

## 팔당호의 조류 발생 특성

김진근<sup>†</sup> · 이송희 · 방호희 · 황수옥\*

한국수자원공사 수도권리처 · \*한국수자원공사 수도권지역본부

(2009년 5월 6일 접수, 2009년 5월 21일 채택)

## Characteristics of Algae Occurrence in Lake Paldang

Jinkeun Kim<sup>†</sup> · Songhee Lee · Hohee Bang · Suok Hwang\*

Department of Water Supply Operation and Maintenance, K-water

\*Seoul Metropolitan Water Supply Regional Headquarters, K-water

**ABSTRACT** : This study was performed to evaluate characteristics of algal occurrence in Lake Paldang. Chlorophyll *a* concentration was highest during spring, based on weekly measurements from 2006 to 2008, which revealed a different trend compared to the data before 2000 that showed the highest level during summer. Total algae cell quantity was also highest during spring, based on monthly data. Overall, Bacillariophyceae was dominant and represented 87% of total algae cells and occupation was more significant during spring and winter. Cyanophyceae was dominant during summer. 2-MIB and geosmin originating in algae which caused odor problems was high in July 2008, and more research on the relationship between algae and production of odor causing material is needed.

**Key Words** : Algae, 2-MIB, Geosmin, Bacillariophyceae, Cyanophyceae

**요약** : 본 연구는 팔당호내 조류의 발생특성 파악을 위해 수행되었다. 2006-2008년 매주 측정된 자료를 토대로 클로로필-*a* 농도는 봄철에 가장 높은 것으로 조사되어 여름철에 가장 높게 조사되었던 2000년 이전 자료와 다른 결과를 나타내었다. 월간 측정 자료에 의하면 2008년 총 조류개체수도 봄철에 높게 나타났다. 전체적으로 규조류가 우점하였으며 연평균값으로는 총 조류개체수의 87%를 차지하였으며, 특히 봄과 겨울에 우점정도가 높았다. 하절기의 경우 특정시기에 남조류가 우점을 차지하였다. 조류에서 기인하는 냄새 유발물질인 2-MIB와 geosmin은 2008년 7월에 특히 높게 나타났는데 조류와 냄새물질 발생간의 상관관계에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

**주제어** : 조류, 2-MIB, Geosmin, 규조류, 남조류

### 1. 서론

수도권 주민의 상수원인 팔당호는 1973년 팔당댐이 건설되면서 형성된 인공호소로서 평균 만수면적은 38.58 km<sup>2</sup>, 유역면적은 23,800 km<sup>2</sup>, 총 저수용량은 244백만톤이며 호소의 체류시간이 짧고, 평균 수심은 6.55 m로 얕아 성층의 발달이 미약한 대표적인 하천형 호소로 분류되고 있다.<sup>1-3)</sup> 특히, 팔당호의 수표면적에 대한 유역면적의 비는 618로 일본의 Biwa호, 미국의 Michigan호 등에 비하여 매우 크며, 이러한 특성은 호소의 수질 및 수생태계가 유역내의 오염물질 유입과 강우 등에 많은 영향을 받을 수 있음을 의미한다.<sup>1,2)</sup>

팔당호는 크게 남한강, 북한강, 경안천 3개 수계에서 유입되고 있으나 대부분의 유입량은 남한강과 북한강이 차지하고 있으며, 팔당댐은 상류의 소양강댐, 충주댐 등과는 달리 홍수조절 기능이 거의 없어 호소 체류시간은 강우에

의한 유입유량의 변동 및 팔당댐 방류량에 의해서 결정되고 있다.

팔당호에서는 1990년대 이후 기상조건, 영양염류 유입 등 조류생장에 영향을 미치는 조건의 변화에 따라 주기적으로 조류의 발생과 소멸이 반복되고 있다. 조류는 수생태계에서 1차 생산자로서 중요한 위치를 점하고 있으며, 수온, 영양물질(질소, 인 등), 탄소원, 일사량 등의 인자가 조류의 생산활동에 중요한 인자로 작용하고 있다.<sup>4)</sup> 정부에서는 조류에 대한 관리강화를 위하여 1998년부터 클로로필-*a* 농도가 15 mg/m<sup>3</sup> 이상이고 남조류 세포수가 500 세포/mL 이상일 경우 조류예보제를 시행하고 있으며, 조류예보제 시행 이후 팔당호에서는 총 141일간 조류주의보가 발령되었으며, 2008년의 조류발생일수가 가장 길었다(2000년 23일, 2001년 12일, 2002년 20일, 2004년 14일, 2005년 15일, 2006년 21일, 2008년 36일). 조류예보제는 2008년 기준으로 모두 20개의 호소를 대상으로 시행중에 있으며, 2008년의 경우 4개소(팔당호, 대청호, 영천호, 진양호)에서 조류주의보가 발령되었다. 조류예보제 발령기준이 클로로필-*a* 농도와 남조류 세포수에 국한되고 있으므로 다른 조

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: kjinkeun@kwwater.or.kr

Tel: 042-629-2802

Fax: 042-629-2849

류개체수를 고려할 경우 특정시기에 팔당호에서 조류의 발생정도는 매우 심각한 수준으로 판단된다.

조류발생이 수돗물의 품질에 영향을 미칠 것으로 예상되는 점은 여과지 폐색에 의한 여과장애, 맛냄새 발생, 조류독소 발생 등이며, 이러한 문제점의 발생정도 및 양상은 조류의 총 개체수 및 우점종 등에 따라 상이할 수 있다. 여과지 폐색장애는 빈번한 여과지 역세척을 수반하여 수돗물 생산단가 상승의 원인이나 수돗물 품질에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 팔당호의 조류발생이 극심했던 시기에 팔당호를 상수원으로 하는 일부 정수장의 경우 여과지속시간이 6시간 정도로 평소의 1/10수준으로 감소한 경우도 있으나, 일반적으로 여과수 탁도의 심각한 저하는 발생하지 않는다. 한편, 팔당댐 앞 지점에서 채수된 시료에서 측정된 Microcystis에서 기인하는 조류독소인 Microcystin의 경우 1 µg/L 이하인 것으로 보고되어 팔당호에서는 조류독소 문제가 심각하지 않은 것으로 판단된다.<sup>5)</sup> 그러나 대청호의 경우 2001년 하절기에 문의취수장 인근에서 채수한 시료 분석결과 0.01~35.92 µg/L (평균 3.79 µg/L) 검출된 바 있다.<sup>6)</sup>

조류에서 기인한 맛냄새 발생은 수돗물 품질에 큰 영향을 미치게 되고 수돗물 음용 기피의 주요 원인으로 작용한다. 조류 자체는 일정한 크기를 갖는 입자성 물질로 약품응집-침전-여과-소독을 기본공정으로 하는 일반적인 정수처리과정(conventional water treatment processes)에서 일정부분 제거될 수 있으나, 조류에서 기인하는 맛냄새 물질인 2-MIB, geosmin 등은 대부분 용존성 물질로 일반적인 정수처리과정에서는 제거율이 매우 낮다.<sup>7,8)</sup> 2-MIB, geosmin은 오존산화 및 활성탄흡착에 의해 효과적으로 제거될 수 있으나, 현재 수도권지역의 정수장은 대부분 일반적인 정수처리공정으로 구성되어 있어 맛냄새 유발물질 제거에는 한계가 있다. 수도권지역 정수장에서는 맛냄새 유발물질의 농도가 낮을 경우 분말활성탄을 투입하여 대응하고 있으나 농도가 높을 경우 대응에 한계가 있다. 따라서 상수원의 수질관리 측면에서 여과장애 및 맛냄새 문제를 발생시키는 조류의 발생특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다.

정부에서도 수돗물에 대한 신뢰도 향상을 위하여 맛냄새 원인물질인 2-MIB와 geosmin에 대해 2009년 7월 1일부터 먹는물 감시항목으로 지정하여 특광역시 정수장, 한국수자원공사가 운영하는 광역상수도 정수장, 일반수도사업자가 운영하는 시설규모 50,000 m<sup>3</sup>/일 이상인 정수장에서는 농도를 모니터링 하도록 하였다.<sup>9)</sup> 한편, 팔당호를 상수원으로 하는 수도권지역 정수장은 2008년 반월정수장에 활성탄여과지(GAC filter-adsorber)가 도입된 이래 맛냄새 물질제거를 위하여 활성탄흡착공정을 포함한 고도정수처리공정 도입을 서두르고 있다.

본 논문에서는 여과장애 및 맛냄새 물질의 발생원인 조류의 발생특성 파악을 위하여 팔당호의 계절별 클로로필-a 농도, 조류개체수 및 개별 조류종 분포, pH 변화 등에 대하여 조사하였다. 특히 상수원에서 맛냄새 발생으로 인해

민원이 발생하기도 했던 2008년 7월 팔당호 원수에서의 2-MIB와 geosmin의 농도 분포를 조사하여 조류발생이 맛냄새 유발물질의 농도에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 분석대상

본 연구의 대상은 팔당호이며 팔당호 및 시료채취 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 조사지점은 팔당호에 유입되는 북한강, 남한강, 경안천 수계의 물이 모두 합류되는 수도권 광역상수도 제 2취수장 인근지점으로 수도권에 공급되는 원수의 수질을 대표한다고 볼 수 있다.

### 2.2. 분석방법

주요 측정항목은 pH, 클로로필-a, 조류종, 2-MIB, geosmin 농도이며, 분석기간 및 주기는 pH는 2000년부터 매일측정, 클로로필-a는 2006-2008년 주간측정, 조류종은 2008년 주간측정, 2-MIB, geosmin은 냄새발생이 심했던 2008년 7월 매일측정하였다. pH는 수질연속자동측정기를 활용하였으며, 2-MIB, geosmin은 Standard Methods<sup>10)</sup> 절차에 따라 GC/MS (Varian, CP 3800/1200)를 이용하여 HS-SPME법으로 분석하였다. 클로로필-a는 수질오염공정시험방법에 규정된 절차에 따라 시료 100 mL를 GF/C로 여과한 후 acetone 용액으로 추출한 색소를 UV/Visible Spectrophotometer (Perkin-Elmer, Lambda 45)를 이용하여 흡광도를 측정하여 클로로필-a 농도를 구하였다. 조류분석의 경우 시료 1 L를 미리 준비된 Lugol 용액으로 고정하고 24~48시간 자연침강을 거쳐 위상차 현미경을 이용하여 동정, 계수하였다. 동정을 위해 한국담수조류도감 및 상수도의 생물 등을 참고하였다.<sup>11,12)</sup>

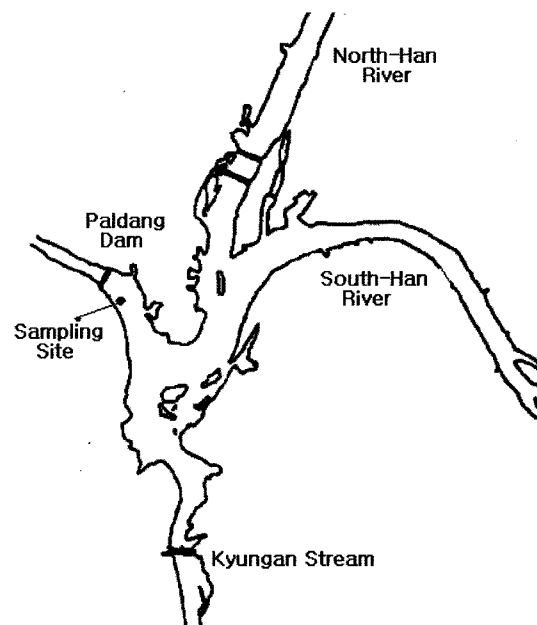


Fig. 1. Location of Lake Paldang and sampling site.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 기상현황

조류는 광합성을 하는 특성상 기상조건에 매우 민감하다. 따라서 강우특성 및 일조시간에 많은 영향을 받는다. 일반적으로 체류시간이 길고 일조시간이 길수록 조류발생량이 많은 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 팔당호 유역의 강수량과 일조시간을 나타내고 있다. 2008년은 이전 조사기간(1999~2008년)의 년평균 강수량 1,296 mm 보다 22.1% 낮은 1,009 mm로 조사되어 2001년 다음으로 낮은 수치를 나타내었다. 한편 2008년도 일조시간은 1999~2008년 평균인 2,344시간보다는 낮았으나, 2007년도에 비해 13% 증가된 1,969시간으로 조사되었다. 따라서 2008년도의 경우 강수량이 적어 호소내 체류시간은 길고 일조시간은 늘어나 조류의 생장조건 측면에서 유리하였던 것으로 판단된다. Fig. 2의 자료중 강수량 자료는 집수구역내의 북한강수계와 남한강수계를 대표하는 인제, 충주지역의 기상청 강수량 자료를 평균하였으며, 일조시간의 경우 기상청 양평측정소 측정자료를 이용하였다.

#### 3.2. 클로로필-a 농도

식물성 플랑크톤량을 나타내는 클로로필-a의 농도를 매주 측정된 결과, 2008년에는 4.5~44.1 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 나타내었고 년평균 농도는 15.0 mg/m<sup>3</sup>였으며, 평균농도 초과 비율은 49.1%였다. 3개월 단위로 클로로필-a 농도를 비교한 결과, 1~3월 평균은 18.6 mg/m<sup>3</sup>, 4~6월 평균은 16.0 mg/m<sup>3</sup>, 7~9월 평균은 12.0 mg/m<sup>3</sup>, 10~12월 평균은 11.7 mg/m<sup>3</sup>로 조사되었다. 2008년 수질자료를 토대로 분석할 경우 클로로필-a 농도는 봄철에 높고 하절기에 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 팔당호의 체류시간을 고려할 경우 봄철에 강수량이 적고 일조시간이 길어 조류의 생육조건이 좋은 반면 여름철에는 집중호우로 인해 호소수의 탁도가 상승하고 호소내 체류시간이 상대적으로 짧아 발생하는 현상으로 생각된다.

Fig. 3은 2006~2008년 클로로필-a 농도를 나타내며, 최대 농도는 2006, 2007년은 4월에, 2008년은 2월에 발생한 것으로 조사되었다. 한편, 2002~2004년까지 3년간 분석된 자

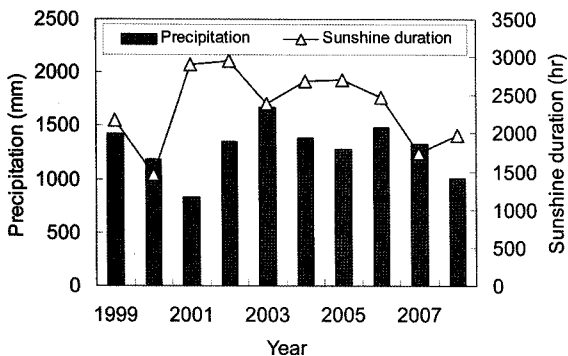


Fig. 2. Precipitation and sunshine duration of Lake Paldang (1999~2008).

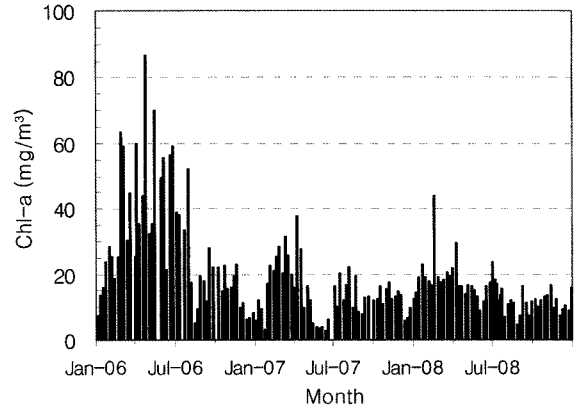


Fig. 3. Variations of chlorophyll a concentration (2006~2008).

료에 의하면 4월에 클로로필-a 농도가 가장 높은 것으로 나타나 금번 조사결과와 유사한 경향을 나타냈다.<sup>13)</sup> Fig. 3에서 2006년도의 클로로필-a 농도가 2007년 및 2008년에 비해서 높은데, 이는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 일조시간과 밀접한 영향이 있는 것으로 생각된다. 2006년의 경우 강수량이 많음에도 불구하고 일조시간이 긴 것은 강우지속시간이 짧고 강우강도는 강해서 나타나는 현상으로 해석된다. 2006~2008년 연평균 총 조류개체수는 7,208 cells/mL, 2,732 cells/mL, 4,871 cells/mL로 조사되었으며, 동기간에 연평균 클로로필-a 농도는 각각 30.8 mg/m<sup>3</sup>, 14.0 mg/m<sup>3</sup>, 15.0 mg/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

한편 1988~2000년까지 평균자료를 분석한 결과, 8월에 클로로필-a의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다.<sup>2)</sup> 이러한 경향의 차이는 영양염류의 농도가 부족했던 1990년대 전후반의 경우 강우에 의한 영양염류 유입이 조류발생에 큰 영향을 미쳤으나, 2000년대의 경우 강우에 의한 영양염류 농도의 증가보다는 체류시간, 일조시간, 투명도 등이 더 중요한 인자로 작용하고 있음을 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 강우와 함께 유입된 영양물질이 조류증식에 결정적인 역할을 할 경우 홍수기 이후에 조류가 대번식할 수 있으나, 팔당호의 경우 인 등의 영양염류가 이미 충분한 것으로 알려져 있으므로<sup>14)</sup> 인 유입량 증가와 클로로필-a 농도간의 상관관계가 약한 것으로 파악된다. 특히 팔당호의 경우 오히려 유입량(강수량) 증가시 탁도상승, 수온변화, 체류시간의 급격한 감소에 의한 수체교체효과 등에 의해 조류증식이 제한을 받아 클로로필-a 농도가 감소할 수 있기 때문이며, 이러한 결과는 강수량, 강우강도, 일조시간, 호소 체류시간 등에 따른 차이로 설명될 수 있다. 실제 Fig. 4는 본 연구의 조사지점 인근(팔당댐)의 환경부 수질측정망 자료로서 클로로필-a와 총인 농도의 상관관계는 거의 없는 것으로 조사되었으며, 총인은 하절기(8월경)에 높고 클로로필-a는 Fig. 3과 유사하게 봄철에 높은 것으로 나타났다. 총인의 2006~2008년의 연평균 농도는 0.055 mg/L, 0.051 mg/L, 0.042 mg/L로 조사되었다. Fig. 4에서 클로로필-a 농도는 Fig. 3과 전체적인 경향은 유사하나 값에는 차이가 있는데 이는 측정주기(매월, 매주)의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

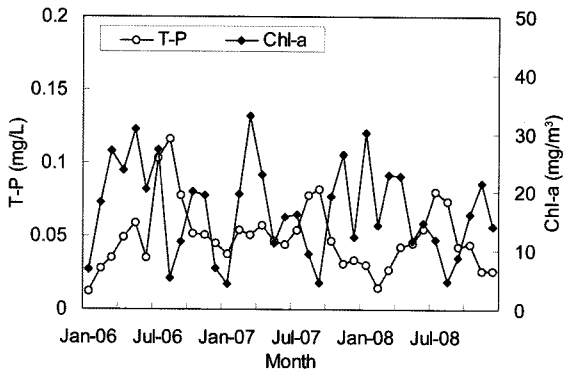


Fig. 4. Relationship between chlorophyll a and total phosphorus concentration (2006~2008).

3.3. 조류개체수 분포

Fig. 5는 매주 측정자료를 바탕으로 2008년의 총 조류개체수 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 봄철에 개체수가 증가하고 하절기 및 동절기에 개체수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 특성은 강수량을 포함한 기상조건에 많은 영향을 받으며, 종별 변화는 매우 동적인 것으로 조사되었다. 한편, Fig. 6은 클로로필-a와 총 조류개체수간의 상관관계를 나타내고 있으며, 양의 상관성( $R^2 = 0.317$ )을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

Table 1은 주간측정자료를 토대로 한 주요 조류군별 최대, 최소, 평균값을 나타내고 있다. 연평균값으로 고려할 경

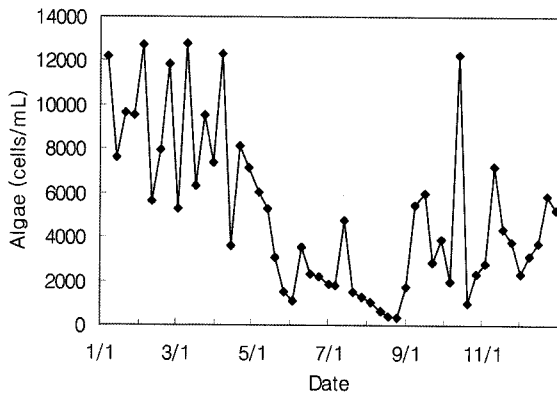


Fig. 5. Variation of algae cell quantity (2008).

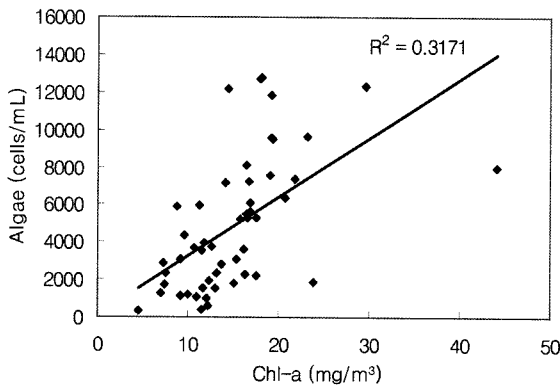


Fig. 6. Relationship between algae cell quantity and chlorophyll a concentration (2008).

Table 1. Relative abundance of algae based on weekly data (2008)

Class	Cell quantity (cells/mL)			
	Max.	Min.	Ave.	Standard Deviation
Bacillariophyceae	12,636	252	4,243(87.1%)	3,622
Cryptophyceae	2,158	0	306(6.3%)	446
Cyanophyceae	3,192	0	127(2.6%)	480
Chlorophyceae	1,596	0	124(2.5%)	298
Dinophyceae	168	0	14(0.3%)	37
Euglenophyceae	420	0	11(0.2%)	62
Chrysophyceae	42	0	2(0.03%)	8
others	830	0	44(0.9%)	129

우 Bacillariophyceae(규조류)가 평균 4,243 cells/mL로 가장 높았으며, 전체 조류개체수의 87.1%를 차지하는 것으로 조사되었다. 다음으로 Cryptophyceae(와편모조류)가 6.3%로 조사되었으며, 다른 조류의 경우 5% 미만으로 조사되었다. 그러나 계절적으로는 많은 차이를 나타내었다. 한편, Table 2는 매주 측정된 종별 개체수 자료를 월평균값으로 계산하여 나타낸 값이다.

Fig. 7은 높은 비율을 차지하는 4개 군의 천이를 나타내고 있다. 조류종의 분포는 계절별로 큰 차이를 나타내고 있다. 봄과 겨울에는 Bacillariophyceae가 우점을 이루지만 여름철 냄새발생이 심했던 7월의 경우 상대적으로 Cyanophyceae(남조류, 남세균)의 비율이 높아져 우점을 이룬 것으로 조사되었다. 8월과 9월의 경우에는 Chlorophyceae(녹조류)의 비율이 상대적으로 올라가는 것으로 조사되었다. 박 등의 연구결과에 의하면 초봄과 늦가을부터 겨울까지는 규조류가 우점하고 봄부터 초여름까지는 녹조류, 편모조류, 여름과 초가을에 남조류가 우점하여, 본 연구결과와 유사한 경향을 나타냈다.<sup>13)</sup>

조류는 기상 및 수질조건에 따라 계절별로 출현종의 천이가 이루어지며, 냉수성 규조류는 3~5월에 주로 증식하고, 수온이 상승하는 5~6월에는 녹조류로 천이가 이루어지고, 녹조류 증식으로 인해 물의 pH가 상승하고 일조시간이 증가하는 시기에 남조류로 천이가 이루어진다.<sup>15)</sup> 남

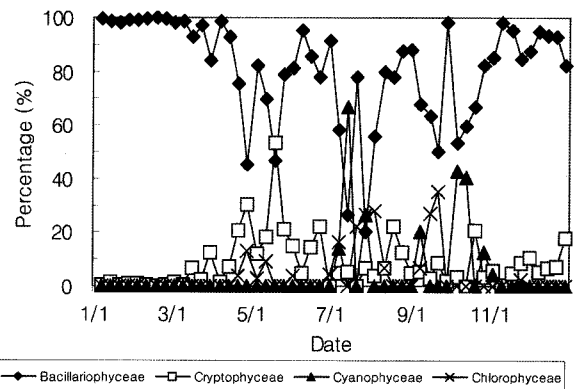


Fig. 7. Algae succession in Lake Paldang (2008).

**Table 2.** Cell quantity of major algae types based on monthly average data (2008) (unit : cells/mL)

Class	Genus	Jan	Feb	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Cyanophyceae	<i>Microcystis</i>	0	0	0	0	0	0	34	0	0	70	0	0
	<i>Oscillatoria</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	218	0	0	0
	<i>Anabaena</i>	0	0	0	0	0	0	588	0	0	1,456	32	0
	<i>Phormidium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bacillariophyceae	<i>Cyclotella</i>	3,356	5,815	6,739	3,778	517	267	249	158	314	130	315	2,614
	<i>Asterionella</i>	6,025	3,327	623	1,543	2,130	1,415	17	0	0	11	63	361
	<i>Aulacoseira</i>	226	0	0	0	0	267	650	95	2,433	2,576	3,213	428
	<i>Fragilaria</i>	0	325	345	821	0	0	16	11	0	0	511	143
	<i>Navicula</i>	21	29	99	0	60	21	101	74	64	0	21	50
	<i>Synedra</i>	10	0	0	58	82	21	42	11	42	18	0	0
	<i>Melosira</i>	0	0	0	0	0	0	17	11	0	0	70	42
	<i>Cymbella</i>	0	0	25	21	41	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Nitzschia</i>	0	0	0	0	0	0	0	63	8	0	11	0
	<i>Diatoma</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Stephanodiscus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Gomphonema</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Surirella</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Achnanthes</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Chlorophyceae	<i>Chlamydomonas</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Eudorina</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Scenedesmus</i>		0	0	0	230	80	0	134	0	202	0	0	0
<i>Ankistrodesmus</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0
<i>Actinastrum</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0
<i>Coelastrum</i>		0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0
<i>Pediastrum</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Micractinium</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	185	0	0	0
<i>Cosmarium</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Dictyosphaerium</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pandorina</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Chlorella</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Closterium</i>		0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
<i>Monoraphidium</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	101	0	21	0
<i>Planktosphaeria</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Westella</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Sphaerocystis</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Spondylosium</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Hormidium</i>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oocystis</i>		0	0	16	78	81	10	16	0	0	0	0	0
Cryptophyceae	<i>Cryptomonas</i>	20	10	17	174	161	0	84	0	56	21	39	25
	<i>Rhodomonas</i>	51	40	332	885	754	287	0	53	118	70	151	377
Dinophyceae	<i>Peridinium</i>	0	0	13	0	0	0	16	0	0	42	95	8
	<i>Ceratium</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chrysophyceae	<i>Dinobryon</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Mallomonas</i>	0	0	8	0	0	0	0	11	0	0	0	0
	<i>Synura</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Euglenophyceae	<i>Euglena</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0
	<i>Trachelomonas</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
	<i>Phacus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
others	<i>others</i>	39	0	50	208	81	0	92	32	25	0	0	0

조류는 수온에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 일반적으로 수온이 15~25℃의 온난한 계절, 특히 늦여름부터 초가을에 주로 발생하는 것으로 알려져 있으며,<sup>12)</sup> Table 2에서도 주로 7~10월 사이에 발생하는 것으로 조사되었다.

### 3.4. 우점종 분포

여름철을 제외한 대부분의 계절에서 Bacillariophyceae가 우점하는 것으로 조사되었다. 월평균자료를 기술한 Table 2의 결과에 의하면 1,2월의 경우 Bacillariophyceae중에서는 *Asterionella*와 *Cyclotella*가 주요한 속(genus)으로 조사되었다. 한편 주간자료의 경우 변동성이 더 큰 것으로 조사되었다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 팔당호의 지리적 특성상 매우 짧은 체류시간과 유역의 환경에 지배되는 특징을 반영한 결과로 해석된다. Fig. 8은 Bacillariophyceae중에서 우점하고 있는 4종의 변화를 나타내고 있다. 여름과 겨울철에는 *Asterionella* spp., 봄철에는 *Cyclotella* spp.가 우점을 나타내며 가을철에는 *Aulacoseira* spp.가 우점하는 것으로 조사되었다. Fig. 9는 Cyanophyceae와 Cryptophyceae중에서 우점하는 종을 나타내고 있다. 봄과 초여름에는 *Rhodomonas* spp., 여름과 가을에는 *Anabaena* spp.의 개체수가 높은 것으로 조사되었다. 우점종의 분포와 개체수는 매우 짧은 기간에 변화되는 특징을 보여주고 있다.

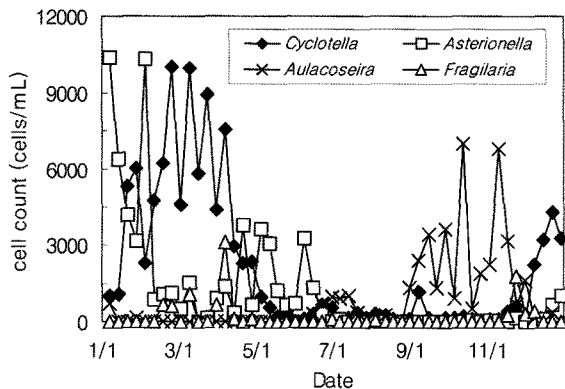


Fig. 8. Dominant genera of Bacillariophyceae (2008).

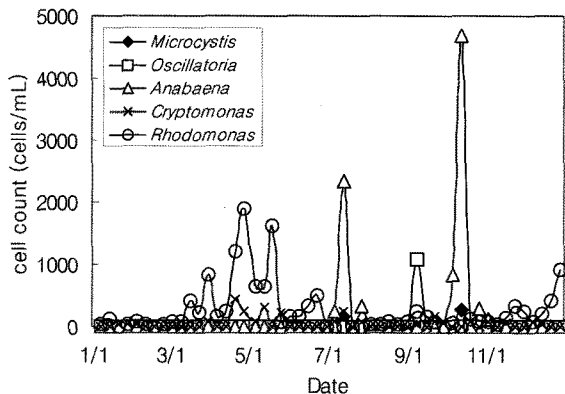


Fig. 9. Dominant genera of Cryptophyceae and Cyanophyceae (2008).

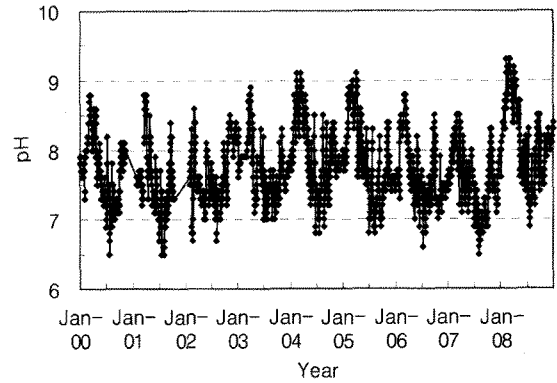


Fig. 10. pH variation at Lake Paldang (2000~2008).

### 3.5. 상수원 수질에 미치는 영향

#### 3.5.1. 원수 pH 상승

조류의 발생은 pH 상승의 원인이 된다. 조류가 광합성을 하게 되면 수중의 탄소원( $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ )을 소모함으로써 호소의 pH가 상승하게 된다. Fig. 10은 팔당호의 월별 pH 변화를 나타낸 것으로 2000년 이전 자료와<sup>2)</sup> 비교시 팔당호의 pH는 지속적으로 증가하여 왔다. 수처리 측면에서 원수의 pH가 높을수록 응집효율이 저하되고 응집제 성분중 알루미늄의 용해도가 높아져 수돗물에서 잔류 알루미늄 농도가 상승할 수 있다. 한편 조류발생에 기인한 호소수의 pH 상승은 인의 용출속도를 가속시켜 조류의 성장을 촉진하는 결과를 초래할 수 있다.<sup>16)</sup> 2008년 최대 pH는 9.3(2.11일, 3.3일 발생), 평균 8.12, 최소는 6.9(7.18일 발생)로 조사되었다.

#### 3.5.2. 이취미 발생

상수원에서 조류의 발생이 수돗물 품질을 저하시키는 가장 큰 원인은 맛냄새 문제 발생이다. 팔당호에서는 2008년 7월에 맛냄새 물질의 농도가 단기간에 급격하게 증가하여 수돗물에서 불쾌한 냄새를 유발하였다. 상수원에서 조류에 의한 맛냄새 원인의 대표적인 물질은 2-MIB, geosmin으로 알려져 있으며, 이외에도 mucidone, isobutyl mercaptan, dimethyl sulfide 등의 냄새 물질이 발생되는 것으로 알려져 있다. 이러한 맛냄새 유발물질중 2-MIB와 geosmin은 최저감지농도는 6~10 ng/L 내외로 알려져 있어 낮은 농도에서도 심각한 피해를 유발할 수 있으며, 일본의 경우 각각에 대해 먹는물 수질기준을 10 ng/L 이하로 설정하여 운영중이다.<sup>8)</sup> 2-MIB, geosmin은 주로 방선균(actinomycetes)과 남조류의 대사물질(metabolites)에서 기인하는 것으로 알려져 있으나 특정 조류 및 특정 발현 조건과의 인과관계에 대해서는 아직도 규명되지 않은 부분이 많이 남아있다.<sup>7,17)</sup>

Fig. 11은 2008년 7월 팔당호의 geosmin, 2-MIB 농도를 나타내고 있다. 7월에 매우 높은 농도로 geosmin이 검출되었으며, 2-MIB는 geosmin과 비교시 농도가 다소 낮은 것으로 조사되었다. 7월의 경우 특히 *Anabaena*, *Aulacoseira*, *Cryptomonas*, *Microcystis* 등의 개체수가 높았는데 *Ana-*

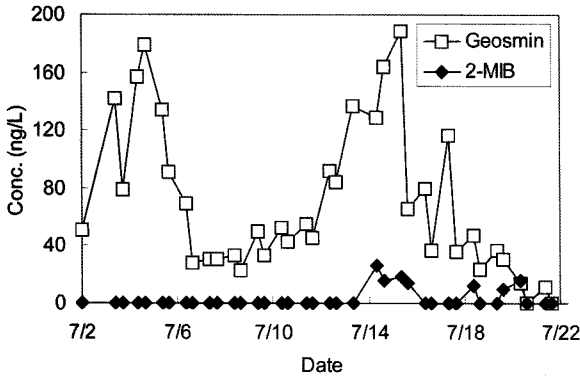


Fig. 11. Concentration of geosmin and 2-MIB in Lake Pal-dang (2008).

*baena* 속의 경우 geosmin 농도 발생과 매우 관련성이 높은 것으로 알려져 있으며, 수온이 20℃이며 일사량이 높을수록 발생농도가 높게 나타나는 것으로 보고되기도 하였다.<sup>18,19</sup> Geosmin은 *Anabaena*와 *Oscillatoria*에 주로 기인하고, 2-MIB는 *Oscillatoria*에 주로 기인하는 것으로 알려져 있다.<sup>17</sup> 2008년 7월의 경우 geosmin의 농도가 2번의 peak를 기록하였는데 최고 농도(189 ng/L) 기록일 하루 전(7.14) 조류분석결과에 의하면 *Anabaena*가 전체 개체수의 49%를 차지하여 우점하였으며, 개체수는 2,352 cells/mL로 조사되었다. 한편 두 번째로 높은 농도(179 ng/L)가 검출된 7.4일의 경우 *Anabaena*가 전체 개체수의 14%인 252 cells/mL로 조사되었다. 조류종과 냄새발현 환경 등에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

#### 4. 결론

팔당호소내 조류개체수 증감은 수온, 강수량, 일조시간 등에 많은 영향을 받고 있으며 봄철에 가장 높은 개체수 및 클로로필-a 농도가 나타나는 것으로 조사되었다. 2000년 이전의 조사자료에 의하면 집중호우가 발생하는 하절기에 클로로필-a 농도가 높았지만 2000년 이후 조사자료에 의하면 하절기보다 강수량이 적어 호소내 체류시간이 늘어나는 봄철에 더 높은 농도를 보였다. 조류개체수의 경우 전체적으로 규조류가 우점하여 총 조류개체수의 87%를 차지하였으며, 특히 봄과 겨울에 우점정도가 높았다. 하절기의 경우 특정시기에 남조류가 높은 개체수로 출현하기도 하였다. 전체개체수에서 가장 높게 나타났던 Bacillariophyceae의 경우 개별 속의 분포는 계절별로 상이하였으며, 겨울에는 *Asterionella*, 봄철에는 *Cyclotella*, 가을에는 *Aulacoseira*가 우점하는 것으로 조사되었다. 조류의 대사물질로 추정되는 2-MIB와 geosmin은 2008년 7월에 특히 높게 나타났으며 조류와 맛냄새 유발물질 발생간의 상관관계 연구에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

#### 사사

수질분석에 도움을 주신 한국수자원공사(K-water) 수도

권지역본부 수질검사소와 수돗물 분석연구센터 직원분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 공동수, “팔당호의 영양구조적 특성,” 수질개선 시스템 개발에 관한 한-일 심포지움 논문집, pp. 167~196(1995).
2. 김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 정완중, 임연택, “팔당호 수질의 계절별 변화특성 및 장기 추세,” 한국물환경학회지, **18**(1), 67~76(2002).
3. 김종민, 노혜란, 허성남, 양희정, 박준대, “강우 및 유입 하천수가 팔당호 수질에 미치는 영향분석,” 한국물환경학회지, **21**(3), 277~283(2005).
4. 이인규 공역, “조류생물학,” 월드사이언스(2000).
5. 박혜경, 정원화, 임연택, 김종택, 유재근, “팔당호에서 남조류 및 마이크로시스틴의 경시적 변화,” 한국물환경학회 춘계학술발표회 논문초록집(1999).
6. 최일환, 이정호, 김학철, 박종근, 지연숙, “대청호의 microcystin 농도 분포,” 대한환경공학회 춘계학술발표문집, pp. 285~286(2002).
7. AWWA, Water Quality and Treatment, AWWA(1999).
8. Whelton, A. J. and Dietrich, A. M., “Relationship between intensity, concentration, and temperature for drinking water odorants,” *Water Res.*, **38**, 1604~1614(2004).
9. 환경부, “먹는물 관리지침”(2009).
10. APHA, AWWA, WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. Washington, DC, USA(1995).
11. 정준, “한국담수조류도감,” 아카데미서적, 서울(1993).
12. 이현동, 이의신, 서규태, “상수도의 생물,” 진리탐구(1996).
13. 박혜경, 이현주, 김은경, 정동일, “팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석,” 한국물환경학회지 **21**(6), 584~594(2005).
14. 한명수, 어운열, 유재근, 유광일, 최영길, “팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집구조의 변화,” 한국육수학회지, **28**(3), 335~344(1995).
15. 환경부, 국립환경과학원, 조류예보제 운영 매뉴얼(2008).
16. 전상호, 박용안, “소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출가능성에 대하여,” 한국하천호소학회지, **22**, 262~271(1989).
17. MWH, Water Treatment Principles and Design, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA(2005).
18. Park, D., Maeng, J., Ahn, C., Chung, A., Lee, J., and Oh, H., “Geosmin concentration and its relation to environmental factors in Deachung reservoir, Korea,” *Korean Journal Limnology*, **34**(4), 319~326(2001).
19. Saadoun, I. K., Schrader, K. K., and Blevins, W. T., “Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *anabaena* sp.,” *Water Res.*, **35**(5), 1209~1218(2001).