

## 축산폐수 처리를 위한 광섬유 생물반응기를 이용한 조류 배양 공정 개발

†최 정 우·김 영 기·류 재 홍·이 우 창·이 원 홍·<sup>1</sup>한 징 택  
서강대학교 공과대학 화학공학과, <sup>1</sup>서강대학교 이과대학 생명과학과  
(접수 : 1999. 12. 24., 게재승인 : 2000. 2. 15.)

### Process Development of Algae Culture for Livestock Wastewater Treatment Using Fiber-Optic Photobioreactor

Jeong-Woo Choi†, Young-Kee Kim, Jae-Hong Ryu, Woochang Lee, Won Hong Lee, and Jing-Tag Han<sup>1</sup>  
Department of Chemical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea  
<sup>1</sup>Department of Life Science, Sogang University, Seoul 121-742, Korea  
(Received : 1999. 12. 24., Accepted : 2000. 2. 15.)

In this study, algae cultivation using the photobioreactor has been applied to remove the nitrogen and phosphorus compounds in the wastewater of the livestock industry. The optimal ratio of nitrate and ortho-phosphate concentration was found for the enhancement of removal efficiency. To achieve the high density culture of algae, the photobioreactor consisted of optical fibers was developed to get the sufficient light intensity. The light could be illuminated uniformly from light source to the entire reactor by the optical fibers. The structured kinetic model was proposed to describe the growth rate, consumption rate of nitrates and ortho-phosphates in algae culture. The self-organizing fuzzy logic controller incorporated with genetic algorithm was constructed to control the semi-continuous wastewater treatment system. The proposed fuzzy logic controller was applied to maintain the nitrate concentration at the given set-point with the control of wastewater feeding rate. The experimental results showed that the self-organizing fuzzy logic controller could keep the nitrate concentration and enhance algae growth.

**Key Words** : algae, fiber-optic photobioreactor, self-organizing fuzzy controller, genetic algorithm, livestock

#### 서 론

국민 생활패턴의 변화에 따른 국내 축산 농가 증가에 비례하여 배출되는 축산 폐기물의 양이 급격한 증가를 보이고 있으며 폐수처리기준의 강화로 인하여 축산폐수의 적절한 처리에 대한 관심이 고조되고 있다. 축산 폐기물은 다량의 유기질과 질소, 인성분을 포함하고 있어 하천 부영양화에 심각한 영향을 초래하므로, 환경보존을 위해 처리의 필요성은 매우 높다. 여기에 적절한 처리방법을 사용할 경우 축산폐수에 풍부하게 존재하는 질소와 인성분을 비료 등으로 재활용할 수 있어, 자원의 재사용이란 측면에서 매우 바람직하다고 할 수 있다.

축산 폐수의 처리를 위해서는 일반적으로 물리·화학적인

1차 처리공정과 유기물을 생물학적으로 처리하는 2차 처리공정이 이용되고 있다(1-3). 1차 처리는 폐기물 내의 형태, 크기, 밀도가 다른 다양한 고형물을 제거하기 위한 스크린 분리, 침강, 응집침전 등의 단위공정으로 이루어지며, 2차 처리는 미생물을 이용하여 폐수 중의 유기물을 대사 활동을 통해 제거하는 생물학적 처리 방법을 일컫는다. 그러나, 축산폐수는 유기물, 질소 및 인성분의 함유량이 매우 높아 1차 처리와 2차 처리를 거처도 만족할만한 방류수질을 얻기 어려우므로 배출수를 생태계에 그대로 방류할 경우 부영양화 등 하천 생태계의 심각한 파괴를 유발할 수 있다. 따라서, 유기질과 질소 및 인성분의 처리효율을 높이기 위한 부가적 고도처리공정이 필요하며, 그 대안으로 태양광을 에너지원으로 하여 영양염류인 질소 및 인성분을 제거할 수 있는 조류 이용 기술이 개발되고 있다(4-8).

조류는 유기물과 질소, 인성분을 기질로써 사용하여 환경오염물질을 제거함과 동시에 성장하여 유용한 바이오매스를 생산한다. 생산되는 조류는 세포내 우량 단백질의 함량이 높아 고단백 가축사료로 이용할 수 있으며, EPA, DHA,

†Corresponding Author : Department of Chemical Engineering,  
Sogang University, C.P.O. Box 1142, Seoul 100-611, Korea  
Tel: 02-705-8480, Fax: 02-711-0439  
E-mail : jwchoi@ccs.sogang.ac.kr

g-linolenic acid 등의 불포화 지방산 함유량이 높아 식품산업으로의 이용도 가능하다(9-10).

이러한 조류 배양 공정을 효율화하기 위해서는 가장 먼저 생물반응기내로의 효과적 광전달 문제가 해결되어야한다. 일반적 생물반응기에서는 배양액 표면에 조사된 빛에너지가 배양액 내부로 갈수록 고농도의 세포로 인하여 급격한 광도 손실을 일으키며, 광합성에 사용되지 않은 빛에너지가 열에너지로 전환되어 생물반응기의 온도를 상승시키게 된다(11). 따라서 단위 배양액 부피에 빛의 직접적인 노출 면적을 극대화시킬 수 있는 생물반응기의 개발이 필요하다.

또한, 생물공정은 일반적인 화학공정과 비교하여 복잡한 반응기구를 갖는 생화학반응이 일어나므로 반응기내의 상태 변수와 제어변수 사이의 함수관계를 정확하게 동적 모델화하기 매우 곤란하다. 또한 배양 환경의 변화와 세포의 활성변화에 대한 적절한 대응이 필요하고 예기치 못한 조업조건의 변화가 일어날 수 있으므로, 생물 공정은 기존의 수학적 모델에 의존한 제어개념이 아닌 새로운 제어개념이 필요하다(12). 복잡한 모델이 필요하지 않고 전문가의 지식과 경험에 의존하는 퍼지제어는 이러한 관점에서 생물 공장에서 우수한 제어효과를 가질 수 있다(13).

본 연구는 조류를 이용하여 축산폐수로부터 방출되어 하천의 부영양화를 유발하는 질소, 인 등의 영양염류를 제거하여 환경오염을 방지함과 동시에 고단백 사료로 활용될 수 있는 조류의 고농도 배양공정을 개발함으로써 공정의 효율성과 경제성을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 영양염류가 조류의 성장에 미치는 영향을 조사하여 최적의 질소/인 비를 얻으며 이를 공정운전에 적용하여 공정효율을 극대화하였다. 조류의 성장에 필수적인 광에너지의 적절한 공급을 위하여 광섬유를 이용한 광생물배양기를 제작하여 조류의 고농도 대량생산을 가능하게 하였다. 또한 반연속식 반응기 공정에서 설정된 질소 배출 농도를 유지하기 위하여 유전알고리즘을 이용한 퍼지 논리 제어를 설계하여 조류 배양 공정의 처리효율을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

**재료 및 방법**

**세포종류 및 배양방법**

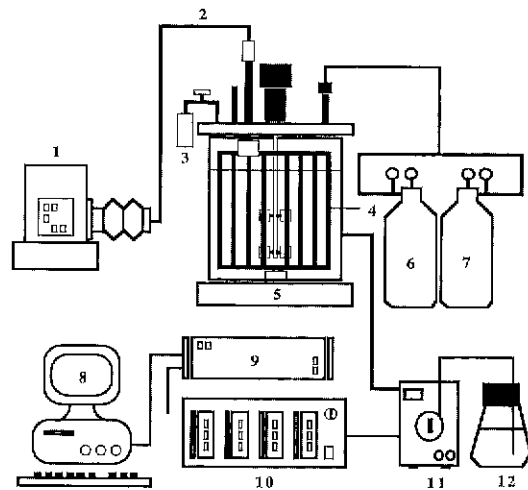
*Chlorella* sp. HA-1은 전북대학교의 정용섭 박사로부터 제공받아 사용하였다. *Chlorella* sp. HA-1은 담수 미세조류로서 독립 영양 광합성 생물이다(14)

*Chlorella* sp. HA-1의 현탁배양은 세포의 유지를 위해서 MBM배지를, 조류 생산량 증진을 위해서 M4N배지를 각각 사용하였으며 각 배지의 조성을 Table 1에 나타내었다. 제대 배양은 3주마다 수행하였으며, 배양현탁 대 배양액의 비율은 1:3으로 하였다. 배지의 pH는 평균전 6.0으로 조정하였으며 현탁세포는 shaking incubator(비전과학, Model 8480 SR)를 이용하여 온도 30 ℃, 교반속도 125 rpm의 조건에서 배양하였다. 조류의 광합성을 위해 조사되는 인공광의 조건은 metal halogen lamp(100W)를 이용하여 광도 2500 lux, 광조사 주기 12시간으로 하였다.

조류성장을 위한 최적 질소/인 비율을 결정하기 위하여 M4N배지에서 인의 농도를 일정하게 하고 질소의 공급원인

**Table 1.** The composition of MBM and M4N medium for *Chlorella* sp. HA-1 culture

Element	MBM	M4N
KNO <sub>3</sub>	200	5000
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	75	2500
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	2.5	2 175
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.222	0.222
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0 079	0 07
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	10	
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2	3
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86	2.86
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.247	0.0247
NaCl	25	
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	75.	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	175.	1250



1 Halogen Lamp 2 Fiber Optical Bundle 3. Sample Port  
 4. Optical Fiber 5. Reactor 6 Air  
 7. Carbon dioxide 8. Computer 9 D/A Converter  
 10. Lab 8800 11. Masterflex Pump 12. Substrate Reservoir

**Figure 1.** Schematic diagram of fiber-optic photobioreactor

KNO<sub>3</sub>의 첨가량을 변화시켜 배지를 제조하였으며, 접종후 15일이 지난 세포 현탁 flask로부터 건조 세포 중량, 질소와 인의 농도를 각각 분석하여 최적비를 얻었다.

조류의 생물반응기 배양 실험을 위하여 5L부피의 배양기를 제작하여 배양부피 3L로 회분식 운전하였다. 조류 배양액의 혼합을 위하여 교반기는 유분학적인 전단응력 등을 최소화하고 균일한 혼합이 이루어지도록 paddle type으로 제작하였다. 공기공급은 *Chlorella* sp. HA-1 배양시 최적의 농도비인 10%의 CO<sub>2</sub>를 0.1 vvm으로 공기 부양하여 혼합효과를 증진시켰다.

고농도 조류 배양시 불균일한 광조사 문제를 해결하기 위하여 광섬유를 이용한 생물반응기를 제작하였다. 빛은 광원으로부터 배양기 내부에 설치한 120개의 광섬유를 통하여 전달되도록 하였다. 광섬유 각각의 길이는 80 cm이며 반응기 내부에 빛을 전달하기 위해 말단 15 cm의 피복을 제거하였다.

축산폐수 처리 실험을 위해 김포에 위치한 축산농가에서 채취한 생물부분을 거즈로 고형물을 제거하여 1일 정도 정치시

킨 후 상등액을 10%로 희석하여 멸균 없이 사용하였다. 유기질 축산폐수를 이용한 *Chlorella* sp. HA-1의 유가식 배양 공정에서 질소 농도 제어를 위하여 광섬유 생물반응기를 Figure1과 같이 구성하였다. 폐수의 공급속도는 자기구성 퍼지 논리 제어기를 통하여 제어하였으며, 축산폐수의 공급은 peristaltic pump(Masterflex, Model 7523-00)를 Lab 8800 (Hando Eng, Co., Korea)을 이용하여 컴퓨터와 연결하여 수행하였다.

**분석방법**

세포의 성장은 세포 건조 중량 측정법을 이용하여 측정하였다. 현탁세포를 미리 무게를 측정한 test tube에 옮기고 3,000 rpm에서 30분간 원심분리하여 여액과 침전된 세포를 분리하였다. 침전된 세포들은 60℃ 건조 oven에서 무게가 일정하게 될 때까지 건조시켜 세포 건조 중량을 측정하여 g/L 단위로 표현하였다. 질소농도분석은 nitrate electrode방법을 적용하였으며, pH Meter System(Model 720A, Orion, U. S. A.), Nitrate Electrode(Model 93-07, Orion, U. S. A.)와 Double Junction Reference Electrode(Model 90-02, Orion, U. S. A.)를 이용하여 배양여액 50 mL와 ISA solution (Orion, U. S. A.) 1 mL를 충분히 교반한 후 전압을 측정하여 정량관계식에 의해 질소농도를 계산하였다. 인 농도 분석은 photometric method를 이용하였으며 molybdate 용액에 100배 희석된 여과여액을 일정비로 혼합후 U V. Spectrophotometer(Model. V-550, JASCO, Japan)를 사용하여 파장 365nm에서 absorbance를 측정하고 정량관계식을 이용하여 인농도를 계산하였다(15).

**이 론**

***Chlorella* sp. HA-1의 성장모델식**

축산폐수를 이용한 광섬유 생물반응기의 회분식 배양 실험결과를 토대로 *Chlorella* sp. HA-1의 생산공정에서 세포 성장과 질소 및 인의 소모를 예측할 수 있는 구조적 성장 모델식을 수립하였다. 수립된 모델식은 세포 성장과 질소, 인의 소모를 정량적으로 예측 가능하게 하며 광섬유 생물반응기의 운전성능 모사에 응용할 수 있다.

**(1) 세포 건조 중량식**

세포 성장에 따른 질소와 인의 소모에 질소-인의 경쟁적 제한을 가정하였다. 접종후 세포가 환경에 적응하는 지연기가 나타났으며 지연시간은 대략 1일이었다. 질소-인의 경쟁적 제한과 지연기를 고려하여 Monod식을 변형하여 식(1)과 같이 비성장 속도를 표현하였다

$$\mu = (1 - \exp(-\frac{t}{t_L})) \cdot \left[ \frac{\mu_{mN}S_N}{S_N + K_N(1 + S_P/K_P)} + \frac{\mu_{mP}S_P}{S_P + K_P(1 + S_N/K_N)} \right] \tag{1}$$

세포 건조 중량식은 세포의 성장뿐 아니라 세포의 사멸을 고려하여 비사멸 속도를 포함한 식으로 수립하였다. 식(2)와

같이 표현된 세포 건조 중량식에서, 첫째 항은 질소와 인을 소모하는데 따른 세포성장을 나타내며 두번째 항은 세포의 사멸과 용혈에 의한 세포 건조 중량의 감소를 나타낸다. 세포 건조 중량식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{dX_d}{dt} = (1 - \exp(-\frac{t}{t_L})) \cdot \left[ \frac{\mu_{mN}S_N}{S_N + K_N(1 + S_P/K_P)} + \frac{\mu_{mP}S_P}{S_P + K_P(1 + S_N/K_N)} \right] X_d - k_d X_d \tag{2}$$

**(2) 질소/인 소모 속도식**

$$\frac{dS_N}{dt} = -\frac{1}{Y_{N/S_N}} (1 - \exp(-\frac{t}{t_L})) \cdot \left[ \frac{\mu_{mN}S_N X_d}{S_N + K_N(1 + S_P/K_P)} \right] \tag{3}$$

$$\frac{dS_P}{dt} = -\frac{1}{Y_{P/S_P}} (1 - \exp(-\frac{t}{t_L})) \cdot \left[ \frac{\mu_{mP}S_P X_d}{S_P + K_P(1 + S_N/K_N)} \right] \tag{4}$$

질소와 인은 세포성장에 필요한 기질로서 세포성장에 따라 소모되며 상호 경쟁적 제한 관계를 가지는 것으로 가정하였다. 질소/인 소모속도식은 질소와 인의 경쟁적 제한에 의한 항과 지연기의 항을 첨가하였으며, 세포 유지를 위한 질소/인 소모는 무시하였다.

**(3) 매개변수추정**

수립된 모델식들은 미분식으로, 모델에 사용된 매개변수들은 비선형 매개변수 추정기법을 이용하여 얻어진다(16, 17). 매개변수 추정이 이루어지는 동안 Runge-Kutta-Verner 6<sup>th</sup>-order method를 이용하여(18) 미분식의 수치적분으로 동시에 해를 구하게 된다. 매개변수 값들은 실험 결과와 모델식의 결과가 가장 잘 일치하는 경우의 것으로 결정하였으며, 결정된 매개변수의 값들은 Table 2에 나타내었다.

**Table 2.** List of parameters for the kinetic model of *Chlorella* sp. HA-1

	Parameter	Dimension	Value
$\mu_{mN}$	Maximum specific growth rate in nitrate	day <sup>-1</sup>	0.2148
$\mu_{mP}$	Maximum specific growth rate in phosphate	day <sup>-1</sup>	0.1714
$K_N$	Monod constant in nitrate	g/L	0.1015
$K_P$	Monod constant in phosphate	g/L	0.0917
$Y_{N/S_N}$	Yield coefficient in nitrate	g/g	2.4812
$Y_{P/S_P}$	Yield coefficient in phosphate	g/g	0.5871
$k_d$	Death rate	day <sup>-1</sup>	0.05
$t_L$	Lag time	day	1

**자기구성 퍼지 제어기의 구성**

**(1) 퍼지 규칙과 퍼지 제어 알고리즘**

*Chlorella* sp. HA-1의 배양공정에서 조류성장 및 영양염류 처리의 향상을 위하여 반연속식 배양공정에서 폐수유입량 조

질을 통하여 주어진 설정치로 질소 농도를 제어하는 퍼지 논리 제어기를 설계하였다. 퍼지 논리 제어기의 퍼지 변수는 2개의 입력변수와 1개의 출력변수로 구성된다. 퍼지 입력변수는 질소 농도의 설정치 오차(set point error of nitrate concentration) E, 질소 농도의 오차 변화 (change in error of nitrate concentration) CE, 그리고 퍼지 출력 변수로서 공정에 가해지는 축산폐수의 유량 변화인 제어 동작 DU 등이다. 자연언어로 표현된 목적 함수들을 귀속도 함수(membership function)를 통하여 퍼지집합으로 표현함으로써 제어에 관한 지식을 3개의 퍼지변수들을 포함한 규칙 베이스로 묘사하였다.

Rule A if E is E<sub>i</sub> and CE is CE<sub>i</sub>,  
then DU is DU<sub>i</sub> (A=1N) (5)

여기서 E<sub>i</sub>, CE<sub>i</sub>, 그리고 DU<sub>i</sub>는 각각 퍼지 변수 E, CE, DU의 언어부호 (linguistic label)이다. 이러한 부호는 다음의 퍼지 집합으로 구성되었다; Positive Big, Positive Medium, Positive Small, Zero, Negative Small, Negative Medium, Negative Big. 약호로는 다음과 같이 표현하였다; PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB.

퍼지 제어시스템을 구성하기 위하여 입력변수로서 세포 배양기내의 질소 농도를 고려하고 질소 농도를 제어하기 위한 출력변수로서 축산폐수의 공급속도의 변화를 선정하였다. 생물 배양기에서 측정되는 질소의 농도와 최적 질소 농도 설정치를 비교하여 계산된 오차와 오차변화가 퍼지화되어 귀속도 함수에 적용되며, 퍼지 규칙에 따라 각 제어규칙의 출력이 계산되었다. 각 제어규칙의 출력을 비퍼지화하여 출력변수인 실제 축산 폐수의 공급속도 변화량을 무게중심법(center of gravity method)으로 구하게 되며 이 값은 기질 공급의 속도 조절을 위한 신호로 출력되었다.

(2) 자기구성 퍼지 제어기

퍼지논리제어만으로 최적의 공정 조건을 구현하는데 한계가 있다. 운전전략을 표현한 언어 모델의 신뢰성에 문제가 있으며 공정 제어의 상당 부분에 대한 전문가의 경험과 지식이 부족한 상황에서는 퍼지제어기를 설계하기 어렵다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 도입하여 축산폐수의 공급 속도를 제어하는 퍼지 규칙을 자동으로 생성하는 자기구성 퍼지 논리 제어기를 Figure 2와 같이 구성하였다(19)

(3) 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연적 선택과 자연적 유전의 메커니즘을 바탕으로 하는 일종의 탐색 알고리즘으로서 다윈의 진화론에 근거한 것이다(20). 유전알고리즘에서는 개체군이라 불리는 데이터의 집단으로부터 적합도(fitness)에 의해서 한 세대에서 다음 세대로 개체군이 바뀌어 가게 된다. 그리고 이 적합도는 타당한 개체군을 선택해 내는 역할을 수행하게 된다. 여기서 타당한 개체군은 최적의 질소 농도 궤적을 제어하기 위한 퍼지 제어기의 규칙 베이스로서 퍼지 규칙의 생성을 의미한다 퍼지 규칙은 이진화된 스트링으로 변환되고 여기서 이

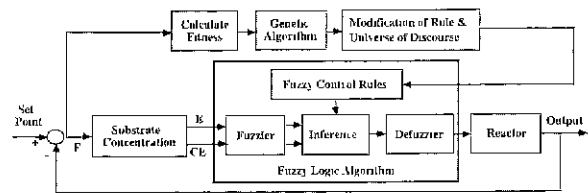


Figure 2. Self-organizing fuzzy logic controller

진화 스트링은 생물체의 염색체에 비유된다. 염색체의 변화는 실제 이진화되어 삽입된 매개변수를 대상체에 적용함으로써 결정되며 타당한 개체군 선발을 위한 척도로서 실수형 적합도(fitness)를 표현하고 그 식은 다음과 같다.

$$Fitness = \frac{K}{\sum_{j=1}^n |y_{set} - y_j| + \sum_{i=1}^m |y_{set} - y_i|^2} \quad (6)$$

적합도의 계산 후에 모든 염색체는 유전 연산자-재생(reproduction), 교배(crossover), 변이(mutation)-를 통해 서로 조합되어 새로운 염색체군을 형성한다. 재생연산 과정은 일반적인 염색체의 진화를 의미하고 전세대의 적합도에 비례하여 이루어진다. 즉 각각의 스트링들은 자신의 목적함수에 따라 복사된다 스트링을 복사한다는 것은 보다 높은 적합도를 가지는 스트링이 그 다음 세대에서 보다 많은 후세대 스트링을 생성해 낼 확률이 높다는 것을 의미한다. 재생후에는 자연계의 암수 성을 고려한 단순한 교배연산이 두단계로 수행된다. 처음에는 새롭게 생성된 스트링들을 임의로 짝을 지운다. 그 다음에는 각 스트링의 쌍들에 대해서 스티링의 임의의 위치에서 두 스트링을 분할한 뒤, 그 위치 이하를 각각 바꾸어 상대 스트링에 붙여준다. 이런 과정을 통해 새로운 스트링을 만들어 낸다. 극부적으로 드물게 나타나는 돌연변이현상을 고려한 변이 연산을 수행한다. 변이 연산은 주어진 확률에 의해서 발생하게 되는데 스트링의 임의 위치를 비트를 0은 1로, 1은 0으로 바꿔 주는 연산이다. 이는 유전적인 조합과정에서 유전자가 뒤집힐 수 있는 적은 가능성을 고려한 것이다. 유전 알고리즘은 생물체의 선천적 유전형질과 후천적 유전형질을 나타낼 수 있다 즉 알고리즘의 변화 연산은 선천적 유전형질과 같은 역할을 수행하고 그 선택 메커니즘은 후천적 유전 형질에 해당된다.

결과 및 토의

최적 질소/인 비율

Figure 3 은 조류성장을 위한 최적 질소/인 농도 비율을 결정하기 위하여 배지내 질소/인의 비율을 다양하게 조절하여 지수 성장의 말기인 접종후 15일에 측정된 세포 건조 중량의 비교 결과이다. 세포 건조 중량은 질소/인의 비율이 15:1일 경우가 최대값을 나타내었다. 질소/인의 비율이 30:1 이상의 경우는 세포가 현탁세포 배양내에서 응집체를 형성하거나 벽면 증식이 현저히 증가하는 등 비균일 성장을 하게 되므로 조류의 고농도 배양 및 유기질 분해 효율을 향상을 기대하기 어렵게 된다. 따라서 세포의 성장 상태가 균일하고

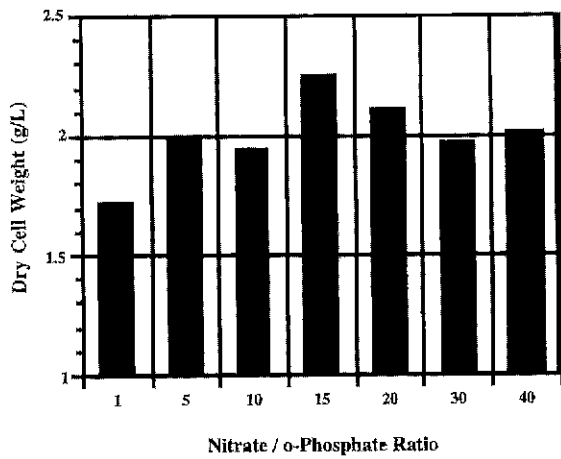


Figure 3. Experimental results for optimal N/P ratio determination in *Chlorella* sp. HA-1 culture

고농도의 배양이 이루어 질 수 있도록 질소/인 농도비를 15:1로 결정한 배지를 반응기 운전에 적용하였다.

**광생물반응기 및 광섬유 생물반응기 실험**

Figure 4에 외부광조사 방식에 의한 광생물반응기와 광섬유 생물반응기를 이용하여 *Chlorella* sp. HA-1의 회분식 배양 실험에서 얻은 시간에 따른 세포 건조 중량, 질소 및 인의 변화를 나타내었다. 외부광조사에 의한 현탁배양실험을 통한 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 및 질소와 인의 소모량을 비교한 결과, 광섬유를 이용한 생물반응기의 실험결과는 일반 생물반응기 실험결과에 비해, 세포 건조중량이 11% 증가하였으나, 초기집중량의 차이를 볼 때, 유사한 세포 성장을 유도하는 것으로 볼 수 있고, 인의 소모도 초기의 ortho-phosphate 농도의 차이를 감안하면 유사한 소모특성을 보임을 알 수 있다. 하지만, 질소의 소모는 초기 질소농도가 높았음에도 불구하고 19% 향상된 제거효율을 보여, 질소 소모특성이 우수하다고 볼 수 있다. 이는 광섬유 생물반응기에서 사용된 광섬유를 통하여 반응기내로의 효과적이고 균일한 광조사가 이루어질 수 있으며, 광을 필요로 하는 미생물의 배양에서는 광섬유를 이용한 생물반응기의 응용이 가능한 것으로 해석할 수 있다.

**광섬유 생물반응기를 이용한 회분식 축산폐수 처리**

Figure 5에 *Chlorella* sp. HA-1의 회분식 축산폐수처리 실험을 통한 세포 건조 중량 및 질소와 인의 변화 및 전산모사결과를 나타내었다. 세포의 최대 성장은 접종 후 11일경에 나타났으며, 질소와 인의 처리 효율은 각각 89% 와 92%를 나타내었다. *Chlorella* sp. HA-1의 회분식 배양을 통한 축산폐수처리 실험결과를 토대로 구성된 모델식의 현상모사 결과는 전체 배양기간에 걸쳐 세포 성장 및 기질의 소모 거동을 잘 설명하고 있음을 알 수 있다.

**자기구성 퍼지 제어기를 이용한 유기식 축산폐수처리**

*Chlorella* sp. HA-1의 배양공정에서 세포성장과 영양염류 오염물질의 처리를 유지시킬 수 있는 연속운전의 가능성을 모색하기 위하여 유기식 배양공정에서 주어진 설정치로 배양

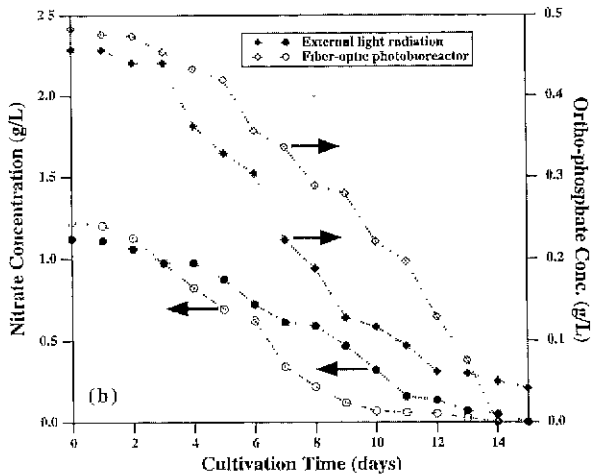
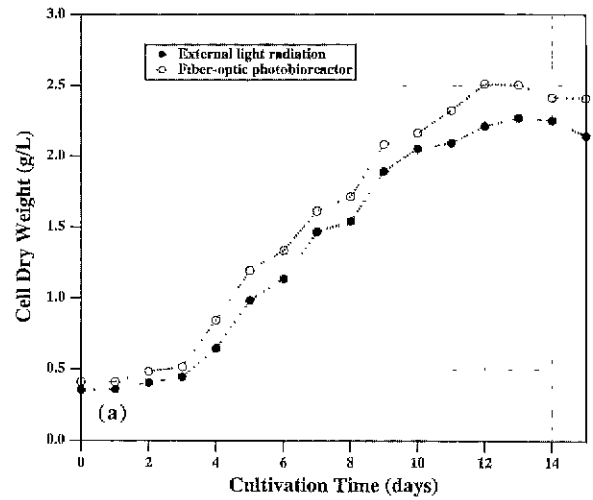


Figure 4. Experimental results of *Chlorella* sp. HA-1 batch culture in conventional photobioreactor and fiber-optic photobioreactor (a) dry cell weight (b) nitrate and ortho-phosphate concentration

기 내의 질소 농도를 제어하는 퍼지 논리 제어기를 설계하였다. 설정치는 연속적인 공정운전에 따른 배출을 위하여 오수 분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률 시행규칙에 의하여 축산폐수 질소 방류기준인 0.120g/L(1998년 12월 31일까지 적용된 기준임)로 정하였다(21). Figure 6은 제안된 구조적 모델을 이용하여 현상모사된 각 세대별 적합도를 나타낸 것으로 세로축은 최적 질소 설정치에서 벗어난 정도, 즉 오차의 합을 나타낸다. 최대, 평균, 최소 적합도는 거의 세대수에 비례하여 증가함을 보인다. 최대 적합도는 27번째 세대의 5번째 개체에서 나타났으며, 이때의 규칙을 기질 공급을 위한 퍼지 제어 규칙으로 선정하였다. Figure 7에 퍼지논리 제어기에 적용될 퍼지 규칙과 귀속도 함수를 나타내었다.

Figure 8에 초기 집중량을 0.4015g/L로 한 *Chlorella* sp. HA-1의 자기구성 퍼지 제어기를 이용한 유기식 배양공정에서 시간경과에 따른 세포 건조 중량 및 질소와 인의 변화에 대한 현상모사 및 실험결과를 나타내었다. 현상모사 결과 개발된 퍼지제어기는 질소농도 설정치 제어를 유지하는데 좋은 제어성능을 나타냄을 보여주었으며, 실험결과에서도 질소농도

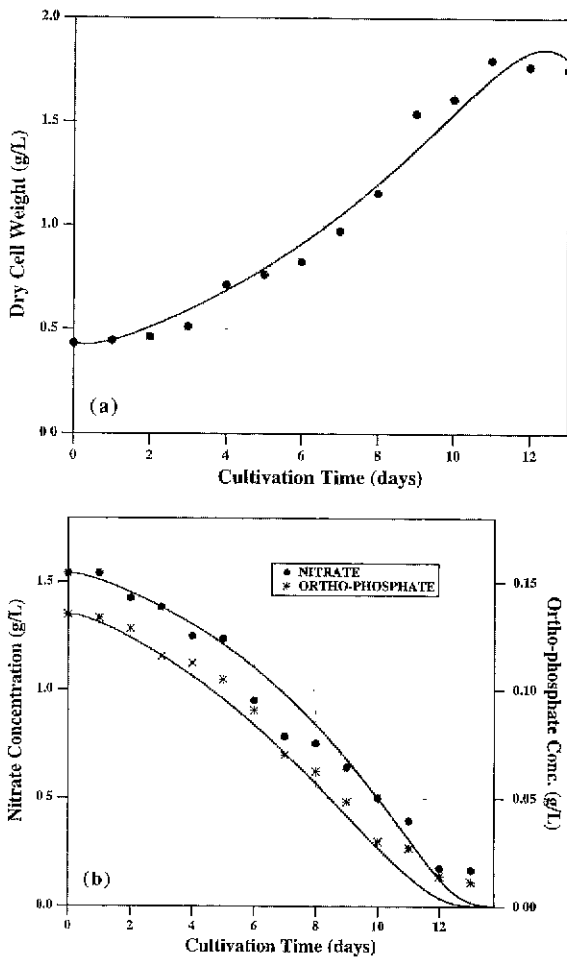


Figure 5. Experimental and simulation results of *Chlorella* sp. HA-1 batch culture for livestock wastewater treatment in fiber-optic photobioreactor (a) dry cell weight (b) nitrate and ortho-phosphate concentration

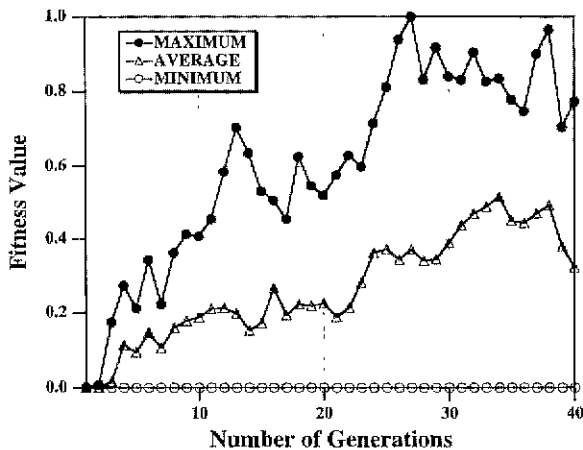
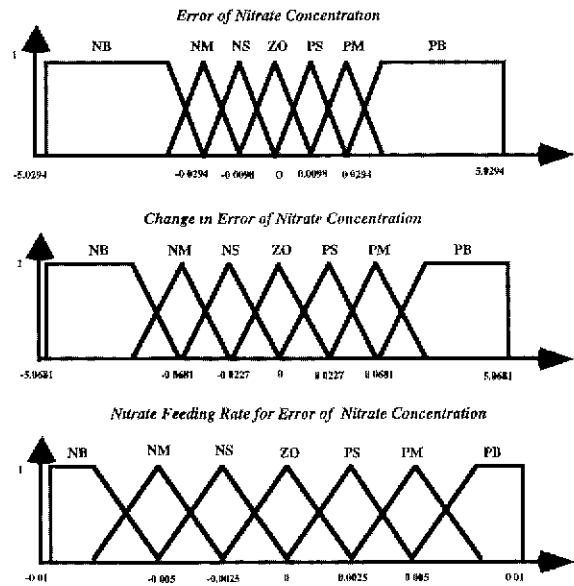


Figure 6. Fitness values of individual generation of self-organizing fuzzy logic controller

가 주어진 질소농도 설정치 궤적을 잘 유지함으로써 제어가 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있다. 세포 건조중량은 꾸준히 증가하여 배양 마지막 날인 20일경에 1.9514g/L이르렀으며, 인의 농도는 꾸준히 감소하다가 질소 농도가 설정치에



E	CE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		NB	ZO	NB	NB	PS	PM	ZO
NM		ZO	PS	NS	ZO	NB	NM	PB
NS		PM	NB	PB	NM	ZO	PS	PB
ZO		NB	NS	PB	PM	PM	ZO	NB
PS		PS	NB	ZO	PM	PB	NS	PS
PM			PM	NS	ZO	PS	NS	PM
PB		PS	PS	ZO	PS	PM	PM	PM

Figure 7. Fuzzy rules and Membership functions of self-organizing fuzzy logic controller

도달한 후 큰 변화없이 유지되었다. 배양기간 동안 세포 건조중량, 질소와 인의 총 처리량을 회분식 배양 결과와 비교하였을 때 세포 건조중량은 12% 증가하였으며 질소와 인의 소모량은 각각 32%, 27%증가하였다 따라서 축산폐수처리를 위한 조류배양공정에서는 유기식 배양이 회분식 배양보다 우수한 세포 성장과 인 및 질소 소모 특성을 가지고 연속적인 처리를 가능하게 해줄 수 있음을 알 수 있었다.

요 약

본 연구는 조류의 고농도 배양을 통하여 축산폐수로부터 질소, 인등의 영양염류를 효과적으로 제거하여 환경오염을 감소시키는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 조류성장의 환경적 요소인 질소/인 농도비에 대한 질소와 인의 제거효율

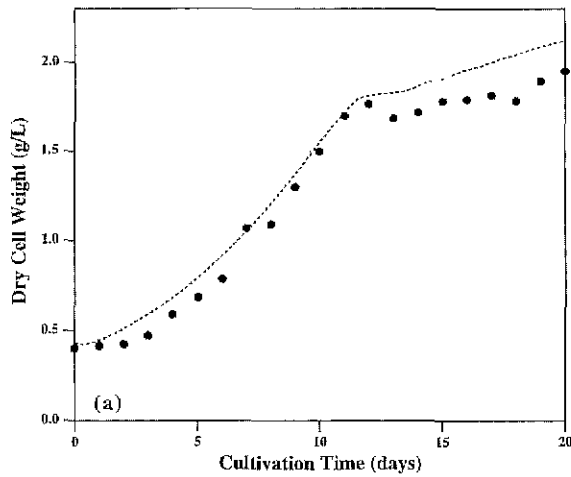


Figure 8. Simulation and Experimental results of livestock wastewater treatment in the semi-continuous culture of *Chlorella* sp. HA-1 (a) dry cell weight (b) nitrate and ortho-phosphate concentration

분석 실험을 통하여 최적 질소/인 농도비를 결정하였다. 고농도 조류 배양을 위한 광도의 균일한 공급을 위하여 광섬유를 이용한 광생물반응기를 공정에 적용하였다. 제한된 광섬유를 이용한 광생물반응기는 광원으로부터 반응기 전체로 효과적인 광전달을 수행하는 것을 확인하였다. 조류 배양에서 조류의 성장과 질소, 인의 제거를 표현하기 위해서 구조적 속도식 모델을 제시하였다. 유전알고리즘을 이용한 자기구성 퍼지 제어를 구성하여 반연속식 폐수처리공정의 제어를 수행하였다. 구성된 퍼지 제어기는 폐수의 유입량 조절을 통하여 질소의 농도를 주어진 설정치로 유지되도록 운전하였다. 실험 결과에 의해 자기구성 퍼지 제어기는 원하는 질소의 농도를 잘 유지함은 물론 조류의 성장을 증진시킴을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 현대 아산 재단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

사 용 기 호

$k$	rate constant ( $\text{day}^{-1}$ )
$t$	time (day)
$y$	substrate concentration (g/L)
$K$	Monod constant (g/L)
$S$	substrate concentration (g/L)
$X$	biomass concentration (g/L)
$Y$	yield coefficient (g/g)

Greek symbols

$\mu$	specific growth rate ( $\text{day}^{-1}$ )
-------	--

Subscripts

$d$	dry cell weight
$N$	nitrate
$P$	ortho-phosphate
$L$	lag phase
$m$	maximum
$set$	setpoint
$X/S_N$	biomass from nitrate
$X/S_P$	biomass from ortho-phosphate

참 고 문 헌

- Moo-Young, M. and D. Chahal (1981), Pollution Control of Swine Manure and Straw by Conversion to *Chaetomium Celluliticum*, *Biotechnol. Bioeng.* **23**, 2407-2475.
- Oswald, W. (1965), Harvesting and Proceeding Sewage Grown Planktonic Algae, *J Water Poll Control. Fed.*, **37**, 471-480.
- Shelef, G. And C. J. Soeder (1980), *Algae Biomass Production and Use*, p852-871, Elsevier Press, New York.
- Redalje, D. J (1989), *Biotreatment of Agricultural Wastewater*, p91-110, CRC Press, New York.
- Laws, E. A., K L Terry, J. Wickman, and M. S. Charup (1983), A Simple Algal Production System Design Utilizing Flashing Light Effect, *Biotechnol. Bioeng.*, **25**, 2319-2325.
- Hashimoto, S and K. Furukawa (1989), Nutrient Removal from Secondary Effluent by Filamentous Algae, *J. Fermt. Bioeng.*, **67**, 62-69.
- WPCF and ASCE (1977), *Wastewater Treatment Plant Design*, WPCF Manual of Practice No. 8 and ASCE Manual of Engineering Practice No. 36, Lancaster Press Inc., New York.
- Glynn Henry, J. and G. W. Heinke (1989), *Environmental Science and Engineering*, p409-469, Prentice Hall, New York.
- Lavoie, A. and de la J. Noue (1985), Hyperconcentrated Cultures of *Scenedesmus obliquus*, *Water Res.*, **19**, 1437-1442.
- Becker, E. W. (1994), *Microalgae: Biotechnology & Microbiology*, p39-41, Cambridge University Press, Cambridge.
- Matsunaga, T., H. Takeyama, H. Sudo, N. Oyama, S. Ariura, H Takano, M. Hirano, J. G. Burgess, K. Sode, and N. Nakamura (1991), Glutamate Production from CO<sub>2</sub> by Marine Cyto bacterium *Synechococcus* sp. using Novel Biosolar Reactor Employing Light Diffusing Optical Fibers, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **28/29**, 157-167.
- Choi, J. W., S. M. Oh, H. G. Choi, S. B. Lee, K. S. Lee, and W. H. Lee (1998), Fuzzy Control of Ethanol Concentration for Emulsion Production in a Fed-Batch Cultivation of *Acinetobacter Calcoaceticus* RAG-1, *Korean J. of Chem. Eng.* **15**, 310-316.
- Choi, J. W., J. K Park, K S Lee, and W. H. Lee (1994), Application of Genetic Algorithm to Fuzzy Rule Generation in Fed-Batch Culture of *Thalicttrum rugosum* Plant Cell, Proc. the Asian Control Confer-

- ence, pp305-308.
14. Watanabe, Y., N. Ohmura, and H. Saiki (1992), Isolation and Determination of Cultural Characteristics of Microalgae which function under CO<sub>2</sub> enriched atmosphere, Pergamon Press, U. K
  15. APHA, AWWA, WEF (1998), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., p4/139-4/154, APHA, Washington D.C.
  16. Metzler, C. M., G. L. Elfring, and A. J. McEwen (1974), A Package of Computer Programs for Pharmacokinetic Modeling, *Biometrics* **30**, 562-563.
  17. Seinfeld, J. and L. Lapidus (1970), Process Modeling, Estimation and Identification, Prentice Hall, New Jersey.
  18. Maron, M. J. (1982), Numerical Analysis: A Practical Approach, p344-370, Macmillan Publishing, New York.
  19. Zadeh, L. A. (1993), Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process, *IEEE Tr. On Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3, pp28-44.
  20. Goldberg, D. E. (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, p28-53, Addison-Wesley Publishing Co. Ltd. New York.
  21. The ministry of environment (1991), Act Relating to Treatment of Sewage, Night soil and Livestock Wastewater, Presidential Decree, Annex 1, Republic of Korea.