

KSTAR 토카막 진공용기 및 플라즈마 대향 부품의 탈기체 처리를 위한 가열 해석

이강희^a·임기학^b·조승연^b·김종배^c·우호길^d

The baking analysis for vacuum vessel and plasma facing components of the KSTAR tokamak

K.H. Lee^a, K.H. Im^b, S. Cho^b, J.B. Kim^c and H.K. Woo^d

Key Words: KSTAR(차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업), Tokamak, VV(진공용기)
PFC(플라즈마 대향 부품), Hard & Soft Baking(고온/저온 탈기체처리)

Abstract

The base pressure of vacuum vessel of the KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) Tokamak is to be a ultra high vacuum, $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa, to produce clean plasma with low impurity containments. For this purpose, the KSTAR vacuum vessel and plasma facing components need to be baked up to at least 250°C, 350°C respectively, within 24 hours by hot nitrogen gas from a separate baking/cooling line system to remove impurities from the plasma-material interaction surfaces before plasma operation. Here by applying the implicit numerical method to the heat balance equations of the system, overall temperature distributions of the KSTAR vacuum vessel and plasma facing components are obtained during the whole baking process. The model for 2-dimensional baking analysis are segmented into 9 imaginary sectors corresponding to each plasma facing component and has up-down symmetry. Under the resulting combined loads including dead weight, baking gas pressure, vacuum pressure and thermal loads, thermal stresses in the vacuum vessel during bakeout are calculated by using the ANSYS code. It is found that the vacuum vessel and its supports are structurally rigid based on the thermal stress analyses.

1. 서 론

핵융합실험장치^[1,2]에서 플라즈마는 토로이달 방전 단독 또는 전자공명 예비전리의 도움을 받아 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ Pa 영역에서 발생한다. 동작압력은 비록 낮은 고진공 영역에 해당하지만 여러 가지 이유로 핵융합 실험장치의 기저진공도는 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa의 초고진공이 되지 않으면 안 된다.

진공시스템 구성요소 표면의 기체방출은 시스템이 낮은 압력에 도달하는 것을 방해하는 주요 원인이다^[3]. 따라서 초고진공 달성을 위해서는 반드시 가열에 의한 베이킹(Baking, 탈기체 처리)이 선행되어야 하는데, 이는 진공용기나 용기내부 구성재료 표면에 흡착되어 있거나 재료에 흡수되어 내부에 저장되어 있는 기체분자를 열적으로 활성화시킴으로써 결합을 끊고 공간으로 방출되는 확률을 높여 이들 분자들을 원활히 배기하는데 목적을 두고 있다^[4,5].

탈기체 처리에 필요한 가열온도는 원하는 진공도, 진공용기의 재료와 사용이력 및 진공시스템의 구성부품에 따라 다르나 KSTAR 핵융합

^a 충남대학교 대학원 기계공학과

^b 기초과학 지원연구소

^c 현대중공업(주) 화공설계부

^d 충남대학교 기계공학과

실험장치^[6,7]의 경우 SS316LN인 진공용기는 250 ℃, 탄소 기반 물질인 플라즈마 대향 부품은 350 ℃ 까지 고온 탈기체 처리(Hard Baking)를 수행할 예정에 있으며^[3-5], 추가로 주 1회 정도 진공용기는 150 ℃, 플라즈마 대향 부품은 250 ℃로 저온 탈기체 처리(Soft Baking)를 계획하고 있다.

KSTAR 핵융합 실험장치의 탈기체 처리를 위한 가열방식으로는 고온 질소가스를 진공용기 이중 벽 사이로 흘려주는 방식과 코일에 저주파 유도전류를 흘려 진공용기를 유도가열하는 방식이 고려되고 있는데, 유도가열방식의 경우 최대 유도전력이 70 kW 정도로 실제 베이킹에 필요한 열량을 공급하는데 있어 적잖이 부족하며^[8], 또한 국부적인 가열특성으로 인하여 KSTAR의 베이킹 방식으로 전자의 가열방식을 우선적으로 채택하고 있다.

탈기체 처리를 위한 가열과정동안 진공용기 전체를 균일하게 가열하는 것이 중요한데, 온도가 균일하지 않으면 고온부에서 방출된 기체분자가 저온 부분에 흡착되는 현상이 일어나 배기 효율이 가열온도에 비해 현저히 떨어질 수 있고, 복잡한 형상의 진공용기에 큰 열응력이 발생할 수 있으며, 결과적으로 용기의 변형을 초래할 수 있다. 따라서 핵융합 진공시스템의 구성부품에 대한 열부하를 최소화시키면서, 비용과 신뢰성 및 안전성의 측면에서 효과적인 베이킹 계획(가열온도, 가열과정, 빈도수 등)을 제안이 필요하다.

본 연구에서는 KSTAR 토카막의 베이킹 계획에 준하여 2차원 베이킹 해석 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 모의 베이킹을 수행함으로

써 전체 가열과정동안의 장치 각 부분과 가열가스의 온도 분포 및 가스유량을 산정해 보기로 한다. 또한 가열해석의 결과치를 근거로 베이킹 과정동안의 진공용기 및 지지구조물에서 발생할 수 있는 열응력과 열변형에 대한 구조적인 안전성을 점검해 봄으로써 KSTAR 베이킹을 위한 안정적인 가열 시나리오를 제안하고자 한다.

2. 2차원 베이킹 해석

계획된 베이킹 시나리오에 준해서 실제 베이킹 시에 필요한 가열가스의 유량과 투입온도를 결정하고, 베이킹 과정동안 장치의 열·구조 특성해석에 필요한 입력자료를 계산하기 위해 Fig. 1과 같은 해석모델을 근거로 2 차원 베이킹 해석을 수행하였다. 해석모델의 각 분할영역에 대한 열평형 방정식을 유도하고 온도에 대한 1차항을 중심으로 Implicit numerical method를 적용하여 전체 베이킹 과정동안 시간에 따른 장치 각 분할영역의 온도 분포와 열교환 양 및 등가 열전달계수등을 계산하였다. 열평형 방정식으로부터 유도된 수치해석 모델은 Appendix 1에 제시한다.

2.1 2차원 베이킹 해석 모델

진공용기와 플라즈마 대향부품^[7]에 대한 2차원 베이킹 해석모델은 플라즈마 대향부품의 구성요소들을 기준으로 폴로이달(poloidal) 방향 9 영역으로 분할하였으며 형상은 플라즈마 대향 부품 inboard limiter를 중심으로 상하 대칭이다. Fig.2는 가열 탈기체 처리 시 KSTAR 진공용기 주변부의 열전달 메카니즘을 보여준다.

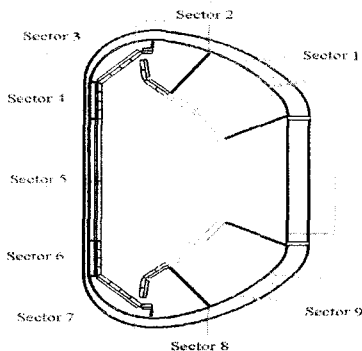


Fig. 1 Model for 2D baking analysis

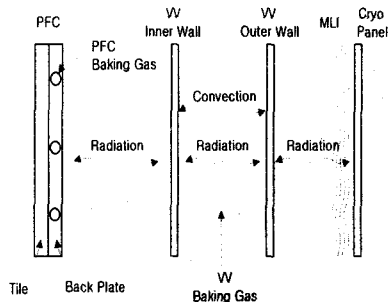


Fig. 2 Heat Transfer mechanism

2.2 2차원 베이킹 해석을 위한 입력조건

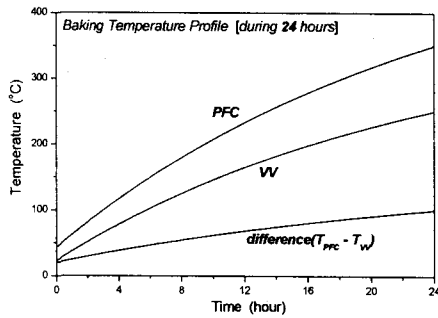
전체 베이킹 과정을 편의상 베이킹 목표온도까지의 가열과정, 베이킹 목표온도에서 정상상태 도달 과정, 이후 냉각과정의 세 단계로 나누어 각 단계에서 가열 및 정상상태 온도유지, 그리고 냉각을 위해 필요한 가열가스(냉각가스)의 유량과 투입온도의 추정에 해석의 초점을 맞추었다.

진공용기 및 플라즈마 대향 부품 가열가스의 시간에 따른 유량과 투입온도를 입력자료로 사용하였으며, 네 가지의 입력조건을 이용하여 계획했던 베이킹 시나리오를 만족시킬 수 있을 것이라 판단한다. 또한 베이킹 목표온도 도달이후 정상상태의 조건을 만족하도록 가스의 유량과 온도를 적절히 조정하면, 고온 탈기체 처리의 경우 목표온도 도달시간의 반 정도인 12시간의 시간범위 안에서 시스템의 온도 분포가 정상상태에 돌

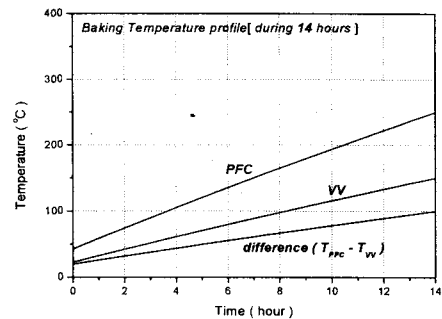
입한다고 가정하고 시간 36시간에서부터 가열시간 동안과 동일한 온도변화율로 냉각시키기 위해 냉각시간을 24시간으로 설정하였고, 같은 이유로 저온 탈기체 처리의 경우는 각각 12시간, 26시간, 14시간으로 설정하였다.

베이킹 목표온도까지의 진공용기 및 플라즈마 대향부품에 대한 시간에 따른 고온 및 저온 베이킹 시나리오는 Fig. 3 에서와 같이 계획하고 있는데, 이는 베이킹에 소요되는 필요 열에너지가 i) 내부에너지를 증가시키기 위한 에너지와 ii) 복사열에 의해 손실되는 에너지로 이루어진다는 가정 하에, 전체 운전시간에 걸쳐 비교적 균일한 열에너지를 요구하는 온도분포 모형이 되도록 일련의 필요 열량 해석을 통하여 결정하였다.

베이킹 목표온도 도달시간 까지 VV와 PFC

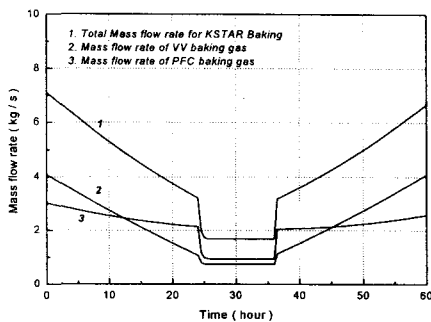


a) hard baking

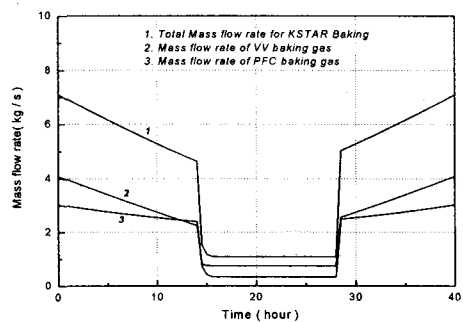


b) soft baking

Fig. 3 Baking Temperature profiles of VV and PFC



a) hard baking



b) soft baking

Fig. 4 Mass flow rate profiles for VV and PFC baking

베이킹에 필요한 가열가스의 유량은 앞선 필요 입열량 및 필요 유량해석결과^[9]로부터 결정되고, PFC의 경우 각 분할영역에 공급해야할 유량을 각 영역의 질량비율에 비례해서 계산하였다. 정상상태에서 VV와 PFC가 베이킹 목표온도를 유지할 수 있도록 공급되어야할 가열가스의 유량은 가열과정동안의 시스템 내부 에너지를 증가시키기 위해 필요했던 열량만큼을 제한 유량이고, 냉각 시에 공급해야 할 베이킹 가스의 유량은 가열 과정 동안 투입했던 가스유량과 동일한 변화율로 증가시키는데, 이는 냉각가스에 의한 냉각이 가열과정에 비해 너무 급속하지 않도록 하기 위함이다. Fig. 4은 고온 및 저온 베이킹에 대한 VV 및 PFC 베이킹 가스의 유량 분포를 나타낸다. 가열가스의 최대 필요 (총)유량은 베이킹 시작과 냉각 끝 시점에서 대략 7 kg/s이다.

진공용기 가열가스 입구온도는 베이킹 목표온도 도달 시점까지 고온 베이킹의 경우 최고 280 °C까지 상승시키고 최고점에서 정상상태로 유연하게 감소하면서 일정하게 유지되다가 냉각 시에는 가열과정 동안의 온도 변화율로 서서히 감소하는 온도분포 모형으로 가정하였고, 저온 베이킹의 경우는 최고 210°C까지 상승시킨 후 정상상태(140°C)까지 수렴하고 이후 가열과정과 동일한 온도구배로 냉각되는 아래와 같은 형태로 가정하였다(Fig. 5).

가열과정동안의 PFC 후판과 타일의 베이킹을 위한 입·출구 평균 가스 온도분포는 PFC 베이킹 시나리오에 근거해서 조정하였으며, 정상상태

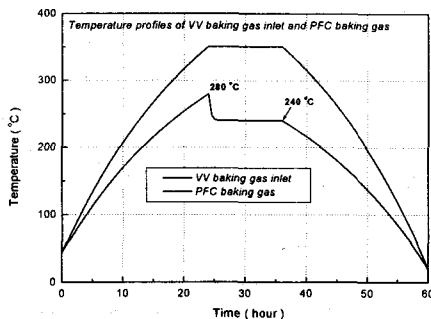
동안은 가열가스 온도를 일정하게 유지하고 냉각 과정에는 가열과정과 동일한 온도 변화율을 가지면서 감소하는 온도 분포모형으로 가정하였다. 이전의 해석결과에서 PFC 후판이나 타일의 시간에 따른 온도분포가 입력 값인 PFC 가열가스의 입·출구 평균 온도분포와 거의 같았기 때문에 PFC 가열가스의 온도분포 만을 조정하여 계획했던 PFC 후판과 타일의 온도분포 모형을 얻어낼 수 있었다.

Table1. 기타 해석조건 및 모델과 관련된 입력자료

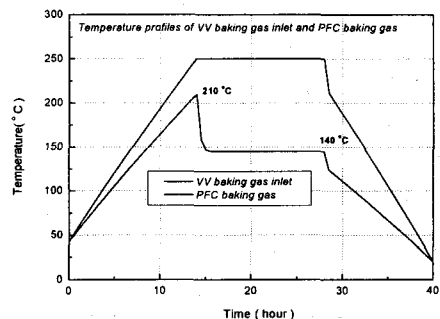
PFC 질량	21000 kg
VV 이중벽 질량	20500 kg
PFC emissivity	0.1
VV emissivity	0.1
VV 베이킹 가스 입·출구 온도차	10 °C
PFC 베이킹 가스 입·출구 온도차	20 °C
VV 베이킹 가스 압력	3 bar
PFC 베이킹 가스 압력	10 bar
PFC backplate와 tile 사이의 Gap Conductance	0.2 W/cm ² K

2.3 2차원 베이킹 해석 결과

Fig. 6과 7은 각각 진공용기 내벽과 진공용기 베이킹 가스의 고온 및 저온 베이킹 과정동안의 온도 분포를 나타내고 있다. 1번과 9번 분할영역에 해당하는 진공용기 내벽의 부분은 베이킹 가스와 내벽 사이의 열전도 계수가 상대적으로 낮아 가열과 냉각시에 베이킹 가스에 대한 온도 응

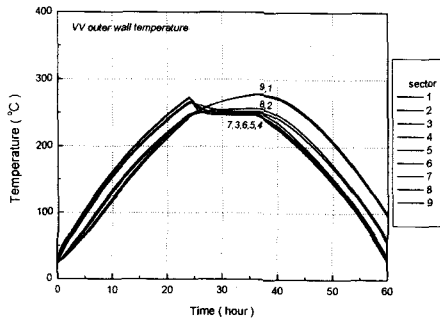


a) hard baking

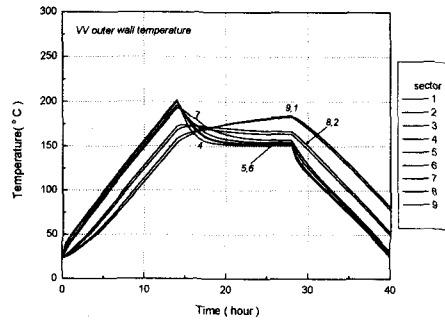


b) soft baking

Fig. 5 Baking gas temperature profiles of VV & PFC

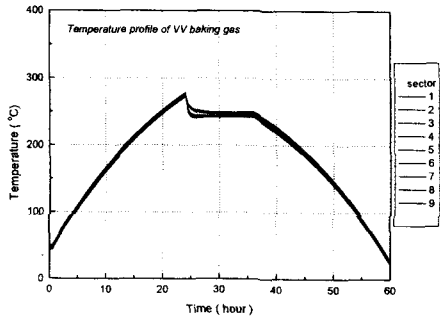


a) hard baking

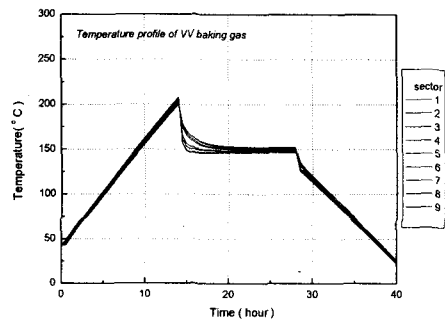


b) soft baking

Fig. 6 Temperature profiles of VV inner wall

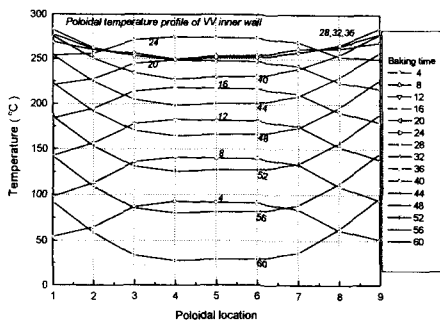


a) hard baking

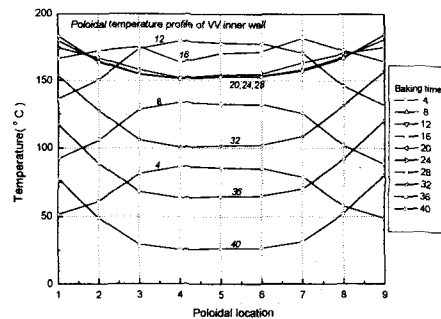


b) soft baking

Fig. 7 Temperature profiles of VV baking gas



a) hard baking



b) soft baking

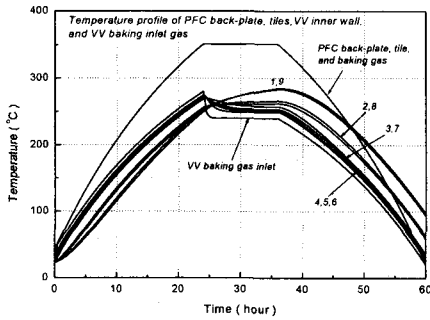
Fig. 8 Poloidal temperatures of VV inner wall

답이 늦게 나타나고 있다. 따라서 정상상태 구간에서 해당 분할영역에 대한 일정한 온도유지가 어렵다.

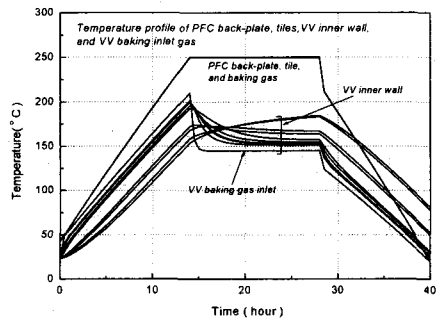
플라즈마 대향 부품 inboard limiter에 상당하는 진공용기 내벽 분할 영역은 가스의 유량과 입구온도의 조절만으로 계획했던 베이킹 시나리오를 만족시키기 용이하지만 가스 입·출구 부근의 진공용기 분할영역은 앞서 언급했던 바와 같이 온도조절이 쉽지 않다. 진공용기와 플라즈마 대향 부품 전체 분할영역의 온도를, 고온 및 저온 베이킹에서 요구되는 목표온도로 만족시키기 위해서는 적어도 어느 한 분할영역의 과열을 허용해야만 한다.

전체 베이킹 과정동안 진공용기 내벽과 플라

즈마 대향 부품 각 분할영역 사이의 시간에 따른 온도차이는 100℃미만으로 계산되었다. 가열과정동안은 진공용기 내벽 1번과 9번 분할영역의 온도가 플라즈마 대향부품과 가장 큰 차이를 가지면서 증가하다가 정상상태와 냉각 시에는 다른 분할영역들에 비해 온도차이가 감소하게 된다. 플라즈마 대향 부품 inboard limiter에 상당하는 진공용기 내벽 분할 영역의 경우는 정상상태 유지 과정과 냉각 시에 플라즈마 대향 부품과 상당한 온도차이를 갖게 된다. 따라서 가열과정동안은 진공용기 입·출구 부근에, 정상상태 및 냉각 시에는 진공용기 폴로이달 방향의 중심부 위치에 온도차이에 의한 과다 열응력의 발생가능성에 대한 구조적인 주의를 요한다.

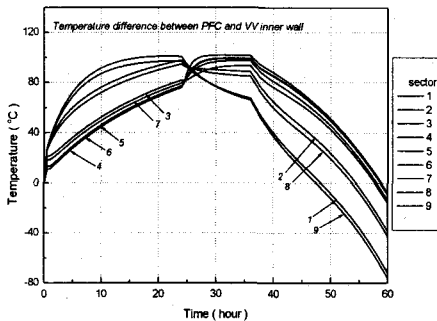


a) hard baking

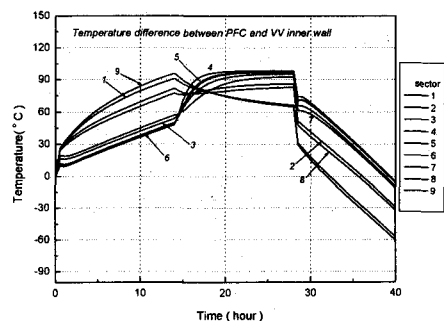


b) soft baking

Fig. 9 Temperature profiles of PFC backplate/ tile, VV inner/outer wall, and heating gases

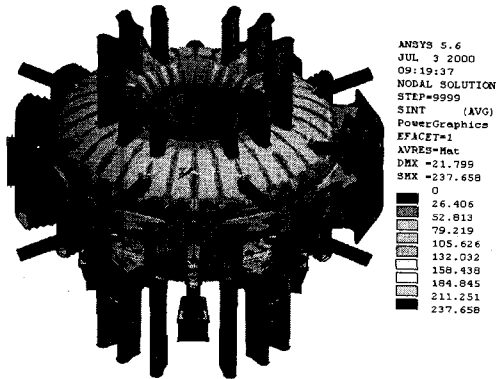


a) hard baking

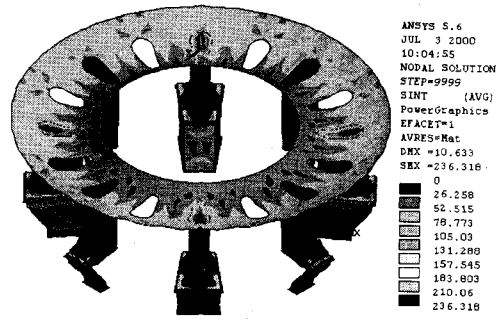


b) soft baking

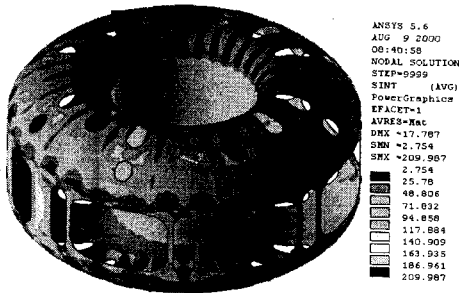
Fig. 10 Temperature difference profile between PFC back plate and VV inner wall



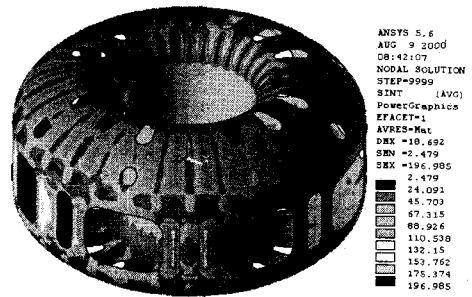
a) Assembly of vacuum vessel, supporting structures and various ports



b) supporting structures



c) inner wall



d) outer wall

Fig. 11 Results of thermal stress analysis for the KSTAR tokamak

3. 구조해석 및 결과

앞선 가열해석 결과를 근거로 고온 가열 탈기체 처리 시, 진공용기와 지지 구조물에서 발생하는 열응력을 계산하고 구조적 안전성을 판단하기 위해 혼합하중(자중, 베이킹 가스 압력, 진공압력, 열하중 등)이 작용할 경우에 대한 열응력 해석을 범용 구조해석 코드인 ANSYS를 이용하여 수행하였다.

최대 열응력의 발생위치와 크기는 Fig. 11a,b)에서와 같이 판스프링 형태의 지지구조물 중에서 발생하였으며, 이는 체적 팽창으로 인한 진공용기 반경 방향으로 변형이 비 균일하게 위치한 수평포트들로 인하여 비대칭화 되기 때문이라고 판단된다. 계산된 최대 응력 값은 238 MPa로 지지구조물의 허용응력인 347 MPa에 비해 충분히 작은 수준이다.

고온 가열 탈기체 처리시 진공용기 이중벽에서 발생하는 최대 열응력은 내벽과 외벽 각각에 대하여 210 MPa, 197 MPa로 지지 구조물에서 발생하는 최대 열응력의 값보다는 안정적인 수준이며, 상대적으로 큰 온도차이를 갖는 진공용기 내벽의 열응력 발생이 외벽보다 크다.

4. 결론

본 논문에서는 KSTAR 진공용기 및 플라즈마대향 부품의 가열 탈기체 처리를 위한 2차원 베이킹 해석 프로그램을 개발하였고, 이를 이용하여 베이킹 과정동안의 가열해석을 수행하였다. 또한 가열해석 결과에 근거하여 베이킹 시 진공용기 및 지지구조물에 대한 열·구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전체 베이킹 과정동안의 진공용기 및 플라즈

마 대향 부품에 대한 2차원 온도 분포를 얻었다.

2) 가열해석 결과로 얻어진 온도분포는 ANSYS 구조해석 결과, 안정한 응력 범위 내에 들어움을 확인할 수 있었다.

이로써, 2차원 베이킹 해석과 열구조해석을 통하여 KSTAR 장치의 탈기체 처리를 위한 안정적인 가열 시나리오를 얻게 되었다.

참고문헌

- [1] T.J. Dolan, *Fusion Research*, Pergamon Press Inc., New York(1982)
- [2] W.M. Stacey, *Fusion : An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*, John Wiley & Sons Inc.(1984)
- [3] H.F. Dylla, "A Review of the Wall Problem and Conditioning Techniques in Tokamaks", J. of Nuclear Materials, **93&94**, pp. 61 (1980)
- [4] K.L. Wilson and W.L. Hsu, *Hydrogen recycling properties of Graphite*, J. Nuclear Materials, **145-147**, pp. 121-130 (1987)
- [5] G.L. Jackson, T.S. Taylor, and P.L. Taylor, *Particle Control in DIII-D with Helium Glow Discharge Conditioning*, Nuclear Fusion, **30**, pp. 2305-2317(1990)
- [6] G.S. Lee et al., *The KSTAR Project: An advanced steady state superconducting tokamak experiment*, Nuclear Fusion, **40**, pp. 575-582 (2000)
- [7] The KSTAR Team, *KSTAR TSER (Tokamak Systems Engineering Review) Documents*, KBSI (Korea Basic Science Institute) (1997)
- [8] K.H. Im and J. Kim, *Inductive Heating Scheme for KSTAR Vacuum Vessel and PFC Bakeout*, 한국물리학회 회보 제 16권 제 2호, pp.419(1998)
- [9] K.H. Lee and K.H. Im, *Baking analysis of the KSTAR vacuum vessel and plasma facing components*, J. of the Korean Vacuum Society, **8**, 4(1), pp. 397-402(1999)

부 록

Energy balance equation for the analysis model

1) VV inner wall segment i

$$(mC_p)_{VV_{in}} \frac{\partial T_{VV_{in}}}{\partial t} = hA_{VV_{in}}(T_{VV_{in}} - T_{VV_{in}}) + \sigma F_{VV_{in} \rightarrow back} A_{VV_{in}}(T_{back}^4 - T_{VV_{in}}^4) - \sigma F_{VV_{in} \rightarrow VV_{out}} A_{VV_{in}}(T_{VV_{in}}^4 - T_{VV_{out}}^4) + kA_{CS_{VV_{in}}}(T_{VV_{in}(i-1)} - T_{VV_{in}(i)}) - kA_{CS_{VV_{in}}}(T_{VV_{in}(i)} - T_{VV_{in}(i+1)}) - kA_{cond_{VV_{in}}}(T_{VV_{in}} - T_{VV_{out}})$$

2) VV outer wall segment i

$$(mC_p)_{VV_{out}} \frac{\partial T_{VV_{out}}}{\partial t} = hA_{VV_{out}}(T_{VV_{out}} - T_{VV_{out}}) + \sigma F_{VV_{in} \rightarrow VV_{out}} A_{VV_{out}}(T_{VV_{in}}^4 - T_{VV_{out}}^4) - 5\sigma F_{VV_{out} \rightarrow panel} A_{VV_{out}}(T_{VV_{out}}^4 - 80^4) + kA_{CS_{VV_{out}}}(T_{VV_{out}(i-1)} - T_{VV_{out}(i)}) - kA_{CS_{VV_{out}}}(T_{VV_{out}(i)} - T_{VV_{out}(i+1)}) + kA_{cond_{VV_{out}}}(T_{VV_{out}} - T_{VV_{out}}) - kA_{cond_{VV_{out}}}(T_{VV_{out}(i)} - T_{port_end})$$

where $F_{VV_{out} \rightarrow panel} = 1 / ((1/e_{in} + 1/e_{MLI}) - 1) + 1 + n(2/e_{MLI} - 1)$

3) control volume i of heating gas flowing through VV double wall

$$\rho_{N_2} C_p V_{gas} \frac{\partial T_{gas}}{\partial t} = hA_{VV_{in}}(T_{VV_{in}} - T_{gas}) + hA_{VV_{out}}(T_{VV_{out}} - T_{gas}) + mC_p(T_{VV_{in}(i-1)} - T_{VV_{in}(i)})$$

4) PFC backplate i-th segment

$$(mC_p)_{back} \frac{\partial T_{back}}{\partial t} = hA_{back}(T_{gas} - T_{back}) + \sigma F_{VV_{in} \rightarrow back} A_{VV_{in}}(T_{VV_{in}}^4 - T_{back}^4) + kA_{back}(T_{back} - T_{tile})$$

5) PFC tile i-th segment

$$(mC_p)_{tile} \frac{\partial T_{tile}}{\partial t} = kA_{tile}(T_{back} - T_{tile}) - \sum_{j=i-1}^0 \sigma F_{tile(i) \rightarrow tile(j)} A_{tile(i)}(T_{tile(i)}^4 - T_{tile(j)}^4)$$