

촉매반응에 의한 에탄올 생산공정의 전 과정 평가

정연수[†] · 황일훈 · 여영구* · 주오심** · 정광덕**

서울시립대학교 화학공학과
130-743 서울시 동대문구 전농동 90
*한양대학교 화학공학과
133-791 서울시 성동구 행당동 17
**한국과학기술연구원 나노환경연구센터
136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1
(2006년 5월 9일 접수, 2006년 6월 15일 채택)

Life Cycle Assessment of Ethanol Production Process Based on Catalytic Reaction

Yonsoo Chung[†], Ilhoon Hwang, Yeong-Koo Yeo*, Oh-Shim Joo** and Kwang-Deog Jung**

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, 90, Cheonnong-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea

*Department of Chemical Engineering, Hanyang University, 17, Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

**Eco-Nano Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1, Hawolgok-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

(Received 9 May 2006; accepted 15 June 2006)

요 약

이 논문에서는 전 과정 평가 기법을 이용하여 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정의 환경적 가치를 평가하고 발효에 의한 에탄올 생산공정과 그 환경성을 비교하였다. 평가의 목적은 두 공정의 환경성 비교를 통하여 보다 환경 친화적인 공정 개발을 위한 방안을 마련하는데 있었다. 두 공정에서 생산되는 에탄올의 소비 및 폐기 과정은 모두 동일하다고 가정하고 원료물질의 획득으로부터 제품의 생산 과정에 대한 전 과정 평가를 실시하였다. 촉매공정에 대한 전 과정 목표분석을 통해 중간 원료인 메탄올의 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소가 주요 환경오염인자라는 것을 확인하였다. 두 공정에 대한 영향평가의 결과 비교를 통하여 발효에 의한 에탄올 생산이 촉매반응에 의한 것보다 환경 친화적이라는 것을 확인하였다. 전 과정 평가의 결과를 바탕으로 공정의 환경성 개선을 위한 방안을 제시하였다.

Abstract – In this paper, the methodology of life-cycle assessment was applied to an ethanol production process based on catalytic reaction. The environmental performance of the process was quantified and compared with that of the fermentation process. The purpose of the assessment was to develop design guidelines for the environmentally better ethanol production. The assessment was carried only on the stages of raw material acquisition through ethanol manufacture since it was assumed that ethanol from two processes had the same environmental impacts through its use and discard. The inventory analysis of the catalytic process resulted in that carbon dioxide from methanol production was the major environmental impact. The impact assessment showed that the fermentation process was environmentally better than the catalytic one. Suggestions for environmental improvement of the catalytic process were prepared based on the assessment results.

Key words: Life-Cycle Assessment, Ethanol Production Process, Catalytic Reaction, Fermentation, Environmental Comparison

1. 서 론

에탄올은 전분의 발효, 메탄의 산화반응 그리고 에틸렌, 아세틸렌, 합성가스 등의 화학적 전환반응 등을 통해 생산되고 있다. 에탄올은 주로 주류의 생산에 이용되지만 화학산업에 있어서 매우 중요한 용매 및 중간 원료로써 이용되기도 한다. 최근에는 MTBE의 환경 유해성 논란에 따라 기술련의 옥탄가를 높이기 위한 주요 첨가물로 각광받고 있다.

촉매반응을 통해 화학적으로 에탄올을 생산하는 많은 공정이 개발되었다. Uhm 등[1]은 메탄올을 원료로 하여 에탄올을 합성하는 촉매공정을 제안하였으며 Hwang과 Chung[2]은 그 반응실험 결과에 기초하여 생산공정의 기본설계를 실시하고 공정의 물질 및 에너지지수를 확립하였다. Hwang[3]은 공정의 경제성 평가를 통해 시간당 100 kg의 에탄올을 생산하는 경우 촉매반응을 이용한 화학적 에탄올 생산공정이 발효를 이용한 생물학적 공정에 비해 더욱 경제적이란 보고하였다.

두 공정에서 생산되는 에탄올의 품질이 동일하다면 연속공정을 통해 대량 생산이 가능하고 경제성이 뛰어난 화학적 에탄올 생산공

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: yonsoo@uos.ac.kr

정을 선택하는 것이 당연해 보인다. 그러나 공정의 선택을 위해서는 이러한 기술적, 경제적 요소뿐 아니라 환경적, 사회적, 정책적 요소 등도 고려되어야 한다. 탄소세 등과 같은 새로운 세금의 도입, 옥수수 등 재생 가능한 원료의 사용에 따른 세금의 감면, 환경유해요소 등에 대한 세금 부과 등 환경적, 정책적 요소 등에 의하여 공정의 경제성이 달라질 수 있고 그에 따라 공정의 선택 역시 달라질 수 있다.

여기서는 발효공정과 촉매공정의 환경성을 정량적으로 평가하기 위하여 전 과정 평가 기법을 사용하였다. 전 과정 평가를 통해 메탄올의 촉매반응을 통해 에탄올을 생산하는 공정[1]의 환경적 가치를 평가하고 발효에 의한 에탄올 생산공정의 전 과정 평가[4]의 결과와 비교함으로써 보다 환경 친화적인 공정 개발을 위한 방안을 마련하고자 하였다.

2. 전 과정 평가의 목적 및 범위

여기서 실시한 전 과정 평가의 목적은 메탄올과 합성가스의 촉매반응을 통해 에탄올을 생산하는 공정의 환경적 가치를 정량적으로 평가하고, 그 결과를 발효공정에 대한 전 과정 평가[4]의 결과와 대비함으로써 두 공정의 환경성을 비교하는데 있었다. 전 과정 평가를 통해 두 공정의 환경적 문제점을 비교, 확인하고자 하였으며 얻어진 결과는 보다 환경 친화적인 에탄올 생산공정의 개발을 위한 지침을 마련하는데 이용될 수 있을 것이다.

발효공정과 촉매공정에서 생산되는 에탄올의 질과 용도가 모두 같다고 가정하여 원료물질의 획득으로부터 제품의 생산 과정까지를 시스템 경계 안에 포함하였다. Fig. 1은 촉매반응을 이용한 에탄올 생산공정의 전 과정 평가에 적용된 시스템 경계 안에 존재하는 단위공정들을 나타낸 것이다.

본 연구에서는 95%의 에탄올 1kg을 생산하는 것을 기능단위로 채택하였는데 이는 발효공정에 대한 전 과정 평가[4]에서 채택한 기능단위와 같다. 전 과정 평가는 ISO 14040[5]을 비롯한 Vigon 등[6]과 Fava 등[7-9]에서 정의된 방법 및 과정을 좇아 실시되었으며 GaBi[10], SimaPro[11], TEAM[12] 등 상용 프로그램을 사용하여 목록분석을 수행하였고 Eco-indicator 95[13]를 이용하여 영향평가를 실시하였다. 촉매반응을 이용한 에탄올 생산공정의 환경성 향상을 위한 방안을 마련하기 위하여 전 과정 해석이 실시되었다.

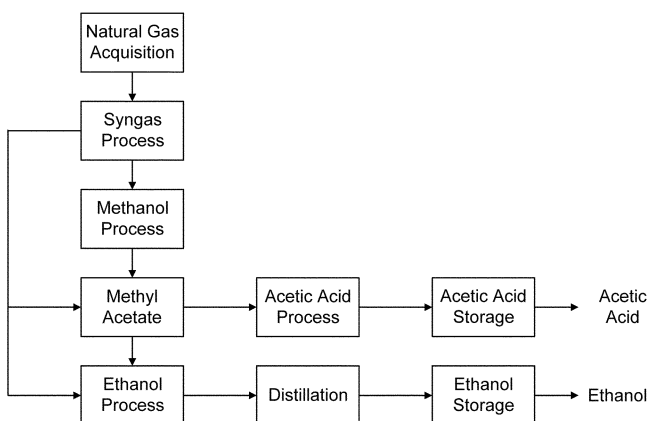


Fig. 1. Unit processes inside of the system boundary of the ethanol production process based on catalytic reaction.

3. 목록분석

본 연구의 시스템 경계 안에는 원료물질인 천연가스를 획득하는 과정, 천연가스를 액화하고 수송하는 과정, 합성가스로 제조하는 과정, 합성가스로부터 메탄올을 합성하고 메틸아세테이트를 거쳐 최종적으로 에탄올을 얻는 과정 등이 포함되었으며 생산된 에탄올의 유통, 소비 및 폐기 단계는 제외되었다. 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정에서 주원료로 쓰이는 메탄올은 합성가스의 전환반응에 의해 얻어지며 합성가스는 다시 천연가스로부터 얻어진다고 가정하였다. 공정에 이용되는 천연가스는 인도네시아를 비롯한 동남아시아 국가의 인근 해안에서 채굴된다고 가정하였다. 채굴된 천연가스의 주요 성분은 메탄이며, 수증기, 고밀도의 탄화수소, 질소, 황화수소 등의 불순물이 포함되어 있다. 채굴된 천연가스는 액화공정을 거쳐 불순물이 제거된 후 파이프라인 또는 LNG선을 통해 수송되는데 여기서는 LNG선을 이용하여 국내로 수송된다고 가정하였다. 천연가스의 액화는 다량의 천연가스 액화에 경제적으로 유리하다고 알려진 다단냉동법을 이용하는 것으로 가정하였다. 수송된 천연가스는 수소와 반응하여 합성가스로 전환되고 합성가스는 다시 메탄올로 전환된다. 메탄올은 합성가스와 반응하여 중간물질인 메틸아세테이트를 생성하며 메틸아세테이트는 최종적으로 에탄올로 전환된다[1]. 생성된 에탄올은 증류공정을 통해 95%까지 정제된다고 가정하였다.

천연가스의 획득에 관한 자료는 미국환경정의 보고서[14]를 기초로 하였으며 천연가스의 액화 및 수송 과정에 대한 자료는 주로 SimaPro[13]의 데이터베이스로부터 수집하였다. 합성가스와 메탄올의 제조에 대한 자료 역시 상용 데이터베이스를 중심으로 수집하였다. 천연가스 채굴 및 액화 과정의 공간적 경계는 인도네시아로 가정하였으며 합성가스, 메탄올 및 에탄올 합성 공정 등의 공간적 경계는 국내로 하였다. 천연가스의 채굴로부터 메탄올의 제조 과정까지는 모든 상용 공정이 존재하는데 반해, 메틸아세테이트를 거쳐 에탄올이 합성되는 과정은 상용 공정이 아직 개발되지 못한 상태이다. 메탄올이 촉매반응에 의해 메틸아세테이트를 거쳐 에탄올로 전환되는 과정과 정제 과정에 대해서는 전산모사를 통하여 얻어진 공정의 기본설계 결과[2, 3]에 근거하여 자료를 확보하였다. 천연가스의 수송 이후 모든 단위공정의 공간적 경계가 국내로 설정되었지만 본 연구에서는 국내 데이터를 전혀 사용하지 않았다.

수집된 전 과정 자료와 전산모사의 결과에 의하면 에탄올 1kg을 생성하는데 합성가스 2kg과 메탄올 2.7kg이 소비되며 물과 혼합된 아세트산 3.7kg이 부산물로 생성되는 것으로 나타났다. 부산물은 추가 정제를 통해 아세트산 생산에 이용되는 것으로 가정하고 그에 따른 환경부하의 할당을 실시하였다. 할당은 에탄올과 아세트산의 무게 비에 따랐으며 그 비는 1:1.3이었다.

같은 제품을 생산하는 여러 공정을 비교하기 위하여 전 과정 평가를 수행할 때, 목록분석이 동일한 동일한 목록에 대하여 실시되지 않는 경우 환경영향평가의 결과를 해석하는데 많은 어려움이 따를 수 있다. 이러한 이유로 여기서는 발효에 의한 에탄올 생산공정의 전 과정 평가[4]에서 사용하였던 것과 동일한 목록에 대하여 목록분석을 실시하였다. 목록분석에 여러 상용 프로그램을 동시에 사용하여 부족한 자료의 비교 및 상호 지원을 통해 자료의 질을 높이고자 하였다. Table 1은 목록분석을 통해 수집, 정리된 물질 가운데 기능단위 당 1g 이상의 사용 및 배출량을 보인 물질에 대하여 그 값을 정리한 것이다.

Table 1. Life-cycle inventory data of the ethanol production process based on catalytic reaction

Inventory Parameter	LCI Result (g/kg ethanol)
Resources	
Cooling water	126,900
Water (unspecified)	31,506
Natural gas	5,380
Air Emissions	
Carbon dioxide	15,883
Hydrogen	100
Sulfur oxides	75
Methane	63
Nitrogen oxides	28
Water Emissions	
Chlorides	78
Sodium	30
Suspended matter	6
Chemically polluted water	4

목록분석의 결과는 물과 천연가스의 사용량 및 이산화탄소 배출량이 크게 두드러진 반면 수질오염물질의 배출량은 상대적으로 적고 고형폐기물의 배출량은 무시할 수 있을 정도로 적다는 것을 보이고 있다. 에탄올 1 kg을 생산하기 위해 168 kg 정도의 물이 이용되고 있으며 그 중 80%는 냉각수로 이용되고 있음을 알 수 있었다. 물 다음으로 많이 소비되고 있는 물질은 천연가스로 기능단위 당 약 5.4 kg이 이용되었다. 기능단위 당 16 kg 이상의 많은 대기오염물질이 발생하였는데 그 중 98% 이상이 이산화탄소라는 것을 알 수 있었다. 이산화탄소 외에도 수소, 황산화물, 메탄, 질소산화물 등이 대기 중으로 배출되었다. 수질오염물질의 배출량은 질량 기준으로 대기오염물질 배출량의 1% 이하이었으며 그 대부분은 염소와 나트륨 성분이었다. 고형폐기물의 경우, 기능단위 당 1 g 이상 배출되는 물질이 전혀 없는 것으로 나타났다. Table 1에는 나타나지 않았지만 칼슘, 탄소 등의 성분들이 고형폐기물의 형태로 매우 소량 배출됨을 알 수 있었다.

이산화탄소는 촉매반응을 이용한 에탄올 생산공정에서 발생하는 주요 오염물질로서 질량 기준으로 전체 오염물질 배출량의 97% 이상을 차지하고 있다. Fig. 2는 시스템 경계 안에 존재하는 각 단위공정의 이산화탄소 배출 정도를 상대적으로 나타낸 것이다. 단위공정 가운데 메탄올 생산공정이 가장 많은 이산화탄소를 배출하고 있으며 그 양은 전체 이산화탄소 배출의 40% 정도를 차지하고 있다. 이는 메탄올 생산공정에 투입되는 화석 연료 때문인 것으로 판단된다. 합성가스 전환공정과 에탄올 합성공정에서도 많은 양의 이산화탄소가 배출되는데 그 배출량은 각각 전체의 28.0%와 12.6%였다. 메탄올이 천연가스로부터 합성가스를 거쳐 생성되므로 메탄올 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소는 전체의 68% 정도임을 알 수 있다. 이는 메탄올 생산공정이 전체 공정의 환경성을 결정하는데 매우 큰 역할을 한다는 것을 의미한다.

주요 공정 변수들을 대상으로 TEAM[12]을 이용한 민감도분석을 실시하였다. 주요 공정 변수로서 합성가스와 메탄올의 투입량을 선택하여 각각 ±50%의 변화를 주고 이산화탄소 배출량의 변화를 관찰하였다. 민감도분석 결과, 합성가스 투입량의 변화에 대한 결과의

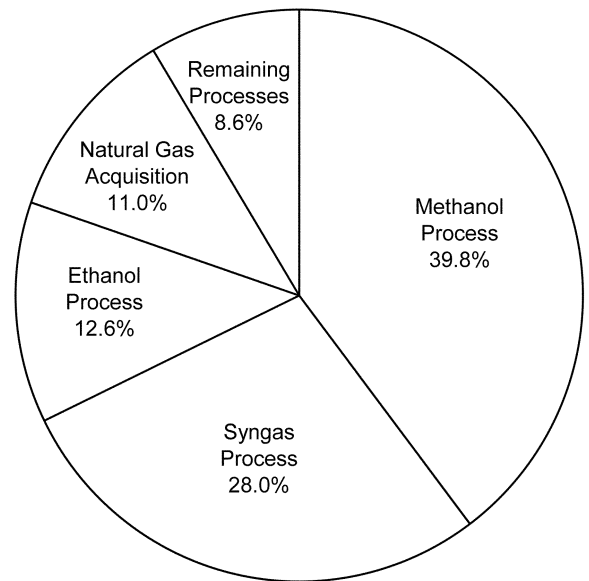


Fig. 2. Carbon dioxide emissions from sub-processes of the catalytic ethanol process.

변화는 ±5% 정도인 반면 메탄올 투입량의 변화에 대한 결과의 변화는 ±40% 정도로 나타났다. 이러한 결과 역시 에탄올 제조공정과 관련하여 그 하부 구조인 메탄올 생산공정의 효율성이 매우 중요함을 보여주는 한편 전 과정 평가의 신뢰도 향상을 위해서는 이러한 하부 구조에 대한 보다 면밀한 자료수집과 평가가 이루어져야 함을 나타낸다.

4. 영향평가

목록분석의 결과를 분류하고 특성화하여 정량화 된 환경지표를 계산하는 영향평가[5]는 제품 또는 공정의 전 과정을 통해 발생하는 주요 환경부하의 정도 및 발생 원인을 파악하는데 매우 유용한 자료를 제공한다. 발효공정과의 환경성 비교를 위해서 Chung 등[4]에서와 같이 Eco-indicator 95[13]를 이용하여 촉매공정에 대한 영향평가를 수행하였다. 따라서 여기서 얻은 결과는 국제적 데이터를 바탕으로 한 것이기 때문에 국내의 실정을 반영한 것은 아니다.

Fig. 3은 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정에 대한 영향평가의 결과를 정규화하여 나타낸 것이다. 정규화는 Eco-indicator 95에서 일반적으로 이용되는 가중치를 이용하여 실시하였다. Fig. 3에서 환경영향요소별 환경부하의 크기는 각 가로막대의 전체 길이로 나타나는데 이로부터 온실가스 및 산성화의 발생 등이 주요 환경부하라는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 3은 각 환경영향요소의 환경부하를 그것을 유발하는 단위공정 별로 다시 구분하여 보이고 있다. 단위공정별 환경부하의 발생을 살펴보면, 에탄올 생산공정의 하위 공정인 메탄올 생산공정에서 가장 큰 환경부하가 발생하며 에탄올 합성과 합성가스의 생산 과정에서도 상대적으로 큰 환경부하가 발생함을 알 수 있다. 이들에 비해 다른 단위공정의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작았다.

이상에서 보았듯이 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정의 환경성을 저하시키는 가장 큰 요소는 메탄올 생산 과정이며 이는 화석연료의 이용에 따른 이산화탄소의 발생에 의한 것임을 알 수 있었다.

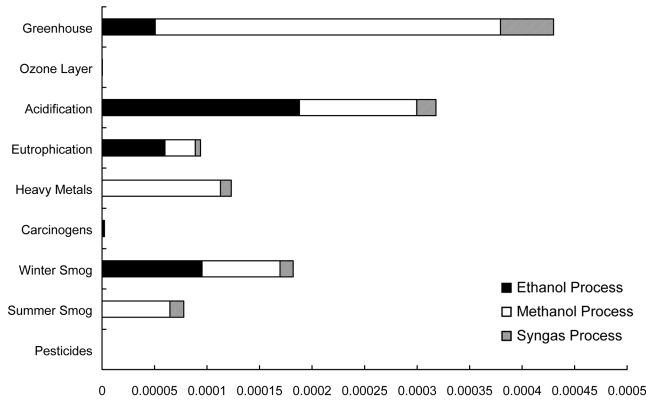


Fig. 3. Normalized environmental impacts of the ethanol production process based on catalytic reaction.

따라서 보다 환경 친화적인 에탄올 생산을 위해서는 메탄올 생산 공정에서의 효과적인 에너지 사용이 중요함을 알 수 있었다.

5. 발효공정과 촉매공정의 비교

5-1. 목록분석에 의한 비교

같은 제품을 생산하는 서로 다른 두 공정의 환경성을 비교하는 가장 간단한 방법의 하나는 두 공정에서 이용되는 자원의 양과 배출되는 오염물질의 양을 직접 비교하는 것이다. 발효공정에 대한 전 과정 평가[4]와 여기서 실시한 촉매공정에 대한 전 과정 평가의 목록분석 결과로부터 두 공정의 목록분석에서 상대적으로 큰 결과 값을 갖는 목록들은 냉각수의 사용량과 이산화탄소, 화학적으로 오염된 물, 그리고 쓰레기 등의 배출량임을 알 수 있다. 이들을 정량적으로 직접 비교한 결과가 Fig. 4이다. 냉각수의 사용과 이산화탄소 등 대기오염물질의 배출 측면에서는 촉매공정이 발효공정에 비해 환경적으로 불리하며, 화학적으로 오염된 물 등 수질오염물질과 쓰레기 등 고형폐기물의 발생 측면에서는 발효공정이 촉매공정에 비해 환경적으로 불리함을 알 수 있다. 그러나 발생량은 많아도 환경적으로 적은 영향을 미치는 물질이 있으며, 발생량은 적지만 환경적으로 큰 영향을 미치는 물질이 존재할 수 있기 때문에 보다 정확한 환경성 비교를 위해서는 목록분석 결과뿐 아니라 영향평가의 결과가 동시에 고려되어야 함을 알 수 있다.

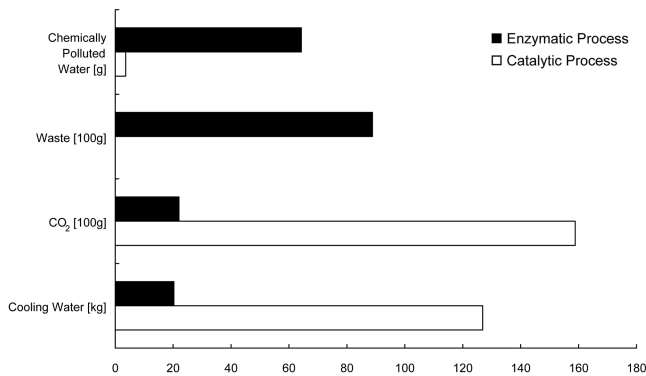


Fig. 4. Inventory comparisons between enzymatic and catalytic ethanol production processes.

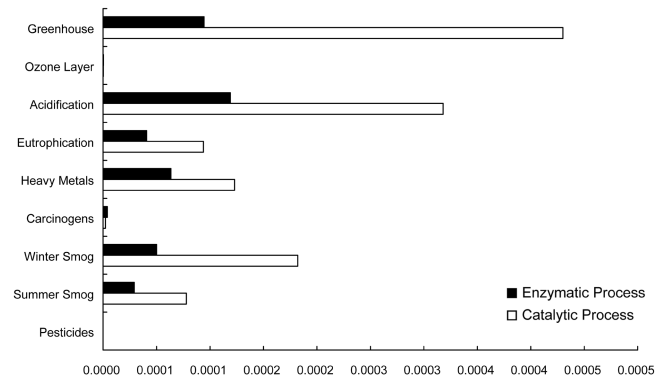


Fig. 5. Environmental impact comparisons between enzymatic and catalytic ethanol production processes.

5-2. 영향평가에 의한 비교

발효공정에 대한 전 과정 평가[4]와 앞서 설명한 촉매공정에 대한 전 과정 평가의 영향평가 결과로부터, 두 공정 모두 산성화 및 온실가스효과 등의 요소에 대해 상대적으로 큰 환경부하가 발생함을 알 수 있다. 이들을 포함한 모든 요소들에 대하여 발생하는 환경부하의 크기를 직접 비교하기 위하여 두 공정에 대한 영향평가의 정규화 된 결과를 하나로 정리하여 보인 것이 Fig. 5이다. Fig. 5는 온실효과, 산성화, 스모그, 중금속, 부영양화의 발생 등 거의 모든 요소들에 대해서 촉매공정이 발효공정에 비해 더 큰 환경부하를 발생함을 보이고 있다. 이로부터 촉매반응에 의한 에탄올 생산 공정이 발효에 의한 공정에 비해 환경적으로 더 나쁜 영향을 미친다는 결론을 내릴 수 있다.

6. 전 과정 해석

발효공정에 비해 환경적으로 더 나쁜 것으로 밝혀진 촉매공정의 환경성 개선을 위해 다음 몇 가지 방안을 점검하였다.

에탄올 생산을 위한 하위 공정인 메탄올 생산공정에서의 화석연료의 사용이 많다는 것은 에너지 사용이 많다는 것을 의미한다. 이는 메탄올 생산공정에서의 효과적인 에너지 이용을 위한 공정의 개선이 필요함을 의미한다. 이의 개선을 위해 먼저 메탄올 합성반응 자체의 변화를 생각할 수 있다. 여기서 평가되었던 공정에서는 메탄올이 천연가스의 수증기 개질 반응을 통해 생성되는 합성가스로부터 생산된다고 가정하였다. Amor와 Halloin[15]은 천연가스의 수증기 개질 보다는 부분 산화를 통해 생성되는 합성가스의 조성이 메탄올 합성에 보다 유리하다는 것을 보이고 있다. 따라서 천연가스의 부분 산화를 통한 합성가스 생성 공정을 채택하는 것이 공정의 환경적 가치를 높이는 한 방안이 될 수 있을 것이다.

또한, 원료물질 자체의 변화를 생각할 수 있다. 앞에서 발효공정에서 발생하는 이산화탄소의 양이 촉매공정에서의 발생량보다 적음을 살펴보았다. 즉 이산화탄소의 발생 감소로 인해 발효공정이 보다 환경 친화적인 공정이 된 것이다. 이를 바탕으로 이산화탄소를 반응물로 이용하는 대안의 촉매공정을 생각해 볼 수 있는데 이산화탄소와 수소를 주원료로 이용하는 역수성가스전환반응[16]이 한 예라 할 수 있다.

마지막으로 에탄올 생산공정의 전면적 변화를 생각할 수 있다.

여기서 평가되었던 공정에서는 다른 상용 공정에서 생산된 메탄올과 합성가스를 이용한다고 가정하였다. 이렇게 각각 따로 설계되었던 합성가스, 메탄올, 에탄올 생산공정을 하나의 공정으로 통합 설계하는 방안을 고려할 수 있을 것이다. 통합된 에탄올 생산공정에서는 메탄올 생산공정에서 발생하는 잉여 수소와 에탄올 생산공정에서 부족한 수소의 문제를 연결하여 해결할 수 있을 것이며, 열교환합성을 통한 에너지 사용 저감 효과도 얻을 수 있을 것이다. 또한, 천연가스 산지에서의 에탄올 직접 생산은 천연가스를 액화시켜 수송하는데 소비되는 에너지 사용을 줄일 수 있는 또 다른 방안이 될 수 있을 것이다.

이상에서 제시된 개선 방안들에 대하여 각각 전 과정 평가를 실시하여 여기서 얻은 결과들과 비교한다면 보다 효과적인 공정의 설계 및 선택이 가능할 것이다.

7. 결 론

전 과정 평가 기법을 이용하여 촉매반응을 통한 에탄올 생산공정의 환경적 가치를 평가하고 발효공정과 그 환경성을 비교하였다. 두 공정에서 생산되는 에탄올의 소비 및 폐기과정은 동일하다는 가정 아래 원료물질의 획득으로부터 제품의 생산 과정에 대한 환경 영향을 평가하였다. 촉매공정에 대하여 목록분석을 수행한 결과, 주요 환경오염인자는 메탄올 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소라는 것을 알 수 있었다. 두 공정에 대한 영향평가의 결과를 비교한 결과, 발효에 의한 에탄올 생산이 촉매반응을 통한 생산에 비해 보다 환경 친화적임을 알 수 있었다. 전 과정 평가의 결과를 바탕으로 에탄올 생산공정의 개선을 위한 여러 방안을 제시하였다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 ‘R01-2001-000-00409-0(2002)’ 과제에 의하여 이루어진 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Uhm, S. J., Han, S. H., Oh, J. W., Joo, O.-S., Jung, K.-D. and Baek, J. Y., "Process for the Preparation of Ethanol from Methanol," U.S. Patent No. 5,414,161(1995).

2. Hwang, I. and Chung, Y., "Preliminary Design for Ethanol Process from Methanol," *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **6**(2), 2993(2000).

3. Hwang, I., "Design and Life-Cycle Assessment of Chemical Ethanol Process," M.S. Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea(2001).

4. Chung, Y., Hwang, I., Kim, I.-W., Moon, I. and Yeo, Y.-K., "Life Cycle Assessment of Ethanol Production Process Based on Fermentation," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(3), 319-322(2006).

5. International Standard Organization, ISO 14040, 1st ed., International Standard Organization(1997).

6. Vigon, B. W., Tolle, D. A., Cornaby, B. W., Latham, H. C., Harrison, C. L., Boguski, T. L., Hunt, R. G. and Sellers, J. D., *Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*, EPA/600/R-92/245, U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, D. C.(1993).

7. Fava, J. A., Denison, R., Jones, B., Curran, M. A., Vigon, B., Selke, S. and Barnum, J., *A Technical Framework for Life-Cycle Assessments*, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education(1991).

8. Fava, J., Consoli, F., Denison, R., Dickson, K., Mohin, T. and Vigon, B., *A Conceptual Framework for Life-Cycle Impact Assessment*, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education(1993).

9. Fava, J., Jensen, A. A., Lindfors, L., Pomper, S., De Smet, B., Warren, J. and Vigon, B., *Life Cycle Assessment Data Quality: Conceptual Framework*, SETAC and SETAC Foundation for Environmental Education(1994).

10. IKP, GaBi 3.0 User's Manual, IKP(1998).

11. Pre, SimaPro 5.0 User's Manual, Pre(2001).

12. Ecobilan, TEAM 3.0 User's Manual, Ecobilan(1999).

13. Goedkoop, M., *Eco-indicator 95*, NOH Report 9523, PRe(1995).

14. U. S. EPA, *Profile of the Oil and Gas Extraction Industry*, EPA/310-R-99-006, U. S. EPA Office of Compliance, Washington, D. C.(2000).

15. Amor, H. and Halloin, V., "Methanol Synthesis in a Multifunctional Reactor," *Chem. Eng. Science*, **54**(10), 1419-1423(1999).

16. Joo, O.-S., Jung, K.-D., Moon, I., Rozovskii, A., Lin, G., Han, S. and Uhm, S., "Carbon Dioxide Hydrogenation to Form Methanol via Reverse-Water-Gas Shift Reaction," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**(5), 1808-1812(1999).