

어트리션 밀과 DMF 용매를 이용한 폐 인쇄회로기판에서 분리된 재생 유리섬유의 재활용

김종석[†] · 이재천* · 정진기*

전북대학교 화학공학부
561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14
*한국지질자원연구원 광물자원연구본부
305-350 대전시 유성구 가정동 30
(2012년 4월 29일 접수, 2012년 7월 9일 채택)

Recycling of Separate Glass Fiber from Waste Printed Circuit Boards Using Attrition Mill and DMF

Jong Seok Kim[†], Jae-Cheon Lee* and Jin Ki Jeong*

School of Chemical Engineering, Chonbuk National University, 664-14 1 Ga, Duckjin-dong, Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea
*Mineral Resource Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea
(Received 29 April 2012; accepted 9 July 2012)

요 약

폐 전자제품의 양이 지속적으로 증가하므로 폐 인쇄회로기판(WPCBs: waste printed circuit boards)의 재활용에서 금속과 유리섬유 및 에폭시 수지를 분리하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 WPCBs로부터 금속과 유리섬유 및 에폭시 수지를 분리하기 위해 dimethylformamide 용매와 어트리션 밀 반응기를 사용하였다. WPCBs에서 유리섬유의 분리는 다양한 교반기를 이용하여 교반속도를 300~600 rpm에서 반응시간을 1~2 h에서 반응을 수행하였다. WPCBs에서 에폭시 수지의 분리도를 재생 유리섬유의 열 중량 분석을 통해 분석하였으며 기계화학적 방법인 어트리션 밀 교반기에서 에폭시 수지의 분리도가 증가하였다. 재생 유리섬유를 보강제로 재활용하기 위하여 재생 유리섬유/숄포화 폴리에스테르 수지 복합재료로 적용하였다.

Abstract – In recent years, recycling process has come to be necessary for separating metals, glass fibers and polymer from WPCBs (waste printed circuit boards) due to an increasing amount of electronic device waste. In this study, dimethylformamide (DMF) and attrition mill reactor were used to separate the component such as metals, glass fiber and epoxy resin from WPCBs. Separation of glass fiber from WPCBs was carried out under stirring rates 300~600 revolution per minute (rpm) for 1~2 h as the various agitator. The recycled glass fibers (RGF) were analyzed by thermogravimetric analyzer (TGA) for degree of separation of epoxy resin in the WPCBs. The degree of separation of epoxy resin of WPCBs increased in attrition mill agitator as a mechanochemical process for recycling WPCBs. The RGF separated in the WPCBs was applied as a reinforcement in the RGF/unsaturated polyester composites to reuse as a reinforcement.

Key words: WPCBs, Attrition Mill, Glass Fiber, Recycling

1. 서 론

폐기되는 personal computer (PC)와 휴대폰의 잠재발생량은 각각 1999년도에 911천대와 15,860천대에서 2003년도에는 1,866천대와 16,619천대로 증가 추세에 있다[1,2]. PC와 휴대폰에서 PCB (printed circuit board)는 유리섬유/에폭시 수지 복합재료와 도체인 구리도선 및 폴리우레탄계 코팅제로 이루어져 있다[3]. 폐 PC와 폐 휴대폰에서 발생한 폐 인쇄회로기판(waste printed circuit boards; WPCBs)

의 재활용은 기계적 분쇄[4,5]와 열분해에[6,7] 의한 물리적 방법과 용매를 이용한 화학적 방법[8,9]이 있다. WPCBs의 기계적 분쇄에 의한 금속과 비금속의 분리는 효율이 매우 낮으며 금속성분의 분쇄 에너지가 클 뿐만 아니라 비금속성분에서 유리섬유 미립자들의 미세 먼지에 의해 작업환경이 열악해진다[4]. 따라서 이러한 단점을 개선하기 위한 방법으로 유기용매를 이용하여 WPCBs의 금속과 비금속성분을 분리하는 화학적 처리를 통한 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[10,11]. WPCBs를 분해하여 화학원료로 회수하는 방법으로 초임계 유체를 이용한 해중합[12] 및 수소화 분해[13] 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 WPCBs를 구성하는 고

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: js-kim@jbnu.ac.kr

분자 복합재료에서 고분자 수지와 유리섬유로 분리한 후 생성된 재생 유리섬유를 처리하는 문제점이 발생한다[14]. 재생 유리섬유는 원재료인 유리섬유보다 기계적 물성이 감소하고 유리섬유의 화학적인 분해시간이 장시간 필요하다는 점과 금속과 고분자수지에 비해 부피가 커 이를 처리하는데 한계가 있다[15].

본 연구에서는 WPCBs에 있는 금속을 얻기 위해 금속에 접촉되어 있는 고분자 수지의 분리를 목적으로 극성용매인 dimethylformamide (DMF) 용매와 어트리션밀 반응기를 사용하여 반응조건의 변화를 통해 WPCBs에서 고분자 수지의 분리효율을 고찰하였다. 반응 후 WPCBs에서 분리된 재생 유리섬유의 처리가 WPCBs의 재활용에 문제점을 갖게 된다. 폐유리섬유의 처리방법 중 매립에 의한 방법이 있으나 다른 소재에 비해 부피가 커 매립지의 부족사태가 발생할 수 있다. 따라서 재생 유리섬유의 재활용법 중 효과적인 방법은 소재로 사용하는 방법이다[16]. 유기용매와 어트리션밀 반응기로 처리한 WPCBs에서 분리된 재생 유리섬유를 재활용하는 방법으로 재생 유리섬유를 보강재로 사용하여 불포화폴리에스테르수지를 기재로 한 복합재료를 제조하여 재활용성에 대한 연구도 수행하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

WPCBs는 3년 이상 사용한 후 폐기된 인쇄회로기판을 shredding mill을 이용하여 길이가 20×20 mm 이하의 크기로 자른 후 두께가 2 mm 이하로 선별한 다음 표면에 있는 먼지 등의 불순물을 제거하기 위해 비 이온화된 물을 이용하여 세척 후 80 °C에서 24시간 진공 건조하여 사용하였다. 유기용매는 Showa 사의 dimethylformamide (DMF)를 정제하지 않고 그대로 사용하였다. 불포화 폴리에스테르 수지(unsaturated polyester; UP)는 Cray Valley Korea 사의 G-650BY, 경화제로는 상온경화제인 methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO)를 사용하였다.

2-2. 실험방법

유기용매와 교반조건을 변화시켜 WPCBs의 화학적 처리방법을 다음과 같이 수행하였다. 냉각관이 달린 500 mL 반응기에서 반응온도가 150 °C에서 K₃PO₄를 첨가한 DMF 용액에서 WPCBs를 10 wt%로 첨가한 후 반응시간을 변화하여 반응기에서 마그네틱 바로 300 rpm으로 교반하였다. DMF 용매 500 mL에서 WPCBs를 20 wt%로 하고 용매의 온도를 150 °C로 유지한 다음 three-blade propeller 교반기와 어트리션 밀을 이용한 회분반응기에서 반응시간을 1~6 h으로 하였다. Fig. 1에 어트리션 밀을 이용한 회분식 반응기를 나타내었다. 반응기의 온도는 oil bath를 이용하여 150 °C로 유지하였고 냉각관을 설치하여 반응 중 발생하는 DMF의 증발을 제어하였다. DMF 용매에서 반응조건과 교반조건을 달리한 WPCBs에서 고분자 수지의 분리율과 분리된 유리섬유에 남아있는 고분자 수지를 정량하기 위해 열중량 분석기(thermogravimetric analyzer; TGA, TA instrument Q600)를 사용하였다. 각 시료를 100 °C에서 24시간 건조한 후 15 mg 채취하여, 질소분위기하에서 승온 속도를 20 °C/min으로 하여 상온에서 700 °C까지 무게감소량을 측정하였다. 유리섬유의 표면을 광학현미경(Nikon LV100D)과 주사 전자현미경(scanning electron microscope; SEM, Jeol JSM-6400)으로 분석하였다.

WPCBs에서 분리된 재생 유리섬유와 UP 복합재료는 상온에서

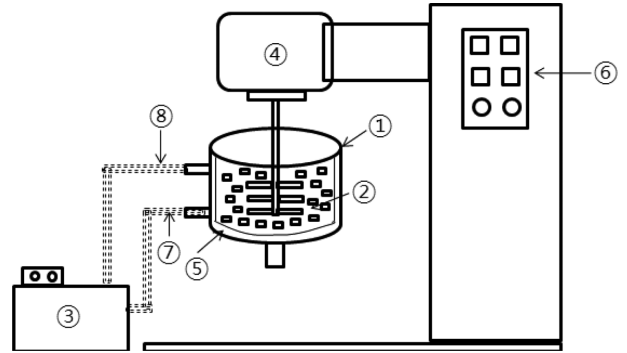


Fig. 1. Schematic diagram of attrition mill reactor.

- ① reactor
- ② impeller
- ③ oil bath and circulation pump
- ④ motor
- ⑤ oil jacket
- ⑥ controller
- ⑦ oil in
- ⑧ oil out

UP와 개시제인 MEKPO를 1% 혼합시킨 후, 테프론 성형 틀에서 상온에서 24시간, 60 °C에서 1시간 경화하여 제조하였다. 제조된 유리섬유/UP 복합재료의 굴곡강도와 굴곡 탄성률을 LLoyd사의 Universal Test Machine (UTM)을 이용하여 측정하였다. 굴곡강도 및 탄성률은 ASTM D790 방법으로 사용된 support span은 48 mm로 고정하였으며 support span과 시편두께의 비(L/d)는 약 16이 되도록 고정하였다. 측정에 사용된 load cell은 500 kg이었으며 crosshead 속도는 1 mm/min이었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 파쇄된 WPCBs와 DMF 용매 하에서 three-blade propeller (TBP) 교반기와 어트리션 밀 반응기를 사용하여 WPCBs로부터 분리된 재생 유리섬유를 나타내었다. TBP 교반기를 이용한 반응에서는 유리섬유에서 완전분리되지 않은 형태를 보였으나 어트리션 밀을 사용한 반응에서는 유리섬유가 거의 분리됨을 확인하였다. 반응에 의해 금속이 단체분리는 되지만 비금속 성분인 유리섬유 등과 혼합물로 존재하며, 선별공정을 통하여 유리섬유만을 분리하였다. DMF를 용매로 사용하여 TBP 교반기와 어트리션 밀 반응기에서 WPCBs로부터 얻은 유리섬유의 TGA 결과를 Fig. 3와 4에 나타내었다. TGA 결과에서 WPCBs의 에폭시 수지를 포함한 고분자 수지의 평균함량은 38%였다. 어트리션 밀에서 반응시간이 2시간에서 가장 작은 중량 감소량을 보였으며 이는 유리섬유표면에 고분자 수지의 분리효율이 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 WPCBs에서 금속의 단체분리와 유리섬유의 분리는 TBP에 의한 교반보다는 기계적 전단력이 증가한 어트리션 밀 반응기에서 유리섬유에서 에폭시 수지의 분리가 증가함을 확인할 수 있다. WPCBs에서 분리된 재생 유리섬유에서 남아있는 고분자 수지의 양을 아래와 같은 식 1)을 통하여 구하였다. 유기용매와 각 교반조건에 따라 유리섬유에 남아있는 고분자 수지함량을 Table 1에 나타내었다.

$$\text{반응 후 남아 있는 고분자 수지(\%)} = \frac{B}{A} \times 100 \quad (1)$$

A: WPCBs의 열중량 감소량(wt%)

B: 재생 유리섬유의 열중량 감소량 (wt%)



Fig. 2. Waste printed circuit boards (WPCBs) using shredding mill (left); resin, glass fiber and copper (middle) using the three-blade agitator, glass fiber (right) using the attrition mill in the DMF.

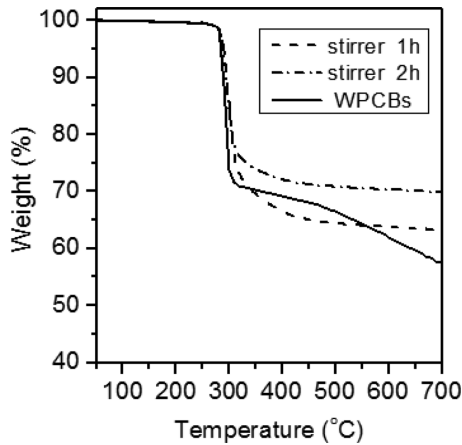


Fig. 3. Thermogravimetric analyzer (TGA) thermogram of glass fibers from WPCBs using DMF and three-blade agitator at 150 °C.

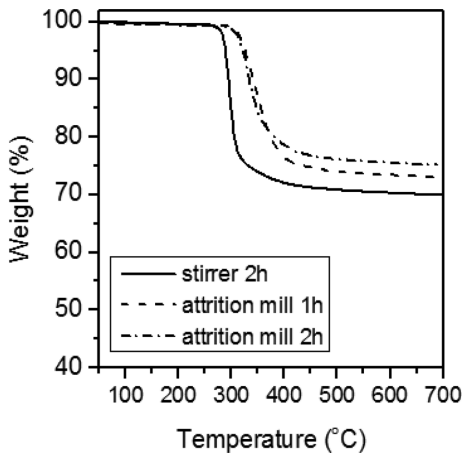


Fig. 4. Thermogravimetric analyzer (TGA) thermogram of glass fibers from WPCBs using DMF and attrition mill at 150 °C.

Table 1의 결과로부터 DMF 용매를 사용하여 마그네틱 바와 TBP 및 어트리션 밀을 이용한 반응 후 WPCBs로부터 에폭시 수지의 분리 기계적 전단력에 의한 물리적 힘이 증가할수록 분리가 증가함을 알 수 있다. 특히 어트리션 밀을 사용할 경우 TBP의 기계적 교반에 비해 수지의 용해율이 10% 가까이 증가하였다. 유리 섬유 표면에 남아있는 분리된 고분자 수지의 양을 확인하기 위해 메탄올용액에서 초음파세척을 하였다. 초음파 세척시간이 12시간에서 수지

Table 1. Residual Resins from WPCBs by TGA test

Chemical method	Weight at 600 °C by TGA (%)	Residual resins (%)	Stirring conditions
WPCBs	38.0	100.0	
DMF/K ₃ PO ₄ , 4h	33.9	89.2	300 rpm, magnetic bar
DMF, 1h	36.0	94.8	300 rpm, magnetic bar
DMF, 4h	29.5	77.6	300 rpm, magnetic bar
DMF, 1h	26.3	69.2	600 rpm, three-blade propeller
DMF, 2h	24.3	63.9	600 rpm, three-blade propeller
DMF, 1h	24.1	63.4	600 rpm, attrition mill
DMF, 2h	20.0	52.6	600 rpm, attrition mill

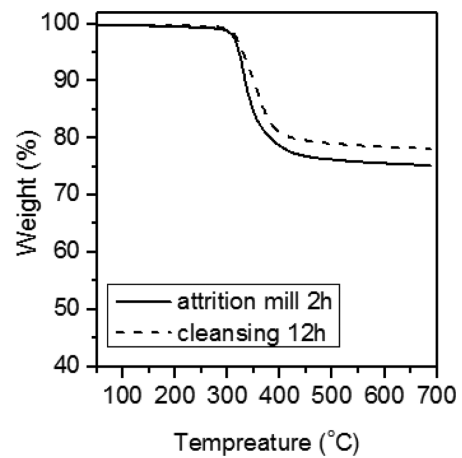


Fig. 5. Thermogravimetric analyzer (TGA) thermogram of glass fibers from WPCBs using DMF and attrition mill at 150 °C ultrasonic cleansing for 12 h (dot line).

의 중량이 12.6% 감소함을 Fig. 5의 TGA 분석 결과를 나타내었다. 이는 분리된 에폭시 수지가 유리섬유 표면에 물리적으로 부착되어 있음을 알 수 있다. 따라서 어트리션 밀을 통한 기계적 전단력의 증가는 유리섬유 표면에 있는 에폭시 수지의 분리효율을 증가시키는 것을 알 수 있다. 따라서 강산에 의한 유리섬유 보강 에폭시수지의 화학적 처리방법[9]에 비해 어트리션 밀을 사용한 물리화학적 방법이 처리시간을 크게 단축할 수 있으며 기존의 화학적 방법인 강산 처리로 인한 재생 유리섬유의 표면손상과 환경오염을 감소시킬 수 있다고 판단된다[17]. 광학현미경과 SEM을 사용하여 용해 후 분리된 유리섬유의 표면관찰 결과를 비교하였다. 유기용매와 용해방법

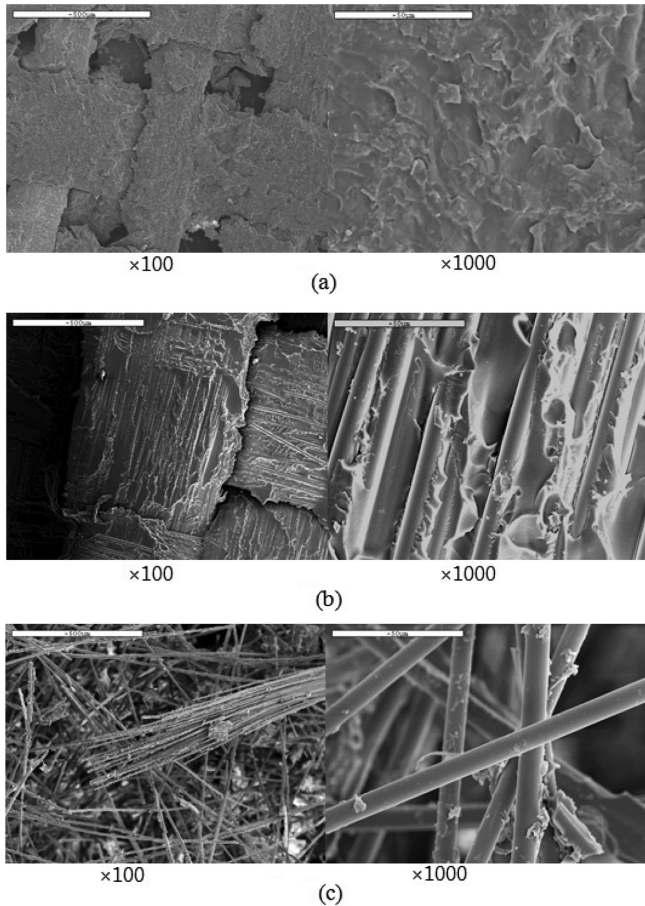


Fig. 6. SEM micrographs of glass fibers from WPCBs using K_3PO_4 /DMF solution and attrition mill/DMF: (a) DMF for 2 h, (b) K_3PO_4 /DMF for 2 h, (c) attrition mill and DMF for 2 h.

에 따른 SEM에서 유리섬유의 표면은 Fig. 6에 광학현미경 관찰 결과를 Fig. 7에 나타내었다. K_3PO_4 용액을 이용한 화학반응에서 WPCBs에서 고분자 수지와 유리섬유의 분리효율을 확인하였으며 K_3PO_4 용액과 DMF를 사용한 WPCBs로부터 유리섬유와 고분자 수지의 분리도는 매우 낮았으며 고분자 수지가 유리섬유위에 남아있음을 보였다. 어트리션 밀과 DMF 용매를 이용하여 분리된 유리섬유는 SEM에서 장섬유가 배열된 부직포형태로 배열된 유리섬유와 고분자 수지가 분리됨을 관찰하였다. Fig. 8은 재생 유리섬유를 보강한 불포화 폴리에스테르 복합재료를 광학현미경을 통하여 표면을

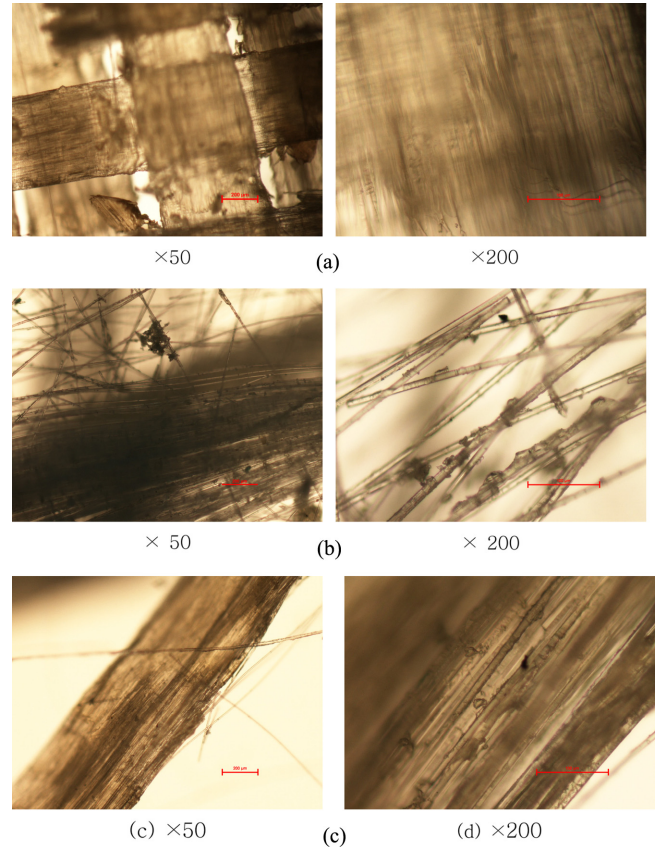


Fig. 7. Optical photographs of glass fibers from WPCBs using K_3PO_4 /DMF solution and attrition mill/DMF: (a) K_3PO_4 /DMF for 2 h, (b) attrition mill/DMF for 2 h, (c) after ultrasonic cleansing for 12 h.

관찰한 결과를 나타내었다. 어트리션 밀에 의한 반응시간이 1시간에서 2시간으로 증가됨에 따라 고분자 수지와 금속의 양이 감소하였으며 재생 유리섬유의 표면에 있는 금속과 고분자 수지가 침출된 결과를 보였다. 이는 재생 유리섬유 안에 미세한 입자로 존재한 금속 성분과 고분자 수지들이 불포화 폴리에스테르 수지의 침투에 의해 유리섬유 표면 밖으로 나온 것으로 판단된다. 재생 유리섬유의 초음파 세척을 통해 유리섬유매트에 있는 금속과 고분자 수지 고형물이 감소된 결과를 통해 어트리션 밀과 DMF 용매를 이용하여 분리된 재생 유리섬유 표면에 고분자 수지와 금속이 물리적으로 부착되었음을 확인하였다.

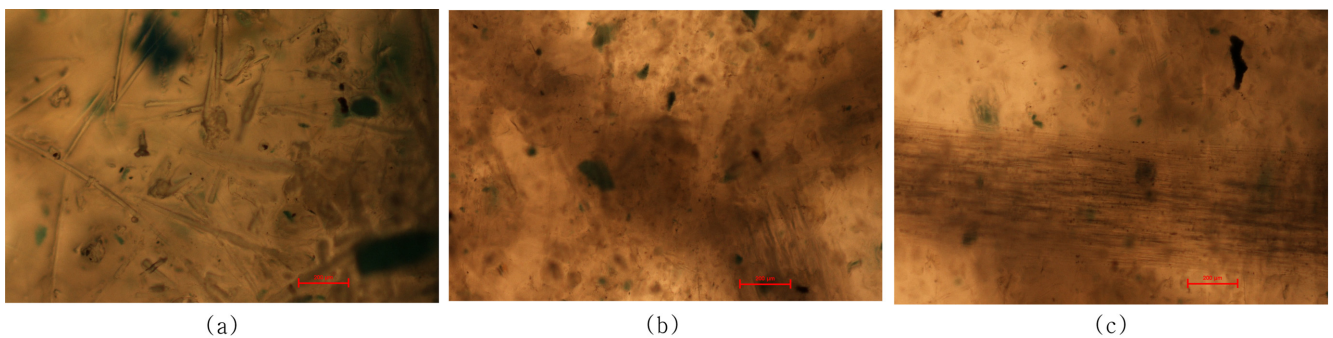


Fig. 8. Optical photographs of recycled glass fibers reinforced unsaturated polyester: (a) attrition mill for 1 h, (b) attrition mill for 2 h, (c) ultrasonic cleansing for 12 h (attrition mill for 2 h).

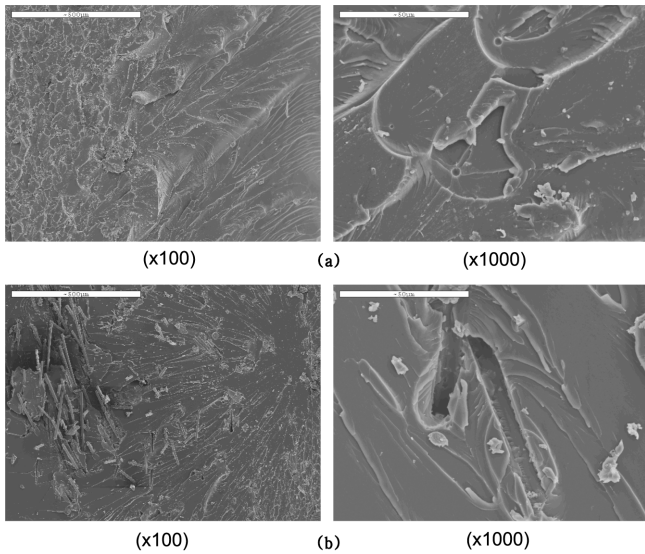


Fig. 9. SEM micrographs of recycled glass fiber reinforced unsaturated polyester after flexural test: (a) control, (b) 10 wt% recycled glass fiber.

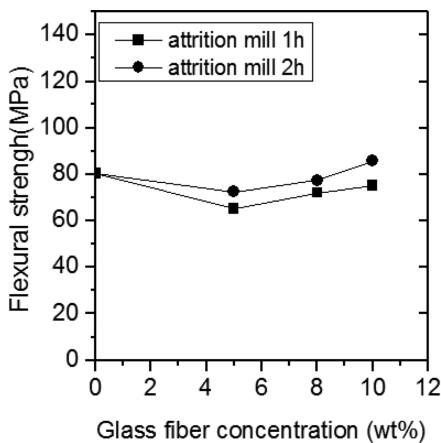


Fig. 10. Flexural strength of recycled glass fiber reinforced unsaturated polyester with recycled glass fiber content: (■) attrition mill for 1 h, (●) attrition mill for 2 h.

Fig. 9는 재생 유리섬유를 첨가한 불포화 폴리에스테르 복합재료의 굴곡강도 시험 후 파괴단면을 전자주사현미경으로 관찰한 결과이다. 재생 유리섬유의 양이 10 wt%인 불포화 폴리에스테르 수지 복합재료의 파괴단면에서 묻혀있는 재생 유리섬유의 파괴와 재생 유리섬유가 불포화 폴리에스테르 수지의 계면에서 떨어져나가는 현상을 관찰하였다[18]. Fig. 10과 11은 재생 유리섬유를 첨가한 불포화 폴리에스테르 복합재료의 굴곡강도와 굴곡탄성률을 나타냈다. 반응시간이 1시간에서 분리된 재생 유리섬유양이 증가함에 따라 유리섬유의 보강효과에 의한 굴곡강도는 불포화 폴리에스테르 기재의 굴곡강도와 유사한 값을 보였으나 반응시간이 2시간에서 재생 유리섬유의 함량이 10 wt%에서 굴곡강도가 6% 증가하였으며 굴곡탄성률이 33% 이상 증가함을 보였다. 열처리온도가 150 °C와 시간에 따라 단일 유리섬유의 인장강도는 변하지 않지만 유리섬유다발은 유리섬유간의 마찰효과에 의해 50% 이상 감소하였으며 유리섬유의 밀도가 증가하여 인장탄성률은 크게 변하지 않았다[19]. WPCBs의

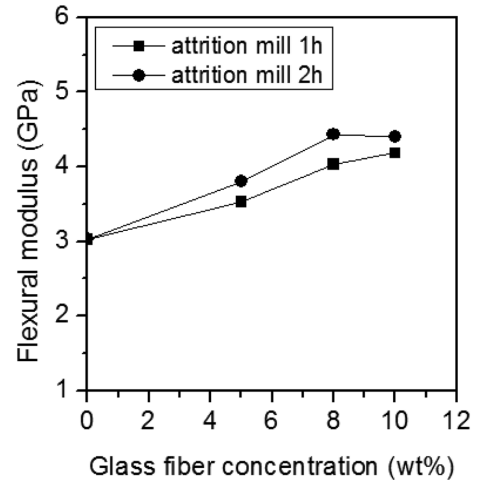


Fig. 11. Flexural modulus of recycled glass fiber reinforced unsaturated polyester with recycled glass fiber content: (■) attrition mill for 1 h, (●) attrition mill for 2 h.

반응온도를 150 °C로 하여 분리된 재생 유리섬유는 불포화 폴리에스테르 복합재료의 굴곡강도는 거의 변화가 없는 반면 굴곡 탄성률이 크게 증가한 것으로 판단된다. 어트리션 밀과 DMF에 의한 WPCBs에서 분리된 재생 유리섬유는 반응시간이 1시간에 비해 2시간에서 유리섬유와 고분자 수지의 분리도가 증가함에 따라 재생 유리섬유와 불포화 폴리에스테르 수지간의 계면에서 슬립이 감소하여 복합재료의 굴곡강도가 약간 증가하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통해서 극성용매인 DMF와 어트리션 밀을 이용한 방법을 통하여 폐 인쇄회로기판에서 금속과 고분자 수지 및 유리섬유의 분리가 가능함을 알 수 있었다. 기계적 교반조건과 DMF 용매를 사용한 반응에서 폐 인쇄회로기판에서 금속과 고분자 수지 및 유리섬유의 분리에서 어트리션 밀을 사용한 분리속도가 가장 빠르게 도달하였다. 반응시간이 2시간에서 폐 인쇄회로기판에서 분리된 유리섬유에 남아있는 고분자 수지의 함량의 결과에서 고분자 수지의 분리도는 어트리션 밀에서 TBP 교반기를 사용한 경우보다 고분자 수지의 분리도가 11.3% 증가하였다. DMF와 기계적 교반을 이용한 금속 및 고분자 수지 및 유리섬유의 분리는 기계적 전단력이 증가함에 따라 폐 인쇄회로기판을 구성하는 고분자 수지의 분리도가 증가함에 따라 금속과 유리섬유의 분리효율이 증가하였다. 폐 인쇄회로기판에 분리된 재생 유리섬유를 불포화 폴리에스테르 수지의 충전제로 하여 기계적 물성 결과에서 재생 유리섬유의 함량이 10 wt%에서 불포화 폴리에스테르 복합재료의 굴곡탄성률은 33% 이상 증가하였다. 이상의 결과로부터 폐 인쇄회로기판에서 분리된 재생 유리섬유를 고분자 수지의 충전제로 이용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Yoo, J. M., Jeong, J. K., Yoo, K. K., Lee, J. C. and Kim, W. B., "Enrichment of the Metallic Components from Waste Printed

- Circuit Boards by a Mechanical Separation Process Using a Stamp Mill;" *Wast. Manage.*, **29**, 1132(2009).
2. Lee, J. C., Song, H. T. and Yoo, J. M., "Present Status of the Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment in Korea;" *Resour. Conserv. Recycl.*, **50**, 380(2007).
 3. Kelly, E. J., "Base Material Components;" in *Printed Circuits Handbook*, C. F. Coombs, Editor, McGraw-Hill, New York, Vol **1**, Chap. 7(2008).
 4. Zang, S. and Forssberg, E., "Mechanical Separation-oriented Characterization of Electronic Scrap;" *Resour. Conserv. Recycl.*, **21**, 247(1997).
 5. Guo, J., Li, J., Rao, Q. and Xu, Z., "Phenolic Molding Compound Filled with Nonmetals of Waste PCBs;" *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 624(2008).
 6. Hall, W. J. and Williams, P. T., "Separation and Recovery of Materials from Scrap Printed Circuit Boards;" *Resour. Conserv. Recycl.*, **51**, 691(2007).
 7. Guo, J., Guo, Jie. and Xu, Z., "Recycling of Non-metallic Fractions from Waste Printed Circuit Boards: A Review;" *J. Hazard. Mater.*, **168**, 567(2009).
 8. Sato, Y., Kondo, Tsujita, Y. K. and Kawai, N., "Degradation Behaviour and Recovery of Bisphenol-A from Epoxy Resin and Polycarbonate Resin by Liquid-phase Chemical Recycling;" *Polym. Degrad. Stabil.*, **89**, 317(2005).
 9. Koyanaka, S., Endoh, S. and Ohya, H., "Effect of Impact Velocity Control on Selective Grinding of Waste Printed Circuit Boards;" *Advan. Powder. Tech.*, **17**, 113(2006).
 10. Dang, W., Kubouchi, M., Sembokuyu, H. and Tsuda, K., "Chemical Recycling of Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin Cured with Amine Using Nitric Acid;" *Polymer.*, **46**, 1905(2005).
 11. Park, Y. J. and Fray, D. J., "Recovery of High Purity Precious Metals from Printed Circuit Boards;" *J. Hazard. Mater.*, **164**, 1152(2009).
 12. Goto, M., Sasaki, M. and Hirose, T., "Reaction of Polymers in Supercritical Fluids for Chemical Recycling of Waste Plastics;" *J. Mater. Sci.*, **41**, 1509(2006).
 13. Braun, D., Gentzkow, W. and Rudolf, A. P., "Hydrogenolytic Degradation of Thermosets;" *Polym. Degrad. Stabil.*, **74**, 25(2001).
 14. Cunliffe, A. M., Jones, N. and Williams, P. T., "Pyrolysis of Composites Plastic Waste;" *Environ. Technol.*, **24**, 653(2003).
 15. Giulvezan, G. and Carberry, W., "Composites Recycling and Disposal-an Environmental R&D Issue;" *Boeing Environ Technotes*, **8**, 1(2003).
 16. Hwang, T. S., Choi, D. M., Choi, J. R., Lim, J. H. and Park, J. K., "Effect of Coupling Agent (3-methylacryloxyvinyl silane) on the Mechanical Properties of Waste FRP/unsaturated Polyester Composites;" *Korean J. Mater. Research.*, **8**, 13(1998).
 17. Lee, S. H., Choi, H. O., Kim, J. S., Lee, C. K., Kim, Y. K. and Ju, C. S., "Circulating Flow Reactor for Recycling Carbon Fiber from Fiber Reinforced Epoxy Composites;" *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 449(2011).
 18. Lee, J. K., Kim, S. Y. and Ju, C. S., "Improvement of Tensile Strength of Polyester Resin Using Silica/Chopped Glass Fiber Modified by Coupling Agent;" *Korean Chem. Eng. Res.(HWA-HAK KONGHAK)*, **50**, 30(2012).
 19. Feith, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A. G. and Mouriz, A. P., "Mechanical Properties of Thermally-treated and Recycled Glass Fibers;" *Composites: Part B*, **42**, 350(2011).