

# 변형률 속도에 따른 유리섬유 에폭시 복합재료의 동적 강도 변화

임태성\* · 이대길\*

## Dynamic Strength Variation of Glass Epoxy Composites with respect to Strain Rates

Tae Seong Lim, Dai Gil Lee

KEY WORDS : Strain rate, Glass epoxy composite, Low temperature

### ABSTRACT

In this study, the tensile and compressive tests of glass fiber epoxy composites were performed to measure the strength variation with respect to strain rates of 1-200 sec<sup>-1</sup>. In addition, tensile and compressive tests of 50-200 sec<sup>-1</sup> strain rates were conducted at a low temperature (-60°C) to investigate the effects of temperature on the strength variation. From the test results, it was found that the tensile and compressive strengths increased about 100 % and 70 %, respectively, at the strain rates of 10-100 sec<sup>-1</sup> compared to the quasi-static strengths while the strengths were little affected by the environmental temperature variation.

### 1. 서 론

일반적으로 섬유 강화 복합재료 (Fiber reinforced composite material)는 비강도 (강도/밀도)와 비강성 (강성/밀도)이 우수할 뿐만 아니라, 좋은 피로특성과 높은 감쇠 특성 때문에 우주항공 재료나 스포츠 분야에 응용이 확산되고 있다 [1]. 특히 유리섬유 강화 고분자 복합재료 (Glass fiber reinforced polymer composite)는 강철 재료에 비하여 비강도가 우수하면서도 가격이 저렴하여 하중을 지지하는 구조에 적용되고 있으며, 충격 에너지 흡수능이 우수하여 승용차 도어 내에 장착되는 충격 흡수봉 (Side door impact beam)이나 승용차의 범퍼 빔 (Bumper beam), 고속도로의 가아드 레일 (Guard rail) 등 충격을 받는 구조물에도 적용되고 있다 [2-5].

충격 발생시 재료의 거동은 일반적인 정적 거동과 달라지고 재료의 물성도 변화하게 되며, 충

격 에너지 흡수 기구의 분석을 위해서는 충격 하중에 의해 파괴되는 순간의 변형률 속도에 해당되는 물성에 대한 정보가 필요하게 된다. 일반적으로 사파 충격 시험, 자동차 충돌 등의 경우에 재료의 변형률 속도 (Strain rate)는 10-200sec<sup>-1</sup> 정도이며, 변형률 속도에 따라 강도 등의 물성이 변화하는 것으로 알려져 있다 [6-12]. 변형률 속도에 따른 섬유강화 복합재료 물성은 주로 실험을 바탕으로 연구되어 왔으며, 시험 방법으로는 변형률 속도에 따라서 범용 시험 장비, 충격형 시험 장비, 스플릿 홉킨슨 바 (SHPB, Split Hopkinson Pressure Bar) 등이 사용되었다. 그러나 본 연구의 관심 대상인 10-200sec<sup>-1</sup> 범위의 변형률 속도에 대한 구체적인 강도 데이터는 풍부하지 못하다. 또한, 재료가 달라질 경우 변형률 속도에 따른 파괴 강도의 변화 경향이 달라질 수 있으며, 유사한 재료에 대해서도 연구자마다 다른 결론을 내리고 있어서 설계에 이용되는 재료의 물성에 대한 정확한 평가가 요구된다 [6]. 또한, 본 연구 결과의 적용 분야인 차량 구조 및 가아드레일과 같은 구조는 영하 40°C 정도의 저온에서 사용될 수도 있기 때문에,

\* 한국과학기술원 기계공학과

저온에서의 물성에 대한 파악이 중요하다.

본 연구에서는 유리섬유 에폭시 복합재료에 대하여 상온과  $-60^{\circ}\text{C}$  정도의 저온 환경에서  $1\text{--}200\text{sec}^{-1}$  범위의 변형률 속도에 대한 인장 및 압축 강도의 특성을 파악하였다.

## 2. 상온에서의 강도 특성

### 2.1. 시험 방법

시편은 선경 (SK Chemicals Co. Ltd)에서 생산되는 일방향 유리섬유 에폭시 복합재료 프리프레그 (Prepreg)인 UGN150을 사용하여 제작하였다. 시편의 형상은 Fig. 1과 같으며, 제조된 인장 및 압축 시편에 대하여 정적 강도를 얻기 위하여 정적 물성 시험기 Instron 4206을 사용하였다.

$1\text{--}20\text{sec}^{-1}$ 의 변형률 속도 범위를 얻기 위하여 Fig. 2와 같이 범용 동적 물성 시험기인 Instron 8032에 유압 실린더를 이용한 속도 증가 시스템을 장착하였다. 제작된 유압 실린더는 Fig. 2(c)와 같이 단면적이 다른 두 개의 실린더와 피스톤을 가지고 있어서 단면적의 비 만큼 피스톤의 속도가 증가된다. 제작된 유압 실린더를 장착하고 시편에 LVDT를 이용하여 변위를 측정된 결과 10 배 정도 속도가 증가함을 알 수 있었으며, 시험 속도를 최대  $250\text{mm/sec}$ 까지 높여서 최대  $20\text{sec}^{-1}$ 의 변형률 속도를 얻을 수 있었다.

$20\text{--}200\text{sec}^{-1}$ 의 변형률 속도 범위의 시험을 위해서는 수정된 동적 시험기보다 높은 시험 속도가 요구되므로, Fig. 3과 같은 수평형 공압 충격 시험기 (Horizontal type pneumatic impact tester)를 제작하였다. 충격속도는  $250\text{--}3000\text{mm/sec}$ 로 하여  $20\text{--}200\text{sec}^{-1}$ 의 변형률 속도를 얻었다.

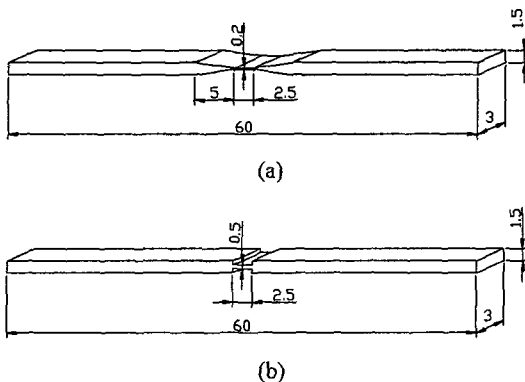


Fig. 1 Specimen dimensions for dynamic tensile and compressive tests: (a) Tensile test specimen; (b) Compressive test specimen.

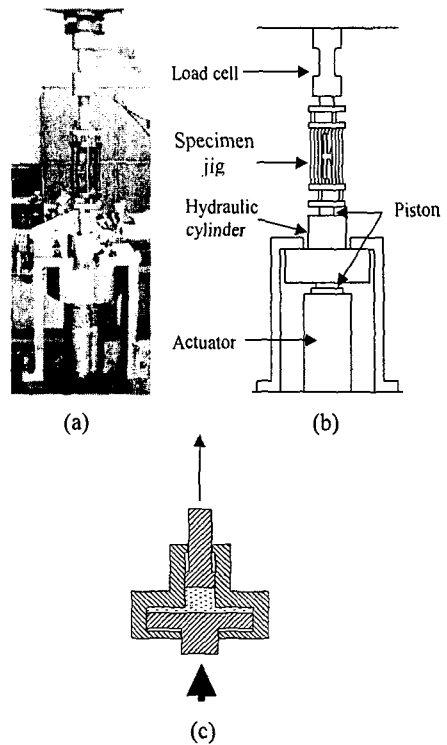


Fig. 2 Experimental setup for tensile and compressive tests with the strain-rate-increase mechanism: (a) Photograph of the test equipment; (b) Schematic diagram of the test equipment; (c) Section of hydraulic cylinders.

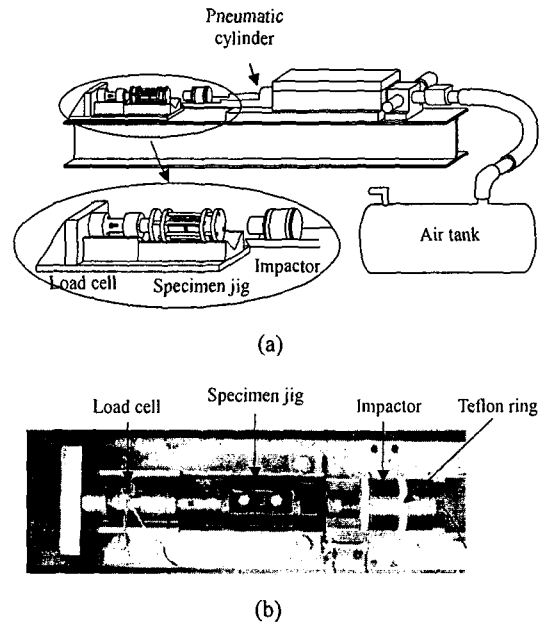


Fig. 3 Experimental setup of the horizontal type impact tester for tensile and compressive tests: (a) Schematic diagram of the test equipment; (b) Photograph of the main part.

동적 하중 측정을 위하여 Fig. 2(a), Fig. 3(c)에 나타나 있는 로드셀을 제작하였다. 4 개의 스트레인 게이지를 사용하여 풀 브리지 (Full bridge) 회로를 구성하여 굽힘 변형률의 영향을 제거하고 온도 보상 (Temperature compensation)이 되도록 하였다. 신호 증폭에는 직류형 스트레인 앰프 (DC type strain amplifier AS2103, NEC, Japan)가 사용되었으며, 증폭된 신호는 고속 I/O 보드 (High sampling rate I/O board PCI-6071E, National Instrument, USA)를 통하여 IBM-PC 에 일정 시간 간격으로 기록되도록 하였다. 사용된 고속 I/O 보드의 최대 샘플링 주파수 (Sampling frequency)는 1MHz 이므로 최소 1μsec 간격으로 데이터 획득이 가능하며, 변형률 속도에 따라서 적절한 샘플링 주파수를 선택하여 데이터를 저장하였다.

유압 실린더를 이용하는 보완된 동적 시험 장비와 충격형 시험 장비는 압축 하중만을 가할 수 있다는 문제점이 있다. 이러한 문제 해결을 위하여 시험기의 구동부는 압축 방향으로 하중을 가하지만, 시편에는 인장 하중이 걸릴 수 있는 시편 고정구를 설계하였다. 또한, 압축 시험의 경우, 좌

굴 (Buckling) 등의 바람직하지 못한 파괴 모드가 나타날 수 있다. 이를 고려하여 Fig. 4 와 같은 새장형 고정구를 설계, 제작하였다.

## 2.2. 시험 결과

유리섬유 에폭시 복합재료의 준정적 물성을 얻기 위해서 인장 및 압축 시편에 대하여, 정적 물성 시험기 Instron4206 을 이용하여 강도를 얻었다. 인장 강도는 1050MPa 이며 압축 강도는 700MPa 로, 인장 강도가 압축 강도에 비해 50% 정도 큰 것을 알 수 있었다.

변형률에 따른 강도 측정을 위해서는 변형률과 응력을 각각 시간에 따라서 측정해야 하는데, 본 연구에서는 간접적인 방법으로 변형률 속도를 예측하였다. 유리섬유 에폭시 복합재료의 경우 변형률 속도에 따른 강성의 변화는 없거나 강도의 변화에 비해 매우 작다 [6,8,12]. 따라서 변형률 속도에 대하여 강성이 일정하다는 가정을 할 수 있으며, 다음의 식과 같이 하고 응력-시간 선도의 기울기를 강성으로 나눈 값을 변형률 속도로 볼 수 있다.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (1)$$

시험은 인장과 압축에 대해서 각각 70 회씩 수행하였으며, Fig. 5 에 변형률 속도에 따른 유리섬유 에폭시 복합재료의 인장 및 압축 강도를 나타내었다. 인장과 압축 모두 변형률 속도가 증가할 경우 강도가 증가함을 알 수 있다. 변형률 속도가 100sec<sup>-1</sup> 까지는 변형률 속도의 로그 스케일 (Logarithm scale)에 대하여 거의 선형적으로 증가하며 100sec<sup>-1</sup> 보다 더 큰 범위에서는 강도가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 정적 시험과 마찬가지로 인장 강도가 압축 강도에 비하여 1.5 배에서 2 배 가량 더 크며, 변형률 속도가 증가함에 따라 인장 강도의 증가폭이 압축 강도의 경우보다 더 큼을 알 수 있었다.

샤피 충격 시험이나 자동차의 충격에 의한 파손 등의 경우 변형률 속도가 10-100sec<sup>-1</sup> 인 점을 감안할 때, 해당 구간에서의 평균 인장 강도는 2100MPa 이며, 평균 압축강도는 1200MPa 이다. 정적 강도에 비교해 보면 인장 강도의 경우 100%, 압축 강도의 경우 70% 정도 증가하였다. 이는 일반적인 금속 재료경우 비슷한 변형률 속도에서 강도가 10% 정도 증가하는 것에 비하여 매우 큰 값이다 [13].

변형률 속도에 따른 강도 증가 현상은 유리 섬유 및 에폭시의 특성과 계면 특성으로부터 설명할

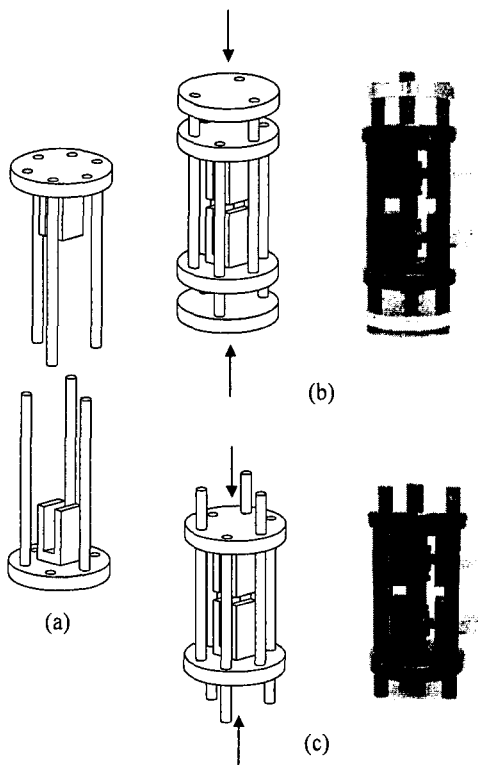


Fig. 4 Jig for tensile and compressive tests: (a) Schematic diagram of the disassembled jig; (b) Jig for tensile test; (c) Jig for compressive test.

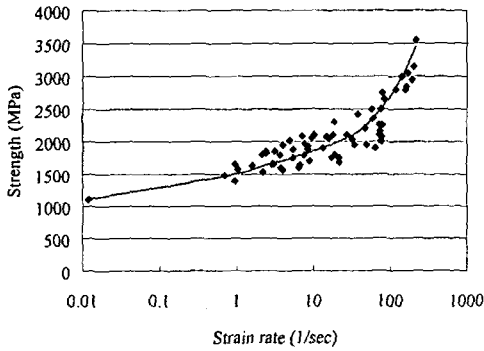
수 있다. 일반적으로 유리섬유는 변형률 속도의 영향을 받지 않으며, 에폭시는 변형률 속도가 증가할 경우 강도와 강성이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다 [7-10]. 복합재료의 압축 파괴는 유리섬유의 미시적 좌굴에 의해 발생하고 섬유의 좌굴 강도는 기지 재료의 전단 물성의 영향을 받으므로, 복합재료의 압축 강도는 변형률 속도에 따라 증가하게 된다.

인장 강도의 증가는 비효과 길이 (Ineffective length)의 감소로 설명할 수 있다. 비효과 길이는 장섬유 강화 복합재료에서 섬유가 파단되었을 때 하중을 지지하지 못하는 길이를 의미하며, 섬유가 지지하는 응력 ( $\sigma$ )은 다음의 식으로 표현된다 [1].

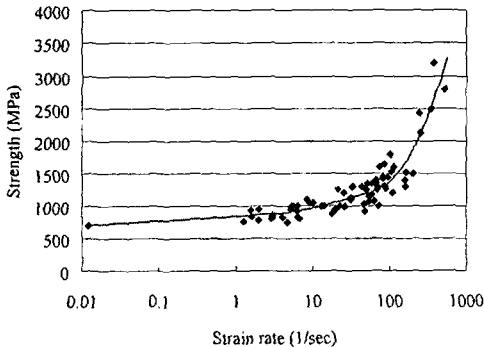
$$\sigma_f \cong \frac{\sigma_v}{v_f} (1 - e^{-K\eta}) \quad (2)$$

여기서,

$$K = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{G_m}{E_f} \left( \frac{\sqrt{v_f}}{1 - \sqrt{v_f}} \right)^2} \quad (3)$$



(a)



(b)

Fig. 5 Test results of the glass epoxy composites w.r.t. strain rates (room temperature): (a) Tensile strength; (b) Compressive strength.

$$\eta = \frac{z}{d_f} \quad (4)$$

변형률 속도가 증가하면 에폭시의 전단 강성이 증가하므로 K 값이 커지게 되고 비효과 길이는 짧아지게 된다. 복합재료에 인장을 가할 경우 섬유에 존재하는 초기의 결함이나 미시적인 응력 집중에 의해서 순차적인 섬유 파손이 발생하게 되며, 파손된 유리섬유는 비효과 길이 범위 내에서 하중을 지지할 수 없게 된다. 동적 하중을 가할 경우에 비효과 길이가 짧아지면, 파단 섬유 양이 동일하더라도 하중 지지능이 높아져서 강도가 증가한다.

### 3. 저온에서의 강도 특성

#### 3.1. 시험 방법

강 (Steel) 재료의 경우 임계연성온도 (Nil ductility transition temperature)가 존재하여 취성이 증가하는 특성을 가지고 있다. 이로 인하여  $-20^\circ\text{C}$  이하의 범위에서는 충격에너지 흡수능이 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다 [3]. 일반적인 경우에 저온에서 강도와 강성은 변화하며, 이러한 특성이 충격에 의한 파손에 영향을 미치게 된다. 복합재료의 경우에는 극저온 (4-76 K)에서 강도와 강성이 증가하는 것으로 알려져 있다 [14]. 본 연구에서는 복합재료를 실제 구조에 적용하기 위해서 충격을 받는 구조의 실제 사용 온도 범위 내에서의 강도 변화 여부를 확인하였다.

시험은 앞서 수행된 상온 물성 측정에 사용된 시험편과 동일한 것을 사용하였으며, 시험 장비는 앞장에서 소개된 충격시험기를 사용하여 변형률 속도  $50-200 \text{ sec}^{-1}$ 의 범위에 대한 시험을 수행하였다. 시험편에 드라이 아이스 (Dry ice) 분말을 시험편에 뿌려 온도를 낮추어 약  $-60^\circ\text{C}$  정도에서 시험을 수행하였다.

#### 3.2. 시험 결과

유리섬유 에폭시 복합재료는 극저온 (4-76 K) 환경에서의 정적시험 결과 인장 및 압축 강성의 변화가 10% 이내로 알려져 있으므로 [14], 본 연구 대상 온도 범위에서는 강성이 변화가 없다고 볼 수 있다. 따라서 저온 시험에서의 변형률 속도는 상온 시험과 동일한 식 (1)로 예측할 수 있다.

약  $-60^\circ\text{C}$ 에서  $50-200 \text{ sec}^{-1}$ 의 범위의 변형률 속도에 따른 인장 및 압축 강도를 측정하여 Fig. 6에 나타내었으며, 상온에서의 시험 결과와 마찬가지로

지로 변형률 속도가 증가함에 따라 강도가 증가함을 알 수 있었다. 상온 시험 결과와 저온 시험 결과를 직접 비교해 본 결과, Fig. 7 과 같이 시험한 저온 범위의 강도 특성은 상온 시험 결과와 동일하다고 볼 수 있었다.

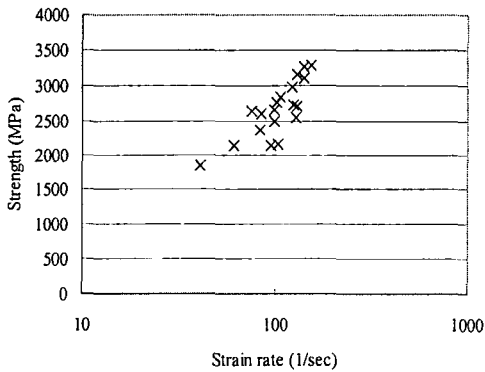
#### 4. 결론

본 연구에서 유리섬유 에폭시 복합재료에 대한 동적 시험을 수행하기 위하여 시험장비를 제작하였다. 변형률 속도 1-20  $\text{sec}^{-1}$  의 범위에 대한 물성을 얻기 위해서 유압 실린더를 응용한 속도 증가 시스템을 구성하여 범용 동적 시험 장비에 장착하였다. 변형률 속도 20-200  $\text{sec}^{-1}$  의 범위에 대한 시험을 위해서 수평형 공압식 충격 시험기를 개발하였다. 제작된 시험 장비를 이용하여 현재까지 데이터 축적이 미비한 일방향 유리섬유 에폭시 복합

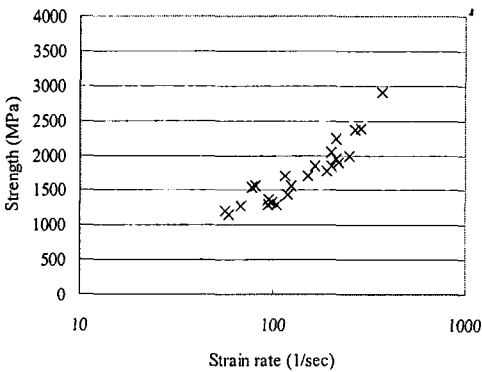
재료의 1-200  $\text{sec}^{-1}$  범위의 변형률 속도에 대한 시험을 수행하였으며,  $-60^\circ\text{C}$  에서 변형률 속도에 따른 인장 및 압축 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) 상온 시험 결과, 변형률 속도가 증가함에 따

라 인장 및 압축 강도가 증가하였으며, 압축 강도에 비하여 인장 강도의 증가폭이 더 컸다. 사피 충격 시험 및 자동차의 충돌 등에 해당하는 10-100  $\text{sec}^{-1}$  의 변형률 속도에서 인장 강도의 경우 약 100 %, 압축 강도의 경우 약 70 % 정도 증가하였다.

(2) 변형률 속도 50-200  $\text{sec}^{-1}$  범위에 대하여  $-60^\circ\text{C}$  에서 저온 시험을 수행하였으며, 인장 및 압축 강도를 측정된 결과 상온 시험 결과와 거의 차이가 없었다.

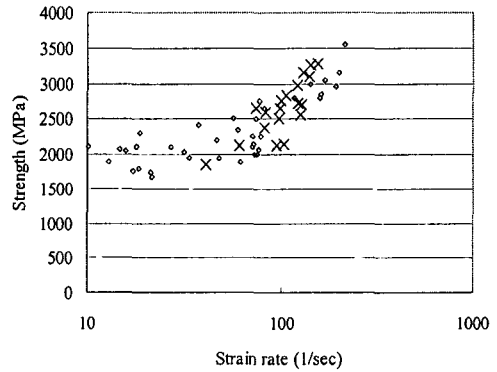


(a)

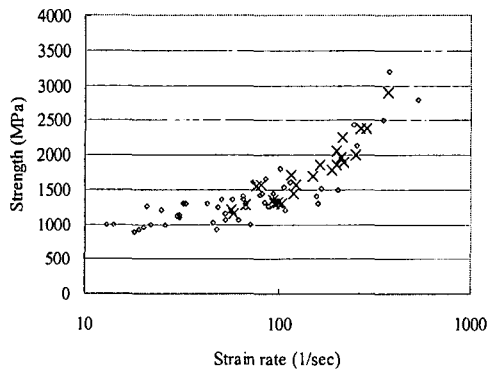


(b)

Fig. 6 Test results of the glass epoxy composites w.r.t. strain rates (low temperature,  $-60^\circ\text{C}$ ): (a) Tensile strength; (b) Compressive strength.



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison between the strength data of the room temperature ( $20^\circ\text{C}$ ) and the low temperature ( $-60^\circ\text{C}$ ) w.r.t. strain rates: (a) Tensile strength; (b) Compressive strength ( $\diamond$  : room temperature,  $20^\circ\text{C}$ ,  $x$  : low temperature;  $-60^\circ\text{C}$ ).

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 목격기초연구 (98-0200-01-01-5) 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조기술, 시그마프레스, 1998, 186-196.
- (2) Cheon, S.S., Choi, J.H. and Lee, D.G., "Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars," *Composite Structures*, Vol.32, 1995, pp. 491-499.
- (3) Cheon, S.S., Lee, D.G. and Jeong, K.S., "Composite Side-door Impact Beams for Passenger Cars," *Composite Structures*, Vol.38, No.1-4, 1997, pp. 229-239.
- (4) Beardmore, P., "Composite Structures for Automobiles," *Composite Structures*, Vol.5, 1986, pp. 163-176.
- (5) Thornton, P.H. and Jeryan, R.A., "Crash Energy Management in Composite Automotive Structures," *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 7, No.2, 1988, pp. 167-180.
- (6) Barre, S., Chotard, T. and Benzeggagh, M. L., "Comparative Study of Strain Rate Effects on Mechanical Properties of Glass Fibre-Reinforced Thermoset Matrix Composites," *Composites Part A*, Vol.27A, 1996, pp. 1169-1181.
- (7) Hsiao, H.M., Daniel, I.M. and Cordes, R.D., "Strain Rate Effects on the Transverse Compressive and Shear Behavior of Unidirectional Composites," *J. Composite Materials*, Vol.33, No.17, 1999, pp. 1620-1642.
- (8) Harding, J., "Effect of Strain Rate and Specimen Geometry on the Compressive Strength of Woven Glass-Reinforced Epoxy Laminates," *Composites*, Vol.24, No.4, 1993, pp. 323-332.
- (9) Hamouda, A.M.S., Hashmi, M.S.J., "Testing of Composite Materials at High Rates of Strain: Advances and Challenges," *J. Materials Processing Technology*, Vol.77, 1998, pp. 327-336.
- (10) Zhao, H. and Gary, G., "An Experimental Investigation of Compressive Failure Strength of Fibre-Reinforced Polymer-Matrix Composite Plates under Impact Loading," *Composites Science and Technology*, Vol.57, 1997, pp. 287-292.
- (11) Harding, J. and Welsh, L. M., "A Tensile Testing Technique for Fibre-reinforced Composites at Impact Rates of Strain," *J. Materials Science*, Vol.18, 1983, pp. 1810-1826.
- (12) Plastinin, A.V. and Sil'vestrov, V.V., "Dynamic Compressive Strength of Epoxy Composites," *Mechanics of Composite Materials*, Vol.31, 1995, pp. 549-553.
- (13) Nicholas, T., "Tensile Testing of Materials at High Rates of Strain," *Experimental Mechanics*, Vol.21, No.5, 1981, pp. 177-185.
- (14) Walsh, R.P., McColskey, J.D. and Reed, R.P., "Low

Temperature Properties of a Unidirectionally Reinforced Epoxy Fibreglass Composite," *Cryogenics*, Vol.35, No.11, 1995, pp. 723-725.