

SM24)

동북아시아에서의 대기오염물질 장거리이동과 침적현상 연구현황 및 향후전망

Current Status and Future Prospect of the Long-range Transport and Deposition Process in Northeast Asia

한진석

국립환경연구원 대기연구부

1. 서론

동북아시아 지역은 최근의 급속한 경제성장으로 오염물질의 배출량도 급격한 증가추세에 있다. 중국의 배출량이 동북아시아 배출량의 대부분을 차지하고 있으며, 산출자료에 따라 다르기는 하지만, 그 중 아황산가스는 80% 이상을 중국이 배출하고 있는 것으로 나타나고 있다(김용표, 1999).

강수나 에어로졸 생성에 중요한 역할을 하는 주도적인 물질인 황화합물은 대류권 하부에 주로 2일에서 1주일정도 체류하면서 보통 수백에서 수천 km까지 이동이 가능하다. 대기중에 배출된 SO₂는 장거리이동 과정에서 황산염인 입자상으로 변환하여 에어로졸 상태로 존재하면서 직접적으로 빗을 산란 혹은 흡수시키며, 간접적으로는 구름의 응결핵으로 작용하여 구름내 물리현상에 영향을 주고, 결국에는 지구복사 체계를 변화시키게 된다(Charlson et al., 1991). 이밖에도 SO₂에서 황산염으로 변환된 에어로졸은 대기중에 부유하면서 아시아 몬순지역의 경우 패턴을 변화시키거나 농작물의 감소, 산성화된 물질의 침적으로 인한 수산 어획고의 감소, 아시아 기후변화, 산성화된 미세 입자의 증가, 그리고 시정장애 현상 유발 등의 광범위한 영역에 걸쳐 대류권 화학 메카니즘에 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다(Huebert et al., 1998).

자연적으로 혹은 인위적으로 발생한 SO₂는 건·습성 침적(wet and dry deposition)이나 황산염으로의 변환등을 통해 소멸되는 데, 지역적인 규모 혹은 전지구적 규모에서 SO₂의 주된 소멸작용은 건성침적을 통해서였고, 다음이 액상산화반응, 가스상산화반응, 습성침적순이었다. 오염원에서 배출되거나 바람의 이류에 의해서 수송되어 대기 중에 존재하는 산성오염물질이 지표면으로 침적되면 외부에 노출되어 있는 물체를 부식시킬 뿐만 아니라 토양 및 수질의 산성도를 높이게 되어 산림이 황폐화되고 지상 및 수중 생태계가 파괴되며 도시의 경우는 건축물이 부식되는 등 심각한 환경문제를 야기시키게 된다(김시완과 박순웅, 1996).

산성오염물질이 침적되는 과정은 강수 형성과정의 응결핵으로 작용하여 대기중에서 제거되거나 강수 입자들이 낙하하면서 오염물질을 포착하는 과정에서 제거되는 습성침적과 대기에서 식생, 토양, 수면 등의 지표면으로 직접적으로 이동되는 과정인 건성침적으로 구별할 수 있다. 이들 산성오염물질 침적에 대한 많은 연구들이 습성침적만을 중요한 것으로 간주하고 건성침적은 무시하거나 매우 작은 역할을 하는 것으로 취급하였다. 이것은 아마도 강수가 산성오염물질의 침적에 가장 뚜렷한 원인이 되는 것처럼 보인다는 것과 건성침적량을 정의하고 실제 관측하는 것이 어렵다는 사실에 기인하는 것이다(Hicks et al., 1980). 그러나 최근 건성침적량 관측방법이 개선되어 이에 대한 연구가 활발하게 진행된 후에 나온 많은 결과는 강수가 없는 경우의 산성오염물질의 침적량이 강수가 있는 경우의 침적량과 비슷할 정도로 많다는 사실을 제시하고 있다(Record et al., 1980).

이렇게 장거리이동이 생태계나 자연환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지면서 침적현상에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 그리고 국제적으로도 이를 반영하듯 일본에서의 동아시아 산성강하물측정망 구축사업이나 한국에서 추진하고 있는 한·중·일 장거리이동 대기오염물질 전문가회의가 진행중에 있다. 이 자료에서는 동북아시아의 지역적인 규모에서의 황화합물의 장거리이동 연구 현황과 국제적인 협력사업의 동향을 살펴보고 이와 관련한 건성강하물 침적측정방법들을 정리하였으며, 마지막으로 향후 연구 전망을 간단하게 소개하고자 한다.

2. 동북아시아에서의 장거리이동 연구현황

2.1 동북아에서의 장거리이동 연구현황

최근에 동북아시아에서 오염물질 배출과 이동에 대한 연구들이 많이 수행되고 있는 데 이중 모델링 관점에서의 접근을 살펴보면 먼저 Carmichael and Arndt(1996)이 RAINS-Asis 모델을 이용하여 동북아에서의 배출량 시나리오에 따른 황의 배출과 침적에 대한 연구가 있고, Sato et al.(1996)는 MRI-LTM 모델을 이용하여 오염물질의 장거리이동 과정에서 구름과의 상호 작용에 대하여 연구하였다. 또한 Carmichael et al.(1997)는 STEM-II를 이용하여 동아시아에서 봄철에 오존농도가 높게 나타난 현상에 대한 수치모의를 수행하였고, Park and Cho(1997)는 MM4와 STEM-II를 이용하여 강수가 있었던 사례에 대해 적용하여 SO₂와 황산염의 수송을 이해하였다. Xiao et al.(1997)는 ECMWF 분석 기상장과 STEM-II를 이용하여 SO₂와 황산염의 수송을 연구하였는데 이들은 모델과의 비교자료로 PEM-B 측정 결과를 활용하였다. 대부분의 동북아시아지역에서 화학모델로 STEM-II를 이용하는 것과는 달리 이태영 등(1997)은 RADM과 RAMS을 접목한 종합산성 침적모델을 동북아시아 지역에 적용하여 황화합물의 이동과 건성·습성 침적량에 대해 연구하였다.

그리고 Hayami et al.(1997)은 일본 Fukue, Tsushima와 한국 제주에서 측정된 SO₂와 황산염 농도를 이용하여 고농도 오염물질 수송사례의 수평크기(350×160km)를 추정하였고, Chen et al.(1997)은 제주에서 측정결과를 토대로 대륙으로부터의 오염물질 수송이 있을 경우 에어로졸의 성상에 대하여 분석하였다. Kim et al.(1998)이 1994년 봄철에 제주에서 측정된 장거리이동 에어로졸의 성분농도를 조사하였으며 이종훈(1999)는 제주 고산과 강화측정소에서의 PM_{2.5} 성분 분석과 역계적 분석결과를 토대로 한반도가 중국에서 배출된 오염물질의 영향을 받고 있음을 보인 바 있다. 이상과 같은 지상측정의에도 Hatakeyama et al.(1996)는 항공측정자료를 이용하여 기류의 이동 경로와 기단의 나이에 따라 황의 화학적 성상이 어떻게 다른가에 대하여 밝혔다.

2.2 장거리이동과 관련한 침적현상에 대한 연구

장거리이동 대기오염물질의 중요성이 부각되면서 이들의 침적현상에 대한 연구가 요구되고 있는 데 Murano et al.(1997)은 오염물질 농도와 건성침적속도를 추정하는 방법으로 가스상과 에어로졸의 침적량을 산정하였으며, Park(1998)은 지상오염농도에 건성침적속이 미치는 영향을 고려하였다. 또한 Ichikawa et al.(1998)는 배출원근처에서는 오일어리안 모델을, 그리고 멀리 떨어진 위치에서는 궤적모델을 접목한 합성모델(Hybrid model)을 이용하여 황의 침적을 계산하였다. Phandis et al.(1998)는 동아시아에서 한층의 라그랑지안 모델과 3차원 오일러리안모델을 비교하여 오염물질 수송과 침적을 이해하였다. 이와 같이 최근 몇 년 동안 장거리이동오염물질의 침적에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

3. 국가간 공동조사사업

동북아시아 환경보전과 관련하여 정부차원에서 진행되고 있는 다자간 국제협력사업으로는 동북아고위급환경협력회의, UNDP 두만강 개발사업, 동아시아 산성강하물 측정사업, 한·중·일장거리이동 대기오염전문가회의 등이 있으며 이중에서 대기오염물질의 장거리 이동과 침적현상에 대한 실질적 조사사업이 진행중인 것은 동아시아 산성강하물 측정사업, 한·중·일 장거리이동 대기오염전문가회의라 볼 수 있다.

3.1 한·중·일 장거리이동 대기오염전문가회의

제1회 동북아지역 장거리이동 대기오염물질에 관한 워크숍이 '95. 9월 서울에서 개최되었으며 한·중·일 동북아 대기보전을 위하여 공동연구의 필요성이 인식되어 3국 공동운영위원회와 임시사무국 설치에 합의하였고, 제1, 2회 동북아 장거리이동 대기오염물질 관련 공동운영위원회의가 '96. 7월, '97. 11월 각각 개최되어 측정 및 모델링분야에 대한 공동연구 수행합의, 분야별 전문가 구성 및 공동연구제안서 채택, 분야별 공동연구 수행을 위한 전문가회의 개최에 합의한 바 있다. 따라서 '99. 11월 서울에서 동북아 장거리이동에 관한 연구를 지속적으로 수행하기 위하여 1차 전문가회의를 개최하여 측정분야와

모델링분야로 나누어 공동연구계획을 논의하였으며 측정 및 모델링분야에 대하여 3단계 5개년 계획으로 수행할 공동연구계획이 채택되었다. 측정분야에서는 측정망 운영계획의 정보교환과 대기질 현황분석, 지상측정 및 항공관측 등을 단계별로 수행하고 모델링분야에서는 UNDP 방법에 의한 국가별 오염물질 배출량 산정과 모델검토 및 모델링 결과와 실측자료와의 비교 등을 연구내용으로 하고 있다(표 1).

표 1. 한·중·일 공동연구계획

연구단계	측정분야	모델링분야
1단계 (1999. 9~2000.8)	<ul style="list-style-type: none"> - 선정된 각국의 측정소 자료 상호 비교분석 - 항공기를 이용한 공동 측정(한국,일본)계획수립 - 측정·분석 방법 비교 및 결정 	<ul style="list-style-type: none"> - 각국은 SO₂ 와 NO_x에 대해 1° × 1° 간격의 배출량을 UNDP 방법으로 산정 - 각국에서 사용중이거나 개발된 주요모델의 검토
2단계 (2000. 9~2002.8)	<ul style="list-style-type: none"> - SO₂, NO₂, O₃, 입자상물질 등 - 강수의 pH, 전도도, 이온성분 (SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) 등 - 풍속, 풍향, 기온, 습도, 강수량, 등의 기상인자 - 항공기를 이용한 대기오염 측정 	<ul style="list-style-type: none"> - 1° × 1° 간격의 VOCs 배출량을 산정 - 실측사례에 대한 수치 모사실험 - 실측치와 모델예측치간의 비교 - 모델 가동조건 선정
3단계 (2002. 9~2004.8)	<ul style="list-style-type: none"> - 공동측정소 가동 및 공동 항공 측정 수행 - 모델링분야와 협력하여 동북아 지역 대기오염물질 유출입량 추정 - 동북아지역 대기질변화 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 배출원-피해지간 분석 - 동북아지역 대기질평가 - 시나리오별 동북아지역 대기질 개선 평가

3.2 동아시아 산성강하물 측정사업(EANET)

동사업의 참여국은 한국, 중국, 일본, 인도네시아, 말레이시아, 몽골, 필리핀, 러시아, 태국, 베트남 10개국이며 지난 94년 이후 4차례의 전문가회의를 걸쳐, 1998년 3월 제1차 정부간 회의(일본 요코하마)에서 “Design of the EANET” 및 “시범사업 실시문서”에 대하여 논의하였으며 시범사업 문서채택에 동의하는 국가를 모두 시범사업에 참여하는 것으로 간주하기로 함에 따라 한국등 9개국 모두 시범사업에 참여하는 것으로 결정하였고 중국은 추후 외교경로를 통해 참여의사를 밝혀 '99년 이후 시범사업이 본격적으로 시작되었다. 동아시아 산성강하물 측정사업에는 습성 강하물과 건성 강하물 측정분야, 토양 식생 영향조사분야, 내수면 영향조사분야 등 4개 분야로 구성되어 있으며 측정지점은 원격지점(remote sites), 교외지점(rural sites), 도시지점(urban sites), 생태지역(sites in ecological areas)으로 분리하고 있다. 원격 지점은 배경지역의 산성강하물 평가를 위하여 설치되는 것으로 측정자료는 동북아지역의 장거리 이동과 산성물질의 이동 모델에 사용될 수 있다. 이러한 측정소는 오염이나 배출원에서 영향이 가장 적거나 없는 지역에 설치되어야 한다. 교외 지점은 도시지역이나 배후지(hinterland)지역의 산성강하물 측정하기 위하여 설치한 것이다. 측정자료는 농작물이나 삼림의 산성강하물의 영향을 평가하는데 사용될 수 있다. 교외 지점의 위치는 지역적인 오염원의 영향이 최소가 되는 곳에 설치한다. 도시 지점은 도시 지역의 산성 강하물 측정을 위해서 설치된 것이다. 도시나 산업지역 또는 이들 지역의 인근이 이 범주에 포함된다. 측정자료는 문화재나 건축물의 산성 강하물 영향 평가에 사용된다. 도시 지역의 측정자료는 도시지역 강우의 산도와 장기적인 경향을 평가하는데 유용하다. 생태지역내 지점은 토양 및 식생과 내수면에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로 토양 및 식생, 내수면의 영향을 조사하는 지역에 포함

되거나 인접한 지점을 활용할 수 있다. 습성 강하물 측정에서의 측정항목은 풍속, 풍향, 기온, 습도, 강수량, 일사량 등의 기상인자와 강수량을 포함한 강수의 pH, 전도도, 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) 등이며, 건성 강하물 측정에서는 SO₂, NO/NO₂, O₃와 입자상 물질(PM)이 1차적인 관심 대상이 되는 측정항목이며 PM을 정하는 데 있어 EANET에 참여하는 각국의 측정 준비상태와 자료의 일치성을 고려해서 PM10이 우선 대상으로 다음이 PM2.5이 측정항목으로 고려되고 있다. 건성 침적량을 직접적으로 측정하는 데는 실질적으로 많은 어려움이 있으므로 대기질 농도를 연속적으로 측정함과 동시에 풍속, 풍향, 풍향의 표준편차, 온도, 습도, 일사량(1시간 resolution), 지표면 습기(시간자료), leaf area index, soil moisture, plant water stress, 생물학적 종의 분포 등과 같은 기상인자와 대기와 지표면 간의 교환을 제어하는 과정에 관여하는 침적 저항관련인자를 연속 측정하여 침적량의 간접 추정하는 방법을 모색하고 있다. 또한 측정방법의 최종결정을 위한 단계별 접근방법이 제안되고 있다.

건성 침적량 계산에 있어서 제일 관심있는 오염물질은 SO₂, HNO₃, SO₄²⁻, NO₃⁻ 등이다. 그러나 EANET에서 실제 측정 항목은 현재 대기질 측정의 가능 여부와 추가 측정이 손쉬운가 하는 점들을 고려해서 결정되어야 할 것이다. 측정에는 실시간 측정 또는 분석 샘플러(필터팩, 디누더, 수동 샘플러 등)를 이용 시료 채취후 분석하는 방법이 있다. 향후과제로 해당 오염물질의 건성 침적속도 추정에 관한 방법의 고찰과 제한 측정지점에서의 건성 침적 플럭스 직접측정의 실시와 대상지역의 지표면 특성별 건성 침적속도에 대한 검토 등 제안되고 있다. 건성 침적 플럭스 직접측정방법으로 장기간 자동 측정이 용이하고 상대적으로 비용이 저렴한 Bowen ratio방법이 제시되고 있으며 이 방법은 동남아시아에서 일부 실험을 적용한 바가 있다. 이러한 노력들은 모델내의 건성침적량 산정 방법을 보다 현실적이고 정확하게 묘사하기 위해 행해지고 있는 데 국내에서도 외국의 직접측정방법중 적절한 방법을 택하여 모델을 통한 산정방법과 비교가 요구되어진다. 따라서 현재까지 제시된 여러 가지 건성침적량 측정방법에 대하여 간단히 언급하고자 한다.

4. 건성침적량 측정방법

건성침적은 가스상물질이나 에어로졸이 대기중에서 지면으로 직접 침적되는 과정을 의미한다. 그 대표적인 방법으로는 미기상 측정방법, 지면측정방법, 낙하방법 등의 직접측정방법과 간접추정방법이 있다 (Erisman, 1994).

4.1 미기상측정방법

건성침적량 산정에 가장 적합한 방법으로써 에디상관방법(eddy correlation method), 경도방법(gradient method) 등이 있다. 에디상관방법은 가스상물질과 연직속도의 변동을 이용하여 산정하고, 경도방법은 몇 개 층에서 기상변수와 오염물질의 농도를 이용하여 플럭스를 계산하는 것이다. 이중 에디상관방법이 정확하나 짧은 시간동안 농도를 측정할 수 있는 고가의 장비가 필요하여 비용 소모가 많고, 경도 방법은 두 층에서 오염물질의 농도를 일정시간 간격으로 측정하여 건성침적량을 추정하는 방법으로 측정항목별로 각 두 대의 측정기가 소요되며, 에디상관방법과 같이 정밀한 미기상측정장비가 요구된다.

미기상 측정방법의 장점은 지면위에서 측정이 이루어지며, 지면으로의 총 침적량을 측정하는 것이며, 또한 연속측정이 가능하고 기상조건과 침적량의 관계를 파악할 수 있다. 단 측정위치는 플럭스가 일정한 지표층(surface layer)내에 있어야 한다. 그러나 한지점에서의 침적량 추정결과를 광범위한 영역으로 확장하는 데에의 한계성과 복잡한 지형에의 적용이 큰 문제이다.

에디상관방법에 의한 건성침적속은 아래식과 같은 방법으로 산정한다.

$$F = \overline{w'c'} \quad (1)$$

여기서 w' 는 순간연직속도의 평균치와의 차이, c' 는 순간 오염물질농도의 평균치와의 차이를 나타내고, $\overline{\quad}$ 는 평균을 의미한다. w' 는 3차원 풍향풍속계로, c' 는 시간에 대해 고해상도를 갖춘 오염물질 측정기를 이용하여 계산한다.

그리고 경도방법에 의한 건성침적속 $F(\text{ppb m s}^{-1})$ 는 농도의 연직경도에 의해 결정된다.

$$F = -u_s k \frac{\partial C}{\partial Z} = -\frac{ku_s \Delta C}{\Delta Z} \quad (2)$$

여기서 u_s 는 마찰속도(m s^{-1}), C 는 기준고도에서의 가스농도, k 는 von Kalman상수(=0.4)이다. 그리고 $\Delta C / \Delta Z$ 는 두 고도사이의 농도의 경도(gradient)를 나타낸다.

4.2. 지면축적방법

지면에 직접 혹은 간접 침적량을 측정하는 방법으로 자연적인 표면이나 강하면지통, 평면, 페트리디쉬 등에 낙하하는 양을 측정하는 것이다. 지면축적방법은 비용이 저렴한 반면에 입자의 퇴위입이나 채취기 표면에서의 화학반응 등에 의한 변질의 문제가 있고 화학종에 대한 구분이 어렵다(Erisman, 1994). 최근에는 수표면(water surface)을 형성하여 측정하는 방법이 이용되고 있다.

4.3. 관통낙하(Throughfall) 방법

이는 산림지역에서 식물체로부터의 물방울 낙하나 나무줄기로부터의 관류(stemflow)를 측정하는 것이며 측정의 정확성은 낙하에 영향을 주는 과정들에 영향을 받게 된다. 이 방법은 식물체 아래에 채취기를 설치하여 식물체로부터 떨어지는 물방울을 모아 측정하는 데, 숲에서의 대기 플럭스를 산정하는 좋은 방법으로 장기간의 측정에 용이하고 미기상 측정방법에 비해 저렴하고 용이한 방법이다. 그리고 배출원 지역이나 숲이 많은 지역에 적용하는 것이 바람직하다. 지면축적방법처럼 대기오염의 성분을 구분할 수 없는 단점이 있다(Erisman, 1994).

4.4. 간접추정방법(Inferential method)

이상에서 설명한 직접측정방법의 어려움 때문에 가장 널리 알려진 방법은 난류를 측정하여 건성침적속도를 구하고 이를 오염물질농도와 곱하여 산정하는 간접추정방법이 있는데 이는 간접 측정방법이나 직접측정방법에 비하여 간편한 장점이 있다. 건성침적속도를 구하기 위해서 여러 가지 접근방법 중 가장 널리 알려진 방법이 저항유사법(resistance analogy)이 있는데 먼저 대기층의 오염물질이 지표면으로 수송되기 위해서는 지표층, 준층류 표면층, 그리고 지표면을 통과하여야 한다(김시완과 박순웅, 1995). 첫 번째는 지표층에서 준층류표면층까지 난류확산에 의해 수송되는 과정이고 두 번째는 준층류 표면층에서 지표면까지 분자확산에 의해 수송되는 과정이다. 오염물질이 지표면에 도달한 후에는 오염물질의 화학적 성질과 지표면의 물리적 성질에 의해서 오염물질이 선택적으로 침적되게 된다. 이 같은 세 단계에 걸친 지표면으로의 건성침적을 다루는 일반적인 방법으로 저항유사법이 사용된다. 건성침적속은 저항유사법에 의해 구한 각층을 통과할 때 생기는 저항의 합의 역수인 건성침적속도와 지표층 농도의 곱으로 나타낸다. 건성침적속 $F(\text{질량/단위면적} \cdot \text{단위시간})$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$F = V_d \cdot C \quad (3)$$

여기서 C 는 지상오염농도(질량/체적)이고, V_d 는 침적속도(길이/시간)이다. 침적속도는 기상조건과 지표 조건에 따라 좌우되는 데 건성침적속을 오옴의 법칙에 의해 저항선을 통과하는 전류처럼 취급하여 오염물질이 여러 가지 방해요소의 합을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (4)$$

여기에서 R_a 는 공기역학적 저항, R_b 는 준층류표면층 저항, 그리고 R_c 는 지표면 또는 식물체 저항이다.

4.5 우리나라에 적합한 건성침적량 측정방법

동아시아산성강하물 네트워크구축사업(EANET)에서 현재 권장하고 있고(Fukuyama, 1998), 우리나라와 같이 숲이 많은 지역에 적합한 방법으로 보엔비(Bowen-ratio)방법과 경도방법을 혼합한 직접측정방법이 있다. 이를 간단히 정리하면 다음과 같다.

건성침적속은 경도방법과 동일하게 가정할 수 있다.

$$F = -K \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$

여기에서 K는 질량에 대한 에디확산계수, $\frac{\partial C}{\partial z}$ 는 농도의 연직경도를 의미한다. K는 에너지에 대한 에디확산계수(K_H)라 가정할 수 있기 때문에 지면에서의 에너지 평형식을 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$H_s + H_L + R + G = 0 \quad (6)$$

$$H_s = -K_H C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (7)$$

$$H_L = -K_H L \frac{\partial q}{\partial z} \quad (8)$$

여기에서 H_s 는 현열속, H_L 은 잠열속, R은 순복사에너지, G는 지면으로의 열속, q는 수증기의 양, C_p 는 정압비열, 그리고 L은 수증기의 증발산에 의한 잠열을 의미한다. 그리고 $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 는 온위(θ)의 연직경도를 말하고, $\frac{\partial q}{\partial z}$ 는 수증기양(q)의 연직경도를 의미한다. 식 6~8을 정리하여 K_H 를 구해보면 다음과 같다.

$$K_H = \frac{(R + G)}{C_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial z} + L \frac{\partial q}{\partial z}} \quad (9)$$

따라서 농도의 연직경도와 식 9의 에디확산계수를 식 5에 대입하여 긴성침적속을 계산할 수 있다.

5. 향후 전망

동아시아 산성강하물 측정 시범 및 본 조사사업에 능동적으로 대처하고 장거리 이동현상에 대한 한·중·일 국제조사를 위하여 체계적으로 장기적인 기본방향 및 전략을 국가적인 차원에서 정립할 필요가 있으며 대기오염물질 장거리 이동과 산성강하물 조사사업을 일원화된 장기적인 계획 아래서 일관성있게 추진하여야 한다. 또한 산성강하물 측정조사와 장거리 이동 측정망을 정규 대기오염 측정망화하므로써 지속적인 자료의 축적이 가능할 것이다.

5.1 국가 대기오염측정망 정비와 확충

환경부는 2000년대 대기오염측정망 기본계획을 수립하여 기존 측정망이 안고 있는 문제점과 제한성을 개선하기 위한 측정망 분류 및 운영체제 개선안과 확충계획을 제시하고 있다.

지역대기, 지역배경, 도로변측정망 등 총 127개소의 일반대기오염측정망을 확충(현재 167개소, 총 294개소)하며, 유해대기, 광화학평가, 산성강하물측정망 등 총 138개소의 특수대기오염측정망을 확충(현재 42개소, 총 180개소)하여 2005년까지 측정소를 현재 209개소에서 474개소로 확충한다. 특수 대기오염측정망중 기존의 산성우 측정망을 산성강하물 측정망으로 개편하고 측정망의 재구성을 피하며 산성강하물 측정망의 설치 목적은 전국적인 산성강하물의 침적량을 파악하여 산성강하물에 의한 피해를 예방하고 대책수립을 위한 자료로 활용하기 위한 것이다. 산성강하물 설치기준으로 80~100km의 격자체계를 가상하여 산성강하물 측정소를 설치하며 가급적 기존 측정소를 최대한 활용하되, 활용이 불가능한 경우에는 배경농도측정소와 연계 또는 동일지점에 설치하도록 하고 있다.

산성강하물 측정망은 1단계로 23개의 습성강하물 측정망과 6개의 건성강하물 측정망으로 구성하며 단계별로 확충하며 습성 강하물 측정소에서는 강수중 pH, 전기전도도, 이온농도(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2})와 강수량을 측정하며 도시지역에서는 강수일별 시료 채취를 교외나 원격지역에서는 주 1회 시료 채취를 실시한다. 건성 강하물 측정소에서는 SO_2 , NO_2 , HNO_3 , O_3 , NH_3 등 기체상 물질과 PM-2.5중 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} 를 측정분석하고 침적속도를 산정하기 위한 풍향, 풍속, 온도, 습도, 일사량, 강수량과 같은 기상인자를 동시에 관측할 수 있도록 한다.

표 2. 산성강하물 측정소 선정(안)

도 시 지 역	지역배경지역	국가배경지역
서울(불광), 부산(덕천)	수도권(경기 의정부, 안산)	강화도
대구(지산), 대전(구성)	중부권(경기 이천, 충북 괴산)	태안군
광주(농성), 인천(부평)	영남권(경북 영주, 영천)	제주도
울산(성남), 강원(원주,춘천)	호남권(전북 임실, 전남 진도)	울릉도
경남(창원), 전남(여수)	영동권(강원 고성, 양구)	거제도
11개소	10개소	5개소

5.2 장거리 이동 및 침적현상 집중조사

2000년에 시작될 예정인 동아시아 산성강하물 측정사업 습성강하물, 건성강하물 측정과 토양, 식생, 호소 영향조사 분야에 적극적으로 참여하기 위하여 국내적인 준비단계 사업과 한·중·일 장거리 이동 공동조사사업을 병행하여 종합적인 측정 프로그램 계획이 진행되고 있으며 2000년부터 집중 측정 및 특정연구 프로그램이 향후 추진되어야 한다. 측정 프로그램에는 정규 측정망을 위한 상시 측정과 기상인자를 포함한 측정대상의 확대와 함께 항공기 및 선박을 이용한 입체적인 집중측정이 포함되어야 하며 tracer 실험 프로그램을 통한 이류 특성 파악 및 모델의 검증 자료 제공이 필요하다. 이와 함께 건성 강하물의 침적량 파악을 위한 측정과 침적속도 산정방법의 검토를 위한 집중조사 프로그램이 추진되어야 할 것이다. 특히 건성 강하물의 침적현상과 관련하여 대상지역의 지표특성을 고려한 측정방법의 개발과 모델 등에 사용되는 건성 강하물 침적속도에 대한 검토는 장거리 이동을 포함한 대기오염물질의 침적을 통한 토양 및 식생, 내수면에 미치는 영향을 파악하기 위한 해결하여야 할 당면 연구과제임에 틀림이 없다. 이를 위해서는 우선 특정관측지점을 선정하고 우리나라에 적합한 건성침적량 직접측정방법을 적용하여 건성침적속도를 구하여야 한다. 그리고 미기상변수를 이용한 간접추정방법으로 계산한 건성침적속도와 비교하여 현재 적용중인 간접추정방법 계산의 정확도를 향상시켜야 할 것이다.

참고문헌

김시완, 박순웅 (1996) 서울지방의 산성오염물질의 건성침착량 추정, 한국기상학회지 32(2), 325-338.
 김용표 (1999) 동북아시아지역 대기오염 현황 : 중국을 중심으로, 한국대기보전학회지, 15(2), 211-217.
 이종훈 (1999) 동북아시아지역 대기오염장거리이동에 관한 연구, 건국대 박사학위논문, 142pp.
 Carmichael G.R. and R. Arndt (1996) Integrated analysis of energy growth and acid deposition in Northeast Asia. Proceedings of the International Symposium on Acidic Deposition and its Impacts, 12.10-12 1996, Japan, 17-30.
 Chen L. et al., (1997) Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju island, South Korea, Journal of Geophysical Research, 102(D23), 28551-28574.
 Erisman J.W. et al. (1994) Review of deposition monitoring methods, Tellus 46B, 79-93.
 Fukuyama T., (1998) Dry deposition monitoring, including presentation on the draft reports of the Task Force on Dry Deposition Monitoring, Proceedings of the 1st Training Workshop, 11.17-19, Japan.
 Hayami H., S. Fujita, and A. Takahashi (1997) Spatial and temporal distribution of acidic substances being transported from/to Japan. Proceedings of 3rd International Joint Seminar on the

- Regional Deposition Process in the Atmosphere, 11.5-7, 1997, Japan, 106-111.
- Hicks B.B. et al., (1980) Critique of methods to measure dry deposition : Workshop summary. EPA-600/9-80-050, EPA, Washington D.C., 83.
- Huebert et al. (1998) Web page in <http://saga.pmel.noaa.gov/aceasia/prospecus122198.html>
- Ichikawa Y., H. Hayami, and S. Fujita (1997) A long-range transport model for East Asia to estimate sulfur deposition in Japan, *Journal of Applied Meteorology*, 37, 1364-1374.
- Kim Y.P. et al., (1998) Monitoring of air pollutants at Kosan and Cheju island, Korea during March-April 1994. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 1117-1126.
- Lee T.Y. (1997) Verification of an acid deposition model, *Proceedings of International Workshop on Monitoring and Prediction of Acid Rain*, 9.29-10.1, Korea, 89-94.
- Mennen M.G., et al. (1995) Monitoring dry deposition fluxes of SO₂ and NO_x : Analysis of errors. *Acid Rain Research : Do we have enough answers?* edited by Heiji and Erisman, 41-52.
- Murano K and S. Hatakeyama (1997) Annual variations of gaseous and particulate air pollutant concentration and estimation of dry deposition amount with concentration method in Dazaifu, Japan, *Proceedings of International Workshop on Monitoring and Prediction of Acid Rain*, 9.29-10.1, Korea, 69-75.
- Park J.K. and S.Y. Cho (1997) A long-range transport of SO₂ and sulfate between Korea and East China, *Proceedings of International Workshop on Monitoring and Prediction of Acid Rain*, 9.29-10.1, Korea, 104-113.
- Park S.U. (1998) Effects of dry deposition on near-surface concentrations of SO₂ during medium-range transport, *Journal of Applied Meteorology*, 37, 486-496.
- Record, F.D. et al., (1982) *The acid rain information book*. Noyers Data Corp., 99-101.
- Xiao H. et al. (1997) Long-range transport of SO_x and dust in East Asia during the PEM B experiment. *Journal of Geophysical Research*, 102(D23) 28589-28612..