

Scenedesmus sp.를 이용한 하수의 영양물질 제거에 관한 연구

이 희 자
서울시립대학교 환경공학과
(1999년 5월 21일 접수)

A Study on the Nutrient Removal of Wastewater Using *Scenedesmus* sp.

Hee-Ja Lee

Dept. of Environ. Eng., The University of Seoul
(Manuscript received 21 May, 1999)

This paper describes the working of algal culture system under batch and continuous feeding effluents in biological treatment process. The main objective of this study was the determination of fundamental operating parameters such as dilution rates, light intensity, biomass concentration, nutrients contents, which engender an effective nutrient and organic waste removal process.

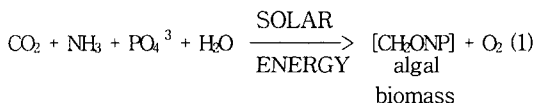
The results of this research indicate that the algae system will remove effectively nutrient and organic waste. In batch cultures, 91.8% dissolved orthophosphate and 83.3% ammonia nitrogen were removed from the sewage in ten days. In continuous flow systems, a detention time of 2.5 days was found adequate to remove 91% T-P, 87% T-N and 95% NH₃-N. At 22-28°C, 60 rpm, with an intensity of 3500 Lux, the specific growth rate, k was 0.59/day in batch experiments. The optimal growth temperature and nutrients rate (N/P) were respectively 25°C and 3~5. With an abundant supply of nutrients, it was possible to sustain substantial population densities in the temperature range of 22~28°C.

Key words : *Scenedesmus* sp., algal culture, nutrient removal, light intensity

1. 서 론

우리나라에서 유기성 폐수처리에 많이 사용되고 있는 대표적 생물학적 처리공법의 하나인 활성슬러지 공법은 유기물의 제거효율은 높으나, 질소 및 인 등과 같은 영양물질의 제거율은 30% 내외로 비교적 낮은 편이다. 2차처리수에 함유되어 배출되고 있는 이러한 영양 물질은 호소 및 하천에 유입되어 생태계에 악영향을 미쳐 부영양화 현상을 유발시키고 있다. 이러한 영양물질의 농도를 줄이기 위하여 물리적, 화학적, 생물학적 방법을 이용한 다수의 3차 처리 공법들이 보고되고 있으나 대부분 설치, 운영비가 많이 들고 제거효율도 크게 높지 않아 실용화에 많은 문제점이 있는 것으로 알려지고 있다.

조류는 독립영양 미생물로서 식(1)과 같은 광합성반응을 위해 햇빛으로부터 에너지를 얻고 무기물인 CO₂를 탄소원으로 이용하므로, 적당한 양의 빛과 용존 영양물질만 존재하면 생장이 가능하다.¹⁾



활성슬러지 공법의 최종유출수에는 호소 및 하천의 부영양화를 유발하는 질소, 인 등의 영양물질과 조류성

장에 필요한 미량 영양물질을 풍부하게 함유하고 있으므로, 환경조건을 잘 조절하면서 이 유출수에 조류를 배양하면 동화 및 이화작용을 거쳐 조류의 증식과 함께 높은 영양물질의 제거효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.²⁾ 즉, 하·폐수에 존재하는 질소, 인 등의 화합물이 생물학적 처리공정(2차 처리)에서 30% 내외만 제거되고 그 처리수에 상당한 농도로 함유되어 자연수계에 배출되므로, 조류(algal)를 3차 처리에 이용할 경우 이들 영양물질이 조류체 합성에 사용되어 수중의 농도를 상당량 줄일 수 있을 것이다.

한편 영양물질을 흡수하여 성장한 조류의 biomass는 이상적인 단백질원으로서 동물의 사료로서 이용가능하고, 또한 조류사체를 슬러지와 함께 혐기성 소화조에 투입하면 유용한 가스인 메탄을 회수할 수 있어 에너지원으로서도 가치가 있다.

따라서 조류의 대량배양은 제 2차 세계대전 이후 세계 곳곳에서 활발히 진행되었으며, 조류를 이용한 폐수 처리 system이 여러나라에서 운전 중에 있고, 미소조류로부터 단백질원을 추출하려는 노력이 계속 진행 중이다.³⁾

따라서 본 연구에서는 조류배양을 이용한 영양물질의

제거능, 조류배양조의 최적운전 방법, 조류 증식량과 질소 및 인농도와의 관계, 환경인자가 조류성장에 미치는 영향 및 조류의 효율적인 분리, 회수방안 등에 대하여 이론적 고찰과 실험적 검토를 가함으로써 공법의 개선방안을 모색해 보았다.

2. 실험내용 및 방법

조류에 의해 영양물질을 효율적으로 제거하기 위해서는 질소, 인과 같은 필수 영양물질, algal biomass 및 환경인자 즉, 수온, 조도, pH, 교반강도 등의 적절한 제어가 필요하다. 조류에 의한 영양물질 제거능을 평가하기 위하여 먼저 활성슬러지조 유출수의 성분을 분석하고, 유출수에 조류를 배양하여 영양물질을 어느 정도 제거하는지 회분 및 연속 배양실험을 실시하였고, 조류제거에 영향을 미치는 인자 등에 관해서도 검토하였다.

2.1. 조류의 순응

조류배양을 위해서 조류가 함유된 한강 원수 25 l를 Fig. 1과 같은 조류배양조에 채운 후 Table 1과 같은 영양물질을 넣어 3,500 Lux의 조도, 60 rpm의 혼합강도 및 20~28℃의 온도를 유지한 상태로 옥외에서 한 달간 배양한 결과 빠른 조류성장을 관찰할 수 있었다.

인공배지에서 배양된 조류를 중량하수처리장 활성슬러지조의 최종유출수에 순응(adaptation)시킨 결과, 햇빛이 비치는 옥외에서 배양 4~5일 만에 algal blooming 현상이 나타나기 시작하였다. 이때 녹조류(green algae)에 속하는 *Scenedesmus* sp.가 95% 이상을 차지하여 우점종을 이루었고, 이 밖에 *Chlorella*, Bacteria 및 원생동물군 등도 출현하였다.

Table 1. Nutrient composition of synthetic medium for algae cultivation

(per 75 l)			
Chemicals	Amounts	Chemicals	Amounts
KNO ₃	6.00 g	Na ₂ · EDTA	3.75 g
K ₂ HPO ₄	0.84 g	MnSO ₄ · H ₂ O	0.11 mg
KH ₂ PO ₄	0.63 g	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	15.0 mg
MgSO ₄ · 7H ₂ O	18.75 g	CuSO ₄ · 5H ₂ O	6.00 mg
CaCl ₂ · 2H ₂ O	1.16 g	H ₃ BO ₃	0.23 mg
Fe ₂ (SO ₄) ₃	0.3 g	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₄ · 4H ₂ O	9.75 mg
NaHCO ₃	12.6 g	CoCl ₂ · 6H ₂ O	3.00 mg

2.2. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 유입 저수조, 조류배양조, 침전조로 이루어졌으며, Fig. 1과 같이 조류배양조는 투명한 아크릴로 제작한 완전혼합형으로 배양용적은 125 l (0.5 m × 0.5 m × 0.5 m)이고 실 배양용적은 75 l로 하였다. 저수조와 침전조의 용량은 각각 50 l와 30 l이며, 침전조의 유출수는 25 l tank에 모아졌다. Peristaltic pump를 이용하여 활성슬러지조의 유출수

를 배양조로 유입하고, 배양조 유출수는 Imhoff형 침전조에 모았다. 침전조 바닥의 조류는 펌프를 이용하여 연속적으로 반송하였다.

또한, 혼합과 포기의 이중효과를 얻기 위해서 교반기를 설치하고, 일정한 온도를 유지하기 위하여 heater와 온도 조절장치를 설치하였으나, 옥외에서 실험하였기 때문에 완전한 온도의 제어는 불가능했다. 또한 조류의 성장에 필요한 빛을 야간에도 계속 공급해 주기 위해서 자동 조도조절기, 형광등, 백열등 등을 설치하였다.

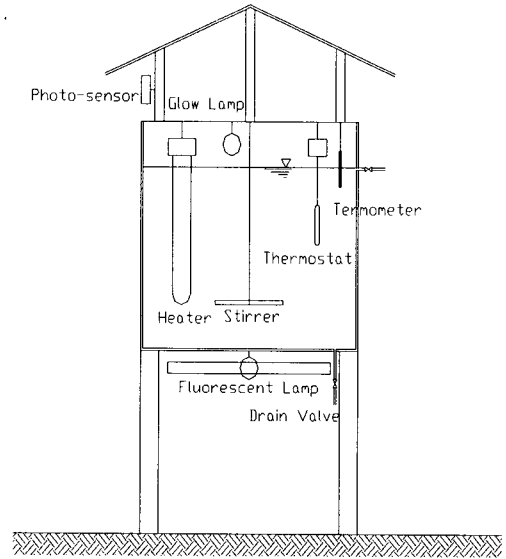


Fig. 1. Schematic diagram of algae cultivation tank.

2.3. 실험방법

조류의 영양물질 제거능을 알아보기 위하여 중량하수처리장의 2차처리수에 인공배지에서 적용된 조류를 클로로필-a 농도가 30 ppm이 되도록 주입하여 회분실험을 실시하였다.

자연환경에서는 항상 낮과 밤이라는 주기 속에서 조류가 증식하고 있지만 조류의 인위적인 배양을 위하여 24시간 연속조사를 실시하였다. 낮에는 햇빛을 밤에는 인공조명을 이용하였으며, 실험조건은 수온 25±3℃, 혼합강도 60 rpm, 조도 3,500 Lux로 일정하도록 유지하였다. *Scenedesmus* sp.가 배양조에서 급속히 성장하였고, 전 실험기간 동안 95% 이상을 차지하는 우점종이 되었다.

배양조의 클로로필-a 농도가 대략적으로 300 ppm이 되었을 때 Table 2의 조성과 같은 합성폐수를 유입수로 하여 연속배양으로 전환하였고, 반응조 용량과 유입량을 고려하여 회석비율을 0.25/day에서 0.77/day로 달리하면서 연속실험을 실시하였다. 조류배양조의 유출수는 Imhoff형 용기에 침전시키고, 침전조 바닥의 조류는 반응조의 조류농도를 유지하기 위하여 펌프를 이용하여 연속적으로 반송하였다. System에서 충분한 biomass가 형성된 후 정상상태 운전이 시작되었다.

연속배양 실험에서 *Scenedesmus* sp.의 평균세포체류

시간(θ_c)은 식(2)로 계산하였다.

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_e X_r + (Q_i - Q_e) X_e} \quad (2)$$

여기서, Q_e 는 인출되는 세포량(ℓ/day), Q_i 는 유입수량(ℓ/day), X_r 은 반송 또는 인출되는 조류농도(mg/ℓ), X 는 배양조내의 조류농도(mg/ℓ), V 는 반응조 용적(ℓ)을 의미한다. 조류의 성장속도가 느리므로 침전되는 모든 조류를 배양조로 반송하였을 때의 θ_c 는 식(3)으로 계산하였다.

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_e X_r} \quad (3)$$

옥외에서 실험한 회분 및 연속실험과는 별도로 3개의 조류배양조(3 ℓ)를 제작하여 옥내에 설치하고 일정한 실험조건으로 조류증식에 영향을 미치는 인자 및 제한영양인자에 관한 실험을 실시하였다. 환경인자실험을 위한 유입원수는 Table 2의 합성폐수를 이용하였다.

영양물질을 섭취한 후 배양조 유출수 속에 남아 있는 조류를 효율적으로 회수하는 일이 조류배양 system에서 중요한 문제이다. 따라서 이러한 조류를 분리, 회수하기 위한 효과적인 방법을 찾아보기 위해서 조류의 자연적 침강실험으로 시간의 경과에 따른 조류의 침강율을 투과도로 측정하였고, 원심분리기의 회전속도를 500 rpm 과 1,000 rpm으로 변화를 주면서 원심분리 후의 시료 상정수를 투과도로 측정, 비교하였다.

Table 2. Composition of synthetic wastewater used in study

Chemicals	Conc. (mg/ℓ)	Chemicals	Conc. (μg/ℓ)
Glucose	80	Na ₂ · EDTA	4.88
(NH ₄) ₂ CO ₃	137	MnSO ₄ · H ₂ O	1.41
Na ₂ HPO ₄	20	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	200
MgSO ₄ · 7H ₂ O	250	CuSO ₄ · 5H ₂ O	80
CaCl ₂ · 2H ₂ O	15.47	H ₃ BO ₃	3.13
Fe ₂ (SO ₄) ₃	4.06	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₄ · 4H ₂ O	0.13
NaHCO ₃	167.97	CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.04

2.4. 측정방법

조류농도를 측정하기 위하여 1.0 μm의 유리섬유여지(GF/C)로 여과한 다음 여지를 조직마쇄기에 넣고 아세트(9+1)을 넣어 마쇄하였다. 마쇄한 시료를 원심분리관에 넣고 밀봉하여 4℃ 냉장고에서 24시간 방치하여 조류세포 중의 클로로필을 추출하였다. 추출혼합액을 3,000 rpm으로 5분간 원심분리한 후 상등액의 양을 측정하고 663 rpm, 645 rpm, 750 rpm, 630 rpm의 흡광도를 측정하여 클로로필 a량을 계산하였다.⁴⁾

pH, DO, 온도 및 조도는 측정기기를 사용하여 측정하였고, COD, N, P항목은 Standard Methods에 준하여 분석하였다.⁵⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분배양실험

폐수처리 미생물로서 조류를 성공적으로 사용하기 위해서는 조류배양조 표면에 도달하는 빛에너지를 효율적으로 이용하여 조류 생산성을 최대한으로 높이는 데 있다.

적당한 빛과 온도를 제공해 준다면 조류는 생물학적 2차처리수에서 빠른 증식을 나타내기 때문에 야간에도 광합성 작용을 통한 세포증식을 위해서 인공적으로 연속적인 빛을 제공해 주어야 한다. 조류를 주·야간 계속 배양할 때 조류의 사멸이 전혀 없는 것이 아니라 다만 조류의 지수증식기를 계속 유지해 주어 사멸에 의해 없어지는 조류 보다 증식에 의해 생성되는 조류가 더 많도록 조류배양조를 조정해 주는 것을 뜻한다.

활성슬러지조 유출수 속에 함유되어 있는 영양물질을 조류배양을 이용하여 충분히 제거할 수 있는지 알아보기 위해 실시한 회분배양실험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 4일 까지 COD 및 T-P의 급격한 감소를 관찰할 수 있었는데, T-P 및 COD의 경우 각각 12.74 ppm에서 2.89 ppm, 75 ppm에서 17 ppm으로 각각 77%의 제거효율을 보였다. 반면에 NH₃-N, TKN은 완만한 감소의 경향을 보였는데, 10일 동안의 회분실험 결과 약 91.8%의 T-P와 83.3%의 T-N 및 90.2%의 NH₃-N 제거율을 나타내었다.

조류는 처음 32.77 mg/m³의 농도에서 배양되어 2일 부터 꾸준히 증가하는 경향을 보였는데, 지수증식기의 조류증식 속도는 k=0.59 doubling/day로서 11일 동안 배양한 결과 352 mg/m³의 조류농도를 나타내었다. 조류의 비증식 속도는 algae biomass의 증가에 따라 감소하는데, 그 이유를 살펴보면 algae biomass가 증가함에 따라 투명도가 감소하고 따라서 햇빛의 투과가 순조롭지 못하여 조류배양조 표면에서만 광합성 작용이 일어나기 때문일 것으로 생각된다.

Batch 실험에서의 조류증식 속도(k)는 식(4)에 의해 처음 4~5일 동안 지수증식기의 cell biomass로 부터 측정되었다.⁶⁾

$$k = \frac{2.3 \log(N_2/N_1)}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

여기서 k는 성장속도상수(하루 중 대수증식)이며, N₁, N₂는 각각 T₁, T₂시간의 cell biomass이다. 회분배양실험에서의 비증식속도를 측정해 본 결과, k값이 평균 0.59 day⁻¹로 doubling time은 1.69일이다. 따라서 조류배양조 체류시간은 1.69일 이상으로 유지해야 효과적으로 영양물질을 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3은 조류가 성장하는 동안 반응조의 DO와 pH를 측정한 그림이다. 조류의 생장은 전형적인 세포증식곡선을 나타내었으며, 활발한 조류의 광합성 작용으로 pH는 초기 7.2에서 1일 후부터 급속하게 증가하기 시작하여 3일째는 9.3까지 증가하였으며, 그 이후에는 완만한 상승을 보였다. 반응조의 DO를 측정해 본 결과 3일 까지는 pH와 비슷한 증가경향을 보여 초기 7.2 mg/ℓ에서 3일 후에는 9.2 mg/ℓ 까지 증가하였으며, 6일째는 11.0 mg/ℓ 까지 증가하는 과포화상태를 보였다.

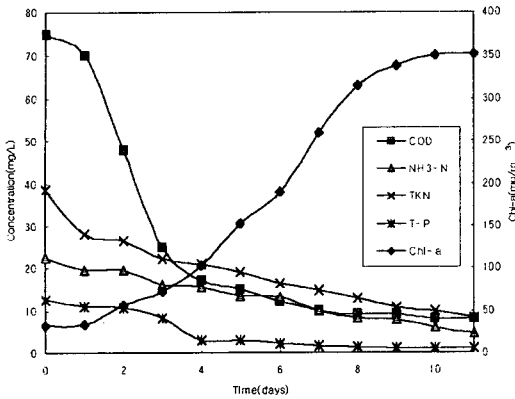


Fig. 2. Trend of algal growth and nutrient concentration in algal cultivation tank(3500 Lux, 25±3°C, 60 rpm).

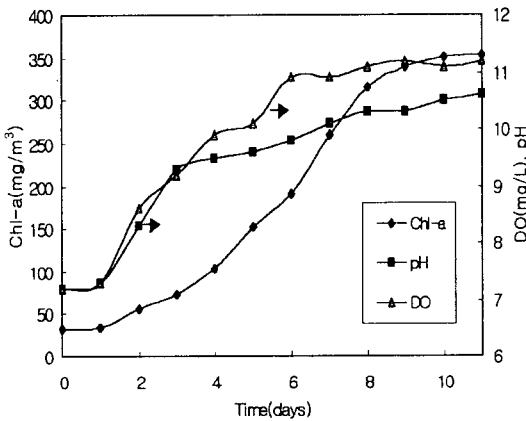


Fig. 3. DO and pH variations on algal growth.

3.2. 연속배양실험

회분배양실험과 같은 운전조건으로 희석비율을 0.25/day에서 0.77/day로 달리하면서 연속실험을 실시한 결과를 Table 3에 나타내었다. 유입하수의 평균 pH는 7.2, COD 평균농도는 80 mg/L, N/P비율은 6/1이었으며, 조류배양조의 온도는 22°C였다.

약 한달 정도 운전 후 정상상태에 도달하였으며, 희석율에 따른 반응조의 조류농도는 희석율이 0.77/day로 가장 높을 때 300~350 mg/m³으로 매우 낮은 농도를 나타내었고, 희석율이 0.4/day, 0.25/day로 감소함에 따라 각각 610~620 mg/m³, 650~660 mg/m³로 증가하였다. 이 때 반응조의 DO, pH는 희석율 0.25/day에서 각각 10.6 mg/L와 10.6의 높은 값을 나타내었으며, 이것은 조류배양조내의 광합성 활동이 그만큼 활발하다는 것을 뜻하고, 또한 영양물질의 제거율이 높은 것을 의미한다고 하겠다.

질소 및 인의 제거율은 희석율이 감소함에 따라 즉 체류시간이 길수록 제거효율이 높아져서 희석율이 0.77/day일 때 T-P는 4.3 ppm에서 1.4 ppm으로 약 68%의 제거율, T-N은 평균 24.4 ppm에서 8.7 ppm으로 64.2%, 암모니아성 질소는 평균 18.8 ppm에서 4.4 ppm으로 77%의

제거율을 보였다. 희석율 0.4/day, 0.25/day에서는 T-P는 각각 91%, 97%, T-N은 87%, 88%, 암모니아성 질소는 각각 94%, 95%의 높은 제거효율을 보였다. 따라서 조류배양을 이용하여 하수내의 질소와 인을 효과적으로 제거하기 위해서는 희석율을 0.4/day 이하로 낮추어야 할 것으로 사료된다.

COD는 75~82 mg/l가 유입되어 각 희석율에서 약 85~90%의 제거율을 보였다. 조류는 독립영양생물로서 유기물질이 아닌 이산화탄소를 탄소원으로 이용하므로 순수배양에서는 유기물질의 제거가 곤란하지만 혼합배양에서는 일반세균이 조류와 공생하면서 유기물질을 섭취하기 때문에 COD의 제거가 가능하다. 따라서 본 조류배양조에서도 세균과 조류가 활발한 공생관계를 이루고 있으며 조류가 생성하는 용존산소를 이용하여 세균이 유기물질을 섭취하는 것으로 추정할 수 있다.

Table 3. Result of continuous culture experiment at steady-state

Parameter	Dilution Rate		
	0.77/day	0.4/day	0.25/day
Influent			
pH	7.2	7.2	7.2
COD, mg/l	78	75	82
T-P, mg/l	4.26	4.26	5.06
T-N, mg/l	24.4	24.6	25.2
TKN, mg/l	22.3	21.9	23.6
NH ₃ -N, mg/l	18.75	18.44	19.08
Reactor			
Temperature, °C	22	22	22
pH	8.9	9.8	10.6
Chl-a, mg/m ³	345.25	617.61	652.98
DO, mg/l	9.2	10.9	10.6
Effluent			
pH	8.2	8.6	9.2
COD, mg/l	10.0	8.00	8.00
T-P, mg/l	1.38	0.40	0.17
T-N, mg/l	8.74	3.32	3.00
TKN, mg/l	7.64	3.11	2.86
NH ₃ -N, mg/l	4.39	1.11	1.01

Fig. 4는 T-P의 평균 유입농도가 5 ppm인 하수를 각 희석율에 따라 운전하였을 때의 반응조 pH와 유출수의 T-P농도를 측정하여 pH와 T-P 및 희석율과의 관계를 나타낸 그림이다. 희석율에 따른 pH와 T-P의 제거율은 반비례 관계로서 희석율이 0.25/day로 낮을 때는 조류배양조내의 광합성 활동이 가장 활발하게 진행되어 pH가 10.6으로 가장 높았으며, 상대적으로 유출수의 T-P농도는 평균 0.2로서 가장 낮아 96%의 제거율을 보였다. 희석율이 0.77/day일 때는 반응조의 pH는 평균 8.9로 상대적으로 가장 낮았으며 유출수의 T-P농도는 평균 1.3 mg/l로 68%의 제거율을 보였다.

Fig. 5에서는 각 희석율에 따른 암모니아의 유입, 유출농도를 나타내었다. 암모니아는 평균 18.5 mg/l가 유

입되어 희석율 0.77/day에서는 4.2 mg/ℓ로 77%의 제거율을 보였지만 0.4/day, 0.25/day에서는 모두 2 mg/ℓ 이하로 유출되어 94% 이상의 제거율을 나타내었다.

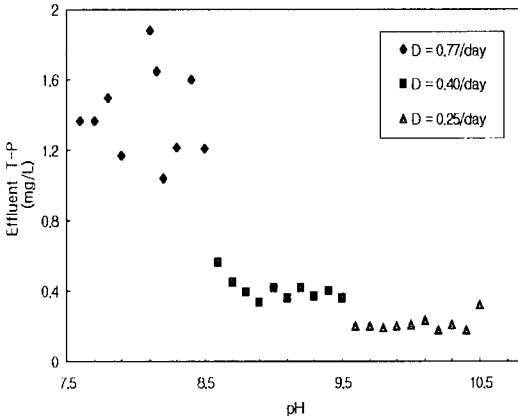


Fig. 4. Relation between pH and T-P.

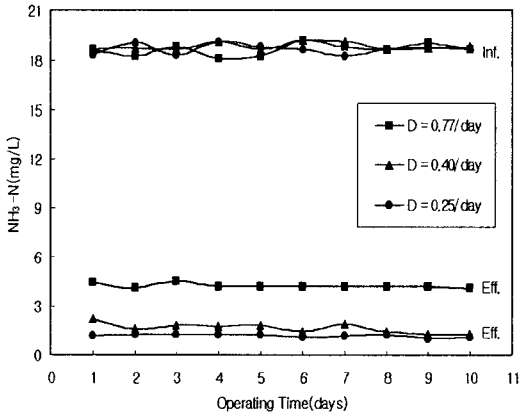


Fig. 5. Influent and effluent concentration of NH₃-N.

3.3. Scenedesmus의 영양물질 제거능

Scenedesmus sp.의 성장과 영양물질 제거능과의 관계는 다음 식(5)와 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = Y_N \frac{Q_i(N_i - N_e)}{V} \tag{5}$$

$$\frac{dX}{dt} = Y_P \frac{Q_i(P_i - P_e)}{V} \tag{6}$$

여기서, Y_N은 T-N에 관한 세포수율계수(g cells/g T-N), Y_P는 PO₄³⁻-P에 관한 세포수율계수(g cells/g PO₄³⁻-P), Q_i는 유입수량(ℓ/day), N_i, N_e는 유입수와 처리수의 T-N 농도(mg/ℓ), P_i, P_e는 유입수와 처리수의 PO₄³⁻-P 농도(mg/ℓ)를 나타낸다.

Scenedesmus sp.의 비증식속도(μ)와 세포체류시간(θ_c)과의 관계는 식(7)과 같다.

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu = \frac{1}{\theta_c} \tag{7}$$

식(7)을 식(5), 식(6)에 각각 대입하여 1/θ_c에 대하여

정리하면 식(8), 식(9)와 같다.

$$\frac{1}{\theta_c} = Y_N \frac{Q_i(N_i - N_e)}{XV} \tag{8}$$

$$\frac{1}{\theta_c} = Y_P \frac{Q_i(P_i - P_e)}{XV} \tag{9}$$

질소와 인에 대한 연속실험 자료를 식(8)과 식(9)에 대입하여 그림으로 나타내면 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 그림의 직선 기울기는 Y_N과 Y_P를 의미하며 질소에 대한 세포수율계수(Y_N)는 19.5 g cells/g T-N, 인에 대한 세포수율계수(Y_P)는 23.3 g cells/g PO₄³⁻-P이었다.

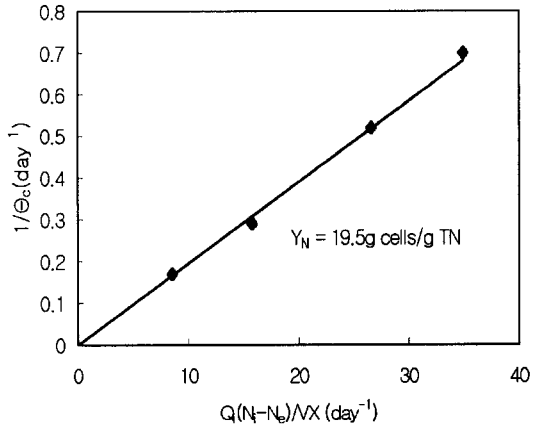


Fig. 6. The relationship of 1/θ_c and specific nitrogen removal rate.

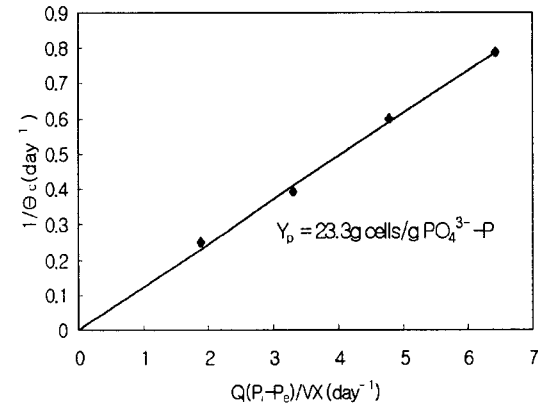


Fig. 7. The relationship of 1/θ_c and specific phosphorus removal rate.

3.4. 조류증식에 영향을 미치는 환경인자

조류의 탄소 제한영양에 관해서 고찰해 보면, 이산화탄소는 조류의 가장 중요한 1차 무기영양물질로서 부족할때는 조류성장에 제한영양으로 작용한다. 그러나 자연수중에는 중탄산염의 형태로 충분하게 존재하기 때문에 조류에 의한 이용이 가능하고, 광합성 작용으로 pH가 상승함에 따라 중탄산염이 탄산염으로 이동하기 때문에 농도차에 의해서 대기 중으로 부터 쉽게 흡수된다. 따라서 조류성장에 있어 탄소원은 일반적으로 제한요소가 되지

않을 것으로 보여진다.

자연수에서 질소, 인은 조류성장에 중요한 제한영양 인자로 작용하므로 본 실험의 우점종인 *Scenedesmus* sp.의 최적 영양염 조건을 파악하는 것은 매우 중요하다. 질소, 인이 조류성장에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다른 조건은 연속실험과 같게 하고 N, P 농도를 변화시켜 회분실험을 실시한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8과 같이 N/P비가 15로서 질소에 비해 인농도가 부족할 때는 인이 제한영양으로 작용하여 조류의 증식이 가장 낮았지만, N/P비가 3~5로 질소농도가 인농도에 비해 낮을 때는 증식에 큰 영향을 미치지 않았다. N/P비율이 3일 때의 조류농도는 초기 28 mg/m³에서 234.98 mg/m³까지 증가하여 가장 높은 증식율을 보였으며, N/P비가 15일 때 보다 증식량이 2배 이상으로 증가하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 *Scenedesmus* sp.은 N/P요구량이 다른 미생물에 비해 낮기 때문에 질소가 제한영양 인자로 작용함을 알 수 있다.

조류는 광합성을 하는 미생물이기 때문에 조도와 온도는 조류성장과 신진대사 등에 중요한 영향을 미친다. 실험실에서 일정하게 유지해 주는 온도, 조도는 자연환경에서 관측된 실제 값과는 다르기 때문에 성장 최적온도 뿐만 아니라 성장에 적합한 온도 및 조도범위를 알아내는 것도 중요하다. 조류성장에 대한 온도 및 조도의 영향을 알아보기 위해서 희석율 0.25/day, 온도 15~30℃, 조도 2,500~4,500 Lux로 변화시키면서 연속배양실험을 실시한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 조류성장의 최적온도는 25℃이지만 20~28℃ 온도 범위에서는 성장에 특별한 영향을 끼치지 않았고, 30℃에서 배양했을 때 실험 조류군은 황갈색으로 변하면서 모두 사멸하거나 분해되었다. 조도 변화에 따른 실험결과 어느 한계까지는 조도가 높을수록 조류 증식량도 증가하였으며 4,500 Lux에서 최대 성장을 나타내었다.

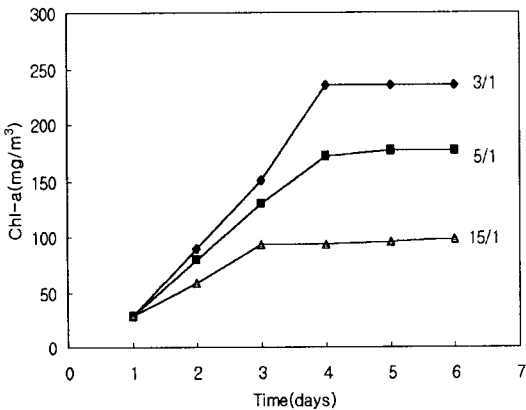


Fig. 8. Effect of N/P ratio on algal growth in batch culture(25℃, 60 rpm, 3,500 Lux).

3.4. 조류의 침강실험

조류는 그 자체가 유기물이므로 조류배양조 유출수 속에 함유된 조류를 효율적으로 분리, 회수할 수 있다면

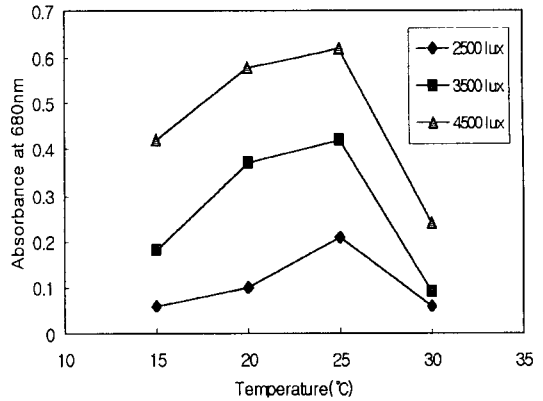


Fig. 9. Effect of temperature and light on algal growth at dilution rate of 0.25/day.

에너지 개발차원에서 많은 공헌을 할 수 있을 것이다. 조류배양조에서 영양물질을 섭취한 조류는 침전조에서 효율적으로 회수되어야 하지만 일반적으로 조류의 침강성이 좋지 않아서 별도의 회수방법을 강구해야만 한다. 조류회수에는 원심분리기, 이온 교환수지, 화학적 침전, microstraining, 초음파 진동 등을 이용하는 여러가지 방법이 알려져 있지만, 실험실에서 쉽게 적용할 수 있는 조류의 자연적인 침강성 및 원심분리시 조류의 회수율을 각각 실험을 통하여 조사하였다.

먼저 침전조로 유입되는 배양조 유출수를 모아서 시간의 경과에 따른 조류의 침강실험을 수행한 결과를 Fig. 10에 나타내었는데, 3시간 경과시 57%, 10시간 경과시 92%, 24시간 경과시 97%의 침강효율을 보였다. 자연침강만으로도 비교적 높은 효율을 보였는데, 이것은 조류의 광합성작용으로 반응조내의 pH가 8.5 이상으로 증가하여 조류의 침전현상이 일어났기 때문이다. 따라서 조류의 효과적인 분리를 위해서는 10시간 이상 침전시켜야 하겠다.

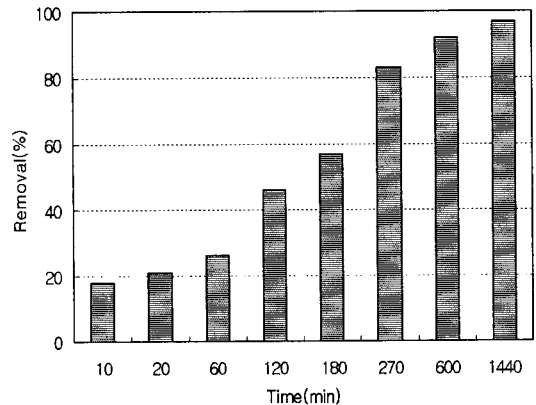


Fig. 10. Algae removal rate on settling time.

조류의 자연침강실험과 비교하기 위하여 원심분리기를 이용한 조류의 침강실험을 실시하였다. 배양조 유출

수의 시료로 채취하여 680nm에서 조류농도를 측정하고, 500 rpm 및 1,000 rpm에서 각각 원심분리 후 상정액의 조류농도를 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. 500 rpm에서는 10분 후에 86%, 30분 후에는 92% 이상의 제거율을 보였으며, 1,000 rpm에서는 10분 후에 93%, 30분 후에는 94% 이상의 높은 제거율을 보였다.

본 연구에서 행한 조류의 분리, 회수 실험결과 원심분리기를 이용한 조류회수는 효율이 좋지만 비용문제를 동반하기 때문에 공정으로 도입하기가 어려우며, 간단한 자연침강만으로도 조류의 분리가 가능하다고 할 수 있다.

Table 4. Algae settling rate in centrifugation

Time (min)	500rpm, Absorbance(680nm)			1,000rpm, Absorbance(680nm)		
	Before (O.D)	After (O.D)	Removal (%)	Before (O.D)	After (O.D)	Removal (%)
10	0.654	0.091	86.1	0.668	0.05	92.5
20	0.626	0.057	90.9	0.723	0.045	93.8
30	0.761	0.057	92.5	0.791	0.047	94.1

4. 결 론

조류배양을 이용한 2차 처리수의 영양물질 제거실험과 조류배양조 최적 운전방법 및 환경인자에 관한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 조류배양 system은 운전이 용이하고 질소, 인의 제거율이 높기 때문에 고도처리의 일환으로 사용하기에 적합하다. 조류배양을 이용한 T-P, T-N의 제거율은 2.5일 체류시간에 평균 90%, 87%의 효율을 나타내었고, 이때의 조류농도는 617.61 mg/m³로 매우 높았다.

2) 회석비율을 달리하면서 연속배양 실험을 실시해 본 결과 회석율 0.4/day, 0.25/day 에서 T-P는 각각 91%,

97%, T-N은 87%, 88%, 암모니아성 질소는 94%, 95%의 높은 제거효율을 보였다.

3) Scenedesmus sp.의 영양물질 제거능을 파악해 본 결과 질소에 대한 세포수율계수(Y_N)는 19.5 g cells/g T-N, 인에 대한 세포수율계수(Y_P)는 23.3 g cells/g PO₄³⁻-P로 파악되었다.

4) Green algae인 Scenedesmus sp.의 낮은 질소/인비율 요구량 때문에 상대적으로 인 제거율이 높다. N, P 제한영양에서 각각 실험해 본 결과 N/P비가 3~5일 때 조류중의 증식량이 최대값을 나타내었다.

5) 조류성장에 대한 온도 및 조도의 영향을 파악하기 위하여 회석율 0.25/day, 온도 15~30℃, 조도 2,500~4,500 Lux로 변화시키면서 연속배양실험을 실시한 결과 조류성장의 최적온도는 25℃이지만 20~28℃ 온도 범위에서는 성장에 특별한 영향을 끼치지 않았다. 조도변화 실험결과 4,500 Lux에서 조류의 최대성장을 나타내었다.

6) 조류의 침강실험 결과 10시간 경과 후에 92%, 24시간 경과 후에 97%의 높은 침강율을 보였으므로 조류의 효과적인 분리를 위해서는 침전조에서 10시간 이상 체류시켜야 하겠다.

참 고 문 헌

- 1) Gabriel Bitton, 1996, Wastewater Microbiology, John wiley & Sons, 68~75.
- 2) Michael D. Doran, 1989, Phosphorus Removal by Activated Algae, Water Research, 13.
- 3) Joel C. Goldman, 1989, Outdoor Algal Mass Culture, Water Research, 13, 1~19.
- 4) 정우용, 1996, 수질오염공정시험방법, 269~270.
- 5) Andrew, D. E., 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition.
- 6) 김주영, 1997, 환경미생물 실험법, 동화기술, 222~228.