

4C6) 황해 수은 침적 예측을 위한 실측 및 모니터링 Monitoring and Modeling Study for Mercury Deposition over the Yellow Sea

심상규 · 김진영 · 진현철 · 권운용
 한국과학기술연구원 환경기술연구단

1. 서 론

최근 급속한 경제발전으로 석탄 사용량이 급속히 증가하고 있는 중국의 수은 배출량 추정치는 연간 약 600톤으로 전세계 배출량의 3분의 1에 이르며, 중국내 도시에서의 대기 중 수은 농도는 한국 내 도시에 비해 약 5배 정도 높은 수준이다. 미국은 자국내 수은의 30%가 중국에서 이동해 온 것이라고 주장하고 있다. 황해는 중국과 한반도에 의하여 3면이 막혀 있는 바다로서, 바닷물의 유출입이 제한적이어서 오염물질의 축적이 쉽기 때문에 중국으로부터의 수은 오염에 대한 관심이 필요하다. 막대한 양의 수은이 대기 중으로 배출되어 이동하는 중 일부가 황해로 침적되어 해양 환경을 악화시키고 이로 인해 황해 자원에 영향을 줄수 있다. 본 연구에서는 한국, 중국에서의 지상 모니터링, 한국, 중국간 페리를 이용한 모니터링, 모델링 연구를 종합하여 한국, 중국 내의 수은 농도 현황을 파악하고 황해의 오염에 영향을 미치는 수은의 이동과 침적량을 예측하였다.

2. 연구 방법

대기중 수은과 먼지 및 빗물에 포함된 수은의 농도를 한국과 중국에서 측정하였다. 대기중 수은의 농도는 한국의 경우 서울 한국과학기술연구원 및 덕적도 등 2개소, 중국의 경우 북경 중국과학원 생태환경연구센터, Chengshantou 및 Ningbo 등 3개소에서 계절별 2주일 측정하였으며 사용기기는 RA-915⁺(Lumex사 제품)이었다. 인천과 제주도, 인천과 중국 Qingdao 노선의 페리를 이용하여 각 왕복 1회 측정하였으며 가스상 수은 농도는 같은 장비를 사용하였다. 먼지(한국은 TSP, 중국은 PM₁₀) 및 빗물중 수은의 농도도 양국에서 측정하였다(그림 1).

수은의 황해 침적량을 산출하기 위하여 CMAQ-Hg(Community Multiscale Air Quality Mercury)모델을 사용하였으며 기상장은 PSU/NCAR 메조스케일 모델(PSU/NCAR MM5) 모델을 사용하여 추출하였다. CMAQ-Hg 모델은 수은의 가스상 및 액상 화학 반응과 수은의 건식/습식 침적을 고려하는 모델이다.

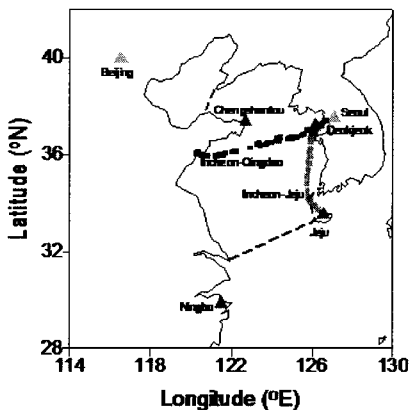


Fig. 1. Ground monitoring sites and shipboard monitoring routes.

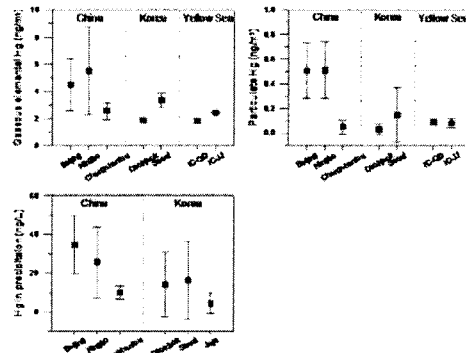


Fig. 2. Hg⁰ concentration from ground and shipboard monitoring.

3. 결과 및 고찰

중국의 북경과 Ningbo의 가스상 수은 농도가 중국 Chengshantou와 한국 덕적도의 수은의 농도가 낮았으며 중국 북경은 서울보다 1.5-4배, 덕적도 보다는 2-10배 높은 수준이었다(그림 2). 황해상의 평균 수은 농도는 연안에 위치한 시골지역과 비슷한 수준이거나 약간 높은 수준이었다. 그림에서는 제시되지 않았으나 중국의 경우 밤시간에 수은의 농도가 높아지는 일변화가 관찰되었으나 한국에서는 뚜렷한 일변화가 관찰되지 않았다.

인천-Qingdao간 가스상 원소 수은의 평균 농도는 $1.8 \pm 0.15 \text{ ng/m}^3$ 으로서 덕적도와 유사한 수준이었으며 입자상 수은의 평균 농도는 $0.09 \pm 0.03 \text{ ng/m}^3$ 으로서 덕적도, Chengshantou와 서울의 중간 농도 수준이었다. 황해 중심부에서는 전세계 배경 농도와 유사하게 낮은 수준이며, 청도는 인천의 약 2배 정도 높이었다. 인천-제주간 가스상 원소 수은 농도는 인천 근처 해상에서 가장 높았으며 제주도 인근 해역에서 가장 낮았다. 선박 측정을 이용한 황해상의 평균 수은 농도는 가스상 원소 수은 $2.1 \pm 1.5 \text{ ng/m}^3$, 입자상 수은 $0.09 \pm 0.05 \text{ ng/m}^3$ 로 산출되었다.

모델을 이용하여 침적량을 계산하는데 가장 큰 불확실성은 수은의 배출량에 있다고 볼 수 있다. Wu et. al.(2006)에 의하면 유럽과 북미대륙에서의 배출량은 감소하고 있으나 중국의 배출량은 연간 2.9% 증가하는 것으로 추정되고 있다. 동아시아의 배출량을 고려하여 보면 중국의 수은 배출량은 전체의 86%, 일본과 북한은 각각 4%, 한국은 3%를 기여하는 것으로 되어 있다.

가스상 수은의 계절별 건식 침적 속도를 계산하였을 때 수은은 표면저항의 영향이 가장 커서 바다 영역 전체에서 거의 균일한 분포를 보인다. 이는 일반적인 가스상 물질의 경우 풍속의 영향에 의해서 바다 중심부에서 건식 침적 속도가 큰 것과 대조적인 결과이다. 황해 영역에 대한 연간 건조 침적량의 경우 전체 침적량은 1,708kg으로 추산되었으며 이는 습성침적량 6,364kg에 비하면 27%에 해당하여 습식 침적량이 지배적인 것으로 나타났다. 황해에 침적량은 중국 연간 수은 배출량의 4.4%, 한국 연간 배출량의 115%에 해당하여 중국의 영향이 매우 중요함을 알 수 있다(표 1).

Table 1. Annual dry and wet deposition of Hg in the Yellow Sea. (unit: kg)

건조 침적				습식 침적량	총 침적량	습식/건조 침적량 비율
가스상 수은	입자상 수은	반응성 수은	건조 침적량			
405	168	1,135	1,708	6,304	8,072	3.7

참 고 문 헌

Wu, Y., S. Wang, D.G. Streets, J. Hao, and J. Jiang (2006) Trends in Anthropogenic Mercury Emissions in China from 1995 to 2003, ES&T, 40, 5312-5318.