

# GMT Sheet에서 섬유함유율 및 섬유배향이 인장강도에 미치는 영향

이정주† · 이동기\* · 심재기\* · 조선형\*\* · 김진우\*\*\*

## Effect of Fiber Content and Fiber Orientation on the Tensile Strength in Glass Mat Reinforced Thermoplastic Sheet

Jung-Ju Lee, Dong-Gi Lee, Jae-Ki Sim, Seon-Hyung Jo and Jin-Woo Kim

Key Words : Glass Mat Reinforced Thermoplastic Sheet (GMT 시트), Fiber Content (섬유함유율), Fiber Orientation Function (섬유배향함수), Relative Fiber Length (상대 섬유길이)

### Abstract

We can say that the increasing range of the value of GMT Sheet's tensile strength in the direction of fiber orientation is getting wider as the fiber content increases. It shows that the value of GMT Sheet's tensile strength in the direction of fiber orientation 90 is similar with the value of pp's intensity when fiber orientation function is  $J=0.7$ , regardless of the fiber content. Tensile strength of GMT Sheet is affected by the fiber orientation distribution more than by the fiber content.

#### 기호설명

- J : 섬유배향함수  
L : 섬유길이  
 $q(\theta)$  : 섬유배향각 분포  
 $\sigma_{pp}$  : 모재의 인장강도  
 $\sigma_{[0^\circ]}$  : 섬유배향 0° 방향의 복합재료 인장강도  
 $\sigma_{[90^\circ]}$  : 섬유배향 90° 방향의 복합재료 인장강도

#### 1. 서론

GMT Sheet는 금속재료에 비해 비강도(중량대비 강도) 및 비강성(중량대비 강성) 등의 우수한 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 특정 방향으로 섬유를 배향하여 강도를 향상시킬 수 있어 다양

한 용도로 사용되고 있다. 또한, 성형의 자유도가 커서 복잡한 형상의 부품성형이 가능하며 생산성이 높아 생산비를 낮출 수 있다. 따라서 이 복합재료의 성형품은 강판 프레스의 성형품을 대신해서 항공기, 자동차, 스포츠, 에너지 관련분야 등의 구조재료로 사용이 확대되고 있는 실정이다.

GMT Sheet의 성질은 모재의 성질에 의존하는 것이 당연하지만, 강화재의 섬유배향상태, 섬유길이, 섬유함유율, 섬유영김상태, 섬유매트구조 그리고 모재와 강화재의 함침성 및 성형조건 등에 따라서 물성이 변화한다. 그러므로 GMT Sheet에서 섬유함유율과 섬유배향상태가 기계적 성질에 어떠한 영향을 미치는가를 밝혀두는 것은 재료설계, 최적 성형조건의 결정, 기계적 특성 등을 예측하는데 있어서 선결되어야 하는 가장 중요한 인자이다. 이와 관련하여 한 방향 복합재료에 대해서는 많은 연구가 있었으나 섬유배향상태에 따른 연구는 미흡한 실정이며 연구결과들을 보면 다음과 같다.

Lee<sup>(1)</sup> 등은 장섬유강화 고분자복합판의 압축성형에 있어서 섬유의 분리와 배향의 상관관계에, Lee<sup>(2)</sup> 등은 Thermoforming용 장섬유강화 복합재료

† 조선대학교 대학원 정밀기계공학과  
E-mail : dglee@mail.chosun.ac.kr  
TEL : (062)230-7015 FAX : (062)230-7015

\* 조선대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 동서울대학교 컴퓨터응용기계공학부

\*\*\* 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

의 성형공정에 관한 연구에서 분리·배향의 상관관계에 대하여, Jo<sup>(3)</sup>등은 장섬유강화 고분자복합판의 프레스성형에 있어서 화상처리에 의한 섬유의 배향에 관한 연구를 수행하였다.

그리고 Byun<sup>(4)</sup>등은 끈 섬유로 강화한 복합재료의 탄성계수를 예측하기 위한 강성모델을 제시하였다. Lim<sup>(5)</sup>등은 자동차용 고강도 폴리머 복합재료의 변형과 강도에 대해 연구하였고, Shin<sup>(6)</sup>등은 고속압밀법에 의한 유리섬유강화 PET 기지 복합재료의 제조에 있어서 제조공정과 장치의 최적제작조건에 대한 연구를 수행하였다.

그러나 GMT Sheet는 자동차 등의 구조부재에서 어느 특정 방향으로 강도가 요구되기 때문에 섬유함유율과 섬유배향 상태가 GMT Sheet의 인장강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모재는 폴리프로필렌, 강화재는 유리섬유를 사용하여 GMT Sheet를 제작하였다. 이때 섬유배향상태의 척도인 섬유배향함수를 이론적으로 계산하여 섬유배향상태를 변화시켜 복합판재를 제작한 후, 이 제작된 GMT Sheet의 인장강도를 높이는 데 사용되는 섬유함유율과 섬유배향과의 관계에 대해 고찰하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 섬유배향함수

현재, 국내외에서 사용되고 있는 대부분의 GMT Sheet의 두께(3.8mm)는 폭과 길이에 비교하여 매우 얇기 때문에 Fig. 1과 같이 섬유를 2차원 집합체로서 취급하여, x-y평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우 x축과 이루는 섬유배향각  $\theta$ 는  $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에 있다. 따라서 섬유배향각 분포상태를 표시하는 섬유배향함수(J)와 섬유배향각 분포  $q(\theta)$ 사이의 관계는 식(1)과 같다<sup>(1-3)</sup>. Fig. 1은 식(1)의 섬유배향함수(J) 값 변화에 따른 섬유배향각( $\theta$ )와 상대 섬유길이  $q(\theta)$ 와의 관계를 나타낸 그림이다.

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{1-J}{1+J} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{1+J}{1-J} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서 J는 2차원 섬유배향각 분포에 대한 섬

유배향함수이며, 섬유배향이 무작위로 되어 있는 등방성인 경우  $J=0$ , 섬유배향이 한 방향으로만 배열되어 있는 이방성인 경우는  $J=1$ ,  $J=1$ 의 방향에 대해  $90^\circ$  회전방향으로 배열되어 있는 경우는  $J=-1$ 이다. 이와 같이 섬유배향함수(J) 값은 0에서 1사이에서 있으나 0에 가까워지면 섬유의 배향상태가 무작위에 가깝게 됨을 나타낸다.

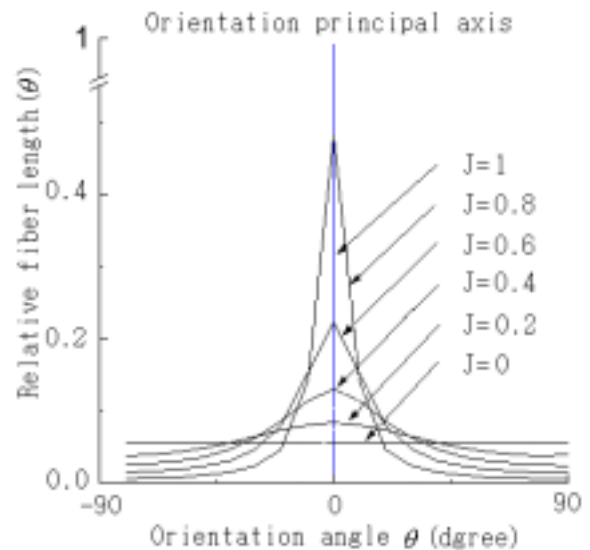


Fig. 1 Distribution of relative fiber length according to the fiber orientation angle

## 3. 실 험

GMT Sheet의 인장강도에 미치는 섬유함유율과 섬유배향 상태의 영향에 대해서 고찰하기 위하여, 프레스 성형용으로 개발된 폴리프로필렌에 유리섬유를 사용하여 강화할 때 Fig. 2와 같은 금형을 사용하여 섬유배향 상태의 척도인 섬유배향함수와 섬유함유율을 변화시킨 다음 Fig. 3의 열압축프레스(Carver Model 2518, U.S.A.)로 GMT Sheet를 제작하였다. 이때 성형온도는  $210^\circ\text{C}$ 이다.

GMT Sheet는 Fig. 4와 같은 구조로 적층할 때 섬유함유율과 섬유배향상태 변화에 따른 섬유층과 모재의 적층상태를 나타낸 그림의 한 예이다. 식(1)에 의하여 이론적으로 계산된 섬유배향함수(J)는 0에서 1사이에서 0.1간격으로 변화시키고, 섬유함유율은 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%로 변화를 주었다. 실험에 사용한 유리섬유는 시판되고 있는 한국화이바의 E-글라스 안(필라멘트 직경:

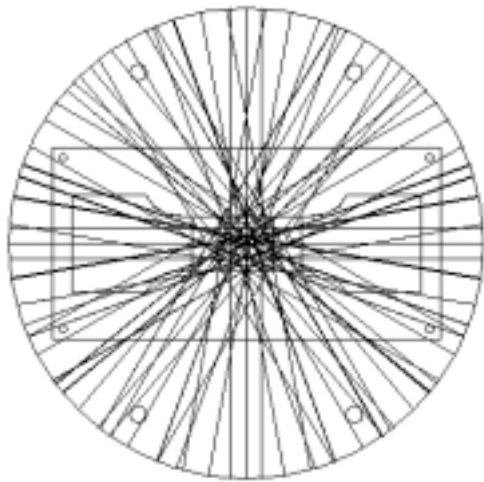


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental mold

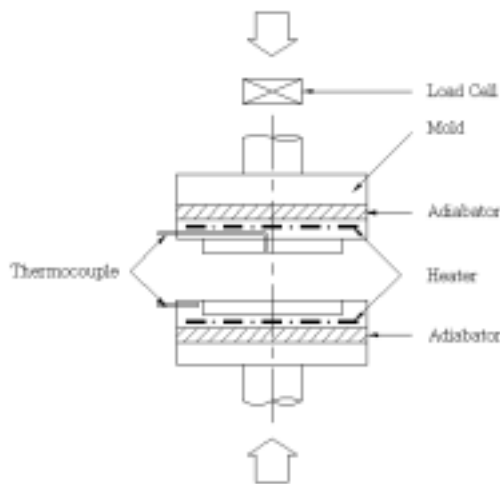


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

13 $\mu$ m, Tex : 135 g/1,000m)이다. Fig. 2와 같은 금형을 사용하여 제작한 GMT Sheet의 중앙부는 Fig. 5와 같은 치수(25mm $\times$ 25mm $\times$ 3.2mm)와 구조로 적층하였다. 인장강도 측정부위에 배향된 섬유배향분포 상태의 한 예(10wt%)를 Table 1에 나타냈으며, 섬유배향상태는 Fig. 6과 같고, 이 섬유배향분포 상태는 Fig. 7과 같다.

각각의 섬유배향 변화에 따라 함침성형된 GMT Sheet의 인장강도 값을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상으로 ASTM D638 규격을 참조하여 인장시험을 행하였다. 재료시험기는 만능재료시험기(Hounsfield, Load Cell: 5 ton, U.K.)를 사용하여 측정하였고, 크로스 헤드 속도는 1mm/min로 하였다.

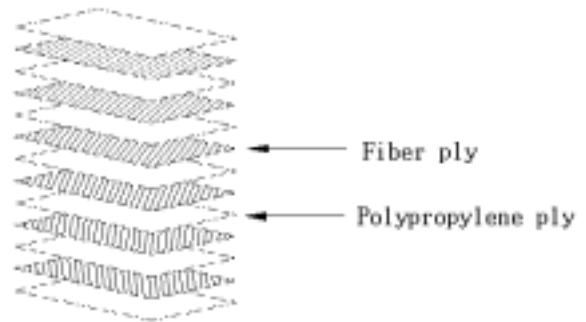


Fig. 4 Schematic of the fiber ply and polypropylene ply lay up

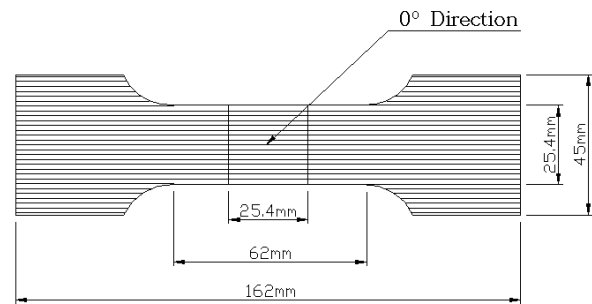


Fig. 5 Schematic diagram of test sample (J=1,  $\theta = 0$ )

Table 1. Distribution of fiber length according to the fiber orientation function (10wt%)

[Unit : mm]

$\theta^\circ \backslash J$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
90	55.6	45.5	37	29.9	23.8	18.5	13.9	9.8	5.9	2.2	0
80	55.6	45.9	37.7	30.6	24.4	19.0	14.3	10.1	6.1	2.2	0
70	55.6	47.3	39.6	32.6	26.3	20.7	15.6	11.0	6.7	2.4	0
60	55.6	49.5	43.0	36.4	29.9	23.8	18.1	12.9	7.9	2.8	0
50	55.6	52.6	48.1	42.3	35.9	29.3	22.7	16.3	10.1	3.7	0
40	55.6	56.4	55.0	51.3	45.7	38.7	30.9	22.6	14.2	5.2	0
30	55.6	60.4	63.5	64.0	61.4	55.6	46.8	35.7	23.0	8.6	0
20	55.6	64.2	72.7	80.2	85.3	86.1	80.7	67.6	46.6	18.1	0
10	55.6	66.9	80.3	96.1	114.3	134.3	153.0	161.9	141.3	65.8	0
-0	55.6	67.9	83.3	103.2	129.6	166.7	222.2	313.8	482.3	780.0	1,000
-10	55.6	66.9	80.3	96.1	114.3	134.3	153.0	161.9	141.3	65.8	0
-20	55.6	64.2	72.7	80.2	85.3	86.1	80.7	67.6	46.6	18.1	0
-30	55.6	60.4	63.5	64.0	61.4	55.6	46.8	35.7	23.0	8.6	0
-40	55.6	56.4	55.0	51.3	45.7	38.7	30.9	22.6	14.2	5.2	0
-50	55.6	52.6	48.1	42.3	35.9	29.3	22.7	16.3	10.1	3.7	0
-60	55.6	49.5	43.0	36.4	29.9	23.8	18.1	12.9	7.9	2.8	0
-70	55.6	47.3	39.6	32.6	26.3	20.7	15.6	11.0	6.7	2.4	0
-80	55.6	45.9	37.7	30.6	24.4	19.0	14.3	10.1	6.1	2.2	0
-90	55.6	45.5	37	29.9	23.8	18.5	13.9	9.8	5.9	2.2	0

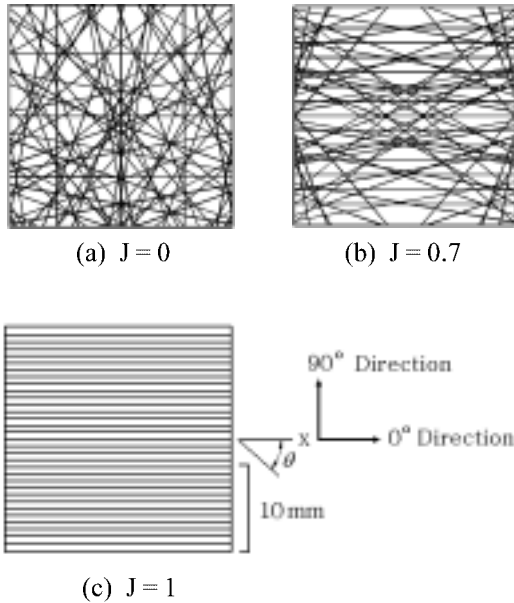


Fig. 6 Schematic representation of long fibers distributed in two dimensions (10wt%)

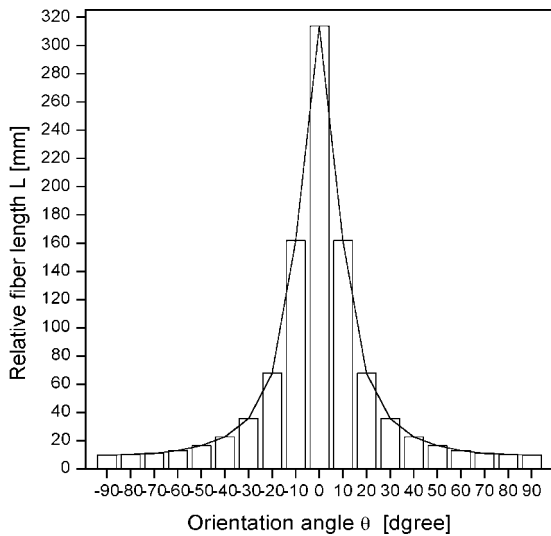


Fig. 7 Distribution of relative fiber length according to orientation angle in fiber orientation function J=0.7 (10wt%)

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 섬유함유율과 섬유배향상태를 변화시켜서 제작한 판재의 인장강도( $\sigma_{[0^\circ]}$ ) 값과 섬유배향함수(J)와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 GMT Sheet의 인장강도는 섬유배향 상태가 무작위인 등방성에서 한 방향인 이방성으로 일정하게 증가되었다. 섬유함유율 10wt%에서는 J=1인

경우가 J=0보다 강도 값이 약 33 MPa 향상되었고, 섬유함유율 20wt%에서는 J=1인 경우가 J=0보다 강도 값이 약 53 MPa 향상되었고, 섬유함유율 30wt%에서는 J=1인 경우가 J=0보다 강도 값이 약 61 MPa 향상되었고, 섬유함유율 40wt%에서는 J=1인 경우가 J=0보다 강도 값이 약 76 MPa 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 9는 섬유함유율과 섬유배향상태를 변화시

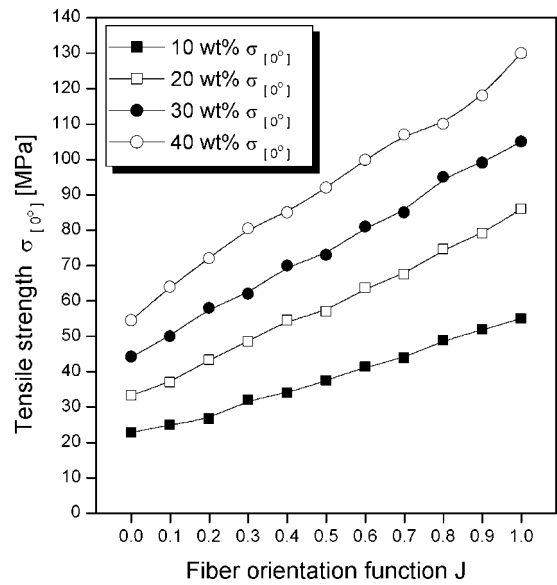


Fig. 8 Relationship between tensile strength  $\sigma_{[0^\circ]}$  and fiber orientation function J

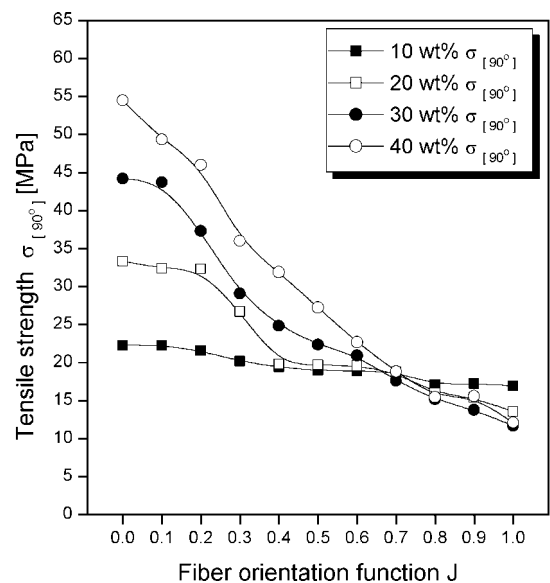


Fig. 9 Relationship between tensile strength  $\sigma_{[90^\circ]}$  and fiber orientation function J

켜서 제작한 GMT Sheet의 인장강도( $\sigma_{[90^\circ]}$ ) 값과 섬유배향함수(J)와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 강화섬유의 폭방향으로 하중이 가해질 때 섬유 필라멘트의 분리로 인하여 순수 모재의 인장강도 값보다 더 낮게 나타났다. 또한, 섬유함유율에 관계없이 섬유배향함수  $J=0.7$ 에서는 복합판재의 강도값이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 10은 GMT Sheet의 섬유배향 종횡방향 인장강도비( $\sigma_{[0^\circ]} / \sigma_{[90^\circ]}$ )와 섬유배향함수(J)와의 관계를 나타낸 그림이다. GMT Sheet는 강화섬유가 대부분의 외력을 흡수하므로 하중지지 방향의 섬유함유율의 증가는 강화효율의 증가를 의미한다. 그러나 섬유배향의 수직방향으로 하중이 작용할 때는 강화섬유의 필라멘트가 분리되기 때문에 강화효율이 감소함을 알 수 있다.

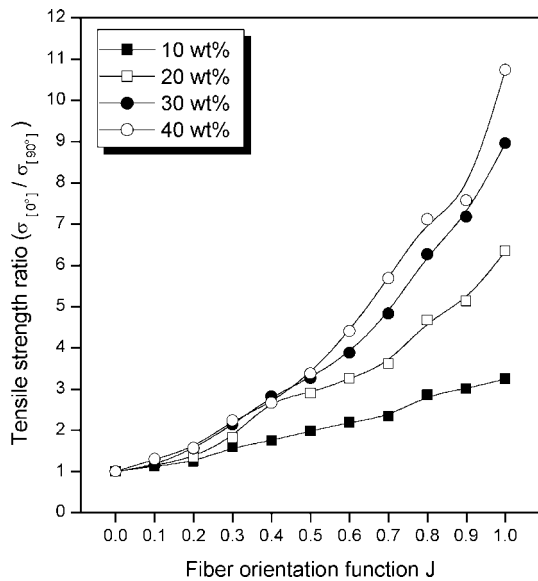
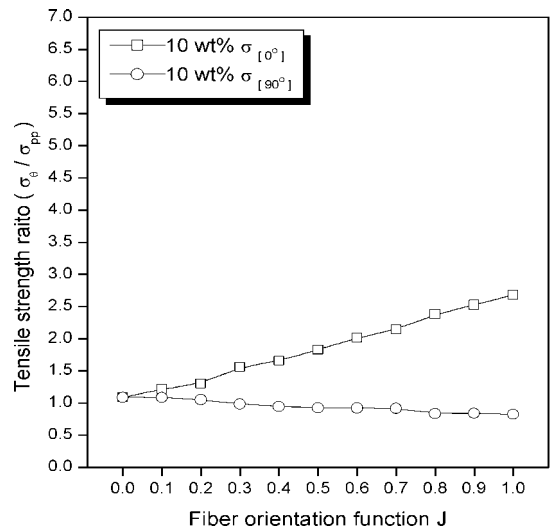
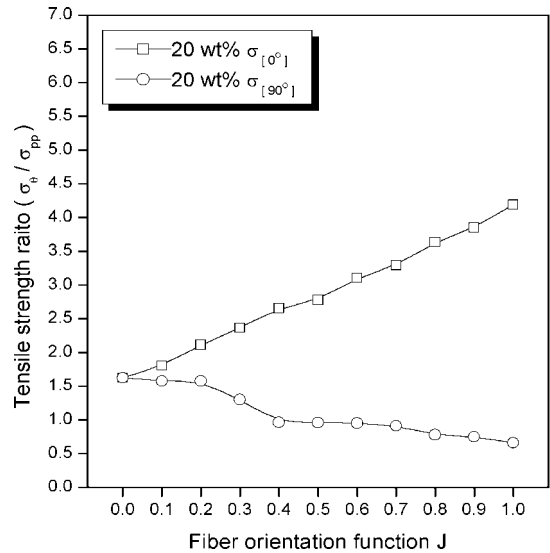


Fig. 10 Relationship between tensile strength ratio ( $\sigma_{[0^\circ]} / \sigma_{[90^\circ]}$ ) and fiber orientation function J

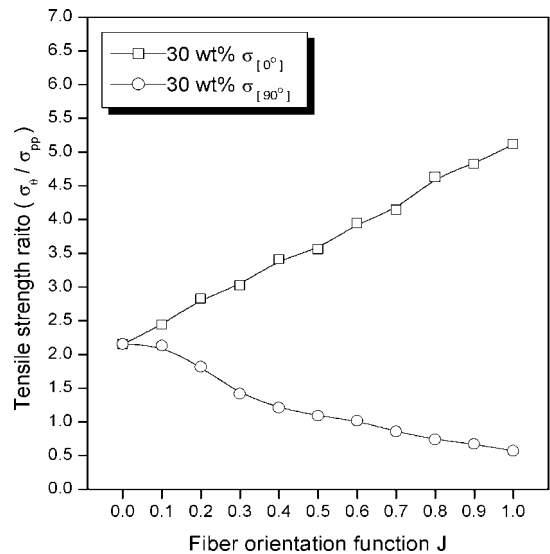
Fig. 11은 모재(PP)와 복합판재와의 인장강도비( $\sigma_{\theta} / \sigma_{PP}$ )를 섬유배향함수(J)에 따라 비교한 그림이다. GMT Sheet에서  $0^\circ$  방향의 인장강도( $\sigma_{[0^\circ]}$ )는 등방성에서 이방성이 될수록 섬유함유율과 섬유배향상태에 비례하여 일정하게 증가되었다. 섬유배향상태가 등방성인  $J=0$  일 때는  $0^\circ$  방향인장강도( $\sigma_{[0^\circ]}$ )와  $90^\circ$  방향 인장강도( $\sigma_{[90^\circ]}$ )는 일치하나,  $90^\circ$  방향 인장강도( $\sigma_{[90^\circ]}$ )는 이방성이 될



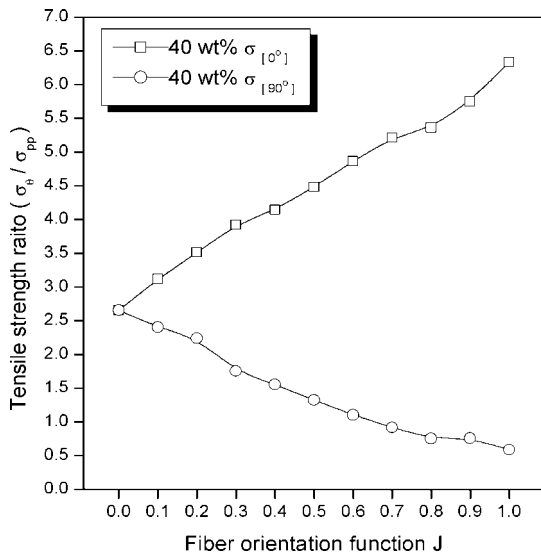
(a) 10wt%



(b) 20wt%



(c) 30wt%



(d) 40wt%

Fig. 11 Relationship between tensile strength ratio ( $\sigma_{\theta} / \sigma_{PP}$ ) and fiber orientation function J

수축(J가 커질수록) 인장강도비가 감소하였다. 이는 섬유가 배향된 강화섬유의 폭(법선)방향으로 인장하중이 가해질 때 섬유 필라멘트의 분리는 균일단면이 편향을 가질 때와 같은 응력집중 효과로 인하여 순수 모재의 인장강도 값보다 더 낮게 나타났다.

5. 결론

GMT Sheet에서 인장강도에 미치는 섬유함유율과 섬유배향의 영향에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 섬유배향 0°방향의 GMT Sheet 인장강도( $\sigma_{[0^\circ]}$ ) 값의 증가폭은 섬유함유율이 증가할수록 크게 나타남을 알 수 있었다.
2. 섬유배향 90°방향의 GMT Sheet의 인장강도( $\sigma_{[90^\circ]}$ ) 값은 섬유함유율에 관계없이 섬유배향함수 J=0.7에서 모재(PP)의 강도값과 유사하게 나타남을 알 수 있었다.
3. GMT Sheet의 인장강도는 섬유함유율의 영향보다는 섬유배향상태에 더 지배적인 영향을 받음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Lee, D. G., Yoo, J. H., and Kim, E. G., 1993, "A Study on Correlation between Separation and Orientation of Fibers during Compression Molding of Long Fiber-Reinforced Polymeric Composites", *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 1, pp. 62~68.
- (2) Lee, D. G., Kim, J. L., Kim, S. P., Lee, W. I., and Kim, E. G., 1993, "A Study on the Processing of Long Fiber-Reinforced Composite Materials for Thermoforming", *Trans. of KSME*, Vol. 17, No. 5, pp. 1106~1114.
- (3) Jo, S. H., Lee, D. G., and Kim, E. G., 1991, "A Study on Fiber Orientation by Image processing during press Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheet", *Trans. of KSME*, Vol. 15, No. 3, pp. 834~842.
- (4) Byun, J. H., Lee, S. K., Um, M. K., and Kim, T. W., 2002, "Characterization and Prediction of Elastic Constants of Twisted Yarn Composites" *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 15, No. 6, pp. 30~37.
- (5) Lim, J. K., Shin, J. H., Park, H. J., Shoji, T., and Takeda, H., 2001, "A Study on the Deformation and Strength of High-Strength Polymer Composites Using Automobiles", *Trans. of KSME (A)*, Vol. 25, No. 7, pp. 1082~1088.
- (6) Shin, I. J., Lee, D. J., and Kim, H. G., 2002, "Optimal Manufacturing Conditions of Glass Fiber Reinforced PET Matrix Composites by Rapid Press Consolidation Technique", *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No. 5, pp.813~821.