

전과정평가 기법을 활용한 국내 주요 플라스틱에 대한 환경영향 분석

김 익, 허 탁

(건국대학교 화학생물공학부)

Analysis of a Environmental Impact of the Major Domestic Plastics using Life Cycle Assessment Methodology

Ik Kim, Tak Hur

(School of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University)

ABSTRACT

This study analyzes environmental impact of major domestic plastics materials using Life Cycle Assessment methodology. To identify the key environmental issues by holistically analyzing environmental performance of constituent materials of products, this study divides environmental factors into material use, energy use and impact of emission, and also divides manufacturing process into productions of raw material in upstream stage, basic material, intermediates and final products. This study also allocates various key environmental issues into direct processes and indirect processes to properly propose efficient alternatives.

As a result, several key issues were identified such as basic unit of naphtha for producing ethylene and propylene, energy use in the PP production and in the PS intermediates production, and finally heavy metal discharged from chlorine production in PVC. Different alternatives are proposed in this study by differentiating direct and indirect processes on the key environmental issues.

key words : Life Cycle Assessment, Plastics, HDPE, LDPE, PP, PS, PVC, Eco-indicator, Key issue of environmental aspects, Alternatives, gate-to-gate database

요 약 문

본 연구에서는 국내에서 제조되어 범용적으로 사용되는 플라스틱의 환경영향을 전과정평가 기법을 이용하여 분석하였다. 제품을 구성하는 소재들의 환경성을 총체적으로 분석하여 환경측면의 주요이슈를 도출하기 위하여, 환경문제 유발요인은 원료사용, 에너지 사용, 배출물에 의한 영향 등으로, 생산공정은 원료물질 생산 및 기초물질생산, 중간제품생산, 제품생산 등의 단계로 구분하였다. 또한, 효율적인 대안 제시를 위하여, 도출된 환경측면의 주요이슈를 직접 공정과 간접 공정으로 나누어 접근하였다. 그 결과, 에틸렌과 프로필렌의 원료인 납사의 경우에는 워단위가, PP는 생산 공정내의 에너지사용, PS의 경우에는 중간제품 생산과정에서의 에너지 사용, PVC의 경우는 염소제조 과정에서 발생하는 중금속이 주요 이슈로 판명되었다. 이렇게 판명된 주요 이슈에 대하여 직접 공정과 간접 공정을 구별하여 서로 다른 대안을 제시하였다.

주제어 : 전과정평가, 플라스틱, 고밀도폴리에틸렌, 저밀도폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스티렌, 폴리염화비닐, 환경지수, 환경측면 주요이슈, 대안, gate-to-gate 데이터베이스

I. 개 요

공장에서 나오는 배출물에 대한 농도규제를 통하여

공장단위당 배출물의 농도와 양은 과거보다 줄어들었다. 하지만, 인구증가와 더불어 풍요로운 삶을 추구하고자 하는 소비자의 욕구가 늘어나면서 이를 충족시키기 위하여 공장에서 다량의 제품이 생산되면서 제품생

산 단위당 배출물의 양은 감소하였지만, 제품량이 증가하면서 결국에는 배출물의 총량은 계속하고 증가하였다. 이로 인하여 환경문제는 날로 심각한 지경에 이르게 되었다. 이러한 환경문제를 근본적으로 해결하기 위한 대안으로 배출물의 관점이 아니라 환경친화적인 소재의 개발 및 청정생산기술을 활용한 제품 또는 부품생산, 에너지효율 개선, 재활용 촉진을 통하여 배출물의 근원을 줄이려는 방향으로 환경개선 전략이 전환되고 있다. 이러한 대안들 중에서 환경친화적인 소재의 개발은 오염원 감소(source reduction)의 차원에서 활발히 연구가 진행되고 있다.

여러 소재들 중에서 제품을 구성하는 대표적인 소재인 플라스틱은 환경문제를 야기하는 주요 소재들 중의 하나로 인식되고 있기 때문에 이에 대한 환경친화적인 소재의 개발이 절실히 요구된다. 그런데, 플라스틱에 의해서 야기되는 환경영향은 원유채취에서부터 원유정제, 납사 크래킹, 모노머 생산, 중합 등 플라스틱을 생산하기까지의 상위흐름 단계들에 의해서 발생되는 환경영향이 누적된 결과이므로 환경성을 개선하기 위해서는 상위흐름을 세부적으로 구분한 후, 세부 단계들에 대한 공정데이터를 조사하고 분석하여 환경영향 야기하는 요인을 파악하고 이를 통하여 개선기회를 모색하여야 한다.

이러한 취지 하에, 본 고에서는 국내에서 생산되는 주요 플라스틱 소재인 HDPE(High Density Polyethylene), LDPE(Low Density Polyethylene), PP(Polypropylene), PS(Polystyrene), PVC(Poly Vinyl Chloride)에 대하여 전과정평가를 수행하고 이를 통하여 구축된 gate-to-gate 데이터베이스를 활용하여 투입물과 배출물의 관점에서 상위흐름의 전과정 단계별로 환경영향을 분석한 후에 적절한 개선대안을 제시하고자 한다.

II. 본 론

1. 전과정평가 수행

본 연구의 기능단위는 HDPE, LDPE, PP, PS, PVC 각 1kg을 생산하는 것으로 정의하였으며, 시스템 경계는 원유채취 단계부터 플라스틱을 출하하는 단

계까지인 cradle to gate로 설정하였다. 최종 중합공정의 데이터 품질요건은 현장 데이터를 사용하는 것을 원칙으로 하였으며, 중합공정 외부의 데이터베이스의 경우에 시간적인 경계는 최근 5년 이내의 데이터를, 지리적인 경계는 국내 데이터베이스를 사용하는 것을 원칙으로 하였으나, 해당 데이터베이스가 없을 경우에는 지역적 시간적 상관성을 고려하여 최선의 대안을 선택하기로 하였다. 또한, 제품과 부산물에 대한 할당은 매출액을 기준으로 하였다.

전과정 목록분석은 ISO14041의 절차에 준하여 수행하였다. 먼저, ISO14048 문서에 준하여 설문지를 개발하고 이를 활용하여 데이터를 수집하였다. 수집한 데이터에 대해서는 물질수지 및 이상치 유무, 데이터 누락여부 등을 종합적으로 고려하여 데이터를 검증하였다. 또한, 검증된 데이터를 단위공정별로 할당하고 기능단위별로 환산한 후에 데이터를 통합하여 gate-to-gate 데이터베이스를 구축하였다. 구축한 gate-to-gate 데이터베이스를 전과정으로 확장시키기 위하여, 기술계로 투입되거나 산출되는 물질에 대해서는 범위정의 단계에서 고려한 데이터 품질요건에 부합되는 데이터베이스를 연결하여 cradle-to-gate 데이터베이스를 구축하였다. 모듈별로 구축된 전과정 목록 분석 결과를 토대로 잠재적인 환경영향을 규명하기 위하여 산업자원부에서 개발한 영향평가 방법론을 적용하여 환경지수를 산출하였다.

2. 플라스틱 소재별 환경영향 분석

플라스틱 소재에 의해서 야기되는 환경영향을 발생요인별로 보면, 원료 및 에너지의 사용과 공정상의 배출물들에 의해서 야기된다. 또한, 전과정 단계별로 보면, 원유를 채취하는 단계에서부터 플라스틱 수지를 생산하는 단계까지가 포함된다. 본 연구에서는 플라스틱 소재에 의해서 야기되는 환경영향을 총체적으로 분석하기 위하여 각 발생요인의 전과정 단계별로 세부적으로 분석하였다. 아래에는 정의한 전과정 단계별로 고려범위와 발생요인을 제시하였다.

- 원료 생산단계 : 자연계의 자원 채취 공정
- 기초물질 생산단계 : 원료생산과 중간제품

생산단계의 중간단계

- 중간제품 생산단계 : 최종 제품생산에 투입되는 원료의 생산단계 까지
- 제품 생산단계 : 중간제품을 가공하여 출하하는 단계까지

2.1 환경 지수 분석

환경지수는 원유를 채취하는 단계부터 제품생산단계까지인 cradle to gate에서의 투입물과 배출물에 의해서 야기되는 총 환경영향을 나타낸 것으로 Fig. 1은 환경지수를 사용하여 플라스틱 소재별 환경성을 나타낸 것이다.

Fig. 1은 각 소재별로 1kg을 생산하는 과정에서 야기되는 환경영향을 통합하여 지수화한 것으로 소재들의 물성 및 용도가 다르기 때문에 이들을 단순히 비교하는 것은 의미가 없고 단지 Fig. 1을 통하여 소재별로 환경성의 정도만을 파악하였다.

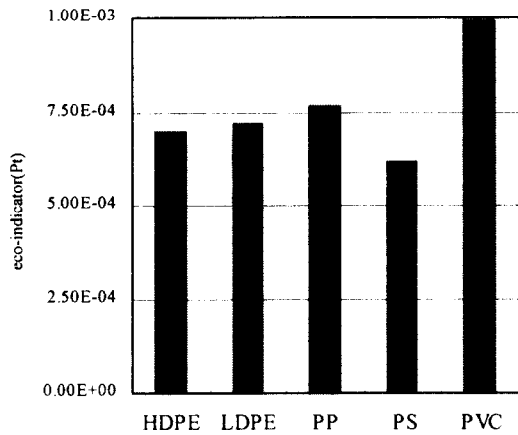


Fig. 1. Comparison of eco-indicator on the main plastics

이러한 관점에서 볼 때, HDPE와 LDPE는 약 7.00E-04 Pt 정도의 환경지수를 가지며, PP는 7.70E-04, PS 6.20E-04, PVC 1.00E-03 정도의 환경지수를 가지는 것으로 파악된다. 여기서 Pt는 무차원수를 의미한다.

Fig. 1에서 제시된 총 환경지수를 세부적으로 분석하기 위하여 상위흐름 전과정 단계별로 환경영향을 분

석하였다. Fig. 2는 상위흐름의 각 단계에서 야기되는 순(net) 환경영향을 누적한 그래프로, 각 구간 사이의 1차 함수의 기울기는 순 환경지수를 나타내며 제품생산단계의 함수값은 총 환경영향을 의미한다.

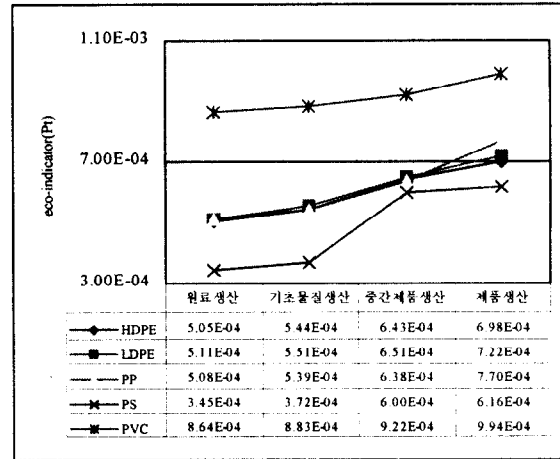


Fig. 2. Comparison of eco-indicator by each upstream stage on the main plastics

먼저, 각 소재별로 원료생산단계를 보면, PVC의 경우에는 원료에 의해서 야기된 환경영향이 8.6E-04로 정도로 PVC 전체 환경영향의 약 87%를 차지하는 반면에, PS는 3.4E-04로 전체 대비 27% 정도의 환경부하를 야기하였다. 즉, PVC는 원료에 의한 영향이 지배적인 반면에, PS는 원료에 의한 영향이 낮은 것을 확인할 수 있다. HDPE, LDPE, PP는 원유의 사용에 따른 환경영향이 전체 환경영향의 65-70% 정도로 거의 유사함을 알 수 있다.

다음으로, 각 단계들 사이의 기울기인 순환경영향을 보면, PS의 기초물질생산과 중간제품생산 사이의 기울기가 가장 급한 것을 확인할 수 있다. 이는 PS의 경우에 중간제품을 생산하는 공정에서 환경영향이 가장 크다는 것을 의미한다. 이외에, PP의 경우에 중간제품을 활용하여 제품을 생산하는 과정에서 환경부하가 큰 반면에, PS는 제품 생산단계에서의 환경부하는 거의 없는 것으로 분석되었다.

위의 결과를 통하여 소재들에 의해서 야기되는 환경영향은 상위흐름 전과정 단계들에 투입되는 물질과 배출물들에 기인한다는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 투입물과 배출물들에 의한 환경영향을 세부적으로

분석하기 위하여 아래와 같이 원료 사용량과 에너지 사용량, 배출물들에 의한 환경영향에 대하여 전과정 단계별로 세분화하여 분석해 보고 환경측면의 주요 이슈를 도출하였다.

2.2 원료 사용량 분석

소재의 환경성을 파악하기 위하여 원료 사용량을 파악하는 것은 원료사용량이 소재의 환경성 개선을 위한 중요한 대안이 될 수 있는 원단위의 함수로 나타나기 때문이다. 이에 따라 본 연구에서는 상위흐름 전과정 단계별로 투입되는 물질들의 원단위를 활용하여 자연계에서 기술계로 투입되는 총 원료량을 산출하고 이를 통하여 자원고갈에 의한 잠재적인 환경영향을 평가하였다.

Fig. 3은 원료사용량을 산출하기 위한 모식도를 나타낸 것이다. 원료사용량을 계산하기 위해서는 각 공정별로 투입되는 물질의 원단위를 파악한 후에, 상위흐름 각 단계에 포함된 기초물질생산부터 제품생산까지의 전과정 단계별로 물질들의 원단위를 누적하여 곱하면 된다. 한편, 전과정 단계별로 순 원료사용량을 산출하기 위해서는 하위공정의 누적원단위에서 상위공정의 누적원단위를 제외하면 된다.

대부분의 플라스틱의 경우에는 자연계에서 투입되는 원료가 원유이기 때문에 Fig. 3을 활용하여 총 원유사용량과 전과정 단계별 순 원유사용량을 산출할 수 있다. 하지만, PVC와 같이 원유 이외에 다른 주원료가 있을 경우에는 원유만으로 자원고갈 잠재성을 파악하는 것은 심각한 오류를 산출할 수 있다. 따라서 원유가 아닌 원료에 대하여 원유 상응량으로 환산하기 위하여 식(1)을 활용하였다.

식(1)은 원유의 자원고갈 특성화지수에 대한 i 원료의 자원고갈 특성화지수로 표현된 환산인자와 i 원료를 곱하여 i 원료에 대한 원유 상응량을 산출하는 식이다.

$$M_o = \left(\frac{EI_i}{EI_o} \right) \times M_i \quad (1)$$

M_o : 원유환산량, M_i : i 원료량,
 EI_o : 원유 자원고갈특성화지수, EI_i : i 자원고갈 특성화지수

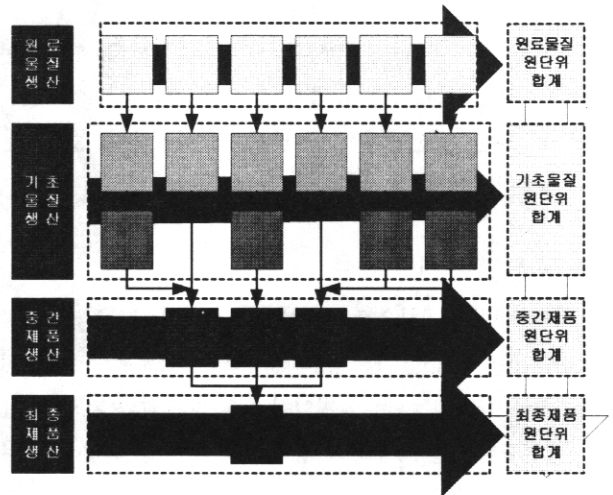


Fig. 3. Scheme for calculating amount of raw material (crude oil)

Fig. 4는 Fig. 3의 원단위 산출방법과 식(1)의 원유 상응식을 이용하여 상위흐름 단계별로 원유 상응량을 누적한 그래프화한 것이다. 이에 따르면, HDPE와 LDPE, PP의 원유 상응량이 PS와 PVC에 비하여 상대적으로 많은 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 Fig. 2의 소재별 환경지수의 경향과는 다른 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히, PVC는 환경지수에 비하여 원료사용량이 상대적으로 적은 것으로 나타나는데, 이는 원료사용량에 의한 기여도가 크지 않음을 나타낸 것이다.

전과정단계를 세부적으로 보면, HDPE와 LDPE, PP의 중간물질인 에틸렌과 프로필렌의 제조를 위하여 투입되는 납사의 원단위가 상대적으로 높게 나타나는데, 이는 전체 누적원단위를 높이는 원인이 될 것으로 여겨진다. 기초물질생산의 원단위의 경우에는 PVC의 원단위가 약 0.7정도로 상대적으로 매우 낮게 나타나는데, 이는 염소의 원료인 암염 등에 의한 자원고갈 기여도가 없기 때문이다.

PS의 제품생산단계와 PVC의 중간제품 생산단계에서는 음의 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 일부 공정으로 투입되는 물질들 중에서 자원고갈에 대한 기여도를 고려하지 못하는 화학물질과 같은 물질들이 들어갈 경우에 상대적으로 고려하는 원료의 원단위가 낮아지기 때문에 하위공정에서 상위공정을 제외한 순원료사용량이 음의 값을 가지는 것으로 분석된다.

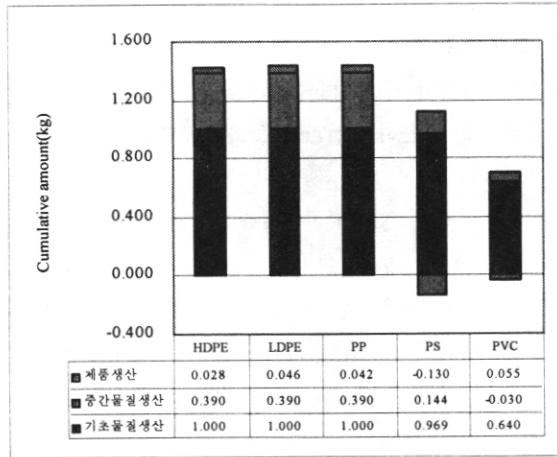


Fig. 4. Cumulative amount of crude oil by each upstream stage of the main plastics

이상의 결과를 통하여, 소재들의 원료사용량이 전체 환경지수에 영향을 줄 수는 있지만, PVC에 의해 나타난 경향으로 볼 때, 원료사용 이외에 다른 요인들을 총체적으로 파악해 볼 필요가 있을 것으로 여겨진다.

2.3 에너지 사용량 분석

플라스틱 소재를 생산하는 과정에서 투입되는 에너지는 최종 제품의 환경성에 직접적인 영향을 줄 수 있는 요인인데, 이는 소재를 생산하는 상위흐름 단계들에서 에너지가 누적되어 사용된 결과이다. 그러므로 소재들의 에너지 사용량을 줄이기 위해서는 상위흐름 각 단계들의 에너지 집약도를 분석하는 것이 중요하다.

Fig. 5는 플라스틱 소재들의 상위흐름 단계들의 에너지 집약도를 분석한 그래프이다. 이에 따르면, 총 에너지 사용량의 측면에서는 PP가 가장 많은 에너지를 소비하며, 다음으로는 PS, PVC, LDPE, HDPE의 순으로 나타났다. 이러한 경향은 Fig 1에서 제시된 환경부하의 경향과는 상당히 다른 것을 확인할 수 있다. PP가 가장 많은 에너지를 소비하는 이유는 액상과 기상의 두 단계의 중합과정을 거치는 과정에서 에너지를 다량 소비하기 때문이다. 실제로 PP의 제품 생산단계는 전체 에너지 사용량의 88.2%를 차지하고 있다.

PS는 중간제품을 생산하는 단계에서 총 에너지 사용량의 90.3%를 차지하는데, 이는 중간제품 생산단계

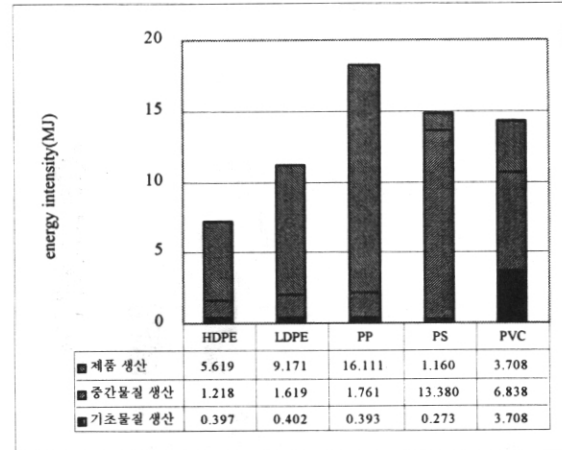


Fig. 5. Comparison of energy intensity by each upstream stage on the main plastics

가 열분해가솔린으로 벤젠을 만들고, 벤젠과 에틸렌을 반응시켜 스티렌모노머를 합성하는 여러 단계가 포함되기 때문이다. PVC는 전체 환경부하에 비하여 에너지 사용에 따른 환경영향 기여는 상대적으로 낮은 것으로 분석되었지만, 기초물질 생산단계만을 볼 때는 다른 소재들에 비하여 상대적으로 크게 나타났다. 이는 암염으로 염소를 생산하는 과정에서 많은 에너지를 소비하기 때문이다. LDPE와 HDPE는 다른 소재들에 비하여 에너지 집약은 상대적으로 낮지만, PP와 더불어 제품 생산 단계에서 총 에너지 사용량의 약 80% 정도를 차지하는 것은 중요한 환경이슈로, 제품의 환경성 개선을 위한 대안이 될 수 있다. 한편, LDPE가 HDPE보다 에너지 사용량이 많은 이유는 중합과정에서 HDPE보다 고압에서 작업이 이루어지기 때문이다. 에너지 사용에 의한 환경영향도 제품의 환경성에 영향을 미치는 요인이다. 하지만, Fig. 1에 대한 환경성 경향을 보이는 Fig. 4와 Fig. 5에 의하여 Fig. 1의 환경성에 대한 경향을 명확히 파악할 수 없기 때문에 추가적인 환경요인을 분석해 볼 필요가 있을 것이다.

2.4 배출물의 환경영향 분석

소재들의 환경성에 영향을 미칠 수 있는 요인은 원료와 에너지 이외에 상위흐름의 공정들 중에서 발생하는 배출물들에 의해서도 영향을 미친다. Fig. 6은 소재별 상위흐름 공정들에서 발생하는 배출물들에 의해

서 야기된 환경영향을 도식화한 것이다.

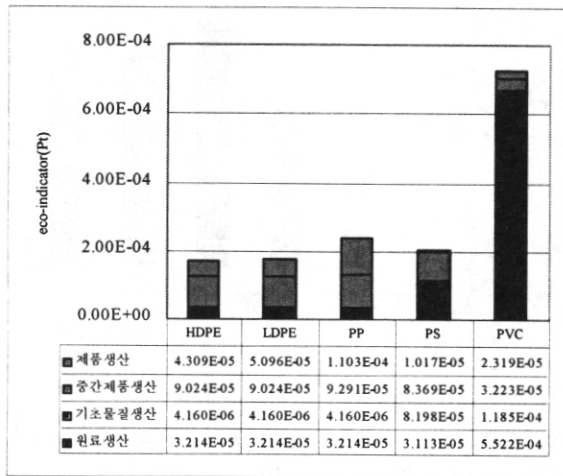


Fig. 6. Comparison of eco-indicator generated by total emissions by each upstream stage on the main plastics

이에 따르면, PVC의 원료생산단계에 의해 야기된 환경영향이 다른 소재들에 비하여 지배적으로 크게 나타나고 있다. 이는 PVC의 원료인 염소를 생산하는 과정에서 발생하는 중금속류들에 의한 수계독성이 매우 크기 때문이다. 이러한 결과는 연결한 데이터베이스 및 영향범주별 특성화 지수에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나, 이러한 경향을 보인다는 것은 간과할 수 없는 부분일 것이다. 이 때문에, PVC가 원료사용이나 에너지 사용이 다른 소재들에 비하여 매우 높지 않음에도 불구하고 환경지수가 높게 나타나는 이유가 될 수 있을 것으로 풀이된다. 따라서 PVC에 대한 환경영향을 줄이기 위해서는 PVC의 기초원료를 생산하는 공정을 친환경적으로 유도하는 것이 필요할 것이다. PVC 이외에는 PP의 중합과정에서 배출물에 의한 환경영향이 상대적으로 높게 나타나는데, 이는 PP가 다른 공정들보다는 많은 에너지를 사용하여 이로 인하여 생산공정 중에서 발생하는 배출물의 양이 많기 때문이다.

3. 플라스틱 소재별 환경개선 대안 제시

플라스틱 소재들의 환경성에 영향을 줄 수 있는 원료사용, 에너지 사용, 배출물에 의한 영향 등의 환경

영향 요인들에 대하여 전과정 단계별로 환경성을 분석한 결과 Table 1과 같이 환경측면의 주요이슈가 도출되었다. 이러한 주요이슈는 환경측면의 일부가 아니라 총체적으로 접근하여 trade-off를 규명한 후에 결정되어야 한다.

본 고에서는 도출된 환경측면의 주요이슈에 대한 적절한 대안을 제시하고자 Table 1과 같이 환경개선 대안이 제시되었을 때, 직접적으로 공정개선이 가능한 제품생산단계인 직접(Direct)공정과 원료생산부터 중간제품생산까지의 단계와 같이 직접적으로 공정개선이 어려운 간접(Indirect) 공정으로 구분하였다.

Table 1은 물질사용과 에너지 사용, 배출물 영향과 같은 환경요인별로 규명된 환경측면의 주요이슈를 직접공정과 간접공정으로 구분한 표이다.

이에 따르면, 물질사용의 경우에 직접적인 개선 대안은 없는 반면에 간접적인 개선 대안으로 HDPE와 LDPE, PP에 대하여 기초물질인 납사의 원단위를 줄이는 것이 도출되었다. 에너지 사용의 경우에는 PP를 중합하는 과정에서 투입되는 에너지의 사용량을 줄이는 것이 직접적인 대안으로 제시되었으며, PS의 중간제품 생산과정의 여러 단계들에서 사용되는 에너지 사용이 간접공정의 주요이슈로 제시되었다. 배출물의 관점에서 볼 때는 PP의 중합과정에서 에너지의 사용에 따른 대기배출물 발생량을 줄이는 것이 직접적인 대안으로 제시되었으며, PVC의 원료인 염소를 제조하는 과정에서 발생하는 중금속의 유출을 통제하는 것이 간접적인 대안으로 제시되었다.

Table 1. Key issue of environmental aspects in the direct and indirect process by material use, energy use and emissions

	Direct	Indirect
물질 사용		• Naphtha 원단위 (HDPE, LDPE, PP)
에너지 사용	• PP 중합	• 중간제품생산 (PS)
배출물 영향	• 대기배출물 (PP)	• 염소제조 시 중금속 배출

III. 결 론

본 고에서는 소재별로 환경측면의 주요이슈를 세부적으로 분석하고자 환경요인인 원료사용 및 에너지 사용, 배출물에 의한 환경영향 등을 총체적으로 고려하고 각 요인들에 대하여 원료물질생산과 기초물질생산, 중간제품생산, 제품생산 단계로 세분화된 전과정 단계별로 환경측면의 주요이슈를 도출하였다. 뿐만 아니라 환경개선을 위한 효율적인 대안을 제시하고자 전과정 단계를 직접 공정과 간접 공정으로 구분하고 환경측면의 주요이슈를 직접공정과 간접공정에 분배하였다. 직접공정에 포함된 주요이슈는 공정 엔지니어와의 협의를 통하여 공정개선의 기회를 모색하여야 하며, 간접공정은 장기적으로 볼 때, Supply Chain Management와 연계하여 환경개선 대안을 수립하는 것이 타당할 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1) 이진모, 허탁, 김승도, 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 한국품질환경인증협회, 1998
- 2) ISO 14041 : Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis, 1998
- 3) ISO 14049 : Life cycle assessment - Examples of application of ISO14041 to goal and scope definition and inventory analysis, 2000
- 4) Michael Hauschild and Henrik Wenzel, Environmental Assessment of Products, CHAPMAN & HALL, 1998
- 5) Lars-Gunnar Lindfors, K. Christiansen, L. Hoffman, V. Juntala, A. Leskinen, Ole-Jorgen Hanssen, A. Ronning and T. Ekvall, Nordic Guidelines on the Life-Cycle Assessment, Nord, 1995.