

## 재활용 횟수에 따른 폴리프로필렌 및 탄소섬유 강화 PP 복합재료의 물성 변화 관찰

권동준\* · 왕작가\* · 이태웅\* · 박종만\*†

### Investigation of Mechanical Property of Polypropylene and CF/PP Composites with Number of Recycle

Dong-Jun Kwon\*, Zuo-Jia Wang\*, Tea-Ung Lee\*, Joung-Man Park\*†

**ABSTRACT:** Carbon fiber (CF) reinforced polypropylene (PP) composite was increased to amount consumed. In this study, recycle of composites by recycle times. CF was containing 20%. Mechanical and interfacial properties of CF/PP were evaluated for number of recycle time. Mechanical assessment of CF/PP was tension, bending, fatigue tension test and Izod test method. Interfacial assessment of CF/PP was wettability test and FE-SEM of fracture surface method. Fiber and matrix were changed to recycle time. The more recycle of CF/PP, the more interfacial bonding was decreased. Because fiber and matrix were damaged to thermal damage. And then reinforced CF was shorter than original shape.

**초 록:** 탄소섬유(CF) 강화 폴리프로필렌(PP) 복합재료의 수요는 증가되고 있다. 본 연구에서는 재활용 횟수에 따라 변화되는 복합재료의 물성 변화를 관찰하였다. CF 함량을 20% 함량으로 조성한 복합재료에 대해서 재활용 횟수에 따른 기계적 물성 평가를 진행하였다. 인장, 굴곡, Izod 동적 피로 실험에 따른 영향을 확인하였다. CF/PP 복합재료의 계면 물성을 평가하기 위해 젖음성 평가와 파단면을 FE-SEM으로 확인하였다. 재활용 횟수에 따라 섬유와 기지는 변화된다. CF/PP 복합재료는 재활용 할수록 섬유와 기지간의 계면에 열 데미지와 분쇄 과정에 의한 결합력 감소가 확인하였다.

**Key Words:** 재활용(recycle), 복합재료(composite materials), 폴리프로필렌(polypropylene), 결정성(crystallinity)

## 1. 서 론

고분자 재료들 중에 가장 일반적으로 사용되는 재료는 당연히 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)이다. 내화학성이 우수하고, 기계적 강도도 있으며, 내구성이 열가소성 고분자 재료 중에 높은 편이고 단가와 가공이 용이하다는 점 때문에 사용량이 높은 소재이다[1]. 복합재료에 대한 사용처가 항공기용 소재 뿐만 아니라 차량용 소재에도 사용될 수 있기 때문에, PP를 기지로 이용한 섬유강화 복합재료에

대한 개발이 크게 발달되었다. PP 소재는 기지재료로 활용하기에 가장 적합한 소재라 할 수 있다[2]. 차량용 복합재료 소재를 제조할 때 강도 역시 중요하지만 가장 큰 핵심은 생산속도이다. 제조 속도를 빠르게 할 수 있는 소재는 PP를 이용하는 것이다. 또 PP 기지를 이용할 경우 가장 큰 장점은 재활용이 가능하다는 것이다. 기존의 열경화성 섬유강화 복합재료의 경우 거의 대부분 재활용 처리 과정이 몇 단계 존재한다. 하지만 PP 재료는 녹는점이 170°C이기 때문에 섬유가 내부에 존재한다고 하여도 열을 가하면 PP를

Received 27 June 2013, received in revised form 9 October 2013, accepted 18 October 2013

\*경상대학교 나노·신소재공학부 대학원

\*†경상대학교 나노·신소재공학부, 공학연구원, Corresponding author (E-mail: jmpark@gnu.ac.kr)

녹여서 다시 새로운 성형이 가능하기 때문에, 열가소성 복합재료에 대한 장점으로 존재한다[3].

하지만 단점이 존재한다. 섬유강화 복합재료에 있어서 가장 중요한 부분은 바로 강화재와 기지간의 계면 물성이다[4]. 강도적인 부분에 있어서 섬유를 강화재로 활용함으로써 단순히 기계적 강도만 증가된다. 단순한 기계적 강도는 여러 반복 하중에 의해 손상을 당하기 쉽다. 이러한 조성에 의해 문제가 되는 것은 강화재가 기지에서 미끄러짐 현상이 발생되기 때문이다. PP는 내화학성이 우수하여 강화재와 계면을 이룰 때 강한 화학적 반응이 발생되지 못하는 단점이 있다. 열가소성 섬유강화 복합재료를 제조할 경우 PP의 성형성을 강점으로 하면서 단점인 계면 물성을 강화하기 위해서 폴리아미드(Polyamide, PA) 소재를 이용해서 계면 상태를 보강하기도 한다[5].

열가소성 복합재료에 대한 차량용 소재로 적용하기 위해서 많은 소재적, 성형적 개발을 시도하였다. 이런 부분에서 발생하는 소재는 매우 많이 활용 불가능의 상태로 만들어지게 된다[6]. 일반적으로 사출성형을 시도할 경우 1시간 정도 성형을 지속하게 되면, 사출 노즐 부분에서 급형으로 삽입되지 못한 CF/PP 입자들이 부산물로 발생될 경우도 존재한다. 이렇게 발생하는 부산물들에 대해서는 새로운 활용을 시도하는 것이 용이한 편이다. 왜냐하면 PP는 저렴하지만, CF는 단가가 높은 소재이며, 내열성이 높은 소재이기 때문에 재 성형을 시도하여도 적정 물성을 유지하기 때문이다. 또한 복합재료에 대한 재활용을 시도하는 것 역시 환경 친화적인 부분에 대해서 개발을 필요로 하기 때문이다[7].

본 연구를 통해서 열가소성 섬유강화 복합재료에 재활용에 대한 연구를 진행하였다. 열가소성 섬유강화 복합재료에 대한 재활용 횟수에 따라 변화되는 재료의 물성을 인장, 굴곡, Izod, 동적 피로 실험을 통해 확인하였다. 또한 섬유/기지간 계면 상태에 대한 변화를 젖음성 평가와 FE-SEM을 이용한 파단면 관찰 결과를 통해 관찰하였다. 처음 1회 성형은 CF 20%/PP 조성으로 열가소성 섬유강화 복합재료를 사출 성형하였으며, 2, 3, 4회는 사출성형하였던 시편을 분쇄하고 핫플레이트를 이용하여 시편 성형을 시도하였다. 열가소성 섬유강화 복합재료에 대한 물성 비교를 하기 위해 PP 기지 자체의 변화도 동일한 조건으로 관찰하였다. 재활용 횟수에 따라 변화되는 물성변화에 대해 DSC 촬영을 진행하였다. 재료의 결정성 변화를 분석하여 복합재료의 재활용 횟수에 따른 소재 물성 변화 이유를 확인하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

본 실험을 진행하기 위해 기지 재료로 PP(HP908, (주)현대EP, 한국)를 사용하였다. 또한 탄소섬유가 20% 함유된 PP

펠렛(C-LFP 20%, (주)현대EP, 한국)를 이용하여 시편을 제조하였다. 시편 제조는 C-LEP 펠렛을 사출기에 넣어 시편을 성형하는 방법을 이용하였으며, 이후 시편에 대한 재활용 평가를 위해 시편을 2 × 2 cm 간격으로 분쇄하여 핫플레이트를 이용하여 재활용 시편을 제조하였다.

### 2.2 기계적 물성 평가

기계적 물성을 평가하기 위해 인장실험을 하였다. UTM(LR 10 K, Lloyd 사, 영국)을 이용하고, 실험의 기준은 ASTM D638을 기준으로 하였다. 인장 실험 이후 시편의 파단면을 FE-SEM을 통해 확인하여, 재활용에 따른 재료의 물성 저하에 대한 분석을 시도하였다. 두 번째로 아이조드 충격 실험을 하였다. 해머의 에너지는 6.8 J이며 3.5 m/s의 속도로 운동하였다. 시편 규격은 63 × 12.7 × 3 mm로 설정하였다. 실험 기준은 ASTM D256을 참조하였다. 세 번째 실험 방법은 ASTM D790 규격을 바탕으로 굴곡 실험을 진행하였다. 모든 기계적 물성 평가 결과는 5개의 시편을 통한 결과의 평균으로 확인하였다[8,9].

마지막으로 동적 피로 실험을 진행하였다. 1 mm/min의 속도로 재료별 최대 신율의 절반의 길이는 동적 피로 움직임 간격으로 설정하였다. 재료별 10회의 피로 실험을 진행하였다. 재료별 내구성 수준을 평가하기 위해 초기 응력 대비 10회 실험 후 응력을 비교하여 응력 감소율을 측정하여 재활용 횟수에 따른 재료의 물성 변화를 관찰하였다[10].

### 2.3 재활용 횟수에 따른 결정성 변화 및 표면 변화 평가

재활용 횟수에 따라 PP 및 CF/PP의 물성은 기존에 비해 달라지는 경향을 확인하였다. 이러한 점을 분석하기 위하여 열가소성 기지의 재활용에 따른 결정성 변화를 관찰하였다. 결정성 평가를 진행하기 위해 DSC(Q200, TA Instrument, U.S.A)를 활용하였다. 10°C/min 속도로 승온을 하여 30~200°C 온도 범위를 2회 반복하여 재료를 열분석하였다. 온도 변화에 따라 발생하는 재료의 melting enthalpy를 분석하여 결정성 평가를 시도하였다. 결정성을 평가하는 식은 다음과 같다[11].

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{W_p \Delta H_m^0} \quad (1)$$

$\chi_c$ 는 섬유강화 복합재료의 결정성을 의미한다.  $\Delta H_m$ 는 복합재료에 대한 melting enthalpy를 의미하며,  $\Delta H_m^0$ 는 PP 고분자에 대한 melting enthalpy (209 J/g)를 나타낸다.  $W_p$ 는 고분자 복합재료 전체에 대해 고분자가 차지하고 있는 무게 비율을 의미한다.

표면 상태 분석을 위해서 접촉각 측정을 시도하였다. 재활용 횟수에 의해 재료의 변형은 발생될 수 있으며, 그에 따른 상태를 확인하는 방법이 접촉각 측정이기 때문이다. 젖음성 평가를 기본으로 하는 원리는 Young's 식을 바탕으로

물과 시편간의 각도를 확인하였다[12].

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 재활용 횟수에 따른 PP 및 CF/PP의 기계적 물성 평가

Fig. 1은 재활용 횟수에 따라 인장 실험을 진행한 재료에 대한 결과를 정리한 그림이다. CF/PP와 같은 경우 초기 상태에 비해서 몇 차례 재활용 실험을 할 경우 인장 강도와 신율이 동시에 감소되는 경향을 확인 할 수 있었다. 하지만 PP 소재의 경우 재활용을 할 경우 인장 강도는 증가되나, 신율은 감소하게 되는 경향을 확인 할 수 있다. PP 소재의 경우 재활용에 따라 열적 데미지를 받게 된다. 고분자적 이론에 의해 고분자 사슬의 배열 정도가 증가되어 결정성이 증가된다. 이는 PP 자체의 재활용은 인장 강도 증가의 결과를 얻었지만, 다수의 열처리 과정에 의해 기존 PP가 보유한 프

리블룸은 최소화되며, 사슬간의 결합 강도는 저하하게 되기 때문에, 재활용 횟수의 증가에 따라 신율이 감소하게 된다. 하지만 CF/PP는 재활용함에 따라 기계적 강도의 증가보다 저하가 발생된다. 이러한 점은 최초 단계에 사출 작업을 하고 재활용을 위해서 다시 시편 제조를 핫플레이트로 할 경우 CF/PP 내부에 섬유는 손상을 받게 된다. 이런 점에 의해서 섬유의 길이 감소, 열적 데미지에 의한 강화재 부분 손상을 유발하게 된다.

Fig. 2는 재활용 시편에 따른 파단면에 대해서 분석한 결과이다. 재료자체의 변화를 확인해 볼 수 있는데, PP 재료는 연신이 좋은 재료이 이기 때문에 파단면의 상태를 Fig.

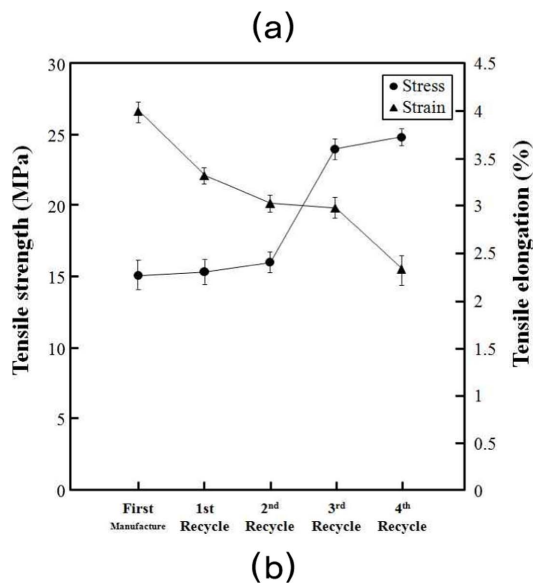
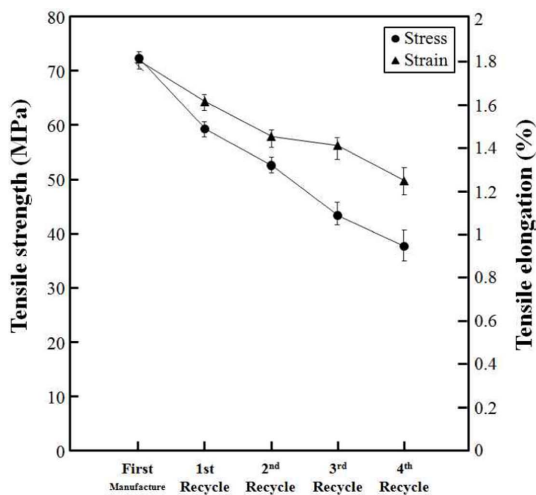


Fig. 1. Tensile test of CF/PP, PP with number of recycle; (a) CF/PP, (b) PP

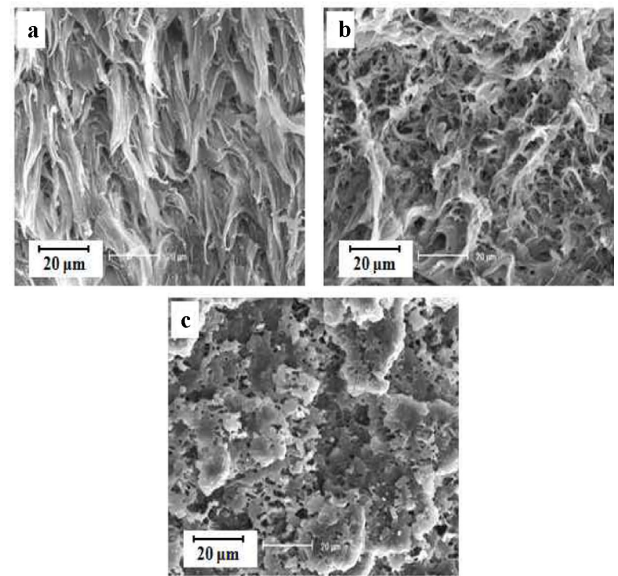


Fig. 2. FE-SEM of fracture surface of PP with number of recycle; (a) 1<sup>st</sup> manufacture, (b) 3<sup>rd</sup> recycle (c) 4<sup>th</sup> recycle

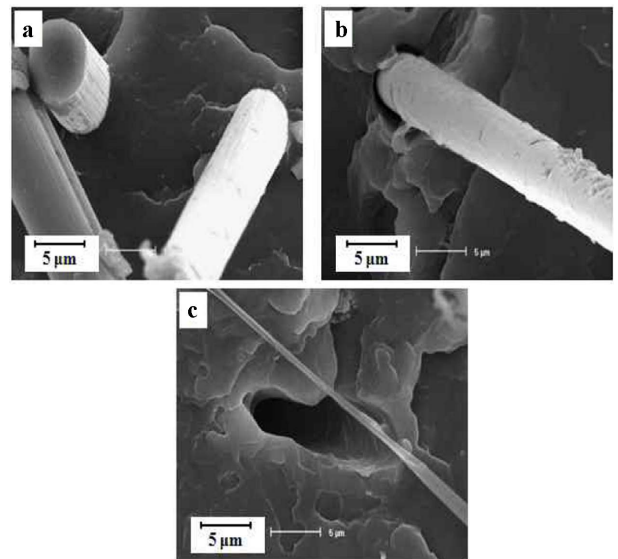


Fig. 3. FE-SEM of fracture surface of CF/PP with number of recycle; (a) 1<sup>st</sup> manufacture, (b) 3<sup>rd</sup> recycle (c) 4<sup>th</sup> recycle

2(a)의 결과를 통해 볼 수 있듯이 파단면에 PP 재료들이 최대 연신을 통해 늘어진 상태를 확인할 수 있다. 이후 재활용 횟수에 따라 서서히 연신되는 단계가 떨어지는 경향을 분석할 수 있었다.

Fig. 3은 CF/PP의 재활용 횟수에 따른 경향을 나타낸다. FE-SEM 결과를 통해 확인할 수 있는 점은 계면 상태와 섬유와의 변화이다. 재활용 횟수의 증가에 따라 섬유의 직경은 소폭 감소되었다. 또한 재활용을 많이 할수록 PP 기지는 동일재료간의 응집력이 더 증가되기 때문에 섬유를 잡아주는 힘이 감소하게 된다. 이러한 문제로 인장 시편의 파단면에 섬유가 존재하기 보다는 섬유가 빠진 상태를 쉽게 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 CF/PP와 PP에 대한 Bending 실험 결과를 나타낸

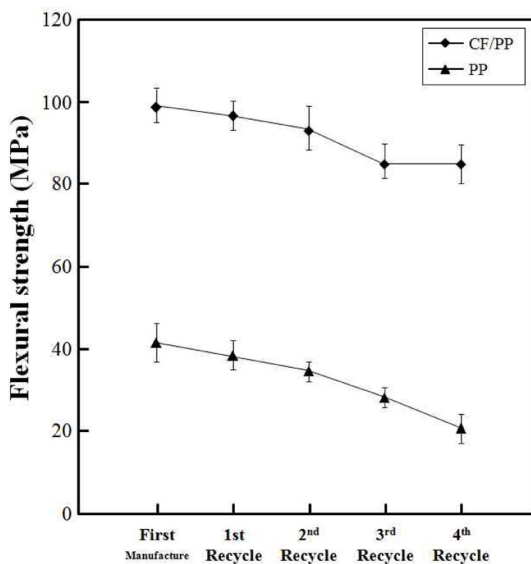


Fig. 4. Bending test of CF/PP, PP with number of recycle

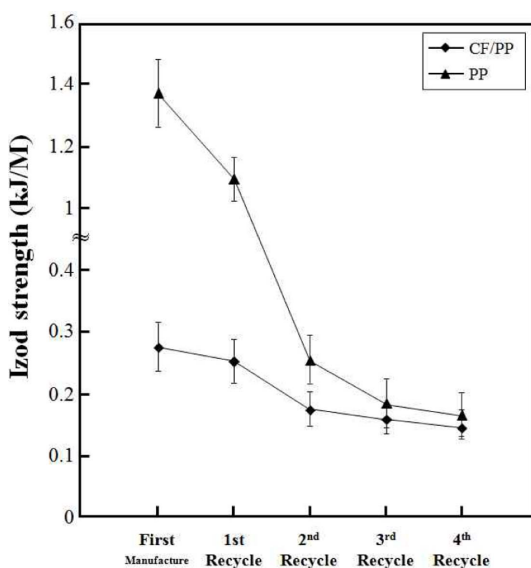


Fig. 5. Izod test of CF/PP, PP with number of recycle

다. 이 결과를 통해 확인할 수 있는 점은 재활용 횟수에 따라 굴곡 강도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 CF/PP의 경우 2차 재활용을 하고난 상태까지는 물성은 소폭 감소되었다. 하지만 3차 재활용부터 물성이 큰 폭으로 감소되는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 비해 PP 재료는 지속적으로 굴곡강도가 저하되는 것을 확인하였다. 이런 차이는 CF/PP가 가지는 섬유 강화재의 영향이다. 섬유의 존재 여부가 재활용에 따른 물성저하 현상을 지연시키는 것이다.

Fig. 5는 Izod 실험 결과에 대해서 재료별로 정리한 것이다. 물성에 대한 결과는 PP 재료 같은 경우 재활용 횟수에 따라 물성 저하 정도가 매우 크게 발생하는 것을 확인하였다. PP 재료는 내충격성이 강한 소재였으나, 2회차 재활용의 경우부터 충격 강도가 크게 감소되어 CF/PP 재료와 유사한 강도가 되었다. CF/PP 소재의 경우 역시 강도 저하는 2차 재활용 시편부터 물성저하가 크게 발생되었다. 하지만 이후 재활용 횟수 증가에 따라 물성이 소폭으로 저하되었다.

Fig. 6은 동적 피로 실험을 진행한 결과를 바탕으로 재료의 초기 최대 응력치 대비 10회 피로 실험 시 최대 응력치를 비교하여 물성 감소율을 비교한 결과이다. 결과를 비교하여 볼 경우 PP의 경우 재료의 물성 저하 경향은 재활용 횟수에 따라 지속적으로 물성 저하가 발생되었다. 하지만 CF/PP 재료의 경우 초기 단계에서 안정적인 물성 저하 상태를 확인하였다. 약 4% 내외로 피로 실험에 의해 물성이 저하되었다. 하지만 3회 재활용 시편의 경우 물성 저하가 크게 발생되었고 4회 재활용 상태는 약 18%의 물성 저하를 확인하였다. PP 재료 대비 CF/PP의 물성 저하 경향은 매우 크게 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 문제는 CF/PP의 내부 섬유와 기지간의 계면 미결합에 의한 영향으로 예상된다. 2회 재활용까지는 CF/PP의 상태가 비교적 안정적

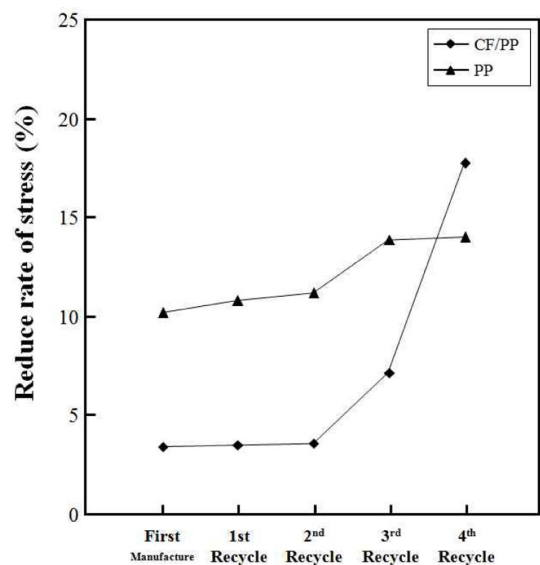


Fig. 6. Reduce rate of stress of CF/PP, PP with number of recycle after Fatigue test



으로 물성을 유지할 계면 상태를 유지하고 있으나, 3회 재활용 상태는 섬유와 기지간의 계면 미끄럼의 발생으로 유발된 경향이다. 이러한 경향에 대한 상태는 Fig. 3의 결과를 통해 확인할 수 있다. 3회 재활용 경우부터 파단면에서 섬유와 기지간의 계면 사이가 벌어지는 경향을 확인할 수 있다.

기계적 물성 평가를 통해 초기 대비 물성 감소율은 CF/PP가 PP에 비해 비교적 안정적이다. 이는 섬유의 영향이다. 섬유의 존재는 재활용에 따른 물성 감소를 줄일 수는 있지만, 초기 물성을 유지할 수는 없었다.

### 3.2 재활용 횟수에 따른 PP 및 CF/PP의 결정성 분석

Fig. 7은 DSC 촬영을 통해 확인한 재활용 횟수에 따른 CF/PP 및 PP 소재의 결정성을 계산한 결과이다. 이 결과를 통해 확인할 수 있는 점은 PP소재의 결정성 변화이다. Fig. 2 결과를 통해 확인할 수 있듯이, PP 소재의 변화는 명확하게 확인된다. 초기 약 30%의 결정성이었던 PP 소재가 약 40%의 결정성을 나타내는 경향을 바탕으로, 파단면의 경향을 설명할 수 있다. CF/PP 재료의 경우 초기 재활용 횟수에 따라 비교적 안정적이었던 기계적 물성 결과와 유사하다. 초기 상태는 약 50%의 결정성을 유지하고 있다. 하지만 재활용 횟수가 증가됨에 따라 약 43% 정도로 결정성이 감소되었다. 이러한 점을 바탕으로 섬유와 기지간의 계면에 문제가 있음을 말할 수 있다. 재료자체의 변형으로 PP 기지는 결정성이 증가된다. 하지만 섬유 강화 재료는 오히려 감소된다. 이러한 점이 CF/PP에 존재하고 있는 CF에 의한 영향이며, CF의 섬유 소형화 현상과 잦은 열 처리 공정에 의한 손상으로 CF/PP 자체의 물성 변화를 저하시킨 것이다.

Fig. 8은 재활용 횟수에 따라 달라지는 CF/PP와 PP 소재에 대한 표면 물성 변화를 젖음성 평가로 확인한 결과이다. 이 결과를 통해 확인할 수 있는 점은 표면의 변화가 Fig.

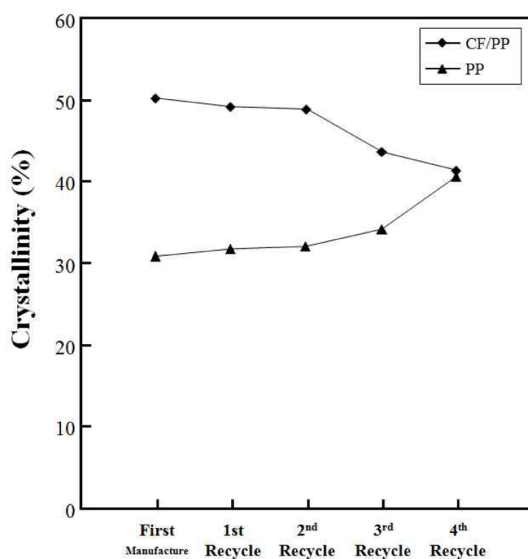


Fig. 7. Crystallinity of CF/PP, PP with number of recycle

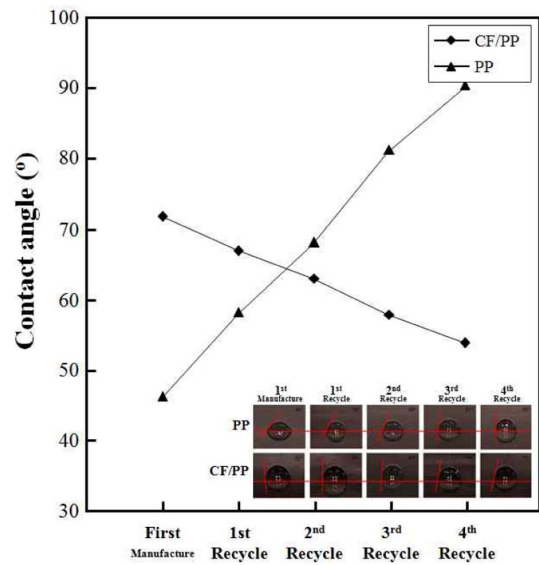


Fig. 8. Model of CF/PP, PP with number of recycle

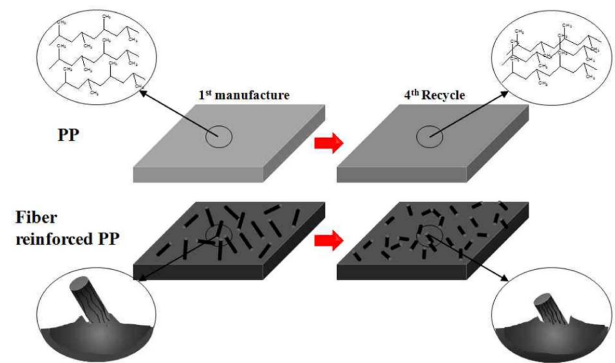


Fig. 9. Contact angle results of CF/PP, PP with number of recycle

7에서 평가한 결정성 결과와 유사하다는 점이다.

Fig. 9는 재활용 함에 따라 변화되는 재료의 상태를 나타내는 모델이다. 젖음성 평가 결과와 비교하여 설명하면, CF/PP 소재의 경우 재료 자체의 변화는 젖음성이 재활용 횟수의 증가에 따라 서서히 감소한다. 이는 섬유와 기지가 이루는 계면 상태의 결합력이 감소하면서 표면의 응집력이 감소되었기 때문이다. 하지만 PP 소재의 경우 매우 큰 폭으로 표면 상태가 변화되는 결과를 확인할 수 있다. 초기 상태에 비해 재활용 횟수의 증가에 따라 PP 재료를 이루고 있는 사슬들의 응집이 더 크게 증가되어 발생하는 결과이다. 재료자체의 강직도가 향상되고 있다는 것을 의미한다.

## 4. 결 론

본 연구를 통하여 재활용 횟수에 따른 열가소성 복합재료에 대한 기계적 물성 변화를 관찰하였다. 재료는 가장 일반적으로 사용되는 PP 소재와 CF/PP 소재를 가지고 재활용 횟수에 따른 물성 변화를 관찰하였다. 기계적 물성 평가

는 인장, 굴곡, Izod, 동적 피로 실험에 따른 경향을 분석하였다. 재활용 횟수의 증가에 따라 기계적 물성 저하를 관찰하였다. PP 단일 소재일 경우 보다 CF를 활용하였을 경우 재활용에 따른 물성 저하 정도가 적었다. 재료의 물성 저하 원인을 규명하기 위해 DSC를 이용한 결정성 분석과 접촉 각 실험을 통한 표면 분석을 시도하였다. PP 재료는 여러 차례의 재활용처리에 의해 열 가공에 의한 결정성 강화로 강직성을 보유한다는 점을 확인하였다. CF/PP의 경우 재활용 횟수에 따라, 성형 과정에서 강화재의 길이 감소 및 손상을 받게 되고, 열 처리 가공에 의한 손상과 함께 PP 기지의 동일 재료간 응집력 강화와 섬유와 기지간의 계면 결합력이 약해짐을 확인하였다. 궁극적으로 여러 횟수의 재활용 처리는 재료 본연의 물성 저하를 발생된다. 따라서 열가 고성 복합재료를 좀더 효율적으로 재활용하기 위해서 강화재의 손상을 최소화 하는 범위에서, PP 기지와와의 계면 강도 유지 및 강화를 목적으로 추가적인 보강재가 필요함을 예측할 수 있다.

## 후 기

이 연구는 경상대학교 공학연구원의 지원을 받아 수행 하였습니다. 본 연구자 중 권동준은 2단계 BK21의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Akonda, M.H., Lawence, C.A., and Weager, B.M., "Recycled Carbon Fibre-Reinforced Polypropylene Thermoplastic Composites," *Composites: Part A*, Vol. 43, 2012, pp. 79-86.
- 2) James, M., Sophie, C.C., Ed, C., Sam, C., Stewart, A., Jon, L., Stuart, R.C., Benjamin, M.W., and Kerry, K., "Recycled Carbon Fibre for High Performance Energy Absorption," *Composites Science and Technology*, Vol. 72, 2012, pp. 688-695.
3. Jun, Y., and Katsuyoshi, I., "Sheet Forming Process of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Lightweight Parts," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 61, 2012, pp. 247-250.
4. Varga, J., and Karger-Kocsis, J., "Interfacial Morphologies in Carbon Fibre-Reinforced Polypropylene Microcomposites," *Polymer*, Vol. 36, No. 25, 1995, pp. 4877-4881.
5. McDonnell, P., McGarvey, K.P., Rochford, L., and Brdáigh, C.M.Ó., "Processing and Mechanical Properties Evaluation of a Commingled Carbon-Fibre/PA-12 Composite," *Composites Part A*, Vol. 32, 2001, pp. 925-932.
6. Soraia, P., and Silvestre, T.P., "Recycling Carbon Fibre Reinforced Polymers for Structural Applications: Technology Review and Market Outlook," *Waste Management*, Vol. 31, 2011, pp. 378-392.
7. Park, J.M., Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., and DeVires, K.L., "Effect of Thermal Treatment Temperatures on the Reinforcing and Interfacial Properties of Recycled Carbon Fiber-Phenolic Composites," *Composites: Part A*, Vol. 47, 2013, pp. 156-164.
8. Rajkiran, R.T., and Paul, D.R., "Polypropylene-Elastomer (TPO) Nanocomposites: 2. Room Temperature Izod Impact Strength and Tensile Properties," *Polymer*, Vol. 52, 2011, pp. 5595-5605.
9. Nunes, L.C.S., Dias, F.W.R., and Mattos, H.S.C., "Mechanical Behavior of Polytetrafluoroethylene in Tensile Loading Under Different Strain Rates," *Polymer testing*, Vol. 30, 2011, pp. 791-796.
10. Park, J.M., Kwon, D.J., Wang, Z.J., Gu, G.Y., and DeVires, K.L., "Interfacial Properties and Self-Sensing of Single Carbon Fiber Reinforced CNT-Phenolic Nanocomposites Using Electro-Micromechanical and Wettability Tests," *Composites: Part B*, Vol. 43, 2012, pp. 1171-1177.
11. Roh, J.U, Ma, S.W., Lee, W.I., Hahn, H.T., and Lee, D.W., "Electrical and Mechanical Properties of Graphite/Maleic Anhydride Grafted Polypropylene Nanocomposites," *Composites: Part B*, Vol. 45, 2013, pp. 1548-1553.
12. Wang, Z.J., Kong, J., Lee, W.I., Park, J.G., and Park, J.M., "Interfacial Properties of Gradient Specimen of CNT-Epoxy Nanocomposites using Micromechanical Technique and Wettability," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 5, 2009, pp. 8-14.