

◆ 특집 ◆ 바이오매스 대량생산용 광생물반응기 개발

미세조류 대량 생산용 광생물반응기 설계

Design of Photobioreactor for Mass Production of Microalgae

안동규^{1,✉}, 조창규¹, 정상화¹, 이동기²
Dong-Gyu Ahn^{1,✉}, Chang-Gyu Cho¹, Sang-Hwa Jeong¹ and Dong-Gi Lee²

¹ 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

² 조선대학교 메카트로닉스 (Department of Mechatronics Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: smart@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7043

Manuscript received: 2010.12.15 / Accepted: 2010.12.27

The objective of this paper is to investigate into the design of photobioreactor for mass production of microalgae. Characteristics of previously developed photobioreactors were examined to obtain design factors, including light transfer, fluid dynamics and metabolic reactions, of the photobioreactor. Design technology of components related to the design factors, such as light sources, photobioreactor cases, spargers, mixer, etc., was discussed to improve the viability and the growth rate of microalgal and productivity of the photobioreactor. Finally a principle direction of the design for an airlift flat plane photobioreactors was investigated.

Key Words: Design of Photobioreactor (광생물 반응기 설계), Microalgal (미세조류), Mass Production (대량생산), Characteristics of Photobioreactor (광생물 반응기 특징), Design Factors (설계인자)

기호설명

n = refractive index

s = illuminated surface area of a photobioreactor

k = number of sides for the polygon

r = radius of a circumscribed circle for the polygon

F = light flux

E = illuminance

T = transmissivity

I = light intensity

I_{avg} = mean light intensity

I_s = saturation light intensity

I_o = light intensity on the inside of a photobioreactor case

ϵ = extinction coefficient

X = concentration of microbial biomass

d = depth of a photobioreactor

P_v = volumetric productivity

μ = coefficient of specific growth rate

V = volume of a photobioreactor

F_g = medium and gas flow rates

U_g = superficial gas velocity

r_{e2} = effective radius of a photobioreactor

D = dilution rate

v = entrance gas velocity

λ = number of nozzle for sparger

d_i = diameter of each nozzle for sparger

AD = area of downcommer

AR = area of riser

L = length of static mixer

1. 서론

최근 석유/천연가스 등 주요 에너지 자원의 평균 가채 연수가 각각 40.5 년과 63.3 년 정도로 전 세계적인 에너지원의 고갈 현상이 가속화되고 있어 신규 에너지원의 개발이 절실히 요구되고 있다.¹ 또한 1997 년에 제정된 교토의정서에 따라 38 개 선진국들은 2009-2012 년까지 대기 가스 배출량을 1990 년 배출 기준으로 평균 5.2 % 이상 감축해야 하는 상황이어서, 온실 가스의 주요 성분인 CO₂ 가스의 포집과 신재생에너지 생산이 동시에 가능한 바이오 연료/에너지 관련 기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있는 상황이다.² 미국은 2017 년까지 전체 수송용 에너지 소비의 15 % 인 350 억 갤런을 바이오 연료로 공급할 계획이고, EU 는 2020 년까지 수송용 연료의 최소 10 % 를 바이오 연료로 대체하는 계획을 발표하였다.^{3,4} 또한 국내 바이오 디젤 증장기 보급 계획에 따르면 디젤 연료내 바이오 디젤 혼합 비율을 5 % 까지 확장할 예정이다. 이러한 시대적 요구에 따라 바이오디젤/에탄올/가스 등 바이오 에너지를 대량 생산하기 위한 기술개발의 관심이 높아지고 있다.

바이오 에너지를 대량 생산하기 위해서는 바이오 질량(Biomass)의 대량 생산이 수반되어야 한다. 현재 옥수수, 콩 등 식량 바이오 질량에서 바이오 에너지를 추출하는 기술이 상용화되어 있으나, 이 방법의 경우 인류의 식량 자원과 연계되어 있어 새로운 바이오 질량을 개발하고자 하는 연구가 진행되고 있다.⁵ 최근 광합성을 통한 CO₂ 고정 가능한 미세조류(Microalgae)를 바이오 질량으로 활용하는 방법과 미세조류의 대량생산 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁶ 미세조류 대량 생산시스템으로 광생물 반응기(Photobioreactor)가 사용되고 있으며, 미세 조류의 생산성 향상을 위하여 개방형 및 밀폐형으로 다양한 광생물 반응기들이 개발되고 있다.⁷ 광생물 반응기의 생산성과 에너지 효율은 반응기 케이스 및 연결 시스템의 설계에 매우 의존적이다.⁸

본 논문에서는 미세조류 대량생산용 광생물 반응기의 특징을 고찰하여, 광생물 반응기의 설계인자를 도출 하였다. 미세조류의 생존율과 성장률 및 광생물 반응기 생산성 향상을 위하여 각 설계인자에 관련된 광생물 반응기 부품/요소의 설계 기법과 고려 사항에 대하여 기술하였다. 또한 미세조류 대량생산이 가능한 공기 부양식 평판형 광생물 반응기 설계 방향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 미세조류 대량 생산용 광생물반응기

2.1 광생물 반응기

광생물 반응기에서는 Fig. 1 과 같이 미세조류 종자가 함유한 수분과 CO₂ 가 주입된 빛에 의하여 식 (1)과 같은 광합성(photosynthesis)을 한다.

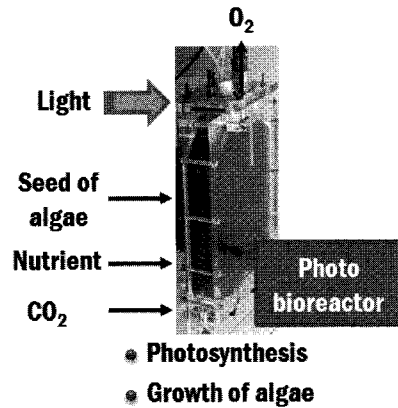
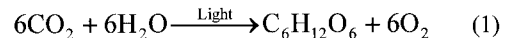


Fig. 1 Concept of photosynthesis in the photobioreactor



광합성에 의하여 미세조류 종자 내부에 당(C₆H₁₂O₆)이 생성되고, 산소는 배출되게 된다. 미세조류 종자가 이 당을 주 양분으로 섭취하여 성장하며, 섭취하지 못한 당은 지질(lipid)로 미세조류 내부에 저장하게 된다. 이 과정을 연속적으로 반복함으로써 미세조류가 성장하고 미세조류 내부에 포함되는 지질의 양이 증가함과 동시에 대량의 바이오 질량을 배양이 가능하게 된다.

바이오 질량을 대량 생산하기 위한 광생물 반응기는 Fig. 2 와 같이 매우 다양한 형태로 개발되고 있다.^{6,9,10}

2.2 형상에 따른 분류

광생물 반응기의 형상에 따라 개방형과 밀폐형으로 분류할 수 있다.^{6,10}

개방형 광생물 반응기의 경우 수로형 연못(Raceway pond)의 형태로 일반적인 상용화된 미세조류 대량 생산시스템이다.^{11,12} 수로형 연못의 장점은 Table 1 과 같이 상대적 경제성과 반응기 청소와 대량생산의 용이성이다. 이 광생물 반응기의 단점은 배양 조건 제어의 어려움, 장시간 미세조류 성장의 어려움, 낮은 생산성과 대면적의 장소가 요구

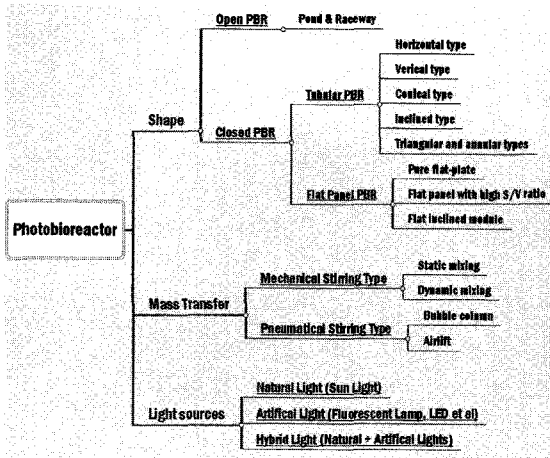


Fig. 2 Classification of photobioreactor^{6,9,10}

되는 것이다.^{10,13}

밀폐형 광생물 반응기는 크게 원통형과 평판형으로 구분할 수 있다.^{10,11,13-15} 원통형 광생물 반응기는 수평형, 수직형, 원뿔형, 경사형 및 삼각/고리형 등이 개발되었다.¹⁶⁻¹⁹ 수직형 광생물 반응기의 장점은 Table 1 과 같이 높은 물질 전달율, 낮은 전단 응력에서의 우수한 혼합성, 낮은 에너지 소비율, 높은 대량 생산 가능성 및 적은 전용 면적을 들 수 있다. 그러나 이 광생물 반응기는 작은 광 조사 면적, 복잡한 형상의 제작 요구, 미세조류에 미치는 전단응력 및 대형화 하였을때 광 조사 면적의 감소의 단점을 가지고 있다. 수평형 광생물 반응기는 Table 1 과 같이 넓은 광조사 면적, 옥외 설치 적합성, 매우 우수한 바이오 질량 생산성 및 상대적으로 저렴한 비용 등이 장점이다. 그러나 이 광생물 반응기는 산소 축적, 막힘 현상, 관의 벽 두께 증가, 광합성 저해 현상(Photoinhibition) 및 큰 설치 면적 등의 단점이 있다.

평판형 광생물 반응기의 경우 Table 1 과 같이 바이오 질량 생산에 소비되는 에너지 감소와 짧은 산소 경로 특징 때문에 최근 활발한 연구가 수행되고 있다.^{10,13,20-22}

이 광생물 반응기는 넓은 광조사 면적, 옥외 설치 용이성, 우수한 광 경로, 저렴한 비용, 우수한 바이오 질량 생산성 및 낮은 산소 증가의 장점을 가지고 있다. 하지만 이 반응기를 대형화하기 위해서는 많은 격실과 지지구조가 필요하다. 또한 이 반응기는 온도 제어가 어렵고, 유체역학적 응력이 미세조류에 가해질 수 있는 단점이 있다.

Table 1 Characteristics of photobioreactors^{10,13}

Type	Advantages	Disadvantages
Race way (Open)	<ul style="list-style-type: none"> - Relatively economical - Easy to clean up - Good for mass cultivation 	<ul style="list-style-type: none"> - Little control of culture condition - Difficulty in growing for long period - Poor productivity - Occupy large land mass - Easy contamination
Vertical column (Closed)	<ul style="list-style-type: none"> - High mass transfer - Good mixing with low shear stress - Low energy consumption - High potentials for scalability - Easy to sterilize - Reduced photoinhibition and photo-oxidation - Least land use 	<ul style="list-style-type: none"> - Small illumination surface area - Construction required sophisticated materials - Shear stress to algal - Decrease of illumination surface area upon scale-up
Tubular (Horizontal & Closed)	<ul style="list-style-type: none"> - Large illumination surface area - Suitable for outdoor cultures - Fairly good biomass production - Relatively cheap 	<ul style="list-style-type: none"> - Gradients of pH - Dissolved oxygen and CO₂ along the tubes - Fouling - Some degree of wall growth - Requires large land space
Flat Panel (Closed)	<ul style="list-style-type: none"> - Large illumination surface area - Suitable for outdoor cultures - Good light path - Good biomass production - Relative cheap - Easy to clean up - Low oxygen buildup - Low power consumption 	<ul style="list-style-type: none"> - Scale-up require many compartments and support material - Difficulty in controlling culture temperature - Some degree of wall growth - Possibility of hydrodynamic stress to some algal strains

2.3 물질 전달 방법에 따른 분류

물질 전달 측면에서는 광생물 반응기를 기계적 교반 시스템과 공기역학적 교반 시스템으로 구분할 수 있다.⁹

기계적 교반 시스템은 정/동적 혼합 시스템으

로 나누어진다. 정적 혼합시스템에서는 Fig. 3 과 같이 광생물반응기 내부에 헬리컬 정적 혼합기, 바이오 코일, 내격벽 및 부착물등을 부가/생성시켜, 유체의 유동 방향/속도 변경과 난류로의 전이를 유도시켜 미세조류의 효율적 혼합과 성장성을 제어한다.^{20,23-25}

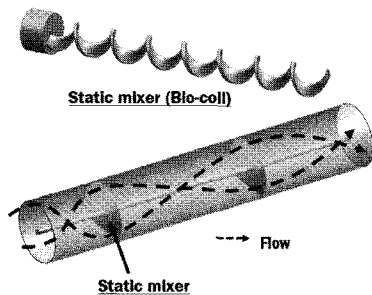


Fig. 3 Examples of static mixers (Adapted from references 24 and 25)^{24,25}

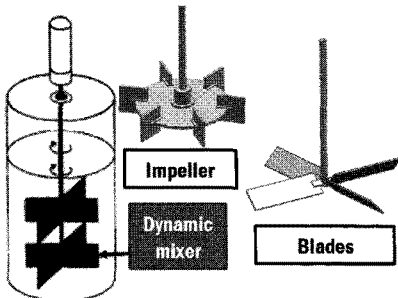


Fig. 4 Examples of dynamic mixers (Adapted from references 9 and 26)^{9,26}

동적 혼합시스템은 Fig. 4 와 같이 광생물반응기 내부에 모터로 구동되는 블레이드, 임펠러 같은 혼합장치를 삽입하여 강제적으로 작동하여 미세조류의 내부 유동을 제어한다.^{9,26}

공기역학적 교반 시스템은 Fig. 5 와 같이 기포 주입형(Bubble column)과 공기 부양형(Airlift)의 두 가지 시스템이 대표적으로 사용되고 있다.^{21,27-29}

기포 주입형 교반 시스템에서는 살포기(Sparger)에서 광생물 반응기 내부로 공기와 CO₂ 가스를 주입하여, 미세조류의 광합성을 유도한다. 광생물반응기 내부로 주입된 공기와 CO₂ 가스에 의한 미세조류와 유체의 유동은 거의 발생하지 않는다. 기포 주입형 교반 시스템을 사용할 경우 기포가 터지면서 미세조류에 부과되는 전단응력에 의하여 미세조류의 손상이 발생할 수 있다.^{9,13,29}

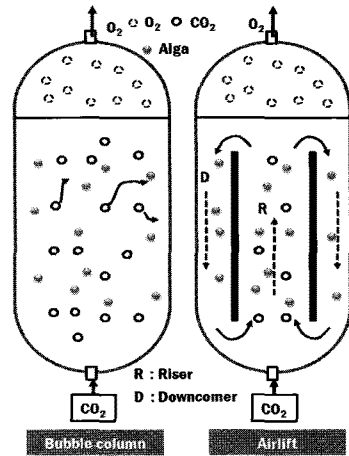


Fig. 5 Comparison of bubble column and airlift photobioreactors (Adapted from reference 29)²⁹

공기 부양형 교반 시스템에서는 광생물 반응기 내부로 주입된 공기와 CO₂ 가스에 의하여 미세조류와 유체의 수직/수평방향 순환(Circulation)과 회전이 발생한다.^{20,21} 공기 부양형 교반 시스템에는 유체 및 미세조류의 순환을 유도하는 상승부(Riser)와 하강부(Downcomer) 구분용 격벽이 부착된다. 공기 부양형 교반 시스템은 기포 주입형 교반 시스템보다 기포 주입 속도가 느리며 균일한 공기와 CO₂ 가스를 광생물 반응기 내부에 공급함으로써 미세조류에 작용하는 전단응력이 감소하며 반응기 내의 산소의 분류/제거가 용이하다.^{29,30} 또한 미세조류의 순환에 의하여 미세조류에 빛이 조사되는 시간이 증가하여 미세조류 성장율이 증가된다.^{29,30}

2.4 광원에 따른 분류

광생물 반응기는 사용되는 광원에 따라 태양광을 활용하는 자연 광원, 인공 광원 및 하이브리드 광원을 가진 광생물 반응기로 구분할 수 있다.³¹⁻³³

자연 광원을 활용한 광생물 반응기에서는 태양광을 활용한다. 대부분 태양광이 직접적으로 광생물 반응기 케이스 표면에 조사되도록 개발되고 있다. 그러나 광생물반응기 케이스에 조사되는 태양광조도(Illuminance)를 증가시키기 위하여 Fig. 6 과 같이 광섬유(Optical fiber), 도광판(Light guide plate) 및 프레넬 렌즈(Fresnel lens)를 케이스 주위에 부착하는 방식에 대한 연구도 진행되고 있다.^{31,34-37} 특히 도광판을 사용할 경우 광생물 반응기 케이스 단면 적당 조사되는 조도가 균일하게 되어, 수직 방향의 미세조류 성장성을 균일하게 할 수 있다.

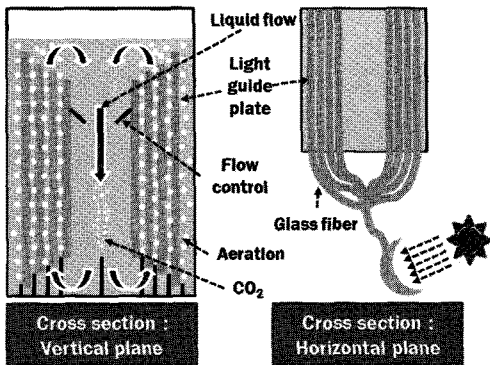


Fig. 6 Example of a rectangular airlift photobioreactor with light guide plates and light collector (Adapted from Reference 36)³⁶

인공광원을 활용한 광생물 반응기에서는 일반적으로 할로겐 램프, 형광 램프, OLED(Organism light emitting display), 고효율 LED(Light emitting display) 등을 많이 활용 한다.^{32,38-40} 균일 광원을 반응기 내부에 제공하기 위하여 도광판을 적용하기도 한다. 인공광원을 활용하는 경우 광생물 반응기내에 광합성을 발생시키는 에너지를 조사하기 위해서는 많은 갯수의 형광등과 LED 가 소요된다. 그러므로 실재로는 실험실 단위의 소형 광생물 반응기에만 적용되고 있는 상황이다. Fig. 7 은 독일 Ruhr 대학에서 개발한 LED 를 광원으로 사용하는 평판형 광생물 반응기의 예를 나타낸다. 인공광원을 사용할 경우 광원에서 발생하는 열 문제를 해결하여야 한다. 그러나 인공광원을 사용할 경우 미세조류가 활발한 광합성을 할 수 있는 특정 파장대의 빛을 집중적으로 조사할 수 있어, 미세조류 성장율을 증대시킬 수 있는 장점이 있다.

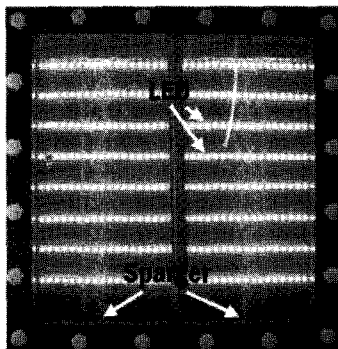


Fig. 7 Example of photobioreactor with LEDs (Ruhr-University Bochum)

하이브리드 광원을 활용하는 광생물 반응기의 경우 주 광원과 보조광원을 각각 태양광과 보조광원으로 사용한다. 보조 광원으로써는 형광등과 LED 를 많이 사용한다. 이 광생물반응기는 일기에 의하여 광생물 반응기 내부로 조사되는 태양광 에너지가 부족할 때나 일몰 후의 추가적인 미세조류 성장이 필요할 때 사용된다.

2.5 공기 부양식 평판형 광생물 반응기

2.1 절에서 2.3 절까지의 광생물 반응기들 중에서 바이오 질량의 옥외 대량 생산이 가능하고 우수한 투입에너지 대비 바이오 질량 생산성을 가진 공기부양식 평판형 광생물 반응기(Flat panel airlift photobioreactor)에 대한 관심이 높아지고 있다.

특히 독일 Fraunhofer 연구소의 Trösch Walter 박사팀이 개발하여 Subitec 사로 기술 이전한 Fig. 8 과 같은 광생물 반응기 케이스가 정적 교반기 역할을 하는 공기 부양식 평판형 광생물 반응기의 경우 바이오 질량을 대량/연속/옥외 생산을 할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁴¹⁻⁴⁶



Fig. 8 Examples of flat panel airlift photobioreactor developed by Fraunhofer Institute and Subitec Inc. (Adapted from references 41 and 42)^{41,42}

이 광생물 반응기 케이스는 태양광 조도를 높이기 위하여 체적 대비 표면적율(Surface to volume ratio : S/V ratio)가 최대값을 나타내는 사각형 평면을 가진 각 분실(Compartment)들이 연속적으로 연결되어 있어, 공기와 CO₂ 로 구성된 기포가 기저면에서부터 케이스 최상단까지 연속적으로 이동할 수 있도록 되었다. 또한 각 분실을 교차 결합시켜 분실간의 격벽이 정적 교반기 역할을 하여, 미세조류의 순환에 의한 반복적 광합성이 가능하도록 설계되었다. 수직형 구조로 되어 있어 설치 면적이 적으며, 플라스틱 성형으로 케이스를 제작하여 케이스의 대량 생산이 가능한 장점을 가지고 있다.

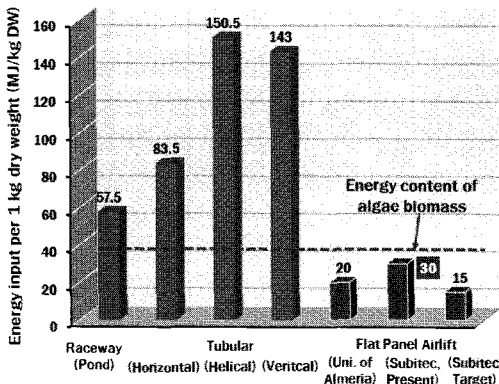


Fig. 9 Variation of energy input per 1kg dry weight of microalgae for different types of photobioreactors (Adapted from references 41 and 42)^{41,42}

Fraunhofer 연구소와 Subitec 사의 연구 결과에 의하면 이 형태의 광생물 반응기의 경우 Fig. 9 와 같이 단위 미세조류가 가진 에너지량보다 적은 에너지를 광생물 반응기에 투입하여도 미세조류가 생산되는 것으로 보고되고 있다.^{41,42}

3. 광생물 반응기 설계 인자

3.1 광생물 반응기에서 미세조류 배양시 주요 변수

광생물 반응기에서 미세조류를 배양할 때 고려할 3 가지 주요변수는 Fig. 10 과 같이 광전달 (Light transfer), 반응기 내부 매체들의 유체역학적 특성 (Fluid dynamics) 및 대사 반응 (Metabolic reaction)이다.²⁴ 광생물 반응기 설계시 위 3 가지

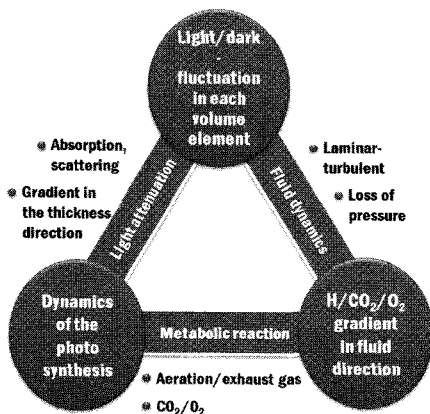


Fig. 10 Parameters for the cultivation of microalgal in the photobioreactor (Adapted from reference 24)²⁴

주요변수와 관련된 구성 부품/요소들의 설계 사양 수립이 광생물 반응기의 성능과 특성을 결정할 수 있다.

3.2 광전달 요소의 설계 고려사항

3.2.1 광원 관련 부품/요소

자연 광원을 사용할 경우 광전달 부품/요소는 빛을 집광하여 균일 강도의 빛을 광생물 반응기로 전달하는 역할을 한다. 집광기로는 다양한 표면형상을 가진 프리넬 렌즈 시스템 및 거울 기반 시스템으로 분류할 수 있다.^{36,37} 집광기를 사용할 경우 태양광과 집광면이 수직을 유지하도록 실시간 태양 고도 추적 장치(Tracker)를 사용하여야 한다.³⁶

집광기에서 광생물 반응기로 집광된 광을 전달하기 위해서는 도광(Light guide) 장치가 필요하다. 도광 장치로는 도광판(Light guide plate)³⁶와 광전달 선(Light guide cable)³⁷을 많이 사용한다. 집광시스템과 광전달 선을 사용하는 경우 태양광 집광 효율이 45-50 % 이하로 보고되었다.^{10,36} 광전달 케이블을 사용하는 경우 집광 효율이 케이블의 광전달 효율에 매우 의존적이다. 집광시스템과 도광판을 사용할 경우 태양광을 광생물 반응기로 21 % 까지 전달할 수 있다.^{36,47} 특히 평판형 광생물 반응기에 적용될 때, 광전달 효율이 극대화된다. 도광판을 사용할 경우, 도광판의 굴절률(Refraction index)이 매우 중요한 변수이다. 도광판으로 집광된 태양광을 전달시키기 위해서는 도광판 굴절률이 1.415 이상이 되어야 한다.^{10,36} 도광판 재질로는 PMMA(Polymethylmethacrylate)가 적합한 것으로 보고되고 있다. Table 2 는 플라스틱 재료와 유리의 굴절률이다.^{10,48} Fig. 11 은 도광판의 예이다. 또한 집광된 태양광이 접하는 도광판의 면은 평면(Flat surface)이고, 이 평면과 집광된 태양광은 직각이 아니어야 한다.³⁶ 그러나, 도광판에서 광생물반응기로 광을 전달하는 도광판 면에서는 도광판내에서 굴절된 빛이 광생물반응기로 전달될 수 있도록 도광판의 단면이 감소하도록 설계하여야 한다.³⁶

Table 2 Refraction index for different plastic material^{10,48}

Material	PMMA	PC	ABS	PS	PVC	Glass
Refraction index (n)	1.47	1.54	1.52	1.57	1.53	1.49
	-1.52	-1.59		-1.60	-1.56	-1.50

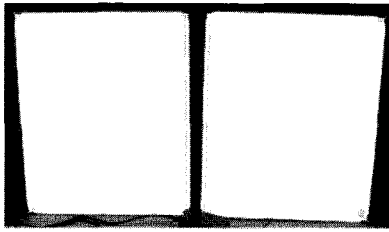


Fig. 11 Examples of light guide plate

인공광원을 사용할 경우 광의 조도와 파장 및 L-D 변동(Light-dark fluctuation) 조절이 가능하다. 인공광원인 형광 램프, 할로겐 램프 및 LED 개수와 단위 용량은 광생물 반응기 표면에 조사되어야 될 조도(Illuminance)와 PFD(Photon flux density)에 의존적이다. 인공광원의 파장은 미세조류가 함유하고 있는 엽록소의 최대 흡수 파장에 매우 의존적이다. Matthijs 등은 붉은색 LED 의 경우 초록색 미세조류의 성장에 매우 효과적이라고 보고 하였다.^{10,49} 빛 조사 기간의 비율과 PFD 가 미세조류 성장율에 영향을 크게 미친다.^{10,50,51} 그러므로 인공광원에서 L-D 변동 제어 시스템이 추가되는 것이 미세조류 배양에 효율적일 수 있다.

3.2.2 광생물 반응기 케이스

광생물 반응기 케이스 설계시 케이스 표면을 통과하여 광생물 반응기 내부로 전달되는 광속(Light flux)의 양을 고려하여야 한다.

식 (2)는 광속의 정의를 나타낸다. 동일 조도에서 광생물 반응기 표면에서 흡수되는 광속을 증가시키기 위해서는 빛이 조사되는 표면적(Illuminated surface area)을 증가시켜야 한다.⁵² 그러므로 광생물 반응기 케이스의 외관 형상은 표면이 최대화되는 형상으로 설계하는 것이 바람직하다. Fig. 11 은 정다각형 형상에 따른 표면적의 변화를 나타낸다. 본 논문에서는 외접원의 반경을 1 로 적용하였다. 평판형 광생물 반응기의 경우 사각형 형상의 표면적을 많이 사용한다. 구(Sphere)형상의 경우 광생물 반응기의 깊이 방향이 표면적에 의하여 제한되므로 거의 사용하지 않고 있다. Fig. 12 에서 평판형 광생물 반응기 설계시 각 격벽으로 구분된 단위 반응기 케이스의 경우 다각형 변의 수를 증가하는 것이 광속을 증가시키는 바람직한 설계로 사료된다.

$$F(\text{lumen}) = E(\text{lux}) \times S \quad (2)$$

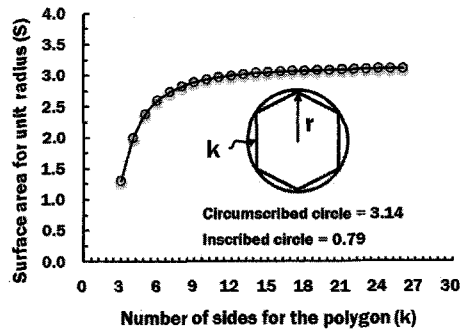


Fig. 12 Surface areas for different regular polygon

광원으로부터 조사된 빛은 Fig. 13 과 같이 광생물 반응기 케이스에 의하여 반사, 흡수 및 투과 현상이 일어난다. 조사된 빛이 광생물 반응기 내부로 많이 전달되기 위해서는 투과율이 높은 물질을 광생물 반응기 케이스 재료로 선정하여야 한다. Table 3 은 평판형 광생물 반응기 케이스 제작에 많이 사용되는 플라스틱 재료와 유리의 투과율이다.⁵³ 재료의 투과율(Transmissivity)은 식 (3)과 같이 굴절률과 상관관계가 있다.⁵⁴ 식 (3)에서 굴절률이 커지면 투과율이 적어지는 것을 알 수 있다.

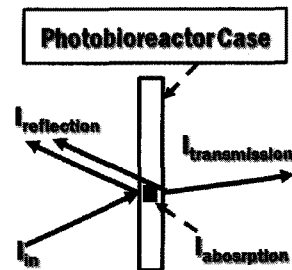


Fig. 13 Illustration for the reflection, absorption and transmission of light in the photobioreactor case

Table 3 Transmissivity for different plastic material⁵³

Material	PMMA	PC	ABS	PS	PVC	Glass
Transmissivity (%)	92-93	85-91	88-90	≅89	≅84	90-92

$$T \approx \left(1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right)^2 \quad (3)$$

생물 반응기 내부로 투과된 광속 및 광 조도에 의하여 반응기 내부에서 미세조류가 성장하게 된다. Fig. 14 는 평균 광조도(Mean light intensity)와 미

세조류 비 성장율(Specific growth rate)의 전형적인 상관관계를 도시하였다.⁹ 이 상관관계는 Fig. 14 에서와 같이 최대 비 성장율이 발생하는 포화 광조도(Saturation light intensity)보다 작은 광조도가 부과되는 광 제한 영역(Light limited region)과 포화 광조도 보다 큰 광조도가 부과되는 광 억제 영역(Light inhibited region)으로 구분할 수 있다. 미세조류가 배양되는 광생물 반응기 내부는 최대 비 성장율을 얻을 수 있는 포화 광조도를 유지하는 것이 바람직하나, 미세조류에 의한 빛의 산란, 미세조류간의 상호 그림자 효과(Mutual shading) 및 미세조류에 의한 광 흡수에 의하여 광생물 반응기 깊이 방향으로 식 (4)와 같이 광조도의 지수적 감소가 일어난다.^{9,24} 이 현상에 의하여 Fig. 15 와 같이 광생물 반응기 깊이 방향으로 광합성 반응 정도의 차이가 발생하게 된다. 그러므로 광생물 반응기 내부 깊이 방향에 따라 균일한 미세조류 생산성을 얻기 위해서는 광생물 반응기 케이스의 깊이를 적게 하는 것이 바람직하다.^{9,41,42}

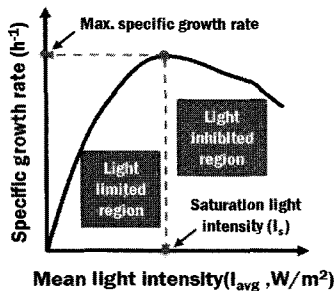


Fig. 14 Schematics of the relationship between mean light intensity and specific growth rate of microalgal⁹

$$I = I_0 \exp(-\epsilon Xd) \tag{4}$$

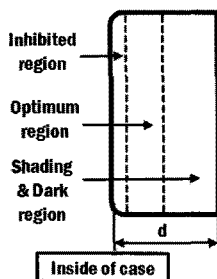


Fig. 15 Variation of photosynthesis regions in the depth direction of photobioreactor^{9,41,42}

Fig. 14 의 포화 광조도와 비 성장율은 미세조류에 따라 다른 값을 나타내며, 광원에서 요구되는 광조도와 광속은 케이스 투과율과 포화 광조도에 의하여 결정할 수 있다.

광생물 반응기로 미세 조류를 배치 또는 연속 배양할 경우, 단위 체적당 미세조류 생산량 (Volumetric productivity)는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.⁹ 식 (5)에서 미세조류의 생산량을 향상 시키기 위해서는 광생물 반응기의 체적 대비 표면적 비(Surface to volume ratio: S/V ratio)를 증가시켜야 하는 것을 알 수 있다. Fig. 16 은 정다각형 표면 형상을 가진 평판형 광생물 반응기의 깊이에 따른 S/V 비의 변화이다. Fig. 16 에서 큰 S/V 비를 얻기 위해서는 평판형 광생물 반응기의 깊이가 짧아야 한다는 것을 알 수 있다.

$$P_v = \mu Xd \left(\frac{S}{V}\right) \tag{5}$$

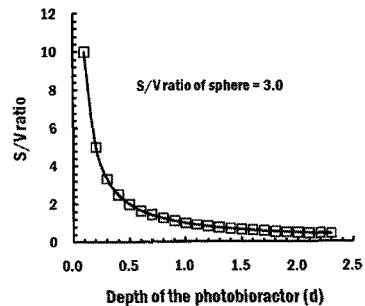


Fig. 16 Surface to volume ratio of the flat plane photobioreactor with a polygon surfaces

3.3 유체역학적 특성 관련 고려 사항

광생물 반응기 설계시 유체역학적 특성 고려 사항들은 주로 미세조류와 영양분/CO₂ 간 향상 및 O₂ 의 제거능력 향상 및 pH 유지에 관련되어 있다.²⁴ 또한 미세 조류의 침전과 반응기 표면 부착을 방지하는 방법에도 연관된다.²⁴ 이와 관련된 부품/요소로서는 살포기와 혼합기가 해당된다.

3.3.1 살포기

기포 주입형과 공기 부양형 광생물 반응기에서 내부 유체, 영양분, CO₂ 및 미세조류의 혼합을 일으키는 원동력이 살포기로부터 분사되는 기포이다.⁹ 이 기포에 의하여 미세조류의 와류(Vortex)도 발생하게 된다. 또한 살포된 기포에 의하여 전단

응력이 발생하는데, 과도한 전단 응력은 미세조류의 생존율 감소와 붕괴를 발생시킨다.^{9,51,55} Tramper 등은 기포의 전단응력에 의한 미세조류의 죽음은 기포가 발생하는 살포기 영역과 기포가 부양되는 영역 및 기포가 이탈이 발생하는 표면에서 발생한다고 보고하였다.⁵⁶ 그러나 긍정적인 면에서는 전단응력에 의하여 열과 물질 전달률을 향상시킨다.

살포되는 기포의 광생물 반응기내 속도(Superficial gas velocity)가 증가할수록 미세조류의 순환속도가 증가하여, 미세조류의 분산 계수가 증가하게 된다.⁵⁷ 그러므로 미세조류가 반응기 내에 집중되지 않아, 미세조류에 의한 상호 그림자 효과 감소 및 식 (6) 과 같은 미세조류의 반응기 내부 유동성 상승에 의하여 광합성의 기회가 증가하게 된다. 그 결과 식 (7) 및 Fig. 16 과 같은 연속 배양 또는 정상 상태에서의 생산성이 증가하게 된다.⁵⁸

$$F_g = \pi U_g r_c^2 \quad (6)$$

$$P_v = DX = X \left(\frac{F_g}{V} \right) \quad (7)$$

살포되는 기포의 광생물 반응기내 속도가 임계치 이상이 되면 미세조류에 전단응력을 작용하여 미세조류의 생존율 (Viability) 를 감소시킴으로써 미세조류 생산성을 감소시키게 된다.^{59,60} 광생물 반응기내의 가스 속도와 광생물 반응기 유효 직경에 의하여 기포 형성 특성이 달라진다.^{9,51} 기포가 커질수록 기포 파열에 의한 미세조류 손상이 커지므로, 미세 균일 기포(Homogeneous bubble)가 발생하도록 광생물 반응기의 유효 직경과 광생물 반응기내 기포 속도의 비를 조절하여야 한다.

Fig. 17 과 같이 전단 응력에 의하여 미세조류의 생산성이 감소하는 현상은 살포기의 기포 주입구 직경과 개수는 유지하고, 광생물 반응기내 가스 유량을 증가시키기 위하여 가스 공급장치와 연결된 광생물 반응기의 기포 주입구 입구 속도(Entrance gas velocity)만을 증가시켰을 때 미세 조류의 사망률(Death rate)이 증가하기 때문이다.^{51,59} Barbosa 는 식 (8)과 같이 살포기의 주입구 개수와 직경을 조절하여 광생물 반응기내 기포 유량과 속도는 증가시키면서 기포 주입구 입구 속도는 유지

하는 방법으로, 광생물 반응기내 기포 속도를 증가시켜도 미세조류 사망률을 거의 변하지 않게 할 수 있다고 제안하였다.⁵¹ 이 방법을 사용할 경우 미세조류의 생산성을 증가시킬 수 있다. 또한 광생물 반응기내 기포 유량과 속도를 증가시키기 위해 기포 주입구 입구 속도는 유지하고 주입구 직경을 증가시킬 경우, 미세조류 사망률을 감소시킬 수 있다.⁵¹ 이 현상은 주입구당 생성되는 기포 발생 주기가 감소하기 때문이다.⁵¹

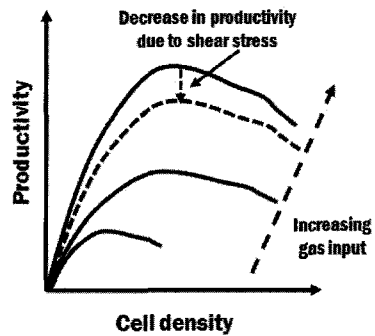


Fig. 17 Schematics of influence of cell density and gas input on productivity (Adapted from reference 51)⁵¹

$$F_g = \pi \frac{v \lambda d_i^2}{4} \quad (8)$$

3.3.2 정적 혼합기

기포의 주입만으로 광생물 반응기내 미세조류, 영양분 및 CO₂ 를 혼합하는 경우, 희석율(Dilution rate)과 미세조류 와류 발생을 위하여 높은 단위 유체당 입력 동력(Specific power input per weight of the liquid)이 요구되며 기포 전단응력/파열에 의한 미세조류 사망률이 증가할 수 있다.^{9,51,56}

이런 문제를 해결하기 위해서 공기 부양식 광생물 반응기에서 기포 부양율은 감소시키고, 정적 혼합기를 활용하여 광생물 반응기 내부 유동을 발생시킨다. 미세조류의 광생물 반응기 내부 유동을 통하여 미세조류 희석율을 높이고, 미세조류 집중에 의한 상호 그림자 현상 및 빛의 산란을 감소시킬 수 있다.^{9,19,29,24,41} 또한 그림자 및 어두운 영역에 위치한 미세조류를 광생물 반응기 케이스 내벽 가까이에 위치한 최적 성장 영역으로 이동 시켜, 미세 조류에 전달되는 광조도를 증가시켜 미세조류 성장율과 생산성을 높일 수 있다.

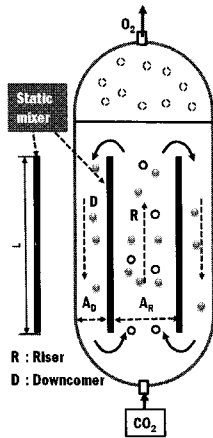


Fig. 18 Concept and representative dimension of the static mixer for an airlift photobioreactor

공기 부양식 광생물 반응기의 경우 Fig. 18 과 같이 정적 혼합기의 상승부와 하강부의 면적비 및 정적 혼합기 격벽의 높이가 중요한 설계 변수이다.^{9,30,61} 이 3 가지 변수의 영향성의 경우 CFD (Computational fluid dynamics) 해석에 의하여 결정하고 있다. 특히, Fig. 4 와 같은 복잡한 형상의 정적 혼합기의 설계는 CFD 를 많이 활용하고 있다.⁶¹⁻⁶³ 정적 혼합기를 사용할 경우 상승부에서는 가스 함유량이 배양 시간에 따라 증가하나, 하강부에서는 가스 함유량이 배양 시간에 따라 일정하게 된다.⁶⁴

평판형 광생물 반응기의 경우 각 분실간을 연결하는 격벽을 정적 혼합기로 활용하기도 한다.^{20,41-46} 이 경우 각 분실에서는 유체와 미세조류의 자기 순환(Self circulation)이 일어나며, 기포는 수직 방향으로 상승하게 된다. 공기 부양식을 사용할 경우 반응기내의 산소를 상승부를 따라 반응기 상부로 배출할 수 있으며, 하강부에는 산소량을 최소화 할 수 있다. 또한 각 분실에서 유체와 미세조류의 자기 순환 속도를 증가시키기 위하여 Fig. 19 와 같이 와류 발생기(Vortex generator)⁶⁵ 와 같은 난류 발생 기구를 분실의 격벽에 부가할 수도 있다. 그러나 난류 발생 기구와 미세조류의 마찰에 의하여 미세조류에 전단응력이 부가되지 않도록 하여야 한다.

3.4 대사 반응 관련 고려 사항

미세조류 대사 반응과 관련된 광생물 반응기 설계 고려사항은 광생물 반응기 높이/길이 방향으

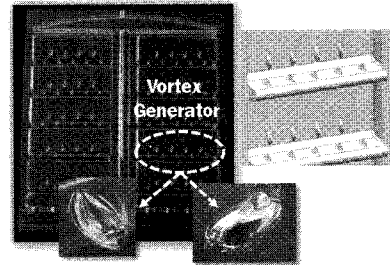


Fig. 19 Example of application of vortex generator to the photobioreactor

로의 CO₂ 와 O₂ 의 농도 및 pH 의 조절에 연관되어 있다.²⁴ 광생물 반응기가 대형인 경우, 살포기로부터 살포된 CO₂ 는 기포에 의하여 이동하면서 광합성에 사용되어 높이/길이 방향의 CO₂ 농도 구배가 발생한다.^{30,66} 이 현상에 의하여 CO₂ 는 광합성을 위한 탄소(C)의 주 근원으로 높이/길이 방향의 광합성을 제한할 수 있다. 또한 광합성 반응에 의하여 광생물 반응기 높이/길이 방향으로 O₂ 농도가 증가하게 된다. 그 결과 O₂ 농도가 독성 수준까지 누적될 수 있다. 광생물 반응기내 CO₂ 와 O₂ 농도 변화는 반응기 내 pH 를 변경시킬 수 있다. 그러므로, 광생물 반응기의 높이/길이 방향 CO₂ 농도 구배 문제를 해결하기 위해서는 광생물 반응기내 CO₂ 가스 함유 비율(Gas hold-up)을 증가시키거나, 광생물 반응기의 높이/길이를 작게하여야 한다. 광생물 반응기내 CO₂ 가스 함유 비율을 증가시키기 위해서는 광생물 반응기내 가스 속도를 증가시켜야 한다.⁶⁷ 그러나, 이 경우 전단 응력에 의하여 미세조류의 손상이 발생할 수 있으므로 가스 속도의 정밀 제어가 필요하다.

3.5 공기 부양식 평판형 광생물 반응기 설계 방향

3.1 절에서 3.4 절까지 고찰된 광생물 반응기 구성 부품/요소의 설계 고려사항을 활용하여 공기 부양식 평판형 광생물 반응기 설계시 광원, 광생물 반응기 케이스, 살포기 및 정적 혼합기에 대한 설계 방향 정립이 필요하다.

광원관련 부품/요소 설계시 태양광만을 사용할 때는 집광기, 도광판 및 태양고도 추적장치에 대한 설계를 하여야 한다. 특히 도광판의 경우 굴절률이 1.415 이상이 되는 플라스틱이나 유리 재료를 사용하여 한다. 인공광원만을 사용할 경우 배양되는 미세조류의 광 흡수능이 가장 높은 파장

대의 인공 광원을 선정하여야 한다. 녹조류의 경우 붉은색 LED 가 바람직하며, L-D 변동 제어시스템을 부착하는 것이 미세조류의 성장성을 높일 수 있다. 미세조류의 성장성과 생산성을 향상시키기 위하여 태양광과 인공광원을 혼합하여 사용하는 방법도 바람직할 것으로 사료된다.

광생물 반응기 케이스 설계시 케이스 빛이 조사되는 표면적을 증가시키기 위하여 각 분실의 외곽 표면 형상을 변의 수가 많은 정다각형 형상에 가깝도록 설계하여야 한다. 케이스 재료는 광 투과율이 높은 플라스틱이나 유리로 선택하여야 한다. 투과율은 85~90% 이상이 되는 것이 바람직하다. 광생물 반응기 단위 체적당 미세조류 생산성을 높이기 위해 S/V 비를 증가시켜야 하며, 광생물 반응기 내부에서 발생하는 미세조류간 상호 그림자 효과와 빛 산란 현상을 최소화하여야 한다. 이 두가지 요구사항을 모두 만족시키기 위하여 광생물 반응기 케이스의 깊이를 짧게 하는 것이 바람직하다. CO₂ 와 O₂ 의 광생물 반응기 높이/길이 방향 구배를 최소화하기 위하여 광생물 반응기 높이/길이 방향 크기는 짧게 설계하는 것이 바람직하다. 그러나 O₂ 를 효율적으로 배출하기 위하여, O₂ 가 배출되기 전 임시적으로 저장될 수 있는 여유 공간을 광생물 반응기 상단부에 설정하여야 한다. 이 O₂ 의 임시 저장 공간의 크기를 광생물 반응기 케이스 설계시 고려하여 한다.

살포기의 설계시 살포기의 구멍 개수와 직경을 증가시켜 광생물 반응기 내부의 기포 유량 증가와 기포 발생 주기를 감소시킴으로써, 미세 조류의 생존율 증대와 생산성 향상을 도모할 수 있다. 또한 기포 파열에 의한 미세조류 손상 방지를 위해 미세 균일 기포가 광생물 반응기 내부에 발생하도록 살포기의 직경과 구멍 개수를 설계하여야 한다.

정적 혼합기는 미세 조류의 자기 순환 증대와 CO₂ 및 미세조류의 회석률을 향상시키기 위하여 광생물 반응기 내부에 삽입되어야 한다. 이 정적 혼합기에 의하여 발생하는 미세조류 순환에 의하여 미세 조류 집중에 의한 상호 그림자 및 빛의 산란 현상을 감소시킬 수 있고, 미세 조류가 최적 광합성 영역에 머무르는 시간을 증대시킬 수 있다. 그 결과 광생물 반응기의 미세조류 생산성과 성장성을 향상시킬 수 있다. 정적 혼합기 설계시 상승부와 하강부 면적비 및 격벽 높이의 최적 설계를 위하여 CFD 해석이 필요하다. 또한 정적 혼합기와 각 분실 격벽 표면에 자기 순환 확대와 유체 속도

증가를 위한 와류 발생 기구를 부착할 때에는 전단 응력에 의한 미세 조류 손상 및 생존율 감소 현상을 고려하여야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 최근 관심이 집중되고 있는 신재생 에너지 개발 관련 연구 중 바이오 디젤과 바이오 에탄올 생산용 바이오 질량인 미세 조류의 대량 생산을 위한 광생물 반응기 설계 기법에 대하여 고찰하였다.

현재 개발된 광생물 반응기들의 특징들을 비교/분석하여 광생물 반응기 설계를 위한 설계인자들을 도출하였다. 효율적이고 고생산성을 가진 광생물 반응기를 개발하기 위해서는 광집광/전달 장치, 유체역학적 특성 향상 장치 및 미세 조류 대사 반응 활성화 장치에 대한 적합한 설계가 이루어져야 함을 알 수 있었다.

미세조류의 생존율과 성장율을 향상시키기 위한 광집광/전달 부품, 광생물 반응기 케이스, 살포기 및 정적 혼합기에 대한 설계 기법과 설계 고려사항들을 도출하였다.

최종적으로 효율적인 공기 부양식 평판형 광생물 반응기 설계를 위한 구성 부품/요소들의 바람직한 설계 방향을 제시할 수 있었다.

추후 제 3 세대 바이오 에너지원인 미세조류의 육외 대량 배양을 위하여, 대용량 광생물 반응기 설계 기술에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 될 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2010 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20103020090020)

참고문헌

1. BP, "BP Statistical Review of World Energy," BP Statisticalreview, 2010.
2. Sebastian, O. and Hermann, E. O., "The Kyoto Protocol: International Climate Policy for the 21st Century," Springer-Verlag, pp. 1-136, 1999.
3. U.S. Department of Energy, <http://www.energy.upenn.edu/docs/EWGP-Milliken-slides.pdf>

4. IEA, "Biofuels for Transport," IEA Bioenergy, pp. 33-50, 2008.
5. Chisti, Y., "Biodiesel from Microalgae," *Biotechnology Advances*, Vol. 25, No. 3, pp. 294-306, 2007.
6. Jeon, S. M., Kim, I. H., Ha, J. M. and Lee, J. H., "Overview of Technology for Fixation of Carbon Dioxide Using Microalgae," *Journal of the Korean Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, No. 2, pp. 145-150, 2008.
7. Chaumont, D., "Biotechnology of Algal Biomass Production: A Review of Systems for Outdoor Mass Culture," *Journal of Applied Phycology*, Vol. 5, No. 6, pp. 593-604, 1993.
8. Suh, I. S. and Lee, C. G., "Photobioreactor Engineering: Design and Performance," *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Vol. 8, No. 6, pp. 313-321, 2003.
9. Asenjo, J. A. and Merchuk, J. C., "Bioreactor System Design," Marcel Dekker Inc., 1995.
10. Kunjapur, A. M. and Eldridge, R. B., "Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 49, No. 8, pp. 3516-3526, 2010.
11. Borowitzka, M. A., "Commercial Production of Microalgae: Ponds, Tanks, Tubes and Fermenters," *Journal of Biotechnology*, Vol. 70, No. 1-3, pp. 313-321, 1999.
12. Radmann, E. M., Reinehr, C. O. and Costa, J. A. V., "Optimization of the Repeated Batch Cultivation of Microalga *Spirulina Platensis* in Open Raceway Ponds," *Acquaculture*, Vol. 265, No. 1-4, pp. 118-126, 2007.
13. <http://biofuels2010.blogspot.com/2010/11/mit-algae-photobioreactor.html>
14. Schenk, P. M., Thomass-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnung, J. H., Posten, C., Kruse, O. and Hankamer, B., "Second Generation Biofuels: High-efficiency Microalgae for Biodiesel Production," *Bioenergy Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 20-43, 2008.
15. Sierra, E., Acien, F. G., Fernandez, J. M., Garcia, J. L., Gonzalez, C. and Molina, E., "Characterization of a Flat Plate Photobioreactor for the Production of Microalgae," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, No. 1-3, pp. 136-147, 2008.
16. Yoshihara, K., Nagase, H., Eguchi, K., Hirata, K. and Miyamoto, K., "Biological Elimination of Nitric Oxide and Carbon Dioxide from Flue Gas by Marine Microalga NOA-113 Cultivated in a Long Tubular Photobioreactor," *Journal of Fermentation and Bioengineering*, Vol. 82, No. 4, pp. 351-354, 2001.
17. Watanabe, Y. and Hall, D. O., "Photosynthetic Production of the Filamentous Cyanobacterium *Spirulina Platensis* in a Cone Shaped Helical Tubular Photobioreactor," *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 44, No. 6, pp. 693-698, 1998.
18. Carlozzi, P. and Sacchi, A., "Biomass Production and Studies on *Rhodospseudomonas Palustris* Grown in an Outdoor, temperature Controlled, Underwater Tubular Photobioreactor," *Journal of Biotechnology*, Vol. 88, No. 3, pp. 239-249, 2001.
19. Vunjak-Novakovic, G., Kim, Y., Wu, X. X., Berzin, I. and Merchuk, J. C., "Air-lift Bioreactors for Algal Growth on Flue Gas: Mathematical Modeling and Pilot-plant Studies," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, No. 16, pp. 6154-6163, 2005.
20. Degen, J., Uebele, A., Retze, A., Schemid-Staiger, U. and Trosch, W., "A Novel Airlift Photobioreactor with Baffles for Improved Light Utilization through the Flashing Light Effect," *Journal of Biotechnology*, Vol. 92, No. 2, pp. 89-94, 2001.
21. Hoekema, S., Bijmans, M., Janssen, M., Tramper, J. and Wiffels, R. H., "A Pneumatically Agitated Flat-panel Photobioreactor with Gas Re-circulation: Anaerobic Photoheterotrophic Cultivation of a Purple Non-sulfur Bacterium," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1331-1338, 2007.
22. Sierra, E., Acien, F. G., Fernandez, J. M., Garcia, J. L., Gonzalez, C. and Molina, E., "Characterization of a Flat Photobioreactor for the Production of Microalgae," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 138, No. 1-3, pp. 136-147, 2008.
23. Travieso, L., Hall, D. O., Rao, K. K., Benitez, F., Sanchez, E. and Borja, R., "A Helical Tubular Photobioreactor Producing *Spirulina* in a Semicontinuous Mode," *International Biodeterioration*

- & Biodegradation, Vol. 47, No. 3, pp. 151-155, 2001.
24. Sastre, R. R., Csogor, Z., Perner-Nochta, I., Fleck-Schneider, P. and Posten, C., "Scale-down of Microalgae Cultivations in Tubular Photobioreactor - A Conceptual Approach," *Journal of Biotechnology*, Vol. 132, No. 2, pp. 127-133, 2007.
 25. Ugwu, C. U., Ogbonna, J. C. and Tanaka, H., "Design of Static Mixers for Inclined Tubular Photobioreactors," *Journal of Applied Phycology*, Vol. 15, No. 2-3, pp. 217-223, 2003.
 26. Lee, C. G. and Kim, J. H., "Cylinder Type Multi-Layered Photobioreactor," Inha Industry Partnership Institute, Korea Patent, No. 10-0986732-0000, 2010.
 27. Miron, A. S., Gomez, A. C., Camacho, F. G., Grima, E. M. and Chisti, Y., "Comparative Evaluation of Compact Photobioreactors for Large-scale Monoculture of Microalgae," *Journal of Biotechnology*, Vol. 70, No. 1-3, pp. 294-270, 1999.
 28. Miron, A. S., Gomez, A. C., Camacho, F. G., Grima, E. M. and Chisti, Y., "Bubble-column and Airlift Photobioreactors for Algal Culture," *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 9, pp. 1872-1887, 2000.
 29. Xu, Z., Dapeng, L., Yiping, Z., Xiaoyan, Z., Zhaoling, C., Wei, C. and Fan, O., "Comparison of Photobioreactors for Cultivation of *Undaria Pinnatifida* Gametophytes," *Biotechnology Letters*, Vol. 24, No. 18, pp. 1499-1503, 2002.
 30. Molina, E., Fernandez, J., Acien, F. G. and Chisti, Y., "Tubular Photobioreactor Design for Algal Cultures," *Journal of Biotechnology*, Vol. 92, No. 2, pp. 113-131, 2001.
 31. Pulz, O., Gerbsch, N. and Buchholz, R., "Light Energy Supply in Plate-type and Light Diffusing Optical Fiber Bioreactors," *Journal of Applied Phycology*, Vol. 7, No. 2, pp. 145-149, 1995.
 32. Kim, B. W., Chang, K. P. and Chang, H. N., "Effect of Light Source on the Microbiological Desulfurization in a Photobioreactor," *Bioprocess Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 343-348, 1997.
 33. Richmond, A., "Principles for Attaining Maximal Microalgal Productivity in Photobioreactors: an Overview," *Hydrobiologia*, Vol. 512, No. 1-3, pp. 33-37, 2004.
 34. An, J. Y. and Kim, B. W., "Biological Desulfurization in an Optical-fiber Photobioreactor Using an Automatic Sunlight Collection System," *Journal of Biotechnology*, Vol. 80, No. 1, pp. 35-44, 2000.
 35. Gordon, J. M., "Tailoring Optical Systems to Optimized Photobioreactors," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 11-12, pp. 1175-1184, 2002.
 36. Zijffers, J. F., Jassen, M., Tramper, J. and Wijffels, R. H., "Design Process of an Area-Efficient Photobioreactor," *Marine Biotechnology*, Vol. 10, No. 4, pp. 404-415, 2008.
 37. Ono, E. and Cuello, J. L., "Design Parameters of Solar Concentrating Systems for CO₂-mitigating Algal Photobioreactors," *Energy*, Vol. 29, No. 9-10, pp. 1651-1657, 2004.
 38. Park, K. H. and Lee, C. G., "Effectiveness of Flashing Light for Increasing Photosynthetic Efficiency of Microalgal Cultures over a Critical Cell Density," *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 189-193, 2001.
 39. Shotipruk, A., Kaufman, P. B. and Wang, H. Y., "Conceptual Design of LED-Based Hydroponic Photobioreactor for High-Density Plant Cultivation," *Biotechnology Progress*, Vol. 15, No. 6, pp. 1058-1064, 1999.
 40. Lee, C. G. and Palsson B. Ø., "High-density Algal Photobioreactors Using Light-emitting Diodes," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 44, No. 10, pp. 1161-1167, 1994.
 41. Subitec, http://global.subitec.com/pdf/subitec_achema_130509.pdf
 42. Subitec, http://global.subitec.com/pdf/Subitec_ALGAE_2009.pdf
 43. Subitec, <http://www.subitec.com>
 44. Fraunhofer IGB, http://www.igb.fraunhofer.de/www/gf/umwelt/algen/en/NeuartigerPhotobioreakto_en.html
 45. Trösch, W., "Bioreactor for the Cultivation of Microorganisms, and Method for the Production Thereof," *Fraunhofer Gesellschaft*, EP 1 326 959 B1, 2005.
 46. Trösch, W., Schmid-staiger, U., Zastrow, A., Retze, A. and Brucker, F., "Photobioreactor with Improved Supply of Light by Surface Enlargement, Wavelength Shifter Bars or Light Transport," *Fraunhofer Gesellschaft*, EP 1 169 428 B1, 2005.
 47. Bolton, J. R. and Hall, D. O., "The Maximum

- Efficiency of Photosynthesis,” *Photochemistry and Photobiology*, Vol. 53, No. 4, pp. 545-548, 1991.
48. Parker, http://www.texloc.com/closet/cl_refractiveindex.html
 49. Matthijs, H. C. P., Balke, H., Vanhes, U. M., Kroon, B. M. A., Mur, L. R. and Binot, R. A., “Application of Light-emitting Diodes in Bioreactors: Flashing Light Effects and Energy Economy in Algal Culture (*Chlorella Pyrenoidosa*),” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 50, No. 1, pp. 98-107, 1996.
 50. Gorden, J. M. and Polle, J. E. W., “Ultra-high bioproductivity from algae,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 75, No. 5, pp. 969-975, 2007.
 51. Barbosa, M. J. G. V., *Microalgal Photobioreactors: Scale-up and Optimisation*, Ph.D. Thesis, Bioprocess Technology, Wageningen University, 2003.
 52. Pedrotti, F. L. and Pedrotti, L. S., “Introduction to Optics,” Prentice-Hall Inc., pp. 10-15, 1993.
 53. LG MMA, <https://www.chemwide.co.kr:444/6support/4educate/pdf/pmma.pdf>
 54. Fowles, G. R., “Introduction to Modern Optics,” Dover Publications Inc., pp. 40-47, 1989.
 55. Chalmers, J. J., “Shear sensitivity of insect cells,” *Cytotechnology*, Vol. 20, No. 1-3, pp. 163-171, 1996.
 56. Tramper, J., Williams, J. B., Joustra, D. and Vlak, J. M., “Shear sensitivity of insect cells in suspension,” *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 33-36, 1986.
 57. Joshi, J. B. and Sharma, M. M., “A Circulation Cell Model for Bubble Columns,” *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 57, No. 3, pp. 244-251, 1979.
 58. Livansky, K., “Semicontinuous cultivation of autotrophic algae,” *Folia Microbiologica*, Vol. 24, No. 4, pp. 346-351, 1979.
 59. Hu, Q. and Richmond, A., “Productivity and Photosynthetic Efficiency of *Spirulina Platensis* as Affected by Light Intensity, Algal Density and Rate of Mixing in a Flat Plate Photobioreactor,” *Journal of Applied Phycology*, Vol. 8, No. 2, pp. 139-145, 1996.
 60. Janssen, M., Tramper, J., Mur, L. R. and Wijffels, R. H., “Enclosed Outdoor Photobioreactors: Light regime, Photosynthetic Efficiency, Scale-up and Future Prospects,” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 81, No. 2, pp. 193-210, 2003.
 61. Yu, G., Li, Y., Shen, G., Wang, W., Lim, C., Wu, H. and Chen, Z., “A Novel Method Using CFD to Optimize the Inner Structure Parameters of Flat Photobioreactors,” *Applied Phycology*, Vol. 21, No. 6, pp. 719-727, 2009.
 62. Shen, R. C., Shu, Z. M., Haung, F. R. and Dai, Y. C., “CFD Simulation of Hydrodynamics of Gas-liquid Flow in an Oxidation Airlift Reactor,” *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 159, pp. 525-528, 2006.
 63. Jai, X., Wen, J., Wang, X., Feng, W. and Jiang, Y., “CFD Modeling of Immobilized Phenol Biodegradation in Three-Phase Airlift Loop Reactor,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 48, No. 9, pp. 4514-4529, 2009.
 64. Fröhlich, S., Lotz, M., Korte, T., Lübber, A., Schügerl, K. and Seekamp, M., “Characterization of a Pilot Plant Airlift Tower Loop Bioreactor, I: Evaluation of the Phase Properties with Model Media,” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 43-55, 1991.
 65. Koike, M., Nagayoshi, T. and Hamamoto, N., “Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generator,” *Mitsubishi Motors Technical Review*, No. 16, pp. 11-16, 2004.
 66. Rubio, F. C., Fernandez, F. G. A., Perez, J. A. S., Camacho F. G. and Grima. E. M., “Prediction of Dissolved Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations Profiles in Tubular Photobioreactors for Microalgal Culture,” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 362, No. 1, pp. 71-86, 1999.
 67. Chisti, M. Y. and Moo-Young, M., “Gas Holdup in Pneumatic Reactors,” *The Chemical Engineering Journal*, Vol. 38, No. 3, pp. 149-152, 1988.