

GFRP 적층복합재료관의 신뢰성해석

Reliability Analysis of GFRP Laminated Composite Cylindrical Shells

조 호 남*
 Cho, Hyo Nam
 이 승 재**
 Lee, seung Jae
 최 영 민***
 Choi, Young Min

요 旨

일반적으로 복합재료 적층원통관의 강도와 강성은 세장모수, coupling 강성모수, 섬유배향각, 적층 방법, 그리고 적층수 등의 변동성에 매우 민감하게 변화한다. 본 논문에서는 복합재료 적층원통관의 합리적인 신뢰성해석을 수행할 수 있는 강도 및 좌굴한계상태함수를 제안하고, 전술한 인자들이 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 적층원통관의 강도 및 좌굴신뢰성에 미치는 영향을 고찰하였다.

이들은 복합재료 적층원통관의 강도 및 좌굴신뢰성에 매우 다양하고 복합적인 영향을 미치기 때문에 최적 설계 기법이나 설계기준의 개발 등을 통하여 설계관련 인자들을 설계에 합리적으로 반영하므로써 실무에서 균형설계(Balanced Design)를 위한 일관성 있는 안전도/신뢰도의 확보가 가능하다고 사료된다.

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 this 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.

As these factors have various and complicated effects on the strength and buckling reliabilites of GFRP laminated cylindrical shells, the results should be incorporated into the design formula such that optimum design technique and design code which provide uniform consistent reliability for balanced design in practice

* 한양대학교 토목공학과 교수
 ** 한양대학교 공과대학 강사
 *** 한양대학교 토목공학과 박사과정

이 논문에 대한 토론을 1993년 9월30일까지 본학회에 보내주시면 1994년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 유리섬유, 탄소섬유, 케블라섬유 및 보론 섬유 등의 신소재 개발로 인한 고비강도, 고비강성 등의 고성능 섬유강화를 플라스틱재의 발달로 인하여 석유공업용관, 상하수도관, 폐수처리관 등의 관구조물에 FW(Filament Wound)식 복합재료 적층원통관이 점차 이용되기 시작하고 있다. 복합재료 적층원통관은 중앙단면에 대한 적층배열이나 섬유의 배향각 등에 따라 각종 Coupling 효과가 발생하기 때문에 균질한 직교이방성 원통관과는 상당히 다른 역학적 거동을 나타낸다. 특히, 외압에 의한 좌굴은 세장비가 큰 관구조물의 해석 및 설계에서는 가장 중요한 문제로 되는데 복합재료 적층원통관에 있어서 이에 대한 연구동향을 살펴보면 설계모수의 다양성으로 인하여 등방성 재료에서와 같은 충분한 연구고찰이 수행되지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 복합재료 적층원통관의 실용적 설계규준 개발 및 기설 구조물의 안전도 분석을 위한 기초적인 연구로서 외압을 받는 GFRP 적층원통관의 합리적인 강도 및 좌굴한계 상태방정식을 유도한 다음 세장모수의 변화에 따른 지배적인 한계상태와 구조신로도의 특성에 대하여 고찰하고자 한다. 또한 복합재료는 본질적으로 비균질성이며 주분제작으로 인한 제품의 다양성 등 높은 변동성을 내포하고 있기 때문에 적층수, 적층배열, 섬유배향각의 변화 등에 따른 민감도분석을 실시하였다. 신뢰성해석 기법으로는 선형근사화 기법인 AFOSM(Advanced First Order Second Moment method : 2차 모멘트법)법 [Ang / Tang, 1984] 과 수치적 시뮬레이션 기법인 중요도표본추출기법(Importance Sampling Techniques : IST) [조효남 외, 1990]을 사용하고 각 한계상태 방정식에 대한 이들의 적용성 여부도 함께 고찰하였다.

2. 해석모형

그림 1에는 FW식 GFRP 적층원통관의 해석모형 [Kasuya / Uemura, 1985](반경 R, 길이 ℓ , 관

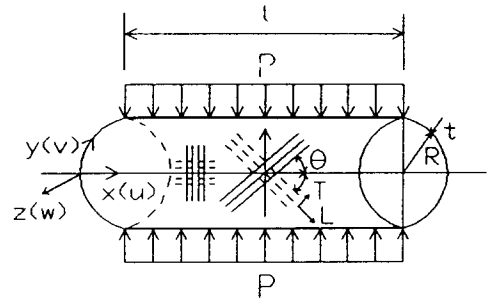


그림 1. 적층원통관의 해석모형과 좌표

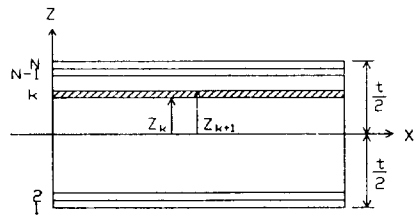


그림 2. N층으로 구성된 적층원통관의 단면

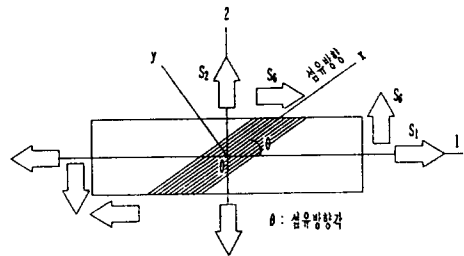


그림 3. k번째 층의 좌표계

두께 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. 그림 2에는 N층으로 구성된 적층원통관의 단면을 나타내었다. 이때 k번째 층의 섬유는 원통축과 θ_k 의 각도를 이루게 된다. 그림 3에는 k번째 층의 일방향 복합부재의 좌표계를 나타내었다.

3. 한계상태방정식

3.1 강도한계상태방정식

3.1.1 일반 한계상태 모형

본 연구에서는 재료의 역학적 성질 추정에 관한 불확실성 및 시편의 실험결과를 실제 구조물에 적용할 때 일어나는 스케일효과와 추정에 관한 문제 그리고 구조수명간 작용하중의 통계적 분포 추정에 관한 문제 등을 종합하여 다음과 같이 각종 중간수준(Intermediate level)의 랜덤변수들의 상관형(Interactive type) 강도한계상태방정식을 제안하였다.

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = g(\mathbf{r}(x_r), \mathbf{s}(x_s)) \quad (1)$$

$$x_r = [\dots X_{iM}, X_{iF}, X_{iP}, \dots] \quad (2)$$

$$x_s = [\dots X_{Ai}, X_{Qi}, \dots] \quad (3)$$

여기서, \mathbf{r} : 저항관련 기본 랜덤 벡터 x_r 의 함수

로 되는 랜덤 저항벡터

\mathbf{s} : 하중관련 기본 랜덤 벡터 x_s 의 함수

로 되는 랜덤 하중벡터

X_{iM}, X_{iF}, X_{iP} : i 번째 강도저항 관련 재료강도, 제작, 모델링에 관한 불확실량 확률변수

X_{Ai}, X_{Qi} : i 번째 외력(하중효과) 관련 해석 및 랜덤하중에 관한 불확실량 확률변수

3.1.2 파괴기준

강도한계상태방정식은 복합재료의 여러가지 파괴기준에 기초하여 설정될 수 있다[조효남외, 1991; 최영민, 1992]. 따라서 각각의 파괴기준에 대한 한계상태방정식의 유용성을 비교, 검토하여 신뢰성해석에 적절하게 사용될 수 있는 파괴기준의 선정이 바람직한데 여기서는 본 논문에서 비교 대상으로 하고 있는 Tsai-Wu[Tsai/Wu, 1971]와 Tsai-Hill[Hill, 1956] 기준에 대하여 정리하였다.

1) Tsai-Wu 기준

$$\begin{aligned} & [(1/F_L - 1/F'_L)\sigma_L + (1/F_T - 1/F'_T)\sigma_T + \sigma_L^2 \\ & /F_L F'_L + 2F_{12}\sigma_L\sigma_T + \sigma_T^2 /F_T F'_T + \tau_{LT}^2 /F_{LT}^2] \\ & = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, F_L, F'_L : 섬유축방향의 인장, 압축강도
 F_T, F'_T : 섬유축을 가로지르는 방향의 인장, 압축강도

F_{LT} : 일방향 복합부재의 전단강도

$\sigma_L, \sigma_T, \tau_{LT}$: 각방향의 응력

이때, F_{12} 는 Tsai-Wu 기준 내의 상관강도 텐서로서 다음 값의 범위에 있으나 본 논문에서는 비교적 합리적으로 값이 구해지는 1/2의 값을 적용하였다.

$$F_{12, lower} \leq F_{12} \leq F_{12, upper} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } F_{12, lower} = -1/\sqrt{F_L F'_L F_T F'_T}$$

$$F_{12, upper} = +1/\sqrt{F_L F'_L F_T F'_T}$$

2) Tsai-Hill 기준

$$\left[\frac{\sigma_L}{F_L}\right]^2 - \left[\frac{\sigma_L\sigma_T}{F_L^2}\right] + \left[\frac{\sigma_T}{F_T}\right]^2 + \left[\frac{\tau_{LT}}{F_{LT}}\right]^2 = 1 \quad (6)$$

3.2 좌굴한계상태방정식

3.2.1 일반 한계상태 모형

반경방향의 등분포 외압 P를 받는 복합재료 적층원통관의 일반 좌굴한계상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 하중은 확정량으로 간주하였다.

$$g(\cdot) = P_B \cdot X_F \cdot X_M - P \quad (7)$$

여기서, P_B : 좌굴강도(원주방향의 막력)

X_F : 제작 및 시공에 관련된 불확실량

확률변수

X_M : 모델링에 관련된 불확실량 확률
변수

P : 반경방향의 등분포외압

3.2.2 좌굴강도

복합재료 적층원통관이 반경방향으로 외압 P 를 받아 좌굴되는 경우, 이때 발생하는 변위를 받아 좌굴되는 경우, 이때 발생하는 변위를 이용하여 표현되는 Donnell형 좌굴평형방정식과 좌굴시작 단계의 원주 및 축방향의 조화적 처짐변형을 가정하여 이를 좌굴방정식에 대입한 후 고유치방정식의 해를 구하면 좌굴강도 P_B 를 구할 수 있다. [Kasuya and Uemura, 1985]

$$P_B = (R/n^2) \cdot [T_{33} + (2T_{12}T_{13}T_{23} - T_{11}T_{23}^2 - T_{22}T_{13}^2) / (T_{11}T_{22} - T_{12}^2)] \quad (8)$$

여기서, n : y 방향의 주기값 (P_B 를 최소로 하는 값으로 정함)

이때, T_{ij} 는 섬유배향각 및 적층방법에 따라 유도되는 모수로서 Angle-Ply의 역대칭 적층판인 경우에는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 대칭이나 Cross-Ply의 경우에는 Kasuya/Uemura[1985]의 문헌에 상술되어 있다.

$$\begin{aligned} T_{11} &= A_{11}(m\pi/L)^2 + A_{66}(n/R)^2 \\ T_{12} &= (A_{12} + A_{66})(m\pi/L)(n/R) \\ T_{22} &= A_{22}(n/R)^2 + A_{66}(m\pi/L)^2 \\ T_{13} &= -\{A_{12}(m\pi/L)/R + 3B_{16}(m\pi/L)^2 \\ &\quad (n/R) + B_{26}(n/R)^3\} \quad (9) \\ T_{23} &= -\{A_{22}(n/R)/R + B_{16}(m\pi/L)^3 + 3B_{26} \\ &\quad (m\pi/L)(n/R)^2\} \\ T_{33} &= D_{11}(m\pi/L)^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})(m\pi/L)^2 \\ &\quad (n/R)^2 + D_{22}(n/R)^4 + A_{22}/R^2 + \\ &\quad -4B_{26}(m\pi/L)(n/R)/R \end{aligned}$$

여기서, m, n 는 각각 x, y 방향의 반주기값 및 주기값 (P_B 를 최소로 하는 값으로 정함)이고 A_{ij}, B_{ij}, D_{ij} 는 적층판에 적용되는 구성방정식인 식 (10)의 계수로서 식 (11)과 같다 [Jones, 1975].

$$\left\{ \frac{N}{M} \right\} = \left[\frac{A_{ij}}{B_{ij}} \right] \left\{ \frac{\epsilon}{\kappa} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, N : 막력

M : 모멘트

ϵ : 중앙면의 변형을

κ : 중앙면의 곡률변화

A_{ij} : 축강성 매트릭스

B_{ij} : coupling 강성 매트릭스

D_{ij} : 휨강성 매트릭스

또한 \bar{Q}_{ij} 는 섬유배향각 및 식 (13)와 같은 기본 랜덤변수로 이루어진 강성 매트릭스의 함수로 된다.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}c^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2\theta c^2\theta + Q_{22}s^4\theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2\theta c^2\theta + Q_{12}(s^4\theta + c^4\theta) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}s^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2\theta c^2\theta + Q_{22}c^4\theta \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s\theta c^3\theta + (Q_{12} - Q_{22} + \\ &\quad 2Q_{66})s^3\theta c\theta \quad (12) \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3\theta c\theta + (Q_{12} - Q_{22} + \\ &\quad 2Q_{66})s\theta c^3\theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2\theta c^2\theta + Q_{66}(s^4\theta \\ &\quad + c^4\theta) \end{aligned}$$

여기서, c : cosine

s : sine 이고,

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{LT} E_L}{1 - \nu_{LT} \nu_{TL}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_T}{1 - \nu_{LT} \nu_{TL}}$$

$$Q_{66} = G_{LT}$$

4. 신뢰성 해석

상기한 바와 같이 GFRP 적층원통관의 강도나 좌굴한계상태함수는 비폐합형의 매우 복잡한 비선형 함수가 되는데 이러한 비폐합비선형 함수의 신뢰도는 과거에 사용해오던 FORM이나 SORM[Ang /Tang,1984]에 의해서는 실제적인 추정이 어렵고, 선형 또는 2차함수적 근사화에 기초한 FORM, SORM형 2차모멘트방법을 한계상태구배함수의 해석에 필요한 응답 Jacobian의 설계민감도 분석과 함께 FEM해석코드에 결합하는 방법인 유한요소형 2차모멘트신뢰성해법(Finite Element Reliability Method : FER) [Nakagari /Hisada,1986]이 적절하다.

그러나 비선형성이 크지 않은 경우에는 선형근사화기법이 실용적으로 사용될 수 있기 때문에 본 연구에서는 식 (4), (6)과 같은 강도한계 상태함수에 대해서는 AFOSM방법을 사용하였다[Miki et al.,1991].

한편 좌굴신뢰성해석에 있어서는 세장모수, 섬유방향, 적층방법 등 강도관련 인자들의 기본 특성을 고찰하기 위해 우선적으로 저항만을 확률변수로 취급하고 하중은 확정량으로 하였다. 신뢰성 해석은 식 (7)이 내포하고 있는 바와 같이 고차의 비선형성을 고려하여 중요도표본추출 방법을 사용하여 수행하였으며 두 방법간의 적용성도 고찰하였다.

5. 수치해석 및 고찰

5.1 불확실량

복합재료는 재료자체가 매우 다양하고 소재 개발이 신속하게 이루어지기 때문에 각종 기계적 성질의 통계적 정리가 상당히 미흡한 실정이다. 본

표 1. 해석에 사용된 불확실량 자료
(E-유리 /에폭시, $V_f=0.72$)

한계상태 함 수	기본변수	평 균 (t /cm ²)	변동계수 (%)
강 도	F_L	2.951	10
	F'_L	8.367	10
	F_T	0.469	10
	F'_T	1.778	10
	F_{LT}	0.460	10
좌 굴	E_L	618.96	10
	E_T	252.89	4
	G_{LT}	122.6	5
	ν_{LT}	0.23	10

표 2. 문헌의 불확실량 자료

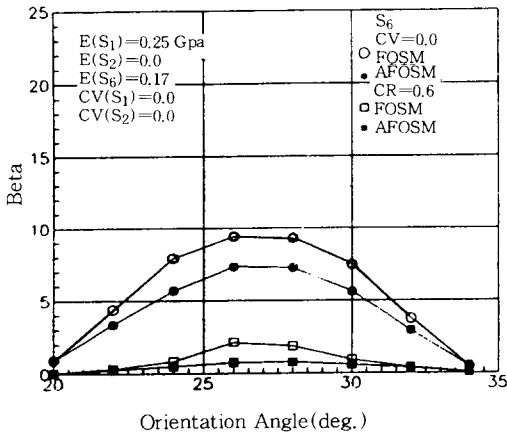
문헌 기본변수	ASM [1987]	일본복합 재료학회 [1989]	이 교 성 [1989]	추정치	
				평균	COV(%)
E_L (t/cm ²)	458.87	448.67±41.8	428.27±20.4	448.67	9
E_T (t/cm ²)	122.36	122.36±4.8	-	122.36	3
G_{LT} (t/cm ²)	44.87	45.89±5.1	-	45.89	4
ν_L	2.55	2.55±0.2	-	2.55	8

연구에서는 국내외 가용문헌을 참고하여 통계자료를 획득하였는데 다음 표 1에는 수치해석에 사용된 E-유리 /에폭시(섬유함유율, $V_f=0.72$)의 각종 기계적 성질에 대한 불확실량을 나타내었다. 여기서 평균치는 ASTM규정에 따라 실험한 값으로 부터 정한 것이다[AFML, 1977]. 해석에서는 응력의 변동에 따른 영향을 주로 고찰하고자 하기 때문에 강도변수의 불확실량을 간단하게 Miki et al.[1991]과 같이 공히 10%로 취하였다. 좌굴신뢰성 해석에 사용되는 기본 변수의 변동계수는 표2와 같이 세가지 문헌으로 부터 획득된 값을 다수 조정한 것이다.

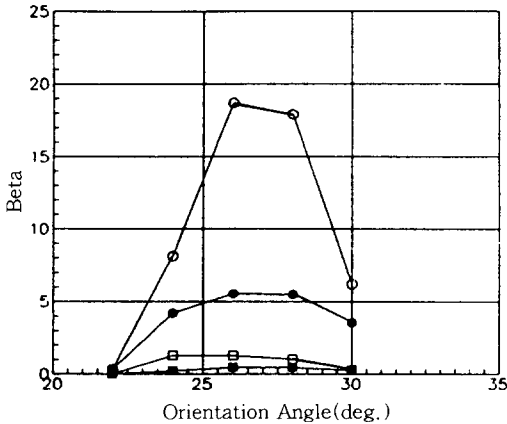
5.2 강도신뢰성 해석

1) 파괴기준별 신뢰도의 변화

그림 4에는 2축응력하에서 전단응력만의 변동성을 고려하였을 때 Tsai-Wu기준과 Tsai-Hill기



a) Tsai-Wu기준



b) Tsai-Hill기준

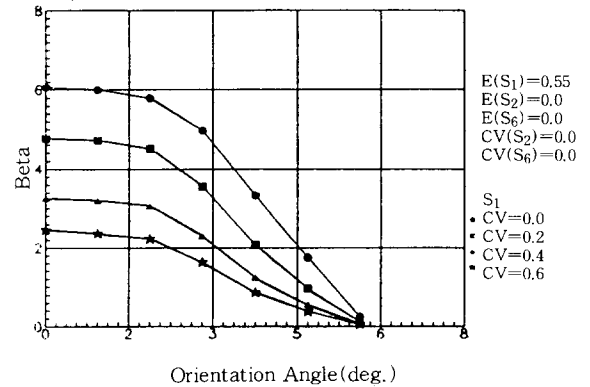
그림 4. 파괴기준별 신뢰도의 변화

준 각각에 기초한 강도한계상태함수의 신뢰성해석 결과를 나타내었다. 우선 각 경우에 있어서 AFOM과 MFOSM의 결과는 파괴기준마다 차이가 크게 나는데 이는 한계상태함수의 비선형성에 기인하는 것으로서 복합재료의 강도신뢰성해석에 있어서 MFOSM은 부적절한 것을 알 수 있다. 한편 두 기준 모두 섬유배향각 θ 가 약 27°에서 최대 신뢰성지수를 나타내며 신뢰성지수의 감소추세도 비슷하게 나타내는데 다른 기준들에서도 유사한 결과를 얻을 수가 있었다[최영민,1992]. 따라서 복합재료의 파괴기준들은 신뢰성해석에 모두 적

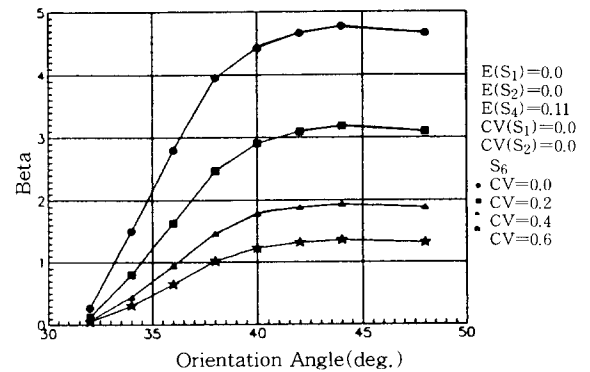
합하게 사용될 수 있다고 판단되나 본 연구에서는 Tsai-Wu기준이 해의 수렴성이 좋게 나타났기 때문에 이후 해석에는 Tsai-Wu기준을 적용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

2) 응력의 변동성에 따른 신뢰도의 변화

그림 5에는 1축응력 상태하에서 응력의 변동계수를 변화시켰을 때 신뢰도의 변화를 나타내었다. 그림으로 부터 부재축방향 응력[그림 3참조]이 작용할 때는 6°이내의 배향각에서, 전단응력이 작용할 때는 30°이상의 배향각에서 신뢰성지수 β 가 민감하게 변화함을 알 수 있다. 이는 복합재료의 설계에 있어서 섬유배향각의 중요성을 나타내는 것이라 하겠다.



a) S_1 의 변동



b) S_6 의 변동

그림 5. 응력의 변동성에 따른 신뢰도의 변화(1축응력)

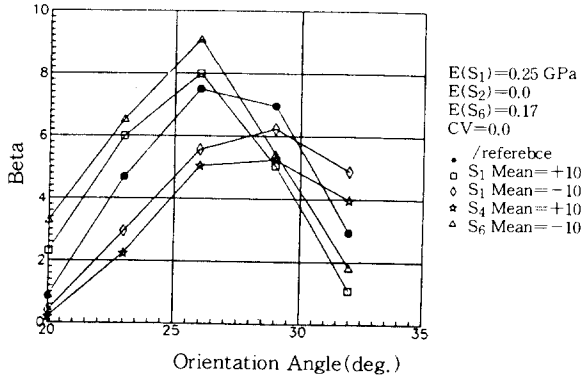


그림 6. 응력의 평균변화에 따른 신뢰도의 변화

3) 응력의 평균변화에 따른 신뢰도의 변화
 2축응력 상태하에서 각 방향의 응력을 각각 $\pm 10\%$ 씩 가감하였을 때 신뢰도해석 결과를 그림 6에 나타내었다. S_1 을 기준으로 10% 증가시켰을 때, $\theta=27^\circ$ 를 기준으로하여 좌측에서는 β 가 기준선상단에 위치하고 우측에서는 기준선의 하단에 위치하고 있음을 알 수 있었다. 이는 실무설계에 있어서 섬유배향각 뿐만아니라 작용외력에 대한 충분한 고찰을 통한 최적설계의 필요성을 암시하는 것이라 하겠다.

5.3 좌굴신뢰성 해석

1) 세장모수비 R/t 에 섬유배향각 θ 의 증가에 따른 P_{cr} 의 변화

그림 7에는 세장모수비 R/t 의 증가에 따른 강도한계상태함수의 극한하중 P_u 와 좌굴한계상태함수의 좌굴하중 P_{cr} 의 변화를 Angle-Ply($\theta=70^\circ$)대칭인 경우에 대해서 나타내었다. 극한하중과 좌굴하중 교차점의 80%를 탄성 및 비탄성 좌굴의 한계치라 했을 때 이때의 한계세장비는 약 8정도임을 알 수 있었다. Cross-Ply대칭인 경우에는 추세는 비슷하지만 적층수에 따른 전반적인 P_{cr} 의 변화폭이 Angle-Ply인 경우 보다 다소 크게 나타남을 알 수 있었다[최영민,1992]. 그림 8에는 섬유배향각 θ 의 증가에 따른 좌굴하중 P_{cr} 의 변화를 나타내었다. θ 가 증가함에 따라 P_{cr} 은 증가하나 R/t 가 커지면 이영향은 적어짐을 알 수 있다. 여기서 ●점은 각각의 R/t 에 대한 Cross-Ply의 P_{cr} 값이다.

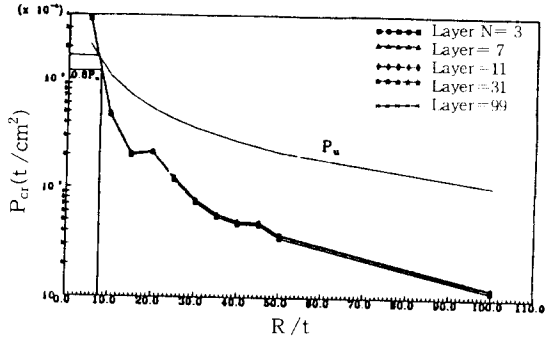


그림 7. R/t 의 증가에 따른 P_{cr} 의 변화 Angle-Ply($\theta=70^\circ$)대칭의 경우

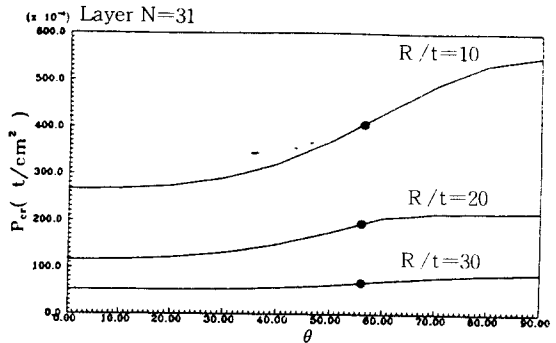


그림 8. 섬유배향각의 증가에 따른 P_{cr} 의 변화

2) 세장모수비 R/t 의 증가에 따른 β 의 변화

그림 9에는 θ 가 70° 이고 적층수 $N=16$, 두께 $t=1.6\text{cm}$, 관길이 $L=2\text{m}$ 인 적층관의 세장모수비 R/t 의 증가에 따른 신뢰성지수 β 의 변화에 대해

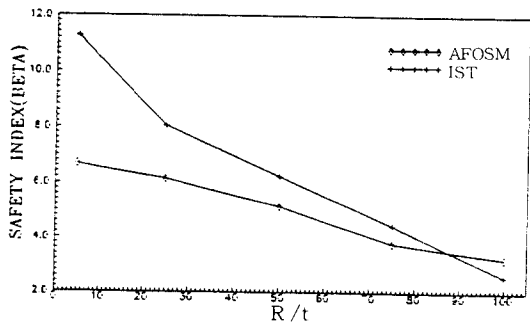


그림 9. R/t 의 증가에 따른 β 의 변화

AFOSM과 IST 방법을 이용하여 해석한 결과를 나타내었다. 두가지 방법 모두에 좌굴신뢰성지수가 세장모수비에 대해 매우 민감함을 알 수 있다. 이때 AFOSM의 결과는 IST의 결과와 큰 차이를 보이고 있는 데 이는 강도한계상태함수와는 달리 좌굴한계상태가 지니고 있는 고차의 비선형성에 기인하는 것으로서 이러한 경우에는 IST기법이 더욱 효과적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

6. 결론

GFRP 적층원통관의 강도 및 좌굴신뢰성 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 복합재료의 파괴기준들은 강도신뢰성해석에 모두 적합하게 사용될 수 있다고 판단되며, 강도신뢰성은 섬유배향각 및 작용외력의 변동성 및 상화 등에 따라 민감하게 변화하므로 이들에 대한 합리적인 최적설계가 필요하다고 사료된다.

(2) 복합재료 적층원통관의 좌굴신뢰성은 작용외력 뿐만아니라 섬유배향각, 세장모수비, 적층구성, 두께 등에 따라 민감하므로 이들을 설계에 합리적으로 반영할 수 있는 설계기준 및 최적설계기법의 개발이 필요하다고 사료된다.

(3) 복합재료의 강도신뢰성해석 기법으로는 폐합형 한계상태함수의 2차모멘트 근사화에 기초한 AFOSM방법이 효과적으로 사용될 수 있다고 판단된다. 그러나 좌굴한계상태함수와 같이 고차의 비선형비폐합형 음함수적인 한계상태를 갖는 문제에 대해서는 IST 또는 추계적 유한요소 신뢰성 해석 기법 같은 진보된 방법들의 적용이 바람직하다고 생각된다.

(4) GFRP 적층원통관은 섬유배향각, 적층구성, 적층두께, 탄성계수, 작업조건, 숙련도 등에 있어서 많은 불확실성을 내포하고 있으나 아직 이에 대한 통계적 취급이 매우 미흡하다. 따라서 보다 신뢰성 있는 기준이나 안전도의 채택을 위해서는 앞으로 각종 자료의 D/B화가 선결되어야 할 것이며 이를 기초로 실제 현장에서 적용 가능한 합리적 안전도의 개념이 정립될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구지원 연구비로 수행되었으며 이에 심심한 사의를 표합니다.

참고 문헌

- AFML(1977), "Advanced Composite Design Guide," Air Force Materials Laboratory Write-Patterson Air Force Base, Third Ed., Vol. 1, pp.1.21~3.
- Ang, A.H-S, Tang, W.H., (1984) "Probability Concepts in Engineering Planning and Design," Vol I,II., John Wiley & Sons, New York.
- ASM(1987), "Engineered Material Handbook, Composites," ASM International, Vol. 1., U.S.A.
- Fukunaga, H, and Uemura, M. (1981), "Probabilistic Burst Strength of Filament Wound Cylinders Under Internal Pressure," Journal of Composite Materials, Vol.15, pp.462~480.
- Hill, R.(1956), "The Mathematical Theory of Plasticity,"Oxford.
- 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, pp.262~266.
- Miki, M., Murotsu, Y., Tanaka, T. and shaowen, S.(1991), "Reliability of Unidirectional Fibrous Composite," J. of AIAA, Vol.28, No.11, pp1980~1986.
- Nakagari, s. and Hisada, T.(1986), "Stochastic Finite Element Analysis of Uncertain In-Ply Stress in Fiber Reinforced Plastic Laminated

Plate,” Proc. of the Institute of Mechanical Engineers, 1986, pp.35~38

Tsai, S.W. and Wu, E.M(1971) “A General Theory of Strength for Anisotropic Materials,” Journal of Composite Materials, Vol.5, pp.58~80.

日本複合材料學會(1989), “複合材料ハンドブック”, 日本複合材料學會篇, 日刊工業新聞社

이교성(1989), “복합재료학”, 광화문출판사

조 효남, 김 인섭(1990), “교량구조의 체제신뢰성 해석을 위한 중요도 표본추출기법”, 한국전산구조공학회지, 제4권 제 2호, pp.119~129.

최영민(1992), “GFRP 적층복합재료관의 신뢰성해석”, 석사학위취득 논문, 1992. 6.

(접수일자 : 1992. 11. 9)