

# KSTAR 진공용기 열 및 전자기력 하중에 의한 응력해석

조승연\* · 김종배\*\* · 허남일\* · 임기학\* · 사정우\* · 유인근\* · 김윤춘\*\* · 도철진\* · 권면\*

## Stress analysis of the KSTAR vacuum vessel under thermal and electromagnetic loads

S. Cho\*, J.B. Kim\*\*, N.I. Her\*, K.H. Im\*, J.W. Sa\*, I.K. Yu\*,  
Y.C. Kim\*\*, C.J. Do\*, and M. Kwon\*

**Key Words :** Electromagnetic loads (전자기력하중), vacuum vessel (진공용기), thermal loads (열하중), tokamak (토카막), bakeout (베이킹), plasma disruption (플라즈마 붕괴), eddy current (유도전류), halo current (환상전류), leaf spring (릿스프링), thermal shield (열차폐벽)

### Abstract

One of the principal components of the KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) tokamak structure is the vacuum vessel, which acts as the high vacuum boundary for the plasma and also provides the structural support for internal components. Hyundai Heavy Industries Inc. has performed the engineering design of the vacuum vessel. Here the overall configuration of the KSTAR vacuum vessel was briefly described and then the design methodology and the analysis results were presented. The vacuum vessel consists of double walls, several ports, leaf spring style supports. Double walls are separated by reinforcing ribs and filled with baking/shielding water. The overall external dimensions of the main body are 3.39 m high, 1.11 m inner radius, 2.99 m outer radius, and made of SA240-316LN. The vacuum vessel was designed to be capable of achieving the base pressure of  $1 \times 10^{-8}$  Torr, and also to be structurally capable of sustaining the vacuum pressure, the electromagnetic and thermal loads during plasma disruption and bakeout, respectively. The vacuum vessel will be baked out maximum 150 °C by hot pressurized water through the channels formed between double walls and the reinforcing ribs. A 3-D temperature distribution and the resulting thermal loads in the vessel were calculated during bakeout. It was found that the vacuum vessel and its supports were structurally rigid based on the thermal stress analysis. The maximum electromagnetic loads on the vacuum vessel induced by eddy and halo currents resulting from the engineering plasma radial and vertical disruption scenarios have been estimated. The stress analyses have been performed based on these electromagnetic loads and the resulting stresses at the critical locations of the vacuum vessel were within the allowable stresses.

#### 기호설명

- F : 열차폐벽 복사율 보정상수 (= 5)
- $h_i$  : 진공용기 내벽과 플라즈마 대향부품 사이의 복사 열전달계수 ( $W/m^2K$ )
- $h_{ii}$  : 진공용기 외벽과 열차폐벽 사이의 복사 열전달계수 ( $W/m^2K$ )

- $n_{MLI}$  : 열차폐벽 절연재 층 수
- $T_{CP}$  : 진공용기 외부 열차폐벽 온도 (= 300K)
- $T_{PFC}$  : 플라즈마 대향부품 온도 (K)
- $T_{VVI}$  : 진공용기 내벽 표면온도 (K)
- $T_{VVO}$  : 진공용기 외벽 표면온도 (K)
- $\epsilon_{MLI}$  : 열차폐벽 복사율 (= 0.1)
- $\epsilon_{PFC}$  : 플라즈마 대향부품 복사율 (= 0.1)
- $\epsilon_{VV}$  : 진공용기 복사율 (= 0.1)
- $\epsilon_i$  : 플라즈마 대향부품과 진공용기 내벽 사이의

\* 한국기초과학지원연구원

\*\* 현대중공업 (주)

등가 복사율 (= 0.1)

$\epsilon_{\text{eff}}$  : 열차폐벽과 진공용기 외벽 사이의 등가 복사율 (= 0.1)

$\sigma$  : Boltzmann 상수 (=  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

## 1. 서론

진공용기는 KSTAR 토카막 주장치 중에서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 진공용기는 생산된 플라즈마를 양질의 상태로 유지하기 위하여  $10^{-8}$  Torr 의 초고진공 상태이어야 하고 진공용기 내부에 플라즈마 대향부품(Plasma Facing Components, PFC)과 플라즈마 진단장치, 제어장치 및 기타 보조장치들을 지지하여야 한다. 진공용기 주위에는 진공배기, 플라즈마 가열 및 진단, 냉각수 및 가열 유체 유입 등의 목적으로 각종 포트(Port)들이 부착되어 외부로 연결된다. Figure 1 은 KSTAR 토카막 주장치 및 진공용기의 개념도이다.

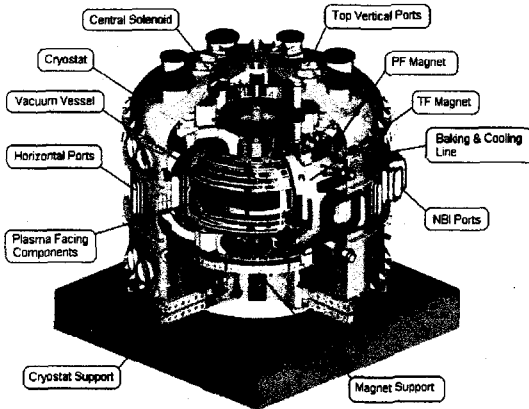


Figure 1 KSTAR tokamak main facility

진공용기의 여러 운전 시나리오 중에서 진공용기에 구조적으로 가장 큰 영향을 줄 수 있는 것은 플라즈마 붕괴조건과 베이킹 조건이다<sup>(1)(2)</sup>. 플라즈마 붕괴조건 하에서는 플라즈마의 비정상 가동 중에 막대한 크기의 유도전류 및 환상전류가 PFC와 진공용기 벽을 따라 흐르게 되는데, 이때 강한 자장 속에 들어 있는 진공용기 및 전도체에 전자 기력이 발생된다. 또한 진공용기와 내부의 PFC를 초고진공 상태로 유지하기 위해 표면의 불순물을 제거해야 하는데, 이를 위해 진공용기는 최대  $150^\circ\text{C}$ , PFC는  $300^\circ\text{C}$ 로 베이킹을 해야 한다. 진공용기는 이중벽 사이에 부착되어 있는 보강 리브

(Rib)에 의해서 형성된 유로를 통하여  $150^\circ\text{C}$ 의 가압온수를 흘려 가열한다. 이 때 진공용기는 외부와의 온도차에 의해서 내벽과 외벽, 그리고 포트 등에 발생하는 열응력을 견뎌야 하고, 열팽창은 진공용기의 지지구조물이 흡수하여야 한다.

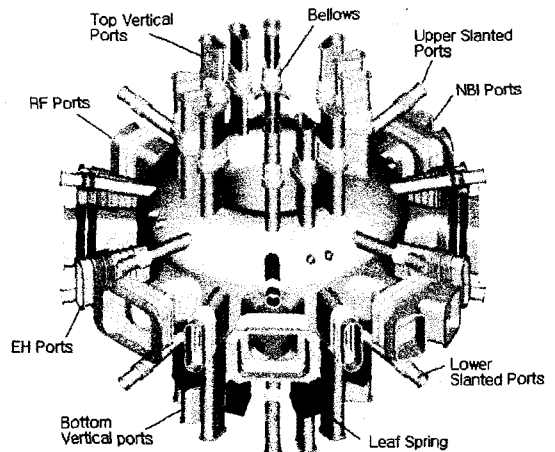
이러한 두 가지 운전조건에 대하여 진공용기의 구조적 안정성을 검토하기 위하여 다음 두 가지 측면에서 구조해석을 수행하였다.

- 1) 베이킹 조건의 열하중에 대한 진공용기의 열응력 해석
- 2) 플라즈마 붕괴조건 하중에 대한 진공용기의 응력해석

위에서 언급한 진공용기 응력해석을 수행하기 위하여 범용 유한요소해석 코드인 ANSYS R5.6을 사용하였다.

## 2. 진공용기의 구조형태

이중 벽 구조는 벽 사이에 보강 리브를 부착함으로써 용기를 경량화 하고 동시에 요구하는 구조강도를 얻을 수 있게 설계되었다. KSTAR 토카막 진공용기는 경마장 형상의 이중 벽 구조로 되어 있다. 벽 사이에 32개의 플로이달 리브가 원주방향으로  $11.25^\circ$  간격으로 부착되어 있고 2개의 토로이달 리브가 수평포트 상하로 부착되어 있다. 이중 벽 사이에는 플라즈마 발생 중에는 상온의 붕산수가 채워져 진공용기의 냉각과 중성자차폐 역할을 하고 베이킹 시에는  $150^\circ\text{C}$ 의 가압온수가 흘러 진공용기를 가열한다. 이중 벽 사이의 플로이달 리브가 유체의 유로를 형성한다. 진공용기의 구조 형상은 Figure 2와 같다.



(a) Isometric View

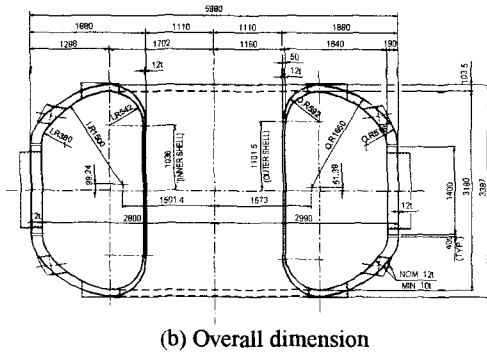


Figure 2 Configuration of the vacuum vessel

진공용기 주위에는 각종 포트들이 부착되어 외부로 연결된다. 수평방향으로는 NBI (Neutral Beam Injection) 포트 5개, RF (Radio Frequency) 포트 4개, EH (Enlongated Horizontal) 포트 7개, 수직방향으로는 눈물방울 형태의 포트가 위 아래로 각각 12개, 반경 방향으로 위 아래로 각각 8개의 PFC 및 진공용기 냉각/가열 포트가 부착되어 있다. 진공용기 지지구조 형태는 탄성지시대 형태인 릿스프링으로 진공용기 베이킹시 반경방향의 열팽창을 흡수할 뿐만 아니라 전자기력, 자중, 지진 하중에 의한 수평변위를 억제하는 역할을 하게 된다. 또한 베이킹이 끝났을 때 진공용기가 정확히 복원할 수 있게 해준다. 릿스프링의 재질은 용접성, 제작성, 투자율 등을 고려하여 진공용기와 같은 SUS 316LN 으로 선정되었다.

### 3. 플라즈마 붕괴 조건의 응력해석

#### 3.1 플라즈마 붕괴 시나리오

플라즈마 붕괴의 형태는 반경방향붕괴(Radial disruption)와 수직방향붕괴(Vertical disruption)로 구분된다. 반경방향붕괴는 플라즈마 밀도가 한계를 초과하거나 고정된 전자기장 내에서 플라즈마 압력을 정의하는 상수가 한계를 초과할 경우 플라즈마 형태가 거시적으로 변형이 생겨 평형상태가 깨짐으로써 발생한다. 수직방향붕괴는 중성입자 빔의 비균형적 입사나 플라즈마 형태의 상하 비대칭성에 의해 플라즈마가 동요를 받을 경우 수직방향으로 이동을 하게 되는데 제어코일이나 수동안전 PFC가 이를 제어하지 못할 경우 플라즈마는 수직방향으로 붕괴하게 된다<sup>(3)</sup>.

이와 같이 플라즈마가 붕괴할 경우 진공용기나 PFC에 토로이달 방향과 폴로이달 방향으로 막대

한 양의 유도전류와 환상전류가 흐르게 되고 강한 자장 속에 들어 있는 진공용기나 PFC에 전자기력이 발생된다. 이때 발생하는 전자기력을 계산하기 위해 다음의 4 가지 플라즈마 붕괴 시나리오를 가정하였다.

- (1) 반경방향 붕괴 시 발생하는 환상전류
- (2) 반경방향 붕괴 시 발생하는 유도전류
- (3) 수직방향 붕괴 시 발생하는 환상전류
- (4) 수직방향 붕괴 시 발생하는 유도전류

#### 3.2 전자기력 하중 계산

각 시나리오별 진공용기 및 PFC에 발생하는 전자기력은 전자기력 계산 코드인 SPARK<sup>(4)</sup>를 이용하여 계산되었으며 진공용기 내벽 전체에 Figure 3과 같이 분포된다. PFC에 걸리는 전자기력은 PFC 지지구조물을 통해 진공용기에 전해진다. PFC에도 막대한 크기의 전자기력이 발생하므로 이 힘은 진공용기에 관성력으로 적용된다.

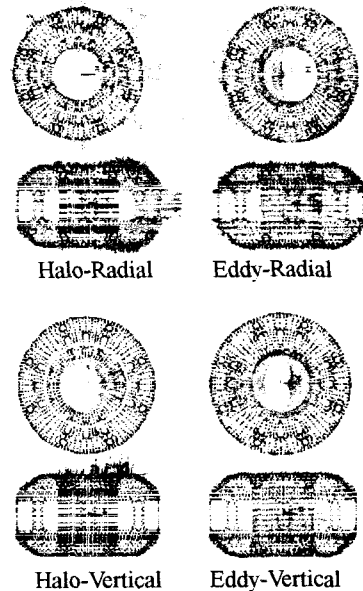


Figure 3 Distribution of electromagnetic loads on the vacuum vessel generated during plasma disruption

#### 3.3 전자기력 응력해석

이러한 하중을 바탕으로 ANSYS에서 선형해석을 수행한 결과 막응력 및 굽힘응력 등을 따로 제시할 수 있으나 보다 안전한 설계를 위하여 표면응력을 막응력과 굽힘응력의 합으로 평가하였다.

플라즈마 붕괴 시나리오 중 대표적인 경우인 수직 방향 붕괴 시 발생하는 유도전류에 의해 야기되는 전자기력에 의한 진공용기의 응력분포를 Figure 4에 나타내었다. 최대 국부 막응력이 186 MPa로 PFC의 수직 지지대와 진공용기와의 연결부위인 리브에서 발생하였다. 또한 KSTAR 진공용기는 주변 열차폐벽 및 초전도자석과의 간격이 매우 작을 뿐만 아니라 초전도 자석은 극저온 수축을 하기 때문에 주변 구조물과의 상호 간섭문제를 주의 깊게 고려해야 한다. 이러한 관점에서 진공용기의 변형 형태를 파악해야 하며 대표적인 시나리오에 대해 최대 변형량 및 최대 발생응력을 Table 1에 정리하였다.

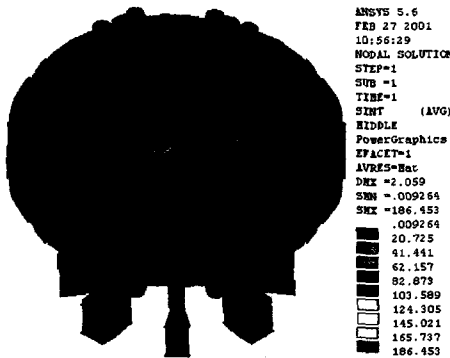


Figure 4 Stress intensity contour for electromagnetic loads generated due to eddy current during plasma disruption

Table 1 Maximum displacement and stress intensity due to electromagnetic loads (Eddy-Vertical)

Parts	Maximum Displacement (mm)	Stress Intensity (MPa)
Inner Shell / Rib	2.059	186.453
Outer Shell	2.000	125.812
Top Vertical Port	1.353	54.474
Upper Slanted Port	1.301	26.344
NBI Port	1.252	28.863
EH Port	1.267	36.825
Lower Slanted Port	0.877	12.413
Bottom Vertical Port	0.687	115.473
Leaf Spring/Base	0.398	32.395

#### 4. 베이킹 조건의 열전달 및 열응력해석

##### 4.1 베이킹 조건

진공용기와 내부 PFC는  $10^{-8}$  Torr의 초고진공 조건을 만족시키기 위해 표면의 불순물을 제거해야만 한다. 이를 위해 진공용기는 최대 150 °C, PFC는 300 °C로 가열하여 표면의 불순물을 분리시키고 진공펌프를 사용하여 불순물을 배출시킨다. 베이킹 조건에서 가장 우려되는 하중은 용기를 가열할 때 발생하는 열하중이다. 베이킹 하는 동안 열응력을 고찰해보기 위해서 먼저 정상상태 열전달 해석을 수행하여 용기의 온도분포를 계산하였고 다음으로 용기의 온도분포를 열하중으로 적용하여 정적해석을 수행하였다.

##### 4.2 열전달 해석

진공용기의 온도분포를 계산하려면 용기 주위의 경계조건을 알아야 한다. PFC와 진공용기 내벽 사이 및 진공용기 외벽과 열차폐벽 사이의 열전달은 모두 진공상태이기 때문에 대류는 없고 복사 열전달만 존재한다. 진공용기의 베이킹 시에는 열차폐벽 및 주변 온도가 상온인 것으로 가정하였다. 진공용기의 내부와 외부의 복사전열 계수는 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

- 1) PFC와 진공용기 내벽 사이 ( $h_I$ )

$$h_I = \frac{\sigma \cdot \epsilon_I \cdot (T_{PFC}^4 - T_{VVI}^4)}{T_{PFC} - T_{VVI}} \quad (1)$$

여기에서

$$\epsilon_I = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{VV}} + \frac{1}{\epsilon_{PFC}} - 1} \quad (2)$$

- 2) 진공용기 외벽과 열차폐벽 사이 ( $h_{II}$ )

$$h_{II} = \frac{\sigma \cdot \epsilon_{II} \cdot (T_{VVO}^4 - T_{CP}^4)}{T_{VVO} - T_{CP}} \quad (3)$$

여기에서

$$\epsilon_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_{VV}} + \frac{1}{\epsilon_{CP}} - 1\right) + n_{MLI} \cdot \left(\frac{2}{\epsilon_{MLI}} - 1\right)} \times F \quad (4)$$

진공용기의 이중 벽 사이에 흐르는 유체와 벽 사이의 전열계수는 유체의 물성과 유동속도에 따라 변동되며, 2차원 열전달 해석을 통해 주어졌다<sup>(6)</sup>. 열전달 해석에 적용된 열전달 미커니즘이 Figure 5에 나타나 있다. 이와 같은 경계조건을

기준으로 정상상태에서의 열전달해석을 ANSYS<sup>(7)</sup>를 이용하여 3 차원 모델로 확대하여 실시하였으며, 그 결과가 Figure 6 에서와 같이 진공용기의 3 차원 온도분포로 나타나 있다. 내벽과 외벽의 온도분포는 베이킹유체의 온도보다 높으며 특히 내벽의 온도는 진공용기 내부 PFC의 베이킹 온도에 의한 복사열 때문에 외벽보다 20 °C 가량 높게 나타났다.

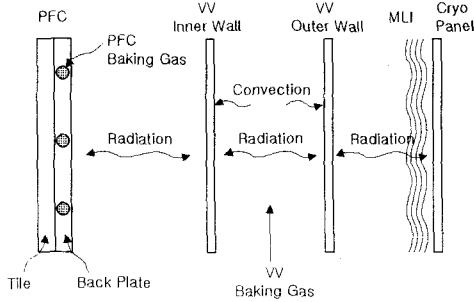
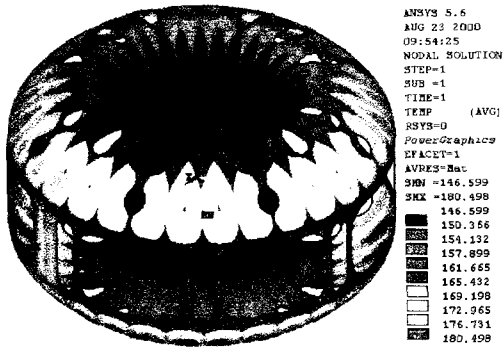
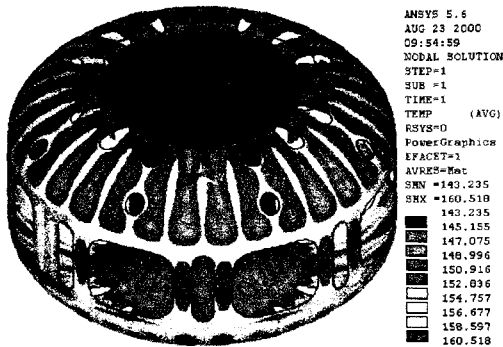


Figure 5 Heat transfer mechanism



(a) Inner wall



(c) Outer Wall

Figure 6 Temperature contour of vacuum vessel

### 4.3 열응력해석

열하중은 열전달해석 결과인 진공용기 표면 온도이며, 이 열하중에 의해 발생하는 응력은 이차 응력으로 막응력과 굽힘응력의 합으로 평가된다. 베이킹 조건에서 열하중에 따른 열응력해석 결과가 응력강도분포의 형태로 Figure 7 에 나타나 있다. 최대 170 MPa 의 이차응력이 진공용기 지지 구조물인 릿스프링과 바닥면과의 연결점에서 발견되었다. 이 응력은 베이킹 도중 열팽창에 의해 릿스프링의 굽힘현상에 의해 반경방향의 변위가로 인해 발생되었으며 허용응력인 347 MPa 보다 훨씬 낮다는 것을 알 수 있었다.

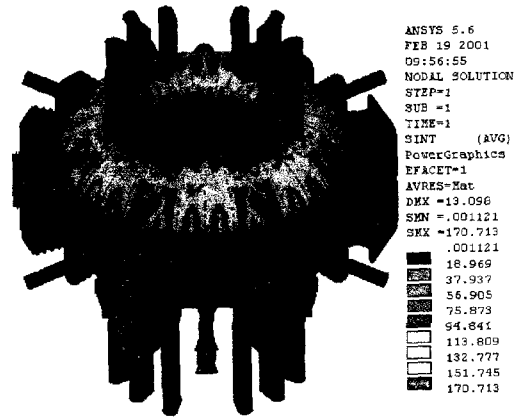


Figure 7 Stress intensity contour of vacuum vessel for thermal loads during baking state

베이킹 시 열팽창에 의한 변형량은 플라즈마 붕괴조건에 비해 상대적으로 크기 때문에 포트 끝단에 연결된 벨로우즈의 설계에는 열팽창에 의한 변형량이 고려되어야 할 것이다. Table 2 에는 베이킹시 진공용기의 각 부분별 최대 변형량 및 발생응력을 나타내었다.

### 5. 응력평가

설계의 적합성을 판단하는 요구조건 중의 하나는 계산된 응력강도가 ASME CODE 에 규정된 허용 응력강도를 초과하지 않아야 한다. 따라서 본 논문에서는 ASME CODE 의 Allowable Criteria<sup>(7)</sup>에 따라 응력강도를 평가하였다.

Table 2 Maximum displacement and stress intensity due to thermal loads

Parts	Maximum Displacement (mm)	Stress Intensity (MPa)
Inner Shell	10.857	103.766
Outer Shell	10.643	82.128
Top Vertical Port	12.621	33.554
Upper Slanted Port	13.098	52.269
NBI Port	11.454	22.735
RF Port	11.415	28.998
EH Port	11.382	36.137
Lower Slanted Port	9.206	53.823
Bottom Vertical Port	5.627	57.337
Leaf Spring	4.801	170.713

## 6. 결론

플라즈마 붕괴조건으로 4 가지 붕괴 시나리오가 제시되었으며 각 시나리오에 따라 전자기력을 계산하여 이를 바탕으로 응력해석과 변형량을 계산하였다. 제시된 4 가지 붕괴 시나리오 중 수직방향 붕괴 시 발생하는 유도전류(Eddy-Vertical) 시나리오에서 가장 큰 응력이 발생하였으나 허용응력을 초과하지는 않았다. 최대 응력은 예상대로 진공용기 내벽과 PFC 지지구조물과의 연결 부위에서 발생하였다. 이를 해결하기 위해서는 지지구조물 연결부에 보강 패드를 붙여서 작용하는 힘을 분산시켜 발생응력을 저하시킬 필요가 있다. 플라즈마 붕괴조건에서의 최대 변형량은 열팽창에 의한 변형량에 비하여 상대적으로 작은 값임이 발견되었다.

베이킹 조건에서도 열하중에 대한 응력해석과 변형량을 검토하였다. 이 경우 진공용기 지지구조물인 릿스프링에서 최대 응력이 발생하였으나 허용치보다 훨씬 작은 응력이 발생하였다. 베이킹 조건에서의 최대 변형량은 13 mm 로서 플라즈마 붕괴조건에서 보다 6 배 이상 큰 변형이 일어나는 것을 알 수 있었다. 따라서 포트 벨로우즈 설계 시 열팽창에 의한 변형량이 고려되어야 할 것이다.

## 후 기

이 연구는 과학기술부가 주관하는 특정연구사업 (KSTAR Project)의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 인상렬, 윤병주, 조승연, 1998, "KSTAR 진공용기의 베이킹시 열응력 해석, 한국진공학회지 8(4), pp. 285-292.
- (2) S. Cho, B.J. Yoon, J. Kim S.R. In, J.Y. Kim, J.H. Park, T.G. Brown, N.I. Her, H.S. Kim, K.H. Im, L. Sevier and the KSTAR Team, 1998, "Design and Analysis of KSTAR Vacuum Vessel", Proceedings of the 20<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology, Marseille, France, Sep. 7-11, pp. 1733-1736.
- (3) J.Y. Kim and S. Cho, 2000, "Disruption Load Analysis on KSTAR PFC structure", J. Accel. Plasma Res. 5, pp. 149-152.
- (4) D.W. Weissenburger, 1988, Spark version 1.1 User Manual, Princeton Plasma Physics Laboratory, Report No. PPPL-2494.
- (5) A.K. Mills, 1995, "Heat and Mass Transfer", Richard D. Irwin, Inc..
- (6) 이강희, 임기학, 허남일, 인상렬, 조승연, 1999, "KSTAR 진공용기 및 플라즈마 다항부품에 대한 베이킹 해석", 한국진공학회지 Vol. 8, No. 4(1), pp. 397-402.
- (7) ANSYS, Inc. 201 Johnson Road, Houston, PA15342, USA.
- (8) The American Society of Mechanical Engineers, 1998, Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division II - Alternative Rules.