

충격손상 복합재료의 피로수명에 대한 통계적 해석 연구

강기원*

¹국립군산대학교 기계자동차공학부

Probabilistic Approach for Fatigue Life of Composite Materials with Impact-Induced Damage

Ki-Weon Kang^{1*}

¹School of Mechanical and Automobile Engineering, Kunsan National University

요약 본 논문에서는 충격손상 복합재료의 피로수명 저하 특성과 이의 변동성을 통계적으로 분석하였다. 충격손상 복합재료의 잔류강도는 2모수 Weibull 분포에 잘 적합되었으며 충격에너지의 증가에 따라 잔류강도의 변동성은 감소하였다. 복합재료의 피로수명은 충격손상에 의하여 크게 저하되었으며 또한 이의 피로수명에 대한 충격손상의 영향은 작용 응력진폭에 따라 변화함을 알 수 있었다. 또한 2모수 Weibull 분포를 이용하여 충격손상 복합재료의 피로수명의 변동성을 추정하였으며 충격에너지의 증강 및 응력진폭의 감소에 따라 피로수명의 변동성은 점차 감소하였다.

Abstract This paper presents the probabilistic analysis for fatigue life of Glass/Epoxy laminates with impact-induced damage. For this, a series of impact tests were performed on the Glass/Epoxy laminates using instrumented impact testing machine. Then, tensile and fatigue tests carried out so as to generate post-impact residual strength and fatigue life. Two Parameter Weibull distribution was used to fit the residual strength and fatigue life data of Glass/Epoxy composite laminates. The residual strength was affected by impact energy and their variance decreased with increasing of impact energy. The fatigue life of impacted laminates was greatly reduced by impact energy and this trend depended on applied stress amplitude. Additionally, the variation of fatigue life was gradually decreased with the applied stress amplitude.

Key Words : Composite materials, Impact damage, Residual strength, Probabilistic analysis

1. 서론

풍력 발전용 블레이드(Wind turbine blade) 등과 같은 각종 기계 구조물의 구조재료로 사용되는 복합재료에는 사용 중에 작용하는 다양한 하중으로 인한 내부손상이 존재하게 된다[1,2]. 이의 발생 원인은 다양하나 복합재료는 두께방향 강화가 부족한 구조적 특성으로 인하여 조류충돌 등의 외부물체충돌(Foreign object impact)로 인한 내부손상의 발생이 용이하다는 단점을 보유하고 있다[1,2]. 이러한 충격손상(Impact damage)은 파괴의 기점이 되며 또한 구조물의 하중지지능력에 매우 큰 영향을 미침이 보고되고 있다[3,4]. 따라서 복합재료 구조물의 안

전성 및 신뢰성 확보를 위해서는 이의 하중지지능력과의 상호작용에 대한 체계적인 연구가 매우 중요하다.

기계 구조물 파괴의 대부분은 직접 혹은 간접적으로 반복하중에 의한 피로와 관련이 있다[5]. 이러한 반복하중하의 피로파괴는 모재균열, 층간분리, 섬유분리 및 섬유파단 등의 복잡한 피로손상의 누적과 상호작용에 의하여 발생하며 이들은 피로수명 및 이의 변동성(Variation)과 밀접한 관련이 있다. 이를 고려하기 위하여 대수정규(log-normal distribution) 또는 와이불 분포(Weibull distribution)와 잔류강성 및 잔류강도 모델을 이용한 확률론적 해석이 수행되고 있다[5,6]. 그러나 외부물체 충격을 받은 복합재료는 그 내부에 다양한 충격손상이 발생한

이 논문은 2008학년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음

*교신저자 : 강기원(kwkang68@kunsan.ac.kr)

접수일 10년 08월 18일

수정일 10년 08월 26일

게재확정일 10년 09월 08일

상태에서 피로하중을 받게 되므로 피로수명의 변동성은 변화할 가능성이 매우 높다. 이러한 충격손상 복합재료의 피로수명에 나타나는 변동성을 고려하기 위하여 강기원 등[7]은 저속 충격 하중을 받은 복합재료 구조물이 피로 하중을 받을 경우 이의 피로수명에 대한 변동성을 평가할 수 있는 모델을 제안하였다. 본 모델은 충격손상 복합재료의 피로수명 예측모델에 피로수명의 변동성을 나타내는 랜덤변수를 도입하였으며 이의 변동성을 평가함으로써 충격손상 복합재료의 변동성을 평가하였다. 그러나 본 모델은 피로수명의 변동성에 지대한 영향을 미치는 복합재료의 인장강도(Tensile strength), 잔류강도(Residual strength) 및 작용 피로하중의 영향을 고려하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 충격손상 복합재료의 피로수명 분포를 평가하기 위하여, 이의 피로수명을 평가하고 피로수명의 변동성에 영향을 미치는 인장강도, 잔류강도 및 작용 피로하중의 영향에 대한 통계적 해석을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

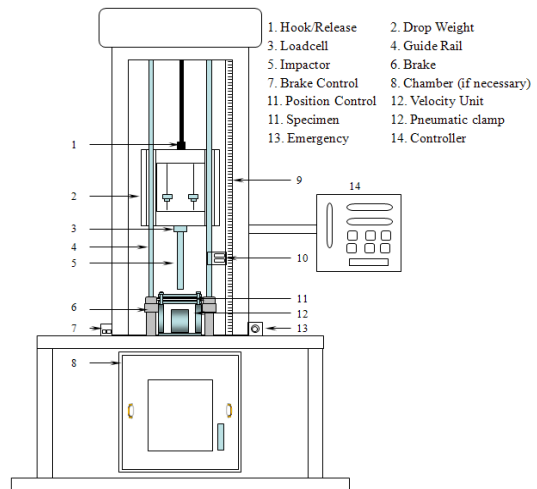
본 연구에 사용한 재료는 (주)한국화이버에서 제조한 주자직 Glass/Epoxy 복합재료(Model : HG1581/RS 1212)로 두께 0.24mm의 프리프레그 시트(prepreg sheet)를 적층하여 오토클레이브 방법으로 제작하였다.

이의 기계적 특성은 10장의 플라이를 적층하여 제작된 시험편을 대상으로 ASTM D3039-00[8]의 규정에 의거한 인장 시험을 통하여 구하였으며 그 값은 표 1과 같다. 푸아송비(Poisson's ratio) ν_{xy} 는 0°/90°로 직교된 스트레인 게이지(strain gage)를 이용하여 구하였으며, G_{xy} 는 ±45° 스트레인 게이지법을 사용하여 계산하였다.

일련의 인장, 충격 및 피로시험에 사용된 시험편은 두께 0.24mm의 플라이 12장을 적층하여 제작하였으며 충격시험의 특수성을 고려하여 40mm의 판폭 및 120mm의 길이를 갖는 시험편을 사용하였다. 이 때 시험편의 두께는 3.2mm이며 섬유 함유비(Volume fraction of fiber)는 약 39%이다.

[표 1] Glass/Epoxy 복합재료의 기계적 특성

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}	σ_0 (MPa)
26.87	26.87	3.1	0.12	490.89



[그림 1] 낙하식 충격시험기 구조도

2.2 충격 및 피로시험

충격시험은 Instron 사의 낙하 충격시험기(Dynatup model 9250HV)를 사용하였다. 본 시험기는 그림 2와 같이 반원형 충격체(Hemispherical tup)가 장착된 낙하 타워(Drop tower), 가변 중량식 낙하 몸체, 고성능 DSP(Digital signal processor), 로드셀 및 Impulse™ 제어 및 데이터 계측 소프트웨어로 구성된다. 시험편과 접촉하는 반원형 충격체 부분의 직경은 12.7mm, 충격체의 총 질량은 5.08kg이다. 시험편은 공압식 시험편 고정장치에 고정되었으며 이의 개구부(Opening)는 정사각형으로서 한 변의 길이는 60mm이다.

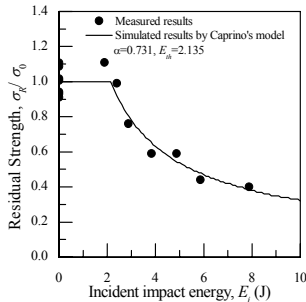
한편 충격손상을 갖는 시험편과 손상이 없는 시험편의 정적잔류강도와 피로수명을 평가하기 위해 INSTRON Model 1332를 사용하였다. 이 때 인장시험은 1mm/min의 일정변위 속도 조건하에서 행하였으며 피로시험은 정현파 형태의 하중을 가하여 실시하였다. 이때, 주파수는 5Hz, 응력비 R 은 0.1로 고정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

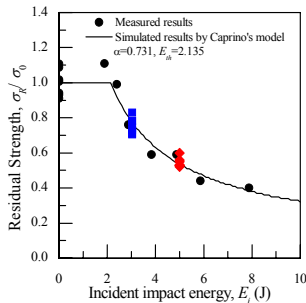
3.1 정적잔류강도

그림 2는 충격에너지에 따른 구조물의 하중지능력의 저하를 정량적으로 평가하기 위하여 충격후의 정적잔류강도를 충격에너지에 대하여 나타낸 것이다. 정적잔류강도 σ_R 는 충격손상이 없는 복합재료의 인장강도 σ_0 에 대하여 정규화되었으며 이 때 충격손상이 없는 복합재료의 인장강도는 총 7회의 인장강도에 대한 평균값을 사용

하였다. 여기서 실선은 식 (1)의 Caprino 모델[7]에 의한 예측결과를 나타낸 것이다.



[그림 2] 잔류강도 저하거동



[그림 3] 충격에너지에 따른 잔류강도의 변동성

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{E_{th}}{E_i} \right)^\alpha \quad (1)$$

여기서 E_{th} 는 충격에너지, E_i 는 하한계 에너지이며 α 는 재료상수이다.

그림에서 0J~2.1J의 충격에너지에서는 정적잔류강도는 거의 저하되지 않으나 2.1J 이상의 범위에서는 에너지의 증가에 따라 정적잔류강도는 저하되며 이는 Caprino 모델에 의하여 잘 표현되고 있다. 이의 거동은 하한계 충격에너지 이하에서는 하중지지능력이 저하되지 않으나 그 이상에서는 충격에너지에 따라 저하된다는 기존의 연구[7]와 일치하고 있다. 따라서 충격에너지를 받는 Glass/Epoxy 복합재료의 하중지지능력은 정적잔류강도에 의해 평가될 수 있음을 알 수 있다.

한편 그림 2에서 볼 수 있듯이 복합재료의 잔류강도는 충격에너지의 크기에 따라 저하되고 있으며 이러한 잔류강도의 변동성 역시 충격에너지에 따라 변한다고 보고되

고 있다[9]. 이러한 충격에너지에 따른 주자식 Glass/Epoxy 복합재료의 잔류강도의 변동성 변화 여부를 평가하기 위하여 3.03J 및 5.00J의 충격에너지에서 각각 7회의 충격시험 및 정적시험을 실시한 후 이의 결과를 그림 2의 결과와 종합하여 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 3.03J 및 5.00J에서 잔류강도는 변동성의 차이가 있는 것처럼 보이지만 이에 대한 정량적인 평가는 곤란하다.

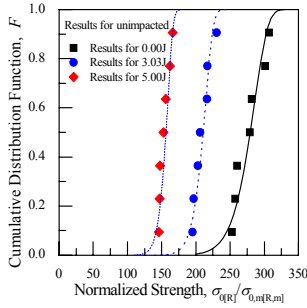
이의 명확한 평가를 위하여 충격손상이 없는 경우의 인장강도와 3.03J 및 5.00J의 충격에너지를 받는 시험편의 잔류강도에 대한 통계적 분석을 실시하였다. 사용된 확률분포는 식 (2)의 2모수 Weibull 분포(2-Parameter Weibull distribution)를 사용하였다.

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/\eta)^\beta] \quad (2)$$

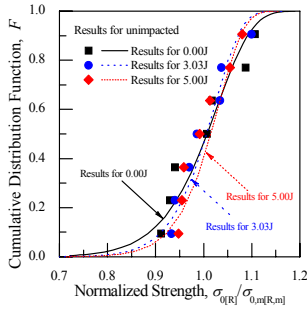
여기서 $F(x)$ 는 Weibull 분포의 누적분포함수(Cumulative distribution function)이고 η 와 β 는 각각 크기(scale) 및 형상(shape) 모수이다. 표 2 및 그림 4는 이러한 통계적 분석의 결과를 나타낸 것으로서 여기서 점선은 Median Rank에 의하여 평가된 실험적 누적확률값을 나타낸 것이다. 또한 2모수 Weibull 분포의 크기 및 형상 모수는 상용 소프트웨어인 Weibull++[10]의 최우추정법(Maximum likelihood method)을 사용하여 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 충격손상이 없는 복합재료와 충격손상 복합재료의 잔류강도는 2모수 Weibull 분포에 잘 적합됨을 알 수 있으며 또한 Weibull 분포의 형상을 결정짓는 형상 계수는 충격에너지의 증가에 따라 점차 증가함을 알 수 있다. 이러한 충격에너지에 따른 변동성의 변화를 보다 명확히 검토하기 위하여 그림 4의 모든 경우에 대한 누적분포함수를 종합하여 그림 5에 나타내었다. 여기서 충격에너지의 에 따라 잔류강도는 저하되므로 이를 고려하지 않고 비교하면 변동성의 변화에 대한 평가가 곤란할 수 있다. 이의 해결을 위하여 잔류강도를 각 경우의 평균값으로 정규화한 후 이를 누적분포함수로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 충격손상이 존재하는 경우, 변동성의 크기와 반비례하는 누적분포함수의 기울기가 커지는 현상이 나타나고 있으며 이러한 경향은 충격에너지가 증가할수록 더욱 현저함을 알 수 있다.

[표 2] 잔류강도에 대한 Weibull 분포의 형상 및 크기 모수

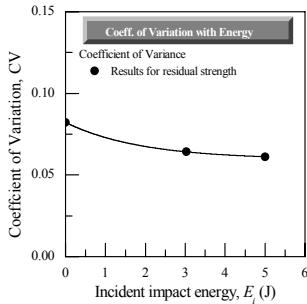
	0.00J	3.03J	5.00J
η	286.210	214.527	159.126
β	14.921	19.297	20.262



[그림 4] Weibull 누적분포함수



[그림 5] 정규화된 잔류강도에 대한 Weibull 누적분포함수



[그림 6] 잔류강도의 변동계수

이러한 현상의 원인은 충격손상이 일종의 응력집중부의 역할[9]을 하여 이로부터 정적파손이 야기되므로 잔류강도의 변동성이 작아졌기 때문이라고 할 수 있다. 이를 명확히 평가하기 위하여 식 (3)의 2모수 Weibull 분포의 변동계수(Coefficient of variation)를 구하고 이를 충격에너지에 대하여 나타내었다.

$$CV = \frac{\eta\sqrt{\Gamma(2/\beta+1)-\Gamma(1/\beta+1)^2}}{\eta\Gamma(1/\beta+1)} \quad (3)$$

여기서 Γ 는 감마함수(Gamma function)이다. 그림 6은 이의 결과로서 충격에너지가 증가함에 따라 잔류강도의 변동성은 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.2 피로수명 저하거동

그림 7은 복합재료의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 검토하기 위하여 충격손상이 없는 경우와 3.03J 및 5.00J의 충격에너지에 의한 충격손상을 받은 경우의 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 여기서 점선 및 실선은 식 (4)로 평가된 $S-N$ 곡선을 나타낸다.

$$\sigma_{amp} = AN_f^B \quad (4)$$

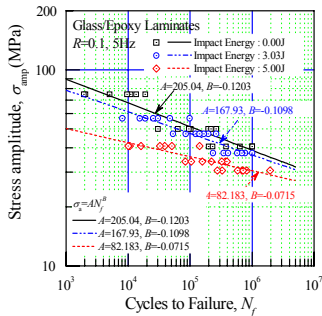
여기서 σ_{amp} 와 N_f 는 작용 응력진폭(Stress amplitude)과 피로수명을 나타낸다. 또한 A 와 B 는 상수로서 그림 7에 각 경우의 값들이 제시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 복합재료의 피로수명은 충격손상으로 인하여 저하되고 있다. 또한 $S-N$ 곡선의 기울기로 표현될 수 있는 충격손상에 대한 복합재료의 피로수명의 민감도는 작용 응력진폭의 크기에 따라 변화, 즉 응력진폭이 저하되면 피로수명의 민감도 역시 저하되는 현상이 나타나고 있다. 이러한 피로수명에 대한 충격손상 및 응력진폭의 영향을 검토하기 위하여 식 (5)와 같은 충격손상 피로지수 (Impact damage fatigue factor) D_f 를 정의하였다.

$$D_f = \frac{\sigma_{amp,0}}{\sigma_{amp,i}} \quad (5)$$

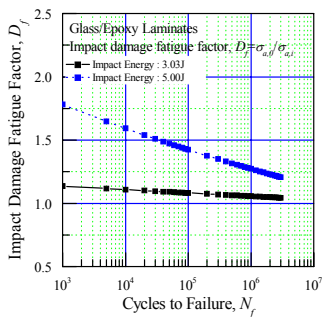
여기서 $\sigma_{amp,0}$ 와 $\sigma_{amp,i}$ 는 특정 수명에 해당하는 충격손상이 없는 경우와 있는 경우의 응력진폭을 나타내며 각 피로수명에서의 응력진폭은 식 (4)를 이용하여 평가하였다. 이러한 충격손상 피로지수는 충격손상으로 저하된 복합재료의 피로강도의 비를 나타내며 이의 결과를 그림 8에 나타내었다. 복합재료의 피로강도는 충격손상에 의하여 저하되지만 이의 크기는 작용 응력진폭이 작을수록 즉, 피로수명이 증가할수록 저하되는 현상이 관찰되었다. 이러한 경향을 보다 면밀히 검토하기 위하여 식 (6)의 충격손상 민감도지수(Impact damage sensitivity factor)를 정의하였다.

$$D_s = \frac{D_f - 1}{D_t - 1}, \quad D_t = \frac{\sigma_R}{\sigma_0} \quad (6)$$

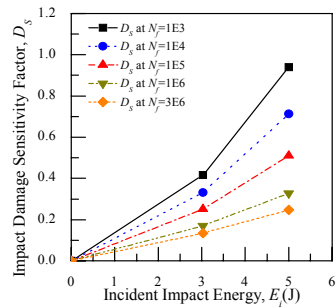
$10^3 \sim 10^6$ 까지의 피로수명에 해당되는 충격손상 민감도 지수를 계산한 후 이를 충격에너지에 대하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 충격손상 민감도 지수는 충격에너지가 증가할수록 급격하게 증가하고 있으며 특히 동일 충격에너지에서도 작용 응력진폭의 크기에 비례하고 있다. 이는 작용된 충격에너지가 증가할수록 충격손상 역시 증가하므로 피로수명에 대한 영향 역시 증가함을 의미한다. 또한 피로수명에 대한 충격손상의 영향은 충격에너지뿐만 아니라 작용 응력진폭에 따라 크게 의존하고 있다. 이러한 현상은 충격손상 복합재료에 높은 응력진폭이 작용할 경우, 응력집중부 역할을 하는 충격손상 부위에서 피로손상이 크게 발생하여 충격손상의 영향이 크지만 낮은 수준의 응력진폭이 작용할 경우에는, 충격손상 부위의 응력집중량이 상대적으로 작아 피로하중의 영향이 상대적으로 높게 나타나기 때문이라고 판단된다.



[그림 7] S-N 곡선



[그림 8] 충격손상 피로지수



[그림 9] 충격손상 민감도 지수

3.3 피로수명에 대한 통계적 해석

복합재료의 피로수명은 그림 7에서 볼 수 있듯이 많은 변동성을 나타내므로 이를 고려할 수 있는 확률론적 해석이 요구된다.

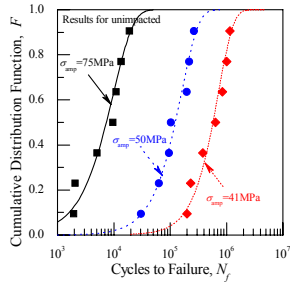
이를 위하여 그림 7의 각 S-N 곡선의 각 작용 응력진폭에서의 피로수명 데이터를 대상으로 2모수 Weibull 분포를 이용한 통계적 해석을 수행하였다. 표 3은 2모수 Weibull 분포의 모수값들을 정리한 것이다. 그림 10은 표 2의 Weibull 모수값들을 이용하여 구한 피로수명의 누적분포함수를 피로수명에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 복합재료의 피로수명은 충격손상의 유무에 관계없이 2모수 Weibull 분포에 잘 적합됨을 알 수 있다. 또한 충격손상이 없는 경우의 누적분포함수를 나타낸 그림 10(a)를 살펴보면 피로수명의 변동성은 작용 응력진폭에 따라 미미하지만 변화하고 있으며 이러한 경향은 충격손상이 존재하는 그림 10(b) 및 10(c)의 경우에도 존재함을 알 수 있다. 그러나 그림 10을 통해서는 복합재료의 피로수명에 대한 충격손상의 영향을 정량적으로 평가하기 곤란하다고 판단된다.

이의 해결을 위하여 본 연구에서는 식 (3)의 Weibull 변동계수를 이용하여 충격손상 복합재료의 피로수명의 변동성에 미치는 충격손상의 영향을 평가하였다. 먼저 식 (3)의 Weibull 변동계수를 이용하여 충격손상이 없는 경우와 있는 경우의 피로수명에 대한 변동계수를 구하였다. 이와 같이 구해진 변동계수를 0.00, 3.03 및 5.00J의 충격에너지를 받은 복합재료중에서 작용 응력진폭이 가장 높은 경우의 변동계수로 정규화하고 이를 피로수명의 특성

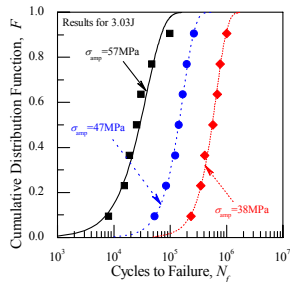
[표 3] 피로수명에 대한 Weibull 분포의 형상 및 크기 모수

E_i (J)	0.00J			3.03J			5.00J		
	75MPa	50MPa	41MPa	57MPa	47MPa	38MPa	41MPa	34MPa	31MPa
η	9,947	159,310	722,130	25,365	169,730	659,550	43,575	270,520	846,080
β	1.2341	1.4219	1.6195	1.3783	2.0170	2.1545	1.2129	1.7844	1.7827

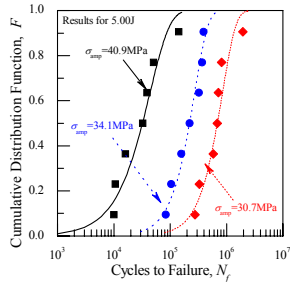
수명(Characteristic life)에 대하여 나타내었다. 그림 11은 이의 결과이다.



(a) Impact energy : 0.00J

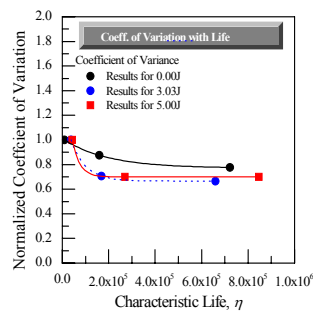


(b) Impact energy : 3.03J



(c) Impact energy : 5.00J

[그림 10] 피로수명의 누적분포함수



[그림 11] 정규화된 피로수명의 변동계수

그림에서 알 수 있듯이 충격손상이 없는 복합재료의 피로수명의 변동성은 특성수명의 증가에 따라 감소하고 있다. 이는 기계적 특성의 변동성은 일반적으로 복합재료 자체의 불균질성에 기인하는 바가 크지만 작용 응력진폭이 작을 경우에는 불균질한 부위에서 바로 파괴가 발생하는 것이 아니라 그 부위에서 피로손상이 누적되기 때문에 재료 자체의 불균질성의 영향은 점차 줄어들기 때문으로 판단된다.

한편 특성수명의 증가에 따른 피로수명 변동성의 감소 현상은 충격손상이 없는 경우보다 충격손상 복합재료의 경우가 보다 더 현저하다. 이러한 현상의 원인으로 충격손상은 그 자체가 재료 불균질성의 영향을 받지만 충격손상 복합재료의 경우, 재료의 불균질성에 기인한 충격손상의 변동성보다는 충격손상 자체의 응력집중 및 이로 인한 피로손상의 집중으로 인하여 피로수명의 변동성이 감소하기 때문으로 판단된다. 또한 그림 11에서는 충격에너지에 따른 피로수명의 변동성은 변화가 없는 현상 역시 관찰되었다. 이는 충격에너지에 따라 충격손상의 크기는 변화하지만 충격손상 부위에서 피로손상이 누적되기 시작하는 메커니즘은 충격손상의 크기에 관계없이 유지되기 때문이라 판단된다.

5. 결론

- 1) 충격손상으로 인하여 저하된 복합재료의 잔류강도는 2모수 Weibull 분포에 잘 적합되었으며 충격에너지의 증가에 따라 잔류강도의 변동성은 점차 감소하였다.
- 2) 충격손상 복합재료의 피로수명은 충격손상에 의하여 크게 저하되었으며 또한 복합재료의 피로수명에 대한 충격손상의 영향은 작용 응력진폭의 크기에 따라 변화함을 알 수 있었다.
- 3) 충격손상 복합재료의 피로수명은 2모수 Weibull 분포에 잘 적합되었다. 또한 작용 응력진폭의 감소에 따라 피로수명의 변동성은 점차 감소하였으며 이는 충격손상부위의 응력집중효과 및 이로 인한 피로손상의 누적현상에 기인한다고 판단된다.

참고문헌

- [1] Abrate, S., "Impact on Laminated Composite Materials", Applied Mechanics Rev. Vol. 44, No 4, pp. 155~190, 1991

- [2] Middleton, D.H., "Composite Materials in Aircraft Structures", pp. 207~227, 1990
- [3] Park, J.H., Ha S.K., Kang, K.W., Kim, C.W. and Kim, H.S., "Impact Damage Resistance of Sandwich Structure subjected to Low Velocity Impact", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101, pp. 425~430, 2008
- [4] 김도식, "유리섬유강화복합재료의 노치강도 및 피로 수명 예측에 관한 연구", 박사학위논문, 한양대학교, 1994
- [5] Broutman, L. J. and Sahu, S., "A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforced Plastics", ASTM STP 497, pp. 170~188, 1972
- [6] Yang, J. N., "Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 11, pp. 176~203, 1977
- [7] Kang, K.W. and Kim, J.K., "Fatigue Life Prediction of Impacted Carbon/Epoxy Laminates under constant amplitude Loading", Composites Part A, Vol. 35, pp. 529~535, 2004
- [8] ASTM D 3039-00, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite", 2000
- [9] Kang K.W., S.K. Koh, D.K. Kim and K.J. Kim, "Assessment of the Statistical Distribution of Flexural Strength of Woven-Fabric Laminates with Impact-Induced Damage", Composite Structures, Vol. 90, pp. 60~66, 2009
- [10] Weibull++7 User's manual, Reliasoft Inc, 2008

강 기 원(Ki-Weon Kang)

[정회원]



- 1993년 2월 : 한양대학교 대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 대학원 기계설계학과 (공학박사)
- 2001년 4월 ~ 2008년 3월 : 한국스포츠과학연구원 책임연구원
- 2008년 4월 ~ 현재 : 국립군산대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

복합재료 구조 및 피로해석, 복합재료 블레이드