

# 섬유강화복합소재 전과정평가 연구 동향



변재원

- 2015. 전북대학교 화학공학 학사
- 2017. 전북대학교 화학공학 석사
- 2020. 전북대학교 화학공학 박사
- 2020-2021. 전북대학교 화학공학부 박사후연구원
- 2021-2022. Princeton University 박사후연구원
- 2022-2025. 전남대학교 석유화학소재공학과 조교수
- 2025-현재. 전남대학교 석유화학소재공학과 부교수

## 1. 서 론

지속가능성에 대한 국제사회의 관심이 높아짐에 따라, 다양한 제품 및 서비스가 환경에 미치는 영향을 객관적으로 정량화 하기 위한 노력이 활발히 진행되어 왔으며, 전과정평가(life cycle assessment, LCA)는 다양한 산업 분야에 적용되는 소재의 환경영향을 평가하기 위한 대표적 방법론으로 알려져 있다. LCA는 ISO 14040/14044 국제 표준에 따라 제품 및 서비스의 원료 채취부터 제조, 운송, 사용, 그리고 폐기에 이르기까지 전 생애주기에 걸친 환경영향을 정량적으로 분석하고 평가함으로써, 단순히 제조 단계의 환경부하만을 고려하는 것이 아니라, 전 생애주기에 걸친 종합적인 환경영향을 평가할 수 있게 한다는 점에서 다양한 제품의 실제적인 환경영향을 분석하기에 매우 유용하다[1,2].

섬유강화복합소재(fiber reinforced plastic; FRP)의 경우 우수한 기계적 물성을 가지면서도 경량성을 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있는 핵심 소재로써, 항공우주, 자동차, 선박 및 해양, 풍력발전 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다[3]. FRP 활용에 따른 에너지 효율 증가는 사용단계에서의 에너지 소비에 따른 온실가스 간접 배출을 상당부분 감소시킬 수 있으나, 제조단계에서의 높은 환경부하, 복잡한 재활용 공정으로 인한 폐FRP 처리문제 등은 새로운 환경 문제를 야기하고 있다는 점에서 FRP의 환경성을 정확히 평가하고, 재료 선택부터 폐기 단계까지 전 생애주기에 걸친 환경영향의 종합적인 고려가 필수적이다.

본 기고문에서는 FRP의 전과정평가 방법론과 주요 연구 현황을 상세히 분석하고, 현행 연구의 주요 한계점을 규명하며, 향후 개선 방안과 발전 방향을 종합적으로 제시하고자 한다.

## 2. 섬유강화복합소재 LCA 연구 방법론

ISO 14040/14044를 기반으로 하는 LCA는 네 가지 주요 단계로 구성되며, 각 단계마다 체계적인 절차와 고려사항이 존재한다(Figure 1). 첫 번째 단계는 목적 및 범위 정의(goal and scope definition) 단계로, 평가의 목적을 결정하고 그에 따른 시스템 경계와 기능단위를 결정하는 것이다. 이때 시스템 경계는 평가에서 고려되는 공정의 범위이고 기능단위는 제품이 제공하는 기능의 정성적, 정량적 기준단위이다. 두 번째는 전과정목록분석(life cycle inventory analysis) 단계로, 각 생애주기 단계에서 투입 및 배출되는 물질 및 에너지를 정량화하고 이를

기능단위 당으로 환산한 전과정 인벤토리(life cycle inventory; LCI)를 구축하는 단계이다. 세 번째는 전과정영향평가(life cycle impact assessment) 단계로, 구축된 LCI 데이터를 기반으로 제품 및 시스템의 환경영향을 정량화하는 단계이다. 네 번째 이자 최종단계인 해석(interpretation) 단계는 평가결과를 분석하여 주요 환경영향 요인 및 병목점을 제시하고 그 개선방안을 도출하는 단계이다[1,2].

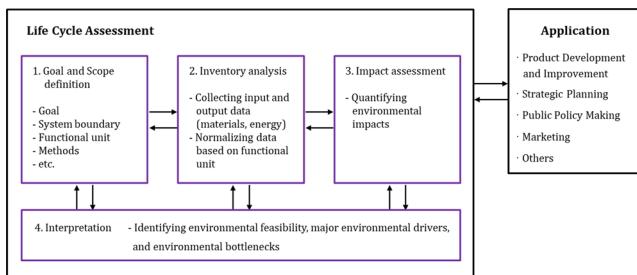


Figure 1. Framework of life cycle assessment.

전과정평가 방법론을 기반으로 FRP 생산 및 활용에 대한 다양한 환경영향을 정량화 할 수 있으며, 일반적으로는 화석연료(에너지) 소비 및 온실가스 배출량을 중점적으로 평가한다. FRP 전과정평가시 제품의 수명주기를 크게 3가지 (생산, 활용, 폐기 및 재활용)로 구분하여 평가를 진행하며(Figure 2), 이때 제조 공정의 복잡성, 다양한 기지재(에폭시 수지, 폴리에스터 수지, 비닐에스터 수지) 및 강화재(탄소섬유, 유리섬유, 천연섬유 등) 조합, 그리고 최종 사용 단계 이후의 폐자재 처리 방식의 다양성 등이 고려된다. 각 제품 수명주기별로 FRP 기반 제품이 기존 소재 기반 제품과의 비교 분석이 수행되며, 최종적으로는 전체 수명주기에 대한 에너지 소비 및 온실가스 배출량을 합산하여 FRP 기반 제품의 환경영향을 정량화 할 수 있다. 전과정평가시 각 수명주기별 주요 고려사항 및 특징은 다음과 같다.

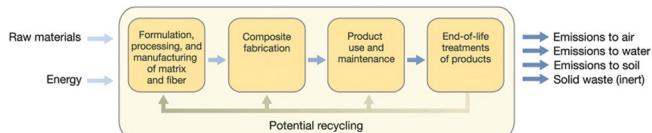


Figure 2. Life-cycle phases of a composite component [4].

먼저 생산 단계 평가에서는 개별 기지재 및 강화재에 대한 평가, FRP 제조 공정에 대한 평가, FRP 기반 제품 생산에 대한 평가 등이 진행되며, 최종적으로 기존 제품 대체 시 영향을 비교 분석한다. 탄소섬유복합소재(carbon fiber reinforced plastic; CFRP)의 경우 탄소섬유 생산단계가 전체 환경영향의 60~80%를 차지하는 주요 요인으로 보고되었으며, 이는

polyacrylonitrile(PAN) 기반 전구체를 초고온에서 탄화시키는 과정에서 요구되는 다량의 에너지소비에서 기인한다. 유리섬유복합소재(glass fiber reinforced plastic; GFRP)의 경우 제조 공정에서의 에너지 소비가 주요 환경요인으로 작용하며, prepreg 제조 및 curing 단계에서의 에너지 소비가 상당한 환경부하를 야기할 수 있다.

Table 1. Energy demand and greenhouse gas (GHG) emission of composites in production phase[4].

	Energy demand (MJ/kg)	GHG emission (kg CO <sub>2</sub> eq./kg)
<b>Matrix</b>	76–137	4.7–8.1
Liquid epoxy	62.8–78	2.3
Polyester, unsaturated	73.4	2.0
Polypropylene	54.8	1.3
Mater-Bi®-modified starch	67.8	1.3
Polylactic acid (Ingeo 2009™)	59–107	0.7–4.4
Polyhydroxyalkanoates	19	1.2
Epoxidized linseed oil monomer	76–137	4.7–8.1
<b>Reinforcement</b>		
Polyacrylonitrile-based carbon fiber	286–704	22.4–31
Carbon nanofiber	654–1807	70–92
Glass fiber	45	2.6
Flax fiber, with irrigation	9.6–12.4	0.4
Hemp fiber, without irrigation	6.8–13.2	1.6
Jute fiber	3.8–8.0	1.3–1.9
Sugarcane bagasse	11.7	NA
<b>Manufacturing Processes</b>		
Sheet molding compound	3.5–3.8	NA
Resin transfer molding	12.8	NA
Pultrusion	3.1	NA
Autoclave	21.9	NA
Injection molding	21.1–29.9	0.5–1.2

FRP 소재 평가 이후 확보한 환경영향 데이터를 기반으로, 실제 제품에서 기존 소재(강철, 알루미늄, 콘크리트 등)를 FRP 기반으로 대체시의 기대효과 분석 또한 생산단계에서 수행될 수 있으며, 기존 소재 및 대체 FRP에 따라 그 영향도가 상이하게 나타난다. 기존 소재의 FRP 기반 소재 대체 시 일반적으로 중량

이 감소하는 경량화 효과를 나타내지만 소재 생산단계에서 다량의 에너지가 요구되는 CFRP의 경우 제품 생산에서의 누적 에너지 요구량이 타 소재 대비 증가함을 보이며, 이는 생산단계만 고려했을 때 FRP가 기존 소재 대비 에너지 소비 및 온실가스 배출량이 높을 수 있음을 의미한다.

**Table 2.** Impact of replacing traditional materials with FRP in production phase [4].

Products	Composite	Replaced traditional materials	Change		
			Weight	Energy demand	GHG
Bridge	GF/PES pultruded	Structural steel	-33%	-57%	NA
		Stainless steel	-28%	-68%	
		Concrete	-85%	-62%	
		Aluminum	+25%	-56%	
Car side door	Hemp/EP	ABS	-27%	-45%	-15%
Under-floor pan	Flax/PP	GF/PP	0	-14%	NA
Rotor blade	Flax/EP	CF/EP	0	-50%	-45%
Car interior	Bagasse/PP	Talc/PP	-20%	-22%	-21%
Car door	GF/PP	Steel	-31%	-59%	+2%
		Aluminum	+25%	-87%	-74%
Rear body of truck	GF/PES	Steel	-44%	-20%	NA
		Aluminum	+11%	-44%	
Closure panel	CF/EP	Steel	-60%	+280%	-15%
		Aluminum	-27%	-65%	NA
		GF/PET	-42%	+127%	-45%
Sedan	CF/EP (virgin)	Steel	-38%	+30%	-21%
Propeller shaft	GFCF/EP	Steel	-63.5%	-13%	NA
		Aluminum	-55%	-83%	
Car floor pan	CNF/PP or CNF/PES	Steel	-18.9% to -61.2%	+30% to +1000%	NA
	CFRP	Steel	-17%	+363% to +412%	+136% to +219%

사용 단계 평가에서는 FRP 기반 제품 사용 시 환경영향에 대한 평가가 진행되며, 이때 복합소재 제품의 사용에 따른 직·간접적인 영향을 다각도로 고려할 필요가 있다. FRP의 주요 사용처인 자동차 분야에서는 기존 강철이나 알루미늄을 FRP로 대체함으로써 얻어지는 1차 중량 저감 뿐만 아니라 전체 차체의 무게 감

소에 따른 샤시 및 브레이크 경량화, 파워트레인 요구 성능 감소 등에 따른 2차 중량 저감 효과가 있으며, 1차 중량 저감 1 kg 당 약 0.5~1.5 kg의 2차 중량 저감 효과가 보고된 바 있다. 콘크리트 또는 강철 교량의 경우 50년 이후 초기 건설자재의 5%를 교체해야 하지만 CFRP 또는 GFRP로 제작된 교량의 경우 유지 보수를 위한 추가 자원이 필요하지 않으며, 상기 사항과 같은 직간접 영향 고려를 통해 FRP의 기존 소재 대체 시 환경영향을 명확하게 정량화 할 수 있다. 운송분야에서 기존 소재를 FRP로 대체 했을 때, 경량화에 따른 연료 소모 (에너지 사용량) 감소 및 온실가스 감축이 주된 이점으로 고려될 수 있으며, FRP 사용 시 강철이나 알루미늄 대비 상당한 중량 감소를 통해 큰 폭의 에너지 절감 효과를 보일 수 있다. 특히, CFRP의 경우 GFRP와 비교했을 때도 경량화가 가능하다는 점에서 CFRP 소재 기반 제품 사용 시 에너지 소비 및 온실가스 배출 저감 효과의 극대화가 가능하다.

**Table 3.** Impact of replacing traditional materials with FRP in use phase[4]

Products	Composite	Replaced traditional materials	Lifetime (km)	Change	
				Energy demand (GJ/unit)	GHG (kg CO <sub>2</sub> eq./unit)
Car interior	Bagasse/PP	Talc/PP	150000	-19.3	-206
Transport pallet	China reed/PP	GF/PP	5000–200000	-0.6 to -2.3	NA
Propeller shaft	CF and GF/EP	Steel	150000	-3.7	-227
		Aluminum		-2.5	-158
	CF/EP	Steel	200000	-26.9	-2096
	Aluminum	-6.8		-531	
	GF/PET	-13.1		-1023	
Car door	GF/PP	Steel	150000	-2.0	-150
		Aluminum		+0.8	+67
Rear body of truck	GF/PES	Steel	190000	-181	NA
		Aluminum		+23	NA
		Aluminum			

마지막으로 폐기 및 재활용 단계 평가에서는 FRP 기반 제품 사용 이후 폐기 및 재활용 단계에 대한 평가가 진행되며, 폐기 단계로써 매립 및 소각이, 재활용 단계로써 기계적, 열적, 화학적 처리 등이 고려될 수 있다. FRP 재활용 시 일반적으로 섬유의 파단, 열처리 과정에서의 섬유 손상 등으로 인해 인장강도 감소 등의 물성저하가 나타나며, 이로 인해 건설용 필러와 같은

저급 용도로 사용하는 다운사이클링이 고려된다. 반면에 FRP의 경쟁군인 강철, 알루미늄의 경우 거의 대부분 재활용이 가능하고 신재와 동일한 성능을 나타낼 수 있다는 점에서 폐기 및 재활용 단계에서의 FRP의 온실가스 배출이 더 크게 나타난다.

Table 4. Impact of FRP and traditional materials in end-of-life phase[4]

Products	Landfill		Incineration with energy recovery		Recycling	
	Energy demand (MJ/unit)	GHG (kg CO <sub>2</sub> eq./unit)	Energy demand (MJ/unit)	GHG (kg CO <sub>2</sub> eq./unit)	Energy demand (MJ/unit)	GHG (kg CO <sub>2</sub> eq./unit)
SMC	NA	NA	-7.5 87	0.9	7	0.4
GMT	0.09	0-0.02	-25.2 87	1.9	11	0.9
CFRP	0.11	0.02	-31.7 to -34	3.2-3.4	10-15	NA
NFRP	NA	NA	-12 to -34	2.3-2.9	NA	NA
Steel	NA	NA	NA	NA	11.7-19.2	0.5-1.2
Aluminum	NA	NA	NA	NA	2.4-5.0	0.3-0.6

제품의 전체 수명주기에 대해 평가를 진행한 이후 이를 합산하여 FRP 소재의 기존 소재 대체 시 환경영향의 정량화가 가능하다. FRP가 가장 많이 적용되는 운송분야에서 기존 소재인 강철, 알루미늄 등과 비교했을 때, 제품 생산, 폐기 및 재활용 단계에서는 FRP보다 기존 소재가 우수한 결과를 보이나, 사용단계에서 FRP 사용에 따른 경량화를 통해 상당한 에너지 소모량 절감 및 온실가스 배출량 저감이 가능하다. 이는 잠재적으로 주행거리에 따른 교환(trade off) 존재함을 의미하며 일정 주행거리 이상 도달 시 FRP의 기존 소재 대체가 환경적으로 우수한 손익분기점(break-even point)를 도출 할 수 있다(Figure 3).

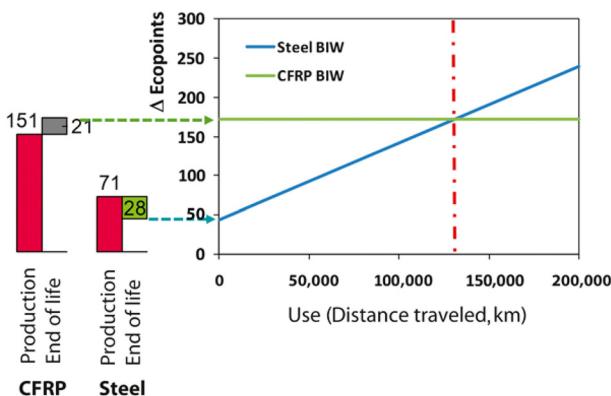


Figure 3. Total life cycle impact of carbon-fiber reinforced polymer (CFRP) body in white (BIW) compared to conventional steel BIW. (adapted from[4]).

### 3. 섬유강화복합소재 LCA 연구의 한계점 및 발전방향

2장에서 다뤄진 것과 같이 FRP에 대한 고도화된 전과정평가 연구가 수행되고 있음에도 불구하고 여전히 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫 번째는 데이터 불확실성 및 LCI 데이터베이스의 한계이다. FRP LCA 연구에서 가장 심각한 문제는 전과정 인벤토리 데이터(life cycle inventory database; LCI DB)의 불확실성으로, 현행 LCI DB는 주로 유럽 중심의 데이터를 기반으로 하고 있어, 국내 제품 평가 시 국가 및 지역별 특성의 차이를 충분히 반영하기 어렵다. 또한 기존 LCI DB의 경우 범용적인 제품에 대한 데이터가 주를 이루고 있어 FRP 제품 전주기 및 신규 공정에 대한 데이터가 부족하며, 이는 평가 단계에서 기술개발 주체가 신뢰할 수 있는 환경영향정보를 제공하지 못하게 되는 원인으로 친환경 기술개발을 저해하는 요인으로 작용할 수 있다. 두 번째는 기능단위 정의의 문제점이다. 기능단위의 경우 전과정평가 시 환경영향 정량화의 기준이 되는 수량이나 성능기준을 말하며, 일반적으로 범용제품 평가 시 1kg의 제품 또는 1 unit을 기준으로 한다. 그러나 복합소재의 경우 동일한 질량의 소재라도 물성에 상당한 차이가 발생하며, 동일한 소재에 대해서도 물성 고려 유무에 따라 전과정평가 결과가 상이하게 도출될 수 있다. 따라서 신뢰도 있는 비교분석 결과를 도출하기 위해서는 적절한 기능단위에 대한 고려가 필수적이다. 세 번째는 사용 단계와 폐기 및 재활용 단계에서 발생할 수 있는 불확실성이다. 복합소재 적용 제품의 경우 사용 조건에 따라 그 수명이 크게 변동할 수 있으며, 천연재료 기반 복합소재의 경우 온·습도 등 외부 요인에 의한 성능열화 예측이 어려워 이에 대한 높은 불확실성이 존재할 수 있다. 또한 폐기 단계 시나리오의 경우 대부분이 매립 또는 소각되고 있는 것으로 고려하며, 다양한 재활용 기술의 경우 기초연구개발 단계로 신뢰도 있는 데이터 확보가 어렵다[5].

상기 한계점은 정책 결정권자 및 연구개발주체에게 FRP 기반 제품의 환경영향 정보를 신뢰도 있게 전달하는데 있어 병목점으로 작용하며, 이러한 한계점을 극복하기 위해 다음과 같은 노력이 수반되어야 한다.

첫 번째 방안은 고품질 LCI 데이터 구축 및 국제 표준화이다 [6]. FRP LCA의 신뢰성 향상을 위해서는 국가 및 지역별 맞춤형 LCI DB를 구축하고, 국제 표준화 기구와의 연계를 통해 국제적으로 인정되는 기준을 마련하여 비교 연구의 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 두 번째 방안은 기능단위 표준화 및 시스템 경계 설정 지침 마련이다. FRP LCA 연구의 비교가능성을 높이기 위해서는 기능단위의 표준화가 필수적이며, 산업 분야별 특성을 고려하여 자동차, 항공우주, 풍력, 해양 분야 등에서 사용되는 복합소재에 대한 기능단위 설정 지침을 개발해야 한다. 마지막 방안은 사용, 폐기 및 재활용 단계 모델링 정밀화 및 실증 데이터 확보이다. 복합소재의 환경적 우위를 정확히 평가하기

위해서는 실제 사용 조건 기반의 모델링 데이터 또는 실증데이터의 확보가 필수적이며, 항공기, 자동차, 풍력 블레이드 등 주요 적용 분야에서 장기 서비스 수명에 따른 성능 변화와 환경영향을 추적하는 실증 연구 및 기계적 재활용, 열분해, 화학적 분해 등 다양한 재활용 기술에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

FRP는 경량성 및 고강도 특성으로 인해 탄소중립 산업 전환의 핵심 소재로 주목받고 있다. 항공, 자동차, 선박 및 해양, 풍력 등 주요 산업 분야에서 상당한 온실가스 저감 효과를 제공할 수 있으나, FRP 제조 단계의 높은 에너지소비와 폐FRP의 증가는 새로운 환경 문제를 야기하고 있다. 따라서 실질적인 FRP의 환경영향을 평가하기 위한 방법론으로써 LCA가 활용되고 있다.

현재까지 수행된 FRP LCA 연구들은 국제 표준을 기반으로 발전해온 전과정평가 방법론에 기반하여 수행 및 고도화 되었으나, LCI 데이터 불확실성, 기능단위 설정의 편차, 사용 단계와 폐기 및 재활용 단계의 불확실성 등으로 인해 그 신뢰도 확보에 어려움을 겪고 있다. 향후 FRP의 진정한 환경성을 정확히 평가하고, 이를 기반으로 한 정책 수립 및 기술 개발을 추진하기 위해서는 국가 및 지역 맞춤형 고품질 LCI 데이터베이스 구축, 기능단위 및 시스템 경계 설정에 대한 국제 표준화 추진을 포함하여 사용 단계, 폐기 및 재활용 단계 실증데이터 확보가 필수적이며, 이를 통해 FRP의 지속가능성에 대한 신뢰도 있는 결과 도출이 가능하다. 향후 FRP LCA는 단순 환경영향평가를 넘어 사회적, 경제적 영향을 통합적으로 고려하는 방향으로 발전할 수 있으며, 학계, 산업계, 정부, 그리고 국제 기구와 같은 다양한 주체 간의 긴밀한 협조를 통해 FRP 지속가능성을 확보하기 위한 근간이 될 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- ISO 14040. “Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework”. International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, 2006.
- ISO 14044, “Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines”. International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, 2006.
- A. Muhammad, M. R. Rahman, R. Baini, and M. K. B. Bakri, in *Advances in sustainable polymer composites*, 185-207 (Elsevier, 2021).
- J. R. Dufliou, Y. Deng, K. Van Acker, and W. Dewulf, “Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study”, *Mrs Bulletin*, 2012, **37**, 374-382.
- A. Ziemińska-Stolarska, M. Sobulska, M. Pietrzak, and I. Zbiciński, “A review of end-of-life scenarios for fibre-reinforced polymer materials,” *Energies*, 2024, **17**, 3713.
- N. Dissanayake, Assessment of Data Quality in Life Cycle Inventory (LCI) for Fibre-reinforced Polymer (FRP) Composites, (2022).