

〈論 文〉

열수축을 하는 필라멘트 와인딩 복합재료 관의 설계

정태은* · 신호철**

(1993년 1월 13일 접수)

Design of Filament Wound Composite Tubes under Thermal Contraction

Tae-Eun Chung and Hyo-Chol Sin

Key Words: CFRP(탄소섬유 복합재료), Thermal Stresses(열응력), Thermal Expansion Coefficient(열팽창계수), Filament Winding Angle(필라멘트 와인딩 각), Cryogenic Environments(극저온 환경)

Abstract

Thermal deformations and stresses due to temperature changes are the serious problems in cryogenic structures such as the torque tube in a superconducting generator. In this paper, the equations of thermal expansion coefficients expressed only by material properties and winding angles are derived for the filament wound composite tubes. The experimental results of thermal contraction of CFRP tubes are compared with those from theoretical approach. Composite tubes with optimally regulated thermal expansion coefficient are designed on the basis of the study for the torque tube in the superconducting generator with temperature distributions varying from 300 K to 4.2 K. The filament winding angle of composites resisting thermal stresses properly is sought by the finite element method using layered shell elements. The results show that the composite tubes designed for the requirements in cryogenic environments can effectively cope with the thermal stress problem.

1. 서 론

복합재료의 제조 방법에는 여러가지 방법이 있으나, 특히 필라멘트 와인딩 공법에 의한 복합재료⁽¹⁾는 축대칭 구조물과 같은 형상의 성형이 가능하고, 섬유의 끊어짐이 없이 성형이 된다는 장점으로 인해 사용 범위가 점차 확대되고 있다. 탄소섬유의 이방성은 여러 용도의 설계에 이용될 수 있으나, 그 중 열팽창계수에 대한 성질은 기존의 등방성 재료와는 매우 다른 경향을 나타낸다. 일반적인 재료의 경우에는 온도가 상승함에 따라 팽창하는 것이

대부분이지만, 탄소섬유의 경우는 격자 구조의 심한 이방성⁽²⁾으로 인하여 섬유 방향으로는 온도 상승 시, 수축 또는 0에 가까운 팽창을 하게 된다. 이러한 성질은 온도 변화가 중요한 인자가 되는 환경, 이를테면 우주 공간이나 초전도 현상을 만들어 주는 극저온 분위기, 공력 가열에 의한 비행체 등에서 나타나는 열변위, 열응력 문제를 해결해주는 설계에 응용될 수 있다.

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 복합재료 구조물의 열팽창계수 산출을 위한 새로운 모델을 구성하여, 와인딩 각의 조절에 의해서 설계 목적에 적합한 열팽창 계수를 구하는 방법을 제시하였다. 대상이 되는 재료는 고강도 섬유인 T300 탄소섬유와 에폭시 수지의 복합재료로서 헬리칼 와인딩

*정회원, 한국항공우주연구원

**정회원, 서울대학교 기계설계학과

(helical winding) 성형법에 의하여 제조되었다. 또한 필라멘트 와인딩 복합재료 관의 열수축 실험을 통하여 제안된 열팽창계수 산출 모델의 타당성을 입증하였다. 상온과 극저온 사이의 온도 분포가 있는 초전도 발전기에서 회전축 및 열교환장치로 이용되는 토크관⁽³⁾의 설계에 적용하여 기존의 재료를 대체하여 냉각에 의한 열수축 문제를 해결하는 설계 방법을 제시하였다. 이를 위하여 축방향으로 온도 분포가 있는 복합재료의 열응력 및 파손 해석을 수행하였다.

2. 이론 해석

2.1 필라멘트 와인딩 구조물의 모델화

축대칭 구조물의 경우, 헬리칼 와인딩 방식에 의하여 수직 성분을 문힌 섬유를 심축(mandrel) 위로 한번은 축에 대하여 (+)방향으로, 다음은 (-)방향으로 감아 나가면서 구조물을 이루게 된다. 따라서 필라멘트 와인딩 구조물은 다음과 같은 성질을 나타내게 된다.^(1,4)

(1) 완전한 직물 구조(fabric structure)는 아니지만 일종의 준직물구조(semifabric structure)를 이룬다.

(2) 재료의 대칭축이 관의 축과 평행하므로 실린더 형태에 대하여 직교 이방성(cylindrical orthotropy)을 이룬다.

(3) (+), (-)각으로 교대로 감기므로 균형된 구조(balanced structure)를 이룬다.

따라서 필라멘트 와인딩 구조물은 한층이 (+), (-)각이 얹혀서 이루어지므로 Fig. 1과 같은 적층 구조를 이루게 된다. 즉 한층은 단순히 +φ 또는 -φ의 형태가 아니라, ±φ의 적층각을 갖는다.⁽⁵⁾ 이러한 필라멘트 와인딩 구조에 대한 해석을 위해서는 적층 상태를 반영하는 적절한 모델을 구성할 필요가 있다.

2.2 비대칭 앵글-플라이 적층 모델

첫 단계로 필라멘트 와인딩 구조물을 (+)층과 (-)층이 교대로 적층된 구조로 가정하면, 이것은 짝수층의 비대칭 앵글-플라이적층(antisymmetric angle-ply laminates) 구조가 된다. 두께 h, 적층수 N개의 비대칭 앵글-플라이 구조에 대하여 축방향을 x, 원주방향을 θ, 반경방향을 r이라고 할 때, 구성식은 식(1)과 같은 형태가 된다.⁽⁶⁾

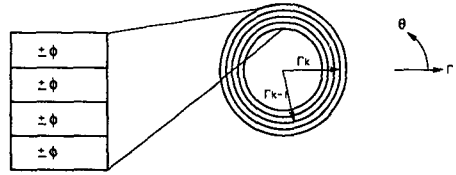


Fig. 1 Lamination type of a filament wound tube

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \\ M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & B_{26} \\ 0 & 0 & A_{66} & B_{16} & B_{26} & 0 \\ 0 & 0 & B_{16} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & B_{26} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ B_{16} & B_{26} & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_\theta^o \\ \gamma_{x\theta}^o \\ \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^E \\ N_\theta^E \\ N_{x\theta}^E \\ M_x^E \\ M_\theta^E \\ M_{x\theta}^E \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

$$B_{16}, B_{26} = -\frac{h^2}{2N} (Q_{16}, Q_{26}) \quad (2)$$

이다. B_{ij} 는 연계 강성(coupling stiffness)으로서 B_{ij} 성분을 지닌 적층 구조물을 인장하였을 때, 인장 변형 뿐만 아니라 비틀림 또는 굽힘이 발생하게 된다. 이때에 인장력은 다음과 같이 표시된다.

$$N_x = A_{11}\epsilon_x^o + A_{12}\epsilon_\theta^o + B_{16}\kappa_{x\theta}^o \quad (3)$$

따라서 합력 N_x 는 인장 변형률 $\epsilon_x^o, \epsilon_\theta^o$ 이외에도 B_{16} 성분의 존재로 인해 비틀림에 의한 곡률 $\kappa_{x\theta}^o$ 를 발생시키게 된다. 이상의 결과는 단순 인장 시 구조물의 비틀림 현상이 연계 강성 성분의 존재에 기인한다는 것을 보여준다.

2.3 준직물구조 모델

헬리칼 와인딩 공법에 의한 구조물은 단순히 (+), (-)각이 교대로 적층되는 것이 아니라, (+)각과 (-)각이 공존하면서 $[\pm\phi]_n$ 의 적층 상태를 이룬다. Young은 헬리칼 와인딩 구조물에 대하여 'netting analysis'에 의한 식을 정립하였다.⁽⁴⁾ 이러한 구조물의 적층 상태는 준직물구조(semifabric structure)를 이루며,⁽¹⁾ +φ, -φ의 섬유가 서로 얹혀진 적층 구조물의 경우에는 인장만을 가하였을 때, 단순히 인장 변형률만을 발생하며 비틀림 현상은 나타나지 않을 것이다. 이것은 식 (3)에서 $B_{16}=0$ 이 됨을 뜻하며, B_{16} 성분이 사라진다는 것은 식(2)에서 적층수 $N \rightarrow \infty$ 로 된다는 것을 의미한다.

2.4 필라멘트 와인딩 적층 모델의 열팽창계수

필라멘트 와인딩 구조물은 (+), (-)가이 교차하는 앵글-플라이 구조이면서 이들이 서로 얹혀있는 준직물 형태로, 이는 비대칭 앵글-플라이 적층 구조에서 적층수가 무한히 많은 경우로 근사화할 수 있다. 따라서 식 (1)에서 연계 강성성분인 B_{16} , B_{26} 성분이 0이 되며, 균형된 상태가 되어 전단 팽창 합력, $N_{x\theta}^E$ 또한 없어져서 다음과 같은 형태가 된다.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_\theta^o \\ \gamma_{x\theta}^o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^E \\ N_\theta^E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

구속되지 않은 상태에서 열팽창할 경우,

$$N_x = N_\theta = N_{x\theta} = 0 \quad (5)$$

$$N_x^E = N_x^I, N_\theta^E = N_\theta^I \quad (6)$$

$$\epsilon_x^o = \alpha_x \Delta T, \epsilon_\theta^o = \alpha_\theta \Delta T \quad (7)$$

가 되어 축방향, 원주방향으로의 유효 열팽창계수는 다음과 같은 식이 된다.

$$\alpha_x^o = \frac{A_{22}N_x^I - A_{12}N_\theta^I}{(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)\Delta T} \quad (8)$$

$$\alpha_\theta^o = \frac{A_{11}N_x^I - A_{12}N_\theta^I}{(A_{11}A_{22} - A_{12}^2)\Delta T} \quad (9)$$

여기서 T 는 열합력(thermal force resultants)을, ΔT 는 온도 변화를 나타낸다.

식(8)에 대하여 적층이론⁽⁷⁾을 적용하면 강성 Q_{ij} 를 포함한 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} \alpha_x^o \Delta T &= \sum_{k=1}^N \frac{Q_{22}^k N_x^I - Q_{12}^k N_\theta^I}{Q_{11}^k Q_{22}^k - (Q_{12}^k)^2} (\gamma_k - \gamma_{k-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

열팽창계수의 표현식을 재료의 불변 상수들(invariant properties)⁽⁸⁾로 나타내고 강성 성분들을 재료의 물성치들로 표현하면, 필라멘트 와인딩 구조물의 축방향, 원주방향으로의 유효 열팽창계수는 각각 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\begin{aligned} \alpha_x^o &= \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \cos 2\phi + \alpha_1 + \alpha_2}{2} \\ &+ \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \sin 2\phi (C_1 \sin 4\phi + C_2 \sin 2\phi)}{2(C_1 \cos 4\phi + C_3)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \alpha_\theta^o &= \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \cos 2\phi + \alpha_1 + \alpha_2}{2} \\ &+ \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \sin 2\phi (C_1 \sin 4\phi - C_2 \sin 2\phi)}{2(C_1 \cos 4\phi + C_3)} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서

$$C_1 = \frac{1}{2(1 - \nu_{12}\nu_{21})^2} [E_1(E_2 - G_{12}) - E_2 G_{12}(2\nu_{12} + 1) + E_1 G_{12} \nu_{12} \nu_{21} + E_2 G_{12}(2\nu_{12} + 1) \nu_{12} \nu_{21} - \nu_{12}^2 E_2^2]$$

$$C_2 = \frac{1}{2(1 - \nu_{12}\nu_{21})^2} \times [2G_{12}(E_1 - E_2)(1 - \nu_{12}\nu_{21})] \quad (13)$$

$$C_3 = \frac{1}{2(1 - \nu_{12}\nu_{21})^2} \times [E_1(E_2 + G_{12}) + E_2 G_{12}(2\nu_{12} + 1) - E_1 G_{12} \nu_{12} \nu_{21} - E_2 G_{12}(2\nu_{12} + 1) \nu_{12} \nu_{21} - \nu_{12}^2 E_2^2]$$

이다. 따라서 적층각 $\pm\phi$ 인 필라멘트 와인딩 구조물의 열팽창계수는 전단 연계강성(shear coupling stiffness) 성분이 사라진 앵글-플라이 적층 구조로 모델화되어 재료의 물성치($E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}, \alpha_1, \alpha_2$)와 적층각 ϕ 만으로 구할 수 있다. 이러한 결과를 이용하면 필라멘트 와인딩 구조물의 성형 시 와인딩 각을 조절함으로써 열팽창계수의 값을 요구하는 방향으로 변경시킬 수 있다.

Fig. 2는 고강도 탄소 섬유 의 일종인 T300 그라파이트 섬유와 9405 에폭시의 복합재료에 대하여 필라멘트 와인딩 관을 만들었을 때, 축방향 및 원주방향의 열팽창계수를 계산한 것이다.

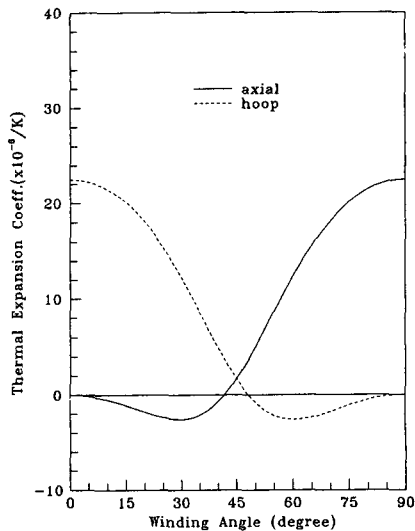


Fig. 2 Thermal expansion coefficient of T300/epoxy

Table 1 Material properties of T300/9405^(7, 9)

Item	Value
Modulus of elasticity, E_1	132.1 GPa
Modulus of elasticity, E_2	8.2 GPa
Poisson's ratio, ν_{12}	0.33
Shear modulus, G_{12}	5.0 GPa
Longitudinal strength of tension, X	1417 MPa
Longitudinal strength of compression, X'	1020 MPa
Transverse strength of tension, Y	34 MPa
Transverse strength of compression, Y'	141 MPa
Shear strength, S	70 MPa
Longitudinal thermal expan. coeff., α_1	$0.02 \times 10^{-6}/K$
Transverse thermal expan. coeff., α_2	$22.5 \times 10^{-6}/K$

3. 실험

3.1 실험재료

복합재료 관의 제작에 사용된 섬유는 고강도 섬유인 T300그래파이트 섬유이고, 수지 성분은 9405 에폭시이다. T300/9405 복합재료의 기계적 물성치

는 Table 1과 같다. 실험에 사용된 복합재료 관은 한국화이바(주)에서 헬리칼 와인딩 머신에 의하여 만들어졌다. 열수축 실험에 사용된 복합재료 관 및 304 스테인리스강 관의 길이는 300 mm, 외경은 44 mm이고, 두께는 CFRP의 경우에 5.0 mm이며 스테인리스 강 의 경우에 4.7 mm이다. 제작된 스테인리스 강 관과 CFRP관은 Fig. 3에서 보는 바와 같다.

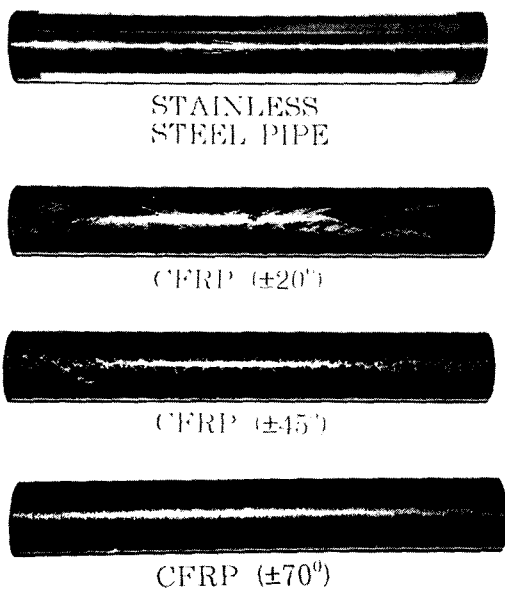


Fig. 3 Tube specimens

3.2 열수축량 측정

와인딩 각 $\pm 20^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 70^\circ$ 인 CFRP관과 열팽창계수가 알려진 304스테인리스 강에 대하여 열수축 실험을 하였다. 측정하고자 하는 관을 실험대에 장치한 후, 상온에서 관의 길이를 측정하였다. 액체질소 저장용기에서 냉매를 공급하면 먼저 기체상태의 질소가 나온 후, 온도가 떨어지면서 액체질소가 공급되면서 관이 완전히 액체질소에 잠긴 상태에서 냉각이 되며, 온도와 수축한 길이를 재서 복합재료 관의 적층각에 따른 수축량의 차이를 살펴 보았다. 한편 열팽창계수의 산출을 위해서, 스테인리스 강으로 만든 관에 대하여도 같은 실험을 하여, 필라멘트 와인딩 복합재료 관의 열팽창계수를 산출하는데 기준으로 삼았다. 실험에 사용된 장치의 구성은 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

실험 결과는 Fig. 5에 나와있다. 초기 온도는 296.4 K이고 ΔL 은 측정 온도에서 관이 수축한 길

이를 나타낸다. 관 전부가 액체질소에 잠기는데 걸리는 시간은 약 10분 정도였고, 그후 2~3분이 경과하였을 때 수축량의 변화가 나타나지 않았으며, 액체질소의 온도가 77K이므로 이때의 수축량은 77K에서의 수축량이 된다. 스테인리스 강 의 경우에 측정 자료에서 구해진 열팽창계수는 $16.4 \times 10^{-6}/K$ 의 값을 나타내었다. 같은 조건에서 CFRP관에 대하여 축방향의 수축량을 측정하여, 와인딩 각에 따른 수축량의 차이를 비교하였다.

한편 열수축 실험에서 얻어진 복합재료 관의 열팽창계수와 본 연구에서 제안한 방법으로 계산한 축방향의 열팽창계수를 Fig. 6에 비교하였다. 기준 온도 296.4K에서 150K까지 냉각되었을 때의 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 관이 액체질소에 완전히 담겨져 있을 때의 온도를 77K이라고 보았고, 이때 구한 열팽창계수는 150K에서 구한 값보다 약간 증가하였는데, 이는 77K이하의 극저온에서 복합재료의 섬유 방향과 섬유 직교 방향의 열팽창계수가 변하기 때문이라고 여겨진다.

와인딩각 20도의 복합재료 관인 경우에는 온도가 떨어졌음에도 불구하고 관이 약간 팽창한 것은 탄소섬유의 격자 구조의 이방성에서 기인한 것으로,

등방성 재료에서는 볼 수 없는 특이한 현상이다. 이상의 실험 결과로부터 필라멘트 와인딩 복합재료 관의 열팽창계수를 산출한 식의 타당성이 입증됨

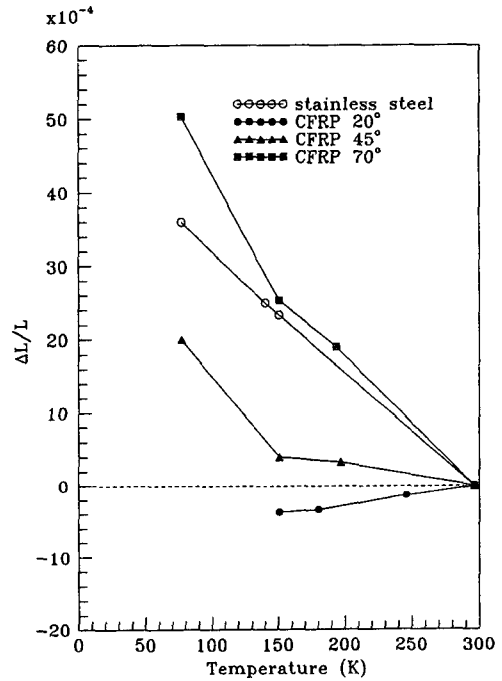


Fig. 5 Thermal contraction of tube specimens

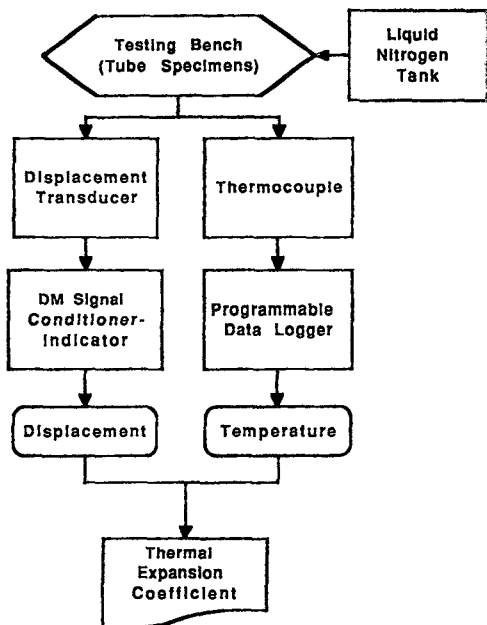


Fig. 4 Experimental equipments of thermal contraction

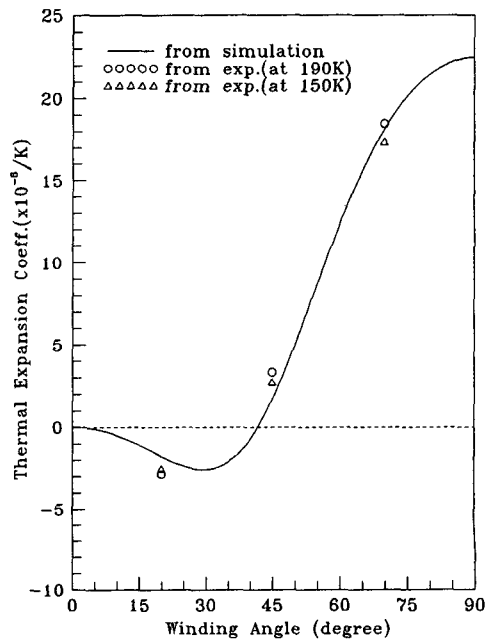


Fig. 6 Axial thermal expansion coefficient of CFRP

로써, 열문제와 관련된 복합재료의 설계에 이용할 수 있다.

4. 유한요소해석

4.1 개요

축방향으로 온도 분포를 갖는 초전도 발전기의 토크관에 대한 열변형, 열응력 및 파손 해석을 통하여 적합한 설계 방법을 제시하고자 한다. 토크관의 재료로 사용되어 왔던 304스테인리스강의 경우, 양단이 고정되었을 때에는 냉매에 의해 Fig. 7과 같이 온도가 분포될 때 온도차에 의한 열응력이 발생하여 Fig. 8에서와 같이 상당응력은 재료의 항복응력(상온에서 205 MPa⁽¹⁰⁾, 77K에서 260 MPa, 4K에서 350 MPa⁽¹¹⁾)을 초과하여 파단에 이르게 된

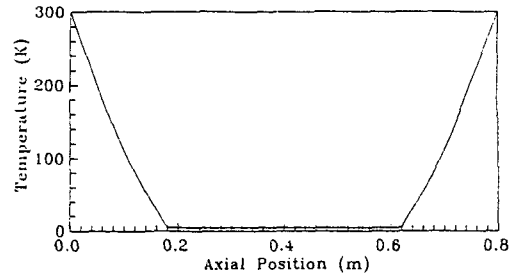


Fig. 7 Temperature distribution in the torque tube tested

다. 기존의 토크관의 경우에는 열수축 문제를 해결하기 위하여 관의 한쪽 끝을 고정하지 않고, 연성 디스크나 벨로우즈⁽¹²⁾를 설치함으로써 구조가 복잡해지고 제조가 어려운 단점을 지니고 있다.

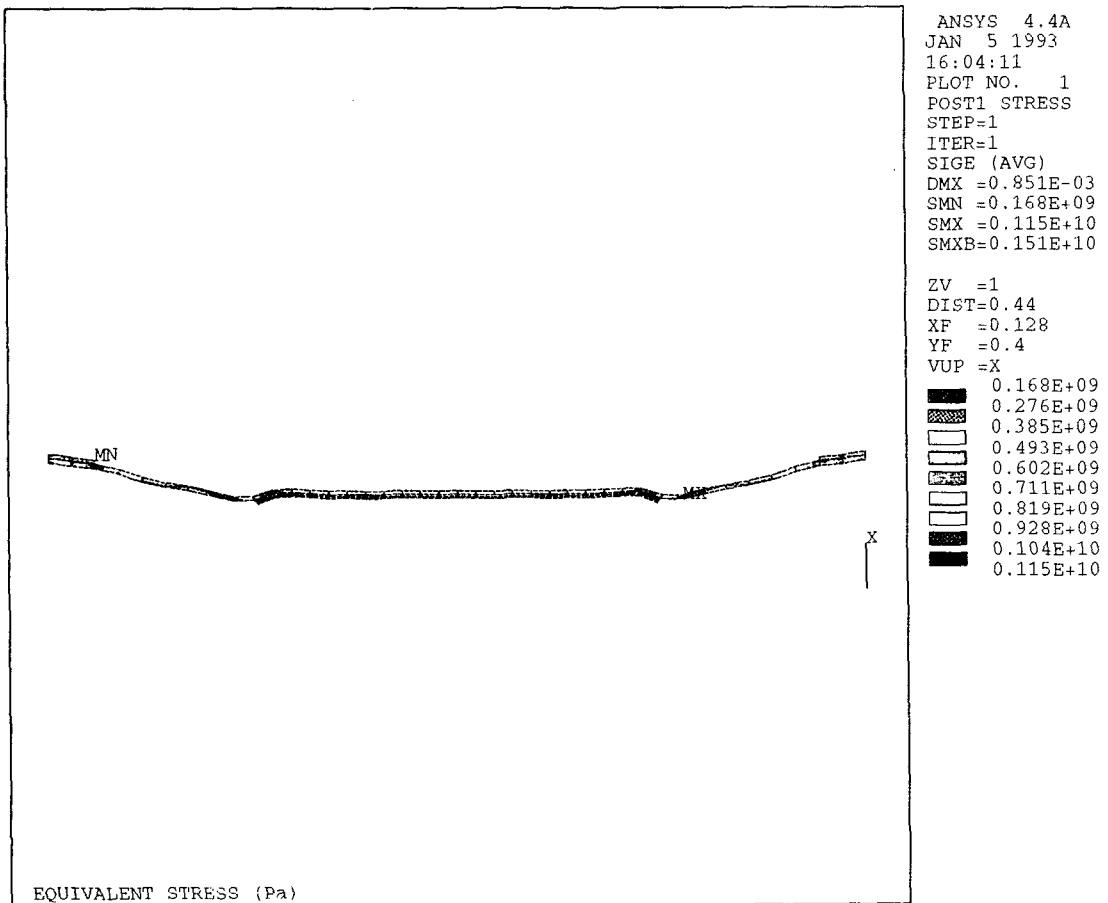


Fig. 8 Equivalent stress distribution in a stainless steel tube

본 연구에서는 열팽창계수를 조절한 적층 복합재료 관을 사용하여, 양단이 고정된 간단한 구조에서 온도차에 의한 열응력에 견딜 수 있는 토크관을 설계하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 복합재료 토크관의 유한요소 모델화는 앞에서 제안한 필라멘트 와인딩 구조물의 모델을 바탕으로 이루어졌으며, 적층 원통 셀구조에 대하여 응력해석 및 Tsai-Wu 파손기준식을 이용한 파손해석을 수행하였다.

4.2 유한요소 모델화

복합재료 토크관은 길이 800 mm, 외경 266 mm, 두께 7 mm의 관으로 양단이 고정되어 있으며, 하중 조건은 각 절점에 설정한 온도와 기준 온도(300 K)의 차이에 의한 열응력으로 주어졌다.

필라멘트 와인딩 복합재료 관은 앵글-플라이 적층 방식에서 적층수가 무한히 많아져서 연계 강성 B_{16} , B_{26} 성분이 0이 되는 경우이므로, 유한요소 해석 시 B_{16} , B_{26} 성분이 무시될 수 있는 적층 수에 대하여 조사를 하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 연계 강성과 인장 강성의 비를 적층수와 적층각에 따라 비교

한 것으로 적층수가 ∞ 로 갈수록 그 비가 0에 접근함을 볼 수 있다. 유한요소 해석 시, 계산의 효율성을 감안하여 적층수가 20개이면 연계 강성 B_{16} , B_{26} 성분이 무시될 수 있는 값이라 보고, 적층수를 20개로 선정하였다.

하중 조건과 기하학적 대칭성에 의하여 1/4 원통 셀에 대하여 해석을 하였으며, 구조 해석용 프로그램인 ANSYS Package 중, 각 층(layer) 별로 해석이 가능한 8절점 적층 셀 요소(8-node layered shell element)⁽¹²⁾를 사용하였다. 이때 사용한 요소의 갯수는 144개, 절점수는 493개, 적층수는 20개이며, 실린더 좌표계를 사용하였다.

4.3 적층 복합재료 원통 셀의 파손 해석

등방성 재료의 경우에는 최대 응력 이론이나 최대 변형률 이론으로 파손 판별을 하고 있지만, 이방성 복합재료에 대해서는 정확도가 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 실험값과 가장 접근한다고 알려진 식 (14)의 Tsai-Wu 파손 기준식⁽¹⁴⁾을 이용하여 파손 해석을 수행하였다.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \quad (14)$$

여기서 F_i 와 F_{ij} 는 강도텐서이다.

식(14)를 적층 원통 셀 구조에 적용하면 대상층에 대하여 다음과 같은 3차원 층간 2차 파손판별식(3dimensional intra-laminar quadratic failure criterion)이 된다. 원통 셀의 축방향을 x , 원주방향을 r 이라고 하고, 재료의 파손 여부를 판단하는데 사용되는 파손 기준계수를 $F.C.$ (failure criterion value)라고 할 때,

$$F.C. = F_{xx} \sigma_x^2 + F_{rr} (\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2) + F_{ss} \tau_{x\theta}^2 + 2F_{xr} (\sigma_r + \sigma_\theta) \sigma_x + 2F_{r\theta} \sigma_r \sigma_\theta + F_r (\sigma_r + \sigma_\theta) + F_x \sigma_x \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} F_{xx} &= 1/(XX') \\ F_{rr} &= 1/(YY') \\ F_{ss} &= 1/S^2 \\ F_x &= 1/X - 1/X' \\ F_r &= 1/Y - 1/Y' \\ F_{xr} &= -0.5 \times (F_{rr} F_{xx})^{1/2} \\ F_{r\theta} &= -0.5 \times F_{rr} \end{aligned} \quad (16)$$

이며, X, X' 는 각각 복합재료의 섬유방향의 인장,

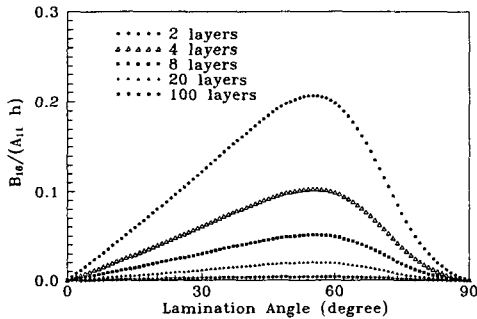


Fig. 9 Distribution of coupling stiffness, B_{16}

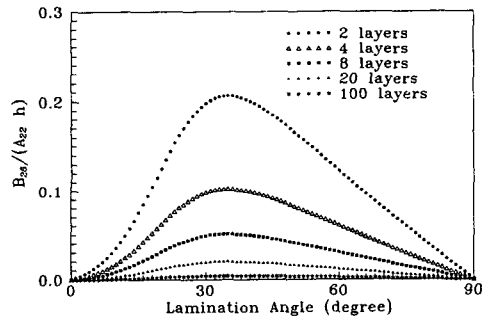


Fig. 10 Distribution of coupling stiffness, B_{26}

압축 강도이고, Y, Y' 는 각각 섬유 직교방향의 인장, 압축 강도이며, S 는 전단 강도이다.

적층 복합재료의 각 성분의 강도를 알고, 응력 성분들이 계산되면, 식 (15)의 파손 기준식을 각 층에 대하여 적용하여 파손 기준계수의 값이 1 이상 이 되는 층(layer)에서 파손이 발생한다고 판정한다.

4.4 해석결과 및 분석

초전도 발전기의 경우에 운행 시 회전자는 1800 rpm으로 회전하며, 토크관이 감당해야 하는 토크는 안전계수를 10으로 할 경우에 관이 최대로 전달할 수 있는 토크의 1/20 정도이다.⁽¹⁵⁾ 또한 토크관 내부에는 고압 상태가 아니라 액체상태에서 전도열 등에 의해 기화된 냉매가 통과하므로 내압의 영향은 무시할 수 있다. 토크관에는 열하중, 토크, 내압 등이 작용하지만 토크관의 두께는 토크 전달

의 목적보다는 열하중에 견디기 위하여 설계되었고, 냉매의 압력도 대기보다 약 0.02기압이 높은 상태이므로,⁽¹⁵⁾ 본 연구에서는 설계 목적을 열하중에 견디는 복합재료 관의 설계에 국한하였다.

적층각 $\pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 18^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 50^\circ, \pm 60^\circ, \pm 70^\circ$ 에 대하여 계산을 수행하였다. 각 적층각에 대하여 적층 복합재료의 윗면(top surface)에 대한 응력분포와 Tsai-Wu파손해석에서 구한 파손 기준계수의 분포를 도시하였다.

축응력(axial stress)의 경우, 와인딩 각 ± 18 도에서는 축방향의 열팽창계수가 등방성 재료와 반대인 (-)의 값을 나타내므로 Fig. 11에서 보는 바와 같이 축방향으로 압축 상태를 나타낸다. 반면에 와인딩 각 ± 70 도에서는 열팽창계수가 (+)이므로 Fig. 12에서와 같이 인장 상태를 나타낸다. Fig. 13은 전단 응력의 최대값에서 최소값까지의 분포를 와인딩 각에 따라 나타낸 것이며, 최대값은 토크

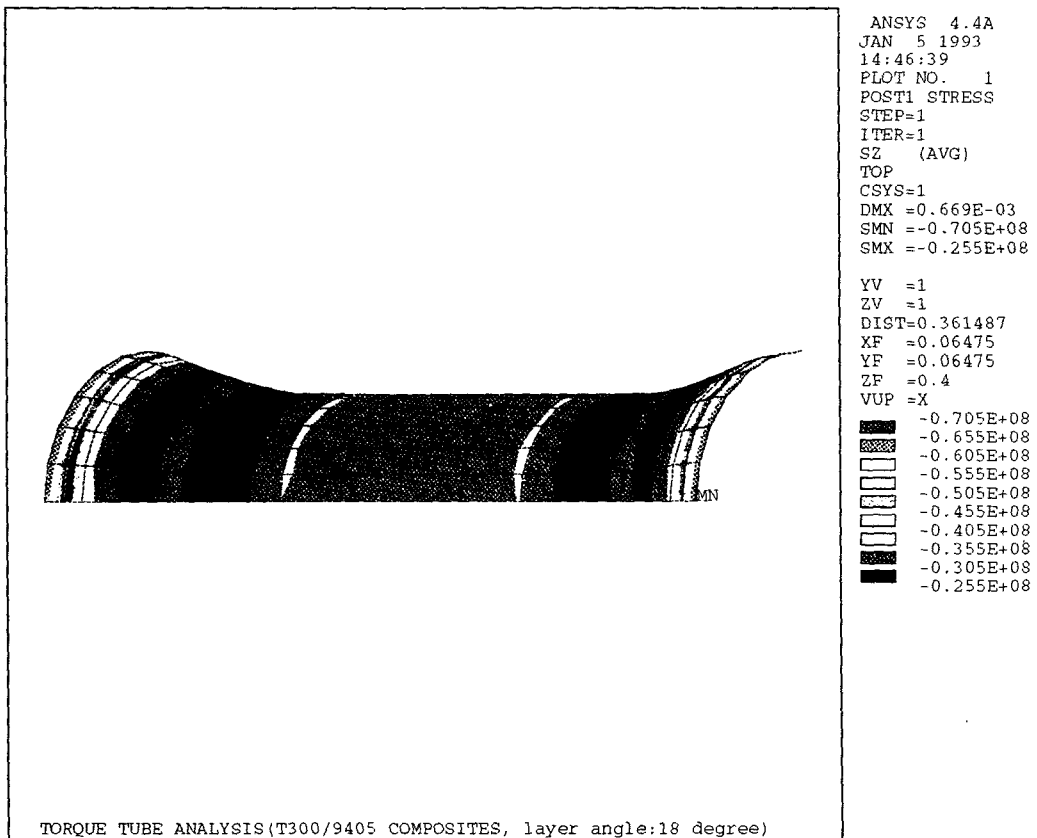


Fig. 11 Distribution of axial stress(winding angle 18°)

관의 중앙부에서 나타난다. 각 응력 성분들과 식 (15)의 파손 판별식에 대하여 전단 응력이 재료의 전단 강도, S 값에 근접함으로써 전단 응력의 영향이 가장 크게 나타나며, 와인딩 각 ± 50 도 이후에는 원주 응력이 섬유 직교방향의 인장 강도, Y 값

에 근접하면서 이의 영향이 증가한다. 결과적으로 파단 발생 여부를 판단하는 파손 기준계수는 Fig. 14에서와 같이 와인딩 각 ± 50 도 부근에서 최대값을 이루고, 0도 부근으로 갈수록 급격히 떨어진다. 축대칭 복합재료 구조물의 제작은 미리 만들어진

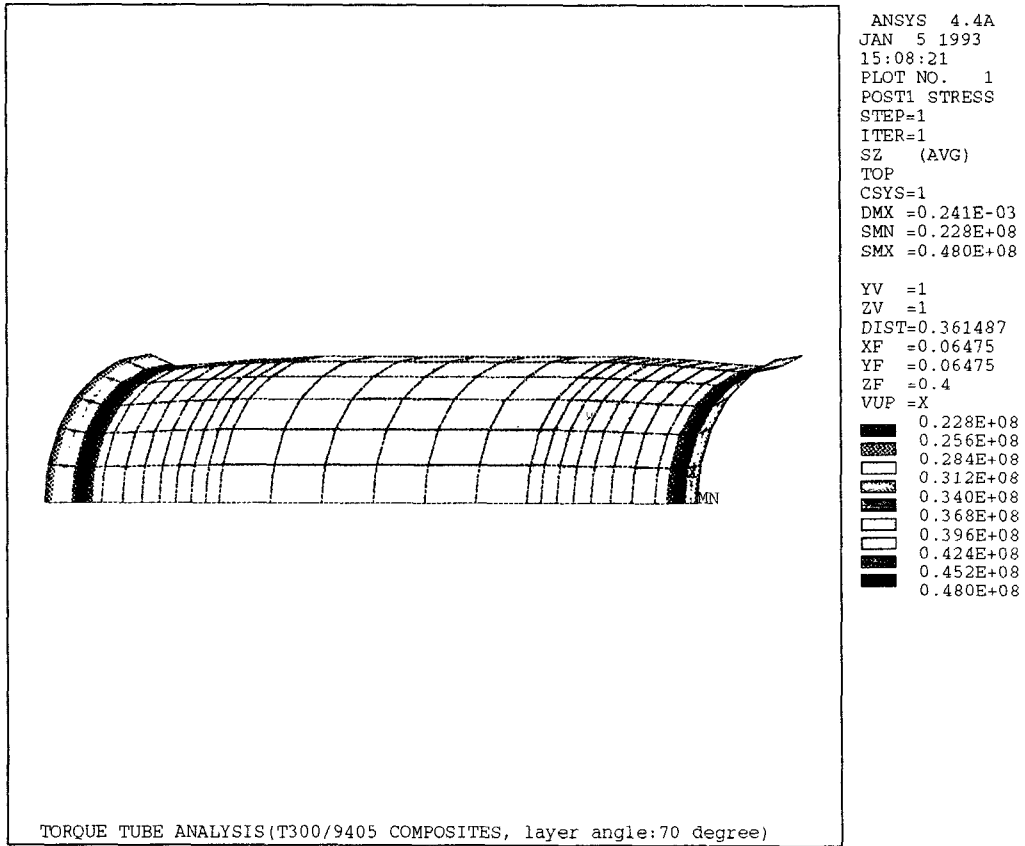


Fig. 12 Distribution of axial stress(winding angle 70°)

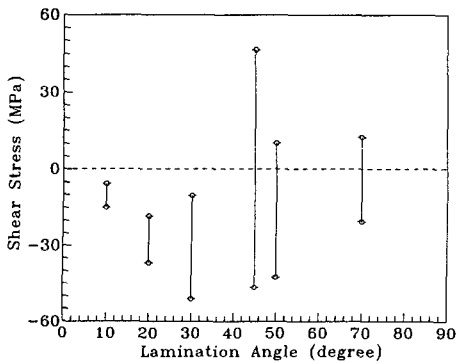


Fig. 13 Shear stress distribution in the torque tube

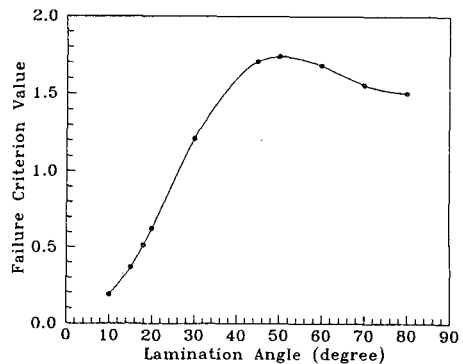


Fig. 14 Failure criterion value of the CFRP tube

심축 위에 수지를 묻힌 섬유를 감아나가면서 성형한다. 따라서 복합재료의 적층각은 제조시 와인딩 각에 해당한다. Fig. 14를 살펴보면 적층각의 크기가 작을수록 안전하다고 볼 수 있다. 그러나 실제의 경우, 필라멘트 와인딩 공법에 의한 축대칭관의 제작 시 적층각이 작아질수록 심축과 섬유 다발 사이에 미끄럼(slip)이 발생하여 제조가 어려워진다. 와인딩 각의 경우에 5도~15도로 와인딩하는 것도 가능하나, 초전도 발전기의 토크관의 경우에는 길이 800 mm, 외경 266 mm로서 이러한 재료의 관을 제조할 때 와인딩 머신의 제조 길이의 한계를 고려할 때, 현재의 제조 여건으로는 와인딩 각 ± 18 도가 최소의 와인딩 각이었으며, 이때의 파손 기준 계수의 값은 0.5152로 열응력에 충분히 견딜 수 있는 값으로 볼 수 있다.

5. 결 론

열수축 문제를 해결하기 위하여, 열팽창계수를 중심으로 필라멘트 와인딩 공법에 의한 복합재료관을 설계하였다. 상온에서 극저온까지의 온도 분포를 갖는 초전도 교류 발전기의 토크관에 대하여 (+)에서 (-)까지의 열팽창계수를 갖는 T300/9405 복합재료를 이용하였을 때, 응력 및 파손 해석을 하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 필라멘트 와인딩 공법으로 만들어지는 복합재료관에 대하여 비대칭 앵글-플라이 적층 모델과 준직물구조 모델을 혼합한 새로운 모델을 제시하여 재료의 물성치와 와인딩 각으로 결정되는 열팽창계수의 식을 산출하였다. 여러 종류의 와인딩 각으로 복합재료관을 제조하여 저온에서의 열수축 실험을 한 결과, 필라멘트 와인딩 구조물의 열팽창계수의 산출식이 타당하다는 것이 입증되었다.

(2) 필라멘트 와인딩 모델을 근거로 복합재료 토크관에 대하여 적층 셸 요소(layered shell element)를 사용한 유한요소해석을 수행하였다. 토크관에 작용하는 하중 중에서 열하중의 영향이 가장 크며, 열하중만을 고려하여 와인딩 각에 따른 열변형 및 각 응력 성분들을 구하였다. Tsai-Wu 파손 기준식을 적용하고 제조 여건을 고려하였을 때, 온도차로 발생하는 열응력에 견딜 수 있는 복합재료 토크관의 와인딩 각은 ± 18 도가 가장 적합하다고 판정하였다. 앞으로 초전도 발전기의 토크관의 복

합재료를 사용할 경우에 Buckling 문제나 기존 재료와의 Joining 문제 등도 고려하여 최적의 와인딩 각을 선정하여야 할 것으로 생각한다.

(3) 재료의 열팽창계수를 조절한 복합재료관의 설계는 열변형을 감당하기 위한 벨로우즈 등과 같은 별도의 장치가 필요 없으므로 해서 구조가 간단해지고 무게가 경량화하는 잇점을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kelly, A. and Mileiko, S. T., 1983, "Fabrication of Composites," North-Holland, Netherlands, pp. 45~63.
- (2) Chawla, K. K., 1987, "Composite Materials," Springer-Verlay New York Inc., pp. 19~20.
- (3) 한송엽, 1987, "초전도 교류 발전기의 개발 현황과 문제점," 대한기계학회지 제27권 제3호, pp. 180~186.
- (4) Bader, M. G. and Smith, W., 1989, "Processing and Fabrication Technology," Technomic Pub. Co., Inc., pp. 193~199.
- (5) Tsai, S. W., 1988, "Composites Design 4th edition," Think Composites., pp. 231~233.
- (6) Kedward, K. T. and Whitney, J. M., 1989, "Design Studies," Technomic Pub. Co., Inc., pp. 59~74.
- (7) Pramila, 1990, "Extrema and Zeros of Coefficients of Thermal Expansion of a Balanced Symmetric Laminate," J. of Composite Materials, Vol. 24, pp. 786~794.
- (8) Jones, R. M., 1975, "Mechanics of Composite Materials," Scripta Book Co., pp. 57~59.
- (9) 도영대, 황태경, 손영일, 조원만, 정발, 1989, "F/W-압력용기의 구조 해석에 대한 연구," 한국복합재료학회지, 제2권, 제2호, pp. 20~27.
- (10) Bever, M. B., 1986, "Encyclopedia of Materials Science and Engineering," Vol. 6, Pergamon Press Ltd., p. 4573.
- (11) Bever, M. B., 1986, "Encyclopedia of Materials Science and Engineering," Vol. 2, Pergamon Press Ltd., p. 957.
- (12) Keim, T. A., Laskaris, T. E., Fealey, J. A. and Rios, P. A., 1985, "Design and Manufacture of a 20 MVA Superconducting Generator," IEEE

- Trans. on Power App. and Sys., Vol. PAS-104, No. 6., pp. 1475~1483.
- (13) Kohnke, P. C., 1989, ANSYS Engineering Analysis System Theoretical Manual, Swanson Analysis Systems, Inc.
- (14) Evans, K. E. and Zhang, W. C., 1987, "The Determination of the Normal Interaction Term in the Tsai-Wu Tensor Polynomial Strength Criterion," Composite Science and Technology, Vol. 30, pp. 251~262.
- (15) 기초전력공학 공동연구소, 1992, "20KVA 초전도 교류 발전기의 개발에 관한 연구," 한국전력공사 기술연구원.