



양돈폐수의 영양염류 제거를 위한 녹조류 *Chlorella vulgaris* 성장 모형의 비교

Comparison of Models to Describe Growth of Green Algae *Chlorella vulgaris* for Nutrient Removal from Piggery Wastewater

임병란* · 주티담롱판** · 박기영**†

Lim, Byung-Ran · Jutidamrongphan, Warangkana · Park, Ki Young

ABSTRACT

Batch experiments were conducted to investigate growth and nutrient removal performance of microalgae *Chlorella vulgaris* by using piggery wastewater in different concentration of pollutants and the common growth models (logistic, Gompertz and Richards) were applied to compare microalgal growth parameters. Removal of nitrogen (N) and phosphorus (P) by *Chlorella vulgaris* showed correlation with biomass increase, implying nutrient uptake coupled with microalgae growth. The higher the levels of suspended solids (SS), COD and ammonia nitrogen were in the wastewater, the worse growth of *Chlorella vulgaris* was observed, showing the occurrence of growth inhibition in higher concentration of those pollutants. The growth parameters were estimated by non-linear regression of three growth curves for comparative analyses. Determination of growth parameters were more accurate with population as a variable than the logarithm of population in terms of R square. Richards model represented better fit comparing with logistic and Gompertz model. However, Richards model showed some complexity and sensitivity in calculation. In the cases tested, both logistic and Gompertz equation were proper to describe the growth of microalgae on piggery wastewater as well as easy to application.

Keywords: Algae; batch culture; *Chlorella vulgaris*; growth model; piggery wastewater

1. 서 론

하폐수 고도처리시설은 유기오염물질과 더불어 영양염류를 제거하기 위한 것으로 1990년대 많은 연구와 더불어 우리나라 실제 처리장에 널리 보급되었다. 최근 들어서는 고도처리뿐만 아니라 에너지 문제 및 지속가능한 처리 방법 등이 중요한 하폐수 처리의 요소로 대두되고 있다. 특히, 양돈폐수를 포함한 축산분뇨는 1990년대 이후에도 발생량이 현저하게 증가되었으며 폐수로부터 나오는 인, 질소 등은 수계환경 및 수질보전에 영향을 주는 주요한 인자이다. 축산분뇨의 가장 큰 특징 중의 하나는 배출되는 폐수의 양은 우리나라 전체 배출되는 폐수의 1%에 불과하지만 오염부하량 측면에서는 전체 폐수의 15%를 차지할 정도로 크다는 것이다 (MOAF and MOE, 2004).

현재 축산분뇨는 규제대상 농가에서는 주로 퇴비화, 저장 액비화 등 자원화 시설 (80%)을 설치·운영하여 자체 처리하고 있고 규제미만 농가에서는 배출되는 축산분뇨를 자체 퇴비화하거나, 일부는 시·군에서 운영 중인 축산폐수공공처리시설에서 처리하여 방류하고 있다. 그러나 여전히 축산폐수에 의한 오염부하도가 타 폐수에 비해 매우 높고 또한 수거·처리시스템 구축 및 인·질소의 고도처리가 미흡한 관계로 상수원, 하천 및 호소의 부영양화의 주요 원인이 되고 있다 (Interagency Report, 2004). 또한 퇴비화 및 액비로의 활용은 비점오염원에 의한 부영양화의 큰 부분을 차지하고 있다.

일반적으로 축산분뇨를 적절하고 지속가능하게 처리 및 처분하기 위해서는 여러 가지 단위기술을 조합한 복합기술이 필요한데 선진국에서는 주처리 공정으로 약취방지 및 에너지 자원화가 용이한 고효율의 혐기성 소화방식이 대규모 처리장을 중심으로 보편화되었다 (Haga, 2010; Oono, 2004; Lincoln and Earle, 1990). 혐기성소화는 현재 에너지 문제 및 지구온난화 문제의 대두로 인하여 바이오매스 활용사업과 연계되어 대규모 투자가 이루어지고 있다. 그러나 혐기성처리는 유기물의 감량, 병원균의 안정 및 메탄가스의 에너지화가 주요 목표로 수계의

* 서울과학기술대학교 환경공학과
 ** 건국대학교 사회환경시스템공학과
 † Corresponding author Tel.: +81-2-450-3736
 Fax: +81-2-450-3726
 E-mail: kypark@konkuk.ac.kr

2010년 9월 14일 투고
 2010년 9월 28일 심사완료
 2010년 9월 30일 게재확정

오염에 직접적인 영향을 주는 부영양화 원인물질인 인·질소를 효과적으로 제거하지는 못한다. 따라서 토지가 넓은 경우에는 비료로서 이용하거나 이것이 용이하지 못할 경우에는 혐기성 처리수를 고도처리하여 배출하는 것이 일반적이다 (Harada, 2001). 고도처리시 물리화학적 처리의 경우 처리비용이 높고 생물학적 고도처리 기술을 부가하는 경우는 탄소원의 공급, 폐바이오매스 처분 및 비교적 낮은 처리효율 등의 문제가 있다. 이와 더불어 고도처리 방법의 하나로 제시되는 조류처리 (algal treatment)의 경우 축산분뇨에 포함된 영양물질을 미세조류 (microalgae)를 이용하여 처리하는 방식으로 기존 처리시설과 연계하였을 경우 여러 가지 시너지효과가 있을 것으로 예상하고 있다 (Travieso et al., 2006; Wilkie and Mulbry, 2002).

조류를 이용한 폐수처리는 1950년대부터 연구되고 적용되던 방식으로 전혀 새로운 것은 아니다 (Oswald and Gotaas, 1957). 조류처리는 수중에 포함된 무기 영양염류를 단시간에 섭취 이용하는 능력이 큰 미생물로서 조류를 활용하는 방법으로 (Lincoln and Earle, 1990), 조류복원법 (Phycoremediation)이라고도 하는데 다양한 조류를 이용하여 축산폐수를 비롯한 하·폐수 중의 영양물질 및 오염물질을 제거하는 방법으로 정의된다 (Olguin, 2003). 하·폐수 처리과정에서 발견되는 가장 보편적인 종의 하나인 *Chlorella vulgaris*와 같은 미세조류는 질소 및 인 함량이 각각 10% 및 1% 정도로 식물에 비하여 높아 영양염류 처리에 유리하며 양돈폐수처리에도 효과적이라고 한다 (Sevrin-Reyssac, 1998; Kumar et al., 2010). 또한 조류처리시스템 (algal treatment system)은 잘 설계된 시스템에서 조류를 배양하여 영양물질을 유용 단백질함유 바이오매스로 전환시켜 인·질소 제거는 물론이고 부산물의 가치를 증대시키는 기술로도 활용될 수 있다 (Wilkie and Mulbry, 2002). 이러한 단백질 함량이 높은 조류를 동물 사료 첨가제로 사용하였을 경우 젖소의 경우 오메가-3 지방산 함유량이 많은 우유를 생산하게 되어 우유의 질적 가치를 저비용으로 올리는 결과를 보였다고 한다 (Nitsan et al., 1999). 동물사료 첨가제로의 사용은 젖소의 예에서뿐만 아니라 클로렐라와 같은 조류기반의 상품이 사람의 영양보조제로 쓰이고 있는 상황이니 만큼 축산분뇨에서 회수된 조류단백질은 효모단백질을 이용한 다양한 사료첨가제와 유사한 용도로 활용될 수 있다고 생각된다 (Park and Jung, 2003). 한편, 최근에는 에너지 문제의 대두로 미세조류를 바이오디젤 원료로 사용하려는 연구가 활발하다 (Travieso et al., 2006; Sialve et al., 2009). 그러나 많은 연구에서 조류의 성장 특성을 연구하였으나 양돈폐수에서의 조류성장 및 성장특성을 예측 분석하는 도구로서 성장 모형에 대해서 비교하는 예는 많지 않다. 본 연구에서는 양돈폐수에 광범위하게 적용되는 혐기성처리 및 고도처리 방류수에 미세조류 (microalgae)를 이용하여 처

리하고 미세조류의 성장특성을 logistic, Gompertz 및 Richards 방정식을 활용하여 각 성장 파라미터를 도출하여 모형을 비교하였다.

II. 연구방법

1. 실험재료

양돈폐수는 일반적으로 부유물 (SS)이 많고 유기물 농도가 높아 혐잡물을 제거하고 혐기성 소화, 질산화 탈질의 생물학적 처리를 거치고 최종적으로 물리화학적 산화응집처리를 거쳐 처리된다. 본 연구에서는 양돈폐수에 존재하는 질소, 인 등의 영양물질을 이용한 조류의 성장 특성을 연구하고자 다양한 공정 및 조건에서 방류수를 채취하여 실험에 사용하였다. 실험에 이용된 양돈폐수는 경기도 축산연구소 및 충남 홍성의 처리장에서 얻은 양돈폐수로 구성성분은 Table 1과 같으며 성분의 특성에 따라 암모니아성 질소가 많은 A, 질산성 질소 농도가 높은 B 및 인 성분이 상대적으로 많은 C로 나누고 SS를 비롯한 오염물질의 농도 및 조성에 따라 다시 세분하였다.

본 연구에서 사용된 미세조류는 녹조류 *Chlorella vulgaris*로 대량 배양하기 용이하며 현재 논이나 호소에서 대량 발생을 일으키는 종으로 실제 적용성을 고려하여 선택하였다. 실험에 사용된 균주는 *Chlorella vulgaris* (UTEX265)로서 BBM (Bold Basal media) 배지에서 배양하였다. 배양 pH는 8-10이었다.

2. 실험방법

본 연구에서 배양조건은 온도 25°C, 광도 35~40 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, L : D cycle = 12 hr : 12 hr에서 실시하였고, 실험을 위해 *Chlorella vulgaris*는 대수성장기 세포를 이용하였다. 대수성장기의 *Chlorella vulgaris*는 세포들을 2000 rpm으로 10분 동안 원심분리 한 후 배지를 제거하여 300 mL의 삼각플라스크

Table 1 Chemical composition of wastewater

	Piggery wastewater						
	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2
pH (mg/L)	8.5	8.2	8.4	7.8	8.0	9.0	8.7
SS (mg/L)	105	2.7	172	2	110	250	120
COD (mg/L)	200	4.8	60	55	165	223	66
T-N (mg/L)	120	3.4	32	5.3	6.1	165	11
NH ₄ -N (mg/L)	110	2.8	6.2	1.5	1.2	105	9.8
NO ₃ -N (mg/L)	1.5	0.02	23	3.5	4.3	2.5	0.5
T-P (mg/L)	4.2	0.1	5.1	1.3	2.1	18.9	4.1

에 총 부피 150 mL의 폐수시료와 함께 초기 농도는 3×10^5 cells/mL 정도의 농도가 되도록 주입하였다. 실험은 3배수 (triplicate)로 수행하였으며, 매 실험 시 총질산염과 총인산염을 분석하기 위하여 3 mL의 시료를 채취하였으며, 0.45 μ m PP syringe filter로 여과한 후, 각각 HACH 영양염 분석 방법을 이용하였다. *Chlorella vulgaris*는 일부 휘발성 부유 고형물 (VSS)을 측정하였으나 나머지 실험에서는 매 실험시 1 mL의 시료를 채취하여 1 % glutaraldehyde로 고정 후, Sedgwick-Rafter counting chamber를 이용하여 $\times 400$ 현미경을 사용하여 계수하였다.

3. 성장 모형

미세조류 성장의 동력학은 다른 미생물에서 관찰된 것과 유사하다. 다만, 에너지원이 배지에 따라 즉시적이며 독립적이라는 특징이 있다 (Lembi and Waaland, 1988; Ogbondeminu and Okoye, 1992). 미생물의 일반적인 회분 성장특성을 나타내는 성장곡선은 Fig. 1과 같이 나타나게 되는데 제한 영향조건에서 지체기, 대수성장기, 정체기, 사멸기의 네 가지 구간으로 나눌 수 있다. 회분 성장에서 영양물질이 바닥나는 정체기까지를 나타내거나 예측하는 모형을 성장곡선이라고 하는데 이와 같은 성장곡선은 실지로 미생물 성장뿐만 아니라 식품, 곡물, 자원, 인구, 산업 등의 분야에서 폭넓게 응용되고 있다. 성장 곡선은 일반적으로 비성장속도 (specific growth rate)가 시간 0에서 시작하여 지체시간 (lag time, λ)이라 불리는 일정한 시간이 경과한 후 성장속도의 최대점 (μ_m)에 도달하게 된다. 그 후 성장은 영양소 고갈로 멈추게 되는데 즉 극한 값 (A)을 나타내게 된다. y축은 세균의 성장의 경우 로그개체군 (log population)으로 사용하는 것이 일반적이며 기타의 응용에서는 개체군으로 나타낼 수도 있다. Jiménez-Perez 등 (2004)에 따

르면 폐수를 처리하는 조류의 경우 세로축을 개체수로 하는 것이 적합하다고 한다.

미생물의 전통적인 개체수 성장 함수는 간단하게 지수 곡선 등으로도 나타낼 수도 있지만 제한된 자원을 이용하는 생명체의 경우 비현실적으로 최대성장이 제한되는 Sigmoidal 형태가 일반적이다 (Batschelet, 1976). 전형적인 Sigmoidal 곡선으로 로지스틱 (logistic) 곡선, Gompertz 모형, Weibull 함수 (Weibull function)를 비롯하여 많은 함수들이 있다. 적용 가능한 모형을 모두 다루는 것은 큰 의미는 없을 것이므로 본 연구에서는 미생물 성장 또는 조류의 성장곡선으로 가장 빈번히 이용되고 있는 logistic 및 Gompertz 모형을 중심으로 연구하였고 이와 함께 bioenergetic 분석으로 도출되었으며 앞의 두 모형을 포괄할 수 있는 확장형인 (복잡한 형태인) Richards 모형을 사용하여 양돈폐수에서 *Chlorella vulgaris*의 성장에 적용하고 계산된 파라미터를 비교하였다. 이들 모형들의 수학적 검토는 여러 분야에서 많은 연구자들에 의하여 제시되어 있으나 (Berger 1981; Zwietering et al., 1990), 통계학적 의미 및 계산의 용이성 등이 많이 검토되었다. 성장곡선을 미세조류의 성장에 적용한 예는 더러 있으나 각 모형이 독립적으로 사용되었다. 따라서 미세조류의 실험에서 파라미터의 비교를 통하여 성장 특성을 분석할 때 다른 모형을 사용할 경우 동일한 의미를 가지는 것인지 확실하지가 않다.

전통적인 개체수 성장 모형은 로지스틱 곡선 (logistic curve)이다 (Batschelet, 1976). 이 모형은 1838년 Verhulst의 연구에서 처음 적용된 것으로 수정된 방정식은 식 (1)과 같다.

$$y = y_0 + \frac{A}{\left\{ 1 + \exp \left[\frac{4\mu_m}{A} (\lambda - t) + 2 \right] \right\}} \quad (1)$$

이때 미생물 성장의 경우 일반적으로 세포 개체량을 로그로 표시하여 그리는 보고가 많다. 여기서, y는 개체군의 크기 ($\ln N/N_0$) 또는 (N/N_0) , t는 경과시간 (hr), y_0 는 초기 개체량으로 로그개체군일 때 0, μ_m 는 최대비성장속도 (1/hr), A는 성장의 극한 값, λ 는 지체시간 (hr)이다. 로지스틱 모형은 미세조류 성장에 관한 모형으로 Golterman and Clymo (1969)에 의하여 제시된 바 있으며 이후 폭넓게 적용되고 있다 (Jiménez-Perez et al., 2004; Travieso et al., 2006).

Gompertz 모형은 1825년 영국의 수학자 B. Gompertz에 의하여 경험적인 관찰을 기반으로 개발된 것으로 세균의 증식 특성을 비롯하여 혐기성소화의 해석 및 조류성장 등 생명환경분야의 회분실험 해석에 광범위하게 사용되고 있다 (Ebert, 1999; Celeckli et al., 2009). 수정된 Gompertz 방정식은 다음 식

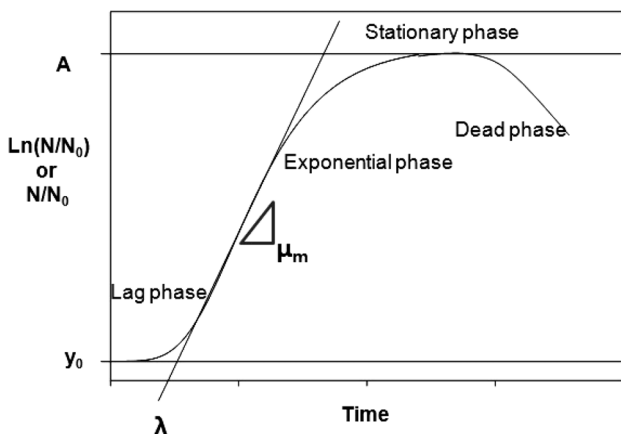


Fig. 1 A growth curve of microorganisms

(2)와 같다.

$$y = y_0 + A \exp\left\{-\exp\left[\frac{\mu_m e}{A}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (2)$$

여기서, 각 파라미터는 logistic 모형과 동일하며 $\exp(1)$ 이다.

다음으로는 식 (3)의 Richards 모형인데 이 모형은 단순한 bioenergetic 분석에 기초한 von Bertalanffy 모형을 추가적인 파라미터 (ν)를 도입하여 일반화한 방정식이다 (Richards, 1959). 개체 성장을 간단한 동적 반응조로 생각하고 이화와 동화작용의 흐름을 성장식으로 정리하여 유도한 것이다. 이 식은 형상 파라미터인 지수 (ν)를 변화시켜 앞의 여러 가지 함수를 유도할 수 있다고 한다. Richards 모형에서 ν 가 -1일 때 로지스틱 식이 되고 무한소 값을 가질 때 Gompertz 모형이 되며 적당한 상수값으로 von Bertalanffy 모형으로 유도할 수 있다고 한다 (Ebert, 1999).

$$y = y_0 + A \left\{ 1 + \nu \cdot \exp(1 + \nu) \cdot \exp\left[\frac{\mu_m}{A}(1 + \nu)\left(1 + \frac{1}{\nu}\right)(\lambda - t)\right] \right\} \quad (3)$$

여기서 각 파라미터는 앞의 두 모형과 동일하며 파라미터 (ν)는 Richards 식에서 추가된 형상 수이다. 본 연구에서는 미세조류의 회분 성장을 예측하는 위의 세 가지 모형을 적용하였으며 비선형회귀 분석은 SigmaPlot 10.0을 사용하였다. 정량적으로 계산된 상수 값들을 이용하여 모형을 비교하였다. 또한 y축에 대하여 개체군 및 로그개체군 두 가지를 모두 사용하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 조류의 성장과 영양염 제거

본 연구에서는 양돈폐수의 존재하는 영양염류 (질소, 인) 성분이 미세조류 *Chlorella vulgaris*의 성장으로 인하여 제거되는 특성을 확인하기 위하여 회분식으로 실험하였다. 300 mL의 삼각플라스크에 총 부피 150 mL의 실제 양돈폐수와 함께 배지에서 성장시킨 조류를 일정 농도가 되도록 주입하였다. 양돈폐수의 처리 및 생체량을 증가를 탐색하기 위하여 24시간 주기로 10일간 총질소, 총인 및 식물플랑크톤 생체량 (biomass)을 조사하였다. Fig. 2는 양돈폐수에서 미세조류 *Chlorella vulgaris*의 성장과 이에 따른 영양물질의 감소를 나타내고 있다. 조류가 성장함에 따라 개체수의 증가와 더불어 생체량의 증가가 관

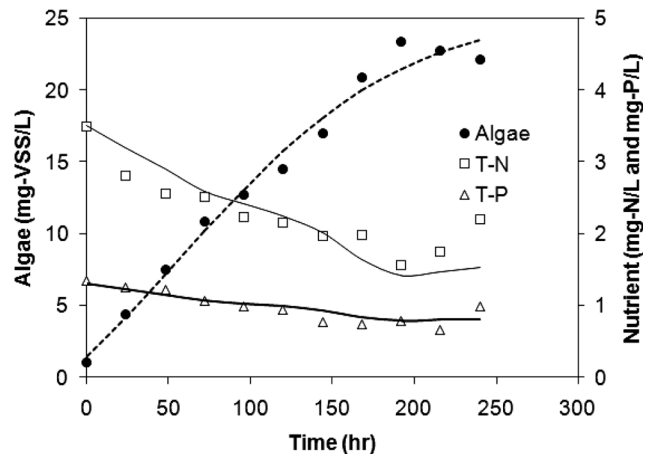


Fig. 2 Microalgae growth and nutrient removal

찰되었으나 성장 후 사멸기에서 생체량이 약간 감소하는 것을 보여주고 있다. 조류의 성장으로 인한 질소 및 인의 제거는 생체량의 증가와 반대의 경향을 나타낸다. 조류의 경험식은 대표적으로 $CH_{1.7}O_{0.4}N_{0.15}P_{0.0094}$ 와 같이 나타낼 수 있는데 (Oswald, 1988) 비록 조류에 의한 영양염류의 제거가 조류의 성장조건에 따라 달라지기는 하지만 대략 인 1.3 % 및 질소 9.3 % 정도 임을 추측할 수 있다. 이를 바탕으로 Fig. 2에서 선은 조류생체량의 경우 성장곡선 (logistic equation)을 나타내고 질소 및 인의 경우 생체량의 비율에 따른 질소 및 인의 제거를 나타낸 것인데 대체로 영양염류의 섭취에 따른 감소와 대체로 일치한다. 또한 조류가 회분 실험과정에서 사멸기에 접어들면 반응조 내액 중의 질소, 인의 농도가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 실제 조류를 하폐수의 영양염 제거 목적으로 사용한다면 사멸기에 있는 조류량을 줄이는 운전 전략이 필요할 것이다.

2. 다양한 농도분포의 양돈폐수에서 조류성장

본 연구에서 사용한 양돈폐수는 원시료 및 원처리공정에 따라 앞의 Table 1과 같이 다양한 농도 분포를 가질 수 있다. 본 연구에 적용된 7개의 서로 다른 폐수 조건에서 *Chlorella vulgaris*의 성장 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 양돈 폐수의 배지인 원수가 생물학적 공정을 거쳐 SS 및 COD 등의 농도가 비교적 낮고 질산화된 질소를 포함한 B2에서 *Chlorella vulgaris*가 가장 잘 성장하였다. 협착물 제거 등 전처리 또는 혐기성처리만 거쳐 SS 및 COD 등의 농도뿐만 아니라 질소 및 인의 농도가 비교적 높은 양돈폐수 시료를 사용한 C1에서 가장 성장이 좋지 않았다. 이러한 결과는 *Chlorella*와 같은 미세조류의 경우 고농도의 양돈폐수를 직접 적용하는 경우 부유물에 의한 빛의 전달이 방해받고 유기물농도나 암모니아성 질소 농도가

높으면 성장이 저해를 받을 것으로 예상되어 직접적인 적용이 어려움을 시사한다. A1과 A2의 경우는 거의 동일한 한 조성으로 농도가 다를 경우를 비교한 것인데 성장이 크게 차이가 나지는 않았다. 또한 인의 농도가 상대적으로 높은 C2의 경우도 비슷한 성장 특성을 보였으나 개체군의 극한값만 조금 차이가 났다. 그러나 C2와 비슷한 조성이지만 SS의 농도가 250 mg/L로 아주 높을 경우 잘 성장하지 못하는 것으로 빛의 투과와 같은 환경조건의 차이가 직접적인 원인으로 생각된다. 이러한 결과는 질산화된 시료를 사용한 B1~B3 실험에서 SS 농도가 172 mg/L로 매우 높은 B3가 가장 성장이 안 되고 SS가 110 mg/L인 B1이 다음이고 SS가 2 mg/L로 거의 제거된 시료에서의 특성을 살펴보면 SS에 의한 영향을 뚜렷이 확인할 수 있다.

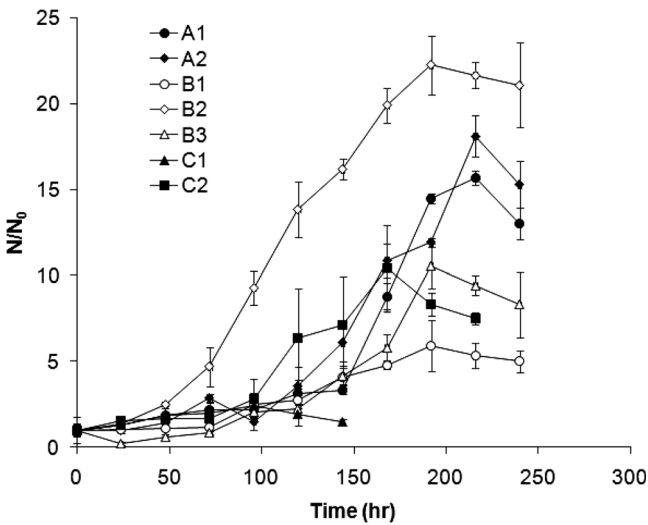


Fig. 3 Microalgae growth on various culture media (piggery wastewater)

3. 성장 모형의 적용 및 파라미터의 비교

서로 다른 농도 조합의 양돈폐수에서 조류 *Chlorella vulgaris*의 성장 특성을 이해하고 정량화하기 위하여 앞서 서술한 3가지의 성장곡선을 사용하였다. 또한 성장 특성의 나타내는 모형 적용에서 문헌에 따라 종속변수인 y축을 개체군 및 로그개체군 (log population)으로 하는 경우가 있으므로 본 연구에서는 두 가지 경우 모두에 대하여 검토하였다. Fig. 4는 개체군 및 로그개체군에 대하여 모형을 적용시켜 비교한 것이다. Fig. 4 a)의 개체군을 y축으로 사용할 경우 A1을 제외하면 세 성장곡선이 거의 겹치는 것으로 fitting할 수 있다. 따라서 이는 계산된 각 파라미터값들이 유사할 것으로 예측할 수 있다. 한편 로그개체군을 사용하였을 경우에는 B2만 3개의 모형이 거의 비슷한 곡선을 나타내고 나머지 두 개에서는 차이가 더 크게 벌어졌다. 특히 Richards 모형을 적용할 경우 그림에서 가장 진한 선으로 나타내었는데 다른 두 모형과 달리 변화하는 것을 볼 수 있다.

각 경우에 대하여 모형을 적용하여 회귀분석하여 계산한 결과를 Table 2에 정리하였는데 최대 비성장속도 및 지체시간 등 성장 파라미터들을 정량적으로 비교 해볼 수 있다. 이 결과는 Sigmaplot 10.0을 사용하여 비선형 회귀분석법으로 분석하였는데 내장된 함수로 손쉽게 통계처리할 수 있다는 장점이 있다. 각 모형에 대한 통계적 및 수학적 의미는 기존 논문들에서 매우 많이 다루고 있으므로 본 연구에서는 관심은 어떤 모형을 사용할 경우 더 정확히 성장특성을 반영할 수 있는지에 대하여 검토하였다. R^2 및 SEE값을 비교해보면 거의 모든 경우에서 개체군을 y축으로 사용했을 경우 성장곡선이 적절히 반영될 수 있음을 보여준다. 또한 성장이 잘 일어날수록 즉 B2,

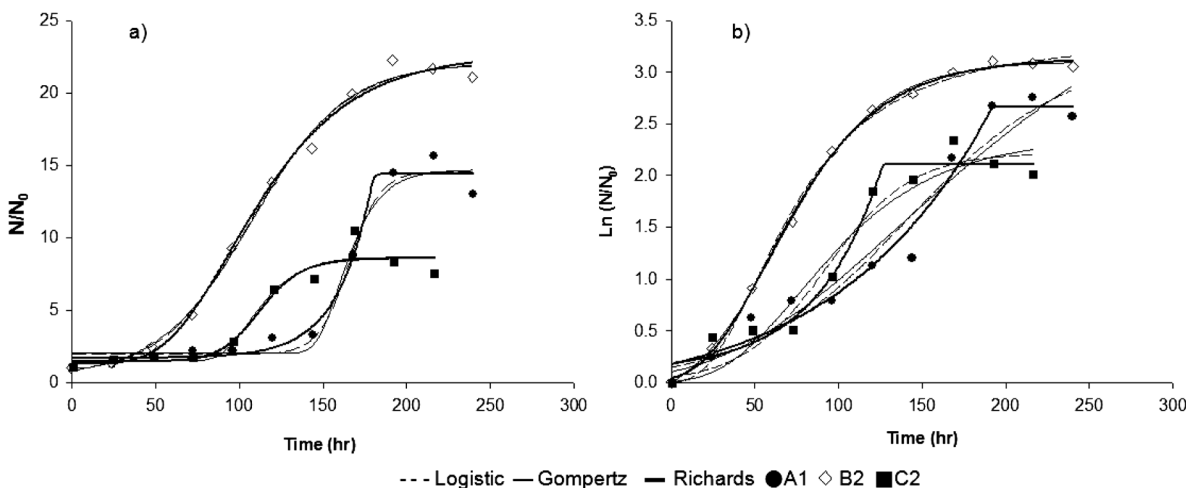


Fig. 4 Growth curve of microalgae fitted with the models: a) Population, b) Log population

Table 2 Growth parameters from the microalgae cultures

	Model	Population, N/N_0					Log Population, $\ln(N/N_0)$				
		A	μ_m	λ	R^2	SEE*	A	μ_m	λ	R^2	SEE*
A1	Logistic	12.6	0.343	147.4	0.979	0.987	3.18	0.0169	48.1	0.949	0.255
	Gompertz	12.7	0.339	145.9	0.974	1.114	4.23	0.0146	33.2	0.941	0.274
	Richards	12.7	0.568	156.6	0.984	0.942	2.84	0.0303	96.9	0.975	0.206
A2	Logistic	15.7	0.171	116.0	0.966	1.382	2.99	0.0209	57.4	0.952	0.275
	Gompertz	16.3	0.168	115.0	0.964	1.424	3.50	0.0179	43.7	0.945	0.291
	Richards	15.7	0.198	116.7	0.966	1.485	3.19	0.0271	48.9	0.957	0.300
B1	Logistic	4.48	0.049	78.6	0.971	0.391	1.68	0.0188	60.0	0.978	0.122
	Gompertz	4.53	0.048	75.7	0.967	0.418	1.71	0.0199	59.6	0.980	0.115
	Richards	4.69	0.062	79.7	0.974	0.399	1.67	0.0034	61.7	0.098	0.102
B2	Logistic	21.6	0.194	52.7	0.995	0.751	3.05	0.0311	23.0	0.996	0.082
	Gompertz	21.3	0.198	56.0	0.994	0.799	3.13	0.0304	18.9	0.999	0.047
	Richards	21.4	0.172	53.9	0.995	0.806	3.33	0.0250	9.9	0.999	0.046
B3	Logistic	8.65	0.123	117.8	0.949	1.033	2.23	0.0284	91.6	0.807	0.631
	Gompertz	8.64	0.128	118.2	0.937	1.142	2.35	0.0238	79.6	0.813	0.622
	Richards	9.12	0.181	138.8	0.976	1.141	3.12	0.0024	50.7	0.905	1.569
C1	Logistic	0.96	0.032	15.1	0.669	0.391	0.65	0.0248	14.2	0.762	0.180
	Gompertz	0.94	0.039	16.9	0.668	0.391	0.65	0.0311	16.1	0.762	0.180
	Richards	1.20	0.034	11.8	0.669	0.478	1.07	0.0190	11.9	0.762	0.255
C2	Logistic	7.15	0.143	87.0	0.944	1.002	2.22	0.0218	41.2	0.954	0.210
	Gompertz	7.07	0.159	88.2	0.943	1.007	2.36	0.0190	30.2	0.933	0.255
	Richards	7.12	0.131	87.2	0.944	1.097	2.00	0.0495	84.1	0.973	0.190

* Standard error of estimate

A2, A1 등에서 R^2 값이 크고 SEE가 작으며 성장이 잘 되지 못한 C2, C1 등에서 R^2 및 SEE 값이 현저히 반대로 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 세 가지 모형에서 얻어진 파라미터 값들을 비교할 수 있도록 한 것이다. 위쪽에 있는 세 그래프를 보면 y축을 개체군으로 한 것인데 그 중 a)를 보면 개체군의 최대 크기 (A)를 나타내는데 logistic, Gompertz 및 Richards 모형이 거의 일치하였는데 이것은 계산한 값들이 거의 동일함을 보여준다. 또한 c)에 있는 지체시간 (λ)의 경우도 A에 비해서는 조금 일치도가 떨어지지만 거의 유사한 것을 알 수 있다. 반면, 최대 비성장속도 (μ_{max})의 경우 logistic식과 Gompertz식에서 얻은 값은 유사한데 반하여 Richards식에서 얻은 값들에는 차이가 났다. 특히 최대 비성장속도는 변곡점의 기울기로 수학적 의미에 대해서는 기존 문헌 (Zwietering et al., 1990; Zwietering et al., 1992)에 자세히 서술되어 있지만 대수성장기가 종료되는 시기의 예측과 관련이 깊다. 본 연구에서와 같이 Richards 식이 민감도가 앞 두 식에 비하여 매우 커서 실제 데이터의 작은 변화에 곡선이 많이 급격히 반응하여 생긴 결과로 보여지

며 Fig. 4에서 보듯이 R^2 는 높지만 그래프의 변화가 완만하지는 못하다. Fig. 5의 아래 세 그림은 y축을 로그개체군으로 한 것인데 R^2 값 앞에 비하여 많이 떨어지고 파라미터 값들의 일치도가 매우 낮았다. Logistic식과 Gompertz식은 파라미터 비교한 R^2 값이 0.9이상이고 기울기가 0.8이상으로 유사하였으나 Richards식은 파라미터를 구하는 과정에서 회귀분석의 오차는 적었으나 나머지 두 식으로부터 구해진 파라미터 값들과는 차이가 매우 심하였으며 최대 비성장속도는 매우 상이한 값을 가졌다.

따라서 세 가지 곡선은 일련의 분석을 통하여 세 가지 곡선은 성장이 전형적인 sigmoidal 형태를 띠 경우 적용이 가능하지만 조류의 경우 종속변수를 로그스케일 대신에 개체군으로 하였을 경우 정확도가 높아진다. 또한 Richards모형의 경우 정확도는 증가하지만 계산이 복잡하고 실측자료의 변화에 매우 민감한 특성이 있다. Logistic 및 Gompertz 곡선의 비교에서는 logistic이 약간 더 정확하였으나 전반적으로 도출된 파라미터에는 차이가 거의 없었고 조류의 성장에 간편하게 적용할 수 있는 모형이라고 생각된다.

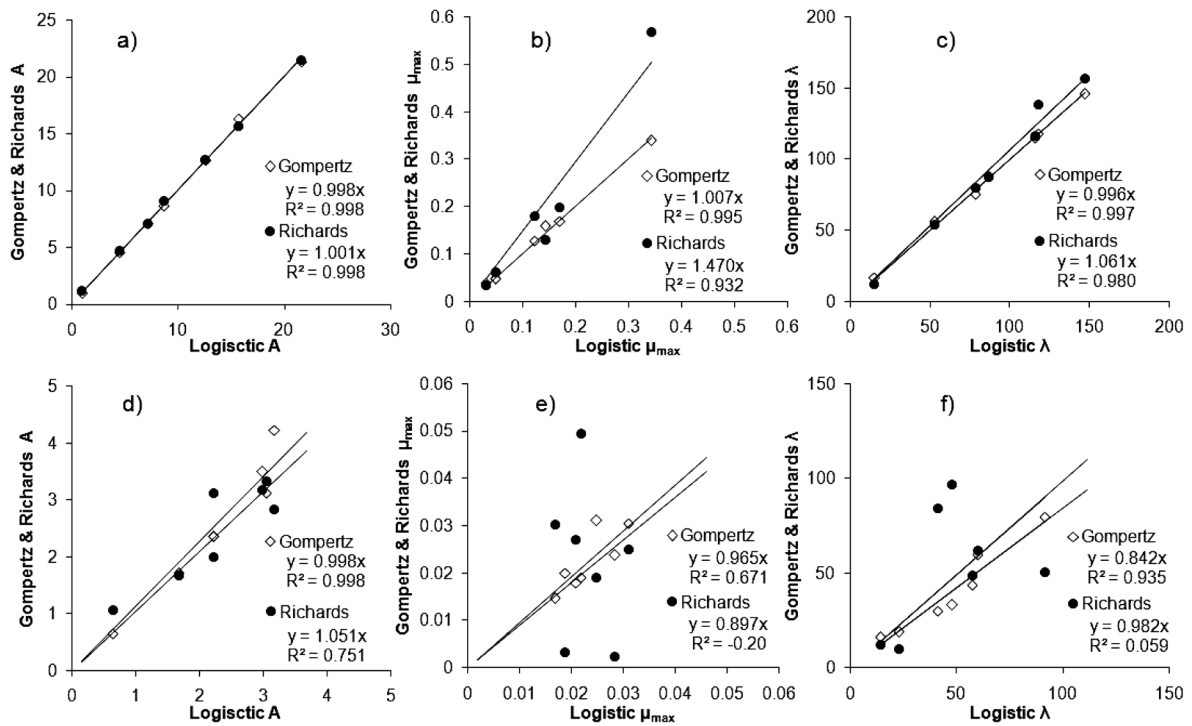


Fig. 5 Comparison of growth parameters: a) A, b) μ_{max} and c) λ for population, and d) A, e) μ_{max} and f) λ for log population

IV. 결 론

본 연구는 양돈분뇨를 *Chlorella vulgaris*와 같은 녹조류를 이용하여 처리하고자 할 때 조성이 상이한 폐수배지에서 조류의 성장특성을 살펴보고 이를 비교 예측할 수 있는 세 가지 성장모형을 비교하는 기초적인 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 조류에 의한 영양염류의 제거는 섭취에 따른 제거로 생체량에 포함되는 인, 질소의 함량의 비율에 따랐으며 사멸기에 접어들면 질소, 인의 농도가 다시 증가하는 것을 볼 수 있었다.
2. 다양한 조성 및 농도의 양돈폐수를 *Chlorella vulgaris* 성장의 배지로 사용한 결과 원수가 처리공정을 거쳐 SS 및 COD 등의 농도가 비교적 낮고 질산화된 질소를 포함한 폐수에서 가장 잘 성장하였으며 SS 및 COD 등의 농도 및 암모니아성 질소 및 인의 농도가 비교적 높은 양돈폐수 시료를 사용할수록 성장에 적합하지 않았다.
3. 성장곡선의 적용에서 종속변수를 개체군으로 사용했을 경우 로그개체군을 사용했을 경우에 비하여 R^2 값이 컸으며 세 모형에서 구해진 상수값들의 일치도가 높았다.
4. 미세조류 성장 특성을 logistic, Gompertz 및 Richards 모형을 사용하여 회분 성장의 상수 값들을 정량적으로 결정하고 비교한 결과 Richards식, logistic식, Gompertz식 순으로

적합하였으나 Richards 모형에서 다른 두 모형에 비하여 계산이 복잡하고 변화가 심하였다. 따라서 본 연구 조건에서는 비록 logistic식이 Gompertz식에 비해 약간의 정확도는 높았으나 계산 결과가 매우 유사하여 이 두 식 모두 양돈폐수와 같은 조건의 미세조류 성장특성 분석에 용이하게 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

이 논문은 2006년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00131)

REFERENCES

1. Batschelet, E. 1976. Introduction to *Mathematics for Life Scientists*. Springer, New York.
2. Berger, R. D., 1981. Comparison of the Gompertz and logistic equations to describe plant disease progress. *Phytopathology* 71: 716-719.
3. Çelekli, A., M. Balcı, and H. Bozkurt, 2009. Modelling of *Scenedesmus obliquus*: function of nutrients with modified Gompertz model. *Bioresource Technology*

- 99(18): 8742-8747.
4. Ebert, T. A., 1999. *Plant and animal populations. Methods in demography*. Academic Press, San Diego.
 5. Golterman, H. L., and R. S. Clymo, 1969. *Methods for physical and chemical analysis of freshwaters*, IBP Handbook No. 8 Oxford: Blackwell Scientific Publications.
 6. Haga, K., 2010. Environmentally friendly livestock production. *The Japanese Journal of Swine Science* 47(3): 154-158. (in Japanese)
 7. Harada, Y., 2001. Recycling of animal manure. *Journal of water and waste* 43(4): 306-311. (in Japanese)
 8. Interagency Report, 2004. *Non-point Source Control for 4 River Water Management*. Interagency Report, Gwacheon. (in Korean)
 9. Jiménez-Perez, M. V., P. Sánchez-Castillo, O. D. Romera, D. Fernández-Moreno, and C. Pérez-Martínez, 2004. Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure. *Enzyme and Microbial Technology* 34: 392-398.
 10. Kumar, M. S., Z. H. Miao, and S. K. Wyatt, 2010. Influence of nutrient loads, feeding frequency and inoculum source on growth of *Chlorella vulgaris* in digested piggery effluent culture medium. *Bioresource Technology* 101(15): 6012-6018.
 11. Lembi, C. A., and J. R. Waaland, 1988. The role of microalgae in liquid waste treatment and reclamation. In: *Algae and Human Affairs*. 251-281, Cambridge, Cambridge University Press. U. K.
 12. Lincoln, E. P., and J. F. K. Earle, 1990. Wastewater treatment with microalgae. In: I. Akatsuka, Editor, *Introduction to Applied Phycology*, SPB Academic Publishing, The Hague, 429-446.
 13. MOAF, and MOE, 2004. *Recycling and Management of the Livestock Manure*. Ministry of Agriculture and Forestry (MOAF) and Ministry of Environment (MOE), Gwacheon. (in Korean)
 14. Nitsan, Z., S. Mokady, and A. Sukenik, 1999. Enrichment of poultry products with $\omega 3$ fatty acids by dietary supplementation with the alga *Nannochloropsis* and mantur oil. *J. Agric. Food Chem.* 47(12): 5127-5132.
 15. Ogbondeminu, F. S., and F. C. Okoye, 1992. Microbiological evaluation of an untreated domestic wastewater aqua-culture system. *J. Aqua. Trop.* 7(1): 27-34.
 16. Olguin, E. J., 2003. Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes. *Biotechnol. Adv.* 22: 81-91.
 17. Oono, T., 2004. The present state and challenge of livestock environment. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 66(1): 4-7. (in Japanese)
 18. Oswald, W. J., 1988. Micro-algae and waste-water treatment, In: *Micro-algal Biotechnology*, Borowitzka and Borowitzka (eds.), 305-328, Cambridge University Press, U. K.
 19. Oswald, W. J., and H. B. Gotaas, 1957. Photosynthesis in sewage treatment. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 122: 73-105.
 20. Park, K. Y., and J. Y. Jung, 2003. Use of yeast for food processing organic wastewater treatment and microbial biomass protein recovery. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 25(8): 1004-1009.
 21. Richards, F.J., 1959. A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Biot.* 10(29):290-300.
 22. Sevrin-reyssac, J., 1988. Biotreatment of swine manure by production of aquatic valuable biomass. *Agric. Ecosyst. Environ.* 68(3): 177-186.
 23. Sialve, A., N. Bernet, and O. Bernard, 2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnol. Adv.* 27 (4): 209-416.
 24. Travieso, L., F. Benítez, E. Sánchez, R. Borja, A. Martín, and M. F. Colmenarejo, 2006. Batch mixed culture of *Chlorella vulgaris* using settled and diluted piggery waste. *Ecological Engineering* 28(2): 158-165.
 25. Wilkie, A. C., and W. W. Mulbry, 2002. Recovery of dairy manure nutrients by benthic fresh water algae. *Bioresource Technology* 84(1): 81-91.
 26. Zwietering, M. H., F. M. Rombouts, and K. van't Riet, 1992. Comparison of definition of the lag phase and exponential phase in the bacterial growth. *J. Applied Bacteriology* 72: 139-145.
 27. Zwietering, M. H., I. Jongenburger, F. M. Rombouts, and K. van't Riet, 1990. Modeling of the bacterial growth curve. *Appl. Environ. Microbiol* 56(6): 1875-1881.