

친환경 저비중 자기보강 복합소재 개발을 위한 공정 변수별 영향도 평가

윤덕우* · 강현민*†

Study of Mechanism for Improving Tensile Elastic Modulus of Self-reinforced Composite

Yun, Deok Woo*, Kang, Hyun Min*†

ABSTRACT: Tensile properties of polypropylene based self-reinforced composites were investigated as a function of process variables of the double-belt lamination equipment such as pressure, temperature and cooling conditions. Elastic modulus was enhanced approximately 6 times from 0.2 to 1.2 GPa. The improvement mechanism was studied by identification of crystalline structure changes using DSC and XRD analysis. In addition, morphology change of self-reinforced composites was also investigated by SEM analysis in order to reveal the degree of impregnation.

초 록: 폴리프로필렌 기반 자기보강 복합재는 기지재와 보강재가 동일한 소재로 구성되어 기존 섬유강화 복합재와 달리 섬유와 기지재의 분리없이 바로 재활용이 가능할 뿐 아니라 폴리프로필렌 수준까지 저 비중화가 가능한 고분자 복합재이다. 본 연구에서는 더블벨트 라미네이터 공정기술을 이용하여 압력, 온도, 냉각조건과 같은 공정 변수가 폴리프로필렌으로 제조된 자기보강 복합재의 인장 물성에 미치는 영향을 연구하였다. XRD, DSC를 이용하여 결정구조의 변화에 따라 인장 탄성계수는 0.2~1.2 GPa로 약 6배까지 향상되는 것을 확인하였다. SEM 분석을 통해 함침 정도를 확인함으로써 자기보강 복합재의 함침 후 형상 변화 또한 고찰하였다.

Key Words: 자기보강복합재(Self-reinforced), 폴리프로필렌(Polypropylene), 더블벨트라미네이터(Double belt laminator), 복합재(Composite), 탄성계수(Elastic modulus)

1. 서 론

자기보강 복합재(Self-reinforced composites)는 기지재와 보강재가 동일한 소재로 구성된 섬유강화 복합재이다. 이는 기존 섬유 복합재와 달리 섬유보강재와 기지재의 분리 없이 바로 재활용이 가능하다. 또한 폴리프로필렌기반 자기보강복합재의 경우 0.9 수준까지 저 비중화가 가능하고 기계적 특성은 공정최적화 및 소재결정성 극대화를 통하여 기존 고강성 소재 수준까지 향상이 가능함에 따라 경량소재로서 차량에 다양한 적용 가능성이 매우 높은 소재라

할 수 있겠다. 더욱이, 보강재와 기지재가 동일한 소재로 구성되어 우수한 표면특성이 가능하며, 기존 유리/탄소섬유 복합재보다 뛰어난 신율로 금형 내 굴곡부의 늘임성(Drapability)문제도 해결 가능하다는 장점이 있다.

자기보강 복합재의 컨셉은 1975년 미국의 Capiati, Porter에 의해서 처음 소개 되었는데, 일반적인 결정화도를 가지고 있는 폴리에틸렌(PE)을 기지재로 사용하고 보강재는 더욱 긴 분자사슬의 폴리에틸렌을 연신시키고 용융점을 올려 사용하였다고 보고된 바 있다[1]. 이는 저밀도 폴리에틸렌(Low density poly ethylene)과 고밀도 폴리에틸렌(High

Received 7 July 2015, received in revised form 27 August 2015, accepted 31 August 2015

*Advanced Materials Research Team, Hyundai Motor Company

*Advanced Materials Research Team, Hyundai Motor Company, Corresponding author (E-mail: hyunmin.kang@hyundai.com)

density poly ethylene)은 동일한 폴리에틸렌 소재이지만 고분자 체인의 구조, 결정의 종류 및 결정화도의 차이에 따라 용점 차이가 발생하게 되고 이에 따라, 공정 변수의 면밀한 제어를 통하여 자기보강 복합재를 제조할 수 있었을 것으로 판단된다. 이와 같은 최초의 시도 이후에 폴리에틸렌[2,3], 폴리프로필렌(PP)[4-6], 폴리에틸렌테레프탈레이트[7], 폴리아미드(PA)[8] 등의 다양한 열가소성 고분자 소재를 기반으로 자기보강 복합재 제조 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기보강 복합재의 기계적 물성 향상을 위해서는 열가소성 섬유와 필름 소재 자체의 특성 제어 뿐만 아니라, 열가소성 섬유의 보강효과가 유지되는 상태로 열가소성 수지를 함침시킬 수 있는 공정 개발에 대한 연구 개발도 함께 수행되어야만 한다.

이와 같은 자기보강 복합재 중에서 특히 폴리프로필렌 기반의 소재가 저렴한 가격, 우수한 기계적 특성 및 저 비중 특성을 바탕으로 일부 기업에서 상업화가 진행되고 있으며, Pure[®](네덜란드), Armordon[®](영국), Curv[®](독일)가 대표적인 예이다. 이를 생산하고 있는 해당 기업에서는 열가소성 섬유/필름 및 수지 함침을 통한 자기보강 복합재 제조를 모두 일괄 공정으로 내부에서 진행하고 있는 중이고, 최근에는 유럽에서 폭스바겐, 다임러등을 포함한 17개 기관이 참여하는 형태로 2012년부터 대형 컨소시엄(HIVOCOMP)을 구성하여 자기보강 복합재와 연속섬유강화복합소재의 하이브리드화를 통한 차량 경량화 기술을 적극적으로 개발 진행 중에 있다.

이와 같이 향후 차량 경량화 소재로 우수한 전망을 가지고 있는 자기보강 복합재의 개발을 해외에만 의존해서는 안되며 관련 요소기술의 국내 개발을 착수하는 것이 시급한 과제인 것으로 생각된다. 이에 따라, 본 연구에서는 자기보강 복합재의 핵심 공정 기술을 확보하고자 더블벨트 라미네이션(Double-belt lamination) 공정을 자체 개발/제작하였고, 이를 바탕으로 폴리프로필렌 기반 자기보강 복합재 제조 시, 각 공정 변수가 기계적 물성에 미치는 영향도를 고찰하였으며, 특히 탄성계수 향상의 메커니즘을 규명하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 실험

2.1.1 재료

섬유보강재는 호모폴리프로필렌을 용융방사 하여 원사를 제작한 후 평직 형태로 제직하여 사용하였으며, 기지재는 에틸렌 공중합 폴리프로필렌을 원료로 제작된 무연신(Casting PP) 필름이다. 호모폴리프로필렌 섬유보강재 대비 녹는점이 30도 이상 낮아(Fig. 1) 섬유보강재 보다 낮은 온도에서 충분히 녹기 때문에 기지재의 목적으로 작용할 수 있다. 재료의 특징은 Table 1에 나타내었다.

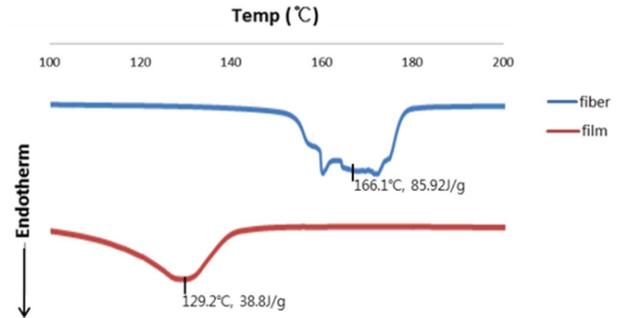


Fig. 1. Melting point of Reinforcement fiber and matrix film

Table 1. Bass materials of Self reinforced composites

Fiber	Fabric	Film
Tm : 165°C 200Denier, 90filament Thickness : 200 um	Plain weave Warp : 137/inch Weft : 53/inch	Tm : 130°C Thickness : 60 um

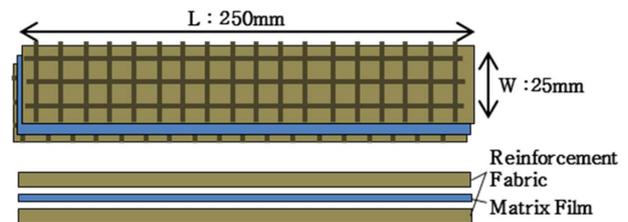


Fig. 2. Specimen structure of fiber and matrix film

2.1.2 시편제작

시편의 형태는 섬유보강재원단 / 필름기지재 모두 가로 25 mm/세로 250 mm로 재단하여 사용하였다. 호모 폴리프로필렌으로 제작된 섬유 보강재와 공중합 폴리프로필렌으로 제작된 필름기지재는 Fig. 2와 같은 구조로 적층되어 사용되었다. 섬유보강재 원단 1매의 두께는 200 um이며 필름기지재의 두께는 60 um이다. Fig. 2 같은 적층구조로 시편 제작 시 섬유보강재의 중량비는 85 wt.%이다.

2.1.3 연속섬유 복합재 함침설비

자기보강 복합재 시편을 제조함에 있어 가열/가압을 위한 장비로 자체 제작한 연속섬유 복합재 함침설비를 사용하였다. 본 설비는 열가소성 및 열경화성의 고강성 연속섬유 복합재 자체 개발을 위해 제작된 설비이다. 장비의 상세 구조는 Fig. 3에서 나타내었다.

본 연속섬유 복합재 함침설비는 크게 다섯 부분으로 구성되어 있으며 그 구성 및 특징은 Table 2에 나타내었다.

연속섬유 복합재 함침설비중 열가소성 수지 함침 설비인 더블벨트 라미네이션부는 상,하에 위치한 롤에 두 개의 스틸벨트가 설치되어 있고 그 벨트가 압착하여 회전되는 방식이다. 적층된 각 소재는 두 벨트의 사이로 통과하며 열



Fig. 3. Continues fiber composites impregnation machine

Table 2. Feature of each component of continues fiber composites impregnation machine

Facility	Description
Tube furnace	Remove impurities and other organics remaining in the continuous fiber surface
Continuous fiber surface treatment/fiber spreading	Fiber spreading and plasma surface treatment to improve the impregnation of continuous fibers
Thermoplastic fiber impregnation : double belt lamination	Laminating a thermoplastic resin film and impregnated with continuous fibers by a variety structures, by using a double belt
Thermoset fiber impregnation	Impregnating with resin and fiber by electronic syringe and Teflon tube
Cutting/Winding	Cutting, winding of impregnated continuous fiber composites prepreg

과 압력을 받아 성형이 이루어진다. 두 벨트의 간격과 온도를 조절할 수 있는 구간이 크게 4구간으로 나뉘어져 있으며 벨트속도에 따라 소재의 가공시간이 결정된다. 구간별 온도는 상온~400°C까지이며 상하 벨트간 간격은 두 롤러 사이에 위치한 기계식 두께측정기로 확인할 수 있다.

2.1.4 분석 설비

각 소재의 초기인장물성 및 자기보강복합재의 제조공정에 따른 인장 물성을 확인하기 위해 UTM(MTS200, MTS社 미국)을 사용하였다.

섬유 보강재와 기지재의 초기 비중 및 각 공정 조건에 따라 제조된 자기보강 복합재의 함침성을 확인하기 위하여 비중계(GH-200, AND社, 일본)을 사용하였다.

섬유 보강재와 기지재의 용점 측정, 각 공정으로 제조된 자기보강 복합재의 결정화를 확인하기 위하여 DSC(404 F1

Pegasus, NETZSCH 社, 독일)을 사용하였다.

초기 보강재섬유의 각 필라멘트의 형상과 공정에 따른 보강재 섬유/기지재 필름의 형태와 기지재의 함침 정도 확인을 위해 SEM(SEC社, SNE4500M, 한국)을 사용하였다.

섬유 보강재와 기지재의 결정화도 및 각 공정조건에 따라 제조된 자기보강 복합재의 결정구조를 확인하기 위하여 XRD(DMAX-2500, Rigaku Corporation社, 일본)을 사용하였다. 측정은 시편의 바깥 면인 섬유보강재 부분을 측정하였다.

2.2 공정조건 영향도

2.2.1 더블벨트 간격 영향성

섬유보강재 원단 1매의 두께는 200 μm 이며 필름 기지재의 두께는 60 μm 이다. Fig. 2에 나타내었듯이 섬유보강재 2매와 필름기지재 1매가 사용 되었으나 필름기지재는 더블벨트라미네이션 공정 이후 섬유보강재 원단에 함침되므로 시편 최소 두께는 400 μm 로 예상되었다. 실제로 테스트 결과 400 μm 이하에서는 시편두께보다 벨트간 간격이 작아 시편의 주름이 잡히거나 파단되는 등 균일한 성형이 일어나지 않는 것을 확인하였다.

온도는 섬유보강재의 녹는점 이하인 160도, 벨트간 간격은 최소 간격인 400 μm 부터 500 μm , 800 μm , 체류시간은 150 sec에서 실험하였다

결과는 Table 3에서 보듯이 동일 온도에서 벨트간 간격이 감소할수록 인장강도, 인장탄성계수가 모두 증가하는 것을 확인하였다. 이는 벨트간 간격이 작아짐에 따라 증가하는 비중을 확인하여 볼 때 더블벨트 라미네이션 설비 안에서 받는 시편의 압력이 증가할수록 함침율이 향상되고, 공극이 감소 함으로서 인장강도 및 인장탄성계수가 향상된 것을 확인할 수 있다.

2.2.2 온도 영향성

자기보강 복합재에서 가장 중요한 점은 연신공정에 의해 최대로 연신된 섬유 보강재에 열적 손상(열에 의한 수축)없이 기지재필름을 용융시켜 열가소성 섬유를 함침시킴으로써 섬유 간의 공극을 최소화하고 섬유 보강 효과를 극대화 하는 것이다. 이에 섬유보강재의 표면이 부분적으로 녹아 계면접합을 돕고 내부는 보강재로써 소재강화를

Table 3. Tensile properties and specific gravity according to belt gap

Temp	160°C		
	Belt gap (μm)	400	500
Specific gravity	0.885	0.874	0.869
Tensile strength (MPa)	135	104	75
Tensile modulus (GPa)	0.83	0.35	0.17
Elongation (%)	61	77	89

이루어내는 것이 중요하다. 그러므로 자기보강복합재의 공정에서 가공온도는 항상 섬유보강재의 녹는점 이하에서 이루어진다. 벨트간 간격은 500 μm 고정, 체류시간은 150 sec, 온도는 155°C부터 160, 165, 170°C에서 실험하였다. 녹는점 약 165°C의 본 소재를 이용하여 녹는점 이하 155°C, 160°C, 녹는점 165°C의 3조건에서 평가 하였다. 결과는 Table 4, Fig.

Table 4. Tensile properties and specific gravity according to temperature

Belt gap (μm)	500 μm		
Temp	155°C	160°C	165°C
Thickness (μm)	510	530	550
Specific gravity	0.869	0.874	0.891
Tensile strength (MPa)	106	104	97
Tensile modulus (GPa)	0.39	0.35	0.78
Elongation (%)	58	77	105

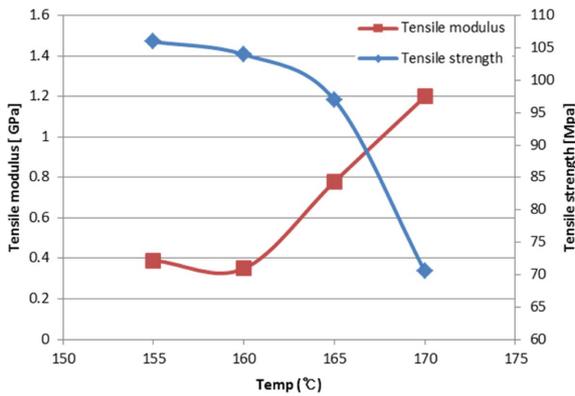


Fig. 4. Tensile properties according to temperature

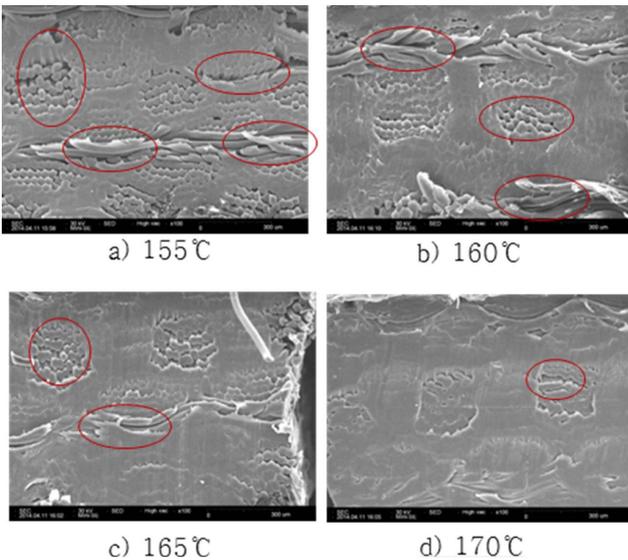


Fig. 5. SEM image of self-reinforced composites section according to temperature

4에 나타내었듯이 동일압력(동일벨트간 간격)에서 온도가 증가할 경우 인장탄성 계수는 상승하고 인장강도는 저하되는 것으로 확인되었다.

인장강도 저하는 온도가 상승 함에 따라 섬유보강재 자체의 수축에 의해 결정성이 저하되어 강도가 떨어짐에 따라 전체적인 복합재의 인장강도 저하를 유도하게 된다. 인장 탄성계수의 상승은 기지재 뿐만 아니라 섬유보강재 자체의 용융으로 함침을 향상, 공극 감소에 따른 결과임을 확인할 수 있다. Table 4의 비중과 Fig. 5 SEM 이미지에서 보듯이 온도 상승에 따라 시편의 공극이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

2.2.3 체류시간 영향성

상기에서 설명하였듯이 더블벨트 라미네이션 설비는 벨트속도에 따라 소재의 가공시간이 결정된다. 온도와 체류시간을 결정함에 따라 소재가 받는 총 에너지를 결정할 수 있는 것이다.

우선 체류시간은 150 sec와 충분한 열을 받을 수 있다고 판단되는 470 sec로 진행하였다.

결과는 Table 5에서 보듯이 동일압력(동일 벨트간 간격), 동일온도에서 체류 시간이 증가함에 따라 인장 탄성계수가 증가하고 인장강도가 감소하는 온도 상승과 동일한 경향이 나타나는 것을 확인하였다.

2.2.4 냉각에 따른 영향성

앞서 진행한 실험에서의 더블벨트 라미네이션 설비는 4구간 모두 온도를 같게 진행함으로써 벨트에서 나온 후 냉각이 이루어졌다. 이번 실험은 벨트 내에서 가압이 된 상태로 단계적 냉각에 따른 물성을 확인 하였다. 상기에서 설명한대로 더블벨트 라미네이션 설비는 온도/벨트간 간격을 조절할 수 있는 구간이 4개(Fig. 5)로 구성되어 있다. 전구간을 165°C로 설정하여 제작된 샘플(Ref)과 초기구간을 165, 170, 175°C, 2구간 110°C, 3구간 90°C, 4구간 50°C로 제작된 샘플을 비교하였다. 냉각 조건은 1구간 이후 가열을 하지 않고 자연냉각 조건으로 진행하였다. Ref에 비해 전구간에서 받는 열이 줄어들어 함침에 불리하므로 초기 구간의 온도를 높여 충분한 함침을 한 후에 냉각될 수 있도록 초기구간의 온도를 ref 대비 5°C씩 상승시켜 진행하였다.

Table 5. Tensile properties and specific gravity according to processing time

Belt gap (μm)	500	
Temp (°C)	160	
Processing time (sec)	150	470
Tensile strength (MPa)	104	85.8
Tensile modulus (GPa)	0.35	1.34
Elongation (%)	77	82



Fig. 6. 4 section of double belt laminator

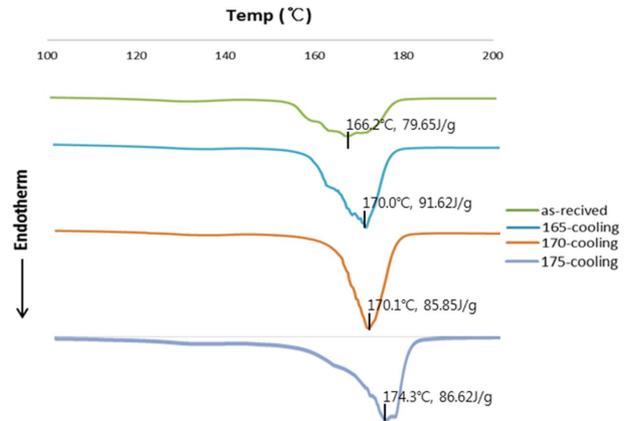


Fig. 8. Melting point according to temperature in DSC

Table 6. Tensile properties and specific gravity and according to cooling process

Section 1 Temp (°C)	Ref.	165	170	175
Specific gravity	0.896	0.863	0.887	0.896
Tensile strength (MPa)	103.0	115.3	123.5	115.7
Tensile modulus (GPa)	0.93	0.80	1.04	1.18
Elongation (%)	88	47	55	52

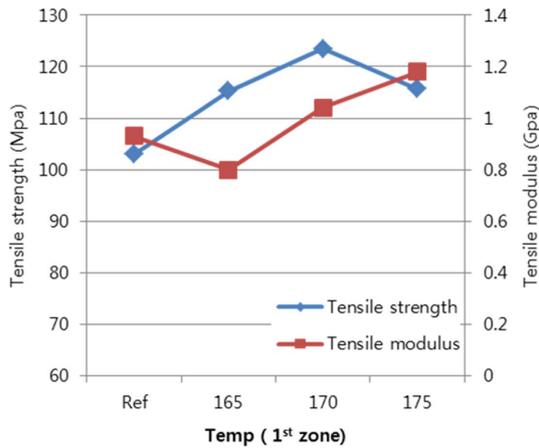


Fig. 7. Tensile properties according to temperature

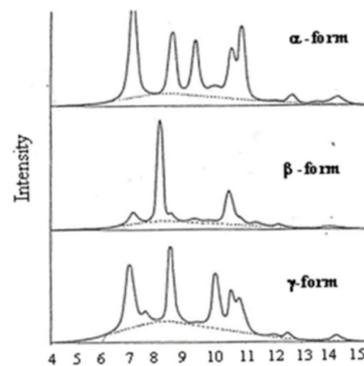


Fig. 9. Main crystalline form of polypropylene

Table 6, Fig. 7에서 냉각에 따른 인장 특성 및 비중을 나타내었다. 제1구간 165°C 시편을 비교해보면 전구간 165°C 대비 같은 온도이지만 제1구간에서만 열을 받으므로 총 에너지가 작아 함침이 덜 이루어져 비중이 감소하고 그 결과 인장탄성계수가 저하되었다.

이후 초기구간 온도 상승에 따라 인장강도는 유지되고 탄성계수는 상승하였다. 가압냉각을 하지 않은 시편의 경우(Table 4) 온도가 증가함에 따라 벨트 구간 이후(압력이 없는 상황)에서 냉각이 되므로 시편의 수축이 커져 신율 증가, 인장강도 감소가 나타나는 반면 일정한 온도에서 용융 함침 이후 가압상태에서 냉각을 해줌으로써 섬유보강재의 수축을 방지하여 연신 상태가 유지되고 자기보강 복합재

인장 강도 또한 유지되었다. 175°C 이후부터 인장강도가 약간 감소하는 것을 확인하였는데 175°C 이후에 온도에서는 소재의 녹는점 대비 많은 열량으로 인해 전구간 온도 증가와 같이 보강재의 용융으로 인한 물성 저하가 일어날 것으로 예상된다. 1구간 함침이후 냉각구간에서는 소재를 용접 이하에서 열처리하는 효과를 수반한다. 폴리프로필렌섬유의 경우 결정화도가 증가할수록 용융점이 증가하고[9] 인장 탄성계수가 증가하게 된다[10]. 이에 따라 Fig. 8에 나타난 DSC그래프에서 용융점피크를 보면 최초 섬유원단 상태의 용융 피크에서 온도 상승에 따라 우측으로 시프트되면서 용융점이 올라가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에 나타난 일반적인 폴리프로필렌의 결정 구조 중 α -form이 가장 열역학적으로 안정하여, α -form을 이루기 위해서는 다른 두 개 보다 더 많은 연신을 필요로 하게 된다[11]. 따라서 고강도 섬유에서는 고연신 공정을 통해 α -form의 결정을 유도하게 된다.

Fig. 10에서 나타난 섬유원단(As-received)과 가압냉각하의 온도별 시편의 XRD 그래프에서 보면 최초 섬유 원단과 더블벨트 라미네이션공정을 거친 시편을 비교하여 볼 때 작지만 theta 10.4°에서의 피크가 생성되는 것을 보아 α -form에 해당 하는 결정이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다.

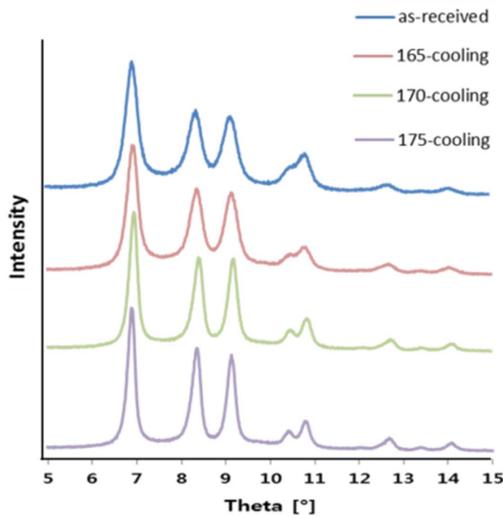


Fig. 10. Crystalline peak according to temperature in XRD

Table 7. FWHM of main peak in XRD

Sample	FWHM (full width of half maximum) at theta				
	6.9°	8.4°	9.1°	10.4°	10.8°
as-recieved	0.570	0.545	0.593	0.473	0.860
165-cooling	0.537	0.537	0.553	0.603	0.880
170-cooling	0.424	0.455	0.442	0.215	0.581
175-cooling	0.411	0.447	0.428	0.395	0.487

또한 XRD 피크에서 반폭(FWHM_full width of half maximum)은 브래그피크의 침예함을 나타내는 지표로서 해당 피크의 결정 크기가 커질수록 감소하게 된다[12]. Table 7에 나타난 주요 브래그피크의 반폭을 보면 더블벨트 라미네이터의 온도가 증가할수록 반폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다. DSC 데이터와 더불어 가압 냉각 조건하에서 온도가 증가함에 따라 인장탄성계수 상승을 유도하는 결정화 도의 증가가 나타나는 구조를 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 폴리프로필렌 자기보강 복합재 개발을 위해 섬유함침 설비를 자체 제작하였고, 해당 설비의 공정 변수가 자기보강복합재의 기계적 물성에 미치는 영향도를 고찰하고, 탄성계수 향상 메커니즘 규명을 하고자 하였으며, 해당 연구의 주요 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) 자체 제작된 장비의 더블벨트 라미네이션 유닛의 벨트간 간극을 조절함으로써 시편에 가해지는 압력의 크기를 제어하였다. 시편에 가해지는 압력이 증가할수록 자기보강복합재 내의 공극이 감소가 되는 것을 확인하였으며, 이는 복합재 시편 내 결점 저하로 보강 효과 향상을 기대할 수 있다. 실제 인장특성 평가에서도 간극 감소에 따라 인장

강도 및 탄성계수가 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. 하지만, 시편의 압축비 미만의 간극에서는 시편이 과도하게 가압되어 압축파단이 발생할 수 있어 이에 대한 내용을 포함하여 공정 최적화를 실시해야 한다. 본 연구에서는 원소재의 두께와 같은 400 μm 에서 최적의 물성을 확인하였다.

(2) 더블벨트 라미네이터의 구간별 온도 제어가 가능하지만, 전 구간 온도를 동일하게 설정하고 온도 변화에 따른 자기보강복합재 인장 특성 변화를 고찰한 결과, 열가소성 섬유 용융점 이상의 온도에서는 온도 증가에 따른 인장강도 저하가 확인되었으며, 이는 고연신 공정으로 제작된 섬유보강재 자체의 수축에 의해 결정성이 저하되어 강도가 떨어짐에 따라 전체적인 복합재의 인장강도 저하가 나타난 것으로 판단된다. 하지만, 열가소성 섬유 용융에 따른 함침성 상승으로 인하여 인장탄성계수는 온도에 따라 상승하는 결과를 확인하였다.

(3) 구간별 온도 동일가공의 경우 소재 가공 이후에 압력이 해제된 상태에서 냉각이 되므로 소재 수축에 따른 물성 저하가 확인되었다. 이에 따라 구간별 온도를 점차 낮게 설정함으로써, 가압냉각 조건에 따른 인장특성 변화를 고찰한 결과, 전 구간 동일한 온도를 설정한 조건과 달리 열가소성 섬유의 용융 온도 이상인 175°C에서도 인장강도 저하 없이 인장탄성계수가 상승하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 용융점 이상의 온도구간에서 소재의 함침이 일어나고 이후 압력이 유지된 상태로 점차 냉각하여 함침성 향상과 동시에 냉각구간에 의한 소재의 결정화도 증가에 의한 것이라 판단된다. 제조된 자기보강복합재의 DSC 및 XRD 분석 결과, 더블벨트 라미네이션 공정을 거친 이후에 보다 안정한 α -form의 결정이 많아지게 되어 소재의 결정성 향상에 의한 탄성계수 상승 효과가 있음이 증명되었다.

(4) 본 논문에서의 소재와 설비를 이용하여 진행된 최적 공정은 벨트간 간격 400 μm , 벨트속도 150 sec, 온도 1구간 175°C, 2구간 110°C, 3구간 90°C, 4구간 50°C에서 인장탄성계수 115.7 MPa, 인장강도 1.18 MPa 신율 52%의 최적 물성을 확인하였다. 이후 섬유보강재 자체 물성 증가(폴리프로필렌 섬유 초고연신에 따른 보강재 강도증가) 더 높은 물성의 자기보강 복합재를 개발할 수 있다고 판단된다.

REFERENCES

1. Capiati, N.J. and Porter, R.S., "The Concept of One Polymer Composites Modelled with high Density Polyethylene", *Journal of Matterials Science*, Vol. 10, 1975, pp. 1671-1677.
2. Stern, T., Teishev, A., and Marom, G., "Composites of Polyethylene Reinforced with Chopped Polyethylene Fibres: Effect of Transcrystalline Interphase" *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 1009-1015.
3. Pegoretti, A., Ashkar, M., Miglaresi, C., and Marom, G., "Relaxation Processes in Polyethylene Fibre-reinforced Polyeth-

- ylene Composites" *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1181-1189.
4. Cabrera, N., "Recyclable All-polypropylene Composites : Concept, Properties and Manufacturing", Technische Universiteit Eindhoven. 2004.
 5. Alcock, B., Cabrera, N., Barkoula, N., and Peijs, T., "Low Velocity Impact Performance of Recyclable All-polypropylene Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 66, 2006, pp. 1724-1737.
 6. Cabrera, N., Reynolds, C.T., Alcock, B., and Peijs, T., "Non-isothermal Stamp Forming of Continuous Tape Reinforced All-polypropylene Composite Sheet" *Composites: Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 1455-1466.
 7. Rojanapitayakorn, P., Mather, P.T., Goldberg, A.J., and Weiss, R.A., "Optically Transparent Self-reinforced Poly(ethylene terephthalate) Composites: Molecular Orientation and Mechanical Properties", *Polymer*, Vol. 46, 2005, pp. 761-773.
 8. Hine, P.J. and Ward, I.M., "Hot Compaction of Wove Nylon 6,6 Multifilaments" *Journal of Materials Science*, Vol. 101, 2005, pp. 991-997.
 9. Benjamin Alcock, "Single Polymer Composites Based on Polypropylene: Processing and Properties", Queen Mary, University of London, UK, 2004.
 10. Parenteau, T. and Ausias, G., "Structure, Mechanical Properties and Modelling of Polypropylene for Different Degrees of Crystallinity", *Polymer*, Vol. 53, 2012, pp. 5873-5884.
 11. Raghavendra, R.H., Atul Dahiya, and Kamath, M.G., "Olefin Fiber", College of Engineering: UT Knoxville 2004.
 12. Jia, J. and Raabe, D., "Evolution of Crystallinity and of Crystallographic Orientation in Isotactic Polypropylene during Rolling and Heat Treatment", *European Polymer Journal*, Vol. 42, 2006, pp. 1755-1766.