

강우시 합류식 하수관거의 유출특성 분석

Analysis of Storm Water Run-off Characteristics during Wet Weather

최 성 현* 최 승 철** 박 은 영** 임 재 명***
Choi, Sung-Hyun Choi, Seung-Chol Park, Eun-Young Rim, Jay-Myoung

Abstract

Much of domestic city is served by combined sewer system rather than separate sanitary or storm sewers. During wet weather, when the volume of sanitary sewage and storm water entering the combined sewers exceeds the system capacity, the system is designed to overflow at several designated CSOs. The objective of this research is to have grasp of characteristics of combined sewer runoff and to evaluate efficiently the intercepted volume of CSOs. During the wet weather in first rainfall, SS load at each site H-1, H-2, and H-3 were 600kg/event, 370kg/event, and 289kg/event. SS load at each site in second rainfall were 216kg/event, 113kg/event, and 37.2kg/event. EMCs at each site were 702mg/L, 816mg/L, 861mg/L in first rainfall and 99.9gm/L, 161.9mg/L, 103.6mg/L in second rainfall, respectively. First flush coefficients b at each site were 0.237, 0.166, and 0.151.

키워드: 합류식하수관거, 합류식하수관거의 월류수, 초기세척, 유량가중평균농도
Keywords: Combined sewer system, CSOs, First-flush, EMCs

1. 서론

2000년말 현재 전국의 하수관거 총연장은 68,195km로서 하수관거 보급률은 계획연장의 63.4%이며, 하수도 보급률은 처리인구를 기준으로 68.4%이다.[1] 그러나 기존에 설치된 하수관거의 경우 지하에 매설되는 특성으로 인하여 부설시공이 많으며, 타관 통과, 우·오수관의 오접, 관의 노후화로 인한 파손과 침하, 이음볼량 등의 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한 합류식 하수관거의 경우 강우시 수체에 심각한 영향을 미치는 월류수 처리 문제가 대두되고 있다.[2][5][10]

일반적으로 합류식 배제방식의 경우 하류간선 또

는 주간선 하수관거에 우수토실(regulator)을 설치하여 강우시 차집관거의 용량을 초과하는 유량에 대해서는 차집관거로 유입되지 않도록 조절하고 있으며, 차집되지 못한 하수는 직접 방류수계로 유출되도록 설계되어 있다.

그러나, 국내 중소도시의 경우 우수토실의 설치가 미흡한 실정이며, 우수토실이 설치된 지역에서도 관리 소홀로 인하여 차집관거에 유입되기 전에 스크린의 폐쇄로 인하여 평상시에도 하수가 월류되어 인근 수계로 방류됨으로 인해 심각한 오염문제를 유발시키고 있는 실정이다. 또한 방류수계의 목표수질 달성 및 수질개선 효과를 달성하기 위해서는 월류수의 저류 및 처리시설의 설치가 요구되고 있어, 강우시 발생하는 합류식 하수관거의 월류수(combined sewer overflows, CSOs) 및 초기 오염물질의 발생특성을 파악하고, 이에 대한 합리적인 제어 및 관리방안이 수립되어야 한다.[7]

본 연구에서는 강원도 홍천군 홍천읍을 대상유

* 강원대학교 환경공학과 석사과정
** 강원대학교 환경공학과 박사과정
*** 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사

역으로 선정하여 강우시 합류식 하수관거의 월류수 차집유량을 효율적으로 산정하기 위하여 유출특성을 파악하고자 하였다.

2. 조사방법

2.1 현장조사 및 시료채취

본 연구의 대상유역을 선정하기 위하여 하수도 대장, 토지이용도 등에 대한 자료수집 및 분석을 통하여 예비 표본지역을 선정하였으며, 이에 따른 현장확인 및 조사를 실시하여 최종 표본지역을 결정하였다.

표본지역은 하수 배제방식 및 용도지역별 특성, 관거 시설현황, 처리분구의 최하류 지점 중 일정 규모 이상의 하수 집수 가능지점, 그리고 유량계 설치 가능 여부 및 유량·수질조사의 용이성 등의 사항들을 고려하여 선정하였다.

표본지역은 흥천읍에 3개소(H-1, H-2, H-3)를 선정하였으며, 하수배제 방식은 우수와 오수가 동일관거로 배제되는 합류식 배제방식이다. 유량계는 수심과 유속이 자동 측정되는 전자식(FLO-TOTE 260)을 사용하여 15분 간격으로 연속 측정하였다.

본 조사지점의 강우량과 강우강도는 강우량계를 직접 설치하여 측정하였으며, 건기시 유량과 수질특성을 파악하기 위하여 2시간 간격으로 3일동안 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 또한, 강우시 강우초기에는 5분 간격, 그리고 그 이후에는 10분~30분 간격으로 시료를 채취하였으며, 강우종료 후에는 일정기간동안 2시간 간격으로 시료를 채취하였다. 표본지역의 특성 및 강우특성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우시 오염물질의 유출특성

(1) 하수량 및 수질특성

각 조사지점의 강우시 유출되는 유량 및 오염물질의 최소, 최대 및 평균농도를 Table 3에 나타내었다. 시료채취와 분석은 봄철과 여름철에 각각 1회씩 실시하였으며, 봄철 첫 번째 강우의 총 강우량은 17mm, 순간 최대 강우강도는 8.5mm/hr이며, 여름철 두 번째 강우의 총 강우량은 28.5mm, 순간 최대 강우강도는 7.5mm/hr이다. 강우상상 별 최대유량은 강우강도에 따라서 변화하는 것으로 나타났으며, 최대유량이 나타나는 시간은 지역적인 특성에 따라서 다소 차이가 있는 것으로 조사되었다.

강우기간동안의 수질변화는 대부분의 조사지점에서 강우초반에 오염물질의 농도가 최대치를 보였으며, 강우가 지속되면서 오염물질의 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 강우시 조사지점에서 유출되는 오염물질 중 SS의 농도변화가 가장 심한 것으로 나타났는데, 이는 노면의 각종 부유물과 관거내에 퇴적되어 있는 퇴적층이 초기세척 현상에 의해 순간적으로 유출되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 1. Characteristics of various drainage basin.

Site	Drainage area(ha)	Runoff coefficient	Sewer type	Land uses	Drainpipe size	Drainpipe type
H-1	19.57	0.65	Combined	Residence Commerce	1.0×1.5m	Box
H-2	13.16	0.44	Combined	Residence Commerce	1,200mm	HP
H-3	6.58	0.56	Combined	Residence Commerce	250mm	PE

Table 2. Characteristics of rainfall in each event.

	Date (y/m/d)	Antecedent dry day(days)	Rainfall duration(hr)	Rainfall depth(mm)	Rainfall intensity(mm/hr)
Rainfall 1	March 21, 2002	5	2.5	17.0	8.5
Rainfall 2	June 10, 2002	8	7.0	28.5	7.5

강우시 합류식 하수관거의 유출특성 분석

Table 3. Water quality and runoff during wet weather(Min., Max., and Average)

Site	Runoff (m ³ /d)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	
Rainfall 1	H-1	3,815 ^{a)} 10,202 ^{b)} (6,901) ^{c)}	38 1,950 (325.4)	24 1,200 (188.7)	180 10,620 (1,503.5)	7.9 78.6 (20.9)	0.58 11.9 (2.3)
	H-2	1,197 6,375 (3,563)	38 2,210 (309.2)	26 1,450 (199.3)	140 6,700 (974.4)	10.6 78 (21.5)	0.87 16.5 (2.9)
	H-3	1,103 3,412 (2,019)	22 2,260 (335.8)	14.6 1,550 (203.1)	154 8,440 (1,177.3)	6.3 50.6 (21.2)	0.71 14.7 (3.2)
	H-1	1,250 19,376 (5,962)	59 1,568 (175.5)	41 926 (93.4)	49 3,698 (276.8)	7.0 52.8 (12.4)	0.61 9.8 (1.4)
	H-2	700 5,884 (2,663)	41 1,640 (159.0)	24 864 (85.3)	31 3,750 (243.7)	8.4 68.3 (14.3)	1.03 11.4 (2.8)
	H-3	134 2,652 (932)	34 1,841 (181.4)	51 885 (108.0)	32 4,214 (283.5)	6.8 52.1 (11.4)	0.67 8.47 (1.6)

a) Min. b) Max. c) Average

(2) 유출수의 오염부하량

일반적으로 강우기간동안 하수관거에서 유출되는 오염물질의 농도와 양은 건기시보다 수습 배에서 수백 배 이상 높은 것으로 보고되고 있으며,[2] 이러한 오염물질의 유출은 하루 중의 시간, 선행건기 일수, 선행건기시의 상태, 그리고 하수관거의 특성, 배제지역의 크기와 배치 등에 의해 영향을 받는 것으로 판단되어 이미 여러 연구가 수행되었지만 아직까지 명확한 해석을 하지 못하고 있다.[3][4][8]

본 연구에서 강우기간동안 유출된 오염물의 부하량과 건기시 동일 시간동안 유출된 오염물질의 부하량을 Table 4에 나타내었다. 조사된 오염물질 중 SS가 가장 많은 양이 유출되는 것으로 나타났으며, 같은 강우기간동안 각 조사지점의 부하량을 비교해보면 배수면적 등 여러 가지 요인에 의하여 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다.

(3) 유량가중평균농도(EMC)

강우시에는 월류수가 수체에 미치는 영향을 파악하기 위하여 부하량 개념의 유량가중평균농도(Event Mean Concentration:EMC)를 제시하는 것이 바람직하다고 판단되는데, 이는 유출수가 수체에 미치는 영향을 부하량 개념으로 나타낸 것이다.[9]

산술평균농도는 건기시 작은 변동의 유량과 농도 발생 시에는 사용이 간편하지만, 강우시 유출되는 유량과 오염물질 농도의 폭이 클 때에는 유량과 이산시간을 고려하지 않기 때문에 수체가 실제로 받아들이는 영향을 평가하기엔 부족하기 때문이다. EMC는 총 유출부하량을 총 유출유량으로 나누어서 계산할 수 있으며 다음 식과 같다.

$$EMC = \frac{\text{Pollutant-mass}}{\text{Runoff-volume}} = \frac{\sum Q_i C_i \Delta t}{\sum Q_i \Delta t}$$

Table 4. Total pollutants mass during wet weather.

Site	COD (kg/event)	BOD (kg/event)	SS (kg/event)	T-N (kg/event)	T-P (kg/event)	
Rainfall 1	H-1	132.1(3.6)	75.5(2.1)	600.7(1.8)	11.5(0.6)	1.1(0.1)
	H-2	114.2(1.9)	73.3(1.2)	370.9(0.8)	8.5(0.3)	0.8(0.05)
	H-3	61.9(1.3)	39.2(0.7)	289.3(0.4)	5.4(0.2)	0.7(0.03)
Rainfall 2	H-1	207.3(33.0)	109.3(20.5)	216.9(17.1)	21.8(3.3)	1.8(0.6)
	H-2	91.3(30.2)	47.2(16.7)	113.8(14.2)	11.9(3.3)	1.6(0.6)
	H-3	34.2(8.1)	23.0(5.0)	37.2(3.5)	3.0(0.9)	0.4(0.16)

Note: Values in the parenthesis indicate total pollutants mass for dry weather.

여기서, Q_t 는 유출되는 유량(m^3/d), C_t 는 오염물질의 농도(mg/L), 그리고 Δt 는 이산시간 간격(min)을 나타낸다.

첫 번째 강우의 경우 강우초반의 많은 유량과 높은 농도로 인하여 전체적으로 수치가 높게 나타났는데, 특히 SS의 EMC가 가장 큰 것으로 나타났다. 두 번째 강우의 강우량은 봄철에 비하여 많았으나 일정기간의 강우동안 지면과 하수관거내의 오염물질이 거의 유출된 이후에도 강우가 지속되어 유출되는 유량에 비하여 오염물의 농도가 낮음으로 인하여 전체적으로 EMC 수치가 낮은 것으로 조사되었다.

의 분율(%)이며, b 는 초기세척 계수, X 는 오염물질의 양을 포함하고 있는 유출유량의 분율(%)이다. b 값이 낮을수록 명확한 초기세척을 구분할 수 있으며, 일반적으로 $0 < b \leq 0.185$ 가 가장 이상적인 b 값인데 이는 오염물의 80%가 유량 30%에 포함될 때의 수치이며, $0 < b \leq 0.862$ 는 오염물의 80%가 유량 78% 혹은 오염물의 30%가 유량 25%에 포함될 때의 값이다.

Table 5. Event Mean Concentration(EMC) during wet weather.

	Site	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Rainfall 1	H-1	154.4(27.4)	88.3(16.2)	702.2(13.7)	13.4(4.3)	1.26(0.74)
	H-2	254.1(41.1)	161.5(25.8)	816.7(18.0)	18.6(6.7)	1.93(1.13)
	H-3	249.3(26.8)	150.9(16.9)	861.5(9.16)	18.2(4.6)	2.44(0.74)
Rainfall 2	H-1	95.6(73.3)	50.3(45.6)	99.9(38.3)	10.0(7.3)	0.83(1.46)
	H-2	129.8(102.1)	67.2(56.3)	161.9(48.2)	16.9(11.2)	2.32(2.17)
	H-3	95.1(76.3)	64.1(47.4)	103.6(33.1)	8.1(8.9)	1.08(1.49)

Note: Values in the parenthesis indicate EMCs for dry weather.

3.2. 초기세척(first flush)

유출유량에 따른 오염물질의 분산 경향은 간단한 무차원 그래프로 나타낼 수 있다. 이러한 곡선은 몇 가지 인자에 대하여 매 강우시마다 다양하게 나타나게 되는데, 강우강도의 다양함을 나타내는 강우우량도, 선행건기일수와 강우량, 하수관거의 상태, 하수관거에 축적되는 오염물질의 양, 배수지역과 하수관거의 특성 등이 인자로 작용한다. 이러한 누적곡선과 양분선 사이의 차이를 특성화하기 위하여 일반적으로 초기세척 계수를 이용하는데, 이는 다음의 식에 의하여 쉽게 교정될 수 있다.[3]

$$F(X) = b \cdot X \Leftrightarrow \ln(F(X)) = b \cdot \ln(X)$$

본 연구에서는 기준오염물질의 분율을 80%로 정하였으며, 이를 기준으로 도출된 b 값과 오염물질 80%를 포함하는 유량의 분율 V_{80} 을 Table 6에 제시하였다.[5]

조사결과 첫 번째 강우시 H-2지점의 COD, BOD, SS, T-P와 H-3지점의 SS 가 각각 0.140, 0.141, 0.166, 0.140, 그리고 0.151로서 명확한 초기세척이 이루어진 것으로 조사되었으며, 이것은 오염물의 대부분이 강우초기의 초기세척에 의해 유출된다는 것을 의미한다. 그러나 b 값은 첫 번째와 두 번째의 강우사상 형태에 따라 매우 상이한 형태로 나타나는 것을 알 수 있으며, 이와 같이 강우시 초기세척과 오염물의 분산에 관한 연구는 방대한 양의 강우사상 별 자료와 b 값, 오염물의 유출특성에 대한 지속적인 연구를 토대로 하여 일반화 시켜야 할 것으로 사료된다.

Table 6. First flush coefficient b and V_{80} for different pollutants.

Site	COD		BOD		SS		T-N		T-P		
	b	V_{80}	b	V_{80}	b	V_{80}	b	V_{80}	b	V_{80}	
Rainfall 1	H-1	0.259	0.42	0.281	0.45	0.237	0.39	0.533	0.65	0.468	0.62
	H-2	0.140	0.20	0.141	0.20	0.166	0.26	0.608	0.69	0.140	0.20
	H-3	0.196	0.32	0.197	0.32	0.151	0.23	0.638	0.70	0.402	0.59
Rainfall 2	H-1	1.000	0.80	0.912	0.78	0.671	0.71	0.845	0.76	1.047	0.81
	H-2	0.837	0.77	0.889	0.79	0.654	0.71	0.937	0.79	1.160	0.82
	H-3	0.937	0.79	0.957	0.77	0.563	0.67	0.973	0.79	0.706	0.72

여기서, $F(X)$ 는 초기세척을 만족할 수 있는 오염물

또한 초기세척은 정의된 시간 누적곡선에 대한 누적유량과 누적오염물 사이의 최대 상이점과의 관계를 이용하여 초기세척의 발생특성 등을 좀더 다양하게 분석할 수 있다. 이 방법의 장점은 그래프상의 특정 지점에 대한 누적관계는 주어진 오염물의 양을 제어하는데 필요한 탱크의 저장용량을 설계하는데 유용하며, 강우의 관리와 제어에 대한 전략이 일반화될 때 중요한 인자로 작용할 초기세척의 발생시간을 예측할 수 있다는 것이다.[7][8]

일반적으로 합류식 하수관거의 강우유출수를 예측하기 위하여 BOD, COD, 그리고 SS와 같은 수많은 인자들이 사용되었다. 그러나, 초기세척의 해석과 도시의 하수배제 시설의 설계를 위한 오염물질 인자로서 SS의 사용을 권장하고 있는데, 이는 영양염류, 중금속, COD 그리고 유기물 등의 다른 오염물질의 상당부분이 하수관의 고형물과 관련이 있으며, 강우의 유출에 의하여 T-P와 유기물 등의 90%까지가 재부유된 관의 침전물들로부터 유발될 가능성이 크기 때문이다.[11][12]

강우사상별 각 지점의 누적시간과 누적유량에 대한 누적오염물질의 최대 상이점과 그래프를 Table 7과 Fig. 1~Fig. 3에 각각 제시하였다. 최대 상이점이 발생한 지점에서 초기세척이 발생한 것으로 판단할 수 있으며, 초기세척이 발생한 시간도 추정할 수 있다.

최대 상이점은 첫 번째 강우의 경우 H-1 조사지점의 COD, BOD, SS에 대하여 각각 0.53, 0.54, 0.51로 나타났으며, H-2 조사지점은 0.60, 0.62, 0.54, H-3 조사지점은 0.54, 0.55, 0.57로서 비교적 높은 상이 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이에 비해 두 번째 강우시 H-1 조사지점은 각각의 오염물질에 대하여, 0.11, 0.12, 0.27, H-2 조사지점은 0.14, 0.16, 0.26, H-3 조사지점은 0.16, 0.11, 0.36으로 첫 번째 강우에 비해 낮은 차이를 보이는 것으로 나타났다.

첫 번째 강우시 모든 오염물질의 상이점이 비슷하게 나타났으나, 두 번째 강우시에는 첫 번째 강우시와 다른 강우특성에 기인하여 SS의 상이점이 두드러지게 크게 나타났다. 또한 모든 오염물질에 대하여 초기세척은 강우의 초반에 발생하는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 1~Fig. 3에 제시한 바와 같이 초기 강우강도가 강한 봄철의 경우 최대 상이점이 발생하는 시점에서 오염물질의 60~80% 이상이 초기유량 10~20%에 포함되어 유출되는 것으로 나타났지만, 두 번째 강우의 경우 오염물질이 비교적 일정하게 분포하고 있는 것으로 조사되었다.

Table 7. Maximum divergence between the dimensionless cumulative percentage of pollutant mass and those of volume.

	Site	COD	BOD	SS
Rainfall 1	H-1	0.53	0.54	0.51
	H-2	0.60	0.62	0.54
	H-3	0.54	0.55	0.57
Rainfall 2	H-1	0.11	0.12	0.27
	H-2	0.14	0.16	0.26
	H-3	0.16	0.11	0.36

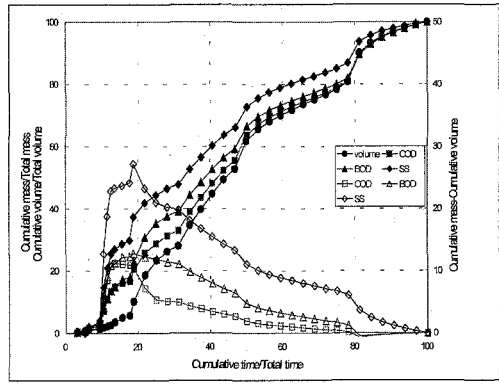
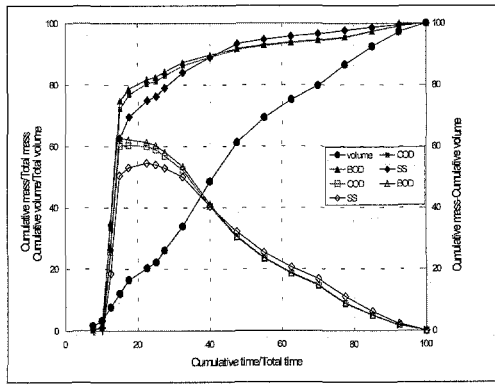


Fig. 1. Maximum divergence for different pollutant at H-1 (Rainfall 1 and 2)

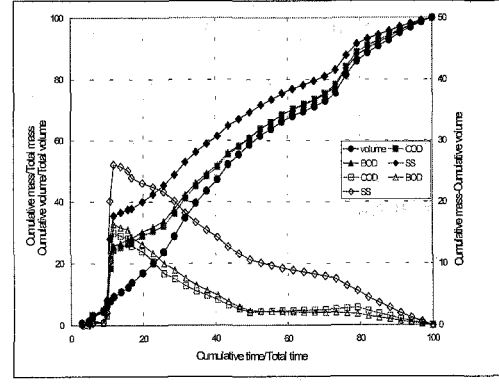
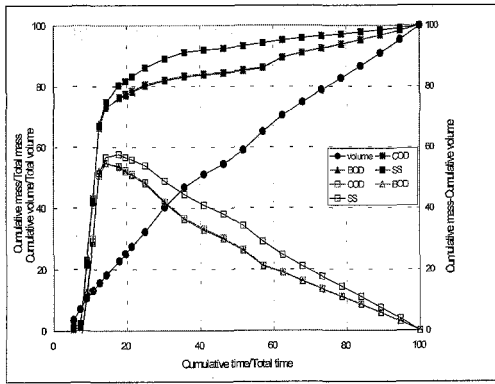


Fig. 2. Maximum divergence for different pollutant at H-2 (Rainfall 1 and 2)

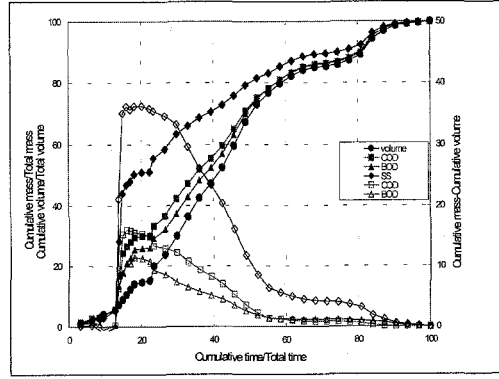
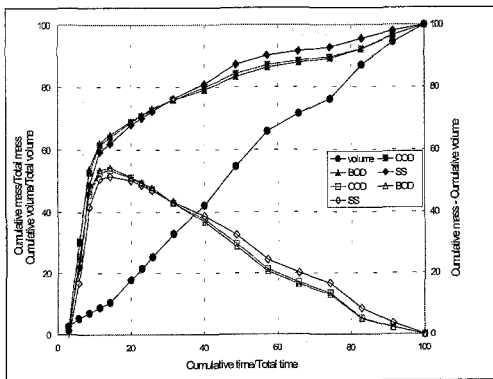


Fig. 3. Maximum divergence for different pollutant at H-3 (Rainfall 1 and 2)

4. 결 론

중·소도시의 강우시 합류식 하수관거의 월류수 차집용량 산정을 위하여 유출특성을 조사·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 조사대상지점의 강우시 합류식 하수관거의 월류수 유량 및 오염물질의 발생특성은 배수구역의 특성과 선행건기일수 및 강우특성에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 조사되었다.

2. 유출수의 오염물질 부하량 중 SS 부하량은 첫 번째 강우시, H-1, H-2, H-3 조사지점에서 각각 600.7kg/event, 370.9kg/event, 289.3kg/event로서 건기시 1.8kg, 0.8kg, 0.4kg에 비해 매우 높게 나타났으며, 유량가중평균농도(EMC)는 첫 번째 강우시 각 조사지점의 경우 SS의 EMC가 H-1, H-2, H-3 조사지점에서 각각 702.2mg/L, 816.7mg/L, 861.5mg/L로서 건기시 13.7mg/L, 18.0mg/L, 9.16mg/L보다 약 40배~95배 가량 높은 것으로 조사되었다.

3. 시간 누적곡선에 대한 누적유량과 누적오염물 사이의 최대 상이점을 이용한 초기세척 발생특성을 분석한 결과 SS의 경우 첫 번째 강우시, H-1, H-2, H-3 조사지점은 각각 0.51, 0.54, 0.57로 비교적 높은 상이 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 두 번째 강우시, H-1, H-2, H-3 조사지점은 각각 0.27, 0.26, 0.36으로 첫 번째 강우에 비해 낮은 차이를 보이는 것으로 나타났다.

4. 향후 방류수 수질기준이 오염물질의 농도에서 부하량 기준으로 변화해 감에 따라 수체에 최소의 영향이 미치도록 효과적이고 경제적인 월류수의 관리가 요구되며 이에 따른 기초자료 수집에 대한 연구가 지속적으로 수행되는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

[1] 환경부, *환경백서*, 2001

[2] 황병기, 유세진, 차영기, 안양천 유역의 강우시 비점오염원에 따른 유출부하특성에 관한 연구, *환경영향평가*, 제 10권 제 3호, pp. 223-234, 2001.

[3] Bertrand-Krajewski J., Chebbo G., and Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon, *Wat. Res.* Vol. 32, No. 8, pp. 2341-2356, 1998.

[4] Butler, D., and Davies, J. W. *Urban drainage*, London: E & FN Spon, 2000.

[5] Chebbo G., Mouchel J. M., Saget A. and Gousailles M. La pollution des rejets urbains par temps de pluie: flux, nature et impacts. *TSM*, Vol. 90, No. 11, pp. 796-806, 1995.

[6] Lau J., Butler D. and Schutze M., Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact?, *Urban Water*, Vol. 4, pp. 181-189, 2002.

[7] FNDAE, Stormwater tanks in sewer systems, *FNDAE Technical report No. 6*, 1988.

[8] Gupta K. and Saul A. J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer systems. *Wat. Res.*, Vol. 30, No. 5, 1244-1252. 1996

[9] Jun Ho Lee, Ki Woong Bang, Characterization of urban stormwater runoff, *Wat. Res.*, Vol. 34, No. 6, 2000.

[10] King county, City of Seattle Denny way/Lake union CSO control facilities plan, phase 2 and 3/4, 1998.

[11] Mecalff & Eddy, Inc. Urban stormwater management and technology: update and users guide, *Report to the U.S. EPA*, Report No. EPA-600/8-77-014, 1977.

[12] US.EPA. Manual for combined sewer overflow control. *EPA Report EPA/625/R-93/007*,