

# 섬유의 적층각과 금속판의 특성에 따른 섬유 금속 적층판의 충격 손상 거동

남현욱<sup>†</sup>, 정성욱<sup>\*</sup>, 한경섭<sup>\*\*</sup>

(2002년 5월 13일 접수, 2003년 1월 6일 심사완료)

## Effect of Fiber Orientation Angle and Property of Metal Laminate on Impact Behaviors of Fiber Metal Laminates

HyunWook Nam, SungWook Jung and KyungSeop Han

**Key Words :** Fiber Orientation Angle(섬유 적층각), Metal Laminate(금속판), Impact Damage(충격 손상), Fiber Metal Laminates(섬유 금속 적층판)

### Abstract

Impact tests were conducted to study the effect of angle ply and metal laminate on impact damage characteristics of Fiber Metal laminates (FML). Impact tests were conducted using drop weight impact machine and damage behavior were analyzed by comparing with load-displacement curve and surface observation and microscopic observation of cross sections. The effect of angle ply on impact characteristics of FML are influenced by property of metal laminate. i.e., when the metal laminate is not enough to strong to prevent fiber debonding, Angle ply FML is superior to singly oriented ply (SOP) FML because angle ply enhance the stiffness by fiber supports and prevent crack propagation. However, when the metal laminate is enough to strong to prevent fiber debonding, SOP FML is superior to Angle ply FML because the fiber of lower ply in Angle ply FML are more stressed than that of SOP FML.

### 1. 서론

복합재료는 치수 안전성, 피로 특성, 비강도 및 비강성 등 우수한 기계적 성질을 가지고 있으므로 여러 구조물에 응용되고 있으며, 특히 경량화가 요구되는 항공기에 널리 사용되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 또한 적층판 각 층의 두께와 섬유방향, 그리고 적층 순서를 설계자가 임의로 결정할 수 있는 이방성 재료의 특성을 가지고 있기 때문에 설계자의 요구 조건에 적합한 특성을 갖도록 구조 요소를 설계, 제작할 수 있는 장점이 있다. 그러나 기존의 섬유고분자 복합재료(FRP)는 섬유 방향과 수직인 방향으로 섬유보다 매우 낮은 지지재의 강도에 의존

한다.

따라서 섬유 방향에 수직인 방향으로의 사용이 극히 제한적이었고, 비록 적은 양의 충격에너지라도 하더라도 복합재 구조물에 상당한 손상을 일으켜 복합재 구조물의 갑작스런 파괴를 일으키기도 한다.<sup>(3)</sup>

섬유 금속 적층판(Fiber Metal Laminates, FML)은 섬유층 사이에 위치한 금속층이 횡방향의 하중을 증가시켜주고 섬유간의 분리가 두께 방향으로 전파되지 않도록 막아주는 역할을 하기 때문에 FRP에서 발생하는 이러한 문제들을 해결할 수 있고 손상 인성(Damage Tolerance)이 뛰어나기 때문에 차세대 구조재로서 주목을 받고 있다.<sup>(4-6)</sup>

인장 강도나 피로 특성이 우수한 FML의 특성상 면내(in-plane) 하중 조건에서의 연구는 상당히 수행되었으나,<sup>(7,8)</sup> 면외(out-of-plane) 하중을 받는 연구는 매우 부족하다. Vlot 등<sup>(9)</sup>은 FML의 충격 물성을 FRP와 알루미늄과 비교 연구하였다. 남 등은 다양한 적층 각도로 FML을 제작한 다음 압

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : redhair@postech.ac.kr  
TEL : (054)279-5893 FAX : (054)279-5899

<sup>\*</sup> 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 회원, 포항공과대학교 기계공학과

입 시험을 통해 섬유의 적층 각도가 FML의 특성이 미치는 영향을 분석하였다. 이 연구에서 강도가 낮은 금속판이 FML의 소재로 사용되는 경우 섬유를 한 방향으로 보강(Singly Oriented Ply, SOP)하면 섬유를 따라 균열이 진행되기 때문에 교차각을 사용하는 것이 바람직하다는 결과를 얻었으며 FML 내부의 교차각이 [15/-15]-[80/-80]에서 우수한 압입 특성을 나타내는 것으로 나타났다.<sup>(10,11)</sup>

본 연구에서는 FML의 충격 손상 거동에 미치는 교차층의 영향과 삽입된 금속의 특성에 따른 FML의 충격 특성을 연구하였다. 교차층의 영향을 연구하기 위하여 SOP FML과 Angle Ply FML를 비교연구하였으며, 금속의 특성에 따른 FML의 충격 특성을 연구하기 위하여 Steel을 삽입한 섬유-금속 적층판(FML-S)과 알루미늄을 삽입한 섬유-금속 적층판(FML-A)을 비교연구하였다. 충격 속도에 따른 각각의 하중 에너지 선도를 중심으로 연구를 수행하였으며, 충돌 후 파괴 양상과 광학 사진을 통해 충격 손상 특성을 연구하였다.

## 2. 변위, 속도, 에너지 측정

충격 변위, 속도, 에너지는 다음과 같이 계산하였다. 낙추가 받는 힘( $f(t)$ )은 중력( $mg$ )과 시편이 받는 힘( $p(t)$ )의 합이라 할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(t) = mg - p(t) \tag{1}$$

따라서 가속도, 속도, 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a(t) = f(t)/m = (g - p(t))/m \tag{2}$$

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt = gt - \frac{1}{m} \int_0^t p(t)dt \tag{3}$$

$$x(t) = \int_0^t v(t)dt = \frac{1}{2}gt^2 - \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t p(t)dt \tag{4}$$

시험 중에 낙추/시편 시스템에서의 총 에너지는 보존된다고 가정을 하면 에너지는 다음과 같이 나타난다.

$$E(t) = K(t) + V(t) + E_a(t) = const. \tag{5}$$

여기서  $K(t)$ 는 운동에너지,  $V(t)$ 는 위치에너지,  $E_a(t)$ 는 시편이 흡수한 에너지이다.  $t=0$ 에서의  $V(t)$ 와  $E_a(t)$ 는 0이므로  $K(0)$ 와  $E(0)$ 는 상수

이며 식 (5)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$E_a(t) = K(0) - K(t) - V(t) = \frac{m}{2}(V_i^2 - V^2(t)) + mgx(t) \tag{6}$$

## 3. 실험 방법

### 3.1 사용 재료

본 연구에 사용한 FML의 3장의 금속판과 4장의 섬유층이 들어간 3/4 FML을 사용하였으며,  $[M/\theta_1/\theta_2/M/\theta_2/\theta_1/M]$ 의 적층 구조를 가진다. 여기서  $M$ 은 금속판을 나타내며  $\theta$ 는 섬유층을 나타낸다. 간단한 표기를 위해 알루미늄을 사용한 FML의 경우 FML-A $[\theta_1/\theta_2]$ , 스틸을 사용한 FML의 경우 FML-S $[\theta_1/\theta_2]$ 로 표기하기로 한다. 본 연구에 사용한 섬유의 각도는 SOP FML의 경우 80°를 사용하였으며, Angly ply FML의 경우 80/-80을 사용하였다. 이 각도에서 FML은 압입 물성의 지하 없이 FML가장 높은 인장 강도를 가진다.<sup>(11)</sup> FML의 제작 과정은 이전의 연구와 동일하므로 여기서는 Steel을 이용한 FML의 제작에 대해서만 간단히 언급하겠다. 사용한 Steel은 (주포항제철에서 제작된 저탄소강(Low Carbon Steel)으로써 인장강도는 400MPa, 항복강도는 300MPa, 탄성 계수는 210GPa이다. Steel을 이용한 섬유 금속 적층판(FML-S)의 제작은 Steel의 표면처리를 제외한 나머지 과정은 FML-A의 경우와 동일하다. Steel의 표면처리 방법에는 인산-알코올(Phosphoric Acid-Alcohol) 방법, 질산-인산(Nitric-Phosphoric Acid)방법, 황산-중크롬산 나트륨(Sulfuric Acid-Sodium Dichromate)방법, 황산-중황산염 나트륨(Sulfuric Acid-Sodium Bisulfate)방법을 이용하는 방법이 있다.

본 연구에서는 질산-인산 방법을 이용하여 화학 연마하였는데, 이 방법은 Trawinski가<sup>(12)</sup> 기준 표면처리 방법에서는 용액이 고온이어야 하며, 에칭시 6가 크롬(Hexavalent Chromium)이 발생한다는 문제점을 해결하기 위해 제한한 방법으로 상온에서 표면처리를 하는 것이 특징이다.

질산-인산 방법을 이용하여 화학 연마(Chemical Polishing)된 Steel 박판은 FML의 비중을 고려하여 시편의 가운데만 사용하였다. 따라서 FML-S는  $[Al/\theta_1/\theta_2/Steel/\theta_2/\theta_1/Al]$ 의 적층 구조를 가진다. 이 경우 FML-S의 평균 밀도는 3.4g/cm<sup>3</sup>이며

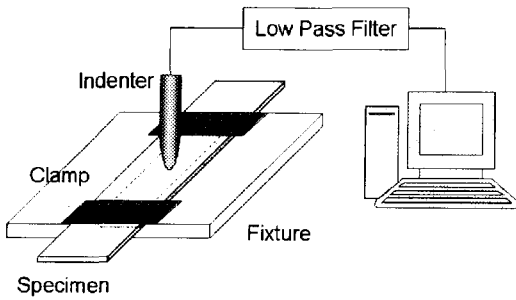


Fig. 1 Schematic of Impact test

이는 FML-A 의 평균 밀도  $2.17\text{g/cm}^3$  보다 1.5 배정도 높은 값이다. 적층 각도는 FML-A 와 동일하게 [80/80], [80/-80]을 선택하였다.

3.2 충격 시험

충격 시험은 자유 낙하식 저속 충격 시험기 (Dynatup, Model 8250)을 이용하여 수행하였다. 충격체는 직경 12.7mm 이고 끝이 둥근 봉 형태로 압입 시험시 압입자와 동일한 형상을 가진다. 충격 속도는 충격체의 낙하 높이로 조절하며 충격 에너지는 충격체의 질량과 낙하 높이로 조절할 수 있다. 본 연구에서는 충격체의 질량(2.58kg)은 고정시키고 낙하 높이를 조절하여 FML-A 의 경우 0.65, 1, 1.5, 2, 4m/s 의 충격 속도에서 시험을 수행하였으며, FML-S 의 경우 1, 1.5, 2, 2.5, 4m/s 의 충격 속도에서 시험을 수행하였다. 충격 시험 전 자유 낙하 시험을 통해 충격 속도를 검증하였다. 충격 시험시 시편이 휘어지지 않도록 손상이 진행될 부위를 제외한 나머지를 고정하였으며, 충격 시험 후 이차 충격이 발생하지 않도록 Rebound Break 를 이용하여 이차 충격을 방지하였다. Fig. 1 은 충격 시험의 개략도를 나타낸다.

충격 시험시 발생하는 충격 신호는 Load Cell 을 이용하여 감지하였으며, 이 신호는 저주파 여파기 (36kHz, 3dB)와 고속 신호 획득기(GRC Data Acquisition Board)를 거친 다음 PC 에서 받아 속도, 에너지, 변위를 계산하였다. 충격 시험 후 손상 관찰은 전면의 손상 영역과 후면의 균열 진전 영역을 육안으로 관찰한 후 두께 방향으로 시편을 절단한 후 Polishing 처리하여 광학 현미경으로 시편 내부의 파괴 양상을 관찰 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2 에 FML-A[80/80]의 충격 속도에 따른 하중-변위 선도를 나타내었다. 충격 선도는 초기 균

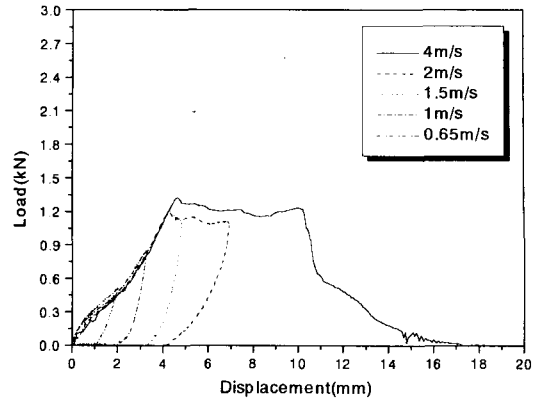


Fig. 2 Load-displacement curve of FML-A[80/80] for the variation of impact velocity



(a)



(b)

Fig. 3(a) Top face and (b) Back face of FML-A[80/80] after impact

열 발생에 의해 일차 피크를 형성하고 섬유를 따라 균열이 성장하면서 하중이 감소가 발생하며 섬유의 파괴와 함께 이차 피크가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 충격 하중 선도를 충격 후 시편의 균열 전과 양상을 비교하면 각 충격 속도에서의 초기 균열 성장 및 전과 양상을 파악할 수 있다.

Fig. 3에 FML-A[80/80]의 충격 후 시편의 전면과 후면사진을 나타내었다. 0.65m/s 의 충격 속도에서 섬유 방향을 따라 균열이 발생한 흔적이 나타난다. 1m/s 의 충격 속도에서 균열은 섬유 방향 따라 더욱 성장하게 되며, 1.5m/s 에서는 전면과 후면에 모두 균열의 흔적이 나타나는 것으로 미루어 시편의 두께 방향으로 균열이 완전히 전파되었음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2의 하중선도에서 첫번째 하중감소가 발생하는 점과 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 하중 선도의 첫번째 피크는 시편의 두께 방향으로 전파된 균열이 섬유 방향으로 성장하면서 나타나는 것이라 볼 수 있다. 2m/s 에서는 섬유의 파괴에 의한 균열은 보이지 않으나 지그의 경계까지 균열이 성장한 것을 볼 수 있으며, 4m/s 에서는 섬유의 파괴와 함께 관통이 발생된 것을 볼 수 있다. 4m/s 에서의 첫번째 피크는 저속에서 나타나는 첫번째 피크에 비하여 약간 높은 것을 볼 수 있는데, 이것은 하중 속도와 에너지가 높아 섬유 분리에 의한 균열 전파가 끝나기 전에 섬유 파괴가 발생하기 때문이다.

Fig. 4에 FML-A[80/80]의 단면의 광학 사진을 나타내었다. FML-A[80/80]의 경우 하부 섬유층과 알루미늄층 사이에서 초기 균열이 형성되고, 이 균열은 상대적으로 취약한 섬유층의 모재를 따라 섬유 방향과 두께 방향으로 성장하면서 중간이

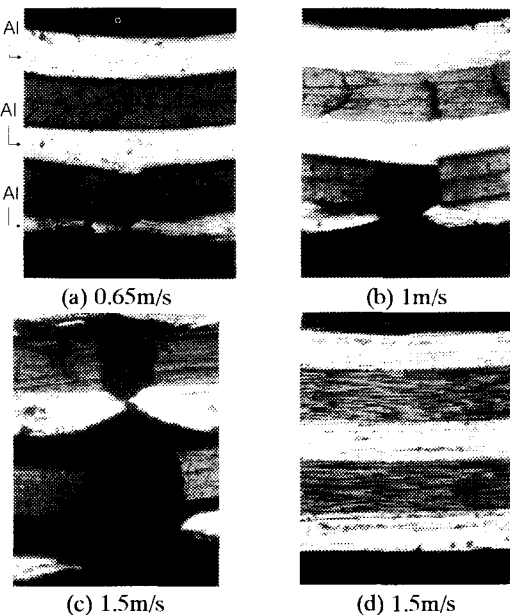


Fig. 4 Optical Microscopy of FML-A[80/80] after impact (a), (b), (c) Transverse section and (d) Longitudinal section (x 80)  
알루미늄층에 도달하게 된다. 이 때 상부 섬유층

에서도 섬유층의 두께 방향으로 균열이 발생하여 알루미늄층에 도달하게 되는데, 중간이 알루미늄층은 약간의 균열 지연을 시키지만 균열 전파를 막지 못하고 섬유 분리로 이어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에 FML-A[80/80]의 하중 변위 선도를 나타내었다. FML-A[80/80]에서와 같이 압입 선도와 비슷한 거동을 나타내었다. 섬유 분리에 의한 균열의 성장 없이 섬유의 파괴가 발생할 때까지 하중이 증가한 후 관통하였다.

Fig. 6에 FML-A[80/80]의 충격 후 시편의 전면과 후면을 나타내었다. 0.65m/s 에서 시편의 하부에 섬유의 방향을 따라 약간의 균열이 형성되나, 충격 속도가 증가하여도 균열이 FML-A[80/80]에 비하여 작게 형성되는 것을 볼 수 있다. FML-A[80/80]에서 두께 방향으로 균열 전파가 발생하였던 1.5m/s 에서도 시편의 두께 방향으로 균열이 전진하지 못하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 하부의 섬유층에 발생한 균열들이 교차층의 존재로 상부로 전파하지 못하고 균열의 성장이 하부 섬유가 파괴될 때 까지 방해 받기 때문이다. 교차층이 존재하는 FML-A[80/80]의 경우 2m/s 의 충격 속도에서 상부 섬유층에 섬유의 파괴가 발생된 것을 볼 수 있는데, 이것은 충격 하중 변위 선도에서 급격히 하락한 점과 일치하는 것이다.

Fig. 7에 FML-A[80/80]의 광학 사진을 나타내었다. FML-A[80/80]의 경우도 초기 균열은 하부 섬유층과 알루미늄층에서 발생하는 것을 볼 수

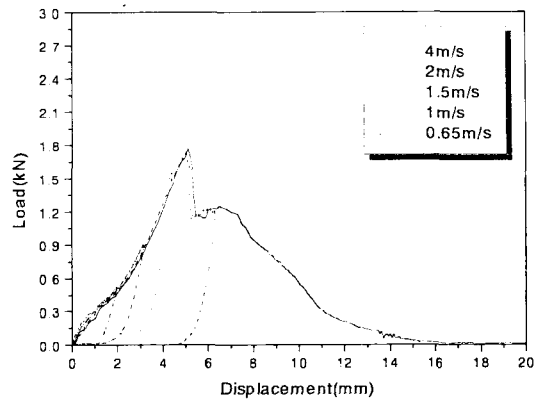


Fig. 5 Load-displacement curve of FML-A[80/80] for the variation of impact velocity

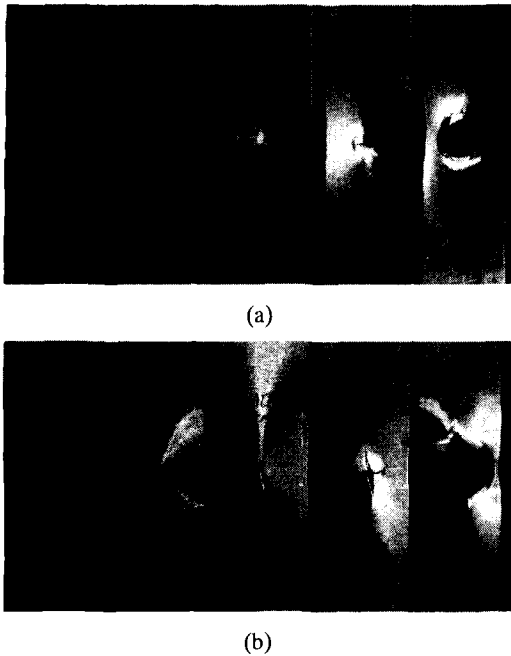


Fig. 6 (a) Top face and (b) Back face of FML-A[80/80] after impact

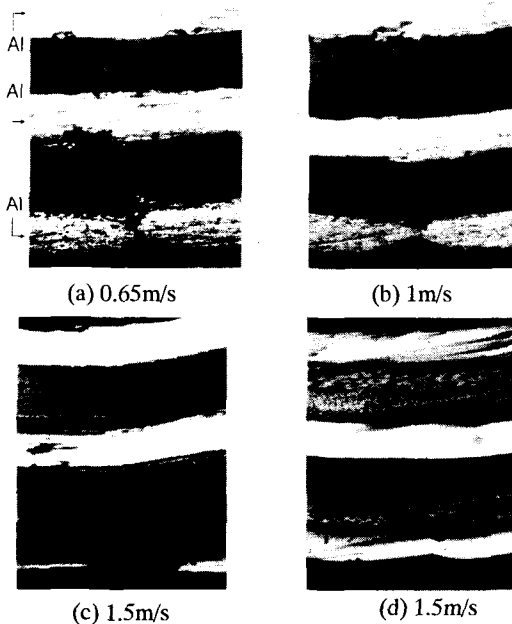


Fig. 7 Optical Microscopy of FML-A[80/80] after impact (a), (b), (c) Transverse section and (d) Longitudinal section (x 80)

있다. 그러나 이 균열은 속도의 증가에 따라 하부 균열 개시부의 폭이 증가하고 상부 섬유층의

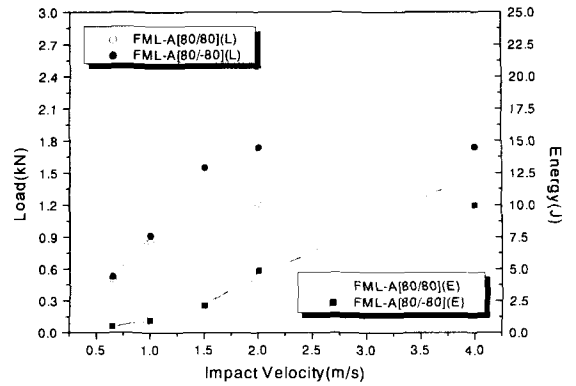


Fig. 8 Maximum load and absorbed energy of FML-A[80/80] and FML-A[80/80] for the variation of impact velocity

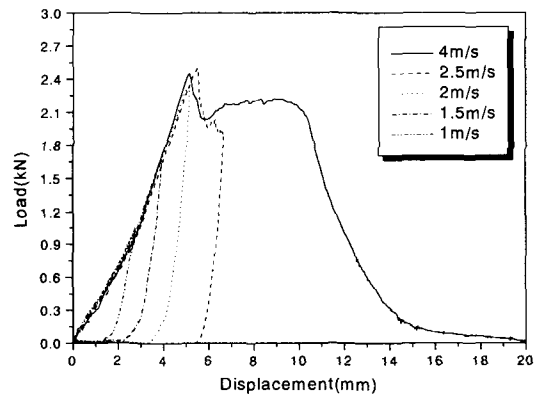


Fig. 9 Load-displacement curve of FML-S[80/80] for the variation of impact velocity

모재에도 균열이 발생하지만 교차층의 존재로 균열이 시편의 두께 방향으로 전파 되지 않을 것을 볼 수 있다. 이런 손상 기구는 SOP FML-A 에서 나타나는 섬유의 분리에 의한 균열 성장 형태를 섬유의 파괴로 바꾼다. Fig. 7 의 (d)에 섬유 방향을 따라 절단한 단면의 광학 사진에서는 FML-A[80/80]은 섬유의 파괴가 관찰되지 않으나 FML-A[80/80]은 하부 섬유층이 파괴된 것을 볼 수 있다. Fig. 8 에 FML-A[80/80]과 FML-A[80/80]의 충격 속도에 따른 최대 하중과 흡수 에너지를 나타내었다. 흡수 에너지는 비슷한 경향을 나타내었으나 최대 하중은 FML-A[80/80]이 높게 나타났다

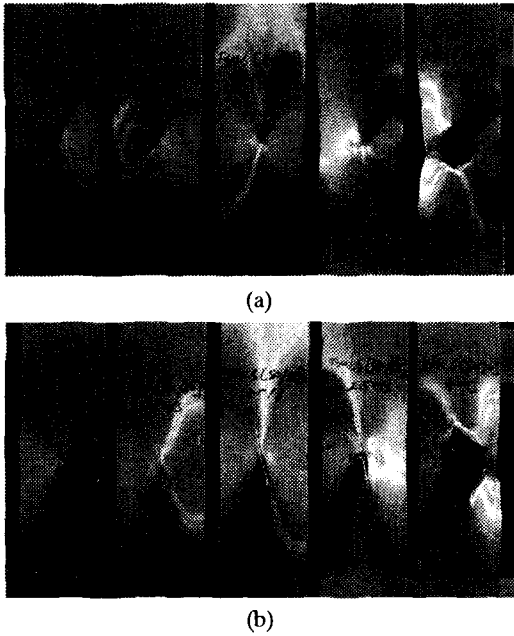


Fig. 10 (a) Top face and (b) Back face of FML-S[80/80] after impact

이것은 Angle Ply FML 의 경우 아래층 섬유의 파괴에 의해 거시적 균열이 시작되는 반면 금속판이 섬유 분리를 효과적으로 막지 못하는 FML-A 의 경우 섬유 분리에 의해 거시적 균열이 시작되기 때문이다.

Fig. 9 에 FML-S[80/80]의 충격 하중-변위 선도를 나타내었다. FML-A[80/80]과 달리 균열 진전의 흔적이 나타나지 않고 섬유의 파괴 후 일정한 하중을 유지하다 하중이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10 에 FML-S[80/80]의 충격 후 시편의 전면과 후면을 나타내었다. 1m/s 에서 시편의 하부에 균열이 생성된 것을 볼 수 있다. 이 균열은 충격 속도의 증가에 따라 조금씩 성장하지만 FML-A[80/80]에 비하여 매우 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 중간에 삽입된 Steel 층이 시편의 두께 방향 균열 진전을 막을 뿐 아니라 섬유 분리를 막기 때문이다.

FML-S[80/80]은 2m/s 의 충격 속도까지 섬유의 파괴 흔적은 보이지 않으며 2.5m/s 에서 Steel 에 균열이 발생하면서 상부와 하부의 균열이 결합하고 섬유의 파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 2.5m/s 에서의 하중-변위 선도가 최대 하중 발생점을 지난 것과 일치하는 결과이며 하중 감소의 원인이 섬유의 파괴와 Steel 에 균열 발생 때문이라 할 수 있다.

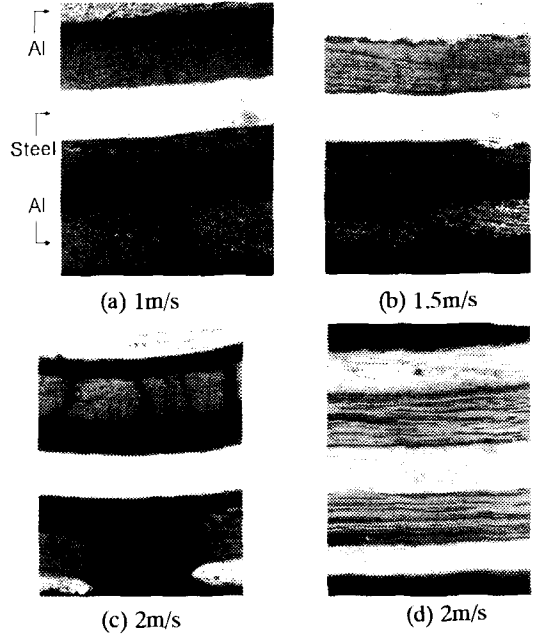


Fig. 11 Optical Microscopy of FML-S[80/80] after impact(a), (b), (c) Transverse section and (d) Longitudinal section (x 80)

Fig. 11 에 FML-S[80/80]의 충격 속도에 따른 단면의 광학 사진을 나타내었다. FML-S[80/80]의 초기 균열 역시 하부 섬유층과 알루미늄층에 발생하며 이 균열은 섬유층의 모재를 따라 쉽게 성장하는 것을 볼 수 있다. 섬유의 법선 방향 단면의 경우 속도의 증가에 따라 하부 섬유층의 균열의 폭이 증가하고 상부 섬유층에도 모재를 따라 두께 방향으로 많은 균열이 발생되었으나 중간의 Steel 층이 균열의 전파를 막고 있는 것을 볼 수 있으며, 섬유 방향의 단면의 경우 손상이 거의 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. 이러한 Steel 층은 SOP FML-A 에서 발생하는 섬유 분리에 의한 균열의 전파를 섬유의 파괴가 발생할 때까지 억제하여 Steel 층과 섬유층이 동시에 파괴되는 역할을 한다.

Fig. 12 에 FML-S[80/80]의 충격 하중-변위 선도를 나타내었다. FML-S[80/80]은 FML-S[80/80]과 달리 첫번째 피크에서 하중이 감소한 후 다시 하중이 증가하여 두 번째 피크를 나타내었다. 각각의 피크는 섬유 파괴와 Steel 의 균열 발생과 관련이 있는 것으로 충격 후 시편으로부터 원인을 추정할 수 있다.

Fig. 13 에 FML-S[80/80]의 충격 후 시편의 전면과 후면을 나타내었다.

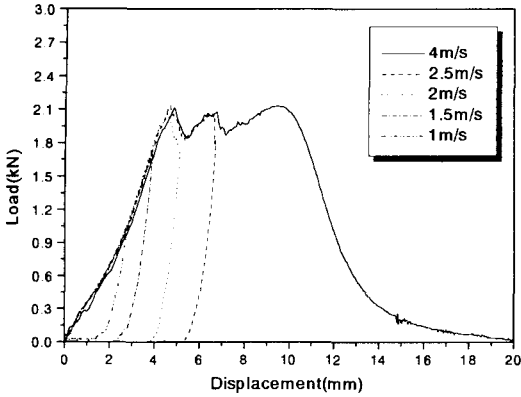


Fig. 12 Load-displacement curve of FML-S[80/-80] for the variation of impact velocity

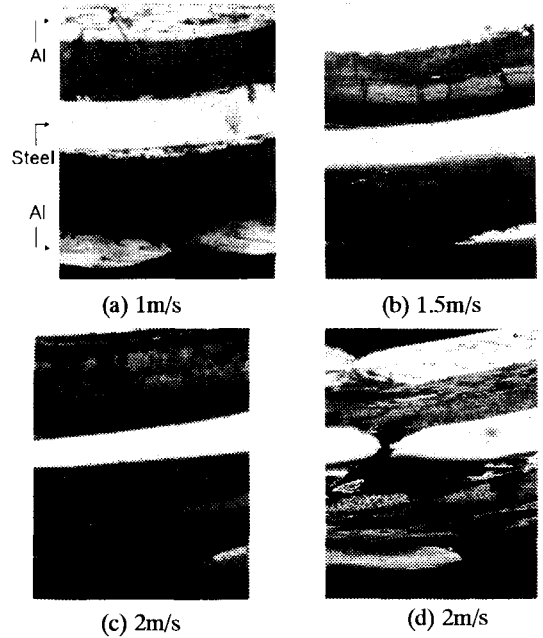
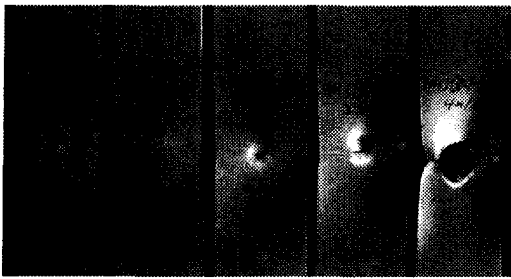


Fig. 14 Optical Microscopy of FML-S[80/-80] after impact (a), (b), (c) Transverse section and (d) Longitudinal section (x 80)



(a)



(b)

Fig. 13 (a) Top face and (b) Back face of FML-S[80/-80] after impact

1m/s 에서 시편의 하부에서 발생한 균열은 충격 속도가 증가해도 거의 성장하지 않는 것을 볼 수 있다. FML-S[80/-80]의 균열 성장은 FML-S[80/80]에 비하여도 작게 발생하였는데, 이것은 Steel 이 주는 균열 억제 효과 외 에도 교차층에 의한 균열 억제가 발생하기 때문이다. 그러나 이 경우 하부 섬유층이 상대적으로 힘을 많이 받기 때문에 상부와 하부 섬유층이 힘을 동일하게 받는 FML-S[80/

80]에 비하여 섬유의 파괴가 빨리 발생한다. FML-S[80/-80]의 경우 2m/s 의 충격 속도에서 섬유 파괴의 흔적을 찾아 볼 수 있다. 2m/s 의 충격 속도에서 하중 선도는 첫번째 피크를 지난 직후 인 것 볼 수 있는데, 이것은 첫번째 피크의 발생 원인이 하부 섬유층의 파괴인 것을 의미한다. 2.5m/s 의 충격 속도에서는 아래 층의 섬유 파괴는 더욱 증가하고 Steel 균열도 성장하여 상부 알루미늄 층으로 전달된 것을 볼 수 있다. 이것으로 미루어 FML-S[80/-80]의 두 번째 피크는 Steel 의 균열의 성장에 기인한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14 에 FML-S[80/-80]의 충격 속도에 따른 단면의 광학 사진을 나타내었다. 하부 섬유 층에서 균열이 발생한 것을 볼 수 있으며 교차층 때문에 상부 섬유층으로 전파되지 않는 것을 볼 수 있다. 섬유의 법선 방향 단면의 광학 사진의 경우 FML-S[80/80]에 비하여 손상이 작게 관찰되는 것을 볼 수 있다. 이것은 교차층이 섬유층 내의 균열 전파를 억제하였기 때문이다. 그러나 섬유 방향 단면의 광학 사진은 FML-A[80/80]에서 나타나지 않은 섬유층의 파괴나 Steel 층의 균열이 발견된다. 이것은 Angle Ply FML 의 경우 아래 섬유층이 상대적으로 힘을 많이 받아 먼저 파괴가 발생한다는 모델이 타당하다는 것을 보여준다.

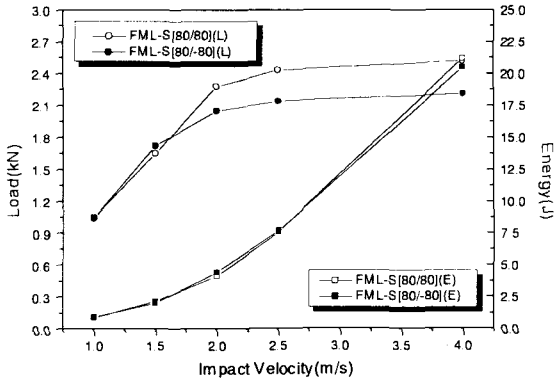


Fig. 15 Maximum load and absorbed energy of FML-S[80/80] and FML-S[80/-80] for the variation of impact velocity

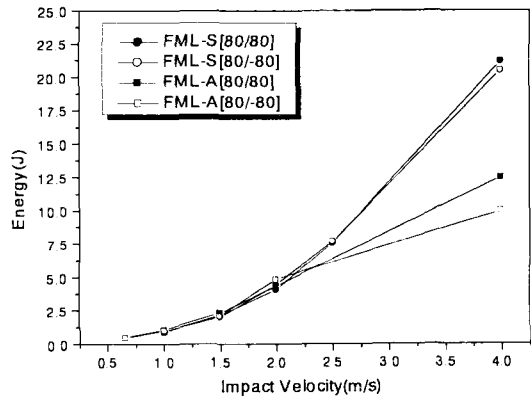


Fig. 17 Absorbed energy behavior of each specimen for the variation of impact velocity

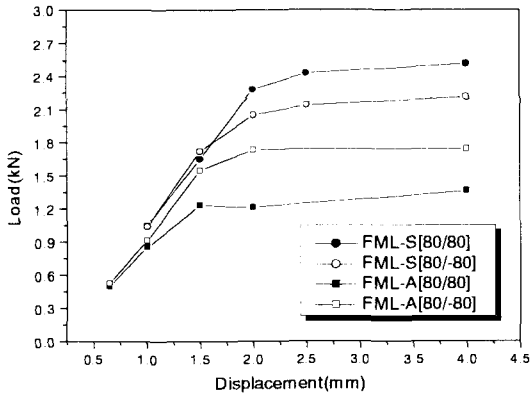


Fig. 16 Maximum load behavior of each specimen for the variation of impact velocity

Fig. 15 에 FML-S[80/80]과 FML-S[80/-80]의 충격 속도에 따른 최대 하중과 흡수 에너지를 나타내었다. 최대 충격 하중의 경우 FML-S[80/80]이 높게 나타났다. 이것은 FML-S는 FML-A와 달리 균열이 발생하더라도 강성이 높은 Steel이 교차층 없이도 섬유 분리에 의한 균열의 전파를 막을 수 있기 때문에 한 방향으로 적층한 SOP FML도 강성의 저하가 발생하지 않으며, 오히려 상대적으로 하부 섬유층이 큰 힘을 받는 Angle Ply FML에서 섬유의 파괴가 먼저 발생하기 때문이다. 따라서 금속판의 섬유 분리에 의한 균열 전파를 막을 수 있는 경우 SOP FML이 Angle Ply FML보다 우수한

충격 특성을 나타낸다. Fig. 16 에 각 시편의 충격 속도에 따른 하중 선도를 나타내었다. SOP FML의 경우 Steel의 사용에 따른 하중의 향상이 Angle Ply FML에 비하여 높게 나타났는데, 이것은 SOP의 경우 Steel 자체의 강성의 향상 외에 Angle Ply FML-A에서는 나타나지 않는 섬유 분리에 의한 강성저하를 막을 수 있기 때문이다. Fig. 17 에 각 시편의 충격 속도에 따른 에너지 선도를 나타내었다. SOP FML과 Angle Ply FML의 흡수 에너지는 거의 유사하게 경향을 나타냈으며, FML-A와 FML-S의 흡수 에너지도 Steel에 균열이 발생하기 전인 2m/s 이전의 까지 비슷한 경향을 나타내다 달라졌다. 이런 점으로 미루어 것은 FML의 에너지 흡수는 섬유의 적층 형태보다는 사용되어진 금속판의 특성에 영향을 받는 것으로 보인다.

### 5. 결론

- (1) 교차층에 따른 충격 특성은 사용되어진 금속층의 특성에 따라 영향이 달라졌는데, 사용되어진 금속판이 섬유 분리에 의한 균열 전파를 막을 수 없을 경우 Angle Ply FML은 섬유 지지에 의한 강성 향상과 균열 전파 방지로 SOP FML보다 우수한 특성을 나타내었다.
- (2) 사용된 금속판이 섬유 분리에 의한 균열 전파를 막을 수 있는 경우 상대적으로 힘을 많이 받는 섬유층의 파괴로 SOP FML에 비하여 열등한 특성을 나타내었다.
- (3) Steel의 사용은 Angle Ply에 비하여 SOP



FML 의 충격 특성을 효과적으로 상승시켰다. 이것은 SOP FML 의 경우 Steel 자체의 강성향상 요인 외에 섬유 분리에 한 강성저하를 막아 주기 때문이다.

### 후 기

이 논문은 2001 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Jan, B. Z. 1994, *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications*, ASM International.
- (2) Kondo, K. 1995, *Advanced Composite Materials*, Vol. 4, No. 3, pp. 197~298.
- (3) 1973, *Foreign Object Impact Damage to Composites*, ASTM STP 568.
- (4) Asundi, A. and Choi, Y. N., 1997, "Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, pp. 384~394.
- (5) Reyes G. V. and Cantwell, W. J., 2000, "The mechanical properties of fiber-metal laminates based on glass fiber reinforced polypropylene," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 1085~1094.
- (6) Voglesang L. B. and Volt, A., 2000, "Development of fiber metal laminates for advanced aerospace structures," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, pp. 1~5.
- (7) Chen, J. L. and Sun, C. T., 1989, "Modeling of Orthotropic Elastic-Plastic Properties of ARALL Laminate," *Composites Science and Technology*, Vol. 36, pp. 321~337.
- (8) G. Reyes V. and W.J. Cantwell, "The mechanical properties of fiber-metal laminates based on glass fiber reinforced polypropylene," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1085~1094.
- (9) Vlot, A., 1996, "Impact Loading on Fiber Metal Laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 291~307.
- (10) Nam, H. W., Kim, Y. H., Han, K. S., 2001, "Damage Analysis of Fiber Metal Laminate under Concentrated Loading using Acoustic Emission Technique," *Korean Society of Composite Materials Journal*, Vol. 14, No. 5, pp. 46~53.
- (11) Nam, H. W., Jung, S. W. and Han, K. S., 2001, "Stacking Sequence Effects on Indentation Damage Behaviors of Fiber Metal Laminate," *KSME Journal A*, Vol. 26, No. pp. 960~968.
- (12) Trawinski, D., 1984, "A Low Temperature Etchant Surface Preparation for Steel Adhesive Bonding," *SAMPE Quarterly*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~5.