

SM23) 미국의 대기침적현상 규명을 위한 접근방법 및 대응방안 EPA's Research Activities & Strategies for the Reduction of Atmospheric Deposition of Air Pollutants

정장표

경성대학교 건설·환경공학부

1. 서론

대기침적은 대기중으로 방출된 오염물질의 이동과 그 영향을 조절하는 중요한 기작으로서, 현상론적인 형태에 따라 습성침적 및 건성침적으로 구분된다. 이러한 대기침적 현상은 수질의 악화, 건강 및 생태학적 악영향을 초래하는 중요한 요소로 작용할 뿐만 아니라, 최근 우리나라를 비롯한 동북아시아지역에서의 대기오염물질의 장거리 이동현상의 정확한 규명을 하기위한 노력의 일환으로 그 관심이 모아지고 있다.

미국의 경우 정부당국의 각종 환경규제프로그램의 실행 및 민간인과 산업체의 긴밀한 협조 및 노력의 결과로서, 지난 수십년동안 5대호를 비롯하여 크고 작은 호수 및 해역수질의 개선이 꾸준히 진척되고 있으나 만족할 만한 수질에 결코 도달하지 못했다. 그 중요한 원인중 하나가 대기로부터 수체(water bodies)로 떨어지는 대기오염물질이라는 사실이 규명되면서부터, 수체의 수질을 개선하기 위하여 대기질 개선에 부단한 노력을 경주해 오고 있다. 관련 연구결과에 의하면 미국의 5대호에 있어서 납 총량의 95%이상 이 대기로부터 기여되고 있으며 미국동부의 체사피크만(Chesapeake Bay)의 경우 적조현상의 원인물질로 알려진 질소에 대한 대기 기여도가 25 ~ 40%에 이르고 있는 것으로 보고되고 있다.

이러한 연구결과로부터 수체의 수질을 개선하기 위해서는 대기로부터 수체로 유입되는 대기오염물질의 근원적인 규제가 필수적인 사항으로 인식되어졌다.

따라서 미국은 1990년 이래, 대기오염물질의 배출원 추적 및 기여도 산정자료를 통하여 배출원 규제를 강력하게 할 수 있는 법적조항을 대기청정법(Section 112(m))에 제정하여 시행하고 있다. 최근 미국에서 연구된 방법과 동일한 방법을 택하여 부산지역의 3군데 지점(회동수원지, 광안동, 대연동)에 대해 대기건성침적량을 산정한 결과, 미국 시카고지역의 대기건성침적량($130 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$)보다 약 2~3배 높은 침적량($320 \sim 360 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$)을 보이고 있었으며, 그 화학적 성분특성 또한 미국의 경우와 비슷한 수준을 나타내거나 상회하고 있었다.

위와 같은 연구결과는 부산광역시를 비롯한 우리나라의 경우도 수질등을 비롯한 환경생태계에 대기오염물이 미치는 영향이 심각한 수준에 이미 도달되었음을 입증하고 있으며, 이에 대한 대책마련이 시급함을 의미하고 있다.

이러한 대책마련의 일환으로 최근 들어 대기침적현상 규명을 위한 연구논문들이 제한적인 내용이나 발표되고 있으며, 특히 침적현상의 측정 및 평가방법론에 있어서 불확실성을 줄이기 위한 침적장치개발이 활발히 진행되고 있는 점 및 주요식수원에 대한 영향규명을 위한 체계적이고 종합적인 침적연구가 행해지고 있는 사실은 다행스러운 일이라 하겠다.

그러나 이러한 대기침적 현상에 대한 정확한 이해 및 평가가 제대로 수행되지 않을 경우, 오염된 대기자체에 의한 피해 및 수반되는 환경적 악영향을 줄이기 위한 우리들의 노력은 경감되어질 수 밖에 없다.

대기침적현상에 따른 환경적 피해를 최소화시키며, 이를 효과적으로 국가정책에 반영하는데 필요한 내용을 제공하기 위해 미국의 대기침적 현상규명과 그 피해를 줄이기 위한 방안에 대한 주요 내용을 간략히 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 대기침적 연구필요성

지난 30여년에 걸친 연구결과를 통하면 대기독성물질이 배출원에서 방출되어, 상당히 먼거리까지 이

동하여 표면으로 침적되어 여러 가지의 환경학적 악영향을 줄 수 있다는 증거를 확신하게 되었다.

따라서 미국 정부는 현재 미국내에서 주요한 식수원으로 보호·관리되고 있는 5대호 및 동부지역에 위치한 Champlain 호수 및 생태학적 의미, 상업적 관점에서 보전될 필요가 있는 Chesapeake만과 연구/교육학적 목적으로 지정된 주요 하구들에 대한 기존의 관리 및 보전대책에 대해 필요하다면 법적·제도적 보완을 통하여 대기침적에 의한 영향을 줄이기 위한 과정이 필수적임을 인식하게 되었다.

이러한 배경에서 1990년 11월 15일, 미의회는 기존의 대기청정법을 개정하여 EPA로 하여금 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)와 협력하여 미국내의 수체에 대해 대기침적 현상과 관련된 내용에 대해 연구 보고토록 하는 조항(Section 112(m))을 신설하였다.

이 조항에 의해 지정된 대상수체(waterbodies)는 그림 1과 같으며, 그 주요내용은 표 1과 같다.

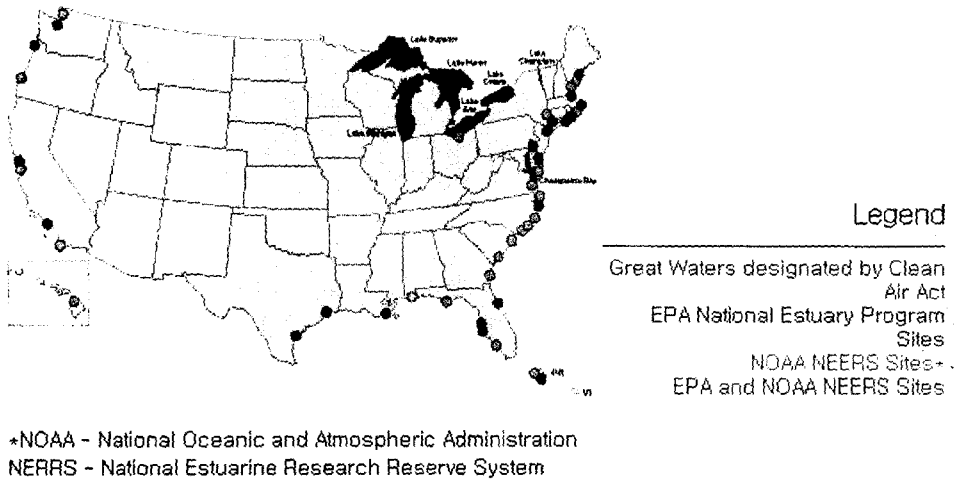


Fig. 1. Locations of designated Great Waters.

Table 1. The "Great Waters" section of the 1990 Clean Air Act Amendments.

Section 112(m)	· monitor hazardous pollutants by establishing sampling networks
	· investigate the deposition of these pollutants
	· improve monitoring methods
	· monitor for these hazardous pollutants in fish and wildlife
	· determine the contribution of air pollution to total pollution in the Great Waters
	· evaluate any adverse effects to public health and the environment
	· determine sources of pollution
	· provide a report to Congress in 1993 and every 2 years thereafter.

2. 2 연구대상 오염물질

5대호와 Champlain 호수의 경우 60년대 후반까지는 도시하수 처리장이나 각종 산업폐수의 유입으로 인한 과도한 영양소의 유입 및 용존산소 고갈물질이 수질오염을 야기하는 가장 심각한 문제로 대두되었다.

그러나 70년대 들어, 과도한 양식업의 번창, 순철작업, 서식지 변경 등에 의한 수질오염원인과 더불어 DDT 등과 같은 유해한 화학물질의 사용확대로 인해 수질오염의 양상이 더욱 복잡하고 심각한 수준에

이르러게 되었다.

비록 70년대 후반까지 하수처리장의 처리효율제고 및 수질보전에 대한 보다 향상된 대안의 실행으로 수질오염정도를 완화시킬수 있었으나 물고기의 조적이나 퇴적물 등에 존재하는 독성오염물질의 농도수준은 지금까지 핵심적인 문제로 남아 있다.

이에 반해 Chesapeake Bay를 비롯하여 NERRS(The National Estuarine Research Reserve System) sites로 지정된 연안수역은 어패류의 보고로써 그 생태학적 중요성과 더불어 상업적인 가치가 높다.

이 지역은 주로 영양원의 과다유입으로 인한 수질문제의 완화를 가장 중요시 취급하며 이와 아울러 대기침적에 의한 독성물질의 영향, 특히 수체에서의 중금속, 유기물, 농약 그리고 퇴적물에서의 PAHs의 오염에 대해 중요하게 다루고 있다.

Table 2. Reasons for selecting and grouping 15 pollutants.

15 Great Waters Pollutants	Reasons for selecting these pollutants	Reason for grouping these pollutants
Cadmium and cadmium compounds	* Persist in the environmental and have a high potential to accumulate in living organism. * All 15 pollutants are known air pollutants and to be present in atmospheric deposition. * These pollutants are present in the waters and biota of the Great Waters and that one route is atmospheric deposition. * These pollutants overlaps substantially with the toxic air pollutants that ranked highest in an EPA-sponsored study.	* The pollutants in each group generally originate from similar sources or are released through similar mechanism. * Pollutants in each group may have similar chemical characteristics, allowing for generalizations related to deposition and cycling within the environment. * Unique regulatory concerns, such as mercury and nitrogen, to be highlighted and emphasized in the Report to Congress. * Grouping the pollutants helps decision-makers develop conclusions about pollutants with similar chemical/physical behavior or sources, where there are limited data.
Chlordane		
DDT/DDE		
Dieldrin		
Hexachlorobenzene (HCB)		
Hexachlorocyclohexane (-HCH)		
Lindane (-hexachlorocyclohexane; -HCH)		
Lead and lead compounds		
Mercury and mercury compounds		
Polychlorinated biphenyls (PCBs)		
Polycyclic organic matter (POM)		
Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD;dioxins)		
Tetrachlorodibenzofuran (TCDF; furans)		
Toxaphene		
Nitrogen compounds		

대기침적과 관련하여 재정리해 보면, 미국에서는 대기침적에 의한 수생태계의 영향을 규명하고 그 피해를 줄이기 위해 대기유해물질(독성물질)을 공통적으로 연구대상물질로 지정하고 있으며 만 및 연안수역에서는 부영양화 및 적조현상의 원인 물질로 알려진 영양원(질소)에 대해 그 연구 초점을 두고 있다.

대기청정법 Section 112(m)에 의하여 5개 그룹의 15개의 대기오염물질에 대해 대기침적현상을 규명하

고 있다. 이때 15개 대기오염물질을 선택한 배경 및 5개 그룹으로 나누어 취급하는 주요이유는 다음 < 표 2>와 같다.

3. 연구 활동의 방향과 그 결과

궁극적으로 대기침적에 의한 영향을 줄이기 위하여 미국은 필요에 따라 연방정부, 주정부, 지방정부 및 인근 국가등과 공조체제를 구축하여, 문제가 되고 있는 대상 수체들의 특성(물리적 특성, 영향배출원 분포, 주요 용도 등)을 고려한 다양한 프로그램을 운영하고 있다.

프로그램이나 대상수체 특성에 따라 연구내용 및 방법론에 있어서 다소 차이점을 나타내고 있지만, 근본적으로 다음과 같은 4가지의 연구활동에 초점이 주어진다.

- 첫째, 대기침적에 의해 수체로 유입된 유해대기 오염물질의 노출로 인한 수생태계의 피해를 분석하고,
- 둘째, 관심의 대상이되는 유해대기오염물질에 대한 대기침적에 의한 상대적 기여도를 분석하며,
- 셋째, 그 주요 배출원에 대한 규명 및 평가를 행함으로써,
- 넷째, 위의 3가지 연구활동으로부터 개발된 정보를 토대로 여러 가지 배출량 저감 대책에 대해 평가 규명함으로써 추가적인 규제법규 제정필요성 여부를 판단하여 실행한다.

위와 같은 연구활동은 표 3에 정리된 일련의 연관된 과학적인 측면과 규제적인 측면에서의 질문내용에 부합하기 위한 현실적인 접근방법이라 할 수 있다.

Table 3. Major activities and questions addressed by the Great Waters Program.

Scientific questions	Regulatory questions	Major activities
What do we know about atmospheric deposition to the Great Waters ?	What action is needed to reduce atmospheric deposition to the Great Waters ?	
What human health and environmental effects are associated with pollutants of concern in the Great Waters ?	Are impacts or risks significant enough to be of concern ?	Analyze pollutants exposure and effects in waterbodies.
What is the relative importance of atmospheric deposition in causing contamination in the Great Waters ?	Are loadings from the air significant enough to need reduction ?	Evaluate pollutant loadings to waterbodies.
Where and what are sources of air emissions of pollutants of concern ? What sources are significant contributors to the Great Waters ?	If reductions are needed, what emission sources should be targeted ?	Identify and evaluate air emission sources.
Would emission reductions be effective in reducing effects of atmospheric deposition to the Great Waters. ?	What are the options for implementing reductions ? What are the costs and benefits of the various options ?	Identify and evaluate air emission reduction options.

여기서는 앞에서 언급된 주요한 연구활동의 방향에 초점을 맞추어 각 연구활동별로 도출된 주요 내용 및 방향에 대해 간략히 제시한다.(자세한 연구결과는 발표시 제공할 예정이다)

3. 1 대기 침적에 의한 피해

대기침적에 의한 피해는 인간에 대한 수생태계의 직접적 피해와 여러 가지 노출경로를 통한 인간에 대한 피해로 구분되며 EPA의 접근 방법은 양자를 동시에 고려하는 연구활동방향을 적용시키고 있다. 이러한 방향은 대기청정법 Section 112(m)의 규정에 살펴보다도 잘 파악될 수 있다. 즉 대기침적에 기인된 수질오염으로 인하여 야기되는 환경적 피해 및 공중보건상의 평가하고, 대기침적에 의한 수질오염 기여정도를 음용수 기준 등 각종 수질기준치와 비교·평가하도록 규정하고 있다.

지금까지의 연구결과에 의하면 수생태계에 미치는 영향에 관한 정보에 비하여 인체건강학상 영향에 관한 정보는 대단히 제한되어 있어서 대부분의 경우 동물에 미치는 영향에 관한 영향을 추정하고 있는 실정이다.

이에 반해, 생태학적 영향은 산란률 저하, 질병 및 물고기와 야생종에서 발견되는 조기사망 등에 관한 연구를 통해 비교적 명백하게 밝혀지고 있다. 특히 생태학적 영향은 개체 자체에 초점을 맞추는 individual level과 개체수의 변화 등과 연관된 ecosystem level에서의 영향이 동시에 연구되기도 한다.

또 하나 특기할 만한 사항은, 미국을 비롯하여 캐나다, 유럽 등지에서 잡히고 있는 물고기 조직에 포함된 수은 농도는 각종 기준치를 초과할 정도로 대단히 농축되어 있어, 경제적 손실을 야기시킬 뿐만 아니라 인간건강에 심각한 위해가 되고 있다. 1998년 9월 현재 미국내 27개 주에서, 수은에 중독된 물고기나 갑각류에 대한 섭취 권고안을 채택하고 있다.

결론적으로, 여러 가지 다양한 연구결과에 의하면 대기 유해 물질이 수생태계로의 유입에 의해 심각한 정도의 생태학적 영향 및 인체건강학상 피해가 기정사실화 되었거나 우려되어 지는 수준이다.

3. 2 대기침적의 상대적 기여도

다음으로 대기침적을 평가하는데 있어서 중요한 과정은 유해대기오염물질이 대기로부터 수체로 유입되는 양을 평가하는 단계로써, 대기침적이 인체건강학상의 악영향과 생태학적 악영향의 주요한 원인임을 규명하여, 그 피해저감대책을 합리적으로 수립해 낼 수 있다는 데 그 의미가 있다.

이 때, 대기 오염물질의 상대적 기여도를 평가하기 위하여 사용된 주요한 접근방법으로써 유출입수지(input-output budget) 혹은 질량수지모형(mass balance model)이 사용되어오고 있다.

이러한 방법은 "Great Waters"의 수질오염에 대해 대기침적의 상대적 중요성을 결정하는 적절한 개념적 구조를 제공한다는 의미를 가지고 있으나 측정상의 문제(정확도, 정밀도, 샘플링 방법 등) 및 자료의 제한 등으로 인해 극히 일부분을 제외하고는, 그 추정치에 불확실성이 존재하고 있다. 그러나 Lake Superior의 PCBs, Wisconsin주와 Sweden의 여러 호수에서의 수은, Delaware만의 Cd 등에 대한 상대적 부하량 산정을 위한 연구결과에 의하면 대기침적에 의한 상대적 기여가 매우 중요함을 나타내고 있다.

3. 3 대기 침적의 배출원 평가

최근까지 계속된 연구결과에 의하면 "Great Waters"에서 독성물질에 의한 노출 및 영향에 대한 증거가 확실히 되며, 이들 독성물질 중 대부분이 대기침적에 의해 상당량 수체로 유입되어지고 있음을 밝히고 있다. 따라서, 미국 정부는 대기침적에 의한 수체의 영향을 줄이기 위한 현실적인 접근 방법으로써, 연구대상의 유해대기오염물질에 대한 주요 대기 배출원을 평가하여 적절하고도 합리적인 배출저감 규제를 실시하는 것을 주요 대안으로 간주하고 있다.

일반적으로 피해가 유발되는 수체 인근의 국지 배출원 및 상당거리 떨어진 원거리 배출원의 영향이 복합적으로 피해 수체에 가해지기 때문에, 미국 정부는 수체에 인접한 지방 및 주 영역 안에 위치하는 배출원과, 주 영역 밖에 위치하는 배출원으로 구분하여 평가하고 있다.

배출원 평가에는 관심의 대상이 되는 대기유해물질을 배출하는 배출원에 대한 평가 및 규명을 위한 "배출원 특성" 규명, 피해지점에서 대기배출원의 상대적 기여도를 산정하는 "배출원 할당" 과정이 요구되어 진다.

원거리 및 국지 배출원에 의한 상대적 기여도 산정의 정확도는 활용 가능한 배출원 자료, 주요 기여 배출원의 기여에 대한 사전정보 및 배출원 할당을 위한 기법의 정확성 등에 따라 달라지게 된다.

최근까지 배출원 할당에 관련되어 연구된 사례에 의하면 PAHs의 경우는 연소과정(특히 난방용 목재), 질소산화물은 자동차 배기가스, Lindane 및 수은은 원거리 배출원에서 기여하는 것으로 보고되고 있다. 또한 일련의 연구결과를 종합하면 현재 기여배출원과 관련하여 내릴수 있는 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 현재까지는 배출원 특성과 규명이 완벽하지 못하다.
- (2) "Great Waters"에 영향을 미치는 특정한 배출원 및 배출원군이 명백히 규명되어 있지 않다.
- (3) "Great Waters"에 침적되는 대기오염물질은 국지 및 지역 배출원 뿐만 아니라 지구규모의 장거리 이동에 기인될 수 있다.
- (4) "Great Waters"에 침적되는 국지 및 장거리 배출원의 상대적 기여도 산정은 불확실하다
- (5) 오염물질이 환경중에서 순환하기 때문에 오염물질의 대기중 농도는 현재의 배출량과 밀접하게 연관되지 않을 수 있다.

4. 결 론

미국은 지난 20~30년 동안 수질개선을 위하여 연방정부를 비롯하여 주정부, 지방정부 및 캐나다 등과 협력하여 다양한 프로그램 및 법적 규제를 실시해온 결과 수체에 대한 직접적 배출에 의한 수질오염 저감효과를 상당부분 달성하였으나, 대기오염물질의 침적에 의한 수질오염 및 그 피해가 우려할 만한 수준에 이르렀다.

이에 대한 영향을 감소시키기 위해 지금까지 행해진 연구결과를 종합해 볼 때, 미국의 경우 대기침적 현상에 의한 수질오염 기여도가 무시되지 못할 수준이며, 이에 따른 인간건강에 미치는 피해 및 생태학적 피해가 상당히 심각한 수준에 도달되었음을 알 수 있다.

이에 대처하고자 체계적이고 종합적인 관점에서 정부 주도하의 다양한 프로그램과 관련 법규를 개정 혹은 신설하여 효과적으로 시행하고 있다.

우리 나라의 경우도 대기침적으로 인한 수생태계의 영향이 심각한 수준에 도달했음을 입증하는 연구 결과들이 보고되고 있다. 미국의 사례를 참고삼아 대기침적 피해를 저감하기 위한 효과적인 대처 방안을 신속하게 수립·시행해야 할 것이다.

참고문헌

- Eisenreich, S.J., and Strachan, W.M.J.(1992), "Estimating atmospheric deposition of toxic substances to the Great Lakes," in Proceedings of 1992 Workshop Sponsored by the Great Lakes Protection Fund and Environment, Ontario, Canada.
- Jang-Pyo Cheong, Hyun-Moo Shin, Sang-Heon Kim, and Sang Kwun Lee(1996), "The Impact of Dry Deposition on the Environment of Hoidong Reservoir", *Environmental Engineering Research* 1:2 PP. 89~98.
- Zobrist, J., Wersin, P., Jaques, C., Sigg, L., Stumm, W.(1993), "Dry deposition measurements using water as a receptor: A chemical approach," *Water, Air, and Soil Pollution.*, 71, 111-130.
- Seinfeld, J.H.(1986), *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley and Sons, New York, pp. 639-647.
- Seung-Muk Yi, Jang-Pyo Cheong (1997) Evaluation and Comparison of Models for Predicting SO₂ Dry Deposition to the Measurement Using A Water Surface Sampler, *Korean Society of Environmental Engineers* Vol. 2, No. 2,
- Baker, J.E.(1994), Atmospheric deposition of contaminants to the great lakes and coastal waters. Proceedings from a session at the SETAC 15th Annual Meeting. Denver, Colorado.
- Baker, J.E., Church, T.M., Eigenreich, S.J., Fitzgerald, W.F., and Scudlark, J.R.(1993), Relative atmospheric loadings of toxic contaminants and nitrogen to the Great Waters. [S. 1].

- Eisenreich, S.J., and Strachan, W.M.J.(1992), Estimating atmospheric deposition of toxic substances to the Great Lakes. Proceedings of 1992 Workshop Sponsored by the Great Lakes Protection Fund and Environment. Ontario, Canada.
- Slinn, S.A., and Slinn, W.G.N.(1980), predictions for particle deposition on natural waters. Atmos. Environ., 14, 1013-1016.
- U.S. EPA.(1994), Deposition of air pollutants to the Great Waters: first report to congress, EPA-453/R-93-055.
- U.S. EPA.(1996). Air quality criteria for particulate matter. EPA-600/P-95/001aF.
- U.S. EPA.(1997), Deposition of air pollutants to the Great Waters: second report to congress, EPA-453/R-97-011.