

인 유출지수와 유역수질오염관리

Phosphorus Site Index and Water-quality Management in Watershed

김 성 배*
Kim, Sung Bae

I. 머리말

인(phosphorus, P)은 식물과 동물의 성장에 필수적인 영양요소로서, 인의 공급은 식물과 동물의 생산성을 지속적으로 유지하기 위해 필수적인 것이다. 수계의 인의 유입은 부영양화(eutrophication)를 야기함으로써, 수체의 생물학적인 생산성을 증가시킨다. 일반적으로, 부영양화는 영양물질의 증가에 의한 호소나 하천의 자연적인 숙성(aging)현상을 말한다. 하지만, 인간의 활동에 의한 인 부하율의 급격한 증가는 지표수 수질을 악화시키는 주요한 원인으로 인식되고 있다.

부영양화는 수질에 부정적인 영향을 미치는 조류(algae)나 수생식물의 성장과 이들의 사멸 및 분해에 의한 산소의 부족을 야기함으로써 낚시, 레크리에이션, 산업 생산 활동, 및 음용수 공급을 위한 물의 이용을 제한한다. 또한, 남조류(blue-green algae, cyanobacteria)에 의한 상수 공급원에서의 주기적인 수화발생(algal bloom)은 동물과 인간의 건강에 심각한 위협을 가한다. 특히, 이러한 조류에 의해 분비되는 맹

독성 물질에 사람이 노출될 경우 뇌신경계에 손상을 일으키는 것으로 알려짐으로써 부영양화에 대한 대중의 인식이 증가하였고 이에 대한 해결책의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

전 세계적으로 지표수의 부영양화는 대부분 인의 유입에 의해 가속화되는 것으로 알려져 있다. 물론, 질소(nitrogen)나 탄소(carbon)도 수생생물의 성장에 필수적인 영양요소이다. 하지만, 대기와 물 사이에서의 질소와 탄소의 교환 현상이나 특정 남조류에 의한 대기 중 질소의 고정현상을 제어하는 것이 매우 어렵다. 그러므로, 부영양화와 관련하여 거의 모든 관심은 인의 유입에 맞추어져 있으며, 조류성장의 제한영양요소인 인의 제어는 가속화되고 있는 지표수의 부영양화를 감소시키는데 가장 핵심적인 사항이다.

따라서, 본 고에서는 유역에서 수질오염의 중요한 인자로 작용하는 인의 제어와 관련하여, 관리도구(management tool)로써 미국에서 개발·적용되고 있는 인 유출지수(phosphorus site index)를 소개하고자 한다.

*서울대학교 지역시스템공학과(songbkim@snu.ac.kr)

II. 주요내용

환경용량을 초과한 비료, 축산 퇴비/액비의 농경지 시용은 토양에서의 인의 축적을 초래하고 하천이나 호소 등의 수계로의 인의 유출을 초래한다. 지표 환경에서 수체로의 이동과정에서 인은 용존성 인(dissolved P)과 입자성 인(particulate P) 형태로 이동된다. 인은 농업 지역에서 주로 입자의 형태로 이동되는 반면에 산림지와 목초지에서는 용존성 형태로 이동된다(Lemunyon et al., 1993). 용존성 인은 수체로 유입되는 과정에서 식물에 의해서 흡수되거나 수체로 유입되어 식물이 즉시 이용할 수 있게 된다. 식물에 의해서 흡수되지 않는 인은 수체로 유입되어 수중 생물에 의해서 흡수된다. 인의 이동 형태 중 75~90%를 차지하는 입자성 인은 수체에 유입되어 퇴적되는데, 수체의 바닥부분이 환원상태가 될 경우 입자로부터 수체로 인이 다시 방출된다(Correll, 1998).

토양에 축적된 인의 양과 유출수 내에 용존되어 있는 인의 농도는 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다. 즉, 토양에 축적되어 있는 인의 양이 많을수록 강우 시 유출되는 인의 농도가 높은 것으로 조사되었다(Pote et al., 1999). 토양에 축적되어 있는 인의 양과 더불어, 토양의 인에 대한 흡착능(sorption capacity)이 인의 유출에 중요한 요소임이 알려졌다. 동일한 양의 인이 토양에 축적되어 있더라도, 토양의 흡착능이 높은 토양보다 낮은 토양에서 인의 유출이 많은 것으로 나타났다(Sharpley, 1995).

농업 활동으로 인한 수체로의 인 유입을 방지하기 위해서는 퇴비나 비료의 투입되는 양과 작물에 의해서 소비되는 양과의 균형을 맞추어 인의 이용효율을 높여야 한다. 유출에 의한 인의 손실을 막기 위해서는 토양내의 인의 농도,

분뇨와 비료의 시비와 관련되어 있는 원천인자(source factor)와 유출, 용탈, 침식 등과 관련되어 있는 수송인자(transport factor)를 제어하여야 한다. 인에 의한 수질오염문제는 원천인자와 수송인자가 동시에 영향을 미치는 지역에서 발생한다(그림 1). 즉, 어떤 지역의 토양에 많은 양의 인이 존재한다고 할지라도 이동 가능성이 없으면 오염문제가 발생하지 않는다. 반대로, 이동 가능성이 높은 경우라도 그 지역의 토양에 인이 적게 존재하면 문제가 되지 않는다. 따라서, 인의 관리는 두 인자가 함께 존재하는 소위 '위험 원천 지역'(critical source area)에 초점이 맞추어져야 한다.

Lemunyon and Gilbert(1993)에 의해서 처음으로 소개된 인 유출지수는 유역에서 유출에 의한 인 손실의 취약 정도를 감별하는 도구로서 여러 분야의 전문가들의 공동연구에 의하여 개발되었다. 인 유출지수는 8×5 행렬의 형태로 5개의 원천인자 항목과 3개의 수송인자 항목에 대하여 인 유출 정도를 5 등급으로 구분하고 있는데, 각 항목마다 가중치와 등급을 곱한 후 이를 합하여 인 유출지수값(P index rating)을 결정한다(Lemunyon and Gilbert, 1993). 이들이 제시한 인 유출지수에는 원천인자로서 토양축

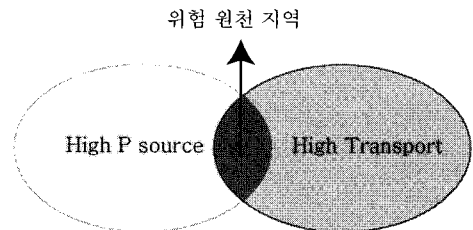


그림 1. 위험 원천지역

표 1. 인 유출지수의 예 (Source : McDowell et al., 2002)

PART A		Phosphorus Transport Characteristics			
Transport Factors	Very Low (0.6)	Low (0.7)	Medium (0.8)	High (0.9)	Very High (1.0)
Soil Erosion (mg ha ⁻¹)	Not applicable	< 10	10-20	20-30	> 30
Irrigation Erosion (mg ha ⁻¹)	Not applicable	Infrequent irrigation on well-drained soils	Moderate irrigation on soils with slopes <5%	Frequent irrigation on soils with slopes of 2 to 5%	Frequent irrigation on soils with slopes <5%
Runoff Class	Very Low	Low	Medium	High	Very High
Contributing Distance (m)	None (0.2)	Low (0.4)	Medium (0.6)	High (0.8)	Very High (1.0)
	>170	170-130	130-80	80-30	<30
PART B		Phosphorus Soil Characteristics			
Soil Test P	Soil Test P (mg P kg ⁻¹)				
Loss Rating Value	Soil Test P 0.2 CP				
Fertilizer P Rate	Fertilizer Rate (kg P ha ⁻¹)				
P Fertilizer Application Method and Timing	Very Low Placed with planter or injected more than 2 inch deep	Low Incorporated <1 week after application	Medium Incorporated <1 week after application	High Incorporated >1 week or not incorporated following application in November to April	Very High Surface applied on frozen or snow covered soil
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Loss Rating Value	Fertilizer P application rate × Loss rating for fertilizer P application method and timing				
Manure P Rate	Manure Application (kg P ha ⁻¹)				
P Manure Application Method and Timing	Very Low Placed with planter or than 2 inch deep	Low Incorporated <1 week after	Medium Incorporated >1 week or not	High Incorporated >1 week or not incorporated following application in November to April	Very High Surface applied on frozen or snow covered soil
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Loss Rating	Manure P application rate × Loss rating for manure P application method and timing				

Note : P Index Rating = Part A (Soil erosion × Irrigation erosion × Runoff class × Contributing distance) × Part B (Soil test P loss rating value + Fertilizer P loss rating value + Manure P loss rating value)

표 2. 인 유출지수의 해설 (Source: McDowell et al., 2002)

P Index Rating	Generalized Interpretation
<25	LOW potential for P loss. If current farming practices are maintained, there is a low probability of adverse impacts on surface and subsurface waters.
25-75	MEDIUM potential for loss. The chance for adverse impacts on surface and subsurface waters exists, and some remediation should be taken to minimize the probability of P loss. Crop N requirements should be better timed to suit periods of optimal uptake and minimal loss.
75-150	HIGH potential for P loss and adverse impacts on surface and subsurface waters. Soil and water conservation measures and a P management plan are needed to minimize the probability of P loss.
>150	VERY HIGH potential for P loss and adverse impacts on surface and subsurface waters. All necessary soil and water conservation measures and an integrated P management plan must be implemented to minimize the P loss. Additional P application stopped.

정 인(soil test P), 비료의 시비횟수와 적용시점/적용방법, 축산분뇨의 시비횟수와 적용시점/적용방법이 포함되었다. 수송인자로는 토양침식, 관개침식, 유출등급이 포함되었다. 토양침식은 흙 입자에 부착된 입자성 인의 이동 지표로서 USLE, RUSLE를 이용하여 결정할 수 있다. 관개침식은 관개 시 수리적 요소와 수리적 전단에 의한 토양입자의 분리를 고려한 것이며, 유출등급은 지면의 경사도와 포화토양의 수리전도율에 의해서 결정될 수 있다.

Lemunyon and Gilbert(1993)에 소개된 인 유출지수는 그 이후 여러 연구자들에 의해서 발전되고 현장에 적용되었다. Sharpley (1995)는 미국 Oklahoma와 Texas 지역에 인 유출지수를 적용하였는데, 인 유출지수에 의해 평가된 인 유실의 취약 지역과 실제 측정된 인의 유실량이 밀접한 관계를 보였다고 보고하였다.

Lemunyon and Gilbert (1993)에 의해서 제시된 인 유출지수에는 지표유출만 고려되었다. 그러나 Sims et al (1998)는 입자가 굵은 토양,

인공적인 배수로, 지하수위가 낮은 지역의 경우에는 지하유출과 용탈이 인의 중요한 이동경로가 되므로, 인 유출지수의 수송인자에 지하유출과 용탈을 고려할 것을 제안하였다.

Heathwaite et al (2000)는 인 유출지수 값을 계산하는 과정에서 기존의 방법인 원천인자와 수송인자 각 항목의 가중치와 손실률(loss rating)을 곱한 후 전체를 합하는 방식 대신에 수송인자 각 항목의 곱과 원천인자 각 항목의 합을 곱하는 새로운 방식이 제시하였다. 이것은 기존의 방식에서 특정 항목 값이 다른 항목에 비하여 상대적으로 너무 큰 경우, 인 유출지수 값이 왜곡된다는 단점을 보완하기 위함이었다.

Gburek et al (2000)은 인 유출지수의 수송인자에 수문학적 재현기간(return period)을 고려한 기여거리(contributing distance)를 추가하였다. 그는 인의 유실은 수체(receiving waters) 주변부에서 집중적으로 발생하므로 수체 주변부가 집중적인 관리 대상지역이 되어야 하며, 그 범위는 폭우사상의 크기에 따라서

달라진다고 하였다.

이외에도, 각 지역의 특성을 고려한 인 유출지수에 대한 연구가 미국의 Florida(USDA, 2000), Pennsylvania(Sharpley et al., 2001), Minnesota(Birr and Mulla, 2001), Maryland(Coale et al., 2002), Delaware(Sims and Leytem, 2002)등 여러 주에서 수행되었다. 표 1과 2는 McDowell et al (2002)에 의해 제시된 Pennsylvania주의 인 유출지수를 예시한 것이다.

III. 맺는말

최근 우리나라에서는 유역차원의 수질오염관리를 위하여 수질오염총량제가 실시되고, 이와 더불어 유역 수질오염부하의 상당 부분을 차지하는 비점오염원의 관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 따라서, 앞으로 제기 될 수 있는 영양오염물질에 대한 수질오염총량제에 대비하여, 유역차원에서 인을 효율적으로 관리하고, 인의 유출에 의한 유역의 수질오염을 저감하는 방안을 마련할 필요가 있다. 이와 관련하여, 인의 유출에 영향을 미치는 원천인자와 수송인자에 대한 제어전략이 필요한데, 이를 위해서 국내 현실에 맞는 인 유출 지수를 개발하기 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Birr, A.S., Mulla, D.J., 2001. Evaluation of the phosphorus index in watersheds at the regional scale. *Journal of Environmental Quality*, 30, 2018-2025.
- Coale, F.J., Sims, J.T., Leytem, A.B., 2002. Accelerated deployment of an agricultural nutrient management tool: The maryland phosphorus site index. *Journal of Environmental Quality*, 31, 1471-1476.
- Correll, D.L., 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 27, 261-266.
- Gburek, W.J., Sharpley, A.N., Heathwaite, L., Folmar, G.J., 2000. Phosphorus management at the watershed scale: A modification of the phosphorus index. *Journal of Environmental Quality*, 29, 130-144.
- Heathwaite, L., Sharpley, A.N., Gburek, W.J., 2000. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. *Journal of Environmental Quality*, 29, 158-166.
- Lemunyon, J.L., Gilbert, R.G., 1993. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *Journal of Production Agriculture*, 6, 483-486.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., Kleinman, P.J.A., 2002. Integrating phosphorus and nitrogen decision management at watershed scales. *Journal of The American Water Resources Association*, 38, 479-491.
- Pote, D.H., Daniel, T.C., Nichols, D.J., Sharpley, A.N., Moore, P.A., Miller, D.M., Edwards, D.R., 1999. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 28, 170-175.
- Sharpley, A.N., 1995. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *Journal of Environmental Quality*, 24, 947-951.
- Sharpley, A.N., McDowell, R.W., Weld, J.L., Kleinman, P.J., 2001. Assessing site vulnerability to phosphorus loss in an agricultural watershed. *Journal of Environmental Quality*, 30, 2026-2036.
- Sharpley, A.N., Sims, D.T., Lemunyon, J.L., Stevens R., Parry, R., 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-149.
- Sims, J.T., Simard, R.R., Joern, B.C., 1998. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *Journal of Environmental Quality*, 27, 277-293.
- Sims, J.T., Leytem, A.B., 2002. The phosphorus site index: A phosphorus management strategy for Delaware's agricultural soils. Available at http://pswmru.arsup.psu.edu/phosphorus/DE_FactSheet.pdf, University of Delaware Cooperative Extension, United States Department of Agriculture.
- USDA, 2000. The Florida phosphorus index. Available at <http://seweb.ga.nrcs.usda.gov/fl>, United States Department of Agriculture.