

# 한국형 중이온가속기

김 영 권 기초과학연구원 중이온가속기건설구축사업단 연구위원 | e-mail : ykkim78@ibs.re.kr

이 글에서는 대전에 설치될 예정인 한국형 중이온가속기에 대해 초전도 선형가속기를 중심으로 소개하고자 한다.

한국형 중이온가속기(RAON, 라온)는 국제과학비즈니스벨트의 핵심 시설로서 기초과학연구원(IBS: Institute for Basic Science) 산하 중이온가속기건설구축사업단(RISP: Rare Isotope Science Project)에서 장치 개발 및 건설이 진행되고 있다. 중이온가속기는 양성자에서 우라늄에 이르는 다양한 이온을 가속시켜 핵반응을 이용해 희귀동위원소를 생성하고, 이를 다양한 연구 및 응용분야에 활용하기 위한 대형 연구시설이다. 중이온가속기에서 발생된 희귀동위원소들은 새로운 원자를 만들어 내거나, 원자핵이나 소립자를 관찰하고, 물

**한국형 중이온가속기는 파쇄핵분리와 온라인 동위원소분리의 두 가지 희귀동위원소 생성방식을 하나의 가속기에서 사용할 수 있는 독창적인 방식으로 세계 최고 수준의 성능을 목표로 하고 있다.**

질의 성질에 대한 연구에 활용된다. 우주와 별의 진화과정 연구, 핵의 대칭에너지 연구, 첨단 암치료기술 개발과 생명과학 등 다양한 분야에 활용이 가능하다. 전 세계적으로 중이온가속기는 캐나다 TRIUMF의 ISAC-II, 프랑스 GANIL의 SPIRAL2, 일본 RIKEN의 RIBF과 미국 MSU의 FRIB 등이 건설되었거나 건설 중에 있다. 한국형 중이온가속기는 고에너지(200MeV/u), 고출력(400kW)에 해당하는 성능을 목표로 하며, 현재 운영 중이거나 2020년까지 완공 예정인 가속기 중 가속에너지, 가속출력, 희귀 동위원소빔 등에서 세계 최고사양을



그림 1 중이온가속기 조감도

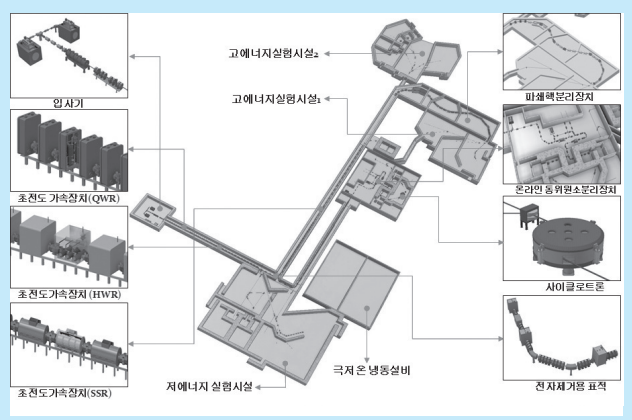


그림 2 중이온가속기 시스템 개략도

추구하고 있다. 희귀동위원소 생성에는 두 가지 방법이 사용된다. 파쇄핵분리(IF: In-flight Fragmentation) 방식은 얇은 표적에 중이온을 충돌시켜 대전류 고에너지 동위원소빔을 생성하는 방법이고, 온라인 동위원소분리(ISOL: Isotope On-line) 방식은 두꺼운 표적에 양성자를 충돌시켜 고순도 저에너지 동위원소빔을 생성하는 방법이다. 한국형 중이온가속기는 이 둘을 결합하는 방식으로 운영이 가능하다. 즉 사이클로트론(Cyclotron)에서 가속된 중성자를 사용해 온라인 동위원소분리방식으로 생성된 희귀동위원소를 초전도가속장치를 통해 가속한 후 파쇄핵분리장치에 주입하여 더욱 희귀한 동위원소를 생성시키는 방식으로 운용이 가능하다. 이러한 독자적인 운용으로 기존의 가속기보다 넓은 범위의 희귀동위원소를 생성해 다양한 기초 및 응용 연구를 위해 공급할 수 있을 것이다.

초전도 선형가속기(SCL: superconducting linac)는 다양한 방법으로 생성된 중이온을 가속시키기 위한 장비이다. 초전도 선형가속기는 전기장에 의해 이온을 가속시킬 수 있는 니오븀(Nb: Niobium) 초전도 가속관(Superconducting cavity)과 빔을 집속시킬 수 있는 전자석과 빔 진단 장비로 이루어져 있다. 초전도 가속관은 고주파(Radio Frequency)에 의해 전기장이 주기적으로 발생하여 그 내부를 지나가는 이온을 가속시킨다. 한국형 중이온가속기는 3개의 선형 가속단으로 이루어져 있다. 이온원에서 발생된 중이온은 1/4파장 공명기(QWR:

Quarter Wave Regenerator)와 1/2파장 공명기(HWR: Half Wave Regenerator)로 이루어진 초전도선형가속기 1(SCL1)을 통해 가속되며, 90도 굴절구간에서 가속 효율을 높이기 위해 일부 전자를 제거하고 2종류의 1파장 공명기(SSR: Single-spoke resonator)를 사용하는 초전도선형가속기2(SCL2)에서 빛의 속도의 50%까지 가속되어 파쇄핵분리장치에 주입된다. 온라인 동위원소분리장치에서 생성된 중이온들은 SCL1과 동일한 가속관을 사용하는 초전도선형가속기3(SCL3)을 통해 가속된 후 180도 굴절구간을 지나서 SCL2에 유입된다.

초전도가속관은 각각 형상에 따른 공진주파수(Resonant frequency)를 가지고 있으며, QWR의 경우 81.25MHz, HWR의 경우 162.5MHz, SSR1과 SSR2은 325MHz이다. 초전도가속관은 초전도 상태에서 고주파에 의한 열 손실을 최소화할 수 있도록 고 순도의 니오븀으로 제작되며 제작과정에서는 복잡한 곡면 형상을 얻기 위해 딥드로잉(deep drawing)을 통해 각 부품을 제작하고, 전자빔 용접(E-beam welding) 용접으로 각 파트를 접합한다. 전자빔 용접 시에 용접부위의 표면저항이 초전도 상태에서 목표치 이하가 될 수 있도록 용접 조건을 조절할 필요가 있다. 더불어 가속관의 내부는 매우 높은 청정도 및 진공도( $10^{-9}$ torr 이하)를 필요로 한다. 이러한 특성 때문에 가속관의 제작과정에서 화학연마(BCP: Buffered Chemical Polishing), 고압수세(HPR: High Pressure Rinsing), 열처리와 같은 다수의 과정이 클래스



그림 3 중이온가속기의 초전도 가속관

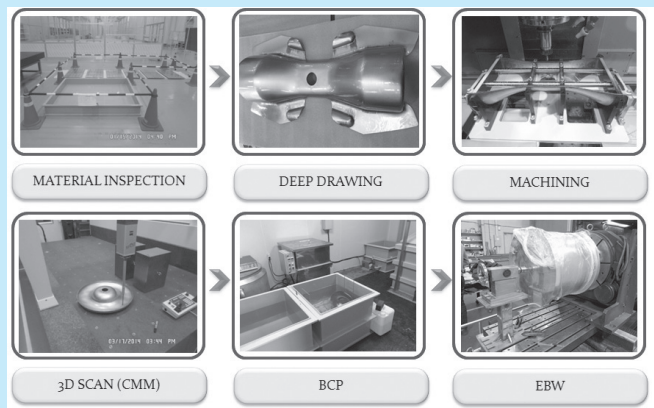
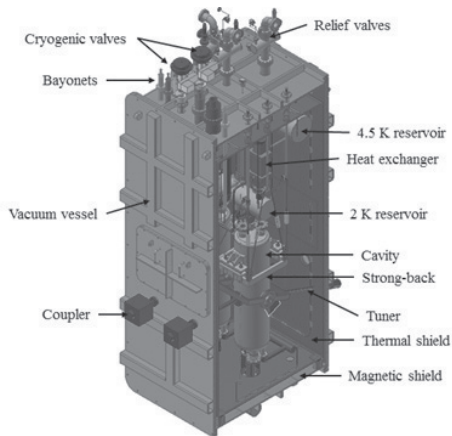
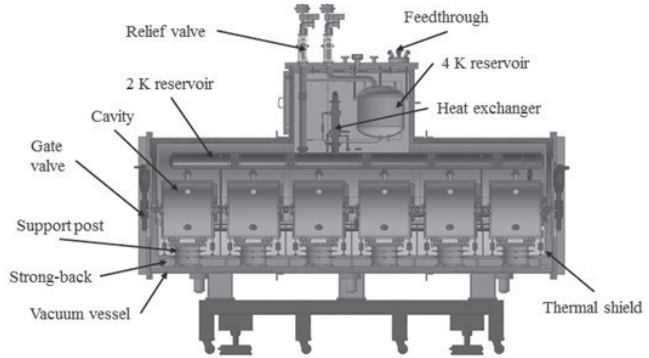


그림 4 초전도 가속관 제작과정



HWR cryomodule

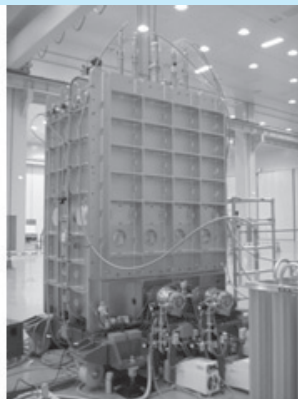


SSR2 cryomodule

**그림 5** 저온유지모듈 시제품의 세부 형상(왼쪽: HWR 가속관이 2개 설치되는 저온유지모듈, 오른쪽: SSR2 가속관이 6개 설치되는 저온유지모듈)



QWR cryomodule



HWR cryomodule



SSR1 cryomodule

**그림 6** 제작된 저온유지모듈 시작품

100 또는 10 이하의 청정실(clean room)에서 수행된다.

초전도가속관은 파워 커플러(power coupler)를 통해 고주파 전력(RF power)을 공급받으며, 외부 요인에 의한 가속관의 형상 변화에 따른 공진주파수 변화를 보정할 수 있도록 튜너(Tuner)가 설치된다. 가속관이 고주파에 의해 작동하기 때문에 표면저항(surface resistance)에 의해 손실이 발생하며, 이는 온도에 반비례한다. 따라서 열 손실을 줄이기 위하여 9.2K 이하에서 초전도성을 가지는 니오븀을 재료로 하는 초전도가속관의 작동 온도는 QWR 가속관이 4.3K, 이외의 가속

관은 2.1K의 극저온이다. 이러한 극저온 냉각을 위해 액체 헬륨을 사용하며, 액체 헬륨은 1bar에서 4.2K의 포화온도(saturation temperature)를 가진다. 특히 액체 헬륨은 2.172K 이하에서 초유체(superfluid) 상태로 변화한다. 초유체 상태에서는 유체의 점성이 무시할 수 있을 정도로 작고, 유체 내부에서의 열전달 현상이 대류보다는 전도와 비슷한 형태로 발생하며, 그 열전도도는 지금까지 알려진 고체 물질의 열전도도보다 크다. 또한 포화 상태에서 외부로부터 열유입이 발생하더라도 비등(boiling)현상이 없이 열전달이 발생하는 특성이 있다.

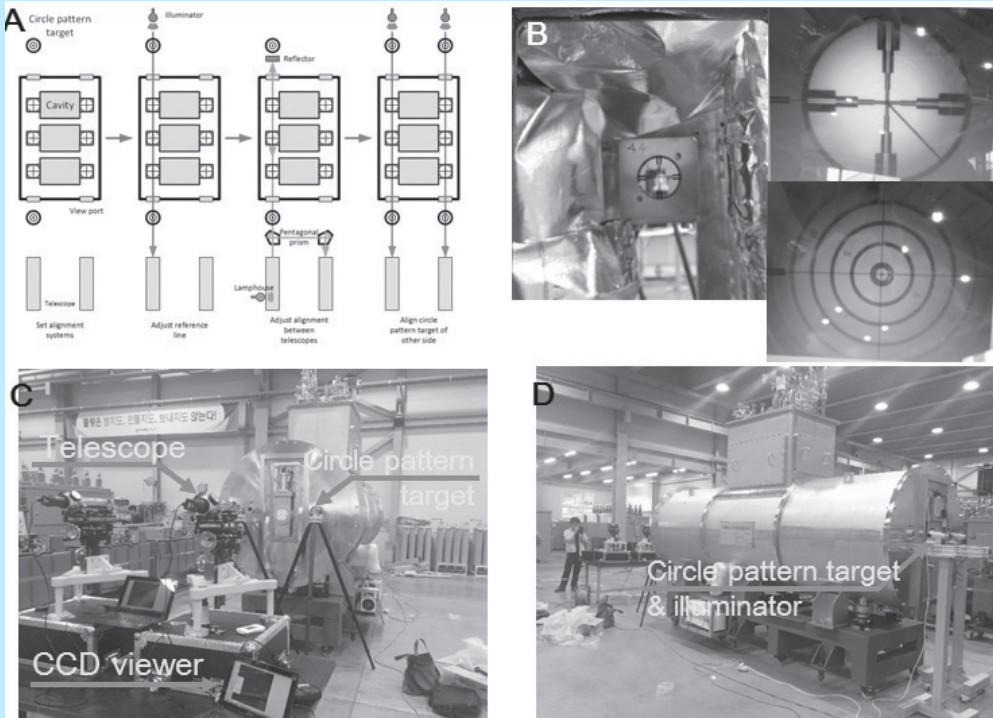


그림 7 저온유지모듈의 가속관 정렬도 측정 장면; A: 저온유지모듈 정렬 개념도, B: 가속관에 부착된 타겟 및 원형패턴 타겟, C, D: SSR2 저온유지모듈과 정렬로 측정 장비

즉, 온도가 낮아짐에 따라 낮아지는 니오븀의 표면저항, 초유체 헬륨의 높은 열전달 성능 때문에 RF 파워가 일정 수준 이상이 되면 극저온 냉동시스템의 효율을 고려하더라도 2.1K 또는 그 이하의 온도에서 가속관 작동이 보다 효율적일 수 있다.

초전도가속관은 단열 및 고진공 환경을 조성해 주는 저온유지모듈(cyromodule) 내부에 설치된다. QWR 가속관은 저온유지모듈 당 1개, HWR 가속관은 2개와 4개가 설치되는 2종류의 저온유지모듈에 설치된다. SSR1 가속관은 3개, SSR2 가속관은 6개씩 저온유지모듈의 내부에 설치된다. 저온유지모듈의 외형은 가속관의 형상에 따라 두 종류로 제작된다. QWR과 HWR 가속관용 저온유지모듈은 박스 형태이며, SSR1과 SSR2 가속관용 저온유지모듈은 실린더 형태이다.

저온유지모듈은 크게 두 가지 기능을 하며, 그 중 하나는 가속관과 외부와의 단열이다. 2.1K 또는 4.3K의 극저온에서 작동하는 가속관에 침입하는 열을 감소시

켜 극저온 냉동시스템의 부하를 최소화 한다. 이를 위해 진공단열을 통해 대류 열전달을 제거하고, 40K의 복사 열 차폐막과 다층단열막(MLI: Multi Layer Insulation)을 사용하여 복사 열전달을 최소화한다. 필연적으로 저온부와 상온부를 연결하는 커플러, 지지부 등을 통한 전도 열 침입을 최소화할 수 있는 구조가 필요하다. 저온유지모듈의 다른 주된 기능은 가속관의 정렬이다. 가속관은 극저온 냉각에 의한 열수축이 완전히 발생한 이후에 빔 방향의 수직으로  $\pm 1\text{mm}$  이하의 오차 이내에서 정렬되어야 한다. 진공용기 내부에 설치된 가속관의 정렬을 측정하기 위해서 정렬용 망원경(MAT: Micro Alignment Telescope)과 타겟을 이용하는 방법을 적용하고 있다. 가속관에 타겟을 설치하고, 진공용기에 양쪽에 설치된 원형 패턴 타겟을 기준으로 진공 배기, 냉각 전과 후에 타겟의 변위를 측정하여 가속관의 정렬도를 측정한다.

중이온가속기의 이온원과 과쇄핵분리장치에는 초전도자석이 사용된다. 이온원에 필요한 형태의 자장을 발

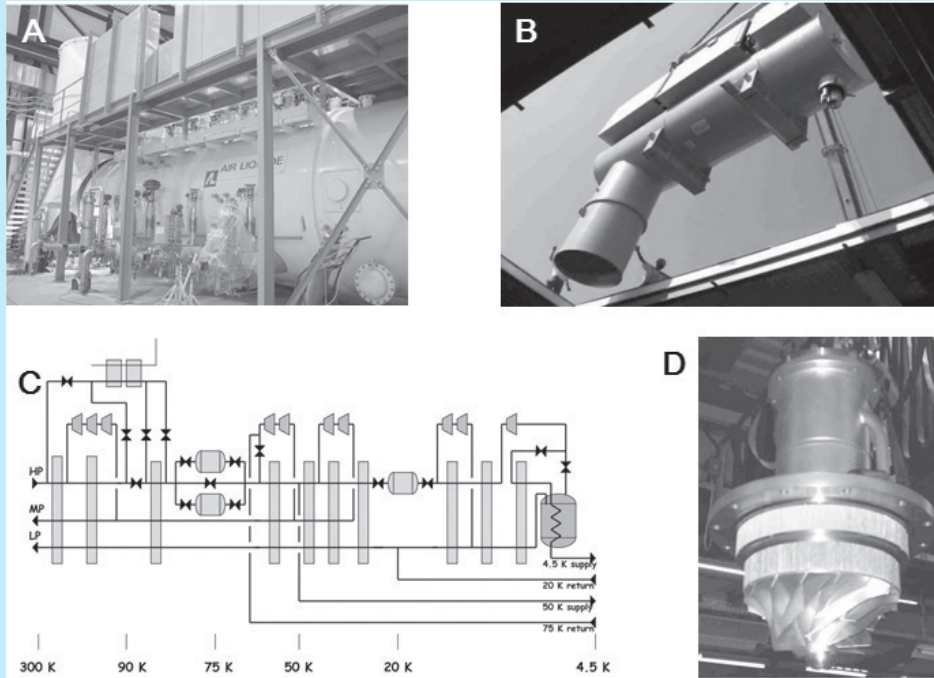


그림 8 LHC에 사용된 A: 극저온 냉동기의 4.5 K 콜드박스, B: 2 K 콜드 박스, C: 4.5 K 콜드박스 내부의 냉동사이클, D: 콜드 컴프레서(CERN)

생시키기 위해서 6극 자석과 4개의 솔레노이드로 이루어진 형태의 저온 초전도 자석이 필요하며, 파쇄핵분리 장치에는 고온 및 저온 초전도 자석이 다수 사용된다. 초전도 가속관 및 초전도 자석의 냉각을 위해서는 대형 헬륨 냉동시스템(Helium Cryogenic Plant)이 필요하며, 냉동기에서 생산된 극저온 유체를 각 냉동부하로 전달해주는 헬륨 분배시스템(Helium Distribution system)이 초전도가속관과 초전도자석을 따라 설치된다. 헬륨 냉동시스템은 상온 기체 상태인 헬륨을 터보팽창기(turbo expander)를 이용한 등엔트로피 팽창과 열교환을 통해서 4.5K까지 냉각하고 분배시스템을 통해서 저온유지모듈 및 초전도 자석으로 공급하고, 냉각 후 승온되거나 증발된 기체 헬륨을 다시 냉동기로 회수하여 폐회로 사이클을 구성한다. 특히 2.1K 초유체 헬륨은 저온유지모듈에 공급된 4.5K 헬륨이 열교환기를 통과하며 예냉된 후, 줄-톰슨 팽창(Joule-Thomson expansion)을 통해 생성된다. 포화상태의 2.1K 초유체를 유지하기 위해서 저온유지모듈의 액체 헬륨 저장소는 41mbar의 진공압을 유지

해야 한다. 이를 위해 증발된 기체는 분배시스템을 통해 냉동기의 콜드 컴프레서(cold compressor)로 유입되어 승압된 후 열교환기를 통해 상온 압축기로 유입된다.

2009년 국가과학기술비즈니스벨트의 일환으로 중이온가속기 구축계획 수립 연구가 시작되고, 2011년 12월에 중이온가속기건설구축사업단이 구성된 이후로 세계최고 성능의 가속기를 위한 연구 개발을 진행해 오고 있다. 중이온가속기는 앞서 언급한 장치 이외에도 고주파시스템, 제어시스템 등의 기반 장비와 희귀동위원소 생성 장치 그리고 생성된 희귀동위원소 빔을 활용하는 다양한 실험 장치들로 이루어지며, 현재는 상세 설계가 완료된 이후 핵심장치들의 제작 및 성능 시험이 진행되고 있다. 즉 초전도 기술 및 희귀동위원소 생산기술과 같은 핵심기술을 자체 개발하여 중이온가속기가 독창적이고 세계적인 연구시설이 되고, 완공 이후에도 세계적인 연구가 시작될 수 있는 특화된 실험시설구축이 함께 이루어질 수 있도록 노력하고 있다.