

합류식 관거 내 고형물 퇴적량 산정기법 분석

Analysis of Estimation Technique for Solid Sediments in Combined Sewer Systems

이 재 수*

Lee, Jae Soo

Abstract

The deposition of sewer solids during dry weather in combined sewer systems results in a loss of flow capacity that may restrict flow and cause a local flooding and enhanced solids deposition. Sewer solid accumulations in drainage systems also create the 'first-flush' phenomena during wet weather runoff periods. In order to solve these problems, measurement of these loadings for a given sewer system for extended period is needed but this task is very difficult and extremely expensive. In this study, generalized procedures for estimating sewer sediment solid during dry weather in combined sewer systems developed by the U. S. Environmental Protection Agency were applied in a drainage system in Korea. As result, the appropriate equation can be selected and applied according to the available data. However, the estimated solid sediment shows considerable difference between methods which classified by model and estimation methods of variable. The estimated values using equations (1)~(4) are greater than that of equations (5)~(9) and intermediate models show greater values than elaborate or simplest models. The comparison between simulated and measured solid deposition is difficult due to the absent of measurement data, but this estimation method can be used usefully for the management of sewer solid with reduction of cost and effort if the measurement is carried out and the equation is adjusted according to the actual drainage systems in Korea.

keywords : combined sewer systems, solid sediment, management of sewer solid

요 지

건조기 때의 합류식 관거 내 고형물의 퇴적으로 인해 통수능이 감소하여 여름철 장마시 국지적인 침수가 발생하며 이로 인해 관거 내 퇴적을 더욱 초래할 수가 있다. 또한 관거 시스템에 퇴적된 고형물로 인해 우기시 'first-flush' 현상을 초래하기도 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 장기간에 걸친 관거 내 고형물 퇴적량을 관측할 필요가 있으나 많은 비용과 노력이 수반되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 미국환경보호청에서 개발한 건조기의 합류관거 내 고형물 퇴적량 산정기법을 우리나라의 배수유역에 적용하여 분석하였다. 분석결과 적용 배수유역의 가용 자료에 따라 모형을 선택하여 실무에서 간편하게 적용할 수가 있지만 모형별 변수산정 방법별로 많은 차이를 보이고 있다. 초기에 유도된 Eqs. (1)~(4)가 후에 유도된 Eqs. (5)~(9)보다 산정치가 모두 크게 나타나고 있으며 전반적으로 중간모형이 정밀모형이나 단순모형보다 크게 나타나고 있다. 건조기 동안의 관거 내 퇴적고형물의 관측자료가 구비되어 있지 않아 실질적으로 비교하기가 곤란하지만 대상 배수유역 관거에서의 장기적인 관측이 이루어지고 이에 따

* 전주대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Jeonju Univ., Jeonbuk 560-759, Korea
(e-mail: jscivil@jj.ac.kr)

라 국내실정에 맞도록 산정공식의 수정이 이루어지면 실무에서 많은 비용과 노력을 줄이고 관거 관리를 할 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 합류식 관거시스템, 퇴적고형물, 하수고형물 관리

1. 서론

도시 내배수시스템 중에서 합류 관거에서 건조기에 고형물 퇴적으로 인해 홍수소통 단면적이 축소되어 우기에 우수관거의 기능을 제대로 유지하지 못해 침수가 발생하는 경우가 자주 발생하고 있으며, 또한 건조기에 관거에 퇴적되어 있던 퇴적물들이 우기의 초기 우수로 인한 'first-flush' 현상으로 인해 관거 하류부로 많은 고형물과 오염물을 배출시키고 있다. 따라서 관거 내의 고형물 퇴적의 감소 및 관거의 유지관리를 위해서는 관거시스템을 통한 퇴적 고형물의 산정 및 분포에 대한 분석이 필수적이라 할 수 있다.

합류식 관거 내에는 여러 종류의 고형물이 혼합된 상태로 퇴적되어 있으며, 이들 고형물들은 생활하수(주방, 목욕, 화장실, 청소 등으로부터의 고형물), 산업 및 상업지역으로부터의 하수, 지붕, 도로, 고속도로, 주차장, 공원으로부터의 지표면 유출로 인해 이송된 고형물, 그리고 건설과 같은 활동으로부터의 고형물 등 다양한 출처를 가지고 있다.

이들 고형물들은 크기에 따라 서로 다른 특성과 이동양상을 보여주고 있다. 일반적인 관거 흐름 상태에서는 결코 퇴적되지 않는 가장 작은 고형물인 미립부유사(wash load)의 이동은 보통 이송확산(advection-dispersion) 방정식과 함께 용존물질의 이동으로 모의하게 된다. 부유상태로 이동하는 고형물들은 30~40 μm 의 중앙입경을 가지고 있으며 만일 흐름의 에너지가 감소한다면 이들은 침강하여 퇴적 고형물로 남게 된다. 부유유사(suspended load)의 이동에 대해서 유사의 농도 분포는 보통 Rouse(1937) 와 Coleman(1982)의 모형으로부터 유도된 방정식을 사용하여 나타낸다. 부유유사의 이동 능력은 매우 불확실한 상태로 있으며 보통 특정 상황에 맞는 경험적 모형으로 모의하게 된다. 자주 사용되는 방법은 Ackers and White(1973) 모형으로부터 Coghlan et al.(1993), Ackers et al.(1996)이 특정상황에서 적용한 것과 같이 유도된 방법을 적용하게 된다. 소류사(bed load)로 이동하는 고형물들은 일반적으로 200~1500 μm 의 중앙입경을 가지고 있으며 관거 내 고형물의 평균입경과 비슷하다. 소류사에 대해 다양한 공식과 모형들이 적용되고 있으며, 대부분이 Meyer-

Peter and Muller(1948), Ackers and White(1973) 등과 같은 전통적인 하천모형으로부터 유도되었고 최근에는 Arthur et al.(1996), Lin and Guenne(1996)이 관련모형을 연구한 바 있다. 이와 같이 관거 내 고형물의 농도 및 퇴적과 관련한 이론적인 연구뿐만 아니라 실험을 통한 연구도 이루어지고 있다. Pisano and Queiroz(1977, 1984), Laplace(1991) 등은 실험구간을 정하여 장기적인 관측을 하였으며, Bachoc(1992), Ashley and Crabtree(1992)는 퇴적이 주로 건조기간이나 호우사상이 끝날 무렵 유속이 감소할 때 발생하는 것을 알아내었다. 최근에는 Bertrands-Krajewski et al.(2004)이 프랑스 Lyon에서 1.8m의 높이를 가진 계관형태의 사람이 들어갈 수 있는 관거에서 새로운 실험을 실시한 바 있다. 이러한 실험을 통해 관거 내 고형물의 퇴적과 관련하여 1) 고형물의 특성, 2) 관거의 기하학적, 물리학적 상태 및 형태, 3) 유입부의 형태 및 분포를 포함하는 상류 관거망의 특성, 그리고 4) 하상전단응력 등과 같은 유출상태 등이 중요한 인자로 분석되고 있다.

이상과 같이 관거 내 퇴적 고형물량을 산정하기 위한 이론적 및 실험적 연구가 지속적으로 이루어지고 있지만 많은 시간, 노력 및 비용이 소요되고 있다. 그럼에도 불구하고 관거 내 퇴적의 복잡한 메커니즘에 의해 아직까지 국제적으로 높은 신뢰도를 가지고 적용할 방법이 제시되지 못하고 있다. 건조기간 동안의 관거 내 고형물량을 산정하기 위한 방법으로 컴퓨터를 통한 수치해석에 의한 방법들이 있는데 이들은 매우 복잡하고 많은 노력을 필요로 한다. 이러한 이유로 EPA에서는 건조기에 관거 내 퇴적 고형물을 산정하기 위한 회귀모형(Pisano and Queiroz, 1977, 1984)을 제시하여 실무에서 관거 관리에 용이하게 적용할 수 있도록 하였다(Fan, 2004).

따라서 본 연구에서는 EPA에서 제시하고 있는 건조기의 관거 내 퇴적 고형물 산정기법을 소개하고 국내 배수유역에 적용하여 적용성을 검토하는 한편 개선점을 제시하여 국내 도시 배수유역 관거에서의 고형물 퇴적량 산정 및 이를 이용한 관거 관리에 유용하게 사용할 수 있는 방법을 제시하기로 한다.

2. 관거 내 고형물 퇴적량 산정기법

2.1 관거 내 고형물 퇴적량 산정을 위한 회귀모형식

미국 환경보호청(EPA)에서 개발 제시한 회귀모형식 (Pisano and Queiroz, 1977, 1984; Fan, 2004)은 다음과 같은 절차를 통해 얻어진다. 먼저 산정모형의 일반 특성 및 매개변수들을 정의한다. 그 다음 실제 상황에서 접할 수 있는 다양한 조건에 대해 퇴적량을 발생시키기 위한 일련의 실험을 준비한다. 다음 단계로 선택된 관거시스템과 관련된 모든 물리적 자료를 수집한다. 즉, 시스템의 개요, 관거길이, 모양 및 크기, 저부높이 등과 같은 자료를 수집한다. 이와 함께 관거시스템의 관할 면적, 총 관거길이, 관거경사분포, 관거시스템의 평균 관거직경을 산정한다. 이 물리적 자료들은 관거시스템에서의 퇴적모형 및 총 퇴적량 모의에 사용된다.

퇴적모형결과는 각 관할구역별 각 관거 요소에서 퇴적된 고형물량(kg/day)을 포함하고, 각 시스템을 통한 총 퇴적량을 산정하게 된다. 각 관거 요소별로 산정된 고형물 정보는 퇴적이 발생하는 관거길이의 누가 퍼센트에 대한 퇴적된 고형물의 누가 퍼센트를 보여주는 각 관할 소유역에 대한 고형물곡선을 유도하는데 사용된다. 시스템의 물리적 자료들은 관거를 통한 퇴적분포와 함께 L_{PD} , S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정하는데 사용된다. 퇴적모형에 의해 유역으로부터 발생된 총 고형물량은 기본적인 변수들(관거길이, 면적, 평균경사, 평균직경 등) 및 유도된 변수(L_{PD} , S_{PD} 및 $S_{PD/4}$)들과 함께 회귀분석의 입력 자료로 사용되며, 마지막으로 회귀분석의 결과를 테스트한다.

이와 같은 방법으로 미국 내 Boston, Dorchester 그리고 Fitchburg 지역을 대상으로 유도한 초기의 회귀모형(Pisano and Queiroz., 1977)은 다음과 같다.

정밀모형

$$TS = 0.0038L^{0.8142}S_{PD}^{-0.8187}S_{PD/4}^{-0.1078}Q^{-0.5098} \quad (1)$$

($R^2=0.949$)

중간모형

$$TS = 0.001303L^{1.18}A^{-0.178}S^{-0.418}D^{0.604}Q^{-0.51} \quad (2)$$

($R^2=0.852$)

$$TS = 0.00389L^{1.2195}A^{-0.1866}S^{-0.4343}Q^{-0.51} \quad (3)$$

($R^2=0.848$)

단순모형

$$TS = 0.0076L^{1.063}S^{-0.4375}Q^{-0.51} \quad (4)$$

($R^2=0.845$)

여기서 S_{PD} 는 L_{PD} 에 상응하는 관거 경사(ft/ft), L_{PD} 는 관거시스템에서 고형물의 80%가 퇴적되는 관거 길이(ft), $S_{PD/4}$ 는 고형물의 80%가 퇴적하는 관거 길이 백분율의 1/4에 상응하는 관거 경사(ft/ft), A는 집수관거시스템의 관할 면적(acre), D는 평균 관거 직경(in), L은 총 관거 길이(ft), Q는 침투를 허용한 1인당 유출율(gpcd), S는 평균 관거 경사(ft/ft), TS는 집수시스템에서의 일 총 고형물 퇴적량(lb/day)이다. 앞으로는 계산 과정 및 결과를 SI단위로 나타내기로 한다.

그 후 유도된 회귀모형(Pisano와 Queiroz, 1984)은 다음과 같다.

- Boston 및 Fitchburg에 대한 경우
정밀모형

$$TS = 0.00073L^{0.81}S_{PD}^{-0.82}S_{PD/4}^{-0.11}Q^{-0.51} \quad (5)$$

($R^2=0.95$)

중간모형

$$TS = 0.0013L^{1.2}D^{0.61}A^{-0.18}S^{-0.42}Q^{-0.51} \quad (6)$$

($R^2=0.85$)

단순모형

$$TS = 0.0011L^{1.1}S^{-0.44}Q^{-0.51} \quad (7)$$

($R^2=0.85$)

- Cleveland에 대한 경우

정밀모형

$$TS = 0.00017L^{0.95}S^{-0.32}S_{PD}^{-0.52}S_{PD/4}^{-0.15}Q^{-0.52} \quad (8)$$

($R^2=0.94$)

단순모형

$$TS = 0.0012L^{1.1}S^{-0.43}Q^{-0.54} \quad (9)$$

($R^2=0.88$)

2.2 회귀모형 적용 절차

관거 내 총 퇴적 고형물량을 산정하기 위한 절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 관거경사 자료가 구비되어 있는지 확인한다. 만일 자료가 있다면 평균 관거경사 S를 직접 구하고 자료가 없다면 지표면 평균 경사를 이용하여

Table 1. Summary data on derived pipe characteristics

No	Number of pipes	Total pipe length (m)	Mean pipe slope	Mean pipe dia. (mm)	Basin area (ha)	Mean basin slope
1	5	191.38	0.00125	748	0.5173	0.02355
2	62	1778.55	0.00841	538	5.6565	0.00441
3	80	2601.07	0.01804	511	7.7532	0.02309
4	46	1324.47	0.02135	605	4.1555	0.03097
5	125	4128.01	0.02704	535	15.2564	0.03544
6	58	1597.40	0.00847	613	4.8854	0.00179
7	45	1185.87	0.02301	873	2.9995	0.02808
8	46	1343.91	0.01369	826	4.2107	0.02218
9	164	4543.94	0.01645	599	12.4905	0.01553
10	27	788.54	0.04407	502	2.5180	0.01862
11	27	720.36	0.04334	461	1.8547	0.04622
12	88	2356.19	0.01783	526	6.0760	0.01804
13	54	1602.77	0.02349	537	2.9821	0.01632
14	62	1982.24	0.02689	543	6.2863	0.01845
15	62	1673.11	0.01555	584	3.6627	0.01214
16	59	2451.41	0.02163	819	15.2159	0.01814
17	98	2712.35	0.01887	516	7.8101	0.03093
18	18	789.10	0.02106	711	2.5259	0.02428
19	32	1120.81	0.02392	579	5.1979	0.02411
20	54	1464.00	0.01862	465	6.3424	0.01633
21	38	989.62	0.03251	481	4.2228	0.03841
22	10	297.13	0.0492	518	0.9791	0.04995
23	47	1313.70	0.0234	552	9.5077	0.02944
24	73	2085.11	0.01891	607	54.5676	0.02548
25	74	2275.45	0.02494	521	6.8681	0.05059
Sum	1454	43317			194.542	

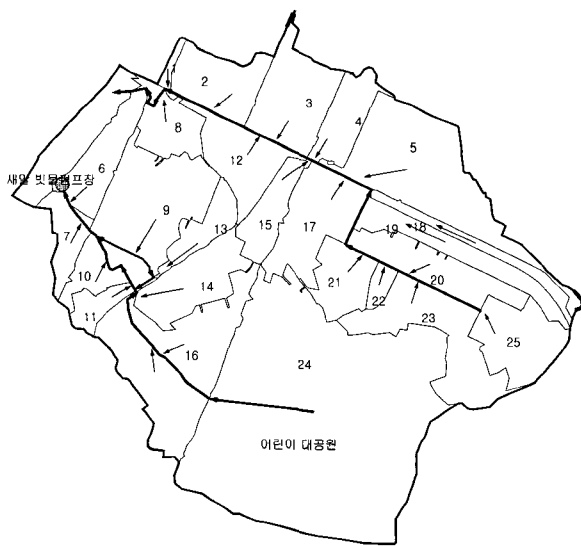


Fig. 3. Drainage system on Gunja drainage basin

소유역을 거쳐 중랑천으로 유입되고 있다. 이 Box 관거로 배수되는 유역은 1~5번 소유역, 8, 12, 15번 소유역 그리고 17~25번 소유역들이다. 남서쪽으로 또 다른 Box 관거가 위치하고 있으며 6, 7번 소유역, 9~11번 소유역, 13, 14, 16 그리고 24번 소유역이 이 관거로 배

수되어 7번 소유역 출구지점의 새말뫂물펌프장을 통해 중랑천으로 배수되고 있다. 군자배수분구유역 상부에 위치한 Box 관거는 직접 중랑천으로 유입하지만 남서쪽의 Box 관거는 새말뫂물펌프장을 통해 배수되므로 이 곳에서의 준설자료가 충분하다면 이 Box 관거의 관련 소유역에서 배출되는 퇴적 고형물과 간접적인 비교가 가능하다.

3.2 퇴적고형물 산정 및 분석

이상과 같이 분석한 군자배수분구유역의 배수관망자료를 이용하여 앞에서 설명한 회귀모형을 이용하여 각 소유역별 관거 내 고형물 퇴적량을 산정하였다. 퇴적량 산정시 회귀식 적용에 필요한 관거경사 변수들을 세 가지 방법으로 결정하여 분석해 보았다. 첫 번째 방법은 실제 관거경사 자료로부터 유도된 분포를 이용하여 변수들을 산정하고, 두 번째 방법은 오직 평균 관거 경사 S만 필요로 하고 관거경사가 지수분포를 보인다고 가정하였으며, 세 번째 방법은 오직 지표면 경사자료만 있고 시스템 관거경사가 지수분포를 보인다고 가정하여 산정하였다. 즉, 변수로 SPD 및 SPD_4 가 필요한 정밀모형 (Eqs. 1, 5, 8)에서는 이들 변수를 위와 같이 세 가지 방

법으로 산정하여 적용하였으며, 중간모형(Eqs. 2, 3, 6) 및 단순모형(Eqs. 4, 7, 9)에서는 관거자료로부터 산정한 관거 평균경사와 유역경사로부터 산정한 관거 평균경사를 산정하여 적용한 퇴적량을 비교하여 보았다.

3.2.1 회귀식 적용을 위한 관련변수 산정

상관계수가 가장 높은 정밀모형은 관거시스템에서 고형물의 80%가 퇴적되는 관거길이 L_{PD} 와 이에 상응하는 관거경사 S_{PD} 그리고 고형물의 80%가 퇴적하는 관거길이 백분율의 1/4에 상응하는 관거경사 $S_{PD/4}$ 의 값을 산정하여야 한다. 하지만 군자배수분구유역에서는 관거별 퇴적량이나 준설량 자료가 충분하지 않기 때문에 직접적으로 S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 EPA에서 S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정하기 위해 회귀식 유도시 대상 도시유역으로부터 산정한 Fig. 4를 이용하여 간접적으로 이들 변수들을 산정하여 적용하기로 한다.

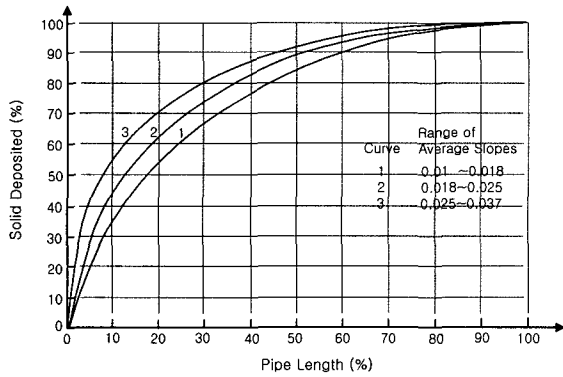


Fig. 4. Cumulative distribution of solid deposited vs. pipe length

첫 번째 방법으로 Fig. 4를 이용하여 S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정하기 위해서는 먼저 각 소유역별 관거경사 분포를 결정하여야 한다. 이를 위해 각 소유역별로 관거 경사

에 대해 구간 길이를 가중치로 하여 경사분포를 산정하였으며 6번 소유역에 대한 결과가 Table 2와 같다. 예를 들어 6번 소유역인 경우 평균 관거경사 S 가 0.00847이므로 경사 변수 S_{PD} 는 다음과 같이 산정할 수가 있다. Fig. 4에 누가 퇴적분포 대 누가 관거길이 분포에 대한 세 개의 곡선에서 관거경사가 0.00847이므로 첫 번째의 곡선을 선택한다. 퇴적량의 80%에 해당하는 관거길이 백분율은 44.5%임을 알 수 있다. Table 2의 6란으로부터 보간법을 이용하여 44.5%에 해당하는 3란의 값으로부터 S_{PD} 를 산정할 수 있으며 0.00361로 산정된다. 같은 방법으로 $S_{PD/4}$ 도 $0.445/4=0.111$ 에 해당하는 Table 2의 6란으로부터 보간하여 3란의 값을 보간하면 0.00096으로 산정된다. 이와 같은 방법으로 새말펌프장으로 유입하는 각 소유역에 대한 S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정할 수가 있으며 그 결과가 Table 3과 같다.

두 번째 방법으로 S_{PD} 와 $S_{PD/4}$ 를 산정하기 위해 회귀식 유도시 관거경사 분포를 분석하여 얻은 Eq.(10)과 같은 지수누가분포함수에 평균 관거경사를 적용하였다.

$$FS = 1 - e^{-s/S} \quad (10)$$

여기서 FS 는 누가 관거경사 분포, s 는 임의로 주어진 경사, 그리고 S 는 소유역의 평균관거경사이다. Eq.(10)에 $FS=0.445$, $s=S_{PD}$, $S=0.00847$ 을 적용한 결과 $S_{PD}=0.00499$ 로 산정되며, 같은 방법으로 $FS=0.445/4=0.111$, $s=S_{PD/4}$, $S=0.00847$ 을 적용한 결과 $S_{PD/4}=0.000997$ 로 산정되었다. 세 번째 방법에서 필요한 자료는 오직 지표면경사 S_G 로 회귀식 유도시 산정된 Eq.(11)을 이용하여 평균 관거경사를 산정할 수 있다.

$$S = 0.348S_G^{0.818} \quad (11)$$

Table 2. Distribution of pipe slope to estimate S_{PD} and $S_{PD/4}$

Sub-basin	Interval	Upper bound	Freq.	PDF	CDF	Histogram of slope distribution
6	1	0.002	367.51	0.2301	0.2301	
	2	0.004	426.25	0.2668	0.4969	
	3	0.006	137.59	0.0861	0.5830	
	4	0.008	184.53	0.1155	0.6985	
	5	0.010	164.56	0.1030	0.8015	
	6	0.020	170.74	0.1069	0.9084	
	7	0.040	109.56	0.0686	0.9770	
	8	0.060	4.33	0.0027	0.9797	
	9	0.080	0.00	0.0000	0.9797	
	10	0.100	32.33	0.0203	1.0000	

Table 3. Estimated S_{PD} and $S_{PD/4}$

Method	Basin	6	7	9	10	11	13	14	16	24
1	S_{PD}	0.00361	0.01255	0.00837	0.02089	0.01856	0.01424	0.01407	0.00801	0.01196
	$S_{PD/4}$	0.00096	0.00314	0.00165	0.00346	0.00660	0.00216	0.00337	0.00200	0.00296
2	S_{PD}	0.00499	0.01045	0.00969	0.0154	0.01515	0.01062	0.0094	0.00982	0.00859
	$S_{PD/4}$	0.000997	0.002196	0.001936	0.003388	0.003332	0.002232	0.002067	0.002064	0.001804
3	S_{PD}	0.00116	0.0085	0.00679	0.00468	0.00984	0.00545	0.00464	0.00595	0.00785
	$S_{PD/4}$	0.000232	0.001786	0.001357	0.001029	0.002164	0.001146	0.001021	0.00125	0.00165

여기서 S는 소유역 평균관거경사, 그리고 S_G 는 지표면 평균경사이다. 6번 소유역에 대해 지형학적 자료를 이용하여 구한 지표면 평균경사는 0.00179이고 Eq. (11)을 이용하여 평균관거경사를 구한 결과 $S=0.00197$ 로 나타났다. 이 값을 이용하여 두 번째 방법처럼 S_{PD} 와 $S_{PD/4}$ 를 구한 결과 $S_{PD}=0.00116$ 및 $S_{PD/4}=0.000232$ 로 나타났다. 이와 같은 방법으로 새말펌프장으로 유입하는 각 소유역에 대한 S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정한 결과가 Table 3과 같다.

3.2.2 관거내 고형물 퇴적량 산정

먼저 군자배수분구 전체 소유역에 대해 정밀모형을 제외한 중간모형(Eqs. 2, 3, 6) 및 단순모형(Eqs. 4, 7, 9)을 적용하여 관거내 고형물 퇴적량을 산정하여 보았다. 즉, 실질적으로 구할 수 있는 군자배수분구유역의 관거자료를 이용하여 6가지의 관거 내 퇴적고형물량 산정 회귀모형식을 적용하여 각 소유역별로 퇴적고형물을 산정하였다. 이때 회귀모형식 적용에 필요한 1인당 1일 하수배출량 Q (lpcd)는 군자배수분구유역의 인구가 약 98,000명인 것을 감안하여 하수도시설기준(1998)에서 제시하고 있는 2001년 기준 인구규모 5만~40만명에 대한 1인 1일 평균급수량 353lpcd로 선정하고, 이러한 평균급수량에서 누수로 손실되거나 사용 후 지하침투 및 증발 등에 의한 손실량을 약 15%로 가정하여 1인 1일 평균하수량을 300lpcd로 산정하였다. 이와 같이 군자배수분구유역의 각 소유역별 퇴적 고형물 산정공식별로 산정한 결과가 Table 4와 같다. 각 공식별로 많은 차이를 보이고 있으며 Eq.(6) 과 Eq.(9)는 약 11.5배의 차이를 보이고 있다.

퇴적량 산정 결과를 비교하기 위해 준설 자료가 있는 새말펌프장으로 유입하는 9개 소유역에 대해 앞에서 구한 변수들을 사용하여 좀 더 구체적으로 고형물 퇴적량을 산정해 보았다. 먼저 초기에 제시된 정밀모형(Eq. 1), 중간모형(Eqs. 2, 3), 단순모형(Eq. 4)에 앞에서 설명한 바와 같이 실제 관거자료로부터 구한 변수(방법 1)

및 지수분포(방법 2) 및 유역경사를 이용한 변수(방법 3)를 적용한 결과가 Table 5와 같다.

Table 4. Comparison of estimated daily solids deposited

No.	Solid deposition (kg/day)					
	2	3	4	6	7	9
1	15.38	8.54	6.51	18.04	1.22	1.09
2	51.51	36.19	30.23	62.52	6.10	5.57
3	53.74	38.94	32.42	65.56	6.63	6.09
4	27.95	17.85	14.70	33.70	2.93	2.70
5	71.32	50.56	44.38	87.65	9.22	8.51
6	50.25	32.52	26.88	60.92	5.41	4.93
7	31.44	16.05	12.65	37.93	2.51	2.31
8	41.22	21.99	18.13	49.86	3.62	3.32
9	109.07	73.22	61.08	134.59	12.75	11.71
10	10.93	7.60	6.17	13.03	1.20	1.12
11	9.93	7.26	5.64	11.81	1.10	1.02
12	51.07	36.31	29.34	62.22	5.97	5.49
13	33.20	22.99	17.27	40.18	3.46	3.19
14	35.54	24.45	20.40	43.12	4.12	3.80
15	42.08	27.89	21.65	51.02	4.35	4.00
16	54.77	29.52	28.12	66.82	5.73	5.28
17	55.66	40.13	33.24	67.96	6.80	6.26
18	18.38	10.48	8.53	21.98	1.67	1.53
19	20.48	13.30	11.71	24.59	2.32	2.14
20	26.35	19.78	17.36	31.77	3.47	3.19
21	14.43	10.39	8.97	17.26	1.77	1.63
22	3.98	2.63	2.08	4.66	0.39	0.36
23	21.75	14.56	14.00	26.16	2.79	2.57
24	31.82	20.24	25.11	38.54	5.09	4.68
25	41.44	29.40	24.41	50.40	4.96	4.57
Sum	923.67	612.78	520.96	1122.32	105.57	97.04

Eq.(1)과 같이 주어진 정밀모형은 L, S_{PD} , $S_{PD/4}$, Q값을 필요로 한다. $Q=300$ lpcd에 대해 세 가지 서로 다른 방법으로 구한 S_{PD} , $S_{PD/4}$ 를 이용하여 산정하였다. 방법 1인 자세한 관거경사 자료 및 분포를 이용하여 산정한 S_{PD} , $S_{PD/4}$ 를 이용한 TS는 180.91kg/day로 나타났으며, 방법 2 즉, 평균 관거 경사와 지수누가분포를 이용하여 산정한 S_{PD} , $S_{PD/4}$ 를 이용한 TS는 182.07kg/day로 나타났고, 방법 3 즉, 평균 지표면 경사를 이용하여 산정한

Table 5. Estimated daily solids deposition by Eqs. (1)~(4)

Method Basin	Eq. (1)			Eq. (2)		Eq. (3)		Eq. (4)		
	1	2	3	2	3	2	3	2	3	
6	41.86	31.98	123.59	50.25	92.44	32.52	61.28	26.88	50.88	
7	10.42	12.58	15.24	31.44	34.27	16.05	17.55	12.65	13.84	
9	46.46	40.51	56.32	109.07	126.54	73.22	85.43	61.08	71.36	
10	4.87	6.27	18.91	10.93	18.00	7.60	12.76	6.17	10.39	
11	4.65	5.92	8.82	9.93	11.89	7.26	8.76	5.64	6.82	
13	12.51	15.84	29.39	33.20	43.94	22.99	30.77	17.27	23.15	
14	14.31	20.99	40.37	35.54	47.73	24.45	33.21	20.40	27.77	
16	28.54	24.08	38.30	54.77	67.55	29.52	36.70	28.12	35.02	
24	17.27	23.89	25.97	31.82	33.04	20.24	21.05	25.11	26.11	
Σ	(kg/day)	180.91	182.07	356.91	366.95	475.39	233.85	307.51	203.32	265.35
	(m ³ /day)	0.090	0.091	0.178	0.183	0.238	0.117	0.154	0.102	0.133
	(m ³ /yr)	32.203	32.408	63.529	65.317	84.620	41.626	54.736	36.190	47.232

SPD, SPD/4를 이용한 TS는 356.91kg/day로 나타나고 있다. 실제 관거경사자료를 적용한 방법 1과 2는 유사한 결과를 보여주지만 지표면 경사를 이용하여 관거경사를 구한 방법 3은 차이를 보이고 있다.

Eqs. (2)~(3)과 같이 주어진 중간모형은 L, A, S, Q 값을 필요로 한다. 이들 값도 두 가지 방법에 의해 산정하였다. 방법 2는 자료로부터 관거길이 및 경사를 직접 산정한 경우이고, 방법 3은 관거길이를 직접 산정하고 관거경사는 지표면 평균경사를 이용하여 산정한 경우이다. 이와 같이 두 가지 방법에 의해 산정된 총 퇴적량은 Eq.(2)인 경우 TS는 각각 366.95, 475.39kg/day로 나타나고 있으며, Eq.(3)인 경우 233.85와 307.51kg/day로 나타났다.

Eq.(4)와 같이 주어진 단순모형은 L, S, Q를 필요로 한다. 방법 2를 적용한 결과는 203.32kg/day로 나타났고, 방법 3을 이용한 경우 265.35kg/day로 나타났다.

같은 방법에 의해 나중에 제시된 Boston 및 Fitchburg 지역으로부터 유도한 회귀식 Eqs. (5)~(7)과 Cleveland 지역으로부터 유도한 회귀식 Eqs. (8)~(9)를 이용하여 관거내 퇴적 고형물을 산정한 결과는 Table 6과 같다.

3.2.3 산정 퇴적량과 시범 유역자료와의 비교분석

이상과 같이 각 회귀모형식을 이용하여 산정한 관거 시스템에서의 고형물 부하량 또는 퇴적량을 군자배수분구 유역에서의 준설자료와 비교하여 검토할 필요가 있다. 군자배수분구 소유역별 퇴적 고형물 준설자료를 검토한 바 각 소유역마다 일부 관거요소에서만 부정기적으로 준설한 자료만 존재하였으며 일부 소유역에서는 아예 준설자료가 존재하지 않아 회귀모형식에 의해 산정된 퇴적 고형물과 서로 직접적으로 비교하기가 사실상 곤란하다.

Table 6. Estimated daily solids deposition by Eqs. (5)~(9)

Method Basin	Eq. (5)			Eq. (6)		Eq. (7)		Eq. (8)			Eq. (9)		
	1	2	3	2	3	2	3	1	2	3	2	3	
6	7.93	6.05	23.51	60.92	112.41	5.41	10.27	6.59	5.54	14.72	4.93	9.23	
7	1.97	2.38	2.88	37.93	41.37	2.51	2.75	1.58	1.83	2.11	2.31	2.53	
9	8.74	7.62	10.60	134.59	156.26	12.75	14.90	8.57	7.75	9.84	11.71	13.64	
10	0.92	1.19	3.59	13.03	21.50	1.20	2.03	0.66	0.77	1.72	1.12	1.86	
11	0.88	1.12	1.67	11.81	14.15	1.10	1.33	0.59	0.72	0.96	1.02	1.23	
13	2.36	2.99	5.56	40.18	53.25	3.46	4.65	2.07	2.40	3.75	3.19	4.26	
14	2.70	3.96	7.63	43.12	58.00	4.12	5.62	2.28	3.03	4.86	3.80	5.15	
16	5.38	4.54	7.23	66.82	82.49	5.73	7.15	4.34	3.89	5.44	5.28	6.55	
24	3.25	4.51	4.90	38.54	40.01	5.09	5.29	2.98	3.81	4.04	4.68	4.86	
Σ	(kg/day)	34.13	34.35	67.59	446.94	579.44	41.37	54.00	29.66	29.75	47.44	38.03	49.31
	(m ³ /day)	0.0171	0.0172	0.034	0.223	0.290	0.021	0.027	0.0148	0.0149	0.024	0.019	0.025
	(m ³ /yr)	6.075	6.115	12.031	79.556	103.140	7.363	9.611	5.279	5.295	8.445	6.770	8.777

Table 7. Comparison of estimated solid deposition

Equation	Eq. (1)			Eq. (2)		Eq. (3)		Eq. (4)	
Method	1	2	3	2	3	2	3	2	3
TS(m ³ /yr)	32.203	32.408	63.529	65.317	84.620	41.626	54.736	36.190	47.232
Equation	Eq. (5)			Eq. (6)				Eq. (7)	
Method	1	2	3	2	3			2	3
TS(m ³ /yr)	6.075	6.115	12.031	79.556	103.140			7.363	9.611
Equation	Eq. (8)							Eq. (9)	
Method	1	2	3					2	3
TS(m ³ /yr)	5.279	5.295	8.445					6.770	8.777
Measured data	28 m ³ /yr								

Table 8. Comparison of estimated solid deposited for specific basin using different equations

Method	Solid deposited		Percentage error relative to deposition model
	(m ³ /day)	(m ³ /yr)	
Deposition model	0.0384	13.999	
Elaborate model Eq. (1)			
Exact data	0.0353	12.892	-7.9%
Exponential data	0.0269	9.828	-30.0%
S _G and exponential Approx.	0.0252	9.198	-34.0%
Intermediate model Eq. (3)			
Exact data	0.0424	15.471	+10.5%
Estimated slope S	0.0395	14.406	+3.0%
Estimated L and S	0.0432	15.774	+12.7%
Simplest model Eq. (4)			
Exact data	0.0406	14.803	+17.6%
Estimated slope S	0.0420	15.317	+9.4%
Estimated L and S	0.0454	16.578	+18.4%

그러나 군자배수분구 내에 존재하는 새말빛물펌프장에서 2002년과 2004년의 준설자료가 존재하므로 이를 이용하여 개략적이거나 비교를 해 보기로 한다. 앞에서도 언급한 바와 같이 군자배수분구유역 내 6, 7번 소유역, 9~11번 소유역, 13, 14, 16 그리고 24번 소유역이 Box 관거를 통해 배수되어 7번 소유역 출구지점의 새말빛물펌프장을 통해 중랑천으로 배수되고 있다. 따라서 새말빛물펌프장으로 유입되는 소유역들로부터 발생하여 퇴적되는 고형물과 새말빛물펌프장에서 준설량을 비교하였다. 새말빛물펌프장에서 준설기록은 2002년에 48m³의 준설을 하였고, 2004년에는 56m³의 준설을 하였다. 관계자에 의하면 준설시 바닥이 들어날 때까지 준설 한다고 하였으므로 2002년에 준설을 하여 2년 뒤에 56m³의 준설을 하였으므로 연간 28m³의 고형물이 새말빛물펌프장으로 유입된다고 판단할 수 있다.

회귀모형식을 이용하여 산정한 관거시스템에서의 고형물 부하량 또는 퇴적량은 단위가 kg/day이므로 회귀

식 유도시 분석된 고형물의 평균 비중 2.0을 적용하여 새말빛물펌프장에서 준설된 고형물 단위 m³/yr로 변환하였으며 이와 같이 산정한 새말빛물펌프장으로 유입하는 소유역들의 고형물 총 퇴적량이 Table 7과 같다.

신뢰도가 높은 정밀모형(Eqs. 1, 5, 8) 결과를 보면 방법별로 6~7배 정도의 차이를 보이고 있다. 새말빛물펌프장의 준설량 기록과 비교하면 Eq.(1)의 방법 1 및 2가 유사한 결과를 준다고 볼 수 있지만, 다음과 같은 이유 등으로 인해 Eq.(5) 또는 Eq.(8)이 오히려 적용가능성이 높다고도 볼 수가 있다. 즉, 회귀식을 이용하여 산정한 퇴적량자료와 준설자료를 직접적으로 비교하기는 여러 가지 변수들이 많이 존재하여 곤란하다. 회귀식에 의해 산정한 고형물 퇴적량은 관거 내에 퇴적되는 양을 산정하게 된다. 하지만 관거 내에 한계 깊이 이상 퇴적되면 평형상태가 되어 더 이상 퇴적되지 않고 하류 침사지로 이송될 수가 있다. 또한 우기시 지표면의 고형물들이 하류 침사지로 이송되기 때문에 펌프장의 준설

량과 직접적으로 비교하기가 곤란하며, 관거 내 퇴적되어 남아 있는 고형물 또한 존재하므로 모든 관거 내의 퇴적량을 측정하기 전까지는 구체적으로 결론을 내리기는 곤란하다. 따라서 관거 내에 퇴적되어 있는 고형물량을 정기적으로 측정하고, 펌프장에 퇴적되어 있는 고형물의 근원을 지표면과 하수로부터 분리 산정하는 방법도 연구 및 개발하여야 회귀모형을 이용한 퇴적량 산정치와 비교가 가능하리라 본다. 참고로 Table 8은 회귀모형식 유도에 사용하기 위한 퇴적량을 산정하기 위해 퇴적모형(deposition model)을 적용한 결과와 유도된 회귀식(Eqs. 1, 3, 4)을 이용하여 Dorchester 지역의 한 소유역 관거 시스템에 대해 고형물 퇴적량을 산정한 결과를 보여주고 있다. 퇴적모형에 의한 퇴적량을 기준으로 할 때 정밀모형(Eq. 1)의 방법 1과 같이 모든 자료를 사용한 결과가 양호한 것으로 나타나고 있으며, 중간모형(Eq. 3)과 단순모형(Eq. 4)인 경우 방법 3과 유사한 방법으로 실제 관거길이를 적용하고 관거 평균경사는 지표면 경사를 이용하여 산정한 것이 양호한 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 EPA에서 제시한 합류식 관거 내 고형물 퇴적량 산정을 위한 회귀모형식을 소개하고 이를 근자배수분구유역의 관거시스템에 적용하여 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 회귀모형식은 정밀모형, 중간모형, 단순모형으로 구분되어 실제 적용 배수유역의 가용자료에 따라 적절한 모형을 선택하여 적용할 수가 있어 실무에서 관거 내 고형물 퇴적량을 고려한 유지관리에 활용할 수가 있다.
2. 신뢰성이 높은 정밀모형을 적용하기 위해서는 S_{PD} 및 $S_{PD/4}$ 를 산정하여야 하며 이를 위해서는 적용 배수유역의 관거길이와 경사분석 및 퇴적량분석을 통한 관거길이(%)대 퇴적량(%)관계곡선을 사전에 준비할 필요가 있다.
3. 회귀모형식을 적용한 결과 모형별 변수산정 방법 별로 많은 차이를 보이고 있다. 초기에 유도된 Eqs. (1)~(4)가 후에 유도된 Eqs. (5)~(9)보다 산정치가 모두 크게 나타나고 있으며 전반적으로 중간모형이 정밀모형이나 단순모형보다 크게 나타나고 있다. 따라서 신뢰성 있는 적절한 모형을 선정할 필요가 있으나 적용 배수유역의 관거시스템에서의 정기적인 관거 내 퇴적자료와 빗물 펌

프장에서의 준설자료 등과 같은 결과를 비교할 자료가 준비되어 있지 않아 현재로서는 결과를 판단하기가 사실상 곤란하다. 또한, 회귀모형식은 미국의 몇 도시지역의 자료로부터 유도한 식으로 유도한 도시지역 상황과 다른 우리나라 도시지역에 직접 적용하여 사용하기 전에 충분한 검토를 할 필요가 있다.

4. 추후 대상 유역 관거시스템에서의 구체적인 퇴적량 관측과 이들 자료를 바탕으로 한 국내실정에 맞는 회귀모형식 산정 또는 수정을 통하여 실무에서 관거 내 고형물량 관리 및 정기적인 준설계획 등을 수립할 수 있도록 할 필요가 있으며, 이를 통해 비용 및 노력을 줄이며 관거 내 통수능 감소를 방지하여 호우시 관거의 역류로 인한 피해를 방지하는데 유용하게 적용할 수 있으리라 본다.

참 고 문 헌

- 한국수도협회 (1998). **하수도시설기준**.
- Ackers, J.C., Butler, D. and May, R. (1996). "Design of Sewer to Control Sediment Problem." *London(UK), CIRIA, project report*. 141. pp. 181.
- Ackers, P. and White, W.R. (1973). "Sediment Transport: New Approach and Analysis." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 99(11), pp. 2041-2060.
- Arthur, S., Ashley, R.M. and Nalluri, C. (1996). "Near Bed Solids Transport in Sewers." *Wat. Sci. Tech.*, 33(9), pp. 69-76.
- Ashley, R.M. and Crabtree, R.W. (1992). "Sediment Origins, Deposition and Build-up in Combined Sewer Systems." *Wat. Sci. Tech.*, 25(8), pp. 1-12.
- Bachoc, A. (1992). "Location and General Characteristics of Sediment Deposits into Man-entry Combined Sewers." *Wat. Sci. Tech.*, 25(8), pp. 47-55.
- Bertrands-Krajewski, J.-L., Champisano, A., Creaco, E. and Modica, C. (2004). "Experimental Study and Modeling of the Hydraulic Behavior of a Hydrass Flushing Gate." *Proceedings of Novatech 2004*, Lyon, France, 6-10 June 2004, Vol. 1, pp. 557-564.
- Coghlan, B.P., Ashley, R.M. and Jefferies, C. (1993). "An Appraisal of Suspended Sediment Transport Modeling Methods for an Interceptor Sewer." *Wat.*

- Sci. Tech.*, 27(5-6), 81-89
- Coleman, N.L. (1982). "Discussion of Paper 16313." *J. of the Hydraulics Division, ASCE*, 108(1), pp. 164-165.
- Fan, C.Y. (2004). *Sewer Sediment and Control: Management Practices Reference Guide*, Report No. EPA/600/R-04/059, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Laplace, D. (1991). *Dynamique du depot en collecteur d'assainissement*, PhD thesis, Institut National Polytechnique/ENSHEEIT, Toulouse, France, pp. 202.
- Lin, H.S. and Le Guennec, B. (1996). "Sediment Transport Modelling in Combined Sewer." *Wat. Sci. Tech.*, 33(9), pp. 61-67.
- Meyer-Peter, E. and Muller, R. (1948). "Formulas for Bed-load Transport." *IAHR-Meeting Stockholm*, Zahlentabellen zu den Geschiebetransportversuchen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH Zurich.
- Pisano, W.C. and Queiroz, C.S. (1977). *Procedures for Estimating Dry Weather Deposition in Sewerage Systems*. Cincinnati, USEPA, Report No. EPA-600/2-77/120.
- Pisano, W.C. and Queiroz, C.S. (1984). *Procedures for Estimating Dry Weather Sewage Inline Pollutant Deposition-Phase II*, Report No. EPA-600/2-84/020(NTIS PB 84141 -480), U.S. Environmental Protection Agency, Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, OH.
- Rouse, H. (1937). "Modern Conceptions of the Mechanics of Turbulence." *Transactions of ASCE*, Vol. 102, pp. 463-543.

(논문번호:06-01/접수:2006.01.02/심사완료:2006.03.13)

