

GFRP 적층복합재료관의 신뢰성해석

Reliability Analysis of GFRP Laminated Composite Cylindrical Shells

조효남* 신재철** ○이승재*** 최영민****
Cho, Hyo-Nam Shin, Jae-Chul Lee, Seung-Jae Choi, Young-Min

Abstract

In general, the strength and stiffness of laminated composite cylindrical shells are very sensitive to the variation of slenderness parameters, some coupling-stiffness parameters, lamination angles, stacking sequence and number of layers. In the paper, the effects of these factors on the strength and buckling reliabilities of GFRP laminated cylindrical shells are investigated based on the proposed strength and buckling limit state models.

It may be concluded that the applicable ranges of the slenderness limits of the strength and buckling failure criteria for laminated composite cylindrical shells should be indentified and incorporated into the design formula with appropriate safety factors which provide uniform consistent reliability for balanced design in practice.

1. 서론

최근 고비강도, 고비강성 등의 고성능 섬유강화 플라스틱재의 발달로 인하여 석유공업용관, 상하수도관, 폐수처리관 등의 관구조물에 FW(Filament Wound)식 복합재료관이 점차 이용되기 시작하고 있는데, 직경 25cm의 소구경관에서부터 직경 10m이상의 대구경관에 이르기까지 그 활용폭은 대단히 크다. 이러한 적층원통관의 특색중의 하나는 중앙단면에 대한 적층배열이나 섬유 배향각 등에 따라 각종의 Coupling효과가 발생하므로서 균질한 직교이방성 원통관과는 상당히 다른 역학적 거동을 나타낸다. 특히, 외압에 의한 좌굴은 세장비가 큰 관구조물의 해석 및 설계에서는 가장 중요한 문제로 되는데 복합재료에 있어서 이에 대한 종래의 연구동향을 살펴보면 설계모수의 다양성으로 인하여 등방성 재료에서와 같은 충분한 연구고찰이 수행되지 못하고 있는 실정이다. 또한, 현재의 설계개념은 세장비가 상대적으로 작은 영역 즉, 강도한계상태가 지배적인 영역에서는 비교적 타당하게 적용될 수 있으나 세장비가 커지면 좌굴한계상태가 지배적으로 되기 때문에 적용에 있어서 상당한 문제점이 노출되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 앞으로의 첨단소재 복합적층관의 실용적 설계기준 개발 및 기설 구조물의 안전도 분석을 위한 기초적인 연구로서 외

압을 받는 단순 GFRP 적층원통관의 합리적인 강도한계상태 방정식과 좌굴한계상태 방정식을 유도한 다음 세장모수의 변화에 따른 지배적인 한계상태와 이에 따른 GFRP관의 구조신뢰도 특성에 대하여 고찰하고자 한다. 또한 복합재료는 본질적으로 비균질성이며 주문제적으로 인한 제품의 다양성 등의 높은 변동성을 내포하고 있기 때문에 적층수, 적층배열, 섬유배향각, 관두께 변화에 따른 민감도 분석을 실시하고, 특히 세장모수가 큰 대구경관의 설계를 지배하는 좌굴한계상태 방정식에 중점을 두어 신뢰성 해석을 수행하고자 한다. 아울러 복합재료 구조에서 나타나는 고차의 비선형 한계상태 방정식의 실용적 신뢰성해석 기법으로서 선형근사화 기법인 2차모멘트법 AFOSM(Advanced First Order Second Moment Method)을 사용하고 이 방법의 유용성 여부는 중요도표본추출기법(Importance Sampling Techniques:IST)[조효남 외, 1991]을 이용하여 고찰하기로 한다.

2. 해석모형

그림 2.1에는 FW식 GFRP 적층원통관의 해석모형[Kasuya/Uemura, 1985](반경 R, 길이 L, 관두께 t)을 나타내었다. 이때, 하중은 반경방향의 균일한 외압력 p를 받는 경우에 대해서만 고려하였으며, x, y, z축은 각각 원통축방향, 원주방향, 반경방향을 나타낸다. 또한 L, T는 각각 섬유축방향, 섬유를 가로지르는 방향을 나타낸다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
*** 한양대학교 토목공학과 박사과정
**** 한양대학교 토목공학과 석사과정

그림 2.2에는 N층으로 구성된 적층원통관의 단면을 나타내었다. 이때 k번째 층의 섬유는 원통축과 θ_k 의 각도를 이루게 된다.

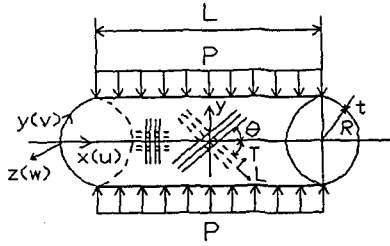


그림 2.1 적층원통관의 해석 모형과 좌표

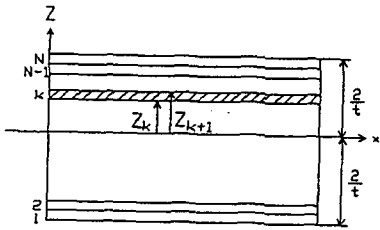


그림 2.2 N층으로 구성된 적층원통관의 단면

3. 한계상태 방정식

3.1 강도한계상태 방정식

강도한계상태 방정식은 복합재료의 파괴기준에 기초하여 설정될 수 있는데[조효남 외, 1991], 본 연구에서는 실용화를 위한 기초적 연구로서 신뢰성해석에 비교적 간단하게 적용될 수 있는 Tsai-Wu기준을 사용하여 강도신뢰성 해석을 수행하였다. 한계상태방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$g(-) = 1 - [(1/F_L - 1/F_L')\sigma_L + (1/F_T - 1/F_T')\sigma_T + \sigma_L^2/F_L F_L' + 2F_{12}\sigma_L\sigma_T + \sigma_T^2/F_T F_T' + \tau_{LT}^2/F_{LT}^2] \quad (1)$$

이때, F_{12} 는 Tsai-Wu기준 내의 상관강도 텐서로서 다음 값의 범위에 있다.

$$F_{12, \text{lower}} \leq F_{12} \leq F_{12, \text{upper}} \quad (2)$$

여기서, $F_{12, \text{lower}} = -1/\sqrt{F_L F_L' F_T F_T'}$
 $F_{12, \text{upper}} = +1/\sqrt{F_L F_L' F_T F_T'}$

3.2 좌굴한계상태 방정식

3.2.1 적층원통관의 일반한계상태 방정식

적층원통관이 반경방향으로 외압 p를 받아 좌굴되는 경우, 이때 발생하는 변위를 이용하여 표현되는 Donnell형 좌굴평형방정식과 좌굴시작 단계의 원주 및 축방향의 조화적(harmonic) 처짐변형을 가정하여 이를 좌굴방정식에 대입한 후 고유치방정식의 해를 구하면 좌굴저항 \bar{N}_y 를 구할 수 있다[Jones, 1975].

이에 따라 유도된 일반 좌굴한계상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\cdot) = \bar{N}_y - p \cdot R \quad (3)$$

$$\bar{N}_y = \left\{ \frac{R}{n} \right\}^2 \left\{ T_{33} + \frac{2T_{12}T_{13}T_{23} - T_{11}T_{23}^2 - T_{22}T_{13}^2}{T_{11}T_{22} - T_{12}^2} \right\} \quad (4)$$

여기서, p : 반경방향의 등분포외압

R : 관의 반경

\bar{N}_y : 좌굴저항(원주방향의 membrane force)

m, n : x, y방향의 반주기값 및 주기값 (\bar{N}_y 를 최소로 하는 값으로 정함)

이때, T_{ij} 는 섬유배향각 및 적층방법에 따라 상이하게 유도되는 모수로서 Angle-Ply의 역대칭 적층판인 경우에는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 대칭이나 Cross-Ply의 경우에는 Jones[1975]의 문헌에 상술되어 있다.

$$\begin{aligned} T_{11} &= A_{11}(m\pi/L)^2 + A_{66}(n/R)^2 \\ T_{12} &= (A_{12} + A_{66})(m\pi/L)(n/R) \\ T_{22} &= A_{22}(n/R)^2 + A_{66}(m\pi/L)^2 \\ T_{13} &= -(A_{12}(m\pi/L)/R \\ &\quad + 3B_{16}(m\pi/L)^2(n/R) \\ &\quad + B_{26}(n/R)^3) \\ T_{23} &= -(A_{22}(n/R)/R + B_{16}(m\pi/L)^3 \\ &\quad + 3B_{26}(m\pi/L)(n/R)^2) \\ T_{33} &= D_{11}(m\pi/L)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \times \\ &\quad (m\pi/L)^2(n/R)^2 + D_{22}(n/R)^4 \\ &\quad + A_{22}/R^2 + 4B_{26}(m\pi/L)(n/R)/R \end{aligned} \quad (5)$$

위에서 A_{ij} , B_{ij} , D_{ij} 는 적층판에 적용되는 다음과 같은 구성방정식의 계수이다.

$$\left\{ \frac{N}{M} \right\} = \left[\begin{array}{c|c} A_{ij} & B_{ij} \\ \hline B_{ij} & D_{ij} \end{array} \right] \left\{ \frac{\epsilon}{\kappa} \right\} \quad (6)$$

여기서,

N : 막력

M : 모멘트

ϵ : 중앙면의 변형률

κ : 중앙면의 곡률변화

A_{ij} : 축강성 매트릭스

B_{ij} : Coupling강성 매트릭스

D_{ij} : 휨강성 매트릭스

3.2.2 길이가 긴 적층원통관의 한계상태방정식

길이 L이 매우 긴 적층원통관이 반경방향의

하중을 받을 경우에는 D_{22} , A_{22} , B_{22} 의 함수로만 표현되는 다음과 같은 단순한 한계상태 방정식을 적용할 수 있다.

$$g(\cdot) = \frac{3 \left(D_{22} - \frac{B_{22}^2}{A_{22}} \right)}{R^2} - p \cdot R \quad (7)$$

4. 신뢰성 해석

GFRP 적층원통관의 세장모수, 섬유보강방향, 적층방법 등에 따른 좌굴신뢰성의 기본 특성을 고찰하기 위한 본 연구에서는 저항의 불확실량만을 우선 고려할 필요가 있으므로 하중은 확정량으로 취급하였다.

따라서 한계상태함수는 폐합형 비선형 함수가 되므로 실용적인 AFOSM 방법에 의해 쉽게 해석할 수 있다. 그러나 고차 비선형 한계상태함수에 대한 선형 근사화 과정의 오차를 알아보기 위하여 중요도 표본추출 기법에 의해 해석의 정확도를 검증하였다.

5. 수치해석 및 결과 고찰

본 수치해석을 위해 사용된 재료는 E-유리/에폭시로서 재료상수는 ASTM규정에 따라 결정된 다음과 같은 값을 사용하였다[AFML, 1977].

$E_L = 618.96 \text{ t/cm}^2$	$E_T = 252.89 \text{ t/cm}^2$
$\nu_{LT} = 0.23$	$G_{LT} = 122.26 \text{ t/cm}^2$
$F_L = 2.951 \text{ t/cm}^2$	$F_L' = 8.367 \text{ t/cm}^2$
$F_T = 0.469 \text{ t/cm}^2$	$F_T' = 1.778 \text{ t/cm}^2$
$F_{LT} = 0.460 \text{ t/cm}^2$	

한편, 허용응력을 구하기 위한 안전율은 재래의 규준에 따라 다음과 같이 결정하였다.

$$\text{안전율} : F_s = F_0 \times L_1 \times L_2 \times \dots \quad (8)$$

여기서,

- F_0 : 탄성율기준 (= 1.2)
- L_1 : 재료특성치의 신뢰도계수 (= 1.1)
- L_2 : 구조계산에서의 정도계수 (= 1.1)
- L_3 : 사회적 중요도계수 (= 1.1)
- $F_s = 1.2 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.1 = 1.6$

다음 그림 4.1에는 세장모수 R/t 의 변화에 따른 극한 외압 P_u 및 좌굴외압 P_{cr} 의 변화에 대해서 나타내었다. P_u 와 P_{cr} 은 R/t 의 증가에 따라 모두 감소하지만 R/t 가 약 7인 값에서 서로 교차되고 있음을 알 수 있다. 즉, 세장모수가 약 7인 범위가 강도 및 좌굴한계상태 방정식 지배 영역의 경계점이 된다고 볼 수 있으며, 현재 국내외 기성 GFRP관 제품의 세장모수 R/t 가 4~35까지 광범위하게 분포되어 있음을 보면, 대부분의 GFRP관의 설계에서 강도보다는 좌굴강도가 지배적임을 알 수 있다. 한편 그림 4.1(b)에서 보면 Cross-Ply적층관에서는 Angle-Ply적층관의 경우에 비해 적층수의 변화에 따른 P_{cr} 의 차이가 두드러지게 나타나고 있다.

그림 4.2에는 R/t 에 대한 설계안전율($F_s=1.6$)을 사용한 Tsai-Wu강도 파괴기준에 의해 설계된 GFRP관의 좌굴신뢰성지수 β 의 변화를 나타내었다. 그림 4.2에서 보면 강도신뢰성지수는 강도한계상태 방정식의 특성상 R/t 에 무관하게 나타나지만 그림 4.1과 마찬가지로 탄성좌굴이 지배적인 세장모수 $R/t = 7$ 보다 큰 10~20영역에서는 좌굴신뢰도가 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

즉, 앞에서 좌굴이 지배적인 세장모수에 대한 고찰에서와 마찬가지로 R/t 가 약 7의 범위에서 좌굴이 지배적인 β 의 경계가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 세장모수가 7보다 큰 대부분의 GFRP관의 설계는 좌굴강도가 설계 기본식이 되어야 하고 안전율도 좌굴신뢰도를 기준으로 결정되어야 함을 의미한다. 따라서, 앞으로 경제성과 안전도가 균형을 이룬 설계를 가능하게 하는 일관성있는 신뢰도를 갖는 GFRP적층관 구조의 합리적인 설계규준의 개발에서는 지배적인 세장비의 함수로 나타난 합리적인 강도 및 좌굴 설계공식과 안전율을 사용해야함을 알 수 있다.

감사의 글

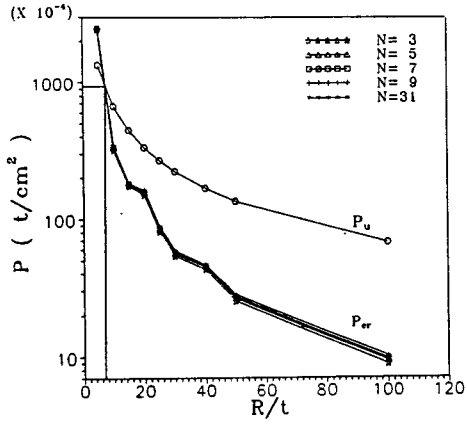
본 논문은 한국과학재단의 '90 목적기초연구의 지원하에 이루어진 연구의 일부로서 이에 감사의 뜻을 표합니다.

6. 참고문헌

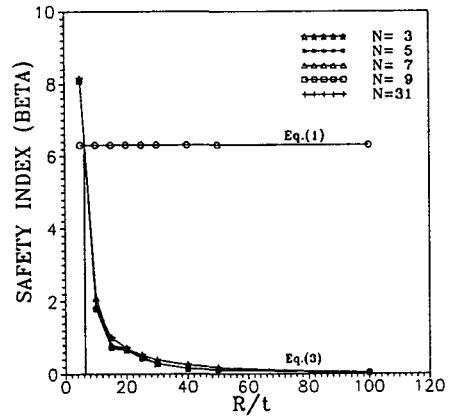
- AFML(1977), "Advanced Composite Design Guide," Air Force Materials Laboratory Write-Patterson Air Force Base, Third Ed., 1977, Vol.1, p.1.21-3.
- Fukunaga, H. and Uemura, M. (1981), "Probabilistic Burst Strength of Filament-Wound Cylinders Under Internal Pressure," Journal of Composite Materials, Vol.15, p.462~480.
- Jones, R.M. (1975), "Mechanics of Composite Materials," McGraw-Hill, New York.
- Kasuya, H. and Uemura, M. (1985), "Buckling of Laminated Composite Cylindrical Shells under External Pressure," Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.34, p.262~266.
- Vinson, J.R. and Sierakowski, R.L. (1987), "The Behavior of Structures Composed of Composite Materials," Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- 이 교성(1989), "복합재료학", 광화문출판사.
- 조 효남, 김 인섭(1990), "교량구조의 체계신뢰

성 해석을 위한 중요도 표본추출기법," 한국전
산구조공학회지, 제 4권 제 2호, p.119~129.

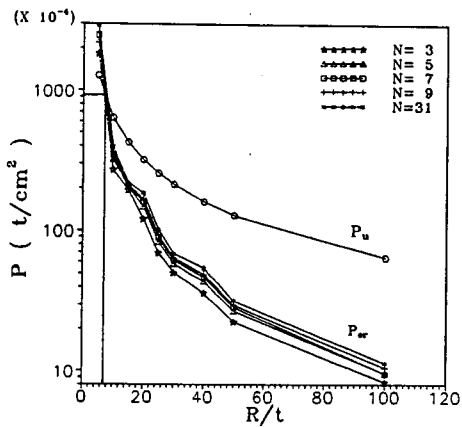
조 효남, 신 재철, 최 영민(1991), "GFRP 복합
구조의 강도신뢰성 해석모형에 관한 연구," 대
한토목학회 1991년도 학술발표회 개요집, p.115
~118.



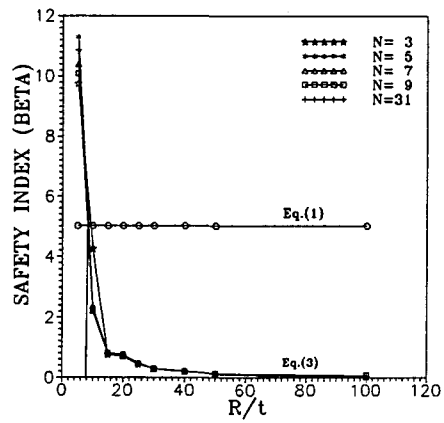
(a) Angle-Ply 적층원통관



(a) Angle-Ply 적층원통관



(b) Cross-Ply 적층원통관



(b) Cross-Ply 적층원통관

그림 4.1 R/t의 변화에 따른 P_u , P_{cr} 의 변화

그림 4.2 R/t에 대한 신뢰성지수 β 의 변화