

## 論文

## 단섬유 HMC 복합재료의 충격거동

손현우\* · 윤병일\*

## Impact Behavior of Short-Fiber HMC Composites

Hyeon-Wu Sonn\* and Byung-Il Yoon\*

## ABSTRACT

A high strength sheet Molding Compound(HMC-R) of random chopped glass-fiber/polyester has been developed for a ballistic application. The considered variations were fiber length, areal density, and fiber weaving pattern. Impact response was studied by both drop-weight and ballistic methods. Also, impact damage was observed by ZnI<sub>2</sub> X-ray, Ultrasonic C-scan, and SEM. The HMC Composite composed of longer fibers(50 mm) resulted the best ballistic performance compared with any composite materials. This result might be due to higher absorbed energy and slower propagation rate of cracks such as interlaminar debonding and fiber bridging. A drop-weight impact test was found to be a very attractive method in terms of predicting and comparing the ballistic performance for the composite material used. Consequently, it seems that the new HMC composite developed in this study can be applied on the ballistic fields.

## 초 록

고강도 유리섬유/폴리에스터 HMC-R73 소재가 고속충격 응용을 위해 개발되었다. 고려된 변수는 섬유길이, 면밀도 그리고 섬유조직이었다. 저속 및 고속 충격시험이 수행된 후 손상영역은 X선 촬영, 초음파 탐상법 및 주사전자현미경에 의해 관찰되었다. 섬유길이가 긴 HMC 복합재가 다른 복합재와 비교했을 때 높은 고속충격 성능을 보이는데 이 결과는 큰 흡수에너지와 느린 크랙 성장에 기인한다. 낙추 충격시험 방법은 복합재료의 고속충격 성능을 예측하고 비교할 수 있는 시험으로 사료되며, 본 연구에서 개발된 새로운 HMC 복합재료는 고속충격 분야에 응용될 수 있다.

\* 정회원, 국방과학연구소

## 1. 서 론

지난 20여년동안 각종 섬유강화 복합재의 충격 특성에 대하여 상당한 연구가 이루어졌다[1-6]. 유리섬유(Glass Fiber)와 Kevlar 49 섬유가 많이 있게 연구되었으며, 이들은 에너지 흡수에 있어 대단히 우수한 성능을 갖고 있음이 보고되었다. 또한 최근에 새로이 개발된 고강도, 고탄성률의 폴리에틸렌(Polyethylene) 섬유인 Spectra는 기존의 E형 유리섬유나 Kevlar보다도 훨씬 높은 에너지 흡수 특성을 갖고 있음을 보여주고 있다[7]. 특히 고강도 유리섬유인 S-2 강화재는 다른 섬유강화재에 비하여 가격이 저렴할 뿐만 아니라 우수한 비강도, 비강성 특성으로 경량화를 얻을 수 있으며 고속충격성이 우수하다고 한다.

섬유강화 복합재는 경량성과 충격특성으로 최근에 알루미늄 대체용 또는 세라믹과 복합화하여 고속충격 소재로서 개발이 진행되고 있고 일부는 실용화되어 있는 실정이다[8-9]. 일반적으로 유리섬유 복합재(S-2)는 알루미늄 보다 동일 방호력에서 15%의 중량을 줄일 수 있다. 복합재료가 이와같이 우수한 고속충격 성능을 나타내는 이유는 지금까지 명확히 규명이 되지 않고 있다. 그러나 높은 비강도와 비강성, 그리고 탄자 관통시 파괴모드 즉, 횡전단(Transverse Shear), 인장파괴 그리고 층간분리(Delamination) 파괴가 발생하므로써 에너지를 흡수 분산시키기 때문이라 보고되고 있다[10]. 지금까지 모든 고속충격용 복합재는 연속섬유로 구성되어 있다. 그러나 최근에 미국의 FMC와 TACOM사는 단섬유로 구성된 SMC(Sheet Molding Compound) 소재를 사용하여 M2 케도차량의 Turret을 개발하는데 성공하였다[11]. 그러나 여기에 사용된 소재에 대한 상세한 내용은 보고되지 않고 있다.

SMC 재료는 오늘날 자동차 등의 충격흡수재로서 개발되고 있으며, 따라서 지금까지는 저속 충격에 대한 연구가 극히 일부 이루어졌다[12-13]. SMC 재료는 70mm이하의 단섬유가 불규칙하게 Sheet 형으로 구성된 것으로 이 재료의 주요 인자는 섬유의 길이와 함유량, 그리고 섬유의 분포와 배열

등을 향상시키는 각종 첨가제의 선택이 최종 제품의 물성에 큰 영향을 미친다[14]. 그러나 SMC 복합재에 대하여 이와같은 인자들이 고속충격 성능에 미치는 영향에 관한 연구결과는 발표되지 않고 있다.

본 연구에서는 고강도 HMC-R73 소재를 개발하여 낙추 충격시험(Drop-Weight Impact Test)과 Cal. 30 및 Cal. 50 AP탄에 의한 고속충격 시험을 통하여 섬유길이의 영향, 시편두께 또는 면밀도의 영향을 고찰하고, 이 결과를 S-2 유리섬유계 적층 복합재와 비교하였다. 끝으로 SMC 복합재의 파단현상을 초음파 탐상(C-Scan), ZnI<sub>2</sub>-X-Ray 및 주사전자 현미경을 통하여 관찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 재 료

본 연구에서는 유리섬유로 강화된 범용 폴리에스테르(Polyester) SMC로부터 유리섬유 스트랜드(Strand)를 많이 함유하고 있는 고강도 HMC(High Strength Molding Compound)를 제조하였다. 평균 섬유함유량은 73wt%이다. 매트릭스로서의 폴리에스테르 수지는 Isophthalic형이며, 유리섬유 roving 강화재는 25mm와 50mm 2종류로 절단하여(chopped fiber) 사용하였다.

Table 1에 HMC-R73의 배합조성을 나타내었다. 섬유함유량을 높이기 위하여 HMC의 첨가제 함량을 조절하였다. HMC 평판은 유압프레스에서 성형하였으며, 이들의 두께는 5mm와 6mm 2종류로 하였다. 이보다 두꺼운 시편은 앞서의 평판을 Epoxy로 접착하여 사용하였다. 시편의 비중은 약 1.7이었다. 단섬유 HMC 재료의 성능 비교를 위하여 S-2계 고강도 유리섬유/폴리에스테르 적층 복합재를 제조하였다. 섬유강화재는 평직(Plain Weave) 구조로 5×5/in count로 되어 있다.

### 2-2. 실험

HMC를 구성하고 있는 단섬유 길이의 영향을 관찰하기 위하여 3점 굴곡시험을 하였다. 시편의

길이는 110mm, 폭 20mm 그리고 Span 길이와 두께의 비는 16 : 1로 하였다.

충격시험은 낙추 충격시험기(Drop Weight Impact Tester)에 의한 방법과 AP(Armor Piercing) 탄자를 사용한 Cal. 30, Cal. 50의 고속충격시험을 하였다. 전자에서 충격속도는 3.14, 4.43, 5.42m/sec 3종류로 하였고, 충격하중은 가속도계를 사용하여 Digital Oscilloscope로 기록하고 PC로 자료처리를 수행하였다. 150×150mm 크기의 시편은 100×100mm 4각형 Simple Support로 지지하였다.

고속충격 시험은 100×100mm 크기의 시편을 네모서리에서 고정시키고 시편후면에 알루미늄 6061 판재를 설치하여 관통깊이를 측정함으로써 복합재의 고속충격 효율을 구하였다.

충격시험을 거친 시편의 손상 정도와 손상 기구의

규명을 위하여 C-can 초음파 탐상기를 수침(Immersion)법을 사용하여 손상상태를 관찰하였다. 그리고 또한 이들 시편은 ZnI<sub>2</sub>액(ZnI<sub>2</sub>, Isopropyl alcohol, 증류수 혼합물)에 24시간 침적한 후 X-Ray 촬영을 하였다. 파괴단면은 전자주사 현미경으로 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 기계적 시험

Table 2는 HMC와 S-2 유리섬유/폴리에스테르 복합재의 굴곡시험 결과를 나타낸다. Table 2에서 섬유 길이, 시편의 두께 및 재료의 기하학적 구조에 따라서 굴곡성질이 변함을 알 수 있다. 시편 2와 3에서 섬유의 길이가 50mm일 경우 섬유길이가 25mm 일때보다 굴곡강도가 35% 증가하였으며, 굴곡 탄성율은 거의 동일한 값을 나타내었다. 이것은 단섬유의 응력 전달에 따른 응력분포와 관계되는 것으로 보인다[15]. 따라서 25mm의 섬유 길이를 갖는 HMC는 전단응력이 크게 작용하여 섬유/매트릭스 계면이 분리(Debonding)되는 파괴 현상이 일찍 혹은 많이 발생하므로써 낮은 강도의 결과를 주었다고 사료된다.

시편 두께에 있어서는 시편 1과 2에서 보듯이 동일한 섬유 길이를 갖는 HMC의 경우에 두께가 얇을때의 굴곡강도가 약 51% 증가하였으며, 시편 1과 3과 같이 섬유의 길이가 다를때에는 짧은 섬유로 구성된 시편이 12% 높은 강도를 나타내었다. 이것은 HMC 성형시에 섬유의 분포, 배향 및 수지의 분포가 이 소재의 유동성과 깊은 관계를 갖는다 [16].

#### 3-2. 낙추 충격시험(Drop-Weight Impact Test)

Table 3에 낙추 충격시험의 결과를 나타내었다. 여기서 H-1-5t-50란, H는 HMC, 1은 섬유길이 1", 5t는 시편두께 5mm 그리고 50은 충격 낙하거리 50cm를 나타낸다. 시험결과는 면밀도(시편두께×밀도)로 나누어 주어 처리하였다. HMC 복합재의

Table 1. HMC-R73 Formulation

Function	Component	Weight(%)
Reinforcement	E-Glass fibers (25mm, 50mm)	73
Resin	Isophthalic Polyester	24
Filler	Calcium Carbonate	1.16
Thicker	Magnesium Oxide	1.1
Inhibitor	p-Benzoquinone (PBQ)	0.01
Initiator	t-Butyl perbenzoate	0.24
Mold Release	Zinc Stearate	0.5

Table 2. Flexural Properties of HMC-R73 & S-2 Glass/Polyester Composite

No	재 료	강 도 (MPa)	강 성 (GPa)	최대변형 (%)
1	HMC-1 a)	297.4	12.26	2.65
2	HMC-2 b)	196.9	12.9	2.03
3	HMC-3 c)	265.5	12.8	2.44
4	S-2 Glass d)	226.3	26.17	1.46

a) Test specimen thickness: 5mm, Chopped fiber length: 25mm

b) Test specimen thickness: 6mm, Chopped fiber length: 25mm

c) Test specimen thickness: 6mm, Chopped fiber length: 50mm

d) Test specimen thickness: 5mm, Plain Weave

Table 3. Drop Weight Impact Test Data

No	Material	AD [g/cm <sup>2</sup> ]	P'/AC [Nm <sup>2</sup> /Kg]	Di/AC [Jm <sup>2</sup> /Kg]	Ep/AD [Jm <sup>2</sup> /Kg]	E'/AD [Jm <sup>2</sup> /Kg]	E''/AD [Jm <sup>2</sup> /Kg]
1	H-1-5t-50	0.85	1112	3.51	0.08	3.59	1.47
2	H-1-5t-100	0.85	1319	4.21	2.96	7.16	6.31
3	H-1-5t-150	0.82	1213	4.81	4.17	8.98	8.98
4	H-1-6t-100	1.04	1048.4	3.42	2.4	5.82	4.95
5	H-1-6t-150	1.08	1011.6	3.97	3.13	7.1	6.62
6	H-1-12t-100	2.09	1088.7	2.91	0.0	2.91	1.5
7	H-1-12t-150	2.16	1292.4	4.19	0.03	4.22	1.72
8	H-2-6t-100	1.03	1110.9	3.86	2.04	5.9	5.67
9	H-2-6t-150	1.06	986.6	3.37	3.92	7.29	6.89
10	S-5t-50	1.0	1033	2.93	0.12	3.05	1.66
11	S-5t-100	1.0	1470	5.68	0.41	6.09	3.58
12	S-5t-150	1.01	1646	8.25	0.77	9.01	5.49

NOTE :

- P' : 최대하중(Peak load)                          P'/AD : 비 최대하중(Specific Peak load)
- E' : 최대에너지(Max. energy)                      E'/AD : 비 최대에너지(Specific Max. energy)
- E'' : 흡수에너지(Absorbed energy)                  E''/AD : 비 흡수에너지(Specific Absorbed energy)
- Ei : 발생에너지(Initiation energy)                  Ei/AD : 비 발생에너지(Specific Initiation energy)
- Ep : 전파에너지(Propagation energy)              Ep/AD : 비 전파에너지(Specific Propagation energy)
- AD : 면밀도(Areal Density)

최대 하중은 대체로 시편두께 5mm의 경우가 가장 크며, S-2의 경우는 낙하거리 50cm를 제외하고는 모두 HMC보다 큰 값을 나타내었다. 충격시험시 재료의 파괴거동을 알기 위해서 파괴발생 에너지와 파괴전파 에너지, 최대 에너지 그리고 흡수에너지를 계산하였다. 최대 에너지 E'는 Ei와 Ep의 합이다. 전체적으로 Ei는 HMC 복합재 보다 S-2 유리섬유 복합재가 크다.

HMC 복합재를 비교할때 시편 1~3의 경우가 다른 시편들의 Ei 값보다 크다. 동일 두께에서는 충격속도에 따라 명확한 경향을 나타내지 않았다. 그러나 두꺼운 시편에서는 충격속도에 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며 가장 낮은 Ep값을 보여 준다. 모든 재료에 대해서 비 최대에너지는 속도 증가에 따라서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 두께 5mm의 HMC 복합재가 가장 큰 에너지를 보

여주고 있으며, S-2 복합재에는 최대속도의 경우에 HMC와 유사한 값을 갖는다. HMC의 경우에는 시편의 두께가 얇은 것이 두꺼운 것보다 보다 큰 에너지 값을 나타내며, 그리고 동일 두께에서는 섬유 길이가 50mm일때가 25mm의 경우보다 약간 높은 값을 나타내었다.

Fig. 1은 HMC 복합재와 S-2 유리섬유 복합재가 1m 높이에서 4.43m/sec의 속도로 충격을 받았을 때의 시간에 따른 하중-에너지-속도변화를 나타낸 것이다. 여기서 두 재료의 충격 거동이 상당히 다르게 나타남을 관찰할 수 있다. 최대 하중점 이후 (b)에 비해 (a)는 편차가 심한 하중분포를 보임에 따라 HMC의 크랙 전파가 지연되리라는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 2는 두 재료의 Normalized 하중곡선을 나타낸다. S-2 유리섬유 복합재의 거동은 취성이

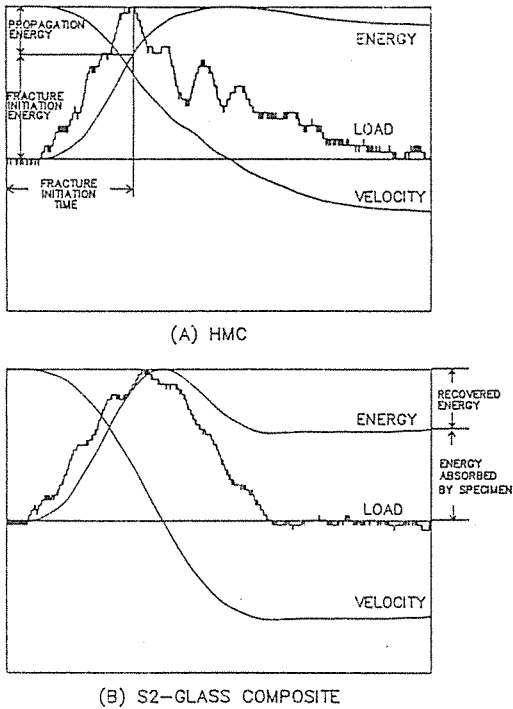


Fig. 1 Load, energy & impact speed vs. time for (a) HMC & (b) S2-glass composite.

강한 금속과 유사한 것을 볼 수 있으며, HMC 복합재는 일반적인 복합재료 적층판의 하중곡선과 유사하다. HMC 복합재는 충격시에 섬유파괴, 섬유/매트릭스 계면분리, 층간분리 및 pull-out이 복합적으로 발생하기 때문인데 이에 대해서는 다음 절에서 논의하고자 한다.

Fig. 3은 흡수에너지를 면밀도로 나눈 비 흡수 에너지( $E^*/AD$ )를 충격속도에 따라 나타낸 것이다. 비 흡수에너지는 충격시에 시편이 손상을 입거나 파손되면서 흡수한 것을 의미한다. 그림에서 보듯이 일반적으로 HMC는 두께 12mm 시편의 경우를 제외하고는 S-2 유리섬유 복합재보다 높은 흡수에너지를 보여주고 있다. 동일 두께의 HMC에서는 섬유길이가 긴 시편 (HMC-2-6t)이 짧은 섬유길이를 갖는 시편보다 높은 흡수에너지를 보여주었다. 충격에너지가 클 때 S-2 유리섬유 복합재는 HMC 보다 15-39% 낮은 흡수에너지를

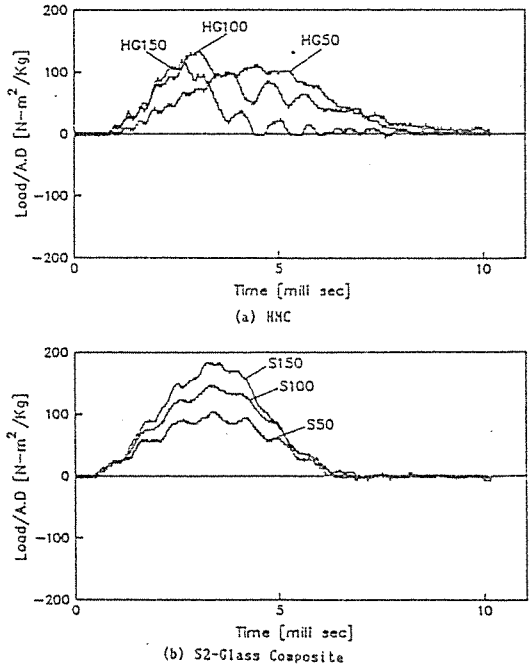


Fig. 2 Normalized load vs. time for (a) HMC & (b) S2-glass composite.

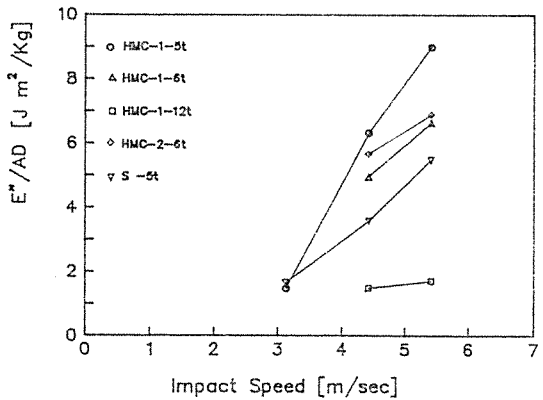


Fig. 3 Specific absorbed energy vs. impact speed for HMC & S2-glass composite.

나타내었다. 에너지 흡수 메커니즘은 굴곡과 층간 전단변형(Interlaminar Shear Deformation)에 좌우된다고 일방향 복합재의 Izod에 의한 Notch를 갖는 시편의 충격시험 결과에서 보고하고 있다[1]. 따

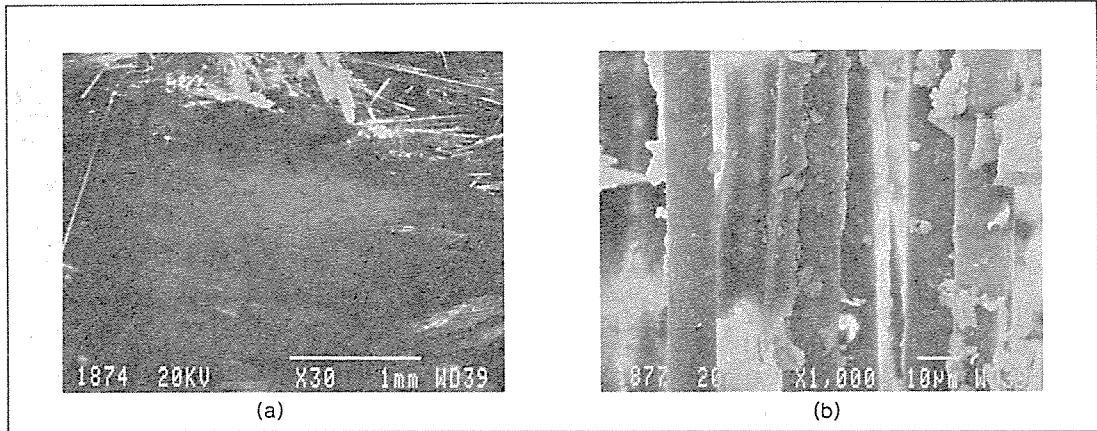


Fig. 4 Scanning electron micrograph of damaged HMC by drop weight impact test.

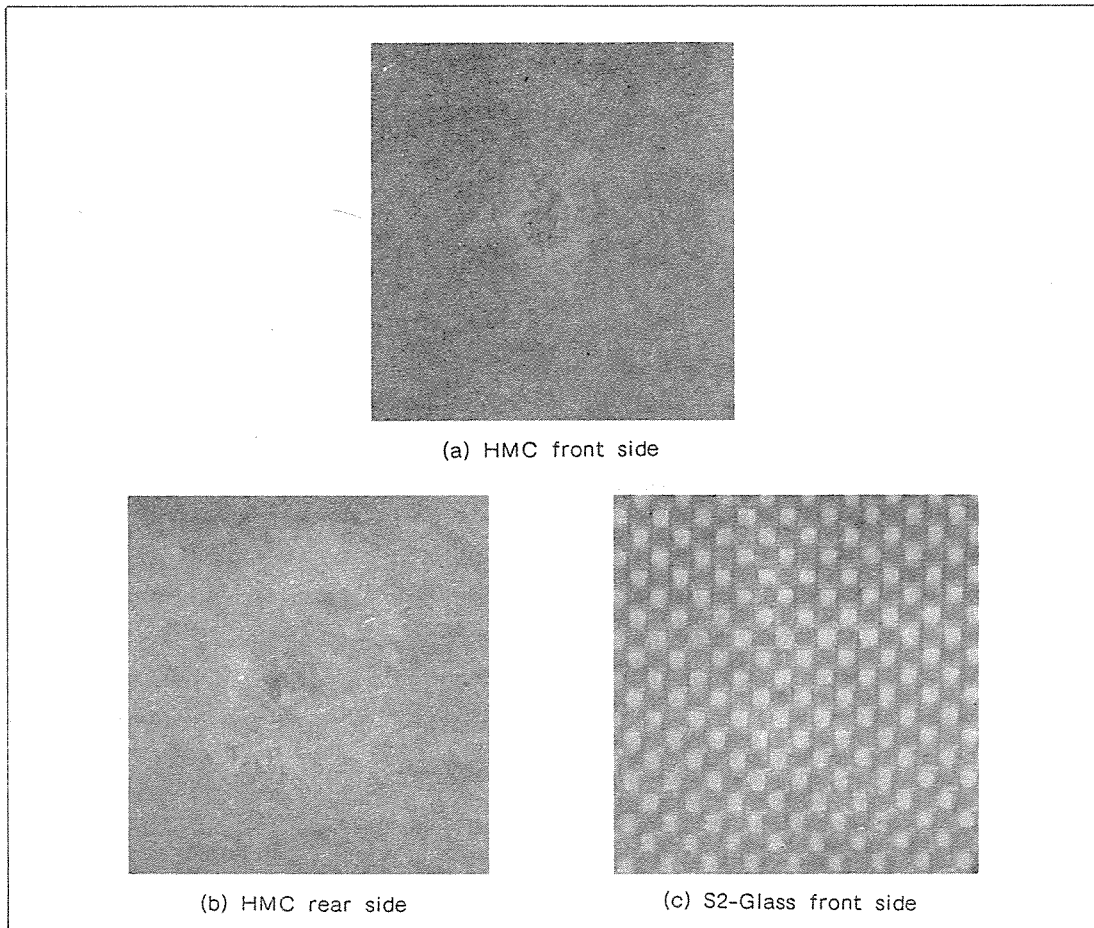


Fig. 5 Photographs of damaged HMC & S2-glass composite by drop weight impact test.

라서 굴곡시험의 결과로부터 HMC가 S-2 유리섬유 복합재보다 충격 흡수가 우수하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 1m 높이에서 4.43m/sec의 속도로 충격을 받은 HMC 복합재의 전자주사 현미경 사진이다. (a)에서 불규칙하게 배열된 유리섬유들이 표면층으로부터 분리된 상태를 볼 수 있다. 이것은 (b)에서 보는 바와 같이 매트릭스의 파괴로부터 계면에서의 debonding이 일어났기 때문이다.

Fig. 5는 낙추 충격시험에 의해 손상을 받은 전형적인 시편 상태를 나타낸다. 시편 표면의 손상 현상은 두 재료에 있어서 다르게 나타났다. HMC 복합재는 충격기를 중심으로 원형으로 손상이 전파되어 파괴가 일어났으며, 또한 전면보다는 후면에서의 손상정도가 크게 나타남을 볼 수 있다. S-2 유리섬유 복합재에서 손상은 십자형으로 전파가 길게 일어났다. 그러나 후면에서는 HMC와 같은 뚜렷한 파괴를 관찰할 수 없었다.

Fig. 6과 7은 위의 현상을 좀 더 자세히 관찰하기 위한 방법으로서 초음파 탐상에 의한 HMC와 S-2 유리섬유 복합재의 C-S can 결과들을 보여주고 있다. Fig. 6의 HMC 손상영역은 거의 원형이며 후면에서의 손상면적이 더 크다. 이와 같은 결과는 SMC-R50 복합재의 Air gun에 의한 충격시험에서도 관찰되었다[12]. Fig. 7의 S-2 유리섬유 복합재는 십자형으로 손상이 발생하였으며 손상길이는 충격속도에 영향을 받았다.

상기 두 재료의 손상면적을 Image analyzer로 측정하였으며, 이것을 충격속도에 따라서 Fig. 8에 나타내었다. 손상면적은 충격속도에 따라서 4.43 m/sec은 HMC 복합재가 S-2 유리섬유 복합재보다 약 30% 낮은 충격을 받았다. 낙추 충격시험에서는 결론적으로 단섬유로 구성된 HMC 복합재가 직물 적층복합재보다 충격 특성이 우수함을 보여주었으며, 또한 HMC는 두께, 섬유강화재의 길이에 영향을 받았다.

### 3-3. 고속충격 시험

Table 4에 고속충격 시험결과를 나타내었다. 고속충격 효율은 탄자의 운동에너지가 모두 시편과

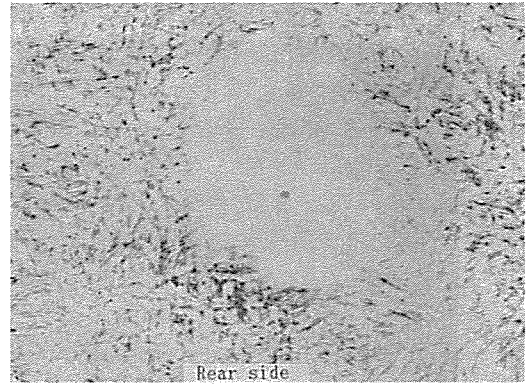


Fig. 6 Typical damaged patterns of HMC by ultrasonic c-scan method.

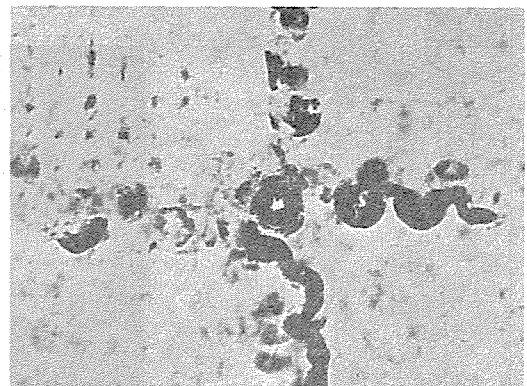


Fig. 7 Typical damaged patterns of S2-glass by ultrasonic c-scan method.

후면판에 흡수된다는 가정하에 시편과 후면판의 단위질량당 관통에 저항하는 일의 비율로서 정의된다[19].

Fig. 9는 면밀도에 따른 고속충격 효율의 변화를 나타낸 것이다. Cal. 30 시험에서 HMC의 고속충격 효율은 면밀도 5.6g/cm<sup>2</sup>까지 계속 증가하는 추세를 나타내었으며, 반면에 S-2 유리섬유 복합재는 HMC와는 반대로 급격히 감소하였다. 시편의 두께가 얇을 경우에는 S-2 유리섬유 복합재가 약간 높은 고속충격 효율을 주었다. 그러나 두께가 두꺼울수록 두 재료의 고속충격 성능의 차이가 더욱 커지는데 예를 들어서 면밀도 4g/cm<sup>2</sup>의 경우에

Table 4. Results of Ballistic Testing for HMC Composite

탄 자	섬유길이 (mm)	면 밀도 (g/cm <sup>2</sup> )	밀 도 (g/cm <sup>3</sup> )	고속충격 효율
Cal. 30 AP M2	25	2.1	1.69	2.0
		3.99	1.7	2.87
		5.61	1.69	3.57
Cal. 50 AP M2	25	6.16	1.72	1.42
		8.26	1.71	1.70
		10.3	1.71	1.36
	50	6.16	1.71	1.43
		8.26	1.71	1.99
		10.3	1.71	1.49

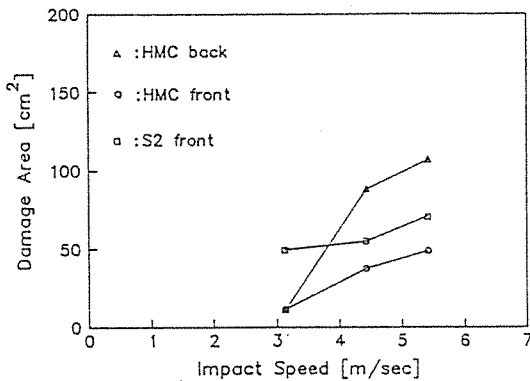


Fig. 8 Damaged area vs. impact speed.

HMC 복합재는 S-2 복합재보다도 103% 높은 효율을 보여주고 있다. Cal. 50 시험에서 HMC 복합재는 면밀도 8g/cm<sup>2</sup>까지는 증가하다가 면밀도 10g/cm<sup>2</sup>에서는 감소현상을 나타내었다. 이와같은 현상은 섬유길이에 관계없이 동일한 현상을 보여 주었다. 이 결과에서 중요한 것은 섬유의 길이가 고속충격 효율에 영향을 미친다는 것이다. 면밀도 6g/cm<sup>2</sup>에서는 거의 같은 효율을 나타내며, 면밀도 8g/cm<sup>2</sup>과 10g/cm<sup>2</sup>에서는 섬유길이가 각각 17%, 9.6% 증가된 고속충격 효율을 나타내었다. 섬유길이의 영향은 낙추 충격 시험에서의 결과(Fig. 3)와 잘 일치하고 있다.

Fig. 3은 50mm HMC가 25mm HMC보다도 약

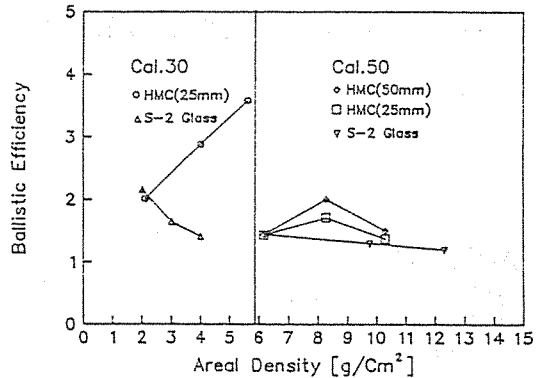


Fig. 9 Ballistic efficiency of HMC and S2-glass panels against Cal. 30 and Cal. 50 AP projectile.

4.1-14.6% 높은 흡수 에너지를 나타내고 있으며, 굴곡시험에서도 섬유길이가 긴 복합재가 약 35% 높은 굴곡강도를 보여주었다(Table 2). S-2 유리 섬유 복합재는 Cal. 30의 경우와 동일한 현상을 나타내고 있다. 시편의 두께가 얇은(36mm) 경우에는 두 재료의 효율은 거의 같으나 면밀도가 증가할수록 효율은 감소현상을 나타내고 있다. 고속 충격 시험결과로부터 단섬유 HMC 복합재는 직물 섬유 강화재로 구성된 적층복합재 보다도 우수한 고속충격 성능을 보여주었다. 이의 원인을 규명하기 위하여 ZnI<sub>2</sub>-X-ray와 전자 주사현미경으로 파 단현상을 관찰하였다.

Fig. 10은 두께 24mm, 섬유길이 25mm인 HMC 복합재에 대한 Cal. 30 고속충격 시험후의 X-Ray 사진이다. 손상상태를 명확히 관찰하기 위하여 ZnI<sub>2</sub> 용액을 크랙부위에 침투시킨후 X-Ray 촬영을 하였다. 이 시편은 완전 관통된 것으로 Hole 주위에서 손상상태를 관찰할 수 있다. 그러나 손상은 시편 전체에 걸쳐 발생하지 않고 국부적으로 존재한다.

Fig. 11에서 (a)는 고속충격 시험후 절단한 HMC 시편을 나타내고, (b)는 S-2 유리섬유 복합재의 파단현상을 나타낸 것이다. 거시적으로 두 복합재는 페탈링(Petalling)과 플러깅(plugging)의 관통현상을 나타내었다. 그러나 미시적으로는 파단현상이 다르게 관찰되었다. 층간분리(Delamination)가 두 복합재에서 많이 발생하였는데 특히 HMC 복합재가



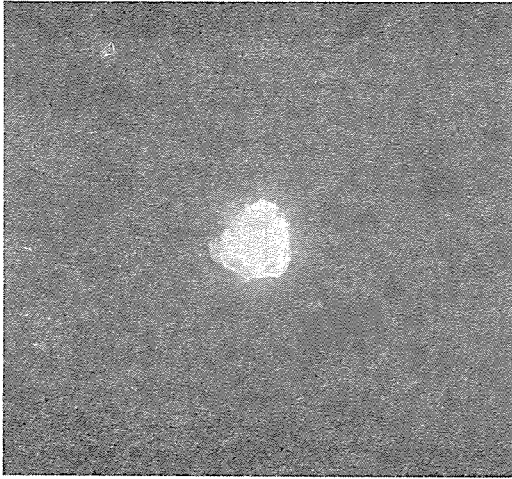
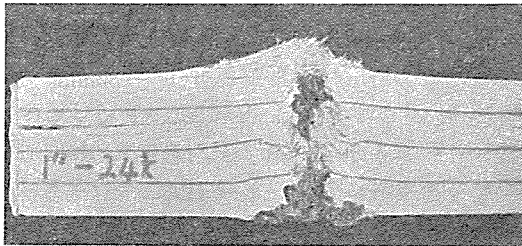
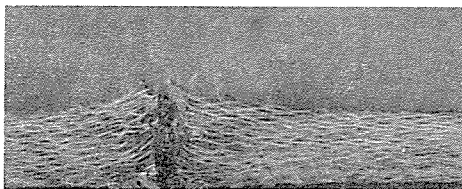


Fig. 10  $ZnI_2$  X-Ray photograph of HMC composite after ballistic attack with Cal. 30 AP projectile.



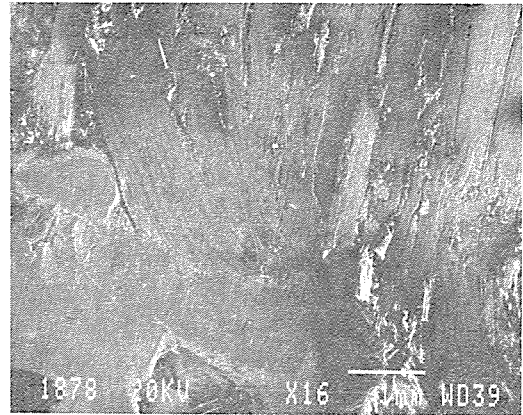
(a) HMC



(b) S-2 Glass Composite

Fig. 11 Cross-section of (a) HMC and (b) S-2-glass composite after ballistic testing.

보다 더 많았다. 둘째는 관통 주위에서의 변형상태이다. 연속섬유로 구성된 S-2 유리섬유 복합체는 시편 edge로부터 탄자 입구를 향하여 큰 변형을 하였다. 그러나 단섬유로 이루어진 HMC 복합체는 탄자 관통의 제한된 부위만이 변형을 하였다. HMC



↑  
Projectile  
direction

Fig. 12 S.E.M photograph showing local deformation of short fiber reinforced HMC composite owing to projectile penetration.

복합체의 변형 현상을 Fig. 12에 나타낸다.

복합체를 구성하고 있는 섬유의 탄성율은 충격에 의한 파장(wave) 속도와 변형(strain)량에 영향을 미친다[17]. 변형은 충격지점에서 가장 크며, 이것은 시편 edge 방향으로 전파되는데 고탄성율 섬유는 가장 큰 속도와 가장 낮은 변형으로 전파된다. 따라서 탄성율이 큰 S-2 유리섬유 복합체는 이 때문에 시편 edge로부터 관통중심까지 변형이 일어났다고 본다. 탄자 충돌시에는 탄자 방향으로 압축응력파의 전파로 반대방향에서 인장응력이 발생하며, 또한 앞서 언급한 변형파의 전파로 층과 층 사이에서 전단응력이 발생한다[10, 17]. 따라서 이와 같은 응력작용으로 층간분리가 발생한다. S-2 유리섬유 복합체는 탄성율이 크기 때문에 빠른 에너지 흡수가 일어나 관통이 짧은 시간에 일어난다. 다시 말해서 일단 발생한 층간분리는 빠른 속도로 크랙 전파가 일어나며, 또한 충격 저항력이 약해져서 많은 층간분리가 발생하지 않은 것으로 사료된다. 낙추 충격시험에서도 S-2 유리섬유 복합체의 전면에서의 손상면적이 크며, 그리고 낮은

비파괴 전파에너지와 낮은 비흡수 에너지 결과가 고속충격 시험결과를 뒷받침 해준다. HMC 복합재는 낮은 탄성율로 충격에너지 흡수 속도가 느리기 때문에 보다 많은 총 에너지 흡수를 가져온다. 따라서 관통에 긴 시간을 요한다. 이 때문에 발생된 층간분리는 느리게 전파하므로써 관통저항력을 상승시키고, 이 동안에 층간분리가 다른 위치에서 많이 발생한 것으로 사료된다.

Table 3에서 보듯이 낙추충격에 의한 에너지 흡수가 HMC 복합재에서 가장 크게 나온 것은 고속충격 시험결과와 잘 일치하고 있다. HMC 복합재에서는 또 다른 손상현상이 관찰되었다. 층간분리된 층 사이에는 섬유들간의 Bridging이 존재하였다. 따라서 이같은 현상이 크랙의 진행을 느리게 하여 파괴에너지 값을 상승시킨다는 SMC 연구[17, 18]로부터 Bridging 모드는 고속충격 성능을 높이는 역할을 하였다고 본다. 또한 이외에도 HMC 복합재 제조에 첨가된 CaCO<sub>3</sub> 등이 크랙의 진행을 막는 지연재의 역할을 한다는 것을 고려할 때 단섬유 복합재 HMC는 앞서 언급한 모든 현상들이 복합적으로 이루어졌다고 본다.

#### 4. 결 론

단섬유로 구성된 고강도 HMC 복합재 개발과 이의 낙추 충격시험과 고속충격 시험에 의한 충격거동 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다 :

- 1) 동일 두께에서 섬유의 길이가 긴 HMC 복합재의 충격성이 약간 우수하였으며, 그리고 HMC 복합재는 직물형의 섬유강화재를 사용한 S-2 유리섬유 복합재보다 높은 충격 흡수특성을 나타냈다.
- 2) Cal. 30과 Cal. 50에 의한 고속충격 시험에서 낙추 충격시험에서와 같이 긴 섬유강화재를 사용한 HMC 복합재가 10-19% 높은 고속충격 효율을 나타내었으며, 또한 HMC 복합재는 S-2 유리섬유 복합재보다 9-103% 높은 고속충격 효율을 보여주었다.
- 3) 고속충격 효율은 먼질도에 따라서 S-2 유리섬유 복합재는 감소하였으나 HMC 복합재는 증가하는 경향을 나타내었다.

- 4) 초음파 탐상 C-S can, ZnI<sub>2</sub>-X-Ray 및 전자주사현미경에 의한 충격손상 관찰은 HMC와 S-2 유리섬유 복합재의 손상모드가 다름을 보여주었으며, 주 손상모드는 층간분리이었다.

- 5) 낙추 충격시험 방법은 복합재료의 고속충격 성능을 평가할 수 있는 수단임을 보여주었다.

#### 참고문헌

1. C.C. Chamis, H. Sinclair, ASTM STP 864, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp.326-345.
2. L.J. Broutman and A. Rotem, ASTM STP 586, pp.326-345.
3. J.D. Winkel and D.F. Adams, Composites, Vol. 16, No. 4, 1985, pp.208-278.
4. R.S. Zimmerman and D.F. Adams, 32nd Inter. SAMPE Symposium, April 6-9, 1987, pp.1461-1471.
5. P. Young and L.J. Broutman, Polymer Eng. Sci., Vol. 18, No. 62, 1978.
6. M.D. Rhodes, J.G. Williams and J.M. Starnes, Proceedings 34th Technical Conference, SPI 1979.
7. L.C. Lin, A. Bhatnagar, D.C. Lang and H.W. Chang, 32nd Inter. SAMPE Symposium 1988, pp.883-888.
8. W.E. Haskell and L.J. Dickson, 40th Annal Conference, SPI, 1985, Session 23-B.
9. T.A. Nobbe, 1986.
10. A. Vasudev and M.J. Mehlman, SAMPE Quarterly, 1987.
11. N.K. Young and J. Hill, 31st Inter. SAMPE Symposium, 1986, pp.1192-1203.
12. R.P. Khetan and D.C. Chang, J. of Composites Materials, Vol. 17, 1983, pp.182-195.
13. FMA. Myers, 37th Anrual Conference, SPI, 1982, Session 1-C.
14. T.J. Reinhart et al., Engineered Materials Handbook, Composites, Vol. 1, ASM Inter, 1987.
15. C. Zweben and R.B. Pipes, University of

Delaware, Composites Design Guide, Vol. 1.

16. B.M. Lynskey and F.C. Robertson, 40th Annual Conference, SPI, 1985, Session 9-D.

17. R.C. Laible, Ballistic Materials and Penetration Mechanics, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.

18. S.S. Wang, E.S. Chim and P.P. Goetz, J.C.M, Vol. 17, 1983, pp.299-314.

19. Z. Rosenberg, "A New Definition of Ballistic Efficiency," Presented at the "Impact 87" Conference in Bremen, FRG, May 18-22, 1987.

---