

工學碩士 學位論文

오수관거 내의 오염물질 변화에  
관한 모델링



2007 年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

金 光 載

工學碩士 學位論文

오수관거 내의 오염물질 변화에  
관한 모델링

指導教授 李 柄 憲

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

金 光 載

金光載의 工學碩士 學位論文을  
認准함

2006 年 12 月



主 審 工學博士 姜 壬 錫



委 員 工學博士 金 上 旦



委 員 工學博士 李 柄 憲



## 목차

<b>제 1 장 서론</b>	1
<b>제 2 장 문헌연구</b>	4
2.1 하수배제방식	4
2.2 하수관거의 역할	6
2.3 하수관거 내에서의 오염물질의 생물학적 변화	8
2.3.1 유기물 및 질소의 변화	9
2.3.2 황의 변화	11
2.4 활성슬러지 모델	14
2.4.1 활성슬러지 모델의 접근법	15
2.4.2 ASM1	17
2.4.3 ASM2, 2d	24
2.4.4 ASM3	25
<b>제 3 장 재료 및 방법</b>	28
3.1 유입수 분율	29
3.2 적용된 매트릭스	31
3.3 시뮬레이터의 선택	33
<b>제 4 장 결과 및 고찰</b>	36
4.1 유기물의 변화	36
4.2 COD 소모량	38
4.3 유입과 유출의 유기물 성상	41
4.4 질소화합물의 변화	42
4.5 황화합물의 변화	45
<b>제5장 결론</b>	46
<b>제6장 참고 문헌</b>	47
<b>제7장 부록</b>	50
부록. AQUASIM Program	50

## *List of Table*

Table 2.1 Classification of microorganisms by doner, electron acceptor, source of cell carbon, and end product in sewer -----	9
Table 2.2 ASM1 matrix -----	21
Table 3.1 Concentration of inflow in this study (unit:mg/L) -----	29
Table 3.2 Concentration of state variable in inflow water (unit:mg/L)--	30
Table 3.3 Description of parameter (at 20°C) -----	32
Table 3.4 Matrix of this study -----	33
Table 3.5 Process of this study -----	34
Table 3.6 Simulator type -----	35



## *List of Figure*

Fig. 2.1 Diagram of combined sewer. -----	4
Fig. 2.2 Diagram of separate sewer. -----	6
Fig 2.3 Mass transfer in sewer. -----	8
Fig 2.4 Biomass growth and substrate consumption with electron acceptor. -----	10
Fig. 2.5 Biological reaction in sewer. -----	13
Fig. 2.6 Modelling approach about activated sludge process. -----	17
Fig. 2.7 Classification of carbon compound in ASM1. -----	19
Fig. 2.8 Classification of nitrogen compound in ASM1. -----	20
Fig. 3.1 Diagram of sewer in this study. -----	28
Fig. 3.2 Characteristic of carbon compounds in inflow water. -----	29
Fig. 3.3 Characteristic of nitrogen compounds in inflow water. -----	30
Fig. 4.1 Variation of $X_S, S_S$ . -----	36
Fig. 4.2 Variation of $X_H, X_A, X_I, S_I$ . -----	37
Fig. 4.3 Variation of TCOD. -----	38
Fig. 4.4 Variation of SCOD. -----	39
Fig. 4.5 Mass balance of organic compounds. -----	40
Fig. 4.6 COD fraction at the inflow and the outflow. -----	41
Fig. 4.7 Variation of nitrogen compounds. -----	42
Fig. 4.8 Variation of TKN. -----	43
Fig. 4.9 Mass balance of nitrogen compounds. -----	44
Fig. 4.10 Variation of surfactant compounds. -----	45

# Modeling for Pollutants Variation in Sanitary Sewer

**Kwang-Jae Kim**

*Department of Environmental Engineering, Graduate school,  
Pukyong National University*

## Abstract

Contaminants move to the wastewater treatment plant through the sewer systems. Simultaneously, while flowing, contaminants are diminished in sewer systems. This is due to the physical, chemical, and biological reactions while wastewater is flowing: the sedimentation of solid particles and the decomposition of contaminants caused by microbes living in wastewater or the pipe wall. These reactions make the composition of raw water be changed before wastewater reaches the wastewater treatment plant, thus it influences the efficiency of wastewater treatment directly or indirectly.

In this study focused on organic matters, nutrients, and sulfides in order to predict the change of contaminants which is occurred while sewage flows in sanitary sewer. Also we simulated modeling applied to ASM1(Activated Sludge Models No. 1). When the velocity is constant at 1m/s and sewage flows for 24 hours, in the organic matter's concern, TCOD is 375mg/L at upstream and 330mg/L at downstream, showing 12% decrease. Also, SCOD is 170mg/L at upstream and 122mg/L at downstream, showing 28% decrease. To represent nutrients, TKN records 39mg/L at upstream and reduces 4mg/L, 35mg/L at downstream.

In terms of sulfides, sulfur ions decrease by 60%, 12mg/L downstream from 30mg/L upstream. Consequently, hydrogen sulfide increases to 4mg/L and 2mg/L is emitted.



## 제 1 장 서론

우리나라의 2004년 말 현재 공공하수도 처리 구역 내에 거주하는 인구 및 폐수종말처리시설을 통해 하수처리가 이루어지는 지역의 인구를 기준으로 한 하수도 보급률은 81.4%이고, 전국에 가동 중인 하수처리종말시설은 268개소, 시설용량은 21,534,745 톤/일이다(환경부, 2005). 또한 하수관거 설치연장은 82,214km로 하수도정비기본계획상의 계획연장 120,814km의 68.1%이며, 이중 오수와 우수를 동시에 배제하는 합류식 관거는 47,255km(57.5%), 우수와 오수를 분리하여 배제하는 분류식은 34,959km(42.5%)이다(환경부, 2005). 하수도와 하수관거의 보급률은 96년 이후로 꾸준히 증가해 왔다. 현재까지의 이러한 하수관련시설에 대한 투자의 양적인 증가는 하수처리장의 공정 및 성능향상에만 집중되어왔고 하수관거 내에서 일어나는 생물학적, 물리적인 반응들은 간과되어 왔다.

하수관거는 발생원으로부터 하수종말처리장까지 하수를 운송하는 역할을 한다. 또한 하수가 하수관거를 따라 하수종말처리장으로 이동하는 동안 하수내 입자성 고형물의 침전, 하수나 관거벽에 서식하는 미생물에 의한 오염물질이 분해되는 이른바 반응기적인 역할도 수행한다(Hvitved-Jacobsen, 2002). 하수의 성장변화를 일으키는 원인은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫째로, 하수내에 존재하는 입자성 고형물이 관거내에서 침전, 재부유하면서 하수 성상이 변하는 물리적 반응이다. 두 번째로, 하수나 하수관벽에 서식하는 미생물이 하수를 먹이로 사용하면서 제거되어 변하는 생물학적 반응이다. 이러한 하수의 성장변화는 하수가 하수관거를 유하하면서 하수처리장에 유입되기 전에 하수의 처리가 이루어 진다는 것을 의미한다(Chen *et al.*, 2001). 하수관거의 반응기적인 역할은 하수처리장으로 들어오는 하수의 유입수질을 결정하므로 하수처리장의 처리효율 면에서 직, 간접적으로 영향을 미친다.

Henze(1992)는 활성슬러지 공정의 모델링을 이용하여 하수관에서의 하수의 성상을 규명하려 하였고, 김(2002)은 하수관거의 반응기적인 역할을 규명하기 위하여 관거내에서의 수질의 변화를 실험하였다. 이(2005) 등은 하수관거를 통하여 하수가 유하할때의 물리적, 화학적, 생물학적 반응을 통하여 오염물질이 제거되는 특성을 평가하고자 하였다.

그러나, 지금까지의 연구는 유기물의 변화에만 국한되어 실험에 의한 현상의 해석에 집중되어 있었다. 따라서 본연구에서는 오수관거 내에서의 오염물질의 변화 특성을 연구하는데 있어서 활성슬러지 모델을 적용하여 오염물 변화 현상중 유기물 및 영양염류, 그리고 황화합물의 변화를 이해하고 모의 예측하고자 하였다.

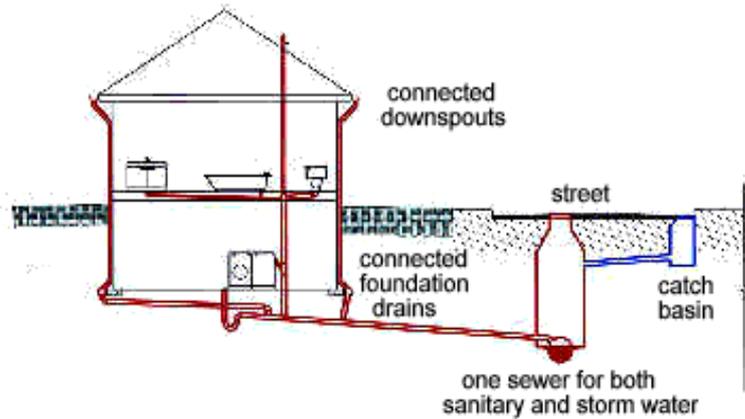


## 제 2 장 문헌연구

### 2.1 하수배제방식

하수도란 하수를 배제 또는 처리하기 위하여 설치되는 도관 등 기타의 공작물과 시설의 총체를 말한다(박중현, 1998). 하수를 발생원에서 처리장까지 수송하여 처리한 다음 방류지점까지 운반하는데 요구되는 시설의 총체를 하수도라 한다. 하수의 배제에 사용되는 하수관거는 오수는 오수관거로 우수는 우수관거로 분류하여 배제하는 분류식 하수관거와 오수와 우수를 한 관에서 함께 배제시키는 합류식 하수관거가 있다(하수도시설기준, 1998).

합류식 하수도의 일반적인 장점은 다음과 같다. 우수관과 우수관을 각각 매설하는 완전한 분류식에 비하여, 하나의 관거로 오수와 우수를 모두 수송하므로 건설비가 적게 들고 하수관거가 1개이기 때문에 도시 가스관이나 수도관, 전화 케이블 등 다른 지하 매설물과 경합을 벌이는 일이 그만큼 적고, 분류식에 비하여 시공이 비교적 용이하다. 또한, 강우 초기의 우수에 포함되어 있는 지상의 먼지나 지면상의 오염물질(비점원 오염물질, NPS Pollutant) 등을 하수처리장으로 운반하여 처리할 수 있다. 비점원 오염물질은 그 양과 질이 갈수록 증가하고 있어 최근에 많은 문제를 유발하여 처리대상 물질로 분류되고 있다. 관거 단면이 크므로 경사가 완만하게 되고, 소구경관이 많은 분류식보다 매설깊이가 작아도 된다. 그리고 우천시에는 대량의 우수에 의하여 관내세정이 자연적으로 이루어진다. 관 지름이 크므로 점검 및 청소가 용이하고, 사실 하수도에 연결하기가 쉽다. 그러나, 단점으로는 다음과 같다. 우수토실에서 모래나 쓰레기 등이 침적되어 있어 하수의 흐름을 방해하는 경우에는, 우수토실이나 오수가 수역으로 유출하여 수질오염의 원인이 되기 쉽고, 관거의 단면이 커서 경사가 완만하여 관내에 오물이 침전되기 쉽고, 강우 초기시에는 관거 내의 퇴적물이나 도로 면의 오염물이 씻겨 흐르기 때문에, 하수의 수질이 가장 악화되는 때이다. 이 시점에서 계획된 희석배율을 초과하여 우수가 유출되는 경우에는 매우 오염된 하수가 우수 토실이나 펌프장으로부터 수역으로 방류되어 수질오염의 원인이 되기 쉽다는 단점이 있다. Fig. 2.1에 합류식 관거를 나타내었다.



**Fig. 2.1 Diagram of combined sewer.**

분류식 관거의 장점은 다음과 같다. 오수와 우수는 분리해서 배제되기 때문에, 모든 오수를 하수 처리장으로 수송한 후 처리하여 방류할 수 있다. 또한 분류식의 오수관은 유량이 합류식에 비해 일정하므로 유속도 빠르고 관내에 침적물 (sediment)이 적게 발생한다. 이에 비하여 합류식에서는 우천시인 대유량의 빗물을 대상으로 관거가 설계되기 때문에, 청천시에는 설계유량에 비해 아주 적은 유량이 하수관 내를 흐르고, 따라서 유속이 느리고 침적물을 남기기가 쉽다. 또한, 우천시의 고수위와 청천시의 저수위의 사이에는 관 벽에 오물이 침적하여 오랜 시간 비가 오지 않을 경우에는, 이것이 말라붙어서 다음 강우시에는 수류에 저항하여 마찰계수가 증대될 수가 있다. 그리고, 상류에 있는 하수관은 일반적으로 유속이 작아 고형물이 침적하기 쉬우나, 분류식에서는 단면이 작기 때문에 세척수로 세척하기가 쉬우며, 하천을 횡단하는 경우나 중계 펌프장을 설치하는 경우에 우수를 모두 방류하고, 오수만을 처리장으로 수송하면 되기 때문에 펌프장과 역사이편 등의 시설이 작게 된다. 하수처리 시설의 용량은 오수만을 대상으로 하기 때문에 작게 해도 무관하며, 하수처리장에 유입되는 하수의 수질변동이 비교적 적은 장점이 있다. 반면에 단점으로는 오수관과 우수관을 따로 매설하기 때문에 합류식에 비해서 건설비가 많이 들고 시공도 어렵다. 오수관은 비교적 소구경관도 많이 있으므로 관거 경사가 크게 되고, 평탄한 지형에

있어서는 하수관거의 매설 깊이가 매우 크게된다. 또한, 분류식에 있어서는 우수 초기에 비점원 오염물질 또는 우수관거에 부착된 오염물질 등이 씻겨져서 빗물과 함께 처리되지 않고 그대로 방류된다. 그리고, 오수를 우수관에 연결하거나 우수를 우수관에 연결하는 오접합(cross connection)의 우려가 있다. 오수를 우수관에 연결하는 경우에는 처리되어야 할 오수가 항상 무처리된 채로 방류되며, 우수를 우수관에 연결하는 경우에는 처리할 필요 없는 우수가 하수 처리장으로 유입되어 처리장의 운전에 부담을 주고, 또한 우수관에 비해 상대적으로 단면이 작은 우수관의 유하능력에 지장을 초래한다. Fig. 2.2에 분류식 관거를 나타내었다.



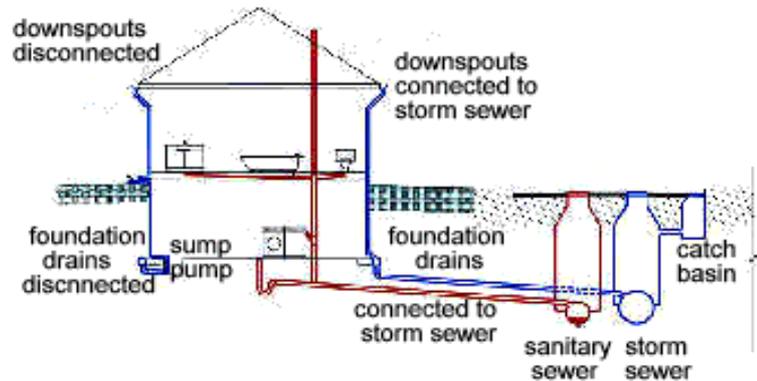


Fig. 2.2 Diagram of separate sewer.

지금까지의 우리나라의 하수배제방식은 경제적인 문제와 시공상의 용이성으로 인하여 분류식관거 매설이 대부분이었으나 우천시의 월류에 의한 비점오염원의 유출로 도시 인근의 하천등의 수질관리에 문제점을 야기시킴으로 하여 민간 자본을 활용한 하수관거정비 종합투자 계획과 맞물려 기존의 합류식관거는 우수관거로 사용하고 오수관거를 새로 매설하는 분류식관거로의 교체가 이루어지고 있다.

## 2.2 하수관거의 역할

우리나라의 하수배출체계는 주거생활로부터 발생한 오수는 합류식 하수관거 시스템 경우에는 수세식 화장실에 정화조의 설치를 의무화하고 있다. 하수처리장이 없는 경우에는 생활오수 전체를 오수정화시설에 의해 처리하고 있다. 수거식 화장실의 경우에는 분뇨를 별도로 분뇨처리장에서 처리하고 있다. 공장폐수의 경우에는 일단 자체 처리가 필요하나 하수와 혼합시켜 처리가 가능한 경우에는 그대로 방류시킨다. 축산폐수의 경우에는 분은 수거하여 농지활용하나 폐

액은 별도로 운반처리하기도 한다. 처리된 축산폐수도 공장 폐수와 마찬가지로 하수관거로 유입될 수 있다. 분류식 하수관거의 경우 오수받이와 우수받이가 따로 설치가 되어 우천시 빗물은 우수관을 통하여 공공수역으로 어떠한 처리 없이 배출되고, 오수관은 오수만을 모아 하수처리장으로 수송되어 처리를 거친 후 공공수역으로 배출된다.

하수관거는 하수의 발생원으로부터 하수종말처리장까지의 하수의 수송역할을 담당한다. 하수가 배출원으로부터 하수종말 처리장으로 가는동안 하수관거 내에서 물질의 전환이 일어난다. 이것은 하수관거내의 물리학적, 생물학적, 화학적인 반응에 의하여 발생한다. 관거내의 유속이 떨어지는 곳에서는 입자성물질의 침전이 일어나고 이 퇴적물이 다시 탈리되어지거나 용해성물질을 방출하기도 하며, 황환원이 발생하기도한다. 특히 하수관거의 벽면에서 부착하여 생성된 미생물막에서는 다양한 종들의 미생물이 용존산소,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  등을 전자수용체로 하여 성장하기도 하는데 이러한 일련의 과정들은 하수중의 오염물질을 감소시키고 유기물의 성상변화를 유발하여 유기물의 감소를 야기시킴과 동시에  $N_2O$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$  등의 가스형태로 관거의 대기로 방출되어져 냄새를 유발하고 관정에 침식을 일으키기도 한다. 이러한 반응기적인 역할은 하수종말처리장의 운전에 직, 간접적으로 영향을 미치게 된다. 하수관거내의 물질이동을 Fig. 2.3에 나타내었다.

## SEWER

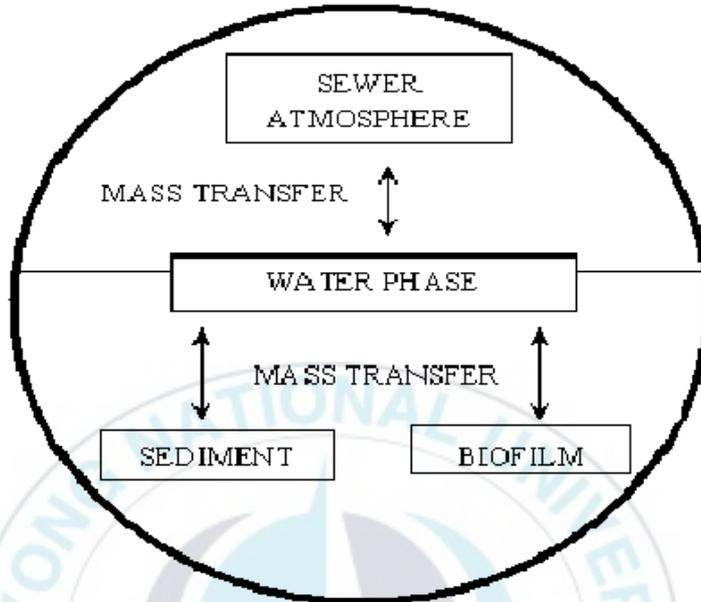


Fig 2.3 Mass transfer in sewer.

### 2.3 하수관거 내에서의 오염물의 생물학적 변화

분류식의 오수관거내에서의 생물학적인 반응과 화학적 반응은 매우 복잡하다. 이러한 반응에는 수계에 의한 반응, 오수관거 내벽에 부착하여 성장하는 미생물에 의한 반응, 오수관거내의 대기와의 반응 등이 있다. 오수관거 내에서의 원수성상을 변화시키고 유기물질을 감소시키는 것은 주로 종속영양미생물에 의해서 발생한다. 이러한 반응들은 이용 가능한 전자수용체에 따라 결정된다. 오수관거에서 중요한 반응은 유기물질의 제거나 전환이 아니라 전자수용체의 변화이다. Table 2.1은 오수관거 내에서의 미생물분류에 따른 전자수용체 및 세포 탄소원 그리고 최종생성물을 나타내고 있다.

**Table 2.1 Classification of microorganisms by donor, electron acceptor, source of cell carbon, and end product in sewer**

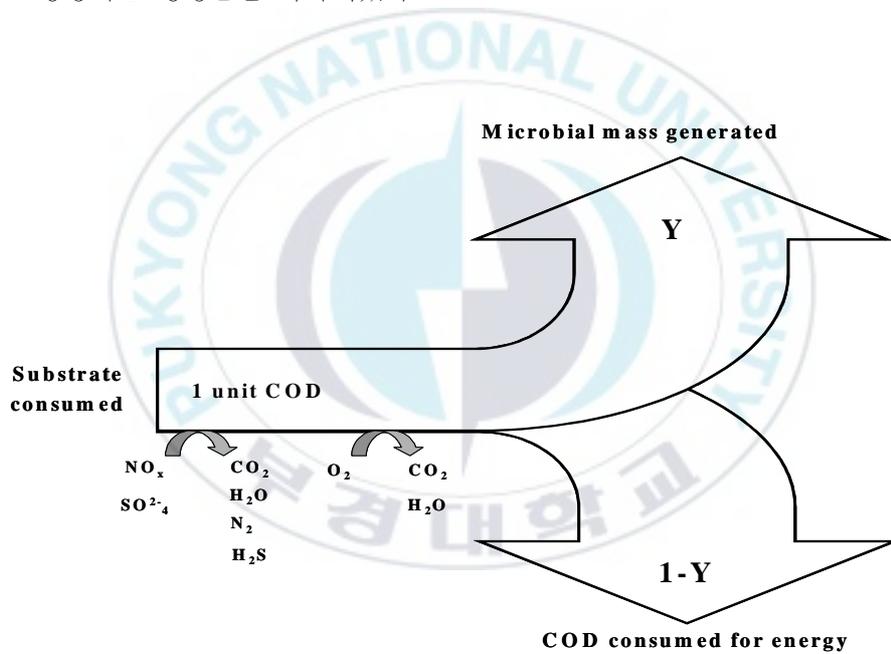
Type of bacteria	Common reaction name	Carbon source	Electron donor	Electron acceptor	Products
Aerobic heterotrophic	Aerobic oxidation	Organic compounds	Organic compounds	$O_2$	$CO_2, H_2O$
Aerobic autotrophic	Nitrification	$CO_2$	$NH_3, NO_2$	$O_2$	$NO_2, NO_3$
Anaerobic heterotrophic	Acid fermentation	Organic compounds	Organic compounds	Organic compounds	VFAs
	Sulfate reduction	Organic compounds	Organic compounds	$SO_4$	$H_2S, CO_2, H_2O$

### 2.3.1 유기물 및 질소의 변화

호기조건에서는 미생물의 활성도가 매우 높으므로, 유기물이 가수분해 (Hydrolysis)된 것을 미생물이 먹이로서 소비하므로 수질의 성상 변화가 일어나며 미생물은 성장하게 된다. 즉 쉽게 제거되는 물질이 제거되어지고 쉽게 제거되지 않는 물질이 생성된다. 무산소조건에서는 하수관거내에서  $NO_3$ 의 농도는 낮거나 거의없다. 따라서 탈질과 같은 반응은 거의 존재하지 않는다. Bentzen (1995)은 하수관거내에  $NO_3$ 을 주입하여 혐기조건을 제어하는 공정을 소개하기도 했다. 혐기조건에서는 가수분해에 의하여 유기물은 가수분해되어 발효로 전환된 후 발효가능한 기질이 휘발성유기산과 같은 쉽게 생분해가능한 유기물로 전환된다. 또한 휘발성유기산은 메탄을 형성하게 된다.

유기물질의 농도가 높을때 유기질소와 용해성 질소의 일정량은 침전이나 확산에 의하여 제거가 된다. 또한 Ammonification 속도가 질산화 속도보다 높고 생물막에서도 확산에 의해 암모니아가 생산되어 진다. 유기물질의 농도가 낮을 때는 질산화를 위한 충분한 용존산소가 존재한다면 암모니아는  $NO_2$ ,  $NO_3$ 로 산화된다.

일반적으로 미생물은 일정량의 기질을 사용하여 활동 및 증식에 필요한 에너지의 생성과 세포를 합성한다. 미생물의 활동 및 성장에 필요한 에너지는 산소 등과 전자수용체를 이용하여 유기물등과 같은 전자공여체를 산화시킴으로써 이루어진다. Fig 2.4는 유기물이 소모됨과 동시에 미생물이 성장하며 부가적으로 생성되는 생성물을 나타내었다.



**Fig 2.4 Biomass growth and substrate consumption with electron acceptor.**

### 2.3.2 황의 변화

황은 -2 ~ +6가의 안정된 원자가를 가진 반응력이 있는 원소로서, 황산철(Ⅲ) 및 황산칼슘의 특이한 예를 제외하고는 대부분인 황산염은 물에 쉽게 녹는다. 일반적으로 생활하수 및 공장폐수에는 단일 또는 수종의 황화합물이 존재한다. 그 존재 형태는 이온 또는 각 유기황 화합물을 포함하여 약 30여종으로 구분할 수 있다. 그러나 실질적으로 상온에서는 열역학적으로 6가 형태( $HSO_4^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $S$ ,  $H_2S$ ,  $HS^-$ ,  $S^{2-}$ )만이 안정적으로 존재한다. 하수내의 황은 유기물 내의 유기황 화합물과 상수도에 기인하는 황산이온으로 구분할 수 있다. 존재비율로 봤을때 황산이온이 20~100mg/l 정도이나 유기황 화합물은 1~3mg/l 정도에 불과하므로 황산이온의 존재비율이 약 20배 크다. 따라서 존재량을 기준으로 할때 하수도에는 황화수소의 생성조건을 위한 충분한 농도가 존재하며 황화수소 생성에 황산이온이 주로 역할을 함을 알 수 있다.

하수관거내에서 용존산소나  $NO_3N$ 이 고갈되게 되면 sulfate reducing 박테리아는 전자수용체(electron acceptor)로 sulfate를 사용하게 되고 기질로서 쉽게 분해 가능한 기질(readily biodegradable substrate)을 이용하게 된다.



문헌에 의하면 중력식하수관거에서 sulfide가 생성될 수 있는 조건은 낮은 유속(30cm/sec이하), 재포기가 될 수 없는 큰 하수관거, 그리고 높은 온도(15~20℃)이다(Piet Lens *et al*, 2000). 이 반응은 타영양성의 혐기성 박테리아인 황산이온환원균 (SRB: Sulfate Reducing Bacteria)이 가수분해된 유기물과 유기산 생성균에 의하여 생성된 유기산을 선택적으로 섭취하는 것으로 알려져 있다. 용존산소가 없고 흐름이 비교적 양호한 일반적인 하수관거의 경우에 있어서는 SRB가 잠수면 이하의 측벽 및 저면에 혐기성 생물막 형태로 존재하면서 황화수소를 발생시킨다. 또한 관저에 유기성 퇴적물이 있을 경우 다량의 SRB가 분포하여 다량의 황화수소를 발생시킨다. 그러나 하수에 용존산소가 존재하는 경우에는 호기성 미생물막이 형성되며, 황화수소의 발생 및 용출을 저해시킨다.

이상에서의 하수관거 내의 오염물의 유입에 의한 생물학적인 반응을 간단하게 나타내면 다음 Fig. 2.5 과 같다.



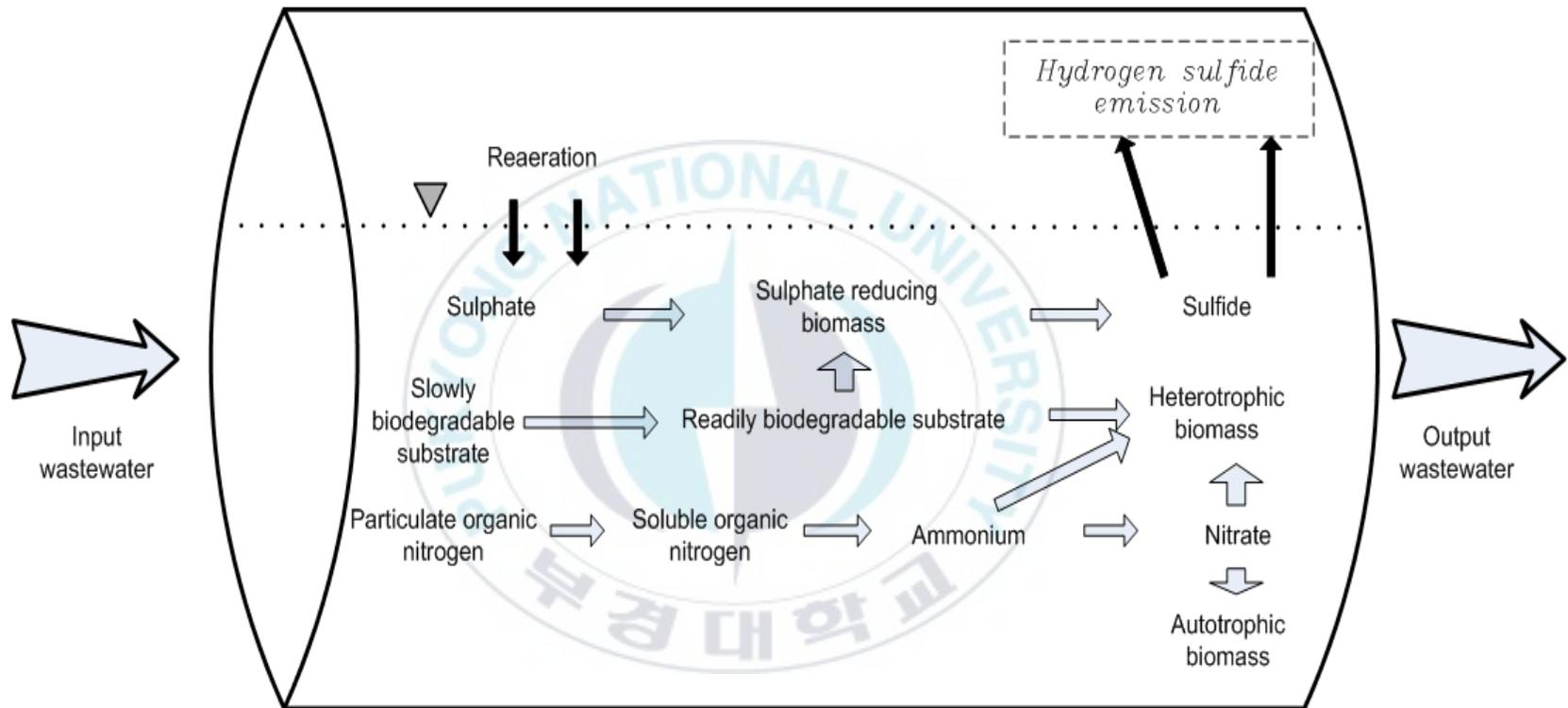


Fig. 2.5 Biological reaction in sewer.

## 2.4 활성슬러지 모델

활성슬러지 모델은 수질환경계에 관한 여러 문제를 취급하는 국제학회인 IWA (International Water Association) 의 전신인 IAWQ (International Association on Water Quality : 국제 물환경 학회) 와 IAWPRC (International Association on Water Pollutant Reserch and Control : 국제 수질오염 연구협회) 안에 설치된 ‘생물학적 폐수 처리의 설계 및 운영을 지원하기 위한 수학모델에 관한 태스크 그룹’ 이 제안한 수학모델로서 현재까지 4종류의 모델이 제안 되었다(Henze *et al.*, 1987). 일반적으로 이러한 모델은 ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3로서 약식 표현되는데 활성슬러지 프로세스에 있어서 유기물, 질소, 인 제거 반응을 기술하는 모델의 세계 표준으로서 세계적으로 인정받고 있는 모델이다.

기존의 모델이나 모델에 관한 기본정보를 정리하여 연구자 및 실무자가 공통적으로 합의할 수 있는 기본적인 수학모델을 개발하기 위해 만들어진 활성슬러지 모델은 Peterson matrix 라는 표시방식을 채용하여 슬러지의 성장에 필요한 수학적 방정식을 추가할 수도 혹은 필요없는 식을 삭제할 수도 있게 하였으며, 슬러지의 성장과 사멸 현상을 간략하게 설명할 수 있는 현상의 재현과 간결함을 나타내고, 또한 화학량론 계수나 반응속도론 정수의 표준치를 나타내면서도, 실제로 이용하는 값은 유저의 책임으로 하고 있다.

1986년 최초로 발표된 ASM1은 활성슬러지 프로세스에 있어서의 산소 수지로부터, 유기물과 질소의 제거를 시뮬레이션 하는 것이었다. 여기에 인 제거 프로세스를 추가한 것이 1995년에 발표된 ASM2이다. 인 제거와 탈질과의 관계를 수정한 ASM2d가 1999년에 개량되어 발표되었고, 그리고 같은해에 기존의 모델에 코어개념을 도입한 새로운 모델인 ASM3가 발표되었다.

활성슬러지모델이 주로 표현하는 것은 오염물질에 의한 활성슬러지중의 미생물의 증식이다. 이를 수학적으로 표현하기 위하여 반응의 진행에 따르는 물질의 형태 변화의 양적인 관계를 나타낸 화학양론식과 이러한 반응이 일어나는 반응속도인 반응속도론이 중요하다. 활성슬러지모델에서는 이러한 관계식을 이용하고 반응탱크에 있어서 물질 수지의 반응항이 표현되고 있다. 여기서 물질수지는 모델의 대상물질인 유기물 (탄소화합물), 질소, 인에 대하여 계산되게 된다. 즉, 활성슬러지 모델은 슬러지로 일하는 미생물의 증식모델이다. 오염물 (유

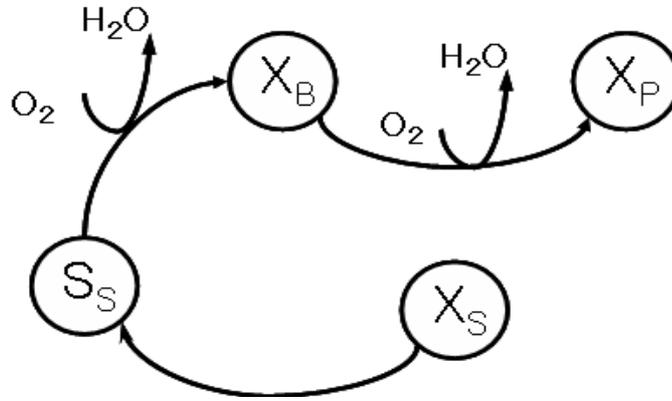
기물, 질소, 인등) 은 미생물의 증식에 이용되어 그 결과로서 제거된다.

#### 2.4.1 활성슬러지 모델의 접근법

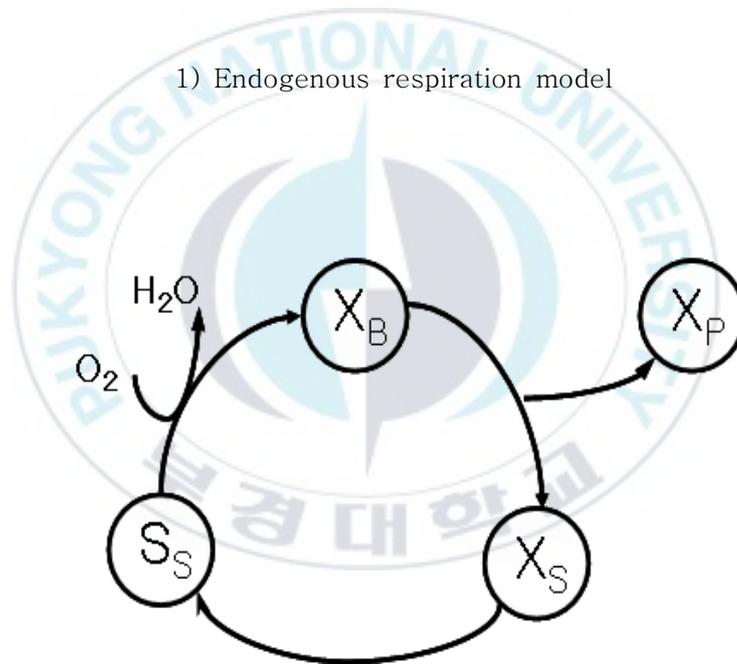
활성슬러지 공정 모델링에서 미생물 성장을 표현하는 대표적인 세 가지 접근법은 다음과 같이 분류될 수 있다.

- 1) 내생 사멸 모델 (Endogenous respiration model),
- 2) 사멸 재생산 모델 (Death regeneration model),
- 3) 2단계 성장 모델 (Two step growth model)

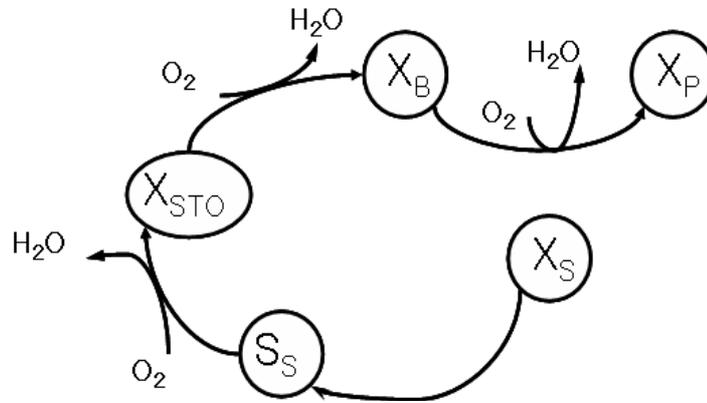
이 중에 ASM1과 ASM2, ASM2d는 미생물의 사멸에 의한 산소소모가 없으며 사멸된 미생물은 가수분해를 거쳐 다시 미생물의 성장에 재사용된다는 사멸 재생산 모델을 따르며, ASM3은 사멸공정에서 산소가 소비된다는 연구결과들과 내생 사멸 모델의 관점인 기질이 바로 미생물의 성장에 이용되는 것이 아니고 미생물 내에 저장된 후 성장에 이용되며, 저장과 성장 모두에서 산소 소비가 있다고 정의하는 2단계 성장 모델을 채택하고 있다. 미생물 성장을 표현하는 세 가지 접근법을 그림으로 나타내면 Figure 2.6과 같다.



1) Endogenous respiration model



2) Death regeneration model



3) Two step growth model

**Fig. 2.6 Modelling approach about activated sludge process.**

### 2.4.2 ASM1

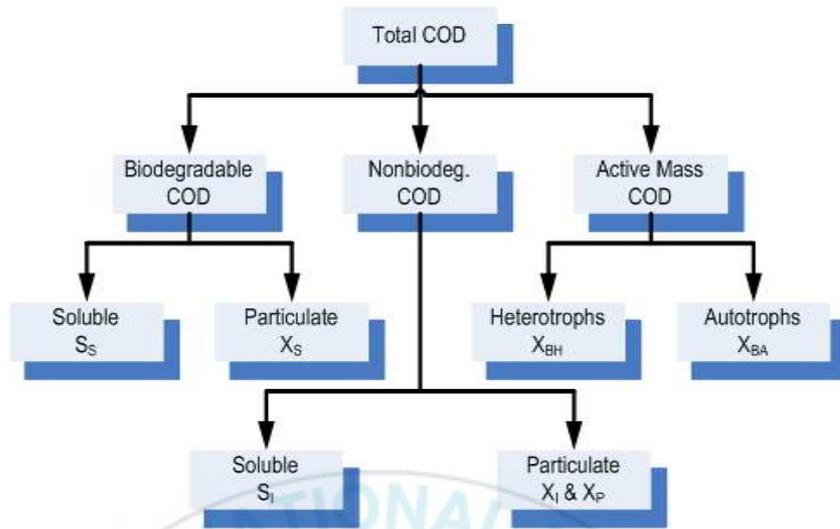
폐수중의 유기물은 몇 개의 종류로 분류할 수 있다(McKinney and Ooten,1969; Dold *et al*,1980). 그 중에서도 생물 분해성에 근거를 둔 분류법이 가장 널리 이용되는 방법으로 비생분해성 유기물은 생물학적으로 불활성이며, 그 형태가 변화하는 일 없이 활성슬러지 시스템을 통과한다. 이것은 물리적인 상태에 의해 용해성과 부유성으로 나누어 진다. 용해성 불활성 유기물 용해성 불활성 유기물( $S_I$ )은 유입하는 폐수와 같은 농도로 시스템 내에 존재한다. 한편, 입자성 불활성 유기물( $X_I$ )은 폐수보다 높은 농도로 존재한다. 그이유는,  $X_I$ 는 활성 슬러지에 원래 존재하는 것부터, 슬러지 생성에 의해 시스템 외로 제거되지만, 그 유출 속도가, 폐수의 유입 속도보다 작기 때문이다.

생물 분해성 유기물은, 쉽게분해되는것과 느리게 분해되는것 이라는 2개의 부분으로 분류된다. 모델에서는 쉽게분해되는 유기물( $S_S$ )은 용해성이고, 느리게분해되는 유기물( $X_S$ )는 부유성인 입자성으로 취급된다. 그렇지만,

실제로는  $X_S$ 속에도 용해성의 것이 존재한다.  $S_S$ 는, 종속영양 세균에 의해 직접 섭취되어 증식에 이용되는, 비교적 단순한 분자로 이루어져 있다. 섭취된 만큼의 일부는 세포 합성에 이용되어 나머지는 그 에너지원으로서 이용된다. 이 때, 세포 외에 존재하는 전자 수용체(산소 또는 질산)로 전자가 수송된다. 한편, 비교적 복잡한 분자로 구성되는  $X_S$ 는, 섭취되기 전에 세포 외에서 가수분해 되어,  $S_S$ 로 변화한다.

$S_S$ 의 소비 속도에 비해,  $X_S$ 의 가수분해 속도는 비교적 느리므로, 기질로서  $X_S$ 만이 존재할 경우에는, 가수분해가 증식의 지배인자가 된다. 또, 무산소 조건하(전자 수용체로서 질산만이 존재)에서는, 호기 조건하에서 가수분해의 속도는 작고, 혐기 조건하(산소, 질산이 모두 존재하지 않을 때)에서는, 가수분해는 전혀 일어나지 않는다(van Haandel *et al.*,1981). 이와 같이, 유기물을 2개의 형태로 나누는 것으로, 전자 수용체의 이용에 타임 래그를 일으키게 할 수 있어 산소나 질산의 이용의 시공간변화를 모델로 표현할 수 있다.

종속영양 생물  $X_{B,H}$ 는, 호기 조건하 또는 적은산소가 존재하는 조건하에서  $S_S$ 를 이용해 증식 하지만, 혐기 조건하에서는 증식 하지 않다고 가정되고 있다. 이것은 내생 호흡, 사멸, 포식 및 용균을 포함한 많은 현상에 의하여 소멸한다. 이러한 현상은 생물로부터  $X_S$ 나  $X_P$ (생물의 Decay에 의해 생기는 부유 불활성 유기물이며, 앞서 설명한  $X_I$ 와는 다르다.)에의 변환이라고 가정되고 있다(Dold *et al.*,1980). 후자는, McKinney and Ooten(1969)에 의해 제안되고 있는 내생 물질의 개념에 유사하고 있어, 반응조 내에서의 슬러지의 활성을 감소시키도록 작용한다. Decay는, 전자 수용체의 종류나 농도에 의존하지 않는다고 가정되고 있지만, 앞서 말한 것처럼, 자기 분해에 의해 생성하는  $X_S$ 로부터  $S_S$ 에의 변화는, 전자 수용체의 종류에 영향을 준다. ASM1 에서의 유기물의 분류는 다음 Fig. 2.7과 같다.



**Fig. 2.7 Classification of carbon compound in ASM1.**

폐수중의 질소 화합물은, 탄소화합물과 같게, 우선 비생물 분해성과 생물 분해성이라고 하는 2개의 획분으로 분류되어 그것들은 한층 더 세세하게 분류된다. 비생물 분해성의 부분 중 입자성의 부분은  $X_P$ 에 결합해 존재하고 있다. 용해성의 부분은, 통상은 무시할 수 있을 만큼 작은 것으로서, 모델에서는 고려하고 있지 않다. 생물 분해성의 부분은, 암모니아성 질소  $S_{NH}$ (유리 암모늄과 암모늄 이온의 합), 용해성 유기성 질소  $S_{ND}$  및 부유 유기성 질소  $X_{ND}$ 로 분류되고 있다.  $X_{ND}$ 는,  $X_S$ 의 가수분해와 동시에  $S_{ND}$ 로 변화한다.  $S_{ND}$ 는,  $X_{B,H}$ 의 작용에 의해  $S_{NH}$ 로 변화한다.  $S_{NH}$ 는,  $X_{B,H}$ 의 세포 합성의 질소원이나 질화세균  $X_{B,A}$ 의 증식을 위한 에너지원으로서 이용된다.  $S_{NH}$ 로부터 질산성 질소  $S_{NO}$ 에의 독립 영양적인 변환은, 단순화를 하기 위해서, 용존 산소  $S_0$ 를 소비하는 단일 단계의 프로세스라고 가정하고 있다. 생성된  $S_{NO}$ 는, 무산소 조건하에서  $X_{B,H}$ 에 전자수용체로서 이용되어 질소가스( $N_2$ )가 된다.  $X_{B,H}$ 나  $X_{B,A}$ 의 자기 분해에 의해  $X_{ND}$ 가 생성되어 이 사이클에 들어간다. ASM1 에서의 질소화합물의 분류는 다음 Fig. 2.8과 같다.

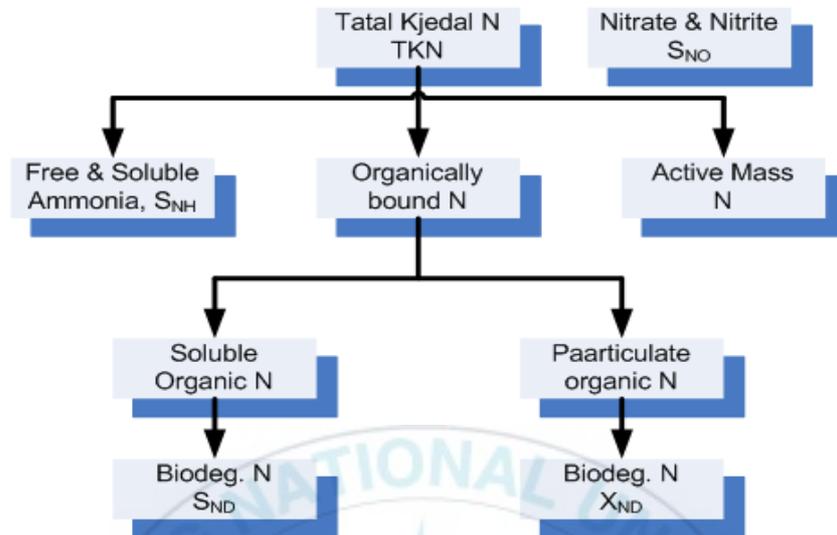


Fig. 2.8 Classification of nitrogen compound in ASM1.

$X_{B,H}$ 나  $X_{B,A}$ 가 유입 폐수 중에 존재하는 경우, 시스템의 처리 능력에 강하게 영향을 미칠 가능성이 있다. 그렇지만, 이것은 정량적으로는 분석이 불가능하다는 일반적인 견해에 의해, 태스크 그룹은 고려하지 않았다. 다만, 유입 수종의 향으로서 이것들을 물질 수지식에 추가하면, 이 현상을 모의할 수 있다.

ASM1은 타가영양 미생물 (heterotrophs) 및 자가영양 미생물 (autotrophs)의 성장과 사멸 및 가수분해 등 8개의 공정과 4종류의 탄소성 물질 및 질소성물질 등 13개의 성분 (component)을 포함하며, 알아보기 쉽도록 Table 2.2 와 같은 매트릭스 형태로 표현되었다.

Table 2.2 ASM1 Matrix

Component process j		Component i													Process Rate, $\rho_j$	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
		$S_i$	$S_s$	$X_i$	$X_s$	$X_{BH}$	$X_{BA}$	$X_p$	$S_o$	$S_{NO}$	$S_{NH}$	$S_{ND}$	$X_{ND}$	$S_{ALK}$		
1	Aerobic growth of heterotrophs		$-1/Y_H$			1			$-(1-Y_H)/Y_H$		$-i_{XB}$			$-i_{XB}/14$	$\mu_H \cdot (S_s / (K_s + S_s)) \cdot (S_o / (K_{OH} + S_o)) \cdot X_{BH} \cdot (S_{NH4} / (0.01 + S_{NH4})) \cdot (S_{ALK} / (0.01 + S_{ALK}))$	
2	Anoxic growth of heterotrophs		$-1/Y_H$			1			$-(1-Y_H)/2.86Y_H$		$-i_{XB}$			$(1-Y_H)/(14 \cdot 2.86Y_H) - i_{XB}/14$	$\mu_H \cdot (S_s / (K_s + S_s)) \cdot (K_{OH} / (K_{OH} + S_o)) \cdot (S_{NO} / (K_{OH} + S_{NO})) \cdot \eta_g \cdot X_{BH} \cdot (S_{NH4} / (0.01 + S_{NH4}))$	
3	Aerobic growth of autotrophs						1		$-(4.57 - Y_A)/Y_A$	$1/Y_A$	$-i_{XB}$ $-1/Y_A$			$-i_{XB}/14 - 1/(7 \cdot Y_A)$	$\mu_A \cdot (S_{NH} / (K_{NH} + S_{NH})) \cdot (S_o / (K_{OA} + S_o)) \cdot X_{BA} \cdot (S_{ALK} / (0.01 + S_{ALK}))$	
4	Decay of heterotrophs				$1 - f_p$	-1		$f_p$					$i_{XB} - f_p \cdot i_{XP}$		$b_H \cdot X_{BH}$	
5	Decay of Autotrophs				$1 - f_p$		-1	$f_p$					$i_{XB} - f_p \cdot i_{XP}$		$b_A \cdot X_{BA}$	
6	Ammonification of soluble organic nitrogen										1	-1		1/14	$k_a \cdot S_{ND} \cdot X_{BH}$	
7	Hydrolysis of entrapped organics		1		-1										$k_h \cdot (X_s / (K_x \cdot X_{BH} + X_s)) \cdot [((S_o / (K_{OH} + S_o)) + \eta_h) \cdot (K_{OH} / (K_{OH} + S_o)) \cdot (S_{NO} / (K_{NO} + S_{NO}))] \cdot X_{BH}$	
8	Hydrolysis of entrapped organic nitrogen											1	-1		$k_h \cdot (X_{ND} / (K_x \cdot X_{BH} + X_{ND})) \cdot [((S_o / (K_{OH} + S_o)) + \eta_h) \cdot (K_{OH} / (K_{OH} + S_o)) \cdot (S_{NO} / (K_{NO} + S_{NO}))] \cdot X_{BH}$	
		gCOD/m <sup>3</sup>	gN/m <sup>3</sup>	gN/m <sup>3</sup>	gN/m <sup>3</sup>	gN/m <sup>3</sup>	gN/m <sup>3</sup>	mole/L = kmole/m <sup>3</sup> = M								

모델이 표현하고 있는 기본적인 프로세스는, 생물의 증식, 자기 분해, 유기성 질소로부터의 암모니아 생성(암모니아화), 프럭에 포착된 유기물의 가수분해라고 하는 4개의 프로세스이다.

1) 호기 조건하에서의 증식

증식에 의해  $S_S$ 가 소비되어  $X_{B,H}$ 가 생성되는 것과 동시에,  $S_0$ 가 소비된다. 산소의 요구량은  $S_S$ 의 제거량으로부터 생성한  $X_{B,H}$ 를 뺀 것과 동일해진다.  $S_{NH}$ 는 유입수로부터 제거되어 세포의 일부가 된다.  $S_0$ 의 항을 도입한 주된 목적은,  $S_0$ 의 농도가 낮을 때 호기적인 증식을 멈추게 하기 위한 것이다.

$$\hat{\mu}_H \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left( \frac{S_0}{K_{OH} + S_0} \right) X_{B,H}$$

2) 무산소 조건하에서의 증식

호기적인 증식과 같이,  $S_S$ 가 소비되어  $X_{B,H}$ 가 생성된다.  $S_{NO}$ 는, 전자 수용체로서의 역할을 완수하여 그 소비량은,  $S_S$ 의 소비량으로부터  $X_{B,H}$ 의 생성량을 뺀 값에 비례한다.  $S_{NH}$ 는, 호기적인 증식과 같이, 생물 내에서 유기성 질소로 변화한다.

$$\hat{\mu}_H \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_0} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{B,H}$$

3)  $X_{B,A}$ 의 호기 조건하에서의 증식

$S_{NH}$ 는,  $X_{B,A}$ 의 증식의 에너지원으로서의 역할을 하고, 최종적으로  $X_{B,A}$ 와  $S_{NO}$ 로 변환된다. 또, 소량의  $S_{NH}$ 가 세포의 일부가 된다.  $S_0$ 는,  $S_{NH}$ 의 산화량에 비례해 소비된다.

$$\hat{\mu}_A \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_S} \right) \left( \frac{S_0}{K_{OA} + S_0} \right) X_{B,A}$$

4)  $X_{B,H}$ 의 사멸(Decay)

Dold *et al* (1980)에 의해 제안되고 있는 사멸-재생의 개념을 도입했다. 속도식은  $X_{B,H}$ 에 대한 일차 반응이지만, 이  $b_H$ 의 개념이나 그 값의 크기는, 통상의 자기 분해의 개념과는 다르다.  $X_{B,H}$ 는  $X_P$ 나  $X_S$ 로 변환되지만, 이 과정에서 COD는 감소하지 않고, 전자 수용체는 이용되지 않는다.

$$b_H X_{B,H}$$

5)  $X_S$ 의 가수분해(Hydrolysis)

$X_S$ 는 가수분해에 의해 감소된 만큼  $S_S$ 가 된다. 이  $S_S$ 는, 호기 조건하에서  $S_0$ 의 소비를 통하여 그리고, 무산소 조건하에서는  $S_{NO}$ 의 소비를 통하여 세포합성에 사용되어 없어진다.  $X_S$ 는 반응조 내에 축적되어, 호기 조건 혹은 무산소 조건이 되었을 때에만,  $S_S$ 로 변화해 이용된다.

$$b_A X_{B,A}$$

6)  $X_{B,A}$  사멸(Decay)

$X_{B,H}$ 의 사멸과 거의 같은 개념이 도입되었다. 왜냐하면, 집적 배양으로 관찰되는 질화세균의 사멸은, 포식이나 용균이 원인이 되고 있지만, 그 후, 종속영양 생물이 이 용균산물을 이용해 증식 할 가능성이 있기 때문이다.

$$k_a S_{ND} X_{B,H}$$

7) 암모니아화(Ammonification)

이 단순한 일차 반응식은 경험적으로 사용되어 온 것이지만,  $X_{ND}$ 의 가수분해의 속도식과 맞추어서 이용되었을 때 변화를 정확하게 모델링 할 수 있다(Dold and Marais, 1986).

$$k_h \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + (X_S / X_{B,H})} \left[ \left( \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$$

8)  $X_S$  와  $X_{ND}$  의 가수분해(Hydrolysis)

활성슬러지 시스템을 현실에 입각해서 모델링 하려면 ,  $X_S$ 의 분해가 매우 중요해진다. 왜냐면 전자 수용체의 변화의 재현에 밀접하게 관계하기 때문이다.  $X_{ND}$ 는  $X_S$ 중에 분포하는 것으로 보고, 포획된  $X_{ND}$ 의 가수분해 속도는  $X_S$ 의 가수분해 속도에 비례하는 것으로 한다.

$$k_h \frac{X_S/X_{B,H}}{K_X + (X_S/X_{B,H})} \left[ \left( \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] \left( \frac{X_{ND}}{X_S} \right) X_{B,H}$$

### 2.4.3 ASM2, 2d

ASM2는 ASM1를 발전시킨 것이다. 그 결과, ASM1보다 복잡한 모델이 되고 있어 폐수 수질이나 활성 슬러지의 특성을 표현하기 위한 새로운 성분이 도입되고 있다. 또, 새로운 반응 프로세스도 도입되었는데 그것은 주로 생물학적 인제거프로세스이다. ASM1과 ASM2와의 가장 큰 차이점은, 세포의 내부 구조를 고려한 점이다. 따라서, ASM2의 미생물은 ASM1의  $X_{B,M}$ 과 같은 단일의 성분으로 표현할 수 없게 되어 있다. 이것은, 생물학적 인제거의 프로세스를 넣기 위해서 이다.

ASM2에서는, 생물학적 반응 프로세스에 더하여, 인의 화학적 응집 침전 프로세스를 모델화하기 위해서, 두 개의 화학적 반응 프로세스가 도입되고 있다. ASM1에서는, 활성 슬러지 농도도 포함하고, 모든 부유성 유기물이 COD로 표현되고 있었다. ASM2에서는 활성 슬러지의 일부를 차지하는 성분으로서 폴리인산이 도입되고 있지만, 이 성분은 COD에는 포함되지 않는다. 여기에, ASM2에서는 총 부유물질(TSS)을 표현하는 성분의 도입을 제안하고 있다. 이것에 의해, 폴리인산이 더해지고, 유입수에 포함된다, 혹은 인의 화학적 응집 침전에 의해 생기는 무기성의 부유물질을 고려하는 것이 가능하게 되었다.

활성슬러지 모델링 그룹의 연구에 의하여 제안된, ASM2보다 간략한 모델에서는, 생물학적 영양염 제거 시설이 많은 현상을 예측하는 것이

가능했다. ASM2에 대해서도, 반응속도나 시설의 성능에 대한 기여가 작은 성분을 생략 해, 간소화하는 것이 가능하다.

ASM2에서는, 개개의 생물 세포가 가지는 내부 구조의 차이를 고려에 넣고 있는 것은 아니고, 특정의 생물군의 평균적인 거동을 기술하고 있는 것에 지나지 않는다. 현실에는, 각 세포는 각각 다른 이력을 가지기 위해, 개개의 세포의 내부 구조는 평균적인 물건과는 다를 것이다. 이 점은 중요하고, ASM2와 같은 비선형의 모델에서는, 반드시 평균적인 특성으로부터 평균적인 거동을 예측할 수 있다고는 할 수 없다. 태스크 그룹은, 이러한 문제점을 인식한 다음, 실용상의 견지로부터, 평균적인 특성에 근거하는 모델을 제안하였다.

ASM2d는, ASM2에서 인축적 미생물  $X_{PAO}$ 가 호기 조건하에서만 증식한다는 가정을,  $X_{PAO}$ 에 탈질능력을 더하고 있다. 즉, ASM2d의 PAO는 세포내 저장 유기물을 이용해 탈질을 행할 수 있으므로, 무산소 조건하에서도 증식 한다. 이 때문에, 새로운 반응 프로세스가 추가되고 있다.

#### 2.4.4 ASM3

ASM1의 접근법이 많은 엔지니어와 연구자들에게 선호되어 왔으나 최근 ASM1의 제한점 즉, 질소와 알칼리니티에 의한 성장 제한이 없다는 점, 용존상, 입자상 유기질소가 포함되어 있어 측정의 어려움이 있고 암모니아화 반응의 정량화가 어렵다는 점, 불활성 입자상 유기물질을 기원에 따라 구분함이 불가능하다는 점, 가수분해공정에 의한 영향이 매우 큰데 반해 가수분해 공정의 규명이 어렵고 동력학 계수 산출이 어렵다는 점, 호기와 무산소 조건에서 PHA와 Glycogen 저장이 실험적으로 관찰되고 있으나 ASM1에서는 이를 포함하고 있지 않다는 점, 호기와 무산소 조건에서 질산화균 사멸 속도가 동일한 것으로 나타나 SRT가 긴 경우 또는 무산소조 부피가 큰 경우 최대질산화 속도 예측이 어렵다는 점 등으로 ASM3에 대한 사용빈도가 증가하고 있다.

ASM3는 이러한 ASM1의 제한점을 보완하기 위하여 개발되었다. ASM3는 기본적으로는 유기물과 질소를 제거하는 공정을 모사할 수 있으나, 생물학적 인 제거는 고려되어 있지 않다. 그러나 ASM3는 Core model로 필요한 공정을 모

들의 형태로 기본구조의 변화 없이 삽입할 수 있도록 되어있다.

Swiss의 EAWAG에 의해 개발된 Bio-P Module은 ASM3에서 사용가능한 add-on module이다. ASM3에 Bio-P module을 결합하는 것으로 유기물과 질소는 물론 인 제거 공정에 대한 모델링이 가능해진다. Bio-P Module은 각 process와 kinetic은 대체로 ASM2d에 근거한다. 추가적으로 dPAO에 의한 인 제거에 대한 모사가 가능하고, 내생호흡공정에 대해서도 호기/무산소 반응을 완전히 분리한 것이 ASM2d와의 뚜렷한 차이라고 볼 수 있다.

#### 1) 가수분해(Hydrolysis)

유입수 내에 함유되어있는 모든  $X_S$ (Slowly biodegradable substrate)를 활성슬러지 시스템에서 사용될 수 있도록 한다. 전자 공여체에서 독립적으로 활성을 가지는 것으로 가정한다. 이 공정은 ASM1에서의 가수분해와는 구조는 같으나 다르다. 즉, 산소 소비율 및 탈질율에 있어 보다 덜 중요하다.

#### 2) $S_S$ (Readily biodegradable substrate)의 호기성 저장

호기성 조건에서  $S_S$ 를  $X_{STO}$ 형태로 저장하는 공정이다. 모든 기질은 우선 저장물질로 저장 되었다가 미생물에 동화된다. 저장물질  $X_{STO}$ 는 PHAs, Glycogen 등을 포함한다. 이 공정은  $X_H$ (Heterotrophs)에 관해서만 생성되며,  $X_H$ 의 질량에는 포함되지 않는다. 이 값은 단지 모델링을 위한 기능적인 성분으로 화학적으로 직접 규명되지 않는다. COD 보존을 만족해야 하므로 COD 분석을 통해 발견될 수 있다. 양론적인 고려에서  $X_{STO}$ 는 PHB(poly hydroxy butyrate,  $(C_4H_6O_2)_n$ )으로 가정된다.

#### 3) $S_S$ (Readily biodegradable substrate)의 무산소 저장

이 공정은 호기성 저장과 동일하며, 호기성 호흡 대신 탈질이 요구되는 에너지를 제공한다.  $X_H$ 의 일부만이 탈질을 할 수 있는지 아니면 모든  $X_H$ 가 호기성 호흡보다 느린 속도로 탈질을 할 수 있는지는 불명확하다. ASM3에서는  $X_H$ 를 두 그룹으로 구별하기보다는 anoxic heterotrophic storage rate가 감소하는 것으로 간주한다.

#### 4) $X_H$ 의 호기성 성장

$X_H$ 의 성장을 위한 기질은 전적으로  $X_{STO}$ 인 것으로 가정한다. 이 가정으로 인해 ASM3은 크게 단순화 되었다.

#### 5) $X_H$ 의 무산소 성장

호기성 성장과 유사하지만 호흡은 탈질과 관계된다.

6) 호기성 내생 호흡

이 공정은 호기성 조건하에서 관계된 호흡(decay, 내생호흡, lysis, 포식, 운동성, 죽음)을 고려함으로써 성장과 관련되지 않은 모든 형태의 미생물 손실과 에너지 수요를 기술한다. 이 공정은 ASM1에 도입된 decay공정과는 크게 다른 형태이다.

7) 무산소 내생 호흡

호기성 내생 호흡과 유사하다. 그러나 전형적으로 느리다.

8) 저장 생성물의 호기성 호흡

내생 호흡과 유사하며, 이 공정은 저장 생성물( $X_{STO}$ )이 Biomass와 함께 decay한다는 것을 확실하게 한다.

9) 저장 생성물의 무산소 호흡

호기성 공정과 유사하며, 탈질 조건에서 일어난다.

10)  $X_A$ (Autotrophs)의 성장

$X_A$ 의 호기성 성장을 나타내는 공정이다.

11)  $X_A$ 의 호기성 내생 호흡

$X_H$ 의 호기성 내생호흡과 동일하다.

12)  $X_A$ 의 무산소 내생 호흡

$X_H$ 의 무산소 내생호흡과 동일하다.

### 제 3 장 재료 및 방법

본연구에서는 오수관거를 유하하는 동안 오염물질의 변화를 모의하기 위해서 분류식 관거인 가상의 오수관거를 설정하였다. 각 관에서의 유속은 1m/s이고, 관거(C1,C2,C3,C4,C5)의 길이와 각 유입점 (P1,P2,P3)에서의 유량은 Fig. 3.1 과 같다. 각 유입점에서 모든 성분의 농도는 동일하게 적용하였다.

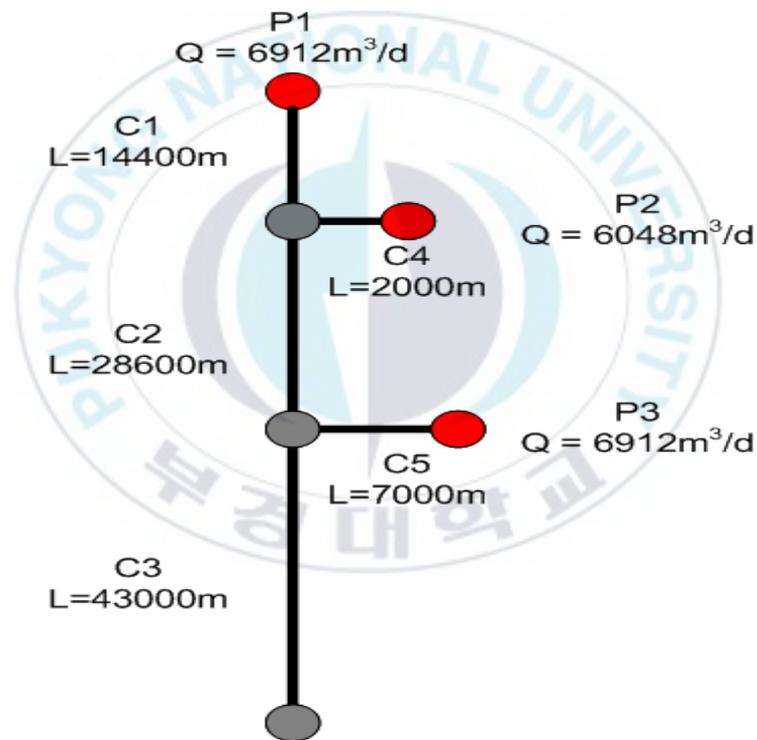


Fig. 3.1 Diagram of sewer in this study.

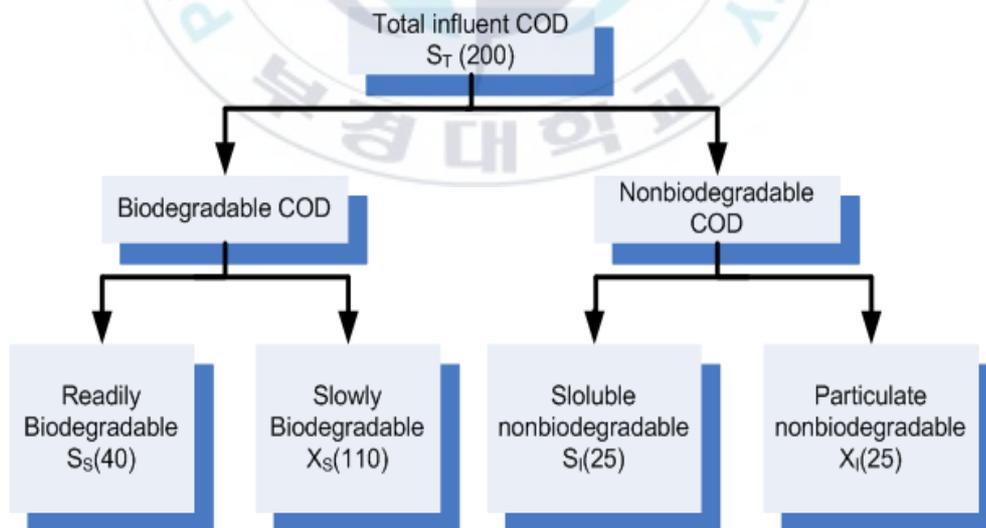
### 3.1 유입수 분율

본 연구에 사용된 오수관거로 유입되는 유입수의 농도는 Table 3.1과 같다. 유입수의 성상은 Henze *et al.*(1992)에 의하여 선행된 연구의 유입수 농도를 사용하였고, ASM1에 적용하기 위한 성상분류는 Henze *et al.*(1992)이 제시한 성상분류를 따랐다.

**Table 3.1 Concentration of inflow in this study (unit:mg/L)**

	TCOD	TN	NH4	SO4
Inflow concentration	375	48	17	30

Henze *et al.*(1992)이 제시한 유기물의 성상분류는 다음 Fig.3.2와 같고 영양염류의 분류는 Fig.3.3과 같다.



**Fig. 3.2 Characteristic of carbon compounds in inflow water.**

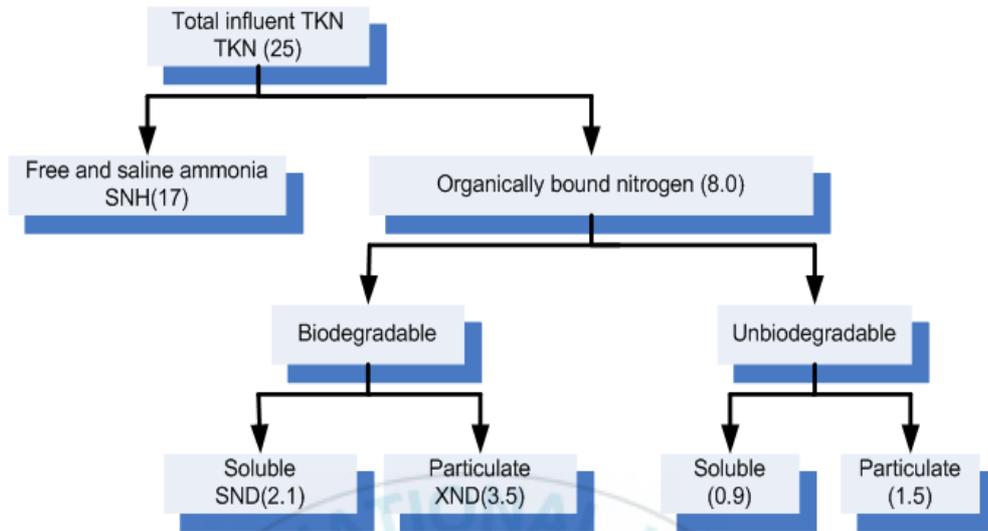


Fig. 3.3 Characteristic of nitrogen compounds in inflow water.

ASM1에 들어갈 유입수의 각 성분들 (상태변수)를 Fig.3.2와 3.3의 분류를 통하여 나타내면 다음 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Concentration of state variable in inflow water  
(unit:mg/L)

성분	농도	성분	농도
$S_{H_2S}$	30	$X_A$	0.1
$S_I$	25	$X_H$	1
$S_{ND}$	12	$X_I$	25
$S_{NH}$	15	$X_{ND}$	12
$S_{NO}$	0.5	$X_S$	179
$S_{O_2}$	1	$X_{SR}$	10
$S_S$	145		
$S_{SO_4}$	30		

### 3.2 적용된 매트릭스

본연구에서는 오수관거 내에서의 미생물 들에 의한 오염물 성상의 변화를 모의하기 위하여 ASM1을 바탕으로 Diederik Rousseau *et al.*(2005)이 제시한 황환원 박테리아에 대한 process 를 추가하였으며, 사용된 매개변수의 default값을 다음 Table 3.3에 나타내었고 Matrix와 프로세스를 Table 3.4와 Table 3.5에 제시하였다.



Table 3.3 Description of parameter (at 20°C)

Symbol	Description	Unit	Default value	Reference
b_A	Decay coefficient for autotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	0.15	Henze <i>et al.</i> (2000)
b_H	Decay coefficient for heterotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	0.62	Henze <i>et al.</i> (2000)
b_SR	Decay coefficient for acetotrophic sulphate reducing biomass	day <sup>-1</sup>	0.012	K&F(1998)
eta_g	Correction factor for anoxic growth of heterotrophs	dimensionless	0.8	Henze <i>et al.</i> (2000)
eta_h	Correction factor for hydrolysis under anoxic condition	dimensionless	0.4	Henze <i>et al.</i> (2000)
f_SI	Fraction of X_H converted to S_I during decomposition	dimensionless	0.1	Batston <i>et al.</i> (2002)
f_XI	Fraction of X_H converted to X_I during decomposition	dimensionless	0.25	Batston <i>et al.</i> (2002)
i_XB	Mass of nitrogen per mass of COD in biomass	gN/gCOD <sub>microbial</sub>	0.086	Henze <i>et al.</i> (2000)
i_XI	Mass of nitrogen per mass of COD in inert from biomass	gN/gCOD <sub>Product</sub>	0.06	Henze <i>et al.</i> (2000)
k_a	Ammonification rate	m <sup>3</sup> /gCOD <sub>microbial</sub> day	0.06	Henze <i>et al.</i> (2000)
k_h	Maximum specific hydrolysis rate	day <sup>-1</sup>	2	Henze <i>et al.</i> (2000)
k_La	Oxygen reaeration coefficient	day <sup>-1</sup>	20	
K_NH	Ammonia half-saturation coefficient for autotrophs biomass	gNH <sub>4</sub> -Nm <sup>-3</sup>	1	Henze <i>et al.</i> (2000)
K_NO	Nitrate half-saturation coefficient for denitrifying heterotrophs biomass	gNO <sub>3</sub> -Nm <sup>-3</sup>	0.5	Henze <i>et al.</i> (2000)
K_O2A	Oxygen half-saturation coefficient for autotrophs	gO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	0.4	Henze <i>et al.</i> (2000)
K_O2H	Oxygen half-saturation coefficient for heterotrophs	gO <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	0.2	Henze <i>et al.</i> (2000)
K_S	Half-saturation coefficient for hydrolysis of slowly biodegradable substrate by heterotrophs	gCOD <sub>microbial</sub> /gCOD <sub>substrate</sub>	1	Henze <i>et al.</i> (2000)
K_SH	Half-saturation coefficient for growth of heterotrophs	gCOD <sub>substrate</sub> m <sup>-3</sup>	4	Henze <i>et al.</i> (2000)
K_SO4SR	Sulphate half-saturation coefficient for acetotrophic sulphate reducing bacteria	gSm <sup>-3</sup>	19	K&F(1998)
K_SSR	Half-saturation coefficient for growth of SR on acetate	gCOD <sub>substrate</sub> m <sup>-3</sup>	24	K&F(1998)
mue_A	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	0.8	Henze <i>et al.</i> (2000)
mue_H	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	6	Henze <i>et al.</i> (2000)
mue_SR	Maximum specific growth rate for acetotrophic sulphate reducing biomass	day <sup>-1</sup>	0.18	K&F(1998)
Y_A	Yield for autotrophic biomass	gCOD <sub>microbial</sub> /gCOD <sub>substrate</sub>	0.24	Henze <i>et al.</i> (2000)
Y_H	Yield for heterotrophic biomass	gCOD <sub>microbial</sub> /gCOD <sub>substrate</sub>	0.67	Henze <i>et al.</i> (2000)
Y_SR	Yield for acetotrophic sulphate reducing bacteria	gCOD <sub>microbial</sub> /gCOD <sub>substrate</sub>	0.05	K&F(1998)

\* K&F(1998)=Kalyuzhnyi and Fedorovich(1998)

Table 3.4 Matrix of this study.

		$S_O$	$S_I$	$S_S$	$S_{NO}$	$S_{NH}$	$S_{ND}$	$S_{SO4}$	$S_{H2S}$	$X_s$	$X_I$	$X_{ND}$	$X_H$	$X_A$	$X_{SR}$	$X_{HI}$	$X_{AI}$
1	Aerobic growth of $X_H$	$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$\frac{-1}{Y_H}$		$-i_{XB}$							1				
2	Anoxic growth of $X_H$			$\frac{-1}{Y_H}$	$-\frac{1-Y_H}{2.86*Y_H}$	$-i_{XB}$							1				
3	Aerobic growth of $X_A$	$-\frac{4.57-Y_A}{Y_A}$			$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB}-\frac{1}{Y_A}$								1			
4	Aerobic growth of $X_{HI}$ in biofilm	$-\frac{1-Y_{HI}}{Y_{HI}}$		$\frac{-1}{Y_{HI}}$		$-i_{XB}$							1			1	
5	Aerobic growth of $X_{AI}$ in biofilm	$-\frac{1-Y_{AI}}{Y_{AI}}$		$\frac{-1}{Y_{AI}}$		$-i_{XB}$								1			1
6	Decay of $X_H$									$1-f_{X_I}$	$f_{X_I}$	$i_{XB}-f_{\Xi}^*i_{\Xi}$	-1				
7	Decay of $X_A$									$1-f_{X_I}$	$f_{X_I}$	$i_{XB}-f_{\Xi}^*i_{\Xi}$		-1			
8	Decay of $X_{HI}$									$1-f_{X_I}$	$f_{X_I}$	$i_{XB}-f_{\Xi}^*i_{\Xi}$				-1	
9	Decay of $X_{AI}$									$1-f_{X_I}$	$f_{X_I}$	$i_{XB}-f_{\Xi}^*i_{\Xi}$					-1
10	Ammonification					1	-1			$1-f_{X_I}$	$f_{X_I}$	$i_{XB}-f_{\Xi}^*i_{\Xi}$					
11	Hydrolysis of $X_s$		$f_{SI}$	$1-f_{SI}$													
12	Hydrolysis of $X_{ND}$						1			-1							
13	Reaeration	1															
14	Growth of $X_{SR}$			$\frac{-1}{Y_{SR}}$				$-\frac{1-Y_{SR}}{0.55*Y_{SR}}$	$\frac{1-Y_{SR}}{1.65*Y_{SR}}$						1		
15	Decay of $X_{SR}$									$1-f_{X_I}$	$f_{X_I}$				-1		
16	$H_2S$ Volatilization								-1								

**Table 3.5 Process of this study.**

	<b>Process rate</b>
1	$\mu_H \left( \frac{S_S}{K_{SH} + S_S} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_H$
2	$\mu_H \left( \frac{S_S}{K_{SH} + S_S} \right) \left( \frac{K_{O2H}}{K_{O2H} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_H$
3	$\mu_A \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O2A} + S_O} \right) X_A$
4	$\mu_{HF} \left( \frac{S_S}{K_{SH} + S_S} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_{HF}$
5	$\mu_{AF} \left( \frac{S_S}{K_{SH} + S_S} \right) \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_{AF}$
6	$b_H \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_H$
7	$b_A \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_A$
8	$b_{HF} \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_{HF}$
9	$b_{AF} \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) X_{AF}$
10	$k_a^* S_{ND}^* X_H$
11	$k_h \frac{X_S/X_H}{K_S + (X_S/X_H)} \left[ \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) + \eta_h \left( \frac{K_{O2H}}{K_{O2H} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_H$
12	$k_h \frac{X_S/X_H}{K_S + (X_S/X_H)} \left[ \left( \frac{S_O}{K_{O2H} + S_O} \right) + \eta_h \left( \frac{K_{O2H}}{K_{O2H} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] \left( \frac{X_{ND}}{X_S} \right) X_H$
13	$k_{la}^* (S_{Osat} - S_O)$
14	$\mu_{SR} \left( \frac{S_S}{K_{SSR} + S_S} \right) \left( \frac{S_{SO4}}{K_{SO4SR} + S_{SO4}} \right) X_{SR}$
15	$b_{SR} X_{SR}$
16	$k_{iv}^* S_{H2S}$

### 3.3 시뮬레이터의 선택

사용된 Simulator는 Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG)에서 개발된 AQUASIM 2.1(Computer Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems)을 사용하였다. Aquasim의 경우는 프로그램상 변화의 융통성이 있어 오수관거 내의 미생물에 의한 오염물의 변화를 ASM1 모델과 함께 시뮬레이션이 가능하다. Table 3.6는 여러 시뮬레이터의 특징의 요약이다.

Table 3.6 Simulator types

분류	Program	Advantage	Disadvantage
Text base 텍스트 기반	Aquasim ASIM	연구자에게 적합 유연성 크다 대체로 저렴 Compile 과정 필요 없음 빠른 계산속도	초보자가 사용하기 어려움
그래픽 기반	STOAT Simba	초보자가 사용하기 적합	유연성 작다 (주어진 모델만 사용 가능) 대체로 비싼 가격
범용	MATLAB ACSL + C Fortran	연구자에게 적합 유연성 대단히 크다 전문가적인 사용자에게는 상당히 편리할 수 있음	프로그램 무경험자에게 대단히 어려움

## 제 4 장 결과 및 고찰

### 4.1 유기물의 변화

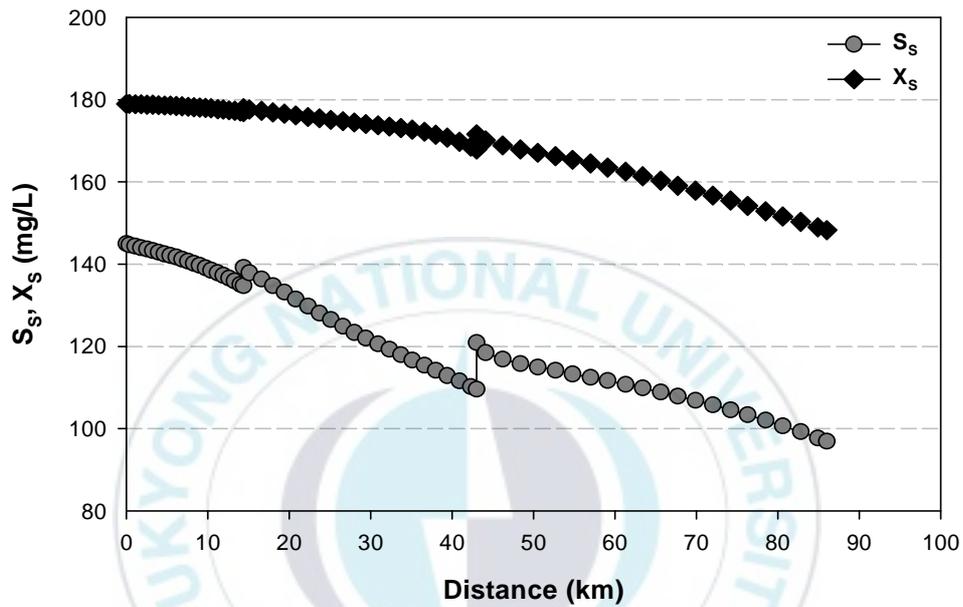


Fig. 4.1 Variation of  $X_S, S_S$  .

오수관거 내의 오염물 중 유기물의 거리에 따른 변화를 Fig 4.1과 Fig 4.2에 나타내었다. 오수가 관거를 유하하는 동안 빠르게 분해되는 물질  $S_S$ 와 느리게 분해되는 물질  $X_S$ 가 모두 감소하였음을 알 수 있었다. C1구간 까지는 빠르게 분해되는 물질인  $S_S$ 의 소비가 느리게 분해되는 물질  $X_S$ 의 소비보다 더 빠르게 나타났다. 이것은 빠르게 분해되는 물질 즉, 미생물이 쉽게 섭취할 수 있는 기질의 소비가 먼저 일어나고, 그 이후에 느리게 분해되는 물질이 빠르게 분해되는 물질로의 가수분해가 일어난 후 소비가 되기 때문이라 사료된다.

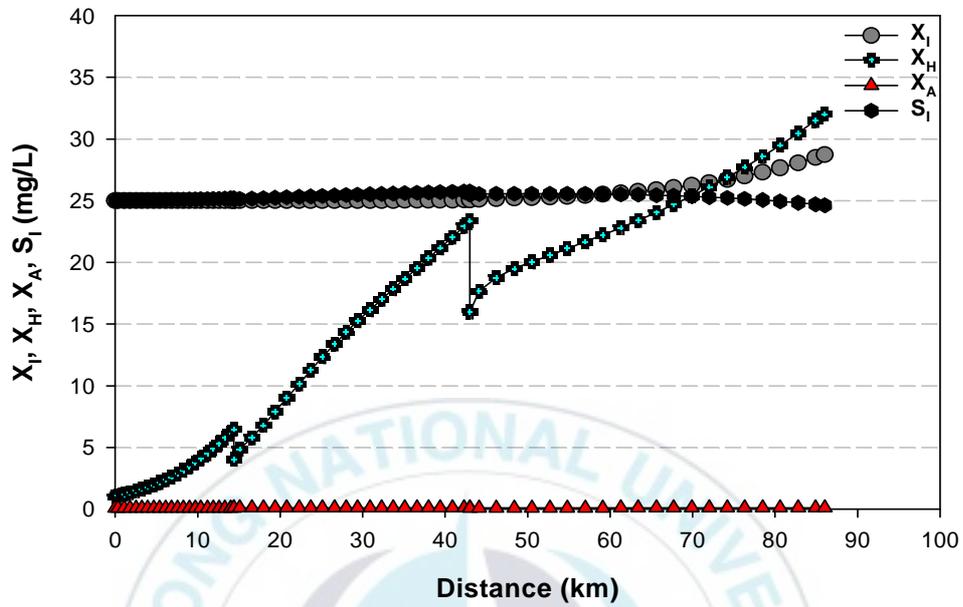


Fig. 4.2 Variation of  $X_I$ ,  $X_H$ ,  $X_A$ ,  $S_I$ .

Fig. 4.2에서 보는 바와 같이 유기물이 감소함에 따라 종속영양생물이 증가했다. 상대적으로 자가영양생물의 성장은 미미했는데 이는 오수내의 용존산소의 부족으로 인하여 질산화반응이 억제되어 자가영양생물의 성장에 전자공여체로 제공되는  $NO_2$ 의 발생이 억제되었기 때문이라 사료된다. 관거의 시작점으로부터 14400m와 43000m가 떨어진 지점에서 농도의 변화가 심한 현상을 발견할 수 있는데 이 지점에서는 C4와 C5의 합류지점이다.

## 4.2 COD 소모량

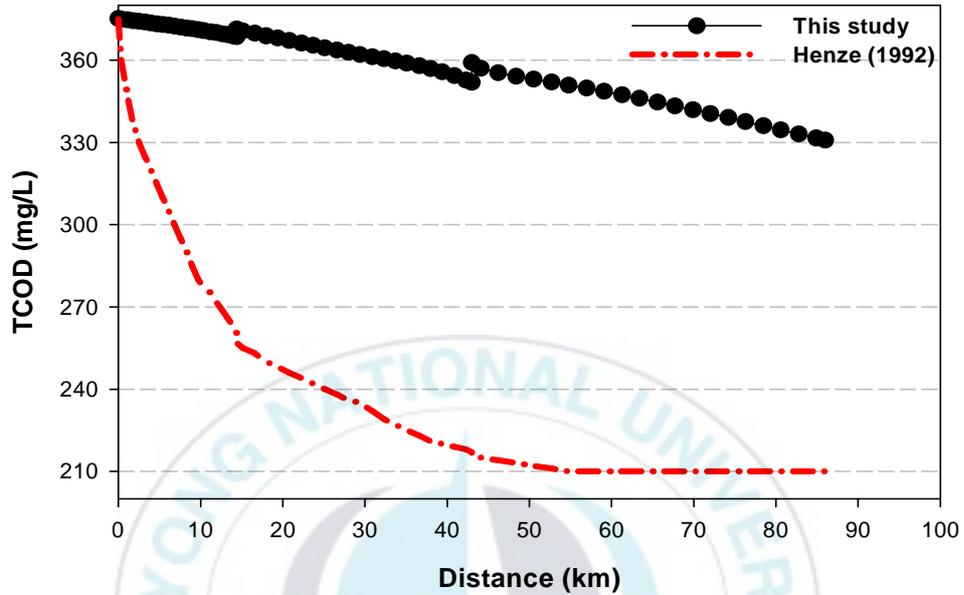


Fig. 4.3 Variation of TCOD.

Fig. 4.3은 TCOD의 변화량을 나타내었다. TCOD의 감소량은 44.45mg/L였고, 제거율은 12%로 나타났다. 결과는 점선으로 나타난 Henze의 선행된 연구와 차이를 나타냈는데 이는 본 연구에서는 오수가 오수관을 유하하는 동안 발생하는 생물학적인 반응에 기인한 오염물의 변화에 중점을 두고 물리적인 변화를 고려하지 않음에 기인함이라 사료된다.

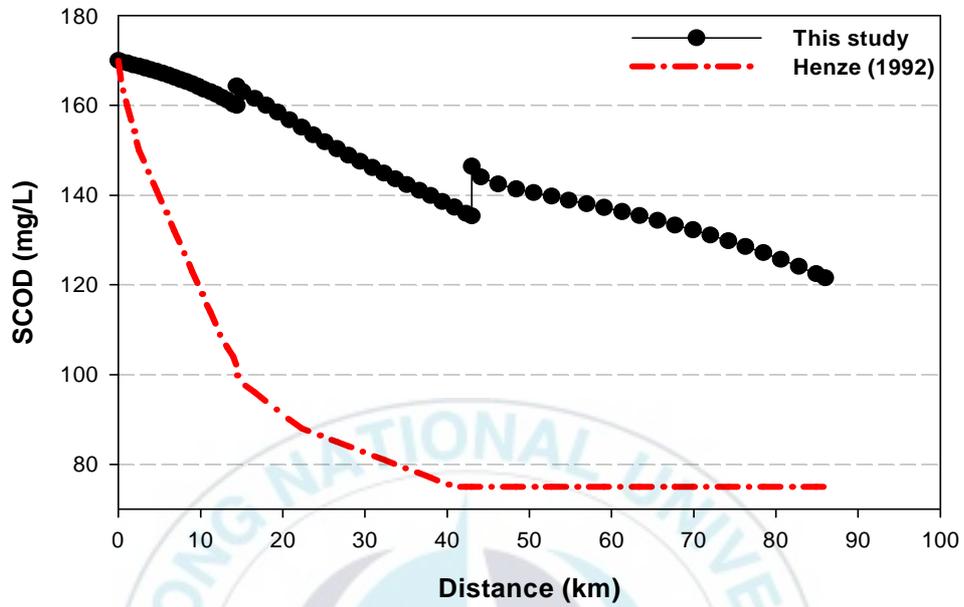


Fig. 4.4 Variation of SCOD.

Fig. 4.4는 SCOD의 변화량을 나타내었다. SCOD의 감소량은 48.43 mg/L 이고, 약 30%가 제거되었다. TCOD의 제거율은 SCOD의 제거율에 비하여 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 SCOD의 감소에 따라 미생물이 증가하였으나, 미생물 자체가 COD를 유발하여 TCOD값에 포함되었으므로 TCOD로 고려했을 때 제거율이 낮았으리라 사료된다.

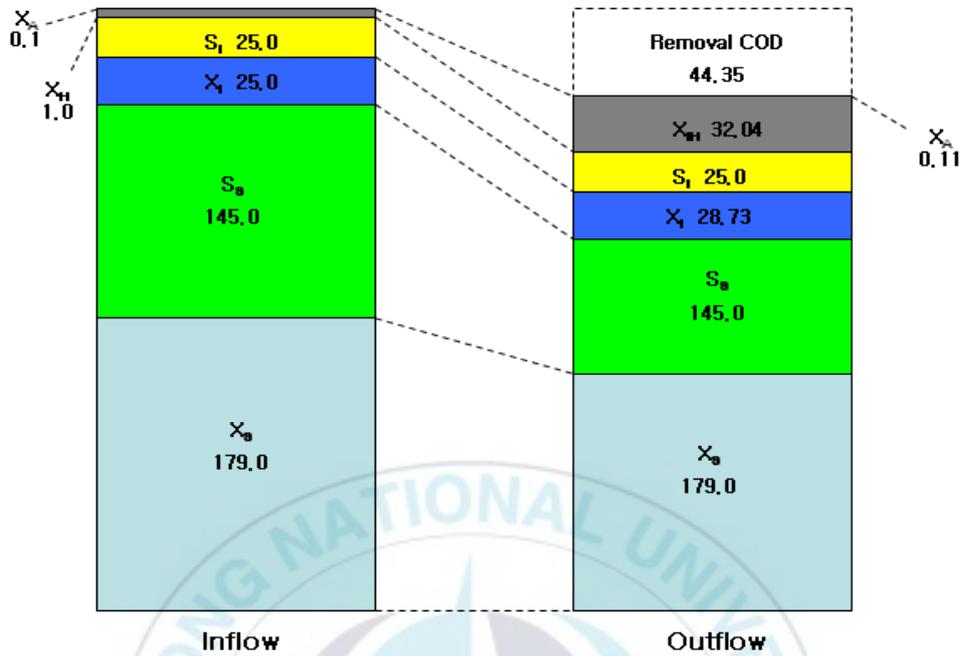


Fig. 4.5 Mass balance of organic compounds.

Fig. 4.5는 유입된 유기물이 관거를 유하하여 유출될때 야기되는 성상의 변화를 TCOD로서 보여준다. 유입된 유기물  $X_s$ 와  $S_s$ 는 324mg/L에서 약 245mg/L로 약 24%가 감소하였고 그 결과로 증속영양생물은 1mg/L에서 약 32mg/L로 300%가량 증가한 것으로 나타났다. 이때 제거된 TCOD의 양은 44.35mg/L였다. 그 외의 성분은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

### 4.3 유입과 유출의 유기물 성상

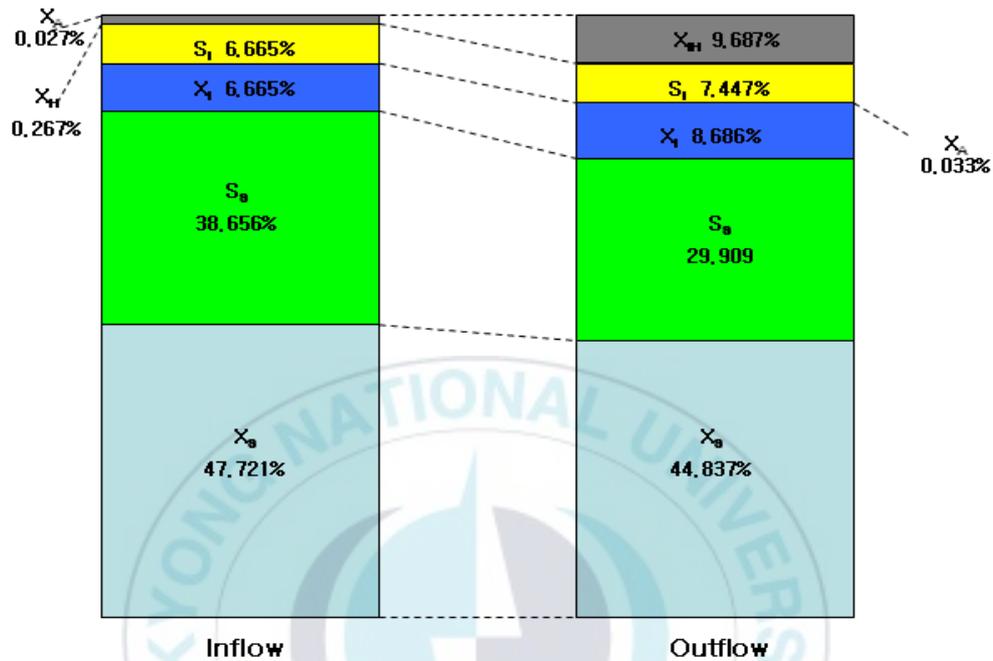


Fig. 4.6 COD fraction at the inflow and the outflow.

Fig. 4.6은 관거 내에 유입되는 지점에서의 TCOD중 각 유기물 성분의 분율과 유출되는 지점에서의 TCOD 중의 유기물 성분 분율을 나타내었다. TCOD중의 기질  $X_s$ 는 약 3%가량 감소하였으나 큰 변화는 없었고,  $S_2$ 는 초기 유입지점에서 차지하던 비율 보다 유출지점에서의 비율이 약 9% 감소한 것으로 나타났다.  $X_1$ 와  $S_1$ 는 유하하는 동안 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 기질  $X_s$ 와  $S_2$ 의 소비와 더불어 중속영양 미생물인  $X_H$ 는 약 0.3%에서 약 10%로 증가하였다.

#### 4.4 질소화합물의 변화

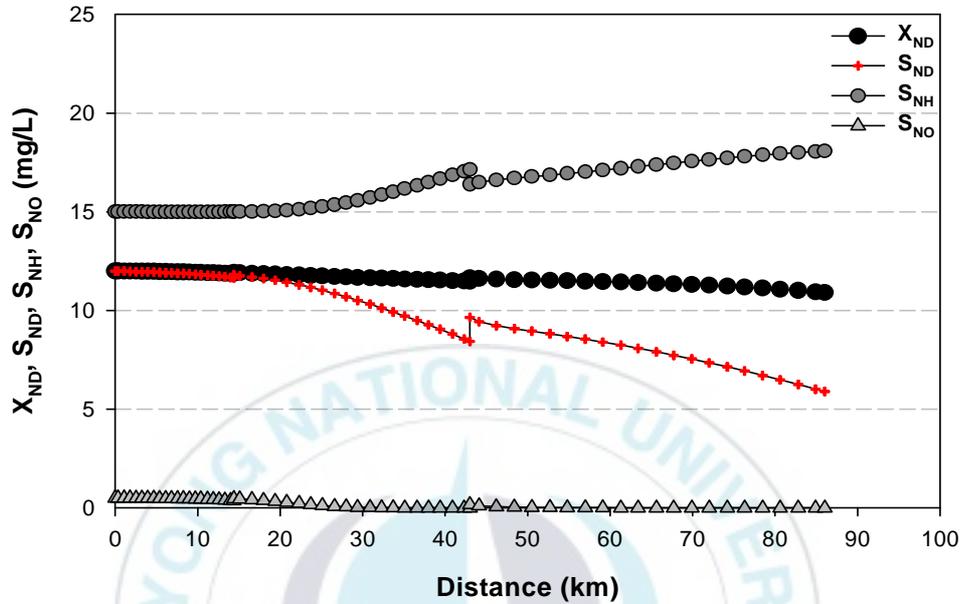
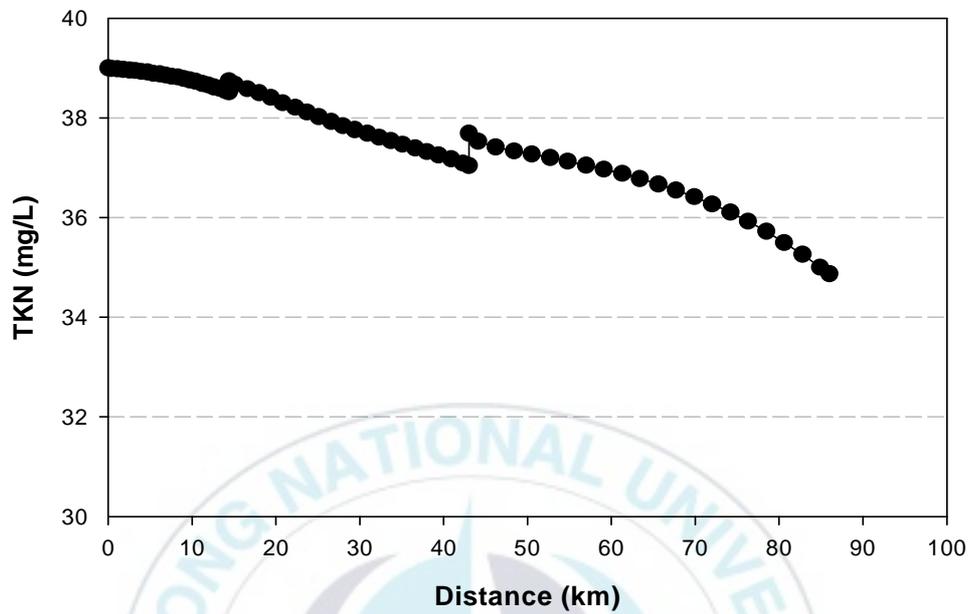


Fig. 4.7 Variation of nitrogen compounds.

질소화합물의 변화는 Fig. 4.5와 같이 나타났다. 느리게 소비되는 유기질소의 변화는 약 20000m 이전까지는 무시할 정도였으나 20000m를 지나면서 크게 변화 하였는데 이는 빠르게 소비되는 유기질소가 미생물의 성장에 사용되어 부족해 지자 느리게 분해되는 유기질소가 빠르게 분해되는 유기질소로 가수분해됨에 기인하리라 사료된다. 이때 암모니아는 약 3mg/L가 생성되었다. 관거 내의 용존산소의 부족으로 인하여 질산화반응은 거의 일어나지 않았고 유입된 적은 양의 질산성 질소는 탈질에 의하여 소비되어 0에 가까운 값으로 나타났다.



**Fig. 4.8 Variation of TKN.**

Fig. 4.8은 유기성 질소와 암모니아성 질소의 변화량을 나타내는데 TKN는 관거를 흐르는 동안 약 4mg/L가 감소하는 것으로 나타났다. 유입수에서와 유출수에서의 TKN를 구성하는 유기질소와 암모니아의 변화를 Fig. 4.9에 나타내었다. 암모니아는 가수분해에 의하여 3mg/L 가 생성 되었고 유기질소는 7mg/L 가 감소되었다.

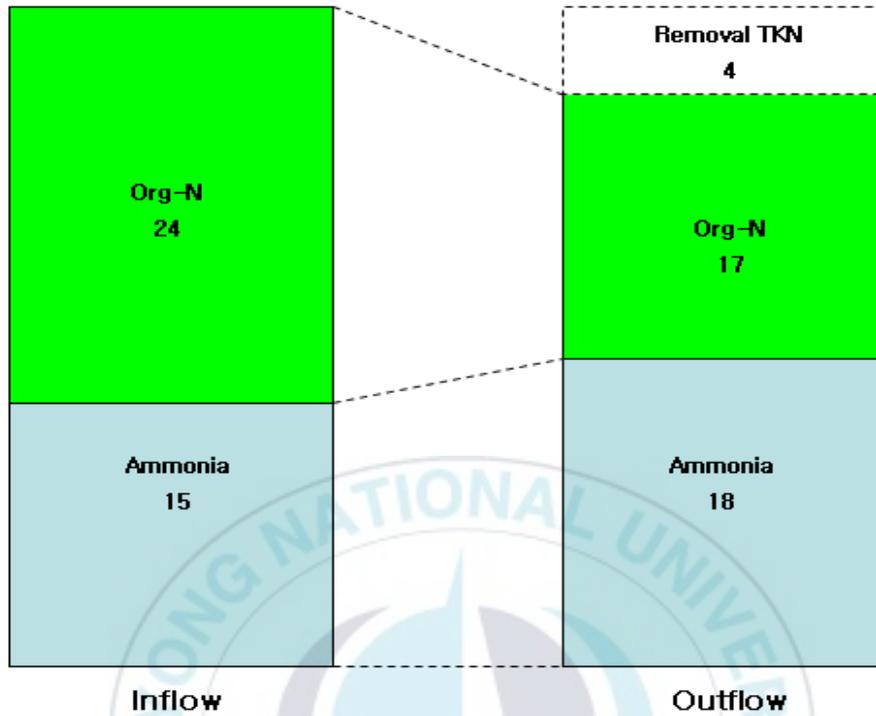


Fig. 4.9 Mass balance of nitrogen compounds.

#### 4.5 황화합물의 변화

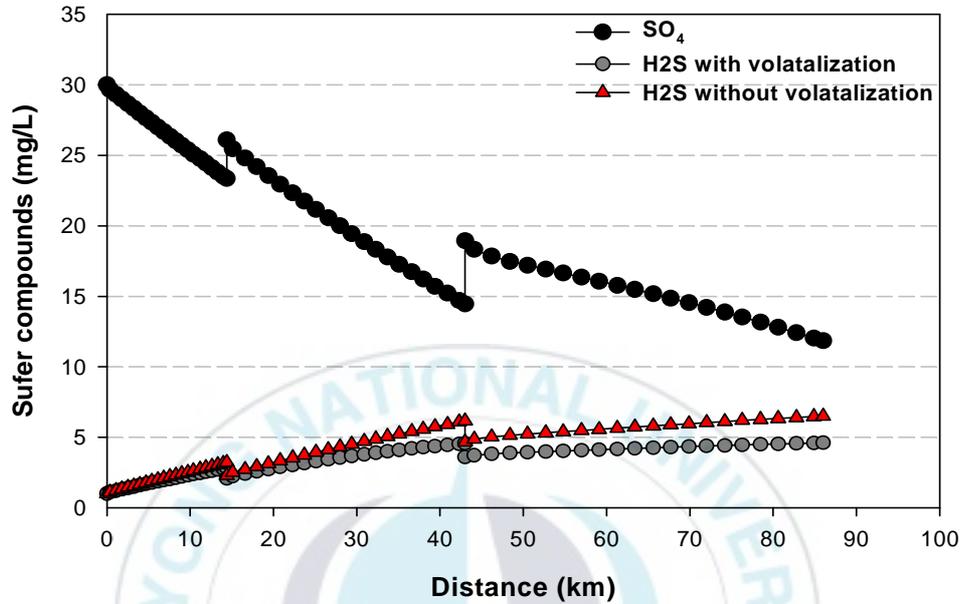


Fig. 4.10 Variation of sulfur compounds.

황화합물의 변화는 Fig. 4.10과 같이 나타났다. 거리에 따라서 황환원 박테리아의 전자공여체로 쓰이는  $SO_4$ 의 농도가 감소하면서 황화수소가 생성되는 것으로 나타났다. 황화수소의 탈기를 고려하지 않았을 때와 고려했을 때 용존성 황화수소의 차이가 2mg/L 발생하였다. 이는  $SO_4$ 의 감소로 발생한 황화수소중 2mg/L 만큼이 관거 내의 대기로 탈기되었기 때문이라 사료된다.

## 제5장 결론

1. 오수관거 내에서 오수가 유하하는 동안의 오염물질의 정상변화를 ASM1에 적용시킨 결과 유속이 1m/s 로 일정하고 24시간 유하시 TCOD의 감소량은 44.5mg/L로 였고, 12%가 제거 되었다. 또한 SCOD의 감소량은 48.43mg/L 로 약 30%가 제거 되었다.
2. 유기화합물의 정상변화는 유입지점에서  $X_S$ 가 179mg/L 였으나 유출지점에서는 148.3mg/L로,  $S_S$ 가 145mg/L에서 96.94mg/L로 감소하였으나  $X_H$ 는 1mg/L에서 32mg/L로 증가하였다.
3. 질소화합물의 정상변화는 유기질소가 7mg/L 감소하였고, 암모니아가 3mg/L 늘어났다. TKN은 4mg/L 제거 되었다.
4. 황화합물의 정상변화는  $SO_4$ 의 제거량은 18mg/L 였으며, 2mg/L의  $H_2S$ 가 가스상태로 관거내 대기로 탈기되어 관정부식에 영향을 주리라 예측된다.

## 제6장 참고 문헌

- Chen, G., Leung, D., and Hung, J.(2001). Removal of dissolved organic carbon in sanitary gravity sewer. *Journal of Environ. Eng.*, 127(4)
- Dold, P.L. and Marais, G. v. R.(1986). Evaluation of the general activated sludge model proposed by the IAWPRC task group. *Water Science and Technology*, 18(6)
- Dold, P.L. Ekama, G. A. and Marris, G. v. R. (1980). A general model for the activated sludge process. *Prog. Water Science and Technology*, 12
- Fronteau, C., Bauwens, W. and Vanrolleghem, P. A. (1997). Integrated modelling : Comparison of state variables, processes and parameters in sewer and wastewater treatment plant models, *Water Science and Technology*, 36(5)
- Gujer, W. and Larsen, T.A. (1995) The implementation of biokinetics and conservation principles in ASIM. *Water Science and Technology*, 31(2)
- Henze, M., Grady, C. P. L., Jr.Gujer, w., Marais, G. v. R. and Matsuo, T. (1987). Activated sludge Model No.1, *IAWPRC Science and Technical Report No.1.*
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. C., Marais, G. v. R. and van Loosdrecht, M. C. M. (1999). Activated Sludge ModelNo.2d. *Water Science and Technology*. 39(1)
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M. C. M. (2000). Activated sludge models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA *Scientific and Technical Report No.9.*
- Hvitved-Jacobsen (2002), Sewer process, Microbial and Chemical process engineering of sewer networks, CRC press
- Metcalf & Eddy, Inc. (1995) *Wastewater Engineering., 4th Ed.*, McGraw Hill Pub., Washington, DC.

- McKinney, R. E. and Octen, R. J. (1969). Concepts of complete mixing activated sludge. *Trans. 19th Sanit. Eng. Conf.* University of Kansas.
- Mino, T., Liu, W-T., Kurisu, F. and Matsuo, T. (1995) Modelling glycogen storage and denitrofication capability of microorganisms in enhanced biological phosphate removal processes. *Water Science and Technology.* 31(2)
- Mogens Henze, (1992). Charaterization of wastewater for modelling pf activated sludge processes, *Water Science and Technology,* 25(6)
- Petersen, E. E. (1965). Chemical Reaction Analysis. *Prentice-Hall,* Englewood Cliffs, NJ.
- Vollertsen, J. and Hvitvied-Jacobsen, T (1999). Stoichiometric and kinetics model parameters for microbial transformations of suspended solids in combined sewer system, *Water Research* 33(14)
- Vollertsen, J. and Hvitvied-Jacobsen, T (2002). Biodegradability of wastewater-a method for COD-fraction, *Water Science and Technology,* 45(3)
- 김준호, 생물학적 반응기로서의 관거 안에서의 수질 변화, 고려대학교 환경공학 석사학위논문 (2002)
- 김환기, 송호면, 하수관거의 생화학적 부식특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 22(3), (2000).
- 박중현, 하수도공학, 동명사 (1998)
- 배성우, 하수관거 내부의 생물막 형성 및 수질 특성 변화 연구, 고려대학교 환경공학과 석사학위논문 (2002)
- 이두진, 김문일 하수관거내 오염물질 성장변화 특성, 대한환경공학회지,(2005)
- 최의소, 상하수도공학, 청문각 (2001)
- 최의소, 윤주환, 박두현, 다양한 환경 조건에 따른 생물막의 특성과 수질에 대한 영향 연구, 한국과학재단 (2003)
- 한국건설기술연구원, 하수관거의 침식에 관한 연구 (1994)

한국수도협회, 하수도시설기준 (198)

환경부, 2004 하수통계 (2005)



## 제7장 부록

### 부록1. AQUASIM Input Data

```

*****
AQUASIM Version 2.1 (win/mfc) - Listing of System Definition
*****

Date and time of listing: 11/28/2006 13:55:32
*****
Variables
*****
A:      Description:
        Type:          Program Variable
        Unit:          m^2
        Reference to:  Cross Sectional Area
-----
A_R1:   Description:
        Type:          Formula Variable
        Unit:
        Expression:    0.08
-----
A_R2:   Description:
        Type:          Formula Variable
        Unit:          m^2
        Expression:    0.15
-----
A_R3:   Description:
        Type:          Real List Variable
        Unit:
        Argument:      x
        Real Data Pairs (1 pairs):
        43000          0.23
-----
b_A:    Description:
        Type:          Decay coefficient for autotrophic b
        Unit:          iomass
        Expression:    Formula Variable
        Unit:          1/d
        Expression:    b_A20
-----
b_A20:  Description:
        Type:          Decay coefficient for autotrophic b
        Unit:          iomass at 20 deg
        Value:         Constant Variable
        Unit:          1/d
        Value:         0.15
-----
b_Af:   Description:
        Type:          Decay coefficient for autotrophic b
        Unit:          iomass
        Expression:    Formula Variable
        Unit:          1/d
        Expression:    b_Af20
-----
b_Af20: Description:
        Type:          Decay coefficient for autotrophic b
        Unit:          iomass at 20 deg
        Value:         Constant Variable
        Unit:          1/d
        Value:         0.25

```

b_H:	Description:	Decay coefficient for heterotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	b_Hf20
b_H20:	Description:	Decay coefficient for heterotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.62
b_Hf:	Description:	Decay coefficient for heterotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	$b_{H20} \cdot \exp(\text{the\_bH} \cdot (T - 20))$
b_Hf20:	Description:	Decay coefficient for heterotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.4
b_SR:	Description:	Decay coefficient for autotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	$b_{SR20} \cdot \exp(\text{the\_SR} \cdot (T - 20))$
b_SR20:	Description:	Decay coefficient for autotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.012
C01_S_H2S:	Description:	
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	
	Relative Accuracy:	1e-005
	Absolute Accuracy:	1e-005
C01_S_H2Sin:	Description:	
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	30
C01_S_H2Sini:	Description:	
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	10
C02_S_I:	Description:	Soluble inert organic matter
	Type:	Dyn. Volume State Var.
	Unit:	gCOD/m <sup>3</sup>
	Relative Accuracy:	0.0001
	Absolute Accuracy:	1e-006

C02_S_lin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of S_I Formula Variable gCOD/m <sup>3</sup> 25
C02_S lini:	Description: Type: Unit: Expression:	initial concentration of S_I Formula Variable gCOD/m <sup>3</sup> 10
C03_S_ND:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Dyn. Volume State Var.   1e-005 1e-005
C03_S_NDin:	Description: Type: Unit: Expression:	Formula Variable   12
C03_S_NDini:	Description: Type: Unit: Expression:	Formula Variable   1
C04_S_NH:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Dyn. Volume State Var.   1e-005 1e-005
C04_S_NHin:	Description: Type: Unit: Expression:	Formula Variable   15
C04_S_NHini:	Description: Type: Unit: Expression:	Formula Variable   10
C05_S_NO:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Nitrate and nitrite nitrogen Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> N 0.0001 0.0001
C05_S_NOin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of S_NO3 Formula Variable g/m <sup>3</sup> N 0.5
C05_S_NOini:	Description: Type: Unit: Expression:	initial concentration of S_NO3 Formula Variable g/m <sup>3</sup> N 0.5
C06_S_O2:	Description: Type: Unit:	Dyn. Volume State Var.  

C06_S_O2in:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of S_O2 Formula Variable g/m <sup>3</sup> 1
C06_S_O2ini:	Description: Type: Unit: Expression:	initial concentration of S_O2 Formula Variable g/m <sup>3</sup> 0.0001
C06_S_O2sat:	Description: Type: Unit: Expression:	Saturation concentration of oxygen Formula Variable g/m <sup>3</sup> 1
C07_S_S:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Readily biodegradable substrate Dyn. Volume State Var. gCOD/m <sup>3</sup> 0.0001 1e-006
C07_S_Sin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of S_S Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 145
C07_S_Sini:	Description: Type: Unit: Expression:	initial concentration of S_S Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 30
C08_S_SO4:	Description: Type: Unit:	Dyn. Volume State Var.
C08_S_SO4in:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of S_SO4 Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 30
C08_S_SO4ini:	Description: Type: Unit: Expression:	initial concentration of S_SO4 Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 5
C09_X_A:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Active autotrophic biomass Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> COD 0.0001 0.0001
C09_X_Af:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Active autotrophic biomass Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> COD 0.0001 0.0001
C09_X_Afin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_A Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 0.1

C09_X_Afini:	Description: Type: Unit: Expression:	Initial concentration of X_A Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 0.5
C09_X_Ain:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_A Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 0.1
C09_X_Aini:	Description: Type: Unit: Expression:	Initial concentration of X_A Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 0.3
C10_X_H:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Active heterotrophic biomass Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> COD 0.0001 1e-006
C10_X_Hf:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Active heterotrophic biomass Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> COD 0.0001 1e-006
C10_X_Hfin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_H Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 1
C10_X_Hfini:	Description: Type: Unit: Expression:	Initial concentration of X_H Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 1
C10_X_Hin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_H Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 1
C10_X_Hini:	Description: Type: Unit: Expression:	Initial concentration of X_H Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 10
C11_X_I:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Particulate inert organic matter Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> COD 0.0001 0.0001
C11_X_Iin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_I Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 25
C11_X_Iini:	Description: Unit: Expression:	Initial concentration of X_I g/m <sup>3</sup> COD 100

C12_X_ND:	Description: Type: Unit:	Dyn. Volume State Var.
C12_X_NDin:	Description: Type: Unit: Expression:	Formula Variable  12
C12_X_NDini:	Description: Type: Unit: Expression:	Formula Variable  1
C13_X_S:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Slowly biodegradable substrate Dyn. Volume State Var. g/m <sup>3</sup> COD 0.0001 1e-006
C13_X_Sin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_S Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 179
C13_X_Sini:	Description: Type: Unit: Expression:	Initial concentration of X_S Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 100
C14_X_SR:	Description: Type: Unit: Relative Accuracy: Absolute Accuracy:	Dyn. Volume State Var.  1e-005 1e-005
C14_X_SRin:	Description: Type: Unit: Expression:	Inflow concentration of X_SR Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 10
C14_X_SRini:	Description: Type: Unit: Expression:	initial concentration of X_SR Formula Variable g/m <sup>3</sup> COD 30
eta_g:	Description:  Type: Unit: Value:	Correction factor for mueH under an oxic conditions Constant Variable  0.8
eta_h:	Description:  Type: Unit: Value:	Correction factor for hydrolysis un der anoxic conditions Constant Variable  0.4
f_SI:	Description: Type: Value:	Constant Variable 0.1

f_XI:	Description: Type: Unit: Value:	Constant Variable   0.25
i_XB:	Description: Type: Unit: Value:	Mass of nitrogen per mass of COD in biomass Constant Variable  0.086
i_XI:	Description: Type: Unit: Value:	Mass of nitrogen per mass of inert particulate COD Constant Variable  0.06
k_a:	Description: Type: Unit: Expression:	Ammonification rate Formula Variable 1/d $k_{a20} \cdot \exp(\frac{k_a}{T-20})$
k_a20:	Description: Type: Unit: Value:	Ammonification rate at 20 deg Constant Variable $m^3/(gCODd)$ 0.06
k_h:	Description: Type: Unit: Expression:	Maximum specific hydrolysis rate Formula Variable 1/d $k_{h20} \cdot \exp(\frac{k_h}{T-20})$
k_h20:	Description: Type: Unit: Value:	Maximum specific hydrolysis rate at 20 deg Constant Variable 1/d 2
k_La:	Description: Type: Unit: Value:	Constant Variable   20
k_Lv:	Description: Type: Unit: Value:	Constant Variable   0.9
K_NH:	Description: Type: Unit: Value: Standard Deviation:	Ammonia half-saturation coefficient for autotrophic biomass Constant Variable $gN/m^3$ 1 0.5
K_NO:	Description: Unit: Value:	Nitrate half-saturation coefficient for denitrifying heterotrophic biomass $gN/m^3$ 0.5

K_O2A:	Description:	Oxygen half-saturation coefficient for autotrophic biomass
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gO/m <sup>3</sup>
	Value:	0.4
K_O2H:	Description:	Oxygen half-saturation coefficient for heterotrophs
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gO/m <sup>3</sup>
	Value:	0.2
K_S:	Description:	Half-saturation coefficient for hydrolysis of slowly biodegradable substrate
	Type:	Formula Variable
	Unit:	
	Expression:	$K_{S20} * \exp(\frac{K_S}{T-20})$
K_S20:	Description:	Half-saturation coefficient for hydrolysis of slowly biodegradable substrate by heterotrophs
	Type:	Constant Variable
	Unit:	
	Value:	1
K_SH:	Description:	Half-saturation coefficient for growth of heterotrophs
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gCOD/m <sup>3</sup>
	Value:	4
K_SO4SR:	Description:	Sulphate half-saturation coefficient for acetotrophic sulphate reducing bacteria
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gCOD/m <sup>3</sup>
	Value:	19
K_SSR:	Description:	Half-saturation coefficient for growth of SR on acetate
	Type:	Constant Variable
	Unit:	gCOD/m <sup>3</sup>
	Value:	24
mue_A:	Description:	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	$mue_{Af20}$
mue_A20:	Description:	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.8
mue_Af:	Description:	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass
	Unit:	1/d
	Expression:	$mue_{A20}$

mue_Af20:	Description:	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.1
mue_H:	Description:	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	$\text{mue\_H20} * \exp(\text{the\_mueH} * (T - 20))$
mue_H20:	Description:	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	6
mue_Hf:	Description:	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	$\text{mue\_Hf20}$
mue_Hf20:	Description:	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.5
mue_SR:	Description:	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass
	Type:	Formula Variable
	Unit:	1/d
	Expression:	$\text{mue\_SR20} * \exp(\text{the\_mueSR} * (T - 20))$
mue_SR20:	Description:	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass at 20 deg
	Type:	Constant Variable
	Unit:	1/d
	Value:	0.18
Qdis:	Description:	
	Type:	Program Variable
	Unit:	$\text{m}^3/\text{d}$
	Reference to:	Discharge
Qin_R1:	Description:	
	Type:	Formula Variable
	Unit:	$\text{m}^3/\text{d}$
	Expression:	6912
Qin_R4:	Description:	
	Type:	Formula Variable
	Unit:	$\text{m}^3/\text{d}$
	Expression:	6048
Qin_R5:	Description:	
	Unit:	$\text{m}^3/\text{d}$
	Expression:	6912

T:	Description: Type: Unit: Expression:	Temperature Formula Variable degC 20
t:	Description: Type: Unit: Reference to:	Time Program Variable s Time
the_bH:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of bH Constant Variable 1/degC 0.1132
the_ka:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of ka Constant Variable 1/degC 0.0693
the_kh:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of kh Constant Variable 1/degC 0.1098
the_KS:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of KS Constant Variable 1/degC 0.1098
the_mueH:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of MueH Constant Variable 1/degC 0.0981
the_mueSR:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of MueSR Constant Variable 1/degC 0.0981
the_SR:	Description: Type: Unit: Value:	Coefficient for temperature dependence of bA Constant Variable 1/degC 0.0981
x:	Description: Type: Unit: Reference to:	Program Variable m Space Coordinate X
Y_A:	Description: Type: Unit: Value:	Yield for autotrophic biomass Constant Variable 0.24

-----  
Y\_H:           Description:           Yield for heterotrophic biomass  
                  Type:                    Constant Variable  
                  Unit:  
                  Value:                   0.67  
-----

Y\_SR:           Description:           Yield for heterotrophic biomass  
                  Type:                    Constant Variable  
                  Unit:  
                  Value:                   0.05  
                  Standard Deviation:    0.01  
                  Minimum:                0.01  
                  Maximum:                0.5  
                  Sensitivity Analysis: inactive  
                  Parameter Estimation: inactive  
-----

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

Processes

\*\*\*\*\*

rho\_01aerobicgrowthX\_H:  
                  Description:           growth of X\_H  
                  Type:                    Dynamic Process  
                  Rate:                     $\mu_{H,S} \cdot (C_{07,S,S} / (K_{SH} + C_{07,S,S})) \cdot (C_{06,S,O_2} / (K_{O_2H} + C_{06,S,O_2})) \cdot C_{10,X,H}$   
                  Stoichiometry:  
                  Variable : Stoichiometric Coefficient  
                  C10\_X\_H : 1  
                  C04\_S\_NH : -i\_XB  
                  C06\_S\_O2 : -(1-Y\_H)/Y\_H  
                  C07\_S\_S : -1/Y\_H  
-----

rho\_02anoxicgrowthX\_H:  
                  Description:           growth of X\_H  
                  Type:                    Dynamic Process  
                  Rate:                     $\mu_{H,S} \cdot (C_{07,S,S} / (K_{SH} + C_{07,S,S})) \cdot (K_{O_2H} / (K_{O_2H} + C_{06,S,O_2})) \cdot (C_{05,S,NO} / (K_{NO} + C_{05,S,NO})) \cdot \eta_g \cdot C_{10,X,H}$   
                  Stoichiometry:  
                  Variable : Stoichiometric Coefficient  
                  C10\_X\_H : 1  
                  C07\_S\_S : -1/Y\_H  
                  C05\_S\_NO : -(1-Y\_H)/(2.86\*Y\_H)  
                  C04\_S\_NH : -i\_XB  
-----

rho\_03aerobicgrowthX\_A:  
                  Description:           aerobicgrowthX\_A  
                  Type:                    Dynamic Process  
                  Rate:                     $\mu_{A,S} \cdot (C_{04,S,NH} / (K_{NH} + C_{04,S,NH})) \cdot (C_{06,S,O_2} / (K_{O_2A} + C_{06,S,O_2})) \cdot C_{09,X,A}$   
                  Stoichiometry:  
                  Variable : Stoichiometric Coefficient  
                  C09\_X\_A : 1  
                  C04\_S\_NH : -i\_XB-(1/Y\_A)  
                  C06\_S\_O2 : -(4.57-Y\_A)/Y\_A  
                  C05\_S\_NO : 1/Y\_A  
-----r

ho\_05decayX\_A:Description:           decay of X\_A  
                  Type:                    Dynamic Process  
                  Rate:                     $b_A \cdot (C_{06,S,O_2} / (K_{O_2A} + C_{06,S,O_2})) \cdot C_{09,X,A}$   
                  Stoichiometry:

Variable : Stoichiometric Coefficient  
 C09\_X\_A : -1  
 C13\_X\_S : 1-f\_XI  
 C12\_X\_ND : i\_XB-f\_XI\*i\_XI  
 C11\_X\_I : f\_XI

rho\_06ammonification:  
 Description: ammonification  
 Type: Dynamic Process  
 Rate:  $k_a * C03\_S\_ND * C10\_X\_H$   
 Stoichiometry:  
 Variable : Stoichiometric Coefficient  
 C03\_S\_ND : -1  
 C04\_S\_NH : 1

rho\_07hydrolysisX\_S:  
 Description: hydrolysis of X\_S  
 Type: Dynamic Process  
 Rate:  $k_h * ((C13\_X\_S / C10\_X\_H) / (K_S + (C13\_X\_S / C10\_X\_H))) * ((C06\_S\_O2 / (K_{O2H} + C06\_S\_O2)) + (\eta_h * (K_{O2H} / (K_{O2H} + C06\_S\_O2))) * (C05\_S\_NO / (K_{NO} + C05\_S\_NO))) * C10\_X\_H$   
 Stoichiometry:  
 Variable : Stoichiometric Coefficient  
 C13\_X\_S : -1  
 C07\_S\_S : 1-f\_SI  
 C02\_S\_I : f\_SI

rho\_08hydrolysisX\_ND:  
 Description: hydrolysis of X\_ND  
 Type: Dynamic Process  
 Rate:  $k_h * ((C13\_X\_S / C10\_X\_H) / (K_S + (C13\_X\_S / C10\_X\_H))) * ((C06\_S\_O2 / (K_{O2H} + C06\_S\_O2)) + (\eta_h * (K_{O2H} / (K_{O2H} + C06\_S\_O2))) * (C05\_S\_NO / (K_{NO} + C05\_S\_NO))) * (C12\_X\_ND / C13\_X\_S) * C10\_X\_H$   
 Stoichiometry:  
 Variable : Stoichiometric Coefficient  
 C12\_X\_ND : -1  
 C03\_S\_ND : 1

rho\_10reaeration:  
 Description: reaeration  
 Type: Dynamic Process  
 Rate:  $k_{La} * (C06\_S\_O2_{sat} - C06\_S\_O2)$   
 Stoichiometry:  
 Variable : Stoichiometric Coefficient  
 C06\_S\_O2 : 1

rho\_11growthSR:  
 Description: growth of SR  
 Type: Dynamic Process  
 Rate:  $\mu_{e\_SR} * (C07\_S\_S / (K_{SSR} + C07\_S\_S)) * (C08\_S\_SO4 / (K_{SO4SR} + C08\_S\_SO4)) * C14\_X\_SR$   
 Stoichiometry:  
 Variable : Stoichiometric Coefficient  
 C07\_S\_S : -1/Y\_SR  
 C01\_S\_H2S : (1-Y\_SR)/(1.65\*Y\_SR)  
 C08\_S\_SO4 : -(1-Y\_SR)/(0.55\*Y\_SR)  
 C14\_X\_SR : 1

rho\_12decaySR: Description: decay of SR  
Type: Dynamic Process  
Rate:  $b_{SR} * C_{14\_X\_SR}$   
Stoichiometry:  
Variable : Stoichiometric Coefficient  
C14\_X\_SR : -1  
C13\_X\_S : 1-f\_XI  
C11\_X\_I : f\_XI

---

rho\_13H2SVolatilization:  
Description: H2S Volatilization  
Type: Dynamic Process  
Rate:  $k_{Lv} * C_{01\_S\_H2S}$   
Stoichiometry:  
Variable : Stoichiometric Coefficient  
C01\_S\_H2S : -1

---

rho\_14aerobicgrowthX\_Hf:  
Description: growth of X\_Hf  
Type: Dynamic Process  
Rate:  $\mu_{Hf} * (C_{07\_S\_S} / (K_{SH} + C_{07\_S\_S})) * (C_{06\_S\_O2} / (K_{O2H} + C_{06\_S\_O2})) * C_{10\_X\_Hf}$   
Stoichiometry:  
Variable : Stoichiometric Coefficient  
C10\_X\_Hf : 1  
C04\_S\_NH : -i\_XB  
C06\_S\_O2 : -(1-Y\_H)/Y\_H  
C07\_S\_S : -1/Y\_H

---

rho\_15decayX\_Af:  
Description: decay of X\_Af  
Type: Dynamic Process  
Rate:  $b_{Af} * (C_{06\_S\_O2} / (K_{O2H} + C_{06\_S\_O2})) * C_{09\_X\_Af}$   
Stoichiometry:  
Variable : Stoichiometric Coefficient  
C09\_X\_Af : -1  
C11\_X\_I : f\_XI  
C13\_X\_S : 1-f\_XI  
C12\_X\_ND : i\_XB-f\_XI\*i\_XI

---

rho\_15decayX\_Hf:  
Description: decay of X\_Hf  
Type: Dynamic Process  
Rate:  $b_{Hf} * (C_{06\_S\_O2} / (K_{O2H} + C_{06\_S\_O2})) * C_{10\_X\_Hf}$   
Stoichiometry:  
Variable : Stoichiometric Coefficient  
C10\_X\_Hf : -1  
C11\_X\_I : f\_XI  
C13\_X\_S : 1-f\_XI  
C12\_X\_ND : i\_XB-f\_XI\*i\_XI

---

rho\_16aerobicgrowthX\_Af:  
Description: growth of X\_Af  
Type: Dynamic Process  
Rate:  $\mu_{Af} * (C_{07\_S\_S} / (K_{SH} + C_{07\_S\_S})) * (C_{06\_S\_O2} / (K_{O2H} + C_{06\_S\_O2})) * C_{09\_X\_Af}$   
Stoichiometry:  
Variable : Stoichiometric Coefficient  
C09\_X\_Af : 1  
C04\_S\_NH : -i\_XB

C06\_S\_O2 :  $-(1-Y_H)/Y_H$   
 C07\_S\_S :  $-1/Y_H$

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 Compartments  
 \*\*\*\*\*

mix1: Description: Mixed Reactor Compartment  
 Type: Mixed Reactor Compartment  
 Active Processes:  
 Initial Conditions:  
 Inflow: 0  
 Loadings:  
 Volume: 0.1

-----  
 mix2: Description: Mixed Reactor Compartment  
 Type: Mixed Reactor Compartment  
 Active Processes:  
 Initial Conditions:  
 Inflow: 0  
 Loadings:  
 Volume: 0.1

-----  
 R1: Description: Advective-Diffusive Comp.  
 Type: Advective-Diffusive Comp.  
 Compartment Index: 101  
 Initial Conditions:  
 Variable(Zone) : Initial Condition  
 C09\_X\_A(Water Body) : C09\_X\_Aini  
 C10\_X\_H(Water Body) : C10\_X\_Hini  
 C11\_X\_I(Water Body) : C11\_X\_Iini  
 C13\_X\_S(Water Body) : C13\_X\_Sini  
 C12\_X\_ND(Water Body) : C12\_X\_NDini  
 C14\_X\_SR(Water Body) : C14\_X\_SRini  
 Inflow: Qin\_R1  
 Loadings:  
 Variable : Loading  
 C02\_S\_I : Qin\_R1\*C02\_S\_Iin  
 C07\_S\_S : Qin\_R1\*C07\_S\_Sin  
 C10\_X\_H : Qin\_R1\*C10\_X\_Hin  
 C11\_X\_I : Qin\_R1\*C11\_X\_Iin  
 C13\_X\_S : Qin\_R1\*C13\_X\_Sin  
 C01\_S\_H2S : Qin\_R1\*C01\_S\_H2Sin  
 C03\_S\_ND : Qin\_R1\*C03\_S\_NDin  
 C04\_S\_NH : Qin\_R1\*C04\_S\_NHin  
 C06\_S\_O2 : Qin\_R1\*C06\_S\_O2in  
 C08\_S\_SO4 : Qin\_R1\*C08\_S\_SO4in  
 C12\_X\_ND : Qin\_R1\*C12\_X\_NDin  
 C14\_X\_SR : Qin\_R1\*C14\_X\_SRin  
 C05\_S\_NO : Qin\_R1\*C05\_S\_NOin  
 C09\_X\_A : Qin\_R1\*C09\_X\_Ain  
 Lateral Inflow: 0  
 Start Coordinate: 0  
 End Coordinate: 14400  
 Cross Section: A\_R1  
 Num. of Grid Pts: 22 (low resolution)

-----  
 R2: Description: Advective-Diffusive Comp.  
 Type: Advective-Diffusive Comp.  
 Compartment Index: 102  
 Initial Conditions:  
 Variable(Zone) : Initial Condition

C10\_X\_H(Water Body) : C10\_X\_Hini  
 C11\_X\_I(Water Body) : C11\_X\_Ini  
 C13\_X\_S(Water Body) : C13\_X\_Sini  
 C12\_X\_ND(Water Body) : C12\_X\_NDini  
 C14\_X\_SR(Water Body) : C14\_X\_SRini  
 C09\_X\_A(Water Body) : C09\_X\_Aini  
 Inflow: 0  
 Loadings:  
 Lateral Inflow: 0  
 Start Coordinate: 14400  
 End Coordinate: 43000  
 Cross Section: A\_R2  
 Num. of Grid Pts: 22 (low resolution)

---

R3: Description: Advective-Diffusive Comp.  
 Type: Advective-Diffusive Comp.  
 Compartment Index: 103  
 Initial Conditions:  
 Variable(Zone) : Initial Condition  
 C10\_X\_H(Water Body) : C10\_X\_Hini  
 C11\_X\_I(Water Body) : C11\_X\_Ini  
 C13\_X\_S(Water Body) : C13\_X\_Sini  
 C12\_X\_ND(Water Body) : C12\_X\_NDini  
 C14\_X\_SR(Water Body) : C14\_X\_SRini  
 C09\_X\_A(Water Body) : C09\_X\_Aini  
 Inflow: 0  
 Loadings:  
 Lateral Inflow: 0  
 Start Coordinate: 43000  
 End Coordinate: 86000  
 Cross Section: A\_R3  
 Num. of Grid Pts: 22 (low resolution)

---

R4: Description: Advective-Diffusive Comp.  
 Type: Advective-Diffusive Comp.  
 Compartment Index: 201  
 Initial Conditions:  
 Variable(Zone) : Initial Condition  
 C10\_X\_H(Water Body) : C10\_X\_Hini  
 C11\_X\_I(Water Body) : C11\_X\_Ini  
 C13\_X\_S(Water Body) : C13\_X\_Sini  
 C12\_X\_ND(Water Body) : C12\_X\_NDini  
 C14\_X\_SR(Water Body) : C14\_X\_SRini  
 C09\_X\_A(Water Body) : C09\_X\_Aini  
 Inflow: Qin\_R4  
 Loadings:  
 Variable : Loading  
 C02\_S\_I : Qin\_R4\*C02\_S\_Iin  
 C07\_S\_S : Qin\_R4\*C07\_S\_Sin  
 C10\_X\_H : Qin\_R4\*C10\_X\_Hin  
 C11\_X\_I : Qin\_R4\*C11\_X\_Ini  
 C13\_X\_S : Qin\_R4\*C13\_X\_Sin  
 C01\_S\_H2S : Qin\_R4\*C01\_S\_H2Sin  
 C03\_S\_ND : Qin\_R4\*C03\_S\_NDin  
 C04\_S\_NH : Qin\_R4\*C04\_S\_NHin  
 C06\_S\_O2 : Qin\_R4\*C06\_S\_O2in  
 C08\_S\_SO4 : Qin\_R4\*C08\_S\_SO4in  
 C12\_X\_ND : Qin\_R4\*C12\_X\_NDin  
 C14\_X\_SR : Qin\_R4\*C14\_X\_SRin  
 C05\_S\_NO : Qin\_R1\*C05\_S\_NOin  
 C09\_X\_A : Qin\_R1\*C09\_X\_Ain  
 Lateral Inflow: 0

Start Coordinate: 0  
 End Coordinate: 2000  
 Cross Section: 0.07  
 Num. of Grid Pts: 22 (low resolution)

R5: Description:  
 Type: Advective-Diffusive Comp.  
 Compartment Index: 301  
 Initial Conditions:  
 Variable(Zone) : Initial Condition  
 C10\_X\_H(Water Body) : C10\_X\_Hini  
 C11\_X\_I(Water Body) : C11\_X\_Ini  
 C13\_X\_S(Water Body) : C13\_X\_Sini  
 C12\_X\_ND(Water Body) : C12\_X\_NDini  
 C14\_X\_SR(Water Body) : C14\_X\_SRini  
 C09\_X\_A(Water Body) : C09\_X\_Aini  
 Inflow: Qin\_R5  
 Loadings:  
 Variable : Loading  
 C02\_S\_I : Qin\_R5\*C02\_S\_Ini  
 C07\_S\_S : Qin\_R5\*C07\_S\_Sin  
 C10\_X\_H : Qin\_R5\*C10\_X\_Hin  
 C11\_X\_I : Qin\_R5\*C11\_X\_Ini  
 C13\_X\_S : Qin\_R5\*C13\_X\_Sin  
 C01\_S\_H2S : Qin\_R5\*C01\_S\_H2Sin  
 C03\_S\_ND : Qin\_R5\*C03\_S\_NDin  
 C04\_S\_NH : Qin\_R5\*C04\_S\_NHin  
 C06\_S\_O2 : Qin\_R5\*C06\_S\_O2in  
 C08\_S\_SO4 : Qin\_R5\*C08\_S\_SO4in  
 C12\_X\_ND : Qin\_R5\*C12\_X\_NDin  
 C14\_X\_SR : Qin\_R5\*C14\_X\_SRin  
 C05\_S\_NO : Qin\_R1\*C05\_S\_NOin  
 C09\_X\_A : Qin\_R1\*C09\_X\_Ain  
 Lateral Inflow: 0  
 Start Coordinate: 0  
 End Coordinate: 7000  
 Cross Section: 0.08  
 Num. of Grid Pts: 22 (low resolution)

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*  
 Links  
 \*\*\*\*\*

L01\_R1m1: Type: Advective Link  
 Link Index: 0  
 Compartment In: R1  
 Connection In: Outlet  
 Compartment Out: mix1  
 Connection Out: Inflow  
 Bifurcations:

L02\_m1R2: Type: Advective Link  
 Link Index: 0  
 Compartment In: mix1  
 Connection In: Outflow  
 Compartment Out: R2  
 Connection Out: Inlet  
 Bifurcations:

L03\_R2m2: Type: Advective Link  
 Link Index: 0

Compartment In: R2  
Connection In: Outlet  
Compartment Out: mix2  
Connection Out: Inflow  
Bifurcations:

-----  
L04\_m2R3: Type: Advective Link  
Link Index: 0  
Compartment In: mix2  
Connection In: Outflow  
Compartment Out: R3  
Connection Out: Inlet  
Bifurcations:

-----  
L05\_R4m1: Type: Advective Link  
Link Index: 0  
Compartment In: R4  
Connection In: Outlet  
Compartment Out: mix1  
Connection Out: Inflow  
Bifurcations:

-----  
L06\_R5m2: Type: Advective Link  
Link Index: 0  
Compartment In: R5  
Connection In: Outlet  
Compartment Out: mix2  
Connection Out: Inflow  
Bifurcations:

\*\*\*\*\*  
Definitions of Calculations  
\*\*\*\*\*

calc1: Description:  
Calculation Number: 0  
Initial Time: 0  
Initial State: given, made consistent  
Step Size: 0.1  
Num. Steps: 100  
Status: active for simulation  
active for sensitivity analysis

\*\*\*\*\*

## 감사의 글

석사 2년... 짧지도 그렇지만 길지도 않았던 시간이 이제 마지막 한 페이지를 남겨 두고 있습니다. 논문수정의 완료와 더불어 가벼운 마음으로 시작했던 감사의 글 쓰기가 논문쓰는것 만큼이나 어려운줄 이제야 새삼 느낍니다. 2년간의 생활의 큰 흔적 때문이겠지요... 돌이켜 보면 때론 즐겁고, 때론 힘들었던 석사생활이 논문을 쓰는 요 몇 달의 기간과 너무나도 닮은것 같습니다. 앞에서 풀어주신 여러 교수님들 그리고 선배님들, 그리고 잘 따라와준 고마운 후배들 그리고 동생들... 이 모든이가 있었기에 지금의 저도 논문도 존재하는거 같습니다.

학문의 길을 열어 주시며 언제나 변함없는 사랑과 격려로 때로는 아버지처럼 질책과 포근한 배려로 오늘의 영광을 안겨주신 이병헌 교수님께 깊이 감사드리며, 더욱 성실하고 겸허한 마음으로 학문에 정진할 것을 다짐합니다. 환경에 대한 기본을 늘 강조하시던 박청길 교수님, 지금도 잊지 못하는 수업시간의 카리스마 이제군 교수님, 많은 조언과 격려를 함께 해주시는 여석준 교수님, 항상 응원의 격려를 아끼 않으셨던 강임석 교수님, 복도에서 인사드리면 언제나 반갑게 받아주시는 김일규 교수님, 재밌는 수업과 석사생활과 앞으로 진로에 대해서 걱정해 주시고 조언을 아끼지 않으셨던 김상단 교수님, 언제나 편안한 삼촌같은 이석모 교수님께도 감사드립니다.

집안일 하시라 실험실 돌보시라 논문쓰시라... 이모든 일을 훌륭하게 해 내시고 언제나 큰 누님같이 사랑으로 돌봐주신 은주선배님.. 이시대의 진정한 원더우먼이십니다!!! 앞으로 행복하고 즐거운 일만 함께 하실꺼예요!! 못난 후배이자 동생 논문쓴다고 일 끝나고 피곤하실 텐데도 늦게 실험실 찾아 주셔서 질책과 조언 아끼지 않으셨던 이창근선배님, 그리고 대수쌤, 성재쌤.. 제가 얼마나 고마워 하는지 아시죠?? 앞으로 하시는일 더욱더 번창하시고 행복하시길 기원합니다. 가끔 오시지만 오실때마다 좋은 말씀 잊지 않으시던 박걸서 선배님, 그리고 어려운 실험 부탁에도 시원하게 해결해 주시는 권동민 선배님, 멀리 서울에서 자주 오시지는 못하지만 전화로 격려와 조언 잊지 않으셨던 김정래선배님, IC 분석하로 오셔서 기기 빌려 쓴다고 미안해

하시지만 고장난거 다 고쳐주고 가시는 송원철 선배님 정말 감사드립니다. 그리고 명환쌤!! 맨날 투덜대고 심질부러도 큰 덩치 만큼이나 넓은 마음과 아량으로 덮어줘서 고맙습니다. 쌤 열심히 하니까 회사서 인정도 받고 더불어 회사도 크게 번창하실 겁니다. 집안사정 때문에 석사생활 다 끝내지 못하고 논문수정 말미에 반응조 돌린다고 끌려온(?) 우리동생 용덕아.. 쌤말 언제나 허투루 들지 않고 잘 따리와 줘서 너무 고맙고 우리 열심히 하자. 심심할 때 불쑥 나타나 음료수 한잔과 담배 한대 같이 해준 우리 동생 용민아... 열심히 해서 좋은 석사 되고 니 꿈 꼭 이뤄라. 추위 많이 타서 겨울에 항상 옷 몇겹씩 켜 입던 우리 윤준 상회야 필리핀은 따뜻하나? 적지 않은 나이에 편입해서 굶은 일 마다하지 않고 묵묵히 해줘서 고맙다. 기사시험 꼭 합격해라. 그리고 우리 방의 꽃이자 분위기 메이커 우리 재신이 우리 은미... 갖은 폭력(?)과 폭언(?) 속에서 잘 따리와 줘서 고맙고 너희들 있어서 힘든일도 웃으면서 할 수있었던거 같다. 재신아 기사시험 꼭 합격하고 은미야 올라가기 전에 꼭 집에 애러다 주게. 앞으로 힘들겠지만 실험실 끌고가야할 우리 창욱이.. 길게 같이 생활 못해서 아쉽지만 짧은시간 이나마 논문쓴다고 늦게까지 같이 해줘 고맙다. 그리고 일본에 계시는 우리 타카하시 쌤.. 제가 학번은 선배지만 배울꺼 정말 많았습니다. 배움에 대한 그 지칠줄 모르는 열정 언제나 간직하시고 건강하세요. 영나, 기순이도 잘 따리와줘 고맙다. 지금은 같은 실험실에 있지 않지만 왕년 방장 강현이, 만능 스포츠맨 기원이, 육군상병 우리 막둥이 상엽이도 너무 고맙다.

비슷한 처지에 있어서 소주한잔 기울이며 기쁨과 슬픔 같이 했던 우리동기 이자 멋진 친구 형욱아.. 두해 동안 논문쓰라 실험실 관리하라 학과 일 신경쓰느라 고생 많았다. 그 마음 그 열정이면 어디가든 무슨 일 하든 성공할꺼야 힘내고 아버님도 쾌차하시길 빌게. 꼭 성공해서 웃는 모습으로 보자. 같은 동기지만 많이 챙겨주지 못해서 언제나 미안한 우리 성훈이.. 고생많았고 성훈이도 꼭 성공해라. 그 외 우리 동기 봉균이, 분석방에 성호형, 주현이, 토양방에 현승이형, 재형이, 상수방 상훈이, 광현이, 상회, 확산방에 명국이에게도 감사드립니다.

끝으로, 못난 아들 위해 일생을 희생만 하신 우리 아버지, 어머니... 그리고

누나들 매형들... 아들, 동생, 처남 하고자 하는일 끝까지 믿고 믿어줘서 너무 감사합니다 .이 몇마디 글과 글자로 어찌 고마움을 다 표시 하겠습니까? 정말 사랑합니다. 고맙습니다. 미안합니다. 앞으로 못난 아들, 동생, 처남은 안될게요... 그리고 사랑하는 내 반쪽 진경아... 논문 쓴다는 핑계로 잘 만나지도 잘 해주지도 못하고 해서 언제나 미안한거 알께? 잘 참아줘서 고맙고... 하고 싶은 말은 많은데, 이 말 밖에 할 말이 없네... 잘 할께... 이모든 분들께 이 논문을 바칩니다.

