

## 초전도 대전류 입자가속기

김종원

기초과학연구원, 중이온가속기건설구축사업단

### 1. 서론

초전도가속기의 역사는 1961년 스탠포드 대학의 Fairbank 교수가 초전도가속관으로 전자 빔 가속을 제안하여 시작되었고 64년 같은 그룹에서 납을 구리표면에 코팅하여 만든 초전도가속관으로 전자를 최초로 가속하였다. 한편 이온빔의 경우는 1978년 미국 알곤 국립연구소에서 세계최초의 초전도 중이온 가속기를 완성하여 지금도 사용하고 있다, 양성자 빔은 미국 오크리지 연구소 SNS (Spallation Neutron Source)에서 전자빔 가속을 위해 개발한 elliptical 가속관을 사용하여 186 MeV로 부터 1 GeV 이상의 에너지로 빔을 가속한다 [1]. 유럽에서는 차세대 대전류 양성자가속기로 ESS (European Spallation Source)를 2019년에 1단계 완성을 목표로 제작이 진행 중이다 [2]. 초전도 가속관은 선형가속기에서 대규모로 사용되나 높은 가속전압이 필요한 원형가속기에도 설치된다.

이온빔을 대 전류로 가속하기 위해서는 그림 1과 같이 이온원에서 낮은 에미턴스의 대전류 빔을 인출하고 RFQ (radio frequency quadrupole) 라고 불리는 저에너지 가속기를 사용하여 양성자 빔은 수 MeV, 중이온 빔은 핵자 당 수백 keV로 가속한 후 구리로 만들어진 상온의 가속관 (DTL, CCL) 또는 초전도가속관을 곧바로 사용하여 빔을 가속한다.

대전류 초전도 이온빔 가속기는 주로 높은 선속의 중성자를 생산하거나 동위원소 빔 생

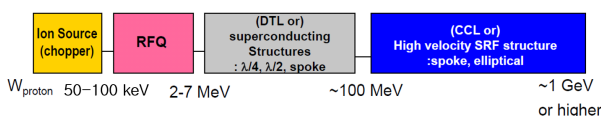


그림 1. 대 전류의 양성자 빔 가속을 위한 선형가속기 구조.

성을 위해서 사용되고 미래에는 긴 반감기를 가지는 핵 폐기물처리 및 핵융합발전을 위해서도 활용될 것으로 기대된다.

### 2. 초전도 고주파 가속장치

초전도체로 만들어진 가속관의 경우 높은 전압을 생성할 경우에도 가속관내 전자기장에 의한 Ohmic 손실이 거의 없다. 초전도체에서 DC 전류는 전력손실이 전혀 없지만 AC 전류는 아래식과 같은 두 종류의 저항에 의한 전력손실이 발생한다.

$$R_s = R_{BCS}(T) + R_{res}$$

여기서  $R_{res}$ 는 초전도체 표면의 불순물에 따라 변하여 엄격하게 제조된 고순도 Nb 판의 경우 수 nΩ의 값을 가지고 액체헬륨 온도영역에서 온도의존성은 거의 없다. 한편 BCS 저항은 온도 및 주파수의 제곱에 의존하여 4K 대신 2K에서 가동할 경우 전력손실을 더욱 낮출 수 있다, 대전류 빔은 빔 손실을 줄이기 위해 가속관 내 빔 가속구간의 직경을 크게 하는 것이 유리한데 초전도체 가속관은 수 MV의 가속전압에서도 전력손실이 수 Watt 정도로 낮아 빔 aperture를 크게 할 수 있는 장점이 있다.

전자의 질량은 0.51 MeV 정도로 가속장치 초반에 빠르게 가속되는 반면 양성자 및 중이온의 경우 무거워 가속관 한개 당 수 MV의 가속전압으로도 이온 빔의 속도를 높이기 위해서는 여러 단계를 거친다. 그림 2는 빔의 속도 ( $\beta=v/c$ ) 증가에 따라 보다 효율적인 초전도가속관의 구조변화를 보여준다. 이때 가속관의 주파수도 증가하게 되는데 공명주파수를 빔 주파수의 배수로 증가하여 가속관 크기를 줄일 수 있다.

그림 2에서 보여주는 것과 같이 낮은 에너지에서는 QWR(quarter wave resonator)

그리고 HWR(half wave resonator)을 사용하는 것이 일반적이다. Spoke 구조는 HWR의 일종으로 HWR은 실린더 구조 내에 고전압 발생을 위한 전극이 원통 중심에 위치한 반면 spoke는 자전거 바퀴살과 같은 구조를 가지고 있다. 한편  $\beta$ 가 0.5 이상이 되면 여러 개의 셀을 가진 elliptical 가속관이 가장 효율적이다. 사실 양성자 빔을 CW(continuous wave)가 아닌 펄스로 가속할 경우 약 100 MeV 정도까지는 상전도 가속관을 효율적으로 사용할 수 있어 SNS에서는 elliptical 가속관 만을 사용하고 ESS는 double spoke로 가속한 후 elliptical 가속관을 사용한다

QWR은 소위  $\beta\lambda/2$  ( $\lambda$ 는 파장) 구조로 내부의 전기장 파형이 그림3과 같이 중심전극을 중심으로 반대칭이고 두 개의 가속 갭 중 하나만 빔을 가속할 수 있는 Widro 형식의 가속관이다. QWR의 전극은 구조상 상하로 대칭이 되지 못해 수직방향의 전기장이 발생하고 이로 인한 빔 손실의 우려가 있어 특히 대전류 빔 가속에서는 첫 가속관으로 QWR을 사용하지 않고 HWR부터 사용하는 경우도 많다.

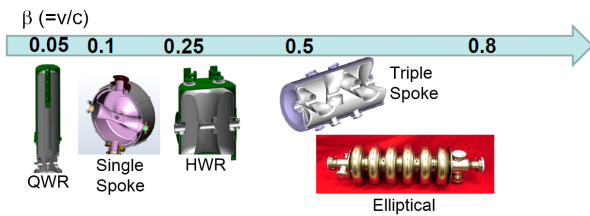


그림 2. 빔의 속도에 따라 적합한 초전도가속관의 구조 변화.

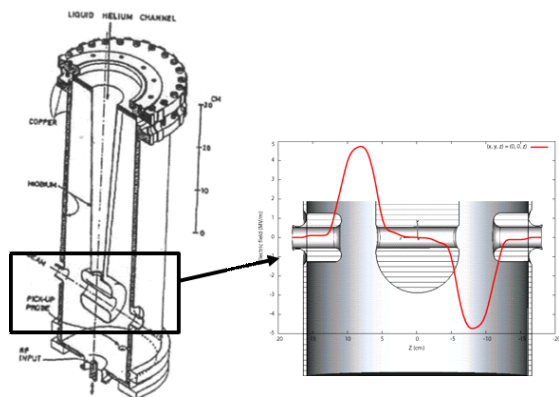


그림 3. QWR 내 빔 가속 전극부분에서의 전기장 분포(붉은색).

초전도 가속관 설계에서 고려할 주요 상수는  $Q(=\omega W/P)$  값으로 상전도가속관은  $10^4$  정도인 반면 초전도는  $10^9$  이상의 값을 가진다.  $Q$  값이 전력손실과 관련된 반면 고전압을 안정적으로 발생하기 위해서는 가속관 내  $E_{peak}$  값과 가속전기장  $E_{acc}$ 의 비율인  $E_{peak}/E_{acc}$ 가 작아야하고 궁극적으로 최대  $E_{acc}$ 는 초전도체의 임계자기장 값에 의해 제한된다.

초기 초전도가속관은 액체헬륨 온도에서 초전도체인 Pb를 Cu 구조체에 입혀서 만들어졌고 이후 Pb 대신 Nb를 코팅하여 사용해왔으나 최근 대전류 빔 가속에는 순수한 Nb관을 형상화하여 가공한 후 전자빔 용접으로 결합하여 만든다. 지금까지는 Pb나 Nb와 같이 단일 초전도물질을 사용하여 가속관을 만들었으나 임계자기장이 높은 Type II 초전도 합성물질 사용에 대한 연구도 진행되고 있다. 실용화를 위해서는 grain boundary 조정, 코팅기술 등에 대한 지속적인 연구가 필요해 보인다.

### 3. 대전류 양성자 가속기

대전류 양성자 빔은 파이온( $\pi$ )과 같은 단수명 입자 또는 중성자 빔을 대량으로 생산하기 위해서 주로 사용되어진다. 특히 중성자 빔은 전자빔으로 생성하는 x선에 의한 영상과 유사하지만 선속의 감쇄에 의한 방법으로 x선으로 볼 수 없는 영상을 만들 수 있다. 현재 미국 SNS가 초전도 선형가속기시설로 국제 사용자들에 중성자 빔을 제공하고 있고 유럽의 ESS는 설계가 완료되고 건물 및 장치제작이 진행 중으로 2019년 첫 시운전을 시작할 예정이다.

이온원에서 수소원자의 전자를 제거하거나 수소원자에 전자를 붙여  $H^-$  상태를 만들어 양성자 빔을 가속할 수 있다. SNS가 대전류  $H^-$ 를 가속하는 대표적인 예로 가속 끝단에서 charge stripping 과정을 통해  $H^-$ 의 전자 두 개를 제거하면 선형가속기로부터 원형 저장링에 빔을 입사할 수 있다. 한편 ESS에서는 저장링을 사용하지 않고 빔을 중성자 생성 타겟에 직접 입사하는 방식을 채택하여 이온원으로부터 양성자를 인출하여 가속한다.

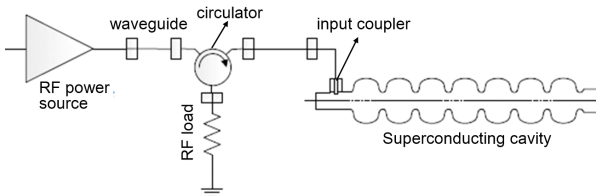


그림 4. 초전도가속관에 연결되는 rf 전원 회로의 개념도.

이온화된 수소원자는 수십 kV의 전압으로 인출된 후 RFQ 가속기 내에서 빔 번칭된 후 수 MeV의 에너지까지 가속된다. 영상을 위한 양성자 빔은 펄스파로 제공하여 100-200 MeV까지는 상전도 가속관을 사용하고 초전도가속관으로 1-3 GeV로 가속한다. 타겟을 파쇄하여 중성자 빔을 효과적으로 발생하기 위해서는 1 GeV 이상의 양성자 에너지가 필요하다.

국내에서도 양성자가속기 사업을 통해 100 MeV의 대전류 양성자가속기가 개발되어 운영되고 있고 상전도가속관 만을 사용한다 [3]. 추후 파쇄 중성자 발생을 위해서 높은 에너지로 가속하기 위해서는 초전도가속관 사용이 필요하다.

빔 가속을 위해서는 각 가속관의 공명구조에 의한 고전압과 빔 전류를 유지하기 위한 전력을 rf 전원을 통해 공급한다. 그림 4와 같은 회로를 통해 rf 전력을 공급하고 가속관에서 반사되는 rf파가 전원에 직접 전달되지 않도록 circulator를 사용한 보호회로를 부착한다.

#### 4. 대전류 중이온 가속기

차세대 핵 과학 연구에 필요한 동위원소를 생성하기 위한 주요 방법 중 하나로 대전류의 중이온 빔을 얇은 타겟에 입사하는 비행 파쇄 핵 (in-flight fragmentation) 방법이 사용되는데 미국 버클리연구소에서 최초 개발되었다. 반응단면적이 작은 희귀동위원소 생산을 위한 대전류 중이온 빔 가속기가 2000년 초에 미국의 RIA (Rare Isotope Accelerator) 계획에서 제안되었고 이후 수정 제안된 FRIB (Facility for Rare Isotope Beam)의 구축이 미국 미시간주립대학에서 진행 중이다 [4]. 주요 빔인 우라늄

을 약 200 MeV/u, 400 kW로 가속한 후 그라파이트 타겟에 입사하여 in-flight fission 방법에 의해 희귀 동위원소를 생성하는데 수천종의 새로운 동위원소 발견 및 특성 측정을 계획하고 있다.

대전류 중이온을 가속하기 위해서는 먼저 이온원으로부터 높은 전하상태인 이온을 높은 전류로 인출하는 것이 필요하다. U 빔의 경우 400 kW의 빔 파워를 위해서는 33+ 이온을 5 particle  $\mu\text{A}$  이상의 전류로 인출해야 하는데 이를 위해서 초전도 솔레노이드 전자석과 높은 주파수의 rf 파워를 입력하는 28GeV 초전도 ECR 이온원이 개발되었다 [5]. 두 개 이상의 초전도솔레노이드 코일은 빔 방향으로 이온을 가두고 반경 방향으로 초전도 6극 전자석을 사용하여 이온들이 플라즈마 챔버 벽에 부딪히는 것을 막는다. 세 방향으로 가두어진 이온에 rf 파워를 인가하면 전자가 공명 주파수로 가속되어 핵자와 충돌하여 이온의 전자를 제거하게 된다.

국내에서도 핵 과학 및 활용연구를 위하여 기초과학연구원 중이온가속기사업단의 RISP (Rare Isotope Science Project)에서 대전류 초전도중이온가속기를 구축 중에 있고 그림 5와 같은 배치를 하고 있다 [6]. 주요 가속빔들의 사양은 표 1과 같고 주기율표상에 있는 대부분의 원소를 최대 빔 파워 400 kW로 가속할 수 있도록 설계되어 있다.

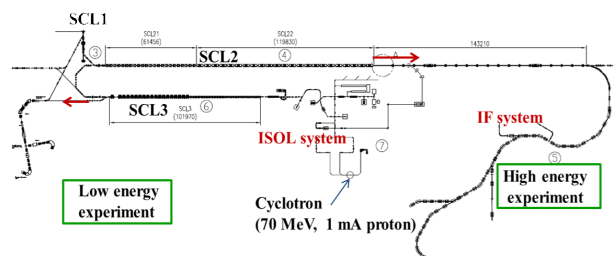


그림 5. 중이온가속기사업단의 가속장치 배치 개념도.

표 1. RISP 초전도 가속기 빔 사양.

	초전도 선형가속기 (SCL3+SCL2)			
	Proton	O	Xe	U
E (MeV/u)	600	320	251	200
I ( $\mu\text{A}$ )	660	78	11	8.3
Power (kW)	> 400	400	400	400

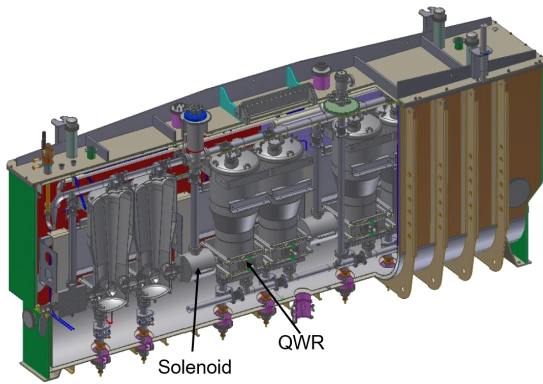


그림 6. 다수의 QWR과 초전도 솔레노이드를 사용하는 초전도 cryomodule의 예.

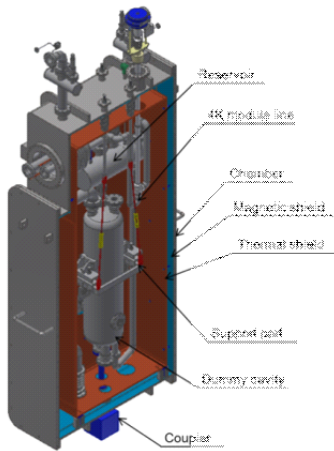


그림 7. RISP의 QWR 저온유지모듈.

미국 FRIB의 경우는 그림 6과 같이 하나의 cryomodule 내에 다수의 초전도가속관과 빔 집속을 위한 초전도 솔레노이드가 내장된다. 이러한 방식은 같은 가속전압에 필요한 cryomodule 수를 줄여 구축비용을 절감할 수 있어 일반적으로 채택되고 있다. 반면에 RISP에서는 RFQ 가속기로 0.5 MeV/u로 가속한 후 낮은 에너지에서는 그림 7과 같이 하나의 QWR을 내장하는 cryomodule을 사용하고 빔 집속은 cryomodule 바깥에서 상전도 사극전자석에 의해 이루어진다.

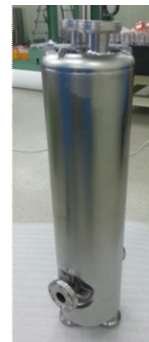
RISP에 사용되는 초전도가속관의 종류 및 특성들은 표 2와 같은데 QWR은 4.5 K에서 다른 종류의 가속관들은 2K에서 가동된다. 제작된 초전도가속관들의 초기시제품은 그림 8과 같다. HWR 및 QWR의 Q 값은 4K, 2K에서 테스트가 진행되어 요구사양을 만족함을 확인하였고 2차, 3차 시제품

의 제작 및 테스트가 계속 진행 중으로 Q값 이외에 가속관의 구조적인 안정성 등의 테스트를 통해 실제 가속기에서 사용될 수 있는 제품으로 개선이 진행 중이다.

그림 5의 초전도가속기 배치도에 있는 SCL3와 SCL2의 구축이 우선 진행 중으로 두 부분을 사용하여 U 빔을 200 MeV/u로 가속할 수 있다. SCL3, SCL2의 가속관 및 cryomodule 상세배치는 그림 9와 같고 SCL3에는 22개의 QWR 및 98개의 HWR이 SCL2에는 약 200개의 초전도가속관이 사용될 예정으로 총길이는 약 300m 이다.

표 2. RISP의 초전도 가속관 사양.

Parameters	QWR	HWR	SSR1	SSR2
$\beta_g$	0.047	0.12	0.3	0.51
f (MHz)	81.25	162.5	325	325
Aperture(mm)	40	40	50	50
$QR_s$ ( $\Omega$ )	22	42	94	112
R/Q ( $\Omega$ )	468	310	246	296
$V_{acc}$ (MV)	1.1	1.5	2.4	4.1
$E_p$ (MV/m)	35	35	35	35
$B_p$ (mT)	57	55	58	64
$Q_0/10^9$	2.1	4.2	9	10.5
T(K)	4.5	2	2	2



(a) QWR



(b) HWR



(c) SSR1



(d) SSR2

그림 8. RISP에서 제작한 네 종류 초전도 가속관들의 시제품.

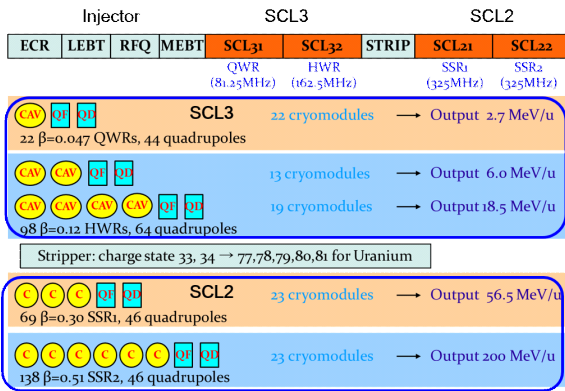


그림 9. RISP SCL3, SCL2 내의 가속관 및 cryomodule 배치개념도.

#### 4. 초전도 대전류가속기 전망

대전류 빔을 CW 또는 펄스 파로 가속하기 위해서 초전도가속관을 사용한다. 전자빔에 주로 사용되는 elliptical 가속관의 경우는  $B_{peak}$ 이 Nb의 임계자장에 근접할 정도로 연구개발이 이루어지고 있는 반면 QWR, HWR 등 낮은 속도용은 구조가 복잡하여 개발의 여지가 남아있다. 보다 높은 가속전압을 얻기 위해서는 임계자장이 높은 초전도체 사용을 고려할 수 있으나 실제 가속관 형태로 만들어 높은 효율로 전압을 얻기 위해서는 앞으로도 노력이 필요해 보인다. 대전류 양성자 빔은 중성자 빔을 발생하여 비파괴영상이나 핵융합로용 물질의 내방사선시험 등에 사용되고 있고 추후 핵 폐기물처리를 위한 대규모 중성자발생장치로도 개발이 진행 중에 있다 [7,8]. RISP에서는 대전류 초전도 중이온가속기 구축을 위하여 관련 국내기술 개발이 진행 중에 있다.

#### 참고문헌

[1] M. A. Plum, "Commissioning of the spallation neutron source accelerator systems", Proc. of PAC 2007, Albuquerque USA, pp2603-2607 June 25-29 (2007)  
 [2] C. Darve et al., "The ESS superconducting accelerator",

Proc. of SRF 2013.Paris, France pp 77-79 Sep. 23-27 (2013)  
 [3] Y. S. Cho et al., "The operation experience at KOMAC", Proc. of HB 2016 Malmo, Sweden pp 468-473 July 3-8 (2016)  
 [4] J. Wei et al., "The FRIB project-Accelerator challenges and progress", Proc. of HIAT 2012 Chicago, USA pp 8-19 June 18-21 (2012)  
 [5] J. Benitez et al., "Current developments of the VENUS ion source in research and operations", Proc. of ECRIS 2012.Sydney, Australia pp 153-158 Sep. 25-28 (2012)  
 [6] S. C. Jeong, "Progress of the RAON heavy ion accelerator project in Korea", Proc. of IPAC 2016, Busan Korea, pp4261-4265 May 8-13 (2016)  
 [7] J. Biarrotte et al., "Design of the MYRRHA 17-600 MeV superconducting linac", Proc. of SRF 2013.Paris, France pp 129-132 Sep. 23-27 (2013)  
 [8] K. Shinto and C.Vermare, "Present status of the accelerator system in the IFMIF/EVEDA project", J. Plasma Fusion Res. SERIES V9 378-381 174-179 (2010)

#### 저자이력



김중원 (金鍾元)  
 1982-1986년 서울대학교 물리학과, 1994년 미국 미시간주립대학 물리학과 박사, 1994-1995년 미국 Argonne 연구소 연구원, 1995-2000년 일본 이화학연구소 연구원, 현재 기초과학연구원 중이온가속기구축사업단 장치구축부 부장