

## CICC 형태의 초전도 버스 선에서 냉각 및 자기장에 의한 응력 해석

### Analysis of the stresses induced by magnetic field and cooling in the CICC type superconducting bus-line

이호진\*, 남현일\*\*, 김기백\*, 홍계원\*

H.J. Lee\*, H.I. Nam\*\*, K.B. Kim\*, G.W. Hong\*

**Abstract** : A CICC type superconducting bus-line electrically connecting a superconducting magnet to a power supply is cooled down to low temperature under the external magnetic field during operation. The thermal contraction during the cooling may be constrained by the supports which are installed to protect the bus-line from Lorentz magnetic forces. This constrained contraction causes thermal stresses in the bus-line. To decrease thermal stresses the supports should be properly arranged for the bus-line to release thermal contraction. The minimum stress conditions in the bus-line may be optimized by controlling the supports arrangement considering the thermal contraction and the external field. The analytical method to find optimal supports arrangement was suggested by using the beam theory, and numerical calculation using commercial code was performed to verify the suggested analytical optimization method.

**Key Words** : CICC type bus-line, thermal contraction, external magnetic field, stress

## 1. 서 론

핵융합용 자석과 같은 대규모 초전도 자석에 전류를 공급하기 위해 자석의 단말부와 상온의 전원장치를 전기적으로 연결하는 버스 선(bus-line)이 필요하다. 버스 선은 자석에 필요한 전류를 흘리기 위해 냉각수로 냉각되는 구리 케이블이 많이 사용되나, 대용량의 경우 구리 케이블의 단면적이 커지고 설비가 복잡해지므로 초전도체를 사용하는 것이 유리하다. 초전도체를 사용하는 버스 선은 유연성 있는 형태로 제작되기도 하나 제조 과정이 복잡하고 제작비용이 크므로, 초전도 자석 제조에 사용되는 CICC(Cable in Conduit

Conductors) 형태의 도체를 이용하는 것이 경제적인 면에서 유리하다[1]. CICC는 스테인레스 스틸과 같은 금속 도관(conduit) 내부에 초전도 케이블이 압축되어 있는 형태로서, 대용량의 전류를 흘릴 수 있는 도체 형태이다[2].

초전도 버스 선은 냉각 시 열손실을 최소화하기 위해 진공 통로 내부에 설치되며, 한 쪽 단말부는 전원장치 단말부에, 그리고 다른 쪽 단말부는 고정된 초전도 자석에 연결된다. 극 저온으로 냉각된 버스 선의 열 수축 변형이 상온의 진공 통로에 고정된 플랜지 혹은 지지대(support)들에 의해 제한되어 도관에 열응력(thermal stress)이 발생한다. 즉 로렌츠(Lorentz) 힘에 의해 버스 선이 파손되는 것을 방지하기 위해 설치된 지지대에 의해 초전도 버스 선에 열응력이 발생하여 버스 선을 파손시킬 수 있다. 따라서 극 저온으로 냉각되는 CICC 형태의 버스 선의 경우 외부 자기장과 냉각 변형을 고려한 최적의 지지대 설치 위치에 대한 해석이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 SSTF(Samsung Superconducting magnet Test Facility)에 사용 가능한 초전도 버스 선을 모델로 하여 버스 선에 발생하는 응력을 최소화시키기 위해 해석적인 방법으로 지지대들의 위치를 예상하는 방법을 제시하였다. 90° 굽힘부를 갖는 버스 선에서 지지대의 위치 및 간격이 열응력과 외부 자기장에 의한 응력에 주는 영향을 보(Beam)의 해석적인 방법을 통해 확인하였으며, 이를 근거로 도관 재료 선정의 기준을 제시하였다. 또한 상업용 ANSYS code를 사용하여 버스 선에 발생하는 응력을 3차원 모델로 계산하였으며, 그 결과를 사용하여 본 연구에서 제시된 해석적인 방법의 실용성을 확인하였다.

## 2. 열 변형 및 응력

재료는 온도가 변하는 경우 식 (1)과 같이 온도 변화량과 재료의 선팽창계수의 곱에 해당하는 변형율을 가지고 변형한다.

$$\epsilon = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$ 는 변형율,  $\alpha$ 는 선팽창계수,  $T$ 는 온도,  $T_0$ 는 초기 온도이다. 냉각된 버스 선의 변형을 외부에서 모두 구속하는 경우 식 (2)와 같은 응력을 받게된다.

\* 정 회 원 : 한국원자력연구소 책임연구원

\*\* 비 회 원 : 충북대학교 안정공학과 석사과정  
 원고접수 : 2000년 10월 10일  
 심사완료 : 2000년 11월 07일

$$\sigma = E\varepsilon = E\alpha(T - T_0) \quad (2)$$

여기서 E 는 영률(Young's modulus) 이다. 식 (2) 에 의하면 같은 온도 차이 및 선팅창계수에서 도체가 받는 응력을 줄일 수 있는 방법은 영률이 작은 재료를 사용하는 것이다. 버스 선이 굽힘부를 가지고 있거나, 도체 중간에 작은 강성(stiffness) 를 갖는 벨로우즈(bellows) 를 사용하는 경우 재료가 갖는 고유한 영률 외에 도체 형상에 의해 결정되는 강성, 즉 시스템 강성을 가지게 된다. 재료 고유특성인 재료의 영률은 물론 시스템 강성을 조절하는 경우 변형의 유연성을 가지게 되어 열응력을 감소시킬 수 있다.

### 3. 버스 선의 냉각에 의한 응력 해석

버스 선이 길이 방향으로 완전히 구속되어 있는 상태로 상온에서 4 K 까지 냉각되는 경우 도체가 받는 최대응력은 식 (2) 에 의해 약 620 MPa 로 계산된다. 응력 계산 시 CICC 내부에 있는 구리 케이블은 도관 재료에 비해 유연성이 있고 서로 꼬여 있어 CICC 변형이나 구속에 유연하므로 해석에서는 금속도관만으로 구성된 버스 선으로 가정하였다. 현재 도관 재료로 많이 사용되고 있는 스테인레스 스틸 316 LN 의 경우 허용 응력이 4 K 에서 약 640 MPa 이므로 외부 자기장에 의한 힘이 같이 작용하는 경우 도체가 허용할 수 있는 응력의 여유는 거의 없다[3]. 따라서 버스 선의 형상이나 경계조건을 조정하여, 즉 버스 선의 시스템 강성을 조정하여 열응력과 자기장에 의한 응력의 합을 최소한 감소시켜야 한다.

열응력을 줄일 수 있는 버스 선 형상 중 가장 기본적인 형태는 그림 1 과 같이 90° 굽힘부를 갖는 형태이다. 그림 1 은 단말부 사이를 연결하기 위해 수직 a, b 길이로 각각 굽힘 변형이 되어 있으며, 수평 길이는 L 이다. 이 형태는 단말부와 단말부를 연결하기 위한 CICC 버스 선의 기본 연결형태이다. 길이가 L 인 수평방향 도체가 수축하는 경우 a, b 부분이 휘어지게 되므로, L 도체의 수축에 의한 구속이 감소되어 최대 응력이 감소하게 된다. 그림 1(a) 와 같은 90° 굽힘부를 갖는 버스 선의 열응력을 계산하기 위해 그림 1(b) 와 같은 자유 물체도를 가정하였다.

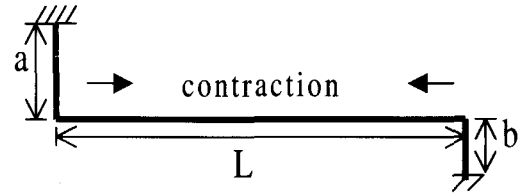
자유 물체도에서 보듯이 L 길이의 수평 도체가 수축하는 경우, 수직 길이 도체에  $x_a, x_b$  처짐을 일으키는 힘 F 가 작용하며, 90° 굽힘부 각도를 유지하기 위한 모멘트  $M_a, M_b$  가 각각 굽힘부에 작용한다.

식 (3-1)과 같이 변형 후 굽힘부에서의 각도변화가 없다고 가정하는 경우 식 (3-2) 와 같은 관계를 얻을 수 있으며, 처짐  $x_a$  는 식 (3-3) 과 같이 나타낼 수 있다. 처짐  $x_b$  는  $x_a$  의 경우와 같으므로 식 (3-4) 처럼 표현할 수 있다[4].

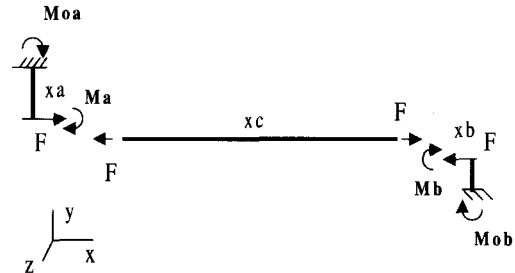
$$\theta_a = \frac{Fa^2}{2EI} - \frac{M_a a}{EI} = 0 \quad (3-1)$$

$$M_a = \frac{Fa}{2} \quad (3-2)$$

$$x_a = \frac{Fa^3}{12EI} \quad (3-3)$$



(a)



(b)

그림 1. (a) CICC 형태 버스 선의 개략도, (b) 응력해석을 위한 자유 물체도.

Fig. 1. (a) Bus-line schematic drawing, and (b) free body drawing.

$$x_b = \frac{Fb^3}{12EI} \quad (3-4)$$

여기서 I 는 단면 2차 모멘트,  $\theta_a$  는 굽힘부에서의 각도 변화이다. 그림 1(b) 에서 단말 고정부에 작용하는 모멘트  $M_{oa}$  는 식 (4) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{oa} = Fa - M_a = \frac{1}{2} Fa \quad (4)$$

수평력 F 는 식 (5-1) 의 관계를 이용하여 계산하면 식 (5-2) 와 같이 표현될 수 있으며, L 의 열수축에 의해 수직 단말부에 걸리는 최대 응력  $\sigma_{oa}$  는 식 (6) 과 같이 표현된다.

$$F = \frac{EA[L\alpha\Delta T - (x_a + x_b)]}{L} \quad (5-1)$$

$$F = \frac{12ILE\alpha\Delta T}{\frac{12IL}{A} + a^3 + b^3} \quad (5-2)$$

$$\sigma_{oa} = \frac{D/2 \cdot M_{oa}}{I} \quad (6)$$

여기서 A 는 도관의 단면적이다. 식 (3) 에서 보듯이 a, b 부분 중 길이가 긴 쪽에서 큰 처짐 변위가 발생하여 열변형 구속을 해소시킬 수 있음을 예상할 수 있다. 또한 식 (3), (4) 에서 보면 열수축에 의해 형성되는 버스 선의 최대 굽힘응력은 수직 길이가 긴 쪽의 고정 단말부나 혹은 굽힘부로 계산되었으나, 실제 변형 중 굽힘부에서 각도 변화가 발생할 수 있으므로 고정 단말부에 가장 큰 응력이 발생할 것으로 예상된다.

### 4. 지지대에 의한 버스 선 열 변형 제한

외부 자기장 B 에서 전류 I<sub>c</sub> 가 흐르는 도체에 걸리는 힘 Q 는 식 (7) 로 표현된다[5]. 외부 자기장 하에서 로렌츠 힘에 의해 버스 선이 파손되는 것을 방지하기 위해 지지대를 설치한다.

$$Q = \int I_c ds \times B \quad (7)$$

여러 개의 지지대로 지지되는 버스 선에서 지지대 간격과 모멘트의 관계를 쉽게 계산하기 위해 그림 2 와 같이 2 개의 지지대로 고정 지지되는 양단 고정보 (beam) 로 가정하였다.

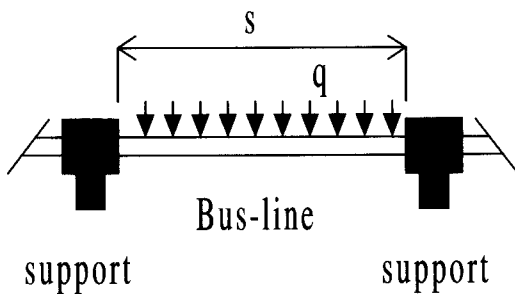


그림 2. 지지대로 지지되는 CICC 버스 선 개략도.  
Fig. 2. Schematic drawing of CICC bus-line with supports.

버스 선은 지지대에서 길이 방향을 따라 미끄러질 수 있으며, 길이의 수직 방향으로 제한되어 있고, 지지대가 길이 방향으로 충분히 길어 지지대에서 버스 선의 회전을 제한하여 모멘트를 발생시킬 수 있다고 가정하였다. s 길이의 양단 고정보의 경우 단위길이 당 q 의 분포하중을 받는 경우 최대모멘트는 양단 고정부에서 발생하며, 최대응력은 식 (8) 과 같이 표현된다. 이 굽힘 응력이 재료가 갖는 허용강도 Y 보다 작게 되도록 지지대 간격 s 를 결정한다.

$$\sigma_s = \frac{MD/2}{I} = \frac{1}{12} q \cdot \frac{s^2}{2} \frac{D}{(D^4 - d^4)} < Y \quad (8)$$

여기서 M 은 외부 자기장에 의해 도체가 받는 모멘트, D 및 d 는 도관의 단면이 원형인 경우 각각 내경 및 외경의 치수이다.

버스 선에서 변형이 주로 발생하는 곳은 굽힘부이며, 변형량은 수직 길이가 큰 굽힘 부분의 수직 길이 a 에 크게 영향을 받으므로 굽힘부 근처에서의 지지대 위치 결정이 중요하다. 굽힘부에서 외부자기장의 방향이 x,y,z 방향으로 각각 가해지는 경우 크게 그림 3 과 같은 자기력 부하 조건을 생각할 수 있다.

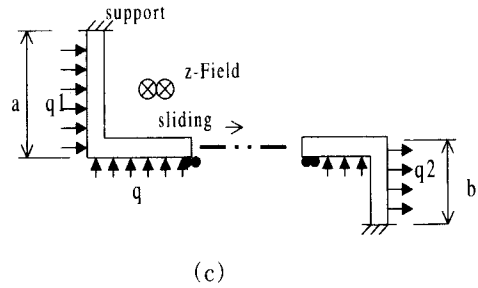
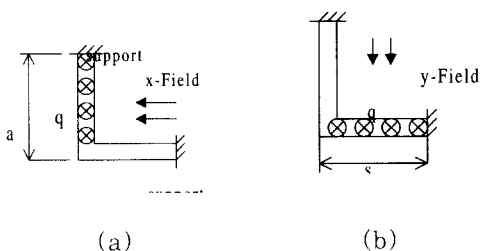


그림 3. 굽힘부에서 x,y,z, 각 방향의 자기장에 대한 자기력 부하 양상.

Fig. 3. Respective loading profiles around the bend under x, y and z direction external field.

그림 3(a), (b) 와 같은 부하 조건의 경우 두 개의 외팔보가 굽힘부에서 서로 같은 처짐을 갖는다고 가정하여 계산한 결과 최대 모멘트는 식(9) 와 같이 표현된다.

$$M = \frac{5}{16} q \cdot s^2 \quad (9)$$

한편 그림 3(c) 와 같은 경우, 수평 도체에 작용하는 y 방향의 자기력에 대해서는 양단 고정보로 가정하여 식 (8) 과 같은 최대 모멘트를 계산하였으며, x 방향의 자기력에 대해서는 버스 선이 지지대를 따라 미끄러질 수 있으므로 열변형 계산 과정과 유사하다. 그림 1 과 같은 관계를 이용하여 계산하면 식 (10) 과 같은 자기장에 의한 최대 모멘트 M<sub>foa</sub> 값을 계산할 수 있다.

$$M_{foa} = \frac{q_1 \cdot a^2}{2} - M_{fa} - nq_1ra - R_{AA} \quad (10)$$

x 성분자기력 작용 경우

여 기 서

$$R_A = \frac{1}{2(a^3 + b^3)} [(q_1a^4 - q_2b^4) - (2nq_1ra^3 - 2nq_2rb^3)]$$

여기서 q<sub>1</sub> 은 a 길이에 작용하는 단위 길이 당 자기력, q<sub>2</sub> 는 b 길이에 작용하는 단위 길이 당 자기력이다. n 은 곡률 반경 r 의 굽힘부를 직각으로 굽어진 굽힘부로 가정하는 경우 r 길이의 직선 부에서 과대하게 고려된 자기력을 보상하기 위한 값으로, 0.5 인 경우 곡률반경을 직선으로 가정한 부분에서 자기력이 직선적으로 감소하는 것을 의미한다.

그림 3(a), 3(b) 와 같은 경우는 자기장에 의한 응력과 열 응력이 서로 90° 로 서로 중첩되지 않으므로 열응력을 고려하지 않고, 단지 외부 자기장을 견딜 수 있도록 지지대 위치를 계산하여 설치하면 된다. 그러나 그림 3(c) 와 같은 경우 외부 자기장에 의한 응력이 열변형에 의한 응력과 중첩되므로 외부 자기장과 열변형에 의한 응력을 모두 고려 해야한다. 지지대가 설치된 버스 선에서 중첩된 최대 모멘트는 식 (11-1) 과 같으며, 응력을 최소로 하는 굽힘 수직 거리 a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub> 즉 굽힘 부에서 수직 방향 도체의 첫 번째 지지대까지의 거리를 각각 계산하기 위해 식 (11-3) 과 같이 1 차 미분 값이 0 이 되는 a<sub>1</sub> 및 b<sub>1</sub> 값을 찾거나, 혹은 해석 범위 안에 0 이 되는 a<sub>1</sub> 과 b<sub>1</sub> 이 없는 경우 미분

값의 부호를 찾아 경계에서 최소 값을 계산한다.

$$M_t = M_{oa} + M_{foa} \quad (11-1)$$

$$\sigma_{oi} = \frac{M_t \cdot \frac{D}{2}}{I} \quad (11-2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{oi}}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{oi}}{\partial b} = 0, \text{ 혹은 경계에서 최소} \quad (11-3)$$

열변형에 의한 모멘트를 최소화하기 위해서는 a<sub>1</sub>, 혹은 b<sub>1</sub> 즉 굽힘 부의 수직 길이가 크게 되도록 지지대를 굽힘부에서 되도록 멀리 설치하는 것이 유리하며, 외부 자기장에 대하여 모멘트를 최소화하기 위해서는 되도록 지지대를 굽힘부에 가까이 설치해야 한다. 중첩된 응력을 최소화하기 위해서는 식 (11-3) 과 같은 최적의 조건을 만족하도록 각각의 굽힘부에서 수직 방향으로의 첫째 지지대의 설치 위치가 설정되어야 한다. 이렇게 얻은 최소 응력값은 지지대 위치를 변수로 하여 얻을 수 있는 최소 응력값이므로, 이 값 이상의 허용강도를 갖는 재료를 선정해야 한다.

### 5. SSTF 용 버스 선 설치를 위한 지지대 위치 계산

SSTF 에 사용될 수 있는 CICC형 초전도 버스 선을 설계 및 설치하기 위해 위에서 언급한 해석적인 방법을 사용하였다. 냉각 중 발생하는 열응력과 외부 자기장에 의해 형성된 응력의 합을 최소화하기 위한 지지대의 설치 위치와 도관 재료를 선정하고자 하였다. CICC 버스 선 도체 설계에 사용된 계산 자료는 표 1 과 같다.

식 (11-3) 과 같은 조건을 갖는 a<sub>1</sub> 과 b<sub>1</sub>, 즉 굽힘부에서 수직 방향 도체의 첫 번째 지지대의 위치를 계산하였다. 전원 공급장치 쪽의 굽힘부 수직방향 도체의 첫 번째 지지대 위치의 도체가 받는 최대 응력을 최소로 하는 b<sub>1</sub> 을 계산하기 위해 식 (12-1)과 같이 b 에 대한 응력 미분값을 계산하여 표 1 의 값을 대입하고 식 (12-2) 와 같이 지지대를 설치한다고 가정하는 경우 식 (12-1) 은 항상 0 보다 큰 수임을 알 수 있다.

따라서 b<sub>1</sub> 의 값은 되도록 작아야 하며, 코일 단말부 쪽 굽힘부의 곡률 반경 안에서의 지지대 설치를 피하기 위해 수평 도체로부터 20 cm 위치에 지지대를 설치한다.

$$\frac{\partial \sigma_{ot}}{\partial b} = \frac{\partial \sigma_{oa}}{\partial b} + \frac{\partial \sigma_{foa}}{\partial b} > 0 \quad (12-1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{oa}}{\partial b} = 3LEa \cdot \Delta TD \cdot \left( \frac{-a(-3b^2)}{\left(\frac{12IL}{A} + a^3 + b^3\right)^2} \right)$$

$$\frac{\partial \sigma_{foa}}{\partial b} = (-) \frac{D}{2I} \left[ \frac{a \cdot (-3b^2)}{4(a^3 + b^3)^2} (q_1 a^4 - q_2 b^4 - 2nq_1 r a^3 + 2nq_2 r b^3) + \frac{a}{4(a^3 + b^3)} (-4q_2 b^3 + 6nq_2 r b^2) \right]$$

$$n = 1/2, \quad r = 20\text{cm}, \quad r \leq b < a \quad (12-2)$$

표 1. 초전도 버스 선의 응력을 계산하기 위한 변수.  
Table 1. Parameters for calculation of stresses in superconducting bus-line.

parameters	values
a	96.5 cm
b	45.0 cm
L	377.6 cm
D	3.16 cm
d	2.6 cm
E	201 GPa
$\alpha$	$10.3 \times 10^{-6} / \text{K}$
$\Delta T$	300 K
Bending radius	200 mm
Power supply 쪽 굽힘부 자기장	0.08 T
:외부자기력	3.924KN/m (eq. 7)
Coil 쪽 굽힘부 자기장	0.4 T
:외부자기력	19.62KN/m (eq. 7)

다음은 a<sub>1</sub> 을 계산하기 위해 전원 장치 쪽 지지대 위치의 도체에 발생하는 응력의 a 에 대한 미분 값을 계산한 후 식 (13) 과 같이 이 값을 0 로 하는 a<sub>1</sub> 을 수치대입법으로 계산하였다.

$$\frac{\partial \sigma_{ot}}{\partial a} = \frac{\partial \sigma_{oa}}{\partial a} + \frac{\partial \sigma_{foa}}{\partial a} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \sigma_{oa}}{\partial a} = 3LEa \cdot \Delta TD \cdot \frac{(-2a^3) + b_1^3 + \frac{12IL}{A}}{\left(\frac{12IL}{A} + a^3 + b_1^3\right)^2}$$

$$\frac{\partial \sigma_{foa}}{\partial a} = \frac{D}{2I} \left[ \frac{2q_1 a}{3} - \frac{1}{2} nq_1 r - \frac{(-2a^3) + b_1^3}{4(a^3 + b_1^3)^2} (q_1 a^4 - q_2 b_1^4 - 2nq_1 r a^3 + 2nq_2 r b_1^3) - \frac{a}{4(a^3 + b_1^3)} (4q_1 a^3 - 6nq_1 r a^2) \right]$$

여기서  $n = 1/2, r = 20\text{cm}, b_1 = 20\text{cm}$

식 (13) 을 만족하는 a 즉 a<sub>1</sub> 값을 계산한 결과 103 cm를 얻을 수 있었다. 즉 b<sub>1</sub> 이 20 cm 위치 일 때, 전원공급장치 단말부의 수직 도체의 경우 수평 도체 부에서 103 cm 위치에 지지대를 설치하는 경우 최소 응력을 얻을 수 있다. b<sub>1</sub> = 20 cm 인 경우 a<sub>1</sub> 에 대한 버스 선에서의 최대 응력 변화를 확인하기 위해 식 (11-2) 식에서 a<sub>1</sub>을 변화시키면서 발생하는 응력을 그림으로 나타내었다. 최소 응력은 위에서 계산한 것처럼 a<sub>1</sub>이 103 cm 인 경우 417 MPa 였다.

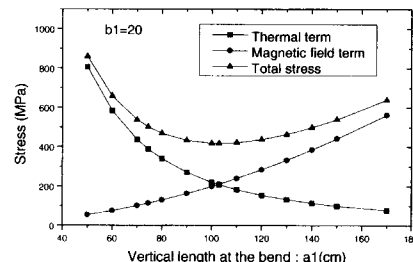


그림 4. 지지대 수직 설치위치와 응력 관계도.  
Fig. 4. Relations between stresses and support vertical-position.

그러나 표 1 에서 보듯이 단말부를 연결하기 위한 수직부의 길이는 96.5 cm 이며, 더욱이 그림 3(a), (b)와 같은 외부 자기장이 작용하는 경우 이 자기장에 의해 결정되는  $a_1$  의 길이는 식 (9) 에 의해 93.5 cm 를 넘을 수 없다. 따라서 이 경우 최적 지지대 설치 위치는 z 방향 자기력에 의한 경계 조건인 93.5 cm 가 된다.

### 6. ANSYS code를 이용한 버스 선에서의 최대 응력 계산

해석식을 이용해 얻은 지지대의 최적 설치조건을 확인 하기 위해 ANSYS code을 사용하여 버스 선에 발생하는 응력을 계산하였다. 계산 조건은 표 1, 형상은 그림 5, 그리고 자기장 조건은 그림 3(c) 와 같은 조건이며, 자기력은 버스 선 수평 부에서 3.924 KN/m 와 19.62 KN/m 사이에서 일차적으로 변한다고 가정하였다.

사용된 요소(element) 는 3-D solid structural solid 요소를 사용하였으며 탄성 한도 내에서 계산되었다. 버스 선 경계조건에서 온도차에 의한 응력 발생을 막기 위해 버스 선 반경방향으로는 변형이 자유롭다고 가정하였다. 도관 재료는 그림 4 로 부터 스테인레스 스틸 316 LN을 선택하였다. 지지대의 위치는  $b_1$  의 경우 20 cm, 수평부의 지지대 위치는 해석식에서의 계산 오차 및 안전율을 고려하여 식 (8), (9) 에서 계산된 간격의 80 % 값을 만족하는 지지대의 위치를 계산한 후, 그 값 한도 내에서 균일하게 배열시켰다. 굽힘부에서  $a_1$  길이도 안전율을 고려하여 해석식에서 얻은 93.5 cm 의 약 80% 인 74.5 cm 의 지지대 위치를 계산에 사용하였다. 계산 결과 최대 응력은 해석식에서 예상한 것처럼 전원장치 쪽의 수직 도체에서, 굽힘부로부터 첫 번째 지지대 위치의 버스 선에서 발생하며 그 크기는 지지대의 위치가 변함에 따라 표 2 와 같이 변하였다.

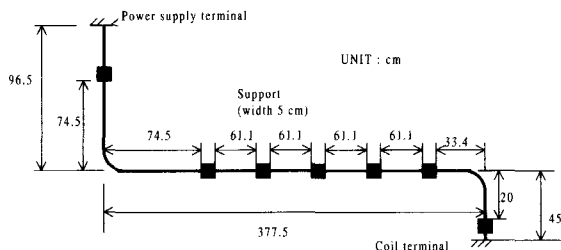


그림 5. 버스 선에서 최적의 응력을 얻기 위해 해석식을 통해 제시된 지지대 위치.

Fig. 5. Suggested support positions by using analytical solution to get optimal stress in bus-line.

표 2 에서 해석식 결과와의 차이는 주로 자기력에 의한 응력항에서 발생하였으며, 이것은 해석식에서 계산을 간단히 하기 위해 굽힘부 곡률을 직각 굽힘부로 가정하여 계산한 결과 때문으로 예상된다. 표 3 은  $a_1 = 74.5$  cm 지지대 설치의 경우  $b_1$  길이에 따른 버스 선에서의 최대 응력 변화로서, 해석식에서 예상한 것처럼  $b_1$  의 길이가 커질수록 응력값이 커지고 있는 것을 확인하였다.

표 2. ANSYS code 와 해석식을 이용한 전원장치 단말부 쪽 지지대 위치 변화에 따른 버스 선의 최대응력 비교 ( $b_1=20$  cm)

Table 2. Comparison of maximum stress of bus-line with change of support position on the power supply side, which were calculated by ANSYS code and analytical solution respectively. ( $b_1=20$  cm)

$a_1$ (cm)	ANSYS (MPa)			해석식 (Mpa)		
	열변형	자기력	전체	열변형	자기력	전체
65	461	57	518	503	87	590
74.5	385	82	467	388	113	501
85	310	109	419	301	145	446
93.5	262	133	395	250	174	424

그림 3(c) 와 같은 자기장 조건과 그림 5 와 같은 지지대 설치의 경우에 대하여 ANSYS code를 사용하여 계산한 결과 표 2 에서 보듯이  $a_1 = 74.5$  cm,  $b_1 = 20$  cm 에서 467 MPa의 응력을 얻었으며, 그림 3(a) 와 같은 경우 454 MPa 의 값을 얻어 허용응력 640 MPa 을 잘 만족하고 있음을 알 수 있었다.

표 3. ANSYS code 와 해석식을 이용한 코일 단말부 쪽 지지대 위치에 따른 버스 선의 최대응력 비교. ( $a_1=74.5$  cm)

Table 3. Comparison of maximum stresses of bus-line with change of support position on the power supply side, which were calculated by ANSYS code and analytical solution respectively. ( $a_1=74.5$  cm)

$b_1$ (cm)	ANSYS (MPa)			해석식 (MPa)		
	열변형	자기력	전체	열변형	자기력	전체
20	385	82	467	388	113	501
30	379	124	503	372	136	508
40	363	205	568	343	200	543

### 7. 결 론

저온으로 냉각된 CICC 형의 버스 선이 외부 자기장의 영향을 받는 경우 버스 선에 최소응력이 발생하도록 지지대의 위치를 배열해야 한다. 냉각 변형에 대해서는 지지대의 간격을 크게 하며, 외부자기장에 대해서는 지지대의 간격을 좁게 해야 응력이 적게 발생하므로 최적의 지지대 설치 위치가 있음을 본 연구에서 제안한 해석식들을 이용해 확인하였다. SSTF 의 버스 선을 모델로 하여 해석식을 이용하여 최적의 지지대 위치를 결정하는 방법을 제시하였으며, 이 결과를 이용해 얻어진 지지대의 배치 경우에 대하여 ANSYS code 를 이용

한 계산 결과 버스 선에서의 최고응력 및 위치가 해석  
식 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 차세대 초전도 핵융합연구 장치 개발 사업의  
지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

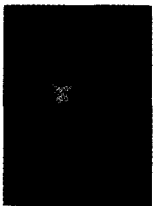
- [1] Shuichi Yamada et al., " Superconducting  
Current Feeder System for the Large Helical  
Device" IEEE Transactions on magnetics, Vol.32,  
No4, 2422-2425, July 1996
- [2] M. N. Wilson, Superconducting Magnets,  
Clarendon Press Oxford, 306-3091983
- [3] KSTAR 초전도자석 계통개발 연구자 회의자  
료,"Preliminary Analysis of the Thermal  
contraction : TF Bus-lines inside the  
Cryostat" KBSI, 2000 년 1월
- [4] 김문생 외, 재료역학, 청문각, 1986
- [5] Keller, et al., Physics-Classical and  
Modern, McGraw-Hill, 1996

### 저 자 소 개



#### 이호진(李浩鎭)

1958년 1월 28일생. 1980년 한양대  
학교 기계공학과 졸업, 1992년 한국  
과학기술원 정밀공학과 졸업(공학박사),  
1985년~현재 한국원자력연구소 책임  
연구원



#### 남현일(南鉉一)

1973년 9월 19일생. 2000년 충북대  
학교 안전공학과 졸업, 2000년~현재  
충북대학교 안전공학과 석사과정



#### 김기백(金基伯)

1960년 2월 10일생. 1988년 대전산  
업대학교 기계공학과 졸업, 1984년~  
현재 한국원자력연구소



#### 홍계원(洪啓源)

1956년 4월 3일생. 1978년 서울대학  
교 요업공학과 졸업, 1983년 한국과학  
기술원 재료공학과 졸업(공학박사),1983  
년~현재 한국원자력연구소 책임연구원