 사용하는 공명체 대신 단순한 capacitive 요소를 사용한다. 질량분해능을 높이기 위해서는 빔 회전수를 최대화하는 것이 필요하고 현재 고려되고 있는 최대 가속전압은 약 300 V이다. 이때 최대 회전수는 자기장의 등시성에 의해 결정되어 이상적인 등시성 조건에서는 무한한 회전이 가능하지만 실제로는 자기장의 오차 등으로 회전수가 늘어남에 따라 빔이 등시성조건에서 점차로 벗어나게 된다. 가속되는 빔의 위상각 범위를 넓히기 위해서 기본 rf 주파수의 3차 하모닉을 이용한 flat topping을 고려하고 있고 [16] 이러한 조건을 만족시키는 rf driving 회로를 그림 8에 표시하였다.

가속전극에 대한 전기장 분포 그리고 가속장치 capacitance 값의 사용 주파수에 따른 변화 등을 고려하기 위하여 3차원 전자기분석 프로그램을 사용한 계산을 수행하였다. 이때 사용된 모델과 전기장 분포는 그림 9와 같다.

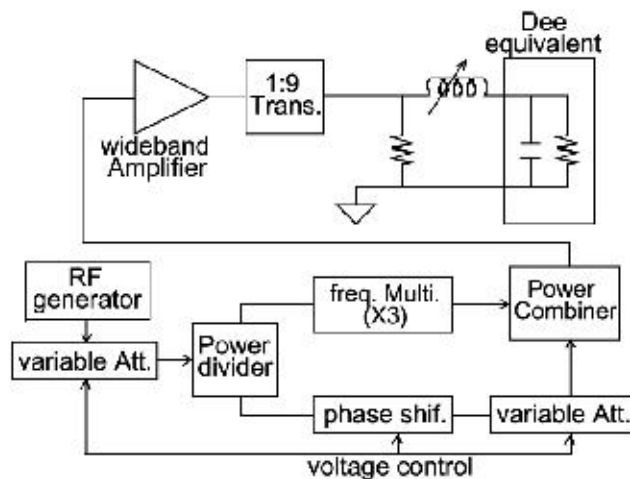


그림 8: 기본 rf 주파수의 3번째 하모닉 성분을 사용하여 flat-topping을 하기위한 rf 회로도.

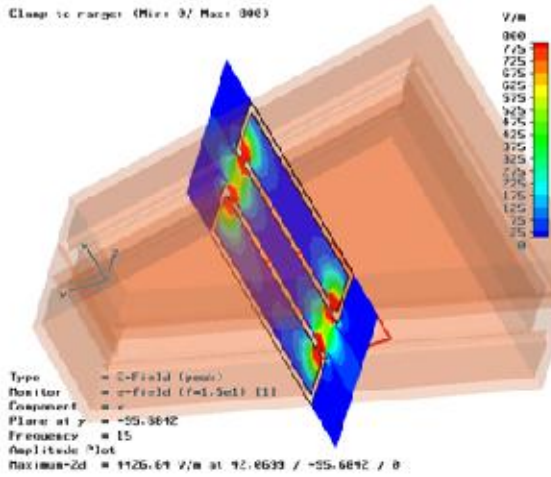


그림 9: 3D 가속장치 모델 및 전기장 분석결과.

계산에 의해 결정된 cavity를 실제로 제작하였고 원자력연구소의 기반시설을 이용하여 rf 특성에 대한 부분적 분석을 실시하였다. 그림 10은 실험장면 및 오실로스코프에 측정된 rf 신호로 3번째 하모닉을 첨가함으로써 기본 rf 파에 대해 flat-topping을 할 수 있음을 확인하였다.

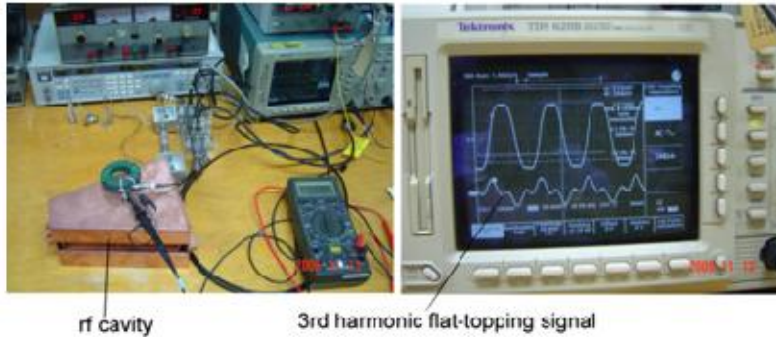


그림 10: 제작된 rf cavity 테스트 장면 및 측정된 flat-topping rf wave.

또한 입사빔 라인에는 이온원에서 추출된 DC 빔을 CW 빔으로 변환하기위해 번칭하는 buncher가 주요한 rf 요소로 bunching 효율을 높이기위해서는 rf 파를 선형으로 즉 sawtooth파를 형성하는 것이 필요하다 [17]. 이러한 번처에 대한 분석 및 테스트를 위한 제작이 진행 중이다.

이상의 사이클로트론 rf 요소 도입으로 빔의 가속효율이 상하이 사이클로트론과 비교하여 최소 2-3배 증가할 것으로 추정한다.

2.3 빔 입사라인 설계

이온원에서 추출된 빔을 사이클로트론 빔 acceptance와 일치하도록 입사하는 장치의 설계는 본 연구의 주요 부분 중 하나이다. 먼저 최소한의 빔 전달 요소 사용을 가정한 입사 라인을 고려하여 그림 11과 같이 TRANSPORT를 [18] 사용하여 계산해 보았다. bending 전자석의 경우 다른 전하 대비 질량을 가지는 이온을 분리하기 위하여 반드시 필요하고 이중극 전자석의 가장자리를 조절하여 빔의 수직 집속을 강화하였다. 그 외 최소수의 4중극 전자석을 이용하여 사이클로트론 내부에서 빔이 집속되도록 전달하는 경우에 대해 계산하였다. 표시된 F1 지점은 DC 상태로 추출된 빔을 rf bunching 하기 위한 buncher가 위치해야 하는 곳으로 빔 내 공간에서 균일하게 번칭하기 위하여 빔이 집속되도록 빔 광학을 정하였다.

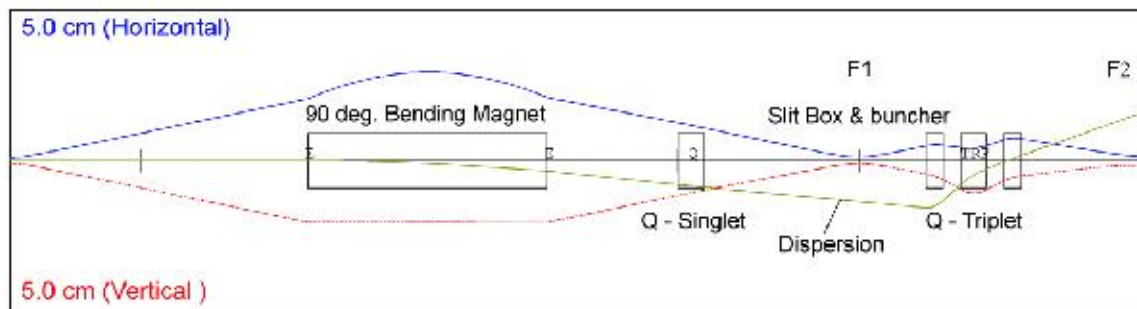
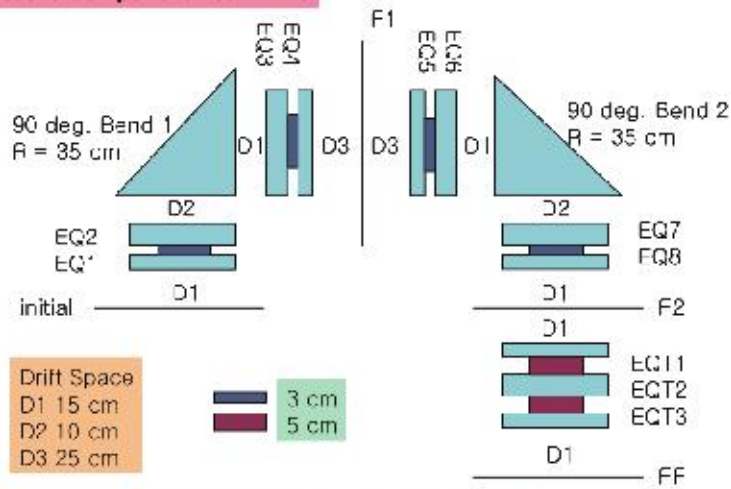


그림 11: 간단한 입사 라인의 경우에 대해 계산한 빔 envelope 및 분산의 분포.

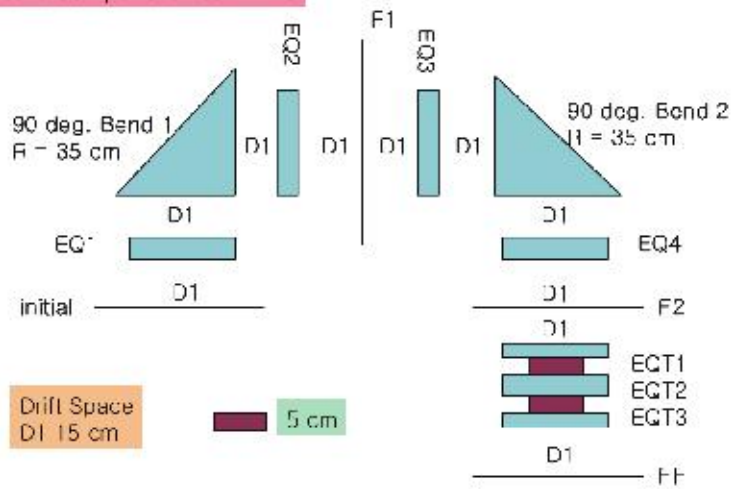
사이클로트론 AMS의 경우 순차적으로 가속주파수를 조절하여 가속되는 입자를 변경할 때 입사 시스템 요소들의 자기장에는 변화가 없는 것이 필요하다. 이를 위해서 입사 빔 라인 내에서 분리가 필요한 이온들은 한 지점에서 분리되고 사이클로트론에 입사되는 지점에서 다시 집속되어야 한다. 이러한 소위 recombination 빔 라인을 구성하기 위해서는 두 번의 동일한 bending이 필요하고 분산을 최대화하기 위해 bending 각도를 90도를 선택하였다. 또한 이러한 입사조건을 만족하기 위해서는 비교적 많은 수의 빔 집속요소가 필요하여 먼저 11 개의 4중극 전자석을 사용하는 경우 그리고 7개를 사용할 경우에 대한 빔 광학적 분석을 TRANSPORT 및 TURTLE [19] 프로그램을 사용하여 수행하였다. 그림 12는 두 경우에 대한 빔 요소들의 배치를 도식화한 것으로 빔 요소의 주요 상수가 일부 표시되어있다.

11 Electric Component Beam Line



EQ1, EQ4, EQ5, EQ8, EQ7: 3 cm effective length
 EQ2, EQ3, EQ6, EQ7, EQ2: 6 cm effective length

7 Electric Component Beam Line



EQ1, EQ2, EQ3, EQ4, EQ2: 6 cm effective length
 EQ1, ECT3: 3 cm effective length

그림 12: 재결합 빔 라인에 사용된 빔 요소 분포로 사용되는 빔 집속요소의 수가 11 개 그리고 7 개인 경우에 대한 배치 및 주요 상수.

TRANSPORT를 사용하여 계산한 빔 envelope을 그림 13에 표시하였다. F1 지점은 빔이 분리되는 지점으로 11개의 빔 집속요소를 사용할 경우 빔의 수직면 크기를 조절할 수 있는 장점이 있으나 분리는 수평면에서 이루어진다는 점을 고려할 때 빔 크기가 크더라도 전체적인 빔 수송효율에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다. F2 지점에서 빔 bunching이 이루어져 양 평면에서의 빔 크기를 최소화 되는 것이 빔 질을 높이는 데 필요하다. 각 지점에서 실제 빔의 모양을 그림 14와 같이 TURTLE 프로그램으로 계산하여 비교해 보았다. 빔 분리 및 집속 측면에서는 7개의 빔 집속요소만 사용하더라도 큰 문제는 없고 전체적인 빔 라인 길이가 짧아지는 등의 장점이 부각되는 것으로 판단된다.

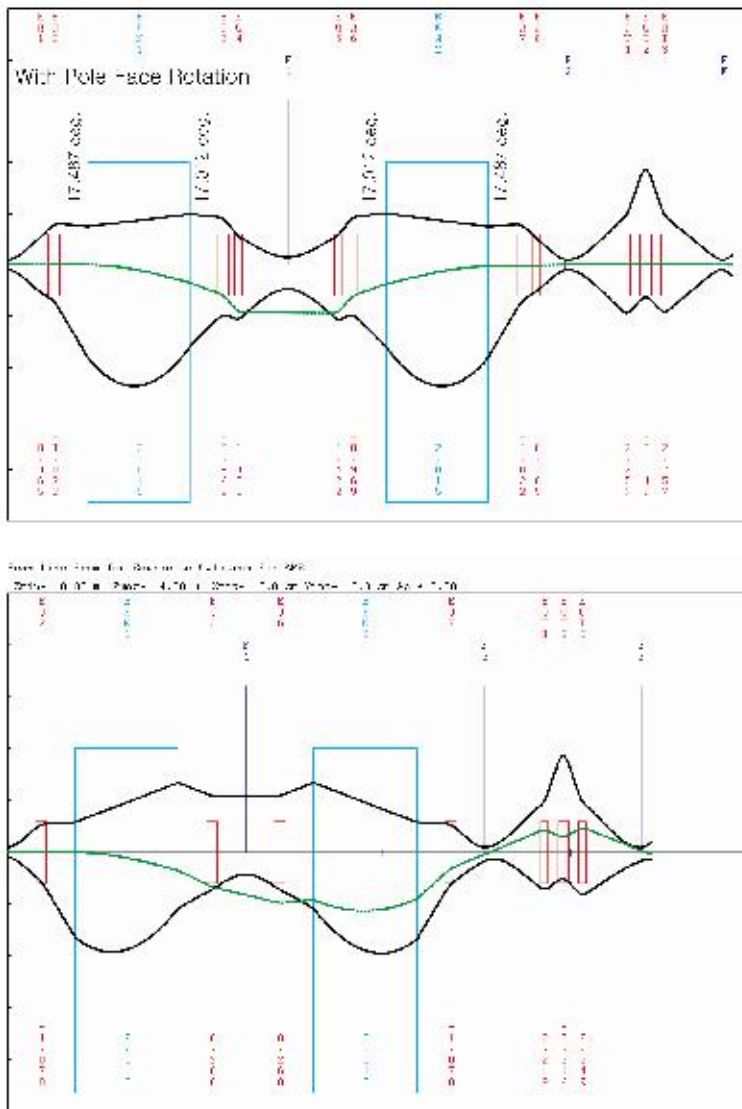


그림 13: 위쪽: 11개의 4중극 전자석을 사용할 경우 및, 아래쪽: 7개를 사용할 경우의 빔 envelope 계산 결과 비교.

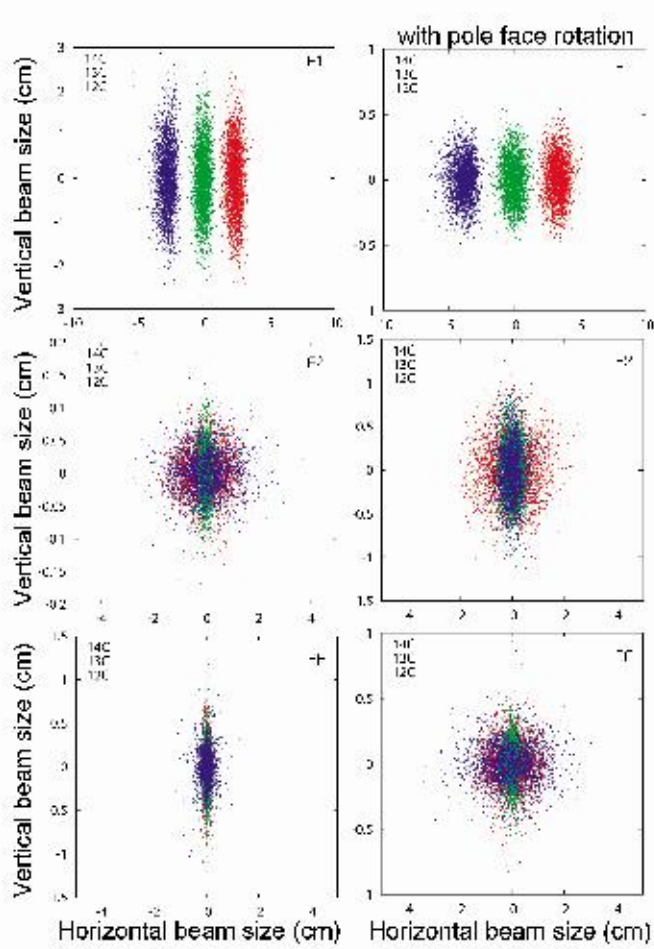


그림 14: (왼쪽) 7개의 4중극 전자석 (오른쪽) 11의 4중극 전자석을 사용할 경우 그림 13에 표시된 세 지점에서의 빔 단면 분포.

TRANSPORT 빔 광학 계산은 평면 위상공간에 대한 것인 반면 빔의 longitudinal 위상공간에서 사이클로트론 acceptance와의 matching은 그림 15와 같이 TRACE3D를 [20] 사용하여 계산하였다. 주요 요건은 saw-tooth 파형을 가지는 buncher에 의해 사이클로트론 입사지점에서 rf 위상각도가 약 20° 이내로 되도록 번칭하는 것이고 그림 15는 약 300 V의 전압을 사용한 경우이다.

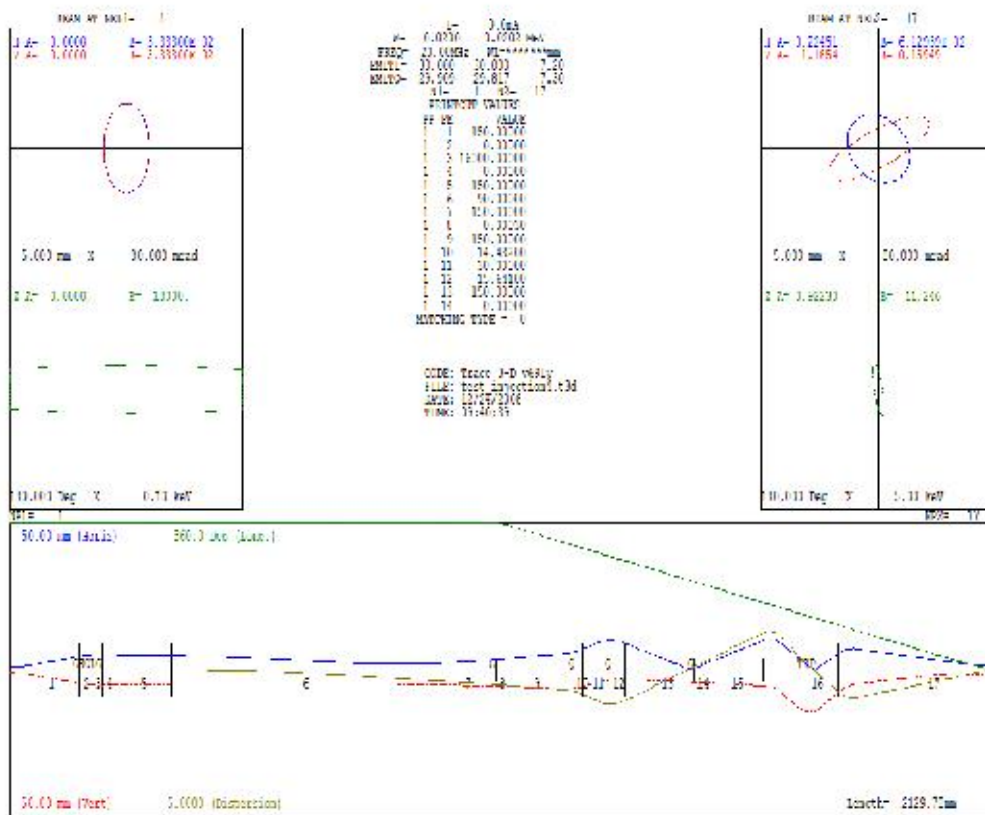


그림 15: TRACE3D를 사용하여 계산한 longitudinal 위상공간에서의 빔 광학, 평면공간에 대한 계산 결과는 TRANSPORT 경우와 일치하도록 조정하였다.

2.4 양이온 AMS 사이클로트론

방사선탄소 비율 측정에 양이온을 사용할 수 있을 경우 기존의 탐뎀 시스템 그리고 가속기 질량 분석은 반드시 음이온을 사용해야한다는 개념을 바꿀 수 있을 뿐만 아니고 현재 목표로 하고 있는 생의학용 질량분석시스템의 활성화에 결정적 역할을 할 수 있을 것이다. 전술한 바와 같이 사이클로트론 자체로 ^{14}C 을 질소이온으로부터 분리하는 것은 실질적으로 가능하지 않다. 결국 가속 후 분리하여야 하는데 이때 물질에 입사되어 정지할 때까지 도달하는 비거리(range)가 틀리다는 점을 이용할 수 있다. 이러한 비거리 분석법을 사용하기 위해서는 빔 에너지가 커질수록 유리하지만 요구되는 사이클로트론의 규모가 커지는 약점이 있다. 두 이온을 분리할 수 있는 최소 빔 에너지를 확인하기 위하여 GEANT 몬테카를로 프로그램을 [21] 이용한 모의계산을 수행하였다. 그림 16은 빔 에너지 분산이 0.1% 일 때 그림 16 내 아래쪽에 표시한 것과 같이 stacking된 range verifier를 사용하여 측정되는 빔의 정지 분포곡선이다. 입사 빔 에너지가 2 MeV/u 일 때는 ^{14}N 와 ^{14}C 피크사이에 2채널 3 MeV/u 일 때는 4채널이 분리됨을 알 수 있다.

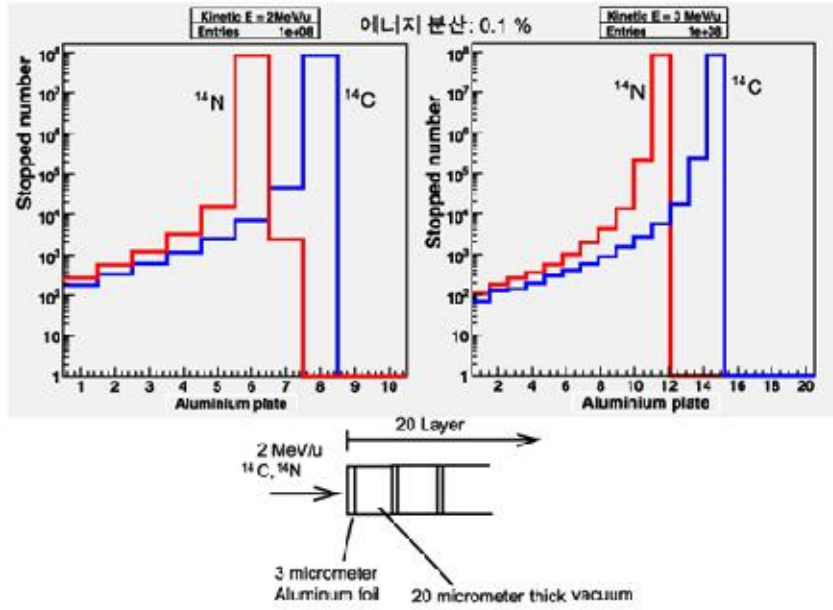


그림 16: GEANT로 계산한 ^{14}C 및 ^{14}N 의 분포로 빔 에너지가 각각 2 MeV/u 그리고 3 MeV/u 일 경우.

$^{12}\text{C}^{6+}$ 를 2 MeV/u로 가속하기 위한 magnetic rigidity ($B\rho$)는 약 0.57 T·m 이다. 한편 그림 16 및 여러 오차요소를 고려하면 적절한 빔 에너지는 최소 3 MeV/u로 판단되고 전체 직경을 1 m 이내로 유지하기 위해서는 초전도 전자석을 사용하는 것이 필요하다. 그림 17은 간단한 4 sector 초전도 전자석에 대한 계산으로 주어진 코일에서 전류 밀도에 대한 평균자기장 분포 변화를 보여주고 있다. 약 5 T에서 전류밀도는 NbTi 초전도 선재를 사용한 전자석으로 얻을 수 있는 값이다. 그 외 전자석 바깥쪽의 stray 자장 등을 고려하여 전자석 크기가 결정된다.

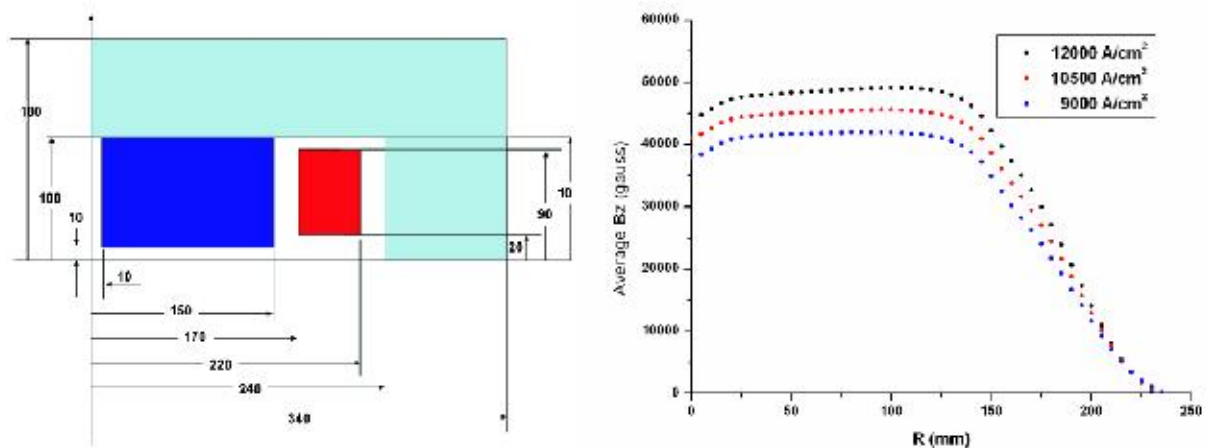


그림 17: (왼쪽) 전자석의 1/4 단면도, (오른쪽) 코일 내 전류밀도 값에 따른 평균자기장 분포. 이상의 양이온 AMS는 실현 가능한 장치로 판단되고 구체적인 설계는 평균 5T의 고자기장에서

빔 광학 측면 등을 고려하여 이루어져야 한다.

3. 연구결과 고찰 및 결론

- 현재 탄뎀을 사용한 질량분석기가 상용화되어 있어 사이클로트론 시스템에 대한 설계 또는 제작 연구는 국외에서 이루어지지 않는 분야로 성공적으로 설계/개발이 이루어질 경우 기술선점이 가능한 분야임.
- 매우 적은양의 시료를 분석해야하는 방사선탄소 연대 측정의 경우 기존의 탄뎀가속기를 이용하는 전문기관에서의 분석으로 수요 및 높은 정밀도를 유지하는데 적절한 것으로 판단됨. 반면 생의학용 AMS의 경우 상대적으로 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율이 높아 연대측정과 동일 장치를 사용하는 것은 바람직하지 않으며 분석 자료의 기밀성 등으로 주요 병원 등 각 기관에서의 독립적인 장치를 사용하는 것이 필요함. 특히 장치의 소형화 및 운영의 간편성 등 사이클로트론 AMS가 가지는 특성이 주요 장점이 되어 사이클로트론 Biomedical AMS가 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 판단됨.
- 80년대 말 미국 버클리연구소에서 처음으로 제작된 AMS 사이클로트론은 빔 가속 및 투과 효율이 이온원으로부터 추출된 이온 대비 10^{-4} 로 매우 낮았다. 한편 AMS 전용으로 설계된 상하이 사이클로트론의 경우 버클리 장치에 비해 수백 배 높은 효율로 최고 약 10%의 효율을 보인 것으로 판단된다. 한편 상용화된 탄뎀의 경우 이보다 높아 여전히 충분한 경쟁력을 확보하지 못했다. 본 연구에서 빔 입사 장치 사이클로트론의 가속되는 위상범위 확대 등으로 상하이 장치와 비교하여 추출이온 이용효율을 3-4 배 이상 증가시키는 것이 가능한 것으로 판단되어 실현될 경우 시장 경쟁력도 있을 것임.

4. 연구성과 및 목표달성도(1) 연구성과

| 논문명 | 저자 (저자구분) | 저널명(I.P.) | Vol(No)Page | 구분 | 과제 관련성 |
|--|--------------|--|-------------|-----------|-----------|
| Design study of a mini cyclotron for the application of biomedical accelerator mass spectrometry | 교신 및 제1 | AIP Conference Proceedings | accepted | 국외 | 상 |
| Study of an accelerator mass spectrometer based on a compact cyclotron | 교신 및 제1 | Journal of Korean Physical Society (IF 1.20) | accepted | 국내 SCI | 상 |

나 국내 및 국제 학술대회 논문 발표

| 논문명 | 저자 | 학술대회명 | 지역 | 과제 관련성 |
|--|----------------------------------|---|----|-----------|
| Characteristics of a heavy ion accelerator for basic and applied science research | J. Kim | Spring meeting of 2008 Korea Physical Society | 국내 | 중 |
| Design study of a mini cyclotron for the application of biomedical accelerator mass spectrometry | J. Kim, C. Yun, M. Youn, S. Wang | 20 th Int'l Conf. on the App. of Accelerators in Research and Industry | 국외 | 상 |

다 산업계산

(2) 목표달성도

가. 연구목표의 달성도

| 최종목표 | 연차별목표 | | 달성내용 | 달성도(%) | |
|--|-------|---|---|--------|----|
| | | | | 연차 | 최종 |
| 생명공학에 사용할 수 있는 초고감도 질량분석 시스템용 사이클로트론 가속기 제작. | 1차년도 | 음이온 탄소를 이용하는 질량분석 사이클로트론 설계. | 사이클로트론 전자석의 3D 설계, 가속 cavity 일부를 제작하고 테스트 수행. | 95% | |
| | | 양이온 탄소를 이용하는 질량분석용 소형 사이클로트론의 타당성 및 실용성 평가. | 방사성탄소를 분리할 수 있는 실용적인 양이온 초전도 사이클로트론 AMS 시스템을 제시함. | | |
| | 2차년도 | | | | |
| | 3차년도 | | | | |

나. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

| 평가의 착안점 | 자 체 평 가 |
|----------------------------|--|
| AMS 사이클로트론 시스템의 주요 상수 결정 | 최적 설계를 이루기 위해서는 종합적인 테스트가 필요하여 이를 효과적으로 수행하기 위한 설계를 제시함. |
| 빔 가속 및 투과 효율 증진 방법의 설계 포함. | 빔 전달 시스템과 사이클로트론 acceptance의 효과적인 matching을 위한 시스템을 제안하는 등 과거 국외에서 실패한 부분에 대한 시스템 개선을 고려함. |

5. 연구결과의 활용계획

(1) 연구종료 2년후 예상 연구성과

| 구 분 | 건 수 | 비 고 |
|-----------|-----|---|
| 학술지 논문 게재 | 1 | Review of Scientific Instruments (IF 1.38) |
| 산업재산권 등록 | | |
| 기 타 | | 연구보고서 등에 포함된 설계내용은 추후 관련 연구과제의 연구에 도움이 될 것으로 예상됨. |

(2) 연구성과의 활용계획

- 2009년도 기관고유사업을 통해 추가로 1년간 시스템 설계의 완성도를 높이는 연구를 수행하고 외부 연구과제로 전체 시스템제작을 수행할 수 있도록 할 계획이다. 총 제작비는 테스트 비용 등을 포함하여 약 10억원이 소요될 것으로 추산하고 있으며 5년 이내에 완성할 수 있을 것으로 판단됨.
- 예산이 확보되면 제작에 약 3년이 소요될 것으로 예상되고 1-2년간의 검증 후 실용화/상용화가 가능한 AMS 사이클로트론 설계가 도출될 수 있을 것으로 생각됨. 기업은 검증기간 동안 상용화가 가능할 경우 참여할 수 있을 것임.

6. 참고문헌

- [1] J. Arnold and W. Libby, *Science* **110**, 678 (1949).
- [2] R. Muller, *Science* **196**, 489 (1977).
- [3] H. Gove, A. Lutherland and K. Purser, *Nucl Instru. Meth B* **29**, 437 (1987).
- [4] K. Brown, E. Tompkins, I. White, *Mass Spectrometry Rev.* **25**, 127 (2006).
- [5] R. Garner and D. Leong, *Nucl Instru. Meth. B* **172**, 892 (2000).
- [6] J. Kim, M. Youn, I. Kim, J. Park, Y. Song, J. Kang, H. Choi, J. Korean Phys. Soc. **43**, S45 (2003).
- [7] J. Park, C. Lee, I. Kim, J. Kim, J. Korean Phys. Soc. **45**, 880 (2004).
- [8] K. Bertsche, C. Karadi, R. Muller, *Nucl Instru. Meth. A* **301**, 358 (1991).
- [9] M. Chen, D. Li, S. Xu, G. Chen, L. Shen, Y. Zhang, X. Lu, W. Zhang, Y. Zhang, Z. Zhong, *Nucl Instru. Meth. B* **92**, 213 (1994).
- [10] Y. Liu, S. Wang, D. Li, G. Chen, W. Jia, M. Chen, *Nucl Instru. Meth. B* **259**, 62 (2007).
- [11] D. Clark, *Proc. of 10th Int'l Conf. on Cyclotrons and Their Applications* (E. Lansing, 1984) p. 534.
- [12] P. Elleaume, O. Chubar, J. Chavanne, *Proc. of the 1997 Part. Accel. Conf.* (Vancouver, 1997) p. 3509.
- [13] Los Alamos Accelerator Code Group, <http://laacg1.lanl.gov/laacg>.
- [14] TOSCA is a product of a Vector Fields Limited, England.
- [15] S. Ninomiya, T. Saito, H. Tamura, K. Sato, *Proc. of 17th Int'l Conf. on Cyclotrons and Their Applications* (Tokyo, 2004) p. 140.
- [16] W. Joho, *Proc. of 11th Int'l Conf. on Cyclotrons and their Applications* (Tokyo, 1986) p. 31.
- [17] A. Chabert, Ch. Ricaud, L. Boy, B. Monsanglant, W. Coz, *Nucl Instru. Meth. A* **423**, 7 (1999).
- [18] PSI Graphic Transport Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version by K. L. Brown et al, CERN 73-16 (Villigen, 2007) .
- [19] PSI Graphic Turtle Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version by K.L. Brown et al, DECAY TURTLE CERN 74-2 (Villigen, 2007)

[20] K. R. Crandall and D. P. Rusthoi, "Trace 3-D Documentation," Los Alamos National Lab, report LA-UR-97-886 (New Mexico, 1997).

[21] R. Brun, F. Ruyant, M. Maire, A. McPherson, P. Zanarini, GEANT3-detector description and simulation tool, CERN, 1994.

7. 첨부서류

첨부 논문은 2009년 AIP (American Institute of Physics) Proceeding 책자 내 논문으로 발간될 예정입니다.