지속가능 제품설계 연구 동향

글 _ 이재현 _ 대구대학교 산업경영공학과_ jaehyun.lee@daegu.ac.kr

1. 서 론

많은 기업들은 정부 정책과 규제 또는 고객 요구사항의 변화에 따라 자사 제품의 환경 영향도를 개선하고자 한다.

제품의 환경 영향을 평가하기 위한 대표적인 방법론으로 국제 표준에서 정의한 ISO-1404x 시리즈 LCA (Life cycle Assessment)가 있다. LCA는 제품 환경성을 평가하기 위한 4개의 프로세스를 정의하고, 각 프로세스에서 고려해야 할 정보 요소들을 정의하였다 [1]. 4개의 프로세스는 1)분석 범위 설정, 2) Lifecycle inventory (예, CO2 배출량)분석, 3) 환경 영향도 평가, 4) 평가 결과에 대한 해석으로 구분된다.

LCA 방법론은 기본적으로 제품 설계가 끝나고 생산되어 판매가 된 제품을 대상으로 수행했을 때 그 결과가 정확할 수 있다. 제품을 구성하는 재료와 제품을 만들기 위한 제조 공정이 결정되었고, 제품을 사용하고 폐기하는 시나리오가 결정되어 있을 때 LCA 방법론을 적용하면 제품의 환경 영향도를 정확히 파악할 수 있다.

제품의 환경 영향도를 효과적으로 개선하기 위해서는 제품 구현 단계보다는 제품 설계 단계에서 개선하는 것이 더 좋다. 설계자에게 설계 변경에 따른 환경 영향도 예상치를 제공해 주는 것이 필요하다. 지속가능한 제품설계를 위해 설계의 환경 영향도를 추정하는 여러 방법들이 제안되었고 현재도 개발 중이다.

본고에서는 제품 설계의 환경 영향도가 어떻게 표현될 것이며, 설계의 환경 영향도에 가장 큰 영향을 주는 재료 선택과 제조 공정 선택을 위해 어떤 연구들이 진행되고 있는지 소개한다.

2. PCR과 EPD: 제품간 환경 영향도 비교

LCA를 통해 제품의 환경 영향도를 평가하는 주요 이유 중의 하나는 그 제품을 구매하는 구매자 입장에서 제품의 환경 영향도를 다른 제품의 환경 영향도와 비교할 수 있는 척도를 제공하는 것이다. 요즘 슈퍼마켓에서 먹거리를 살 때 칼로리와 영양성분을 비교하며 사는 것이 매우 보편화 되었듯이, LCA를 통해 분석된 제품의 환경 영향도를 구매자들이 쉽게 비교할 수 있도록 해야 한다. 이렇게 된다면 환경을 생각하는 구매자들이 올바른 구매 결정을 내릴 수 있으며, 기업은 좀 더 환경 친화적인 제품을 설계하기 위하여 노력하게 될 것이다.

하지만, 현실적으로 현재의 LCA 방법론에 따라 분석된 서로 다른 두 제품의 환경 영향도를 비교하기에는 문제점들이 있다.

첫 번째는 서로 다른 기능을 하는 제품들 간의 환경 영향도를 비교하는 것이 무의미하기 때문에, 동일한 기능을 하는 제품들끼리 환경 영향도를 비교할 수

있는 제품 분류체계가 필요하다. 예를 들어, 제품 구매자가 구매 의사결정을 할 때, 필기구와 가구를 놓고 환경 영향도를 비교하지는 않을 것이다. 구매자가 가구를 필요로 한다면, 동일한 기능을 하는 가구들끼리 환경 영향도를 비교해야 한다. 새로운 제품들이 끊임없이 개발되며, 여러 기능을 복합적으로 수행하는 제품들이 개발되는 현재의 상황을 고려했을 때, 동일한 기능을 하는 제품들을 분류하는 분류체계를 구축하는 것 자체가 많은 노력을 필요로 한다.

두 번째는 기능적으로 동일한 두 제품들의 생산과정의 Lifecycle inventory (LCI)를 계산할 때 필요한 LCI 데이터베이스에 대해 서로 다른 가정들을 적용할 수 있다는 점이다. LCA는 프로세스 표준으로써 제품의 환경 영향도를 분석하고 평가하는 절차만을 표준화 하였기 때문에, 제품들이 서로 다른 분석 범위와 각자의 고유한 LCI 데이터베이스 활용에 대한 가정들을 사용하였더라도 절차적 문제만 없다면 표준을 따라 분석된 결과라 본다. 따라서, 동일한 기능의 두 제품이 소비하는 이산화탄소 배출량을 계산할 때 서로 다른 LCI 데이터베이스를 쓰거나 데이터의 정확도에 대해 서로 다른 가정을 정의할 경우에는 두 제품의 환경 영향도에 대해 직접적인 비교를 할 수가 없다.

세 번째는 LCA의 분석 범위를 설정할 때, 제품 사용 및 폐기 단계의 시나리오가 각 제품들마다 다를 수 있기 때문에 서로 다른 두 제품의 환경 영향도 결과에 대해 직접적인 비교가 어렵다는 점이다.

ISO 1402x 시리즈 표준들은 이러한 LCA 방법론의 문제점들을 해결하기 위하여 제안되었다. ISO 14020 - Environmental Labeling: General Principle [2]은 제품의 환경 영향도를 표기(labeling)하기 위한 일반적 기준들과 방법들을 정의한다. 방법은 크게 Type I, Type II, Type III로 구분된다. Type I [2]과 Type II [3]는 제품 생산자 또는 외부 전문가가 제품의 환경 영향도를 몇 가지 특성을 선정하여 표기하기 위한 절차와 표기방법에 대한 표준안을 제공한다. Type III는 LCA 방법론을 적용하여 제품의 환경성을 표기하기 위한 절차와 방법들을 정의한다. Type III에 대한 자세한 내용은 ISO 14025- Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures 표준 [4]에 정의되어 있다.

ISO 14025에서 제안하는 제품의 환경 영향도 표기 방법의 핵심 개념은 제품들을 기본 기능에 따라 분류한 UN CPC codes [5]와 제품 분류별 세부 LCA 방법론을 정의한 PCR (Product category rule)이다. LCA 방법론은 모든 제품에 적용 가능한 절차와 원칙들을 정의하였기에 이를 동일한 기능을 하는 제품별로 세분화한 상세 LCA 방법론을 별도로 정의할 필요가 있다. 미국에서 판매되는 모든 제품들을 분류한 UN CPC codes를 활용하여 제품들을 분류하고, 이 분류체계의 최 하위 제품 분류들에 적합한 LCA 방법론인 PCR을 정의하는 절차와 원칙들이 ISO 14025에 기술되어 있다.

PCR 접근방법은 앞서 설명했던 LCA의 문제점들을 해결할 수 있다. 모든 제품들이 UN CPC codes 또는 UN CPC codes에 대응되는 분류체계에 따라 특정 제품 분류 코드를 할당 받기때문에, 서로 다른 두 제품들의 LCA 결과를 비교할 수 있는지 여부를 각 제품의 분류 코드로 확인 할 수 있다. 또한, 두 제품이 동일한 분류 코드를 갖을 경우 그 분류 코드 제품에 대한 LCA방법론이 PCR에 정의 되어 있기 때문에 LCI 데이터를 수집하고 분석하기 위한 가정들이 크게 다르지 않게 된다. 제품 활용 및 폐기 시나리오들도 PCR에 정의되어 있기 때문에 LCI 분석의 범위도 유사하게 된다.

PCR에 따라 분석된 LCA 결과의 표현을 EPD (Environmental Product Declaration)이라 한다. PCR은 유사한 기능의 제품들의 EPD를 작성할 때 반드시 표기해야 할 정보들과 이 정보들을 분석하기 위해 필요한 절차 및 가정들에 대하여 정의한 것이라 할 수 있다.

PCR과 EPD가 중요한 이유는 현재 프랑스 시장에서 판매되는 모든 공산품들은 반드시 EPD를 가지고 있어야 한다고 프랑스 정책으로 제정되었으며, 이러한 추세는 유럽연합 시장으로 확대될 것이라 기대되기 때문이다.

현재까지 모든 제품 분류코드들에 대한 PCR이 개발된 것은 아니며, 일부는 개발되었고, 많은 제품 분류코드들에 대한 PCR이 개발 진행중에 있다. PCR 개발 상황과 개발된 PCR을 한 번에 볼 수 있도록 EPD 웹사이트 [6]에서 관리하고 있으며, PCR에 따라 개발된 EPD들도 함께 볼 수 있다.

3. 재료 데이터베이스의 활용

모든 기업들이 제품의 EPD를 공개해야만 하는 시점이 온다면, 이들은 설계 단계에서부터 제품의 환경 영향도를 예측하여 요구되는 기능과 개발비용을 만족하면서 환경 영향도를 최소화 할 수 있는 설계를 하고자 노력할 것이다.

환경 영향도를 측정하는 기준으로 널리 이용되는 것이 제품 1kg 당 에너지 사용량과 자원 소비량이다. 제품 설계 단계에서 선택되는 재료는 제품 수명주기에 걸친 에너지 사용량과 자원 소비량에 많은 영향을 주게 된다. 재료의 종류에 따라 다르지만, 철강과 같은 재료들은 채광하고 제조 가능하도록 만드는 열처리 과정에서 이미 많은 에너지를 소비하게 된다. 재료 설계 단계에서 최소한의 무게만으로 요구되는 기능을 만족시킬 수 있는 재료를 선택하게 된다면 대량 생산 효과에 의해 전체 재료 소비량을 대폭 경감시킬 수 있다. 이처럼 재료 선택이 지속가능 제품설계에 중요한 역할을 함에 따라, 엔지니어에게 정확한 재료의 특성 정보를 신속히 제공하는 것이 설계 지원 정보시스템의 중요한 역할이 되었다.

Michael Ashby와 David Cebon 교수가 1994년도에 세운 Granta Design [7]이라는 영국 회사는 재료 특성들에 대한 데이터베이스를 설계 단계에서 활용하기 쉽도록 도와주는 Granta MI와 CES Selector라는 도구를 개발하였다. 이 도구들은 기존에 단순히 재료 특성 정보를 테이블로 보여주는 것이 아니라 Ashby의 버블 차트라고 불리는 여러 재료들의 두 가지 특성들을 동시에 비교할 수 있는 차트를 사용자에게 보여주어, 설계자들이 재료들의 특성을 한 눈에 비교해 볼 수 있게 하였다. 또한, 설계에서 대표적으로 필요로 하는 기능별로 어떤 재료 특성들이 좋아야 하는지를 사전에 분석하여, 재료들 간에 비교해야 할 성능 지수를 정의하였다. 이 성능 지수는 설계자들이 재료를 선택할 때 최적의 재료를 선택할 수 있도록 도와준다. 그림1은 Young's Modulus와 Density 특성들로 구성된 버블 차트이다. 이 차트는 주로 가벼우면서도 뻣뻣한(stiff) 제품을 설계할 때 최적의 재료를 선택하기 위하여 사용된다. 차트 위에 표시된 세 개의 서로 다른 점선의 기울기는 제품의 형상과 그 기능에 따라 서로 다른 성능 지수를 표현한 것이다. 한 점선 위에 있는 재료들은 기능적으로 동일한 성능을 보이는 재료들이다. 점선 위쪽에 위치한 재료들은 점선 위의 재료들보다 성능이 더 좋은 재료들이다. 설계자는 제품의 형상과 기능에 따라 적절한 점선을 선택하여 설계 대안 재료들을 선택하고 종합적인 비교를 통해 최적의 재료를

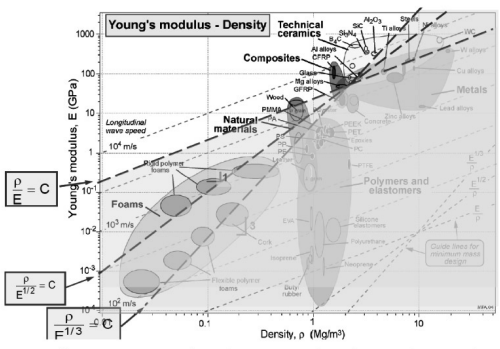

그림 1. Ashby의 재료 특성 버블 차트 예

선택할 수 있다.

Granta Design의 도구들은 과거의 재료 특성 데이터베이스들을 종합적으로 볼 수 있는 기능을 제공하며, 최근에는 CAD와 CAE 도구들과 연동하는 기능도 보이고 있다. 또한, LCI 데이터베이스와 함께 엮어서 설계 단계에서 제품의 환경 영향도를 분석할 수 있는 도구들도 개발 중에 있다.

국내에서는 엘에스디지탈 [8]이라는 회사가 Granta Design과 독점계약을 체결하여 솔루션들을 판매하고 있으며, 현재 LG전자, 현대모비스, 현대 중공업 등에서 사용 중이라 한다. 국내 대학 중에서는 UNIST, 홍익대, 조선대에서 교육 과정에 채택되어 사용되고 있다.

4. 단위 공정 데이터베이스 연구

재료의 특성 정보에 대한 데이터베이스 연구는 오래 전부터 계속되어 왔었다. 하지만, 상대적으로 재료를 가공하는 제조 공정의 에너지 소비량와 재료 소비량에 대한 연구는 최근에 다시 조명을 받고 있다. 과거에는 특정 제조 공정의 에너지와 재료 소비량을 분석했다면, 최근에는 제조 공정의 다양한 조합과 파라메터 설정에 따라 변화하는 에너지 소비량과 재료 소비량에 대한 분석적 모델을 개발하기 위한 연구들과 프로젝트들이 진행되고 있다. 이는 LCA 방법론이 가지고 있는 근본적인 문제인 LCI 데이터베이스의 신뢰도와 직접적으로 관련이 있다.

여러 LCA S/W들이 제품의 Lifecycle inventory를 계산할 때 자체적 또는 타사의 LCI 데이터베이스를 활용한다. LCI 데이터베이스를 구축할 때 제조 공정에 대한 에너지와 자원 소비량은 보통 과거 연구 데이터나 기업의 평균치를 차용한다. LCA를 수행하는 기업의 입장에서는 오래된 과거 LCI 데이터에 대해 신뢰하기 어려우며, 한편으로는 자사의 최신 제조 공정의 LCI 데이터를 수집하기 위한 시간과 자본 투자에 한계가 있다. 현재 CAD나 PLM 에 통합되어 있는 환경 영향도 분석 도구들을 보면, 설계 정보에 포함된 재료 정보와 질량 정보를 바탕으로 계산을 통해 제조 공정의 환경 영향도를 도출한다. 하지만, 아직까지는 설계 특징의 변화에 따른 공정 변화를 환경 영향도 계산에 반영하지 못하고 있다. 예를 들어, 구멍을 뚫어야 할 때 구멍의 크기, 깊이, 재료의 단단함과는 상관없이 구멍을 만들기 위해 없애야 하는 재료의 무게를 기준으로 공정의 에너지 소비량을 계산하는 방식이다. 이는 공정의 에너지 소비량과 설계 형상 특징, 공정 파라메터들 간의 관계를 정의한 분석 모델이 없기 때문이다.

이를 개선하기 위하여 CO2PE! 프로젝트 [9]와 NIST의 Unit manufacturing process 프로젝트 [10]는 단위 제조 공정을 정의하고, 각 단위 공정 별 LCI 데이터를 추정할 수 있는 분석 모델 개발을 연구하고 있다. 또한, NIST에서는 단위 공정의 분석 모델을 컴퓨터가 이해할 수 있는 표현방법으로 구현하고, 전체 제조 공정의 환경 영향도 평가를 시뮬레이션 할 수 있는 방법론과 환경 구축을 목표로 하여 지속가능 제조 프로그램 [11]을 진행하고 있다. 또한, 그 노력의 결과를 표준으로 만들기 위하여 ASTM E60내 하위 그룹 [12]에서 활발히 활동 중이다.

5. 결론

지속가능 제품 설계와 생산은 시장의 요구사항과 정책적 요구사항에 맞물려 제조 기업으로서는 피해가기 어렵게 되었다. 일류 기업들은 오히려 더욱 적극적으로 환경 친화적 기업임을 마케팅하며 환경 친화적 제품 설계와 생산을 강조하고 있다.

그러나, 이러한 노력들이 올바르게 평가 받기 위해서는 명확한 기준에 따라 제품의 환경 영향도를 측정해야 하며 비교가 가능해야 한다. 이를 위해 정부 기관들과 국제 표준은 PCR과 EPD에 대한 연구를 추진하고 있다. 또한, 제품의 환경 영향도를 설계 단계에서

정확히 예측할 수 있도록 재료 데이터베이스와 제조 공정 데이터베이스를 구축하고 활용하는 방안들이 연구되고 있으며, 기초적인 기능들은 상용화 되어 CAD와 PLM 도구들에서 활용되고 있다. 본고에서는 이러한 측면들에서 지속적 제품설계 연구 동향을 소개하였다.

참고문헌

1. ISO 14040, 'Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework', 2006.
2. ISO 14024, 'Environmental labels and declarations -- Type I environmental labelling -- Principles and procedures', 1999.
3. ISO 14021, 'Environmental labels and declarations -- Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)', 1999.
4. ISO 14025, 'Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures', 2006.
5. United Nations Statistics Division, The Central Product Classification (CPC) Ver.2, http://unstats.un.org/unsd/cr/registry/cpc-2.asp
6. The International EPD System, EPD website, http://www.environdec.com/, accessed October 30 2013
7. GRANTA Design, Granta Materials Data Product, http://www.grantadesign.com/products/data/, accessed August 1st 2013
8. 엘에스디지탈, Granta 솔루션, http://www.grantadesign.com/products/data/, accessed August 1st 2013
9. CO2PE!, CO2PE! Project, http://www.co2pe.org/, accessed August 1st 2013
10. NIST (National Institute of Standards and Technology), Sustainability of Unit Manufacturing Processes Project, http://www.nist.gov/el/msid/lifecycle/sm_sump.cfm, accessed August 1st 2013
11. NIST (National Institute of Standards and Technology), Sustainable Manufacturing Program, http://www.nist.gov/el/msid/lifecycle/sustainable_mfg.cfmv, accessed August 1st 2013
12. ASTM International, Committee E60 on Sustainability - Subcommittee E60.13 on Sustainable Manufacturing, http://www.astm.org/COMMIT/SUBCOMMIT/E6013.htm, accessed August 1st 2013