creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000235874

2008 년 *2* 월
박사학위논문

GFRP 복합재료의 섬유 배향과 함유율이 인장강도와 고속충격 흡수에너지에 미치는 영향

조 선 대 학 교 대 학 원

정밀기계공학과

김 진 우

GFRP 복합재료의 섬유 배향과 함유율이 인장강도와 고속충격 흡수에너지에 미치는 영향

Effects of Fiber Orientation and Contents on the Tensile Strength and High Velocity Impact Absorbed Energy of GFRP Composites

2008 년 *2* 월 *25* 일

조 선 대 학 교 대 학 원

정밀기계공학과

김 진 우

GFRP 복합재료의 섬유 배향과 함유율이 인장강도와 고속충격 흡수에너지에 미치는 영향

지도교수 이 동 기

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2007 년 *10* 월

조 선 대 학 교 대 학 원

정밀기계공학과

김 진 우

김진우의 박사학위 논문을 인준함.

심사위원장 조선대학교 교수 심 재 기 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 한 길 영 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 김 재 열 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 유 영 태 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 이 동 기 인

2007 년 *12* 월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF FIGURES ..... Ⅲ
LIST OF TABLES ..... Ⅶ
LIST OF PHOTOGRAPHS ..... Ⅷ
NOMENCLATURES ..... Ⅸ
ABSTRACT ..... Ⅹ

제 *1* 장 서 론

제 *1* 절 연구 배경 *1*
제 *2* 절 연구 동향 *5*
1. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 인장강도 *5*
2. 인장강도 시험 시 열화상 계측 *5*
3. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 고속충격 *6*
제 *3* 절 연구 목표 및 내용 *7*

제 *2* 장 섬유배향함수 및 열측정 이론

제 *1* 절 섬유배향함수 이론 *9*
제 *2* 절 열측정 이론 *15*

제 *3* 장 시험편 제작 및 실험방법

제 *1* 절 시험편 제작 *18*
1. 성형 조건 *18*
2. 성형 방법 *23*

제 2 절 인장강도 실험 29
제 3 절 열화상 계측 방법 31
제 4 절 고속충격 실험 34

제 4 장 결과 및 고찰
제 1 절 인장강도 38
1. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 인장강도 38
2. 섬유배향이 일방향인 복합재료의 인장강도 57
3. 섬유배향과 일방향 섬유배향각 변화에 따른 인장강도 비교 60
제 2 절 열화상 온도분포 65
1. 적외선 열화상 카메라의 인장강도 시험 시 온도분포 ... 65
2. 적외선 열화상 카메라의 인장시편 파단부분의 온도분포 79
제 3 절 고속충격 86
1. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 파괴모드 86
2. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 고속충격 특성 98

제 5 장 결 론 119

참 고 문 헌 121

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Fiber orientation model in two dimension ····· 13

Fig. 2 Distribution of relative fiber length according to the fiber orientation angle ····· 14

Fig. 3 Atmospheric transmission over 1 nautical mile ····· 15

Fig. 4 Radiation contributions to the general measurement situation ···· 15

Fig. 5 Structure of fiber oriented specimen ····· 20

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental apparatus ····· 21

Fig. 7 Schematic of the fiber ply and polypropylene ply lay up ····· 22

Fig. 8 Schematic distributed fibers according to fiber orientation function ····· 26

Fig. 9 Schematic distributed fibers according to orientation angle ··· 28

Fig. 10 Schematic diagram of test sample (f=1, θ=0) ····· 29

Fig. 11 High velocity impact test setup ····· 37

Fig. 12 Tensile load-elongation response for fiber orientation function f=1 ····· 42

Fig. 13 Tensile strength-strain response for fiber orientation function f=0.9 ····· 43

Fig. 14 Relationship between tensile strength $\sigma_{[0°]}$ and fiber orientation function f ····· 44

Fig. 15 Relationship between tensile strength $\sigma_{[90°]}$ and fiber orientation function f ····· 45

Fig. 16 Relationship between tensile strength (σ_{θ}) and fiber orientation Function f ····· 46

Fig. 17 Relationship between tensile strength ratio ($\sigma_{[0°]}/\sigma_{[90°]}$) and

fiber orientation function J ····· 47
Fig. 18 Relationship between tensile strength ratio ($\sigma_{\theta}/\sigma_{PP}$) and fiber orientation function J ····· 49
Fig. 19 Relationship between tensile strength ($\sigma_{[0°]}$) and fiber content (wt%) ····· 50
Fig. 20 Relationship between tensile strength ($\sigma_{[90°]}$) and fiber content (wt%) ····· 51
Fig. 21 Relationship between tensile strength ratio($\sigma_{J=1}/\sigma_{J=0}$) and fiber content (wt%) ····· 52
Fig. 22 Relationship between tensile strength ratio($\sigma_{J=1}/\sigma_{PP}$) and fiber content (wt%) ····· 53
Fig. 23 Relationship between tensile strength($\sigma_{[90°]}$) of experimental equation and tensile strength of tensile test ····· 55
Fig. 24 Relationship between tensile strength($\sigma_{[0°]}$) of experimental equation and tensile strength of tensile test ····· 56
Fig. 25 Relationship between tensile strength σ_a and orientation angle θ ·· 58
Fig. 26 Relationship between tensile strength ratio (σ_a/σ_{PP}) and orientation angle θ ····· 59
Fig. 27 Relationship between efficiency of orientation angle η_J and fiber orientation function J ····· 62
Fig. 28 Relationship between efficiency of orientation angle η_a and orientation angle θ ····· 63
Fig. 29 Relationship tensile strength between fiber orientation function J and tensile strength σ_a ····· 64
Fig. 30 Model of fracture process ····· 68
Fig. 31 Relationship between fracture velocity and fiber orientation function J ····· 69

Fig. 32 Relationship between peak temperature and fiber orientation function f ····· 70
Fig. 33 Temperature change measurement on time(PP) ····· 71
Fig. 34 Temperature change measurement on time(f=0.1 , 10wt%) ···· 72
Fig. 35 Temperature change measurement on time(f=0.3 , 10wt%) ···· 73
Fig. 36 Temperature change measurement on time(f=0, 20wt%) ····· 74
Fig. 37 Temperature change measurement on time(f=0.1, 20wt%) ····· 75
Fig. 38 Temperature change measurement on time(Θ=20°, 30wt%) ··· 76
Fig. 39 Temperature change measurement on time(Θ=30°, 30wt%) ··· 77
Fig. 40 Temperature change measurement on time(Θ=60°, 30wt%) ··· 78
Fig. 41 Fracture model of thermography by tensile test ····· 81
Fig. 42 Temperature distribution measurement (PP) ····· 82
Fig. 43 Temperature distribution measurement (f=0.1, 10wt%) ····· 83
Fig. 44 Temperature distribution measurement (f=0.1, 20wt%) ····· 84
Fig. 45 Temperature distribution measurement (Θ=30°, 30wt%) ····· 85
Fig. 46 Fracture model of partial penetration ····· 88
Fig. 47 Fracture model of complete penetration ····· 89
Fig. 48 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_I and fiber orientation function f on 2bar ····· 104
Fig. 49 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_I and fiber orientation function f on 4bar ····· 105
Fig. 50 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_I and fiber orientation function f on 6bar ····· 106
Fig. 51 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_I and fiber orientation function f on 8bar ····· 107
Fig. 52 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_I and fiber orientation function f on 8bar ····· 109

Fig. 53 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 6bar ····· 110
Fig. 54 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 4bar ····· 111
Fig. 55 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on fiber content 10wt% ····· 113
Fig. 56 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on fiber content 20wt% ····· 114
Fig. 57 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on fiber content 30wt% ····· 115
Fig. 58 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber content ····· 117
Fig. 59 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and air pressure on fiber content 10wt% ····· 118

LIST OF TABLES

Table 1. Classification of polymeric composite materials ····· 3

Table 2. Board classification of composite materials by matrix ····· 4

Table 3. Distribution of fiber length according to the fiber orientation function J (Total fiber length = 1,000 mm) ····· 24

Table 4. Result of high velocity impact test ····· 100

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo 1. Fiber orientation mold ····· 19

Photo 2. Universal Test Machine (U. T. M) ····· 30

Photo 3. Thermography experiment device ····· 32

Photo 4. Thermography image of tensile test ····· 33

Photo 5. Circular clamping fixtures ····· 36

Photo 6. High velocity impact test device ····· 37

Photo 7. Complete penetration shape according to fiber orientation function in air pressure 6bar ····· 92

Photo 8. Complete penetration shape according to fiber content in fiber orientation function f=0.8 ····· 93

Photo 9. Complete penetration shape according to air pressure (f=0.5, ω_t=10wt%) ····· 94

Photo 10. Partial penetration shape according to fiber orientation function f (6bar, ω_t=30wt%) ····· 96

Photo 11. Partial penetration shape according to air pressure and fiber content in fiber orientation function f=0.3 ····· 97

NOMENCLATURES

J	:	Fiber orientation function
L	:	Fiber length
$q(\theta)$	:	Distribution of fiber orientation angle
V_f	:	Volume of fiber content ratio
γ	:	Density ratio of fiber and matrix (ρ_f / ρ_m)
η_a	:	Efficiency of fiber orientation angle
η_J	:	Efficiency of fiber orientation function
θ	:	Fiber orientation angle
σ_c	:	Tensile strength of composite materials
σ_a	:	Tensile strength according to fiber orientation angle
σ_f	:	Tensile strength of fiber
σ_{pp}	:	Tensile strength of matrix (Polypropylene)
$\sigma_{[0°]}$	:	Tensile strength of 0°direction
$\sigma_{[90°]}$	:	Tensile strength of 90°direction
$\sigma_\theta / \sigma_{pp}$	:	Ratio of tensile strength according to fiber orientation function
σ_a / σ_{pp}	:	Ratio of tensile strength according to fiber orientation angle
ω_t	:	Ratio of fiber content weight
E_1	:	Energy before impact
E_2	:	Energy after impact
E_a	:	Absorbed energy
E_a/E_1	:	Absorbed energy ratio

ABSTRACT

Effects of Fiber Orientation and Contents on the Tensile Strength and High Velocity Impact Absorbed Energy of GFRP Composites

By Kim, Jin-Woo
Advisor : Prof. Lee, Dong Gi, Ph. D.
Dept. of Precision Mechanical Engineering
Graduate School of Chosun University

GFRP (Glass fiber reinforced plastic composite materials) composites has superior strength/density and modulus/density ratios to metallic materials. In addition, GFRP composites has been widely used as aerospace and automobile application due to high impact absorbing property. Among automobile components, structural parts in interior / exterior application (Structural parts requiring impact resistance) is the one of promising applications for GFRP.

The property of composites depends on the property of matrixes but fiber length, fiber aspect ratio, fiber content ratio, fiber orientation state of reinforcements directly affect the mechanical characteristics of composites such as tensile strength, impact resistance, elasticity coefficient, thermal and fracture characteristics. The purpose of this study was intended to examine the effects of fiber content and orientation on tensile test, high velocity impact test and IR test in GFRP composites by varying fiber content and orientation.

From tensile strength, high speed shock absorption energy, and

temperature distribution during tensile test by the orientation and content of fiber in GFRP, the following conclusions were acquired.

Increment of tensile strength with 0° fiber orientation showed proportional increase with fiber content. Tensile strength with 90° fiber orientation showed similar strength value to strength of matrix at J=0.7 regardless of fiber content.

Tensile strength ratio at 0° orientation was constant regardless of fiber content, but tensile strength ratio of 90° orientation was decreased with increased fiber content. For 10wt% of fiber content, J=0.3 of fiber orientation function had similar fiber strengthening effect with unidirectional fiber orientation at θ=30°. For 20wt% of fiber content, J=0.2 showed similar fiber strengthening effect with θ=20°.

For unidirectional composite material, there is theoretical mixture equation to calculate the strength of composite from properties of matrix and fiber content. However, equation for tensile strength with fiber content and orientation is not available. In this study, empirical equation to estimate tensile strength out of fiber orientation and content was proposed.

$$\sigma_{[0^0]} = 1.12\{(\mathrm{wt\%}+10)+(\mathrm{wt\%}+22.32)\mathrm{J}\}$$

$$\sigma_{[90^0]} = (11.4+1.15\mathrm{wt\%})\mathrm{e}^{(0.034-0.0402\,\mathrm{wt\%})\,\mathrm{J}}$$

Method to analyze temperature distribution during crack propagation under tensile test of GFRP via IR thermography camera was suggested. Anisotropy in fiber orientation showed longer fracture time and lower maximum temperature.

Through high velocity impact test, critical penetration speed by fiber orientation and content was determined. Speed (Pressure) near to critical penetration speed was affected significantly by orientation than content.

Therefore, composites with unidirectional orientation, such as bumper for automobile, is effective for high velocity impact rather than critical penetration speed. This could be elucidated by the fact of less crack propagation in composite material except critical penetration speed. In addition, J=0.9 (More directionality) exhibited higher impact absorption energy under high speed than J=1.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

GFRP 복합재료(Glass fiber reinforced plastic composites)는 기존의 금속재료보다 비강도(Strength/Density)와 비강성(Modulus/Density)이 크고 높은 충격흡수특성을 가지고 있어, 무게를 줄여야 하는 우주항공 재료나 자동차의 재료로 사용되고 있다. 자동차 부품 중에서도 특성상 내외장의 구조재, 특히 내충격 특성이 요구되는 구조 부품으로 주로 사용되고 있다.

강화재인 유리섬유의 열팽창계수(CTE, Coefficient of thermal expansion)는 거의 0에 가깝기 때문에, 높은 온도와 낮은 온도에서 동시에 사용되는 구조재료로 사용되면 크기가 거의 변화하지 않는 구조물을 제조할 수 있다. 성형품은 복잡한 형상이라 할지라도 금형이 준비되면 가공을 거의 필요로 하지 않는 정형가공(Net shape manufacturing)을 할 수 있다.

GFRP 복합재료는 모재와 강화재로 구성되어 있으므로 이 두 가지 성질에 의하여 소재의 기계적 특성이 달라진다. 모재와 강화재의 종류에 따라 분류하면 Table. 1과[1] 같고, 모재(Matrix)의 종류에 따라서 크게 열경화성 고분자 복합재료와 열가소성 고분자 복합재료로 분류하면 Table. 2와[2] 같다.

GFRP의 장점은 무엇보다도 물성과 가격과의 균형이 우수하다는 점이다. 원료인 PP 및 유리섬유가 범용 소재이기 때문에 가격이 비교적 저렴하면서도 강성 및 인성이 우수한 특성을 보여주고 있다. 단섬유 강화 PP에 비해서는 충격강도가 우수하고, SMC(Sheet molding compounds)에 비해서도 강성은 다소 약하나 충격 특성이 우수하다. 특히 자동차의 범퍼빔 용도로 사용되고 있는 일방향 복합재료는 직선 섬유배향 방향의 강도가 강화되고 인장 및 굴곡강도가 금속재료에 견줄 만하다. 두 번째 특성으로는 crack의 전개가 제한된다는 점을 들 수 있다. GFRP에 사용되는 유리섬유는 다층구조의 형상이기 때문에 어떤

충격에 의해 crack이 발생되더라도 그 전개 범위가 제한을 받게 된다. 세 번째 특성으로는 다양한 품등(Grade)을 생산할 수 있다는 점이다. 즉 유리섬유의 종류 및 함량, 열가소성 모재 수지의 종류에 따라 소비자가 원하는 다양한 품등을 생산할 수 있다. 횡 방향으로 강성이 요구되는 범퍼빔의 특성을 고려하여 개발된 일방향 복합재료가 그 대표적인 예이다. 또 하나의 장점으로는 리사이클의 용이성을 들 수 있다. 현재 독일 BASF사에서는 폐 GFRP를 최고 26%까지 다양한 recycle grade를 생산하여 판매하고 있다.

적외선 열화상은 재료나 기기 구조물의 표면에 존재하는 결함의 원격 및 비접촉에 의한 검출에 응용하는 것이 가능하다. 적외선 열화상법에 의해 박리의 위치 및 형상을 정상적으로 측정할 수 있으므로 적외선 열화상법은 콘크리트 구조물, 전기설비, 누수 등의 보수 점검 작업에 유용하다. 절대온도 0도 이상 물체로부터 방사되어 나오는 적외선을 일정거리에 놓여진 적외선 카메라에 장착된 적외선 센서를 통해 감지하여 그 물체의 온도분포를 온도가 높은 곳은 적색으로 낮은 곳은 청색 등으로 인텍싱하여 나타낸 열화상(Thermography)으로, 물체 표면의 온도분포를 하나의 화상으로 얻을 수 있을 뿐 아니라 각 지점의 온도까지 알 수 있다[3-6].

또한, 복합재료는 외부 물체의 충격에 의한 구조적 특성이 급격히 저하되는 단점이 있으며 이러한 문제점을 개선하려는 연구가 여러 분야에서 진행되고 있다. 특히, 조류충돌, 타이어의 파손 조각에 의한 충격, 지상 이착륙 상태에서의 튕겨져 나온 돌조각과의 충돌, 부서진 엔진의 팰 블레이드에 의한 충격, 우박 등에 의한 충격과 같은 고속충격은 충격체의 질량이 비교적 작지만 빠른 속도(10-100 m/s)로 충돌하기 때문에 복합재료 구조물의 손상 메커니즘이 저속충격의 경우와 다르고 구조물과 서브시스템에 치명적일 수 있다. 저속충격은 충격체에 의한 층간분리로 인하여 먼저 국부적인 굽힘강성을 저하시켜 굽힘과 좌굴에 영향을 미치며, 국부좌굴은 다시 층간분리의 확장을 유발하여 구조물이 전체적으로 취약하게 함으로써 정적 및 피로강도를 감소시킨다.

Table. 1 Classification of polymeric composite materials.

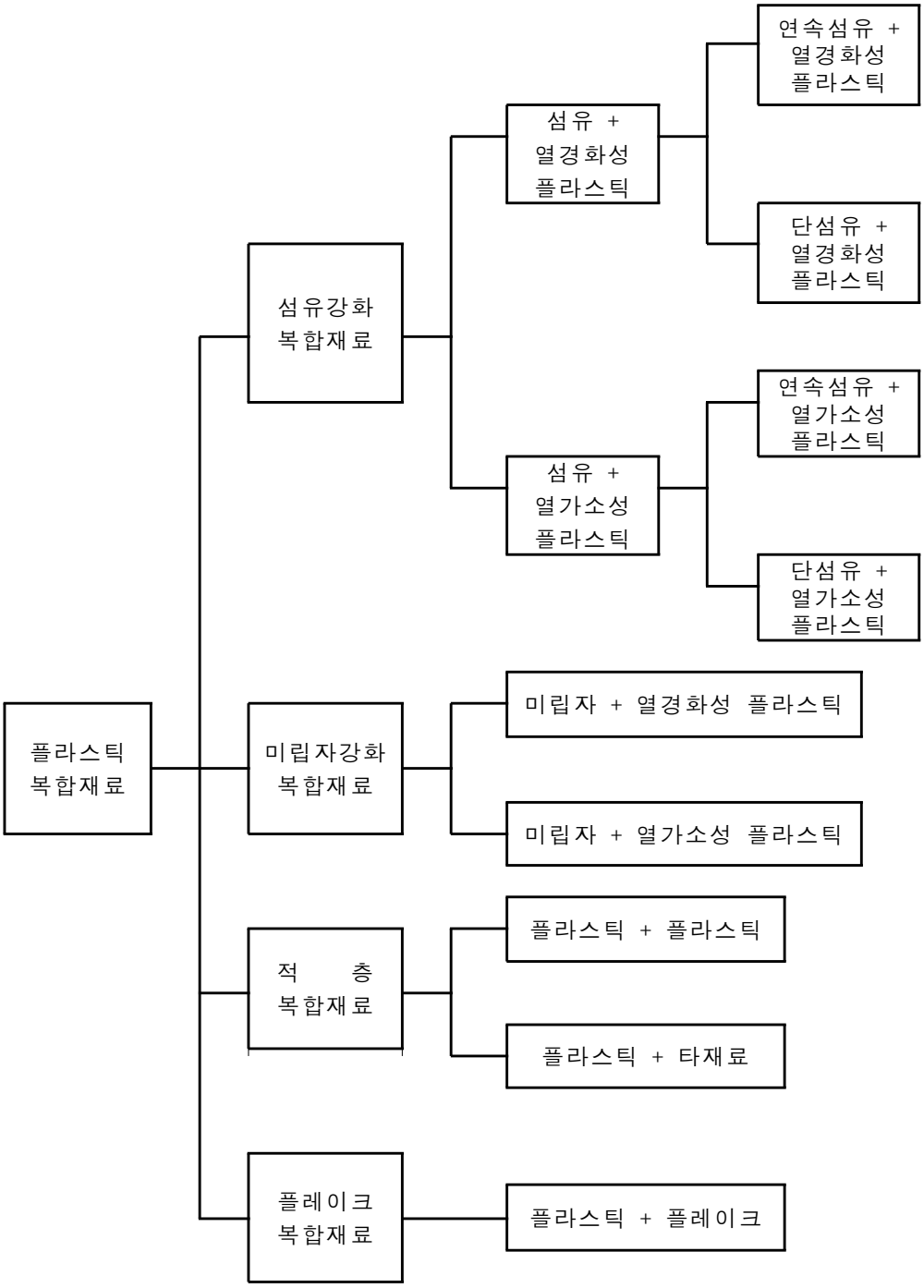
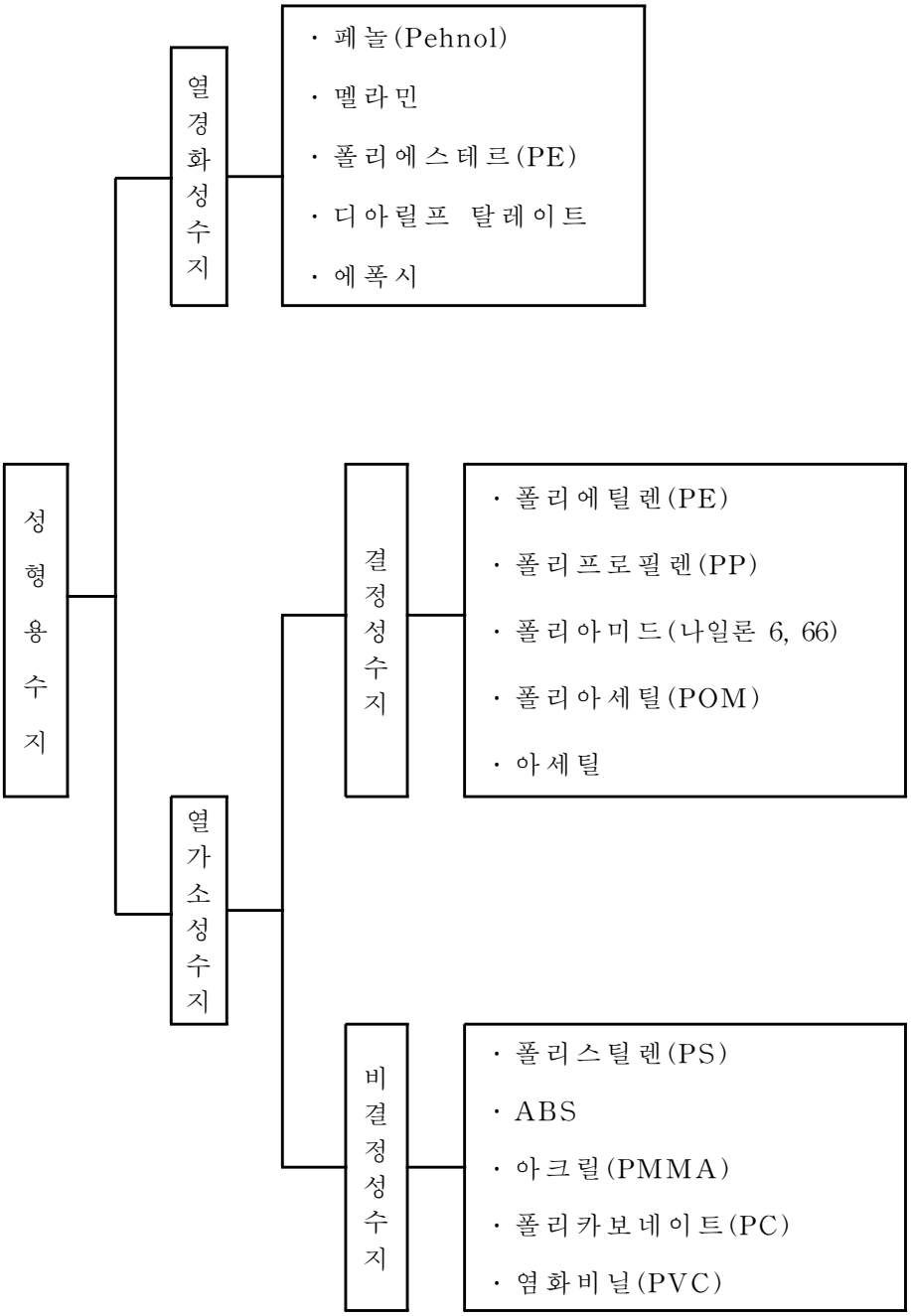


Table. 2 Board classification of composite materials by matrix



제 2 절 연구 동향

1. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 인장강도

섬유배향은 섬유직경, 섬유길이, 섬유함유율에 따른 섬유 상호간의 간섭력 등과 같은 재료인자와 금형 닫힘속도, 성형압력 및 금형온도 등과 같은 성형인자에 의해서도 발생한다. 압축성형된 제품은 섬유배향 때문에 불균질하고 이방성이 나타나 성형품의 기계적 성질 등에 큰 영향을 미친다[7-9].

섬유배향된 복합재료 성형품의 기계적 성질에 미치는 성형, 재료 및 금형 등의 인자와 관련된 주요 연구내용을 보면, Lee[10] 등은 섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유종횡비와 면적비의 영향에 대해 연구하였고, Lim[11] 등은 자동차용 고강도 폴리머 복합재료의 변형과 강도에 대해 연구하였고, Shin[12] 등은 고속압밀법에 의한 유리섬유강화 PET 기지 복합재료의 제조에 있어서 제조공정과 장치의 최적제작조건에 대한 연구를 수행하였다.

Kim[13] 등은 장섬유강화 고분자 복합판의 섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 대해서 연구하였고, Choi[14] 등은 횡방향 전단하중을 받는 단일방향 복합재료의 미시역학적 거동연구를 하였고, Byun[15] 등은 꼰 섬유로 강화한 복합재료의 탄성계수를 예측하기 위한 강성모델을 제시하였다. Jo[16] 등은 압축성형된 한 방향 섬유강화 고분자 복합판의 섬유함유율 분포에 대해서 연구하였고, Lee[17] 등은 화상처리에 의한 섬유배향각 분포측정에 있어서 교차점합산법의 정밀도를 고찰하였다.

2. 인장강도 시험 시 열화상 계측

적외선 카메라를 이용한 열화상 계측의 주요 연구내용을 보면, Kim[18] 등은 적외선 카메라를 이용한 용접부 안전성 평가에 관한 연구를 시행하였고,

Choi[19] 등은 적외선 열화상 기술을 이용한 내부 인공결함 평가를 시행하였고, Youn[20] 등은 적외선 열화상 데이터를 통한 정량적 부식률 분석방법에 관한 연구를 시행하였다. Park[21] 등은 MTS 피로시험기에 시편을 장착하고 시편 2군데의 저널부를 고정하여 하중을 걸고, 인장하중을 140MPa에서 340MPa까지 20MPa 단계로 단계적으로 올려가면서 일정한 하중을 유지한 상태에서 각각의 하중에서의 적외선 응력 화상과 분산에너지의 온도 상승량을 적외선 카메라로 측정하였다.

3. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 고속충격

섬유배향된 복합재료의 고속충격에 관련된 주요 연구내용을 보면, Jung[22] 등은 세라믹/유리 섬유강화 복합재 적층판의 고속충돌에 의한 파괴거동을 수행하여 이종재료의 적층으로 구성된 방탄판의 설계 시 가장 중요한 요소는 각기 다른 두 재료의 접착에 관한 부분이라 할 수 있는데, 후면재인 섬유강화 복합재에 사용된 에폭시 등의 기지를 진공성형하여 사용하는 것이 양호나 결과를 보였다. Lee[23] 등은 유리섬유 강화 열가소성 복합재료 고상 성형품의 충격특성에 관한 연구를 하여 유리섬유의 함유량이 증가함에 따라 충격강도는 증가하였고, 고상 성형 시 성형변형률이 증가함에 따라 충격강도가 증가하였으나 임계 성형변형률 이상에서는 성형변형률이 증가함에 따라 충격강도가 감소하는 것으로 추정하였다. Kim[24] 등은 적층복합판의 충격에 의한 모재균열 및 층간분리에 관한 연구를 수행하였고, Cho[25] 등은 CFRP 적층쉘의 적층구성 및 곡률 변화에 따른 관통 특성에 관해 연구하여 평판과 곡면 시험편 모두 플라이수가 많을수록 더 높은 임계관통에너지를 보였으며, 계면수가 적은 시험편의 임계관통에너지가 계면수가 많은 시험편 보다 다소 높게 나타났다.

제 3 절 연구 목표 및 내용

현재, 시판되고 있는 스템퍼블 시트(Stampable sheet)와 같은 GFRP 복합재료는 강화섬유가 다수의 필라멘트를 집속한 스트랜드를 기본단위로 하여 루프구조를 이루어 시트 상에 적층되는 복잡한 형상으로 제작된다. 이 스템퍼블 시트는 열가소성 수지를 모재(기지재)로 하고 강화재로서는 랜덤(무작위)하게 배향된 유리 장섬유 매트 혹은 촙트 스트랜드(Chopped strand) 유리섬유를 사용하고 있기 때문에 강도의 방향성이 없는 것이 특징이다.

그러나 자동차 범퍼빔 등의 구조부재에 요구되는 특성으로서는 어느 특정한 방향으로 강도가 필요한 경우가 있다. 이와 같은 요구에 대응하기 위해서 강도에 방향성을 부여하기 위해서는 GFRP 복합판재 제작 시 어느 특정 방향으로 섬유를 배향하여 기계적 성질을 향상시킬 수 있다.

GFRP 복합재료에서 최대강도 및 강성은 인장력이 작용하는 방향으로 섬유가 배향되어 있을 때 얻어진다. 일방향으로 섬유가 배향된 복합판재의 인장강도, 탄성계수비와 강화섬유가 담당하는 하중비는 복합재료의 혼합법칙에 의해 구할 수 있다.

자동차 범퍼빔 등의 구조부재로 사용되는 섬유강화 고분자 복합판재는 유리장섬유가 랜덤하게 배향되어 있는 랜덤 매트와 일방향으로만 배향되어 있는 유리 장섬유를 조합시킴으로서 강도의 방향성을 부여한 것이다. 이와 같이 제작된 복합판재의 강도 값을 예측할 수 있어야 한다. 그러나 섬유함유율에 따른 섬유배향상태와 복합판재의 체계적인 연구결과는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 섬유 배향과 함유율이 인장강도와 내충격성에 많은 영향을 미치므로 최적의 섬유 배향과 함유율의 정량인 값을 구하는 것이 목적이다.

연구내용으로는 일방향 복합재료에서 모재의 성질과 강화재인 섬유함유율을 알면 복합재료의 강도를 얻을 수 있는 혼합법칙의 이론식이 있으나, 섬유함유율과 섬유배향상태에 따른 인장강도 식을 구할 수 있는 식이 없어 섬유 배향과 함유율에 따른 복합재료 제작 후 인장강도 실험결과를 통해 인장강도를 예측할 수 있는 식을 제안하고자 한다.

또한, 적외선 열화상 카메라의 기존의 비파괴 검사용도가 아닌 인장강도 시험 시 시험편의 하중에 따른 온도변화와 파괴 시 크랙이 진전될 때의 온도분포를 분석 할 수 있는 방법을 제시하고, 미세한 온도변화를 측정할 수 있는 적외선 열화상 카메라의 기법 중에 하나인 록인 방식을 적용시켜 인장시험 시 발생하는 시편의 분산에너지의 온도 변화와 인장시편에 crack이 진전될 때 온도분포를 모니터링 하고자 한다.

GFRP 복합재료는 높은 비강성 및 비강도 특성을 가지고 있으나, 이러한 좋은 성질들은 외부 하중과 충격에 대한 특성이 규명되었을 때만 잘 활용될 수가 있다. 이러한 특성들이 잘 알려져 있지 않은 경우 실제 구조를 설계할 때 높은 안전률을 주게 되어, 재료의 이용도를 낮추는 효과를 주게 된다. 따라서 구조물이 충격을 받았을 경우에 손상이 커서 위험이 초래되지 않게 하는 것이 매우 중요하다. 재료가 정적인 상태에서 강구에 의해 고속충격을 받을 때 복합재료 특성에 대해 고찰하여 섬유함유율과 섬유배향상태에 따른 관통여부, 파괴모드, 흡수에너지 비를 파악하고자 한다.

제 2 장 섬유배향함수 및 열측정 이론

제 1 절 섬유배향함수 이론

GFRP 복합재료는 폴리머로부터 열이 방출되어 응고되기 위한 시간이 필요하다. 성형품의 두께가 두꺼울수록 많은 시간을 필요로 하여 생산비용도 더 들게 되는 단점이 있어 제품의 강도를 유지할 수 있는 한도 내에서 두께를 최소화해야 한다.

현재, 국내외에서 사용되고 있는 대부분의 섬유강화 고분자 복합판재의 두께(3.2 mm)는 폭, 길이와 비교하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급하여 섬유배향각 분포식을 나타낼 수 있다.

Fig. 1은 섬유배향각 분포 $q(\Theta)$식 유도에 사용하는 좌표계이다. 집합체가 x축 방향에 α배, y축 방향에 β배 신장되었을 때 집합체의 변형과정에 대해서 다음의 가정을 세운다[26].

가정 1. 집합체의 변형에 의해 섬유길이는 변화하지 않는다.

가정 2. 초기상태에서 임의의 한 개의 섬유가 접해 있는 사각형 면적 $a_o \times b_o$는 집합체 변형 후 $\alpha_{ao} \times \beta_{bo}$의 직사각형이 되어, 섬유는 이 변형된 직사각형의 대각선상에 온다.

가정 3. 초기상태에서 임의의 한 개의 섬유중심점 좌표 x_o, y_o는 집합체 변형 후 αx_o, βy_o로 된다.

섬유집합체의 변형 전 섬유배향각 θ_0와 변형 후 섬유배향각 θ는 다음과 같다.

$$\tan\theta_0 = \frac{b_0}{a_0} \tag{1}$$

$$\tan\theta = \frac{\beta\, b_0}{\alpha\, a_0} \tag{2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\beta \tan\theta_0}{\alpha}\right) \tag{3}$$

식(3)을 θ_0로 미분하여 나타낸 섬유집합체의 변형 전•후의 배향각은

$$\theta_0 = \tan^{-1}\left[\frac{\alpha \times \tan\theta}{\beta}\right] \tag{4}$$

$$\frac{d\theta_0}{d\theta} = \frac{\alpha\beta}{\alpha^2 \sin^2\theta + \beta^2 \cos^2\theta} \tag{5}$$

초기상태에 있어서 섬유배향각 분포 $q(\theta_0)$는 $-\frac{\pi}{2} \leqq \theta \leqq \frac{\pi}{2}$의 일정한 분포이기 때문에

$$q(\theta_0) = \frac{1}{\pi} \tag{6}$$

변형후의 섬유배향각 분포 $q(\theta)$는 식(5), (6)으로부터

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi}\frac{\alpha\beta}{\alpha^2 \sin^2\theta + \beta^2 \cos^2\theta} \tag{7}$$

섬유배향각 분포식(7)을 Stein 등이[26] 제안한 섬유배향함수 J로 나타내면 식(8)과 같다.

$$J = 2\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2\theta\, q(\theta)\ d\theta - 1$$

$$= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos 2\theta\, q(\theta)\ d\theta \tag{8}$$

식(8)을 우함수로 표시하고, 식(7)을 대입하면

$$A(2k) = 2\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \cos 2k\theta\, q(\theta)\, d\theta = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos 2k\theta d\theta}{(\frac{\beta}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta})\cos^2\theta + \frac{\alpha}{\beta}} \tag{9}$$

여기서 $\theta = \frac{x}{2}$, $d\theta = \frac{dx}{2}$로 치환하면

$$A(2k) = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\pi} \frac{\cos kx\ \ dx}{\left(\frac{\beta}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta}\right)\cos x + \left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\alpha}{\beta}\right)}$$

$$= \left[\frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta}\right]^k \tag{10}$$

여기서 k의 급수는 $0 \leqq A(2k) \leqq 1$로서, k값이 1인 경우가 섬유배향함수에 영향을 가장 크게 미치므로 $k = 1$로 한다.

식(8), (10)으로부터 J=A(2)가 되어서 식(7)을 변형하면

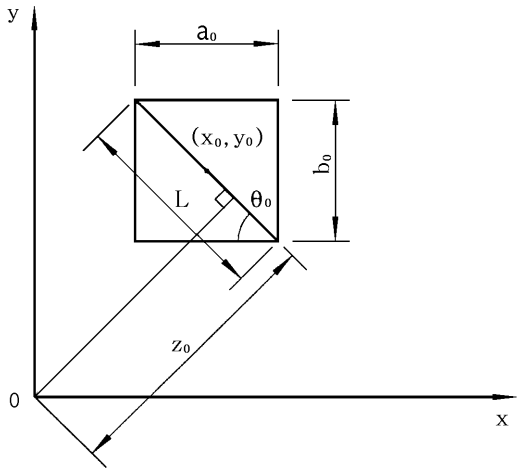
$$\frac{\beta}{\alpha}=\frac{(1-J)}{(1+J)} \qquad (11)$$

식(11)을 식(7)에 대입하여 섬유배향각 분포 $q(\theta)$식을 구하면

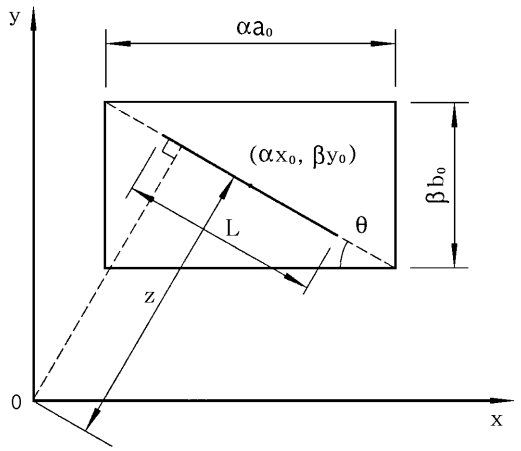
$$q(\theta)=\frac{1}{\pi}\left[\left(\frac{1-J}{1+J}\right)\cos^2\theta+\left(\frac{1+J}{1-J}\right)\sin^2\theta\right]^{-1} \qquad (12)$$

여기서 J는 2차원 섬유배향각 분포에 대한 섬유배향함수[27-30]이며, 섬유배향이 등방성(Isotropic)인 경우 J=0, 섬유배향이 한 방향으로만 배열되어 있는 이방성(Orthographic)인 경우는 J=1, J=1의 방향에 대해 90°회전방향으로 배열되어 있는 경우는 J=-1이다. 이와 같이 섬유배향함수 J값은 0에서 1사이에 있으나 0에 가까워지면 섬유의 배향상태가 무작위(Random)에 가깝게 됨을 나타낸다.

Fig. 2는 식(12)의 섬유배향함수 J값 변화에 따른 섬유배향각 θ와 상대 섬유길이와의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서, 상대 섬유길이는 배향된 섬유의 총길이에 대한 개개의 섬유배향각 θ를 갖는 섬유의 총길이와의 비이다. 이 그림에서 섬유배향함수 J=1일 때는 섬유배향상태와 일방향인 이방성이므로 배향주축과 일직선인 관계를, J=0일 때는 섬유배향상태가 0°에서 180°까지 등방성으로 균일하게 배향되어 있음을 각각 나타내고 있다.



(a) Before molding



(b) After molding

Fig. 1 Fiber orientation model in two dimension

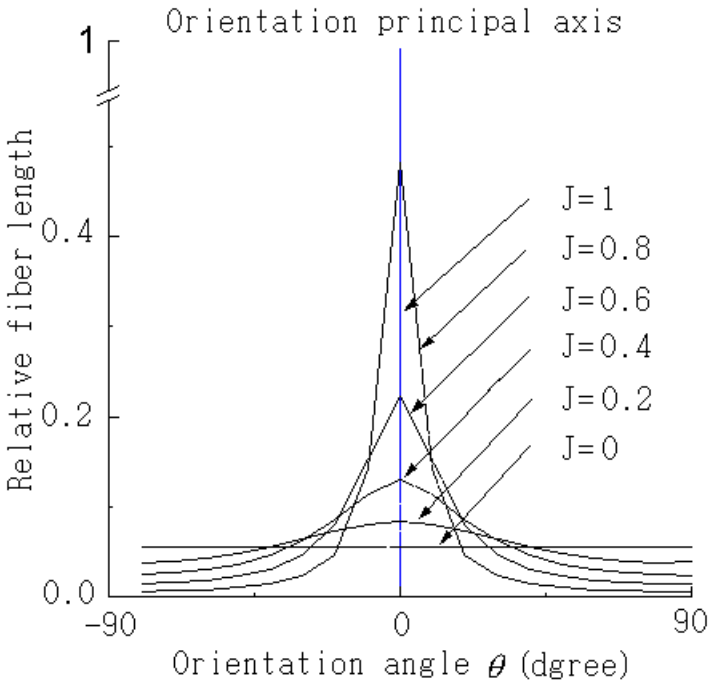


Fig. 2 Distribution of relative fiber length according to the fiber orientation angle

제 2 절 열측정 이론

전자기 스펙트럼은 대역(Band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다. 여기에는 전자기 스펙트럼의 다른 대역간의 기본적인 차이점은 없고 모두가 동일 법칙에 의한 지배를 받고 있으며 유일한 차이점은 단지 파장의 차이뿐이라는 사실이다. 적외선 열화상 카메라는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2㎛-13㎛ 대역을 사용한다. 여기서 SW(Shortwave) 영역은 2㎛-5㎛의 대역을 사용하고 LW(Longwave) 영역은 8㎛-12㎛의 대역을 사용한다. 중간에 5㎛-8㎛의 대역에서는 공기 중 수증기에서의 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하기 때문이다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.

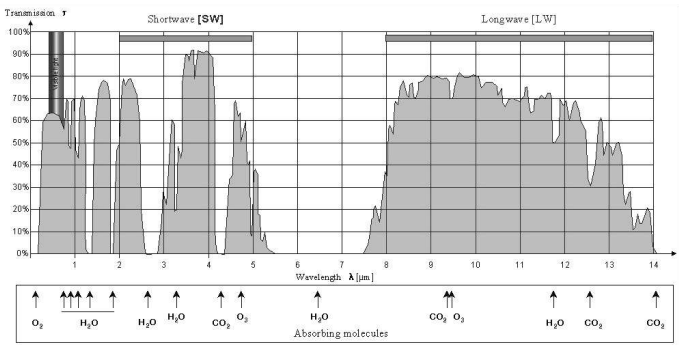


Fig. 3 Atmospheric transmission over 1 nautical mile

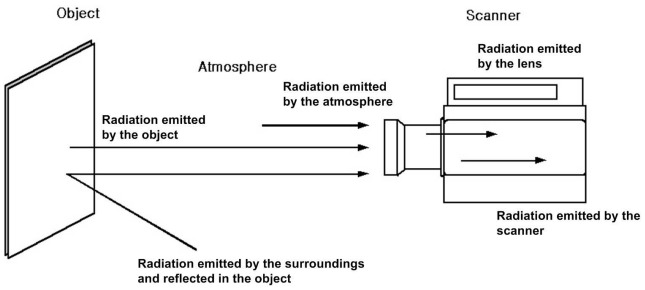


Fig. 4 Radiation contributions to the general measurement situation

대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같다. 이에 상응하는 측정공식은 시스템 컨트롤러에 포함된 ERIKA 소프트웨어 안에 주어진다. 열측정 공식은 식 (13)에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1-\epsilon) \times I(T_{amb}) + (1-\tau) \times I(T_{atm}) \tag{13}$$

이 측정 공식은 Thermovision 900에 의해 자동적으로 계산되며 오퍼레이터가 피사체에 대해 입력해야하는 매개변수는 대상체의 방사율, 피사체거리, 상대습도, 대기 온도, 반사된 주위 온도 등이다.

식 (13)에서 $I(T)$는 온도 T일 때 흑체로부터 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이다. 식 (13)은 불투명 물체, Lambertian 표면, 일정 분광 방사율(Grey body)이라는 가정을 갖는다.

적외선 열화상 테크닉은 기본적인 Pulse 적외선 열화상 테크닉과 Lock-in 적외선 열화상 테크닉, Pulse-phase 적외선 열화상 테크닉이 있다. Pulse 적외선 열화상 테크닉은 적외선 열화상 테크닉에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 짧은 순간의 열자극은 사용이 편리한 Heating sources를 이용하여 평판에 직접 주사하는 방법을 취한다. 더욱이 신속한 열자극은 재료의 손상을 방지한다.

Lockin 적외선 테크닉은 모듈레이터 램프의 레이저 공학에서 기초되었다. 측정 대상체에 저주파의 Thermal wave를 동시에 주사하여 IR 장비로 측정을 하는 원리이다. 또한 IR 장비 검출기로 주사된 물체에 대해서 수많은 점 중에서 단지 1개의 점에 대해서만 모니터링이 가능하다는 점이다[31-32].

제 3 장 시험편 제작 및 실험방법

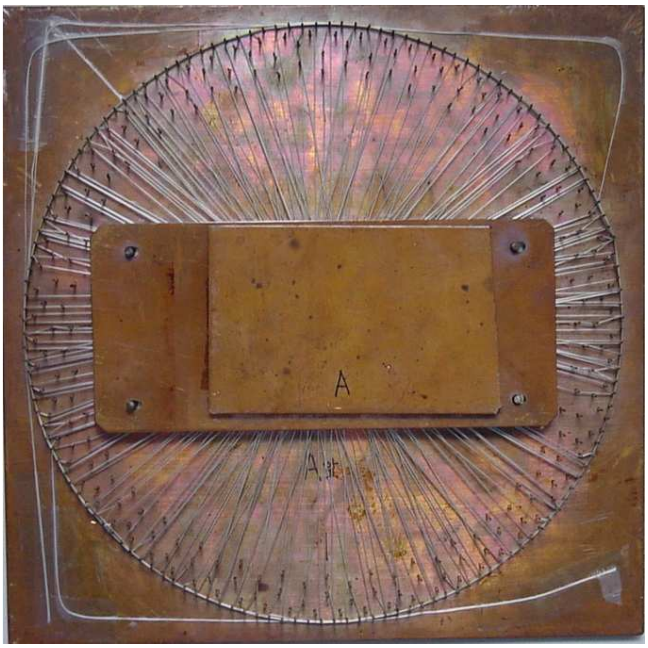
제 1 절 시험편 제작

1. 성형 조건

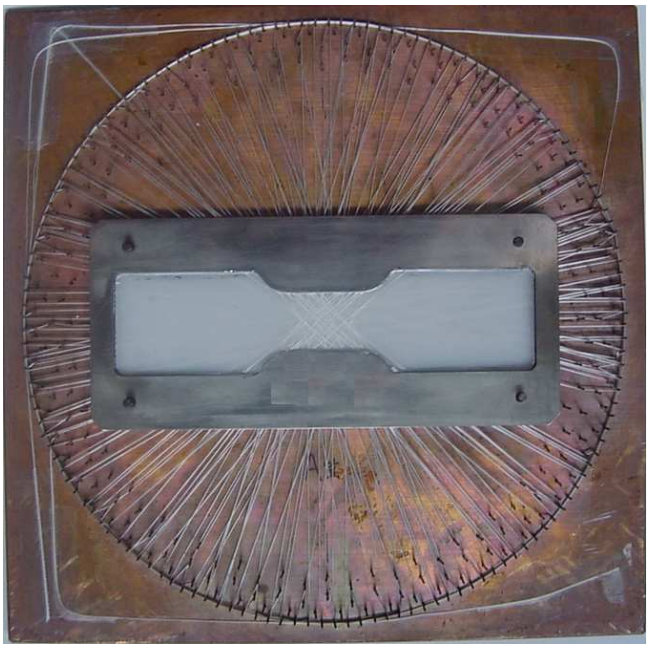
프레스 성형용으로 개발된 폴리프로필렌(모재)에 유리섬유(강화재)를 배향하여 Photo. 1과 같은 금형을 사용하여 GFRP 복합판재를 제작하였다.

Photo. 1(b)와 같이 제작된 GFRP 복합판재의 중앙부는 Fig. 5와 같은 치수(폭 25 mm×길이 25 mm×두께 3.2 mm)와 구조로 적층하였다. 이때 유리섬유로 강화할 때 섬유배향상태의 척도인 섬유배향함수와 섬유함유율을 변화시킨 다음 Fig. 6과 같은 열압축프레스(Carver Model 2518, U.S.A.)를 사용하여 성형온도는 210℃로 하여 압축성형 하였다. 그리고 섬유를 배향시킬 때 식(12)에 의하여 섬유배향함수(f)는 0에서 1사이에 0.1간격으로 변화시키고, 섬유함유율은 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%로 변화를 주었다.

실험에 사용한 유리섬유는 시판되고 있는 한국화이바의 E-글라스 얀(필라멘트 직경 : 13 ㎛, Tex : 135 g/1,000 m)이다. Fig. 7은 Fig. 5와 같은 구조로 적층할 때 섬유함유율과 섬유배향상태 변화에 따른 섬유층과 모재의 적층상태를 나타낸 그림의 한 예이다. 인장강도 측정부위에 배향된 섬유의 총길이(L)는 1m (10wt%), 2m (20wt%), 3m (30wt%)와 4m (40wt%)로 배향하였다.



(a) Before compression molding



(b) After compression molding

Photo. 1 Fiber orientation mold

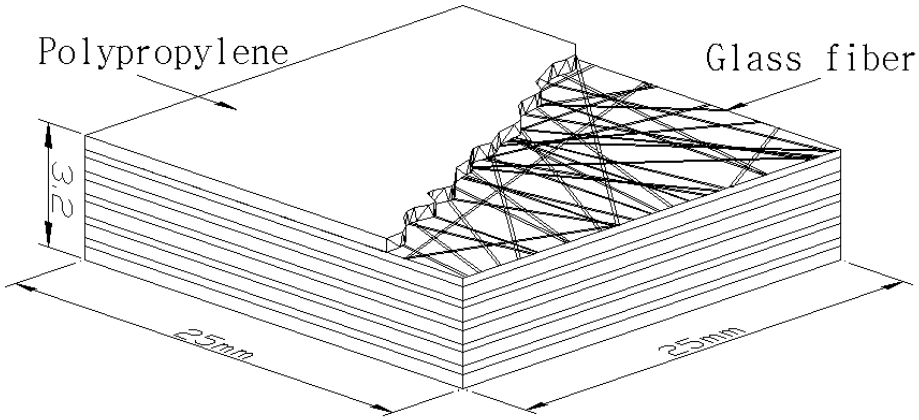


Fig. 5 Structure of fiber oriented specimen

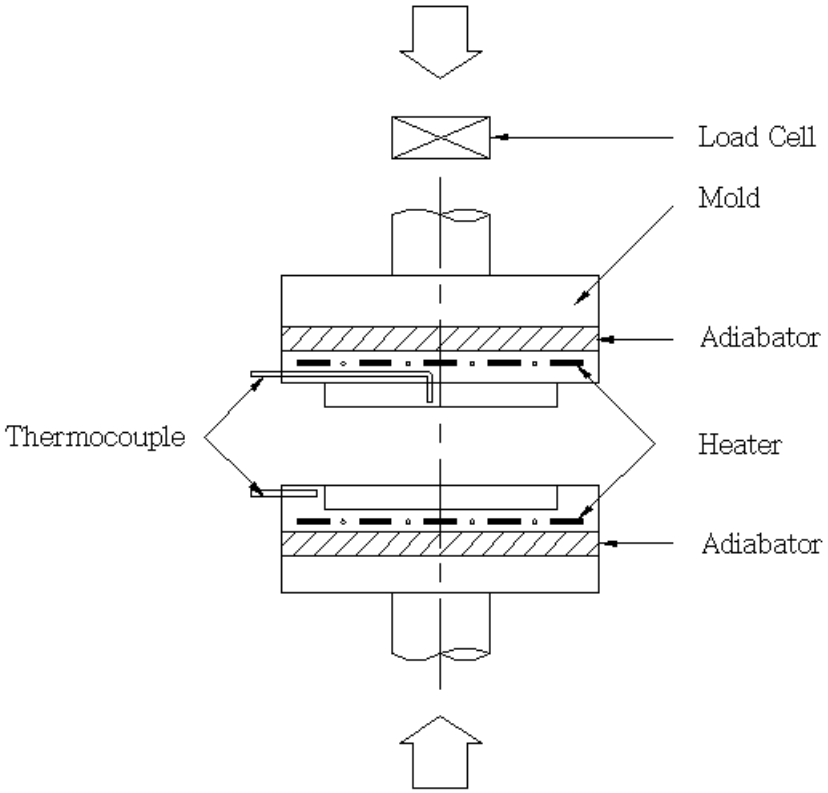


Fig. 6 Schematic diagram of the experimental apparatus

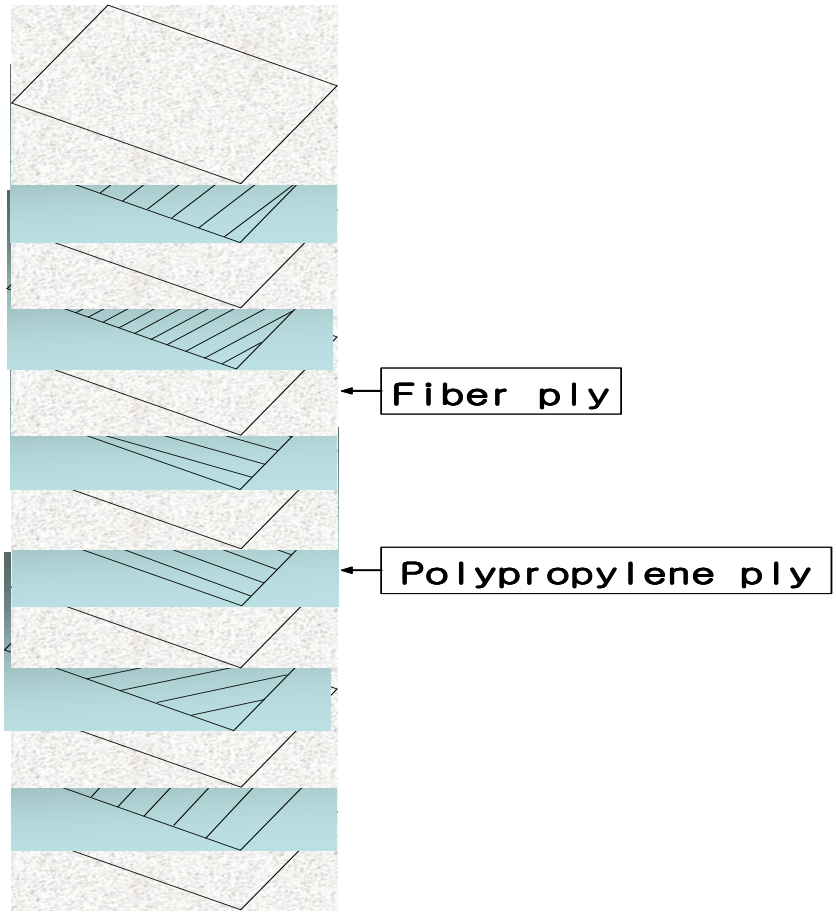


Fig. 7 Schematic of the fiber ply and polypropylene ply lay up

2. 성형 방법

GFRP 복합재료는 비중이 작기 때문에 비강도, 비강성 등의 기계적 특성이 뛰어나 자동차의 연비개선과 경량화 추세에 힘입어 자동차 범퍼빔 등의 구조부품 용도로 많이 사용되고 있는 추세이다. GFRP 복합재료에서 고온압축 유동성형할 때 장섬유강화 복합판재는 단섬유강화 복합판재와 비교하여 모재인 폴리프로필렌은 유동되나, 강화재인 섬유는 유동되지 않기 때문에, 모재와 강화재가 유동하는 단섬유강화 복합판재와는 달리 유동에 의해서 섬유의 방향성이 없는 성형품을 얻을 수 있는 것이 특징이다.

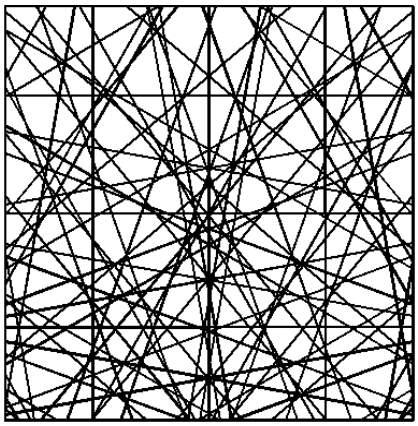
어떤 방향에서도 일정한 강도 값을 갖도록 하기 위해서는 섬유배향상태를 Fig. 8(a)와 같이 무작위(Random)인 등방성으로 배향시켜야 하고, 어느 특정방향으로의 강도 값을 향상시키기 위해서는 Fig. 8(k)와 같이 일방향인 이방성으로 배향시켜야 한다.

본 연구에서는 섬유함유율과 섬유배향상태 변화에 따른 GFRP 복합판재를 제작한 후 각 성형조건 별로 인장강도 값을 측정하여 복합재료의 설계자료로 활용할 수 있도록 하였다. 이때, 섬유함유율과 섬유배향 분포 상태는 Table. 3에 나타냈으며, 섬유배향 상태는 Fig. 8과 같이 변화시켰다. Fig. 9는 GFRP 복합판재 제작 시 각도 변화에 따른 일방향으로 배향된 섬유를 나타낸 그림이다.

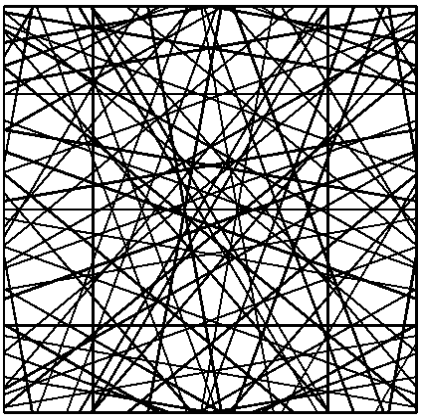
Table. 3 Distribution of fiber length according to the fiber orientation function J (Total fiber length = 1,000 mm)

[Unit : mm]

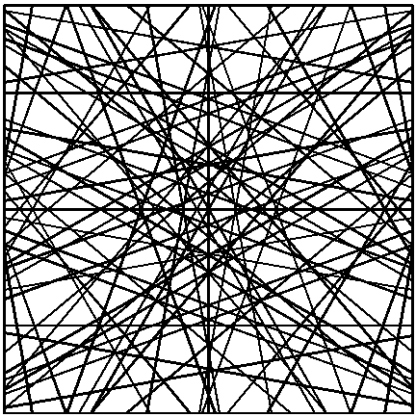
θ \ J	J=0	J=0.1	J=0.2	J=0.3	J=0.4	J=0.5	J=0.6	J=0.7	J=0.8	J=0.9	J=1
90°	55.6	45.5	37	29.9	23.8	18.5	13.9	9.8	5.9	2.2	0
80°	55.6	45.9	37.7	30.6	24.4	19.0	14.3	10.1	6.1	2.2	0
70°	55.6	47.3	39.6	32.6	26.3	20.7	15.6	11.0	6.7	2.4	0
60°	55.6	49.5	43.0	36.4	29.9	23.8	18.1	12.9	7.9	2.8	0
50°	55.6	52.6	48.1	42.3	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



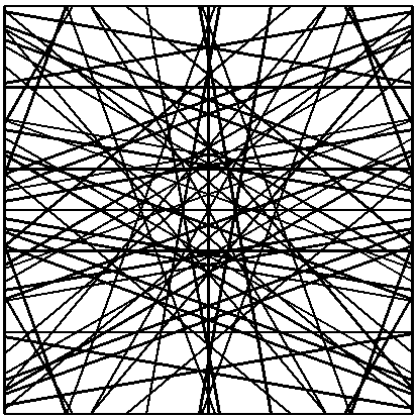
(a) Fiber orientation function f=0



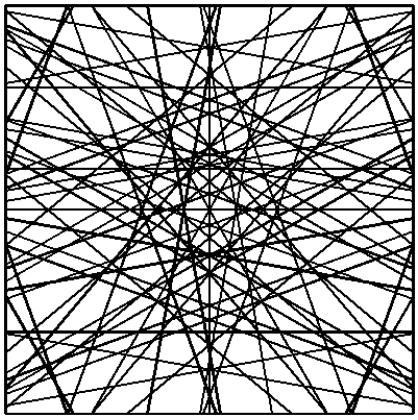
(b) Fiber orientation function f=0.1



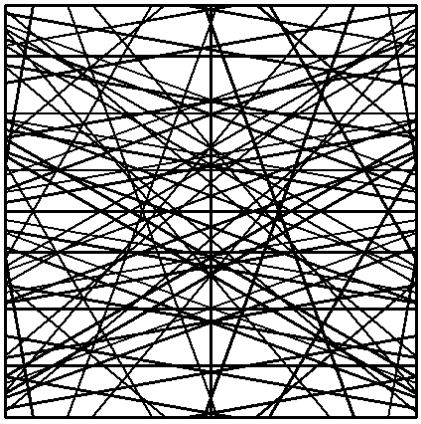
(c) Fiber orientation function f=0.2



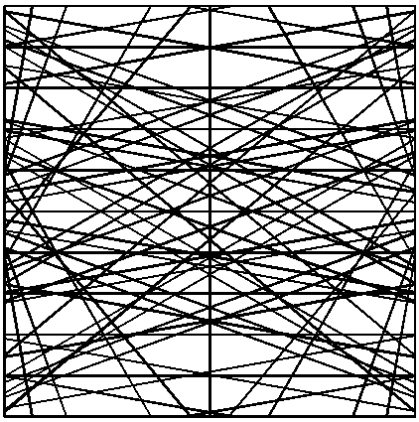
(d) Fiber orientation function f=0.3



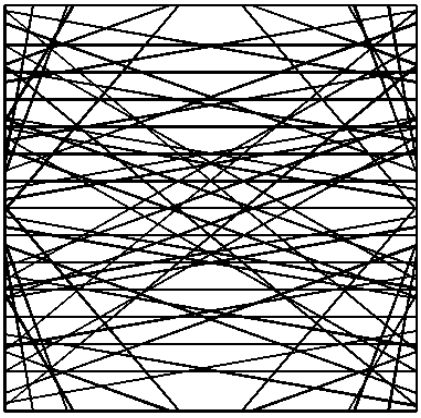
(e) Fiber orientation function f=0.4



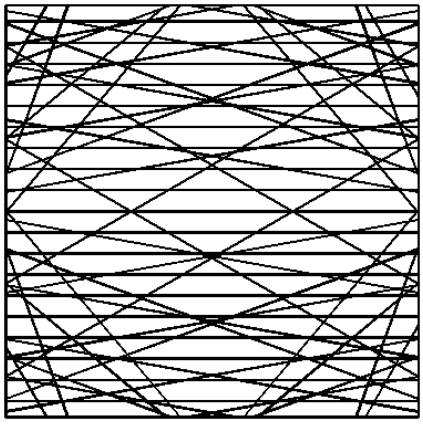
(f) Fiber orientation function f=0.5



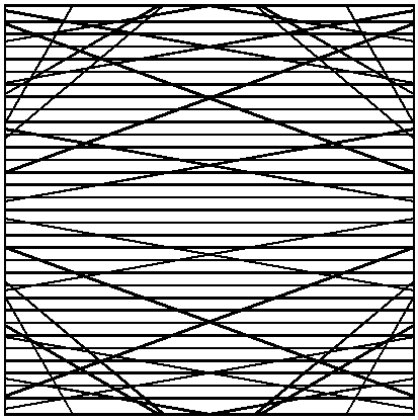
(g) Fiber orientation function f=0.6



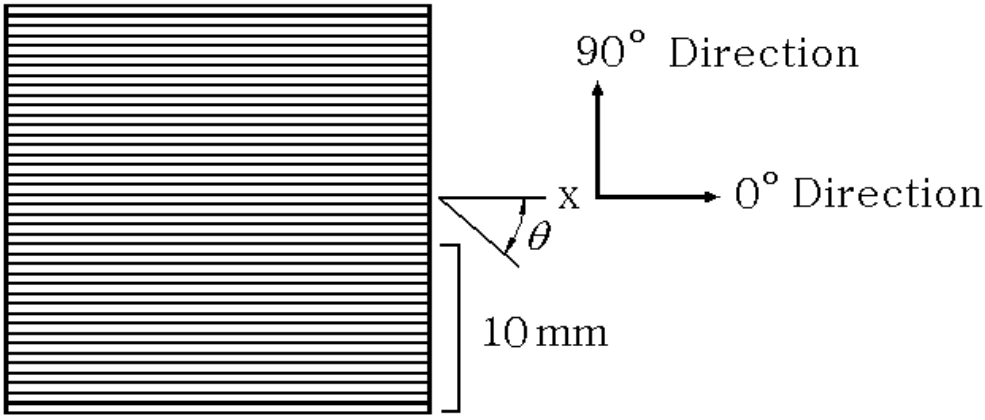
(h) Fiber orientation function f=0.7



(i) Fiber orientation function f=0.8

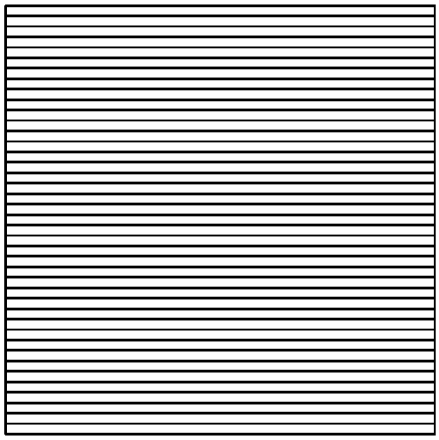


(j) Fiber orientation function f=0.9

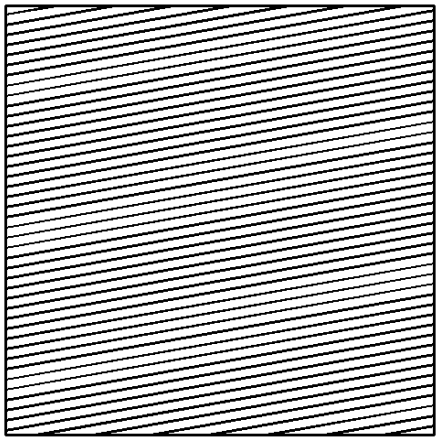


(k) Fiber orientation function f=1

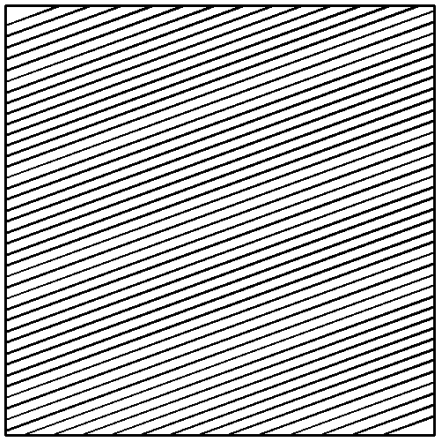
Fig. 8 Schematic distributed fibers according to fiber orientation function



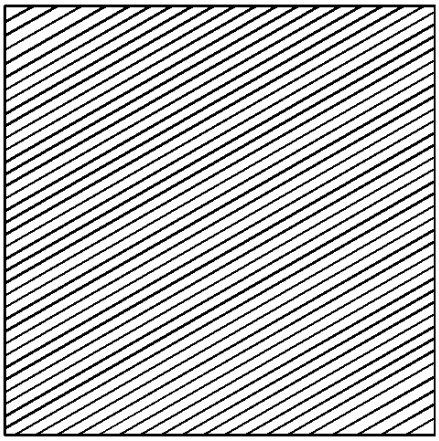
(a) Orientation angle Θ=0°



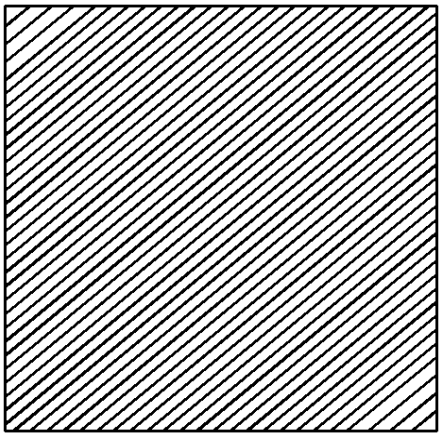
(b) Orientation angle Θ=10°



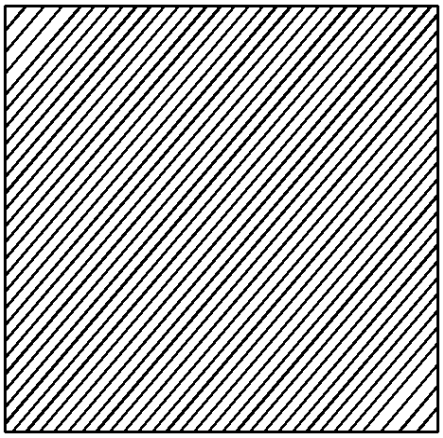
(c) Orientation angle Θ=20°



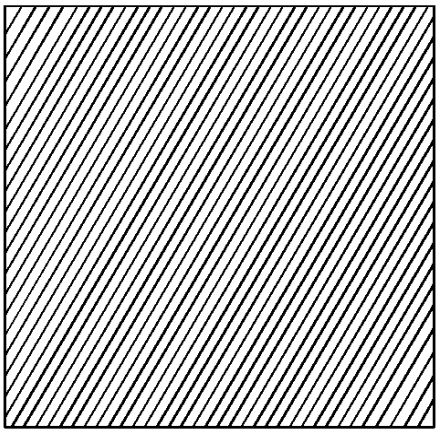
(d) Orientation angle Θ=30°



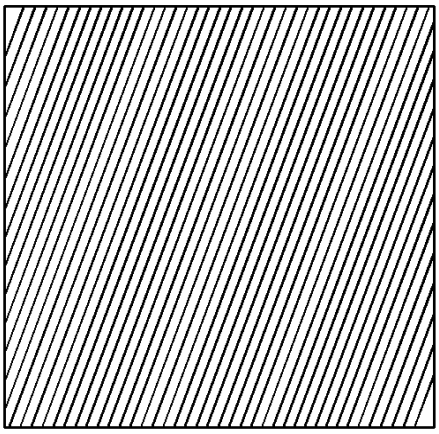
(e) Orientation angle Θ=40°



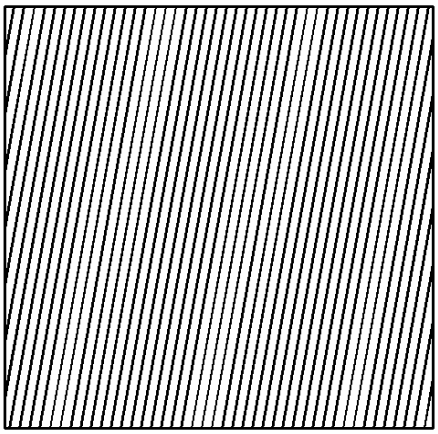
(f) Orientation angle Θ=50°



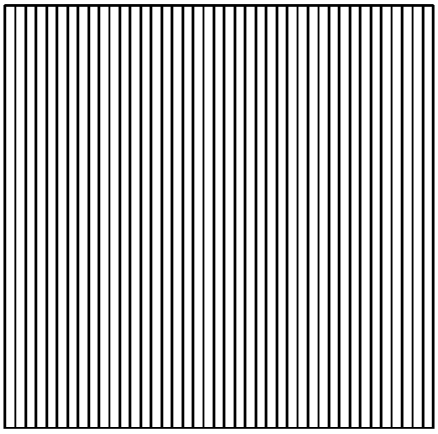
(g) Orientation angle θ=60°



(h) Orientation angle θ=70°



(i) Orientation angle θ=80°



(j) Orientation angle θ=90°

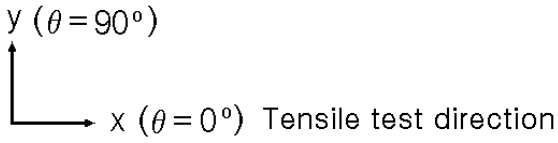


Fig. 9 Schematic distributed fibers according to orientation angle

제 2 절 인장강도 실험

각각의 섬유배향상태 변화에 따라 함침성형된 GFRP 복합판재의 인장강도 값을 측정하기 위하여 Fig. 10과 같은 형상으로 ASTM D638 규격을 참조하여 인장시험을 시행하였다. 인장강도 시험은 Photo. 2와 같은 만능재료시험기 (Hounsfield, Load Cell : 5 ton, U. K.)를 사용하여 측정하였고, 크로스 헤드 속도는 1 mm/min로 하였다.

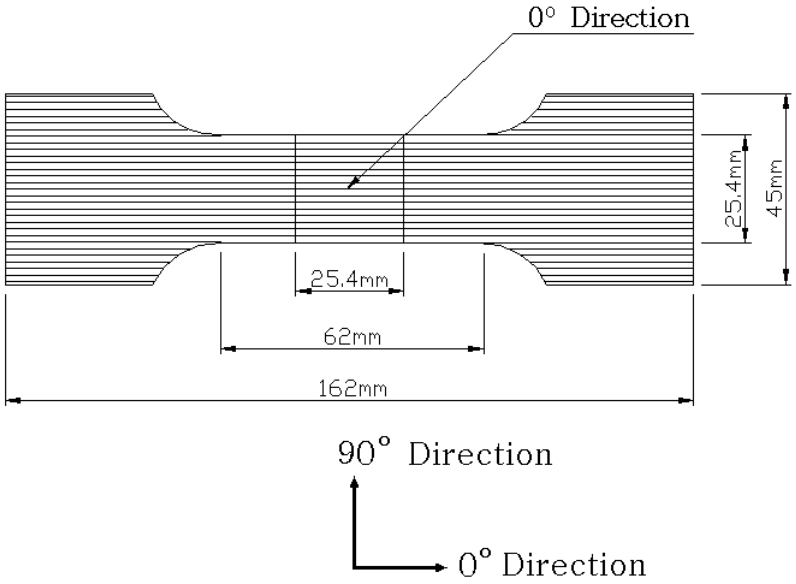


Fig. 10 Schematic diagram of test sample (J=1, Θ=0)

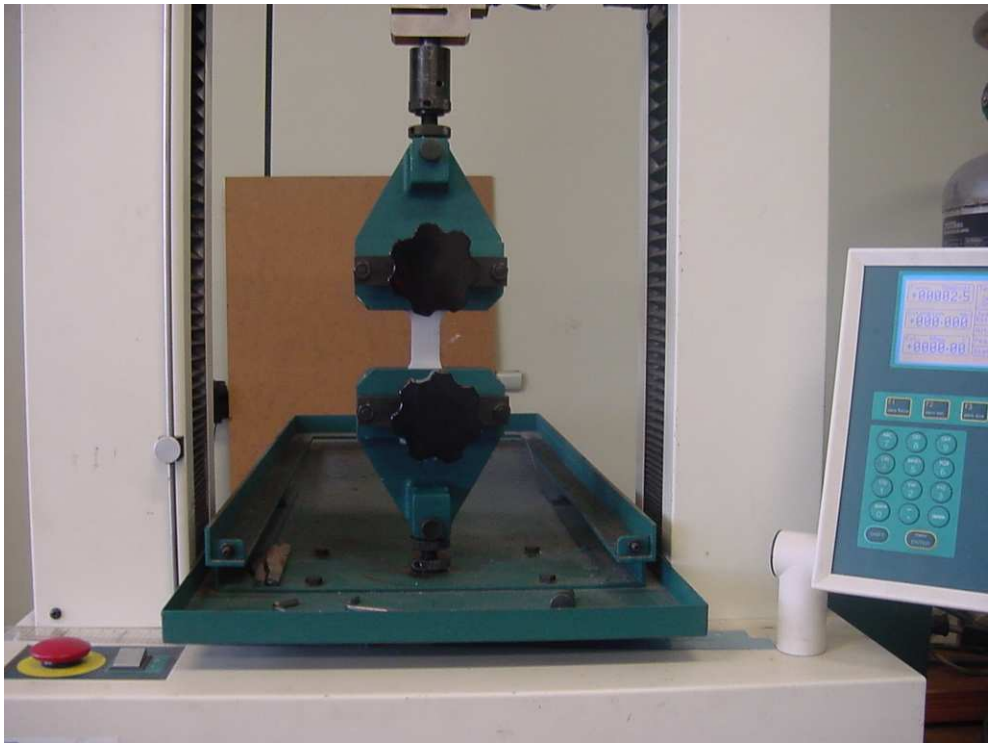


Photo. 2 Universal Test Machine (U. T. M)

제 3 절 열화상 계측 방법

실험에 사용한 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system은 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산한 적외선 SCANING SYSTEM을 사용하였다. 이중 채널 마이크로프로세서를 기초로 하는 제어기 부분에서는 2개의 68020 프로세서가 사용되고 32비트 VME버스, 2개의 16비트 IR버스가 사용된다. 스캐너의 냉각방식은 열 전기적이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 스캐닝, 2-5.4 마이크론 스펙트럼 응답을 보이며 온도 범위는 -10℃-500℃(고온 필터 사용 시 2,000℃까지 검출 가능), 민감도는 30℃에서 0.1℃, 공간 해상도는 140원소/Line(50%변조), IR라인 주파수 3.5 kHz, 심플/라인 204를 갖추고 있다.

Photo. 3은 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system과 UTM의 전체적인 모습과 이동성을 위해 노트북컴퓨터와 연결할 수 있는 Research package 900을 나타냈다. 인장시험 시 열화상 정보로 인해 온도분포를 측정하기 위해서, Photo. 4에 보이는 바와 같이 UTM에 인장시편을 걸어 놓는다. 시편의 0.1m 전방에 적외선(IR; Infra red) 열화상 카메라를 설치하고, 인장시험기의 로딩신호와 카메라로부터 읽어 들이는 온도 정보를 실시간으로 동기화시키기 위해 Photo. 3과 같이 설치한다. IR camera의 프레임 세팅은 1초에 한 프레임씩 읽도록 하고, 주위온도는 20도로 하였다. 암실과 같은 조건을 갖추기 위하여 UTM과 IR camera에 검은 천을 둘러싸고, 온도 보정의 시간을 30분 정도 갖고 나서 실험을 진행하였다.

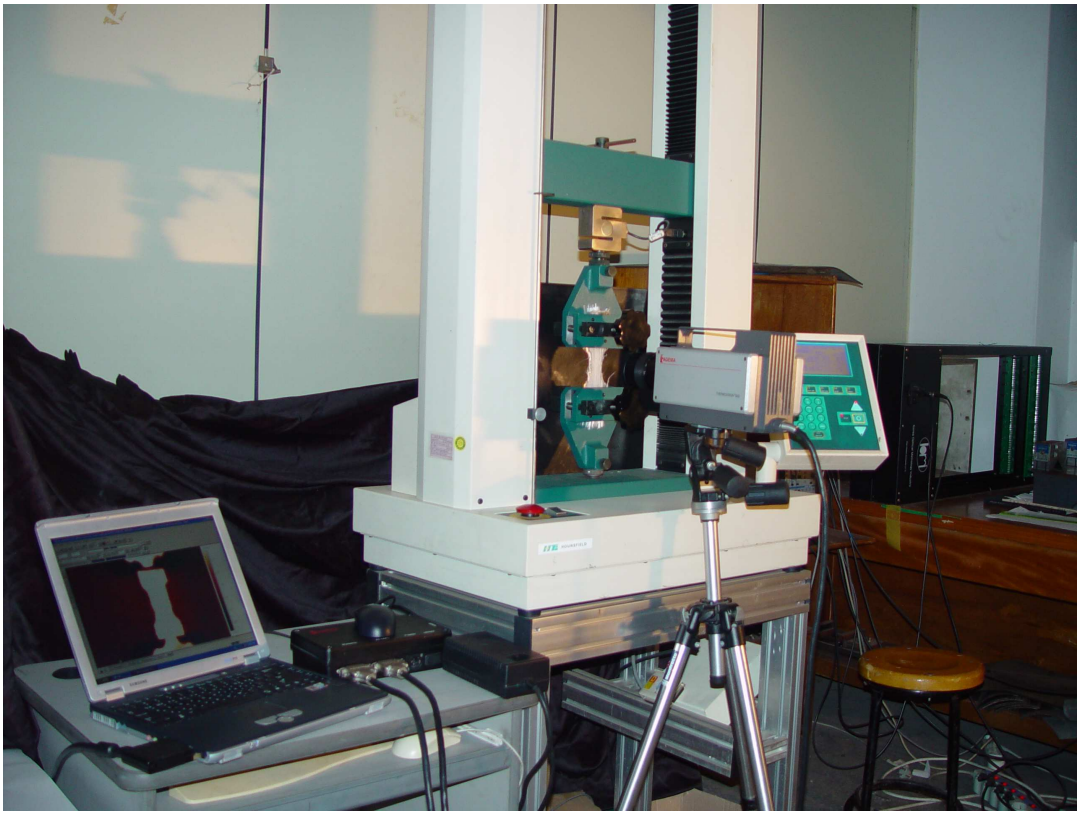
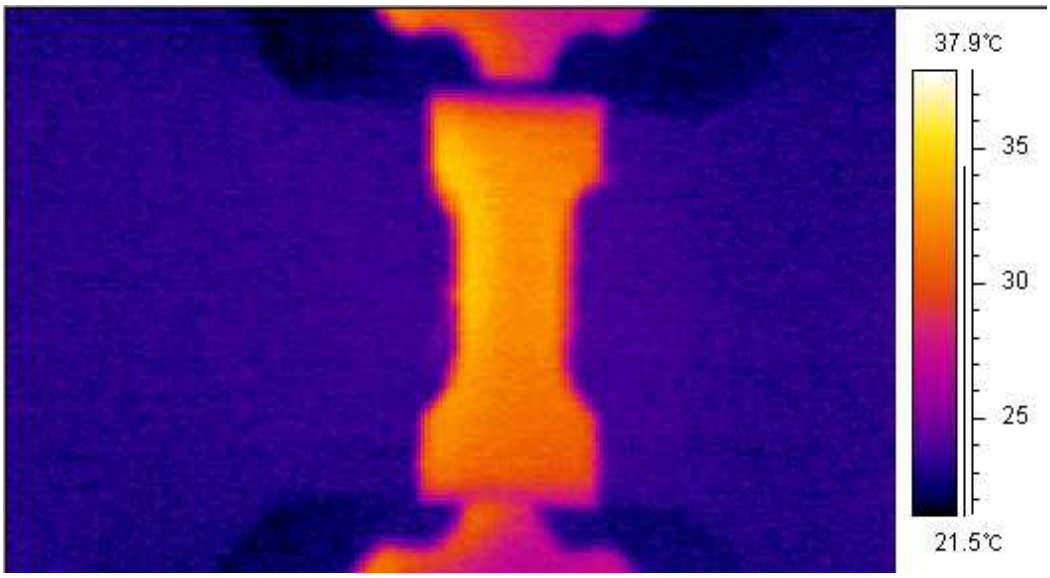
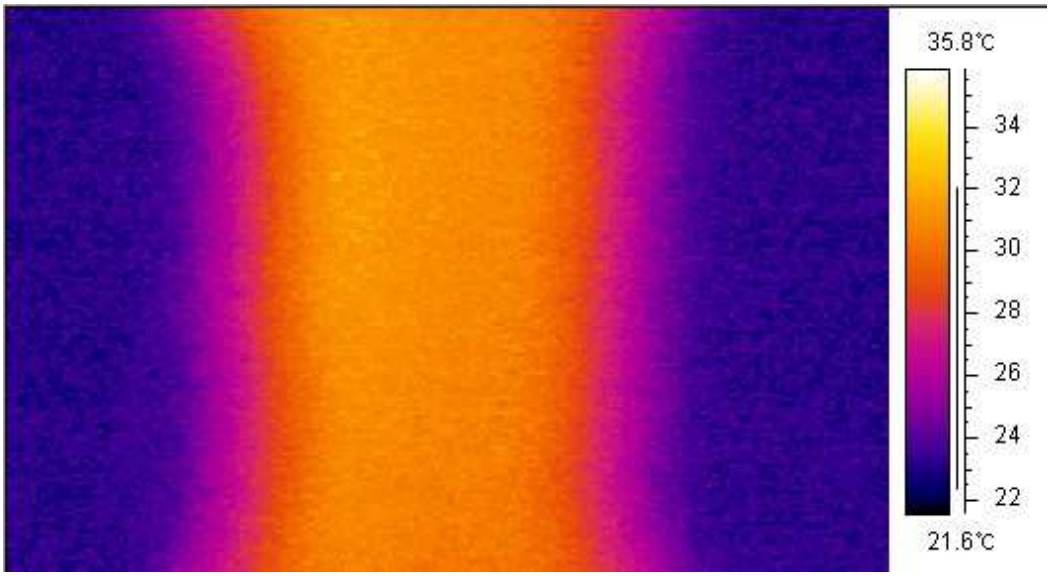


Photo. 3 Thermography experiment device



(a) Long distance



(b) Short distance

Photo. 4 Thermography image of tensile test

제 4 절 고속충격 실험

복합재료를 이용하여 구조물을 설계할 때, 인장강도를 높이기 위해 섬유배향 상태를 섬유길이 방향인 일방향으로 배향시키면, GFRP 복합재료의 경우는 재료의 충격특성 혹은 에너지를 흡수하는 능력이 감소하기 때문에 종종 제한을 받게 된다. 따라서 GFRP 복합재료의 충격특성을 잘 이해하는 것이 구조물을 안전하게 설계하는 중요한 인자이다.

재료의 인성을 측정하는 보편적인 방법의 한가지는 시편을 파괴시키기 위하여 필요로 하는 에너지를 측정하는 것이다. 복합재료의 고속충격시험에 충돌시의 속도는 볼 스크린 센서(Ballistic screen sensor)를 이용하여 측정하여 시편의 파괴 전•후 속도를 측정한다. 충돌속도를 증가시키기 위하여 공기압축기 등을 사용하여 충격자(Impacter)의 속도도 증가시킬 수 있다.

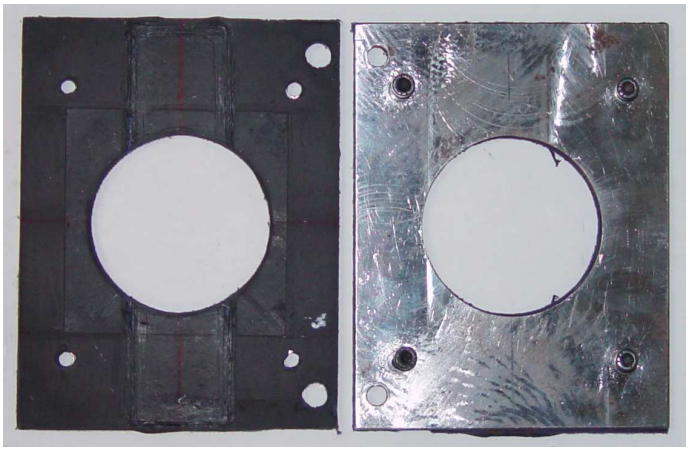
파괴의 개시 부분에서 하중이 증가하면 전체파괴가 생기기 전에, 시편에 탄성에너지가 축적되어 압축 영역에서 섬유의 미소 좌굴과, 섬유와 모재사이의 계면에서 박리가 생길 수 있다. 개시 부분의 마지막 단계에서, 하중이 임계값에 도달하면 복합재료는 인장 및 층간전단강도의 크기 여부에 따라서 인장 혹은 전단 파괴가 발생한다. 이때 취성재료인 경우 급격한 파괴가 발생하며, 연성재료는 점진적인 파괴가 발생하여 에너지를 좀 더 흡수한다.

Photo. 5에 본 연구에서 사용된 시험편의 고정 지그를 나타냈다. 평판과 시험편의 원형고정(Circular clamping)지지 조건을 갖는 구조로 되어있다. 또한 이러한 시험편을 지지하는 경계조건은 기존의 연구논문[33-36]에서 나타낸 바와 같이 복합재료 적층판의 거동에 절대적인 영향을 미친다. 고정된 시험편의 중앙에 강구가 정확히 관통되게 하기 위해 에어건의 총구 둘레에 레이저 빔을 부착하였다. 또한 강구의 발사는 에어건의 챔버(Chamber)에 의해 압축된 공기를 이용하였으며, 항공기나 자동차 부품 충돌테스트 속도인 2-8bar(60 m/s-130

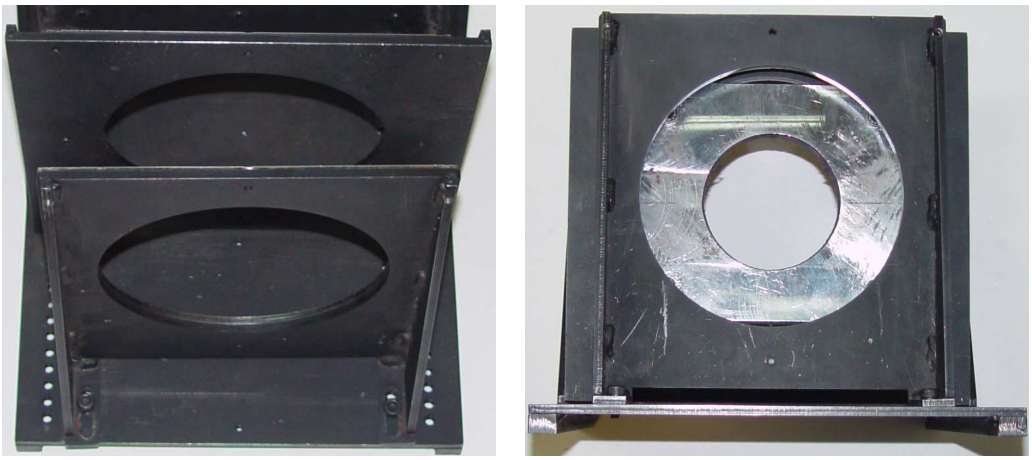
m/s)의 충격속도를 낼 수 있는 충격시험 장치이다. 본 충격시험기의 속력의 측정은 Ballistic screen sensor를 사용하였으며, 모두 4개의 스크린 센서를 부착시켰다. 강구의 충격속도는 시험편의 앞·뒤에 설치된 4개의 볼 스크린 센서에 의해 강구가 두 정점 간을 통과하는 시간을 체크하여 측정하였으며, 시험편의 흡수에너지 비는 충격 직전과 충격 직후 강구의 운동에너지 차에 충격 직전 에너지를 나누어서 측정하였다. 충격실험 후 시험편에 발생한 섬유파단, 크랙패턴 및 관통모드를 판별하기 위해 본 연구에서는 고해상도 디지털 카메라를 이용하여 관찰하였다.

본 연구에 사용된 실험장치 구성은 Fig. 11, Photo. 5에 나타낸 것과 같이 공기를 압축시키는 압축기와 에어건 압력을 조절하는 게이지, 강구속도를 측정하는 Ballistic screen sensor 및 오실로스코프와 시험편 고정 지그로 구성되어 있다. 실험방법으로는 압축기에서 공기를 압축시킨 후 게이지로 압력(2, 4, 6, 8bar)을 조절한다. 레이저 빔으로 시험편의 중심을 맞춘 후 에어건으로 강구를 발사시킨다. 발사된 강구는 첫 번째, 두 번째 센서를 지나 지그에 고정된 시험편을 관통시킨 후 세 번째, 네 번째 센서를 지나고 스톱박스(Stop box)안으로 들어간다.

시험편을 고정한 지그는 실험 시 ASTM D-3736의 평판용 지그를 참고하여 지그를 제작하였다. 또한, 충격 시 시험편의 변형에 의한 미끄러짐을 최소화하고 충격 시 전단파에 의한 진동으로 에너지가 손실되는 것을 방지하기 위한 제진대의 역할로 고무패드를 지그 사이에 위치시켰다.



(a) For clamping specimen



(b) For clamping jig

Photo. 5 Circular clamping fixtures

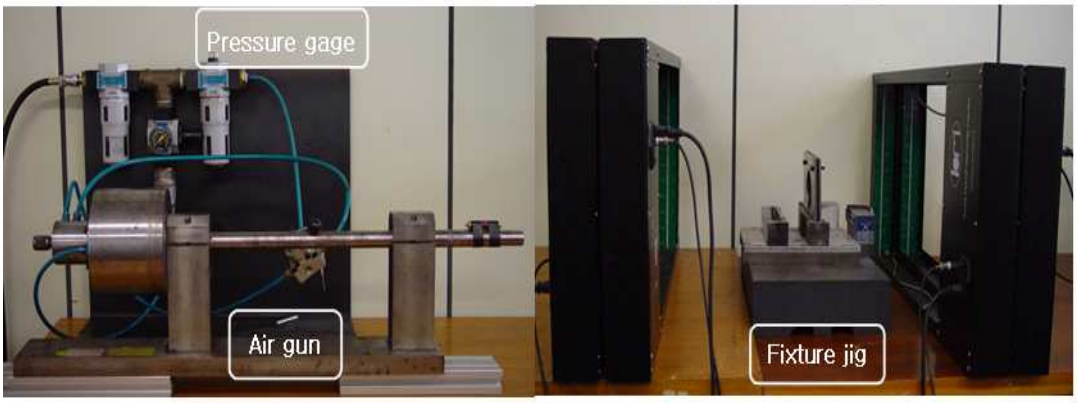


Photo. 6 High velocity impact test device

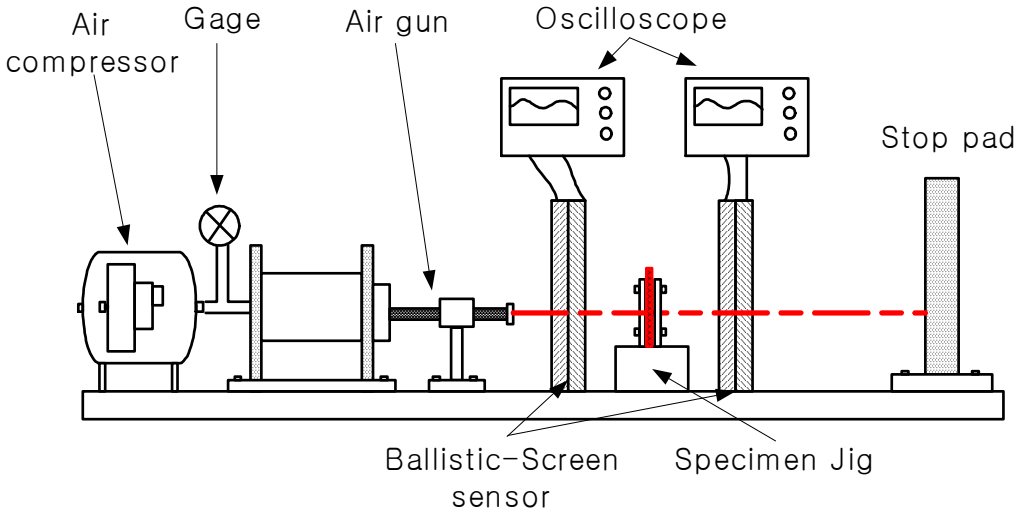


Fig. 11 High velocity impact test setup

제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 인장강도

1. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 인장강도

Fig. 12는 섬유배향함수가 f=1인 경우 인장하중(P)과 신장량(δ)의 관계를 복합판재의 종횡방향에 대하여 나타낸 그림이다. 0°방향에서는 섬유함유율이 20wt%인 경우가 10wt%인 경우보다 하중-변위가 향상되는 것은 당연하나, 90°방향에서는 섬유함유율이 10wt%인 경우가 20wt%인 경우보다 변위가 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 13은 섬유배향함수가 f=0.9인 경우 인장강도(σ)와 변형률(ε)과의 관계를 복합판재의 종횡방향에 대하여 나타낸 그림이다. GFRP 복합판재의 0°방향에서는 섬유함유율이 20wt%인 경우가 10wt%인 경우보다 인장강도와 변형률이 높게 나타났으나, 90°방향에서는 섬유함유율이 10wt%, 20wt%인 경우 모두 변형률이 유사하게 나타났다. 이는 90°방향에서는 강화재인 섬유 필라멘트의 분리로 인하여 섬유함유율 영향보다는 모재인 폴리프로필렌의 성질에 의존함을 알 수 있었다.

Fig. 14는 섬유함유율과 섬유배향상태를 변화시켜서 제작한 판재의 인장강도($\sigma_{[0°]}$) 값과 섬유배향함수(f)와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 GFRP 복합재료의 인장강도는 섬유배향 상태가 무작위인 등방성에서 한 방향인 이방성으로 일정하게 증가되었다. 섬유함유율 10wt%에서는 f=1인 경우가 f=0보다 강도 값이 약 33MPa 향상되었고, 섬유함유율 20wt%에서는 f=1인 경우가 f=0보다 강도 값이 약 53MPa 향상되었고, 섬유함유율 30wt%에서는 f=1인 경우가 f=0보다 강도 값이 약 61MPa 향상되었고, 섬유함유율 40wt%에서는 f=1인 경우가 f=0보다 강도 값이 약 76MPa 향상됨을 알 수 있었다.

Fig. 15는 섬유함유율과 섬유배향상태를 변화시켜서 제작한 GFRP 복합재료의 인장강도($\sigma_{[90°]}$) 값과 섬유배향함수(f)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 f=0.7에서는 복합판재의 강도 값이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 16은 GFRP 복합재료의 인장강도(σ_{θ})와 섬유배향함수(f)와의 관계를 나타낸 그림이다. GFRP 복합재료에서 0°방향의 인장강도($\sigma_{[0°]}$)는 등방성(f=0)에서 이방성(f=1)이 될수록 섬유함유량과 섬유배향상태에 비례하여 일정하게 증가되었다. 이는 GFRP 복합재료에서 하중이 가해질 때 강화섬유가 대부분의 하중을 흡수하므로 하중지지 방향의 섬유함유량의 증가는 강화효율의 증가를 의미한다. 섬유배향상태가 등방성인 f=0일 때는 0°방향 인장강도($\sigma_{[0°]}$)와 90°방향 인장강도($\sigma_{[90°]}$)는 일치하나, 90°방향 인장강도($\sigma_{[90°]}$)는 이방성이 될수록(f가 커질수록) 인장강도 값 차이가 크게 나타났다. 이는 섬유 필라멘트 가닥수가 약 400개로 이루어진 얀 섬유가 배향된 길이방향에 대하여 수직방향으로 인장하중이 가해질 때 스트랜드의 필라멘트 분리는 균일단면에서 핀홀을 가질 때와 같은 응력집중 효과로 인하여 인장강도 값이 작게 나타났다. Fig. 11의 실험결과로부터 복합재료가 외부로부터 하중을 받을 경우에 섬유함유율과 섬유배향상태를 알면 복합재료의 인장강도 값을 예측할 수 있다.

Fig. 17은 GFRP 복합재료의 섬유배향 종횡방향 인장강도비($\sigma_{[0°]}$ / $\sigma_{[90°]}$)와 섬유배향함수(f)와의 관계를 나타낸 그림이다. GFRP 복합재료는 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.

섬유배향함수 f=1에서는 섬유함유율이 20wt%인 경우가 10wt%인 경우보다 인장강도 비가 약 2배 정도 높아짐을 알 수 있고, 섬유함유율이 30wt%인 경우가

20wt%인 경우보다 인장강도 비가 약 1.4배 정도 높아짐을 알 수 있다. 또한, 섬유함유율이 40wt%인 경우가 30wt%인 경우보다 인장강도 비가 약 1.2배 정도 높아짐을 알 수 있다. 이는 실험에 사용된 유리섬유는 필라멘트 가닥수가 약 400개로 이루어진 스트랜드의 얀 섬유이므로 섬유함유율이 높을수록 유리섬유와 폴리프로필렌과의 함침이 잘 되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 17에서 섬유배향함수 f=0인 경우는 섬유배향상태가 등방성이므로 섬유함유율에 관계없이 복합판재의 종횡방향 인장강도의 값이 같고, 섬유배향상태가 이방성인 섬유배향함수 f=1인 경우는 섬유함유율이 증가할수록, 복합판재의 종횡방향 인장강도의 값 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 18은 모재(PP)와 복합판재와의 인장강도비(σ_f / σ_{pp})를 섬유배향함수(f)에 따라 비교한 그림이다. GFRP 복합재료에서 0°방향의 인장강도($\sigma_{[0°]}$)는 등방성에서 이방성이 될수록 섬유함유율과 섬유배향상태에 비례하여 일정하게 증가되었다. 섬유배향상태가 등방성인 f=0 일 때는 0°방향 인장강도($\sigma_{[0°]}$)와 90°방향 인장강도($\sigma_{[90°]}$)는 일치하나, 90°방향 인장강도($\sigma_{[90°]}$)는 이방성이 될수록 (f가 커질수록) 인장강도비가 감소하였다. 이는 섬유가 배향된 강화섬유의 폭(법선)방향으로 인장하중이 가해질 때 섬유 필라멘트의 분리는 균일단면이 핀홀을 가질 때와 같은 응력집중 효과로 인하여 순수 모재의 인장강도 값보다 더 낮게 나타났다.

Fig. 19, 20은 0°방향 인장강도($\sigma_{[0°]}$), 90°방향 인장강도($\sigma_{[90°]}$)를 섬유함유율과 비교한 그래프이다. Fig. 19에서는 섬유함유율이 증가 할수록 인장강도가 증가하였다. 섬유배향함수가 증가할수록(이방성, 일방향 복합재료) 인장강도가 더 크게 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 20에서는 이방성(일방향 복합재료)이 될수록 인장강도가 10wt%보다 감소하였다. 섬유배향함수가 f=0.5 이상에서는 순수 모재의 인장강도 20.52MPa 보다 더 적게 나타났다.

Fig. 21에서는 인장강도 비($\sigma_{f=1} / \sigma_{f=0}$)와 섬유함유율(wt%)에 대한 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 21(a)는 복합재료 0°방향에서 인장강도 비가 섬유함유율의

증가와는 관계없이 일정하게 나타났다. Fig. 21(b)는 복합재료 90°방향에서 인장강도 비가 섬유함유율의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 이는 하중이 작용할 때, 모재인 폴리프로필렌이 하중을 받고 강화재인 유리섬유 얀의 필라멘트 가닥수가 약 400개로 이루어져 있으므로 하중작용 시 섬유 필라멘트 길이방향에 수직방향으로 섬유 필라멘트들이 쉽게 분리되기 때문에 강화재의 역할을 못함을 알 수 있다.

Fig. 22는 폴리프로필렌 판재에 대한 복합 판재의 인장강도 비($\sigma_{f=1}/\sigma_{PP}$)와 섬유함유율(wt%)의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 22(a)는 유리섬유의 길이방향으로 하중이 가해지기 때문에 0°방향에서 인장강도 비가 섬유함유율이 높을수록 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 22(b)는 유리섬유 얀의 필라멘트 길이방향에 수직으로 하중이 가해지기 때문에 얀인 유리섬유 필라멘트 분리로 인하여 90°방향에서 인장강도 비가 섬유함유율이 높을수록 감소함을 알 수 있다. 그러므로 향후 GFRP 복합재료 제조 시 필라멘트 가닥수가 많은 것 보다는 적은 유리섬유 얀을 사용하는 것이 섬유길이방향에 대하여 수직방향으로 보다 큰 강도를 요구할 수 있을 것이다.

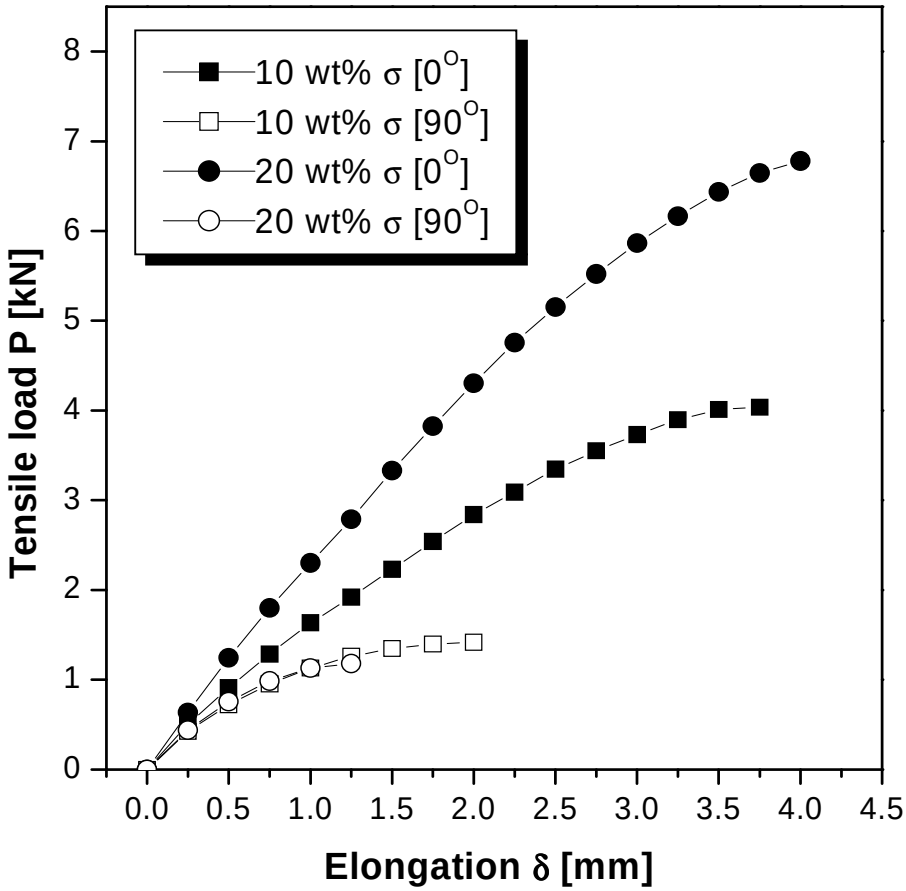


Fig. 12 Tensile load-elongation response for fiber orientation function J=1

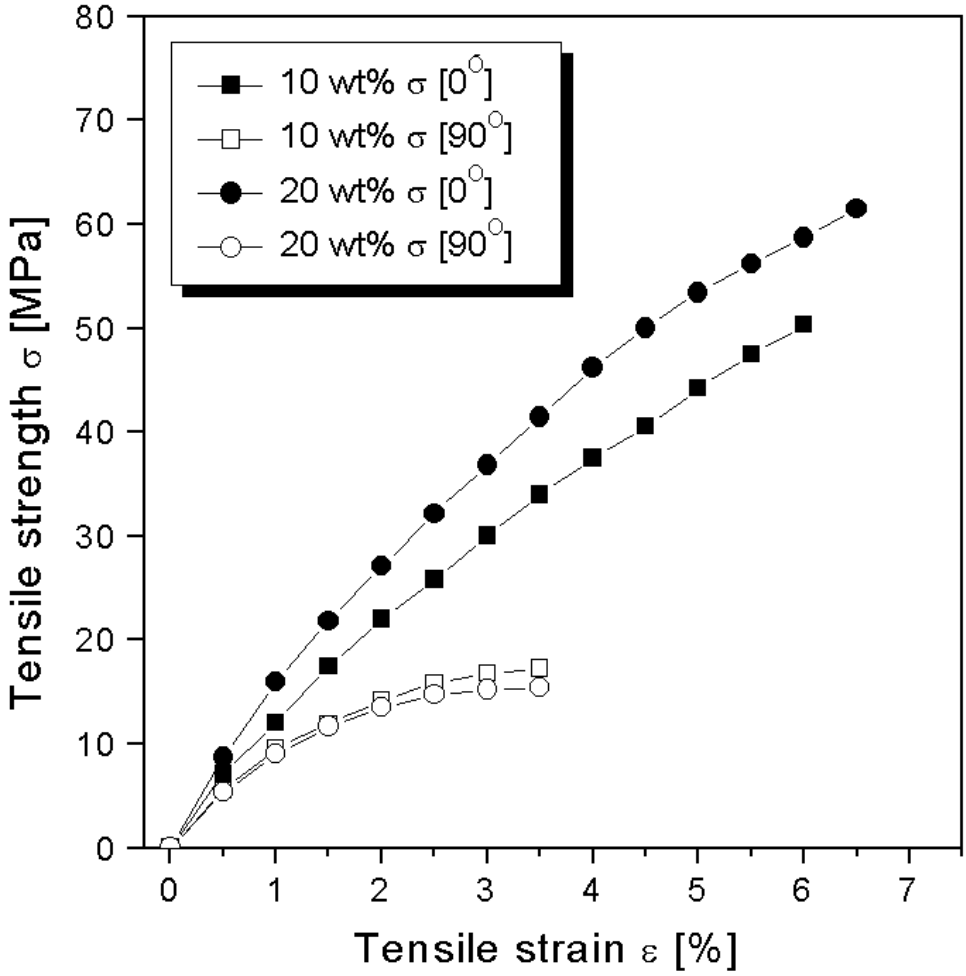


Fig. 13 Tensile strength-strain response for fiber orientation function f=0.9

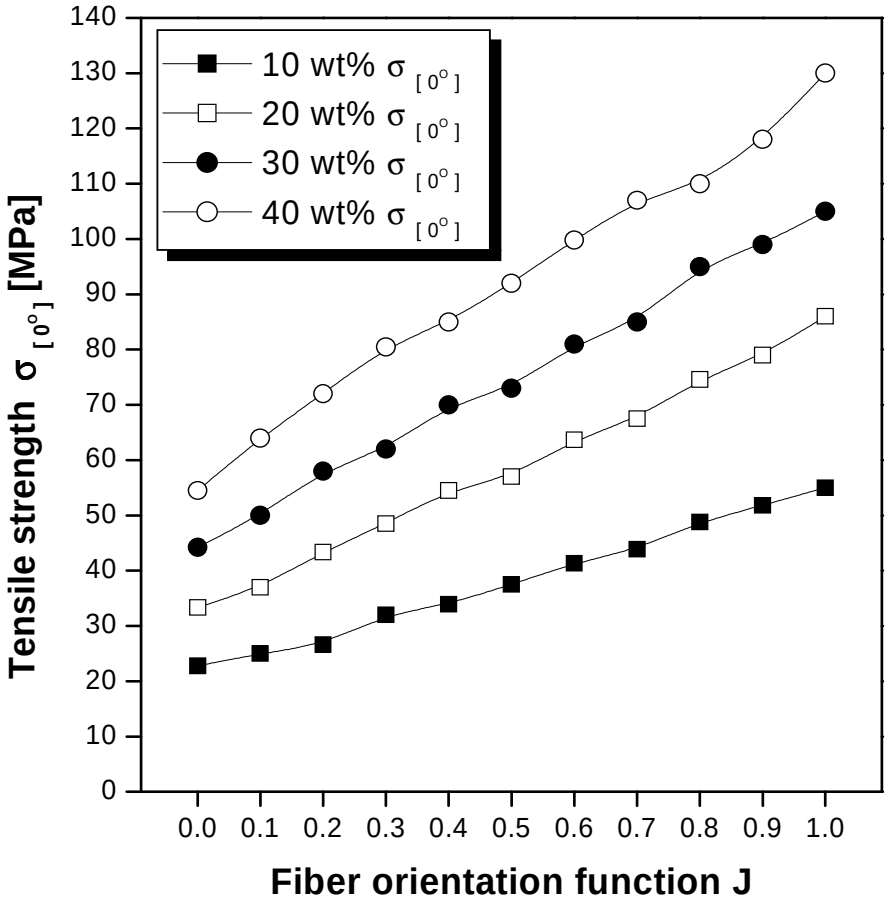


Fig. 14 Relationship between tensile strength $\sigma_{[0°]}$ and fiber orientation function J

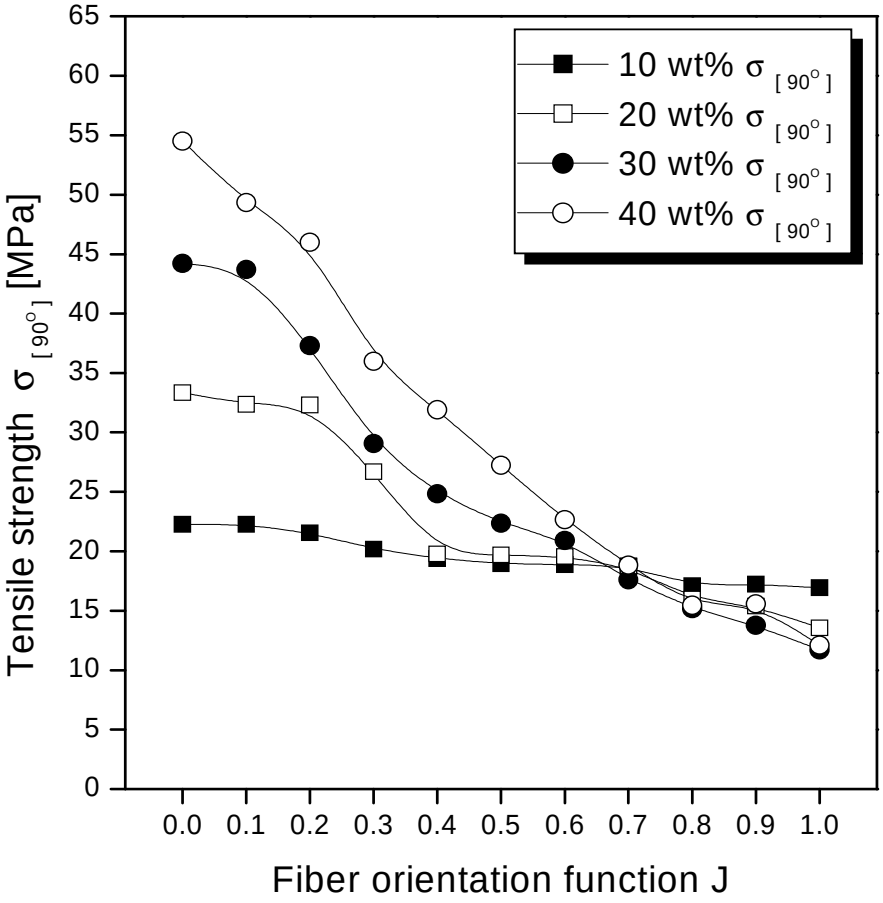


Fig. 15 Relationship between tensile strength $\sigma_{[90^\circ]}$ and fiber orientation function J

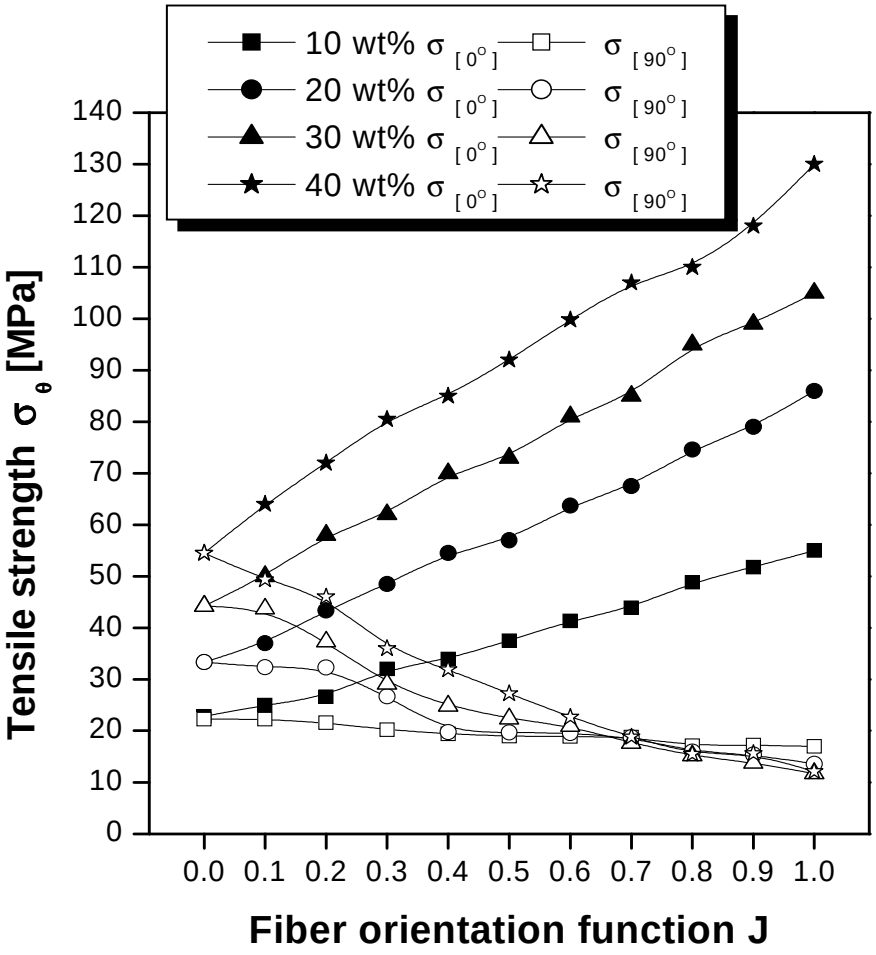


Fig. 16 Relationship between tensile strength (σ_θ) and fiber orientation function J

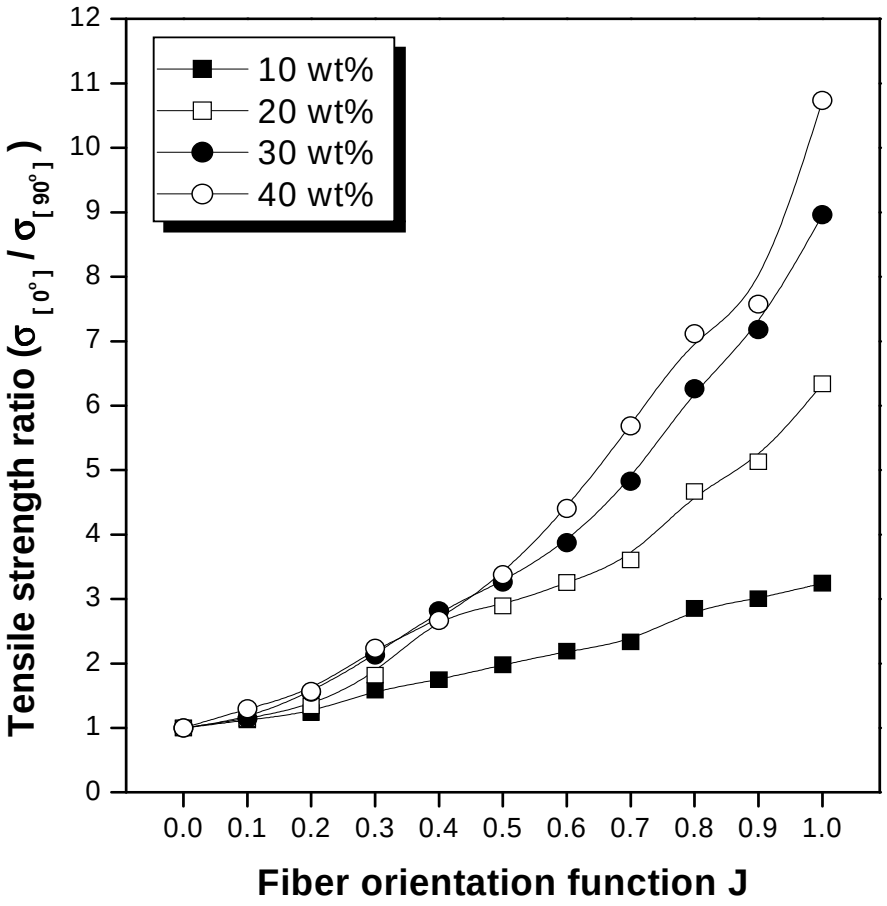
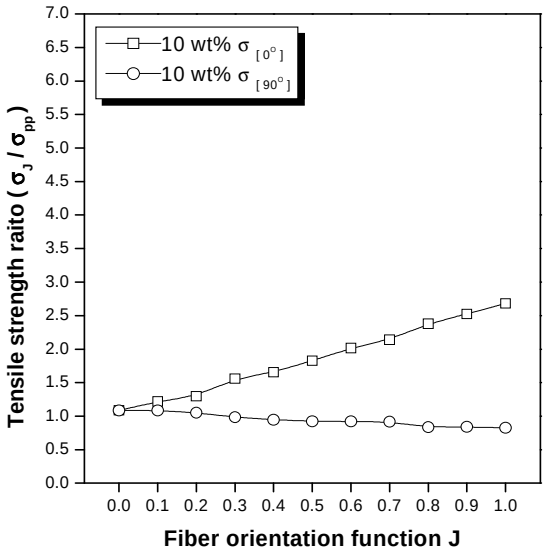
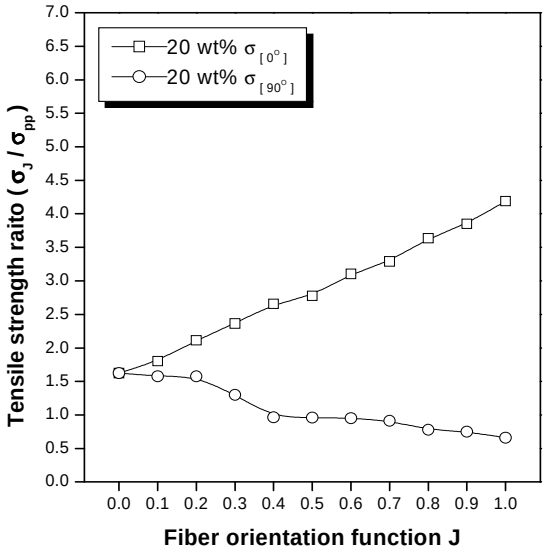


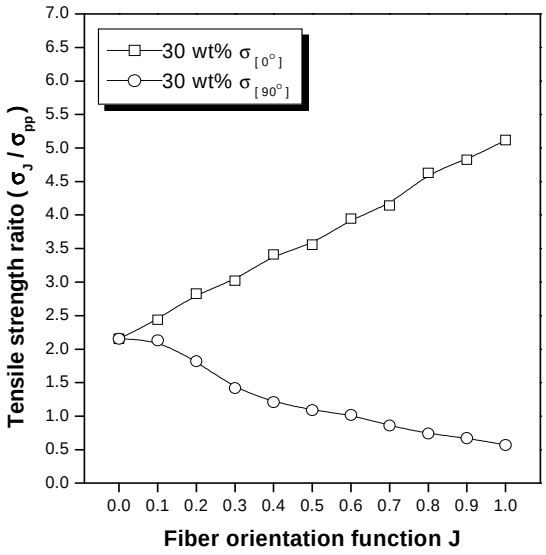
Fig. 17 Relationship between tensile strength ratio ($\sigma_{[0°]}/\sigma_{[90°]}$) and fiber orientation function J


10 wt% σ [0°]
10 wt% σ [90°]
Tensile strength raito (σJ / σpp)
Fiber orientation function J
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

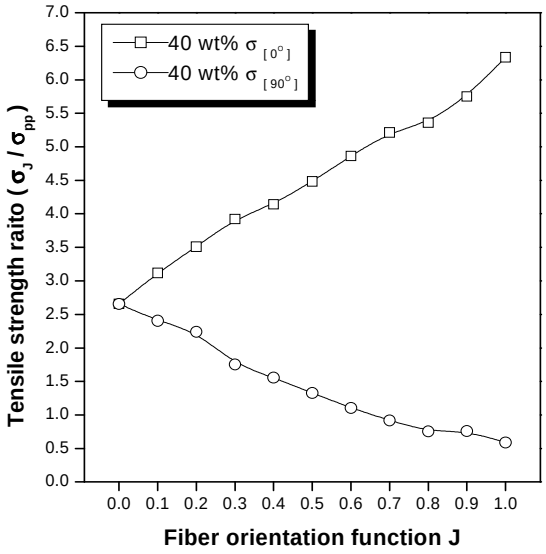
(a) 10wt%


20 wt% σ [0°]
20 wt% σ [90°]
Tensile strength raito (σJ / σpp)
Fiber orientation function J
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
5.5
6.0
6.5
7.0
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

(b) 20wt%



(c) 30wt%



(d) 40wt%

Fig. 18 Relationship between tensile strength ratio (σ_{θ} / σ_{PP}) and fiber orientation function J

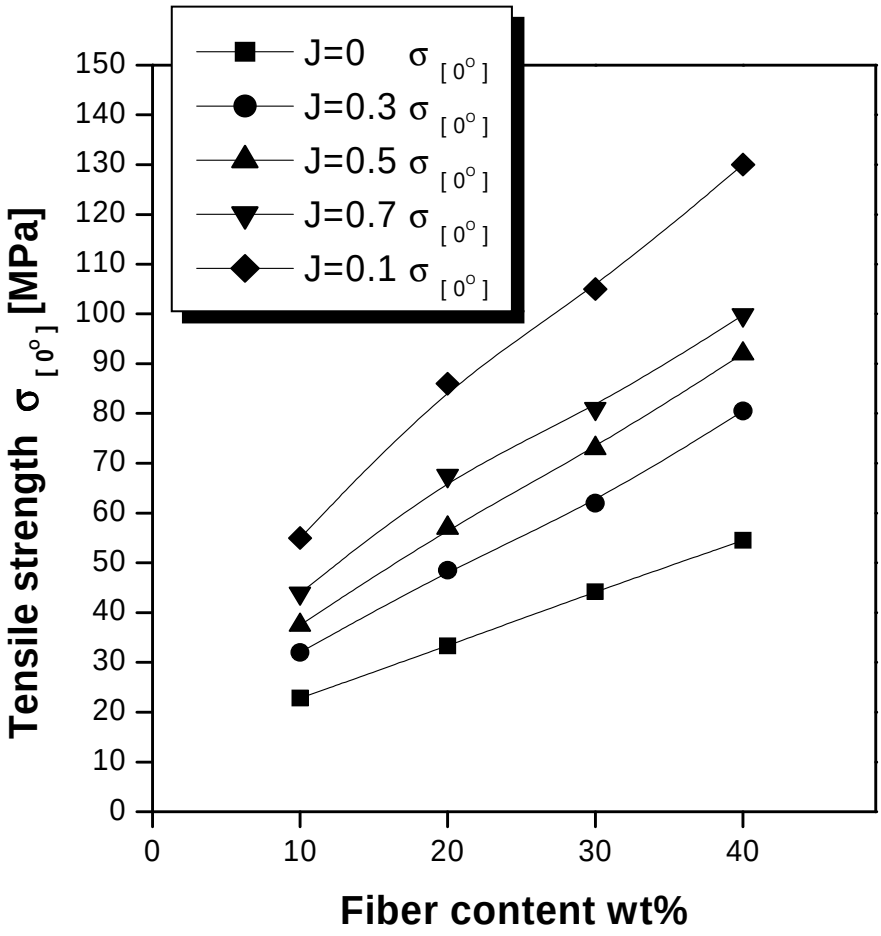


Fig. 19 Relationship between tensile strength ($\sigma_{[0°]}$) and fiber content (wt%)

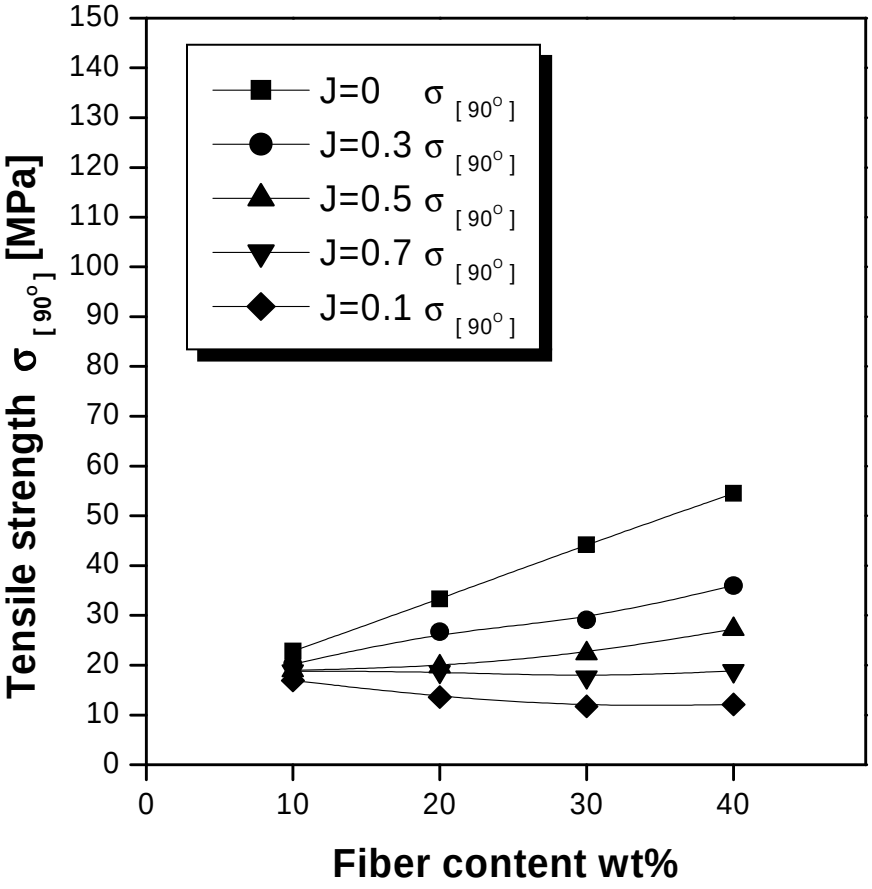
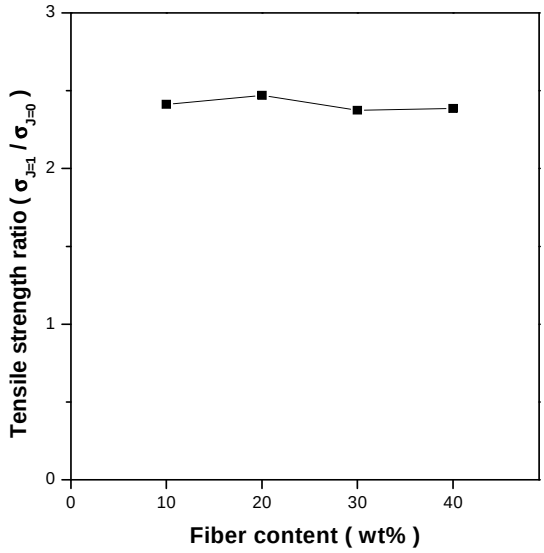
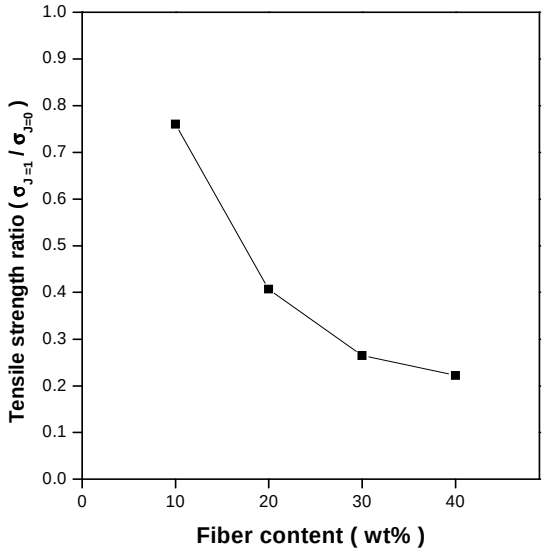


Fig. 20 Relationship between tensile strength ($\sigma_{[90°]}$) and fiber content (wt%)

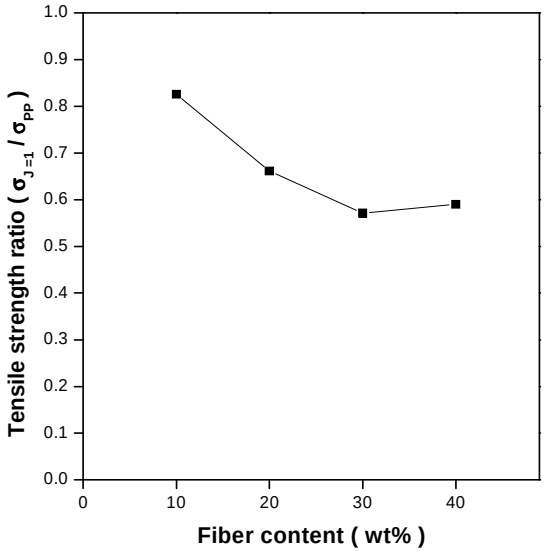


(a) 0° Direction

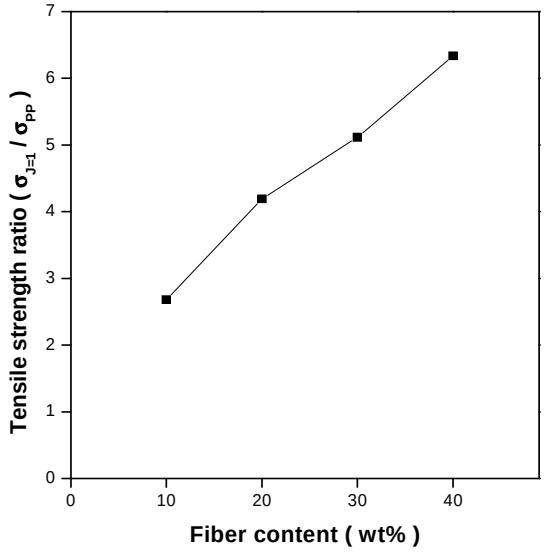


(b) 90° Direction

Fig. 21 Relationship between tensile strength ratio($\sigma_{J=1}/\sigma_{J=0}$) and fiber content (wt%)



(a) 0° Direction



(b) 90° Direction

Fig. 22 Relationship between tensile strength ratio($\sigma_{J=1}/\sigma_{PP}$) and fiber content (wt%)

GFRP 복합재료의 인장강도 실험식을 구하기 위하여, 0°방향 및 90°방향 복합재료의 인장시험 강도 값을 최소자승법으로 Polyfit하였다. 0°방향은 선형 최소자승법에 의해서 구했고, 90°방향은 비선형 최소자승법에 의해서 구했다. 섬유배향함수와 섬유함유율을 감안하여, 본 연구에서 섬유배향함수와 섬유함유율을 대입하면 인장강도 값이 구해지는 실험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma_{[0^0]} = 1.12\{(\mathrm{wt\%}+10)+(\mathrm{wt\%}+22.32)\mathrm{J}\} \tag{14}$$

$$\sigma_{[90^0]} = (11.4+1.15\mathrm{wt\%})\mathrm{e}^{(0.034-0.0402\mathrm{wt\%})\mathrm{J}} \tag{15}$$

Fig. 23, 24에는 실험식으로부터 구한 인장강도 값과 본 실험에서 구한 인장강도 값이 근사한지를 비교하기 위한 것이다. 두 그림 모두 실험으로부터 구한 인장강도 값과 실험식으로부터 구한 인장강도 값이 잘 일치함을 나타내고 있다.

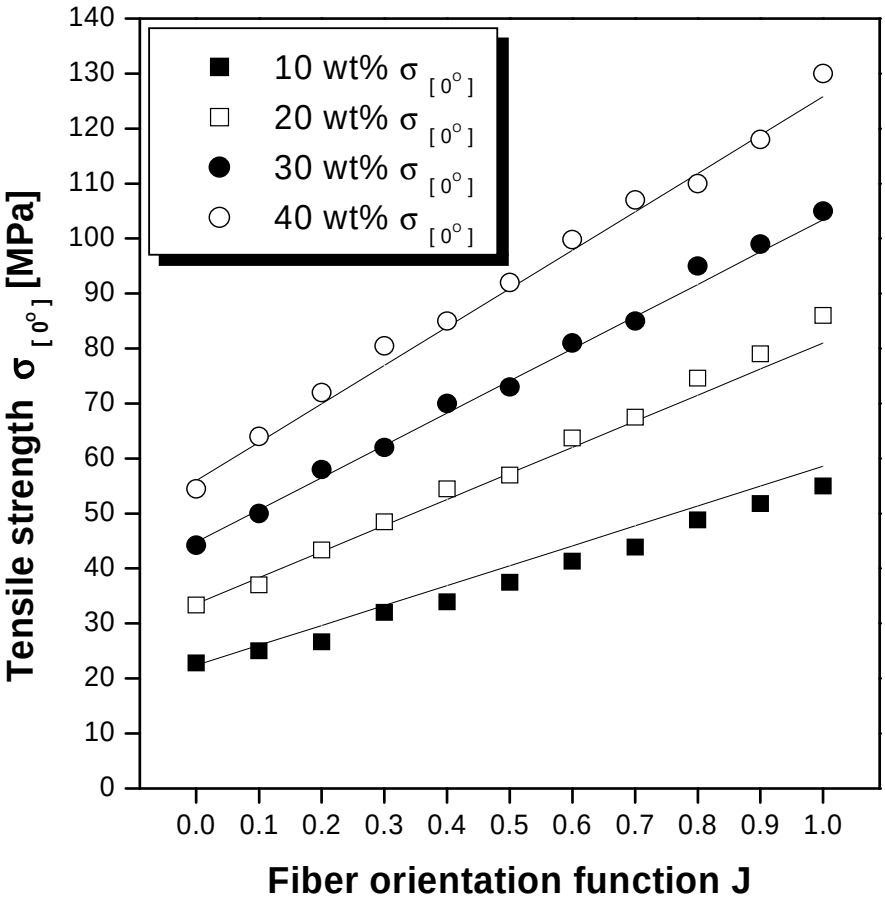


Fig. 23 Relationship between tensile strength($\sigma_{[0°]}$) of experimental equation and tensile strength of tensile test

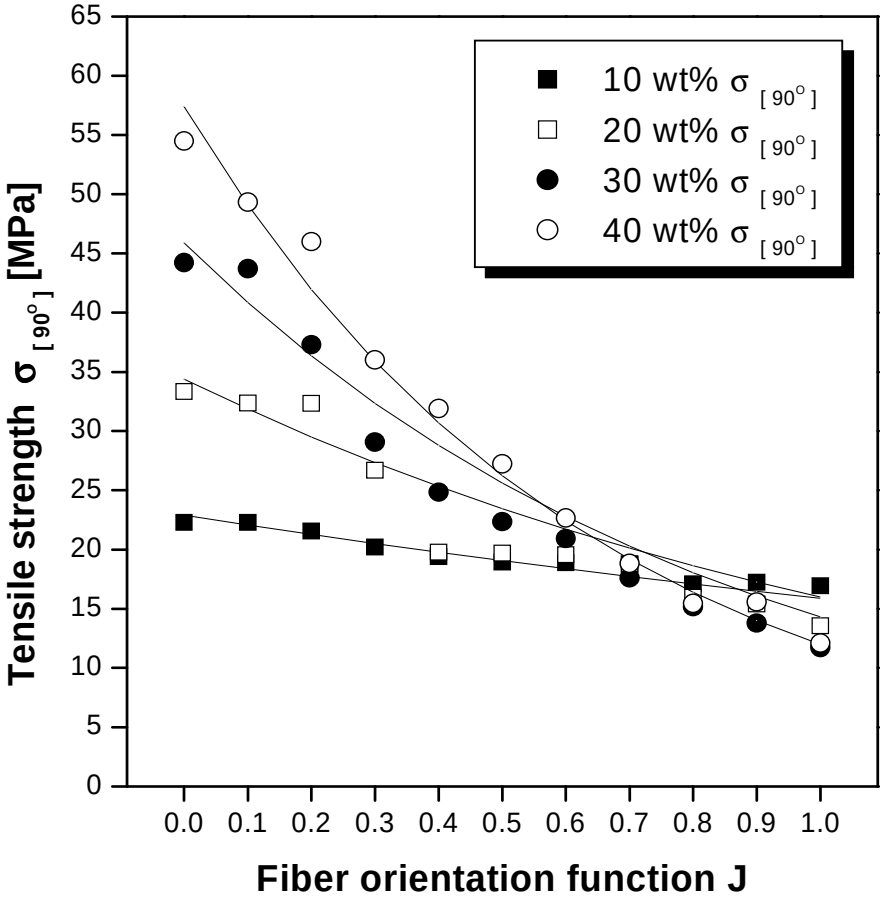


Fig. 24 Relationship between tensile strength($\sigma_{[90°]}$) of experimental equation and tensile strength of tensile test

2. 섬유배향이 일방향인 복합재료의 인장강도

Fig. 25는 섬유배향각을 Fig. 9와 같이 변화시켜 제작한 섬유배향이 일방향인 복합판재를 x 방향(θ= 0°)으로 인장시험 하여 얻은 인장강도(σ_a) 값과 섬유배향각(θ)과의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 섬유배향이 일방향인 복합판재의 인장강도 값은 섬유배향각 0°방향에서 90°방향으로 감소되었다. 또한, 섬유함유율이 20wt%인 경우가 10wt%인 경우보다 인장강도 값의 감소폭이 높게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 26은 모재인 폴리프로필렌(PP)과 섬유배향이 일방향인 복합판재와의 인장강도비 (σ_a / σ_{pp})를 섬유배향각 θ에 따라 비교한 그림이다. GFRP 복합판재에서 섬유함유율 10wt%와 20wt% 모두 섬유배향각 θ=0°에서 θ=90°방향으로 인장강도 비가 감소하였다. 이는 섬유함유율의 영향보다는 인장하중의 방향과 섬유배향각과의 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 일방향 섬유강화(θ= 0°, f=1) 복합판재를 x 방향(θ= 0°)으로 인장력을 가할 때 섬유배향각 θ=40°이상에서는 인장강도비가 모재인 폴리프로필렌(PP)의 인장강도 값보다 더 낮게 나타나므로 섬유강화 효과가 없음을 알 수 있다.

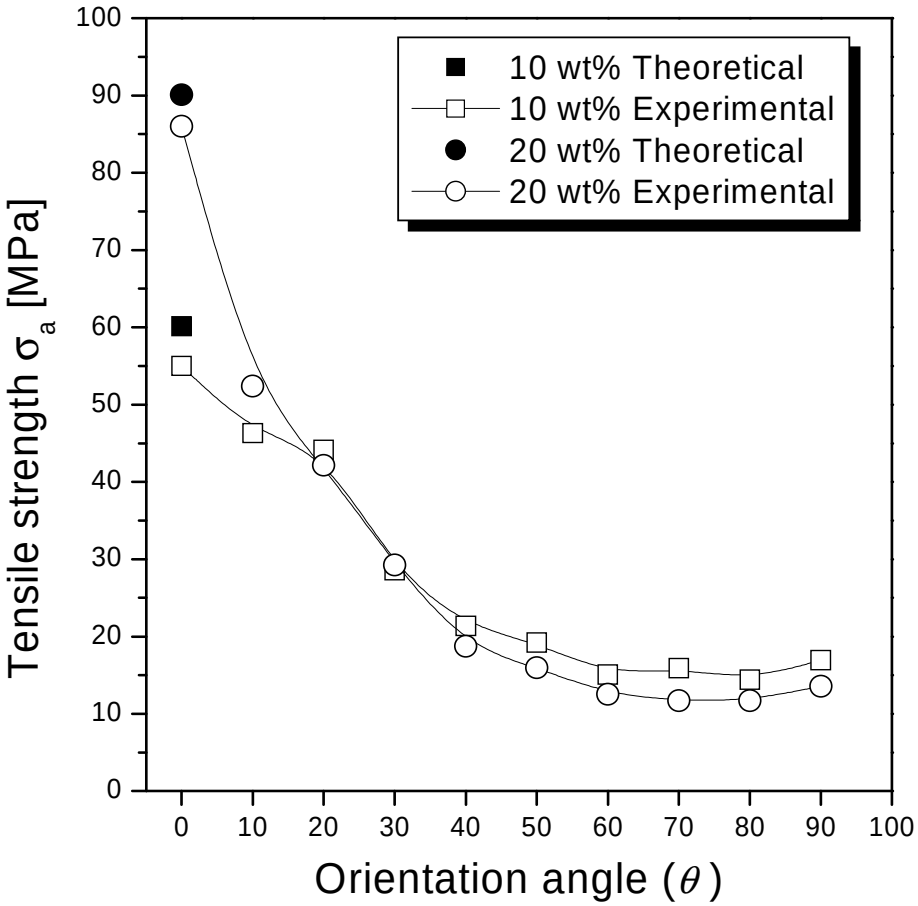


Fig. 25 Relationship between tensile strength σ_a and orientation angle θ

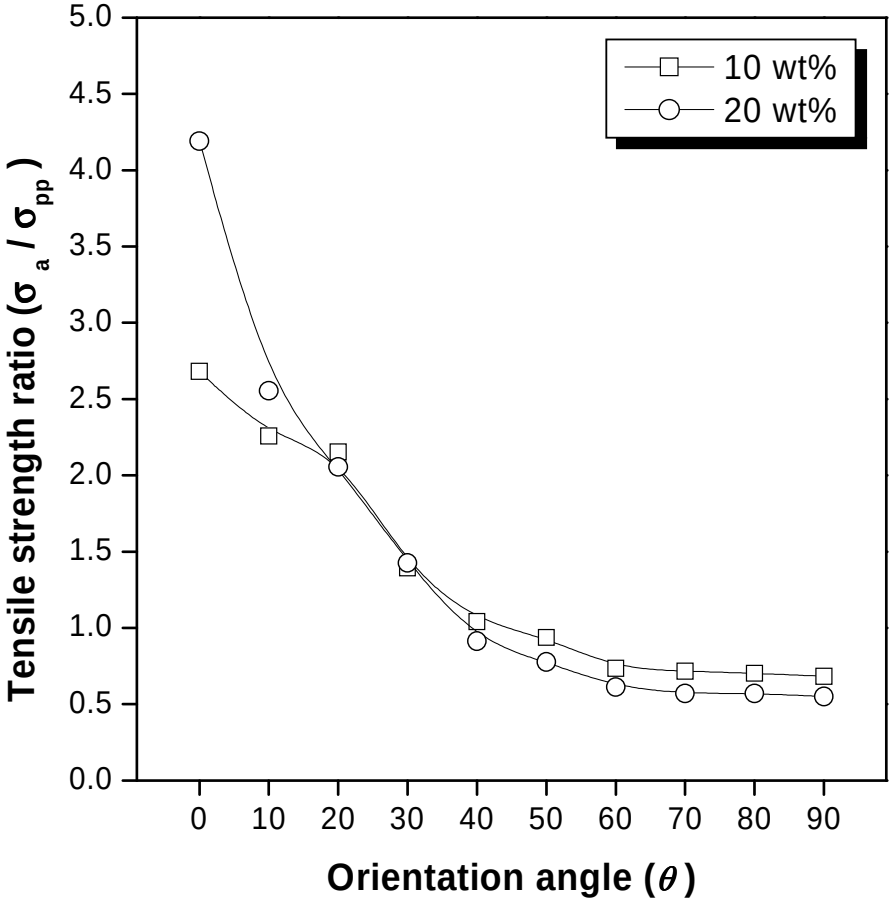


Fig. 26 Relationship between tensile strength ratio (σ_a / σ_{PP}) and orientation angle Θ

3. 섬유배향과 일방향 섬유배향각 변화에 따른 인장강도 비교

GFRP 복합재료에서 강화섬유는 인장에 대해서는 매우 강하므로 대부분의 외부하중을 담당하고, 모재는 하중의 지지보다는 강화섬유를 물리적인 손상과 주위환경으로부터 보호하는 기능을 가지고 있다.

섬유배향효율(η_J)은 식(16)과 같이 정의되며, 섬유배향 상태 변화에 따라 얼마만큼의 강도저하가 일어나는가를 예측하기 위한 중요한 인자이다. 즉, 섬유배향상태의 척도인 섬유배향함수(J)는 0에서 1사이에 있으며 0에 가까워지면 섬유배향은 무작위(Random)이고, 1에 가까워지면 섬유배향은 일방향이다. 그러므로 섬유가 일방향으로 배향된 복합재료의 섬유배향효율은 높게 나타나고, 무작위로 배향된 복합재료의 섬유배향효율은 낮게 나타난다[26].

$$\text{섬유배향효율}(\eta_J) = \frac{\text{섬유배향함수에 따른 인장강도}}{\text{섬유배향이 일방향인 복합판재의 인장강도}} \times 100 \qquad (16)$$

일방향 섬유배향각효율(η_a)은 식(17)과 같이 나타낸다.

$$\text{일방향 섬유배향각효율}(\eta_a) = \frac{\text{섬유배향각 변화에따른 인장강도}}{\text{섬유배향이일방향인복합판재의 인장강도}} \times 100 \qquad (17)$$

Fig. 27은 섬유배향효율(η_J)과 섬유배향함수(J)와의 관계를 나타낸 그림이다. 섬유배향함수가 증가할수록 섬유배향 효과가 증가함을 알 수 있다.

섬유배향효율(η_J)은 섬유함유율이 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%인 경우 모두 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 이는 복합재료 내의 섬유배향효율(η_J)은 섬유함유율의 영향은 받지 않고 섬유배향상태가 지배적인 영향을 미침을 알 수 있

었다.

그러므로 섬유강화 복합재료에서 섬유배향함수 f=0.1과 f=1인 경우를 비교해 보면 섬유배향효율은 f=1인 경우가 f=0.1인 경우보다 복합재료의 섬유배향 효과가 약 60% 높게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 28은 섬유배향각효율(η_a)과 섬유배향각(θ)과의 관계를 나타낸 그림이며 섬유배향각(θ)이 증가할수록 섬유배향 효과가 감소함을 알 수 있었다. 이는 일방향 섬유강화(θ=0°, f=1) 복합재료를 x 방향(θ=0°)으로 인장시험하면 섬유배향 방향으로 인장력을 받아서 파단에 이르기까지 일방향 섬유층에서 외력의 대부분을 받고 있지만, 섬유가 θ= 90°방향으로 배향 될수록 강화재인 유리섬유보다는 모재인 폴리프로필렌이 외부에서 가해지는 하중을 담당하기 때문에 섬유배향각효율이 낮아짐을 알 수 있다. 섬유배향각효율(η_a)은 섬유함유율이 10wt%인 경우가 20wt%인 경우 보다 높게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 29는 섬유배향상태를 변화시켜서 제작한 복합판재의 인장강도 값과 섬유배향각을 변화시킨 일방향인 복합판재의 인장강도 값을 비교하여 나타낸 그림이다. GFRP 복합재료의 섬유함유율 20wt%에서 섬유배향함수 f=0.2 인 경우와 섬유배향각 θ=20°인 경우는 인장강도 값이 유사하게 나타났다. 또한 GFRP 복합재료의 섬유함유율 10wt%에서도 섬유배향함수 f=0.3 인 경우와 섬유배향각 θ=30°인 경우는 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

이는 섬유함유율이 10wt%에서는 f=0.3과 θ=30°은 비슷한 섬유강화효과를 갖으며, 20wt%에서는 f=0.2와 θ=20°인 경우도 비슷한 섬유강화효과를 갖는 것을 알 수 있었다. 그러므로 GFRP 복합재료를 x 방향(θ= 0°)으로 인장력을 가할 때 섬유함유율이 높을수록 섬유배향함수 f와 섬유배향각 θ의 인장응력 값이 만나는 점이 높게 나타날 것으로 생각된다. 연구결과는 산업현장에서 GFRP 복합판재를 이용하는 최적 부품설계 또는 GFRP 복합판재의 설계 자료에 대한 지침이 될 것이다.

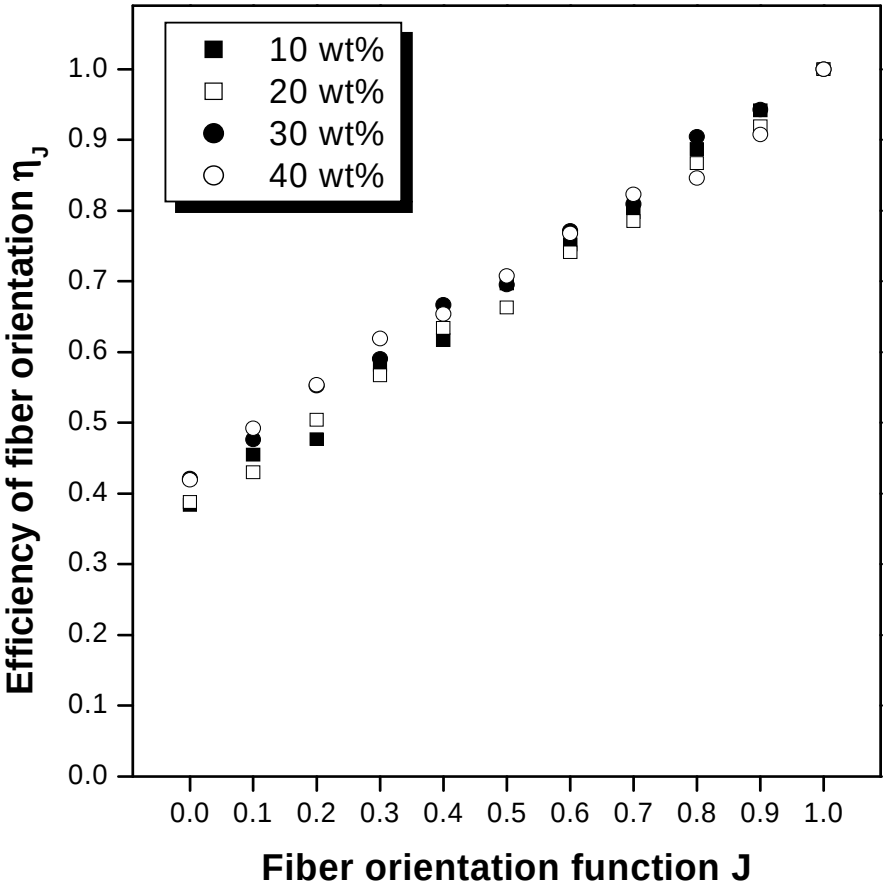


Fig. 27 Relationship between efficiency of orientation angle η_J and fiber orientation function J

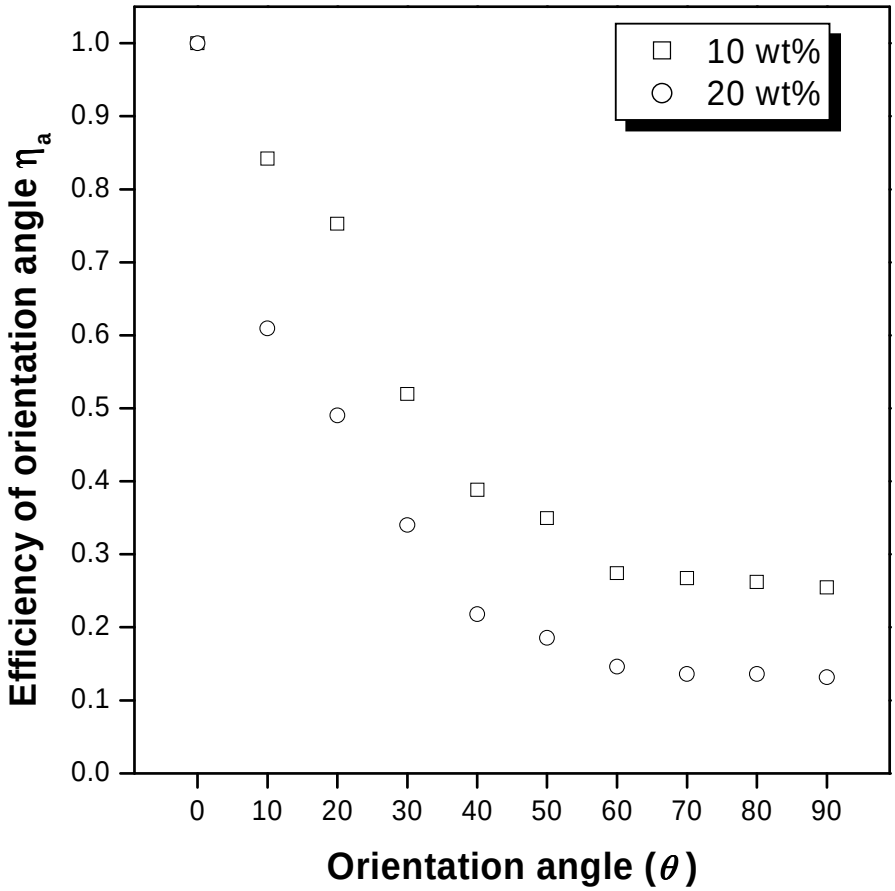


Fig. 28 Relationship between efficiency of orientation angle η_a and orientation angle θ

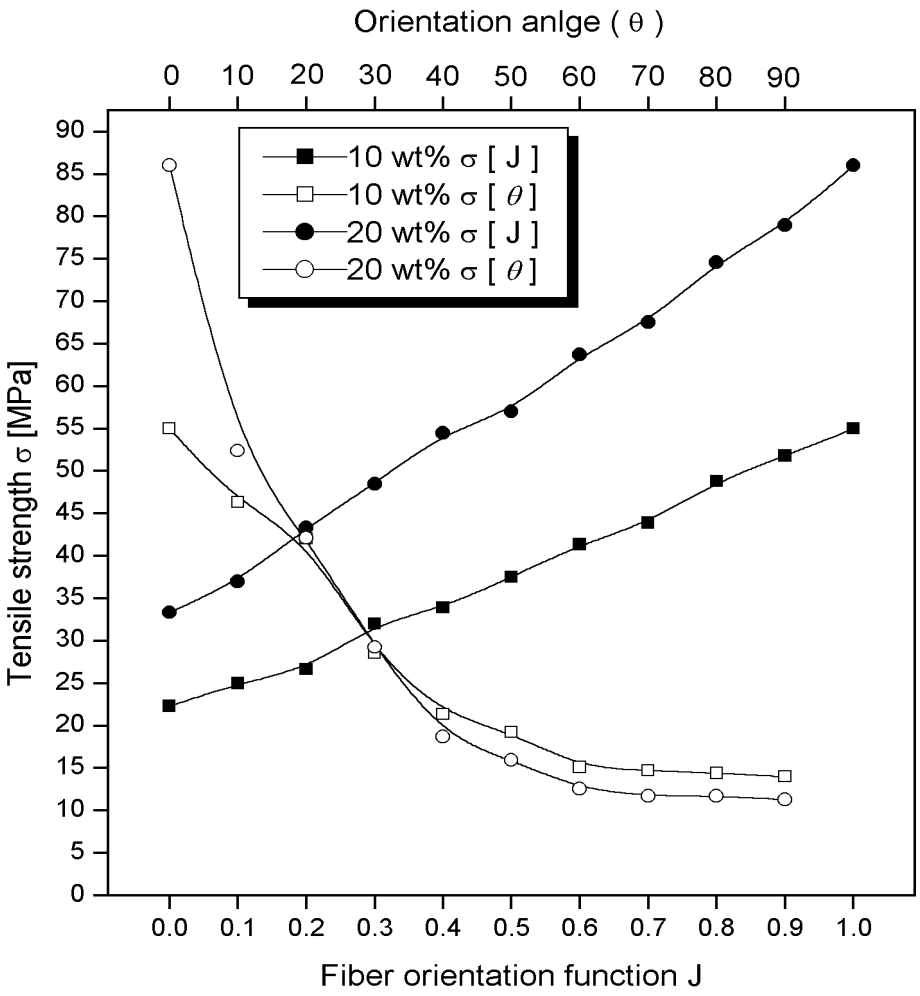


Fig. 29 Relationship tensile strength between fiber orientation function J and tensile strength σ_a

제 2 절 열화상 온도분포

1. 적외선 열화상 카메라의 인장강도 시험 시 온도분포

금속과 마찬가지로, 복합재료의 파괴도 재료내의 결함에서 시작된다. 이러한 결함은 깨진 섬유, 모재내의 흠 및 박리된(Debonded) 계면 등이 될 수가 있다. 파괴가 시작되면, 균열의 전파과정은 간단한 모델을 사용하여 기술할 수가 있다. 예를 들면, 균열선단의 모델을 Fig. 30과 같이 표시할 수가 있다. 이 모델은 GFRP 복합재료의 파괴동안에 발생하는 여러 가지 가능한 국부적인 파괴형태를 보여준다. 균열의 앞부분의 어느 정도 거리에서는 섬유가 손상을 입지 않은 상태로 존재한다. 균열근처의 높은 응력구역에서는 섬유가 파단되어 있다. 균열의 바로 뒤에서는 섬유가 기지로부터 인출(Pull-out)되어 있다. 어떤 복합재료에서는 섬유가 파단되기 전에 섬유가 모재로부터 박리될 수도 있으며, 어떤 경우는 균열이 전파된 후에도 섬유의 파단이 발생하지 않을 수도 있다. 취성의 섬유가 연성의 모재에 잘 접합되어 있을 경우에, 섬유는 균열선단 앞에서 끊어지는 경향이 있으며, 이 경우에 모재가 교량(Bridging)처럼 복합재료를 연결하고 있으며, 기지의 연성 때문에 복합재료는 네킹(Necking)이 발생하는 연성파괴가 발생한다. 이와 같이 국부적인 파괴 외에도, 균열이 두 플라이의 경계면에 도달하면, 균열이 분기(Split)하여 계면을 따라서 전파되어 층간 균열을 발생시킬 수 있다.

Fig. 31에서는 섬유배향함수와 파단속도의 관계를 나타낸 그림이다. 섬유배향함수가 높아질수록(이방성이) 될수록 파단속도가 늦어지는 것을 알 수 있었는데, 이는 섬유배향이 이방성으로 갈수록 파단이 늦게 진행되고 인장 응력 값이 높게 나타나는 것을 의미한다. 섬유배향함수 f=0, 0.1, 0.2, 0.3 에서는 파단속도가 똑같이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 32에서는 섬유배향함수와 최고온도의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 31에서의 파단속도가 늦어질수록 파단 최고온도도 낮아지는 것을 알 수 있고, 이방성(f=1)이 될수록 최고온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig. 31에서의 파단속도는 f=0-0.3까지 같았지만, 최고온도는 f=0.2가 가장 높았으며, f=0.2 이후부터는 최고온도가 낮아지는 것을 알 수 있다.

복합재료의 인장시험 동안 나타는 온도분포를 확인하기 위해, 시험 시작 후 파단이 끝날 때까지 온도분포를 측정하였다. 또한, 파단 최고온도 발생부분의 온도분포를 알아보기 위해 점(SP01)으로 나타내고, 파단 후 그 주변 부분의 온도를 알기위해 최고온도 발생부분 근처에 점(SP02)으로 나타내고, 마지막으로 최고온도 발생부분의 외곽지역에 점(SP03)로 나타내었다. 시편 전반적인 온도분포를 알아보기 위해 열화상 전 지역의 외곽을 제외하고 면적(AR01)을 잡아서 인장시험 동안의 온도분포를 측정하였다. 면적의 온도분포 측정되는 그래프에 최대응력 부분을 확인하여 면적(AR01)으로 측정한 모든 그래프에서 최대응력지점과의 관계를 고찰하였다.

Fig. 33은 복합재료가 아닌 모재를 성형하여 인장시험 시 온도분포를 측정한 그래프다. 온도분포가 전반적으로 균일하게 상승한다. Fig. 34는 10wt%, f=0.1인 복합재료의 인장시험 시 온도분포를 나타낸 그림이다. 인장시험 시 파단의 마지막 부분인 섬유 인출이 일어나는 부분에서 급격하게 온도가 상승한다. Fig. 35는 10wt%, f=0.3을 복합재료를 측정한 그림이다. 최대응력지점을 지나자마자 급격하게 온도가 상승하였다. 최대응력지점과 섬유 인출이 거의 비슷한 지점에서 일어났다.

Fig. 36은 20wt%, f=0일 때의 복합재료의 온도분포를 나타낸 그림인데, 최대응력 값을 지나고 온도상승이 점진적으로 커지다가 섬유 인출이 일어나는 부분에서 급격한 온도 상승을 보였다. Fig. 37은 20wt%, f=0.1일 때의 복합재료의 온도분포를 나타낸 그림에서는 최대응력 값을 지나고 섬유 인출이 중간정도 진

행 되었을 때 최고온도가 측정되었다.

섬유함유율이 20wt%인 경우가 총 파단시간이 길어지는 것을 알 수 있다. 총 파단시간이 길어지는 것은 파단속도가 낮아지는 것을 의미한다. 파단속도가 낮아지는데도 평균온도와 면적(AR01)의 최고온도가 비슷하게 측정되는 것은 섬유함유율이 높을수록 인장응력 값이 크기 때문이다.

면적(AR01)으로 측정한 모든 그림에서 최대응력지점부터 온도가 뚜렷이 상승하는 것을 알 수 있었다. 파단시간이 짧은 시편은 최대응력지점에서 급격한 온도상승을 보이고, 파단시간이 긴 시험편들은 최대응력지점부터 온도상승이 시작하는 것을 알 수 있다.

Fig. 38-40은 일방향 섬유배향각 복합재료의 온도분포를 나타낸 그림이다. Fig. 38(θ=20°, 30wt%), Fig. 39(θ=30°, 30wt%), Fig. 40(θ=60°, 30wt%)은 최대응력지점을 지나고 바로 파단이 일어나는 것을 알 수 있었다. 1절에서 보인 바와 같이 일방향 섬유배향각이 높아질수록 인장응력 값은 급격하게 낮아진다.

Fig. 38-40은 일방향 섬유배향각이 높아짐에 따라서 최고온도 값이 낮아지는 것을 알 수 있고, 파단 시간도 짧아지고, 온도 상승 또한 최대응력지점을 지나고 급격하게 상승한다.

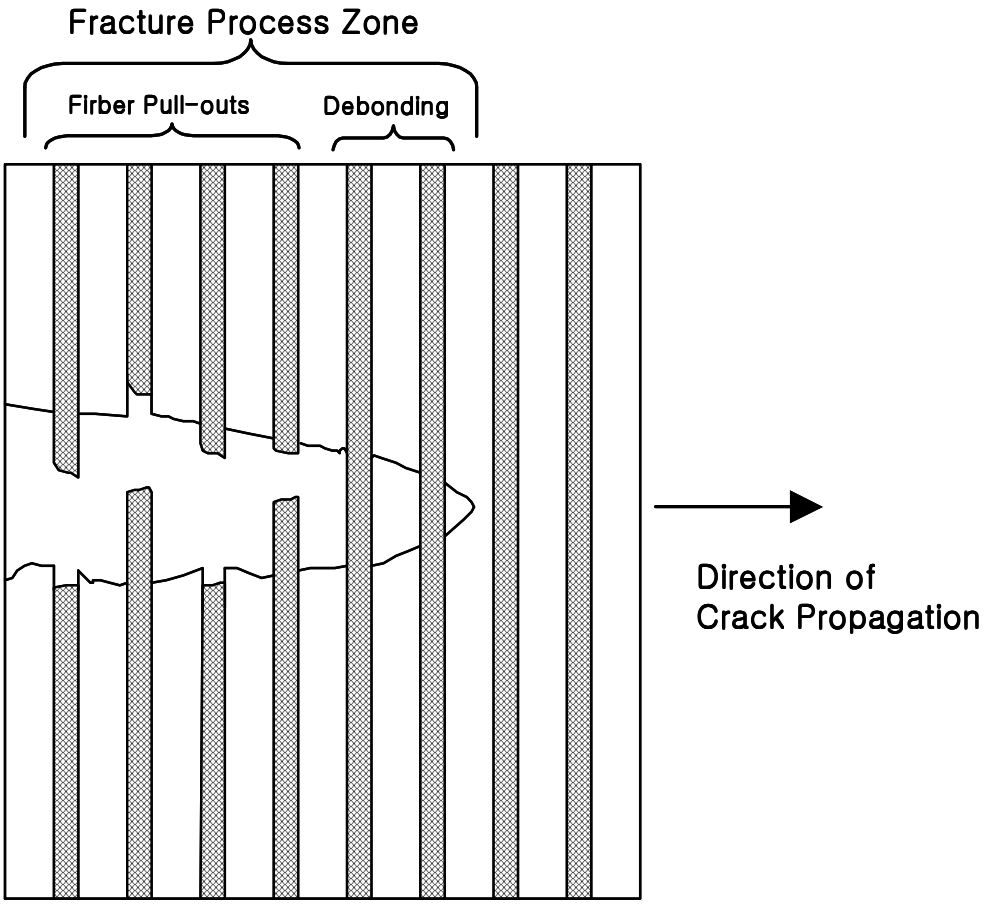


Fig. 30 Model of fracture process

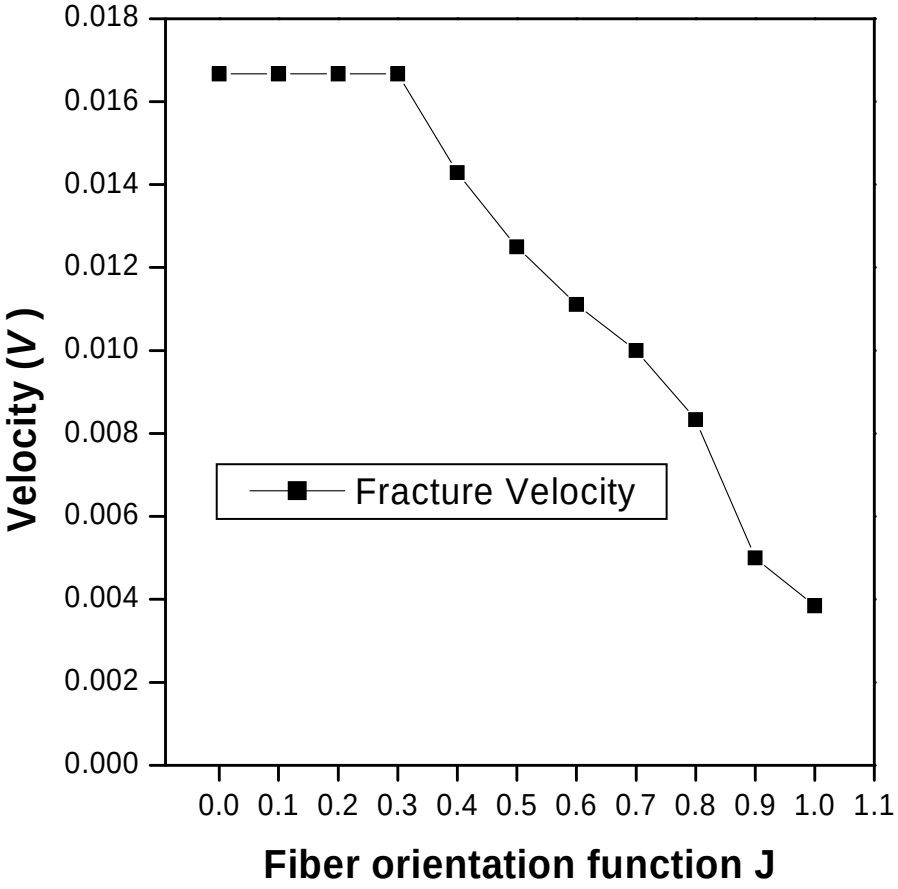


Fig. 31 Relationship between fracture velocity and fiber orientation function J

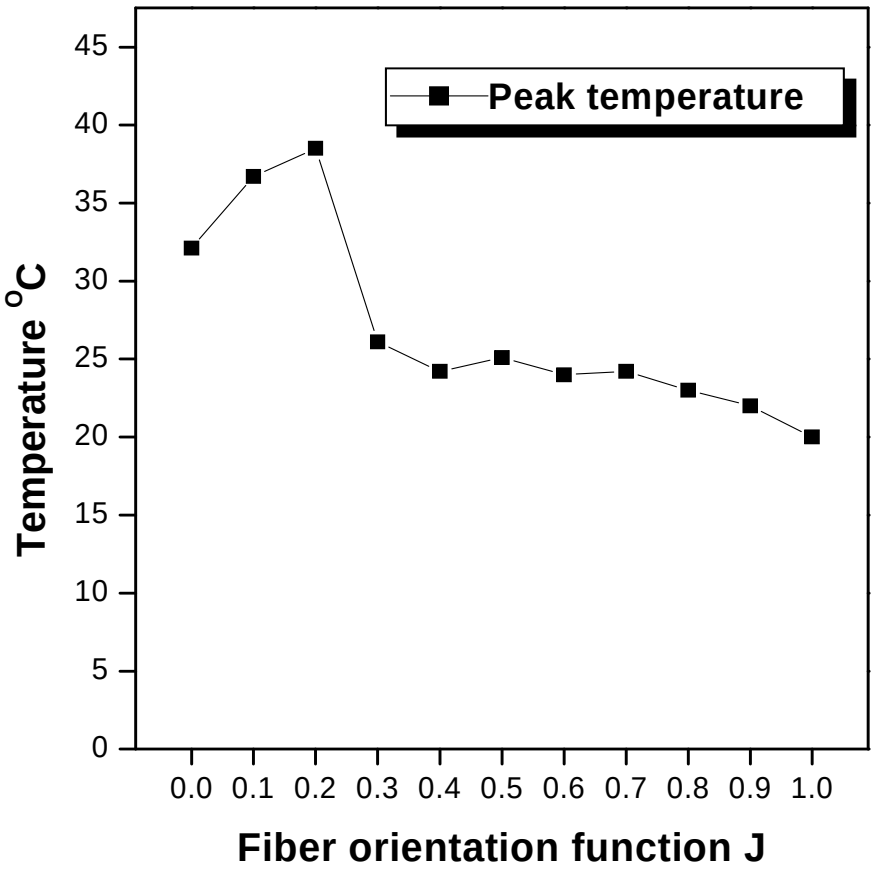
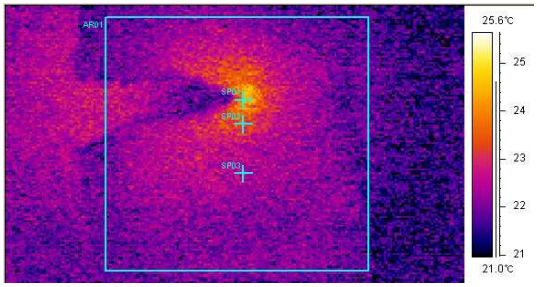
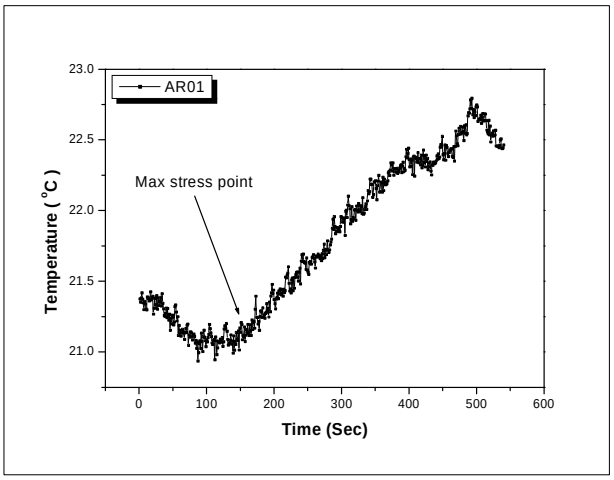


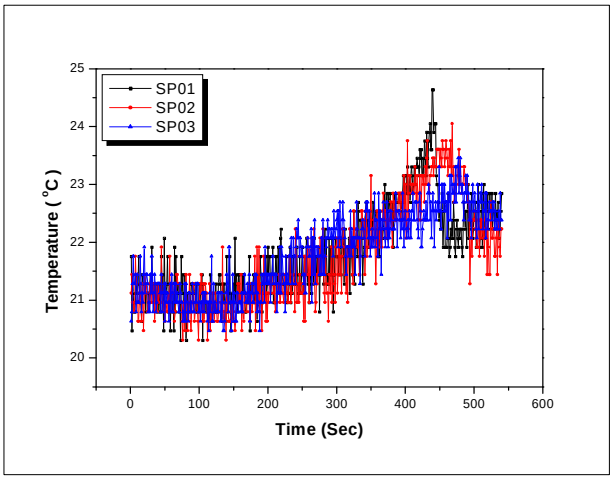
Fig. 32 Relationship between peak temperature and fiber orientation function J



(a) Temperature distribution

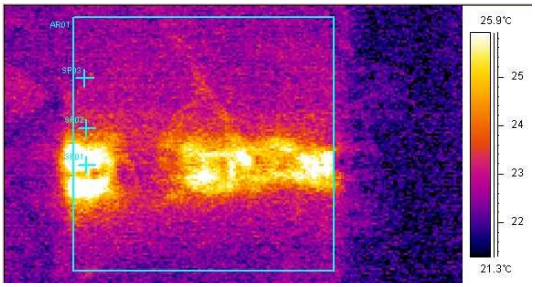


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 162 sec)

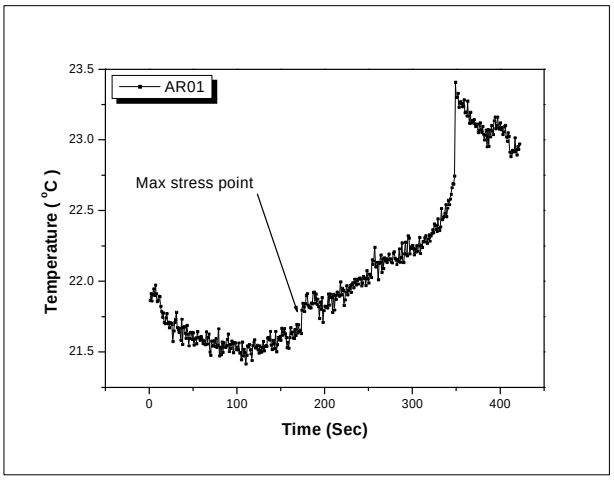


(c) Profile of tread in 3 spots

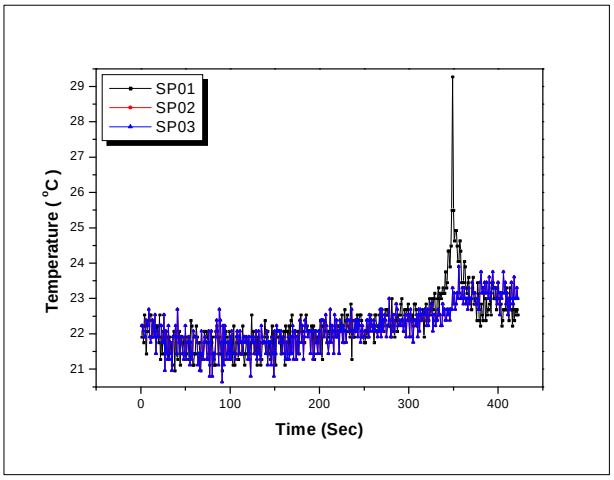
Fig. 33 Temperature change measurement on time (PP)



(a) Temperature distribution

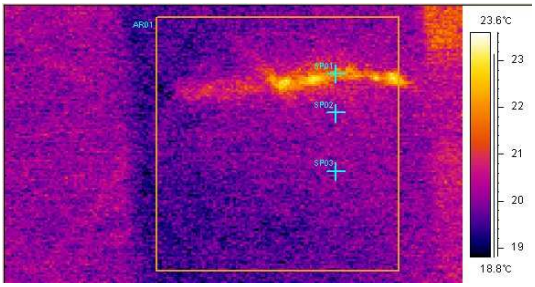


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 180 sec)

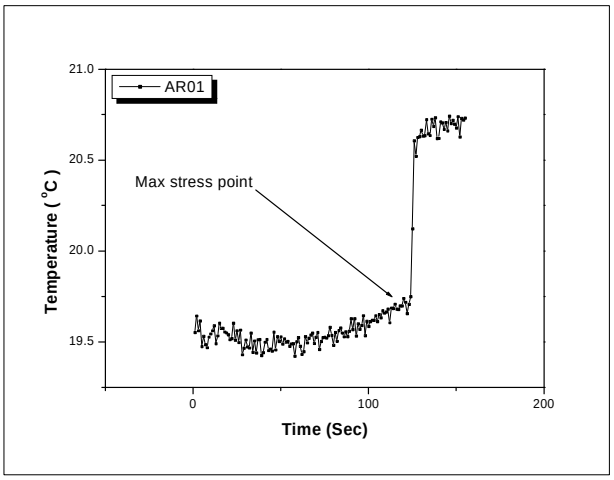


(c) Profile of tread in 3 spots

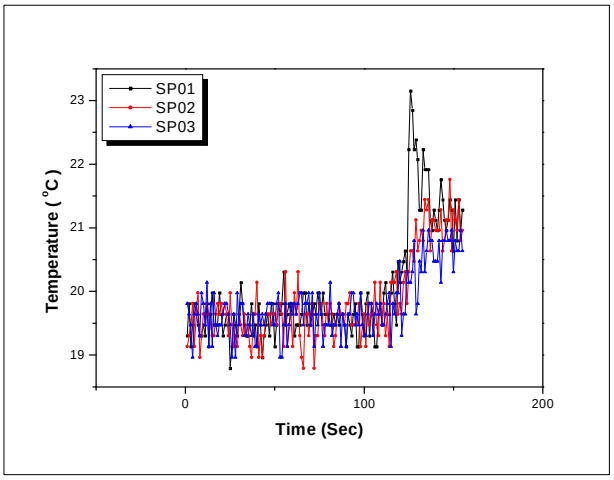
Fig. 34 Temperature change measurement on time (μ=0.1 , 10wt%)



(a) Temperature distribution

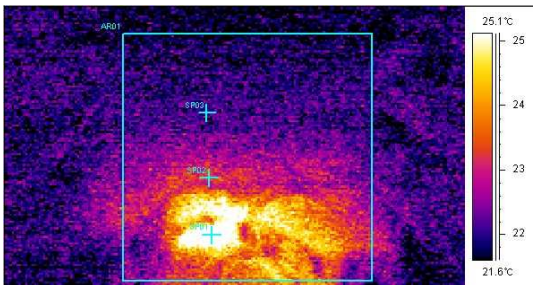


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 120 sec)

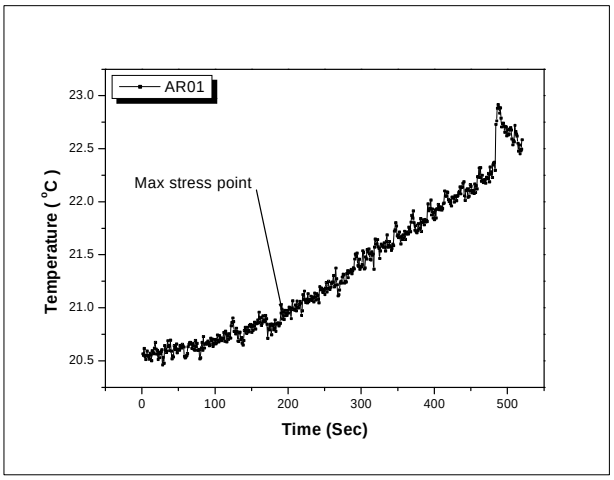


(c) Profile of tread in 3 spots

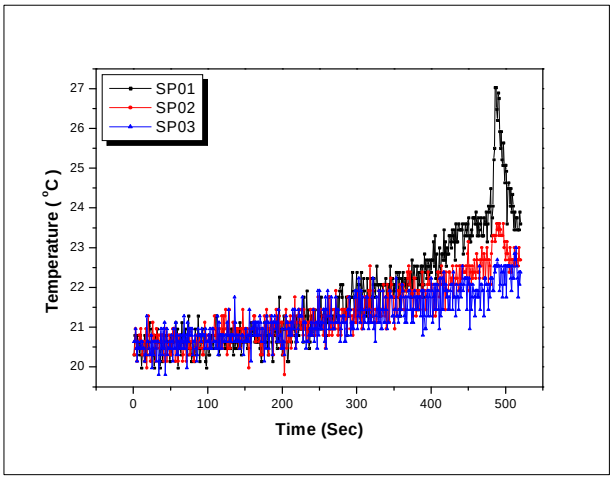
Fig. 35 Temperature change measurement on time (μ=0.3 , 10wt%)



(a) Temperature distribution

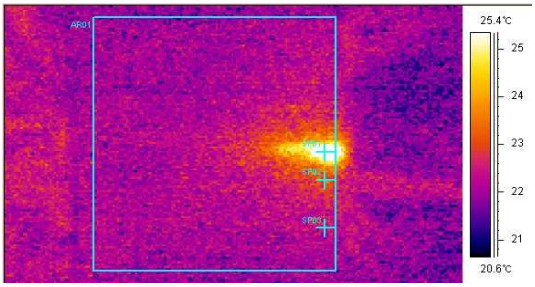


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 198 sec)

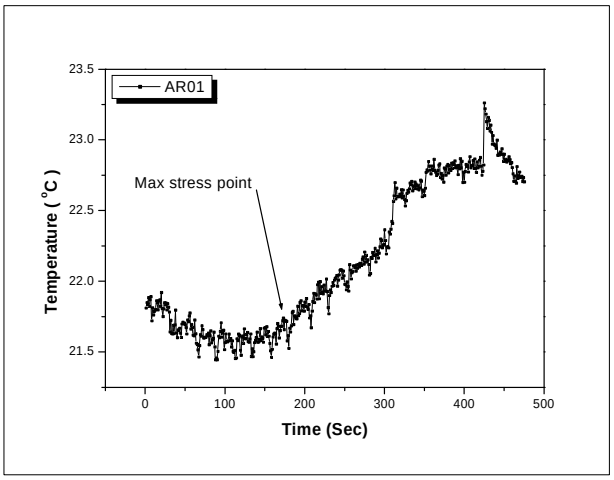


(c) Profile of tread in 3 spots

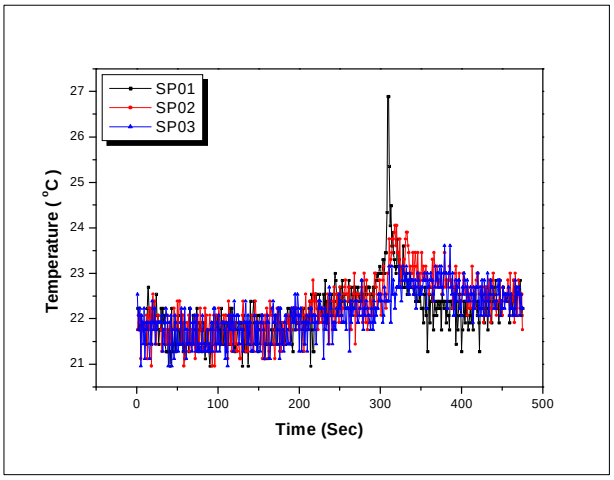
Fig. 36 Temperature change measurement on time (J=0, 20wt%)



(a) Temperature distribution

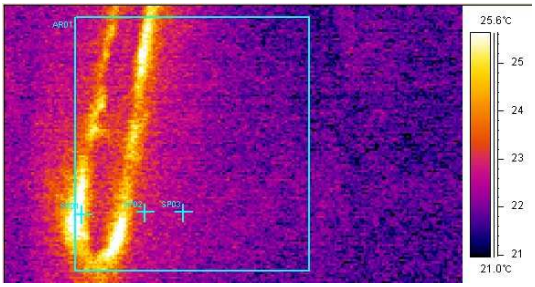


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 180 sec)

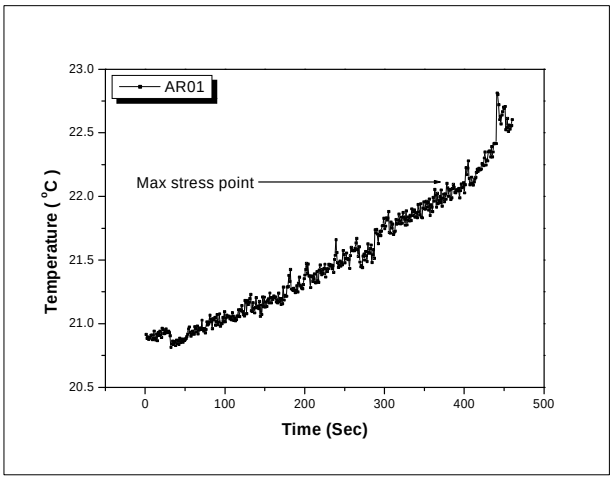


(c) Profile of tread in 3 spots

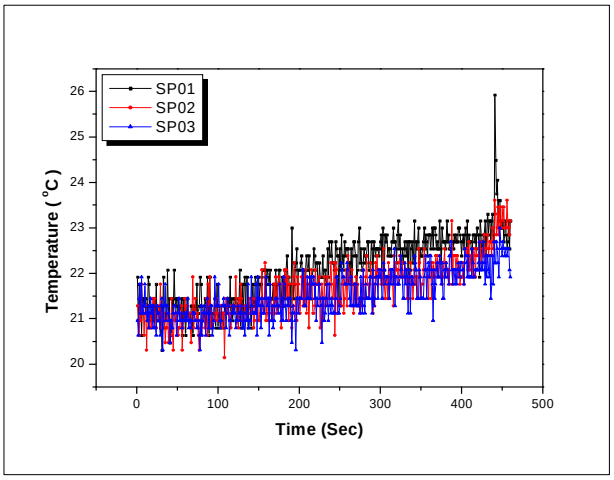
Fig. 37 Temperature change measurement on time (μ=0.1, 20wt%)



(a) Temperature distribution

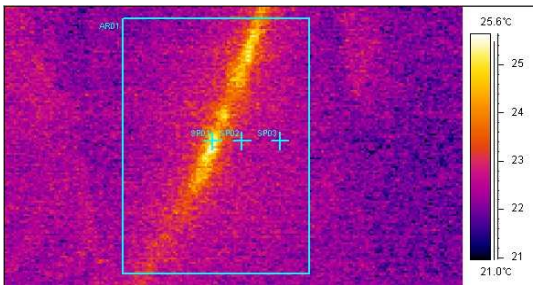


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 378 sec)

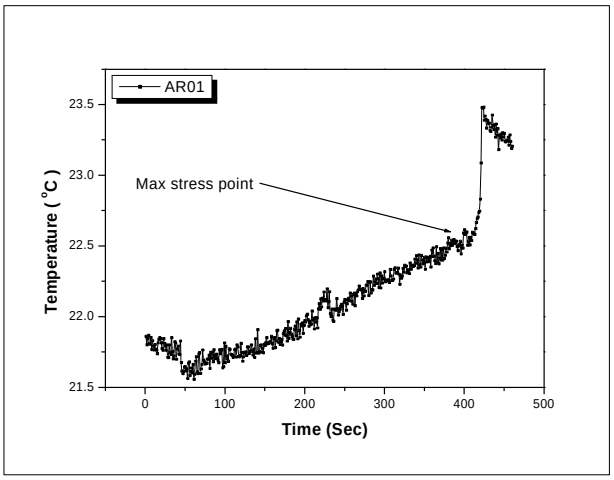


(c) Profile of tread in 3 spots

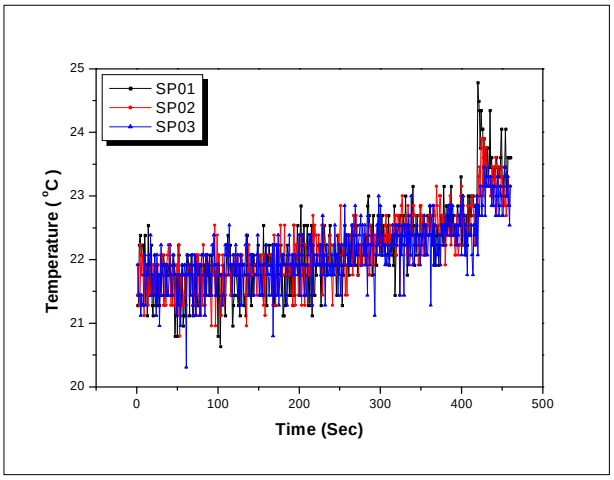
Fig. 38 Temperature change measurement on time (Θ=20°, 30wt%)



(a) Temperature distribution

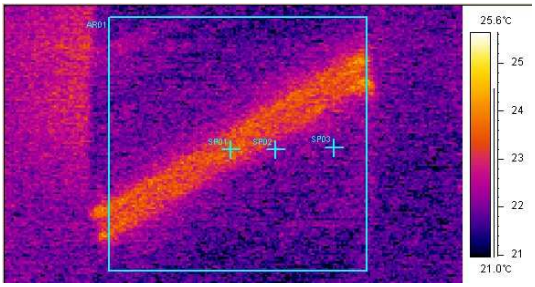


(b) Profile of tread in area (Max stress point : 390 sec)

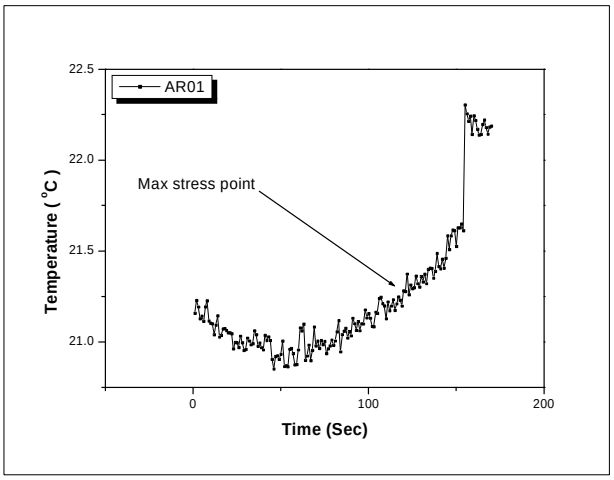


(c) Profile of tread in 3 spots

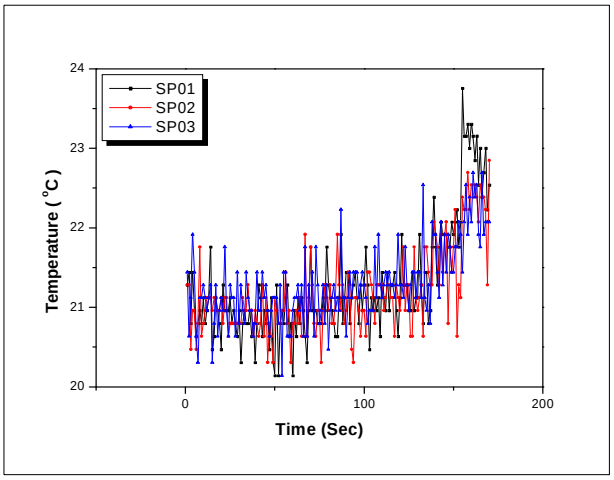
Fig. 39 Temperature change measurement on time (Θ=30°, 30wt%)



(a) Temperature distribution



(b) Profile of tread in area (Max stress point : 126 sec)



(c) Profile of tread in 3 spots

Fig. 40 Temperature change measurement on time (Θ=60°, 30wt%)

2. 적외선 열화상 카메라의 인장시편 파단부분의 온도분포

GFRP 복합재료의 인장강도 시험 시 나타나는 파단부위의 온도분포를 측정하기 위하여 파단부위의 열화상을 시편 당 3부분으로 나눈 모델을 Fig. 41에 나타냈다. Fig. 41(a)는 인장시험 시 외력에 의하여 섬유 박리와 섬유 인출이 일어나지 않는 모델이다. (b)는 복합재료에서 섬유 박리와 섬유 인출이 부분적으로 일어나는 모델이다. (c)는 복합재료에서 섬유 인출이 주로 일어나는 모델이다. 한 부분의 열화상 이미지를 다시 파단부위 주변에 5개의 직선으로 온도분포를 나타냈다.

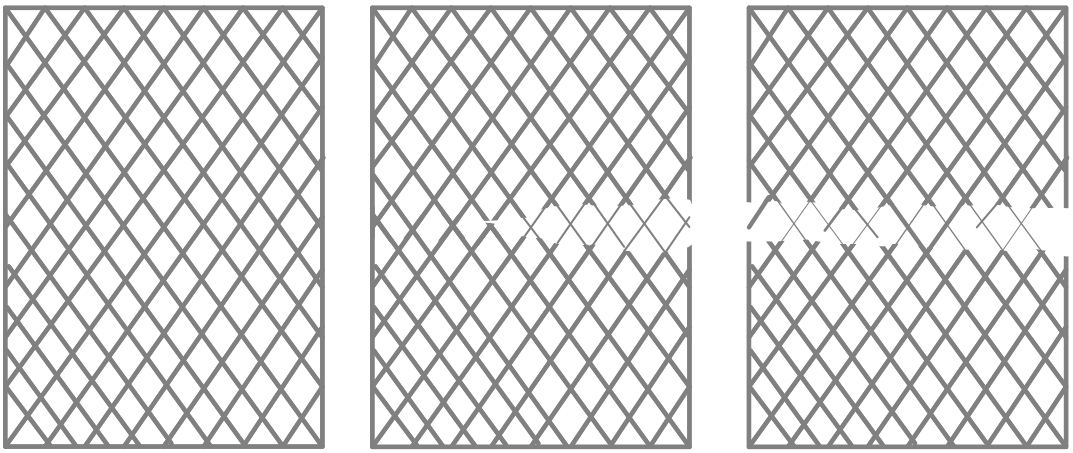
총 4개의 시편을 열화상으로 온도분포를 확인하였으며, 유리섬유가 없는 PP 시편, 10wt%-f=0.1, 20wt%-f=0.1, 30wt%-θ=30°를 측정하였다. 1개의 시편 당 3개의 영상은 파단부위의 온도분포가 뚜렷한 곳에서 측정하였다.

Fig. 42는 섬유가 없는 PP의 열화상 열상을 고찰한 것이다. 1차 파단이 일어나면서 변위가 계속 지속되고, 약 150초 후에 다시 2차 파단이 일어나는 것을 알 수 있었다. 시편의 파단부위 최고온도는 24.7°이었으며, 2차 파단이 일어나는 부분부터는 파단 면적이 많이 넓어져 가는 것을 알 수 있었다.

Fig. 43은 섬유함유율이 10wt%이고 섬유배향함수가 f=0.1인 시편의 파단 영상이다. 시편에 걸린 하중을 x축에 결려진 섬유들이 받고 있으면서 버티다가 순간적으로 파단되는 모습을 보였다. Fig. 44는 섬유함유율이 20wt%인 f=0.1인 시험편이다. 10wt%인 시험편 보다 파단 시간이 길었는데, 이는 2배 많은 섬유들이 하중 분포 면적을 넓게 하여 파단이 천천히 진전 되었다고 사료된다. 파단시간일 길어진 만큼 파단 최고온도는 10wt%보다 낮게 나타났다.

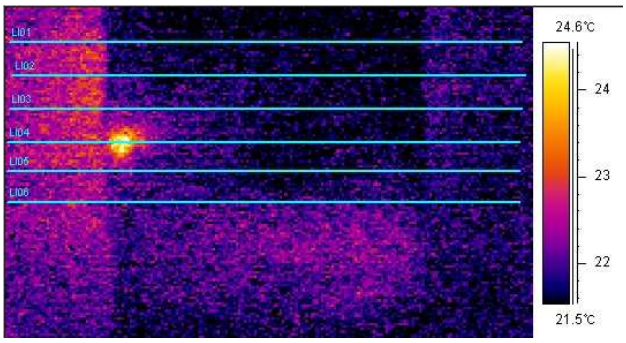
Fig. 45는 섬유함유율이 30wt%인 일방향 섬유배향각 복합재료 θ=30°의 열화상 영상을 나타냈다. 파단부위가 사선으로 나타나기 때문에 온도분포 측정을 위한 직선을 5개 모두 측정하였다. 파단시간이 짧기에 파단부위의 최고온도가

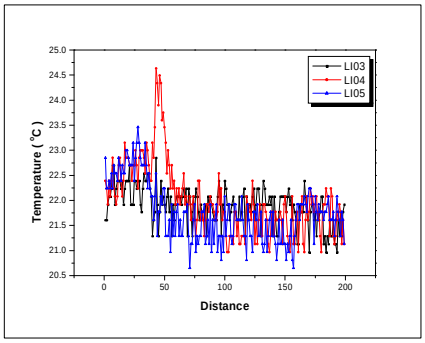
높을 것으로 생각되었으나, 최고온도는 높지 않았다. 인장강도 값이 적고, 파단 부위가 사선으로 있어서 면적 넓고, 파단 속도가 빠르게 일어나지 않았기 때문이라고 사료된다.



(a) (b) (c)

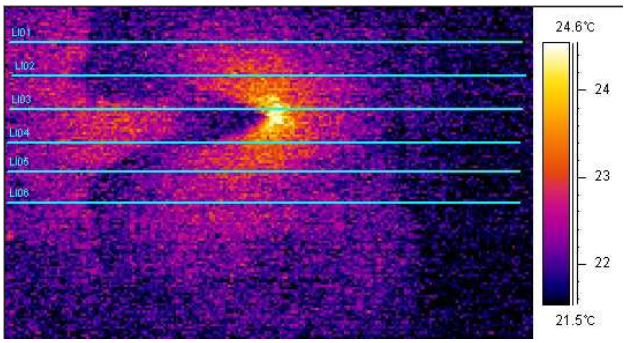
Fig. 41 Fracture model of thermography by tensile test

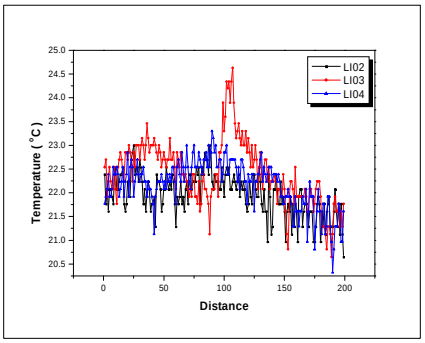




(a) Temperature distribution at 286 sec

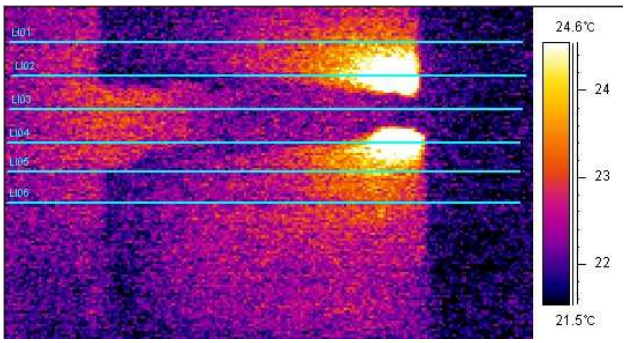
Profile of tread

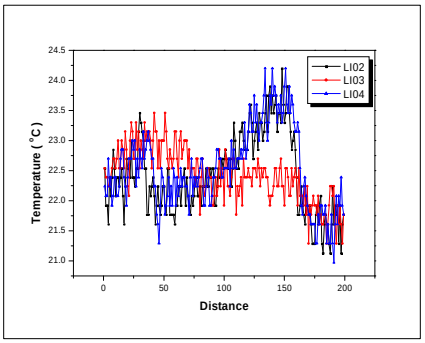




(b) Temperature distribution at 439 sec

Profile of tread

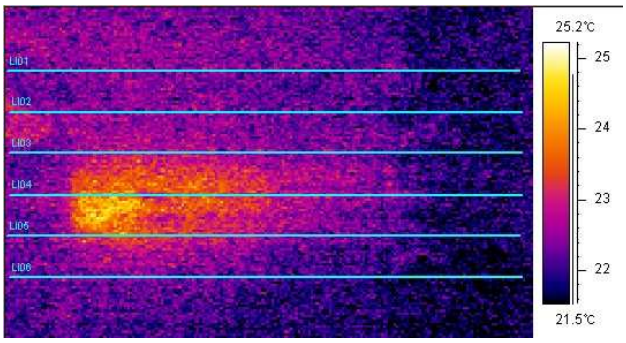


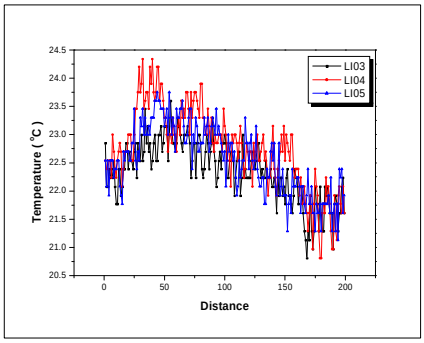


(c) Temperature distribution at 491 sec

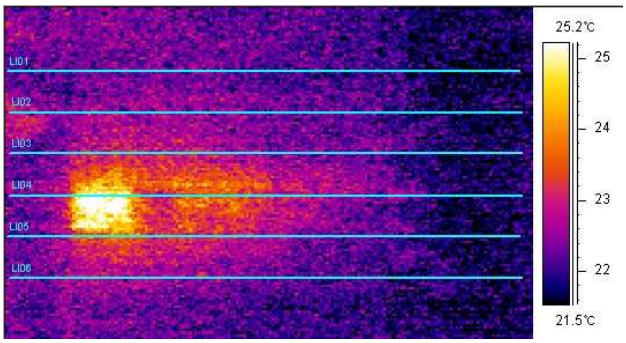
Profile of tread

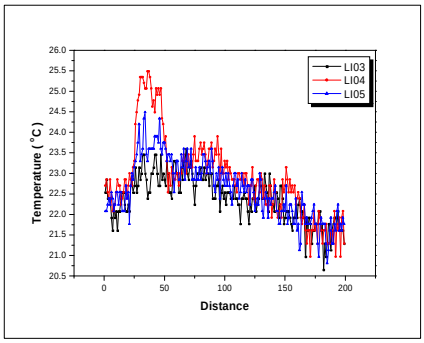
Fig. 42 Temperature distribution measurement (PP)



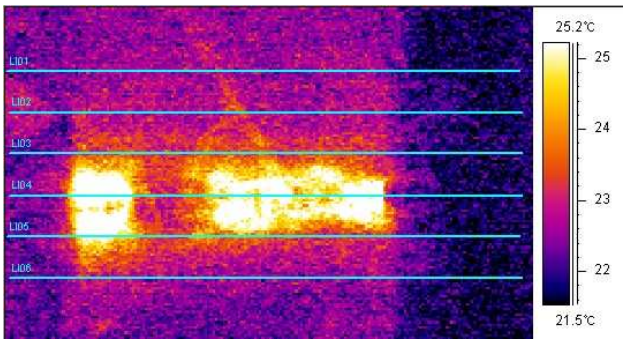


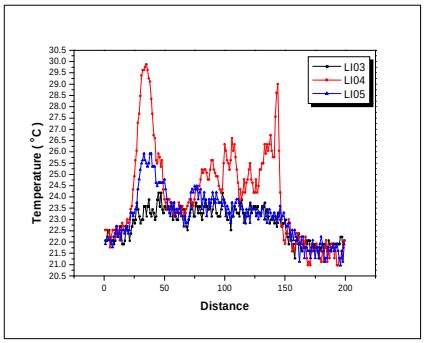
(a) Temperature distribution at 345 sec　　Profile of tread





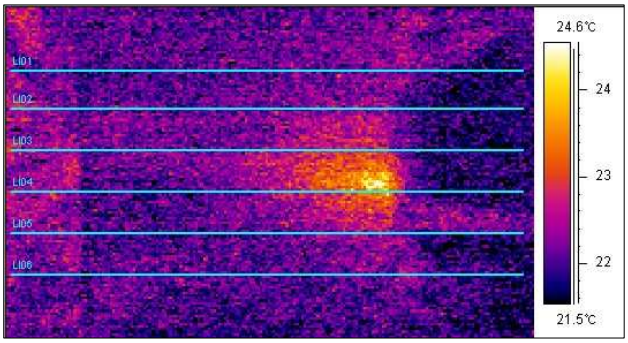
(b) Temperature distribution at 348 sec　　Profile of tread

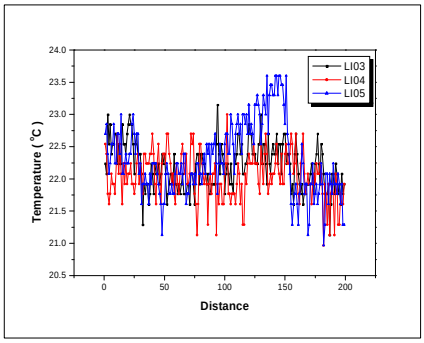




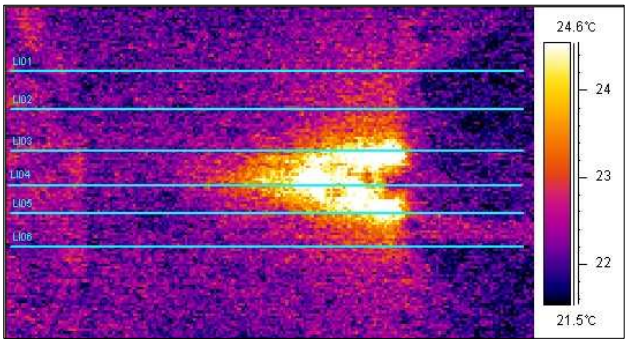
(c) Temperature distribution at 349 sec　　Profile of tread

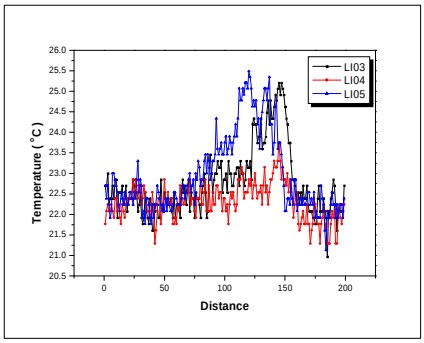
Fig. 43 Temperature distribution measurement (μ=0.1, 10wt%)



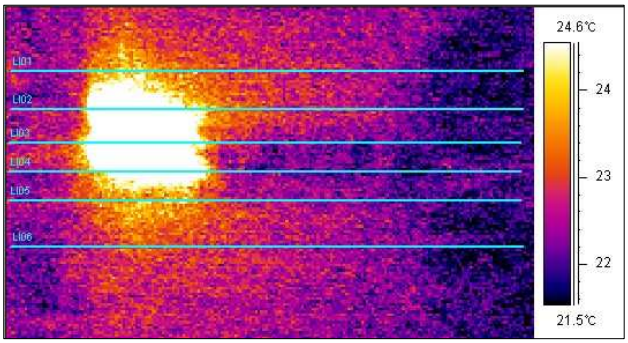


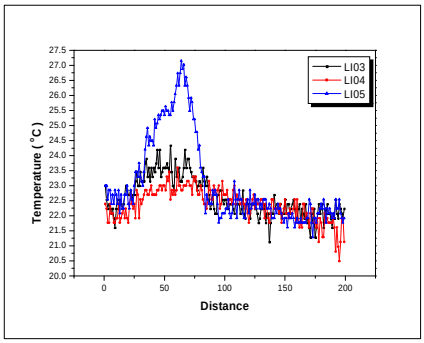
(a) Temperature distribution at 308 sec　　Profile of tread





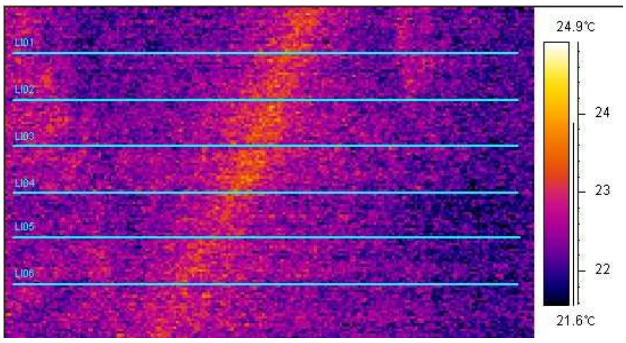
(b) Temperature distribution at 313 sec　　Profile of tread

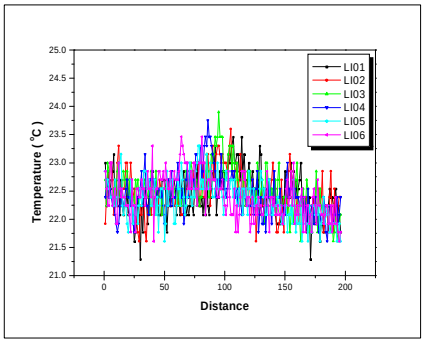




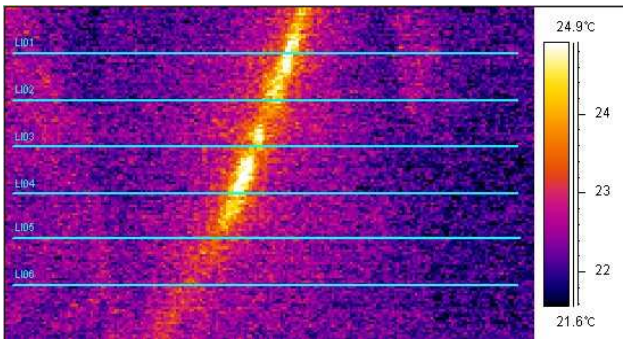
(c) Temperature distribution at 425 sec　　Profile of tread

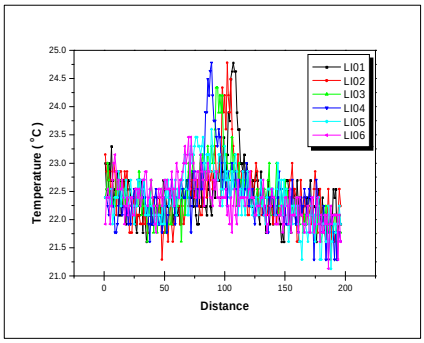
Fig. 44 Temperature distribution measurement (λ=0.1, 20wt%)



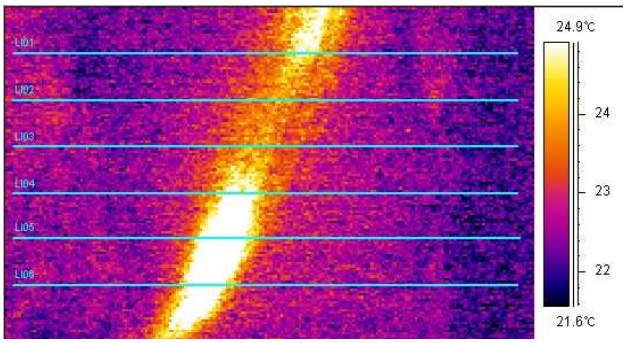


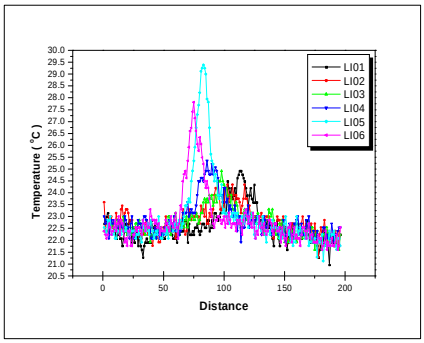
(a) Temperature distribution at 419 sec　　Profile of tread





(b) Temperature distribution at 420 sec　　Profile of tread





(c) Temperature distribution at 422 sec　　Profile of tread

Fig. 45 Temperature distribution measurement (Θ=30°, 30wt%)

제 3 절 고속충격

1. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 파괴모드

섬유 배향 및 함유율은 GFRP 복합재료의 충격특성에 영향을 미치는 중요한 인자이다. GFRP 복합재료 충격 파괴 시의 다른 중요한 인자는 복합재료의 파괴모드를 결정하는 계면 강도이다[37].

고체가 정적 혹은 동적 하중을 받으면 2가지 기구(Mechanism)인 재료의 변형과 새로운 표면의 생성에 의하여 에너지를 흡수하게 된다. 하중을 받으면 재료의 변형이 먼저 발생되며, 가한 에너지가 매우 크면, 균열이 개시되어 전파되며, 따라서 새로운 표면이 생성하게 된다. 취성재료의 경우에는 아주 작은 양의 변형이 발생되기 때문에 취성 재료의 에너지 흡수 능력은 매우 작다. 그러나 연성이 강한 재료는 파괴 과정에서 많은 소성 변형이 발생하므로 많은 에너지가 흡수된다. 따라서 재료의 에너지 흡수 능력은 균열의 길이를 증가시키거나, 변형 능력을 증가시켜서 향상시킬 수가 있다.

섬유의 파단(Fiber breakage)은 균열이 섬유의 수직방향으로 전파될 때, 복합재료가 완전히 분리되기 위해서는 섬유의 파단이 발생하여야만 한다. 섬유의 존재가 파괴의 형태(Mode)를 결정하므로 결과적으로 전체 에너지 흡수량에 영향을 미친다[38].

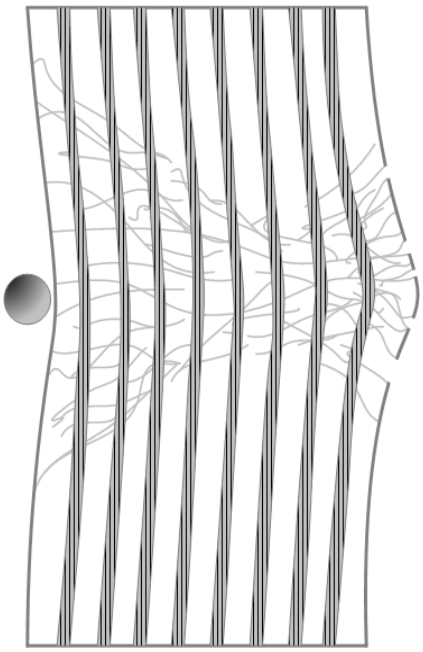
기지의 변형 및 균열(Matrix deformation and cracking)은 복합재료가 완전히 파괴되려면, 섬유를 감싸고 있는 기지도 파괴가 되어야만 한다. 복합재료의 기지가 흡수하는 에너지는 크지 않다. 균열이 한 방향으로만 전파되면, 생성된 면적이 작기 때문에 파괴에너지도 작다. 균열이 기존 균열에 수직한 방향으로 가지(Branching)를 치면 많은 균열 면적이 생길 수 있다[39].

섬유 박리(Fiber debonding)는 복합재료의 파괴 과정에서, 섬유와 평행한 균열에 의해서 섬유가 기지로부터 분리될 수가 있다. 이때에 섬유와 기지 사이의 화학적인 결합 혹은 이차적인 결합이 깨진다. 이러한 균열은 섬유가 강하고 계면이 약할 때에 발생한다[40]. 섬유 인출(Fiber pullout)은 취성을 가진 섬유나 불연속 섬유가 인성이 강한 기지에 결합되어 있을 때에 발생한다. 섬유는 가장 약한 부분에서 파괴되며 따라서 파괴위치는 균열면 밖일 수도 있다. 섬유의 파괴에 의하여 발생된 응력집중은 인성이 강한 기지의 항복에 의해서 이완(Relieve)되어 파괴가 발생하지 않으며, 따라서 파괴된 여러 섬유를 연결시킨다. 이러한 경우에 섬유가 다시 파괴되는 것보다는 복합재료의 파괴면에서 섬유가 인출되어 파괴가 전진할 수 있다. 이러한 파괴 현상은 파괴된 섬유의 끝으로부터 파괴단면까지의 거리가 섬유의 임계길이보다 작은 경우 주로 일어난다[41].

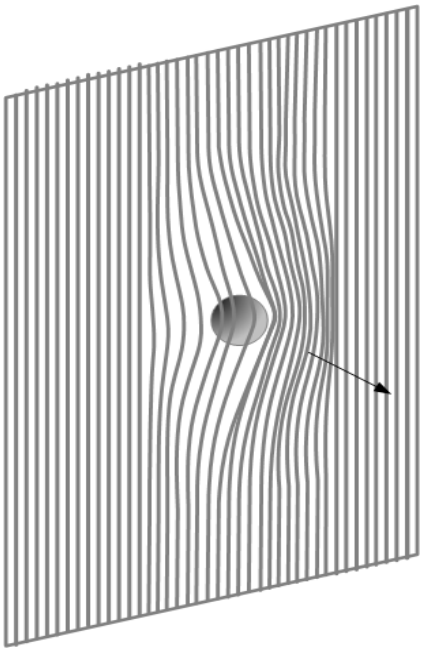
층간 균열(Delamination crack)은 플라이 내로 전파되는 균열 선단이 이웃한 플라이의 섬유에 도달하면 균열이 붙잡히게 된다. 이러한 균열의 잡힘(Arrest)은 섬유와 기지 계면에서의 기지의 균열이 붙잡히는 것과 유사하다. 균열 선단의 높은 전단 응력 때문에 균열은 분기되며 플라이의 면에 평행하게 전파되기 시작한다. 이러한 균열을 층간 균열이라고 부르며, 파괴에너지의 대부분을 차지한다.

Fig. 46, 47의 모델은 섬유강화 복합재료의 파괴동안에 발생하는 국부적인 파괴형태를 보여준다. Fig. 46은 고속충격 시 부분관통된 시험편의 파괴모델이다. (a)는 측면의 모습이고 (b)는 정면의 모습이다. Fig. 47은 고속충격 시 완전관통된 시험편의 파괴모델이다.

Fig. 46에서는 부분관통하면서 기지의 파괴가 일어나 섬유 박리가 일어났다. 충격 후 뒷면에서는 기지의 균열이 일어났다. Fig. 47에서는 섬유 파단 및 인출이 완전관통 부근에서 일어났으며, 후면으로 갈수록 기지의 파괴가 많이 일어났다. 일방향 복합재료이기 때문에 섬유 길이 방향으로 파괴가 많이 일어났다.

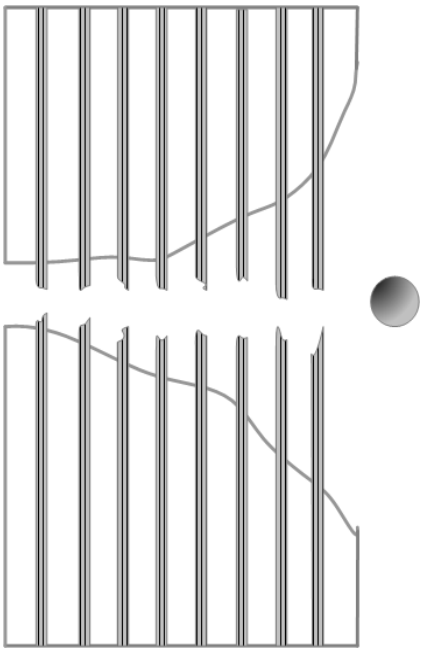


(a) The side

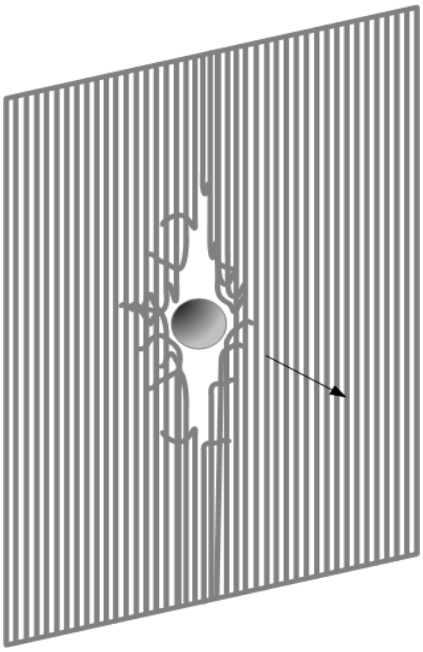


(b) The front

Fig. 46 Fracture model of partial penetration



(a) The side



(b) The front

Fig. 47 Fracture model of complete penetration

섬유 배향과 함유율 변화에 따라 고속충격 실험한 결과, 복합재료는 제작조건 및 충격 에너지에 따라 부분관통(Partial penetration), 또는 완전관통(Complete penetration)되었다. 고속충격으로부터 파괴기구는 섬유의 파단(Fiber breakage), 기지의 변형 및 균열(Matrix deformation and cracking), 섬유 박리(Fiber debonding), 섬유 인출(Fiber pull-out) 및 층간 균열(Delamination crack) 등으로 설명할 수 있다.

Photo. 7-11까지 섬유배향함수, 섬유함유율, 에어건의 공기압력에 따라서 고해상 디지털카메라로 찍은 시험편의 앞, 뒷면의 파괴모드를 고찰하였고, Photo. 7-9까지는 완전관통(C.P), Photo. 10-11은 부분관통(P.P)이다.

Photo. 7은 공기압력이 6bar인 섬유함유율 20wt%의 복합재료를 섬유배향함수의 변화에 따른 파괴모드를 고찰하였다. (a)는 관통부분을 중심으로 모든 방향으로 조금씩 크랙이 가고 섬유 파단 및 인출이 일어나는 것을 알 수 있다. (b)는 섬유가 배향되어 있는 x방향으로 섬유 파단 및 인출이 진전되었다는 것을 알 수 있었고, (c)는 섬유 파단 및 인출, 기지의 균열로 인해 전면부터 모두 크랙이 간 상태이다.

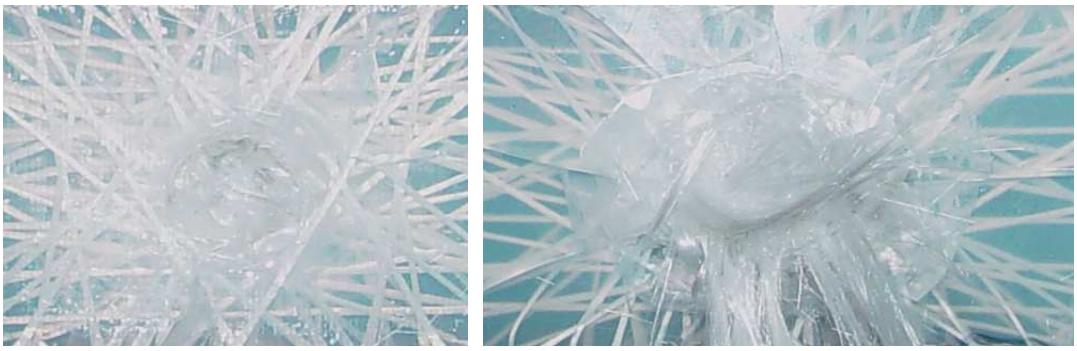
Photo. 8은 섬유배향함수 f=0.8에서 섬유함유율 변화에 따른 관통 형상을 나타낸 그림이다. (a)에서 (c)그림으로 갈수록 섬유함유율이 10wt%씩 높아지고 있는데 섬유함유율이 낮은 (a)에서는 섬유의 파단 및 인출보다는 모재의 변형 및 균열(표면파쇄)이 두드러지는 것을 알 수 있었고, (b)그림에서도 관통 뒷면의 모재가 균열을 일으키는 것을 알 수 있었다. (c)에서는 섬유 파단 및 인출이 많이 일어나는 것을 알 수 있다. 섬유함유율이 높을수록 모재의 균열보다는 섬유의 파단 및 인출이 많이 일어나는 것을 알 수 있다.

Photo. 9는 섬유배향함수 f=0.5이고 섬유함유율이 10wt%일 때 공기 압력에 따른 파괴모드를 보였다. (a)그림은 압력이 낮은 4bar에서 충격시험 한 형상인데, 관통 후 섬유 박리 영향을 받아 모재까지도 파괴가 일어난 것을 알 수 있었고, (b)그림에서도 관통 전・후 모두 모재의 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다. 그러

나 (c)그림에서 8bar의 압력으로 관통 시켰을 때, 모재 주위의 파단보다는 섬유 파단 및 인출이 많이 일어나는 것을 알 수 있다.

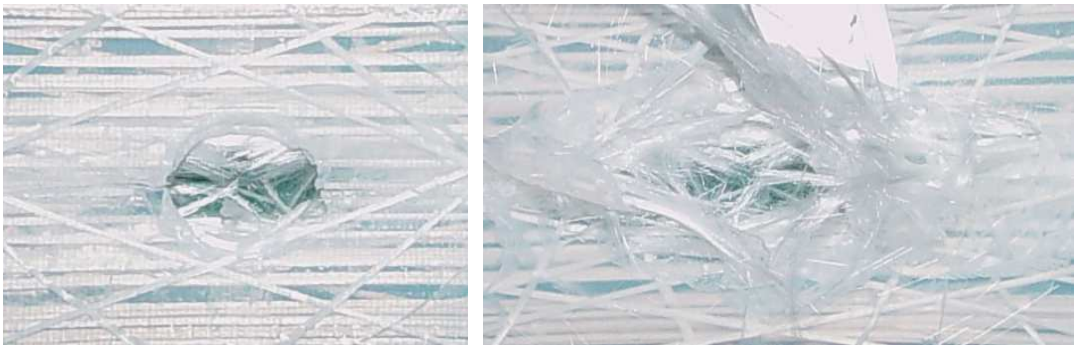
Photo. 9(a)의 부근에서 임계관통속도가 이루어지는 것을 추측해볼 수 있고, 임계관통속도의 부근에서의 관통은 섬유의 크랙이 모재에 대부분을 전달하여 모재의 변형 및 균열을 많이 일으키는 것을 알 수 있다. 섬유배향함수 f=1, f=0.9인 경우가 높은 압력에서는 높은 흡수에너지 비를 받는 이유는 이것 때문이라고 사료된다. 적은 압력에서 고속충격을 받을 때 섬유 층간 균열에 영향을 받지만 높은 압력을 받을 때에는 섬유층간 균열에 영향을 받지 않기 때문이다.

자동차 범퍼가 일방향으로 배향되어있어 주행 중 돌맹이나, 새부리 등의 고속충격에는 일방향 섬유강화 복합재료가 효과적인 것도 알 수 있다. 저속충격의 경우는 범퍼의 두께가 두껍기 때문에 충분히 견딜 것이라 사료된다.



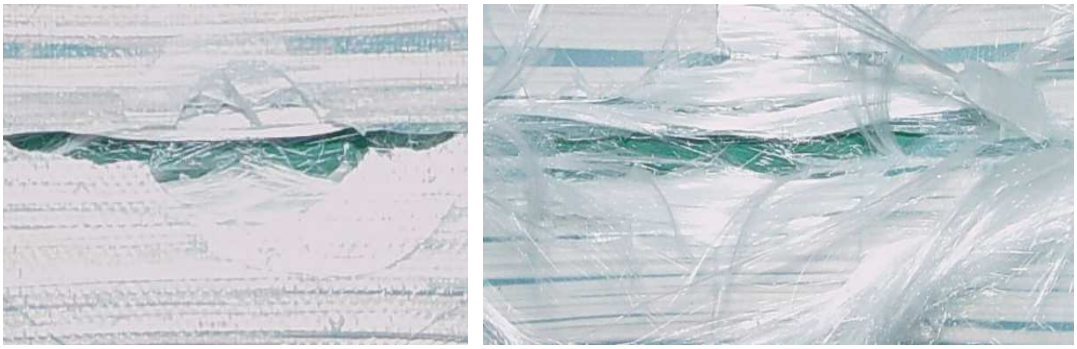
Front *Back*

(a) Fiber orientation function 0.1 (20wt%)



Front *Back*

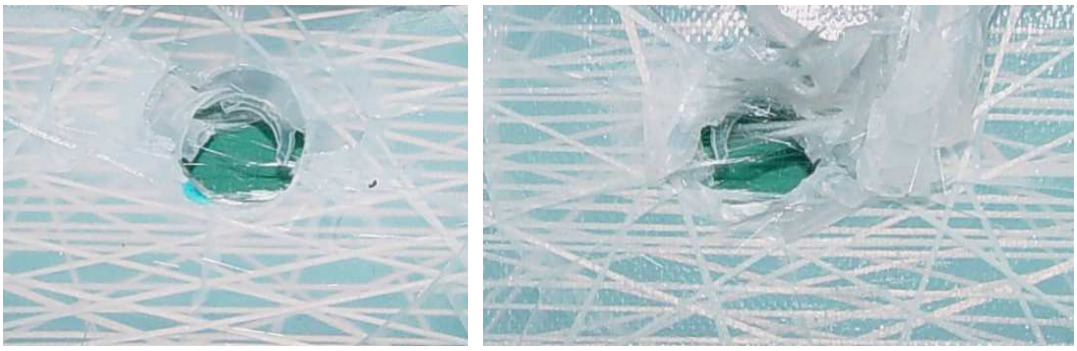
(b) Fiber orientation function 0.7 (20wt%)



Front *Back*

(c) Fiber orientation function 1 (20wt%)

Photo. 7 Complete penetration shape according to fiber orientation function in air pressure 6bar



Front *Back*

(a) Fiber content 10wt% (2bar)

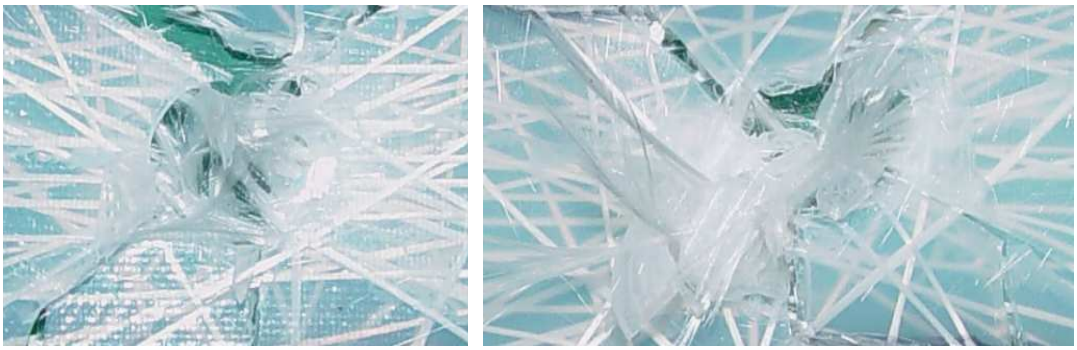
Front *Back*

(b) Fiber content 20wt% (4bar)

Front *Back*

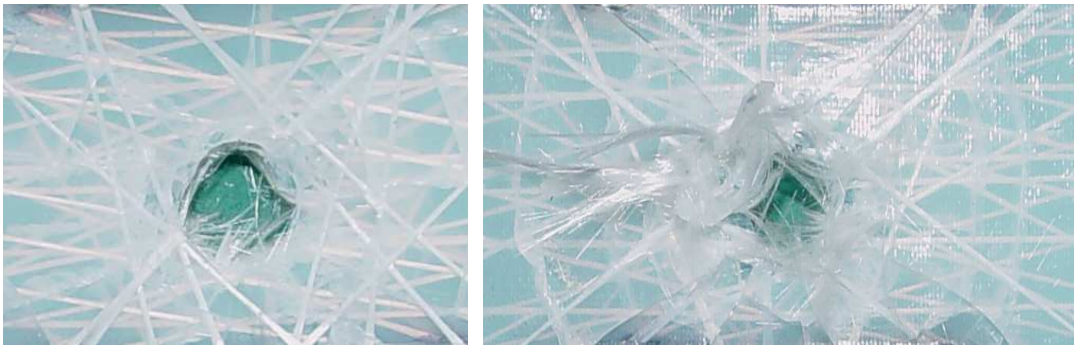
(c) Fiber content 30wt% (8bar)

Photo. 8 Complete penetration shape according to fiber content in fiber orientation function J=0.8



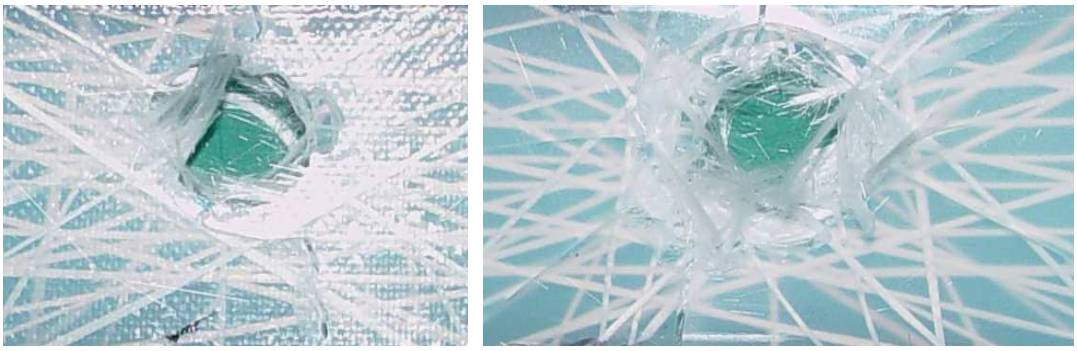
Front *Back*

(a) Air pressure 4bar



Front *Back*

(b) Air pressure 6bar



Front *Back*

(c) Air pressure 8bar

Photo. 9 Complete penetration shape according to air pressure

(J=0.5, ω_t=10wt%)

Photo. 10, 11은 부분관통의 파괴모드를 고찰하였다. Photo. 10은 6bar의 압력이 섬유함유율 30wt%의 복합재료에 미치는 섬유배향함수의 영향이다. (a)그림에서 (c)그림으로 갈수록(섬유배향함수가 높아질수록) 후면파쇄의 영향이 두드러졌다. 충격에너지의 영향을 (a)그림에서는 전체방향(360°)으로 섬유가 이동시키기 때문에 후면파쇄가 많이 일어나지 않았고, (b)에서 (c)그림으로 갈수록 후면파쇄가 섬유 길이 x방향으로 많이 일어나는 것을 알 수 있다.

Photo. 11은 섬유배향함수 f=0.3인 복합재료의 섬유함유율(10, 20, 30wt%)과 에어건의 공기압(2, 4, 8bar)을 변화시켜 파괴모드를 고찰하였다. 섬유함유율이 높고, 압력이 높을수록 전•후면 파쇄가 많이 일어났으며, 섬유함유율이 높을 때가 강구의 충격에너지를 흡수하는 면적이 더 넓어졌다.

Front *Back*

(a) Fiber orientation function 0

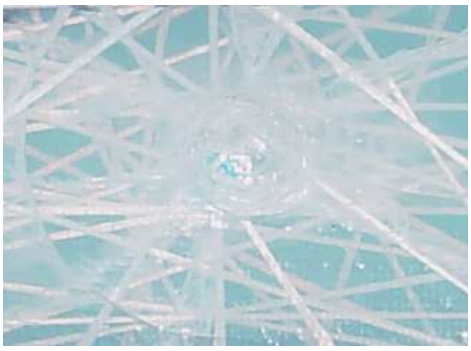
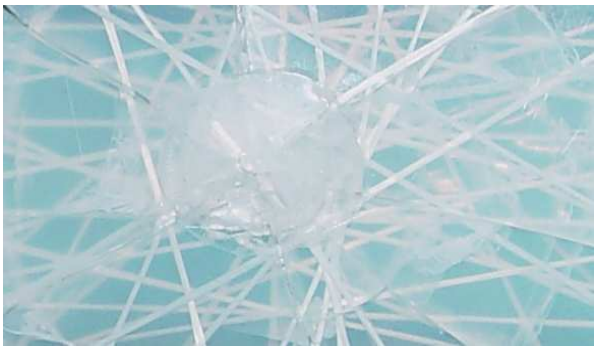
Front *Back*

(b) Fiber orientation function 0.5

Front *Back*

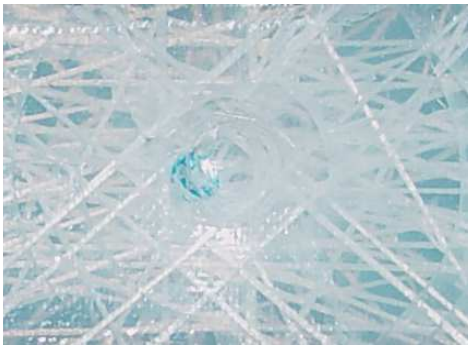
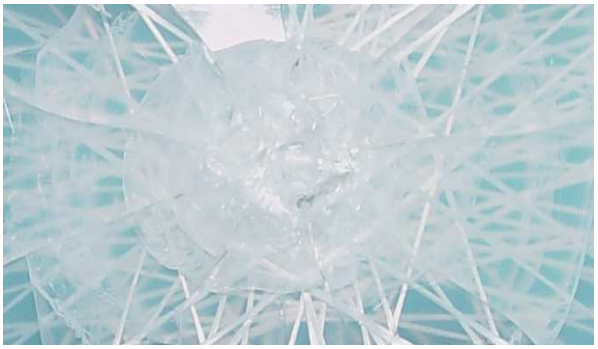
(c) Fiber orientation function 0.8

Photo. 10 Partial penetration shape according to fiber orientation function J (6bar, ω_t=30wt%)

Front *Back*

(a) Air pressure 2bar and fiber content 10wt%

Front *Back*

(b) Air pressure 4bar and fiber content 20wt%

Front *Back*

(c) Air pressure 8bar and fiber content 40wt%

Photo. 11 Partial penetration shape according to air pressure and fiber content in fiber orientation function J=0.3

2. 섬유 배향 및 함유율 변화에 따른 고속충격 특성

복합재료의 섬유배향 및 함유율 변화에 따른 고속충격 특성을 파악하기 위해 압력을 2, 4, 6, 8bar에 따른 충격속도는 65-120 m/s(234-432 km/hr)로 변화를 주어 각 시험편에 대한 고속충격시험을 시행하였다. 자동차의 속도 145km/hr를 기준으로 안전계수를 3으로 잡을 때의 기준속도인 435km/hr까지 고속충격 실험하였다. Table. 4에는 고속충격에 따르는 결과를 섬유배향함수와 섬유함유율에 따라서 분류하였다. E_1은 충격 전의 에너지이며 E_2는 충격 후 에너지이다. E_a는 E_1과 E_2의 차인 흡수에너지를 의미한다. 섬유배향함수에 따른 충격특성은 흡수에너지 비로 비교 하였다.

$$\text{흡수 에너지 비}(E_a/E_1) = \frac{E_1 - E_2}{E_1}$$

섬유함유율 10wt%에서는 2bar에서 부분관통(Partial penetration)일 일어난 부분이 나타났으며, 20wt%에서는 4bar에서 부분관통이 일어났다. 30wt%에서는 6bar에서 거의 모든 시편이 부분관통 현상이 발생되었다. 40wt%에서도 8bar에서 부분관통이 일어났고, 다른 부분은 모두 완전관통(Complete penetration)되었다.

또한, 부분관통이 일어나는 속도의 섬유함유율(10wt%=2bar, 20wt%=4bar, 30wt%=6bar, 40wt%=8bar)에서는 거의 대부분이 섬유배향함수가 낮은 쪽에서 일어나는 경향을 알 수 있다. 일방향(f=1)에서 랜덤(f=0)으로 가면서 부분관통이 일어나는데 이것은 복합재료의 임계관통속도(Critical penetration velocity) 부분에서는 섬유의 크랙진전이 많이 일어나 크랙이 360° 전체 방향으로 진전되면서 부분관통이 일어난다고 볼 수 있다.

그러나 일방향(f=1) 복합재료에서는 섬유층간 균열이 한 방향으로 진전되기 때문에 완전관통되는 것을 알 수 있었다. 고속충격 실험을 통하여 섬유 배향과

함유율 별로 임계관통속도를 알아내었다. 임계관통속도에서는 섬유배향함수가 f=1(이방성)인 부근에서 고속충격에 약한 특성을 보였다. 섬유함유율 별 임계관통속도 부근압력(속도)에서는 섬유배향상태에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

Table. 4 Result of high velocity impact test

ω_t	bar	J	E_1(Joule)	E_2(Joule)	E_d(Joule)	E_d/E_1
10wt%	2	0	6.79	-	-	-
		0.1	6.4	-	-	-
		0.2	6.21	-	-	-
		0.3	6.62	-	-	-
		0.4	6.21	-	-	-
		0.5	7.03	-	-	-
		0.6	7.03	-	-	-
		0.7	6.44	-	-	-
		0.8	6.48	1.85	4.63	0.71
		0.9	7.32	4.07	3.25	0.44
		1	7.24	3.12	4.12	0.57
	4	0	14.19	7.54	6.65	0.47
		0.1	14.17	8.33	5.84	0.41
		0.2	14.13	9.01	5.12	0.36
		0.3	13.87	9.01	4.86	0.35
		0.4	13.87	8.43	5.44	0.39
		0.5	14.25	8.58	5.67	0.40
		0.6	13.98	8.85	5.13	0.37
		0.7	14.31	9.28	5.03	0.35
		0.8	13.87	9.08	4.79	0.35
		0.9	13.89	8.97	4.92	0.35
		1	14.34	7.12	7.22	0.50
	6	0	19.73	9.08	10.65	0.54
		0.1	18.87	8.95	9.92	0.53
		0.2	18.7	10.14	8.56	0.46
		0.3	19.21	10.98	8.23	0.43
		0.4	19.07	10.16	8.91	0.47
		0.5	20.28	10.26	10.02	0.49
		0.6	20.48	11.27	9.21	0.45
		0.7	19.57	10.26	9.31	0.48
		0.8	20.23	10.4	9.83	0.49
		0.9	18.85	7.82	11.03	0.59
		1	18.95	6.95	12	0.63
	8	0	24.55	18.51	6.04	0.25
		0.1	25.02	15.98	9.04	0.36
		0.2	26.02	14.52	11.5	0.44
		0.3	26.25	15.86	10.39	0.40
		0.4	25.45	15.52	9.93	0.39
		0.5	25.01	16.1	8.91	0.36
		0.6	24.76	15.68	9.08	0.37
		0.7	25.68	16.18	9.5	0.37
		0.8	26.62	14.85	11.77	0.44
		0.9	25.34	12.23	13.11	0.52
		1	24.68	13.14	11.54	0.47

ω_t	bar	J	E_1(Joule)	E_2(Joule)	E_d(Joule)	E_d/E_1
20wt%	4	0	14.1	-	-	-
		0.1	14.1	-	-	-
		0.2	13.35	-	-	-
		0.3	13.22	-	-	-
		0.4	13.11	5.63	7.48	0.57
		0.5	13.47	6.57	6.9	0.51
		0.6	13.13	6.75	6.38	0.49
		0.7	13.7	5.94	7.76	0.57
		0.8	13.01	6.35	6.66	0.51
		0.9	13.5	4.43	9.07	0.67
		1	12.78	4.84	7.94	0.62
	6	0	18.66	12.38	6.28	0.34
		0.1	19.86	13.02	6.84	0.34
		0.2	19.56	11.32	8.24	0.42
		0.3	20.57	12.14	8.43	0.41
		0.4	20.14	11.17	8.97	0.45
		0.5	18.97	11.42	7.55	0.40
		0.6	18.83	10.59	8.24	0.44
		0.7	18.92	10.48	8.44	0.45
		0.8	19.48	9.39	10.09	0.52
		0.9	18.7	8.6	8.63	0.54
		1	19.2	9.6	6.59	0.50
	8	0	22.61	17.22	5.39	0.24
		0.1	23.8	16.17	7.63	0.32
		0.2	23.35	13.02	10.33	0.44
		0.3	24.34	13.76	10.58	0.43
		0.4	23.04	14.41	8.63	0.37
		0.5	24.13	15.03	9.1	0.38
		0.6	23.22	13.95	9.27	0.40
		0.7	24.26	15.1	9.16	0.38
		0.8	24.43	12.81	11.62	0.48
		0.9	23.04	9.92	13.12	0.57
		1	23.04	11.98	11.06	0.48

ω_t	bar	J	E_1(Joule)	E_2(Joule)	E_d(Joule)	E_d/E_1
30wt%	6	0	17.88	–	–	–
		0.1	17.9	–	–	–
		0.2	18.83	–	–	–
		0.3	19.13	–	–	–
		0.4	18.63	–	–	–
		0.5	19.23	–	–	–
		0.6	18.36	–	–	–
		0.7	18.35	–	–	–
		0.8	19.11	–	–	–
		0.9	19.88	2.87	17.01	0.86
		1	18.6	4.67	13.93	0.75
	8	0	27.66	18.34	9.32	0.34
		0.1	25.26	16.24	9.02	0.36
		0.2	24.79	15.43	9.36	0.38
		0.3	25.95	16.02	9.93	0.38
		0.4	25.37	16.33	9.04	0.36
		0.5	24.76	15.36	9.4	0.38
		0.6	25.01	15.32	9.69	0.39
		0.7	25.23	16.03	9.2	0.36
		0.8	26.4	16.21	10.18	0.39
		0.9	25.18	13.6	11.58	0.46
		1	26.48	14.6	11.88	0.45
40wt%	8	0	24.26	–	–	–
		0.1	25.3	–	–	–
		0.2	23.93	–	–	–
		0.3	24.25	–	–	–
		0.4	23.85	–	–	–
		0.5	24.87	–	–	–
		0.6	24.81	9.61	15.2	0.61
		0.7	24.22	13.5	10.72	0.44
		0.8	25.8	13.96	11.84	0.46
		0.9	26.44	12.22	14.22	0.547
		1	25.73	13.88	11.85	0.46
PP	2	•	7.08	4.89	2.19	0.31
	4	•	13.72	10.29	3.43	0.25
	6	•	19.1	14.27	4.83	0.25
	8	•	24.19	17.5	6.69	0.28

Fig. 48-51에서는 임계관통에너지와 섬유배향함수의 관계를 나타냈다. Fig. 48은 충격 속도 2bar에서 10wt%인 복합재료의 임계관통에너지는 섬유배향함수 f=0.7에서 나타났다. Fig. 49는 충격 속도 4bar에서 20wt%인 복합재료의 임계관통에너지는 섬유배향함수 f=0.3에서 나타났다. Fig. 50은 충격 속도 6bar에서 30wt%인 복합재료의 임계관통에너지는 섬유배향함수 f=0.8에서 나타났다. Fig. 51은 충격 속도 8bar에서 40wt%인 복합재료의 임계관통에너지는 섬유배향함수 f=0.5에서 나타났다.

임계관통속도에서는 이방성(f=1)이 될수록 고속충격에 약하다는 것을 알 수 있다. 이는 이방성이 될수록 섬유층간 균열이 한 방향으로 되어있기 때문에 강구의 충격에 섬유길이방향의 섬유들이 벌어져서 충격에 약하다. 이방성이 아닌 복합재료에서는 강구의 충돌 시 섬유 크랙의 진전이 360° 모두 진전되기 때문에 충격에 강하게 나타났다.

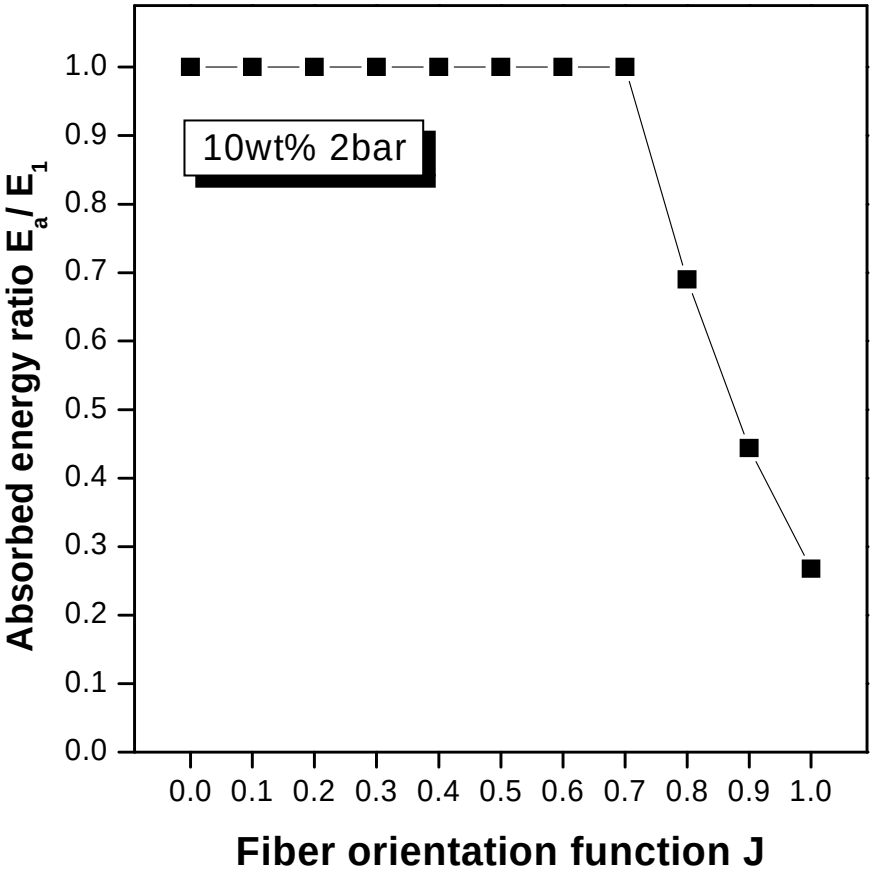


Fig. 48 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 2bar

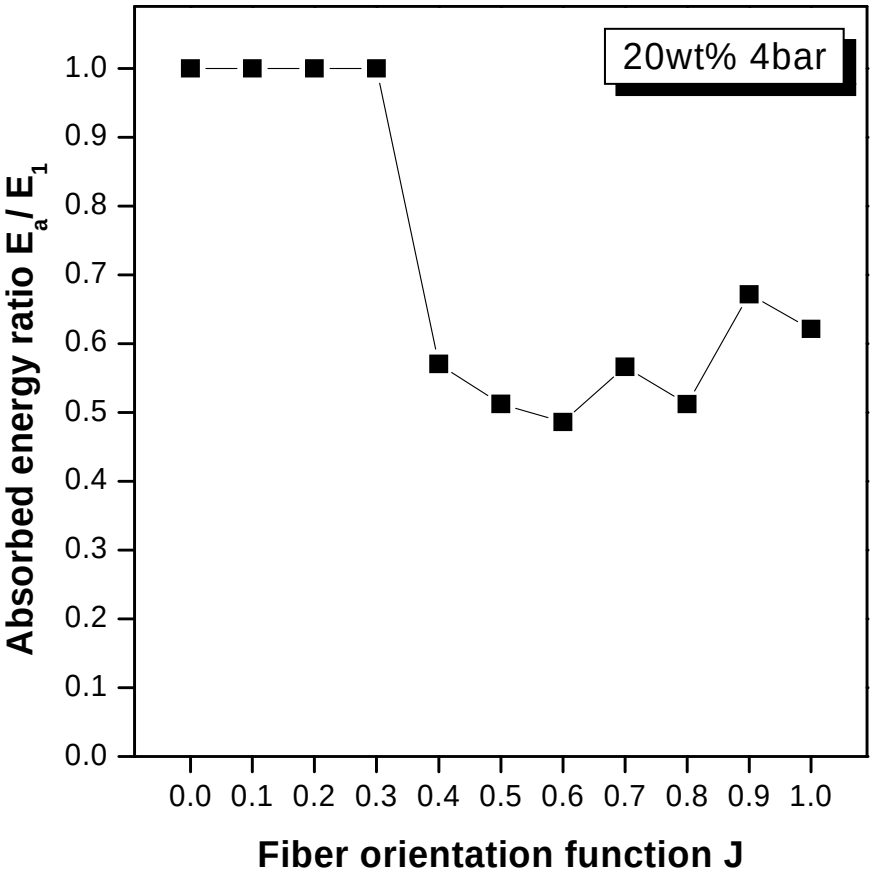


Fig. 49 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 4bar

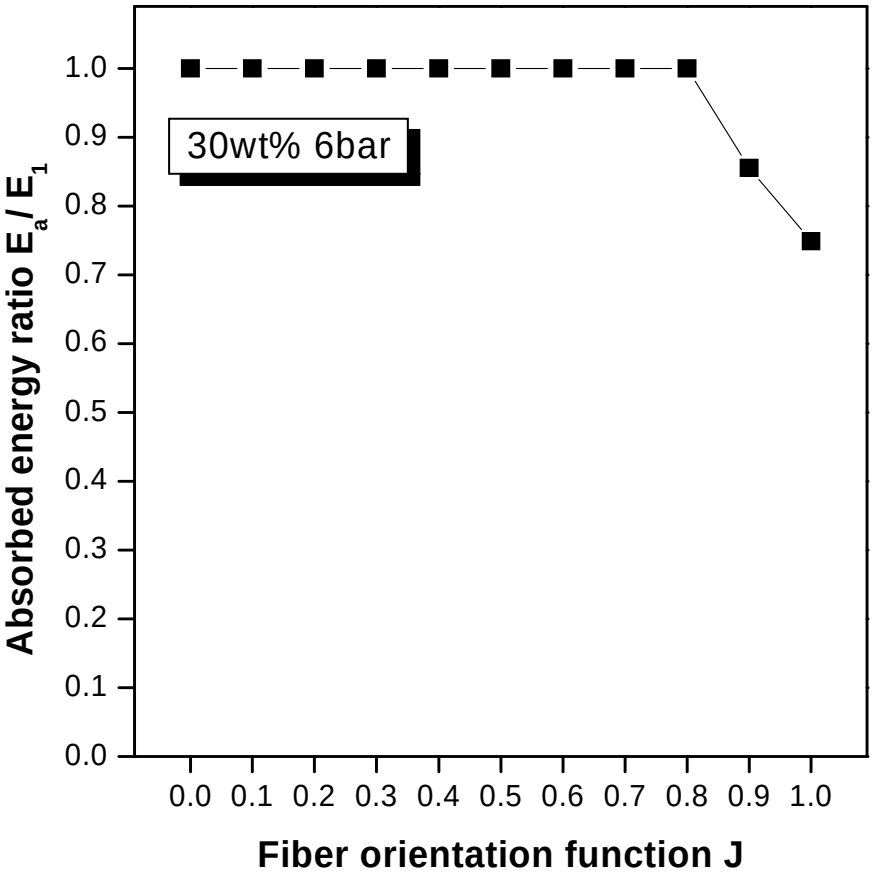


Fig. 50 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 6bar

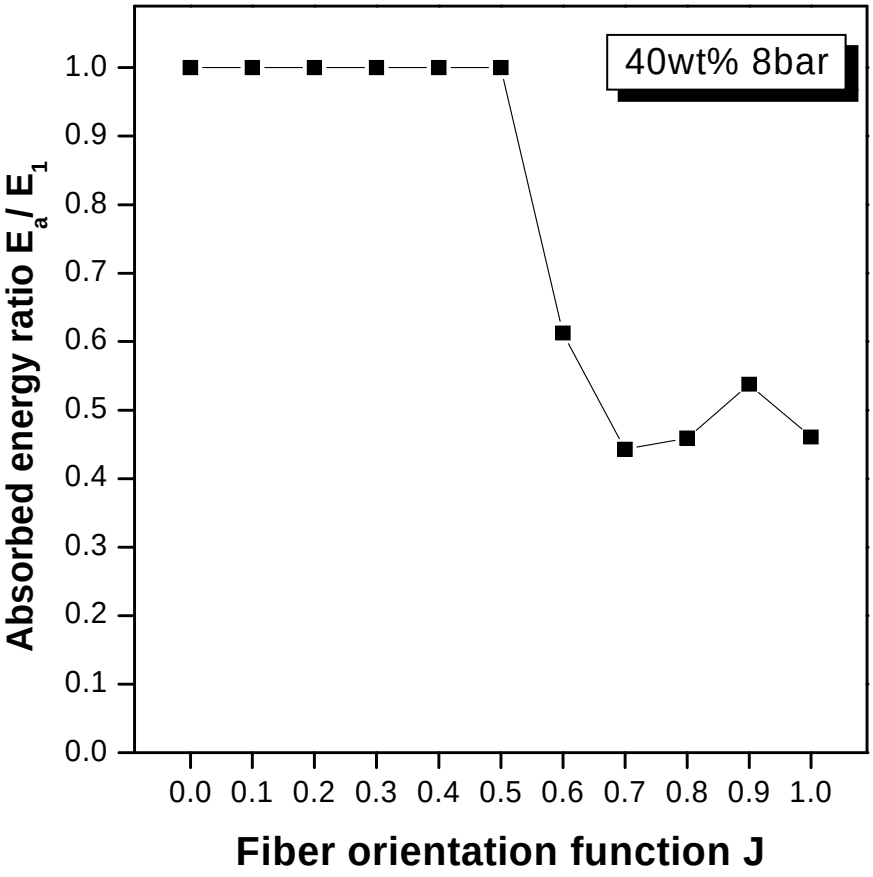


Fig. 51 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 8bar

Fig. 52-54는 강구의 압력(속도)에 따라서 복합재료의 흡수에너지 비를 비교한 그림이다. Fig. 52에서는 강구가 8bar의 압력에서 섬유함유율 10-40wt%를 비교한 그림이다. 임계관통에너지 부근인 40wt%를 제외하고는 10, 20, 30wt% 복합재료의 흡수에너지 비가 유사하게 나타났다. 완전관통된 복합재료는 이방성(J=1)이 될수록 흡수에너지 비가 높아지는 경향이 있다.

이는 고속으로 강구가 복합재료에 충격을 가할 때, 이방성 섬유층에서 섬유들이 층간 균열을 전파하지 못해 등방성보다 더 높은 흡수에너지 비가 나타났다. 또한, J=1이 아닌 0.9에서 가장 높은 흡수에너지가 나타났다. 완전한 이방성인 J=1보다는 약간의 방향성을 가지고 있는 J=0.9가 흡수에너지 비가 나타났다.

Fig. 53에서는 강구가 6bar의 압력에서 섬유함유율 10-30wt%를 비교한 그림이다. 섬유함유율에 따라서 전체적으로 약간의 차이가 있었다. 완전관통된 10, 20wt%에서는 이방성이 될수록 흡수에너지 비가 높아졌다. Fig. 54의 그림에서는 10wt%와 20wt%의 흡수에너지 비가 확연한 차이를 보여줬다. 압력이 낮을수록 10wt%에서는 섬유배향함수(섬유배향)의 영향이 거의 없을 것으로 사료된다.

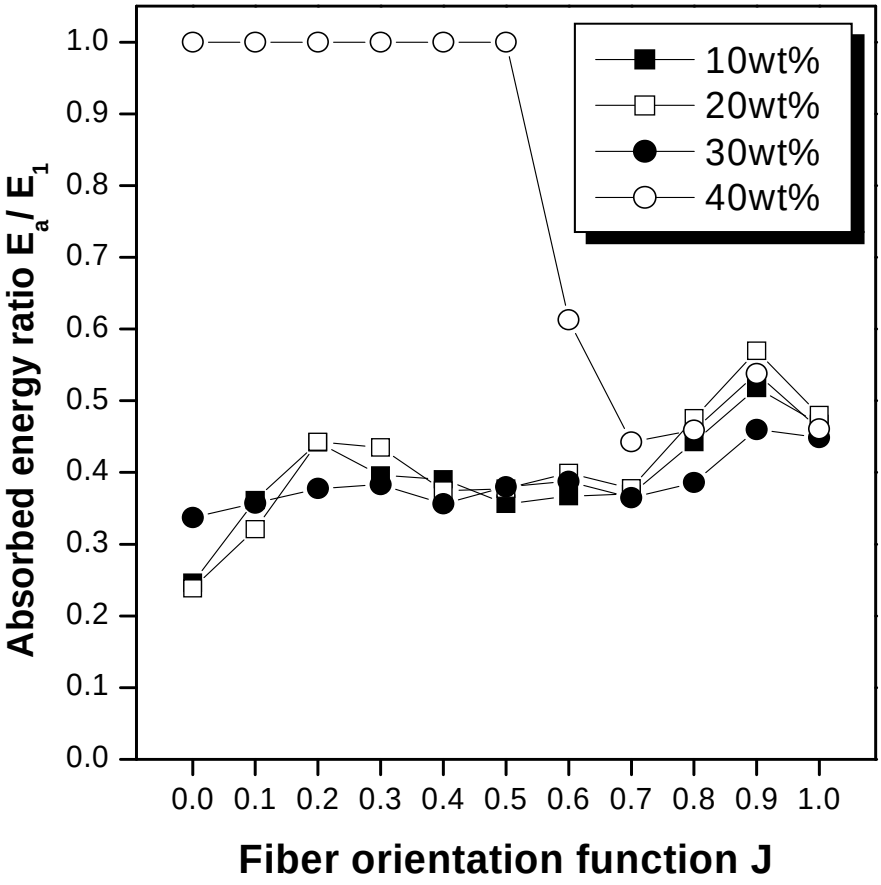


Fig. 52 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 8bar

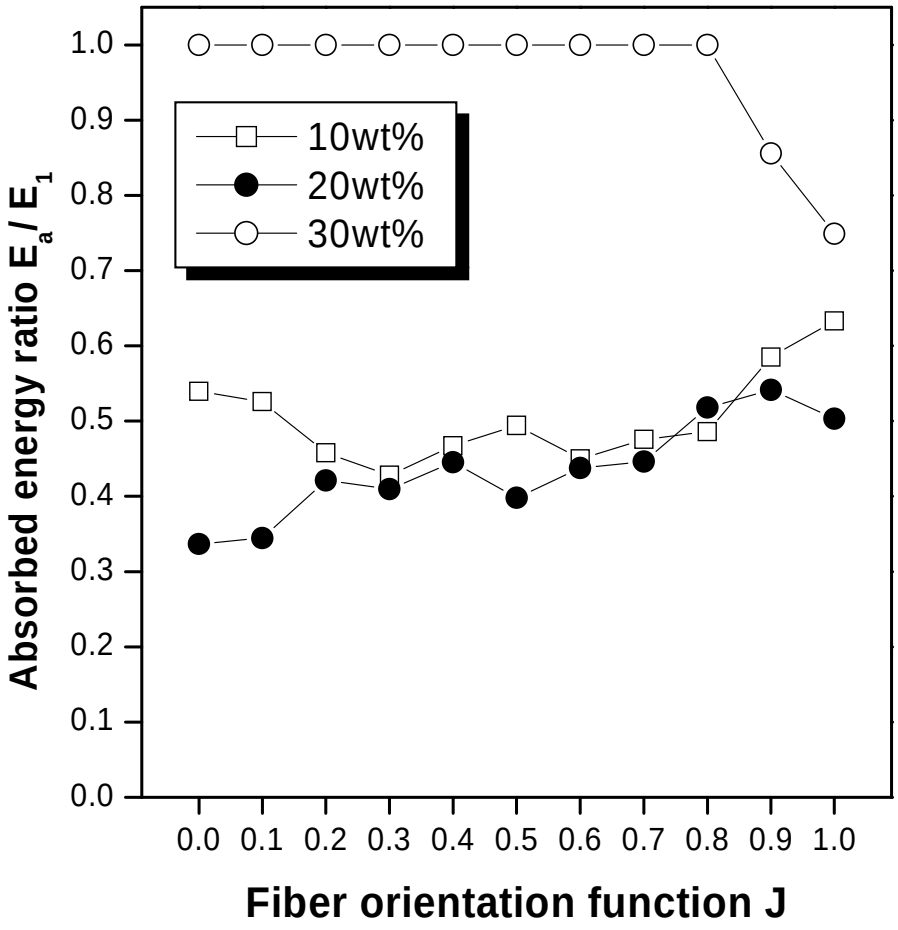


Fig. 53 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 6bar

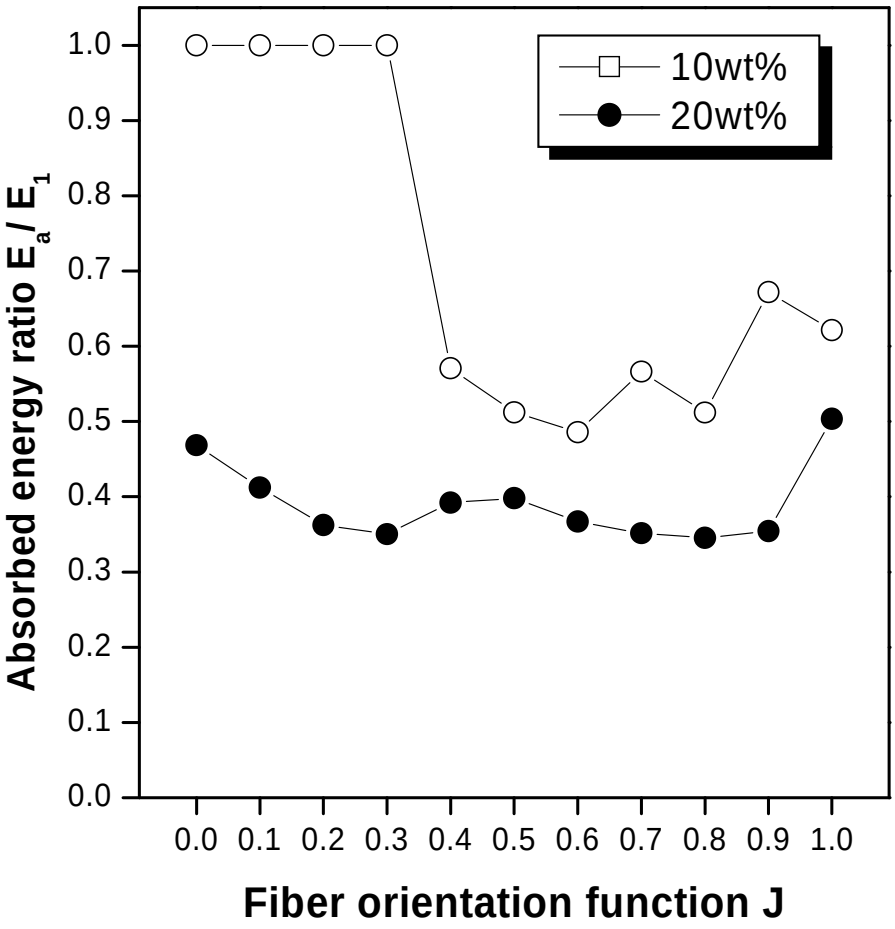


Fig. 54 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on 4bar

Fig. 55-57은 섬유함유율에 따른 흡수에너지 비를 비교한 그림이다. Fig. 55는 10wt%의 복합재료가 충격 속도에 따른 흡수에너지 비를 나타낸 그림이다. 8bar에서 완전관통 된 흡수에너지 비가 섬유함유율의 영향을 많이 받았다. Fig. 56은 20wt%의 복합재료를 4-8bar 별로 흡수에너지 비를 나타낸 그림인데, Fig. 55보다 섬유배향함수의 영향이 확연하게 나타났다. 이방성이 될수록 흡수에너지 비가 높아졌다. 임계관통에너지 부근에서는 이방성인 복합재료의 흡수에너지 비가 낮게 나타났다. 10wt%에서는 섬유배향의 영향이 많이 나타나지 않는 이유는 섬유함유율이 낮아서이다. Fig. 57은 30wt%인 복합재료의 흡수에너지 비를 나타낸 그림이다. 8bar에서의 흡수에너지 비의 편차가 없었다. 섬유함유율이 높아지면서 섬유배향의 영향보다는 섬유함유율의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

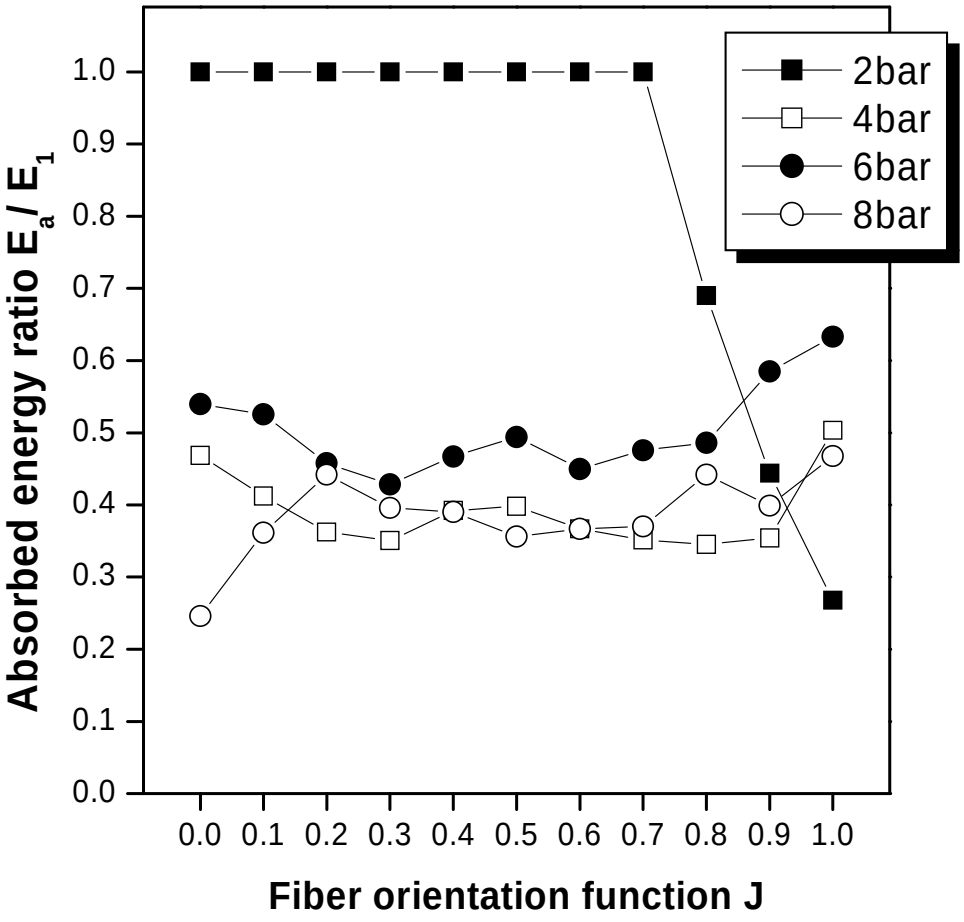


Fig. 55 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on fiber content 10wt%

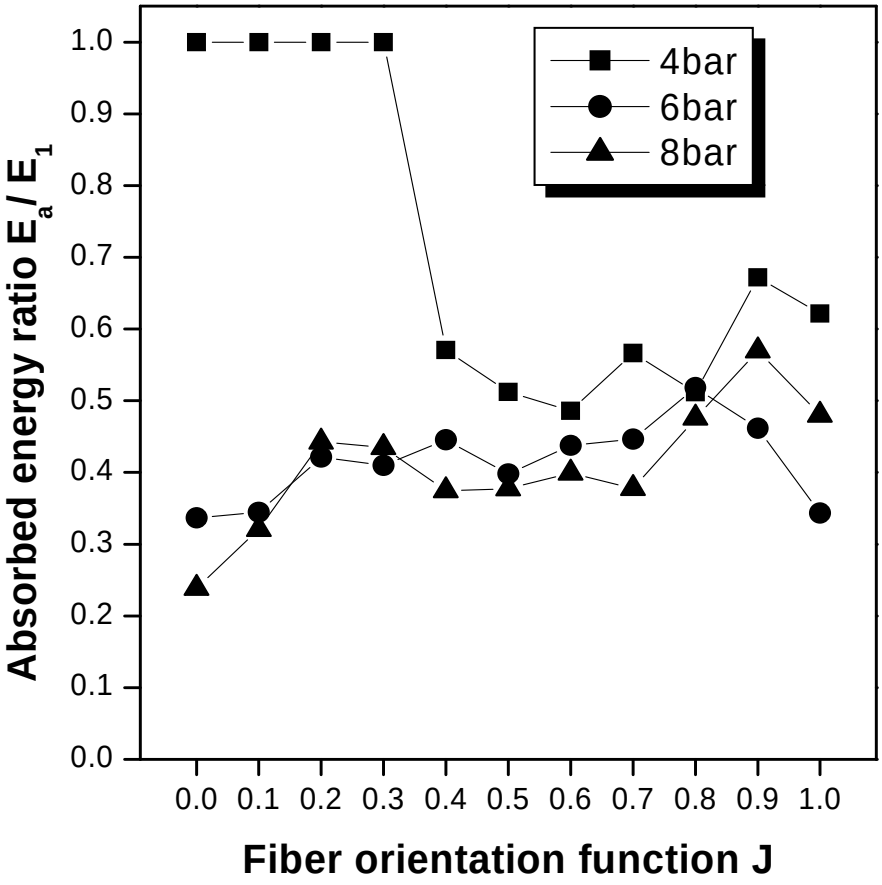


Fig. 56 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on fiber content 20wt%

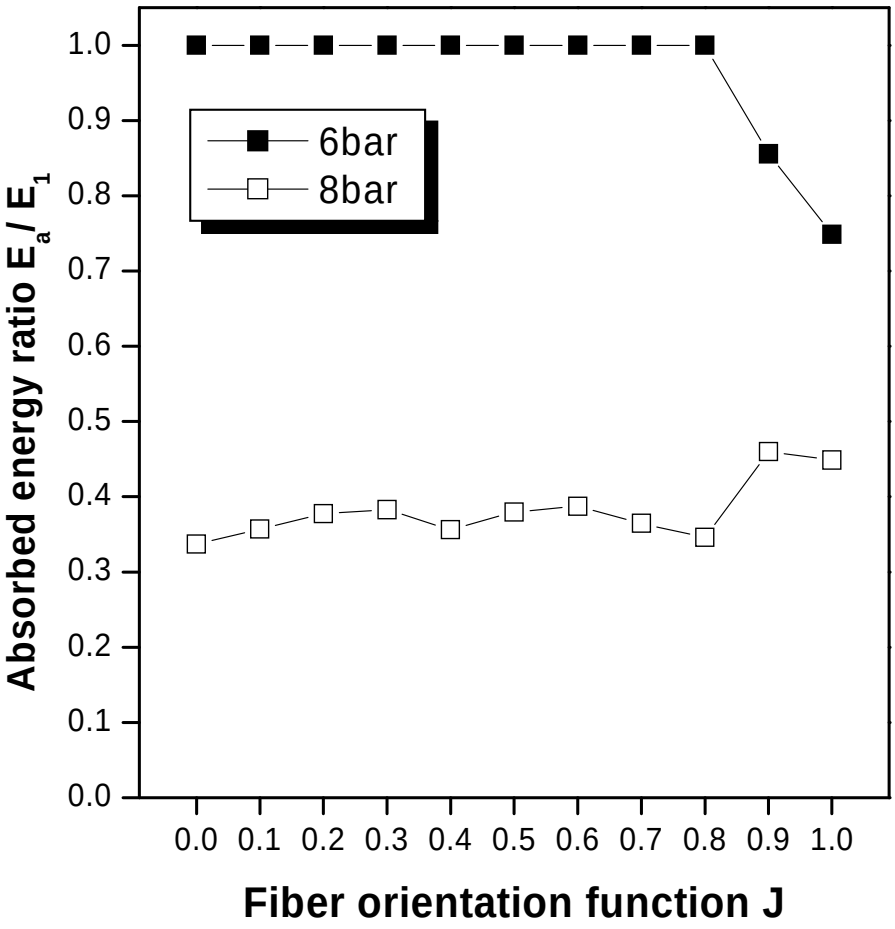


Fig. 57 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber orientation function J on fiber content 30wt%

Fig. 58은 섬유함유율과 흡수에너지 비의 관계를 나타낸 그림이다. 섬유함유율이 높아지면서 이방성의 흡수에너지 비는 비슷하게 나타났으나, 등방성인 흡수에너지 비는 함유율이 높아지면서 흡수에너지가 높아졌다. 30wt%에서는 섬유배향의 영향이 많이 없어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 59는 섬유함유율이 10wt%인 복합재료의 공기압과 흡수에너지 비의 관계를 나타낸 그림이다. 압력에 따른 흡수에너지의 편차는 랜덤이 f=0에서 높게 나타났다. 6bar에서의 흡수에너지 비가 다른 bar보다 높게 나타났다. 강구(9mm)가 고속충격을 줄 때 GFRP 복합재료가 가장 크게 에너지를 흡수한다고 사료된다. 섬유배향함수 f=1일 때 흡수에너지 비가 큰 이유는 섬유배향이 이방성일 때 완전관통 부근에서는 효과적이라는 것을 알 수 있다.

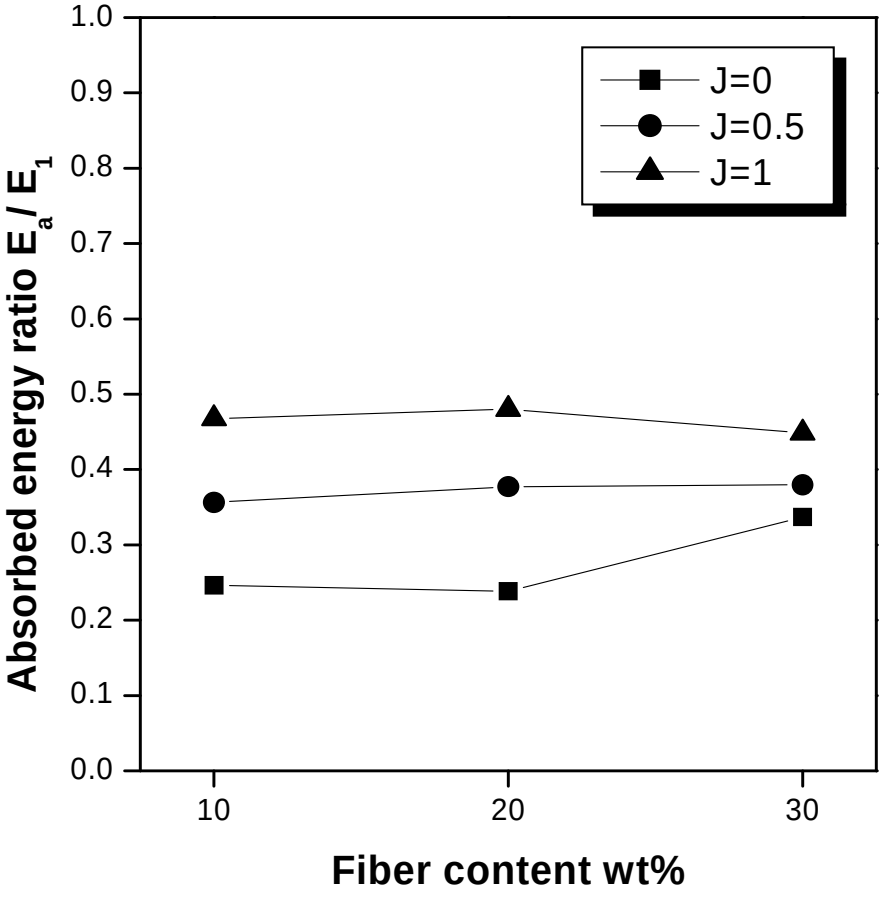


Fig. 58 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and fiber content

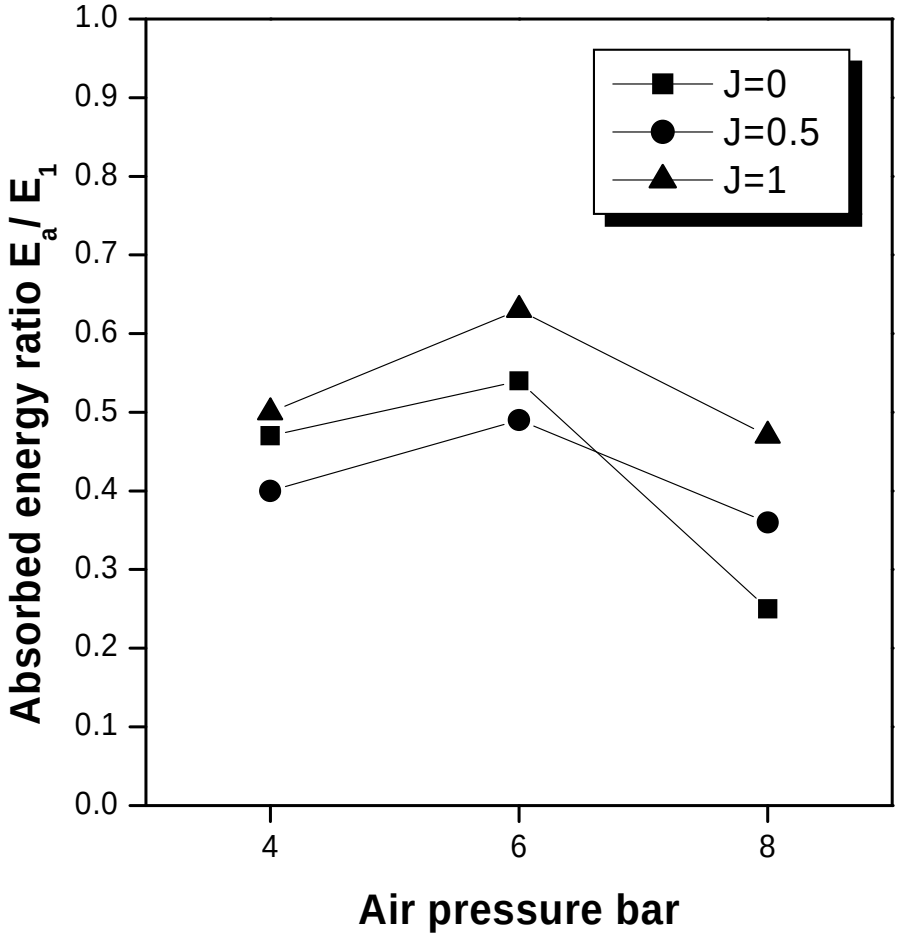


Fig. 59 Relationship between absorbed energy ratio E_a/E_1 and air pressure on fiber content 10wt%

제 5 장 결 론

GFRP 복합재료의 섬유 배향과 함유율에 따른 인장강도 측정, 고속충격 흡수에너지 비 측정, 인장시험 시 열화상 측정 등으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 섬유배향 0°방향의 인장강도 값의 증가폭은 섬유함유율이 증가할수록 크게 나타남을 알 수 있고, 섬유배향 90°방향의 인장강도 값은 섬유함유율에 관계없이 섬유배향함수 J=0.7에서 모재의 강도 값과 유사하게 나타남을 알 수 있다.

2. 복합재료 0°방향에서 인장강도 비는 섬유함유율의 증가에 관계없이 일정하게 나타났으나, 90°방향에서 인장강도 비는 섬유함유율이 증가 할수록 감소함을 알 수 있으나, 섬유함유율이 10wt%에서는 섬유배향함수 J=0.3과 일방향 섬유배향각 θ=30°은 비슷한 섬유강화효과를 갖으며, 20wt%에서는 섬유배향함수 J=0.2와 일방향 섬유배향각 θ=20°인 경우도 비슷한 섬유강화효과를 갖는 것을 알 수 있었다.

3. 일방향 복합재료에서 모재의 성질과 강화재인 섬유함유율을 알면 복합재료의 강도를 얻을 수 있는 혼합법칙의 이론식이 있으나, 섬유함유율과 섬유배향상태에 따른 인장강도 식을 구할 수 있는 식이 없어, 본 연구에서 섬유배향함수(J)와 섬유함유율(wt%)을 대입하면 인장강도 값이 구해지는 실험식을 다음과 같이 제안 하였다.

$$\sigma_{[0^0]} = 1.12\{(\mathrm{wt\%}+10)+(\mathrm{wt\%}+22.32)\mathrm{J}\}$$

$$\sigma_{[90^0]} = (11.4+1.15\mathrm{wt\%})\mathrm{e}^{(0.034-0.0402\mathrm{wt\%})\mathrm{J}}$$

4. 고속충격 실험을 통하여 섬유 배향과 함유율 별로 임계관통속도를 알아냈다. 섬유함유율 별 임계관통속도 부근압력(속도)에서는 함유율 보다는 섬유배향상태에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

5. 자동차 범퍼 등이 일방향으로 배향되어있어 복합재료는 임계관통속도 부근이 아닌 고속충격에는 효과적인 것도 알 수 있다. 이는 임계관통속도 부근이 아니면 복합재료에 충격을 받는 섬유 층간 균열이 많이 되지 않기 때문이라고 사료된다. 또한, 섬유배향함수가 f=1일 때 보다 약간의 방향성을 갖는 f=0.9가 고속충격 흡수에너지 비가 가장 크게 나타났다.

6. GFRP의 인장시험 시 온도분포와 크랙이 진전될 때의 온도분포를 적외선 열화상 카메라로 분석할 수 있는 방법을 제시하였다. 섬유배향상태가 이방성으로 진행될수록 파단시간이 길어지고, 파단시간이 길어질수록 최고온도가 낮아지는 것을 알 수 있고, 인장강도와의 상관관계가 있는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 森田乾郎, 金原 勳, 福田 傳. “複合材料.” 日本:日刊工業新聞社 *1*:1, 1988.
2. 이대길, 정광섭, 최진호, "복합재료 역학 및 제조 기술." 『시그마프레스』:1-2, 1998.
3. 최만용, 김원태, “적외선열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함진단.” 『한국비파괴검사학회』 *14(5)*:525-531, 2004.
4. Vavilov V. Thermal nondestructive testing: short history and state-of-art. In: Balageas D, busse G, Carlomagno GM, *editors Proceedings of the QIRT92*, Eurotherm Series 27. EETI ed.,:179-93. 1992.
5. Won T. Kim, Man Y. Choi, and Jung H. Park, "Diagnosis of defect points in materials using infrared thermography." *Key Engineering Materials 297-300*:2169-2173, 2005.
6. Jung H. Park, Man Y. Choi, Won T Kim, "Infrared thermography and modeling to the concrete deck with internal defects as a non-destructive testing." *Key Engineering Materials 270-273*:938-943, 2004.
7. 임태건, 윤성운, 조선형, 김이곤, "사출성형된 장섬유강화 플라스틱 복합재료의 화상처리기법을 이용한 섬유배향의 측정." 『대한기계학회논문집(A)』 *22(10)*:1821-1832, 1998.
8. Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., "Separation of Matrix and Fibers during Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics." *Proceedings of 3rd Japan_U.S. Conference on Composite Materials*, Tokyo, 605-612, 1986.
9. Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fibre-Reinforced Thermoplastics." *International Polymer Processing 3(1)*:54-61, 1988.
10. 이상동, 김혁, 이동기, 한길영, "섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유종횡비와 면적비의 영향." 『대한기계학회논문집(A)』 *22(4)*:953-959, 1998.

11. 임재규, 신재훈, 박한주, T. Shoji and H. Takeda. "자동차용 고강도 폴리머 복합재료의 변형과 강도에 관한 연구." 『대한기계학회논문집(A)』25(7):1082-1088, 2001.
12. 신익재, 이동주, 김홍건, "고속압밀법에 의해 제작된 유리섬유강화 PET 기지 복합재료의 최적제작조건." 『대한기계학회논문집(A)』 *26(5)*:813-821, 2002.
13. 김혁, 이동기, 한길영, 김이곤, "장섬유강화 고분자 복팝판의 섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도." 『한국복합재료학회지』*9(2)*:23-34, 1996.
14. 최홍섭, J. D. Achenbach, "횡방향 전단하중을 받는 단일방향 복합재료의 미시역학적 거동연구." 『대한기계학회논문집(A)』*21(11)*:1896-1911, 1998.
15. 변준형, 이상관, 엄문광, 김태원, "Twisted Yarn 복합재료의 물성치 시험 및 탄성계수 예측." 『한국복합재료학회지』*15(6)*:30-37, 2002.
16. 조선형, 임영호, 김이곤, "압축성형된 한 방향 섬유강화 고분자 복합판의 섬유함유율 분포." 『한국복합재료학회지』*7(3)*:67-76, 1994.
17. 이상동, 박준식, 이동기, 한길영, "화상처리에 의한 섬유배향각 분포측정에 있어서 교차점합산법의 정밀도." 『한국정밀공학회지』*15(12)*:97-105, 1998.
18. 김재열, 송경석, 최철준, 김훈조, "적외선 카메라를 이용한 용접부 안전성 평가에 관한 연구." 『한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집』:360-365, 2006.
19. 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, "적외선 열화상 기술을 이용한 내부 인공결함 평가." 『KSNT』:68-71, 2007.
20. 윤주영, 윤세현, 노영숙, 조승호, 정란, "적외선 열화상 데이터를 통한 정량적 부식률 분석방법에 관한 연구." 『KSNT』:61-66, 2007.
21. 박정학, 최만용, 강기수, 김원태, "적외선 열화상을 이용한 CT시편의 열응력 분석." 『KSNT』:305-311, 2006.
22. 정우균, 안성훈, 이우일, 김희재, 권정원, "세라믹/유리섬유강화복합재 적층판의 고속충돌에 의한 파괴거동." 『한국정밀공학회지』*23(5)*:170-176, 2006.
23. 이중희, 정광진, 최창근, "유리섬유 강화 열가소성 복합재료 고상 성형품의 충격특성에 관한 연구." 『한국복합재료학회지』*12(6)*:8-14, 1999.
24. 김문생, 박승범, "적층복합판의 충격에 의한 모재균열 및 층간분리에 관한 연구." 『대한기계학회논문집(A)』*21(2)*:317-326, 1997.

25. 조영재, 김영남, 양인영, “CFRP 적층쉘의 적층구성 및 곡률 변화에 따른 관통 특성.” 『한국정밀공학회지』*22(2)*:164-171, 2005.

26. 山田國廣, 堀川 明. "2次元纖維集合體の確率幾何." 纖維機械學會誌 *37(12)*:51-64, 1984.

27. Stein, R. S., and Stidham, S. N.. "A Theory of Orientation Correlation in Crystalline Polymeric Solids.", *J. Applied Physics 35*:42, 1964.

28. Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E. G., "Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing.", *International Polymer Processing X(3)*:262- 269, 1995.

29. 水島二郎, 宮內新, 濟勝善雄, "ペソコン畵像處理", 哲學出版 : 1-21, 1986.

30. 조선형, 이동기, 김이곤, "장섬유강화 고분자 복합판의 프레스성형에 있어서 화상처리에 의한 섬유의 배향에 관한 연구." 『대한기계학회논문집』*15(3)*:834-842, 1991.

31. Rovert Madding, Gray orlove. "INFRAMATION 2004." *5*, 2004.

32. Rovert Madding, Gray orlove. "INFRAMATION 2005." *6*, 2005.

33. Vistasp M. Karbhari., "Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes." *J. Composite Materials* : 1164-1186, 1997.

34. Im, K. K, Park, N. S., Kim, Y. N., Kim, S. K., and Yang, I. Y., "Characteristics Analysis of Falling Weight Impact Response in CF/Epoxy Composite Plates Using Frequency Responses." *The Korea Society for Composite Materials 6(29)*:9-17, 2003.

35. Hwang, J. J, Lee, G. S., Kim, Y. N., Ra, S. W., Sim, J. K., and Yang, I. Y., "Impact Damage of CFRP Laminated Shells with the Curvature.", *KSPE*:1341-1344, 2003.

36. G. L. Farley, and R. M. Jones., "Energy-Absorption Capability of Composite Tubes and Beams." *NASA TM* 101634, 1989.

37. P. K. Mallick and L. J. Broutman, "Impact Properties of Laminated Angle Ply Composites." *SPI Annual Technical Conference 30(9-C)*, 1975.

38. R.C. Novak and M. A. DeCrescente, "Impact Behavior of Unidirectional Resin Matrix Composites Tested in Fiber Direction." In Composite Materials : Testing

and Design, ASTM STP 497, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, Pa., 311-323, 1972.

39. A. Kelley, Stong Solids, *Clarendon, Oxford*, 1973.
40. A. Kelley, *Proc. Roy. Soc.*, A319, 95, 1970.
41. P. W. R. Beaumont, "A Fracture Mechanics Approach to Failure in Fibrous Composites." *J. Adhesion 6*:107-037, 1974.

감 사 의 글

본 논문이 완성되기까지 학문적인 지도와 제자사랑의 마음으로 올바른 길로 이끌어 주신 이동기 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 앞으로 교수님의 가르침이 헛되이 되지 않도록 열심히 노력하겠습니다.

학위 기간 동안 충고와 조언을 아끼지 않으시고 격려해주신 심재기 교수님과 본 논문의 심사를 통하여 많은 검토를 하여 주신 한길영 교수님, 김재열 교수님, 유영태 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 학위 과정동안 많은 지도와 가르침을 주신 김영석 교수님, 오율권 교수님께도 감사드립니다.

저를 지켜봐 주시고 격려하여 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

끝으로, 평생을 자식들을 위해서 사랑과 헌신으로 한없이 뒷바라지하신 부모님에게 이 작은 결실의 영광을 올립니다.

김 진 우

저작물 이용 허락서

학 과	정밀기계공학과	학 번	20047384	과 정	박사
성 명	한글 : 김 진 우 한문 : 金 辰 宇 영문 : Kim Jin-Woo				
주 소	광주광역시 북구 두암동 주공아파트 109동 304호				
연락처	E-mail : jinu763@chosun.ac.kr				
논문제목	한글 : GFRP 복합재료의 섬유 배향과 함유율이 인장강도와 고속충격 흡수에너지에 미치는 영향				
	영문 : Effects of Fiber Orientation and Contents on the Tensile Strength and High Velocity Impact Absorbed Energy of GFRP Composites				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포・전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함.

동의여부 : 동의(∨) 반대( )

2008 년 2 월 일

저작자 : 김 진 우 (인)

조선대학교 총장 귀하