

전과정평가(LCA)기법을 이용한 카본블랙 공정의 원료 조합 모델 연구

박성태, 이의수*
 동국대학교 생명·화학공학과
 (eslee@dongguk.edu*)

**A study on feedstock mix model in the carbon black process
 using Life Cycle Assessment Method**

Sungtae Park, Euy Soo Lee*
 Dept. of Chemical & Biochemical Engineering, Dongguk Univ.
 (eslee@dongguk.edu*)

서론

최근 선진국을 중심으로 환경규제강화를 골자로 하는 국제무역장벽이 강화되고 있다. 이에 따라 제품의 환경부하를 감소시키기 위한 연구가 진행되고 있으며 그 중 하나가 전과정평가(LCA)이다. 전과정평가는 기존의 단위공정만을 대상으로한 연구가 아닌 원료의 취득에서부터 제품의 생산 그리고 폐기 및 재활용까지의 전과정에서 발생하는 환경오염 물질의 배출 및 자원소모량을 과학적이면서도 계량적으로 분석하는 연구기법이다. 이를 통해 전체공정 중 가장 환경부하가 큰 단위공정을 분석해낼 수도 있고 비슷한 역할을 하는 여러 대용품 중에 전 지구적으로 환경부하가 더 적은 제품을 규명해낼 수 있게 되었다. 국내에서도 가전제품이나 석유화학 기초 원료들에 대한 전과정평가를 이용한 분석이 시행된바 있지만 복잡한 중간가공공정을 거치는 석유화학제품에 대한 전과정평가는 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 타이어 및 고무제품의 보강제로 널리 사용되는 카본블랙 제품에 대해 전과정평가기법을 적용시켜 카본블랙 제품의 원료 취득에서 제품 생산 공정까지의 환경 부하감소 및 에너지 절감을 시도하였다.

본론

본 연구에서는 카본블랙 원료로 사용되고 있는 FCC Oil과 Creosote Oil의 생산 공정을 분석하고 이를 통하여 실제로 제조되고 있는 카본블랙 제품에 대한 전과정평가(LCA)를 수행하였다. 이 결과를 토대로 석탄계 원료 물질의 비율을 변화시켰을 때 온실가스 발생량과 제품 생산을 위해 요구되는 에너지 소비량의 분석을 통해 온실가스 저감과 단위 유틸리티 소비량의 감소를 위한 원료 조합 모델에 대하여 접근 하고자 하였다.

Carbon Black 공정에 대한 LCA 연구는 국내 'D'사의 9개 등급 제품에 대해 실시하였으며 여기서는 이중 N330 등급의 제품에 대해 다루었다. 전과정 목록 분석 및 영향평가를 위하여 Ecobilan사의 TEAM software(version 3.0)를 활용하였다. 전과정평가를 위한 시간적 경계는 2001년 1월부터 2001년 12월까지 1년간의 자료를 이용하였다. 또한 연구를 수행하기 위한 범위는 원료 물질인 석탄 광석의 채광과 원유 채굴 등 원료 채집 단계에서 Carbon Black을 생산하는 단계를 포함하였으며, 제품의 사용 및 폐기 단계는 생략하였다. (Cradle to Gate) 석탄계 최종 원료 물질인 Creosote Oil까지의 생산 공정 자료, 즉 Coke Oven, Tar Distillation 자료는 국내 기업 'P' 사의 공정 자료와 월간 유틸리티 자료를 이용하였다. 석유계 최종 원료 물질인 FCC Oil까지의 공정자료는 현장데이터의 수집이 용이하지 않아 상용 Process Simulator인 PRO II(ver 5.61)의 데이터를 참고자료로 이용하였다. 최종 Carbon Black 공장에서의 자료는 국내기업인 'D'사의 공정데이터와 월간 유틸리티 자료 및 대기 배출물 분석자료 등을 이용하였다. 원료 물질 습득(원유 채굴과 석탄원석의

채광)에 대한 자료와 질소 및 한국의 전력 생산 그리고 기타 유틸리티에 대해서는 TEAM™에 보유된 데이터베이스를 활용하였다.

전과정 목록 분석에 있어서의 할당 기준은 공장 및 공정에 대해서 제품 생산량(무게)을 기준으로 할당하였다. 투입물과 산출물에 대한 Cut-Off 적용 기준은 전체 연구 결과에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 단위 공정 전체 사용량 대비 1% 미만의 물질에 대해 적용하여 전체 조사 과정에서 제외하였다. 또한 원료 물질(원유와 석탄 원석)의 국내까지의 수송 과정과 각 단위 공정 간의 제품의 수송 과정은 무시하였다.

다음의 그림 1은 연구의 전체 System Boundary 및 공정 흐름도를 나타낸 것이다.

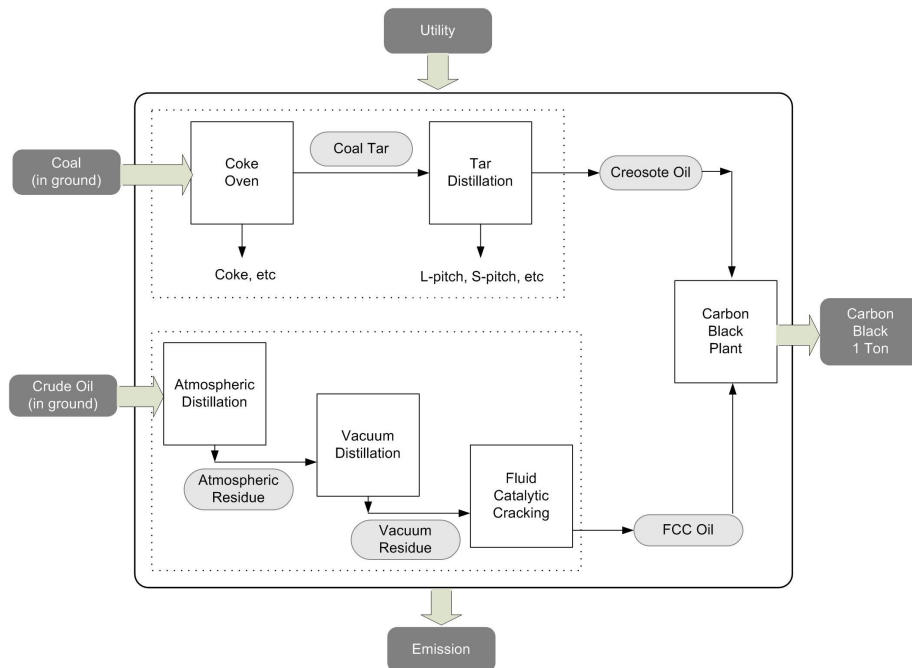


그림 1. Carbon Black LCA 전체 시스템 공정도

국내 'D' 기업에서 생산되는 9개 등급의 carbon black 중에서 Hard Black에 속하는 N330 제품에 대해 단위 제품 1톤을 생산할 때 발생하는 온실가스를 각 세부 공정별 분석한 결과를 그림 2에 나타내었다. N330 제품을 만드는데 가장 많은 이산화탄소를 배출하는 공정은 'Carbon Black Plant'로 전체 이산화탄소 발생량의 약 67%를 차지하고 있다. N330의 경우 석탄계 최종 원료 물질(Creosote Oil)과 석유계 최종 원료 물질(FCC Oil)의 비율이 약 3:1 정도인데 반해 최종 원료 물질의 생산을 위한 중간 단계에서 발생하는 온실가스의 비율은 석유계에 비해 석탄계가 현저하게 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 2에서 진한 색 막대로 표시된 메탄가스를 제외하고, 밝은 색 막대로 표시된 이산화탄소 발생 기준으로 살펴보면 Coke Oven에서 발생하는 COG(Coke Oven Gas)의 연소 과정에서 발생하는 이산화탄소, 그리고 최종 카본 블랙을 생산하는 과정에서 발생하는 Tail Gas의 연소에서 발생하는 이산화탄소가 온실효과를 일으키는 주요 원인임을 알 수 있다. 이는 석탄계 최종 원료물질의 생산을 위한 중간 단계에서의 환경오염 부하가 상대적으로 크다는 사실을 알 수 있다.

N330 1톤의 제품을 생산하기 위해 소비되는 유틸리티 에너지의 사용량 및 세부 공정 간의 비교는 다음과 같은 방법을 이용하였다. 현재 이용 가능한 화석 에너지는 크게 석탄, 석유, 천연가스 그리고 이와는 약간 다르지만 우라늄을 이용한 원자력 발전이 있다. 이미 유럽에서 시행되고 검증된 전과정평가 결과들은 이들 주요 화석에너지들에 대한 신뢰할

만한 전과정 목록을 제시하고 있다. 이를 통해 공정에서 쓰이는 다양한 종류의 에너지들(전력, Bunker-C 유, 디젤유, Coal Tar 등)을 4가지의 자원(Oil, Coal, NG : Natural Gas, 우라늄)의 소모량으로 계산해 낼 수 있다. 그리고 기준이 되는 4개 에너지 자원의 NCV(Net Calorific value)을 이용하여 에너지 단위로 환산하였다.

N330 제품에 대한 세부 공정에 따른 에너지 소비의 패턴을 파악하여 그림 3에 나타내었다. 공정에서 소모되는 유틸리티의 대부분이 석탄계 중간 가공 공정과 Carbon Black Plant에 집중되어 있음을 알 수 있다.

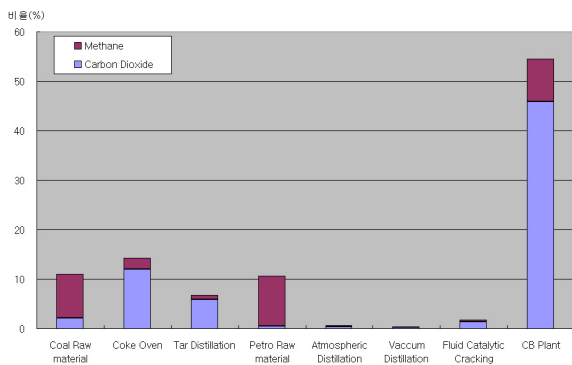


그림 2. N330의 각 공정별로 발생하는 온실가스의 배출비율

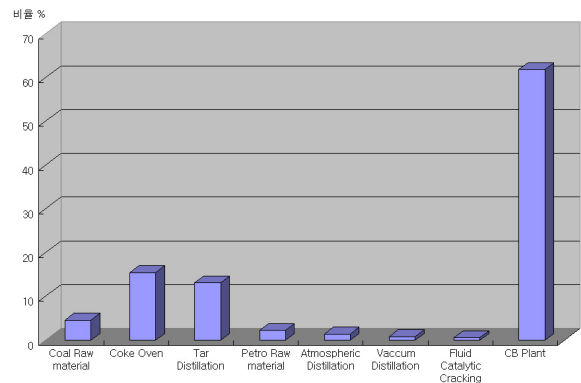


그림 3. N330의 각 공정별로 소비되는 유틸리티 사용비율

이번에는 최종 원료 물질의 비율 변화가 구체적으로 석탄계 원료 물질이 증가할 때 온실가스 배출과 유틸리티 에너지 소비에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 4는 석탄계 원료 비율이 변화에 따른 온실가스 발생량을 국내 화학 산업(Global)과 카본 블랙 생산 공장(Local)에 대해 비교하여 나타낸 그림이다.

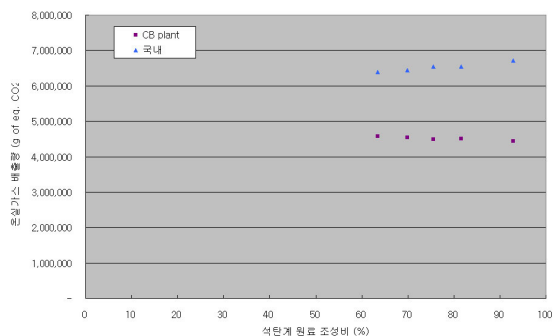


그림 4. 원료비율의 변화에 따른 카본블랙공장과 국내 전과정에 나타내는 온실가스발생량

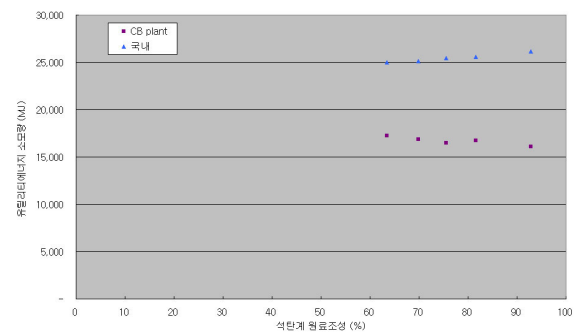


그림 5. 원료비율의 변화에 따른 카본블랙공장과 국내 전과정에 나타내는 유틸리티 사용량

진한 사각형으로 표시된 카본 블랙 생산 공장에서의 온실가스 발생량을 주목해 보면 석탄계 원료 비율이 높아질수록 온실가스 배출량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 일반 산업 현장에서 알려진 바와 같이 석탄계 원료 물질의 수율이 석유계 원료 물질의 수율보다 높기 때문인 것으로 보인다. 따라서 카본블랙공장만을 대상으로 본다면 카본블랙을 생산하는데 석탄계 원료 물질인 Creosote Oil을 사용할수록 온실가스 배출규제에 대한 홀

를 통한 선택이 될 수 있다. 하지만 이와는 반대로 국내 화학 산업 전반(삼각형으로 표시)을 통해서 볼 때는 석탄계 원료 물질의 증가가 온실가스 발생량의 증가로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 국내 화학 산업이라는 국가적 관점에서 본다면 석탄계 원료 물질의 사용은 온실가스 배출량 증가로 인한 국제적 압력과 경제적인 제재에 직면할 수 있다는 사실을 말해준다. 이러한 상반된 경향을 보이는 이유는 이미 앞에서 약간 언급된 바와 같이 석탄계 최종 원료 물질인 Creosote Oil을 생산하기 위한 중간가공 공정에서의 온실가스의 과도한 배출이 그 원인으로 지목될 수 있다.

카본 블랙 N330 등급 1 ton을 생산하기 위해 소모되는 유틸리티 에너지의 양을 그림 5에 나타내었다. 원료 조합 비율에 따른 온실가스 발생과 유틸리티 에너지 소비를 비교한 결과 단위 공정과 전체 공정에서 상반된 결과를 보여주고 있다. 즉 단위 공정인 Carbon Black Plant에서의 온실가스 발생, 유틸리티 사용 양의 모든 면에서 석탄계 원료 물질의 사용이 효과적이라는 결론을 보여주고 있다. 그러나 System을 국내 화학 산업 전반으로 확대하게 되면 석탄계 원료 물질의 사용비율 증가가 오히려 좋지 않은 영향을 미친다는 결과를 보여 주고 있다. 이는 최적화된 단위 공정들의 조합이 전체적으로 볼 때는 최적 아닐 수 있는 의미심장한 결과를 보여주는 것이라 하겠다.

이와 같은 결과를 토대로 살펴 볼 때 석탄계열의 원료 물질이 Carbon Black을 생산하는데 유리한 면이 있으나 최종 원료 물질인 Creosote Oil을 만들기 위한 상위 가공 공정들, 즉 Coke Oven과 Tar Distillation에서의 온실가스 발생과 Utility Energy의 과도한 소비가 국가 산업 전체로 보았을 때 문제점으로 부각됨을 알 수 있다.

결론

특정 등급의 카본블랙 생산에 대한 전과정평가 결과 석탄계 최종 원료 물질인 Creosote Oil의 생산까지의 중간 가공공정인 Coke Oven 공정과 Tar Distillation 공정이 Carbon Black 생산 공정에서 우선적으로 개선되어야 할 환경 부하가 큰 공정임을 알 수 있었다. 또한, 석탄계 원료 물질의 비율이 증가가 전체 공정에 미치는 영향을 전과정(Global)을 대상으로 하는 경우와, 카본블랙생산공장(Local)만을 대상으로 하는 경우로 나누어 분석을 실시한 결과 석탄계 원료 물질이 증가할수록 카본블랙 생산 공장에서는 온실가스 배출 및 에너지 절감에 있어 효과적임을 알 수 있었다. 하지만 전과정을 대상으로 하는 경우에는 석유계 원료가 석탄계 원료에 비하여 온실가스 배출 및 에너지 사용이 더 절감됨을 확인할 수 있었다. 이상의 연구기법을 화학 산업 전반에 대하여 적용할 경우, 국가 전체적인 범주에서 온실가스 저감과 에너지 소모를 최소화하기 위한 석유계와 석탄계 원료의 적절한 조합비율 모델을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 에너지 관리공단의 학술 진흥 연구과제의 지원에 의하여 이루어졌음.

참고문헌

1. 이건모, 허 탁, 김승도, "환경 전과정 평가의 이론과 지침", 한국품질환경인증협회 (KAB), 1998
2. ECOBILAN, "Getting Started with TEAM (Car LCA Tutorial)", ECOBILAN, 2001
3. 안석원, 이재란, 권승혁, 박상춘, 변용만, 강명호, "NCC 제품에 관한 LCA 적용", 한국 전과정평가학회, 1999년 정기 총회 연구 논문집, pp. 90-96, 2001
4. 윤성이, 소천방수, "화석에너지원의 LCI 구축 및 온난화 가스 배출량 분석 : 일본의 사례", 한국전과정평가학회, 한국전과정평가학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 83-93, 1999