

〈論 文〉

고속충격을 받는 CFRP 복합재료의 잔류강도 예측

박근철* · 김문생**

(1993년 11월 23일 접수)

Prediction of Residual Strength of CFRP Subjected to High Velocity Impact

Kun Cheol Park and Moon Saeng Kim

Key Words : CFRP(탄소섬유강화 복합재), High Velocity Impact(고속충격), Residual Strength(잔류강도), Indentation(압입량), Contact Law(접촉법칙), Failure Mechanism(파괴기구), Unidirectional Ply(일방향 단층재)

Abstract

The purpose of this research is to propose a model for the prediction of residual strength. For this purpose, two-parameter model based on Caprino's is developed and formulated by the ratio of indentation due to impact and normalized residual strength. The damage zone is considered only as an indentation. Impact tests are carried out on laminated composites by steel balls. Test material is carbon/epoxy laminate. The specimens are composed of $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ and $[\pm 45^\circ]_4$ stacking sequence and have $0.75^T \times 0.26^W \times 100^L$ (mm) dimension. A proposed model shows a good correlation with the experimental results. And failure mechanism due to high impact velocity is discussed on CFRP laminates to examine the initiation and development of damage by fractography and ultrasonic image system. The effect of the unidirectional ply position on the residual strength is considered here.

1. 서 론

강섬유강화 고분자 복합재료는 고분자의 경량성을 살리고 강도를 보충하기 위해 분산층에 따라 강화한 것도 있으며, 일반적으로 비강도 및 비강성이 높고, 또한 큰 파괴저항, 전기 절연성 등의 기능도 가지고 있다. 때문에 기계구조물의 중량경감과 동시에 강도와 강성을 높이는 것이 무엇보다 중요한 조건이 되는 항공우주 기술분야에서 주로 발전이 이루어져 왔다. 그리고 현재로서는 이런 분야 뿐만 아니라 에너지 관련분야, 자동차산업 등 공업재료의 많은 분야에서 연구 개발이 진행되고 있다.

그러나 복합재료는 이러한 많은 장점에도 불구하고 충격하중에 상당히 약하므로 충격 후에는 심한 강도감소를 일으키는데, 비록 최초 충격에는 견딜 수 있도록 설계되었다 하더라도 이후의 충격에는 어느 정도까지 구조물을 지지할 수 있는가의 문제가 여전히 남아 있다.

그러므로 손상을 입은 복합재료의 강도평가에 대한 연구가 많이 진행되어 왔는데 현재까지, 노치(notch)가 있는 복합재료의 잔류강도를 평가하고 예측하는 모델로는 Waddoups, Eisenmann과 Kaminski의 모델⁽¹⁾ 그리고 Whitney와 Nuismer의 모델^(2,3)이 있다. 이러한 모델은 재료의 특성길이(characteristic length)로 잔류강도를 평가하였는데 재료의 특성길이가 재료의 적층구조와 노치나 구멍(hole) 크기에는 독립적인 재료상수(material constant)라

*정회원, 부산대학교 기계설계공학과 대학원

**정회원, 부산대학교 기계설계공학과

는 가정에서였다. 그러나 이후에 보고된 몇몇 연구 기록^(4,5)에서는 이 특성길이가 노치길이에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며 결과적으로 위의 두 모델은 노치길이에 대한 영향은 고려할 수 없는 것으로 밝혀졌다. 그러나 복합재료에서는 노치 또는 구멍이 있는 경우에 대한 잔류강도를 정확히 평가할 수 있는 모델이 아직 제안되어 있지 않으므로 위의 두 모델이 지금까지도 주로 사용되고 있는 실정이다.

그 후 Husmann 등에 의해 선형 파괴역학적(linear elastic fracture mechanics, LEFM) 개념을 이용하여 충격으로 발생한 손상영역과 재료내에 인공적으로 등가결함(equivalent flaw)을 만듦으로서 상사시키려는 시도가 있었다.⁽⁶⁾ 이 후 LEFM을 기초로 한 모델이 물리적해석과 함께 Mar와 Lin에 의해 제안되었고,⁽⁷⁾ 이것을 이용하여 Caprino는 거기에 포함된 물리적해석과 함께 간단한 2-매개변수 모델(two-parameter model)을 제안하였다.⁽⁸⁾ 그러나 이 모델도 관통직전까지의 잔류강도 예측은 하기 어려운 난점이 있었다. 그리하여 Caprino는 다시 적절한 구속조건(constraint condition; 구조물의 형상과 크기, 투사체의 형상과 크기 등)하에서 drop tower 충격실험을 통해 관통 직전까지의 잔류강도를 충격시의 충격에너지를 이용하여 예측할 수 있는 2-매개변수 모델을 제안하였으나,⁽⁹⁾ 고속충격시는 그 파괴양상이 그가 제안한 저속충격과 다르기 때문에 잔류강도를 평가할 때 마다 충격에너지를 계산하여야 한다는 점에 있어서는 구조물에 적용하기에는 어려운 한계성이 있다.

복합재료는 관통노치가 발생하면 급격한 강도 손상을 발생시킴으로 이미 구조재로서의 가치가 없어지게 된다. 그러므로 본 연구에서는 고속충격을 받은 탄소장섬유강화 복합재료의 관통 직전까지의 잔류강도(residual strength) 예측을 위한 적절한 해석모델을 제안하고자 한다. 즉, Caprino⁽⁹⁾의 2-매개변수 모델에서 제안한 충격에너지를 이로 인하여 발생한 압입량(indentation)으로 대체한 2-매개변수 모델로서 잔류강도를 영구압입량(permanent indentation)의 함수로서 계산되어질 수 있도록 시도하였다. 따라서 적절한 구속조건 즉, 구조물의 형상과 크기, 투사체의 형상과 크기가 일정하게 유지된다면 단순히 충격에 의해 발생한 영구 압입량의 크기만으로 그 재료의 잔류강도를 쉽게 예측할 수 있을 것이다. 그리고 충격에너지에 따른 잔류강

도의 변화와 투사체의 크기변화에 따른 잔류강도의 경향을 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1 시편

본 실험에서 사용한 충격시편은 0.12~0.125 mm/RS1222 프리프레그(prepreg)를 사용하여 오토클레이브 몰딩(autoclave molding)공법으로 한국화이바(주)에서 제조한 탄소/에폭시(carbon fiber reinforced plastics, CFRP) 적층복합재이다. 시편의 규격은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 0.75^T×26^W×100^L(mm)의 크기를 가지며 적층형태는 [±45°/0°/90°]₂

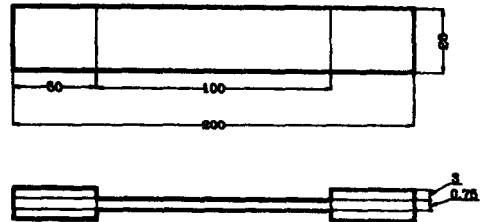


Fig. 1 Geometry and nominal dimensions (mm) of the specimens

Table 1 Properties of carbon fiber(RS/1222)

Maker	TOHO RAYON CO., LTD		
Grade	HTA-7-12000		
Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Density (g/cm ³)
3.969	0.238	1.66	1.77

Table 2 Specification of specimen and tensile strength

Material	Carbon/Epoxy	
Stacking seq.	[±45°/0°/90°] ₂	[±45°] ₄
Thickness	0.75 ^t	
Size	26 ^w ×100 ^l	26 ^w ×100 ^l
Tensile strength (MPa)	802.8	223.6

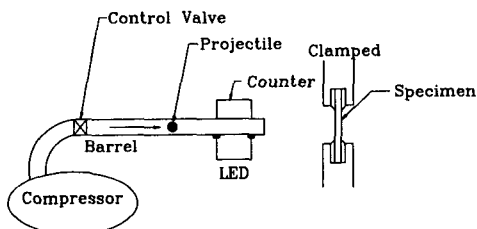
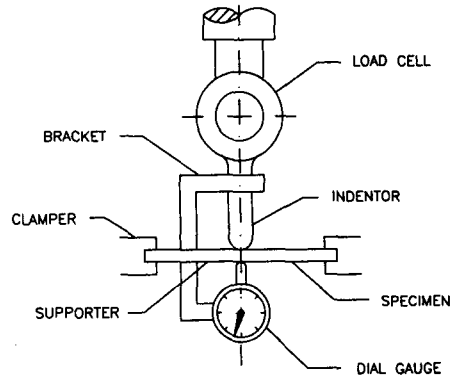
Table 3 Properties of carbon/epoxy (lamina)

Longitudinal modulus	E_1	122.4	GPa
Transverse modulus	E_2	7.95	GPa
Shear modulus	G_{12}	3.57	GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.33	

와 $[\pm 45^\circ]_4$ 이다. 그리고, Table 1에는 탄소섬유 프리프레그의 물성치를 나타내었으며, Table 2에는 시편의 규격과 적층형태 및 적층형태에 대한 인장강도를 나타내었다. 또한 Table 3에는 CFRP 단층(lamina)의 재료상수를 나타내었다.

2.2 충격 실험장치 및 방법

시편에 충격을 가하기 위한 충격장치는 Fig. 2에 나타내었으며, 공기 압축기(air compressor), 발사관, 지지대, 시편고정대, 전자식 카운터(digital counter) 및 제어밸브 등으로 구성되어 있다. 공기 압축기는 $7.5 \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$ 의 압력까지 가압할 수 있고, 이 가압한 공기를 제어밸브에서 한 순간에 개폐시킴으로서 투사체의 속도를 가속시킬 수 있도록 하였다. 투사체로는 직경이 5 mm와 7.14 mm인 강구(steel ball)을 사용하였다. 시편은 시편고정대에 양단 고정된 상태에서 충격을 받도록 장치하였다. 투사체의 속도측정은 수광 다이오드를 센서로 이용하여 발사대 아래에 일정한 거리를 두고 설치하여 두 지점을 통과하는 시간차로 계산하였고, 사용된 카운터는 10^{-4} sec 까지 측정할 수 있다. 속도조절은 공기 압축기의 압력을 조절함으로써 대략 $25 \text{ m/s} \sim 120 \text{ m/s}$ 까지의 필요한 속도를 얻을 수 있었다. 그리고 압흔의 깊이와 폭을 측정하기 위하여 표면조도기(surface roughness tester, Mitutoyo Surf-test-501)를 사용하여 폭은 3배로, 깊이는 상태에 따라 배율을 변화시켜가며 측정하였다.

**Fig. 2** Schematic illustration of impact test**Fig. 3** Schematic illustration of static indentation test

잔류강도의 측정은 하중을 최대 25 Ton까지 가할 수 있는 만능시험기(UTM25T)를 사용하였으며, 전체 하중범위를 $[\pm 45/0/90]_2$ 의 시편에서는 2 Ton, $[\pm 45]_4$ 의 시편에서는 1 Ton으로 하였으며, 크로스헤드(cross head)의 속도는 1 mm/min 으로 실험하였다.

2.3 정적압입 실험장치 및 방법

정적압입에서의 임계압입량, α_{cr} 을 구하기 위한 정적압입 실험장치는 Fig. 3에 나타내었으며, 만능시험기(UTM25T)를 사용하여 전체하중을 5 Ton으로 실험하였다. 실험시 압자와 시편의 접촉력과 압입량을 측정하였으며, 압입량 측정을 위하여 압자에 "C"형 브라켓(bracket)을 설치하고, 시편의 반대면에 0.001 mm까지 측정 가능한 다이알 게이지(dial gauge)를 설치하여, 압자와 시편의 상대변위를 측정하였다. 이 때 압자와 다이알 게이지는 일직선이 되도록 하였다. 실험은 만능시험기의 크로스헤드(cross head)의 속도를 1 mm/min 로 하여 다이알 게이지에 변화가 있을 때 마다 그 하중과 압입량을 측정하였으며, 제하과정에서의 압입량과 하중도같은 방법으로 측정하였다. 최대 접촉력을 $25 \text{ Kg}_f \sim 60 \text{ Kg}_f$ 까지 변화시켜 가면서 행하였으며, 또한 강구의 압입에 의하여 관통이 발생하는 하중의 범위에서도 실험을 행하였다.

3. 잔류강도 예측의 결과 및 고찰

3.1 이론해석

정적 잔류인장강도는 어떤 하중이나 충격을 받은

재료를 단축 인장시험을 하였을때 재료의 파손 강도로 정의된다. 장섬유강화 복합재료에서는 관통이 발생하면 급격한 강도감소가 발생하므로 더 이상 구조재로서의 효용성은 없다. 그러나 충격으로 관통 직전까지의 손상을 받은 복합재료의 잔류강도를 예측할 수 있다면 구조물의 잔존수명 및 이후 견딜 수 있는 최대하중 등도 예측할 수 있으므로 충격 구조물의 성능평가 및 지속적인 사용 가능성을 가늠할 수 있을 것이다. 그러므로 국부적 충격후, 관통 직전까지의 잔류강도는 충격하중을 받은 구조물에 복합재의 지속적인 사용 가능성 여부를 가릴수 있는 유용한 측정량일 것이다.

Caprino⁽⁹⁾는 선형 파괴역학(LEFM) 개념을 기초로 하여 다음과 같은 2-매개변수 모델을 제안하였다.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_o} = \left(\frac{U_o}{U}\right)^n \quad (1)$$

여기에서, σ_r 은 재료의 잔류강도(residual strength), σ_o 는 재료의 인장강도(tensile strength), U 는 충격에너지(impact energy), U_o 는 최초로 재료의 강도가 감소하는 임계 충격에너지(critical impact energy)로 정의되었다. $U=U_o$ 이면, $\sigma_r/\sigma_o=1$ 이 된다. 그리고 U 와 n 은 경제조건, 구조물의 형상과 크기, 투사체의 형상과 크기 등과 같은 구속조건들이 일정하게 유지된다면 재료상수(characteristic property)로 사용된다.

위의 식에서는 재료가 충격을 받았을 경우, 재료가 받은 손상에너지를 계산해야만 하는데, 그러나 대부분의 구조재에 있어서는 재료가 입은 손상의 외형만 나타날 뿐이지 에너지를 구하기는 어렵다. 즉, 충격을 준 투사체의 크기와 속도 등이 주어져야 한다는 점에 있어서는 여전히 구조물의 적용에 한계성이 있다. 그러므로 본 연구에서는 재료에 발생한 외형적 손상 즉, 영구압입량을 측정함으로써 잔류강도를 평가할 수 있는 방법을 제안한다.

재료가 충격을 받게 되면 압입현상이 재료의 충격 표면에서 가장 먼저 일어난다. 충격을 받은 물체의 표면에서 압입현상이 발생했을 때 그 압입된 깊이는 재료가 받은 충격에너지의 정도를 알려주는 것이라 할 수 있다. 때문에 층간분리 등과 같은 파괴양상도 충격시 압입의 깊이에 따라 상대적으로 결정되어지는 손상이라 생각할 수 있다. 그러므로, 여기서는 재료의 잔류강도가 충격에 의해 발생

한 압입으로 결정된다고 생각하였다. 이를 위하여 먼저 다음과 같이 가정한다. (1) 같은 크기의 투사체에 대하여 고속충격시 발생하는 압입의 폭은 같다. 따라서, (2) 재료의 인장강도에 대한 잔류강도 비는 임계압입량에 대한 영구압입량의 비에 의해서만 결정된다고 가정하였다. 고속충격의 충격양상은 같은 에너지 수준에서도 저속충격과는 전혀 다르고, 강도의 감소도 고속충격의 경우가 더 크게 나타난다. 그리고 충격시편의 거동도 Fig.4에 나타난 것과 같이 고속충격의 경우는 국부 압입거동(local indentation behavior)이 거의 지배적인데 반해 저속충격의 경우는 재료의 휨(deflection)이 지배적이다.⁽¹¹⁾ Fig.5에 5 mm 강구의 충격압입의 형상을 두가지 속도에 대해 폭은 3배, 깊이는 측정의 정밀도를 높이기 위해 배율을 변화시켜가며 측정한 것을 예로 나타낸 것이다. Fig.5에서 볼 수 있듯이 투사체의 속도가 43.5 m/s와 80 m/s일때

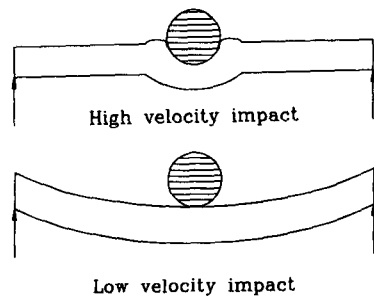


Fig. 4 The comparison of impact behavior between high velocity and low velocity

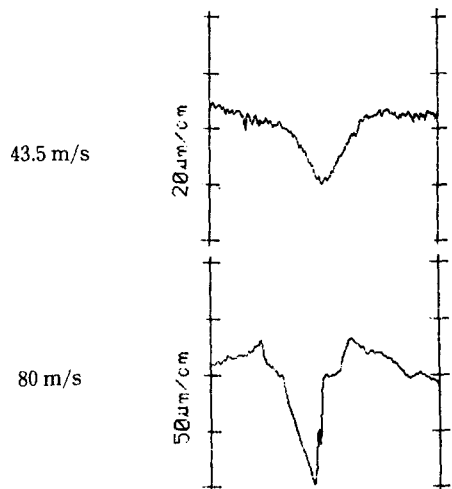


Fig. 5 Configuration of indentation 43.5m/s, 80m/s

외형적으로 드러나는 압입의 폭은 그 크기가 거의 동일함을 알 수 있다. 그러므로 가정(1)은 어느정도 타당하다고 할 수 있을 것이다. 물론 저속충격의 경우라면 압입의 폭이 달라질 수 있기 때문에 위의 가정은 불가하다. 그림에서 볼 수 있듯이 속도가 증가할 수록 즉, 충격에너지가 커질수록 압입량이 증가한다. 따라서 충격에너지는 압입량의 함수로 표현할 수 있을 것이다. 위의 내용에 근거하여 Hertz의 접촉법칙에 근거한 지수법칙(power law)을 사용하면 압입량(indentation)과 충격에너지 사이의 관계를 다음과 같이 표현하면

$$U_o = \kappa a_{cr}^2 \quad (2)$$

$$U = \kappa a_o^2 \quad (3)$$

이다. 그러므로, 식(2)와 (3)을 (1)에 대입함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_o} = \left(\frac{a_{cr}}{a_o} \right)^m \quad (4)$$

$$m = nq$$

여기서, a_{cr} 은 재료가 최초로 강도저하를 일으키는 임계압입량(critical indentation)이고 a_o 는 충격으로 인하여 발생한 영구압입량(permanent indentation)이다. 결과적으로 식(4)는 충격을 받은 재료의 관통 직전까지의 잔류강도를 예측하기 위한 2-매개변수모델이 된다. 여기서 구조물의 형상과 크기, 투사체의 형상과 크기 등과 같은 구속조건이 일정하게 유지된다면 a_{cr} 과 m 은 그 구속조건에 따른 재료상수(characteristic property)라 할 수 있다. a_{cr} 과 m 을 하나의 구속조건에 따라 구하면 영구압입량 a_o 를 측정하여 식(4)에 대입하면 잔류강도를 예측할 수 있다.

식(4)의 양변에 log를 취하면 다음과 같이 표현된다.

$$\log(\sigma_r/\sigma_o) = m \log a_{cr} - m \log a_o \quad (5)$$

식(5)의 m 과 a_{cr} 을 구하기 위하여, 최소자승법(least square method)을 이용하여 계산하였다. 여기서 m 은 log-log 그래프에서 기울기의 절댓값이고, $m \log a_{cr}$ 은 그래프의 종축절편과 같다. 그리고 식(3)을 실험결과에 적용한 것이 Fig. 6~Fig. 13까지는 식(4)와 식(5)를 실험결과에 적용한 결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 이론과 실험이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6~Fig. 9까지는 7.14 mm 강구로 충격한 경우를 나타내는데 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$

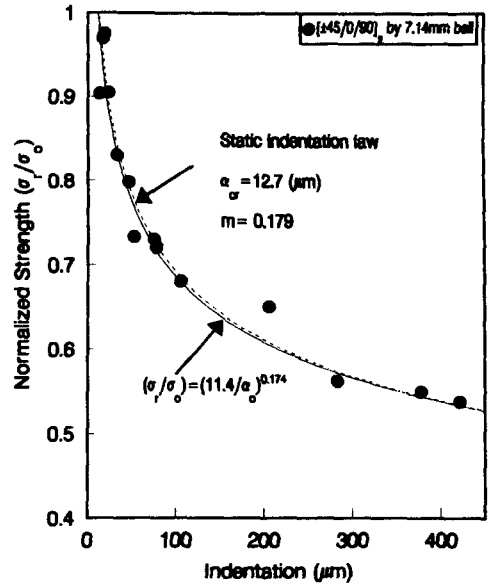


Fig. 6 Residual strength ratio vs. indentation for $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ specimens impacted by 7.14 mm steel ball

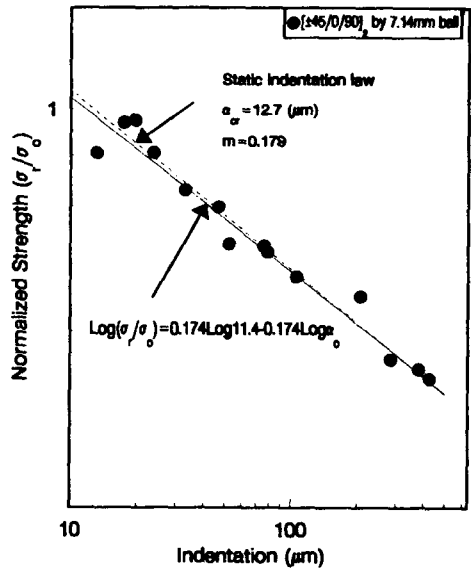


Fig. 7 Residual strength ratio vs. indentation in log-log plot for $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ specimens impacted by 7.14 mm steel ball

적층에서 a_{cr} 은 11.4, m 은 0.174이고, $[\pm 45^\circ]_4$ 적층에서는 a_{cr} 이 14.03, m 이 0.171로 나타난다.

여기까지의 평가방법은 실험값과 잘 일치하고 가정한 것이 타당하다는 것을 보여준다. 그러므로 식(4)로부터 압입깊이의 함수로서 강도감소를 예측할

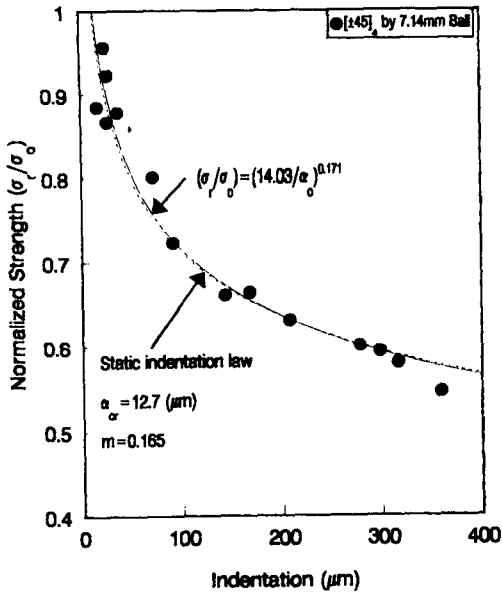


Fig. 8 Residual strength ratio vs. indentation for $[\pm 45]_4$ specimens impacted by 7.14 mm steel ball

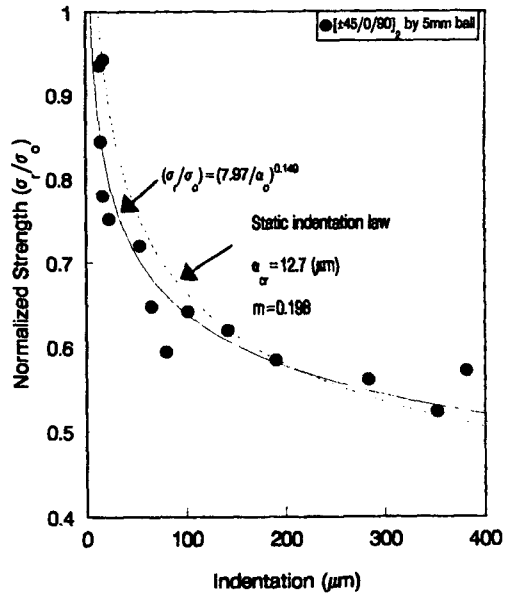


Fig. 10 Residual strength ratio vs. indentation for $[\pm 45/0/90]_2$ specimens impacted by 5 mm steel ball

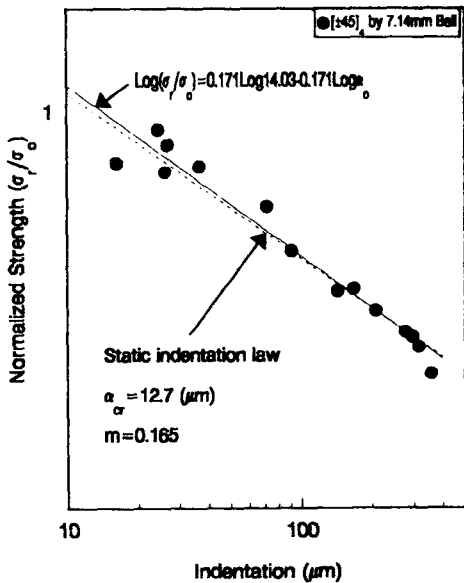


Fig. 9 Residual strength ratio vs. indentation in log-log plot for $[\pm 45]_4$ specimens impacted by 7.14 mm steel ball

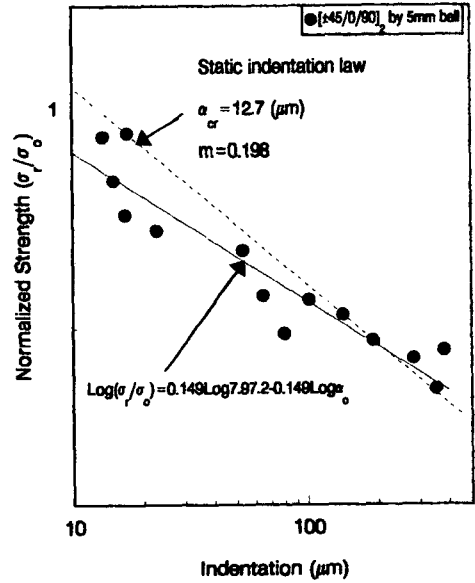


Fig. 11 Residual strength ratio vs. indentation in log-log plot for $[\pm 45/0/90]_2$ specimens impacted by 5 mm steel ball

수 있다. 그리고 이것은 관통속도 이상의 범위에서는 어느 일정한 강도값 즉, 투사체(projectile)의 직경과 같은 노치(hole)을 가진 시편의 강도 값에

가까워진다고 알려져 있다.⁽¹²⁾

Fig. 10에서 Fig. 13까지는 5 mm 강구로 충격한 경우를 나타낸다. 여기에서 $[\pm 45/0/90]_2$ 적층에

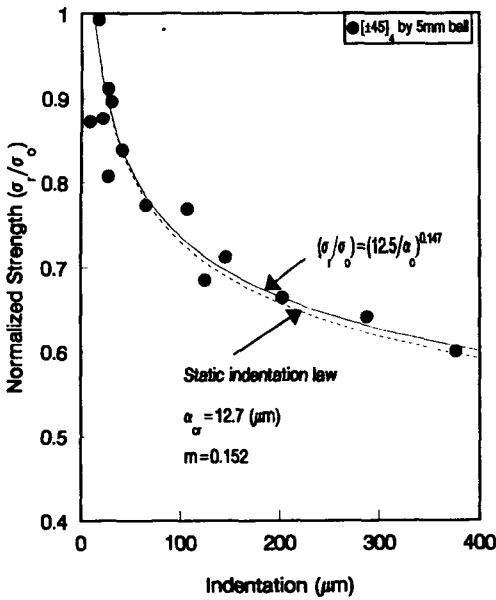


Fig. 12 Residual strength ratio vs. indentation for $[\pm 45]_4$ specimens impacted by 5 mm steel ball

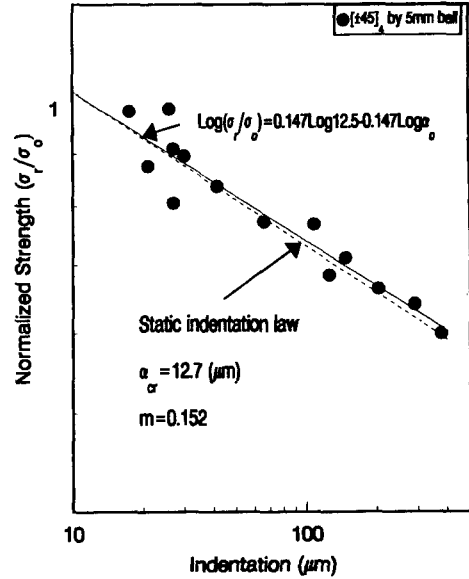


Fig. 13 Residual strength ratio vs. indentation in log-log plot for $[\pm 45]_4$ specimens impacted by 5 mm steel ball

Table 4 Power, m and critical indentation, α_{cr} of presented two-parameter model

Ball dia.	7.14 mm		5 mm	
Stacking seq.	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$
Power, m	0.174	0.171	0.149	0.147
Critical Indentation $\alpha_{cr}(\mu m)$	11.4	14.03	7.97	12.5

서 α_{cr} 은 7.97, m 은 0.149이고, $[\pm 45]_4$ 적층에서는 α_{cr} 이 12.5, m 이 0.147로 나타났다. Table 4에는 각각의 경우에 따른 m 과 α_{cr} 을 도표화 하였다.

재료의 적층형태에 따른 2-매개변수의 값은 큰 폭이 없이 일정하게 유지되는데 반해, 투사체의 크기의 변화에 대해서는 차이를 보이고 있다. 그러므로 잔류강도비는 적층형태보다는 투사체의 크기에 대해 더욱 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 투사체의 크기와 그 외의 구속조건에 따라 달라지는 2-매개변수의 정보(α_{cr} , m)를 수집하면 고속충격을 받는 구조물의 경우에는 영구압입량만 결정되면 그 잔류강도를 예측할 수 있게 된다.

3.2 정적 압입법칙을 이용한 2 매개변수의 유도
충격시의 α_{cr} 과 m 을 구할때는 그 실험장치의 준비나 그 외의 여러가지 필요한 정보를 얻어내는데 측정기구 및 그 외의 과정이 복잡하다. 그러나 정적 압입법칙(static indentation law)을 이용하여 α_{cr} 과 m 을 유도한다면 실험이 간편하고 정보를 얻어내는 측면에서는 보다 유리할 것이다. Fig. 14와 Fig. 15는 7.14 mm의 압자로 정적 압입실험하여 얻어진 영구압입량과 최대 압입량 사이의 관계를 그래프상에 나타내었다. 영구압입량과 최대 압입량 사이의 관계는 Fig. 14, 15와 같이 선형적이므로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

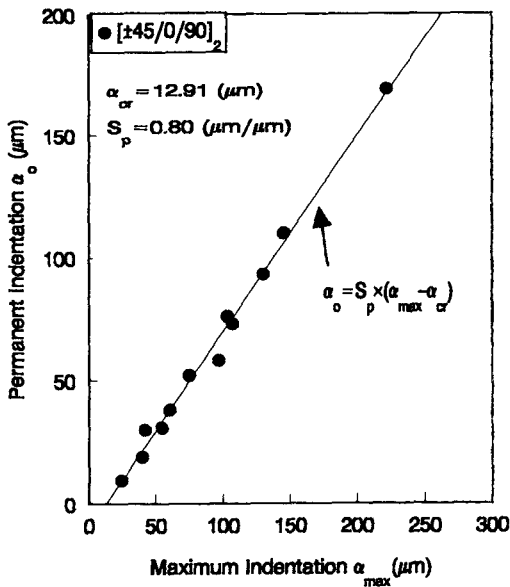


Fig. 14 Permanent indentation vs. maximum indentation for α_{cr} on $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ specimens using by static indentation law

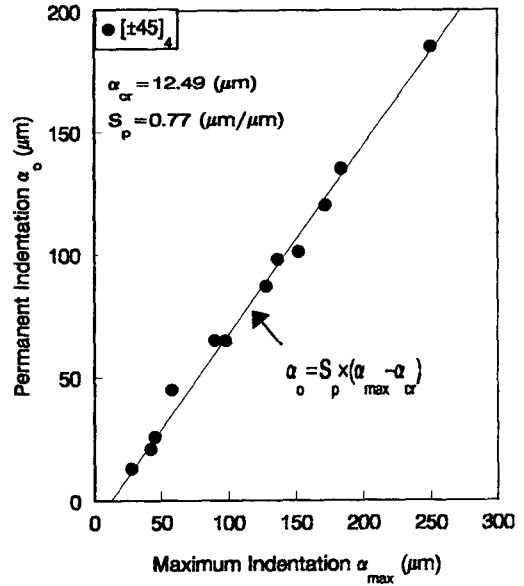


Fig. 15 Permanent indentation vs. maximum indentation for α_{cr} on $[\pm 45^\circ]_4$ specimens using by static indentation law

$$\alpha_o = S_p (\alpha_{max} - \alpha_{cr}) \quad (6)$$

여기서, α_o 는 영구압입량이고 α_{max} 는 최대 압입량(maximum indentation)이다. 그리고 α_{cr} 은 재료에 발생한 최초의 임계압입량을 나타낸다. 영구 압입량과 최대 압입량사이의 관계는 선형관계이므로 S_p 는 기울기를 나타낸다.^(13,14) 정적 압입실험을 통해 하중상태에서의 최대 압입량과 제하중상태에서의 영구 압입량을 측정하면 임계압입량 α_{cr} 을 구할 수 있게 된다.

정적 접촉법칙에서 얻어진 임계압입량 α_{cr} 은 압자(indentor) 및 시편의 크기에는 독립한 재료상수라는 보고가 이미 있었다.⁽¹³⁾ 그리고 이 임계값은 영구압입이 재료에 최초로 발생하였을 때의 압입량이라는 의미이다. 재료의 강도가 감소하였다는 것

은 재료의 소성변형량인 영구압입량이 임계압입량을 넘어섰다는 것을 뜻하므로 정적 압입실험에서 α_{cr} 을 구하고 인장실험으로 충격을 받은 재료의 잔류강도를 구하면, 최소수의 실험으로 m 을 결정할 수 있게 된다. 그러면 영구압입량만의 함수로 표현되는 잔류강도를 구할 수 있다.

Table 5에는 정적 압입실험을 통해 구한 α_{cr} 을 나타내었고, Table 6에는 Table 5의 α_{cr} 평균값을 이용하여 유도한 m 을 도표화 하였다. 두 매개변수의 값은 직경 5 mm의 강구일 때 $[45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ 적층 복합재의 경우에 조금 차이를 보일 뿐 거의 일정함을 알 수 있다. 그리고 여기서 구한 α_{cr} 과 m 을 이용한 곡선을 Fig. 6~Fig. 13에 점선으로 나타내어 충격에서 그려진 곡선과 비교하였다. 그림에서 정적인 경우의 곡선과 충격을 받은 경우의 곡선

Table 5 Critical indentation, α_{cr} using by static indentation law with 7.14 mm indenter

Ball dia.	7.14 mm		
Stacking seq.	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$	Averaged
Critical indentation $\alpha_{cr} (\mu m)$	12.91	12.49	12.7

Table 6 Derived power, m using by static averaged critical indentation, $a_{cr}=12.7(\mu m)$

Ball dia.	7.14 mm		5 mm	
Stacking seq.	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$
Power, m	0.179	0.165	0.198	0.152

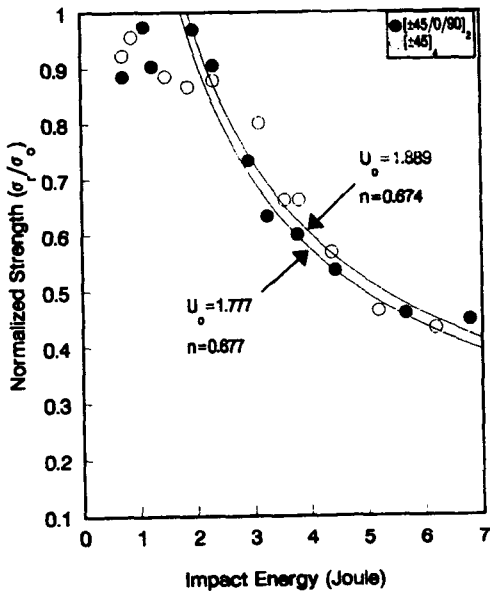


Fig. 16 Residual strength ratio vs. impact energy by 7.14 mm ball

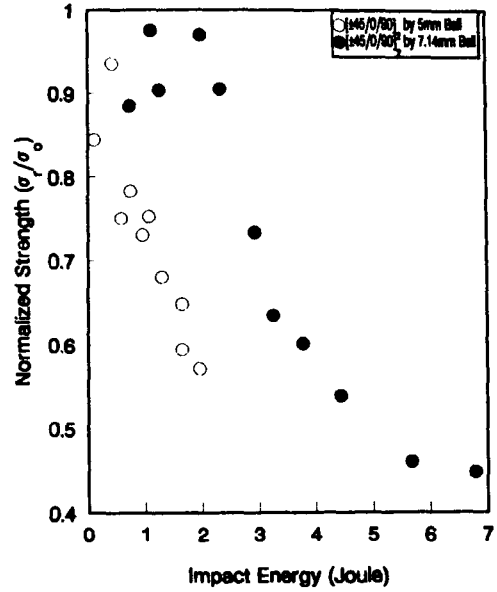


Fig. 18 Residual strength ratio vs. impact energy for $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ specimens

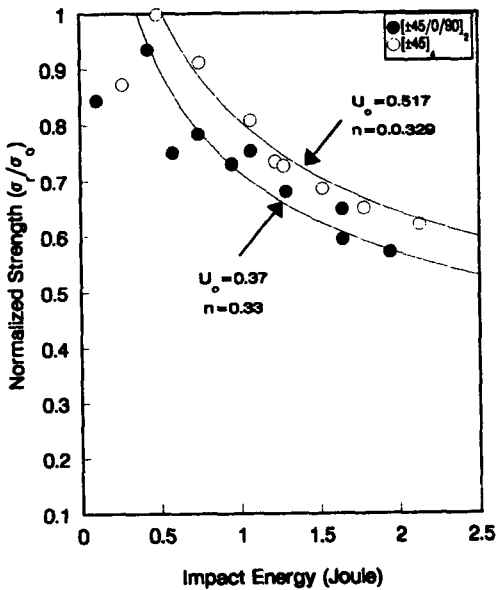


Fig. 17 Residual strength ratio vs. impact energy by 5 mm ball

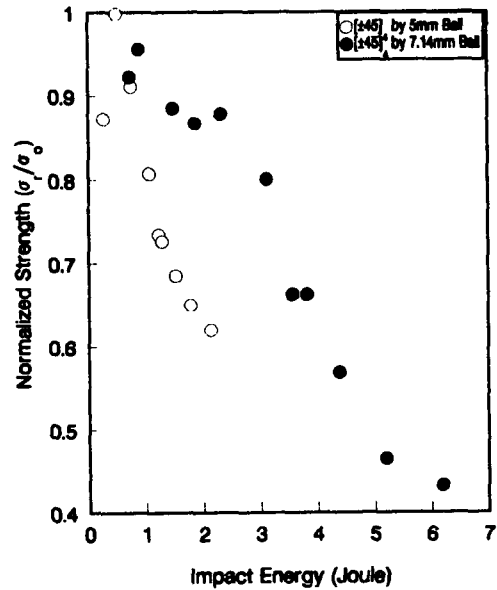


Fig. 19 Residual strength ratio vs. impact energy for $[\pm 45^\circ]_4$ specimens

이 큰 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 그러므로 정적압입실험을 통해 a_{cr} 과 m 을 구하여 잔류강도를 예측하는 것이 타당함을 알 수 있다.

3.3 충격에너지와 잔류강도비

Fig. 16과 Fig. 17은 같은 직경의 투사체 (5 mm, 7.14 mm)에 대하여 적층이 다른 시편의 영향을 각각 잔류강도비와 충격에너지에 대해서 나타내었다. 그리고 Fig. 18과 Fig. 19는 적층은 같으나 크기가 다른 투사체에 대한 충격의 영향을 나타내고 있다. 그리고 Table 7에는 Fig. 16과 Fig. 17에서 Caprino의 방법을 그대로 이용하여 구한 2-매개변수를 도표화 하였다. 위 곡선들의 경향은 Caprino⁽⁹⁾에 의해 제안된 것과 유사한 양상을 나타내고 적층

방향에는 관계없이 거의 같은 기울기와 절편을 가짐을 확인할 수 있다. 즉, Caprino는 drop tower를 이용한 저속충격에 대해서만 해석의 타당성을 보이고 있지만 본 논문에서는 저속충격 뿐만 아니라 고속충격에 대해서도 해석의 타당성을 볼 수 있다. 그림들을 보면 Caprino⁽⁹⁾가 제안한 모델에서도 언급했듯이 잔류강도비와 충격에너지의 관계에서 투사체의 크기의 영향을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 구속조건이 일정하게 유지되어야만 매개변수가 일정하다는 것이다. 본 논문에서 제안한 모델과 Caprino가 제안한 모델은 그 근본적인 의미에 있어서는 에너지를 압입의 향으로 나타내었기 때문에 같다고 할 수 있지만 Caprino 모델은 충격에너지의 향으로 잔류강도를 평가해야 하는데 이

Table 7 Power, n and critical damage energy, U_0 of Caprino's two-parameter model on the given specimens

Ball dia.	7.14 mm		5 mm	
Stacking seq.	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$	$[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$	$[\pm 45^\circ]_4$
Power, n	0.677	0.674	0.33	0.329
Critical damage energy U_0 (J)	1.777	1.889	0.37	0.517

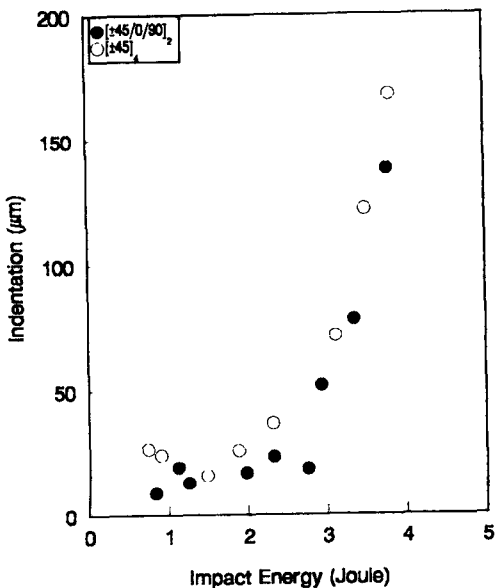


Fig. 20 Indentation vs. impact energy by 7.14 mm ball

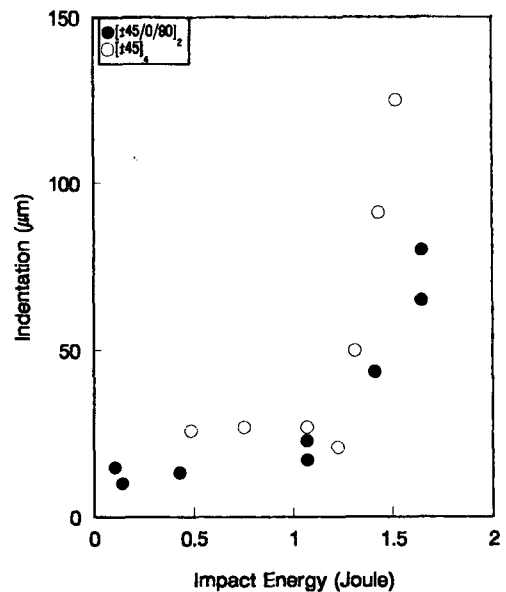


Fig. 21 Indentation vs. impact energy by 5 mm ball

손상을 입은 재료에서는 그 충격 에너지를 구하기가 어려운데 비해 본 논문에서는 그 항을 압입의 항으로 나타냈다는 점에서 구조물에의 적용 가능성이 더욱 높은 것이다. Fig. 20과 Fig. 21은 충격에너지와 압입의 관계를 보여주는데 충격에너지가 증가할수록 압입은 기하급수적으로 증가하는 것을 보여준다.

Fig. 22는 충격을 받을 때 시편의 일방향 배향층(unidirectional ply)의 위치가 잔류강도에 어떤 영향을 나타내는가를 알기 위해 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ]_2$ 와 $[90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ]_2$ 시편을 충격함으로서 충격속도에 따른 잔류강도의 양상을 나타내었다. 일방향 배향층이 충격면에 위치해 있는 시편의 잔류강도 감소폭이 같은 속도에 대해서 큰 것을 볼 수 있는데 그러므로 충격에서 발생하는 강도 감소의 원인은 층간분리 그 자체보다 층간분리에 의하여 발생하는 섬유부의 균열, 그리고 충격면에서의 균열의 영향이 더 크게 차지하는 것을 알 수 있다. 때문에 일방향 배향층의 적층위치 선정도 재료의 충격에 고려하여야 할 요소라 생각된다.

결과적으로 Caprino의 매개변수들은 투사체의 크기에 따라 그 변화량이 큰 반면에 본 논문에서 제안된 모델의 매개변수는 투사체의 크기에 따른

영향이 훨씬 적다. 특히 2 매개변수중 α_{cr} 은 투사체의 크기에는 큰 차이가 없으므로 이 값이 정적인 경우와 같이 투사체의 크기에는 독립적인 재료상수(characteristic property)로 고려해 줄 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 Caprino의 저속충격을 받는 적층복합재의 잔류강도평가 모델을 기초로 하여 고속충격을 받은 적층복합재의 잔류강도를 충격시 복합재가 받는 압입량으로 예측하는 2-매개변수 모델을 제안하였다. 이를 위하여 고속충격실험을 행하였으며 그 때 재료에 발생한 영구 압입량의 비와 잔류강도비의 관계식을 구하였다. 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구조물과 투사체의 형상 및 크기 등과 같은 동일한 실험조건 하에서 고속충격후 발생하는 영구 압입량만으로 예측한 CFRP 복합재료 잔류강도의 이론치와 실험치가 아주 잘 일치함을 보였다.
- (2) 충격에너지에 따른 잔류강도비의 감소율은 재료의 적층순서에 의한 영향보다 투사체의 크기에 의한 영향이 더 지배적임을 알 수 있다. 그렇지만 충격시 일방향 배향층이 충격부 표면에 위치하면 아래쪽에 위치하는 것보다 충격으로 인한 손상을 섬유(fiber) 부분이 크게 받아서 더 심한 강도감소의 원인을 제공한다.
- (3) 두 매개변수 중 α_{cr} 은 투사체의 크기에는 큰 차이가 없으므로 이 값이 정적인 경우와 같이 투사체의 크기에는 독립적인 재료상수로 볼 수 있으나 이에 대하여 더 많은 연구가 요구된다.

참고문헌

- (1) Waddoups, M. E., Eisenmann, J. R. and Kaminski, B. E., 1971, "Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composites Materials," *J. Compos. Mater.*, Vol 5, p. 446.
- (2) Nuismer, R. J. and Whitney, J. M., 1974, "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *J. Compos. Mater.*, Vol 8, p. 253.
- (3) Nuismer, R. J. and Whitney, J. M., 1975, "Uniaxial Failure of Composite Laminates

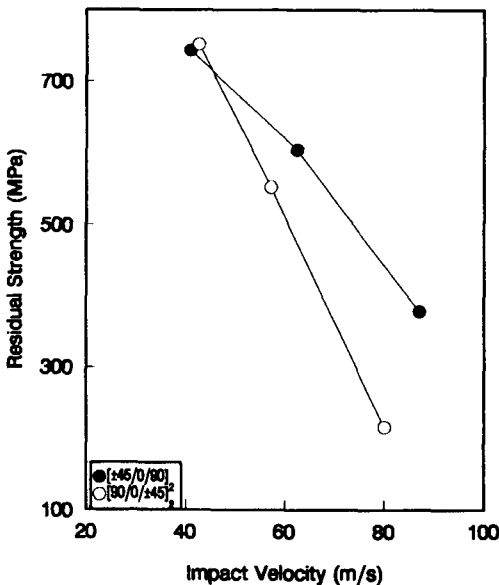


Fig. 22 The comparison of strength decrease between $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/2$ and $[90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ]_2$ impacted by 7.14 mm steel ball

- Containing Stress Concentrations," *ASTM STP* 593, p. 163.
- (4) Prabhakaran, R., 1979, "Tensile Fracture of Composites with Circular Holes," *J. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 41, p. 121.
- (5) Ochiai, S. and Peters, P. W., 1982, "Tensile Fracture of Centre-Notched Angle Ply (0/±45/0)_s and (0/90)_{2s} Graphite/Epoxy Composites," *J. Mater. Sci.*, Vol. 17, p. 417.
- (6) Husmann, G. E., Whitney, J. M. and Halpin, J. C., 1975, "Residual Strength Characterization of Laminated Composites Subjected to Impact Loading," *ASTM STP* 568, p. 92.
- (7) Mar, J. W. and Lin, K. J., 1977, "Fracture of Boron/Aluminum Composites with Discontinuities," *J. Compos. Mater.*, Vol 11, p. 405.
- (8) Caprino, G., 1983, "On the Prediction of Residual Strength for Notched Laminates," *J. Mater. Sci.*, Vol. 18, p. 2269.
- (9) Caprino, G., 1984, "Residual Strength Prediction of Impacted CFRP Laminates," *J. Compos. Mater.*, Vol. 18, p. 508.
- (10) Matsumoto, H., Arai, M., Adachi T. and Ujihashi, S., 1991, "Evaluation of Perforation for CFRP Laminates," *日本機械學會論文集(A編)*, 57卷, 535號, p. 583.
- (11) Cantwell, W.J. and Morton, J., 1989, "Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP," *Composites*, Vol. 20, No. 6, p. 545.
- (12) Awerbuch, J. and Hahn, H.T., 1976, "Hard Object Impact Damage of Metal Matrix Composites," *ASTM 4th Conference on Composite Material : Testing and Design*, p. 231.
- (13) Yang, S. H. and Sun, C. T., 1982, "Indentation Law for Composites Laminates," *ASTM STP* 787, p. 425.
- (14) Tan, T. M. and Sun, C.T., 1985, "Use of Statical Indentation Laws in the Impact Analysis of Laminated Composite Plates," *ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 6~12.