

치수효과를 고려한 복합재료 봉구조재의 파괴강도

김두환 · 김덕현 · 백대호*

서울산업대학교 구조공학과 · *대공기업

1. 서론

치수효과는 콘크리트나 암석과 같은 quasi-brittle 재료들의 물리적 특성에 영향을 미친다. 모든 재료의 경우에 체적이 크면 흠이 클 수 있다. 구조물의 섬유 묶음 크기가 증가하면, 섬유강도가 감소하는 현상을 흔히 경험해 왔다. 복합재료내의 강도분배와 치수사이의 관계를 특성 짓는 효과적인 방법은 아직 완전하지 않다. 본 논문에서는 경험에서 얻어진 Filament Wound 튜브에 사용되는 유리섬유와 에폭시의 인장강도 감소비율 실험데이터로 얻은 그래프로부터 Crasto 와 Kim의 일방향 보강된 AS4/3501-6 복합재료의 90°방향 인장강도에 대한 실험결과로부터 복합재료 봉구조재의 강도 치수효과를 증명하였다.

2. 이론적 배경

직교이방성 일 방향 플라이가 평면 응력의 상태에 있을 때에 강도 특성은 섬유로 강화된 복합재료인 경우에 인장인 경우와 압축인 경우가 서로 다르므로, 다음과 같은 다섯 개의 독립된 특성이 존재한다.

- X : 일방향 플라이의 섬유길이의 인장강도
- X' : 일방향 플라이의 섬유길이의 압축강도
- Y : 일방향 플라이의 X축에 수직인 방향의 인장강도
- Y' : 일방향 플라이의 X축에 수직인 방향의 압축강도
- S : 일방향 플라이의 전단강도

Tsai 와 Wu는 응력장내에서 파손면 존재한다고 가정하였다.

$$F_{ij} \sigma_i \sigma_j + F_i \sigma_i = 1 \quad (i,j=1,2,3,4,5,6)$$

여기서 F_i 와 F_j 는 2차(Second Rank)와 4차(Forth Rank) 강도 텐서(Strength tensor)이고

$\sigma_4 = \sigma_{23}$, $\sigma_5 = \sigma_{31}$, $\sigma_6 = \sigma_{12}$ 를 각각 나타낸다.

대칭축 X-Y에 관하여 평면 응력 상태에 있는 얇은 직교이방성에 대해서 이 파괴영역은 다음과 같이 된다.

$$E_{xx}\sigma_x^2 + E_{yy}\sigma_y^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + F_{ss}\sigma_s^2 + F_x\sigma_x + F_y\sigma_y + F_s\sigma_s = 1$$

여기서 F는 강도 변수들이고 다음으로부터 얻어진다.

$$E_{xx} = 1/XX', \quad E_{yy} = 1/YY', \quad E_{ss} = 1/S^2,$$

$$F_x = 1/X - 1/X', \quad F_y = 1/Y - 1/Y', \quad F_s = 0$$

이러한 강도들은 실험에 의해서 얻어진다. Tsai의 경험식은

$$F_{xy} = F_{xy}^* \sqrt{E_{xx}E_{yy}}$$

여기서 F_{xy}^* 경험적인 상수로서 아래식을 사용한다.

$$-1/2 \leq F_{xy}^* \leq 0$$

여기서 $-1/2$ 을 일반화된 Von Mises의 값이고, 0은 Hill's의 값이다.

경험이 많은 복합재료 제조기술자 Mr J. Lowrie Mclarty에 의해서 Filament Wound에 사용되는 유리섬유의 인장강도 감소비율은 다음 그림에 나타나 있다.

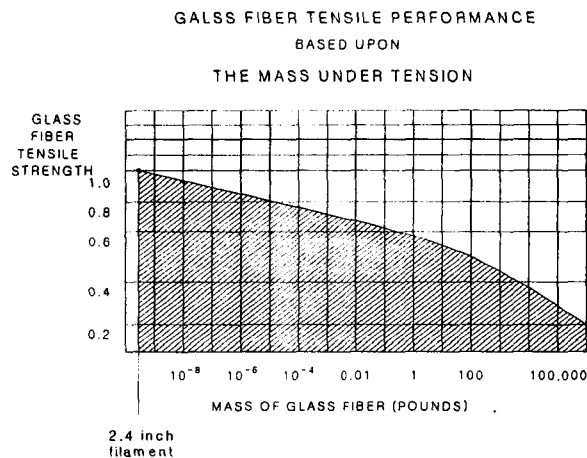


Fig 2.1 Rate of decrease of glass fiber tensile strength based on mass

Crasto 와 Kim 에 의한 실험결과로부터 90°방향에 대한 인장강도 감소비율 Y와 일 방향으로 보강된 복합재료 AS4/3501-6에 대한 관계로부터 Fig. 2.2 에 나타나 있다.

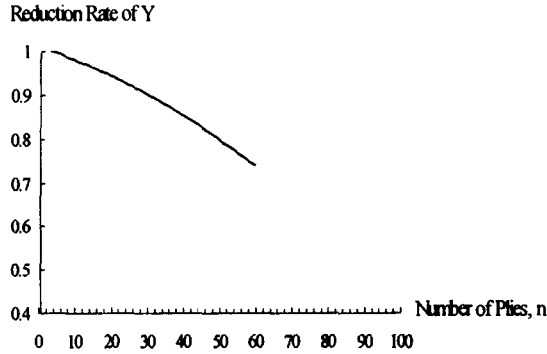


Fig. 2.2 Tensile strength reduction rate of epoxy matrix based on mass

같은 모재를 사용한 결과가 아니라도 에폭시에 대한 이 방정식은 90° 인장강도 감소비를 측정하는데 사용할 수 있다. 보강섬유와 구성 재료들 마다 질량이 커짐에 따른 X, X', Y, Y' 그리고 S의 강도 감소비가 점차로 반드시 얻어져야 한다. 제조방법과 다른 가능한 요인들도 마찬가지로 고려되어야 할 것이다.

현재의 이용 가능한 지식으로서 에폭시 모재에 유리섬유로 보강된 복합재료에 대해서 다음과 같은 강도-파괴해석 과정을 추천한다.

- 1) Fig. 2.1 에서 감소된 X값을 얻는다.
- 2) 치수효과는 인장과 압축이 같다고 가정한다.
- 3) $Y = Y(\text{시험편강도}) \times \text{【Fig. 2.2에서 구한 값】}$
- 4) $Y' = Y'(\text{시험편강도}) \times \text{【Fig. 2.2에서 구한 값】}$
- 5) $S = S(\text{시험편강도})$ 로 가정한다.
- 6) 응력 공간에 대하여 Tsai-Wu 파괴영역을 사용한다.

탄성계수의 감소비를 모르기 때문에 변형률 공간의 영역사용은 복잡하다.

계산에 사용된 유리섬유와 에폭시로 된 복합재료(GFRP)의 물성치는 Table 2.1과 Table 2.2와 같다.

Table 2.1 Properties of GFRP

E_x	E_y	ν_{12}	ν_{21}	G	h_0	V_f
38.6GPa	8.27GPa	0.26	0.0557	4.14GPa	0.125mm	0.45

E_x : 종 방향의 탄성계수 E_y : 횡 방향의 탄성계수 ν : Poisson비

G : 전단계수 h_0 : 플라이 한 개의 두께 V_f : 섬유의 체적율

Table 2.2 Strength of GFRP

X	X'	Y	Y'	S
1062MPa	610MPa	31MPa	118MPa	72MPa

X, X' : 종 방향의 인장강도, 압축강도
 Y, Y' : 횡 방향의 인장강도, 압축강도 S : 전단강도

다음과 같은 세가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

- A) 인장과 압축 모두 강도 감소를 시킨 경우
- B) 단지 인장만 감소를 시킨 경우
- C) 인장, 압축 모두 감소하지 않는 경우

각각의 경우에 대하여 수정된 Hill's

($F_{xy}^* = 0$)와 일반화된 Von Mises영역($F_{xy}^* = -1/2$)을 고려하였다.

작용하중은 다음과 같이 가정하였다.

$\sigma_x = 700\text{MPa}$ $\sigma_y = 20\text{MPa}$ $\sigma_s = 50\text{MPa}$ $\sigma_y = -20\text{MPa}$ 인 경우,
 층수는 100층으로 가정하였다.

3. 수치해석

수치해석을 실시 하는데 축 하중 $549.5 \times 10^6 \text{N}$ 을 받고 봉의 길이는 $L=3\text{m}$ 직경은 $d=100\text{cm}$ 일 때 설계 종 방향 강도는 1000Mpa 이다. 이때 Size-Effect를 고려 안한 경우와 고려한 경우를 비교하였다.

$$\text{작용 응력은 } \sigma_x = 4 \times 549.5 \times 10^6 / (\pi \times 1^2) = 700 \text{ Mpa}$$

계산에 사용된 유리 섬유와 에폭시로 된 복합재료의 물성치는 Table 2.1과 Table 2.2와 같다.

섬유의 지름을 .00045in ~ .00050in로 한다면 $h_o = 0.125\text{mm}$ 을 갖는 한 개의 플라이는 대략 10개의 섬유지름이 두께이고, $V_p = 0.45$ 인 Ply이므로 대략 5개의 섬유들을 포함하고 있다. 단일 방향의 복합재료가 $h = 100 h_o$, $L = 1\text{m}$, 폭 $b = 0.01\text{m}$ 라면 섬유들의 질량은 2.4 inch(60.9mm) 길이를 갖고, 500ksi (3449MPa)의 인장강도를 갖는 한 개의 섬유에 대해 다음과 같은 질량을 갖는다.

$$\begin{aligned} \text{Volume of Fibers} &= (10/2 \times 100) \times (100 / (2.54 \times 2.4)) \times (10\text{mm} / 0.125\text{mm}) \times 5 \\ &= 500 \times 16.4 \times 400 = 3,280,000 = 3.28 \times 10^6 \text{ Times of One Fiber} \end{aligned}$$

1) Fig. 2.1에서 질량이 3.28×10^6 우리 섬유인 인장강도 감소비는 0.7을 얻을 수 있다.

2) Fig. 2.2로부터 90° 인장강도의 감소비로 0.71 얻을 수 있다.

다음과 같은 세 가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

A) 인장과 압축 모두 강도 감소를 시킨 경우

B) 인장만 감소를 시킨 경우

C) 인장, 압축 모두 감소하지 않는 경우

각각의 경우에 수정된 Hill's ($F_{xy}^* = 0$)와 일반화된 Von Mises 영역 ($F_{xy}^* = -0.5$)을 고려하였다.

(1) Size-Effect를 고려 안한 경우

(A) Ordinary Strength Theory

$$\sigma_{\max} = S \sigma_{\text{applied}} \quad S_t = 1000 / 700 = 1.429$$

(B) Tsai-wa Failure Criteria Considering Tensile and Compression Strength Only

$$R = 1.464 \quad (F_{xy}^* = 0, F_{xy}^* = -0.5)$$

(2) Size-Effect를 고려한 경우 인장강도 감소비는 0.7 이고, 90° 인장강도 감소비는 0.71이다.

(A) Ordinary Strength Theory

$$\sigma_{\max} = S \sigma_{\text{applied}} \quad S_t = 1.429 \times 0.7 = 1.000$$

(B) Tsai-wa Failure Criteria Considering Tensile and Compression Strength Only

$$R = 1.062 \quad (F_{xy}^* = 0, F_{xy}^* = -0.5)$$

(a) Ordinary Strength Theory S_t

	S_t
Size-Effect를 고려 안한 경우	1.429
Size-Effect를 고려 한 경우	1.000

(b) Tsai-wa Failure Criteria Considering Tensile and Compression Strengths Only

	$F_{xy}^*=0$	$F_{xy}^*=-0.5$
Size-Effect를 고려 안한 경우	1.464	1.464
Size-Effect를 고려 한 경우	1.062	1.062

결론은 예제인 경우 Safety Factor 는 1.464~1.000이다. 즉, 파손기준($R \leq 1$)의 최적 설계 Size-Effect를 고려 안한 경우 강도비가 최대46.4%까지 증가되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 Mr J. Lowrie Mclarty에 의해서 경험에서 얻어진 Filament Wound 튜브에 사용되는 유리섬유의 치수에 따른 강도 변화와 Crasto 와 Kim의 일 방향 보강된 AS4/3501-6 복합재료의 90°방향 인장강도에 대한 실험결과로부터 복합재료 봉 구조재의 강도 치수효과를 검토하였다. 변형 공간을 사용한다면 강성 감소계수를 모르기 때문에 응력 공간에서 Tsai-Wu의 파괴영역을 사용하였다. 본 논문에서의 연구는 유리섬유와 에폭시 모재로 구성된 재료에 대하여 강도는 다음의 다섯가지 경우에 대하여 검토되었다.

- (1) 시편강도의 감소를 인장강도와 압축강도를 고려한 경우
- (2) 시편강도의 감소를 인장강도에 대해서만 고려한 경우
- (3) 파괴범주 $F_{xy}^* = 0$ 일 때
- (4) 파괴범주 $F_{xy}^* = -1/2$ 일 때
- (5) 작용된 응력 상태

앞으로 연구·개발 방향은 제안된 Size/Scale 효과를 Matrix와 대형구조물의 사용 가능한 재료의 각각에 대하여 질량에 기초한 더 많은 재료강도의 감쇠율을 구하고 설계에 사용될 여러 가지 적층판의 각 형태에 대해서 적용 응력의 가능한 모든 경우를 조합하여 실험을 수행하여 구조물의 최적설계에 적용되어야 한다.

참고문헌

- 1) Kim. D. H, "Size-Scale Effects in the Failure of Composite Structure", 한국복합재료학회 94년도 추계학술발표대회 논문집 PP 255-267, 1994
- 2) S. W. Tsai and H.T.Hahn, Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Co., 1980
- 3) R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill Inc., 1994