

## KSTAR CRYOSTAT의 열차폐막 설계

육종설, 김동락, 이기성  
기초과학지원연구소

### Thermal Shield for Cryostat of KSTAR TOKAMAK

Jong Seol Yuk, Dong-Lak Kim, Ki-Seong Lee  
Korea Basic Science Institute

jsyuk@comp.kbsi.re.kr

**Abstract** - KSTAR coils use superconducting magnet systems. These coils operate around 4.5 K and therefore require a thermal shield to reduce the heat load from outer cryostat. 80 K thermal shields must be cooled by a forced flow of He gas at 20 bars without the pressure drop of 0.5 bar. Designed thermal shield shows that the pressure drop is lower than that of 0.5 bar.

#### 1. 서 론

현 인류가 사용하는 석유나 석탄과 같은 화석 연료가 자원 고갈과 생태계 파괴와 같은 환경 문제를 우리에게 던져 주었다. 또한 이들 에너지원의 매장량이 한계를 가지고 있어 사람들이 대체 에너지원을 찾게 되었다. 원자력 에너지는 풍부한 자원이 있는데 반해 체르노빌 원전 사고와 같은 대형 방사능 유출의 안전성 문제와 원자력 발전 후 나오는 핵폐기물의 처리에 많은 문제점을 노출시키고 있다. 이에 반해 핵융합 에너지는 화석 에너지의 고갈 문제 해결과 폐기물 같은 환경 문제를 보여주지 않을 뿐더러 대형 방사능 유출 사고가 없는 깨끗한 대체 에너지원으로서의 개발 가능성을 가지고 있다.

KSTAR(1) 핵융합 장치는 고온의 플라즈마를 가두기 위해서 PF(poloidal field)와 TF(toroidal field) 코일을 사용하는데 이들 코일은 모두 초전도 자석으로 이루어져 있다. 이들 코일은 4.5 K 영역의 초임계 헬륨(supercritical helium)을 공급하여 작동하게 되므로 외부의 열 침입이 초전도 자석 성능에 치명적인 문제를 주게 된다. 따라서, 저온진공용기(cryostat)의 외부에서 초전도 자석에 전달되는 300 K 복사 에너지를 줄이기 위해서 열차폐막(thermal shield)을 저온진공용기 내벽에 설치하여야 한다. 본 논문에서는 저온진공용기의 열차폐막 설계를 위한 냉매(coolant)의 압력 강하 및 배관에 대해 고찰하였다.

#### 2. 본 론

20 bar의 헬륨 가스가 냉각 파이프를 통해 강제 유동됨으로 열차폐막이 80 K 이하로 유지되어야 하며, 입구 냉각 파이프의 헬륨 가스 온도는 60 K이고 출구 온도는 80 K가 되도록 설계하였다. 이때 허용 압력 강하는 0.5 bar이다.

cryopanel은 그림 1과 같이 두께 3 mm의 스테인레스 스틸 판을 사용하여, 저온진공용기 내벽에서 5 cm 떨어진 것을 고려하며, 가스 헬륨이 흐르게 될 내경 10 mm 동관을 부착하여야 한다. 판의 부착은 cryopanel에 직접 부착하는 방법과 stycast를 사용하여 접착하는 방법을 사용할 수 있다. cryopanel은 전자기력에 의한 변형과 eddy current를 최소화하기 위한 재질을 고려하며 저온진공용기 내벽에 지지 부품을 이용하여 부착하여야 하는데, 열전도도가 적은 GFRP(glass-fiber-reinforced plastic) 재질을 사용하여 설계하였다. 저온진공용기 내벽과 cryopanel 사이에 MLI(multilayer insulation)를 설치하여 상온에서 침입하는 열에너지를 최대한 줄이게 하였다.

KSTAR의 저온진공용기를 LID, BODY, BASE 세 부분으로 크게 나누고 각각을 동등하게 8등분한다. 8등분한 각각의 조각을 panel이라 부르며, panel을 다시 임의의 조각으로 다시 나누는데 이때의 조각을 module이라 한다. module과 module의 간격을 6 mm로 하여 eddy current로 인한 joule heating을 줄이도록 하였으며, 냉각 파이프는 panel당 1개의 inlet과 outlet을 가지도록 설계하였다. 파이프와 파이프의 간격은 ~ 20 cm가 되도록 배관을 하였다. (2) LID, BODY, BASE 각각에서 1개씩 냉각 파이프가 나와서 manifold 형태로 8 panel에 균일하게 나누어져 냉각하도록 설계하였다. 표 1.에서 Blasius 방정식(A)과 수정된 Bernolli 방정식(B)으로 구한 압력강하가 나타나 있다. 이때 사용된 관이름 손실계수는 0.75이며, 특히 LID 부분은 상용화된 FLOWMASTER 해석 결과 8.3 mbar의 압력 강하를 보여주었다.

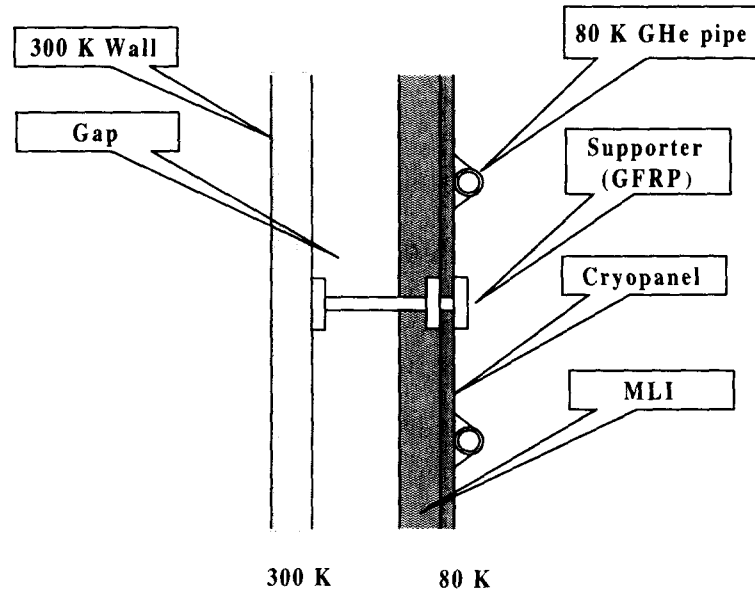


Fig. 1. Components of Thermal Shield

Table 1. Pressure Drop of a Cryopanel

part	# of bend	# of elbow	length	area	mass flow	pressure drop (mbar)	
	180 °	90 °	(m)	(m <sup>2</sup> )	(g/s)	A	B
LID	42	15	49	7.90	0.53	3.3	2.1
BODY	53	16	72	16.06	1.10	16.4	10.7
BASE	58	18	71	13.98	0.94	12.8	8.7

### 3. 결 론

cryopanel의 배관 간격을 대략 20 cm로 하여 냉각 파이프를 배관하였을 때 수정 Bernolli 방정식, Blausis 방정식 그리고 MASTERFLOW의 해석 결과 KSTAR의 허용 압력 강하 0.5 bar 보다 매우 작았다. 따라서 저온 진공용기 열차폐막 설계에 있어서 압력 강하로 인하여 발생할 수 있는 문제는 매우 적다고 판단된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] KSTAR Project Team, "PHYSICS REQUIREMENTS DOCUMENT", KSTAR ANCILKARY ENGINEERING REVIEW DOCUMENTS, pp. 1 ~ 11. 1998
- [2] S. Imagawa, T. Mito, K.Y. Watanabe, H. Tamura, N. Yanagi, H. Sekiguchi, R. Maekawa, T. Satow, S. Satoh and O. Motojima, "DESIGN AND PERFORMANCE OF COOLING SYSTEM OF HELICAL COILS FOR THE LHD", Proceedings of CEC/ICMC, 1999