

## 충격손상 복합재료의 잔류강도저하거동에 대한 통계적 평가

강기원<sup>1</sup>, 이승표<sup>2\*</sup>, 이진수<sup>3</sup>, 고병갑<sup>4</sup>

<sup>1</sup>국립군산대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>한양대학교 기계공학과 대학원,

<sup>3</sup>인천대학교 기계공학과 대학원, <sup>4</sup>인하공업전문대학 기계과

## Statistical Evaluation for Residual Strength of Impacted Composite Materials

Ki-Weon Kang<sup>1</sup>, Seung-Pyo Lee<sup>2\*</sup>, Jin-Soo Lee<sup>3</sup> and Byung-Kab Koh<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automobile Engineering, Kunsan National University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Incheon University

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

**요약** 본 논문에서는 충격손상을 갖는 유리섬유강화 복합재료의 강도 저하 특성과 이의 통계적 특성을 실험적으로 평가하였다. 평직 복합재료의 주요 충격손상은 섬유파단과 모재균열로서 이는 층간분리가 주된 충격손상인 일방향 적층복합재료와는 상이한 양상이다. 일방향 적층복합재료에 대하여 제안된 기존의 잔류강도 예측모델을 이용하여 충격손상을 갖는 평직 glass/epoxy 복합재료의 잔류강도를 평가하였다. 그 결과 Avva 및 Caprino의 잔류강도 예측모델은 평직 복합재료의 잔류강도에 대해서도 잘 평가되었다. 또한 유리섬유강화 복합재료의 잔류강도에 대한 통계적 특성 평가를 위한 모델을 제안하였으며, 이를 통한 예측결과는 복합재료의 두께와 관계없이 실험결과를 잘 묘사하였다.

**Abstract** This study is experimentally performed to evaluate the strength reduction behavior and its statistical properties of plain woven glass/epoxy composites. The results indicate that the major impact damage of plain woven glass/epoxy composites is the fiber breakage and matrix crack, whereas the dominant impact damage of unidirectional carbon/epoxy laminates is the delamination, which depends on the stacking sequence. The residual strength prediction models, previously proposed on unidirectional laminates, are applied to evaluate the residual strength of plain woven glass/epoxy composites with impact damage. Among these models, the results by Caprino and Avva's model have a good agreement with the experimental results. To investigate the variability of residual strength of the impacted composite materials, a statistical model was proposed and its results were in conformance with the experimental results regardless of their thickness.

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

### 기호설명

$\bar{E}_a, \bar{E}$  : 단위두께 당 흡수, 입사충격에너지  
 $(\bar{E}_{th})E_{th}$  : (단위두께당) 하한계 충격에너지  
 $E_{xx}, E_{yy}, G_{xy}$  : 종방향, 횡방향, 전단탄성계수  
 $F_W$  : 유한폭 보정계수

$G_{IC}$  : 임계에너지해방률

$R$  : 신뢰도

$S_{ij}$  : 직교이방성판의 컴플라이언스

$W_b, W_s$  : 손상이 있는 부재와 없는 부재의

파단에 필요한 변형률에너지밀도

$Z, \mu, \psi$  : 랜덤변수, 평균, 표준편차

\*교신저자 : 이승표(chrisl@hanyang.ac.kr)

접수일 09년 11월 03일

수정일 10년 02월 04일

게재확정일 10년 02월 24일

$\Phi$ : 표준정규분포의 누적함수

$\nu_{xy}$ : 푸아송비

$\sigma_0$ : 손상이 없는 부재의 인장강도

$\sigma_N^\infty$ : 무한판의 노치강도

$\sigma_R$ : 잔류인장강도

$K, k, m, \alpha$ : 실험으로부터 결정되는 재료상수

## 1. 서론

섬유강화 복합재료는 비강도 및 비강성 등의 우수성으로 인하여 기계, 항공 및 자동차 등의 분야에서 광범위하게 적용되고 있다[1,2]. 그러나 복합재료는 두께방향 강화(reinforcement)의 부족으로 충격하중에 매우 취약하다는 단점을 가지므로 충격손상에 대한 보다 신뢰성 있고 안전한 설계방안을 확립하기 위하여 충격손상거동 및 이로 인한 잔류강도 저하양상에 대한 체계적인 연구의 필요성이 증가하고 있다[3,4].

충격손상을 가진 복합재료의 정적인장강도 평가는 부재에 존재하는 원공이나 균열과 동일한 강도저하를 야기한다는 가정 하에 기존의 인공적인 불연속 부에 대한 잔류강도 모델[4-6]을 기본으로 연구가 수행되었다. 예를 들면 Husman 등[4]은 변형률에너지밀도와 입사된 충격 에너지를 결합한 잔류강도 예측식을 제안하였으며, Caprino[5]는 손상량과 충격에너지의 관계를 실험으로부터 결정하는 2-매개변수 모델을 제안하였다. 그리고 Avva 등[6]도 이와 유사한 잔류강도 평가모델을 제안하였다. 그러나 이상의 잔류강도 예측모델은 일방향(unidirectional) 적층 복합재료를 대상으로 정립된 것이므로 이와 상이한 충격손상을 보이는 복합재료에 대한 적용여부는 불확실하다.

한편 복합재료는 이의 특유한 불균질성으로 인하여 인장강도 등에 많은 변동성을 보이고 있다. 이를 고려하기 위하여 대수정규 또는 와이불(Weibull) 분포를 도입한 다수의 확률론적인 해석이 수행되고 있다[7]. 그러나 충격 손상 복합재료의 인장강도는 복합재료 자체의 변동성과 충격손상에 의한 불규칙성[8]이 복합되어 이를 고려한 설계방안은 쉽지 않다.

본 연구에서는 복합재료에 가해진 충격손상과 잔류강도간의 관계를 규명하기 위하여 충격손상을 가진 복합재료의 잔류강도를 평가하고 또한 이의 변동성을 고려할 수 있는 확률론적 해석을 수행하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 잔류강도저하모델

충격손상으로 인한 잔류강도는 인공적으로 삽입된 동일 크기의 균열 또는 원공 등의 불연속 부를 갖는 부재의 잔류강도와 등가 된다는 가정으로부터 충격에너지의 향으로 표현된 잔류강도 예측모델들에 의해 평가되고 있다[4-6].

Husman 등[3]은 충격손상의 영향을 정량화하기 위해 손상이 존재하지 않는 부재와 존재하는 부재의 변형률에너지 밀도(strain energy density)의 차이는 단위두께 당 흡수충격에너지(absorbed impact energy)에 비례한다고 가정하였다.

$$W_s - W_b = K \bar{E}_a = K E_a / B \quad (1)$$

또한 이들 변형률에너지 밀도와 손상길이와의 관계를 정립하기 위하여 복합재료 고유의 손상길이 (intrinsic damage length) 또는 손상영역(damage zone)을 의미하는  $c_0$ 와 이에 길이  $2c$ 의 판통균열이 있는 부재에 대하여 식 (2), (3)과 같이 임계에너지해방률  $G_{IC}$ 를 도입하였다.

$$G_{IC} = A c_0 W_s \quad (2)$$

$$G_{IC} = A (c + c_0) W_b \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 식 (4)와 같다.

$$A = \pi \left\{ \left( 2S_{11} / S_{22} \right) \left[ \left( S_{22} / S_{11} \right)^{1/2} + \left( 2S_{12} + S_{66} / 2S_{11} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

또한 충격손상에 의한 잔류인장강도  $\sigma_R$ 은 식 (1)-(3)으로부터 구한 예측모델 식 (5)에 의해 평가되었다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{W_s - K \bar{E}_a}{W_s}} \quad (5)$$

또한 Avva 등[6]은 충격손상길이  $2a$ 와 단위두께 당 입사충격에너지(incident impact energy,  $E$ ) 및 충격손상으로 인하여 인장강도의 저하가 시작되는 하한계 충격에너지(threshold impact energy,  $E_{th}$ )와의 사이에는 식 (6)의 선형적인 관계가 있다고 가정하였다.

[표 1] 복합재료의 기계적 물성치

	$E_{xx}$ (GPa)	$E_{yy}$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$	$\sigma_0$ (MPa)	$B$
glass/epoxy	19.96	19.96	3.1	0.136	247.6	2.3 (mm)
carbon/epoxy	116.04	7.69	4.92	0.204	885.3	2.0 (mm)

$$a = k(\bar{E} - \bar{E}_{th}) \quad (6)$$

충격손상길이  $2a$ 는 관통균열길이  $2c$ 에 동가(equivalent)된다는 가정으로부터 이들은 식 (6)에 평균응력조건(average stress criterion)[9]에 의한 무한판(infinite plate)의 강도예측식[10]을 도입하여 다음과 같은 잔류강도 예측모델을 제안하였다.

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{c_0}{2c + c_0}} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \frac{1}{F_W} \sqrt{\frac{c_0}{2k(\bar{E}_i - \bar{E}_{th}) + c_0}} \quad (8)$$

여기서,  $F_W$ 는 유한폭보정계수(finite width correction factor)[10]이다.

한편 Caprino [5]는 충격손상길이를 정량화하기 위하여 입사충격에너지  $E$ 와 충격손상길이  $2a$ 는 멱(power)의 관계가 있다고 가정하였다.

$$a = kE^n \quad (9)$$

또한 길이  $2c$ 의 관통균열이 존재하는 복합재료의 예측모델 식 (10)을 도입하고 식 (9)로부터 식 (11)과 같은 충격손상으로 인한 잔류강도 예측모델을 구하였다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{c_0}{c}\right)^m \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = \left(\frac{E_{th}}{E}\right)^{mn} = \left(\frac{E_{th}}{E}\right)^\alpha \quad (11)$$

이상의 잔류강도 예측모델들은 다양한 일방향 적층 복합재료에 적용되었지만 예측모델의 특성에 따른 문제점을 각각 가지고 있다. 즉, 식 (5)의 Husman 모델은 흡수 충격에너지 표현이 어려우며, 특히 강도저하가 시작되는 하한계 충격에너지  $E_{th}$ 의 향이 없으므로 잔류강도의 평가에 부적절하다고 생각된다. 또한 Avva의 모델 식 (8)은

식 (6)을 적용함으로써 산출이 용이한 입사충격에너지  $E$ 의 향으로 표현될 뿐만 아니라 Husman 모델의 문제점인  $E_{th}$ 를 평가할 수 있다. 그러나 손상량과 입사충격에너지의 관계가 비선형인 경우에는 잔류강도 평가의 정확성이 떨어지며 특히  $E_{th}$ 는 물리적으로 의미가 없을 가능성도 있다. 한편 Caprino의 모델 식 (11)은  $E$  및  $E_{th}$  뿐만 아니라 충격손상량과 입사충격에너지간의 비선형성을 고려할 수 있다.

## 2.2 잔류강도의 확률론적 해석

복합재료는 특유한 불균질성으로 인하여 정적강도 등에 많은 변동성을 보이고 있다. 그러나 충격손상 복합재료의 정적강도는 복합재료 자체의 변동성과 충격손상에 의한 불규칙성 [7]이 복합되어 이를 고려한 설계방안은 쉽지 않다. 본 절에서는 이러한 충격손상 복합재료의 정적강도의 변동성을 평가하기 위하여 잔류강도 예측모델과 잔류치 해석(residue analysis)를 통하여 정적강도의 변동성을 평가할 수 있는 방법론을 제시하였으며 다음은 이에 대한 내용이다.

충격손상을 가진 복합재료의 인장강도는 충격손상 크기에 따라 변화하므로[7,8] 이는 충격에너지의 함수로 표현될 수 있다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = f(E) \quad (12)$$

그러나 이의 인장강도는 복합재료의 불균질성과 충격손상의 불확실성으로 인하여 많은 변동성을 나타내므로 이를 고려할 수 있는 확률변수  $Z(X)$ 를 도입하면 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = f(E) + Z(X) \quad (13)$$

여기서  $Z(X)$ 는 인장강도에 무관한 랜덤변수라고 가정하면, 이는 평균이 1이고 양의 값을 갖는 단순한 랜덤변수  $Z$ 로 나타낼 수 있다.

식 (13)을  $n$ 개의 모든 실험 데이터에 대하여 정리하면

다음과 같다.

$$Z_i = \frac{\sigma_{R,i}}{\sigma_0} - f(E_i) \quad (14)$$

여기서  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 이다.

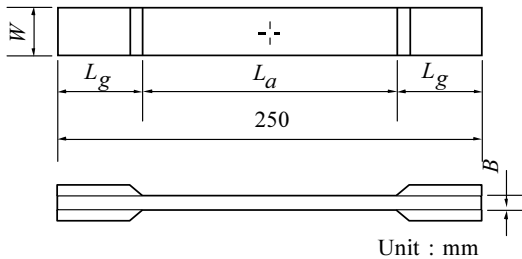
$Z$ 는 인장강도에 관계없는 랜덤변수로 가정하였으므로 평균이 0인 랜덤변수이다. 이는 재료 및 충격손상의 변동성을 나타내므로 이의 확률적 특성은 일반적인 정규분포에 근사한다고 가정할 수 있다.

이와 같은 확률론적 특성을 갖는  $Z$ 의 평균  $\mu_Z$ 과 표준편차  $\psi_Z$ 를 이용하면 이의 신뢰도(Reliability)  $R(Z)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(\Omega) = 1 - \Phi \left[ \frac{Z - \mu_Z}{\psi_Z} \right] = 1 - \Phi \left[ \frac{Z}{\psi_Z} \right] \quad (15)$$

여기서  $\Phi$ 는 표준정규분포의 누적함수이다.

따라서 임의의 신뢰도  $R(Z)$ 에 해당되는 충격손상 복합재료의 잔류강도는 식 (16)과 같이 표현된다.



[그림 1] 시험편 형상

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0} = f(E) + [\phi_Z \cdot \Phi^{-1}(1 - R(Z))] \quad (16)$$

### 3. 실험방법

#### 3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 평직 glass/epoxy 복합재료 및 carbon/epoxy [0<sub>4</sub>/90<sub>8</sub>/0<sub>4</sub>] 적층 복합재료로써 이의 기계적 특성은 ASTM D3039-00[11]의 규정에 의거하여 구하였으며 그 값은 표 1과 같다. 이의 푸아송비(Poisson's ratio)  $\nu_{xy}$ 는 0°/90°로 직교된 스트레인 게이지(strain

gage)를 이용하여 구하였으며,  $G_{xy}$ 는 ±45° 스트레인 게이지법을 사용하여 계산하였다.

시험편 형상은 그림 1과 같으며, carbon/epoxy 복합재료의 적층순서와 판폭은 각각 [0<sub>4</sub>/90<sub>8</sub>/0<sub>4</sub>] 및 20mm이고, 판폭 40mm의 glass/epoxy는 두께의 영향을 고려하기 위해  $B_1=2.3\text{mm}$ ,  $B_2=3.0\text{mm}$ ,  $B_3=4.0\text{mm}$ ,  $B_4=5.0\text{mm}$  및  $B_5=6.6\text{mm}$ 의 5가지 시험편을 사용하였다. 또한 carbon/epoxy와 glass/epoxy 복합재료의 게이지 길이( $L_g$ )는 각각 60mm, 150mm이다.

#### 3.2 충격 및 인장시험

충격시험은 수평형 충격시험기를 제작하여 사용하였다. 시험편과 직접 접촉하는 충격체 팁(tip)부분의 직경은 12.7mm, 충격체의 총 질량은 57.2g이다. 이와 같은 충격시험기를 사용하여 충격손상으로 인한 정적잔류강도 저하량 평가를 위해 충격에너지를 가하였다.

이상의 충격시험기를 사용하여 시험편 두께 당 총 16~24회의 충격시험을 수행하여 충격에너지와 잔류강도와의 관계를 평가하였다. 시험편의 경계조건은 종방향 고정, 횡방향 자유지지조건이며, 또한 충격손상은 초음파현미경(Scanning Acoustic Microscope, Sonix HS1000 Hi SPEED™, 사용주파수:75MHz)을 사용하여 촬영하였다.

한편 잔류인장강도평가는 ASTM D3039-00[11] 규정에 따라 Shimadzu사의 AG-10TE 만능시험기를 사용하여 수행하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 충격손상 평가

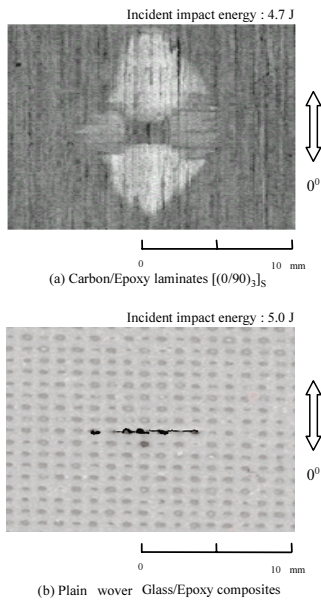
충격으로 인한 glass/epoxy와 carbon/epoxy의 손상양상을 평가하기 위하여 이들 복합재료에 충격에너지 ( $E = 4.7 \sim 5.0\text{J}$ )를 가하였다. 그림 2는 초음파 현미경으로 촬영한 이들 복합재료의 충격손상의 예이며, 특히 carbon/epoxy의 충격손상은 충격점으로부터 아홉 번째 및 열 번째 경계면(interface)의 충격손상을 관찰한 것이다.

이전 연구에서 보고된 바와 같이 일방향 적층복합재료의 충격손상은 모재균열, 층간분리 및 관통저항성의 지배인자로서 매우 높은 충격에너지에서 주로 발생하는 섬유파단으로 구성된다[12]. 이들 충격손상 중에서 층간분리는 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 최하층 경계면인 열 번째 경계면에서 가장 크게 발생하며, 이는 최하층의 적층방향(stacking orientation)과 동일한 종방향으로의 층간분리

길이가 횡방향 층간분리 길이에 비하여 상당히 큼을 알 수 있다.

한편 glass/epoxy 평직복합재료의 충격손상은 충격점 반대편을 촬영한 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 섬유파단과 모재균열로 구성되어 있으며 적층 복합재료와는 달리 횡방향 충격손상이 크게 발생한 슬릿(slit) 형태이며 반면에 종방향 충격손상은 거의 발생하지 않았다.

또한 carbon/epoxy 적층복합재료의 충격손상은 주로 복합재료 내부에 존재하지만 glass/epoxy 평직복합재료의 충격손상은 충격점 반대표면에서 가장 크게 발생하였다. 따라서 glass/epoxy 평직복합재료의 주된 충격손상은 carbon/epoxy 적층복합재료와는 상이한 복합재료 표면에서의 모재균열과 섬유파손이다[12].



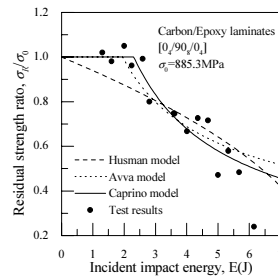
[그림 2] carbon/epoxy 및 glass/epoxy의 충격손상 양상

### 4.2 잔류강도 평가

충격손상 복합재료에 대해 제안된 기존의 잔류강도 예

측모델[4-6]들의 정확성 등을 평가하기 위하여 carbon/epoxy에 대한 충격 및 인장시험을 실시하였다. 그림 3은 잔류강도의 실험결과와 식 (5), 식 (8) 및 식 (11)의 예측모델로부터 평가한 결과를 나타낸 것이다.

각 예측모델에서 사용된 파라미터는 하한계 충격에너지  $E_{th}$  이후의 모든 실험결과를 고려해서 얻었으며, 표 2는 이의 결과를 종합한 것이다. 또한 Avva 모델에서 특성길이  $c_0$ 는 충격손상에 의해 저하된 잔류인장강도와 이에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 횡방향 충격손상길이  $2a_1$ 의 관계를 식 (7)의 평균응력조건으로 평가하여 이들의 관계를 가장 정확하게 표현할 수 있는 값으로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이, Husman 모델은 강도 저하가 시작되는 하한계 충격에너지 및 강도저하양상을 잘 나타내지 못하고 있다. 반면 Avva와 Caprino 모델은 충격에너지에 따른 잔류강도 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.



[그림 3] carbon/epoxy의 잔류강도 평가 결과

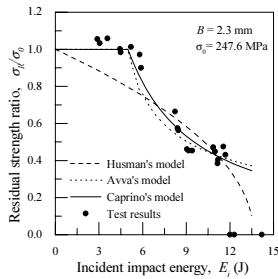
그림 4는 이러한 잔류강도 예측모델들의 정확성과 적용성을 보다 명확히 검토하기 위하여 두께 2.3mm 및 6.6mm의 평직 복합재료에 대한 실험결과와 각 예측모델에 의한 평가결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, Husman 모델은 glass/epoxy의 두께의 대소에 관계없이 하한계 충격에너지 및 강도저하양상을 잘 나타내지 못하고 있다. 반면에 Avva와 Caprino 모델은 본 glass/epoxy의

[표 2] 잔류강도 예측모델의 매개변수 값

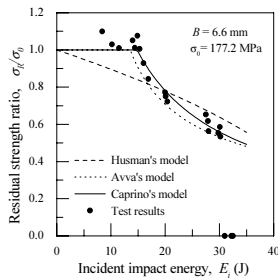
Material	B (mm)	Husman's model		Avva's model			Caprino's model	
		K (MPa·mm/J)	Ws (MPa)	$c_0$ (mm)	k (mm <sup>2</sup> /J)	$\overline{E}_{th}$ (J/mm)	$\alpha$	Eth (J)
glass/epoxy	2.3	0.390	1.982	3.299	2.777	2.220	1.070	4.992
	3.0	0.488	1.921	3.200	6.472	2.227	1.610	6.121
	4.0	0.094	1.224	14.307	2.568	2.630	0.529	12.091
	5.0	0.055	1.224	11.625	3.206	3.935	0.947	21.829
	6.6	0.098	0.766	10.538	5.376	2.053	0.739	13.845
carbon/epoxy	2.0	2.540	0.987	5.163	3.048	1.953	0.708	2.31

경우에서도 충격에너지에 따른 잔류 강도 변화를 잘 나타내고 있으며, 또한 두께가 다른 경우에도 이들에 의한 평가가 타당함을 알 수 있다.

이상의 각 모델에 의한 강도 평가는 이전 연구[12]에서 언급한 바와 같이 충격에너지와 충격손상량 등의 관계를 규정하는 식 (1), 식 (6) 및 식 (9)의 타당성 여부에 의존한다고 판단된다. 그림 5는 이의 검토를 위하여 carbon/epoxy 및 두께 2.3mm의 glass/epoxy의 입사충격에너지에 대하여 횡방향 충격손상길이  $2a_1$  과 변형률 에너지를 나타낸 것이다. 그림의 회귀선은 각 잔류강도 예측모델의 기본가정 식 (1), 식 (6) 및 식 (9)에 의거하여 나타낸 것이다.



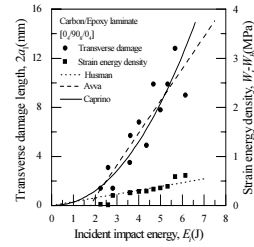
(a)



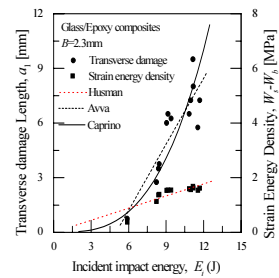
(b)

[그림 4] 평직 복합재료의 예측 및 실험결과

각 예측모델 중에서 식 (9)와 같이 충격손상량과 입사 충격에너지는 역의 관계가 있다고 가정한 Caprino 모델은 그림 5의 실험결과와 잘 일치하고 있으며 또한 고유손상길이에 해당하는 입사충격에너지를 도입함으로써 하한계 충격에너지도 평가할 수 있으므로 우수한 잔류강도 평가 결과를 보이고 있다[12].



(a) carbon/epoxy laminates



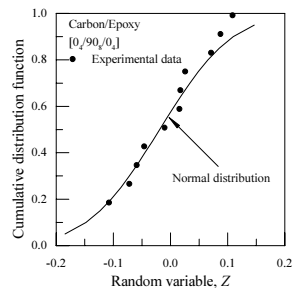
(b) glass/epoxy composites

[그림 5] 충격에너지에 대한 손상 길이 및 변형률에너지 거동

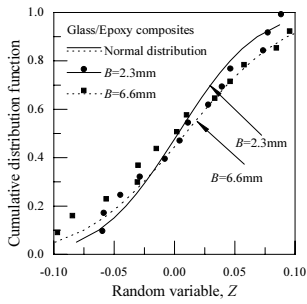
### 4.3 잔류강도의 확률론적 특성

그림 3과 4에서 알 수 있듯이 충격손상 잔류강도는 많은 흠어짐 현상을 보이고 있다. 따라서 잔류강도의 변동성과 이에 대한 충격손상의 영향을 묘사하기 위해서는 확률론적인 해석이 요구된다.

충격손상 복합재료의 잔류강도 평가를 위하여 기존의 잔류강도 예측모델 중에서 정확성과 적용성이 가장 우수한 식 (11)의 Caprino 모델에 랜덤변수  $Z$ 를 도입하고 이를 정리하면 다음과 같다.



(a) carbon/epoxy laminate

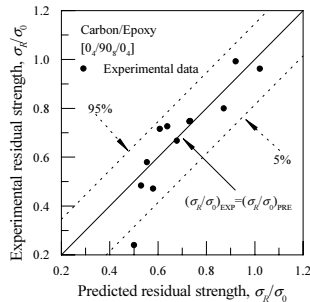


(b) glass/epoxy composite

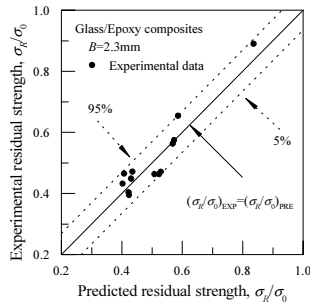
[그림 6] 랜덤변수  $Z_i$ 의 누적분포함수

$$Z_i = \frac{\sigma_{R,i}}{\sigma_0} - \left( \frac{E_{th}}{E_i} \right)^\alpha \quad (16)$$

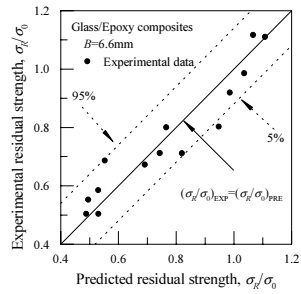
여기서  $i = 1, 2, \dots, n$ 이다.



[그림 7] carbon/epoxy의 잔류 강도에 대한 통계적 평가 결과



(a) B=2.3mm



(b) B=6.6mm

[그림 8] glass/epoxy의 잔류 강도에 대한 통계적 평가 결과

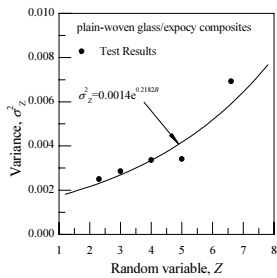
그림 6은 carbon/epoxy와 두께 2.3 및 6.6mm의 glass/epoxy에 대하여 랜덤변수  $Z_i$ 의 누적확률분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 랜덤변수  $Z_i$ 는 모두 0을 중심으로 좌우 대칭적인 경향을 보이고 있으며 또한 누적확률분포곡선에 일치하고 있다. 따라서  $Z$ 는 평균이 0인 정규분포를 따르는 랜덤변수라 할 수 있다.

이와 같은 랜덤변수  $Z$ 의 통계적 특성과 식 (16)을 이용하면 임의의 잔류강도에 대한 신뢰도를 구할 수 있다. 그림 7과 8은 5% 및 95%의 신뢰도에 해당되는 carbon/epoxy 및 glass/epoxy의 잔류강도 예측결과를 나타낸 것이다. 그림에서 예측결과와 실험결과를 잘 묘사하고 있으며 이로부터 본 연구의 방법은 변동성을 포함하는 피로수명의 예측에 유용하다고 할 수 있다.

또한 그림 8(a)와 (b)에서와 같이 두께 2.3mm의 경우가 두께 6.6mm의 경우보다 산포가 심하게 나타나고 있으며 이는 전자의 경우가 잔류수명의 변동폭이 크기 때문이다. 이러한 현상은 복합재료의 특성상 이의 두께가 증가함에 따라 시험편의 불균질성이 더욱 증가하기 때문이라고 판단된다. 이를 보다 명확히 평가하기 위하여 평직 복합재료의 두께에 따른 랜덤변수  $Z$ 의 분산  $\psi_Z^2$ 를 구한 후 이를 충격에너지  $E$ 에 대하여 나타내었다. 그림 9는 이의 결과로서 충격에너지가 증가함에 따라  $Z$ 의 분산은 지수적으로 증가하고 있으며 이는  $Z$ 의 분산과 충격에너지의 관계인 식 (17)로 잘 표현됨을 알 수 있다.

$$\psi_Z^2 = 0.0014 \cdot e^{0.2182B} \quad (17)$$

여기서  $B$ 는 평직 복합재료의 두께이다.



[그림 9] 두께에 따른 랜덤변수의 변동성

### 5. 결론

본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 충격손상 및 이로 인한 잔류강도를 평가하고 이의 변동성을 검토하기 위한 확률론적 해석을 수행하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 일정 수준 이하의 에너지가 가해질 경우, carbon/epoxy 적층 복합재료의 주된 충격손상은 모재균열로부터 발생한 층간분리이지만 평직 glass/epoxy 복합재료의 충격손상은 섬유파손과 모재균열이었다.
- 2) 일방향 적층 복합재료에 대해 제안된 Avva 및 Caprino의 잔류강도 예측모델은 평직 복합재료의 잔류강도에 대해서도 잘 평가되었다.
- 3) 섬유강화 복합재료의 잔류강도에 대한 통계적 특성 평가를 위한 모델을 제시하였으며, 본 모델은 5% 및 95% 신뢰도를 가지며 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 섬유강화 복합재료의 변동성은 두께에 따라 지수함수적으로 증가하였다.

### 참고문헌

- [1] 김영기, 김일현, “탄소섬유강화복합재료의 마식에 관한 연구”, 한국산화기술학회논문지, 제9권, 제2호, pp.291-297, 2008
- [2] 조재용, “복합재료 된 판재에서의 동적 파괴 해석”, 한국산화기술학회논문지, 제7권, 제3호, pp.265-270, 2006
- [3] Abrate, S. "Impact on Laminated Composite Materials", Applied Mechanics Rev. vol. 44, no 4, pp 155~190, 1991
- [4] Husman, G. E., Whitney, J. M., and Halpin, J. C., "Residual Strength Characterization of Laminated

Composite Subjected to Impact Loading", ASTM STP 568, pp. 92~113, 1975

- [5] Caprino, G.,, "Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 18, pp. 508~518, 1984
- [6] Avva, V. S., Vala, J. R., and Jeyaseelan, M.,, "Effect of Impact and Fatigue Loads on the Strength of Graphite/Epoxy Composites", ASTM STP 893, pp. 196~206, 1986
- [7] Kang, K.W. and Kim J.K., "Effect of Shape Memory Alloy on Impact Damage Behavior and Residual Properties of Glass/Epoxy Laminates under Low Temperature", Vol. 88, pp. 455-460, 2009
- [8] Tai, N. H., Yip, M. C. and Lin, J.L.,,"Effects of low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/epoxy laminates", Composite Science and Technology Vol. 58, No. 1, pp. 1-8, 1998
- [9] Nuismer, R. J., and Whitney, J. M., "Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations", in Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593, pp. 117~142, 1975
- [10] Tan, S., C., "Laminated Composites Containing an Elliptical Opening. I. Approximate Stress Analyses and Fracture Models", Journal of Composite Materials, Vol. 21, pp. 925~948, 1987
- [11] ASTM D 3039-00, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite", 2000
- [12] 김정규, 강기원, “평직 Glass/Epoxy 복합재료의 충격 손상거동과 잔류강도평가”, 대한기계학회논문(A) 제 23권, 제2호, pp.294-303, 1999

강 기 원(Ki-Weon Kang)

[정회원]



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

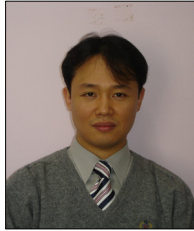
<관심분야>

복합재료 구조 및 파괴해석, 복합재료 블레이드



**이 승 표**(Seung-Pyo Lee)

[정회원]



- 1992년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>  
구조해석, 피로해석

---

**이 진 수**(Jin-Soo Lee)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국교육개발원(기계공학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>  
피로해석, 기계가공

---

**고 병 갑**(Byung-Kab Koh)

[정회원]



- 1995년 8월 : 한양대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1997년 2월 : University of Virginia 박사후 연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과 부교수

<관심분야>  
구조해석 및 최적설계, 피로해석