

고속압밀법에 의해 제작된 유리섬유강화 PET 기지 복합재료의 최적제작조건

신익재* · 이동주† · 김홍건**

(2001년 3월 27일 접수, 2002년 3월 18일 심사완료)

Optimal Manufacturing Conditions of Glass Fiber Reinforced PET Matrix Composites by Rapid Press Consolidation Technique

Ick-Jae Shin, Dong-Joo Lee and Hong-Gun Kim

Key Words: PET Matrix Composites(polyethylene-terephthalate 기지 복합재료), Rapid Press Consolidation Technique(고속압밀법), Optimal Manufacturing Conditions(최적제작조건)

Abstract

Glass fiber reinforced PET matrix composite was manufactured by rapid press consolidation technique as functions of temperature, pressure and time in pre-heating, consolidation and solidification stages. The optimal manufacturing conditions for this composite were discussed based on the void content, tensile, interlaminar shear and impact properties. In addition, the levels of crystallinity with various manufacturing conditions were measured using differential scanning calorimetry to investigate the mechanical properties of this composite material as a function of crystallinity. Among many processing parameters, the mold temperature and the cooling rate after forming were found to be the most critical factors in determining the level of crystallinity and mechanical properties. The level of crystallinity affects the tensile properties to some degree. However, impact properties are affected much more. It also affects the degree of ductility, which determines the impact energy of this material.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 여러 산업분야에 사용되어지고 있으며 그 제작과정 또한 끊임없이 발전하고 있다. 최근 환경에 대한 관심이 점점 높아져 감에 따라 열경화성수지 보다는 재활용이 가능한 열가소성수지를 기지재료로 사용하는 것에 관심이 높아지고 있다. 특히 열가소성수지 중 PET는 결정구조에 의해서 그 성질이 바뀌며 일

반적으로 표면 평활성이 풍부하고 광택이 있는 외관을 나타낸다. 높은 용점과 점도를 가지며 낮은 흡수율이나 열팽창계수로 인해 성형은 어렵지만 치수안정성은 뛰어나다. 그러나 PET의 결정화 특성에 기인하여 내충격성, 내열성에 난점이 남지만 그 밖의 기계적 성질은 다른 고분자 재료에 비해 비교적 우수한 편이며, 무엇보다도 재생이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 열가소성수지 복합재료의 제조에 있어서 기지재료에 포함되어 있는 휘발성물질과 보강섬유의 수분으로 인한 기공의 형성은 고분자재료를 기지재료로 하는 복합재료의 공정에서 중요한 요소이다.^(1~6) 또한 보강섬유의 층간결합력은 제조공정동안의 성형온도와 압력, 냉각속도에 따라

* 회원, 영남대학교 대학원 기계공학부과

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : djlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2469 FAX : (053)813-3703

** 회원, 전주대학교 기계공학과

기지재료와의 결합에 의해 결정되며 기공과 함께 성형된 재료의 기계적 물성을 좌우하는 중요한 변수가 되며 이에 대한 연구가 계속되고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 그리고 계면결합력은 기공은 물론이고 기지재료의 성질에 따라 좌우되기도 하는데 그것은 성형시 온도와 성형후의 냉각속도에 의한 결정성의 변화가 원인이 되기 때문이다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

본 연구에서는 유리섬유를 보강한 PET 기지 복합재료의 특성을 이용하여 기공함유량을 최소화하고 계면결합력을 최대화시키며 빠르면서도 비용을 절감할 수 있는 제작공법으로 압축성형방법인 고속압밀법 (Rapid Press Consolidation Technique, RPCT)을 제시하였다.⁽¹³⁾ 이 공정은 PET의 높은 용점과 점도를 고려하여 가공성 향상과 고품질의 복합재료를 제조하기에 적합하다.

장비의 제작과 동시에 구성장치 중 예열장치와 프레스에서의 온도, 압력, 시간 등을 변화시켜 복합재료를 제작함으로써 이들 재료에 대한 성형상태를 평가한다. 재료내의 기공의 함유량 및 기지재료와 보강재료간의 결합력을 검사하고 이를 인장 및 충격특성과 층간전단강도와 같이 비교한다. 또한 제작변수가 결정화도(crystallinity, X_c)에 미치는 영향과 관련하여 기계적인 성질과의 연관성도 조사해 본다. 그러므로 고속압밀법을 이용한 PET 기지 복합재료의 제조시 최적제작기법을 찾고 다른 열가소성수지 복합재료의 제조에도 적용하고자 한다.

2. 고속압밀법(RPCT)

RPCT 장비는 Fig. 1과 같이 크게 예열장치(pre-heating unit), 이송장치(conveyor system), 프레스(press)로 이루어져 있다. 예열장치는 자동화되어 최대 7kN의 가압과 350°C의 예열이 가능하며 예열시 기공의 형성을 방지하기 위해 진공펌프가 작동된다. 이송장치는 예열후 제품을 프레스로 이송하며, 고정프레임에 전자석을 이용한다. 프레스는 유압을 이용하며 최대 300kN의 가압력을 가지며 최대 가압거리 100mm이다. 그리고 가압속도는 500mm/min으로 일정하다. 최대 온도는 500°C이며 평판형태의 시편을 만들기 위해 2D-plate의 금형이 설치되어 있다.

RPCT공정은 Fig. 2와 같이 예열(pre-heating),

압밀(consolidation), 응고(solidification)로 공정동안 온도, 압력, 시간을 변화시켜 제품이 우수한 기계적 성질을 갖게 최적화시키는 것이 중요하다. 그리고 공정시간을 최소화시켜 생산의 효율성을 극대화하는 것이 이 공법의 특징이다. 예열은 녹는점 이상의 온도에서 기지재를 충분히 녹인 다음 진공상태에서 저압(5kN)을 가해 기지재가 섬유사이로 잘 스며들게 하는 과정이다. 진공은 기지재가 녹는 동안 기포의 형성을 최소화한다. 압밀은 예열 후 제품에 고압을 가하여 프레스에 설치된 금형에 따라 성형된다. 이 공정으로 기지재와 보강재 간에 강한 결합력이 생긴다. 또한 각 층 사이가 완전히 밀착된다. 응고는 압밀후 제품을 냉각시키는 과정이고, 제품의 변형을 막기 위해 적당한 잔류압이 유지되어야 한다. 그리고 냉각시 소요되는 시간을 최소화시켜 생산의 효율성을 높이는 것도 이 단계에서 이루어진다.

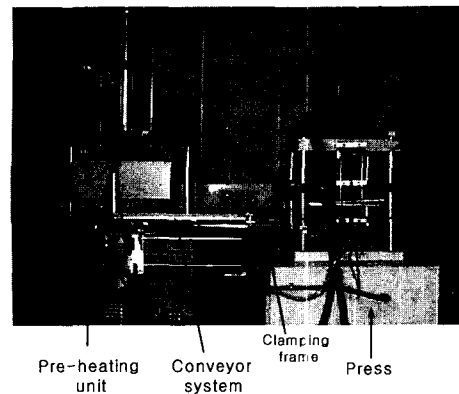


Fig. 1 Equipment for rapid press consolidation technique

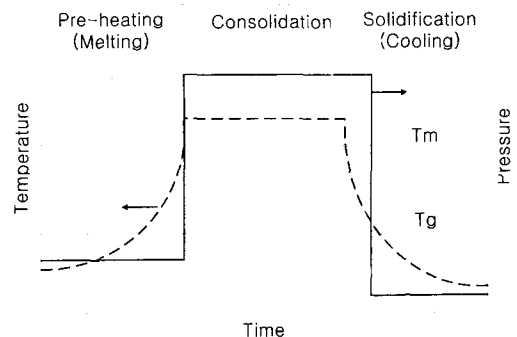


Fig. 2 Schematic of manufacturing processes for rapid press consolidation technique

3. 시편제조 및 실험방법

3.1 시편제조

시편에 사용되어진 기지재료는 (주)새한에서 생산한 필름형태의 Polyethylene-terephthalate(PET)를, 보강재료는 한국화이버(주)의 Plain Weave Fabric 형태의 E-glass 618 CR을 사용하였다. 유리섬유의 체적 함유량은 40%를 유지하였고 금형과 시편사이 가 눌러 붙는 것을 방지하기 위하여 테프론 (teflon) 필름을 사용하였다.

제작조건은 성형상태에 대한 육안검사와 PET의 기본적인 성질을 고려하여 Table 1에서와 같이 예열장치와 프레스의 온도, 압력, 시간 등을 변화시켜 가면서 시편을 제작하였다. 단, 예열장치에서의 가압력은 3kN으로 일정하고 진공압은 약 10⁵Pa이다.

결정화도의 차이는 성형후 냉각속도에 따라서도 변화하므로 가압후 냉각속도를 달리하였다. 압밀단계에서 프레스로 성형이 끝난 후에 본 재료에 대해 Slow, Normal A, Normal B, Fast Cooling의 네 가지 서로 다른 냉각속도를 적용하여 보았다.

Slow Cooling : 압밀단계에서 최종성형을 한 후 압력을 제거하고 금형에 시편을 그대로 유지하여

서 1 °C/min의 냉각속도를 가지게 하였다.

Normal A Cooling : 최종성형을 한 후 시편을 금형에서 꺼내어 공기 중에서 냉각시켰다. 냉각속도는 약 10°C/min이다.

Normal B Cooling : 최종성형을 한 후 압력만 제거하고 금형에 시편을 그대로 유지한 채로 냉각수를 이용하여 냉각속도를 조절하였다. 냉각속도는 약 20°C/min이다.

Fast Cooling : 최종성형을 한 후 시편을 금형에서 꺼내고 찬물에 담구어 급랭을 시켰다. 냉각속도는 약 100°C/min이다.

3.2 실험방법

각각의 제작조건에 따라 만들어진 시편의 성형상태를 평가하기 위해 기공함유량은 SEM과 광학현미경에 의해 단면을 조사하고 Image Analysis로 기공함유량을 측정하였다. 단, 채취된 시편은 충분한 냉각과정을 통하여 연마하였고 측정은 13가지 제조변수에 대해서 각각 체적함유량이 같은 3개의 시편을 선정하여 평균값을 취하였다.

보강섬유와 기지재료와의 접착력을 평가하기 위해 SEM을 이용하였고 파단면에서 보강섬유가 기지재료에서의 뽑힘(pull-out) 현상이나 섬유가 파괴되는 형태를 조사하였다.

Table 1 The processing parameters of RPCT(No. 1 is the basic parameters)

Process	Pre-heating		Consolidation				Solidification (cooling)	
			Step I	Step II				
Unit	Pre-heating unit			Press				
No.	Pre-heating temperature (°C)	Pre-heating time (min)	Pressing time (sec)	Mold temperature (°C)	Pressing time (sec)	Pressing force (kN)	Cooling rate (°C/min)	
1	290	12	10	140	15	125	I. Slow	1
2	280	12	10	140	15	125		
3	300	12	10	140	15	125		
4	290	9	10	140	15	125	II. Normal A	10
5	290	15	10	140	15	125		
6	290	12	5	140	15	125		
7	290	12	15	140	15	125	III. Normal B	20
8	290	12	10	80	15	125		
9	290	12	10	200	15	125		
10	290	12	10	140	10	125	IV. Fast	100
11	290	12	10	140	20	125		
12	290	12	10	140	15	75		
13	290	12	10	140	15	175		

인장시편은 ASTM D 3037-76에 따르고 시편형상은 25mm(폭)× 250mm(길이), 두께는 1.7mm, 인장길이(gauge length)는 150mm로 실험 결과 각 제작조건에 따른 인장강도의 차이를 평가하고 재료의 제작에 있어서의 최적조건을 알아보았다.

적층형태의 복합재는 층간전단강도가 재료의 물성을 좌우하므로 이에 대한 확실한 규명이 필요하기 때문에 굴곡에 의한 단보전단강도 시험을 시행하였다. 시험편은 ASTM D2344-76과 같이 스펠과 두께비를 5 : 1로 정하였고, 하중을 가하는 실린더형 지그의 반지름은 3.15 mm이다. 지지단의 실린더형 지그 반지름은 1.6mm로 설정하였다.

충격시험은 (주)Instron의 8250 Impact Test System을 사용하여 자유낙하 방식의 충격시험을 실시하였다. 충격시편의 형상은 100mm(폭)× 100mm(길이), 두께는 2mm이다. 충격지수(ductility index)를 측정하여 제작조건과 냉각속도에 따라 연성의 정도의 차이를 살펴보았으며, 이러한 변화에 따른 충격강도와 충격에너지를 알아보았다.

결정화도는 DSC(differential scanning calorimetry) 실험으로 각 제작조건에 따라 평가해 보았다. 실험은 Universal V1.8M TA를 사용하였고, 시편은 약 10mg이며 가열속도는 20℃/min이다. DSC 실험 전에 복합재 시편을 Image Analysis로 제적함유량을 측정하고 PET의 무게를 산출하여 결정화도를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기공(void)

고분자 복합재료에는 제조공정상 여러 종류의 결합이 생겨날 수 있는데 그 중에서도 원재료속에 포함되어 있는 공기나 휘발성물질이 공정중에 온도나 불균일한 성형압에 의해 기공으로 생겨난다. 이러한 기공은 복합재의 실제 사용시 재료의 균열에 의한 파괴촉진을 발생시켜 재료의 기계적 물성을 저하시킨다.

Figs. 3-4는 고속압밀법에 의해 제작된 유리섬유강화 열가소성 복합재료의 단면에서의 기공의 존재 여부를 확인시켜 주는 것으로 공정의 신뢰와 재료의 품질을 확인시킨다.

Fig. 3은 Table 1의 No. 1으로 예열에서 진공을 가하지 않고 제조된 것이다. 사진에서 보듯이 기

지재료나 보강섬유와 기지재료사이에 균데균데 원이나 타원형의 기공이 검은 점으로 나타나 있다. 그러나 보강섬유 위에 나타난 검은 점은 기공이 아니라 보강섬유가 시편 연마과정에서 부분적으로 마모된 상태를 나타내는 것으로 보인다.

다음은 13가지 제조변수중 대표적인 형태의 단면을 나타낸 것으로 Fig. 4는 진공을 가하고 Table 1중 No. 1의 조건에 따라 제조된 시편이다. 진공을 가한 모든 시편은 가하지 않은 Fig. 3보다 기공이 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다.

사진에 나타난 기공함유량은 Image Analysis를 이용하여 측정하였고 진공을 가한 모든 시편에 대해 거의 일정하게 약 0.3-0.4% 사이로 전체적으로 상당히 낮은 기공함유량을 보였다. 반면에 진공을 가하지 않은 시편은 약 1.9% 정도의 기공함유량을 보였다. 만약 섬유와 기지재료의 계면이나 섬유 위에 부분적으로 파손된 것을 기공으로 포함한다면 기공함유량의 증가는 불가피하다.



Fig. 3 Photograph(×200) of cross-sectional surface for No. 1 specimen with no vacuum

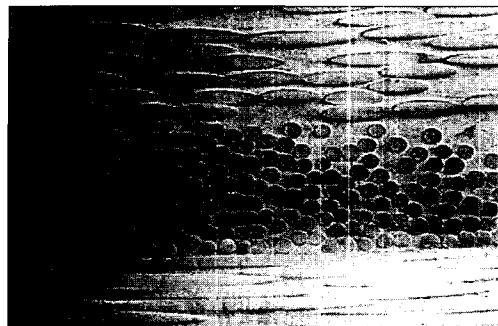


Fig. 4 Photograph(×200) of cross-sectional surface for No. 1 specimen with vacuum

Table 2 Tensile strength(σ_t) with various manufacturing parameters

No.	σ_t (MPa)	No.	σ_t (MPa)
1	252	8	244
2	212	9	235
3	250	10	237
4	237	11	245
5	227	12	231
6	215	13	228
7	242	Optimum : No. 1	

4.2 인장특성과 결정화도

4.2.1 인장강도 및 탄성계수

인장실험결과를 바탕으로 제작변수의 변화에 따른 최적조건을 조사해 보았다. 각 시편은 Table 1에 따라 만들어졌으며, 모두 공기중에서 냉각(10°C/min)을 하였다. 각각에 대한 인장강도를 Table 2에 나타내었다. 인장실험결과 최적의 조건은 Table 1에서 No. 1의 경우였다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 여러 제작조건 중 No. 1의 경우에 인장강도가 가장 높았으며 본 재료에 대한 최적의 제작 조건임을 알 수 있었다. No. 1의 조건에서 결정화도를 높이기 위해 압밀 단계에서의 성형후 냉각조건을 변화시켜보았다.

Fig. 5는 4가지로 설정된 각각의 냉각조건에 따른 인장강도와 탄성계수의 관계를 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 인장강도는 냉각속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 서냉(1°C/min)의 경우 인장강도가 약 258MPa로 가장 높았고 급랭(100°C/min)이 242MPa로 가장 낮게 나타났다. 또한 인장탄성계수도 냉각속도가 증가할수록 점점 감소하며 연성의 성질을 나타내고 있음을 알 수 있다. 참고로 뒷부분에 언급한 충격특성도 냉각속도에 대해 큰 변화를 보인다.

냉각속도에 의해 재료가 연성의 정도가 변화하는 것은 재료에 있어서 중요한 기계적 성질중 하나이며, 이들은 후반부에 기술할 충격성격과도 연관이 있음을 알 수 있다.

냉각방식에 따른 성형상태를 조사해 보면 성형 후 제품의 굴곡 및 비틀림을 없애거나 두께를 일정하게 유지하는 데는 서냉방식이 가장 적합한 것으로 나타났다.

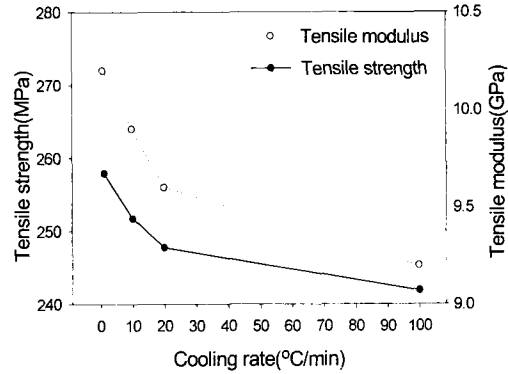


Fig. 5 Tensile strength and modulus as a function of cooling rate

4.2.2 결정화도(Xc)

결정화도는 다른 제작변수들 뿐만 아니라 제작 시 시편의 열적변화에 크게 의존한다. Fig. 6과 같이 DSC실험을 통해 제작공정중 온도와 관계되는 예열온도, 압밀에서의 성형온도와 응고에서의 냉각속도에 따른 결정화도를 살펴보았다.

Table 3은 온도와 냉각속도에 따른 결정화도의 변화를 나타낸 것으로 서냉일수록 결정화도는 높게 나타났다. 이것은 재료가 성형된 후 냉각속도를 늦추어 줌으로써 결정화를 이룰 수 있는 시간적 여유를 더 많이 가질 수 있기 때문이다. 냉각속도가 1°C/min인 서냉에서는 Xc가 26%로 PET의 최고 결정화도인 30%에 가깝다.

압밀단계에서의 프레스 급형온도변화에 따른 결정화도는 140°C의 가압온도에서 결정화도는 제일 높았는데 일반적으로 PET의 결정화온도영역이 120-220°C이고 190°C부근에서 최대 결정화속도를 가지기 때문에 시편이 290°C의 예열장치에서 빠져 나와 140°C의 프레스에서 가압 될 경우 80°C나 200°C보다 상대적으로 최대결정화가 이루어지는 190°C정도에서 성형되지만 나머지는 그렇지 않다. 또한 성형후의 응고단계에서도 공랭이므로 200°C가 140°C보다 급랭이 되어 결정화도가 낮아진다. 따라서, 냉각속도와 가압온도의 변화에 따라 결정화도가 차이가 나고, 이러한 결정화도에 따라 인장강도 및 탄성계수가 어느 정도 영향을 미치는 것으로 나타났다

Table 1에서 280°C의 예열온도인 No. 2시편의 경우 인장강도가 상당히 낮음을 Table 2의 인장

강도 결과를 통해 알 수 있다. 하지만 예열온도 280℃인 경우 결정화도는 예열온도 290℃의 경우와 별 차이가 없음을 알 수 있었고, 따라서 예열온도가 다르지만 냉각조건이 같은 재료는 결정화도의 차이가 없기 때문에 인장강도에 영향을 미치는 또 다른 중요한 요인을 생각해 볼 수 있다.

예열온도의 변화에 따라 단보전단실험을 실시하여 이들의 층간전단강도의 변화를 측정하여 보았다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 280℃의 예열온도의 경우 층간전단강도가 상당히 낮음을 알 수 있고, 290℃가 층간전단강도가 가장 큰 것을 알 수 있었다. 결과적으로 이들간에 결정화도에서는 별로 차이를 보이지 않았지만 층간전단강도의 차이에 따라 인장강도가 변화한다는 것을 알 수 있었다. 즉 Table 2에서 인장강도의 차이가 가장 큰 No. 1과 No. 2의 경우 결정화도 보다는 층간전단강도의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

또한 인장실험후 파단면에서 섬유 파괴 및 계면분리현상을 조사한 결과로, Fig. 8은 No. 1 제품으로 파단면에서의 섬유가 계면에 접촉된 상태로 파괴되었고 기지재료의 표면이 거칠고 균열이 생긴 것을 보아 계면접착력이 우수하다는 것을 알 수가 있다. 그러나 Fig. 9의 No. 2는 섬유가 계면에서 분리된 상태에서 파괴되었고 기지재료의 표면도 깨끗한 것으로 보아 파괴진행시 섬유가 계면에서 쉽게 분리된 다음 파괴가 되었다는 것을 알 수 있어 계면 접착력이 No. 1에 비해 약하다는 것으로 판단할 수 있다.

Table 3 Crystallinity as functions of temperatures and cooling rate

Manufacturing conditions		Crystallinity(%)
Pre-heating temperature (°C)	280	19.3
	290	19.5
	300	19.1
Press mold temperature (°C)	80	16.5
	140	19.5
	200	17.5
Cooling rate (°C/min)	1	26.3
	10	19.7
	20	16.8
	100	14.8

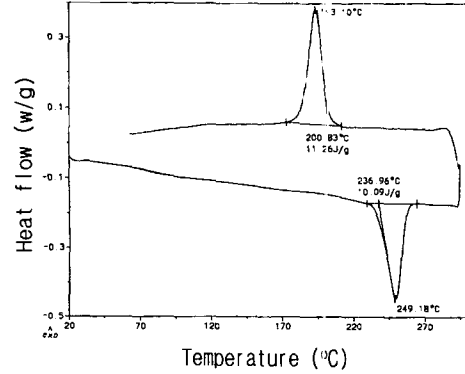


Fig. 6 Typical DSC test result of glass fiber reinforced PET matrix composite

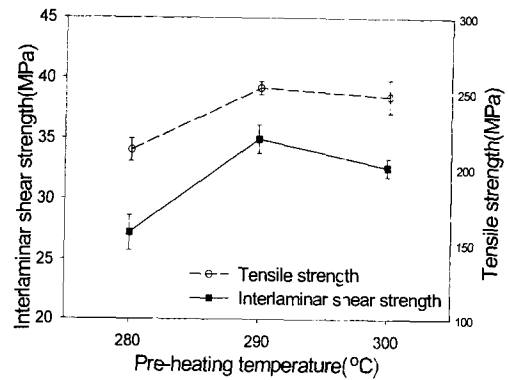


Fig. 7 Interlaminar shear strength and tensile strength as a function of pre-heating temperature

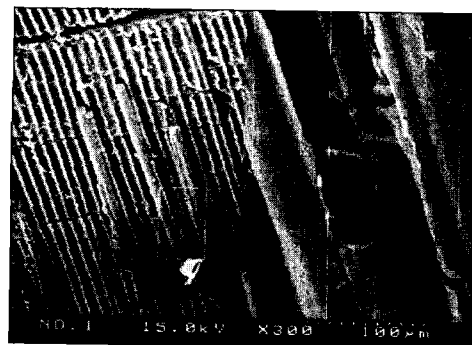


Fig. 8 Photograph(left : ×300, right : ×1500) of fractured surface for No. 1 condition

4.3 충격특성과 결정화도

지금까지 결정화도와 인장강도, 탄성계수와와의 관계를 살펴보았는데, 이러한 결정화도는 재료의 취성을 증가시킴을 알 수 있었다. 재료에 있어서 연성, 취성의 정도는 충격의 특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로, 이를 살펴보기 위해 충격실험을 실시하였다.

Fig. 10은 예열온도의 변화에 따른 충격강도와 충격에너지의 변화를 나타내었다. 충격강도는 인장강도와 같이 예열온도가 290℃(No. 1시편)인 경우가 가장 높았다. 반면에 충격에너지는 280℃의 경우 가장 높았는데, 이는 280℃의 경우 섬유와 기지재료 사이의 계면강도가 상당히 약하기 때문인 것으로 생각된다. 섬유와 기지재료간의 계면강도가 약할 경우 충격에너지의 흡수를 돕는 것으로 알려져 있다. 이는 Fig. 7에서 보듯이 층간 전단강도실험을 통해 확인해 볼 수 있다.

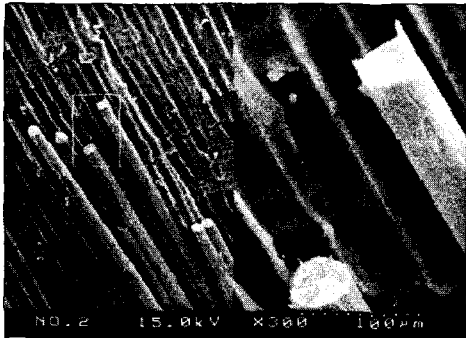


Fig. 9 Photograph(left : ×300, right : ×1500) of fractured surface for No. 2 condition

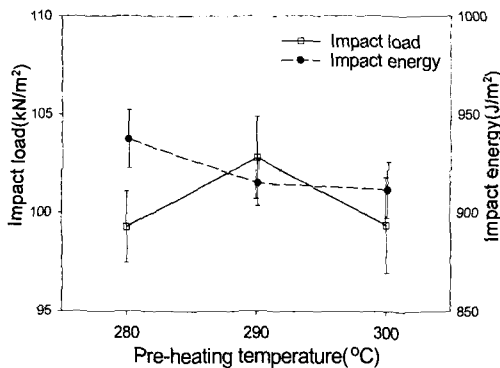


Fig. 10 Impact load and impact energy as a function of pre-heating temperature

Fig. 11은 압밀단계의 가압온도에 따른 충격강도와 충격에너지를 나타내었다. 충격강도에 있어서는 인장강도와 마찬가지로 140℃의 경우 가장 높았으나 충격에너지 측면에서는 가압온도 80℃의 경우 가장 높은 흡수율을 보였다. 이처럼 가압온도 80℃에서 에너지 흡수율이 좋은 것은 290℃로 예열된 상태의 재료가 결정화를 촉진시키는 온도인 190℃보다 훨씬 낮은 80℃에서 가압되므로 급랭의 효과를 가져 결정성이 낮아지고 연성화가 되기 때문이다.

Fig. 12에서 볼 수 있듯이 서냉일수록 충격강도는 증가하는 반면 에너지 흡수율은 감소하였다. 이것은 급랭에서 결정화도가 최소인 것과 비교한다면, 재료의 결정성과 연성화가 충격특성에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

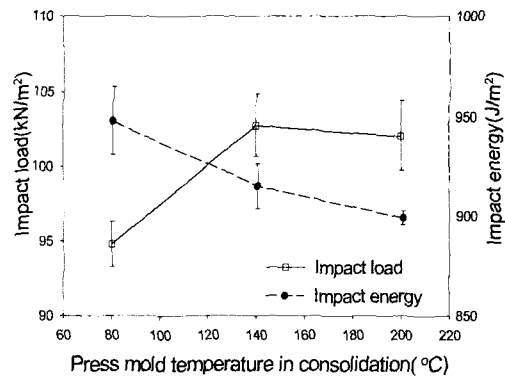


Fig. 11 Impact load and impact energy as a function of press mold temperature in consolidation section

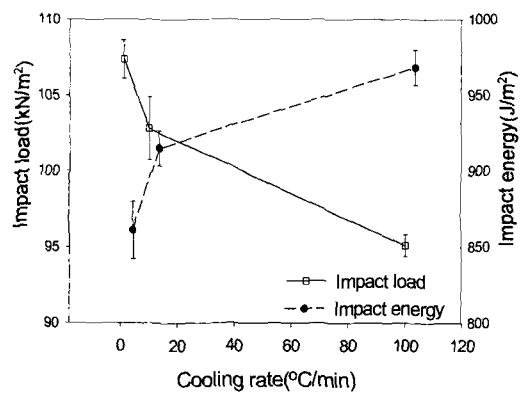


Fig. 12 Impact load and impact energy as a function of cooling rate

각 재료의 연성 정도를 충격지수(ductility index)를 통해 비교하였다. 충격지수는 충격개시 에너지와 충격전파에너지의 비교로 알 수 있다

$$DI = \frac{E_p}{E_i} \quad (1)$$

식 (1)에서 E_i 는 충격개시에너지이고 E_p 는 충격전파에너지이다. 충격전파에너지가 상대적으로 클수록 연성의 성질을 나타낸다. Table 4 에서 압밀에서의 가압온도가 낮을수록, 급랭일수록 연성의 경향을 보였으며, Figs. 11과 12에서 보듯이 충격에너지의 비교에 있어서 연성일수록 에너지흡수율이 좋다는 것을 알 수 있다.

충격실험을 통해 확인할 수 있었던 결정화도의 변화에 따른 충격특성에 관한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 결정화도가 증가할수록 충격강도는 증가하였고, 취성의 경향을 나타내면서 에너지 흡수율이 감소하였다.

Table 4 Values of ductility index(DI) after impact tests

Manufacturing conditions		DI
Pre-heating temperature(°C)	280	2.1858
	290	2.2622
	300	2.1945
Press mold temperature(°C)	80	2.3864
	140	2.2622
	200	1.8598
Cooling rate (°C/min)	1	1.6595
	10	2.2622
	100	2.5847

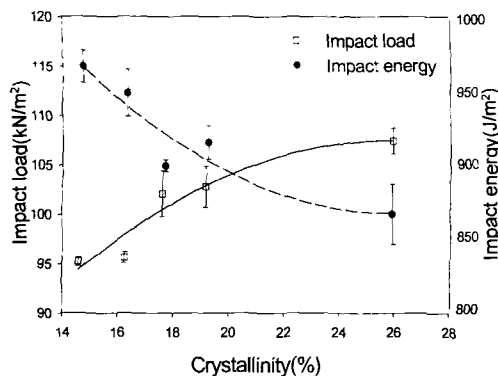


Fig. 13 Impact load and impact energy as a function of crystallinity

5. 결론

고속압밀법에 의한 유리섬유강화 PET 기지 복합재료의 제조에 있어서 제조공정과 장치의 최적화를 위해 13가지 제조변수를 설정하여 제조된 재료의 기공, 계면결합력, 인장 및 충격 특성을 평가하였고 결정화도와와의 관계도 알아보았다.

(1) 고속압밀법에 의해 제작된 시편의 기공함수량은 모든 제조변수에 대해 약 0.3%에서 0.4%로 상당히 낮은 기공함유량을 보여 본 제조공정중 예열단계에서 진공의 중요성이 확인되었다.

(2) 인장강도는 최적의 조건(Table 1에서 No.1)에서 약 258MPa이었고, 냉각속도가 증가할수록 결정화도가 낮아지는 것을 알 수 있었고 이는 인장강도의 변화에 다소 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그러나 냉각방법이 같은 재료에 대해서는 중간진단강도의 영향이 인장강도의 증가에 지배적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 탄성계수는 결정화도가 높을수록 취성의 성질을 보이면서 증가하는 것을 알 수 있었다.

(3) 충격특성을 살펴본 결과 결정화도가 높을수록 낮은 변형률로 인해 에너지 흡수능력이 감소하였다. 결정화는 냉각속도에 의해 결정이 되고 이러한 냉각속도는 재료의 연성, 취성에 영향을 미친다. 이러한 변화들이 인장강도에서의 차이보다도 더 크게 나타났고, 특히 충격에너지 측면에서는 비슷한 인장강도이더라도 압밀단계에서의 가압온도와 응고단계에서의 냉각속도의 차이에서 오는 재료의 연성정도에 의해 큰 차이를 보였다. 따라서 이러한 제조조건의 변화에 따른 본 재료의 기계적 성질을 이용하여 요구에 맞는 제조조건을 찾는 것이 중요하다.

후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단(KRF-2000-042-E0008)의 지원에 의해 연구되었 으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Hancox N. L., 1977, "The Effect of Flaws and Voids on the Shear Properties of CFRP," *Journal*

- of Materials Science*, Vol. 12, pp. 884~892.
- (2) Judd N. C. W. and W. W. Wright, 1978, "Voids and Their Effects on the Mechanical Properties of Composites-An Appraisal," *SAMPE Journal*, Vol. 14, pp. 10~14.
- (3) Harper B. D., G. H. Staab and R. S. Chen, 1987, "A Note on the Effects of Voids Upon The Hygral and Mechanical Properties of AS4/3502 Graphite/Epoxy," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 281~289.
- (4) Bowles K. J. and Frimpong S., 1992, "Voids Effects on the Interlaminar Shear Strength of Unidirectional Graphite Fiber Reinforced Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 10, pp. 1487~1509.
- (5) Lim S. T., Kang M. K. and Lee W. I., 1999, "Modeling of Void Formation During Resin Transfer Molding," *12th International Conference on Composite Materials*.
- (6) Yongsung Eom, Louis Boogh, Veronique Michaud, Paul Sunderland and Jan-Anders Manson, 1999, "Dynamics of Void Formation Upon Curing of Epoxy Resin," *12th International Conference on Composite Materials*.
- (7) Kim J. K. and Gao S. L., 2000, "Interface Adhesion and Interlaminar Fracture Resistance of Carbon/PEEK Composites Influenced by Cooling Rate," *Key Engineering Materials*, Vols. 183-187, pp. 1063~1068.
- (8) Niklas Svensson, Roshan Shishoo and Michael Gilchrist, 1998, "Interlaminar Fracture of Commingled GF/PET Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, No. 20, pp. 1808~1835.
- (9) Curtis P., Davies P., Patridge I. K. and Sainty J. P., 1987, "Cooling Rate Effects in PEEK and Carbon Fiber-PEEK Composites," *Proceeding of ICCM6-ECCM2*, pp. 4.401~4.412.
- (10) Moshe M. Domb and Jorn S. Hansen, 1998, "The Effect of Cooling Rate on Free-Edge Stress Development in Semi-Crystalline Thermoplastic Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 32, No. 4, pp. 361~386.
- (11) Curtis P., Davies P., Patridge I. K. and Sainty J. P., 1987, "Cooling Rate Effects in PEEK and Carbon Fiber-PEEK Composites," *Proceeding of ICCM6-ECCM2*, pp. 4.401~4.412.
- (12) Christoph M. Pistor and Selcuk I. G.üCeri, 1999, "Crystallinity of On-Line Consolidated Thermoplastic Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, No. 4, pp. 306~324.
- (13) Andersent T. Logstrup, 1997, "Development of a Rapid Press Consolidation Technique for Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites," *Proceeding of 18th Risø International Symposium on Materials Science*, pp. 237~244.