

중이온 가속기용 극저온 헬륨 냉각 시스템

최철진
기초과학연구원

1. 서론

한국형 중이온가속기 RAON(라온)은 기초과학연구원(IBS, Institute for Basic Science) 산하 중이온가속기건설구축사업단(RISP, Rare Isotope Science Project)에 의해 2021년 완공을 목표로 구축중이다. 세종 국제과학비즈니스벨트의 주요 거대실험시설로서, 순수과학 및 응용학문 지식창출의 세계적인 주요 거점을 목표로 하고 있다.

중이온가속기는 희귀동위원소(Rare Isotope)를 만들고, 연구하는 장치이다. 희귀동위원소를 만드는 방법에는 ISOL(Isotope Separation On-Line)과 IF(Inflight Fragmentation) 두 가지 방식이 있다. ISOL은 양성자를 가속하여 무거운 원자로 이루어진 표적에 충돌시켜 희귀동위원소를 만들며, IF는 중이온(탄소, 납, 우라늄 등의 무거운 이온)을 광속의 50% 이상으로 가속시켜서 표적 원자핵에 충돌시켜서 만든다. 라온에서는 세계 최초로 이 두 방식을 결합하여 기존에 발견하지 못한 희귀동위원소를 얻어내는 것을 목표로 하고 있다. 이때 발생된 희귀동위원소를 연구하여 새로운 원소를 발견하거나, 물질의 성질 연구 등에 활용된다. 우주와 별의 진화과정, 핵의 대칭 에너지 연구, 첨단 암 치료 기술 개발, 생명과학과 DNA 구조 연구 등 최고 수준의 첨단연구가 가능하다. 라온을 활용하면 선진 가속기연구소들도 아직 찾지 못한 원자번호 117번 이상의 원소를 찾아내고, 코리아늄(Koreanium) 등으로 명명하여 국가의 명예를 높일 수 있다. 라온의 성능은 빔에너지 200 MeV/u, 빔출력 400 kW급으로 현재 운용 또는 건설 중인 중이온가속기 중 최고 수준이다.

라온은 3개 구간의 초전도 선형가속기(SCL1,2,3)로 구성되어 있으며, 극저온플랜트(cryoplant) 및 헬륨분배시스템 필요하다. 극저온플랜트(cryoplant)는 크게 나누어 헬

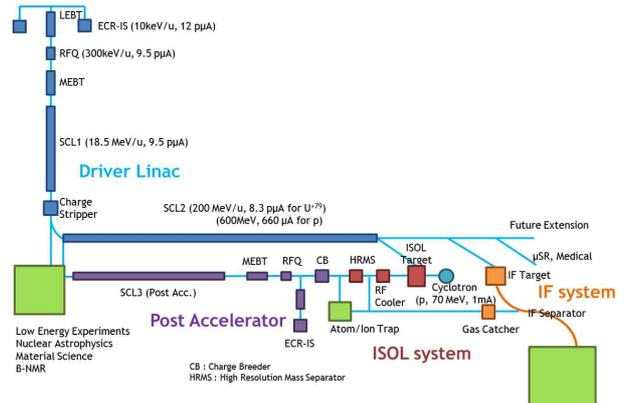


그림 1. 한국형 중이온가속기의 개략도.

륨냉동시스템(HRS, Helium Refrigeration System)과 헬륨분배시스템(HDS, Helium Distribution System)으로 구성되며, 극저온 냉각을 필요로 하는 저온유지모듈(Cryomodule, CM)에 냉매(극저온 헬륨)를 공급하게 된다. 초전도 가속관(Superconducting Cavity)과 초전도 자석(Superconducting Magnet), 그리고 저온유지모듈(Cryomodule)의 개발을 위해서는 시험시설용 극저온시스템(Test Facility Cryogenic System, TFCS)이 필요하다. 그림 2에 라온의 운전 및 개발에 필요한 극저온 냉각설비의 개요를 도시하였다.

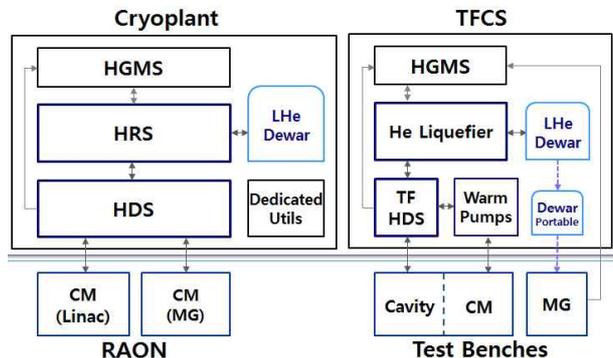


그림 2. 라온 극저온 시스템의 개요.

2. 헬륨냉동시스템

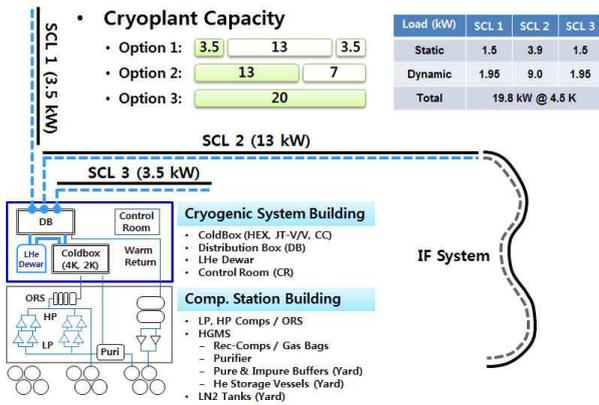


그림 3. 라온 극저온 냉각설비의 개략도.

극저온플랜트를 구축하기 위해서는 먼저 냉각 대상물의 열부하(heat load)를 예측하여야 한다(표 1). 현재 SCL1, 2, 3에 대한 열부하 예측이 완료되었으며 약 13.2 kW(4.5 K equivalent)의 열부하가 있는 것으로 예측되었다.

표 1. 라온 가속기의 Heat Load 요약.

DF	LINAC	Static [kW]	Dynamic [kW]	Sum [kW]	Total [kW]
1	SCL1 (SCL1+TL1, ECR IS)	1.0	1.3	2.3	13.2
	SCL2 (SCL2+CS+P2DT+TL2+IF+D/B)	2.6	6.0	8.6	
	SCL3 (SCL3+TL3)	1.0	1.3	2.3	
0.2	SCL1	1.0	0.4	1.4	8.2
	SCL2	2.6	2.8	5.4	
	SCL3	1.0	0.4	1.4	

표 2. 라온의 운전을 위한 극저온플랜트 용량 (50% 마진 포함).

DF	LINAC	Static [kW]	Dynamic [kW]	Sum @4.5 K [kW]
1	SCL1 (SCL1+TL1, ECR IS)	1.5	1.95	3.45
	SCL2 (SCL2+CS+P2DT+TL2+IF+D/B)	3.9	9.0	12.9
	SCL3 (SCL3+TL3)	1.5	1.95	3.45
	Subtotal	6.9	12.9	19.8
0.2	SCL1 (SCL1+TL1)	1.5	0.6	2.1
	SCL2 (SCL2+CS+P2DT+TL2+IF+D/B, ECR-IS)	3.9	4.2	8.1
	SCL3 (SCL3+TL3)	1.5	0.6	2.1
	Sub total	6.9	5.4	12.3

실제 구축할 극저온플랜트의 용량은 예측된 열부하의 총 합에 50%의 마진(overall margin)을 포함하며, 표2에 요약하였다. 극저온플랜트의 용량에 포함되는 50%의 마진은 국외 가속기용 극저온플랜트의 예를 참조하여 결정하였으며, 표3에 정리하였다. 표3에서 ESS의 경우를 보면, 동적열부하(dynamic heat load)의 불확실성(uncertainty factor)이 1.0임을 알 수 있다. 이는 오랜 기간에 걸쳐 생산되고 개선이 이루어져온 5-cell elliptical cavity가 사용되기 때문에 실제 동적열부하를 거의 정확하게 예측 가능하기 때문이다. 그러나 라온의 경우에는 현재 가속관과 저온유지모듈들은 시제품 시험이 진행되는 단계이기 때문에, 이론적으로 계산한 열부하 예측치의 불확실성은 높을 수밖에 없다. 그리고 F_o(overcapacity for control and off-design or off-optimum operation)값 또한 지속적으로 가속기의 설계치가 수정되고, 앞으로도 지속될 것으로 예상되는 상황에서 최저치로 잡을 수 없는 실정이다.

극저온 냉동시스템 개발 현황

표2에 정리된 바와 같이, SCL 1, 2, 3 모두를 설계 최대부하(Duty Factor, DF = 1) 조건으로 운전하기 위해서는 약 19.8 kW(20 kW급)의 플랜트를 준비해야 한다. 그러나 시운전(commissioning) 동안에는 DF = 0.2로 운전한다는 가속기 운전 조건이 있었고, 이를 만족시키기 위해서는 최소한 12.3 kW 용량의 플랜트가 필요하다.

극저온플랜트 용량으로 예측된 20 kW급의 극저온플랜트를 한 번에 모두 구축하는 방안

은 투자비 및 운영비의 효율 측면에서 어려운 선택이 될 수 있다. 현실적인 대안으로는 플랜트를 2개 이상으로 나누어 구축하는 안을 고려하여야 한다. 극저온플랜트의 용량을 적절한 값으로 나누고 각각의 플랜트로 운전 가능한 모드를 표 4에 정리하였다. 표 4의 내용을 설명하자면, 예를 들어 13 kW 용량의 HRS가 있다면 SCL1 + SCL2 + SCL3를 모두 동시에 DF(Duty Factor) = 0.2로 운전이 가능하다는 의미이다.

표 3. 극저온플랜트의 용량설정을 위한 마진계산.

	CERN(beginning*)	ILC**	ESS***	FRIB	RAON
F_{u_s}	1.1(1.5)	1.1	1.5	-	1.1 ~ 1.3
F_{u_d}	1.1(1.5)	1.1	1.0	-	1.1 ~ 1.3
F_o	1.4(1.5)	1.4	1.15	-	1.15 ~ 1.4
F_{overall}	1.54(2.25)	1.54	1.44	1.5****	1.27 ~ 1.62 ~ 1.82

Modified version of the HRS capacity formulation:

$$\text{Cryoplant capacity} = F_o (F_{ud} Q_d + F_{us} Q_s + Q_B) = F_{overall} (Q_d + Q_s)$$

Where F_o is the safety factor associated with operational margin for control and off-design or off-optimum operation
 F_{ud} is the safety factor for the dynamic heat load (Q_d) estimate
 F_{us} is the safety factor for the static heat load (Q_s) estimate
 Q_B is the heat load due to beam heating
 $F_{overall}$ is the overall safety margin considering all the heat load estimate

표 4. 극저온플랜트의 용량에 따른 운전가능 범위.

Plant Capacity @4.5K	운전가능 범위
20 kW	모든 운전모드에 활용 가능함
13 kW	1. SCL3(1) DF1 = 3.5 kW 2. [SCL3 + SCL1] DF1 = 7 kW 3. [SCL3 + SCL2 + SCL1] DF 0.2 = 12.3 kW 4. SCL2 DF 1 = 12.9 kW 5. [SCL3(1) + SCL2] DF 0.2 + SCL1(3) DF 1 = 13.7 kW
7 kW	1. SCL3(1) DF1 = 3.5 kW 2. SCL3 + SCL1 냉각 = 3 kW 3. SCL3 + SCL1 DF1 = 7 kW 4. SCL3 DF 0.2 + SCL2 냉각 = 7 kW 5. SCL3 DF 1 + SCL 2 냉각 = 7.35 KW 6. SCL3 + SCL2 + SCL1 냉각 = 6.9 kW
3.5 kW	1. SCL3(1) DF 1 = 3.5 kW 2. SCL3 or SCL1 냉각 = 1.5 kW 3. SCL2 냉각 = 3.9 kW

또한 13 kW 용량은 SCL2의 전체부하 운전(12.9 kW, DF = 1)에도 적합하다는 것을 나타낸다. 결론적으로 SCL1,2,3의 전체 시운전이 가능하면서 투자비를 분산할 수 있는 최적의 플랜트 용량은 13 kW임을 알 수 있다.

3. 헬륨분배시스템

중이온 가속기의 헬륨분배시스템은 극저온 플랜트를 통해 생산된 헬륨을 저온유지모듈(Cryomodule)로 안정적이고 효율적으로 공급하여 초전도가속관이 초전도 상태를 유지할 수 있는 극저온 환경을 구축하는 것에 그 사용 목적이 있다. 헬륨분배시스템은 헬륨분배박스(Distribution box, DB), 헬륨 이송관(Main transfer line, MTL) 그리고 밸브박스(Valve Box, VB)의 세 가지로 주요 구성품으로 이루어져 있다.

분배박스는 냉동기를 통해 생산된 극저온 헬륨(SHe: 4.5 K, 3 bar, GHe: 40 K, 20 bar)을 각 SCL의 열부하에 맞게 공급될 수 있도록 헬륨의 공급유량을 제어하고 초전도가속관과 저온유지모듈을 냉각시키고 회수된 헬륨을 저온압축기(Cold compressor), 정제기(Purifier) 및 저장시설(Helium Storage)로 보내는 역할을 한다. 분배박스를 통해 헬륨이 각 SCL로 분기되어 헬륨 이송관(Main Transfer Line, MTL)로 공급되고 회수되는 공정을 그림 4에 나타내었다.

중이온가속기의 헬륨 이송관(MTL) 기초설계는 다음과 같다. 가속관에 설치될 저온유지모듈 및 분배시스템에서 발생하는 정적, 동적 열부하량을 토대로 헬륨의 공급유량 및 액화기의 용량을 결정한다. 예측된 헬륨 공급유량을 기반으로 압력강하 예측을 통해 관 내경 및 두께를 설계한다. MTL 기초설계(preliminary design)를 통해 표 5와 같은 설계안과 MTL의 대략적인 단면 형상을 그림 5 도시하였다. VB에는 MTL을 통해 공급된 헬륨을 가속기의 운전모드에 따라 각 저온유지모듈로 공급 및 회수를 제어하는 극저온 밸브가 설치된다. VB와 저온유지모듈과의 연결은 두 가지 방법으로 나누어지며, 4.5 K로 운전되는 QWR 섹션은 플랜지를 이용하여 저온유지모듈과 연결이 되며, 2 K로 운전되는 HWR1, 2 및 SSR1, 2 섹션은 U-tube 형태의 bayonet

joint를 이용하여 연결한다.

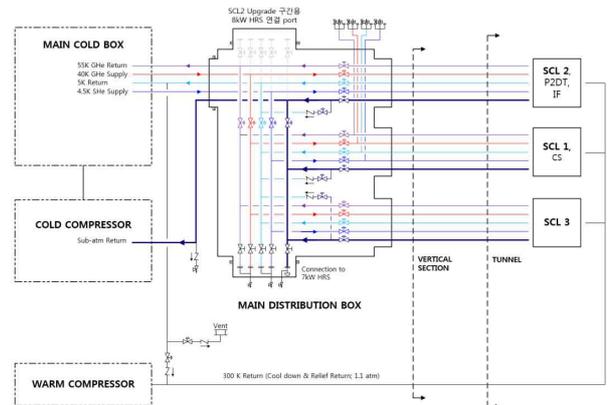


그림 4. Main distribution box P&ID.

표 5. 헬륨이송관 기초설계.

	내경		두께 (mm)	압력강하 (kPa)
	mm (DN)	Inch		
SHe supply	45.3 (40)	1 1/2	1.65	9.36
GHe return	57.1 (50)	2	1.65	0.91
Shield supply & return	72.1 (65)	2 1/2	2.10	1.99
2 K cold compressor return	260.6 (250)	10	3.40	0.15

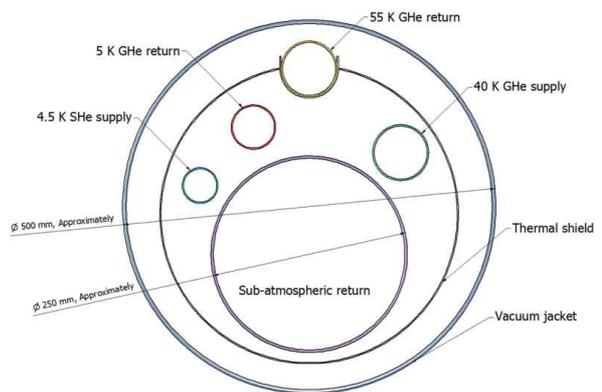


그림 5. A cross-sectional view of MTL.

4. 시험시설용 극저온시스템

시험시설용 극저온 시스템(Test Facility Cryogenic System, TFCS)은 초전도가속

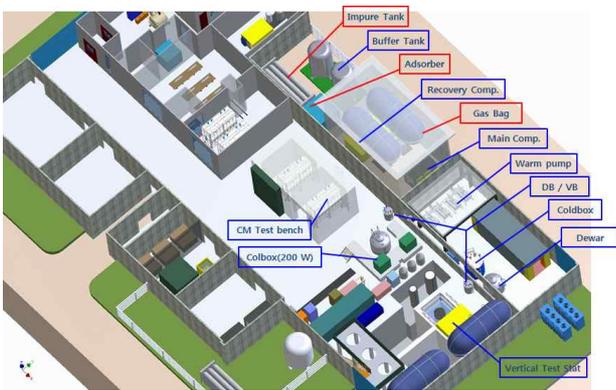


그림 6. 시험시설용 극저온 시스템 설치 개략도.

관 및 저온유지모듈의 시제품 및 양산품의 성능 및 저온특성, RF(radio frequency) 특성, 열부하(heat load)를 측정·평가하는 곳으로서 그림 6과 같이 설치될 예정이며 가속기 개발에 필요한 실험이 일부 진행되고 있다.

극저온 시스템의 시험 수행 능력을 향상시키기 위해 본 시설에서는 액화기 2대를 운용할 계획이다. 신규 장비인 330 W 액화기는 저온유지모듈 시험 전용으로, 기존에 설치되어 있는 200 W 액화기는 가속관 시험 전용으로 사용하고자 하며, 이를 위해 신규 시스템과 기존 시스템과의 연계 설계를 진행하였다. 저온유지모듈과 가속관의 성능시험은 크게 세 가지 절차로 진행된다. 성능 시험을 위한 준비 절차 및 cool-down, 성능시험, 마지막으로 시험 종료 후 장비 내 헬륨 회수를 위한 warm-up으로 진행된다.

A. 상온펌프시스템(Warm Pump System)

상온펌프시스템은 헬륨 탱크(Vessel)의 압력을 제어하여 초유체 헬륨의 온도를 유지하는 장치이다. 2.1 K 초유체 헬륨의 증기압은 41 mbar, 저진공 영역으로 펌프와 버터플라이 밸브(Butterfly valve)를 이용하여 탱크 내 압력을 41 mbar로 유지해야 한다. 현재 상온펌프시스템은 설치가 완료되었고, 시운전이 진행 중이다. 상온펌프시스템의 용량은 헬륨을 기준으로 4000 m³/hr 이다. 상온펌프 4대를 2개씩 묶어 하나의 세트로 설치하였으며, 그림 7에 설치된 현장상황을 도시하였다.

B. SRF 시험시설용 저온장치의 제어시스템
SRF 시험시설용 저온장치의 제어시스템은

PLC를 기반으로 액화기용 PLC, 상온펌프시스템, 헬륨분배시스템 그리고 2K-모듈용 PLC는 EPICS를 사용하여 시스템 전체를 제어한다. 액화기 PLC는 액화기 제작업체에서 Siemens사 제품을 이용하여 제작하였고, 기타 시스템용 PLC는 AB 사 제품을 이용하여 제작하였다. 그 중에서 상온펌프시스템과 2K 모듈용 PLC는 그림 8과 같은 P&ID로 제어된다. 상온펌프시스템과 2K-모듈의 시운전이 완료되었으며, 추후 헬륨분배시스템 전체 제어로 확장할 계획이다.



그림 7. 상온펌프시스템.

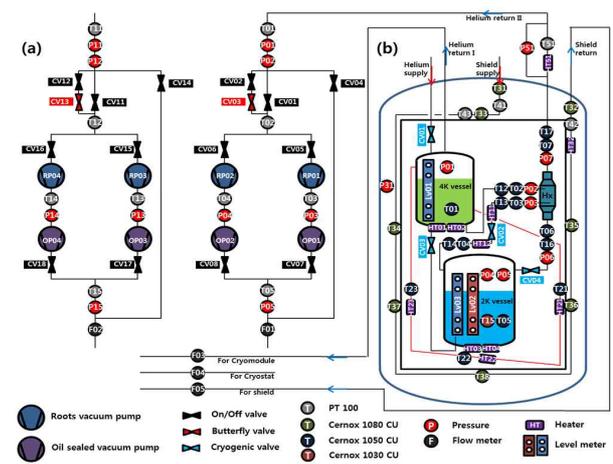


그림 8. 상온펌프와 2K-모듈 제어 P&ID.

5. 맺음말

한국형 중이온가속기 RAON의 핵심 부품인 초전도 가속관의 성능을 유지하기 위해서는

극저온 시스템이 필수적이다. 극저온플랜트와 헬륨분배시스템, 그리고 시험시설용 극저온 시스템의 성공적인 구축을 통해, RAON이 순수과학 및 응용학문 지식창출의 세계적인 주요 거점이 될 수 있도록 저온그룹의 연구원들은 구슬땀을 흘리고 있다.

참고문헌

- [1] T. Peterson, "Cryogenic considerations for cryomodule design", USPAS (2013)
- [2] L. Philippe, "Cryogenic refrigeration for LHC", MaTeFu spring training school (2009)
- [3] J. G. Weisend II et al., "Conceptual design of the FRIB cryogenic system" (2012)
- [4] ESS, "Technical design report" (2012)
- [5] RISP, "Technical design report" (2013)
- [6] 중이온가속기건설구축사업단, "중이온가속기 장치구축사업 4차년도 연차실적 및 5차년도 계획서" (2015)

저자이력



최철진(崔喆珍)

1989-1993년 부산대학교 기계설계공학과, 1993-1995년 한국과학기술원 기계공학과, 1995-2004년 한국과학기술원 기계공학과, 2004-2009 LG전자, 2009-2012년 미국 일리노이 주립대학 대학 기계공학과 (Post Doc.)
현재 기초과학연구원 책임연구원