



LED가 결합된 아간풍력발전 활용을 포함한 해상환경 바이오매스 생산시스템의 최적 설계

홍기훈 · 조성현 · 강 훈 · 박정필 · 김태옥 · [†]신동일

명지대학교 화학공학과

(2015년 4월 1일 접수, 2015년 4월 22일 수정, 2015년 4월 23일 채택)

Design and Optimization of a Biomass Production System Combined with Wind Power Generation and LED on Marine Environment

Gi Hoon Hong · Sunghyun Cho · Hoon Kang · Jeongpil Park
Tae-Ok Kim · [†]Dongil Shin

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received April 1, 2015; Revised April 22, 2015; Accepted April 23, 2015)

요약

최근 화석연료의 사용증가에 따라 대량으로 배출되는 이산화탄소는 지구 온난화 현상을 일으키는 온실가스 중 하나로 지정되어 국제협약을 통하여 온실가스의 배출을 저감하도록 규제하고 있다. 본 연구에서는 이산화탄소를 저감하는 방법 중의 하나로, 3세대 바이오매스 생산시스템인 해조류를 활용한, 지속가능한 신 개념의 FPSO로서 해상환경 바이오매스 생산시스템의 최적구조를 설계하였다. 이를 위해 격자로 구조물을 설치한 후 해조류의 주변에 LED 조명을 비추어 성장을 최대화 시키는 시스템을 구상하였다. 그리고 기존 해조류의 성장자료를 통하여 해조류의 성장 모델을 만든 후 풍력발전기와 LED 조명을 포함하는 바이오매스 생산시스템을 모델링하여 최적화 도구인 GAMS 프로그램을 이용하여 본 시스템이 환경적 관점뿐만 아니라 경제성 측면에서도 타당성을 가질 수 있는 최적구조를 설계하였다. 또한 기존의 해상환경 바이오매스 생산시스템과 비교하여 최적구조를 제안하였다.

Abstract - Carbon dioxide was designated as one of greenhouse gases that cause global warming. Among various ways to solve the CO₂ emission issue, the 3rd-generation biomass (algae) production is considered as a viable method to reduce CO₂ in the atmosphere. In this research, we propose a design of an innovative sustainable production system by utilizing the 3rd generation biomass in the environment of floating production storage and offloading (FPSO). Existing biomass production systems depend on the solar energy and they cannot continue producing biomass at night. Electricity produced from offshore wind farms also need an efficient way to store the energy through energy storage system (ESS) or deliver it real-time through power grid, both requiring heavy investment of capital. Thus, we design an offshore grid structure harnessing LED lights to supply the necessary light energy, by using the electricity produced from the wind farm, resulting in the maximized production of biomass and efficient use of wind farm energy. The final design integrates the biomass production system enhanced by LED lights with a wind power generation. The suggested NLP model for the optimal design, implemented in GAMS, would be useful for designing improved offshore biomass production systems combined with the wind farm.

Key words : biomass production, FPSO, optimal design, wind farm

[†]Corresponding author: dongil@mju.ac.kr

I. 서론

산업혁명 이후로 지속되어온 전 세계적인 화석연료 사용이 최근 급속도로 증가하면서 에너지 자원의 고갈과 더불어 화석연료의 연소로부터 배출되는 온실가스로 인한 지구온난화가 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로, 신재생에너지인 태양광 에너지, 풍력발전 등으로 대체하기 위한 연구개발이 진행 중에 있지만, 관련 장치의 제작 과정에서 요구되는 희토류 희귀금속 자원의 지역적인 편재로 인해 이들 자원의 지속적인 생산은 불투명하다[1].

에너지 생산기술 중의 하나인 바이오매스는 화석연료 고갈과 대기 중 이산화탄소 농도 상승의 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 기반시설에 바로 적용시킬 수 있다는 점에서 매우 큰 장점을 지니고 있다. 바이오매스는 1세대 바이오매스, 2세대 바이오매스와 3세대 바이오매스로 나뉜다. 1세대 바이오매스의 경우 옥수수 등의 곡물을 이용하기 때문에 식품산업과 경쟁해야 한다는 것에 대한 비판 여론이 강하여 현재는 잘 이용하지 않고 있다. 2세대 바이오매스는 목질계 바이오매스를 이용하는 것으로, 작업장의 톱밥이나 공사장의 폐목을 바이오매스로 사용한다. 2세대 바이오매스 또한 바이오디젤로의 변환과정이 어렵고, 나무의 성장 사이클이 비교적 길어서 효과적인 대체방안으로 보기에는 어렵다. 무엇보다도 1, 2세대 바이오매스는 수확에 필요한 토지면적에 제한을 받기 때문에 대량생산에 있어 힘든 측면이 있다.

그러나 3세대 바이오매스는 해조류와 녹조류를 이용하여 바이오에탄올 혹은 바이오디젤로 변환하는 방식으로, 해조류와 녹조류는 2배로 분열하는 성장 사이클이 짧게는 5~6시간에서 길게는 3~7일 정도로, 1, 2세대 바이오매스에 비해 상당히 짧기 때문

에 대량생산이 가능하고, 성장조건만 맞으면 해상 어디에서든 수확할 수 있기 때문에 면적의 제약이 무시 가능하다[2].

이러한 바이오매스를 생산하기 위한 시스템은 현재 태양광만을 의존하여 생산되기 때문에 태양광이 유효한 시간대에서만 생산할 수 있어서 생산량이 시간에 따라 제한적이다.

한편으로 해상 풍력발전의 경우는 제작·설치비와 전력계통 유지보수 비용이 커서 대규모 투자가 필요할 뿐만 아니라 야간전력 사용처를 찾는 것에 어려움이 있다[3]. 이때, 이 잉여전력을 이용하여 바이오매스 성장을 촉진시킬 수 있으면 이차전지를 대체하는 전기저장의 대안이 될 수 있다. 또한 바이오매스를 통한 바이오디젤 및 바이오에탄올 등의 액체연료를 생산한 후 공정 부산물인 글리세롤과 수증기와 이산화탄소를 원료로 하는 개질공정을 거쳐 수소 가스를 생산할 수 있어서 부가적인 생성물을 얻을 수 있다.

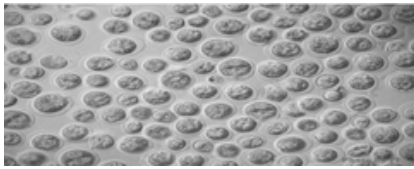

본 연구에서는 바이오매스 생산시스템과 해상 풍력발전의 제한적인 문제를 해결하기 위해 먼 해상에서 작동되는 해상풍력발전단지에 LED 조명을 결합시켜 태양광이 비추지 않는 야간시간에도 바이오매스를 지속적으로 생산할 수 있는 시스템을 제안하고, 연간 이익을 최대도 최적화시키는 설계를 진행하였다.

II. 바이오매스 생산시스템의 모델링 및 개념설계

2.1. 해조류 선정

해조류는 Table 1과 같이 미세조류와 대형조류로 구분된다. 미세조류의 경우 개체 내 지질의 함유량이 높아서 바이오디젤을 생산할 수 있고, 성장 사이클이 짧게는 몇 시간에서 길게는 며칠 정도로, 다른 바

Table 1. Characteristics of micro and macro algae

Microalgae	Macroalgae
	
<ul style="list-style-type: none"> - Produce high-quality of the bio-oil - Separated through a chemical process or purified oil is a bio-diesel - Can be converted into fuels (jet fuel) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mainly used for the production of bio-ethanol - After acid treatment of glucose contained in the algae, fermented to obtain ethanol

이오매스에 비해 비교적 짧아서 대량 생산의 가능성이 있다. 대형 조류의 경우 셀룰로오스 등의 다당류를 개체 내에 많은 부분 포함하고 있어서 전처리 후 발효공정을 거쳐 바이오에탄올 생산에 주로 쓰인다.

본 연구에서는 바이오에탄올의 생산을 목표로 하므로 대형조류를 대상으로 선정하였다. 대형조류에는 녹조류, 홍조류, 갈조류 등이 있는데, 그 중 우리나라에서 가장 많이 양식되고 있는 갈조류의 다시마를 바이오매스로 선정하여 연구를 진행하였다.

2.2. 해조류 성장식

최근 해조류 성장에 대한 상세한 모델링이 시도되고 있으나[4,5], 최적화 연구를 진행하기 위해 해조류의 성장 모델식은 해조류가 성장하기 위한 여러 가지 변수 중 광량만을 변수로 두는 기존 성장 모델식인 Steele 식을 사용하였다. Steele 식은 광량에 대해서만 해조류가 성장한다고 가정한 식으로, 과도한 광량을 받게 되면 성장이 더디게 진행되는 광 저해 현상 또한 포함한 식이다[1]. 이때, 식 (1)에서 μ_{max} 와 I_{opt} 의 값은 참고문헌[2]를 통해 각각 6.36 cm/day와 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 설정하였다.

$$\mu = \mu_{max} \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (1)$$

여기서 μ 는 상대성장속도(specific grown rate, day^{-1}), μ_{max} 는 최대 상대성장속도(maximum specific grown rate, day^{-1}), I 는 광량(irradiance, $\mu\text{ mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), I_{opt} 는 최적 광량(optimum photon flux density (PFD), $\mu\text{mol photons}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)이다.

2.3. LED 조명을 결합한 신개념 바이오매스 생산 시스템의 개념설계

기존의 바이오매스 생산은 주간 태양광만을 에너지원으로 활용했으나, 바이오매스 생산에 필요한 유효한 태양광 시간대가 제한적이므로, 태양광의 영향을 받지 못하는 시간대의 경우 인공광원인 LED 조명의 적용을 통해 생산량을 늘릴 필요가 있다. 먼 해상에서 가동되는 해상풍력발전의 경우 발전된 전력을 육상으로 수송 및 저장하기 위해 해저케이블이나 ESS 등의 부가적인 장치가 요구되기 때문에 발전된 전력의 완전한 수송은 어렵다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 잉여전력 문제가 발생하는 야간의 경우 수송하기 위한 전력을 제외한 나머지 전력을 가지고, LED 조명을 적용시켜 바이오매스를 생산하는 시스템을 구상하였다.

해상풍력 발전모델은 고정식과 부유식 중에서 먼

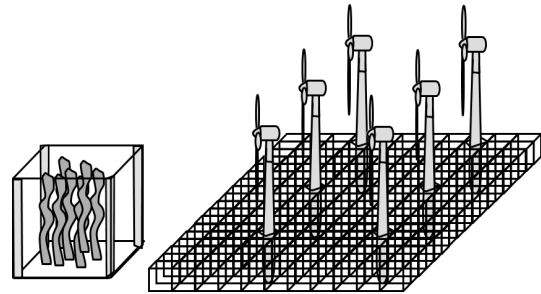


Fig. 1. Diagram of the suggested biomass production system (vertical LED bars installed at the 4 corners of a single box).

해상에 적용성이 높은 부유식으로 선정하였다[3]. 제안된 바이오매스 생산시스템은 기존 먼 바다에 설치된 해상풍력발전단지에 해조류를 성장시키기 위한 구조물을 결합시키고, 그 구조물에 LED 바를 적용시켜 설계한다. 이때, LED 바의 소모 전력은 해상풍력발전을 통해 얻고, LED 바의 적용시간은 태양광의 효과가 없는 야간시간대에 작동한다.

풍력발전과 LED 조명이 결합된 해상환경 바이오매스 생산시스템의 모식도는 Fig. 1과 같다.

2.4. 바이오매스를 통한 바이오에탄올 생산시스템의 수익구조

수확한 바이오매스를 통해 얻을 수 있는 수익은 두 가지가 있다. 한 가지는 바이오매스를 바이오에탄올로 전환시켜 얻는 수익이고, 다른 하나는 바이오매스를 생산할 때 소모되는 이산화탄소 양을 세계 이산화탄소 배출권 가격 기준으로 계산하여 얻는 수익이다. 이 두 가지의 수익을 합친 총 수익에서 야간 생산에 소모되는 전력량과 LED 조명 설치비용을 감하여 얻는 차액이 총 순이익이 된다.

2.4.1. 바이오에탄올을 직접 유통하여 얻는 수익
생산된 바이오매스는 건조되면 21.4%로 총중량이 줄어들고, 건조된 바이오매스 1 g당 0.0465 g의 바이오에탄올이 생산되므로, 바이오에탄올의 총 생산량은 식 (2)와 같다[6].

$$\text{총 바이오에탄올 생산량} = \text{건조된 바이오매스의 총 질량} \times \frac{0.0465 \text{ g 바이오에탄올}}{1 \text{ g 바이오매스}} \quad (2)$$

위 식으로 얻어진 총 바이오에탄올 생산량에 에탄올 가격[7]을 적용하여 바이오에탄올을 통한 수익을 산출한다.

LED가 결합된 야간풍력발전 활용을 포함한 해상환경 바이오매스 생산시스템의 최적 설계

$$\text{바이오에탄올을 통한 이익} = \frac{\text{바이오에탄올 총 생산량} \times \text{약 150 원/g}}{\text{(에탄올의가격)}} \quad (3)$$

$$\frac{\text{LED 1 lx당 광량 } 68.2 \mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \times 12 \text{시간} \times 365}{\text{}} \quad (7)$$

2.4.2. CO₂ 제거를 통해 얻는 수익

CO₂ 제거량은 CO₂가 포도당을 합성시키는 데에만 소모된다고 가정하고, 광합성 반응식을 통해 도출할 수 있다. 포도당 1 mol 합성 시 CO₂ 6 mol이 소모된다. 건조된 바이오매스 중 포도당의 비율은 10 %이다.

$$\text{CO}_2 \text{ 제거량} = \text{건조된 바이오매스의 총 질량} \times 0.1 \times \frac{6 \text{ mol CO}_2}{180 \text{ g/mol 포도당}} \times 44 \text{ g/mol CO}_2 \quad (4)$$

식 (4)에서 도출된 CO₂ 제거량에 탄소배출권 가격을 적용하여 CO₂ 제거를 통해 얻는 수익을 계산한다.

$$\text{CO}_2 \text{ 제거를 통한 총 이익} = \frac{\text{CO}_2 \text{ 제거량 (ton)} \times 10,000 \text{ 원/ton (탄소배출권 가격)}}{\text{}} \quad (5)$$

2.4.3. 연간 LED 조명의 설치비 및 유지비

D bar 2 Rail LED의 조명수명은 약 40,000시간으로, 본 연구의 LED 조명 사용 기준시간인 하루 12시간으로 환산할 경우 약 10년이다. 그리고 LED 조명의 가격은 격자 하나(LED 바 4 개)당 5,000원 정도이다.

$$\text{연간 LED의 설치비} = \frac{\text{격자의 개수} \times 5,000 \text{ 원}}{10 \text{년}} \quad (6)$$

2.4.4. 연간 필요전력량

필요전력량은 총 LED 조명의 개수에 소모되는 전력을 산출하면 된다. 본 연구에서 사용하는 LED 종류는 FEELUX사의 D bar 2 Rail 제품으로, 광 효율이 100 lm/W이다. 그리고 백색광 LED의 경우는 1 lx당 광량이 대략 68.2 μmol·m⁻²·s⁻¹이다[8]. 또한 빛은 거리의 제곱에 반비례하고, lx는 lm/m²이므로, 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\text{연간 필요전력량} = \frac{\text{필요 광량} \times (\text{격자의 중심으로부터 꼭지변까지의 거리})^2 \times \text{격자의 개수} \times \text{격자 한 면의 면적}}{\text{광효율 } 100 \text{ lm/W}}$$

2.4.5. 연간 총 전력사용료

사용하는 전기는 주로 야간에 사용되므로, 연간 총 전력사용료 계산을 위한 심야전력의 요금은 한국전력공사의 심야전력 요금표를 참조하여 kW당 52.6 원으로 적용하였다.

$$\text{연간 총 전력사용료} = \text{연간 필요전력량} \times \frac{(1 \text{ kW/1000 W}) \times 52.6 \text{ 원}}{\text{}} \quad (8)$$

III. 바이오매스 생산시스템의 최적화

3.1. 문제 정의를 위한 가정

본 연구에서 다루고자 하는 최적화 문제의 목적은 해상풍력발전과 LED 조명이 결합된 바이오매스 생산시스템의 수익을 최대화하는 것이다. 바이오매스 생산시스템의 최적화 문제는 연간 수익률을 비교하는 목적함수와 설계 가중과 광량 및 면적에 의해 결정되는 제한조건과 LED 조명이 결합된 바이오매스 생산시스템을 구성하는 여러 가지 변수들로 구성된다.

최적화 모델은 영국의 Vattenfall사가 시공한 영국 동남방의 Thanet 해역에 세워진 해상풍력발전단지 를 기초로 면적 등을 참고하였다[2]. 그리고 바이오매스 생산시스템 구조의 경우 해상풍력발전단지와 결합한 형태를 참고하여 여러 개의 입방체 격자를 합친 구조를 적용시켜 설계하였다.

모델로 하는 해상풍력발전단지는 이미 설치되어 있다고 가정하였고, 바이오매스 생산시스템을 LED 조명을 적용하지 않고, 태양광에만 의존하는 형태의 시스템과 LED 조명을 적용시켜 태양광이 유효하지 않은 야간시간대에도 추가 생산이 가능한 시스템을 비교하였다. 바이오매스를 생산하는 시스템에서 온도는 일 년 평균온도로 하여 온도에 대한 영향은 없으며, 이산화탄소는 광합성 반응에 충분한 양이 공급된다고 가정하고, 광량만이 바이오매스의 성장에 관여한다고 하였다. 또한 태양광은 하루 24 시간 중 에서 6 시간은 100 %가 유효하고, 6 시간은 50 %가 유효하다고 가정하였다.

3.2. 변수 정의

바이오매스 생산시스템의 모델링에서 사용되는 변수들은 Table 2와 같다.

Table 2. Variables of the system defined

Variables	Name
Mu	Relative growth rate
I	Quantity of light
r	Distance from center of grid
NOD	Biomass number per grid
ASD	Biomass production per day per grid
CEA	Energy absorption of center of grid
LOS	Length of one side of grid
AOS	Area of grid
NOS	Number of grid
AOD	Total Biomass production per day
ADD	Dried biomass production per day
AOE	Bio-ethanol production per day
PFE	Total revenue from bio-ethanol
ARCm	Total removals of CO ₂ per day (moles)
ARCg	Total removals of CO ₂ per day(grams)
PFC	Total revenue from CO ₂ removal
NFP	Power requirements
TFP	Total power charges
TLI	LED installation cost per year (LED lifetime based on 10 years)
TPY	Total annual income

3.3. 목적함수

LED 조명을 적용한 바이오매스 생산시스템의 순익을 나타내는 목적함수는 식 (9)와 같다.

$$\text{Max}[\sum_{i=1}^3 (\text{PFE} + \text{PFC})_i - (\text{TFP} + \text{TLI})] \quad (9)$$

여기서 i 는 각 시간대의 광량기준으로, i 가 1일 때는 오전 9시부터 오후 3시, 2일 때는 오전 6시부터 오전 9시와 오후 3시 오후 6시, 3일 때는 오후 6시부터 오전 6시를 기준으로 하였다. 또한 연중 광량의 변화는 무시하였고, 하루 24시간 중에서 1의 시간대는 태양광 효율이 최대인 시점으로, 6시간의 구간으로 설정하였고, 2의 시간대의 경우는 태양광 효율이 50%인 6시간을 표현하였다. 그리고 시간대 3은

LED 조명을 적용하여 최대의 태양광 효율과 같은 조건으로, 총 12시간으로 가정하였다.

3.4. 제약조건

LED 조명이 해조류에 공급해줄 수 있는 광량의 범위[2]는

$$30 \leq [I] \leq 100 \quad (10)$$

이고, LED 조명(격자의 꼭지점)과 격자 중심사이의 거리는

$$1 \leq [r] \leq 5 \quad (11)$$

이다. 그리고 격자 하나당 존재할 수 있는 바이오매스 개수는

$$1 \leq [\text{NOD}] \leq 100 \quad (12)$$

이다.

위의 목적함수와 제약조건을 GAMS에 적용하여 최적화 결과를 산출하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 최대 광량 조사

격자의 중심에서 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 최대 광량을 조사하는 경우에 최적화 프로그램 도구인 GAMS로 본 연구의 최적화 모델과 목적함수, 제약조건 등을 적용시켜 총 순수익이 최대가 되도록 코딩하여 결과를 도출하였으며[9], 그 결과는 Table 3과 같다.

GAMS를 이용하여 최대광량을 조사시키는 바이오매스 생산시스템 모델의 결과가 상대성장속도는 12.72 cm/day, 격자 중심에서 LED 기관의 거리가 1.182 m로, 이에 따른 격자 당 4 개의 LED 에너지 방출량은 $139.689 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 하루 당 총 건조된 바이오매스 생산량은 2.14E+9 g/day, 이를 통해 생산된 바이오에탄올의 총 수익은 54억 4817만원/year로 도출되었다. 추가적으로, CO₂의 제거를 통한 총 수익은 11억 4561만원/year로, 바이오에탄올의 이익과 합쳐 총 전력 사용료와 연간 LED 설치비 44억 849만원을 제한 결과, 연간 총 순이익은 13억 6107만원이었다.

최대 광량을 조사하는 바이오매스 생산시스템의 모식도는 Fig. 2와 같다.

LED 조명을 적용하지 않은 경우에 동일한 격자 수에서 수익은 생산된 바이오에탄올의 수익 11억

Table 3. Results for the farm of 24 km² at maximum photon flux density (100 μmol·m⁻²·s⁻¹)

Variables	Optimal values	Variables	Optimal values
Relative growth rate	12.72 cm/day	Dried biomass production per day	2.14E+9 g/day
Quantity of light	100 μmol/m ² ·s	Bio-ethanol production per day	99510 L/day
Distance from center of grid	1.182 m	Total revenue from bio-ethanol	₩544,817*10 ⁴ /year
Biomass number per grid	92	Total removals of CO ₂ per day(grams)	313.867 ton/day
Biomass production per day per grid	1164.078 cm/day	Total revenue from CO ₂ removal	₩114,561*10 ⁴ /year
Energy emissions per grid	139.689 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	Power requirements	5.899E+6 W/m ² ·day
Length of one side of grid	1.671 m	Total power charges	₩11,325*10 ⁴ /year
Area of grid	2.794 m ²	LED installation cost per year (LED lifetime based on 10 years)	₩429,524*10 ⁴ /year
Total Biomass production per day	1.0E+10 cm/day	Total annual income	₩136,107*10 ⁴ /year

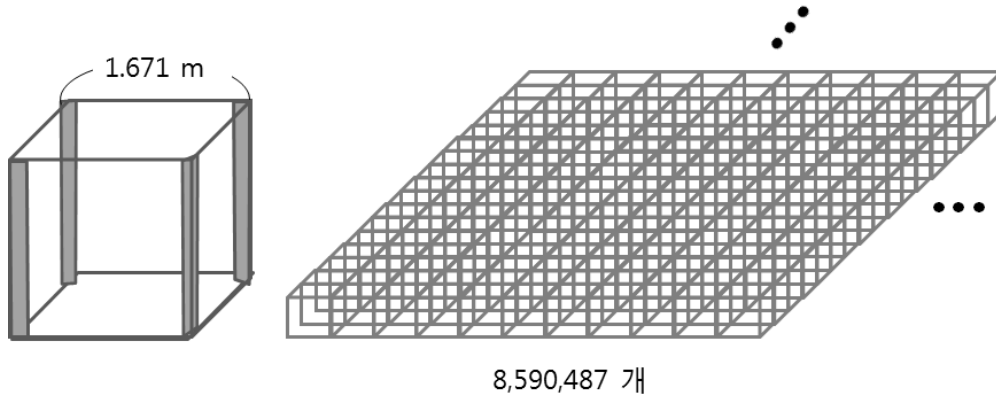


Fig. 2. Layout of the biomass production system at maximum photon flux density (100 μmol·m⁻²·s⁻¹).

1686만원/year과 CO₂의 제거를 통한 수익 3억 9141만원/year을 합하면 13억 5170만원/year으로, 최대 광량을 조사하는 LED 조명 적용 시스템과의 차액은 약 937만원으로 산출되었다.

4.2. 최적 광량 조사

GAMS를 이용하여 광량에 대해 최적화시킨 바이오매스 생산시스템 모델의 결과는 Table 4와 같이 상대성장속도가 12.688 cm/day이고, 격자 중심에서 LED 기판의 거리는 1.234 m로, 이에 따른 격자 당

4 개의 LED 에너지 방출량은 141.727 μmol·m⁻²·s⁻¹ 이고, 하루 당 총 건조된 바이오매스 생산량은 2.14E+9 g/day이었으며, 이를 통해 생산된 바이오에탄올의 총 수익은 54억 4817만원/year로 산출되었다. 추가적으로 CO₂의 제거를 통한 총 수익은 11억 4561만원/year로, 바이오에탄올의 이익과 총 전력 사용료와 연간 LED 설치비 39억 4069만원을 제한 결과, 연간 총 순이익은 17억 1397만원/year이었다.

최적 광량을 조사하는 바이오매스 생산시스템의 모식도는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 4. Results for the farm of 24km² (optimized)

Variables	Optimal values	Variables	Optimal values
Relative growth rate	12.688 cm/day	Dried biomass production per day	2.14E+9 g/day
Quantity of light	93.084 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	Bio-ethanol production per day	99510 L/day
Distance from center of grid	1.234 m	Total revenue from bio-ethanol	₩544,817*10 ⁴ /year
Biomass number per grid	100	Total removals of CO ₂ per day(grams)	313.867 ton/day
Biomass production per day per grid	1268.814 cm/day	Total revenue from CO ₂ removal	₩114,561*10 ⁴ /year
Energy emissions per grid	141.727 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	Power requirements	5.985E+6 W/m ² ·day
Length of one side of grid	1.745 m	Total power charges	₩11,325*10 ⁴ /year
Area of grid	3.045 m ²	LED installation cost per year (LED lifetime based on 10 years)	₩394,069*10 ⁴ /year
Total Biomass production per day	1.0E+10 cm/day	Total annual income	₩171,397*10 ⁴ /year

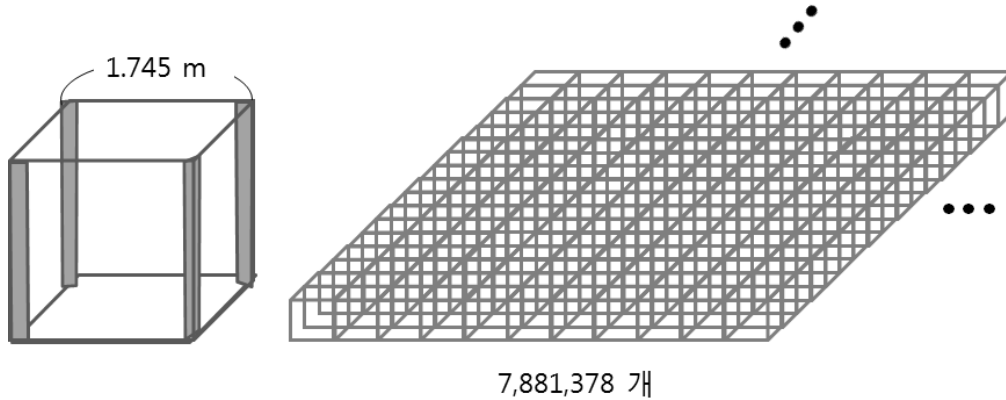


Fig. 3. Layout of the optimum biomass production system.

LED 조명을 적용하지 않은 경우 동일한 격자수에서 수익은 생산된 바이오에탄올의 수익 10억 2414만원/year과 CO₂의 제거를 통한 수익 2억 1535만원/year을 합하면 12억 3949만원/year으로, 최대 광량을 조사하는 LED 조명 적용 시스템과의 차액은 약 4억 7448만원이었다. 이를 연간 LED 설치비 및 유지비와 전력 사용료로 나누면 이에 따른 연간 추가 수익률은 약 12.04 %이었다. 이때, LED의 평균적인

수명은 약 40,000 시간으로, 하루 12 시간 사용기준으로는 약 10 년 정도를 사용할 수 있다.

이와 같이 광량만을 변수로 하여 최적화 시켰을 때 투자의 관점에서는 수익성이 다소 떨어지지만, 기존 해상 풍력발전이 야간에는 사용처 확보에 곤란을 겪고 있으므로, 전력저장 대신 본 방법과 같이 바이오매스를 전기저장매체로서 공급(2차 전지를 대체할 전기저장장치로서의 개념)을 검토할 수 있다고 판단된다. 또한 LED의 수명은 기술발전을 통

LED가 결합된 야간풍력발전 활용을 포함한 해상환경 바이오매스 생산시스템의 최적 설계

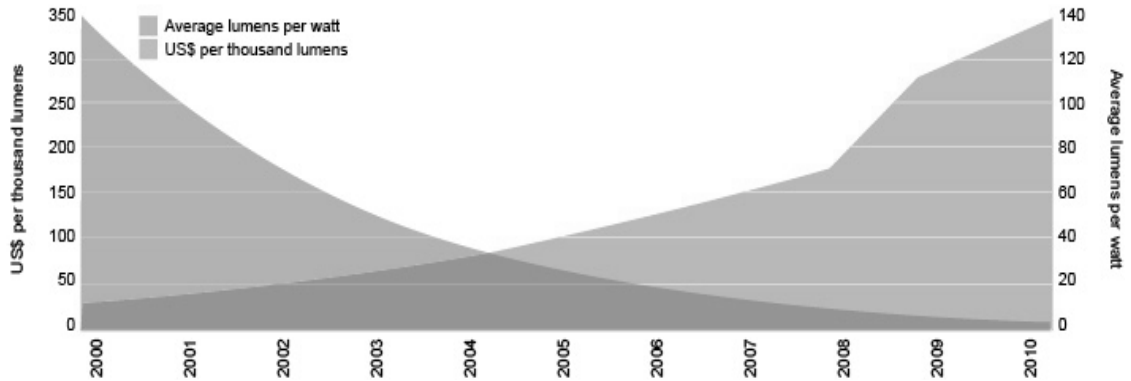


Fig. 4. White LED technology and cost have improved rapidly over the past decade[10].

Table 5. LED device efficacy and price are expected to continue to improve rapidly[10]

Lamp type	2010	2012	2015	2020
LED cool white efficacy (lm/W)	134	176	224	258
LED cool white price (US\$/klm)	\$13	\$6	\$2	\$1
LED warm white efficacy (lm/W)	96	141	202	253
LED white price (US\$/klm)	\$18	\$7.5	\$2.2	\$1

해 10만 시간 이상을 연장될 수 있으며[10], Fig. 4와 Table 5에서와 같이 동일 킬로루멘 기준가격이 2010년 기준으로 2015년까지 85 %가 절감된 2 \$, 2020년에는 1 \$까지 예측되기 때문에 장기적인 기술발전을 통해 2020년에는 수익성이 현재 순수익의 4 배정도 가 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 환경적 관점뿐만 아니라 경제성 측면에서도 타당성을 가질 수 있는 해상환경 바이오매스 생산시스템의 최적구조를 비선형계획법을 활용하여 설계하였다. 이를 위해 해상풍력발전과 LED를 접목시켜 바이오매스를 생산하는 공정을 제안하고, 빛에 대한 영향만을 고려하여 최적화시켰다. 그 결과, 24 km² 면적의 해상풍력단지에 최대 광량을 조사시키는 시스템의 경우는 약 859만 개의 격자가 필요하였으며, LED를 적용하지 않은 시스템과의 연간 총 수익의 차액은 약 940만원으로, 연간 LED 설치비와 전력 사용료 기준 연간 수익률(ROI)이 약

0.2%로, 매우 낮게 산출되었다.

최적의 광량을 조사하는 시스템의 경우는 약 788만 개의 격자가 산출되었으며, LED를 적용하지 않은 시스템과의 연간 총 수익의 차액은 약 4억 7400만원이 산출되어 ROI는 약 12 %이었다. 이것은 LED의 수명인 10 년보다 빠른 8.3 년의 payback period가 확인되므로, 현 단계에서도 적정하다고 판단할 수 있지만, LED 기술이 발전됨에 따라 2020년에는 현재보다 4 배의 순수익을 향상시킬 수 있으므로, 보다 빠른 시간에 투자금을 회수할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 같이 본 연구에서는 광량만을 변수로 설정하였으나, 향후 실제 바이오매스 생산공정에서는 광량뿐만 아닌 온도, 염도, 자연채해 등의 복잡한 변수들이 적용되므로, 구체적인 바이오매스 생산시스템의 모델링이 요구된다. 또한 야간에 LED를 조사 시에는 원하는 바이오매스의 성장을 촉진하는 반면 환경적 변화를 예측할 수 없기 때문에 이에 대한 추가적인 검토가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 ‘협틱기반 플랜트 안전훈련시스템 기술개발’ 과제 (과제번호: 14IFIP-B085984-02)의 성과입니다.

REFERENCES

- [1] Seok, J. O., Park, D. S., Yang, H. S., Yoon, Y. H., and Honjo, T., "Bioremediation on the Benthic Layer in Polluted Inner Bay by Promotion of Microphytobenthos Growth Using Light Emitting Diode (LED)", *Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*, **10**(2), 93-101, (2007)
- [2] Park, B. J., *Effects of PAR and UV radiation on growth, photosynthesis and pigmentation of marine macroalgae*, Master's Thesis, Incheon University, (2004)
- [3] Park, J. S. "5MW offshore wind turbine developments and key technologies", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 4459-4474, (2010)
- [4] Jason, Q., Lenneke, de Winter, and Thomas, B., "Microalgae bulk growth model with application to industrial scale systems", *Bioresource Technology*, **102**, 5083, (2011)
- [5] Kliphuis, A. M. J., *Modeling of microalgal metabolism*, Ph.D. Thesis, Wageningen University, (2010)
- [6] Park, J. I., Woo, H. C., and Lee, J. H., "Production of Bio-energy from Marine Algae: Status and Perspectives", *J. Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(5), 833-844, (2008)
- [7] Mustafa, B. and Havva, B., "Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel", *Applied Energy*, **86**, 2273-2282, (2009)
- [8] Park, H. W., *Scientific study on plant growth and plant factory with LED lighting*, Agriculture and Horticulture Magazine, (2010)
- [9] Richard, E. R., *GAMS: A user's guide*, www.GAMS.com, (2013)
- [10] *THE CLIMATE GROUP: LIGHTING THE CLEAN REVOLUTION*, <http://thecleanrevolution.org/>, (2012)