

초전도자석 지지각 설계 및 구조해석

허남일, 도철진, 사정우, 조승연, 임기학, KSTAR 설계팀
기초과학지원연구소

A Design and Structural Analysis of the Superconducting Magnet Supporting Post

N. I. Her, C. J. Do, J. W. Sa, S. Cho, K. H. Im, and the KSTAR Design Team
Korea Basic Science Institute

hni@comp.ksbi.re.kr

Abstract - The Superconducting magnet supporting post of the KSTAR system is a flexible structure that absorbs thermal shrink of the superconducting magnet and also a rigid structure that supports the weight of the magnet and dynamic loads. In this work, a structural analyses for the post under the loads were performed. As a result, it turns out that the post would be safe when it is exposed to the loads, such as magnet weight, thermal contraction, and plasma vertical disruption load. And, Buckling and modal analysis results of the post are presented.

1. 서 론

KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석 지지구조물은 1개의 magnet supporting ring과 8개의 지지각(supporting post)으로 이루어진 구조물로서, cryostat base structure와 TF coil 사이에 설치되어 초전도자석의 하중을 지지해야 한다. 이 지지구조물은 액체헬륨 온도로 운전되는 초전도자석의 열손실을 최소화시키면서 구조적으로는 약 300ton에 이르는 초전도자석의 자중과 plasma disruptions에 의한 동적 하중을 지지해야 하고, 초전도자석의 극저온 수축에 의한 열변형을 흡수할 수 있도록 설계되어야 한다. 이러한 설계요구조건을 고려하여 4.5K 온도의 magnet supporting ring과 4.5-300K의 온도 구배를 갖는 지지각 설계가 이루어지고 있으며, 특히 지지각 구조재로서 SUS316 외에 극저온에서 단일 및 구조강도 특성이 우수한 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) plate 사용을 고려하고 있다.

본 연구에서는 개념설계 시 수행되었던 지지각의 구조해석 결과와 현재까지 진행되어온 구조설계 내용을 정리하였다.

2. 지지각 설계

2.1 설계조건

초전도자석 지지각은 초전도자석의 자중을 지지해야 하고, 초전도자석 냉각 시 열 수축변형을 흡수해야 하며, plasma disruption 시 초전도자석에 인가되는 동적 하중과 지진하중에서 안정되도록 설계되어야 한다. 그리고 제한된 설계공간에서 극저온의 초전도자석 열손실을 최소화시켜야 하며, 5×10^{-5} Torr의 cryostat 진공요구조건을 만족하도록 탈가스율(outgassing rate)을 고려하여 설계되어야 한다.

2.2 구조 설계

초전도자석 지지각은 Fig. 1과 같은 형상을 하고 있으며, 높이 1m, 가로와 세로가 각각 0.8m이다. 조립 시 지지각은 주장치 중심으로부터 2.6m되는 지점에 등 간격으로 설치될 것이다. 지지각은 magnet supporting ring과 볼트 체결되는 4.5K 온도의 SUS316 upper block, 4.5-80K 온도의 inner CFRP plate, 80K 온도의 SUS316 lower block, 80K 온도의 SUS316 plate, 80K 온도의 SUS316 thermal anchor block, 80-300K 온도의 outer CFRP plate, cryostat base structure 상부의 bearing plate에 볼트 체결되는 300K 온도의 SUS316 block, 80K와 300K 온도의 SUS316 strengthen plate, 그리고 80K thermal anchor block 상부의 80K cooling module로 구성된다.

단열재료로 사용되는 CFRP 적층판은 SUS316 block 사이에서 핀으로 체결되며, CFRP 적층판의 핀 구멍 내부에는 CFRP의 마모 방지와 균일한 하중인가를 위해 SUS316 부시를 삽입하였다. Inner CFRP plate는 두께 20mm plate 4장으로 구성되고, outer CFRP plate는 각각 2장으로 구성된다. 그리고 초전도자석의 조립 후 이 plate에 작용하는 주요하중은 압축하중이 될 것이다.

SUS316 plate는 초전도자석 냉각 시 굽힘 변형에 의해 초전도자석의 수축 변형을 흡수하도록 두께 6mm plate 4장을 각각 적층하였다. 초전도자석의 수축 변형 이외에 이 plate에 작용하는 주요 하중은 자석의 자중과 plasma disruption에 의한 인장하중이 될 것이다.

Thermal anchor block 상부에 부착되는 80K cooling module은 구리 block과 구리 pipe로 구성되며, 60K의 GHe 냉매를 이용하여 thermal anchor block의 온도를 80K로 유지시키는 역할을 할 것이다. 운용 중 이 모듈에 요구되는 냉각용량은 outer CFRP plate의 전도와 복사 열전달에 의해 thermal anchor block에 유입되는 에너지와 같으며, 한개의 지지각에 대해 계산된 에너지는 약 60W이다.

Strengthen plate는 초전도자석의 수직하중 작용 시 thermal anchor block 및 300K SUS316 block의 변형 방지를 위해 부착되는 보강판으로써, outer CFRP plate에 작용되는 굽힘하중을 최소화시키고, 주요 작용하중이 수직하중이 되도록 할 것이다.

2.3 설계기준

극저온 구조물에 대한 설계규격은 현재 존재하지 않으며, 본 설계에서는 ASME B&PV code의 응력평가 기준을 근거로 작성된 TPX 구조 및 저온설계 규정집을 적용하였다[2]. 설계 기준으로 Design Tresca Stress (S_m)를 사용하며, 각 온도에 따른 S_m 은 각 온도에서의 항복강도(yield strength) 또는 극한강도(ultimate strength)로부터 구할 수 있다. 일반적으로 SUS316 재료의 경우, 온도에 따른 재료 물성이 주어져 있으며, 이 값을 이용하여 응력해석 및 평가를 할 수 있다. 그러나, CFRP plate의 경우는 상온에서의 물성치만 존재하며, 극저온에서의 물성치는 유사 재료에 한해 제한적으로 존재한다. 따라서 본 해석에서는 CFRP plate의 정확한 해석은 불가능하였으며, 단지 유사 재료의 극저온 물성치를 계산에 사용하였다[3],[4]. 추후 CFRP의 온도 및 이방성 특성을 고려하여 정확한 해석이 수행되어야 할 것이다.

3. 구조해석

3.1 해석모델

지지각 1개에 대한 구조안정성 평가를 위하여 ANSYS 코드를 이용한 응력해석이 수행되었다. Fig. 2와 같이 3-D shell element를 사용하여 SUS316 plate, CFRP plate, strengthen plate를 모델링하였고, 그 밖의 SUS316 구조물은 3-D solid element를 사용하였다. 핀에 의해 체결되는 SUS316 plate 및 CFRP plate는 해석의 편의를 위해 rigid하게 연결된 것으로 가정하여 모델링 하였으며, 핀 설계를

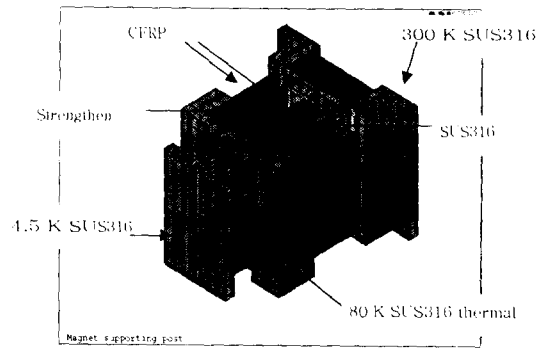


Fig. 1 Superconducting magnet supporting post for the KSTAR

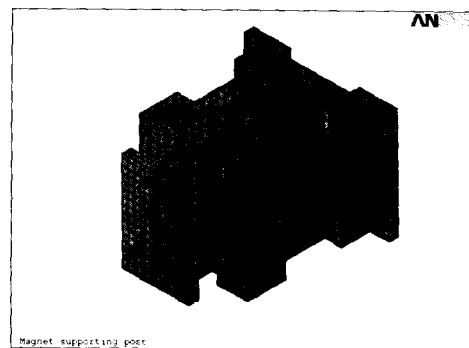


Fig. 2 FEM model for the analysis

위해 별도의 수계산이 수행되었다. 그리고 구조 취약이 예상되는 CFRP plate의 핀 구멍에 대해서는 추후 정밀한 구조해석과 시제품 시험을 통한 설계검증이 이루어질 것이다.

본 해석에서는 상온에서의 하중과 저온에서의 하중을 분리하여 계산하였다. 상온에서 지지각에 작용될 수 있는 하중은 자석의 자중과 지지각 설치 시 자석의 열 수축을 고려하여 수축 방향과 반대방향으로 밀어 설치하는 초기 변위이다. 저온에서 예상되는 하중은 초전도자석의 자중과 plasma disruption 시 발생하는 하중이며, 이를 위해 우선 지지각의 온도경계조건을 이용하여 전도 열전달 해석을 수행하였고, 이로부터 얻어진 온도분포를 이용하여 냉각 후의 작용하중에 대한 응력해석을 수행하였다.

지지각 1개가 지지해야 할 초전도자석 자중은 전체 자석의 무게를 300ton이라 가정할 때 38ton이며, 지지각 조립 시 가해지는 초기 변위는 3.75mm이었고, plasma disruption 시 예상되는 수직하중은 19ton 이었다. 이 하중들은 개념설계 당시 사용했던 하중들로서, 현재 지지각의 치수 및 설치위치 변경, 초전도자석의 자중 증가, disruption에 의한 하중 증가가 예상되며, 이에 대한 해석이 추후 수행될 것이다.

3.2 응력해석

상온에서 지지각 조립 시 자석의 하중과 초기 변위가 작용하는 경우, SUS316 plate에서 100MPa, outer CFRP plate에서 31MPa, upper strengthen plate에서 142MPa의 응력이 발생되었으며, 이 응력들은 모두 2 이상의 안전계수를 갖는 것으로 평가된다.

저온에서 자석의 자중과 disruption에 의한 수직하중이 작용하는 경우, SUS316 plate에서 185MPa, outer CFRP plate에서 132MPa, inner CFRP plate에서 103MPa, upper strengthen plate에서 216MPa의 응력이 계산되었으며, 이 경우도 2 이상의 안전계수를 갖는 것으로 평가되었다.

Fig. 3은 지지각의 전도 열전달 계산에 의한 온도분포를 나타낸 것이다. 지지각의 상부upper block과 SUS316 block 사이에서 4.5-300K의 온도분포가 계산되었다. Fig. 4는 저온에서 자석의 자중과 disruption 수직하중이 작용할 때 응력 분포를 나타낸 것이고, Fig. 5는 이때 변위를 나타낸 것이다. 최대 1.17mm의 수직 변형이 계산되었으며, 초전도자석의 가능한 제작/조립 공차와 비교할 때 허용될 수 있는 수치라 생각된다.

3.3 좌굴해석

응력해석에 사용되었던 모델을 이용하여 수직 하중에 대한 선형좌굴해석을 수행하였다. 해석결과 Fig. 6과 같이 최초 좌굴이 발생하였고, 가장 큰 수직하중으로 예상되는 자석의 자중과 수직 disruption이 작용할 경우 88의 임계좌굴계수가 계산되었다. 이 계수는 일반적으로 사용되는 좌굴 임계치 5보다 훨씬 큰 값으로서, 본 지지각은 수직좌굴에 충분히 안전할 것으로 예측된다.

3.4 모달해석

지지각도 다른 구조물과 마찬가지로 지진을 비롯한 시스템 내/외부 진동환경에 항상 노출되어 있으며, 가진 주파수가 구조물 자체의 고유진동수와 일치될 경우 공진이 발생하여 지지각 자체의 파손과 더불어 인접시스템에 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 지진과 같은 저주파수 진동의 경우 큰 질량을 갖는 대형 구조물에 치명적일 수 있으며, 구조설계 시 모달해석을 통한 시스템 진동특성 규명과 진동 대책 설계가 요구된다.

본 연구에서도 응력해석 모델을 사용하여 모달해석을 수행하였으며, Fig. 7과 같이 최저고유진동수 7.4Hz에서 SUS316 plate의 반경방향 변형모드가 계산되었다. 계산된 2차 고유진동수는 9Hz, 3차 고유진동수는 28.5Hz, 4차 고유진동수는 53.8Hz이었다. 이 진동수 중 지진의 가진주파수 영역 33Hz 이내의 고유진동수는 내진해석 시 공진에 의한 증폭 영향을 평가해야 할 것이다.

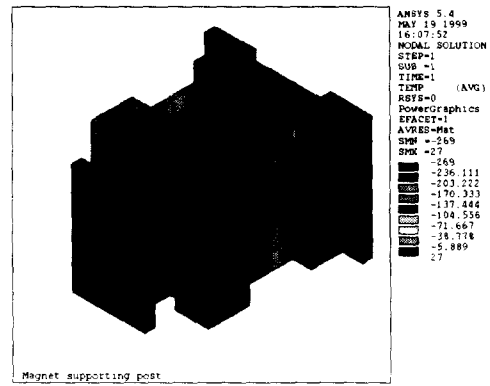


Fig. 3 Temperature distribution of the post

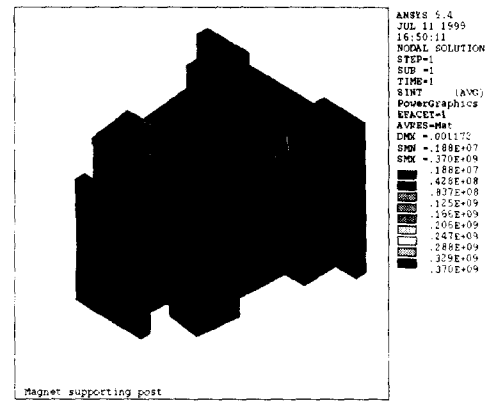


Fig. 4 Stress intensity distribution due to the magnet weight(38ton) plus VDE load(19ton) at the operation temperature

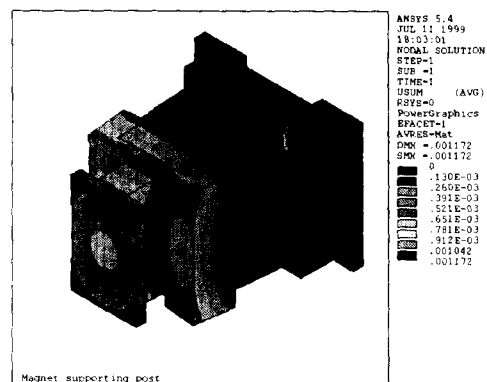


Fig. 5 Displacement distribution due to the magnet weight(38ton) plus VDE load(19ton) at the operation temperature

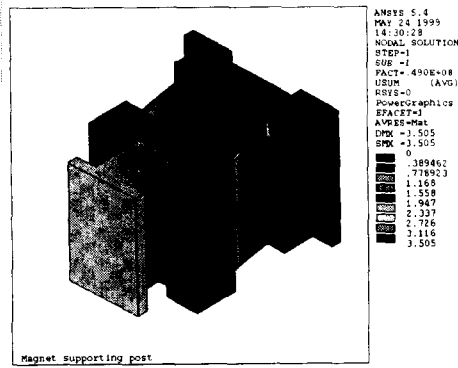


Fig. 6 The 1st buckling mode shape of the post

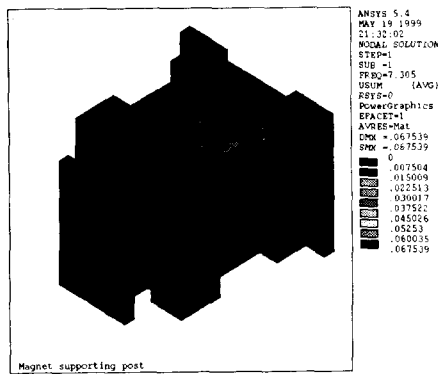


Fig. 7 The 1st fundamental vibration mode shape of the post

5. 결 론

본 연구에서는 KSTAR 핵융합 실험장치용 초전도자석 지지각에 대해 좌굴 및 모달해석이 포함된 구조해석이 수행되었다. 지지각 조립 시 자석의 자중과 초기 변위를 고려한 응력해석과 초전도자석 냉각 후 plasma disruption에 의해 발생하는 수직하중에 대한 응력해석 결과 발생된 응력이 2 이상의 안전계수를 갖는 것으로 계산되었으며, 최대 수직 변위도 2mm 이내이어서 초전도자석의 기능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예측되었다. 수직하중에 대한 좌굴해석 결과도 일반적인 설계 임계값(5)보다 큰 안전계수가 계산되었으며, 이로부터 지지각이 좌굴에도 충분히 안전할 것으로 평가되었다. 지지각의 진동특성 파악을 위한 모달해석 결과 지진의 가진 주파수 범위에서 고유진동수가 존재하는 것으로 나타났으며, 이 결과는 초전도자석의 내진설계 자료로 활용될 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] KSTAR Project Team, "KSTAR TSER Documents", 1997

[2] I. Zatz, "TPX Structural and Cryogenic Design Criteria", 1995

[3] H. Tamura, S. Imagawa, H. Hayashi, T. Satow, J. Yamamoto, O. Motojima, T. Takahashi, K. Asano, S. Suzuki and LHD group, "Structural and Mechanical Design of Cryogenic Support System for LHD", Fusion Technology, pp. 1019-1022, 1996

[4] T. Horiuchi, T. Ooi, "Cryogenic Properties of Composite Materials", Cryogenics, Vol. 35, No. 11, pp. 677-679, 1995