論文

GMT-Sheet 성형품의 표면요철에 미치는 성형조건의 영향

김형석*, 김진우**, 김용재***, 이동기****+

Effects of Molding Condition on Surface Unevenness of GMT-Sheet Moldings

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

ABSTRACT

Observing of GMT-Sheet in molding conditions, we have investigated unexpected phenomenons of moldings surface. In microscope investigation, we observe that there exist deficiencies on the surface of GMT-Sheet moldings, such as the spherulite, fiber projection, crack, fiber exposure, micro-weldline, pinhole and winding. They are caused to arise unevenness and phenomenons influence polish on surface. Especially, the major cause of the unevenness, effected to surface roughness, is a shrinking of 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 GMT-Sheet moldings improved its appearance.

초 록

성형조건에 따른 GMT-Sheet를 관찰하여, 성형품 표면의 불량원인을 조사했다. 현미경 관찰 결과, GMT-Sheet 성형품의 표면에서 구정, 섬유돌출, 크랙, 섬유노출, 마이크로 웰드라인, 핀홀, 여파굴곡선 등의 결함을 발견했다. 이 결함들은 요철의 발생원인이고, 표면 광택에 영향을 주는 현상이다. 그리고 표면거칠기에 영향을 주는 요철의 가장 주요한 발생원인은 보압·냉각 과정에서 발생하는 모재의 수축이었다. 성형 시의 보압하중이 높을수록 GMT-Sheet 성형품 표면은 좋아졌다. 또한 서냉실험에서는 탈형온도가 낮을수록 성형품의 표면이 좋아졌다.

Key Words : GMT-시트 성형품(GMT-Sheet moldings), 구정(Spherulite), 섬유돌출(Fiber projection), 섬유노출(Fiber exposure), 마이크로 웰드라인(Micro-weldline), 핀홀(Pinhole)

1. 서 론

복합재료는 형태와 화학조성이 다르고 서로 용해되지 않은 2개 혹은 그 이상의 소재를 복합하여 얻어진 재료로써 본래의 재료보다는 우수한 특성을 가지고 있는 재료이다[1]. 소재를 복합화하는 목적은 (1)비강성(Specific stiffness : E/ρ), 비강도(Specific strength : S/ρ) 등 기계적 강도가 크다. (2)원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있다. (3)성형가공성, 성형정도, 치수 안정성 등을 향상시킨다. (4)금형을 사용한 정형가공(Net shape manufacturing)을 할 수 있다.

현재 실용화되어 폭넓게 이용되고 있는 GFRP 복합판재는 모재를 플라스틱(PP), 강화재를 유리섬유(Glass fiber)로 한 유리섬유강화 플라스틱 복합판재인 GMT-Sheet가 있다. 유리섬유강화 플라스틱 복합재료는 모재의 종류에 의하여 가열냉각에 의해 물리변화를 이용한 열가소성 플라스틱 복합재료(FRTP)와 분자구조변화(화학변화)를 이용한 열경화성 플라스

* 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과
** Center for NDE, Iowa State University
*** 조선대학교 전기공학과
****+ 조선대학교 메카트로닉스공학과, 교신저자(E-mail:dglee@chosun.ac.kr)

틱 복합재료(FRTS)로 크게 분류된다. 이 중 열가소성 플라스틱 복합재료는 내충격성이 높은 점과 성형성이 우수한 점 또한 회수 후 재사용이 가능한 점 등 많은 면에서 우수한 특성을 가지고 있어, 여러 분야에서 실용화가 진행되어 사용되고 있다[2].

프레스 가공용의 유리섬유강화 열가소성 플라스틱 복합판재인 GMT-Sheet는 모재시트와 유리섬유매트의 라미네트이며 시트 형상의 2차제품으로서 시판되고 있다. 이 성형법은 GMT- Sheet를 필요한 크기로 절단한 블랭크를 가열하여 프레스로 열압축 유동성형한 것이다. 일반적으로 모재를 용융상태로 가열하여 열압축 유동성형하면 재료는 금형 내로 유동하고 복잡한 형상의 성형이 가능하다. 또한 성형 사이클이 짧은 시간에 완료하기 때문에 생산성이 우수한 재료이다. 이러한 특징으로부터 GMT- Sheet 성형품은 판금 프레스 성형품에 대신해 여러 산업분야에서 사용되고 있으며, 장래 그 이용범위는 더욱 넓어질 거라고 생각된다[3].

GMT-Sheet의 용도 확대를 막는 결점으로서 이 재료를 열압축 유동성형 시 성형품 내면에는 모재와 강화재의 분리 및 섬유의 배향이 발생하고, 외면에는 표면요철 등의 영향으로 표면이 거칠다는 점을 들 수 있다. 성형품의 표면을 보면, 여러 형태의 요철(凹凸)이 발생하고 있으며, 모재수지 단일체와 비교하여 표면거칠기와 여파굴곡곡선이 크다. 이러한 이유 때문에 GMT-Sheet의 사용범위를 좁게 하고 있다.

이와 같은 문제점 등이 있어 Kim 등은 농도법에 의해 GFRP 복합재료에서 섬유배향을 화상처리를 이용하여 측정하는 방법을 제안하였다[4-5]. 또한 Kim 등은 장섬유강화 고분자 복합판재를 열압축 유동성형 시 모재와 섬유의 분리 및 배향이 발생하며, 이 분리를 표시하는 불균질도와 섬유배향의 정도를 나타내는 섬유배향함수는 상관관계가 있다. 즉 불균질도가 증가하면 섬유배향함수도 증가하기 때문에 모재와 섬유의 분리 및 섬유의 배향은 별개가 아니라 서로 불가분의 관계가 있으며 양자는 상관관계가 있음을 발표하였다[6-9]. 그리고 섬유강화 고분자 복합판의 제조 및 개량을 위한 강화재인 섬유길이 변화의 연구에서, 섬유와 모재의 분리 및 배향의 상관관계로부터 섬유길이가 길수록 상관계수는 증가함을 발표하였다[10].

이 외에 섬유강화 고분자 복합재료의 열압축 유동성형에서 발생하는 금형-재료 계면의 마찰상태[11]와 성형품의 섬유함유량을 비파괴적으로 구하는 화상처리 측정법을 제안하였고[12], 복합재의 모재와 강화섬유와의 미시계면의 분리를 SEM 사진 등을 통해서 고찰하였다[13]. 그러나 GMT-Sheet의 열압축 유동성형 시 보압·냉각 과정에서 발생하는 성형품의 표면불량 현상의 규명이나 표면상태의 개선에 관한 연구는 극히 적다[14].

본 논문에서는 GMT-Sheet를 여러 성형조건에서 성형한 후, 성형품 표면을 현미경을 이용한 관찰과 표면형상측정기로 표면요철을 측정하여 표면에 나타나는 여러 형태의 표면요철이 생성하는 과정을 규명하여 표면상태와 성형조건의 관계를 명확하게 하고자 한다. 또한 표면불량 발생 수가 많으면 표면의 광택이 없어져 성형품의 표면상태가 좋지 않으므로 얻어진 실험결과를 바탕으로, 성형품의 표면상태를 개선하는 방법을 제안하였다.

2. 실 험

2.1 실험재료

본 연구에서는 주로 성형조건이 표면상태에 미치는 영향에 대해서 조사하기 위해서, 시험재료는 하나의 종류로 한정하고, 성형조건을 변화시켜 실험을 행하였다. 시험재료로는, 폴리프로필렌수지(PP)를 유리섬유(Glass fiber)로 강화한 두께 3.8mm인 GMT-Sheet (X-시트 : 일본 出光NSG(주)) 를 이용하였다. 또한 섬유함유율은 모두 40wt%의 것을 사용하였다. Table 1에는 본 실험에 사용된 GMT-Sheet 재료의 기본 물성치를 나타냈다. 섬유 및 수지의 비중량은 각각 2.55g/cm^3, 0.9g/cm^3 이다. 시험편은 GMT- Sheet를 60mm(W) × 80mm(L) × 3.8mm(t) 형상으로 절취하였다.

GMT-Sheet의 일반적인 성형법은 열압축 유동성형이지만, 재료의 유동은 모재와 섬유의 분리 및 섬유의 배향을 발생한다[6-9]. 본 실험에서는 분리·배향의 영향을 없애기 위해서 블랭크 및 성형품의 크기를 동일하게 하였다. 즉 블랭크의 크기는 금형 캐비티와 같은 크기로 하고, 재료가 흐르지 않은 상태로 성형하였다.

Table 1 Material properties

Properties	Value
Specific gravity	1.19
Void content (%)	3~5
Filament diameter (㎛)	22
Filament number (ea)	60
Fiber length (mm)	55
Sheet thickness (mm)	3.8
Sheet weight (N / mm^2)	44 ±2

2.2 실험장치

압축성형에 사용한 가압장치는 하중제어가 가능한 유압열프레스를 이용했다. 실험조건에 의한 블랭크를 예열할 필요가 있는 경우에는, 적외선 가열기를 사용했다. 금형 캐비티의 치수는 60mm(W) × 80mm(L) × 3.8mm(t)이고, 금형은 펀치와 다이의 두 부분으로 이루어져 있으며 열전대가 부착되어 있다. 가열은 봉히터를 사용하고, 냉각을 위해 냉각수의 순환 구멍이 뚫어져 있다.

금형 내압은 선단직경 4mm의 핀을 끼워서 저항선열형게이지식 압력센서에 의해 검출했다. 또한 금형온도는 열전대(∅ 1.0mm)를 사용하여 캐비티 표면으로부터 1mm 위에서 측정했다. Fig. 1에 압력 및 온도의 계측 위치를 나타냈다. 압력과 온도는 Fig. 1의 ①, ②, ③ 계측 위치에서 각각의 측정값들이 유사한 경향을 보여, 성형품 성형 시 보압은 센서 ①에서 계측된 값으로, 온도는 열전대 ①에서 계측된 값으로 하였다. 압력센서는 증폭기를 끼우고, 열전대는 데이터 디지털 측정기에 접속하고 컴퓨터를 사용하여 제어 · 기록을 행하였다.

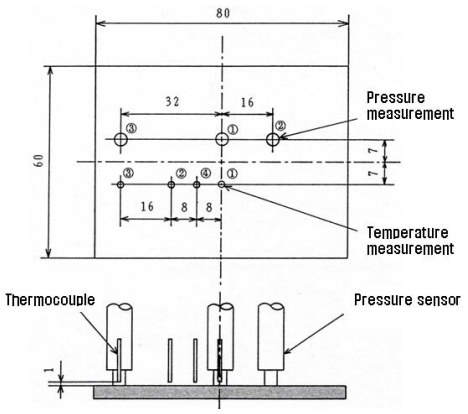


Fig. 1 Measurement position of temperature and pressure.

2.3 실험방법

GMT-Sheet의 성형법은 크게 나누어서 예열, 충진, 보압 · 냉각, 탈형의 4개 과정으로 되어 있다. 본 실험에서는 재료의 예열과 냉각의 방법을 변화시켜, 서냉실험과 급냉실험의 2종류로 실험하였다.

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. 재료 뿐만 아니라 금형도 냉각하기 위해 냉각속도가 늦어지게 되고, 재료는 천천히 냉각시키는 것이 된다.

급냉실험인 경우에는 재료의 재결정온도보다 낮은 온도의 금형에 가열된 재료를 넣고 압축성형한 후, 재료를 냉각한다. 이는 실제의 생산현장에서 행하고 있는 것과 동일한 방법이다. 이 방법은 재료를 금형 벽면에 급격하게 냉각시키는 것이다. 이 급냉실험법은 지극히 성형 사이클이 짧은 특징을 가진다.

본 실험에서 성형한 서냉실험 성형품의 성형조건을 Table 2에 나타냈다. 서냉실험에서는 성형온도, 성형속도를 일정하게 하고, 성형품 탈형 시 보압하중과 금형온도를 변화시켰다. 그리고 급냉실험 성형품의 성형조건을 Table 3에 나타냈다. 급냉실험에서는 블랭크 온도, 성형속도, 보압시간을 일정하게 하고, 보압하중과 금형온도를 변화시켰다.

Table 2 Molding condition of annealing experiment

molding temperature (℃)	molding velocity (mm/s)	holding pre-ssure load (kN)	demolding temperature (℃)	holding pressure time
173	13	50	80	8' 10"
		100	40	20' 30"
			60	12' 10"
			80	8' 15"
			100	5' 40"
		150	80	8' 12"
		200		8' 08"
		250		8' 13"
		300		8' 14"

Table 3 Molding condition of rapid-chilled experiment

blank temperature (℃)	molding velocity (mm/s)	holding pre-ssure time (min)	holding pre-ssure load (kN)	mold temperature ℃
200	13	1	50	80
			100	40
				60
				80
				100
			150	80
			200	
			250	
			300	

2.4 여파굴곡곡선 측정

GMT-Sheet 성형품의 표면에 발생한 결함은 형상공차, 표면거칠기 및 여파굴곡곡선의 3성분으로 나타낼 수 있다. 3성분 중에서 성형품 자체 치수 정밀도에 대해서는 취급하지 않기 때문에 형상공차에 대해서는 생략한다. 성형품 표면의 외관에 관계하는 것은 표면거칠기와 여파굴곡곡선이다.

불규칙한 표면요철의 거칠기곡선(Roughness curve), 여파굴곡곡선(Waviness profile) 등을 Fig. 2에 나타냈다. 성형품 표면요철의 표면거칠기는 중심선평균거칠기를 이용하고, 여파굴곡곡선은 단면곡선으로부터 파장의 짧은 성분과 긴 성분을 제거하여 얻을 수 있으며, 여파굴곡곡선을 추출곡선으로 한다. 이 추출곡선은 성형품이 휘어짐 등의 형상공차 영향이 제거된 측정값이다. 그 구하는 방법은 여파굴곡곡선(W_{ca})을 y=f(x)로 나타냈을 때, 식 (1)에 의해 구해지는 값을 ㎛로 나타낸 것이다.

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

금형 및 성형품 표면의 표면거칠기와 여파굴곡곡선의 측정은 촉침식 표면형상측정기((株)東京情密 : Surfcom 570A)를 사용하였다.

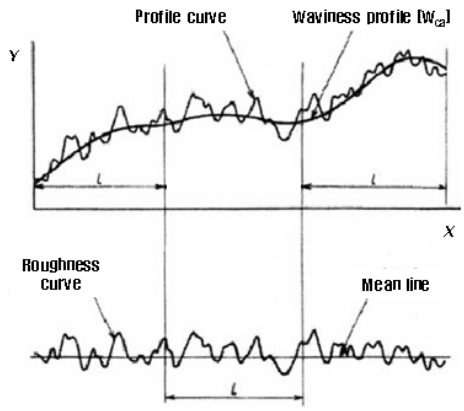


Fig. 2 Waviness profile, roughness curve and profile curve.

본 실험에서 GMT-Sheet 재료의 특성상 실험값의 편차가 심하기 때문에 표면거칠기와 여파굴곡곡선의 측정값은 성형품의 길이방향으로 10회 측정하여 그 평균값을 성형품의 측정값으로 하였다. 표면거칠기의 측정길이는 5mm이고, 여파굴곡곡선의 측정길이는 30mm이다. 실험에 이용한 금형 표면거칠기 값은 0.06㎛이고 여파굴곡곡선 값은 0.2㎛로 측정되었다.

또한 성형 시에 금형의 표면상태가 성형품의 표면에 어느 정도 전사되었는가를 조사하기 위해 보압하중 100kN, 탈형 시 금형온도 80℃에서 성형한 폴리프로필렌 단일재료만의 성형품 표면을 측정한 결과 표면거칠기 값은 0.08㎛이고, 여파굴곡곡선의 값은 0.21㎛로 측정되었다. 폴리프로필렌 단일재료만의 성형품은 금형과 비슷한 값으로 측정되어, 이 실험의 성형법으로 금형표면의 상태가 성형품에 잘 전사된 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 GMT-Sheet 성형품 표면의 외관에 발생한 표면불량 중 여파굴곡곡선 값이 표면거칠기 값보다 약 2.6배 크므로 표면결함에 가장 큰 영향을 미치는 여파굴곡곡선에 대해서만 측정한다.

3. 실험 결과 및 고찰

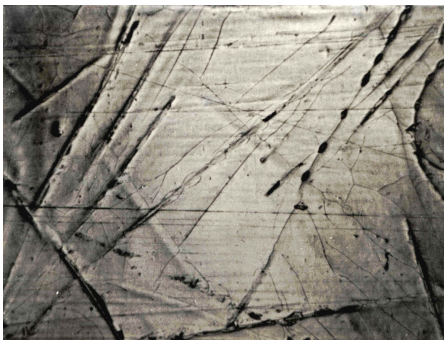
3.1 성형조건에 따른 표면요철 관찰

GMT-Sheet 성형품의 표면을 금형 냉각속도에 따라 현미경을 이용하여 관찰하고, 성형품 표면의 섬유돌출 높이 등의 표면요철은 촉침식 표면형상측정기로 측정한 결과, 다음과 같은 표면요철의 주요 원인인 표면불량 현상 등이 나타났다. 이 표면불량 현상은 그 크기가 작아 현미경을 이용한 관찰과 표면형상측정기로 측정되지만 표면불량 발생 수가 많으면 표면의 광택이 없어져 성형품의 표면상태에 나쁜 영향을 끼친다.

3.1.1 구정

모재가 결정성수지인 경우, 성형품이 냉각된 과정에서 결정이

(a) Surface of annealing experiment moldings



(b) Surface of rapid-chilled experiment moldings

(c) Surface of air-cooled moldings

Fig. 3 Spherulite.

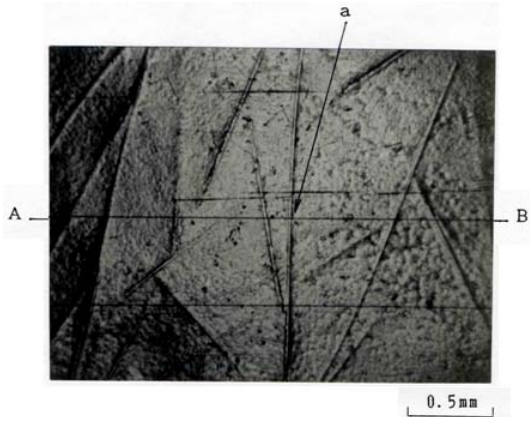
성장하기 때문에 성형품 표면의 상태는 결정성장의 정도에 의해 변화한다. 폴리프로필렌은 냉각의 과정에서 결정이 구상으로 성장하여 구정(Spherulite)이 생성된다.

Fig. 3은 금형 냉각속도가 다른 3종류의 성형품 표면을 현미경으로 관찰한 것이다. (a)는 서냉실험으로 얻어진 보압하중 100kN, 탈형 시 금형온도 80℃의 성형품의 표면으로 표면이 약 30㎛ 크기의 입자로 덮여져 있는데 이를 구정이라 한다. (b)는 급냉실험에서 보압하중 100kN, 금형온도 80℃의 성형품이다. 모재부분의 표면은 매끄럽고 구정은 보이지 않는다. (c)는 보압

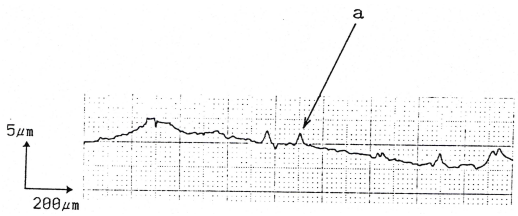
하중 100kN에서 자연냉각에 의해서 냉각시간을 1시간 정도로 한 성형품이다. 표면의 입자의 직경은 (a)와 비교하여 구정이 더욱 크게 성장하고 있다. 이와 같이 모재가 결정성수지인 경우 성형 시 서서히 냉각시키면 성형품의 표면에 구정이 발생하여, 미세한 표면요철을 만들어 평활도를 불량하게 한다. 따라서 구정의 크기는 성형품의 냉각속도에 의해서 결정되어, 냉각속도가 늦을수록 구정의 직경이 크게 성장하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 섬유돌출

성형품 표면에 있는 유리섬유는 들뜬 것 같은 형태로 섬유돌출(Fiber projection)이 생성된다. Fig. 4에 서냉실험 성형품의 섬유돌출의 현미경 사진과 표면거칠기 값을 나타냈다. 서냉 및 급냉 실험에서 성형품의 표면에는 파장이 수 ㎛ 정도의 크기의 섬유돌출이 다수 존재하고 있고, 표면의 평활도를 악화시키는 중요한 원인이 되고 있다. 섬유돌출은 성형온도에서 상온까지 성형품이 냉각될 때 모재와 유리섬유의 수축차에 의해 발생하는 표면불량 현상이다. 성형품 표면 근처에 단위체적당 유리섬유가 많은 부분에서는 모재가 적기 때문에 섬유돌출이 발생한다. 즉 GMT-Sheet의 폭, 길이 방향에 비해 두께 방향으로 모재의 수축이 지배적으로 일어나므로 표면의 섬유가 돌출되어 표면에 작은 요철을 만들고 있음을 알 수 있다.

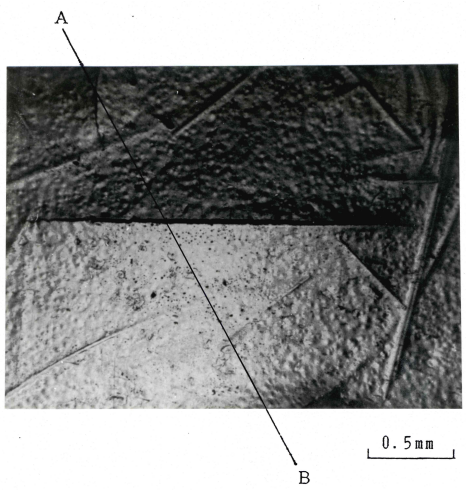


(a) Micrograph

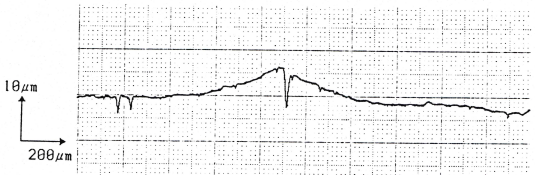


(b) Section AB

Fig. 4 Fiber projection.



(a) Micrograph



(b) Section AB

Fig. 5 Crack.

3.1.3 크랙

크랙(Crack)은 서냉실험의 성형품에서 많이 보이는 표면의 균열이다. 크랙의 현미경 사진과 표면거칠기의 값을 Fig. 5에 나타냈다. 이 표면거칠기 그래프로부터 크랙은 표면이 부풀어 올랐던 윗부분에 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 크랙은 성형온도에서 상온까지 성형품이 냉각될 때 유리섬유와 모재의 수축차에 의해 성형품의 표면에 발생한 장력이 원인이라 생각된다. 표면의 장력이 유리섬유와 모재의 계면의 접착강도보다 큰 경우에 크랙이 발생한다.

크랙이 발생한 부분에서 성형품을 절단한 표면의 현미경 사진을 Fig. 6에 나타냈다. 크랙은 Fig. 5로부터 성형품 표면 근처의 섬유와 모재의 계면에서 발생하고, 내부섬유에서도 모재와의 계면박리가 보인다.

크랙은 보압하중이 작고 탈형 시 금형온도가 높은 성형조건에서 성형한 성형품의 표면에서 많이 관찰되었다.

3.1.4 섬유노출

급냉실험 성형품의 표면을 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7의 중앙 근처에 표면이 모재로 덮여있지 않은 부분이 섬유노출(Fiber exposure)이다. 급냉실험 성형품의 표면에는 이러한 유리섬유

Fig. 6 Section of crack.

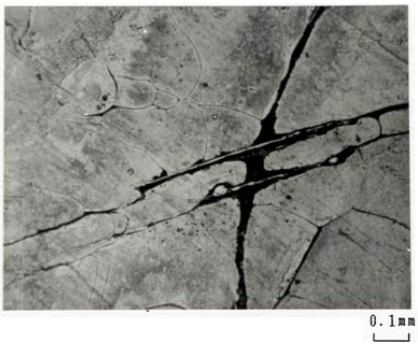


Fig. 7 Fiber exposure and micro weldline.

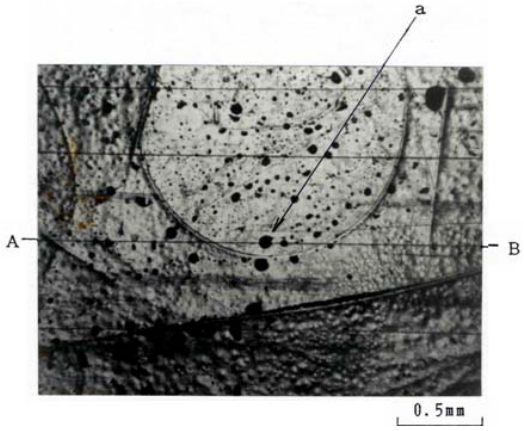
노출상태가 많이 관찰되었다. 이 표면불량 현상은 금형 벽면에서 모재가 급냉되어 굳어지기 때문에 모재의 유동성이 나빠진다. 즉 모재가 유리섬유의 상면까지 흘러들지 않아, 유리섬유가 모재에 덮여있지 않는 상태에서 표면이 굳어지는 것에 의해 발생한다고 생각된다.

3.1.5 마이크로 웰드라인

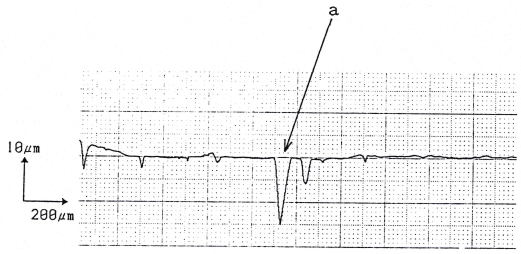
급냉실험의 성형품 표면에는 모재의 흐름이 부딪혀서 생긴 것처럼 선이 다수 관측되었다. Fig. 7에 급냉실험의 성형품 표면에 호를 그린 것처럼 보이고 있는 가는 선이 마이크로 웰드라인(Micro weldline)이다. 적외선 가열기에 의해 블랭크를 가열하면 모재인 폴리프로필렌만 용융상태로 된다. 이 블랭크는 금형 내에 삽입되어, 펀치를 하강시킬 때에 유동하고 금형에 충진된다. 급냉실험에서는 금형이 재결정온도보다 낮은 온도로 되어 있어, 모재가 급속히 굳기 때문에 성형품의 표면에는 모재가 흘렀던 흔적이 남는다. 열압축 유동성형 시 급냉으로 모재의 거동이 원활하지 않아 섬유와 모재와의 사이에 선이 생겨 마이크로 웰드라인이 생성된다.

3.1.6 핀홀

GMT-Sheet 성형품의 표면에 보이는 작은 구멍이 핀홀



(a) Micrograph



(b) Section AB

Fig. 8 Pinhole.

(Pinhole)이며 현미경 사진을 Fig. 8에 나타냈다. 성형품 성형시에 혼입한 공기가 빠지지 않고 표면에 기포로 남아서 발생한 것이다. 이 표면불량 원인은 적외선 가열기에서 예열 시, 실험재료인 GMT-Sheet 블랭크가 부풀어 올랐을 때 블랭크 내에 혼입된 공기가 원인이라 생각된다. 기포는 압력에 의해 빠져나가기 때문에 보압하중이 큰 경우에는 표면불량 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다.

3.1.7 성형조건에 따른 표면요철의 분류

GMT-Sheet 성형품 표면의 현미경 관찰에 의해 표면요철의 주요 원인인 다수의 표면불량 현상이 존재하는 것을 알 수 있었다. 표면요철에 큰 영향을 미치는 원인을 조사하기 위해, 표면불량 현상들을 성형조건에 따라 분류하여 Table 4에 나타냈다.

3.2 성형조건에 따른 여파굴곡곡선 측정

Fig. 4와 같이 성형품의 표면 A-B 단면에 나타난 모든 표면거칠기, 즉 성형품의 표면을 관찰할 때 보이는 표면요철의 척도를 나타낸 것을 여파굴곡곡선(Winding)이라 한다. 성형품 내부의 유리섬유함유율(40wt%)은 단위체적당 차이가 커

Table 4 Classification according to molding condition of surface unevenness

Surface unevenness	Annealing	Rapid -chilled	Holding pressure	Mold tem -perature
Spherulite	◎			
Fiber projection	△	△	◎	
Crack	◎		○	○
Fiber exposure		◎		
Micro-weldline		◎		
Pinhole			◎	

◎ : High ○ : Medium △ : Low

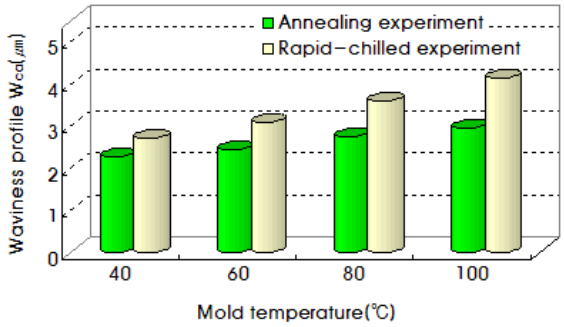


Fig. 9 Relationship between mold temperature and waviness profile at holding pressure load 100kN.

유리섬유보다 모재가 많은 부분에서는 수축량이 크기 때문에 성형품 단면 두께가 얇고, 모재보다 유리섬유가 많은 부분은 반대로 성형품 단면 두께가 두껍기 때문에 발생한다. 즉 여파굴곡곡선은 성형품이 성형온도에서 상온까지 냉각될 때, 성형품 내부에 유리섬유가 많게 포함되어 있는 부분과 모재가 많은 부분과의 수축량에 차가 있기 때문에 표면에 발생하는 표면불량 현상이다.

3.2.1 금형온도의 영향

GMT-Sheet를 보압하중 100kN에서 열압축 유동성형 후 성형품 탈형 시 금형온도와 여파굴곡곡선(W_{ca})의 관계를 Fig. 9에 나타냈다. 본 실험의 결과로부터 여파굴곡곡선의 값은 급냉실험과 서냉실험의 결과는 유사한 경향으로 나타났고, 이 여파굴곡곡선의 값은 금형온도가 낮을수록 낮게 나타났다. 즉 성형품의 표면상태는 탈형 시 금형온도가 낮을수록 양호하게 나타남을 알 수 있다.

급냉실험에서 성형품 탈형 시 금형온도가 낮으면 200℃에서 예열된 블랭크가 보다 빨리 냉각되어 표면의 평활성이 양호한 효과가 있지만 이 외 금형의 냉각속도에도 관계가 있음을 알 수 있다. 금형의 냉각속도가 빠르면 빠를수록 모재인 폴리프로필렌은 결정화가 진행되지 않은 채 고체가 되어 수축량이 적게 될 것이다. 이 때문에 성형품 표면의 섬유돌출 높이는 낮아져 평활한 표면이 된다. 이와 같이 금형 냉각 시

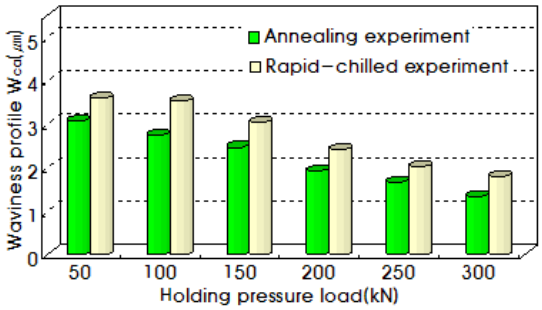


Fig. 10 Relationship between holding pressure load and waviness profile at mold temperature 80℃.

급냉이 장점이 있으나, 급냉에 의해 Fig. 7과 같이 섬유노출과 마이크로 웰드라인이 발생하기도 하므로 표면이 반드시 좋아지는 것은 아니라는 것을 알 수 있다.

3.2.2 보압하중의 영향

성형품 탈형 시 금형온도가 80℃일 때, 보압하중과 여파굴곡곡선의 관계를 Fig. 10에 나타냈다. 보압하중의 영향에 대해서 급냉실험과 서냉실험의 결과는 같은 경향으로 나타났으나, 금형 냉각 시 서냉이 급냉보다 여파굴곡곡선 상태가 양호함을 알 수 있다. GMT- Sheet를 열압축 유동성형 시 보압하중이 클수록 여파굴곡곡선의 거칠기(W_{ca})값이 작게 측정된 것을 알 수 있다. 이 실험결과로부터 성형 시 보압하중이 클수록 성형품의 표면상태가 양호해지는 것을 알 수 있다.

또한 여파굴곡곡선의 측정값으로부터 측정 파장에서 불량현상 중 가장 큰 원인의 하나는 Fig. 4와 같은 섬유돌출이다. 이 섬유돌출 등으로 인한 표면거칠기 값은 성형품 성형 시 보압하중이 커지면 섬유돌출 등의 요철이 작게 되기 때문에, Fig. 10에 나타낸 것과 같이 거칠기 값이 직선적으로 감소함을 알 수 있다.

3.2.3 성형조건에 따른 결과의 비교분석

표면거칠기는 성형품 표면의 섬유돌출 높이 등과 밀접한 관계가 있는 표면불량 현상의 하나이다. 그리고 여파굴곡곡선은 성형온도에서 상온까지 성형품이 냉각될 때 강화재인 유리섬유는 수축하지 않고, 모재인 폴리프로필렌(PP)의 수축에 의해 발생한 두께 변화와 밀접한 관계가 있는 표면 불량현상이다.

GMT-Sheet를 이용한 열압축 유동성형 시 성형온도에서 탈형온도까지의 금형 냉각과정에 있어서 급냉은 서냉보다 표면거칠기와 같이 성형품의 평활도가 양호하다는 장점이 있다. 그러나 여파굴곡곡선에서 금형 냉각 시 서냉이 급냉보다 성형품 표면의 평활도가 좋은 이유는 모재의 수축 이외 급냉 시 발생하는 섬유노출, 마이크로 웰드라인 등의 표면요철 값들이 서냉 시 발생하는 구정, 크랙의 표면불량 현상 값보다 상대적으로 크기 때문이라 생각된다. 따라서 GMT- Sheet를

이용한 부품 성형에서 금형 냉각 시 급냉의 여파굴곡곡선 상태가 반드시 좋아지는 것이 아니라는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 표면요철의 척도를 나타내는 여파굴곡곡선의 값으로부터 보압하중이 크고, 금형온도가 낮은 성형품일수록 표면상태가 양호함을 알 수 있다. 그리고 성형품의 표면상태는 열압축 유동성형 후 성형품 탈형 시 금형온도의 영향보다는 성형 시 보압하중이 더 지배적임을 알 수 있다. 여파굴곡곡선의 값은 구정, 섬유돌출, 크랙, 섬유노출, 마이크로 웰드라인, 핀홀 등의 표면불량 현상과 비교하여 크기 때문에 성형품의 표면불량에 더 큰 영향을 준다. 또한 성형품 표면의 여파굴곡곡선의 값은 금형 냉각 시 급냉보다 서냉에서 낮게 나타났으며, 서냉의 표면상태가 양호함을 알 수 있다.

성형품 표면에 존재하는 강화재인 유리섬유와 모재인 폴리프로필렌과의 수축차에 의해 섬유돌출이나 여파굴곡곡선과 같은 표면불량 현상 등이 발생한다. 그리고 크랙은 표면의 유리섬유와 모재의 계면에서 발생한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는, 폴리프로필렌 단일재료만의 여파굴곡곡선 값이 0.21㎛로 측정된 실험으로부터, GMT-Sheet 외관의 표면에 폴리프로필렌 시트 피복층에 의해서 성형품 표면불량 현상 등이 어느 정도 개선될 수 있으므로 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

GMT-Sheet 성형품의 표면요철에 미치는 성형 조건의 영향으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) GMT-Sheet 성형품 표면의 현미경 관찰에 의해 표면에는 구정, 섬유돌출, 크랙, 섬유노출, 마이크로 웰드라인, 핀홀 등이 발생하여 표면불량 현상의 원인임을 알 수 있다. 성형품의 표면에서 구정은 냉각속도가 늦을수록 크게 성장하고, 섬유돌출은 표면상태에 가장 큰 영향을 주는 것으로 보압·냉각 과정에서 발생하는 모재의 수축에 의해 생성되고, 크랙은 표면 근처 섬유와 모재의 계면에서 서냉 시 발생하고, 섬유노출과 마이크로 웰드라인은 탈형 시 급냉되어 금형 벽면에서 모재의 유동성이 불량하여 발생하고, 핀홀은 성형 시 혼입한 공기가 빠지지 않고 기포로 남아서 생긴 것을 알 수 있다.
2) GMT-Sheet 성형품 표면요철의 척도를 나타내는 여파굴곡곡선의 값은 열압축 유동성형 후 금형 냉각 시 급냉보다는 서냉이 양호하게 나타났으며, 성형품 표면상태는 보압하중이 크고, 금형온도가 낮을수록 양호함을 알 수 있다. 또한 성형품 탈형 시 금형온도의 영향보다는 성형 시 보압하중이 더 지배적임을 알 수 있다. 그리고 성형품 표면에 존재하는 섬유돌출, 크랙과 여파굴곡곡선 등의 표면불량 현상을 해결하기 위하여 폴리프로필렌 시트의 피복층에 의해서 개선될 수 있으므로 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

후 기

"이 논문은 2007학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음"

참고문헌

1) Chawla K.K., *Composite Materials*, Springer - Verlag New York Inc, 1987, pp. 3-5.
2) 이대길, 복합재료 역학 및 가공론, 성안당, 1993, pp. 3-6.
3) Lee S.S., Kwak T.H., and Min T.I., "Characteristic and Use of GMT-Sheet," *Proceedings of The Korean Society for Composite Materials*, Apr 26, 1996, pp. 1-8.
4) Yaguchi H., Hojo H., Lee D.G. and Kim E.G., "Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing," *The Journal of the Polymer Processing Society*, Vol. 3, 1995, pp. 262-269.
5) Jo S.H., Lee D.G. and Kim E.G., "A Study on Fiber Orientation by Image Processing during Press Molding of Long Fiber- Reinforced Thermoplastics Sheet," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 15, No. 3, 1991, pp. 834-842.
6) Lee D.G., Yoo J.H. and Kim E.G., "A Study of Correlation between Separation and Orientation of Fibers during Compression Molding of Long Fiber-Reinforced Polymeric Composites," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 1, 1993, pp. 62-68.
7) Lee D.G., Kim J.L., Kim S.P., Lee W.I. and Kim E.G., "A Study on the Processing of Long Fiber-Reinforced Composite Materials for Thermoforming," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 5, 1993, pp. 1106-1114.
8) Kang K., Jo S.H., Lee D.G. and Kim E.G., "A Study on Mean Coefficient of Separation during Compression Molding of Fiber- Reinforced Thermoplastics," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 20, No. 4, 1996, pp. 1146-1153.
9) Lee D.G. and Cho K.H., "A Study on Structure and Separation·Orientation of Fiber- Reinforced Thermoplastic Sheet," *Journal of The Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 10, No. 2, 1993, pp. 104-113.
10) Ryoo H.W., Lee D.G. and Kim E.G., "An Effect of Fiber Length on the Correlation between Separation and Orientation of Flow Molded Fiber-Reinforced Polymeric

Composites," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 6, No. 1, 1993, pp. 19-28.

11) Park S.H., Lee D.G. and Kim E.G., "A Study on Slip at Interface between Mold and Material Considering Bulging during Compression Molding of Long Fiber-Reinforced Polymeric Composites," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 4, 1993, pp. 740-745.
12) Lee D.G., Yaguchi H., Jo S.H. and Kim E.G., "Measurement of Fiber Content Distribution of Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheet by Image Processing," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 15, No. 4, 1991, pp. 1177-1183.
13) Kim Y.M., Park G.S., Han G.Y., Lee D.G. and Kim E.G., "A Study on Characteristic Adhesive Condition at Microscopic Interfaces and Notch Shape Strength of GFRP Composites Laminates under Low-Hot-Wet Environment," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 10, No. 4, 1996, pp. 58-66.
14) Kim H.S., Kim J.W., Kim Y.J. and Lee D.G., "Effects of Molding Condition on Surface of GMT-Sheet Moldings," *Proceedings of The Korean Society for Composite Materials*, Oct 23, 2009, pp. 251-255.