

〈論 文〉

Glass/Epoxy 복합재료의 피로강도평가 및 피로수명예측

김정규* · 김도식**

(1993년 3월 11일 접수)

The Fatigue Strength and the Fatigue Life Prediction in Plain Woven Glass/Epoxy Composite Plates

Jung-Kyu Kim and Do-Sig Kim

Key Words : Circular Hole(원공), Notch Sensitivity(노치민감도), Fatigue Strength(피로강도), Modified Point Stress Criterion(수정점 응력조건), Fatigue Life(피로수명), S-N_r Curve(S-N_r 곡선)

Abstract

The effects of the hole size(2R) and the specimen width(W) on the fatigue strength and the fatigue life in plain woven glass/epoxy composite plates are experimentally investigated under constant amplitude tensile fatigue loading. It is shown in this study that the notch sensitivity under fatigue loading is lower than that under static loading. It can be explained by the fact that the stress concentration is relaxed by the damage developed at the boundary of circular hole. To predict the fatigue strength at a specific cycle, the modified point stress criterion represented as a function of the geometry of the specimen(2R and W) is applied. It is found that the model used in the prediction of the notched tensile strength predicts the fatigue strength with reasonable accuracy. A model for predicting the fatigue life in the notched specimen, based on the S-N_r curve in the smooth specimen, is suggested.

1. 서 론

원공등과 같은 불연속부가 존재하는 복합재료에 대한 정적강도평가는 선형탄성파괴역학(LEFM)⁽¹⁾ 또는 불연속부 선단의 수직응력분포에 기초를 둔 파손이론^(2,3) 등에 의하여 행하여지고 있다. 이들 중 Whitney와 Nuismer^(2,3)는 노치선단의 수직응력 분포를 기초로 하여 파손조건을 결정짓는 특성길이(*d_o* 또는 *a_o*)가 재료의 상수임을 가정한 정적강도

예측모델을 제안하였다. 그러나 그 후 많은 연구결과에 의하면 이 특성길이는 재료상수가 아니라 재료의 성형조건, 적층순서 또는 시험편 형상 등의 함수로 보고되고 있으며, Karlak⁽⁴⁾과 Pipes⁽⁵⁾등 및 Kim^(6,7)등은 이들의 영향을 고려한 새로운 파손모델을 제시하였다. 이러한 파손모델을 이용한 노치재의 정적강도평가는 여러 연구자들에 의하여 보고되고 있지만 노치재의 인장강도와 피로강도간의 상관관계 및 노치재의 피로강도 예측에 대한 연구는 상당히 미미한 실정이다.

정적파손모델 중의 하나인 평균응력조건^(2,3)을 적용하여 원공이 있는 FP/Al(alumina fiber reinfor

*정회원, 한양대학교 기계설계학과

**정회원, 한양대학교 기계설계학과 대학원

ced aluminum)의 피로강도를 예측하고자 하는 시도는 Tsangarakis^(8,9)등에 의하여 행하여졌다. 그러나 그들의 연구에서 알 수 있듯이 원공직경(2R)의 변화에 따른 피로강도의 예측결과는 실험결과에 비하여 과소평가되고 있다. 따라서 평균응력조건을 수정없이 피로강도를 평가함에는 문제가 있다고 할 수 있다.

한편, 피로수명예측에 있어서는 피로하중 반복수에 따른 잔류강도 및 강성 등과 같은 재료 특성치의 변화양상을 이용한 연구가 많이 수행되었다. Hahn과 Kim⁽¹⁰⁾은 피로하중에 따라 저하된 잔류강도가 최대부하응력과 같아질 때 피로파손이 발생한다는 가정을 이용하여 피로수명분포를 예측하였다. 또한 Yang⁽¹¹⁾과 Chou⁽¹²⁾등은 각각 잔류강도감소모델(residual strength degradation model)과 급격파손모델(sudden death model)을 제안하였다. 전자는 잔류강도가 피로하중의 반복수에 따라 단조감소한다고 가정한 것이며, 후자는 피로파손이 발생되기 직전의 몇 주기까지는 하중반복수에 의한 잔류강도저하가 없다는 가정을 사용하였다.

Poursartip^(13,14)등, Min-hwa⁽¹⁵⁾등 및 Hwang⁽¹⁶⁾등은 강성감소(stiffness degradation)를 이용한 피로수명예측식을 제안하였다. 즉 Poursartip^(13,14) 등은 피로수명예측식을 피로하중하의 탄성계수 감소를 이용한 손상성장률로부터 일반적인 형태로 나타내었으며, Ming-hwa⁽¹⁵⁾ 등은 탄성계수 감소율이 피로주기의 지수함수라는 가정하에 탄성계수의 함수로서 피로수명예측식을 제안하였다. 또한 Hwang⁽¹⁶⁾등은 피로계수 및 변형을 파괴조건을 도입하여 반복응력레벨의 함수로서 피로수명예측식을 나타내었다. 그러나 이상의 피로수명예측식들은 원공 및 판폭 등과 같은 시험편 형상을 동시에 고려하지 못하고 있으므로 여러가지 형상을 가진 복합재료의 피로수명예측에 대한 적용여부가 불투명한 상태이다.

본 논문에서는 평직(plain woven) glass/epoxy 복합재료를 하중방향에 대하여 0°/90°방향으로 채취하여, 원공크기와 판폭에 따른 단축인장 피로실험을 수행하였다. 이로부터 노치강도 및 피로강도 저하의 관계를 살펴보았으며, 수정점 응력조건을 적용하여 임의의 피로수명에서의 피로강도를 예측하고 그 적용여부를 검토하였다. 또한 평활재의 S-N_r 곡선을 기초로 하여 원공크기 및 판폭 등과 같은 시험편 형상을 고려한 노치재의 피로수명예측식을

제안하였다.

2. 실험방법

사용한 재료는 평직 glass/epoxy 복합재료($\nu_f \approx 60\%$, 두께 $t=2\text{ mm}$)로서, 한층의 두께가 약 0.18~0.2 mm인 ply를 10매 적층하여 가압(온도 180~190°C, 압력 9.8 MPa, 시간 2 hr)한 것이다. 이 재료의 기계적 특성은 ASTM D3039-76⁽¹⁷⁾의 규정에 의거한 인장실험으로부터 구하였으며, 이의 결과는 Table 1과 같다. 시험편은 섬유방향이 하중방향에 대하여 0°/90°가 되도록 diamond cutter를 사용하여 채취하였다. 시험편 형상은 Fig. 1과 같으며, 원공은 endmill을 사용하여 각 판폭($W=10, 20\text{ mm}$)에 대한 원공직경의 비 $2R/W$ 가 0.05, 0.1, 0.2, 0.4의 4종류로 주의깊게 가공하였다.

피로실험은 실험중의 시험편 내부의 온도상승을 거의 무시할 수 있는 최대 5 Hz의 인장-인장정현파(sinusoidal wave)로 행하였으며,⁽¹⁶⁾ 응력비 r ($=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)은 0을 유지하였다. 또한 피로하중시의 최대반복응력 σ_{\max} ($=P/tW$)는 각 시험편 인장강도의 45%~95%의 범위에서 설정하였다.

Table 1 Mechanical properties

E_{xx}	E_{yy}	ν_{xy}	G_{xy}	K_T^∞
23.6	23.6	0.11	4.0	3.73

E_{xx} : Longitudinal Young's modulus (GPa)

E_{yy} : Transverse Young's modulus (GPa)

ν_{xy} : Poisson's ratio

G_{xy} : In-plane shear modulus (GPa)

K_T^∞ : Stress concentration factor in the infinite plate

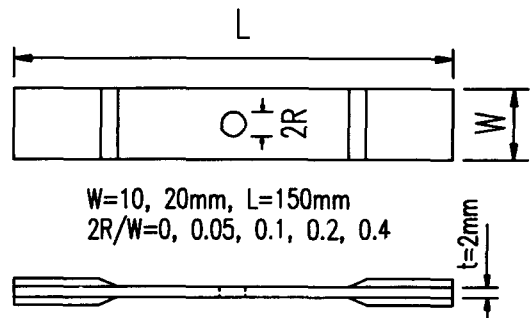


Fig. 1 Configuration of test specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노치재의 피로강도

Table 2는 판폭 $W=20$ mm인 시험편의 원공직경 $2R$ 에 따른 실험결과를 정리한 것이다. Fig. 2는 평활재와 노치재에 대한 최대반복응력 σ_{max} 와 피로수명 N_f 의 실험결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 임의의 피로수명 N_f 에서의 노치재의 피로강도 σ_{Nf} 는 원공이 작을수록 증가하지만, 고수명영역에서는 이의 차이가 감소함을 알 수 있다.

이러한 임의의 피로수명 N_i ($N_i \approx 50$ cycles, $N_o \approx 2,500$ cycles, $N_o \approx 40,000$ cycles)에서의 판폭에 대한 원공직경의 비 $2R/W$ 에 따른 피로강도 감소계수의 변화를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 이 때 피로강도 감소계수(fatigue strength reduction factor, FSRF)는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} FSRF &= \frac{N_i \text{ cycle에서의 노치재의 피로강도}}{N_i \text{ cycle에서의 평활재의 피로강도}} \\ &= \frac{\sigma_{Nf}}{\sigma_{or}} \end{aligned} \quad (1)$$

그림에서 보는 바와 같이 피로강도 감소계수는 원공직경이 커짐에 따라 감소하고 있으며, 또한 그 저하양상은 인장강도의 저하^(6,7)와 유사한 경향을 보이고 있다.

피로하중 및 정적하중하에서의 원공크기에 따른 노치민감도의 차이를 비교하기 위하여, 피로강도 감소계수와 평활재의 인장강도에 대한 노치재의 인장강도의 비 즉, 인장강도 감소계수(tensile strength reduction factor, TSRF)를 비교한 것이 Fig. 4(a, b)이다. 이 그림에서 동일한 $2R/W$ 에 대하여 피로강도 감소계수가 인장강도 감소계수보다 높은 값을 나타내므로, 피로하중의 경우가 정적하중의 경우보다 노치에 대한 민감도가 낮다고 할 수 있다. 원공을 갖는 복합적층재에 하중이 작용하면 Fig. 5(a~d)와 같이 원공주위의 응력집중부에서 손상이 발생하며, 이 손상은 원공선단의 응력집중을 완화시키는 응력재 분포현상을 유발시킨다. 특히 피로하중하에서는 원공선단의 손상이 정적하중의 경우보다 더 넓은 영역에서 나타나므로,^(18,19) 노치민감도가 더 낮게 나타나는 것으로 생각되어 진다.

3.2 파손이론에 의한 피로강도의 평가

원공을 갖는 시험편에 반복하중이 부하되면,

Table 2 Experimental results ($W=20$ mm)

2R	2R/W	σ_N^*	σ_{max}^*	N_f^*
0	0	385.5	327.7	70
			289.2	340
			250.6	2310
			212.0	9810
			173.5	56710
1	0.05	277.6	263.7	40
			236.0	380
			208.1	3090
			180.4	11970
			152.7	25010
2	0.1	249.2	236.7	40
			211.8	220
			186.9	2060
			161.9	10390
			137.0	48890
4	0.2	209.7	199.2	50
			178.3	280
			157.3	1830
			136.3	12180
			115.3	37440
8	0.4	150.2	142.6	40
			127.6	250
			112.6	1780
			97.6	11650
			82.6	41170

2R : Hole diameter (mm)

σ_N : Notched tensile strength (MPa)

σ_{max} : Maximum cyclic stress (MPa)

N_f : Cycles to failure (cycles)

* : Average values of three specimens

Fig. 5(a~d)에서 살펴본 바와 같이 원공주위의 응력집중부에서 손상이 발생하고 확장되어 급작스런 피로파손이 일어나게 되며, 이는 정적인장 하중하의 파손양상과 유사하다. 따라서 피로파손은 반복

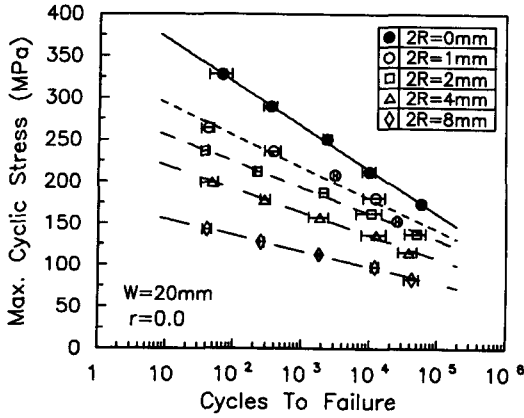


Fig. 2 Effect of circular hole on S-N curves

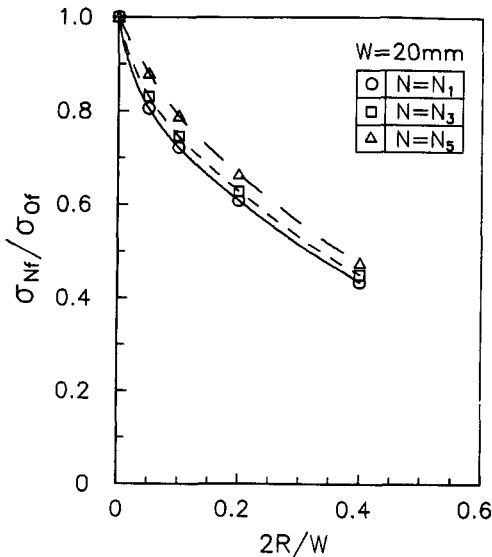


Fig. 3 Reduction of notched fatigue strength according to 2R/W

하중하에서 원공선단으로부터 일정한 거리(d_o)만큼 떨어진 곳에서의 수직응력 σ_{yf} 가 평활재의 피로강도 σ_{of} 와 같아질 때 발생한다고 가정할 수 있으며, 피로파손조건식은 정적노치강도의 예측을 위하여 제안된 점응력조건식(point stress criterion)^(2,3)과 유사한 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{yf}(R + d_o, 0) = \sigma_{of} \quad (2)$$

피로하중하의 점응력조건은 원공선단의 수직응력분포와 식(2)의 관계로부터 아래의 식으로 나타내어진다.

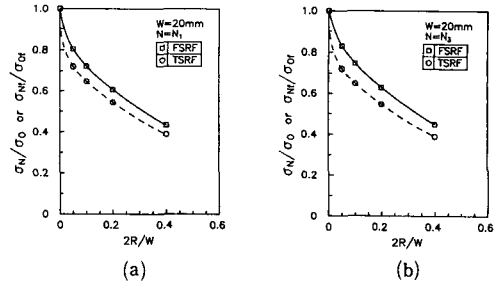


Fig. 4 Comparisons of tensile strength and fatigue strength reduction factor

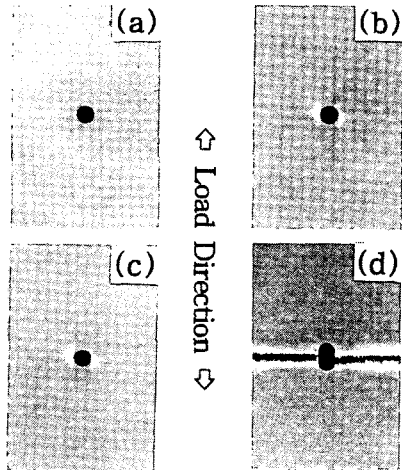


Fig. 5 Photographs showing extent of damage under fatigue loading at $\sigma_{max} = 0.65\sigma_N$ at (a) $N_f/N_t = 0$, (b) $N_f/N_t \approx 0.6$, (c) $N_f/N_t \approx 0.95$, (d) $N_f/N_t = 1$, $N_t = 10,390$

$$\frac{\sigma_{Nf}}{\sigma_{of}} = Y \frac{2}{[2 + A_1^2 + 3A_1^4 - f(K_T^\infty, A_1)]} \quad (3)$$

여기서 $A_1 = R/(R + d_o)$ 이며, 특성길이 d_o 는 일정하다. 그러나 많은 연구결과^(4~7)에 의하면 d_o 는 일정하지 않음이 보고되고 있으며, 이들 중 김^(6,7) 등은 d_o 를 시험편형상(2R 및 W)의 함수로 가정한 수정점 응력조건을 제안하였다. 이 파손조건은 평직 glass/epoxy와 carbon/epoxy 및 주자직 glass/polyester재에 대한 정적노치강도의 예측에 있어서 좋은 결과를 나타낸바 있다. 따라서 본 연구에서는 김 등의 특성길이 표현식 $d_o = (1/k)(2R/W)^m$ 을 식(3)에 적용하여 피로하중하의 수정점 응력조건식(4)를 얻었다.

$$\frac{\sigma_{Nf}}{\sigma_{of}} = Y \frac{2}{[2 + A_2^2 + 3A_2^4 - (K_T^\infty - 3)(5A_2^5 - 7A_2^3)]}$$

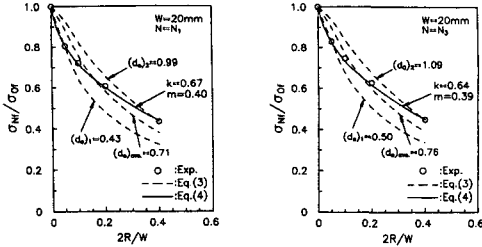


Fig. 6 Comparisons between the test results and the fatigue strength predictions using Eq. (3) and Eq.(4)

$$A_2 = \frac{1}{1 + 2^m R^{m-1} W^{-m} k^{-1}} \quad (4)$$

여기서 k 는 $2R$ 및 W 에 대한 노치감도계수 그리고 m 은 특성길이의 변화를 나타내는 계수로서, 임의의 피로수명에 대한 노치강도 σ_N 의 실험결과로부터 산출된다. 또한 식(3)과 (4)에서 Y 는 무한판에 대한 파손이론을 유한판의 피로수명예측에 적용시키기 위하여 도입된 유한폭 보정계수(finite width correction factor, FWC Factor)이며, 적교이방성 재료에 대해서도 적용이 가능한 식(5)⁽³⁾를 이용하였다.

$$Y = \frac{3(1-2R/W)}{2 + (1-2R/W)^3} \quad (5)$$

Fig. 6(a, b)는 임의의 피로수명 N_i 에서의 피로강도 감소계수의 실험결과와 파손조건식(3)과 (4)에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 이 그림에서 $(d_o)_1$ 및 $(d_o)_2$ 는 식(3)으로부터 산출한 최소 및 최대원공에서의 특성길이이며, $(d_o)_{ave}$ 는 원공의 크기에 따른 d_o 의 평균값이다. 또한 본 재료에서의 d_o 는 원공의 크기에 따라 다르므로, $d_o = (1/k)(2R/W)^m$ 의 관계식으로 나타내어지며 이 식에서 노치감도 계수 k 및 지수변수 m 값을 각각 그림에 표시하였다. 피로강도는 일정한 특성길이를 가정한 식(3)에 의하여 예측될 수 없으며, $(d_o)_{ave}$ 에 의하여 산출하여도 과대 또는 과소평가됨을 알 수 있다. 그러나 수정점 응력조건식(4)에 의한 피로강도의 예측값은 실험결과와 잘 일치하므로, 식(4)는 원공을 가진 복합재료에 대한 임의의 피로수명에서의 피로강도평가에 적용되어질 수 있다.

3.3 노치재의 피로수명

피로수명예측에 있어서는 서론에서 언급한 바와

같이 피로하중반복수에 따른 잔류강도 및 강성의 변화양상을 이용하여 평가하는 경우가 많다. 이들 중 피로하중에 따른 탄성계수의 감소양상을 도입한 피로수명예측식은 Poursatip,^(13,14) Ming-hwa⁽¹⁵⁾ 및 Hwang⁽¹⁶⁾ 모델 등이 있으며, Hwang 등은 피로계수(F)의 감소율이 피로주기(n)의 지수함수라고 가정하여 식(6)과 같은 피로수명예측 모델을 제안하였다.

$$N_f = [J(1-S)]^{1/H} \quad (6)$$

이 식에서 J 및 H 는 실험결과로부터 결정되는 재료상수이며, S 는 인장강도(σ_o)에 대한 최대반복응력(σ_{max})의 비로서 식(7)과 같은 피로계수(F)와의 관계를 나타낸다.

$$S = \sigma_{max}/\sigma_o = F_f/F_o \quad (7)$$

여기서 F_o 및 F_f 는 첫번째 피로주기 및 파손시의 피로계수이다. 이와같이 식(6)은 변수결정이 용이하고 반복응력비의 함수로 나타내어지므로 피로수명예측이 간편하다.

Fig. 7(a, b)는 피로수명의 실험결과를 식(6)에 의한 예측결과와 비교한 대표적인 예로서, 실선은 실험과 예측결과가 일치함을 나타내는 것이다. 원공직경 1mm인 시험편의 실험결과는 식(6)에 의한 예측결과와 비교적 잘 일치하지만 원공직경이 커짐에 따라 이의 결과에는 상당한 차이가 나타나고 있으며, 상대오차는 최소 37%에서 최대 87%에 이르고 있다. 따라서 본 연구에 있어서의 피로수명예측에 식(6)을 적용함은 부적합하며, 원공직경 및 판폭 등의 시험편 형상을 고려한 피로수명예측식을 평활재의 실험결과로부터 제안하고자 한다.

Fig. 8은 각 시험편의 인장강도(σ_o 또는 σ_N)에 대한 최대반복응력(σ_{max})의 비 S 와 피로수명 N_f 의

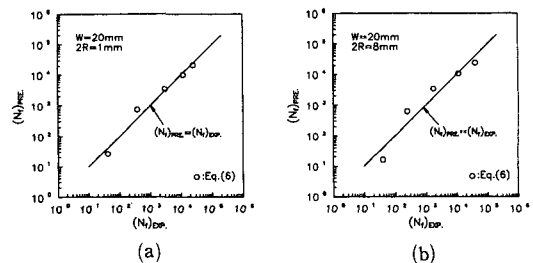


Fig. 7 Comparisons between the test results and the predictions using Eq. (6)

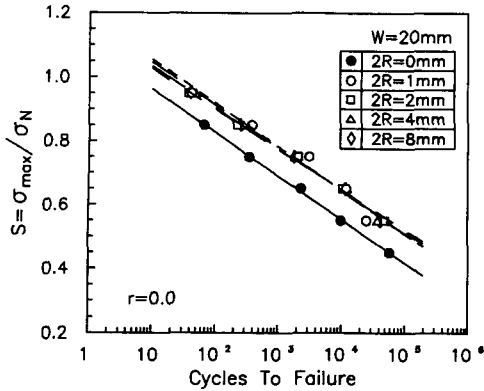


Fig. 8 Normalized S-N curves (W=20 mm)

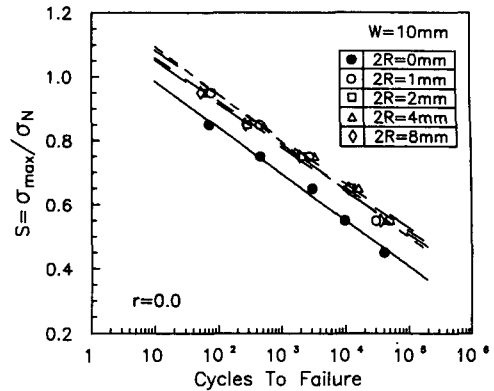


Fig. 10 Normalized S-N curves (W=10 mm)

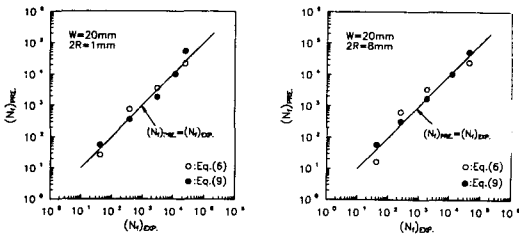


Fig. 9 Comparisons between the test results and the predictions using Eq.(6) and the present model Eq. (9) (W=20mm)

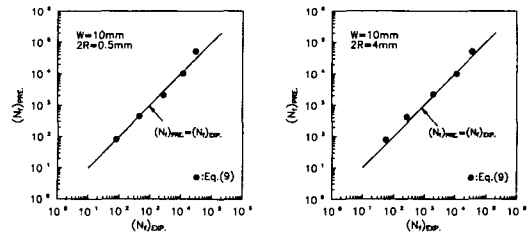


Fig. 11 (a), (b) Comparisons between the test results and the predictions using the present model Eq. (9) (W=10mm)

관계이다. 이 그림에서 평활재의 $S (= \sigma_{max} / \sigma_o)$ 와 N_f 의 관계는 식(8)과 같이 표현되어 진다.

$$\sigma_{max} / \sigma_o = A + B \log N_f \quad (8)$$

한편 Fig. 2에서 나타난 피로수명 N_f 에 대한 원공 크기 $2R$ 의 영향은 σ_{max} 를 σ_o 또는 σ_N 으로 규격화함으로써 소멸되며, 평활재와 노치재의 S-N곡선의 기울기는 거의 동일하게 나타난다. 또한 동일한 피로수명 N_f 에 대하여 노치재의 $S (= \sigma_{max} / \sigma_N)$ 값은 평활재의 경우보다 C 만큼 높은 값을 나타내므로, 노치재의 S 와 피로수명 N_f 사이에는 식(9)와 같은 관계식이 얻어진다.

$$\sigma_{max} / \sigma_N = (A + B \log N_f) + C \quad (9)$$

이 식에서 A 및 B 는 평활재의 S-N_r곡선의 절편 및 기울기이며, C 는 본 실험결과로부터 0.1의 값으로 얻어진다. 또한 σ_N 은 노치재의 인장강도로서 전보에서의 수점 응력조건^(6,7)에 의하여 예측되어 진다.

Fig. 9(a, b)는 판폭 $W=20$ mm인 시험편에 대하여 식(6)과 식(9)에 의한 피로수명 예측결과와 실험결과를 비교한 것이다. 이 그림에서 실선은 실험과 예측결과가 일치함을 나타내는 것으로, $2R=1$ mm인 경우는 두 모델의 예측결과가 거의 일치하지만, 그 외의 경우에는 식(9)에 의한 피로수명의 예측결과가 실험결과와 보다 잘 일치함을 보이고 있다.

한편 식(9)의 유용성을 검토하기 위하여 판폭 $W=10$ mm, 원공직경 $2R=0.5 \sim 4$ mm인 시험편에 대하여 피로실험을 수행하고 이에 의한 실험결과를 식(9)에 의한 예측결과와 비교하였다. Fig. 10은 $W=10$ mm인 시험편의 S-N_r곡선이며, Fig. 11(a, b)는 각 시험편의 피로수명을 식(9)에 의한 예측결과와 함께 나타낸 것으로 이 값들도 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 식(9)는, 평활재의 S-N_r곡선으로부터 절편 및 기울기, 수점 응력조건^(6,7)으로부터 산출된 노치재의 인장강도 σ_N 그리고 C

(≈ 0.1)의 값이 결정되면, 본 연구와 같은 $S-N_f$ 관계를 나타내는 노치재의 피로수명을 예측함에 있어서 유용하다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 중앙원공을 갖는 평직 glass/epoxy 복합재료의 노치강도 및 피로강도저하의 관계를 살펴보았으며, 임의의 피로수명에서의 피로강도예측에 수정점 응력조건을 도입하고 그 적용여부를 검토하였다. 또한 평활재의 $S-N_f$ 곡선을 기초로 하여 원공 및 판폭의 영향을 고려한 노치재의 피로수명 예측식을 제안하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 인장강도 감소계수와 피로강도 감소계수를 비교한 결과, 피로강도 감소계수가 11% 이상의 높은 값을 나타내었다. 이로부터 피로하중하에서의 노치민감도는 정적인장의 경우보다 낮음을 알 수 있으며, 이는 원공선단의 피로손상에 따른 응력집중의 완화현상으로 설명되어진다.

(2) 점응력조건에서의 특성길이 d_0 를 원공 및 판폭의 함수로 평가한 수정점 응력조건은 임의의 피로수명에서의 피로수명예측에도 유용함을 나타내었다.

(3) 원공 및 판폭의 영향을 고려하여 다음과 같은 피로수명예측식을 제안하였으며, 이에 의한 피로수명의 예측값은 실험결과와 좋은 일치율을 보였다.

$$\sigma_{\max}/\sigma_N = (A + B \log N_f) + C$$

여기서 σ_{\max} 와 A, B 는 각각 최대반복응력과 평활재 $S-N_f$ 곡선의 절편 및 기울기이며, σ_N 은 수정점 응력조건으로 예측한 노치재의 인장강도이다. 또한 C 는 평활재와 노치재의 피로특성 차이를 나타내는 파라미터로서, 본 연구의 경우 $C \approx 0.1$ 이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구비 지원(과제번호 90-07-00-08)으로 수행된 연구결과와 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

참고문헌

(1) Waddoups, M. E., Eisenmann, J. R. and Kamin-

ski, 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 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) 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.

(5) Pipes, R. B., Wetherhold, R. C. and Gillespie Jr., J. W., 1979, "Notched Strength of Composite Materials," Journal of Composite Materials, Vol. 13, pp. 148~160.

(6) Kim, Jung-Kyu, Takeda Nobuo and Shioya Tadashi, 1992, "Fracture Criteria of Polymer Matrix Composites with Circular Hole," Proceeding of 69th Annual Meeting, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. A., No. 920-17, pp. 173~175.

(7) 김정규, 김도식, 1992, "원공을 가진 Glass/Epoxy 복합재료의 노치강도 및 파손조건," 대한기계학회논문집, 제16권, 제7호, pp. 1285~1293.

(8) Tsangarakis, N., 1984, "Fatigue Failure of an Orthotropic Plate with a Circular Hole," Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp. 47~57.

(9) Tsangarakis, N., Slepetz, J. M. and Nunes, J., 1988, "Static and Fatigue Notch Strength Prediction in Alumina Fiber Reinforced Aluminum Plates with a Circular Hole," Journal of Composite Materials, Vol. 22, pp. 386~393.

(10) Hahn, H. T. and Kim, R. Y., 1976, "Fatigue Behavior of Composite Laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 10, pp. 156~180.

- (11) Yang, J. N. and Jones, D. L., 1981, "Effects of Load Sequence on the Fatigue Unnotched Composite Materials," ASTM STP 723, pp. 213~232.
- (12) Chou, P. C., 1979, "Scale Effect in Fatigue of Composite Materials," Journal of Composite Materials, Vol. 13, pp. 178~194.
- (13) Poursartip, A., Ashby, M. F. and Beaumont, P. W. R., 1986, "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : I-Development of the Model," Composites Science and Technology, Vol. 25, pp. 193~218.
- (14) Poursartip, A. and Beaumont, P. W. R., 1986, "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : II-Life Prediction," Composites Science and Technology, Vol. 25, pp. 283~299.
- (15) Ming-hwa, R. J., Hsu, J. M. and Hwang, D. G., 1990, "Fatigue Degradation in Centrally Notched Quasi-Isotropic Laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 24, pp. 823~838.
- (16) Hwang, W. and Han, K. S., 1986, "Fatigue of Composites-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," Journal of Composite Materials, Vol. 20, pp. 154~165.
- (17) ASTM D3039-76, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites."
- (18) Hahn, H. T., 1989, "Fatigue of Composites," in Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials edited by Zweben, C., Technomic, pp. 96~98.
- (19) Okubo, K., Matsuoka, T., Fujii, T. and Amijima, S., 1990, "Microscopic Fatigue Nature of a Plain Woven Glass Cloth Composite," 日本複合材料學會誌, Vol. 16, No. 6, pp. 241~247.