

수질오염총량관리를 위한 비점오염저감시설의 저감효율 검토

Review of Pollutant Removal Effectiveness of Treatment Control BMPs for the Korean TMDL Management

강민지*, 이성준**, 문선정***, 최재완****

Min Ji Kang, Sung Jun Lee, Sun Jung Moon, Jae Wan Choi

요 지

수질오염총량관리제도 하에서 토지계 개별배출부하량 삭감을 위해 설치되는 비점오염저감시설의 저감효율은 삭감부하량 산정에 중요한 요소이다. 본 연구에서는 관련 문헌 및 환경부 모니터링 사업 결과로부터 비점오염저감시설의 저감효율에 영향을 미치는 요소들을 살펴보았다. 모니터링 결과 중 여과형 시설의 저감부하량에 대한 회귀분석을 실시한 결과 선행토양함수량보다 시설의 운영 및 유지관리 및 유역 특성을 포함하는 개별 시설의 특성에서 기인하는 영향이 컸다. 또한 BOD에 대한 회귀식의 결정계수는 높았으나 TN과 TP에 대한 결정계수는 낮았다. 비점오염저감시설의 저감효율을 안정적으로 얻기 위해서는 시설의 적절한 운영 및 유지관리가 중요하며, 향후 이를 평가할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

핵심용어 : 비점오염저감시설, 수질오염총량관리, 유지관리, 저감효율, 회귀분석

1. 서론

수질오염총량관리제도(총량제) 하에서 비점오염저감시설은 오염원 그룹 중 토지계 개별배출부하량을 삭감하기 위해 설치된다. 이러한 비점오염저감시설은 그 종류가 다양할 뿐 아니라 설치된 배수구역의 토지이용, 강우 및 유출사상의 특성, 모니터링 방법 등에 따라 오염물질을 저감하는 시설의 효율이 달라질 수 있다. 그러나 총량제에서 저감시설의 효율은 시설종류별로 부여되어 있다. 본 연구에서는 기존 문헌 및 환경부에서 수행한 비점오염저감시설의 모니터링 사업 결과 등을 검토하여 비점오염저감시설의 저감효율에 영향을 미치는 요소들을 살펴보고, 총량제 하에서 이를 평가하기 위하여 어떠한 사항들을 고려해야 하는지 살펴보았다.

2. 비점오염저감시설의 삭감부하량 및 저감효율

‘제2단계 수계오염총량관리 기술지침(국립환경과학원, 2008)’에서 인정하는 비점오염저감시설은 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 시행규칙 별표 6에 규정된 바와 같다. 여기서 비점오염

* 정회원 · 국립환경과학원 물환경연구부 수질총량연구과 · E-mail : skyjina@skku.edu

** 정회원 · 국립환경과학원 물환경연구부 수질총량연구과 · E-mail : sungjun82@korea.kr

*** 정회원 · 국립환경과학원 물환경연구부 수질총량연구과 · E-mail : ohn09697@korea.kr

**** 정회원 · 국립환경과학원 물환경연구부 수질총량연구과 · E-mail : chlwodhk@dreamwiz.com

저감시설에 의한 토지계 개별삭감부하량은 연강우량 중 시설의 설계용량에 따라 결정되는 처리 대상의 강우량, 이에 포함된 오염부하량, 토지계 지목별 연평균 발생부하원단위로 결정되는 발생부하량, 그리고 선정된 저감시설에 해당하는 저감효율을 이용하여 산정한다.

$$\text{비점오염저감시설 삭감부하량} = \text{삭감대상부하량} \times \text{저감효율} \quad (1)$$

$$\text{삭감대상부하량} = \text{삭감대상부하비} \times \text{발생부하량} \quad (2)$$

$$\text{삭감대상부하비} = \exp[0.2716 \times \{\ln(\text{강우처리비})\}^2 - 0.2425 \times \ln(\text{강우처리비})] \quad (3)$$

$$\text{강우처리비} = 0.2716 \times \ln(\text{설계기준 강우량}) - 0.2425 \quad (4)$$

이와 같이 비점오염저감시설에 의한 삭감부하량은 시설용량(설계강우), 토지계 지목, 저감 시설의 종류에 의해 결정된다. 삭감부하량 산정에 중요한 요소인 저감효율은 시설유형별로 동일하게 적용되고 있으며, 시설의 저감효율에 영향을 미치는 운영 및 유지관리와 관련된 요소 들은 반영되어 있지 않다. 이는 비점오염원 및 비점오염물질의 거동의 불확실성을 정량화하기 어렵고, 현재 이에 대한 과학적 지견이 부족한 탓이며, 총량제 시행에 참여하는 다양한 이해 관계자간에 발생할 수 있는 갈등의 소지를 최소화하기 위해서이다.

3. 비점오염저감시설의 기능에 영향을 미치는 인자

Maestre와 Pitt(2006)는 강우유출수의 수질에 영향을 미치는 주요 인자로서 EPA의 강우 지역구분(EPA Rain Zone), 토지이용, 불투수성 지표의 점유율, 유역내 강우유출수 관리 시설, 샘플링 방법, 유출발생기간 동안의 샘플링 횟수 및 샘플링 할 강우사상의 선정, 통수유형, 강수량, 무강우일수 등을 제시하였다. 비점오염저감시설의 유입부하량과 저감부하량 관계는 선형으로 시설의 효율에 따라 저감부하량이 결정된다(이호선, 2010). 이를 고려하면 비점시설의 저감부하량 역시 강우유출수의 수질 특성에 영향을 주는 인자들의 영향을 받는다고 할 수 있다.

본 연구에서는 환경부에서 수행한 ‘한강 유역 비점오염저감시설 시범설치 및 모니터링 사업’ 결과(환경관리공단·한국물환경학회, 2009)와 이를 해석한 이호선(2010)의 논문을 검토하였다. 모니터링 된 비점오염저감시설은 자연형 시설(인공습지, 침투형, 식생형 시설)과 장치형 시설(여과형, 와류형 및 스크린형 시설)이며, 관련 문헌으로부터 자연형 시설이 더 높고 안정적인 효율을 갖고 있음을 알 수 있었다. 여기서 저감효율의 변동이 큰 장치형 시설 중 설치개소가 많은 여과형 시설을 선정하고 3년간 모니터링이 수행된 전체 자료에 대해 부하량 합산법(Summation of Loads, SOL)으로 저감효율을 다시 산정하였다(표 1). 각 시설의 대표 저감효율에 대한 평균값은 BOD 53.6%, TN 48.7%, TP 57.7%이었다. 시설 1, 2, 3의 경우 대부분 50% 이상의 효율을 가졌으며, 시설 1과 2는 전처리 수조의 정체수 배제 및 퇴적물 준설과 같은 적절한 유지관리의 이행에 따라 효율이 높아진 것으로 평가된다. 시설 3의 경우 모니터링 된 강우사상의 규모가 상대적으로 작기 때문에 효율이 높게 평가되었을 가능성도 있다.

$$\text{오염물질 저감효율 (\%)} = \frac{\sum_{I=1}^N \text{모니터링 사상 I에 대한 총 저감부하량(reduction mass)}}{\sum_{I=1}^N \text{모니터링 사상 I에 대한 총 유입부하량(inflow mass)}} \quad (5)$$

여기서 I는 모니터링 사상, N는 3년간 모니터링 횟수이다.

표 1. 여과형 시설의 모니터링 현황 및 저감효율

시설	배수구역 면적(ha)	토지 이용	모니터링 횟수(회)	강우량(mm) ($\mu \pm \sigma$)	저감효율(%)			비고
					BOD	TN	TP	
1	0.77	도로	18	16.6±13.5	53.0	59.4	80.3	전처리수조 정체 수 배제와 퇴적물 로 준설
2	0.50	주차장	17	23.1±19.4	80.5	46.3	65.4	전처리수조 정체 수 배제와 퇴적물 로 준설
3	1.00	주차장	16	10.8±9.0	66.8	65.5	68.7	
4	0.65	도로	17	19.2±19.2	39.1	40.9	33.4	
5	0.52	도로	17	20.7±20.4	28.9	31.2	40.7	
전체 평균 및 표준편차 ($\mu \pm \sqrt{\sigma}$)					53.6±20.7	48.7±13.9	57.7±19.8	

3년간 자료를 합산하여 저감효율을 산정하면 각 시설에 대하여 하나의 저감효율이 산정되며, 이를 평균한 값을 여과형 시설의 대표 저감효율로 나타낼 수 있다(표 1 참조). 이와 같이 저감효율을 개별 시설 및 시설 유형별로 부여할 경우 대푯값으로 시설의 오염물질 저감기능에 대해 이해하기 어려우므로, 모니터링 사상별로 오염물질 저감부하량의 변동성을 검토하도록 한다. 이호선(2010)은 유입부하량과 저감부하량 사이에 높은 상관관계를 있음을 확인하였는데, 본 연구에서는 그 두 변수 뿐 아니라 다른 영향 인자들을 추가적으로 검토하였다. 또한 시설의 유형(여과형 시설)에 대한 대표 저감효율을 결정하는 것이 가능한지를 확인하기 위하여 단위면적당 부하량을 고려하였다. BOD 유입부하량과 저감부하량의 관계는 회귀식 I으로 나타낼 수 있다(표 2 참조). 이 때 결정계수는 0.9013으로 BOD 유입부하량은 저감부하량을 90% 정도 설명할 수 있는 것으로 나타났고, P-값도 0.0에 가까우므로 유의수준 5%에서 유의함을 알 수 있다.

표 2. BOD 저감부하량 회귀분석(자료개수 n=82)

구분	계수		P-값	결정계수
회귀식 I: $\ln(y) = \alpha + \beta \times \ln(x)$	α	0.7199	2.3E-10	0.9013
	β	0.9726	5.5E-42	
회귀식 II: $\ln(y) = \alpha + \beta_1 \times \ln(x) + \beta_2 \times A_{II} + \beta_3 \times A_{III}$	α	0.6836	3.8E-09	0.9037
	β_1	0.9749	2.5E-41	
	β_2	0.3357	0.2176	
회귀식 III: $\ln(y) = \alpha + \beta_1 \times \ln(x) + \beta_2 \times F_{II} + \beta_3 \times F_{III} + \beta_4 \times F_{IV} + \beta_5 \times F_{V}$	β_3	0.2417	0.4914	0.9432
	α	0.3860	0.0075	
	β_1	0.7971	2.3E-26	
	β_2	-0.1362	0.4600	
	β_3	-0.9534	0.0005	
	β_4	0.6885	0.0003	
	β_5	0.5346	0.0056	

x = 단위면적당 유입부하량(kg/ha), y = 단위면적당 저감부하량(kg/ha)
 $A_{II} \rightarrow AMC_{II} = 1 \ \& \ AMC_{III} = 0$, $A_{III} \rightarrow AMC_{II} = 0 \ \& \ AMC_{III} = 1$
 $F_{II} \rightarrow$ 시설 2 = 1 & 그 외 = 0, $F_{III} \rightarrow$ 시설 3 = 1 & 그 외 = 0,
 $F_{IV} \rightarrow$ 시설 4 = 1 & 그 외 = 0, $F_{V} \rightarrow$ 시설 5 = 1 & 그 외 = 0

Maestre와 Pitt(2006)가 NSQD의 모니터링 자료를 검토한 결과, EPA 강우 지역 2에 해당하는 강우유출수 수질이 선행건기일수에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이와 유사하게 본 연구에서는 선행강수량에 따른 선행토양함수조건을 나타내는 AMC 조건을 가변수로 고려하였다(표 2의 회귀식 II 참조). 그 결과 유입부하량만으로 저감부하량을 추정하는 회귀식에 비하여 결정계수가 다소 높아졌으나, AII와 AIII에 대한 유의확률은 0.2176과 0.4914로서 유의수준 5%에서 유의하지 않았다. 그러나 분석된 강우사상(총 82회) 중에서 AMC II 조건은 7회, AMC III 조건은 4회로 그 횟수가 너무 작기 때문에 해당 조건에 대한 모니터링을 추가한 이후 재검토 할 필요가 있다고 판단된다. 이와 함께 시설별로 운영 및 유지관리, 배수구역 특성이 다소 상이하므로, 각 시설을 가변수로 고려하여 회귀식 III을 추정하였다. 이 때 결정계수는 0.9432로 높았고 ln(x), FIII, FIV, FV에 대한 유의확률은 모두 0.05 이하로 산정되었다. 그러나 FII에 대한 유의확률은 0.4600으로 시설 1과 시설 2의 차이는 유의수준 5%에서 유의한 차이라고 볼 수 없다.

TN과 TP에 대해서 회귀식 I과 회귀식 III을 추정한 결과는 표 3에 제시하였다. TN과 TP의 경우 BOD에 비해 회귀식의 결정계수가 낮고, 변수에 대한 유의확률이 높아 유의수준 5%에서 유의하지 않은 경우가 많았다. 따라서 BOD에 비해 TN, TP의 저감부하량을 추정하는 것은 어려울 것으로 판단되며, 회귀분석을 적용해야 한다면 시설별로 다른 인자들을 추가적으로 도입하여 회귀식을 추정해야 할 것이다.

표 3. TN 및 TP의 저감부하량 회귀분석(자료개수 n=80)

TN				TP			
구분	계수	P-값	결정계수	구분	계수	P-값	결정계수
회귀식 I	α	-2.3601	0.1146	회귀식 I	α	-9.3118	8.6E-06
	β	0.6891	0.0521		β	1.4304	0.0025
회귀식 III	α	1.2084	0.2817	회귀식 III	α	-3.4857	0.0879
	β_1	-0.0737	0.7728		β_1	0.2191	0.6376
	β_2	0.8231	0.0885		β_2	0.3862	0.5501
	β_3	-4.2570	5.5E-14		β_3	-5.2121	1.2E-13
	β_4	0.7871	0.0952		β_4	0.4826	0.3554
	β_5	0.8103	0.0903		β_5	0.8393	0.1711

4. 비점오염저감시설의 모니터링 및 유지관리에 대한 고찰

3절의 여과형 시설에 대한 검토 결과 수질항목별, 시설별로 저감부하량은 달라질 수 있으며, 이는 각 소재지에 설치된 시설의 운영방법이나 유지관리에 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러므로 시설의 적절한 운영이나 유지관리가 더 중요해지고 있으나, 시설유지관리의 주체가 불분명하거나 이에 소요되는 비용 문제로 인해 사후관리가 미흡한 경우도 발생한다. 따라서 시설 관리자의 노력 여부에 따라 패널티 또는 인센티브를 고려하지 않으면 비점오염저감시설의 기능을 확보하기 어려울 것이다. 이러한 패널티 또는 인센티브를 부여하는 방법으로 총량제 이행평가에 반영하는 방법이 제안될 수 있으나, 그 평가 기준을 마련하기 위한 추가 연구가 선행되어야 할 것이다.

물론 현행 총량제 이행평가에서는 강우시 가동되는 비점오염저감시설의 누적처리용량이나 시간당 처리용량에 따라 대표강우 연 3회 또는 6회의 모니터링을 실시하게 되어 있다. 이에 따라 지방자치단체에서는 모니터링 결과를 반영해달라는 요청이 있으나, 아직까지는 시설 기능을 평가하기에 자료가 부족한 경우가 많다. 그러므로 모니터링 결과를 이행평가에 반영하기 위해 필요한 최소한의 모니터링 횟수 및 측정된 강우·유출사상의 특성 등에 대한 기준이 필요하다.

일반적으로 설치되는 강우유출수를 차집한 후 오염물질을 저감하는 시설(treatment control BMPs)은 유입부·유출부가 명확하여 강우유출수를 발생단계에서 조절하는 시설(source control BMPs)에 비해 상대적으로 모니터링 수행이 용이하다. 그러나 발생원 관리 시설(생태면적 등)은 전형적인 모니터링 방법(강우유출수 유입 전·후의 수질 비교)으로 저감효율을 결정하기 어렵기 때문에 시설의 유지관리가 더 중요한 의미를 갖게 된다. 현재 발생원 관리 시설은 ‘수질오염총량 관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침(국립환경과학원·환경부, 2010)’이 마련됨에 따라 지역개발사업의 비점관리를 위해 설치할 수 있게 되었다. 따라서 모니터링 어려운 시설에 대하여 계획단계에서 인정받은 시설의 저감효율을 담보하기 위해 필요한 최소한의 유지관리 이행여부를 판단할 기준이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 총량제의 비점오염저감시설의 삭감부하량 산정방법 및 저감효율과 환경부가 수행한 모니터링 사업 결과를 검토하였다. 여과형 시설에 대한 검토 결과 BOD의 저감부하량은 유입부하량으로 설명할 수 있었고, 선행토양함수조건인 AMC 조건은 저감부하량에 큰 영향을 미치지 않았다. 단, 개별 시설을 구분하여 설명하면 회귀식의 결정계수를 높일 수 있었다. BOD에 비해 TN과 TP의 저감부하량은 유입부하량으로 추정하기 어려웠다. 일부 수질항목은 간단한 회귀식을 통해 저감부하량을 추정할 수 있을 것이라 판단되며, 이는 모니터링 횟수나 샘플링할 강우사상의 선정 시 반영하여 비점오염저감시설의 모니터링을 개선하는데 적용할 수 있다. 그러나 배수구역의 특성, 강우·유출 특성, 비점오염저감시설의 유형, 운영 및 유지관리의 문제점 등 모든 사례에 대하여 유의한 수준으로 저감부하량을 추정하는 것에는 한계가 있으므로, 총량제 이행평가 시 제출되는 해당 시설의 모니터링 결과 및 지역 특성을 충분히 이해하고 이를 바탕으로 패널티/인센티브를 부여할 수 있도록 기준을 마련할 수 있는 연구가 필요하다. 특히, 비점오염저감시설의 운영 및 유지관리와 같은 사후관리가 더욱 중요해지고 있는 시점에서 ‘수질오염총량관리를 위한 비점오염저감시설 유지관리실적대장 작성지침(국립환경과학원, 2009)’과 같은 지침을 활용하여 사후관리에 대한 평가에 중점을 둘 필요가 있다.

참고문헌

1. 국립환경과학원(2008). 제2단계 수계오염총량관리 기술지침.
2. 국립환경과학원(2009). 수질오염총량관리를 위한 비점오염저감시설 유지관리실적대장 작성지침.
3. 국립환경과학원(2010). 수질오염총량관리를 위한 개발사업 비점오염원 최적관리지침.
4. 이호선(2010). 비점오염저감시설 형태별 유입부하량 변화에 따른 관리주기 산정에 관한 연구. 인천대학교 박사학위 논문.
5. 환경관리공단·(사)한국물환경학회(2009). 한강수계 비점오염저감시설 모니터링 및 유지관리 3차년도 보고서.
6. Maestre A. and R. Pitt(2006). Identification of Significant Factors Affecting Stormwater Quality Using the NSQD. Stormwater and Urban Water Systems Modeling Proceedings, Monograph 14. CHI. Guelph, Ontario, pp. 287-326.