

제품수준 탄소배출이력 계산을 위한 제품자료모델 확장

도남철*

An Extension of Product Data Model for Calculating Product-level Carbon Footprint

Nam Chul Do*

ABSTRACT

The product-level carbon footprint (PCF) is a comprehensive and widely accepted metric for sustainable product development. However, since a full PCF study in general is time and cost intensive, it is not feasible for the product development team to synchronize the activity to the main product development process. In addition, the current dedicated life cycle assessment (LCA) tools for calculating PCF, separated from the main product data management systems, have limitations to provide timely PCF information for design decision makings and collaborations between design and environment engineers. This paper examines the possibility of the extension of the current product data model that can support the PCF calculation with PDM (Product Data Management) databases. The product data model can represent not only the content of products but also context or system information of the products. The product data model can be implemented as a PDM database that can satisfy the needs for handy and timely PCF calculations from the consistent product data for dynamic design decision makings and engineering collaborations.

Key words : Carbon footprint, Product-level carbon footprint (PCF), Product data model, Product data management (PDM), Product life cycle management (PLM)

1. 서 론

환경보호와 자원의 효율적 사용은 제품개발 시 추구해야 할 핵심 가치가 되고 있다. 특정 가치를 추구하고 이를 만족시키는 제품을 개발하기 위해서는 해당 가치의 구현 정도를 측정할 수 있는 지표가 필요하다. 제품수준 탄소배출이력(Product-level Carbon Footprint: PCF) 혹은 제품수준 탄소발자국은 자구온난화를 야기하는 온실가스 배출에 대한 종합적인 지표로서 널리 사용되고 있다.

하지만 제품수준 탄소배출이력 평가는 전체 제품수명주기상의 물질과 에너지의 흐름을 고려해야 하기 때문에 시간과 자원 집약도가 매우 높은 작업이다^[1].

현재 제품수준 탄소배출이력 평가 과정은 제품개발 프로세스와 분리되어 있으며, 이로 인해 제품개발 단계에 동기화된 탄소배출이력 정보를 지원하지 못하고 있다.

친환경 제품에 대한 시장의 높은 수요를 만족시키기 위해서는 제품개발의 다양한 의사결정 단계에서 제품의 환경에 대한 영향을 검토해야 한다. 그러므로 제품개발 프로세스와 연동된 제품수준 탄소배출이력 정보의 제공은 경쟁력 있는 제품개발을 위하여 꼭 필요하다.

제품개발에 연동된 제품수준 탄소배출이력 정보를 제공하기 위해서는, 탄소배출이력 평가 자료, 프로세스, 그리고 사용자 환경과 현재 제품개발 과정을 지원하는 제품자료관리(Product Data Management: PDM) 시스템과의 통합이 필요하다. PDM과 특정 응용의 통합을 위해서는 PDM의 제품자료모델(Product Data Model)에 해당 응용에 필요한 자료모델을 함께 표현할 수 있어야 한다^[2]. 그러므로, 제품수준 탄소배출이

*교신저자, 종신회원, 경상대학교 공과대학 산업시스템공학부, 공학연구원
- 논문투고일: 2011. 02. 19
- 논문수정일: 2011. 06. 17
- 심사완료일: 2011. 06. 20

력 평가를 PDM 시스템에 성공적으로 통합하기 위해서는 기존 PDM 제품자료모델에 제품수준 탄소배출이력 평가에 필요한 자료모델을 효과적으로 통합할 수 있어야 한다.

본 논문에서 제안하는 제품자료모델은 PDM의 제품자료모델과 탄소배출이력 계산을 위한 자료모델을 통합 지원한다. 또한 통합을 위한 자료모델 확장의 기반 개념으로써 제품 시스템(Product System)과 제품 컨텍스트(Product Context) 개념을 도입한다. 이를 통해 제품수준 탄소배출이력 평가를 위한 제품자료모델의 확장이 보편적인 PDM 확장 방향과 일치함을 확인한다.

이 논문에서 제안한 제품자료모델을 기반으로 PDM 시스템을 개발할 경우, 설계자는 기존 PDM을 이용하여 제품 개발 프로세스와 연동된 탄소배출이력 정보를 확인할 수 있다. 또한 설계자와 환경전문가가 동일한 사용자 환경과 데이터베이스를 사용하여 친환경 제품개발을 위한 경쟁력 있는 협동 설계환경을 구현할 수 있다.

이 논문의 2장은 관련연구를 다룬다. 3장에서는 제품수준 탄소배출이력과 그 계산 방법에 대하여 소개한다. 4장에서는 제품수준 탄소배출이력 계산을 지원할 수 있는 통합 제품자료모델과 적용 예제를 소개한다. 5장에서는 제안된 제품자료모델을 적용한 연구용 PDM 시스템을 소개하고, 6장에서 결론을 도출한다.

2. 관련 연구

제품수준 탄소배출이력은 수명주기평가(Life Cycle Assessment: LCA)를 이용하여 측정한다. 현재 수명주기평가를 지원하는 대표적 컴퓨터 기반 정보 시스템으로써 open LCA^[3], SimaPro^[4], SAS CVM^[5], 그리고 Gabi^[6] 등이 존재한다.

이 시스템들은 다양한 환경영향범주에 대한 환경부담을 평가할 수 있으나, 그 과정이 복잡하고, 많은 시간이 소요되고, 필요한 제품정보를 PDM으로부터 일방적으로 제공받아야 하는 단점이 있다. 특히 빈번한 설계변경으로 인하여 제품 정보가 동적으로 변화하는 경우, 이에 동기화된 자료를 제공하는 것이 어렵다. 이로 인해 자료 불일치에 따른 설계정보 오류의 위험도 뒤따른다. 이는 또한 기존 PDM 시스템과 다른 사용자 환경을 제공함으로써 다양한 제품 설계 및 개발 참여자간의 협동작업을 어렵게 한다.

현재 상용 PLM(Product Life cycle Management) 시스템은 수명주기평가 기능을 직접적으로 지원하지 않고 있지 않다. 다만 위에서 언급한 수명주기평가 도구들을 기존 PLM 시스템에 연결하는 시도가 나타나고 있다. Permexas LCA connector^[7]는 상용 PLM 시스템 중의 하나인 Simense 사의 Teamcenter enterprise와 기존 상용 수명주기평가 시스템들을 연결하는 역할을 한다.

기존에 존재하는 PDM과 수명주기평가 시스템을 연결하는 접근법은 자료를 중복관리하고 사용자간의 긴밀한 연결을 제한하여, 제품개발 프로세스와 제품수준 탄소배출량 계산의 연동과 이를 통한 협동제품설계를 어렵게 한다. 예로 설계변경 대안의 탄소배출이력을 검토해야 할 경우 각 대안 별 설계 자료를 준비하여 외부 수명주기평가 시스템에 전달하고, 그 결과를 다시 받아 의사결정에 사용해야 한다.

Glazebrook *et al.*^[8]은 환경고려설계(Design for Environment)를 위한 설계방법론으로 설계지침(Guideline), 수명주기평가, 그리고 분해고려설계(Design for Disassembly)를 제안하였다. 또한 제품수명주기 기반의 설계방법 통합과, 이를 지원하는 통합 제품정보 모델(Product Information Model)의 중요성을 주장하였다.

Jianjn *et al.*^[9]은 Life Cycle Engineering Design (LCED) 설계방법론을 지원하기 위한 제품정보모델을 제안하였다. LCED란 환경고려 제품설계 방법의 일종으로 제품수명주기 동안 환경에 부담을 최소화 시키는 제품 개발을 목표로 삼고 있다. 이 연구에서는 NIST의 Core Product Data Model을 확장하여 수명주기평가를 비롯한 조립고려설계(Design for Assembly), 생산고려설계(Design for Manufacturing), 그리고 수리고려설계(Design for Repair) 등 다양한 설계방법론을 통합하는 자료모델을 제안하였다. LCED를 비롯한 다양한 설계방법론을 통합한 수명주기 중심 제품개발방법론^[10]에 적용되는 개별 설계방법론들은 아직 충분히 일반화되거나 구체화 되지 않았다. 그러므로 이들을 통합 지원하는 제품정보모델도 매우 추상적이고, 그 구현가능성을 확인하기 어렵다.

반면 본 연구에서 대상으로 하고 있는 제품수준 탄소배출이력 계산은 현재 국제 표준화와 상업화가 이루어지고 있는 구체적인 수명주기평가 방법론이다. 그러므로 제품수준 탄소배출이력의 PDM 통합에 대한 본 연구는 구체적 정보시스템으로 실현 가능한 제품자료모델을 제안하고 있다.

3. 제품수준 탄소배출이력 계산

3.1 제품수준 탄소배출이력 소개

제품수준 탄소배출이력(Product-level Carbon Footprint: PCF)은 제품의 수명주기 동안 배출시킨 온실가스(Green House Gas: GHG)의 총량을 뜻하며, 제품수명주기 동안 환경에 부담을 측정하는 수명주기 평가(Life Cycle Assessment: LCA)를 통하여 측정할 수 있다.

수명주기평가는 ISO 표준으로 정의되어 있으며, 평가조사를 위한 목표와 범위 결정, 제품수명주기 모델과 입출력자료 조사, 입력과 출력 사이의 환경적 관계 이해, 그리고 조사 결과의 해석으로 구성되어 있다¹¹⁾. 이 논문에서 이들 중 제품수명주기 모델과 입출력자료 조사와 입력과 출력 사이의 환경적 관계 이해를 다루게 된다.

환경에 관련된 자원과 에너지의 입력과 출력 자료를 조사하고 결정하는 첫 번째 단계는 수명주기평가에서 가장 중요하고 어려운 단계이다. 이 과정에서 입출력 자료의 목록이 생기는데 이를 수명주기목록(Life Cycle Inventory: LCI)이라고 한다. 수명주기목록 증현재 대상이 되는 특정 수명주기에 필요한 자료는 별도의 조사과정을 거쳐 결정해야 한다. 반면에 재료, 에너지, 운송, 그리고 폐기 과정에 관련된 일반적인 자료는 공공 데이터베이스 등을 통하여 확보할 수 있다. 이와 같이 수명주기목록에 대한 표준화된 값을 제공하는 공공 데이터베이스를 LCI 데이터베이스(Life Cycle Inventory Database)라 한다.

제품수명주기 동안 환경에 관련된 물질과 에너지의 입력과 출력 관계를 설정하고 평가함으로써 제품이 환경에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 이 과정을 수명주기 영향평가(Life Cycle Impact Assessment: LCIA)라 부르며 환경영향범주 선택, 분류(Classification), 특성화(Characterization), 그리고 정규화 단계로 구분하고 있다. ISO 표준에서는 분류와 특성화를 수명주기 영향평가에서 꼭 실행해야 할 과정으로 분류하고 있으며 정규화는 추가적으로 실행할 수 있는 과정을 정의하고 있다.

환경영향범주(Environmental Impact Category)는 제품이 수명주기 동안 영향을 주는 환경분야를 뜻하며, 종류로는 지구온난화, 자원고갈, 오존층 파괴, 산성화, 광화학적산화물 생성, 부영양화, 생태계 독성, 그리고 인체독성 등이 있다. 분류는 환경영향 범주에 따라 목록 데이터를 분류하는 것으로 하나의 입출력 목록이 하나의 환경영향범주에 속할 수도 있고, 혹은

다수의 영향범주에 속할 수도 있다. 예로 이산화황 발생량은 산성화와 인체독성 환경범주에 모두 속하는 수명주기목록이 될 수 있다.

특성화는 환경영향 범주 내에서 목록 데이터의 영향을 모델화하는 것이다. 이때 기준이 되는 물질을 이용하여 상대적 영향을 수치화하게 되는데, 이산화탄소를 기준으로 다양한 온실가스의 지구온난화에 대한 상대적 영향을 계산한 단위인 CO₂e를 특성화 예로 들 수 있다. 예로 온실가스의 하나인 메탄의 경우 같은 양의 이산화탄소에 비하여 온난화에 대한 영향이 약 21배 강하므로 1kg의 메탄발생은 21 kg CO₂e로 계산된다.

탄소배출이력은 환경범주 중 지구온난화에 영향을 주는 온실가스 배출량을 평가하는 것이다. 제품수준 탄소배출이력은 기관이나 조직 전체의 온실가스 배출이력을 측정하는 것이 아니라 특정 제품을 중심으로 탄소배출이력을 측정한 결과를 뜻한다.

제품수준 탄소배출이력에 관한 표준으로는 영국의 PAS2050이 있으며¹²⁾, 이 표준에 따르면 제품수준 탄소배출이력을 측정하는 과정은 다음과 같다.

계획: 목표설정, 대상 제품 및 기능단위(The Functional Unit) 결정, 공급자 참여

실행 - 탄소배출이력 계산:

단계 1: 프로세스 지도(Process Map) 작성

단계 2: 대상범위와 계산 대상 우선순위결정

단계 3: 자료수집

단계 4: 탄소배출량 계산

단계 5: 확률모형 고려(선택사항)

후처리: 결과검증, 탄소배출 감소활동, 탄소배출량 공저 및 탄소감소 주장

본 논문에서는 제안하는 제품자료모델은 PAS2050의 두 번째 '실행' 단계를 지원한다. 그러므로 제안하는 제품자료모델은 탄소배출이력 계산 과정을 지원할 자료를 기존 PDM 자료와 통합하여 표현할 수 있어야 한다.

3.2 제품수준 탄소배출이력 계산 과정

제품수준 탄소배출이력을 계산하기 위하여 필요한 자료요소를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 제품구조(Product Structure)
- 2) 제품 컨텍스트(Product Context)
- 3) 수명주기 자료
- 4) LCI 데이터베이스

제품구조는 계산 대상이 되는 제품과 이를 구성하는 부품 정보를 제공한다. 각 부품정보는 부품의 온실가스 배출량을 계산할 수 있는 속성을 포함한다. 제품 컨텍스트는 최종 제품에 포함되지 않지만 온실가스 배출량 계산을 위하여 필요한 자료이다. 예로 부산물이나 폐기물 등이 포함된다. 수명주기 자료는 제품이 거쳐야 할 전체 수명주기상의 각 단계에 대한 정보이다. 일반적으로 제품수명주기는 재료사용(Material Use), 생산(Manufacturing), 배송(Distribution), 사용(Use), 그리고 폐기(End of Life) 단계를 포함한다. 생산 공정 자료는 제품을 생산하는 방법과 순서에 대한 자료로써 제품수명주기의 생산 단계를 보다 상세화시킨 것이다. LCI 데이터베이스는 특정 재료, 공정, 운반, 그리고 에너지 소비에서 발생하는 표준 온실가스 배출량을 제공하는 데이터베이스이다. 이 데이터베이스에 필요한 변수를 입력하면 해당 조건의 온실가스 배출량을 계산할 수 있다.

이해를 돕기 위하여 Fig. 1의 간단한 예제를 통하여 제품수준 탄소배출이력을 계산하는 과정을 설명한다. 이 예에서는 가상의 단순화된 LCI자료를 사용하였다.

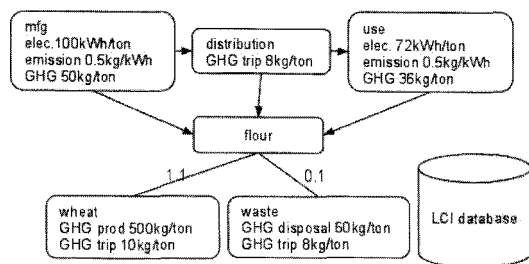


Fig. 1. An Example of PCF Calculation.

Fig. 1은 밀가루(flour)의 수명주기 동안 온실가스 배출이력을 보여준다. 수명주기의 첫 번째 단계인 재료사용 단계에서 제품수준 탄소배출이력을 계산하기 위해서는 제품구조 정보가 필요하다. 최종 제품인 밀가루는 밀(wheat)과 폐기물(waste)로 구성되어 있다. 예의 구성관계는 기존 PDM에서 관리하는 최종 제품에 포함되는 구성품을 표현하는 구성관계와 다르게 재료뿐만 아니라 이 제품의 생산과정에서 발생하는 폐기물과의 관계도 표현하고 있다. 밀가루 1톤을 만들기 위해서는 1.1톤의 밀이 필요하고 0.1톤의 폐기물이 발생한다. 여기서 1톤은 기능단위(Functional Unit)로 제품의 수명주기 동안 탄소배출이력 계산을 위한 기본 단위를 제공한다. 1톤의 밀가루를 생산하기 위

하여 사용되는 밀의 생산과정에서 배출되는 모든 온실가스의 양은 미리 조사된 LCI 데이터베이스에서 검색할 수 있으며, 예에서는 500 kgCO₂e/ton의 온실가스가 발생하였다. 또한 이 밀을 운송할 때 10 kgCO₂e/ton의 온실가스가 발생하였다. 운송 시 탄소배출량을 계산하기 위해서는 운송량, 운송거리, 운송수단(예로 경유트럭), 그리고 운송방법(예로 편도화물) 등의 입력자료가 필요하다.

밀가루 기능단위 량을 생성하기 위해서 발생하는 폐기물(waste)도 폐기 시 배탄 등 온실가스를 배출하며, 해당 자료도 LCI 데이터베이스를 통하여 검색할 수 있다. 예의 경우 60 kgCO₂e/ton의 온실가스를 배출한다. 폐기물도 폐기장소로 운송해야 하며, 이때 온실가스가 발생한다. 예에서는 8 kgCO₂e/ton의 온실가스가 배출된다.

그러므로 1톤의 밀가루를 생산하기 위하여 재료사용 단계에서 발생하는 탄소배출량은 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

(단위 밀 생산 및 운송에서 발생하는 온실가스) * (단위 밀가루 생산에 필요한 밀의 양) + (단위 폐기물 매립과 운송에서 발생하는 온실가스) * (단위 밀가루 생산에 발생하는 폐기물 양)

$$(500 \text{ kgCO}_2\text{e/ton} + 10 \text{ kgCO}_2\text{e/ton}) * 1.1 \text{ ton} + (60 \text{ kgCO}_2\text{e/ton} + 8 \text{ kgCO}_2\text{e/ton}) * 0.1 \text{ ton} = 622.2 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

제품수명주기 측면에서 밀가루를 가공(Manufacturing)해야 하며, 이를 고객에서 운송(Distribution)하고 고객이 사용(Use)하게 된다. 경우에 따라 폐기(End of Life) 단계가 있으나, 예의 밀의 경우 사용 후 최종 폐기물이 따로 남지 않는 것으로 가정한다.

생산공정(Fig. 1의 mfg)을 수행하기 위해서는 단순히 전기만이 필요하며, 단위 밀가루 생산에 필요한 전기량은 100kWh로 알려져 있다. 단위 전력을 생산하기 위한 온실가스 배출량으로 LCI 데이터베이스에서 제공하는 0.5 kgCO₂e /kWh 수치를 사용하면 단위 밀가루 생산 시 발생하는 온실가스의 양 50 kgCO₂e/ton을 계산할 수 있다. 가정으로 운송하고 사용하기 위하여 발생하는 온실가스는 밀가루의 동계학적 운송거리와 사용방법을 통하여 계산할 수 있다. 예의 운송과 사용 단계에서 온실가스 배출량이 각각 8 kgCO₂e/ton과 36 kgCO₂e/ton으로 결정되었다. 그러므로 예의 밀가루 제품의 제품수명주기 동안 발생하는 온실가스 배출이력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

(재료사용으로 발생하는 온실가스) + (생산에 필요한 전기생산에서 발생하는 온실가스) + (운송수단에서 발생하는 온실가스) + (사용에 필요한 전기생산에서 발생하는 온실가스)

$$622 \text{ kgCO}_2\text{e/ton} + 50 \text{ kgCO}_2\text{e/ton} + 8 \text{ kgCO}_2\text{e/ton} + 36 \text{ kgCO}_2\text{e/ton} = 716 \text{ kgCO}_2\text{e/ton}$$

그러므로 밀가루 1톤의 탄소배출이력은 716 kg CO₂e이다.

4. 제품자료모델 확장

4.1 제품 컨텍스트(Product Context)와 제품시스템(Product System) 개념

상세설계를 위한 부품리스트, 기술문서, 그리고 제품구조 관리를 지원했던 PDM은, 공정계획과 고객지원 기획 등 설계 외 부분을 지원하는 PLM(Product Life Cycle Management)으로 확대 발전되고 있다^[2]. 이러한 PDM에서 PLM으로의 발전을 위해서는 PDM에서 관리하는 자료의 구조를 결정하는 제품자료모델의 확장이 필요하다. 기존 PDM은 최종 제품에 포함되는 부품리스트, 기술문서, 그리고 제품구조를 표현하는 제품내용(Product Content)을 주로 표현하고 있는 반면, PLM의 새로운 응용과 통합을 위해서는 제품 주위환경이나 시스템 정보까지 확대 관리해야 할 필요가 있다. 최종제품의 주위 환경 정보까지 포함하는 확대된 제품자료 개념으로써 제품 컨텍스트(Product Context)^[13]와 제품 시스템(Product System)^[11]이 있다.

제품 컨텍스트는 최종제품 정의에 중심을 둔 제품컨텐츠(Product Content)의 반대 개념으로 제품환경 혹은 제품배경으로 해석될 수 있다. 제품 컨텍스트는 기존의 최종제품 중심의 정의에서 벗어나 각 응용 별 제품목적과 환경 정보를 포함한 확대된 제품정보를 뜻한다.

제품 컨텍스트의 예로 Computer-Aided Engineering (CAE) 자료와 PDM 통합에서 필요한 제품 사용환경 정보 관리 예를 들 수 있다. CAE 자료의 PDM 통합은 독립적으로 운영되고 있는 CAE 프로세스와 자료관리를 PDM 시스템과 통합하고자 하는 노력이다^[14]. 이를 통해 CAE활동을 제품개발 프로세스에 통합할 수 있다. CAE 활동에 요구되는 자료 중에는 제품형상, 부품정보, 그리고 제품구조 등 최종 제품과 직접적으로 관련된 정보(제품컨텐츠)도 있지만, 기능, 목표, 주위 온도, 열, 그리고 외력 분포 등 제품의 사용

환경에 대한 정보도 통합적으로 관리해야 할 필요가 있다. 그러므로 이러한 제품환경에 대한 정보를 통합 관리할 수 있는 제품자료모델의 확장이 필요하다^[13].

비슷한 확장 개념으로써 제품시스템(Product System) 개념이 존재한다. 제품시스템이란 제품 자체뿐만 아니라 전체 수명주기 동안 필요한 자료, 재료, 그리고 에너지 등에 대한 정보를 포함한다.

제품의 환경 영향을 평가하기 위하여 최종 제품뿐만 아니라 제품 생산 과정에서 생성되는 부산물이나 폐기물 등의 환경영향도 함께 고려해야 한다. Fig. 1의 예에서도 밀가루의 제품구조에 재료인 밀과 부산물인 폐기물이 함께 포함된 것을 알 수 있다. 이와 같이 최종 제품만 표현하는 기존 제품자료모델으로써는 환경 영향 평가를 지원할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 제품수준 탄소배출이력을 계산하기 위하여 기존의 PDM 응용에 필요한 자료모델을 확장하여 제품 시스템에 관련된 객체를 포함할 수 있도록 한다.

4.2 확장된 제품자료모델

본 논문에서는 기존 제품자료모델을 표현하기 위하여 Fig. 2와 같이 주요 엔티티(Entity)로 구성된 제품자료모델을 채용하였다. 이 모델은 PDM의 부품리스트, 기술문서, 그리고 제품구조 관리 기능을 제공한다.

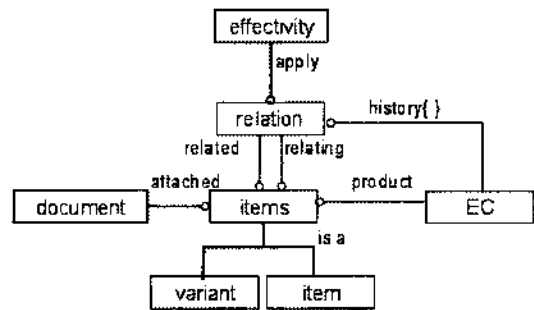


Fig. 2. The Existing Product Data Model.

Fig. 2에서 items는 일반적인 제품(혹은 부품)을 표현하고 is a 관계를 통해 두 개의 하위 엔티티인 variant와 item을 가진다. variant는 조건에 따라 제품구조가 변할 수 있는 변형품을 나타내고, item은 제품구조가 고정된 일반 제품을 표현한다. items 엔티티를 통하여 PDM 기본기능인 부품리스트 관리를 지원할 수 있다.

item에는 item을 서술하는 기술문서(document) 엔티티를 추가할 수 있다(attached 속성 참조). item에 연결되어 관리되는 기술문서 객체를 통하여 PDM의

문서관리 기능을 지원할 수 있다.

각 items는 relation 객체와 두 개의 관계(relating 과 related 관계)를 통해 제품구성관계의 집합인 제품 구조(Product Structure)를 표현할 수 있다. 제품구성 관계의 상위부품이 variant 객체일 경우 relation 객체에 적용된 유효성(effectivity) 객체를 통하여 유효한 제품구조를 정의할 수 있도록 한다. 설계변경(Engineering Changes: EC) 엔티티는 대상이 되는 item을 product 관계로 연결하고 제품구조 변화를 변화된 relation의 순서(Sequence)로 표현한다(Fig. 2의 history 속성), relation, effectivity, 그리고 EC 엔티티를 이용하여 제품구조 관리 기능을 지원할 수 있다.

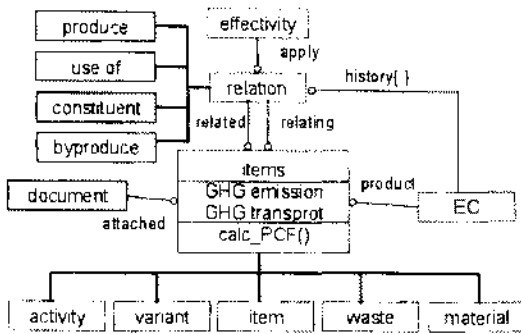


Fig. 3. The Extended Product Data Model.

Fig. 3의 확장된 제품자료모델은 제품시스템을 표현하기 위하여 material과 waste 엔티티를 items의 하위 엔티티로 추가하였다. 즉 재료와 폐기물은 최종 제품에 포함되지 않지만 수명주기 동안 필요한 자료항목으로써 추가하였다. 같은 이유로 activity가 items의 하위 엔티티로 추가되었다. activity는 생산, 운송, 사용, 폐기 등의 제품수명주기 단계를 표현하는 데 사용된다.

items에는 제품기반 탄소배출이력 계산에 필요한 속성들을 확장할 수 있다. 제안된 모델에서는 각 items가 생성하는 온실가스배출량(GHG_emission)과 운송과정에서 발생하는 온실가스배출량(GHG_transport())을 서술하는 속성을 추가하였다. GHG_transport() 속성은 각 객체의 다른 속성을 입력 받아 계산되는 유도 속성(Derived Attribute)이다.

제품시스템을 위해 추가된 엔티티간의 관계를 나타내기 위하여 relation 엔티티에도 세분화된 하위 엔티티를 추가하였다. 제품-재료간의 사용(use of) 관계, 제품-폐기물간의 배출(by-produce) 관계, 제품-활동간의 생산(produce)관계가 하위 엔티티로 추가되었다. 하위

엔티티들은 related와 relating 속성으로 연결된 엔티티의 종류에 따라 그 종류가 결정된다.

items 엔티티에는 제품수준 탄소배출이력을 계산할 수 있는 calc_PCF() 메소드(Method)가 정의되어 있다. calc_PCF() 메소드는 엔티티에 속한 각 개체에 적용할 수 있는 메소드(Instance Method)로써 자신의 하위 제품구조에 속한 item의 GHG_emission과 GHG_transport 속성 값을 산출 합하는 기능을 가지고 있다. 다음은 calc_PCF() 메소드의 정의이다.

```
real calc_PCF() {
    items sub_items[] = this.sub_items(); // 하위 item 추출
    for (i < sub_items[.count; i++){
        sub_item[i].calc_PCF(); // 재귀적 적용
    }
    real total_PCF = total_PCF + (this.GHG_emission +
    this.GHG_transport()); //발생량과 운송시 발생량 합
    return total_PCF;
}
```

4.3. 제품자료모델 적용 예

제안된 PDM 데이터베이스 모델의 유효성을 확인하기 위하여 Wimmer *et al.*의 연구에서 사용한 전기주전자(Fig. 4 참조)의 생애주기평가 예제를 확장된 제품자료모델을 이용하여 표현하였다.

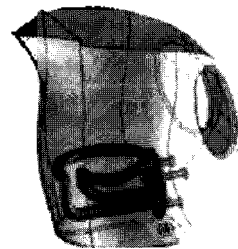


Fig. 4. The Example Kettle^[1].

Fig. 5에서 전기주전자의 재료 사용(Material Use) 단계의 탄소배출이력 계산에 필요한 제품구조는 kettle package (item type)의 하위 구조로 표현되어 있다. kettle package는 kettle과 packaging로 구성되어 있으며, kettle은 다시 housing과 heater로 구성되어 있다. 이들 간의 제품구조는 relation의 하위 엔티티인 constitute의 relating과 related 속성으로 연결되어 있다. 각 item 개체의 최종에는 material 객체들이 use of 관계로 연결되어 있다. 이 예제에서는 waste 객체

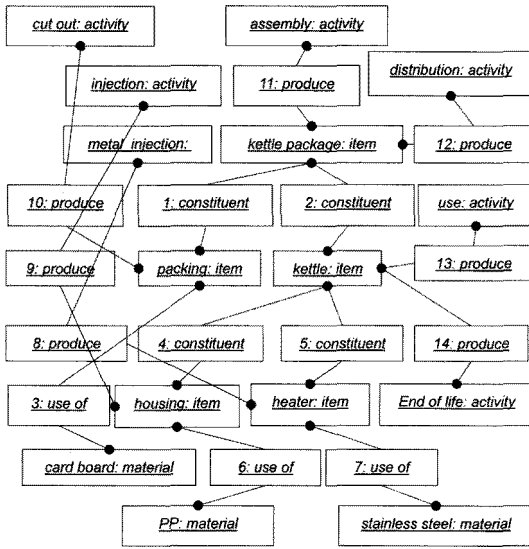


Fig. 5. Instance Model of the Example Kettle^[1].

가 사용되지 않았지만 만일 material이나 item의 구성 관계에서 폐기물이 발생하면 waste 객체와 by-produce 관계를 사용하여 표현할 수 있다.

전기주전자의 생산, 배송, 사용, 그리고 폐기 단계를 표시하기 위하여 items의 하위 엔티티인 activity 객체들이 사용되었다. 그리고 각 activity 객체들은 각 단계에서 관계된 item 혹은 material 객체들과 produce 관계로 연결되어 있다. 예에서 생산 단계는 보다 세분화된 공정인 injection, metal injection, 그리고 assembly(asm) 단계로 표현되어 있으며, 각각 housing, heater, 그리고 packaging과 produce 관계로 연결되어 있다. 다음 단계인 distribution, use, 그리고 end of life는 각각 kettle package와 kettle에 연결되어 있다.

전기주전자의 탄소배출이력 계산은 LCI 준비단계와 탄소배출계산 단계로 나누어진다. LCI 준비단계는 각 객체에 속성인 GHG_emission과 GHG_transport 값을 자체조사나 LCI 데이터베이스를 이용하여 결정하는 단계이다. 예의 전기주전자의 경우 재료인 PP (Polypropylene)에 관련된 LCI 자료는 다음과 같다^[1].

- 소요 PP량 = 0.33 kg/개
- PP 생산 시 탄소배출이력 = 1.8k gCO₂e/kg
- PP 재료사용으로 인한 제품 1개당 탄소배출이력 = 0.33 kg/개 * 1.8 kgCO₂e/1 kg = 0.594 kgCO₂e/개
- 제품구조와 단위부품당 사용 재료와 부품수량을 이

용하여 제품 1개당 필요 재료 량과 단위 재료 생산에 필요한 탄소배출량을 곱하고 이 모든 값을 합하여 재료사용 단계의 탄소배출이력을 계산할 수 있다.

모든 LCI 자료가 준비된 후에 제품구조의 가장 최상위 제품인 kettle package 제품에 calc_PCF() 메소드를 적용하여 탄소배출이력을 계산할 수 있다. 이 메소드가 제품구조를 따라 각 item, material, 그리고 activity 객체에 calc_PCF() 메소드를 재귀적(recursive)으로 적용하게 되어 전체 제품수준 탄소배출이력을 계산할 수 있다. 예의 전기주전자에 대한 탄소배출이력 계산 중 배송단계(distribution: activity)에 대한 탄소배출이력 계산과정을 살펴보면 다음과 같다.

전기주전자 평균배송거리 = 3000 km
 이송방법 40 ton 트럭, 50% load
 전기주전자 중량 0.87 kg/1000kg/ton
 이송 시 탄소배출량 = 93 gCO₂e/ton-km (40 ton 트럭, 50% load)

이송 단계에서 전기주전자 1개당 탄소배출이력
 - 0.87 kg/1000 kg/ton/개 * 0.93 kgCO₂e/ton-km *
 3000 km
 - 2.42 kgCO₂e/개

생산, 사용, 그리고 폐기단계에서도 1개 전기주전자 별 탄소배출이력을 계산한 후 이를 산술 합하면 전기주전자 1개당 탄소배출이력을 계산할 수 있다.

5. 구 현

지금까지 서술한 확장된 제품자료모델의 유효성을 확인하기 위하여 연구용 시제 PDM 시스템을 개발하여 4장에서 언급한 전기주전자 예를 적용하여 보았다. 개발된 PDM 시스템은 상용 관계형 데이터베이스 관리시스템(MySQL 5.0 Database Management System)을 사용하여 제안된 제품자료모델을 PDM 데이터베이스로 구현하였다. 구축된 데이터베이스를 바탕으로 PDM의 기본 기능인 부품리스트, 기술문서, 제품구조, 그리고 설계변경 관리 기능을 구현하였으며, 이를 위하여 Java 기반의 웹 응용프로그램 개발 환경을 사용하였다. 사용된 상용 관계형 데이터베이스 관리시스템은 메소드를 직접적으로 지원하지 않으므로 제안된 calc_PCF() 메소드는 응용 프로그램을 이용하여 개발하였다.

Fig. 6은 개발된 PDM 시스템의 제품구조 생성 기능을 이용하여 전기주전자의 제품구조를 작성한 화면

을 보여준다. kettle package 제품구조아래 관련된 item, material, 그리고 activity 객체들이 연결되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 6의 각 item의 상세 정보 화면에서 제품수준 탄소배출이력을 계산할 수 있다. 탄소배출이력 계산에 필요한 LCR는 제품구조상의 객체들 속성에 나누어 저장되어 있다.

제품수준 탄소배출이력 계산을 지원하는 통합 제품자료모델을 기반으로 만들어진 PDM 데이터베이스는 설계자와 환경전문가가 동일한 환경과 자료를 사용하여 협동 작업할 수 있도록 한다. 예로 설계자는

Fig. 6에서와 같이 제품구조와 재료를 정의할 수 있으며, 제품사용 부분의 환경전문가는 같은 사용자 환경과 데이터베이스를 이용하여 사용관련 개체에 고객의 제품사용 통계치를 입력함으로써 전체 탄소배출이력 계산을 위한 협동작업이 가능하다.

Fig. 7은 제품수준 탄소배출이력을 계산한 결과를 포함한 보고서 기능을 보여준다. 보고서는 calc_PCF() 메소드를 사용하여 생성되었다. 보고서는 Fig. 6에서 정의한 제품구조를 따라 관련 객체의 GHG_emission과 GHG transport 값을 계산한 과정을 보여준다.

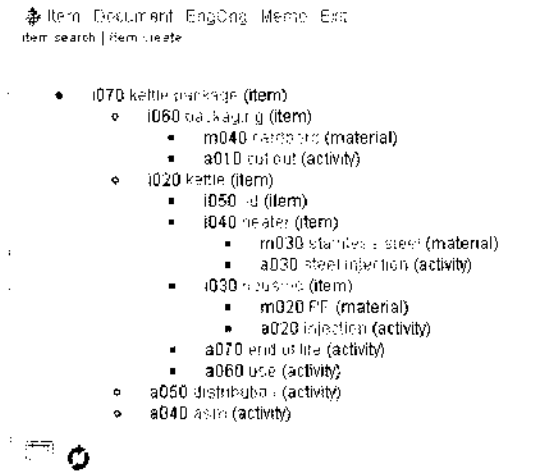


Fig. 6. The Product Structure Browser Window of The Implemented Prototype PDM system.

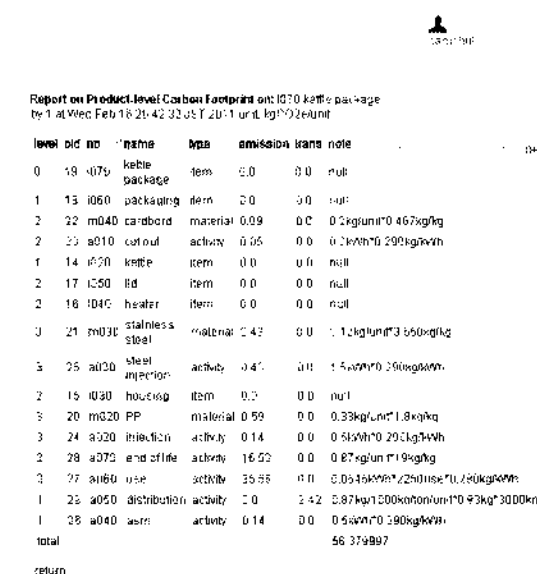


Fig. 7. The PCF Report on the Example Product.

6. 결 론

현재 친환경 제품개발의 대표적 지표인 제품수준 탄소배출이력 계산은 그 과정에서 시간과 자원을 많이 소모하므로 제품개발과 연동되지 못하고 있다. 친환경 제품 개발 압력이 가중됨에 따라 제품설계와 개발 전 과정에 걸쳐 제품수준 탄소배출이력이 필요한 의사결정이 급속히 증가하고 있다. 그러므로 제품개발 프로세스와 제품자료를 관리하는 PDM 시스템과 통합된 제품수준 탄소배출이력 계산 요구가 높아지고 있다.

본 논문은 제품개발과 긴밀히 연동된 제품수준 탄소배출이력 계산을 구현하기 위하여 탄소배출이력 계산에 필요한 프로세스와 제품자료를 통합할 수 있는 확장된 제품자료모델을 제안하였다. 확장된 제품자료모델은 제품개발과 제품수준 탄소배출이력 계산을 위한 정보를 일관되게 통합 관리할 뿐만 아니라, 친환경 제품개발에 참여하는 설계자와 환경전문가들에게 일관된 협동작업 환경을 제공할 수 있다.

제안된 제품자료모델은 새로운 엔티티와 엔티티간의 관계, 탄소배출이력 계산을 위한 속성 추가, 그리고 계산 메소드를 제공하고 있다. 이 제품자료모델의 확장은 최근 PDM의 PLM 확장이 가속화되면서 여러 분야의 통합 요구를 수용하는 제품시스템 개념을 바탕으로 하고 있다.

제안된 모델이 유효한지를 확인하기 위하여 기존 연구에서 제안한 제품수준 탄소배출이력 예를 새로운 제품자료모델을 이용하여 표현하였다. 또한 연구용 PDM 시스템의 데이터베이스 구조를 확장하여 제안한 모델을 구현하고 이를 통하여 해당 예를 실제 시스템에 구현하고 탄소 배출이력을 계산하는 환경을 제공하였다.

그러므로 제안된 제품자료모델을 적용한 PDM 데이터베이스를 사용할 경우, 그동안 분리되어 실행되

던 제품수준 탄소배출이력 계산을 제품개발 프로세스와 연동하고, 이를 통하여 친환경 제품개발을 위한 의사결정을 지원할 수 있게 된다. 또한 설계자와 제품수명주기에 관계된 다양한 부서의 환경전문가들이 같은 사용자환경에서 일관된 제품자료 데이터베이스를 기반으로 효율적인 협동제품개발을 할 수 있다.

제안된 제품자료모델은 수명주기평가 중 가장 대표적이고 표준화된 제품수준 탄소배출이력을 기존의 PDM 데이터베이스에 통합 관리하도록 하고 있다. 추후 다양한 환경영향범주에 대한 평가방법이 구체화되고 표준화 될 것으로 예측된다. 그러므로 추후연구로 추가된 친환경 평가과정을 통합할 수 있는 제품자료모델의 개발이 필요하다.

아울러 현재 제안된 제품자료모델은 보편성을 담보할 수 없다. 그러므로 또 다른 추후 연구로 ISO STEP과 같은 표준 제품자료모델에 기반한 보편적이고 일반적인 제품자료모델의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. Wimmer, W., Züst, R. and Lee, K.-M., "ECODESIGN Implementation - A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development," Springer, 2004.
2. 도남철, "PLM이해와 응용," 생능출판사, 2007.
3. Openlca, "Openlca - Modular Open Source Software for Sustainability," <http://www.openlca.org>, 2011.
4. Product Ecology Consultants, "Simapro LCA Software," <http://www.pre.nl/simapro>, 2011.
5. SAS, "SAS Carbon Value Management Solution," <http://www.sas.com/offices/asiapacific/korea/product/sustainability/cvm/index.html>, 2011.
6. Gabi Software, "Gabi 4 professional," <http://www.gabi-software.com>, 2011.
7. Pernexas, "Pernexas LCA Connector," <http://pernexas.com>, 2011.
8. Glazebrook, B., Coulon, R. and Abrassar, C., "Towards a Product Life Cycle Design Tool," ISEE2000. Proceedings of the 2000 IEEE Interna-

tional Symposium, 8-10 May 2000, San Francisco, CA, pp. 81-85, 2000.

9. Jianjun, Y., Baiyang, J., Yifeng, G., Jinxiang, D. and Chenggang, L., "Research on Evaluation Methodologies of Product Life Cycle Engineering Design (LCED) and Development of Its Tools," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 8, December, pp. 923-942, 2008.
10. Yun, B., Kim, M., Jeong, M. G. and Suh, H., "An Approach to LCA and Eco-Design using Ontology," *Asian Conference on Design & Digital Engineering 2010*, pp. 321, 2010.
11. ISO, "ISO 14000:2004 - Environmental Management," ISO, 2004.
12. BSI, "Guide to PAS 2050 - How to Assess the Carbon Footprint of Goods and Services," 2008.
13. Blakey, K., Johnson, L., Koto, B., Amador, R. and Fairfull, A. H., "Integrating CAE and PDM - A First Step towards Providing Simulation Data Management," *Integrated Enterprise Journal*, No. 2, Issue 2, pp. 7-16, 2001.
14. 도남철, 양영순, "제품관점을 이용한 CAE 자료관리와 PLM 통합," 한국전산구조공학회 논문집, 제21권, 제6호, 2008년 12월, pp. 527-533, 2008.



도 남 철

1991년 포항공과대학교 산업공학과 학사
1993년 포항공과대학교 산업공학과 석사
1996년 포항공과대학교 산업공학과 박사
1996년 삼성중공업 중앙연구소 선임연구원

1998년 볼보건설기계코리아㈜ CAD/PDM팀 과장
2001년 한국전자통신연구원 동시공학연구팀 선임연구원
2002년~현재 경성대학교 산업시스템공학부 부교수

관심분야: Product Data Representations for Product Data Management, Product Lifecycle Management, Sustainable Product Development, and Life Cycle Design