

디버터의 열유동 및 열응력 해석

이상윤*, 김홍배**

Analysis of Heat Flow and Thermal Stress for Divertors

Sang Yun Lee*, Hong Bae Kim**

ABSTRACT

For the optimal design of plasma facing components of a fusion reactor, thorough understanding of thermal behavior of high heat flux components are required. The purpose of this research is to investigate the characteristics of heat flow and thermal stress in divertors which are exposed to high heat load varying with time and space. Numerical simulations of heat flow and thermal stress for three types of diverter are performed using finite volume method and finite element method. Respectly, commercial FLUENT code are used in the heat flow simulation, and maximum surface temperature, temperature distribution and cooling rate are calculated. Commercial ABQUS code are used for calculating temperature distribution, thermal stress, strain and displacement. Through this computer simulation, design data for cooling system and structural provided.

Key Words : Tokamak(토카막), Plasma Facing Component(플라즈마 대향장치), Heat Flow(열유동), Thermal Stress(열응력)

1. 서론

수소 및 그 동위원소의 핵융합 반응에 의하여 창출되는 핵에너지의 실용화는 인류의 에너지 문제를 근본적으로 해결할 수 있다는 기대로 핵융합발전기술에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 핵융합 발전은 기존의 우라늄을 사용하는 원자력발전이나 석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료를 사용하는 화력발전과는 달리 자원의 고갈 및 환경오염이 없는 미래의 에너지원으로 각광을 받고 있다.

토카막 경계플라즈마는 폴로이달 형상을 가지며 방사층과 SOL(Scrape off Layer)로 이루어진다. 방사층은 separatrix의 안쪽 수 cm에 해당하는

부분으로서 플라즈마-불순물간의 상호작용으로 인해 방사작용이 활발한 영역이며, SOL은 노심 플라즈마로부터 확산에 의해 유입된 플라즈마가 자장을 따라 이동하다가 플라즈마 접촉면의 표면에 발생하는 Sheath에 의해 가속되어 디버터의 표면에 입사된다. 토카막 플라즈마에 투입된 에너지는 결국 주변의 물체에 흡수된다. 토카막 장치에서 고온 플라즈마가 보유하고 있던 에너지는 주위로 확산되어 소멸하게 되며 이는 용기 벽이나 내부부품에 용융, 증발, 침식, 마모 등 재료의 손상을 일으키고 양질의 플라즈마 형성 및 유지를 불가능하게 만들 수도 있다.⁽¹⁾ 토카막 장치를 비롯한 핵융합 실험장치에서는 이를 해결하기 위해 리미터(Limiter), 디버터(Divertor)라고 하는 구조를 도입하고 있다.

* 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

** 충남대학교 공과대학 기계공학과

리미터와 디버터를 플라즈마 대향부품(Plasma Facing Component)이라고 부르며, 플라즈마는 자력선을 따라 홀러가 이들 부품과 충돌하여 에너지를 잃어버리므로 플라즈마와 재료간 상호작용을 극소화하여야 한다. 이때 에너지 속이 좁은 면적에 플라즈마가 집중되는 만큼 열부하가 매우 커지기 때문에 이들 부품의 표면은 텅스텐, 베릴륨, 탄소 등 고온재료로 이루어지지 않으면 안 된다.⁽²⁻⁴⁾ 플라즈마 대향부품 중 디버터 판은 높은 열부하에서 지속적으로 사용되며, 바깥쪽 디버터의 경우 열부하가 10MW/m³ 정도로 매우 높고 거리에 따라 지수적으로 감소한다. 열부하가 SOL 두께 정도의 폭으로 분포되는 것은 경계플라즈마의 본질적인 성질에 기인하는 것인데 열부하의 공간적 집중을 일으키는 요인들로는 물리적인 요인과 공학적인 요인으로 나눌 수 있다. 물리적인 요인으로는 플라즈마 평형구조의 불균일에 기인한 상하 비대칭과 플라즈마 불안정성의 특정모드의 발달이고, 공학적인 요인으로는 자력선과 수열면이 경사졌기 때문이다.⁽¹⁾ 따라서 디버터 판은 최대 열부하 조건에서도 용융, 증발 등이 일어나지 않아야 되고, 열부하가 국부적으로 집중되므로 열을 효과적으로 분산하고 제거할 수 있어야하며, 구조적으로 변형이 적은 재료의 선택 및 냉각 시스템이 필요하다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 디버터에 열부하가 지수함수로 분포될 때 디버터의 구조, 디버터의 재료, 냉각수의 속도, 냉각관의 위치에 따라서 디버터 표면에서의 최대온도와 디버터 내부에서의 온도분포, 디버터 내부에서의 열응력을 전산해석으로 구하였다.

2. 디버터의 열유동해석

2.1 지배방정식과 전산해석기법

디버터에서 유동과 열전달을 해석하기 위한 지배방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} [\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}] + S_\phi \quad (1)$$

여기서 좌변 첫 번째 항은 검사체적 내의 시간에 따른 물리량의 변화를 나타내며, 두 번째 항은 대류항(convection term), 우변 첫 번째 항은 확산항

(diffusion term), 두 번째 항은 생성항(source term)을 나타낸다. x_i 는 i 값의 변화에 따라서 좌표가 달라지며 $i=1$ 일 때 x , $i=2$ 일 때 y , $i=3$ 일 때 z 를 나타낸다. 변수에 따라 지배방정식이 달라지며 $\phi=1$ 인 경우 연속방정식, ϕ 가 속도 성분인 경우는 운동량방정식, ϕ 가 엔탈피인 경우는 에너지방정식을 나타낸다. 각각의 지배방정식에 대한 확산계수와 생성항은 다른 형태로 표시된다. 생성항은 일반적으로 $S_\phi = ax+tb$ 와 같이 일차함수 형태로 표현될 수 있으며, S_ϕ 는 일차함수의 ax 에 해당하며, 상수값 b 는 S_c 에 해당한다. 유한체적법(FVM:Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식(1)의 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (2)$$

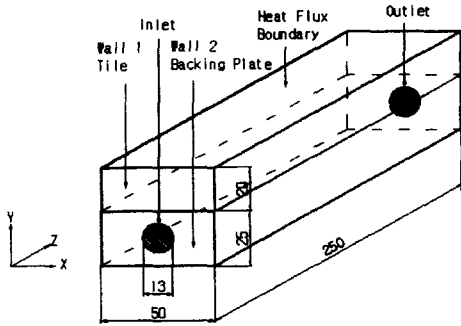
본 연구에서는 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (2)의 해를 구하였으며, 수렴판정은 다음의 전 영역 잔류항의 총합이 10⁻⁶이하가 되는 점이다. 식(3)에서 첨자 P는 기준 격자점을 나타내며, E와 W는 기준 격자점을 중심으로 좌·우 격자점을 나타내며, N과 S는 상·하 격자점을 나타낸다.

2.2 열유동 해석결과 및 고찰

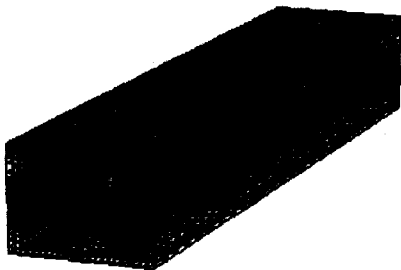
2.2.1 Flat-Tile인 경우

Fig. 1은 가로가 50 mm, 높이 45 mm, 길이 250 mm인 디버터의 형상과 경계조건 및 계산격자를 나타낸 그림이다. Tile의 두께는 20 mm이고 Backing Plate의 두께는 25 mm이다. 냉각관은 Backing Plate의 정 중앙에 위치하며, 냉각관의 직경은 13 mm이다. 격자 수는 X 방향 25개, Y 방향 24개, Z 방향 24개이며 냉각관 주변에는 온도가 급격하게 변하므로 격자를 조밀하게 배치하였다. 경계조건은 냉각관에는 293K의 일정한온도의 냉각수 물이 10 m/s의 균일한 속도로 유입되며, Tile 표면에는 열부하가 지수함수 (0-125 mm ; $10^7 \times e^{-\frac{x}{30mm}}$ W/m²,

$$\bar{R} = \frac{\sum | [A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P] |}{\sum | (A_P \phi_P) |} \leq 10^{-6} \quad (3)$$



(a) geometry and boundary condition



(b) grid

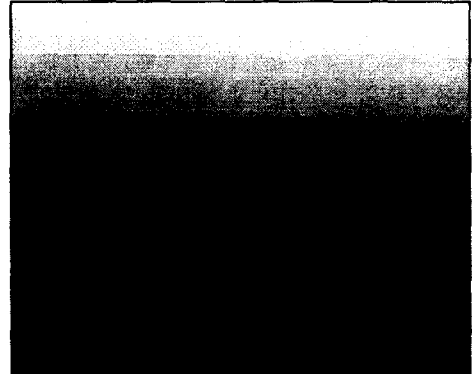
Fig. 1 Schematic of flat-tile with centered cooling pipe

125 - 250 mm $10^7 \times e^{-\frac{\lambda}{15\text{mm}}} \text{ W/m}^2$ 로 분포된다
고 가정하였으며, 디버터의 밀면과 좌·우면은 단
열이라 가정하였다. 시간 증분은 0.1초 간격으로,
플라즈마에 의한 가열이 끝나는 시간인 10초까지
계산하였다. Tile의 재료는 CX-2002U, N11, DMS70
4를 사용하였으며, 이들 재료는 온도에 따라 열전
도계수 및 정압비열이 변화하므로 이들 물성치를
온도의 함수로 입력하여 사용하였다. Backing Plate
재료는 OHFC, AL-15, CuCrZr, TZM, SUS304를 사
용하였다. 전산해석은 Tile 재료를 고정하고 Backin
g Plate 재료를 변화시켜 가면서 수행하였다. 본 연
구에서 사용한 Tile과 Backing Plate의 물성치는 참
고문헌^(3,6)에 나타나 있다.

Fig. 2는 Tile의 재료가 CX-2002U이고, Backing
Plate의 재료는 AL-15인 경우에 대하여 Tile 표면과
중앙단면에서 온도분포를 나타낸 그림이다. Tile 표
면에서 최대온도는 1161K로 나타났으며, Tile의 표
면 중앙에서 최대로 올라간다. 이는 열부하 분포



(a) tile surface (y = 45 mm)



(b) middle Section (y = 125 mm)

Fig. 2 Temperature contours for flat tile

특성상 Tile 표면 중앙에서 열부하가 최대로 분포
되기 때문이다. 최대온도가 분포되는 Tile 중앙 단
면에서의 온도분포를 살펴보면 수평방향으로 온도
가 거의 일정하나, 냉각관 주변은 냉각수의 영향으
로 인하여 온도가 비교적 낮게 분포된다. Tile 표면
으로부터 전도된 열은 냉각관 좌·우로 흘러
Backing Plate 하단부까지 전도되는 열흐름을 볼 수
있으며 특히 냉각관 주위에서는 냉각수로의 열 유
입으로 인하여 온도구배가 크게 나타나는 것을 볼
수 있다.

Table 1은 Tile과 Backing Plate 재료들의 조합을
달리했을 때, 플라즈마로 10초간 가열한 후 Tile 표
면에서의 최대온도를 보여주고 있다. 동일 재료의
Tile에 대하여 Backing Plate 재질이 OHFC, AL-15,
CuCrZr 등의 재료로 변화할 경우, Tile 표면에서의
최대온도는 유사하게 나타났다. 그 이유는 이들 재
료의 밀도, 정압비열, 열전달계수 등의 물성치가 유
사하여 열을 전달하는 능력이나 열을 흡수하여 열
을 저장하는 능력이 비슷하기 때문이다. 그러나
TZM, SUS-304 재료는 밀도, 정압비열은 OHFC,
AL-15, CuCrZr 등과 비슷하나, 열전도 계수가 낮아
열전달이 지연되기 때문에 Tile에 열이 계속 축적
되어 타일 표면에서의 OHFC 등과 같은 재료에 비
하여 높게 올라간 것으로 나타났다.

Table 1. Comparison of maximum surface temperature for flat-tile with centered cooling pipe

Tile	CX-2002U	N11	DMS704
Backing plate	(K)	(K)	(K)
OHFC	1150	1124	1180
AL-15	1160	1153	N/A
CuCrZr	1151	1128	N/A
TZM	1384	1320	N/A
SUS-304	1560	1530	N/A

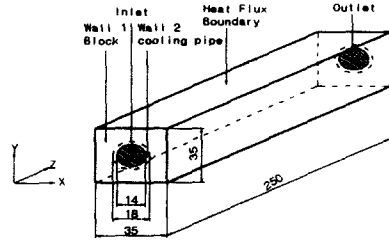


Fig. 3 Schematic of mono-block with centered cooling pipe

2.2.2 Mono-Block인 경우

Fig. 3은 가로 35 mm, 높이 35 mm, 길이 250 mm 인 Block에, 직경이 14 mm이고 두께가 2 mm인 냉각관이 Block의 중심부에 위치한 경우 디버터의 형상과 계산격자를 나타낸 그림이다. 격자 수는 X 방향 23개, Y 방향 23개, Z 방향 20개로 구성하였다. 열부하 및 경계조건은 Flat-Tile의 경우와 동일하다. Block의 재료는 CX-2002U, N11, DMS704이며, 냉각관의 재료는 OHFC, AL-15, CuCrZr, TZM, SUS304로 변화시켰다. 계산은 Block 재료를 고정하고 냉각관의 재료를 변화시켜 가면서 전산해석을 수행하였다. Fig. 4는 Block의 재료가 CX-2002U이고, 냉각관의 재료가 TZM인 경우 10초 후 Block 표면과 중앙단면에서 온도분포를 나타낸 그림이다. 표면온도는 중앙에서 최대로 올라가고 표면을 중심으로 좌·우에 온도분포 대역이 다르게 나타났다. 전반적인 온도분포의 특성은 Flat-Tile의 경우와 유사하다. 그러나 Block 표면 중앙을 살펴보면 Flat-Tile과는 다르게 냉각관이 지나가는 중앙지점에서 최대온도가 분포되는 좁은 대역이 나타나는데, 이는 냉각관 때문에 미처 전달되지 못한 열이 축적되어서 그 영향으로 인하여 온도가 급격히 상승하여 그 영향이 Block 표면에까지 영향을 미치는 것으로 생각된다. 최대온도가 분포되는 중앙 단면에서는 Flat-Tile 경우와는 다른 양상의 온도분포가 형성되는 것을 볼 수 있다.

Table 2는 Block과 냉각관 재료들의 물성치 조합에 따른 Block 표면에서 최대온도를 나타낸 표이다. 표에서 동일 재료의 냉각관에 대하여 Block 재질이 CX-2002U, N11, DMS704로 변화할 경우에 Block 표면에서 최대온도는 유사하게 나타났다. 그 이유는 이들 재료의 밀도, 정압비열, 열전달계수 등



(a) tile surface (y = 35 mm)



(b) middle Section (y = 125 mm)

Fig. 4 Temperature contours for mono-block

이 비슷하여 열을 전달하는 능력이나 열을 저장하는 능력이 비슷하기 때문이다. 그러나 Block의 재질은 같고 냉각관의 재질이 변화하는 경우에는 열전도계수가 낮을수록 Block 표면에서 최대온도는 올라가는 것을 알 수 있다. 특히 Flat-Tile인 경우에는 Backing Plate가 냉각관 역할을 함으로써 표면으로부터 전달된 열을 흡수하여 그만큼 온도수준이 낮게 나타나지만, Mono Block인 경우에는 이러한 역할을 담당하는 Backing Plate가 없기 때문에 열이 Block 내부에 축적되어 온도가 Flat-Tile보다 전반적으로 높게 나타나는 것으로 생각된다.

Table 2. Comparison of maximum surface temperature for mono-block with centered cooling pipe

Block	CX-2002U	N11	DMS704
Cooling Pipe	(K)	(K)	(K)
AL-15	1453	1430	1484
TZM	1568	1540	
SUS-304	1730	1700	

3. 디버터의 열응력 해석

3.1 열응력 해석의 지배방정식

열전달방정식과 열응력 및 변형률 계산에 사용되는 구조해석 방정식 사이에는 상사성이 있으며 구조해석의 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{\dot{u}\} = \{P\} \quad (4)$$

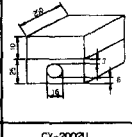
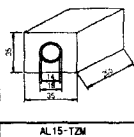
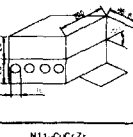
여기서 $[M]$ 은 열용량에 상응하는 질량행렬, $[K]$ 는 열전도도에 대응하는 강성행렬이며, $\{P\}$ 와 $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ 는 각각 에너지방정식의 열부하와 온도에 해당하는 하중 벡터 및 변형률 벡터이다. 열 변형률은 온도에 영향을 받으며 온도 변화장에 노출된 구속되지 않은 물체는 일반적으로 온도 증가시 늘어나며 그 비율은 변형률과 열팽창계수 α 에 비례한다. 여기서 α 는 온도에 따라 증가하는 경향을 보이며 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon^{th} = \alpha(\theta)(\theta - \theta^0) - \alpha(\theta')(\theta' - \theta^0) \quad (5)$$

식(5)에서 θ , θ' , θ^0 는 각각 현재온도, 초기온도 및 기준온도이다.

구조해석에서 사용한 임의 시간에서의 온도 계산 값을 읽어 열해석시 사용한 mesh topology와 공유하였으며 그 조건에서의 열응력 및 변형률을 계산하였다.⁽⁷⁾ 온도분포의 천이상태 적용에 따른 열적 팽창과 수축현상이 열응력 해석의 주된 관심사항이며 빠른 온도변화에 노출된 구조물의 국소 영역이 열적 변형(열충격:thermal shock)을 야기하게 되나 빠른 온도변화에 노출되지 않는 다른 영역은 변형률이 제한적일 수밖에 없으므로 이런 경우는 일반적으로 총 변형률(resultant deformation)이 급힘 현상을 유발하게 되며 구조물의 유연성이 떨어진다면 항복이 다를 수 있다. 따라서, 천이상태의 열응력

Table 3. Schematic and material of divertor

Name	Flat-Tile	Mono Block	Standard Flat-Tile
Shape and Dimension			
Material(A)	CX-2002U	AL-15-TZM	N11-CuCrZr
Material(B)	AL-15	CX2002U-CuCrZr N11-CuCrZr	N11-TZM

및 변형률을 계산하여 어느 영역에서 어느 정도의 열응력과 변형률이 어떤 이유로 발생하는지를 검토하면 이용할 수 있는 재질 선정도 가능하다. 해석에서 고려된 형상과 재질 및 크기는 Table 3과 같다.

3.2 유한요소 모델링

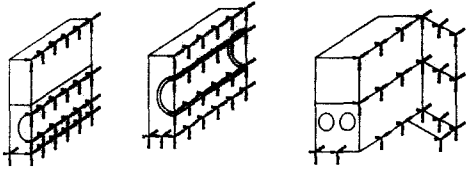
해석을 위한 모델은 전 형상에 대해 모델의 폭 방향으로의 온도구배가 없으므로 대칭면의 한쪽 면에 대해서만 모델링과 해석을 수행하였다. 모델링을 위한 전처리로는 PATRAN을 사용하였다. 해석 요소로는 육면체의 solid 요소를 사용하였으며, 열해석과 구조해석 모두 접촉부위는 완전접촉이라 가정하였다.

3.3 열해석 경계조건

비등방성 물질의 해석이 가능한 ABAQUS를 사용하였으며, 열해석시 경계조건으로는 고온 플라즈마의 열부하에 대해서는 상판에 대하여 길이 방향으로 거리에 따라 지수함수의 분포를 갖되 시험 실시시간 동안인 처음 10초간은 지수함수 분포로, 10초 이후는 열부하가 0인 값으로 주었다. 경계면 및 외부 벽면에서의 조건은 대칭과 단열조건으로, 냉각유체와 관벽판의 경계조건은, 원관내 유체 냉각시 이용되는 실험식 $Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ 으로부터 얻어진 대류열전달계수 $h=6000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 부여하였다.

3.4 구조해석 경계조건

Fig. 5에 경계조건이 나타나 있다. 경계조건을 살펴보면 구조물이 핵융합로 내에 부착되는 형상을 고려하여 하부 양 끝단만을 구속하였는데 이 경우 끝단의 각 절점에 대해 x, y, z 세 방향의 변위와 회전성분의 값을 모두 구속 조건으로 부여하였다. 구조물의 다른 영역은 자유로운(free) 상태이며 대칭



(a) Flat-Tile (b) Mono Block (c) Standard Flat-Tile
 Fig. 5 Boundary condition for structure analysis

면 (y-z 평면)에서는 x 방향의 변위와 y, z 방향의 회전성분을 구속하였다.

3.5 시간증분의 결정

천이상태의 해석에서 고려되어지는 시간 증분, Δt 는 계산의 정확도와 관련이 되는 항으로 최소 시간 증분보다 작을 경우 결과가 oscillation 혹은 divergence되게 되므로 이의 결정이 중요하며 결정 사항은 주로 요소의 특성길이(characteristic length)로서 시간증분과는 다음의 상관관계가 있다.⁽⁸⁾

$$\delta \tau_{\min} \geq \frac{\rho C_p}{6k} (\Delta l)^2$$

여기서 Δt 는 최소 시간증분, ρ 는 밀도, C_p 는 정압비열, k 는 열전도계수, Δl 은 특성길이(온도구배가 가장 큰 요소에서의 절점간의 거리)이다.

3.6 열응력 해석결과 및 고찰

해석 범위는 열해석의 결과인 구조물 내 각 절점에서의 온도값을 이용하여 탄성범위 내에서 열응력, 변형률 및 변형량을 고찰하였다.

Mono-Block(AL15-TZM 조합)의 상판 형상에 대한 열팽창을 고려한 경우의 5초에서의 Von-Mises 응력 포도가 Fig. 6에 나타나 있다. 온도구배가 가장 큰 영역으로 예측된 Z=145 mm 위치에서 인장 응력이, 냉각수가 흐르는 하판에는 압축응력이 생기며 구조물의 하부 끝단이 구속되어 있으므로 구속점을 기준으로 열유속이 집중되는 중앙 부분이

불룩하게 올라가는 굽힘(bending) 현상을 관찰할 수 있다. 전반적으로 낮은 응력값을 보이고 있으나 부분적으로 응력집중 현상을 볼 수 있다. 그러나 최대 응력값이 항복 응력치에 미치지 못하므로 어느 정도 안전율은 확보하고 있다고 볼 수 있다.

Mono-Block(N11-CuCrZr 재질로 조합된 디버터)에 대한 시간 10초에서의 응력 및 변형량을 Fig. 7에, 경사 Flat-Tile(N11-TZM)에 대한 시간 10초에서의 응력 및 변형량을 Fig. 8에 각각 보였으며 Table 4에 해석결과를 보였다. 해석결과 나타난 응력집중 부위는 전반적으로 열에 의한 구배가 큰 고온 영역 외에 이중 재질의 접합부위, 그리고 구속지점에서 크게 나타났으며, 경사 Flat-Tile의 경우 구부러진 형상 때문에 그 영역에서 다소 높은 값을 보였다. 계산된 모든 경우에 대하여 최대 응력값은 항복강도를 넘지 않았으므로 기동후 정지 시에도 잔류변형을 수반하지 않을 것으로 보인다.

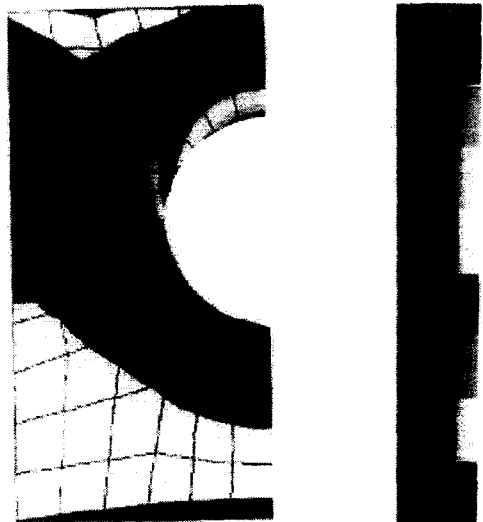


Fig. 6 Von-Mises stress distribution
 ($\sigma_{\max} = 119,335 Pa$)

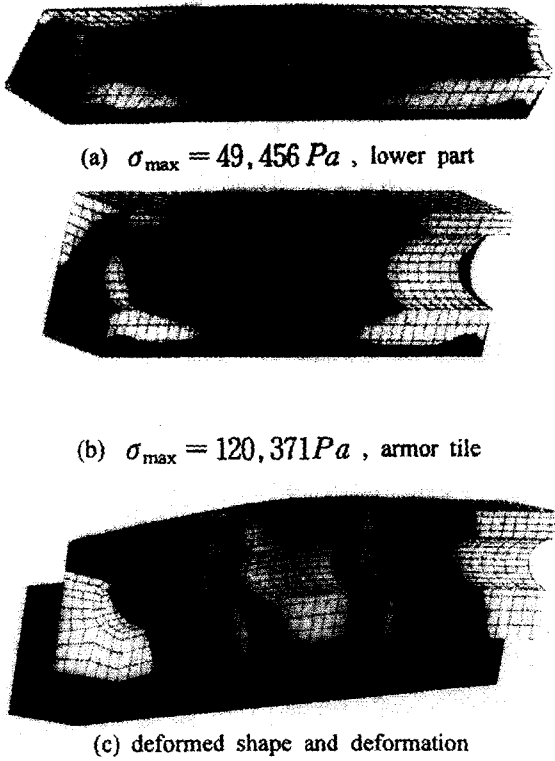


Fig. 7 Stress and Strain Distribution for mono block of AL15-TZM(t=10sec)

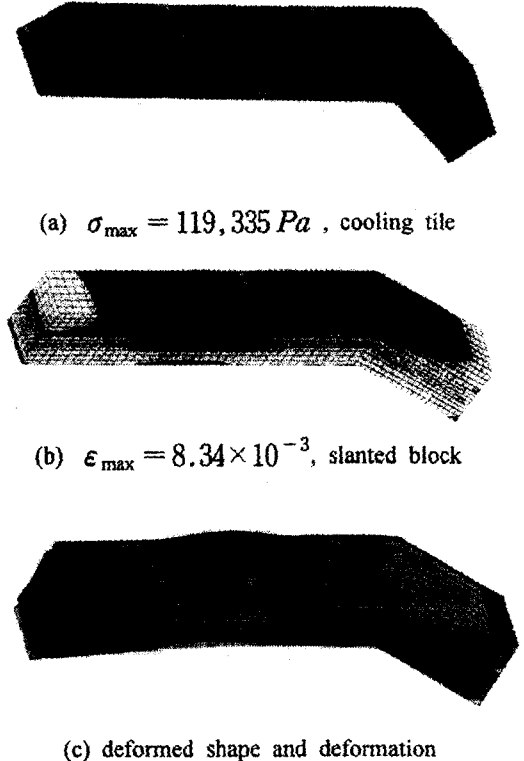


Fig. 8 Stress and Strain Distribution for slanted flat-tile of N11-TZM(t=10sec)

Table 4. Result of thermal stress analysis

Time	Sape	Flat-Tile	Mono-Block				Slanted Flat-Tile	
		CX2002U AL15	AL15-TZM	CX2002U- CuCrZr	N11-TZM	N11-CuCrZr	N11-TZM	N11-CuCrZr
Stress	5	1.147E4	N/A	1.869E4	3.042E4	3.091E4	7.858E4	8.492E4
	10			3.437E4	4.244E4	4.240E4	3.684E5	1.199E5
	15	1.129E4		3.246E4	1.550E4	1.904E4	1.732E5	8.015E4
	20			2.379E4	1.097E4	1.215E4	9.591E4	6.316E4
Strain	5	N/A					8.926E-2	
	10	N/A					1.568E-2	
	15	N/A					4.416E-3	
	20	N/A					2.150E-3	2.019E-3
Displacement (mm)	5		2.028	2.246	1.310		1.395	1.196
	10		2.351	2.615	1.421	1.534	1.590	1.695
	15	1.277	1.624	1.670	1.188	1.232	1.154	1.361
	20	1.266	1.0	1.412	1.119	1.138	1.201	1.234

N/A : Not Applicable

4. 결론

토카막 장치에 사용되는 플라즈마 대향부품인 디버터에서의 열유동과 열응력을 대표적인 형상인 Flat-Tile, Mono-Block, 경사 Flat-Tile에 대하여 전산 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모든 경우 디버터 표면의 온도분포는 열부하가 집중되는 디버터의 중앙부에서 최대가 되며 양쪽 끝 방향으로 가면서 점차 낮아진다. 각 단면에서의 온도분포는 냉각관 윗부분에서는 수평방향으로 거의 일정하나, 냉각관 주위에서는 온도 구배가 크게 나타났다.
- 2) Flat-Tile의 경우, Backig Plate의 열전도계수가 디버터 표면의 최대온도에 크게 영향을 미친다. 따라서 Backing Plate는 열전도계수가 높은 재료가 요구된다.
- 3) Mono-Block의 경우, 냉각관 역할을 하는 Backing Plate가 없기 때문에 디버터 표면의 최대 온도가 Flat-Tile보다 높게 올라간다. 그러나 이러한 경향은 냉각관과 냉각수 사이의 대류 열전달계수를 높여주면 대류 열저항과 전도 열저항의 상대적인 크기에 따라 달라질 수 있다.
- 4) 최대 열응력은 Flat-Tile에서는 $1.147 \times 10^4 \text{Pa}$, Mono-Block에서는 CX2002U-CuCrZr의 경우에 $3.437 \times 10^4 \text{Pa}$, 그리고 경사 Flat-Tile의 경우는 N11-TZ M 재질 사용시 $3.684 \times 10^4 \text{Pa}$ 로 계산되었으나, 이 값 모두가 탄성한도 이내의 값이므로 구조물의 수명에 영향이 크지 않을 것으로 생각된다.
- 5) 세 가지 모델 모두 디버터는 판 하부의 양 끝단에서만 구속되어 있으므로 변형은 x-, y-, z- 3방향으로 진행되며, 상판이 고온에 따른 변형 정도가 크게 나타나고 있다.
- 6) 변형의 양상을 살펴보면 길이 방향을 기준으로 고온 영역인 위 방향으로 늘어나고 있으며 구속 점에서 판이 전후좌우로 각각 변형되려는 경향 때문에 고정점에서 응력값이 상당히 크게 얻어지므로 디버터 설계시 고려하여야 한다.

참고문헌

1. 인상렬 외, "핵융합로 연구 - 토카막 장치 기술개발," 과학기술처 3차년도 연구보고서, 한국원자

- 력연구소, KAERI/RR-1536/94, 1995.
2. PLANSEE, "Offer for the Development and Manufacturing of Plasma Facing Components for KT-2." TX-No. 1851, 1995.
3. Tokamak Physics Experiment, "System Design Description - Plasma Facing Components (Divertor)," TPX 11-930319-GA/LSevier-01, 1993.
4. M. Akiba, "High Heat Flux Components and Thermal Conditions in Fusion Reactor," *J. of Soc. of Plasma Nuclear Fusion*, Vol. 69, No. 12, pp. 1444-1449. 1993.
5. S. Toda, "Cooling Methods of High Heat Flux Walls and These Heat Removal Limits," *J. of Soc. of Plasma Nuclear Fusion*, Vol. 69, No. 12, pp.1450-1456. 1993.
6. Toyo Tanso Co., "CX-2002U Flat Type C/C Composite," 1990.
7. S. P. Timosenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity." McGraw Hill, 1997.
8. J. P. Holman "Heat Transfer 7th edition." McGraw Hill, 1990.