

유한요소해석을 이용한 다상의 초전도 코일에 대한 기계적 열적 등가 물성

사정우*, 허남일*, 최창호*, 오영국*, 조승연*, 도철진*, 권면*, 이경수*

Equivalent Mechanical and Thermal Properties of Multiphase Superconducting Coil Using Finite Element Analysis

J.W. Sa*, N.I. Her*, C.H. Choi*, Y.K. Oh*, S. Cho*, C.J. Do*, M. Kwon*, and G.S. Lee*

Key Words : Equivalent material property (등가물성), Elastic modulus (탄성계수), Shear modulus (전단탄성계수), Finite element method (유한요소법), Orthotropic material (직교이방성 재료)

Abstract

Like composite material, the coil winding pack of the KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) consist of multiphase element such as metallic jacket material for protecting superconducting cable, vacuum pressurized impregnated (VPI) insulation, and corner roving filler. For jacket material, four CS (Central Solenoid) Coils, 5th PF (Poloidal Field) Coil, and TF (Toroidal Field Coil) use Incoloy 908 and 6-7th PF coil, Cold worked 316LN. In order to analyze the global behavior of large coil support structure with coil winding pack, it is required to replace the winding pack to monolithic matter with the equivalent mechanical properties, i.e. Young's moduli, shear moduli due to constraint of total nodes number and element numbers. In this study, Equivalent Young's moduli, shear moduli, Poisson's ratio, and thermal expansion coefficient were calculated for all coil winding pack using Finite Element Method

기호설명

- E: 탄성계수 또는 영계수 (Young's Modulus)
G: 전단탄성계수 (Shear Modulus)
 ν : 프아송 비 (Poisson's Ratio)
 α : 열팽창 계수 (Thermal expansion coefficient)

1. 서 론

등가물성(Equivalent or Smeared material Properties)은 두개 이상의 재료가 혼합되어 거시적으로 하나의 단일체 거동을 나타내는 재료의 물성을 말하며 그 대표적인 예로 섬유강화 복합재료를 들 수 있는데 이것은 기지(matrix)와 보강섬유(fiber)로 구성된다. KSTAR 초전도 자석을 구성하는 CICC (Cable-In-Conduit-Conductor)는 초전도 선재 (super-

conducting cable)와 이를 보호하는 자켓(jacket) 그리고 CICC 들간의 접착과 절연을 위한 절연재가 사용된다. 코일 지지구조물의 전체적인 거동을 알기 위해서, 구조해석 시 이러한 상세한 요소들 까지 유한요소모델에 적용하는 것은 효율적이지 못하다. 특히, 요소의 크기와 수에 대하여 커다란 제한을 가질 수 있기 때문에 코일의 등가물성은 필수적이라 말할 수 있다. 현재까지 예비적인 구조해석에서 사용된 코일의 물성들은 주로 KSTAR 초전도 자석 장치를 설계한 MIT 에서 정의된 것을 사용해왔다[1]. KSTAR 는 코일을 구성하는 재료의 측면에서 TPX 와 유사하나, 형상이나 재료의 측면에서 몇몇 차이점을 가지고 있다. 최근에는 KSTAR CS, PF 그리고 TF 코일에 대한 등가물성에 대한 연구가 진행되어 왔다[2].

일반적인 재료의 물성은 규격화된 시험편을 이용하여 간단한 실험에 의해 결정될 수 있는 반면 초전도 자석의 경우, 시험편 제작이 어려울 뿐만

* 한국기초과학지원연구원

아니라 저온에서의 실험조차도 쉽지 않다. 그러나 유한 요소법은 모델의 수립과 경계조건 등을 자유롭게 부여할 수 있기 때문에 물성시험을 모사하는데 매우 용이하다. 실제로 ITER RF(Russia Federation) Home Team 에서는 TF 코일에 대한 등가물성을 계산하기 위하여 유한요소해석을 이용한 바 있으나, 그 해석절차는 대부분 내부문서로 제한되어 있다[3].

본 메모에서는 최근에 제안된 KSTAR 코일의 재료 및 치수에 대한 등가물성(i.e., 탄성계수)을 상용 유한요소 코드인 ANSYS 를 이용하여 계산하였으며, 초전도 자석 구조물의 공학설계를 위한 기본입력자료를 확보하는데 그 의의를 두고 있다[4].

2. 관련이론

2.1 직교 이방성재료에 대한 후크의 법칙[5]

3 차원 재료에 대한 일반화된 후크의 법칙(Hooke's law)은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (1)$$

여기서, ε_j 는 변형률을 나타내고, S_{ij} 는 컴플라이언스(compliance), 그리고 σ_i 는 응력을 나타낸다.

컴플라이언스 행렬의 요소들을 공학적인 물질의 상수값으로 나타내면 식(2)에서와 같이 총 9 개의 독립 상수를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

E_i : 탄성계수 (Young's modulus)

ν_{ij} : 프아송 비(Poisson's ratios)

G_{23}, G_{31}, G_{12} : 전단탄성계수(shear moduli)

컴플라이언스의 대칭조건으로 탄성계수와 프아송 비는 식(3)과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

결국 KSTAR 코일 winding pack 에 대하여, 우리는 원통 좌표계를 사용하여 다음과 같이 6 개의 기본적인 방정식을 쓸 수 있다.

$$\varepsilon_R = \frac{1}{E_R} \sigma_R - \frac{\nu_{\theta R}}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{ZR}}{E_Z} \sigma_Z \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\nu_{R\theta}}{E_R} \sigma_R + \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta - \frac{\nu_{Z\theta}}{E_Z} \sigma_Z \quad (5)$$

$$\varepsilon_Z = -\frac{\nu_{RZ}}{E_R} \sigma_R - \frac{\nu_{\theta Z}}{E_\theta} \sigma_\theta + \frac{1}{E_Z} \sigma_Z \quad (6)$$

$$\gamma_{\theta Z} = \frac{1}{G_{\theta Z}} \sigma_{\theta Z} \quad (7)$$

$$\gamma_{ZR} = \frac{1}{G_{ZR}} \sigma_{ZR} \quad (8)$$

$$\gamma_{R\theta} = \frac{1}{G_{R\theta}} \sigma_{R\theta} \quad (9)$$

여기서, R 은 코일의 반경방향을 나타내고, θ 는 길이 또는 권선방향을, 또한 Z 는 CS, PF 에 대해서는 수직방향 그리고 TF 코일에서는 토로이달(Toroidal) 방향을 나타낸다.

2.2 수직응력에 의한 탄성계수

먼저 Fig. 1 에서와 같이 코일의 길이방향으로 균일한 압력(σ_Z)을 가해보자. 이때, 다른 방향의 응력은 거의 제로($\sigma_Z \gg \sigma_R, \sigma_\theta$)라 가정할 수 있으며, 선형적인 응력-변형률 범위 내에서 아래와 같은 식들이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_R = -\frac{\nu_{ZR}}{E_Z} \sigma_Z \quad (10)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\nu_{Z\theta}}{E_Z} \sigma_Z \quad (11)$$

$$\varepsilon_Z = \frac{1}{E_Z} \sigma_Z \quad (12)$$

$$\gamma_{R\theta} = \gamma_{\theta Z} = \gamma_{ZR} = 0 \quad (13)$$

우리는 식(12)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_Z = \frac{L_Z}{\Delta Z} \sigma_Z \quad (14)$$

여기서 L_Z 와 σ_Z 는 알고 있는 값이므로, 해석으로부터 수직방향의 변위(ΔL) 만을 얻으면 수직방향 탄성계수(E_Z)를 계산할 수 있다.

또한 식(10), (11)은 각각 (15), (16)와 같이 표현될 수 있으며, 이때, 프아송비($\nu_{ZR}, \nu_{Z\theta}$)가 결정된다.

$$\nu_{ZR} = -\frac{\epsilon_R E_Z}{\sigma_Z} = \frac{\Delta r E_Z}{L_R \sigma_Z} \quad (15)$$

$$\nu_{Z\theta} = -\frac{\epsilon_\theta E_Z}{\sigma_Z} \quad (16)$$

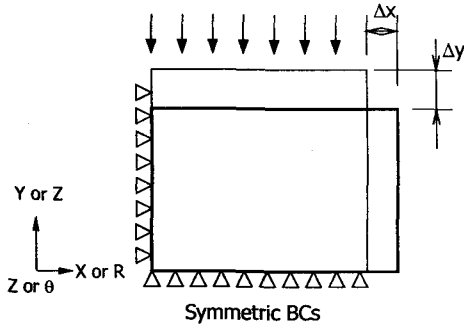


Fig. 1 Schematic deformation due to the vertical uniform pressure

마찬가지로 반경방향 압력에 의한 탄성계수(E_R)도 E_Z 와 동일한 계산 절차를 사용할 수 있다.

2.3 전단탄성계수

Fig. 2 에서와 같이 순수 전단 응력($\sigma_{RZ} = \tau_{RZ}$)이 R-Z 평면에 적용될 때를 고려해보자. 이 때 적용된 응력(τ)과 변형률(γ)은 선형적인 범위 내에서 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tau_{RZ} = \gamma_{RZ} G_{RZ} \quad (17)$$

$$\epsilon_R = \epsilon_\theta = \epsilon_Z = \gamma_{R\theta} = \gamma_{\theta Z} = 0 \quad (18)$$

여기서 G_{RZ} 는 R-Z 평면에서의 전단탄성계수 (in-plane shear modulus)라고 한다. 식 (17)은 (18)과 같이 표현될 수 있으며, 전단탄성계수는 적용된 하중(F)과 변형량을 이용하여 쉽게 계산될 수 있다.

$$\therefore G_{RZ} = \frac{F \cdot L}{\Delta x \cdot A} \quad (19)$$

또한 나머지 두 평면(out of plane, i.e. R- θ plane 과 θ -Z plane) 에서는 단순히 침자만을 치환하여 위와 같은 관계를 성립시킬 수 있다.

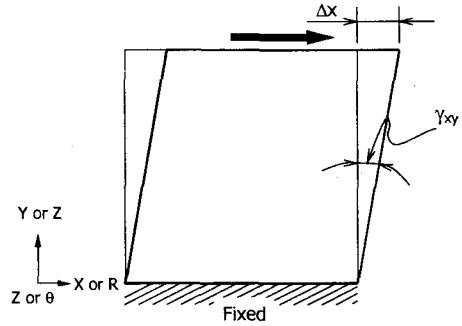


Fig. 2 Schematic deformation due to the radial pressure

2.4 열팽창계수 ($\alpha_R, \alpha_\theta, \alpha_Z$)

KSTAR 초전도 자석은 4K 에서 운전되며, 열수축을 고려한 응력해석을 위해서는 코일의 등가 열팽창(또는 열수축)을 조사할 필요가 있다. 먼저 해석을 통하여 각 세 방향에 대한 수축된 변위를 얻은 후, 식 (20)과 (21)을 이용하여 열팽창계수를 산출하였다.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L} = \alpha \Delta T \quad (20)$$

$$\therefore \alpha = \frac{\Delta l}{L \Delta T} \quad (21)$$

3. 해석절차

3.1 재료의 물성[6]

코일의 등가물성에 가장 큰 영향을 주는 것은 자켓 재료이다. 초전도 자석 선재를 보호하고 있는 자켓은 CS 1-4, PF 5 그리고 TF 의 경우, Incoloy 908 이 사용되며, PF 6-7 은 냉간 가공된 스테인레스 강 (CW 316LN)이 사용된다. 또한 금속재료 이외에도 코일을 구성하는 또 하나의 중요한 재료는 절연재이다. 이것은 절연 뿐 아니라, 압축강도나 전단강도와 같은 기계적 강도를 필요로 한다. Table 1 는 코일 구성재료의 저온 물성을 나타낸 것이다.

Table 1 Material Properties at 4K

| Materials | Ex | Ey | Ez | Gxy | Gyz | Gxz |
|-------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| | GPa | GPa | GPa | GPa | GPa | GPa |
| CW 316LN | 205 | 205 | 205 | 80 | 80 | 80 |
| Incoloy 908 | 185 | 185 | 185 | 71.2 | 71.2 | 71.2 |
| VPI | 12 | 20 | 20 | 6 | 6 | 6 |
| Prepreg | 7 | 10 | 10 | 4 | 4 | 4 |
| G10 | 20 | 35 | 35 | 10 | 10 | 10 |

Table 1 Material properties (Continued)

| Materials | vxy | vyz | vzx | α_x | α_y | α_z |
|-------------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|
| | | | | % | % | % |
| CW 316LN | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| Incoloy 908 | 0.2992 | 0.2992 | 0.2992 | 0.174 | 0.174 | 0.174 |
| VPI | 0.198 | 0.17 | 0.198 | 0.7 | 0.25 | 0.25 |
| Prepreg | 0.231 | 0.17 | 0.231 | 0.7 | 0.25 | 0.25 |
| G10 | 0.186 | 0.17 | 0.186 | 0.7 | 0.25 | 0.25 |

[Note] * x is through thickness

3.2 형상 및 유한요소모델

Fig. 3 은 등가 물성을 위한 CICC의 유한요소 모델을 나타낸 것이다. CICC는 약 38%의 기공률(void fraction)을 갖는 초전도 선재와 이를 보호하는 자켓, 그리고 절연체인 turn insulation, corner roving filler 등으로 구성된다. 그러나 초전도 선재는 자켓과 접촉되지 않으며, 외부의 힘에 움직일 수 있는 충분한 공간을 갖기 때문에 등가물성에는 거의 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 따라서 초전도 선재는 모델에 사용되지 않았다. 또한 Table 2는 각 코일에 대한 CICC의 치수를 나타낸 것이다. 앞에서 언급했듯이, PF 코일과 CS 코일은 같은 치수를 갖지만 자켓 재료가 다르며, 또한 TF 코일은 다른 코일에 비해 자켓의 두께가 두껍기 때문에 해석은 세 종류의 코일에 대하여 각각 다른 모델을 사용한다.

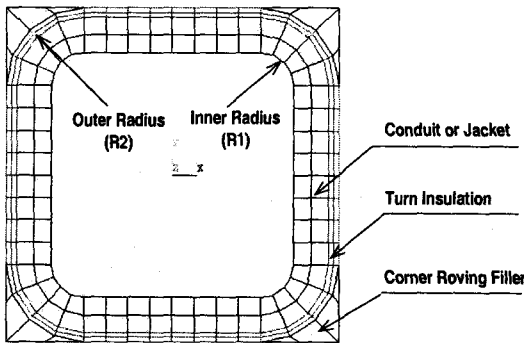


Fig. 3 Geometry and finite element model of CICC

Table 2 Dimensions of CICC (unit : mm)

| Coils | Total length | Inner Radius | Outer Radius | Thickness (1) | Thickness (2) |
|----------------|------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | Central Solenoid | 23.92 | 2.69 | 5.1 | 2.41 |
| Poloidal Field | 23.92 | 2.69 | 5.1 | 2.41 | 0.81 |
| Toroidal Field | 27.27 | 2.69 | 5.55 | 2.86 | 0.81 |

[Note] (1) Jacket thickness

(2) Turn insulation thickness

3.3 하중 및 경계조건

하나의 모델에 대하여 반복적인 해석을 할 경우, ANSYS 사용자는 입력파일을 만드는 것이 효율적이다. 특히, 탄성 계수 (Young's Moduli)와 전단 탄성계수 (Shear Moduli)는 서로 다른 경계조건을 갖기 때문에 각각 독립된 해석 모델을 필요로 한다. 다시 말해서, 본 연구에서는 모든 코일(CS, PF, TF)에 대하여 탄성계수, 프와송 비, 열팽창계수를 위한 모델, R- θ 평면에서의 전단탄성계수($G_{R\theta}$)를 위한 모델, 그리고 R-Z 평면에서의 G_{RZ} 를 위한 모델이 각각 만들어 졌다. 다음은 해석모델에 적용된 하중 및 경계 조건이다.

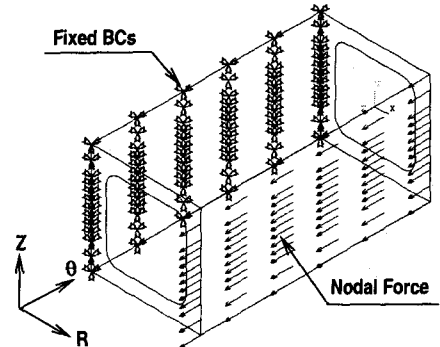


Fig. 4 Load and boundary condition for shear of the CICC

(1) 탄성계수, 프와송 비, 열팽창계수

이 모델에 적용된 하중은 약 1000N으로 CICC의 소성 변형을 피하기 위해 충분히 작은 값을 사용하였다. 또한 세 평면($x=y=z=0$)에 대하여 대칭 경계조건을 사용하였고, 하중이 적용되는 면의 절점은 모두 커플링 된다.

(2) R- θ 평면에서의 전단탄성계수, $G_{R\theta}$

전단탄성계수($G_{R\theta}$)를 위한 모델에서 하중은 (1)에서 사용한 것 보다 좀 더 작은 하중(10N)을 사용하였다. Fig. 4에서와 같이, CICC의 한 쪽면은 완전히 구속하고, 반대면의 절점은 역시 커플링 된다.

(3) R-Z 평면에서의 전단탄성계수, G_{RZ}
 G_{RZ} 는 $G_{R\theta}$ 를 위한 조건과 같다.

4. 결 과

4.1 기하학적 형상의 영향

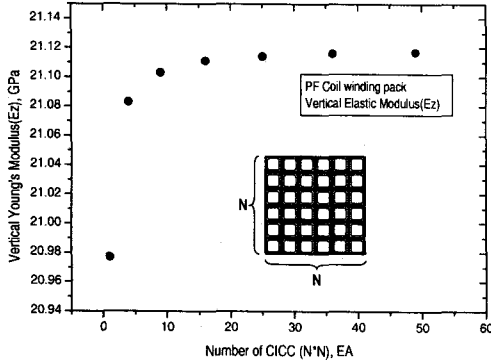


Fig. 5 Vertical Young's modulus variation according to the number of CICC

Winding pack 의 횡 탄성계수(E_R , E_Z) 는 유한요소 모델에 고려한 CICC 의 수가 증가함에 따라 어떤 값에 수렴함을 보여왔다. 즉, 코일의 기하학적 형상이 물성 값에 영향을 주는 것이다. 실제로, Fig. 5 에서와 같이 CICC 의 수를 1-49 개까지 증가시켰을 때, 10 을 넘어서면서 탄성계수는 빠르게 수렴함을 볼 수 있으며, 횡 탄성계수의 최대값과 최소값의 차이는 2GPa 을 벗어나지는 않는다.

이전의 연구에서 고찰한 것처럼 중공을 갖는 CICC 는 횡 방향의 균일한 압력을 받을 때, CICC 의 횡 방향을 따라 국부적으로 상당히 큰 변위 분포를 갖는다. 이러한 변위를 평균하여 사용하는 것은 등가 물성에 오차를 가져올 수 있다. 이러한 영향을 최대한 줄이기 위해, 앞에서도 언급했듯이 압력이 가해지는 면의 모든 절점을 커플링(coupling) 시켰다.

Winding pack 의 종 탄성계수(E_θ) 는 CICC 의 수에 거의 영향을 받지 않는다. 이것은 R-Z plane 에서 CICC 의 단면형상이 일정하기 때문이다.

전단탄성계수도 CICC 의 기하학적 형상에 크게 영향을 받는다. 특히, 단순 전단시험에서 중요시 되는 것은 순수 전단을 유지하는 것이다. 이것을 유한요소 해석에 적용하기 위하여 전단면에서의 AR(Aspect Ratio, t/L)를 고려하였다. Fig. 6 은 전단탄성계수가 84GPa 인 등방성 재료($1m \times 1m \times 1m$)

를 이용하여 역으로 유효 전단탄성계수를 계산한 것이다. $AR=1$ 인 경우, 해석결과는 입력으로 사용했던 값(84GPa)에 크게 못 미치는 것을 볼 수 있다. 이것은 굽힘응력에 의해 전단 변형률이 크게 증가하기 때문이다. 그러나 AR 이 작아짐에 따라, 즉 길이(L)에 비해서 두께(t) 가 작아짐에 따라, 주어진 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이런 예비 해석으로부터 코일의 등가 전단탄성계수는 모델의 AR 비에 크게 의존하며, 적절한 수렴에 요구되는 값을 약 0.05 로 설정하였다.

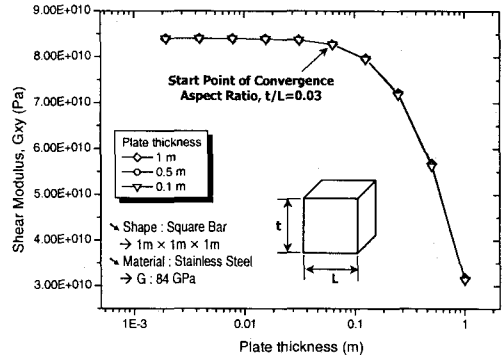


Fig. 6 Bending effect for shear modulus

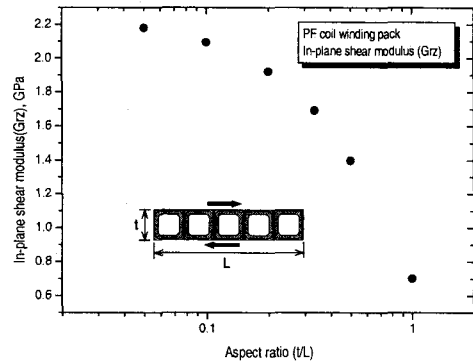


Fig. 7 In-plane shear modulus variation according to aspect ratio

Fig. 7 은 면내(in-plane, i.e., R-Z plane)에서의 전단탄성계수를 나타낸 것으로 AR 을 줄이기 위해서 CICC 의 높이(t)는 고정시키고, 길이(L)을 증가시키기 위해서 약 30 개의 CICC 를 가로방향으로 나열하였다. 마찬가지로 G_{RZ} 는 어떤 하나의 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

그림으로 나타내지는 않았지만 면외(out-of-plane, i.e., R- θ , θ -Z plane) 에서도 Fig. 6 에서 예측한 대로 AR 이 감소함에 따라 전단탄성계수($G_{R\theta}$, $G_{\theta R}$)는 어떤 값으로 수렴함을 볼 수 있다.

4.2 결과 요약

KSTAR 초전도 자석 코일에 대한 등가물성이 유한요소 해석을 이용하여 계산되었다. Table 3은 CS, PF, 그리고 TF 코일에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 먼저 동일한 형상과 치수를 갖는 CS1-4/PF5와 PF 6-7의 경우, 자켓재료를 Incoloy908보다 강성이 좀 더 큰 SUS316LN을 사용한 PF6-7의 횡 탄성계수($E_R \approx E_Z$)는 약 3%, 종 탄성계수(E_θ)는 약 9% 증가됨을 볼 수 있다. 그러나 TF는 자켓의 체적비가 증가했음에도 불구하고 상대적으로 강성이 낮은 Incoloy 908을 자켓 재료로 사용하기 때문에 코일의 탄성계수는 그렇게 크게 증가하지는 않는다.

Table 3 Result summary

| Properties | KSTAR CS1-4, PF5 | KSTAR PF6-7 | KSTAR TF |
|--|------------------|-------------|----------|
| Young's Modulus (GPa) | | | |
| E_R | 20.563 | 21.213 | 21.671 |
| E_θ | 59.841 | 65.878 | 62.511 |
| E_Z | 20.463 | 21.117 | 21.579 |
| Shear Modulus (GPa) | | | |
| $G_{R\theta}$ | 12.267 | 13.381 | 12.766 |
| $G_{\theta Z}$ | 12.267 | 13.381 | 12.766 |
| G_{RZ} | 2.145 | 2.178 | 2.098 |
| Poisson's Ratio | | | |
| $\nu_{R\theta}$ | 0.0961 | 0.0812 | 0.0981 |
| $\nu_{\theta Z}$ | 0.2792 | 0.2519 | 0.2826 |
| ν_{RZ} | 0.3365 | 0.3243 | 0.3013 |
| Thermal Expansion Coefficient (%) | | | |
| α_R | 0.2401 | 0.3423 | 0.2319 |
| α_θ | 0.1746 | 0.2972 | 0.1768 |
| α_Z | 0.2419 | 0.3441 | 0.2334 |

면의 전단탄성계수($G_{R\theta} \approx G_{\theta Z}$)는 CS1-4/PF5에서 가장 작은 값인 12.267 GPa로 계산되었으며, 최대값은 약 13.4 GPa로 PF 6-7에서 보인다. 또한 면내 전단탄성계수(G_{RZ})는 세 종류의 코일에 대하여 2.0-2.15 GPa의 범위를 갖으며 변화한다.

코일에 대한 열팽창 계수는 2.6 절에서 설명되었듯이 293 K에서 4 K로 냉각 시 수축되는 평균 변위량으로부터 계산된다. KSTAR CS1-4/PF5와 TF의 등가 열팽창계수는 유사한 값을 보이는데 반하여 PF6-7의 경우, 다른 코일에 비하여 30-40% 정도 증가된 값을 보인다. 이것으로부터 자켓 재료의 열 물성이 코일의 등가 열팽창계수에 매우 큰 영향을 주는 것이라 생각된다.

5. 결론

유한요소해석을 이용하여 KSTAR 코일에 대한 기계적등가물성을 계산하였다. CICC의 초전도 선재가 위치하는 부분의 국부적인 변형에 의한 탄성계수는 CICC 배열의 수를 증가시킬수록 수렴을 보였다.

전단탄성계수의 경우, 순수전단을 모사하기 위해서, 전단력에 의한 CICC 내부의 굽힘응력을 최대한 줄여야 하며, 이를 위하여 길이에 대한 높이비(Aspect Ratio, t/L)를 0.05 이하로 조절하여야 한다.

탄성계수 및 전단탄성계수는 다른 재료에 비하여 강성이 큰 자켓의 기하학적 형상 및 체적비에 크게 의존되며 마찬가지로 열해석 결과도 PF6-7에서 약 0.34%의 높은 수축률을 나타냈으며, 자켓의 재질에 크게 의존함을 알 수 있었다.

앞에서 계산된 각 코일의 등가 값들은 초전도 자석 구조물의 구조해석에 사용될 수 있다.

후기

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

참고문헌

- (1) R. L. Myatt, 1997, "Proposed Mechanical Property Data Base for Use in all Structural Analysis", KSTAR-USMIT-RLMyatt-060997-01.
- (2) J.W. Sa, 2001, "Smearred Elastic Properties Benchmark of the ITER TF Winding Pack", KSTAR-memorandum, Feb. 16.
- (3) A.I. Borovkov, P. Ilyin, 1992, "Finite Element Analysis of Effective Mechanical and Thermal Characteristics of Micro Heterogeneous Superconducting Toroidal Field Coils", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28., pp. 927-930.
- (4) Y.K. Oh, 2000, "Suggestions on KSTAR Coil Dimensions Revision 5", KSTAR Memorandum, Aug. 22.
- (5) R.F. Gibson, 1994, "Principles of Composite Material Mechanics", McGraw-Hill.
- (6) 사정우, 2000, "KSTAR 초전도 자석 구성재료의 기계적 물성에 관한 조사", T130/140-AT0-TH3-

5. 결 론

본 논문에서 재료의 동적 물성치를 추출하여 LS-DYNA 의 Johnson-Cook 구성방정식을 이용한 유한요소해석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 재료의 정적특성과 동적특성은 응력-변형률 선도에서 변형률 속도에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다.
- (2) 충돌현상과 같이 짧은 시간에 두 물체의 접촉이 일어날 경우 변형률 속도 경화를 고려하여 해석하는 것이 준 정적 물성치만으로 해석한 경우보다 정확한 해를 얻을 수 있다.
- (3) 외연적 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA 에서 재료의 변형률 속도 경화 효과를 고려하기 위해서는 Johnson-Cook Material 과 같은 동적 특성을 고려한 물성치를 사용하는 것이 바람직하다.
- (4) 해석결과 응력집중이 일어나는 취약부위는 가동접점과 고정접점의 경우 서로 다른 부위에서 발생하고 있음을 관찰할 수 있었다.
- (5) 충돌직후 접촉부위에서 반발력에 의한 되튀김현상(Chattering)이 발생함을 알 수 있었으며 이를 방지하기 위한 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) 강우중, 조상순, 허훈, 정동택, 1997, " 새로운 Tension Split Hopkinson Bar 를 이용한 박판의 고속인장시험," 대한기계학회논문집 A, Vol. 21, No.12, pp. 2209~2219
- (2) 강우중, 2000, " 외연적 유한요소법을 이용한 차체 구조물의 충돌해석," 한국과학기술원 박사학위논문.
- (3) Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., 1982, *IMPACT DYNAMICS*, A Wiley-Interscience Publication.
- (4) 이승우, 홍성인, 2000, " 홉킨슨 압축봉에서의 동적 재료특성에 관한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 A, Vol. 24, pp.1438~1445
- (5) Goldsmith, W., 1960, *Impact-The theory and physical behaviour of colliding solids*, Edward Arnold Ltd.