

강우시 합류식 하수관거의 월류수 차집용량 산정을 위한 유출특성 분석

Analysis of Storm Water Run-off Characteristics to Evaluate the Intercepted Volume of CSOs during Wet Weather

최성현 · 최승철 · 김병욱 · 임재명*

Choi, Sung-Hyun · Choi, Seung-Chol · Kim, Byoung-Ug · Rim, Jay-Myoung*

강원대학교 환경공학과

(2004년 1월 27일 접수, 2004년 5월 18일 최종수정논문 채택)

Abstract

Most of domestic city is served combined sewer system among various sewer system like as separate sanitary, combined sewer system and storm sewers. During the wet weather, sewer and rainfall have been overflowed because it is over capacity of the combined sewer system; that is called combined sewer overflows(CSOs)

This research was carried out to investigate runoff characteristics of combined sewer and to evaluate the effective CSOs volume in Hong-Chun gun.

During wet weather, SS load of first rainfall at H-1, H-2, and H-3 were 600kg/event, 370kg/event, and 289kg/event, respectively. SS load of second rainfall were 216kg/event, 113kg/event, and 37.2kg/event.

When the first rainfall, event mean concentrations(EMCs) at each site were 702mg/L, 816mg/L and 861.5mg/L. The second rainfall's event mean concentrations(EMCs) were 99.9mg/L, 161.9mg/L, 103.6mg/L. First flush coefficient b at each site were 0.237, 0.166, and 0.151. When the first rainfall, the flow containing 80% of pollutant mass of CSOs at each site were 0.55, 0.23, 0.48 in first rainfall, respectively. The case of second rainfall were 0.79, 0.83, 0.81.

Most of all, characteristics of rainfall like as analysis of first-flush, CSOs volume, pollutant loadings is investigated to decide intercepted volume for control of CSOs.

Key words: combined sewer overflows, event mean concentration, first flush

주제어: 합류식하수관거의 월류수, 유량가중평균농도, 초기세척

1. 서론

전국의 하수관거 총 연장은 2000년 말 현재 68,195km로서 계획 관거연장기준 63.4%이며, 하수도 보급률은 처리인구를 기준으로 68.4%에 이르고 있다(환경부, 2001). 그러나 기존에 설치된 하수관거의 경우 지하에 매설되는 특성으로 인하여 부실 시공된 경우가 많으며, 타관통과, 우·오수관의 오점, 관의 노후화로 인한 파손과 침하, 이음불량 등의 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한 합류식 하수관거의 경우 강우시 수체에 심각한 영향을 미치는 월류수 처리 문제가 심각하게 대두되고 있다(U.S. EPA, 1989; Chocat, 1994; Chebbo, 1995).

오·우수 배제방식으로는 분류식과 합류식 그리고 부분 분류식으로 크게 구분할 수 있으며, 국내에 매설된 하수관거는 계획 신도시와 일부 도시의 부분 분류식을 제외한 대부분이 오·우수를 동일관에서 배제·운반하는 합류식 관거이다(환경부, 2001). 일반적으로 합류식 배제방식의 경우 하류간선 또는 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 대부분의 중·소도시의 경우 우수토실의 설치가 미흡한 실정이며, 우수토실이 설치된 지역에서도 관리 소홀로 인하여 차집관거에 유입되기 전에 스크린의 폐쇄 등으로 인하여 평상시에도 하수가 월류되어 인근 수계로 방류됨으로 인해 심각한 오염문제를 유발시키고 있는 실정이다(임재명 등, 2002). 또한 방류수계의 목표수질 달성 및 수질개선 효과를 달성하기 위해서는 합류식하수관거의 월류

수(Combined Sewer Overflows; CSOs)의 저류 또는 처리시설의 설치가 요구되고 있어, 강우시 발생하는 CSOs 및 초기 오염물질의 발생특성을 파악하고, 이에 대한 합리적인 제어 및 관리방안이 수립되어야 한다(David et al., 2002).

본 연구에서는 강원도 홍천군 홍천읍을 대상유역으로 선정하여 강우시 발생하는 CSOs의 처리를 위한 차집유량을 효율적으로 산정하기 위해 유출특성을 파악하고자 하였다.

2. 조사방법

2.1. 현장조사 및 시료채취

본 연구에서는 대상유역을 선정하기 위하여 하수도대장 및 토지이용도 등의 자료수집 및 분석을 통하여 예비 표본지역을 선정하였으며, 이에 따른 현장확인·조사를 실시하여 최종 표본지역을 결정하였다. 표본지역은 하수 배제방식 및 용도지역별 특성, 관거 시설현황, 처리분구의 최하류 지점 중 일정량 이상의 하수 집수 가능지점, 그리고 유량계 설치 가능 여부 및 유량·수질조사의 용이성 등의 사항들을 고려하여 선정하였다.

표본지역은 홍천읍에 3개소(H-1, H-2, H-3)를 선정하였으며, 하수배제 방식은 우수와 오수가 동일관거로 배제되는 합류식 배제방식으로 이루어져 있다. 본 연구에 사용된 유량계는 수심과 유속이 자동 측정되는 초음파식(Sigma 950)과 전자식(FLO-TOTE 260)을 사용하였으며, 15분 간격으로 연속 측정하였다. 또한, 강우에 의한 월류특성 분석에 주요한 인자인 강우량과 강우강도는 Rain gauge를 직접 설치하여 측정하였으며, 강우시와 비교를 위한 건기시 유량과 수

Table 1. Characteristics of various drainage basin

Site	Drainage area(ha)	Runoff coefficient	Sewer type	Land uses	Drainpipe diameter	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 season

	Date	Antecedent dry day(days)	Rainfall duration(hr)	Rainfall depth(mm)	Rainfall intensity(mm/hr)
Rainfall 1	02/03/21	5	2.5	17.0	8.5
Rainfall 2	02/06/10	8	7.0	28.5	7.5

질 특성을 파악하기 위하여 2시간 간격으로 3일동안 시료를 채취하여 분석을 실시하였다.

강우시에는 초기 유출특성을 파악하기 위해 강우 초기에는 5분 간격, 그리고 그 이후에는 10분~30분 간격으로 시료를 채취하였으며, 강우종료 후에는 일정기간동안 2시간 간격으로 시료를 채취하였다.

표본지역의 특성 및 강우특성을 **Table 1**과 **Table 2**에 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 3**에 나타내었다.

시료채취와 분석은 2회에 걸쳐 실시하였으며, 첫번째 강우의 경우 총 강우량은 17mm, 순간 최대 강우강도는 8.5mm/hr이었으며, 두번째 강우의 경우 총 강우량은 28.5mm, 순간 최대 강우강도는 7.5mm/hr였다.

2회에 걸친 조사결과를 살펴보면, 강우시 발생하는 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 나타났으며, 강우시 유출되는 오염물질 중 SS의 농도변화가 가장 심한 것으로 나타났는데, 이는 노면의 각종 부유물과 관거 내에 퇴적되어 있는 퇴적층이 초기세척 현상에 의해 순간적으로 유출되기 때

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

문인 것으로 판단된다.

(2) 유출수의 오염부하량

일반적으로 강우기간동안 하수관거에서 유출되는 오염물질의 농도와 양은 건기시보다 수십 배에서 수백 배 이상 높은 것으로 보고되고 있으며(황병기 등, 2001), 이러한 오염물질의 유출은 하루 중의 시간, 선행건기일수, 선행건기시의 상태, 그리고 하수관거의 특성, 배제지역의 크기와 배치 등에 의해 영향을 받는 것으로 판단되어 이미 여러 연구가 수행되었지만 아직까지 명확한 해석을 하지 못하고 있다(Gupta et al., 1996).

본 연구에서 강우기간동안 유출된 오염물의 부하량과 건기시 동일 시간동안 유출된 오염물질의 부하량을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 조사결과 강우기간동안에 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)

강우시 합류식 하수관거의 월류수가 수체에 미치는 영향을 파악하기 위하여 농도 개념보다는 부하량 개념의 유량가중평균농도(event mean concentration: EMC)를 제시하는 것이 바람직하다고 판단되며, 이는 유출수가 수체에 미치는 영향을 부하량 개념으로 나타낸 것이다(Lee et al., 2000). 일반적으로 산술평균 농도는 건기시 작은 변동의 유량과 농도 발생시에는 사용이 간편하지만, 강우시 유출되는 유량과 오염물질 농도의 폭이 클 때에는 유량과 이산시간이 고려되지 않기 때문에 수체가 실제로 받아들이는 영향을 평가하기엔 부족하다. 일반적으로 EMC는 총 유출부하량을 총 유출유량으로 나누어서 계산할 수 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, Q_i 는 유출되는 유량(m^3/d), C_i 는 오염물질

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 (): Total pollutants mass for dry weather

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 (): EMCs for dry weather

의 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.

3.2. 초기세척(first flush)

강우시 발생하는 유출유량과 오염물질의 누적분포 경향은 간단한 무차원 그래프로 나타낼 수 있다. 이러한 곡선은 몇 가지 인자에 대하여 매 강우시마다 다양하게 나타나게 되는데, 강우강도의 다양함을 나타내는 강우우량도와 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 (Bertrand-Krajewski et al., 1998).

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

여기서, $F(X)$ 는 초기세척을 만족할 수 있는 오염물의 분율(%)이며, b 는 초기세척계수, X 는 그 오염물질의 양을 포함하고 있는 유출유량의 분율(%)이다. b 값이 낮을수록 명확한 초기세척을 구분할 수 있

으며, 일반적으로 $0 < b < 0.185$ 가 가장 이상적인 b 값인데 이는 오염물의 80%가 유량 30%에 포함될 때의 수치이며, $0 < b < 0.862$ 는 오염물의 80%가 유량 78% 혹은 오염물의 30%가 유량 25%에 포함될 때의 값이다(Saget et al., 1995). 본 연구에서는 초기세척현상을 만족할 수 있는 오염물질의 기준 분율을 80%로 정하였으며, 이를 기준으로 도출된 b 값과 오염물질 80%를 포함하는 유량의 분율 V_{80} 을 Table 6에 제시하였다.

본 연구에서는 첫 번째 강우시 SS를 기준으로 b 값을 살펴보면 H-1 0.237, H-2 0.166, H-3 0.151로 초기세척이 명확하게 이루어진 것으로 조사되었으며, 이것은 오염물의 대부분이 강우초기의 초기세척에 의해 유출된다는 것을 의미한다. 그러나 두 번째 강우시에는 b 값이 H-1 0.671, H-2 0.654, H-3 0.563으로서 첫 번째 강우시와 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와같이 b 값은 강우사상에 따라 매우 상이한 형태로 나타나는 것을 알 수 있으며, 강우시 초기세척과 오염물의 분산에 관한 연구는 방대한 양의 강우사상별 자료와 b 값, 오염물의 유출특성에 대한 지속적인 연구를 토대로 하여 일반화 시켜야 할 것으로 사료된다.

또한, 초기세척분석은 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, 강우사상에 따른 관리와 제어에 대한 전략을 일반화시킬 때 중요한 인자로 작용하는 초기세척의 발

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

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

생시간을 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있다 (Gupta et al., 1996). 일반적으로 합류식 하수관거의 월류수를 예측하기 위하여 BOD, COD, 그리고 SS와 같은 인자들을 사용하고 있다. 그러나, 초기세척의 해석과 도시의 하수배제 시설의 설계를 위한 오염물질 인자로서 SS의 사용을 권장하고 있는데, 이는 영양염류, 중금속, COD 그리고 유기물 등의 다른 오염물질 상당부분이 하수관거 내 고형물과 관련이 있으며, 또한, 강우 유출에 의한 T-P와 유기물 등은 약 90%까지 채부유된 관의 침전물들로부터 유발될 가능성이 크기 때문이다(Hogland et al., 1984).

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

최대 상이점(maximum difference point)은 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 SS의 상이점만 두드러지게 크게 나타났다. 초기 강우강도가 강한 첫 번째 강우의 경우 최대 상이점이 생기는 시점에서 오염물질의 60~80% 이상이 초기유량 10~20%에 포함되어 유출되는 것으로 나타났지만, 중반이후 강우강도가 강했던 두 번째 강우의 경우 오염물질이 비교적 일정하게 분포하고 있는 것으로 나타났다.

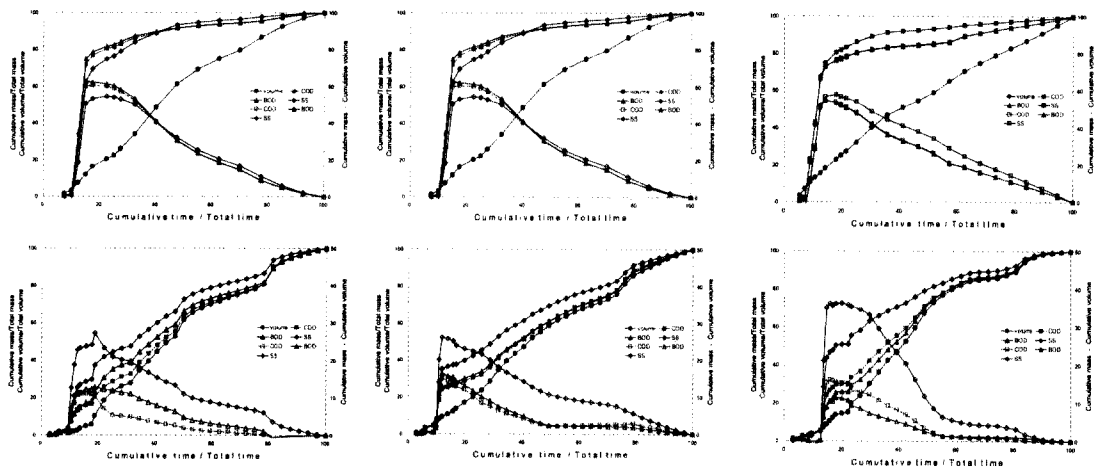


Fig. 1. Maximum divergence for different pollutants at H-1, H-2, and H-3(Rainfall 1 and 2).

Table 8. Evaluation of CSOs and characteristics of runoff

	Site	FLOW _{a,d} (m ³ /d) ^{a)}	RAIN _{tot} (mm) ^{b)}	RFIN _{max} (mm/hr) ^{c)}	FLOW _{int} (m ³ /d) ^{d)}	FLOW _{tot} (m ³) ^{e)}	CSOs (m ³)	CSOs/ FLOW _{tot} (%)
Rainfall 1	H-1	1,665	17.0	8.5	5,000	855	275	32.2
	H-2	702	17.0	8.5	2,500	454	187	41.2
	H-3	452	17.0	8.5	1,500	335	71	21.2
Rainfall 2	H-1	1,297	28.5	7.5	5,000	2,168	1,100	50.7
	H-2	851	28.5	7.5	2,500	702	167	23.8
	H-3	316	28.5	7.5	1,500	359	115	32.0

- a): average volume of wastewater per day
- b): total amount of rainfall during wet weather
- c): maximum rainfall intensity
- d): intercepted volume of wastewater during wet weather
- e): total runoff during wet weather

3.3. 월류유량 및 월류수의 오염부하량

(1) 월류유량(CSOs) 산정

H-1 조사지점의 하수관거는 BOX 형태로 되어 있으며, 차집맨홀 전 철제격자형 우수토실이 설치되어 일정량 이상의 하수가 발생시 그대로 월류토록 설계되어 있다. 홍천군(2000)에 의하면 H-1 조사지점 관경 등의 설계에 이용된 설계유속은 0.629m/s이며, 설계 차집용량은 0.158m³/s(13,651.2m³/d)로 되어있다. 그러나 평상시 각종 협잡물과 쓰레기로 인하여 스크린이 부분적으로 폐쇄되어 있으므로 건기시에도 종종 월류가 발생되고 있으며, 강우 발생시 초기부터 월류가 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서 H-1 조사지점의 CSOs량은 건기시 평균유량 1,665m³/d 3Q인 4,995m³/d(5,000m³/d)를 기준으로 산정하였다.

H-2, H-3 조사지점도 H-1 조사지점과 유사하게 스크린의 부분적인 폐쇄로 인한 비정상적인 월류가 발생하고 있었다. 따라서 H-2 조사지점의 CSOs량은 건기시 평균유량 702m³/d의 3Q인 2,106m³/d(2,500m³/d)를 기준으로 산정하였으며, H-3 조사지점은 건기시 평균유량 452m³/d의 3Q인 1,356m³/d(1,500m³/d)를 기준으로 산정하였다.

강우유출특성과 산정된 월류유량 및 월류율을 Table 8에 제시하였다. 월류율은 첫 번째 강우의 경우 H-1, H-2, H-3 조사지점에서 각각 32.2%, 41.2%, 21.2%로 나타났으며, 두 번째 강우의 경우 많은 강우량으로 인하여 50.7%, 23.8%, 32.0%로 첫

번째 강우보다 높은 것으로 나타났다.

(2) 월류수(CSOs)의 오염부하량

강우시 합류식 하수관거는 설계차집용량을 초과할 경우 처리되지 않고 하천이나 호수에 직접 방류되는 경우가 대부분이나, 선진 외국의 경우 월류수 발생시 수체에 직접 방류하지 않고 차집하여 처리한 후 방류하는 방식을 채택하고 있다. 또한, 이러한 월류수의 저장탱크를 설계하기 위하여 많은 방법들이 보고되고 있으며, 나라마다 기술적, 경제적인 면을 고려하여 적합한 저류시설과 처리시설을 설치하여 운영하고 있다. 우리나라는 현재 저류탱크의 설치가 전무한 실정이며, 월류지점의 여러 가지 문제점으로 인하여 실제 설계 월류량보다 훨씬 많은 양의 오염물질들이 수체로 그대로 방류되고 있다. 일반적으로 월류수를 차집하기 위한 저장탱크를 설계하기 위해서는 적절한 크기를 결정하여야 하며, 수체에 미치는 영향을 최대한 고려하여야 한다(David et al., 2002). 지금까지 가장 일반적으로 사용하고 있는 방법은 초기 침투농도와 유량에 기초한 방법이 있으나(FNDAE, 1988; US. EPA, 1993), 이는 지속적인 강우시 수체에 흘러 들어가서 영향을 미치는 오염물질의 부하를 고려할 때 바람직하지 못한 방법인 것으로 판단되고 있다. 따라서 월류수의 수질보다는 강우기간동안 발생하는 월류수의 오염부하량을 고려하여 차집유량을 결정하는 것이 바람직하다고 사료된다(Bertrand-Krajewski et al., 1998).

본 연구에서는 오염물질 중 대표성이 있다고 판단

Table 9. Evaluation of SS load of CSOs during wet weather

	Site	Dry weather			Wet weather		
		RAIN _{tot} (mm) ^{a)}	LOADR _{SS} (kg/d) ^{b)}	LOAD _{SS} (kg) ^{c)}	LOAD _{tot,SS} (kg) ^{d)}	LOAD _{CSO,SS} (kg) ^{e)}	LOAD _{CSO,SS} / LOAD _{tot,SS} (%)
Rainfall 1	H-1	17.0	83.8	1.8	600.7	115.4	19.2
	H-2	17.0	32.1	0.8	370.9	210.0	56.6
	H-3	17.0	13.5	0.4	289.3	65.3	22.6
Rainfall 2	H-1	28.5	45.4	17.1	216.8	82.7	38.1
	H-2	28.5	32.0	14.2	113.8	19.7	17.3
	H-3	928.5	9.8	3.5	37.2	6.3	16.9

a): total amount of rainfall during wet weather

b): average loading rate of SS per day

c): SS load for dry weather at the same period of wet weather

d): total SS load during wet weather

e): SS load of CSOs during wet weather

되는 SS에 대한 부하량을 중심으로 월류수를 해석하였으며(Hogland et al., 1984), 강우시와 건기시의 SS의 부하량을 Table 9에 제시하였다.

첫 번째 강우시 H-1 조사지점의 일평균 SS 부하량은 83.3kg/d, 강우기간 중 유출된 총부하량은 600.7kg, 그리고 월류수의 부하량은 115.4kg로서 일평균 SS 총부하량의 138.5%에 해당하는 것으로 나타났다. H-2, H-3 조사지점의 월류수의 SS 부하량은 각각 210kg, 65.3kg으로서, 일평균 SS 총부하량 32.1kg/d, 13.5kg/d의 656.3%, 483.7%에 해당하는 것으로 나타났다.

두 번째 강우시 H-1, H-2, H-3 조사지점의 월류수 내의 SS 부하량은 각각 82.7kg, 19.7kg, 6.3kg으로서, 일평균 SS 총부하량 45.4kg/d, 32.0kg/d, 9.8kg/d의 182.2%, 61.6%, 64.3%에 해당하는 것으로 나타났다.

첫 번째와 두 번째 강우시 월류수중의 SS 부하량은 뚜렷한 차이를 보였는데, 이는 첫 번째 강우시 침투유량과 침투농도가 강우 초기에 거의 동시에 나타남으로써 월류수가 침투농도의 영향을 많이 받았기 때문이며, 두 번째 강우의 경우 침투유량은 강우 후반에 나타난 반면, 침투농도는 강우 초반에 발생하여 월류수가 낮은 농도의 침투유량의 영향을 받은 것으로 판단된다.

또한, 강우시 합류식 하수관거의 유출특성은 명확히 규명되지 않은 많은 요인들에 의하여 각각 다르게

나타나는데, 본 조사 결과 같은 지점이라도 초기강우의 특성, 관의 유속 및 이에 따른 퇴적층의 특성에 따라 월류수의 오염부하는 많은 영향을 받는 것으로 조사되었다. 따라서, 수체를 보호하기 위한 월류수 차집탱크 및 처리시설을 설계하기 위해서는 월류수에 영향을 미치는 인자들간의 상호작용을 규명하여 일반화시킬 수 있는 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.4. 월류수 유량에 따른 오염물질의 분산

일반적으로 강과 호수등의 수체의 오염관리를 위해서 배출기준을 설정하여 규제를 실시하고 있는데, 이러한 규제기준에는 농도기준과 총량기준의 방법들이 있다. 농도기준은 오염원 배출구에서 배출물 중의 오염물질 농도를 그 척도로 이용하나, 오염원의 수와 규모가 늘어나면 모든 배출원이 농도기준을 완전히 이행하더라도 오염부하가 증가하고 환경기준을 달성하지 못하게 된다. 한편, 총량기준은 오염원의 수나 규모가 증가하여도 각 오염원은 방지시설의 확장이나 조업의 단축 등을 통하여 배출한도량을 지켜야 하는 만큼, 오염물질의 부하는 일정하며 목표로 하는 환경기준이 유지할 수 있다. 최근 우리나라의 경우 4대강 물관리종합대책을 수립하면서, 배출허용기준 한도에서 개별 배출원을 제어하는 종래의 농도규제에 더하여 목표 수질기준 한도에서 유역배출량을 관리하는 오염총량관리제를 새로이 도입하고 있다(공동수,

Table 10. Evaluation of CSOs volume at the 50% and 80% of SS load

	Site	RAIN _{tot} (mm) ^{a)}	LOAD _{CSO,SS} (kg) ^{b)}	Intercepted volume			
				I.V ₅₀ (m ³)	V ₅₀	I.V ₈₀ (m ³)	V ₈₀
Rainfall 1	H-1	17.0	115.4	70	0.24	165	0.55
	H-2	17.0	210.0	20	0.09	47	0.23
	H-3	17.0	65.3	25	0.35	34	0.48
Rainfall 2	H-1	28.5	82.7	535	0.49	870	0.79
	H-2	28.5	19.7	87	0.51	138	0.83
	H-3	928.5	6.3	50	0.44	93	0.81

a): total amount of rainfall during wet weather

b): SS load of CSOs during wet weather

2003).

본 연구에서는 오염물질의 총량규제의 개념을 기초로 하여 월류수내의 SS부하량의 50%, 80%를 포함하는 월류수의 유량을 산정하여 Table 10과 Fig. 2에 제시하였다(Bertrand-Krajewski et al., 1998).

첫 번째 강우시 H-1, H-2, H-3 조사지점에서 SS 부하량의 50%를 포함하는 유량분율은 각각 0.24, 0.09, 0.35이며, SS 부하량의 80%를 포함하는 유량분율은 각각 0.55, 0.23, 0.48인 것으로 나타났다. 이와는 대조적으로 두 번째 강우시 각 조사지점의 월류

수내의 SS 총부하량은 첫 번째 강우시보다 낮음에도 불구하고 SS 부하량의 80%를 기준으로 했을 때, 0.79, 0.83, 0.81로 약 150%에서 360% 가량 유량이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 두 번째 강우의 경우 첨두유량과 첨두농도가 같은 시점에서 이루어지지 않았기 때문이며 오염물질이 월류되는 유량의 첫 부분이 아니라 전반적으로 분포하는 것을 의미한다.

이와 같이, 강우시 강우특성에 따라 유출과 월류 특성이 매우 다양하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 월류수 저장 및 처리를 위한 시설 설계시 각 지점별

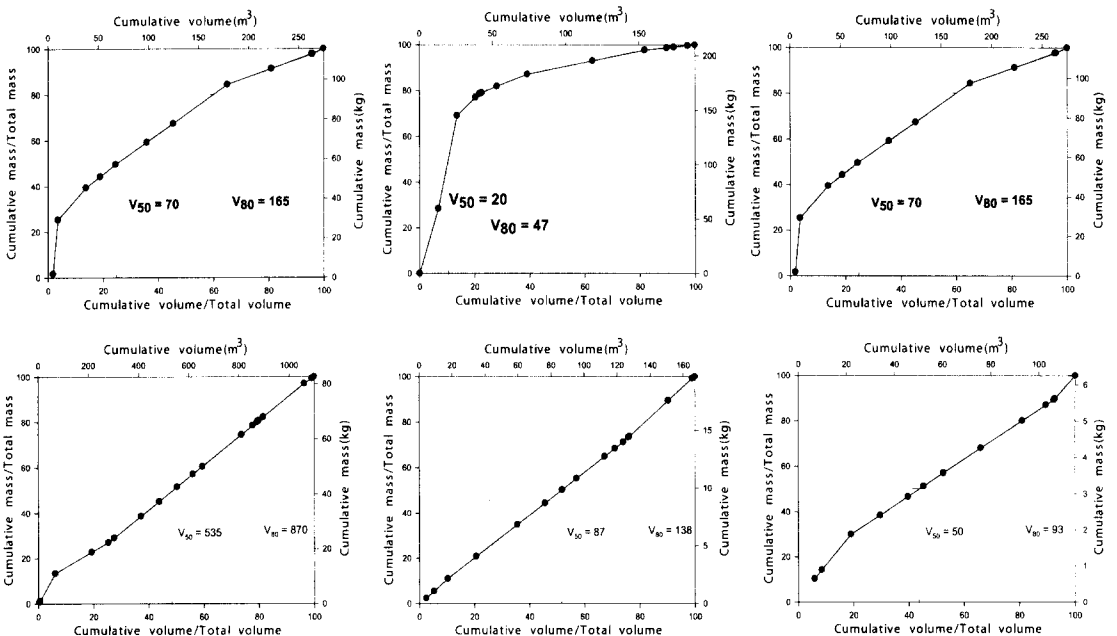


Fig. 2. Cumulative curves for SS load of CSOs at H-1, H-2, and H-3(Rainfall 1 and 2).

로 일시적인 자료보다는 지속적인 강우와 유출특성에 대한 연구 결과를 기초로 하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

중소도시의 강우시 합류식 하수관거의 유출특성과 방류수계에 많은 영향을 미치는 월류수의 차집유량 산정에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 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 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.

2. 강우시 초기세척현상을 분석하기 위한 방법으로 초기세척계수 b 값과 최대상이점을 이용하여 분석한 결과 SS를 기준으로 첫 번째 강우의 경우 각각 0.151~0.237, 0.51~0.57의 범위를 보였으나, 두 번째 강우의 경우 0.563~0.654, 0.26~0.36의 범위를 보였다. 이와 같이 동일 조사지점에서 강우시 최대강우 강도의 위치 등 강우사상의 변화에 따라 초기세척현상은 매우 다르게 나타나는 것으로 조사되었다.

3. 각 조사지점에서의 강우시 월류수 유량과 오염물질 부하량을 조사한 결과 총 유출유량에 대한 월류수의 비는 3.4%~50.7%로 나타났으며, 총 유출 SS 부하량에 대한 월류수내의 SS 부하량의 비는 10.6%~63.7%로 나타났다.

4. 강우시 월류수내의 발생된 오염물질의 80%를 포함하는 월류수량이 발생된 총 월류수량에서 차지하는 비율을 살펴보면, 첫 번째 강우시의 경우 H-1, H-2, H-3 조사지점에서 각각 0.55, 0.23, 0.48, 두 번째 강우시의 경우 0.79, 0.83, 0.81으로 산정되었다. 이와같이 강우초반의 최대 강우강도에 의한 명확한 초기세척 효과가 발생될 경우 적은 차집용량으로 오염물질을 제어할 수 있지만, 강우초반에 낮은 강우강도로 인한 초기세척이 잘 이루어지지 않을 경우 목표

오염물질의 양을 제어하기 위해서는 많은 유량의 차집 및 처리가 필요한 것으로 나타났다.

5. 강우시 발생하는 CSOs의 제어를 위한 차집용량을 산정하기 위해서는 우선적으로 강우특성에 따른 세밀한 조사가 이루어져야 하며, 합리적인 용량을 산정하기 위해서는 강우사상에 따른 초기세척현상 분석 및 월류량, 오염물질 부하량등의 상관관계를 명확히 파악하여 산정하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 부속 환경연구소와 석재복 합신소재제품연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 공동수, 수계별 오염총량관리제의 도입배경과 향후 전망, *춘천 물포럼 2003* 논문집, pp. 571-596.
- 임재명, 김병욱, 최승철, 최성현, 원철희(2002), 강우시 합류식 하수관거의 유출특성 및 차집유량 산정, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회* 논문집, G141~G144.
- 홍천군(2000) 홍천읍 하수종말처리시설 실시설계 보고서.
- 환경부(2001) 환경백서.
- 황병기, 유세진, 차영기(2001) 안양천 유역의 강우시 비점오염원에 따른 유출부하특성에 관한 연구, *환경영향평가*, 10(8), pp. 223-234.
- Bertrand-Krajewski J., Chebbo G., and Saget A. (1998) Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon, *Wat. Res.* 32(8), pp. 2341-2356.
- Chebbo G., Mouchel J. M., Saget A. and Gousailles M. (1995) La pollution des rejets urbains par temps de pluie: flux, nature et impacts. *TSM* 90(11), 796-806.
- Chocar B., Cathelain M., Mares A. and Mouchel J. M. (1994) La pollution due aux rejets urbains par temps de pluie: impacts sur les milieux recepteurs. *Houille Blanche* 1/2, 97-105.
- David Butler, James Lau, Manfred Schutze (2002) Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact. *Urban Water* 157, No. of p. 9.
- FNDAAE (1988) Stormwater tanks in sewer systems, FNDAAE Technical report No. 6.
- Gupta K. and Saul A. J., (1996) Specific relationships for the first

- flush load in combined sewer systems. *Wat. Res.* **30**(5), 1244-1252.
- Hogland W., Berndtsson R. and Larson M.(1984) Estimation of quaility and pollution load of combined sewer overflow discharge. *Proc. III Int. Conf, on Urban Storm Drainage*, Goteborg, Sweden, pp. 841-850.
- Jun Ho Lee, Ki Woong Bang (2000) Characterization of urban stormwater runoff, *Wat. Res.* Vol. 34, No. 6.
- Saget A. and Chebbo G. (1995) Distribution of pollutant loads during rainfall events. *CERGRENE/Lyonnaise des Eaux report*, p. 60.
- U.S. EPA (1989) Needs Survey Report to Congress, Assessment of Needed Publicly Owned Wastewater Treatment Facilities in the United States, *Report NO. EPA 430/09-89-001*.
- U.S. EPA (1993) Manual for combined sewer overflow control. *EPA Report EPA/625/R-93/007*, p. 95.