

特輯

“철도분야에서의 신소재 복합재 응용 기술”(총 7편) 중 - 제5편

철도차량 분야에서의 수명주기평가(Life Cycle Assessment) 기술

신광복*, 이상진**, 조세현**

1. 서론

최근들어 전세계적으로 감소하던 철도 이용객이 열차의 빠른 속도와 편리함에 이끌려 다시 늘어나고 있다. 영국의 Railtrack사는 향후 10년간 수요가 30 퍼센트 증가하게 된다는 전망을 내놓았고, 네덜란드의 Railways사는 2010년까지 50 퍼센트나 증가한다고 내다본다. 일반인들의 머리 속에는 열차는 자동차나 항공기에 비해 '깨끗한' 운송 수단으로 인식되어 있다. 그럼에도 불구하고 이 부문에 관한 한 아직도 개선의 여지가 많이 남아 있다. 수명 주기 평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 산업 생산품의 환경 영향을 평가하는 도구이며, 제품의 전체 수명 주기와 관련하여 주요 문제를 다루는 데 사용된다. 이를 통하여 환경 영향에 미치는 핵심 사안이 무엇인지를 전체적으로 조감할 수 있으며, 그 영향을 줄일 적절한 방안을 선택하는 데에도 도움을 받을 수 있다.

철도 차량의 경량화 노력도 이러한 환경 영향에 대한, 좀 더 구체적으로 에너지 절감과 관련하여 그 중요성이 대단히 커지고 있는 최적화 작업의 일환이다. 이러한 목표를 이루기 위한 한 가지 예상되는 방법으로서 복합재와 같은 차세대 소재의 사용을 들 수 있다. 물론, 철도 차량이 경량화 되면 에너지 소비도 감소하게 된다. 즉, 사용 단계에서의 환경 영향이 감소하게 됨을 의미한다.

본 논문에서는 철도차량 분야의 수명주기평가(LCA) 관련 해외 동향을 조사하고, 한국형 틸팅열차(TTX)에 적용되는 하이브리드 복합재 차체의 수명주기평가 분석을 통한 기존 재질의 차체와 비교 분석 과정을 소개하고자 한다.

2. 수명주기평가와 철도차량 산업

2.1 수명주기평가의 정의

수명 주기 평가는 자원의 사용과 배출 부담을 기준으로

제품이나 서비스를 정량화하고, 우선순위를 부여하고, 오염을 방지하고, 자원의 소비를 감소하여 궁극적으로는 생산물의 수명 주기 성능을 개선하고 그 이점과 잠재력을 이끌어내기 위한 의사 결정 보조 수단이다. 수명주기평가는 한 제품의 탄생과 폐기까지(원료 추출, 에너지 획득, 제조, 사용, 폐기물 처리) 그 수명 주기의 각 단계에서 소모되고 배출되는 에너지 및 물질의 양을 정량화하여, 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하고 이를 통하여 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적인 환경영향 평가 기법이다.

수명 주기 평가의 적용 기준은 국제환경규격 ISO 14000 시리즈에 정의된 내용을 우선 적용하고 다음을 그 근거로 한다.

- 분석 대상 제품과 관련된 시스템의 정의 (그 한계 및 내용 등)
- 해당 시스템의 입력 및 출력의 목록
- 이들 입력 및 출력과 관련된 환경적 잠재 영향 평가
- 연구대상물을 근거로 한 목록 및 환경평가 결과에 대한 해석

단품 또는 시스템 하나의 수명 주기 평가를 수행하려면 기능 단위, 시스템 경계를 결정하고 검토 대상 수명 주기 단계를 규정할 필요가 있다.

검토 대상의 수명주기평가 단계는 제조, 조립, 사용, 폐기 등이다. 시스템 경계 내에 포함되는 것을 예로 들자면, 단품의 제작과 조립, 사용, 폐기에 직접 관련되는 모든 공정, 소비, 배출 등이며, 설비의 제작과 각각의 생산지 간의 이송, 도로 건설 등은 제외된다.

열차와 같은 기능 단위는 그 자체로 복잡한 시스템으로서, 정의하기도 훨씬 어려워진다. 열차는 여러 가지 변수 (레도 건설 및 보수, 터널 및 교량 건설, 정거장과 출입구 건설 등)외에 인프라까지 함께 고려해서 평가하여야 한다.

* 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 시스템엔지니어링팀, 교신저자(E-mail:shin955@krii.re.kr)

** (주)한국화이버 복합재료연구소

운용 단계에서 에너지 소비를 줄이는 주요 방안은 차량 중량을 줄이는 것이다. 그 다음으로는 좌석 점유율과 열차의 공기역학적 설계 및 제동시의 에너지 회수 등이다. 사용되는 에너지 종류도 환경 영향 측면에서 중요하다.

내장재나 구조물의 경우에 있어서도 단품의 중량을 줄이는 방안은 강재나 알루미늄 대신 복합재를 사용하는 것이다. 철도차량 구조물로서의 적용은 아직까지 그다지 광범위한 편은 아니지만 구조물에 복합재를 사용한다는 것은 매우 흥미롭고 장래성 있는 분야로 계속 빠른 속도로 증가하고 있으며 별도의 연구를 필요로 한다.

2.2 해외 연구 사례 분석

2.2.1 에코인벤트 데이터베이스(Ecoinvent Database)

본 연구는 화물 및 수송 열차에 관련한 것으로 여객 수송에 대해서는 시도하지 않았고 철도 운송 시스템은 스위스 여건과 평균적인 유럽 여건 모두를 반영한 두 가지 모델을 기준으로 하였다[1].

화물 철도 수송의 환경적 영향은 직접 공정(철도 운송으로 인한 것)과 간접 공정으로 인한 영향으로 분류될 수 있다. 간접 공정의 경우는 다시 화물 수송 철도 장비와 철도 인프라 비용 두 부분으로 나뉜다. 이러한 결과로 철도 수송 시스템은 다음 세 영역으로 나뉜다.

- 철도 운용: 선로 전환 공정까지 포함한 화물 수송 열차의 운용과 직접 연결된 모든 공정을 포함한다.
- 화물 운송 장비: 화물 운송 철도 장비는 다시 기관차와 화물차로 나뉘고, 제조, 정비, 폐기 등 차량 수명 주기(운용 단계 제외)와 연관된 모든 공정을 포함한다.
- 철도 인프라: 철도 궤도 건설, 보수, 폐기 등으로 구성된다.

이상의 분류와 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- a) 전기: 열차의 운용 단계와 관련하여, 모든 배출 기준 영역에 걸쳐서 스위스 화물 열차는 평균적인 유럽 화물 열차보다 훨씬 우수한 성능을 보유하고 있다. 이러한 결과는, 스위스에서 추진 에너지원으로 수력 발전을 위주로 하여 전기 기관차만을 사용하도록 한 사실을 잘 반영하고 있다. 이와 같은 이유로 인하여, 열차의 전체 수명 주기의 제반 단계와 비교하여 볼 때, 유럽의 평균적인 철도 운송에서는 운용 단계가 제일 큰 비중을 차지하고 있음을 관찰할 수 있다. 이에 비하여, 스위스의 평균적인 철도 운송에서는 결과는 매우 대조적으로 어느 한 단계가 다른 단계보다 더 큰 비중을 차지하지는 않는다.
- b) 중량: 기술 성능 가운데에서 중량 문제가 핵심 요소이다.

- c) 혁신: 복합재 사용은 중량 감소와 밀접한 관련이 있는 것으로 예상할 수 있다.

이러한 결론은 운용 단계의 중요성을 잘 보여 주고 있다. 에너지 절약과 이산화탄소 배출을 고려할 때 주요 요소는 추진 에너지 사용과 열차의 중량이다. 따라서, 금속재 대신 복합재를 사용함으로써 중량 문제를 개선할 수 있음을 제시하고 있다.

2.1.2 Okoinventar Transporte/INFRAS

이 자료에서는 여객 및 화물용 각종 운송 수단(자동차, 트럭, 열차, 항공기, 선박)의 수명 주기 목록(life cycle inventory)이 실려 있다[2]. 운송 수단의 종류에 따른 환경 영향은 운용 단계로 제한하여 보는 경우가 많다. 이 연구에서는 운송의 모든 영역에 연관된 직접 및 간접 공정을 모두 포함하여 전체 수명 주기를 검토하였다. 이와 같이 철저한 분석을 통하여 운송 분야의 사용 연료의 종류, 여객 운송의 종류, 트럭의 중량, 기관차 또는 화물차, 사용 전력의 종류 등의 경우를 구분하여 평가할 수 있게 되었다. 이로써 운송 수단에 관한 완전한 데이터베이스를 갖출 수 있게 되었다.

이 분석 자료는 운송 수단별 비교에 초점을 맞추었으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. 열차와 관련하여 이 연구에서 도출된 것은 열차가 다른 운송 수단에 비하여 더 환경 친화적이라는 사실이다.

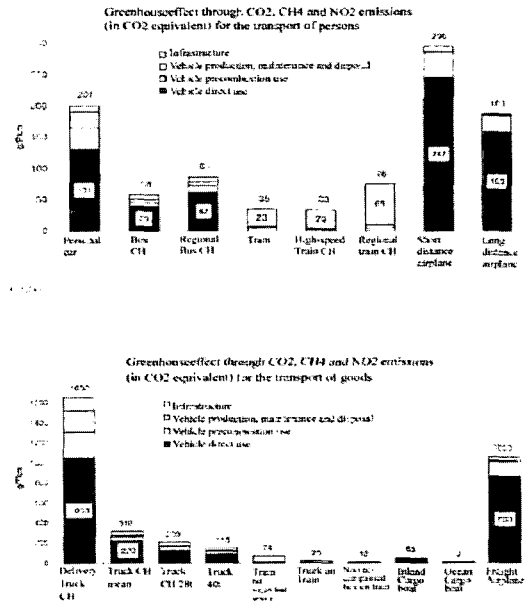


Fig. 1 각 운송 수단 별 이산화탄소 등가치로 환산한 승객-km 당(여객 수송의 경우) 또는 톤-km 당(화물 수송의 경우) 비 온실가스 방출량.

2.1.3 열차 운행과 철도차량의 에너지 효율 기술 평가

본 연구의 초점은 열차가 직접 소비하는 에너지에 맞추었다[3]. 고정 설비의 에너지 효율은 다루지 않았으며, 여객 및 화물 수송, 기타 모든 견인 차량 관련 시스템을 망라하였다. 이 과정의 범위를 명확하게 하기 위하여 열차의 에너지 소비를 다음 네 부분으로 크게 나누어 검토하였다.

- 열차를 가속하고 산언덕을 올라가는 데에 필요한 에너지
- 주행 저항(마찰 및 공기 저항)을 극복하는 데에 필요한 에너지
- 여객 열차의 안락성 기능 등과 같은 탑승 목적에 필요한 에너지
- 견인 시 또는 에너지 전환 장치에서의 에너지 손실

열차 운행에 있어서 모든 에너지 절약 노력은 하나 이상의 위 항목에 초점을 두고 있으며 다음의 결론을 얻었다.

- a) 중량은 열차의 에너지 수요에 있어서 결정적인 요소이다. 이러한 분야에서 복합재와 같은 신소재와 경량 추진 부품 등은 그 잠재력을 지니고 있다.
- b) 고속 여객 열차와 화물 열차에서는 공기 저항이 에너지 소비의 주요인이 된다. 대차를 부드러운 유선형 덮개로 씌우면 고속전철의 공기저항을 감소할 수 있는 좋은 해결책이 될 것이다.
- c) 공간 활용을 최적화함으로써 차량 중량과 공기 저항의 상승은 최소화하면서 열차의 좌석은 더 많이 장착할 수 있다. 이와 같이 하면 결과적으로 좌석당 에너지 소비를 상당히 줄일 수 있다. 이층 열차와 광폭 열차 설계는 전체적인 에너지 효율 면에서 획기적인 비약을 도모할 수 있다.

또한, 이 연구에서는 열차의 중량은 에너지 효율 개선에 핵심적인 변수라는 결론에 도달하였다. 열차의 중량을 경감하는 데에는 몇 가지 방안이 있다. 그 중 하나는 복합재와 같은 경량 소재를 사용하는 것임을 제시하였다.

2.1.4 신칸센 차량의 수명주기평가에 대한 예비 조사

일본 철도 기술 연구소 (Railway Technical Research Institute)는 수명주기평가 기법을 이용하여 신칸센 열차 차량의 환경 영향을 점검하는 과정을 수행하였다[4].

본 연구를 통하여 제조, 운행/정비, 최종 폐기 등 세 가지 단계를 검토하였다. 에너지 소비와 이산화탄소 배출 문제만 평가 대상으로 삼았다. 신칸센 열차 차량의 시리즈 별(0, 100, 200, 300)로 각각 비교하였고 차량 중량의 90% 이상이 강, 알루미늄, 구리로 이루어졌으며, 주행 거리는 8백만 km였다.

주요 결론은 운행 단계에서 수명 주기 에너지 소비와

이산화탄소 배출 양은 모든 단계 중에서 가장 많았으며, 기타 단계에서는 운행 단계에 비하여 낮았다. 이를 통하여 철도 차량의 에너지 절약 문제의 개선은 곧 환경 영향의 감소로 이어짐을 알 수 있었다. 그렇게 하는 방법 가운데 하나로 경량 소재를 사용하는 것임을 보였다.

2.1.5 기타 철도에 대한 수명주기평가 연구

본 연구에서는 철도 운송 사업으로 인하여 환경에 미치는 효과에 대하여 조사하였다[5]. 독일 고속 여객 열차 시스템인 ICE에 대하여 수명주기평가 기법에 따라 분석하였다.

결론은 다음과 같다. 검토 노선에서, 100인 km(100 person kilometers)당 인프라의 에너지 수요는 전체 에너지 수요의 13%를 차지하는 데 비하여, 차량 운행에 필요한 에너지 수요는 수명 주기에 가장 큰 영향을 미친다. 정량적 결과로, ICE 차량으로 100km 운행에 필요한 승객 일인당 소요되는 에너지는 48kg의 화석 연료량과 같다.

3. 한국형 틸팅열차 하이브리드 복합재 차체의 수명주기평가

신소재 복합소재를 차체 재질로 채택하여 개발 중인 한국형 틸팅열차 개발 사업에서도 향후 차량이 환경에 미치는 영향을 기존 재질의 차체와 비교하여 복합소재 채택에 따른 효과를 분석하기 위해 본 연구를 착수하였다.

3.1 비용 모델링(Cost modelling)

비용 모델링 접근법(cost modeling approach)은 이전부터 복합재 제작 과정에 대해 적용해 왔다. 비용 모델링 접근법은 활동기준원가(activity based cost, ABC)와 관련 되지 만, 제조활동과 관련된 공학, 기술적 특성 및 경제적 특성을 사용한다. 기술적인 비용 모델링 접근법은 Fig. 2에 나타나 있다.

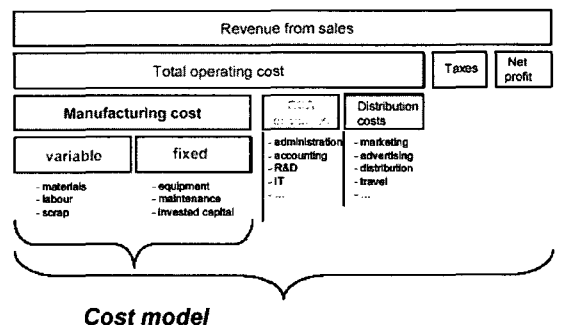


Fig. 2 기술적 비용 모델링.

기술적 비용 모델링은 부품을 제작하기 위해 요구되는 적절한 공정 과정을 확인하는 것으로 시작된다. 부품제작 비용에서 이들 항목의 기여도는 공정 요소, 생산 요소(예, 생산율, 노동력, 그리고 필요 자본) 그리고 생산량을 포함하는 입력값들로 부터 유도된다. 이들 요소들은 공학적 원칙, 경제적 상관관계 그리고 제작 가변성 등에 기초하여 계산된다.

3.1.1 입력 자료와 가정

비용 모델 입력 자료는 재료(중량, 비용), 설비(비용, 공간, 에너지, 수명, 유지보수, 투자비용), 노동력(작업자수, 교대자수, 작업 공간), 공구 그리고 간접비(소모품, 보관료, 폐기물 및 불량률) 등을 포함한다.

기술적 비용 모델링의 순서에 따라, 복합재 원료의 소요량과 가격이 요구된다. 원료비용을 정하는 것은 시스템 비용을 계산하기 위한 첫 단계이다.

두 번째 단계는 제조 공정설비를 위한 일반적인 입력 자료를 정의하는 것이다. 자료는 명백하게 제작공정과 계획된 생산량에 따라 변화한다. 이것은 일반적으로 다음 요소들을 포함하며, 이는 개별적으로 결정된다.

- 연간 최대 공정라인 용량
- 연간 요구되는 부품수량
- 수년간 생산량
- 불량률
- 부품 순환 속도
- 연간 작업일
- 교대 인원 및 교대 시간
- 결합한 직접 및 간접 노동비용
- 직접 노동 직원에 대한 간접 노동 직원 비율
- 에너지 비용
- 단위면적당 공장설비 운영비용
- 설비 유지보수
- 투자 이율

3.1.2 비용 모델 산출

기술적 비용 모델링은 설비 비용, 감가상각비 및 운영 비용을 포함하는 요소들을 정의할 수 있게 한다. 수량에 대한 비용의 상관관계는 다음에 대한 총 생산 비용의 분할과 함께 주어진다.

- 재료
- 직접 노동
- 간접비(간접 노동 및 공장설비 비용)
- 감가상각, 이율 및 유지보수
- 에너지
- 소모품

- 공구
- 운송
- 계약금

비용 모델링의 추가 결과물로는 전체 스크랩율(scrap rate) 및 불량률, 생산 순환속도, 생산 시간, 생산율, 공장설비 면적 그리고 에너지 요구사항이 있다.

3.2 킬팅 복합소재 차체의 수명주기평가

킬팅열차에 대한 수명주기평가는 킬팅열차의 차체구조에 한해 분석대상을 제한할 것이며 구동시스템 및 킬팅 기계장치는 제외될 것이다. 향후, 사례연구와 같은 접근법을 사용하여 다음과 같은 대안들과 비교할 것이다.

- 유리섬유 복합소재 차체
- 하이브리드 차체 (Composite/aluminium)
- 알루미늄 차체

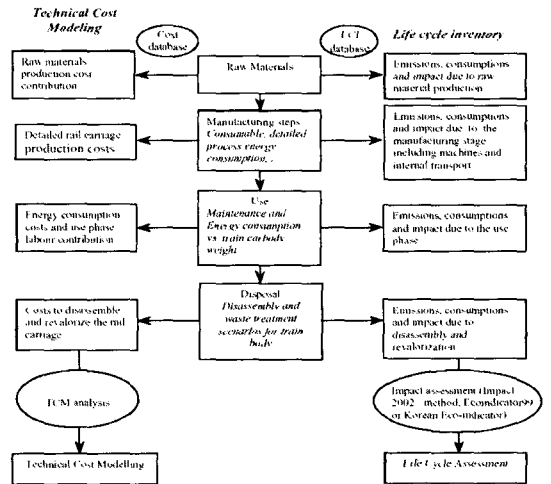


Fig. 3 기술적 비용 모델링과 수명주기평가.

Fig. 3에서는 킬팅열차 차체에 대한 기술적 비용 모델링과 수명주기평가를 원자재, 생산, 사용, 폐기의 단계로 나눠 수행함을 보여주고 있다. 제작단계에 중점을 둔, 수명주기 평가와 기술적 비용 모델링은 관련된 공정의 상세 분석에 근거한다. 각각의 공정을 위해 재료 및 에너지 소비량, 필요한 노동력 그리고 기타 부수적인 정보들이 차체특성에 따라 정의되어진다. 이러한 부수적인 정보들은 비용 데이터베이스(cost database)에 조합된 후 기술적 비용 모델링(technical cost modelling)으로 전달된다. 동시에 수명주기 목록 데이터베이스(life cycle inventory database)

는 수명주기 전반에 걸친 환경적 영향을 종합적으로 분석하는데 필요한 기초 데이터를 추출하기 위해 이러한 부가적인 정보들과 조합된다.

각 단계별 세부 분석내용은 다음과 같다.

원자재단계(material step)에서는 유한요소해석 등의 물성평가를 통해 기술적인 요구사항을 만족하는 원자재의 생산비용 및 그 생산과정에서 생성된 공해 배출, 에너지 소비 등 환경적 영향을 확인한다. 생산단계(manufacturing step)에서는 필요한 소모품, 투입 공수 등의 비용 측면과 여러 제작공정에 필요한 설비 작동으로 인한 환경적 영향을 분석한다.

Fig. 3의 세번째 단계인 운용단계(use step)에서는 복합소재 차체의 유지보수, 차체 경량화에 따른 운영상의 효과를 비용적 측면과 환경영향 측면에 대해 검토한다. 폐기단계(disposal step)에서는 차체 분해 및 폐기물 처리에 소요되는 비용 및 환경 영향을 평가한다.

본 연구를 통해 기존 차체 재질인 알루미늄 등 금속재질에도 동일 분석과정을 적용하고 복합소재의 적용 시, 장단점을 확인하여 경쟁력 있는 소재, 공법 등을 지속적으로 개발할 계획이다.

4. 맺음말

철도차량 분야의 수명주기평가 해외연구사례를 조사하여 그 적용기법을 확인하였다. 차량의 수명주기는 제작에서 폐기 단계까지이며, 이중 가장 큰 영향을 주는 단계는 운용 단계이었다. 운용 단계에서 주요한 인자는 차량의 중량이며, 이를 줄이는 방안으로 경량소재인 복합소재 적용을 언급하였다. 본 연구에서는 현재 연구개발 중인 텀핑열차의 하이브리드 복합재 차체에 대한 비용 및 환경영향 평가를 통해 차체 적용 가능성 및 복합재 차체의 생산성, 타 재질과의 경쟁력, 에너지 절감 효과 등의 정량적인 데이터를 얻을 것이다.

참고문헌

- 1) M. Spielmann, T Kgi, P. Stadler, O. Tiethe, Life Cycle Inventories of Transport Services, in Ecoinvent database 1.01, *Ecoinvent reports No 14*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dbendorf, 2003.
- 2) K. Maibach, D. Peter, B. Seiler, koinventar Transporte, Grundlagen fr den kologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in kobilanzen, 2. korrigierte Auflage, 1999. *Swiss National Science Foundation*. Zrich.

- 3) R. Nolte, EVENT Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways, Final report, 2003, *International Union of Railways*, Deutsche Bahn AG, Berlin.
- 4) T. Nagatomo, T. Miyauchi and H. Tsuchiya, Preliminary investigation for life cycle assessment (LCA) of Shinkansen vehicles, 1997, *Proceedings on the World Congress on Railway Research*, Italy.
- 5) C. von Rozycki et al., Ecology Profile of the German High-speed Rail Passenger Transport System, ICE, 2003, *International Journal of LCA*, 8(2) 83-91.