

우수유출수 처리시설로부터 더 이상 저감될 수 없는 오염물질 농도

Irreducible Pollutant Concentration Discharges from Storm Water Treatment Facilities

윤 광 식*

Yoon, Kwang Sik

1. 서 론

제거율은 우수유출수 처리기술의 성능을 평가하기 위해 전통적으로 사용 되어온 기준이다. 처리시설의 유입 및 유출 오염부하량을 비교하는 것은 간단하며, 제거효율 계산도 빠르다. 오염부하량 감소는 다양한 처리기술의 상대적인 성능을 비교하는 유용한 기준인 반면에, 몇 가지 제한점이 있다. 예를 들어 오염부하량의 제거율은 처리시설 유출수의 오염물질 농도에 대한 정보를 제공하지 않는다. 처리시설에서 방류되는 유출수 농도는 수질 관리에 있어 매우 중요한 요소이다. 현재 기술로 달성 가능한 우수유출수 오염물질의 배경농도 및 더 이상 저감할 수 없

는 농도가 존재하는가? 이에 대한 연구내용이 실린 (CWP, 2002)의 결과를 소개하고 국내의 연구 결과를 비교하여 우수유출수 처리 시설의 적용한계에 대한 정보를 제공하고자 한다.

2. 우수유출수 처리시설의 처리한계 농도 (외국의 사례)

더 이상 저감할 수 없는 농도의 개념은 폐수처리용 습지의 설계에 사용된 공정 모델에서 명백히 인정되어 왔다(Kadlec and Knight, 1996; Reed, 1995). 전문가들의 의견에 의하면, 폐수처리용 자유수면 흐름습지는 수면적 및 처리용량이 아무리 증가하더라도, 침전물 및 영양물질 농도를 표 1에 나타낸 농도이하로 저감

표 1. 폐수처리용 습지 및 우수유출수 관리시설의 더 이상 저감할 수 없는 농도

| 수질 인자 (mg/L) | 폐수처리용 습지 (Kadlec and Knight, 1996) | 폐수처리용 습지 (Reed, 1995) | 우수유출수 처리시설 |
|--------------|------------------------------------|-----------------------|------------|
| TSS | 2-15 | 8 | 20-40 |
| T-P | 0.02-0.07 | 0.5 | 0.15-0.2 |
| T-N | 1.0-2.5 | 1.0 | 1.9 |
| 질산성 질소 | 0.05 | 0.00 | 0.7 |
| TKN | 1.0-2.5 | 1.0 | 1.2 |

*전남대학교 농업생명과학대학(ksyoon@chonnam.ac.kr)

할 수 없다.

그림 1은 가상적인 우수유출수 처리시설에서 더 이상 저감할 수 없는 농도의 효과를 보여주고 있다. 예를 들어, 유입 오염물질의 농도가 다소 높은 경우, 처리강도(면적 및 용량)가 증가할수록 오염물질의 유출농도는 감소할 것이다 (line A). 그러나 유입 오염물질의 농도가 더 이상 저감할 수 없는 농도(C^*)에 접근하면, 처리강도를 아무리 증가시키더라도, 유출수 농도를 현저히 줄일 수는 없다(line B). 사실 유입 오염물질 농도가 더 이상 저감할 수 없는 농도 이하라면 음의 제거효율도 가능할 가능하다 (line C).

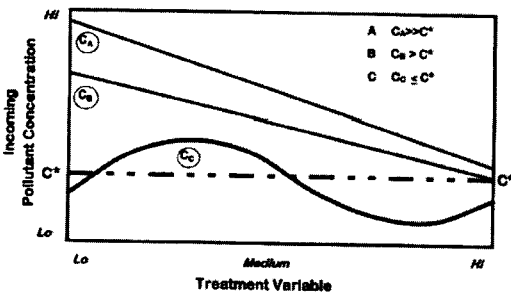


그림 1. 처리 변수가 더 이상 저감될 수 없는 농도에 미치는 영향

왜 더 이상 저감할 수 없는 오염물질 농도가 존재할까? 우선 연못 및 습지내에서 미생물, 식물, 조류에 의한 생물학적 생산에 의해 영양물질 및 탁도의 내부 재생산이 있을 수 있다. 이러한 내부 공정에 의해 일부 오염물질은 다시 수중으로 재유입 되어, 다음 강우시 유출될 수 있다. 다른 경우 더 이상 저감할 수 없는 농도는 단지 우수유출수 처리시설에서 이용되는 특정 저감경로의 한계를 반영하기도 한다. 예를 들어 주로 침전을 이용한 처리기술은 상대적으로 높은 C^* 값을 가진다. 이것은 Grizzard et

al.(1986)에 의해 수행된 그림 2의 침전칼럼 자료에 잘 보여지고 있다. 침전이 유일한 제거 경로라면, 체류시간이 아무리 증가하더라도, 오염물질 제거율은 결과적으로 접근선에 접근하게 된다.

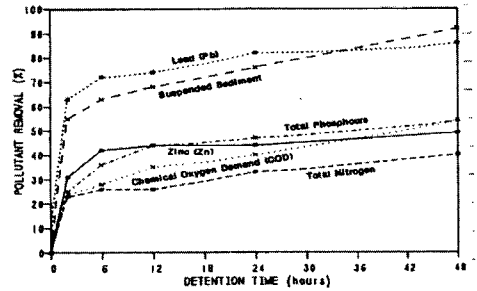


그림 2. 일련의 우수유출수 오염물질에 대한 제거율 vs 체류시간

우수유출수 처리기술에서 제어되는 오염물질의 경우 C^* 가 존재하나? 최근의 두 개의 연구결과에 의하면, 더 이상 저감할 수 없는 오염물질의 농도는 존재한다. 첫 번째 연구에서, Kehoe 및 그의 동료는 플로리다의 Tampa Bay에 위치한 36개의 연못 및 습지에서의 우수유출수 수질을 시스템 적으로 분석하였다. 연구자들은 2년 간에 걸쳐 연못(Wet Ponds, N=24) 및 연못/습지 시스템(Pond/Wetland Systems, N=12)의 유출수의 침전물, 금속, 용존산소 함량을 특성 지었다. 강우 후 1~3일에 각 측정지점에서 샘플(grap samples)을 채취하였다.

표 2에 연못 및 연못/습지시스템에 대한 연구결과를 요약하였다. 유출수의 TSS 농도는 현저하게 일치하였으며, 10mg/L보다 다소 낮은 값을 나타내었다. DO 농도는 변화가 심하였으며, 연못에 비해 습지에서 DO 농도가 다소 낮았다. 유사하게 연못/습지 시스템의 pH가 연못에 비해 다소 더 산성이었으며, 이는 아마도

습지에 더 많은 유기물질이 축적되었기 때문일 것이다. 모니터링 자료의 대부분은 금속(카드뮴, 크롬, 구리, 납, 니켈, 아연)이었다. 금속의 분석은 검출한계 문제로 인해 다소 복잡하였으나, 대부분의 금속이 연못의 유출수에서 검출되었으며, 때때로 플로리다의 금속농도 기준치를 초과하였다.

두 번째 연구에서, 연구자는 42개의 우수유출수 처리시설의 유출수의 유량가중평균농도(EMCs, event mean concentrations)를 분석하였다. 이러한 사후 NURP(National Urban Runoff Practice) 우수유출수 처리시설 모니터링 연구는 많은 지역(FL, TX, WA, MN, WI, MD, VA, CT, CO, 뉴질랜드)에서 수행되었으며, 연못, 습지, 여과시스템, 식생 수로의 네 가지 형태의 처리기술을 포함한다. 각각의 처리기술 형태에 대해, 각 개별 연구(N은 3-16)의 침전물질 및 영양물질의 유출수 농도

에 기초하여 평균 및 표준편차를 계산하였으며, 분석결과는 표 3 ~ 표 6에 나타내었다. 초기의 연구와 달리, 여기서 농도는 평균 우수유출수 농도를 나타낸다.

표 3 ~ 표 6에서 보는 바와 같이, 우수유출수 처리시설의 유출수 농도는 각 유형간에 유사한 값을 보였다. 흥미로운 점은, 연못 및 습지에서의 유출수 농도의 평균값은 거의 유사하였으며, 특히 질소 및 인의 경우는 더욱 유사한 농도 경향을 보였다. 일반적으로 유출수의 평균 농도는 여과 시스템에서 다소 낮았으며, 식생수로형에서 다소 높았다. 각 처리기술 유형간에 가장 심한 농도 변화를 나타낸 질소 형태는 질산성 질소였다. 유출수 중 질산성 질소의 농도는 여과시스템에서 가장 높았으며, 연못 및 식생 수로에서 중간 정도, 습지에서 가장 낮았다. 그러나 총질소의 농도는 각 처리기술 유형별로 매우 유사하였다(1.6~1.9mg/L). 이러한 결과는

표 2. 플로리다의 Tampa Bay의 우수유출수 처리용 연못 및 습지의 수질 특성

| 수질인자 | 우수유출수 처리용 연못 N=24(236) | 연못/습지 N=12(83) |
|-----------|---------------------------|-------------------|
| TSS(mg/L) | 8.8±11.4 | 9.1±2.1 |
| DO(mg/L) | 5.7±2.8 | 4.1±3.8 |
| pH | 7.2 | 6.7±0.9 |
| Cd(µg/L) | 3±6 | 6±7 |
| Cr(µg/L) | 12±26 | 5±3 |
| Cu(µg/L) | 16±25 | 10±10 |
| Pb(µg/L) | 12±28 | BDL |
| Ni(µg/L) | 9±36 | BDL |
| Zn(µg/L) | 37±73 | 33±30 |
| 수온(°C) | 22.8 | 23.7 |

주) 강우 후 1~3일 경과후 그랩 샘플하였음
 N = 사이트 수(모든 사이트에서 총 샘플수)
 BDL(below detection limits) = 검출한계 이하
 중금속농도의 넓은 표준편차는 검출한계를 반영한다.
 자료 : Kehoe, 1993 and Kehoe et al., 1994

표 3. 우수처리용 습지에서서의 유출수 평균 농도

| 수질인자 | N | 농도(mg/L) |
|---------|----|-----------|
| TSS | 15 | 32±25.8 |
| T-P | 16 | 0.19±0.13 |
| ortho-P | 14 | 0.08±0.04 |
| T-N | 11 | 1.63±0.48 |
| TKN | 11 | 1.29±0.43 |
| 질산성 질소 | 11 | 0.35±0.28 |

자료 : Leersnyder, 1994; Ryshton, 1995; Urbonas et al., 1994; Oberts, 1990, 1992; OWML, 1998, 1990; Athanas et al., 1989; Martin, 1998; City of Baltimore, 1988; Barten 1988; Reinelt et al., 1990.

표 4. 습식 연못(wet pond) 및 장기저류 연못(extended detention ponds)에서의 유출수 평균 농도

| 수질인자 | N | 농도(mg/L) |
|---------|----|-----------|
| TSS | 11 | 35.0±19.0 |
| T=P | 11 | 0.22±0.12 |
| ortho-P | 6 | 0.08±0.04 |
| T-N | 11 | 1.91±0.56 |
| TKN | 11 | 1.21±0.36 |
| 질산성 질소 | 11 | 0.70±0.36 |

자료 : Urbonas et al., 1995; Oberts and Osgood, 1989; Yousef et al., 1989; City of Austin, 1990; Stanley, 1994; Martin, 1988; Dorfman et al., 1989

각 처리유형별로 질산화율 및 탈질율이 각기 다르기 때문이다.

이러한 분석결과에 기초하여, 더 이상 저감될 수 없는 우수유출수 농도의 일차적 추정치는 표 1에 나타난 바와 같다. 일반적으로 침전물의 농도는 폐수처리용 습지에 비해 2~4배 정도 높았으나, 영양물질의 농도는 폐수처리용 습지와 비슷한 범위를 보였다.

3. 우수유출수 처리시설의 처리한계 농도 (국내의 사례)

전남대학교에서 수행한 농림기술과제(농림부, 2002) 연구결과를 살펴보고자 한다. 고흥 담수호 수질개선을 위해 유역처리 연못 - 습지 시스템의 적용성이 연구되었다. 담수호 유입 하천수의 수질은 평상시에 BOD₅ 3 ~ 8mg/l, T-N 3 ~ 8mg/l, T-P 0.15 ~ 0.26mg/l로 담수호 수질기준인 T-N 1mg/l, T-P 0.1mg

표 5. 우수처리용 여과시스템(모래 여과 다중여과)에서의 유출수 평균농도

| 수질인자 | N | 농도(mg/L) |
|---------|----|-----------|
| TSS | 10 | 19.3±10.1 |
| T-P | 10 | 0.14±0.13 |
| ortho-P | ND | - |
| T-N | 6 | 1.93±1.02 |
| TKN | 6 | 0.90±0.52 |
| 질산성 질소 | 6 | 1.13±0.55 |

자료 : Horner, 1995; City of Austin, 1990; Bell, 1995; CSF, 1994

/l 보다 다소 높았다. TN이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 강우시 수질은 BOD₅ 8 ~ 21mg/l, T-N 10 ~ 14mg/l, T-P 0.5 ~ 0.8mg/l 이었다.

연못-습지 시스템은 연못 2개와 부들습지셀(셀1, 셀2, 셀3) 과 갈대습지셀(셀4, 셀5, 셀6) 의 총 6개의 습지가 직렬로 연결 되어있다. 조사기간 유입수의 평균 BOD₅ 농도는 6.01mg/l 이었다. 1차 연못에서 유입수의 BOD₅가 평균 4.57mg/l로 처리되고, 2차 연못에서 평균 3.98mg/l로 정화되었다. 부들습지셀 처리수의 평균 BOD₅는 2.62mg/l, 최종 갈대습지셀 처리수의 평균 BOD₅는 2.54mg/l 이었다. 유입수의 평균 SS 농도는 15.43mg/l, 1차 연못에서 유입수의 SS가 10.96mg/l로 처리

되고, 2차 연못에서 평균 8.79mg/l로 낮아졌다. 부들습지셀 처리수의 평균 SS는 5.71mg/l고, 최종 갈대 습지셀 처리수의 평균 SS는 5.40mg/l 이었다.

유입수의 평균 T-N 농도는 5.80mg/l 이었다. 1차 연못에서 T-N이 평균 4.64mg/l, 2차 연못에서 평균 3.98mg/l. 부들셀 처리수의 평균 T-N 농도는 2.41mg/l, 최종 갈대셀 처리수의 평균 T-N 농도는 2.47mg/l 이었다. 유입수의 평균 T-P 농도는 0.198mg/l 이었다. 1차 연못에서 T-P가 평균 0.152mg/l로, 2차 연못에서 평균 0.129mg/l 부들셀 처리수의 평균 TP 농도는 0.081mg/l로, 갈대셀 처리수의 평균 T-P 농도는 0.085mg/l로 처리되었다.

표 6. 우수처리용 식생수로에서의 유출수 평균농도

| 수질인자 | N | 농도(mg/L) |
|---------|---|-----------|
| TSS | 5 | 43.4±47.0 |
| T-P | 5 | 0.33±0.15 |
| ortho-P | 3 | 0.16 |
| T-N | 5 | 1.74±0.71 |
| TKN | 5 | 1.19±0.41 |
| 질산성 질소 | 5 | 0.55±0.29 |

주) 자료수가 제한되어 정확한 추정에 한계가 있었음
 자료 : Harper, 1987, Dorfman et al., 1989

부들 습지유출수를 갈대습지에서 추가처리를 하여도 농도가 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 갈대습지로 유입수 농도가 한계농도에 다다랐음을 보여준다. 연못 - 습지 시스템에서 관측된 유출수 최저농도는 BOD₅ 2.0mg/ℓ, SS 3.28mg/ℓ, T-N 농도는 2.17mg/ℓ, T-P 0.05mg/ℓ이었다(표 7). 이는 T-N의 경우 농업수로 쓰이는 담수호 수질 기준을 초과하는 것이고, T-P의 경우도 상수원 수질 기준을 초과함을 알 수 있다.

IV. 요약 및 결론

우수유출수의 처리 후, 더 이상 저감할 수 없는 오염물질 농도의 존재는 유역관리에 있어 중요한 의미를 가진다. 예를 들어 우수중의 인의 배경농도인 0.1 ~ 0.15mg/L는 아마도 우수유출수 처리시설이 달성할 수 있는 가장 낮은 농도 값일 것이다. 일부 오염에 민감한 호수지역의 경우, 이러한 인의 농도는 호소 부영양화의 효과적인 방지를 위해서는 여전히 높은 농도이다.

더 이상 저감할 수 없는 농도의 또 다른 중요한 의미는 복합 우수유출수 처리시설과 관련

이 있다. 일부 지자체는 우수유출수 처리시설의 건설에 있어 우수유출수 부하량의 80~90%를 저감할 수 있도록 요구한다. 더 이상 저감할 수 없는 농도의 존재는 추가적인 처리시설의 도입을 통한 처리효율의 향상에 실질적인 제한이 있음을 의미한다. 간단히 말해서, 첫 번째 처리시설이 오염물질 농도를 거의 더 이상 저감할 수 없는 농도까지 저감시킨다면, 후속의 처리시설은 더 이상의 수질 향상을 기대하기 어렵다는 것이다.

또한 더 이상 저감할 수 없는 농도의 존재는 우수유출수 처리시설의 모니터링 자료의 변화성을 해석하는데 도움이 된다. 많은 경우 처리시설의 제거율은 강우 사상별로 달라지며, 일부 시설은 처리 용량이 유사하더라도 오염물질 제거율에 있어 상당한 변화를 나타낸다. 낮은 오염물질 제거율이 나타나는 경우는 아마도 유입수의 오염물질 농도가 더 이상 저감할 수 없는 농도에 근접하였기 때문일 것이다(결과적으로, 더 이상 저감할 수 없다). 따라서 처리시설의 성능이 불량한 경우, 조사자는 그 이유를 부실 설계 및 충분하지 않은 샘플링의 문제라고 생각하기에 앞서, 유입 농도를 자세히 검사할 것이다. 유역보호 및 복원프로그램을 개발시 이러한

표 7. 연못-습지 시스템 유출수 평균 농도 및 최저 농도

| | BOD (mg/ℓ) | SS (mg/ℓ) | T-N (mg/ℓ) | T-P (mg/ℓ) | 비고 |
|--------------|------------|-----------|------------|------------|---------|
| 유입수 평균 농도 | 6.01 | 15.43 | 5.80 | 0.198 | |
| 1차연못 평균 농도 | 4.57 | 10.96 | 4.64 | 0.152 | |
| 2차연못평균 농도 | 3.98 | 8.79 | 3.98 | 0.129 | |
| 부들습지시설 평균 농도 | 2.62 | 5.71 | 2.41 | 0.081 | 셀 3 유출수 |
| 갈대습지시설 평균 농도 | 2.54 | 5.40 | 2.47 | 0.085 | 셀 6 유출수 |
| 유출수 최저 농도 | 2.00 | 3.28 | 2.17 | 0.050 | |

한계를 명심하여야 한다. 끝으로, 더 이상 저감할 수 없는 농도의 개념이 중요한 의미를 가지기는 하나, 많은 우수유출수 처리시설에 대해 이러한 값을 특성 짓기 위해서는 더 많은 유출수 모니터링이 필요하다 하겠다.

참고문헌

농림부, 2002, 담수호 수자원보전을 위한 유역처리 시스템 개발.

Center for Watershed Protection, 2002, Technical Note #75 from Watershed Protection Techniques. 2(2): pp.369~372

Grizzard, T, C. Randall, B. Weand, and K. Ellis, 1986, "Effectiveness of Extended Detention Ponds." in *Urban Runoff Quality-Impact and Quality Enhancement Technology*. B. Urbonas and L. Roesner (editor). American Society of Civil Engineers. New York, NY. pp.323-338.

Kadlec, R and R. Knight, 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press and Lewis Publishers. Boca Raton, FL. p.894

Kehoe, M. J. 1993, *Water Quality Survey of Twenty-Four Stormwater Wet Detention Ponds - Final Report*. Southwest Florida Water Management District. Brooksville, FL. p.84

Kehoe, M, C. Dye and B. Rushton, 1994, *A Survey of Water Quality of Wetlands-Treatment Stormwater Ponds*. Southwest Florida Water Management District. Brooksville, FL. p.40

Reed, S, 1995, *Surface Flow Wetlands: A Technology Assessment*. USEPA, Office of Wastewater, Washington, DC.