ISSN 1738-3935
New & Renewable Energy 2015. 6 Vol. 11, No. 2 http://dx.doi.org/10.7849/ksnre.2015.06.11.2.29

[2015-6-RP-004]

해조류 바이오매스 에너지화 사업의 경제적 타당성과 파급효과 분석

배정환[1)**] · 정해영[2)*] · 김미정[3)]

Economic Feasibility and Impact Analysis on Energy Transformation Project of Macro-Algae Biomass

Jeong Hwan Bae[1)**] · Heayoung Jung[2)*] · Mee Jeong Kim[3)]

Received 10 March 2015 **Revised** 10 April 2015 **Accepted** 10 April 2015

ABSTRACT This study aims at examining economic feasibility, economic impacts, and CO2 reduction of a large scale project on conversion of macro-algae to bioenergy in South Korea. As feedstock for producing biofuels such as methane, ethanol, and bio-oil, Laminaria was accounted in the feasibility study. For low, medium, and high crude oil price scenarios, NPV, B/C, and IRR supported positive feasibility of this project. As economic spill-over effects, forward and backward linkage effects were over 4trillion KRW, employment effect was over 10,000 persons in 2030. For environmental effects, about 741,231TCO2 were abated due to this project in 2030. We suggested that RPS, RFS, or RHO should take account of credits on the bioenergy from macro-algae in the future.

Key words Macro-Algae Biomass(해조류 바이오매스), Economic Feasibility(경제적 타당성), Economic Spillover(경제적 파급효과)

Nomenclature

Daf : dry and ash free
MT : metric tonne
TCO2 : ton of CO_2
KRW : Korean won

subscript

NPV : Net present value
B/C : Benefit-cost ratio
IRR : Internal rate of return
RPS : Renewable Portfolio Standard
RFS : Renewable Fuel Standard
RHO : Renewable Heat Obligation
GHG : Green house gases

1) 전남대학교 경제학부 부교수 E-mail: jhbae@jnu.ac.kr
Tel: +82-62-530-1542 Fax: +82-62-530-1559

2) 전남대학교 경제학부 박사과정 E-mail: hywind13@gmail.com
Tel: +82-62-530-1540 Fax: +82-62-530-1559

3) 전남대학교 경제학부 박사과정 E-mail: love-green27@hanmail.net
Tel: +82-62-530-1540 Fax: +82-62-530-1559

1. 서 론

본 연구는 거대 해조류(macro-algae)에 속하는 다시마를 이용하여 바이오에너지로 전환하는 사업의 경제적 타당성과 경제적 파급효과, 그리고 온실가스 저감효과를 추정하였다. 아직까지 전 세계적으로 거대 해조류를 이용하여 상업적으로 바이오연료를 생산하는 사업이 본 궤도에 오르

Copyright ⓒ 2015 by the New & Renewable Energy
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지는 못했으나 거대 해조류는 육상에서 재배되는 옥수수나 카사바를 이용한 바이오에탄올이나 유채, 해바라기, 팜 등을 이용한 바이오디젤에 비해 광대한 토지를 이용할 필요가 없고, 식량문제를 야기하지 않는다는 점에서 향후 주요한 바이오에너지용 원료가 될 수 있다(Cha and Bae, 2011).[1)]

또한 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고, 전통적으로 거대 해조류를 대량으로 재배해온 기술과 노하우, 인프라를 갖추고 있기 때문에 해조류 바이오에너지 사업화에 유리하다. 따라서 중장기적으로 거대해조류를 바이오 에너지화 하는 기술을 개발하여 상용화한다면 에너지 자립률을 제고하고, 연관 산업의 부가가치 및 고용효과를 기대할 수 있을 것이며, 온실가스 감축에도 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 특히 우리나라의 바이오연료는 국산 원료로 이용할 수 있는 가능성이 높지 않고, 수입 원료를 주로 이용하고 있어 국민들도 바이오연료 보급확대에 긍정적이지 못한 것으로 보인다(Bae, 2014a).[2)]

따라서 향후 바이오에탄올, 바이오디젤과 같은 바이오연료의 수송 부문이나 전력 부문에서의 이용을 확대하고, 국산원료 비중을 높이기 위해서는 국산 보리나 유채를 이용하기 보다는 거대 해조류를 이용한 바이오연료 생산이 더 효과적일 것으로 판단된다(Bae, 2014b).[3)]

본 연구는 국내 해양에서 쉽게 재배될 수 있는 다시마를 이용하여 바이오연료를 대규모로 생산하는 사업에 대해 경제적 타당성이 있는지 분석하고, 인접 산업에 미치는 경제적 파급효과와 화석연료 대체에 따른 온실가스 감축효과를 추정함을 목적으로 한다. 아직까지 국내에는 국산 거대해조류를 이용하여 생산된 해조류 바이오에너지에 대한 경제성이나 파급효과를 분석한 논문이 거의 없고, 다만 일부 연구 보고서(김경수, 2007[4)]; 전희동, 김형석, 2006[5)]; 홍현표, 마창모, 2009[6)]; 조지혜, 이희선, 2011[7)]; 해양바이오매스기획위원회, 2009[8)])에서 해외자료를 원용하거나 기초적인 경제성 분석 수준에 머물고 있다.

따라서 본 논문은 경제성 분석을 위해 보다 세밀한 전제와 데이터에 기반하여 비용편익기법과 산업연관분석기법을 활용했다는 점에서 해조류 바이오에너지의 타당성과 파급효과 분석 관련 연구에 학술적으로 기여한 것으로 사료된다.

2. 경제성 분석의 기본전제

경제성 분석을 위해 우선 다시마의 생산성과 에너지 전환율, 생산비용, 판매단가 등에 대한 전제가 필요하다.

2.1 다시마 생산성

해조류에 속하는 다시마(Laminaria)를 이용하여 메탄과 에탄올, 바이오오일로 구성된 바이오연료(Biofuel) 생산단계를 거쳐 최종 생산물로 휘발류와 에탄올, 등유를 생산하는 에너지화 사업①의 경제성을 분석하였다. 아직까지 세 가지 바이오연료를 동시에 생산할 수 있는 기술 수준에 이르지는 못하고 있으나 중장기적으로는 미국 에너지부 연구에 기초②하여 세 가지 바이오연료를 생산할 수 있을 것으로 가정하였다(Roesijadi et al., 2010).[9)]

우선 다시마 생산단가는 건조중량 톤당 $112로 가정③하고, 정상가동시 건조중량 기준 연간 50만톤의 다시마를 생산할 수 있는 것으로 전제하였다(Table 1).

전체 사업기간은 2013~2030년으로 총 17년을 사업기간으로 하였고, 이는 해조류바이오매스사업단(ABRC: Aquatic

Table 1. Production Costs and Productivity of Various Macro Algae

Types of Macro Algae	Productivity		Production Costs (Unit: $/ton)
	Daf MT/ha/yr	Dry MT/ha/yr	
Macrocystis, nearshore	50	83	25
Laminaria/ Laninariaropefarm (offshore)	45	59	112
Ulva/Ulva, tidal flat farm	23	30	21
Sargassum, floating cultivation	45	47	25

(주: Daf=Dry and Ash Free)

(출처: Reith et al.(2009)[10)], citing Chynoweth(2002)[11)])

① 바이오리파이너리 기술에 의하면 해조류 바이오매스로부터 의약품 생산도 가능하지만 본 연구는 에너지화에 초점을 맞추었다.
② 국내에도 거대조류를 이용한 바이오연료 실증사업이 이루어지고 있으나, 아직까지 상업화에 이르지 못하고 있어 국내 자료를 이용하지 못하였음을 밝혀둔다.
③ 본 사업의 시행시기를 기준으로 가격을 조정해야 하지만 인플레이션 변동이 크지 않은 것으로 전제함.

Biomass Research Center)의 자료에 기초하였다. 또한 다시마를 이용하여 메탄과 에탄올, 바이오오일(HTL Biocrude)을 생산하기 위한 에너지 전환율은 각각 0.124m^3/kg, 0.254 kg/kg, 0.2278kg/kg으로 전제하였다④. 이때 바이오 오일은 경질유(light oil)만을 대상으로 하였다.

한편 다시마의 생산성(건조중량 기준 59톤/헥타르/연)을 기준⑤으로 다시마 생산량을 초기에는 목표 생산량 50만톤의 10%인 5만톤에서 로지스틱 함수형태로 증가하는 것으로 가정하였다(Fig. 1). 이때 사용된 로지스틱 함수는 다음과 같다.

$$Y(t) = \frac{1}{1+(\frac{1}{Y_0}-1)e^{-rt}} \quad (1)$$

($Y(t)$: 시간 t에서의 생산성, Y_0: 초기 생산성, r: 성장률로 0.5 사용)

Table 2. Bioenergy conversion rate and production costs of macroalgae

Production	Methane	Ethanol	Biooil
Scale (metric ton/yr, dry basis)	500,000	500,000	500,000
Conversion rate (dry Laminaria)	0.124 m^3/kg	0.254 kg/kg	0.2278 kg/kg light crude;
Byproducts	n/a	electricity 212,778 MWh/yr	n/a
Investment (millionUSD)	41.5	243	151.1
Operation cost (millionUSD/yr)	4.2	29.3	19.1
Net production (per yr)	61.8 million m^3	127,000 metric ton	113,900 metric ton lightcrude 48,800 metric ton heavycrude

(Source: Roesijadi et al., 2010[9])

④ Roesijadi et al.(2010)[9]에서는 세 가지 연료가 독립적으로 생산되는 경우를 비교하고 있으나, 해조류 바이오매스 사업단의 최종 목표는 세 가지 연료를 동시에 생산하는 기술을 개발하는 것이기 때문에 본 경제성 및 파급효과 분석에서는 세 가지 연료가 동시에 생산되는 것으로 전제하였다. 이로 인해 과다추정의 가능성이 존재한다.

⑤ 습량기준으로 환산하면 헥타르당 590톤으로, 해조류바이오매스 사업단이 최종 목표로 하는 기준인 300톤/헥타르의 약 2배에 가까운 생산성이다.

통상 로지스틱 함수는 생물의 생애주기 동안의 성장 패턴을 나타내기 위해 많이 사용되며, 해조류 바이오매스 역시 생물이기 때문에 유사한 패턴을 따를 것이라고 가정한 것이다.

에너지 전환율을 감안한 메탄과 에탄올, 바이오오일의 최종 연간 생산량은 각각 61.8백만m^3, 127천톤, 113.9천톤으로 전제하였다. 최종 에너지인 휘발류와 에탄올, 등유 생산량도 로지스틱 함수를 따르는 것으로 전제하였다(Fig. 2).

한편 메탄, 에탄올, 바이오오일별로 사업 투자비는 각각 41.5백만달러, 243백만달러, 151백만달러이고, 유지비는 각각 4.2, 29.3, 19백만달러로 전제하였다(Table 3).

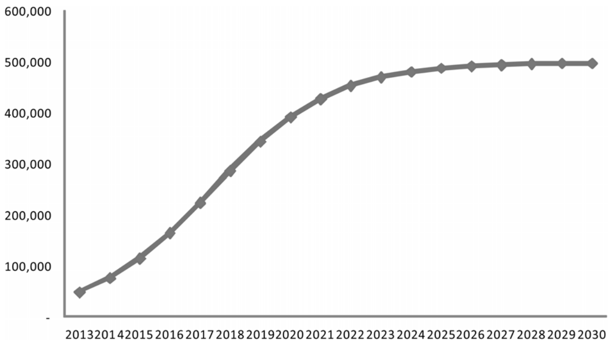

Fig. 1. Logistic pathway on annual production of Laminaria (dry metric ton)

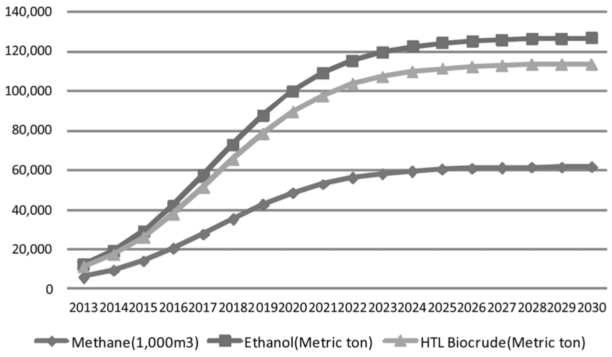

Fig. 2. Logistic pathway of methane, ethanol, and biooil

Table 3. Investment and maintenance costs for producing energy

Item	Methane	Ethanol	Biooil
Investment (MillionUSD)	41.5	243	151.1
Maintenance costs (MillionUSD)	4.2	29.3	19.1
Production (m^3, MT)	61.8	127000	113900
Conversion rate (m^3, MT/y)	0.124	0.254	0.2278

또한 환율은 달러당 2012년 연평균인 1126.25원을 적용하였다.

한편 메탄과 에탄올, 바이오오일을 이용하여 석유제품을 최종생산하기 위해서는 추가적인 전환비용이 요구되며, Roesijadi et al.(2010)[9]에 따르면, 메탄에서 휘발류로 전환하는 비용은 갤런당 1.5달러, 바이오오일에서 디젤로 전환하는 데에는 갤런당 1.2달러가 소요되는 것으로 추정되었다(Table 4). 이를 리터당 한화로 전환하면 가솔린 전환비는 446원/리터, 디젤은 357원이 소요된다. 본 연구에서는 디젤이 아닌 등유를 최종산물로 간주하였다.

또한 최종 에너지 생산물을 판매할 경우 판매 단가를 산정하기 위해 2008~2012년간 평균 휘발류, 자동차용 경유, 실내등유 가격을 이용하였다(에너지경제연구원, 2012[14]). 1kcal당 단가로 환산하면 세 가지 석유제품 모두 0.1원이 되는 것으로 분석되었기 때문에, 메탄은 휘발류 기준, 바이오오일은 실내등유 기준으로 단가를 각각 리터당 각각 780원과 802원으로 계산하였고, 에탄올은 발열량이 휘발류 대비 90% 수준(6,992kcal/리터)이므로 리터당 701원으로 계산하였다.

Table 4. Production costs of final products (2008 average USD)

Production cost	Gasoline	Ethanol	Gasoline/ Diesel
Core technology	Fermentation and MTG	Fermentation	HTL and Upgrading
Material (dry MT/Y)	500,000	500,000	500,000
Intermediate product	Methane	n/a	HTL biooil
Final product	Gasoline	Ethanol	Gasoline, diesel
Annual production, (million gal/yr)	11	42	39
Intermediate product cost ($/gallon)	1.4	1.8	1.5
Final product ($/gallon)	1.5	n/a	1.2
2008 market average of final products ($/gallon)	2.6	2.2	2.82

Footnote 1. Excludes feedstock cost, all costs rounded nearest $0.10;
Footnote 2. Rounded average of gasoline price and diesel price in 2008

한편 2008~2012년간 기간 연평균 석유제품의 가격 상승률은 3.38~5.9%이므로 각각 민감도 분석을 위해 저유가, 기준, 고유가 시나리오로 구분하였다. 저유가 시나리오는 연평균 2%씩 가격이 상승하고, 기준 시나리오는 3%, 고유가는 4%씩 매년 상승하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 기준 시나리오의 경우 휘발류와 에탄올, 바이오오일 가격은 2013년 각각 780, 701, 802원에서 2030년에는 1,289, 1,158, 1,326원으로 상승한다고 전제하였다.

2.2 경제성 분석 기준

경제성 분석을 위해 산정된 비용과 편익을 할인율(discount rate)과 내구연한(duration period)을 이용하여 현재가치(present value)화 하고, 이에 기초하여 순현재가치(Net Present Value: NPV), 내부수익률과 편익비용비율(B/C ratio)을 산정하였다(Rosen and Gayer, 2010[12]). 우선 편익(PVB)과 비용(PVC)의 현재가치는 아래의 공식을 이용하여 구할 수 있다. 이때 할인율은 r이고, 내구연한은 n으

Table 5. Sales price (before tax) for petroleum products

Year	Gasoline	Diesel	Kerosene
2008	731	855	752
2009	610	631	627
2010	714	748	722
2011	899	964	936
2012	945	1,000	974
Average	780	840	802

Source: http://www.opinet.co.kr/chart.do?cmd=chart.pricestep16)

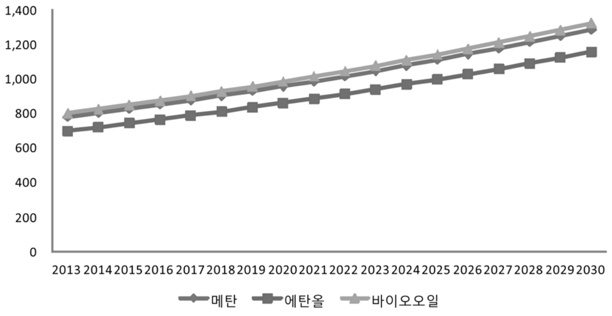

Fig. 3. Prediction of prices for methane, ethanol, and biooil with Baseline scenario (3% oil price growth) (KRW/liter)

로 표시된다. 본 연구의 경우 할인율은 2011년 연평균 중소기업 자본대출이자율인 6.35%를 이용하고, 내구연한은 17년으로 하되, 공장건설기간 8년을 감안하였다. 이는 해양바이오매스기획위원회(2009)[8]에서 전제하고 있는 2020년 기준 해조류 바이오매스 에너지화 시설의 상업적 가동 시기와 일치시키기 위해서 2013년부터 전체 건설기간을 2020년으로 전제하고, 이에 따라 투자비가 매년 동일한 비용이 투하된다고 가정했기 때문이다. 편익의 순현재가치에서 비용의 순현재가치를 제하면 순현재가치가 되며 이것이 0보다 크다면 해당 사업은 경제성이 있다고 판단할 수 있다. 또한 사업의 여러 대안이 있을 경우 순현재가치가 가장 큰 것을 선택해야 할 것이다. 한편 비용과 편익이 할인율을 통해 현재가치화되므로 먼 미래에 발생하는 비용과 편익일수록 현재가치는 감소한다고 볼 수 있다.

$$PVB=\sum_{t=0}^{n}\left(\frac{B_t}{(1+r)^t}\right),\ PVC=\sum_{t=0}^{n}\left(\frac{C_t}{(1+r)^t}\right),$$

$$NPV=\sum_{t=0}^{n}\left[\frac{B_t-C_t}{(1+r)^t}\right]\begin{cases}>\\<\end{cases}0 \tag{2}$$

다음으로 내부 수익률(IRR: Internal Rate of Return)은 순편익의 현재가치를 0으로 만들어주는 할인율과 같다. 즉 비용과 편익의 현재가치가 같아지도록 만드는 할인율과 같아지게 된다.

$$\sum_{t=0}^{n}\left(\frac{B_t-C_t)}{(1+i)^t}\right)=0 \tag{3}$$

다음으로 편익비용비율(B/C)법은 편익과 비용의 현재가치의 비율로 정의된다.

$$B/C=\frac{PVB}{PVC} \tag{4}$$

이 기준에 의하면 비율이 1보다 크면 편익의 현재가치가 비용의 현재가치보다 높기 때문에 높으면 높을수록 사업의 경제성이 좋은 것이고, 낮을수록 경제성이 감소된다.

3. 경제성 분석 결과

3.1 기준 시나리오

기준 시나리오는 메탄과 에탄올, 바이오오일이 매년 3%씩 가격이 상승한다고 전제하였다. 우선 비용의 현재가치를 살펴보면, 2020년까지 일정하게 상승하다가 투자비가 소진된 이후 시점에서 크게 감소하고, 2030년까지 완만하게 감소함을 알 수 있다. 2013년 기준 비용의 현재가치는 83,755백만원이고, 2030년에는 67,869백만원으로 감소하는 것으로 분석되었다. 한편 수입의 현재가치는 2013년에는 26,230백만원에 불과하지만 2022년까지 로지스틱 형태로 증가하다가 그 이후에는 완만하게 2030년까지 감소함을 알 수 있다. 2030년의 수입의 현재가치는 151,952백만원으로 추산되었다.

수입에서 비용을 차감한 이윤은 초기에는 높은 투자비로인해 계속 손실이 발생하지만 2018년부터 이익이 발생하기 시작한다. 그 이후 2021년까지 급격하게 이익이 상승하다가 2028년부터는 완만하게 감소한다. 2013년의 이윤은 −57,524백만원에서 2030년의 이윤은 84,083백만원이다.

사업기간 순현재가치의 합은 669,330백만원이고, 편익/비용비율은 1.38, 내부수익률은 15.7%로 나타나 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 다만 주의할 것인 해조류 바이오매스가 성공적으로 밀집 재배되고, 메탄, 에탄올, 바이오오일 복합 에너지화 사업 또한 성공적으로 상업화되었다는 전제를 감안하여야 할 것이다. 또한 자본 대출 이자율을 6.35%로 가정하였지만, 앞으로 자본 대출 이자율이 상승할 경우, 본 사업의 경제성이 감소할 수 있는 요인임을 고려하여야 할 것이다.

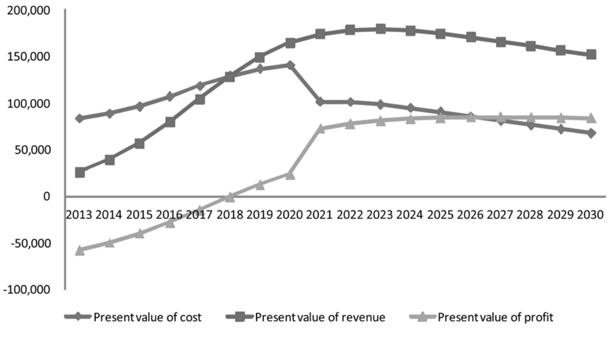

Fig. 4. NPV for baseline scenario (Unit: Million KRW)

3.2 저유가 및 고유가 시나리오

한편 저유가 및 고유가 시나리오는 메탄과 에탄올, 바이오오일이 각각 매년 2%와 4%씩 가격이 상승한다고 전제하였다. 우선 저유가 시나리오의 경우 사업기간 순현재가치의 합은 444,446백만원이고, 편익/비용비율은 1.25, 내부수익률은 11.84%로 나타났고, 고유가 시나리오의 경우 사업기간 순현재가치의 합은 919,403백만원이고, 편익/비용비율은 1.52, 내부수익률은 19.23%로 나타나, 저유가와 고유가 시나리오 모두 경제성이 있는 것으로 나타났다. 즉 유가가 더 높게 상승할수록 경제성이 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 유가가 상승하면 물가도 연동되어 상승하므로 제반 비용도 동반상승함을 감안하면 유가 상승이 반드시 경제성을 더 좋게 만드는 것은 아니라는 것을 염두에 두어야 한다. 향후 추가적인 연구를 통해 유가에 연동된 비용을 감안하여 보다 정밀한 경제성 분석이 요구된다.

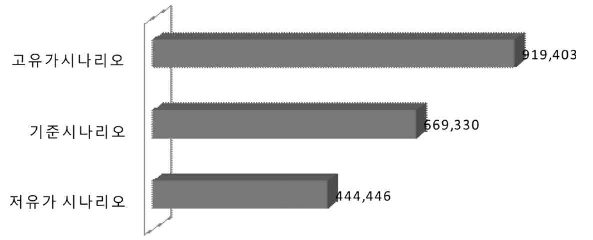

Fig. 5. Comparison of NPV for different scenarios (unit: Million KRW)

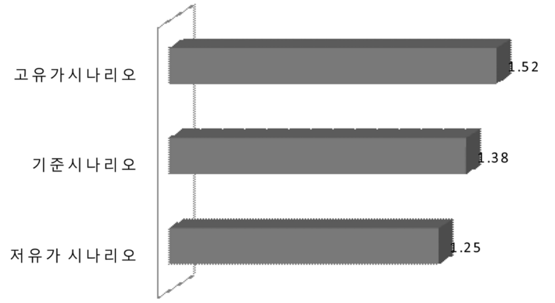

Fig. 6. B/C ratio for different scenarios

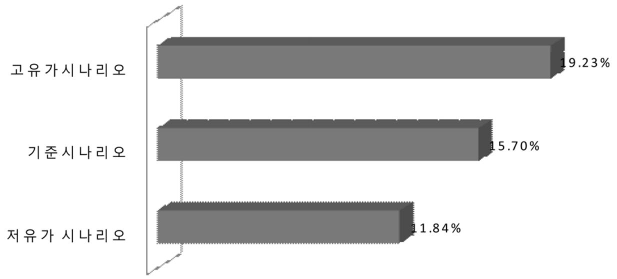

Fig. 7. IRR for different scenarios

4. 경제적·환경적 파급 효과

4.1 경제적 파급효과

경제적 파급효과는 기준 시나리오를 대상으로 산업연관분석을 통해 전후방연쇄효과와 부가가치 파급효과, 취업 및 고용유발효과를 중심으로 분석하였다.

4.1.1 산업연관분석 개요

산업연관표상의 해당산업별 투입가치의 최종생산가치 비중인 투입계수행렬을 이용하여 레온티에프 역행렬계수를 도출할 수 있고, 이 계수를 이용하면 특정 산업의 최종수요 한 단위 증가로 인해 각 산업부문에서 발생하는 생산유발효과를 파악할 수 있다(Miller and Blair, 1985[13)]). 전후방 연쇄효과란 이러한 레온티에프 역행렬계수를 이용하여 산업 간의 상호의존도를 나타내는 것이다.

우선 후방 연쇄효과는 특정 산업의 최종수요가 증대됨에 따라 이를 충족시키기 위한 생산에 투입되는 재화를 조달하는 생산 활동 과정에서 발생하는 직접적 파급효과와 간접적 파급효과를 합한 총 파급효과를 파악하는 것으로 정의된다. 후방연쇄효과를 나타내는 승수를 영향력 계수라고도 한다.

후방 연쇄효과가 최종수요의 변화에 따른 파급효과를 표현하는 것이라면 전방 연쇄효과는 생산의 변화에 따른 파급효과를 표현하는 것이다. 즉 특정 산업의 생산이 자신을 포함한 전 산업에 어떠한 기여를 하였는지를 표현하는 것으로 정의된다. 전방연쇄효과를 나타내는 승수를 감응도계수라고도 한다.

한편 특정 산업의 최종 수요 증가는 해당 산업의 부가가치뿐만 아니라 전 산업의 부가가치를 증가시키게 되는데 전자를 직접유발효과 후자를 간접유발효과라 한다. 이러한 부가가치유발효과 또한 레온티에프 역행렬을 이용하여 산출할 수 있다. 부가가치유발효과는 부가가치투입계수와 레온티에프 역행렬계수의 곱으로 정의되는 부가가치유발계수를 이용하여 나타낼 수 있다.

또한 특정 산업의 최종수요 증가는 생산을 유발하게 되고 이러한 생산 유발효과로 인해 해당 산업뿐만 아니라 다른 산업의 노동수요가 유발된다. 이러한 파급효과를 고용유발효과라 부르며 부가가치유발효과와 마찬가지로 직접 고용유발효과와 간접 고용유발효과로 구분된다. 고용유발효과를 나타내는 지표로써 고용유발계수가 이용된다.

4.1.2 산업연관분석 결과

산업연관분석을 위해 우선 해조류 바이오매스를 이용한 에너지화 사업으로 인해 신규 투자수요가 얼마나 어떤 산업 분류에서 발생하는지를 파악해야 한다. 이를 위해 관련 산업으로 수산 양식업과 주류산업, 그리고 연료유 산업으로 구분한다. 수산 양식업에는 다시마 생산 및 수확비용이 대응되고, 주류산업에는 에탄올 생산투자비 및 유지비, 연료유 산업에는 메탄과 바이오오일 투자비와 유지비, 최종 에너지 전환비용이 대응되는 것으로 보았다. 재무 비용은 기회비용으로 파급효과가 없는 것으로 간주하였다(Table 6).

Fig. 8과 같이 사업 초기에는 주로 연료유 산업과 주류산업용 투자비가 소모되기 때문에 두 산업의 비중이 92%에 이르고, 수산양식업 비중은 8%에 불과하지만, 수산양식업 비중이 점차 다시마 생산 증가에 따라 로지스틱 형태로 증가하다가 투자가 끝나는 시점인 2021년부터는 전체 산업의 33%를 차지하게 된다.

총사업비를 연도별로 수산양식업과 주류산업, 연료유 산업으로 할당한 다음에 한국은행 산업연관표(2010)[15]로부터 전후방연쇄효과, 부가가치효과, 취업 및 고용유발효과 계수를 추출해야한다. 연료유 산업의 경우 장치산업이고, 타산업의 주요 중간투입재로 이용된다는 특성으로 인해 타산업에 비해 전후방연쇄효과가 크게 나타나지만, 고용이나 취업유발효과는 낮게 나타난다. 이는 자본 집약적 산업의 특성을 잘 나타내고 있다고 할 수 있다.

우선 후방연쇄효과의 현재가치를 산업별로 비교해 보면, 사업초기에는 수산양식 16,465백만원, 주류산업이 76,005백만원, 연료유산업이 87,285백만원으로 나타나 수산양식업의 후방연쇄효과가 비중이 낮지만, 점차 수산양식업 비중이 증가하여 2030년에는 164,346백만원이 되고, 주류산업이 66,854백만원, 연료유산업이 230,572백만원이 되어 수산양식업 비중이 크게 증가함을 알 수 있다(Fig. 9).

한편 전방연쇄효과는 연료유 산업이 사업 전반에 걸쳐 가장 크게 나타나고, 주류산업은 사업 초기에는 증가하다가 2021년이후부터는 그 비중이 가장 낮게 나타난다. 이는 연료유 산업이 타산업의 중간투입재로 주로 사용되기 때문이다. 또한 수산양식업의 전방연쇄효과는 사업초기에는 미

Table 6. Industry share of cost items for 2013

Cost item	2013 value (million KRW)	Corresponding industry	Share (%)
Investment for methane	5,842	Fuel	44.0
Process cost of methane	474		
Investment for biooil	21,272		
Process cost of biooil	2,155		
Gasoline conversion cost	1,858		
Kerosene conversion cost	5,271		
Financial cost	3,066	N.A.	3.7
Investment for ethanol	34,210	alcohol	44.8
Process cost of ethanol	3,306		
Production cost of lamania	6,300	Fishery and marine farm	7.5
Total cost	83,755		

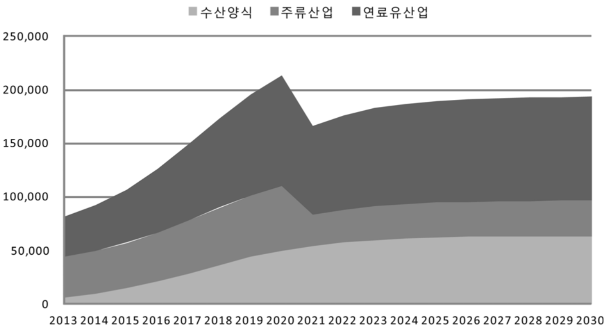

Fig. 8. Industry share of total project costs (unit: million KRW)

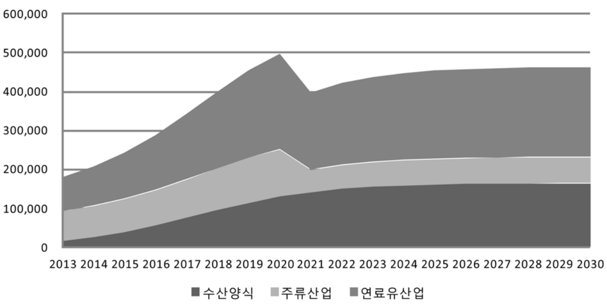

Fig. 9. Backward linkage effects (unit: million KRW)

미하지만 2021년 이후 생산이 본격화되면서 점차 증가하여 주류산업보다 커짐을 보여준다.

다음으로 부가가치 유발효과를 연도별로 비교해보면, 연료유 산업은 장치산업이면서, 중간투입재로 주로 쓰이기 때문에 부가가치 유발효과가 다른 효과들보다 상대적으로 미약하게 나타나고, 주류산업의 경우 상대적으로 높게 나타난다. 이는 주류산업이 식음료용 주류를 포함하고 있기 때문이며, 보다 정확한 분석을 위해서는 추후 에탄올 산업에 대한 승수를 별도로 추정해야 할 것이다. 한편 수산양식업의 경우 부가가치 유발효과가 가장 크게 나타나, 노동집약적 산업임을 알 수 있다.

다음으로 산업별 취업유발효과를 비교해보면, 수산양식업이 사업기간 동안 가장 높은 효과를 창출하며, 다음으로 주류산업이고, 연료유산업의 경우 취업유발효과가 매우 낮음을 알 수 있다. 고용효과는 취업자 수에서 자가 고용인원을 제외한 것이므로 취업유발효과와 유사한 형태를 갖기 때문에 비교를 생략하기로 한다.

끝으로 현재가치 기준으로 세 산업에 대한 총후방연쇄효과는 4,100,538백만원, 총전방연쇄효과는 4,783,502백만원, 총부가가치효과는 1,002,171백만원으로 나타나고, 총취업유발효과는 18,558명, 총고용효과는 10,056명으로 나타났다.

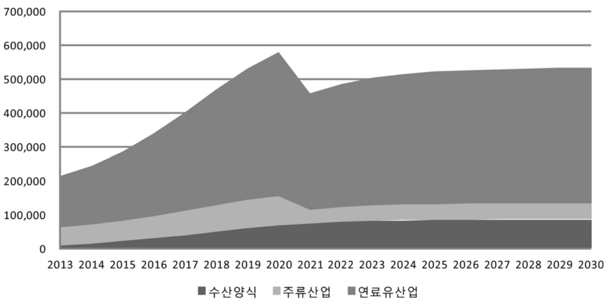

Fig. 10. Forward linkage effects (Unit: million KRW)

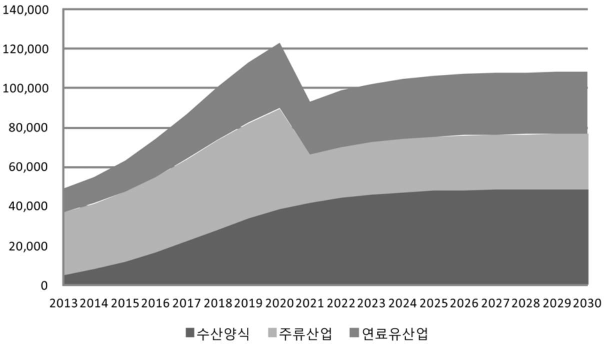

Fig. 11. Value added effect (Unit: million KRW)

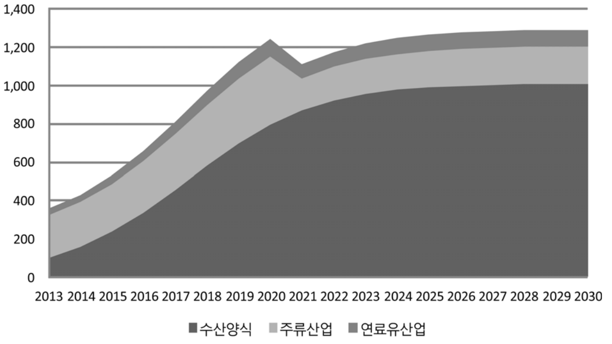

Fig. 12. Job creation effects (person/billion KRW)

4.2 환경적 파급효과

환경적 효과는 해조류 바이오매스를 이용하여 에너지를 생산함으로써 화석에너지를 대체함에 따른 온실가스 저감효과에 국한하기로 한다. 온실가스 저감효과를 정확하게 규명하기 위해서는 통상 생애주기평가기법(Life Cycle Assessment)을 적용해야 하지만 아직까지 국내외 연구된 바가 없기 때문에 최종 에너지 생산량 기준으로 온실가스 저감효과를 평가하기로 한다.

우선 해조류 바이오매스를 이용하여 생산된 중간재인 메탄과 에탄올, 바이오오일을 이용하여 최종 생산물인 휘발류, 에탄올, 등유로 전환된 양을 기준으로 온실가스 저감효과가 있다고 전제하였다. 즉 해조류 바이오매스가 성장하면서 온실가스를 흡수하기 때문에 탄소중립적이라는 것이다. 휘발류 1KL의 온실가스 배출계수는 2.08TCO2, 에

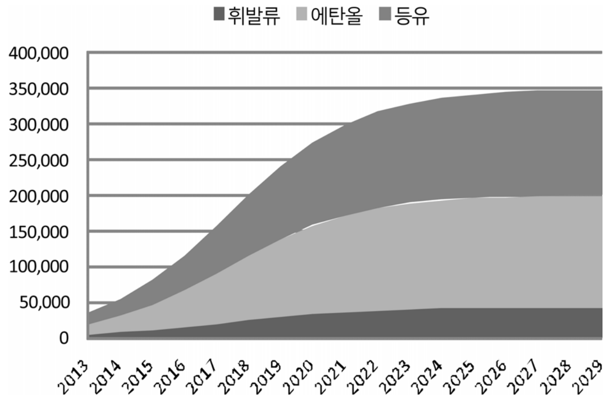

Fig. 13. Annual production of final products (unit: KL)

탄올 1KL는 휘발류 발열량의 90% 수준이므로 배출계수를 1.87TCO2, 등유는 2.44TCO2로 가정하였다(에너지관리공단[16]).

휘발류, 에탄올, 등유 생산량은 2013년에는 각각 4,164, 15,899, 14,763KL이지만 2030년에 이르면 41,514, 158,509, 147,187KL에 이른다.

최종 생산량에 근거하여 각 유종별로 온실가스 배출계수를 곱하면, 유종별 온실가스 배출 저감량이 계산되는데, 메탄에서 만들어진 휘발류는 2013년에 8,643TCO2에서 2030년에 86,172TCO2를 저감하며, 에탄올은 2013년 29,661TCO2에서 2030년 295,716TCO2를 저감하고, 바이오오일에서 전환된 등유는 2013년 36,043TCO2에서 2030년 359,343TCO2를 저감하게 된다.

이에 따라 온실가스 총저감량은 2013년에 74,347TCO2에서 2030년에 741,231TCO2로 늘어나며, 전체 사업기간 동안의 저감량은 8,881,281 TCO2 에 달한다.

지금까지 해조류 바이오매스 가운데 다시마를 이용하여 연간 건조중량 기준 50만톤을 상업적으로 재배하는 것으로 전제하고, 메탄과 에탄올, 바이오오일과 같은 세 가지 종류의 바이오연료가 결합 생산(joint production)이 가능한 경우 이를 이용하여 휘발류와 에탄올, 등유를 최종 산물로 생산하는 경우에 대해 경제성과 경제적 파급효과, 그리고 환경적 효과를 추정해 보았다. 추정 결과 저유가, 기준, 고유가 시나리오에 상관없이 결합 생산 시설의 경제적 타당성이 있는 것으로 나타나고, 전후방연쇄효과, 부가가치효과, 고용유발효과와 온실가스 저감효과가 높은 것으로 나타났다. 따라서 향후 해조류 바이오매스를 이용하여 에너지를 대규모로 생산하는 사업에 있어서 경제성을 확보하기 위해서는 세 가지 바이오연료를 '결합생산'할 수 있는 기술이 확보되어야 할 것으로 판단된다. 또한 해조류의 생산성 측면에서도 해조류바이오매스사업단에서는 2030년까지 헥타르당 300톤(습량기준)을 최종목표로 하고 있으나, 본 경제성 분석에서는 2배에 해당하는 590톤(습량 기준)을 전제하고 있어, 향후 해조류사업단이 최종 단계에서 사업성 확보를 위해서는 현재 목표치를 2배 정도 상향 조정할 필요가 있을 것이다.

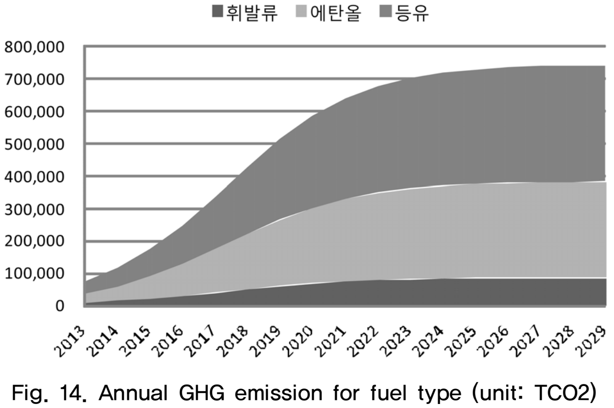

Fig. 14. Annual GHG emission for fuel type (unit: TCO2)

5. 결 론

국내에서 다시마를 이용하여 바이오연료를 생산하는 사업의 경제적 타당성을 분석해 본 결과, 2030년 기준 사업의 순현재가치(이윤)는 기준 시나리오에서 840억원, 편익비용비율은 1.38, 내부수익률은 15.7%로 추정되었다. 한편 저유가 및 고유가 시나리오를 적용해 본 결과, 저유가 시나리오에서는 순현재가치가 444억원, 편익비용비율은 1.25, 내부수익률은 11.84%로 나타났다. 또한 고유가 시나리오에서는 순현재가치가 919억원, 편익비용비율이 1.52, 내부수익률이 19.23%로 나타났다.

한편 기준 시나리오에 입각하여 2030년의 경제적 파급효과를 살펴보면, 우선 전후방연쇄효과는 각각 4조 7835억원과 4조 1005억원으로 나타났고, 부가가치효과는 1조 21억원, 고용효과는 10,056명으로 나타났다.

또한 해조류 바이오연료 생산으로 화석연료를 대체함에 따라 기대할 수 있는 온실가스 저감효과를 추정한 결과, 2030년에 741,231TCO2의 이산화탄소를 저감할 수 있을 것으로 계산되었다.

아직까지 거대 해조류를 에너지용으로 대량 재배하기 위해서는 많은 기술적, 제도적 난관들이 도사리고 있기 때문에, 단계별 민관 합동 연구가 필요한 영역이며, 특히 거대 해조류를 이용한 에너지 개발이 촉진되기 위해서는 정부의 제도적 지원이 필수적이다. 현재 우리나라는 해조류 바이오에너지화 기술개발 및 실증 연구 단계에 있다. 그러나 이를 상업화하기 위해서는 전력부문 신재생에너지의무화제도인 RPS에서 해조류 바이오에너지 이용에 대한 가중치 조항을 신설할 필요가 있고, 곧 시행될 예정인 수송부문 신

재생연료 의무화 제도인 RFS 및 시행을 검토 중인 열이용 부문 의무화제도인 RHO 제도에서도 해조류 바이오연료 이용에 대한 가중치가 도입되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국수산자원관리공단의 ‘바이오매스용 해조류 대량생산 기술개발’ 사업내 ‘해조류 바이오매스 정책자료집’을 발간하기 위한 정책연구의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] Cha, K.S., Bae, J.H., 2011, “Dynamic Impacts of High Oil Prices on the Bioethanol and Feedstock Markets”, Energy Policy, 39, 753-760.

[2] Bae, J.H, 2014a, “Non-linear Preferences on Bioethanol in South Korea”, Environmental and Resource Economics Review, 23(3), 515-551.

[3] Bae, J.H., 2014b, “Supply Portfolio of Bioethanol in the Republic of Korea”, The Korean Economic Review, 30 (1), 133-161.

[4] 김경수, 2007, “해조류를 이용한 바이오에너지 생산 타당성 연구”, 한국생산기술연구원, 서울.

[5] 전희동, 김형석, 2006, “해조류를 이용한 온실가스 저감연구 사업 타당성 연구」, 해양수산부, (재)포항산업과학연구원, 서울.

[6] 홍현표, 마창모, 2009, “해조류를 이용한 바이오에너지 산업의 현황과 정책 방향”, 정책연구, 봄호 통권160호, 29-64.

[7] 조지혜, 이희선, 2011, “해조류를 이용한 바이오연료의 환경 친화적 적용을 위한 기초연구”, 한국환경정책평가연구원, 서울.

[8] 해양바이오매스기획위원회, 2009, “바이오매스용 해조류 대량 양식 및 바이오에너지 생산기술 개발 로드맵(타당성 조사) 연구”, 농림수산식품부, 서울.

[9] Roesijadi, G., Jones, S.B., Snowden-Swan, L.J., Zhu, Y., 2010, “Macroalgae as a Biomass Feedstock: A Preliminary Analysis, U.S. Department of Energy”, PNNL-19944, Washington.

[10] Reith, J.H., W. Huijgen, J. van Hal and J. lENSTRA, 2009, “Seaweed potential in the Netherlands”. Macroalgae-Bioenergy Research Forum. Plymouth, UK.

[11] Chynoweth, D.P., 2002, “Review of Biomethane form Marine Biomass”, University of Florida, 1-207.

[12] Rosen, H. S. and T. Gayer, 2010, “Public Finance”, McGraw Hill International Edition.

[13] Miller, R. E. and P.D. Blair, 1985, “Input-output analysis: foundations and extensions”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

[14] 에너지경제연구원, 2012, “2011 에너지통계연보”, 지식경제부, 서울.

[15] 한국은행 경제통계시스템, 2012, “2010년 투입산출표”, http://ecos.bok.or.kr.

[16] 에너지관리공단, 2013, “온실가스 배출계수정보”, http://co2.kemco.or.kr/toe/toe.aspx.