

단세포 조류 배양조의 자동화에 관한 연구

김환성 · 조만기* · 한봉호**

한국해양대학교 물류시스템공학과, *동서대학교 산업기술연구센터,
**부경대학교 식품공학과

A Study on the Automation of Photobioreactor

Hwan-Seong Kim, Man-Gi Cho* and Bong-Ho Han**

Department of Logistics Engineering, Korea Maritime University

*Engineering Research Center, Dongseo University

**Department of Food Science and Technology, Pukyong National University

Abstract

Seafoods are well known to be useful for prevention of adult diseases. For this reason, the industrial aquaculture has been rapidly developed in Korea. In the aquaculture industry, a photobioreactor with high productivity is a prerequisite for mass production of microalgae, i.e., *Chlorella* sp., a feeding fry for animal plankton. But in Korea, the cultivation of *Chlorella* sp. has been carried out in an open pond. In this case, the productivity of *Chlorella* sp. would be affected severely by climate, i.e., light intensity, temperature, pH, CO₂, etc. Therefore, this study was oriented to develop a photobioreactor for mass production of microalgae, *Chlorella* sp. free from the restriction of climate. We developed an automation system for control of temperature, pH and flow rates of O₂ and CO₂ during the culture of the *Chlorella* sp. in a multiple slanting plate type photobioreactor. The system was so designed that the fisherman can easily operate and recognize the growth rate of *Chlorella* by reading the digital output of turbidity indicated by photosensor.

Key words: photobioreactor, *Chlorella*, automatic control

서 론

수산식품은 건강식품 또는 장수식품으로 인식되면서 그 수요가 점차 확대되어 가는 추세에 있다. 그러나 최근에는 수산자원의 고갈로 인하여 많은 양의 수산식품이 양식어업에 의하여 공급되고 있으며, 이에 따라 양식어업의 기초사료로서 이용되고 있는 단세포 조류인 *Chlorella* 수요가 크게 증가하고 있다.

*Chlorella*는 해산어류 종묘배양장에서 치어의 먹이인 동물성 플랑크톤의 먹이로 이용되는 식물성 조류로서 광합성에 필요한 빛, 탄소원 및 배양액의 pH를 조절해 주는 CO₂의 공급, 그리고 적정 온도의 유지가 생존에 필수적이다(Burlew, 1953a; Becker, 1981). 그런데 종래의 *Chlorella*의 배양법은 노천에서 넓은 면적의 연못형 배양조를 이용하는 방법으로서 기후조건

과 같은 농업적 요소에 크게 지배되기 때문에 1년중 특정 시기에만 배양이 가능하다. 또한, 배양조가 개방형이어서 잡균, 원충등의 오염에 의해 생산수율이 떨어지기 쉬운 어려움이 있어서, 부족한 양의 *Chlorella*는 전적으로 수입에 의존하고 있는 실정이다(임 등, 1998; Han과 Cho, 1998; 광 등, 1998).

이러한 어려움을 타개하기 위하여 협소한 면적에서 고밀도로 *Chlorella*를 배양하는 경우에는 갑작스런 외부환경의 변화에도 민감하게 반응할 수 있으므로 배양에 세밀한 주의가 요구된다(Burlew, 1953b). 그러나 광합성에 필요한 빛, CO₂를 적절하게 공급하면서 배양온도를 일정하게 유지시킨다면, 자연의 기후조건에 관계 없이 연중무휴로 *Chlorella*를 생산할 수 있게 된다.

본 연구에서는 배양액의 체적(V)은 동일하게 유지하되, *Chlorella*가 빛에 노출되는 면적(S)을 달리한 몇종의 모형 배양조에서의 *Chlorella*의 비증식속도와 생산성을 비교하였을 때의 결과(광 등, 1998)를 토대로 다단 경사 평판형 배양조(multiple slanting plate type

Corresponding author: Bong-Ho Han, Department of Food Science and Technology, Pukyong National University, 608-737 Pusan, Korea

photobioreactor, MSPP)를 제작하고자 하였다. 전체 배양공정은 자동화시키고, 개발된 자동화장치는 어민들이 쉽게 조작 가능하도록 하였으며, 배양상태를 수치화하여 현재의 배양정도를 직접 보고 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

재료 및 방법

배양조 장치 구성

PC를 이용, *Chlorella* 배양시의 온도, 배양액의 pH, CO₂ 공급에 대한 제어변수들을 계측한 후, 이들 제어변수를 실제 제어변수로서 이용하여 배양조 자동화 시스템을 개발하였다. *Chlorella*를 최적 배양조건에서 배양시키기 위한 배양조 및 자동화 장치는 Fig. 1에 나타내었다.

여기서 배양조 자동화 장치는 크게 신호처리부, 제어부, 열교환부로 분류할 수 있다. 신호처리부는 pH 센서, 흡광도(O.D.)센서 및 온도센서로 구분된다. pH 센서는 배양액의 pH를 측정하기 위한 pH 전극과 pH 입력모듈(Suntex, SP-701)로 구성하였고, pH 정밀도는 ±0.01로서, 1 mV의 전압을 출력하도록 하였다.

*Chlorella*의 배양상태를 측정하는 흡광도 센서는 배양액의 상대적인 혼탁도를 측정하도록 photosensor를 이용, 자체 제작하여 사용하였다. 배양액의 온도를 측정하는 온도센서로는 E형 열전대를 사용하였으며, 온도변환모듈(Analog, 5B37)을 이용하여 온도에 비례한 전압이 출력되도록 하였다.

제어부에서는 CO₂를 공급하여 배양액의 pH를 조절하였으며(pH start method, Schugerl, 1991), 솔레노이드

드밸브를 이용하여 CO₂의 공급속도를 조절하였다. 배양액의 순환유량을 조절하는 배양액 유량조절부는 펌프와 인버터(LG, starvert-iG)로 구성하고, 인버터의 주파수의 가감을 조절하여 배양액의 순환유량이 제어되도록 구성하였다.

열교환부는 배양액의 온도를 제어하는 부분으로서 heater와 cooler로 구성하고, 직접 배양액에 열기 및 냉기가 가해지지 않도록 하기 위하여 2중 stainless steel 통으로 제작하였다.

배양조의 자동화를 위하여서는 PC를 이용한 실시간 계측 및 통합 제어환경을 구성하였으며, 이를 위해 12 bits 16 채널의 A/D 및 D/A 보드(Analog, RTI820)를 내장하여 데이터의 계측 및 각 공정의 제어를 행하였다. 또한, CO₂ 솔레노이드밸브, heater 및 cooler의 제어를 위해 SSR (solid state relay)을 이용하였고, SSR 드라이버를 자체 제작하여 사용하였다.

실시간 통합 계측 및 제어환경 구축

본 연구에서는 Turbo C언어를 사용하여 DOS환경에서 PC를 이용한 실시간 계측 및 통합 제어환경을 구축하였다. 이때 조작화면은 그래픽 모드로 처리하였으며, 사용자가 쉽게 이용할 수 있도록 GUI (graphic user interface)의 체계를 도입하여 프로그램화하였다. 배양조의 배양조건으로 배지의 순환속도(0~100%), 온도 및 pH를 직접 키보드로부터 설정할 수 있도록 하였으며, 수정도 가능하도록 하였다. 배양조의 제어프로그램 실행시 화면결과는 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서는 A/D 보드를 통하여 계측되는 온도, pH, 혼탁도를 실시간적으로 보여주고 있으며(Bastin

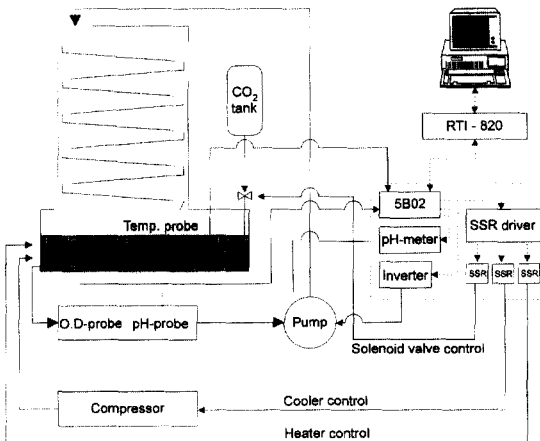


Fig. 1. Schematic diagram of automatic control system for multiple slanting plate type photobioreactor.

온탁도 : 7.97	유 속 : 35 %	총배양일 : 12 일
현재온도 : 26.28	설정온도 : 25 도	
현재 pH : 7.94	설정 pH : 7.50	

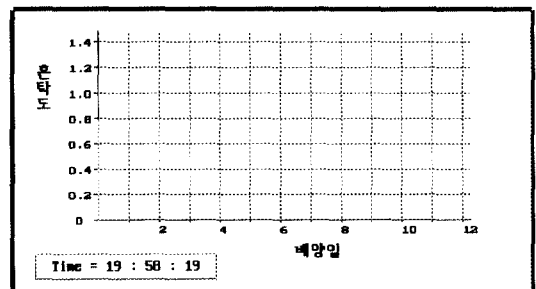


Fig. 2 Measuring screen of operating system.

Exc기를 누르시면 종료됩니다!!!

과 Dochain, 1986), 위의 데이터를 바탕으로 각 공정의 제어를 행할 수 있게 된다. 또한, 흡광도 센서를 통해 계측된 값을 그래프처리하여 배양상태를 쉽게 알 수 있도록 하였다. 배양일수는 최대 50일 이내에서 세팅이 가능하게 하였으며, 배양액의 순환속도는 1%에서 100%까지 조절할 수 있게하여 최고 40 L/min까지 설정할 수 있게 하였다.

프로그램에 의한 실시간 구현시, PC의 8253 timer chip의 데이터 내용을 변경하여 샘플링 주기를 10 ms로 설정하였고, 이에 따라 interrupt vector table을 변경하였으며, 데이터는 1초 간격으로 저장되게 하였다.

제어알고리즘 구현

배양조 내에서의 *Chlorella*의 원활한 생존에는 온도, 온도, pH가 중요한 요소로 작용하는데, 본 연구에서의 조도는 배양실 환경에서의 6000 lx로 고정시켰다. 온도제어는 설정온도(25°C)와 현재온도를 비교하고 필요에 따라 heater 또는 cooler를 가동시키기 위해

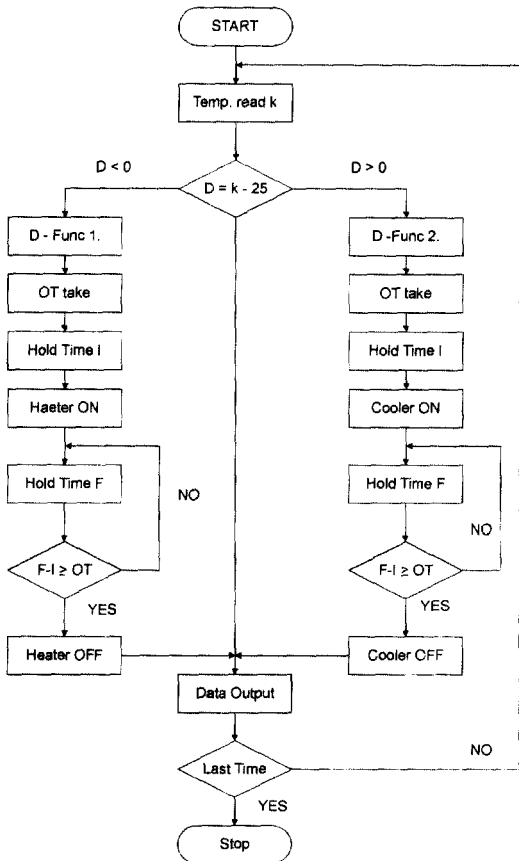


Fig. 3. Flow chart of control routine on temperature.

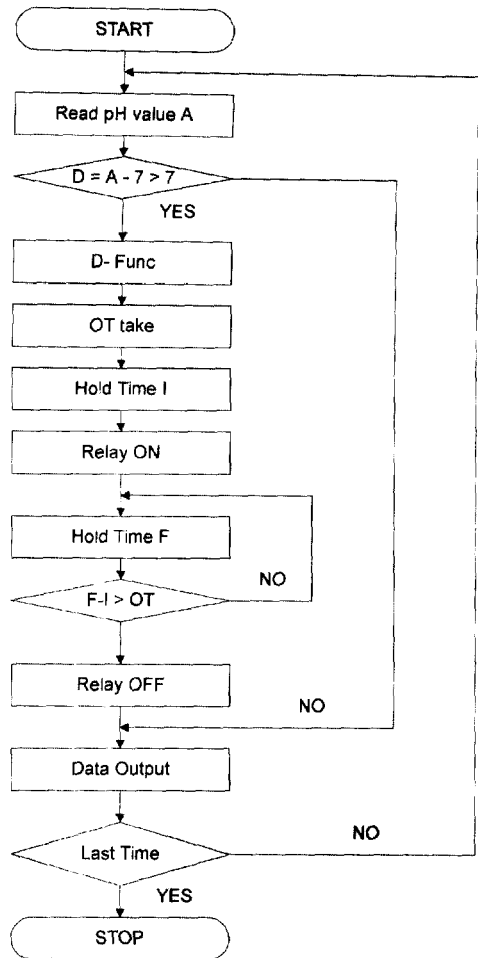


Fig. 4. Flowchart of control routine on pH.

SSR을 동작시켰으며, 이 때의 제어알고리즘은 Fig. 3에 나타내었다.

배양액의 pH는 pH센서로부터 입력받아 설정치(7.0)보다 크면 SSR을 구동시켜 CO₂ 솔레노이드밸브를 동작시킴으로써 CO₂가 공급되어 pH가 낮아지도록 하였으며, 이 때의 제어 알고리즘은 Fig. 4에 나타내었다.

배양액의 유속은 모터의 회전수에 비례하게 되므로, 인버터를 이용하여 모터의 회전수를 PC에서 D/A 보드를 통해 제어되도록 하였다.

결과 및 고찰

최적 제어변수의 도출법

PC를 이용하여 배양조 내에서의 *Chlorella* 배양공정을 자동화하였다. 최적 배양공정을 위한 제어변수를 산출하기 위해서는 배양조의 각 공정의 특성과 시간

자연에 대해 고려하여야 한다. 즉, *Chlorella*의 성장에 관여하는 각 변수들의 관계가 이미 명백하게 밝혀져 있다면, 위의 관계를 이용하여 제어를 행하면 된다.

그러나 위의 관계는 대부분 선형 또는 비선형관계로 이루어져 있으므로 이러한 관계를 밝히기에는 명확하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 각 제어 입력에 대한 출력과의 관계로부터 간단히 시정수를 구하고 이로부터 관계를 유추하는 방법을 택하였다. 즉, PC에서 프로그램을 이용하여 반복적인 실험에 의해 최적 조건으로 *Chlorella*가 성장할 수 있는 제어변수를 구한 다음, 이를 실제 배양조의 자동화 장치의 제어변수로 이용하였다.

시제품 제작

본 연구에 이용된 실제 시제품용 배양조의 자동화 장치는 Photo. 1과 같다. 시제품용 배양조는 PC를 이용한 제어계를 상용제어모듈로 대체하여 설계하였으며, 주로 제어 및 제어결과를 나타낼 수 있도록 stainless로 제어 및 표시부를 추가 제작하였다.

제어 및 표시부에서는 배양조의 pH 제어를 위한 pH 제어부(PID-600)와 표시부(PH-6000)로 나뉘며, 온

도는 노이즈에 강한 축은저항체($pt\ 100\ \Omega$)을 이용한 PID제어(Cardello와 San, 1988, Dairaku et al. 1983)를 행하였다. 유량제어는 인버터를 이용하였으며, 제작한 혼탁도센서의 출력을 표시하기 위해 S-1100(Sejin elec. co.)을 이용하여 제작하였다.

이때, 각 제어기인값은 PC를 이용하여 설정한 값을 이용하여 제어를 행하였으며, 그 결과 온도는 $25^{\circ}C$ 에서, 그리고 pH는 7.0 부근으로 양호하게 제어될 수 있었다.

비교실험 및 결과

제작한 배양조 및 배양조 자동화 장치의 유효성을 검증하기 위하여, 비교 배양실험을 행하였다. 이 때, 종래의 배양조로는 배양액의 체적이 $60\ m^3$ 규모인 노천의 연못형 배양조(전남 연천군 진남배양장)를 택하였고, 이를 본 연구에서의 $0.5\ m^3$ 규모의 MSPP (Fig. 1)와 비교하였다. 두 배양조에는 초기 농도 3.0×10^6 의 *Chlorella*를 접종하여 배양하였다.

종래의 연못형 배양조에서 *Chlorella*가 도달하는 최고농도는 $10^7\ cell/mL$ 였으나, MSPP에서는 그 농도가 $10^8\ cell/mL$ 여서, *Chlorella*의 농도를 약 10배 정도 높일 수 있었다.

또한, *Chlorella*의 회수방법을 보면, 연못형 배양조에서는 *Chlorella*가 최고농도에 이르기까지 3일이 소요되어 3일에 한번씩 $40\ m^3$ 의 배양액을 회수하였다. 그러나 $0.5\ m^3$ 규모의 MSPP의 경우에는 *Chlorella*가 하루만에 최고농도에 이르러서 매일 $0.25\ m^3$ 의 배양액을 회수할 수 있었다. 따라서, 배양액의 회수량으로 비교하면 MSPP는 배양액의 체적이 연못형의 1/120에 불과하지만 1일 배양액 $1\ m^3$ 당의 *Chlorella* 생산량은 연못형 배양조의 22.5배 정도여서 적은 면적에서 대량 배양이 가능함을 알 수 있었다. 그리고, MSPP는 밀폐형 배양조이므로 미생물에 의한 오염 및 배양액의 증발이 방지되는 잇점이 있음도 확인되었다.

요 약

본 연구에서는 *Chlorella*의 고밀도 배양을 위한 배양 자동화 장치개발에 관하여 논하였다. 최적 배양조건에 적합한 제어변수를 구하기 위하여 조도, 배양온도, pH, 배양유속을 바탕으로 PC를 이용하여 실험을 행하였다. 또한, 얻어진 제어변수를 이용하여 시제품용 배양자동화 장치를 개발하였다. 그 결과, 배양상태의 변화에도 불구하고 일정한 배양조건의 유지를 위한 제어가 가능하였다. 이를 바탕으로 기존의 노천의 연못형

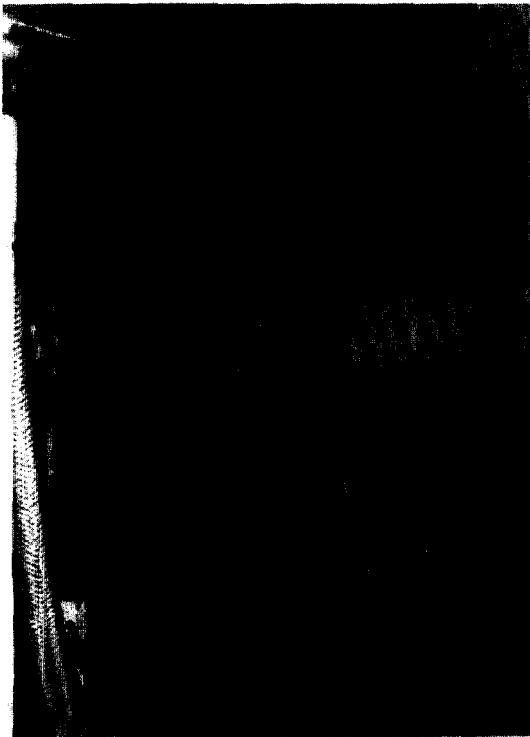


Photo. 1. Automatic control system for multiple slanting plate type photobioreactor.

배양장에 비하여 작은 체적의 배양조로도 *Chlorella*의 고밀도 대량배양이 가능함을 확인하였으며, 배양조 시스템의 완전 자동화로 연중무휴로 *Chlorella*를 배양할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 농림부지원 현장애로기술개발 사업비에 의하여 수행된 결과의 일부이며, 이에 깊이 감사드립니다. 또한, 본 연구 수행에 있어 많은 도움을 준 동서대학교 산업기술연구센터의 광중기 연구원께 깊은 감사드립니다.

문헌

Bastin G. and D. Dochain. 1986. On-line estimation of microbial growth processes. *Automatica*. **22**: 705-709
 Becker, E.W. 1981. Algae mass cultivation-production and utilization. *Process Biochemistry*. **8**(9): 10-14

Burlew, J.S. 1953a, Algal culture from laboratory to pilot plant. *Carnegie Institute of Washington Publication* 600, Washington DC.
 Burlew, J.S. 1953b, Current status of large-scale culture of algae, In 'Algal culture from laboratory to pilot plant'. Ed. Burlew, J.S. pp. 3-23, Washington DC: Carnegie Institution.
 Cardello, R.J. and K.Y. San. 1988. The design of controllers for batch bioreactor. *Biotech. Bioeng.*. **32**: 519-526
 Dairaku, K., E. Izumoto, H. Morikawa, S. Shioya and T. Takamutu. 1983. An advanced microcomputer coupled control system in a Baker's yeast fed-batch culture using a tubing method. *J. Ferment. Bioeng.*. **61**: 189-196
 Han, B.H. and M.G. Cho. 1998. Design of photobioreactors for mass production of microalgae. *Proceeding of International Seminar between Korea and Germany with Exhibition*. Dongseo University, pp. 109-118
 Schugerl. K. 1991. On-line analysis of broth, *Biotechnology*. **4**: 150-178
 광중기, 김현주, 이지현, 신가희, 조만기, 한봉호. 1998. 모형 배양조 형태에 따른 단세포 조류의 비중식속도. *한국수산학회지*. **31**: 477-482
 임진영, 조만기, 한봉호. 1998. 해수산 *Chlorella*의 최적 배양조건에 관한 연구. *한국수산학회지*. **33**: 139-142