

탄소섬유를 이용한 열가소성 복합재료 시트 제조 및 특성

이윤선* · 송승아* · 김완진* · 김성수* · 정용식*†

Fabrication and Characterization of the Carbon Fiber Composite Sheets

Yun-Seon Lee*, Seung-A Song*, Wan Jin Kim*, Seong-Su Kim*, Yong-Sik Jung*†

ABSTRACT: Recently, the applications of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) have become broader than ever when it comes to such industries as automotive, ships, aerospace and military because of their lightweight-ness and high mechanical properties. Thermosetting plastics like epoxy are frequently used as the binding matrix in CFRPs due to their high hardness, wetting characteristics and low viscosity. However, they cannot melted and remolded. For this reason, thermosetting plastic wastes have caused serious environmental problems with the production of fiber reinforced plastics. Thus, many studies have focused on the carbon fiber reinforced thermoplastics (CFRTPs) and recycling carbon fiber. In this study, recycled carbon fiber (RCF) was prepared from CFRPs using a pyrolysis method, which was employed to separate resin and carbon fiber. The degree of decomposition for epoxy resin was confirmed from thermal gravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscope (SEM). The RCF was cut and ground to prepare a carbon fiber composite sheet (CFCS). CFCS was manufactured by applying recycled carbon fibers and various thermoplastic fibers. Various characterizations were performed, including morphological analyses of surface and cross-section, mechanical properties, and crystallization enthalpy of CFCS at different cooling conditions.

초 록: 탄소섬유 강화 복합재료는 높은 비강도 및 비강성을 가지기 때문에 자동차 산업, 선박, 우주 항공 산업과 같은 다양한 산업 분야에 적용되어 왔으며, 수요가 점차 증가하고 있다. 탄소섬유 강화 복합재료에는 기지재로 주로 에폭시(Epoxy)와 같이 점도가 낮고 젖음 특성이 우수하며 강도가 양호한 열경화성(Thermosetting) 수지가 사용된다. 열경화성 수지는 우수한 물리적 특성을 나타내지만 재사용이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 재사용이 가능한 탄소섬유 강화 열가소성 수지(Thermoplastic) 복합재료 개발 및 탄소섬유 재사용에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 열분해 방법을 사용하여 탄소섬유/에폭시 복합재료로부터 탄소섬유와 수지를 분리하여 탄소섬유를 재활용하였다. 에폭시의 분해도(Degree of decomposition)는 열중량분석기(TGA)와 시차 주사현미경(SEM)을 통해 확인하였다. 수지로부터 분리해낸 탄소섬유는 절단(Cutting)과 그라인딩(Grinding) 방법을 거쳐 탄소섬유 복합재료 시트(Sheet)를 제조하였다. 재활용 탄소 섬유로 제조된 탄소섬유 시트는 각각 다른 냉각 조건에서 결정화 엔탈피(Crystallization enthalpy)와 기계적 특성, 표면과 단면의 형태를 분석하였다.

Key Words: 탄소섬유(Carbon fiber), 탄소섬유 강화 열가소성 복합재료(Carbon fiber reinforced thermoplastic composite), 시트 성형(Sheet molding compound), 재활용 탄소섬유(Recycled carbon fiber)

Received 3 July 2015, received in revised form 21 August 2015, accepted 24 August 2015

*Department of Organic Materials & Fiber Engineering, Chonbuk National University

*†Department of Organic Materials & Fiber Engineering, Chonbuk National University, Corresponding author (E-mail: psdcolor@jbnu.ac.kr)

1. 서 론

탄소섬유는 직경이 5~15 μm 인 수십~수만 개의 필라멘트(Filament)로 구성되어 있다. 탄소섬유는 복합재료의 강화재(Reinforcement)로 주로 사용되며 기지재(Matrix)와 함께 사용되어 외부 하중을 지지하는 역할을 한다[1-4]. 이때 기지재는 강화재로 사용된 섬유들을 묶어주는(Binding) 역할을 하는데 탄소섬유 강화 복합재료에 사용되는 기지재로는 기계적 물성이 우수하며, 점도가 낮고 젖음 특성이 우수한 열경화성(Thermosetting) 수지가 주로 사용된다. 그러나 탄소섬유 강화 열경화성 복합재료(Carbon fiber reinforced thermosetting plastic)는 재성형이 어렵기 때문에 복합재료 제조 시 공정 불량 및 손실(Loss)로 인해 발생한 탄소섬유 복합재료 및 사용되고 난 후 복합재료의 대부분이 폐기물로 처리되고 있다[4]. 이러한 폐기물 처리는 소각처리 시 다양한 유해가스의 발생을 피할 수 없으므로 극히 비환경적이다. 따라서 재성형이 가능한 탄소섬유 강화 열가소성 복합재료에 관한 연구 및 친환경적 처리방법과 탄소섬유 재활용 기술에 대한 다양한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

열가소성 수지(Thermoplastics)는 단순 열처리를 통하여 탄소섬유에서 분리가 가능하고 열처리만으로 재성형이 가능하기 때문에 친환경적인 소재이다. 또한 현재까지 연구되어온 폐 탄소섬유의 재활용 방안으로써 산처리, 유기용매 사용, 열분해, 초임계 유체 이용과 같은 다양한 방법들이 제시되었다. 그러나 폐기물에서 분리된 탄소섬유는 길이 및 종류가 다양하고 고비용 문제로 인해 제품으로서 가치가 떨어져 전량 폐기처분 또는 저급의 충전제로 활용되고 있는 실정이다. 또한 현재 대부분의 재활용 기술은 폐 탄소섬유 강화복합재료에서 기지재를 분리한 후 탄소섬유를 재활용하거나, 스크랩 탄소섬유를 그대로 이용하여 2차 가공을 하는 기술개발에 머물러 있기 때문에 다양한 응용분야를 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 열분해법을 사용하여 폐 탄소섬유 복합재료로부터 스크랩 탄소섬유를 재활용하였으며, 이를 위한 최적의 제조 조건을 제시하였다. 또한 제조된 재활용 탄소섬유와 열가소성 섬유를 혼합하여 재활용 탄소섬유 복합시트(Sheet compound)를 제조하였으며, 제조공정에서 각각의 제조 조건이 복합시트의 물리·화학적 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. 재료 및 실험

2.1 재활용 탄소섬유 제조

재활용 탄소섬유를 얻기 위한 기존 탄소섬유 복합재료는 일방향 연속 탄소섬유가 강화된 프리프레그(USN150, SK chemical, Korea)를 사용하여 적층한 복합재료이다.

열분해 공정에 앞서 폐 탄소섬유복합재료를 원활한 탄

화로 투입을 위하여 파쇄기(Cutter mill, Hankook crusher Co., Ltd.)로 1차 파쇄하였으며 파쇄기의 경우 칼날이 반대 방향으로 맞물려 복합재료를 파쇄하는 방식이다.

파쇄된 폐 탄소섬유 복합재료 시편에서 에폭시 수지를 분해하기 위해 고온전기로(Horizontal high temperature furnace, Jeon Heating Industrial CO. Ltd.)를 이용하여 400°C, 600°C, 800°C에서 열분해 하였다. 각각의 샘플에서 에폭시 수지 분해상태를 확인하기 위해서 주사전자현미경(SEM; Scanning electron microscope, SU-70, HITACHI Ltd.)을 이용하여 표면을 관찰하였으며, 최적의 열분해 온도 선정을 위해 열중량 분석기(Thermo-gravimetric analysis, Q50, TA Instruments)를 이용하여 10°C/min의 승온 속도로 400°C, 600°C, 800°C까지 3회 측정하여 시료의 잔류량을 비교분석 하였다.

폐 탄소섬유 복합재료에서 수지가 제거된 재활용 탄소섬유의 균일한 섬유장을 조절하기 위해 Ham-cut(HC) 절단법을 이용하여 4000 rpm으로 절단하였다.

2.2 복합재료 시트 제조

복합재료 시트 제조를 위해 강화재로 2.1에서 제조된 재활용 탄소섬유를 이용하였고, 기지재로는 열가소성 섬유인 PET(Polyethylene terephthalate, LME, Huvis, Korea)와 PE/PP(Polyethylene/Polypropylene, OEP, Huvis, Korea)를 사용하였으며 각각의 섬유의 섬도, 섬유장, 용융점은 Table 1에

Table 1. Properties of thermoplastic fiber

	Fineness (Denier)	Length (mm)	Melting point (°C)	Working temperature(°C)
LM-PET	6	32	110/250	150
PE/PP	2	38	130/170	150
PPS	2	51	250	250

Table 2. Manufacturing conditions of recycled CF and thermoplastic fiber composite sheet with 250 g/m² of basis weight

	Weight ratio		Volume ratio	
	RCF	Resin	RCF	Resin
RCF/PET(30:70)	30	70	35.8	64.2
RCF-PET(20:80)	20	80	24.4	75.6
RCF-PET(10:90)	10	90	12.6	87.4
RCF-PE/PP(30:70)	30	70	45.2	54.8
RCF-PE/PP(20:80)	20	80	32.6	67.4
RCF-PE/PP(10:90)	10	90	17.6	82.4
RCF-PPS(30:70)	30	70	40.2	59.8
RCF-PPS(20:80)	20	80	28.2	71.8
RCF-PPS(10:90)	10	90	14.8	85.2

나타내었다. 강화재와 기지재의 분산 및 응집을 위한 고분자 첨가제로는 물에 0.5%로 희석된 폴리아크릴아마이드 (polyacryl amide, PAA, Hansol chemical, Korea)를 사용하였다.

물 3000 ml에 재활용 탄소섬유와 각각의 열가소성 섬유의 부피비를 Table 2와 같은 조건으로 고속 교반기를 통해 1000 rpm의 속도로 1분동안 분산시켜 슬러리(slurry)를 제조하였다. 제조된 슬러리에 PAA(0.5 wt% in water) 100 ml를 투입한 후 400 rpm의 속도로 2분 동안 교반시켰다.

재활용 탄소섬유와 열가소성 섬유가 혼합된 슬러리를 Fig. 1에 나타난 수초지기의 Head box에 투입하고 200 mesh 위에 균일하게 분산시킨 시트형태로 제조한 후 Vacuum pump를 사용하여 탈수하였다. 물리를 사용하여 제조된 복합시트를 압착 탈수 및 평탄화한 후 80°C에서 3시간 동안 건조하였다.

건조된 복합재료 시트내의 열가소성 섬유를 용융시켜 강도를 향상시키기 위해 열압기(Hot press, Daejin Mold & Plastic, Korea)를 이용하여 고온압착을 수행하였으며, 각각의 열가소성 섬유의 용융점을 기준으로 열압기의 온도를 설정하여 3분 동안 5 MPa 압력으로 진행하였다.

압착 공정 후 냉각조건에 따른 복합재료 시트의 강도변화를 확인하기 위해 자연냉(상온냉각), 서냉(-8°C/min) 등

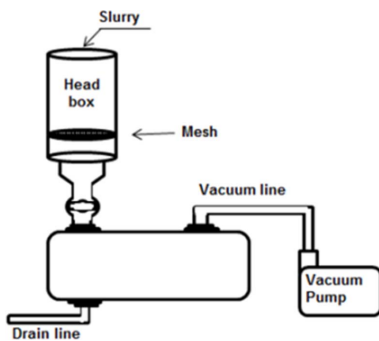


Fig. 1. Schematic diagram for fabrication of recycled CF and thermoplastic fiber composite sheet

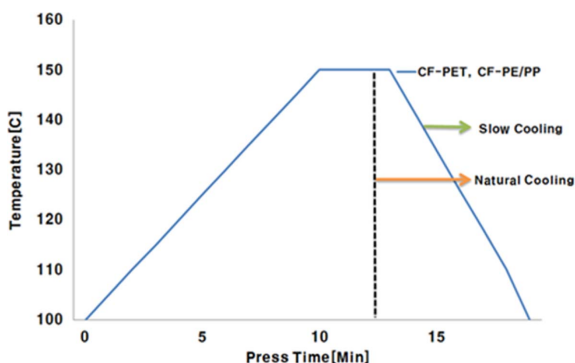


Fig. 2. Hot-press and cooling temperature of composite sheet as a function of time

Table 3. Cooling conditions of recycle CF and thermoplastic fiber composite sheet

	Hot-press temperature (°C)	Cooling method (Natural or Slow)
RCF-PET(30:70)-N	150	Natural
RCF-PET(20:80)-N		
RCF-PET(10:90)-N		
RCF-PET(30:70)-S	150	Slow
RCF-PET(20:80)-S		
RCF-PET(10:90)-S		
RCF-PE/PP(30:70)-N	150	Natural
RCF-PE/PP(20:80)-N		
RCF-PE/PP(10:90)-N		
RCF-PE/PP(30:70)-S	150	Slow
RCF-PE/PP(20:80)-S		
RCF-PE/PP(10:90)-S		

냉각조건을 달리하여 시트를 제조하였다. 복합재료 시트의 압착공정은 Fig. 2에 표시된 사용온도를 근거로 하여 압착 온도를 설정하였으며 각각의 Sample 제조조건을 Table 3에 나타내었다.

복합재료 시트의 형태적 특성을 확인하기 위해 주사전 자현미경을 이용하여 표면 및 단면을 관찰하였다. 인장강도의 분석을 위해 만능시험기(Universal testing machine, Instron Co., U.S.A.)로 ASTM D3039 규격을 기준하여 측정하였으며, 시험 속도 1 mm/min으로 고정된 후 진행하였다. 냉각방법에 따른 결정화도의 차이를 확인하기 위해 시차주사열량측정기(Differential scanning calorimetry, TA Instruments)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재활용 탄소섬유

TGA를 사용하여 폐 탄소섬유 복합재료의 열분해 거동을 분석하였다. 에폭시 수지의 열분해 온도(400°C)를 기준으로 600°C와 800°C까지 3회 측정하였다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 온도에 따라 중량 감소율의 차이가 발생하였으며, 각 온도에서 중량 감소율은 400°C에서 55%, 600°C에서 70%, 800°C에서 72%로 나타났다. TGA 분석 결과 400°C에서는 에폭시 수지가 완전히 열분해 되지 않고 잔류량이 존재하는 것으로 예상되며, 600°C 이상에서는 에폭시 수지가 완전히 제거되었다. 따라서 폐 탄소섬유 복합재료에서 에폭시 수지를 분리하기 위한 최적의 열분해 온도는 600°C가 적합할 것으로 판단된다.

고온 전기로를 이용하여 400°C, 600°C, 800°C까지 열분해된 폐 탄소섬유 복합재료를 SEM을 통해 표면을 관찰하였다. Fig. 4에서 열분해 되지 않은 폐 탄소섬유 복합재료(a)

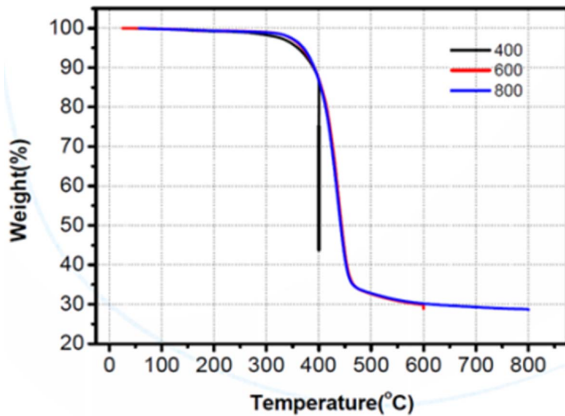


Fig. 3. TGA analysis of recycle CF according to temperature condition

의 경우 탄소섬유 표면에 에폭시 수지로 보이는 물질이 코팅되어 있는 것을 알 수 있으며, 400°C에서 열분해된 (b)는 대부분의 에폭시 수지가 분해된 것으로 보이나, 미분해 에폭시 수지가 일부 관찰된다. 하지만 600°C와 800°C에서 열분해된 (c)와 (d)를 살펴보면, 비교적 높은 열분해 온도의 영향으로 탄소섬유 표면이 일부 산화되어 거친 형상을 나타내고 있으나, 에폭시 수지는 완전히 제거된 것으로 판단된다.

3.2 복합재료 시트

재활용 탄소섬유 강화재와 각각의 열가소성 섬유 바인더를 이용하여 복합재료 시트를 제조하였으며, 제조된 복

합재료 시트는 열압기를 이용하여 고온압착을 수행한 후 SEM을 통해 표면 및 단면 형상을 관찰하였다. 바인더의 종류에 따른 복합재료 시트의 압착공정은 Table 3에 표시된 사용온도를 근거로 하여 압착온도를 설정하였다.

Fig. 5는 열가소성 바인더로 저융점 PET 섬유를 사용하여 강화재와 바인더 비율, 고온압착 후 냉각조건에 따라 제조된 복합재료 시트의 표면과 단면 SEM 사진이다. 복합재료 시트의 표면에서, 바인더 함량이 증가될수록 용융된 바인더가 면 방향으로 균일하게 분포되어 결합점이 증가되었으며, 표면의 형상이 보다 매끄러운 것을 알 수 있다. 단면에서도 마찬가지로 바인더 함량이 증가될수록 용융된 바인더가 시트 내부까지 균일하게 침투된 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과로 인해 시트의 두께가 점점 감소되는 것으로 나타났다. Fig. 5(a)와 (b)는 동일한 조건에서 제조된 복합재료 시트를 고온압착 후 냉각방법만을 달리하여 관찰한 SEM 이미지로 서냉 조건에서 제조된 시트가 급냉 조건에서 제조된 시트에 비하여 바인더 분포의 균일성이 증가되었다.

이것은 고온압착 공정에서 용융된 바인더의 자유도가 증가하여 강화재 사이로 침투되는데, 압착공정이 종료된 후 냉각공정에서 온도가 급격히 낮아질 경우 용융된 바인더가 빠르게 고화되어 강화재 사이로 충분히 침투되지 못하며 낮은 냉각속도에서는 냉각공정 중에도 바인더가 지속적으로 침투되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 서냉 조건에서 제조된 시트 (b)는 고온압착 후 바인더가 완전히 고화될 때까지 일정한 냉각속도로 시트에 가해지는 압력이 유

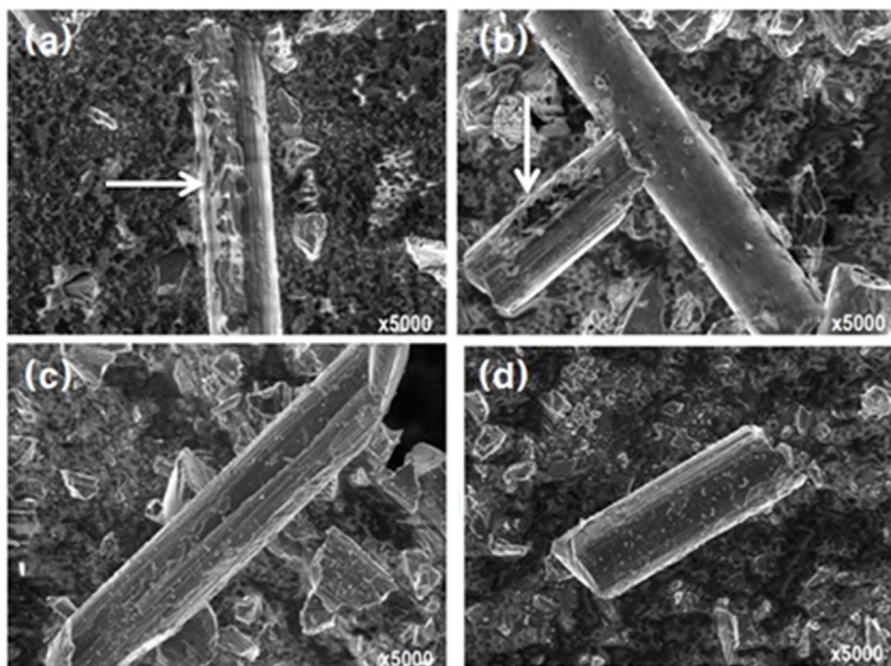


Fig. 4. Surface observations of recycle CF according to pyrolysis temperature; (a) untreated, (b) 400°C treated, (c) 600°C treated, (d) 800°C treated

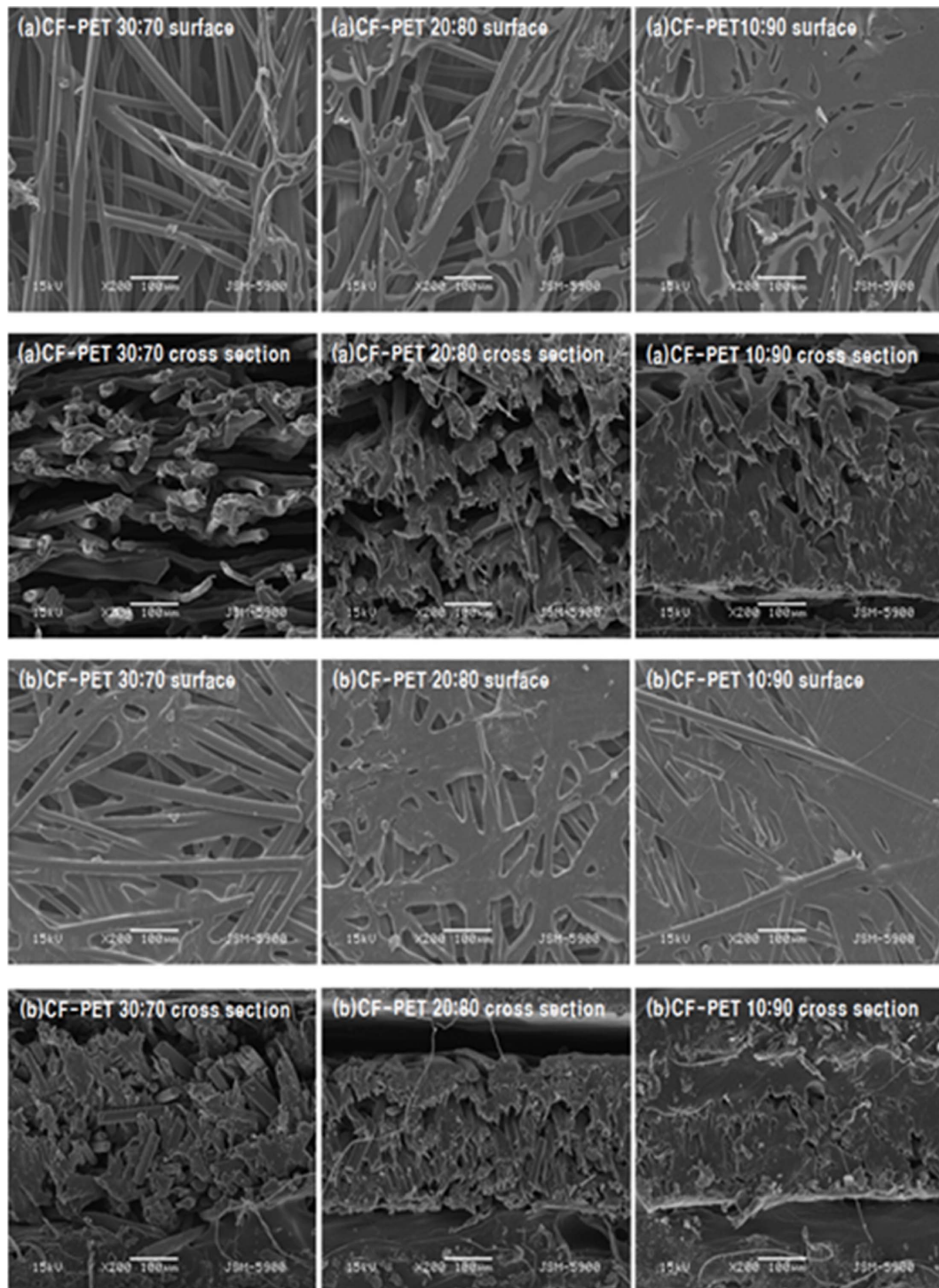


Fig. 5. SEM images on surface and cross section obtained from recycle CF-PET fiber composite sheet according to CF-PET content ratio and cooling condition; (a) natural cooling, (b) slow cooling

지되기 때문에 고화되기 전 압력이 제거되는 급냉 조건에서 제조된 시트(a)보다 두께가 감소되었다. 따라서 바인더의 함량과 냉각조건은 복합재료 시트의 강도에 영향을 줄 것으로 예상된다. Fig. 6은 열가소성 바인더로 PE/PP 복합섬유를 사용하여 제조된 복합재료 시트의 SEM 분석 결과

이다. PE/PP 바인더의 경우에도 복합재료 시트의 표면 및 단면 형상은 앞서 설명한 저융점 PET로 제조된 시트와 유사한 경향이 나타났다.

UTM을 사용하여 조건에 따라 제조된 복합재료 시트의 인장강도를 측정하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었

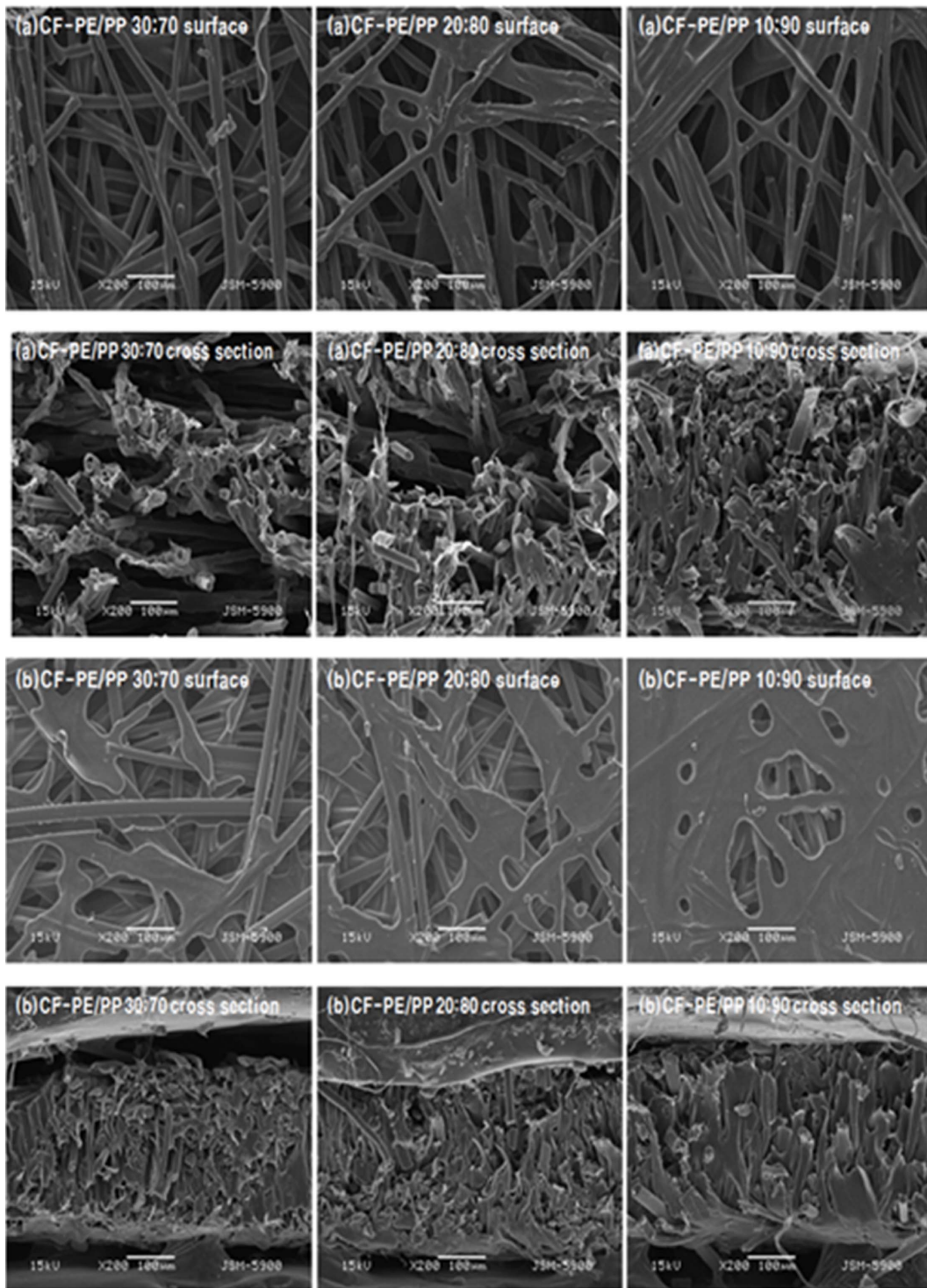


Fig. 6. SEM images on surface and cross section obtained from recycle CF-PE/PP fiber composite sheet according to CF-PE/PP content ratio and cooling condition; (a) natural cooling, (b) slow cooling

다. 동일한 중량비에서 자연냉 조건과 서냉 조건 모두 저융점 PET 섬유를 바인더로 이용한 복합재료 시트의 인장강도가 PE/PP 섬유를 이용한 복합재료 시트보다 높았으며, 바인더 함량이 90%일 때 자연냉 조건에서 53.8 MPa, 서냉 조

건에서는 106.8 MPa로 나타났다. 또한 바인더 함량이 증가될수록 시트의 인장강도는 자연냉 조건과 서냉 조건 모두에서 증가되는 것으로 나타났으며, 앞서 SEM 관찰에서 설명한 것과 같이 바인더 함량이 증가될수록 강화재간 결합

Table 4. Tensile strength of recycle CF and thermoplastic fiber composite sheet

	Thickness (mm)	Bulk density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)
RCF-PET(30:70)-N	1.69	0.18	10.13
RCF-PET(20:80)-N	1.13	0.28	26.88
RCF-PET(10:90)-N	0.69	0.41	53.80
RCF-PET(30:70)-S	0.32	0.80	50.99
RCF-PET(20:80)-S	0.31	0.88	101.01
RCF-PET(10:90)-S	0.28	0.92	106.83
RCF-PE/PP(30:70)-N	1.41	0.22	5.01
RCF-PE/PP(20:80)-N	0.81	0.41	11.03
RCF-PE/PP(10:90)-N	0.44	0.75	14.46
RCF-PE/PP(30:70)-S	0.31	0.89	20.48
RCF-PE/PP(20:80)-S	0.24	1.12	22.52
RCF-PE/PP(10:90)-S	0.22	1.3	38.44

Table 5. Crystallization temperature and degree of crystalline of the recycled CF-PE/PP composite sheet obtained from DSC analysis

	T _c (°C)	ΔH _{fusion} (J/g)
RCF-PE/PP(30:70)-N	119.02	19.66
RCF-PE/PP(20:80)-N	122.59	31.85
RCF-PE/PP(10:90)-N	118.83	40.48
RCF-PE/PP(30:70)-S	115.53	105.63
RCF-PE/PP(20:80)-S	115.28	120.57
RCF-PE/PP(10:90)-S	115.73	173.82

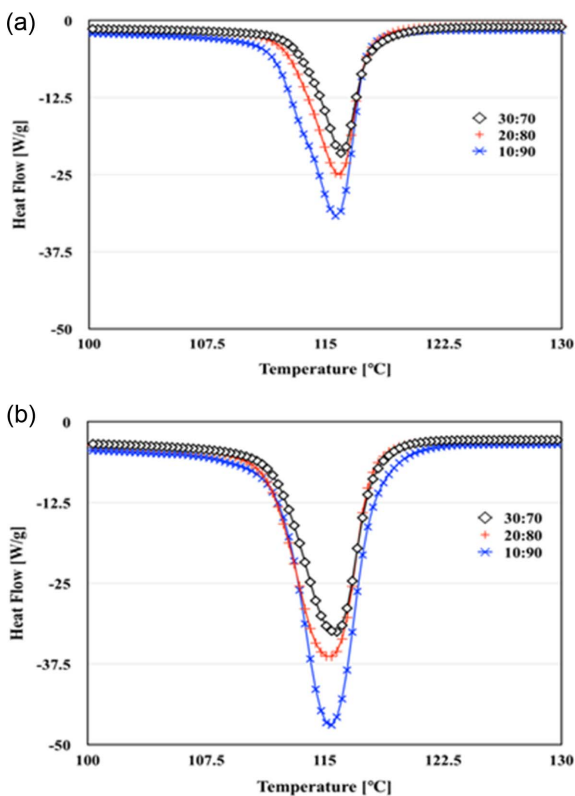
이것은 다음과 같은 두 가지 원인으로 설명될 수 있다 첫째, SEM 분석결과에서 확인한 바와 같이 서냉 조건에서 제조된 시트는 내부까지 바인더가 균일하게 침투되어 시트의 인장강도가 증가된 것으로 판단된다. 둘째, 바인더 수지의 결정화도에 기인한 것으로, 일반적으로 용융된 고분자 수지는 고화되는 과정에서 냉각속도가 결정화 정도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 서냉 조건에서 고화된 바인더 수지의 결정화도가 자연냉 조건에서 보다 증가된 것으로 예상된다.

결정성 고분자 수지는 용융온도 이상에서 빠른 속도로 냉각을 시키면 결정이 생성되지 않은 무정형 상태로 상온에서 존재한다. 하지만 느린 속도로 냉각하면, 결정화 온도(T_c) 부근에서 발열과 함께 결정이 생성되기 때문에, DSC를 이용하면 결정화 온도와 결정화 정도(ΔH)를 구할 수 있다. 바인더 수지의 냉각조건에 따른 결정화 정도가 복합재료 시트의 비강도 변화에 미치는 영향을 확인하기 위하여 DSC를 사용하였다. Fig. 7은 PE/PP 복합섬유를 바인더로 사용하여 제조된 복합재료 시트의 DSC 분석결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타난 발열 피크의 면적을 계산하여 각각의 조건에 따른 바인더 수지의 결정화 정도와 결정화 온도를 Table 5에 나타내었으며, 이를 통해 냉각속도가 증가되면 결정화 정도가 낮아지는 경향을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 폐 탄소섬유 복합재료를 열분해법을 이용하여 에폭시 수지를 분리한 후 재활용 탄소섬유를 제조하였다. 재활용 탄소섬유와 PET, PE/PP 열가소성 섬유를 사용하여 복합재료 시트를 제조하였으며, 냉각 공정을 달리 하여 각각의 복합재료 시트의 표면 및 단면 관찰, 물성, 결정화 정도를 비교 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 탄소섬유 복합재료 재활용 방법 중 하나인 열분해법을 사용하였을 시 600°C 이상의 온도에서 에폭시 수지가 완전하게 열분해 되는 것을 TGA와 SEM을 통하여 확인하였다.
- SEM을 통해 열가소성 섬유의 함량이 증가할수록 복합재료 시트 표면의 바인더의 결합점이 증가하였고 시트 내

**Fig. 7.** DSC analysis of recycle CF-PE/PP composite sheet according to content ratio and cooling condition; (a) natural cooling, (b) slow cooling

력이 증가하여 시트의 인장강도가 증가된 것으로 판단된다. 동일한 중량비에서 냉각조건에 따른 인장강도의 변화를 분석한 결과, 자연냉 조건에서 제조된 시트보다 서냉 조건에서 제조된 시트의 인장강도가 증가되었다.

부까지 균일하게 침투된 것을 확인하였다. 또한 자연냉 조건에서 제조된 시트는 바인더가 완전히 고화될 때 까지 시트에 가해지는 압력이 유지되기 때문에 두께가 감소되었다.

3. 재활용 탄소섬유-열가소성 섬유 복합재료 시트는 전체적으로 열가소성 섬유의 함량이 증가될수록 결합점의 증가로 인해 인장강도가 증가되는 것을 확인하였으며, PET 열가소성 섬유를 사용한 복합시트의 강도가 비교적 우수하였다.

4. 서냉 조건에서 제조된 재활용 복합재료 시트가 바인더의 충분한 결정성장으로 인하여, 자연냉 조건에서 제조된 복합재료 시트에 비해 결정화 정도가 증가되었으며 이로 인해 높은 인장 강도를 보였다.

후 기

본 연구는 2011년도 전북대학교 연구교수 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Kim, Y.A., "Carbon Fiber Composite." *Physics & High Technology*, Vol. 12, No. 3, 2003, pp. 31-35.
2. Schwartz, M.M., *Composite Materials Handbook*, McGraw Hill Higher Education, 1983.
3. Rosato, D., *Designing with Plastics and Composites: A Handbook*, Springer, 1991.
4. Gauthier, M.M., *Engineered Materials Handbook*, Asm International Handbook Committee, 1995.
5. Lee, S.H., "The Recovery of Carbon Fiber from Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Applied to Railway Vehicles," *Korea Railway*, Vol. 12, No. 6, 2009, pp. 1059-1066.