

〈논 문〉

원공노치를 가진 탄소섬유강화 플라스틱 적층판의 피로수명예측

허재석* · 황운봉** · 박현철** · 한경섭**

(1995년 3월 20일 접수)

Fatigue Life Prediction of Circular Notched CFRP Laminates

J. S. Huh, W. Hwang, H. C. Park and K. S. Han

Key Words : Circular Notch(원공노치), Stress Concentration(응력집중), Fatigue Fracture Criterion(피로파괴조건), Fatigue Life Prediction(피로수명예측)

Abstract

Fatigue life prediction and fatigue behavior of circular notched carbon fiber reinforced plastic laminates are presented. Point and average stress criteria by Whitney and Nuismer are generalized to fatigue fracture criteria for notched laminates. Residual strength degradation model and the assumptions on the stress redistribution are introduced during the derivation of prediction equations. S-N curve, Basquin's relation, and H and H's FLPEI are chosen for evaluation of residual strength of unnotched laminates and six prediction equations are derived. Experiments are performed using Graphite/Epoxy laminates whose fiber orientation is $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$. Presented prediction equations are reasonably close to experimental data and proposed approach is found to be suitable to predict fatigue life of notched composite laminates.

기 호 설 명			
a_o	: 평균응력조건의 특성길이	N	: 노치재의 피로수명
B, C, M	: H and H's FLPEI (피로수명예측 식 1)의 재료상수	N_{un}	: 평활재의 피로수명
b, σ_f	: Basquin 관계식의 재료상수	n	: 피로반복수
d_o	: 점응력조건의 특성길이	r	: 원공노치의 반경
d, k	: S-N곡선의 재료상수	SSR	: 전차 제곱합
E	: 탄성계수	W	: 시편의 폭
F	: 가한응력에 대한 유한폭 보정계수	Y	: 응력분배에 대한 유한폭 보정계수
K_I^∞	: 무한평판의 응력집중계수	$\bar{\sigma}$: 노치재의 평균응력
K_T	: 유한평판의 응력집중계수	σ_a	: 가한응력
L_o, α, β	: 노치재의 응력재분배에 의한 재료상수	σ_o	: 평활재의 정하중강도
		σ_{or}	: 평활재의 잔류강도
		σ_y^∞	: 무한폭을 갖는 원시편의 응력분포
		σ_y	: 유한폭을 갖는 원시편의 응력분포
		σ_{yf}	: 피로손상시편의 응력분포

*삼성종합기술원

**회원, 포항공과대학교 기계공학과

ν_{LT} : L 방향 수직응력하에서 측정된 푸아송 비

하첨자

L : 섬유방향
 T : 섬유수직방향
 t : 인장
 c : 압축

정한다고 가정하고 이러한 영역의 크기를 반영하는 재료상수로서 특성길이의 개념을 도입하여 점응력 조건(point stress criterion)과 평균응력조건(average stress criterion)의 두 가지 정적 파괴 조건을 제시하였다.^(2,3) 이들의 제안식은 복합재료의 파괴 특성을 잘 고려하고 있으며 상대적으로 단순한 형태의 응력파괴조건으로 표현되므로 노치를 가진 복합재료의 피로파괴에 대한 해석에 용이하게 적용할 수 있다.

복합재료의 피로파괴에 대한 이론은 잔류강도 저하모델과 잔류강성 저하모델의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. Leifsnider 등은 피로손상은 재료의 강도를 저하시키며 재료의 잔류강도가 가한하중과 같아질때 피로파괴가 일어난다는 잔류강도 저하모델을 제시하였다.^(4,5) Hwang 등은 피로로 인한 재료의 손상을 강성저하의 측면으로 규정하고 변형률 파괴기준을 적용하여 잔류강성 저하모델을 제시한 바 있다.⁽⁶⁾ 응력집중을 가진 복합재료에 있어서 재료내의 변형률은 균일하지 않으므로 거시적 의미의 강성을 정의하기 어렵고 정적파괴조건 또한 응력파괴조건으로 나타나므로 잔류강성 저하모델은 노치를 가진 복합재료의 피로수명예측에 적용하기에는 그다지 용이하지 않다.

응력집중을 가진 복합재료의 정적강도에 대한 체계적인 연구결과에 비해 피로수명과 같은 거시적 피로거동에 대한 정량적 연구결과는 미흡하며 노치 경계에서의 층간분리나 균열 등과 같은 국소적인 손상의 생성과 진전에 대한 해석^(7,8)이나 피로수명과 잔류강도 등에 대한 실험적, 정성적 관찰^(9~12)이 주로 연구되어 왔다. 노치로 인한 응력집중을 가진 복합재료의 피로 하의 잔류강도에 대한 실험결과의 보고에서 주목할 사항은 0° 와 90° 이외의 적층각을 포함한 복합재료에 있어서 피로후의 잔류강도가 정적인 노치강도보다 증가한다는 사실이다.^(10~12) 이는 지속적인 피로하중의 반복으로 인해 균열이 생성된 즉시 파괴가 일어나는 금속재료와는 달리 복합재료의 경우 단 일회의 하중 반복으로도 균열이 형성될 수 있으며 균열의 형성이 즉시 피로파괴를 유발하지는 않으므로 피로가 반복됨에 따라 다수의 균열이 재료내에 축적될 수 있고, 이로 인해 노치 주위의 응력이 재분포되어 그 집중정도를 감소시키기 때문인 것으로 설명되고 있다. Yip 등은 원공 노치를 가진 복합적층판의 피로손상 축적에 따른 응력재분포를 가정하여 잔류강도의 증가를 설명한

1. 서 론

원공 등의 불연속부는 재료내의 응력집중을 유발하여 정하중 및 피로하중 하에서 재료의 강도를 저하시키는 원인이 되므로 구조물의 안정성을 검토하는데 있어서 불연속부로 인한 응력집중이 정적 강도 및 피로 수명에 미치는 영향은 반드시 고려되어야 하는 정보이다. 일반적인 금속재료는 단일균열의 생성과 진전에 의해 파괴가 유발되므로 집중된 응력의 최대값을 통하여 파괴를 예측할 수 있으며 따라서 불연속부의 형상에 의해 결정되는 응력집중계수를 설계변수로 도입하여 노치 등으로 인한 응력집중이 재료의 강도에 미치는 영향을 고려할 수 있다. 이러한 금속재료와는 달리 복합재료는 생성된 균열이 한층내에서만 성장하며 그 성장은 주위의 섬유에 의해 억제된다. 또한 재료내의 균열 외에도 층간분리, 모재와 섬유의 분리, 섬유의 파괴 등 다양한 형태의 파괴기구를 가지는 것으로 알려져 있다. 복합재료의 이러한 파괴특성으로 인하여 응력집중계수만의 고려를 통해서만 복합재료에서 나타나는 노치의 크기의 영향 등을 해석할 수 없다.

노치를 가진 복합재료의 정적강도에 대해서는 다음과 같은 주요 연구결과가 보고되어 있다. Waddoups 등은 등방성재료의 선형 탄성파괴역학을 노치를 가진 복합재료의 해석에 적용하여 원공 노치재의 정적강도를 노치의 반경과 가정된 에너지 집중영역의 함수로 표현하였다.⁽¹⁾ 이 모델은 기본적으로 균일한 등방성재료에 대한 해석에 기초하고 있으므로 일반적으로 이방성을 가지고 섬유가 균열의 성장을 억제하는 복합재료의 특성을 충분히 고려하지 못하여 일반적인 복합재료에 대한 적용에는 한계가 있는 것으로 사려된다. Whitney와 Nuismer는 응력집중이 있는 복합재료에 있어서 일정 크기의 영역에 집중된 응력의 정도가 파괴를 결

바 있다.⁽¹³⁾ 그러나 Yip의 예측식은 파괴조건을 기준강도를 평활재의 정적강도로 고정하여 피로초기의 잔류강도 증가를 예측할 수는 있으나 잔류강도가 지속적으로 증가하여 피로파괴가 일어나지 않는 것을 예측하므로 이를 피로수명예측에 직접 적용하기는 힘들다.

본 논문에서는 잔류강도 저하모델의 개념을 도입하여 Whitney와 Nuismer가 제시한 점 및 평균응력조건을 두 정적파괴조건을 일반화하여 응력집중을 가진 복합재료에 대한 두가지의 피로파괴조건을 구성하였다. 제시된 피로파괴조건에 피로손상으로 인한 응력재분포를 가정하고 평활재에 대한 피로수명예측식을 평활재의 잔류강도를 표현하기 위해 도입하므로써 노치를 가진 복합적층판의 피로수명예측식을 유도하였다. 제시된 두 가지의 피로파괴조건식에 대해 평활재에 대한 피로수명예측식으로 S-N 곡선, Basquin's relation, 그리고 Hwang 등이 제안한 피로수명예측식 중 FLPE1(fatigue life prediction equation 1)을 이용하여 총 6개의 노치재에 대한 피로수명예측식을 제시하였다. 원공노치를 가진 Graphite/Epoxy 복합적층판에 대해 정하중 및 피로실험이 수행되었고 그 결과를 제시한 피로수명예측식과 비교하였다.

2. 노치재의 피로수명예측

2.1 노치재의 파괴조건

복합재료는 결함의 형태가 다양하며 균열의 생성 자체가 파괴를 유발하는 것이 아니라 일정정도 이상의 결함이 형성된 경우에 재료가 파괴에 이르는 것이 일반적으로 알려져 있다. Whitney와 Nuismer는 복합재료의 파괴의 원인이 되는 결함은 일정한 크기 이상이어야 하며, 이러한 결함의 형성을 위해서는 결함을 포함할 수 있는 크기 이상의 영역에 분포하는 응력이 특정한 수준 이상이어야 한다고 주장하였다. 즉, 고응력이 분포하는 범위가 넓을수록 결함을 형성할 확률이 높아지므로 재료의 강도는 작아진다. 이상에서 언급된 영역의 크기는 노치의 형상과 크기에 무관한 재료상수이며 단축인장과 같은 일차원 문제에 있어서 특성길이의 개념으로 표현할 수 있다.

2.1.1 노치재의 정적파괴조건

Whitney와 Nuismer는 특성길이의 개념을 도입

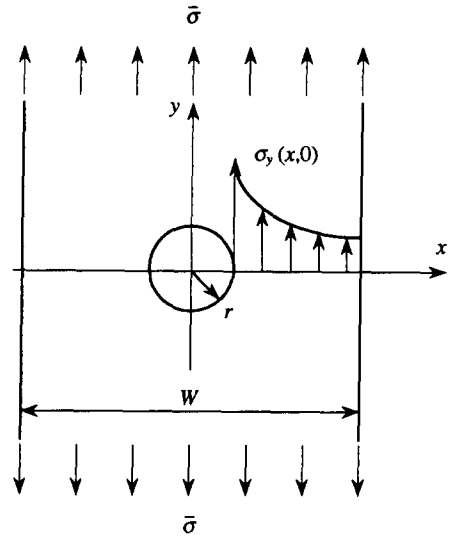


Fig. 1 Plate containing a circular notch under remote uniform tension

하여 단축인장 하의 노치재에 대해 점응력조건과 평균응력조건의 두가지 정적파괴조건식을 제안하였다.^(2,3) 이들 각각의 조건식에 따르면 단축인장에서 노치로 인한 응력집중을 가진 복합재료는 응력집중이 가장 큰 노치의 경계에서 특성길이 d_0 만큼 떨어진 지점의 하중방향 응력이 또는 특성길이 a_0 까지의 하중방향 응력의 평균이 재료의 정적강도 σ_0 와 같아질 때 파괴가 일어나며 Fig. 1과 같이 노치의 형상이 원공인 경우 정적파괴조건들은 다음과 같은 식들로 표현된다.

점응력조건

$$\sigma_y(r + d_0, 0) = \sigma \quad (1)$$

평균응력조건

$$\frac{1}{a_0} \int_r^{r+a_0} \sigma_y(x, 0) dx = \sigma_0 \quad (2)$$

2.1.2 노치재의 피로파괴조건

노치재의 피로수명예측식을 구하기 위해서는 노치재의 피로파괴조건을 구성하여야 한다. 노치재의 경우 변형률과 강성을 거시적으로 정의하기 어려우며 정적파괴조건들이 응력을 기준으로 나타나므로 잔류강성 저하모델보다는 피로 하의 잔류강도가 가한하중과 같아질 때 피로파괴가 발생함을 가정하는 잔류강도 저하모델의 관점을 따르는 것이 적합하다. 앞 절에서 기술한 두 가지 정적파괴조건에 잔류강도 저하모델을 적용하면 피로에 대해서 일반화

된 점 및 평균응력조건을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 Whitney 등의 정적파괴조건에서 정하중하의 응력분포 σ_y 를 피로하중 하의 응력분포 σ_{yf} 로, 평활재의 정적강도 σ_o 를 노치재에 가해진 피로하중을 받은 평활재의 잔류강도 σ_{or} 로 대체하고, 피로시의 특성길이는 정하중조건 특성길이 d_o , a_o 와 동일하다고 가정하여 단축인장 피로시 노치재의 파괴조건을 다음과 같이 제시하였다.

점응력조건: 노치재의 피로파괴는 노치의 경계로부터 특성길이만큼 떨어진 지점의 하중방향 응력이 그 노치재에 해당하는 평활재의 잔류강도에 이를때 파괴가 일어난다.

$$\sigma_{yf}(r + d_o, 0) = \sigma_{or} \quad (3)$$

평균응력조건: 노치재의 피로파괴는 노치의 경계로부터 특성길이만큼 떨어진 지점까지의 하중방향 응력의 평균이 그 노치재에 해당하는 평활재의 잔류강도에 이를때 파괴가 일어난다.

$$\frac{1}{a_o} \int_r^{r+a_o} \sigma_{yf}(x, 0) dx = \sigma_{or} \quad (4)$$

2.2 잔류강도 저하모델

Leifsnider 등은 단일 및 다응력 수준의 피로수명을 예측할 수 있는 비선형 잔류강도 저하모델을 제시하였다.⁽⁴⁾ Broutman과 Sahu가⁽⁵⁾ 단일응력수준(single stresslevel)의 피로에 대해 제시한 선형 잔류강도 저하모델은 Leifsnider의 모델에서 재료상수인 지수 i 를 1로 가정한 것이며 잔류강도에 대한 실험없이 피로수명에 대한 정보만으로 이용할 수 있으므로 본 논문에서는 이를 평활재에 대한 잔류강도 예측식으로 이용하였다. Broutman 등의 모델을 적용하면 평활재의 잔류강도 σ_{or} 을 다음과 같이 가한 응력 σ_a 와 피로반복수 n 의 함수로 표현할 수 있다. 여기서, N_{un} 은 가한응력 σ_a 의 함수로 표현되는 평활재의 피로수명이다.

$$\sigma_{or} = \sigma_o \left[1 - \left(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_o} \right) \left(\frac{n}{N_{un}} \right) \right] \quad (5)$$

노치재의 피로에서는 응력집중으로 인하여 불균일한 응력분포를 가지므로 유한폭을 가진 평판에서 가한 응력 σ_a 를 포함한 전체 단면적으로 나눈 $\bar{\sigma}$ 로 보는 것은 전체 단면에 대해 노치가 차지하는 면적의 비중을 고려하지 않은 것으로 가한 응력을 실제보다 과소평가하게 하므로 가한 하중을 노치를 제외한 실제 단면적으로 나눈 응력을 가한 응력으로

보는 것이 타당하다. 즉, 노치재에 있어서 가한 응력 σ_a 는 응력이 작용하는 실제 단면의 평균응력으로 가정한다.

$$\sigma_a = \frac{2}{W} \int_r^{W/2} \sigma_y(x, 0) dx = F \bar{\sigma} \quad (6)$$

여기서, $F = \frac{W}{W-2r}$ 식 (6)에서 원공의 반경이 0이거나 무한평판일 경우 보정계수 F 는 1이 되어 σ_a 는 $\bar{\sigma}$ 와 같아지며 이는 노치재에서 불균일한 집중응력을 평균한 것을 평활재의 특성으로 보고자 하는 본 논문의 의도에 부합한다. 식 (5)의 N_{un} 은 평활재에 대한 피로수명예측식의 선택에 따라 여러 형태를 가질 수 있으며 본 논문에서는 일반적으로 많이 이용되는 S-N 곡선과 Basquin's relation 그리고 Hwang과 Han이⁽⁶⁾ 제시한 FLPEI의 세 가지를 평활재에 대한 피로수명예측식으로 도입하였다.

2.3 원공노치의 응력분포

Konish와 Whitney는 평균응력 $\bar{\sigma}$ 가 작용하는 원공을 가진 직교이방성 무한평판의 응력분포에 대한 근사해를 노치의 반경 r 과 응력집중계수 K_r^∞ 로 다음과 같이 표현하였다.⁽¹⁴⁾

$$\sigma_y^\infty(x, 0) = \bar{\sigma} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{x} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{r}{x} \right)^4 - \frac{(K_r^\infty - 3)}{2} \times \left(\frac{2r}{W} \right) \times \left(5 \left(\frac{r}{x} \right)^6 - 7 \left(\frac{r}{x} \right)^8 \right) \right] \quad (7)$$

실질적으로 유한한 폭을 가지는 시편에서 유한폭으로 인한 응력의 상승효과를 고려하기 위해 Tan은 무한평판의 응력분포 σ_y^∞ 의 상수배로 표현되는 유한평판의 응력분포 σ_y 의 근사해를 제시하고 유한평판의 응력집중계수 K_r 와 무한평판의 응력집중계수 K_r^∞ 의 비로 나타나는 유한폭 보정계수 Y 를 도입하였다.⁽¹⁵⁾

$$\sigma_y(x, 0) = Y \sigma_y^\infty(x, 0) \quad (8)$$

유한폭 보정계수 Y 는 일반적으로 노치의 형상과 크기에 따라 달라지며 원공노치를 가진 이방성재료에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{Y} = \frac{K_r^\infty}{K_r} = \frac{1}{2} \left[2 - \left(\frac{2r}{W} \right)^2 - \left(\frac{2r}{W} \right)^4 + (K_r^\infty - 3) \times \left(\frac{2r}{W} \right)^6 \left(1 - \left(\frac{2r}{W} \right)^2 \right) \right] \quad (9)$$

원형노치를 가진 준등방성 무한평판의 경우 응력집

증계수는 $K_T^\infty=3$ 으로 가정할 수 있으며, 따라서 원공노치를 가진 준등방성 유한평판의 응력분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_y(x, 0) = Y\bar{\sigma}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{x}\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\frac{r}{x}\right)^4\right] \quad (10)$$

$$\text{여기서, } Y = \frac{2}{[2 - (2r/W)^2 - (2r/W)^4]}$$

2.4 피로 하의 응력재분포

노치를 가진 복합재의 잔류강도에 대한 기존의 연구결과는 피로하중 하에서 잔류강도가 정적강도보다 증가하는 현상을 보고하고 있으며, 이는 모재의 균열 등 손상이 축적됨에 따라 노치주위의 응력이 재분배되어 응력의 집중이 감소하기 때문인 것으로 분석되고 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ Yip 등은 원공노치를 가진 무한평판에 대한 잔류강도 예측모델에서 피로손상이 축적됨에 따라 집중정도가 감소하는 응력분포를 제시하여 잔류강도의 증가를 설명하였다.⁽¹³⁾ 본 논문에서는 유한폭을 가진 노치재의 피로시 응력분포 σ_{yy} 를 식 (11)과 같이 가정하였다. 무한평판의 경우 $F=1$ 이므로 식 (11)은 Yip 등의 제안식을 포함하는 식 (12)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}(x, 0) &= \frac{2 \int_r^{W/2} \sigma_y(x, 0) dx}{W} \\ &+ \left(\sigma_y(x, 0) - \frac{2 \int_r^{W/2} \sigma_y(x, 0) dx}{W} \right) g(n) \\ &= F\bar{\sigma} + (\sigma_y(x, 0) - F\bar{\sigma})g(n) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\sigma_{yy}^\infty(x, 0) = \bar{\sigma} + (\sigma_y^\infty(x, 0) - \bar{\sigma})g(n) \quad (12)$$

손상으로 인한 응력재분포의 척도인 함수 g 는 하중반복수 n 이 1일때 1의 값을 가져야 하며 n 이 증가할수록 감소하여야 한다. Yip 등은 반경 r 과 평균응력 $\bar{\sigma}$ 에 대해 지수형으로, n 에 대해서는 선형적으로 표현되는 함수 g 를 제안하였다. 이를 수정하여 본 논문에서는 노치를 제외한 실제 단면의 평균응력 $F\bar{\sigma}$ 와 피로반복수 n 에 의해 결정되는 함수 g 를 다음과 같이 제안한다.

$$g(n) = 1 - \left(\frac{\log n}{L_o}\right)^\alpha \left(F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right)^\beta \quad (13)$$

식 (13)에서 L_o , α 와 β 는 노치재의 피로실험을 통해 구해지는 재료상수이다. 무한평판의 경우 F 는 1이 되어 함수 g 는 반경의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 원공노치를 가진 유한평판

의 피로 하의 응력분포는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}(x, 0) &= F\bar{\sigma} + (\sigma_y(x, 0) - F\bar{\sigma}) \\ &\times \left[1 - \left(\frac{\log n}{L_o}\right)^\alpha \left(F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right)^\beta \right] \quad (14) \end{aligned}$$

2.5 노치재의 피로수명예측식

유도된 잔류강도저하식 (5)와 피로 응력분포 식 (14)를 제시한 노치재의 피로파괴조건[식 (3) 및 (4)]에 대입하면 노치재의 피로수명예측식을 구성할 수 있다. 피로반복수 n 이 노치재의 피로수명 N 일때 피로파괴조건식은 만족되며 결과적으로 노치재의 피로수명예측식은 점응력 및 평균응력조건에 경우에 대해 각각 다음과 같이 나타난다.

점응력조건

$$\begin{aligned} &\sigma_o \left[1 - \left(1 - F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right) \frac{N}{N_{un}} \right] \\ &= F\bar{\sigma} + (\sigma_y(r+d_o, 0) - F\bar{\sigma}) \\ &\times \left[1 - \left(\frac{\log N}{L_o}\right)^\alpha \left(F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right)^\beta \right] \quad (15) \end{aligned}$$

평균응력조건

$$\begin{aligned} &\sigma_o \left[1 - \left(1 - F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right) \frac{N}{N_{un}} \right] \\ &= F\bar{\sigma} + \left(\frac{1}{a_o} \int_r^r + a_o \sigma_y(x, 0) dx - F\bar{\sigma} \right) \\ &\times \left[1 - \left(\frac{\log N}{L_o}\right)^\alpha \left(F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right)^\beta \right] \quad (16) \end{aligned}$$

한 예로써 점응력조건을 피로파괴조건으로 S-N 곡선을 평활재에 대한 피로수명예측식으로 이용할 경우 노치재의 피로수명예측식의 유도과정을 보이면 다음과 같다. 먼저 S-N 곡선의 경우 해당 평활재의 피로수명 N_{un} 는 다음과 같이 표현된다.

$$N_{un} = 10^{(F\sigma/\sigma_o - d)/k} \quad (17)$$

정하중하의 원공노치에 대한 응력분포 σ_y 로 제시된 식 (10)과 식 (17)을 점응력조건식인 식 (15)에 대입하면 노치재의 피로수명예측식은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} &\sigma_o \left[1 - \left(1 - F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right) \frac{N}{10^{(F\sigma/\sigma_o - d)/k}} \right] \\ &= \bar{\sigma} \left[F + \left(Y \left(1 + \frac{1}{2}\xi_1^2 + \frac{3}{2}\xi_1^4 \right) - F \right) \right. \\ &\times \left. \left(1 - \left(\frac{\log N}{L_o}\right)^\alpha \left(F\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right)^\beta \right) \right] \quad (18) \end{aligned}$$

여기서, $\xi_1 = \frac{r}{r+d_o}$

Table 1 Proposed fatigue life prediction equations of circular notched composite laminates

	Proposed life prediction equation	
I - 1	Point stress criterion	S-N curve
	$\sigma_0[1 - (1 - F\bar{\sigma}/\sigma_0) (N/10^{(\sigma_a/\sigma_0 - d)/k})]$ $= \bar{\sigma}[F + (Y(1 + \xi_1^2/2 + 3\xi_1^4/2) - F) (1 - (\log N/L_0)^a (F\bar{\sigma}/\sigma_0)^b)]$	
I - 2	Point stress criterion	Basquin's relation
	$\sigma_0[1 - (1 - F\bar{\sigma}/\sigma_0) (2N / (\sigma_a/\sigma_0)^{1/b})]$ $= \bar{\sigma}[F + (Y(1 + \xi_1^2/2 + 3\xi_1^4/2) - F) (1 - (\log N/L_0)^a (F\bar{\sigma}/\sigma_0)^b)]$	
I - 3	Point stress criterion	H and H's FLPE1
	$\sigma_0[1 - (1 - F\bar{\sigma}/\sigma_0) (N/[M(1 - (\sigma_a/\sigma_0)^B])^{1/C})]$ $= \bar{\sigma}[F + (Y(1 + \xi_1^2/2 + 3\xi_1^4/2) - F) (1 - (\log N/L_0)^a (F\bar{\sigma}/\sigma_0)^b)]$	
II - 1	Average stress criterion	S-N curve
	$\sigma_0[1 - (1 - F\bar{\sigma}/\sigma_0) (N/10^{(\sigma_a/\sigma_0 - d)/k})]$ $= \bar{\sigma}[F + (Y(2 - \xi_2^2 - \xi_2^4)/(2 - \xi_2) - F) (1 - (\log N/L_0)^a (F\bar{\sigma}/\sigma_0)^b)]$	
II - 2	Average stress criterion	Basquin's relation
	$\sigma_0[1 - (1 - F\bar{\sigma}/\sigma_0) (2N / (\sigma_a/\sigma_0)^{1/b})]$ $= \bar{\sigma}[F + (Y(2 - \xi_2^2 - \xi_2^4)/(2 - \xi_2) - F) (1 - (\log N/L_0)^a (F\bar{\sigma}/\sigma_0)^b)]$	
II - 3	Average stress criterion	H and H's FLPE1
	$\sigma_0[1 - (1 - F\bar{\sigma}/\sigma_0) (N/[M(1 - (\sigma_a/\sigma_0)^B])^{1/C})]$ $= \bar{\sigma}[F + (Y(2 - \xi_2^2 - \xi_2^4)/(2 - \xi_2) - F) (1 - (\log N/L_0)^a (F\bar{\sigma}/\sigma_0)^b)]$	
	$Y = \frac{2}{[2 - (2r/W)^2 - (2r/W)^4]} \quad F = \frac{W}{W - 2r} \quad \xi_1 = \frac{r}{r + d_0} \quad \xi_2 = \frac{r}{r + a_0}$	

이상에서 보인 유도방법을 적용하면 노치재의 파괴 파괴조건과 평활재에 대한 피로수명예측식의 선택에 따라 노치재에 대한 여러 형태의 피로수명예측식을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 점 및 평균응력조건에 대한 두 가지 파괴파괴조건에 S-N 곡선, Basquin's relation, 그리고 Hwang 등이 제시한 FLPE1의 세 가지를 평활재에 대한 피로수명예측으로 도입하여 모두 여섯 가지의 노치재에 대한 피로수명예측식을 구성하였다. Table 1은 그 결과를 정리한 것이다.

3. 실험

실험에 사용된 복합적층판은 (주)한국화이버 제품인 두께 0.125 mm의 Graphite/Epoxy prepreg을 [0°/+45°/-45°/90°]_s의 적층각을 가지도록 여덟층 적층한 후 130°C에서 두시간 동안 경화시켜 제조하였다. 제조된 시편은 두께가 1 mm이며 폭은 25 mm로 통일하였다. 노치재의 실험을 위해서 반경

1, 2, 3, 4, 5 mm의 원공을 시편의 중앙에 가공하였다. Fig. 2는 시편의 최종적인 형상이다.

평활재와 반경 1, 2, 3, 4, 5 mm의 노치재에 대한 정하중실험을 변위제어방식을 통해 분당 0.5 mm의 속도로 수행하였으며, 평활재와 반경 1, 3 mm의 노치재에 대한 피로실험을 하중제어방식을 통해 4 Hz의 정현파로 수행하였다. 피로실험은 평활재의 경우 강도의 65% 이상, 노치재의 경우 강도의 70~80% 이상의 범위에서 수행되었으며, 최

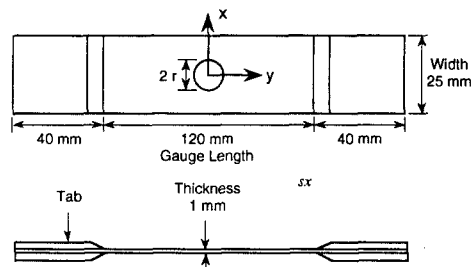


Fig. 2 Test specimen configuration

소하중과 최대하중의 응력비는 0.1 이하로 유지하였다. 하중반복수는 10⁶까지 제한하였다. 정하중 실험 및 피로실험의 데이터는 SAS 패키지를 이용하여 회귀분석하였다. 실험에 사용된 일방향 Graphite/Epoxy 적층판의 기계적 성질은 다음과 같다.

$$E_L = 124.1 \text{ GPa}, \quad E_T = 8.27 \text{ GPa}$$

$$G_{LT} = 4.38 \text{ GPa}, \quad \nu_{LT} = 0.3$$

$$X_t = 1551 \text{ MPa}, \quad X_c = 965.3 \text{ MPa}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 노치재의 정적강도

단축인장실험 결과 평활재의 정적강도는 631 MPa로 구해졌다. 노치재에 대한 정하중실험의 결과로 17개의 실험치를 구하였으며 이를 Whitney와 Nuismer의 점 및 평균응력조건에 대해 회귀분석하였다. 결과는 Table 2 및 Fig. 3에 나타나 있다.

평균응력조건과 점응력조건은 전체적인 예측에 있어서는 비슷한 양상을 가지나, 점응력조건에 예측이 노치의 반경에 대해 강도의 감소가 더 급격한 것으로 나타났다. 노치의 반경이 2 mm에서 두 파괴조건에 예측은 거의 일치하며 노치의 반경이 2 mm보다 큰 경우에는 점응력조건이 평균응력조건으로부터 예측된 강도보다 낮은 값을 예측하고, 반경이 2 mm보다 작은 노치에 대해서는 반대로 점응력조건에 예측이 평균응력조건보다 다소 높은 것으로 나타났다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 평균응력조건이 실험의 전 구간에 걸쳐 다소 양호한 예측을 할 수 있으며, SSR(residual sum of

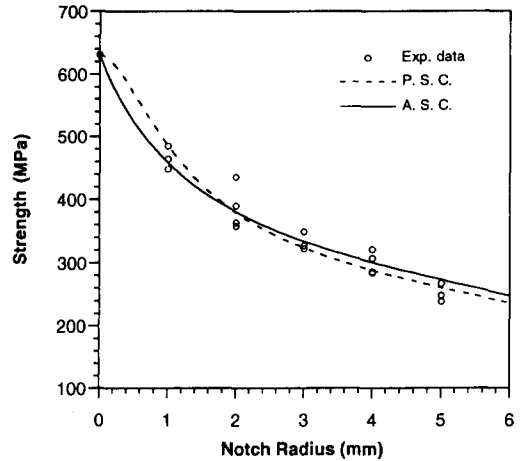


Fig. 3 Static notch strength predicted by point and average stress criteria

squares)도 다소 작은 값을 가진다.

파단후 노치와 시편의 경계에서 약간의 층간분리가 관찰되었고, 가장 바깥 층인 0°층은 결함이 적은데 비해 가운데 층인 90°층은 모재의 심한 균열과 섬유와의 분리가 나타나므로 실험에 사용된 재료가 낮은 층간 결합력을 가지며 전단 및 인장응력에 대해 모재가 상당히 취약함을 알 수 있다.

4.2 평활재의 피로거동

평활재에 대한 인장-인장 피로실험이 수행되었고, 그 결과가 본 논문에서 도입된 S-N 곡선, Basquin's relation, 그리고 FLPE1의 세 가지 피로수명예측 모델에 대해 회귀분석되었다. Table 3은 평활재의 피로수명에 대한 회귀분석의 결과를

Table 2 Characteristic lengths obtained from static notch strength

Fracture criterion	Characteristic length(mm)	SSR(MPa ²)
Point stress criterion	d ₀ =0.8035	8667.5
Average stress criterion	a ₀ =2.2225	7933.3

Table 3 Parameters of fatigue life prediction equations of un-notched composite laminates

Fatigue life prediction	Parameters	SSR(MPa ²)
S-N curve	k=-0.0557 d=0.9947	5167
Basquin's relation	σ _f =652.33 b=0.0299	5637
H and H's FLPE1	M=-3.232 B=-5.856 C=0.261	4578

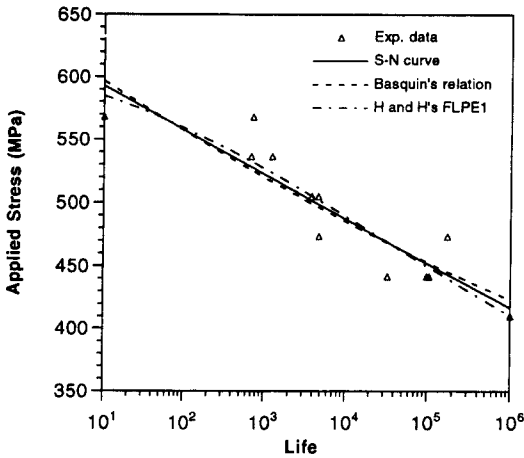


Fig. 4 Fatigue life prediction curves of un-notched laminates

나타낸 것으로 SSR 수치에 있어서 FLPE1에 의한 예측이 가장 양호함을 알 수 있다.

Fig. 4는 S-N 곡선, Basquin's relation, 그리고 FLPE1으로 예측된 평활재의 피로수명예측 곡선이다. 다소 편차는 있으나 가한응력과 피로수명의 로그값과의 관계는 대체로 선형적인 것으로 나타나며 대부분의 실험범위에서 세 피로수명예측식에 의한 예측은 큰 차이를 보이지 않는다.

정하중 실험과 비교할때 층간분리가 특히 두드러지는 피로손상의 형태로 나타났다. 피로파괴후 시편의 관찰에서 정하중실험의 경우와는 달리 90°층의 파괴로 인해 시편의 광범위한 영역에 걸친 층간분리가 형성됨을 볼 수 있는데, 이는 재료의 적층각이 가운데 층으로 갈수록 인장방향 강도와 강성이 작은 90°쪽으로 배열된 것에서 기인한다고 볼

수 있다. 즉, 피로하중이 반복됨에 따라 취약한 모재에 더 큰 응력이 가해지는 90°층에 균열이 형성되어 시편의 경계로부터 층간분리가 시작되고 재료의 안쪽층으로 갈수록 하중의 수직방향으로의 강성이 큰 적층층을 가지므로 인장방향의 하중이 바깥쪽으로는 굽힘을 유발하여 층간분리를 증가시키는 것으로 생각된다.

4.3 노치재의 피로거동

정하중실험 및 평활재에 대한 피로실험의 결과로 구해진 특성길이와 평활재에 대한 피로수명예측식의 재료상수들을 Table 1에 제시된 피로수명예측식에 대입하면 노치재의 피로수명은 L_o , α 와 β 의 재료상수를 포함하는 가한응력에 대한 함수의 형태로 표현된다. 피로수명 N 이 주어질때 이 식들은 실수지수를 가진 $\bar{\sigma}$ 에 대한 다항식으로 표현되며 이 다항식의 해를 수치적으로 구하면 주어진 피로수명에서의 가한 응력을 구할수 있다.

노치재에 대한 정하중실험의 결과로부터 반경 1 mm와 3 mm의 노치재를 선택하고 인장-인장피로 실험을 수행하여 총 26개의 노치재에 대한 피로수명 데이터를 구하였다. 이를 본 논문에서 제시한 여섯가지의 피로수명예측식 I-1, I-2, I-3, II-1, II-2, II-3에 대입하고 회귀분석을 통해 도입된 L_o , α 와 β 의 세 상수를 구하여 Table 4에 나타냈다.

제시된 예측식중 평균응력조건과 Hwang 등의 FLPE1을 이용한 식 II-3이 가장 양호한 예측을 보이며 점응력조건과 FLPE1의 피로수명예측식을 사용한 식 I-3이 SSR 수치에 있어서 가장 큰 편차를 보인다. Fig. 5와 6은 노치재에 대한 피로실

Table 4 Parameters of proposed fatigue life prediction equations of notched composite laminates

Proposed fatigue life prediction equation	Parameters			SSR (MPa ²)
	L_o	α	β	
Eqn. I -1	2.527	30.48	64.03	20855
Eqn. I -2	2.384	37.99	87.65	26831
Eqn. I -3	4.102	80.00	69.97	80546
Eqn. II -1	2.504	23.70	50.30	13377
Eqn. II -2	1.968	15.56	43.73	18004
Eqn. II -3	2.652	20.48	39.18	10197

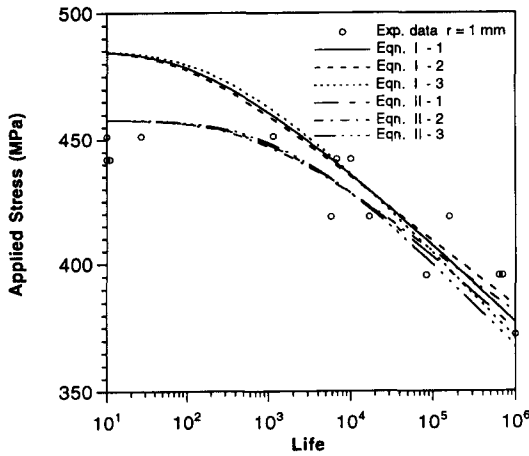


Fig. 5 Comparison of prediction equations : r=1 mm

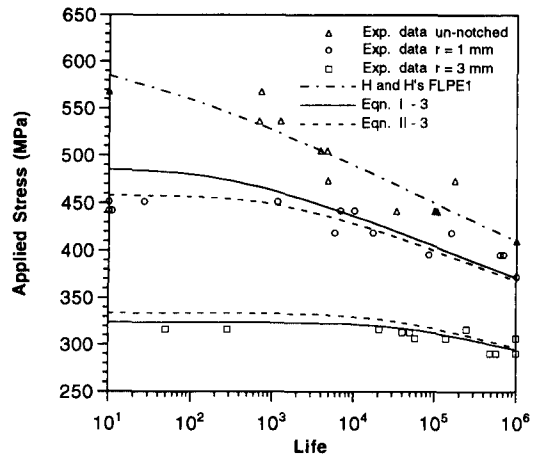


Fig. 7 Comparison of prediction equations derived using H and H's FLPE1

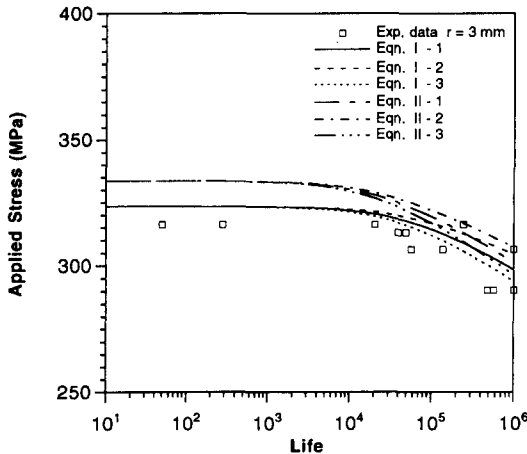


Fig. 6 Comparison of prediction equations : r=3 mm

험의 결과와 본 논문에서 제시한 예측의 결과를 비교한 것으로 대부분의 구간에서 제시된 식은 노치재의 피로수명을 잘 예측하는 것으로 보인다.

Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이 평균응력조건을 이용하여 유도된 예측식이 점응력조건을 이용한 경우보다 예측이 정확하며 I-3식을 제외한 다른 예측식에서는 동일한 정적파괴조건으로부터 유도되었을때 예측식의 정확도는 이용된 평활재에 대한 피로수명예측식의 정확도와 같은 우열을 가짐을 알 수 있다. 이는 제시된 노치재의 피로수명예측식은 도입된 정적 강도 예측식과 평활재의 피로수명예측식의 특성을 잘 반영하는 것을 의미하며 노치재의 피로수명예측의 유도시 재료에 따라 도입에 적절한 파괴조건 및 평활재의 피로수명예측식을 선

택하는 근거가 된다.

제시된 노치재의 피로수명예측식은 피로하중을 받지 않은 상태, 즉 N 이 1일때 도입한 정적강도 예측식과 동일한 형태를 가진다. 그러므로 예측곡선은 같은 파괴조건에 대해 동일한 가한하중에서 시작되며 하중반복수가 작은 범위에서 예측 곡선의 형태는 이용된 파괴조건에 의해 결정된다. 예측곡선은 피로의 초기에는 피로손상이 작아 잔류강도의 저하나 응력의 재분배효과가 거의 나타나지 않으므로 이용된 노치재의 파괴조건식의 영향을 크게 받아 평활재에 대한 피로수명예측식이 다르게 사용되었다더라도 비슷한 형태를 가지게 되며, 피로손상이 진전됨에 따라 그 차이가 감소하여 점차 파괴조건식의 영향은 작아지고 평활재에 대해 동일한 피로수명예측식이 이용된 예측곡선이 서로 접근함을 알 수 있다.

Fig. 7은 동일한 평활재에 대한 피로수명예측식으로부터 유도된 식들을 비교하기 위한 한가지 예로 평활재의 피로수명예측식으로 Hwang과 Han의 FLPE1을 이용한 경우의 예측곡선이다. 반경이 1 mm인 노치의 경우, 점응력조건으로 예측된 정적강도가 평균응력조건에 예측강도보다 크므로 피로 초기에서는 점응력조건을 이용한 식 I-3이 평균응력조건을 이용한 식 II-3보다 더 큰 가한응력을 허용하며 이러한 파괴기준에 따른 차이는 피로가 반복됨에 따라 점차 감소하여 두 예측식이 서로 접근하는것을 볼 수 있다. 이러한 성향은 반경 3 mm의 노치에서도 동일하게 관찰되며, 이 경우 반경 1

mm인 노치와는 달리 평균응력조건이 더 큰 정적 노치강도를 예측하므로 식 II-3이 더 큰 가한응력을 예측함을 알 수 있다. 이러한 특성은 S - N 곡선과 Basquin's relation을 이용하였을 경우에도 동일하게 나타난다.

노치재에 대한 피로실험에서 가한응력이 정적노치강도의 95% 이상이 되었을 경우 피로수명이 심한 편차를 보인다. 정하중에 의한 파괴와는 달리 노치재 피로파괴에서는 층간분리 뿐만이 아니라 0°층의 전단파괴가 주요한 피로손상의 형태이며 이로 인해 노치 주위의 응력집중이 초기에 급격하게 완화되므로 노치재의 피로수명 곡선은 피로 초기에 0에 가까운 기울기를 가지며 피로가 진전될수록 곡선의 기울기는 점차 큰 절대값을 가진다. Fig. 8은 식 I-1을 적용하여 구해진 재료상수 L_0 , α 와 β 로부터 계산한 반경 1 mm의 노치재가 가지는 피로하에서의 수직응력분포이다. 377 MPa의 가한하중에서 식 I-1은 10⁶의 피로수명을 예측하며 피로 파괴시 집중된 최대응력은 피로손상을 받지 않았을 때의 82.3%로 감소하는 것으로 예측되었다.

본 논문에서 제시된 피로파괴조건은 잔류강도저하모델에 기초한 것으로서 동일한 파괴조건으로부터 잔류강도에 대한 예측식의 구성이 가능하다. 제시된 접근법에 있어서 피로수명과 잔류강도는 본질적으로 같은 문제이며 잔류강도와 피로수명에 대한 실험치는 하나의 파괴조건식의 데이터로서 동시에 회귀분석될 수 있다.

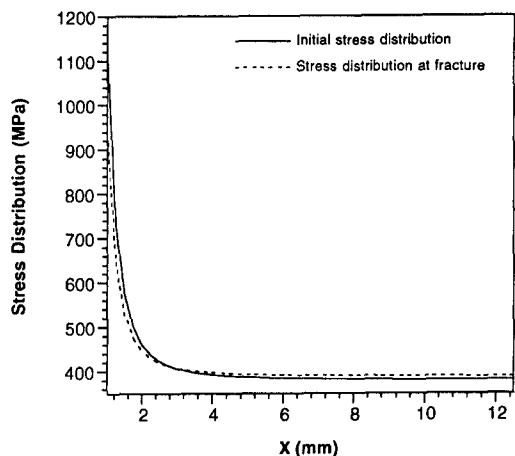


Fig. 8 Stress distribution of notched laminates($r=1$ mm, $W=25$ mm, $\bar{\sigma}=377$ Mpa and $N=10^6$ cycles)

5. 결 론

원공노치를 가진 복합적층판의 피로수명예측에 대한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 정하중 하의 노치재에 대한 Whitney와 Nuismer의 점 및 평균응력조건외 파괴조건을 잔류강도 저하모델의 개념과 피로시의 응력재분배에 대한 가정을 도입해 일반화하여 노치재의 피로파괴조건을 제시하였다.
- (2) 제시된 노치재에 대한 두가지 피로파괴조건에 평활재에 대한 피로수명예측식으로서 S-N 곡선, Basquin's relation, Hwang 등이 제안한 FLPE1을 도입하여 원공노치를 가진 복합재료의 피로수명에 대한 여섯가지의 예측식을 제시하였다.
- (3) $[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 의 적층각을 가지는 Graphite/Epoxy 복합적층판으로 평활재 및 노치재에 대한 정하중 및 피로실험을 수행하여 그 결과를 제시한 예측식과 비교하였다.
- (4) 본 논문에서 제시된 피로수명예측식은 도입된 정적파괴조건 및 평활재에 대한 피로수명예측식의 특성을 잘 반영하며 노치를 가진 복합적층판의 피로수명을 잘 예측하는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호 : 91-0200-07-04-3)에 의하여 연구되었다.

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 ~ 454.
- (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," *Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593*, pp.

- 117~142.
- (4) Reifsnider, K. L. and Stinchcomb, W. W., 1986, "A Critical-Element Model of the Residual Strength and Life of Fatigue-Loaded Composite Coupons," *Composite Materials : Fatigue and Fracture*, ASTM STP 907, Hahn, H. T., Ed., pp. 298~313.
- (5) Broutman, L. J. and Sahu, S., 1972, "A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforce Plastics," *Composite Materials : Testing and Design(Second Conference)*, ASTM STP 497, pp. 170~188.
- (6) Hwang, W. and Han, K. S., 1989, "Fatigue of Composite Materials-Damage Model and Life Prediction," *Composite Materials : Fatigue and Fracture, Second Volume*, ASTM STP 1012, Paul A. Lagace, Ed., pp. 88~102.
- (7) Ye, L., 1989, "Characteristics of Delamination Growth in a Notched Graphite/Epoxy Composite Laminate," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 8, pp. 79~89.
- (8) Beghine, M., Bertini, M. and Vitale, L., 1991, "Analysis of Fatigue Delamination Growth in Carboresin Specimens with Central Hole," *Composite Structures*, Vol. 17, pp. 257~274.
- (9) Razvan, A., Bakis, C. E. and Reifsnider, K. L., 1990 "Influence of Load Levels on Damage Growth Mechanisms of Notched Composite Materials," *Composite Materials : Testing and Design(Ninth Volume)*, ASTM STP 1059, Garbo, S. P. Ed., pp. 371~389.
- (10) Whitcomb, J. D., 1981, "Experimental and Analytical Study of Fatigue Damage in Notched Graphite/Epoxy Laminates," *Fatigue of Fibrous Composite Materials*, ASTM STP 723, pp. 48~63.
- (11) Kress, G. R. and Stinchcomb, W. W., 1985, "Fatigue Response of Notched Graphite/Epoxy Laminates," *Recent Advances in Composites in the United States and Japan*, ASTM STP864, Vinson, J. R. and Taya, M., Eds., pp. 173~196.
- (12) Bakis, C. E., Simonds, R. A., Vick, L. W. and Stinchcomb, W. W., 1990, "Matrix Toughness, Long-Term Behavior, and Damage Tolerance of Notched Graphite Fiber-Reinforced Composite Materials," *Composite Materials : Testing and Design(Ninth Volume)*, ASTM STP 1059, Garbo, S. P., Ed., pp. 349~370.
- (13) Yip, M. C. and Perng, T. B., 1993, "The Influence of Hole Size in Static Strength and Fatigue for CFRP Composite Materials," *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials*, Chandra, T. and Dhingra, A. K., Eds., pp. 651~657.
- (14) 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.
- (15) Tan, S. C., 1988, "Finite-Width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 1080~1097.