

수치해석을 통한 KSTAR 주장치 열차폐 패널 열·유동 특성해석

Thermal Flow Analysis and Design of KSTAR Thermal Shield Panel by Numerical Method

김동락*, 김광선**, 노영미***, 조승연*, 김승현*

Dong-Lak Kim*, Kwang-Sun Kim**, Young-mi Noh***, Seungyeon Cho*, Seung-Hyun Kim*

Abstract : In order to derive the detailed design of Thermal Shield Cryopanel, which plays a role to make the Tokamak Nuclear Fusion Equipment work at both stable and efficient conditions, the commercially available software package FLUENT Version 5.3, was utilized. This study investigated the effects of thermal sources and distributions on the temperatures of Lid, Body, Base, and EH-Port Cryopanel by the numerical technique whose grid generations cover the solid and gas region of the panel. The physical model of the Thermal Shield Cryopanel is that the 10mm diameter of the pipe with 1mm thickness is soldered on the Stainless steel Panel with 4mm thickness. The heat fluxes to the panel are assumed to be by thermal radiation in the vacuum space and by conduction through the supporters. The inlet conditions of Helium gas are 20 atmospheric pressures and 60K temperature. The panel shapes with cooling pipes and the operational conditions to keep appropriate temperature distribution of Thermal Shield Cryopanel have been found and suggested.

Key Words : Thermal Shield Cryopanel, Radiation, Conduction, Simulation, Helium Gas

1. 서 론

핵융합은 핵분열에 비하여 원료가 풍부하고, 지구 상의 분포율이 평등할 뿐만 아니라, 이산화탄소를 배출하지 않아 환경오염과 지구온난화 문제를 야기하지 않는다. 또한 유해 방사능이 적고, 사고시의 위험성이 적으며, 중요한 융합원료인 중수소의 가격이 같은 열량을 주는 석탄가격에 비하여 월등하게 낮다. 이러한 장점들로 인하여 깨끗하고 값싸며 안전한 에너지로써 핵융합은 선두 대체 에너지로 평가받고 있다.

핵융합로의 모델 가운데 토카막 장치는 1960년대 소련의 쿠르차토프 연구소에서 처음으로 개발된 것이다. 그 뒤, 유럽(JET), 일본(JT60), 미국(TFTR)을 포함

한 선진국에서 이에 대한 기술력을 보유하고 있는 상태이다. 국내에서는 기초과학연구원원이 중심이 되어 KSTAR (Korea Super-conducting Tokamak Advanced Research, 이하 KSTAR) 차세대 초전도 토카막 장치의 건조를 추진하고 있다. KSTAR 토카막 장치는 진공용기 내의 플라즈마를 효과적으로 제어하고 효율을 높이기 위하여 초전도 코일을 이용하고 있다. 이 토카막 장치에서 최고 150℃에 이르는 진공용기로부터 복사열이 4.5K 초전도 자석에 직접 도달하는 것을 차단하기 위한 열차폐 장치(Thermal Shield Cryopanel)는 초전도 자석이 좀 더 안정적이고 효율적으로 작동하도록 하기 위하여 고안된 것이다.

본 연구에서는 KSTAR 토카막 장치에서 사용되는 열차폐 패널이 열차폐 장치로서의 역할을 충실히 수행할 수 있도록 최적의 조건을 갖게 설계하기 위해 열유동 해석을 한다. 그리고 이를 통해 열차폐 패널에서의 열전달 거동 예측을 위한 수치적 방법을 확립하고, 이를 통해 여러 가지의 열원에 의하여 가열되는 열차폐 패널이 적절한 온도를 유지하기 위한 냉각 조건의 확립과 관련된 열전달 해석을 상업용 열유체해석코드인 FLUENT [1]를 사용하여 수행하였다.

2. 본 론

2.1. 열하중

본 연구에서 사용된 복사열과 전도열을 구하는데 관련된 식을 아래와 같이 나타내었다. 진공용기 내에서 열차폐 패널로 유입되는 복사열량을 구하는데 관련된 식은 식(1)에, Supporter를 통해 유입되는 전도열량을 구하는데 관련된 식은 식(2)에 나타내었다. 실제 사용된 값들은 이들 식을 통해 계산된 결과에 안전율 5를 곱한 것이다.[2,3]

토카막 장치내의 진공 용기 내에서 복사열량을 구할 때 고온부와 열차폐 패널이 평행하다고 가정하였으며, 고온부의 방사율(emissivity), ϵ_h 과 열차폐 패널 자체의 방사율, ϵ_c 를 제외한 고온부와 열차폐 패널 사이의 Shield(MLI) 방사율, ϵ_s 은 진공용기의 고진공도를 유지하기 위한 표면에 대한 값이 0.01을 모두 동일하게 사용하여 계산하였다.

$$\frac{Q_{Rad}}{F_c} = \left(\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1 \right) + (N-1) \left(\frac{2}{\epsilon_s} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_h} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1 \right) \quad (1)$$

$$Q_{Cond} = \sum k_a A \frac{dT}{dX} \quad (2)$$

* 정 회 원 : 기초과학연구원

핵융합연구개발사업단 책임연구원

** 정 회 원 : 한국기술교육대학교 기계공학과 교수

*** 비 회 원 : 한국기술교육대학교 석사과정

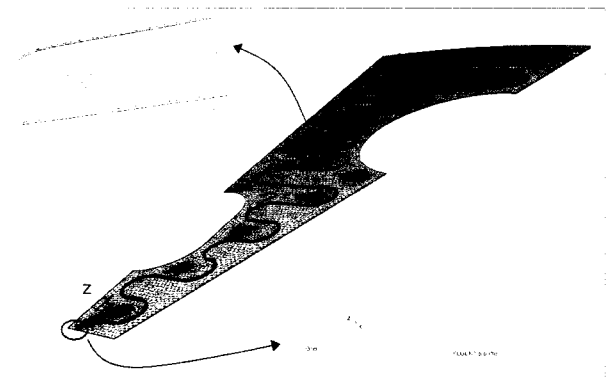
원고접수 : 2002년 04월 25일

심사완료 : 2003년 01월 22일

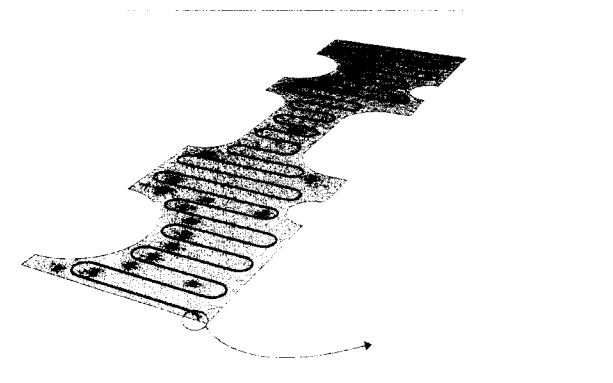
N은 Shield의 층수로 30을 사용하였으며, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수를 나타내고 있다. 전도열을 구하는데 사용되는 ka 는 열전도도(Thermal Conductivity)를 나타낸다. 이와 같이 계산된 복사열과 전도열량을 합한 총열부하량은 Lid, Body, Base, EHPort에서 각각 2.2, 5.1, 1.4, 3.9W이다.

2.2. 물리적 모델 및 격자 생성

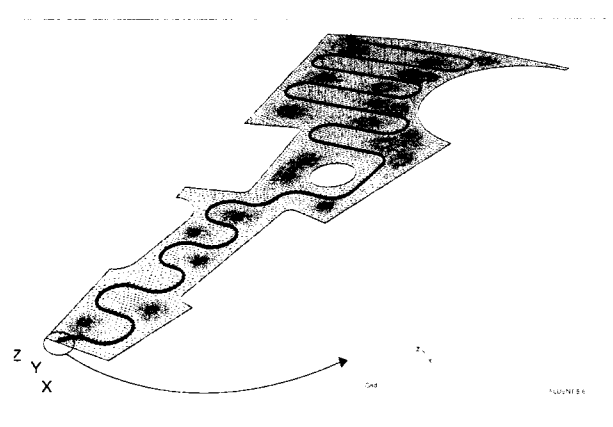
열차폐 패널의 기본 구성은 다음과 같다. 4mm 두께의 Stainless steel 304L 패널 위에 내경 10mm, 두께 1mm인 동종의 관을 납땜을 이용하여 접합한다. 이 관은 150~200mm의 간격을 두고 설치되며 가능한 패널 전체에 걸쳐 분포되도록 하고 있다. 이에 대한 모



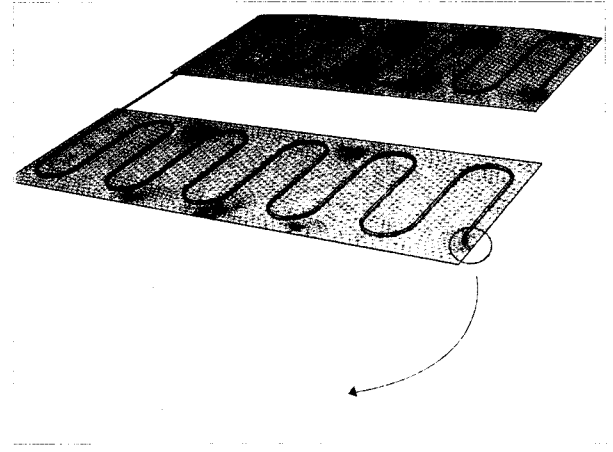
(a) Lid 패널의 물리적 모델 및 격자 생성
(a) Physical Model & Grid Generation of Lid Panel



(b) Body 패널의 물리적 모델 생성 및 격자 생성
(b) Physical Model & Grid Generation of Body Panel



(c) Base 패널의 물리적 모델 및 격자 생성
(c) Physical Model & Grid Generation of Base Panel



(d) EH-Port 패널의 물리적 모델 격자 생성
(d) Physical Model & Grid Generation of EH-Port Panel

그림 1. 열차폐 패널의 물리적 모델 및 격자 생성
Fig. 1. Physical Model & Grid Generation of Cryopanel Panel

델은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 장치의 작동시 관 입구에 60K의 헬륨이 유입되며 패널이 얻는 복사열 및 전도열은 헬륨의 대류를 통해 제거된다.

KSTAR 토카막 장치의 열차폐 패널은 크게 Cryostat(Lid, Body, Base) 부분과 Port를 포함하는 진공용기(Vacuum Vessel) 부분으로 나뉜다. 이들을 각각 16등분하고 등분된 조각들을 2개(상·하)로 분리한 형태로 제작하여 Cryostat 내벽과 진공용기 및 Port 외벽에 설치한다. 이들 중 Lid, Body, Base, EH-Port 패널에 대해 모델링을 수행하였다. 수치적 해석에서 정확도가 높고 시간을 줄이기 위하여 fig. 1과 같이 격자를 생성하였다. 관 내부의 헬륨 가스에 의한 강제 대류 열전달과 패널 자체의 전도 열전달 현상을 동시에 처리할 수 있도록 격자를 생성하였고 전도열이 유입되는 부분에 대해서는 좀 더 정확한 계산을 얻기 위하여 조밀한 격자를 생성하였다. 사각형 비정렬격자를 사용하여 격자 수를 최소화하면서도 정확도를 높였다. 삼각형 완전 자동 격자 형성도 가능하나 이 경우 격자 수가 많아지므로 해석 시간이 길어진다. 또한 삼각 기둥 형상의 격자와 육면체 격자를 혼용하여 격자 생성하였으며, 특히 유동 영역에 해당하는 관 내부에서의 열 및 유동에 관한 정확한 계산을 위하여 벽면 근처에 격자가 밀집되도록 격자를 생성하였다. Fig. 1은 이들 4가지 경우의 물리적 모델과 격자를 나타내고 있다.

2.3. 경계 조건

경계 조건은 크게 두 가지 형태로, 패널에 유입되는 열과 패널의 열을 제거하는 관내부 유동에 관계되는 조건으로 나뉜다. 패널에 유입되는 열은 고온부와 접한 면을 통해 들어오는 5.5W/m²의 복사열과 패널의 종류에 따라 각기 다른 값을 가지며 유입되는 전도열로 나뉜다. 이는 패널을 Cryostat와 진공용기에 지지하기 위한 Supporter를 통한 전도열과 맨홀 차폐장치(Man-hole Shield Panel)의 복사열을 제거하기 위한 냉각선의 전도열을 나타내고 있다. 이에 대해서는 표 1과 표2에서 나타내었다. 관의 입구에 유입되는 헬륨

표 1. Supporter를 통해 유입되는 전도열량(W/개수)
Table 1. Conduction Heat transfer through the Supporter(W/EA)

구 분	Supporter 종류	열부하 (W)	
Lid	고정용	0.755	
	상부	Case 1	0.755
		Case 2	0.755
	하부	고정용	0.503
		Case 1	0.503
		Case 2	0.629
Body	고정용	0.440	
	Case 1	1.600	
Base	Case 1	0.470	
EH-Port	상부	고정용	1.600
		Case 1	0.220
	하부	고정용	2.240
		Case 1	0.220
		Case 2	0.628
		Case 3	0.629

표 2. 맨홀 차폐장치의 냉각 선을 통해 유입되는 전도 열량(W/개수)

Table 2. Conduction Heat transfer through the Cooling Line of Manhole Shield Panel(W/EA)

구 분	입열량 (W/EA)	
Lid	0.33	
Body	상부	0.20
	하부	0.43
Base	0.27	

표 3. 관으로 유입되는 헬륨의 질량유량(kg/s)

Table 3. Helium mass flow rate in pipe(kg/s)

구 분	헬륨의 질량 유량 (kg/s)
Lid	0.000579
Body	0.00133
Base	0.000369
EH_Port	0.00120

가스의 온도는 60K, 20기압으로 고정하였으며 표1과 표2에서 제시된 값들을 이용하여 계산된 총 유입열량을 통해 관의 입구와 출구 온도차가 15K 이내로 유지하기 위한 질량유량을 결정하였다. 각각에 대한 질량 유량은 표 3에 나타내었다. 헬륨의 유동이 있는 관의 내벽에서는 점착 조건(no-slip boundary condition)을 적용하였다.

연속 방정식 및 운동량 보존 방정식에서 물성치가 온도 의존성을 고려하여 물성치를 온도의 함수로 두고, SIMPLE 해법, k-ε 난류 모형, Upwind 공간 차분법, Under relaxation method를 이용하여 수치해석을 수행하였다.[4] 헬륨과 Stainless steel 패널의 물성치에 대한 값은 압력의 변화가 370Pa 정도로 매우 작아 온도만의 함수로 표 4와 표5에 나타내었다.

표 4. 헬륨의 물성값

Table 4. Physical properties of Helium

구 분	헬륨의 물성치
Density, (kg/m ³)	$\rho = \rho(T)$ $= 0.0027T^2 - 0.5664T + 39.663$
Specific heat, C _p (J/kg-K)	$C_p = C_p(T)$ $= 0.0542T^2 - 10.017T + 5693.5$
Thermal conductivity, k (W/m-K)	$k = k(T) = 0.0005T + 0.024$
Viscosity (pa-s)	$\nu = \nu(T) = 7 \times 10^{-8}T + 3 \times 10^{-6}$

표 5. 패널(Stainless steel 304)의 물성값

Table 5. Physical properties of Stainless steel panel

구 분	패널의 물성치
Density, (kg/m ³)	7900
Specific heat, C _p (J/kg-K)	$C_p = C_p(T)$ $= -0.0062T^2 + 3.5T - 40.248$
Thermal conductivity, k (W/m-K)	$k = k(T)$ $= -0.0001T^2 + 0.0677T + 3.5908$

3. 수치 해석 결과

3차원 수치 해석의 결과는 Panel의 온도분포 특성을 집중적으로 고찰하여 가급적 균일 온도분포를 얻는 것에 해석의 초점을 맞추었다. Fig. 2에서 Fig. 5은 패널에 복사열과 전도열이 유입되는 동시에 헬륨을 관을 통해서 강제 유동시킬 때 관과 패널의 온도 분포를 나타낸 것으로, 왼쪽 그림은 패널 전체의 온도 분포를 나타낸 것이고 오른쪽 그림은 왼쪽 그림의 패널 전체 온도 분포 가운데 75K 이상인 부분을 표시한 것이다.

앞에서 언급된 경계 조건을 이용하여 해석을 수행한 결과, 헬륨의 온도는 관의 경로에 따라 비교적 선형적으로 변하며, Lid, Body, Base, EH-Port 패널은 대부분의 영역에서 60~80K 사이를 유지하고 있다. 열차폐 패널로 유입되는 복사열은 고온부에 접하는 면을 통해 균일한 열유속을 가지므로 국부적으로 높은 온도 분포를 나타내는 곳이 존재하지 않는다. 그러나 Supporter 등의 구조물이 부착되는 몇몇의 경우에서 전도 입열 부위는 작은 접촉면적을 통해 큰 열유속을 갖는 열이 유입되므로 이 부근에서는 최고 온도가 100K까지 나타나는 곳이 존재하기도 한다.

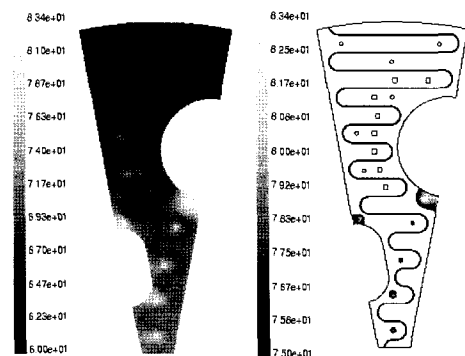


그림 2. Lid Panel의 온도 분포

Fig. 2. Panel Temperature Distribution of Lid Panel

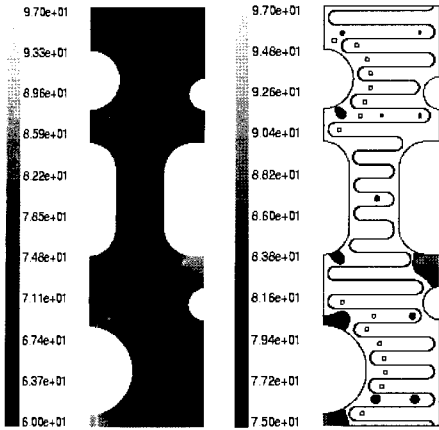


그림 3. Body Panel의 온도 분포
Fig. 3. Panel Temperature Distribution of Body Panel

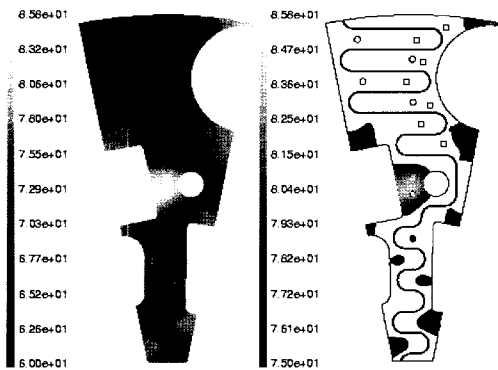


그림 4. Base Panel의 온도 분포
Fig. 4. Panel Temperature Distribution of Base Panel

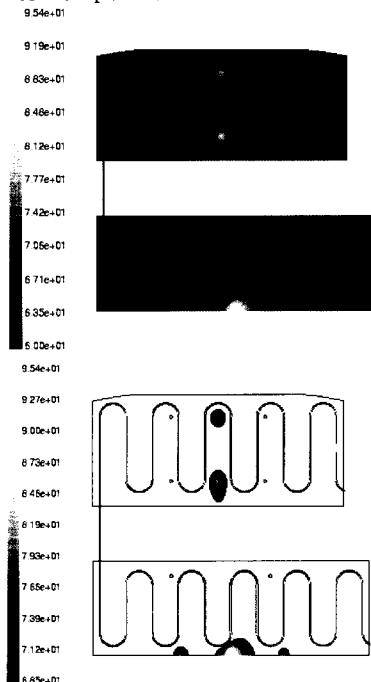


그림 5. EH_Port Panel의 온도 분포
Fig. 5. Panel Temperature Distribution of EH_Port Panel

Fig. 2~5에서 보인 것과 같이 일부 영역에서 100K에 달하는 부분이 존재하기는 하지만 이는 전체 패널의 극소에 불과하고 온도차도 40K이하이므로 위에서 언급된 경계 조건을 만족하도록 열차폐 패널을 설계한다면 Lid, Body, Base, EH-Port 패널은 열차폐 장치로

써의 역할을 수행하는데 큰 문제가 없으리라 판단하였다. 몇몇 영역에서는 비교적 높은 온도 분포를 나타내는 곳이 존재하고는 있다. 이는 Supporter를 통해 유입되는 열 유속이 높은 것이 가장 주요한 원인이고 이와 더불어 냉각관이 입열부의 일부에만 접해 헬륨이 열을 효과적으로 제거하지 못하기 때문이다. 이와 같은 사실을 통해 패널의 온도 분포를 좀 더 균등하게 유지하기 위해, 패널로 유입되는 전도열 부하량을 줄이고, 입열부 위치를 가능한 냉각관에 인접시키고, 헬륨의 질량유량을 증가시킨다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 KSTAR 차세대 토카막 장치의 열차폐 장치(Thermal Shield Cryopanel)를 설계하고 제작하기 위하여 열 차폐 효과를 검증 할 수 있는 전산 열유체 역학 모사를 진행하였다. 이를 통해 여러 가지의 열원에 의하여 가열되는 열차폐 패널이 적정 온도를 유지할 수 있는 경계 조건 및 최적 형상을 도출하였다.

열차폐 패널에서 고려할 열전달 현상을 세 가지 형태로 구분하였으며 다음과 같다

- (1) 패널에 공급되는 열 부하(복사열과 Supporter등의 구조물을 통한 전도열)
- (2) 관 내부의 헬륨 가스에 의한 강제 대류 3차원 열전달
- (3) 패널 자체의 전도열

위에서 언급한 열전달 현상을 동시에 처리할 수 있도록 Fluent 5.3 Software Package를 이용하여 격자 생성 모델링을 완성하였고 따라서 관 내부의 강제 대류 와 패널 부분의 전도를 동시에 해석하였다. 결과로서 구조물을 통해 들어오는 전도열원으로 인한 국부적 열 집중 현상을 피하기 위하여, 제안된 열원의 위치와 열전달량을 이용하여 Lid와 Base 열차폐 패널을 해석할 경우 85K이내의 온도 분포를 달성하였으며 Port와 Body 열차폐 패널의 경우 97K 이내를 유지할 수 있었다.

감사의 글

본 과제는 KSTAR Project의 지원으로 연구되었으며 모든 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Fluent 5 User's Guide, Fluent 5.3, Fluent Inc.(1998)
- [2] Michael F. Modest, Radiative Heat Transfer, McGRAW-HILL International Edition
- [3] Frank P. Incropera & David P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 1996
- [4] H. K. Versteeg & W. Malalasekera, Computational Fluid Dynamics, Longman Scientific & Technical (1995)

- [5] Cryodata, Inc., Hepak Version 3.4
- [6] Cryodata, Inc., Cryocomp properties Version 3.06

저 자 소 개



김동락(金東洛)
 1953년 4월 4일생, 1972년 경북대 물리학과 졸업, 1993년 일본 Osaka City Univ. 졸업(이학박사), 현재 한국기초과학지원연구원 핵융합연구개발사업단 책임 연구원



김광선(金光宣)
 1954년 6월 16일생, 1978년 한양대 기계공학과 졸업, 1986년 미국 University of Kansas 졸업(기계공학박사), 현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과 교수



노영미(魯映美)
 1977년 3월 2일생, 2000년 한국기술교육대학교 졸업, 현재 동 대학원 기계공학과 석사 과정



조승연(趙昇衍)
 1961년 8월 2일생, 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업, 1994년 UCLA 기계항공원자력학과 졸업(공학박사), 현재 한국 기초과학지원연구원 핵융합연구개발사업단 책임 연구원



김승현(金昇顯)
 1973년 2월 17일생, 1998년 홍익대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기초과학지원연구원 핵융합연구개발사업단 연구원