

KSTAR 저온진공용기 구조해석

허남일, 김형섭, 조승연, 임기학, KSTAR 설계팀
기초과학지원연구소

A Structural Analysis of the KSTAR Cryostat

N. I. Her, H. S. Kim, S. Cho, K. H. Im, and the KSTAR Project Team
Korea Basic Science Institute

hni@comp.kbsi.re.kr

Abstract - KSTAR cryostat is a large vacuum vessel that provides the necessary thermal barrier between the ambient temperature test cell and the liquid helium cooled magnets. In this work, the structural analyses for the cryostat under the normal operation condition were performed. As a result, it turns out that the vessel would be safe when it is exposed to normal operation loads, such as system weight, vacuum pressure, and plasma vertical disruption load. And, the preliminary result on the modal analysis is presented.

1. 서 론

KSTAR 핵융합 실험장치의 저온진공용기(cryostat)⁽¹⁾는 초전도자석의 열손실을 줄이기 위해 초전도자석 주위에 진공 벽을 형성하는 구조물로서, 저온진공용기 본체, 포트 관통부, 열차폐막(thermal shield), 지지구조물로 구성된다.

저온진공용기 본체는 진공용기와 초전도자석의 정적/동적 하중을 지지하는 주 구조물로서, 원형실린더 구조물에 돔 형상의 상부구조물과 판 형상의 하부구조물이 플랜지에 의해 조립된 형상을 하고 있으며, 진공, 진단, 가열, 냉각 등을 위한 많은 포트들이 관통하게 된다. 이 포트 관통부는 진공용기의 전자기력에 의한 동적거동과 베이킹 시 열팽창을 고려하여 metal bellows를 이용한 유연구조 설계가 이루어지고 있다. 용기본체 내벽에는 초전도자석으로 들어오는 외부 복사열을 차폐하기 위해 GHe를 이용한 80K shield panel과 MLI(Multi-Layer Insulation)가 설치될 것이며, 용기의 하부구조물이 놓여지는 지지구조물은 G10 판을 이용하여 콘크리트바닥과 전기적으로 절연시킬 것이다.

저온진공용기는 운영 중 시스템 하중, 진공압

력, 전자기력, 지진하중 등의 큰 하중 작용이 예상되며, 구조 설계 시 하중의 정확한 예측과 안전을 고려한 엄격한 설계규격 적용이 요구된다. 현재 진행중인 KSTAR 저온진공용기 설계는 ASME B&PV 규격에 근거한 TPX 설계규격⁽²⁾이 적용되고 있다.

본 논문에서는 KSTAR 저온진공용기의 운영 중 하중조건에 대한 응력해석과 좌굴해석을 통해 구조적 안정성을 고찰하였으며, 모달해석을 통해 저온진공용기의 진동 특성을 파악하였다.

2. 저온진공용기 설계

2.1 설계조건

저온진공용기는 5×10^{-5} Torr 이하의 진공압력, 2×10^{-4} Torr-l/s 이하의 누설률(leak rate), 2.2×10^{-2} Torr-l/s 이하의 탈가스율(outgas rate), 진공압력 및 전자기적 하중에서 안정, 진공용기 및 초전도자석 하중지지, 상온에서 동작, 복사열 차폐를 위한 열 차폐막 설치, 유연한 포트 연결구조, 콘크리트 바닥과 전기적 절연 등의 설계조건을 만족해야 한다.

2.2 저온진공용기 본체 설계

저온진공용기 본체는 Fig.1과 같이 높이 10 m, 직경 9 m, 두께 30~50 mm이고, 전체 무게가 150톤에 달하는 대형진공용기로서, 플랜지가 부착된 원형실린더 구조물과 상/하부 구조물로 제작될 것이다. 구조물의 조립은 진공 씰(seal)과 장치의 유지/보수 편의를 위해 viton o-ring 또는 용기 내부에서 진공 용접하는 방법이 이용될 수 있다.

용기본체의 상부구조물은 높이 2.4 m, 두께 30 mm의 돔 형상 구조물로서, 중앙에 작업자 통로용 홀과 진단용 수직 포트가 가공될 것이다. 원형실린더 구조물은 내경 8.8 m, 높이 5.5 m, 두께 30 mm의 원통 셸 구조물이며, 진단용, 플라즈마 인접벽 부품 냉각용, 진공용기 가열/냉각용, 플라즈마 가열용 포트들이 가공되고,

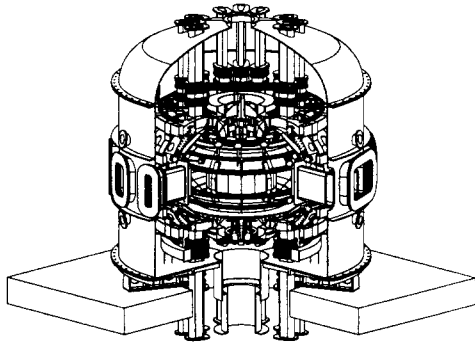


Fig.1 Isometric view of KSTAR system

용기 외부 포트 상/하부에 2개의 원주방향 보강재가 용접될 것이다. 하부구조물은 두께 50 mm의 판 형상 구조물로서, 구조물의 중앙에 CS코일(Central Solenoid Coil)을 위한 직경 2 m의 홀과 진단용 수직포트들이 가공될 것이다. 판의 외부에는 원주 및 반경방향 보강 립(rib)이 용접되고, 내부에는 진공용기와 초전도 자석의 하중을 지지하는 지지판(bearing plate)이 부착될 것이다. 그리고 하부구조물은 등간격으로 설치되는 8개의 지지구조물에 용접되어 콘크리트 바닥에 고정될 것이다.

2.3 설계기준

KSTAR 저온진공용기 설계는 TPX 구조 및 저온설계 규정집에 근거한 하중과 하중조합조건을 적용할 수 있다. 설계에 사용되는 Design Tresca Stress (S_m)는 stress intensity와 같은 값이며, 저온진공용기의 S_m 은 항복강도(yield strength) 값의 2/3을 사용한다. 허용응력은 발생하는 주응력 성분들과 조합하중의 조건에 따라 Table 1과 같이 결정될 수 있다. 그리고 좌굴하중에 대한 안전계수는 5이다.

Table 1. Basic stress intensity limits

Stress intensity	Allowable stress
General primary membrane(P_m)	1.0K S_m
Local primary membrane(P_l)	1.5K S_m
Primary membrane plus bending($P_l + P_b$)	1.5K S_m
Primary plus secondary($P_l + P_b + Q$)	3.0K S_m

Normal operation condition : $K=1.0$

Anticipated condition : $K=1.1$

Unlikely condition : $K=1.2$

Extremely unlikely condition : $K=1.35$

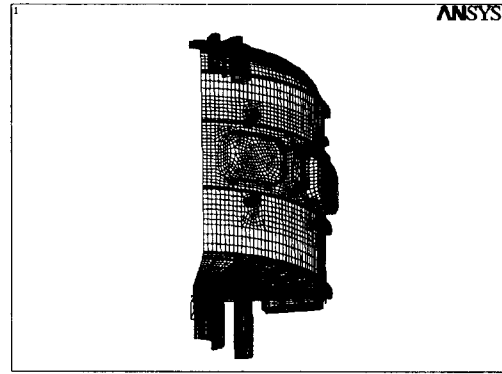


Fig. 2 FEM model for static analysis

3. 구조해석

3.1 해석모델

정상운전조건에서 저온진공용기의 구조적 안정성 평가를 위하여 ANSYS 코드를 이용한 응력해석이 수행되었다. 모델링에 사용된 요소는 4-절점 쉘 요소로서, 구조물의 원주방향 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 90도 축대칭 모델로 모델링하였으며, 해석의 편의를 위해 구조물의 립, 플렌지 연결부, 지지구조물 등은 고정된 것으로 가정하였다. 계산에 사용된 SUS304 계통 재료의 Young's modulus는 200 GPa 이었고, Poisson's ratio는 0.3이었다.

본 해석에서 고려한 하중들은 정상운전조건에서 작용할 수 있는 하중조합으로서, 각각의 하중 크기는 Table 2와 같다. 플라즈마 인접벽 부품, 진공용기, 저온진공용기, 초전도자석의 자중이 시스템 하중으로 작용될 것이고, 수직방향 플라즈마 이상거동(disruption)에 의한 전자기력이 진공용기가 구속되는 용기본체 하부구조물에 상방향 또는 하방향으로 작용될 것이다. 그리고 저온진공용기 본체에는 용기 표면과 수직 방향으로 1기압에 해당하는 0.1 MPa의 진공압력이 작용할 것이다. 온도에 의한 영향은 vessel이 상온에서 동작되므로 무시하였고, 진공용기와외 간섭 하중도 포트들이 bellows로 연결되기 때문에 무시하였다.

3.2 허용응력

저온진공용기 본체는 일반 용접구조물로 분류되며, SUS304 재료의 S_m 은 138 MPa을 이용할 수 있다. Table 1.에 보여지듯이 허용응력은 정상운전조건인 $K=1$ 을 적용하여 주응력 성분에서 계산될 수 있으며, P_m 의 경우 1.0K S_m 인 138 MPa을 초과할 수 없으며, P_l 과 $P_l + P_b$ 의 경우 1.5K S_m 인 207 MPa을 초과할 수 없다. 따라서 평평한 형상을 갖는 하부구조물이나 포트 연결부에서는 207 MPa이 허용응력으로 사용될 수 있고, 포트 연결부를 제외한 돔 형상의 상부구조물과 원형실린더 구조물

의 경우 138 MPa이 사용될 수 있다.

ASME B&PV 규정집에는 구조물 설계에 대한 변위 임계값은 언급되어 있지 않다. 그러나, 포트에 의해 진공용기와 연결되는 본 해석모델의 경우 허용응력 이하에서도 포트부에 대변형이 발생할 수 있으므로, 인접 시스템과의 간섭을 고려하여 변위 임계값을 결정해야 할 것이다.

3.3 응력해석

Cryostat은 정상운전 중 Table 2와 같은 하중 발생이 예상되며, 이 하중조건들을 이용하여 용기제작 후 진공시험조건, 시스템 운용을 위한 진공배기조건, 시스템 정상운용조건에 대한 구조해석을 수행하였다.

저온진공용기 제작 후에 요구되는 진공시험은 내부 시스템이 설치되지 않은 상태에서 수행될 수 있으며, 작용하중은 저온진공용기 본체의

Table 2. Loads used in the analysis

Load	Position	Values
Vacuum vessel, plasma facing component, cooling water weight	Base structure (Hillman roller)	80ton
Magnet weight	Base structure (Support structure)	300ton
Plasma vertical disruption	Base structure (Hillman roller)	150ton
Vacuum pressure	Cryostat vessel	0.1MPa
Cryostat weight	Cryostat vessel	9.8m/s ²

Table 3. Static analysis results

Load	Stress intensity(MPa) /displacement(mm)
Vacuum pressure +cryostat weight	113 / 1.6 at cylinder 53 / 1.8 at base 77 / 2.0 at top
Vacuum pressure +system weight	113 / 1.6 at cylinder 39 / 0.2 at base 77 / 2.0 at top
Vacuum pressure +system weight +plasma upper vertical disruption	113 / 1.6 at cylinder 78 / 2.2 at base 77 / 2.0 at top
Vacuum pressure +system weight +plasma lower vertical disruption	113 / 1.6 at cylinder 30 / 0.9 at base 77 / 2.0 at top

자중과 진공압력이 될 것이다. 해석결과, 진공압력의 영향으로 원형실린더 구조물의 포트 연결부에서 최대응력 113 MPa이 발생하였고, 상부 구조물의 수직포트에서 최대변위 2 mm가 발생하였다. 하부구조물에서의 응력과 변위는 작은 값이었다.

시스템 운용을 위한 진공 배기 중 예상되는 하중은 시스템의 모든 자중과 진공압력이 될 것이다. 해석결과, 용기 제작 후 진공시험의 경우에서처럼 원형실린더 구조물의 포트 연결부에서 최대응력이 발생하였고, 상부구조물의 수직포트에서 최대 변위가 발생하였다. 하부구조물의 응력과 변위는 진공압력과 반대 방향으로 작용하는 시스템 자중의 영향으로 작은 값이었다.

정상운전조건에서 저온진공용기에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 전자기력은 수직방향 플라즈마 이상거동에 의한 진공용기의 상/하방향 수직하중이며, 진공용기 지지구조물을 통해 저온진공용기 하부구조물에 전달될 것이다. 이 하중은 시스템의 정상운용 중 쉽게 발생할 수 있으며, 진공압력, 시스템 자중과 함께 저온진공용기에 영향을 미칠 것이다.

상방향 플라즈마 이상거동에 의한 하중이 작용하는 경우, 원형실린더 구조물과 상부구조물의 응력과 변위는 진공압력의 영향으로 앞의 두 경우 같은 결과가 계산되었다. 그러나 이상거동 하중이 작용하는 하부구조물에서 78 MPa의 응력이 발생하였고, 수직포트부에 2.2 mm의 변위가 발생하였다.

하방향 플라즈마 이상거동에 의한 하중이 작용하는 경우도 상방향 플라즈마 이상거동의 경우와 같이 원형실린더 구조물과 상부구조물에서 같은 크기의 응력과 변위가 계산되었으나, 하부구조물에서의 응력과 변위는 상방향 플라즈마 이상거동의 경우에 비해 작은 값이었다.

이상의 하중조합을 고려한 응력해석 결과, 상부구조물과 원형실린더 구조물에는 진공압력이 가장 큰 영향을 미치고 있었으며, 하부구조물에는 시스템 자중, 진공압력, 상/하방향 플라즈마 이상거동에 의한 하중들의 작용 조건에 따라 응력 및 변형량이 다소 차이가 있었다. 그러나 발생된 최대응력은 허용응력 이하였으며 변위량도 작은 값이었다. 이상의 정적해석 결과가 Table 3.에 요약되어 있다.

3.4 좌굴해석

정적해석에 사용되었던 모델의 진공압력에 대한 선형좌굴해석이 수행되었다. 최초 좌굴이 상부구조물에서 발생하였으며, 임계 좌굴계수 보다 큰 좌굴계수 22가 계산되었다. 따라서 KSTAR 저온진공용기는 좌굴에 안정할 것으로 예측된다.

4. 모달해석

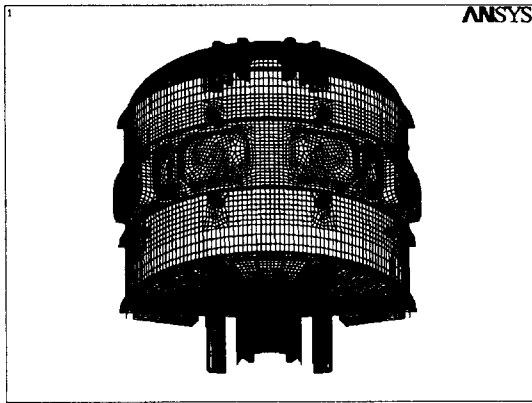


Fig. 3 FEM model for modal analysis

4.1 해석모델

저온진공용기는 지진을 비롯한 시스템외부 진동과 시스템 내부 진동 환경에 항상 노출되어 있으며, 가진 주파수가 구조물 자체의 고유진동수와 일치될 경우 공진이 발생하여 시스템에 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 지진과 같은 저주파수 진동의 경우 대형 구조물에 치명적일 수 있으므로, 설계 시 모달해석을 통한 시스템 진동특성 규명과 진동 대책 설계가 요구된다.

모달해석을 위해 Fig.3과 같이 저온진공용기를 유한요소로 모델링하였으며, 콘크리트 바닥에 고정되는 지지구조물 하부가 완전 구속된 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 SUS304 재료의 물성은 응력해석의 경우와 같다.

4.2 해석결과

모달해석 결과 Table 4와 같은 고유진동수 및 모드형상(mode shape)이 계산되었다. 1차 고유진동은 27.56 Hz에서 상부구조물 수직포트 변형과 원형실린더 구조물 상부가 전체적으로 변형되는 모드를 보였다. 이러한 진동 모드는 수직포트 연결부와 진단작업 등에 영향을 줄 것으로 예상된다. 2차 고유진동은 1차 고유진동과 유사한 진동수에서 하부구조물의 포트가 변형되는 모드가 계산되었다. 3차 고유진동은 상부구조물의 수직포트와 원형실린더 구조물이 변형되는 모드가 얻어졌으며, 4차 고유진동은 하부구조물의 중앙 홀과 수직포트가 변형되는 모드가 계산되었다. 하부구조물의 진동 모드는 상부구조물에서와 같이 수직포트 변형을 유발시키므로 설계 시 이에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

본 모달해석과 연계하여 시스템 자중을 고려한 저온진공용기의 지진해석이 수행될 예정이며, 해석 결과 시스템에 큰 영향을 미칠 수 있는 변형이 발생할 경우 보강설계가 이루어질 것이다.

Table 4. Modal analysis results

Mode No.	Natural frequency (Hz)	Mode shape
1	27.56	Top structure (vertical port), cylindrical structure (vessel)
2	27.63	Base structure (vertical port)
3	39.76	Top structure (vertical port), cylindrical structure (vessel)
4	40.26	Base structure (central hole & vertical port)

5. 결 론

본 연구에서는 KSTAR 저온진공용기의 구조적 안정성 고찰을 위해 운전 중 하중조건에 대한 응력해석과 좌굴해석이 수행되었다. 그 결과 발생된 최대응력이 허용응력 범위 내에 있었으며 변형량도 무시할 만큼 작았다. 따라서 본 구조물이 정상운전조건에서 안정함을 알 수 있었다. 그리고 모달해석을 통해 저온진공용기의 진동특성을 파악하였으며, 해석결과는 내진설계 자료로 활용될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] KSTAR Project Team, "Design Description Document WBS 15 Cryostat", KSTAR Tokamak System Engineering Review Documents, pp.605~622, 1997
- [2] I. Zatz, "TPX Structural and Cryogenic Design Criteria", 1995
- [3] D. Ravenscroft, "TPX WBS 15 Cryostat SDD", 1993
- [4] 허남일, 김형섭, 김진춘, 조승연, 이경수, KSTAR 설계팀, "KSTAR 저온진공용기 설계 및 구조해석", 기계학회추계학술대회논문집 A, pp.464~469, 1998