

# 합류식 하수관거 지역에서 강우시 하수처리장 적정운영방안에 관한 연구

이두진<sup>†</sup> · 신응배<sup>\*</sup> · 홍철의<sup>\*\*</sup> · 안세영<sup>\*\*\*</sup>

<sup>†</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 국제상하수도 연구소

<sup>\*</sup>안산환경기술개발센터

<sup>\*\*</sup>e-Matrix

<sup>\*\*\*</sup>수엔지니어링

## Alternatives for The Stable Operation of Wastewater Treatment Plant in Combined Sewer System during Wet Weather

Doo-jin Lee<sup>†</sup> · Eung-Bai Shin<sup>\*</sup> · Chul-ui Hong<sup>\*\*</sup> · Se-young Ahn<sup>\*\*\*</sup>

Water Resource Research Institute, International Water & Wastewater Research Center

Ansan Environmental Technology Development Center

e-Matrix

Water Engineering & Consulting

**Abstract** : The purpose of this study was to evaluate alternatives for stable operation of WWTP(Wastewater Treatment Plant) with a higher rate of inflows and a higher concentration of pollutants during wet weather to minimize the pollution loads being discharged into receiving waters. 3Q(Q: dry weather flow) of a base flow is normally intercepted and flows into WWTP as it was current practice. It is revealed by simulation that the bypassing alternative of 1Q through secondary treatment and 2Q into the stream after primary treatment was as good as it is expected.

The bypass pollution loads were in the range of 23.9 ~ 38.5 % of the total loads flowing into the WWTP indicating that the bypassed flows need an extra treatment such as stormwater detention reservoir, high-rate coagulation with sedimentation, and step-feed. The high-rate coagulation with sedimentation was the most effective with respect to removal of the pollution loads.

**keywords** : 3Q, Bypass, Stormwater Detention, High-rate Coagulation/Sediment, Step-feed

### 1. 서 론

공공 하수처리장에 요구되는 조건은 연중 안정적으로 법적 방류수 수질기준을 만족하는 것이다. 우리나라의 경우 사계절에 따른 기후변화, 여름철 집중호우, 겨울철 수온저하 등과 같은 특성이 하수처리장의 안정적인 운영을 어렵게 하고 있다. 특히 여름철 장마, 태풍에 의한 집중호우시 지표유출수가 하수관거로 유입되면서 하수처리장 유입 유량과 수질변화를 유발시키게 되는데, 이러한 유입수의 양적, 질적 변동은 처리장 성능에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 강우 지표유출수의 관거내 유입은 합류식 하수관거의 경우 건기하수량 대비 일정비율의 유입이 불가피하지만, 분류식 오수관거의 경우 강우유발 침입수/유입수로 인하여 발생한다.

본 연구에서는 강우시 합류식 하수관거시스템에서 지표 유출수가 포함된 유량이 하수처리장으로 유입되는 경우, 하수처리장 운전 에 미치는 영향에 대하여 분석하고 적절한 대응운전방안에 대하여 모의하였다.

연구절차는 Fig. 1과 같이 대상처리장의 건, 우기 유·출입유량 및 수질 등 전반적인 운전현황을 분석하고, 특정 강우사상에 대하여 처리장 유입유량 및 수질의 연속적인 모니터링을 통하여 처리장에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 강우시 하수처리장을 안정적으로 운전하기 위한 대응운전 방안에 대하여 검토하였으며, 하수처리 시스템 해석 모델(Activated Sludge Model, ASM)을 이용하여 각 대응운전 방안별 처리효과를 모의, 예측, 평가함으로써 방류수역으로 유출되는 오염부하를 최소화할 수 있는 효과적인 대응운전 방안을 제안하였다.

### 2. 연구범위 및 방법

#### 2.1. 대상지역 및 처리장

대상처리장은 경기도내에 위치한 공공하수처리장으로서, 수도권 광역상수원인 팔당호의 지류인 경안천에 인접해 있기 때문에 방류수 수질이 엄격하게 관리되고 있는 처리장이다.

하수처리장의 기본현황은 Table 1과 같고, 전형적인 표준활성슬러지 공법으로 운전되고 있다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

jin7381@yahoo.co.kr

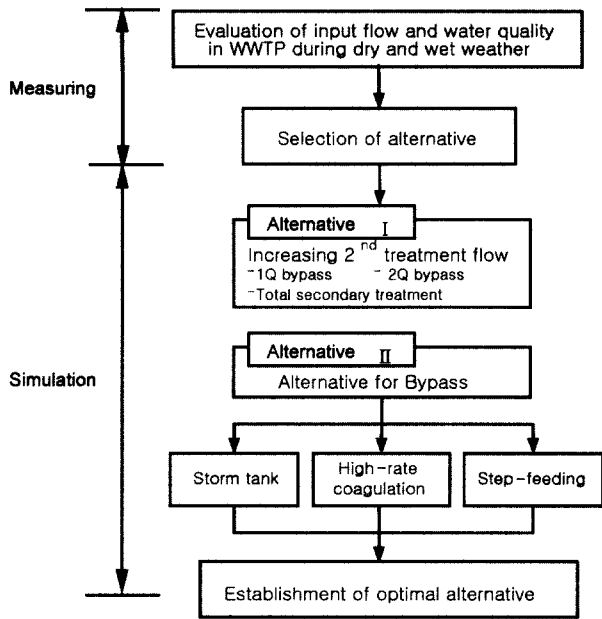


Fig. 1. Scope and content of study.

Table 2는 모델링의 입력데이터로서 각 공정의 설계 및 운전현황을 정리한 것이다.

2.2. 분석항목 및 방법

강우 Event 분석은 특정 강우사상에 대하여 강우량, 하수처리장 유입유량, 유입수질로 구분하여 실시하였다. 유량은 처리장으로 유입되기 직전의 차집관로 맨홀내에 유량계를 설치하여 실시간으로 측정하였다. 유량계에서 수위는 압력식으로 유속은 전자식으로 측정되며 연속방정식에 의해 유량이 산정된다. 수질은 COD, SS를 분석하였으며, 모든 분석은 Standard Methods(1998)에 준하여 실시하였다.

2.3. 강우시 하수처리장 대응운영방안

본 연구에서는 강우시 하수처리장의 효과적인 대응운영 방안을 수립하기 위하여 다양한 운전방안을 제안하고, 수치 해석 모델을 이용하여 그 결과를 분석, 평가하였다.

하수처리장의 적정 운영방안 도출을 위하여 다음과 같은 두가지 관점에서 대응운전을 고려하였다.

첫째는 현행 하수도 시설기준상에서 정한 차집유량에 기

Table 1. Typical conditions of wastewater treatment plant in study area

Capacity (m <sup>3</sup> /d)	Population (person)	Type of sewer system	Watershed area (ha)	Process
25,000	62,079	Combined sewer system	552	Activated Sludge process

Table 2. Operating condition of wastewater treatment plant in study area

Item	Value		
Capacity(m <sup>3</sup> /d)	25,000		
Area(ha)	552.5		
<b>1st clarifier</b>		<b>1 line</b>	<b>2 line</b>
Surface area(m <sup>2</sup> )	778	∅16m × H3m	∅15.5m × H3m
Total volume(m <sup>3</sup> )	2,338	603.18m <sup>3</sup> × 2set	566.07m <sup>3</sup> × 2set
Retention time(h)	2.8	2.6	3.02
<b>Aeration tank</b>		<b>1 line</b>	<b>2 line</b>
Tatal volume(m <sup>3</sup> )	5,220	W9m × L27m × H3m 729m <sup>3</sup> × 4set	W8m × L24m × H3m 576m <sup>3</sup> × 4set
Hydraulic Retention time(h)	6	6	6
Mixed liquid suspended solid(mg/L)	1,764		
Solid Retention Time(d)	13		
Dissolved Oxygen(mg/L)	1.2		
pH	6.8		
Temperature(°C)	12.8		
Air flow rate(m <sup>3</sup> /h)	23,000		
<b>2nd clarifier</b>		<b>1 line</b>	<b>2 line</b>
Surface area(m <sup>2</sup> )	988	∅18.5m × H3m	∅17m × H3m
Total volume(m <sup>3</sup> )	2,974	806.4m <sup>3</sup> × 2set	680.94m <sup>3</sup> × 2set
Retention time(h)	3.5	3.5	3.6
<b>Others</b>			
Recyle MLSS(mg/L)	4,076		
Recycle ratio(%)	39.3		
Dewater sludge cake(m <sup>3</sup> /d)	16.4		
T-COD in supernatant(mg/L)	21,000		
The ratio of contain water in sludge cake(%)	80		

초하여 1차 침전후 배제되는 유량을 저감시키기 위하여 2차처리 유량을 증가시키는 방안(Alternative I)에 대하여 검토하였다. 두 번째는 1차 침전 후 bypass되는 오염부하를 저감시키기 위하여 추가적인 대응방안(Alternative II)을 제안하고 그 효과를 검토하였다. 추가적인 대응운전 방안으로는 1) 우수침전지(Storm tank), 2) 급속응집침전(High rate coagulation-sediment), 3) 유입수 분배주입(Step feed) 등을 검토하였다. 우수침전지와 급속응집침전은 부지에 여유가 있는 미국에서 널리 적용되고 있으며, 분배주입은 유럽과 일본 등에서 시험적으로 운전되고 있는 운전방안이다(EPA, 2000; Takayanagi et al., 1996).

2.3.1. 2차 처리유량 증대 방안

(1) Alt. I-1

하수처리장으로 유입된 3Q를 1차 침전 처리한 후 2Q를 bypass시키고, 1Q만 2차 처리하는 방법으로 하수도시설기준에서 정한 합류식 하수관거 지역에서의 강우시 하수처리장 운전방법이다.

(2) Alt. I-2

1차 침전지를 거친 3Q 가운데 2Q를 2차 처리하고, 1Q는 bypass시키는 방안이다.

(3) Alt. I-3

강우시 차집한 3Q를 전량 2차 처리하는 운전방법이다.

2.3.2. 배제유량 별도처리 방안

(1) Alt. II-1 : 우수 침전지

1차 침전지를 거쳐 bypass되는 2Q를 침전처리 할 수 있는 용적의 우수침전지를 추가하는 방안이다. 침전의 용적은 하수도 시설기준에서 하수처리장의 1차 침전지 설계기준인 2~4 hr중 2 hr으로 정하였으며, 최대 표면부하율은 32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · 일, 유효수심은 2.5 m로 설계하였다.

(2) Alt. II-2 : 급속 응집 침전처리

1차 침전지를 거쳐 bypass되는 2Q를 급속응집 침전처리 하는 방안이다. 급속응집침전 시설은 실험실 규모로 실시한 예비실험에서 2분 급속교반에 20분 완속교반 후 30분간 침전처리 하도록 설계하였으며, 침전지는 표면부하율이 최대 128 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · 일 이다.

(3) Alt. II-3 : 유입수 분배주입

bypass되는 2Q를 포기조의 후단으로 분배주입하는 방안이다. 분배주입 위치는 포기조의 유입지점에서 흐름방향으로 1/3, 2/3에서 각각 1Q씩 추가 주입하도록 설계하였다.

2.3.4. 모델구축

(1) 처리공정의 Layout 및 입력변수 결정

기존 처리시설과 대응운전을 방안을 모의하기 위하여 ASM의 대표적인 상용프로그램인 GPS-X를 이용하여 기본처리공정과 대응운전방안을 다음 그림 2와 같이 구축하였다.

ASM No.1의 보정에는 호흡률 측정 등과 같은 실험적 방법(non-dynamic data)이 주로 이용되고 있으며, 최근에는

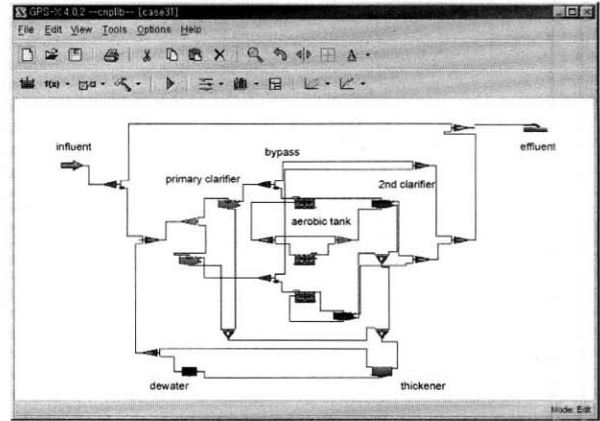


Fig. 2. Layout of treatment process and alternative process.

처리시스템의 동적인 데이터(dynamic data)를 이용하여 매개변수를 추정하는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Vanrolleghem et al., 1999; Roubos et al., 1999). 본 연구에서 대상처리장의 유입수 성상과 동역학적 인자는 G 하수처리장 유입수를 대상으로 측정하였으며, 실측하지 못한 일부 매개변수들은 참고자료와 ASM No.1에서 제안한 전형적인 default value를 이용하였다.

(2) 정상상태 보정결과

시뮬레이션 결과에 대한 보정은 하수처리장 건기 운전데이터를 이용하였다. 보정결과 Fig. 3과 같이 유출수 수질의 경우 TCOD는 실측치에 비해 1.8 mg/L 높게 모의되어 약 8.2 %의 오차를 보였고, SS는 0.1 mg/L가 높은 2 %의 오차를 나타내어 정상상태의 처리수질 예측이 만족스러운 결과를 보인 것으로 판단하였다.

유입수에 비하여 일차침전지의 유출수농도가 높게 나타났는데, 이는 슬러지 처리시설을 갖춘 대규모 하수처리장의 경우 1차 침전지로 농축조 상정액, 소화조 탈리액, 탈수기 탈수여액 등의 재반송수가 유입되기 때문에 1차 침전지 유출수가 유입수에 비하여 높은 농도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

강우시에는 유입유량과 수질이 변화하는 조건 즉, non steady-state이므로 정상상태에서 보정한 parameter를 이용하여 예측하는 경우 실제결과와 다소 차이가 날 우려와 한계가 있다. 다만 본 연구에서는 대응운전방안별 처리효과를 비교하고자 하는 목적으로 모델링을 수행하였으므로 모의된 결과를 바탕으로 각 대응운전방안의 우열을 평가하는 수준으로 수행되었다.

2.3.5. 우수침전지 및 응집침전 처리 기초실험

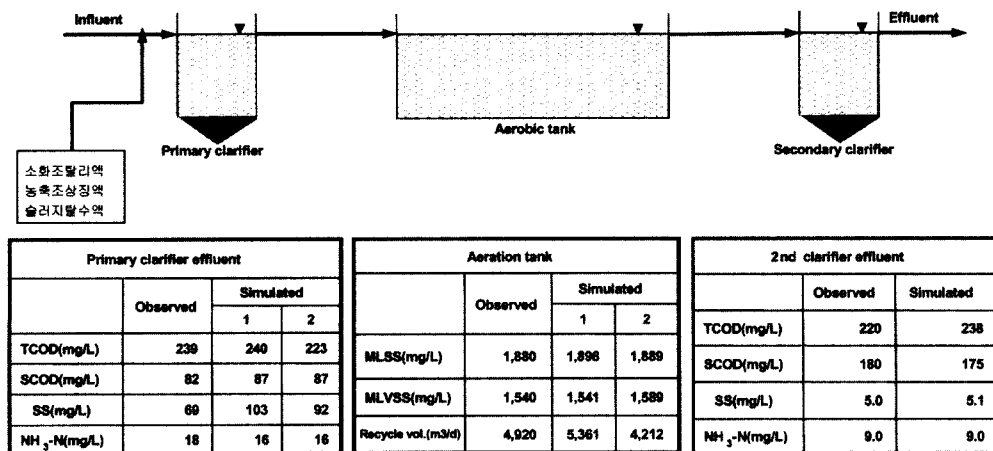
우기시 하수처리장의 대응운전방안 중 우수 침전지와 급속응집 침전시설에 대한 효과를 예측하기 위하여 Fig. 4와 같은 column을 이용하여 침전시험을 실시하였으며, 그 결과를 침전지와 급속응집 침전시설을 통한 오염물 제거효과를 예측하는 검증인자로 활용하였다.

침강실험은 강우유출 중의 고형물질의 침강속도를 측정하기 위하여 FLM(Floating Layer Method)방법으로 시행하였

**Table 3.** Characterization of wastewater and selection of stoichiometric and kinetic parameter.

Symbol	Description	Unit	Value*	Ref. Value <sup>2)</sup>	Typical value <sup>3)</sup>
<b>Characteristics in wastewater</b>					
S <sub>II</sub>	Soluble inert COD concentration in wastewater	g COD m <sup>-3</sup>	11.5	16.8	-
S <sub>S1</sub>	Concentration of readily biodegradable COD in wastewater	g COD m <sup>-3</sup>	51.1	33.40	-
X <sub>II</sub>	Inert suspended organic matter concentration in wastewater	g COD m <sup>-3</sup>	40.7	64.65	-
X <sub>s1</sub>	Slowly biodegradable organic matter concentration in wastewater	g COD m <sup>-3</sup>	97.2	35.15	-
S <sub>NO1</sub>	Soluble nitrate nitrogen concentration in wastewater	g NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	-	1.27	-
S <sub>NH1</sub>	Soluble ammonia nitrogen concentration in wastewater	g NH <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	-	18.25	-
S <sub>NI1</sub>	Soluble inert organic nitrogen concentration in wastewater	g N m <sup>-3</sup>	-	2.65	-
S <sub>ND1</sub>	Soluble biodegradable organic nitrogen concentration in wastewater	g N m <sup>-3</sup>	-	2.25	-
X <sub>ND1</sub>	Slowly biodegradable organic nitrogen concentration in wastewater	g N m <sup>-3</sup>	-	2.36	-
<b>Stoichiometric parameters</b>					
Y <sub>H</sub>	Yield for heterotrophic biomass	g cell COD formed/ g COD oxidized	-	0.49	0.67
Y <sub>A</sub>	Yield for autotrophic biomass	g cell COD formed/g N oxidized	-	-	0.24
f <sub>P</sub>	Fraction of biomass leading to particulate products	g COD/g COD	-	-	0.08
i <sub>XB</sub>	Mass of nitrogen per mass of COD in biomass	g N/g COD in biomass	-	-	0.086
i <sub>XP</sub>	Mass of nitrogen per mass of COD in products from biomass	g N/g COD in endogenous mass	-	-	0.06
<b>Kinetic parameters</b>					
μ <sub>H</sub>	Maximum specific growth rate for heterotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	-	2.68	6.0
K <sub>s</sub>	Half-saturation coefficient for heterotrophic biomass	g COD m <sup>-3</sup>	30.0	53.07	20.0
K <sub>O,H</sub>	Oxygen half-saturation coefficient for heterotrophic biomass	g O <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	-	-	0.20
K <sub>NO</sub>	Nitrate half-saturation coefficient for denitrifying heterotrophic biomass	g NO <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	-	-	0.50
b <sub>H</sub>	Decay coefficient for heterotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	-	0.14	0.62
μ <sub>A</sub>	Maximum specific growth rate for autotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	-	0.49	0.8
K <sub>NH</sub>	Ammonia half-saturation coefficient for autotrophic biomass	g NH <sub>3</sub> -N m <sup>-3</sup>	-	-	1.0
K <sub>O,A</sub>	Oxygen half-saturation coefficient for autotrophic biomass	g O <sub>2</sub> m <sup>-3</sup>	-	-	0.4
b <sub>A</sub>	Decay coefficient for autotrophic biomass	day <sup>-1</sup>	-	-	0.05-0.15
η <sub>r</sub>	Correction factor for μ <sub>H</sub> under anoxic condition	dimensionless	-	-	0.8
η <sub>h</sub>	Correction factor for hydrolysis under anoxic condition	dimensionless	-	-	0.4
k <sub>h</sub>	Maximum specific hydrolysis rate	g slowly biodegradable COD/g cell COD/day	-	-	3.0
K <sub>x</sub>	Half-saturation coefficient for hydrolysis of slowly biodegradable substrate	g slowly biodegradable COD/g cell COD	-	-	0.03
k <sub>a</sub>	Ammonification rate	m <sup>3</sup> COD/g/day	-	-	0.08

\* : COD 229 mg/L, SS 84 mg/L, T-N 23 mg/L, T-P 4 mg/L



**Fig. 3.** Results of steady-state calibration.

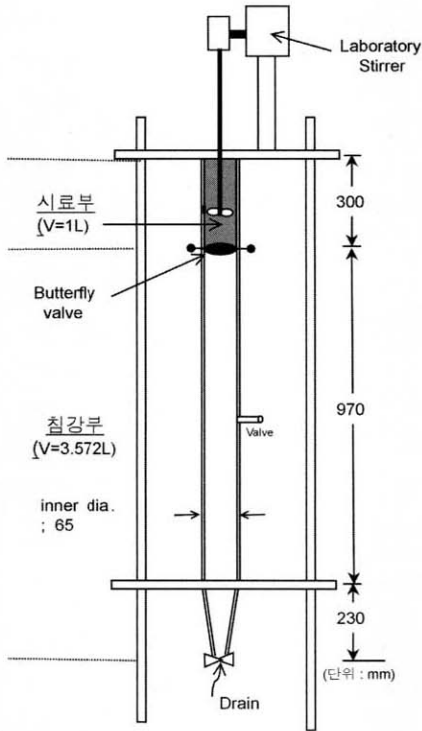


Fig. 4. The settling column apparatus.

다(Michelbach, 1993). 이 방법은 통상 시료부와 침강부를 나누어 구성한다. 시료부에는 시료중의 고형물이 균일하게 분포된 층을 형성하도록 유지시킨 후 침강부의 액중(청정수)으로 고형물이 침강하게 되며, 침강 후 침강부 말단으로 모인 고형물의 분율과 침강속도를 상관짓게 된다. 이 실험으로 응집처리된 시료를 침강시켜 응집침전속도 및 제거효율과의 관계를 알 수 있으며 이것으로 실제 침전지의 설계인자 및 운전인자를 도출해낼 수 있다(윤, 1999). 침전실험용 시료는 강우시 하수처리장으로 유입되는 유입수를 grab으로 샘플링하였으며, 샘플링 즉시 실험실에서 실험하였다.

시료부에 응집제를 넣고 교반한 후 butterfly valve를 열어 침강부로 침강 시킨다. 응집처리된 시료를 시간에 따라 채취한 후 수질분석하여 응집침전속도와 제거효율과의 관

계를 구하였다(김, 1998). 급속응집 침전에서 이용한 응집제는 우수처리시설에서 가장 널리 쓰이는  $FeCl_3$ 를 이용하였으며(EPA, 2000), 김(1998)의 연구결과를 토대로 주입량은 40 mg/L로 정하였다. 교반방법은 100 rpm의 속도로 2분 동안 급속교반한 후, 완속교반은 50 rpm으로 20분간 교반한 후 침강시켜 3, 5, 10, 15, 30, 60분 간격으로 시료를 채취한 후 수질분석하여 입자상 COD, SS의 침강속도와 제거율을 구하여 응집제 주입 전, 후의 침전특성을 비교하였다.

현행 하수도 시설기준에서는 1차 침전지 설계기준을 건기시 계획 1일 최대 오수량에 대하여  $25 \sim 40 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ·일로 정하고 SS 제거율을 50~60% 정도 기대하고 있다. 강우시 합류식 하수관거 지역에서는 3배 높은  $75 \sim 120 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ·일의 표면부하율로 운전될 수 있는데, 위 실험결과로 볼 때 SS 제거효율이 약 35~50%일 것으로 예상된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 강우시 하수처리장 유입 유량 및 수질 분석

##### (1) 강우발생 시간에 따른 유입유량 및 수질

강우발생시간에 따라 처리장으로 유입되는 유량 및 수질의 변화특성을 분석하기 위하여 새벽에 발생한 강우(Event 1)와 주간(주간)에 발생한 강우(Event 2)에 의한 하수처리장 유입 유량 및 수질변화를 분석하였다.

Event 1은 23시부터 시작한 강우로서 Fig. 8과 같이 강우 전 건기시 유입유량은 점차 감소하고 있는 시점이다. 새벽 1~3시경에는 하수처리장 유입유량이 급격하게 감소하는 시간대임에도 불구하고, 측정된 유량은 일평균 유량( $25,000 \text{ m}^3/\text{d}$ )에 근사하게 나타났다. 수질변화는 초기 강우유출수의 영향으로 COD, SS가 각각 450, 326 mg/L까지 급격하게 증가하였다. 강우지속시간이 9시간임에도 불구하고, 초기 2시간 이후부터는 수질이 급격히 악화되는 경향이 나타났다. Event 1에서는 수질의 급격한 변동이 관찰되었으나, 전형적인 유량증가 패턴은 나타나지 않는 특성을 보였다.

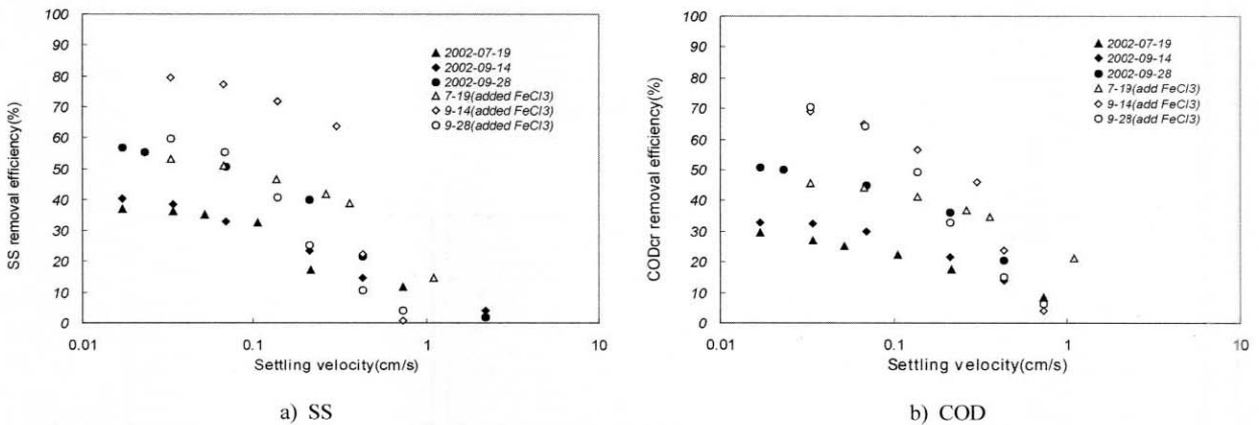


Fig. 5. Relationship between SS and COD removal efficiency and settling velocity.

Event 2는 오전 10시부터 10시간 지속된 강우로서 침투 강우강도는 7 mm/hr 이었고, 2시간 후에 최고 36,840 m<sup>3</sup>/d 까지 유량이 증가하였다(Fig. 6). 수질변화는 Event 1과 비슷한 경향을 보였지만, 강우가 주간(낮)에 내리고 강우량이 상대적으로 많아 초기 강우유출수에 의한 유입농도의 증가폭이 더욱 크게 관찰되었다. 대부분의 강우유출수 분석결과에서도 나타나듯이 초기세척효과에 의한 수질증가가 유량증가에 앞서 발생하였다.

(2) 강우강도-지속시간 변화에 따른 유입유량 및 수질 특성 강우지속시간 및 강우강도에 따른 처리장 유입유량 및 수질변화를 분석하기 위하여 다음과 같은 2개의 강우 Event 즉, 단기간의 높은 강우강도(Event 3)와 장기간의 낮은 강우강도(Event 4)에 대한 하수처리장 유입유량 및 수질변동을 분석하였다. Event 3는 단기간의 높은 강우강도로 강우지속 시간은 9시간, 평균 강우강도는 6.78 mm/hr였다. Event 1과 같이 새벽에 발생하였음에도 불구하고 총 강우량(61 mm)과 강우강도가 크기 때문에, 건기 평균유입량(24,490 m<sup>3</sup>/d)에 비해 4배나 많은 침투 유입유량(98,880 m<sup>3</sup>/d)이 발생하였다. 이러한 침투유량의 계속적인 유입은

처리장 운전 전에 있어서 심각한 문제를 유발시키며, 특히 포기조의 슬러지 유실을 초래하여 처리장 효율을 저하시킬 수 있다(Harremoes et al., 1993). 초기 강우유출수의 유입으로 수질은 Fig. 7과 같이 급격히 증가하다가 지속강우유출량(extended duration flow)의 유입으로 감소하는 경향을 나타내었다.

Event 4는 강우지속시간이 17시간, 평균강우강도 3.9 mm/hr의 강우사상으로서 COD는 512 mg/L 까지 증가하다가 지속적으로 강우가 유입되면서 288 mg/L 까지 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 수질변화는 Event 3과는 달리 점진적으로 변화하는 특징을 나타내었다. 유량은 강우초기에 급격하게 증가하였으나 침투유량(74,976 m<sup>3</sup>/d)은 Event 3보다 낮게 관측되었다. 낮은 강우강도로 지속적으로 진행되는 강우특성으로 인하여 처리장까지 도달하는 유량증가가 수질 침투보다 앞서 발생한 결과도 특징적이다.

Event 3과 Event 4는 총강우량은 비슷하지만 강우지속시간이 다르고, 침투 강우강도도 약 3배 정도 차이가 나는 강우특성을 가지고 있다. 짧은 시간에 집중적으로 내린 Event 3의 경우 유량, 수질 모두 변동계수가 크게 나타났

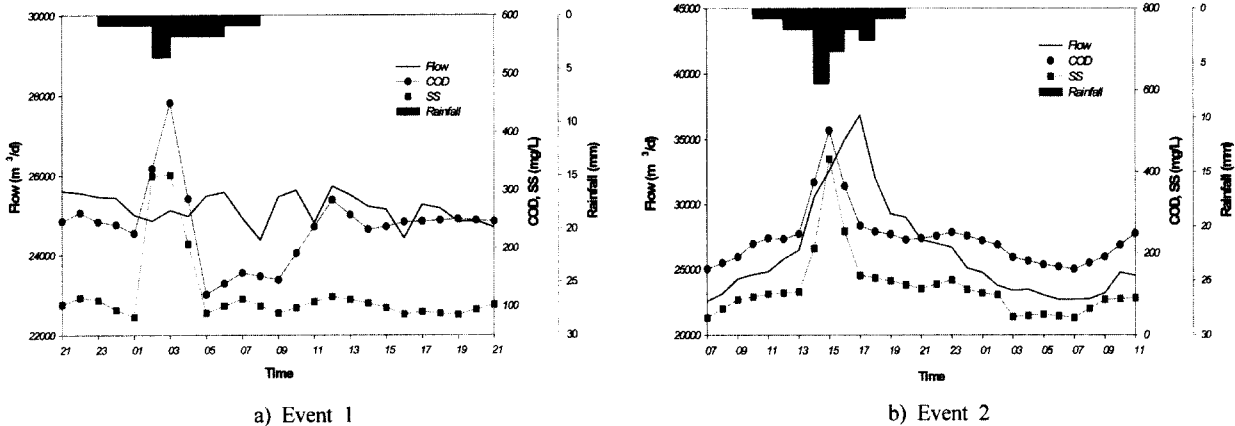


Fig. 6. Variations of inflow flow and water quality during Event 1 and 2.

Table 4. Comparison of inflow and water quality between Event 1 and 2.

Item		Event 1	Event 2	Dry weather <sup>***</sup>	
Total rainfall depth(mm)		15	24	-	
Duration(hr)		9	10	-	
Average rain intensity(mm/hr) (min ~ max)		1.7 (1 ~ 4)	2.4 (1 ~ 7)	-	
Influent flow(m <sup>3</sup> /d)	Average	25,198	29,335	25,269	
	Range (min ~ max)	24,864 ~ 25,584	24,605 ~ 36,840	16,588 ~ 36,849	
	C.V. <sup>**</sup>	0.015	0.157	0.056	
Influent concentration <sup>*</sup> (mg/L)	COD	Average	243	301	229
		Range (min ~ max)	120 ~ 450	221 ~ 501	161 ~ 275
		C.V.	0.424	0.358	0.159
	SS	Average	144	159	83
		Range (min ~ max)	81 ~ 326	93 ~ 432	42 ~ 126
		C.V.	1.092	1.133	0.278

\* : Event mean concentration, \*\* : Coefficient of variation, \*\*\* : 2002. 10. 28 ~ 2002. 10. 30

으며, 수질보다도 유량의 변동성이 더 크게 나타났다. 앞서 Event 1, 2에서와 마찬가지로 침투 강우강도가 강우시 하수처리장의 유입유량 및 수질변동의 주요 원인임을 알 수 있다. 또한 입자성 물질의 유입이 증가하면서 SS의 유입농도 변화가 크게 나타나는 것도 특징적이다.

3.2. 강우시 하수처리장 대응운전결과

강우시 처리장 대응운전방법은 수치해석 모델링을 이용하여 앞서 설명한 두 강우, 단기집중 강우인 Event 3과, 장기지속 강우인 Event 4에 대하여 각 대응운전방법별로 처리결과를 모의, 분석하였다.

3.2.1. 단기 집중강우(Event 3)

(1) 2차 처리유량 증대방안(Alt. I)

강우 Event 3은 지속시간 9시간, 평균강우강도 6.8 mm/hr 인 단기간의 높은 강우강도를 보인 강우사상으로서, 이로 인해 유발된 처리장 유입유량 변화는 평균 유입량에 비해 최대 4배나 많은 98,880 m<sup>3</sup>/d까지 증가하는 경향을 나타내었다.

Event 3에 대하여 각 대응운전방법에 따른 2차 처리수의 SS와 COD 농도변화는 Fig. 8과 같이 나타났다. 2Q를 bypass 한 Alt. I-1의 경우에는 SS농도 농도가 13 mg/L 내외로 안정적인 수질을 나타내었지만, 2차 처리 유량을 2Q, 3Q로 증가시킨 Alt. I-2, 3의 경우 포기조의 수리학적 부하가 증가하여 처리수질이 급격하게 저하되어 유출수의 SS농도가 방류수 수질기준(20 mg/L)을 초과하는 것으로 나타났다.

Carrette et al.(2001)은 포기조 유입유량을 2배로 늘리는 동시에 2차 침전지의 용적을 늘리는 경우에는 처리수질이 기준을 초과하지 않고, 총 발생오염부하를 효과적으로 저감시킬 수 있는 것으로 보고하였으나, 본 연구결과에서는 2차 침전지의 수리학적 부하증가가 처리수질 악화에 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단된다. 강우가 종료되고 약 11시간 이후부터 건기수질로 회복되고 있음을 알 수 있다.

COD의 경우 유량이 급격하게 증가한 초기에 유출수 농도가 급격하게 증가하였으며, 강우종료와 함께 점차 정상상태로 회복되고 있으나 SS에 비해서는 회복속도가 느린 것으로 나타났다. 이는 강우초기에는 단기간에 갑자기 3Q에

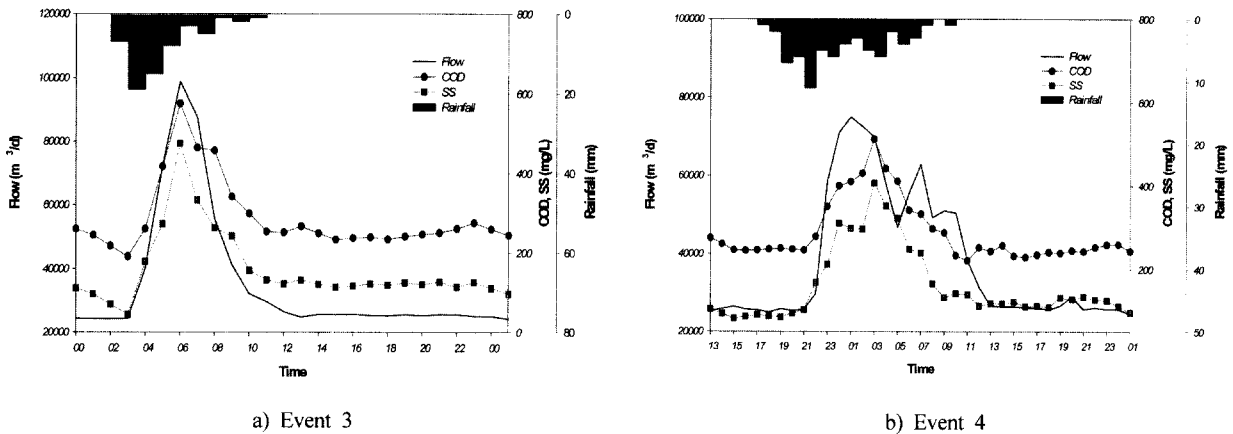


Fig. 7. Variations of inflow and water quality during Event 3 and 4.

Table 5. Comparison of inflow and water quality between Event 3 and 4

Item		Event 3	Event 4	Dry weather***	
Total rainfall depth(mm)		61	67	-	
Duration(hr)		9	17	-	
Average rain intensity(mm/hr) (min ~ max)		6.8 (1 ~ 19)	3.9 (1 ~ 11)	-	
Influent flow(m <sup>3</sup> /d)	Average	43,479	43,142	24,669	
	Range (min ~ max)	24,192 ~ 98,880	24,939 ~ 74,976	21,946 ~ 26,473	
	C.V.**	1.028	0.733	0.056	
Influent concentration* (mg/L)	COD	Average	319	305	229
		Range (min ~ max)	190 ~ 575	221 ~ 512	161 ~ 275
		C.V.	0.501	0.365	0.159
	SS	Average	189	183	83
		Range (min ~ max)	44 ~ 475	85 ~ 407	42 ~ 126
		C.V.	1.396	1.165	0.278

\* : Event mean concentration, \*\* : Coefficient of variation, \*\*\* : 2002. 10. 28 ~ 2002. 10. 30

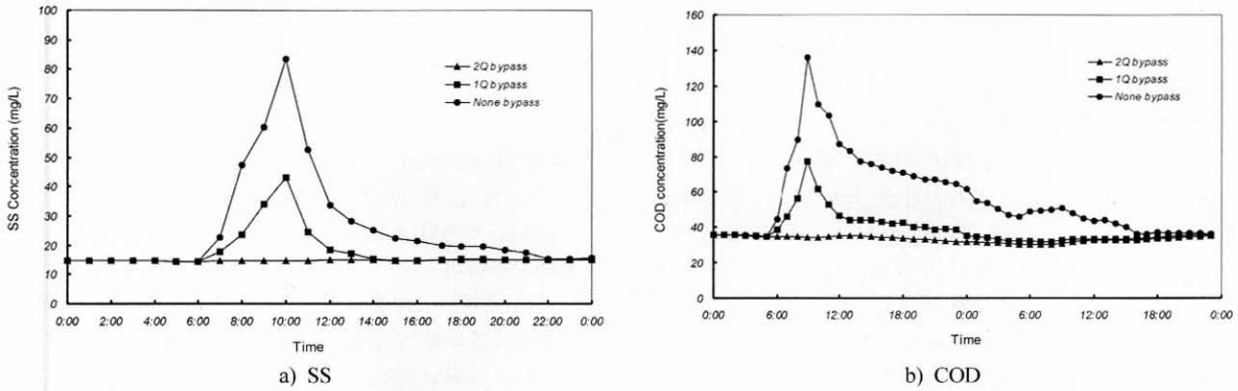


Fig. 8. Effect of increasing 2nd treatment flow on effluent concentration during Event 3.

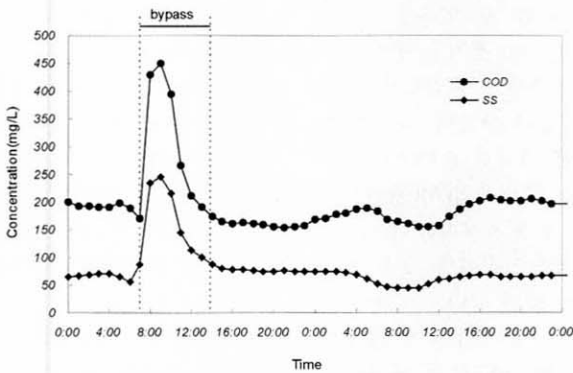


Fig. 9. Effluent water quality of primary clarifier during Event 3.

해당하는 과잉유량과 초기세척에 의해 1차 침전지를 거치고도 450 mg/L에 이르는 고농도의 충격부하에 의하여 미처리된 하수가 그대로 유출되었으며, 침두수질 이후에는 포기조에서 유실된 MLSS로 인하여 완전한 제거가 이루어지지 못했기 때문에 처리수질의 회복이 느려진 것으로 추측된다. 강우가 종료되고 유입유량이 감소함에 따라 점차 수질이 안정화되고 있으며, 오전 10~11시 사이에 일시적으로 수질이 상승한 것은 아침식사 시간 및 샤워 등의 활동이 영향을 주었기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 1차 침전지유출수의 COD, SS 농도변동을 나타낸

것으로서 bypass가 발생하는 오전 7시부터 오후 2시 사이에 급격하게 증가하였음을 알 수 있다. 이처럼 1차 침전지 유출수의 급격한 증가는 초기세척 강우유입수에 의한 영향과 함께, 농축조 상정액, 소화조 탈리액, 탈수기 탈수여액 등이 1차 침전지로 재반송되는 현 시스템에서 과유량에 의하여 재반송수가 미처리상태로 월류된 것도 원인의 하나로 판단된다.

각 대응운전방법별 총 방류오염부하를 분석한 결과, Fig. 13과 같이 SS와 COD 모두 Alt. I-1, 2, 3 순으로 높게 나타났다. Alt. I-2, 3의 경우 Alt. I-1에 비해 SS는 17.4, 44.7 %를, COD는 11.4, 23.7 %를 각각 저감시킬 수 있는 것으로 모의되었다. Takayanagi et al.(1996)의 연구에서는 실제로 2차 처리 유량을 3Q까지 증가시킨 결과 2Q를 bypass시키는 기존의 운전방식에 비해 연간 배출오염부하로 산정할 경우 CODMn은 약 20 %, SS는 14 %정도 저감되는 것으로 나타났다. Alt. I-1에서는 방류 오염부하 중 SS는 80.9 %, COD는 64.4 %가 bypass의한 것으로 나타났다. 이는 bypass가 발생하는 강우초기에 유입수내 수질이 급격하게 증가하였고 3Q를 1차 침전지킴에 따라 침전지 최대 표면부하율이 건기시 32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일에서 96 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·일로 상승함에 따라 처리효율이 급격하게 저하되었기 때문으로 판단된다.

강우 Event 3에 대하여 각 대응운전방법별로 수치해석 모델을 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다. 강우시 처리

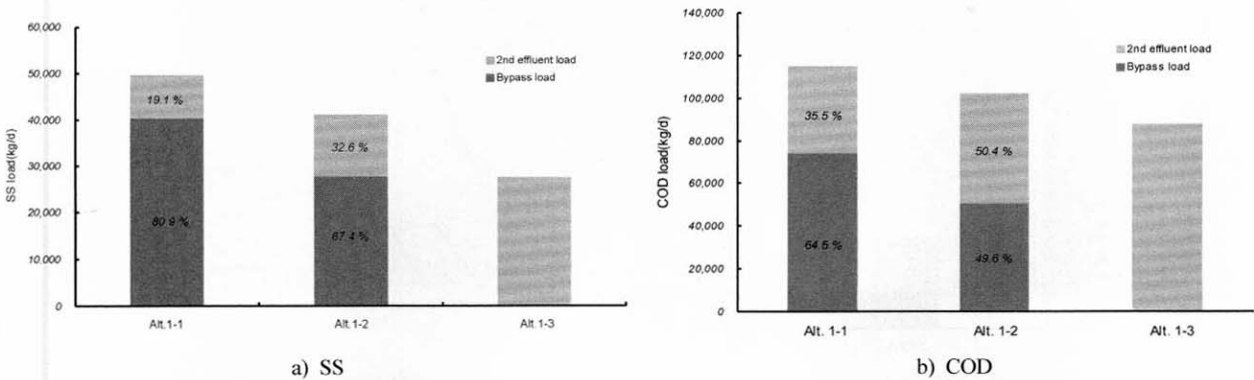


Fig. 10. Total discharge load by Alt I -1, 2, and 3 during Event 3.



장 2차 처리 수질은 Alt. I-1이 가장 안정적으로 유지되고 있으며, Alt. I-2, 3은 포기조대로 2Q, 3Q를 유입시킴에 따라 충격부하에 의하여 강우 종료 후 전기 평균유출수질로 회복되는데 11~30시간이 걸렸다. 실제로 하수도 시설기준 상에서 강우시 합류식 하수관거 지역의 하수처리장에서 1차 침전지는 30분 이상의 체류시간을 확보하도록 규정하고 있으나, 모의결과 1차 침전 후 bypass되는 유량의 오염부하가 상당히 높은 것으로 나타나 그대로 방류하는 경우 방류수역에 미치는 영향이 심각한 것으로 판단되었다. 2차 처리 유량을 2Q, 3Q로 증가시킨 Alt. I-2, 3의 경우 Guderian et al.(1998)의 연구결과와 마찬가지로 방류수역으로 배출되는 총 오염부하 측면에서는 효과적이라고 할 수 있으나, 과부하에 의하여 2차 처리공정에서 슬러지 유실 등이 발생하고, 강우 종료 후에도 다시 정상적으로 회복되는데, 11~30시간이 소요되는 등, 유지관리 면에서 많은 문제를 유발시키는 것으로 나타났다. 강우시 하수처리장 운전에서는 시스템내 미생물의 안정화와 슬러지 월류를 방지하는 것이 중요하다(Chen and Beck, 2001). 이러한 결과를 종합할 때, 현행하수도시설기준에서 제시한 방법인 Alt. I-1을 통하여 처리시스템을 안정적으로 유지하면서, 1차 침전 후 bypass되는 유량에 대해서는 별도의 처리방법을 강구하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단하고 bypass유량의 별도처리 방안에 대하여 검토하였다.

(2) Bypass 유량 별도처리 방안(Alt. II)

① 우수 침전지, 급속응집 침전처리(Alt. II-1, 2)

1차 침전 후 bypass되는 유량에 대한 별도처리 방안(Alt. II)에 대하여 검토한 결과는 다음 그림 11과 같다.

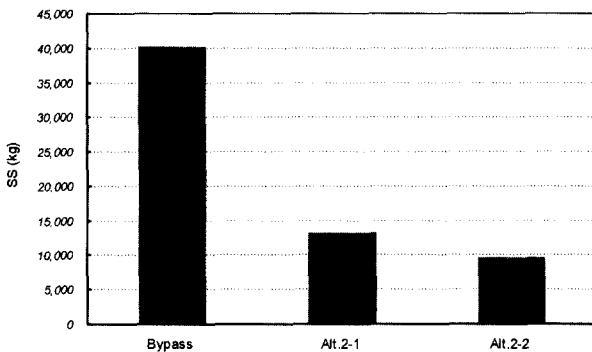
bypass되는 유량에 대하여 4,167 m<sup>3</sup> 용적에 최대 표면부하율을 36 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d로 설계한 우수 침전지에 의하여 SS부하 중 64.7 %가 제거되었으며, 급속응집 침전에 의해서는 약 76.0 %가 제거되는 결과를 보였다.

COD 부하의 경우 우수침전지(Alt. II-1)에 의해 61.9 %가 제거되었으며, 급속응집침전(Alt. II-2)에 의하여 70.8 %가 제거되는 결과를 얻었다. 이는 앞선 실험실 규모의 침전실험에서도 나타났듯이 강우유출수의 경우 지표유출수의 특성 즉, SS농도가 높고, 초기세척효과가 뚜렷한 점 때문에 침전처리만으로도 SS, COD 모두 65 %이상의 처리효율을 얻을 수 있음을 보여준 결과이다. 급속응집침전처리는 침전지의 용적을 줄일 수 있어 기존처리장의 부지소요를 최소화하고 유입유량에 따라 응집제를 탄력적으로 조절할 수 있기 때문에 강우시 bypass되는 유량을 처리하기에 적합한 기술로 판단되었다.

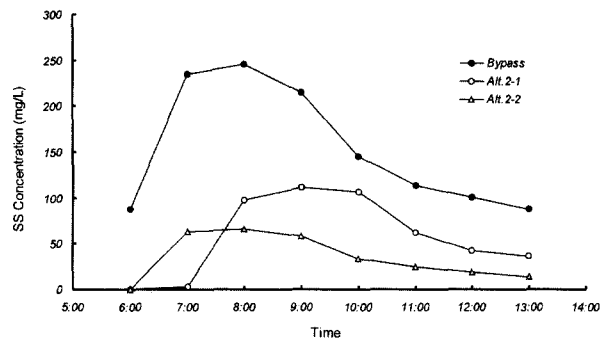
② 분배주입(Alt. II-3)

1차 침전처리한 유량을 전량 2차 처리하되 포기조의 흐름방향으로 1/3, 2/3 지점에서 각각 분배 주입한 결과는 Fig. 13과 같다.

전량을 유입부에 주입한 결과(Alt. I-3)와 비교했을 때, COD와 SS 모두 제거효율이 향상되는 결과를 얻었다. Alt.

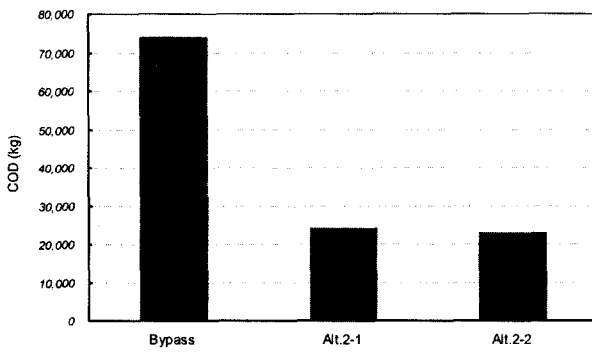


a) SS load

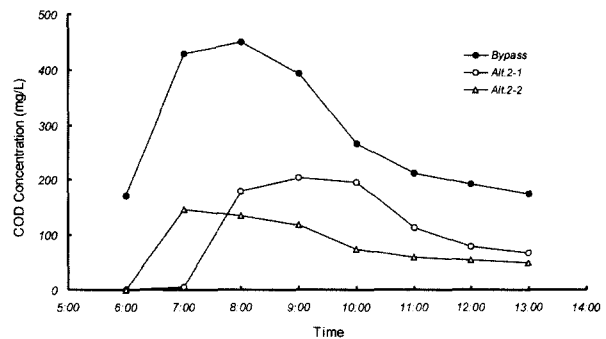


b) SS conc. profile

Fig. 11. SS removal load and SS concentration profile by Alt. II-1 and 2 during Event 3.



a) COD load



b) COD conc. profile

Fig. 12. COD removal load and COD concentration profile by Alt. II-1 and 2 during Event 3.

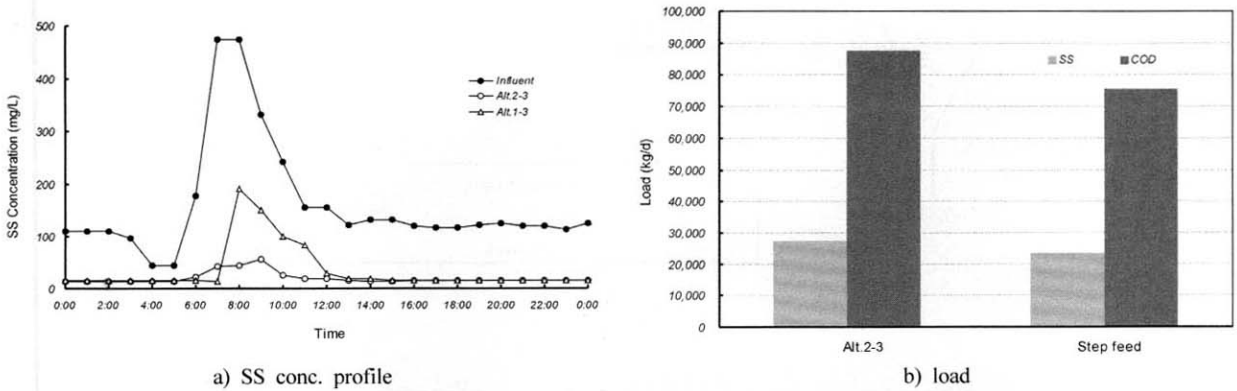


Fig. 13. Comparison of SS and COD removal efficiency and concentration profile between Step feeding(Alt.Ⅱ-3) and Alt.Ⅰ-3.

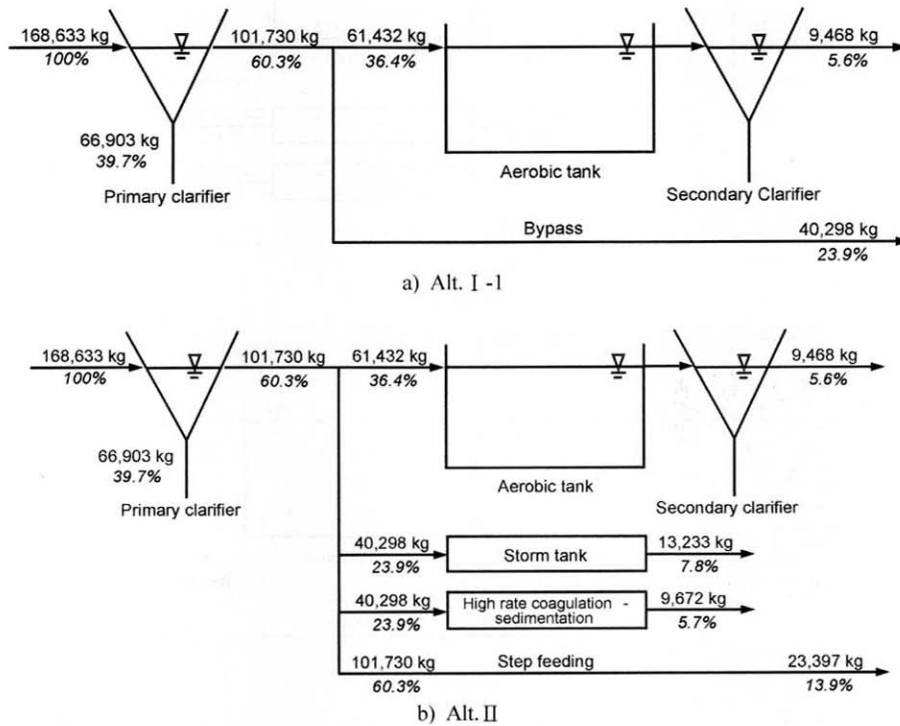


Fig. 14. SS load mass balance by Alt. I and Alt.Ⅱ during rain Event 3.

Ⅱ-3으로 운전하는 경우, 초기세척수에 의해 유입수질이 높은 6~7시 사이에는 유출수질농도가 Alt.Ⅰ-3에 비해 높게 나타났다. 이는 2/3지점으로 유입된 유입수가 미처리상태에서 방류되었기 때문으로 판단되며, 시간이 지남에 따라 유입수질이 점차 희석될수록 처리수질이 안정적으로 유지되고 있음을 알 수 있었다. Step feeding으로 운전한 경우와 전량을 유입구로 유입시켜 운전한 결과에 대하여 총 유출 오염부하를 비교하면, SS부하는 전량을 유입구로 유입시킨 것에 비하여, 15.0%를 줄일 수 있었으며, COD의 경우 13.8%를 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

3.2.2 강우시 대응운전 결과

각 강우사상별로 하수도 시설기준에 준하여 운전하는 경우에 대한 물질수지와 bypass되는 유량에 대하여 별도처리하는 방안(Alt.Ⅱ)에 대한 모의, 분석 결과는 다음과 같다.

(1) Event 3

Event 3에서 대응운전에 따른 SS, COD의 물질수지는 Fig. 14~15와 같다. 현행하수도 시설기준에 따른 Alt.Ⅰ-1의 운전에서는 강우시 유입 SS부하 중 39.7%가 1차 침전지에서 제거되고, 23.9%는 bypass되며 실제로 2차 처리되는 부하는 36.4%에 불과한 것으로 나타났다. 방류되는 오염부하에서도 bypass 부하가 2차 처리수에 비해 약 4배 가량이 많은 것으로 나타나 bypass되는 유량에 대한 별도처리가 반드시 필요할 것으로 판단된다. bypass되는 유량에 대한 별도 처리방안(Alt.Ⅱ)을 검토한 결과, 급속응집침전에 의한 처리방법이 오염부하 제거측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났다.

COD 물질수지를 분석하면 2Q를 bypass 처리하는 경우에는 1차 침전지를 거치면서 32.2%가 제거되고, bypass되는 부하는 24.7%, 2차 처리후 방류되는 부하는 9.8%로 나타

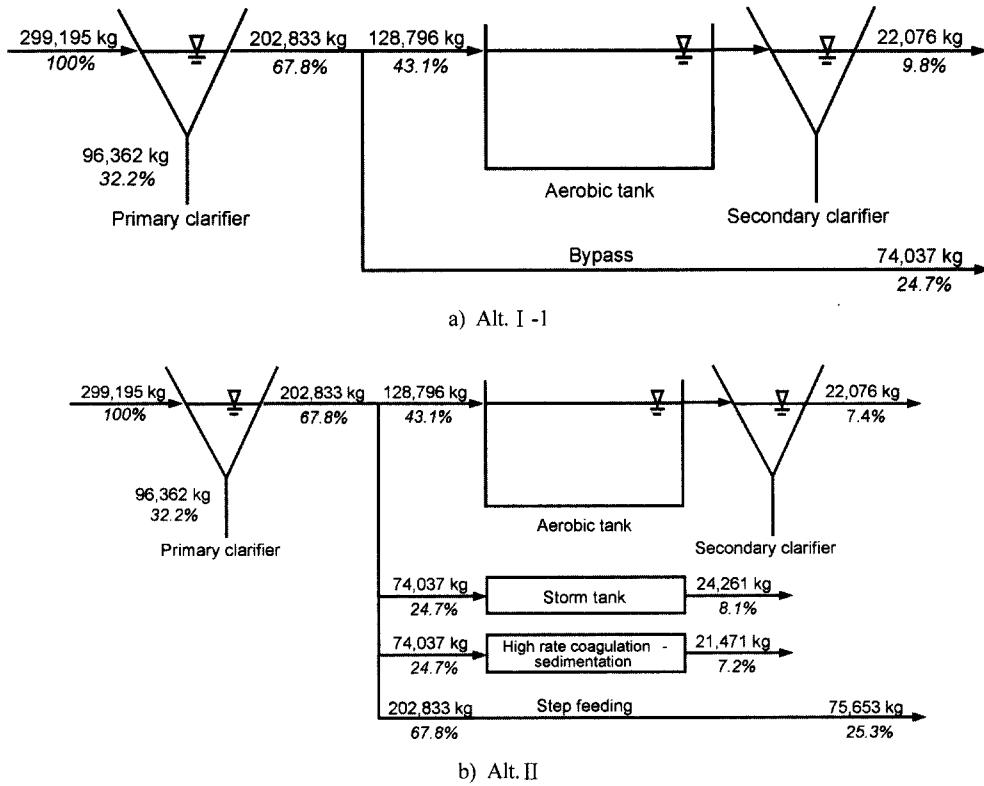


Fig. 15. COD load mass balance by Alt. I and Alt. II during rain Event 3.

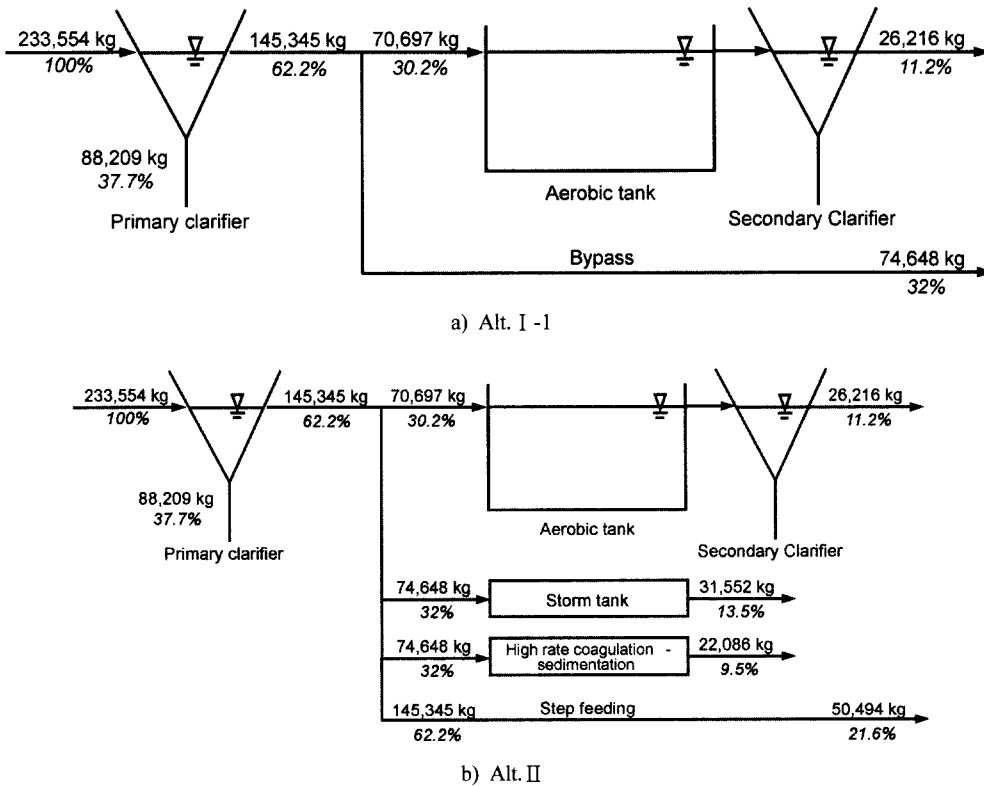


Fig. 16. SS load mass balance by Alt. II during rain Event 4.

났다. bypass되는 74,037 kg을 별도처리한 결과 약 71 %의 처리율을 보인 급속응집침전이 가장 좋은 결과를 보였다.

(2) Event 4

Event 4 대한 각 대응운전 방안별 SS, COD의 물질수지는 Fig. 16~17과 같다. Event 4의 경우 장기적인 강우에 의하여 유입유량이 많았기 때문에 bypass되는 유량도 증가

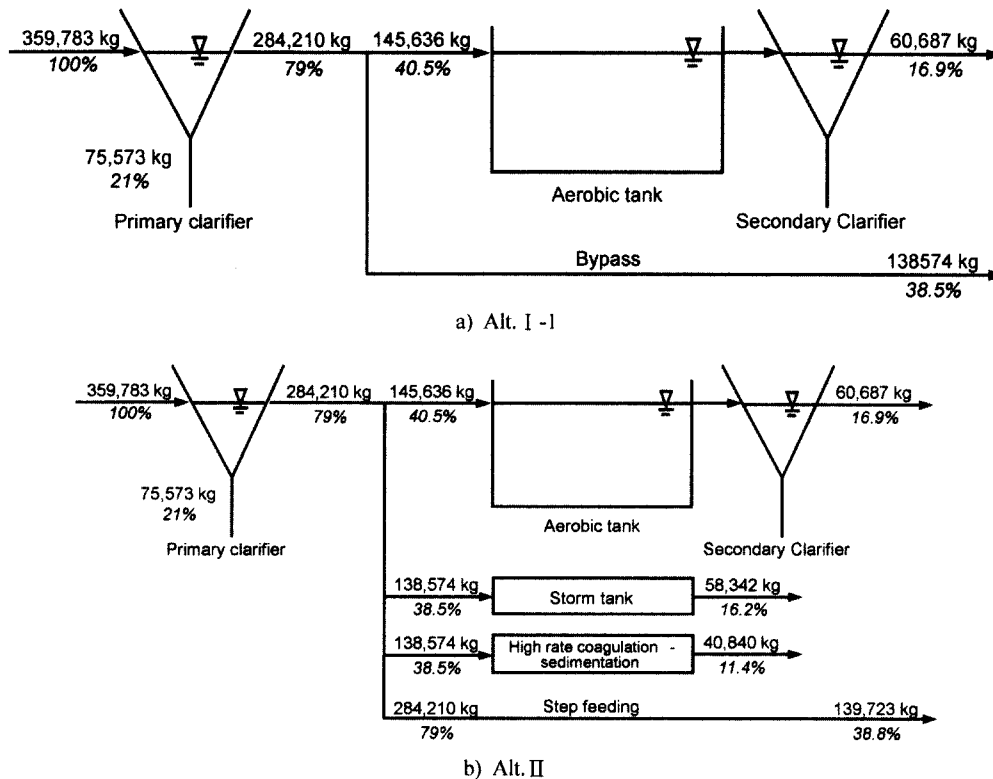


Fig. 17. COD load mass balance by Alt. II during rain Event 4.

하여 오염부하도 상대적으로 크게 나타났다. SS의 경우 bypass되는 부하가 2차 처리 후 방류되는 부하의 3배 정도로 나타났으며, bypass되는 유량을 급속응집침전 처리하는 경우에는 전체 유입SS부하를 79.3 %까지 처리할 수 있는 것으로 나타났다. bypass시키지 않고 분배주입을 통해 전량 처리하는 경우에는 78.4 %를 처리할 수 있는 것으로 나타나 상당한 효과가 있으나, 앞서 언급한 대로 포기조와 2차 침전지에 수리학적 과부하를 유발시켜 방류수 수질기준을 초과하는 문제를 유발시키므로 실제로 적용하기에는 다소 어려움이 있을 것으로 판단된다.

COD 부하의 경우 SS와 유사한 결과를 보였으나, 2차 처리 방류부하가 전체 유입 부하의 16.9 %로 다소 높게 나타났다. 우수 침전지보다는 급속응집침전이 더 우수한 처리 효율을 나타내었고 총 제거효율면에서는 1Q를 2차 처리하고, 나머지 유량은 급속응집침전하는 방안이 71.7 %로 나타나 가장 우수한 것으로 모의되었다.

#### 4. 결론

본 장에서는 합류식 하수관거 지역에서 강우시 하수처리장으로 유입되는 유량과 수질을 분석하고, 처리시스템에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 하수처리시스템 모델링을 이용하여 강우시 유입유량과 오염부하 변동에 안정적으로 대응할 수 있는 운전방안에 대하여 검토하였다.

본 장에서 도출한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 강우특성에 따른 하수처리장 유입유량 및 수질분석 결과, 강우발생시간은 유량 변동에 영향을 미치고, 강우강도

는 수질변화를 크게 하는 것으로 나타났다. 조사된 4회의 강우 중 총 강우량 61 mm, 강우지속시간 9시간, 침투 강우강도 19 mm/h의 강우특성을 가진 Event 3이 처리장 유입 유량과 수질변동을 가장 크게 하였다. 침투 COD, SS 농도는 575 mg/L, 475 mg/L로 나타났으며, 건기 평균수질에 비해 각각 2.5배, 5.7배 높게 나타났다.

2. Event 3과 Event 4에 대하여 2차 처리유량을 증가시킨 Alt. I 과 배제유량을 별도로 처리하는 Alt. II에 대하여 하수처리시스템 해석모델을 이용하여 그 효과를 예측한 결과는 다음과 같다.

2차 처리 유량을 2Q, 3Q로 증대시킨 경우 2Q를 bypass시키는 기존 운전방법에 비하여 총 유출 오염부하를 SS는 17.4 %, 44.7 %, COD는 11.4 %, 23.7 %를 각각 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 유출되는 총 오염부하를 저감시키는 면에서는 효과적이었으나, 포기조와 침전지에 충격부하를 주어 슬리지 유실을 초래하였으며, 이로 인하여 처리수질이 장기간 방류수 수질기준을 초과하는 것으로 예측되었다.

3. 현행 하수도 수질기준에서 강우시 운전기준으로 제시한 1Q(Q, 일최대 하수량) 2차 처리, 2Q bypass 방안에서 Event 3의 경우 1차 침전지를 거치고 배제(bypass)되는 수질이 SS는 87.4~245.7 mg/L, COD는 174.8~449.9 mg/L로 나타났으며, 강우시 총 유입오염부하 가운데 SS는 23.9 %, COD는 24.7 %가 bypass되어 방류수역으로 유출되는 것으로 나타났다.

Event 4의 경우 총 유입오염부하 중 SS는 32.0 %, COD는 38.5 %가 bypass되는 것으로 나타나 1차 침전지만으로는 강우유입수 처리에 무리가 있는 것으로 판단되며, 이는 농

축조 상징액, 소화조 탈리액, 탈수기 탈수여액 등이 1차 침전지로 재반송되는 처리시스템에서 강우유입수에 의한 과유량은 1차 침전지에 과부하를 미치게 되어 고농도의 재반송수가 미처리 상태에서 유출되기 때문에 판단된다. 강우시 처리시스템을 안정적으로 유지하고 방류수역의 배출오염부하를 저감시키기 위해서는 배제유량에 대한 철저한 관리와 별도 처리가 필요할 것으로 판단되었다.

4. 배제유량의 별도처리(Alt.Ⅱ)에 대한 모의 결과를 살펴보면, Step feeding방안(Alt.Ⅱ-3)은 강우조반에 고농도 유입수에 대해서는 다소 불안정한 처리수질을 나타냈으나, 강우가 지속됨에 따라 처리수질이 안정화되었으며, Event 3에서 총 유입 오염부하에 대하여 SS는 86.1 %, COD는 74.7 %를 제거하였고, Event 4에서는 SS 78.4 %, COD 61.2 %를 각각 처리하는 것으로 나타났다. 참고적으로 3Q 전량을 2차 처리한 Alt.Ⅰ-3과 비교했을 때 Event 3에서는 SS 15 %, COD 13.8 %를 Event 4에서는 SS 14.4 %, COD 11.8 %를 더 저감시킬 수 있는 것으로 예측되었다.

5. 배제유량에 대하여 1차 침전지 2배 규모의 우수 침전지를 이용하여 처리한 결과에 따르면, Event 3에서 bypass되는 SS 부하 40,298 kg 중 64.7 %를 제거하였으며, COD 부하는 61.9 %를 제거할 수 있는 것으로 나타났다. Event 4의 모의에서는 배제되는 SS, COD 부하를 각각 57.7 %, 58.0 % 제거하는 결과를 보였다.

6. 배제유량에 대해서 FeCl<sub>3</sub>를 이용하여 급속교반(2분), 완속교반(20분) 후 30분간 침전처리한 급속응집침전 처리(Alt.Ⅱ-3)가 가장 높은 처리효율을 나타내었다. Event 3, 4에서 SS는 각각 76, 73.4 %를 처리하였고, COD는 70.8, 70.5 %를 제거할 수 있는 것으로 예측되었다.

합류식 관거지역에서 강우시 하수처리장의 대응운전에 대하여 모의한 결과, 처리시스템을 안정적으로 유지하기 위해서는 유입유량 중 일부의 배제가 불가피하며, 배제된 유량의 경우 방류수역에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 반드시 별도처리하는 것이 바람직할 것으로 사료되었다. 현재의 처리시설을 그대로 유지하면서 급속응집침전시설을 추가함으로써 강우시 배제유량을 효과적으로 처리할 수 있을 것으로 판단되었다. 아울러 실제로 별도의 강우유입수 처리시설을 적용하는 경우에는 강우유입수의 특성인 초기 세척유량까지 처리유량의 범위를 제한하는 것도 시설을 최적으로 운전할 수 있는 방안으로 제안할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 김태희, 合流式 下水管渠 越流水의 凝集 및 粒徑分布 特性, 한양대학교대학원 석사학위논문 (1998).
2. 윤현식, 合流式 下水管渠 越流水의 汚染物質 特性과 處理, 한양대학교대학원 박사학위논문 (1998).
3. 이두진, 都市地域 下水道시스템의 統合連營管理, 한양대학교대학원 박사학위논문 (2003).
4. 환경부, G 하수처리장 고도처리시설 기본설계 보고서 (2002).
5. APHA, AWWA, WEF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th edition (1998).
6. Carrette, R., Thoeye, C., and Ockier, P., A new concept for storm water treatment: full-scale experience in Flanders, *Wat. Sci. Tech.*, **44**(1), pp. 195-199 (2001).
7. Chen, J., and Beck, M.B., Operational Control of Storm Sewage at an Activated Sludge Process, *Wat. Sci. Tech.*, **43**(7), pp. 131-137 (2001).
8. EPA, Retrofitting control facilities for wet-weather flow treatment (2000).
9. Guderian, J., Durchschlag, A., and Bever, J., Evaluation of Total Emissions from Treatment Plants and Combined Sewer Overflows, *Wat. Sci. Tech.*, **37**(1) pp. 333-340 (1998).
10. Harremoës, P., Capodaglio, A.G., Hellstrom, B.G., Henze, M., Jensen, K.N., Lynggaard-Jensen, Otterpohl, R., and Soeberg, H., Wastewater Treatment Plant under Transient Loading-Performance, Modelling and Control, *Wat. Sci. Tech.*, **33**(12), pp. 71-115 (1993).
11. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., and van Loosdrecht, M., *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA (2000).
12. Langeveld, J.G., Clemens, F.H.L.R., and van der Graaf, J.H.J.M., Increasing Wastewater System Performance-the Importance of Interactions between Sewerage and Wastewater Treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **45**(3), pp. 45-52 (2002).
13. Michelbach, S., and Weiß, G.J., Settleable Sewer Solids at Stormwater Tanks with Clarifier for Combined Sewage, *Wat. Sci. Tech.*, **33**(9), pp. 261-267 (1993).
14. Roubos, J.A., van Straten, G., and van Boxtel, A.J.B., An Evolutionary Strategy for Fed-batch Bioreactor Optimization: Concepts and Performance, *Journal of Biotechnol.*, **67**(2-3), pp. 173-187 (1999).
15. Takayanagi, E., Shimaoka, T., and Kato, T., Activated Sludge Treatment for Wet Weather Wastewater, *Urban Wet Weather Pollution Controlling Sewer Overflows and Stormwater Runoff*, WEF, June 16-19, Quebec, pp. 15-25-36 (1996).
16. Vanrolleghem, P.A., Spanjers, H., Petersen, B., Ginestet, P., and Takacs, I., Estimating(Combinations of) Activated Sludge Model No.1 Parameters and Components by Respirometry, *Wat. Sci. Tech.*, **39**(1), pp. 195-214 (1999).

1. 김태희, 合流式 下水管渠 越流水의 凝集 및 粒徑分布