

〈論 文〉

탄소섬유/에폭시 복합재료의 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명 평가

심봉식* · 성낙원** · 오장우***

(1991년 5월 18일 접수)

Evaluation of the Fatigue Life for Carbon/Epoxy Composite Material by the Residual Strength Degradation Analysis

B.S.Shim, R.W.Sung and J.W. Ong

Key Words : Residual Strength(잔류강도), Strength Degradation(강도저하), Weibull Distribution Function(와이블 분포함수), Shape Parameter(형상계수), Scale Parameter(규모계수), Maximum Likelihood Method(최우 추정법), Failure Probability(파손확률), Converted Ultimate Strength(환산극한강도)

Abstract

Fatigue tests have been carried out to measure the degradation of the residual strength and the fatigue life in carbon/epoxy (0/45/90/-45)_{2s} composite materials. Theoretical predictions of residual strength and fatigue life were compared with experimental results. Distribution characteristics were studied using the probability of failure based on the cumulative distribution function and median rank. The static ultimate strength of carbon/epoxy composites used herein is observed to be relatively higher than that of existing similar composites; while fatigue life is shorter due to the brittleness of matrix. The fatigue life obtained in these experiments is shorter than that estimated by residual strength degradation model when the stress level above 0.6. For the stress level of 0.6, the experimental value was abruptly increased. The cumulative distribution function for the static ultimate strength is well correlated to that for the strength converted from the measured fatigue life. Also, the predicted distribution of residual strength shows good agreement with the experimental results. Therefore, it is proven that the residual strength degradation model is reasonable.

기호설명

C, K : 재료상수
 $f(s, \omega, r)$: 적용응력, 하중주파수, 응력비의 함수
 $F_N(n)$: 피로수명의 분포함수
 $F_{R(n)}(x)$: n 사이클 후의 잔류강도 분포함수

$F_{R(0)}(x)$: 극한강도 분포함수
 J : 전체 시편수
 J_i : 파손순위
 n : 피로 사이클 수
 N : 피로수명
 P_i : 중앙순위
 q : 응력수준
 r : 응력비

*정회원, 국방과학연구소

**정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

***정회원, 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

$R(n)$: n 사이클 후의 잔류강도
$R(0)$: 극한강도
R_i	: i 번째 시편의 잔류강도
$R_i(0)$: i 번째 시편의 상등극한강도
S	: 적용응력
x_i	: i 번째 시편의 극한강도
a	: 형상계수
β	: 규모계수
ω	: 하중주파수

1. 서 론

탄소섬유 복합재료는 비강도와 비강성이 높고 고강도 경량화를 위한 개발된 재료로 우수한 피로특성과 내마멸성, 내부식성, 진동감쇠성, 절연성 등이 좋은 특성을 지니고 있다.

또한 적층각 및 적층순서에 따라 적절한 강도와 강성을 갖는 재료로 설계 제작할 수 있는 장점과 적은 열팽창계수로 인하여 치수 안정성이 뛰어나기 때문에 항공 우주기기 및 자동차, 스포츠, 레저용품 등에 응용이 증가되어 가고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

그러나 이러한 장점과 수요의 증가에도 불구하고 복합재료는 매우 복잡한 파괴특성을 갖는 비균질 이방성 재료일 뿐만 아니라 재료물성, 파손거동과 피로수명 등에 대한 축적된 자료가 빈약하여 항공기나 우주기기와 같이 높은 신뢰성을 요구하는 구조에의 적용에 많은 제약을 받고 있는 실정이다.

따라서 이와같은 제약을 해소하고 신뢰성을 향상시켜 실구조 부재에 적용하기 위해서는 소재와 적층구조에 대한 많은 자료의 축적이 필요하며 피로 특성 및 손상거동에 대한 이해를 통해서 파손에 대한 저항이 최대가 되도록 설계하여야 한다^(5,6). 또한 복합재료를 사용한 구조물의 강도해석과 파손 및 피로수명을 예측하기 위해서는 여러가지 적층순서를 갖는 재료의 파손과정을 알고, 탄성한도 이내의 작은 하중영역에서도 발생할 수 있는 미시가지 크랙, 중간분리와 같은 파손이 반복하중을 받는 피로조건하에서는 어떠한 거동을 갖을 것인가에 대한 이해가 요구되고 있다.

대체로 반복 사이클의 초기 단계에서 미시 가지 크랙이 발생하는 복합재료의 피로거동은 금속이나 고분자(polymer)와 같은 등방성 재료와는 달리 최종 파손하중까지도 여전히 견딜 수 있는 특성이 있으며, 반복사이클 수의 증가에 따라 잔류강도 및

강성, compliance, 변형률, 크랙길이, 크랙밀도, debond된 섬유 수 등과 같은 재료의 많은 변수들이 상호 일정한 함수 관계를 갖는 것으로 알려져 있다^(7,8).

피로 하중하에서 복합재료의 잔류강도저하에 대한 연구는 1972년 Broutman과 Sahu⁽⁹⁾에 의해 시작되었으며 이들은 피로 사이클의 함수로서 잔류강도에 대한 선형 방정식을 제안하였다. Hahn과 Kim⁽¹⁰⁾은 1975년 잔류강도의 기울기가 잔류강도의 멱함수(power function)에 역비례한다고 가정하여 비선형 잔류강도 저하식을 제안하였다. 그들은 잔류강도 저하식과 정적 강도분포로부터 피로수명을 유도하고 정적강도와 피로수명이 와이블 분포로 나타내질 수 있음을 보였다.

Yang 등^(11,12)은 1977년부터 발표한 일련의 연구를 통하여 이론적 잔류강도 저하모델을 정립하고 일정 진폭 피로 하중하에서 노치가 없는 graphite/epoxy 적층판의 실험 결과와 이 모델이 상당한 관련을 갖고 있음을 밝혔다. 또한 복합재료의 취약한 시편을 제거하고 일정한 정도의 신뢰도를 부여하기 위하여 주기적 내력 시험이론을 도입하고 실험조건을 변화하면서 실험을 수행하였다.

1978년 Chou 등^(13,14)은 Hahn과 Yang이 사용한 가정을 기초로 피로 사이클이 증가함에 따라 잔류강도가 단조적으로 조금씩 감소하는 단조감소 저하모델(monotonically decreasing degradation model)과 조금씩 감소하는 것이 아니라 피로수명에 접근되면 불과 몇 사이클 이내에서 급격히 감소하여 파손되는 급격파손모델(sudden death model)을 제안하였다.

이들은 graphite/epoxy 복합재료의 실험에서 급격파손모델은 일방향 섬유강화 적층판에 적합하고, off-axis를 포함하는 적층판에 대해서는 저하모델이 급격파손모델보다 우수함을 보고하였다.

국내에서는 1991년 이등⁽¹⁵⁾에 의해 복합재료의 피로거동과 수명 분포에 관한 연구가 유일하게 발표된 바 있으나, 잔류강도 저하해석에 의한 피로특성의 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 피로 잔류강도저하(fatigue residual strength degradation) 개념을 이용하여 복합재료의 잔류강도와 피로수명을 예측하고 실험을 통하여 비교 평가하였으며, 설계시 고려되어야 할 인자를 파악하여 파손방지를 위한 유한수명설계 및 손상허용설계의 기본자료를 집적함으

로서 새로운 소재인 탄소섬유 강화 복합재료의 신뢰성 향상을 위한 개발과 고강도 경량화를 위한 응용설계에 활용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

2. 잔류강도 저하해석

잔류강도 저하해석에 대한 기본적인 가정은 “잔류강도가 적용응력에 도달했을 때 파손이 일어난다”는 것이다. 노치가 없는 복합적층판이 일정진폭의 반복하중을 받을 때 n 사이클 후의 잔류강도 $R(n)$ 은 반복 사이클 n 에 대해 단조 감소 함수임이 알려져 있다. Yang 등^(11,12)은 이때 n 에 대한 $R(n)$ 의 변화율이 잔류강도 $R(n)$ 의 역에 반비례한다고 가정하여 $R(n)$ 의 기울기를 식 (1)로 표시하였다.

$$\frac{dR(n)}{dn} = -\frac{f(s, \omega, r)}{CR^{(c-1)}(n)} \quad (1)$$

식 (1)을 간략하게 하기 위해 주파수 ω 와 응력비 r 을 일정하게 고정하고 사이클 수 0에서 n 까지 적분하면 식 (2)와 같다.

$$R^c(n) = R^c(0) - f(s) \cdot n \quad (2)$$

여기서 강도저하의 형상(Shape)은 상수 c 에 의존함을 알 수 있다. 또한, 극한강도 $R(0)$ 의 통계적 분포가 2모수 Weibull 분포를 따른다고 가정하면 식 (3)이 된다.

$$F_{R(0)}(x) = P[R(0) \leq x] = 1 - \exp[-(x/\beta)^a] \quad (3)$$

피로파손은 n 사이클 후의 잔류강도, $R(n)$ 이 점차 감소하여 적용응력, S 와 같아질 때 일어나므로 피로 파괴시의 잔류강도는 적용응력과 같고 반복 사이클 수는 피로 수명과 같다.

따라서 식 (2)에 $R(n) = S$, $n = N$ 을 대입하면 피로 파손까지의 사이클 수 N 을 얻게 된다.

$$N = [R^c(0) - S^c]/f(s) \quad (4)$$

파손까지의 사이클 수 N 의 통계적 분포는 식 (5)로 표시된다.

$$\begin{aligned} F_N(n) &= P[N \leq n] = P\{[R^c(0) - S^c]/f(s) \leq n\} \\ &= P\{R(0) \leq \{nf(s) + S^c\}^{1/c}\} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (3)을 대입하면 식 (6)이 된다.

$$\begin{aligned} F_N(n) &= 0 & n < 0 \\ F_N(n) &= 1 - \exp\left[-\left\{\frac{n + \frac{S^c}{f(s)}}{\frac{\beta^c}{f(s)}}\right\}^{\frac{a}{c}}\right] & n \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

따라서, 피로수명 N 의 통계적 분포가 3모수 Weibull분포임을 알 수 있다.

2.1 저응력 진폭 피로

최대응력진폭이 아주 낮을 때에는 $(S/\beta)^c \ll 1$ 이 되므로 식 (6)은 식 (7)과 같이 된다.

$$F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{n}{\frac{\beta^c}{f(s)}}\right\}^{\frac{a}{c}}\right] \quad (7)$$

이때 피로수명 N 의 통계적 분포는 2모수 Weibull 분포가 되며, 종래의 $S-N$ 관계식으로부터 규모계수(특성수명)을 구하면 식 (8)로 쓸 수 있다.

$$N = (KS^b)^{-1} = \beta^c/f(s) \quad (8)$$

이를 정리하여 식 (2)에 대입하면 일정진폭 반복하중 하에서 잔류강도를 나타내는 식이 된다.

$$R^c(n) = R^c(0) - \beta^c KS^b n \quad (9)$$

2.2 고응력 진폭 피로

고응력 진폭 피로 조건하에서는 비록 c 값이 크다고 할지라도 $(S/\beta)^c$ 가 무시되어질 수 없다. 따라서

$$(S/\beta)^c = \gamma, \quad \beta^c/f(S) = N_i \quad (10)$$

으로 놓고 새로운 임의변수 \bar{N} 를 도입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{N} = N + \gamma N_i \quad (11)$$

따라서 식 (1)로부터 변형될 피로수명 \bar{N} 의 통계적 분포를 구할 수 있다.

$$F_{\bar{N}}(n) = P[\bar{N} \leq n] = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{n}{N_i}\right)^{a/c}\right\} \quad (12)$$

종래의 $S-N$ 관계식에서 규모계수를 구하면 식 (8), (10)에 의해 식 (13)을 얻는다.

$$R^c(n) = R^c(0) - \beta^c KS^b n \quad (13)$$

식 (9)와 식 (13)에서 상수 k 와 b 의 의미는 다르지만 형태는 같다. 이것은 식 (9)의 피로 잔류강

도 저하모델의 형태가 저응력진폭 및 고응력진폭 피로에 모두 사용되어질 수 있음을 의미하는 것이다.

따라서 n 사이클 후의 잔류강도 $R(n)$ 의 통계적 분포는 식 (13)의 변환을 통해 식 (2)에 의해 주어진 $R(n)$ 의 통계적 분포로부터 얻어진다.

$$\begin{aligned} F_{R(n)}(x) &= P[R(n) \leq x] = P[R^c(0) - K\beta^c S^b n \leq x^c] \\ &= P[R(0) \leq (x^c + K\beta^c S^b n)^{1/c}] \\ &= 1 - \exp\left[-\left\{\frac{x^c + K\beta^c S^b n}{\beta^c}\right\}^{a/c}\right] \end{aligned} \quad (14)$$

피로 파손까지의 사이클 수 N 은 파괴조건, $n = N$, $R(n) = S$ 를 식 (13)에 대입하면 된다.

$$N = \frac{R^c(0) - S^c}{\beta^c K S^b} \quad (15)$$

또한 피로수명 N 의 통계적 분포는 식 (15)의 변환에 의해 식 (2)의 정적강도 $R(0)$ 로부터 얻어지게 된다.

$$\begin{aligned} F_N(n) &= P[N \leq n] = P[R(0) \leq (nK\beta^c S^b + S^c)^{1/c}] \\ &= 1 - \exp\left[\left\{\frac{(nK\beta^c S^b + S^c)}{\beta^c}\right\}^{a/c}\right] \\ &= 1 - \exp\left[-\left\{\frac{n + \frac{S^c}{K\beta^c S^b}}{\frac{1}{K\beta^c S^b}}\right\}^{\frac{a}{c}}\right] \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)은 피로수명분포가 $-\frac{S^c}{\beta^c K S^b}$ 에서 최저값을 가지는 3모수 Weibull 분포임을 의미한다.

3. 재료 및 실험방법

3.1 시편의 성형제작

본 실험에 사용된 시편은 한국화이버(주)에서 탄소섬유/에폭시 프리프랙을 (0/45/90/-45)_{2s}로 16 ply를 적층하고 섬유의 체적비가 약 60%가 되도록 autoclave에서 성형하여 두께 2mm의 적층판으로

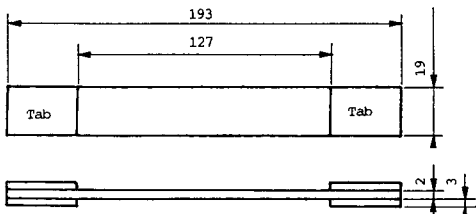


Fig. 1 Configuration of fatigue test specimen

제작한 것이다. 시편의 형상과 크기는 ASTM D3479-76에서 추천하는 Fig. 1과 같은 것을 사용하였다. 또한 그림과 반복하중에 의한 손상으로부터 시편을 보호하기 위하여 양단에 두께 3mm의 에폭시 tab을 부착하였고, 자유단의 손상영역을 제거하기 위하여 #1200에머리 페이퍼로 연마하여 시편을 완성하였다.

3.2 실험방법

본 실험에 사용된 장비는 5톤 로드셀이 부착된 만능시험기(Tensilon/UTM-1-10000C)와 전기유압식(electro-hydraulic servo-pulser) 피로시험기(SHIMADZU사: Model EHR-20)이다. 피로시험은 하중제어(load control)방식으로 파형은 정현파(sine파), 응력비 $r=0.1$, 적용응력(S)는 극한강도의 0.6, 0.6375, 0.675, 0.7125, 0.75, 0.825의 수준이 되도록 하고 각 응력수준에 따라 각각 10개의 시편을 실험하였다. 열가소성 수지나 E glass cross ply 등에 있어서는 손상률(damage rate)이 주파수에 의존하여 피로수명에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나⁽⁵⁾, 0° ply를 포함하는 탄소섬유 복합재료에 대해서는 15Hz~30Hz까지는 그 영향을 무시할 수 있는 것으로 보고되고 있기 때문에 본 실험에서는 주파수를 4Hz로 일정하게 하여 실험하였다^(2,16).

4. 결과 및 고찰

피로 잔류강도 저하모델(fatigue residual strength degradation model)의 해석에 의한 잔류강도 및 피로수명의 분포특성을 예측하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상과 치수를 갖는 시편을 실험하여 얻은 정적 극한강도 및 피로수명은 Table 1, 2와 같다.

정적 극한강도 및 피로수명은 주로 lognormal이나 Weibull분포를 따르는 것으로 보고되어 있으며 이 분포함수들의 계수를 결정하기 위한 방법으로는 모멘트 법, 최우추정법, 비선형 회귀해석 등이 있다. 식 (16)으로 표시되는 피로수명의 분포특성을 규명하기 위해서는 식 (3)과 같은 누적 분포함수를 갖는 2모수 Weibull 분포로부터 정적 극한강도의 형상계수 a 및 규모계수 β 를 결정하고 식 (9)로 표시되는 n 사이클 후의 잔류강도와 정적 극한강도의 관계를 규명하여야 한다.

2모수 Weibull분포를 갖는 정적 극한강도의 형

상계수, 규모계수의 결정에는 주로 식 (17)로 표시되는 최우추정법(maximum likelihood method)이 사용되어 왔다. 그러나 본 연구에서는 최우추정법 및 비선형 회귀해석에 의해 결정하였는데 최우추정법으로 구한 형상계수 및 규모계수는 $\alpha_M = 30.74$, $\beta_M = 596.5\text{MPa}$ 이었고, 비선형 회귀해석으

로 구한 형상계수 및 규모계수는 $\alpha_R = 37.02$, $\beta_R = 593.3$ 이었다.

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i^a \ln X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^a} - \frac{1}{a} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln X_i}{n} = 0$$

$$\beta = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^a \right)^{1/a} \tag{17}$$

Table 1 Static ultimate strength data for carbon/epoxy (0/45/90/45)_{2s}

No	Static ultimate strength, MPa	No	Static ultimate strength, MPa
1	609.1	10	599.9
2	595.1	11	589.9
3	576.5	12	589.0
4	573.8	13	586.6
5	579.7	14	585.5
6	601.2	15	583.3
7	541.6	16	581.4
8	615.0	17	567.3
9	629.1	18	561.3

Mean : 586.96MPa
Standard deviation : 19.70MPa

Table 2 Fatigue life data for carbon/epoxy (0/45/90/-45)_{2s}

Stress level	Fatigue life
483.7 (0.825)	1625, 3739, 3973, 2168, 5027, 2923, 2614, 3186, 884, 4418
439.8 (0.75)	11305, 12980, 9908, 16428, 5449 14542, 6829, 8909, 20114, 17920
417.8 (0.7125)	42489, 12287, 34210, 23288, 17409 21258, 26910, 49210, 37398, 29820
395.8 (0.675)	89200, 54802, 90310, 44750, 60929 105190, 35535, 121330, 78829, 70320
373.8 (0.6375)	130924, 116276, 258295, 124775, 168890 196510, 273200, 213312, 316314, 72300
351.8 (0.6)	472975, 371154, 654892, 682293, 1252705 989052, 1045159, 556378, 791254, 887590

Fig. 2는 최우추정법에 의해 결정된 형상계수 α_M , 규모계수 β_M 을 이용하여 정적 극한강도의 누적 분포함수를 구하고 식 (18)로 정의된 중앙순위

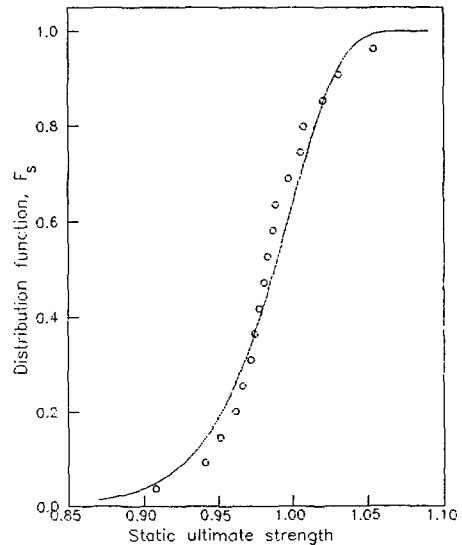


Fig. 2 Comparison between theoretically predicted and measured two parameter Weibull distributions for static ultimate strength

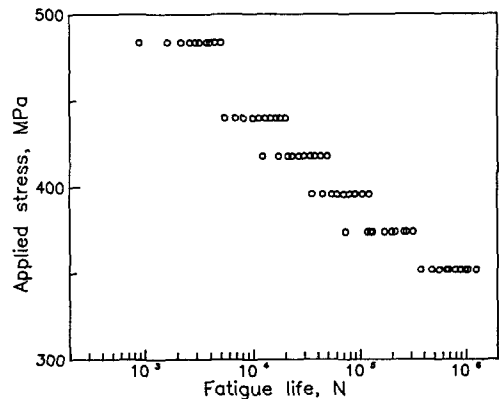


Fig. 3 Correlation between stress level and fatigue life in carbon/epoxy (0/45/90/-45)_{2s}

(median rank)를 사용하여 파손확률(probability of failure)로 환산된 실험값을 나타낸 것이다.

$$P_i = \frac{J_i - 0.3}{J + 0.4} \quad (18)$$

최우추정법이나 비선형 회귀해석에 의해 구한 정적 극한강도의 형상계수는 모두 30이상으로 좁은 영역에 분포하고 있으며 비교적 정확히 예측하고 있었다.

Fig. 3은 Table 2의 피로수명과 적용응력수준 S 사이의 관계를 나타낸 것인데, 응력수준에 따른 피로수명은 S - $\ln N$ 좌표에서 대체로 선형적인 분포를 보이고 있었다.

또한 n 사이클 후의 잔류강도를 나타내는 식 (9)에서 피로파손이 발생되었을 때의 사이클수 n 은 피로수명 N 과 같으며, 이때 잔류강도 $R(n)$ 은 적용응력수준 S 와 같게 된다. 각 응력수준에서 피로수명의 형상계수 α_i 가 같다고 가정하면 전체 피로수명에 대한 형상계수 α_f 는 각 응력수준에서 피로수명을 $Y_{ij} = \frac{X_{ij}}{\beta_i}$ 로 normalizing하여 이에 대한 최우추정법, 식 (19), (20)에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{\alpha_f} \ln Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij}} \frac{1}{\alpha_f} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln Y_{ij}}{mn} = 0 \quad (19)$$

$$\beta_i = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij}^{\alpha_f} \right)^{1/\alpha_f} \quad (20)$$

이때 피로수명의 분포는 식 (16) 또는 식 (21)으로 표현되므로 $C = \frac{\alpha_f}{\alpha_f}$ 가 된다.

$$F_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{N} \right)^{\alpha_f} \right] \quad (21)$$

전체 피로수명 데이터가 식 (22)를 따른다고 가정하고 식 (23)으로 변환하여 b 와 k 를 구할 수 있으며 그 결과는 Table 3과 같았다.

Table 3 Material constants in residual strength equations

Constants	c	b	K
Maximum likelihood method	12.387	15.667	2.97×10^{-50}
Nonlinear regression method	12.387	17.161	4.61×10^{-50}

$$kS^b N = 1 \quad (22)$$

$$\ln \beta_i = -b \ln S - \ln k \quad (23)$$

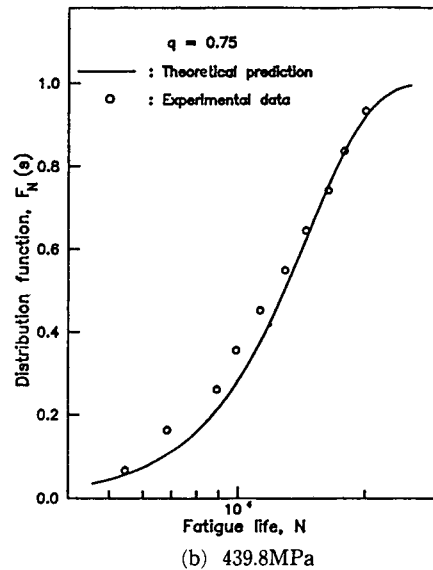
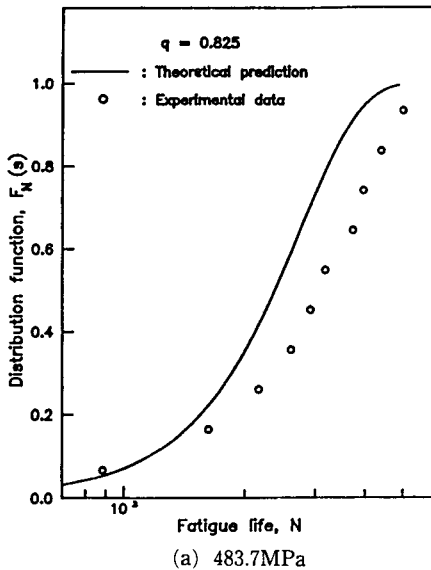
Table 4는 여러 연구자들의 의해 최우추정법으로 결정된 Weibull 상수들을 표시한 것이다^(2,13). 여기서는 적층순서 및 실험조건이 상이하기 때문에 정적강도, 피로수명등을 직접 비교하는 것은 곤란하나, 형상계수가 증가할수록 분산은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, (0°)만으로 적층된 재료보다는 준등방성 적층일수록 형상계수가 증가하고 편차가 감소하는 안정된 실험결과를 보이고 있었다. Alpler등⁽¹⁴⁾은 일방향 적층판에 대한 내구성시험 (proof test)이 형상계수를 증가시키기를 보고하였다. 또한 Park등⁽¹⁷⁾도 여러가지 복합재료의 통계적 특성에 대한 연구를 통하여 피로수명의 형상계수는 $1 \leq \alpha \leq 4$ 이고 정적 극한강도에 대한 형상계수는 $4 \leq \alpha \leq 30$ 임을 발표하였다. 이는 본 실험결과 얻은 정적 극한강도와 피로수명의 형상계수 30.7, 1.95와 비교하여 볼 때, 피로수명의 형상계수는 Park 등의 연구와 유사한 경향을 갖는 것으로 보여지나, 정적 극한강도의 형상계수는 비교적 크며 분산은 매우 적은 편으로 안정된 정적 강도특성을 갖는 것을 알 수 있었다.

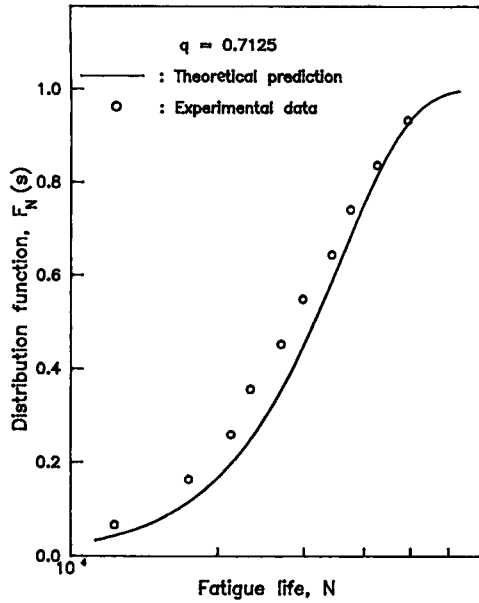
Fig. 4의 (a)~(f)는 Table 3의 c, b, K 를 이용하여 각 응력수준에서 피로수명의 누적 분포함수와 중앙순위에 의한 실험결과의 파손확률을 나타낸 것이다.

Fig. 4의 (a)에서 보듯이 응력수준 0.825(483.7 MPa)에서 피로수명의 누적 분포함수는 실험치의 파손확률보다 훨씬 안전하게 예측하고 있었으나, 파손강도에 비해 적용응력 수준이 높기 때문에 신뢰성이 다른 영역에 비해 저하된 것으로 판단된다. 일반적으로 피로수명 평가에 대한 적용응력수준은 0.6~0.9의 범위에서 이루어 지고 있으나, 높은 적용응력에서의 신뢰성과 실제 사용될 피로응력 등을 고려할 때 0.75이하의 적용응력에 대한 피로수명의 평가가 유용할 것으로 보여진다. (b)~(e)는 응력수준 0.75(439.8MPa), 0.7125(417.8MPa), 0.675(395.8MPa), 0.6375(373.8MPa)에서 식 (16)에 의해 예측된 누적 분포함수와 실험치의 파손확률을 비교한 것인데 비교적 잘 일치하고 있으며, 이 구간에서는 응력수준이 감소함에 따라 실험치에 의한 파손확률이 점차 증대되고 있었다. 또한 응력수준이 0.6375(373.8MPa) 부근에서 누적 분포함수에 의해 예측된 피로수명은 실험결과 보다

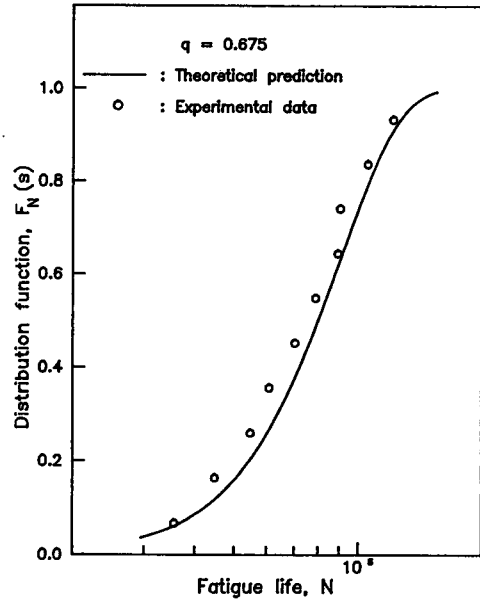
Table 4 Comparison of estimated Weibull parameters by maximum likelihood method * $q=0.7125$

Item	Yang-Liu	Rider-Walker	Rider-Walker	Awerbuc h-Hahn	Wang	R. Kim	present
Material	Graphite /epoxy	Graphite /epoxy	Graphite /epoxy	Graphite /epoxy	Graphite /epoxy	Graphite /epoxy	Carbon /epoxy
Stacking sequence	(0/90/ ± 45) _s	(0/45/90 /-45 ₂ /90 /45/0) _s	(0/45/0 ₂ / -45/0 ₂ /45/ 0 ₂ /-45/0) _s	(0) _{10T}	(0) _{6T}	(0/90/ ± 45) _s	(0/45/90 /-45) _{2s}
Frequency Hz	20	10	10	33	9.5	10	4
Stress ratio	0.1	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1
Stress level	0.7	0.723	0.7	0.65	0.7	5 step	6 step
Mean strength	519.7	477.1	976.9	1354.7	1461.5	581.0	586.3
Standard deviation	44.0	23.4	64.1	189.6	165.5	—	19.7
Shape parameter	15.3	23.9	16.8	9.7	10.2	18.0	30.7
Scale parameter	538.4	487.4*	1005.8	1430.5	1532.5	598.4	596.5
Sample mean	0.965	0.979	0.971	0.947	0.954	0.971	0.983
Fatigue shape parameter	1.18	1.31	0.30	0.75	0.94	1.95	2.71
Fatigue scale parameter	1.65 $\times 10^5$	1.28 $\times 10^5$	8.54 $\times 10^8$	1.92 $\times 10^6$	1.27 $\times 10^6$	39834*	33064*
Ratio of shape parameter	13.0	18.2	56.1	12.9	10.8	9.23	11.34

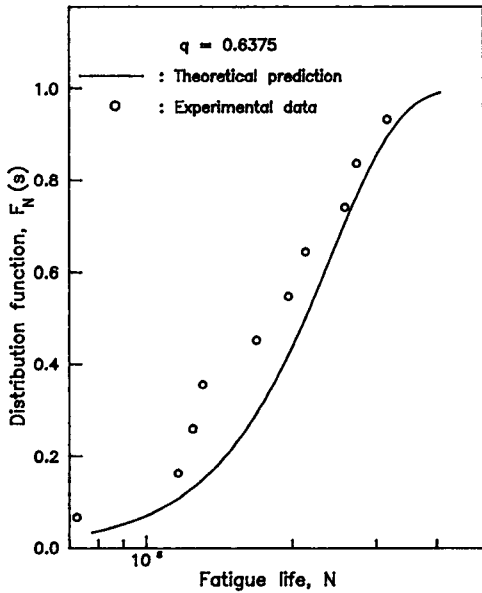




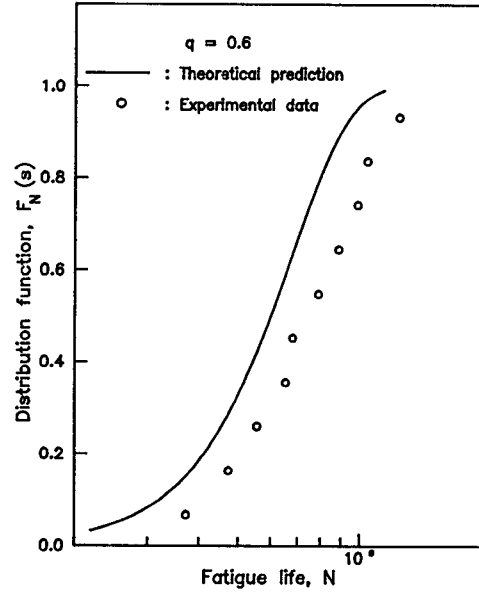
(c) 417.8MPa



(d) 395.8MPa



(e) 373.8MPa



(f) 351.8MPa

Fig. 4 Comparison between theoretically predicted and measured two parameter Weibull distribution in fatigue life at applied cyclic stresses

게 평가되었고 다른 응력수준에 비해 많은 분산 보이고 있으므로 안전 허용설계에 유의하여야 것으로 사료된다. 그러나 0.6(351.8MPa)에서 지금까지의 경향과는 반대로 실험치의 파손확률

이 누적 분포함수보다 크게 평가되었는데 이는 피로수명의 급격한 증가에도 불구하고 규모계수를 종래의 $S-N$ 관계의 직선에 의해 결정하였고, 수명이 피로한도에 접근하고 있기 때문인 것으로 생각

된다. 또한 피로한도로 일컬어지고 있는 $10^6 \sim 10^7$ 사이클을 상회할 것으로 추정되는 적용응력수준 0.5~0.6영역에서의 잔류강도 및 잔류강성의 저하와 피로수명의 예측등은 아직 시도된 바 없으나 무한 수명설계를 위한 기초자료로서 앞으로의 연구가 기대되어지며, 저 응력수준의 안전한 피로사이클에서도 발생되고 있는 손상에 대한 파손과정의 이해는 문제 해결에 중요한 요인이 될 것이다.

이상에서 살펴본 바와같이 탄소섬유/에폭시(0/45/90/-45)_{2s} 복합재료는 응력수준 0.6375이하에서 Yang등^(11,13)의 결과에 비해 거의 같은 수준의 정적 극한강도에도 불구하고 피로수명이 매우 작게 평가되었다. 이와 같은 피로수명의 감소는 취성이 큰 기지의 영향이라 여겨지며, Hahn⁽⁵⁾도 유리섬유/에폭시, 보론섬유/에폭시 등의 off axis, angle ply, 다방향 적층판에 대한 실험에서 정적강도는 섬유의 강도에 의해 영향을 받고 피로수명은 기지에 의해 지배되기 때문에 고강도의 섬유로 보강된 적층판의 강도는 크나, 강한 기지를 사용한 복합재료는 취성 파괴에 의해 유발되는 크랙진전률을 증가시켜 피로에 민감한 결과를 초래하고 피로수명을 감소시키는 요인임을 발표한 바 있다. Fig. 5는 Table 3과 같이 결정된 상수 c, b, K 를 이용하여 식(9)에 의해

Table 5 Residual strength after 15000 fatigue cycles at $S=373.8\text{MPa}$

Residual	581.3	557.0	537.1	626.5
strength(MPa)	514.0	525.2	545.1	472.4

피로 수명으로부터 환산된 정적 극한강도, $R(0)$ 의 파손확률과 정적 극한강도에 대한 2모수 Weibull 누적 분포함수를 나타낸 것이다. 분산성이 큰 복합재료의 피로 특성에 비추어 볼 때 정적 극한강도의 누적 분포함수에 의한 예측곡선과 피로수명으로부터 환산된 극한강도(converted ultimate strength)의 파손확률 관계는 양호하였으며, 따라서 탄소섬유/에폭시 복합재료의 피로 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명 분포특성 모델은 타당성이 있는 것으로 판단된다.

아울러 이론적 모델의 유용성은 c, b, K 값의 결정에 의해 예측된 피로수명과 임의의 반복 사이클에서 잔류강도의 통계적 분포가 실험결과에 의해 입증되어야 하며, 이를 위하여 8개의 시편에 대한 잔류강도를 실험하였다. 적용응력수준 $S=373.8\text{MPa}$ 에서 응력비 $r=0.1$, 주파수 4Hz로 15000사

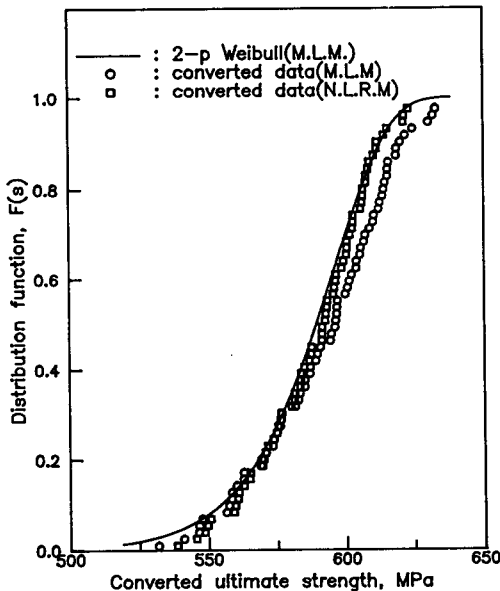


Fig. 5 A two parameter Weibull distribution of ultimate strength converted from tension-tension fatigue data

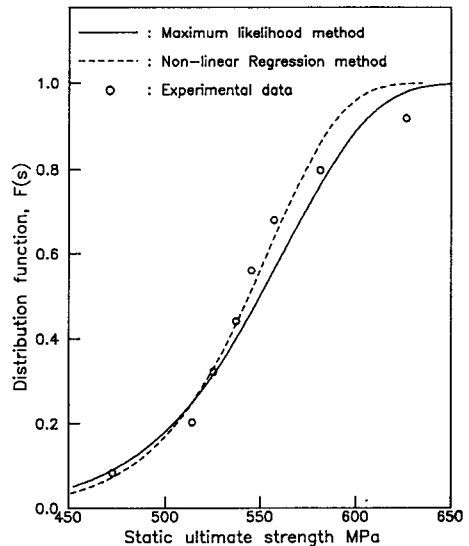


Fig. 6 Two parameter Weibull distribution of residual strength for (0/45/90/-45)_{2s} carbon/epoxy laminates after 15000 fatigue cycles at the applied stress of 373.8 MPa

이들까지 반복 피로하중을 가한 후 정적으로 인장하여 측정된 잔류강도는 Table 5와 같았다.

Fig. 6은 잔류강도의 평가를 위하여 식(14)에 의한 n 사이클 후의 잔류강도 $R(n)$ 의 통계적 누적 분포함수와 실험으로부터 측정된 잔류강도의 파손 확률을 나타낸 것이다. 적은 시편수에 비하여 분포함수와 실험결과 사이에는 비교적 양호한 관계를 나타내고 있었다. 또한 15000사이클 후의 피로파손 가능성을 식(14)로부터 계산하면 0.0678이 된다. 여기서 예측되어지는 파손된 시편의 수는 파손확률 0.0678×8 에 의해 0.542가 되어 8개의 시편 중 1개라도 파손이 일어날 확률은 54.2%였으나, 실제 실험결과 15000 사이클에서 파손된 시편은 없었다.

이와 같은 결과는 Yang J.N. 등⁽¹¹⁾이 8개의 시편에 대해 적용응력수준 0.7에서 26000 사이클을 가한 후 측정된 잔류강도의 분포특성과 유사한 것이었다. 그러나 잔류강도 저하해석에 의한 모델의 유용성을 타당성 있게 입증하기 위해서는 보다 더 많은 시편에 대한 실험이 수반되어야 할 것으로 여겨진다.

5. 결 론

탄소섬유/에폭시(0/45/90/-45)_{2s} 복합재료를 사용하여 응력비 0.1, 파형은 정현파, 하중 주파수 4 Hz의 조건하에서 피로실험을 수행하고 잔류강도의 저하와 피로수명을 측정하였다. 또한 이론모델에 의해 예측된 잔류강도와 피로수명을 실험결과와 비교하고, 이들의 분포특성을 통계적 누적분포함수와 중앙순위에 의한 파손확률을 이용하여 분석한 결과를 비교·고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에 사용된 탄소섬유/에폭시(0/45/90/-45)_{2s} 복합재료의 정적 극한강도는 기존의 실험결과보다 비교적 크게 평가되었으나 기지에 민감한 피로 수명은 기지의 취성으로 인하여 매우 적게 평가되었다.

(2) 응력수준 0.6375 이상에서의 피로수명은 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명의 통계적 누적 분포함수보다 대체로 적었으나, 0.6에서의 피로수명은 급격히 증가하고 있었다.

(3) 정적 극한강도의 누적분포함수와 피로수명으로부터 환산된 극한강도는 양호한 상관관계를 가지며, 잔류강도의 분포도 실험결과와 비교적 양호한 관계를 갖고 있었다. 따라서 피로 잔류강도 저하해

석에 의한 피로수명과 잔류강도의 통계적 분포특성을 타당성이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Jones, R.M., 1975, "Mechanics of Composite Materials," McGraw-Hill Book Company, New York.
- (2) Tsai, S.W., 1987, "Composite Design," 3rd Ed., Think Composites, Dayton, Ohio.
- (3) Tsai, S.W. and Hahn, H.T., 1980, "Introduction to Composite Materials," Technomic Publishing Co., Westport, Connecticut.
- (4) Chamis, C.C., 1989, "Mechanics of Composite Materials : Past, Present and Future," J. of Composite Technology and Research, pp.3~14.
- (5) Hahn, H.T., 1979, "Fatigue Behavior and Life Prediction of Composite Laminates," Composite Materials : Testing and Design (5th Conference), ASTM STP 674, pp.383~417.
- (6) Yang, J.N., Yang, S.H., and Jones, D.L., 1989, "A Stiffness Based Statistical Model for Predicting the Fatigue Life of Graphite/Epoxy Laminates," J. of Composites Technology & Research, Vol.11, No.4, pp.129~134.
- (7) Talreja, R., 1985, "Transverse Cracking and Stiffness Reduction in Composite Laminates," J. of Composite Materials, Vol.19, pp.355~375.
- (8) Wang, A.S.D. and Croman, F.W., 1980, "Initiation and Growth of Transverse Cracks and Edge Delamination in Composite Laminates Part 1 An Energy Method," J. of Composite Materials Supplement, Vol. 14, pp. 71~87.
- (9) Broutman, L.J. and Sahu, S., 1972, "a New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforced Plastics," Composite Materials : Testing and Design(2nd Conference), ASTM STP 497, pp. 170~188.
- (10) Hahn, H.T. and Kim, R.Y., 1975, "Proof Testing of Composite Materials," J. of Composite Materials, Vol.9, pp.297~311.
- (11) Yang, J.N. and Liu, M.K. 1977, "Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Lami-

- ates," J. of Composite Materials, Vol.11, pp.176~203.
- (12) Yang, J.N., Jones, D.L., 1980, "Effect of Load Sequence on the Statistical Fatigue of Composites," AIAA Journal, Vol.18, No.12, pp.1525~1531.
- (13) Chou, P.C., and Croman, R., 1979, "Degradation and Sudden-Death Models of Fatigue of Graphite/Epoxy Composites," Composite Materials : Testing and Design (5th Conference), astm STP 674, pp. 431~454.
- (14) Wang, S.D., Chou, P.C. and Alper, J., 1981, "Effects of Proof test on the Strength and Fatigue Life of a Unidirectional Composite," Fatigue of Fibrous Composite Materials, ASTM STP 723, pp. 116~132.
- (15) 이창수, 황운봉, 한경섭, 윤병일, 1991, "탄소섬유강화 복합적층파의 피로 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제15권, 제1호, pp. 49~60.
- (16) Sun, C.T. and Chang, W.S., 1979, "Frequency Effect on the Fatigue Life of a Laminated Composite," Composite Materials : Testing and Design (5th Conference), ASTM STP 674, pp. 418~430.