

Study on the determination of optimum size of storage tank and intercepting capacity for CSOs reduction in urban area

도시지역 CSOs 저감을 위한 저류조 및 이송관로의 최적 용량결정에 관한 연구

Lee, Kwan Yong^{1*} · Choi, Won Suk¹ · Lee, Yong Jae¹

Koo, Won Suk¹ · Song, Chang Soo²

이관용^{1*} · 최원석¹ · 이용재¹ · 구원석¹ · 송창수²

1 (주)엔포텍디에스 · 2 호남대학교

Abstract : Storage method is one of major measures for reduction of CSOs pollutant loads and several projects have been done nationwide. But systematic analysis of intercepting capacity has not been studied to determine optimum size of storage facility.

In this research, not only storage volume but also intercepting capacity which means flow capacity from intercepting facility to CSOs storage facility was studied and optimum sizing method for storage facility was proposed.

The result shows that pollutants reduction efficiency can be increased significantly by increasing intercepting capacity and it might reduce storage volume and total construction costs.

Intercepting capacity for the study area was evaluated and it was shown as equivalent to 83 % probability rainfall intensity.

Key words : Combined Sewer Overflows, CSOs, storage facility, Intercepting capacity

주제어: 합류식 하수도 월류수, 저류조, 이송관로용량

1. 서론

국내 도시지역의 하수 및 우수의 배제는 합류식하수관거(42.3 %)와 분류식하수관거(57.7 %)를 통해 이루어지며(환경부, 2011). 이중 합류식하수관거의 우수배제는 강우 초기에는 하수관거 말단부에 설치된 우수토실을 통해 일정량만 차집관거로 유입된 후 처리장으로 이송되지만, 차집관거 용량 이상의 우수가 발생시에는 차집관거로 유입되지 못하고 직접 수역으로 방류되며(조 등, 2006), 이를 합류식 하수관거 월류수(CSOs :

Combined Sewer Overflow)라 한다.

김 등(2006)과 환경관리공단(2004)의 연구에 따르면 CSOs 오염부하는 비점오염원 발생부하의 2배 가량으로 수계환경에 매우 큰 영향을 미치며, 기존 하수에 존재하는 유기물, 고형물, 병원성 미생물 등의 유해물질이 높은 농도로 존재하여 미처리 방류시 하천 수질 및 수생태계에 심각한 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다.

CSOs를 저감하기 위한 방안으로는 발생원 대책, 수집방식 개선, 저류시설 등 다양한 방안들이 있으며, 공 등(2004)은 이중 저류시설에 대하여 월류부하량 저감뿐만 아니라 홍수 방재를 위한 우수유출 저감기능을 가지며, 설계와 운영이 용이하여 유량변화에 쉽게 대처할 수 있으나, 넓은 소요

* Received 20 August 2012, revised 17 October 2012, accepted 22 October 2012.

* Corresponding author: Tel:+82-31-423-2973, Fax:+82-31-423-2974, E-mail: kylee@ntds.co.kr

부지로 인하여 경제성 및 효율성면에서 상당한 제약을 받는다고 하였다.

따라서 CSOs 저감을 위한 저류시설은 차집되는 하수량과 CSOs 발생량을 해당지역의 유출특성에 맞게 적절하게 고려하여 오염부하량을 최대한 줄임과 동시에 이를 위한 시설의 기술적 가능성 여부, 경제성 등 종합적인 검토를 통해 합리적인 제어 및 관리방안이 수립되어야 한다. 한편 월류수가 발생하는 지점으로부터 저류시설로 유입시키는 이송관로는 오염부하가 높은 초기우수를 포함하는 적정 유량을 2차 월류없이 저류조로 유입시킬 수 있는 통수능을 가져야 하는데 그동안 이송관로 용량 산정에 대한 합리적인 기준이 정립되지 못하고, 각 사업마다 다양한 방식으로 검토되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 CSOs 저감목표를 달성하기 위한 저류시설 계획시 저류시설의 용량과 이송관로 용량을 조합하여 최적의 저류시설 용량결정 방안을 제시하고자 한다.

2. 대상지역 현황 및 연간 SWMM모의에 의한 CSOs 발생특성 검토결과

2.1 연구대상지역 현황

본 연구에서는 B시내 주요 우수토실 관련 배수구역 기초자료를 검토하여, 수질 및 유량조사 결과 오염농도가 높고 토지이용 및 하수배제방식을 대표하는 우수토실 2개소를 각각 선정하였다.

본 연구의 대상지점별 현황 및 개요는 Table 1과 같다.

Table 1. summary of research area

지점	유역면적(ha)			평균 하수량 (m ³ /day)	BOD ₅ (mg/L)
	합계	산지	시가지		
A site	57.42	11.51	45.91	481,315	24 ~ 367
B site	94.62	12.52	82.10	1,339,085	42 ~ 374

2.2 유량 및 수질조사 현황 및 지점별 초기세척 효과 특성

지점별 CSOs 발생특성 파악 및 강우유출모델의 입력자료구축을 위한 유량 및 수질조사는 선행건기일수를 고려하여 2011년 6월부터 11월까지 청천시 2회, 우천시 3회 각각 실시하였다.

수질조사는 BOD₅, SS 항목에 대해서 실시하였으며, 청천시는 시간대별 패턴을 확인하기 위해 각 지점별로 1시간 간격으로 샘플링을 실시하였으며, 강우시는 초기세척효과를 확인할 수 있도록 능동적으로 채수간격을 조절하였다.

2.2.1 청천시 유량 및 수질조사 결과

청천시 유량 및 수질조사 결과와 시간대별 유량패턴결과는 Table 2 및 Fig. 1과 같다.

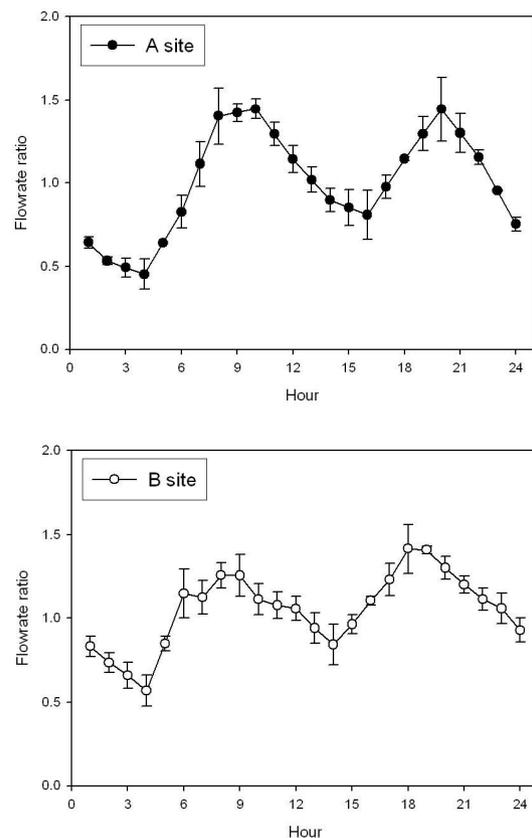


Fig. 1. Variation of flow rate in dry period

Table 2. Flow rate and water quality of dry period

지점	유역면적 (ha)	유량		평균 수질(mg/L)	
		평균 하수량 (m ³ /day)	유량변동비	BOD ₅	SS
A site	57.42	25.7	0.45 ~ 1.46	76.5	64.4
B site	94.62	407.8	0.42 ~ 1.65	116.3	109.8

각 site별로 일평균 건기유량(A site : 25.7 m³/hr, B site : 407.8 m³/hr) 대비 시간대별 유량변동비는 A site의 경우 0.45 ~ 1.46, B site의 경우 0.42 ~ 1.65로 나타났다. 두 지점 모두 유역면적에 상관없이 거의 유사한 값을 나타내었으며, 시간대별 유량패턴도 새벽시간대 급격히 감소하고 오전 8 ~ 9시와 오후 7 ~ 8시에 유량이 증가하는 전형적인 주거지역 유량패턴을 나타내었다.

청천시 수질조사 결과 시간대별 수질변동비는 큰 차이 없이 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 각 site별로 수질항목별 일평균수질은 A site에 비해 B site가 더 높게 조사되었다.

2.2.3 강우시 유량 및 수질조사 결과

총 3회에 걸쳐서 실시한 각 지점별 강우시 유량 및 수질조사 결과에 따른 CSOs 발생특성분석 결과는 Table 3과 같다.

두 지점 모두 강우초기 수질이 급격히 상승하는 초기세척효과가 발생되었으며, 최대발생농도는 A site의 경우 BOD 367 mg/L, SS 1,715 mg/L, B site의 경우 BOD 374 mg/L, SS

2,350 mg/L로 각각 조사되었다. 유량가중평균농도 (EMC)의 경우 2004년 환경관리공단에서 실시한 도시지역 CSOs 연구결과와 유사한 범위인 BOD 50 ~ 132 mg/L, SS 127 ~ 461 mg/L로 나타났으며, 두 지점 모두 강우이벤트별로 선행건기일수가 가장 길고 총 강우량이 가장 높았던 1차 이벤트가 가장 높은 농도를 보였다.

지점별 단위면적당 강우량에 대한 오염부하원단위 산정결과, SS 항목이 BOD 항목에 비해 더 높은 값을 나타내었으며, B site의 경우에는 강우이벤트별로 1차 조사 때의 수질최대농도 및 EMC 농도가 가장 높음에도 불구하고 2차 조사 때보다 상대적으로 월류량이 작아 원단위값은 2차 조사시점이 더 높게 산정되는 현상을 보였다.

초기우수 혹은 초기세척효과(First flush)는 강우초기에 고농도의 오염물질이 유출되는 현상으로 다양한 정의가 내려져 있는데, 미국 EPA의 CSOs 매뉴얼상에는 초기우수의 범위를 '강우유출 시작부터 30분 이내 또는 발생초기 농도가 청천시 평균 하수농도로 저하시'까지로 규정하고 있으며(EPA, 1993), Sansalone 등(1997)은 표준누적오염부하량이 표준누적유출수곡선을 초과하면 초기우수라 정의하였다. 이 외에도 Deletic(1998), Taebi 등(2004)이 초기우수에 대한 연구를 수행하였으며, 초기우수 현상은 복잡하고 지역적 특성에 따라 다양하다고 보고하였다.

각 지점별로 초기세척현상을 평가하기 위한

Table 3. Flow rate and water quality of rainfall period

지점	이벤트	강우량 (mm)	강우강도 (mm/hr)	선행건기일수 (days)	월류량 (m ³)	최대 농도 (mg/L)		EMC (mg/L)		원단위 (kg/mm/ha)	
						BOD ₅	SS	BOD ₅	SS	BOD ₅	SS
A	1	33	14.5	20	2,777	367	1,715	113	461	0.166	0.676
	2	14	7	17	203	266	696	64	346	0.025	0.134
	3	14	6	13	108	242	680	50	196	0.008	0.031
B	1	33	14.5	20	7,974	374	2,350	132	409	0.337	1.043
	2	14	7	17	10,365	176	1,380	91	314	0.709	2.454
	3	14	6	13	6,169	82	630	73	127	0.318	0.554

무차원의 L(V)곡선을 도시하였으며, 이중 EMC 농도가 가장 높게 산정된 첫 번째 강우이벤트의 L(V)곡선은 Fig. 2와 같다.

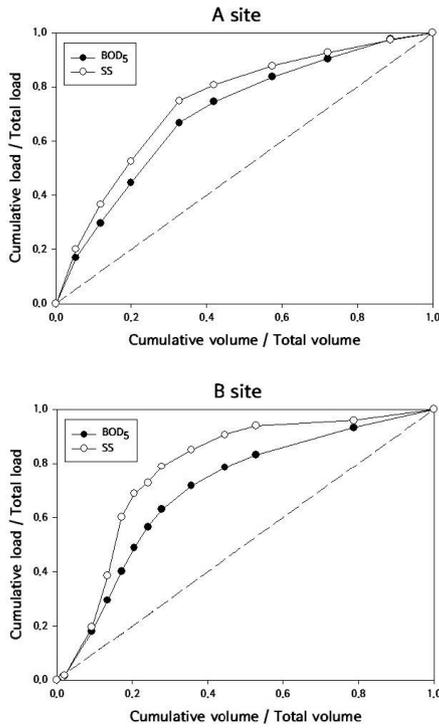


Fig. 2. Cumulative pollution loading curve

Fig 2와 같이 두 지점 모두 수질항목별 누가 부하곡선의 기울기가 1보다 크게 나타나 초기세척현상이 발생한 것으로 확인되었으며, 수질항목별로는 기존의 선행 연구사례와 같이 BOD에 비해서 SS가 초기세척현상이 더 큰 것으로 나타났다.

각 지점별로는 B site가 A site에 비해서 초기 세척효과가 더 높게 나타났는데, 이는 B site의 경우 전체유역면적중 시가지와 같은 불투수면이 차지하는 비율이 87 %로 상대적으로 높기 때문

에, A site에 비해서 초기세척효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

Taebi 등(2004)이 제시하였던 것처럼 본 연구대상지점과 같이 도시화지역 및 불투수비율이 높은 지역은 초기세척효과가 크게 나타나며, 따라서 강우초기 발생하는 초기우수를 처리함으로써 필요한 저류용량을 줄이는 동시에 오염부하 저감효과를 극대화 할 수 있다.

2.3 SWMM 모델링 구축 및 연간 모의에 의한 CSOs 발생특성 검토

2.3.1 SWMM 모델링 구축 및 검·보정 결과

본 연구에서는 CSOs 유량과 수질을 모의하기 위하여 강우유출해석에 가장 널리 이용되고 있는 SWMM(Storm Water Management Model)을 적용하였으며, 하수관망도를 이용하여 간선관거를 중심으로 A site는 12개, B site는 39개의 소유역으로 분리하였으며, 각 소유역에 대하여 유역면적, 폭, 경사, 불투수비율 등의 지형 특성인자 및 구간별 관거와 맨홀의 제원을 입력한 후 모니터링한 자료를 가지고 유량 및 수질에 대한 검·보정을 실시하였다.

강우유출모델 구축후 검·보정을 통한 주요 매개변수 산정 결과 및 그래프는 Table 4, Fig. 3과 같다.

각 지점별로 유량 및 수질항목에 대해서 검·보정한 자료를 가지고 실측값과의 상대오차 및 결정계수를 산정하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

모델 검·보정을 실시한 결과 유량 상대오차는 평균 10.7 ~ 23.6 %, 수질은 평균 26.3 ~ 33.1 %를 나타내어 HSPF(Hydrologic Simulation Program Fortran)의 기준(Donigian, 2000)으

Table 4. Parameter determination of model calibration

지점	불투수비 (%)	유역경사 (%)	유역폭 (m)	유역조도계수(n)		지표면저류(mm)		일평균유량 (m ³ /hr)	유량변동비
				투수	불투수	투수	불투수		
A	28 ~ 85	0.05 ~ 0.9	63.1 ~ 555.0	0.014	0.04	0.1	3.0	25.7	0.45 ~ 1.46
B	65 ~ 95	0.02 ~ 0.43	59.9 ~ 790.4	0.013	0.02	0.05	0.2	407.8	0.42 ~ 1.65

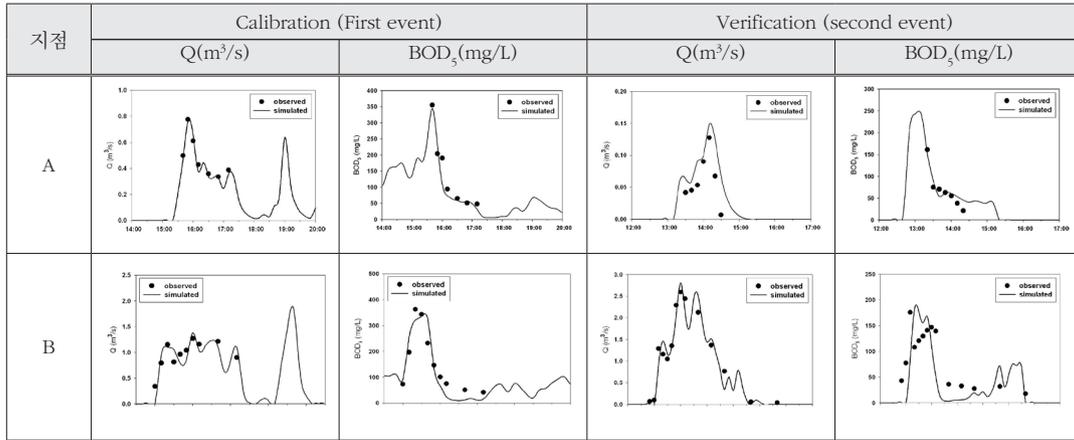


Fig. 3. Comparisons of observed and simulated runoff in calibration period

Table 5. R² and residual of flow rate and water quality

구분	상대오차 (%)				결정계수 (R ²)			
	Calibration		Verification		Calibration		Verification	
	Q	BOD ₅	Q	BOD ₅	Q	BOD ₅	Q	BOD ₅
A site	6.0	19.6	30.2	16.7	0.98	0.91	0.71	0.91
B site	15.4	32.9	17.0	49.5	0.70	0.89	0.90	0.54
Average	10.7	26.3	23.6	33.1	0.84	0.90	0.81	0.73

로 평가하였을 때, 적절(fair)한 범위에 이르는 것으로 나타났다. 항목별로는 유량에 비해 수질의 상대오차가 더 크게 나타났는데, 이는 수질의 경우 선행건기일수, 강우패턴, 초기세척효과 등에 의해 다양한 농도패턴을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

모델의 재현력을 평가하는 결정계수 산정결과 유량은 평균 0.81 ~ 0.84, 수질은 평균 0.73 ~ 0.90으로 산정되어 두 지점모두 시계열적으로 모델의 재현력이 양호한 것으로 나타났으며, B site의 수질항목의 경우에는 모델보정을 위한 매개변수를 선행건기일수가 크고 강우량이 많아 초기세척효과가 크게 나타난 첫 번째 이벤트에 대해서 산정한 결과, 강우패턴이 상이한 두 번째 이벤트에 대해서는 첫 번째 이벤트에 비해서 결정계수가 상대적으로 낮게 나타난 것으로 확인되었다.

2.3.2 연간 모의에 의한 CSOs 발생특성 검토결과

각 지점별로 검·보정에 의해 산정된 매개변수 및 인근 기상청의 시강우자료를 입력하여 연간 장기모의에 의한 CSOs 발생특성을 검토하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. A site는 총 강우횟수 70회에 대하여 CSOs 발생부하는 28,691 kg BOD/yr로서 CSOs원단위는 0.439 kg/mm/ha이며, B site는 총 강우횟수 56회에 대하여 CSOs 발생부하는 50,837 kg BOD/yr로서 CSOs원단위는 0.436 kg/mm/ha를 나타내었다. A site가 B site에 비해서 CSOs 발생빈도가 14회 더 많은 것으로 모의되었으며, 배수면적을 고려하여 산정한 단위면적당 CSOs 발생원단위의 경우에는 두 지점 모두 거의 유사한 값으로 나타났다. Fig. 4에 조사지점과 기존 연구사례의 CSOs 오염부하 결과를 비교하였다.

Table 6. Yearly prediction of each site

구분	강우횟수 (event/yr)	총 CSOs 발생량 (m ³ /yr)	총 CSOs 발생부하 (kg BOD/yr)	CSOs 원단위	
				kg/mm/ha	kg/ha/yr
A site	70	275,212	28,591	0.439	623
B site	56	682,482	50,837	0.436	619

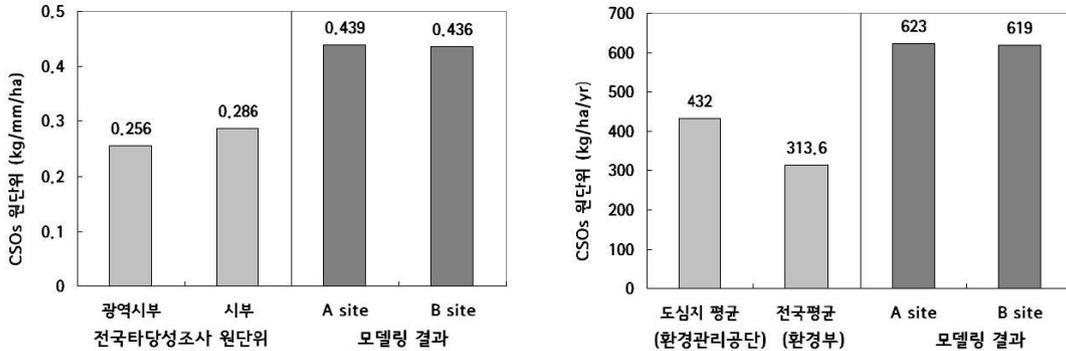


Fig. 4. Comparison of CSOs pollution load between studied site and nationwide site

Fig. 4와 같이 본 연구의 모델링을 수행하여 산정한 CSOs 원단위 값을 기존의 전국타당성조사 등의 연구사례와 비교한 결과, 본 연구에서 산정된 원단위가 기존의 유사지역 및 관련 연구상의 오염부하 원단위보다 모두 높게 나타나 본 연구지점의 CSOs 발생부하가 높음을 알 수 있다. 이는 본 연구대상이 불투수비율 80 % 이상으로 강우에 의한 초기세척효과 및 관내퇴적된 고형물의 재부유에 의한 부하 유출량이 상대적으로 높아 기존 연구사례에 비하여 CSOs 오염부하 원단위가 높게 나타난 것으로 판단된다.

3. 저감목표 시나리오별 장기모의에 의한 최적 저류용량 및 이송관로 용량 산정

3.1 최적 저류 용량 및 이송관로 용량 산정을 위한 시나리오 선정

CSOs의 저감목표는 분류식 우수유출 오염부하수준 이하 또는 월류수 수질기준 40 mg/L 이하로 관리 및 오염부하 60 % 저감 등 다양한

저감목표가 제시되고 있으나, 월류수 BOD 40 mg/L이하로 관리하는 목표는 유량가중 평균농도로 관리하여야 하며, CSOs 관리 실효성 측면에서 검토할 필요성이 있는 저감목표라 할 수 있다. 합류식 하수도 월류수의 궁극적 저감목표는 배수구역에서 배출되는 연간 오염부하량이 수계에 악영향을 미치지 않는 수준 이하로 삭감하거나 분류식 하수도로 전환할 경우에 배출되는 오염부하 이하로 관리하는 것(한국상하수도협회, 2011)을 기본 저감목표라 할 수 있으며, 「합류식 하수도 월류수 오염부하저감시설 설치 타당성 조사(환경부, 2007)」에서는 분류식 우수관 유출부하 수준으로 맞추기 위한 오염부하 삭감목표를 50 %로 설정하였고, 「합류식 하수관거 성능 개선방안 연구(환경부, 2010)」에서는 오염부하삭감목표를 60 %로 제시하고 있다.

이와 같은 국내 연구 사례 및 관련지침 등의 저감목표와 이송관로의 용량에 의한 영향을 고려하여 모델링 시나리오를 Table 7과 같이 설정하였다.

Table 7. Modeling scenario for optimum quantity

CSOs 저감목표 시나리오	저류용량산정	저류조 이송관로 용량산정
· 분류식 우수관 유출부하 수준 · BOD 오염부하 삭감률 60 %	· 월류부하특성에 의한 대표강우 이벤트 60 % 저감	· 저류고 vs 이송용량 변화에 따른 시나리오 조합

Table 7에 나타낸 시나리오는 궁극적으로 시설용량의 경제성을 도모하면서 오염부하 저감목표를 달성할 수 있는 적정 시설용량을 제시하는데 목적이 있으며, 각 시나리오별 조합 및 해석을 통하여 적정 시설계획을 수립하기 위한 모델링을 수행하였다.

3.2 CSOs 저감목표 시나리오에 따른 저류용량 산정결과

앞에서 언급한 CSOs 월류부하를 분류식 우수관 유출부하 수준 혹은 BOD오염부하 60 % 삭감목표를 달성할 수 있는 필요 저류용량을 산정한 후, 지점별로 각각의 경우에 대한 BOD 저감효과, 월류수 평균농도 등을 모의한 결과는 Table 8과 같다.

Table 8과 같이 A site의 경우 두 가지 시나리오에 대한 저류용량은 2,128 ~ 2,650 m³으로 유사한 범위를 나타내었으며, 저류용량산정에 따른 누가유출고 및 BOD 오염부하저감효과

는 각각 4.64 ~ 5.77 mm, 60.0 ~ 68.5 %로 모의되었다.

B site의 경우 시나리오별 저류용량 산정결과가 1,943 ~ 12,640 m³으로 용량차이가 A site에 비해 매우 크게 나타났다. 이는 분류식 우수관 유출부하정도까지 저감시키는 시나리오의 경우 배수구역 특성에 따른 우천시 월류수질이 상대적으로 높아 강우가 지속되어도 희석효과가 상대적으로 미미하기 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 또한 저류용량은 약 6.5배 이상 증가시켜도 BOD 오염부하 저감효과는 4 %만 증가하는 것으로 모의되어, 분류식 우수관 유출부하 정도로 오염부하 저감목표를 산정하는 것은 현장 여건 및 경제성 측면에서 불합리한 것으로 확인되었다.

3.3. 월류부하특성곡선에 의한 저류용량 산정결과

월류부하특성곡선에 의한 저류용량의 산정방법(환경부, 2010)은 최근 10개년에 대한 모의결과를 통계적 기법으로 분석하여 월류량과 월류부하의 상관관계로부터 저감대상 월류량을 산정하고 이로부터 저류용량을 산정하는 방식이다.

각 지점별로 IETD 결정에 의한 강우분리기준을 적용하여 최근 10년간의 강우사상별로 월류량 및 월류부하를 각각 산정하였으며, 이에 대한 결과는 Table 9 및 Fig. 5와 같다.

Table 8. Prediction of Modeling scenario in CSOs reduction target

구분	CSOs 오염부하 저감목표 시나리오							
	분류식 우수관 유출부하수준				BOD 오염부하 60 % 삭감			
	저류용량 (m ³)	누가유출고 (mm)	BOD저감 효과(%)	월류수 평균농도 (mg/L)	저류용량 (m ³)	누가유출고 (mm)	BOD저감 효과(%)	월류수 평균농도 (mg/L)
A site	2,650	5.77	68.5	58.7	2,128	4.64	60.0	61.1
B site	12,640	15.4	64.0	47.5	1,943	2.37	60.0	38.9

Table 9. CSOs pollution loading for each site in 10 years

Site	월류량 (m ³ /event)			월류부하 (kg/event)			강우량 (mm/event)		
	평균	최대	합계	평균	최대	합계	평균	최대	합계
A site	4,913	90,707	2,825,082	378	2,405	217,590	23.5	298.5	13,487.9
B site	15,225	210,657	6,790,595	807	4,561	359,916	29.4	298.5	13,123.8

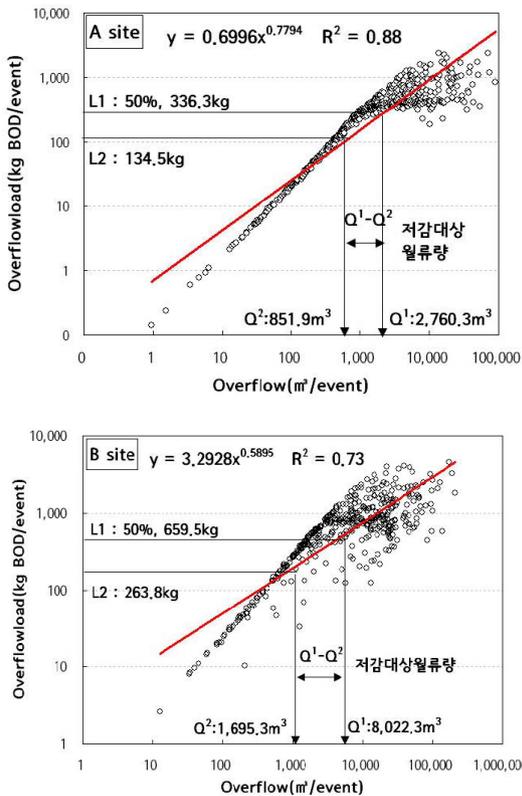


Fig. 5. Correlation of Overflow and CSOs loading for each site

Fig. 5와 같이 강우사상별로 모의한 월류량과 월류오염부하의 상관관계를 이용하여 50분위에 해당하는 월류부하량을 대표강우 이벤트로 결정하였으며, 이에 대한 오염부하를 60% 삭감하기 위한 저류용량을 산정한 결과는 Table 10과 같다.

Table 10. Storage capacity of representative rainfall event for each site

지점	대표강우 이벤트		저류용량 (m³)	저류고 (mm)
	월류부하(kg)	월류량(m³)		
A site	336.3	2,760.3	1,908	4.16
B site	659.4	8,022.3	6,327	7.71

각 지점별로 산정된 저류용량에 해당하는 누가유출고는 A site는 4.16 mm, B site는 7.71mm로 나타나 해당배수구역의 유역 및 강우특

성을 고려할 경우 CSOs 오염부하저감을 위한 저류용량 및 이에 따른 누가유출고는 서로 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.4. 저류고 vs 이송용량 조합에 따른 CSOs 오염 부하 저감효과 모의 결과

각 지점별로 누가저류고에 따른 저류조용량 및 강우강도에 따른 전량이송이 가능한 이송관로용량을 산정한 후 각각의 조합에 따른 연간 CSOs 오염부하 저감효과를 모의하였으며, 그 결과는 Table 11 및 Table 12와 같다.

시나리오 조합을 위한 지점별 누가저류고 변동범위는 1 ~ 10 mm로 선정하였으며, 이송관로용량산정을 위한 기준 강우강도는 해당지점의 최근 10년간 강우특성을 분석하여 2 ~ 10 mm/hr 범위에 대하여 검토하였다.

Table 11 및 Table 12에 나타난 것처럼 각 지점별로 연간 CSOs 오염부하 저감목표를 60% 이상으로 설정하였을 경우, 이를 달성하기 위한 저류조 용량 및 이송관로 용량조합은 매우 다양하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 저류조의 용량증대가 아닌 이송관로의 용량증대만으로도 CSOs 오염부하 저감효과를 크게 개선시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

A site의 경우를 예로 들면, 이송관로 용량을 2 mm/hr 강우강도 기준으로 적용할 경우 60% 이상의 CSOs 오염부하 저감을 위해 최소 6 mm 누가저류고 이상에 해당하는 저류용량이 필요한데 반하여, 이송관로 용량을 4 mm/hr 강우강도 기준 이상으로 증대시킬 경우 4 mm 누가저류고에 해당하는 저류용량으로도 60% 이상의 CSOs 오염부하 저감효과를 달성할 수 있으며, 이는 저류조 용량을 2,755 m³에서 1,837 m³으로 감소시켜 경제적으로나 현장적용측면에서 훨씬 더 유리하게 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

위의 결과를 가지고 지점별로 누가저류고 1 mm 증가시 저류조 이송관로용량변동에 따른 CSOs 오염부하 제거효율 증감분($E = E_i - E_{i-1}$)

Table 11. CSOs reduction effect of combining storage height and piping capacity for A Site (단위 : %)

이송용량 누가저류고	0.255 m/s (2 mm/hr)	0.383 m/s (3 mm/hr)	0.510 m/s (4 mm/hr)	0.638 m/s (5 mm/hr)	0.765 m/s (6 mm/hr)	0.893 m/s (7 mm/hr)	1.020 m/s (8 mm/hr)
1 mm (460 m ³)	23.7	24.0	24.1	24.2	24.4	24.4	24.4
2 mm (919 m ³)	42.0	44.9	46.2	46.9	47.3	47.5	47.7
3 mm (1,378 m ³)	50.0	53.9	56.0	57.2	57.8	58.2	58.5
4 mm (1,837 m ³)	55.7	59.2	61.2	62.6	63.5	64.0	64.5
5 mm (2,296 m ³)	59.8	63.9	65.3	66.6	67.6	68.4	68.8
6 mm (2,755 m ³)	63.1	67.8	69.1	69.8	70.9	71.7	72.2
7 mm (3,214 m ³)	65.6	71.0	73.1	73.1	73.4	74.1	74.6
8 mm (3,673 m ³)	67.4	73.4	76.2	76.9	76.7	77.0	77.5

Table 12. CSOs reduction effect of combining storage height and piping capacity for B Site (단위 : %)

이송용량 누가저류고	0.684 m/s (3 mm/hr)	0.912 m/s (4 mm/hr)	1.140 m/s (5 mm/hr)	1.368 m/s (6 mm/hr)	1.596 m/s (7 mm/hr)	1.824 m/s (8 mm/hr)	2.281 m/s (10 mm/hr)
3 mm (2,463 m ³)	38.7	42.6	45.3	47.0	48.0	48.7	49.7
4 mm (3,284 m ³)	44.3	46.4	49.6	51.7	53.0	54.1	55.4
5 mm (4,105 m ³)	48.0	51.2	52.7	54.7	56.1	57.3	58.8
6 mm (4,926 m ³)	50.5	54.8	56.7	57.5	58.7	59.9	61.5
7 mm (5,747 m ³)	52.9	57.6	60.3	60.9	61.5	62.7	64.5
8 mm (6,586 m ³)	55.5	59.5	63.0	64.2	64.2	64.6	66.3
9 mm (7,389 m ³)	57.7	62.2	65.5	67.3	67.4	67.2	68.1
10 mm (8,210 m ³)	59.8	64.6	67.4	69.9	70.7	70.5	70.1

을 도시하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 각 지점별로 누가저류고 증가에 따른 저류조 용량에 관계없이 이송관로 용량이 증가할수록 CSOs 오염부하제거효율은 더 개선되는 것을 알 수 있으며, 저류조 용량이 작을수록, 저류조 용량증대시 이송관로 용량증가에 따른 오염부하제거효율 증가분이 더 크게 나타났다.

본 연구대상지역의 경우 이송관로용량설정을 위한 기준은 Table 11 및 Table 12에서 알 수 있듯이 4 mm/hr의 강우강도 이상에 해당하는 용량으로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 이는 대상지역 강우특성을 고려할 때 확률빈도 83 %에 해당하는 강우강도로 산정되었다.

한편 A site에 대한 경제적 효과를 살펴보면, 저류시설 개략공사비 함수식(환경부, 2007)과 관경별 개략공사비를 이용하여 산정한 결과, 약 26 %의 사업비를 절감할 수 있는 것으로 나타

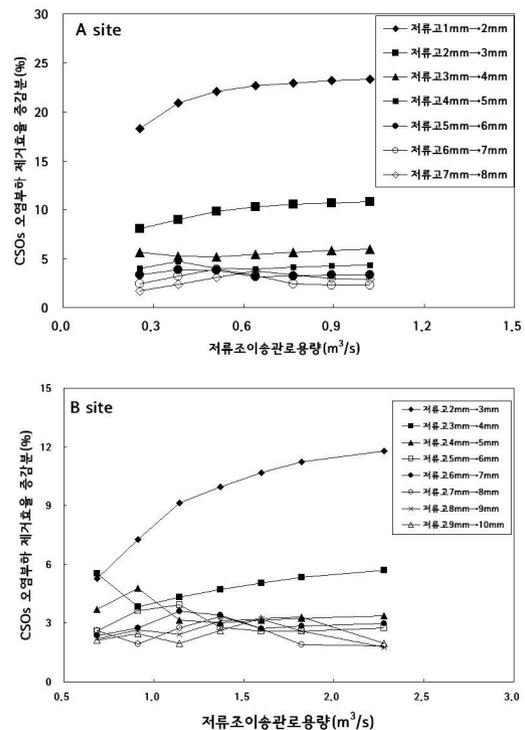


Fig. 6. Increasing effect of CSOs reduction according to cumulative storage height and intercepting capacity

났으며, 이는 전체 공사비에서 이송관로 공사비가 차지하는 비중은 매우 미미하므로 이송관로를 확대하더라도 저류용량의 저감으로 인한 비용절감효과가 큰 것으로 나타났다.

이상을 경우를 살펴볼 때, 국내의 경우 대부분의 차집관이 우수토실에 매우 근접하여 위치하고 있음을 고려할 때, CSOs 저감을 위한 저류조 설계시 우선적으로 저류조로의 이송관로용량을 최대한 확보한다면, 좀 더 경제적인 저류조의 용량설정이 가능하고 CSOs 저감효과도 제고시킬 수 있을 것으로 판단되며, 이처럼 저류조 이송관로의 용량결정이 합리적인 저류조 설계를 위한 중요한 인자로 작용될 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

그동안 CSOs 저류시설의 설계시 우수토실에서 발생하는 월류수를 저류조로 이송시키는 이송관로용량에 대한 검토는 거의 이루어지지 않았고, 관련 설계기준이나 기존 설계 사례에도 체계적인 검토방안이 제시되지 못하였다. 본 연구에서는 CSOs 오염부하저감목표를 달성하기 위하여 SWMM모델을 이용하여 연간 CSOs 발생 특성을 조사하고, 이를 이용하여 CSOs저감목표에 따른 저류조 및 이송관로 용량을 산정을 통한 각각의 영향을 파악하고자 하였다.

1. 조사되어진 두 지점 모두 수질항목별 누가부하곡선의 기울기가 1보다 크게 나타나 초기세척현상이 발생하며, 불투수면이 차지하는 비율이 클수록 초기세척효과가 상대적으로 크게 나타나며, BOD에 비해서 SS가 초기세척현상이 더 큰 것으로 나타난다. 이는 도시지역의 경우 초기에 유출되는 오염물질을 최대한 저류함으로써 오염부하저감효과를 높일 수 있음을 의미한다.
2. SWMM model을 이용하여 CSOs 발생부

하를 모의하였으며, 연간 시강우자료를 이용하여 CSO발생 원단위를 산정한 결과, 0.439 kg/mm/ha와 0.436 kg/mm/ha를 보여 전국 평균값보다 다소 높은 결과를 나타내었다.

3. CSOs 월류부하를 분류식 우수관 유출부하 수준 혹은 BOD오염부하 60 % 삭감 목표를 달성할 수 있는 필요 저류용량 산정에 따른 누가유출고 및 BOD 오염부하저감효과는 각각 4.64 ~ 5.77 mm, 60.0 ~ 68.5 %로 모의되었다. 우수관 유출부하 수준으로 저감시키는 시나리오의 경우 배수구역 특성에 따른 우천시 월류수질이 상대적으로 높아 강우가 지속되어도 희석효과가 상대적으로 미미하기 나타나므로 저류용량이 강우에 따라 변동폭이 크게 나타나게 되므로 현장 여건 및 경제성 측면에서 불합리한 것으로 조사되었다.
4. 연간 CSOs 오염부하 저감목표를 60 % 이상으로 설정하였을 경우, 이를 달성하기 위한 저류조 용량 및 이송관로 용량조합은 다양하게 나타나지만, 저류조의 용량증대가 아닌 이송관로의 용량증대만으로도 CSOs 오염부하 저감효과를 크게 개선시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 아울러 저류조 용량이 작을수록, 저류조 용량증대시 이송관로 용량증가에 따른 오염부하제거효율 증가분이 더 크게 나타났다.
5. 국내의 경우 대부분의 차집관이 우수토실에 매우 근접하여 위치하고 있음을 고려할 때, CSOs 저감을 위한 저류조 설계시 우선적으로 저류조로의 이송관로 용량을 최대한 확보한다면, 좀 더 경제적인 저류조의 용량설정이 가능하고 CSOs 저감효과도 제고시킬 수 있을 것으로 판단되며, 이처럼 저류조 이송관로의 용량결정이 합리적인 저류조 설계를 위한 중요한 인자로 작용될 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- Kong, M.K. , Bae, K.H. and Kang, W.Y. (2004) Optimal Sizing of Intercepting Flow for Reducing Pollution Loads Causes by CSOs , *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 18(4), pp. 418~424
- Kim, J.K. and Ko, I.H. (2006) Modeling of Discharge Characteristics of Combined Sewer Overflows (CSOs) from a Small Urban Watershed in Daejeon City, *J. of KSEE*, 28(6), pp. 654~660
- Jo, D.K. and Kim, G.H.(2006) Characterization of Combined Sewer Overflows from a Small Urban Watershed and Determination of Optimum Detention Volume, *Journal of Korean Society of Water quality*, 22(2), pp. 314~320
- Korean Water and Wastewater Association (2011) Design Criteria of Wastewater Treatment
- Korea Environment Corporation (2004) Study on the Combined Sewer Oveflows in Urban and Loading of Rainfall Separate Line
- Ministry of Environment (2011) Statistics of Wastewater
- Ministry of Environment (2010) Study on Upgrading of Combinbed Sewer
- Ministry of Environment (2007) Feasibility Study on the Reduction of Combined Sewer Overflows
- Deletic, A. (1998) The first flush load of urban surface runoff, *Water Resources*, 32, pp. 2462~2470.
- Donigian, Jr., A.S., (2000) HSPF Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, 10-14 January, Washington, D.C.
- Sansalone, J.J., and Buchberger, S.G. (1997) Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water, *J. of Environ. Engineering*, 123(2), pp. 134~143.
- Taebi, A and Droste, R.L. (2004) First flush pollution load of urban stormwater runoff, *J. of Environ. Engineering and Science*, (3), pp. 301~309.
- U.S.EPA (1993) Combined Sewer Overflow Control.