

## KSTAR 초전도 버斯拉인의 안정성 해석

### Stability Analysis of the KSTAR SC Bus-line

박영민, 이영주, 김양수, 오영국, 김웅채, 진승보, 곽상우, 박주식  
한국기초과학지원연구원  
대전광역시 유성구 어은동 52

#### 요 약

초전도 버斯拉인은 “차세대 초전도핵융합연구장치(KSTAR)”의 초전도 자석에 20~40 kA의 대용량 전류를 전류인입선으로부터 초전도 자석까지 운송하는 역할을 한다. NbTi 초전도체를 사용하여 관내연선도체(cable-in-conduit conductor ; CICC)로 제작되어지는 버斯拉인은 도관 내에 4.5 K의 초임계헬륨(supercritical helium)을 강제 순환시켜 냉각한다. 버斯拉인의 운전 조건에 대한 current sharing 온도를 분석한 결과 백그라운드 자기장이 2 테슬라 일때의 current sharing 온도는 각각 6.8 K로 나타났다. 또한 CICC가 300 K에서 운전온도인 4.5 K로 냉각될 때 열수축에 의해 발생하는 최대응력은 약 4 MPa 정도로 평가되었으며, CICC가 고정되어있는 양쪽 끝단에서 최대응력이 발생한다. 그러나 이때의 응력은 스테인레스 스틸이 갖는 허용응력 이내에 있으므로, 냉각에 의한 응력으로부터 초전도 버斯拉인의 CICC는 안전함을 알 수 있다.

#### Abstract

The main function of the superconducting (SC) bus-lines in the current feeder system of the KSTAR device is current transmission between the SC coils and the current leads. SC bus-line is made of cable-in-conduit conductor (CICC) with NbTi strand, and is cooled down with forced flow supercritical helium. The current sharing temperature has been analyzed to be 6.8K under background magnetic field strength of 2 tesla. Also, we performed the stress analysis due to thermal contraction when CICC was cooled down from 300 K to 4.5 K. The maximum stress of 4 MPa appears at the end of fixed CICC. This stress is much less than the allowable stress of stainless steel. We can confirm that CICC is safe from the cool down stress.

## 1. 서론

토카막 핵융합 장치의 자석은 플라즈마를 toroidal 방향으로 가둬두기 위한 TF (Toroidal Field) 코일과 플라즈마 발생 및 위치제어를 위한 PF (Poloidal Field) 코일로 구성되며, 긴 플라즈마 구속시간을 갖는 steady-state 운전을 가능하게 하기 위해서 초전도자석의 사용이 필수적으로 요구되고 있다.<sup>(1)</sup> 차세대 초전도 핵융합 연구장치인 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 장치도 반경 1.8 m에서 TF 자기장 3.5 테슬라와 플라즈마 전류 2 MA, 플라즈마 구속시간 300 초 등을 실현하기 위해서 초전도자석을 사용한다. KSTAR 장치의 초전도자석 시스템은 16개의 “D”형 모양의 TF 코일과 14개의 PF 코일로 구성되어 있으며, PF 코일은 중심에 위치한 4쌍의 CS (Central Solenoid)와 외곽에 위치한 3쌍의 PF 코일이 상하 대칭으로 설계되었다. 또한 각 초전도코일에 공급되는 전류는 TF 코일에 35.2 kA, CS 코일과 PF 코일에 각각 20 ~ 25 kA 이다. TF 코일 및 CS, PF5 코일은 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재를 사용하는 Cable-In-Conduit Conductor (CICC)로 제작되며, 두 쌍의 PF 코일 (PF6, PF7)은 NbTi CICC로 제작된다. TF 코일들은 16개가 서로 직렬로 연결되며, 7쌍의 PF 코일들은 플라즈마의 shape을 조절하기 위해 짧은 시간동안 펄스로 운전된다.<sup>(2)</sup>

일반적으로 초전도자석을 사용하는 연구장치들은 전원장치로부터 초전도자석까지 전류의 수송을 위해서 전류인입선(current lead)과 같은 전류공급을 위한 별도의 장치들이 필요하다. 더구나 KSTAR 장치와 같이 대용량의 전류를 필요로 하는 대형초전도자석에서는 전원장치로부터 초전도자석까지 대용량의 전류를 가능한 에너지 손실 없이 공급하는 기능을 수행하기 위한 전류공급시스템(current feeder system)이 반드시 필요하다. 또한 전류공급장치는 초전도 코일의 켄치(quench)나 갑작스러운 정전 등의 비정상적인 운전이 발생했을 때 초전도자석 시스템을 보호하기 위해서 매우 짧은 시간동안에 초전도자석에 저장된 대량의 에너지를 전원장치로 dump 하는 기능을 수행해야 하므로 초전도자석보다 높은 운전 안정성을 가져야 한다.<sup>(3, 4)</sup>

초전도버스라인에 사용되는 CICC의 규격은 제작의 용이성과 운전 안전성 확보를 위하여 KSTAR TF 코일에 사용하는 CICC jacket과 같은 규격으로 설계되었다. CICC jacket의 재질은 TF 코일에 사용하는 Incoloy 908 대신에 stainless steel 316LN을 사용하도록 설계되었다. 버스라인용 초전도 선재는 지름 0.78 mm인 NbTi를 사용하며, 구리 도선과 초전도선을 합한 총 도선의 수는 486 가닥이다. 이중 NbTi초전도 도선의 수는 324 가닥이다.<sup>(5)</sup> 초전도버스라인용 CICC의 규격에 대한 자세한 사항을 표 1에 나타내었다.

이번 연구에서는 초전도 버스라인으로 사용될 CICC가 KSTAR의 운전 시나리오를 만족하면서 안전하게 대용량의 전류를 공급할 수 있는가에 대한 안정성 해석을 수행하였으며, 버스라인의 운전온도인 4.5 K까지 냉각될 때 발생하는 응력을 분석하였다.

표 1. 초전도버스라인용 CICC 규격.

| Parameter                         | Units  | Specification  |
|-----------------------------------|--------|----------------|
| Conductor                         |        | NbTi SSC-class |
| Conduit                           |        | SS316LN        |
| $D_{strand}$                      | mm     | 0.78           |
| $N_{strand}$                      |        | 486            |
| $N_{Cu-strand}$                   |        | 162            |
| $A_{noncu}$                       | $mm^2$ | 34.4           |
| $A_{cu}(SC_{strand})$             | $mm^2$ | 120.4          |
| $A_{cu}(SC_{strand}+Cu_{strand})$ | $mm^2$ | 197.8          |

## 2. 초전도버스라인용 CICC의 안정성 해석

Cryogenic 안정성은 초전도버스라인에 국소적인 normal 상태가 생겼을 때 원래의 초전도 상태로 회복 될 수 있는 능력을 말한다. 임계온도에서는 일반적으로 초전도 상태로 회복되지 못하기 때문에 cryogenic 안정성은 온도의 함수라고 말할 수 있으며, 냉각능력의 함수 이기도 하다. CICC의 열적 안정성(thermal stability)은 전류가 흐르는 전선으로부터 액체헬륨으로 전달되는 에너지를 0차원 분석(zero dimensional analysis)한 것을 출발점으로 한다. 전선의 주울열(joule heat)이 냉매로 전달될 수 있는 최대 에너지보다 작은 경우, 그 시스템을 아주 잘 냉각된 상태(well-cooled state) 혹은 안정한 상태(stable state)라고 한다. CICC의 경우 이는 만족되어야 하는 최소 조건이지만 헬륨 냉매의 양이 제한적이고 냉매의 온도가 일정하다고 할 수 없기 때문에 많은 제한을 받게 된다. 가장 간단한 경우로서 Steckly criterion 정의를 사용하여 최대 전달될 수 있는 에너지에 대한 주울열의 비를 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\alpha = \frac{\rho \cdot I_{op}^2}{p \cdot h \cdot A_{Cu} (T_c - T_{op})} \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 normal 상태인 도체, 즉 Cu의 비저항,  $I_{op}$ 는 operating current,  $p$ 는 도체의 perimeter,  $h$ 는 열전달계수이며,  $A_{Cu}$ 는 Cu의 단면적,  $T_c$ 는 초전도체의 임계온도,  $T_{op}$ 는 냉매의 온도이다. (1)식에서  $\alpha$ 가 1보다 적을 때 이를 well cooled regime 이라고 한다. 이 영역에서의 최대 운전전류는  $\alpha=1$  일때 계산 할 수 있다. 표 1. 에 나타난 바와 같이 버스라인용 CICC는 324개의 NbTi 선재와 162개의 Cu 선재로 구성되어 있으며, 초전도체와 Cu의 부피비는 1:2.8 이다. CICC의 최대운전 전류를 계산하기 위하여 사용한 열전달

계수는  $700 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  이다. 초임계 헬륨이 버스라인에 공급되어 들어갈 때에는  $4.5 \text{ K}$  이나 버스라인의 길이가 길기 때문에 전체 온도는 입구 온도 보다 약간 증가할 것을 가정하여  $5.5 \text{ K}$ 로 설정하였다. 그리고 RRR(residual resistivity ratio)은 100을 사용하였으며, 최대 자기장  $0.1 \text{ 테슬라}$ 에서 임계온도는  $9 \text{ K}$ 이다. CICC의 perimeter는 1096 이며, Cu의 비저항은  $1.55 \times 10^{-10} \text{ ohm} \cdot \text{m}$ 이다. 이때, (2)식을 사용하여 초전도 버스라인에 사용되어지는 CICC의 최대 운전전류를 계산하면  $I_{\max} = 5.76 \times 10^4 \text{ A}$  이다.

$$I_{\max} = \left[ p \cdot h \cdot A_{\text{Cu}} \cdot \frac{(T_c - T_{\text{op}})}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

초전도버스라인에 사용되어지는 CICC는 자석의 켄치나 전원차단 등의 응급상황에서 자석에 저장되어있는  $500 \text{ MJ}$  이상의 높은 에너지를 수분 내에 안전하게 배출할 수 있어야 한다. 따라서 초전도버스라인 CICC는 자석과 동등하거나 그 이상의 안정성을 확보하고 있어야 한다. 온도 안정성 분석은 초전도 자석이 펄스 모드로 운전될 때 KSTAR 저온용

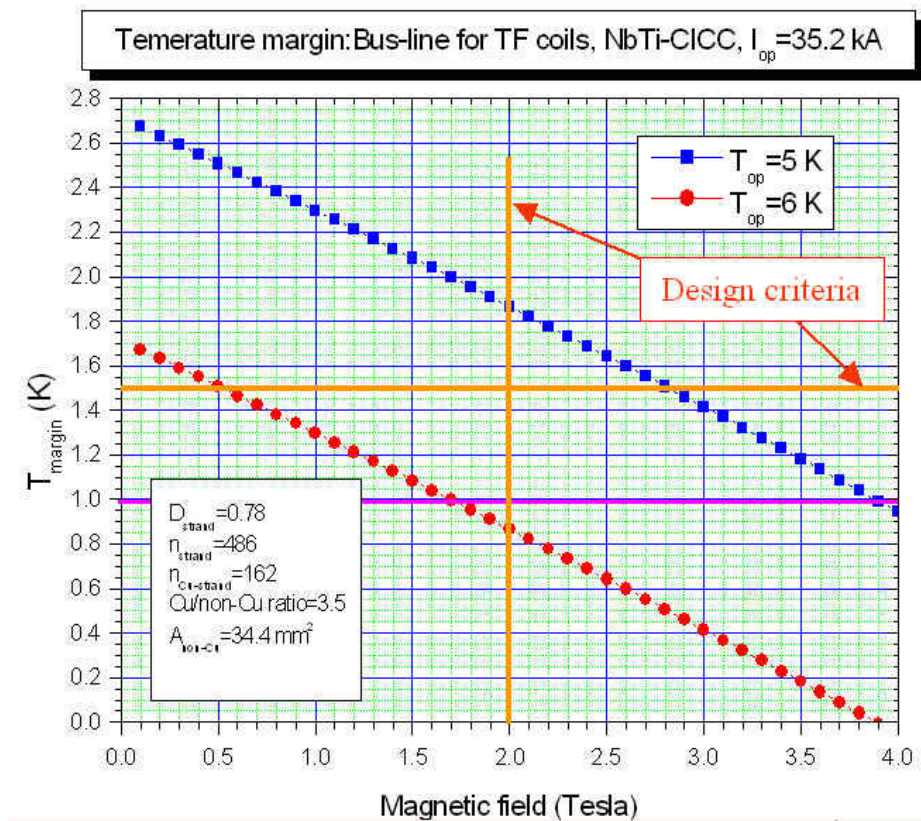


그림 1. 초전도버스라인용 CICC의 온도안정성 분석

기 내에서 발생하는 백그라운드 자기장이 NbTi CICC에 미치는 영향을 고려하여 계산하였으며, 실제로 저온용기 내에 위치하는 in-cryostat 버스가 설치되는 부분의 자기장은 1 테슬라 이하이며, KSTAR 저온용기와 전류인입선을 연결하는 초전도버스라인에서의 백그라운드 자기장은 무시할 수 있을 정도로 적다. 그림 1에 35.2 kA의 정격전류가 흐를 때 백그라운드 자기장에 대한 초전도버스라인 CICC의 온도안정성 분석 결과를 나타내었다. 그림 1은 5 K의 냉매로 운전될 경우와 6 K의 냉매로 운전될 경우에 백그라운드 자기장에 대한 각각의 온도안정성을 보여주고 있으며, 실제 초전도버스라인의 CICC는 4.5 K의 초임계헬륨으로 냉각되기 때문에 충분한 온도 안정성을 가지고 있음을 알 수 있다. 5 K로 운전될 경우 백그라운드 자기장이 증가함에 따라 current sharing 온도가 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

### 3. 초전도버스라인의 냉각시 응력해석

초전도버스라인이 동작온도인 4.5 K로 냉각될 때 열수축에 의한 응력이 발생하게 된다. 특히 길이가 30 m 이상이 되는 경우에 300 K의 상온에서 4.5 K로 냉각될 경우 최대 100 mm 이상의 열수축이 발생하므로 CICC가 받게 되는 응력 또한 심각하게 고려

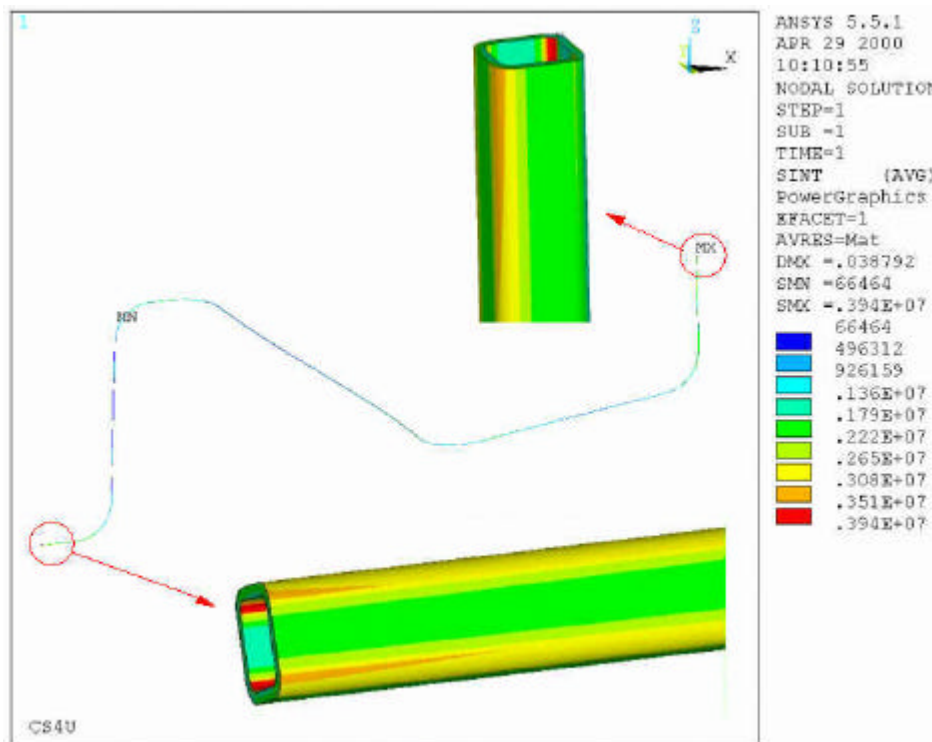


그림 2. 초전도버스라인 CICC의 ANSYS analysis

되어야만 한다. 따라서 초전도버스라인 설계 시에 이러한 수축율을 고려하여 냉각시 발생하는 수축을 길이방향으로 보상할 수 있게 하였으며, 초전도 버스라인과 in-cryostat 버스에 대하여 CICC routing에 따른 열수축 해석을 ANSYS code를 사용하여 분석하였다. 그림 2는 3차원 경로를 가지는 하나의 버스라인 CICC에 대한 응력 해석 결과를 보여주고 있다. CICC가 상온에서 4.5 K로 냉각될 때 열수축에 의해 발생하는 최대응력은 약 4 MPa 정도이고, CICC가 고정되어있는 양쪽 끝단에서 최대응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 스테인레스 스틸의 경우 허용응력이 667 MPa 정도 이므로 설계되어진 버스라인이 동작온도에서 받는 응력은 160배 이상의 안정성을 확보하고 있다. CICC의 경로 중간에서 발생하는 응력은 3차원적 밴딩에 의한 변위의 변화로 상쇄되는 것으로 나타났다. 직교좌표계를 사용하였을 때 나타나는 공간상의 최대 변위는 약 40 mm 정도 이었다.

In-cryostat의 버스라인은 복잡한 형상을 가지고 있으며, KSTAR 장치가 운전되기 위해서는 초전도 자석과 자석 구조물, 지지구조물 등이 4.5 K로 냉각되어진다. 따라서 서로 다른 형상의 구조물들이 여러 방향으로 수축하게 되고, 더불어 각 구조물과 초전도 코일 lead부에 연결되어있는 버스라인에 응력을 작용시키게 된다. 또한 버스라인

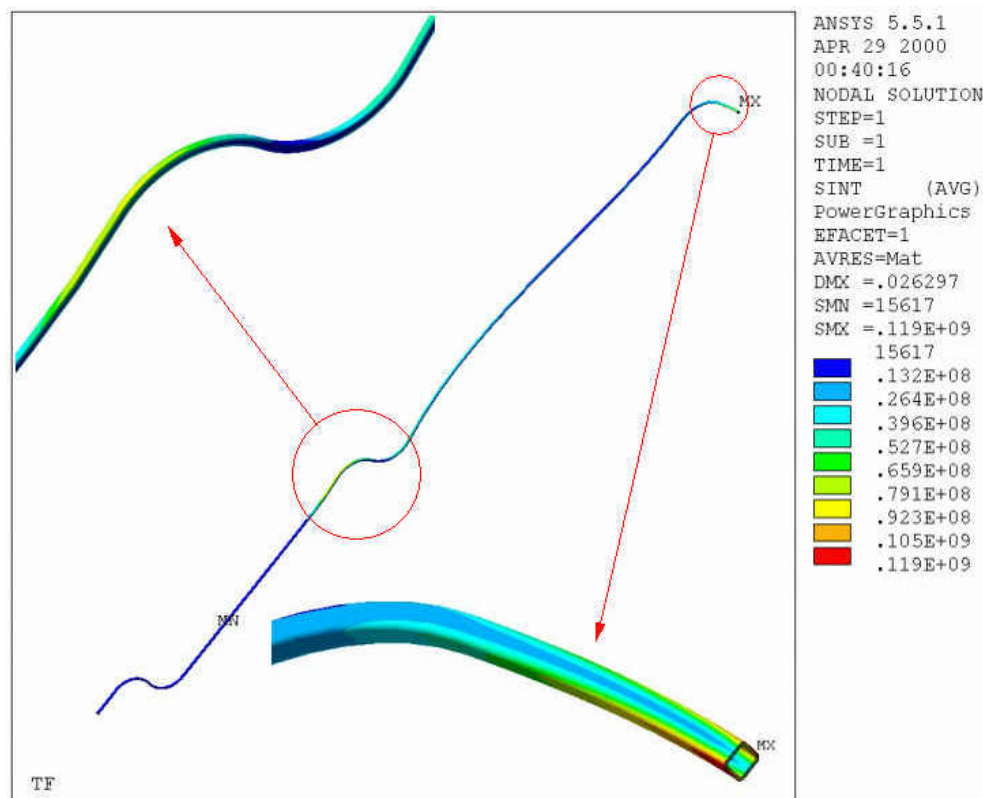


그림 3. In-cryostat TF 버스라인에 대한 ANSYS 해석

CICC 자체의 열수축에 의한 응력도 발생하게 되므로, 복합적인 해석이 수행되어야 한다. 이러한 사항을 고려하기 위하여, 저온용기 내의 버스라인의 설계시 ANSYS code를 이용하여 초전도 자석을 포함한 저온 구조물과 버스라인이 300 K 상온에서 4.5 K로 냉각될 때 버스라인 CICC에 작용하는 응력과 변형량을 분석하였다.

그림 3는 초기 설계된 in-cryostat 버스라인에 대한 ANSYS 해석결과이다. 해석을 위한 조건은 코일 lead의 terminal 부분은 고정시켰으며 중간에 지지구조물을 설치하여 길이방향으로는 자유롭게 움직이게 하였고, 횡방향으로는 움직일 수 없게 구속하였다. 그리고 저온용기 바깥쪽의 버스라인과 연결되는 부분은 구속조건 없이 자유롭게 움직일 수 있게 설정하였다. 해석결과 최대응력은 코일 터미널과 연결되는 부분에서 119 MPa로 나타났고, 최대 변위량은 약 27 mm 정도로 분석되었다. 구속조건이 없는 버스라인 연결부위와 중간 지지구조물 사이의 길이 약 3 m 영역에서는 응력이 거의 나타나지 않았고, 길이방향으로 약 12 mm의 수축이 나타났다.

KSTAR 초전도 자석중 CS 코일 lead는 코일의 터미널을 백그라운드 자기장이 낮은 곳에 위치시키기 위해서 다른 PF 코일의 lead나 TF 코일의 lead 보다 더욱 길게 제작되어진다. CS 4U 코일의 경우 저온용기 아래쪽으로 코일 lead를 내릴 경우 거의 5 m 정도이며, 이때 작용하는 열수축에 의한 응력은 코일 터미널 뿐만 아니라 저온용기 내의 버스라인에 까지 미치게 된다. 따라서 CS 코일 lead의 열수축 응력을 보상하기

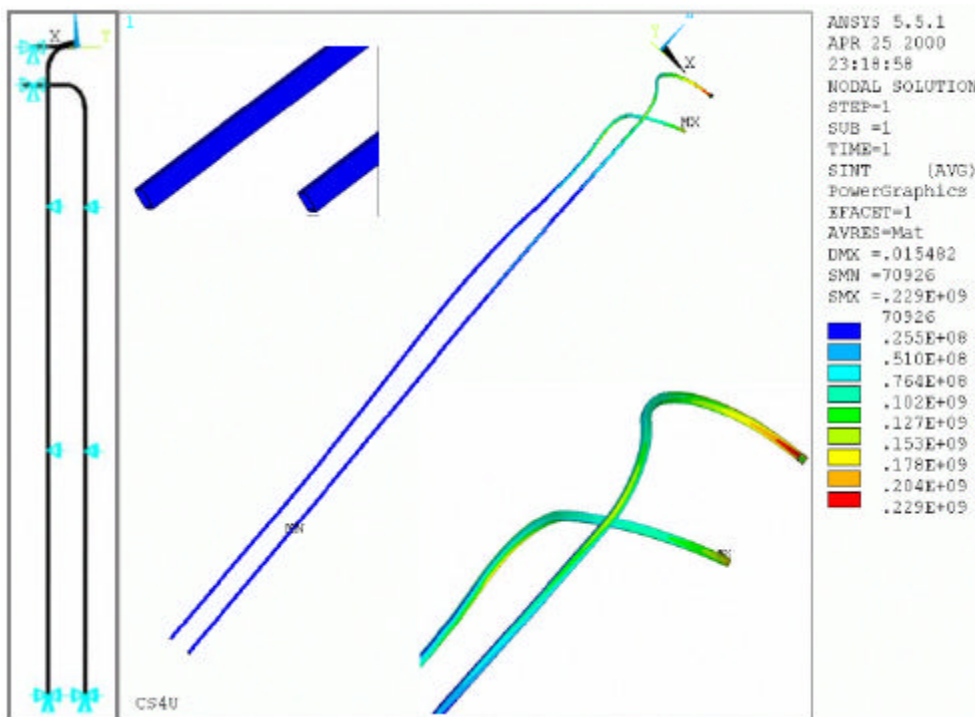


그림 4. CS 4U coil lead에 대한 ANSYS 분석

위한 설계가 이루어져야 하며, CS 코일 lead 자체로 응력을 보상할 수 있게 제작하기 어렵기 때문에 여기에 연결되는 버스라인이 응력을 보상 할 수 있어야 한다. 그림 4은 CS 4U 코일이 4.5 K로 냉각될 때 코일 lead에 작용하는 열수축 응력을 ANSYS code로 분석한 것이다. 해석을 위한 구속조건은 코일 lead 양단을 완전히 움직일 수 없게 구속하였고, lead 중간에 두 지점에 대해서 길이 방향으로만 자유롭게 움직일 수 있게 구속하였다. 수직방향으로 움직이지 못하게 구속하고, 길이방향으로는 움직일 수 있게 한 것은 lead가 수축할 때 구속된 지점에 응력이 집중되지 않게 하기 위해서이다. 해석결과 최대응력은 변위가 가장 심하게 나타나는 lead의 밴딩 부위에 집중되어 있었으며, 약 230 MPa 정도의 값을 보였다. 이때 열수축에 의한 최대 변위량은 약 16 mm 이었다.

#### 4. In-cryostat 자기장 분포 해석

KSTAR PF 초전도자석은 펄스 모드로 운전되기 때문에 자기장 영향 내에 있는 도체에 맴돌이 전류(eddy current)를 유도시키게 된다. 이 전류는 도체에 주울열을 발생시키는 원인이 되어 저온 구조물에 열을 가하는 심각한 영향을 미치게 되며, 자기장의 세기(B)가 크고 변화(dB/dt)가 큰 부분에서 더욱 심각하게 나타난다. 특히 버스라인과 초전도자석이 결합되는 터미널에서 발생하는 AC loss는 초전도자석과 버스라인의 켄치를 유발시키는 원인이 되므로 각 운전시나리오에 따른 자기장의 크기와 변화를 분석하여 백그라운드 자기장이 낮은 곳에 터미널을 위치시키는 것은 아주 중요

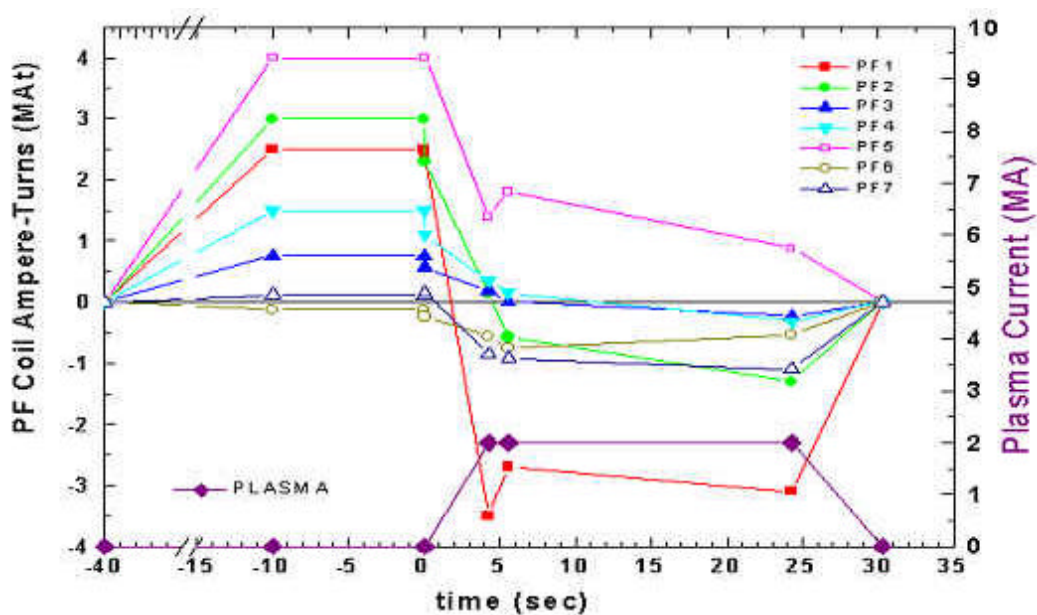


그림 5. KSTAR 운전 시나리오

한 문제이다. 그림 5에 저온용기 내의 자기장을 분석하기 위한 KSTAR 장치의 기본적인 운전 시나리오를 고려하였다. 그림 6은 그림 5에 나타낸 운전시나리오 중 0.06초에 해당하는 부분에서의 field map이다. 0.06초에 해당하는 after blip에서의 백그라운드 자기장이 다른 시간 때에 발생하는 자기장보다 세기 때문에 이 위치에서 발생하는 자기장을 기준으로 터미널의 위치를 확정하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 CS 코일의 터미널 위치에서 약 1.5 테슬라로 가장 크게 나타났다.

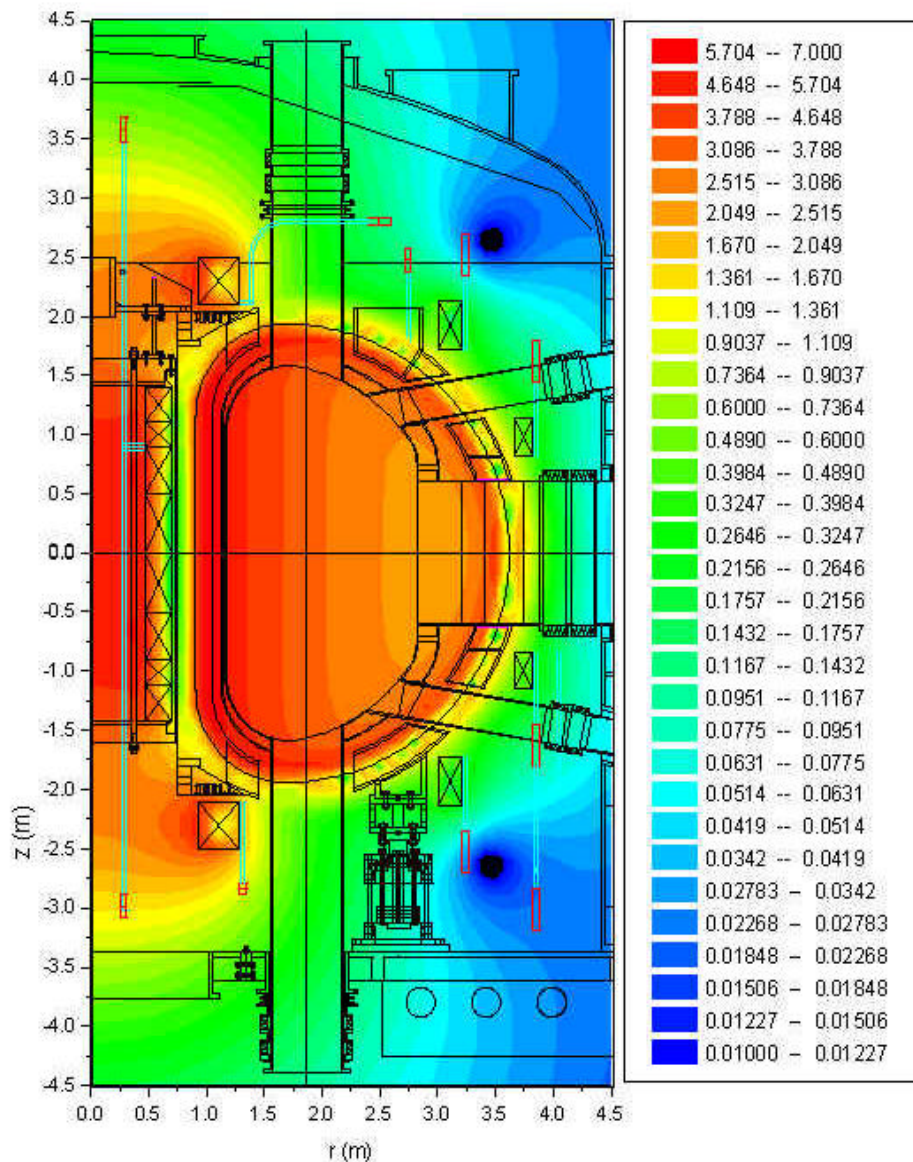


그림 6. 운전시나리오에 따른 in-cryostat field map

## 5. 결 론

차세대 초전도 핵융합 연구장치인 KSTAR에 대용량의 전류를 공급하기 위한 초전도 버스라인의 current sharing 온도에 대한 분석을 수행하였으며, 온도 안정성 분석은 초전도 자석이 펄스 모드로 운전될 때 KSTAR 저온용기 내에서 발생하는 백그라운드 자기장이 NbTi CICC에 미치는 영향을 고려하여 계산하였다. 초전도 버스라인이 5 K로 운전될 때 백그라운드 자기장이 1 테슬라인 위치에서의 current sharing 온도는 7.2 K였고, 2 테슬라인 위치에서는 6.8 K로 분석되었다. 실제로 저온용기 내에 위치하는 in-cryostat 버스가 설치되는 부분의 자기장은 1 테슬라 이하이기 때문에 버스라인은 충분한 안전성을 가지고 있음을 알 수 있다.

초전도 버스라인과 in-cryostat 버스에 대하여 CICC routing에 따른 열수축 해석을 ANSYS code를 사용하여 분석하였다. 분석결과 전류인입선과 KSTAR 저온용기 사이를 연결하는 버스라인의 CICC가 상온에서 4.5 K로 냉각될 때 열수축에 의해 발생하는 최대응력은 약 4 MPa 이었다. 이 값은 스테인레스 스틸의 경우 허용응력이 667 MPa 정도 이므로 설계되어진 버스라인이 동작온도에서 받는 응력은 160배 이상의 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다. In-cryostat 버스의 해석결과 최대응력은 코일 lead terminal과 연결되는 부분에서 119 MPa로 나타났고, 최대 변위량은 약 27 mm 정도로 분석되었다. 구속조건이 없는 버스라인 연결부위와 중간 지지구조물 사이의 길이 약 3 m 영역에서는 응력이 거의 나타나지 않았고, 길이방향으로 약 12 mm의 수축이 나타났다. In-cryostat 버스의 경우 냉각에 의한 응력 이외에 운전 시 작용하는 전자기력에 의한 응력도 동시에 해석이 수행되어야 정확한 분석을 할 수 있으므로 추후에 더 자세한 해석을 수행할 예정이다.

KSTAR 초전도 코일의 터미널에 in-cryostat 버스라인이 연결되는 부분이 높은 자기장 영역에 위치할 경우 주울 heating에 의하여 코일과 버스라인에 켄치가 발생할 수 있다. 따라서, KSTAR 운전시나리오 중  $dB/dt$ 가 가장 큰 0.06초에 해당하는 부분에서의 자기장 분포를 분석하였다. 0.06초에 해당하는 after blip에서의 백그라운드 자기장이 다른 시간대에 발생하는 자기장보다 세기 때문에 이 위치에서 발생하는 자기장을 기준으로 자기장이 낮은 곳에 터미널의 위치를 확정하였다. 분석결과 CS 코일의 터미널 위치에서 약 1.5 테슬라로 가장 크게 나타났다.

## 6. 참고문헌

- [1] D. I. Choi, "The KSTAR Tokamak", 17th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering, 215 (1998).
- [2] G. S. Lee, et al., "The KSTAR project: An advanced steady state superconducting tokamak experiment", Nuclear Fusion, Vol. 40, No. 3Y, 575 (2000).

- [3] C. H. Choi, et al, "Helium and Current Feeder System of KSTAR", IEEE Trans. Applied Superc., Vol. 11, No. 1, 2062 (2001).
- [4] Martin N. Wilson(1983), *SUPERCONDUCTING MAGNETS*, current lead ARENDON PRESS OXFORD.
- [5] Y. S. Kim, Y. M. Park, K. Kim, Y.K. Oh, et al., "Current Feeder System for the KSTAR Magnet System", IEEE Trans. on App. Sup., America, Vol. 12, No.1. 571 p., 2002.
- [6] L. Bottura, "Limiting current and stability of cable-in-conduit conductors", Cryogenics, Vol. 34, 787 (1994).