

초기우수 관거유입계수 산정 및 오염부하 기여도 평가

김홍태 · 신동석[†] · 김용석

국립환경과학원 물환경연구부 유역총량연구과

Evaluation of First Flush Rainfall Inflow and Pollution Loads into Manhole against Combined and Sanitary Sewer Overflows

Hongtae Kim · Dongseok Shin[†] · Yongseok Kim

Water Pollution Load Management Research Division, Water Environment Research Department,
National Institute of Environmental Research

(Received 15 January 2015, Revised 28 January 2015, Accepted 28 January 2015)

Abstract

Some data into combined and sanitary sewer system were collected in order to find out the characteristics of discharge from first flush rainfall inflow. The inflow ratios of combined and sanitary sewer system were 0.46 and 0.27 during rains from various survey data. The average inflow ratio 0.31 was appropriate for general application because many watersheds were not classified clearly as combined or sanitary sewage treatment areas. The percentage of first flush loads in the whole BOD load was about 10%. This result was thought some meaningful, comparing with similarity of first flush pollution load contribution previous surveyed by KECO (2004).

Key words : Combined sewer overflow, First flush, Inflow ratio, Pollution loads

1. Introduction

우리나라는 많은 인구가 도시에 살고 있으며, 하수처리구역 비율도 지속적으로 증대되어 왔다. 점오염원은 4대강사업과 방류수질강화 등 정책적 지원과 처리기술의 발달로 하천에 대한 오염기여율이 점점 감소하고 있는 추세이나 비점오염원은 발생 및 배출 경로가 다양하고 강우시 다량 발생할 뿐만 아니라 차집처리가 곤란하여 적절한 관리대책 마련이 어렵다.

합류식 하수관거의 월류수(Combined Sewer Overflow, CSOs)는 강우시 우수배제기능을 수행하는 차집관거 용량을 초과한 유량이 방류수역으로 배출되는 유량이다. 그러나 수체내 종합적인 수질관리에 필수적인 우수유출에 기여하는 오염원 현황 조사나 강우유출수에 포함된 오염물질에 대한 처리규모 및 오염기여율에 대한 적절한 대책은 미흡한 실정이다(U. S. EPA, 1993). 특히 Field et al. (1993)의 연구에 따르면 강우초기에 발생하는 유출수는 지표면 초기세척현상과 관거 내 퇴적물 재부유 등으로 인하여 건기하수의 수 배에서 수십 배에 이르는 오염도를 띄기 때문에 방류수역에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 초기우수의 관거유입량을 산정하는 방법은 초기 침투농도와 유량에 기초한 방법(FNDAE, 1988; U. S. EPA, 1993)이 일반적이다. 강우가

지속될 경우 수체에 유입되어 영향을 미치는 오염부하가 시간에 따라 다양하게 변동하는 것을 고려하면 타당하지 않은 방법이나 현실 여건상 합리적인 방법이라고 판단된다.

Bertrand-Krajewski et al. (1998)은 월류수의 농도보다는 강우기간동안 발생하는 월류수의 오염부하량을 고려하여 차집유량을 결정하는 것이 적절하다고 판단하였다. 또한, David et al. (2002)은 월류수 차집에 필요한 저장탱크를 설계할 때 수체에 미치는 영향을 최대한 고려하여 크기를 결정하여야 한다고 지적하였다.

국내에서도 강우시 초기우수 월류에 따른 오염부하 유출 특성을 파악한 사례가 다수 있었다. An et al. (2010)은 월류 강우의 농도를 검토하는 과정에서 침입수/유입수(Infiltration/Inflow, I/I) 및 누수의 발생 특징 분석에 대상지역의 관거 불량도 계량화, 사업우선순위 설정, 사업효과를 고려하였다. Cho et al. (2001)은 퇴적물 재부유가 유출 오염농도에 미치는 영향 실험을 토대로 퇴적물 자체 오염도가 관거 월류 수질과 밀접한 상관성이 있음을 제시하였다. 또한 Kang et al. (2003)은 오염부하 발생원단위는 고밀도 주거지역과 공업지역에서 높은 것으로 발표하였으며, Won et al. (2011)은 무강우시 합류식 하수관거의 오염부하특성을 조사하였다. Lee and Shin (2004)에 따르면 고밀도지역에서는 COD를 기준으로 적정 차집유량을 3Q와 Q+2mm/hr로 설계한 경우, 현행 하수도시설기준(월류오염부하 저감목표인 청천시 발생부하량의 5% 미만)은 달성이 가능하나 일률적인 기준 적용에 한계가 있으며, 인구밀도, 유역별 강우유출특성, 오

[†] To whom correspondence should be addressed.
sds8488@korea.kr

염부하발생 경향 등 지역특성을 고려한 정량적 평가가 필요한 것으로 판단하였다.

그러나 전국단위로 하수처리구역에서 강우시 우수가 어느 정도 관거에 유입되고 배출되며 초기우수 월류부하가 어느 정도 배출되는지는 연구된 사례는 없었다. 본 연구에서는 분류식 및 합류식 하수처리구역에서 강우시 맨홀 등을 통해 관거로 유입되는 유입유량 비율을 파악하고 초기 우수 월류에 의한 오염부하의 기여도는 원단위법을 이용하여 산정하고 검토하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 토지계 관거유입계수 산정방안

수계오염총량관리기술지침(NIER, 2007)(이하“총량기술지침”)에서 관거유입량은 실측하거나 총량기술지침에 제시된 토지계 관거유입계수를 활용하도록 명시되어 있고, 토지계 관거유입계수는 실측 유입량과 배수면적에 유효강수량을 곱한 값의 비율로 산정하도록 되어있다.

본 연구에서는 선행 연구보고서에 수록된 실측 관거유입량과 배수유역자료를 이용하였는데 Fig. 1과 같이 분류식 286개, 합류식 79개 총 365개 지점으로, 각각 한국환경공단(KECO, 2003, 2004) 189개, 4대강 수계관리위원회(WMC, 2009) 64개, 경기보건환경연구원(GIHE, 2011) 112개 지점이다.

실측 관거유입량과 배수유역별 유효우량을 이용하여 각 지점에 대한 분류식 및 합류식 토지계관거유입계수를 아래의 식 (1)~(3)에 따라 산정하였다.

유효우량은 NRCS (Natural Resources Conservation Service) 유효우량 산정방법으로 식 (1)~(2)을 이용하여 산정하였다.

$$S = 25400 / (CN - 254) \quad (CN = 98 \text{ 적용(불투수층 적용)}) \quad (1)$$

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad (Q: \text{유효우량}, P: \text{총강우량}, S: \text{최대잠재보유수량}) \quad (2)$$

관거유입계수는 식 (3)과 같이 각 강우사상별로 차집면적과 관거유입유량, 유입일수를 이용하여 산정하였다.

$$\text{관거유입계수} = (\text{관거유입유량} \times \text{유입일수}) \div (\text{유효우량} \times \text{차집면적}) \quad (3)$$

산정된 관거유입계수는 처리구역 형태를 반영하여 분류식과 합류식으로 구분하였고, 분류식 및 합류식 지역의 개수로 가중평균하여 전체평균 관거유입계수를 산정하였다.

다만, 식 (3)에서 산정된 값이 1.0을 초과하는 것은 유역에서 발생하는 양보다 유입이 많아 측정이 잘못되었거나 유역외에서 추가적인 유입이 있는 것으로 사료되어 이상치로 판단하여 산정에서 제외하였다.

2.2. 초기우수월류량의 오염부하 기여도 평가방법

본 연구에서는 초기우수월류량에 의한 오염부하 기여도 평가를 위하여 두가지 방법을 적용하였다. 우선, 선행연구

<토지계 관거유입량 산정방법>

- ① 토지계 관거유입량은 합류식 관거지역에서 강우에 의한 토지유출수가 유입되는 양, 분류식 관거에서 맨홀부의 시공불량 또는 우·오수관의 오점 등으로 우수가 유입되는 양을 말한다.
- ② 처리구역내 차집구역(처리구역 중 우수가 환경기초시설에 연결된 관거배수설비로 유입되지 않는 구역 제외)으로부터 유효강우(유효강우로서 10mm/일 이상의 강우강도를 기준한다)시 강우유출수로 인한 토지계 관거유입유량은 다음의 합리식으로 구한다. 유입계수는 표본조사를 통하여 유효강우고-관거유입유량의 관계식을 도출하여 이 식에 유효강우고를 대입하여 산출하며, 조사자료가 없는 경우에는 0.088의 유입계수를 적용한다.

$$\text{토지계관거유입유량} = \frac{\sum(\text{유입계수} \times \text{유효강우고} \times \text{차집면적})}{\text{유효강우일수}}$$

차집면적은 처리구역 중 전, 담, 임야, 기타를 제외한 대지면적을 말한다.

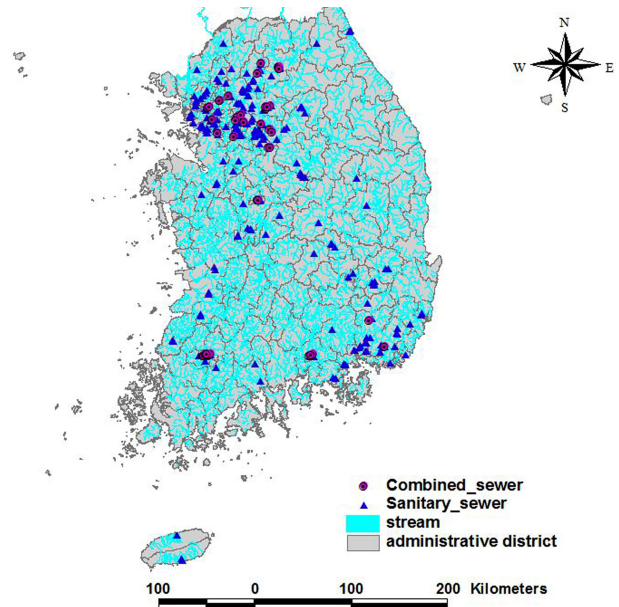


Fig. 1. Target sites.

365개 지점 자료를 이용하여 산정한 실측 토지계 관거유입계수를 이용하여 총량기술지침에 명시된 초기우수월류부하량 산정방법을 적용하였고, 또한 KECO (2004)에서 전국단위로 조사된 도심지 합류식 하수관거 월류수 및 분류식 우수관거 우수유출 오염부하 기초자료를 이용하여 인구·면적·시군별 원단위를 적용하여 초기우수월류량에 의한 오염부하 기여도를 평가하였다.

본 연구에서 총량기술지침을 적용한 초기우수월류부하량은 한강수계 의무제 총량관리(2013-2020) 목표수질 설정과 3대강수계 제2단계 총량관리(2011-2015) 기본계획 수립시 오염원에 대한 기준년도인 2008년도 자료를 활용하여 산정하였다.

Table 1에 제시된 면적 및 인구당 오염부하 원단위 적용방법은 처리구역내 합류식 및 분류식 인구 비율을 기준으로 처리면적을 구분하여 산정하였다.

Table 1. The method of calculation first flush pollution loads from CSOs and SSOs

Source	Scenario	Method	Unit	Site
TMDL guideline (NIER, 2007)	S1-1	Inflow ratio 31% for sewer	kg/day	whole (BOD, T-P)
	S1-2	Inflow ratio 40% for sewer		
Estimated Pollution Loads from Combined Sewer Overflow (CSOs) and Stormwater Runoff in Urban Areas (KECO, 2004)	S2	Load unit by area and year - BOD: CSOs = 432, SSOs = 223.4 - TP: CSOs = 13.35, SSOs = 6.25	kg/ha/yr	whole (BOD, T-P)
	S3	load unit by a person and year - BOD: CSOs = 1.48, SSOs = 1.05 - TP: CSOs = 0.05, SSOs = 0.04	kg/person/yr	
	S4	city, country load unit by area and year - BOD: city = 432.0, country = 216.0	kg/ha/yr	whole (BOD)

3. Results and Discussion

3.1. 초기우수 관거유입계수 산정

연구방법에서 제시된 강우시 합류식 및 분류식 관거유입량에 대한 365개 실측자료를 이용하여 토지계관거유입계수를 산정한 결과, 전체평균은 Table 2와 같이 0.31로 산정되었으며 분류식은 0.27, 합류식은 0.46으로 산정되었다. 여기서, 전체평균치는 총량기술지침의 권고치 0.088보다 3.5배 정도 크게 평가되었다. 기존 유입계수(0.088)는 162개 표본을 사용하였으나, 본 연구는 365개 표본이 이용되었고, 분류식 지역뿐만 아니라 합류식 지역까지 포함하여 조금 더 참값에 근접할 것으로 판단하였다. 다만, 기존의 지침 적용에서 관거유입계수가 상향되면 관거유입량일 증가됨으로써 미처리배제량과 관거월류량이 증가함으로써 초기우수월류에 따른 부하량이 증가할 수 있으므로 총량계획단계부터 변경된 값이 적용되어야 하며 강우시 발생하는 부하량으로 모델링시 유달률 또는 배출계수를 적용하여 저·평수기 배출시 과대평가되지 않도록 하여야 한다.

3.2. 초기우수월류량의 오염부하 기여도 평가

새로 산정된 토지계관거유입계수인 0.31을 총량기술지침에 적용하면 Table 3과 같이 S1-1 시나리오의 초기우수 월

류부하비율과 S3 시나리오의 인구당오염부하원단위(kg/인/yr) 적용 결과가 전체 배출부하량의 약 10%로(BOD기준) 매우 유사하게 나타났다.

또한, S1~S4 시나리오에서 총량기술지침과 오염부하원단위 방식 모두 합류식 지역은 분류식 지역보다 2배 정도의 오염부하 기여도를 나타내고 있는데, 이는 KECO (2004)의 연구 결과와도 일치한다.

면적원단위 적용결과인 S2 시나리오의 경우, 총량기술지침 및 인구원단위에 비해 BOD, T-P 항목에서 약 7~8배의 오염부하기여도를 나타내며 전체오염부하 비율에서도 초기우수월류부하가 BOD는 77.5%, T-P는 32.5%로 비상식적으로 높게 산정되었다.

이는 면적원단위는 조사지역 부하의 평균값으로 대체로 오염부하가 높게 산정된 것으로 판단되며 인구의 분포, 도시 및 농촌지역 구분 등 지역적 특성을 반영하지 못해 전국단위로 처리구역에 대한 합류식 및 분류식 구분 일괄 적용에 따라 과도하게 높게 산정된 것으로 판단된다.

4. Conclusion

기존 환경기초조사업 등 비점오염원 배출특성조사 자료를 수집·분석하여 강우시 합류식 및 분류식 하수관거로 유

Table 2. Observed inflow ratio in sewer at rainfall

Source	Supervision	Section	Inflow ratio	
			Count	Avg.
The whole Country Sewer Maintenance Propriety Investigation	KECO (2003)	whole	162	0.088
		SSO	162	0.088
Estimated Pollution Loads from Combined Sewer Overflow (CSOs) and Stormwater Runoff in Urban Areas	KECO (2004)	whole	27	0.487
		SSO	6	0.407
		CSO	21	0.509
The Pollution Loadings Characterization by Drain Process Types in Sewer Systems	WMC (2009) - Han river, Nakdong river, Geum river, Youngsan river	whole	64	0.199
		SSO	36	0.150
		CSO	28	0.262
Paldang Basin Non-point Source Pollution Loads Estimate	GIHE (2011)	whole	112	0.657
		SSO	82	0.675
		CSO	30	0.609
		whole	365	0.31
sum/average		SSO	286	0.27
		CSO	79	0.46

Table 3. Results of first flush pollution loads ratio from CSOs and SSOs

Scenario		Total load (kg/d)		First flush load ratios to TMDL					
				CSOs		SSOs		CSOs+SSOs	
		BOD	T-P	BOD	T-P	BOD	T-P	BOD	T-P
TMDL guideline (NIER, 2007)	S1-1	1,584,857	103,362	6.7%	2.8%	3.5%	1.3%	10.1%	4.1%
	S1-2			105,862	2,865	54,671	1,337	160,533	4,202
				8.4%	3.4%	4.5%	1.7%	12.9%	5.1%
				133,019	3,549	71,137	1,739	204,156	5,288
First flush load unit (KECO, 2004)	S2	1,584,857	103,362	49.7%	20.6%	27.8%	11.9%	77.5%	32.5%
				787,530	21,247	441,375	12,289	1,228,905	33,536
	S3			6.6%	3.4%	3.4%	2.0%	10.1%	5.4%
				105,368	3,560	53,894	2,053	159,262	5,613
				39.4%	-	-	-	-	-
S4	623,673	-	-	-	-	-			

입되는 초기우수의 관거유입계수 산정결과, 합류식은 0.46, 분류식은 0.27로 나타나 처리구역별로 구분하여 관거유입계수를 적용하는 것이 타당하다. 그런데, 처리구역이 분류식과 합류식으로 명확히 구분되어 관리되지 않는 지역이 다수 존재하고 지역별 차등 적용시 형평성 문제 등 추가적인 분쟁의 소지가 있으므로 평균치인 0.31을 적용하는 것은 무리가 없다고 판단된다.

또한 전국을 대상으로 초기우수월류부하에 의한 오염 기여도를 검토하였는데 총량기술지침에 토지계관거유입계수 0.31을 적용하면 BOD 기준의 초기우수월류부하량은 전체 배출부하량의 약 10%에 해당하였다. 이는 환경공단의 인구당 오염부하원단위(kg/인/y) 적용결과와 유사하였다. 따라서 처리구역을 합류식과 분류식으로 구분하여 산정하고 평균 유입계수는 실측자료 기반의 원단위와 근사하므로 의미 있는 값이라 판단된다.

본 연구결과는 지금까지 조사된 자료를 근거로 산정된 결과이며 추후 비점배출특성 규명을 위한 더 많은 조사연구가 수행되면 관거유입계수 및 원단위 등에 대한 정기적인 개선이 가능할 것으로 사료된다.

References

- An, K. S., Jang, S. R., and Kwon, Y. H. (2010). Characteristics and Combined Sewer Overflows, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(6), pp. 747-753. [Korean Literature]
- Bertrand-Krajewski, J., Chebbo, G., and Saget, A. (1998). Distribution of Pollutant Mass vs Volume in Stormwater Discharges and the First Flush Phenomenon, *Water Resource*, 32(8), pp. 2341-2356.
- Cho, M. J., Shin, E. B., Kim, Y. K., and Bae, W. K. (2001). The Characteristics of Pollutant Release by Sediment in Combined Sewer, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 17(3), pp. 407-415. [Korean Literature]
- David, B., James, L., and Manfred, S. (2002). Is Combined Sewer Overflow Spill Frequency/Volume a Good Indicator or Receiving Water Quality Impact, *Urban Water*, 4(2), pp. 181-189.
- Field, R., O'shea, M. L., and Chin, K. K. (1993). *Integrated Stormwater Management*, Lewis Publishers.
- Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau (FNDAE). (1988). *Stormwater Tanks in Sewer Systems*, FNDAE Technical report No.6. [French Literature]
- Gyeonggi Institute of Health Environment (GIHE). (2011). *Paldang Basin Non-point Source Pollution Loads Estimate*, Gyeonggi Institute of Health Environment, pp. IV-1-152. [Korean Literature]
- Kang, G. B., Yoon, H. S., Kwon, Y. S., and Choi, E. S. (2003). Estimated Pollution Loads from Combined Sewer Overflow (CSOs) and Stormwater Runoff in Urban Areas, *Proceedings of the 2003 Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, pp. C87-90. [Korean Literature]
- Korea Environment Corporation (KECO). (2003). *The Whole Country Sewer Maintenance Propriety Investigation*, Korea Environment Corporation, pp. 128-161. [Korean Literature]
- Korea Environment Corporation (KECO). (2004). *Estimated Pollution Loads from Combined Sewer Overflow(CSOs) and Stormwater Runoff in Urban Areas*, Korea Environment Corporation, pp. 102-106. [Korean Literature]
- Lee, D. J. and Shin, E. B. (2004). Optimal Sizing of CSOs Storage Tank by Stormwater Simulation Modeling(I)-Characteristics of CSOs in Urban Area-, *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, 26(3), pp. 362-369. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2007). *TMDL Technical Guideline*, National Institute of Environmental Research, pp. 49-83. [Korean Literature]
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (1993). *Manual Combined Sewer Overflow Control*, EPA Report EPA/625/R-93/007, pp. 95.
- Watershed Management Committee (WMC). (2009). *The Pollution Loadings Characterization by Drain Process Types in Sewer Systems* (han river, nakdong river, Geum river, youngsan river), pp. 166-192. [Korean Literature]
- Won, C. H., Choi, Y. H., Park, W. J., Shin, M. H., and Choi, J. D. (2011). Characteristics of Pollution Loads from the Combined Sewer during Dry Season, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(6), pp. 137-144. [Korean Literature]