

論文

섬유배향과 섬유함유량이 섬유강화 열가소성수지 복합재료의
인장강도에 미치는 영향

김진우*, 이동기**+

Effect of Fiber Orientation and Fiber Contents on the Tensile Strength
in Fiber-reinforced Thermoplastic Composites

Jin-Woo Kim*, Dong-Gi Lee**+

ABSTRACT

Fiber-reinforced thermoplastic composites not only approach almost near to the strength of thermosetting composite but also has excellent productivity, recycling property, and impact resistance, which are pointed as weaknesses of thermosetting composites. The study for strength calculation of one direction fiber-reinforced thermoplastic composites and the study measuring precisely fiber orientation distribution were presented. Need the systematic study for the data base that can predict mechanical properties of composite material and fiber orientation distribution by the fiber content ratio was not constructed. Therefore, this study was investigated what affect the fiber content ratio and fiber orientation distribution have on the strength of composites. Fiber-reinforced thermoplastic composites by changing fiber orientation distribution and the fiber content ratio were made. Tensile strength ratio of 0° direction of fiber-reinforced composites increased being proportional the fiber content and fiber orientation function as change from isotropy($J=0$) to anisotropy($J=1$). But, tensile strength ratio of 90° direction by separation of fiber filament decreased when tensile load is imposed for width direction of reinforcement fiber length direction.

초 록

섬유강화 열가소성수지 복합재료는 열경화성수지 복합재료의 강도 수준에 근접할 뿐만 아니라 열경화성수지 복합재료의 취약점으로 지적되고 있는 생산성, 리사이클, 내충격성 등이 우수하다. 일방향 섬유강화 복합재료의 강도계산을 위한 연구와 섬유배향상태를 측정하여 정량적으로 나타낼 수 있도록 연구하여 발표하였으나, 섬유함유율에 따른 섬유배향상태와 복합재료의 기계적 성질을 예측할 수 있는 데이터베이스 구축은 되어있지 않으므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 섬유함유율에 따른 섬유배향상태를 변화시켜 섬유강화 열가소성수지 복합판재를 제작한 후, 섬유함유율 및 섬유배향상태가 복합판재의 인장강도에 어떠한 영향을 주는지에 대해서 고찰하였다. 섬유강화 열경화성수지 복합재료의 0° 방향에서 인장강도 비는 등방성에서 이방성으로 갈수록 섬유배향함수와 섬유함유율에 관계없이 일정하게 나타났으나, 90° 방향에서 인장강도 비는 인장 하중이 강화섬유 길이방향의 수직방향으로 작용했을 때 섬유필라멘트 분리에 의해 감소하였다.

Key Words : 섬유함유량(Fiber Content), 섬유강화 열가소성수지 복합재료(Fiber-reinforced Thermoplastic Composites), 상대섬유길이(Relative Fiber Length), 배향각(Orientation Angle), 섬유배향함수(Fiber Orientation Function)

* 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

**+ 조선대학교 메카트로닉스공학과 교신저자(E-mail: dglee@chosun.ac.kr)

1. 서론

섬유강화 열가소성수지 복합재료는 비강도(중량대비 강도) 및 비강성(중량대비 강성) 등의 우수한 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 특정 방향으로 섬유를 배향하여 인장강도 등을 향상시킬 수 있어 다양한 용도로 사용되고 있다. 또한, 경량성 재료이며 성형성이 좋아 복잡한 형상이나 디자인을 중시하는 구조부품 등에 활용도가 증가되고 있다.

섬유강화 열가소성수지 복합재료의 성질은 모재의 성질에 의존하는 것이 당연하지만, 섬유배향상태, 섬유의 길이와 함유량, 섬유영집상태, 섬유매트구조, 플라스틱인 모재와 유리섬유인 강화재의 함침성 및 성형조건 등에 따라서 기계적 성질이 변화한다. 그러므로 섬유강화 열가소성수지 복합재료 성형품의 섬유함유량에 따른 섬유배향상태를 밝혀두는 것은 재료설계, 최적 성형조건의 결정, 기계적 특성 등을 예측하는데 있어서 선행되어야 하는 가장 중요한 인자이다.

김[1-2] 등은 농도법을 이용하여 장섬유강화 고분자 복합판 내의 섬유배향각 분포상태를 측정할 수 있는 측정법을 제안하였고, 또한 섬유강화 고분자 복합재료에서 섬유길이가 분리와 배향의 상관관계에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 그리고 배[3] 등은 끈 섬유로 강화한 복합재료의 탄성계수를 예측하기 위한 강성모델을 제시하였다. 김[4-8] 등은 일방향 섬유강화 고분자 복합판을 압축성형한 후 섬유함유율 분포에 대해 연구하였고, 무배향/일방향 섬유강화 적층매트를 갖는 플라스틱 복합판을 3차원 압축변형 해석하였고, 니들펀칭 횡수를 변화시켜 유리섬유강화 복합재료 성형성을 연구하였다.

그러나 섬유강화 열가소성수지 복합재료를 이용한 구조부재에서는 어느 특정 방향으로 강도가 요구되는 경우가 빈번하므로 섬유함유량에 따른 섬유배향상태를 변화시킨 복합재료의 제작이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 섬유배향상태의 척도인 섬유배향함수를 이론적으로 계산하여 섬유배향 시 변화를 주고, 섬유함유량을 변화시켜 복합재료를 제작한 후, 이 제작된 복합재료의 섬유배향과 섬유함유량이 인장강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 고찰하였다.

2. 섬유배향

현재, 국내외에서 사용되고 있는 대부분의 섬유강화 열가소성수지 복합판재의 두께(3.8mm)는 폭과 길이에 비교하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급하여, 이차원(x-y)평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우 섬유배향각 θ 는 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에 있다. 따라서 섬유배향각분포상태의 척도를 표시하는 섬유배향함수(J)와 섬유배향각 분포 $q(\theta)$ 사이의 관계는 식(1)과 같다. Fig. 1은 식(1)의 섬유배향함수(J) 값 변화

에 따른 섬유배향각(θ)와 상대 섬유길이의 관계를 나타낸 그림이다[1].

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

여기서 J 는 2차원 섬유배향각 분포에 대한 섬유배향함수이며, 섬유배향이 무작위로 되어 있는 등방성인 경우 $J=0$, 섬유배향이 일방향으로만 배열되어 있는 이방성인 경우는 $J=1$, $J=1$ 의 방향에 대해 90° 회전방향으로 배열되어 있는 경우는 $J=-1$ 이다. 이와 같이 섬유배향함수(J) 값은 0에서 1사이에서 있으나 0에 가까워지면 섬유의 배향상태가 무작위에 가깝게 됨을 나타낸다.

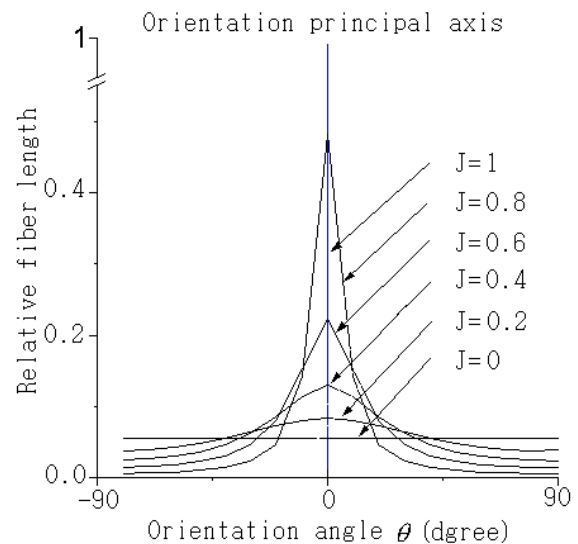


Fig. 1 Distribution of Relative Fiber Length According to the Fiber Orientation Angle.

3. 실험

섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도에 미치는 섬유함유량과 섬유배향상태의 영향에 대해서 고찰하기 위하여, 실험에 사용한 유리섬유는 시판되고 있는 한국화이버의 E-글라스 안(필라멘트 가닥수:약 400개, 필라멘트 직경:13 μ m, Tex:135g/1,000m)이다. 복합재료 제작 시 프레스 성형용으로 개발된 폴리프로필렌에 유리섬유를 사용하여 강화할 때 Fig. 2와 같이 섬유배향상태의 척도인 섬유배향함수와 섬유함유량을 변화시킨다.

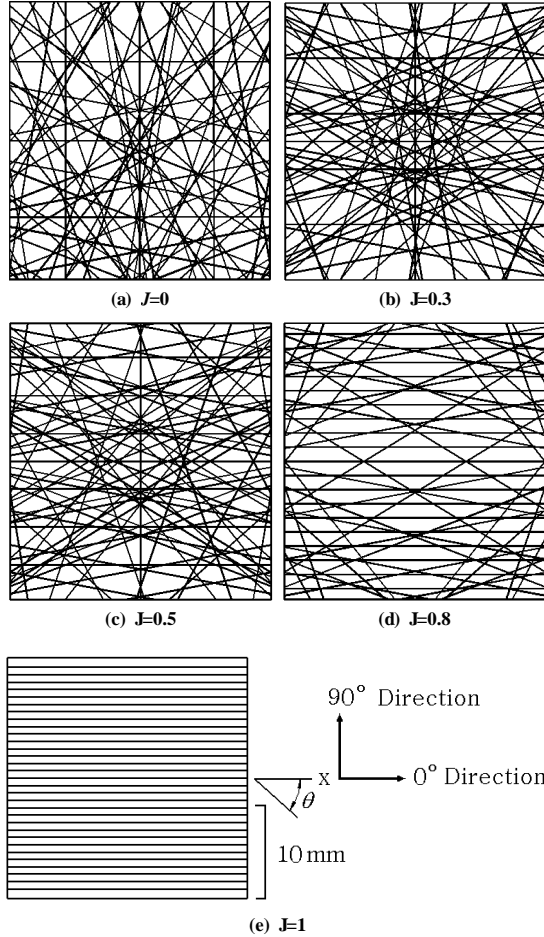


Fig. 2 Schematic Representation of Long Fibers Distributed in Two Dimensions.

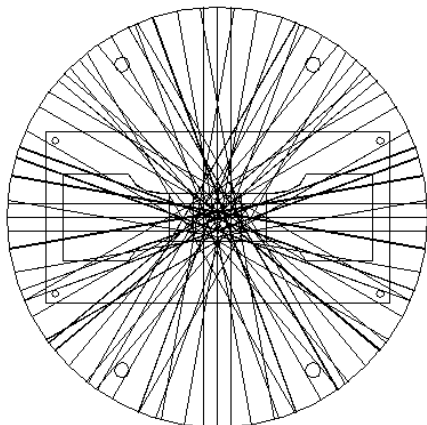


Fig. 3 Schematic Diagram of the Experimental Mold.

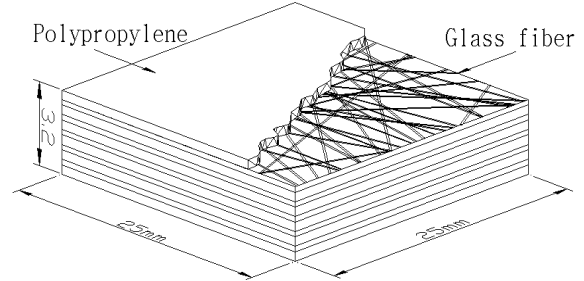


Fig. 4 Schematic Structure of Specimen.

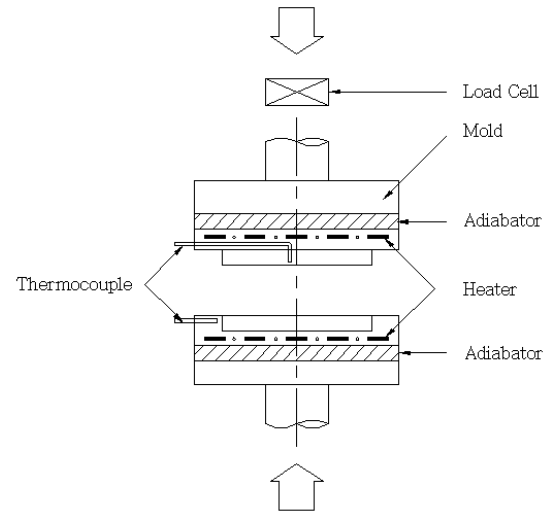


Fig. 5 Schematic Diagram of the Experimental Apparatus.

Fig. 3과 같은 금형을 사용하여, Fig. 4와 같은 구조로 유리 섬유 6층과 폴리프로필렌 필름 8층을 샌드위치 적층시킨 후 Fig. 5의 열압축프레스(Carver Model 2518, U.S.A.)로 압축성형하여 복합판재를 제작하였다. 이때 성형온도는 210°이다. 섬유배향과 섬유함유량이 인장강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 고찰하기 위하여, 섬유배향상태는 식(1)에 의하여 이론적으로 계산된 섬유배향함수(J)를 0에서 1사이로 0.1간격으로 변화시키고, 섬유함유율은 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%로 변화를 주었다. 인장강도 측정부위에 배향된 섬유배향분포상태의 한 예로 섬유함유율이 10wt%인 경우를 Table 1에 나타냈으며, 이 섬유배향분포상태의 한 예로 섬유배향함수 $J=0.7$ 인 경우를 막대그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다. 각각의 섬유배향과 섬유함유량 변화에 따라 합침성형된 섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도 값을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같은 형상으로 ASTM D638 규격을 참조하여 인장시험을 행하였다. 재료시험기는 만능재료시험기(5ton, UK)를 사용하여 측정하였고, 크로스 헤드 속도는 1 mm/min로 하였다.

Table 1 Distribution of Fiber Length According to the Fiber Orientation Function (10wt%) [Unit:mm].

J θ	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	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

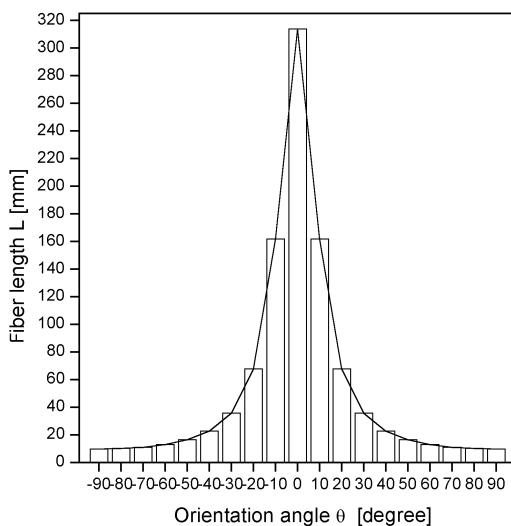


Fig. 6 Distribution of Relative Fiber Length According to Orientation Angle in Fiber Orientation Function $J=0.7$ (10wt%).

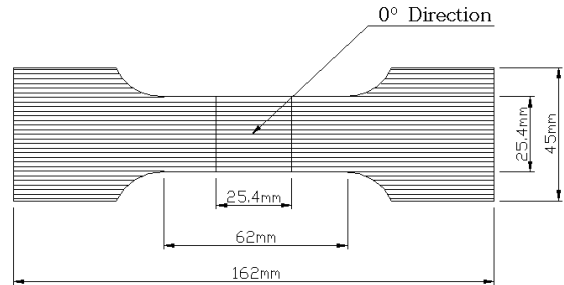


Fig. 7 Schematic Diagram of Test Sample ($J=1$).

4. 결과 및 고찰

Fig. 8은 섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도(σ_0)와 섬유배향함수(J)와의 관계를 나타낸 그림이다. 섬유강화 열가소성수지 복합재료에서 0°방향의 인장강도($\sigma_{0(0^\circ)}$)는 등방성($J=0$)에서 이방성($J=1$)이 될수록 섬유함유량과 섬유배향상태에 비례하여 일정하게 증가되었다. 이는 섬유강화 열가소성수지 복합재료에서 하중이 가해질 때 강화섬유가 대부분의 하중을 흡수하므로 하중지지 방향의 섬유함유량의 증가는 강화효율의 증가를 의미한다. 섬유배향상태가 등방성인 $J=0$ 일 때는 0°방향 인장강도($\sigma_{0(0^\circ)}$)와 90°방향 인장강도($\sigma_{0(90^\circ)}$)는 일치하나, 90°방향 인장강도($\sigma_{0(90^\circ)}$)는 이방성이 될수록(J 가 커질수록) 인장강도 값 차이가 크게 나타났다. 이는 섬유 필라멘트 가닥수가 약 400개로 이루어진 얇은 섬유가 배향된 길이방향에 대하여 수직방향으로 인장하중이 가해질 때 스트랜드의 필라멘트 분리는 균일단면에서 편향을 가질 때와 같은 응력집중 효과로 인하여 인장강도 값이 작게 나타났다. Fig. 8의 실험결과로부터 복합재료가 외부로부터 하중을 받을 경우에 섬유함유율과 섬유배향상태를 알면 복합재료의 인장강도 값을 예측할 수 있다.

Fig. 9에서 섬유배향함수 $J=0$ 인 경우는 섬유배향상태가 등방성이므로 섬유함유율에 관계없이 복합판재의 종횡방향 인장강도의 값이 같고, 섬유배향상태가 이방성인 섬유배향함수 $J=1$ 인 경우는 섬유함유율이 증가할수록, 복합판재의 종횡방향 인장강도의 값 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

섬유배향함수 $J=1$ 에서는 섬유함유율이 20wt%인 경우가 10wt%인 경우보다 인장강도 비가 약 2배정도 높아짐을 알 수 있고, 섬유함유율이 30wt%인 경우가 20wt%인 경우보다 인장강도 비가 약 1.4배정도 높아짐을 알 수 있다. 또한, 섬유함유율이 40wt%인 경우가 30wt%인 경우보다 인장강도 비가 약 1.2배정도 높아짐을 알 수 있다. 이는 실험에 사용된 유리섬유는 필라멘트 가닥수가 약 400개로 이루어진 스트랜드의 얇은 섬유이므로 섬유함유율이 높을수록 유리섬유와 폴리프로필렌과의 합침이 잘 되지 않음을 알 수 있다.

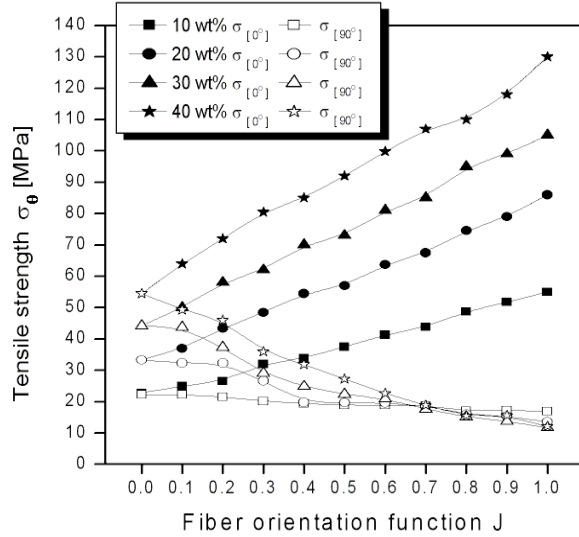


Fig. 8 Relationship between Tensile Strength (σ_θ) and Fiber Orientation Function J .

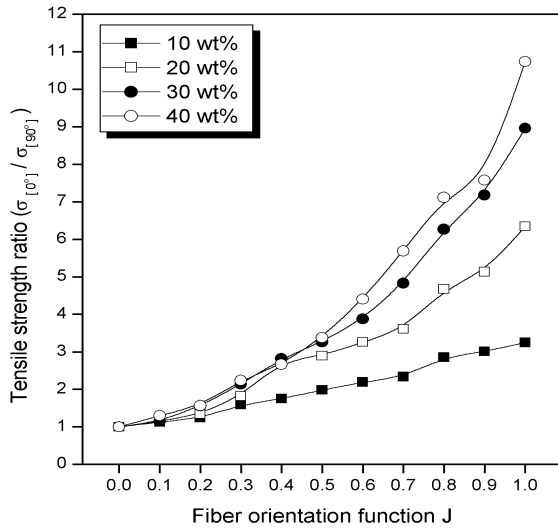
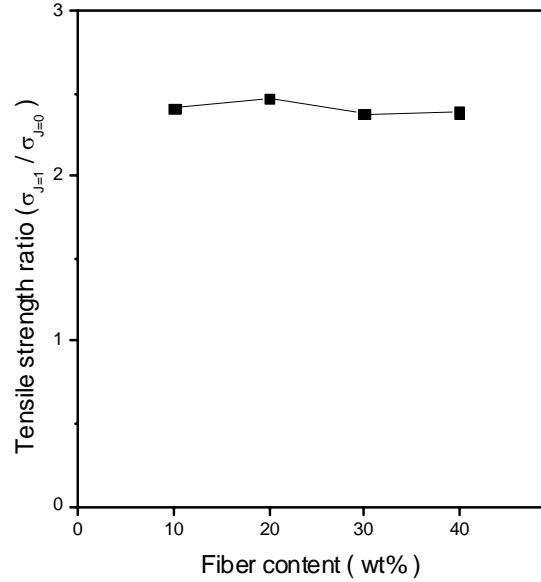
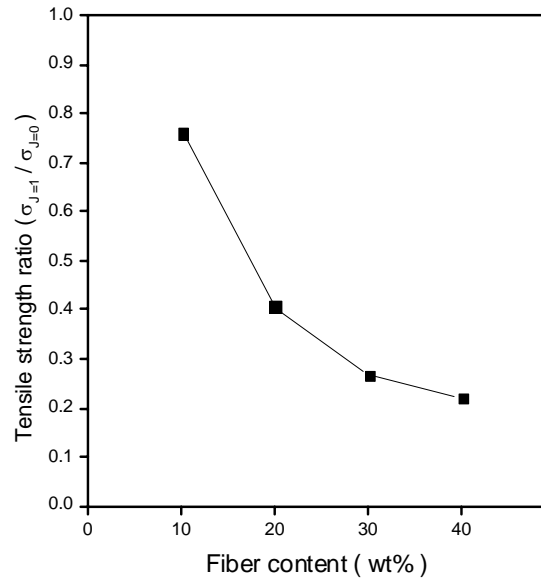


Fig. 9 Relationship between Tensile Strength Ratio ($\sigma_{[0^\circ]}/\sigma_{[90^\circ]}$) and Fiber Orientation Function J .

Fig. 10에서는 인장강도 비($\sigma_{J=1}/\sigma_{J=0}$)와 섬유함유율(wt%)에 대한 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 10(a)는 복합재료 0° 방향에서 인장강도 비가 섬유함유율의 증가와는 관계없이 일정하게 나타났다. Fig. 10(b)는 복합재료 90° 방향에서 인장강도 비가 섬유함유율의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는 하중이 작용할 때, 모재인 폴리프로필렌이 하중을 받고 강화재인 유리섬유 양의 필라멘트 가닥수가 약 400개로 이루어져



(a) 0° Direction



(b) 90° Direction

Fig. 10 Relationship between Tensile Strength Ratio($\sigma_{J=1}/\sigma_{J=0}$) and Fiber Content (wt%).

있으므로 하중작용 시 섬유 필라멘트 길이방향에 수직방향으로 섬유 필라멘트들이 쉽게 분리되기 때문에 강화재의 역할을 못함을 알 수 있다.

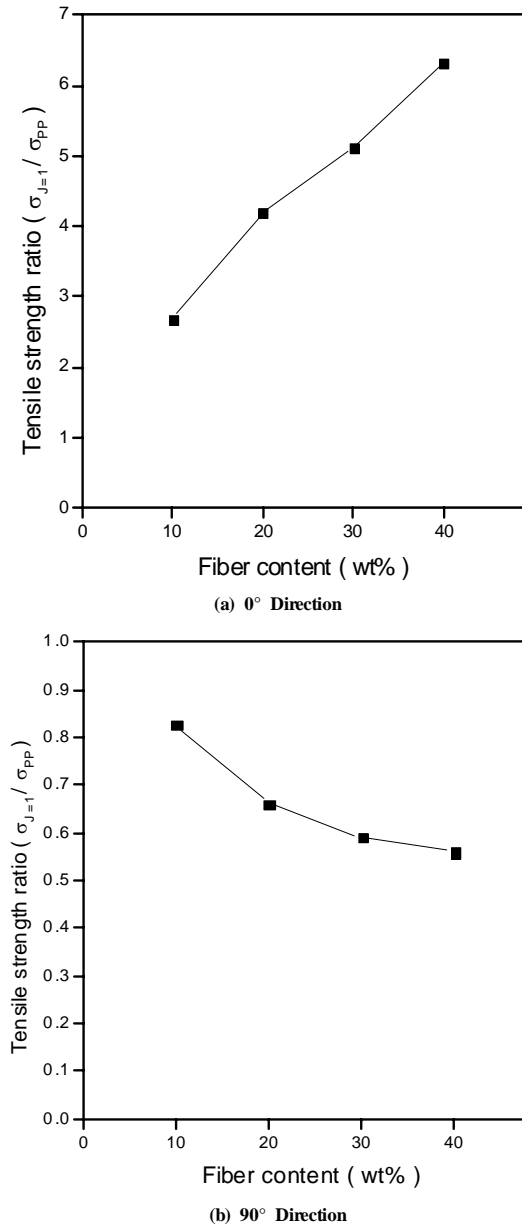


Fig. 11 Relationship between Tensile Strength Ratio($\sigma_{J=1}/\sigma_{PP}$) and Fiber Content (wt%).

Fig. 11은 폴리프로필렌 판재에 대한 복합 판재의 인장강도 비($\sigma_{J=1}/\sigma_{PP}$)와 섬유함유율(wt%)의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 11(a)는 유리섬유의 길이방향으로 하중이 가해지기 때문에 0° 방향에서 인장강도 비가 섬유함유율이 높을수록 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 유리섬유 양의 필라멘트 길

이방향에 수직으로 하중이 가해지기 때문에 안인 유리섬유 필라멘트 분리로 인하여 90° 방향에서 인장강도 비가 섬유함유율이 높을수록 감소함을 알 수 있다. 그러므로, 향후 섬유강화 열가소성수지 복합재료 제조 시 필라멘트 가닥수가 많은 것보다는 적은 유리섬유 양을 사용하는 것이 섬유길이방향에 대하여 수직방향으로 보다 큰 강도를 요구할 수 있을 것이다.

5. 결 론

섬유강화 열가소성수지 복합재료의 인장강도에 미치는 섬유함유율과 섬유배향의 영향에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 섬유배향함수 $J=0$ 에서는 섬유배향상태가 등방성이므로 복합판재의 종횡방향 인장강도의 값이 같고, 섬유배향함수 $J=1$ 에서는 섬유배향상태가 이방성이므로 복합판재의 종횡방향 인장강도의 값 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.
- 2) 복합재료 0° 방향에서 인장강도 비($\sigma_{J=1}/\sigma_{J=0}$)는 섬유함유율의 증가에 관계없이 일정하게 나타났으나, 90° 방향에서 인장강도 비는 섬유함유율이 증가 할수록 감소함을 알 수 있다.
- 3) 섬유함유율과 섬유배향함수 값을 알면 공학설계 시 필요한 복합재료의 허용인장강도 값을 예측할 수 있도록 데이터베이스를 구축하였다.

후 기

“이 논문은 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음”

참고문헌

- 1) 김혁, 이동기, 한길영, 김이곤, “장섬유강화 고분자 복합판의 섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도,” 한국복합재료학회지, 제9권, 제2호, 1996, pp. 23-34.
- 2) 류형우, 이동기, 김이곤, “유동성형된 섬유강화 고분자 복합판의 분리·배향의 상관관계수에 미치는 섬유길이에 관한 연구,” 한국복합재료학회지, 제6권, 제1호, 1993, pp. 19-28.
- 3) 변준형, 이상관, 엄문광, 김태원, 배성우, “Twisted Yarn 복합재료의 물성치 시험 및 탄성계수 예측,” 한국복합재료학회지, 제15권, 제6호, 2002, pp. 30-37.
- 4) 조선형, 임영호, 김이곤, “압축성형된 한 방향 섬유강화 고분자 복합판의 섬유함유율 분포,” 한국복합재료학회지, 제7권, 제3호, 1994, pp. 67-76.

- 5) 채경철, 조선형, 김이곤, “무배향/일방향 섬유강화 적층매트를 갖는 플라스틱 복합재의 3차원 압축변형 해석,” 한국복합재료학회지, 제12권, 제5호, 1999, pp. 23-30.
- 6) 오영준, 김형철, 김이곤, “연속섬유강화 플라스틱 복합재료의 압축성형성에 관한 연구 -제1보: 니들펀칭횟수에 따른 물성치 및 컵형 압축성형성,” 한국복합재료학회지, 제12권, 제5호, 1999, pp. 31-39.
- 7) 오영준, 김이곤, “연속섬유강화 플라스틱 복합재료의 압축성형성에관한연구 -제2보: 압축성형에 미치는 상관계수의 영향,” 한국복합재료학회지, 제13권, 제1호, 2000, pp. 1-10.
- 8) 조선형, 임영호, 김이곤, “섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 이방성을 고려한 유동해석,” 한국복합재료학회지, 제9권, 제1호, 1996, pp. 1-9.