

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.481

홀 노치를 포함한 평직 탄소섬유강화플라스틱의 파괴기준 연구[§]

김상영* · 금진화* · 구재민* · 석창성*[†]

* 성균관대학교 기계공학부

Study of Failure Criterion of Hole-Notched Plain-Weave Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites

Sang Young Kim^{*}, Jin Hwa Geum^{*}, Jae Mean Koo^{*} and Chang Sung Seok^{*†}

** Dept. of Mechanical Engineering, SungKyunKwan Univ.

(Received December 21, 2009 ; Revised February 26, 2010 ; Accepted February 26, 2010)

Key Words: CFRP(탄소섬유강화플라스틱), Hole Notch(홀 노치), Characteristic Length(특성길이), Point Stress Criterion(점응력 조건)

초록: Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP) 복합재료는 높은 비강성 및 우수한 화학적 특성 등으로 인하여 여러 분야에서 점점 사용이 증가하고 있다. 대부분의 CFRP 복합재료는 여러 부품들의 조립을 통해 제작된다. 이러한 독립된 부품들은 볼트, 핀 등과 같은 기계적인 방법을 통해 체결된다. 볼트나 핀에 의한 hole은 구조내에서 노치로 작용하여 부품의 강도저하의 원인이 된다. 본 논문에서는 홀의 크기와 시험편 폭이 노치재의 파괴강도에 끼치는 영향을 평가하여 hole을 포함하고 있는 평직 CFRP 복합재료의 정하중 파괴 강도를 실험적으로 평가하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 홀 크기와 시험편 폭에 따른 점응력 조건의 특성길이를 평가하였으며, 특성길이와 노치재의 파괴강도의 관계를 확인하였다. 이를 이용하여 노치재의 정하중 파괴기준을 재정의하였다.

Abstract: Recently, carbon fiber reinforced plastic (CFRP) have been used in various fields because of its high specific modulus, and chemical properties. Most products in which CFRP composites are used are manufactured by joining the product components by bolts or pins. Holes for bolts and pins decrease the strength of the components because these holes act as notches in the structures. In this study, the fracture strength of CFRP plain-weave composite plates containing holes is experimentally investigated to examine the effects of hole-size and specimen width on notched tensile strength. The results show that the characteristic length considered in the point stress criterion depends on the hole size and specimen width. There exists a certain relation between notched tensile strength and characteristic length. Fracture criterion is redefined on basis of this relation.

- 기호설명 -

a_0 : 평균응력 조건에서의 특성길이

σ_y : Y축 방향 응력

R : 홀의 반경

σ_N : 노치강도

σ_N^∞ : 무한평판에서의 노치강도

σ_u : 인장강도

d_0 : 점응력 조건에서의 특성길이

1. 서론

일반적인 구조물의 경우, 체결부위가 없는 일체형으로 만드는 것이 가장 이상적이기는 하나, 부품의 크기, 제작의 어려움, 또는 검사의 편리성 등의 이유로 여러 개의 독립된 부재들을 조립하여 전체 구조물을 제작하게 된다. 이때 독립된 부재들을 볼트(bolt)나 핀(pin)과 같은 기계적 방법에 의해 체결하는 경우가 많은데, 이와 같은 체결법은 원공과 같은 불연속부를 부재에 형성하게

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author. seok@skku.edu

된다. 일반적으로 홀 노치 등의 불연속부를 가진 노치재의 강도평가는 응력집중계수를 사용하여 평가하고 있으나, 선형탄성파괴역학에 기반을 둔 Waddoups등⁽¹⁾의 결함모델이나 불연속부의 선단의 수직응력분포에 기반을 둔 Whitney 등^(2,3)의 모델 등도 사용되고 있다. 특히 후자의 경우는 불연속부 선단으로부터의 거리, 즉 특성길이(characteristic length)에서의 응력이 평활재의 파괴응력과 같을 때 파손이 일어난다는 모델(point stress criterion)로써, 파손조건을 결정짓는 특성길이가 재료상수라는 가정하에서 강도평가를 하는 것이다. 그러나 CFRP 또는 Glass Fiber Reinforced Plastic(GFRP)등의 적층판을 이용한 연구결과에 의하면 특성길이는 재료의 종류, 온도, 적층구조, 시험편의 형상 등에 의해 영향을 받고 있다고 보고되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ Karlak⁽⁷⁾과 Pipes 등^(8,9)은 특성길이가 원공크기의 함수임을 고려하여 Whitney^(2,3)의 모델을 수정하였다. 한편 복합재료의 파손양상은 대단히 복잡할 뿐만 아니라 노치선단에서의 응력조건의 복잡성 때문에 이들 모델이 모든 복합재료의 강도평가 및 파괴조건에 적용된다고 할 수 없으며, 특히 직조(woven)된 복합재료의 경우에 대해서는 이에 관한 연구가 미흡한 상태이다.

본 연구에서는 평직 CFRP복합재료에 있어서 홀 노치 및 시험편의 폭이 노치강도에 미치는 영향을 명확히 하고, 또한 노치강도 및 파괴조건과 위에서 언급한 특성길이와의 관계를 검토하였다.

2. Whitney와 Nuismer^(2,3)에 의한 복합재료 적층판의 파괴해석 모델

2.1 노치재의 파괴조건

복합재료는 결함의 형태가 다양한데, 일반적인 금속재료와 달리 결함의 일종인 단일 균열에 의한 파괴가 쉽게 일어나지 않고, 일정 정도 이상의 결함이 형성된 경우에 재료가 파괴에 이르는 것이 일반적으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ Whitney와 Nuismer^(2,3)는 복합재료의 파괴의 원인이 되는 결함은 일정한 크기 이상이어야 한다고 하였다. 또한, 이러한 결함은 특정한 수준 이상의 응력에서 발생한다고 하였다. 즉, 고 응력이 분포하는 범위가 넓을수록 결함을 형성할 확률이 높아지므로 재료의 강도는 작아진다고 하였는데, 그 영역의 크기는 노치의 형상과 크기에 무관한 재료상수이며, 단축인장과 같은 일 차원 문제에서 특성길이

의 개념으로 표현할 수 있다고 주장하였다.

2.2 점응력 파손이론

Whitney와 Nuismer^(2,3)는 불연속부 선단의 수직응력 σ_Y 의 분포에 기반을 둔 점응력조건(point stress criterion) 및 평균응력조건(average stress criterion)의 파손모델을 제안하였다. 즉 불연속부 선단으로부터 일정한 거리(d_0)만큼 떨어진 곳에서의 수직응력 또는 그 구간(a_0)에 걸친 평균수직응력이 평활재의 파괴강도 σ_u 와 같아질 때 파손이 일어난다고 가정한 것으로 각각의 파손 조건식은 식 (1) 및 (2)와 같다

$$\sigma_Y(R+d_0, 0) = \sigma_u \quad (1)$$

$$\frac{1}{a_0} \int_R^{R+a_0} \sigma_Y(x, 0) dx = \sigma_u \quad (2)$$

여기에서 R 은 원공의 반경, 그리고 σ_u 는 인장 강도이다.

점응력 조건은 원공선단에서의 수직응력분포^(10,11)와 식 (1)의 관계로부터 아래의 식으로 표현된다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_u} = \frac{2}{2 + \zeta^2 + 3\zeta^4 - (K_T^\infty - 3)(5\zeta^6 - 7\zeta^8)} \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{R}{R+d_0}$$

여기서 σ_N^∞ 는 무한 평판에서의 노치강도이며, K_T^∞ 는 무한 판의 응력집중계수로서 식 (4)와 같다.⁽¹²⁾

$$K_T^\infty = 1 + \left[\frac{2}{A_{22}} \left(\sqrt{A_{11}A_{22}} - A_{22} + \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{2A_{66}} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기에서, A_{ij} 는 직교 이방성 강성텐서(orthotropic stiffness tensor)로서 첨자 1과2는 하중의 부하방향에 평행 및 수직한 방향을 나타낸 것이다. 식 (3)으로부터 노치강도의 저하는 원공반경 R 과 K_T^∞ 및 특성길이 d_0 의 함수임을 알 수 있다. Whitney와 Nuismer^(2,3)는 특성길이를 불연속부의 크기에 무관하게 일정한 재료상수로 가정하여 원공이나 균열 slit을 가진 glass/epoxy 및 graphite/epoxy 재료의 노치강도를 평가하였다.

그러나 Karlak⁽⁷⁾은 특성길이와 원공반경 사이에 아래의 관계를 가정하여 Whitney 등^(2,3)의 모델을 수정하였다.

$$d_0 \propto R^{1/2} \quad (5)$$

이 모델은 식 (5)를 식 (3)에 적용함으로써 복합재의 노치강도를 예측할 수 있지만, 주어진 적층판의 특성길이가 Whitney와 Nuismer^(2,3)의 경우와 같이 일정하거나 식 (5)의 관계를 갖지 않는 경우에는 좋은 예측결과를 보이지 않는다.

또한 Pipes 등^(8,9)은 d_0 와 R사이에 식 (6)의 지수관계를 적용하여 수정된 점응력조건을 제안하였다.

$$d_0 = C^{-1} R^m \quad (6)$$

여기서 C는 노치감도계수, m은 특성길이 변화의 기울기($0 < m < 1$)를 나타낸다.

식 (3)과 식 (6)에 의한 Pipes 등^(8,9)의 파손조건은 여러 가지 복합 적층재의 노치강도의 예측에 있어서 좋은 결과를 보이고 있다. 그러나 이 모델에서 C값은 적층순서 및 적층판의 형상 등에 따라 변화하므로 주어진 재료의 고유한 노치감도를 나타내지 못하며, m도 원공의 크기가 작은 경우에서 음(-)의 값을 나타내는 문제점을 가지고 있다.

이에 따라 Kim 등⁽¹³⁾은 시험편의 형상을 나타내는 2R 와 W의 함수로 특성길이 d_0 의 계산식을 아래 식 (7)과 같이 수정하였다.

$$d_0 = k^{-1} (2R/W)^m \quad (7)$$

여기서 k는 2R 및 W에 대한 노치의 감도계수이고 m은 특성길이의 변화를 나타내는 계수이다. 또한 Kim 등⁽¹³⁾은 W가 작을수록 k는 상승하고 m은 거의 유사한 것으로 정의하였으며, 수정된 특성길이 계산식에 따라 식 (3)을 아래의 식 (8)과 같이 수정하였다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_u} = \frac{2}{2 + \eta^2 + 3\eta^4 - (K_T^\infty - 3)(5\eta^6 - 7\eta^8)} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + 2^m R^{m-1} W^{-m} k^{-1}}$$

그러나 이 경우, 동일한 재료라고 하더라도 시험편의 폭에 따라 노치강도를 예측하는 식이 각각 존재하게 되어 일반적인 적용이 어려운 것이 사실이다.

3. 인장시험

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 (주) SK chemical에서 시판되는 직물구조 탄소섬유 프리프레그인 WSN3K (1ply 두께 0.27mm)를 이용하여 최종두께가 3.52mm (16 plies)가 되도록 제작하였다. 적층판은 Autoclave에서 140°C, 60kg/cm²의 온도와 압력에서 60분간 성형, 제작되었다. 제작된 시험편의 각 성분의 함량은 Table 1과 같으며, 기계적인 특성은 Table 2와 같다. 시험편은 ASTM D3039-02⁽¹⁴⁾를 참조하여 NC 머신으로 절단/가공하여 제작하였다. 또한, 시험편의 채취방향은 0°/90°이며, 시험편 끝 단에는 그림으로부터 미끄러짐과 손상을 방지하기 위해 ASTM⁽¹⁴⁾을 참조하여 사포(Emery cloth)를 부착하여 사용하였다. 시험편 중앙의 원공노치 가공은 적층분리와 같은 손상을 최소화하기 위하여 원통형 초경합금 드릴을 사용하여 가공하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조이며, Fig. 2는 홀 노치 시험편의 형상이다. 홀 노치는 시험편의 중앙에 직경 1~32mm로 가공하였으며, 시험편의 폭은 10, 25 및 40mm로 가공하였다.

Table 1 Physical properties of WSN3K

Wet Resin Content	32±2 (Wt. %)
Resin Areal Weight	148±5 g/m ²
Fiber Areal Weight	197±8 g/m ²
Total Areal Weight	353±10 g/m ²

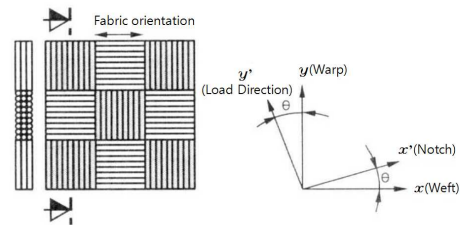


Fig. 1 Texture and load orientation of plain weave CFRP laminate composite

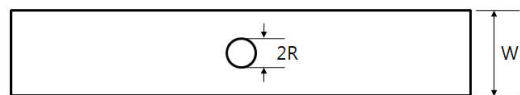


Fig. 2 Configuration of test specimens

Table 2 Mechanical properties of WSN3K

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	ν_{xy}	G_{xy} (GPa)
55	55	0.13	4.75

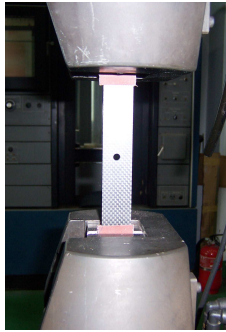


Fig. 3 Installed specimen for test

3.2 시험방법

시험은 인스트론(Instron)사의 25ton용량의 전기 유압식 시험기(model 8802)를 사용하여 수행하였으며, 시험속도는 3mm/min으로 상온에서 수행하였다. Fig. 3은 시험편을 그림에 장착한 모습이다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 노치강도의 평가

Table 3는 시험편의 폭 W 및 원공의 직경 2R의 변화에 따른 시험결과를 정리한 것이다. 이 표에서 σ_N^∞ 는 유한판 노치재의 파괴강도 σ_N 를 무한판에 대하여 환산한 값으로, 유한판 보정계수 Y를 사용한다면 $Y\sigma_N$ 와 같이 표현할 수 있는데, 이때 유한판 보정계수 Y로는 다음과 같은 이방성효과를 고려한 Tan의 식⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

$$Y = \left[\frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{2R}{W} M \right\}^6 (K_T^\infty - 3) \left\{ 1 - \left(\frac{2R}{W} M \right) \right\} \right]^{-1} \quad (9)$$

여기서,

$$M^2 = \frac{\sqrt{1 - 8 \left[\frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3} - 1 \right]} - 1}{2(2R/W)^2}$$

Fig. 4는 시험편의 폭이 10, 25와 40mm인 경우, 홀의 직경에 대한 노치를 갖는 시험편의 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 실험결과와 최소자승법을 이용하여 식 (8)과 (9)에 의한 추세선을 획득하였으며, 이 때, m값은 0.35로 변화가 없었고, k값은 Kim 등⁽¹³⁾과 같이 시험편의 폭이 작아질수록 점점 커지는 경향을 나타내었다.

Table 3 Test results

W	2R	2R/W	σ_N	σ_N^∞	σ_N^∞/σ_u
10	1	0.1	633.80	640.60	0.7429
	1	0.1	650.84	657.82	0.7628
	2	0.2	515.53	539.40	0.6255
	2	0.2	508.53	531.72	0.6166
	4	0.4	357.84	435.53	0.5051
	4	0.4	372.36	453.20	0.5255
	6	0.6	235.20	381.76	0.4427
	6	0.6	248.60	403.50	0.4679
	8	0.8	117.20	340.43	0.3948
	8	0.8	92.11	267.57	0.3103
25	2	0.08	561.92	565.72	0.7226
	2	0.08	535.79	539.41	0.6890
	2	0.08	547.98	551.69	0.7047
	4	0.16	431.28	443.68	0.5667
	4	0.16	428.14	440.45	0.5626
	4	0.16	445.56	458.37	0.5855
	6	0.24	374.49	400.24	0.5112
	6	0.24	401.32	428.90	0.5479
	6	0.24	291.56	418.48	0.5345
	8	0.32	365.78	413.33	0.5280
8	0.32	334.78	378.29	0.4832	
8	0.32	340.70	384.98	0.4918	
10	0.4	295.07	359.13	0.4587	
10	0.4	290.89	354.04	0.4522	
10	0.4	281.13	342.17	0.4371	
40	8	0.2	362.74	379.53	0.4401
	8	0.2	356.20	372.70	0.4321
	16	0.4	268.59	326.90	0.3791
	16	0.4	278.08	338.46	0.3925
	27	0.675	155.41	297.58	0.3451
	27	0.675	144.18	276.06	0.3201
	32	0.8	100.55	292.07	0.3387
	32	0.8	113.09	328.49	0.3809

W : specimen width(mm), 2R:hole diameter(mm)
 σ_N : notched strength(MPa), σ_N^∞ : $Y\sigma_N$ (MPa)
 Y : finite width correction factor, Eq.(9)
 σ_u : Unnotched strength(MPa)
 σ_N^∞/σ_u : Notched strength reduction ratio

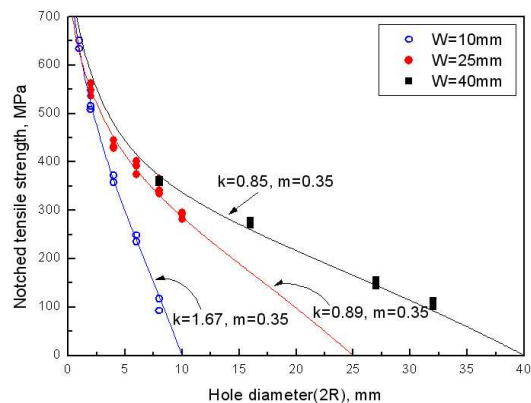


Fig. 4 Reduction of notched strength

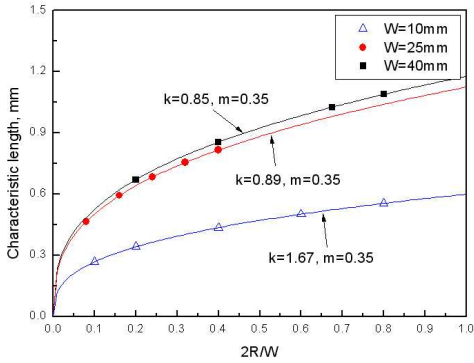


Fig. 5 Variation of characteristic length

4.2 특성길이와 노치강도

Fig. 5는 획득한 m과 k값을 이용하여 식 (7)에 의해 구한 특성길이의 변화를 나타내었다. 그래프와 같이 일정한 폭에서 2R/W가 증가할수록 특성길이는 증가하였다.

또한, Kim 등⁽¹³⁾은 노치강도를 인장강도로 나누어 일반화하였고, 이와 특성길이의 관계를 일차식으로 정의하여 불안정파괴를 정의하였다. Fig. 6은 본 연구에서 획득한 무차원화한 노치강도와 특성길이와의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 특성길이와 노치강도가 선형적인 관계를 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 Kim 등⁽¹³⁾이 밝힌 것과 같이 각각의 직선은 한 점에서 만나지 않고 각 시험편의 폭에 따라 다른 기울기와 절편을 가지는 것으로 나타났다. 식 (10)에 획득한 일차관계식을 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 W = 10\text{mm} : y &= 1.09 - 1.31x \\
 W = 25\text{mm} : y &= 1.01 - 0.69x \\
 W = 40\text{mm} : y &= 0.58 - 0.22x
 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (3)으로부터 무차원화한 노치강도가 d_0/R 의 함수임을 알 수 있기 때문에, 본 논문에서도 특성길이를 무차원화하기 위해 동일한 차원인 홀의 반지름 R로 나누었다. Fig. 7에 나타낸 곡선은 무차원화한 특성길이와 무차원화한 무한판에서의 인장강도와와의 관계를 나타낸 것으로써, 시험편의 폭의 변화에 따른 영향이 없는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라, Kim 등⁽¹³⁾이 수행한 GFRP를 이용한 시험결과를 동일한 방법으로 무차원화한 결과도 본 연구의 결과와 경향이 일치하는 것을 알 수 있다

Fig. 7의 결과를 최소자승법을 이용한 회귀분석으로 적합하여 식 (11)과 같은 최종 곡선식이 도

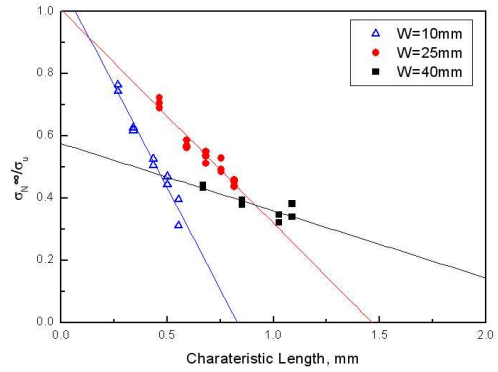


Fig. 6 Variation of notched strength according to characteristic length

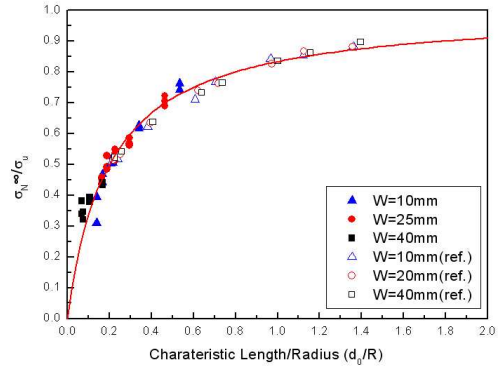


Fig. 7 Variation of notched strength according to characteristic length over hole radius (d_0/R)

출되었다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_u} = \frac{d_0}{0.2R + d_0}, \quad d_0 = \frac{1}{k} \left(\frac{2R}{W} \right)^m \quad (11)$$

5. 결론

본 논문에서는 평직CFRP 복합재료를 이용하여 시험편의 두께 및 홀의 크기에 따른 홀 노치재의 노치강도를 평가하였고, Kim 등⁽¹³⁾이 제안한 수정된 특성길이 계산식을 이용하여 특성길이를 계산하였다. 그리고 이를 무차원화하여 홀 크기 및 시험편의 폭의 영향을 고려한 새로운 파손조건식을 제안하였다. 본 연구로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 홀 노치재의 노치강도 시험결과로부터 변수 m, k값을 획득하였고, 이로부터 평직 CFRP 홀 노치재의 특성길이를 계산하였다. 계산된 특성길이와 2R/W사이에 함수관계가 있음을 확인하였다.
- (2) 노치강도와 특성길이가 선형적인 관계를 갖는 것을 확인하였으며, 시험편의 폭에 따라 영향

을 받는 다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 시험편의 폭에 대한 각각의 직선은 서로 다른 기울기와 절편을 가지는 것으로 나타나 일반화하여 표현할 수 없었다.

(3) 원공의 반경으로 무차원화한 특성길이와 무차원화한 무한판에서의 노치강도와 관계는 시험편의 폭에 따라 영향을 받지 않음을 알 수 있었으며, 그 관계에 의한 파손조건식은 아래와 같았다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_u} = \frac{d_0}{0.2R + d_0}$$

후 기

이 논문은 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

- (1) Waddoups, M.E., Eisenmann, J.R. and Kaminski, B.E., 1971, "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol.5, pp. 446~455.
- (2) Whitney, J.M. and Nuismer, R.J., 1974, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *Journal of Composite Materials*, Vol. 8, pp. 253~265.
- (3) Nuismer, R.J. and Whitney, J.M., 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations," *ASTM STP 593*, pp. 117~142.
- (4) Agrawal, D.C., Agarwal, B.D. and Banerji, K., 1985, "Fracture Behavior of Glass-Cloth-Reinforced Composites," *Polymer Composites*, Vol.6, No.1, pp. 29~33.
- (5) Lagace, P.A., 1986, "Notch Sensitivity of Graphite/Epoxy Fabric Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol.26, pp. 95~117.
- (6) Ghasemi Nejhad, M.N. and Chou, T.W., 1990, "A Model for the Prediction of Compressive Strength Reduction of Composite Laminates With Molded-in Holes," *Journal of Composite Materials*, Vol.24, pp. 236~255.
- (7) Karlak, R.F., 1979, "Hole Effects in a Related Series of Symmetrical Laminates," *Proc. 4th Joint ASM-Metallurgical Society of AIME Symposium on Failure Modes in Composites*, Chicago 1977, the Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Warrendale, Pennsylvania, pp. 105~117.
- (8) Pipes, R.B. and Gillespie, J.W., 1979, "Superposition of the Notched Strength of Composite Laminates," *Polymer Engineering and Science*, Vol.19, No.16, pp.1151~1155.
- (9) Pipes, R.B., Wetherhole, R.C. and Gillespie, J.W., 1980, "Macroscopic Fracture of Fibrous Composites," *Materials Science and Engineering*, Vol.45, pp. 247~253.
- (10) Konish, H.J. and Whitney, J.M., 1975, "Approximate Stresses in an Orthotropic Plate Containing a Circular Hole," *Journal of Composite Materials*, Vol.9, pp. 157~166.
- (11) Young-Myong Han, J. K. Ryou, Dong-Mhan Ahn, 1985, "Consideration of Fracture Characteristic of CFRP Laminate with a Center Hole," 1985's KSME Spring Annual Meeting, pp.16~21.
- (12) Dae-Gil Lee, Myung-Young Jung, Jin-Ho Choi, Sung-Sik Jeon, Seung-Hwan Jang, Je-Hun Oh, *Composite Materials*, Hongrungs publishing corp., pp. 81~83.
- (13) Jung-Kyu Kim and Do-Sig Kim, 1992, "Notched Strength and Fracture Criterion of Glass/Epoxy Plain Woven Composites Containing Circular Holes," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.16, No.7, pp. 1285~1293.
- (14) ASTM D3039-02, 2002, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite," American Society for Testing and Materials, Philadelphia,
- (15) Tan, S.C., 1988, "Finite-Width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening," *Journal of Composite Materials*, Vol.33, pp.1080~1097.
- (16) J.S. Huh, W. Hwang, H.C. Park and K.S. Han, 1996, "Fatigue Life Prediction of Circular Notched CFRP Laminates," *Trans. of the KSME A*, Vol.20, No.3, pp. 832~842.