creative commons

COMMONS DEED

저작자표시 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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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]I804:24011-200000264053

2013 년 8 월
석사학위 논문

자동차 범퍼빔용 유리섬유/폴리프로필렌 프리프레그의 제조 및 특성

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 태 익

자동차 범퍼빔용 유리섬유/폴리프로필렌 프리프레그의 제조 및 특성

Manufacturing and Characterization of Glass Fiber/ Polypropylene Prepreg for Automotive Bumper Beam

2013 년 8 월 23 일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 태 익

자동차 범퍼빔용 유리섬유/폴리프로필렌 프리프레그의 제조 및 특성

지도교수 이 동 기

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013 년 4 월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 태 익

김태익의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 심 재 기 (印)

위 원 조선대학교 교수 황 석 승 (印)

위 원 조선대학교 교수 이 동 기 (印)

2013 년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES I
LIST OF TABLES III
LIST OF PHOTOGRAPHS IV
NOMENCLATURES V
ABSTRACT VI

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구 배경 1
제 2 절 연구 목적 6

제 2 장 이 론 8
제 1 절 함침도 8
제 2 절 프리프레그의 강도 9
제 3 절 압축비, 섬유함유율비 및 불균질도 10
제 4 절 섬유의 분리방정식 13

제 3 장 실험 15
제 1 절 프리프레그 제조 18
제 2 절 프리프레그 압축성형 및 수직교차 직조방법 19
제 3 절 미세조직 관찰 21

제 4 장 결과 및 고찰 25
제 1 절 프리프레그 제조 25
제 2 절 압축성형 31

제 3 절 수직교차 직조방법 36

제 5 장 결 론 38

참 고 문 헌 39

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Automotive fuel economy and mass reduction ····· 3
Fig. 1-2 Affordability of weight reduction and approach ····· 4
Fig. 1-3 Design of lightweight multi-material automotive body ····· 5
Fig. 1-4 X-ray photograph before and after compression molding of GMT Sheet ····· 7
Fig. 2-1 Nomenclature for Slab-shaped Part Compression Molding 12
Fig. 2-2 Distribution of the Fiber Content Ratio ····· 13
Fig. 3-1 Schematic diagram of pultrusion process ····· 18
Fig. 3-2 Part for measuring fiber content ····· 21
Fig. 3-3 Hot press using compression molding ····· 22
Fig. 4-1 Hot Relationship between degree of impregnation and pulling speed (Die temperature T_D=220℃) ····· 30
Fig. 4-2 Relationship between degree of impregnation and pulling speed (Resin temperature T_R=220℃) ····· 31
Fig. 4-3 Relationship between prepreg thickness and pulling speed (Resin temperature T_R=220℃, Die temperature T_D=220℃) 32
Fig. 4-4 Relationship degree of impregnation and pulling speed (Resin temperature T_R=220℃, Die temperature T_D=220℃) 33
Fig. 4-5 Relationship between fiber content ratio and distance from center (Prepreg, R_{cr}=0) ····· 34
Fig. 4-6 Relationship between fiber content ratio and distance from center of prepreg (Rcr=0.8) ····· 36
Fig. 4-7 Relationship between fiber content ratio and distance from center of GFRP Composite (R_{cr}=0.8) ····· 37

LIST OF TABLES

Table. 4-1 Tensile strength of prepreg(40wt%) ····· 28

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo. 3-1 SEM photograph of prepreg (Fiber content 40wt%) ····· 19
Photo. 3-2 Automatic specimen polisher ····· 24
Photo. 3-3 Ion sputter ····· 25
Photo. 3-4 Field emission scanning electron microscope ····· 26
Photo. 4-1 SEM Photograph of prepreg after compression molding (R_{cr} =0.8) ····· 35
Photo. 4-2 Product of prepreg plain ····· 39

ABSTRACT

Manufacturing and Characterization of Glass Fiber/ Polypropylene Prepreg for Automotive Bumper Beam

By Kim Tae-Ik
Advisor : Prof. Lee Dong-Gi Ph. D.
Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering,
Graduate School of Chosun University

GMT, a thermoplastic composite in sheet state, is laminates of matrix sheet and glass fiber mat, and is commercially available as sheet form for press work. This GMT-Sheet is widely used in various internal and external components of automobile due to lightweightness and mechanical strength. One of the issues in GMT-Sheet is the difference of flow molding for glass fiber and matrix during molding process. Because of this difference, molded product shows nonhomogeneity and anisotropic properties. In this study, to eliminate degree of nonhomogeneity and fiber orientation during the molding of GMT-Sheet, GFRP prepreg is fabricated using roving fiber and polypropylene. Using the fabricated GFRP prepreg, GFRP-Sheet is prepared through 0/90° fabric approach. Structural stability, degree of impregnation, surface roughness, moldability, flow analysis, and continuous manufacturing process on GFRP-Sheet are conducted.

Purpose of this study is to remove inhomogeneous fiber orientation using GFRP composite at automobile component formation. After preparing glass fiber prepreg, degree of impregnation of glass fiber and polypropylene was derived. In addition, tensile strength and microstructure of prepreg was evaluated. Degree of impregnation for prepreg was improved along with low pulling speed, high resin temperature, and longer die length. According to SEM micrograph, homogeneous fiber orientation was observed, and there was no separation of matrix and glass fiber. Therefore, application of plain weaving on prepreg in GFRP composite can have superior flow-rate. Also, fundamental data that can be referred in industry field are gathered.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

최근 자동차 업계는 환경공해 문제와 동시에 연비향상을 위해 다양한 연구개발을 하고 있다. 이와 함께 자원재활용을 위한 리사이클링 등에 대한 폭 넓은 연구개발이 이루어지고 있다. 최근의 자동차 관련 기술개발의 동향은 자동차의 경량화, 자동차 부품의 모듈화 및 무공해(전기 및 하이브리드)자동차에 대한 연구를 중심으로 기존 자동차의 연비향상 뿐 아니라 차체 수명연장, 안정성 향상, 배기가스의 정화, 소음방지 그리고 자원재활용을 위한 리사이클링 등에 대한 폭 넓은 연구개발 투자가 이루어지고 있다.

Fig. 1-1과 같이 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서, 결국 소재의 경량화는 환경오염 방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이라 할 수 있다.

Fig. 1-2와 같이 자동차의 경량화 방안은 우수한 물성을 갖는 경량재료의 개발과 기존재료의 제조방법 개선을 통한 기계적 성질을 향상시키는 방법 등이 있으며, 이를 위해 사용되는 재료로 플라스틱 소재의 재료 외에 알루미늄(Al) 합금, 마그네슘(Mg) 합금, 티타늄(Ti) 합금, 철강재료 등의 금속재료와 세라믹 재료 등이 있다.

현재 자동차용 유리섬유강화 복합재료로 실용화되어 폭넓게 이용되고 있는 복합판재는 모재를 플라스틱, 강화재를 유리섬유로 한 유리섬유강화 플라스틱 복합재료가 있다. 국내에서는 호남석유화학 등에서 생산되어 사용하는 “GMT(Glass Mat reinforced Thermoplastics) Sheet” 등이 있고, 국외에서의 대표적인 업체로는 GE Plastic의 “AZDEL”, 독일 BASF의 “Elastogram” 등이 있다. 이 유리섬유강화 플라스틱 복합재료는 종래의 FRP나 SMC(Sheet Molding Compound) 대신 프레스 성형재료로써 열가소성수지를 매트릭스로 하여 유리섬유로 강화한 하이브리드 성형재료이다[1].

유리섬유강화 플라스틱 복합재료의 장점은 폴리프로필렌 및 유리섬유가 범용

소재이기 때문에 가격이 비교적 저렴하면서도 강성 및 인성이 우수하다는 점이다. 특히, 무기물과 유기물을 잘 결합시켜 제작된 유리섬유강화 플라스틱 복합재료는 가열냉각의 물리변화를 이용한 프레스 성형용 열가소성 플라스틱 복합재료(Fiber Reinforced Thermoplastic resin : FRTP)로써 내충격성이 높은 점과 성형성이 우수한 점 또한 회수 후 재사용이 가능한 점 등 많은 면에서 우수한 특성을 가지고 있어, 여러 분야에서 실용화가 진행되어지고 있다[2-3].

Fig. 1-3과 같이 자동차 1대에 차지하는 플라스틱의 구성 비율은 최근 알루미늄과 거의 동등해 약 7%이다. 플라스틱에는 다양한 종류가 있으며 각각의 특성을 살린 여러 가지 용도로 사용되고 있으며 공통된 특성으로서 가볍고, 부식되지 않으며, 가공하기 쉽다는 것을 들 수 있다. 그 때문에 자동차에도 기존부터 사용되어왔던 내장부품에 이어 1980년대부터 엔진부품이나 외장부품에도 확대 채용되어 구성 비율을 크게 신장시키고 있다. 엔진부품으로서 실린더헤드 커버, 흡기 매니폴드, 라디에이터 탱크, 외장부품에는 범퍼, 휠 커버, 헤드램프 렌즈, 도어핸들, 퓨얼리드 등이 수지화되어 왔다. 펜더나 도어패널 등 보디 외판패널에 대한 적용은 이전부터 몇 번 시도되었다. 플라스틱은 일반적으로 강도에 있어 금속에 떨어지므로 강도가 필요한 보디쉘에는 아직 응용되고 있지 않고 있으나, 이에 대한 연구가 국내·외에서 꾸준히 진행되고 있다[4].

또한 플라스틱 소재의 특허는 범퍼에 관한 기술이 가장 많이 출원되었다. 그 다음으로 판재, 흡기 매니폴드, 차체, 프레임 등에 관한 출원이 일부 차지하고 있다. 범퍼에 관련된 기술이 가장 많이 출원되고 있는 것을 볼 때, 자동차의 경량화를 위해 종래의 스틸재의 범퍼 백빔, 범퍼의 보강재 등이 플라스틱 소재로 대체되고 있음을 알 수 있다.

자동차 범퍼 빔 등의 구조부재로 사용되는 섬유강화 플라스틱 복합판재는 유리 장섬유가 랜덤하게 배향되어 있는 랜덤 매트와 일방향으로만 배향되어 있는 유리 장섬유를 조합시킴으로서 강도의 방향성을 부여한 것이다. 이와 같이 제작된 복합판재를 고온압축하여 부품 성형 시, 섬유와 플라스틱의 유동속도차에 의하여 불균질하고, 섬유배향이 발생한다. 그러므로 섬유함유율에 따른 섬유배향상태와 유리섬유의 유동성이 우수한 복합판재 개발이 요구된다[5].

Fig. 1-1 Automotive fuel economy and mass reduction

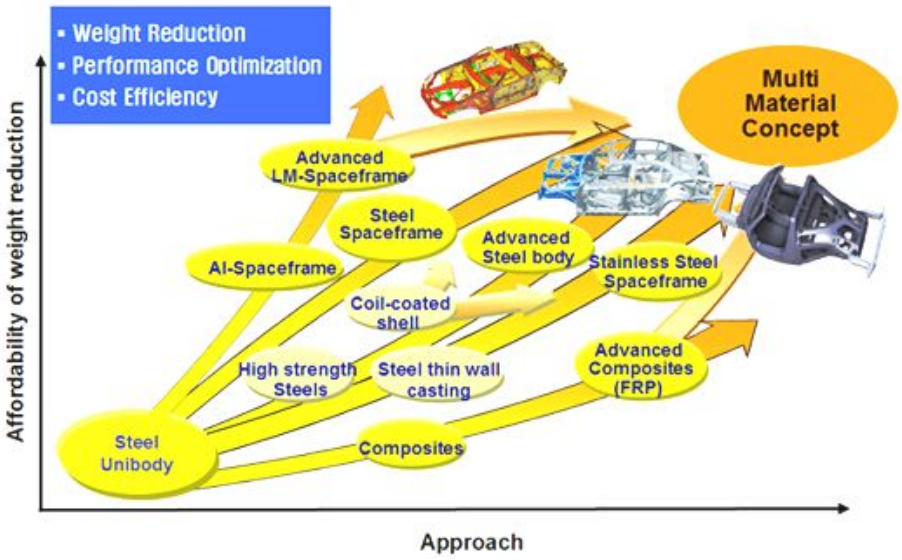


Fig. 1-2 Affordability of weight reduction and approach

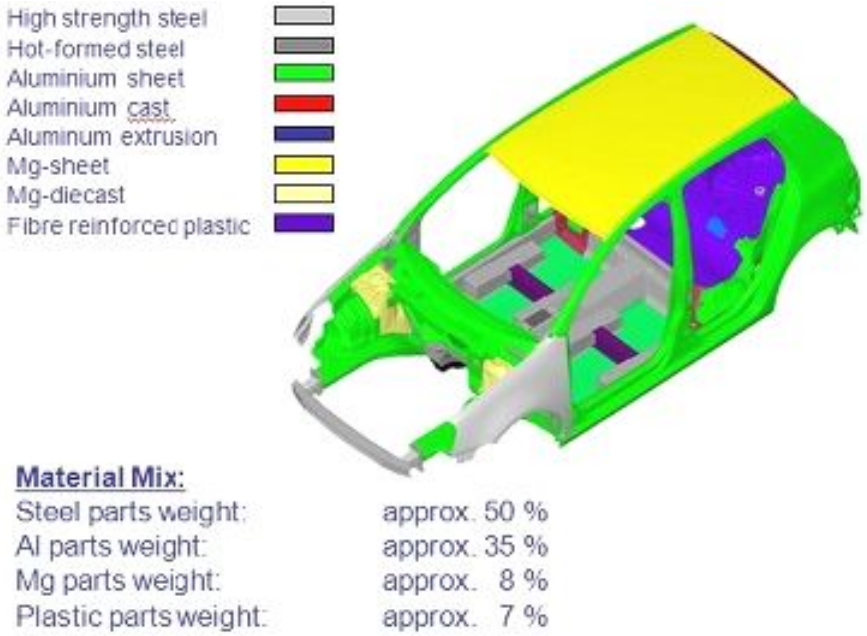


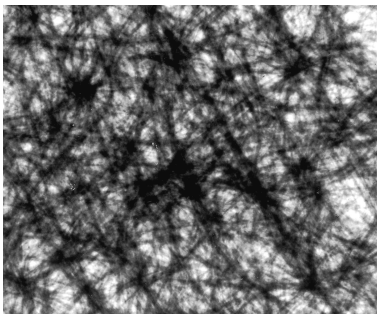
Fig. 1-3 Design of lightweight multi-material automotive body

제 2 절 연구 목적

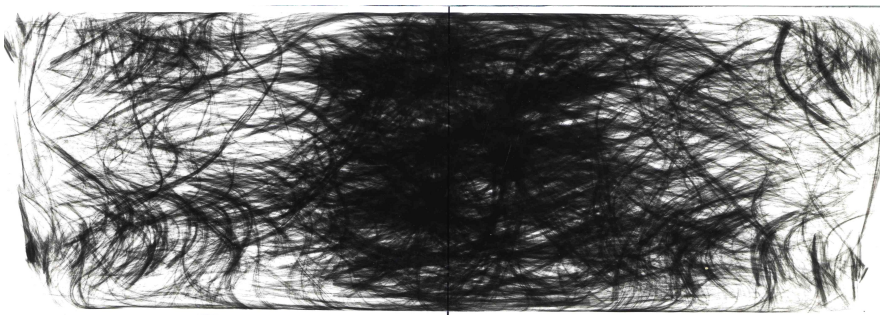
자동차용 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 복합재료로 실용화되어 폭넓게 이용되고 있는 복합판재는 모재(Matrix)를 플라스틱, 강화재(Reinforcement)를 유리섬유로 한 유리섬유강화 플라스틱 복합재료인 GMT(Glass Mat reinforced Thermoplastic) Sheet가 있다. 종래의 FRP(Fiber Reinforced Plastic)나 SMC(Sheet Molding Compound) 대신 프레스 성형재료로써, 열가소성수지를 모재로 하여 유리섬유로 강화한 하이브리드 성형재료이다. GMT Sheet는 자동차의 경량화를 위해, 자동차 내·외장 주요 부품인 범퍼, 헤드램프 커버, 흙받이, 시트 프레임, 차체 등으로 사용된다[4-5]. Fig. 1-4와 같이 GMT Sheet의 가장 큰 문제점은 고온압축 성형 시, 모재와 강화재의 유동속도 차가 발생하는 것이다. 이로 인해, 성형품이 불균질하게 되고, 섬유배향이 이방성이 되며, GMT Sheet 성형품의 강도나 특성에 변화가 생긴다.

이와 같은 문제점과 관련하여, 일방향 섬유강화 복합재료의 강도계산, 섬유배향 상태의 정량적 측정, GFRP 복합재료의 압축성형 시 섬유배향과 불균질도의 상관관계, 섬유함유율 및 섬유배향 상태가 복합판재의 인장강도에 주는 영향, 열가소성수지가 장섬유매트 속으로 함침되는 복합판재의 연속제조공정 및 수학적 모델링, 폴리프로필렌 수지와 유리섬유매트의 물성을 측정하여 함침도를 높이는 주요 인자 등의 연구가 진행됐다[6-13]. 그러나 유리섬유강화 플라스틱 복합재료의 압축성형 시, 모재와 유리섬유의 분리 없이 유동성이 우수하고, 불균질한 섬유배향이 없는 GFRP 복합재료 개발에 관한 체계적인 연구결과는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 GFRP 복합재료를 이용하여, 자동차 부품 성형 시 발생하는 불균질한 섬유배향의 발생을 없애기 위함이다. 본 연구에서는 섬유의 유동성이 뛰어나고, 섬유배향의 구조 안정성, 함침도 및 기계적 성질이 우수한 일방향 유리섬유 프리프레그의 제조와 특성평가를 수행했다. 본 연구의 결과로부터 얻어진 일방향 유리섬유 프리프레그는 수직교차형 직조방법을 적용시켜, 섬유의 유동성이 우수한 GFRP 복합재료를 제조할 수 있도록 하는 것이 본 연구의 주요 목적이다.



(a) Before compression molding



(b) After compression molding

Fig. 1-4 X-ray photograph before and after compression molding of GMT Sheet

제 2 장 이 론

제 1 절 함침도

모재와 섬유의 함침도를 계산하기 위해, 미세조직 관찰을 위한 시편은 마운팅을 한다. 마운팅 된 시편은 SEM 측정을 위해, 폴리싱을 한다. 진동 연마를 통해 표면을 깨끗하게 한 후, 최종 연마된 시편은 Pt 코팅을 한다. 이와 같이 제조된 시편을 주사전자현미경(FE-SEM; Field Emission Scanning Electron Microscope)으로 관찰하여, 시편에 함침된 섬유 수를 센다.

시편의 함침도(D_i)는 다음 식과 같이 계산한다[14].

$$D_i = \frac{\text{시편의 함침된 섬유 수}}{\text{시편의 전체 섬유 수}} \tag{2-1}$$

제 2 절 프리프레그의 강도

프리프레그의 섬유 길이 방향으로의 강도는 섬유와 모재의 강도를 각각 고려하여, 프리프레그의 섬유체적비로부터 계산할 수 있다. 일방향 유리섬유 프리프레그의 인장력(P_p)은 다음과 같다[15-17].

$$P_p = \sigma A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{2-2}$$

여기서 P, σ, A에 붙은 첨자인 p, f, m은 각각 프리프레그, 섬유, 모재를 나타낸다. 식 (2-2)의 양변에 재료의 길이 l을 곱하면 $\sigma(Al) = \sigma_f(A_f l) + \sigma_m(A_m l)$ 가 되며, 괄호 속을 각각의 체적 V, V_f, V_m으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{V_f}{V}\sigma_f + \frac{V_m}{V}\sigma_m \tag{2-3}$$

여기서 섬유의 함유체적비율을 $v_f = V_f / V$라 하면, $V = V_f + V_m$이므로 모재는 $v_m = 1 - v_f$가 되어, 다음과 같이 프리프레그의 강도 계산식이 얻어진다.

$$\sigma = v_f \sigma_f + (1 - v_f)\sigma_m \tag{2-4}$$

이와 같이 섬유와 모재의 각 성질과 함유율 혹은 함유량을 알면, 프리프레그의 강도를 구할 수 있다.

제 3 절 압축비, 섬유함유율비 및 불균질도

프리프레그 섬유 길이 방향에 수직 방향으로 유동하도록, 재료를 Fig. 2-1과 같이 평행판 사이에 끼운다. y 방향(폭: 60mm)의 흐름을 구속하여, 하중을 가해 초기두께 h_0를 h까지 GFRP 복합재료와 프리프레그를 압축성형한 경우의 압축비(R_{cr})는 다음 식과 같다[18].

$$R_{cr} = 1 - \frac{h}{h_0} \tag{2-5}$$

섬유함유율비(Q_{fr})는 다음 식과 같다[19].

$$Q_{fr} = \frac{q_f}{q_{f0}} \tag{2-6}$$

여기서 q_{f0}, q_f는 성형 전·후의 중량섬유함유율이다.

Fig. 2-1과 같이 압축성형한 GFRP 복합재료는 Fig. 1-4에 나타낸 바와 같이 플라스틱과 유리섬유의 분리가 심할수록 불균질하게 되어, Fig. 2-2와 같이 섬유함유율비와 유동거리의 관계를 2차함수 그래프로 나타낼 수 있다. Fig. 2-2에서 성형품은 플라스틱과 유리섬유의 분리가 심해질수록, 사선 부분의 영역이 더 크게 되어, 불균질함을 알 수 있다. 섬유함유율 분포곡선 Q_{fr}을 2차함수로 하고, 계수 c_1, c_2, c_3를 최소자승법으로 구한다. 사선의 면적을 계산하여, 성형품 불균질의 정도를 나타내는 불균질도(Γ)는 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{\text{사선의 면적}}{B \times 1} \tag{2-7}$$

여기서 Γ는 무차원 수이며, 0에서 1 사이에 있으나 0에 가까워지면 성형품은 균질에 가깝다.

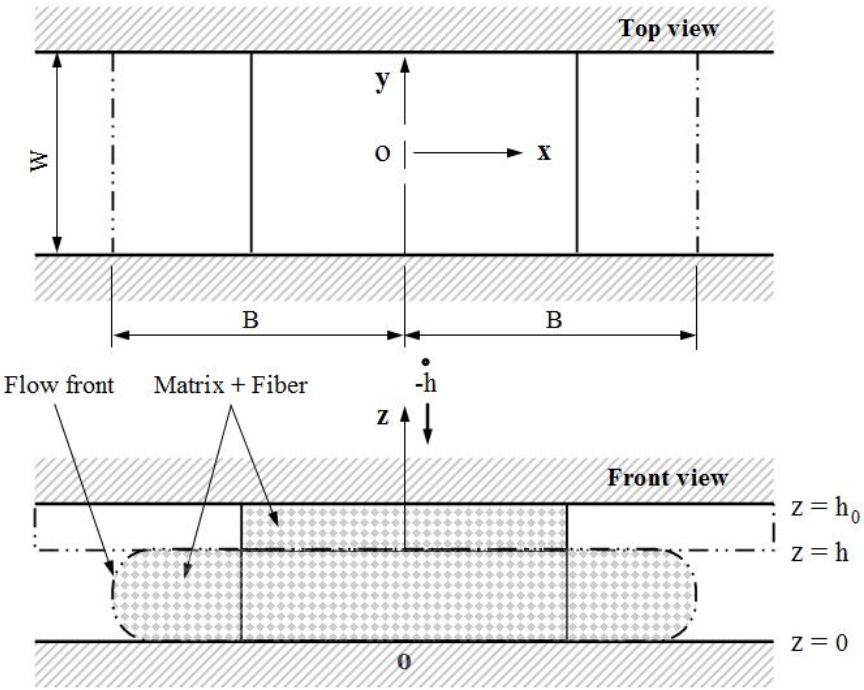


Fig. 2-1 Nomenclature for Slab-shaped Part Compression Molding

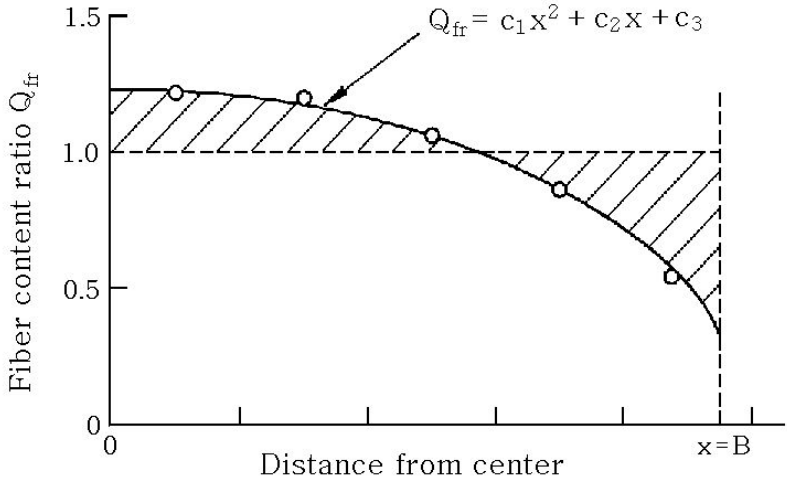


Fig. 2-2 Distribution of the Fiber Content Ratio

제 4 절 섬유의 분리방정식

프리프레그의 압축성형에 있어서 유리섬유를 고체, 수지를 액체로 하여, 2상인 고·액 혼상류를 하나의 유동으로 하고, 섬유는 구로 가정한다. 이 때, 섬유의 속도 V_f, 모재의 속도 V_m인 한 개의 섬유운동방정식은 2상 유동이론의 기초하에 다음과 같다[20].

$$\frac{W_f}{g}\frac{dV_f}{dt} = C_D\frac{\gamma_m}{2g}(V_m - V_f)^2 a_f + W_f\frac{\gamma_f - \gamma_m}{\gamma_f}\cos\theta - f_f \qquad (2\text{-}8)$$

여기서 a_f는 유동방향에 직각방향의 투영단면적, C_D는 항력계수, W_f는 섬유의 중량, γ_f는 섬유의 비중량, γ_m은 모재의 비중량, θ는 중력과 유동방향 사이에 이루는 각이다.

식 (2-8)의 오른쪽 첫 번째 항은 섬유와 모재의 속도차로 인한 항력이다. 두 번째 항은 섬유의 중력과 부력이다. 세 번째 항은 섬유의 형태, 량 및 성형조건 등의 영향을 받은 섬유의 마찰이며, 또는 뒤엉킨 힘을 받는 상호 구속력이다.
유동에 관해, 축심이 수직하게 놓여있는 한 개의 섬유의 항력계수(C_{DO})는 Reynolds수(R_{ef})를 이용하면 다음과 같다.

$$C_{DO} = \frac{\alpha}{{R_{ef}}^{\beta}} \qquad (2\text{-}9)$$

위와 같이 뉴턴유체인 경우 항력계수는 $\alpha\,{R_{ef}}^{-\beta}$로 표시할 수 있다. 실제 섬유의 항력계수($C_D$)는 이와 같이 간단한 것은 아니기 때문에, 보정계수(j)를 주어 C_{DO}를 보정한 식은 다음과 같다.

$$C_D = j\frac{\alpha}{{R_{ef}}^{\beta}} \qquad (2\text{-}10)$$

여기서 α, β는 Reynolds수가 작은 Stokes 형태의 유동이며, 섬유를 구로서 가정한 경우 $\alpha = 24.0, \beta = 1.0$, 원통으로 가정한 경우 $\alpha = 6.47, \beta = 0.88$ 이다.

Reynolds수(R_{ef})는 다음과 같다.

$$R_{ef} = \frac{(V_m - V_f)\, d_f\, \rho_m}{\mu_m} \tag{2-11}$$

단, ρ_m은 모재의 밀도, μ_m은 모재의 점도, d_f는 원통형인 경우의 섬유직경이다.

섬유를 구로 한 경우, 같은 체적의 구의 직경(상당직경) d_{fs}는 다음과 같다.

$$d_{fs} = \sqrt[3]{1.5\, {d_f}^2\, l_f} \tag{2-12}$$

단, l_f는 섬유의 길이이다.

x, y 방향에 비해 z방향의 속도는 무시하는, 1차원 사각형 판재의 압축유동에서 분리계수와 x방향의 평균속도의 관계를 고찰한다. 프리프레그의 속도와 모재의 속도가 같다고 가정하면, 모재의 x방향 평균속도($\overline{V_m}$)는 다음과 같다.

$$\overline{V_m} = \frac{2}{h}\int_0^{\frac{h}{2}} V_m\, dz = \frac{\dot{h}x}{h} \tag{2-13}$$

시험편 전체에 걸쳐서 장섬유가 길게 존재하므로, 각 섬유의 속도를 결정하기에는 어렵기 때문에, 평균속도를 구하여 사용했다. GFRP 복합재료인 프리프레그의 평균속도($\overline{V_c}$)는 다음과 같다.

$$\overline{V_c} = \frac{1}{B}\int_0^{B} \frac{\dot{h}x}{h}\, dx = \frac{B\dot{h}}{2h} \tag{2-14}$$

단, B는 성형품 길이의 1/2에 해당한다.

제 3 장 실 험

제 1 절 프리프레그 제조

일방향 유리섬유 프리프레그를 제조할 때 사용되는 펄트루전 성형장치를 Fig. 3-1에 나타냈다. 펄트루전은 높은 섬유함유율을 가지는 일방향 유리섬유 프리프레그를 제조하기 위해 사용하는 연속공정이다. 펄트루전 성형작업은 로빙 스풀(Spool), 수지함침장치(Resin Bath), 형상제어장치(Shape Preformer), 가열금형(Heated Die), 당김장치(Puller) 및 절단기(Cut-off) 등으로 구성된다 [21-22]. 형상제어장치의 길이는 1.5m, 가열다이의 길이는 6m, 다이 노즐 두께는 조절할 수 있도록 제작했다.

스풀로부터 공급되는 로빙 섬유(Filament diameter: 24μm, Roving linear weight: 2,310tex)가 통과하는 수지함침장치 속에는 브레이크 바(Break Bar)가 있다. 브레이크 바는 섬유의 진행 방향을 바꿔, 수지의 함침을 촉진시킨다. 로빙 섬유의 각 필라멘트를 약간 흩어지게 하여, 수지가 섬유 내부로 잘 흡수되도록 한다.

수지가 함침된 로빙 섬유는 형상제어장치를 거치면서, 펄트루전 될 제품의 모양에 가깝도록 점진적으로 변형된다. 그리고 가열된 금형을 통과하면서 프리프레그로 경화된다. 금형을 빠져나온 프리프레그는 당김장치에 의해 연속적으로 당겨진다. 성형된 프리프레그는 크릴(Creel)에 감겨진 후, 절단되어 최종 완성된다.

본 실험에서 가열부의 다이온도를 일정하게 유지하기 위해, 예열한 후 실험했다. 로빙 섬유의 각 필라멘트 사이에 수지가 함침이 잘 되는 조건을 찾기 위해, 프리프레그의 두께와 다이온도 및 당김속도를 변화시키면서 실험했다. 프리프레그의 섬유함유율은 40wt%이며, 제품의 두께는 약 1mm로 했다.

펄트루전 공정에 의해 제조된, 프리프레그의 모재와 유리섬유가 함침된 단면을 SEM 사진으로 Photo. 3-1에 나타냈다.

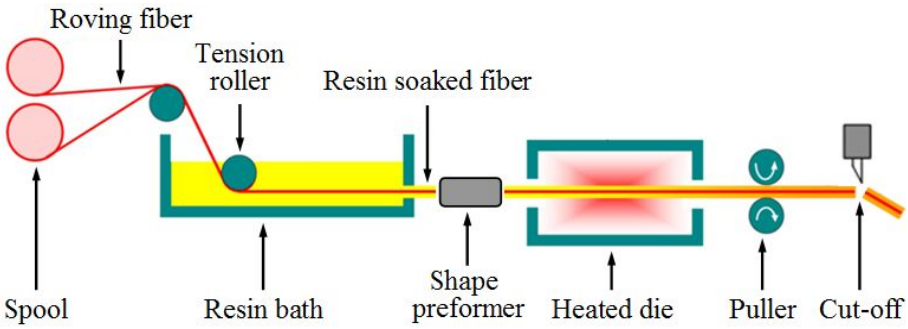


Fig. 3-1 Schematic diagram of pultrusion process

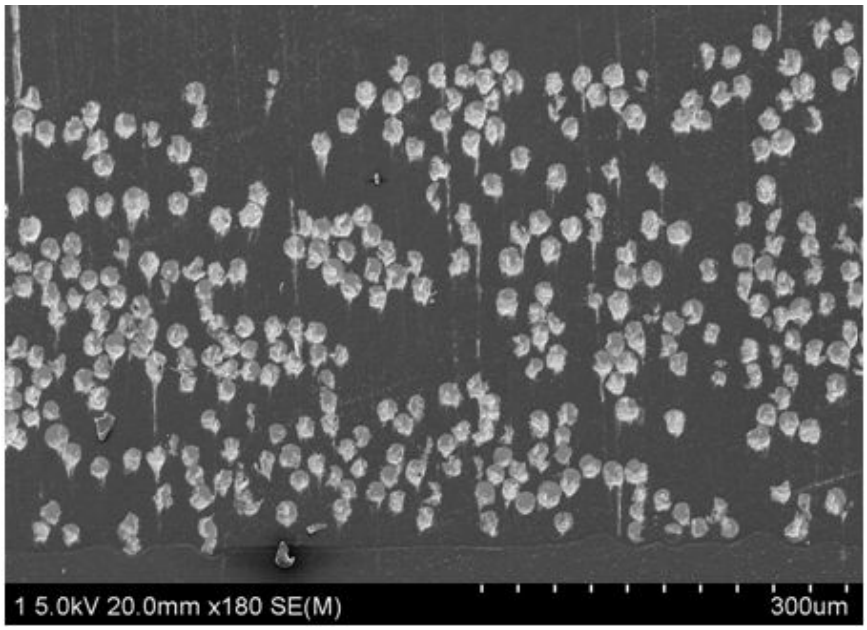


Photo. 3-1 SEM photograph of prepreg (Fiber content 40wt%)

제 2 절 프리프레그 압축성형 및 수직교차 직조방법

본 연구에서 제조한 프리프레그와 시판되는 GFRP 복합재료의 섬유함유율비를 구하여, 불균질도를 계산했다. 각각의 압축성형 시, 성형온도는 200℃, 압축속도는 14.4mm/s이다.

프리프레그의 섬유함유율비는 주사전자현미경(FE-SEM; Hitachi, Japan, S-4800)으로 관찰하여 구했다.

또한, 시판되는 GFRP 복합재료의 섬유함유율비는 연소법(Burning method)으로 구했다. 시판되는 GFRP 복합재료의 모재는 폴리프로필렌, 강화재는 유리섬유매트, 섬유함유율은 40wt%, 두께는 3.8mm이다. 섬유의 밀도는 2.55g/cm^3, 폴리프로필렌의 밀도는 0.9g/cm^{3}이다. 시험편의 형상은 직사각형(60mm(폭)×70mm(길이)×3.8mm(두께))이며, 금형 캐비티의 치수는 60mm(폭)×200mm(길이)이다.

시판되는 GFRP 복합재료의 연소 시의 채취부분을 Fig. 3-2에 나타냈다. 중립면에서 x축을 따라 10mm(가로)×10mm(세로)를 채취하여, 전기로에서 해당 영역을 620℃로 30분간 가열 및 연소했다. 연소 후의 무게를 정밀전자저울(Ohaus, Switzerland, AP250D)로 측정했다. 여기서, GFRP 복합재료의 실험값은 편차가 심하기 때문에, 5회 실험 후 평균을 구했다.

프리프레그와 시판되는 GFRP 복합재료의 압축성형에 사용한 열압축 프레스(30ton)의 개략도를 Fig. 3-3에 나타냈다.

강화섬유의 방향은 GFRP 복합재료의 기계적 강도를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 섬유가 일방향으로 배향된 복합재료의 경우, 일방향 섬유의 수직방향에 비교하여 일방향 섬유의 길이방향으로는 유동성이 현저히 저하된다. 그러므로 본 연구에서는 모재와 섬유의 유동속도 차로 인해, 일방향 섬유배향이 불균질하게 변하는 현상을 막기 위해, 프리프레그 직조를 평직(Plain)으로 제조했다. 프리프레그 직조는 가로축의 프리프레그와 세로축의 프리프레그를 1:1로 교차되도록 수직교차형(0/90° Fabric) 직조방법을 적용했다.

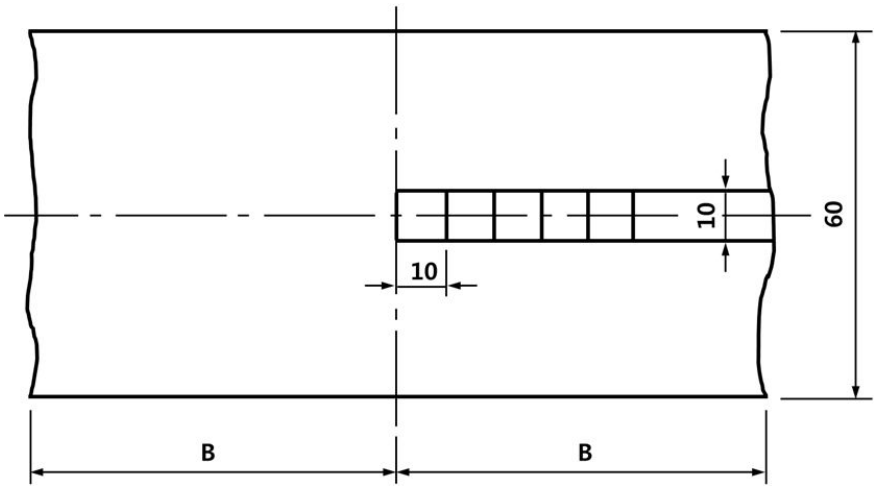


Fig. 3-2 Part for measuring fiber content

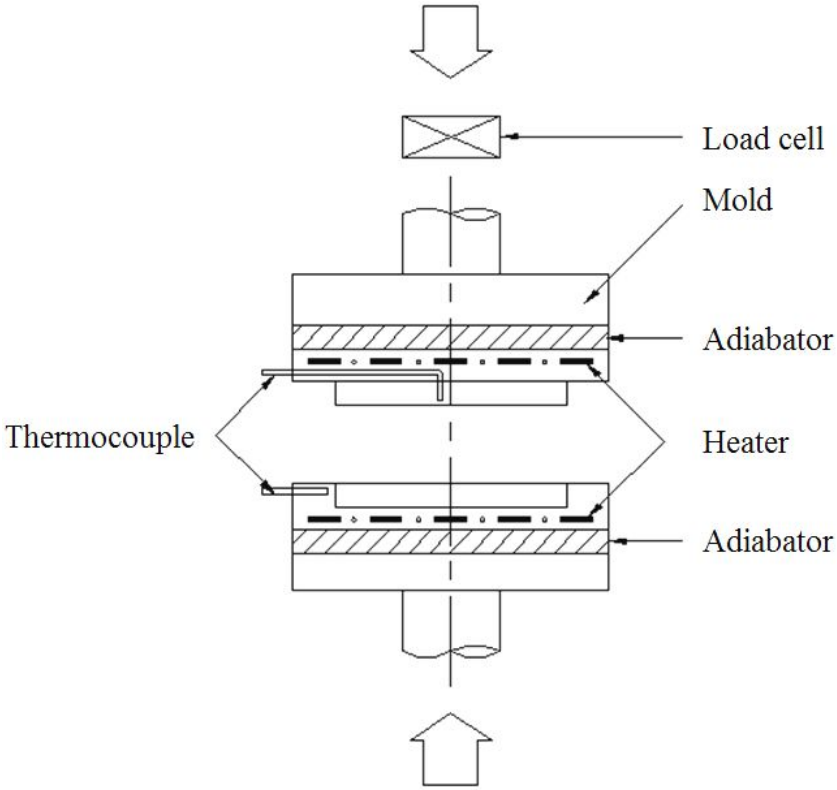


Fig. 3-3 Hot press using compression molding

제 3 절 미세조직 관찰

로빙 섬유는 유리섬유의 생산공정 시, 필라멘트를 꼬임 없이 여러 가닥으로 뽑아낸 Direct roving을 사용하였다. 실험값은 시편 당 5회 관찰 후 평균을 구했다. 섬유함유율비, 불균질도 및 함침도를 구하기 위해, 시편의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰했다.

모재와 섬유의 함침도를 계산하기 위해, 미세조직 관찰을 위한 시편은 에폭시 수지(Epofix Resin)와 경화제(Epofix Hardener)를 약 7:1 비율로 섞어 마운팅을 했다. 마운팅 된 시편은 1,000 grit의 SiC 연마지까지 단계적으로 연마 후, 초음파 세척했다. Photo. 3-2는 마운팅 된 시편을 연마한 자동 시편 연마기(Struers, Denmark, Rotopol 2)이다.

최종연마된 시편은 GFRP 복합재료이기 때문에, 전도성을 주어야 SEM 관찰이 가능하다. Photo. 3-3은 시편을 3-5nm로 Pt 코팅하기 위해 이용한 이온 증착기(Hitachi, Japan, E-1030)이다.

모재와 섬유의 함침을 관찰하기 위해, 이와 같이 제조된 시편의 표면부와 절단면 등의 조직을 주사전자현미경으로 관찰했다. Photo. 3-4는 미세조직 관찰에 이용한 주사전자현미경이다.

Photo. 3-2 Automatic specimen polisher

Photo. 3-3 Ion sputter

Photo. 3-4 Field emission scanning electron microscope

제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 프리프레그 제조

다이온도가 220℃인 경우에서 함침도와 당김속도의 관계를 Fig. 4-1에 나타냈다. 연속적으로 유리섬유와 폴리프로필렌을 함침시킬 경우, 프리프레그의 함침에 영향을 미치는 주요 인자는 당김속도임을 알 수 있다. 함침되는 시간과 밀접한 관계가 있는 당김속도가 수지온도보다 더 지배적임을 알 수 있다. 즉, 당김속도가 낮고, 수지온도가 높을수록 유리섬유와 폴리프로필렌의 함침이 잘 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4-2은 수지온도가 220℃인 경우에서 함침도와 당김속도의 관계이다. 유리섬유와 폴리프로필렌의 함침에 영향을 미치는 주요 인자는 당김속도임을 알 수 있다. 즉, 연속적으로 프리프레그를 제조할 경우, 다이온도의 영향보다는 당김속도가 더 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 4-1과 4-2에서 함침도(D_i)와 당김속도(V_p)의 관계식을 나타내면 식 (4-1)과 같다.

$$D_i = 1.10875 - (0.2125 \times V_p) \qquad (4\text{-}1)$$

Fig. 4-1과 Fig. 4-2로부터 함침도를 높이는 주요 인자는 수지온도의 증가와 당김속도의 감소임을 알 수 있다. 또한, 함침도에 미치는 수지온도와 다이온도의 영향을 비교하면, 수지온도가 다이온도보다 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 4-3은 수지온도가 220℃, 다이온도가 220℃, 함침도가 1인 경우에서 프리프레그의 두께와 당김속도의 관계이다. 함침이 잘 되는 프리프레그 두께는 당김속도에 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-3에서 프리프레그의 두께(t_p)와 당김속도(V_p)의 관계식을 나타내면 식

(4-2)와 같다.

$$t_p(mm) = 1.8325 - (2.35 \times V_p) + (1.25 \times V_p{}^2) \quad (4\text{-}2)$$

이 프리프레그 두께와 당김속도의 관계식으로부터, 산업현장의 생산성 향상에 기여할 수 있는 기초자료를 마련했다.

Fig. 4-4는 수지온도가 220℃, 다이온도가 220℃, 함침도가 1인 경우에서 함침도와 가열부 다이길이의 관계이다. 프리프레그의 함침도는 다이길이가 길어지면, 양호함을 알 수 있다. 즉, 형상제어장치를 통과한 수지와 로빙 섬유는 가열부 다이길이에 따라 영향을 받는다.

다이온도 220℃, 수지온도 220℃, 다이길이 6m에서 제작한 프리프레그에 대해서, Table. 1에 프리프레그의 섬유 길이 방향 인장강도의 이론 및 실험 값을 나타냈다. 이론식 (2-4)와 실험으로 구한 인장강도 값을 비교했다. 오차가 0.81%로 비교적 잘 일치하게 나타났다.

Table. 4-1 Tensile strength of prepreg(40wt%)

Theoretical tensile strength	Experimental tensile strength
295.96 MPa	293.57 MPa

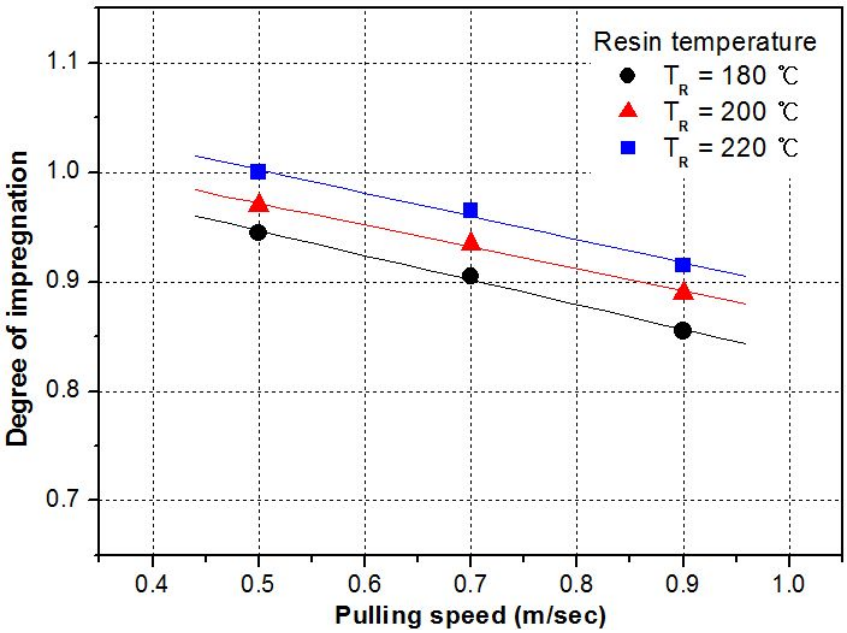


Fig. 4-1 Hot Relationship between degree of impregnation and pulling speed (Die temperature T_D=220℃)

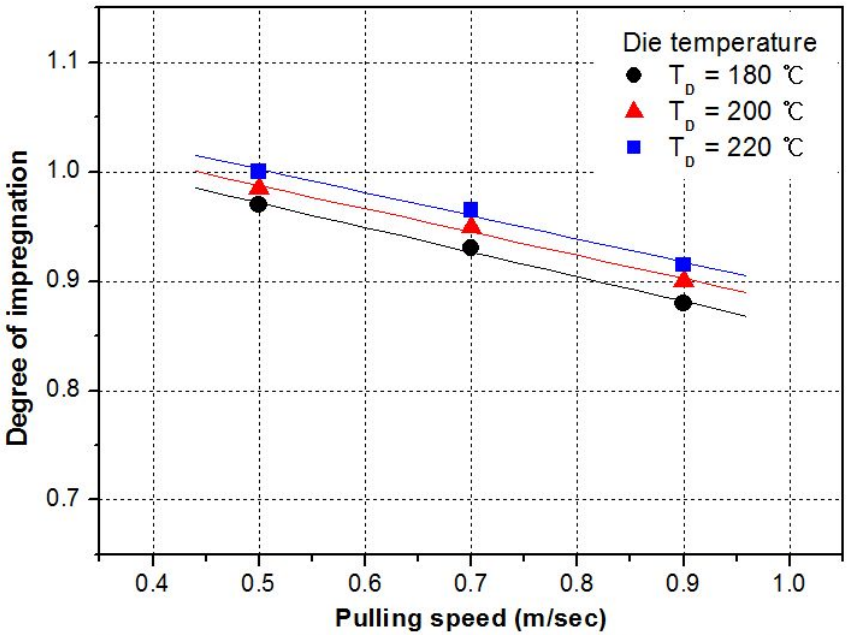


Fig. 4-2 Relationship between degree of impregnation and pulling speed (Resin temperature T_R=220℃)

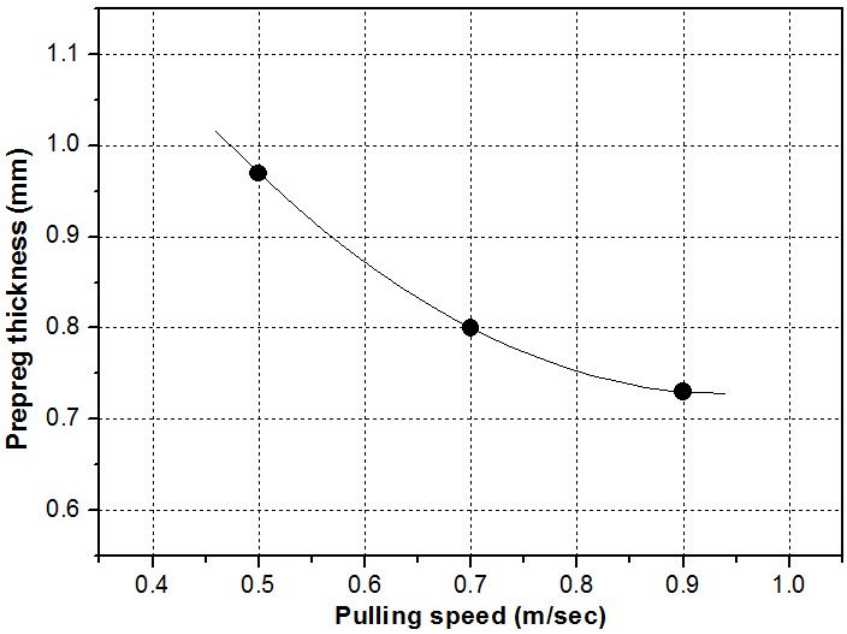


Fig. 4-3 Relationship between prepreg thickness and pulling speed (Resin temperature T_R=220℃, Die temperature T_D=220℃)

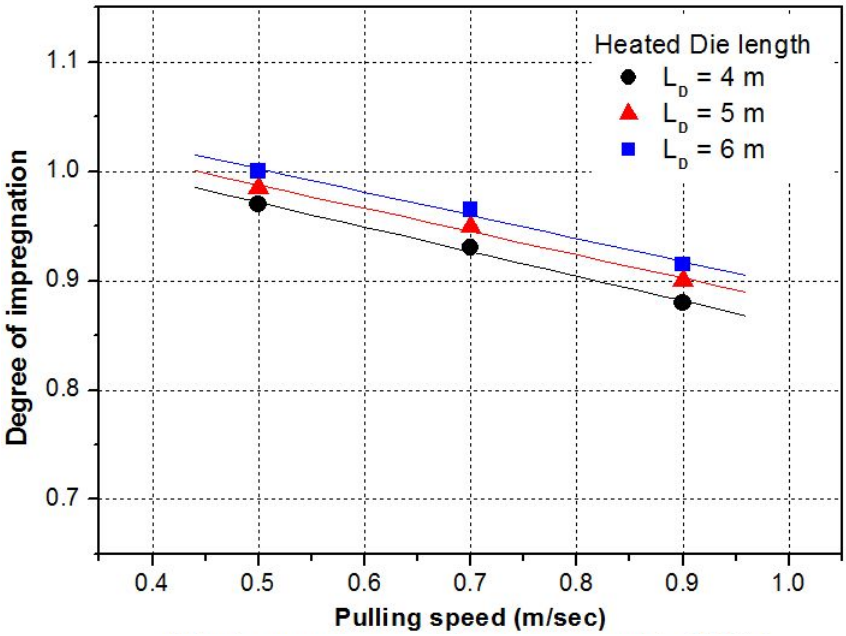


Fig. 4-4 Relationship degree of impregnation and pulling speed (Resin temperature T_R=220℃, Die temperature T_D=220℃)

제 2 절 압축성형

섬유함유율이 40wt%인 프리프레그(Photo. 3-1, R_{cr}=0)를 주사전자현미경으로 관찰하여, 섬유함유율비와 성형품 중심으로부터 거리의 실험결과를 Fig. 4-5에 나타냈다. 이 결과로부터 로빙 섬유에 수지가 잘 함침되어, 섬유함유율 분포가 균질함을 알 수 있다.

Photo. 4-1은 섬유함유율이 40wt%인 프리프레그의 압축성형(압축비 0.8) 후, 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 SEM 사진이다.

프리프레그의 압축성형 후, 섬유함유율비와 성형품 중심으로부터 거리의 실험결과를 Fig. 4-6에 나타냈다. 식 (2-14)의 복합재료 평균속도와 유사하며, 성형품의 중심으로부터의 거리에 따라 섬유함유율 분포가 일정함을 알 수 있다. 즉, 섬유와 모재의 유동성이 뛰어나고, 섬유배향이 변하지 않음을 알 수 있다. 유리섬유와 폴리프로필렌의 함침은 전 영역에서 잘 이루어졌으며, 균질한 섬유배향이 되었음을 알 수 있다.

시판되는 GFRP 복합재료를 Fig. 2-1과 같이 압축성형 후, 섬유함유율비와 성형품 중심으로부터 거리의 실험결과를 나타낸 것이 Fig. 4-7이다. 모재와 섬유의 유동속도 차 때문에, 시험편 중앙 부분의 섬유함유율비는 성형 전보다 섬유함유율비가 높다. 또한, 섬유함유율비는 시험편의 끝으로 갈수록 저하함을 알 수 있다.

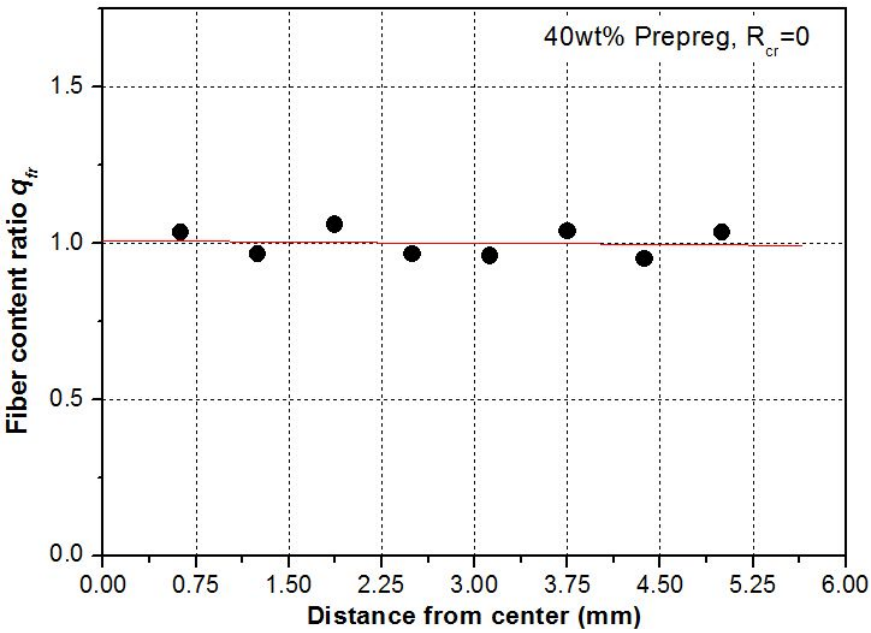


Fig. 4-5 Relationship between fiber content ratio and distance from center (Prepreg, R_{cr}=0)

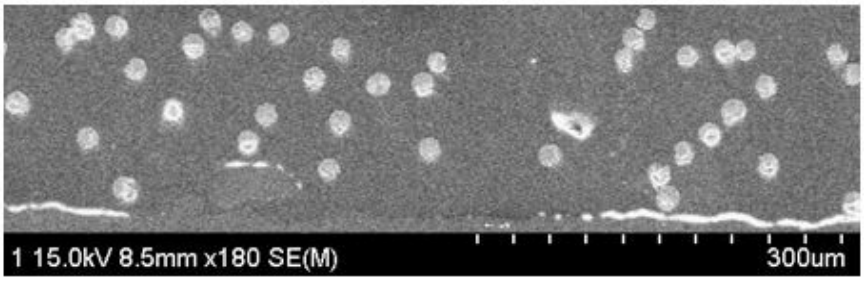


Photo. 4-1 SEM Photograph of prepreg after compression molding (R_{cr} =0.8)

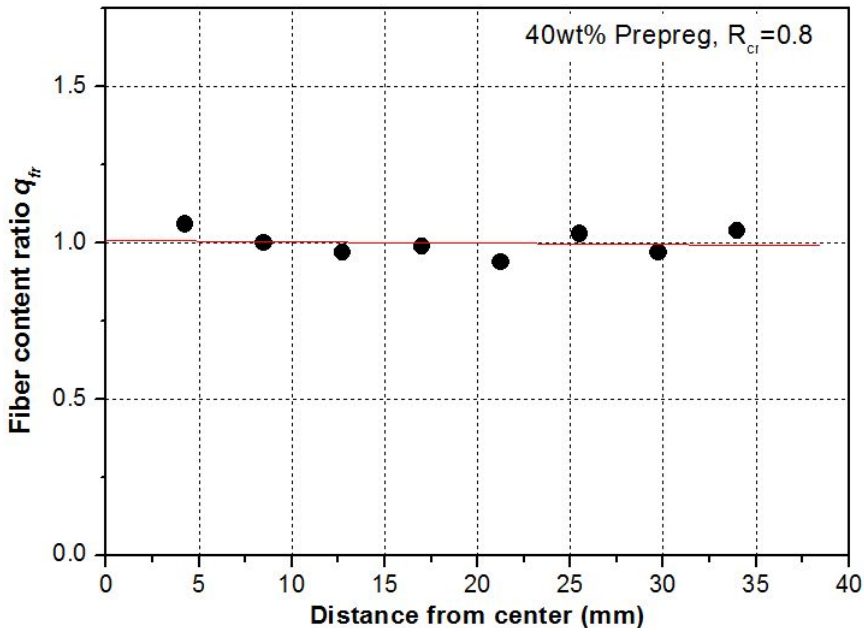


Fig. 4-6 Relationship between fiber content ratio and distance from center of prepreg (Rcr=0.8)

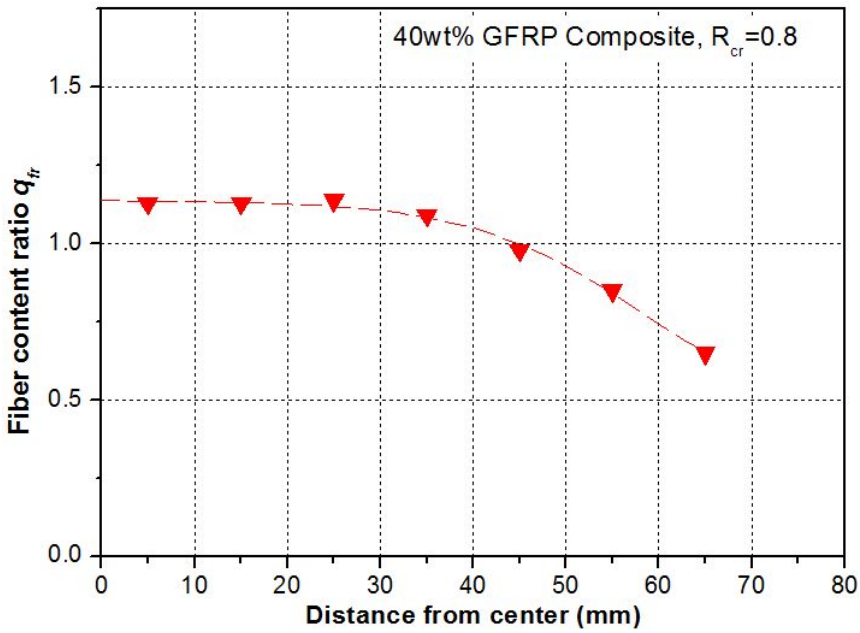


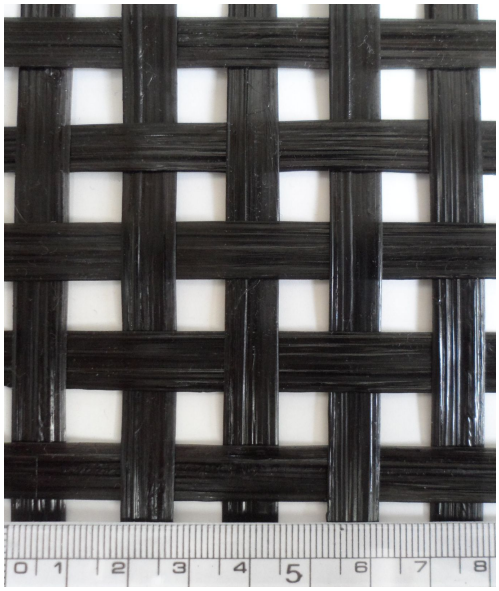
Fig. 4-7 Relationship between fiber content ratio and distance from center of GFRP Composite (R_{cr}=0.8)

제 3 절 수직교차형 직조방법

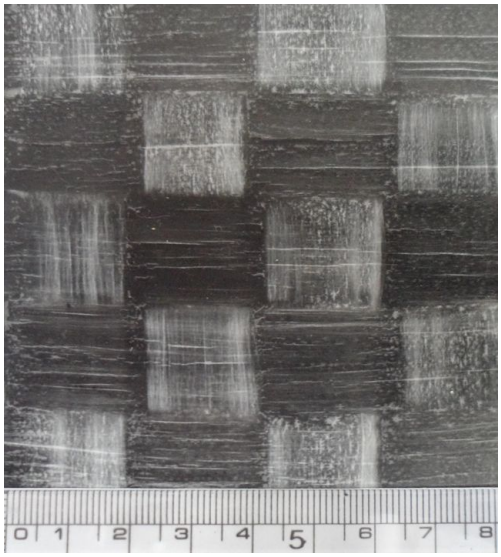
프리프레그에 수직교차형 직조방법을 적용하는 목적은 불균질한 섬유배향이 발생하지 않고, 섬유의 유동성이 양호한 프리프레그 수직교차형 GFRP 복합재료 개발이다.

Photo. 4-2(a)는 수직교차형 직조방법인 평직을 적용하여, 가로, 세로 섬유함유율비를 x : y = 1 : 1로 동일하게 프리프레그를 적층한 것이다. Photo. 4-2(b)는 (a)의 프리프레그 적층판을 프레스 1ton의 압력으로, 다이온도 200℃에서 압축비는 0.5로 1분간 압축성형한 것이다. 이 결과로부터 로빙 섬유에 수지가 잘 함침된 프리프레그를 프레스로 압축성형하면, 섬유와 수지가 분리되지 않고, 유동함을 관찰했다. 즉, 프리프레그의 프레스 압축성형 시, 모재와 유리섬유의 유동속도 차가 발생하지 않아, 모재와 유리섬유의 분리 및 불균질한 섬유배향이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

따라서 프리프레그를 수직교차형으로 적층하여 제조된 GFRP 복합재료를 사용한 성형품은 균질하고 섬유배향이 발생하지 않아, 기계적 강도나 특성에 변화가 생기지 않는다. 또한, 제품의 기계적 특성에 맞도록 x, y 방향의 섬유함유량을 조절할 수 있어, 유동성이 우수한 GFRP 복합재료를 제조할 수 있다.



(a) Prepreg plain (0/90° fabric)



(b) Prepreg plain after compression molding (R_{cr}=0.5)

Photo. 4-2 Product of prepreg plain

제 5 장 결 론

본 연구로부터 유리섬유와 폴리프로필렌 수지를 사용한 일방향 유리섬유 프리프레그를 제조하였다. 또한, 이 프리프레그의 특성 평가 및 미세조직의 관찰을 하였다. 이 프리프레그를 수직교차형 직조방법을 적용하여 복합재료로 제조했으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 프리프레그의 제조 시, 당김속도가 낮고 수지온도가 높을수록 유리섬유와 폴리프로필렌의 함침이 잘 되고, 수지온도가 다이온도보다 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

2) 프리프레그의 프레스 압축성형 시, 모재와 섬유의 분리 및 불균질한 섬유 배향이 발생하지 않았다. 섬유 유동성이 뛰어나고, 함침도가 우수하며, 이론과 실험으로 구한 인장강도 값이 잘 일치하는 프리프레그를 제조했다.

3) 프리프레그를 수직교차형으로 적층한 GFRP 복합재료를 제조했고, 프레스 압축성형 시 유동성이 뛰어난 재료임을 규명하였으며, 산업현장의 생산성 향상에 기여할 수 있는 기초자료를 마련했다.

참 고 문 헌

1) J. W. Kim, H. S. Kim, T. I. Kim, D. G. Lee, and J. K. Sim, “Strength and Efficiency during Lap Joining Molding of GMT-sheet,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 21, No. 6, 2012, pp. 1018-1023.

2) 이대길, “복합재료 역학 및 가공론,” 성안당, 1993, pp. 3-6, 301-330.

3) 이대길, 정광섭, 최진호, “복합재료 역학 및 제조 기술,” 시그마프레스, 1998, pp. 1-16, 407-439.

4) J. W. Kim, H. S. Kim, and D. G. Lee, “Effect of Molding Condition on Waviness Profile of GFRP Composites in Compression Molding,” *Acta Physica Polonica A*, Vol. 123, No. 2, 2013, pp. 337-340.

5) J. W. Kim, H. S. Kim, and D. G. Lee, “Effect of Molding Condition on Arithmetical Average Roughness of GMT-Sheet Moldings,” *Advanced Science Letters*, Vol. 8, 2012, pp. 682-686.

6) D. G. Lee, J. K. Sim, and J. W. Kim, “Study on the Fiber Orientation and Fiber Content Ratio Distribution during the Injection Molding for FRP,” *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 4, 2006, pp. 1-7.

7) D. G. Lee, J. K. Sim, and J. W. Kim, “Fiber Orientation Distribution of Injection Molded Product on the Fiber-Reinforced Polymeric Composites,” *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, 2005, pp. 73-80.

8) T. T. Do, and D. J. Lee, “Analysis of Tensile Properties for Composites with Wrinkled Fabric,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 2, 2010, pp. 471-479.

9) Y. H. Huh, J. H. Lee, D. J. Kim, and Y. S. Lee, “Effect of Stress Ratio on Fatigue Life of GFRP Composites for WT Blade,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, 2012, pp. 2117-2120.

10) J. W. Kim, and D. G. Lee, “Effect of Fiber Orientation and Fiber Contents on the Tensile Strength in Fiber-Reinforced Composites,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 10, No. 5, 2010, pp. 3650-3653.

11) D. S. Han, I. B. Park, M. H. Kim, B. J. Noh, W. S. Kim, and J. M. Lee, “The Effects of Glass Fiber Reinforcement on The Mechanical Behavior of Polyurethane Foam,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, 2010, pp. 263-266.

12) S. W. Han, N. S. Choi, and M. S. Lee, “Analysis of Glass Fabric Impregnation using a Resin Drop Method,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 5, 2012, pp. 1477-1482.

13) D. Kim, Y. H. Kim, S. Gururaja, and M. Ramulu, “Processing and Fiber Content Effects on the Machinability of Compression Moulded Random Direction Short GFRP Composites,” *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 6, 2010, pp. 849-855.

14) J. U. Roh, S. W. Choi, and W. I. Lee, “Assessment of Impregnation Characteristic of Unidirectional Glass Fiber Reinforced Polylactic acd (PLA),” *Proceedings of Spring Conference on the Korean Society of Composite Materials*, Seoul, Korea, May. 2012, pp. 33-34.

15) S. Kalpakjian, Masufacturing Processes for Engineering Materials, Addison-Wesley Pub. Co., Illinois, USA, 1991

16) 최병기, 김태규, “재료강도학,” 선학출판사, 2006, pp. 128-130.

17) 문창권, “고분자복합재료,” 시그마프레스, 2000, pp. 11-13, 145-185.

18) J. W. Kim, and D. G. Lee, “Creep and tensile properties of press molding joined GMT-Sheets,” *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. S1, 2011, pp. 170-174.

19) J. W. Kim, H. S. Kim, and D. G. Lee, “Study on Fibre Orientation of Weld Line Parts during Injection Moulding of Fibre Reinforced Plastic by Image Processing,” *Materials Research Innovations*, Vol. 15, No. S1,

2011, pp. s303-s306.

20) D. G. Lee, and K. H. Cho, “A Study on Structure and Separation Orientation of Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheet,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 10, No. 2, 1993, pp. 104-113.

21) 이대길, 정명영, 최진호, 전성식, 장승환, 오제훈, “복합재료,” 홍릉과학출판사, 2007, pp. 287-292.

22) 이대길, 정광섭, 최진호, “복합재료 역학 및 제조 기술,” 시그마프레스, 1998, pp. 357-362.

감 사 의 글

대학생활 4년과 대학원 생활 2년, 총 6년이란 시간동안 무수히 많은 실패와 좌절을 겪었지만 주변의 모든 분들의 도움으로 이렇게 이 자리까지 올라 올 수 있었습니다. 늘 항상 부족한 저였지만 여러분의 도움 하나하나가 저의 피가 되고 살이 되어 부족한 저를 채워주었습니다. 앞으로도 얼마나 많은 실패와 좌절들이 저를 기다리고 있을지는 모르겠으나 저는 여러분이 있기에 걱정이 되지 않습니다. 여러분이 지켜봐주시는 것만으로도 저는 힘이 나고 열정을 가질 수 있으니 다가올 시련과 고난이 어떻든 간에 당당히 이겨낼 수 있을 것이라 확신합니다.
항상 고맙고 사랑합니다.

-김태익 드림

우리는 자신을 이김으로써 스스로를 향상시킨다.
자신과의 싸움은 반드시 존재하고 거기에서 이겨야 한다.
-에드워드 기번