

천연섬유강화 폐양모/폴리프로필렌 복합재료(NFRP)의 제조 및 특성

김기현¹ · 조동환^{1†} · 김종현²

¹금오공과대학교 고분자공학과, ²폴리비드(주)
(2008년 5월 28일 접수. 2008년 6월 20일 채택)

Fabrication and Properties of Natural Fiber-Reinforced Waste Wool/Polypropylene Composites (NFRP)

Ki Hyun Kim¹, Donghwan Cho^{1†}, and Jong Hyun Kim²

¹Polymer/Bio-Composites Research Lab, Department of Polymer Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyungbuk 730-701, Korea

²Polybead Co., Gumi, Gyungbuk 730-701, Korea

(Received May 28, 2008; Accepted June 20, 2008)

요약: 본 연구에서는 산업현장에서 직물 제작 시 스크랩으로 버려지는 폐양모와 범용 열가소성수지인 폴리프로필렌(PP)으로 구성된 새로운 폐양모/PP NFRPs (Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: 천연섬유강화 고분자복합재료)를 압축성형 방법으로 제조한 후 그들의 기계적, 열적 특성을 분석하였다. PP수지의 기계적 특성은 폐양모의 도입으로 두드러지게 향상되었다. 특히 폐양모의 함량을 50 vol%로 하여 NFRP를 제조하였을 때, PP 대비 NFRP의 굴곡강도는 약 20%, 굴곡탄성률은 약 143%까지 향상되었으며, 인장강도는 약 76%, 인장탄성률은 약 90% 크게 향상되었다. 그리고 열변형온도(HDT)는 최고 138°C로 PP 대비 약 21°C가 증가되는 결과를 보여주었다. 연구결과는 열가소성 매트릭스 수지의 보강소재로서 폐양모의 적용 가능성을 제시하였다.

Abstract: In this study, novel waste wool/polypropylene NFRPs (natural fiber reinforced polymer composites), which are constituted with waste wool discarded as industrial scrap during manufacturing processes of woven fabrics and general purpose thermoplastic polypropylene (PP), were fabricated by means of compressionmolding and their mechanical and thermal properties were characterized. The mechanical properties of PP resin were significantly improved by an introduction of waste wool to PP. In particular, as the loading of waste wool was 50 vol% in the NFRP, the flexural strength of the NFRP was increased about 20%, the flexural modulus about 143%, the tensile strength about 76%, and the tensile modulus about 90% in comparison with each of PP control. In addition, the maximum value of the heat deflection temperature (HDT) obtained with the NFRP was 138°C at a 50 vol% loading of waste wool. This is 21°C higher than the HDT of PP control. The result here suggests that waste wool be a potential candidate for a reinforcing material of thermoplastic matrix resins.

Keywords: waste wool, polypropylene, NFRP, fabrication, properties

1. 서 론

천연섬유강화 고분자복합재료(Natural fiber reinforced polymer composite: NFRP)는 일반적으로 보강섬유로서 천연섬유(natural fibers)와 매트릭스로서 비생분해성 또는 생분해성 고분자매트릭스로 구성되어 있는 소재를

일컫는다. NFRP는 환경적인 측면에서 그린복합재료(green composite), 구성소재 측면에서 천연섬유복합재료(natural fiber composite) 또는 생분해가 가능한 소재로 이루어져 있다 하여 바이오복합재료(biocomposite)라고도 부른다[1-4].

기존의 FRP의 보강재로는 유리섬유, 탄소섬유 그리고 합성고분자 섬유가 대부분을 차지하고 있으며, 그 중에서도 그 사용량이나 응용범위를 고려할 때 유리

[†]Corresponding author: e-mail: dcho@kumoh.ac.kr



Figure 1. Views of waste wool fibers (left) and polypropylene fibers (right) used in this work.

섬유가 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이 섬유들은 자연환경에서 영구적으로 분해되지 않기 때문에 그 폐기물은 거의 모든 나라에서 환경오염이나 재활용 측면에서 큰 문제가 되어 왔다. 섬유강화 고분자복합재료는 높은 강도와 탄성률을 가지는 보강섬유와 섬유와의 접착성이 우수하고 강인성 또는 내열성 등 사용목적에 맞는 고분자매트릭스를 조합하여 제조되며, 고성능 소재로 자동차, 건축자재, 기계 전자부품, 스포츠·레저용품 등 산업 및 생활소재로서 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있다[5].

기존의 유리섬유강화 FRP와 천연섬유강화 NFRP를 비교하면 다음과 같다[6-10]. 1) 환경친화적 소재의 사용으로 폐기물에 의한 환경오염의 문제가 저감된다. 2) 천연섬유 및 매트릭스 수지의 올바른 선택에 따라 사용부품의 폐기기간의 조절 및 재활용이 가능할 수 있다. 3) 천연섬유는 유리섬유보다 비중이 훨씬 낮으므로 부품의 경량화 및 연료효율성 증가에 기여한다. 4) 천연섬유는 자연에 매우 풍부하며 저가이므로 원료 비용을 낮춘다. 5) 천연섬유는 재배과정에서 산소를 발생하고 이산화탄소를 저감시키므로 천연섬유 사용은 지구의 청정환경에 도움이 된다. 6) NFRP 제조 조건이 유리섬유강화 FRP의 경우보다 훨씬 인체와 환경에 안전하다. 7) 고분자수지의 선택에 따라 제조공정시 천연섬유는 유리섬유보다 열안정성 및 성형온도 조건에 제한을 받을 수 있다. 8) 소수성 고분자수지와 접착성 향상을 위하여 친수성 천연섬유의 표면개질이 반드시 필요하다.

천연섬유를 이용한 NFRP에 관한 연구는 90년대 중반 이후에 본격적으로 시작되어 최근에 학계는 물론 산업계로부터도 더욱 큰 관심을 받고 있으며, 현재 여러 나라에서 많은 연구가 수행되고 있다. 그러나, NFRP 연구개발 중 약 90% 이상이 셀룰로스계 식물성 천연섬유를 대상으로 하고 있으며[11-15], NFRP의 매트릭스수지로는 유리섬유강화 고분자복합재료에서 널리

사용되고 있는 폴리프로필렌 같은 비분해성 고분자수지가 주를 이루고 있다[16-18]. 천연섬유의 또 다른 한 부류는 실크(silk), 양모(wool)와 같은 동물성 천연섬유이다[19-21]. 동물성 천연섬유는 단백질 성분으로 이루어져 있으며, 그 분자구조의 결정성이 우수하며 물성도 셀룰로스계 식물성 천연섬유보다 일반적으로 높다. 따라서 본 연구에서는 동물성 천연섬유인 폐양모(waste wool)를 보강섬유로 사용하였으며, 고분자매트릭스 수지로는 폴리프로필렌(polypropylene: PP)을 사용하였다.

스크랩 양모(Scrap wool)이라고도 일컫는 폐양모는 우리나라 도처에서 직물산업의 부산물로 매우 저렴한 가격에 쉽게 얻어질 수 있으며, 산업환경 보호 및 자원 재활용 측면에서도 이용가치가 높다. 양모는 우수한 결정구조를 지니고 있어 섬유물성이 뛰어나고, 가벼우며 수지와 결합성이 우수하므로 적절하게 활용될 경우 기존의 유리섬유복합재료 및 셀룰로스계 천연섬유복합재료의 대체소재로서의 효과도 기대된다. 폴리프로필렌은 그 동안 많은 가공기술이 축적되어 있는 범용 열가소성 수지이다. PP는 유리섬유 FRP 분야에서 널리 사용되고 있으며, 특히 자동차부품소재로서 그 사용량은 매우 크다. 따라서 향후 산업화에 초점을 맞추어, 천연섬유의 공급, 가격경쟁력, 성형성, 물성 및 응용성 등을 종합적으로 고려할 때, 본 논문에서 다루고 있는 폐양모와 PP로 구성된 NFRP 소재에 대한 이해는 매우 필요하다.

본 연구의 목적은 압축성형법을 이용하여 새로운 폐양모/PP NFRP를 제조하여 처음으로 동물성계 폐양모로 보강된 복합재료에 대한 기본정보를 마련하는 것이며, 또한 그들에 대한 인장강도, 굴곡강도 및 열변형온도를 측정하여 보강재를 포함하고 있지 않은 순수 PP와 특성을 비교 분석하여 그 적용가능성을 타진하는 것이다.

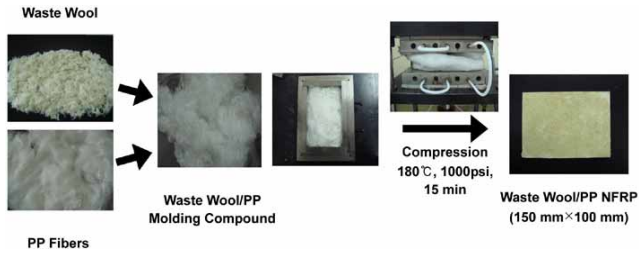


Figure 2. Fabrication procedure of waste wool/PP molding compounds and the NFRP.

2. 실험

2.1. 재료

Figure 1은 본 실험에 사용된 폐양모 섬유와 폴리프로필렌 섬유의 외형을 보여준다. 폐양모는 경상남도 진주에 있는 한국견직연구원에서 무상으로 공급 받았다. 폐양모는 진주시 및 인근에 소재하고 있는 업체로부터 직물 제조과정 중 직물의 양 끝에서 절단, 폐기되는 스크랩 양모이다. 본 연구에서는 스크랩 양모에 함께 포함되어 있는 PET 섬유 가닥들은 수작업에 의해 분리 제거된 폐양모를 사용하였다.

NFRP의 매트릭스 수지로 사용된 폴리프로필렌(P-4203 PP Fiber, Kolon Glotech Co., Korea)은 Figure 1의 우측에서 보는 바와 같이, 불규칙하게 서로 엉켜져 있는 가느다란 섬유 형태이다. PP섬유는 10 denier와 1.5~4.5 g/denier의 tenacity를 갖는다. PP섬유 필라멘트의 평균길이는 76 mm이었으며, 주사전자현미경으로 관찰한 섬유의 평균직경은 약 20~50 μm 의 범위를 나타내었다. 본 실험에서 melt indexer를 사용하여 측정된 PP섬유의 평균 용융흐름지수(melt flow index)는 약 4 g/min를 나타내었다.

2.2. 폐양모/PP NFRP 제조

Figure 2는 폐양모/PP 몰딩컴파운드와 NFRP를 제조하는 공정 단계를 보여준다. 먼저 계획된 섬유/수지 함량비에 맞게 폐양모와 PP섬유를 준비하여 수작업으로 여러 회에 걸쳐 두 섬유가 균일하게 섞일 수 있도록 혼합하였다. 이때 폐양모:PP섬유의 부피비는 40:60이었다. 준비된 몰딩컴파운드를 150 mm x 100 mm 크기의 금형에 다져 넣고, 몰드 뚜껑을 닫고 hot-press에 올려놓았다. 성형 중 금형이 성형온도까지 가열되는 동안 주위와의 온도차이에 의한 온도구배가 발생하지 않도록 세라믹 내열솜으로 금형을 감싸 보온이 되도록 하였다. Figure 3에 나타난 바와 같이, 온도-시간-압력 조건의 성형 스케줄에 따라 압축공정을 행한 후, 전원을 끈 상태에서 금형을 자연냉각시키고, 금형으로부터 복합재료를 탈형(demolding)하여 최종적으로

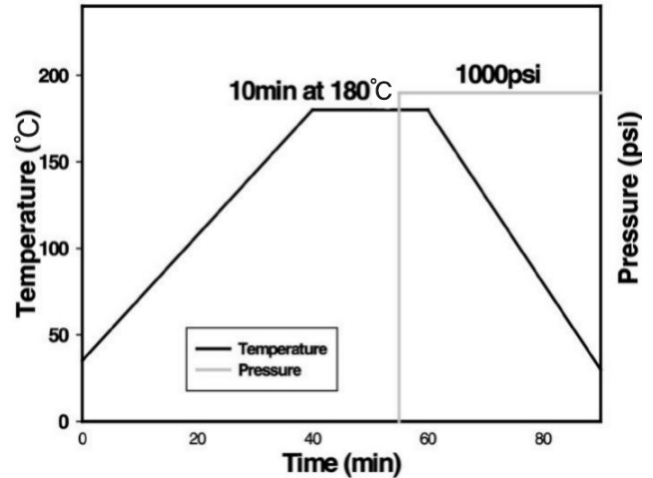


Figure 3. A time-temperature-pressure profile for fabricating waste wool/PP NFRP.

폐양모/PP NFRP를 얻었다. 이때 금형 내 NFRP가 충격 등 무리한 힘을 받지 않도록 주의하면서 탈형하였다. Figure 2에 우측 하단에는 이러한 성형과정을 통하여 얻어진 150 mm x 100 mm x 5 mm 크기의 폐양모/PP NFRP의 외형을 보여준다.

성형 전에 폐양모와 PP섬유는 100°C의 건조오븐 내에서 12시간 동안 건조하였다. 압축성형은 180°C에서 5분 동안 유지시킨 후, 다음 5분 동안에는 1000 psi의 압력을 함께 가하면서 행하였다. 성형과정 동안 PP섬유는 폐양모 내에 충분히 흘러 들어가 각개의 섬유를 적실 수 있도록 충분히 용융되었다. 가해준 1000 psi는 금형이 상온까지 냉각될 때까지 계속 유지하여 주었다. 냉각과정에서 PP섬유는 고형화되어 PP 매트릭스로 전환되었다. NFRP 제조에 사용한 폐양모 함량은 부피비로 각각 30%, 40% 및 50%이었다.

2.3. 특성 분석

2.3.1. 굴곡시험

폐양모/PP NFRP의 굴곡특성은 ASTM D790M-86에 의거하여 3점 굴곡시험을 사용하여 측정하였다. 시험은 만능시험기(universal testing machine: UTM, Instron 4467)를 사용하여 수행하였다. Span-to-depth 비율은 16이었으며, 30 kN의 load cell이 사용되었다. Crosshead speed는 0.85 mm/min로 측정 내내 적용되었다. 각 NFRP의 굴곡강도와 굴곡탄성률의 평균값은 10개의 시편으로부터 측정된 결과로부터 얻었다. 측정에 사용된 시편의 크기는 길이 100 mm, 너비 12 mm 그리고 두께는 5 mm였다.

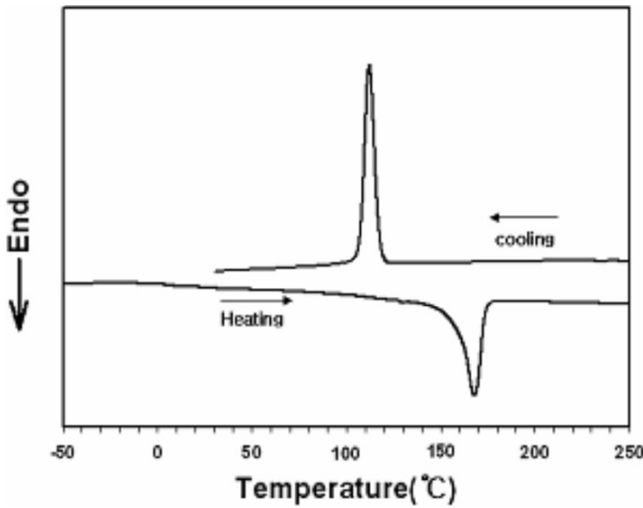


Figure 4. DSC thermograms scanned by heating and cooling with a heating rate of 10°C/min for PP, respectively.

2.3.2. 인장시험

폐양모/PP NFRP의 인장특성은 DIN 53455 규정에 의거하여 만능시험기(Instron 4467)를 사용하여 측정하였다. Gage length는 100 mm였으며, 30 kN의 load cell이 사용되었다. Crosshead speed 10 mm/min가 시험 내내 적용되었다. 각 NFRP의 인장강도와 인장탄성률의 평균값은 10개의 시편으로부터 측정된 결과로부터 얻었다. 측정에 사용된 시편의 크기는 길이 150 mm, 너비 15 mm 그리고 두께는 5 mm였다.

2.3.3. 열분석

온도변화에 따른 PP섬유에 대한 열량의 변화를 조사하기 위하여 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter: DSC, Netzsch-DSC 200F3)를 사용하였다. 측정은 분당 10°C의 속도로 승온하는 조건과 분당 10°C의 속도로 냉각하는 조건에서 각각 행하였다. PP 섬유와 PP펠렛의 열안정성은 열중량분석기(Thermogravimetric analyzer, TGA Q500, TA Instruments)를 사용하여 질소분위기에서 분당 20°C의 승온속도 조건에서 500°C 이상까지 측정하였다.

2.3.4. 열변형온도 측정

PP수지와 NFRP의 열변형온도(Heat Deflection Temperature: HDT)는 ASTM D648 규정에 의거하여 열변형온도시험기(Tinius Olsen, Model 603 HDTM)를 사용하여 3점굴곡하중 모드에서 측정하였다. Nominal test load는 1253 g_f였다. 시편의 크기는 너비 130 mm, 폭 15 mm, 그리고 두께 5 mm였다. 시험은 각 시편이 실리콘오일이 들어있는 챔버 내부로 수직 하강하여 침

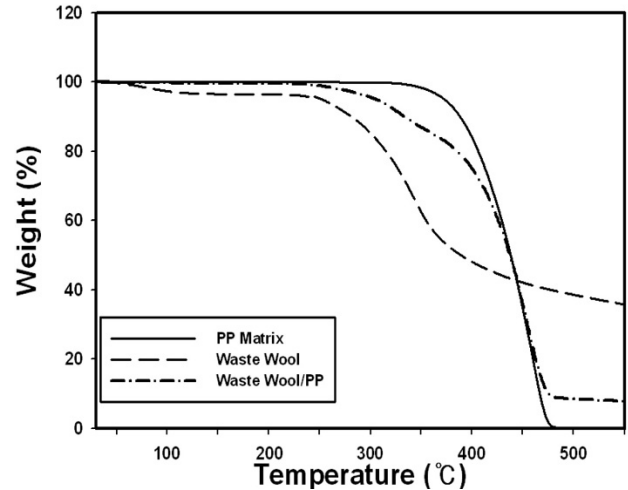
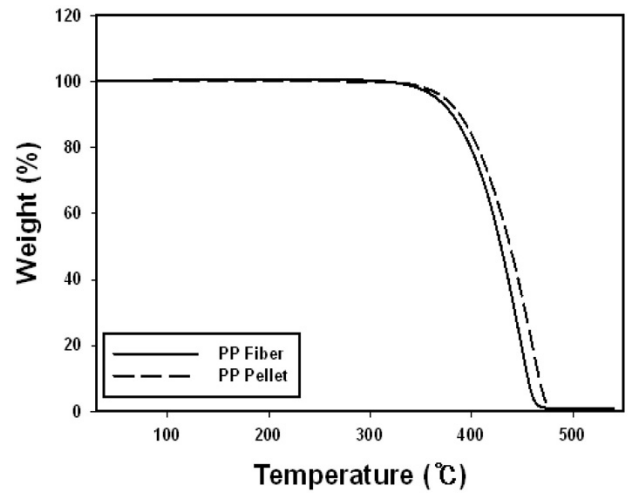


Figure 5. TGA thermograms measured for PP fiber and PP pellet (top) and PP matrix, waste wool and the composite (bottom).

진된 상태에서 온도를 상승시키면서 3점 하중을 가할 때, 시편에 발생하는 변형(deflection)에 이르는 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PP, 폐양모 및 폐양모/PP 복합재료의 특성 분석

Figure 4는 시차주사열량계를 사용하여 PP섬유에 대하여 온도변화에 따른 반응열의 변화를 보여준다. 약 0°C 부근에서 시작하는 아주 완만한 흡열(endothermic) 거동은 본 연구에 사용한 PP섬유가 지니고 있는 결정 구조 영역이 아주 넓음을 의미한다. 그리고 유리전이 온도(glass transition temperature: T_g)도 약 0°C 부근에서 나타나는 것으로 판단되었다. 그리고 PP섬유의 용융온도는 약 165~170°C 사이인 것으로 조사되었다.

그리고 다시 냉각하였을 때 약 110°C 부근에서 나타나는 발열(exothermic) 피크는 PP섬유의 결정화온도(T_c)를 나타내며 그 결정거동도 뚜렷하게 진행되었다.

Figure 5의 위 그림은 섬유상태의 PP와 펠렛 상태의 PP에 대한 열안정성을 질소분위기에서 조사한 결과를 각각 보여준다. 본 연구에 사용한 PP섬유와 일반적으로 성형공정에 사용하고 있는 펠렛 상태의 PP 사이에 열안정성을 비교하였다. 본 연구에 사용한 PP섬유의 열안정성이 범용 PP펠렛보다 다소 높은 것은 펠렛과 섬유 형태 시료 사이의 활성화에너지 차이 때문인 것으로 사료된다. 즉, 주어진 일정량의 시료에서 표면적이 큰 섬유의 활성화에너지가 표면적이 상대적으로 낮은 펠렛보다 더 크기 때문이다.

Figure 5의 아래 그림은 PP 매트릭스수지와, 폐양모 그리고 폐양모/PP 복합재료의 열안정성을 보여준다. 여기서 PP 매트릭스는 일정량의 PP섬유를 금형에 놓은 후 압축공정을 행하여 얻어진 순수PP 성형체에 대한 것으로 복합재료를 구성하는 PP 매트릭스와 동일한 상태를 의미한다. 폐양모는 공급받은 섬유상 그대로 측정된 것이다. 결과는 PP 매트릭스는 Figure 5(위)의 PP섬유에 대한 결과와 거의 일치하며, 천연섬유에서 일반적으로 섬유내부에 존재하고 있는 수분성분 때문에 관찰되는 100°C 이전에서 발생하기 시작하는 중량감소가 폐양모에서도 확인되었다. 복합재료의 열안정성은 PP 매트릭스수지와 폐양모 사이의 열안정성을 나타내었다. 이는 식물성계 천연섬유강화 고분자복합재료에서 관찰되었던 TGA 결과[19,20]와 비슷한 경향을 보여주는 것이다. 이러한 복합재료의 온도에 따른 250°C 이후에서의 중량감소의 변화는 섬유/수지 함량비에 영향을 받는다.

3.2. 폐양모 섬유의 모폴로지 및 수지와와의 접착

Figure 6은 공급받은 상태 그대로의 폐양모 섬유의 모폴로지를 각각 250배율(위)과 2000배율(아래)에서 관찰한 결과이다. 2000배율의 사진에서 보는 바와 같이, 단백질 성분으로 이루어진 양모의 표면은 일반적으로 머리카락으로부터 관찰되는 비늘과 같은 미세구조 양상을 나타내었다. 양모표면은 겹겹이 층구조를 이루고 있으며, 이러한 모폴로지는 복합재료 제조 시 고분자수지와 양모섬유 사이의 기계적 접착성 향상에 도움이 될 것으로 판단되었다. 또한 공급받은 섬유표면에는 불순물이 함께 존재하고 있음이 관찰되었다. 250배율 사진에서 알 수 있듯이, 공급받은 폐양모는 필라멘트들이 모여있는 bundle 형태이며, 이들은 서로 twist 되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 7은 앞에서 언급한 NFRP 성형공정 방법에 따라 제조된 폐양모/PP NFRP에 대하여 폐양모를 들

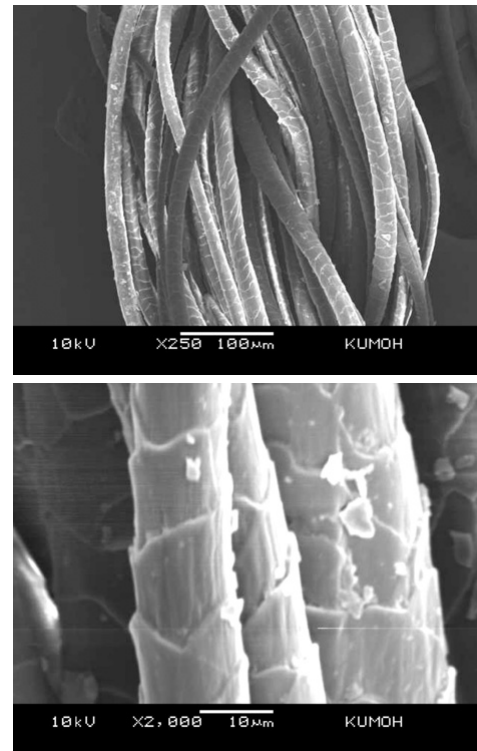


Figure 6. SEM micrographs observed for waste wool fibers: Top ($\times 250$); bottom ($\times 2000$).

러싸고 있는 PP 매트릭스의 접착 정도를 광학현미경으로 관찰하기 위한 시편 준비과정을 묘사한 것이다. 먼저 약 10 mm \times 10 mm \times 5 mm 크기의 시편을 저속다이아몬드톱(low speed diamond saw)으로 절단하여 준비하였다. 준비한 NFRP 시편을 마운팅(mounting)할 수 있는 양쪽이 개방된 실린더 형 소형 플라스틱 튜브의 중앙에 위치시켰다. 시편 주변에 불포화폴리에스터(UPE)와 경화촉매 methyl ether ketone peroxide (MEKPO) 1 wt%를 혼합한 후, 약 70°C의 오븐에서 UPE를 경화시킨 다음, 경화된 수지 중앙에 NFRP가 고정되게 하였다. 표면 광택기(polishing machine)를 사용하여 미세한 분말의 알루미나(alumina) 연마제가 분산된 물을 뿌려가면서 시편의 표면에 결함이 없고 표면이 매끄럽고 광택이 날 때까지 polishing을 하였다. 시편이 충분히 polishing된 후, 광학현미경을 사용하여 NFRP 시편에서 폐양모 필라멘트섬유를 둘러싸고 있는 PP수지의 접착상태를 관찰하였다. 일반적으로 섬유강화 고분자복합재료에서 섬유-수지 사이의 접착상태는 각각의 섬유필라멘트를 둘러싸고 있는 매트릭스 수지의 분포상태 섬유와 매트릭스 경계면의 접착상태 그리고 매트릭스와 섬유 주위의 보이드 형성 및 poor wetting으로 인한 resin-starved area의 존재 여부로부터 정성적으로 판단할 수 있다[22,23]. Figure 7에 보

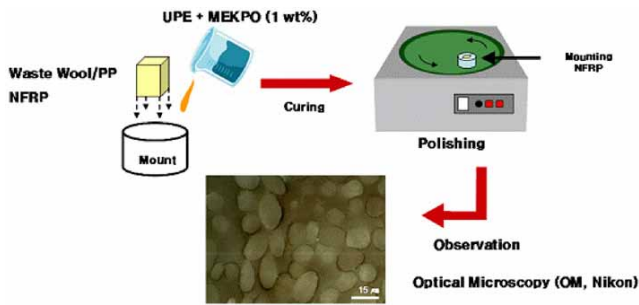


Figure 7. Optical micrograph observed for waste wool/PP NFRP after mounting and polishing.

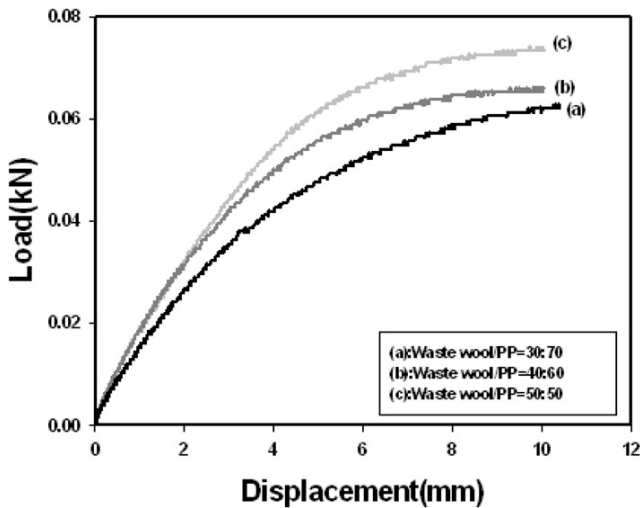


Figure 8. Plots of load as a function of displacement obtained from 3-point flexural tests for waste wool/PP NFRP with different waste wool fiber loadings.

여주는 현미경 사진으로부터 폐양모 필라멘트 각각에 PP수지가 잘 분산되어 있으며, 보이드(void)도 관찰되지 않았고, 수지-섬유 접착 상태도 좋은 것으로 확인되었다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 제조하여 분석에 사용된 폐양모/PP NFRP는 매우 적절하다고 판단되었다.

3.3. NFRP의 특성에 미치는 폐양모 섬유함량의 영향

Figure 8은 서로 다른 폐양모 섬유함량을 사용하여 제조된 폐양모/PP NFRP에 대한 3점 굽곡시험으로부터 얻은 load vs. displacement 곡선의 변화를 보여준다. 폐양모 섬유의 함량이 높아질수록 곡선의 기울기가 커지고 하중값으로부터 얻어지는 강도값의 크기도 증가한다는 것을 알 수 있다. 그 결과는 Figure 9에서 각 NFRP에 대한 굽곡강도와 굽곡탄성률의 변화로부터 비교할 수 있다.

굽곡강도의 상승폭은 두드러지지 않았다. 이는 굽곡강도가 시편의 두께방향에 존재하고 있는 섬유보다 상

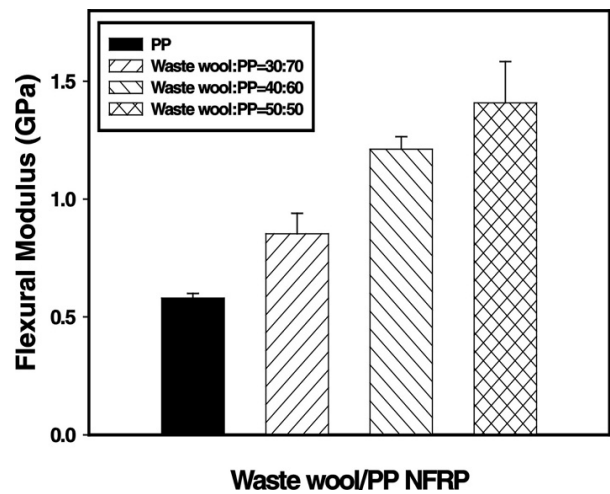
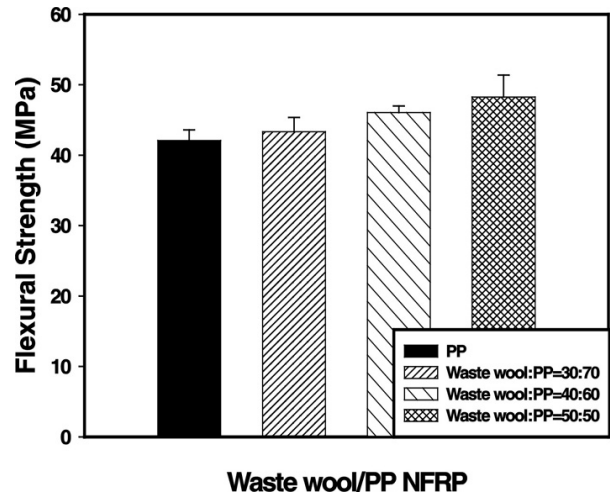


Figure 9. Change of the flexural strength (top) and modulus (bottom) for waste wool/PP NFRP with different waste wool fiber loadings.

대적으로 더 많이 존재하고 있는 PP 매트릭스의 강도에 더욱 의존하기 때문이다. 한편, 굽곡탄성률은 섬유 함량이 증가함에 따라 더욱 크게 증가하였다. 폐양모가 전혀 포함되어 있지 않은 PP수지와 비교할 때, 폐양모:PP 함량비가 부피비로 50:50일 때 탄성률은 약 143%까지 크게 향상되었다. 이는 PP 매트릭스 내에 두께방향으로 무질서하게 분포되어 있는 폐양모가 PP보다 더 높은 탄성률을 지니고 있으며, 폐양모 함량이 증가됨에 따라 섬유 탄성률의 기여도는 더욱 커져, 결과적으로 NFRP의 탄성률도 더욱 향상되었기 때문이다.

Figure 10은 폐양모 함량을 달리하여 제조된 폐양모/PP NFRP에 대한 인장시험으로부터 얻은 load vs. displacement 곡선의 변화를 보여준다. 폐양모 함량이 높아질수록 곡선의 기울기가 커지고 하중값도 증가하였다. 그 결과는 Figure 11에서 섬유함량에 따른

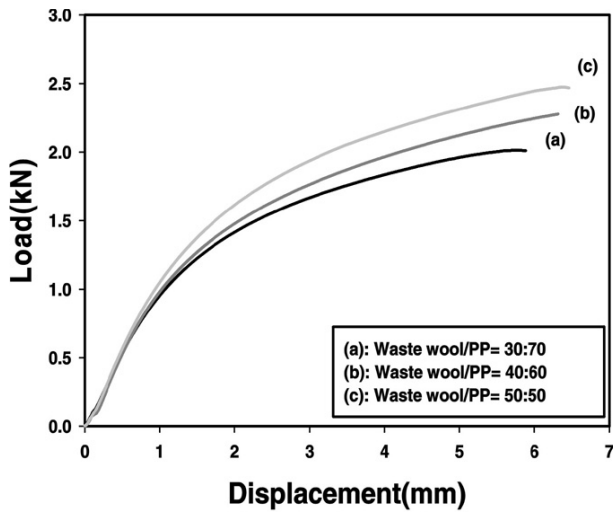


Figure 10. Plots of load as a function of displacement obtained from tensile tests for waste wool/PP NFRP with different waste wool fiber loadings.

NFRP의 인장강도와 인장탄성률의 변화에도 잘 나타나 있다. 결과는 인장강도는 폐양모:PP 함량비가 50:50일 때 약 76% 정도 향상된 반면, 인장탄성률의 함량비가 30:70인 경우에 약 88% 증가한 이후 큰 변화를 보여주지 않았다. 이는 앞서 보여준 굴곡특성 변화 거동과는 차이가 있는 결과이다. 즉, 굴곡특성에서는 탄성률의 변화가 더 뚜렷한 반면, 인장특성에서는 강도의 변화가 더 두드러졌다고 할 수 있다.

폐양모 함량이 증가함에 따라 인장강도의 변화가 큰 이유는 PP수지보다 인장강도가 상대적으로 더 높은 폐양모에 의한 보강효과 때문이라고 해석된다. 폐양모 함량 변화에 따른 인장탄성률의 변화가 30:70 비율에서는 크게 증가하였다가 더 높은 함량비에서 탄성률의 증가가 크지 않았다. 그 이유는 PP 매트릭스 사이에 분포되어 있는 폐양모 섬유는 상대적으로 높은 자유도(degree of freedom)를 가지고 무질서하게 배열되어 있으며, 그들은 rigid하지 않고 매우 유연한 특성을 지니고 있기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 PP 매트릭스 내에 비교적 유연한 폐양모의 무질서한 분포가 NFRP 시편의 인장시험 방향에서 전반적으로 배향특성을 크게 향상시켜주지 못하였음을 간접적으로 제시하여 주는 것이다. 국부적으로 양모섬유에 의한 배향효과는 있으나 전체 탄성률 향상에는 크게 기여하지 못하였을 것으로 판단되었다.

Figure 12는 PP수지의 열변형온도(HDT)의 변화에 미치는 폐양모 함량의 영향을 보여준다. 폐양모를 포함하고 있지 않은 PP control의 열변형온도는 약 117°C인 것으로 조사되었다. 열변형온도는 30 vol% 폐양모를 첨가하여 NFRP를 제조하였을 때 132°C까지

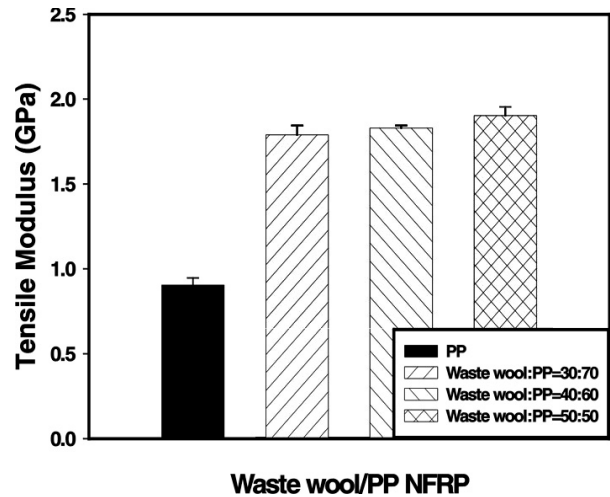
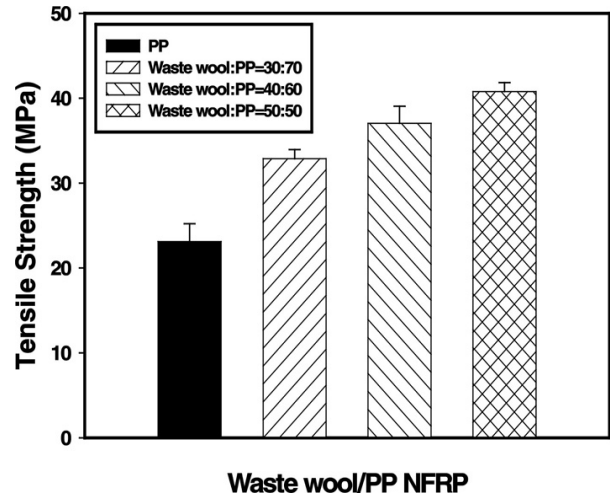


Figure 11. Change of the tensile strength (top) and modulus (bottom) for waste wool/PP NFRP with different waste wool fiber loadings.

크게 상승하였으며, 섬유함량이 증가함에 따라 점차적으로 약간씩 증가하였다. 그리고 50 vol% 함량에서 HDT는 약 138°C에 이르렀다. 이는 주어진 하중의 열변형온도시험 조건하에서 NFRP의 HDT가 PP 대비 약 21°C가 증가하는 큰 효과를 보여주는 결과이다.

4. 결 론

산업현장에서 직물 제직 시 직물의 말단에서 스크랩으로 버려지는 폐양모와 범용 열가소성수지인 폴리프로필렌으로 구성된 폐양모/PP NFRP를 압축성형 방법으로 제조한 후 그들의 기계적, 열적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. PP수지의 기계적 특성은 폐양모의 도입으로 두드러지게 향상되었다. 특

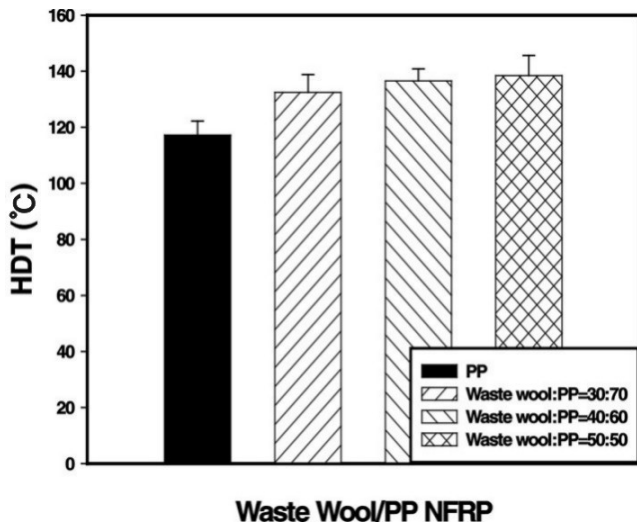


Figure 12. Change of the heat deflection temperature (HDT) for waste wool/PP NFRP with different waste wool fiber loadings.

히 폐양모의 함량을 50 vol%로 하여 NFRP를 제조하였을 때, PP 대비 NFRP의 굴곡강도는 약 20%, 굴곡탄성률은 약 143%까지 향상되었으며, 인장강도는 약 76%, 인장탄성률은 약 90% 크게 향상되었다. 그리고 복합재료의 열변형온도는 최고 138°C로 PP 대비 약 21°C가 증가되는 우수한 결과를 보여주었다.

본 연구에서 제시한 결과는 열가소성 매트릭스 수지의 보강섬유로서 동물성 천연섬유인 양모의 사용하여 제조한 NFRP를 통해서 수지의 물성을 크게 향상시키는 것을 보여주었다. 특히 산업현장에서 부산물 처리 시 문제가 되어 온 폐양모의 적용은 기존의 FRP에 원재료비의 절감을 기대할 수 있게 한다. 아울러 본 연구는 폐양모/PP NFRP를 제조하는데 있어, 기존의 복합재료 공정에서 사용되어 왔던 압축성형을 그대로 적용할 경우 새로운 장비 및 기술에 대한 투자 없이도 응용할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술재단에서 지원한 지역혁신인력양성사업에 의해 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, (Eds) "Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites", Taylor & Francis, Boca Raton, Chapter 1 (2005).

2. D. Cho, S. G. Lee, W. H. Park, and S. O. Han, *Polym. Sci. Tech.*, **13**(4), 460 (2002).
3. B. Y. Chu, M. Y. Kwon, S. G. Lee, D. Cho, W. H. Park, and S. O. Han, *접착 및 계면*, **5**(4), 9 (2004).
4. Y. Pang, S. B. Yoon, J. M. Seo, S. O. Han, and D. Cho, *접착 및 계면*, **6**(4), 12 (2005).
5. D. Cho, *Plastic Magazine*, **22**, 44 (2006).
6. A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, *J. Polym. Environ.*, **10**(1/2), 19 (2002).
7. A. N. Netravali and S. Chabba, *Matrerialstoday*, **April**, 22 (2003).
8. S. Joseph, M. S. Sreekala, Z. Oommen, P. Koshy, and S. Thomas, *Comp. Sci. Tech.*, **62**, 1857 (2002)
9. M. Tolinski, *Plastics Engineering*, **March**, 18 (2005).
10. R. Fisher, *Composites Manufacturing*, **March**, 20 (2006).
11. A. K. Bledzki and J. Gassan, *Prog. Polym. Sci.*, **24**, 221 (1999).
12. S. O. Han, D. Cho, W. H. Park, and L. T. Drzal, *Comp. Interfaces*, **12**, 231 (2006).
13. T. Nishino, K. Hirao, M. Kotera, K. Nakamae, and H. Inagaki, *Comp. Sci. Tech.*, **63**, 1281 (2003).
14. S. G. Lee, S.-S. Choi, W. H. Park, and D. Cho, *Macromol. Symp.*, **197**, 89 (2003).
15. K. C. M. Nair, S. Thomas, and G. Groeninckx, *Comp. Sci. Tech.*, **61**, 2519 (2001).
16. M. Zampaloni, F. Pourboghrat, S. A. Yankovich, B. N. Rodger, J. Moore, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and M. Misra, *Comp.: Part A*, **38**, 1569 (2007).
17. S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, *Comp., Part A*, **35**, 371 (2004).
18. Y. H. Han, S. O. Han, D. Cho, and H. Kim, *Comp. Interfaces*, **14**, 559 (2007).
19. S. M. Lee, D. Cho, W. H. Park, S. G. Lee, S. O. Han, and L. T. Drzal, *Comp. Sci. Tech.*, **65**, 647 (2005).
20. S. M. Lee, S. O. Han, D. Cho, W. H. Park, and S. G. Lee, *Polym. Polym. Comp.*, **13**, 479 (2005).
21. B. Y. Chu, M. Y. Kwon, S. G. Lee, D. Cho, W. H. Park, and S. O. Han, *Adhesion and Interface*, **5**(4), 9 (2004).
22. H. S. Ha, D. G. Kim, D. Cho, and B. I. Yoon, *한국복합재료학회지*, **6**(2), 1 (1993).
23. D. Cho, Y. S. Ahn, and J. Y. Lee, *J. Appl. Polym. Sci.*, **85**, 183 (2002).