

## 미세조류 대량생산을 위한 ICT 융합 계단식 연속 배양 장치

이건우<sup>1,3</sup>, 이영복<sup>1,4</sup>, 유용진<sup>1,4</sup>, 백동현<sup>3</sup>, 김진우<sup>2,3</sup>, 김호섭<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 나노과학과, <sup>2</sup>선문대학교 식품과학과, <sup>3</sup>선문대학교 차세대반도체기술연구소, <sup>4</sup>씨이비티 (주)

### ICT Converged Cascade-type Incubator for mass production of microalgae

Geon Woo Lee<sup>1,3</sup>, Yong Bok Lee<sup>1,4</sup>, Yong Jin Yoo<sup>1,4</sup>,  
Dong Hyun Baek<sup>3</sup>, Jin Woo Kim<sup>2,3</sup>, Ho Seob Kim<sup>1,4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Nano-science, Sun Moon University

<sup>2</sup>Department of Food Science, Sun Moon University

<sup>3</sup>Center for Next-Generation Semiconductor Technology, Sun Moon University, <sup>4</sup>CEBT Co. Ltd.

**요약** 본 연구 목적은 미세조류 대량생산을 위한 ICT와 BT기술이 융합된 계단식 연속 배양 시스템(CCCS)을 개발함에 있다. 본 시스템은 미세조류 성장에 필요한 주요 운전변수인 pH, 온도, 이산화탄소와 조도 제어를 통해 실시간 배양조건 유지를 통해 세포성장 증진과 계절과 장소에 관계없이 미세조류를 생산할 수 있어 경제성이 확보 된 시스템이다. 또한, 안정적이고 높은 생산성을 제공하는 장점을 갖는다. 본 연구에서는 이 시스템을 활용하여 71일간 미세조류를 배양하고 실험 데이터를 분석하였다. 그 결과, 배양초기 O.D.는 수조1에서 0.006로 측정되었으며 이후 배양 71일, O.D.는 수조1: 0.399, 수조2: 0.961, 수조3: 0.795 그리고 수조4: 0.438로 측정되었다. 따라서 배양기간 동안 연속적인 배양이 가능함이 확인되었다. 대량 배양 방식인 ISMC (*In-situ* monitoring and control)기반 스마트팜을 제시하고, 본 개발기술을 통해 미세조류 이외의 수경재배 기반의 약용식물 등에 적용하여 식품, 화장품 그리고 의료 소재용 고부가가치 식물 재배에도 적용이 가능한 상업화 적합 기술이라 사료된다.

**Abstract** This study was undertaken to develop a cascade-type continuous culture system (CCCS) that combines both ICT and biotechnology (BT), for the mass production of microalgae. This system is capable of maintaining the essential culture conditions of pH, temperature, carbon dioxide, and illuminance control, which are key parameters for the growth of microalgae, and is economical for producing microalgae regardless of the season or location. It has the added advantage of providing stable and high productivity. In the current study, this system was applied to culture microalgae for 71 days, with subsequent analysis of the experimental data. The initial O.D. of the culture measured from incubator 1 was 0.006. On the 71st day of culture, the O.D.s obtained were 0.399 (incubator 1), 0.961 (incubator 2), 0.795 (incubator 3), and 0.438 (incubator 4), thereby confirming the establishment of continuous culture. Thus, we present a smart-farm based on ISMC (*in-situ* monitoring and control) for a mass culture method. We believe that this developed technology is suitable for commercialization, and has the potential to be applied to hydroponics-based cultivation of microalgae and cultivation of high-value-added medicinal plants as well as other plants used in functional foods, cosmetics, and medical materials.

**Keywords** : Smart-farm, ICT, Microalgae, ISMC, Real-time Monitoring

본 연구는 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 "지역특화산업육성사업(R&D P0004891)"으로 수행된 연구결과입니다.

\*Corresponding Author : Ho Seob Kim(Sun Moon Univ.)

email: hskim3@sunmoon.ac.kr

Received February 3, 2021

Revised March 2, 2021

Accepted May 7, 2021

Published May 31, 2021

## 1. 서론

식물공장은 농작물에 대하여 통제되고, 일정한 시설 내에서 빛, 온도, 습도 그리고 이산화탄소 등 환경 조건 제어가 가능하며, 계절과 장소에 관계없이 생산할 수 있는 시스템으로 정의한다[1-6]. 이와 유사하게 미세조류 공장은 미세조류 배양에 있어 ICT 개념을 도입한 것으로 농작물 대비 성장이 빠르고 생리활성물질 생산량이 높은 미세조류를 이용하여 연속식 배양시스템에서 세포성장, pH, 빛, 온도, 습도, 이산화탄소 그리고 기타 환경 조건들을 제어가 가능하며, 또한, 계절과 장소에 구애 받지 않고 바이오매스, 바이오디젤 및 생리활성물질을 생산할 수 있는 차세대 배양 시스템이다[7].

식물공장은 기후와 지역에 관계없이 통제된 시설에서 연중 농작물을 생산할 수 있는 자동생산 시스템이고, 미래 지향적 농업으로 주목받고 있으나 막대한 설비투자비와 높은 생산비로 인해 경제성이 낮아 산업화 진입이 어렵다고 평가되고 있다[8]. 또한, 식량안보와 직결되는 곡물류 대신 출하가격이 낮은 열채류 중심으로 재배작물이 치중되어 가격경쟁력 확보와 식량부족문제 해결 위한 지속가능 대안으로는 어려움이 있다. 식물공장에서 재배한 상추와 시설에서 재배한 상추 생산을 비교할 때 생산비 14배, 광열비 35배와 이산화탄소 배출량 60배가 높아 식물공장이 경제성과 환경성에서 경쟁력 낮아 이를 극복하기 위한 방안이 필요하다[9]. 이에, 다양한 형태의 식물공장이 운용되고 있으나 실제 높은 초기투자비용과 낮은 수익성으로 인해 수익형 고부가가치 품목 재배를 통한 기능성·식의약 소재 생산이 식물공장의 대안으로 부각되고 있다.

미세조류는 이산화탄소 고정화 능력이 뛰어나고 성장에 자연광과 인공광 모두를 활용하며 세포 성장이 빠른 장점을 가진다. 특히, 석유자원을 대체할 바이오디젤 생산에 있어 육상생물을 대신할 차세대 바이오매스로 각광받고 있다. 미세조류배양은 노지와 광 반응기를 이용한 배양법 위주로 이뤄지고 있으나 노지형의 경우 일조량, 온도와 오염문제로 인해 대량생산이 어려우며 광 반응기는 유리형 반응기로 스케일-업이 어렵고 고가의 설비비로 대량생산이 어려운 단점을 가진다[7]. 이에, 노지형과 광 반응기의 혼합형인 실내에서 높은 밀도로 미세조류를 배양할 수 있는 식물공장 개념의 ICT-BT 융합 미세조류 스마트팜 기술은 기존 미세조류 배양의 대안이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 ICT의 ISMC (*In-Situ* Monitoring and Control) 기술과 BT의 세포배양 기술이 융합된 배양장치를 개발하여 초기 적응, 중기 대수성장과 후기 2

차 대사산물 생산단계에 적합한 계단식 연속배양 시스템 (Cascade-type Continuous Culture System)을 구성하여 세포성장 증진과 함께 높은 수율의 목적물질 생산이 가능한 미세조류 배양 장치를 개발하였다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 미세조류 및 배양 배지

본 연구에서 계단식 연속 배양시스템 시험을 위해 사용된 미세조류는 *Scenedesmus obliquus*이며, 이는 바이오디젤 생산에 특화된 미세조류로 해양시료도서관 (Jeju-si, Korea)로부터 분양받아 사용하였다. 미세조류는 Modified Bold's Basal Medium (MBBM)를 이용하여 25 °C 항온배양기에서 형광등을 이용하여 12시간 명조조건과 12시간 암조건 하에서 15일 단위로 계대 배양하였다.

배양 환경 및 단계에 따른 세포의 형태변화 관찰을 위해 전자현미경 이미지 측정을 수행하였다. 배양된 *S. obliquus*를 -60 °C로 1차 동결하고 동결건조기 (FDU-1200, Eylea, Japan)에서 동결건조의 온도를 -57 °C로 약 2시간 동결 건조하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 건조된 샘플을 금으로 코팅한 후 EPMA (JEOL JXA-8200 EPMA)에서 가속전압을 10 kV 그리고 배율은 3,000배에서 관찰하였으며, *S. obliquus*의 이미지를 나타내었다.

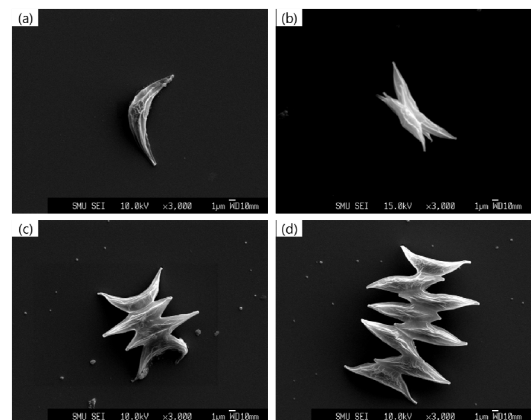


Fig. 1. Morphological observation using SEM and optical images of *Scenedesmus obliquus*. (a) Single-cell form, (b) two-cell combined form, (c) four-cell combined form, (d) eight-cell combined form.

본 연구에서 미세조류의 성장을 위해 MBBM를 미세조류 영양공급을 위한 기본배지로 사용하였다. MBBM 배지의 배양성분은  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{EDTAFeNa}$ ,  $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  그리고  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 를 포함한 16 가지 성분을 포함하고 있다[10]. 배양성분 중에서  $\text{NaNO}_3$ 는 전체 39.06 %를 차지하고 있으며,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  그리고  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 는 11.8 %를 차지하고 나머지 다른 배양성분은 0.2 ~ 4.8 % 정도로 배양을 위한 충분한 질소, 칼륨과 인이 제공됨을 확인할 수 있었다.

## 2.2 계단식 연속 배양 시스템의 구조

미세조류 대량생산을 위한 미세조류 배양 시스템은 미세조류로부터 단계별 세포성장과 생리활성물질 생산 조건 제공하기 위해 배양기를 계단식으로 구성하고 연속식 흐름제어가 가능하게 구성하였다. 이러한 연속 흐름은 각 단계별 실시간으로 배양을 모니터링하여 단계별 최적 성장을 제공하며 이를 위해 실시간 측정과 제어가 가능한 ISMC 배양방식으로 구성하였다.

그림 2는 계단식 연속구조 배양기 개념도 나타낸 것이다. 대량배양을 위한 계단식 배양시스템은 배양수조부와 컨트롤부로 구분되어 있다. 배양수조부는 그림 2에서 보는 바와 같이 미세조류 배양 시스템의 핵심인 4개의 수조로 된 중심수조(수조1, 수조2, 수조3, 수조4)와 2개의 보조수조(배양액수조, 분리수조)가 추가로 구성되어 있다.

Cascade-type continuous culture system (CCCS)

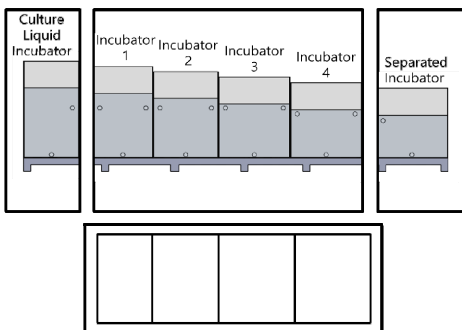


Fig. 2. Conceptual diagram of stepped continuous structure incubator.

중심수조는 미세조류를 배양하는 수조로 배양되는 미세조류를 일정한 양만큼 주기적으로 이동하고 증대와 규

격화를 위해 각 수조의 세로 폭은 1,000 mm로 동일하게 유지하였고, 각 수조의 가로 폭과 높이는 다르게 제작하였다. 이러한 차이로 인해 동일한 양의 미세조류를 각 수조에서 성장시킬 때, 미세조류의 수위는 수조별로 다른 높이를 가지게 된다. 중심수조는 냉각수조 안에 위치하여 항온운전이 가능하며, 냉각수조의 규격은 가로 2,100 mm x 세로 1,200 mm x 높이 450 mm로 제작되었다. 배양액수조와 분리수조는 새로운 배양액과 성장이 완료된 미세조류를 매일 새롭게 이송하므로 오염방지를 위해 중심수조에서 분리하여 위치시켰다.

표 1은 계단식 연속 배양기의 수조 내부크기와 미세조류 배양액 부피를 보여준다. 또한, 각 수조는 10 mm 두께의 강화유리로 설계되었으며 각 수조의 부피는  $285 \pm 15$  L를 기준으로 높이의 단차를 위하여 수조 폭과 높이는 다르게 하며 높이의 단차는 40 mm 주었다.

Table 1. Size and volume of microalgae cultivators and volume of culture medium.

Spec.	Incubator1	Incubator2	Incubator3	Incubator4
Cultivator dimension (W x L x H) (mm)	385 x 1000 x 720	417 x 1000 x 680	455 x 1000 x 640	500 x 1000 x 600
Cultivator volume (L)	270	280	290	300
Working dimension (W x L x H) (mm)	385 x 1000 x 520	417 x 1000 x 480	455 x 1000 x 440	500 x 1000 x 400
Working volume (L)	200	200	200	200

각 수조는 동일한 200 L의 미세조류 배양액이 채워져 있지만, 수조별로 높이의 단차 40 mm 차이로 인해 수조 1의 미세조류 수위는 520 mm, 수조2의 수위는 480 mm, 수조3의 수위는 440 mm, 수조4의 수위는 400 mm이다. 이러한 수조 간에 높이 차이는 미세조류를 다음 수조로 이동시키는 과정에서 펌프 등을 이용한 이동에 있어 미세조류에 주는 전단 스트레스(자극)를 최소화하기 위해 단차에 의한 자유낙하를 통해 자연적으로 이동시키기 위함이다. 각 수조는 볼밸브와 스프링 호스로 연결되어있으며, 밸브가 열리면 높이차와 중력에 의해 무동력으로 연결한 수조로 이동하게 된다.

중심수조는 기존의 다단 연속식과 동일하게 각 수조별로 특정한 역할을 하게 되며, 각 수조에서 성장이 완료되면 다음 수조로 넘어가게 되는 방식으로 작동한다. 초기 동작 시 모든 수조가 완전히 비워진 상태에서 일정량의 배지가 유입되면서 순차적으로 수조1로부터 각각의 수조

에 200 L의 미세조류 배양액을 채우는 방법으로 진행되었다. 배양초기에는 배양액수조에서 준비된 배양액과 중미세조류를 수조1에 일정한 양 만큼 일정한 시간단위로 반복해서 투입한다. 이때 투입량은 배양속도에 따라 조절이 가능하며, 세포성장이 빠를 경우에는 투입량을 증가시켜 희석배수를 증가시키는 방법으로 세포농도를 조절할 수 있다. 수조1의 미세조류가 200 L 채워지면, 이는 1단계 성장이 완료되고, 이후 수조2와 연결된 이송관의 볼밸브가 열리고, 중력에 의해 미세조류는 수조1에서 다음 수조인 수조2로 흐르게 된다. 수조1을 채울 때와 동일하게 일정한 양 만큼 이동 시키는 것을 반복하게 되며, 수조2로 이동된 미세조류의 양만큼 수조1에 배양수조에서 새로운 배지와 증류수를 주입한다. 이 과정을 반복하여 수조2에서도 마찬가지로 200 L의 미세조류가 채워지면, 이는 2단계 성장이 완료되며, 그 다음으로 수조3에서도 위와 같은 방법을 사용하여 미세조류를 이동시키고 성장시키는 과정을 반복한다. 수조3의 미세조류가 200 L가 채워지면, 이는 3단계 성장이 완료되고, 마지막으로 수조4에서도 같은 과정을 반복해 200 L를 채우게 되면 미세조류의 성장이 완료 단계에 도달하게 된다. 이러한 과정에서 수조1에는 새로운 배지와 증류수가 연속적으로 유입되며 다단 배양이 완성되고 연결한 수조로 일정 시간 간격으로 동일한 양의 배양액이 이동하게 되며 일정한 희석배수를 유지하게 되며, 수조4에는 수조1에 유입량과 동량의 최종 배양액이 생산되어 연속 운전이 가능하게 된다.

그림 3은 ISMC 미세조류 배양 관리 및 제어 시스템 개념도와 제작된 ISMC 미세조류 배양 시스템을 보여주고 있다.

중심수조를 구성하는 각각의 수조 내부에는 실시간 모니터링이 가능하도록 pH와 온도 센서가 설치되어 있으며, 광합성 작용에 필요한 LED 광원, 산소 폭기 스파저, 이산화탄소 폭기 스파저, 그리고 수온 유지를 위한 수조용 히터와 냉각기가 설치되었으며 미세조류를 침전을 방지하고 양분과 기체의 균일한 혼합을 위해 수류발생기를 설치하여 배양조건에 따른 일정한 유속을 제공하였다. 중심수조의 온도상승을 위해서는 중심수조를 외부에서 자켓 형태의 냉각수조와 중심수조 내부의 수조용 히터를 통해 2중으로 조절하였으며 온도하강을 위해서는 냉각수조에 냉각기에 의해 중심수조의 온도를 하강시켜 배양액의 온도를 일정하게 유지하였다. 미세조류가 효율적으로 광합성을 할 수 있도록 LED를 30분 간격으로 점등과 소등이 반복되도록 설계하였다. 또한, pH가 증가할 경우

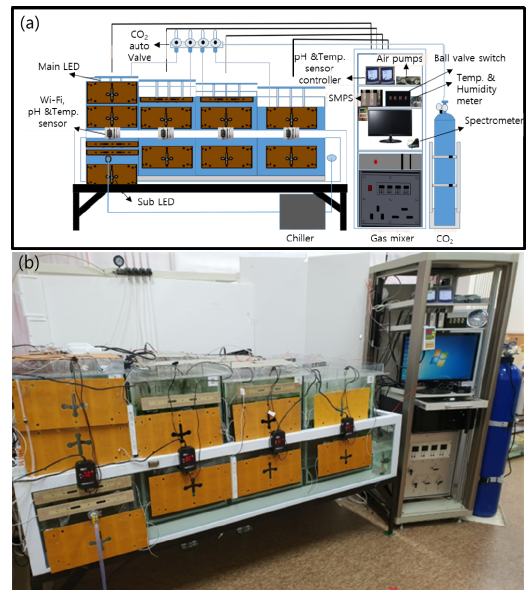


Fig. 3. (a) Conceptual diagram of ISMC microalgae culture management and control system. (b) Picture of ISMC microalgae culture system.

pH 감지기에 의해 신호를 수신하여 이산화탄소 밸브를 개폐를 조절하여 공급되는 이산화탄소량 조절을 통해  $\text{pH } 7.0 \pm 0.2$ 로 배양조건을 유지하였다.

### 2.3 배양장치용 LED 광원

미세조류의 성장에 필요한 광합성 수행을 위해 태양광 또는 인공광의 공급은 필수적인 요소이다. 미세조류는 종과 성장단계에 따라 흡수하는 광원의 파장이 다양하며 세포성장과 2차 대사산물 생산에 있어 광량과 파장이 많은 영향을 미친다[11-15]. 계단식 배양기의 중심수조에는 자체적으로 설계·제작한 수중형 삼각구조 LED 광원이 사용되었다. 삼각구조 LED는 직경 15 mm 인 방수 처리된 아크릴 통에 red LED와 blue LED가 2:1 비율로 혼합하여 설계하였다. 그림 4는 수중형 삼각구조 LED와 측정된 LED 스펙트럼을 보여주고 있다. 파장은 각각 620 nm ~ 695 nm와 423 nm ~ 528 nm이며, 피크 파장은 666 nm와 463 nm이다.

수중형 삼각구조 LED광원은 각각의 수조에 3 × 4배 열로 중심수조 내부에 설치되어 수조 중심부에 광원을 제공하는 역할을 하여 외부 광원과 함께 미세조류의 성장을 위한 LED로 사용된다.

각 수조별 총 전력의 경우, 수조1은 300 W, 수조2와 수조3은 각각 350 W, 수조4는 740 W로 세포성장에 따

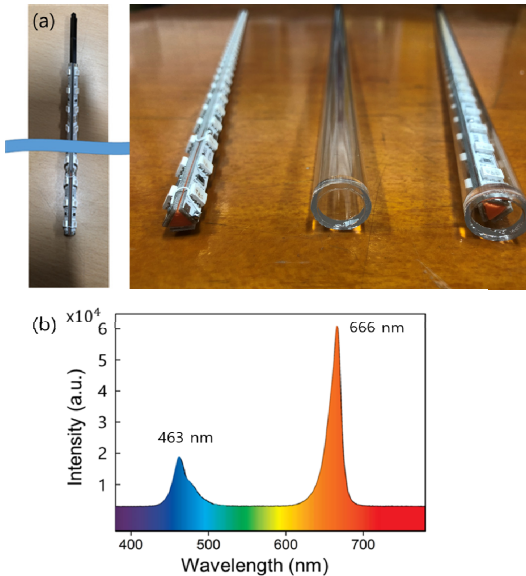


Fig. 4. (a) Triangular type submerged LED source. (b) LED spectrum.

른 농도가 높아짐에 따라 공급 광원을 증가시켰다. 각 수조의 개별 LED 광원은 수조별로 시간별 개별 제어가 가능하여 세포 성장에 따른 세포농도 증가에 비례하여 공급 시간을 증가시켰다.

### 3. 결과 및 고찰

계단식 연속 ISMC 시스템에서 중심배양수조는 4개의 수조로 구성되어 단계적 배양액 이동이 가능한 구조를 구현하였다. 각 수조는 200 L의 동일한 양의 미세조류를 배양할 수 있으며 수조의 바닥면적의 크기를 다르게 하여 배양되는 미세조류의 수위를 다르게 계단식으로 배열되게 하였다. 선행배양에서 배양되는 미세조류가 다음 수조로 20 L/Day 이동하도록 초기 유입량을 설정하여 실험을 세포농도의 조절하며 배양을 진행하였다. 이 경우 각 수조는 10일 경과 시, 다음수조로 배양액의 이동이 시작되며 희석배수는 1/10으로 안정화 과정을 거치게 되는데 시간 당 평균 0.833 L의 새로운 배지가 투입되어 하루 20 L의 신규배지를 수조1에 투입하여 순차적으로 다음 수조로 유입량과 동일한 양이 이송되는 방식으로 진행하였다. 즉, 신규 배지의 연속식 투입량에 따라 배양 기간 중 동량으로 이송하는 것을 기준으로 하였으며 수조3이 채워지면 유입량과 동일한 양의 배양액이 연속적

으로 생산되게 된다. 초기 배양부터 각 수조별 미세조류 성장을 측정하여 전체 배양기간에 걸쳐 배양조건과 세포 농도를 측정하여 이를 바탕으로 각 단계별 성장 특성을 비교하였다. 이를 바탕으로 미세조류 성장증대를 위한 배양조건 최적화를 위하여 조도, 이산화탄소, 온도, pH를 설정하였다. 각 수조의 세포농도는 실시간 측정하여 성장정도에 따라 수조1에 새로운 배지 투입량에 따라 수조별 머물 시간을 결정하고 각 연결한 수조로 이송여부와 이송량의 조절이 가능한 시스템을 구성하였다.

그림 5는 계단식 연속구조 ISMC 시스템에서 71일간 미세조류를 배양한 실험 데이터를 보여준다.

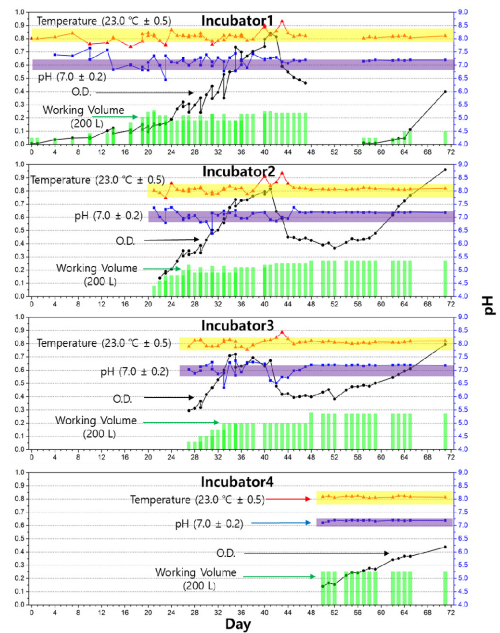


Fig. 5. Microalgae cultivation using cascade-type continuous cultivator.

수조1에서 초기 50 L로 미세조류 배양을 시작하여 매일 7.5 L의 배지를 추가하여 약 20일 후 200 L로 배양부피를 증대시켜 수조2로 이송을 진행하였다. 이때, 배양 초기 O.D.는 수조1에서 0.006이며, 배양 20일의 O.D.는 수조1에서 0.137로서 세포량이 23배 이상 증가되었다. 20일 이후 수조1에서 매일 20 L의 새로운 배지를 공급하여 미세조류를 수조2로 배양액을 순차적으로 이동하였다. 수조2에서 배양 40일에 O.D.는 0.62를 보여 수조2의 초기 O.D.에 비해 4.5배 증가함이 확인되어 세포 성장이 대수기에 접어들었음을 확인할 수 있었다. 수조2에

서 빠른 세포성장으로 인한 세포농도 증가로 광원투과와 영양분 부족의 문제가 발생할 우려가 있어 20 L/Day의 배양액 유입에 추가로 새로운 배지의 추가를 통한 희석 배수 증가가 필요하여 수조2로부터 유입되는 20 L의 배양액에 10 L의 새로운 배지를 수조2에 추가하여 머물 시간을 7일로 단축하였다. 배양 27일, 수조2에서 수조3으로 이송이 시작되었으며 수조3의 초기 O.D.는 0.31이었으며, 배양 35일에 최대 O.D.는 0.68로 대수성장이 유지됨을 확인 할 수 있었다. 수조3에서 대수성장을 거친 미세조류는 배양 34일부터 정체기에 접어들어 세포성장이 낮아지는 경향을 보였다. 수조3의 O.D.는 초기 값과 비교하여 2.5배가 되는 배양 50일에 같은 방법으로 수조4로 미세조류를 이동하여 실험을 진행하였다. 배양 43일 이후에는 O.D.가 전체적으로 감소하는 영향을 보였는데, 이는 배지성분이 고갈에 따라 정체기로 접어들어 성장의 사멸속도가 성장속도에 비해 빨라 세포량에는 큰 변화가 없거나 세포농도가 감소하는 것으로 예측된다. 배양 71일, O.D.는 수조1에서 0.399, 수조2에서 0.961, 수조3에서 0.795 그리고 수조4에서 0.438로 측정되어 배양기간 연속적인 배양이 가능함이 확인되었다. 마지막으로 S. P. Choi et al.,(2012) [7]의 연구결과에 따르면 광 반응기의 경우 고부가 가치 유용물질 생산에는 국한되고 반면에 더 높은 농도로 바이오매스를 생산한다고 보고되었다. 따라서 이는 본 연구와 유사한 결과를 보여준다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 개발한 시스템은 기존 식물공장의 한계점 극복을 위한 기술로 기존 과채류 재배를 위한 공장의 기능향상보다는 재배 식물의 고부가가치화를 통한 식품공장의 경쟁력 강화를 위해 카로티노이드 등의 고부가가치 산물 생산을 위한 미세조류 배양에 적합한 스마트팜이다. 기존의 미세조류 배양 방식인 회분식 배양방법의 단점을 극복하고자 흐름제어 연속식 배양시스템을 사용하여 미세조류의 성장 단계별 최적화 된 배양 조건을 부여하고 이를 실시간 모니터링 제어하는 ICT 기반 스마트팜 기술 구현을 하여 미세조류를 안정적으로 성장시키고 카로티노이드의 대량생산이 가능하다. 이를 위해, 기존 배양방식의 온도와 pH의 단순제어에서 유속, 유량, 이산화탄소 농도를 제어하여 보다 미세조류 성장 증대와 2차 대사산물 생산증대에 특화된 배양시스템을 구축하였다. ICT-BT

융합기반의 실시간 제어 및 자동공정 제어의 개념을 도입하여 배양조건외 안정적 제어와 투여인력 절감을 통해 상업화에 기여할 수 있는 기술로 보다 안정적인 대량 배양 방식인 ISMC 기반 스마트팜을 제시하였으며, 이러한 기술개발을 바탕으로 수경재배 기반의 약용식물 등에 적용하여 식품·화장품·의료용 소재용 고부가가치 식물 재배에도 적용이 가능한 상업화 적용 가능 기술을 구현하였다.

본 연구에서 개발한 배양 시스템은 세포성장 지연기, 초기성장, 대수증식기, 2차 대사산물 생산 등의 세포성장에 따른 4단계 챔버로 구성이 가능하고, 단계별 챔버 외부의 광원과 침수식 광원을 제공하여 각 단계 별 성장조건과 세포농도에 적합한 LED 광원이 설치가 가능하다. 또한, 파장별 LED가 조합된 복합구조 LED 모듈을 사용하여 각 단계별 파장 변화가 가능하고, 각 단계별 챔버에 센서가 부착되어 투입된 미세조류의 단계별 성장조건이 제어가 가능한 장점을 가진다. 그리고 각 단계별 성장이 완료되면 세포농도에 따라 연속적으로 다음 단계 챔버로 이동이 가능하며, 미세조류에 따라 배양단계를 세분화하여 1개 챔버에서 n개 챔버로 확장하여 사용할 수 있으며, 공간적인 효율성을 위해 n개 층으로 3차원 적층이 용이한 구조를 가진다. 마지막으로 모듈화에 따른 배양면적의 크기를 임의로 변경 가능하여 생산력을 향상시킬 수 있는 장점을 가진다.

#### References

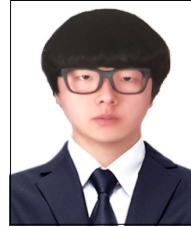
- [1] B. J. Lee, "The Glass Greenhouse's Lighting Simulation for Ginseng with Solar Cell and LED", *Journal of the Korea Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.2, pp.14-19, Feb. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.2.14>
- [2] J. W. Hong, "Study on the Plant Growth Variation According to Change of Luminous Flux LED Light in Plant Factory.", *Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.3, pp.304-311, Mar. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.304>
- [3] S. O. Kim, S. C. Park, "A Study on the Current Status and Research Trends of Domestic and Foreign Plant Factories.", *Proceedings of KIIIE Annual Conference*, KIIIE, Jeongseon, South Korea, pp.62, May. 2017.
- [4] S. I. Hwang, J. M. Joo, S. Y. Joo, "ICT-Based Smart Farm Factory Systems through the Case of Hydroponic Ginseng Plant Factory." *KIICS*, Vol.40, No.4, pp.780-790, Apr. 2015.

DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2015.40.4.780>

- [5] Y. M. Sung, "Light source technology for plant factory.", *KIIEE*, Vol.29, No.1, pp.23-28, Jan. 2015.
- [6] H. Y. Yang, D. B. Jeong, W. Liu, H. K. Kook, D. H. Park, "The Propose and Design of ICT System Based on LED Plant Factory.", *Proceedings of KIIEE Annual Conference, KIIEE*, Seoul, South Korea, pp.51, Nov. 2017.
- [7] S. P. Choi, S. J. Sim, "Microalgal Bioconversion to Organic Resources form CO<sub>2</sub>.", *KIC News*, Vol.15, No.2, pp.11-24, Apr. 2012.
- [8] H. S. Jeon, Domestic and International Trends of Plant Factory, Technical Report, ETRI, South Korea, pp. 2-3
- [9] S. T. Lim, S. R. Yang, "Is Plant Factory a Sustainable Alternative?", *Korean Journal of Agricultural Management and Policy*, Vol.38, No.4, pp.917-942, Dec. 2011.
- [10] Y. J. Yoo, G. W. Lee, D. H. Baek, J. W. Kim, H. S. Kim, "Growth Evaluation of Lipid Production Microalgae *Scenedesmus obliquus* using Raman Spectroscopy.", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.5, pp.223-229, May 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.5.223>
- [11] G. W. Lee, S. Y. Kim, Y. J. Yoo, Y. B. Lee, J. W. Kim, H. S. Kim, "Growth Characteristics of Microalgae *Haematococcus pluvialis* by LED light Source.", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.10, pp.64-71, Oct. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.10.64>
- [12] Y. J. Yoo, S. Y. Kim, G. W. Lee, Y. B. Lee, J. W. Kim, H. S. Kim, "Growth Characteristics of Microalgae *Scenedesmus obliquus* by LED light Source.", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.11, pp.70-77, Nov. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.70>
- [13] H. C. An, J. H. Bae, O. N. Kwon, H. G. Park, J. C. Park, "Changes in the growth and biochemical composition of *Chaetoceros calcitrans* cultures using light-emitting diodes.", *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, Vol.50, No.4, pp.447-454, Nov. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.3796/KSFT.2014.50.4.447>
- [14] M. G. Kang, S. Y. Lim, C. H. Lee, H. R. Baek, J. A. Shin, "Comparison of Marine Microalgae Growth Using LED Lights", *JFMSE*, Vol.29, No.2, pp.552-559, Apr. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2017.29.2.552>
- [15] S. J. Oh, H. K. Kwon, J. Y. Jeon, H. S. Yang, "Effect of Monochromatic Light Emitting Diode on the Growth of Four Microalgae Species (*Chlorella vulgaris*, *Nitzschia sp.*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Skeletonema sp.*)" *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol.21, No.1, pp.1-8, Feb. 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.1.001>

이 건 우(Geon-Woo Lee)

[준회원]



- 2019년 8월 : 선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과 (학사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 선문대학교 일반대학원 나노과학과 (석사과정)

<관심분야>

ICT, 반도체, 바이오

이 영 복(Yong-Bok Lee)

[정회원]



- 2014년 2월 : 선문대학교 나노과학과 (석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 일반대학원 나노과학과 (박사과정)

<관심분야>

전자빔기술, ICT, 반도체

유 용 진(Yong-Jin Yoo)

[준회원]



- 2016년 2월 : 선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과 (학사)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 선문대학교 일반대학원 나노과학과 (석사)

<관심분야>

ICT, 바이오

백 동 현(Dong-Hyun Baek)

[정회원]



- 2007년 8월 : 선문대학교 자연과학대학 신소재과학과 (이학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 일반대학원 전자전기공학과 (공학박사)
- 2014년 9월 ~ 2018년 2월 : U of Wisconsin-Madison 박사후 연구원

• 2018년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 디스플레이반도체공학과 계약제 교수

<관심분야>

MEMS, 유연 디스플레이

---

김 진 우(Jin-Woo Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 인하대학교 생물공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : Colorado State Univ.(美) 화학공학과 (공학석사)
- 2004년 10월 : McGill Univ. (캐) Biosystems Engineering (박사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 식품과학과 교수

<관심분야>

생물, 바이오

---

김 호 섭(Ho-Seob Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 인하대학교 물리학과 (학사)
- 1992년 5월 : 미국 미주리주립대학교 물리학과 (박사)
- 1992년 5월 ~ 1997년 10월 : 미국 IBM T. J. Watson 연구소 연구원

• 2007년 3월 ~ 2008년 2월 : 영국 Cambridge 대학 방문교수

• 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 디스플레이반도체공학과 교수

<관심분야>

반도체기술, 리소그래피, MI 기술, 스마트팜