

MOUSE TRAP 모델을 이용한 하수관거내 수질변화 예측

Estimation of Water Quality Variation in Sewer Network using MOUSE TRAP Model

양해진¹ · 전항배² · 손대익¹

Yang Hae Jin¹ · Jun Hang Bae² · Son Dae Ik¹

1 한국수자원공사 수도개발처, 2 충북대학교 환경공학과

(2009년 4월7일 접수, 2009년 10월18일 수정, 2009년 11월21일 채택)

Abstract

One of the major problems associated with operation of domestic sewer lines involves hydraulic problems such as insufficient conveyance capacity, exceeding maximum velocity, and deficiency of minimum velocity. It has also been pointed out that influent concentration lower than design concentration of pollutants, which is mainly caused by unidentified inflow and infiltration, degrades the operational efficiency of many sewage treatment plants (STPs). A computer-added analysis method supporting a coupled simulation of sewage quality and quantity is essentially required to evaluate the status of existing STPs and to improve their efficiency by a proper sewer rehabilitation work.

In this study, dynamic water quality simulations were conducted using MOUSE TRAP to investigate the principal parameters that governs the changes of BOD, NH_4^+ , and PO_4^{3-} concentrations within the sewer networks based on data acquired through on-site and laboratory measurements. The BOD, NH_4^+ and PO_4^{3-} concentrations estimated by MOUSE TRAP was lower than theoretical pollution loads because of sedimentation and decomposition in the sewer. The results revealed that sedimentation is a most important factor than other biological reactions in decreasing pollutant load in the sewers of C-city.

The sensitivity analysis of parameters pertaining to water quality changes indicated that the effect of the BOD decay rate, the initial DO concentration, the half-saturation coefficient of dissolved BOD, and the initial sediment depth is marginal. However, the influence of settling rate and temperature is relatively high because sedimentation and precipitation, rather than biological degradation, are dominant processes that affect water quality in the study sewer systems.

Key words :

주제어 : 동력학적 수리해석, MOUSE TRAP, 오염부하량, 수질변화 예측, 하수처리장

1. 서론

하수처리장 내 수질은 설계농도보다 낮게 하수처리장으

로 유입되고 있으며, 설계농도 이하의 저농도 유입수가 전체 하수처리장의 효율과 최종방류수의 수질에 악영향을 미치고 있는 것은 어제 오늘의 일이 아니다. 특히 질소와 인을

* Corresponding author Tel:+82-42-629-3300, Fax:+82-42-629-3349, E-mail: yanghj@kwater.or.kr(Yang, H.J.)

제거하는 고도하수처리장의 경우에는 유기물이 질소와 인 제거 미생물의 탄소원으로 사용되어야 하므로 처리 효율저하에 직접적인 영향을 미친다.

이와 같이 저농도 유입수가 발생하는 원인은 하수관거가 불완전하여 불명수(Inflow/Infiltration)가 관거내로 유입되어 오수(Sewage)와 우수(Rainfall)가 희석된 결과이다. 최근 정부는 이러한 난제들을 해결하기 위하여 종합적인 대책을 수립하였고, 과거의 하수관거정비 방법에서 벗어나 새로운 정비 방법을 시도하고 있으며, 공사를 시행하는 회사로 하여금 유입수 수질농도를 적절한 수준에서 보장할 수 있는 계약제도(BOT, BTL 등)를 도입하였다.

한편, 하수관거로 유입되는 원인불명의 유입수가 농도저하에 대부분의 원인을 제공하고 있지만, 연장이 긴 관거에서는 상당한 수준의 유기물 분해과정이 일어나기도 한다. 여름철 기온이 높을 때와 관로연장이 긴 도시를 흐르는 하수의 경우는 하수관거가 제2의 하수처리장 같은 역할을 하기도 한다. 하수관거 내에 모래를 비롯한 오염물질이 침전, 침식 또는 분해 등의 과정을 거쳐 마지막 단계에 하수처리장으로 유입하게 된다. 위와 같이 수량과 수질이 복잡한 과정을 거쳐 상호 영향을 미치기 때문에 이러한 과정을 해석하고 예측하기는 쉽지 않고, 하수도 시스템에는 많은 물리적, 생화학적 변수들이 존재하기 때문에 하수관거 내에서 수질변화를 예측하기는 매우 어려운 일이다.

최근에는 이러한 하수관거내 복잡한 메카니즘을 모델화하여 하수관거 시스템에서 시-공간적인 수질변화 및 오염부하량 등을 예측하고 있다. 반면, 적용대상 유역의 특성이 다르기 때문에 개발된 모델의 적용성과 결과의 타당성은 항상 절대적일 수 없으므로, 하수관망을 모의(simulation)하고,

처리시설을 포함한 하수도 설계 및 운영에 대한 영향인자를 결정하기 위한 모델을 적용하기 위해서는 검증과 보정과정 이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 국내 C시를 대상으로 하수관거내 수질변화를 해석할 수 있는 MOUSE TRAP 모델을 이용하여 하수관거 내의 수질변화를 해석해 보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 MOUSE TRAP 개요

MOUSE TRAP를 통하여 해석되는 하수관거내 수질변화 과정은 Figure 1과 같은 메카니즘을 기본으로 하며 Figure 2와 같이 4개 모듈로 구성되며, MOUSE HD와 함께 구동함으로써 수질해석이 수행된다.

MOUSE TRAP의 세부모듈 중 지표유출수질(SRQ) 모듈은 유역표면의 입자의 축적(accumulation), 강우 등에 의해 입자가 씻겨가는 세척(wash-off)에 의한 오염물질의 축적과 세척을 모델화 한 것으로 오염물질이 지표에서 유출되어 관거로 유입되는 것을 나타낸다.

이류-확산(AD) 모듈은 관거시스템내 용존물질의 이송을 해석하기 위한 것으로 용존물질의 평균유속에 의한 이류이송(Advection transport)과 수체 농도구배에 의한 확산이송(Dispersion transport)의 원리로 구성된다. 용존물질 운반은 Fick의 확산이론을 바탕으로 하였고, 이류확산모듈은 시간에 따른 물질량변화, 거리에 따른 물질운반량 및 확산에 의한 농도변화 등의 요소를 고려하였다.

수질(WQ) 모듈은 하수관거내 생물학적 거동에 관한 해석으로 관거내 형성된 생물막(biofilm) 종속영양(heterotrophic)

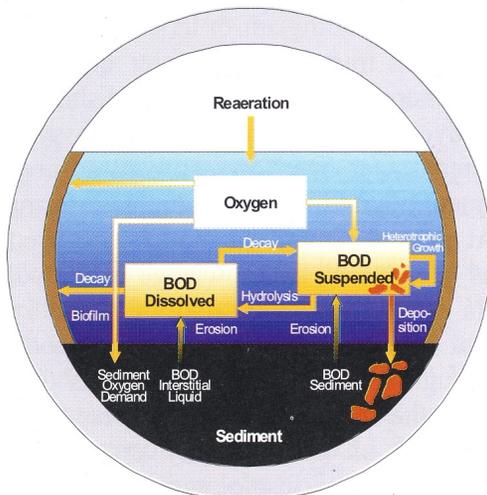


Figure 1. Water Quality Variation Mechanism

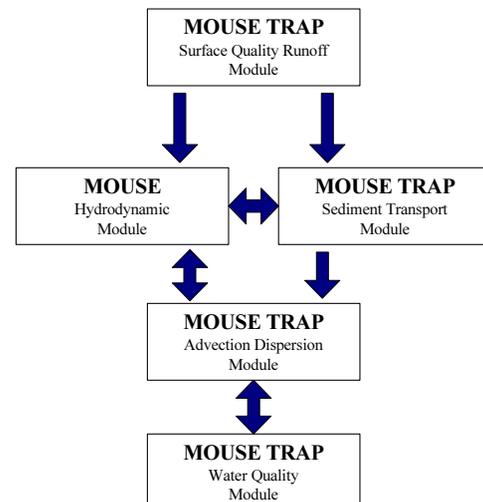


Figure 2. MOUSE TRAP Module

미생물의 분해와 입자유기물의 가수분해(hydrolysis) 및 부식작용 등 하수관거 시스템의 다양한 생물학적 성분의 변형(transformation)을 모델화 한 것으로 수질변화와 부하량을 예측하는 주요모듈이라 할 수 있다.

침전물이송(ST) 모듈은 관거내부에 침전된 퇴적물의 침전 및 침식작용에 의해 이송되어 임의 지점에서 퇴적물 부하량을 예측할 수 있다. 침전물의 이송은 세척부하(wash load), 바닥 부하(bed load), 부유부하(suspended load)의 세가지로 구분하고 입자 특성과 수리학적 조건에 따라 달라진다.

2.2 하수관거내 수질변화 프로세스

하수관거내 수질변화 모의를 위한 WQ모듈은 관거에 형성된 생물막의 종속영양 미생물의 분해와 입자유기물의 가수분해 및 부식작용 등 하수관거 시스템의 다양한 화합물 및 생물학적 성분의 이송과 변형을 모델화 한 것으로 다음과 같은 과정으로 해석될 수 있다.

(1) 미생물 분해 유기물

하수관거내에서 종속영양 미생물에 의해 분해되는 유기물량은 다음과 같다.

$$BOD_{degra} = K_s \cdot \theta^{temp-20} \cdot \frac{BOD}{BOD+k_{m,BOD}} \cdot \frac{DO}{DO+k_{m,DO}} \cdot B_x \dots (1)$$

K_s : μ_{max}/Y_{max} (20°C에서 최대성장률/최대생산계수)

θ : 온도상수

$k_{m,BOD}$: 용존 BOD의 반포화 계수

$k_{m,DO}$: DO의 반포화 계수

B_x : 활성 종속영양생물(heterotrophic organisms)

(2) 재폭기 (Re-aeration)

관내 재폭기는 만관이 아닐 경우를 모델화하였고, 재폭기식은 용존산소(DO)의 실제농도와 포화농도의 차이를 바탕으로 관내유속, 수심등의 수리학적 조건을 적용하여 산정한다.

$$R_{ear} = \left(k_1 \frac{1+k_2 \cdot u^2}{(g \cdot d_m)} \right) \cdot (s \cdot u)^{k_3} \cdot d_m^{-1} \cdot (C_s - DO) \dots (2)$$

K_s : μ_{max}/Y_{max} (20°C에서 최대성장률/최대생산계수)

u : 유속(m/s)

g : 중력가속도(m/s)

d_m : 평균수심 (m)

C_s : 산소포화농도(gDO/m³)

(3) 생물막에서 용존BOD (BODdis)분해

생물막에서 용존 BOD/COD의 분해는 온도에 따른 산소 확산 및 제거와 조합된 표준적인 반차 반응으로 설명된다.

$$BOD_{degra,biofilm} = \theta^{temp-20} \cdot \sqrt{2D \cdot k_{of}} \cdot DO^{1/2} \cdot \frac{A_{biofilm}}{V} \dots (3)$$

D : 20C 물속의 산소확산 계수 (m²/s)

k_{of} : 20C 생물막에서 산소제거율 (gDO/m³ · s)

$A_{biofilm}$: 관내 생물막 면적 (m²)

(4) 부유상태 용존BOD (BODdis)분해

생물막에서 용존 BOD/COD의 분해는 부유성 종속영양미생물의 계수들에 의해 결정된다.

$$BOD_{degra,susp} = K_s \cdot \theta^{temp-20} \left(\frac{BOD}{BOD+k_{m,BOD}} \right) \left(\frac{DO}{DO+k_{m,DO}} \right) k_b \cdot BOD_{susp} \dots (4)$$

K_s : μ_{max}/Y_{max} (20°C에서 최대성장률/최대생산계수)

θ : 온도상수

$k_{m,BOD}$: 용존 BOD의 반포화 계수

$k_{m,DO}$: DO의 반포화 계수

k_b : 부유성 BOD(BOD_{susp})내의 활성미생물 비율

(5) 부유물질 BOD (BOD_{susp})의 가수분해

부유성 기질의 가수분해는 온도에 의존하는 1차반응으로 설명된다.

$$BOD_{hydro} = \theta^{temp-20} \cdot k_{h1} \cdot BOD_{susp} \dots (5)$$

k_{h1} : 20°C에서 1차반응 부식계수 (d⁻¹)

k_{h1} : 0.05 ~ 0.10 d⁻¹

(6) 종속영양 미생물(BOD_{susp})의 성장

종속영양미생물의 성장은 BOD 분해에 의존하며 미생물의 생산계수 Y_{max} 와 관계된다.

$$BOD_{growth} = Y_{max} \cdot BOD_{degra,susp} \dots (6)$$

(7) 침식된 침전물(Eroded sediment)의 산소요구량

$$SED_{ox\ demand} = k_{sed} \cdot SED_{eroded} \left(\frac{1}{V \cdot dt} \right) \dots (7)$$

k_{sed} : 침전물의 산소요구량 (gDO/m³)

SED_{eroded} : 시간간격당 침식물량 (m³)

V : 하수량 (m³)

dt : 시간간격 (일)

3. 실험범위 및 결과

3.1 실험범위

본 연구에서는 유량 및 수질조사, 퇴적물 및 유기물 변화 조사와 미생물의 생물학적 동력학계수 추정으로 구분되며, 자세한 내용은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1. Various Kinetic Constants in MOUSE TRAP Module

구분	내용	적용 모듈	
1. 유량 및 수질조사			
1) 유량조사	국내 C시 : 지선관로 하류 2개소	MOUSE HD모듈	
2) 수질조사	국내 C시 : 지선관로 4개소, 차집관로 2개소	SRQ, AD, WQ 모듈	
2. 퇴적물 및 유기물 실험			
1) 퇴적물	입도분석실험	입도분포, 구성비, 균등계수 측정	SRQ, ST 모듈
	용출실험	오염물질의 용출농도 측정	WQ 모듈
	생분해실험	퇴적물에 의한 산소 감소정도 측정	WQ 모듈
2) 유기물	가수분해실험 감소계수추정	입자성 유기물 → 용해성 유기물 전환속도 측정 암모니아(NH4+) 및 정인산(PO43-)의 감소계수 추정	WQ 모듈 AD 모듈
	3. 미생물 동력학계수		
OUR 실험 (Oxygen Uptake Rate)	미생물 생산계수 추정		WQ모듈
	미생물 최대성장속도 추정		WQ모듈
	미생물 사멸계수 추정		WQ모듈
	반포화속도상수 추정		WQ모듈

Table 2. Details of the Sampling Sites of Sewer in C-city

구분	위치	조사지점현황		연장 (m)	배제 방식	용도 지역
		상류	하류			
지선관로	I YW동	D APT 앞	S 교 아래	866	분류식	주거(고밀도)
		D 300	D 600			
차집관로	II YR동	H APT 앞	Y 교 아래	1,259	합류식	주거(저밀도) 및 상업
		D 500	D 700			
차집관로	I C시	C시 사무소 부근	하수처리장 유입부	6,905	합병식	-
		BOX 2.0 × 2.0 2열	BOX 2.0 × 2.0 2열			

3.2 실험결과

퇴적물 입도분석 실험, 용출실험, 생분해실험, 유기물의 가수분해실험 및 감소계수추정과 미생물 동력학계수 산정을 위한 OUR실험 결과값은 MOUSE TRAP의 세부모듈의 입력구축시 인자로 적용되었다.

하수수질조사는 C시 S지역의 분류식 지역(지선관거 I), 합류식 지역(지선관거 II) 및 차집관거의 상류 및 하류 총 6개 지점에 대해 수질조사를 건기 시 2일 실시하였으며, 조사지점별 현황은 Table 2에 나타내었다.

조사지점 및 횡수가 적어 상기의 수질조사 결과로 C시 전체의 특성을 완벽하게 대표할 수는 없지만, 모델링 결과값과의 비교를 위하여 실시하였으며, 그 결과는 상류에서 하류로 유하하는 과정에서 입자성 오염물질의 침전, 분해 반응등 인하여 농도저하가 발생하였다.

C시에서는 BOD 농도기준으로 상류에서 93.3 mg/L, 하류

에서 61.0 mg/L로 약 35%가 감소하였고, TN은 69.0 mg/L에서 42.1 mg/L로, T-P는 11.3mg/L에서 4.8mg/L로 감소하였다.

4. 모델링 구축 및 결과고찰

4.1 MOUSE TRAP 입력자료 구축

MOUSE TRAP의 SRQ 모듈, AD 모듈, WQ 모듈 및 ST 모듈의 입력인자들은 기존 문헌들, 프로그램 Default값 및 일부는 실험을 통하여 국내 하수관거 해석 및 적용 가능한 값을 보정 후 적용하였다.

4.1.1 SRQ 모듈 입력자료 구축

SRQ 모듈은 Surface sediment build up/wash off(Global), Surface Sediment and Pollutants (Global),

Gully Pot/Catchbasin와 같은 세부 모듈로 나뉘며, 아래의 **Table 3**과 같이 입력인자를 적용하였다.

4.1.2 AD 모듈 입력자료 구축

AD 모듈은 Component Selection, Decay Constants, Initial Concentration 등과 같은 세부 모듈로 나뉘며, 아래

의 **Table 4**와 같이 입력인자를 적용하였다.

4.1.3 WQ 모듈 입력자료 구축

WQ 모듈은 BOD/COD - DO Processes, Reaeration, Pollutants Attached to Sediments 등과 같은 세부 모듈로 나뉘며, 아래의 **Table 5**와 같이 입력인자를 적용하였다.

Table 3. Input Parameters of SRQ Module

모듈	세부 입력인자		금회 적용	비 고
Surface Sediment Build up /Wash off (Global)	Build Up Method : Linear, Exponential		Linear	
	Build Up Rate (kg/ha/day)		50	
	Maximum Value (kg/ha)		500	
	ADWP (days)		0	
	Fine Sediment (mm, kg/m ³)		Size : 0.5, Density : 1,696	퇴적물 변화실험
Coarse Sediment (mm, kg/m ³)		Size : 0.5, Density : 1,696		
Surface Sediment and Pollutants	BOD	TP (g/ℓ)	0.009	최지용(2003)
		Fine Sediment (%)	50	
		Coarse Sediment (%)	50	

Table 4. Input Parameters of AD Module

모듈	세부 입력인자		금회 적용	비 고
Component Selection	Concentration in DWF	DO (mg/ℓ)	1.9	하수 수질조사
		Temperature	13.5	
		BOD (mg/ℓ)	111.0	
Decay Constants	Decay constant	BOD (hr ⁻¹)	0.0052	오염물질 변화실험
Initial Concentration	Concentration	BOD (mg/ℓ)	111.0	하수 수질조사

Table 5. Input Parameters of WQ Module

모듈	세부 입력인자		금회 적용	비 고
BOD/COD - DO Processes	BOD/COD Conversion factor		0.47	하수 수질조사
	Oxygen removal constant (g DO/m ³ /sec)		0.0012	OUR 실험
	Max. growth rate at 20 deg. cel. (day ⁻¹)		1.25	
	Max. yield constant (g VSS/g BOD)		0.53	
	Biomass (g VSS/g BOD)		0.75	
	Decay constant at 20 deg. cel. (day ⁻¹)		0.12	오염물질변화실험
	Eroded sediment oxygen demand (g DO/sed.ℓ)		1.847	퇴적물용출실험
Reaeration	DO (g/m ³)		0.66	OUR 실험
	BOD (g/m ³)		81.0	
	Coefficient 1 (C1)		0.96	
	Coefficient 2 (C2)		0.17	
	Coefficient 3 (C3)		0.375	
Reaeration coefficient at 20 deg		1.024		
Pollutants Attached to Sediments	BOD	TP (g/ℓ)	1.847	퇴적물 변화실험
		DL (%)	9.2	
		Fine Sediment (%)	55.3	
		Coarse Sediment (%)	35.5	

4.1.4 ST 모듈 입력자료 구축

ST 모듈은 Sediment Grain Diameter, Model Parameters, Data for Graded Sediment Transport, Initial Sediment Depth, Sediment Removal in Basin 등과 같은 세부 모듈로 나뉘며, 아래의 Table 6과 같이 입력인자를 적용하였다.

4.2 하수관거 수질해석 모델링 결과

4.2.1 영향인자별 분석

하수관거 내 수질변화를 해석하기 위하여 MOUSE TRAP에 적용되는 많은 입력인자 중에서 온도, 유기물 감소계수, 유기물 반포화 상수, 하수의 초기 용존산소 농도 및 초기 관거 퇴적물 깊이 등에 대하여 인자의 민감도 및 영향을 검토하였다.

(1) 수 온

하수 내의 수온의 영향을 검토하기 위하여, 국내 C시 YW처리

리구역을 대상으로 수질조사결과에서 제시된 최대 25℃, 최소 -2℃, 평균온도 20.7℃를 적용하여 모델링하였다. 모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우, 평균온도에 대하여 최소온도는 -2.0%, 최고온도는 +4.0%의 오염부하량 차가 발생하였다. 그리고 NH₄⁺의 경우, 평균온도 대비 최소온도는 -1.8%, 최고온도는 +4.2%의 오염부하량 차이를 보였으며, PO₄³⁻의 경우, 평균온도 대비 최소온도는 -0.7%, 최고온도는 +4.1%의 경향을 보였다. 결과값을 통하여 온도가 증가함에 따라 오염물질의 분해되는 비율이 높아지는 것으로 판단된다.

(2) 유기물 감소계수 영향

하수 내의 유기물의 감소계수의 영향을 검토하기 위하여, 국내 C시 YW처리구역을 대상으로 문헌과 오염물질 변화실험을 통하여 제시된 최대, 최소, 실험치를 적용하여 모델링하였다.

모델링에서 적용한 감소계수 최대값은 Tanaka 등

Table 6. Input Parameters of ST Module

모듈	세부 입력인자		금회 적용	비 고
Sediment Grain Diameter(Global)	Grain Diameter (mm)		0.5	
	DWF Concentration (mg/ℓ)		0	
	Formula	Engelund-Hansen	○	공식 선택
Model Parameters	Relative Density of the Sediment		1.696	퇴적물 변화실험
	Porosity		0.519	
	Relative Density of Fine Sediment (AD)		1.696	퇴적물 변화실험
	Min. Manning No. updated from the ST		10	
	Max. Manning No. updated from the ST		100	
	Fraction Diameter (mm)		0.100	
Data for Graded Sediment Transport	DWF Concentration (mg/ℓ)		250	
	Erodibility Coefficient (g/m ² /sec)		0.200	
Initial Sediment Depth	Sediment Depth (m)		0.001	
	Type	Computed Manning	○	선택

Table 7. Temperature Effects on Pollutants Loads in C-city

구분		BOD(kg/d)			NH ₄ ⁺ (kg/d)			PO ₄ ³⁻ (kg/d)		
		초기값 ^{주)}	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)
YW 처리 구역	최소온도	3,815	3,791	0.6	1,351	1,254	7.2	272	269	1.1
	평균온도	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	최대온도	3,815	3,563	6.6	1,351	1,173	13.2	272	256	5.9

주) 초기 오염부하량은 처리구역의 계획인구와 발생오염원단위의 곱으로 산정됨

Table 8. Decay Constant(k) Effects on Pollutants Loads in C-city

구 분		BOD(kg/d)			NH ₄ ⁺ (kg/d)			PO ₄ ³⁻ (kg/d)		
		초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)
YW 처리 구역	최소	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	실험값	3,815	3,718	2.5	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	최대	3,815	3,718	2.5	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8

Table 9. Half-saturation Constant(ks) Effects on Pollutants Loads in C-city

구 분		BOD(kg/d)			NH ₄ ⁺ (kg/d)			PO ₄ ³⁻ (kg/d)		
		초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)
YW 처리 구역	최소	3,815	3,689	3.3	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	최대	3,815	3,712	2.7	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	실험값	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8

Table 10. Initial DO Concentration Effects on Pollutants Loads in C-city

구 분		BOD(kg/d)			NH ₄ ⁺ (kg/d)			PO ₄ ³⁻ (kg/d)		
		초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)
YW 처리 구역	문헌최소	3,815	3,718	2.5	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	문헌최대	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	실험값	3,815	3,718	2.5	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8

(1998)에 의하여 제시된 1.0d⁻¹이며, 최소값은 Crabtree(1995)가 사용한 0.075d⁻¹을 아래와 같이 분석하였다.

모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우, 본 연구에서 오염물질 변화실험을 통하여 측정된 실험값에 대하여 최소값 및 최대값의 변화는 미미하였다. 마찬가지로 NH₄⁺와 PO₄³⁻의 경우에도 비슷한 경향을 나타내었다. 결과값을 통하여 유기물 감소계수는 하수관거 내의 수질변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

(3) 유기물 반포화계수

하수 내의 유기물의 반포화계수의 영향을 검토하기 위하여, 국내 C시 YW처리구역을 대상으로 문헌치와 오염물질 변화실험을 통하여 제시된 최대문헌값, 최소문헌값, 실험값을 적용하여 모델링 하였다.

실험을 통하여 추정된 반포화계수는 81g/m³이고, Crabtree(1995)가 제시한 최대값 56g/m³과 최소값 4g/m³을 적용하였다.

모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우, 실험값에 대하여 문헌최소값은 +0.7%, 문헌최대값은 +0.1%의 오염부하량 차가 발생하였다. 그러나 NH₄⁺와 PO₄³⁻의 경우, 측정된 실험값에 대하여 최소값 및 최대값의 변화는 미미하였다.

결과값을 통하여 유기물은 반포화계수가 작을수록 분해되는 비율이 높아지는 것으로 조사되었다.

(4) 하수 내 초기 용존산소농도

하수 내의 초기 용존산소농도의 영향을 검토하기 위하여, 국내 C시 YW처리구역을 대상으로 수질조사 결과에서 제시된 최대 2.2 mg/L, 최소 1.8 mg/L, 평균 2.0 mg/L 용존산소농도를 적용하여 모델링하였다.

모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우, 본 연구에서 오염물질 변화실험을 통하여 측정된 실험값에 대하여 최소값 및 최대값의 변화는 미미하였다. 마찬가지로 NH₄⁺와 PO₄³⁻의 경우에도 비슷한 경향을 나타내었다. 결과값을 통하여 초기 하수 내 용존산소농도는 하수관거 내의

수질변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

(5) 초기 침전물 깊이 변화

하수관거 내의 초기침전물 깊이의 영향을 검토하기 위하여, 국내 C시 YW처리구역에 대상으로 조사결과에서 조사값과 임의로 제시한 최대값 0.01 m, 최소값 0.001 m 및 평균값 0.005 m을 적용하여 모델링 하였다.

모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우, 본 연구에서 오염물질 변화실험을 통하여 측정된 조사값에 대하여 최소값 및 최대값의 변화는 미미하였다. 마찬가지로 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 의 경우에도 비슷한 경향을 나타내었다.

모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우, 조사값과 비교할 때 최소값은 -0.1%, 최고값은 +0.2%의 오염부하량 차가 발생하였다. 그리고 NH_4^+ 의 경우, 조사값 대비 최소값은 -0.1%, 최고값은 +0.1%의 오염부하량 차이를 보였으며, PO_4^{3-} 의 경우에도 미미하지만, 조사값 대비 최소값은 -0.2%, 최고값은 +0.1%의 경향을 보였다. 결과값의 변화가 매우 미미하지만, 3가지 오염물질에 대한 일관된 변화양상을 보여 하수관거 내의 초기침전물 깊이가 증가함에 따라 분해되는 비율이 높아지는 것으로 판단된다.

(6) 침전물 침전계수

하수관거 내의 침전에 의한 오염부하량 감소 영향을 검토하기 위하여 하수관거 내 침전계수 Default 값 0.7과 이를 기준으로 제시한 최대값 2.0 및 최소값 0.1을 적용하여 모델링 하였다.

모델링 분석결과 초기 오염부하량 대비 BOD의 경우,

Default 값에 대하여 최소값은 -1.7%, 최고값은 +2.3%의 오염부하량 차가 발생하였다. 그리고 NH_4^+ 의 경우, Default 값 대비 최소값은 -1.6%, 최대값은 +1.7%의 오염부하량 차이를 보였으며, PO_4^{3-} 의 경우, Default 대비 최소값은 0.7%, 최고값은 +1.7%의 경향을 보였다. 모델링 결과값을 통하여 퇴적물의 침전에 의한 효과로 인하여 오염물질이 퇴적되어 하수내의 농도가 감소하는 것으로 판단된다.

(7) 영향인자별 종합비교 결과

하수관거 내 수질변화에 영향을 줄 수 있는 상기의 인자에 대하여 모델링을 통하여 검토한 결과, 유기물 감소계수, 하수관거 내 초기 용존산소농도, 유기물 반포화계수, 관거 내 초기 침전물 깊이의 변화에 따른 민감도는 적은 것으로 판단된다. 이에 반하여 하수관거내 침전물 침전계수, 하수의 수온은 계수변화에 따른 민감도가 상대적으로 컸다.

이는 연구대상지역인 C시 YW처리구역의 관거연장은 최대 11 km으로 초입부에서 최종 유출부까지의 유하시간이 2시간 정도로 하수관거 내 생물학적 반응에 의한 오염부하량 감소와 비교시 물리적으로 발생하는 하수관거 내 고형물의 침전으로 인한 제거량이 상대적으로 많은 것으로 판단된다.

4.2.2 수질해석 결과

국내 C시는 초기 오염부하량 대비 모델링 결과값은 BOD 8.8%, NH_4^+ 14.6%, PO_4^{3-} 3.4% 감소되는 것으로 분석되었으며, 아래의 Table 8과 같다.

이는 하수수질조사 BOD를 기준으로 35% 감소되는 것에 비하여 작게 예측되었는데, 이는 현장수질조사에서는 하천

Table 11. Initial Sediment Depth Effects on Pollutants Loads in C-city

구 분	BOD(kg/d)			NH_4^+ (kg/d)			PO_4^{3-} (kg/d)			
	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	
YW 처리 구역	최소값	3,815	3,721	2.5	1,351	1,231	8.9	272	268	1.5
	평균값	3,815	3,708	2.8	1,351	1,227	9.1	272	267	1.8
	최대값	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8

Table 12. Sedimentation Coefficient Effects on Pollutants Loads in C-city

구분	BOD(kg/d)			NH_4^+ (kg/d)			PO_4^{3-} (kg/d)			
	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	
YW 처리 구역	최소	3,815	3,782	0.9	1,351	1,251	7.4	272	269	1.1
	Default	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	최대	3,815	3,628	4.9	1,351	1,207	10.7	272	263	3.3

Table 13. Changes in Pollutants Loads below Initial and Simulated Loads at Each District

구분		BOD(kg/d)			NH ₄ ⁺ (kg/d)			PO ₄ ³⁻ (kg/d)		
		초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)	초기값	모델링 결과	변화율 (%)
C시	1.BS	554	545	1.6	196	182	7.1	39	40	-2.6
	2.YL	5,634	5,002	11.2	1,995	1,683	15.6	401	366	8.7
	3.MS	2,898	2,477	14.5	1,026	710	30.8	206	201	2.4
	4.MA	3,012	2,760	8.4	1,066	1,006	5.6	214	218	-1.9
	5.YW	3,815	3,717	2.6	1,351	1,229	9.0	272	267	1.8
	6.WW	101	99	2.0	36	35	2.8	7	8	-14.3
	계	16,014	14,600	8.8	5,670	4,845	14.6	1,139	1,100	3.4

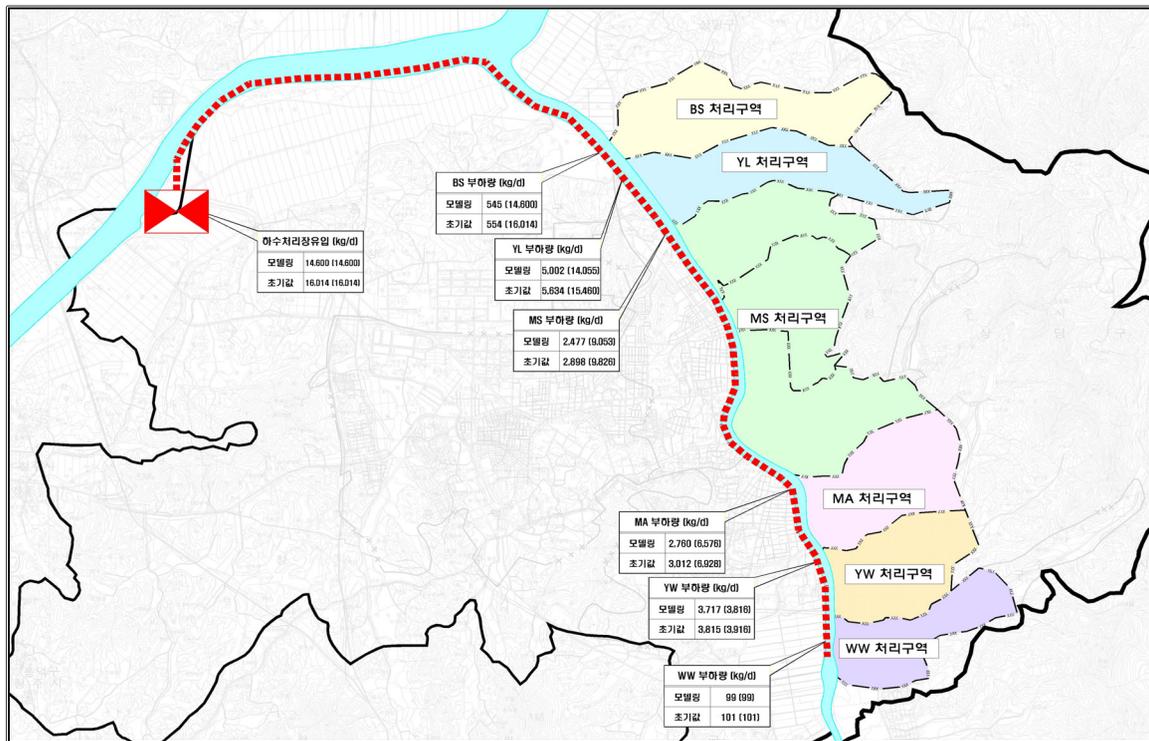


Figure 3. Estimation of Water Quality Variation in Sewer

수계의 특성에 따른 오염부하의 퇴적, 체류시간, 장애물 및 기타의 다른 요소들에 의해 영향을 받았을 것으로 판단된다. 여기서 나타나는 감소비율은 불명수의 유입, 관거내의 분해 및 퇴적효과 등을 비교하여 각각의 오염부하량 감소를 제시하지 못하는 아쉬움이 있지만 실제유역 전체에 감소비율을 산정하는데 의미가 있다고 본다.

하수관거 내의 수질 변화가 하수처리장 유입수질에 미치는 영향을 알아보기 위해 하수처리장으로 유입되는 이론적 오염부하량과 MOUSE TRAP을 통하여 모델링된 오염부하

량을 비교하면 Figure 3과 같다.

위의 결과에서 알 수 있듯이, 각 처리분구별로 발생한 오염 부하량을 합하여 하수처리장으로 유입되는 최종 이론적 오염 부하량은 16,014kg/d로 관거내의 수질 변화를 고려한 모델링 오염부하량인 14,600kg/d보다 높은 값을 나타내었다.

현재 대부분의 하수처리장은 이론적으로 발생하는 오염 부하량을 기준으로 설계가 되거나 하수처리공정 선택이 이루어지고 있다. 또한, 이론적으로 계산된 오염부하량을 근거

로 처리장을 설계하거나 공정을 선택할 경우 유입부하량 예측 실패로 하수처리장 반응조의 처리효율이 떨어져 유출수 질에 문제가 생기는 등 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, 처리 분구별로 모델링을 실시하여 하수처리장으로 유입되는 수질을 예측한다면 좀 더 경제적인 설계와 정확한 공정 선택이 가능 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 하수관거 내 오염물질의 성상과 미생물 동력학 계수 산정을 위한 실험과 이를 통하여 동력학적 해석모델(MOUSE TRAP)로 분석한 결과, 실제 하수관거내 수질변화를 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

그러나 하수관거의 수질변화 예측을 위한 현장조사시 각 지역특성에 따라 지하수 침입여부, 하수관거 연장(체류시간), 온도 등 하수관거내 수질에 영향을 미칠 수 있는 외부인자에 대한 충분한 검토가 필요하고, 예측 모델의 입력인자 설정시 침전계수와 수온의 영향을 반영하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

또한 하수관거내 물리적, 생물학적 반응계수는 하수수질, 퇴적물 조성 및 퇴적물 반응, 관거내 체류시간 등을 고려한 회분식 모사실험을 통하여 도출하고 현장수질과의 비교검증을 통하여 인자보정을 수행하여야 하나 인자간의 민감도 해석결과 해당지역의 특성 값으로 사용하면 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서와 같이 체류시간이 짧은 경우에는 주로 퇴적물의 침전계수와 온도가 주로 영향을 미치고 체류시간이 긴 경우에는 생물학적 반응이 영향을 미칠것으로 판단된다.

이러한 결과는 건기시 하수나 우기시 지표유출수가 하수관거를 통하여 하수처리장이나 방류수역으로 유출될 때까지의 수질성상변화를 파악하고 예측하기 위한 기초연구로서, 하수처리장의 유입수질 산정, 하수관거내 퇴적물 관리, 강우시 유출 오염부하 산정 등에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 최지용 (2003), 우수유출수 저감을 통한 비점오염원 관리, 토지와 기술, pp. 95-105.
2. Amell, V., Harremoes, p., Jesen, M., Johansen, N., B. and Niemczynowicz, J. (1984), Rieviv of Rainfall Data Application for Design and Analysis, *Wat. Sci. Tech.*, Copenhagen, **16**, pp. 1-45.
3. Bouteligier R., Vaes G., Berlamont J., Flamink C. (2005), Advection-dispersion Modelling Tools : What about Numerical Dispersion?, *Wat. Sci. Tech.*, **52**(3), pp. 19-27.
4. Crabtree, R. Ashley and R. Gent (1995), MOUSETRAP: Modelling of Real Sewer Sediment Characteristics and Attached Pollutants, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(7), pp. 38-51.
5. Garsdal, O. Mark, J. Dorge and S-E. Jepsen (1995), MOUSTRAP: Modelling of Water Quality Processes and the Interaction of Sediments and Pollutants in Sewers, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(7), pp. 22-29.
6. Henze, M., Grady, Jr., C. P. L., Gujer, W., Marais, G. v. R and Matsuo, T. (1986), Activated Sludge Model No. 1, IAWPRC, pp. 1-33.
7. Herik Garsdal, Ole Mark, Jesper Dorge and Svend-Erik Jepsen (1995), MOUSE TRAP : Modelling of Water Quality Processes and the Interaction of Sediments and Ppollutants in sewers, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(7), pp. 33-41.
8. Jansen, J. la Cour (1983), Fixed Film Kinetics, Ph.D Thesis, Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark., pp. 87-110.
9. Ole Mark, Cecilia Appelgren, Martin Kosir (1996), Water Quality Modelling for the Ljubljana Master Plan, *8th International conference on urban storm drainage*, pp. 51-56.
10. Ole Mark, Cecilia Appelgren, Torben Larsen (1995), Principals and Approaches for Numerical Modelling of Sediment Transport in Sewers, *Wat. Sci. Tech.*, **31**(7), pp. 107-115.
11. Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T., (1999), Stoichiometric and Kinetic Model Parameters for Microbial Transformations of Suspended Solids in Combined Sewer Systems, *Wat. Res.*, **33**(14), pp. 3127-3141.
12. DHI Software (2004), MOUSE SURFACE RUNOFF MODELS - Reference manual
13. DHI Software (2003), MOUSE Surface Runoff Quality Module - Technical Reference
14. DHI Software (2003), MOUSE Advection-Dispersion Module - Technical Reference
15. DHI Software (2003), MOUSE Water Quality Module - Technical Reference
16. DHI Software (2003), MOUSE Sediment Transport Module - Technical Reference