

論文

복합재료의 피로손상 모형 및 다응력 수위 피로수명 예측 연구 (II)
- 참고계수를 이용한 피로 손상 모형 -

이창수* · 황운봉* · 한경섭*

Study on Fatigue Damage Model and Multi-Stress Level Fatigue Life
Prediction of Composite Materials (II)
- Fatigue Damage Model using Reference Modulus -

C. S. Lee*, W. Hwang* and K. S. Han*

ABSTRACT

During fatigue loading of composite materials, damage accumulation can be monitored by measuring their material properties. In this study, fatigue modulus is used as the damage index. Fatigue life of composite materials may be predicted analytically using damage models which are based on fatigue modulus and resultant strain. Damage models are proposed as functions of applied stress level, number of fatigue cycle and fatigue life. The predicted life was comparable to the experimental result obtained using E-glass fiber reinforced epoxy resin materials and pultruded glass fiber reinforced polyester composites under two-stress level fatigue loading.

초 록

복합재료가 피로하중을 받으면 재료 내부에 손상이 누적되며, 이는 재료의 물성 변화로 나타난다. 본 연구에서는 손상을 나타내는 인자로 피로계수를 사용하였다. 피로계수와 참고계수로 정의되는 손상함수로부터 복합재료의 피로수명 예측을 이론적으로 연구하였다. 제안된 모델들은 인가 응력 수준, 피로주기 및 피로수명의 함수로 유도하였다. 예측 결과는 유리섬유/에폭시 복합재료와 유리섬유/폴리에스터 복합재료를 사용한 다중응력 피로 실험 데이터를 이용하여 검증하였다.

1. 서 론

복합재료는 일반적인 금속재료보다 뛰어난 피로저항을 가지며, 금속재료와는 다른 파괴거동을 보인다. 금속의 피로파괴는 하나의 피로균열의 발생과 성장에 의해 지배되며, 파괴역학적인 해석에 의해 예측이 가능하다.

그러나 복합재료에 있어서 피로손상은 수많은 균열이 누적된 결과로서 기지균열(matrix cracking), 섬유와 기지간의 분리(debonding), 층간분리(delamination), 기공의 성장(void growth), 보강재 파단(fiber breakage) 등의 형태로 나타나며, 이들의 조합된 기구에 의해 피로파괴가 발생하므로 하나의 파단식으로 피로현

* 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

상을 표현하기는 어렵다. 또한, 섬유와 기지의 종류, 섬유의 배열 방향, 적층 순서 등에 따라 피로특성이 크게 바뀌게 된다. 섬유는 복합재료에서 많은 분율을 차지하며, 기지재료에 비하여 매우 큰 강도를 가지므로 구조물에 작용하는 대부분의 하중을 부담하게 된다. 따라서 피로하중의 경우에도 보강재의 피로특성이 복합재료의 피로특성을 좌우하게 된다. 탄소섬유의 피로저항은 매우 우수하나, 유리섬유는 탄소섬유에 비하여 피로하중에 약하며, 일반적으로 탄소계수가 클수록 높은 피로저항성을 가진다는 연구결과가 있다[1]. 재료 자체의 변수 외에도 평균응력, 진동수 등의 시험조건에 따른 피로특성의 변화도 크다[2, 3]. 이러한 복합재료의 고유한 특성으로 인하여 복합재료의 피로파괴 현상을 일반 재료 이론만으로는 해결할 수 없으며, 피로수명 예측 및 파손기구의 규명에는 많은 어려움이 있다. 따라서 복합재료의 피로수명의 예측을 위해서는 먼저 재료의 손상을 정의할 필요가 있다. 복합재료의 손상 정도를 나타내는 직접적인 물리량으로서 균열밀도, 균열길이, 기지와 분리된 섬유의 수, 층간 분리된 면적, 전기전도도 등이 있으며, 손상의 진전은 강도와 강성 등을 저하시키는 원인이 되므로 잔류강도, 잔류강성, 변형량 등의 물성값과 진동특성, 음향방출량 등의 피로 주기에 따른

변화량으로부터 손상을 정의할 수 있다[4]. 이들을 실험적으로 관찰, 측정하여 적당한 물질상수에 의하여 정의된 손상모형을 수식화하면 손상 정도와 피로수명의 예측이 가능해진다. 일반적인 손상형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 세 가지 영역으로 나타나므로 이를 손상 모형의 수식화에 응용하게 된다. 그림에서 CDS는 기지균열의 포화상태(characteristic damage state)를 나타내며, 이 상태에 도달하기까지 모재 내부에 미세 균열이 발생하게 되어 재료의 급격한 초기 손상 진행을 초래하게 된다. 균열 생성으로 인한 재료 내부의 응력 재분배를 겪는 동안 손상의 진전이 다소 완화되며, 최종적으로 급속한 재료의 파단에 이른다.

지금까지 다양한 잔류강도 저하 모형(residual strength degradation model)[5-10]과 잔류강성 저하 모형(residual stiffness degradation model)[11-14]이 제안되었고, 이로부터 피로수명 예측이 이루어졌다. 전자는 비파괴적 평가가 불가능한 반면, 후자의 경우는 피로시험 도중에 손상의 진전을 추적하는 비파괴적 평가가 가능하며, 강성은 강도보다 훨씬 작은 실험의 편차를 가진다는 이점이 있다. Broutman과 Sahu[5]는 유리섬유강화 복합재료에 대한 이중하중 수위의 피로 실험 결과는 Miner의 모델로 손상을 정의할 수 없으며, 복합재료의 피로수명 예측에 부적당함을 보였다. 또한, 잔류강도가 피로주기에 따라 연속적으로 감소함을 관찰하고, 선형 강도저하식을 이용하여 피로손상을 예측할 수 있는 누적 손상이론을 제안하였다. Hahn과 Kim[6], Yang 등[7]은 비선형 강도저하식을 연구하였다.

Charewicz와 Daniel[9]은 잔류강도와 동일 손상곡선의 개념을 바탕으로 한 누적손상모형을 제안하였다. Tsai 등[15]은 변형률만으로 표시되는 손상모형을 세우고, 경계조건을 적용함으로써 피로수명을 예측하였다.

본 연구의 제 I 편[17]에서는 단일 응력 수위의 피로수명 예측이 성공적으로 이루어졌다. 본 논문에서는 피로계수(fatigue modulus)와 합변형률(resultant strain)을 이용하여 제안된 손상모형[16]을 참고계수(reference modulus) 개념의 도입에 의해 피로주기와 작용응력 수위의 함수로 나타낸다. 이로부터 등가 손상량을 계산함으로써 다중 응력 수위의 피로수명과 손상을 계산한다. 여기서 제안된 네 가지의 다른 손상모형을 이용하여 이중응력 상태의 피로수명 예측을 수행하였으며, 제안한 손상모형은 실험을 통해 검증한다.

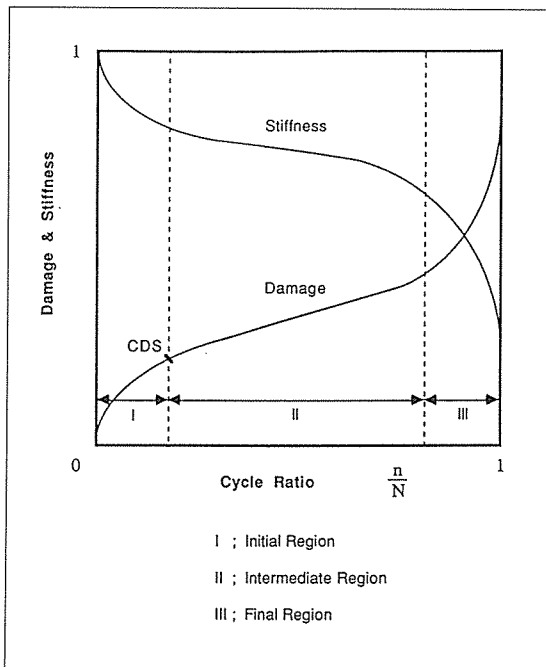


Fig. 1. Damage trend based on experimental results

2. 실험 방법

본 연구에 사용한 실험재료는 3M사가 제작한 일방향 배열의 유리섬유강화 에폭시이다. 피로실험은 MTS(유압식 재료시험기)를 사용하여 하중제어모드(load control mode)에서 정현파(sinusoidal wave) 형태의 하중을 가하여 실시하였다.

진동수는 실험도중 시편의 온도상승을 무시할 수 있는 1-3 Hz를 사용하였다. 누적 피로손상을 조사하기 위하여 네 가지의 이중응력 수위에서의 피로실험을 행하였다. 저-고 응력 수위의 실험은 먼저 낮은 응력($q_1 = 70\%$ UTS 또는 75% UTS)에서 일정한 수($n_1 = 10,000$ 또는 $5,000$)의 반복하중을 인가 후, 높은 응력($q_2 = 85\%$ UTS)에서의 잔류수명을 측정하였으며, 고-저 응력 수위의 실험은 이와 반대로 높은 응력($q_1 = 85\%$ UTS)에서 일정한 수($n_1 = 500$)의 반복하중을 인가 후, 낮은 응력($q_2 = 70\%$ UTS와 75% UTS)에서 파단이 일어날 때까지 실험을 행하였다.

3. 이론 해석

3.1 피로 누적 손상함수

하중이 반복됨에 따라 재료는 손상을 입게 되어 물성의 저하를 초래한다. 피로계수와 합변형률을 이용하여 초기조건($n=0$ 일 때, $D=0$)과 최종조건($n=N$ 일 때, $D=1$)을 만족하는 피로손상 D 를 다음과 같은 몇가지의 함수로 표현할 수 있다.

3.1.1 손상함수 I

피로주기에 따라 변하는 피로계수 F 를 이용하여 아래와 같이 재료의 피로손상 D 를 정의할 수 있다.

$$D = \frac{F_0 - F(n)}{F_0 - F_f} \quad (1)$$

여기서 F_0 는 초기 피로계수, F_f 는 파단시 피로계수, $F(n)$ 은 피로주기 n 일 때의 피로계수이다. 제 I 편[17]의 연구에서 참고계수(reference modulus) F_R 를 가정하고, 물질상수 p 와 적용된 응력수위 q 를 다음 식과 같이 두었다.

$$\frac{F_0}{F_R} = p \quad (2.a)$$

$$\frac{F_f}{F_R} = f(q) = q \quad (2.b)$$

식 (2)와 제 I 편[17]의 식 유도 절차에 의해 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{F(n)}{F_R} = \left(p^B - \frac{1}{M} n^C \right)^{\frac{1}{B}} \quad (3)$$

여기서 B, C, M 은 재료상수이다. 식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 피로 손상식을 얻는다.

$$D = \frac{1}{p-q} \left[p - \left(p^B - \frac{1}{M} n^C \right)^{\frac{1}{B}} \right] \quad (4)$$

3.1.2 손상함수 II

피로 손상 D 는 파단변형률에 대한 n 번째 주기의 변형률 $\epsilon(n)$ 의 비로써 수식화 할 수 있다.

$$D = \frac{\epsilon(n)}{\epsilon_f} \quad (5)$$

피로계수의 개념에 의하여 인가 응력과 변형률의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_a = F(n) \epsilon(n) \text{ at } n \text{ cycles} \quad (6.a)$$

and

$$\sigma_a = F_f \epsilon_f \text{ at failure} \quad (6.b)$$

식 (6)을 이용하면 식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{F_f}{F(n)} \quad (7)$$

식 (2.b)와 식 (3)을 위의 식에 대입하여 정리하면, 다음과 같은 피로손상식을 얻는다.

$$D = q \left[\frac{1}{\left(p^b - \frac{1}{M} n^c \right)} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (8)$$

3.1.3 손상함수 III
 피로 손상 D는 아래와 같이 정의될 수 있다

$$D = \frac{\varepsilon(n) - \varepsilon_o}{\varepsilon_f - \varepsilon_o} \quad (9)$$

식 (2)와 식 (6)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$D = \frac{q}{p-q} \left[\frac{F_o}{F(n)} - 1 \right] \quad (10)$$

식 (2.a)와 식 (3)을 다시 적용함으로써 위 식은 다음과 같이 정리된다.

Table 1. Cumulative damage models using fatigue modulus degradation models

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
	$\frac{F_o - F(n)}{F_o - F_f}$	$\frac{\varepsilon(n)}{\varepsilon_f}$	$\frac{\varepsilon(n) - \varepsilon_o}{\varepsilon_f - \varepsilon_o}$	$\frac{F_o^b - F^b(n)}{F_o^b - F_f^b}$
1. $\frac{dF}{dn} = -A \frac{Cn^{c-1}}{BF^{b-1}}$	$\frac{1}{p-q} \left[p - \left(p^b - \frac{n^c}{M} \right)^{\frac{1}{b}} \right]$	$q \left[\frac{1}{p^b - \frac{n^c}{M}} \right]^{\frac{1}{b}}$	$\frac{q}{p-q} \left[\frac{p}{\left(p^b - \frac{n^c}{M} \right)^{\frac{1}{b}}} - 1 \right]$	$\left(\frac{n}{N} \right)^c$
2. $\frac{dF}{dn} = -ACn^{c-1}$	$\left(\frac{n}{N} \right)^c$	$\frac{qM}{(pM - n^c)}$	$\frac{pM - N^c}{pM - n^c} \left(\frac{n}{N} \right)^c$	
3. $\frac{dF}{dn} = -\frac{A}{BF^{b-1}}$	$\frac{1}{p-q} \left[p - \left(p^b - \frac{n}{M} \right)^{\frac{1}{b}} \right]$	$q \left[\frac{1}{p^b - \frac{n}{M}} \right]^{\frac{1}{b}}$	$\frac{q}{p-q} \left[\frac{p}{\left(p^b - \frac{n}{M} \right)^{\frac{1}{b}}} - 1 \right]$	$\frac{n}{N}$
4. $\frac{dF}{dn} = -ACn^{c-1}F$	$\frac{p}{p-q} [1 - \exp(-An^c)]$	$\frac{q}{p} \exp(An^c)$	$\frac{q}{p-q} [\exp(An^c) - 1]$	
5. $\frac{dF}{dn} = -\frac{A}{nBF^{b-1}}$	$\frac{1}{p-q} \left[p - \left(p^b - \frac{\ln n}{M} \right)^{\frac{1}{b}} \right]$	$q \left[\frac{1}{p^b - \frac{\ln n}{M}} \right]^{\frac{1}{b}}$	$\frac{q}{p-q} \left[\frac{p}{\left(p^b - \frac{\ln n}{M} \right)^{\frac{1}{b}}} - 1 \right]$	$\frac{\ln n}{\ln N}$
6. $\frac{dF}{dn} = -A \frac{F}{n}$	$\frac{1 - n^{-A}}{1 - N^{-A}}$	$\left(\frac{n}{N} \right)^c$	$\frac{1 - n^{-A}}{1 - N^{-A}}$	
7. $\frac{dF}{dn} = F_o^b \frac{Cn^{c-1}}{BF^{b-1}}$	$\frac{p}{p-q} \left[1 - \left(1 + n^c \right)^{\frac{1}{b}} \right]$	$\frac{q}{p} \left[\frac{1}{1 + n^c} \right]^{\frac{1}{b}}$	$\frac{q}{p-q} \left[\frac{q}{\left(1 + n^c \right)^{\frac{1}{b}}} - 1 \right]$	$\left(\frac{n}{N} \right)^c$

$$D = \frac{q}{p-q} \left[\left(\frac{p^B}{p^B - \frac{1}{M} n^C} \right)^{\frac{1}{B}} - 1 \right] \quad (11)$$

3.1.4 손상합수 IV

피로손상 D 는 피로계수의 지수함수로 정의할 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{F_o^B - F^B(n)}{F_o^B - F_f^B} \quad (12)$$

식 (2)와 식 (3)을 적용하면 손상합수 I의 경우와 동일한 유도과정에 의해 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$D = \left(\frac{n}{N} \right)^C \quad (13)$$

이상과 같은 방법으로 제 I 편[17]의 연구에서 제안한 다른 피로계수저하모형(fatigue modulus degradation model)에 대해서도 손상합수(damage model)를 적용하면, 하중수위 q , 피로주기 n , 피로수명 N , 그리고 물질상수들로 구성되는 여러가지 누적 피로 손상 합수(cumulative fatigue damage model)를 얻을 수 있다. 그 결과들을 Table 1에 요약하였다. 모형 IV-3 $D=n/N$ 은 Miner의 모형과 같고, 모형 IV-1과 IV-7 $D=(n/N)^C$ 은 Miner의 수정된 모형과 같다. 모형 IV-5 $D=\ln(n)/\ln(N)$ 은 기준 매개변수의 값이 1에 해당하는 Hashin과 Rotem의 모형[8]과 같다.

3.2 이중응력 수위의 피로수명 예측

이중응력 수위의 잔류 피로수명은 손상합수를 이용하여 다음과 같은 방법으로 예측할 수 있다. (Fig. 2)

STEP I

처음 하중수위 q_1 과 피로주기 n_1 아래에서와 같은 손상을 갖는 두 번째 하중수위 q_2 에서의 주기 n_{12} 를 찾는다. 즉,

$$D_1(q_1, n_1, \dots) = D_{12}(q_2, n_{12}, \dots) \quad (14)$$

STEP II

예상되는 잔류수명 N_r 은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$N_r = N_2 - n_{12} \quad (15)$$

여기서 N_2 는 하중수위 q_2 하에서의 피로수명을 나타낸다. 피로 손상합수에 포함되어 있는 각 물질상수와 피로수명은 제 I 편[17]의 연구에서 수행된 단일 응력 수위의 피로실험 결과로부터 얻어지는 값을 사용한다.

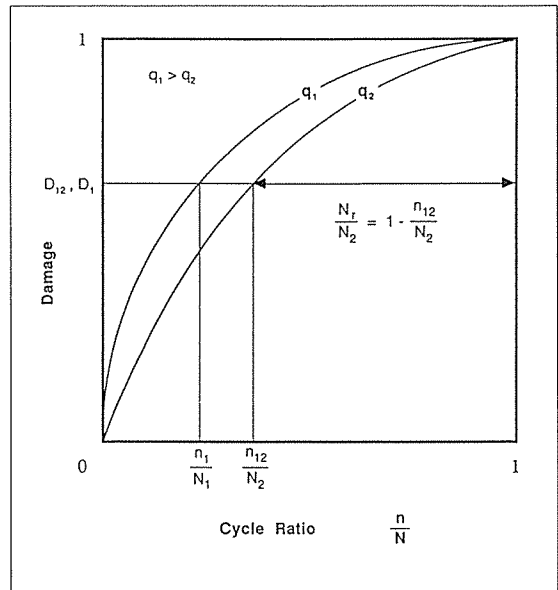


Fig. 2. Two-stress level fatigue life prediction method

4. 결과 및 고찰

다중응력 상태의 실험결과를 Table 2에 나타내었다. 복합재료의 피로수명에 대한 산포성이 인식되고는 있으나, 본 연구에서는 특히, 고-저 응력실험(0.85-0.7)에서 극단적인 편차가 발생하였다. 응력 수위 0.85에서 10개의 시편 중 5개가 500 사이클 이전에 파단되었다. 그러나 500 사이클을 넘긴 시편은 매우 긴 피로 수명을 갖게 됨을 관찰할 수 있다. 하중수위 0.7-0.85에서는 표준편차가 평균 피로수명보다 큰 값을 가지며, 하중 수위 0.85-0.75에서의 최대 피로수명이 하중 수위

0.85-0.7인 경우보다 크게 관찰되었다. 그러나 이러한 실험 편차는 복합재료의 피로 실험에서 자주 관찰되는 현상이다[17]. 이와 같이 이중 하중수위하의 피로실험 값은 매우 큰 편차를 보이거나 예측 결과를 검증하기 위하여 평균값을 비교 대상으로 하였다.

본 연구에서 제안된 손상모형이 예측하는 손상경향은 Fig. 3의 A와 같은 것으로 Palmgren-Miner의 모형(B경향)과 수정된 Palmgren-Miner의 모형(C경향)과 비교된다. 본 연구에서 제안한 손상함수를 이용한 다중응력 수위에서의 피로 잔류수명 N_r 의 예측 정도를 검토하기 위하여 두 가지의 이중응력 수위 피로실험 결과를 이용하였다. 먼저, 본 연구에서 실험한 유리섬유 강화 적층판의 다중응력 수위하의 N_r 실험값과 예측된 N_r 값을 Table 3에 나타내었다. 저-고 실험에서는 손상함수 I이 좋은 예측을 하고, 고-저 실험에서는 손상함수 III이 좋은 예측을 보였다. 피로계수저하모형은 모형 5와 모형 7이 적절한 것으로 판단된다. 여기서, 특이한 사실은 일정응력 수위의 예측이 좋지 않은 피로

계수저하모형 7이 여러가지 손상모형과의 결합을 통해 이중응력 수위의 예측에 좋은 결과를 보인다는 것이다.

다음으로 Han의 실험치[18]를 이용한 피로실험 결과와 예측치의 검증 결과를 Table 4에 나타내었다. 여기서 실험치가 없는 응력수위 0.7에서의 단일응력 수위의 피로수명은 예측결과가 가장 좋은 MFLPE 5[17]에 의해 예측되는 값인 3111을 사용하였다 [17,19]. 이중응력 수위의 피로수명 예측결과는 저-고 및 고-저 실험의 두 경우에 있어서 손상함수 I이 가장 좋은 예측을 보였다. 피로계수저하모형은 특별한 경향을 발견할 수는 없으나, 일정응력 수위의 수명예측이 떨어지는 피로계수저하모형 7의 경우에 가장 나쁜 이중응력 수위의 피로수명 예측을 보인다. 전체적으로 볼 때, 손상함수 I과 III이 유용하며, 피로계수저하모형은 단일응력 수위의 피로수명 예측도 잘 되는 피로계수저하모형 5가 좋을 것으로 사료된다. 피로계수저하모형에 있어서 일정응력 수위에서의 예측 정도와 이중응력 수위의 예측 능력 사이의 상관 관계를 밝히기 위해서는 앞으로 더 많은 실험자료를 토대로 한 고찰이 요구된다.

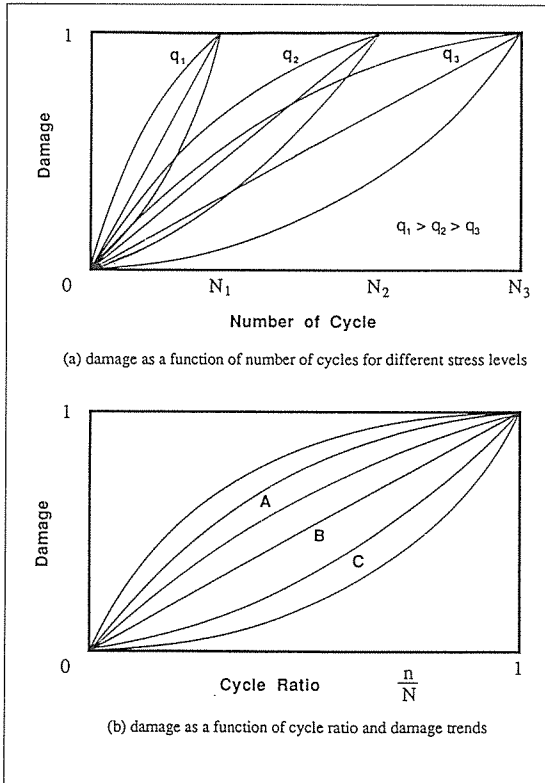


Fig. 3. Damage function

Table 2. Two-stress level fatigue test summary

Applied Stress q_1-q_2	Arithmetic Mean	Minimum	Maximum	Standard Deviation	Number of Specimens
0.7-0.85($n_1=10,000$)	2,031	105	10,179	2,983	10
0.85-0.7($n_1=500$)	33,049	28,200	37,458	3,012	10
0.75-0.85($n_1=5,000$)	3,240	157	11,401	2,986	16
0.85-0.75($n_1=500$)	21,450	3,514	48,190	14,742	11

5. 결론

피로계수의 개념을 기초로 하여 복합재료의 피로수명을 예측하는 새로운 접근방법을 제안하였다. 피로계수와 합변형률을 이용하여 제안한 기본손상모형과 피로계수저하식으로부터 피로주기와 피로수명과 하중수위의 함수로 표시되는 22개의 누적 손상 모형을 유도하였다. 제안된 피로손상 모형중 손상함수 I과 III이 전체적으로 좋은 예측을 하였다. 복합재료의 손상과 피로수명은 피로계수와 관계가 있으며, 피로계수와 합변형률은 피로손상을 나타내는 매개변수로 사용될 수 있다.

Table 3. Comparison of two-stress level fatigue life prediction with experimental data (unidirectional glass/epoxy, tension-tension fatigue)

(a) low-high test($q_1=70\%UTS$, $q_2=85\%UTS$, $n_1=10,000$)

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
1	2,992	3,640	3,151	2,920
2	2,920	3,582	3,086	-
3	2,046	1,729	2,230	2,920
4	2,861	3,364	3,032	-
5	3,248	3,689	3,368	3,686
6	2,483	2,920	2,650	-
7	3,221	3,438	3,334	2,920
Experimental Data : 2,031				

(b) high-low test($q_1=85\%UTS$, $q_2=70\%UTS$, $n_1=500$)

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
1	40,575	18,605	38,429	41,277
2	41,277	18,556	39,352	-
3	45,686	20,557	45,231	41,277
4	41,877	18,412	40,091	-
5	36,609	17,596	33,424	47,730
6	44,768	41,277	43,772	-
7	37,026	29,747	33,559	41,277
Experimental Data : 33,049				

(c) low-high test($q_1=75\%UTS$, $q_2=85\%UTS$, $n_1=5,000$)

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
1	3,024	3,694	3,127	3,024
2	3,024	3,694	3,130	-
3	2,302	2,290	2,412	3,024
4	2,927	3,687	3,034	-
5	3,202	3,651	3,288	3,687
6	2,691	3,024	2,814	-
7	3,058	3,224	3,140	3,024
Experimental Data : 3,240				

(d) high-low test($q_1=85\%UTS$, $q_2=75\%UTS$, $n_1=500$)

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
1	23,832	14,888	23,122	23,844
2	23,844	14,878	23,103	-
3	26,099	15,920	25,970	23,844
4	24,361	14,848	23,759	-
5	22,505	14,575	21,491	27,569
6	25,536	23,844	24,841	-
7	23,796	22,284	23,087	23,844
Experimental Data : 21,450				

Table 4. Comparison of two-stress level fatigue life prediction with experimental data [18] (short fiber Extren, compression-compression fatigue)

(a) low-high test($q_1=60\%UTS$, $q_2=70\%UTS$, $n_1=10,000$)

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
1	2,104	2,473	2,263	1,629
2	1,629	2,475	1,767	-
3	2,412	2,640	2,467	1,629
4	2,081	2,474	2,211	-
5	1,841	2,497	1,998	1,403
6	1,362	1,629	1,440	-
7	2,517	2,694	2,580	1,629
Experimental Data : 2,125				

(b) high-low test($q_1=70\%UTS$, $q_2=60\%UTS$, $n_1=300$)

Degradation Type	Damage Model Type			
	I	II	III	IV
1	17,534	14,557	16,426	18,974
2	18,974	14,787	18,389	-
3	18,503	14,593	17,796	18,974
4	18,311	14,932	17,443	-
5	18,964	14,252	18,279	19,838
6	19,938	18,974	19,741	-
7	16,957	13,567	15,881	18,974
Experimental Data : 20,740				

참고문헌

1. Konur, O. and Matthews, F. L., "Effect of the Properties of the Constituents on the Fatigue Performance of Composites: A Review," *Composites*, Vol. 20, No. 4, 1989, pp. 317-328.
2. Conle, A. and Ingall, J. P., "Effects of Mean Stress on the Fatigue of Composite Materials," *J. of Composites Technology & Research*, Vol. 7, No. 1, 1985, pp. 3-11.
3. Stinchcomb, W. W., Reifsnider, K. L., Marcus, L. A., and Williams, R. S., "Effects of Frequency on the Mechanical Response of Two Composite Materials to Fatigue Loads," *Fatigue of Composite Materials*, ASTM STP 569, 1975, pp. 115-129.
4. Berthelot, J. M. and Rhazi, J., "Acoustic Emission in Carbon Fibre Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 37, 1990, pp. 411-428.
5. Broutman, L. J. and Sahu, S., "A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforced Plastics," *Composite Materials: Testing and Design (Second Conference)*, ASTM STP 497, 1972, pp. 170-188.
6. Hahn, H. T. and Kim, R. Y., "Proof Testing of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 9, 1975, pp. 297-311.
7. Yang, J. N. and Liu, M. D., "Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, 1977, pp. 176-203.
8. Hashin, Z., "Cumulative Damage Theory for Composite Materials : Residual Life and Residual Strength Methods," *Composites Science and Technology*, Vol. 23, 1985, pp. 1-19.
9. Charewicz, A. and Daniel, I. M., "Damage Mechanisms and Accumulation in Graphite/Epoxy Laminates," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP 907, 1986, pp. 274-297.
10. Reifsnider, K. L. and Stinchcomb, W. W., "A Critical-Element Model of the Residual Strength and Life of Fatigue Loaded Composite Coupons," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP 907, 1986, pp. 298-313.
11. Hahn, H. T. and Kim, R. Y., "Fatigue Behavior of Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 10, 1976, pp. 156-180.
12. O'Brien, T. K. and Reifsnider, K. L., "Fatigue Damage Evaluation Through Stiffness Measurements in Boron-Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, 1981, pp. 55-70.
13. Poursatip, A., Ashby, M. F. A., and Beaumont, P. W. R., "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : I - Development of the Model," *Composite Science and Technology*, Vol. 25, 1986, pp. 193-218.
14. Poursatip, A. and Beaumont, P. W. R., "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : II - Life Prediction," *Composite Science and Technology*, Vol. 25, 1986, pp. 283-299.
15. Tsai, G. C., Doyle, J. F., and Sun, C. T., "Frequency Effects on the Fatigue Life and Damage of Graphite/Epoxy Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, 1987, pp. 2-13.
16. Hwang, W. and Han, K. S., "Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, 1986, pp. 125-153.
17. 이창수, 황운봉, 한경섭, "복합재료의 피로손상 모형 및 다응력 수위 피로수명 예측 연구 (I) -참고계수를 이용한 피로수명 예측," *한국복합재료학회지*, 제 4권, 제1호, 1991, pp. 95-106.
18. Han, K. S., "Compressive Fatigue Behaviour of a Glass Fibre-Reinforced Polyester Composite at 300 K and 77 K," *Composites*, Vol. 14, No. 2, 1983, pp. 145-150.
19. 이창수, 복합재료의 피로현상 및 피로수명 예측에 관한 연구, 석사학위논문, 포항공과대학교, 1991, pp. 29-35.