

리사이클 탄소섬유의 연구 동향



융복합섬유팀



ECO융합섬유연구원
Korea Institute of Convergence Textile

□ 탄소섬유 리사이클 기술개발

- 탄소섬유 및 탄소섬유 복합재료 폐기물은 현재 산업폐기물로서 취급되고 있으며, 탄소섬유는 일반 쓰레기 소각로에서는 완전하게 소각되지 않아 일반적으로 흙 속에 매립되고 있다. 따라서, 유한 자원의 재이용, 지구환경 부담의 감소를 위해 탄소섬유 리사이클 중요성이 확대되고 있다. 현재 복합재의 리사이클에 관한 연구는 거의 진행되지 않고 있으므로 앞으로 관련 업계는 효율적인 제후를 통해 보다 활발히 추진할 필요가 있다. 모든 제품은 반드시 수명을 다하게 되며, 따라서 섬유를 제조할 때부터 폐각의 경우를 고려하면 제품의 완성도는 높게 될 것이다. 현재는 사용 완료된 복합재료는 그 부품을 선별하여 에너지 리사이클하거나 산업폐기물로서 폐각하는 것이 일반적이나 복합재의 보급을 확대하기 위해서는 보다 고효율 재료로서 재활용해야 할 것이다.
- 탄소섬유 복합재료의 리사이클 기술로서 분쇄+수지의 열분해에 의한 탄소섬유의 재이용 등 일부 연구되고 있지만 아직 실용화되고 있지 않다. 일반 탄소섬유와 달리 재활용된 탄소섬유 표면에는 리사이클 동안 제거되지 않은 미량의 불순물들이 표면에 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 이에 초임계수(초임계온도 374℃, 임계압력 22.1 MPa 이상의 물)와 아임계수(임계온도 이하, 포화수증기 이상의 액체수)를 이용하여 수지만을 분해하여 탄소섬유를 손상 없이 회수하는 방법이 개발된바 있지만 재활용 탄소섬유의 물성 저하로 인하여 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 현재는 폐각된 복합재를 분쇄 후 콘크리트에 혼합하여 콘크리트 강도를 높이는 연구나 섬유와 수지로 분리 후 분리된 섬유를 다시 복합재화 하는 연구 등이 있다. 현 단계에서는 리사이클 비용이 지나치게 많다는 문제점도 있다. 또한 현재의 리사이클 컨셉으로는 섬유의 질은 리사이클이 반복됨에 따라 저하될 수밖에 없다. 사용 완료된 복합재를 섬유로 분리한 후 리사이클에 의해 섬유의 원재료와 보다 유사한 재료로 개발할 수 있으면 생산과 재생의 프로세스가 근접하여 한층 좋은 재료로서 보급될 수 있다.
- 리사이클링 전문회사인 밀드 카본사(Milled CarbonLtd.)는 재활용에서 거절되던 탄소부품들을 유용한 재활용 재료로 바꿀 수 있는 새로운 공정을 개발하였다. 2003년 후반부터 밀드 카본사는 경화되었거나 경화되지 않은 탄소섬유 복합재료를 연속적으로 재활용하는 시스템을 개발하였다. 현재

밀드 카본사는 2미터 넓이와 250밀리미터 두께를 가진 경화된 탄소섬유 복합재료 부품들을 25밀리미터의 두께를 가지는 조각으로 계속해서 리사이클하고 있다. 또한 제조공정에서 배출되었거나 사전 함침된 재료들의 사용하지 않는 부분에서 나온 경화되지 않은 재료들을 유사한 형태의 제조공정을 거쳐 리사이클 한다. 결과에 의하면 새로 재생된 재료들은 탄소섬유 원재료에 비해 약간 성능이 떨어질 뿐이며 같은 제품을 만드는 데에도 그대로 사용될 수 있다고 알려져 있다. 밀드 카본사는 가치가 있는 “재활용 제품”을 위해 일련의 최종 용도를 개발하고 있다. 사출 성형업체들이 이미 관심을 보이고 있어 비직물 재료에 사용하면 분명히 이 재활용 탄소 섬유에 대한 시장성은 큰 것으로 보고 있다. 또한, 밀드 카본 회사는 몇몇 영국 대학들의 교수들과 함께 리사이클 공정을 향상시키기 위한 연구도 진행하고 있다.

□ 리사이클 탄소섬유의 조건

- 재생 탄소섬유의 비즈니스 요건은 가격에 달려 있다. 재생 탄소섬유의 내용을 잘 살펴보면 탄소섬유를 전부 분리해 내는 것이 쉽지 않고, 섬유 길이를 분리, 정렬하는 것도 용이하지 않다. 더욱이 탄소섬유의 표면 처리제도 소실되어 없는 상태여서 재생 및 회수 공정이 매우 까다롭다.
- 기술적 문제 이외에도 재생 탄소섬유는 우선 가격이 싸서 경제적이지 않으면 사용에 제약을 받을 수밖에 없다. 열분해법에서 얻어지는 재생탄소섬유의 평균 인장강도는 2GPa보다 낮다. 재생공정에서 얻어진 재생탄소섬유의 섬유길이가 짧아도 사출성형에 사용되었을 경우에는 탄소섬유의 강한 강도 특성 때문에 PP 소재와 같이 조합시키면 탄소섬유의 특성이 유지 발휘된다.
- 단섬유B(길이 2~10mm)의 가격: 이와 같은 길이의 탄소섬유 용도는 보통 사출성형용 보강재인 유리섬유 강화 컴파운드(GFPP)보다 비강도, 비강성을 높이는 용도로 사용된다. 일반적으로 GFPP 성형물의 제조 원가는 PP 펠릿=¥220/kg, 칩트 스트랜드(chopped strand) GF=¥250/kg, 조립비용=¥100/kg 정도로 본다. 이 기준으로 볼 때, GFPP 30wt% 펠릿의 가격은 ¥329/kg이 된다.

- 자동차 용도에서와 같이 경량화가 요구되는 분야에서는 신소재로 대체하여 성능이 동일하다면 경량화 이점 때문에 채용 가능성이 높아진다. 유리섬유와 탄소섬유의 밀도, 체적 함유율, 중량 함유율 등을 고려하면 같은 기능을 가질 수 있는 재생 탄소섬유의 중량 함유율은 유리섬유의 70% 이하가 된다.
- 일반적으로 사출성형용에 사용되는 재생 탄소섬유의 직경은 유리섬유보다 가늘다. 따라서 체적함유율이 같으면, CFPP의 강도는 GFPP의 것보다 1할 이상 높고, 강성은 3~4배 정도 높을 것으로 기대된다. 강도에 초점을 맞출 경우에는 10% 정도 가벼워지고, 그 결과 재생 탄소섬유의 가격은 약 ₩400/kg이 된다. 한편, 강성 기준으로 재생 탄소섬유의 가격을 고려하면 동일 굴곡강성을 가진 굴곡판의 두께를 40% 정도 얇게 할 수 있으므로 재생 탄소섬유의 가격은 ₩725/kg 정도로 볼 수 있다.
- 단섬유A(길이 25~100mm) 부직포용의 가격: 이 섬유의 경우는 많이 사용되는 자동차용 부품 중의 뒤쪽 파티션(rear partition)이나 천정재료 패널 소재를 기준으로 산출한다. 이 재료의 경우, 기존 재료에서는 천연섬유가 사용되고 있는데 탄소섬유의 영률은 천연섬유에 비해 10배 이상 높다. 또 우수한 굴곡강성 등을 고려한다면 기존 소재의 10% 정도 두께만 고려해도 되므로 이를 감안한 재생 탄소섬유의 가격은 ₩1000/kg 정도로 이용이 가능해진다.

□ 저가 탄소섬유의 회수법

- 재생 탄소섬유의 가격이 ₩1000/kg 정도이면 사용이 가능하더라도 장래에 대만이나 터키와 같은 곳에서 저가인 탄소섬유가 제조되면 재생 탄소섬유 ₩1000/kg의 가격으로는 경쟁력을 잃을 가능성이 크고, 다음과 같은 결론에 따라 ₩600/kg 이하를 상정해야 가능하다고 본다.
- CFRP를 공기 중에서 600℃ 이상으로 소각시키면 사용된 에폭시 수지경화물은 소실되어 파이프와 같은 성형물의 형상은 완전히 붕괴되어 없어진 모양을 보인다. 이와 같이 소각 처리된 CFRP 파이프로부터 SCF(Single Carbon Fiber)를 추출하여 인장시험을 시행한 결과, 소각온도의 상승에 따라 SCF의 강도가 영향을 받는 것으로 나타났다. 600℃ 조건

에서는 신소재의 강도에 비해 약 1/3 정도 저하했다.

- 600℃ × 30분에서 CF의 표면은 약간 산화되어 작은 산화공이 발생하는 것이 관찰되었다. 이 산화공에 의한 응력 집중 영향에 의하여 섬유의 인장강도가 저하하는 것으로 생각된다. 이 정도의 인장강도 저하가 있더라도 사용 가능한 수준이며, 섬유의 영률은 변하지 않고 있다.
- 폐기 CFRP의 소각처리를 코스트에 더 유리한 일반 쓰레기 소각로를 이용하여 테스트한 시험 결과, 일반적인 소각로에서도 수지는 탄화·소멸되어 없어지지만 PP나 PA 등 사출성형에 강화재로 이용될 수 있는 인장강도 1.5GPa 정도의 CF가 추출 가능하다는 점을 강조하고 싶다. 결론적으로 소각 처리에 의하여 재생 탄소섬유의 강도저하나 단섬유화가 일어나도 사출성형품의 강화재로 사용 가능하다는 결론을 얻었다

□ 단섬유화된 재생 탄소섬유

- 일반적으로 사출성형을 할 경우, 펠릿 중에 들어 있는 섬유의 길이가 5mm 이상이어도 성형 후의 섬유길이는 1~2mm 정도로 줄어들게 되고, 경우에 따라서는 이보다 더 짧은 단섬유도 많이 존재하게 된다. 하지만 열가소성수지 PP의 경우에 보강재 섬유의 강도가 4~5GPa 정도의 강도가 꼭 필요한지도 의문이다. 수지와 섬유 간의 응력 분산에는 섬유의 영률이 더 크게 영향을 주어 영률이 높은 쪽이 많은 영향을 미친다.
- 결론적으로 SCF 강도가 1GPa 이상을 유지하므로 영률이 신제품의 탄소섬유와 같이 변하지 않는 것이므로 “정밀하지” 않은 소각 연소 방법으로 CF를 회수하여도 재생 탄소섬유의 기능을 잃지 않는다고 볼 수 있다.
- RCF/PA6 복합재료는 신제품의 CF/PA6 복합재에 비해 약 91%의 굴곡강도를 나타냈다. 양자 간에 10% 정도의 차이가 있지만 그 원인 때문에 RCF의 겉보기 평균 인장강도가 신제품의 CF보다 1/3 정도 낮다고 보기도 확실하지 않다. SEM에 의한 시험편 파단면을 관찰해 본 결과도 성형품에서 섬유의 뽑힘 현상이 다수 관찰되었지만 양자 간에 큰 차이는 없었다. 굴곡강도 차이는 오히려 섬유와 PA수지 계면 간의 접착강도에 의한 것이 더 영향을 미치는 것으로 보인다.

□ 코스트 절감과 금후의 과제

- 전기로나 일반 배치식 소각로에서도 SCF 회수가 가능하다는 것을 알았다. 그러나 다량으로 CFRP 폐자재가 발생하는 경우를 상정하면, 이 방법은 실용적이지 않을 수 있다. 더 낮은 코스트와 안정적 소각 온도에서 모재 수지의 열분해 처리가 될 수 있는 방안이 요구된다.
- 따라서 외연식 로터리 킬른(kiln)을 이용한 열분해 연소법에 의한 CF회수법이 고려되고 있다. 소형 킬른에 의한 시험 결과, 600℃에서 CFRP 폐자재가 연소하기 시작해서 로 내에서도 연속적으로 연소가 지속되는 것을 확인할 수 있었다. 오히려 균일하게 연소되고 손상을 입지 않아 실용성이 입증되었다. 폐자재의 연소가 시작되어 연속적 연소가 가능하다면 연소를 위한 추가적인 에너지를 밖에서 일부러 조달할 필요가 없다. 다만 배기가스를 어떻게 유효하게 활용할 수 있는 가하는 것이 중요해진다.

□ 폐CFRP의 매립 처리와 유효 활용

- 이러한 결과들을 볼 때, 신제품에 비견하는 잔류 강도를 가진 CF의 회수를 마다할 이유가 없다. 예를 들면, 원래 강도의 1/5 정도라 하더라도 RCF의 강도는 1GPa 정도의 강도를 가지게 된다. 유리섬유의 경우에는 원래 형태가 손상을 입게 되어 처음에 방사한 제품과 같은 유리섬유 강도가 보장될 수 없다. 그럼에도 불구하고 유리섬유는 강화재로 인식, 평가되고 있다.
- RCF 실용화 핵심은 코스트에 있고, 그 것을 실현해 내는 것이 핵심이다. SCF에만 국한한다면 가격이 싸거나 강도가 약한 것이라도 상관없다. 약해도 영률이 높으므로 그 정도의 강도가 문제되지 않는 것으로 보인다.

<출처>

1. 탄소섬유 리사이클의 사업화에 대한 전망(한국과학기술정보연구원)
2. 자동차 경량화를 위한 탄소섬유강화 복합재료의 동향(인하대 화학과, 탄소융합기술연구원, 화승 R&A)
3. 표지 그림 출처: <https://www.designnews.com/automotive-0/carbon-fiber-composites-recycled-virgin-material-on-cheap/200104958346519>