

## 고상성형된 열가소성 복합재료의 성형 변형률이 기계적 특성에 미치는 영향

이중희<sup>†</sup> · 조현철<sup>\*</sup> · 이경엽<sup>\*\*</sup>  
(2000년 10월 19일 접수, 2001년 5월 22일 심사완료)

### Effects of the Pre-strain on Mechanical Properties of the Solid-Phase Formed Thermoplastic Composite

Joong-Hee Lee, Hyun-Choel Cho and Kyong-Yop Rhee

**Key Words:** Solid-Phase Forming(고상성형), Thermoplastic Composite(열가소성 복합재료), Pre-Strain(성형 변형률), Material Properties(재료 특성), Rule of Mixture(혼합법칙)

#### Abstract

This study investigates the effects of the pre-strain level on mechanical properties of the solid-phase formed thermoplastic composite. A uniaxial solid-phase forming was performed at the temperature of 125°C and at the constant cross-head speed of 3mm/sec. The composite sheet was formed to various pre-strain levels of 10%, 20%, and 30%. Tension, flexural, and impact tests were carried out to characterize the material properties of a solid-phase formed part. Tensile and flexural strengths decreased with increasing the pre-strain level, while impact strength increased. Various microstructures of the formed part explained the above material behavior.

#### 1. 서론

고분자 복합재료는 금속성 재료에 비해 가볍고 비강도와 비강성이 높으며, 내화학성, 내부식성 등이 우수하여 조선, 자동차 및 항공산업 등에 널리 사용되고 있다. 특히 제품 제조 공정이 금속성 재료에 비해 비교적 간단하며 복잡한 형상의 제조가 용이하고, 이에 따른 부품의 일체화(parts consolidation)가 가능하여 그 사용이 점차 증가하고 있다.<sup>(1-3)</sup>

고분자 복합재료는 크게 열경화성 복합재료와 열가소성 복합재료로 구분할 수 있다. 최근 폐기물 처리 및 환경문제가 사회문제로 대두되면서

경량화에 유리하고 재활용이 가능하며, 최종처리로서 소각도 가능한 열가소성 복합재료에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>(4)</sup> 특히 긴 유리섬유가 강화된 열가소성 복합재료는 인장강도 및 충격강도 등 기계적 특성이 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

열가소성 복합재료에 사용될 수 있는 성형방법 중 하나로 고상성형(solid-phase forming)이 있다. 고상성형이란 금속관재의 성형에 이용되는 방법을 응용한 것으로 복합재료를 수지의 용융온도(melting temperature)와 유리전이온도(glass transition temperature) 사이로 가열하여 고상 상태에서 성형하는 방법이며, 재료를 용융온도 이상으로 가열하지 않아도 되기 때문에 에너지 소비가 적고, 재료를 녹이지 않고 성형하기 때문에 표면이 비교적 우수하고 비교적 짧은 공정시간에 복합재료 제품을 생산할 수 있다는 장점을 가지고 있다.<sup>(6-9)</sup>

고상성형법은 현재 실험실에서의 연구로만 행해져 왔고 현장에서의 실용화를 위해서는 아직도 많은 연구가 필요한 상태이다.<sup>(7-9)</sup> 본 연구는 이

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 전북대학교 자동차부품금형TIC

E-mail : jhl@mail.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2342 FAX : (063)270-2341

<sup>\*</sup> 전북대 대학원 고분자공학과

<sup>\*\*</sup> 회원, 경희대학교 기계공학부

러한 실용화를 위한 실험의 일환으로써, 고상성형시 제품에 발생하는 변형률이 고상성형된 복합재료 부품의 기계적 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해 수행했다. 고상성형이 가능한 적절한 온도로 시편을 가열한 후 단순인장 모드에서 고상성형 했으며, 성형 변형률에 따른 재료 특성에 미치는 영향을 관찰하고자 다양한 변형률을 갖도록 고상성형을 하였다. 이러한 기계적 특성의 변화를 관찰하기 위하여 고상성형된 시편의 인장시험, 굽힘시험, 충격시험을 하였고, 기계적 특성과 성형동안의 조직의 미세 변화와의 관계를 규명하기 위하여 현미경을 통해 미세조직을 관찰하였다.

## 2. 실험

유리섬유 강화 열가소성 복합재료를 고상성형을 통하여 성형하였을 경우, 성형된 제품의 재료 특성에 미치는 성형 변형률의 영향을 조사하기 위해 본 연구에서는 시편을 단순인장모드에서 여러 변형률에 이르도록 고상성형을 행하였으며, 또한 기계적 특성을 파악하기 위하여 인장시험, 굽힘시험, 충격시험을 행하였다.

### 2.1 단순인장모드의 고상성형

고상성형을 위해 사용된 재료는 Alhstrom사에서 제공된 RTC-C-4000-20-B, RTC-3000-30-B, RTC-3000-40-B이다. 이들 재료는 임의의 방향으로 배향된 긴 유리섬유로 강화된 복합재료이며, 수지는 폴리프로필렌이 사용되었다. 유리섬유가 중량비로 각각 20wt%, 30wt%, 40wt% 함유되어 있으며, 사용된 유리섬유의 길이와 직경은 각각 12mm와 11 $\mu$ m이다. 사용된 재료는 판재형태로 된 열가소성 복합재료이다.

사용된 폴리프로필렌의 유리전이온도와 용융온도는 각각 -10 $^{\circ}$ C와 165 $^{\circ}$ C이다. 복합재료판재의 두께는 유리섬유가 20wt% 함유되어 있는 재료의 경우에는 3.81mm이고, 30wt%와 40wt%가 함유되어 있는 경우에는 2.54mm이다. 단순인장모드에서 고상성형하기 위해 복합재료 판재를 기계가공하여 길이 150mm, 폭 30mm 직사각형 형태의 시편을 제작하였다. 시편을 고온용 항온실(chamber)에 넣은 후 125 $^{\circ}$ C의 온도에서 균일한 온도 분포를 위해

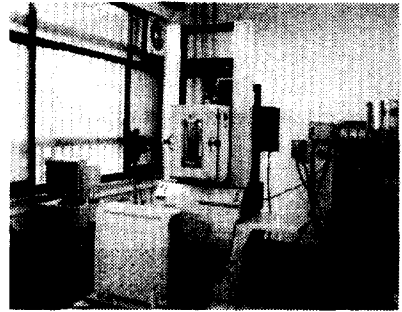


Fig. 1 Equipment used for the solid-phase forming

약 30분 동안 유지한 후, UTM을 이용하여 예열된 시편을 동일 온도를 유지하면서 3mm/sec의 일정 성형 속도로 고상성형하였다. 고상성형시 변형률에 따른 성형된 제품의 재료 특성의 변화를 조사하기 위해 서로 다른 성형 변형률을 갖도록 여러 변형률까지 고상성형하였다. 본 연구에서는 이를 위해 각각 10%, 20%, 30%의 변형률을 갖도록 시편을 고상성형하였다. Fig. 1은 고상성형을 위해 사용된 장비를 보여주고 있다.

성형된 시편의 변형률을 측정하기 위해 시편에 일정한 크기의 정사각형 모양의 눈금을 특수 잉크를 사용하여 시편 제작 전에 인쇄하였으며, 성형 전 모눈의 길이와 성형 후의 모눈의 길이의 차이를 측정함으로써 변형률을 구하였다.

### 2.2 인장시험

고상성형동안의 재료특성 변화를 평가하기 위해 인장시험을 행하였다. 각 변형률에 따라 성형된 시편 중  $\pm 5\%$  이내의 편차를 보이는 5개의 시편을 선정하여 인장시험용 시편을 제작하였다. 인장시험용 시편은 0%, 10%, 20%, 30%로 성형된 시편을 길이 150mm와 폭 20mm인 직사각형으로 밀링머신(milling machine)을 이용하여 기계가공하여 제작하였다. ASTM D3039에 따라 인장시험을 행하였으며, 실험을 위해 UTM장비를 사용하였고, 크로스헤드(cross-head)의 속도는 2mm/min으로 하여 상온에서 실험을 행하였다.

### 2.3 굽힘시험

굽힘시험은 ASTM D790에 따라 행하였으며, UTM을 사용하여 상온에서 1.28mm/min의 cross-

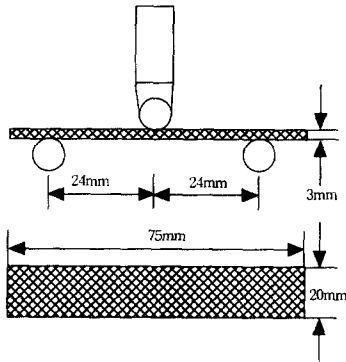


Fig. 2 Schematics of punch and die geometries for the flexural test

head 속도로 실험하였다. 굽힘실험 역시 0%, 10%, 20%, 30%의 성형 변형률을 가지는 시편으로 실험을 행하였다. 굽힘실험 시편은 각각의 변형률을 갖는 고상성형된 복합재료를 길이 75mm와 폭 20mm의 직사각형 모양으로 기계 가공하여 제작하였다. 다이 스패น(die span)의 길이는 48mm로 하였고, 다이와 펀치의 직경은 각각 5mm로 하였다. Fig. 2에서 사용된 다이와 펀치의 형상과 시편의 크기를 보여주고 있다.

#### 2.4 충격실험

충격실험은 ASTM D4812에 따라 행하였으며, 노치(notch)가 없는 Izod 충격실험을 행하였다. 장비는 Zwick사의 충격시험기를 사용하였다. 사용된 충격시험기 추(pendulum)의 놓임 각(release angle)은  $124.4^\circ$  이며, 에너지가 11J인 추(pendulum)를 사용하였다. 각각의 변형률에 따라 고상성형된 시편을 길이와 폭이 각각 62mm와 10mm인 직사각형으로 제작하였다. 시편에 조임조정기(clamping adjuster)를 사용하여 50N의 조임압력(clamping force)을 유지하면서 실험을 행하였고, 조임조정기(clamping adjuster) 위로 시편이 31.75mm로 위치하도록 하였다. 한 실험 조건에서 5번의 반복실험을 통하여 값을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 변형률에 따른 인장특성의 변화

고상성형시 변형률에 따른 기계적 성질의 변화

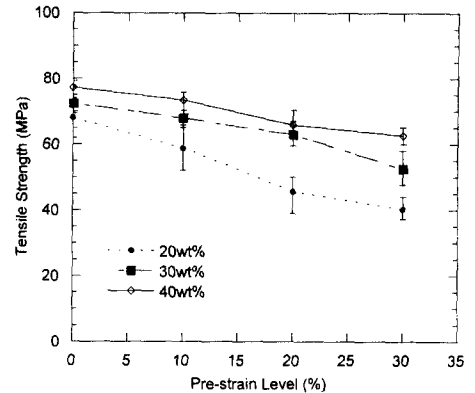


Fig. 3 Tensile strength of solid-phase formed specimens at various pre-strain levels

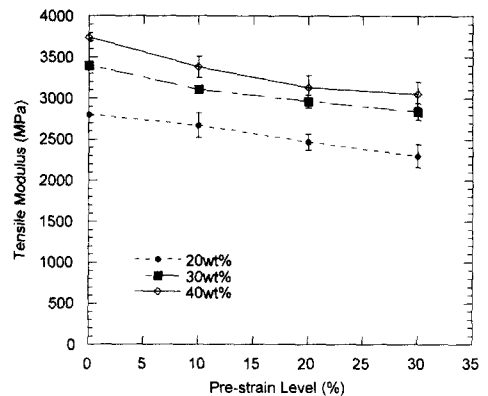


Fig. 4 Tensile modulus of solid-phase formed specimens at various pre-strain levels

를 관찰하고자 행한 인장실험을 통해 Fig. 3, Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 변형률에 따른 인장강도와 인장계수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 변형률이 증가함에 따라 인장강도와 인장계수는 감소하는 경향을 보인다. 유리섬유의 함유량이 20wt%인 시편의 경우 30%의 변형률에서 약 40%의 인장강도가 감소하였으며, 30wt%와 40wt%의 경우에도 30%의 변형률에서 각각 약 25%와 20%의 인장강도가 감소하는 것을 보였다. 즉, 변형률이 증가할수록 인장강도는 감소하며, 또한 유리섬유의 함유량이 감소할수록 인장강도의 감소율이 증가함

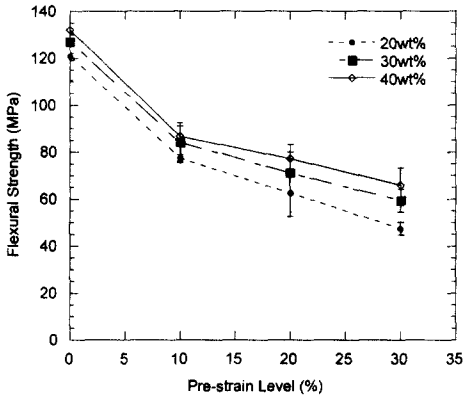


Fig. 5 Flexural strength of solid-phase formed specimens at various pre-strain levels

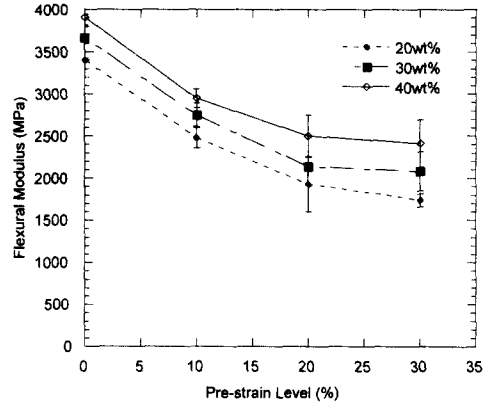


Fig. 6 Flexural modulus of solid-phase formed specimens at various pre-strain levels

을 알 수 있다. 반면 인장계수는 유리섬유의 함유량이 감소할수록 인장계수의 감소율이 감소함을 보인다.

3.2 변형률에 따른 굽힘특성의 변화

굽힘강도와 굽힘계수는 굽힘실험을 통해 얻어진 하중-변위 곡선으로부터 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$S = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

$$E_H = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2)$$

여기서  $S$ 는 굽힘강도(MPa)를 나타내며,  $E_H$ 는 굽힘계수(MPa),  $P$ 는 재료의 최대하중(N),  $L$ 은 스패(span)의 길이(mm), 그리고  $m$ 은 하중-변위 곡선의 초기 직선라인의 기울기를 나타내며,  $b$ 와  $d$ 는 각각 시편의 폭과 두께를 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 변형률에 따른 굽힘강도와 굽힘계수의 측정치를 평균값과 함께 오차막대(error-bar)를 이용하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 유리섬유의 함유량이 적을수록, 또한 변형률이 증가할수록 굽힘강도 및 굽힘계수가 감소하였으며, 이는 인장특성에서 보인 결과와 유사하다. 굽힘강도의 변화에 있어서 초기 10%의 변형률을 가질 경우에는 모든 재료에 대해서 약 35% 감소하였으나 변형률이 증가할수록 감소율이 다소 둔화되는 추세를 보인다.

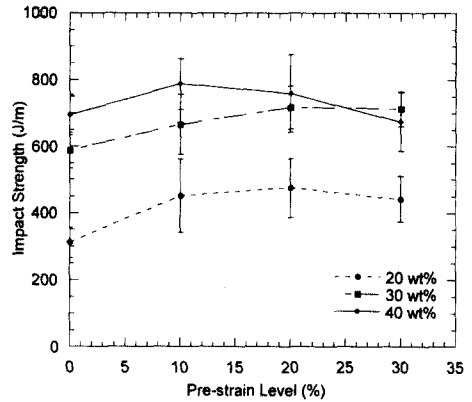


Fig. 7 Impact strength of solid-phase formed specimens at various pre-strain levels

3.3 변형률에 따른 충격특성의 변화

단순인장 고상성형된 제품의 충격 특성 파악을 위해 Izod 충격시험을 행하였으며, Fig. 7은 변형률에 따른 충격강도의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 고상성형시 변형률이 증가함에 따라 어느 정도까지 충격강도는 증가하는 추세를 보이다가 그 이상에서는 변형률이 증가함에 따라 충격강도가 감소하는 추세를 보인다. 이러한 추세는 실험된 모든 유리섬유의 함유량에서 유사하게 나타나며, 유리섬유의 함유량에 따라 최대의 충격강도를 나타내는 성형변형을 값이 다르게 나타남을 알 수 있다. 대체적으로 유리섬유

함유량이 증가할수록 최대 충격강도를 나타내는 성형변형률 값이 감소한다.

### 3.4 미시적 고찰

변형률에 따른 기계적 특성 변화와 재료의 미시적 변화와의 관계를 파악하기 위해 재료의 미시적 관찰을 행하였다. 변형률이 증가함에 따라 인장특성과 굽힘특성이 저하된 이유는 고상성형시 제품의 내부에서 발생되는 조직의 변화, 즉 주로 기공(void)의 형성이나 유리섬유의 파괴, 수지의 소성변형 등에 의해 일어날 것이며, 반면 이렇게 형성된 기공(void)은 충격 시에 완충역할을 하게 되어 충격특성이 증가하는 결과를 초래하는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 유리섬유의 함유량이 20wt%인 재료에 대해서 변형률에 따른 조직의 현미경 사진을 보여주고 있다. (a)의 경우는 성형 변형률이 10%일 때를 보여주고 있으며, 수지에서 국부적인 소성 변형이 시작되고 있음을 보인다. (b)는 성형 변형률이 20%일 경우이며, 소성변형역이 점차 확산되어 감을 보이며 발생 횡수도 증가함을 보인다. (c)는 성형 변형률이 30%인 경우로서 소성 변형역이 확산되어감과 동시에 국부적으로 수지의 찢어짐과 수지와 유리섬유와의 분리현상(debonding) 및 기공(void) 형성이 더욱 진전되는 것을 볼 수 있다.

### 3.5 기계적 특성 변화의 이론적 해석

유리섬유 강화 열가소성 복합재료의 기계적 특성을 예측하기 위하여 일반적으로 혼합법칙<sup>(10,11)</sup>을 사용한다. 본 연구에서는 고상성형된 제품의 재료특성을 예측하기 위하여 충전인자(compaction factor)를 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$E_c = C_o \eta_o E_f V_f + E_m V_m \quad (3)$$

여기서,  $C_o$ 는 복합재료의 밀착(packaging)정도, 즉 유리섬유와 수지와와의 접촉상태를 나타내는 충전인자(compaction factor)이며,  $\eta_o$ 는 유리섬유가 평면 상(in-plane)에서 임의의 방향으로 배열되어 있을 때의 방향 인자로서 대략 0.33이다.<sup>(12)</sup>  $E$ 는 탄성계수를  $V$ 는 체적함유량을 나타내며, 첨자  $f$ 와  $m$ 은 각각 유리섬유와 수지를 나타낸다. 만약 복

합재료가 완전한 밀착(packaging)을 이루고 있다면,  $C_o$ 의 값은 1이 될 것이며, 그렇지 못한 경우에는 1보다 작은 값을 갖게 될 것이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Micrograph of the (a)10%, (b)20%, and (c)30% deformed specimen at 125°C for 20% glass content composite

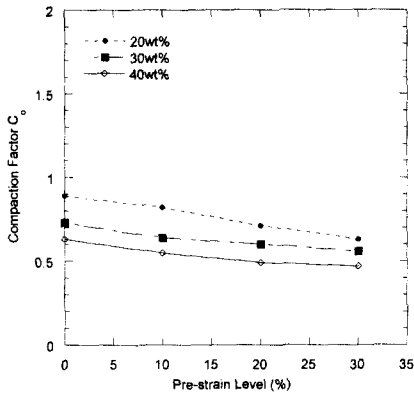


Fig. 9 Compaction factor of solid-phase formed specimens at various pre-strain levels

Fig. 9는 사용된 수지와 유리섬유의 물성치를 식 (3)의 우변에 대입하고, 각 성형 변형률에서 측정된 측정값을 좌변에 대입함으로써 얻어진 고상성형된 복합재료의  $C_0$ (compaction factor) 값을 보여주고 있다. 변형률이 0%인 경우, 모든 재료에 대한  $C_0$ 값은 1보다 작은 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이로부터 복합재료가 완전한 밀착(packing)을 이루지 못하고 그 내부에 기공(void)이나 섬유사이의 겹침으로 인한 불안정한 접촉상태가 존재한다는 것을 알 수 있다. 변형률이 증가할수록 충전인자  $C_0$ 의 값은 감소하며, 이로부터 변형률이 증가함에 따라 기공(void)의 증가와 수지의 소성변형과 분리현상으로 나타나는 불안정한 접촉상태가 나타나는 것을 제안된 모델을 사용하여 쉽게 나타낼 수 있다.

#### 4. 결론

유리섬유 강화 열가소성 복합재료를 고상성형 하였을 때 변형률에 따른 기계적 특성의 변화를 살펴보기 위한 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 변형률이 증가할수록 인장특성 및 굽힘특성은 감소하지만 충격특성은 초기에는 증가하다가 임계점 이상의 변형률에서는 감소함을 보였다.
- (2) 고상성형된 제품의 기계적 특성의 변화는 성형동안의 수지의 소성변형과 분리현상, 수지의

찢어짐, 유리섬유의 파괴 등과 같은 재료의 미세 변화에 기인된다.

(3) 고상성형된 복합재료의 기계적 특성을 예측하기 위해 충전인자(compaction factor)를 함유한 제안된 혼합법칙을 사용하여 성형동안의 기공(void) 형성이나 분리현상 등과 같은 재료의 물성저하를 묘사해 줄 수 있다.

(4) 고상성형을 제품제조에 적용하면 성형동안의 재료의 물성저하로 인해 제품의 성능에 많은 영향을 미칠 것으로 여겨지며, 이러한 성형방법은 특히 인장하중이나 굽힘하중에 노출된 제품보다는 충격하중에 노출된 제품제조에 적합한 것으로 여겨진다.

#### 참고문헌

- (1) Bigg, D. M. and Preston, J. R., 1986, "Stamping of Thermoplastic Matrix Composite," *Polymer Composites*, Vol. 10, pp. 261~268.
- (2) Crosby, J. M., 1988, "Recent Advances in Thermo-plastic Composites," *Advanced Materials and Processes Inc. Metal Progress*, pp. 56~59.
- (3) 이우일, 1987, "섬유강화 복합재료와 자동차 산업에의 응용," *자동차공학회지*, Vol. 9, No. 6, pp. 8~14.
- (4) 이동기, 김정락, 김상필, 이우일, 김이곤, 1993, "Thermoforming용 장섬유강화 복합재료의 성형공정에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제 7권, 제 5호, pp. 1106~1114.
- (5) Ericson, M. and Berglund, L., 1992, "Deformation and Fracture of Glass Mat Reinforced Polypropylene," *Composite Science and Technology*, Vol. 43, pp. 269~281.
- (6) Bigg, D. M., Hiscock, D. F., Preston, J. R., and Bradbury, E. J., 1988, "Thermoplastic Matrix Sheet Composites," *Polymer Composites*, Vol. 9, pp. 222~228.
- (7) Lee, J. H. and Vogel, J. H., 1995, "An Investigation of the Formability of Long Fiber Thermoplastic Composite Sheets," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, pp. 127~132.
- (8) Lee, J. H. and Vogel, J. H., 1995, "Biaxial Stretch Forming of Thermoplastic Composite Sheets," *27th International SAMPE Technical Conference*, Vol. 27, pp. 750~759.

- (9) Lee, J. H. and Vogel, J. H., 1996, "An Investigation of Necking Instability in Fiber Reinforced Polypropylene," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 118, pp. 80~87.
- (10) Matthews, F. L. and Rawlings, R. D., 1994, *Composite Materials: Engineering and Science*, Chapman & Hall, pp. 251~268.
- (11) 이대길, 1993, 복합재료 역학 및 가공론, 성안당, pp. 187~192.
- (12) Mallick, P. K. and Newman, S., 1990, *Composite Materials Technology*, Hanser Publisher, pp. 67~320.