

주암호의 수질변화 및 COD 및 Chl-a 농도의 상관관계 분석

양형재 · 김병익*

국립환경과학원 환경총량관리연구부 · *국립환경과학원 한강물환경연구소

(2006년 6월 16일 접수, 2006년 12월 22일 채택)

The Trend of Water Quality Variations and Correlation between COD & Chl-a Concentration for the Juam Reservoir

Hyungjae Yang · Byungik Kim*

Environmental Cap System Research Department, National Institute of Environmental Research

*Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT : The Juam reservoir, hydrological investigations on the catchment environment and pollutants inflow have been carried out simultaneously. The average COD in 1992 observed in Juam reservoir was 2.3 mg/L, and reached to 2.72 mg/L in 2005 that is increased 0.23 mg/L for 13 years. Following this trend, the water quality is expected to deteriorate down to the second-grade water quality exceeding the 3 mg/L limit in 2010. The concentration exceeding the value of 46.5 mg/m³ will not guarantee the water quality better than 2nd-grade drinking water resource since correlative between COD and chl-a is $y=0.0732x+2.5953$ its $r^2=0.8141$. This result will help control the algal growth in the future by taking into account the expected value as a monitoring target.

Key Words : Juam Reservoir, COD, Chl-a

요약 : 연도별 COD 변화 추세선에서 1992년도의 COD농도 2.31 mg/L에서 2005년 2.72 mg/L로 13년간 0.23 mg/L증가한 것으로 분석되었다(실제 분석결과는 2.3 mg/L에서 2.5 mg/L로 0.2 mg/L증가). 추세선에서 2010년에는 COD농도가 3.0 mg/L 이상으로 나타나지만 상관도는 매우 낮다(결정계수 $r^2=0.3669$). 주암호 댐 앞의 Chl-a와 COD농도의 상관관계는 $r^2=0.8141$ 로 높았으며, Chl-a농도가 5.5 mg/m³ 이하일 때 호소 생활환경 2급수인 COD농도 3 mg/L 이하를 유지하나, Chl-a 농도가 46.5 mg/m³을 초과할 경우에는 상수 3 mg/L 이하를 유지하기 힘든 것으로 나타나 하절기 안정적인 수질을 유지하기 위해서는 조류의 제어가 증대한 인자임을 알 수 있었다.

주제어 : 주암호, COD, Chl-a

1. 서론

주암호 6개 지점별 상·중·하층의 연간 COD 농도의 변화양상을 조사하고, 13년간의 변화 양상을 토대로 앞으로의 COD 농도를 예측하여 적절한 상수원수 관리에 필요한 자료로 활용할 수 있도록 하는데 중점을 두고 연구하였다. 지표수를 상수원으로 하는 우리나라 특성상 수질 현안 문제의 하나로 대두되어 있는 것이 조류의 이상발생으로 인한 수질 악화문제이다.^{1~3)} 상수원에서 우려의 대상이 되는 것이 독소나 이취미 및 염소소독부산물과 같은 것이지만,^{4,5)} 본 연구에서는 COD농도와 Chl-a 농도와의 상관관계에 대한 고찰도 연구 대상으로 하였다. 주암호 6개 측정지점 모두 9월 이후에는 수질이 악화되는 것으로 나타나 이때의 COD 농도증가의 원인은 조류의 발생에 따른 비용해성 COD농도의 증가에 기인한다는 인상적인 결과를 팔당호와 비교하여 그 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 현장 측정항목

현장 수질측정항목인 수온, pH, 전기전도도 및 DO는 Hydro-net surveyer 4와 YSI 6600을 이용하였으며, 투명도는 Secchi disc를 사용하여 측정하였다.

2.2. 실험실 측정항목

주암호 6개 정점에서는 월 2회, 옥정호 등 5개 호소는 1개 정점에서는 월 1회씩 Chl-a 및 영양염류 분석을 위해 시료를 채취하여 얼음상자에 냉장 보관하여 실험실로 이송한 후, COD, BOD 및 SS는 수질오염공정시험법에 따라 분석하였다. 용해성 및 비용해성 COD는 0.45 μm 여과막을 통과한 여액과 잔사에서 분석하여 구하였다.

2.3. 조류의 동정 및 계수

조류 동정 및 세포수 계수를 위하여 표층수를 채수하고 채

† Corresponding author

E-mail: hyungyang@hanmail.net

Tel: 032-560-7579

Fax: 032-561-7087

수 후 Lugol 시약으로 고정하여 실험실로 옮겨 검경시까지 냉장고에 보관하였다. 조류를 계수하는 경우에는 광학현미경으로 100배 또는 200배 배율로 검경하였고, 동정이 필요한 경우에는 1,000배까지 확대하여 검경하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지점별 COD 양상

1) 댐 앞

측정망운영을 위한 수질조사에서, 2002년도 COD농도는 9월월부터 늦가을까지 장기간 조류가 많이 발생하여 9월 12일~11월 8일까지 조류주의보가 발령되었고 이와 함께 상층(표층에서부터 50cm 깊이까지 혼합한 시료) COD농도는 8월까지 안정적인 농도를 유지하다 9월 이후 급격히 높아지면서 수질조사시마다 큰 변동을 나타내어 연평균 농도는 3.5 mg/L로 높은 수치를 나타내었다.

연평균 상층 COD 농도가 3.88 mg/L로 비교적 높은 농도이며 시료채취 날짜에 따라 약 10%의 차이로 나타났다. 주암호 6개 조사지점 중 COD농도가 가장 낮은 댐 앞 상층은, 1월부터 7월까지 평균농도는 2.60 mg/L로 호소의 생활환경수질기준으로 2급수를 유지하였으나 조류가 발생하기 시작한 8월부터는 농도가 증가하여 월평균치(댐 앞, 상층)는 8월 4.18 mg/L, 9월 4.19 mg/L이었고, 10월에는 8.27 mg/L까지 증가하였다 11월에는 5.24 mg/L로 전월에 비해 37% 정도 감소하였으나(Fig. 1), 7월까지의 평균 농도에 비해 2배 이상 증가한 높은 농도였다.

중층(수심 약15m 정도)의 농도는 9월까지 거의 변동 없이 일정한 농도를 유지하다 10, 11, 12월 평균농도가 4.8, 3.9 및 3.1 mg/L로 다소 높은 농도를 보였다. 조류발생시 수심별 조류 농도조사 결과에서 수심 10 m 이하에서는 조류농도가 급격히 낮아지는 현상을 감안하면 이것은 침강하는 사멸된 조류의 영향으로 생각되며, 연평균 농도는 2.9 mg/L로 나타났다.

한편, 하층(호소바닥에서 약 50 cm 상층부)의 매주 1회 분석한 월평균 농도는 모두 3.0 mg/L 이하로 거의 일정한 농도를 유지하였으며, 연평균 농도는 2.6 mg/L로 조류발생 시

기에도 농도증가에 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

조류의 영향이 없었던 8월까지의 평균농도에 비해 조류가 발생하여 농도 증가가 나타났던 10월 이후의 COD평균농도는 16% 정도 증가한 농도였다.

상층의 연평균 COD농도는 3.5 mg/L이지만, 상·중·하층의 전체평균치는 3.0 mg/L로 상수원수 2급수를 겨우 만족하는 농도이며, 장마에 의한 COD 부하량의 증가, 조류의 영향을 제외한 용해성 COD로서 판단하면 주암호 댐 앞의 COD농도는 9월까지의 평균인 2.5 mg/L 정도로 상수원수 2급수로 충분한 수질로 평가할 수 있다.

2) 기타 지점

곡천교 지점(상층)의 COD농도는 3월부터 11월까지(11회 측정) 모두 3 mg/L 이상 이었으며, 8월부터는 5 mg/L 이상으로 나타나 조류의 영향으로 판단되며 댐 앞에 비해 조류가 일찍 발생하는 것으로 보인다. 3월~7월까지의 평균농도는 3.43 mg/L로 비교적 수질이 양호하였으나 8월 이후의 평균농도는 5.42 mg/L, 연평균 4.3 mg/L로 높은 농도를 나타내었다.

문덕교 지점(상층)의 연간 COD 농도변화도 곡천교와 비슷한 양상으로, 7월까지의 평균농도는 4.29 mg/L이었으나, 이후 8월부터 11월까지의 평균은 5.24 mg/L이었다. 전반기에도 높게 나타난 것은 6월에 비점오염원으로부터의 일시에 유입된 오염물질 부하로 인해 6.77 mg/L로 증가하는데 기여했던 것으로 보이며, 연평균은 4.71 mg/L로 주암호 6개 지점 중 가장 수질이 나쁜 것으로 나타났다.

북내교 지점도 같은 양상으로 연평균 농도는 4.59 mg/L인데, 7월까지의 평균은 4.32 mg/L였으나 8월부터 증가하여 8월 이후의 평균농도는 6.55 mg/L였다.

신평교 지점은, 3월까지 3 mg/L 이하를 유지하였으나 6월 이후로 계속 농도는 증가하여 9월에는 5.48 mg/L로 연중 가장 높았다. 주암호 6개 측정지점 중 가장 양호한 수질(상층의 경우 임)을 나타내었다.

이상과 같이 Fig. 1의 측정결과에 대해 고찰해 보면, 주암호 6개 측정지점 모두 9월 이후에는 수질이 악화되었음을 알 수 있었고 이때의 COD농도 증가의 원인은 조류의 발생에 따른 비용해성 COD농도의 증가에 기인했던 것으로 생각되

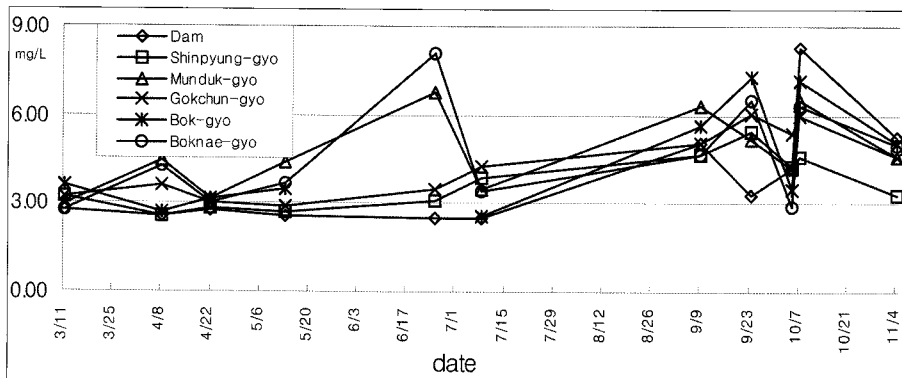


Fig. 1. Daily COD concentration of 6 sampling sites at Juam reservoir.

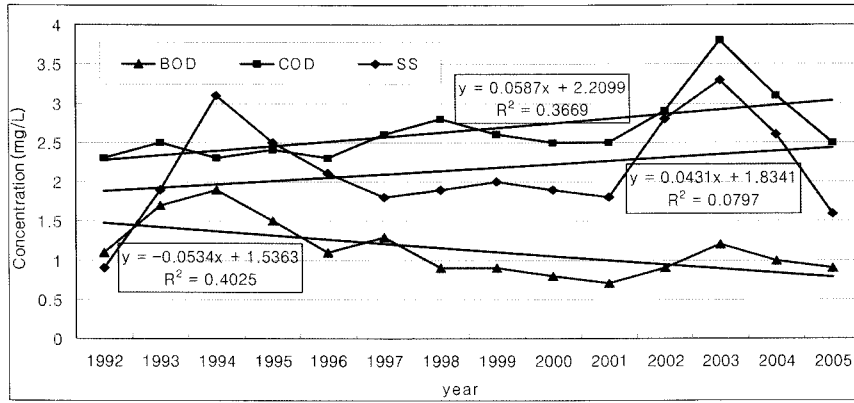


Fig. 2. Variations of BOD, COD and SS concentration(1992~2005).

며, 2002년도에는 예년에 비해 조류가 많이 발생하여 특히 상층부의 COD 농도 증가에 상당히 기여했던 것으로 판단된다.

3.2. 14년간의 COD농도변화 분석

1992년~2005년까지 14년간 COD 평균농도는 1.14 mg/L 이었다. 그림의 추세선($y = 0.0587x + 2.2099$)에 따르면, 1992년도의 COD농도 2.31 mg/L에서 2005년 2.72 mg/L로 13년간 0.23 mg/L증가한 것으로 나타나(실제 분석결과에서는 1992년 2.3 mg/L에서 2005년 2.5 mg/L로 13년간 0.2 mg/L 증가) 2010년에는 COD농도가 3.0 mg/L 이상으로 나타나지만 Fig. 2에서와 같이 결정계수 $r^2 = 0.3669$ 로 상관도는 낮다. 그러나 COD 농도 증가에 대비하기 위해서는 주암호로 유입되는 축산분뇨의 적정관리, 생활오수의 처리 그리고 6월부터 9월까지 우기에 비점오염원으로부터의 오염물질 유입 방지 등 대책을 강구하여야 할 것으로 판단된다.⁷⁾ 주암호는 연간 광주광역시 5천만, 목포시 3.5천만, 나주시 5백만 그리고 화순군에서 3.4만³을 상수원수로 사용하고 있다.

3.3. 용해성 및 비용해성 COD

COD농도의 증가 원인이 조류의 발생에 기인한 것인지를 알아보기 위해 재분석을 통해 용해성 COD농도를 측정하였다. Table 1은 주암호 댐 앞의 용해성 및 비용해성 COD 농도의 구성을 알아보기 위해 분석한 결과치를 표시한 것이다.

Table 1의 2차 분석결과에서, 상층의 COD농도 9.16 mg/L 일 때, 비용해성 COD는 5.97 mg/L로 전체COD의 65%를 포함하고 있는 것으로 나타났다(용해성 COD는 3.19 mg/L로 35%). 또한 조류의 양이 적은 중층에서는 COD농도 4.18 mg/L이었고 비용해성 COD농도는 1.59 mg/L로 38% 정도로 조류가 다량 함유된 상층에 비해 매우 낮은 비율을 차지하고 있는 것으로 조사되었다.

또한 수심 30~40 m 정도인 하층에서는 COD농도는 2.69 mg/L로 나타났는데, 조류가 발생하지 않고 사멸된 조류의 일부가 존재할 것으로 예상되는 지점이며 1월~7월까지의 상층 평균농도(2.66 mg/L)와 거의 같은 농도였다. 이때 비용해성 COD농도는 0.5 mg/L 정도로 1.9% 정도에 불과하였고, 대부분이 용해성 COD 농도(2.19 mg/L)인 것으로 나타났다.

Table 1. Soluble and insoluble COD concentration(Juam reservoir)

Experiment		KMnO ₄ consumption	COD (mg/L)
	date	blank	0.3
surface	experiment 1(10/21)	COD(mg/L) (raw)	4.75
	experiment 2(10/22)	COD(mg/L) (x2)	2.6
	"	SCOD(mg/L) (x2)	1.1
	"	ICOD(mg/L)	5.97
middle	experiment 1(10/21)	COD(mg/L) (raw)	2.65
	experiment 2(10/22)	COD(mg/L) (raw)	2.4
	"	SCOD(mg/L)	1.6
	"	ICOD(mg/L)	1.59
bottom	experiment 1(10/21)	COD(mg/L) (raw)	1.8
	experiment 2(10/22)	COD(mg/L) (raw)	1.65
	"	SCOD(mg/L)	1.4
	"	ICOD(mg/L)	0.5

COD = ICOD + SCOD

ICOD = 비용해성(insoluble) 즉, 0.45 μm 여과지를 통과하지 못한 것
SCOD = 용해성(soluble) 즉, 0.45 μm 여과지를 통과한 것.

3.4. VSS 및 FSS 농도

한편, 고형물질 중 상층과 중층에서는 거의 모두 휘발성부유물질(VSS: Volatile Suspended Solids)이었으며, 하층에서는 강열 잔류부유물질(FSS: Fixed Suspended Solids)의 비율이 3회 측정에서 각각 36%, 45% 및 49%로 나타나 휘발성부유물질과 거의 비슷한 양으로 포함되어 있었다.

상층에는 많은 조류가 발생되어있으며, 중층에는 이들 일부 사멸되고 있는 조류 및 사멸된 조류의 영향으로 대부분이 휘발성부유물질 그리고 하층에서는 대부분 고형물질이며 사멸된 조류의 일부도 포함된 것으로 보인다.

이상과 같이 여과지를 통과한 여액의 COD농도 분석으로 비용해성 COD농도 그리고 부유물질 중에 포함된 휘발성부유물질(VSS: Volatile Suspended Solids)의 양과 강열잔류부유물질(FSS: Fixed Suspended Solids)의 양을 측정함으로써 조류에 의한 COD농도의 증가를 확인할 수 있었다(Table 2).

Table 2. Suspended solids concentration(Juam reservoir)

		TSS(mg/L)	VSS(mg/L)	FSS(mg/L)
10/7	surface	12.3	12.6	-0.3
	middle	6.2	6.6	-0.4
	bottom	2.8	1.8	1.0
10/14	surface	5.8	6.1	-0.3
	middle	4.2	4.3	-0.1
	bottom	3.1	1.7	1.4
10/21	surface	12.0	12.4	-0.4
	middle	4.4	4.7	-0.3
	bottom	4.1	2.1	2.0

- VSS(Volatile Suspended Solids) : TSS를 550℃에서 15분간 태웠을 때 휘산(揮散)된 물질
- FSS(Fixed Suspended Solids) : TSS를 550℃에서 15분간 태웠을 때 남는 물질
- z○ TSS(Total Suspended Solids) : VSS + FSS

3.5. COD농도와 Chl-a 농도와의 상관관계

1) 주암호

Chl-a 농도변화에 따른 COD농도의 변화 양상을 확인하기 위해 주암호에서 2002년 1년간 측정된 값으로 COD농도와 Chl-a 농도의 상관관계를 분석한 결과, Chl-a농도의 증가에 따라 COD농도가 증가한 양상을 확인할 수 있으며, 추세선 $y = 0.0732x + 2.5953$ 에서 상관관계는 매우 높아 결정계수 $r^2 = 0.8141$ 로 나타났다(Fig. 3).

주암호1(땀앞)지점의 Chl-a 농도 증감에 따라 COD농도에 주는 영향을 알아보기 위한 Fig. 3에서, 주암호에서 조류가 발생하는 시기의 COD농도는 Chl-a농도가 5.5 mg/m³ 이하일 때 호소 생활환경 2급수인 3 mg/L 이하를 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 Chl-a 농도가 46.5 mg/m³을 초과할 경우에는 상수원수 3급 수질인 COD농도 6 mg/L 이하를 유지하기 힘든 것으로 나타나, 하절기 동안 안정적인 호소수질을 보전하기 위해서는 조류의 적절한 제어가 중대한 인자임을 알 수 있다. 주암호는 팔당호와는 달리 Chl-a 농도와 COD 농도와 상관도가 매우 커서 Chl-a의 비용해성 COD농도의 증가가 COD농도의 증가에 직접적인 영향을 주고 있다.

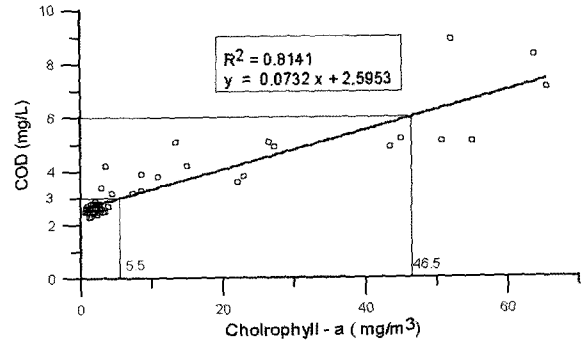


Fig. 3. Correlationship between COD and Chl-a concentration(Juam reservoir).

팔당호는 같은 날의 COD와 Chl-a농도와의 상관도는 거의 없으며 시차를 두고 Chl-a농도의 변화에 따라 COD의 변화가 나타나고 있는 것으로 생각되나, 주암호에서는 같은 시료의 농도에서 상관도가 매우 높은 것으로 나타났다(Fig. 4).

조류가 발생하고 남조류가 우점종으로 나타나던 9월까지의 Chl-a 농도와 조류의 세포수도 일정하게 증가하였으나, 10월부터는 조류의 세포수는 감소하여도 Chl-a농도와 COD농도는 증가하였으며, 11월 이후의 COD농도는 감소하지 않고 년 평균치의 약 2배에 이르지만 지속적인 온도의 저하에 따른 조류의 사멸로 COD농도는 점차 감소하는 양상을 보여주었다.

2) 팔당호

주암호에서 Chl-a 농도의 변화에 따라 COD농도가 큰 영향을 받고 있다는 인상적인 결과를 다른 호소와 비교하여 보았다. Fig. 5는 2001년 팔당호의 1년간 COD와 Chl-a농도의 변화를 나타낸 그림이다.

그림에서 Chl-a의 증가에 따라 일정하게 COD농도도 증가하고 있음을 볼 수 있지만, 자세히 살펴보면 그 변화의 양상은 그렇게 나타나고 있지만 같은 날이 아닌 1주일 후에 여러 차례 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 상관도를 살펴보면, Fig. 6의 추세선 $y = 0.0732x + 2.5953$ (결정계수 $r^2 = 0.09$)으로 나타나 상관관계는 거의 없는 것으로 보는 것이 타당하다. 그렇지만 같은 날의 2개 항목의 농도는 상관관

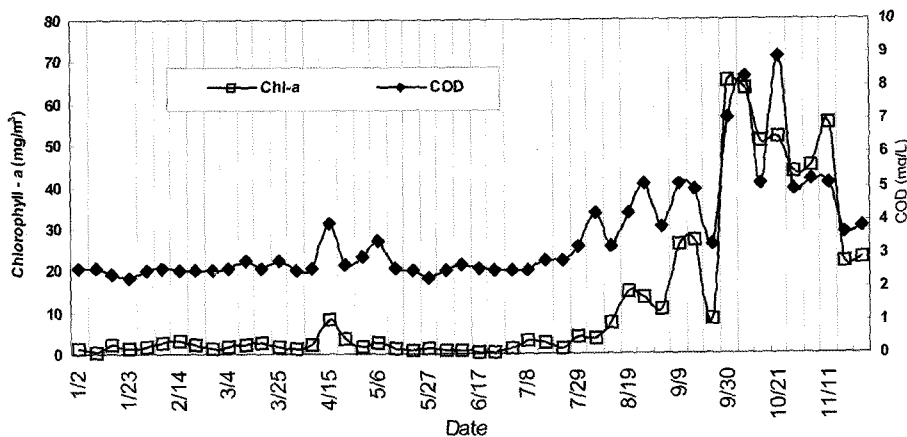


Fig. 4. Variations of COD and Chl-a concentration(Juam reservoir).

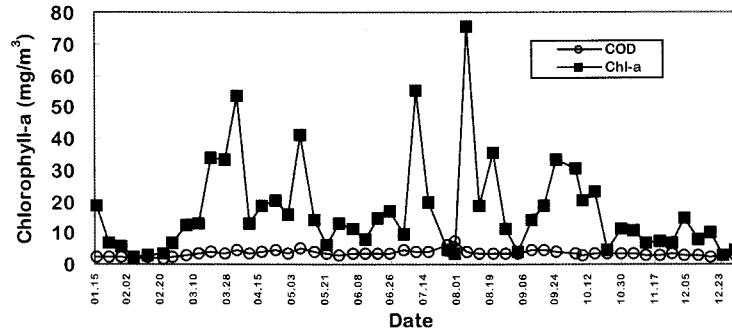


Fig. 5. Correlationship between COD and Chl-a concentration(Paldang reservoir).

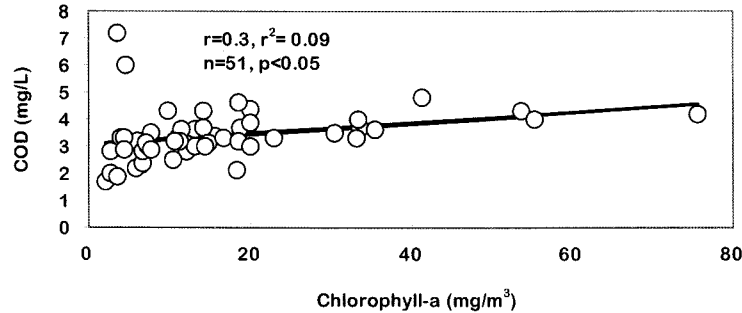


Fig. 6. Correlationship between COD and Chl-a concentration(Paldang reservoir).

계가 없지만 시차를 두고 보면 상관관계가 있는 것으로 평가할 수 있다.

팔당호는 하천형 호수로 Chl-a 농도에 미치는 큰 인자는 강우인 것으로 판단된다. 주암호는 형태, 평균수심 등 팔당호와와는 여건이 다르기 때문에 보이며 일반적으로 소양호, 대청호 등 호소형 호수의 경우 강우량이 증가하는 하절기에 Chl-a 농도가 높아지는 경향을 보이므로 건기와 우기로 나누어 검토하는 것도 좋을 방법일 것이다.⁷⁾

3.6. 가을철 COD농도 증가의 원인

위의 COD농도 분석에서 설명한 것처럼, 주암호 댐앞 상층과 중층의 COD중 65%가 비용해성 COD이었으며, 고형물질은 모두 휘발성부유물질(VSS: Volatile Suspended Solids)이었다. 하층의 고형물질은 휘발성고형물질과 강열잔류부유물(FSS: Fixed Suspended Solids)의 비율이 비슷한 것으로 나타나, 2002년 8월 이후의 COD농도 증가는 조류의 발생에 의한 것으로 평가할 수 있다. 그러나 9월 이후 조류의 세포수의 감소에도 COD농도가 높게 나타난 것은 수운의 감소와 함께 남조류보다 매우 큰 와편모조류인 *Peridinium*이 많이 발생했기 때문으로 보인다. 주암호에서 나타난 *Peridinium*은 원형에 가깝고 상부가 약간 뾰족하고 직경이 50~60 μm로, *Microcystis*의 2~8 μm 비해 매우 커 Chl-a 및 COD농도 증가에 상당히 기여했던 것으로 판단된다.

4. 결론

- 1) 연도별 COD 변화 추세선에서 1992년도의 COD농도 2.31

mg/L에서 2005년 2.72 mg/L로 13년간 0.23 mg/L 증가한 것으로 분석되었다(실제 분석결과는 2.3 mg/L에서 2.5 mg/L로 0.2 mg/L 증가). 추세선에서 2010년에는 COD농도가 3.0 mg/L 이상으로 나타나지만 상관도는 매우 낮다(결정계수 $r^2 = 0.3669$).

2) 상층의 COD농도 9.16 mg/L일 때, 비용해성 COD는 5.97 mg/L로 전체COD의 65%를 차지하였다(용해성 COD는 3.19 mg/L로 35%). 또한 조류의 양이 적은 중층의 COD농도 4.18 mg/L이었고 비용해성 COD농도는 1.59 mg/L로 38% 정도로 조류가 다량 함유된 상층에 비해 매우 낮은 비율을 차지하고 있었다. 사멸된 조류의 일부가 존재할 것으로 예상되는 하층(수심 30~40 m)은 2.69 mg/L로 1월~7월까지의 상층 평균농도(2.66 mg/L)와 거의 같았다. 이때 비용해성 COD농도는 0.5 mg/L 정도에 불과하였고, 대부분이 용해성 COD농도(2.19 mg/L)인 것으로 나타났다.

3) 주암호 댐 앞의 Chl-a와 COD농도의 상관관계에 대한 조사결과, COD농도는 Chl-a농도가 5.5 mg/m³ 이하일 때 호소 생활환경 2급수인 3 mg/L 이하를 유지하나 Chl-a 농도가 46.5 mg/m³을 초과할 경우에는 상수원수 3급수 수질인 COD농도 6 mg/L 이하를 유지하기 힘든 것으로 나타나 하절기 안정적인 수질을 유지하기 위해서는 조류의 제어가 중대한 인자임을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1. Chorus, I. ed., Cyanotoxins. Springer(2001).
- 2. Lambi, C. A. and Waaland J. R. ed., Algae and human affairs, Cambridge University Press(1998).

3. National Research Council, Watershed management for portable water supply, National Academy Press(2000).
4. 박수용 등, 주암호 수질오염 저감방안에 관한 연구(II), 영산강수질검사소(1998).
5. 신상철 등, 주암호의 오염물질 거동과 생태계 변화에 관한 연구(I), 영산강수질검사소(2000).
6. 윤준현 등, 주암호의 거동과 생태계 변화에 관한 연구(II), 영산강수질검사소(2001).
7. 정원화 등, 호소내 조류 대 발생에 대한 수면제어기술에 관한 연구(I) -팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발-, 한강수질검사소(1998).