

인 (P)이 담수 생태계에 미치는 영향

강원대학교 자연과학대학 환경학과 안태석

1. 서론

근래에 산업화와 도시화가 진행됨에 따라 필요한 수자원 요구량은 많아지나, 오염과 공해에 의하여 많은 수자원이 이용 불가능하게 변하고 있다.

이러한 오염의 원인이 되는 물질에는 유기물, 중금속과 같이 유입 즉시 수질을 변화시키거나, 독성을 나타내는 물질들과 질소, 인 등의 영양염류와 같이 유입 즉시 수질상태를 변화시키지 못하나, 생물체들의 증식을 촉진시켜 이들의 유기물질이 늘어나 유기물 투입과 같은 효과를 내는 2차 오염물질이 있다. 후자에 의한 수질변화는 장기간에 걸쳐 일어나므로 자칫 지나치기 쉬우나, 수질변화가 어느 상태를 벗어나면 급격히 변화하므로 많은 수자원이 일시에 악화가 된다. 이러한 영양염류의 유입으로 식물성플랑크톤이 대량으로 증식하는 과정을 부영양화라고 하며, 이 과정을 통하여 용존산소(DO)의 감소, 식물성플랑크톤의 대발생, 부착조류의 증식 등이 관찰된다.

이러한 부영양화의 원인 물질로는 탄소, 질소, 인 등이 Liebig의 최소량의 법칙에 따라 주요한 요인으로 나타나며, 이들 제한 물질(limiting factor)들은 그 양 뿐만 아니라 각 물질들의 비율도 중요한 역할을 담당한다. 탄소는 질소, 인 등보다 훨씬 많은 양이 생물 성장에 필요하나, 탄소가 제한 물질이 되는 경우는 극히 드물다. 질소도 Cyanobacteria가 heterocyst를 이용하여 공기중의 질소를 고정하고, 담수에는 질소가 풍부하여 해양과 달리 제한 물질이 되는 경우도 드물다.

인(P)은 담수 생태계에서 가장 중요한 제한 물질로서, 부영양화의 직접적인 원인 물질이 된다. 또 인은 그 순환과정에 기체상태가 없으므로 담수

에 유입된 인은 저질과 수중에 그대로 남게 되어 급격한 부영양화를 일으킨다(2). 이러한 인의 유입원으로는 도시하수, 합성세제에 포함된 형광제, 비료성분, 삼림토양, 가축의 배설물 등이 있고 국내에서는 최근에 급격히 늘어난 가두리 양식장에서 투입되는 사료도 무시 못할 양이다(3).

2. 담수 생태계에서 인(P)의 동태

인은 orthophosphate(PO_4)의 형태로 존재할 때만 생물체가 직접 이용 가능하다. 그러나, 호수에서는 90% 이상의 인이 생물체내, 또는 사체에 있는 유기인산염으로 존재한다.

대부분의 담수 생태계에서는 이들 인의 측정치를 총인(Total phosphorus)와 무기용존 인산염(orthophosphate)의 양으로 표시되고 있으나, 좀더 세분하면 생물체가 직접 이용 가능한 용존무기인(DIP), ferric phosphate와 calcium phosphate와 같은 입자상 인(sestonic P: PIP), 용존 유기인(DOP) 및 입자상 유기인(POP)으로 세분할 수 있다. 총 인은 부영양화에 좋은 지표가 되며, 기초 생산력에 따른 호수상태에서 보면 빈 영양상태(oligotrophic)에서는 $5 \mu g/l$ 이하, 중영양형태(mesotrophic)에서는 $5-30 \mu g/l$, 부영양화 상태(eutrophic)에서는 $30 \mu g/l$ 이상으로 나타나고 있다. 이러한 총 인의 양은 주위 유역에서 유입되는 양과 저질토(sediment)에서 용출되는 양에 의하여 결정된다.

대부분의 호수에서 DIP의 형태의 인이 5% 미만인 경우가 대부분이다. 인은 수중내에서 금속이온과 반응하여 착염을 형성한다. 일반적으로 인산염의 농도는 이들과 공침할 금속이온이 더 낮은 농도임으로 금속이온의 농도, 이들 반응에 관여하는

다른 음이온들과 pH 등의 상태에 따라 달라진다.

따라서 빈영양상태(oligotrophic)인 호수에서는 총 인 및 DIP의 농도가 수심에 따라 크게 변화하고 있고, 또 봄, 가을의 성층(stratification)이 파괴되면서 물이 섞일 때에도 인의 농도가 거의 일정하게 분포한다. 그러나, 부영양화상태가 되면 상층(epilimnion)에서는 플랑크톤의 증식에 따라 POP가 증가하고 DIP 농도가 감소하고, 성층부 아래의 심층(hypolimnion) 부분에서는 epilimnion으로부터 plankton의 침강, 분해에 의하여 총 인 및 DIP가 증가하여 저질토와 만나는 곳까지 계속적으로 증가한다.

저질토는 물보다 10,000배 정도 높은 농도의 인을 함유하고 있고, 상부수층에서 저질토로 가라앉는 침강현상과 저질토에서 상부수층으로 용출되는 과정이 끊임없이 반복되고 있다(4).

저질토와 상부수층간의 인의 물질이동은 mineral의 평형, 흡착정도, 세균 등 미생물의 활성도 등에 따라 달라진다. 교환율은 확산계수, 효소반응 등에 따라서도 달라진다. 저질토는 산소의 확산이 나빠 저질토 표층부터 몇 mm-몇 cm 정도만 산소가 충분하고, 그 아래 지역은 산소가 거의 없는 지역이다. 이러한 지역의 산화·환원전위가 낮아지면 저질토에 흡착된 인산염이 쉽게 상부수층으로 용출된다. 특히 성층이 형성되어 산소공급이 차단되고 유기물 오염이나, 부영양화로 상부수층의 식물플랑크톤이 왕성히 자라는 지역에서는 이러한 현상이 더욱 더 가속화된다. 가을철에 성층이 깨지면서 저층에 충분한 산소가 공급될 때 ferric phosphate를 형성하여 또 인산염이 PIP를 형성, 침강하는 과정을 되풀이한다.

즉, 부영양화상태인 호수에서 저층에 유기물 분해에 의하여 무산소상태가 되어 황화수소(H_2S)가 생성될 정도이면 이들은 ferric ion과 반응하여 불용성인 황화철(FeS)을 생성하여, hypolimnion에 있는 Fe ion이 소모되면 인산염은 공침할 철분이 없으므로 그대로 용존상태로 상부수층에 남게 된다. 이러한 현상은 호수에 sulfate를 첨가하여 미생물학적으로 H_2S 가 생성되면 더욱 더 저질토에서의 인의 용출을 가속화시키게 된다. 즉, 산소가 풍부한 aerobic 상태에서는 인은 물에서 저질토로 일방적으로 흐르지만, anaerobic 상태에서

는 redox 조건에 따라 평형을 이루어, 상부수층에 인의 농도를 증가시킨다(5).

3. 부영양화와 공중보건

자연적, 인위적인 원인에 의하여 부영양화가 진행되면 가장 먼저 나타나는 현상은 Cyanobacteria의 주기적인 blooming이다. 과거의 화석에서도 이러한 Cyanobacteria의 주기적인 blooming이 관찰되고 있다(6). 이러한 blooming의 원인으로 탄소의 양, 생리학적 관점, Zooplankton의 grazing 등 여러 설이 많으나, 영양염류에 의한 발생설이 가장 유력하다. 일반적인 부영양화 호수에서의 생물상의 변화를 보면, 봄철에 Cyanobacteria의 일시적인 우점과 그 뒤를 이어 Diatom의 blooming이 이어진다. 이때 이들 생물의 농도(밀도)는 겨울철 성층이 지속된 시간, 저층에서의 영양염류의 용출과 혐기성 상태에 따라 결정된다. Cyanobacteria는 생태학적으로 2종류가 있는데, 부유성(planktonic) 및 저서성(benthic)의 2종류가 있다. 수온 약층에 의한 성층이 생성되면, hypolimnion의 물과 저질토 사이에서는 산소의 소모가 일어나 인, 암모니아, 철 등이 용출되어 Cyanobacteria가 왕성히 증식하고, epilimnion에서는 녹조류의 증식과 수온 약층으로 인한 물의 교환이 나빠진 관계로 영양염류가 적어지면서 Cyanobacteria는 spore, cyst를 형성하여 저층으로 가라 앉고, 다시 저층에서 발아하여 gas vacuole 의하여 다시 epilimnion으로 올라오는 등 순환을 계속하다가 가을철 수온 약층이 깨지면서 물이 섞일 때, blooming이 발생하게 된다. 그 뒤로 Actinomycetes 및 diatom의 폭발적인 증가가 따른다(7).

이러한 Cyanobacteria, Actinomycetes 및 diatom의 blooming이 일어나면 이들은 냄새나는 여러 물질, 즉 Geosmin, 2-methylisoborneol 및 저분자량의 유기산 등을 분비한다. 또 Cyanobacteria의 일부 종은 12종류의 exotoxin을 분비한다고 알려져 있다. Anabaena flos-aquae는 VFDF(very fast death factor)라는 alkaloid 물질을, Microcystis aeruginosa는 FDF(fast death factor) 및 SDF(slow death

factor)라는 polypeptide를 생성한다. *Aphanizomenon* spp.는 쌍편모 조류가 분비하는 독소와 유사한 saxitoxin을 분비한다. 이들 독소는 접촉성 피부염, 장염 등을 일으키고, 물고기 및 가축을 폐사시키는 원인이 된다(8).

또 이들 미생물들은 성장하면서 많은 extracellular product (ECP)와 대사물질을 분비한다. 특히 부영양호에서 blooming 시기에는 유기질소함량이 높은 유기물질을 분비하는데, 이들은 상수처리시 염소소독단계(chlorination)에서 발암물질인 THM(trihalomethane)이 생성된다. 이 THM은 ECP외에도 엽록소 등 색소로부터도 생성된다. *Ocillatoria* spp.에 의한 blooming이 일어난 호수물의 Ames test 결과 mutagenicity가 검출되었고, blooming이 없는 상태에서는 검출되지 않았다(7).

4. 부영양화의 회복과 방지

부영양화상태의 호수가 다시 빈영양, 또는 중영양상태로 회복(recovery)될 수 있는가? 일본의 Suwa 호에서 해답을 얻을 수 있다.

일본 중부에 위치한 Suwa 호는 1977년에 총질소량이 최고 2020 ug/l, 총인량이 최고 340 ug/l, 엽록소 *a*의 함량이 년평균 684 mg/m²이었던 부영양상태를 넘어 과영양상태(hypertrophic)이었다. 이때의 dominant 종은 *M. aeruginosa*로서 일부 지역에서는 scum을 형성할 정도였다. 1979년 폐수처리장이 건설되고 영양염류의 30% 이상을 감소시킨 결과 1981년부터 총 인, 총 질소의 농도가 낮아지고 1984년에는 엽록소 *a*함량도 255 mg/m²으로 감소하고 *Microcystis*에 의한 scum도 없어졌다. 이 경우 회복은 Suwa 호의 수리학적 체류시간이 40일 정도여서 가능하였고, 위낙 상태가 나빠 조금의 투자에도 수질이 상당히 좋아진 것처럼 보이나, 1984년의 경우도 매우 높은 부영양화상태이었다. 이 Suwa 호를 빈영양상태로 회복시키기에는 아직도 많은 경제적, 기술적 문제가 따른다(9). 그외 부영양화 방지방법에는 영양염류 제거를 위한 유입수 처리, 유역관리외에도 희석, 확산, 준설, hypolimnion의 방류, 성층파괴, 수초 및 어류 등 biomass의 제거 등이 있다(1).

Table 1. The TSI values of the reservoirs of the Han River.

Lake	Year	TSI(Chl)	TSI(TB)
Soyang	1981	40	
	1982	44	
	1983	38	
	1984	42	
	1985	42	
	1986	41	
	1987	46	49
Paro	1987	50	34
Chunchon	1981	36	
	1982	33	
	1987	45	32
Euiam	1981	41	
	1982	40	
	1987	47	36
Paldang avg.	1987	49	54
Dam Site	1987	50	50
Northern trib.	1987	46	52
Southern trib.	1987	55	55
Chungju	1986	48	

5. 한국의 현실

국내에는 자연호가 거의 없고 흐르던 물을 막아 세운 인공호가 주종을 이루며, 장마시기에 일시에 많은 강우량을 보이는 기후 조건 때문에 이들 인공호들은 용수 공급에 매우 중요한 위치에 있다. 이들 인공호의 부영양화상태를 숫자화한 TSI(trophic state index)를 보면 Table 1과 같다. TSI 지수에는 여러가지가 있으나 여기에서는 엽록소 *a*의 함량과 총 세균수로부터 구하였다(10, 11). 소양호를 비롯한 파로, 춘천, 의암호는 근래에 들어 지수가 높아지고 있고, 팔당, 충주호도 TSI가 50에 육박하고 있다. 또 국내의 인공호는 좁은 계곡에 건설되어 폭이 좁고 길이가 긴 상태로 물의 혼합이 불완전하여 수역에 따라 부영양화상태가 다르다. 소양호의 계곡부분, 의암호의 공지천 유입부, 팔당호의 경안천 유입부 등 물의 혼합이 나쁜 지역은 높은 부영양화상태를 보이고 있다

(12, 13, 14).

이외에도 대청호, 충주호의 dominant가 *M. aeruginosa*이며 (15), 이는 이들 호수가 부영양화 단계에 있음을 의미하며, 소양호에서도 과거 계곡수 유입부에서 발생한 담수 적조외에도 1986년부터 가을철에 *Anabaena* spp.가 출현하는 것은 이 호수가 부영양화의 초기단계에 있음을 보여준다.

6. 결 론

호수의 부영양화는 자연적으로 진행되는 과정이다. 다만 인간활동에 의하여 가속될 뿐이다. 이 부영양화의 원인으로는 인이 가장 중요한 위치를 차지하고 있고, 부영양화의 결과로는 단순한 수질 악화 뿐만 아니라, 우리의 생활 및 생존을 위협하게 된다. 부영양화의 방지에는 여러 방법이 있으나, 가장 좋은 방법은 인의 유입을 막는 것 뿐이다.

참고문헌

- Henderson-Sellers, B. and H.R. Markland. 1987. Decaying lakes. pp. 1-82.
- Wetzel, R.G.. 1983. Limnology (2nd ed.), pp. 255-297.
- Kim, B.C.. 1987. Ph. D. thesis. Seoul National Univ.
- Bostrom, B. et al. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 18: 5-59.
- Sager, M.. 1988. *Arch. Hydrobiol. Beih.* 30: 71-81.
- Vidal, G.. 1984. *Sci. Amer.* 250(2): 48-57.
- Lanza, G.R. and J.K.G. Silvey. 1985. in Microbial processes in reservoirs. pp. 99-120.
- Juttner, F.. 1984. *Appl. Environ. Microbiol.* 47: 814-820.
- Okino, T. and K. Kato, 1987. *GeoJournal.* 14: 373-375.
- Carlson, R.E.. 1977. *Limnol. Oceanogr.* 22: 361-369.
- Aizaki, M. et al. 1980. *Res. Rep. Natl. Environ. Stud.* 23: 13-31 (in Japanese).
- 김범철, 안태석, 조규승. 1988. 한국육수학회지. 21: 153-163.
- 안태석, 이동훈, 김범철, 조규승. 1988. 한국육수학회지.
- 안태석, 이동훈. 1988. 미생물학회지. 26: 230-236.
- Cho, K.S.. 1988. *Proc. 4th Int. Sympo.* pp. 138-146.