환경성을 고려한 폐 복합재료(CFRP)의 재활용기법에 대한 연구

The study on the environmentally friendly recycling method of CFRP

이철규† 김용기* 피라다** 김정석*** 주창식****

Lee, Cheul-Kyu Kim, Yong-Ki Pruitichaiwiboon-Phirada Kim, jung-Suck Ju, Chang-Sik

---

ABSTRACT

Various efforts of reducing the green house gas in the whole industrial fields including railway industry have been implemented. Tilting train is the key example because it can run more faster on the existing rail than others due to its composite body. The system has an advantage of light weight but also a task to solve, recycling of composite material. To recycle the CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), there are two typical methods; chemical and thermal method. In this study, more environmentally friendly recycling method was recommended through the environmental function through comparing both recycling methods.

Keyword : CFRP; Recycle; Rail vehicle; Environment; LCA

---

1. 서 론

범국가적인 지구온난화 이슈로 인하여 사회 전반적으로 온실가스 저감을 위한 노력에 집중하고 있으며 철도산업에서도 다양한 노력이 시도되고 있다. 대표적인 사례로 복합소재를 적용하여 기존선로에서도 고속주행이 가능하도록 한 틸팅열차시스템을 들 수 있다. 복합소재를 적용하여 차체를 경량화하였으며 이를 통하여 장기간의 운행기간동안 전력소모량을 저감할 수 있는 장점을 가졌으나 틸팅열차시스템은 복합소재 재활용에 대한 숙제를 가지고 있다. 틸팅열차시스템에 적용된 탄소섬유강화복합재료(이하 CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic)는 1970년부터 본격적으로 선진재료로 양산되어 2000년 이후 비약적으로 확대되고 있으나 기존 복합소재에 비하여 고가의 재료이다. 따라서 타 복합소재와 달리 CFRP의 경우 폐기단계에서 탄소섬유를 회수하여 재이용하는 기술을 개발하기위하여 노력하고 있다. 현재까지 개발되고 있는 탄소섬유 회수기술은 대표적으로 산 및 유기용매을 이용한 화학적인 방법, 수지를 열분해하는 열적인 방법 및 초임계방법 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 탄소섬유 회수기법별 효율성과 동시에 회수기법별 환경성을 비교함으로서 보다 친환경적인 탄소섬유회수기술을 선택할 수 있도록 하였다.

† 이철규 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 선임연구원
E-mail : cheul@krri.re.kr
TEL : (031)460-5372 FAX : (031)460-5279
* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실, 책임연구원
** 비회원, 아주대학교, 친환경제품설계실, 박사과정
*** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 책임연구원
**** 비회원, 부경대학교, 화학공학화, 정교수

2. 본문

2.1 CFRP 재활용기법

폐기단계의 CFRP에서 탄소섬유를 회수하는 기술은 유럽 및 일본을 중심으로 진행되어 왔다. CFRP는 기존 복합재료보다 물리적 및 기계적 물성이 뛰어나지만 상대적으로 고가라는 단점으로 인하여 항공기 등 일부 특수산업에서 금속을 대체하는 재료로 사용되어 왔으며 이 때문에 회수기술 또한 일부 선진 국가이외에는 경제적인 이유로 개발이 되고 있지 않는 상황이다. 그림 1과 같이 현재까지 적용되고 있는 폐기단계 CFRP의 재활용기술은 크게 분쇄, 열분해, 화학적분해 등으로 나눌 수 있다.

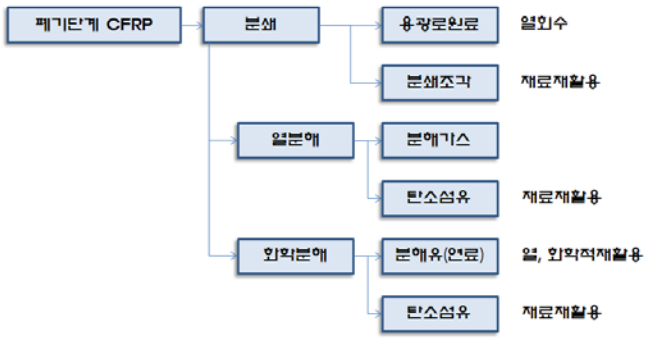

그림 1. CFRP리사이클링 방법

2.2 탄소섬유회수실험

그림 1과 같은 방법들 중에서 틸팅열차시스템의 운영에 따른 빈번한 유지보수 시 보다 경제적인 방법을 개발하기위하여 틸팅차량에 적용된 탄소섬유를 회수하여 재이용할 수 있도록 열 및 화학적으로 재활용하는 방법은 검토하지 않고 탄소섬유를 회수하여 재이용할 수 있는 실험을 진행하였다. 틸팅열차에 적용된 CFRP는 분자량이 430으로 범용 epoxy 수지를 적용하여 제조된 것으로 epoxy 수지는 분자량이 84인 amine 계열의 경화제를 사용하였다. 이러한 조성을 가지는 CFRP 중에서 탄소섬유를 회수하기위하여 HNO_3, DGMM (diethlene glycol monomethyl ether)을 이용한 산 및 유기용매방법과 소성로를 이용한 열적분해 및 초임계유체를 이용한 방법을 적용하였다. 각 회수기법별 실험결과를 표 1 및 그림2에 정리하였다.

표 1. 탄소섬유 회수실험 결과

구분	실험개요	재료	실험조건	결과
화학적방법 (산용액)	질산수용액 담지를 통한 수지분해	질산 및 지지체	용액농도: 8M 분해온도: 80℃ 반응시간: 2 h	분해가능
화학적방법 (유기용매)	유기용매 및 촉매 사용	DGMM(diethlene glycol monomethyl ether) + K_3PO_4 용액	분해온도: 200 ℃ 반응시간: 7 h	분해불가능
열분해	Heating furnace를 이용한 복합소재의 가열	Heating furnace	분해온도: 500 ℃ 반응시간: 2~3 h	분해가능
초임계방법	초임계유체를 이용한 분해	Water Methanol Ethanol 1-propanol Acetone	분해온도:450℃ 분해압력:24Mpa	분해율낮음

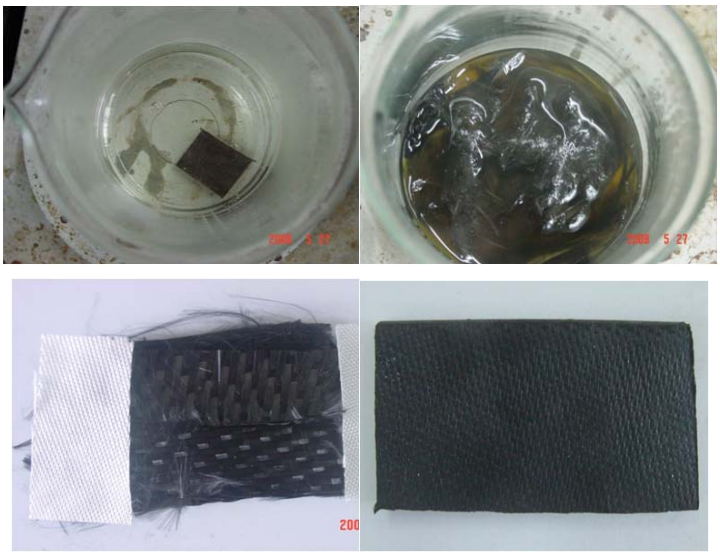

그림 2. 탄소섬유 회수실험결과(산 및 열분해)

2.3 환경성평가기법

표 1의 결과에서와 같이 산 및 열분해방법이 탄소섬유를 회수하는 데 효과적인 것을 알 수 있었으며 이 중 보다 친환경적인 방법을 선택하기위하여 ISO 14040 시리즈에 따라 전과정환경성평가(LCA, Life Cycle Assessment)기법을 적용하였다. LCA기법은 제품생산에 요구되는 원료채취에서 폐기단계까지를 모두 고려한 방법으로 기존의 사용단계에서만 발생되는 환경성만이 아닌 잠재적인 환경성을 모두 고려하여 정량화할 수 있는 기법이다. 본 연구에서는 시스템경계를 탄소섬유재이용 기법에만 한정하여 보다 친환경적인 방법을 선택할 수 있도록 하고자 하였다. 따라서, 산 및 열분해방법에서 요구 및 발생되는 에너지, 부산물 및 폐기물 정보를 그림 3과 같이 수집하여 분석하였다.

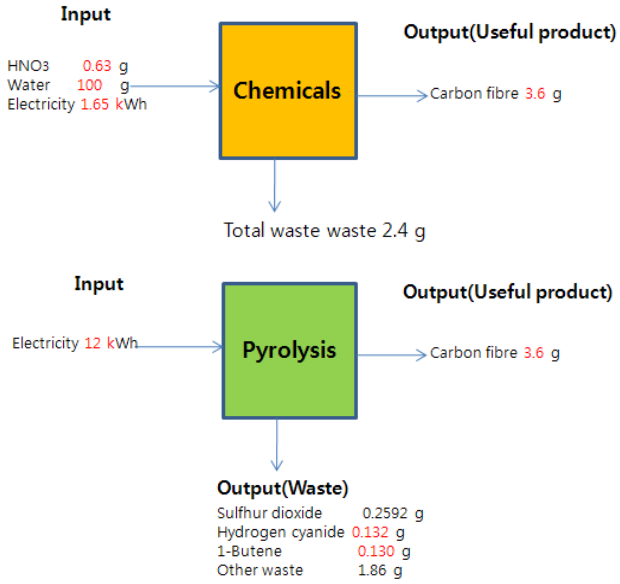

그림 3. 분리기법별 입출력데이타

3. 환경영향정량화결과

탄소섬유 회수기술별 환경성비교를 위하여 환경성평가 프로그램인 SimaPro ver. 7.0을 활용하여 환경영향범주별 기여도를 간략하게 분석하였다. 입력데이타에서 알 수 있듯이 열분해방법은 epoxy 수지를 연소시키는데 필요한 전력량이 상대적으로 많이 소요(약 7배)됨으로 인하여 온실가스 발생량 및 산성화 기여도가 화학적방법에 비하여 높은 것으로 분석되었다.

표 2. 환경영향범주별 환경영향 정량화결과(추정)

Impact category	Unit	Pyrolysis	Chemical
Global warming (GWP 100)	g CO2	990,276.5	129,701.6
Ozone depletion	g CFC11	-0.03	-0.03
Acidification	g SO2	4843.45	596.51
Photochemical smog	g ethene	6.55	-0.28
Ecotoxicity water chronic	m3	-23606.27	-42506.68
Ecotoxicity soil chronic	m3	-238637.05	-405839.58
Human toxicity soil	m3	-20.54	-38.14
Bulk waste	kg	0	8.56E-04
Resources (all)	kg	-1.99E-04	-1.97E-04

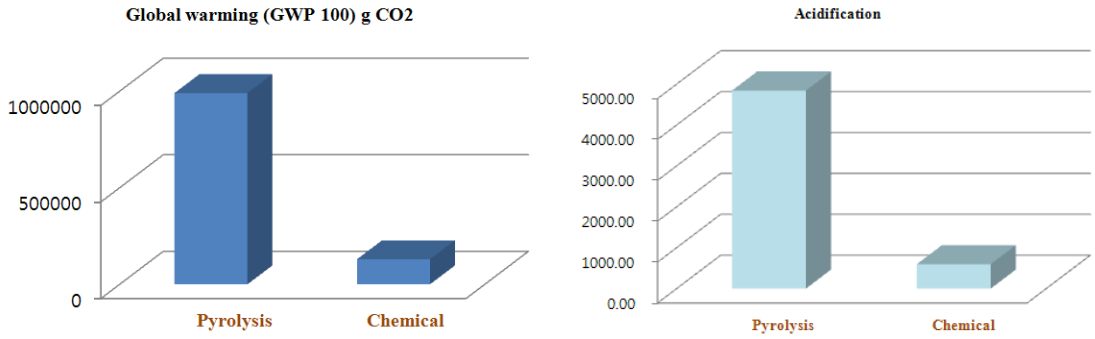

그림 4. 온실가스 발생 및 산성화에 대한 영향비교

4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 틸팅열차의 차체에 적용된 CFRP에 대한 탄소섬유 및 회수에 관한 분리기술 개발하고 보다 친환경적인 분리기술을 선택하는 데 기여할 수 있도록 환경성을 추정하여 비교하였다. NAGAI el. al. 등의 연구결과에 따르면 CFRP제작에 따른 전체 환경부하의 약 50 %가 탄소섬유에 의한 것으로 조사되었다. 따라서, 본 연구에서 상용화하고자하는 탄소섬유회수기술의 의미는 크다고 할 수 있다. 향후 상용화를 목표로 pilot scale 실험 등을 통하여 실험조건 등을 최적화할 계획이지만 현재까지의 실험실 실험결과를 반영하여 전체적인 환경성을 추정해 본 결과 산을 이용한 회수방법이 전체 틸팅열차시스템의 환경부하 저감에 기여할 수 있는 가능성이 더 높은 것으로 예상된다.

5. 참고문헌

1. Hideki NAGAI, Jun TAKAHASHI(2002), "Life Cycle Assessment of CFRP Production and Recycling", 논문집, 제2권 9호, pp. 283-284.
2. Koji Yamaguchi, Akihiko Kitano(2008), "Development in composites Technology for Reduction of Environmental Load", Journal of the Society of Materials Science, Vol.57.No.7,pp.747-752.
3. S.J.Pickering(2006), "Recycling technologies for themoset composite materials-current status", Composites:Part A, Vol.37,pp.1206-1215.