

하수처리장 운영의 최적화를 위한 ASM, PHOENICS의 적용

Application of ASM and PHOENICS for Optimal Operation of Wastewater Treatment Plant

김 준 현* 한 미 덕** 한 영 한***
Kim, Joon Hyun Han, Mi-Duck Han Yung Han

Abstract

This study was implemented to find an optimal model for wastewater treatment processes using PHOENICS(Parabolic, hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series) and ASM(Activated Sludge Model). PHOENICS is a general software based upon the laws of physics and chemistry which govern the motion of fluids, the stresses and strains in solids, heat flow, diffusion, and chemical reaction. The wastewater flow and removal efficiency of particle in two phase system of a grit chamber in wastewater treatment plant were analyzed to inquire the predictive aspect of the operational model. ASM was developed for a biokinetic model based upon material balance in complex activated sludge systems, which can demonstrate dynamic and spatial behavior of biological treatment system. This model was applied to aeration tank and settling chamber in Choonchun city, and the modeling result shows dynamic transport in aeration tank. PHOENICS and ASM could be contributed for the optimal operation of wastewater treatment plant.

키워드 : 하수처리장, 최적운영, PHOENICS, ASM No.3

Keywords : wastewater treatment plant, optimal operation, PHOENICS, ASM3

1. 서론

본 논문에서는 하수처리시설의 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로써 하수처리 공정별로 적절한 전산 모형의 적용에 대한 연구를 수행하였다. 하수처리장의 일반적인 주공정은 침사지, 생물반응조, 침전지 등이며, 특수 공정으로 생물학적 모래여과지, 막분리공정 등이 있다. 본 논문에서는 이러한 공정별로 적합한 모형을 찾고 개발하기 위하

여, 유럽에서 많이 적용된 ASM 모형의 이론과 주 파라미터 등에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 유체역학 및 물질이동문제에 있어서 범용적 해석 모형인 PHOENICS의 적용 가능성을 조사하였다. ASM이나 PHOENICS는 오랜 기간 많은 전문가들이 참여하여 개발한 매우 광범위하고 복잡한 모형으로써, 이론, 파라미터, 사용법에 대한 조사를 위해 많은 노력을 필요로 한다. 본 논문에서는 이러한 부분에 대한 조사를 통하여, 일반인이 이러한 모형을 사용할 수 있도록 소개하였으며, 춘천시 하수처리장에 본 모형들의 적용가능성을 검토하였다.

기존의 하수처리 공정 해석 모형들은 모형에 포함되어 있는 파라미터의 수가 너무 많고 복잡하

* 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 환경공학과 석사과정
*** 강원대학교 대학원 환경공학과 박사과정

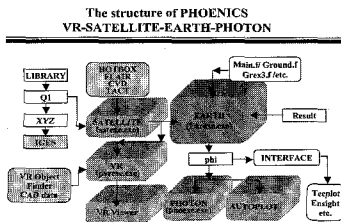
며, 파라미터의 결정과정 역시 상당한 시간과 노력이 필요하여 실제 처리장의 운전과 제어에 적용에는 한계가 있다. 국내에서는 실제 공정의 운영에 있어서 동력학적 모형에 근거한 예측 제어보다는 전문가의 경험이나 지식에 의한 판단으로 운전을 하는 경우가 대부분이며 모형을 직접적으로 사용하지 않는 간단한 구조의 제어기에 대한 계속제어에 머무르는 경우가 많다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 기존 모형의 단점을 극복하기 위하여 PHOENICS나 ASM 모형을 이용한 적절한 최적화 방법을 모색하였다.

2. 본론

2.1 PHOENICS의 기본이론

PHOENICS는 1981년에 처음 배포되기 시작한 범용 유체유동해석 프로그램으로서 단상 또는 다상 흐름, 열/물질이동, 화학반응현상 등을 시뮬레이션하기 위한 다용도의 프로그램이다. 컴퓨터가 발전함에 따라 분리되어 연구되어지던 해석프로그램들이 대부분의 유체유동현상을 예측할 수 있는 하나의 범용적인 프로그램으로 전환되는 추세이다. 또한 수치해석이나 컴퓨터 프로그래밍에 익숙하지 않은 엔지니어나 과학자들이 사용할 수 있도록 개선되었다. PHOENICS는 2개의 주 계산 모형과 4개의 보조 모형이 있다. 주 계산 모형은 SATELLITE와 EARTH이다. 보조 모형중에 후처리 모형은 PHOTON, AUTOPLLOT, PINTO가 있다. 사용자의 지시사항을 받아들이는 프로그램인 GUIDE로 구성되어 있다[1]. 최근 버전에서는 전처리장치로 VR-Editor와 후처리장치로 VR-Viewer를 포함하고 있으며 그 구성을 간단하게 나타내면 <Figure 2.1.1>와 같다.



<Figure 2.1.1> Structure of PHOENICS

2.2 PHOENICS를 이용한 춘천시 하수종말처리장의 침사지모델링

침사지 구조 및 처리 대상 물질을 살펴보면 다음과 같다. 대상물질의 비중은 2000~2500kg/m³ 정도이고, 직경(입자경)은 0.2mm 이상이다. 또한 침전 속도는 0.0225m/s인 입자들이며 유기질의 침전을 피해야 한다. 따라서 유속은 0.15~0.3m/s, 체류시

간은 30~60sec로 하는 것이 유용하다.

침사지의 규격은 유효깊이 1.5~2m, 총깊이 2.5~3.5m, 유효길이 10~20m로 하며 전후에 각각 3~6m 정도의 여유를 주는 것이 좋다. 침사지에는 여러 가지가 있는데 선택은 폐수내의 사석, 처리장의 크기, 운영과 유지의 편의성, 시공비와 운영비 등 여러 가지 요소에 좌우된다. 침사지에 있어서 중요한 점은 침전지와는 달리 모래와 같은 비교적 비중이 높고 크기가 큰 입자를 제거시키는 공정이므로 체류시간이 짧을 수 밖에 없다. 따라서 수평 방향으로의 이동으로 입자상이 켜거나가지 않도록 소류속도에 유의해야 한다. 적당한 소류속도는 약 0.225m/s정도이며, 그 관계는 식(2.2.1)과 같다.

$$V_c = \left(\frac{8\beta \cdot g(s-1)d}{f} \right)^{1/2} \quad (2.2.1)$$

여기서, V_c : 소류속도

β : 상수(모래인 경우 0.04)

g : 중력가속도(980cm/sec²)

s : 입자의 비중

d : 입자경(cm)

f : Darcy-weisbach 마찰계수(콘크리트인 경우 0.03)

2.2.1 PHOENICS의 입력자료 설계 및 구성

1) 춘천시 하수처리장의 침사지의 초기 조건

춘천시 하수처리장의 각 침사지의 유입부에는 점검보수 및 유량 통제를 위해서 유입 수문이 설치되어있으며, 침사지의 유출부에는 유출 수문을 설치하여 침사지의 보수 점검시에 이용하고 있다. 전체적인 침사지의 조건은 <Table 2.2.1>과 같다 [2].

<Table 2.2.1> Condition of grit chamber

구분	단위	100,000 m ³ /일	
유입 Gate 크기	mm	B1,000 × H2,000	
유출 Gate 크기	mm	W1,000 × H2,000	
지 폭	m	3.0	
지 장	m	18.0	
총 수면적	m ²	162.0	
유효 수심	시간최대	m	0.45
	우천시	m	1.35
지 수	3 지	3	

2) 적용된 지배방정식

액체-고체의 이상유동(two phase flow)을 해석하는 방법으로는 입자의 궤적을 추적하여 연속상(액체)과 분산상(입자)이 상호간에 미치는 힘을 계산하는 Lagrangian 방법과 입자를 또 하나의 새로

은 연속상으로 가정하여 이에 대한 지배방정식을 푸는 Eulerian 방법이 있다. 본 논문에 이용된 패키지인 PHOENICS는 두 가지 방법을 모두 제공하지만 그 중에서 Eulerian 방법을 이용하는 IPSA (Inter Phase Slip Algorithm)를 사용하였다.

본 논문에서는 침사지의 길이 방향을 x축, 폭 방향을 y축, 그리고 깊이를 z축을 가리키도록 좌표계를 설정했다. 그리고 x, y, z 방향의 속도는 각각 u, v, w로 나타낸다.

앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 Eulerian 방법을 사용한 연속방정식을 적용하였는데, 이것은 정상상태, 3차원 층류 다상유동에 관한 것으로 식(2.2.2)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j + \rho_j v_{jw}) = 0 \quad (2.2.2)$$

식(2.2.2)을 x, y, z 각각의 좌표축에 대하여 정리하면 식(2.2.3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u + \rho_k u_k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v + \rho_k v_k) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w + \rho_k w_k) = 0 \quad (2.2.3)$$

여기서, u, v, w는 각각의 좌표축 방향의 속도 성분, ρ 는 유체의 겉보기 밀도, ρ_k 는 입자의 겉보기 밀도를 나타낸다.

또한 난류 유동의 해석은 일반 지배방정식의 비선형 유동장에 대한 시간평균의 결과로 나타나는 Reynolds 응력에 대한 모형이 필요하며 본 논문에서는 Boussinesq 가정과 Prandti-Kolmogorov 관계식으로 주어지는 표준 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다. Boussinesq 가정은 다음과 같다.

$$\overline{(\rho' u' v')} \propto \mu_t \frac{du}{dy} \quad (2.2.4)$$

Prandti-Kolmogorov 관계식은 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (2.2.5)$$

3) 유입구와 유출구의 경계조건

각 방향별로의 길이를 보면 실제 침사지의 크기에 맞추기 위해 x축 방향의 길이는 18m로 하였고, y축 방향으로의 길이는 3.4m, 그리고 z축 방향의 침사지 높이는 2.2m로 설정하였다.

또한 앞에서 언급한 바와 같이 침사지에 있어서 가장 중요한 것은 소류속도를 정하는 것이다. 따라서 이 부분은 PHOENICS의 유입속도 부분에 해당한다. 이 소류속도는 침사지 설계 물질의 마찰 계수나 침사되는 물질에 따라서 다소 차이가 있기는 하지만 적당한 소류속도를 0.225m/s로 가정하여 유입속도를 그 값과 동일하게 하였다. 또한 침사지의 입구에서 유입구로 들어오는 유입 질량 유량은 각각의 부피분율에 각각의 밀도와 속도를 곱한 값이다. 따라서 PHOENICS의 VR-editor에서는

유입부분의 속성부분에 main에서 정해진 부피분율 값을 각각의 물질의 밀도와 곱해서 계수값으로 입력하도록 되어있다. 물(ρ_w)과 고형물(ρ_s)의 밀도 값은 각각 1000kg/m³(20℃), 2500kg/m³(20℃)로 하였다.

유입구에서의 물과 고형물의 질량 유량을 식으로 표현하면 각각 식(2.2.6)과 식(2.2.7)과 같다.

$$Q_w = R_w \times \rho_w \times U_x \quad (2.2.6)$$

$$Q_s = R_s \times \rho_s \times U_x \quad (2.2.7)$$

여기서, Q_w 와 Q_s 는 물과 입자의 질량 유량이고, R_w 와 R_s 는 물과 입자의 부피분율, 그리고 U_x 는 x 방향으로의 유입속도성분을 나타낸다.

압력은 유입구와 유출구 모두 대기압이 경계조건이다. 즉, 정압은 $P_{static} = 0$ 이 된다. 또한 유출구에서의 물상과 입자상의 계수값들은 각각 1000kg/m³과 1000×2500kg/m³이다.

2.2.2 모델링 결과 분석

위의 입력자료를 PHOENICS의 VR-editor를 이용하여 main menu에서 입력해주었으며, 모델링을 간단하게 하기 위해서 침사 물질이 침전등에 의하여 제거되는 부분은 생략하였다.

이렇게 구성된 침사지 모형에 대한 격자망은 다른 적용 예들과는 달리 침사지와 같은 경우에는 그 구성이 단순하기 때문에 격자망의 구성에 있어서 큰 어려움은 없었다. 하지만 CFD 모델링에 있어서 수치적 안정성 및 정확성을 지니는 효과적인 계산 격자를 구성하는 것은 매우 중요한 일이다. 본 연구에서는 침사지를 x축으로 100개 y축과 z축으로 각각 10개로 분할하였다.

격자망과 여러 입력 조건들이 설정된 후에 PHOENICS의 simulator인 EARTH에서 계산을 수행하게 된다. 이러한 과정을 통해서 얻어진 속도나 부피분율에 대한 결과값은 VR-View를 통해서 확인할 수 있다.

<Figure 2.2.1>~<Figure 2.2.3>은 EARTH로부터 계산된 값을 vector, contour, 그리고 isosurface로 나타낸 것이다.

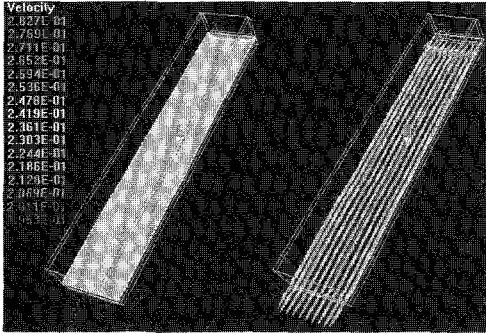
<Table 2.2.2>와 <Figure 2.2.4>에서 확인되는 바와 같이 유입구에서 유출구로 갈수록 R1 값은 증가하게 되고 R2값은 감소한다. 이것은 유출구로 가면서 비중이 무거운 R2, 즉 고형물이 침전하기 때문이다. 물론 이와 동시에 침사지내의 속도는 감소하게 된다. 이것은 <Figure 2.2.3>에서 확인할 수 있다. 또한 이렇게 구해진 부피분율 값은 식(2.2.8)을 이용하여 농도로 환산될 수 있다.

$$C_s = \frac{M_s}{U} = \frac{M_s}{v_s} \frac{v_s}{U} = \rho_s \theta_s \quad (2.2.8)$$

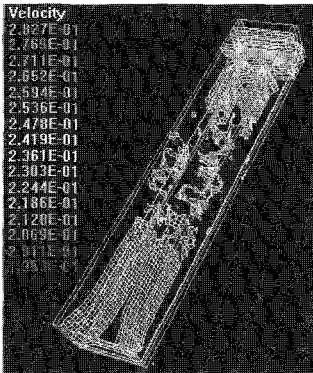
여기서, C_s : 고형물상의 농도
 U : 전체 부피
 ρ_s : 고형물상의 밀도
 θ_s : 고형물상의 부피분율

<Table 2.2.2> Volumetric fraction of water and solid in grit chamber.

IX	R1 (물)	R2 (입자성 물질)
1(유입구)	9.500E-01	5.000E-02
:	:	:
:	:	:
77	9.529E-01	4.711E-02
79	9.580E-01	4.201E-02
81	9.669E-01	3.313E-02
83	9.780E-01	2.196E-02
85	9.882E-01	1.181E-02
87	9.948E-01	5.151E-03
89	9.980E-01	1.998E-03
91	9.991E-01	9.051E-04
93	9.994E-01	6.054E-04
95	9.995E-01	5.429E-04
97	9.995E-01	5.186E-04
99(유출구)	9.996E-01	4.120E-04



<Figure 2.2.1> Calculated velocity using Earth (left : contour, right : vector).



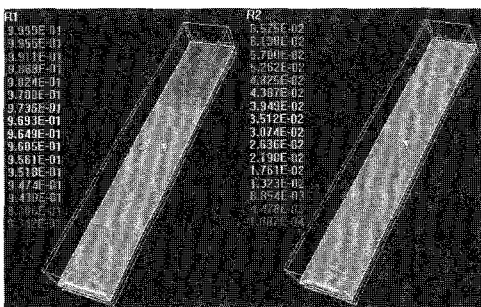
<Figure 2.2.2> Calculated velocity using Earth (isosurface).

이렇듯 PHOENICS를 이용하여 모델링을 수행하였을 경우 사용자는 부피분율값이나 이 값을 통해서 얻어진 농도값등을 통해서 침사지내에서 일어나고 있는 현상들을 파악할 수 있으며 아주 세밀하게 격자망을 구성해주는 것이 가능하다. 따라서, 기존의 침전지나 침사지 모형들과 같이 그저 단순히 유입량의 농도가 부피분율에 대한 유출수를 비교해서 얻는 방식과는 다소 차이가 있으며 좀더 효율적으로 처리장치들에 대한 적절한 대응을 할 수 있을 것이라 생각된다.

그러나 이러한 CFD 모형들은 화학적이나 물리적인 부분에 대해서는 충분한 모델링이 가능하지만 아직까지는 그러한 부분들과 더불어 생물학적 반응을 포함시키는데는 어려움이 많이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 부분을 고려하여 처리장의 생물학적 반응조에 대해서는 ASM 모형을 이용한 모델링을 다음과 같이 수행하였다.

2.3 ASM3의 구성요소 분석

ASM 모형은 "IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes"에서 개발되었다. ASM은 원래 교육용 프로그램으로 구성되었으나, 실제 처리장의 현상에 적용하기에 충분히 범용성이 있고 강력한 기능을 지니고 있다. 그 중에서도 ASM3는 활성슬러지 반응조의 산소 소모량, 슬러지 생성, 질산화와 탈질화를 예측할 수 있다. ASM1의 일부 단점을 수정하였다. ASM1에 추가된 기능으로, ASM3는 새로운 공정으로서의 유기물의 저류를 포함한다. 분해 공정은 내생호흡공정으로 개선되었다. ASM3는 차후의 수정없이 컴퓨터 프로그램내에서 실행될 수



<Figure 2.2.3> Volumetric fraction of water and solid phase in grit chamber.

있는 형태를 제공한다. 기존의 반응역학과 화학량론적 상수들을 모형의 파라미터적인 관점에서 10°C 및 20°C에 대해서 제시되었다[3][4].

2.3.1 관련 파라미터

ASM3는 다음의 파라미터를 필요로 한다. 용해성 성분 농도는 S_7 (7개)으로 입자성 성분은 X_7 (6개)로 표현된다. ASM1과 ASM2의 관계에서 중요한 차이점중 하나는, ASM3에서는 용존 및 입자성 성분들은 0.45 μ m 막에 대한 여과를 통해 구별될 수 있는 반면, ASM1과 ASM2에서는 느리게 생분해되는 유기물인 X_5 의 상당 부분이 유입 하수의 여과액에 포함된다는 것이다.

(1) 용해성 구성요소, S_7 의 정의

- $S_O[M(O_2)L^{-3}]$: 용존산소는 직접 측정될 수 있으며 기체 교환에 영향을 받는다.
- $S_I[M(COD)L^{-3}]$: 불활성 유기물질들은 유입부에서 가정되며, 입자성 기질 X_5 의 가수분해 환경에서 생성된다.
- $S_S[M(COD)L^{-3}]$: 쉽게 생분해가능한 유기 기질(COD). 이러한 용해성 COD 부분은 종속영양 미생물에 의한 생분해에 직접적으로 이용가능하다.
- $S_{NH}[M(N)L^{-3}]$: 암모늄과 암모니아성 질소의 합 ($NH_4^+ - N + NH_3 - N$). 전하수지를 맞추기 위해서, S_{NH} 는 모두 NH_4^- 로 가정된다.
- $S_{N_2}[M(N)L^{-3}]$: 질소 가스. S_{N_2} 는 탈질화의 생성물로만 가정된다. S_{N_2} 는 산소 S_O 와 대응하는 기체교환에 영향을 받는다. 이후, 2차 침전조내의 N_2 과포화로 인한 문제를 예측하는데 사용될 수 있다.
- $S_{NO}[M(N)L^{-3}]$: 질산성 질소와 아질산성 질소의 합 ($NO_3^- - N + NO_2^- - N$). 아질산성 질소는 분리된 모형 구성요소로 포함되지 않기 때문에, S_{NO} 는 아질산성 질소뿐만 아니라 질산성 질소를 포함하는 것으로 가정된다.
- $S_{ALK}[mole(HCO_3^-)L^{-3}]$: 하수의 알칼리도 (HCO_3^-). 알칼리도는 생물학적 반응에서 이온 전하의 보존을 근사하기 위해 사용된다. 모든 화학양론적 연산을 위해, S_{ALK} 는 중탄산염 HCO_3^- 만으로 가정된다.

(2) 입자성 구성요소, X_7 의 정의

- $X_I[M(COD)L^{-3}]$: 불활성 입자성 유기물(COD). 이러한 물질은 공정내에서 분해되지 않으며, 활성 슬러지로 응집된다. X_I 는 유입수에 포함되어 있거나 미생물 분해 과정에서 생성된다.
- $X_S[M(COD)L^{-3}]$: 느리게 생분해가능한 유기물(COD). 느리게 생분해가능한 기질은 분해가 가능해지기 전에 세포 외부의 가수분해과정을 거쳐야만 하는 고분자량, 콜로이드성 및 입자성 유기 기질이다. 가수분해의 생성물은 쉽게 생분해가능한 유기물 (S_S)이거나 불활성 용존 유기물 (S_I)인 것으로 가정된다.
- $X_H[M(COD)L^{-3}]$: 종속영양 미생물(COD). 이러한 미생물은 호기성 및 대부분 무산소적으로(탈질화) 성장하는 종속영양 미생물이라고 가정된다. 세포 외부의 가수분해를 제외하고는 ASM3에는 아무런 혐기성 활동을 포함하지 않는다.
- $X_{STO}[M(COD)L^{-3}]$: 종속영양 미생물의 세포내 저장 생성물(COD). 이것은 polyhydroxy-alkanoates(PHA), glycogen 등을 포함한다.
- $X_A[M(COD)L^{-3}]$: 질산화 미생물(COD). 질산화 미생물은 질산화에 관여한다; 이들은 절대 호기성인 chemo-litho-autotrophic이다.
- $X_{TSS}[M(TSS)L^{-3}]$: 총부유고형물 (TSS). 총부유고형물은 화학양론을 통해 농도를 계산하기 위해서 biokinetic 모형에 도입되었다.

2.3.2 반응속도식

ASM3의 반응속도식은 모든 용존 성분 소비에 대해 전환 함수(switching function : 쌍곡선 또는 포화 항, Monod 식, $S/(K+S)$)을 기조로 하여 구성된다. 이러한 전환 함수는 ASM1과 ASM3 사이의 중요한 차이인, 농도가 0에 접근하는 공정의 유리체(educt)로서 모든 생물학적 활동을 중단시킨다. 입자성 유리체(educt)에 대해 전환 함수는 X_{STO}/X_H 와 X_S/X_H 의 비율에 관련된다.

<Table 2.3.1>은 ASM3의 모든 반응속도식을 요약한 것이다. 여러 온도 T(in °C)에 대한 반응속도상수 k는 식(2.3.1)의 온도 방정식으로 보정된다. $k(T) = k(20^\circ C) \cdot \exp(\theta_T \cdot (T - 20^\circ C))$ (2.3.1) 여기서, θ_T (in °C⁻¹)은 식(2.3.2)에서 구해진다.

$$\theta_T = \frac{\ln(k(T_1)/k(T_2))}{T_1 - T_2} \quad (2.3.2)$$

<Table 2.3.1> Kinetic rate expressions ρ_j for all $\rho_j \geq 0$ in ASM3.

j	Process	Process rate equation ρ_j , all $\rho_j \geq 0$
1	Hydrolysis	$k_H \cdot \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} \cdot X_H$
Heterotrophic organisms, denitrification		
2	Aerobic storage of COD	$k_{STO} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot X_H$
3	Anoxic storage of COD	$k_{STO} \cdot \eta_{NO} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S} \cdot X_H$
4	Aerobic growth	$\mu_H \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO} + S_{HCO}} \cdot \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} \cdot X_H$
5	Anoxic growth (denitrification)	$\mu_H \cdot \eta_{NO} \cdot \frac{K_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{HCO} + S_{HCO}} \cdot \frac{X_{STO}/X_H}{K_{STO} + X_{STO}/X_H} \cdot X_H$
6	Aerobic endog. respiration	$b_{H,O2} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_H$
7	Anoxic endog. respiration	$b_{H,NO} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_H$
8	Aerobic respi-ration of X_{STO}	$b_{STO,O2} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_{STO}$, $b_{STO,O2} \geq b_{H,O2}$
9	Anoxic respi-ration of X_{STO}	$b_{STO,NO} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_{STO}$, $b_{STO,NO} \geq b_{H,NO}$
Autotrophic organisms, nitrification		
10	Nitrification	$\mu_A \cdot \frac{S_O}{K_{A,O} + S_O} \cdot \frac{S_{NH}}{K_{A,NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_{HCO}}{K_{A,HCO} + S_{HCO}} \cdot X_A$
11	Aerobic endog. respiration	$b_{A,O2} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot X_A$
12	Anoxic endog. respiration	$b_{A,NO} \cdot \frac{S_O}{K_O + S_O} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot X_A$

2.3.3 화학양론

<Table 2.3.2>는 구성 행렬 $\omega_{j,i}$ 와 함께 ASM3의 화학양론 행렬 $\nu_{j,i}$ 를 제시한다. 화학양론 행렬은 ASM1에서의 도입으로 인해 알려진데 비해, 구성 행렬은 많이 알려져 있지 않다.

<Table 2.3.2>에 관계된 구성 행렬은 다음과 같이 읽는다: $\omega_{2,3}$ 은 기호 i_{NSS} 로 채워지며 이것은 i_{NSS} 의 N을 포함하는 S_S 형태의 g COD를 나타낸다. 기호 $k=2$ 라는 것은 두 번째 보존성물질 질소와 관계된 것이고, $i=3$ 은 세 번째 성분 S_S 와 관계된다. S_S 는 g COD 향으로 측정되고 보존성 질소는 g N으로 측정된다. 따라서, i_{NSS} 는 질소와

관련된 S_S 의 구성을 나타내므로, $\omega_{k,i}$ 는 구성 행렬이라 한다.

<Table 2.3.2> Stoichiometric matrix $\omega_{j,i}$ and composition matrix $\omega_{k,i}$ of ASM3.

Component j >	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
v	S _O	S _N	S _S	S _{NO}	S _{NO2}	S _{NO3}	S _{HCO3}	X _I	X _S	X _H	X _{STO}	X _A	X _{TS}
expressed as >	COD	COD	COD	N	N	N	Mole	COD	COD	COD	COD	COD	TSS
1 hydrolysis		f_H	x_1	y_1			z_1		-1				-b _H
Heterotrophic organisms, denitrification													
2 Aerobic storage of COD	x_2		-1	y_2			z_2				$Y_{STO,O}$		t_2
3 Anoxic storage of COD			-1	y_3	- x_3	x_3	z_3				$Y_{STO,N}$		t_3
4 Aerobic growth	x_4			y_4			z_4		1		-1/ $Y_{H,O2}$		t_4
5 Anoxic growth (denitrification)				y_5	- x_5	x_5	z_5		1		-1/ $Y_{H,NO}$		t_5
6 Aerobic endog. respiration	x_6			y_6			z_6	f_6		-1			t_6
7 Anoxic endog. respiration				y_7	- x_7	x_7	z_7	f_7		-1			t_7
8 Aerobic respi-ration of X_{STO}	x_8											-1	t_8
9 Anoxic respi-ration of X_{STO}					- x_9	x_9	z_9					-1	t_9
Autotrophic organisms, nitrification													
10 Nitrification	x_{10}			y_{10}		1/ γ	z_{10}					1	t_{10}
11 Aerobic endog. respiration	x_{11}			y_{11}			z_{11}	f_{11}				-1	t_{11}
12 Anoxic endog. respiration				y_{12}	- x_{12}	x_{12}	z_{12}	f_{12}				-1	t_{12}
Composition matrix $\omega_{k,i}$													
k	Conservatives												
1 COD g COD	-1	1	1		-1	-4		1	1	1	1	1	
2 Nitrogen g N		b _{SS}	b _{SS}	1	1	1		b _{OX}	b _{OX}	b _{OX}		b _{OX}	
3 Ionic charge Mole +				1		-1							
				1/14		1/14							
Observables													
4 TSS g TSS								f_{TSS}	f_{TSS}	f_{TSS}	0.60	f_{TSS}	

$\omega_{j,i}$ 혹은 $\omega_{k,i}$ 의 모든 빈 요소는 0의 값을 나타낸다. x_j, y_j, z_j 의 모든 값은 세 가지 보존성물질 k(COD, 질소, 이온 전하)에 대하여 식(2.3.3)의 보존 방정식으로부터 구해질 수 있다.

$$\sum_i \nu_{j,i} \cdot \omega_{k,i} = 0 \text{ for } i=1 \text{ to } 12 \quad (2.3.3)$$

관측가능한 X_{TS} 에 대한 화학양론적 계수는 식(2.3.4)의 보존 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\nu_{j,13} = \sum_i \nu_{j,i} \cdot \omega_{k,i} \text{ for } i=8 \text{ to } 12 \quad (2.3.4)$$

호기성 생산 계수($Y_{STO,O2}$ 와 $Y_{H,O2}$)는 무산소성 생산계수($Y_{STO,NO}$ 와 $Y_{H,NO}$)를 초과한다는 사실을 도출한다. 무산소성 에너지 생산이 호기성 에너지 생산 $\eta_{anoxic} = 0-70$ 이 된다고 가정함으로써 다음의 에너지 관계를 적용한다.

$$\frac{1 - Y_{STO,O2}}{Y_{STO,O2}} = \frac{\eta_{anoxic} \cdot (1 - Y_{STO,NO})}{Y_{STO,NO}}$$

$$\frac{1 - Y_{H,O_2}}{Y_{H,O_2}} = \frac{\eta_{anoxic} \cdot (1 - Y_{H,NO})}{Y_{H,NO}} \quad (2.3.5)$$

식(2.3.5)는 ASM3에서 무산소성 및 호기성 생산과 관련시키기 위해서 사용되는 것을 시사한다.

ASM3에서 제거된 단위 기질 S_5 에 대해 생성된 순생산 종속영양 미생물은 식(2.3.6)과 식(2.3.7)로부터 얻어진다.

$$Y_{net,O_2} = Y_{STO,O_2} \cdot Y_{H,O_2} \quad (2.3.6)$$

$$Y_{net,NO} = Y_{STO,NO} \cdot Y_{H,NO} \quad (2.3.7)$$

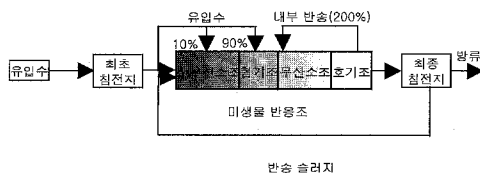
2.4 ASM3를 이용한 4-Stage-BNR 공정의 모델링

앞서 설명된 ASM3에 대한 계수값이나 식들을 바탕으로 간단한 모델링을 수행하였다. 그 중에서 서론 부분에서 언급된 바와 최근 문제가 되고 있는 질소 인과 같은 영양염류에 제거에 대한 부분에 대해서 다음과 같이 고찰하였다.

폐수처리에 있어 생물학적 영양염류제거 (biological nutrient removal : BNR) 공정은 질소와 인의 제거를 위한 공정들이 대표적이다. 이들 공정들은 일반적인 미생물의 신진대사에 이용되는 정도의 영양소보다 더 많은 양이 소모될 수 있는 생화학적 경로와 환경인자를 조절함으로써 발전하게 되었다. 대표적인 생물학적인 인 제거 공정은 A/O, A²/O, Phoredox, UCT, Biedenipho, BB, Modified oxidation dich, Carrousel, Phostriop이다. 그러나 최근에는 질소와 인을 구분하여 제거하는 단일 공정보다 동시에 처리할 수 있는 혼합 공정이 많이 연구되고 있다[5].

2.4.1 입력자료 구성 및 설계

본 논문에서는 “춘천시 하수종말처리장의 기본 및 실시설계보고서(1999)”에 수록되어 있는 BNR 공정 실험의 자료를 기초로 하여 모델링에 필요한 입력자료를 구성하였다[2].



<Figure 2.4.1> Flow-Diagram of 4-Stage-BNR System.

BNR 반응조는 <Figure 2.4.1>과 같이 1st Anoxic - Anaerobic - 2nd Anoxic - Oxic의 4단계로 구성된다. 1st Anoxic조는 반송슬러지내에 존

재하고 있는 NO_3 를 제거하기 위하여 설치하였으며, Anaerobic조는 인용출을 위하여 설치되었다. 2nd Anoxic조는 내부반송에 포함되어 있는 NO_3 를 N_2 로 탈질시키기 위하여 설치되었으며, Oxic조는 유기물의 제거와 질소의 질산화 및 인의 과잉섭취를 목적으로 설치되었다. 각 반응조의 규격과 운영조건은 <Table 2.4.1>과 같다.

<Table 2.4.1> Operational condition and volume of reactors..

Volume of Reactor	1st Anoxic	1L
	Anaerobic	2.4L
	2st Anoxic	6.6L
	Oxic	10L
	Clarifier	10L
DO concentration of Reactor	1st Anoxic	0.1
	Anaerobic	0.0
	2st Anoxic	0.1
	Oxic	2.4
Total influent flowrate		3.3L
Returnsludge flowrate		1.65L(50%)
Internal recirculation flowrate		6.6L(200%)
Saturation concentration for oxygen		10mg/L
Sludge age (SRT)		523.2(hr)

<Table 2.4.2> Typical range of organic fractions of primary effluent in municipal wastewater

Symbol	Component	Typical fraction of total COD in %
S_F	Readily (fermentable) biodegradable substrate	10~20
S_A	Volatile acids (acetate)	2~10
S_I	Inert, non-biodegradable organics	5~10
X_I	Inert, non-biodegradable organics	10~15
X_S	Slowly biodegradable substrate	30~60
X_H	Heterotrophic biomass	5~15
X_{PAO}	Phosphorus-accumulating organisms	0~1
X_{PHA}	S t o r e d poly-hydroxy-alkanoate	0~1
X_{AUT}	Autotrophic nitrifying biomass	0~1

모델링에 필요한 각각의 유입물질의 농도는 실험에서 제시하는 값들과는 차이가 있기 때문에 모델링에 적당한 값을 얻기 위해서 <Table 2.4.2>를 이용하였다. 정확히 측정된 값을 얻기가 불가능하여 대략적으로 경험에 의해 얻어진 값들을 이용하는데 그쳤다[6].

<Table 2.4.2>를 이용하여 용존중과 입자상중으로 구분하고 모델링에 적합한 각각의 물질에 대한 농도를 산출하였다.

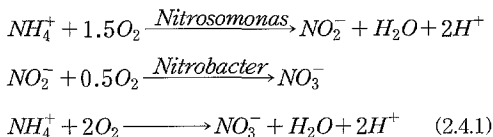
3.4.2 모델링 결과 및 분석

위의 2.4.1절의 내용과 같이 구성된 입력자료를 ASM3를 이용하여 모델링을 수행하였다. ASM3에는 여러 가지 모형이 내장되어 있는데 그 중에서의 인·질소제거 공정이 포함되어 있는 ASM2를 사용하였다. 따라서 입력 부분에서 언급되지 않은 화학식, 반응속도식, 반응파라미터, 온도보정계수, 초기조건, 유입수의 농도 등은 모형에 내장되어 있는 계수들을 그대로 사용하였다. 즉, ASM2의 MOD 파일을 그대로 사용하였다.

반응조의 용적이나 조건들은 유입농도, 설정된 반응조의 상태변수등은 PLN 파일로 저장되는 데 그 중에서 반응조의 구성을 총괄적으로 볼 수 있는 "Graphic of flowscheme" function을 이용하면 구축된 구성도를 얻을 수 있다. 이것은 <Figure 2.4.1>과 같이 구성하고자 하는 반응조 모형을 매우 유사하게 구축할 수 있음을 확인시켜준다.

이렇게 구축된 입력자료를 이용하여 정상상태와 비정상상태의 모델링을 수행할 수 있다. 그중에서 정상상태의 결과값은 <Figure 2.4.2>, <Figure 2.4.3>, <Figure 2.4.4>와 같다.

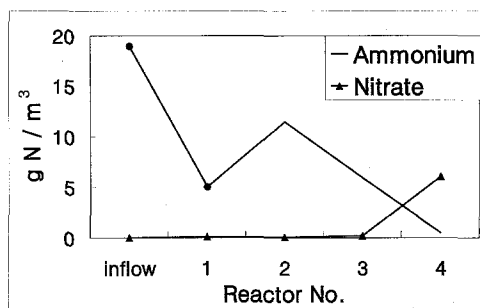
<Figure 2.4.2>은 BNR공법에서 중요한 질산화에 관계되는 암모니아성 질소와 질산성 질소의 각 반응조에서의 변화를 보여준다. 암모니아성 질소가 아질산성 질소와 질산성 질소로 산화되는 것은 독립영양 미생물(autotrophic bacteria)인 Nitrosomonas와 Nitrobacter의 연속적인 반응에 의해 수행된다고 알려져 있다(U.S.EPA, 1993). 2단계 반응에 의해 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되는 경로를 반응식으로 표현하면 식(2.4.1)과 같다.



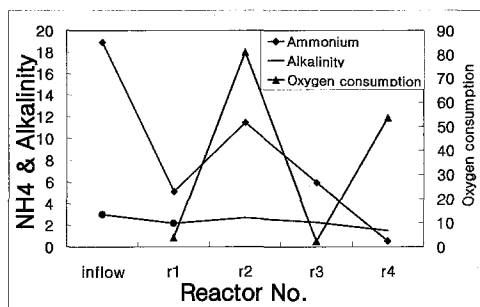
따라서 <Figure 2.4.2>에서 보여주는 값을 통해서 암모니아성 질소는 감소하는 반면 질산성 질소의 양은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그리고, 질산화, 즉 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되는 과정에서는 O_2 , alkalinity 등이

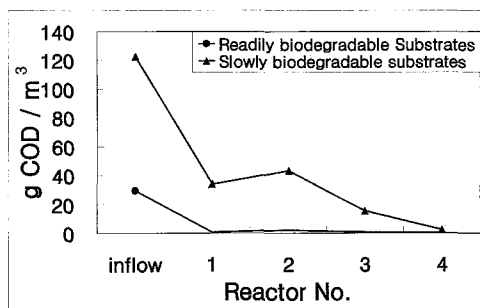
소모되게 된다. 이것에 대한 결과는 <Figure 2.4.3>에서 보여주는 바와 같다.



<Figure 2.4.2> The behavior of Nitrate and Ammonium in each reactor.



<Figure 2.4.3> Ammonium, Alkalinity, and Oxygen consumption in reactors.



<Figure 2.4.4> The behavior of readily biodegradable substrates and lowly biodegradable substrates in reactors.

마지막으로 <Figure 2.4.4>은 생분해가 쉽게 이루어지는 COD와 천천히 생분해가 일어나는 COD의 값을 각 반응조별로 나타낸 것으로 전자의 경우에는 반응조 4에서의 값이 거의 0에 가까운 값을 나타내고 후자의 경우에는 약 5 g COD / m³의 값을 나타내었다. 물론 실제 과정에서는 이러한 과정에 또 다른 변수나 조건들이 관여하기 때문에

다소 차이가 있을 것으로 예측된다.

위의 모델링 결과에서 확인할 수 있듯이 질소에 대해서는 대부분이 적절한 수치를 보였으나, 인에 대해서는 적당한 값을 얻을 수가 없었다. 이로써 ASM 모형에 경우 질산화와 탈질화는 신뢰성이 높은 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 모델링 결과에 의한 최적의 결과값을 도출하기보다는 적절한 모형 구축이 가능성과 각각의 변수 설정등에 대한 연구를 피하였다. 또한 이 모형에서 사용되는 파라미터나 화학양론, 그리고 동력학식에 대한 값들을 이용하여 새로운 모형에 적용가능성을 확인하는데 초점을 맞추었다. 비교적 이러한 값들에 대해 분명하게 언급이 되어있기 때문에 실제로 요즘에 많이 사용되고 있는 Visual Basic이나 인터넷을 이용한다면 더욱더 효율적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

2.5 PHOENICS와 ASM을 이용한 최적화 방안

앞서 언급된 바와 같이 우리 나라의 경우에는 아직도 하수처리장에 대한 최적설계나 운영에서는 많은 부분이 미약하다. 많지는 않지만 알려진 최적화 모형들은 몇 가지가 있다. 이러한 모형들을 이용하여 실제로 소요되는 비용이나 처리 면적, 그리고 처리 공정에 따른 효율들에 대한 연구도 이루어지고 있다. 하지만 이러한 모형들 대부분은 결과값을 도출하는데 있어서는 중요한 자료가 될 수 있지만 그 과정들에 대한 제시는 부족하다. 따라서 본 논문에서 연구대상이 된 CFD모형인 PHOENICS와 같은 경우에는 이러한 부분을 보정할 수 있는 모형이 될 것으로 생각된다. 주로 이 모형의 경우에는 user가 만들고자 하는 처리장치를 그대로 묘사할 수 있고 그에 따른 세밀한 격자망을 구성함으로써 그 내부의 각 셀에서 일어나는 변화나 움직임등을 vector, contour, 그리고 isosurface등의 function을 통해서 적절하게 결과값을 확인할 수 있다. 일반적으로 침전지등에 사용되는 모형들은 이런 부분에 대한 고려는 하지 않고 단지 유입수의 양과 수질등을 통해서 유출구에서의 변화를 확인하는데 많이 이용된다. 따라서 실시간으로 운영이 되고 있는 처리장등에서 이러한 CFD모형을 통한 최적화 기술이 도입된다면 효율적인 제어와 문제점 해결의 한 방안이 될 것이다. 또한 하수처리장에서의 각 산기장치에 따른 폭기조의 산소 분포등을 그 위치나 유입되는 공기의 속도등을 조절하여 적절한 분포속도를 산출할 수도 있다. 물론 이러한 모델링을 통해서 공기방울의 크기나 공기 주입량을 변화시켜주면서 적절한 공기방울의 크기나 주입량등을 결정할 수 있다.

하지만 CFD 모형들의 경우에는 환경에서 가장 중요한 요소인 생물학적 처리 부분에는 한계가 있

기 때문에 실제 주요 공정인 생물학적 처리공정등에 대한 모델링은 ASM과 같은 모형을 사용하는 것이 능률적이다. ASM모형의 경우는 폭기조를 다 성분 반응조로 간주하고 대상이 되는 기질과 미생물을 다성분으로 간주한 구조적 모델로서 폭기조에서 일어나는 생물반응에 대해 체계적이고 수학적 접근을 시도했다는 점에서 크게 신뢰를 받고 있다. 이 모형과 같은 경우에는 여러 가지 다른 활성슬러지 모형들과 비교해서 파라미터나 변수들이 복잡하고 그 수도 매우 많다. 실제로 이러한 입력값에 적절한 자료를 얻는데는 경제적으로나 효율적인 면에서 상당히 큰 과제로 남는다. 하지만 그만큼 생물학적 반응에서 일어나는 수많은 변수들에 대한 고려와 함께, 광범위하게 적용할 수 있다는 의미를 내포하기도 한다. 물론 이러한 장점을 살리기 위해서는 좀더 간단하고 효율적인 자료처리에 대한 연구가 선행되어야 한다. 앞서 문헌연구 부분에서 언급된 신경망이나 퍼지이론등에 대한 접목도 중요한 과제가 될 것이다.

각 처리공정에 대한 최적화를 이루기 위해서는 우선적으로 각 처리공정들에 대한 특성들을 파악하고 그에 알맞는 모형들을 찾아내는 것도 중요한 부분이기 때문에 침사지나 침전지 등에는 PHOENICS와 같은 CFD 모형을 사용하고 실제 생물학적 반응이 많이 이루어지는 처리공정에서는 ASM과 같이 여러 가지 조건들을 만족시켜주는 모형을 사용하여 전체적인 하수처리장 모델링을 수행한다면 아주 좋은 최적화 모형이 될 것으로 생각된다.

3. 결론

본 논문에서는 하수처리시설의 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로서 하수처리 공정별로 적절한 전산 모형의 적용에 대한 연구를 수행하였다. 특히 ASM3 모형의 이론과 주 파라미터 등에 대한 연구 수행과 함께 ASM3를 이용하여 간단한 4-stage BNR공법에 대한 모델링을 수행하였다. 그리고 유체역학 및 물질이동문제에 있어서 일반적 해석 모형인 PHOENICS를 이용하여 침사지에서의 각 물질의 부피분율에 대한 모델링을 수행함으로써 실제 처리장에서의 CFD 프로그램의 적용가능성을 조사하였다. 그 결과 침사지나 침전지와 같이 물리적인 작용만이 관여하는 처리공정에 대해서는 적절한 CFD 모형을 적용함으로써 처리조 내의 유속 및 농도를 삼차원적으로 자세히 예측할 수 있었다. ASM3 모형의 경우는 하수처리시설에 대한 모델링을 위한 모형으로 본 연구의 모델링 결과에서 볼 수 있듯이 적절한 변수나 상수값을 입력해 준다면 비교적 정확한 값을 얻어낼 수 있었다. 하지만 이 두 가지 모형은 서로 연관성이 없

기 때문에 그 사이에 존재하는 상호작용이나 인자들을 찾아내는 것이 무엇보다 중요할 것이다. 따라서 앞으로 이 부분에 대한 지속적인 연구가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 CFD 모형에 반응역학에 대한 부분(반응식)을 추가하거나, 생물학적인 반응조에 CFD 모형을 적용하여 좀더 자세한 유속장과 압력을 계산한 다음, 이러한 계산된 결과를 ASM의 입력자료로서 활용할 수도 있을 것이다. 최근에는 전자의 방법을 이용하는 연구가 진행되고 있다.

하수처리장 운영에 있어서 문제가 되는 것은 강우조건이나 기타 원인에 의해 변동적인 하수유입량, 유입수질, 처리목표수질, 수온 등이다. 하수처리장 설계 및 운영시 이러한 변동적인 원인과 목표에 대하여 미리 예측을 수행할 수 있다면, 하수처리공정의 설계 및 운영을 매우 역동적으로 실시간적으로 수행할 수 있을 것이다. 따라서, 이러한 예측적 최적운영을 위해서는 전산모형을 이용한 모델링 기법이 필수적이라고 할 수 있다. 본 연구에서 보여준 CFD 모형이나, 기타 하수처리공정에 대한 모형을 사용하거나, 새로운 모형을 개발함으로써 이러한 목적을 달성할 수 있다. 그러나, 이러한 목적을 달성하기 위해서는 제안되고 있는 모형이 하수처리장의 수질을 재현하는 것을 검증하여야 한다. 즉, 모델링이외에 하수처리장의 시간별 수질 및 수리 변화에 대한 조사가 필수적이다. 현재 본연구진은 다차원 유한요소법을 이용한 전산모형을 개발중에 있다. 본 모형은 수리 및 수질 현상을 해석하기 위하여 제안되는 처리공정별로 쉽게 반응식을 입력할 수 있는 방법을 포함하고 있다.

사 사

본 연구는 1998 ~ 1999년도 국립환경연구원 공공기반기술개발과제(통합 환경 관리 시스템의 개발 및 적용)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] CHAM, "TR100-A Guide to the PHOENICS Input Language", 1992
- [2] 춘천시, "춘천시 하수종말처리시설(2단계) 증설 공사 기본 및 실시설계보고서", 1999. 3
- [3] IAWQ task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment process, "ACTIVATED SLUDGE MODEL NO.2", 1995
- [4] Willi Gujer, Mogens Henze, Takahashi Mino and Mark van Loosdrecht, "ACTIVATED SLUDGE MODEL NO. 3", Wat. Sci. Tech, Vol. 39, No. 1, pp. 183~193, 1999
- [5] M.C. Wentzel, G.A. Ekama, P.L. Dold, G. vR. Marais, "Biological excess phosphorous removal-steady state process design", Water SA, Vo 16, pp. 29~48, 1990
- [6] Willi Gujer, M.Henze, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel and G. v. R. Marais, "THE ACTIVATED SLUDGE MODEL NO. 2: BIOLOGICAL PHOSPHORUS REMOVAL", Wat. Sci. Tech, Vol. 31, No. 2, pp. 1~11, 1995