

## 주암호의 용존가스상 수은의 농도변화 특성에 관한 연구

박종성 · 오세희 · 신미연 · 이승묵 · 조경덕<sup>†</sup>

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

(2006년 5월 11일 접수, 2006년 6월 27일 채택)

### Variations on the Concentration of Dissolved Gaseous Mercury(DGM) at the Juam Reservoir, Korea

Jong-Sung Park · Sehee Oh · Mi-Yeon Shin · Seung-Muk Yi · Kyung-Duk Zoh<sup>†</sup>

Department of Environmental Health, Seoul National University

**ABSTRACT :** The reduction of Hg<sup>2+</sup> in the aqueous phase results in the production of dissolved gaseous mercury(DGM), and the volatilization of DGM has been identified as an important mechanism for the loss of Hg from waterbodies to the atmosphere. Although mercury emission in the world is known to be mostly from Asia, there have been few studies of measuring DGM concentrations in lakes in Asia. In this study, DGM concentrations were measured at Juam reservoir(35°00'N, 127°14'E), Korea. The results showed that the average concentrations of DGM at the upper and down stream of the lake during summer time were 95 ± 8 and 130 ± 15 pg/L, respectively and the concentration of total mercury(TM) at the upper and down stream was 2.1 ± 0.7, 1.7 ± 0.3 ng/L respectively. Average DGM concentration during summer time(101 ± 14 pg/L) was approximately 5.5 times higher than that during fall(18 ± 0.1 pg/L). The DGM concentrations at the midstream decreased from 32 to 13.7 pg/L during rain event, while the TM concentrations increased from 2.2 ng/L to 2.7 ng/L indicating the deposition of mercury from the atmosphere. Also, the diurnal patterns between DGM concentrations and UV intensities were observed. Water temperatures and DOC concentrations were significantly related to DGM concentrations, while TM concentrations were negatively related to DGM concentrations(p<0.0001). Comparing with the study of Dill *et al.*,(2006) the average concentrations of DGM (109 ± 15 pg/L) and TM(2.2 ± 0.4 ng/L) at Juam reservoir were approximately 3 and 2.2 times higher than those measured in other lakes(DGM: 38 ± 16 pg/L, TM: 1.0 ± 1.2 ng/L).

**Key Words :** Dissolved Gaseous Mercury(DGM), Total Mercury(TM), High Intensity, pH, Temperature, Rain Event

**요약 :** 환경 중에서 Hg<sup>2+</sup>의 환원과정을 통하여 용존가스상 수은인 DGM(dissolved gaseous mercury)이 생성이 되고, 이 DGM의 대기의 휘발이 수체에서의 중요한 이동 제거 기작이다. 아시아에서 배출하는 수은의 양이 전 세계적으로 큰 비중을 차지하는 것으로 알려져 있지만, 이 지역에 대한 DGM의 조사는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 주암호를 대상으로 실시간으로 DGM 및 총 수은(TM) 농도변화를 관찰하였다. 연구 결과 여름철 주암호의 상류에서 하류까지 DGM 평균농도의 변화는 95 ± 8 pg/L에서 130 ± 15 pg/L로 증가했으나, TM의 평균농도는 상류지점 2.1 ± 0.7 ng/L, 하류지점 1.7 ± 0.3 ng/L로 낮아지는 경향을 보였다. 계절적인 DGM의 농도를 비교한 결과, 여름철 주암호의 총 DGM의 평균농도는 109 ± 15 pg/L로 가을철의 19 ± 3 pg/L 보다 약 5.5배 높았다. 중류지점에서 강우에 따른 DGM 평균농도의 변화는 비가 오기 전 32 pg/L에서 비가 내리는 동안 13.7 pg/L로 약 58% 감소했으며, TM은 2.2 ng/L에서 2.7 ng/L로 약 19% 증가했다. 가을철 상류지점의 일중 자외선과 DGM 평균농도의 변화는 빛의 강도와 비슷한 경향을 나타냈다. DGM의 농도와 수온, DOC의 농도 간의 통계적 분석결과는 유의한 상관관계(α=0.05)를 보였으나, TM의 농도는 반대의 상관관계를 나타냈다(p<0.0001). Dill *et al.*,(2006)의 연구와 비교한 결과, 주암호 총(n=23) DGM의 평균농도는 109 ± 15 pg/L로 국외 호수의 38 ± 16 pg/L 보다 약 3배 높았고, TM의 평균 농도(n=11)는 2.2 ± 0.4 ng/L로 국외호수의 1.0 ± 1.2 ng/L 보다 약 2.2배 높게 나타났다.

**주제어 :** 용존가스상 수은(DGM), 총 수은(TM), 빛의 강도, 강우, pH, 온도

## 1. 서론

환경 중에 존재하는 수은, 특히 메틸수은은 생태계 먹이사슬을 통해 생축적(bioaccumulation)되어 최종소비자인 인간의 건강에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 실제로 미국에서는 매년 약 60,000명의 태아가 자궁 내에서 메틸수은(methyl

mercury)에 오염된 상태로 태어나며, 이로 인하여 사지 떨림 현상, 언어 및 운동신경 장애, 학업수행 능력 부족 등 강한 신경독성 장애가 야기된다.<sup>2)</sup> 이러한 이유로 최근 미국 환경청(US EPA)은 수은을 주요오염물질(priority pollutants)로 지정, 관리하는 등, 전 세계적으로 환경 중 수은에 대한 관심이 높아지고 있다.

환경 중 수은이 수체로 유입되는 경로는 주로 대기의 습식 침적이며,<sup>3-5)</sup> 이렇게 침적된 수은은 용존반응성 수은(dissolved reactive mercury, DRM, Hg<sup>2+</sup>)으로 존재하는데, 다른 물질과

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: zohkd@snu.ac.kr  
Tel: 02-740-8891

Fax: 02-745-9104

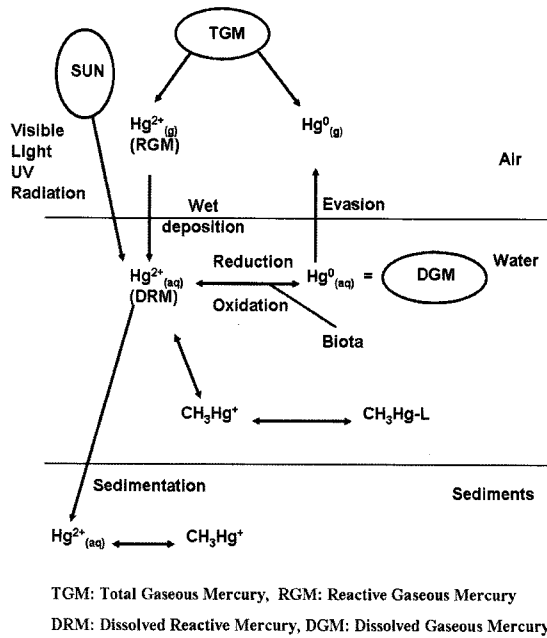


Fig. 1. Schematic representation of mercury cycling in the environment.

의 반응성이 강하여 빠른 속도로 산화·환원반응을 거친다.<sup>6,7)</sup> 산화반응에 의해 DRM은 최종적으로 유기물과 결합하여 메틸수은이 되거나 입자상 형태가 되며, 환원반응 후에는 용존가스상 수은(dissolved gaseous mercury, DGM, Hg<sup>0</sup>) 형태가 된다(Fig. 1).

DGM은 상온에서 휘발성을 가지는 독특한 화학적 성질 때문에 쉽게 대기 중 방출되거나 혹은 산화반응에 의해 다시 무기상태의 수은이나 메틸수은이 된다. 이처럼 수은은 다른 중금속과는 달리 일단 환경 중에 배출되면 대기과 수체 간의 지속적인 침적(deposition)과 기화(volatilization)를 반복하며

순환하는 특징이 있다.<sup>8,9)</sup> 따라서 대기 중의 DGM 방출은 수체 내, 수은의 생축적을 방지할 수 있는 유일한 제거 기작이며, 고정상 수은이 다시 이동상의 수은으로 변화하는 중요한 과정이다.<sup>10,11)</sup>

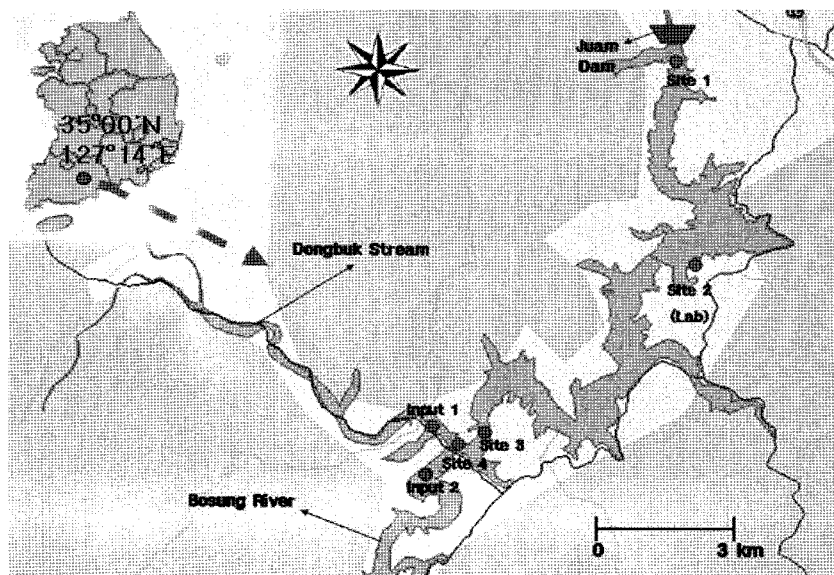
대기-수체간 DGM의 이동을 정확하게 파악하기 위해서는 DGM 생성기작을 이해하는 것이 중요하다. 국외 선행 연구결과에 의하면 빛의 세기, 수온, pH, DO, 용존유기물질(dissolved organic matter, DOM)과 같은 물리·화학적 인자들이 DGM 생성에 관여한다고 보고하고 있다.<sup>12-14)</sup> 이중 빛의 세기가 가장 중요한 역할을 담당하는 것으로 보고되고 있으나,<sup>15,16)</sup> 실제 환경에서는 특정인자 하나만으로 생성기작을 설명하기 어렵다. 따라서 실제 수체 환경에서의 DGM 변화를 지속적으로 관찰하여 환경인자들의 복잡한 상호관계를 파악하는 연구가 필요하다.

이에 근거하여 국외에서는 DGM에 관한 연구의 중요성을 인식하고, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 연구 활동이 이제 막 시작 단계이다. 특히, 기존 연구들은 대기나 수체에 존재하는 총 수은(total mercury, TM)에만 국한되어 있으며,<sup>17,18)</sup> 수체 내 DGM의 변화 및 특성에 대한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 2005년 8~10월 동안 전남 승주군 주암면에 위치한 수질보호구역 내의 주암호를 대상으로 DGM 변화 및 특성을 조사하였으며, 외국의 연구결과들과 비교·분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 대기 침적에 의한 수은 오염가능성이 있으며, 긴 체류시간(약 0.36에서 2년)<sup>19)</sup> DGM의 변화 및 특성을 파악하기 적절하고, 또한 수은 외의 오염물질에 대



Site 1: downstream Site 2: midstream Site 3: upstream Site 4: Junction of two inputs  
 Input 1: Dongbuk Stream, Input 2 : Bosung River

Fig. 2. Juam reservoir lake and the sampling locations.

해 비교적 오염이 덜 된 주암호를 연구 대상지역으로 선정하였다(Fig. 2).

2.1. 조사지역 특성 및 오염원

주암호는 전남 보성의 제암산이 발원지로서 하류로 93 km 지점인 섬진강의 제1지류인 보성강 중류부(전남 승주군 주암면)에 1991년 높이 58 m, 길이 330 m의 중앙차수벽댐이 축조됨으로써 형성된 인공호수로서 저수지 면적 33 km<sup>2</sup>, 최대저수용량 4.5억 톤, 최대수심 40 m, 수리학적 체류시간이 긴 인공호다. 주암호의 수리학적 특성 및 유역의 이용현황은 Table 1과 같다.<sup>19)</sup>

예상되는 수은의 주된 오염원으로는 주암호로부터 남동쪽으로 40 km에 위치한 광양의 초남공단과 광양제철소가 있으며, 남남동쪽 50 km에 울촌산단과 여천 국가산단이 있다. 이들은 특히 남동풍이 자주 부는 여름에 대기를 통한 습식침적으로 주암호를 오염시킬 수 있다.

본 연구에서는 주암호 4개의 지점과 유입수 2개의 지점을 선정하여 조사하였다(Fig. 2). 주암호 1지점(site 1)은 전남 순천시 주암면 대광리로 주암댐에서 500 m 전방에 위치하며, 2지점(site 2)은 승주군 송광면 대곡리(신평교), 4지점(site 4)은 전남 보성군 문덕면 덕치리로 주암호 유입수 두 곳의 합류점이며, 3지점(site 3)은 4지점으로부터 1 km 후방이다. 주암호로 유입되는 하천은 북서쪽에서 동북천(input 1)이 유입되고, 남쪽에서 보성강(input 2)이 유입된다. 또한 보성강의 유역면적이 전체의 약 70%를 차지하므로 유입수량의 대부분이 보성강을 통하여 유입된다고 볼 수 있다.

Table 1. Hydrological characteristics and utilization of drainage basin of Juam Reservoir lake<sup>19)</sup>

Surface area(km <sup>2</sup> )	22
Water capacity(×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	457
Average water volume(×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	311
Annual water inflow(×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	623
Annual water outflow(×10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	673
Maximum water level	108.6
Average water level	104.1
Maximum depth(m)	40
Mean depth(m)	15
Hydraulic residence time(yr)	0.36
Drainage area(km <sup>2</sup> )	1,010
Drainage area : lake area ratio	45
Paddy and dry field area in drainage basin(km <sup>2</sup> )	179
Forest and mountain area(km <sup>2</sup> )	744
Total population in drainage basin(persons)	58,553
Urban population in drainage basin(persons)	13,340
Rural population in drainage basin(persons)	45,193
Annual precipitation(mm/yr)	1,482
Air temperature(°C)	12.4
Wind speed(m/sec)	1.3

2.2. 실험재료 및 기구

환경 중 DGM의 농도는 매우 낮으므로 시료채취와 분석에 사용되는 모든 기자재의 엄격한 산세척과 관리가 필요하다. 본 연구에서는 US EPA에서 제시하는 산세척 과정을 따랐다.<sup>20)</sup>

2.3. 시료채취방법

시료채취는 계절별로 일주일 동안 이루어졌으며, 주암호 1, 3지점은 각각 하루에 2번씩 이틀간 측정하고, 유입수 2곳은 유속이 빠른 강이므로 DGM의 변화가 거의 없다고 가정하여 계절별로 오후에 한 번씩만 측정하였다. 4지점은 여름철 측정결과 DGM의 농도가 3지점과 거의 비슷하여 가을철에는 3지점을 대표로 측정하였다. 2지점은 DGM과 기타 환경인자간의 상호관계를 깊이 파악하기 위하여 3일 동안 3시간 간격으로 연속 측정하였다. 1, 3, 4지점의 시료채취 시간은 DGM의 생성 반응이 활발히 일어날 것으로 예상되는 오후 1시를 기준으로 하루는 오전 8시, 그리고 다른 날은 오후 6시, 하루에 2번씩 실시하였다.

DGM 분석을 위한 모든 시료채취 방법은 US EPA에 고시된 방법을 따랐다.<sup>21)</sup> 모든 지점에서 취수는 표층수로부터 1 m 깊이에서 teflon tube가 연결된 5-MSP 펌프(LGP)를 30분 이상 운전하여 안정화시킨 후, teflon bottle에 1 L를 채취하였다. DGM은 휘발성이 강하며 bottle 벽면에 잘 흡착되므로, 이를 방지하기 위하여 취수시 DGM과의 반응성이 적은 teflon bottle을 사용했으며, head space를 없앴다. 또한 시료의 오염을 방지하기 위하여 latex glove를 착용하여 취수하였으며, 취수가 끝난 bottle은 뚜껑을 teflon tape으로 봉하고, polyethylene bag에 삼중으로 포장하였다. 이것을 아이스박스에 넣어 최대한 빨리 실험실로 이동하여 DGM을 분석하였다. 모든 시료채취는 duplicate로 이루어졌다.

TM 및 기타 수질항목(TOC/DOC, anion/cation)의 시료채취는 50 mL falcon tube에 duplicate로 취수하여 아이스박스에 넣어 이동하였으며, 취수된 TM의 시료는 EM Science Suprapur 등급의 HCl(5 mL/L)을 넣어 수은을 보정한 뒤 분석할 때까지 냉장 보관했다.

기타 수질기본항목들은 시료 채취시 현장에서 동시에 측정했다. UV-A, B의 강도는 VLX 3W Radiometer(Cole-Parmer), DO는 DO meter(Model 850, Thermo Orion), pH · Conductivity · ORP · 수온은 pH/ISE/Conductivity meter(415 CP, Istek)를 이용했다. 또한 주암호 2지점에 기상탑을 설치하여 대기의 온도, 바람의 방향 및 속도 등을 측정했다. 위의 항목들은 측정하기 전 기기보정을 시행했다.

2.4. DGM의 분석

모든 시료분석은 Class 100 Clean room에서 실시하였다. DGM 분석은 Lindberg가 개발한 방법을 이용하였다.<sup>22)</sup> 이 방법은 1993년에 소개된 대기 중 기체상 수은(Total Gaseous mercury, TGM)의 실시간 측정 장치인 Tekran 2537A(Tekran Inc., Canada)를 이용하여 표층수에 존재하는 DGM을 현장에서 자동으로 분석하는 방법이다.

DGM을 1시간 이내의 신속한 연속 측정을 위해 auto purging system을 구성하였다(Fig. 3). 본 시스템에 의하면 DGM의 일일 변화 및 태양광과 강우 등이 DGM 생성에 미치는 영향 등에 관한 연구가 가능하다. 특히 실시간으로 얻어지는 in-field blank 값에 의하여 진공상태로 작동되는 purging system의 누출 여부를 감지할 수 있으며, purging system 및 채수병의 오염으로 인한 자료 손실을 방지할 수 있다.

시료가 담긴 수은과 비반응성인 pyrex 재질의 병에 4-way teflon stopcock가 부착된 유리재질의 impinger가 연결되고, stopcock를 통해 고순도 공기(zero air)가 유입된다(flow rate: 1.5 L/min). Purging 상태에서 고순도 공기에 의해 시료로부터 포화되어 휘발된 DGM은 곧바로 연결된 Tekran으로 들어가 분석된다. DGM 분석시, 시료상의 총 DGM 농도에 따라 purging 시간이 달라진다. 또한 stopcock의 위치를 Fig. 3(a)의 점선과 같이 변경하게 되면 시료를 거치지 않은 고순도 공기가 바로 Tekran으로 유입됨으로써, 시스템의 누출 여부를 확인할 수도 있다.

Tekran 2537A에 의한 수은 농도의 측정원리는 다음과 같다. Auto purging system에 포화된 용존가스상 수은(Hg<sup>0</sup>)은 운반가스인 고순도의 아르곤(Ar) 가스와 함께 gold trap의 손상방지 및 수분제거를 위한 soda lime trap을 거쳐 gold trap에 포집되고, cold-vapor atomic fluorescence spectrometer(CVAFS) analyzer로 탈착되어 검출기로 이동한다. 여기에서는 253.7 nm

의 파장에서 Hg 원자를 여기상태로 만들고, 이것이 photo-multiplier tube에 의해 감지되면 이 신호가 integrator로 전송되어 전압으로 전환되면서 형광현상을 나타내어 분석이 완료된다. Tekran 2537A의 내부 보식도는 Fig. 3(b)와 같다.

Tekran 2537A의 기기보정(QA/QC)은 수동주입보정(manual injection calibration)과 자동보정(auto calibration)이 있다. 수동주입보정은 알고 있는 5개 샘플의 농도를 주입하여 그 농도에 따른 area값을 산출하는 것으로 R<sup>2</sup>가 0.9995 이상일 경우에 분석을 실시하였다. 자동보정은 매우 간편한 보정방법으로 기기 내에서 Tekran이 자동으로 농도 보정을 실시하는 것이다. 본 연구에서는 DGM 분석 시 매일 자동보정을 실시하며, 계절별로 1회 수동주입보정을 실시하여 기기 상태를 확인하였다. 또한 auto purging system에서 고순도 공기가 유입되는 부분에 같은 농도의 Hg<sup>0</sup>를 반복 주입하여 오차범위가 5% 이내일 경우 DGM 분석을 실시하였다.

### 2.5. 기타 환경항목들의 분석방법

총 수은의 분석절차는 US EPA의 Lake Michigan Mass Balance Methods Compendium의 방법을 따랐으며,<sup>23)</sup> 분석 기기는 Tekran 2600을 이용했다. 총 수은에 대한 기기보정은 알고 있는 5개 샘플의 수은농도를 주입하여 결과에 대한 R<sup>2</sup>가 0.9995 이상일 경우 분석하였다. 이온분석은(anion/cation)은 수질오염공정시험법을 따랐으며,<sup>24)</sup> Dionex사의 DX-120

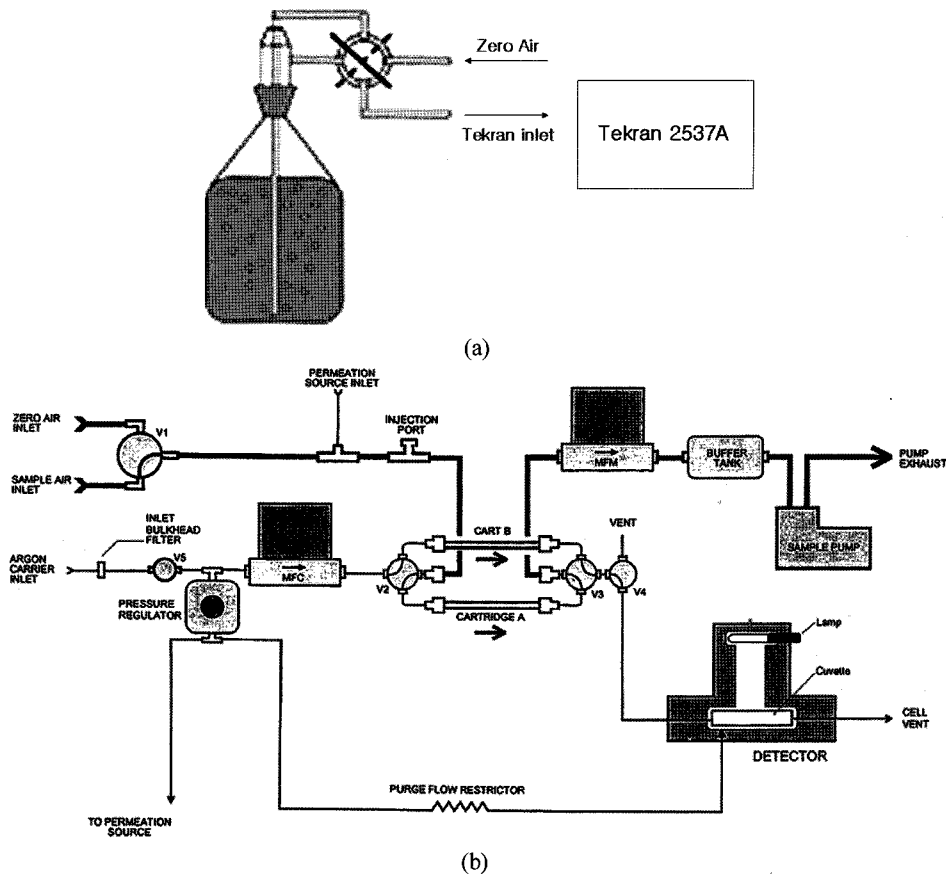


Fig. 3. Schematic representation of (a) auto purging system and (b) Tekran 2537A for DGM analysis.

Ion Chromatograph를 이용하였고, DOC 분석은 시료를 0.2  $\mu\text{m}$ (Advantec MFS) 필터로 여과한 후, ASI-5000A auto sampler가 장착된 TOC-5000A(Shimadzu)를 이용하여 NPOC 법으로 분석하였다. 0.2  $\mu\text{m}$  필터로 여과된 시료는 대부분의 입자상 물질이 제거되었다고 가정하였다.

**2.6. DGM과 기타 환경인자간의 통계적 유의성 검정방법**

DGM의 농도와 여러 환경인자들의 통계적 유의성을 검정하기 위해 SAS 8.2 system을 이용하여 GLM(general linear model) 분석을 하였고, 유의성 수준은  $\alpha=0.05$ 로 하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 여름철 주암호의 DGM 및 TM의 분석결과**

여름철 주암호 각 지점별 DGM 농도, 빛의 강도 및 기타 수질항목의 측정결과를 Table 2에 나타내었다. 그 결과, 주암호의 유입천인 동북천과 보성강의 DGM의 평균농도( $n=5$ )는  $101\pm14$  pg/L로 북서쪽 유입천(동북천)이 남쪽 유입천(보성강)보다 약 35% 높게 나타났으며, TM의 경우는 동북천과 보성강에서 평균( $n=6$ )  $2.6\pm0.1$  ng/L로 비슷하게 나타났다. 또한 상류지점( $n=8$ , site 3, 4)의 DGM 평균농도는  $95\pm$

**Table 2.** The results of DGM concentrations measured and other parameters in Juam reservoir lake

Date	Time	Site	Net DGM (pg/L) <sup>a</sup>	S.D.	n	TM (ng/L)	Water Temp. (°C)	pH	DO (mg/L)	DOC (mg/L)	UV-A ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	UV-B ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	Weather
8/28/2005	15:00	1	129.7	2.9	2	1.2	25.6	6.7	9.3	3.8	1148	130	clear
8/29/2005	9:40	1	147.2	14.7	2	1.8	25.1	6.9	9.0	3.1	821	97	fog
8/29/2005	13:30	1	106.3	2.3	2	2.1	27.6	7	9.1	2.4	1917	232	clear
8/29/2005	18:00	1	135.3	3.7	2	1.9	27.6	6.9	9.0	2.6	238	14	clear
8/31/2005	21:00	2	103.2	2.8	2	-	-	-	-	2.3	-	-	clear
8/31/2005	9:20	3	82.1	0.6	2	1.3	25.9	8.4	9.5	2.6	559	72	cloudy
8/31/2005	13:15	3	104.4	7.4	2	1.8	26.8	8.2	9.6	3.7	1189	195	clear
8/30/2005	13:30	4	92.2	2.6	2	2.1	25.8	8.7	10.6	2.9	725	95	rainy
8/30/2005	17:20	4	99.7	2.4	2	3.3	25.7	9	10.2	2.5	732	112	rainy
8/30/2005	14:00	input2	89.4	4.2	2	3.5	25.7	9.4	10.5	2.6	767	120	rainy
8/31/2005	14:37	input2	97.1	-	1	2.6	26.4	6.7	10.1	2.3	591	88	clear
8/31/2005	13:50	input1	125.4	8.5	2	2.5	26.8	8.9	9.9	3.2	565	86	clear
10/06/2005	12:00	2	34	0.2	2	2.3	21	6.9	7.8	1.8	1064	130	clear
10/06/2005	15:00	2	34	0.7	2	-	22	6.6	7.6	-	1021	97	clear
10/06/2005	18:00	2	29	1.0	2	-	22	7.2	9.2	-	9	0	clear
10/06/2005	21:00	2	24	0.4	2	-	21	7.2	7.9	-	0	0	clear
10/07/2005	6:00	2	20	0.0	1	-	21	6.2	7.5	-	1	0	clear
10/07/2005	9:00	2	16	0.6	2	-	21	6.8	7.7	-	53	3	rainy
10/07/2005	12:00	2	15	1.2	2	2.7	21	7.0	7.6	1.8	96	15	rainy
10/07/2005	15:00	2	12	0.9	2	-	21	6.1	7.5	-	43	5	rainy
10/07/2005	18:00	2	13	0.7	2	-	21	6.9	8.3	-	9	0	rainy
10/08/2005	9:00	2	11	1.0	2	-	21	7.0	7.7	-	493	41	cloudy
10/08/2005	12:00	2	13	0.1	2	3.3	20	7.1	7.7	1.7	1266	105	cloudy
10/25/2005	13:00	1	20.2	0.4	2	3.4	19.1	6.8	7.9	1.4	720	60	clear
10/25/2005	17:50	1	21.3	0.9	2	3.5	17.9	6.7	7.8	1.5	0	0	clear
10/26/2005	9:00	1	27.5	8.2	2	3.3	16.9	6.7	7.6	1.9	439	39	clear
10/26/2005	12:40	1	24.3	1.0	2	3.2	18.2	6.7	7.8	1.9	1310	113	clear
10/26/2005	21:30	2	15.1	0.6	2	3.1	20.0	7.0	7.7	2.2	0	0	clear
10/27/2005	13:40	3	23.3	3.5	2	3.5	18.9	7.1	10.1	1.7	917	82	clear
10/27/2005	17:30	3	13.9	0.9	2	3.5	17.8	7.1	8.9	1.8	115	4	clear
10/28/2005	9:10	3	20.5	1.9	2	3.4	17.6	7.1	8.3	1.8	203	2	clear
10/28/2005	13:15	3	24.7	-	1	2.3	18.1	6.9	8.7	1.8	328	41	cloudy
10/27/2005	13:00	input2	17.2	1.1	2	3.2	17.6	7.0	11.6	1.7	824	68	clear
10/28/2005	12:35	input1	18.0	2.1	2	3.1	17.7	7.1	8.9	2.9	365	46	cloudy

<sup>a</sup> 1 pg Hg L<sup>-1</sup> = 5 fM Hg.

8 pg/L, 중류지점(n=2)은 103±3 pg/L, 하류지점(n=8)은 130±15 pg/L로 상류에서 하류로 내려갈수록 증가하는 경향을 보였다. 반면 TM 평균농도는 상류지점(n=4)은 2.1±0.7 ng/L, 하류지점(n=4)은 1.7±0.3 ng/L로 하류로 갈수록 약간 낮아지는 경향을 보였다. pH의 경우는 상류 및 하류에서 각각 평균 8.5와 6.0으로, 하류로 갈수록 점차 낮아졌고, DO와 수온은 평균 9.7 mg/L와 26.3°C로 큰 변화를 보이지 않았다. 이온의 농도는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우, 상류지점에서 1.2 mg/L, 하류지점에서 2.3 mg/L로 상류에서 하류로 갈수록 증가하였으나, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>의 농도는 각각 3.6, 4.8, 2, 0.4, 0.5, 1.4 mg/L로 비슷하게 나타났다. NO<sub>2</sub><sup>-</sup>와 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>는 거의 검출되지 않았다.

여름철의 주암호의 각 지점별 DGM 및 TM의 평균농도와 pH의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 유입수 중 동북천의 DGM 농도가 높게 나온 이유는 동북천 상류지역에 존재하며 수온의 배출원이 될 수 있는 도시지역과 공단들의 영향 때문이라고 예상된다. 또한 합류점에서는 주암호 유입수의 약 70%가 보성강으로부터 유입되어 희석되기 때문에 DGM의 농도가 낮아졌다고 사료된다.

주암호의 여름철 DGM 평균농도는 상류에서 95±8 pg/L, 하류에서 130±15 pg/L로 상류에서 하류로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈다. 상류에서 하류로 갈수록 DGM의 농도가 높아진 이유는 주암호의 긴 체류시간(0.36년에서 2년)으로 인해 대기로부터 침적된 수온들이 하류로 가면서 축적되었기 때문으로 사료된다. 또한 여름철은 주로 남동풍이 불었고, 이는 주암호로부터 남동쪽 인근에 위치한 광양과 여천의 공단이나 제철소에서 배출되는 수온이 주암호를 비롯한 지역에 특히 많은 영향을 준 것으로 예상된다.

pH와 DGM 생성간의 연관성은 pH 7을 중심으로 약산이 되거나 약알칼리성으로 갈수록 대기로부터 수온의 침적이 높아져 DRM이 증가하는 것으로 보고되었다.<sup>12)</sup> DRM이란 수체 내 양이온 2가 수온으로, 다른 물질과의 반응성이 강하여 빠른 속도로 산화·환원반응을 거쳐, DGM 혹은 메틸수온이 된다.<sup>6,7)</sup> 또한 pH가 낮아질수록 산화반응이 활발해져 DGM

이 DRM으로 쉽게 바뀌는 것으로 조사되었다.<sup>25)</sup> 본 연구의 경우 DGM의 농도는 상류에서 하류로 갈수록 증가하는데 반해, pH는 낮아지는 경향을 보였다. 따라서 하류로 갈수록 pH가 내려가면서 DGM의 산화가 일어나 DRM으로 변화되는 양보다는 대기로부터 DRM의 침적이 높아져 DGM 생성이 증가된 것으로 사료된다.

TM의 평균농도는 상류에서 2.1±0.7 ng/L, 하류지점에서 1.7±0.3 ng/L로 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 DGM이 대기로 방출되었기 때문으로 사료된다.

### 3.2. 가을철 주암호의 DGM과 TM의 분석결과

이에 비해 가을철 분석의 결과 주암호의 유입수(동북천, 보성강; n=6)의 DGM 평균농도는 18±0.1 pg/L로 유입수가 서로 비슷하게 나타났다. 상류지점의 DGM의 평균농도(n=8)는 21±4.1 pg/L, 중류지점(n=24)은 20±8.2 pg/L, 하류지점(n=8)은 23±2.8 pg/L로 나타났다. 또한 TM의 농도는 약 3.2±0.1 ng/L, pH는 약 6.9, 용존산소(DO)는 약 8.7 mg/L, 수온은 약 18.2°C로 상류에서 하류까지 큰 변화를 보이지 않았다. Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 각각 0.2와 5.6 mg/L로 지점에 관계없이 비슷했고, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> 이온들은 거의 검출되지 않았다.

가을철의 DGM 농도는 유입수(18±0.1 pg/L)로부터 하류(23±2.8 pg/L)로 갈수록 약간 증가하는 경향을 나타내었고, 이는 역시 긴 체류시간의 증가로 인한 대기로부터의 침적된 수온량의 증가 때문으로 사료된다. 반면 TM의 농도는 지점별로 별 차이를 보이지 않았다(3.2±0.1 ng/L).

### 3.3. 여름철과 가을철 주암호의 DGM과 TM의 농도 비교

주암호의 여름철과 가을철의 DGM 농도를 비교한 결과, 여름철 DGM의 평균농도(n=23)는 109±15 pg/L로 가을철(n=44)의 20±2 pg/L보다 약 5.5배 높았고, 지점별 DGM 평균농도의 변화는 유입수의 여름철 DGM 평균농도(n=5)의 경우 101±14 pg/L로 가을철(n=4)의 18±0.1 pg/L보다 약 5.6배, 상류지점의 여름철(n=8)은 95±8 pg/L로 가을철(n=8)의 21±4.1 pg/L보다 약 4.5배, 중류지점의 여름철(n=2)은 103±3 pg/L로 가을철(n=24)의 20±8.2 pg/L보다 약 5배, 하류지점의 여름철(n=8)은 130±15 pg/L로 가을철(n=8)의 23±2.8 pg/L보다 약 5.7배씩 각각 높았다(Fig. 4). 이처럼 DGM의 농도가 계절적 차이를 보인 이유는 수온 차이 때문으로 예상할 수 있다. 본 연구결과 여름은 26°C, 가을은 18°C로 계절적인 수온의 차이가 나타났다. 기존 연구에 의하면 수온이 낮아질수록 DRM의 농도가 감소하고, 이로 인해 DGM의 농도가 감소한다고 보고하고 있다.<sup>25,26)</sup> 또한 통계적인 분석의 결과, DGM의 농도와 수온 간의 통계적 유의성이 있음으로 나타났다(p<0.0001, Table 3).

계절에 따른 DGM농도 차이의 또 다른 원인으로는 계절적 풍향변화의 차이를 들 수 있다. 동풍이 부는 여름과는 달리 가을에는 주로 남서풍 혹은 서풍으로 풍향이 바뀌면서 동쪽의 인근공단 지역으로부터 수온의 영향을 덜 받게 되어 DGM의 농도가 감소될 수 있다.

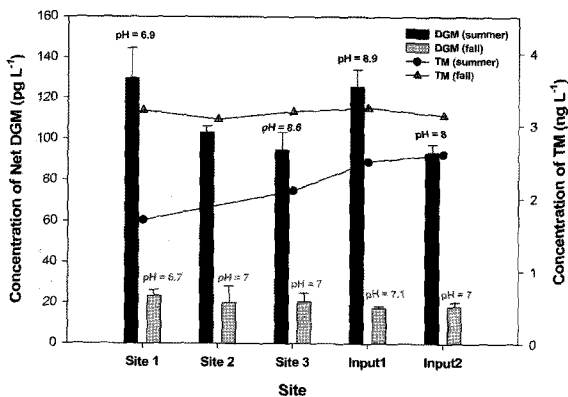


Fig. 4. Seasonal comparison of the average concentrations of Net DGM, pH and TM for each site.(site 1: downstream, site 2: midstream, site 3: upstream, input 1: Dongbuk Stream, input 2: Bosung River)

**Table 3.** The results of statistic relation between DGM concentration and environmental parameters

parameter	n	$\beta$	S.E.	p-value
Water temperature	33	11.3	1.11	<0.0001
DOC	33	56.5	9.18	<0.0001
TM	50	-44.5	9.50	<0.0001
DO	33	21.7	6.04	0.001
UV-B	33	0.35	0.10	0.002
pH	33	26.6	8.80	0.005
UV-A	33	0.03	0.01	0.031
Conductivity	33	-0.08	1.14	0.946

$\beta$ : estimate, S.E.: standard error,  $\alpha=0.05$

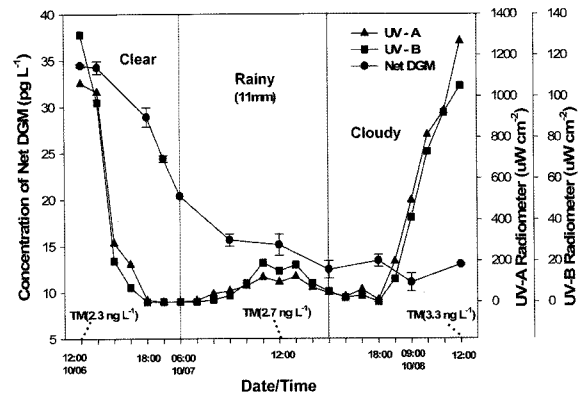
계절에 따른 DGM농도 차이의 또 다른 이유는 수체 내 존재하는 미생물들(조류, 박테리아)의 농도 차이에 따른 DGM 농도의 변화 가능성이다.<sup>27)</sup> 실제로 주암호의 계절적 Chlorophyll a의 농도변화에서 여름철이 가을에 비해 높은 것으로 나타났다.<sup>28)</sup> 또한 미생물 작용에 영향을 주는 DOC 농도도 여름은 2.8 mg/L, 가을은 1.9 mg/L로 계절적인 차이를 나타냈으며, 통계적 분석의 결과도 DGM과 DOC 농도 간의 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났다( $p<0.0001$ , Table 3). 따라서 계절적 조류 및 DOC의 농도변화가 DGM 농도의 변화에 영향을 주는 한 요소라 여겨지며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

반면에 주암호의 여름철과 가을철의 TM 농도를 비교한 결과, 여름철 TM 평균농도인  $2.2\pm 0.4$  ng/L에 비해 가을철은  $3.2\pm 0.1$  ng/L로 약 1.4배 증가했다. 이는 가을철 DGM의 농도 감소로 인해 수체로부터 대기 중으로 기화되는 수은의 양이 감소하여, 수체 내 TM의 농도를 증가시킨 것으로 여겨진다. TM과 DGM 간의 통계적인 분석 결과도 반대의 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났다( $p<0.0001$ , Table 3).

### 3.4. 강우 및 태양광의 세기의 따른 DGM 농도의 변화 양상

2005년 10월 6~8일 3일 동안, 주암호 중류지점(site 2)을 대상으로 강우 전후의 DGM 농도의 변화를 조사했으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 강우 기간의 DGM 평균농도는 13.7 pg/L로 강우 전 같은 기간에 비해( $32$  pg/L) 약 58% 감소했으며, 반면 TM의 농도는 2.2 ng/L에서 2.7 ng/L로 약 19% 증가했다.

강우 중에 DGM 농도가 감소한 이유는 태양광의 강도가 맑은 날에 비해 감소했기 때문으로 여겨진다(맑은날 UV-A:  $1.043 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , UV-B:  $114 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 비오는 날 UV-A:  $69.5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , UV-B:  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ). 또한 Fig. 5에서 나타내듯이, 강우 후 빛의 강도가 증가한 시점부터 DGM의 농도가 증가하는 추세를 나타낸 것은 DGM이 광화학적 반응에 의해 생성된다는 기존 연구결과를 뒷받침해주고 있다.<sup>15,16,26)</sup> 또한 강우 시에 TM 농도의 증가는 습식침적으로 인해 대기 중 존재하던 수은이 수체로 유입되었기 때문으로 사료된다.

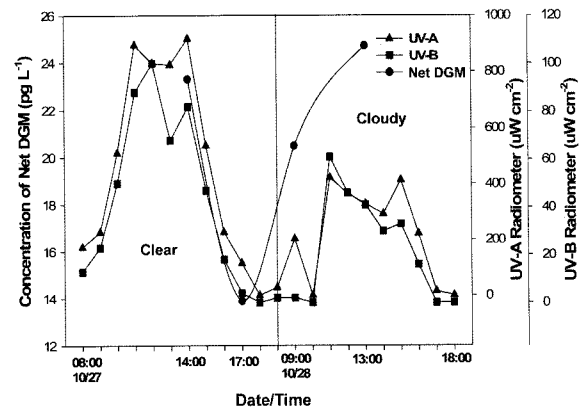


**Fig. 5.** Diurnal variation of DGM related UV Radiometer and rain event in fall, 2005.

다음으로 가을철 상류지점(site 3)의 자외선과 DGM 농도의 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 이틀간 연속 측정된 DGM 농도의 변화는 27과 28일 13시에  $23\pm 3.5$  pg/L와  $25$  pg/L로 가장 높았고, 27일 17시에  $14\pm 1$  pg/L로 가장 낮게 나타나, 태양광과 DGM 농도가 비슷한 경향을 보였다. 통계적인 분석 결과도 DGM의 농도와 UV-A 및 UV-B간에 상관성이 있는 것으로 나타났으며( $p>0.032$ ,  $p>0.002$ , Table 3), 이것은 기존 문헌과 같이 광화학적 반응이 DGM의 생성에 기인한다는 것을 보여주는 결과이다.<sup>15,16,28,29)</sup>

### 3.5. 주암호와 국외 호수의 여름철 DGM 및 TM 농도의 비교

최근에 국외에서 조사된 DGM의 연구는 주로 여름철에 제한되어 있으며, 아직까지 계절별로 조사된 연구가 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 주암호의 여름철 DGM 및 TM 농도 값들과 국외 연구에서 제시한 값들을 비교한 결과를 Table 4와 Fig. 7에 나타냈다. 그 결과 주암호의 총( $n=23$ ) DGM의 평균 농도는  $109\pm 15$  pg/L로 국외 호수의 평균인  $38\pm 16$  pg/L보다 약 3배 정도 높은 수치를 나타내었다. 또한 TM의 평균 농도( $n=11$ )는  $2.2\pm 0.4$  ng/L로 국외 호수의  $1.0\pm 1.2$  ng/L보다 약 2.2배 높게 나타났다.



**Fig. 6.** Diurnal variation of DGM related UV radiometer of the upper stream(site 3) in fall, 2005.

**Table 4.** Mean DGM concentrations measured in fresh waters of the lakes in the North America for summer season(Modified from Dill's study<sup>29)</sup>)

Lake	Location	Time	Sampling depth(m)	Temp. (°C)	Total Hg <sup>a</sup> (ng/L)	DGM <sup>d</sup> (pg/L)	Reference
Amituk Lake(arctic)	Resolute Bay, Cornwallis Island, Canada (75°03'N, 96°46'W)	August 1994	Surface	3	0.3	32-41	Amyot et al., 1997b
Merretta Lake(arctic)	Resolute Bay, Cornwallis Island, Canada (74°42'N, 94°59'W)	August 1994	Surface	1	0.44	61	Amyot et al., 1997b
North Lake(arctic)	Resolute Bay, Cornwallis Island, Canada (74°46'N, 95°06'W)	August 1994	Surface	1	0.36	58	Amyot et al., 1997b
Northern Wisconsin Lakes <sup>c</sup>	N. Highland Lake Dist. ~4 km away from Trout Lake Station(46°N, 89°W)	May and October 1993	Surface	9 <sup>b</sup>	1.5 <sup>b</sup>	40 <sup>b</sup>	Watras et al., 1995
Northern Wisconsin Lakes <sup>c</sup>	N. Highland Lake District	August 1989	~1	-	-	12-71	Fitzgerald et al., 1991
Big Dam West Lake	Kejimkujik Park, Nova Scotia, Canada	June 2001	Surface	18-21.5	5.01	76	O'Driscoll et al., 2003
Puzzle Lake	Kejimkujik Park, Nova Scotia, Canada	June 2001	Surface	19.5-23.5	0.87	27	O'Driscoll et al., 2003
Whitefish Bay, Lake Superior <sup>c</sup> (temperate)	Paradise, MI (46.6°N, 85°W)	July and August 1997	~1	-	0.26	25	Vette, 1998
Tahquamenon River plume <sup>c</sup> (temperate)	Paradise, MI (46.6°N, 85°W)	July and August 1997	~1	-	0.85	26	Vette, 1998
Whitefish Bay, Lake Superior <sup>c</sup> (nearshore, temperate)	Paradise, MI (46.6°N, 85°W)	June 1998	Surface	18	1.7	29	Zhang and Lindberg, 2002
Tahquamenon River plume <sup>c</sup> (temperate)	Paradise, MI (46.6°N, 85°W)	June 1998	Surface	23	-	25	Zhang and Lindberg, 2002
Lake Michigan(temperate) <sup>c</sup>	Five stations	August 1994	Surface	8-13	~0.3	28±17	Sullivan and Mason, 1998
Lake Michigan(temperate) <sup>c</sup>	41-46°N, 85-88°W	July 1994	~5	22	-	20	Vette, 1998
Ranger Lake(temperate)	Canada(45°09'N, 78°02'W)	June 1994	~0.5	21	1.7	72	Amyot et al., 1997c
Jacks Lake(temperate)	Canada(44°41'N, 78°02'W)	July 1994	~0.4	23	-	48	Amyot et al., 1997c
Lake Erie(temperate)	41°54'N, 81°39'W	July 1994	~0.2	21	0.3	34	Amyot et al., 1997c
Cane Creek Lake, TN <sup>c</sup>	36°09'N, 85°33'W	June 2003	Surface	26	<0.2	37	Dill et al., 2005
Cane Creek Lake, TN <sup>c</sup>	36°09'N, 85°33'W	July 2003	Surface	30	<0.2	41	Dill et al., 2005
Cane Creek Lake, TN <sup>c</sup>	36°09'N, 85°33'W	August 2003	Surface	30	<0.2	35	Dill et al., 2005
Everglades, FL(subtropical) <sup>c</sup>	26°40'N, 80°22'W	June-July 1996-1998	0.1	27	0.7-1.0	4-23	Lindberg et al., 2000
Everglades, FL(subtropical) <sup>c</sup>	26°23'N, 80°30'W	June-July 1996-1998	0.1	28	-	23	Lindberg et al., 1999
Everglades, FL(subtropical) <sup>c</sup>	25.3-26.3°N, 80-80.6°W	July 1995	0.23	33	2.6	33	Krabbenhoft et al., 1998
Bosung River(input)	34°57'N, 127°10'E	August 2005	1	26	-	93±4	This study
Dongbuk Stream(input)	38°58'N, 127°10'E	August 2005	1	26.8	-	125±8	This study
Juam Lake(Munduk Bridge)	At the junction of two inputs to the Juam Lake (34°58'N, 127°10'E)	August 2005	1	25.8	-	96±4	This study
Juam Lake(upper)	~1 km away from the Munduk Bridge (34°58'N, 127°11'E)	August 2005	1	26.3	-	93±11	This study
Juam Lake(middle)	-	August 2005	1	-	-	103±3	This study
Juam Lake(down)	35°03'N, 127°14'E	August 2005	1	26.5	-	130±15	This study

<sup>a</sup> 1 ng · Hg/L = 5 pM Hg. <sup>b</sup> Annual average. <sup>c</sup> USA.<sup>d</sup> Mean values for the sampling period indicated in the table(1 pg/L = 5 fM).



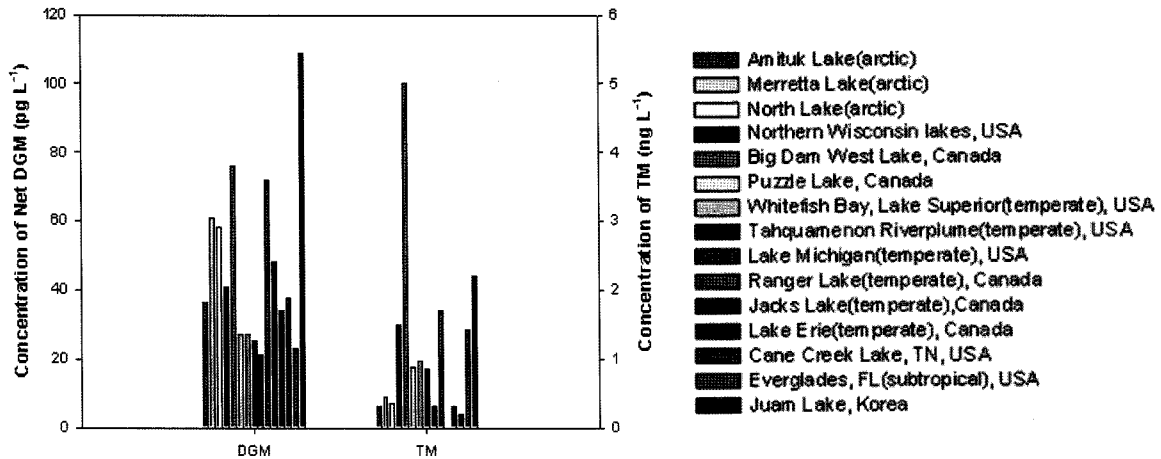


Fig. 7. Comparison of average concentrations of DGM and TM measured in fresh waters of a number of lakes in the North America and Korea for summer season.

이 결과는 아시아 지역의 수은배출량이 전 세계적으로 큰 비중을 차지한다는 것을 감안할 때, 국내의 수체 내의 오염도가 크다는 것을 의미하며 지속적인 수은의 모니터링이 필요함을 알려준다. 또한 환경인자들의 변화와 DGM 및 TM의 농도 변화의 상관성 연구를 통하여 수체 내에서의 DGM 및 TM 농도의 변화 기작을 살펴보는 지속적인 연구는 수은의 수체 내의 거동을 이해하는 데 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구는 전라도의 수질보호구역 내의 주암호를 대상으로 DGM 변화 및 특성을 조사하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 여름철 주암호의 상류에서 하류까지 DGM 평균농도의 변화는 95±8 pg/L에서 130±15 pg/L로 증가했으나, TM의 평균농도는 상류지점은 2.1±0.7 ng/L, 하류지점은 1.7±0.3 ng/L로 낮아지는 경향을 보였다.
- 2) 가을철 주암호의 DGM 농도는 유입수(18±0.1 pg/L)로부터 하류(23±2.8 pg/L)로 갈수록 약간씩 증가했으나, TM의 평균농도는 3.2±0.1 ng/L로 비슷하게 나타났다.
- 3) 계절적인 DGM의 농도를 비교한 결과, 여름철 주암호의 총 DGM의 평균농도는 109±15 pg/L로 가을철의 19±3 pg/L보다 약 5.5배 높았으나, 총 TM의 평균농도는 여름철은 2.2±0.4 ng/L로 가을철의 3.2±0.1 ng/L보다 약 1.4배 낮았다.
- 4) 중류지점에서의 강우에 따른 DGM 평균농도의 변화는 비가 오기 전 32 pg/L에서 비가 내리는 동안 13.7 pg/L로 약 58% 감소했으며, TM은 2.2 ng/L에서 2.7 ng/L로 약 19% 증가했다.
- 5) 가을철 상류지점의 하루 중 자외선과 DGM 평균농도의 변화는 태양광의 강도와 비슷한 경향을 나타냈다.
- 6) DGM 농도와 수은, DOC 농도 간의 통계적 분석결과는 유의한 상관관계(α=0.05)를 보였으나, TM은 DGM과 반대의 상관관계를 나타냈다(p<0.0001).

7) Dill *et al.*,(2006)의 연구와 비교한 결과, 주암호 총(n=23) DGM의 평균농도는 109±15 pg/L로 국외 호수의 38±16 pg/L보다 약 3배 높았고, TM의 평균 농도(n=11)는 2.2±0.4 ng/L로 국외 호수의 1.0±1.2 ng/L보다 약 2.2배 높게 나타났다.

#### 사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2004-10890-0)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 과학재단에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Meili, M., "The coupling of mercury and organic matter in the biogeochemical cycle - towards a mechanistic model for the boreal forest zone," *Water Air Soil Pollut.*, **56**, 333~347(1991).
2. National Research council. National Academy Press, Washington, DC(2000).
3. Fitzgerald, W. F., Mason, R. P., and Vandal, G. M., "Atmospheric cycling and air-water exchange of mercury over mid-continental regions," *Water Air Soil Pollut.*, **56**, 745~767(1991).
4. Keeler, G. J., "Lake Michigan Urban Air Toxics Study," US EPA, Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory. EPA-600/SR-94/191(1994a).
5. Keeler, G. J., Hoyer, M. E., and Lamborg, C. H., "Integration and Synthesis," *Mercury Pollution*, Watras, C. J. and Huckabee, J. W.(Eds.), Lewis Publishers., Boca Raton, FL, pp. 231~241(1994b).
6. Slemr, F., Schuster, G., and Seiler, W., "Distribution, speciation and budget of atmospheric mercury," *J. Atmos. Chem.*, **3**, 407~434(1985).

7. Tokos, J., Hall, B., Calhoun, J., and Prestbo, E., "Heterogeneous gas-phase reaction of  $Hg^0$  with  $H_2O_2$ ,  $O_3$ ,  $CH_3I$ , and  $(CH_3)_2S$ ; implications for atmospheric Hg cycling," *Atmos. Environ.*, **32**, 823~827(1998).
8. Mason, R. P., Fitzgerald, W. F., and Morel, M. M., "The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences," *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **58**, 3191~3198(1994).
9. Schroeder, W. H. and Munthe, J., "Atmospheric mercury-an overview," *Atmos. Environ.*, **32**, 809~822(1998).
10. Xiao, Z. F., Munthe, J., Schroeder, W. H., and Lindqvist, O., "Vertical fluxes of volatile mercury over forest soil and lake surfaces in Sweden," *Tellus*, **43(B)**, 267~279(1991).
11. Lindberg, S. E., Meyers, T. P., and Munthe, J., "Evolution of mercury vapor from the surface of a recently limed acid forest lake in Sweden," *Water Air Soil Pollut.*, **85**, 725~730(1995).
12. Waite, D. T., Snihura, A. D., Liu, Y., and Huang, G. H., "Uptake of atmospheric mercury by deionized water and aqueous solutions of inorganic salts at acidic, neutral and alkaline pH," *Chemosphere*, **49**, 341~351(2002).
13. Amyot, M., Mierle, G., Lean, D., and McQueen D. J., "Effects of solar radiation on the formation of dissolved gaseous mercury in temperate lakes," *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **61**, 975~987(1997c).
14. Ravichandran, M., "Interactions between mercury and dissolved organic matter-a review," *Chemosphere*, **55**, 319~331(2004).
15. Amyot, M., Mierle, G., Lean, D., and McQueen, D. J., "Sunlight-induced formation of dissolved gaseous mercury in lake waters," *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 2366~2371(1994).
16. Zhang, H. and Lindberg, S. E., "Sunlight and iron(III)-induced photochemical production of dissolved gaseous mercury in freshwater," *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 928~935(2001).
17. Kim, K., Kim, M., Kim, J., and Lee, G., "The concentrations and fluxes of total gaseous mercury in a western coastal area of Korea during late March 2001," *Atmos. Environ.*, **36**, 3413~3427(2002).
18. Kim, K., Mishra, V., and Hong, S., "The rapid and continuous monitoring of gaseous elemental mercury(GEM) behavior in ambient air," *Atmos. Environ.*, **40**, 3281~3293(2006).
19. 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수, "국내 주요 호수의 육수학적 조사 (4)-주암호," *Korean J. Limnol.*, **34(1)**, 30~44(2001).
20. Keeler, G. and Landis, M., Standard Operating Procedure for Sampling of Mercury in Precipitation, US EPA(1994b).
21. Mason, R. B. and Sullivan, K. A., Standard Operating Procedure for Site Selection and Sampling for Mercury in Lakewater, US EPA(1996).
22. Lindberg, S. E., Vette, A. F., Miles, C., and Schaedlich, F., "Mercury speciation in natural waters: measurement of dissolved gaseous mercury with a field analyzer," *Biogeochemistry*, **48**, 237~59(2000a).
23. Gerald, J., Keeler and Matthew S. Landis., Standard Operating Procedure for Analysis of Vapor Phase Mercury, US EPA(1994).
24. 환경부, 수질오염공정시험법(2000).
25. Yamamoto, M., "Stimulation of elemental mercury oxidation in the presence of chloride ion in aquatic environments," *Chemosphere*, **32**, 1217~1224(1996).
26. O'Driscoll, N. J., Beauchamp, S., Siciliano, S. D., Rencz, A. N., and Lean, D. R. S., "Continuous analysis of dissolved gaseous mercury(DGM) and mercury flux in two freshwater lakes in Kejimikujik Park, Nova Scotia: evaluating mercury flux models with quantitative data," *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 2226~2235(2003).
27. Lanzillotta, E., Ceccarini, C., Ferrara, R., Dini, F., Frontini, F. P., and Banchetti, R., "Importance of the biogenic organic matter in photo-formation of dissolved gaseous mercury in a culture of the marine diatom *Chaetoceros* sp.," *Sci. Total. Environ.*, **318**, 211~221(2004).
28. 환경부, 물환경정보시스템 <http://water.nier.go.kr/weis/>.
29. Dill, C., Kuiken, T., Zhang, H., and Ensor, M., "Diurnal variation of dissolved gaseous mercury(DGM) levels in a southern reservoir lake(Tennessee, USA) in relation to solar radiation," *Sci. Total. Environ.*, **357**, 176~193(2006).