수질 중 중금속 성분의 규제 기준의 문제점에 대한 연구

- 수은을 중심으로 -

김 기 현*·임 계 규**

Suggestions to Improve Regulation Policy on Mercury in Water

K. H. Kim*·Gye-Gyu Lim**

Ⅰ. 서론

인류의 산업활동이 지속되는 한 주변환경의 지속적인 오염은 불가피한 현실이라고 볼 수도 있다. 그러나 이러한 현실에도 불구하고, 환경오염에 대한 정화노력이 어느 정도 결실을 맺는 경우도 드물지 않게 발견할 수 있다. 예를 들어, 대기오염의 민감한 지표로 인식되는 이산화황이나 납과 같은 물질들의 오염상태가 점차 저감되고 있다는 사실은 비록 부분적이고 제한적이긴 하지만, 고무적인 현상이 아닐 수 없다(Kim and Song, 1997; Kim, et al., 1997).

시민들의 환경에 대한 의식의 함양으로, 환경위해 요소들에 대한 경각심이 날로 증가하고 있다. 이러한 시대적 분위기는 각종 위해인자들에 대한 규제기준의 설정과 같은 형식으로 나타나고 있다. 그러나 이러한 문제를 해결하기 위해 시도된 많은 노력에도 불구하고, 아직까지 문제의 심각성에 대한 인식이 결여된 부분들도 존재한다.

이러한 문제의 단적인 예로 수은과 같은 중금속 성분의 규제기준에 대한 문제점을 지적하지 않을 수 없다. 오늘날 수은의 환경오염과 그로 인한 피해는 광범위한 현상으로 보고되고 있다. 예를 들어, 치아의 아말감 오염 문제 등과 같이 수은의 오염은 많은 사람의 관심을 받고 있다(2004년 1월, SBS TV). 실제로 1950년대에 일본의 미나마타에서 발생한 수은과 관련된 환경오염문제는 지금까지도 많은 사람들에게 완전히 치유되지 않은 큰 상처로 남아 있다. 당시 미나마타에서 일어난 수은유출과 관련된 환경오염사건은 - 폐수중에 방류된 수은이 물고기 등으로 전이되고 그 다음 단계로 사람들의 체내축적의 과정을 그치며 인체에 치명적인 위해 요소로 작용한 사실 - 잘 알려진 바 있다. 그 결과 사람의 모발에서 96～705 ppm 수준의 수은이 검출되었다고 보고되고 있다(예를 들어, Ishimure, 1990).

1980년대 말까지 무연탄 등 석탄연료를 많이 사용한 우리나라의 경우에도, 서울지역과

* 세종대학교 지구환경과학과 교수(Professor, Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University)
** 호서대학교 환경안전공학부 교수(Professor, Division of Environmental and Safe Engineering, Hoseo University)

같은 곳에서 쉽게 수 십 ng/m^3 수준을 초과하는 고농도의 수은이 빈번하게 검출되었다(Kim and Kim, 2000, 2002). 오늘날 석탄연료 사용과 같이 절대적으로 중요한 비중을 차지하던 단일 발생원의 영향은 상대적으로 미미해졌지만, 아직까지 발전시설물, 폐기물소각, 여러 가지 산업공정 등을 통해 배출되는 수은은 여러 가지 환경문제를 초래할 잠재적 소지를 안고 있다(Kim and Kim, 2001a, b). 이들 발생원으로부터 배출되는 수은은 단순히 대기오염을 야기하는 것 뿐만 아니라, (대기를 매개체로) 토양과 수질오염으로까지 확대되는 것으로 잘 알려져 있다. 여러 환경계로 전파된 이들 수은은 다시 다양한 먹이사슬의 경로를 통해, 동물은 물론 사람에게 까지 전이가 이루어진다. 특히 어패류와 같은 수산물을 통해 전파되는 수은오염은 인체에 치명적인 메틸수은이 축적되는 결과를 초래할 수도 있다. 따라서, 선진외국에서는 두뇌의 발달이 미미한 유아 또는 임산부 등에게 적정량 이상의 섭취를 금지하도록 권고하고 있다. 본문에서는 수질에 함유된 중금속 수은의 각종 규제기준을 살펴 보고, 이러한 규제기준의 문제점을 논하고자 하였다.

Ⅱ. 연구방법

본문에서는 수질에 대한 각종 오염물질의 규제기준이 다양하게 설정되어 있음에도 불구하고, 일부 이러한 기준에 대한 문제점을 지적하기 위하여 각종 법령에 제시된 규제기준을 비교할 수 있는 근거를 확보하였다. 특히, 이러한 비교에서 오늘날 중금속 성분들 중에서 3대 핵심 관리대상(수은, 납, 카드뮴)으로 지목되는 수은을 중심으로, 관리기준과 관련된 문제점을 지적하고자 하였다. 이러한 문제점은 현재 수은을 검출하는데 활용되는 기술적인 수준과 규제기준의 비현실성을 체계적으로 논거하는 방식으로 접근하고자 하였다.

Ⅲ. 결과와 토론

1. 수은의 화학적 특성과 수환경계의 분포특성

수은은 주기율표의 IIB족으로 Zn나 Cd과 같은 전이원소로 분류된다. 수은은 상온에서 액상으로 존재하는 유일한 금속으로서, 은백색의 광택을 띤다. 수은은 또한 표면장력과 비중이 크고, 전기적 저항이 작은 특성을 보인다. 또한 온도의 상승에 대해 규칙적으로 부피의 증가를 보이는 특성을 지닌다. 모든 종류의 수은화합물은 각각의 독특한 독성을 지닌다. 따라서 각각의 형태마다 인간이나 동식물의 건강에 미치는 영향도 조금씩 다르게 나타난다. 수은의 물리화학적 특성에 대한 면면을 고찰해 보면, 철이나 백금을 제외한 거의 대부분의 금속과 쉽게 합금이나 아말감을 형성한다는 점에 유의할 필요가 있다. 예를 들어, 수은이 텅스텐 등과 합금을 형성하면, 부식저항이 뛰어난 특성을 보이는 것으로 잘 알려져 있다. 그리고 수은은 실온에서 공기, 암모니아, 이산화탄소, 질소산화물, 산소 등과는 반응하지 않으나, 할로겐이나 황(황화수소 등)과는 즉시 결합하는 특성도 지닌 것으로도 알려져 있다.

수은은 크게 7개의 동위원소와 4개의(불안

정한) 방사성 동위원소로 존재한다. 수은은 0, +1, +2의 산화도를 취하므로, 다음과 같은 무기와 유기 화합물로 구분하는 것이 가능하다(Gelaude, et al., 2002). 전자의 경우, 금속(원소성) 수은(elemental mercury: Hg^0), 제 1 수은염, 제 2 수은염, 아말감 등으로 구분할 수 있다. 이들은 염화 제 1 수은(감홍), 염화 제 2 수은(승홍), 질산 제 1 수은, 질산 제 2 수은 등의 화합물을 형성한다. 이에 반해, 유기수은 화합물은 크게 알릴수은과 알킬수은 화합물로 구분할 수 있다(Gelaude, et al., 2002). 알릴수은 화합물에는 초산페닐수은(농약), 머큐로크롬(소독약) 등이 있고, 알킬수은 화합물로는 메틸수은, 에틸수은 등이 있다.

이들 유기수은 화합물들 중에서 메틸수은의 치명적인 독성은 잘 알려져 있다(Gelaude, et al., 2002). 실제 환경생태계에서 쉽게 발견되는 모노메틸 수은(monomethyl Hg: MMHg)과 다이메틸 수은(dimethyl Hg: DMHg) 등은 수생태계를 중심으로 심각한 오염문제를 야기하기도 하는데, 일본의 미나마타 사건과 같이 심각한 재앙으로 발전한 사례도 확인할 수 있다. 이들 성분은 상대적으로 체내 흡수율이 높고, 체외배출이 쉽게 이루어지지 않는다.

수은은 다른 환경오염물질과 같이 지구상의 모든 환경계에 고르게 분포하는 것으로 알려져 있다(Schroeder and Munthe, 1998). 주로 광물질의 형태를 띄고 지각상에서 고농도로 발견될 뿐만 아니라, 해수, 토양, 대기, 동식물을 포함한 모든 생물체에 이르기까지 미량 성분의 형태로 분포하는 것이 확인된다. 수은의 지구환경계 내의 분포양상을 개략적으로 비교해 보면, 토양 중에 약 150 ng/g(ppb), 해수 중에 평균 3 ng/l(ppt), 우수 중에는 평균 수~수십 ng/l(ppt), 청정 대기 중에는 약 1~2 ng/㎥ 수준으로 존재한다. 담수나 해수와 같은 자연수 중에도 수은의 존재가 뚜렷하게 확인된다. 자연수 중의 수은 농도는 ng/L단위 등을 많이 사용하는데, 본문에서는 편의상 이를 대용한 ppt 단위를 기준으로 농도분포를 비교하였다. 수은의 농도는 담수에서 평균 30 ppt(10~100) 정도, 해수에는 대략 100 ppt 수준 전후의 범위 (5~5000)로 넓게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 해수의 경우, 지역별로 어느 정도 편차를 보이지만, 청정지역의 평균농도는 주로 0.5 ppt 수준에서 발견된다.

수산물에 대한 수요와 소비가 증가하면서, 이들에 함유된 수은의 위해성에 대한 연구가 많은 과학자들의 주요 연구소재로 다루어 졌다. 대기(또는 강물) 등을 통해, 해수 중으로 수은의 유입이 이루어진다. 이들은 해수 중에서 수산물의 체내에 쉽게 축적되는데, 이 때 메틸수은 등의 형태로 전환이 이루어진다. 따라서 바닷물에 수은의 오염이 일어나면, 이는 해양 생태계의 먹이사슬을 따라 전이된다. 실제로 연근해는 물론 원양지역에서 수확해 오는 참치와 같은 대형 수산물에서 까지 이러한 문제의 심각성이 확인되기도 한다. 강수 또는 우수로 표현되기도 하는 빗물 중에는 약 수~수백 ppt 정도의 농도로 수은이 발견된다. 빗물중의 수은은 주로 Hg^{2+}와 같이, 산화도가 가장 높은 상태로 존재한다(이들은 주로 $Hg(OH)_2$, $HgCl_2$ 등의 화합물 또는 이온형태를 취하는 것으로 보고되고 있다.).

2. 수질 중 수은의 환경 규제기준과 문제점

전 세계적으로 수은오염 문제를 줄이기 위한 관리차원의 규제가 각국의 주요 기관들을 통해 제시되고 있다. 국내의 경우, 여러 가지 법령을 통해, 수은의 규제기준이 제시되고 있다. 대기 중 수은의 농도에 대한 규제기준은 일반 환경대기에 대해서는 존재하지 않고, 배출시설물에 대한 배출기준의 형태로 존재한다. 배출기준에 의하면 2004년 말까지는 5 ㎎/Sm^{3}의 기준이 요구되지만, 2005년부터는 이보다 50배 정도 엄격한 0.1 ㎎/Sm^3(또는 100 ㎍/m^3)의 기준이 적용될 예정에 있다(참고로 미국이나 독일과 같은 국가에서는 폐기물소각시설에 대한 배출기준을 우리나라에서 향후에 적용할 기준치보다 훨씬 더 엄격한 80 또는 50 ㎍/m^3 수준으로 제시하고 있다.). 토양오염의 경우, 토양환경 보전법에 의해 규제되고 있다. 이 법령에 의하면, 토양오염 우려지역은 가 (4) 와 나 등급(16 mg/kg)으로 구분하고 있다. 또한 이보다 더 심각한 오염이 진행된 경우, 토양대책기준을 정하여 규제하는데, 이들 지역은 다시 가 (10)와 나 등급(40 mg/kg)으로 구분 된다.

대기오염이나 토양오염에 대한 규제기준에 비해, 물의 경우 훨씬 더 다양한 기준이 적용되고 있다. 〈표 1〉에는 국내 환경부에서 먹는 물을 위시한 각종 수질에 대한 수은 및 중금속 성분들의 기준농도와 배출허용 농도를 제시하였다. 전자의 경우, 먹는물, 하천/호소, 해역 등에 대한 기준으로 나누어지고 있다. 〈표 2〉에는 주요 국가 및 기관의 규제기준을 먹는물을 중심으로 소개하였다. 이들 기준은 대체로 유사한 양상을 보인다. 국외의 기준이 대부분 0.001 ~0.002 mg/l의 수준을 보이는 것을 알 수 있다. 이에 반해 국내의 경우, 그와 유사하거나 또는 그 보다 더 엄격한 기준이 설정되었다는 것을 볼 수 있다. 예를 들어, 먹는물의 경우 우리나라의 환경부도 국외 주요 기관들과 같이 0.001 mg/l의 수준을 규제기준으로 제시하고 있다. 해역에 대한 기준은 이보다 두 배 더 엄격한 0.0005 mg/l의 수준을 요구하고 있다. 이처럼 먹는물의 기준보다 해역의 기준이 더 낮게 설정된 부분도 어느 정도 비현실적이기는 하지만, 이보다 더 심각한 문제점은 하천이나 호소에 대한 기준 또는 청정지역에 대한 배출허용 기준에서 발견할 수 있다. 이들 기준에서는 "수은이 검출되지 않아야 한다" 또는 "불검출"으로 그 기준을 제시하고 있다.

〈표 1〉 국내 각종 수질 및 배출허용기준: 금속 성분을 중심으로

국내 각종 수질 기준 (Concentrations in mg/l)				배출허용기준			
성분	먹는물 기준[1]	하천/호소[2]	해역 기준[2]	청정	가	나	특례
Al	0.2						
As	0.05	0.05	0.05	0.1	0.5	0.5	0.5
B	0.3						
Cu			0.02	0.5	5	5	5
Cd	0.01	0.01	0.01	0.02	0.1	0.1	0.1
Cr^{6+}	0.05	0.05	0.05				
Cr				2	10	10	5
Fe	0.3			5	5	5	10
Hg	0.001	검출되어서는안됨	0.0005	불검출	0.005	0.005	0.005
Mn	0.3						
Pb	0.05	0.1	0.05				
Zn	1		0.1	1	5	5	5
Se	0.01						

1) 환경법 2장 환경보전 11조 먹는물 수질기준 및 검사기준 등에 관한 규칙
2) 환경정책 기본법 시행령 [별표 1] 환경기준 (제2조 관련)

〈표 2〉 주요 국가 및 기관의 먹는물 기준: 금속 성분을 중심으로

	먹는물 기준 (mg/l)*				
구분	WHO	미국	영국	호주	일본
Al	0.2	-	0.2	0.2	-
As	0.01	0.05	0.05	0.05	0.01
B	0.3	-	2	-	0.2
Ba	0.7	2	1	-	-
Cd	0.003	0.005	0.005	0.005	0.01
Cr^{6+}	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05
Cu	2	1.3	-	-	-
Fe	0.3	-	0.2	0.3	-
Hg	0.001	0.002	0.001	0.001	0.0005
Mn	0.5	-	-	-	-
Ni	0.02	0.1	0.05	-	0.01
Pb	0.01	0.015	0.05	0.05	0.01
Sb	0.005	0.06	0.01	-	-
Se	0.01	0.05	0.001	0.01	0.01
Zn	3	-	5	5	-

* 환경연구정보센터(www.dicer.org) 자료

오늘날 많은 연구기관에서는 각종 환경매체에 함유된 수은을 분석하기 위해, 원자흡광 분석기(atomic absorption spectrometry: AAS) 또는 원자형광 분석기(atomic fluorescence spectrometry) 등을 사용하고 있다(Ebinghaus et al., 1999). 이 때, 수은에 대한 분석을 목적으로 이들 기기의 감도를 향상시키기 위하여 냉증기 방식(cold vapor)의 기법을 접목시키므로서, 일상적으로 수 pg($=10^{-12}$ g) 이내 영역의 검출한계를 유지하는 것이 가능하게 되었다 (Ebinghaus et al., 1999). 앞서 언급한 바와 같이, 일반적으로 오염이 되지 않은 각종 수질매체에서 수은의 농도는 리터당 수~수백 ng 영역에서 발견된다. 현재 일반적으로 사용되는 보편적인 검출기술 수준으로 10 ml 또는 수 십 ml 정도의 물을 분석한다면, 0.1 ng/l 영역까지 검출하는 것이 가능하다. 따라서 공기와 접촉하는 대부분의 물의 경우, 아무리 오염원으로부터 격리되어 있다고 하여도, 검출한계 이하의 영역에서 수은이 존재할 가능성은 희박하다. 결론적으로 이처럼 보편화된 검출기법을 활용하여도, 극단적으로 청정한 수준의 수은을 검출하는 것이 가능하다. 그런데 일반적으로 규제기준이라는 기준의 설정은 상당 수준 오염에 인접할 정도로 문제의 소지가 나타나기 쉬운 영역에서 책정된다는 점을 감안하면, 앞서 언급한 불검출과 같은 규제기준은 거의 현실성이 없다고 판정할 수 있다. 실제 가장 엄격한 규제기준이 적용되어야 할 먹는물과 같은 경우에도, 앞서 언급한 임의의 검출능(0.1 ng/l)에 대비하여, 1000배 높은 1000 ng/l(또는 0.001 mg/l) 수준의 기준을 요구하고 있다는 점을 참고할 필요가 있다. 이러한 차이를 감안하면, 이들 불검출을 요구하는 기준의 비현실성은 보다 쉽게 파악할 수 있다. 이와 같은 비현실적 규제기준은 보다 현실성이 있는 기준으로 빠른 시간 내에 대체가 되어야 할 것으로 사료된다.

Ⅳ. 결론

본문에서는 수은이라는 중금속 성분을 대상으로 규제기준의 비현실성을 집중적으로 설명하였다. 이와 같이 규제기준이 비현실적으로 설정되어 있는 문제는, 법령의 설정이 빠르게 진보하는 과학기술의 특성을 잘 반영하지 못하는 문제점을 반영하는 것으로 사료된다. 본문에서 지적한 수은과 관련된 문제 뿐만 아니

라, 기타 오염물질들에 대해서도 여러 가지 비현실적인 문제점들에 대해 보다 심도있는 모색이 따라야 할 것으로 사료된다.

사사

수은과 관련된 연구를 지속적으로 수행할 수 있게 지원한 한국과학재단의 지원에 사의를 표하는 바이다.

참고문헌

Ebinghaus, R., Jennings, S. G., Schroeder, W. H., Berg, T., Donaghy, T., Guentzel, J., Kenny, C., Kock, H. H., Kviektus, K., Landing, W., Muhleck, T., Munthe, J., Prestbo, E. M., Schneeberger, D., Slemr, F., Sommar, J., Urba, A., Wallschlarger, D., and Ziao, X., 1999, "International Field Intercomparison Measurements of Atmospheric Mercury Species at Mace Head, Ireland", *Atmospheric Environment*, 33: 3063~3073.

Gelaude, I., Dams, R., Resano, M., Vanhaecke, F., and Moens, L., 2002, "Direct Determination of Methyl-Mercury and Inorganic Mercury in Biological Materials by Solid Sampling-Electrothermal Vaporization-Inductively Coupled Plasma-Isotope Dilution-Mass Spectrometry" *Analytical Chemistry*, 74: 3833~3842.

Ishimure, Michiko, 1990, *Paradise in the Sea of Sorrow*. English translation by Livet Monnet. Yamaguchi Publishing House(c/o Japan Publications Trading Co., Ltd., Tokyo).

Kim, K. H. and Kim, M. Y., 2001a, "Some Insights into Short-term Variability of Total Gaseous Mercury in Urban Air" *Atmospheric Environment*, 35(1), 49~59.

Kim, K. H. and Kim, M. Y., 2001b, "The Temporal Distribution Characteristics of Total Gaseous Mercury at an Urban Monitoring Site in Seoul during 1999 to 2000" *Atmospheric Environment*, 35(25), 4253~4263.

Kim, K. H. and Kim, M. Y., 2002, "A Decadal Shift in Total Gaseous Mercury Concentration Levels in Seoul, Korea: Changes between the Late 80s and the Late 90s" *Atmospheric Environment*, 36(4), 663~675.

Kim, K. H. and Kim, M. Y., 2000, "The Effects of Anthropogenic Sources on Temporal Distribution Characteristics of Total Gaseous Mercury" *Atmospheric Environment*, 34(20): 3337~3347.

Kim, K. H. and Song, D. W., 1997, "The Concentrations of Lead in Urban and Nonurban Atmospheres of Won Ju City, Korea" *Water, Air and Soil Pollution*, 98(3-4), 225~273.

Kim, K. H., Kim, D. S., and Lee, T. J., 1997, "The Temporal Variabilities in the Concentrations of Airborne Lead and its Relationship to Aerosol Behavior" *Atmospheric Environment*, 31(20), 3449~3458.

Schroeder, W. H. and Munthe, J., 1998. "Atmospheric Mercury-an Overview" *Atmospheric Environment*, 32: 809~822.

원 고 접 수 일 : 2004년 2월 9일
최종원고채택일 : 2004년 3월 18일