

Criteria for calculation of CSO volume and frequency using rainfall-runoff model

우수유출 모형을 이용한 합류식하수관로시스템의 월류량, 월류빈도 산정 기준 결정 연구

Gunyoung Lee¹ · Yongun Na² · Jaena Ryu¹ · Jeill Oh^{1*}

이건영¹ · 나용운² · 류재나¹ · 오재일^{1*}

¹중앙대학교 사회기반시스템공학부 · ²서울시 상수도연구원

Abstract : It is widely known that untreated Combined Sewer Overflows (CSOs) that directly discharged from receiving water have a negative impact. Recent concerns on the CSO problem have produced several large scale constructions of treatment facilities, but the facilities are normally designed under empirical design criteria. In this study, several criteria for defining CSOs (e.g. determination of effective rainfall, sampling time, minimum duration of data used for rainfall-runoff simulation and so on) were investigated. Then this study suggested a standard methodology for the CSO calculation and support formalized standard on the design criteria for CSO facilities. Criteria decided for an effective rainfall was over 0.5 mm of total rainfall depth and at least 4 hours should be exist between two different events. An Antecedent dry weather period prior to storm event to satisfy the effective rainfall criteria was over 3 days. Sampling time for the rainfall-runoff model simulation was suggested as 1 hour. A duration of long-term simulation CSO overflow and frequency calculation should be at least recent 10 year data. A Management plan for the CSOs should be established under a phase-in of the plan. That should reflect site-specific conditions of different catchments, and formalized criteria for defining CSOs should be used to examine the management plans.

Key words : Combined sewer overflows, CSO volume, CSO frequency, effective rainfall, sampling time

주제어 : 합류식하수관로월류수, 월류량, 월류빈도, 유효 강우사상, 샘플링시간

1. 서론

합류식 하수관로 시스템 (CSS, Combined Sewer System)에서 청천 시(Dry weather) 발생된 오수는 차집관로(Trunk sewer)로 모두 집수돼 하수처리장으로 이송·처리되고, 강우 시(Wet weather)에는 배수유역에서 발생된 지표유출수를 포함한 하수량(오수+우수)의 일정량이 차집(우천시계획 하수량, 3Q; Q=계획시간최대오수량)되어 하수처

리장에서 이송·처리된다. 이때 하수관로 용량을 넘어 차집되지 않고 미처리된 상태로 월류 조절시설(우수토실, Regulator)을 통해 하천에 방류되는 유출수를 '합류식 하수관로(거) 월류수(CSOs, Combined Sewer Overflows; 이하 월류수라 칭함)'라 한다(환경부, 2010).

초기 강우 시 발생하는 지표유출수에는 일정기간 동안 지표면에 축적됐던 다양한 오염물질들이 쓸려져 하수관로로 이동되고, 이렇게 증가된 유량으로 인해 관로 내 바닥 퇴적물의 재부유를 유발시키게 된다. 따라서 방류수역으로 유출된 월류수는 매우 높은 오염도를 나타내게 되며, 이로 인해

* Received 28 January 2013, revised 24 May 2013, accepted 27 May 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-2-820-5339 Fax : +82-2-812-1834 E-mail : ohjeill@cau.ac.kr

하천의 용존산소 부족 등의 원인으로 인해 어류 폐사(Fish kill)가 종종 발생하게 된다. 일반적으로 합류식 하수관로의 경우 관내 퇴적을 방지하기 위해 최소유속 0.8 m/sec를 만족하게끔 설계되어 있지만, 하수관 매설시 경사 불량, 관 꺾임, 타관 통과 등의 이유로 인해 최소유속을 만족하지 못해 퇴적물(Suspended Solid, SS)이 다량 존재하는 것으로 알려져 있다(Moffa, 1997; Rodriguez et al., 2012).

홍수 조절시스템의 계획 및 평가는 연최대치 강우계열(극한 사상)에 대한 빈도해석을 기반으로 확률강우량을 산정하고 이를 기반으로 대상 유역의 유출량을 모의하여 적용해 왔다. 그러나 년 간 발생하는 대부분의 강우사상은 큰 확률빈도를 가지고 있지 않으며, 월류수 시스템을 계획하거나 관리하기 위해서는 주로 전체 강우자료의 연속적인 강우-유출 모의 분석에 기반을 둔 통계학적 특성이 보다 더 중요하게 고려되어야 한다(Semadeni-Davies et al., 2008).

국내의 월류수 관련 기준으로는 하수도시설 기준(환경부, 2011)에서 우천시 합류식하수도의 저감목표는 인근 수계에 악영향을 미치지 않을 수준 이하로 삭감하거나 혹은 분류식하수로 전환하였을 수준으로 하거나 그 이하로 하도록 명시되어 있다. 또한, 누적유출고 개념을 도입하여 삭감대상을 산정한 연구(환경부, 2007)와 연간 발생 BOD 월류부하의 삭감율을 60%로 가정하여 산정하는 방법을 제시한 연구(환경부, 2010) 등이 있지만, 통일된 월류수 관리기준은 부재한 상황이다.

본 연구는 우수유출모형을 활용하여 합류식하수관로월류수 산정에 있어 기준이 되는 지표들을 정형화하고자 하였다. 우선적으로 대표성이 있다고 판단되는 사례지역을 선정하여 우수유출모형을 검·보정한 후, 유효강우사상 및 유효 월류사상의 판단을 위해 다양한 기준의 분석을 수행하였다. 기준이 되는 월류 발생의 유효 강우사상 조건에 대해 장기 모의를 통해 모의시 샘플링 시간에 따른 월류량, 월류빈도의 변화 추이를 통

해 기준이 되는 샘플링 시간을 결정하고자 하였다. 결정된 유효강우사상 기준과 샘플링 시간을 적용하여 장기간으로 모의하여 대상유역의 월류수 및 월류빈도 관리기준을 도출하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상유역 및 유량 모니터링

본 연구지점 선정 시 유역특성을 고려하여, 유역 내에서 발생하는 모든 우수 및 우수가 하나의 지점으로 집수 되는 지점을 선정하였다. 대상 유역의 우수와 우수의 집수 방식은 합류식 하수관로로 이루어져 있으며, 건기 시에 유역 내에서 발생하는 우수는 전량 차집 하여 처리하고 있다. 반면, 강우시 차집 용량이 적어 비교적 작은 강우에도 쉽게 토구 말단에서 월류 되어 중랑천으로 유출되는 유역이다.

유역의 면적은 96 ha이며, 토지이용현황은 고밀도의 주거밀집지역으로 주택지와 상업지가 약 49%로서 대부분의 구성을 차지하고 있으며, 도로 및 공공시설물이 26%로 구성되어 있어 전체 유역면적의 약 75%가 도시화가 되어 있다. 그 외 약 20%정도는 중·상류부 좌안 측에 산지로 구성되어 있다.

연구대상유역의 모식도는 Fig. 1(a)와 같다. 유역의 하수유량 및 월류수 측정을 위하여 월류 조절시설 전단(Fig. 1(b))과 후단(Fig. 1(c))에 각각 유량계를 설치하였고, 2012년 3월부터 ~ 6월, 11월(총 5개월)동안 5분 단위로 유량을 측정하였다. 해당 지점은 청천시 하수유량의 수위가 10 ~ 15 cm로 비교적 낮으며 암거(2.2 m×2.2 m Box형)로 되어 있어 적은 유량으로도 정밀한 측정이 가능한 Flo-tote3 전자식 유량계를 설치하였다. 유량 측정 원리는 전기전도성 유체가 자기장을 지나며 흐를 때 유속과 자기장 양쪽에 수직으로 전기장이 생기므로, 관로에 장치한 전극에 의해 전위차를 검출(패러데이 법칙)하는 방식으로 유속을 측정하고, 수심은 압력 트랜듀서 방식으로 수압이 비례하는 원리를

응용하여 수압을 전기적인 신호로 기록하고 변환하였다. 측정된 유속과 수심, 하수관로의 폭을 이용하여 유량을 도출하였다.

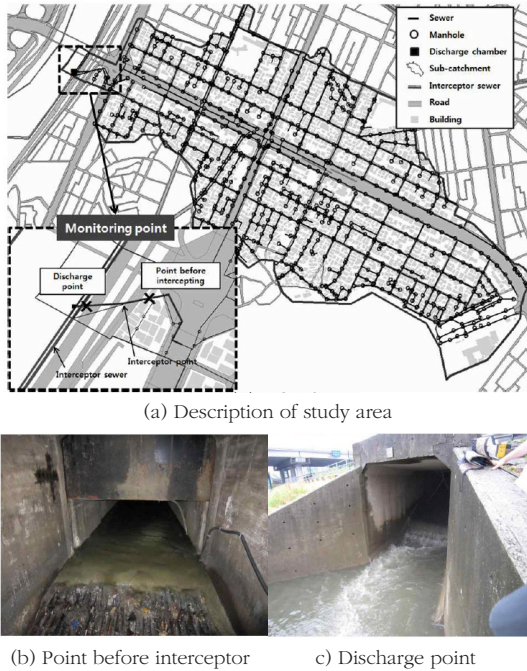


Fig. 1. Description of study area and flow monitoring spots

2.2 유량자료 검증 및 차집용량 결정

확보된 모니터링 자료 중 우수유출모형의 재현성 검증에 사용될 유량자료의 적합성을 확인해 보았다. 월류수가 발생한 2012년 3월 22 ~ 24일(Fig. 2(a)), 6월 28 ~ 30일(Fig. 2(b))의 측정자료를 대상으로 검증하였고 Fig. 2에는 수위-유속간의 관계곡선을 나타내었다. 일반적으로 관로내 유체의 수위-유속 관계는 선형적인 분포를 보이게 되는데 본 연구에서 수집한 자료도 같은 양상을 보이며 R²값이 각각 0.90, 0.96으로 사용상 적합한 자료임을 확인하였다.

대상구역의 차집관로 용량은 월류 조절시설 전·후단에서 측정되는 총 강우유출수와 월류수의 차이를 통하여 계산하였다. 같은 시점에서 측정된 2개 측정값의 차이는 차집된 유량이며, 이중 적정값을 선택하여 이 값보다 많은 강우유출

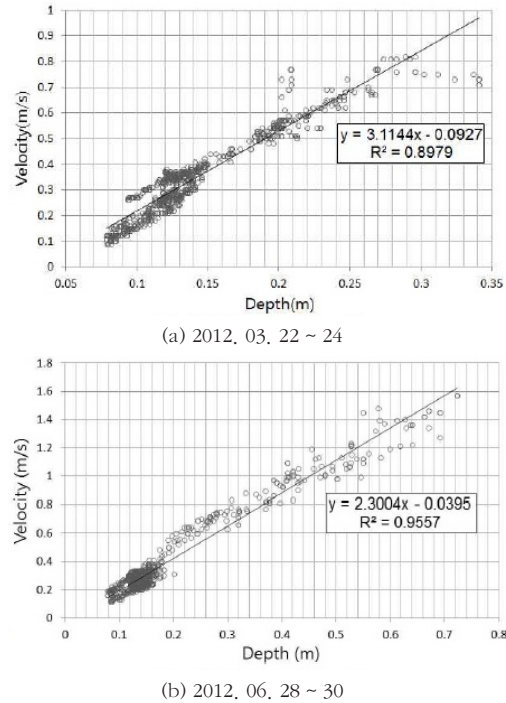


Fig. 2. Depth-Velocity relationships of measured data

수가 발생하면 월류가 발생한다고 가정하였다. 앞서 검증한 유량자료를 대상으로 시행착오법으로 선택한 차집관로용량은 0.54m³/s이다. 이를 적용하여 강우유출수가 차집관로용량을 초과하는 유량과 실제 측정된 월류량을 비교한 결과(Table 1), 2개 강우사상에 대하여 측정값과 계산값은 각각 14 %, 3 %의 오차를 보였다. 이러한 오차는 실제 차집용량은 일정하지 않으며, 유량계의 오차로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

Table 1. Comparison between measured and calculated CSO volume

Rainfall event	Measured CSO(m ³)	Calculated CSO(m ³)	Error(%)
2012-03-22~24	1,145	1,309	14
2012-06-28~30	44,863	46,107	3

2.3 우수유출모형 구축, 보정 및 검증

2.3.1 우수유출모형 구축

우수유출모델은 XP-SWMM(v2011)을 사용하였다. SWMM모형은 우천 시 지표면의 유량이 청천 시 발생하수와 합산되어 지표하의 흐름 추적을 통하여 최종적인 유출수문곡선을 얻게 된다.

Fig. 3(a)는 대상 지역의 지표면의 고도를 나타내는 수치표고모델로 최대고도는 42 m, 최저는 12 m로 중·하류부분은 비교적 경사가 적은 것으로 확인되었다. 우수유출모델의 구축은 GIS를 통한 하수관망도를 바탕으로, 직경이 500 mm 이상인 관로를 기준으로 구성하였고 (Fig. 3(b)), 구성된 관망에 대한 각 관로(463개)와 맨홀(450개)의 제원을 추출하여 모형의 입력값으로 사용하였다. 지역의 지형과 배수계통에 맞추어 소유역을 484개(Fig. 3(c))로 나누어 각 소유역의 물길에 따라 맨홀을 지정하였다. 또한, ArcGIS를 활용하여 각 소유역의 면적, 평균 경사, 폭, 불투수 면적비율 등을 도출하였다. 라우팅 기법은 단위유량도의 시간-면적 기법을 사용하였고, 도달 시간은 25분으로 설정하였다. 침투는 Horton 기법은 사용했으며, Manning 조도계수는 투수 지역의 경우 'Dense shrubbery and forest litter'에 해당하는 0.4, 불투수 지역은 'Asphalt or concrete paving'의 0.014를 적용하였다(Yoon, Y. N., 2008). 또한, 건기시 생활하수량을 적용시키기 위하여 4, 5, 6월의 건기시 유량데이터를 산술평균하여 유입되도록 설정하였다.

2.3.2 우수유출모델 보정 및 검증

보정 및 검증에 이용된 강우는 2012년 3월 22 ~ 24일, 2012년 6월 28 ~ 30일 강우로서 각각 총강우량은 21 mm, 84 mm, 지속시간은 21 시간, 15시간, 평균강우강도는 0.98 mm/hr., 5.25 mm/hr, 최대강우강도는 3 mm/hr, 11.5 mm/hr이다.

보정 결과(Table 2) 침투유량의 발생은 측정 데이터의 경우 3월 23일 11시 30분 경 0.832

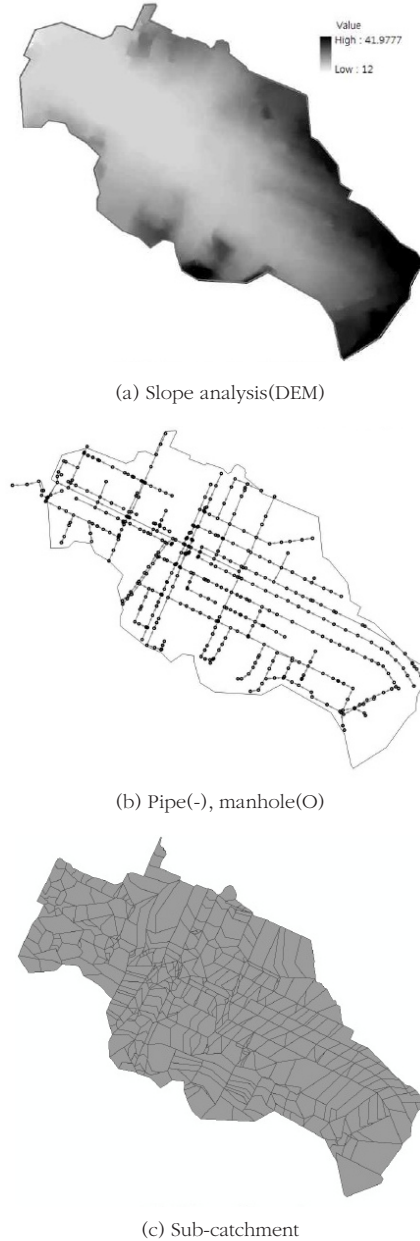


Fig. 3. Model description of study area

Table 2. Comparison of measured and calibrated results

Item	Measured	Simulated	Error
Peak time	3/23 11:30	3/23 11:25	-5 min
Peak flow(m ³ /s)	0.832	0.920	10 %
Total flow*(m ³)	42,092	40,414	4 %
Total overflow**(m ³)	1,145	1,000	13 %

* Total flow(m³) = Cumulative discharge during 3/22 ~ 3/24

** Total overflow**(m³) = Cumulative CSO during 3/22 ~ 3/24

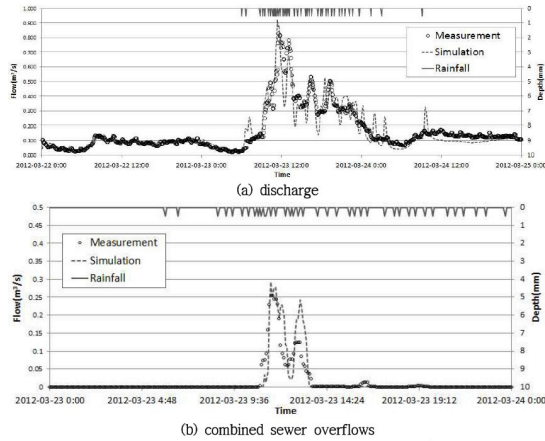


Fig. 4. Hydrographs comparing measured and simulated data (March 22 ~ 24, 2012)

m³/s이고, 모의 결과는 11시 25분 경 0.920 m³/s로 오차는 -5분과 10 %로 나타났다. 모의는 건기시의 생활하수량을 반영하는지 확인하기 위하여 3월 22일부터 24일동안 해석하였고 (Fig. 4(a)), 모의 시간동안의 총 방류되는 유량은 측정 데이터와 모의 결과 각각 42,092 m³, 40,414 m³으로 4 %의 오차를 보였다. 이는 미국 EPA의 Hydrologic Simulation Program-FORTRAN(HSPF) 그룹에서 제안한 허용한계와 목표치에 따르면 'very good'에 해당한다. 또한 같은 강우사상에서 발생된 월류량을 비교한 결과(Fig. 4(b)), 측정된 월류량과 모의된 월류량은 1,145m³, 1,000m³으로 13 %의 오차를 보였다.

2012년 6월 29 ~ 30일의 강우이벤트를 대상으로 검증한 결과는 Table 3에 나타났다. 측정 데이터와 모의 결과의 오차는 침투유량이 발생한 시점은 5분이 빠르며, 12 %가 적게 나타났다. Fig.5(a)는 6월 28일부터 30일까지 모의한 결과의 비교 그래프를 나타낸다. 강우 이벤트의 초기부분은 오차가 크게 나타났지만, 이후 중후반부분에서는 실측 데이터와 그 경향이 잘 표현됨이 확인되었다. Fig. 5(b)은 같은 기간동안 발생한 월류량을 비교한 것으로 잘 재현되고 있음을 보이고 오차는 4 %로 나타났다.

Table 3. Comparison of measured and verified results

Item	Measured	Simulated	Error
Peak time	6/30 6:20	4/3 6:15	-5 min
Peak flow(m ³ /s)	4,076	3,582	-12 %
Total flow*(m ³)	94,275	94,603	0.3 %
Total overflow**(m ³)	44,863	48,099	4 %

* Total flow(m³) = Cumulative discharge during 6/30 ~ 4/3
** Total overflow**(m³) = Cumulative CSO during 6/30 ~ 4/3

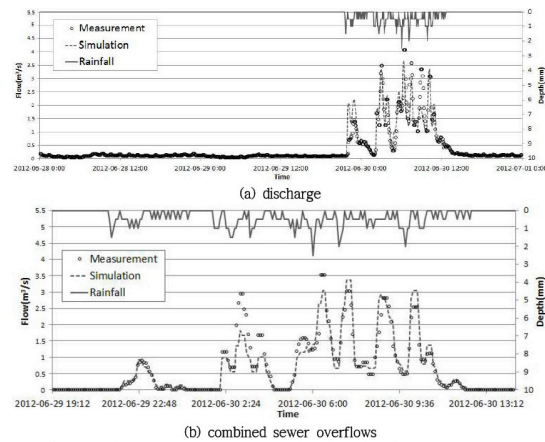


Fig. 5. Hydrographs comparing measured and simulated data (June 28 ~ 30, 2012)

2.4 유효 강우사상 및 샘플링 시간 결정방법

우수유출모형을 이용하여 월류량, 월류빈도를 산정하기 위해서는 유효 강우사상과 샘플링 시간이 결정되어야 한다. 유효 강우사상과 샘플링 시간을 결정하기 위하여 모의 대상강우는 대상구역 내에 위치한 관측소의 자료를 사용하였고, 5분 간격 기록이 있는 2007년부터 현재까지의 자료 중 유효 강우사상 결정시에는 2007 ~ 2011년, 샘플링시간 결정시는 연간 총강우량이 가장 큰 2011년 실강우 자료를 대상으로 분석하였다(Table 4).

Table 4. Annual total rainfall depths of study area

Year	2007	2008	2009	2010	2011
Annual total rainfall depth(mm)	1,065	1,212	1,423	1,672	1,915

2.4.1 유효 강우사상 기준 결정

유효 강우사상이란, 우기를 구분할 수 있는 최소한의 강우조건을 의미하며, 선행강우로부터 독립적이며, 지표유출이 일어날 수 있는 조건을 만족해야 한다(Lee et al., 2004). 유효 강우사상에 대한 조건은 합류식하수관로시스템 특성 및 지역에 따라 기준이 다를 수 있으며, 상이한 설정 기준에 따라 모의의 결과가 변모할 수 있다. 국내의 경우, 특히 도시 유역은 불투수면적의 비율이 크며 유하시간이 짧고 적은 강우에도 월류가 발생하는 지역이 존재하기 때문에 국내에 적용하기 적절한 유효 강우사상 기준이 필요하다.

Table 5은 미국(EPA, 1992)과 일본(JSWA, 2004)에서 제시한 유효 강우사상의 기준이다. 월류수 및 월류빈도의 산정을 위한 유효 강우사상의 기준에 대해 언급한 국내의 연구는 “합류식하수관거 성능 개선방안 연구(환경부, 2010)”이며, 이에는 선행건기일수가 5일 이상을 원칙으로 하나 지역 강우의 특성에 따라 조정이 가능하다고 명시되어 있지만, 이는 유동적인 기준이며 일괄적으로 적용하기엔 한계가 있다. 또한, 선행건기일수 이외의 기준들도 모호한 실정이며, 명확한 기준이 제시되어 있지는 않은 실정이다.

Table 5. Criteria for effective rainfall

Reference	Rainfall depth	Antecedent dry weather period prior to storm	Inter event time
EPA(1992)	≥ 2.54 mm	≥ 3 days	≥ 6 hours
JSWA(2004)	≥ 0.5 mm	≥ 4 days	≥ 4 hours

Gromaire et al. (2001)은 강우사상 특징 중 최대 강우강도, 선행건기일수가 월류에 영향을 주는 주요한 매개변수라고 하였다. 본 연구에서는 누적강우량, 무강우시간, 선행건기일수 중, 누적강우량과 무강우시간을 국외의 유효 강우사상 기준 중 국내의 적용에도 적합하다고 판단되는 기준을 방어적으로 채택하여 0.5 mm와 4시간으로 고정한 후, 선행 건기일수에 대한 판단을 수행하기로 결정하였다.

선행건기일수를 1, 2, 3, 4, 5일로 변화시켜가며 최근 5년(2007 ~ 2011년) 동안의 실강우 자료에 대하여 유효 강우사상을 추출하여 확인해보고, 관련 문헌들을 참고하여 이 후 적용할 선행건기일수 기준을 결정하였다. 여기에서 사용한 실강우 자료는 연구대상유역에서 가장 가까운 기상청의 AWS 지점명 ‘광진(413)’에 해당한다.

2.4.2 강우량 자료의 시간격 및 모의 샘플링시간 결정

어떠한 현상을 모형화하고 가상으로 수행시켜 실제 상황의 결과를 예측하는 모델링 해석은 입력값과 샘플링시간에 따라 결과에 차이가 발생할 수 있다. Ioannis(1995)은 2개 모델을 이용하여 2개의 다른 샘플링시간에 대해 모의하고 비교했으며, Saroj(2011)은 일반순환모델에 대해 샘플링시간을 변경하며 분석하였다. 이와 같이 모델링은 샘플링시간이 결과에 영향을 주게 되며, 모의시 샘플링시간을 짧게 할수록 모의 결과는 정확하게 확인되지만, 장기간 모의시 모의시간이 길어지는 문제점을 야기시킨다.

본 연구에서는 강우량의 시간격과 샘플링시간을 5분, 30분, 1시간, 2시간으로 변경해가며 모의해보고, 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 5분 모의결과와 30분, 1시간, 2시간 모의결과를 비교하여 효율적인 샘플링시간을 결정하였다.

2.4.3 대상유역의 월류량 및 월류빈도 기준 결정

상기 과정을 통해 결정된 유효강우와 샘플링시간에 따라 장기간 모의를 수행하고 월류량 및 월류빈도를 산정하고 분석하였다. James et al. (2002)는 합류식하수관로월류수와 월류빈도를 방류하천의 영향을 미치는 지표로 제시했으며, Thames Water(2012)에서도 장기간 모의를 통해 대표적인 월류수 및 월류빈도를 결정하였다. 본 연구에서는 1981 ~ 2010년(30년간)을 대상으로 모의하고 10년 단위의 평균 월류량과 월류빈도를 산정하여 변화추이를 살펴보고 결과를 분

Table 6. Total rainfall depths and numbers of effective rainfall (2007 ~ 2011)

Year	Total rainfall depth (mm)	Effective rainfall event for different antecedent dry weather period									
		1-day		2-day		3-day		4-day		5-day	
		Total depth	Number	Total depth	Number	Total depth	Number	Total depth	Number	Total depth	Number
2007	1,065	702.0	65	454.0	49	360.5	36	303.5	30	187.5	22
2008	1,212	817.0	61	748.0	48	468.0	36	358.0	27	351.5	23
2009	1,424	1,330.0	54	944.0	48	662.0	40	595.0	35	339.0	25
2010	1,672	717.0	61	456.0	46	350.0	36	288.0	28	256.0	24
2011	1,915	648.5	48	324.5	40	221.0	33	139.0	27	123.5	22

석하여 대상유역의 월류량 및 월류빈도의 관리기준을 결정하였다. 여기서는 유효 강우사상 기준 결정과 모의 샘플링 시간 결정시 사용된 기상청의 AWS 지점명 광진(413) 자료는 2006년 10월부터 기록되어 장기간 모의를 위한 실강우 자료가 부족하여, 서울지역을 대표하고 1960년도부터 기록되어 온 서울(108) 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유효강우 발생 기준 결정

Table 6은 유효 강우사상 결정을 위해 최근 5년동안의 실강우 자료에 대하여 누적강우량 0.5 mm 이상, 무강우시간 4시간 이상인 조건하에 선행건기일수를 1, 2, 3, 4, 5일로 변화시켜주어 연도별(2007 ~ 2011년) 유효 강우사상의 갯수와 총 강우량을 나타낸 표이다. 선행건기일수가 1일에서 5일로 증가할수록 유효 강우사상의 횟수와 총 강우량은 점차 감소하는 경향을 보인다. 유효 강우사상의 연도별 횟수를 5년동안의 평균값으로 비교시 선행건기일수가 1일일 때 57.8회(100%)에서 2, 3, 4, 5일일 경우 46.2회(80%), 36.2회(63%), 29.4회(51%), 23.2회(41%)로 감소함을 확인하였다. 각 연도별 총 강우량을 100%로 했을 때, 유효 강우사상에 해당되는 강우량의 총합의 비율을 확인한 결과 선행건기일수가 1, 2, 3, 4, 5일로 증가시 5년동안의

평균비율은 61%, 45%, 32%, 26%, 19%로 감소되는 것으로 나타났다.

IWA에서 발행된 Solids in sewers(Ashey et al., 2004)에 따르면, 관로내 초기세척을 건기시보다 오염물질의 농도가 낮을 때와 높을 때로 구분하였다. 그리고 후자가 발생하기 위한 조건으로 선행건기일수가 적어도 3일 이상이어야 함을 명시하였다. 또한, 강우시 비점오염원과 선행건기일수와 상관계수에 대한 연구에서는, 선행건기일수가 증가함에 따라 오염농도가 증가함을 확인하였지만 뚜렷한 상관성이 나타나지 않는다는 주장도(Choi, 2005) 제시되었고, 선행건기일수와 오염농도 사이의 상관관계가 나타나지 않는다는 연구도 보고된 바 있다(Lee et al., 2002; Gupta et al., 1996). 합류식 하수관로 월류수의 수질은 강우시 지표면의 오염물질의 유입과 늘어난 유량에 의한 관로내 퇴적물의 세척에 영향을 받는다. 이에 본 연구에서는 선행건기일수를 월류수의 수질이 평시보다 악화되는 최소기준인 3일로 결정하였다.

3.2 강우량 자료의 시간격 및 모의 샘플링시간 결정

강우량 자료의 시간격과 모의 샘플링시간을 결정하기 위하여, 유효 강우사상의 기준은 앞서 결정한 선행건기일수 3일, 누적강우량 0.5 mm, 무강우시간 4시간으로 적용하였으며, 2011년 발

생한 실강우자료에 대하여 모의를 수행하였다. 이때 샘플링시간과 입력되는 강우량 자료의 시간격을 5분, 30분, 1시간, 2시간으로 변화시켜 주어 모의한 결과를 Table 7에 나타냈다.

Table 7. Comparison of CSO spill frequency and overflow volume in different Sampling times

Sampling time	Spill frequency	Spill Volume(m ³)
5-min	13(100 %)	73,756(100 %)
30-min	7(54 %)	69,899(95 %)
1-hour	7(54 %)	70,916(96 %)
2-hour	5(38 %)	58,349(79 %)

2011년의 유효 강우사상은 33개였으며, 이중 월류수가 발생한 횟수는 샘플링시간을 5분으로 적용했을 경우 13회였고, 30분과 1시간 적용시 각 7회씩, 2시간의 경우에는 5회를 기록했다. 이는 5분 동안 집중된 강우량이 시간격이 넓어짐에 따라 30분, 1시간, 2시간에 평균화되어 침투유량이 낮아지기 때문에 월류빈도에서 차이가 발생하였다. Fig. 6은 이와 같은 모의 결과의 차이가 발생하는 한 예를 나타낸 것으로, 2011년 1월 23일 발생한 총 강우량이 5.5 mm인 유효강우 사상에 대한 유출모의 결과이다. 5분의 샘플링시간 모의시에만 월류수가 발생했고, 월류량은 584 m³으로 적게 확인되었다. 이러한 경우의 월류량은 미미하여 Table 7의 월류량 비교시 큰 차이를 보이지는 않았다. 샘플링시간이 5분일 때 2011년의 총 월류량은 73,756 m³(100%)이었으며, 30분, 1시간, 2시간으로 변화시켜주었을 때의 결과는 각각 69,899m³(95 %), 70,916m³(96 %), 58,349m³(79 %)이었다. 5분일 경우를 기준으로 샘플링시간이 길어짐에 따라 오차도 크게 나타났지만, 30분과 1시간은 큰 차이를 보이지 않았다. 샘플링시간을 5분으로 하였을 때 모의의 결과가 가장 정확하겠지만, 모의시간이 1시간과 비교시 수배차이를 보였으며 장기간 모의시 효율적으로 모의하기 위하여 샘플링시간을 조정할 필요가 있다. 이를 위해 4개 샘플링시간에 대

해 모의한 결과, 월류량에서 차이가 덜 발생하며 더 효율적인 1시간을 샘플링시간으로 채택함이 타당하다고 판단하였다.

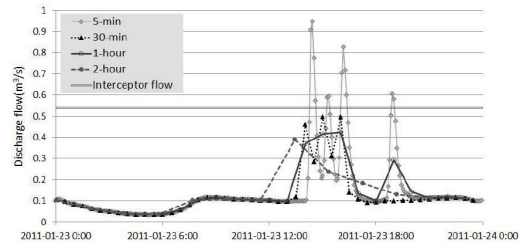


Fig. 6. hydrographs comparing simulated results for different sampling criteria

3.3 대상구역의 월류량 및 월류빈도 관리기준 결정

본 장에서는 국의 월류수 방류기준을 살펴보고, 장기간 모의를 통한 결과를 활용하여 대상구역의 월류량 및 월류빈도의 기준을 결정하였다.

앞서 결정된 강우시간격과 샘플링시간으로 1981 ~ 2010년(30년간) 실강우를 모의한 결과 중 유효 강우사상에 대한 월류량과 월류빈도는 아래 Table 8와 같다. 30년 동안의 평균 월류량은 224,514 m³, 평균 월류빈도는 20회로 나타났다.

총 30년의 모의 결과에서 10년 단위(1981 ~ 1990, 1991 ~ 2000, 2001 ~ 2010)로 변화 추이를 살펴보았다. Fig. 7(a)는 연도별 4계절을 모두 포함한 10년 단위의 년 평균 월류량과 월류빈도를 나타내고, Fig. 7(b)에서는 월류수로 인한 피해가 심한 봄과 가을을 대상으로 분석한 그래프이다. 전체 범위에서는 변화 추이가 나타나진 않지만, 봄과 가을의 경우 년 평균 월류량과 월류빈도가 1981 ~ 1990년 96,427 m³, 10회, 1991 ~ 2000년 117,538 m³, 13회, 2001 ~ 2010년 120,028 m³, 13회로 점차 증가하는 현상을 확인할 수 있었다.

국의 CSO관리 관련법규를 살펴보면, 미국은 연방법(1994)에서 장기적인 CSO 제어 계획(LTCP, Long-Term Control Plans)을 명시하

Table 8. Results of long-term simulation for CSO overflow and frequency(Rainfall data: 1981 ~ 2010, Sampling time: 1 hour)

Year	Overflow(m ³)	Frequency	Year	Overflow(m ³)	Frequency
1981	96,563	15	1996	153,684	21
1982	190,285	17	1997	335,218	19
1983	338,173	19	1998	290,988	23
1984	180,529	20	1999	198,497	20
1985	277,902	19	2000	190,372	25
1986	164,196	18	2001	100,994	14
1987	302,414	23	2002	318,402	26
1988	89,388	15	2003	222,736	22
1989	217,235	16	2004	286,963	18
1990	190,822	25	2005	258,019	19
1991	100,076	13	2006	146,149	19
1992	318,726	26	2007	333,871	19
1993	223,387	24	2008	290,743	22
1994	287,906	18	2009	198,122	19
1995	259,427	20	2010	173,574	21

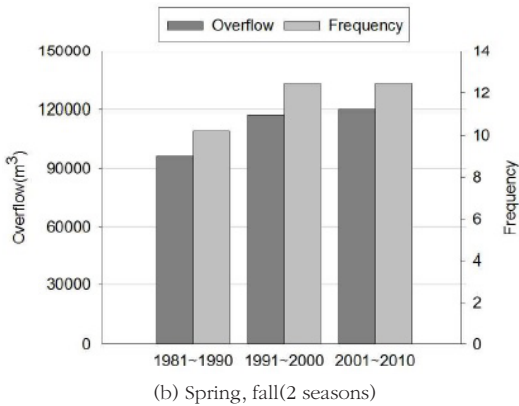
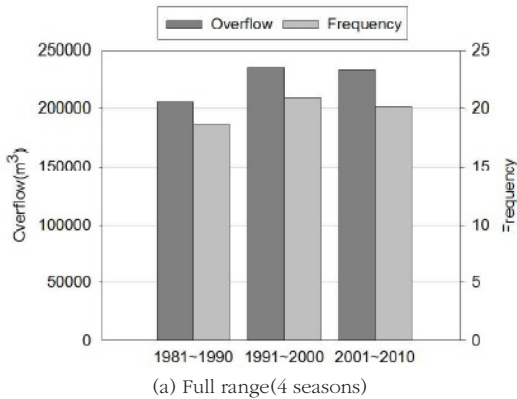


Fig. 7. Changes in 10-year(1981 ~ 90, 1991 ~ 00, 2001 ~ 10) average CSO volume and frequency

고 실증수단과 추정수단 중 선택하여 수립하도록 하였다. 실증수단은 수질환경기준을 만족할 수 있는 계획을 입증하는 방법으로 장기계획을 수립하는 것이고, 추정수단은 최소처리기준으로 연 4 ~ 6회 정도만 CSO 미처리(1차 처리) 방류 또는 강우기간 중 합류식하수의 85% 제거 또는 수질에 미치는 영향이 큰 오염부하량은 합류식하수의 85%에 해당하는 만큼 제거시키는 것이다. 영국은 UPM(Urban Pollution Management Manual, 1998)에서 친수이용 정도에 따라 CSO빈도를 고려하여 별도의 기준을 설정하여 운영한다고 하였다. 6 mm고형물 분리와 10 mm고형물 분리는 고친수성에서 각각 년 2회 이상, 년 1회 이하이고, 중친수성에서는 각각 년 31회 이상, 년 30회 이하이다. 독일의 하수도시설기준은 1999년 EU의 제안에 따라 설계 기준을 월류횟수 년 0.5 ~ 2회, DO 5.0이하, NH₃ 0.1이하로 변경하였다. 일본은 합류식하수도 개선 가이드라인(JSWA, 2002)에서 합류식을 분류식으로 교체할 때 배출되는 오염부하량과 같은 수준을 CSO 관리목표로 설정하여, 발생횟수를 50% 감축시키고 있으며 스크린을 설치하여 협잡물 유출을 최소화하고 있다. 하수도법 시행

령(2004)에서는 적용시기를 2단계로 하여 BOD 방류수질기준(유량가중평균)을 1단계 70 mg/L, 2단계 40 mg/L로 정하였다. 국내의 경우 하수도시설기준(2011)에서는 인근 수계에 악영향을 미치지 않을 수준 이하 또는 분류식하수도로 전환하였을 경우와 같거나 이하로 연간 오염 방류 부하량을 삭감한다고 명시되어 있다.

본 연구에 해당하지 않는 월류부하량의 기준을 제외하면, 대부분의 기준에서 월류빈도의 제한 횟수를 설정하거나 월류수의 일정비율을 감소하여 관리되도록 관련 법규를 시행하고 있는 실정이며, 그 횟수의 제한에 있어서는 각기 다른 지역의 특성을 반영하여 명확하게 수치를 제안함은 모호함이 사실이다. 반면, 월류수 발생의 수량과 빈도에 대한 제안은 하수도시설기준에 기 명기되어있듯이, 인근 수계에 악영향을 미치지 않을 정도 및 합류식하수도를 분류식으로 관리하였을 정도의 수준, 또는 미국 EPA에서 나타내고 있는 바와 같이, 물고기의 폐사(Fish kill)가 일어나지 않을 수준, 방류수역의 오염에 영향을 미치지 않을 수준으로 관리되어야 함이 마땅하다. 이를 달성하기 위해서는 일본 및 미국 등에서 수행하고 있는 바와 같이 단계별로 최종 목표에 맞추어 저감 목표량을 명확히 할 필요가 있으며, 이에 명확한 기준을 바탕으로 대상유역의 모델을 통하여 관리목표를 설정하고, 준수해야한다.

본 연구에서 나타낸 대상지역의 예로 살펴본 것을 보면, 30년 장기 강우의 모의 중 최근부터 10년 평균의 자료에서 각기 모의된 월류수량 및 빈도는 비슷한 값이 산출되었다. 이에 모의 분석을 통하여 기준을 산정할 시 모델의 수행기간은 최근 10년 자료 정도의 모델링을 수행하여 기준을 설정함이 타당할 것으로 판단된다. 저감 목표의 설정은 미국과 일본에서 도입하고 있는 단계별 설정을 적용하고, 최종목표는 미국의 내용을 수렴하여 80 %로 설정함이 타당하다고 판단된다. 따라서 본 대상지역을 예로 삼아 판단하였을 때, 분석된 최근 10년(2001 ~ 2010) 동안의 년

평균 월류량의 경우 232,957 m³에서 116,479 m³으로, 월류빈도의 경우 20회에서 10회/년으로 50 %의 삭감을 1단계 목표로, 월류량의 경우 46,591 m³으로, 월류 빈도의 경우 4회/년으로 80 %의 삭감을 2단계 목표로 설정함이 타당할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 연속강우-우수유출모형 모의를 활용한 합류식하수관로월류수(CSO) 관리기준에 대한 상세한 유효강우 및 연속강우 분석기간 등에 대한 표준화 기준을 도출하였고, 최종적으로는 유역별 월류수 관리 방향(목표)에 대하여 타당한 거시적 접근방향을 제시하였다.

- 1) 분석 대상 유효 강우사상의 상세 기준에 따라 관리 대상 유역의 월류수 발생 범위가 달라진다. 따라서 관련 문헌조사와 검증 내용을 바탕으로 누적강우량 0.5 mm 이상, 무강우시간 4시간 이상, 선행건기일수 3일 이상이 가장 타당한 월류수 분석용 유효 강우사상 상세기준으로 제시하였다.
- 2) 월류수 분석을 위한 우수유출모형 모의에 있어 분석 시간 간격(Sampling time, Δt)에 따라 모의결과가 다소 상이할 수 있으며, 짧은 시간 간격을 적용할수록 결과가 실제 현상을 가장 잘 모사한다고 할 수 있다. 하지만 분석 대상 유역의 시스템이 크고 복잡하거나, 수십년의 장기 모의를 기반으로 분석할 경우 총 모의 시간이 길어지는 비효율성이 있다. 따라서 분석 시간 간격을 5분, 30분, 1시간, 2시간을 대상으로 검증한 결과, 경과의 정확도 및 효율성 측면에서 가장 효율적인 시간 간격은 1시간으로 판단된다.
- 3) 단일 강우사상이 아닌 연속강우를 이용하여 월류수 관리기준을 산정할 경우 가장 최근의 강우를 기준으로 최소 10년 동안의 실강우 분석부터 최대 30년 동안의 실강우

분석을 기반으로 연속 모의하고 그 분석을 통하여 월류수 기준을 도출함이 타당하다.

- 4) 대상 유역별 월류수 관리기준(월류량 삭감량, 발생빈도 저감)은 개별 유역특성별(하수도시스템 및 방류유역 특성 등)로 달라짐을 원칙으로 하며, 최종 관리 목표는 일본, 미국, 유럽 등에서 시행하고 있는 바와 같이 단기대책 및 중장기 대책으로 구별할 수 있으며, 예산 및 제반여건에 따라 단계별 목표를 설정하고 접근해야 한다. 그럼에도 불구하고 월류수 관리기준은 방류수계에 영향이 최소화 되는 수준(예, 협잡물/SS 제어, 부영양화 방지, 용존산소 감소 방지, 물고기의 폐사(Fish kill) 방지, 대장균 제어, 분류식 우수관 오염 수준 등)으로 다양하게 유역별로 설정될 수 있으며, 방류수계 수질모델링과 연계하여 과학적으로 설정함을 원칙으로 해야 한다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션기술개발사업(과제번호 414-111-006)”으로 지원 받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

Ashley, R. M., Krajewski, B., Jacobsen, T. H., Verbanck, M. (2004) Solids in sewers, *IWA*

Choi, S. Y. (2005) *Study of the first flush's water quality in road runoff*, Paper of masters degree in Yonsei university.

FWR (1998) *Urban pollution management manual*, Foundation for Water Research, FR/CL0002

Gromaire, M. C., Garnaud, S., Saad, M., Chebbo, G. (2001) Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers, *Water Research*, 35(2), p521-533

Gupta, K., Saul, A. J. (1996) Specific relationships

for the first flush load in combined sewer flows, *Water Research*, 30(5), p1244-1252

Ioannis, N. (1995) Use of multiple-time-step information in rainfall-runoff modelling, *Journal of Hydrology*, 165, p135-159

James, L., David, B., Manfred, S. (2002) Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact?, *Urban water*, 4, p181-189

JSWA (2002) *[The guidelines and commentary of improvement measures on combined sewer system]*

JSWA (2004) *[Enforcement decree of sewerage law](2004.4)*

Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., Yu, M. J. (2002) First flush analysis of urban storm runoff, *The Science of the Total Environment*, 293, p163-175

Lee, D. J., Yoon, H. S., Sun, S. W., Kwak, S. D., Lee, D. H. (2004) Optimal sizing of CSOs storage tank by stormwater simulation modeling(II), *Korean Society of Environmental Engineers*, 26(3), pp.370-380

Moffa, P. E. (1997) Control and treatment of combined sewer overflows 2nd Ed, *John Wiley & Sons*

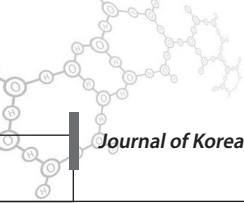
Republic of Korea Ministry of Environment (2010) *[A Study of the improvements of performance of combined sewer system]*

Republic of Korea Ministry of Environment (2011) *[Sewerage facilities standards]*

Rodriguez, J. P., McIntyre, N., Diaz-Granados, M., Maksimovic, C. (2012) A database and model to support proactive management of sediment-related sewer blockages, *Water Research*, 46, p4571-4586

Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., Gustafsson, L. G. (2008) The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system, *Journal of Hydrology*, 350, p100-113

Saroj, K. M. (2011) Sensitivity of the Indian summer monsoon rainfall and its interannual variation to model time step, *Atmospheric Research*, 101, p67-77



Thames Water (2012) *Thames Tideway Tunnel*

US EPA (1992) *NPDES storm water sampling guidance document*

US EPA (1994) *Combined sewer overflow control policy*

US EPA (2004) *Storm Water Management Model, User's Manual Ver. 5.0*

WEF (1992) Stormwater monitoring, measurement, and management, *Pre-Conference Seminar Proceedings*, 65th Annual Conference & Exposition New Orleans

Yoon, Y. N. (2008) Hydrology - basic and application, *Cheong moon gak*