

우포늪의 부영양화도 및 유기물 오염도 평가

성진욱 · 김홍섭 · 정승윤 · 이진석 · 박제철
금오공과대학교 환경공학과

Evaluation of Eutrophication and Organic Matter Pollution in Upo Wetland

SEONG, Jin Uk · Heung Seop KIM · Seung Yoon JEONG ·
Jin Seok LEE · Je Chul PARK

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

ABSTRACT

Evaluation of eutrophication and organic matter pollution were investigated in Upo wetland from February 2009 to October 2009. BOD, COD_{Mn}, TOC concentration were in the range of 0.9~13.9, 7.0~16.2mgO₂/L, 5.4~17.5mgC/L, respectively. The range of DOC to TOC in Upo wetland was approximately 56 to 78 %. TP and TN concentration were in the range of 0.060~0.534, 0.920~3.748 mg/L, respectively. DTP and DTN ratio were calculated 44, 76 %, respectively. Oxidation efficiencies calculated from carbon were approximately 5.7 to 40.9% for BOD and 27.9 to 47.6% for COD_{Mn}. The values of TRIX(Trophic index) ranged between 6.9 and 9.3 indicating that Upo wetland is in poor(very high trophic level) condition. Therefore, the Upo wetland needs further efforts to improve water quality.

Key Words : eutrophication, organic matter pollution, oxidation efficiencies, TRIX

서 론

담수 생태계는 세계적으로 중요한 수자원으로 과거부터 인간의 활용 목적에 따라 다양한 방법으로 관리되어 왔다. 흐름이 조절되는 강 생태계와 같은 물리적 변형 사례가 세계적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 부영양화와 같은 수질 및 생태계의 문제점이 지속적으로 대두되고 있다. 더불어 21세기에 접어들어 수질오염 및 토지이용의 증가와 기후변화 등은 수생태계에 있어 가장 큰 위협이 되고 있으며, 그 중에서 호소와 습지(자연늪) 생태계는 가장 취약한 상태에 놓여 있다(Finlayson and Moser, 1992; Dugan, 1993). 잘 보존된 호소나 습지는 생물 다양성을 높여 줄 뿐만 아니라 심미적, 경제적 가치를 제공해주며, 수많은 희귀종과 멸종 위기종을 보호하는 서식처로서의 기능을 수행한다(Barbier *et*

al., 1994). 하지만 대부분의 호소나 습지들은 주변의 농경작지와 인간 활동에 의한 오염물질에 의해 심각한 부영양화의 위협에 놓여 있다. 홍수 조절, 오염된 수질의 정화, 레크레이션 등의 직접적, 경제적 가치를 지닌 호소와 습지는 국가적 차원에서 보호될 필요성이 있는 뿐만 아니라 호소 내 생물들의 생태적 특성과 천이과정에 대한 지속적인 모니터링이 요구되고 있다.

수중에 존재하는 다양한 유기물질들은 토양 유출이나 인간의 활동으로 인한 오염을 통해 수계에 존재하게 된다. 이러한 유기물질들은 여러 단계의 처리과정을 거치면서 거의 제거되지만, 남아있는 용존 유기물질들은 염소나 오존 같은 산화공정에 의해 부산물 생성과 급·배수관망에서의 미생물 재성장과 같은 문제들은 일으킨다. 따라서 수질관리에 있어서 유기물의 오염도를 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 하천과 호수수질관리에서 유기물 오염도를 반영하는 지표로서 생물화학적 산소요구량(BOD: Biochemical Oxygen Demand)과 화학적 산소요구량(COD: Chemical Oxygen Demand)이 널리 이용되고 있다. 국내의 수질관리정책에서도 BOD와 COD는 유기물의 핵심적인 지표로서 활용되고 있다.

그러나 최근 들어 도시화와 산업화에 따라 외부로부터 유입되는 오염원이 다양해지고, 난분해성을 포함한 비점오염원의 유입이 증가하고 있어, 기존의 BOD, COD 중심의 수질관리지표는 오염원의 총량이나 유기물의 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 또한 분석방법이나 온도, 희석배수 등에 따라 산화율의 차이가 크기 때문에 유기물을 대표하는 지수로서 부적절한 측면이 있다. 따라서 장기적인 측면에서 우리나라의 수질관리정책은 기존의 BOD와 COD 중심에서 벗어나 유기물 총량을 관리할 수 있는 TOC로의 지표전환이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내 최대의 자연 습지인 우포늪의 정기적인 수질 모니터링을 통해 합리적인 수질관리대책을 수립하기 위한 수질 관리 목표 설정에 중요한 판단 기준을 제공하기 위하여 BOD, COD_{Mn}, TOC(DOC+POC)를 측정하였고, TOC에 대한 BOD, COD_{Mn}의 산화율을 비교하였으며, 인과 질소를 측정하여 부영양화도를 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 대상지 개요

우포늪은 경상남도 창원군 유어면 일대에 위치한 약 1,278,285 m²의 규모를 자랑하는 국내 최대의 자연 습지이다. 행정구역상으로는 창원군 대합면, 이방면, 유어면의 3면에 걸쳐 위치하고 있으며, 북위 35°33', 동경 128°25'에 위치하는 자연습지로서 200m 이하의 구릉지대이다. 우포늪은 1997년에 세계생태 보전지역 중 생태계 특별보호구역(환경부고시 1997-66호)으로 지정되었으며, 국제적으로도 1998년 3월에 랍사협약 보존습지로 지정되었다. 현재의 우포늪은 육지로 이행하는 생태적 천이의 중간단계로 각종 물질의 전환을 비롯하여 생물상의 종 구성에 있어서도 고도의 다양성을 지니며, 지구상에서 가장 생명부양력이 높은 생태계로서 생물학적, 수리학적, 그리고 경제학적 가치가 높고 인정되어 그 중요성이 매우 높다고 할 수 있다. 수생식물로는 갈대, 줄, 개연꽃, 노랑머리연꽃, 수련, 부들 등이 얇은 물가에 서식하고 있다. 우포늪의 주변 유역은 대부분 산림으로 이루어져 있으며, 우포늪의 상류부에는 지방 2급 하천인 토평천이 유입되고 있다.

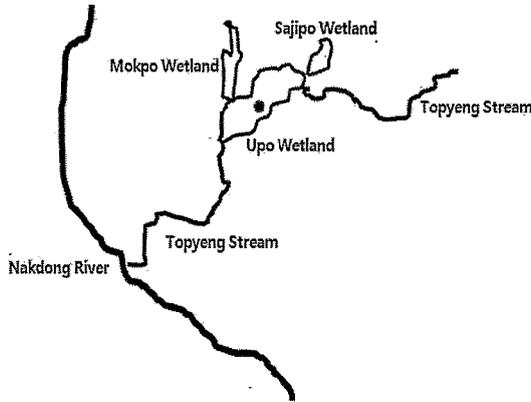


Fig. 1. Watershed and sampling site of the Upo wetland(● : Sampling site).

2. 조사방법

본 연구의 조사기간은 2009년 2월부터 10월까지(총 6회)였으며, 호내 대표지점을 선정하여 시료 채취를 실시하였다. 분석항목으로 수질 기본항목인 수온, pH, DO, 전기전도도, 탁도, SS, Chl.a, 유기물로서 BOD, COD_{Mn}, TOC를, 영양염류로는 TN(DTN), TP(DTP)를 분석하였다. 채수한 시료는 즉시 실험실로 운반한 후 수질오염공정시험방법(환경부, 2005)에 준하여 측정하였고, 이에 제시되지 않는 항목은 Standard Method(APHA, 1999)법에 따라 측정하였다. DOC는 GF/F 유리섬유 여과지로 여과한 여과액을 450 °C에서 미리 태운 10 mL 유리병에 담은 후 HCl(2N)을 첨가하여(pH 2 이하로 맞춤) Air-Zero 가스로 포기시켜 CO₂를 미리 제거한 후, 고온(680 °C)에서 백금 촉매가 내장된 TOC analyzer(Shimadzu TOC-5000A)로 측정하였고, POC는 CHN 원소 분석기를 이용하여 측정하였다. TOC 농도는 측정된 DOC와 POC 농도의 합으로 계산하였다. TOC에 대한 BOD와 COD의 산화율을 계산하기 위하여 BOD 및 COD 농도에 탄소와 산소의 무게비인 12/32를 곱하고, 일반적으로 유기물 산화 시 소비되는 산소(O₂)와 산화되는 탄소(C)의 몰 비인 1.1로 나누어 탄소의 양으로 환산하였다.

부영양화도를 평가하는 지표는 Carlson(1977) 등 현재 여러 가지가 알려져 있다. 본 연구에서 부영양화도를 평가하기 위하여 Trophic Index (TRIX; Vollenweider *et al.*, 1998)를 사용하였다.

$$TRIX = [\text{Log}(\text{Chl} - a \times \text{DO} \times \text{N} \times \text{P}) + 1.5] / 1.2$$

Chl-a : Chlorophyll a(mg/m³)

DO : Absolute deviation of saturation(%)

N : Total nitrogen(mg/m³)

P : Total phosphorous(mg/m³)

결과 및 고찰

1. 수질기본항목

조사 기간 중 현장 및 수질 기본 항목의 월별 측정 결과는 Table 1과 같다. 수온은 5.7~26.3 °C

Table 1. Environmental and water quality parameters of each sampling date

Months	Temp (°C)	pH	DO (mgO ₂ /L)	Cond. (μs/cm)	SS (mg/L)	Turb. (NTU)	Chl.a (mg/m ³)
Feb.	5.7	7.5	13.7	552.0	46.0	47.0	27.0
May	16.5	7.8	5.3	606.0	15.0	19.9	27.2
Jun.	26.3	8.5	7.5	303.0	27.0	13.6	84.3
Jul.	22.3	7.1	3.5	160.2	10.8	10.2	5.1
Aug.	23.5	7.1	2.5	302.5	2.5	1.8	3.9
Oct.	14.8	6.8	0.5	375.6	11.0	12.9	22.7
Mean	18.2	7.5	5.5	383.2	18.7	17.6	28.4

(평균 18.2 °C) 범위로 겨울철에 낮게 나타났고, 여름철에 높은 값을 보였다. pH는 6.8~8.5(평균 7.5) 범위로 대체로 중성에 가까운 경향을 나타내었다. DO는 0.5~13.7 mgO₂/L(평균 5.5 mgO₂/L) 범위로 비교적 큰 편차를 보였고, 수온이 가장 낮았던 2월에 가장 높은 농도로 나타났다. 6월 조사 이후 DO 농도가 계속 줄어드는 현상을 볼 수 있는데, 이는 수생식물이 수면을 가득 덮고 있어 대기와 접촉하는 면적이 거의 없었고, 수생식물의 광합성보다는 호흡량이 더 많아 DO 농도가 계속 줄어드는 것으로 판단된다. 전기전도도는 160.2~606.0 μs/cm(평균 383.2 μs/cm) 범위로 갈수기에 비교적 높았고, 홍수기에 낮은 값을 보였다. SS는 2.5~46.0 mg/L(평균 18.7 mg/L) 범위로 전기전도도와 비교적 비슷한 경향을 나타내었고, 갈수기에는 우포늪의 수심이 매우 얇아(약 0.3 m) 바람에 의한 호내 퇴적질의 재부유에 의해 SS 농도가 높은 것으로 판단된다. 탁도는 1.8~47.0 NTU(평균 17.6 NTU) 범위로 SS와 거의 비슷한 경향을 보였다. 식물플랑크톤 현존량 지표인 Chl.a는 3.9~84.3 mg/m³(평균 28.4 mg/m³) 범위로 갈수기에 비교적 높았고, 홍수기에 낮은 값을 보였다. 이는 갈수기에는 호내 체류시간이 길고, 식물플랑크톤이 증식할 수 있는 환경 조건이 잘 이루어졌으나, 홍수기에는 체류시간이 짧아 식물플랑크톤이 증식할 수 없는 환경 조건이 이루어졌을 것으로 판단된다.

2. 유기물 및 영양염류 항목

조사 기간 중 유기물 항목 및 영양염류의 월별 측정 결과는 Table 2와 같다. BOD 농도는 0.9~13.9 mgO₂/L(평균 6.4 mgO₂/L) 범위로 나타났고, COD_{Mn} 농도는 7.0~16.2 mgO₂/L(평균 12.0 mgO₂/L) 범위를 보였다. TOC는 5.4~17.5 mgC/L(평균 10.8 mgC/L) 범위로 나타났다. TOC 중 약 68 %를 DOC가 차지하는 것으로 조사되었다. 호수에서 DOC 농도는 호수의 생산력이나 영양상태에 따라 크게 좌우되며, 부영양화 될수록 DOC의 농도가 높게 나타난다. 빈영양호로 분류되는 미국의 Lake Superior의 평균 DOC 농도는 호내에서 1.1 mgC/L(Maier *et al.*, 1978), 일본의 부영양호인 Lake Nakanuma의 평균 DOC 농도는 4.4 mgC/L(Ochiai *et al.*, 1980), 중영양호인 Lake Kizaki의 평균 DOC 농도는 2.2 mgC/L(Hama *et al.*, 1980)였다. 본 조사에서는 평균 7.3 mgC/L로 조사되어 부영양호 수준을 보이는 것으로 나타났다. TP는 0.060~0.534 mg/L(평균 0.238 mg/L) 범위를 보였고, 이 중 DTP가 44%로 나타나 입자성 인이 더 많이 존재하는 것으로 나타났다. TN은 0.920~3.748 mg/L(평균 2.269 mg/L) 범위로 보였고, 이 중 DTN이 76 %로 질소의 대부분은 용존성으로 존재하는 것으로 나타나, 인과 반대의 경향으로 나

Table 2. Chemical and biological water quality of each sampling date

Months	BOD (mgO ₂ /L)	CODMn (mgO ₂ /L)	TOC (mgC/L)		Phosphorus (mg/L)		Nitrogen (mg/L)	
			DOC	POC	TP	DTP	TN	DTN
Feb.	8.5	11.9	6.9	5.5	0.138	0.051	2.050	1.072
May	7.1	14.3	13.7	3.8	0.357	0.250	2.419	1.751
Jun.	6.4	13.5	6.7	4.7	0.173	0.052	3.728	3.064
Jul.	1.4	8.9	3.6	2.8	0.164	0.144	2.740	2.460
Aug.	0.9	7.0	4.0	1.4	0.060	0.026	0.920	0.676
Oct.	13.9	16.2	8.7	2.9	0.534	0.107	1.755	1.322
Mean	6.4	12.0	7.3	3.5	0.238	0.105	2.269	1.724

타났다. 일반적인 경향과 다르게 우포늪에서는 홍수기보다 갈수기에 더 높은 농도를 보였는데, 이는 우포늪의 경우 호내 농도가 유입수에 비해 농도가 더 높았고, 호내 보다 낮은 농도의 유입수가 강우기에 호내로 많은 수량이 유입되어 희석 작용을 일으켰을 것으로 판단된다.

3. TOC에 대한 BOD, COD_{Mn}의 산화율 비교

조사 기간 중 TOC에 대한 BOD, COD_{Mn}의 산화율 계산 결과는 Table 3과 같다. BOD의 산화율은 5.7~40.9 % (평균 18.4 %), COD_{Mn}의 산화율은 27.9~47.6 % (평균 40.0 %)의 범위로 나타났다. COD_{Mn}의 산화율이 BOD의 산화율보다 약 2배 이상의 산화율을 보였고, 조사 시기 별 편차도 비교적 적게 나타났다. 기존의 연구에 따르면 국내 몇 개 호수에서의 TOC에 대한 BOD 산화율이 약 18 %, COD_{Mn}의 산화율이 약 38 %로써 본 연구 결과에서 조사된 결과와 거의 비슷한 범위를 보이는 것으로 나타났다(Choi *et al.*, 2004). 따라서 현재 BOD와 COD_{Mn}를 이용한 유기물 지표는 단지 20 %, 40 % 정도만 반영되고 있어, 상당부분이 과소 평가되고 있음을 알 수 있으며, 향후 TOC 지표로의 전환이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 3. Decomposition efficiencies in Upo wetland

Months	BOD/TOC (%)	COD _{Mn} /TOC (%)
Feb.	23.4	32.7
May	13.8	27.9
Jun.	19.1	40.4
Jul.	7.5	47.4
Aug.	5.7	44.2
Oct.	40.9	47.6
Mean	18.4	40.0

Table 4. Evaluation of eutrophication by TRIX

Months	TRIX index	Trophic state
Feb.	8.7	Poor
May	8.9	Poor
Jun.	9.3	Poor
Jul.	7.9	Poor
Aug.	6.9	Poor
Oct.	8.0	Poor
Mean	8.3	Poor

4. 부영양화도 평가

조사 기간 중 TRIX 지표를 이용한 우포늪의 부영양화도 평가 결과는 Table 4와 같다. TRIX 지수는 6.9~9.3의 범위(평균 8.3)로 나타났으며, 상대적으로 강우기에 낮고, 갈수기에 높은 것으로 나타났다. 이는 TRIX 지표 계산시 이용되는 인과 질소의 농도 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 국가장기생태연구사업(환경부, 2009)에서 조사된 TRIX 지표를 이용한 우포늪의 TRIX 지수는 평균 5.04(보통)로 나타나 본 조사와 약간의 차이를 보였지만, 전체적으로 우포늪은 보통에서 악화의 상태를 보여 향후 이를 개선하기 위한 대책이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

결 론

국내 최대의 자연 습지인 우포늪을 대상으로 2009년 2월부터 10월까지의 부영양화도 및 유기물 오염도 평가 결과는 다음과 같다.

- 유기물 항목의 경우, BOD와 COD_{Mn} 농도는 각각 0.9~13.9 mgO₂/L(평균 6.4 mgO₂/L), 7.0~16.2 mgO₂/L(평균 12.0 mgO₂/L)로 나타났고, TOC 농도는 5.4~17.5 mgC/L(평균 10.8 mgC/L) 범위로 나타났다. TOC 중 약 68 %를 DOC가 차지하여 대부분 용존성 형태로 존재하는 것으로 나타났으며, DOC 평균 농도는 7.3 mgC/L로 부영양화 수준을 보이는 것으로 조사되었다.
- 영양염류 항목의 경우, TP와 TN 농도는 각각 0.060~0.534 mg/L(평균 0.238 mg/L), 0.920~3.748 mg/L(평균 2.269 mg/L)로 나타났고, TP와 TN에 대한 DTP, DTN의 비율은 각각 44 %, 76 %로 나타나, 인은 입자성이, 질소는 대부분은 용존성이 더 많은 부분을 차지하는 것으로 조사되었다.
- 수질항목 전체적으로 홍수기보다 갈수기에 더 높은 농도를 보였는데, 이는 우포늪의 경우 호내 농도가 유입수에 비해 농도가 더 높고, 호내 보다 낮은 농도의 유입수가 강우기에 호내로 많은 수량이 유입되어 희석 작용을 일으켰을 것으로 판단된다.
- TOC에 대한 BOD, COD_{Mn}의 산화율은 각각 18.4 %, 40.0 %로 조사되어 기존에 연구된 조사 결과와 비슷한 범위를 보였다.
- TRIX 지표를 이용하여 우포늪의 부영양화도를 평가한 결과, 악화의 상태를 보여 향후 이를 개선하기 위한 대책이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 환경부. 2005. 수질오염공정시험방법.
- 환경부. 2009. 국가장기생태연구사업 2단계 최종보고서.
- APHA, AWWA and WPCF. 1999. Standard method for examination of water and wastewater. 20th edition. New York. USA.
- Barbier, E. B., J. C Burgess and C. Folke. 1994. Paradise lost the ecological economics of biodiversity. Earthscan, London. pp. 267.
- Carlson, R. E. 1977. A trophic state index for lakes. Limnol. Oceanogr. 22: 361-369.
- Choi, K. S., B. Kim, J. H. Park, Y. H. Kim and M. Jun. 2004. Temporal and vertical variability in the relationship among organic matter indices in a deep reservoir ecosystem, Lake and Reserv. Manage. 20: 130-140.
- Dugan, P. J. 1993. Wetland in danger. Beazley M., London. p. 187.
- Finlayson, M. and M. Moser. 1992. Wetlands, facts on file. Oxford University Press. Oxford. p. 224.
- Hama, T. and N. Handa. 1980. Molecular weight distribution and characterization of organic matter and from Lake Water. Arch. Für Hydrobil. 90: 106-120.
- Maier, W. J. and W. R. Swain. 1978. Organic carbon-A nonspecific water quality indicator for Lake Superior, Wat. Res. 12: 523-529.
- Ochiai, M., and T. Hanya. 1980. Change in monosaccharide composition in the course of decomposition of dissolved carbohydrates in Lake Water, Arch. Für Hydrobil. 90: 257-264.
- Vollenweider, R. A., F. Giovanardi, G. Montanari and A. Rinaldi. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. Environmet. 9: 329-357.

요 약

국내 최대의 자연 습지인 우포늪을 대상으로 2009년 2월부터 10월까지의 부영양화도 및 유기물 오염도 평가 결과, 유기물 항목의 경우 BOD와 COD_{Mn} 농도는 각각 0.9~13.9 mgO₂/L(평균 6.4 mgO₂/L), 7.0~16.2 mgO₂/L(평균 12.0 mgO₂/L)로 나타났고, TOC 농도는 5.4~17.5 mgC/L(평균 10.8 mgC/L) 범위로 나타났다. TOC 중 약 68 %를 DOC가 차지하여 대부분 용존성 형태로 존재하는 것으로 나타났으며, DOC 평균 농도는 7.3 mgC/L로 부영양화 수준을 보이는 것으로 조사되었다. 영양염류 항목의 경우, TP와 TN 농도는 각각 0.060~0.534 mg/L(평균 0.238 mg/L), 0.920~3.748 mg/L(평균 2.269 mg/L)로 나타났고, TP와 TN에 대한 DTP, DTN의 비율은 각각 44 %, 76 %로 나타나, 인은 입자성이, 질소는 용존성이 더 많은 부분을 차지하는 것으로 조사되었다. 수질항목 전체적으로 홍수기보다 갈수기에 더 높은 농도를 보였는데, 이는 우포늪의 경우 호내 농도가 유입수에 비해 농도가 더 높고, 호내 보다 낮은 농도의 유입수가 강우기에 호내로 많은 수량이 유입되어 희석 작용을 일으켰을 것으로 판단된다. TOC에 대한 BOD, COD_{Mn}의 산화율은 각각 18.4 %, 40.0 %로 조사되어 기존에 연구된 조사 결과