희귀동위원소 과학을 위한 초전도 중이온가속기

중이온가속기 가속장치 개발

DOI: 10.3938/PhiT.24.047

김형진·진현창·홍인석·정희천·김우강

Progress with the Superconducting Heavy-ion Linear Accelerator

Hyungjin KIM, Hyunchang JIN, Insuk HONG, Heochun JUNG and Wookang KIM

The Rare Isotope Science Project (RISP) has been proposed as a multi-purpose accelerator facility for providing beams of exotic rare isotopes of various energies. It can deliver ions from hydrogen (proton) to uranium. Protons and uranium ions are accelerated up to 600 MeV and 200 MeV/u, respectively. The facility consists of three superconducting linacs whose superconducting cavities are independently phased. The requirement for the linac design is especially high for the acceleration of multiple charged beams. In this paper, we present the design for the linac at the RISP and discuss the development of the electron cyclotron resonator, the radio-frequency quadrupole, the superconducting cavity, and the cryomodule.

저자약력

김형진 박사는 미국 일리노이주립대학 공학박사로서 미국 국립페르미연구소(Fermilab) 연구원을 거쳐 2012년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 가속장치 개발을 책임지고 있다.(hjkim@ibs.re.kr)

진현창 박사는 포항공과대학교 이학박사로서 독일 전자가속기연구소(DESY) 연구원을 거쳐 2014년부터 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단에서 빔물리 연구를 수행하고 있다.(hjin@ibs.re.kr)

홍인석 박사는 서울대학교 공학박사로서 현재 기초과학연구원 중이온가속기사업단에서 입사기개발그룹장으로 재직 중이다.(ishong@ibs.re.kr)

정희천 박사는 서울대학교 이학박사로서 현재 기초과학연구원 중이온가속기사업단에서 초전도가속관개발그룹장으로 재직 중이다.(hcjung@ibs.re.kr)

김우강 박사는 충남대 공학박사로서 외국계 대기업 GM-Delphi 조향 및 구동 그룹장, 국립한밭대학교 겸임교수, 한국기초과학지원연구원을 거쳐 현재 기초과학연구원 중이온가속기사업단 저온유지모듈개발그룹장으로 재직 중이다.(kwko11045@ibs.re.kr)

서 론

중이온 가속기는 에너지의 변화 없이 원하는 장소로 이온 빔을 이동시키는 구간과 낮은 에너지를 가지고 있는 이온 빔을 높은 에너지를 갖도록 가속시키는 구간으로 크게 나눌 수 있다. 저에너지 빔 전송 구간이나 실험실로 가는 빔 전송 구간 등이 전자에 해당하고, 고주파 사극자석(RFQ)과 선형가속기 구간 등이 후자에 해당하게 된다. 이온원 발생장치에 의해 생성된 이온 빔은 이러한 가속기 내의 여러 구간들을 지나 실험실에 위치한 표적에 부딪쳐 다양한 과학 실험에 이용된다. 생성된 이온 빔이 마지막 표적까지 도달하는 동안 여러 종류의 힘들에 의해서 불안정하게 되어 빔의 손실이 발생하기 때문에 이를 막기 위해 자석들을 비롯한 여러 장치들을 이용해 빔을 안정하게 만들어 주어야 한다. 또한 선형가속기 구간에서는 빔의 길이 방향으로도 불안정성이 발생할 수 있기 때문에 이 또한 안정화될 수 있도록 해주어야 한다.

초전도 중이온 가속기는 이온원 발생장치, 저에너지 빔 전송 구간, 고주파 사극자석, 중에너지 빔 전송 구간, 저에너지 선형가속장치, 굴절 구간, 고에너지 선형가속장치 등으로 이루어져 있다. 각각의 구간마다 이루어야 하는 목적들이 있고, 이 목적들과 함께 빔을 안정하게 보내기 위해 요구되는 조건들이 다르다. 또한 이 조건들은 전송하는 이온의 종류마다 달라질 수 있다. 따라서 다양한 종류의 이온 빔을 모두 안전하게 전송하기 위해 세밀한 격자구조 설계가 요구되고, 또한 각 구간에서 요구사항을 만족하는 가속장치의 개발이 중요하다. 여기에서는 중이온가속기 구축을 위해 현재 개발 진행 중인 핵심 가속장치의 개발을 소개하고자 한다.

가속기 격자구조 설계

여기에서는 라온 가속기의 여러 구간들 중에서 저에너지 빔 전송 구간과 선형가속기 구간에서의 격자구조 설계에 대해 설명하고자 한다. 저에너지 빔 전송 구간은 이온원 발생장치(ECR-IS)에서 생성된 낮은 에너지의 이온 빔을 추가적인 예너

Fig. 1. Beam transport line for low energy ions.

Fig. 2. Lattice structure of linac at RISP.

지 증가 없이 고주파 사극자석까지 안전하게 전송시키는 구간이다. 이 구간의 가장 큰 목적 중 하나는 발생장치에서 나오는 다양한 종류의 이온 빔들 중에서 원하는 종류의 이온 빔을 선택하는 작업이다. 이러한 목적과 함께 이온 빔을 손실 없이 고주파 사극자석까지 전송하기 위해 그림 1과 같이 격자구조가 이루어졌다. 두 개의 이극자석(BM)을 이용해 다양한 이온 빔들이 갈라지는 영역을 만들고, 이 영역 내에서 원하지 않는 이온 빔들을 걸러낼 수 있다. 이 구간에서는 저에너지 이온 빔을 좀 더 효율적으로 집속시키기 위해서 사극자석 대신에 사극전자석(ESQ)을 이용하였다. 이 구간에서 빔이 통과하는 관의 직경이 12 cm 이기 때문에 빔의 손실을 막기 위해서 빔의 크기가 이 값보다 크지 않도록 하는 것이 중요하고, 이러한 조건을 만족시켜 주기 위해서 사극전자석들의 세기를 계산하여 조절해 주어야 한다.

RFQ 이후에 연결되는 선형가속기는 가속 효율을 위해 저에너지 선형가속기 구간과 고에너지 선형가속기로 나누어져 있으며 각각 그림 2와 같은 격자구조로 이루어져 있다. 저에너지 선형가속기의 경우 0.5 MeV/u의 낮은 에너지의 이온 빔을 18.5 MeV/u로 가속시킬 수 있고, 고에너지 선형가속기의 경우 200 MeV/u까지 가속시킨다. 선형가속기에는 빔을 가속시키는 초전도 가속관들이 있고, 저온유지 모듈이 이 초전도 가속관을 감싸면서 가속관의 초전도 상태를 유지해주는 역할을 하게 된다. 그리고 저온유지모듈 사이마다 가로 세로 방향으로

Table 1. Specification of ECR ion source.

Frequency (GHz)	28, 18
RF Power (kW)	10, 2
Plasma Chamber ID (mm)	147
Plasma Chamber Material	Aluminum
Mirror Length (mm)	500
$V_{\text{acc}}(\text{kV}) = V_{\text{ext}}(\text{kV}) + V_{\text{acc}}(\text{kV})$	70=30+40
SC Wire	NbTi
Number of Solenoid Coils	4
Hexapole Winding Type	Saddle
Binj(T)	~ 3.5
Br(T)	2
Bext(T)	2
Bmin(T)	0.4 ~ 0.8

빔을 집속시키기 위한 두 개의 사극자석이 존재한다. 선형가속기에서는 반복적인 격자구조가 빔의 크기에 영향을 미치는 효과나 빔의 가로 방향과 길이 방향이 서로 영향을 미쳐 빔의 손실로 이어지는 효과 등 여러 가지 효과들을 모두 고려하여 격자 설계를 진행하여야 한다.

기본적인 격자 설계가 끝난 구간들은 장치들을 설치하면서 발생할 수 있는 오차들에 의해 발생하는 빔의 불안정성들에 대한 연구가 이어지게 되고, 이러한 불안정성들을 줄이고 제거하기 위해 필요한 추가 장치들과 장치들의 세기 등에 대한 연구가 계속 진행된다.

초전도 전자공명(ECR) 이온원

핵융합위원소 물리 실험을 위해서는 양성자부터 우라늄까지 다양한 종류의 이온 빔들을 필요로 한다. 다양한 이온 빔을 생성하여 가속하기 위해 ECR(Electron Cyclotron Resonance) 이온원을 제안하여 개발 중에 있다. ECR 이온원 개발의 주요 목표는 최대 A/q(질량 대 이온화비)는 7.210 keV/u의 인출 에너지를 가지는 0.1 π mm-mrad의 규격화 RMS 에미턴스의 이온 빔을 생성하는 것이다. 표 1에서 제안한 ECR 이온원의 자세한 제원을 볼 수 있다.

ECR 이온원의 성능은 전자의 에너지를 높이기 위한 마이크로파의 진동수와 출력, 그리고 전자의 맴돌이 공명을 일으키기 위한 마이크로파의 진동수에 상응하는 자석 디자인에 의해 결정되므로 $^{238}\text{U}^{33+}$ 과 같이 높은 다가의 중이온을 생산하기 위해 3세대 이온원인 28 GHz 초전도 ECR 이온원을 채택하였다. 28 GHz 초전도 ECR 이온원 설계를 위해 요구되는 자장 계산을 위한 자장구조 최적화 및 극저온시스템 저온계산을 수행하

Fig. 3. Magnetic field distribution of ECR ion source.

였다. 그림 3에서 전자석 최적설계안을 볼 수 있다. 설계된 전자석은 솔레노이드 4set, Saddle형 6극전자석 1set를 설치하여 요구되는 축자장 및 외벽방향 자장값을 만족함을 확인하였고 아울러 축 방향 자장 프로파일을 효율적으로 제어할 수 있었다. 극저온 냉각 시스템을 구성하기 위해 1.5 W Cryo cooler 2단 냉동기 6set를 사용하여 헬륨 재응축 시스템을 구축할 수 있었다. 재응축 열원으로는 플라스마 챔버에서 발생하는 X-선이 열 부하로 작용할 수 있기 때문에 4 K에서 10 W 이상의 냉각 용량을 가지는 극저온 냉각 시스템을 구성하였다. 이온원의 성능 향상을 위해서 두 개의 ECR 영역을 생성시키는 다중 마이크로파원을 이용할 계획이다. 고전류의 다가 이온 빔을 생산하기 위해서 28 GHz와 18 GHz를 플라스마에 동시에 인가할 수 있는 고주파 시스템을 설계하였다. 부가적으로 플라스마 시스템에는 고체 상태의 안정동위원소들을 사용하여 이온 빔을 발생하기 위해서 스퍼터링 방법 및 2,000 °C 이상의 초고온용 오븐 설치가 가능하도록 설계하였다. 이온 빔 인출계는 빔에너지 요구조건 10 keV/u를 만족하는 시스템을 구현하기 위해 30 kV 3전극 시스템을 구성하여 이온 빔을 인출하고 가속관을 설치하여 42 kV로 추가 가속하도록 고전압 시스템을 설계하였다.

초전도 전자석 개발을 위해 시제품을 제작하여 시제품 개별 성능시험을 완료하였고 통합 성능시험 중에 있다. 플라스마 빔 인출 시험을 위해 플라스마 및 빔인출 시스템을 제작하여 플라스마 및 빔 인출 실증시험 중에 있다.

현재 ECR 이온원 성능시험을 위한 시험시설을 구축하여 초전도 전자석 통합시험 및 빔인출 시험에 활용하고 있다. 아울러 이온원 성능을 확보하여 이온빔을 RFQ 및 SCL에 공급하여 가속 성능시험에 활용하고 한다.

고주파 사중극자(RFQ) 가속장치

초전도 ECR 이온원에서 생성된 이온 빔을 후단 주가속기인 초전도 가속기에 요구되는 가속 이온 빔을 공급하기 위해 상

Fig. 4. Photo of the assembled ECR ion source.

Table 2. Main parameters of RFQ.

Parameter	VALUE
Frequency	81.25 MHz
Particle	H+1 to 238U+33
Input energy	10 keV/u
Output energy	0.507 MeV/u
Input emittance(rms, nor.)	0.12 mm-mrad
Output current for 0.4 mA	~0.49 mA
Output emittance	0.125 mm-mrad ~30 keV/u-deg.
Transmission	~98 %
Peak surface field	1.70 Ek (~17.9 MV/m)
Structure power(for 238U+33)	92.4 kW with margin
Total power	~94 kW (1.44 kW beam)
Total Length	4.98 m

전도 RFQ 가속관이 설치된다. RFQ는 Vane type으로 입력 이온빔은 12 pμA 우라늄, 출력 에너지는 500 keV/u이다. 출력 빔은 연속 운전 모드로 설계되었으며, 입력 빔은 0.12 π mm-mrad, 10 keV/u DC 빔으로 가정하였다. 출력 빔의 횡방향 에미턴스의 증가는 약 10% 이내로 하고 종 방향 에미턴스는 0.03 MeV/u-deg를 넘지 않고 빔 전송률은 90% 이상의 조건을 두었다. 내부 최대 표면 전기장이 1.7 Kilpatrick 이하이고 입력 RF 출력은 150 kW, 전체 길이는 5 m가 넘지 않는 제한을 두었다. 표 2는 설계한 RFQ 주요변수를 볼 수 있다.

설계를 바탕으로 주요 제작 기술 검증을 위해 시제품을 제작하였다. 제작된 시제품은 가속관 고에너지 구간으로 modulation이 가장 급격한 부분 및 전체 길이 1/9의 한 섹션으로 실제 크기를 반영하여 전 제작 공정을 수립할 수 있었다. RFQ 시제품은 Multipacting 고주파 정밀 온도 제어 검증을 위한 고주파 시험을 수행 중에 있다.

초전도가속관

전자 빔보다 낮은 속도의 이온 빔을 효과적으로 가속하기 위해, 동축 구조의 공명기를 채택하였다. 빔 속도가 빛 속도의 4.7% 부근인 초전도 선형가속기 앞부분에는 동작 주파수 81.25

Fig. 5. Photo of fabricated RFQ prototype.

Table 3. Parameters of 4 cavities employed at superconducting LINAC.

항목	QWR	HWR	SSR1	SSR2
동작 온도 (K)	4	2	2	2
최적 빔속도	0.047	0.12	0.3	0.51
동작 주파수 (MHz)	81.25	162.5	325	325
최대 전기장 (MV/m)	35			
가속 전압 (MV)	1.1	1.4	2.3	4.1

MHz의 파장의 1/4 길이인 QWR(Quarter Wave Resonator)을 채택하였고, 빔 속도가 빛 속도의 12%인 세션에는 162.5 MHz의 반파장 길이인 Half Wave Resonator(HWR)를 기본으로 최적화 설계를 진행했다. 빔의 속도가 빛 속도의 30%과 51% 부근인 가속기에는 변형된 동축 구조인 SSR(Single Spoke Resonator)를 각각의 빔 속도에 맞도록 설계했다.

초전도 가속관은 내부 열손실이 매우 작은 특성에 따라 공명 주파수의 주파수폭이 매우 작다. 따라서 가속관에 RF 전력을 효율적으로 공급하기 위해 외부 및 내부 영향에 의해 가속관의 고유주파수가 최소로 변할 수 있도록 가속관을 설계해야 한다. 또한 전자 방출, 초전도상태 파괴 등의 여러 요인에 의해 동작할 수 있는 최대 전기장(~ 35 MV/m), 최대 자장(~ 60 mT) 등이 존재하므로, 이러한 한계를 기준으로 가속 전압이 최대가 되도록 설계했다. 방출된 전자가 동작 RF와 공명하여 2차 방출 전자가 기하급수적으로 늘어나는 현상인 멀티팩팅이 가속관 동작 시에 문제가 되지 않도록 설계를 수행했다.

4가지 종류의 초전도가속관의 제작을 국내에서 진행했다. 3 mm 두께의 순수 니오븀 판재를 사용하여 프레스링으로 부품 성형한 후, 오염 등을 방지하기 위해 전자빔을 이용하여 초고진공 환경에서 용접으로 조립하였다. 화학연마 및 초순수를 이용해 세정했고, class 100 이하에서 건조를 했다. 제작된 가속관의 형상은 그림 6과 같다. QWR 및 HWR 가속관에 대해서 저

QWR 초전도가속관

HWR 초전도가속관

SSR1 초전도가속관

SSR2 초전도가속관

Fig. 6. Photo of fabricated 4 type cavities.

온 성능 시험을 수행했다.

캐나다 TRIUMF 연구소와의 협력을 통해 4 K 및 2 K에서 QWR 가속관 및 HWR 가속관의 성능 시험을 수행했다. 초전도 가속관을 TRIUMF의 후처리 설비에서 화학연마 및 고압수세하고 Class10의 클린룸에서 건조한 후 저온유지장치에 설치하여 액체 헬륨으로 냉각했다. 4 K와 2 K에서 가속 전압(전계)을 높여가며 가속관 내부의 열손실을 측정했고, 멀티팩팅이 일어나는 영역을 확인했다. 외부 헬륨 압력 변화 및 내부 전자기력에 의한 주파수 변화율도 측정하여 향후 개발에 적용했다. 또한 인위적으로 가속관의 냉각 속도를 조절하여 내부 수소에 의한 Q disease 현상에 대한 시험도 수행했다. 내부 가속 전계 세기에 따른 Q 인자 측정 결과는 그림 7에 보인다. RAON의 QWR의 동작 가속 전계는 6.6 MV/m이며 이때의 목표 열손실은 11.6 Watt 이하이다. 실험을 통해 Q-disease 현상에 의해 Q 인자가 감소한 상황에도 목표치를 달성함을 확인했다.

저온유지모듈

저온유지모듈은 초전도 가속관과 고주파 파워 커플러, 튜너 등을 포함하고 있는 장치로서 극저온에서 작동하는 초전도 가속관을 외부로부터 단열시키고, 고정하는 역할을 한다. 초전도 가속관은 일반적으로 액체 헬륨(4 K) 또는 초유체 헬륨(2 K)을 사용해서 냉각한다. 극저온 유체는 비열이 매우 작기 때문에 소량의 열유입으로도 많은 양이 증발되므로, 매우 효율적인 단열 시스템을 필요로 한다. 열은 전도, 대류, 복사에 의해서 전달되며, 저온유지모듈은 각각의 열전달을 최소화하는 구조를 가지고 있다. 대류열전달을 완전히 감소시키기 위해서 모듈내부는 진공상태를 유지하고 있다. 복사열 전달은 약 40 K 내외의 기체 헬륨으로 냉각되는 금속판으로 제작된 복사열 차폐막

Fig. 7. Performance of QWR cavity at 4 K.

과 다층절연막(multi-layer Insulation)을 통해서 감소시킨다. 모듈 내 부품들은 필연적으로 상온부와 연결되어 있고 이를 통해 전도 열전달이 발생하므로, 열전도도가 낮은 물질을 사용하거나 전도 열전달량의 일부를 극저온과 상온 사이의 온도에서 감당할 수 있는 구조를 사용한다. 이러한 열적인 성능조건들은 구조적 성능 조건들과 상충하는 경향이 있다. 그러므로 저온유지모듈의 설계 시에는 이러한 다양한 성능 요구조건들을 만족시킬 수 있도록 최적화된 설계가 필요하다.

액체 헬륨으로 가속관을 냉각하고 외부와의 효율적인 단열을 위해서 저온유지모듈은 헬륨 냉동기로부터 4.5 K의 초임계 헬륨을 공급받아서 모듈 내부에 설치된 줄-톰슨 밸브를 통해 4.2 K의 액체 헬륨을 만들고, 이후 열교환기를 통한 냉매 후의 추가적인 줄-톰슨 팽창을 통해서 2 K의 초유체 헬륨을 자체적으로 생성시킨다. 4.2 K의 액체 헬륨 중 일부는 열사이판을 통해서 전도 열침입을 막는데 사용된다. 또한 40 K의 고압헬륨을 공급받아서 복사열 차폐체를 냉각시키는데 사용한다.

저온유지모듈의 또 다른 기능은 초전도 가속관을 일정한 위치로 고정하는 역할을 한다. 100 m 이상의 선형가속관에 사용되는 수백 개의 초전도 가속관이 0.5 mm 이하의 오차범위 내에 설치되어야 한다. 초전도 가속관은 극저온 상태에서 운영이 되므로 온도변화에 의한 열수축이 매우 크게 나타난다. 저온유지모듈 내부의 구성품들은 냉각에 따라 길이가 변화하고, 가속관 역시 그 형상이 변화된다. 일반적으로 상온에서 액체 헬륨 온도인 4 K까지 온도가 감소하는 경우 스테인리스 스틸은 1 m당 3 mm, 나이오븀은 1.4 mm 정도로 길이가 감소한다. 이러한 특성을 고려하여 상온에서 조립한 저온유지모듈의 내부 구성품들이 냉각이 된 이후 원하는 위치에 올 수 있는 구조로 제작되어야 한다. 또한 저온유지모듈 내부의 각 구성품들은 그 기능적 요구사항을 달성하기 위해 다양한 재료로 제작이 되며 각 재료의 열수축률의 차이에 의해서 응력이 발생해서 부품의 파손이 발생할 가능성도 있으므로, 재료의 선정 및 형상 설계 시에도 열수축에 대한 고려가 필요하다.

상기한 두 가지 가장 중요한 기능적 요구사항 이외에도 저온

Fig. 8. Schematic diagram of cryomodules.

Fig. 9. Low temperature test of cryomodules.

유지모듈의 설계시에는 다양한 요구사항이 고려되어야 한다. 운용적 측면에서 다른 저온유지모듈이 냉각된 상태로 하나의 저온유지모듈만을 분리 및 교체할 수 있는 구조가 필요하기도 하고, 이송시의 충격에 의한 파손이 발생되지 않도록 지지부를 구성할 필요도 있다. 또한 극저온 유체를 다량으로 저장하고 있으므로 사고시에 급격한 유체의 증발에 의한 파손을 막기 위해 적절한 안전장치를 필요로 하기도 한다. 이러한 다양한 요구사항을 고려하여 중이온 가속기용 저온유지모듈은 설계 및 제작되고 있다.

맺음말

고출력, 고에너지 중이온빔 및 희귀동위원소를 가속하기 위한 가속기에 대한 최적화가 완료되었으며, 또한 가속장치의 핵심장치에 대한 상세설계를 2013년도에 마쳤다. 초전도 전자공명(ECR) 이온원, 고주파 사중극자(RFQ) 가속장치, 초전도가속관, 저온유지모듈 등 중이온가속기 핵심장치에 대한 시제품 제작을 완료하였으며, 핵심장치에 대한 성능시험을 진행하고 있다. 본제품 제작을 2017년부터 착수하여 2019년까지는 저에너지 빔을 인출하여 실험실에 제공할 계획이며 2021년에는 전체 가속장치가 완공이 될 계획이다.