

KSTAR 진공용기의 베이킹시 열응력해석

인상렬 · 윤병주 · 조승연*

한국원자력연구소, *기초과학지원연구소
(1998년 7월 3일 접수)

Thermal stress analysis of the KSTAR vacuum vessel during bake-outs

S. R. IN, B. J. Yoon, S. Y. Cho*

Korea Atomic Energy Research Institute, *Korea Basic Science Institute
(Received July 3, 1998)

요 약 - KSTAR 토카막용 진공용기는 토러스형으로써 내부에 사람이 들어가 작업할 수 있는 큰 종단면을 갖고 있다. 이 용기는 불순물이 적은 깨끗한 플라즈마 발생을 위해 기저압력이 초고진공이어야 하며 각종 플라즈마 대향부품을 포함해서 용기전체를 350°C까지 베이킹하는 것으로 계획되어 있다. 진공용기의 형태가 삼차원적으로 복잡하고 토카막 가동중 용기에 걸리는 다양한 힘을 해소하기 위해 지지구조물이 설치되어 있으며 균일한 온도분포를 만들기 어려워서 베이킹시 큰 열응력이 발생할 것으로 예상된다. 이 논문에서는 진공용기의 불균일한 온도분포와 지지구조의 구속조건에 따라 열응력이 어떻게 변하는가를 살펴보고 가능한 해결책을 제시하려고 한다.

Abstract - The vacuum vessel of the KSTAR tokamak has a so large poloidal cross-section that workers can enter into the inside the vessel. To produce a clean plasma with low impurity concentrations it is planned that the whole vessel including plasma facing components will be baked out at 350°C and the base pressure of the vessel will be kept in the range of ultra high vacuum. Large thermal stresses are expected during bake-outs due to a three-dimensionally complex structure of the vessel, consequent nonuniformity of the temperature distribution and support systems to resist forces acting on the vessel. In this report variations of the thermal stress according to temperature gradients on the vessel and constraint conditions of supporting structures are studied and some possible counterplans are discussed.

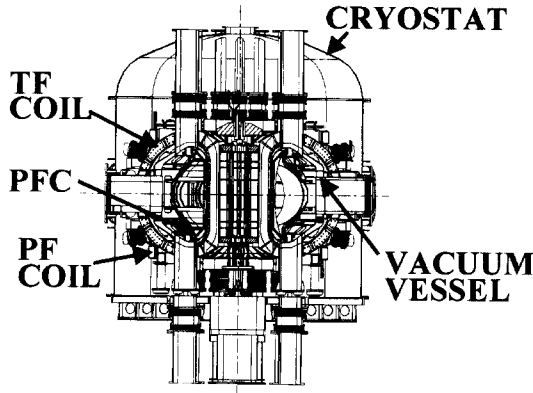
1. 서 론

KSTAR 토카막용 토러스 진공용기는[1, 2] 주반경(중심축에서 용기 종단면 중심까지의 거리)이 2 m, D형 종단면의 폭과 높이가 1.9 m 및 3.4 m에 이르며 주원주 길이는 13 m, 용기내부면적은 98 m², 부피는 52 m³ 또 무게는 33 톤으로 규모가 매우 크다. 용기재료는 스텐레스강 316 LN이다. KSTAR 진공용기는 내부에 디버터(divertor), 리미터(limiter), 수동제어판(passive plate) 등 각종 플라즈마 대향부품(plasma facing component, PFC)들을 포함한 여러 가지 용기내 부품들이 설치된다. 진공용기는 사람이 안으로 들어가 작업할 수 있도록 충분한 공간을 확보하고 있으며 적도면을 따라 부착되어 있는

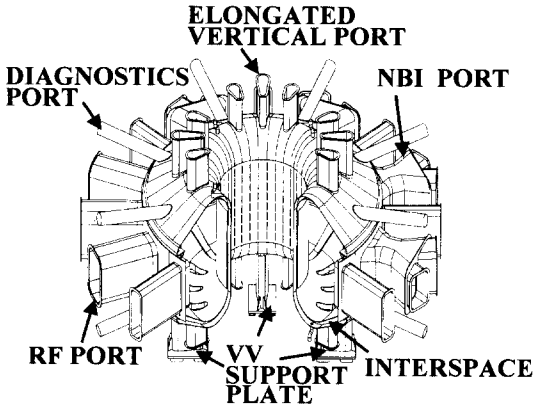
대형 포트들중 하나를 통해 접근이 가능하도록 설계되고 있다. 용기 주위에는 이외에도 진공배기, 가열, 진단, 냉각수 및 냉매(액체헬륨과 액체질소) 유입, 각종 신호선 도입등 다양한 목적을 위해 70 여개의 크고 작은 포트들이 마련된다. Fig. 1은 KSTAR 장치 전체 구성도 및 진공용기의 개념도다.

KSTAR 진공용기는 깨끗한 플라즈마를 발생하고 유지하는 데 필수적인 좋은 진공상태를 제공하고 플라즈마로부터 방출되는 입자와 열을 처리하며 토카막 가동중 발생하는 막대한 전자기력을 견뎌야 한다. 장치에 궁극적으로 중수소를 연료로 쓸 계획이므로 방사선 특히 중성자 차폐에 대한 대책도 필요하다. KSTAR 진공용기는 용기 몸체가 이중벽으로 되어 있다. 비교적 얇은 두

KSTAR TOKAMAK



a)



b)

Fig. 1. a) KSTAR 토카막 장치의 전체 구조도 및 b) 진공용기의 개념도. 토카막은 외각으로 부터 극저온용기(cryostat), 폴로이달 전자석(PFC), 토로이달 전자석(TFC), 진공용기(VV), 플라즈마 대향부품(PFC) 등으로 구성되어 있다. 진공용기는 단면이 유사 D형이며 배기, 중성입자입사 및 고주파가열, 각종 플라즈마 진단, 냉각수 도입 등을 위해 다양한 종류의 포트들을 가지고 있다. 90도마다 한 개씩 있는 대형 수직포트는 지지구조를 겹쳐도록 설계되어 있다.

장의 표피안에는 보강재들이 뼈대를 구성하고 있어 사용재료를 줄이면서도 충분한 기계적 강도를 발휘할 수 있다. 특히 중간에 물을 채워 중성자를 차단할 수 있고 뜨거운 기체를 흘려 용기를 가열할 수 있는 이점이 있다. 초전도 전자석을 쓰고 있는 KSTAR는 중성자에 의한 핵반응열이 초전도상태를 깨뜨릴 위험이 있어 충분한 차폐두께가 요구되므로 용기 바깥부분(중심축에서 먼 쪽)은 벽두께를 30 cm로 했다. 반면에 용기 중심축쪽

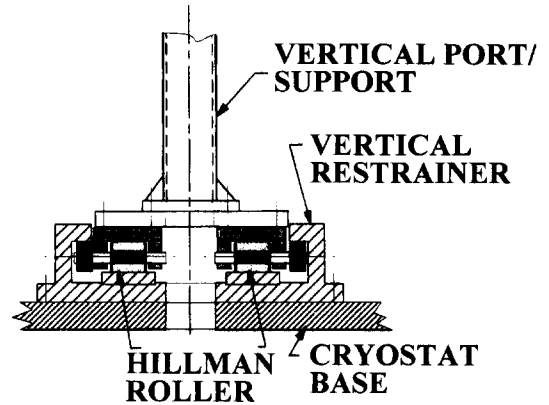


Fig. 2. 하단부 대형 수직포트는 포트 옆면에 용접되어 있는 지지판과 극저온용기를 관통해서 대기측으로 나가고 지지판은 지름방향으로는 이동이 가능하지만 상하로는 거의 구속되는 구조를 가진 힐먼롤러(Hillman roller)를 채용한 지지구조물위에 얹혀진다.

은 전자석설치 공간을 확보하기 위해 벽의 두께를 5 cm로 정했다.

용기는 90도 마다 1개씩 있는 대형 수직포트가 지지대를 겹쳐도록 설계되어 있다. 수직포트 중간에 수평판을 대고 그것을 구조물위에 올려놓는 방식을 취하고 있는데 이때 베이킹시 용기의 열팽창을 수용하기 위해 지름방향으로는 미끄러지고 다른 방향으로(상하 및 원주방향)는 움직임을 제한한 특별한 부품을 사용하는 것으로 계획되어 있다(Fig. 2).

주반경에 따라 두께가 변하는 이중벽 구조와 각종 포트들의 존재는 베이킹시 균일한 온도로 가열하는 것을 어렵게 만들 것으로 생각된다. 또 포트들은 현재 특별한 가열방식이 마련되어있지 않는데 만일 지지대로 사용하는 포트가 용기연결부와 지지판사이에 온도차가 있으면 비록 용기의 온도가 균일하게 올라간다고 해도 열팽창의 총합이 지지판을 기울어지게 하려고 할 가능성이 높고 따라서 지지판이 지름방향으로 원활하게 움직이리라고 기대할 수 없다. 더군다나 용기의 온도차체가 불균일하다면 이런 현상은 더욱 커질 것이다. 이런 이유들 때문에 용기와 지지대 겸용 수직포트에는 큰 열응력 발생이 우려된다.

이 논문에서는 용기온도분포를 열전달 계산결과에 의거해 모델화하고 최대값과 편차를 변화시키면서 온도 불균일에 의해 용기에 발생하는 열응력을 구하여 적절한 베이킹 조건을 찾아내고 수직포트의 온도차를 변화시켜 가면서 포트의 열응력을 구한 후 지지판을 곡면으

로 모델링하여 상하자유도를 부여할 때 과연 열응력이 감소하는가를 분석함으로써 지지구조물 개선방안을 제시하고 있다.

2. 토카막 진공용기의 진공특성 및 베이킹의 필요성

토카막에서 플라즈마는 토로이달 방전 단독으로 또는 전자공명(electron cyclotron resonance, ECR) 예비전리의 도움을 받아 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ Pa 영역에서 발생한다. 동작압력은 비록 낮은 고진공에 해당하지만 여러 가지 이유로 토카막의 기저진공도는 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa의 초고진공이 되지 않으면 안된다. 진공용기의 잔류기체는 일반적으로 H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 등으로 구성된다. 고진공 영역에서는 물이, 초고진공 영역에서는 수소가 주를 이루는 것이 보통이다. 토카막 진공용기에서는 수소(또는 수소 동위 원소)를 연료로 사용하므로 불순물(수소이외의 원소)의 농도를 1% 이하로 낮추는 것은 어렵지 않은 것으로 보인다. 이것은 물론 플라즈마가 없는 상태에서는 맞지만 토카막 운전중의 소위 뜨거운 진공(hot vacuum)상태에서는 플라즈마 입자 또는 방사파가 주변의 벽에 부딪히고 유도탈리(stimulated desorption)현상에 의해 많은 기체가 방출되는데 그 중에는 CO , CO_2 등이 정상시보다 많이 차지하고 있어서 불순물농도가 급격히 높아진다.

이들 불순물의 C 및 O, 또 스퍼터링(sputtering)에 의해 용기벽에서 떨어져 나온 Fe 분자등은 플라즈마 내에서 전리되어 수소 이온에 공급되어야할 에너지를 가로채고 여러 가지 형태로 전자파를 방사하여 에너지 손실을 일으킨다. 플라즈마 발생초기 온도가 낮을 때는(< 0.1 keV) 전리가 불완전하므로 전자의 여기와 천이에 의한 선방사(line radiation)가 강하고 온도가 어느정도 올라가면(≤ 1 keV) 재결합(recombination)방사가 강해지며 온도가 매우 높아지면(> 10 keV) 제동복사(Bremsstrahlung)가 증가한다[3]. 어떤 불순물이 완전히 전리되어 전하량이 Z이고 농도가 f라고 하면 연료입자수는 $1/fZ$ 만큼 줄어드는 반면 제동복사는 $1/fZ + fZ^2$ 만큼 커진다. 제동복사외에도 방사강도는 모두 원자번호 Z가 높을수록 커지므로 고-Z 물질의 유입을 극소화해야한다. 따라서 토카막용기가 초고진공에서 관리되지 않으면 깨끗한 플라즈마를 얻을 수 없고 플라즈마를 고온으로 가열하거나 더 나아가 열핵융합상태에 도달할 수 없다.

플라즈마중 불순물이온의 실질적 영향을 나타내는 파

라미터에 유효전하량 Z_e 가 있는데 $Z_e = 1 - \sum f_k \langle Z \rangle_k + \sum f_k \langle Z^2 \rangle_k$ 으로 정의된다. $\langle \rangle$ 는 어떤 온도에서의 평균값이고 첨자 k는 수소외의 다른 원소들을 나타낸다. 예를 들어 온도가 1 keV인 플라즈마중 산소와 탄소이온의 농도가 각각 2% 및 1%라면 이들은 완전히 전리되어 $\langle Z \rangle$ 가 8 과 6, $\langle Z^2 \rangle$ 이 64와 36이므로 Z_e 는 2.42로 계산된다. 차세대 토카막들은 Z_e 를 2이하로 낮추는 것을 설계기준으로 삼고 있다. 용기벽을 플라즈마에 가능하면 노출시키지 않고 내부에 베릴륨이나 탄소로 방호판을 설치하는 것은 고-열부하를 견디는 것 외에 Z_e 를 줄이려는 의도도 있다.

불순물은 결국 플라즈마 발생, 플라즈마의 안정성, 입자 및 에너지 밀폐 등에 악영향을 미치므로 이를 가능한 한 억제하지 않으면 안되지만 발생경로를 모두 완벽하게 차단하는 것은 쉽지 않다. 불순물은 연료기체와 가열용 중성입자빔에 들어 있을 수도 있고 공기 누설, 배기계로 부터의 역류로도 가능하지만 이들은 적절한 기구를 사용하고 세심하게 공정을 처리함으로써 충분히 억제할 수 있다. 그러나 용기벽으로 부터 나오는 불순물은 용기의 재료제조 및 가공공정에서 최선의 처리(진공야금, 무유 가공, 표면 에칭, 고온 굽기 등)를 한다고 해도 만족할 만큼 줄이는 것이 쉽지 않다.

이때 용기 베이킹과 방전세정이 용기조립후에도 지속적으로 용기벽의 불순물 농도를 낮추어 플라즈마로의 유입량을 줄이는 효과적인 방법이 될 수 있다. KSTAR 진공용기도 방전세정을 채택하는 것은 물론 $350^\circ C$ 에서 베이킹 하는 것으로 계획하고 있다. 용기 자체만은 사실 이런 온도까지 올리지 않아도 되지만 용기내에 설치된 PFC의 재료로 사용되는 탄소의 베이킹 온도와 형평을 맞춘다는 의미가 있다. 이런 온도까지 가열하는 방법으로 고온 질소를 용기 이중벽 사이로 흘려주는 방법과 저항가열 코일에 저주파 교류전류를 흘려 용기를 유도가열하는 방법을 생각하고 있는데 이들을 단독으로 또는 병행해서 사용할 때의 장단점을 비교하고 있는 단계다. 용기를 $350^\circ C$ 로 가열하는 데 약 10 시간이 소요되고 그 온도로 계속 유지하는 데 약 100 kW가 필요하리라고 예측된다.

3. 진공용기 베이킹시 예상되는 문제점

아무리 단순한 용기라도 전체를 노안에 넣고 가열하지 않는 한 균일한 온도를 얻는 것은 힘들다. 토카막의

토러스형 진공용기와 같이 삼차원적으로 매우 복잡하고 수많은 구멍과 부착물이 존재하는 경우 온도차가 발생하는 것을 피할 수 없다. 토러스형 진공용기는 중심축 쪽에 비해 주변경이 큰 바깥쪽이 원주길이가 긴 만큼 재료량이 많아서 같은 열량이 공급된다면 온도가 낮아질 수밖에 없다. 유도가열방식을 사용하는 경우도 원주길이가 긴 쪽은 일주저항이 커서 발열량 자체도 낮을 것으로 예견된다.

온도차 즉 온도기울기가 있다고 열응력이 발생하는 것은 아니다. 열응력은 온도상승에 의한 열팽창 때문에 발생하는 것이 아니라 늘어나야 할 것이 늘어나지 못할 때 또는 그 반대일 때 일어난다[4]. 예를 들어 평판이 있을 때 한쪽 면에 균일하게 열이 가해지고 반대쪽은 일정 온도로 냉각시키면 가열되는 표면에서 가장 온도가 높고 반대면에 이르기까지 거의 직선적으로 온도가 낮아지며 열팽창에 의해 판은 열이 가해지는 쪽으로 볼록하게 원형으로 휜다. 만일 두께방향으로 존재하는 임의의 온도분포에 따라 예상되는 열팽창의 양이 위와 같은 억제된 형상의 변형량과 맞지 않는다면 열응력이 발생하는 것이다. 덜 늘어난 부분(더 늘어나야 하는 부분)은 압축력을, 더 늘어난 부분(덜 늘어나도 되는 부분)은 인장력을 받는다.

단순한 물체의 경우 열응력은 온도기울기에 수직 방향으로 발생하지만 토카막 진공용기의 경우는 좀더 복잡한 양상이 된다. 예상하는 대로 토러스 용기의 중심축 쪽 온도가 더 높다면 열팽창의 결과 중심축 쪽 원주는 많이 늘어나고 주변경이 큰 쪽 원주는 적게 늘어나게 되어 용기의 폭이 열팽창은 커녕 실질적으로 줄어드는 현상이 일어난다. 이때 마치 수평방향으로 양쪽에서 누르는 것과 같은 힘이 작용하여 용기 하단부와 상단부에 꺾어짐과 휨응력이 발생한다.

만일 용기의 온도가 균일하다면 용기의 열팽창을 구속하지 않는 한 자체적으로는 응력이 발생하지 않는다. 이런 의미에서 지름방향으로의 자유도를 제한하지 않으며 상하에서 용기를 붙잡는 것은 피해야 한다. 그런데 비록 이런 조건을 만족한다고 하더라도 지지대(KSTAR의 경우 하부 대형 수직포트가 이를 겸하고 있다)에 수직방향으로 온도기울기가 존재하면 지지대에 큰 응력이 발생할 것으로 예상된다. 이것은 온도기울기 자체에 의한 것 보다 지지대를 포함한 용기전체의 열팽창의 결과 본래 수평으로 되어 있던 지지판이 수평에서 벗어나려고 하는 반면 구조물은 지지판을 계속 수평상

태로 붙잡고 있어서 막상 지름방향으로 원활하게 움직일 수 없게 만들기 때문이다. 더 정밀한 계산이 진행되고 있지만 지금까지의 열전달 계산에 의하면 KSTAR 진공용기에서는 베이킹을 위해 350°C로 가열하고자 할 때 100도 이상의 온도차가 생기는 것으로 나타나고 있어서 온도기울기, 지지구조물 구속조건 등 여러 파라미터에 의한 열응력의 크기 및 분포의 변화추세를 알아보는 것이 필요하다고 판단된다.

4. 열응력 계산

열응력계산을 위해 KSTAR 진공용기의 90도 모델을 만들고 가열 최대온도 범위를 350~250°C로 정한 후 용기의 최대온도값과 온도차를 몇가지 값으로 변화시키면서 ANSYS(5.3 또는 5.4)를 사용하여 응력을 계산했다(Fig. 3). 이때 온도의 영향만을 알아보기 위해 하부 대형 수직포트를 지지구조로 이용하는 현재의 설계개념과는 다르지만 용기의 중심축 쪽 적도면을 지지하면서 지름방향으로는 자유롭게, 반면 상하 및 원주방향으로는 움직이지 않는다는 구속조건을 사용했다. 또 수직포트의 용기쪽과 지지판쪽 온도차는 50도로 고정했다. 먼저 용기의 중심축 쪽과 바깥쪽 온도차가 50도일 때 최대온도값(용기중심축 쪽 직선원통부분)이 250~350°C로 변하면 최대응력은 160~180 MPa로 크게 차이가 나지 않으며 수직포트와 용기사이의 보강판 부분에서 발생한다(Fig. 3-a). 또 용기의 최대온도값은 250°C로 일정하고 용기온도차가 50~150도로 변하면 최대응력은 약 160~365 MPa로 점점 늘어난다(Fig. 3-b). 최대응력지점은 역시 수직포트와 용기의 경계부다. 이상의 계산결과는 용기온도의 절대적 크기보다는 온도차가 응력에 미치는 영향이 매우 큰 것을 말해 준다.

Table 1은 용기온도가 250°C로 균일하거나 또는 150도의 온도차가 있을 때의 두가지 경우에 수직포트의 상하 온도차가 변함에 따라 발생하는 응력과 변형량을 요약한 것이다. 특히 수직포트 하단부의 온도가 상온(35°C)일 때는 세가지 구속형태(하부 수직포트를 지지하는 경우, 적도면을 붙잡는 경우, 상하 수직포트를 모두 구속하는 경우)를 서로 비교했다. 이 표에서 우선 눈에 띄는 것은 지지판 온도를 35°C로 했을 때 발생하는 934 MPa의 엄청난 응력과, 용기의 온도차가 있을 때 오히려 이 값이 621 MPa로 줄어든다는 것이다.

앞절에서 이미 예상했듯이 수직포트를 지지대로 사용

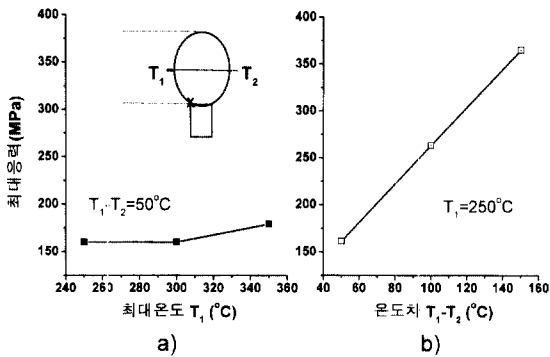


Fig. 3. 용기의 중심축쪽 적도면을 지지하는 경우 a) 용기에서 온도차(T_1-T_2)는 일정하고 최대온도(T_1)가 변할 때와, b) 용기의 최대온도는 250°C 이고 온도차가 변할 때 용기에 발생하는 최대응력값의 변화. 최대응력은 용기와 수직포트 경계부 근처에서 발생한다(X점).

하면서 지지판을 수평으로 만들고 상하움직임을 제한하면 수직포트 다리부분과 지지판에 큰 응력이 발생한다. 용기에 수직포트가 붙을 때 경계선은 종단면의 외형 즉, 유사 D 형의 일부가 된다. 이 경계선에서 수평인 지지판까지의 길이는 중심축쪽 보다 바깥쪽이 길게 마련이다. 수직포트의 온도도 용기온도와 같이 균일하면 열팽창후에도 지지판이 여전히 수평으로 유지되지만 그렇지

않다면 수직포트의 길이가 긴 쪽은 상대적으로 덜 늘어나 지지판이 들러 올라가려는 힘이 작용한다. 그러나 지지판은 여전히 상하로 구속되어 있으므로 수직포트 바깥쪽 정갱이 부분에 인장력이 걸린다. 이 힘의 크기는 용기의 전체적인 변형정도에 관계하므로 평균온도가 낮은 경우 오히려 줄어드는 것이다.

적도면을 붙잡는 경우는 수직포트를 지지할 때와 달리 수평방향으로의 이동을 제한하는 현상이 일어나지 않음에도 불구하고 상당한 수준의 응력이 남는 것도 발견할 수 있다. 이때 발생하는 응력은 용기에 존재하는 온도기울기에 기인한다. 용기몸체의 온도차가 150도일 때는 300 MPa에 가까운 큰 응력이 발생할 뿐만 아니라 용기몸체의 온도가 균일해도 수직포트의 온도차에 의해서 140 MPa대의 응력이 생겨 아직 무시할 수 없는 수준이다.

Table 1에서 용기온도가 $250\sim 100^{\circ}\text{C}$ 일 때 수직포트를 지지대로 삼는 경우와 적도면을 지지하는 경우 응력분포를 Fig. 4에서 비교했다. 전자는 수직포트 다리부분에, 후자는 용기하단부 수직포트와의 경계면 근처에 최대응력점이 있어 응력발생의 원인이 서로 틀린 것을 잘 설명해주고 있다. 또 Fig. 5는 용기온도가 $250\sim 250^{\circ}\text{C}$ 로 균일할 때 지지대 겸용 수직포트의 온도차가 0도에서 215도

Table 1. 용기 몸체온도가 250°C 로 균일하거나 150도의 온도차를 가질 때와 수직포트에 0~215도의 상하 온도차가 있을 때 용기에 발생하는 최대응력값과 최대변형량. 많은 계산결과들은 이미 탄성한계를 넘고 있으므로 상대적 판단기준으로만 사용해야 한다.

		용기 몸체온도(중심축쪽-바깥쪽)			
		250~250°C		250~100°C	
		최대응력 (MPa)	변형량 (mm)	최대응력 (MPa)	변형량 (mm)
250~35°C	지지위치 수직포트	934 (수직포트 다리)	18 (상단 수직포트)	621 (수직포트 다리)	19 (상단 수직포트)
	적도면	140 (용기 하단부)	14 (수평 포트)	286 (용기 하단부)	10 (상하단 수직포트)
	상하 수직포트	1630 (용기/수직포트 경계부)	15 (수평포트)		
수직포트 온도 (용기쪽-바깥쪽)	250~100°C	730	18 (상단 수직포트)		
	250~200°C	235	18 (상단 수직포트)		
	250~250°C	~0	21 (상단 수직포트) 19 (수평포트)		

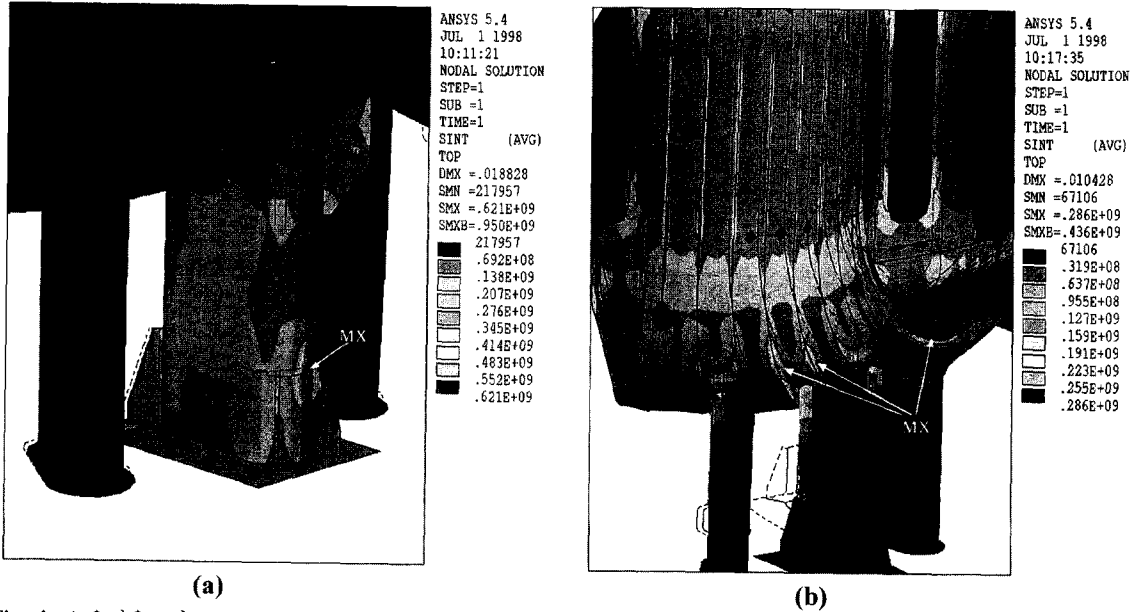


Fig. 4. a) 용기온도가 250~100°C로 변하고, 250~35°C의 온도 기울기를 갖는 하단 수직포트를 지름방향을 제외하고 구속했을 때 발생하는 응력분포. 포트 다리 아래부분에 최대응력집이 있다(화살표). 이 응력은 지지판이 용기의 열팽창을 잘 수용하지 못하기 때문에 발생한다. b) 용기온도가 250~100°C로 변할 때 안쪽 적도면을 지름방향의 자유도를 갖도록 구속했을 때 응력분포. 최대응력지점은 수직포트와의 경계면에서 가까운 용기에 발생한다(화살표). 이 응력은 주로 용기자체의 온도기울기에 기인한다. 여전히 300 MPa에 가까운 값이 되는 것에 유의.

까지 변하는 경우 최대응력을 그래프로 그린 것이다. 현재와 같은 지지구조에서는 응력이 온도차에 매우 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

열응력이 지지판의 구속조건에 의해 어떻게 달라질 수 있는가를 알아보기 위해 수직포트에 부착된 지지판

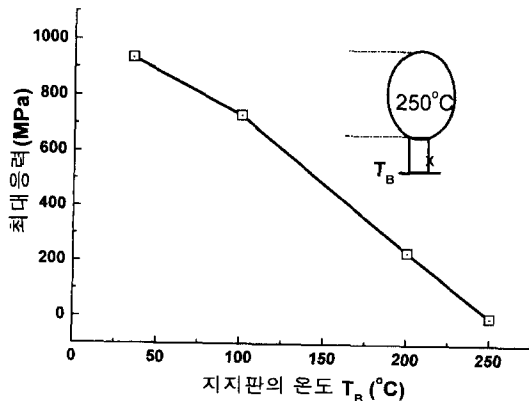


Fig. 5. 지지판의 온도(T_b)에 따른 최대응력의 변화. 최대응력지점은 지지대(수직포트)의 다리부분에 있다(X점). 지지판은 수평판이고 용기의 온도는 250°C로 균일하다.

에 수평과 수직자유도를 동시에 주는 방편으로 지지판을 수평판이 아니라 곡면판인 것으로 가정하고 회전가능하다는 구속조건하에서 응력을 계산했을 때 Table 2 또는 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 응력은 지지판의 곡률반경에 대해 정리했는데 곡률반경이 무한대인 것은 수평판에 해당한다. 이들 계산결과에 의하면 수직포트 온도차에 따라 최적 곡률반경이 존재한다. 이곳에 실지는 않았지만 변형량을 살펴보면 지지판이 수평방향으로 많이 움직여 열팽창을 잘 수용할수록 응력이 줄어드는 것을 알 수 있었다.

5. 계산결과의 검토

이상의 응력계산결과에 의하면 다음과 같은 사실들을 발견하거나 유추할 수 있다. (1) 온도가 모두 균일하고 포트를 직접 구속하지 않으면(용기 적도면을 지지하는 등) 응력이 발생하지 않는다. (2) 수직포트 온도가 직선적으로 변하고 구속이 없을 때 용기온도가 균일해도 용기와 수직포트 경계면에 백수십 MPa 정도의 응력이 생긴다. (3) 하단 수직포트를 지름방향으로의 이동을 제외

Table 2. 수직포트의 지지판이 지름방향(수평 지지판) 또는 회전(곡면 지지판)자유도를 가지고 있다고 가정했을 때 그 곡률에 따른 최대응력의 변화. 수직포트의 상하 온도차가 215도 및 150도인 두가지 경우를 비교했다. 곡률반경이 무한대인 것은 수평판에 해당한다.

	슬라이드 구속 형태	지지판의 곡률반경(m)				
		수평 지지판 (수평이동)	곡면 지지판 (수평+수직 이동)			
		∞	6	5	4	3
수직포트 온도	250~35°C	934 MPa	261 MPa		218 MPa	473 MPa
	250~100	730 MPa	248 MPa	244 MPa	276 MPa	

하고 상하로는 구속했을 때 용기의 온도가 균일해도 수직포트가 온도기울기를 가지고 있으면 그 크기에 따라 최대응력은 약 1000~0 MPa까지 변한다. (4) 포트를 아래위에서 모두 구속하는 경우는 포트와 용기의 경계부에 1500 MPa 정도의 응력을 피할 수 없다. (5) 용기에 250°C에서 100°C까지 변하는 온도 기울기가 있으면 수직포트의 구속과 상관없이 용기에 300 MPa 정도의 응력이 생긴다.

베이킹시 용기에 발생하는 응력을 최소화하기 위해서는 다음과 같은 방안이 있을 수 있다. (1) 수직포트의 어떤 온도 기울기에서 지지구조물에 적절한 패턴의 상하 자유도를 준다. (2) 용기의 적도면을 지지한다. (3) 용기 또는 지지구조물과 시스템 바다구조물과의 접촉길이를 최소화한다. (4) 용기몸체 및 수직포트에서 온도차를 줄인다. 이상의 방안들은 원리적인 것들로 설계에 어떻게 반영될 수 있는가 하는 것은 복합적인 요소들에 의해 좌

우된다. 플라즈마 대향부품(PFC)은 탄소의 효과적인 탈기체(degassing)를 위해 최소 350°C로 가열해야 하지만 만일 PFC의 지지구조가 PFC와 용기사이의 큰 온도차를 견디도록 설계된다면 용기의 베이킹 온도는 250°C 정도로 낮추는 것이 유리하다. 포트들에도 고온의 질소기체를 흘릴 수 있는 도관(또는 금속관 피복 전열선, micro-sheath heater)을 표면에 부착하고 또 가열이 불충분한 용기의 바깥쪽 몸체에도 추가로 이런 도관을 설치하여 온도차를 50도 이하로 줄이는 방안도 생각해볼 만하다.

특히 신경을 써야 할 부분은 지지구조물이다. 용기의 적도면을 지지하는 것이 가장 좋은 방법이지만 설치물들로 인해 여의치 않은 경우 용기하단부를 지지되 지지대가 지름방향으로 용기와(또는 지지판과 하부구조물 사이에) 넓게 접하는 것을 피하는 것이 바람직하다. 예를 들면 현재 지지판의 내귀통이에 각각 슬라이드 구조물이 부착되어 있는데 이를 지지판의 중앙에만 두 개 설치하는 것도 생각할 수 있다. 슬라이드와 상하이동이 모두 가능한 지지구조물에 대해서는 좀더 참신한 아이디어가 필요한 시점이다.

6. 결 론

KSTAR 토카막의 토러스 진공용기를 350~250°C로 베이킹할 때 용기에 발생하는 응력과 변형량을 계산했다. 응력은 용기온도분포의 불균일에 의한 부분과 지지대의 구조적 특성에 기인하는 부분으로 나눌 수 있었다. 용기 베이킹시 가열방식의 특성상 용기의 종단면에서 볼 때 중심축쪽으로 부터 바깥쪽으로 줄어드는 온도기울기가 존재하기 쉬운데 이는 용기 상단부 및 하단부에 휨응력을 발생시켰다. 용기의 적도면을 붙잡아 지지대에 의한 영향이 없는 경우에도 최대온도 250°C, 온도차

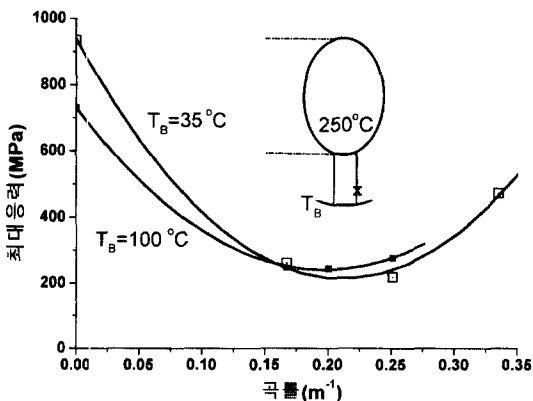


Fig. 6. 지지대(수직포트)의 상하 온도차 및 곡면으로 가정 한 지지판의 곡률에 따른 최대응력의 변화. 최대응력지점은 지지대의 다리부분에 있다(X점). 용기의 온도는 250°C로 균일하다.

150도에서 300 MPa 정도의 값을 가졌다. 참고로 용기재료의 허용 열응력은 280 MPa 정도다. 용기 하단부 수직 포트에 부착한 지지판을 지름방향으로만 움직이고 상하로는 구속했을 때 용기온도가 250°C로 균일한 경우에도 포트 상하의 온도차에 의해 1000 MPa에 육박하는 큰 응력이 수직포트 다리에 발생했다. 이는 지지판의 상하이동도 허용해야함을 보여주었다. 지지구조물의 설계를 혁신해야함은 물론 온도차를 50°C 이하로 줄일 수 있도록 적절한 용기 가열방식의 개발이 시급함을 알 수 있다.

참고문헌

1. J. C. Kim *et al.*, The KSTAR Tokamak, Preprint for 17th SOFE, SanDiego, USA (1997).
2. S. Y. Cho *et al.*, Conceptual design of KSTAR vacuum vessel, *ibid* (1997).
3. G. R. Hopkins and J. M. Rawls, *Nucl. Technol.* **36**, 191 (1977).
4. D. J. Johns, *Thermal Stress Analyses*, Pergamon Press, London, Ch.1 (1965).