



## 목분강화 재활용폴리에틸렌 그린복합재료의 기계적 특성, 충격 특성 및 열변형온도

이기영 · 조동환<sup>†</sup>

금오공과대학교 고분자공학과

접수일(2011년 7월 22일), 수정일(2011년 8월 5일), 게재확정일(2011년 8월 12일)

### Mechanical and Impact Properties and Heat Deflection Temperature of Wood Flour-reinforced Recycled Polyethylene Green Composites

Ki Young Lee and Donghwan Cho<sup>†</sup>

*Polymer/Bio-Composites Research Lab, Department of Polymer Science and Engineering,  
Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea*

(Received July 22, 2011, Revised August 5, 2011, Accepted August 12, 2011)

**요약** : 본 연구에서는 자원 재활용 측면에서 매트릭스수지로 재활용플라스틱과 보강재로 친환경 천연섬유로 구성된 그린복합재료를 제조하고 그 특성을 탐구하였다. 먼저 재활용폴리에틸렌과 천연섬유인 목분을 이용하여 이중 압출공정 방법으로 목분함량이 서로 다른 펠릿을 제조하였다. 이 펠릿을 사용하여 압축성형 방법으로 목분/재활용폴리에틸렌 그린복합재료를 제조하고, 그들의 굴곡특성, 인장특성, 충격특성, 열변형온도 그리고 파단거동에 미치는 목분함량의 영향을 조사하였다. 결과는 목분/재활용폴리에틸렌 그린복합재료의 굴곡강도, 굴곡탄성률, 인장탄성률 및 열변형온도는 목분함량이 증가함에 따라 크게 향상된 반면, 인장강도와 충격특성은 감소한다는 나타내었다. 주사전자현미경으로 관찰한 파단거동은 재활용폴리에틸렌의 유연한 파단현상과 비교하여 목분함량이 증가함에 따라 변화하는 충격거동 경향을 정성적으로 뒷받침해주었다.

**ABSTRACT** : Considering of utilizing renewable resources and recycled plastics, green composites consisted of recycled polyethylene (PE) as matrix and eco-friendly natural fibers as reinforcement were processed and characterized in the present study. First, the wood flour/recycled polyethylene pellets with different wood flour contents were prepared by twin-screw extrusion processing. Using the pellets, wood flour/recycled polyethylene green composites were fabricated and the effects of wood flour loading on their flexural, tensile, impact properties, heat deflection temperature and fracture behavior were investigated. It was concluded that the flexural strength, flexural modulus, tensile modulus and heat deflection temperature of wood flour/recycled polyethylene green composites were increased with wood flour, whereas the tensile strength and impact strength were decreased. The fracture behavior observed by means of scanning electron microscopy supported qualitatively the tendency of the impact strength with wood flour loading, compared with the ductile fracture pattern of recycled polyethylene.

**Keywords** : green composites, recycled polyethylene, wood flour, mechanical properties, impact strength, heat deflection temperature

#### I. 서 론

21세기부터 환경문제에 대한 사회적 관심이 더욱 높아지면서, 많은 나라에서 환경법규가 점차 강화되면서 새로운 친환경 소재의 개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 여러 선진국에서는 점점 고갈되어가고 있는 화석연료를 바탕으로 하는 소재 공급원을 천연소재 및 농작물 자원을 바탕으로 하는 환경친화

적 소재로 대체하려고 노력을 기울이고 있다.<sup>14</sup>

바이오복합재료(biocomposite)라고도 부르는 그린복합재료(green composite)는 보강재로 친환경 천연섬유를 사용하고 매트릭스 수지로는 합성고분자 또는 생분해성 고분자로 이루어진 소재이다. 그린복합재료는 기존의 섬유강화 고분자복합재료 제조에 적용해 왔던 가공/성형 방법의 많은 부분을 적용할 수 있다. 약 200-230 °C 이하에서 열가소성 고분자매트릭스 수지의 성형공정 조건을 만족시킨다면, 일반적으로 수지와 함께 사용하는 천연섬유의 물성 저하 없이 그린복합재료의 제조

<sup>†</sup> 대표저자 E-mail: dcho@kumoh.ac.kr

가 가능하다. 그러므로 천연섬유 도입에 의한 고분자수지의 물성 개선 효과가 있다면, 기존의 유리섬유강화 고분자복합재료를 사용하여 왔던 일부 부품소재를 그린복합재료로 대체할 수 있을 뿐 아니라, 원소재의 단가절감, 환경친화성, 소재경량화 등의 효과를 기대할 수 있을 것이다.<sup>5-7</sup>

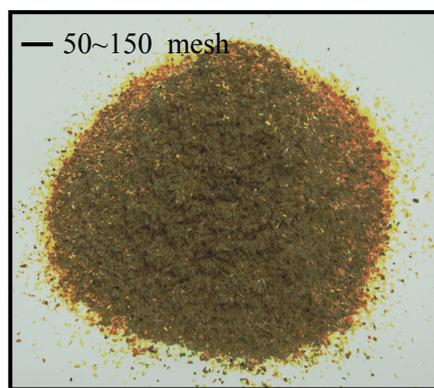
일반적으로 재활용(recycling)된 플라스틱은 원수지(virgin resin)보다 물성이 낮다. 고밀도폴리에틸렌(HDPE)과 저밀도폴리에틸렌(LDPE)으로 이루어진 재활용폴리에틸렌(recycled PE)의 경우, Table 1에서 보여주는 바와 같이, 대략적으로 HDPE 특성과 LDPE 특성의 중간 값을 나타내며, 재활용폴리에틸렌을 구성하고 있는 HDPE와 LDPE의 함량비에 따라 영향을 받는다. 재활용플라스틱의 특성은 그를 구성하고 있는 원료수지 성질, 분자량 및 수지 등급 혹은 원수지와 블랜드 등을 통해 개선될 수 있다. 또는 충전재 또는 보강재를 사용하여 재활용플라스틱의 기계적 또는 열적 특성을 향상시킬 수 있다.<sup>8,9</sup> 고분자복합재료의 보강섬유로 사용되고 있는 유리섬유의 대체섬유로 관심을 받고 있는 천연섬유로는 양마(kenaf), 황마(jute) 등 줄기섬유가 널리 사용되고 있으나,<sup>10,11</sup> 목분(wood flour) 또한 고분자수지와 가공성이 우수하고 보강 천연섬유로서 고분자의 물성 개선에 기여할 수 있기 때문에 wood polymer composites(WPC) 분야에서 건축 내·외장용 소재 등 각종 플라스틱 소재로서 널리 쓰여 왔으며, 그에 대한 연구결과도 많이 소개되고 있다.<sup>12-14</sup> 그러나 재활용플라스틱과 함께 목분을 이용한 연구에 대한 보고는 드문 편이다.

Yao et al.은 동일한 벚짚에서도 그 발체 부위에 따라 달리 얻어진 벚짚섬유를 이용하여 벚짚/재활용폴리에틸렌 및 벚짚/폴리에틸렌 복합재료를 제조하고 그들의 기계적 특성에 대하여 조사하였다. 벚짚섬유 함량이 증가함에 따라 인장탄성률은 증가하였으나 인장강도와 충격강도는 감소한다고 보고하였다.<sup>9</sup> Lei et al.은 사탕수수/재활용폴리에틸렌 복합재료에 대한 특성분석 결과를 보고하였다. 그들은 maleated 폴리에틸렌 또는 carboxylated 폴리에틸렌으로 개질된 재활용폴리에틸렌에 사탕수수가 어떠한 영향을 주는지에 대하여 조사하였다. 사탕수수/재활용폴리에틸렌 복합재료의 탄성률, 인장강도 및 충격강도는 maleated 폴리에틸렌의 함량이 증가함에 따라 증가한다고 주장하였다.<sup>8</sup>

우리 주변에는 많은 양의 폴리에틸렌 필름이 농업용 필름으로 사용되고 있다. 이러한 필름의 대부분은 사용 후 농경지 및 우리 생활주변에 방치됨으로써 토양과 환경을 오염시키고 있다. 이러한 문제점을 줄이고자 하는 차원에서 폐필름류를 수거하여 펠릿(pellet) 형태로 생산된 재활용폴리에틸렌이 상업화되어 있어 이용이 가능하다. 따라서 본 연구의 목적은 자원 재활용 측면에서 매트릭스수지로 재활용플라스틱과 보강재로 친환경 천연섬유로 구성된 그린복합재료를 제조하고 그 특성을 탐구하는 것이다. 이를 위하여 재활용폴리에틸렌과 천연섬유인 목분을 이용하여 이축 압출공정 방법으로 목분함량이 서로 다른 펠릿을 제조하였다. 이 펠릿을 사용하여 압축성형 방법으로 목분함량이 다른 여러 가지 목분/재활용폴리에틸

Table 1. Mechanical Properties of HDPE, LDPE, and Recycled PE

Material	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Impact Strength (J/m)
HDPE	44.06 ± 3.55	1.37 ± 0.16	24.17 ± 0.01	1.16 ± 0.09	103.09 ± 22.21
LDPE	15.01 ± 0.55	0.36 ± 0.01	9.47 ± 0.17	0.22 ± 0.01	426.50 ± 23.52
Recycled PE	34.56 ± 0.86	1.10 ± 0.04	15.76 ± 0.11	0.63 ± 0.01	184.12 ± 21.95



(A)



(B)

Figure 1. Views of 'as-received' wood flour (A) and 'as-received' recycled PE pellets (B) used in this work.



였으며, 30 kN의 load cell을 사용하였고, crosshead speed는 10 mm/min이었다. 각 복합재료 시편의 인장강도와 인장탄성률의 평균값은 10개의 시편으로부터 얻었다. 인장시험에 사용된 시편의 크기는 길이 150 mm, 너비 15 mm, 두께는 5 mm였다.

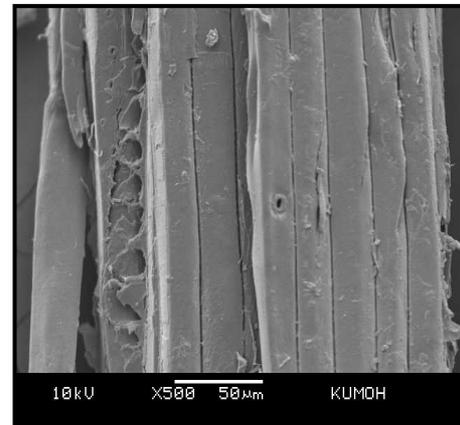
복합재료의 충격시험은 ASTM D256에 의거하여 Izod 모드의 충격시험기(Tinius Olsen Model 892)를 사용하여 상온에서 수행하였다. 노치 커터(notch cutter)를 이용하여 ASTM D256에 의거하여 시편에 약 2.5 mm 깊이의 'V' 노치를 만들었다. 각 시편에 21.6 J의 충격에너지가 610 mm 충격거리에서 3.46 m/s의 속도로 가해졌다. 충격강도의 평균값은 10개의 시편으로부터 얻었다. 충격시편의 크기는 길이 62.5 mm, 너비 12.7 mm, 그리고 두께 12.7 mm였다.

복합재료의 열변형온도는 ASTM D648에 의거하여 열변형시험기(Tinius Olsen Model 603)를 사용하여 3점 굴곡하중 모드에서 측정하였다. 시편의 크기는 길이 130 mm, 폭 5 mm, 두께 15 mm였다. 시험은 각 시편이 실리콘오일이 들어있는 챔버 내부로 수직 하강하여 침지된 상태에서 온도를 상승시키면서 3점 하중을 가하여 수행하였으며, 이때 시편에 발생하는 변형에 이르는 온도 즉, 열변형온도를 측정하였다.

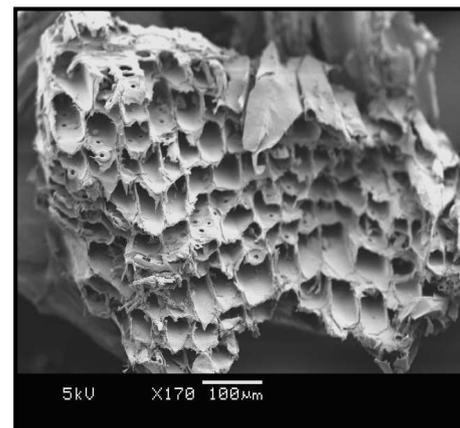
목분 및 복합재료의 파단면을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM 6380)을 사용하였다. 관찰에 사용한 모든 시편은 표면에 전도성을 부여하기 위하여 스퍼터링(sputtering) 방법을 사용하여 시편 표면에 백금(Pt)으로 코팅하였다.

### III. 결과 및 토의

천연섬유를 압출기에 넣어 공정을 수행 할 때 우선적으로 고려해야 할 사항은 고분자수지의 용융흐름지수이다. 고분자수지의 용융흐름지수가 너무 낮으면 천연섬유를 투입할 때 수지가 섬유와 함께 배럴 내로 잘 투입되지 않아 수지만 압출되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우 압출공정 온도를 높임으로써 문제를 해결할 수 있지만, 고분자수지에 비하여 상대적으로 열분해온도가 낮은 천연섬유에서 높은 공정온도로 인해 공정 시 섬유 고유특성의 변화가 초래될 수 있다. 또한 보강재로 사용하는 천연섬유의 길이와 직경을 고려해서 천연섬유의 투입 방법을 결정해야 한다. 천연섬유의 길이가 너무 길고 가는 것을 사용하면, 호퍼에 투입하는 도중 내부의 스크류 앞부분부터 섬유가 걸려 천연섬유를 배럴 내부로 적절하게 이송시키는데 어려움이 있기 때문에 가능한 짧은 섬유를 사용하는 것이 바람직하다. 호퍼를 통하여 수지와 천연섬유를 직접 내부로 투입할 때는 천연섬유의 길이가 5 mm 이하이거나 분말 상태의 천연섬유를 사용하는 것이 좋다. 따라서 본 연구에서는 목분의 종횡비(aspect ratio)가 작아 수지와 함께 목분을 호퍼를 통하여 직접 투입하였다. 여러 공정조건에서 선행공정을 거친 후 Table 2에 제시된 바와 같이, 최적화된



(A)



(B)

**Figure 3.** Scanning electron micrographs of longitudinal surface (A) and cross-section (B) of wood flour used in this work.

성형 조건에서 압출공정을 수행하였다.

#### 1. 목분의 현미경 관찰 및 열안정성

Figure 3은 본 연구에 사용된 목분을 표면과 단면에서 관찰한 주사전자현미경 결과를 보여준다. 전형적인 줄기근원 셀룰로오스계 천연섬유인 kenaf나 jute 섬유의 표면에 왁스나 표면저분자 성분이 존재하고 있어 섬유 표면에 striation이 뚜렷하게 나타나지 않는 것과 달리, 목분에서는 천연섬유 길이방향으로 표면에 striation이 뚜렷하게 관찰되었다. 또한 다른 셀룰로오스계 천연섬유와 유사하게, 섬유 내부에는 많은 작은 셀(cell)로 이루어져 있음을 관찰할 수 있었다. Kenaf나 jute 등의 줄기계 천연섬유와 달리, 셀의 내부의 많은 부분이 채워지지 않고 비워져 있었다.

Figure 4는 TGA를 이용하여 질소분위기에서 분 당 20 °C로 온도를 올리면서 조사한 목분에 대한 열안정성 결과를 보여준다. 목분은 TGA 측정 전에 건조오븐에서 충분히 건조되었지만, 섬유자체에 존재하고 있는 물분자 때문에 약 100 °C 부근

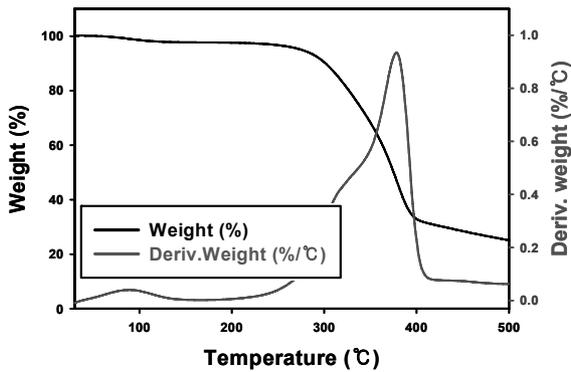


Figure 4. TGA and DTG curves for wood flour measured at the heating rate of 20°C/min.

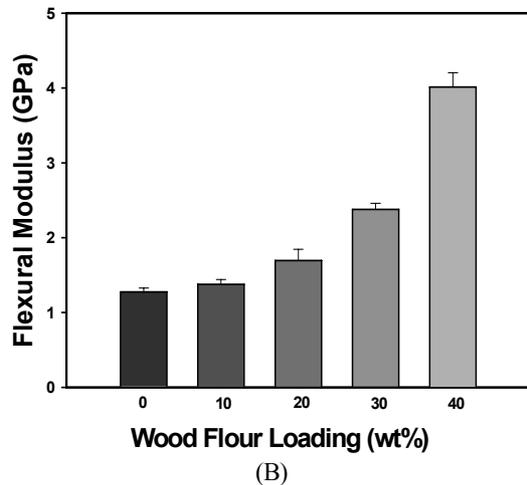
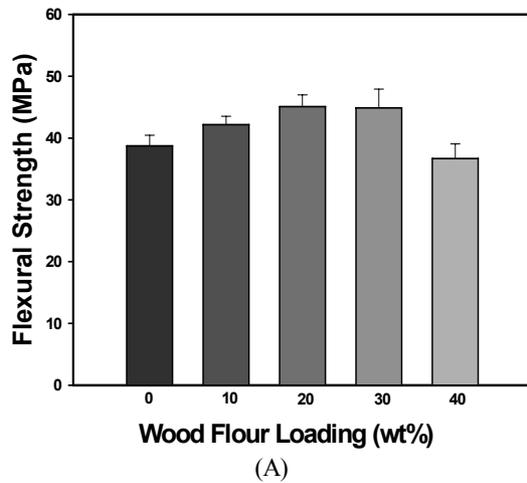


Figure 5. Variation of the flexural strength (A) and modulus (B) of recycled PE and wood flour/recycled PE green composites with different wood flour loadings.

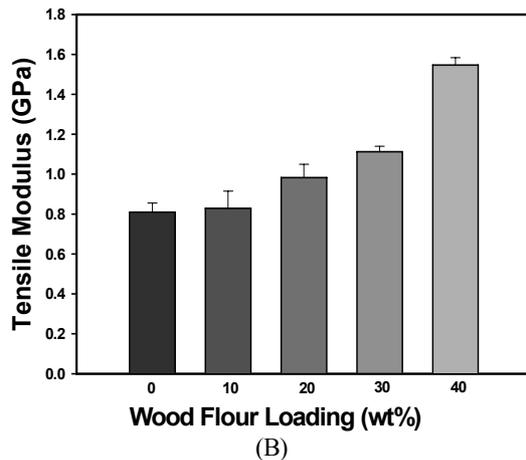
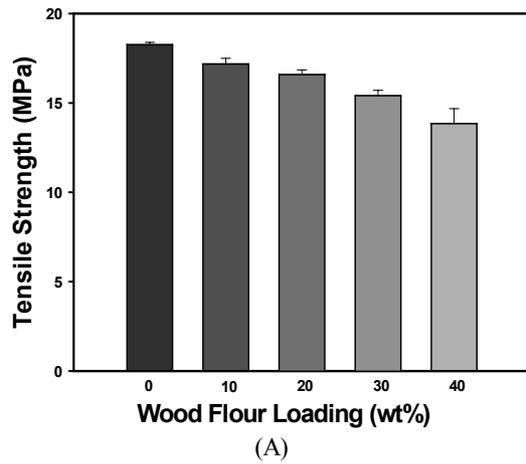
에서 2~3% 정도의 초기 중량감소를 나타내었다. 이후의 중량감소는 거의 발생하지 않았으며, 목분의 분해가 시작하는 약

290 °C에 이르러 중량감소가 급격하게 발생하였고, 약 400 °C까지 전체중량의 약 65-70%가 감소하였다. 이러한 목분의 열안정성 결과는 본 실험에서 재활용폴리에틸렌 수지와 함께 경험하는 압출공정 및 압축성형 온도 조건에도 목분이 열적으로 안정하다는 것을 나타낸다. DTG 곡선의 약 300 °C 부근에서 보이는 shoulder는 목분내 헤미셀룰로오스(hemicelluloses) 성분이 제거되며 나타나는 것이며, 가장 두드러진 중량감소는 약 390 °C 부근에서 셀룰로오스(cellulose)가 분해되면서 발생하였다.

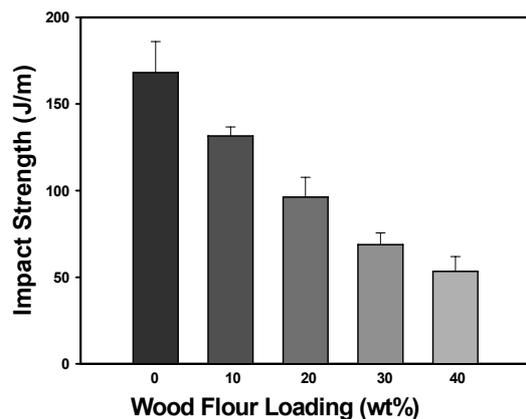
## 2. 굴곡 및 인장 특성

Figure 5는 재활용폴리에틸렌과 각 복합재료에 대한 굴곡강도와 굴곡탄성률의 변화를 비교한 결과이다. 굴곡강도는 목분함량이 증가할수록 점차적으로 증가하였으며, 30 wt%일 때 순수한 재활용폴리에틸렌 보다 굴곡강도가 약 20% 증가되었다. 이러한 기계적 특성의 증가는 목분에 의한 재활용폴리에틸렌의 보강효과 때문인 것으로 판단된다. 목분의 내부가 셀 구조로 이루어져 있음에도 불구하고, 목분함량이 증가함에 따라 굴곡강도가 증가하는 경향을 보이는 이유는 3점 굴곡시험 방법에 근거할 때, 굴곡강도는 시편의 두께방향에 존재하고 있는 매트릭스 성질에 더욱 의존하며, 수지 주위에 무질서(random)하게 분포되어 있으며 매트릭스수지에 의해 둘러싸여 있는 보강섬유는 수지가 굴곡하중에 더욱 견딜 수 있도록 외부에서 가해진 하중을 분산시키는 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 목분함량이 40 wt%일 때 그 값이 다시 감소하였다. 그 이유는 상대적으로 비중이 낮은 목분 40 wt%가 수지에 도입되었을 때, 수지 주변에 존재하고 있는 상대적으로 많은 양의 목분이 용융수지의 흐름을 방해하여 성형시 수지가 각개의 섬유를 충분히 적셔주지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 이 경우 복합재료를 구성하고 있는 섬유와 수지 사이에 접촉이 충분하지 이루어지지 않아 보이드(void)가 형성될 수 있으며, 이는 미세적 결함으로 작용하여 결과적으로 복합재료의 기계적 강도의 저하를 야기시킬 수 있다. 한편, 굴곡탄성률은 목분함량이 증가함에 따라 더욱 크게 증가하였으며, 굴곡강도의 저하를 보여주었던 40 wt% 함량의 경우에도 탄성률은 증가하였다. 재활용폴리에틸렌 수지의 탄성률과 비교할 때, 목분함량이 40 wt%일 때 탄성률은 약 210%가 향상되었다. 그 이유는 재활용폴리에틸렌 매트릭스 내에 두께방향으로 무질서하게 분포되어 있는 wood 섬유가 재활용폴리에틸렌보다 상대적으로 더 높은 배향성과 탄성률을 지니고 있으며, 목분함량이 증가됨에 따라 시편의 길이방향뿐만 아니라 두께방향으로 더 많은 wood 섬유가 존재하여 탄성률 증가에 더욱 기여하였기 때문인 것으로 사료된다.

Figure 6은 재활용폴리에틸렌과 각 복합재료에 대한 인장강도와 인장탄성률의 변화를 보여준다. 복합재료의 인장강도는



**Figure 6.** Variation of the tensile strength (A) and modulus (B) of recycled PE and wood flour/recycled PE green composites with different wood flour loadings.



**Figure 7.** Variation of the Izod impact strength of recycled PE and wood flour/recycled PE green composites with different wood flour loadings.

목분함량이 증가할수록 점차적으로 감소하는 경향을 보여주었다. 반면, 인장탄성률은 목분함량이 증가할수록 증가하였으

며, 40 wt%일 때 그 값은 약 90%까지 증가하였다. 이는 앞서 보여준 굴곡탄성률 변화 경향과 유사하지만 굴곡강도의 변화와는 다른 경향을 보여준다. 목분이 존재할 때 인장강도가 감소하는 이유는 많은 다공성 셀 구조로 이루어진 목분의 내부 공간이 미세결함으로 작용하여 시편 양쪽에 가해지는 외부하중에 충분히 저항하지 못하기 때문이다. 목분함량이 증가하면 미세결함으로 작용하는 셀의 수가 크게 늘어 인장강도 감소 정도도 더 커진다. 목분함량 증가에 따른 인장탄성률의 증대는 재활용폴리에틸렌 매트릭스에 사이에 약 3-5의 중형비율 가진 셀룰로오스계 섬유가 높은 자유도를 가지고 무질서하게 분포되어 있으며, 상대적으로 ductile한 성질의 재활용폴리에틸렌 매트릭스보다 탄성률과 배향성이 높은 wood 섬유가 인장시험 방향에서 재료의 stiffness를 높여주었기 때문인 것으로 판단된다.

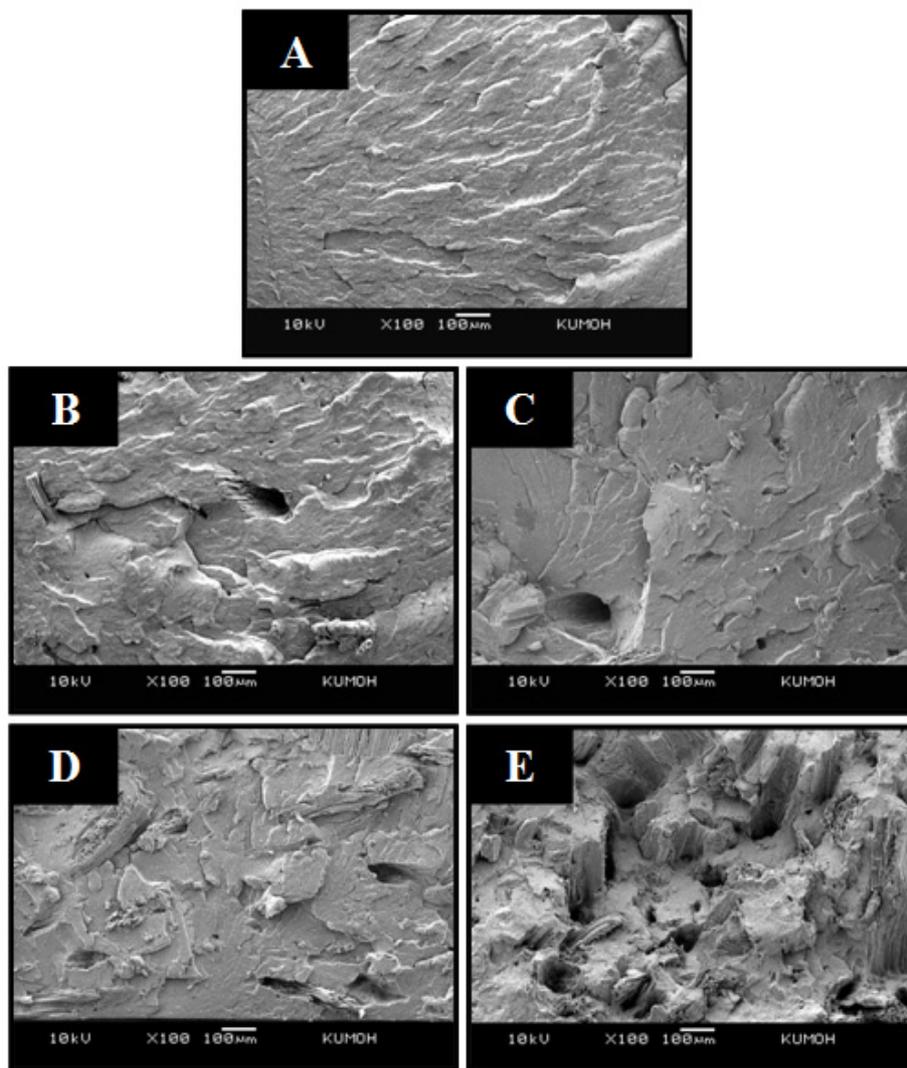
### 3. 충격특성과 파단거동

Figure 7은 재활용폴리에틸렌의 충격강도 변화에 미치는 목분함량의 영향을 보여준다. 기본적으로 ductile한 성질을 지니고 있는 재활용폴리에틸렌의 높은 충격저항성 때문에 Izod 형태의 충격시험은 복합재료 시편에 노치를 만들어서 수행하였다. 예상하였던 바와 같이, 충격강도는 목분함량이 증가할수록 점차적으로 감소하는 경향을 보여주었다. 즉 본질적으로 충격저항성이 높은 재활용폴리에틸렌에 목분의 도입은 충격저항성 향상에 기여하지 않았다. 따라서 유연한 매트릭스로 구성된 폴리에틸렌계 그린복합재료의 충격강도 향상을 피하기 위해 목분 또는 셀룰로오스계 천연섬유의 사용은 바람직하지 않다고 예상할 수 있다.

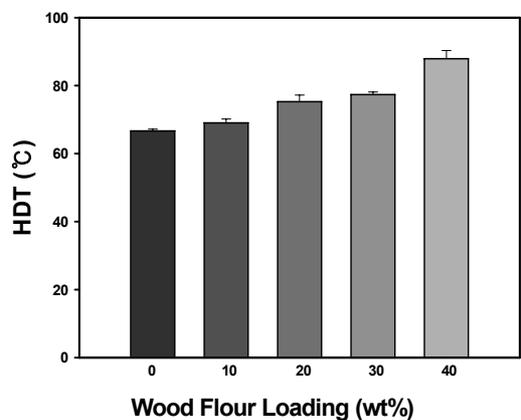
Figure 8은 재활용폴리에틸렌과 목분/재활용폴리에틸렌 그린복합재료의 파단거동을 보여준다. 각 사진으로부터 목분함량에 따라 재활용폴리에틸렌 수지 내에 분포되어 있는 wood 섬유 정도를 비교할 수 있다. 목분이 포함되어 있지 않은 재활용폴리에틸렌은 전형적인 ductile한 파단거동을 보이는 반면, 목분함량이 증가함에 따라 재료는 점점 ductile한 성질이 감소되면서, 40 wt%에서는 매트릭스 사이에 위치하였던 wood 섬유의 일부가 이탈된 pull-out 현상도 관찰되었다. 이러한 파단거동은 Figure 7에서 보여준 충격강도의 변화를 정성적으로 뒷받침해주고 결과이다.

### 4. 열변형온도

Figure 9는 재활용폴리에틸렌의 열변형온도(heat deflection temperature: HDT) 변화에 미치는 목분함량의 영향을 보여준다. 그린복합재료의 열변형온도는 목분함량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하였다. 재활용폴리에틸렌(67 °C)과 비교할 때, 40 wt%를 첨가하였을 때 복합재료의 열변형온도는 약 88



**Figure 8.** Fracture surfaces of (A) recycled PE and wood flour/recycled PE green composites with different wood flour loadings: (B) 10 wt%, (C) 20 wt%, (D) 30 wt%, (E) 40 wt%.



**Figure 9.** Variation of the heat deflection temperature of recycled PE and wood flour/recycled PE green composites with different wood flour loadings.

℃까지 31% 가량 크게 상승하였다. 목분함량이 증가함에 따라 열변형온도가 증가하는 이유는 ductile한 재활용폴리에틸렌에 도입된 상대적으로 탄성률이 큰 wood 섬유의 보강효과 때문이다. 실리콘오일 내에서 오일온도가 증가하면서 3점 굴곡하중이 시편에 가해질 때, 앞서 굴곡특성의 변화에서 기술한 바와 같이, 복합재료 시편의 두께방향에 분포하고 있는 wood 섬유는 매트릭스수지의 열변형에 대한 저항성을 높여준다. 열변형온도의 변화는 앞서 언급한 목분함량에 따른 굴곡탄성률과 인장탄성률의 변화 거동과 일치하는 결과를 보여주었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서 친환경 목분/재활용폴리에틸렌 그린복합재료

를 이축 압출공정과 압축성형 방법으로 제조하고 그들의 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 목분/재활용폴리에틸렌 그린복합재료의 굴곡강도, 굴곡탄성률, 인장탄성률 및 열변형온도는 목분함량이 증가함에 따라 크게 향상된 반면, 인장강도와 충격특성은 점차적으로 감소하였다.

2) 산업폐기물인 폐필름류를 재활용한 저가의 재활용폴리에틸렌 수지와 자연에서 용이하게 구할 수 있는 저가의 셀룰로오스계 천연섬유인 목분으로 이루어진 목분/재활용폴리에틸렌 그린복합재료에 대한 연구를 통하여, 향후 지속 가능한 천연섬유과 재활용플라스틱의 사용을 통한 친환경 그린복합재료의 응용가능성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교의 2010년도 학술연구비 지원에 의해 수행되었으므로 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. A. K. Mohanty, L. T. Drzal, D. Hokens, and M. Misra, "Eco-friendly Composite Materials from Biodegradable Polymers: Biocomposites to Nanocomposites", *Polym. Mater. Sci. Eng.*, **85**, 594 (2001).
2. D. Cho, S.G. Lee, W. H. Park, and S. O. Han, "Eco-friendly Biocomposite Material Using Biofibers", *Polym. Sci. Tech.*, **13**, 460 (2002).
3. A. K. Bledzki and J. Gassan, "Composites Reinforced with Cellulose-based Fibres", *Prog. Polym. Sci.*, **24**, 221 (1999).
4. D. Cho, "Biocomposites", *Polym. Sci. Tech.*, **13**, 81 (2002).
5. M. Sherman, J. Degmin, and D. Carroll, "A Guide for Green Composites", *Rein. Plast.*, **Dec.**, 18 (2004).
6. K. Oksman, M. Strifavars, and J. F. Selin, "Natural Fibers as Reinforcement in Polylactic acid(PLA) Composites", *Comp. Sci. Tech.*, **63**, 1317 (2003).
7. S. Shibata, Y. Cao and I. Fukumoto, "Lightweight Laminate Composites Made from Kenaf and Polypropylene Fibres", *Polym. Testing*, **25**, 142 (2006).
8. Y. Lei, Q. Wu, F. Yao, and Y. Xu, "Preparation and Properties of Recycled HDPE/Natural Fiber Composites", *Composites: Part A*, **38**, 1664 (2007).
9. F. Yao, Q. Wu., Y. Lei, and Y. Xu "Rice Straw Fiber-reinforced High-density Polyethylene Composite: Effect of Fiber Type and Loading", *Ind. Crops Prod.*, **28**, 63 (2008).
10. L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, "Chemical Modification of Hemp, Sisal, Jute, and Kapok Fibers by Alkalization", *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 2222 (2002).
11. J. M. Seo, "Processing and Properties of Jute/PLA and Kenaf/PLA Biocomposites", *M.S. Thesis*, Department of Polymer Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Korea (2006).
12. H. S. Yang, M. Wolcott, H.-S. Kim, S. Kim, and H.-J. Kim, "Properties of Lignocellulosic Material Filled Polypropylene Bio-composites Made with Different Manufacturing Processes", *Polym. Testing*, **25**, 668 (2006).
13. S. Singh and A. K. Mohanty, "Wood Fiber Reinforced Bacterial Bioplastic Composites: Fabrication and Performance Evaluation", *Comp. Sci. Tech.*, **67**, 1753 (2007).
14. C.F. Kuan, H. C. Kuan, C. Chi, M. Ma, and C. M. Huang, "Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Water-crosslinked Wood Flour Reinforced Linear Low-density Polyethylene Composites", *Composites: Part A*, **37**, 1696 (2006).