

## 해조류를 이용한 바이오 에탄올 생산에 대한 전과정평가

고명진, 유준\*  
부경대학교 화학공학과  
(jayliu@pknu.ac.kr\*)

### Life Cycle Assesment of Bioethanol from Seaweeds

Myung jin Ko, Jay liu\*  
Department of Chemical Enginering, Pukyong National University  
(jayliu@pknu.ac.kr\*)

#### 서론

최근 고유가와 지구온난화에 대처하기 위해 선진국에서는 석유의존도를 낮추기 위한 대체 에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 기술로서 신재생에너지의 한 종류인 식물에서 에탄올을 추출하는 즉, 바이오에탄올이 현재 크게 주목받고 있다. 신재생에너지에 있어서 가장 중요한 것이 생산단가와 더불어 탄소 배출량이 기존의 석유에너지에 대비하여 얼마나 감소하는가가 관건이 될 것이다. 이를 판단할 수 있는 방법이 바로 전 과정 평가이다. 현재 바이오에탄올을 생산하는 방법에는 당·전분질계를 이용한 추출, 유채꽃에서의 추출, 해조류를 이용하는 방법 등이 있는데 당·전분질계, 유채꽃에 대한 전 과정 평가는 되어있는 반면, 해조류를 이용한 바이오에탄올 생산에 대한 전 과정 평가는 현재 이루어지지 않고 있다. 따라서 우리는 해조류 재배와 이를 이용한 바이오에탄올 생산의 전 과정 평가를 통해 환경성을 분석하여 지속가능한 바이오에탄올 생산의 정책적 기반을 구축을 위한 자료를 얻고 해조류 재배 및 해조류를 이용한 바이오에탄올 생산의 전과정(Life Cycle)에 대한 분석을 통해 환경영향 및 온실가스(CO<sub>2</sub>)의 발생량을 파악하여 환경경제성을 고려한 지속가능한 해조류 재배 및 바이오에탄올 생산의 정책(안) 도출하고자 한다.

#### 본론

##### 1. 전과정 평가(Life Cycle Assessment)의 정의

전과정평가(LCA : Life Cycle Assessment)는 제품의 원재료 생산, 제품생산, 제품 사용, 폐기까지의 전과정에 걸친 제품의 환경적 영향을 평가하는 것이다. 전과정(Life Cycle, 전과정)이란 제품 제조에 사용된 원료의 채취부터 제품의 최종 폐기까지를 의미한다. 아래 그림과 같이 원료 물질 채취, 원료 가공, 부품 제조, 제품 제조, 제품 사용, 제품 폐기, 제품 재활용, 그리고 각 단계 이동을 위한 수송이 제품 전과정에 포함된다. 원료 채취에서 폐기까지의 전과정은 제품의 탄생에서 최종적 단계까지 포괄하는 의미에서 '요람에서 무덤까지 (cradle to grave)'라는 말로 표현한다. 한편 제품의 이용 목적과 특성에 따라서 원료 채취에서 제품 제조까지의 단계까지 평가하고 사용과 폐기 단계를 제외하는 경우, cradle to gate라는 표현을 이용한다. 대부분의 제품은 제품 제조까지의 단계와 폐기 단계를 평가하는 반면, 에너지 사용이 많은 전자제품의 경우 사용 단계까지 포함하여 환경에 미치는 영향을 평가하게 된다.

전과정평가는 크게 목적 및 범위정의, 목록분석, 영향평가, 해석의 4단계로 위의 과정을 포함하게 된다.

## 2. 실험

### 2.1 전환경목록(life cycle inventory, LCI) 분석

해조류 바이오 에탄올 생산 전과정(life Cycle) 동안 온실가스(CO<sub>2</sub>) 배출량을 평가하기 위하여 재배에 투입되는 농자재와 농작업, 그리고 수송을 포함하는 바이오 에탄올 생산 전과정에 대한 전과정목록(life cycle inventory, LCI) 분석을 수행하였다. 해조류 품종은 우뭇가사리를 기준(reference)으로 하였으며, 생산량은 550 ton ha<sup>-1</sup>, 탄수화물 함량은 76%(wt wt<sup>-1</sup>)를 기준으로 평가하였다. LCI 분석에서는 투입된 농자재, 농기계 사용, 수송, 건조에 대한 사항은 포함하였지만 농기계와 같은 내구재의 생산에 소모된 물질 및 에너지에 대한 영향은 고려하지 않았다. 또한 노동력 투입, 인프라(도로, 수로, 토목건축물 등)에 대한 환경부하 역시 고려하지 않았다.

### 2.2 가정 설정

#### 2.2.1 공장부지 선정

해조류 생산량을 지역별로 비교해 보았을 때 전남 지역에서의 생산량이 전국에서 가장 높았다. 그리고 대표적인 전남지역의 공단 지역이 있는 여수로 설정하였다. 여수의 산업단지와 광양만은 대략 3km 정도의 거리이다. 하지만 주변의 공장 지역의 하수와 여러 가지의 조건에 의해서 양식이 제대로 이루어지지 않고 있다고 한다.

임의로 남해안의 한 지점을 선택하여 해조류를 배로 이동 할 경우 32.45km를 이동하여야 한다. 다른 조건으로 배로 가까운 여수항으로 이동한 후 차량으로 수송할 경우도 생각해 보았다. 이 경우 배로 여수항까지는 8km를 이동한 다음, 차량으로 12.92km를 이동하여야 한다. 이를 통해서 거리상으로 배와 차량을 모두 이용하는 경우가 거리가 작게 측정되지만, 차량과 배에서 소모되는 연료를 비교해보고 더 좋은 조건을 선택하도록 한다.

위의 조건(지도)을 비교해 보았을 때, 배와 차량을 이용하여 수송하는 경우가 거리와 시간 면에서 경제적이란 것을 알 수 있다. 따라서 여수 산업단지에 공장부지가 있다고 설정을 하고 재배지는 남해안으로 설정한다.

#### 2.2.2 바이오에탄올 원료 선정

전체 어업 생산량 330만 톤의 27.8%, 양식생산량 138만 톤의 67.6%에 해당한다. 해조류 생산 추이를 보면, 1990년 44만 톤에서 늘어나기 시작하여 2008년에는 약 2배의 증가를 보였다. 해조류 생산을 일반해면과 천해양식으로 구분하면 일반해면의 생산은 지속적으로 감소한 반면, 천해양식은 증가하여 해조류 생산 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 지역별 해조류 생산량을 보면, 2008년 현재 전체 92만 톤 중에서 전남의 생산량이 79만 톤으로 전체의 85.9%를 점하고 있어 타 지역에 비해 압도적인 우위에 있다. 주요 품종인 김, 미역, 다시마 등 과래를 제외한 모든 해조류의 생산 비중이 가장 높다. 다음으로는 부산, 전북, 충남, 경남의 순이다. 따라서 재배 원료는 수요의 공급이 원활한 다시마로 설정하고 남해안에서 대량 양식을 한다고 가정하겠다.

### 2.3 범위설정(Goal and Scoping Definition)

- LCA 평가방법 및 체계 확립, 환경경제성 분석자료 확보 및 통계처리
  - 우리나라 해조류 조사 및 해조류 재배 농자재 투입요소 분석
  - 우리나라 농업여건을 고려한 작물의 LCA 평가방법 확립
    - LCA 평가 흐름도 및 시나리오 작성

- 바이오 에탄올 생산의 환경성 평가를 위한 개별 LCI 데이터베이스 구축
- 바이오 에탄올 생산의 LCA 평가(환경성 및 온실가스 감축효과 평가)
  - 해조류 재배 전과정에 대한 합리적 평가모델 제시
  - 국내 표준 재배 여건을 분석과 자료의 표준화
  - LCA 실시
    - 해조류 재배·채취 단계, 건조 단계, 수송 단계, 분쇄 단계로 구분
    - 환경성 평가에 대한 결과를 다른 사례들과의 비교

#### 2.4 목록분석

1ha에서 나는 다시마의 생산량(565ton)과 8000시간 조업 기준으로 LCI 목록은 다음의 표 1, 2와 같고 결과는 표 3과 같다.

표 1.LCI 목록분석 (입력 데이터)

목록	예상 사용량
선박 연료	127872L
분쇄 사용 전력	508500kW
건조기 사용 전력	37660000kW
차량연료	43290L
제조 공정의 사용 전력	8904000kW

표 2.LCI 목록분석 (출력 데이터)

목록	이산화탄소 배출량
다시마	-8640t
CO <sub>2</sub> (선박연료)	384t
CO <sub>2</sub> (스팀 건조)	17719t
CO <sub>2</sub> (분쇄)	240t
CO <sub>2</sub> (차량 연료)	106t
CO <sub>2</sub> (제조)	4189t
CO <sub>2</sub> (제조 공정에서의 방출량)	22384t
총 계	36378t

### 3. 결과 및 토론

해조류 바이오 에탄올을 생산하는 과정을 전과정평가를 실시하였다. 해조류 재배지에서 1ha 기준으로 565ton을 생산하며, 조업시간을 8000시간을 기준으로 계산하였다. 재배, 분쇄, 수송, 제조, 방출량에 따라 발생하는 이산화탄소 배출량은 총 36378t으로 계산되었다.

표 3.LCA 결과 (이산화탄소 배출량 기준)

목록	이산화탄소 배출량
다시마	-8,640t
CO <sub>2</sub> (선박연료)	384t
CO <sub>2</sub> (하이브리드식 건조)	5,340t
CO <sub>2</sub> (분쇄)	240t
CO <sub>2</sub> (차량 연료)	106t
CO <sub>2</sub> (제조)	4,189t
CO <sub>2</sub> (제조 공정에서의 방출량)	22,384t
<b>총 계</b>	<b>24,003t</b>

※ 어선 연료소모량은 volvo motor TAMD 71A 375 HP 엔진 기준 33L/hr, 3.3L/노트이다. 덤프트럭 연비는 평균 3km/L이다.

### 결론

이산화탄소 발생 비율을 살펴보면 제조 과정에서 방출되는 양과, 건조기에서 발생하는 이산화탄소 비율이 다른 과정에 비해서 비교할 수 없을 만큼 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 건조 과정을 건조기만을 이용해서 한다면, 매우 비효율적일뿐더러 환경적인 측면에서도 부정적이다. 그러므로 전력 효율이 좋은 건조기 또는 자연건조방법을 사용한다면, 에너지 사용이 상당히 줄어들면서 이산화탄소 배출량도 대폭 감소할 수 있다는 것을 알 수 있다.

또한 다른 조건들을 변화시키면 어떠한 변화가 발생하는지 확인해보았다. 먼저, 공장 부지를 재배지와 더 가까운 곳에 선정했을 경우 선박 및 차량에서 쓰이는 연료를 줄일 수 있다. 다시마 재배 부지 거리를 8km에서 5km로 줄였을 때 이산화탄소 배출량이 24.6%가 감소되었고, 공장 부지의 거리를 13km에서 10km로 줄이게 되면 기존 배출량의 26%가량 감소됨을 알 수 있었다. 그리고 재배량을 1ha당 기준 565ton에서 665ton으로 100ton을 늘리면 이산화탄소 흡수량이 17.7%만큼 증가되는 것을 알 수 있다. 따라서 단위면적당 다시마 생산 수량을 늘리고 공장 및 재배 부지를 가까이 한다면, 평균 20%의 환경부하를 줄일 수 있을 것으로 전망되어 진다.

### 참고문헌

- 1) 국가 LCI 데이터베이스정보망, 환경부 한국환경산업기술원, <http://www.edp.or.kr/lcidb>
- 2) An Engineered Microbial Platform for Direct Biofuel Production from Brown Macroalgae, Adam J. Wargackie, 2012
- 3) 해조류 양식 산업의 현황과 전망, 국립수산물연구원 해조류연구센터, 백재민, 2007. 4
- 4) 바이오에너지 연구 및 기술개발동향, 생명공학정책연구센터, 2011. 1
- 5) BT 기획특집, 한국생산기술연구원. 그린오션사업단, 2009. 4
- 6) 기지개 켜는 조류 바이오 연료 시장, 정유진, 2010. 6
- 7) 이산화탄소 배출량 계산, 에너지관리공단, <http://co2.kemco.or.kr/toe/toe.aspx>