

활성슬러지 하수처리시설 운영 및 유지관리를 위한 시스템다이내믹스 모델의 모의에 관한 연구

박수완[†] · 김봉재^{*} · 전환돈^{**} · 김인철^{***}

부산대학교 공과대학 토목공학과

^{*}한국수자원공사

^{**}고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과

^{***}동서대학교 건축토목시스템공학부

Simulations of a System Dynamics Model for Operations and Maintenance of Activated-Sludge Wastewater Treatment Plants

Suwan Park[†] · Bong Jae Kim^{*} · Hwan Don Jun^{**} · In Chul Kim^{***}

Department of Civil Engineering, Pusan National University

^{}Korea Water Resources Corporation*

*^{**}Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University*

*^{***}Division of Architecture and Civil Engineering, Dongseo University*

(Received 30 May 2006, Accepted 1 August 2006)

Abstract

In this paper, simulation methods of the system dynamics model developed by Das et al. (1997) for activated-sludge wastewater treatment plants are illustrated in an attempt to determine the operating rules and the policies related to capacity expansion of an activated-sludge wastewater treatment plant. For existing conditions, the analyses were performed by varying activated-sludge return rate to observe changes in effluent water quality and treatment efficiency. The effluent water quality is also analyzed for various average daily inflow conditions and activated-sludge return rates. As a result, without expanding the aeration tank, maximum average daily inflow that can satisfy the effluent water quality standard of BOD 0.02 kg/m³ was determined as 2,840 m³/hr, subject to 100% of activated-sludge return rate while other factors remain constant. When the activated-sludge return rate is less than 100%, expansion of the aeration tank is necessary and minimum sizes of the aeration tank to satisfy the effluent water quality standard were determined for various activated-sludge return rates. In addition, the total operating and maintenance as well as unit treatment cost regression equations for activated-sludge wastewater treatment plants are suggested by using the cost data that are obtained from Water and Wastewater Division, Ministry of Environment. The regression analyses showed that the economies of scale phenomena exist in the operating and maintenance costs of activated-sludge wastewater treatment plants.

keywords : Activated-sludge wastewater treatment plant, Capacity expansion, Operating and maintenance costs, Simulation, System dynamics

1. 서론

국내에는 2005년 12월을 기준으로 294개의 하수처리시설이 운영되고 있으며 그 중 활성슬러지공법을 이용하는 하수처리시설이 95개소로 우리나라 하수처리공법의 약 1/3을 차지하고 있다. 산업의 발달과 도시화의 증대에 따라 이러한 활성슬러지 하수처리시설로의 유입하수량이 증가함으로 인해 시설의 개조 및 확장이 요구되게 된다. 본 논문에서는 이러한 유입하수량의 증가에 따른 활성슬러지 하수처리시설의 시설확장 규모의 결정을 위하여 시스템다이내믹스

방법론을 활성슬러지 하수처리 모의에 이용한 Das 등 (1997)의 시스템다이내믹스 모델을 이용하였고, 모델 하수처리시설의 기존 시설제원 상태와 시설용량 확장 상태에서 하수처리를 모의하였다. 이를 통하여 활성슬러지 하수처리시설의 운영조건 및 시설확장 규모를 결정할 수 있는 시스템다이내믹스 모의 방법을 제시하였으며, 환경부 상하수도국의 자료를 이용하여 유입하수량의 증가에 따른 활성슬러지 하수처리시설의 운영 및 유지관리 비용을 산정할 수 있는 회귀식을 제시하였다.

시스템다이내믹스 모델은 시스템 내에 존재하는 정보 혹은 물질의 피드백(feedback)을 직접적으로 모델링함으로써 시스템의 개별 구성에 대한 모델링보다는 시스템 전체의 행태 변화의 모의에 중점을 둔다. 이러한 모델링 방법들

[†] To whom correspondence should be addressed.
swanpark@pusan.ac.kr

이용함으로써 시스템의 개별 구성 요소를 작동시키는 기계들을 정보 혹은 물질의 피드백 체계에 따라 연결하는 것이 가능해지며, 개별 인자의 변화가 시스템 내의 다른 구성에 미치는 영향을 파악하는 것이 용이하게 된다. 활성슬러지 하수처리시스템은 “활성슬러지 반응”이라고 하는 물질의 피드백이 존재하며, 하수의 처리과정이 물, 미생물 및 유기물로 구분할 수 있는 개별 구성요소의 상호작용에 의해 이루어진다. 따라서 활성슬러지 하수처리 과정은 시스템다이내믹스 모델링에 구조적 및 개념적으로 적합하다고 할 수 있다. 또한 활성슬러지 하수처리 과정의 시스템다이내믹스 모델링을 통하여 활성슬러지 시스템의 주요 인자의 변화에 따른 시스템의 상태를 파악함으로써 시설의 운영조건을 파악할 수 있으며, 시설확장의 규모가 용이하게 결정된다.

2. 시스템다이내믹스 모델링의 개요와 활용분야

시스템다이내믹스는 1961년 미국 MIT의 Jay W. Forrester 교수가 산업동태론(Industrial Dynamics)을 발표한 이후 도시동태론(Urban Dynamics), 세계동태론(World Dynamics) 등으로 확장되어 나갔으며(Forrester, 1961, 1969, 1971), 이후로 계속해서 그 응용범위가 확대되어 다양한 학문 및 실무분야에서 사용되어왔다. Forrester 교수의 저작으로부터 알 수 있듯이, 초기에는 시스템다이내믹스라고 불리지 않고 산업동태론으로 거론되었다.

시스템다이내믹스에 대한 정의는 학자마다 조금씩 다르나, 그 핵심을 요약하면, 시스템다이내믹스는 현상에 내재된 순환적 인과관계를 규명하여 하나의 시스템으로 정립시키고, 이를 컴퓨터상에서 구현하여 현상의 시간에 따른 변화과정을 시뮬레이션을 통하여 구현하고 관찰하며, 원하는 시스템의 상태를 얻기 위하여 취할 수 있는 정책적 대안을 결정하고자 하는 일련의 과정을 포함하는 과학적 방법론으로 설명될 수 있다. 시스템다이내믹스는 그 분석의 논리에 있어서 연역과 귀납적 논리를 동시에 사용하는 특징을 가지고 있으며 기존의 전통적인 계량적 접근방식과 차별되는 접근방법을 이용한다(문, 2002). 즉, 시스템다이내믹스는 현상의 변화를 대변하는 연구 대상 변수의 시간에 따른 변화양상에 관심을 두며, 현상에 내재된 피드백 체계(feedback system)의 규명에 중점을 둔다. 또한, 시스템다이내믹스는 현상을 발전시키는 변수들 간의 실제적이며 직접적인 인과관계의 정립에 중점을 둔다.

초기의 시스템다이내믹스는 주로 산업분야, 즉 기업의 경영전략, 조직관리 및 채고문제 등에 이용되었으나, 근래에 이르러서는 자연과 사회에서 발견되는 피드백 기본틀(feedback framework)에 입각하여 산업분야 뿐만 아니라 공공정책, 공학, 그리고 사회과학의 영역 등에까지 광범위하게 적용되고 있는 일반적인 방법론으로 발전하였다.

시스템다이내믹스의 기본 구성요소는 저장변수(stock variable), 유량변수(flow variable), 연결자(connector) 그리고 변환자(converter)라고 하는 매우 간단한 요소로 구성되어 있으며(시간은 기본 구성요소를 작동시키는 내재된 요소로 볼 수 있다), 이들 구성요소의 적절한 관계에 의하여 복

잡한 시스템이 창조된다. 시스템다이내믹스 모델은 이러한 기본 요소들 간의 관계를 차분방정식의 형태로 표현하고 각 단위시간에서의 변수들의 해를 연속적으로 구해 나간다. 한편 이러한 기본 요소들 간의 인과적 관계만을 이용하여 모델을 표현하기도 하는데 이러한 변수들 간의 그래픽적 표현 방법을 인과지도(causal diagram)라고 한다.

시스템다이내믹스가 과학의 일반적인 방법론이 될 수 있었던 근본적인 이유는 시스템다이내믹스를 구성하는 기본 요소의 구성에 있다고 볼 수 있다. 시스템다이내믹스 자체를 하나의 시스템으로 본다면, 위와 같은 시스템다이내믹스의 구조는 다른 복잡한 시스템의 기본 구조와 유사한 성질을 지니는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 원자·분자·사물과 같은 물질 시스템은 양성자·중성자·전자와 같은 기본 요소의 상호작용으로 구성되고, 소설·시·시나리오와 같은 언어 시스템을 구성하는 기본요소는 알파벳 등과 같은 문자의 의미 있는 배열로 구성된다. 또한, 단위 시스템은 질량·길이·시간과 같은 구성요소를 가지며, 음악 시스템은 악기·연주자·청취인의 구성요소로 이루어진다고 볼 수 있다. 이와 같이 간단한 기본 구성요소의 상호작용에 의해 복잡한 시스템이 창조되는 일반적인 시스템의 공통적인 특징이 시스템다이내믹스 방법론에 내재되어 있기 때문에 시스템다이내믹스가 과학의 일반적인 방법론으로 성장할 수 있었던 것으로 사료된다.

현재까지 불환경 분야에 사용된 시스템다이내믹스 방법론은 주로 물의 양의 변화 모의에 사용되어왔다. 최근의 주요 사례를 들면, Simonovic 등(1999)의 이집트 나일강 유역의 수자원 이용 장기계획과 정책분석, Ahmad 등(2000)의 홍수 조절을 위한 저수지 운영문제, Simonovic(2002)의 지구 수자원 모델(world water model), Li 등(2002)의 북미 대초원 유역에서의 해설(解雪, snowmelt)에 의한 홍수 예측, Stave(2003)의 Las Vegas의 물 문제 해결을 위한 정책 결정, 그리고 Ahmad 등(2001)의 홍수예방 정책의 영향 평가를 위한 의사결정도구로서의 시스템다이내믹스에 대한 연구 등을 들 수 있다. 또한 최근에는, 시스템의 시간적 변화의 모사에는 유용하나 시스템의 공간적 변화를 파악하기는 어려운 시스템다이내믹스의 단점을 보완하여, 시스템다이내믹스와 지리정보시스템을 결합한 공간시스템다이내믹스(Spatial System Dynamics) 방법론(Ahmad et al., 2004)이 개발되었고 이로써 시스템다이내믹스의 응용범위는 한층 더 넓어지게 되었다.

3. 활성슬러지 하수처리 시스템다이내믹스 모델

Das 등(1997)은 시스템다이내믹스 모델링 방법론에 입각하여 활성슬러지 하수처리시설의 물질 흐름을 물, 미생물 및 유기물의 세 가지 흐름으로 모델링하였고, 활성슬러지 하수처리 과정의 미생물의 성장, 슬러지 생성, 처리 효율 등의 과도기 상태(transient state)와 정상 상태(steady state)를 모의하였다. 본 연구에서는 Das 등(1997)의 모델을 기반으로 시스템다이내믹스 모델링 프로그램인 STELLA를 이용하여 Fig. 1과 같이 활성슬러지 하수처리 과정을 모델링하였다.

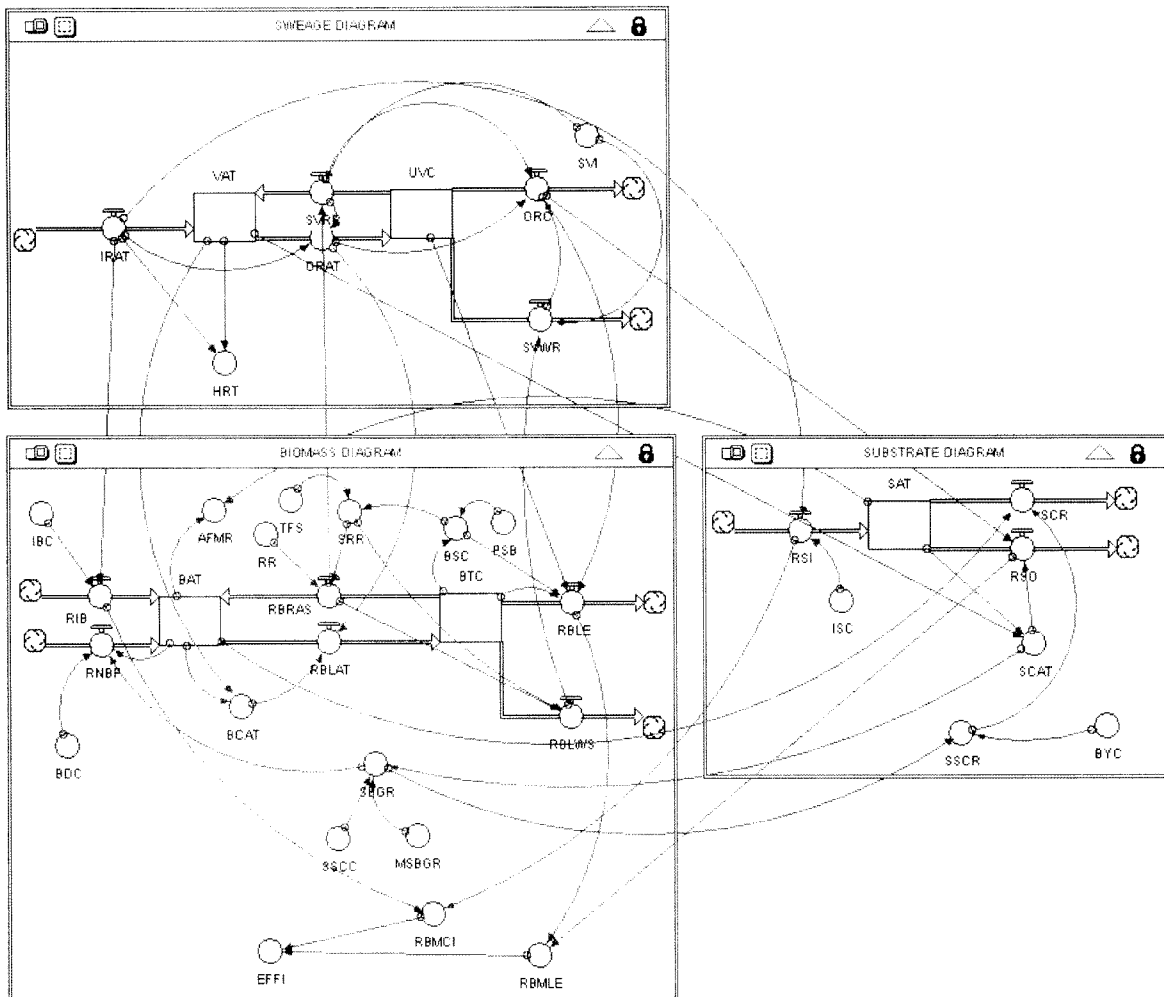


Fig. 1. A system dynamics model for operations and maintenance of activated-sludge wastewater treatment systems.

Fig. 1의 SEWAGE DIAGRAM은 하수처리시설의 하수의 흐름에 대한 모델을 나타내며, BIOMASS DIAGRAM은 미생물에 대한 모델을 나타내고, SUBSTRATE DIAGRAM은 유기물에 대한 모델을 나타낸다. 활성슬러지 하수처리시설의 물질 흐름에 대한 모델 내의 변수들 간의 함수관계는 Das 등(1997)의 정의를 이용하였다. Fig. 1은 모델의 변수들 간의 인과관계를 그래픽으로 보여주는 것이며, 이를 차분방정식의 형태로 나타내는 모델의 시스템다이내믹스 방정식을 Das 등(1997)이 밝히지 않은 변수간의 관계와 오류 부분을 수정하여 부록에 수록하였다.

4. 모델 하수처리시설의 시스템다이내믹스 모의와 분석

인구의 증가와 도시지역의 확장으로 인해 하수처리시설로의 유입하수량이 달라질 경우 방류수 수질기준을 준수하기 위하여 하수처리시설의 운영자는 처리장 운영 정책을 변화시키거나 처리장의 규모를 확장시켜야 한다. 활성슬러지 하수처리시설 시스템다이내믹스 모델은 이러한 운영정책의 변화 및 시설확장과 관련된 정책결정 과정의 의사결

정 도구로서 유용하게 이용될 수 있다.

이러한 예로서 부록에 수록된 변수 값을 가지는 모델 하수처리시설의 기존 시설제원 상태와 시설확장이 요구될 시의 운영정책을 도출하기 위하여 활성슬러지 반응율에 따른 방류수 수질 및 처리효율의 변화를 분석하였고, 유입하수량의 증가에 따라 요구되는 시설규모의 확장과 연관된 정책을 결정하였다. 모델 하수처리시설은 하수도법 상의 “기타지역”에 위치한다고 가정하였다.

4.1. 활성슬러지의 반응율에 따른 방류수 수질의 변화 분석

모델의 폭기조내 유기물농도(SCAT)를 방류수 수질로 고려하였으며, 활성슬러지의 반응율(RR)에 따른 방류수 수질의 변화를 파악하고 모델 하수처리시설의 방류수 수질(기타지역에 대한 하수도법 방류수 수질 BOD 0.02 kg/m³이하)을 만족하기 위한 반응율을 결정하기 위하여 반응율을 10%에서 100%까지 증가시키면서 반응율에 따른 방류수 수질의 변화를 분석하였다. Table 1은 각 반응율에 따른 방류수 수질의 평형상태(steady state)의 값을 나타낸다.

Table 1에 나타난 바와 같이 활성슬러지의 반응율이

Table 1. Effluent water quality according to sludge return rate changes

RR (%)	10%	20%	30%	40%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
SCAT (kg/m ³)	0.032	0.028	0.025	0.022	0.02	0.018	0.015	0.011	0.008	0.005	0.002
F/M Ratio	0.88	0.67	0.50	0.36	0.30	0.25	0.16	0.09	0.05	0.02	0.003

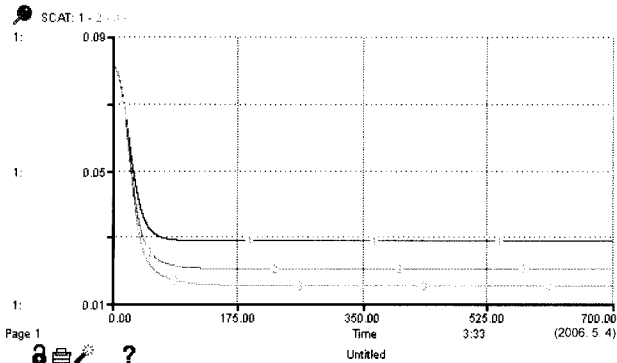


Fig. 2. Graphs of effluent water quality according to sludge return rate.

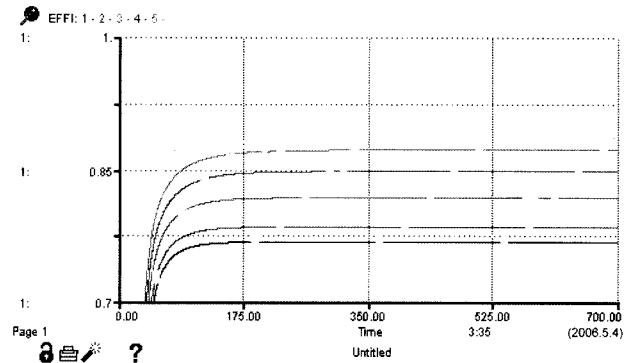


Fig. 3. Graphs of treatment efficiency according to sludge return rate.

45% 이상이 될 때 하수도법 방류수 수질기준 BOD 0.02 kg/m³ 이하를 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 2는 활성슬러지의 반송률에 따른 방류수 수질의 변화를 그래프로 나타내는 것으로서, 반송률을 20%에서 시작하여 60%까지 25%씩 증가시켰을 때 방류수 수질의 변화를 나타내 준다. Fig. 2의 시간축의 단위는 시(hour)를 나타낸다.

따라서 Fig. 2에서 2번 그래프(반송률 45%)와 3번 그래프(반송률 60%)일 경우 방류수 수질기준 BOD 0.02 kg/m³ 이하를 만족한다.

4.2. 활성슬러지의 반송률에 따른 처리효율의 변화 분석

활성슬러지의 반송률(RR)에 따른 처리효율(EFFI)의 변화를 파악하고, 모델 하수처리시설의 처리효율을 최대화하기 위한 반송률을 결정하기 위하여 반송률을 현재 시설제원 상태에서 방류수 수질기준을 만족시키는 최소 반송률인 45%에서 100%까지 증가시키면서 반송률에 따른 처리효율의 변화를 분석하였다. 여기서 처리효율은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$EFFI = (RBMCI - RBMLE) / RBMCI \quad (1)$$

여기서 EFFI는 처리효율, RBMCI는 생물학적으로 분해 가능한 물질의 유입률(kg/hr), RBMLE는 생물학적으로 분해 가능한 물질의 유출률(kg/hr)을 나타낸다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 평형상태(steady state)에서의 처리효율은 방류수 수질기준을 만족하는 최소반송률인 45%에서 처리효율이 77%로 최소이며 반송률 90%에서 효율이 88%로 최대효율을 보인다.

Table 2. Efficiency of treatment according to sludge return rate changes

RR (%)	45	50	60	70	80	90	100
EFFI (%)	77	78	82	85	87	88	81

Fig. 3은 활성슬러지의 반송률에 따른 처리효율의 변화를 보여주는 것으로서, Table 2에서 사용한 반송률의 값에 따른 처리효율의 변화를 나타낸다. Fig. 3의 시간축의 단위는 시(hour)를 나타낸다.

따라서 Fig. 3에서 6번 그래프(반송률 90%)가 최대처리 효율 88%를 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 7번 그래프(반송률 100%)는 시간이 경과할수록 처리효율이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 반송률이 100%일 경우에는 식 (1)에서 RBMCI는 일정하나 RBMLE, 즉 생물학적으로 분해 가능한 물질의 유출률이 과도한 활성슬러지의 반송으로 인해 시간에 따라 커지므로 발생하는 현상으로 분석된다.

4.3. 모델 하수처리시설 시설용량 분석 및 시설확장 정책 결정

하수처리시설의 일평균하수유입량이 증가되어 기존 시설 제원 및 반송률 정책으로는 방류수 수질기준을 만족시킬 수 없을 경우 시설규모는 필연적으로 확대되어야 한다. 이러한 경우의 시설규모 확장과 관련된 정책결정의 예로써 본 논문의 모델 하수처리시설의 기존 일평균하수유입량(IRAT)인 500 m³/hr이 100%에서 500%까지 증가될 때 활성슬러지 반송률(RR)에 따른 방류수 수질(SCAT)의 변화를 모의하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

일평균하수유입량(IRAT)이 1,000 m³/hr로 증가되었을 경우에는 활성슬러지 반송률이 최소 80%가 되어야 방류수 수질기준 BOD 0.02 kg/m³ 이하를 만족하는 것으로 나타났으며, 일평균하수유입량이 2,840 m³/hr으로 증가할 경우 반송률을 100%로 운영하여야만 방류수 수질이 BOD 0.02 kg/m³으로 계산되어 방류수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 활성슬러지 반송률 외 방류수 수질에 영

Table 3. Changes in SCAT (kg/m³) for various IRAT and RR

IRAT (m ³ /hr)	RR (%)						
	45	50	60	70	80	90	100
500	0.02	0.018	0.015	0.011	0.008	0.005	0.0002
1,000	0.042	0.036	0.03	0.023	0.017	0.01	0.004
1,500	0.057	0.051	0.044	0.036	0.026	0.016	0.007
2,500	0.069	0.066	0.062	0.056	0.045	0.032	0.016
2,840	0.07	0.068	0.065	0.06	0.051	0.037	0.02
3,000	0.071	0.069	0.066	0.062	0.053	0.04	0.022

향을 미치는 다른 인자의 값이 변하지 않는다고 가정할 때, 처리시설을 확장하지 않고 활성슬러지 반응율을 최대한 증가시켜 방류수 수질기준을 만족시킬 수 있는 일평균하수유입량의 최대상한치는 2,840 m³/hr인 것으로 나타났다. 그러므로 일평균하수유입량이 2,840 m³/hr 이상으로 증가할 경우, 반응율을 100%로 운영하더라도 방류수 수질기준을 만족시킬 수 없으므로 시설용량의 확대가 필수불가결한 것으로 나타났다.

일평균하수유입량이 2,840 m³/hr으로 증가할 경우 활성슬러지 반응율을 100%로 하면 방류수 수질기준을 만족할 수 있으나 실제 처리장 운영 시 반응율을 100% 미만으로 할 경우에는 방류수 수질기준을 만족시키기 위하여 폭기조 (VAT)의 증설과 같은 시설규모의 확장이 필요하다. 한편 이러한 폭기조의 크기는 활성슬러지 반응율에 따라 달라진다. 따라서 방류수 수질기준을 만족시키기 위한 활성슬러지 반응율에 따른 최소한의 폭기조 용량을 모델 시뮬레이션을 통하여 Table 4와 같이 구하였다.

Table 4에 나타난 바와 같이 폭기조의 용량은 반응율이 45%일 경우에는 반응율이 100%일 때의 폭기조 용량인 6,800 m³에 비해 6 배 증가되어 40,800 m³이 되어야 하며, 반응율이 90%일 경우에는 약 1.9 배 증가되어 13,000 m³이 되어야 하는 것으로 나타났다.

Table 4. Required volume of aeration tank (VAT) for various RR

IRAT (m ³ /hr)	RR (%)	45%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
		VAT (m ³)	40,800	37,700	31,500	25,300	19,200	13,000
2,840	F/M ratio	0.32	0.29	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05
	SCAT (kg/m ³)	0.02						

4.4. 유입하수량의 증대에 따른 운영 및 유지관리 비용의 변화 분석

유입하수량이 500 m³/hr에서 2,840 m³/hr으로 증가할 경우에는 유입하수량의 증가로 인해 인건비, 전기비, 약품비, 슬러지 처리비용과 같은 운영 및 유지관리 상의 비용의 증대가 수반된다. 이러한 유입하수량의 증가로 인한 운영 및 유지관리 비용의 산정을 위하여 환경부 상하수도국의 “2004년도 하수처리장 수질 및 유지관리비” 자료(이하 환경부 상하수도국 자료) 중 유입하수량 100,000 ton/day 이하인 활성슬러지 하수처리시설의 일평균하수유입량과 운영 및 유지관리 총비용자료를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 환경부 상하수도국 자료 전체를 이용할 경우 약 100,000 ton/day 이상에 대해서는 유지관리 비용의 변동 폭이 매우 심해진다. 따라서 회귀분석의 신뢰성을 높이기 위해 유입하수량 100,000 ton/day 이하인 비용자료들만을 이용하여 회귀분석을 실시하여 Fig. 4와 같은 결과를 구하였다.

식 (2)는 일평균하수유입량 100,000 ton/day 이하인 활성슬러지 하수처리시설의 일평균하수유입량과 운영 및 유지관리 총비용 사이의 회귀식을 보여준다.

$$C = 180,992 \cdot IRAT^{0.5363} \tag{2}$$

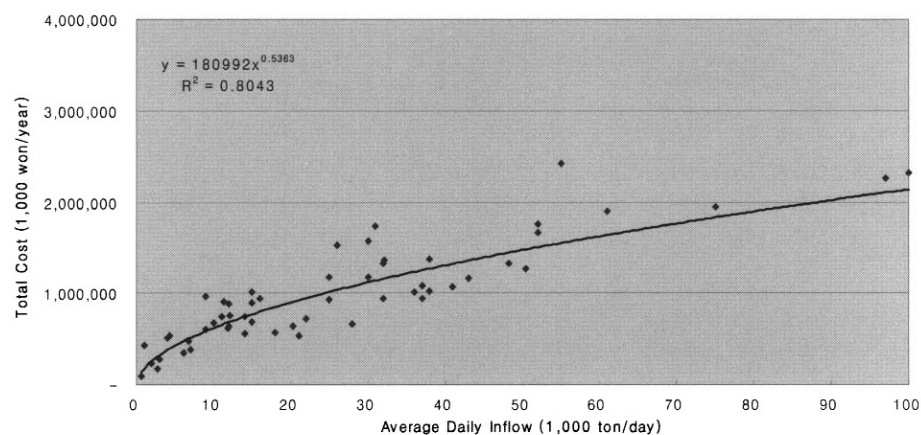


Fig. 4. Regression analysis of average daily inflow and total operation and maintenance cost.

여기서, C 는 운영 및 유지관리 총비용(1,000 won/year), $IRAT$ 는 일평균하수유입량(1,000 ton/day)을 나타낸다. 식 (2)를 이용하면 일평균하수유입량이 500 m³/hr(약 12,000 ton/day)에서 2,840 m³/hr(약 68,200 ton/day)로 4.68 배 증가하여 유입할 경우, 모델 하수처리시설의 운영 및 유지관리 총비용은 610,798,000 won/year에서 1,664,063,000 won/year으로 증가하여 약 2.72 배 증가하는 것으로 나타났다.

한편 환경부 상하수도국 자료로부터 일평균하수유입량과 단위하수처리비용(단위 m³ 당 운영 및 유지관리 비용)의 관계는 Fig. 5와 같으며 회귀식은 식 (3)과 같다.

$$UC = 428.61 \cdot IRAT^{-0.4201} \quad (3)$$

여기서, UC 는 단위하수처리비용(won/m³), $IRAT$ 는 일평균하수유입량(1,000 ton/day)을 나타낸다. 식 (3)을 이용하면 일평균하수유입량이 500 m³/hr에서 2,840 m³/hr로 4.68 배 증가하여 유입할 경우의 모델 하수처리시설의 단위하수처리비용은 151 won/m³에서 73 won/m³로 감소되는 것으로 나타났다.

5. 결론

시스템다이내믹스는 다양한 학문 분야에서 사용되고 있으며, 물환경 분야에서도 적용 예가 많으나 주로 수량의 분석과 그에 관련된 정책결정에 주로 사용되어 왔다. 본 논문에서는 Das 등(1997)의 활성슬러지 하수처리 시스템다이내믹스 모델을 이용하여 모델 활성슬러지 하수처리시설의 운영조건에 대한 분석과 하수유입량의 증가와 활성슬러지 반송율에 따라 요구되는 폭기조의 규모 결정에 대한 분석을 실시하여 활성슬러지 하수처리 시스템다이내믹스 모델의 활용방안을 제시하였다. 그 결과, 기존 시설제원 상태 하에서는 활성슬러지의 반송율이 45% 이상이 될 때 하수도법 방류수 수질기준 BOD 0.02 kg/m³ 이하를 만족하는 것으로 나타났으며, 처리효율은 반송율 90%에서 88%로 최대효율을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 반송율이 100%일 경우에는 과도한 활성슬러지의 반송으로 인해 생물학적으로

분해 가능한 물질의 유출률이 생물학적으로 분해 가능한 물질의 유입률에 비해 시간에 따라 커지므로 처리효율이 시간에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

한편 기존 시설제원 상태에서 활성슬러지 반송율 외 방류수 수질에 영향을 미치는 다른 인자의 값이 변하지 않는다고 가정할 때, 처리시설을 확장하지 않고 활성슬러지 반송율을 100%로 최대한 증가시켜 방류수 수질기준을 만족시킬 수 있는 일평균하수유입량의 최대상한치는 2,840 m³/hr인 것으로 나타났다. 일평균하수유입량이 2,840 m³/hr로 증가하였을 때 활성슬러지 반송율을 100% 미만으로 운영할 경우 방류수 수질기준을 만족하기 위한 최소한의 폭기조 용량(VAT)은 반송율이 45%일 경우에는 반송율이 100%일 때에 비해 6 배 증가되어야 하며, 반송율이 90%일 경우에는 약 1.9 배 증가되어야 하는 것으로 나타났다.

환경부 상하수도국의 100,000 ton/day 이하의 처리용량을 가지는 활성슬러지 하수처리시설의 운영 및 유지관리 비용 자료를 이용하여 일평균하수유입량과 운영 및 유지관리 비용 간의 회귀분석 결과 일평균하수유입량이 500 m³/hr에서 2,840 m³/hr로 4.68 배 증가하여 유입할 경우의 모델 하수처리시설의 운영 및 유지관리 총비용은 약 2.72 배 증가하는 것으로 나타났으며, 단위하수처리비용은 151 won/m³에서 73 won/m³로 감소되는 것으로 나타났다. 이는 시설용량의 규모가 커질수록 비용의 원단위가 작아지는 규모의 경제(Haldi et al., 1967)가 활성슬러지 하수처리시설의 처리비용에도 존재하는 것으로 사료된다.

식 (2)와 식 (3)으로 표현되는 비용에 관한 회귀식들은 환경부 상하수도국의 2004년도 자료만을 이용하였으므로 시설확장 계획연도에서의 정확한 비용 산정을 위해서는 2004년부터 미래의 시설확장 계획연도까지의 예측된 물가상승률을 고려한 비용 계산이 요구될 것으로 사료된다.

본 논문에서는 활성슬러지 하수처리 시스템다이내믹스 모델의 활용방안을 탐색하여 활성슬러지 하수처리시설의 운영조건과 유입하수량의 증가로 인한 시설확장의 규모를 결정할 수 있는 방안으로써 모델의 분석과 모의 방법에 대하여 논하였다. 향후 활성슬러지 하수처리시설의 유기물과 미생물의 특성에 대한 충분한 자료를 이용하여 효율적인

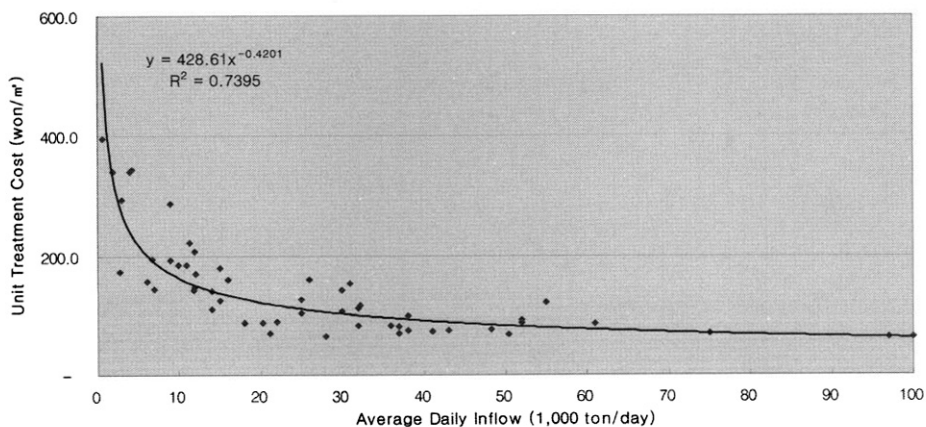


Fig. 5. Regression analysis of average daily inflow and unit treatment cost.

처리시설의 운영과 유입하수량 증가에 따른 시설확장 규모 및 그에 따른 운영 및 유지관리 비용의 산정에 본 논문이 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

문태훈, 시스템다이내믹스의 발전과 방법론적 위상, *한국 시스템다이내믹스 연구*, 3(1), pp. 61-77 (2002).
 Ahmad, S. and Simonovic, S. P., System Dynamics Modeling of Reservoir Operations for Flood Management, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(3), pp. 190-198 (2000).
 Ahmad, S. and Simonovic, S. P., A decision-support Tool for Evaluation of Impacts of Flood Management Policies, *AIH, Hydrological Science and Technology*, 17(1), pp. 11-22 (2001).
 Ahmad, S. and Simonovic, S. P., Spatial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), pp. 331-340 (2004).

Das, B. K., Bandyopadhyay, M., and Mohapatra, P. K. J., System Dynamics Modeling of Biological Reactors for Waste Water Treatment, *Journal of Environmental Systems*, 25(3), pp. 213-240 (1996-1997).
 Forrester, J. W., *Industrial Dynamics*, Cambridge, The MIT Press (1961).
 Forrester, J. W., *Urban Dynamics*, Cambridge, The MIT Press (1969).
 Forrester, J. W., *World Dynamics*, Cambridge, The MIT Press (1971).
 Haldi, J. and Whitcomb, J., Economies of Scale in Industrial Plants, *Journal of Political Economy*, 75(4), pp. 373-385 (1967).
 Li, L. and Simonovic, S. P., A System Dynamics Model for Predicting Floods from Snowmelt in North American Prairie Watersheds, *Hydrological Processes*, 16, pp. 2645-2666 (2002).
 Simonovic, S. P. World water dynamics: Global modeling of water resources, *Journal of Environment Management*, 66(3), pp. 249-267 (2002).
 Simonovic, S. P. and Fahmy, H., A New Modeling Approach for Water Resources Policy Analysis, *Water Resources Research*, 35(1), pp. 295-304 (1999).
 Stave, K. A., A System Dynamics Model to Facilitate Public Understanding of Water Management Options in Las Vegas, Nevada, *Journal of Environmental Management*, 67, pp. 303-313 (2003).

Appendix. Variables and equations of the activated-sludge system dynamics model

Variable / Equation	Value	Unit	N.B.
BAT (Biomass in the Aeration Tank) BAT(t) = BAT(t-dt)+(RIB+RNBP-RBRAS-RBLAT)*dt	10	kg	Initial Value
RIB (Rate of Influent Biomass) = IBC*IRAT	N/A	kg/hr	
RNBP (Rate of Net Biomass Produced) = BAT*(SBGR-BDC)	N/A	kg/hr	
RBRAS (Rate of Biomass Recirculated with activated sludge) = SRR*RR	N/A	kg/hr	
RBLAT (Rate of Biomass Leaving the Aeration Tank) = BCAT*ORAT	N/A	kg/hr	
BTC (Biomass Trapped in Clarifier) BTC(t) = BTC(t-dt)+(RBLAT-RBRAS-RBLE-RBLWS)*dt	0	kg	Initial Value
RBLE (Rate of Biomass Leaving Through Effluent) = ORC*(BTC-BSC)/UVC	N/A	kg/hr	
RBLWS (Rate of Biomass Leaving with Waste sludge) = SRR-RBRAS	N/A	kg/hr	
AFMR (Actual Feed to Micro-organism Rate) = SAT/BAT	N/A	N/A	
BCAT (Biomass Concentration in Aeration Tank) = BAT/VAT	N/A	m ³ /hr	
BDC (Biomass Decay Coefficient)	0.003	hr-1	
BSC (Biomass Settled in Clarifier) = BTC*PSB	N/A	kg	
EFFI (Efficiency of the System) = (RBMCI-RBMLE)/RBMCI	N/A	N/A	
IBC (Influent Biomass Concentration)	0.01	kg/m ³	
MSBGR (Maximum Specific Biomass Growth Rate)	0.25	hr-1	

Variable / Equation	Value	Unit	N.B.
PSB (Percentage of Biomass Settled)	0.9	N/A	
RBMCI (Rate of Biodegradable Matter Coming in Influent) = RSI+RIB	N/A	m ³ /hr	
RBMLE (Rate of Biodegradable Matter Leaving Through Effluent) = RSO+RBLE	N/A	kg/hr	
RR (Recirculation Rate)	N/A	N/A	
SBGR (Specific Biomass Growth Rate) = (MSBGR*SCAT)/(SCAT+SSCC)	N/A	hr ⁻¹	
SRR (Sludge Retention Rate) = BSC/TFS	N/A	kg/hr	
SSCC (Saturation Substrate Concentration Constant)	0.13	kg/m ³	
TFS (Time for Formation of Sludge)	1	hr	
SAT (Substrate in Aeration Tank) SAT(t) = SAT(t - dt) + (RSI - SCR - RSO)*dt	550	kg	Initial Value
RSI (Rate Substrate Coming in the Influent) = ISC*IRAT	N/A	kg/hr	
SCR (Substrate Consumption Rate) = BAT*SSCR	N/A	kg/hr	
RSO (Rate of Substrate Outflow) = SCAT*ORC	N/A	kg/hr	
BYC (Biomass Yield Coefficient)	0.5	N/A	
ISC (Influent Substrate Concentration)	0.08	kg/m ³	
SCAT (Substrate Concentration in Aeration Tank) = SAT/VAT	N/A	kg/m ³	
SSCR (Specific Substrate Consumption Coefficient) = SBGR/BYC	N/A	kg/m ³	
UVC (Useful Volume of Clarifier) UVC(t) = UVC(t-dt)+(ORAT-ORC-SVWR-SVRR)*dt	3000	m ³	Initial Value
ORAT (Overflow Rate from Aeration Tank) = IRAT+SVRR	N/A	m ³ /hr	
ORC (Overflow Rate from Clarifier) = ORAT-SVRR-SVWR	N/A	m ³ /hr	
SVWR (Sludge Volume Wastage Rate) = RBLWS*SVI	N/A	m ³ /hr	
SVRR (Sludge Volume Recirculation Rate) = RBRAS*SVI	N/A	m ³ /hr	
VAT (Volume of Aeration Tank) VAT(t)=VAT(t - dt) + (IRAT + SVRR - ORAT)*dt	6800	m ³	Initial Value
IRAT (Inflow Rate to Aeration Tank)	500	m ³ /hr	
HRT (Hydraulic Retention Time) = VAT/IRAT	N/A	hr	
SVI (Sludge Volume Index)	0.11	m ³ /kg	