

발효에 의한 에탄올 생산공정의 전 과정 평가

정연수[†] · 황일훈 · 김인원* · 문 일** · 여영구***

서울시립대학교 화학공학과
130-743 서울시 동대문구 전농동 90
*건국대학교 화학공학과
143-701 서울시 광진구 화양동 1
**연세대학교 화학공학과
120-749 서울시 서대문구 신촌동 134
***한양대학교 화학공학과
133-791 서울시 성동구 행당동 17
(2006년 5월 9일 접수, 2006년 6월 15일 채택)

Life Cycle Assessment of Ethanol Production Process Based on Fermentation

Yonsoo Chung[†], Ilhoon Hwang, In-Won Kim*, Il Moon** and Yeong-Koo Yeo***

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

*Department of Chemical Engineering, Konkuk University, 1, Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea

**Department of Chemical Engineering, Yonsei University, 134, Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

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

(Received 9 May 2006; accepted 15 June 2006)

요 약

이 논문에서는 전 과정 평가 기법을 이용하여 발효에 의한 에탄올 생산공정의 환경적 가치를 평가하였다. 평가의 목적은 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정의 환경성을 비교, 평가하기 위한 기준으로서 발효공정의 환경적 가치를 정량화하는데 있었다. 두 공정에서 생산되는 에탄올의 소비 및 폐기 과정은 동일하다고 가정하고 원료물질의 획득으로부터 제품의 생산 과정에 대한 전 과정 평가를 실시하였다. 전 과정 목록분석과 영향평가의 결과, 원료의 전처리 단계인 전분의 제조 과정에서 가장 큰 환경부하가 발생하며 그 영향은 주로 산성화 및 온실가스효과로 나타남을 알 수 있었다.

Abstract – In this paper, the methodology of life-cycle assessment was applied to an ethanol production process based on fermentation. The purpose of the assessment was to quantify environmental performance of the process and to prepare a basis for environmental comparisons with the ethanol production process based on catalytic reaction. The assessment was carried only on the stages of raw material acquisition through ethanol manufacture since it was assumed that ethanol from both processes had the same environmental impacts through its use and discard. The assessment results showed that the major environmental impact came from the sub-process of producing starch from corn and the most severe burden was generated in the form of acidification and greenhouse effect.

Key words: Life-Cycle Assessment, Ethanol Production Process, Fermentation

1. 서 론

이제 공정의 설계는 단지 생산공정의 효율 및 비용의 계산이라는 문제뿐 아니라 생산물과 생산공정이 환경에 미치는 영향을 측정하고 그 영향을 제거하는데 드는 비용을 계산하는 문제까지를 포함한다. 제품과 공정의 환경성을 정량적으로 표시하기 위한 많은 연구가 진행되었고 많은 영향평가 방법 및 도구들이 개발되었다. 특히 제품을 생산하는 공정뿐 아니라 제품을 소비하고 재활용하며 폐기

하는 과정에 이르기까지 제품의 전 과정에 대한 환경적 영향이 고려되기 시작하면서 제품에 대한 전 과정 평가 기법이 가장 효과적이었던 환경영향평가 방법의 하나로 대두되었다.

전 과정 평가 방법은 제품의 전 과정 즉, 원료 획득 및 가공, 제조, 수송, 유통, 사용, 재활용, 폐기물 관리 등 제품과 관련된 모든 과정 동안에 소모되고 배출되는 에너지 및 물질의 정량화를 통하여 이들이 환경에 미치는 영향을 총체적으로 평가하고 이를 토대로 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적이며 적극적인 환경영향평가 방법이다[1]. 전 과정 평가는 각 과정에서 소모되고 배출되는 에너지 및 물질을 정량화하는 목록분석, 그 결과를 실질적인 환경영향

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

목록에 연계시켜 임의의 물질이 갖는 환경영향관계를 분석하는 영향평가 그리고 환경영향 결과를 분석하고 환경오염을 줄이기 위한 방법을 제시하는 전 과정 해석의 세 요소로 구성되며 각 단계는 전 과정 평가의 목적과 경계에 맞게 진행된다[2, 3].

에탄올은 매우 중요한 에너지원이자 화학물질로서 그에 대한 전 과정 평가 및 경제성 평가는 이전부터 꾸준히 진행되어왔다. Kiran[4]은 사탕수수 찌꺼기를 이용한 에탄올의 생산에 대하여 목록분석을 실시하고 에탄올 생성 시 배출되는 물질들을 열거하였다. Kinoshita와 Zhou[5]는 하와이 지역에서의 에탄올 생산성에 대한 조사를 실시하였으며, McAloon 등[6]은 전분과 셀룰로오스로부터 에탄올을 생산하는 공정에 대하여 경제성 비교연구를 실시하였다. Sheehan 등[7]은 에탄올과 유사한 바이오 디젤과 일반디젤에 대한 목록분석을 통해 목록분석의 결과만으로는 환경적 입장에서의 공정 선택이 불가능함을 예시하였다.

여기서는 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정[8]의 환경성을 비교, 평가하기 위한 기초를 마련하는 작업으로서 전분의 발효를 통해 에탄올을 생산하는 공정의 전 과정 평가를 실시하였다.

2. 전 과정 평가의 목적 및 범위

여기서 실시한 전 과정 평가의 목적은 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정[8]의 환경성을 평가하기 위한 비교 기준으로서 발효에 의한 에탄올 생산공정의 환경영향을 정량화하는데 있었다. 따라서 여기서는 목록분석과 영향평가만을 실시하고 전 과정 해석은 실시하지 않았다.

촉매공정과 발효공정에서 생산되는 에탄올의 질과 용도가 모두 같다고 가정하여 에탄올 생산 이후의 단계는 평가에서 제외하고 에탄올 생산을 위한 원료물질의 획득으로부터 제품의 생산 과정까지만을 시스템 경계 안에 포함하였다. Fig. 1은 발효에 의한 에탄올 생산공정의 전 과정 평가에 적용된 시스템 경계 안에 존재하는 단위 공정들을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 95%의 에탄올 1kg을 생산하는 것을 기능단위로 채택하였으며 목록분석 및 환경영향평가는 ISO 14040[3]을 비롯하여 Vigon 등[9]과 Fava 등[2, 10, 11]에서 정

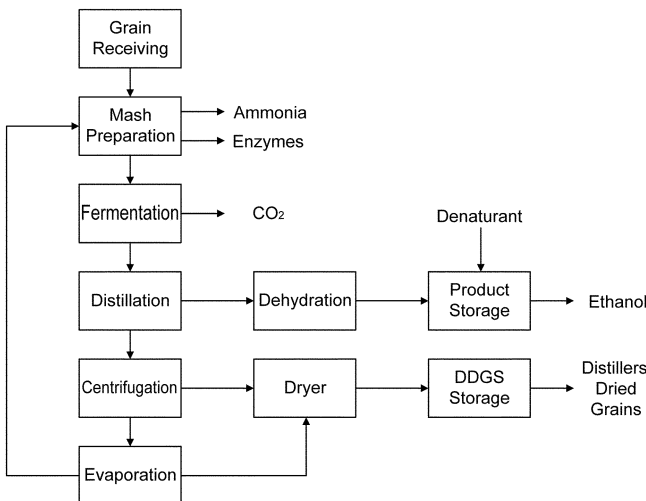


Fig. 1. Unit processes inside of the system boundary of the ethanol production process based on fermentation.

의한 방법 및 과정을 좇아 실시하였다. 목록분석에는 GaBi[12], SimaPro[13], TEAM[14] 등 상용 프로그램을 사용하였으며 영향평가를 위해서는 Eco-indicator 95[15]를 이용하였다.

3. 목록분석

본 연구의 시스템 경계 안에는 옥수수 재배를 통해 원료물질을 획득하는 과정, 전분을 만들기 위한 전처리 공정, 효소를 이용한 발효공정 그리고 분리공정 등이 포함되었으며 생산된 에탄올의 유통, 소비 및 폐기 단계는 제외되었다. 옥수수 재배에는 종자와 물, 햇빛 외에도 비료와 경작기계 그리고 기계를 움직일 수 있는 전기와 디젤 연료가 필요하다. 옥수수 생산과정에서 환경오염물질이 배출되기만 하는 것은 아니며 식물의 광합성 작용을 통하여 다량의 이산화탄소가 흡수되기도 한다. 수확된 옥수수는 전처리 공장으로 이송되어 물로 헹구진 후 전분으로 분쇄된다. 전분은 아밀라아제에 의하여 액화, 당화되며 발효과정을 거쳐 에탄올을 생성한다. 액화공정에서 많은 양의 수증기가 이용되며 약간의 냉각수도 사용된다. 발효를 통해 에탄올을 생성하는 과정에서 물과 이산화탄소가 발생된다. 에탄올은 물에 잘 희석되고 물과 공비혼합물을 이루기 때문에 벤젠 또는 펜탄을 사용하여 분리, 정제된다.

옥수수 재배 과정과 전분을 만들기 위한 전처리 공정에 대한 자료는 상용 프로그램인 SimaPro[13]의 데이터베이스와 Wang 등[16]으로부터 수집하였다. 옥수수 재배 기간은 1년으로 가정하였으며 그 공간적 경계는 미국으로 하였다. 옥수수는 선박에 의하여 국내로 수송된다고 가정하였으며 수송과정에 대한 계산은 SimaPro의 데이터베이스를 기초로 하였다. 발효 및 정제과정에 대한 자료는 McAloon 등[6]과 실제 공정의 조업자료로부터 얻었으며 수증기 및 전기 등 유틸리티에 대한 자료 역시 SimaPro의 데이터베이스로부터 수집하였다. 발효 및 정제 공정의 공간적 경계는 국내로 가정하였으나 조업과 관련된 모든 데이터는 국제적 데이터를 이용하였다.

에탄올 1kg을 생산하기 위해서 5.3kg의 옥수수가 필요하였으며 이 옥수수로부터 생성되는 전분은 약 4kg이었다. 사용되는 물의 양은 약 4.5kg이었으며 발효과정 후 배출되었다. 발효 후 남은 찌꺼기는 1.37kg이었는데 건조되어 가축사료로 사용 가능하기 때문에 고형폐기물의 발생량 계산에서 제외하였다.

목록분석은 상용 전 과정 평가 프로그램을 이용하여 수행하였다. 여러 프로그램을 동시에 이용하여 부족한 자료의 비교 및 상호 지원을 통해 자료의 질을 높이고자 하였다. 목록분석을 통해 수집, 정리된 물질 가운데 기능단위 당 1g 이상의 사용량 및 배출량을 보인 물질에 대하여 그 값을 정리한 것이 Table 1이다.

가장 두드러진 자원투입 요소는 물의 이용이었다. 발효공정의 주 원료인 옥수수를 재배하는 과정에서 기능단위 당 약 42kg의 이산화탄소가 광합성에 의해 흡수되는 것으로 나타났다. 옥수수 재배 기간을 1년으로 가정할 때 이렇게 흡수된 이산화탄소는 자연계에 고정화되지 못하고 다시 대기 중으로 방출된다. 이러한 이유로 광합성을 통해 흡수된 이산화탄소는 환경영향평가에서 제외하였으며 Table 1의 전 과정 목록에도 표시하지 않았다. 이용된 물은 기능단위 당 약 25kg이었으며 80% 이상의 물이 냉각수로 이용되었다. 대기배출물의 경우, 질량 기준으로 배출량의 98% 이상이 이산화탄소로 이루어짐을 알 수 있었다. 기능단위 당 2.2kg이 배출되는 이산화탄소는 수증기 사용을 위한 화석연료의 사용, 발효공정에서의 이

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

Inventory Parameter	LCI Result (g/kg ethanol)
Resources	
Cooling water	20,240
Water (unspecified)	4,727
Alpha amylase	2,955
Air emissions	
Carbon dioxide	2,199
Sulfur oxides	11
Hydrocarbons	8
Nitrogen oxides	8
Ammonia	7
Water emissions	
Steep water	485
Chemically polluted water	64
Fluorides	18
Phosphates	13
Chlorides	3
Solid wastes	
Waste	8,884
Husk	776

산화탄소 생성에 의한 것으로 밝혀졌다. 그 외의 대기배출물도 소량의 황화산화물과 탄화수소 등이 있었다. 발효에 의한 에탄올 생산공정에서는 수질오염물질의 배출량 역시 적지 않음을 알 수 있었다. 많은 물의 사용과 함께 물에 녹아있는 전분 성분의 배출을 통해 수질 오염이 일어남을 알 수 있었다. 배출되는 물은 화학적으로 오염된 것과 그렇지 않은 것으로 나누어 고려하였는데 이들의 환경적 영향은 상이하였으며 각기 다른 결과를 초래하였다. 전처리를 통한 옥수수의 전분화 과정에서 돌, 옥수수 껍질 등과 같은 고형폐기물이 발생하였으며 그것들은 토양에 버려졌다. 옥수수를 재배하는데 사용되는 비료 역시 질소와 인 성분으로 인해 토양 오염을 일으키는 것으로 나타났다.

전 과정 평가의 결과에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소들을 찾기 위하여 주요 공정 변수를 대상으로 민감도분석을 실시하였다. 에탄올 생산에 투입되는 옥수수, 전기 및 수증기의 양 등에 대하여 각각 ±50%의 변화를 주고 이산화탄소 배출량의 변화를 관찰하였다. 관찰 결과 옥수수 및 수증기의 사용량 변화에 대해서는 그 결과의 변화가 ±3% 이내로 미미하였으나 전기 사용량의 변화에 대해서는 ±50% 정도의 큰 변화가 나타남을 확인하였다. 민감도 분석에는 상용프로그램인 TEAM[14]이 사용되었다.

4. 영향평가

영향평가는 환경영향요소를 종류별로 분류하고 분류된 영향요소와 목록분석에서 얻은 목록요소 사이의 관계를 특성화하여 그 영향의 정도를 정량화하는 과정을 거쳐 진행된다[10]. 영향평가 과정 중 목록요소를 특성화하여 환경지표를 구하는 작업은 상대적으로 주관적인 가치판단 과정을 거치게 되는데 여기서는 상용프로그램의 일부인 Eco-indicator 95[15]의 방법을 적용하였다. Eco-indicator 95는 오존층 파괴, 중금속, 발암물질, 여름/겨울철 스모그, 살충제, 온실효

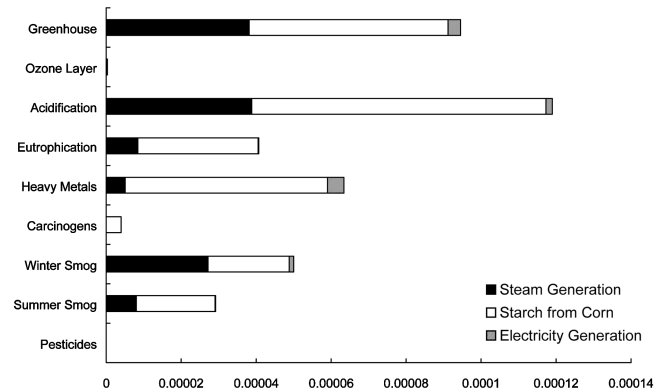


Fig. 2. Normalized environmental impacts of the ethanol production process based on fermentation.

과, 산성화 및 부영양화 등으로 분류된 환경영향요소를 포함하며 각 영향요소의 상호작용을 통한 생명, 건강, 생태계 등에 미치는 영향을 특성화하여 영향지표를 계산한다. 앞서 설명한 것과 같이 목록 분석에 쓰인 대부분의 데이터는 국제적 데이터이다. 여기서는 목록 분석에 쓰인 데이터와 동일한 공간적 경계를 갖는 정규화 기준을 이용하기 위하여 Eco-indicator 95를 선택하였다. 따라서 여기서 얻은 영향평가의 결과는 국내의 실정을 반영한 것은 아니다.

Fig. 2는 발효에 의한 에탄올 생산공정에 대한 영향평가의 결과를 정규화하여 나타낸 것이다. 정규화는 Eco-indicator 95에서 일반적으로 이용되는 가중치를 이용하여 실시하였다. Fig. 2에서 환경영향요소별 환경부하의 크기는 각 가로막대의 전체 길이로 나타나는데 이로부터 산성화 및 온실가스효과의 발생 등이 주요 환경부하라는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 2는 각 환경영향요소의 환경부하를 그것을 유발하는 단위공정별로 다시 구분하여 보이고 있다. 단위공정 가운데 전분 생산공정이 대부분의 환경영향요소에 대하여 가장 큰 환경부하를 발생시키고 있으며 공정에 공급되는 수증기와 전기의 생산 과정에서도 큰 환경부하가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이들에 비해 다른 단위공정의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작았다.

여기서는 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정의 환경성을 평가하기 위한 기준으로서 발효공정의 환경영향을 정량화하는 것이 평가의 목적이었기 때문에 발효공정에 대한 전 과정 해석은 실시하지 않았다. 그러나 발효공정의 전과정 가운데 원료의 마련을 위한 전처리 공정인 전분 생산과정에서 가장 큰 환경부하가 발생한다는 사실로부터 공정의 환경성 개선을 위해 가장 시급한 것이 원료 마련 방안의 개선이어야 함을 알 수 있었다.

5. 결 론

발효에 의한 에탄올 생산공정의 환경적 가치를 전 과정 평가 기법을 통해 정량화함으로써 촉매반응에 의한 에탄올 생산공정을 환경적으로 비교, 평가하기 위한 기초를 마련하였다. 에탄올의 소비 및 폐기 과정은 동일하다는 가정 아래 원료물질의 획득으로부터 제품의 생산 과정에 대한 환경영향을 평가하였다. 전 과정 평가의 결과로부터 옥수수로 전분을 생성하는 과정에서 가장 큰 환경부하가 발생하며 그 영향은 주로 산성화 및 온실가스효과로 나타남을

알 수 있었다. 발효공정 자체의 개선보다는 원료 마련 방법을 개선하는 것이 환경성 개선을 위해 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

감 사

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

참고문헌

1. Curran, M. A., Environmental Life Cycle Assessment, McGraw-Hill, New York, NY(1996).
2. 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).
3. International Standard Organization, ISO 14040, 1st ed., International Standard Organization(1997).
4. Kiran, K., Environmental Life Cycle Implications of Using Bagasse - derived Ethanol as a Gasoline Oxygenate in Mumbai, TP-570-27637, National Renewable Energy Laboratory(2001).
5. Kinoshita C. and Zhou, J., Site Evaluation for Biomass - Ethanol Production in Hawaii, University of Hawaii(1999).
6. McAloon, A., Taylor, F., Yee, W., Ibsen, K. and Wooley, R., Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Ligno Cellulosic Feed Stocks, TP-580-28893, National Renewable Energy Laboratory(2000).
7. Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M. and Shapouri, H., An Overview of Biodiesel and Petroleum Diesel Life Cycles, TP-580-24772, National Renewable Energy Laboratory(1998).
8. Hwang, I. and Chung, Y., "Preliminary Design for Ethanol Process from Methanol," *Theories and Applications of Chemical Engineering*, 6(2), 2993-2996(2000).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. IKP, GaBi 3.0 User's Manual, IKP(1998).
13. Pre, SimaPro 5.0 User's Manual, Pre(2001).
14. Ecobilan, TEAM 3.0 User's Manual, Ecobilan(1999).
15. Goedkoop, M., Eco-indicator 95, NOH Report 9523, PRe(1995).
16. Wang, M., Saricks, C. and Wu, M., Fuel Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from U. S. Midwest Corn, Argonne National Laboratory(1997).