

호기-무산소 SBR 반응조를 이용한 ASM No. 1 모델의 간략화

Simplification of ASM No. 1 Using Aerobic-Anoxic SBR

김신걸 · 최인수 · 구자용*

Shin Geol Kim · In Su Choi · Ja Yong Koo*

서울시립대학교 환경공학부

(2007년 7월 13일 논문 접수: 2007년 8월 2일 최종 수정논문 채택)

Abstract

ASM No. 1 is a very useful model to analyze wastewater treatment system removing organic carbon and nitrogen material. But it isn't adequate to control the wastewater treatment system with real time since it has many material divisions and parameters. So, the purpose of this study is the simplification of ASM No. 1 to control the wastewater treatment system. ASM No. 1 was changed with the model which has 3 material divisions(COD, NH_4^+ , NO_3^-) and two phases(Aerobic and Anoxic condition). SBR was running with two phases(Phase I and II). Phase II running 20 minutes with aerobic time was used for deciding model parameters and Phase I running 12 minutes with aerobic time was used for proving the simplified model. The simplified model was compared with ASM No. 1 using data of Phase I and II. As a result of model comparison, the simplified model has enough ability to express the variation of NH_4^+ compound.

Key words: ASM No. 1, model simplification, SBR, nutrient removal, model control

주제어: 활성슬러지 모델 1, 모델 간략화, 연속 회분식 반응조, 영양염류 제거, 모델제어

1. 서 론

하수처리장에서 질소와 유기물질은 주로 호기-무산소의 두 가지의 공정을 통하여 제거되며 이때에 하수중의 유기물과 유기질소, 암모니아는 가수분해와 질산화, 탈질화를 거쳐 제거된다. 이들 물질들은 호소의 부영양화 등을 유발하는 물질들이기 때문에 엄격한 수질기준으로 규제되고 있으며, 앞으로 더욱 규

제가 강화될 예정이다(환경부, 2005). 이와 같이 유기물과 질소를 대상으로 하는 공정을 모사하기 위해 ASM No. 1 모델이 1987년 IAWPRC(International Association on Water Pollution Research and Control)에서 발표되었다. 이 모델은 모델의 합리적이고 뛰어난 모사능력으로 인하여 실규모 플랜트의 점검(Langergraber et al., 2004), 침지여상막으로의 응용(Cho et al., 2003), 질소제거공정의 제어(Kolisch and Londong, 1998), 산화구(Abusam et al., 1999) 등에

*Corresponding author Tel: +82-2-2210-2624, FAX: +82-2-2244-2245, E-mail: jykoo@uos.ac.kr (Koo, J.Y.)

응용되고 있으며 인처리 제거공정을 위한 확장모델 (Veldhuizen et al., 1999)에까지 사용되고 있다. 그러나 이 모델은 실제로는 13개의 물질분류에 기초한 8개의 반응식으로 존재하며, 이들 사이를 연결하는 파라미터들로 인하여 여러 가지 제약을 안고 있다 (Abusam et al., 2001; Weijers et al., 1996). 이러한 제약은 첫 번째로 각 물질의 분류를 위한 분석이 이루어지기 번거롭다는 것과 두 번째로 각 파라미터들 중 일부는 실제로 측정하기 힘들다는 것으로 결국 이 모델을 이용하여 실시간으로 하수공정을 제어하기 어렵다는 것을 의미한다 (Zhao et al., 1995). 이에 본 연구에서는 하수처리 공정제어를 위해 ASM No. 1 모델을 보다 간략화하고 이것을 ASM No. 1 모델과 비교 및 검증하여 그 유효성을 살펴보고자 한다.

2. 연구의 방법 및 순서

2.1. 연구의 방법

본 연구의 목적은 많은 파라미터와 물질 분류로 인하여 하수처리공정의 제어에 어려움이 있는 ASM No. 1 모델을 간략화하고 검증하는 것이다. 이를 위해 우선 ASM No. 1 모델을 물질분류와 반응조건, 미생물의 변동항목 등의 조건으로 간략화 모델을 작성한다. 또한 두 모델의 모델화와 검증을 위해 SBR 반응조를 포기시간이 다른 두 가지의 호기-무산소 조건 (Phase I 과 II)으로 운영한 트랙 스테디 자료를 얻는다. 그 중 하나의 트랙스테디 자료 (Phase II)를 이용하여 모델의 파라미터를 결정하여 모델을 완성하기 위한 것이며, 다른 하나의 트랙스테디 자료 (Phase I)를 이용하여 간략화 모델의 유효성을 판단하기 위한 것이다.

2.1.1. 반응조 및 측정방법

본 연구에 사용된 SBR 반응조는 Fig. 1과 같다. SBR 반응조는 원통형이며 총 용적은 6L이고 이중 유효용적은 3L이다. 반응조에 대한 하수의 유입과 유출은 각각 타이머에 의해 제어되는 유입·유출 펌프에 의해 이루어진다. 또한, 공기의 공급은 타이머에 의해 조작되는 송풍기에 의해 공급된다. 반응조로 유입되는 하수 원수는 서울시 J하수처리장의 포기조 유입수를 채수하여 사용하였으며 미생물의 활성을 유지하

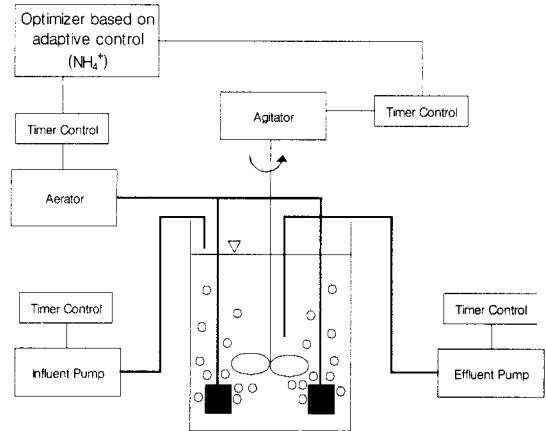


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory SBR system.

기 위하여 80~150mg/L의 아세테이트를 추가로 투입하였다.

물질의 측정방법으로는 음이온인 NO_3^- -N에 대해서는 다이오넥스사의 ICS-90모델의 이온크로마토 그래피를 이용하였으며 컬럼은 IONN PAC AS 14 4×250mm이다. 이 밖에 COD, NH_4^+ -N, MLSS, MLVSS, 켈달 질소 등은 모두 공정시험법에 의거하여 측정하였으며 용존상과 부유물의 분리는 Whatman사의 0.45 μm GF/C여과지를 사용하였다.

2.1.2. 반응조의 운전조건

반응조는 호기-무산소의 상태로 운전되었으며 운전조건은 Table 1과 같다. 반응조의 운전방식은 간헐 포기방식으로 30분을 주기로 하여 4시간이 한 사이클을 이루며 여기에 40분 침전, 40분 유출, 40분 유입으로 총 6시간이 한 주기를 이룬다.

Phase I은 호기 12분, 무산소 18분의 30분 사이클이 4시간동안 8번 반복되며 Phase II는 호기 20분, 무산소 10분의 30분 사이클이 4시간동안 8번 반복된

Table 1. Operational condition of the SBR system(Unit: minute)

	Phase I	Phase II
Aerobic time	12	20
Anoxic time	18	10
Total reaction time	240	240
Inflow time(times)	40	40
Settling time	40	40
Effluent time	40	40
Total cycle time	360	360

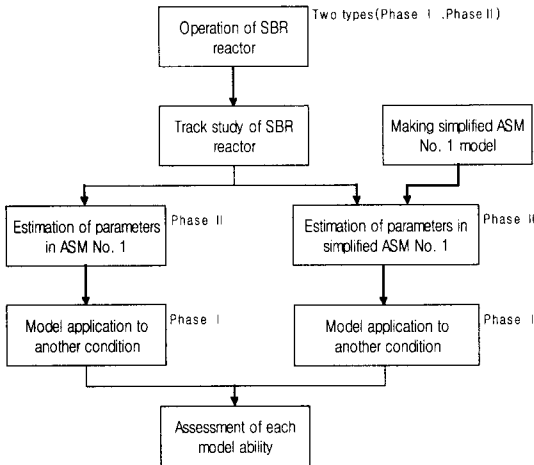


Fig. 2. Study procedure.

다.

2.2. 연구의 순서

본 연구에서는 간략화 모델과 ASM No. 1 모델을 비교하기 위해 SBR 반응조를 두 가지의 형태로 운전한다. 그리고 이 두 가지의 형태에 대하여 각각 트랙

스터디를 실시하여 반응시간에 따른 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 변동자료를 얻는다. 이 두 가지의 트랙스터디 자료 중 하나는 모델의 파라미터를 결정하여 모델을 완성하기 위한 것이고 다른 하나는 완성된 모델을 서로 비교하기 위한 것이다.

이를 위해 Phase II의 자료를 이용하여 ASM No. 1과 간략화 모델의 파라미터를 조정한다. 그리고 Phase I의 자료에 ASM No. 1 모델과 간략화 모델을 대입하고 통계인자인 결정계수를 통하여 간략화 모델의 유효성을 고찰한다.

3. ASM No. 1 모델의 간략화

3.1. ASM No. 1 모델

ASM No. 1 모델은 IAWPRC 그룹에서 1987년에 개발한 모델이다. 모델의 처리대상물질은 유기물과 질소물질이며 이 물질들에 대해 Table 2와 같이 13가지의 물질분류와 8개의 반응식을 가지고 있다. 또한, 이 모델은 각 미생물의 성장 및 사멸계수, 물질의 전환계수 등을 통하여 물질수지(Mass balance)가 맞추어

Table 2. Process kinetics and stoichiometry for carbon oxidation, nitrification, and denitrification in ASM No. 1

Component → j Process ↓	i	S_S	X_S	$X_{B,H}$	$X_{B,A}$	X_P	S_O	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{ALK}	Process Rate
1 Aerobic growth of heterotrophs		$\frac{1}{Y_H}$	1				$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	ρ_1
2 Anoxic growth of heterotrophs		$\frac{1}{Y_H}$	1				$\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	ρ_2
3 Aerobic growth of autotrophs					1		$-\frac{4.57-Y_A}{Y_H}$	$\frac{1}{Y_H}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	ρ_3
4 'Decay' of heterotrophs			$1-f_p$	-1		f_p						$-i_{XB} - f_p i_{XP}$	ρ_4
5 'Decay' of autotrophs			$1-f_p$		-1	f_p						$-i_{XB} - f_p i_{XP}$	ρ_5
6 Ammonification of soluble organic nitrogen									1	-1		$1/14$	ρ_6
7 'Hydrolysis' of entrapped organics		1	-1										ρ_7
8 'Hydrolysis' of entrapped organic nitrogen										1	-1		ρ_8

져 있어서 유기물과 질소물질의 처리에 따른 인과관계를 명확히 보여주고 있다. 모델의 반응프로세스에서는 모노드식(Monod equation)을 이용하여 각 물질 제한에 따른 반응제한을 나타낸다. Table 2의 기호에 대한 설명은 Table 4와 Table 5를 참조하기 바란다.

3.2. ASM No. 1 모델의 한계점

ASM No. 1 모델은 물질분류에 있어서 8가지의 물질로 분류되어 있기 때문에 입자상 유기질소(X_{ND}), 용존상 유기질소(S_{ND}), 암모니아(S_{NH}), 입자상 유기물질(X_S), 용존상 유기물질(S_S), 용존상 불활성물질(S_I)와 입자상물질(X_p) 등에 대해 측정이 이루어져야 한다. 또한 모델의 파라미터에 있어서도 각 물질에 대한 모노드식의 성장계수와 반포화계수(Half saturation coefficient), 종속영양(Heterotrophic) 미생물 생성(Y_H) 및 사멸(b_H)계수와 독립영양(Autotrophic) 미생물의 생성(Y_A) 및 사멸계수(b_A)와 각 물질의 변환계수 등의 측정이 필요하다. 이에 대해 ASM No. 1 모델에서는 이들 계수들에 대해서 디폴트값을 제공하여 주고 있다. 그러나 각 나라마다 유입하수의 특성이 다르고 이를 처리하는 미생물의 구성 및 활성 등이 다르다는 점들을 고려하면 결국 이들 값들을 새로 측정하거나 추정해 주어야 한다. 그런데 이 과정은 체계적으로 이루어지지 않았기 때문에 결국 이 모델을 실제 하수처리공정에 응용하는 경우에는 많은 변수들의 값을 디폴트로 하여야 된다는 문제점이 있다 (Lukasse et al., 1998; Gujer, 2006).

또한 모델의 해에 있어서도 해의 집단이 하나로 존재하는 유일해가 아니기 때문에 여러 가지 조합으로 존재하게 된다. 따라서, 이들 해 중에 하나의 조합을 완성하였다 하더라도 실제로 포기조건, 온도조건 등에 따른 조건이 바뀌어지면 전체 계수의 조합이 바뀌기 때문에 이들 해중에 하나를 찾고 이것이 유의한 것인가를 밝혀야 하며 이것은 지루한 작업이 된다 (Häck and Köhne, 1996).

따라서, ASM No. 1 모델은 이론상으로 완벽한 형태를 취하고 있음에도 불구하고 물질의 분류가 번거롭고 각 파라미터의 정확한 추정이 어렵다는 두 가지의 이유로 인하여 실제의 응용에 많은 어려움이 있다. 또한, ASM No. 1 모델에서도 이러한 점 때문에 이 모델이 궁극적인 하수처리 모델의 지향점이 아니

며 이 모델을 현실에 맞추어 변형할 수 있다는 점을 명시하였다(Henze et al., 1986).

3.3. 간략화 모델

ASM No. 1 모델은 3.2절에서 언급한 물질의 분류 및 파라미터의 추정에 대한 문제로 인하여 실제 공정의 제어에는 어려움이 있다. 이에 이 모델을 간략화하여 하수처리 공정에 직접 적용하려는 연구들이 이루어졌다. 이러한 연구들은 ASM No. 1 모델을 선형화(Anderson et al., 2000), 차수의 간략화(Chachuat et al., 2003) 등을 통하여 이루어졌다. 이들 연구 중 Anderson et al.(2000)의 연구는 암모니아와 질산성질소 등의 질소물질만의 모델식으로도 질소제거 공정에 대한 적용이 원활히 이루어지는 것을 보여주었다. 모델은 일반적으로 구성원소가 복잡해질수록 더욱 정교해지지만 운용이 어렵고 반대로 구성원소가 단순해질수록 다소 정교함이 감소하지만 운용이 쉽다. 이에 모델의 정교성에 대해서는 모델의 예측값과 트랙터디 자료를 비교하여 어느 정도의 정확도를 가지고 있는가에 대해 파악할 수 있다.

이에 기초하여 본 연구에서는 ASM No. 1 모델을 기반으로 간략화된 모델을 제시하고자 한다. 이러한 간략화는 모델의 구성원소, 미생물의 정상상태, 반응조건 등 세 가지의 측면에서 Fig. 3과 같이 간략화가 이루어진다.

3.3.1. 물질의 분류

모델의 간략화를 위한 첫 번째 단계로서 물질의 분류를 단순화하였다. ASM No. 1 모델에서는 물질을 우선 용존상과 입자상으로 나누고, 용존상은 7종(S_I , S_S , S_O , S_{NO} , S_{NH} , S_{ND} , S_{ALK}), 입자상은 6종(X_I , X_S , $X_{B,H}$, $X_{B,A}$, X_p , X_{ND})으로 나누어 물질의 측정이 번거롭다. 이들 물질에 대해서 다음과 같은 과정을 거쳐서 용존상, 입자상의 구분없이 COD, NH_4^+-N , NO_3^-N 의 세 가지로 구분하였다.

3.3.1.1. 유기물질

ASM No. 1 모델에서의 유기물질은 우선 용존상과 입자상으로 나누어진다. 그중 용존상 물질은 즉시 생분해 되는 물질(S_S)과 비활성 용존물질(S_I)이 있으며, 입자상 물질은 서서히 생분해 되는 물질(X_S)과 비활성 입자물질(X_I), 입자상 유기물질(X_p)가 있다. 이들

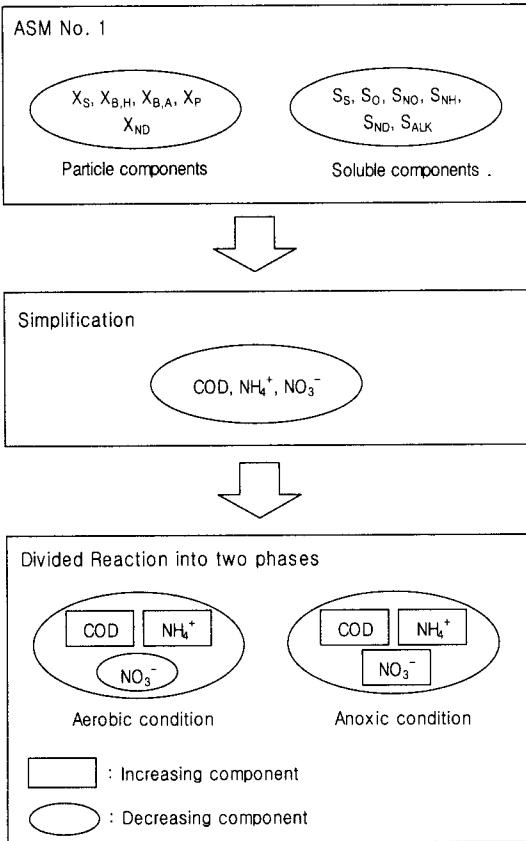


Fig. 3. Simplification of ASM No. 1.

중 비활성 물질(S_I , X_I)은 주로 생물학적 처리가 종료된 후에 유출되는 수질로서 간접적으로 추정이 된다. 그러나 이들 비활성 물질은 유기물질이면서도 반응에 관여하지 않기 때문에 대부분의 간략화연구에서 제외된다. 그리고 입상상 유기물질(X_P)은 반응조내에서 생성되는 것으로 인발슬러지로 제거되어 간략화 모델에서는 변동량이 없다고 가정된다. 이들 유기물질은 종속영양 미생물의 가수분해, 증식, 사멸 그리고 탈질에 관여한다. 그런데 모델의 목적이 질소계열의 물질인 경우에는 유기물질의 기능은 종속영양 미생물에 의한 탈질에 그 초점이 맞추어지게 된다. 이와 같은 관점에서 탈질에 관여되는 유기물질은 즉시 생분해되는 물질(S_S)과 서서히 생분해 되는 물질(X_S)이다. 이에 대해 Lukasse et al.(1998)의 연구에서는 간략화 모델의 유기물질의 구성성분을 용존 유기물질로만 제한을 하였으며 Zhao et al.(1995)의 연구에서는 아예 유기물질의 변동을 고려하지 않고 반응시간별로 질산

성질소를 모델화하여 탈질력의 변화를 표현하였다. 이에 대해 본 연구에서는 유기물질로 용존상과 입상상의 구별이 없이 COD 물질로만 한정한다.

3.3.1.2. 질소물질

ASM No. 1에서 질소계열 물질로는 유기질소(S_{ND} , X_{ND})와 암모니아(S_{NH}), 질산성질소(S_{NO})로 나누어진다. 이들 물질간의 변동에 대해서는 유기질소는 가수분해 반응에 의해 암모니아로 전환되며, 암모니아는 독립영양 미생물에 의해 질산화되며 질산성질소는 종속영양 미생물에 의해 탈질된다. ASM No. 1 모델은 기존의 활성슬러지 공법의 모델과는 달리 질소물질의 처리까지 염두에 두었기 때문에 유출수의 암모니아 혹은 질산성질소의 처리에 초점이 맞추어져 있다. 따라서, Lukasse et al.(1998)의 연구에서는 질소물질에 대해서 암모니아, 질산성질소로 분류를 하였으며 Zhao et al.(1995)의 연구에서도 암모니아, 질산성질소로 분류하였다. 이들 연구사례에서 유기질소를 제외한 이유는 반응식의 변수를 줄이기 위한 것이며 이것은 유기질소가 반응에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 반증하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 질소물질에 대해서는 암모니아와 질산성질소 두가지로 분류하는 것으로 하였다.

3.3.1.3. 종속영양 및 독립영양 미생물

종속영양 미생물(X_H)은 모델에서 유기물질의 분해와 탈질에 관여하며 독립영양 미생물(X_A)은 암모니아의 질산화에 관여한다. ASM No. 1 모델의 경우에는 이들 미생물들의 증식, 사멸에 기초하여 성립한 모델이기 때문에 이들 미생물들의 반응에 대한 표현 방식을 바꾸지 않고서는 모델의 간략화를 수행하기 어렵다. 그리고 이들 미생물들은 슬러지 체류시간을 통하여 일정부분이 제거되고 있기 때문에 실제 반응조에서는 큰 변동을 보여주지 않는다. 이에 대한 해법으로 모델의 구성요소로서 이들 미생물을 배제하고 미생물에 의한 물질들의 변동을 함수화시키는 방법이 사용되었다. 앞의 두 연구(Lukasse et al.(1998)와 Zhao et al.(1995))에서 뿐만 아니라 Argaman(1995)에서도 이들 미생물을 무시하고 다만 이들 미생물에 의해 변화되는 암모니아의 감소현상만을 표현하였다. 따라서 본 연구에서는 이들 미생물에 대해서는 정상상태를 가정하여 간략화 모델의 구성요소인 COD, 암모니아, 질산성질소의 변동으로 표현된다.

3.3.1.4. 그 밖의 물질(S_O , S_{ALK})

ASM No. 1 모델에서는 용존산소(S_O)에 따라 반응을 구분하는 것이 아니라 용존산소의 농도에 따라 반응이 진행하게 되어있다. 그러나 실제 하수처리공정에서는 반응조를 호기조, 무산소조 등으로 구분하여 운영하고 있으며, 각 물질들은 반응조에 형태에 따라 반응이 지배되고 있다. 정연규 등(2000)이나 Veldhuizen et al.(1999) 등의 연구에 있어서도 반응조의 구간에 따라 각각 모델화하였다. 본 연구에서는 이러한 연구들과 반응의 형태에 따라 각각 모델화를 실시하고 있기 때문에 용존산소에 대한 항목을 생략하였다. 알칼리도물질(S_{ALK})은 반응조내에 pH의 변동사항을 대신 표현하기 위해 도입된 항목이다. 이 항목은 반응조내의 pH의 변동이 질산화, 탈질, 유기물의 분해 등 반응에 지장을 줄 범위가 아니기 때문에 대부분의 간략화 모델에서 생략된다.

3.3.2. 미생물의 관련항목

두 번째 단계로는 ASM No. 1 모델에 대해서 미생물에 대해서 정상상태를 가정하였다. ASM No. 1 모델에서는 종속영양 미생물과 독립영양 미생물에 관계된 각각 3가지와 2가지의 성장 및 사멸반응을 포함하고 있다. 이에 대해서 본 연구에서는 이들 미생물은 인발을 통하여 정상상태를 유지한다고 가정하여 미시적인 변동을 무시하고 동적인 평형상태를 가정한다. 따라서, 간략화 모델에서는 미소시간 dt 에 대한 미생물의 변동은 무시된다. 이 밖에 ASM No. 1 모델에서의 다른 반응식들도 간략화 모델에서 분류한 COD, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ 등의 세 가지 물질이 호기 및 무산소 조건에서 변동하는 것으로 다음과 같이 축약된다.

- 호기성 조건에서의 종속영양 미생물의 증식(Aerobic growth of heterotrophs)은 호기조건에서의 유기물 감소로 표현된다.
- 무산소 조건에서의 종속영양 미생물의 증식(Anoxic growth of heterotrophs)은 무산소조건에서의 유기물 감소와 탈질화작용으로 표현된다.
- 호기성 조건하에서 독립영양 미생물의 증식(Aerobic growth of autotrophs)은 호기조건에서의 암모니아의 질산화로 표현된다.
- 종속영양 및 독립영양미생물의 사멸에 따른 물

질의 전환(Decay of heterotrophs and Decay of autotrophs)은 미생물의 정상상태를 가진다는 가정에 의해 무시된다.

- 유기질소의 암모니아화(Ammonification of soluble organic nitrogen)는 반응초기에 일시적으로 발생되어 초기 암모니아감소로 표현되므로 호기조건에서의 암모니아의 감소에 포함되어 표현된다.
- 유기물의 가수분해(Hydrolysis of entrapped organics)는 입자상 유기물질의 변동이다. 간략화 모델에서는 입자상과 용존상을 구분하지 않기 때문에 유기물질의 변동으로 표현된다.
- 유기질소의 가수분해(Hydrolysis of entrapped organic nitrogen)는 입자상 유기질소의 변동이다. 이것은 본 연구에서는 전체 암모니아의 변동에 포함되어 표현된다.

3.3.3. 반응조건

간략화의 세 번째 단계로서 반응모드를 호기 및 무산소 조건으로 나누었다. 실제로 본 연구에서 대상으로 하고 있는 SBR 반응조는 유기물과 질소제거를 위하여 호기와 무산소로 운전하고 있으며, 각 조건에 따라 세가지의 물질변동은 일정한 패턴으로 정하여져 있다. 즉, 호기성 조건일때에는 유기물질과 암모니아는 활발한 감소, 질산성질소는 증가되며, 무산소 조건에서는 유기물질은 소극적 감소 암모니아는 소극적 감소, 질산성질소는 감소하는 패턴을 보인다(Table 3).

3.3.4. 간략화된 ASM No. 1 모델

이와 같은 세가지의 단계를 거쳐 물질은 COD, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ 등 세 가지로 반응조건은 호기와 무산소로 나누어진다. 또한 모노드 식은 각 물질의 제한상황을 설명하기 위해 그대로 사용하였으며, 각각 COD, 암모니아, 질산성질소에 대한 제한상황이 표현된다. 이에 따라 식은 Table 3과 같이 정리된다.

이것을 다시 미분식으로 표현하면,

- 호기성 조건(Aerobic condition)

$$\frac{dCOD}{dt} = -C_{IAE} \cdot \rho_H \quad (1)$$

Table 3. Simplified model processes and parameters

	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ -N	Process rate
Aerobic condition	⊖ C _{1AE}	⊖ C _{2AE}	⊖ C _{3AE}	· Autotrophic reaction(ρ_A): $\left(\frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}}\right)MLSS$
Anoxic condition	⊖ C _{1AX}	⊖ C _{2AX}	⊖ C _{3AX}	· Heterotrophic reaction(ρ_H): $\left(\frac{COD}{K_{COD} + COD}\right)\left(\frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}\right)MLSS$

Table 4. State variables used in the ASM No. 1

Symbol	Definition	Unit	Value
X _S	Slowly biodegradable substrate	mg COD/L	52
X _{B,H}	Active heterotrophic biomass	mg COD/L	0
X _{B,A}	Active autotrophic biomass	mg COD/L	0
X _P	Particulate products arising from biomass decay	mg COD/L	0
X _{ND}	Particulate biodegradable organic nitrogen	mg N/L	5.1
S _S	Readily biodegradable substrate	mg COD/L	160
S _O	Oxygen	mg COD/L	0
S _{NO}	Nitrate and nitrite nitrogen	mg N/L	0
S _{NH}	NH ₄ ⁺ +NH ₃ nitrogen	mg N/L	22
S _{ND}	Soluble biodegradable organic nitrogen	mg N/L	4.0
S _{ALK}	Alkalinity molar units	mmol/L	4.4

$$\frac{dS_{NH_4}}{dt} = -C_{2AE} \cdot \rho_A \quad (2)$$

$$\frac{dS_{NO_3}}{dt} = -C_{3AE} \cdot \rho_H \quad (3)$$

· 무산소 조건 (Anoxic condition)

$$\frac{dCOD}{dt} = -C_{1AX} \cdot \rho_H \quad (4)$$

$$\frac{dS_{NH_4}}{dt} = -C_{2AX} \cdot \rho_A \quad (5)$$

$$\frac{dS_{NO_3}}{dt} = -C_{3AX} \cdot \rho_H \quad (6)$$

이 되며, 여기에서 기호는 **Table 6**을 참조하기 바란다. 6개의 변수 중에 무산소 조건에서의 암모니아 변동은 원래 가수분해와 유기질소에서 공급되는 암모니아의 양에 의해 소량이 증가하는 것으로 반영된다.

그러나 실제 자료를 고찰한 결과 반응 초기를 제외하면 나머지 구역에서는 무산소 조건에서 유기질소로부터 공급되는 암모니아의 양은 급격히 감소하지만 질산화에 따른 암모니아의 감소량이 더욱 크게 된다. 따라서 반응초기에는 유기질소에 의한 암모니아화가 이루어지지만 반응의 후반기로 가면 유기질소의 암모니아화가 대폭 감소하여 무산소 조건에서도 암모니아의 감소가 나타난다.

이것은 Zhao et al.(1995)의 연구에서도 나타난 것으로 반응시간이 암모니아의 변동에 대해서 전체 공정시간 중 1/2시간을 기준으로 다른 모델식으로 표현하였다. 본 연구에서는 이것을 통합하여 고려하였으며, 반응초기에 유기질소의 양이 소량 유입된다는 것을 고려하더라도 전체적으로는 무산소구간에 대해서 암모니아의 소량 감소를 가정하여 파라미터를 소량 감소로 하는 것이 유용하다는 것을 확인하였다. 따라서, 무산소 구간에서의 암모니아 변동에 대해서 소량의 감소를 나타내도록 하였다. 또한 프로세스의 반응식은 독립영양 미생물인 경우에는 암모니아만을 종속영양 미생물인 경우에는 질산성 질소와 COD의 제한

Table 5. Parameters used in the ASM No. 1

Symbol	Definition and Units	Default	Model
Stoichiometric & kinetic coefficients			
Y_H	Heterotrophic yield, mg COD/mg COD removed	0.67	0.67
Y_A	Autotrophic yield, mg COD/mg N oxidized	0.24	0.24
f_P	Fraction of biomass yielding decay products	0.08	0.08
i_{XB}	Fraction of nitrogen in biomass, mg N/mg COD	0.086	0.086
i_{XP}	Fraction of nitrogen in decay products, mg N/mg COD	0.06	0.06
μ_H	Maximum specific growth rate for heterotrophs, d ⁻¹	6.0	8.0
μ_A	Maximum specific growth rate for autotrophs, d ⁻¹	0.80	0.45
b_H	Decay rate for heterotrophs, d ⁻¹	0.62	0.50
b_A	Decay rate for autotrophs, d ⁻¹	-	0.08
η_g	Correction factor for anoxic growth, Dimensionless	0.8	0.8
η_h	Correction factor for hydrolysis, Dimensionless	0.4	0.72
k_a	Ammonification rate for soluble organic nitrogen, d ⁻¹	0.08	1.0
k_h	Particulate organic hydrolysis rate, d ⁻¹	3.0	0.1
Monod half-saturation coefficients			
K_S	S_S , mg COD/L	20.0	1.0
K_{OH}	S_O for heterotrophs, mg COD/L	0.20	1.0
K_{NO}	S_{NO} , mg N/L	0.50	0.10
K_{NH}	S_{NH} , mg N/L	1.0	0.2
K_{OA}	S_O for autotrophs, mg COD/L	0.4	0.2
K_X	X_S , mg COD/mg COD	0.03	0.5
K_{ALK}	Alkalinity, mmol/L	-	1.0

을 받는 포화방정식으로 구성하였다. 결과적으로 독립영양 미생물이 관여하는 반응으로 호기조건에서의 암모니아 감소, 질산성질소 증가, 무산소 조건에서의 암모니아의 소극적 감소로 표현하였으며 종속영양 미생물이 관여하는 반응으로 호기조건에서 COD의 감소, 무산소 조건에서 COD의 저해감소 및 탈질을 표현하였다.

4. 연구결과

4.1. 모델 파라미터 결정 및 비교(Phase I)

본 절에서는 SBR 반응조의 Phase II의 트랙 스테디 자료를 이용하여 ASM No. 1과 간략화 모델에 대해서 파라미터를 결정하였다. 그리고 파라미터의 결정으로 완성된 모델을 검증하기 위해 다른 호기시간을 가지는 Phase I의 자료를 대입하여 비교하였다.

4.1.1. 유입수 조건

본 연구에서는 모델 파라미터의 결정에 앞서 모델의 초기값을 정하기 위하여 반응조로의 유입수 성상

과 초기조건에 대해서 실측값을 구하였으며 **Table 4**와 같다.

4.1.2. 모델 파라미터의 결정

본 절에서는 ASM No.1과 간략화 모델을 이용하여 20분 호기, 10분 무산소 조건(Phase II)에서의 파라미터를 결정하여 각 파라미터의 값을 결정하였다. 이후 이 모델들의 유효성을 살펴보기 위해 앞에서 결정된 파라미터를 12분 호기, 18분 무산소 조건(Phase I)에 적용하여 유효성을 살펴보았다.

4.1.2.1. ASM No. 1 모델의 파라미터 결정

SBR 반응조의 20분 호기와 10분 무산소 조건에서의 실험 자료를 바탕으로 ASM No. 1 모델의 파라미터를 결정하였다. **Table 5**는 ASM No. 1 모델 파라미터의 디폴트값과 본 연구에서 사용한 파라미터값이다. 이들 파라미터 값들은 시산을 통하여 구했으며 파라미터의 보정순서를 우선 물질변동에 기여가 높은 미생물의 성장과 관련된 생산, 사멸, 비성장 계수들을 변화시켜 주었으며 그 다음으로 모노드식의 반포화계수, 물질변환 계수 등의 순서로 변환하였다.

Table 6. State variables and parameters used in simplified ASM No. 1

Symbol	Definition and Units	Value
Influent conditions		
COD	Influent total COD, mg COD/L	212
NH ₄ ⁺ -N	Influent NH ₄ ⁺ -N, mg N/L	22
NO ₃ ⁻ -N	Influent NO ₃ ⁻ -N, mg N/L	0
Coefficients		
C _{1AE}	COD decreasing coefficient in aerobic condition, d ⁻¹	50.0
C _{2AE}	NH ₄ ⁺ -N decreasing coefficient in aerobic condition, d ⁻¹	7.0
C _{3AE}	NO ₃ ⁻ -N increasing coefficient in aerobic condition, d ⁻¹	5.8
C _{1AN}	COD decreasing coefficient in anoxic condition, d ⁻¹	25.0
C _{2AN}	NH ₄ ⁺ -N decreasing coefficient in anoxic condition, d ⁻¹	0.5
C _{3AN}	NO ₃ ⁻ -N decreasing coefficient in anoxic condition, d ⁻¹	4.0
Monod Half saturation coefficients		
K _{COD}	COD, mg COD/L	20.0
K _{NH4}	NH ₄ ⁺ -N, mg N/L	1.0

4.1.2.2. 간략화 모델

Table 6은 Phase II의 20분 호기, 10분 무산소 조건 (Phase II)에서 수정 모델의 파라미터 값들이다. 각 파라미터 값들은 시산을 통하여 얻어진 값들이다. 간략화 모델에서는 해당 물질의 종류가 세 가지라서 각 파라미터들이 서로 복잡하게 연관되어 있지 않다. 따라서 호기 및 무산소 조건에 대해서 적절한 파라미터를 정하는 것만으로 간단히 모델 파라미터의 결정이 손쉽게 이루어졌다.

4.1.2.3. 모델의 비교

Fig. 4는 호기 20분, 무산소 10분(Phase II)에서의 결과이다. NH₄⁺-N는 초기에 많은 감소를 보이는데 이것은 감소식이 용존성 유기물질(S₃)의 제한을 받으면서 이루어지기 때문으로 초기에는 풍부한 유기물질로 인하여 반응이 활발하게 진행되지만 이후 서서히 감소속도가 줄어든다. ASM No. 1 모델에 의한 감소는 호기 20분, 무산소 10분의 경우에 중간과정에서는 다소 오차가 발생하였지만 NH₄⁺-N의 소멸지점에 대해서는 두 모델 모두 정확한 예측을 하였다. 간략화 모델도 ASM No. 1 모델과 마찬가지로 유기물질인 COD의 제한을 받으면서 이루어지도록 되어 있음에도 ASM No. 1 모델과 거의 같은 근사능력을 보여준다. 참고로 ASM No. 2 모델에서도 모델의 간략화를 위해 유기질소의 항목을 생략하였다. 모델을 통한 고찰결과 NH₄⁺-N의 경우에는 두 모델 모두 매우 근사

Phase II

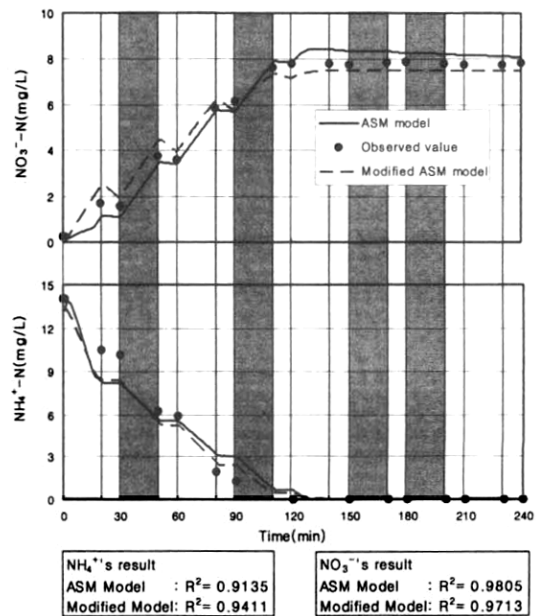


Fig. 4. Comparison of Full ASM No. 1 and Simplified model prediction with experiment data in Phase II.

하게 예측하였으며 이것은 ASM No. 1 모델에서 다루었던 유기질소(X_{ND} 및 S_{ND})항목이 무시된 채로 모델링을 할 수 있다는 것을 보여준 것이다.

전체적으로 Phase II에서의 결과를 결정계수인 R²으로 살펴보면 암모니아에 있어서는 ASM No. 1 모델

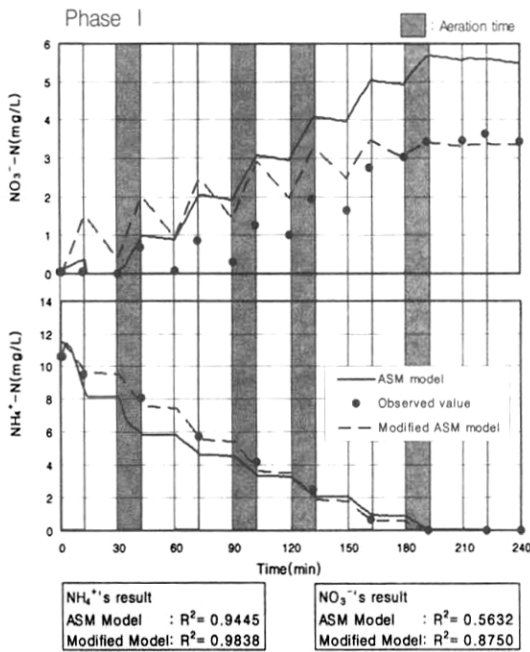


Fig. 5. Comparison of Full ASM No. 1 and Simplified model prediction with experiment data in Phase I.

이 0.9135이며 간략화 모델에서는 0.9411로서 간략화 모델이 보다 정확한 것으로 나타났다.

질산성질소의 경우에는 ASM No. 1 모델이 0.9805이며 간략화 모델이 0.9713로서 ASM No. 1 모델이 보다 정확한 것으로 나타났다.

4.2. 모델의 비교

본 연구에서는 4.1에서 파라미터가 결정된 ASM No. 1 모델과 간략화 모델을 대상으로 Phase I의 자료에 대입하여 그 유효성을 살펴보았다. 우선 이것을 결정계수 R^2 로 비교하면 Phase I에서 암모니아에 대한 간략화 모델의 결정계수는 0.9838로서 ASM No. 1 모델의 결정계수 0.9445보다 높다는 것을 보여주며, 질산성질소에서는 간략화 모델이 0.8750로서 ASM No. 1 모델의 0.5632보다 더 높은 값을 보여주었다. 따라서 두 모델을 비교하면 간략화된 모델이 더 우수하다는 결론을 얻는다. 그리고 모델의 제어는 포기량을 통한 에너지의 절약이 목적이며 이것은 바로 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 소멸점을 의미하기 때문에 제어의 목적은 $\text{NH}_4\text{-N}$ 가 된다. 따라서, 간략화 모델에서 보여준 높

은 정확도로 $\text{NH}_4\text{-N}$ 에 따른 제어를 한다면 신뢰도 높은 제어가 될 것이라고 판단된다. 그리고 초기에 발생하는 탈질능력의 차이를 보정하여 주기 위하여 새로운 파라미터 값을 결정하여 준다면 보다 정확한 유출수의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 추정할 수 있을 것이라고 판단된다.

또한 질산성 질소에 대해서는 두 모델 모두 반응중 간부분에서 정확한 예측을 하지 못하였다. 그 이유는 다음과 같이 두 가지로 살펴볼 수가 있다. 첫 번째는 서서히 생분해되는 물질(X_S ; 입자상 유기물질)의 존재이다. 질산성질소의 탈질반응이 용존성 유기물질(S_S)의 모노드식으로 제한을 받도록 되어 있지만 용존성 유기물질은 즉시 생분해되는 물질로서 대부분 반응시간 30분 이내에 소모된다. ASM 모델에서는 초기 30분까지만 강한 탈질능력을 가지는 것으로 나타나 있지만 실제 반응조에서는 서서히 생분해 되는 물질(X_S ; 입자상 유기물질) 중 분해속도가 빠른 유기물질의 공급을 받기 때문에 1시간 혹은 1시간 30분경까지 뛰어난 탈질 능력을 가지는 것으로 나타난다.

두 번째로서는 80~150mg/L의 아세테이트형태의 탄소원(용존성 유기물질 S_S 에 포함)이 첨가된 상황이 기 때문에 ASM No. 1에서 예측한 탈질능력보다 더 강한 탈질능력을 보여주었다는 것이다. 그러므로 예상보다 강한 탈질능력이 초반에 추가된 아세테이트에 의해 발생하였으며 실제 하수를 대상으로 하였기 때문에 입자상 유기물질에서 상당기간 계속적으로 용존성 유기물질로 전환되어 탈질이 지속되었다는 것이 원인으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 ASM No. 1 모델이 질소 및 유기물질의 제거를 정교하게 표현하고 있지만 물질의 분류 및 파라미터의 결정 등의 문제로 인하여 실제 하수공정 제어에 응용하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 하수처리공정의 제어에 이용하기 쉽도록 ASM No. 1 모델을 간략화하고 이의 성능을 평가하였으며 다음과 같은 결론들을 얻었다.

첫째, ASM No. 1 모델에 대하여 분류물질, 미생물의 정상상태, 반응조건 등의 세가지 가정아래 간략화

를 실시하였다. 우선 물질의 분류는 유기물질과 질소 물질로 축약하였으며, 변동의 주요물질인 COD, NH_4^+-N , NO_3^--N 등의 세 가지로 분류가 되었다. 또한, ASM No. 1 모델에서는 종속 및 독립영양 미생물의 성장 및 사멸 등으로 물질의 변동을 표현하고 있지만 본 모델에서는 미생물이 정상상태를 유지하고 있다는 가정 하에 미생물의 항목은 상수로 표현하였다. 그리고 이들 세 가지 물질들의 주요변동은 반응조의 호기 및 무산소 등의 조건에 따라 다르게 일어난다. 따라서 이들 물질변화를 무산소, 호기 반응으로 분리하여 모델화를 하였다.

둘째, SBR 반응조 Phase I 상태의 트랙 스테디의 결과를 이용하여 모델의 파라미터들을 결정하였다. ASM No. 1 모델의 파라미터는 민감도가 높은 생산, 사멸, 비성장 계수들을 우선 보정하였으며 그 다음으로 노노드식의 반포화계수, 물질변화계수로 보정하였다. 간략화 모델은 물질변동만을 대상으로 하고 구조가 간단하여 호기 및 무산소를 대상으로 파라미터의 결정이 쉽게 이루어 졌다.

셋째, 두 모델을 결정계수값으로 비교하면 Phase II에서 암모니아의 경우에 ASM No. 1 모델에서는 0.9135, 간략화 모델은 0.9411이었다. 그리고 질산성 질소의 경우에는 ASM No. 1 모델에서는 0.9805, 간략화 모델에서는 0.9713을 얻었다. 전체적으로 간략화 모델이 ASM No. 1 모델과 동등한 근사능력이 있다는 것을 보여주었다.

넷째, Phase I에 대해 모델을 적용시킨 결과 암모니아의 경우에 ASM No. 1 모델에서는 0.9445, 간략화 모델에서는 0.9838이었다. 질산성 질소에서는 ASM No. 1 모델이 0.5632, 간략화 모델이 0.8750이었다. 모두 간략화 모델이 ASM No. 1 모델보다 뛰어난 예측 값을 보여주었다.

참고문헌

- 정연규, 김한수 (2000) 연속유입 간헐포기공정 모델에서 계수 민감도 분석, *상하수도학회지*, **16**(2), pp. 231-242.
- 환경부 (2005) *환경백서 2005*.
- Abusam, A. and Keesman, K.J. (1999) Effect of number of CSTR's on the modelling of oxidation ditches: Steady state and dynamic analysis, *Med. Fac. Landbouw. Univ. Gent*, **64**, pp. 91-94.
- Abusam, A. Keesman, K.J., Stranten, G. Spanjers, H. and Meinema, K. (2001) Parameter estimation procedure for complex non-linear systems: Calibration of ASM No. 1 for N-removal in a full-scale oxidation ditch, *Water science and technology*, **43**(7), pp. 357-365.
- Anderson, J.S., Kim, Hyunook, McAvoy, T.J and Hao, O.J. (2000) Control of an alternation aerobic-anoxic activated sludge system- Part 1: development of a linearization-based modeling approach, *Control engineering practice*, **8**, pp. 271-278.
- Argaman, Y. (1995) A steady-state model for the single sludge activated sludge system I. Model description, *Water Research*, **29**(1), pp. 137-145.
- Chachuat, B., Roche, N. and Latifi, M.A. (2003) Reduction of the ASM 1 model for optimal control of small-size activated sludge treatment plants, *Revue des Sciences de l'Eau*, **16**(1), pp. 5-26.
- Cho, J., Ahn, K.H., Seo, Y. and Lee, Y. (2003) Modification of ASM No. 1 for a submerged membrane bioreactor system: Including the effects of soluble microbial products on membrane fouling, *Water science and technology*, **47**(12), pp. 177-181.
- Gujer, W. (2006) Activated sludge modelling: Past, present and future, *Water science and technology*, **53**(3), pp. 111-119.
- Häck, M. and Köhne, M. (1996) Estimation of wastewater process parameters using neural networks, *Water science and technology*, **33**(1), pp. 101-115
- Henze, M., Grady C.P., Jr., Gujer, W., Marais, G.V. and Matsuo, T. (1986) Activated sludge model no. 1, IAWQ Scientific and Technical Report, 1., IAWPRC, London, UK.
- Kolisch, G. and Londong, G. (1998) An on-line simulation to support the operation of municipal sewage plants, *Water science and technology*, **38**(3), pp. 71-78
- Langergraber, G., Rieger, L., Winkler, S., Alex, J., Wiese, J. and Owerdieck, C. (2004) A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants, *Water science and technology*, **50**(7), pp. 131-138.
- Lukasse, L. J., Keesman, K. J., Klapwijk, A. and Van Straten, G. (1998) Optimal control of N-removal in ASPs, *Water science and technology*, **38**(3), pp. 255-262.
- Veldhuizen, H.M., Loosdrecht, M.C. and Hijnen, J.J. (1999) Modelling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process, *Water Research*, **33**(16), pp. 3459-3468.
- Weijers, S.R., Preisig, H.A. and Kok, J.J., Buunen, A., Wouda, T. W. (1996) Parameter identifiability and estimation of the IAWQ activated sludge model no. 1, *Med. Fac. Landbouw. Univ. Gent*, **61**(4A), pp. 1809-1813.

17. Zhao, S.H., Isaacs, H.S. and Kümmel, M. (1995) An analysis of nitrogen removal and control strategies in an alternating

activated sludge process, *Water Research*, **29**(2), pp. 535-544.