(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0078588
(43) 공개일자 2024년06월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C12M 1/00 (2006.01) *B29C 65/00* (2018.01)
B29C 65/18 (2006.01) *B29C 65/78* (2006.01)
B65H 18/10 (2006.01) *B65H 23/26* (2006.01)
B65H 37/04 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C12M 21/02 (2013.01)
B29C 65/18 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0138479
(22) 출원일자 2023년10월17일
심사청구일자 2023년10월17일
(30) 우선권주장
1020220158655 2022년11월23일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
심상준
서울특별시 영등포구 의사당대로 127, 102동 1401호
이정섭
서울특별시 노원구 동일로 1456, 709동 504호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
정은열, 김태훈

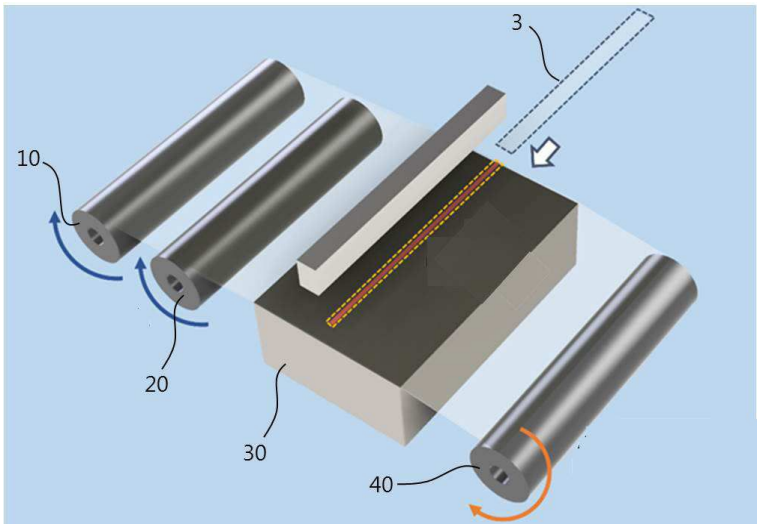
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 **광생물 반응기 제조장치**

(57) 요 약

본 발명은 광생물 반응기 제조장치에 관한 것으로, 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 투명 제1 필름(1)을 연속적으로 풀어주는 제1 언와인더(10), 제1 언와인더(10)와 나란하게 배치되고, 제1 필름(1)과 마주보도록 투명 제2 필름(2)을 연속적으로 풀어주는 제2 언와인더(20), 서로 마주보는 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배치된 배플(baffle, 3)에 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 가압 열접합하는 열접합기(30), 및 열접합기(30)를 통과한 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 동시에 연속적으로 감아주는 리와인더(40)를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
B29C 65/7888 (2013.01)
B29C 66/41 (2013.01)
B29C 66/832 (2013.01)
B29C 66/90 (2020.05)
B65H 18/103 (2013.01)
B65H 23/26 (2013.01)
B65H 37/04 (2013.01)
C12M 23/22 (2013.01)
B65H 2301/51614 (2013.01)
(72) 발명자
이주연
서울특별시 송파구 풍성로20길 34, A동 202호

김동훈
서울특별시 성북구 안암로9가길 53 204호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711128194
과제번호	2020M3H7A1098295
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	유용물질생산을위한CarbontoX기술개발(R&D)
연구과제명	연소가스 내 CO2 직접 광생물전환을 위한 고효율 공정 원천 기술
기 여 율	1/1
과제수행기관명	고려대학
연구기간	2022.01.27 ~ 2023.01.26

명 세 서

청구범위

청구항 1

투명 제1 필름을 연속적으로 풀어주는 제1 언와인더;

상기 제1 언와인더와 나란하게 배치되고, 상기 제1 필름과 마주보도록 투명 제2 필름을 연속적으로 풀어주는 제2 언와인더;

서로 마주보는 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이에 배치된 배플(baffle)에 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 가압 열접합하는 열접합기; 및

상기 열접합기를 통과한 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 동시에 연속적으로 감아주는 리와인더;를 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

각각 풀어진 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 겹쳐서 상기 열접합기로 안내하는 제1 가이드 롤러;를 더 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 배플은,

상기 제1 필름과 열접합되는 제1 열접합 부재;

상기 제1 열접합 부재과 이격 배열되고, 상기 제2 필름과 열접합되는 제2 열접합 부재; 및

상기 제1 열접합 부재와 상기 제2 열접합 부재를 연결하고, 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이의 공간을 구획하는 구획부재;를 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 배플은,

상기 구획부재를 관통하는 다수의 관통공을 구비하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 열접합기와 상기 리와인더 사이에 배치되는 제2 가이드 롤러; 및

상기 열접합기를 통과한 상기 제1 필름 및 상기 제2 필름을 사이에 두고, 상기 제2 가이드 롤러와 상하 방향으로 마주보도록 배치되어, 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 겹쳐서 상기 리와인더로 안내하는 제3 가이드 롤러;를 더 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

각각 풀어져 서로 마주보는 상기 제1 필름과 상기 제2 필름의 이동 거리를 측정하는 센서부;를 더 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 센서부는,

서로 마주보면서 이동하는 상기 제1 필름 및 상기 제2 필름 중 어느 하나에 접촉하여 회전하는 회전체; 및

상기 회전체의 회전각도를 측정하여 상기 제1 필름과 상기 제2 필름의 이동 거리를 산출하는 연산회로;를 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 8

청구항 1에 있어서,

서로 마주보는 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이에 배플(baffle)을 삽입 배치하는 배플 삽입부;를 더 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 배플 삽입부는,

상기 제1 언와인더에 의해 풀어진 상기 제1 필름의 하면에 접촉하여 회전하면서 상기 제1 필름을 상기 열접합기로 안내하는 제1 이격 롤러;

상기 제2 언와인더에 의해 풀어진 상기 제2 필름의 상면에 접촉하여 회전하면서, 상기 제1 필름으로부터 상기 제2 필름을 이격시켜 상기 열접합기로 안내하는 제2 이격 롤러; 및

서로 이격된 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이에 상기 배플을 공급하는 배플 공급기;를 포함하는 광생물 반응기 제조장치.

청구항 10

청구항 1에 있어서,

상기 제1 필름, 및 상기 제2 필름은,

저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 폴리에틸렌 테레프탈레이트와 무연신 폴리프로필렌 혼합 필름(PET+CPP), 폴리 아세탈(POM), 폴리카보네이트(PC), 폴리에스터 설폰(PES), 폴리에틸렌(PE), 폴리염화비닐(PVC), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET), 폴리프로필렌(PP), 폴리페닐렌옥사이드(PPO=PPE) 및 저밀도 폴리에틸렌과 폴리에틸렌 테레프탈레이트와 나일론8(Nylon 8)의 혼합 필름으로 구성된 군에서 선택되는 광생물 반응기 제조장치.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 광생물 반응기 제조장치에 관한 것으로, 보다 상세하게는 롤투롤 와인더(Roll-to-roll winder) 및 가압 열접합 기기를 이용해 대용량 광합성 생물 반응기를 연속적으로 제조하는 기술에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 화석 연료의 사용에 따른 대규모 온실가스의 배출로 야기된 지구 온난화 현상은 인류를 비롯한 지국 생명체의 생존을 위협하고 있다. 이에 따라 이산화탄소 감축을 위한 이산화탄소 포집 및 저장 기술 (CCUS, Carbon Capture & Sequestration) 개발이 전세계적으로 활발히 진행 중에 있다. CCS 기술은 화력발전소를 비롯한 다양한 탄소 배출원에서 방출되는 다량의 이산화탄소를 고농도로 포집한 후 지중이나 해저에 주입하여 대기로부터 격리시키는 방법이다. 이러한 CCS 기술은 단기간에 대량의 이산화탄소를 저감시키는 효과가 있으나, 안정적인 저장 문제, 위치 선정 및 높은 설치비용 등은 국내에서 실질적인 CCS의 현실화를 막는 장애요인이다. 따라서 CCS 기술과 달리 이산화탄소를 저장이 아닌 산업적 용도로 직접 활용하거나 부가가치가 높은 물질로 전환하는 CCU (Carbon Capture & Utilization) 기술이 각광 받고 있고, 국내에서도 이산화탄소를 다양한 고부가 물질로 전환하는 공정 개발이 시도되고 있다. 그 중에서도 광합성 미생물인 미세조류를 활용한 이산화탄소의 생물학적 전환 공정은 이산화탄소 감축과 동시에 바이오연료, 바이오플라스틱, 의약품 등 다양한 고부가 물질 생산이 가능한 경제적인 이산화탄소 저감 기술로 주목받고 있다.

[0004] 식물성 플랑크톤이라 불리는 미세조류는 광합성을 하는 수중 단세포 생물로 에너지 및 산업 소재 생산과 동시에 온실저감이 가능한 자원으로 그 잠재력이 매우 큰 바이오매스 자원으로 관심을 받고 있으며 에너지 · 화학 · 환경 분야를 중심으로 미래에는 그 이용가치가 확대될 전망이다.

[0005] 첫째, 에너지 분야에서 미세조류는 모든 바이오디젤 생산 작물 중 오일 생산성이 가장 우수하다. 대두, 유채, 해바라기, 오일팜 등은 재배 주기가 4~8개월인 반면 미세조류는 매일 수 배로 증식하여 1일 단위로 재배가 가능하며 단위 무게 당 지방 함량치도 높아 연간 오일 생산량이 대두의 100배 이상이다. 또한 식량자원의 에너지화라는 비판에서 자유로운 생명자원으로, 석유계 디젤과 유사한 물성을 가진 바이오 연료를 생산할 수 있다.

[0006] 둘째, 화학 분야에서 미세조류는 다양한 유용물질을 생산할 수 있는 장점이 있으며, 현재 식품 분야를 중심으로 산업화되어 있지만, 향후 바이오케미컬 및 바이오플라스틱 분야로 산업화가 확대될 전망이다. 단백질 함량이 높은 미세조류인 클로렐라, 스피룰리나, 클라미도모나스 외에도 아스타잔틴이라는 고부가가치 물질을 만들어내는 헤마토코쿠스 등을 활용해 각종 아미노산, 항산화물질, 지방산을 보충하는 건강기능식품이 상용화 된 상태이다.

[0007] 셋째, 환경 분야에서 미세조류는 상기에 기술한 것처럼 이산화탄소 저감이 가능하다는 측면에서 가장 큰 관심을 받고 있으며 세계적으로 관련 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 미세조류는 바이오매스 중량의 2배 정도의 이산화탄소를 흡수할 수 있으며 이는 육상 식물 대비 10~50배 높은 흡수 효율 수치이다. 또한 미세조류는 특정한 토양이나 수질을 가리지 않고 배양이 가능하다. 이에 관련 기업들은 이산화탄소 저감 및 공장폐수 정화 사업에 미세조류를 활용하려는 시도를 확대하고 있다.

[0008] 본 발명자들은 미세조류의 효과적인 배양 목적을 달성할 수 있는 투명필름으로 구성된 광생물 반응기를 개발하였다(대한민국 특허 제10-1148194). 하지만, 상기 광생물 반응기는 배양 가능한 미세조류의 양이 매우 적은 단점이 있었다.

[0009] 상기 반응기의 경우, 반응기의 앞/뒷면의 일부를 접합하여 내부에 주름구획을 제작하였기 때문에, 스케일업시, 접합이 분리되어 내부구획이 없어지고, 미세조류 배양액의 양이 증가하면서 내부 구조가 파괴되어가 하부에서 누수가 발생하는 치명적인 단점이 있었다.

[0010] 작은 규모의 미세조류 배양으로는 대규모 산업체 (석탄화력발전소, 열병합발전소 등)에서 배출되는 다량의 이산화탄소 배출량을 감당하지 못하는 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해서는 적게는 수 톤에서 많게는 수백 톤 규모의 미세조류 배양 시설이 요구된다. 세계적으로 널리 활용되는 옥외 대량 배양 장치의 경우, 철근 콘크리트 구조물을 제작하여 연못 형태의 개방형 배양 시설물을 구축하거나 강화유리, 아크릴을 활용한 폐쇄형 광생물 반응기를 활용하고 있다. 하지만 이러한 미세조류 배양 시스템의 경우 배양규모가 증가할수록 초기 투자비용 및 관리 유지비가 매우 높아지는 문제가 있다. 또한, 기존의 비닐 재질의 광생물 반응기는 구조의 한계로 인해 반응기 내 배양액 부피가 증가할수록 누수 및 파손의 위험성이 높아진다.

[0011] 이에 종래 광생물 반응기의 문제점을 해결하기 위한 방안이 절실히 요구되고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0013] 본 발명은 상술한 종래기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 일 측면은 롤투롤 와인더(Roll-to-roll winder)와 가압형 열접합기를 융합함으로써 대용량 광합성 미생물 배양이 가능한 광합성 생물 반응기를 연속적으로 제작할 수 있는 광생물 반응기 제조장치를 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0015] 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 투명 제1 필름을 연속적으로 풀어주는 제1 언와인더; 상기 제1 언와인더와 나란하게 배치되고, 상기 제1 필름과 마주보도록 투명 제2 필름을 연속적으로 풀어주는 제2 언와인더; 서로 마주보는 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이에 배치된 배플(baffle)에 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 가압 열접합하는 열접합기; 및 상기 열접합기를 통과한 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 동시에 연속적으로 감아주는 리와인더;를 포함할 수 있다.

[0016] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 각각 풀어진 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 겹쳐서 상기 열접합기로 안내하는 제1 가이드 롤러;를 더 포함할 수 있다.

[0017] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 상기 배플은, 상기 제1 필름과 열접합되는 제1 열접합 부재; 상기 제1 열접합 부재과 이격 배열되고, 상기 제2 필름과 열접합되는 제2 열접합 부재; 및 상기 제1 열접합 부재와 상기 제2 열접합 부재를 연결하고, 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이의 공간을 구획하는 구획부재;를 포함할 수 있다.

[0018] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 상기 배플은, 상기 구획부재를 관통하는 다수의 관통공을 구비할 수 있다.

[0019] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 상기 열접합기와 상기 리와인더 사이에 배치되는 제2 가이드 롤러; 및 상기 열접합기를 통과한 상기 제1 필름 및 상기 제2 필름을 사이에 두고, 상기 제2 가이드 롤러와 상하 방향으로 마주보도록 배치되어, 상기 제1 필름과 상기 제2 필름을 겹쳐서 상기 리와인더로 안내하는 제3 가이드 롤러;를 더 포함할 수 있다.

[0020] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 각각 풀어져 서로 마주보는 상기 제1 필름과 상기 제2 필름의 이동 거리를 측정하는 센서부;를 더 포함할 수 있다.

[0021] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 상기 센서부는, 서로 마주보면서 이동하는 상기 제1 필름 및 상기 제2 필름 중 어느 하나에 접촉하여 회전하는 회전체; 및 상기 회전체의 회전각도를 측정하여 상기 제1 필름과 상기 제2 필름의 이동 거리를 산출하는 연산회로;를 포함할 수 있다.

[0022] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 서로 마주보는 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이에 배플(baffle)을 삽입 배치하는 배플 삽입부;를 더 포함할 수 있다.

[0023] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 상기 배플 삽입부는, 상기 제1 언와인더에 의해 풀어진 상기 제1 필름의 하면에 접촉하여 회전하면서 상기 제1 필름을 상기 열접합기로 안내하는 제1 이격 롤러; 상기 제2 언와인더에 의해 풀어진 상기 제2 필름의 상면에 접촉하여 회전하면서, 상기 제1 필름으로부터 상기 제2 필름을 이격시켜 상기 열접합기로 안내하는 제2 이격 롤러; 및 서로 이격된 상기 제1 필름과 상기 제2 필름 사이에 상기 배플을 공급하는 배플 공급기;를 포함할 수 있다.

[0024] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 있어서, 상기 제1 필름, 및 상기 제2 필름은, 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 폴리에틸렌 테레프탈레이트와 무연신 폴리프로필렌 혼합 필름(PET+CPP), 폴리 아세탈(POM), 폴리카보네이트(PC), 폴리에스터 설폰(PES), 폴리에틸렌(PE), 폴리염화비닐(PVC), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET), 폴리프로필렌(PP), 폴리페닐렌옥사이드(PPO=PPE) 및 저밀도 폴리에틸렌과 폴리에틸렌 테레프탈레이트와 나일론8(Nylon 8)의 혼합 필름으로 구성된 군에서 선택될 수 있다.

[0026] 본 발명의 특징 및 이점들은 첨부도면에 의거한 다음의 상세한 설명으로 더욱 명백해질 것이다.

[0027] 이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

발명의 효과

[0029] 본 발명에 따르면, 스케일업이 용이한 광합성 생물 반응기를 연속적으로 제작할 수 있다. 또한, 광합성 생물 반응기의 크기를 조절할 수 있어서 반응기의 스케일을 쉽게 제어할 수 있다. 나아가, 롤투롤 와인더 도입을 통해 원단의 이동을 정밀하게 제어함으로써 광합성 생물 반응기 제작자의 기술에 대한 의존도를 감소시키고, 제작인력의 피로도를 줄여 광합성 생물 반응기의 품질을 향상킬 수 있는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로도시한 사시도이다.

도 2는 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로도시한 측면도이다.

도 3은 도 2에 도시된 배플의 사시도이다.

도 4는 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 의해 제조되는 광생물 반응기를 도시한 도면이다.

도 5는 본 발명의 제2 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로 도시한 측면도이다.

도 6은 본 발명의 제3 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로 도시한 측면도이다.

도 7a는 PBR의 물질 전달 속도를 정량화하기 위한 추적 테스트의 개략도이고, 도 7b는 그 테스트 결과이다.

도 8은 대조군 PBR(70 L PBR)과 신규 PBR(150 L PBR)의 CO_2 전달 효율을 비교한 결과이다.

도 9는 대조군 PBR(70 L PBR)과 신규 PBR(150 L PBR)의 면적당 바이오매스 생산성 및 PHB 생산성을 비교한 결과로서, 도 9a는 각 PBR의 면적당 바이오매스 생산량(biomass production per area), 도 9b는 각 PBR의 면적당 PHB 생산량(PHB production per area) 및 PHB 함량(%), 도 9c는 각 PBR의 최대 바이오매스 생산성(g L^{-1} d^{-1}), 도 9d는 각 PBR의 최대 바이오매스 생산성(g m^{-2} d^{-1})을 각각 나탄낸다.

도 10은 다중 PBR 어레이의 차광 효과를 분석한 결과로서, 도 10a는 태양 고도각이 43° (오전 10시)일 때에 햇빛을 조사한 경우, 도 10b는 태양 고도각이 78° (오후 2시)일 때에 햇빛을 조사한 경우, 도 10c는 태양 고도각이 22° (오후 6시)일 때에 햇빛을 조사한 경우의 차광 효과 분석 결과를 나타내고, 도 10d는 각 PBR에서의 *Synechococcus 2973-phaCAB* 세포 성장성을 나타낸다.

도 11은 2톤 규모의 PBR을 운영한 결과로서, 도 11a는 *Synechococcus 2973-phaCAB*를 함유한 2톤 규모 PBR의 파노라마 사진이고, 도 11b는 2톤 규모 PBR의 면적당 *Synechococcus 2973-phaCAB*의 바이오매스이며, 도 11c는 2톤 규모 PBR의 영역별 세포 성장 차이를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다. 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다. 또한, "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해 사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다. 이하, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0033] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.

[0035] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다. 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다. 또한, "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해 사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다. 이하, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0036] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.

[0038] 도 1은 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로도시한 사시도이고, 도 2는 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로도시한 측면도이다. 도 3은 도 2에 도시된 배플의 사시도이고, 도 4는 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치에 의해 제조되는 광생물 반응기를 도시한 도면이다.

[0039] 도 1 내지 도 2에 도시된 바와 같이, 본 발명의 제1 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 투명 제1 필름(1)을 연속적으로 풀어주는 제1 언와인더(10), 제1 언와인더(10)와 나란하게 배치되고, 제1 필름(1)과 마주보도록 투명 제2 필름(2)을 연속적으로 풀어주는 제2 언와인더(20), 서로 마주보는 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배치된 배플(baffle, 3)에 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 가압 열접합하는 열접합기(30), 및 열접합기(30)를 통과한 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 동시에 연속적으로 감아주는 리와인더(40)를 포함한다.

[0041] 본 발명은 롤투롤 와인더(Roll-to-roll winder) 및 가압 열접합 기기를 이용해 대용량 광합성 생물 반응기를 연속적으로 제조하는 장치에 관한 것으로, 제1 언와인더(10), 제2 언와인더(20), 열접합기(30), 및 리와인더(40)를 포함한다.

[0042] 제1 언와인더(10)는 투명 소재의 제1 필름(1)을 연속적으로 풀어준다. 이때, 풀어지는 제1 필름(1)은 열접합기(30)를 향해 이송되고, 열접합기(30)를 통과해서는 리와인더(40)에 감긴다. 제1 언와인더(10)는 광생물 반응기 제조 공정이 수행되는 제1 필름(1)의 이송 방향의 후단에 배치된다. 제1 언와인더(10)는 제1 필름(1)이 권취된 필름롤에 삽입되어 필름롤을 거치하고, 회전하면서 제1 필름(1)을 풀면서 공급하는 제1 공급 롤러로 구현된다. 여기서, 제1 공급 롤러는 별도의 회전 구동력을 제공하는 모터 등과 같은 제1 롤러 구동수단(도시되지 않음)에 연결되거나, 또는 제1 필름(1)을 감는 리와인더(40)의 회전 구동력에 의해 회전될 수 있다. 제1 롤러 구동수단에 연결된 경우에 제1 공급 롤러의 회전방향이 전환될 수 있어서, 제1 언와인더(10)에 의해 제1 필름(1)이 풀릴 뿐만 아니라, 감길 수도 있다.

[0044] 제2 언와인더(20)는 투명 소재의 제2 필름(2)을 연속적으로 풀어준다. 이때, 풀어지는 제2 필름(2)은 열접합기(30)를 향해 이송되고, 열접합기(30)를 통과해서는 제1 필름(1)과 겹쳐지면서 리와인더(40)에 감긴다. 제2 언와인더(20)는 광생물 반응기 제조 공정이 수행되는 제2 필름(2)의 이송 방향의 후단에, 제1 언와인더(10)와 나란하게 배치된다. 이때, 제1 언와인더(10)와 열접합기(30) 사이에 제2 언와인더(20)아 배열되어, 제1 필름(1)의 하방에 제2 필름(2)이 배치되어, 제1 필름(1)과 제2 필름(2)은 서로 마주보면서 열접합기(30)로 이송된다. 제2 언와인더(20)는 제2 필름(2)이 권취된 필름롤에 삽입되어 그 필름롤을 거치하고, 회전하면서 제2 필름(2)을 풀면서 공급하는 제2 공급 롤러로 구현되고, 제2 공급 롤러는 별도의 회전 구동력을 제공하는 모터 등과 같은 제2 롤러 구동수단(도시되지 않음)에 연결되거나, 또는 제2 필름(2)을 감는 리와인더(40)의 회전 구동력에 의해 회전될 수 있다. 제2 롤러 구동수단에 연결된 경우에 제2 공급 롤러의 회전방향 전환에 의해서, 제2 필름(2)은 제2 언와인더(20)에 의해 풀리거나 감길 수도 있다.

[0045] 한편, 제1 필름(1) 및 제2 필름(2)은 광생물 반응기의 배양용기를 이루는 소재로서, 광합성 생물의 성장이 용이하도록 투명하고, 광 투과율이 우수한 것이라면 특별히 제한되지 않고 이용될 수 있으며, 일례로 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 폴리에틸렌 테레프탈레이트와 무연신 폴리프로필렌 혼합 필름(PET+CPP), 폴리 아세탈(POM), 폴리카보네이트(PC), 폴리에스터 설폰(PES), 폴리에틸렌(PE), 폴리염화비닐(PVC), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET),

폴리프로필렌(PP), 폴리페닐렌옥사이드(PPO=PPE) 및 저밀도 폴리에틸렌과 폴리에틸렌 테레프탈레이트와 나일론 8(Nylon 8)의 혼합 필름으로 구성된 군에서 선택될 수 있다. 이러한 투명 필름은 광생물 반응기의 배양용기 소재로 널리 이용되는 유리, 아크릴 등에 비하여 동등한 광 투과율을 가지면서도 가볍고 기계적 강도가 우수하다. 뿐만 아니라, 가압 열접합을 통해 간단하게 대용량 배양용기를 제조할 수 있는 장점이 있다.

[0047] 열접합기(30)는 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배플(baffle, 3)을 가압 열접합하는 기기이다. 이러한 열접합기(30)는 각각 외부 전원에 의해 가열되는 히팅 선반과 히팅 바(heating bar)로 구현되고, 상하 방향으로 움직일 수 있는 히팅 바가 히팅 선반을 향해 하방으로 움직이면서, 히팅 바와 히팅 선반 사이에 배치된 필름을 압착하여 열접합할 수 있다. 다만, 열접합기(30)가 반드시 히팅 선반과 히팅 바에 의해 구현되어야 하는 것은 아니고, 필름을 가압 열접합할 수 있는 기기이기만 하면 특별한 제한은 없다.

[0048] 열접합기(30)에 의한 열접합 공정 시, 제1 언와인더(10) 및 제2 언와인더(20)에 의해 각각 풀리면서 이송되는 제1 필름(1)과 제2 필름(2)은 서로 마주보는데, 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배플(3)이 배치된다. 여기서, 배플(3)을 향해, 배플(3)의 위치에 대응되는 제1 필름(1)과 제2 필름(2)의 영역을 열접합기(30)가 가압한다. 이에 따라, 배플(3)의 일측면과 제1 필름(1)이 열접합되고, 배플(3)의 타측면은 제2 필름(2)과 열접합된다.

[0049] 배플(3)은 광생물 반응기의 배양용기의 내부에 배치되어 그 내부 공간을 구획하는 부재이다(도 3 내지 도 4 참조). 배플(3)은 배양용기의 내부를 부분적으로 구획하여 배양 용량을 늘리는 용도로 사용될 수 있다. 일례로, 배플(3)은 제1 열접합 부재(3a), 제2 열접합 부재(3b), 및 구획부재(3c)를 포함할 수 있다. 제1 열접합 부재(3a)는 제1 필름(1)과 열접합되는 부재이다. 제2 열접합 부재(3b)는 제2 열접합 부재(3b)와 이격 배열되어 제2 필름(2)과 열접합되는 부재이다. 구획부재(3c)는 제1 열접합 부재(3a)와 제2 열접합 부재(3b)를 연결하고, 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이의 공간을 구획한다. 한편, 배플(3)은 구획부재(3c)를 두께 방향으로 관통하는 다수의 관통공(3d)을 구비할 수 있다. 이러한 관통공(3d)은 배플(3)에 의해 구획된 배양용기의 공간 사이에 채널을 형성한다. 이러한 채널을 통해 배양용기 내 배양액 성분 및 기체가 구획된 공간들 사이로 이동할 수 있다. 다만, 배플(3)이 반드시 상기와 같이 형성되어야 하는 것은 아니고, 양측단이 제1 필름(1)과 제2 필름(2)에 열접착되어, 배양용기의 내구 공간을 구획할 수 있기만 하면 특별한 제한은 없다.

[0050] 배양용기의 내부 공간은 배양용기의 정면과 후면의 안쪽면 소정 부분이 배플(3)에 의해 구획을 형성함으로써 부분적으로 구획된다. 내부공간이 부분적으로 구획되었다는 것은 배양용기 내부 공간이 세로 일자형으로 구획되되, 배양용기 상부 끝에서 밑바닥까지 구획된 것이 아니라, 배양용기 상부와 밑바닥으로부터 일정 간격만큼 이격된 후, 구획된 것을 의미한다. 따라서, 배양용기 내의 배양액은 일정 간격만큼 이격된 통로를 통하여 이동이 가능하다. 여기서, 배양용기의 하부에 스파저가 배치되어 배양용기 내부로 가스를 분산시킬 수 있다.

[0051] 한편, 배플(3)은 다수 개가 삽입될 수 있다. 이를 위해서, 하나의 배플(3) 삽입 및 열접합 후에 제1 필름(1) 및 제2 필름(2)을 이동시키고, 다른 배플(3)을 삽입하고 열접합하는 방식을 반복할 수 있다. 여기서, 배플(3)과 다음 배플(3)간의 거리는 반응기의 용량 등을 따라 적절하게 선택될 수 있다.

[0053] 리와인더(40)는 열접합기(30)를 통과한 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 동시에 연속적으로 감아준다. 리와인더(40)는 광생물 반응기 제조 공정이 수행되는 제1 필름(1) 내지 제2 필름(2)의 이송 방향의 전단에 배치된다. 리와인더(40)는 회전하면서 제1 필름(1) 및 제2 필름(2)을 감는 권취 롤러로 구현된다. 여기서, 권취 롤러는 별도의 회전 구동력을 제공하는 모터 등과 같은 권취 롤러 구동수단(도시되지 않음)에 연결되어 회전될 수 있다.

[0054] 리와인더(40)는 제1 언와인더(10) 및 제2 언와인더(20)와 연동되므로, 이송되는 제1 필름(1) 및 제2 필름(2)에 적절한 장력을 유지시킬 수 있다.

[0055] 한편, 제1 필름(1)과 제2 필름(2)은 배플(3)에만 열접합되므로, 제1 필름(1)과 제2 필름(2)의 테두리 부분을 겹쳐서 접합시킴으로써, 광생물 반응기, 즉 그 배양용기를 제조할 수 있다. 이때, 그 테두리 부분도 가압 열접합될 수 있다. 이렇게 제조된 광생물 반응기에서 광합성 미생물이 배양될 수 있는데, 그 배양 대상 미생물의 일례로 미세조류(Microalgae), 남세균(Cyanobacteria), 광합성 박테리아(Photosynthetic bacteria) 등을 들 수 있다.

[0057] 도 5는 본 발명의 제2 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로 도시한 측면도이다.

[0058] 도 5를 참고로, 본 발명의 제2 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 제1 가이드 롤러(50)를 더 포함할 수 있다. 제1 가이드 롤러(50)는 제1 언와인더(10) 및 제2 언와인더(20)로부터 각각 풀려진 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 함께 받쳐서 회전한다. 따라서 제1 필름(1)과 제2 필름(2)은 제1 가이드 롤러(50)를 통과하면서 서로 겹쳐져 열접합기(30)로 안내된다. 여기서, 제1 가이드 롤러(50)는 별도의 구동 수단(도시되지 않음)에 의해 회전력을 제공받거나, 또는 제2 필름(2)에 접촉하여 제2 필름(2)의 이송에 따른 마찰력에 의해 회전할 수 있다.

[0060] 또한, 본 발명의 제2 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 제2 가이드 롤러(60), 및 제3 가이드 롤러(70)를 더 포함할 수 있다. 제2 가이드 롤러(60), 및 제3 가이드 롤러(70)는 열접합기(30)와 리와인더(40) 사이에, 서로 상하 방향으로 마주보도록 배열된다. 여기서, 제2 가이드 롤러(60)와 제3 가이드 롤러(70) 사이에, 열접합기(30)를 통과한 제1 필름(1) 및 제2 필름(2)이 배치된다. 제2 가이드 롤러(60)와 제3 가이드 롤러(70)는 그 사이의 제1 필름(1) 및 제2 필름(2)을 가압하면서 회전한다. 따라서, 제2 가이드 롤러(60)와 제3 가이드 롤러(70)에 의해서 제1 필름(1)과 제2 필름(2)이 서로 겹쳐지면서 리와인더(40)로 공급되고, 리와인더(40)는 용이하게 제1 필름(1)과 제2 필름(2)을 동시에 감을 수 있다.

[0062] 또한, 본 발명의 제2 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 센서부(80)를 더 포함할 수 있다. 센서부(80)는 제1 언와인더(10) 및 제2 언와인더(20)로부터 각각 풀려져 이송되는 제1 필름(1)과 제2 필름(2)의 이동 거리를 측정한다. 이렇게 측정된 이동 거리에 기반하여, 별도의 제어부(도시되지 않음)를 통해 제1 필름(1)과 제2 필름(2)이 기설정된 거리만큼 이동되도록 제어할 수 있다. 여기서, 기설정된 거리는 배플(3)과 다음 배플(3) 간의 간격일 수 있다. 따라서, 반복되는 배플(3) 삽입 및 열접합 공정이 자동화될 수 있다.

[0063] 한편, 센서부(80)는 회전체(81), 및 연산회로(82)로 구현될 수 있다. 회전체(81)는 서로 마주보면서 이동하는 제1 필름(1) 및 제2 필름(2) 중 어느 하나에 접촉하여 회전하는 부재이다. 회전체(81)는 별도의 구동 수단에 의해 연결되는 것은 아니고, 제1 필름(1) 또는 제2 필름(2)의 이동할 때에 그 필름과 접촉되어 마찰력에 의해 회전된다. 연산회로(82)는 회전체(81)의 회전각도를 측정하여 제1 필름(1)과 제2 필름(2)의 이동 거리를 산출하는 회로이다. 일례로, 회전체(81)가 회전할 때에 유도되는 전자기, 또는 그 회전체(81)를 투과하거나 반사되는 광 등을 이용하여 연산회로(82)는 회전체(81)의 회전각도를 측정하고, 이를 기반으로 제1 필름(1)과 제2 필름(2)의 이동 거리를 산출할 수 있다.

[0065] 도 6은 본 발명의 제3 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치를 개략적으로 도시한 측면도이다. 도 6에 도시된 바와 같이, 본 발명의 제3 실시예에 따른 광생물 반응기 제조장치는 배플 삽입부(90)를 더 포함할 수 있다.

[0066] 배플 삽입부(90)는 서로 마주보는 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배플(3)을 삽입 배치한다. 이러한 배플 삽입부(90)는 제1 이격 롤러(91), 제2 이격 롤러(92), 및 배플 공급기(93)를 포함할 수 있다. 제1 이격 롤러(91)는 제1 언와인더(10)에 의해 풀어진 제1 필름(1)의 하면에 접촉하여 회전하면서 제1 필름(1)을 열접합기(30)로 안내하는 롤러이다. 제2 이격 롤러(92)는 제2 언와인더(20)에 의해 풀어진 제2 필름(2)의 상면에 접촉하여 회전하면서 열접합기(30)로 제2 필름(2)을 안내하는 롤러이다. 제2 이격 롤러(92)는 제1 필름(1)으로부터 제2 필름(2)을 이격시킨다. 따라서, 제1 이격 롤러(91)와 제2 이격 롤러(92)에 의해, 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배플(3)이 삽입될 수 있는 공간이 형성된다. 배플 공급기(93)는 서로 이격된 제1 필름(1)과 제2 필름(2) 사이에 배플(3)을 공급한다. 배플 공급기(93)는 피스톤이 배플(3)을 밀어내는 실린더, 배플(3)을 수송하는 컨베이어 등으로 구현될 수 있다.

[0068] 이하에서는 실험예를 통해 본 발명을 보다 상세하게 설명한다.

[0070] 1. 실험 방법

[0071] 1.1. 광생물 반응기(PBR) 제조

[0072] 도 1 내지 도 4에 도시된 바와 같이, 확장이 쉬운 PBR 제작을 자동화하기 위해 맞춤형 롤투롤 와인딩 기기 병합 히트 실러 시스템을 개발하고, 그 시스템에 기기반한 광생물 반응기 제조장치를 사용하여 광생물 반응기(PBR)을 제조하였다.

[0073] 구체적으로, 2개의 언와인더 각각에 폴리머 필름을 거치하고, 2장의 필름을 스테이플러를 활용해 고정시킨 상태로 열접합기를 통과시켰다. 열접합기를 통과한 2장의 필름을 리와인더 롤에 테이프로 고정하여 열접합기를 지나온 필름이 리와인더에 의해 감길 수 있도록 하였다. 열접착기의 열선이 위치한 부분에 2장의 필름 사이에 배플을 삽입한 뒤 가압 열접합을 실시하였다(120 ℃, 3초 가열, 20초 냉각). 열접합이 완료된 이후 롤투롤 와인더를 이용해 광생물 반응기를 리와인더에서 언와인더 방향으로 이동시키고, 다시 필름 사이에 다른 배플을 삽입하고 열접합하는 공정을 반복하여 광생물 반응기를 제작하였다.

[0074] 70L PBR은 폴리머 필름(폴리에틸렌 테레프탈레이트, 폴리옥텐 및 나일론-6), 스톤 스파저 및 가스 통과 구멍으로 구성했다. 확장이 용이한 150L 및 2000L PBR은 폴리머 필름, 선형 고무 스파저 및 배플로 구성되었다. 배양 배지 혼합을 용이하게 하기 위해 일정한 간격으로 배플에 채널을 천공했다. 선형 고무 스파저는 PBR 하단에 위치하여 CO_2가 포함된 배가스를 공급한다.

[0076] 1.2. 세포 배양

[0077] 1.2.1. *Synechococcus* 2973-*phaCAB* 실험실 배양

[0078] *Synechococcus elongatus UTEX 2973-phaCAB* 돌연변이(이하, '*Synechococcus 2973-phaCAB*' 라고 함)를 50 μg mL^{-1}의 스펙티노마이신과 함께 BG-11 배지(10 mM HEPES-NaOH, pH 8.0)에서 성장시켰다. *Synechococcus 2973-phaCAB* 종자 배양물은 인큐베이터에서 교반(130 rpm)하면서 삼각 플라스크에서 5%(v/v) CO_2가 공급되는 연속 빛(200 μmol 광자 m^{-2} s^{-1}) 하에서 배양되었다. *Synechococcus 2973-phaCAB*에 대해서는 온도를 최적값(36℃)으로 유지하였다. 배양 중 세포 농도를 모니터링하기 위해 UV 분광 광도계(UV-1800, Shimadzu, Japan)를 사용하여 광학 밀도(OD)를 730 nm에서 측정했다. *Synechococcus 2973-phaCAB* 세포를 초기 OD 0.1로 접종했다.

[0080] 1.2.2. *Synechococcus* 2973-*phaCAB* 옥외 배양

[0081] 옥외 배양은 70L PBR과 확장이 쉬운 PBR(150L 및 2,000L)을 사용했다. 중탄산염 완충 시스템은 10M KOH와 연도 가스(0.1vvm; 3 ~ 6% CO_2, 11.99 ± 0.73% O_2, 21.72 ± 3.72ppm NOx, 1.43 ± 4.03ppm CO, 수증기 및 먼지)의 폭기에 의해 형성되었다. PBR에 물이 채웠고, 최종 pH는 7.8 ~ 8.0이었다. PBR에 질소 공급 매체인 Smartro NPK(ECOTECH Co.)를 추가했다. 옥외 배양시 초기 OD730은 0.02였으며, *Synechococcus 2973-phaCAB* 종자를 PBR에 접종하였다. 유일한 광원인 자연광은 여름철 낮 동안 제공되었으며, 옥외 배양 동안 광도 변화는 3.8 ~ 1024.1 μmol 광자 m^{-2} s^{-1}이었다. 또한, 유리 온실에서는 온도를 34 ~ 42℃로 유지하였다. 마지막으로, 0.2의 OD730에서 유도를 위해 0.5 mM 이소프로필-d-티오갈락토피라노시드(IPTG)를 첨가했다.

[0083] 1.2.3. 돌연변이 DNA 분석

[0084] *Synechococcus 2973-phaCAB*에 삽입된 PHB 유전자 카세트를 확인하기 위해 중합효소연쇄반응(PCR)을 활용하여 DNA 분석을 수행했다. PCR 분석을 위해 PBR의 세포 현탁액을 원심분리(6,000rpm, 6분)하여 세포 펠릿을 얻었다. 5% Chelex-100 킬레이트 수지(Bio-Rad)로 세포를 용해하여 세포 펠릿에서 게놈 DNA를 추출했다. *Synechococcus 2973-phaCAB*의 NS1 부위는 NS1 프라이머 세트를 사용하여 확인했다. *Synechococcus 2973-phaCAB*의 NS1 길이를 확인하기 위해 아가로스 겔 전기영동(120V, 40분)을 수행했다.

[0086] 1.3. 바이오매스 및 PHB 정량화

[0087] 1.3.1. 건조 중량(dry weight) 정량화

[0088] 시아노박테리아 세포(cyanobacterial cells)의 건조 세포 중량은 중량 측정 방법을 사용하여 측정하였다.

Whatman의 기공 크기 0.45㎛ 마이크로필터 종이를 탈이온수(DI)로 헹구고 물이 완전히 제거될 때까지 밤새 오븐에서 건조했다. 헹궈진 건조 종이의 초기 중량을 측정하였다. DI water로 건조된 종이에 남아있는 염분을 제거한 후 세포 현탁액 3 mL를 로딩하였다. 세포가 로딩된 종이를 오븐에서 밤새 건조시킨 후 최종 중량을 측정했다. 건조 세포 중량은 마이크로필터 종이의 초기 중량과 최종 중량 간의 차이를 세포 로딩 부피로 나누어 결정했다.

[0090] 1.3.2. PHB 정량화

[0091] PHB 정량에는 DB-23 모세관 컬럼(60m × 250㎛ × 0.15㎛)이 장착된 가스 크로마토그래피-질량 분석기(GCMS)(Agilent 6890/5975)를 사용했다. 산성 메탄올 분해법을 이용하여 GC 컬럼에서 PHB를 안정한 단량체인 휘발성 히드록시카르복실산 메틸에스테르(hydroxycarboxylic acid methyl ester)로 전환시키기 위해 다음과 같은 전처리를 수행하였다. 세포 현탁액(5 mL)을 15 mL 유리관에 넣고 3000 rpm에서 10분간 원심분리했다. 상청액을 제거한 후, 세포 펠렛을 15%(v/v) H_2SO_4가 보충된 1 mL의 클로로포름과 1 mL의 메탄올에 재현탁시키고 100 ℃에서 2시간 30분 동안 배양했다. 유리관을 냉각시킨 후, DI water 1mL와 0.2%(v/v) 메틸 벤조에이트가 보충된 클로로포름 1mL를 첨가했다. 반응 혼합물을 충분히 교반하여 클로로포름층에 포함된 유기층을 분리하고, 하단의 유기층을 PHB 분석에 사용하였다. 검량을 위해 메틸 벤조에이트를 내부 표준품으로 사용하고, 폴리[(R)-3-하이드록시부티르산](Sigma-Aldrich, USA)을 참조 표준품으로 사용했다.

[0093] 1.4. 추적 테스트

[0094] 확산에 의한 PBR의 물질 전달 속도를 정량화하기 위해 추적 테스트(tracer test)를 수행했다. 1M KOH가 추적자(tracer)로 사용되었다. 추적자 주입 후, 각 컬럼에 설치된 샘플링 라인에서 용액을 수집하여 추적자 확산에 따른 pH 변화를 측정하였다. PBR에 포함된 용액의 샘플링은 10분마다 수행되었다.

[0096] 1.5. 기포 크기 측정

[0097] 폭기에 의해 형성된 기포의 직경을 고속촬영으로 측정하였다. 카메라(Canon 700D)의 셔터 속도는 1/4000초로 설정되었으며, 빠른 셔터 속도로 인해 부족한 광량을 보완하기 위해 PBR 뒤에 LED를 설치했다. 평균 직경은 촬영된 기포 직경과 눈금 막대를 비교하여 통계적 계산을 통해 결정하였다.

[0099] 2. 평가

[0100] 2.1. 롤투롤 와인딩 기기를 이용한 PBR 스케일 업

[0101] 폴리머 필름으로 제작한 수직 걸이형 PBR은 유리나 아크릴 튜브로 제작한 PBR에 비해 가격이 저렴하지만 자동화된 대량 생산이 어려워 대규모 공정 구축에 적용이 제한적이었다. 반자동화를 통해 수직 걸이형 PBR의 대량 생산을 용이하게 하기 위해 롤투롤 와인딩 기반 PBR 제조 시스템(R2R-PBR 제조 시스템)를 개발하였다(도 1 참조). 두 개의 폴리머 필름 사이에 일정한 간격으로 열 밀봉 배플을 사용하는 간단하고 반복 가능한 제조 기술을 도입하여 PBR 제조 자동화를 실현했다. PBR 제조 공정에는 롤투롤 와인딩 기기가 도입되어 일정한 간격으로 PBR의 이동을 자동화했다. 또한, 배플의 열융착 횟수에 비례하여 PBR의 작업량이 증가하므로 PBR의 규모 확대가 단순화되었다. 기계화된 PBR 제조 시스템을 도입하여 PBR 제조에 필요한 인력을 줄이고 제작된 PBR의 품질을 향상시켰다. 또한, 인건비 절감을 통해 광합성 PHB 비용을 절감할 수 있다.

[0102] R2R-PBR 제조 시스템을 이용하여 제조된 PBR에 배양액을 채우면 열 밀봉된 배플에 의해 PBR의 두께가 균일하게 유지된다(도 4 참조). 배플에는 PBR 내 확산에 의한 물질 전달 속도를 향상시키기 위해 여러 채널이 천공되었다. PBR 하단에 길이 방향으로 설치된 가스 스파저(gas sparger)를 이용하여 CO_2가 배양 배지 안으로 효과적으로 전달되었다.

[0104] 2.2. 최대 혼합 효율 달성을 위한 배플의 채널 직경 및 개수

[0105] PBR의 높은 혼합 효율은 배양 배지의 영양분 구배를 제거하고 미세조류 세포가 햇빛에 균일하게 노출되도록 보장한다. PBR의 혼합 효율을 극대화하여 최적의 미세조류 세포 성장 환경을 조성하기 위해 배플에 형성된 채널의 직경과 개수에 따른 추적자 테스트를 이용하여 물질 전달률을 조사하였다. 도 7a는 PBR의 물질 전달 속도를 정량화하기 위한 추적 테스트의 개략도이고, 도 7b는 그 테스트 결과이다.

[0106] 도 7a를 참고로, 확산 속도는 1m 길이의 PBR을 8개 구역(Z1 ~ Z8)으로 나누고 추적자의 농도를 측정하였다. 버블 컬럼형 PBR에서 배양액의 흐름은 스파저에서 발생하는 기포에 의해 발생하였다. 기포의 상향 이동에 의해 흐름이 유도되기 때문에 배양액이 PBR의 세로 방향으로 이동하기 어렵다. PBR에 함유된 영양분은 배지의 흐름보다는 농도의 차이로 인해 확산되기 때문에, 확산이 원활하게 이루어지도록 배플에 형성되는 채널의 직경과 개수를 최적화하여 확산율을 향상시키는 것이 중요하다.

[0107] 도 7b를 참고로, 직경 6㎜의 채널 20개가 배플에 천공되었을 때 KOH는 10분 이내에 PBR의 구역 4로 확산되었다. 초기 확산 속도는 빨랐지만 추적자 주입 후 40분 후에도 zone 1과 zone 8의 pH 차이는 1.04로 여전히 수산화물 이온 농도가 10배 이상 차이 나는 것으로 나타났다. 채널 직경(12㎜)을 두 배로 늘리고 채널 수를 10개로 줄여 전체 채널 면적을 두 배로 늘렸을 때, Zone 8의 pH 변화율이 더욱 향상되었다. 이 경우, 추적자 주입 후 40분 시점에서 zone 1과 zone 8의 추적자 농도 차이가 약 5.8배인 것을 확인하였다. 그러나 직경 12㎜의 채널 수를 20개로 늘리면 모든 영역의 pH가 추적자 주입 후 30분에 평형에 도달했다.

[0108] 또한, 배플에 형성된 채널의 평균 확산도(D_avg)는 대류-확산 수송 방정식을 사용하여 계산되었다.

[0109] $$\partial C/\partial t = D(\partial^2 C/\partial x^2), \qquad (1)$$

[0110] 여기서 C는 추적자로 사용된 수산화물 이온([OH-])의 농도를 나타내고, 수산화물 이온의 농도는 pH로부터 계산되었다. 대류-확산 수송 방정식은 다음과 같은 차이 방정식으로 변환되어 D_avg의 수치 계산에 사용되었다.

[0111] $$D_i = \left(\frac{C_{i-1,t+1} - 2C_{i,t+1} + C_{i+1,t+1}}{\Delta x^2}\right) \Big/ \left(\frac{C_{i,t+1} - C_{i,t}}{\Delta t}\right), \qquad (2)$$

[0112] 여기서 C_(i,t)는 시간 t에서 구역 i의 수산화 이온 농도이다.

[0113] 각 경우에 대한 D_avg 값은 각각 0.0458, 0.1362 및 0.1716 $cm^2\ s^{-1}$였으며 이는 각 PBR이 추적자 테스트 결과와 일치하는 물질 전달 특성을 가지고 있음을 입증한다. Case 2의 D_avg는 Case 3의 80% 수준이었으나, Case 2의 실제 확산속도는 Case 3에 비해 현저히 느렸다. Case 2의 경우에 비해 zone 1에서 zone 4로의 확산속도가 현저히 향상되었다. Case 1의 경우, zone 6에서 zone 8까지의 추적자 확산 속도는 여전히 낮았다. 따라서 Case 2의 D_avg가 Case 3의 D_avg의 80%임에도 불구하고 추적자 농도의 전체 평형에 늦게 도달했다.

[0115] 2.3. 기체-액체 물질 전달 특성(Gas-liquid mass transfer characteristics)

[0116] CO_2가 포함된 배가스를 반응기에 불어넣는 데 필요한 전력이 기포탑형 PBR의 주요 구동에너지이다. 연도가스 폭기에 필요한 에너지의 효율적인 사용은 시아노박테리아 유래 PHB 생산 공정의 경제적 타당성에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 기포 직경(d_b), 가스 보유율(ε_g), 계면적(a)은 PBR에서 광합성 미생물의 성장에 영향을 미치는 중요한 매개변수이다. 기체-액체 물질 전달 매개변수와 해당 유속은 아래 [표 1]과 같다.

[0117] [표 1]

Flow rate [vvm]	$d_{b,mean}$ [mm]	ε_G	a [$m^3\ m^{-2}$]	P_G/V_l [$W\ m^{-3}$]
0.05	1.87 ± 0.43	0.0188	55.14	19.29
0.10	2.00 ± 0.48	0.0309	85.42	39.02
0.20	2.31 ± 0.55	0.0368	89.29	58.86

[0118]

[0120] 2.3.1. 기포 직경 (d_b)

[0121] 배양 배지에서 CO_2 가스 전달은 기액 계면에 해당하는 기포 표면에서 발생한다. 따라서 d_b가 감소함에 따라 CO_2 전달이 효과적으로 발생할 수 있다. 그러나 d_b는 체적유량(vvm)에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 유량이 4배 증가하면 d_b는 23% 증가하여 기포 단위 부피당 표면적이 20% 감소했다. 유량에 따른 d_b의 증가는 이전에 다공성 금속 스파저에서 관찰되었다.

[0123] 2.3.2. 가스 보유력 (ε_g)

[0124] 가스 정체는 액체-가스 반응기에서 가스상이 차지하는 부피 분율을 나타내는 요소이며 PBR의 가장 중요한 유체역학적 특성 중 하나이다. 가스 보유량은 가스상이 차지하는 부피 비율을 나타낸다. 따라서 이는 PBR에서 배가스의 체류 시간을 나타낸다. 가스 보유력은 표면 속도에 비례하기 때문에 가스 유속이 증가하면 가스 보유력도 증가한다. 본 연구에서 개발된 PBR은 기존에 보고된 수직 걸이형 PBR에 비해 저유량 조건에서도 가스 보유력이 2배 이상 높은 것으로 확인되었다. 이전에 보고된 PBR에 설치된 원통형 스톤 스파저(D = 10mm, H = 20mm)는 기포를 형성할 기공이 부족하여 더 높은 가스 유량(0.3 vvm)에서도 가스 보유력이 낮았다. 그러나 PBR의 길이방향에 충분한 기공을 갖는 선형 다공성 스파저(D = 30 mm, H = 1000 mm)를 설치함으로써 가스 보유성을 효과적으로 향상시켰다.

[0126] 2.3.3. 계면적 (a)

[0127] 계면적은 액체-가스 작업에서 액체와 기체 사이의 총 접촉 면적을 나타낸다. 배양 배지와 폭기된 배가스 사이의 접촉 면적이 비례하기 때문에 계면적의 증가는 시아노박테리아에 대한 CO_2 전달에 유리하다. 계면적은 Sauter 평균 직경(d_{bs}, 식(3))과 가스 보유량(식(4))으로부터 추정할 수 있다.

$$d_{bs} = \sum n_i d_b^3 / \sum n_i d_b^2 \qquad (3)$$

[0128] $$a = 6\varepsilon_g / d_{bs}(1-\varepsilon_g) \qquad (4)$$

[0129] 가스 유량을 0.05 vvm에서 0.10 vvm으로 증가시키면 계면적이 55% 향상된다. 대조적으로, 가스 유량이 0.10 vvm에서 두 배로 증가했을 때, 계면적의 증가는 약 5%에 불과했다. 이전에는 가스 유량이 증가함에 따라 가스 보유 개선 효율이 감소하는 것으로 보고되었다. 이 현상은 옴의 법칙과 유사하게 설명될 수 있다. 다공성 스파저를 이용한 폭기 공정에서는 배기가스가 스파저의 기공을 통과할 때 압력 강하(저항)가 발생한다. 기공을 통해 증가된 유속(전류)으로 연도 가스를 효율적으로 전달하려면 더 높은 가압(전압)이 필요하다. 그러나 링 블로워(ring blower)에 의해 이송되는 배가스의 압력은 더 높은 유속(0.20 vvm)으로 기공을 효과적으로 통과하기에는 불충분했다.

[0131] 2.3.4. 에너지 효율

[0132] 연도 가스 폭기에 필요한 에너지(식(5))와 계면적을 비교함으로써 에너지 효율적인 PBR 작동을 위한 최적의 유량을 결정할 수 있다.

[0133] $$P_G/Q_L = \rho_L g U_G, (5)$$

[0134] 여기서 ρ_L, g 및 U_G는 각각 물 밀도, 중력 가속도 및 표면 가스 속도를 나타낸다. 가스 유량에 비례하여 전력 소비가 증가한다. 그러나 가스유량 0.20 vvm에서는 폭기에 소비되는 에너지가 계면적 개선에 효율적으로 반영되지 않았다. 따라서, 계면적과 소비전력을 고려하면 가스유량 0.10 vvm이 가장 효율적인 운전모드로 판단된다.

[0136] 2.3.5. PBR 사이의 CO_2 전달 효율 비교

[0137] 대조군 수직걸이형 PBR(직렬 컬럼 PBR, 70 L PBR)과 새로 개발된 PBR(150 L PBR)의 CO_2 전달 효율을 비교하였다. PBR의 10 mM KOH 용액은 배가스에 포함된 CO_2와 반응하여 탄산이온이 생성되고 용액의 pH가 감소한다. 연도 가스에서 용액으로의 CO_2 이동 속도가 빠를수록 용액의 pH가 더 빨리 평형에 도달한다. 70L PBR과 150L PBR에 연소가스를 불어 넣은 후 양쪽 끝 컬럼의 매체 pH를 모니터링했다. pH 추적 실험은 두 번 수행되었고 그 결과는 도 8과 같다. 도 8은 대조군 PBR(70 L PBR)과 신규 PBR(150 L PBR)의 CO_2 전달 효율을 비교한 결과이다.

[0138] 70L PBR에 비해 150L PBR의 pH 변화 속도가 더 빠른 것을 확인하였다. 150L PBR에 연도 가스를 불어넣은 후 약 100분 후에 용액의 pH는 8에 도달했는데, 이는 *Synechococcus 2973-phaCAB*에 대한 최적 pH이다. 그러나 70L PBR에서는 250분 후에 pH가 목표 평형값인 8에 도달했다. 동일한 가스 유량(0.10vvm)으로 배가스를 주입했음에도 불구하고 150L PBR은 70L PBR에 비해 2.5배 빠르게 평형에 도달했다. 기존 반응기와 비교하여 150L PBR의 CO_2 전달 효율은 pH 평형 도달 속도에 비례하여 향상되었음을 알 수 있다.

[0140] 2.4. PBR 사이의 PHB 생산 성능 비교

[0141] 2.4.1 바이오매스 생산성

[0142] 동일한 일광조건에서 70L PBR과 150L PBR의 바이오매스 생산성을 비교하였다. 70L PBR은 직경 12cm의 기둥 6개로 구성됐고, 150L PBR은 두께 14cm의 패널 형태로 구성됐다. 도 9는 대조군 PBR(70 L PBR)과 신규 PBR(150 L PBR)의 면적당 바이오매스 생산성 및 PHB 생산성을 비교한 결과로서, 도 9a는 각 PBR의 면적당 바이오매스 생산량(biomass production per area), 도 9b는 각 PBR의 면적당 PHB 생산량(PHB production per area) 및 PHB 함량, 도 9c는 각 PBR의 최대 바이오매스 생산성($g\ L^{-1}\ d^{-1}$), 도 9d는 각 PBR의 최대 바이오매스 생산성($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)을 각각 나타낸다.

[0143] PBR의 배양 배지를 통과하는 햇빛의 강도는 Beer-Lambert 법칙에 따라 기하급수적으로 감소되었다. 따라서 150L PBR에 비해 70L PBR에 함유된 남세균에서 광합성이 더 활발하게 일어난다. 70L PBR의 최대 세포 성장 속도는 빛 이용률의 차이로 인해 150L PBR보다 37% 더 높았습니다(도 9c 참조). 150L PBR의 단위 면적당 배양액 부피가 70L PBR의 2배였기 때문에 150L PBR의 최대 면적 생산성은 45% 더 높았다(도 9d 참조). 옥외 배양 시 단위 면적당 바이오매스 생산량은 150L PBR이 70L PBR보다 높았다. 결과적으로, 150L PBR은 배양이 완료되었을 때 70L PBR보다 PHB를 함유한 시아노박테리아 바이오매스를 21% 더 많이 생산했다(도 9a 참조). 면적 생산성은 바이오매스 생산 비용을 평가하기 위한 전과정 평가의 주요 매개변수이기 때문에, 남조류 배양 시스템의 면적 생산성 향상은 경제적 타당성 실현을 위해 필수적이다.

[0145] 2.4.2. 시아노박테리아 유래 PHB 생산성

[0146] PBR에 배양된 *Synechococcus 2973-phaCAB*의 OD730이 0.2에 도달하면 0.5 mM IPTG를 사용하여 phaCAB 유전자를 과발현시켜 CO_2가 광합성을 통해 PHB로 전환될 수 있도록 하였다. 150L PBR에서 배양된 *Synechococcus 2973-phaCAB*의 PHB 함량은 10.7(w/w)로 70L PBR에 비해 29% 높았다(도 9b 참조). IPTG는 PBR의 주입구에 도입되어 확산을 통해 배지 전체로 확산되었다. 150L PBR 설계시 영양분 확산율 최적화가 이루어졌기 때문에 PBR에 도입된 IPTG는 짧은 시간 내에 배양액 내에서 균일하게 확산되었다. 전체 배양배지의 IPTG 농도가 phaCAB 유전자 과발현의 최적점에 도달함에 따라 PHB 생산을 위한 공정 조작이 정확하게 수행되었다. 따라서 150L PBR에서 배양된 *Synechococcus 2973-phaCAB* 세포는 phaCAB 유전자 과발현에 최적화된 환경에서 PHB를 합성했다. 그 결과, 150L PBR은 작업량이 2배 증가했음에도 불구하고 70L PBR에 비해 PHB 생산 성능이 더 높았다. 단일 컬럼(3L 단일 컬럼 PBR, 최종 PHB 함량:10.5%)에서의 이전 실험 결과와 비교하면, 50배 규모 확장 후에도 PHB 생산 능력의 감소는 없었다. 또한, 150L PBR의 최대 면적 PHB 생산성은 1.087 $g\ m^{-2}\ d^{-1}$로 기존에 보고된 면적 PHB 생산성에 비해 높은 성능을 갖는 것으로 확인되었다.

[0148] 2.5. 다중 PBR 작동에 따른 차광 효과(shading effect)

[0149] 경제적으로 실현 가능한 광합성 PHB 생산공정을 구현하기 위해서는 다수의 PBR을 어레이 형태로 운영하여 남조류 배양에 필요한 부지 면적을 줄이는 것이 필요하다. 다수의 PBR을 어레이 형태로 운영할 경우 차광 효과로 인해 PBR의 광합성 효율이 저하될 수 있다. 여러 PBR 어레이 작업 중에 각 PBR의 광 조사 강도와 *Synechococcus 2973-phaCAB*의 성장을 조사했다. 측정시간을 변화시켜 태양 고도각에 따른 광세기의 변화를 분석하고, 그 결과를 도 10에 나타냈다. 도 10은 다중 PBR 어레이의 차광 효과를 분석한 결과로서, 도 10a는 태양 고도각이 43° (오전 10시)일 때에 햇빛을 조사한 경우, 도 10b는 태양 고도각이 78° (오후 2시)일 때에 햇빛을 조사한 경우, 도 10c는 태양 고도각이 22° (오후 6시)일 때에 햇빛을 조사한 경우의 차광 효과 분석 결과를 나타내고, 도 10d는 각 PBR에서의 *Synechococcus 2973-phaCAB* 세포 성장성을 나타낸다.

[0150] 태양 고도각이 자오선 고도에 도달하기 전에 PBR1이 가장 높은 광 강도를 수신했다. 다른 PBR 사이에 위치한 PBR2 ~ 4는 음영 처리로 인해 빛의 강도가 27% 감소한 것으로 나타났다(도 10a 참조). 태양이 자오선 고도(78°)에 위치할 때 PBR 배열 방향과 태양광 조사 방향이 거의 평행해지기 때문에 PBR 사이에 그림자가 생기지 않는다. 태양이 서쪽으로 이동할수록 PBR5에 조사되는 빛의 세기가 가장 강했고, PBR2는 PBR5에 비해 세기가 15% 감소한 빛을 받았다. 다수의 PBR 어레이 형태로 광생물학적 과정을 진행한 경우, 가장 바깥쪽의 PBR1과 PBR5가 지속적으로 높은 강도의 빛을 받았다. PBR3은 태양이 자오선 고도에 있을 때 강한 빛을 받았다. 여러 PBR 어레이 중에서 PBR2는 다른 PBR보다 약한 강도의 빛을 지속적으로 수신했다.

[0151] PBR에 조사되는 광 강도의 차이는 *Synechococcus 2973-phaCAB*의 성장 속도에 영향을 미치므로 PBR2의 세포 성장 속도는 다른 PBR보다 낮았다 (도 10d 참조). PBR2를 제외하고 PBR에서 배양된 *Synechococcus 2973-phaCAB*는 빛이 부족하여 성장 억제가 거의 나타나지 않았다. PBR2의 바이오매스 생산 성능은 다른 PBR의 78% 수준이었다. 걸이형 PBR 어레이를 이용한 광합성 PHB 생산 공정의 생산성 향상을 위해서는 계절별 태양 고도 변화에 최적화된 PBR 어레이의 설치 방향 연구 등 공정 설계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

[0153] 2.6. 2톤 규모 PBR 성능

[0154] 도 11은 2톤 규모의 PBR을 운영한 결과로서, 도 11a는 *Synechococcus 2973-phaCAB*를 함유한 2톤 규모 PBR의 파노라마 사진이고, 도 11b는 2톤 규모 PBR의 면적 *Synechococcus 2973-phaCAB*이며, 도 11c는 2톤 규모 PBR의 영역별 세포 성장 차이를 나타낸다.

[0155] 모듈 150L PBR을 2톤 PBR로 확장하고 *Synechococcus 2973-phaCAB*를 배양하였다(도 11a 참조). 본 연구에서 개발된 PBR의 scale up은 기둥의 직경 대신에 PBR의 길이를 연장함으로써 이루어졌다. 따라서 모듈 PBR의 성능을 유지하면서 PBR의 확장이 가능했다. 2톤 PBR과 150L PBR의 바이오매스 생산성을 비교한 결과, scale up에 따른 세포성장률 저하가 없음을 확인하였다(도 11b 참조). 2톤 PBR의 면적당 바이오매스 생산량은 44.44 g m^{-2}로 150L PBR의 90% 수준이었다(도 9a 참조). 2톤 PBR의 경우 배양 기간이 150L PBR에 비해 3일 단축된 점을 고려하면, scale-up에 따른 배양 성능 저하가 다소 있었던 것으로 판단할 수 있다. 2톤 PBR의 최대 면적 생산성은 17.77 g m^{-2} d^{-1}로 150L PBR에 비해 2.16배 높았다. 2톤 PBR에 조사되는 태양광량이 더 좋아 바이오매스 생산성이 높아졌다. 배가스 폭기에 의한 배양액의 흐름은 2톤 PBR에서 배양된 *Synechococcus 2973-phaCAB*를 혼합시키는 원동력이었다. 폭기에 의한 배양액의 흐름은 주로 중력과 평행한 방향으로 이루어지기 때문에 2톤 PBR의 길이방향에서는 격렬한 혼합이 이루어지기 어려웠다. 따라서 2톤 PBR에서 재배되는 *Synechococcus 2973-phaCAB*의 성장은 온실 구조물과 구름에 의한 일사량이 고르지 않아 지역적 차이가 발생할 수 있다. 이러한 효과를 정량적으로 확인하기 위해 2톤 PBR의 7개 구역에서 세포 배양물을 샘플링하여 2톤 PBR에서의 세포 성장 속도의 차이를 분석하였다. 세포 밀도와 샘플링 위치 사이에는 일관된 관계가 없었다. 7개 구역에서 수집된 배양액의 세포 밀도의 최대 및 최소값은 평균값에서 약 15% 벗어났다(도 11c 참조).

[0156] 하나의 대규모 PBR을 사용함으로써 PBR 생산에 필요한 파이프, 밸브 등 부자재 사용량을 줄일 수 있어 공정 구축 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한, 관리해야 하는 PBR의 수가 줄어들어 프로세스 운영이 쉬워진다. 본 연구에서 개발된 확장이 용이한 PBR은 유리 및 아크릴 용기 대신 간단한 제조 메커니즘과 저렴한 원자재를 사용한다. 따라서, 본 PBR 생산 시스템을 이용하여 광합성 PHB 생산 공정을 구축한다면 공정 구축 비용이 획기적으로 절감될 것이다. 광합성 PHB 생산비용을 절감함으로써 친환경 생분해성 플라스틱 생산과 온실가스 배출

저감을 동시에 달성할 수 있는 생물전환 공정의 상용화에 기여할 수 있다.

[0158] 3. 결론

[0159] 본 연구에서는 반자동화되고 확장이 쉬운 PBR 제작 시스템이 개발되었다. 개발된 PBR은 같은 면적에서 기존 직렬 컬럼 PBR에 비해 PHB 함유 바이오매스를 21% 더 많이 생산했다. 물질 전달 효율 향상으로 IPTG 기반 PHB 생산이 효과적으로 이루어졌기 때문에 PHB 함량이 기존 PBR보다 29% 더 높았다. *Synechococcus 2973-phaCAB*는 규모 확장으로 인한 성능 저하 없이 2톤 PBR에서 성공적으로 배양되었으며, 면적 바이오매스 생산성은 17.77 g m^{-2} d^{-1}에 도달했다. 결과적으로, 면적 바이오매스와 PHB 생산성이 더 높고 확장이 용이한 PBR은 CO_2를 활용하는 향상된 광합성 PHB 생산 공정에 적용될 수 있다.

[0161] 이상 본 발명을 구체적인 실시예를 통하여 상세히 설명하였으나, 이는 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명은 이에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함이 명백하다.

[0162] 본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속한 것으로 본 발명의 구체적인 보호 범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

부호의 설명

[0164] 1: 제1 필름 2: 제2 필름

3: 배플 3a: 제1 열접합 부재

3b: 제2 열접합 부재 3c: 구획부재

3d: 관통공 10: 제1 언와인더

20: 제2 언와인더 30: 열접합기

40: 리와인더 50: 제1 가이드 롤러

60: 제2 가이드 롤러 70: 제3 가이드 롤러

80: 센서부 81: 회전체

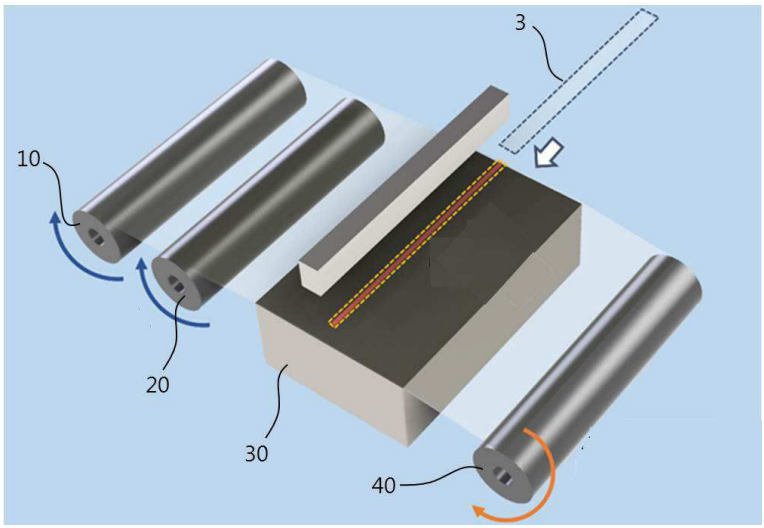
82: 연산회로 90: 배플 삽입부

91: 제1 이격 롤러 92: 제2 이격 롤러

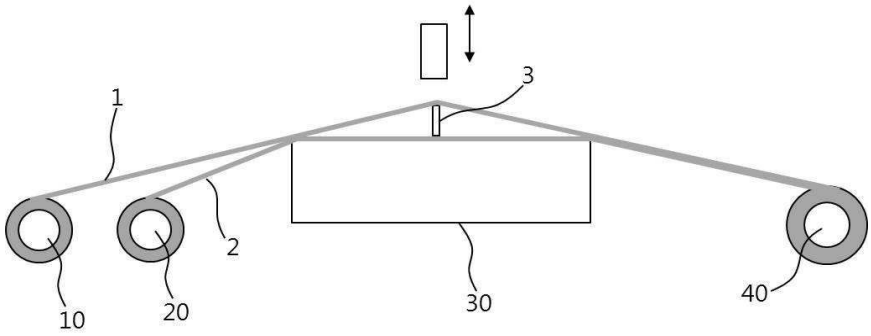
93: 배플 공급기

도면

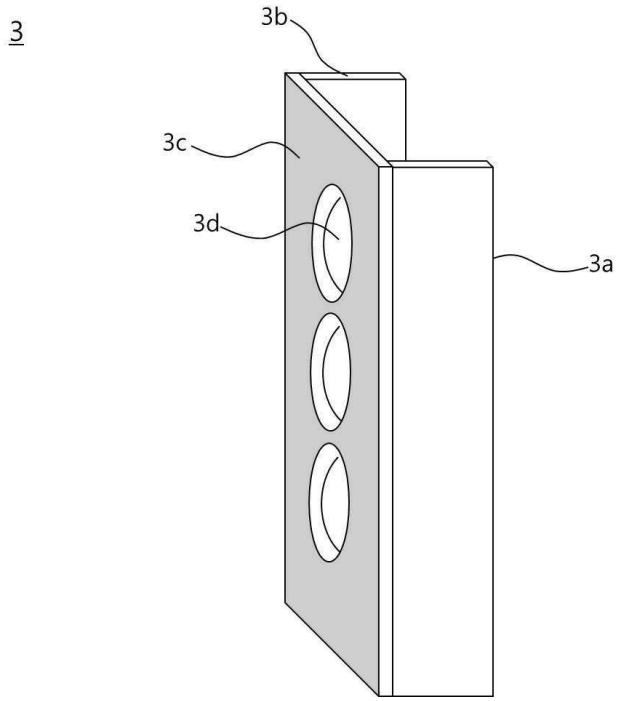
도면1



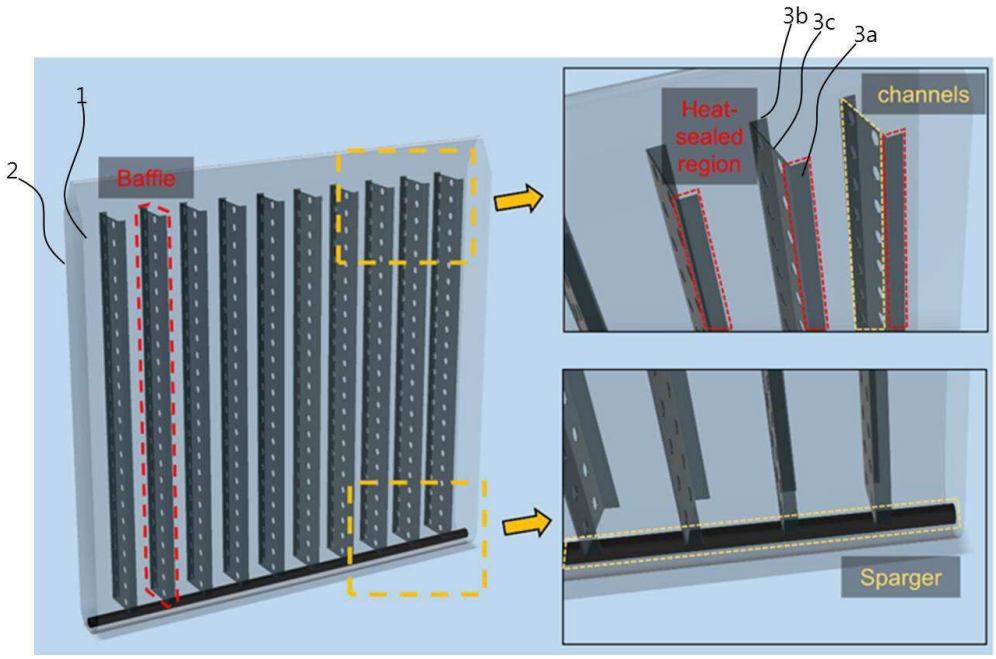
도면2



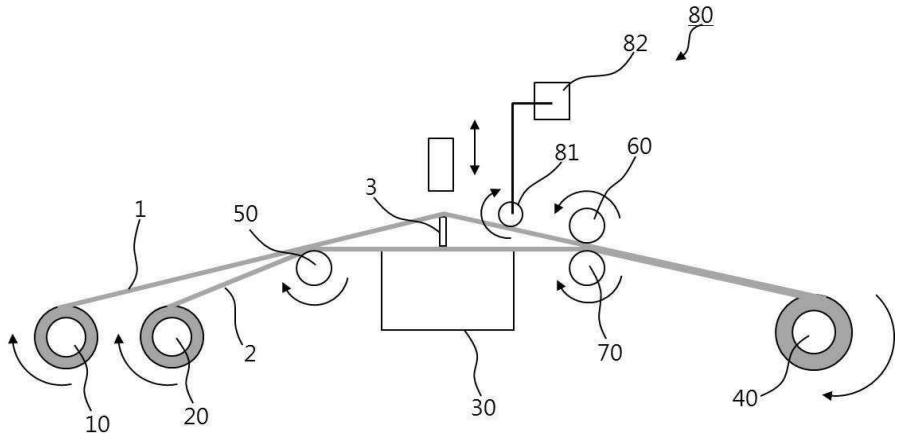
도면3


3
3b
3c
3d
3a

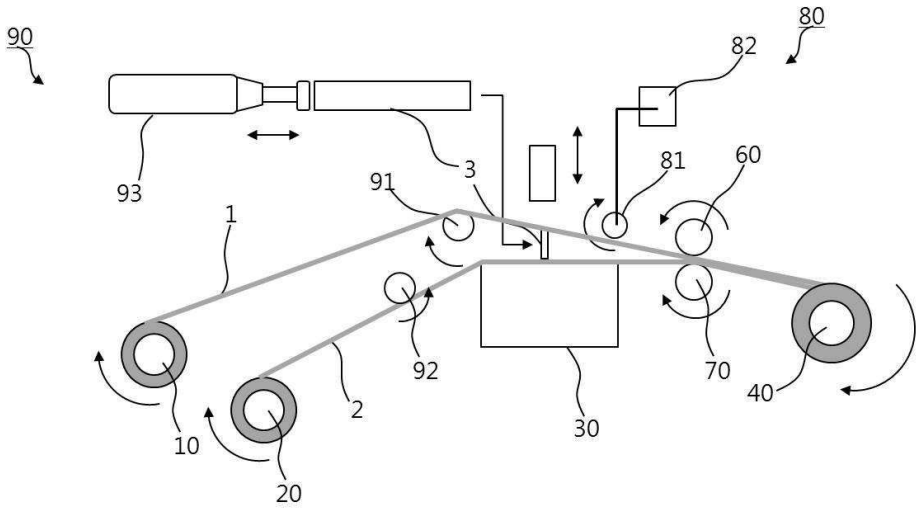
도면4


1
2
Baffle
3b
3c
3a
Heat-sealed region
channels
Sparger

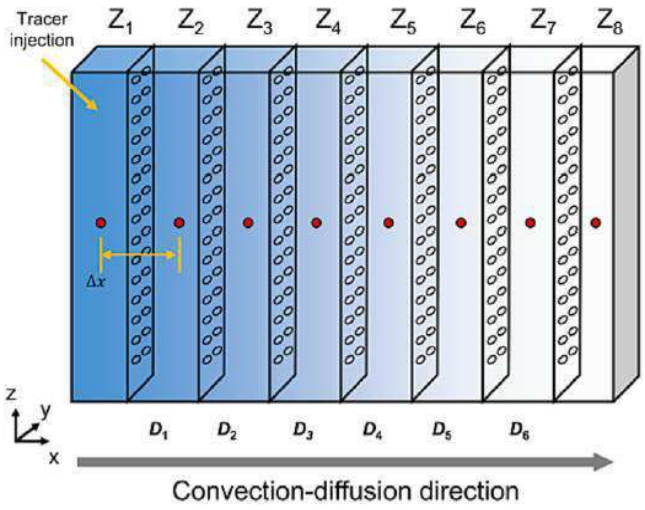
도면5


80
82
81
60
3
1
50
2
10
20
30
70
40

도면6


90
80
82
93
3
91
81
60
1
92
70
40
10
2
30
20

도면7a



• Sampling point

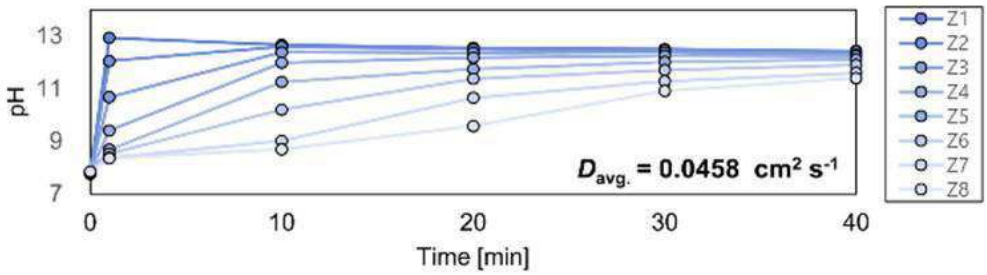
D_i: Diffusivity between zone *i*

$C_{i,t}$: Tracer concentration of zone *i* at time *t*

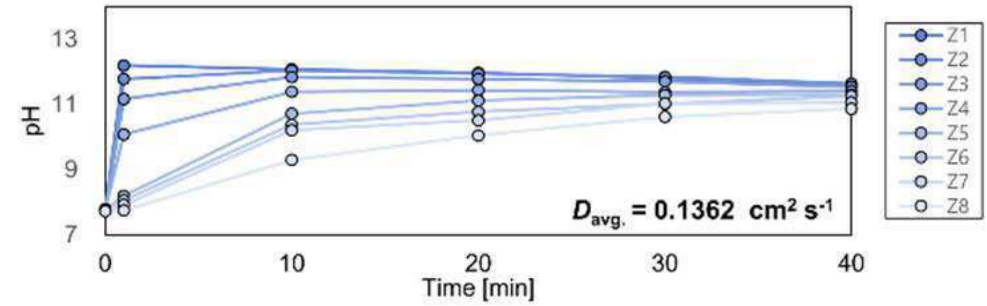
Δx: Distance between sampling point (12 cm)

도면7b

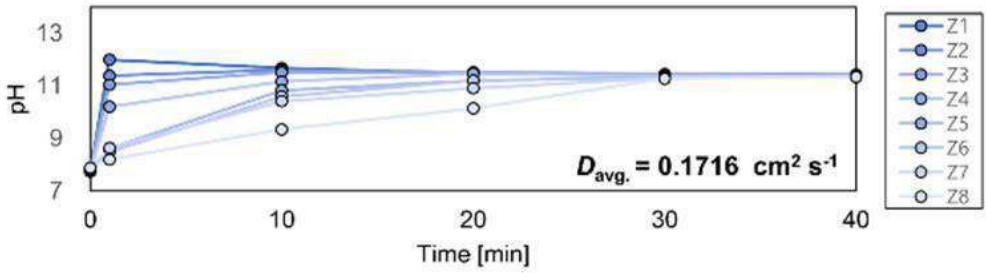
Case 1) channel diameter: 6 mm, number of channel: 20



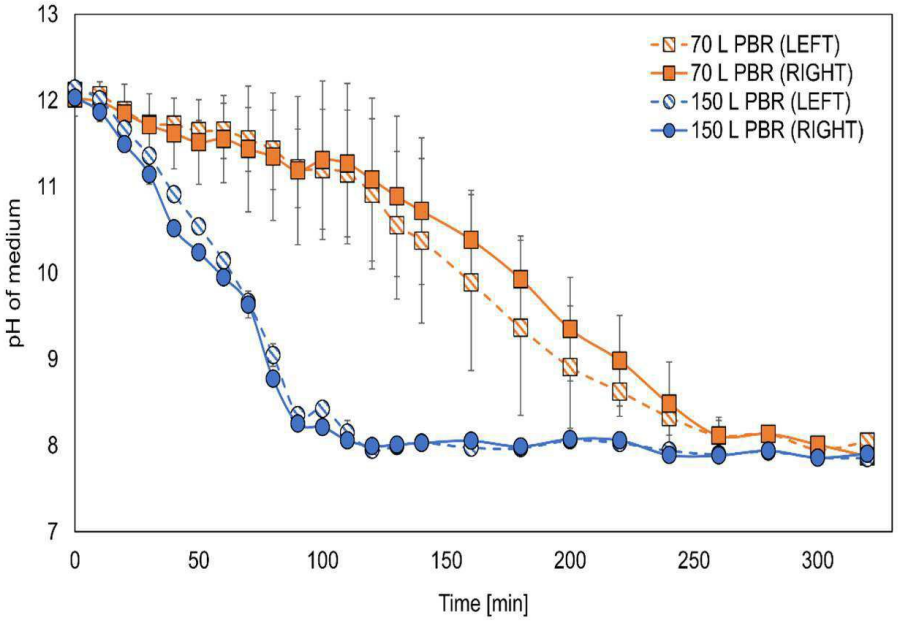
Case 2) channel diameter: 12 mm, number of channel: 10



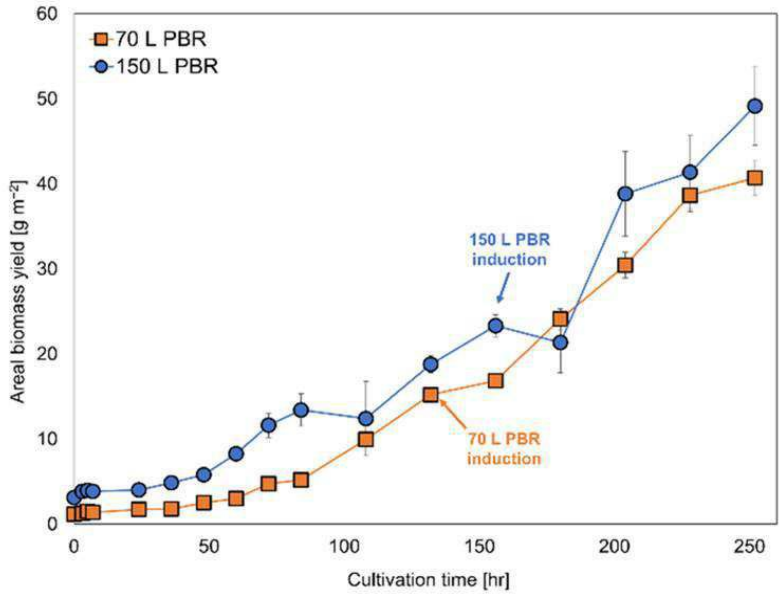
Case 3) channel diameter: 12 mm, number of channel: 20



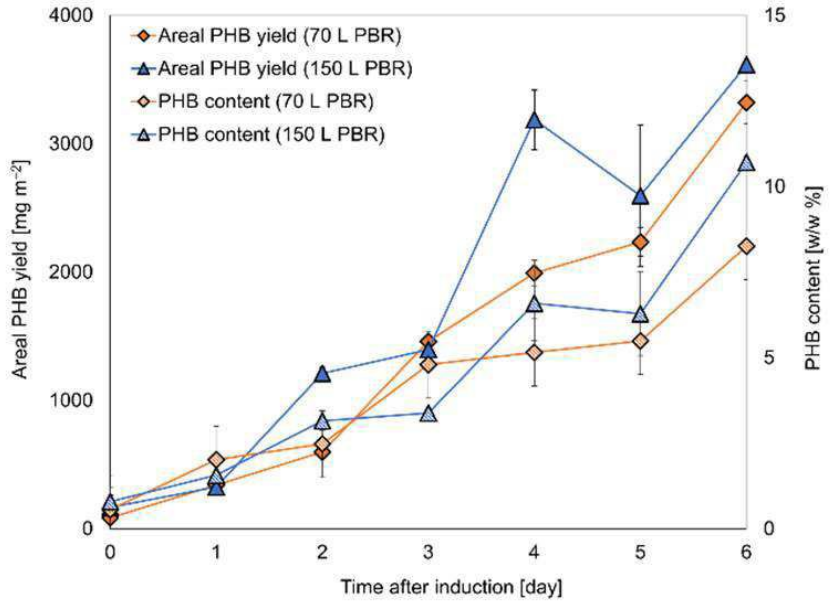
도면8


70 L PBR (LEFT)
70 L PBR (RIGHT)
150 L PBR (LEFT)
150 L PBR (RIGHT)
pH of medium
Time [min]

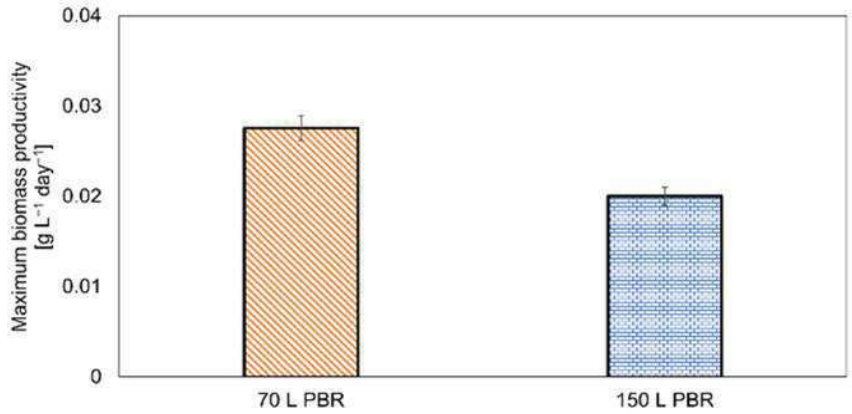
도면9a


70 L PBR
150 L PBR
150 L PBR induction
70 L PBR induction
Areal biomass yield [g m⁻²]
Cultivation time [hr]

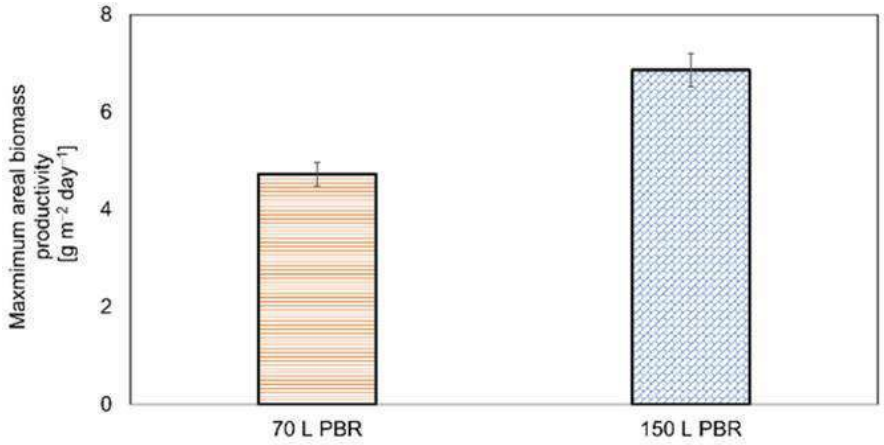
도면9b



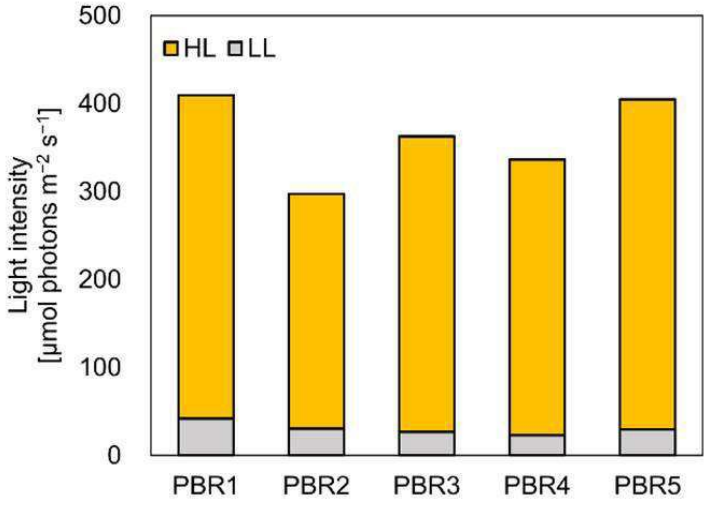
도면9c



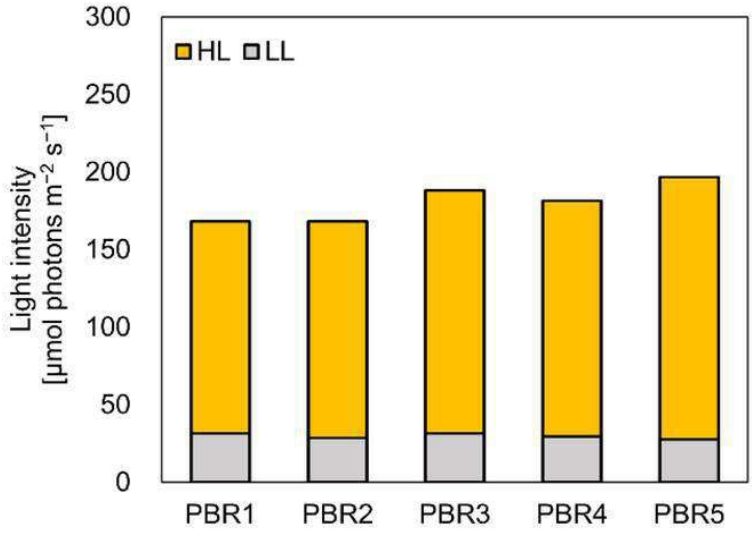
도면9d



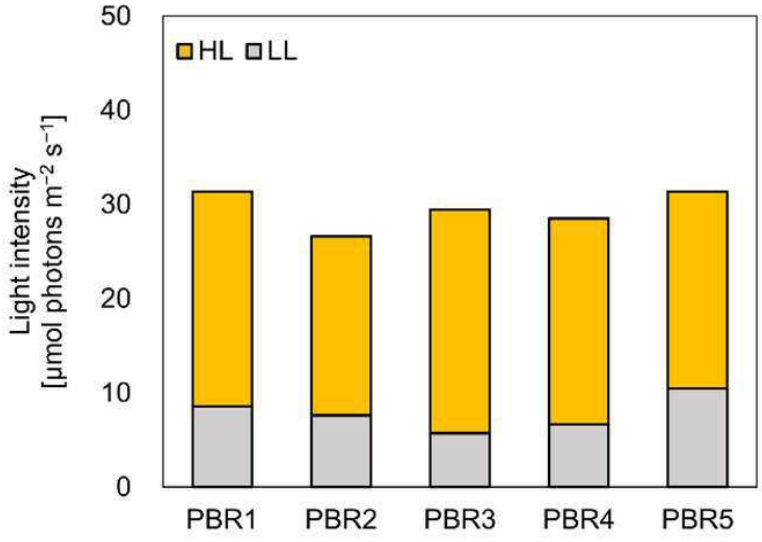
도면10a



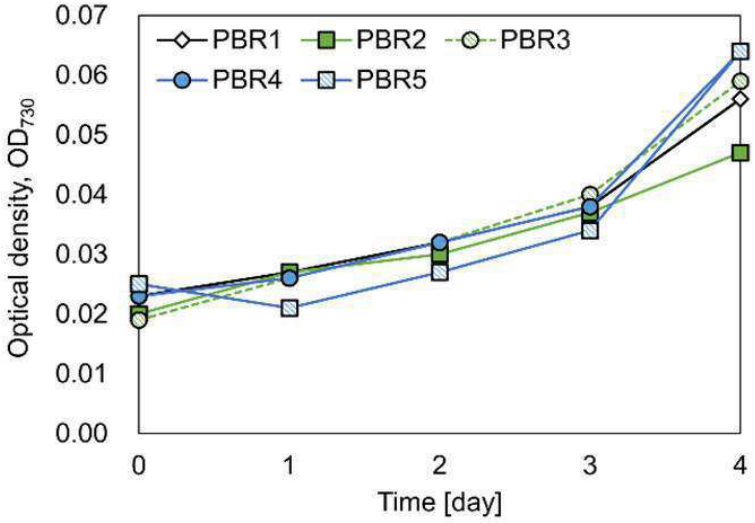
도면10b



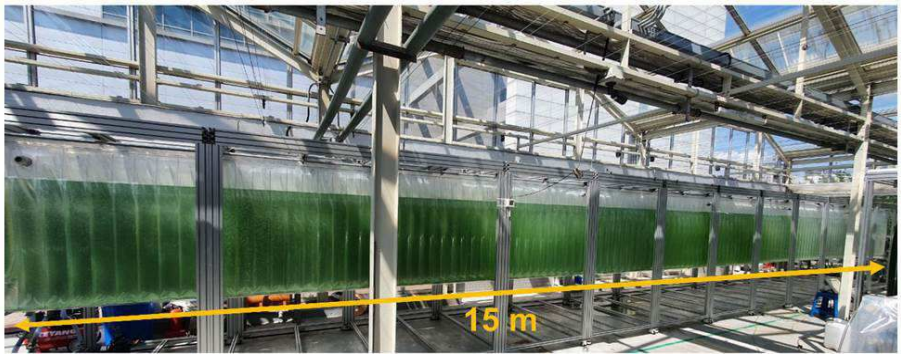
도면10c



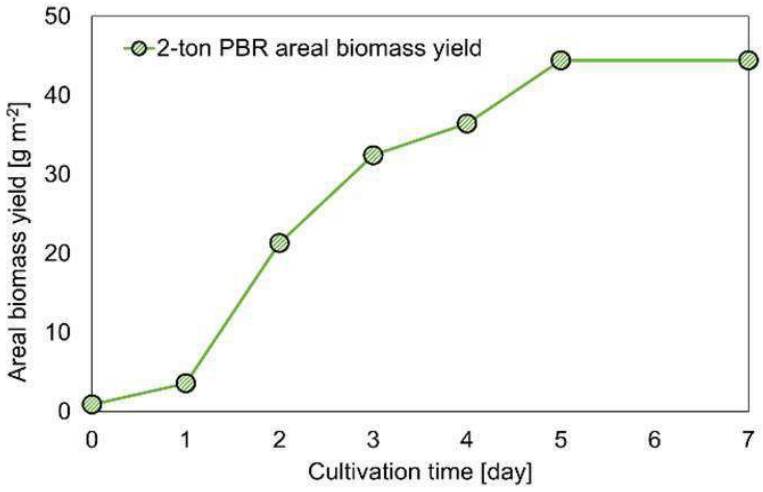
도면10d



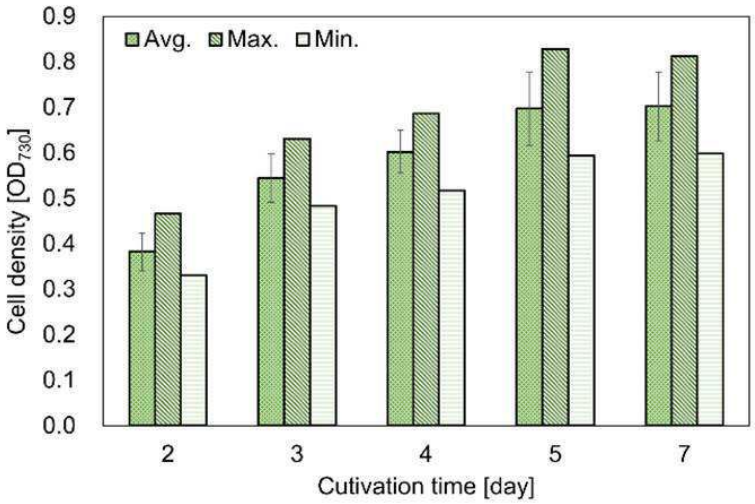
도면11a



도면11b



도면11c


Avg.
Max.
Min.
Cell density [OD730]
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
2
3
4
5
7
Cutivation time [day]