

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.11.1649

ISSN 1226-4873

GFRP 복합재료의 압축성형에서 표면요철에 미치는 성형조건의 영향[§]

김형석* · 김진우** · 김용재*** · 이동기****†

* 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과, ** Iowa State University, Center for NDE,
*** 조선대학교 전기공학과, **** 조선대학교 메카트로닉스공학과

Effects of Molding Condition on Surface Unevenness of GFRP Composites in Compression Molding

Hyoung Seok Kim*, Jin Woo Kim**, Yong Jae Kim*** and Dong Gi Lee****†

* Dept. of Advanced Parts and Materials Engineering, Chosun Univ. Graduate School,

** Center for NDE, Iowa State Univ.,

*** Dept. of Electrical Engineering, Chosun Univ., **** Dept. of Mechatronics Engineering, Chosun Univ.

(Received May 14, 2010 ; Revised August 16, 2010 ; Accepted August 16, 2010)

Key Words: Glass-Fiber-Reinforced-Plastic Composite Materials(유리섬유 강화플라스틱 복합재료), Demolding Temperature(탈형온도), Mold Temperature(금형온도), Holding Pressure Load(보압하중), Center-Line-Average-Height(중심선평균거칠기), Waviness Profile(여과굴곡곡선)

초록: 성형조건에 따른 GFRP 복합재료를 관찰하여, 성형품 표면의 불량원인을 조사했다. 표면거칠기에 영향을 주는 요철의 가장 주요한 발생원인은 보압·냉각 과정에서 발생하는 모재의 수축이었다. GFRP 복합재료 성형품 표면은 성형 시의 보압하중이 높을수록 좋아졌고, 서냉실험에서는 탈형온도가 낮을수록 성형품의 표면이 좋아졌다. 그리고 보압하중과 탈형온도를 고려하여, 성형품의 표면요철 생성과정과 섬유돌출 높이 변화를 규명했다.

Abstract: We have investigated the unexpected phenomena on the surface of molded GFRP composites. The major cause of the unevenness, as a result of which the surface becomes rough, is a shrinking of the matrix in the process of holding pressure and cooling temperature. The higher holding pressure load in a molding process and the lower demolding temperature in an annealing experiment, the better GFRP composites moldings improved its appearance. In addition, by taking the holding pressure and demolding temperature into consideration, we evaluate the process that causes the surface unevenness and the variation in the fiber projection height.

1. 서 론

최근의 자동차 산업은 안전을 고려한 첨단 장치의 장착, 높은 소비자 욕구에 부응하기 위한 주행성능, 내구성능 및 환경규제 등의 만족은 물론 지구온난화 문제의 주된 요인으로 알려진 자동차 배기가스에 대한 감소를 위해 세계 각국의 자동차 회사들은 배기 가스량 저감을 목적으로 한 연비 향상을 위하여 노력하고 있다. 연비 향상을 위한 가장 경제적인 방법은 차체 경량화가 가장 효과적이다.

GFRP 복합재료는 비강도(Specific strength : E/ρ), 비강성(Specific stiffness : E/ρ) 뿐만 아니라 경량화, 성형의 용이성, 생산성 향상 등 여러 면에서 우수하여 오늘날 자동차에서는 꼭 필요한 재료이다. 자동차 경량화 부품 재료로 많이 쓰이고 있는 GFRP 복합재료는 Bumper beam, Front end, Door, Seat structure, Truck steps 등의 내·외장 부품에 적용되고 있다. 이 경량재료의 자동차 부품 적용을 위해서는 재료 특성, 신뢰성 확보, 성형조건 등의 확립이 우선되어야 하므로 GFRP 복합재료를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ Lee 등은 GFRP 복합재료를 이용한 고온압축 유동성형 시 장섬유의 경우 섬유의 배향은 유동장에 의존하는 것이 아니라 변위에 의존함을

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산및설계공학부문 춘계 학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임

† Corresponding Author, dglee@chosun.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

밝혔으며, 또 시판되고 있는 GFRP 복합재료를 사용하여 분리와 배향은 별개가 아니라 서로 불가분한 관계가 있어 양자간의 상관관계에 대해서도 밝혔다.^(1,2)

자동차에 적용 중인 플라스틱계 복합재료의 수지별 구성비율을 보면 열가소성수지가 전체의 약 85%, 열경화성수지가 약 15%를 차지하고 있다. 프레스 가공용의 유리섬유강화 열가소성 플라스틱 복합판재인 GFRP 복합재료는 모재시트와 유리섬유매트의 라미네이트이며 시트 형상의 2차제품으로서 시판되고 있다. 이 GFRP 복합재료의 성형법은 필요한 크기로 절단한 후 블랭크를 가열하여 프레스로 성형한 것이다.

GFRP 복합재료의 용도 확대를 막는 결점으로서, 표면요철을 들 수 있다. 성형품의 표면을 보면 구멍, 섬유돌출, 크랙, 섬유노출, 마이크로 웰드라인, 핀홀 등 여러 형태의 요철(凹凸)이 발생하고 있으며, 모재수지 단일체와 비교하여 표면 거칠기와 윈딩(이하 여과굴곡곡선이라 한다)이 크다. 이러한 이유 때문에 외관이 문제시 되어 GFRP 복합재료의 사용범위를 좁게 하고 있다.⁽⁷⁾ 이와 같은 문제점 등이 있으나, GFRP 복합재료 성형품의 표면성형과정의 규명이나 표면상태의 개선에 관한 연구는 극히 적다. 본 연구에서는 GFRP 복합재료를 여러 성형조건에서 성형한 후, 성형품 표면요철을 측정하여 표면 불량현상의 크기와 성형조건의 관계를 명확하게 하고자 한다.

2. 압축성형 실험 및 표면요철 측정

2.1 압축성형 실험장치

본 연구에서는 표면요철에 미치는 성형조건의 영향에 대해서 조사하기 위해서, 성형품에 발생하는 휘거나 뒤틀림 등을 가능한 배제할 필요가 있어 성형품 형상을 두께가 일정한 직육면체의 단형판으로 하였다. 시험재료는 하나의 종류로 한정하고, 성형조건을 변화시켜 실험을 행하였다. 시험재료로는, 폴리프로필렌수지를 유리섬유로 강화한 GFRP 복합재료(日本 出光NSG(株) 제품 P 4038-B Sheet)를 이용하였다. 또한 섬유함유율은 모두 40wt%의 것을 사용하였다. Table 1에는 GFRP 복합재료(P 4038-B Sheet)의 기본 물성치를 나타냈다. 유리섬유 및 수지의 비중량은 각각 2.55g/cm³, 0.9g/cm³이다. 시험편은 GFRP 복합재료를

를 직육면체 60mm(폭)×80mm(길이)×3.8mm(두께)로 절취하여 사용하였다. GFRP 복합재료의 일반적인 성형법은 유압 열프레스를 이용한 고온압축 유동성형이지만, 재료의 유동은 모재와 섬유의 분리 및 섬유의 배향을 발생한다.^(1~4) 본 연구에서는 분리·배향의 영향을 없애기 위해서 블랭크 및 성형품의 크기를 동일하게 하였다. 즉 블랭크의 크기는 금형 캐비티와 같은 크기로 하고, 재료가 흐르지 않은 상태로 성형하였다.

압축성형에 사용한 가압장치는 하중제어가 가능한 유압 열프레스를 이용했다. 실험조건에 의한 블랭크를 예열할 필요가 있는 경우에는 적외선 가열기를 사용했다. 금형은 펀치와 다이의 두 부분으로 이루어져 있고, 열전대가 부착되어 있다. 금형의 가열은 봉히터를 사용하고, 냉각을 위해 냉각수의 순환구멍이 펀치와 다이에 뚫어져 있다. 금형의 보압하중은 선단직경 4mm의 핀을 끼워서 저항선열형게이지식 하중센서에 의해 검출했다. 또한 금형온도는 열전대(∅1.0mm)를 사용하여 캐비티 표면으로부터 1mm 위에서 측정했다. Fig. 1에 하중 및 온도의 계측 위치를 나타냈다. Fig. 1의 계측 위치에서 보압하중과 금형온도를 측정하여, 보압하중 ①, ②, ③ 및 금형온도 측정값을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타냈다. 본 연구에

Table 1 Material properties of GFRP composites materials (P 4038-B Sheet)

Property	ASTM	Unit	P 4038-B Sheet
Specific gravity	-	-	1.19
Void content	-	%	3~5
Filament diameter	-	μm	22
Fiber length	-	mm	55
Number of filament	-	ea	60
Weight of sheet	-	N / mm ²	44 ±2
Tensile strength	D638	MPa	89
Flexural strength	D790	MPa	137
Tensile elastic modulus	D638	MPa	4,400
Flexural elastic modulus	D790	MPa	4,700
Izod impact strength	D256	kJ / m ²	59
Thermal deformation temp. (182N/cm ²)	D648	°C	155
Coefficient of thermal expansion	D696	cm / cm/°C	2.69×10 ⁻⁵

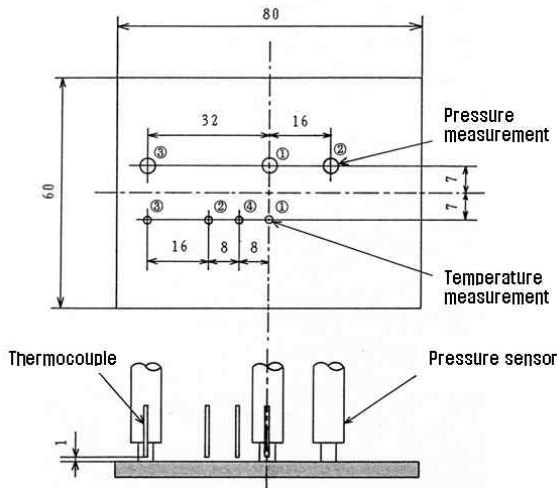


Fig. 1 Measurement position of temperature and pressure

서는 측정값들이 유사한 경향을 보여, 성형품 성형 시 보압하중은 하중센서 ①에서 측정된 값으로 하였고, 탈형 시 금형온도는 열전대 ①에서 측정된 값으로 하였다. 하중센서는 증폭기를 끼우고, 열전대는 데이터 디지털 측정기에 접속하고 컴퓨터를 사용하여 제어·기록을 행하였다.

2.2 압축성형 실험방법

GFRP 복합재료의 고온압축 유동성형은 크게 나누어서 예열, 충전, 보압·냉각, 탈형의 4개 과정으로 되어있다. 본 연구에서는 복합재료 성형 시 예열과 냉각의 방법을 변화시켜, 서냉과 급냉 실험의 2종류로 실험하였다. 보압·냉각 과정에서 x축에는 보압시간을 나타냈고, y축에는 보압하중과 금형온도를 나타냈으며, 급냉 냉각 시 서냉과 급냉의 실험조건이 달라 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타냈다.

첫째 서냉실험인 경우에는 재료를 금형 캐비티 안에 넣은 후에 금형 자체를 성형온도까지 가열하여 압축성형한 후, 금형과 재료를 냉각시키는 방법이다. 이 방법은 각 성형과정에 있어서의 재료와 금형의 온도는 동등하다. 즉 실험 재료뿐만 아니라 금형도 냉각하기 위해 냉각속도가 늦어지게 되고, 재료는 천천히 냉각시키는 것이 된다. 서냉실험에서 GFRP 복합재료 압축성형의 성형조건을 Table 2에 나타냈다. 서냉실험에서는 성형온도, 성형속도를 일정하게 하고, 보압하중과 탈형 시 금형온도를 변화시켜 실험하였다. Fig. 2는 서

Table 2 Molding condition of annealing experiment

Molding temperature (°C)	Molding velocity (mm/s)	Holding pressure load (kN)	Demolding temperature (°C)	Holding pressure time
173	13	50	80	8'10"
			40	20'30"
		100	60	12'10"
			80	8'15"
			100	5'40"
		80	150	8'12"
			200	8'08"
250	8'13"			
300	8'14"			

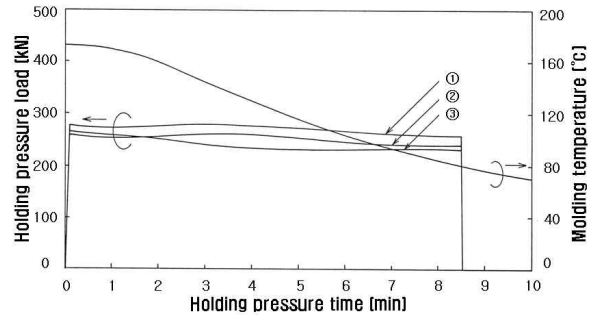


Fig. 2 The measurement result in temperature and pressure of annealing experiment

냉실험인 경우 보압·냉각 과정에 있어서, Table 2의 성형조건에 따라 보압하중과 금형온도를 변화시켜 실험한 과정을 나타낸 한 예이다.

둘째 급냉실험인 경우에는 재료의 재결정온도보다 낮은 온도의 금형에 적외선 가열기에서 가열되어 부풀어 오른 GFRP 블랭크를 금형 캐비티 안에 넣고 압축성형한 후 재료를 냉각한다. 이는 실제의 생산현장에서 생산성 향상을 위해 사용하고 있는 것과 동일한 방법이다. 이 방법은 재료를 금형 벽면에서 급격하게 냉각시키는 것이다. 이 급냉실험법은 성형 사이클이 매우 짧은 특징을 가진다. 급냉실험에서 GFRP 복합재료 압축성형의 성형조건을 Table 3에 나타냈다. 급냉실험에서는 블랭크 온도, 성형속도, 보압시간을 일정하게 하고 보압하중과 금형온도를 변화시켜 실험하였다. Fig. 3은 급냉실험인 경우 보압·냉각 과정에 있어서, Table 3의 성형조건에 따라 보압하중과 금형온도를 변화시켜 실험한 과정을 나타낸 한 예이다. 그리고 Fig. 2와 Fig. 3에 사용된 부호 ①,

Table 3 Molding condition of rapid-chilled experiment

Blank temperature (°C)	Molding velocity (mm/s)	Holding pressure time (sec)	Holding pressure load (kN)	Mold temperature (°C)
200	13	55	50	80
			100	40
				60
				80
				100
			150	80
			200	
			250	
			300	

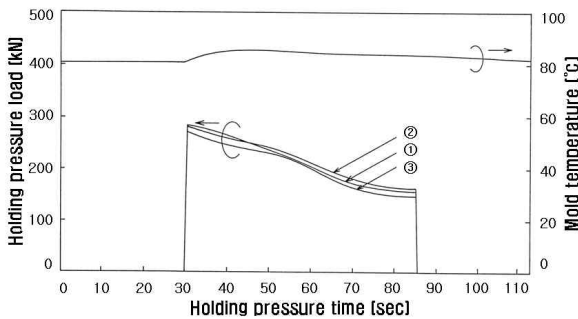


Fig. 3 The measurement result in temperature and pressure of rapid-chilled experiment

②, ③은 블랭크를 금형 내에 넣고 펀치를 강하시켜 충전 시 보압하중을 측정할 때 Fig. 1의 금형에서 측정위치를 나타낸 것이다. 보압·냉각 과정에서 30sec 직후에 압력이 가해지면서 금형온도가 약간 상승한 이유는 GFRP 복합재료 블랭크의 온도가 200°C이고 금형온도는 80°C이기 때문에 블랭크와 접한 금형 표면의 온도는 설정된 금형온도보다 높게 된다.⁽⁸⁾

2.3 표면요철의 측정방법

GFRP 복합재료의 압축성형에서 성형품의 표면에 발생한 불량현상을 표면결함⁽⁸⁾이라 하며, 이는 표면거칠기와 불규칙한 여파굴곡곡선 등으로 나타낸다. 성형품 표면요철의 단면 형상은 형태의 이상을 나타낸 진직도 등의 형상공차, 여파굴곡곡선 및 표면거칠기의 세 개 성분으로 나누어 나타낸다.

본 연구에서는 세 성분 중에서 성형품 자체 치수 정밀도에 대해서는 취급하지 않기 때문에 형

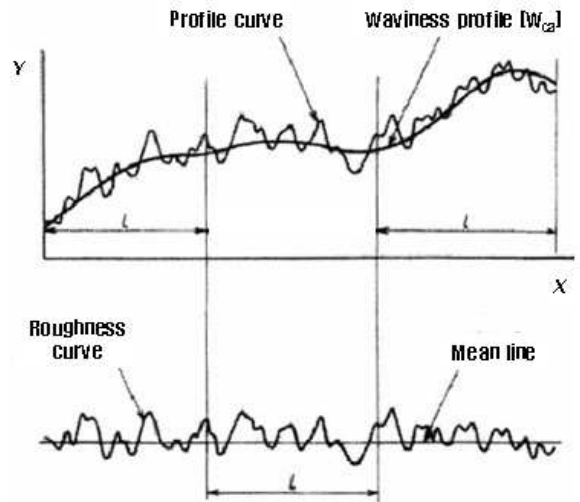


Fig. 4 Profile curve, waviness profile and roughness curve

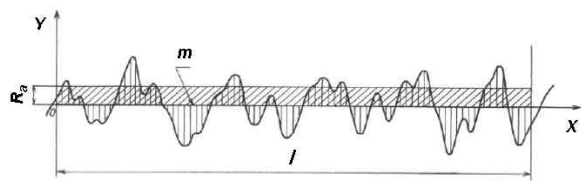


Fig. 5 Center-line-average-height (R_a)

상공차에 대해서는 생략한다. 성형품 표면의 외관에 관계하는 것은 표면거칠기와 여파굴곡곡선이다. 성형품의 표면거칠기와 여파굴곡곡선의 측정은 축침식 표면형상측정기 ((株)東京情密: Surfcom 570A)를 이용하였다. 이 측정기는 자동경사 보정기능에 의해 간단하게 표면 측정이 가능하다.⁽⁹⁾

불규칙한 표면요철의 거칠기곡선(Roughness curve)을 Fig. 4와 같이 나타냈다. 표면거칠기의 측정값은 Fig. 5와 같이 중심선평균거칠기(Center-line-average-height) R_a를 이용했다. R_a는 거칠기곡선으로부터 그 평균선의 방향에 기준 길이 l만큼 뽑아내어, 그 표본 부분의 평균선 방향에 X축을 세로 배울 방향에 Y축을 잡고, 거칠기곡선을 y=f(x)로 나타냈을 때, 식 (1)에 의해 구해지는 값을 μm로 나타낸 것이다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int |f(x)| dx \tag{1}$$

R_a의 측정에 이용한 컷오프값은 0.8mm, 측정길이는 5mm이다. 성형품의 표면거칠기 측정위치를 Fig. 6(a)에 나타냈다. GFRP 복합재료는 폴리프로필렌과 니들펀칭된 유리섬유매트를 적층하여 합

침시킨 복합판재이므로 실험값의 편차가 심하다. 이 편차 때문에, 측정은 성형품의 길이 방향으로 10회, 폭 방향으로 10회 총 20회를 측정하였다. 얻어진 20개의 측정값을 평균으로 하여 성형품의 R_a 값으로 하였다.

여과굴곡곡선(Waviness profile)은 단면곡선으로부터 파장의 짧은 성분과 긴 성분을 제거하여 얻을 수 있으며, 여과굴곡곡선을 추출곡선으로 한다. 이 추출곡선은 성형품이 휘어짐 등의 형상공차 영향이 제거된 측정값이다. 그 구하는 방법은 여과굴곡곡선 (W_{ca})을 $y=f(x)$ 로 나타냈을 때, 식 (2)에 의해 구해지는 값을 μm 로 나타낸 것이다. 즉 여과굴곡곡선 W_{ca} 의 계산식은 중심선평균거칠기 R_a 와 같다.

$$W_{ca} = \frac{1}{l} \int |f(x)| dx \quad (2)$$

W_{ca} 의 측정에 이용한 컷오프값은 0.8~8mm, 측정길이는 30mm이다. 성형품의 여과굴곡곡선 측정위치를 Fig. 6(b)에 나타냈다. GFRP 복합재료의 특성상 실험값의 편차가 심하기 때문에 측정은 성형품의 길이방향으로 10회 행하여 그 평균값을 성형품의 측정값으로 하였다.

실험에 이용한 금형의 표면상태를 알아보기 위하여, 금형의 표면거칠기와 여과굴곡곡선을 측정했다. 그 결과 중심선평균거칠기 R_a 의 값은 $0.06\mu\text{m}$, 여과굴곡곡선 W_{ca} 의 값은 $0.2\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 또한 성형 시에 금형의 표면상태가 성형품의 표면에 어느 정도 전사되었는가를 조사하기 위해 보압하중 100kN, 탈형 시 금형온도 80°C 에서 성형한 폴리프로필렌 단일재료만의 성형품 표면을 측정했다. 그 결과 중심선평균거칠기 R_a 의 값은 $0.08\mu\text{m}$, 여과굴곡곡선 W_{ca} 의 값은 $0.21\mu\text{m}$ 였다. 폴리프로필렌 단일재료만의 성형품은 금형과 비슷한 정도의 값으로 측정된 것으로부터, 이 실험의 성형법으로 금형표면의 상태가 성형품에 잘 전사된 것을 알 수 있다.

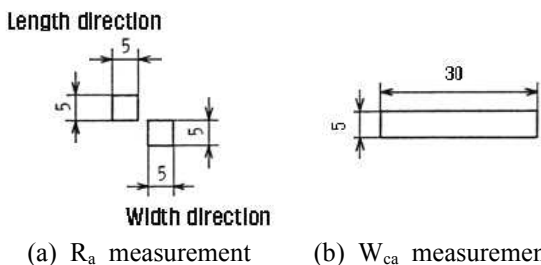


Fig. 6 Measurement position of center-line-average-height

GFRP 복합재료 성형품 표면의 섬유돌출⁽⁷⁾ 높이 측정값은 축침식 표면형상측정기로 측정된 단면곡선으로부터 섬유돌출 부분의 높이를 10개소 읽어 그 평균값으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 보압·냉각과정에서 보압하중의 영향

현재 GFRP 복합재료를 이용한 각종 부품 생산 현장에서는 약 200°C 의 블랭크를 약 $40\sim 80^\circ\text{C}$ 의 금형에 넣고, 약 15~20MPa의 압력으로 압축성형한 후 급냉하여 탈형한다. 본 연구에서는 생산현장과 같은 성형조건을 충족시켜 서냉과 급냉 실험하여 성형품 표면의 섬유돌출 높이 측정값들을 서로 비교 고찰하였다. 탈형 시 금형온도 80°C 에서 섬유돌출 높이와 보압하중과의 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 이 그림으로부터 성형품 표면의 섬유돌출 높이는 보압·냉각과정에서 보압하중이 클수록 작게 나타남을 알 수 있다. 섬유돌출은 서냉과 급냉 실험에서 동일하게 성형 시 모재의 수축에 의해서 성형품 표면에 생성되는 불량현상의 하나이다. 즉 성형품 모재의 수축과정에서 폭, 길이 방향과 비교하여 상대적으로 두께 방향의 수축이 많아, 성형품 표면에 생성된 섬유돌출 부분은 보압하중이 클수록 감소한다. 이 때 섬유돌출 부분은 금형으로 눌러져 성형품 표면이 평활도가 양호한 상태로 유지된다. 이 때문에 성형품 표면의 섬유돌출 높이는 보압하중의 영향이 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 7에서 측정값의 관계를 Origin 6.0의 Linear

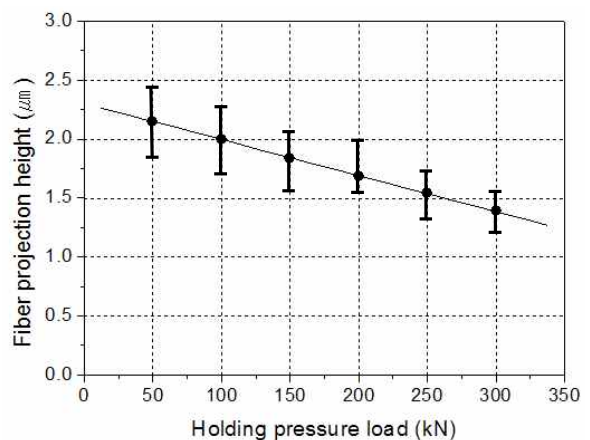


Fig. 7 Relationship between fiber projection height and holding pressure load

fitting 기능을 이용하여, GFRP 복합재료 성형 시 보압하중에 따른 표면의 섬유돌출 높이를 계산하는 실험식을 제시하였다. 성형품 표면의 섬유돌출 높이(H)와 보압하중(P)과의 관계식을 나타내면 다음 식과 같다.

$$H (\mu\text{m}) = 2.3 - 0.00305 \times P(\text{kN}) \quad (3)$$

서냉과 급냉 실험에서 보압하중을 변화시켜 고온압축 유동성형한 후, 성형품 탈형 시 금형온도 80℃일 때 중심선평균거칠기와 보압하중과의 관계를 Fig. 8에 나타냈다. 성형품 표면에서 5mm(폭)×5mm(길이)에 나타난 중심선평균거칠기 R_a 의 값은 보압하중이 증가함에 따라 직선적으로 감소함을 알 수 있다. 보압·냉각 과정에서 GFRP 복합재료 블랭크가 부풀어 올랐을 때 혼입된 공기에 의해 발생한 핀홀⁽⁸⁾과 모재의 수축에 의해 성형품 표면에 발생하는 섬유돌출 등의 표면요철은 보압하중이 클수록 작게 되어, 표면상태가 양호해지는 것을 알 수 있다. 중심선평균거칠기와 성형품 표면의 섬유돌출 높이는 서로 밀접한 관계가 있기 때문에 Fig. 7에서 보압하중이 증가할수록 섬유돌출 높이의 값이 감소하는 경향과 유사하게 나타났다.

서냉실험에서 모재인 폴리프로필렌(PP)은 결정성수지이므로 성형 시 서서히 냉각시키면 성형품 표면에 구정(Spherulite)⁽⁷⁾이 생성된다. 또한 성형온도에서 상온까지 성형품이 서서히 냉각될 때, 표면 근처 유리섬유와 모재의 수축차에 의해 크랙(Crack)⁽⁷⁾이 발생한다. 이 구정과 크랙 등의 표면요철은 성형품의 평활도를 불량하게 한다.

그러나 급냉실험에서는 성형품 성형 시 금형벽면의 재료가 급냉되어, 모재의 냉각과정에서 발생하는 표면 불량 원인의 하나인 구정이 생성되지 않았고 표면 균열인 크랙 현상도 나타나지 않았다. 따라서 성형품 표면에서 중심선평균거칠기 값은 보압하중과 밀접한 관계가 있으며, 서냉 실험보다 급냉실험에서 양호하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8의 서냉과 급냉 실험에서 중심선평균거칠기(R_a)와 보압하중(P)과의 관계식을 각각 나타내면 식 (4), (5)와 같다.

$$R_a (\mu\text{m}) = 0.79 - 0.00148 \times P(\text{kN}) \quad (4)$$

$$R_a (\mu\text{m}) = 0.62 - 0.00130 \times P(\text{kN}) \quad (5)$$

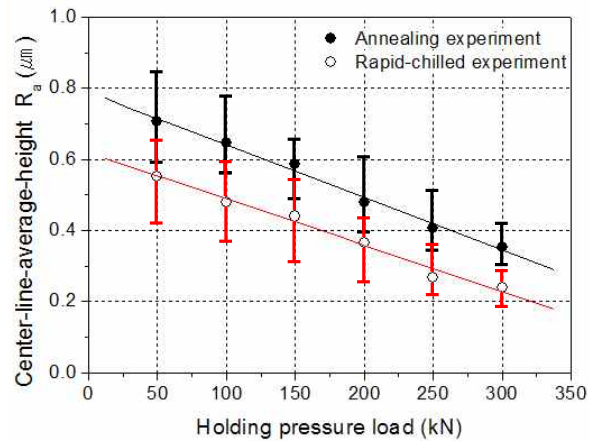


Fig. 8 Relationship between center-line-average-height and holding pressure load at mold temperature 80℃

서냉과 급냉 실험에서 성형품 탈형 시 금형온도 80℃일 때 여과굴곡곡선 값과 보압하중과의 관계를 Fig. 9에 나타냈다. 여과굴곡곡선은 성형온도에서 상온까지 성형품이 냉각될 때 강화재인 유리섬유는 수축하지 않고, 모재인 폴리프로필렌(PP)의 수축에 의해 발생한 두께 변화와 밀접한 관계가 있는 표면 불량현상의 하나이다. 여과굴곡곡선 W_{ca} 의 값은 보압하중이 클수록, 급냉 냉각 시 서냉이 급냉보다 작게 나타났다. 여과굴곡곡선 값은 성형품 표면에서 5mm(폭)×30mm(길이)에 나타난 모재의 수축 이외 구정, 섬유돌출, 크랙, 섬유노출, 마이크로 웰드라인, 핀홀 등과 같은 표면요철을 척도로 나타낸 값이다. 복합재료의 고온압축 유동성형에서 급냉 냉각 시 성형품에 나타나는 표면 불량현상은 서냉에서 구정, 크랙 등이 발생하고, 급냉에서 섬유노출, 마이크로 웰드라인 등이 주로 발생하였다.

급냉 냉각 시 급냉에서는 서냉보다 Fig. 8의 중심선평균거칠기와 같이 성형품 표면의 평활도가 양호하다는 장점이 있다. 그러나 여과굴곡곡선에서 급냉 냉각 시 서냉이 급냉보다 성형품 표면의 평활도가 좋은 이유는 모재의 수축 이외 서냉 시 발생하는 구정, 크랙의 표면 불량현상 값보다 급냉 시 발생하는 섬유노출, 마이크로 웰드라인 등의 표면요철 값들이 상대적으로 크기 때문이다. 따라서 급냉에서 표면이 반드시 좋아지는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9로부터 성형품의 중심선평균거칠기와 여과굴곡곡선을 측정된 결과, 보압하중을

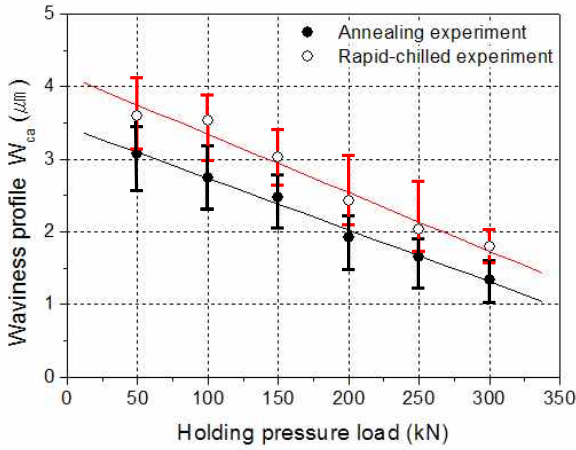


Fig. 9 Relationship between waviness profile and holding pressure load at mold temperature 80°C

크게 하면 표면상태가 양호해지는 것을 알 수 있다. 보압하중에 대해서 서냉과 급냉 실험의 결과는 같은 경향으로 나타났다. 그 결과 성형품의 표면상태는 성형 후 급형 냉각 시, 서냉과 급냉의 영향보다는 성형 시의 보압하중이 더 지배적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 서냉과 급냉 실험에서 여파굴곡곡선 (W_{ca})과 보압하중(P)과의 관계식을 각각 나타내면 식 (6), (7)과 같다.

$$W_{ca} (\mu m) = 3.45 - 0.00713 \times P(kN) \quad (6)$$

$$W_{ca} (\mu m) = 4.15 - 0.00806 \times P(kN) \quad (7)$$

3.2 보압·냉각과정에서 금형온도의 영향

GFRP 복합재료를 이용한 각종 부품 생산현장에서는 압축성형 시의 성형압력이 약 15~20MPa 이므로 시험편에 작용하는 보압하중을 100kN으로 하여 실험한 후 보압·냉각 과정에서 금형온도의 영향을 고찰하였다. GFRP 복합재료를 성형 시 보압하중 100kN에서 고온압축 유동성형 할 때, 탈형 시 중심선평균거칠기와 금형온도와의 관계를 Fig. 10에 나타냈다. 이 그림에서 금형온도가 낮을수록 중심선평균거칠기의 값이 낮게 나타났다. 성형품의 표면상태는 성형 시의 금형온도가 낮고, Fig. 8과 같이 급형 냉각 시 서냉보다 급냉에서 양호함을 알 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 10으로부터 성형품의 표면에서 중심선평균거칠기의 값들을 비교하면 금형온도보다 보압하중에 더 지배적임을 알 수 있다. 그리고

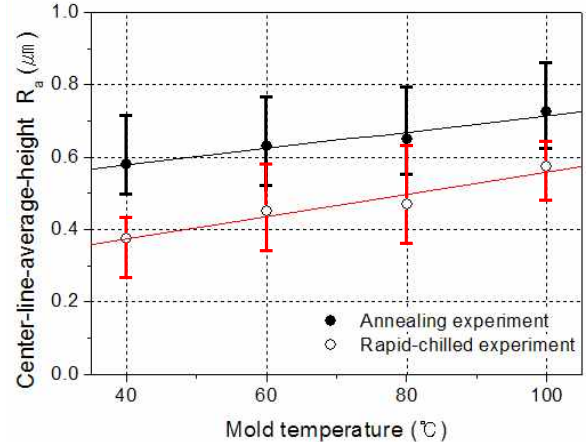


Fig. 10 Relationship between center-line-average-height and mold temperature at holding pressure load 100kN

탈형 시 금형온도를 낮게 하는 것은 성형품 표면을 오랫동안 눌러 평활도가 양호한 상태로 유지하는 것과 같은 효과가 있기 때문에 탈형 시 금형온도가 낮을수록 성형품 표면상태가 양호해진다. 이 외에 성형품의 냉각속도에도 관계가 있다. 금형온도가 낮으면, 200°C에 예열된 블랭크가 보다 빨리 냉각된다. 냉각속도가 빠르면 빠를수록 모재의 폴리프로필렌은 결정화가 진행되지 않은 채 고체가 되어 수축량이 적게 된다.⁽¹⁰⁾ 이 때문에 급형 냉각 시 급냉에서 성형품 표면의 섬유돌출 높이는 낮아져 평활도가 양호한 표면이 됨을 알 수 있다.

Fig. 10의 서냉과 급냉 실험에서 중심선평균거칠기(R_a)와 금형온도(T)와의 관계식을 각각 나타내면 식(8), (9)와 같다.

$$R_a (\mu m) = 0.49 + 0.00226 \times T(^{\circ}C) \quad (8)$$

$$R_a (\mu m) = 0.25 + 0.00309 \times T(^{\circ}C) \quad (9)$$

GFRP 복합재료 성형 시 보압하중 100kN에서 성형품의 여파굴곡곡선과 탈형 시 금형온도와의 관계를 Fig. 11에 나타냈다. Fig. 10의 중심선평균거칠기와 같은 경향으로 탈형 시 금형온도가 낮을수록 여파굴곡곡선의 값이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 9와 같이 보압·냉각 과정에서 서냉이 급냉보다 여파굴곡곡선의 값이 낮게 나타났다. 이 여파굴곡곡선에 큰 영향을 미치는 것은 모재의 수축 이외 섬유노출, 마이크로 웰드라인 등이 급냉 시에만 생성되기 때문이다.

Fig. 10과 Fig. 11의 중심선평균거칠기와 여파굴

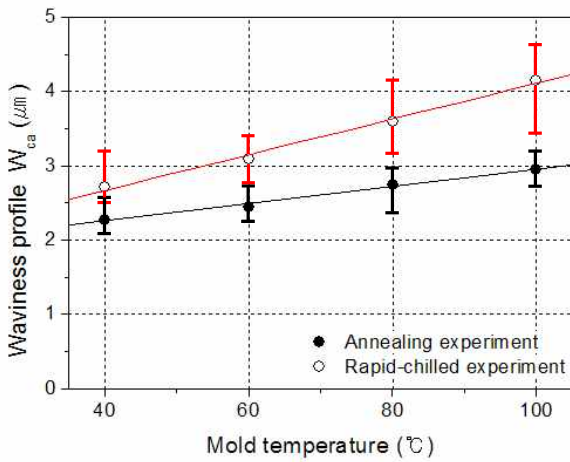


Fig. 11 Relationship between waviness profile and mold temperature at holding pressure load 100kN

곡곡선의 측정값으로부터, 성형품의 표면상태는 급형 냉각 시 서냉과 급냉의 영향보다는 탈형 시의 급형온도가 더 지배적임을 알 수 있다. 또한 보압·냉각 과정에서 여과굴곡곡선 값이 중심선평균거칠기 값보다 크게 나타난 주요 원인은 성형품이 성형온도에서 상온까지 냉각될 때, 모재의 수축에 의해 표면이 자유롭게 변형된 표면요철이다. 이는 GFRP 복합재료 특성상 성형품 내부의 유리섬유함유율이 단위체적당 편차가 심하기 때문이다. 즉 GFRP 복합재료의 성형품은 성형온도에서 상온까지 냉각될 때 성형품 내부에 유리섬유가 많이 포함되어 있는 부분과 모재가 많은 부분의 수축량의 차에 의해서 굴곡곡선이 발생한다.⁽⁸⁾

Fig. 11의 서냉과 급냉 실험에서 여과굴곡곡선 (W_{ca})과 급형온도(T)와의 관계식을 각각 나타내면 식(10), (11)과 같다.

$$W_{ca} (\mu m) = 1.79 + 0.01163 \times T(^{\circ}C) \quad (10)$$

$$W_{ca} (\mu m) = 1.71 + 0.02406 \times T(^{\circ}C) \quad (11)$$

본 연구의 실험 결과로부터, GFRP 복합재료를 이용한 고온압축 유동성형의 보압·냉각 과정에서 성형품 표면의 평활도에 미치는 성형조건은 성형시의 보압하중이 크고, 탈형 시의 급형온도가 낮을수록 양호함을 알 수 있다.

4. 결론

GFRP 복합재료의 압축성형에서 각각의 성형조

건에서 측정식 표면형상측정기로 성형품 표면의 섬유돌출 높이와 표면거칠기 및 여과굴곡곡선을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 성형품 표면의 중심선평균거칠기와 여과굴곡곡선의 측정값은 보압하중이 클수록, 탈형 시의 급형온도는 낮을수록 작게 나타났다. 이것은 표면의 섬유돌출 높이 측정값이 보압하중이 증가할수록 작게 나타난 것과 같은 경향으로 나타났다.

(2) 성형품 표면의 중심선평균거칠기 값은 서냉보다는 급냉에서 양호하게 나타났으며, 여과굴곡곡선은 급냉보다는 서냉에서 양호하게 나타났다. 또한 성형품의 표면거칠기는 성형 시의 급형온도보다 보압하중이 더 지배적임을 알 수 있다.

(3) GFRP 복합재료의 고온압축 유동성형에서 성형품의 표면요철에 영향을 미치는 보압하중과 급형온도의 성형조건에 따라 표면의 섬유돌출 높이와 중심선평균거칠기 및 여과굴곡곡선 값을 정량적으로 예측할 수 있는 관계식을 제시하였다.

후 기

“이 논문은 2010학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음”

참고문헌

- (1) Lee, D. G., Kim, J. L., Kim, S. P., Lee, W. I. and Kim, E. G., 1993, “A Study on the Processing of Long Fiber-Reinforced Composite Materials for Thermoforming,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 5, pp. 1106~1114.
- (2) Lee, D. G., Han, G. Y. and Kim, E. G., 1995, “Effect of Mold Temperature on the Separation and the Orientation During Compression Molding of Fiber-Reinforced Polymeric,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 305~314.
- (3) Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E. G., 1995, “Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing,” *The Journal of the Polymer Processing Society*, Vol. 10, No. 3, pp. 262~269.
- (4) Kang, K., Jo, S. H., Lee, D. G. and Kim, E. G., 1996, “A Study on Mean Coefficient of

- Separation During Compression Molding of Fiber-Reinforced Thermoplastics,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 20, No. 4, pp. 1146~1153.
- (5) Kim, D. S. and Kim, J. K., 1995, “The fatigue Damage Accumulation Behavior and the Fatigue Life Prediction Under 2-Level Block Loading in Plan Woven GFRP Composites,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 19, No. 12, pp. 3299~3307.
- (6) Kim, Y. J. and Lim, J. K., 1997, “A Study on Properties of Corrosion Fracture Surfaces of GFRP in Synthetic Sea Water,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 11, No. 3, pp. 249~254.
- (7) Kim, H. S., Kim, J. W., Kim, Y. J. and Lee, D. G., 2009, “Effects of Molding Condition on Surface of GMT-Sheet Moldings,” *Proceedings of the 2009 Autumn Meeting of KSCM*, pp. 251~255.
- (8) Lee, D. G., Jeong, K. S. and Choi, J. H., 1998, *Composite materials*, Sigma Press, Seoul, pp. 407~441.
- (9) Kim, K. D. and Chung, S. C., 1999, “Design and Analysis of 2½ Dimensional On-the-Machine Measuring and Inspection System Using Touch Trigger Probes,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 23, No. 1, pp. 37~46.
- (10) Heo, S. B., Lee, J. H., Shin, G. S. and Rhee, K. Y., 2002, “A Study on the Processing Characteristic in the Compression Molding of Hybrid Thermoplastic Composites,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 12, pp. 2550~2555.