

사출성형공정의 전과정목록분석 모델링

정종연 · 곽종명 · 허 탁

(건국대학교 화학생물공학부)

Life Cycle Inventory Modelling for a Process of Injection Molding

Jongyoun Jung · Jongmyung Gwak · Tak Hur

(School of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University)

ABSTRACT

It is necessary to construct LCI(Life Cycle Inventory) database about materials, manufacture, forming, transport, use and waste etc. for the study of product LCA(Life Cycle Assessment). So, construction of LCI database about plastic forming to study LCA of plastic product or parts is necessary. For this reason, this study is carried out in regard of LCI of injection molding(polystyrene and polyethylene).

Keywords : LCA, LCI, injection molding, polyethylene, polystyrene

요 약 문

제품의 전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)를 수행하는데 있어서 원료채취, 제조, 성형, 사용, 폐기 등에 대한 전과정목록(Life Cycle Inventory; LCI)을 구축하는 것은 필수적이다. 따라서, 플라스틱 제품이나 부품의 전과정평가를 위해서는 성형공정에 대한 전과정목록을 구축하는 것은 필수적이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 사출성형공정(폴리스티렌과 폴리에틸렌)에 대해서 전과정목록분석을 수행하였다.

주제어 : 전과정평가, 전과정목록분석, 사출성형, 폴리에틸렌, 폴리스티렌

I. 서 론

일반적으로 제품에 대하여 LCA(Life Cycle Assessment)를 수행하는 것은 많은 시간과 비용, 인력이 요구되는 작업이다. 그러나, 주요 원료나 공정에 대하여 미리 투입물과 산출물의 흐름을 규명하고 수집하여 데이터베이스를 구축해서 기업의 제품에 대한 환경성평가가에 단위공정 또는 원료별로 구축된 데이터베이스 정보를 상호 연결시켜 분석에 이용한다면 많은 시간과 비용을 단축하고 수행상의 오류를 줄일 수 있을 것이다. 이러한 이유로, 유럽과 북미의 선진국들은 일찍부터 LCA를 위한 데이터베

이스 구축작업을 주요 원료, 에너지 및 공정에 대하여 수행하여 현재 상당한 양의 데이터를 수집해 놓은 상태이다. 이들 보다는 조금 늦었지만 일본에서도 산업부분별 데이터베이스 구축작업에 착수하여 현재 수송, 전기에너지 등의 사회간접자본 시설과 주요 원료물질에 대한 데이터베이스가 어느 정도 구축되어 있다. 국내에서도 향후 기업들이 그들의 제품에 대하여 LCA를 수행하는 것을 용이하게 하기 위하여 주요 원료, 에너지, 공정, 수송 등에 대한 데이터베이스 구축작업을 지난해부터 시작하게 되었다.

현재 국내기업이 그들의 제품에 대한 LCA를 수행하기 위해서는 통상 외국 software상의 데이터베이스를 이용하게 되는데, 이는 국내의 데이터베이스

가 부족하기 때문이다. 많이 사용되고 있는 software로는 TEAM, Gabi, SimaPro, LCAiT 등이 있으나 이러한 외국 software상의 데이터베이스도 공정부분에 대해서는 상대적으로 취약한 측면을 보여주고 있다. 본 연구에서는 플라스틱의 성형에 대표적인 공정인 사출성형공정에 대한 데이터베이스를 구축하기 위한 모델링을 시도하였다.

플라스틱제품 또는 부품에 대한 LCA를 수행하기 위해서는 원료채취, 제조공정, 성형공정, 사용, 폐기에 대한 LCI 데이터베이스가 필요하다. 따라서, 플라스틱 성형의 대표적인 공정인 사출성형의 LCI 데이터베이스를 구축하는 것은 필수적이라 할 수 있다.

공정부분의 LCI는 제품의 LCI와는 달리 투입물의 양 뿐만 아니라, 투입물의 성형특성에 따라 다르게 나타나는데, 이는 투입물의 강도나 성분에 따라 성형 조건을 다르게 해야 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 성형조건을 고려한 적절한 시나리오를 작성하여 플라스틱 사출성형공정에 대한 데이터베이스를 구축하였다.

II. 목적 및 범위정의

1. 연구목적

플라스틱 성형공정의 대표적인 공정인 사출성형공정에서 발생하는 환경파라미터를 규명하고, 전과정 목록분석 데이터베이스를 구축함으로써, 향후 사출성형공정을 이용한 플라스틱제품의 전과정평가 수행시 용이하게 활용토록 한다.

2. 연구범위

1) 공정시스템의 정의

플라스틱의 대표적인 성형방법인 사출성형으로 정

하였고, 사용원료로는 대표적인 범용플라스틱인 polyethylene(PE), polystyrene(PS)을 선정하였다.

Table 1과 같이 PS, PE에 대해서 사출성형을 통해 제품 성형시 각기 성형조건이 다르므로, 각각의 재료별 LCI database를 구축하는 것이 타당하다.

2) 기능 및 기능단위

일반적으로 주요 원료의 경우에 기능단위를 설정할 때는 제품 1kg 등으로 설정하지만, 사출성형과 같은 공정부분에서 보다 실제적인 데이터베이스를 구축하기 위해서는 시나리오 형태의 LCI 데이터베이스를 구축하는 것이 보다 바람직하므로 기능단위를 범용플라스틱(PS, PE)을 사출압력(1kgf/cm²), 이론사출용량(1cm³), 사출중량(1g), 가소화능력(1kg/hr)으로 사출성형하는 것으로 설정하였다.

3) 공정시스템 경계

사출성형공정의 시스템경계는 원료가 사출성형기에 투입되는 시점부터 제품이 산출되는 시점까지로 정의하였다. 시간적 경계는 1999년 현재, 공간적 경계는 국내로 설정하였다. 즉, 1999년 현재 국내에서 사용되고 있는 사출성형기를 이용하여 제품을 성형하였을 때 발생하는 전기, 윤활유, 그리스사용량을 고려하였다.

4 가정 및 제한사항

1) 사출성형기는 크게 사출압력을 제어하는 piston의 작동을 위해 사용되는 pump motor와 원료를 녹이는데 사용하는 heater로 구성되는데, 이곳에서 전기가 사용된다. pump motor와 관련된 factor는 사출압력, 이론사출용량이고, heater와 관련된 factor는 가소화능력이다.

2) 시나리오 형태의 데이터베이스구축을 위해서

Table 1. PE, PS 사출성형 조건

원료	예비조건		실린더 온도(°C)					금형(°C)
	온도(°C)	시간(h)	노즐	H1	H2	H3	H4	
PE	no	-	210~240	200~230	180~220	160~210	120~180	10~60
PS	no	-	210~250	210~250	210~230	180~220	150~180	10~80

pump motor와 heater의 전기사용과 관련된 인자인 사출압력, 이론사출용량, 사출중량, 가소화능력을 이용하여 전기사용량과의 관계를 규명하였다. 즉, 전기 사용은 원료를 녹여서 일정한 사출압력으로 제품을 생산하는데 필요한 것이므로, 시간당 사용된 일 (J/hr)에 대해서 앞에서 언급한 인자들을 이용하여 다음과 같은 관계식을 도출하였다.

$$\begin{aligned} \text{성능(J/hr)}[\text{생산능력} \times \text{시간당 생산개수}] = \\ [\text{사출압력(1kgf/cm}^2) \times \text{이론사출용량(1cm}^3)] \times \\ [\text{가소화능력(1kg/hr)} / \text{사출중량(1g)}] \times 10 \end{aligned}$$

3) 윤활유, 그리스 사용량은 piston이 얼마나 왕복하는가에 따라 좌우되므로, 시간당 생산개수에 관계된다고 할 수 있다. 따라서, 가소화능력과 사출중량이 관련되는데 가소화능력은 사출성형기의 용량에 따라 고정된 값이므로 변할 수 있는 factor는 사출중량이다. 따라서, 윤활유와 그리스의 사용량은 사출중량과의 관계식으로 구하였다.

4) 사출성형과 관련된 주변장치(호퍼로더, 정량혼합장치, 건조장치, 분쇄기, 금형온도조절기, 금형내형상식별장치, 성형품 취출 로봇 등)에 대해서는 고려하지 않았다.

III. 전과정 목록분석

1. 데이터 수집

연구의 기능단위를 사출압력(1kgf/cm²), 이론사출

용량(1cm³), 가소화능력(1kg/hr), 사출중량(1g)으로 범용플라스틱(PS, PE)을 사출성형하는 것으로 설정하였다. 이들 각각의 인자들에 대한 자료를 수집하기 위하여 1999년 국내에서 가장 많이 사용되는 사출성형기들에 대해서 제원을 조사하였고, 보조재로 사용되는 윤활유와 그리스의 종류와 사용량을 파악한 후, 이들에 대한 전과정목록분석을 하기 위하여 각각의 성분과 함유량을 조사하였다.

2. 데이터 계산

1) 전기사용량

수집된 사출성형기의 제원을 바탕으로 성능과 전기사용량에 대한 관계를 조사하였다. 이를 바탕으로 sigmaplot software를 이용하여 Fig. 1, Fig. 2와 같은 그래프를 작성하였고, 성능대비 전기사용량의 관계식을 도출하였다.

이렇게 구한 사출성형기의 성능과 전기사용량의 관계식은 다음과 같다. 여기서

$$\text{PS ; } y = -5.052 + 1.688e^{-5}X - 1.199e^{-12}X^2 - 5.603e^{-20}X^3$$

$$\text{PE ; } y = -1.437 + 1.643e^{-5}X - 1.085e^{-12}X^2 - 5.603e^{-20}X^3$$

y = 전기사용량(kW)

x = 성능(J/hr) =

$$\frac{\text{사출압력(kg/cm}^2) \times \text{이론사출용량(cm}^3) \times \text{가소화능력(kg/hr)}}{\text{사출중량(g)}} \times 10$$

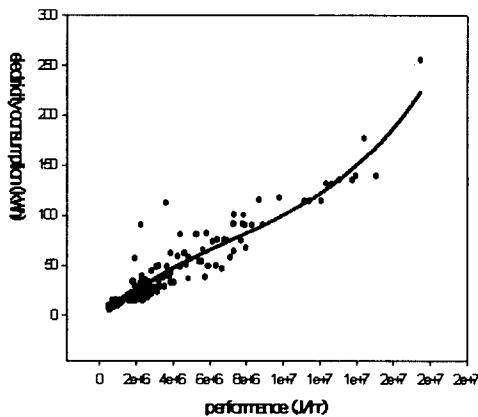


Fig. 1. PS의 사출성형시 성능에 따른 전기소비량

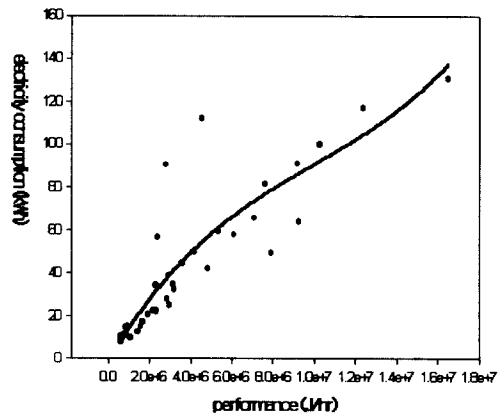


Fig. 2. PE의 사출성형시 성능에 따른 전기소비량

2) 윤활유와 그리스사용량

윤활유와 그리스의 사용량은 전기사용량과는 달리 대부분 사출중량에만 관계되므로, 연간 윤활유와 그리스의 사용량을 연간 생산량의 분율로 전환하여 사출중량(1g)에 대한 윤활유와 그리스의 사용량을 계산하였다. 이렇게 계산한 바에 의하면, 윤활유 사용량은 $7.762 \text{ e-}4 \text{ g/g}$ (사출중량)이고, 그리스 사용량은 $3.524 \text{ e-}5 \text{ g/g}$ (사출중량)이다.

3) 목록분석

전기사용량과 윤활유, 그리스사용에 관한 목록분석의 형태는 Table 2와 같다.

상위공정을 포함한 최종적인 전과정 목록분석 데이터베이스를 구축하기 위해서는 앞에서 구한 관계식으로부터 계산된 전기사용량에 대하여 전기생산과 관련된 데이터베이스를 연결해야하고, 윤활유와 그리스는 성분과 비중을 고려하여 물질파라미터를 산출한 후 상위공정을 규명하기 위해서 각 물질에 대해

Table 2. 목록분석결과

LCI DATA		
제품		
사출압력		kg/cm ²
이론사출용량		cm ³
가소화능력		kg/hr
사출중량		g
성능		J/hr
전기사용량		kWh

항목			물질명	단위	양
대구분	중구분	소구분			
투입물	기술계	원료	PS	kg	
	기술계	유틸리티	전기	kWh	
	기술계	보조물질	윤활유	kg	
	기술계	보조물질	그리스	kg	

항목			물질명	단위	양
대구분	중구분	소구분			
산출물	기술계	제품	PS	kg	
	환경	폐기물	윤활유	kg	
	환경	폐기물	그리스	kg	

서 상위공정으로의 데이터베이스를 연결해야한다.

Table 2에서 보는 바와 같이 실제 사출성형의 도입조건을 사출압력, 이론사출용량, 가소화능력, 사출중량으로 대입하면 그로부터 사출성능을 계산하게 되고, 앞의 관계식으로부터 전기사용량을 구할 수 있게 된다.

최종 결과에서 알 수 있듯이 전기사용량이 출력(kW)으로 계산되었다. 이렇게 산출한 필요출력을 소비전력(kWh)로 산출하기 위해서는 시간의 개념이 들어가야 한다. 이러한 점은 가소화능력(kg/hr) 인자를 이용하여 변환이 가능하다. 가소화능력은 시간당 원료를 녹일수 있는 양으로 사출중량(g)을 가소화능력으로 나누어주면, 사출중량만큼 녹이는 시간을 구할 수 있다. 따라서 위에서 구한 전기사용량에 이를 곱해주면, 소비전력(kWh)을 구할 수 있다. 이렇게 산출된 소비전력은 외국 software의 데이터베이스와 비교하면, 약간 적게 나타나는데, 이는 앞의 고려사항에서 주변장치(호퍼로더, 정량혼합장치, 건조장치, 분쇄기, 금형온도조절기, 금형내 형상식별장치, 성형품 취출 로봇 등)를 배제한 전기소비량이기 때문이다. 물론 이러한 주변장치의 데이터베이스를 연결하면 최종적으로 제품의 사출성형시 발생하는 전기사용량을 산출할 수 있다. 따라서, 이러한 주변장치의 데이터베이스의 구축도 필요하다.

IV. 외국 software의 데이터베이스와의 비교

Gabi 3.0에는 일반적인 플라스틱의 사출성형에 대한 평균 데이터베이스가 포함되어있다. 여기서는 비교를 위하여 상위공정과 하위공정으로의 연결을 배제하고 목록의 형태만을 Table 3과 같이 나타내었다.

한편, SimaPro 4.0에는 일반적인 플라스틱, PVC, non-PVC polymers, PET의 사출성형에 대한 데이터베이스가 있는데, 여기서도 마찬가지로, 상위공정과 하위공정으로의 연결을 배제하고 일반적인 플라스틱이 사출성형공정에 대한 목록의 형태를 Table 4에 나타내었다.

Table 3. 일반적인 플라스틱 사출성형공정의 목록(Gabi 3.0)

항 목			물질명	단위	양
투입물	기술계	원료	플라스틱	kg	
	기술계	유틸리티	전기	MJ	
	자연계	유틸리티	냉각수	kg	
항목			물질명	단위	양
산출물	기술계	제품	플라스틱	kg	
	자연계	폐기물	냉각수	kg	
	자연계	폐기물	플라스틱 폐기물	kg	

Table 4. 일반적인 플라스틱 사출성형공정의 목록(SimaPro 4.0)

항목			물질명	단위	양
투입물	기술계	유틸리티	전기	MJ	
	항목			물질명	단위
산출물	기술계	제품	플라스틱	kg	
	자연계	폐기물	플라스틱	kg	
			폐기물	kg	

Table 3과 Table 4에서 보는 바와 같이 기존 외국의 software에 있는 사출성형관련 데이터베이스는 그 형태에 있어서 매우 취약하며, 각 원료별로 구분되어 있지도 않다. 그 결과 원료를 달리하더라도 소비되는 전기의 사용량이 달라지지 않는다는 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 PS와 PE에 대하여 별도로 사출성능과 전기사용량과의 관계를 유도하였으므로, 각 원료에 대하여 다른 전기사용량을 얻을 수 있었다. 또한, 외국 software의 경우에는 단순히 플라스틱원료의 중량에 기초하여 데이터베이스를 구축하였으므로 실제 사출성형의 조건을 전혀 반영하지 못하고 있다. 즉, 사출압력, 가소화능력 등 성형조건 변화에 데이터베이스가 수용하지 못한다는 치명적인 단점을 갖고 있다. 같은 reference flow 1kg 이라 하더라도 기존의 외국 software 데이터베이스는 사출성형기의 특성 즉, 사출압력, 이론사출용량, 가소화능력, 사출중량의 인자들을 고려하지 못함으로써, 목록결과의 신뢰도를 저하시키게 된다. 현장에서는 성형하는 제품의 특성에 따라 사출압력 등을 변

화시켜야 하는데, 예를 들어 사출압력을 1000kg/cm²으로 사출하였을 때와 1500kg/cm²으로 변화시켰을 때의 전기사용량이 다른 것에 대한 고려를 하지 못하므로 목록결과에 상당한 오류가 발생한다. 반면에, 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 사출압력, 이론사출용량, 가소화능력, 사출중량과 같은 사출성형기의 특성을 고려하여 목록분석 데이터베이스를 작성함으로써 기존 데이터베이스의 단점을 보완하고자 하였다.

V. 결 론

기업에서 그들의 제품에 대한 전과정평가를 용이하게 수행하기 위해서는 주요 원료, 공정, 수송 등에 대한 데이터베이스구축이 필수적이다. 이러한 취지하에 본 연구에서는 플라스틱성형의 대표적인 성형 방법인 사출성형에 대하여 LCI 데이터베이스를 구축하였다.

공정에 대한 LCI 데이터베이스는 제품의 특성에 따라 공정조건이 변화하므로, 실제적인 상황을 반영하기 위해서는 시나리오 형태의 데이터베이스가 타당하다. 이에 본 연구에서는 사출성형공정의 LCI 데이터베이스를 시나리오 형태로 작성하였다. 사출성형공정의 LCI 데이터베이스가 시나리오 형태를 갖추어야 하는 이유는 다음과 같다.

첫째는 사출성형공정에서 발생하는 가장 큰 환경영향이 전기소비에 관련된 부분인데, 국내의 사출성형업체의 대부분이 영세한 소기업으로 사출성형기의 전기사용량을 측정하기 위한 계량기가 설치되어 있지 않고, 하나의 사업장에서 여러 가지 방식의 성형기를 다루고, 전기사용량은 사무실을 포함하는 공장 단위로 관리를 하기 때문에 실제로 사출성형공정에서 소비되는 전기사용량을 산출하는 것은 불가능하다. 따라서, 보다 현실적이고 적용이 용이한 시나리오의 작성이 필요하다.

둘째는 외국 software 데이터베이스는 원료의 LCI 데이터베이스 경우와 마찬가지로 사출성형공정에 대해서도 제품 1kg의 성형에 대해서 데이터베이스가 구축되어있는데, 이를 사용하여 전과정평가를

수행하였을 때는 사출성형기의 특성이나 성형조건의 변화에 대한 부분을 고려하지 못함으로써 목록분석 결과에 상당한 오류가 발생할 수 있다. 따라서, 시나리오 형태의 LCI 데이터베이스를 구축함으로써 사출성형공정의 실제상황이 충분히 고려된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) M. A. Curran, Environmental Life-Cycle Assessment, McGraw-Hill, (1996).
- 2) ISO/TC207/SC5/WG3 Technical Report, (1998).
- 3) A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, (1982).
- 4) R. Heijungs, *Environmental Life Cycle Assessment of Products*, CML, (1992).
- 5) H. Wenzel, Environmental Assessment of Products, Chapman&Hall, (1997).
- 6) ISO/CD 14043.2 : Life Cycle Assessment-Life Cycle Interpretation, (1998).
- 7) ISO 14041 : Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis, (1998).
- 8) ISO 14040 : Life cycle assessment - Principles and framework, (1998).