

수질환경

주암호의 계절별 용존가스상 수은의 변화 및 특성

박중성* · 오세희 · 신미연 · 이승묵 · 조경덕
서울 종로구 연건동 서울대학교 보건대학원

〈초록〉

DGM은 상온에서 휘발성을 가지는 수은의 독특한 화학적 성질 때문에 쉽게 대기로 방출될 수 있고, 대기 중으로의 DGM 방출은 수체 내 수은의 유일한 제거 기작일 뿐만 아니라, 고정상으로 존재하던 수은이 다시 이동상의 수은으로 변화하는 중요한 과정이다. 본 연구는 2005년 8월과 10월에 주암호를 대상으로 실시간 자동분석 장치(Tekran 2537A)를 이용하여 DGM 농도변화를 관찰하였다. 전반적인 주암호(n=23)의 여름철 평균 DGM 농도는 $110 \pm 21 \text{ pg L}^{-1}$ 으로 기존에 발표된 국외 호수에서의 DGM 농도보다 약 3배정도 높았다. 강우에 따른(강우량 : 0.4 mm) DGM 농도 변화는 비가오기 전 89 pg L^{-1} 에서 비온 뒤 97 pg L^{-1} 으로 약 9%가 증가했다. 그러나 가을철 평균 DGM 농도(n=21)는 $20 \pm 0.4 \text{ pg L}^{-1}$ 로 여름철보다 약 5.5배 감소했고, 비가 내리는 날씨에서의 DGM 농도는 13.7 pg L^{-1} 로 맑은 날 같은 시간에 비해(32 pg L^{-1}) 약 58% 감소했다.

1. 서론

환경 중 수은이 수체로 유입되는 경로는 주로 대기의 습식침적이며(Mason et al., 1994), 이렇게 침적된 수은은 양이온 2가 형태(용존 반응성 수은, Dissolved Reactive Mercury, DRM, Hg^{2+})로 존재하는데, 다른 물질과의 반응성이 강하여 빠른 속도로 산화·환원반응을 거친다. 산화반응에 의해 DRM은 최종적으로 유기물과 결합하여 메틸수은이 되거나 입자상 형태가 되며, 환원반응 후에는 용존가스상 수은(Dissolved Gaseous Mercury, DGM, Hg^0) 형태가 된다.

DGM은 상온에서 휘발성을 가지는 독특한 화학적 성질 때문에 쉽게 대기로 방출되거나 혹은 산화반응에 의해 다시 무기상태의 수은이나 메틸수은이 된다. 이처럼 수은은 다른 중금속과는 달리 일단 환경 중에 배출되면 대기와 수체 간의 지속적인 침적(deposition)과 배출

(emission)을 반복하며 순환하는 특징이 있다(Poissant et al., 2000).

기존 연구 결과에 의하면 다양한 물리·화학적 인자들이 DGM 생성에 관여하며, 이중 빛의 세기가 가장 중요한 역할을 담당하는 것으로 보고되고 있다(Amyot et al., 1997c). 그러나 실제 환경에서는 특정인자 하나만으로 생성기작을 설명하기 어렵기 때문에 실제 수체 환경에서의 DGM 변화를 지속적으로 관찰하여 환경인자들의 복잡한 상호관계를 파악하는 연구가 필요하다. 이처럼 국외에서는 DGM에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내의 기존 연구는 대기나 수체에 존재하는 총 수은에만 국한되어 있으며(Kim et al, 2002), 수체 내 DGM의 변화 및 특성에 대한 연구는 전혀 없다. 따라서 본 연구에서는 2005년 8월과 10월에 전남 승주군 주암면에 위치한 주암호를 대상으로 국내 최초로 계절적 DGM 변화 및 특성을 조사하였으며, 그 결과를 기존 국외 연구결과와 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

1. 조사지역 특성 및 오염원

본 연구에서는 대기 침적에 의한 수은 오염가능성이 있으며, 긴 체류시간으로 DGM의 변화 및 특성을 파악하기에 적절한 주암호를 연구 대상지역으로 선정하였다. 수은의 주된 오염원으로는 주암호로부터 남동쪽으로 40 km에 위치한 광양의 초남공단과 광양제철소가 있으며, 남남동쪽 50 km에 울촌산단과 여천국가산단이 있다.

2. 시료채취 및 분석방법

본 연구에서는 미국환경청에서 제시하는 산세척 과정을 따랐다(U. S. EPA 1994b). 시료채취는 주암호 4개 지점(n=18)과 유입수 2개 지점(n=5)에서 실시하였다. 정확한 시료채취 지점은 Fig. 1과 같고, 시료채취 방법은 EPA의 고시된 것을 따랐다(U. S. EPA 1996).

수은 시료분석은 Class 100 Clean room에서 실시하였고, DGM 분석은 Lindberg(Lindberg et al., 2000)가 개발한 방법을 적용하였다. 또한 시료채취 시 현장에서 수질기본항목 및 기타 항목을 동시에 측정하였으며, 사용하기 전 모두 기기보정 하였다.

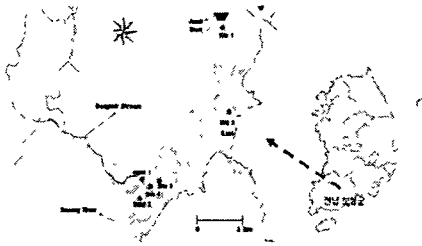
3. 결과 및 고찰

1. 주암호의 계절별 용존가스상 수은(DGM) 분석결과

주암호 각 지점별 DGM 농도, 빛의 강도 및 기타 수질항목의 측정결과는 Table 1과 같다. 여름철 결과 유입수(n=5)의 DGM 평균농도는 $101 \pm 14 \text{ pg L}^{-1}$ 이었으며, 주암호에서의 DGM 평균농도는 상류에서 하류로 내려갈수록 DGM의 농도가 증가하는 경향을 보였다($95 \rightarrow 130 \text{ pg L}^{-1}$).

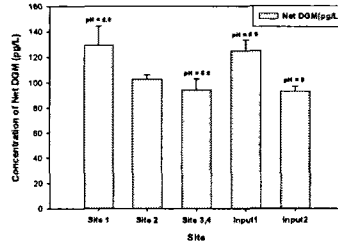
pH와 conductivity는 하류로 갈수록 약간 감소하였고, 수온과 DO는 큰 변화를 보이지 않았다. 질산성질소의 농도는 상류에서 하류로 갈수록 약간씩 증가하였고, 이 외에 Cl^{-} , SO_4^{2-} , Na^{+} , NH_4^{+} ,

Mg²⁺, Ca²⁺는 대체로 비슷하게 나타났다. 중류지점의 가을철 평균 DGM 농도(n=21)는 20 ± 0.4pg L⁻¹ 로 여름철보다 약 5.5배 감소했으며, 하루 중 DGM 변화량은 여름철 보다는 훨씬 적었다.



Site 1 down, Site 2 middle, Site 3 upper, Site 4 Junction of two inputs ,Input 1 Dongbuk Stream, Input 2 Bosung River

Fig. 1. Juam reservoir lake and sampling locations



Site 1: down, Site 2 middle, Site 3 upper, Site 4 Junction of two inputs ,Input 1 Dongbuk Stream, Input 2 Bosung River

Fig. 2. The distribution profile of the Net DGM concentration

Table 1. The results of dissolved gaseous mercury (DGM) concentration and other parameters in Juam reservoir lake

Date	Time	Site	Net DGM (pg/L) _a	SD	n	Water T (°C)	pH	Cond (µs)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	UV-A (µW cm ⁻²)	UV-B (µW cm ⁻²)	DOC (mg/L)	ORP (mV)	weather
8/28	15 00	1	130	29	2	25.6	6.7	71.1	2.3	1148	130	9.3	-	clear
8/29	9 40	1	147	14.7	2	25.1	6.9	71	2.0	821	97	9.0	-	fog
8/29	13 30	1	106	2.3	2	27.6	7	71.4	2.0	1917	232	9.1	-	clear
8/29	18 00	1	135	3.7	2	27.6	6.9	70.5	1.9	238	14	9.0	-	clear
8/31	21 00	2	103	2.8	2	-	-	-	1.8	-	-	-	-	clear
8/31	9 20	3	82	0.6	2	25.9	8.4	75.9	1.4	559	72	9.5	-	cloudy
8/31	13 15	3	104	7.4	2	26.8	8.2	79.3	1.4	1189	195	9.6	-	clear
8/30	13 30	4	92	2.6	2	25.8	8.7	78.5	1.2	232	41	10.6	-	rainy
8/30	17 20	4	100	2.4	2	25.7	9	79.2	1.3	135	11	10.2	-	rainy
8/30	14 00	Input 2	89	4.2	2	25.7	9.4	77.7	1.2	192	22	10.5	-	rainy
8/31	14 37	Input 2	97	0.0	1	26.4	6.7	79.9	1.1	1183	195	10.1	-	clear
8/31	13 50	Input 1	125	8.5	2	26.8	8.9	79.2	1.3	956	171	9.9	-	clear
10/06	12 00	2	34	0.2	2	21.1	6.9	77.5	-	1064	130	7.8	168.2	clear
10/06	15 00	2	34	0.7	2	21.7	6.6	98.3	-	1021	97	7.6	175.2	clear
10/06	18 00	2	29	1.0	2	21.5	7.2	85.9	-	9	0	9.2	190.2	clear
10/06	21 00	2	24	0.4	2	21.3	7.2	81.6	-	0	0	7.9	152	clear
10/07	6 00	2	20	0.0	1	21	6.2	82.6	-	1	0	7.5	169.2	clear
10/07	9 00	2	16	0.6	2	21.2	6.8	87.1	-	53	3	7.7	185.1	rainy
10/07	12 00	2	15	1.2	2	21.2	7.0	71.6	-	96	15	7.6	187.3	rainy
10/07	15 00	2	12	0.9	2	21.2	6.1	74	-	43	5	7.5	189	rainy
10/07	18 00	2	13	0.7	2	20.9	6.9	70.6	-	9	0	8.3	189.4	rainy
10/08	9 00	2	11	1.0	2	20.8	7.0	74.6	-	493	41	7.7	189	cloudy
10/08	12 00	2	13	0.1	2	20.4	7.1	74.3	-	1266	105	7.7	193	cloudy

각 지점별 DGM의 평균농도(Fig. 2)결과에서 다른 인자들의 변화가 거의 없음에도 불구하고 하루지점으로 갈수록 DGM의 농도가 높아진 이유는 대기의 습식침적에 의한 영향으로 추측할 수 있다.

2. 주암호와 국외 호수에서의 용존가스상 수은(DGM) 농도의 비교

Dill(Dill et al., 2005)의 조사에 나타난 국외 각 호수의 여름철 DGM 농도와 비교한 결과, 주암호의 여름철 총(n=23) DGM의 평균 농도는 $110 \pm 21 \text{ pg L}^{-1}$ 으로 국외 호수($38 \pm 16 \text{ pg L}^{-1}$)보다 약 3배 높은 수치를 나타내었다.

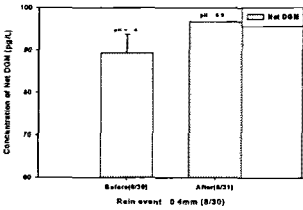
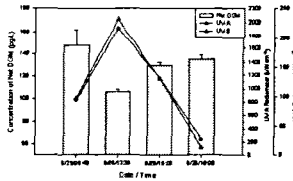


Fig. 3. Comparison of DGM concentration about rain event



DGM vs UV-A, B $r^2 = -0.8, -0.78$
Fig 4 Diel variation of DGM related UV Radiometer in summer

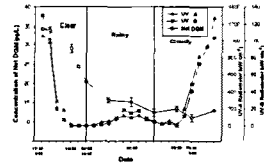


Fig. 5. Diel variation of DGM related UV Radiometer and rain event in autumn

3. 강우 및 UV-A, UV-B와 DGM 농도의 변화양상

보성강에 하루 동안(8/30) 내린 강우량은 0.4 mm 였으며, DGM의 평균 농도는 비오기 전 후로 약 9%(8 pg)가 증가하였다(Fig. 3).

Fig 4에서 이틀간 측정된 결과를 하루에 일어난 것으로 가정했을 때, 주암호의 하루 중 DGM의 변화는 자외선의 강도와 반대의 경향을 나타냈다. 가을철 결과(Fig. 5)는 기존연구와 비슷하게 자외선과 DGM 농도가 비슷한 경향을 나타냈다. 또한 비가 오는 중에는 DGM 농도는 13.7 pg L^{-1} 로 맑은 날 같은 시간에 비해(32 pg L^{-1}) 약 58% 감소했다.

4. 결론

주암호는 긴 수리학적 체류시간을 가진 호수로서 하루로 갈수록 유속이 감소하고 수체와 대기의 접촉시간이 길어짐으로써 대기의 침적 영향을 받아 수체 내로 DGM이 유입된 것으로 생각된다. 또한 전반적인 주암호의 평균 DGM 농도가 국외보다 약 3배 높게 나타난 것과 적은 강우량에도 DGM 농도가 약 9% 정도 증가한 것은 국내 호수에 영향을 미치는 대기 중 수은의 오염이 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 대기 중 수은이 1년 이상의 체류시간을 갖는 특징을 생각할 때, 국내 다른 호수에 대한 DGM 연구의 필요성이 제기된다.

<참고문헌>

Amyot M, Mierle G, Lean D, Mc Queen D.J. : Effects of solar radiation on the formation of dissolved

gaseous mercury in temperate lakes. *Geochim osmochim Acta*. 61, 975 - 87, 1997c.

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.

Keeler, G. and Landis, M. : Lake Michigan Mass Balance Methods Compendium; Standard Operating Procedure for Sampling of Mercury in Precipitation, *U. S EPA*, 1994b. <http://www.epa.gov/glnpo/lmmb/methods/umfield.pdf>(1994b).

Lindberg SE, Vette AF, Miles C, Schaedlich F. : Mercury speciation in natural waters: measurement of dissolved gaseous mercury with a field analyzer. *Biogeochemistry*. 48, 237-59, 2000

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.

Mason, R.P. Fitzgerald, W.F. Morel, M.M. : The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, 3191-3198, 1994.

Poissant L, Amyot M, Pilote M, Lean D. : Mercury water - air exchange over the upper St Lawrence River and Lake Ontario. *Environ Sci Technol*. 34, 3069 - 78, 2000.

Robert P. Mason and Kristin A. Sullivan. : Standard Operating Procedure for Site Selection and Sampling for Mercury in Lakewater, *U S EPA* ,1996.