

블록하중을 받는 충격손상 적층복합재료의 피로수명 예측

강기원* · 김정규[†] · 유승원**
(2000년 11월 16일 접수, 2001년 4월 17일 심사완료)

Fatigue Life Prediction of Impacted Laminates Under Block Loading

Ki-Weon Kang, Jung-Kyu Kim and Sueng-Won You

Key Words: CFRP Laminates(CFRP 적층복합재료), 2-Level Block Loading(2단 블록하중), Impact Damage Parameter(충격손상 파라미터), Stochastic Analysis(확률론적 해석)

Abstract

This paper presents the fatigue behavior of composite materials with impact-induced damage under 2 level block loading. For this purpose, the 2 level block loading fatigue tests were performed on the impacted composite laminate. The fatigue life of the laminate under the block loading is greatly influenced by the impact damage; the effect of impact damage can be characterized by the present impact damage parameter. Based on this parameter, the model is developed to predict the fatigue life under block loading and the results by this model agree well with experimental results regardless of applied impact energy. Also, stochastic model is established to describe the variation of cumulative damage behavior and fatigue life due to the material nonhomogeneity.

기호설명

- D : 손상의 합
- $D_{imp,2}$: 블록하중하의 충격손상 파라미터
- n_i, N_i : σ_i 에 대한 하중반복수 및 피로수명
- $n_{imp,i}, N_{imp,i}$: σ_i 에 대한 충격손상 복합재료의 하중반복수 및 피로수명
- p, q : 재료상수
- R : 신뢰도
- Z_i : 랜덤변수
- Φ : 표준정규분포의 누적함수
- σ_0, σ_R : 정적인장 및 잔류인장강도
- σ_i : i 번째 작용응력
- μ, ψ : 평균과 표준편차

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 외부물체충돌로 인한 충격손상의 발생 가능성이 높으며⁽¹⁾ 또한 이러한 손상상태에서 피로하중을 받게되는 경우가 많다. 따라서 복합재료의 피로강도평가에 있어서는 충격 및 피로하중간의 상호작용에 대한 이해가 매우 중요하다고 사료된다.

충격 및 피로하중간의 상호관계는 피로수명에 미치는 충격손상의 영향에 관한 연구를 통하여 수행되고 있다.^(2~6) 예를 들면 Gray⁽²⁾는 충격손상을 가진 복합재료의 굽힘 S-N선도를 구하였고 Tai 등⁽³⁾은 이의 피로수명과 파손확률을 평가하였으며 또한 저자⁽⁶⁾는 충격손상 복합재료의 피로수명 예측모델을 제시하여 이들의 상호관계에 대하여 규명하였다. 그러나 이상의 연구는 일정진폭 피로하중에 대한 것으로서, 변동하중이 작용할 경우의 피로수명 평가에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

한편 기계구조물에 평균응력 및 응력진폭이 변화하는 변동하중이 작용할 경우, 이의 피로누적 손상거동 및 피로수명은 많은 변동성을 나타내고 있다.⁽⁷⁾ 이를 위하여 대수정규 또는 와이불(Weibull) 분포를 도입한 다수의 확률론적인 해석

* 회원, 체육과학연구원
[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
 E-mail : kimj@email.hanyang.ac.kr
 TEL : (02)2290-0442 FAX : (02)2291-6707
 ** 대림대학 재료정보학과

이 수행되고 있다.^(7~9) 그러나 이러한 연구들은 대부분 금속재료나 충격손상이 없는 복합재료에 대한 것으로서 충격손상 복합재료에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이는 복합재료 자체의 변동성⁽⁶⁾과 충격손상에 의한 불규칙성⁽¹⁰⁾이 복합되어 충격손상 복합재료의 피로누적손상거동 및 피로수명의 평가가 쉽지 않기 때문으로 사료된다.

본 연구에서는 충격손상이 존재하는 cross-ply 형태의 Carbon/Epoxy 복합재료를 대상으로 2단 블록하중하의 피로실험을 수행하고 피로수명에 미치는 충격손상의 영향과 잔류피로수명 예측모델을 제시하였다. 또한 이의 피로누적손상거동 및 피로수명의 변동성에 대한 확률론적 해석을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 Carbon/Epoxy 적층 복합재료로서 일방향 프리프레그시트(prepreg sheet)를 적층하여 오토클레이브방법으로 제작하였다. 이에 사용된 적층복합재료의 기계적 특성은 ASTM D3039-93⁽¹¹⁾의 규정에 의거한 단축인장 시험으로부터 구하였으며 그 값은 Table 1과 같다. 푸아송비 ν_{xy} 는 0°/90°로 직교된 스트레인 게이지를 이용하여 구하였으며, G_{xy} 는 ± 45° 스트레인 게이지법을 사용하여 구하였다.

시험편의 형상은 Fig. 1과 같은 직선형 시험편으로서, 판폭 $W=20\text{mm}$, 길이 $L=250\text{mm}$, 두께 $B=2\text{mm}$ 이며, 적층순서는 [0₄/90₈/0₄]이다.

2.2 충격 및 피로시험

Table 1 Mechanical properties of laminae

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
116.04	7.69	4.92	0.204

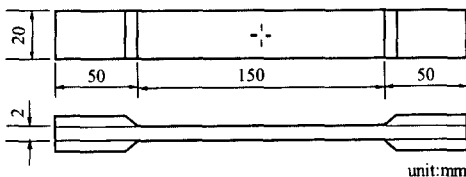


Fig. 1 Configuration of specimen

충격시험은 Fig. 2와 같은 수평형 충격시험기를 제작하여 사용하였다. 충격체 팁(tip)부분의 지름은 12.7mm, 충격체의 총 질량은 57.2g이다. 이와 같은 충격시험기를 사용하여 종방향 고정, 횡방향 자유지지의 경계조건하에서 2.6J과 3.4J의 충격에너지를 시험편에 부과하였다. 이와 같은 충격에너지가 가해진 후의 잔류인장강도는 전보⁽⁶⁾의 경우와 동일하다.

한편 2단블록 피로시험은 INSTRON Model 1332를 사용하여 정현파 형태의 하중을 가하여 실시하였으며 주파수는 5~8Hz, 응력비 R ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)은 0.01로 고정하였다. 또한, 시험편에 가해진 2단블록하중은 Fig. 3과 같은 형태로서 작용응력비 S (σ_{max}/σ_R)는 고(High) → 저(Low)에서 (0.90 → 0.85)과 (0.90 → 0.80)로, 저(Low) → 고(High)에서 (0.80 → 0.85)과 (0.80 → 0.90)로 변동시켰다. 또한 1단의 하중반복수 $n_{imp,1}$ 은 일정진폭 피로수명의 30% 및 60%의 2단계로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Miner 법칙에 의한 피로수명 예측

Miner 법칙은 블록 및 변동하중하에서 피로수명을 평가하기 위하여 사용되는 것으로서 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다.^(7~9)

충격손상 복합재료의 2단 블록하중하에서의 파손조건이 Miner 법칙에 따른다고 가정하면 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^2 \frac{n_{imp,i}}{N_{imp,i}} = 1 \quad (1)$$

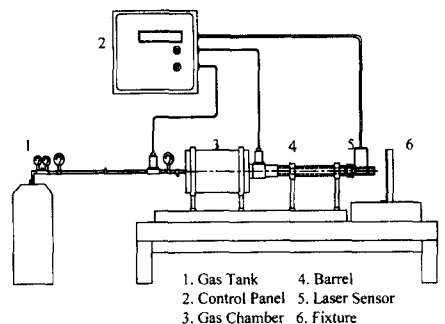


Fig. 2 Impact test apparatus

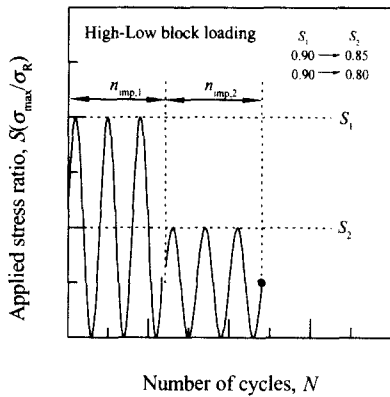
따라서 두 번째 블록에서의 잔류피로수명은 다음과 같다.

$$n_{imp,2} = N_{imp,2} \cdot \left\{ 1 - \frac{n_{imp,1}}{N_{imp,1}} \right\} \quad (2)$$

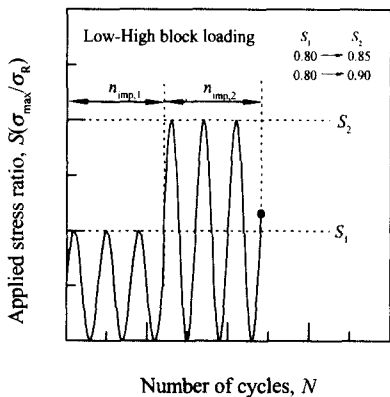
여기서 $n_{imp,i}$ 는 σ_i 에서의 충격손상 복합재료의 하중반복수이며, $N_{imp,i}$ 는 일정진폭 피로수명으로서 이는 식 (3)에 의해 평가될 수 있음을 전보⁽⁶⁾에서 보고하였다.

$$N_{imp,i} = \frac{\sigma_R - \sigma_i}{\sigma_0 - \sigma_i} \cdot b \left\{ 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right\}^q \quad (3)$$

여기서 σ_R 은 충격손상 복합재료의 정적잔류



(a) High → Low block loading

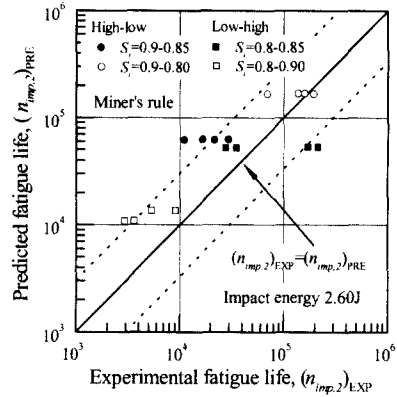


(b) Low → High block loading

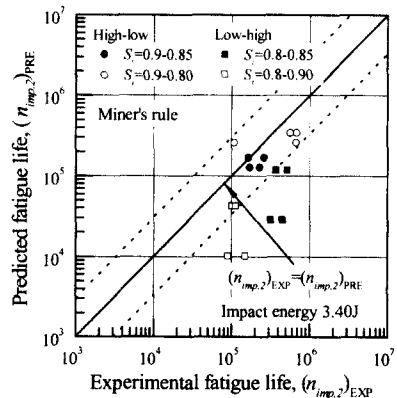
Fig. 3 2-level block loading

강도이고 b, q 는 충격손상이 없는 경우의 일정진폭 피로수명으로부터 얻어지는 재료상수이다.⁽⁶⁾

따라서 식 (2)와 식 (3)을 사용하면 블록하중하의 충격손상 복합재료의 잔류 피로수명에 대한 관계식을 구할 수 있다. Fig. 4는 이의 관계식으로부터 예측된 잔류수명을 실험결과와 비교한 것이다. 예측결과는 실험결과와 많은 오차를 보이고 있으며 이는 Miner 법칙이 충격손상의 영향을 고려하지 못하기 때문이라고 생각된다. 따라서 충격손상 복합재료가 블록하중을 받을 경우 이의 잔류피로수명을 평가하기 위해서는 충격손상의 영향을 검토할 필요성이 있다.



(a) Impact energy 2.6J



(b) Impact energy 3.4J

Fig. 4 Comparison of experimental and predicted fatigue life by Miner's rule

3.2 충격손상 복합재료의 피로수명 예측

복합재료에 발생한 충격손상은 피로수명에 커다란 영향을 미치며 이는 충격손상 파라미터에 의해 정량화 될 수 있음을 전보⁽⁶⁾에서 보고한 바 있다. 그러나 이는 일정진폭 피로수명에 대해 제한된 것으로서 블록하중하의 피로수명에 대한 충격손상의 영향을 평가하기 위해서는 이를 블록하중에 대하여 확장할 필요가 있다.

전보⁽⁶⁾에서는 Broutman⁽¹²⁾의 피로수명 예측식과 잔류강도 저하의 상사성 가정을 이용하여 일정진폭하중하의 충격손상 파라미터를 제시하였다. 따라서 Broutman의 예측식을 블록하중으로 확장시키고 동일한 상사성 가정을 도입하면 2단 블록하중에 대한 충격손상 파라미터를 유도할 수 있다.

충격손상 복합재료에 2단블록하중이 작용할 경우, 충격손상을 블록하중에 의한 피로손상으로 가정한다면 이의 하중조건은 3단 블록하중이 작용하는 경우와 동일하다. 3단 블록하중에 대한 Broutman의 피로수명 예측식은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0 - \sigma_3} \right) \frac{n_i}{N_i} = 1 \tag{4}$$

여기서 N_i 는 충격손상이 없는 복합재료의 일정진폭 피로수명이다.

한편 전보⁽⁶⁾에서 적용한 잔류강도 저하의 상사성에 대한 가정을 2단 블록피로하중에 적용하면 이는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\sigma_0 - \sigma_R = (\sigma_0 - \sigma_1) \frac{n_1}{N_1} \tag{5}$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하고 충격손상 복합재료에 2단 블록피로하중이 작용하는 하중조건을 고려하여 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\left\{ \frac{\sigma_0 - \sigma_R}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\} + \left\{ \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\} \frac{n_{imp,1}}{N_1} = \left\{ \frac{N_2 - n_{imp,2}}{N_2} \right\} \tag{6}$$

식 (6)을 통하여 충격손상 복합재료에 2단블록하중이 작용할 경우, 피로수명이 감소되는 원인은 좌변의 항들과 같은 충격손상 및 첫 번째 블록에서의 하중반복수 때문임을 알 수 있다. 따

라서 정적잔류강도의 항으로 구성된 좌변의 첫 번째 항은 2단 블록하중하의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 의미하며 이는 2단 블록하중하의 충격손상 파라미터(impact damage parameter)로 정의될 수 있다.

$$D_{imp,2} = \frac{\sigma_0 - \sigma_R}{\sigma_0 - \sigma_2} \tag{7}$$

식 (7)의 충격손상 파라미터 $D_{imp,2}$ 는 잔류강도 및 작용 피로하중에 따라 0과 1 사이의 값을 가진다.

Fig. 5는 식 (7)에 의한 평가결과를 인장강도에 의해 정규화된 두 번째 블록에서의 피로하중 σ_2 에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선과 점선은 각각 2.6J와 3.4J에 대한 예측 결과를 나타내며 중심점은 각 경우에 대한 실험결과를 의미한다. 여기서 정적잔류강도는 전보⁽⁶⁾의 값을 사용하였다. 그림에서 블록하중에 대한 충격손상 파라미터 식 (7)에 의한 예측값은 충격에너지에 관계없이 실험값과 일치하고 있으며 이로부터 식 (7)은 블록하중하의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 충격손상 파라미터를 이용하면 충격손상 복합재료의 두 번째 블록에서의 잔류피로수명 $n_{imp,2}$ 를 예측할 수 있다. 즉 식 (7)을 식 (6)에 대입하고 이를 정리하면 $n_{imp,2}$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

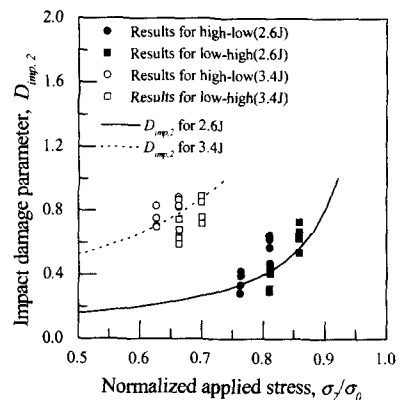


Fig. 5 Impact damage parameter under 2-level block loading

$$n_{imp,2} = N_2 \cdot$$

$$\left[1 - D_{imp,2} - \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_2} \right) \frac{n_{imp,1}}{N_1} \right] \quad (8)$$

한편 식 (8)을 통하여 $n_{imp,2}$ 을 예측하기 위해서는 $D_{imp,2}$ 와 N_i 에 대한 평가가 필요하다. 여기서 $D_{imp,2}$ 는 Fig. 5를 통하여 평가될 수 있으며 N_i 는 전보⁽⁶⁾에서 유용성이 밝혀진 Hwang 등⁽¹³⁾의 관계식 식 (9)을 통하여 얻을 수 있다.

$$N_i = p \left\{ 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right\}^q \quad (9)$$

식 (7)과 (9)를 식 (8)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 블록하중하의 충격손상 복합재료의 잔류피로수명 예측식을 얻을 수 있다.

$$n_{imp,2} = \frac{\sigma_R - \sigma_2}{\sigma_0 - \sigma_2} \cdot p \left\{ 1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_0} \right\}^q - n_{imp,1} \cdot \left\{ \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\}^{1-q} \quad (10)$$

여기서 충격손상 복합재료의 정적잔류강도 σ_R 는 전보⁽⁶⁾의 값을 이용하였다.

Fig. 6은 피로수명 예측모델 식 (10)이 충격손상 복합재료의 잔류피로수명을 예측할 수 있는가를 평가하기 위하여 2.6J 및 3.4J의 충격에너지를 받은 경우의 실험결과와 식 (10)에 의한 예측결과를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 본 모델에 의한 예측결과는 하중순서에 관계없이 실험결과를 잘 묘사하고 있다.

이상의 결과로부터 피로수명 예측모델 식 (10)은 충격손상 복합재료가 블록하중을 받을 경우, 충격손상으로 저하된 정적잔류강도와 손상이 없는 복합재료의 일정진폭 피로특성만으로 이의 잔류피로수명을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 누적손상거동과 피로수명의 확률론적 해석

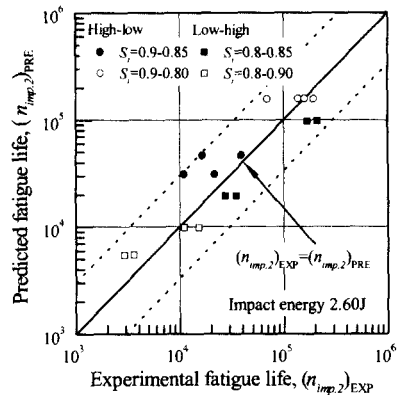
복합재료의 피로수명에 대한 정확한 평가는 구조물의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 매우 중요하다. 그러나 Fig. 6에서 알 수 있듯이 피로수명은 흠어짐 현상을 보이고 있으며 따라서 이의 변동성을 고려한 확률론적인 해석이 요구된다.

블록하중하의 피로누적손상거동 및 피로수명의

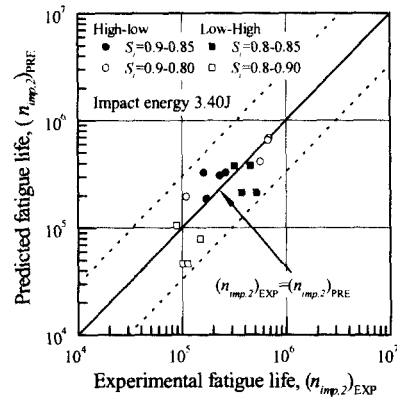
변동성을 고려하기 위하여 Ni 등⁽⁹⁾은 Miner 법칙과 신뢰성 이론을 결합한 TPMiner 법칙(2-D probabilistic Miner's rule)을 제안하여 금속재료에 대한 우수한 결과를 보고하였다. 본 연구에서는 충격손상의 영향을 고려하기 위하여 3.2절의 방법과 신뢰성 이론을 결합하여 충격손상 복합재료의 변동성을 평가하였다.

충격손상 복합재료에 블록하중이 작용하는 경우, 이의 총 손상량은 충격 및 피로손상의 합이라고 할 수 있으며 이는 식 (6)과 (7)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$D = D_{imp,2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\} \frac{n_{imp,i}}{N_i} = 1 \quad (11)$$



(a) Impact energy 2.6J



(b) Impact energy 3.4J

Fig. 6 Fatigue life of impacted laminates for 2-level block loading

또한 충격손상의 유무에 따른 피로수명을 나타내는 식 (3)과 식 (9)를 고려하면 식 (11)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D = D_{imp,2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\sigma_R - \sigma_i}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\} \frac{n_{imp,i}}{N_{imp,i}} = 1 \quad (12)$$

여기서 피로수명과 관계된 \sum 기호 내부의 항들은 변동성을 가지므로 블록하중하의 피로누적 손상거동 및 피로수명의 변동성을 검토하기 위해서는 이들 각각에 대한 평가가 필요하다.

저자는 전보⁽⁶⁾에서 일정진폭 피로수명의 변동성은 식 (3)의 일정진폭 피로수명 예측모델에 랜덤변수 Z_1 을 도입한 식 (13)을 통하여 평가될 수 있다고 보고하였다.

$$N_{imp,i} = Z_1 \cdot \left[\frac{\sigma_R - \sigma_i}{\sigma_0 - \sigma_i} \cdot p \left(1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^q \right] \quad (13)$$

이를 이용하면 첫 번째 블록에서의 하중반복수 $n_{imp,1}$ 에 대한 신뢰도는 식 (14)에 의해 평가될 수 있다.

$$R_1 = \Pr\{N_{imp,1} > n_{imp,1}\} = 1 - \Phi \left[\frac{\log Z_1 - \mu_{\log Z_1}}{\phi_{\log Z_1}} \right] \quad (14)$$

여기서 $\mu_{\log Z_1}$ 와 $\phi_{\log Z_1}$ 는 $\log Z_1$ 의 평균과 표준편차이며 Φ 는 표준정규분포의 누적함수이다.

한편 Ni 등⁽⁹⁾은 3모수 와이분포를 도입하여 두 번째 블록에서의 신뢰도를 평가하였다. 그러

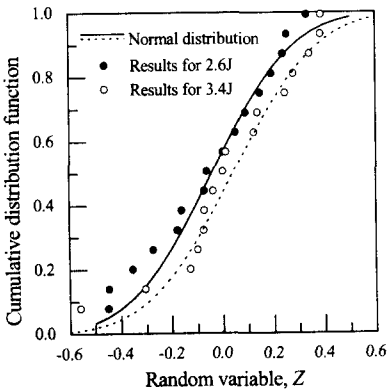


Fig. 7 CDF of random variable, Z_2

나 이는 금속재료에 대한 것으로 충격손상 복합재료에 대한 적용여부는 불투명하며 또한 각각의 작용하중에 대한 많은 시험 자료가 요구되는 문제점이 있다. 이의 해결을 위하여 본 연구에서는 식 (15)와 같은 랜덤변수 Z_2 를 도입하였다.

$$Z_2 = \log \left\{ \frac{(n_{imp,2})_{EXP}}{(n_{imp,2})_{PRE}} \right\} \quad (15)$$

여기서 $(n_{imp,2})_{PRE}$ 는 식 (10)에 의해 예측된 두 번째 블록에서의 피로수명이며 $(n_{imp,2})_{EXP}$ 는 이에 대한 실험결과이다.

랜덤변수 Z_2 의 확률적 특성이 정규분포에 근사한다고 가정할 수 있다면 두 번째 블록에 대한 피로수명 $n_{imp,2}$ 의 신뢰도 R_2 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_2 = \Pr\{n_{imp,2} > n_{imp,2R_2} \mid N_{imp,1} > n_{imp,1}\} = 1 - \Phi \left[\frac{Z_2 - \mu_{Z_2}}{\phi_{Z_2}} \right] \quad (16)$$

여기서 μ_{Z_2} 와 ϕ_{Z_2} 는 랜덤변수 Z_2 의 평균과 표준편차이며 $n_{imp,2R_2}$ 는 R_2 의 신뢰도에 해당하는 두 번째 블록에서의 피로수명이다.

Fig. 7은 랜덤변수 Z_2 의 누적확률분포를 구하고 2.6J 및 3.4J의 경우에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 Z_2 는 정규분포에 근사된다는 가정은 타당하며 따라서 두 번째 블록에 대한 피로수명 $n_{imp,2}$ 의 신뢰도는 식 (16)에 의해 평가될 수 있음을 알 수 있다.

한편 충격손상 복합재료에 블록하중이 작용하는 경우, 이의 전체적인 신뢰도 R 은 충격손상 복합재료가 첫 번째 블록에서 $n_{imp,1}$ 만큼의 하중을 받은 후에 $n_{imp,2}$ 의 하중반복수에서 파손될 경우에 대한 것이므로 이는 다음과 같이 표현된다.

$$R = \Pr\{n_{imp,t} > n_{imp,tR}\} \quad (17)$$

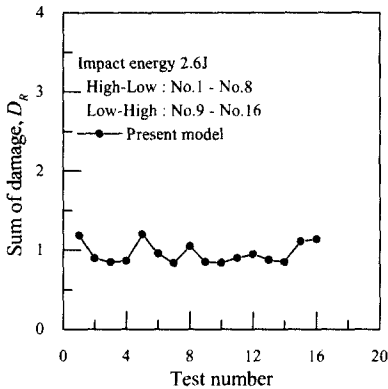
여기서 $n_{imp,t} = \sum n_{imp,i}$ 이다.

이러한 총 신뢰도 R 을 각 블록에서의 독립적인 신뢰도를 나타내는 식 (14)와 식 (16)의 항으로 나타내면 다음과 같다.

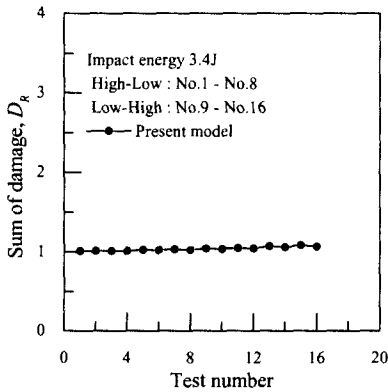
$$\begin{aligned}
 R &= \Pr\{(n_{imp,1} > n_{imp,1R}) \cap (N_{imp,1} > n_{imp,1})\} \\
 &= \Pr\{n_{imp,1} > n_{imp,1R} \mid N_{imp,1} > n_{imp,1}\} \cdot \\
 &\quad \Pr\{N_{imp,1} > n_{imp,1}\} \\
 &= R_2 \cdot R_1
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

이와 같이 구한 총 신뢰도 R 을 변동성을 갖는 식 (12)의 \sum 내부의 항들에 고려하면 누적손상 거동 및 피로수명의 변동성을 고려한 다음의 관계식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 D_R &= D_{imp,2} + \left\{ \frac{\sigma_R - \sigma_1}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\} \frac{n_{imp,1}}{N_{imp,1R}} + \\
 &\quad \left\{ \frac{\sigma_R - \sigma_2}{\sigma_0 - \sigma_2} \right\} \frac{n_{imp,2R}}{N_{imp,2R}} = 1
 \end{aligned}
 \tag{19}$$



(a) Impact energy 2.6J



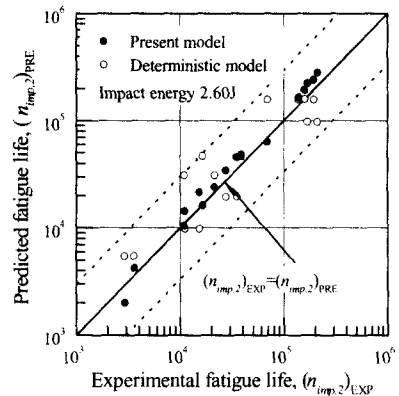
(b) Impact energy 3.4J

Fig. 8 Sum of damage of impacted laminates

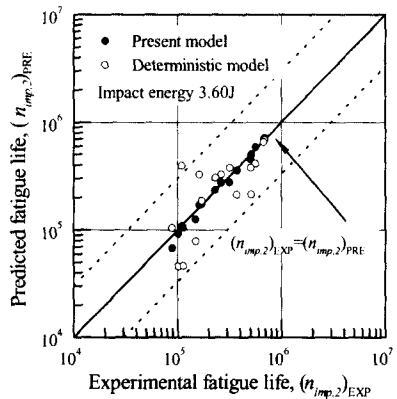
Fig. 8은 피로수명의 변동성을 고려하여 제시된 식 (19)의 유용성을 확인하기 위하여 이의 손상의 합 D_R 을 각각의 피로시험에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 손상의 합 D_R 은 충격에너지의 크기에 관계없이 1에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

또한 식 (19)를 이용하면 변동성이 고려된 2단 블록하중하의 잔류피로수명 $n_{imp,2R}$ 을 예측할 수 있다. Fig. 9는 이의 결과를 식 (10)의 결정론적 모델과 함께 나타낸 것으로서 변동성을 고려한 확률론적 모델 식 (19)에 의한 예측결과는 실험결과와 매우 잘 일치하고 있다.

따라서 본 연구에서 제시한 식 (19)는 충격손상



(a) Impact energy 2.6J



(b) Impact energy 3.4J

Fig. 9 Comparison of experimental and predicted fatigue life by present stochastic model

복합재료가 블록하중을 받을 경우, 이의 변동성을 잘 묘사함에 있어서 매우 유용하다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 충격손상을 가진 cross-ply 적층 복합재료의 2단 블록하중하의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향과 이의 잔류피로수명 예측모델을 제안하였다. 또한 피로수명의 변동성을 묘사할 수 있는 확률론적 모델을 제시하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) Miner 법칙에 의하여 평가된 잔류피로수명은 실험결과와 많은 차이를 보이고 있으며 이는 Miner 법칙이 충격손상의 영향을 고려하지 못하기 때문이다.

(2) 2단블록 피로하중을 받는 충격손상 복합재료의 잔류 피로수명 예측모델은 정적잔류강도 및 손상이 없는 복합재료의 피로특성을 나타내는 상수로써 구축되었으며 이는 충격손상 복합재료의 잔류 피로수명을 예측함에 있어서 유용하였다.

(3) 피로수명의 변동성을 묘사하기 위하여 신뢰성 기법을 도입한 확률론적 모델을 제시하였으며 이는 충격손상 복합재료의 누적손상거동 및 피로수명의 변동성을 잘 묘사하였다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

참고문헌

- (1) Abrate, S., 1991, "Impact on Laminated Composite Materials," *Applied Mechanics Rev.* Vol. 44, No 4, pp 155~190.
- (2) Gray, T. D., 1975, "Foreign Object Damage and Fatigue Interaction in Unidirectional Boron/Aluminum-6061," *ASTM STP* 569, pp. 262~279.
- (3) Tai, N.H., Yip, M.C. and Lin, J.L., 1998, "Effects of Low-energy Impact on the Fatigue

Behavior of Carbon/Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 1~8.

- (4) Ramkumar, R. L., 1983, "Effect of Low-Velocity Impact Damage on the Fatigue Behavior of Graphite/Epoxy Laminates," *ASTM STP* 813, pp 116~135.
- (5) Beheshty, M.H. and Harris, B., 1998, "A Constant-Life Model of Fatigue Behavior for Carbon-Fibre Composites: The Effect of Impact Damage," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 9~18.
- (6) 김정규, 강기원, "충격손상을 가진 CFRP 적층 복합재료의 피로수명예측모델," 대한기계학회논문집 A권, 제 24권, 제 11호, pp. 2828~2835.
- (7) Yang, J.N. and Jones, D.L., 1980, "Effect of Load Sequence on the Statistical Fatigue of Composites," *AIAA Journal*, Vol. 18, No. 12, pp. 1525~1531.
- (8) Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., 1984, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," *Engineering Fracture and Mechanics*, Vol. 20, No. 3, pp. 501~513.
- (9) Ni, K. and Zhang, S., 2000, "Fatigue Reliability Analysis under Two-Stage Loading," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 68, pp. 153~158.
- (10) Tai, N.H., Yip, M.C. and Lin, J.L., 1998, "Effects of Low-energy Impact on the Fatigue Behavior of Carbon/Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 1~8.
- (11) ASTM D 3039-93, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite".
- (12) Broutman, L. J. and Sahu, S., 1972, "A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforced Plastics," *ASTM STP* 497, pp. 170~188.
- (13) Hwang, W. and Han, K.S., 1989, "Fatigue of Composite Materials-Damage Model and Life Prediction," *ASTM STP* 1012, pp. 87~102.