

동아시아 지역에서 대기오염물질 장거리이동의 대책에 관한 연구

禹 完 基
<長安專門大學 教授>

<목 차>

1. 序 論	3. 2 국내의 연구동향
2. 研究內容 및 方法	3. 3 배경농도 측정
3. 結果 및 考察	4. 結 論
3. 1 국외의 연구동향	REFERENCES

1. 序 論

북미, 서유럽 그리고 한국을 포함하는 동아시아 지역은 경제발전예 따른 다량의 대기오염물질을 배출하고 있어 세계 3대 산성우 다발 지역으로 꼽히고 있다. 특히 한국, 중국, 일본을 포함하는 동아시아 지역은 연료 소비량의 급속한 증가로 대기오염에 의한 피해가 심화되고 있으나 이에 대한 연구는 대도시나 공업지역을 중심으로 이루어져 왔을 뿐이다. 대기오염의 피해를 경험해 온 북미 및 서유럽에서는 대기오염물질의 장거리운송, 화학적 특성, 그리고 그에 대한 저감방안 및 대책을 꾸준히 연구하여 왔으나 동아시아 지역에서는 이에 대한 연구가 미비한 실정이다. 봄철의 황사 현상에서도 추측할 수 있듯이 중국의 산업화에 따른 대기오염물질의 유입도 예측이 되는바 한반도를 중심으로 한 동아시아 지역에서 대기오염물질의 장거리 운송, 화학적 특성 및 변화, 배출원 분포를 조사하여 향후 대기오염 관리정책

수립에 대한 과학적 근거는 시급히 마련되어야 한다.

2. 研究內容 및 方法

본 연구에서는 최근 동아시아 지역에 있어서 주요 환경문제로 떠오르고 있는 대기오염물질의 장거리 이동에 대한 대책에 관한 연구로써, 동아시아 각국의 주요연구 현황과 대책에 대해 조사해 보기로 했다.

연구방법에 있어서는 문헌고찰을 통해 우선 선진 구미 각국에 있어서 연구동향과 인접국가간 장거리이동 현황과 그 대책을 살펴보고, 현재 당면과제로 부각되고 있는 동아시아 지역에서는 한국의 실측결과를 토대로한 현황과 일본, 중국의 현황을 조사하여 그 대책을 제시하고자 했다.

3. 結果 및 考察

대도시의 급증, 공업의 발달 등 고도산업사회의 출현으로 최근 약 반세기 동안 화석연료

사용의 급증은 많은 지역에서 대기오염문제를 가중시켰다.

특히, 대기오염물질의 장거리 이동은 북미와 유럽에서 약 15년 이상 광범위한 이해관계의 쟁점으로 부각되어 왔다. 이러한 문제에 대응하기 위해 선진제국에서는 monitoring, modeling, 위해성 평가, 그리고 여러가지 다양한 기술적, 경제분석을 통해 정책수립에 반영하고자 하였다.

그러나, 이러한 유럽과 북미의 정책수립자들과는 달리, 아시아 지역 국가들의 이에 대한 대책은 미흡한 실정이다.

화석연료는 이미 거대한 양이 사용되었고, 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 피해는 지역적으로 증가되고 있다. 실제 배출규제는 일본을 제외한 대부분의 국가에서 엄격하지 않으며, 이러한 현재의 에너지체제로 볼 때, Table 1.에 나타난 바와 같이 2010년에는 아시아의 황산화물 배출량이 동·서유럽과 북미를 합친 것보다 초과하게 되는 것으로 알려졌다.

Table 1. Current Projected SO₂ emission by region(million tons per year)

Region/Country	Emission of SO ₂ in million tons/year			
	YEAR			
	1985	1990	2000	2010
Europe	53	50	39	39
U.S.A	23	26	23	16
ASIA	26	35	53	76
China	17	23	34	49
India	3	4	5.4	6.7
Other	6	8	13.6	20.3

최근의 대기오염 문제는 종래의 국지적인 '공해'에서 보다 광역적인 관점에서 인식되어 지게끔 되고, Background지역에서의 오염물질 농도상승에 따른 지구환경의 변화 및 오염물질의 장거리 이동이 Close up되어져 왔다.

이들의 제반 문제에 대응하는데는 대기질에 관한 다수의 Data가 필요하고, 현재 국제기관 주도하에 대기 Monitoring Network가 정비되어져 가고 있다.

Fig. 1.에는 국제연합(United Nation)주도의 전지구 대기감시망의 계통도를 나타내었다.

세계 160개국에 가맹하는 세계기상기구 WMO(World Meteorological Orgainization)는 1989년 6월에 Global Atmosphere Watch (GAW)계획을 채택했고, 온난화, 오존층파괴, 산성비 및 입자상물질에 의한 대책에 대하여 전지구적 규모의 대기측정망의 정비를 진행하고 있다.

이것은 예측되는 사태에 대한 조기 경보능력을 높여, 정부입안부문의 요청에 응하는 것을 목적으로 하여, WMO가 종래부터 시행해온 몇개의 PROGRAM을 통합한 것이고, 그 중심은 1957년 이래 실적을 보여주고 있는 GOOS(Global Ozone Observation System) 및 1970년 설립된 BAPMoN(Baseline Air Pollution Monitoring Network)이다. BAPMoN에는 현재 197개의 관측지점이 있고, 155개 지점에서 강수의 화학성분, 88개 지점에서 대기의 혼탁도, 85지점에서 부유입자상물질, 22개 지점에서 이산화탄소, 22개 지점에서 오존, 7개 지점에서 Methan, 6개지점에서 Freon Gas를 관측하고 있다.

이 BAPMoN은 1972년 스톡홀름에서 개최된 국제연합 인간환경회의에서의 선언을 받아 발족한 UNEP(United Nations Environmental Program)에 중요한 정보원으로 공헌하였다.

현재 GAW의 대기질 감시망은 전세계에 배치되어있으나, 그 지점수는 지구규모의 대기질 동향을 파악하는데 크게 부족한 실정이다. 이 부족한 부분은 지역적인 대기측정망의 충실로 보완할 필요가 있다고 본다.

유럽지역에서는 각국의 국경이 인접하고 있기 때문에 대기오염물질의 국가간 이동은 일찍부터 문제가 되어왔다.

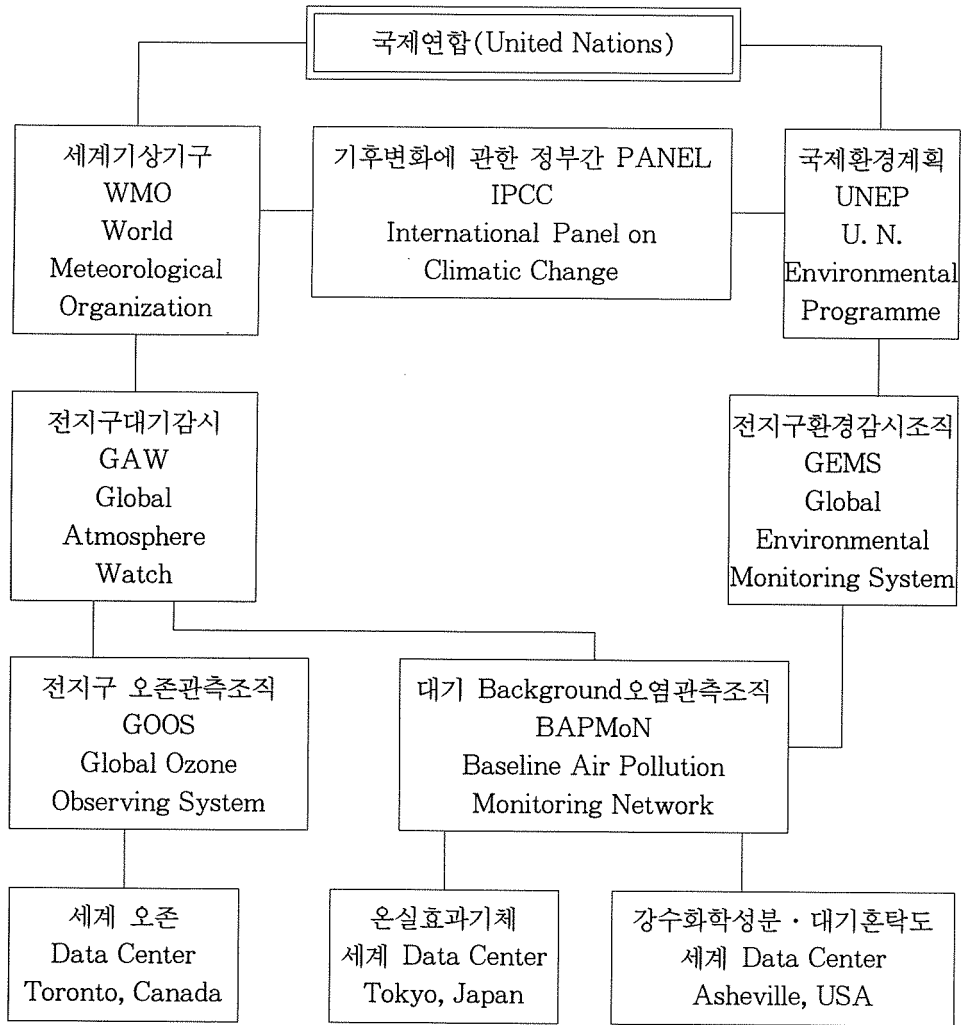


Fig. 1. Global air quality monitoring system of United Nations.

유럽에서의 지역적인 대기측정계획은 1946년 Egner에 의해 이루어져 1960년 대에 많은 기관에 의한 관측이 이루어졌다. 또한 OECD (Organization for Economic Cooperation and Development)주도에 의한 황산화물의 장거리이동과 산성화에 의한 계획도 실시되어, 현재는 보다 많은 지역을 포함하고, 질소산화물 및 기타 측정항목을 설정한 유럽감시평가계획(EMEP : European Monitoring and Evaluation Program)이 실시되고 있다.

또한 인접국인 일본에서는 환경청에 의하여 대기측정망(National Air Surveillance Network; NASN)이 1967년에 설치되어 운영되고 있다.

또한 우리나라의 풍상방향에 위치한 중국은 1970년대에는 '공해'라는 개념이 없었고, 그에 관한 법률도 존재하지 않았다. 그러나 문화대혁명 이후 활발해진 산업활동으로 환경오염이 급속히 진행되어, 1979년 9월에는 中華人民共和國환경보호법이 제정되어, 1982년 4월에는

環境大氣基準이 國務院 環境保護指導班에 의해 공포되었다.

3. 1 국외의 연구 현황

국외의 대기오염 물질 장거리이동에 관한 연구는 70년대 후반 이후 지속적으로 수행되고 있는데 미국, 캐나다 간의 산성비 저감을 위한 NAPAP, NASA에서 주관하는 PEM 등 모델 개발과 측정 연구가 병행되어 수행되고 있으나 극동 아시아 지역은 일본만이 80년대 초반 이후 관심을 갖고 항공기 측정, 배를 이용한 대기오염 물질의 장거리이동 경로 규명 등에 연구투자를 해오고 있다. 중국의 경우는 소극적인 자세로 이 분야에 관한 연구 투자를 국내의 산성비 등에 국한 시켜 수행하고 있다.

한반도를 포함한 동아시아 지역에서 대기오염물질의 장거리이동은 오래전부터 황사현상으로 확인되고 있었으나, SO_x, NO_x, O₃ 등의 대기오염물질에 대한 관심은 최근의 일이며, 동아시아지역은 특히 북미, 유럽과 더불어 세계 3대 산성우 다발지역으로 꼽히고 있다.

유럽의 경우 대기오염물질의 약 50%가량이 국경을 넘어 이동하는 것으로 알려져 있으며, 미국과 캐나다간에는 동북부지역을 중심으로 산성우 문제에 대하여 1970년대 이후 책임소재와 방지대책을 둘러싼 논쟁이 벌어져, 1978년 장거리 대기오염에 관한 연구협의 그룹(The Bilateral Research Consultation Group on Long Range Transport of Air Pollutants : LRTAP)을 결성하기에 이르렀다. 이들의 연구결과에 의하면 캐나다에서 발생하는 산성우의 약 50% 이상이 미국으로부터, 미국 산성우의 15% 정도는 캐나다로부터 비롯되는 것으로 알려졌다. 또한, 북유럽의 경우, 핀란드의 구소련간의 환경협정을 들 수 있는데, 핀란드에 강화되는 아황산가스의 20%만이 국내에 의한 것이며, 나머지는 대부분 구소련의 핀란드국경지대에서 배출되는 것으로 확인되었다. 이러한 상호간의 기여도 산출은 1989년 구소

련과 핀란드 양국이 핀란드 전역과 핀란드 인접 소련 영토내에서 SO₂배출량을 50% 감축하는 협정에 서명하는데 근거자료가 되었다.

동아시아 지역에서의 대기오염물질 장거리이동에 관한 연구는 주로 일본에서 연구가 많이 진행되었으며 이는 극동아시아지역의 풍하방향에 위치하여 한국 및 중국의 산업화에 따른 대기오염물질의 유입을 우려했기 때문인 것으로 보인다. 특히, 일본에서는 최근 여러학자들에 의해 중국과 대륙으로부터 유입되는 오염물질의 기여도에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

角皆(1977)등은 日本海쪽의 각도시에 있어서 황산화물의 강하가 겨울철에 증가하는 것을 발견하고, 그것은 대기오염물질 장거리이동에 의한 것이라고 추정하였다. 藤田(1990)은 큐슈 서쪽해역의 반경 100km내에서의 유황산화물의 건성 및 습성 침착량과 그 지역에서의 발생량을 모델 계산으로 추정한 결과를 발표하였고, 山口(1991)등은 山陰지구에 있어서 산성우 채취기를 사용하여 침착물을 채취하여 성분 분석을 행하였다. 그 결과 산업활동이 비교적 적은 山陰지구에 있어서도 비해염성 SO₂의 침착량이 적지않고, 겨울철에 비해염성 SO₂농도가 증가하는 것은 유적선에 의한 추적을 통해 한반도에서 유입되는 것으로 추정했다.

또한, 동아시아지역에서의 산성물질의 장거리 수송현상의 모델화에 대해서는 池田(1990)등에 의해 trajectory모델, 변질침착모델이, 片谷(1990)등에 의해 Eulerian모델을 이용하여 대륙에 기인한 오염물질의 영향을 추정했다. 田中(1990)등은 기상학적 견지에서 동아시아 지역에서의 오염물질의 장거리 수송현상에 대해 연구했는데, 고·저기압의 이동, 특히 저기압이 중요한 역할을 한다는 것을 입증했다.

중국에서는 Gao Xueqing(1993)이 유황함량이 높은 석탄에 의존하는 에너지 구조에 의해 발생하는 아황산가스로 인한 중국 각 지역에 대한 산성물질 강하에 대해 조사하고 이를 저감하기 위한 방안으로 산업구조개선, 연료대

체, 연소기술의 개선, 관계법령강화 등 행정적, 기술적 목표를 제시했다. 최근의 연구결과에 의하면 Okita(1993)는 중국 혹은 대륙에서 이동되어오는 SO₂강하량의 추정에서 기여도를 1월에는 70% 이상, 3월에는 40~80%로 추정했다.

그 밖에도 몇몇 연구결과가 있지만 아직 시작단계로서 이론적 연구와 실험적연구를 병행하여 장거리이동의 정량, 정성적인 해석의 신뢰성을 높여야할 것으로 보인다.

3. 2 국내의 연구현황

국내의 경우 80년대 중반까지는 대기오염물질의 장거리이동에 관한 연구가 전무하였고, 환경처 주관하의 대도시 측정망과 산성우 측정망이 가동되는 정도였으나 국립환경연구원(1990)에서 대기오염물질의 장거리이동현상과 산성비 강하에 대한 연구가 수행되었고, 홍민선(1992)등이 우리나라 청정지역중의 하나인 제주도 고산 고층 레이다 기상대에서 대기오염물질인 SO₂, O₃의 이른 봄철 농도변화를 측정 분석하여 대륙으로부터의 유입정도를 추정하였으며, 풍향, 일사량 등의 기상조건에 따른 농도변화를 분석하였다. 정용승(1993)등은 충청남도 태안군 소원면 파도리에서 행해진 CO₂의 배경농도 관측결과 북서기류가 유입될때가 남서기류의 유입때보다 CO₂의 농도가 높은 것은 중국의 산업화에 따른 가스 및 오염물질이 기류에 따라 이동할 수 있다는 결론을 얻었다. 또한, 김정욱(1992)등의 연구결과에서는 편서풍대에 위치한 우리나라는 전반적으로 겨울기간을 중심으로 중국대륙의 영향을 받는 것으로 나타났다. 그 밖에도 몇몇 연구결과가 있으나, 대기질의 대한 기여도를 조사한 연구는 전무한 실정이고 경계층 상층부의 자료 또한 전무한 실정이다.

또한, 80년대 중반까지는 대기오염물질의 장거리이동에 관한 연구가 전무하였고, 최근의 연구동향도 유적선 작성을 통한 유입경로, 일

부지역에서의 배경농도측정이 행해지고 있는 정도이며, 국가간 이동량의 정량적해석을 통한 기여도 산출은 전무한 실정이다. 특히 경계층(Planetary Boundary Layer, PBL)상층부에서의 국내 대기질 측정 자료는 전무한데, 일본의 경우 비행 탐사를 통한 경계층 상부의 대기질 측정이 87년 이후 매년 1~2회씩 수행되고 있으며 이들 자료는 대기오염물질의 장거리이동에 관한 정량, 정성적인 분석을 위한 귀중한 자료로 활용되고 있다.

3. 3 배경농도 관측

대기성분기체의 배경농도 관측은 주변지역의 청정도를 기록하는 목적과 함께 각종 오염기체의 미량측정기술개발과 오염원(source)의 종류에 대한 정의 및 Trajectory추적연구 등에 크게 기여하고 있다.

본 연구에서 국내에서의 실측자료는 본인이 연구원으로 참여하여 수행한 우리나라 제주도 지역의 측정결과를 인용하고자 한다. 측정위치는 제주도의 서쪽 끝, 북위 33°17', 동경 126°10'에 위치한 고산지역이다.

이 지점은 중국과 일본의 중간지점에 있어, 이동경로의 파악에는 좋은 지점으로 사료된다.

본 연구에서는 1992년 측정결과를 토대로 가스상물질(Fig. 2-3)과 Aerosol의 이온농도(Fig. 4-5)로 나타냈다.

청정 대기중 일산화질소는 0.01-0.05 ppbv의 농도로 존재하는데 Fig. 2에 나타난 바와 같이 대부분 이범위에 속해 다른 지역에서의 배출보다는 자연적인 배출원의 영향을 받은 것으로 보인다. 대류권 오존농도의 변화 요인에는 성층권에서 생긴 오존의 유입, 대류권내 기체성분의 광화학 반응, 오염된 지역으로부터의 유입과 표면 등에서의 건성침착율(dry deposition rate) 등이 있다. Fig. 3에서 보듯이 제주 지역에서 측정된 오존농도는 30.49-55.92 ppbv로 봄에 높고 여름에는 비교적 낮은 농도를 나타낸다. 이러한 경향은 북반구의 다른 청

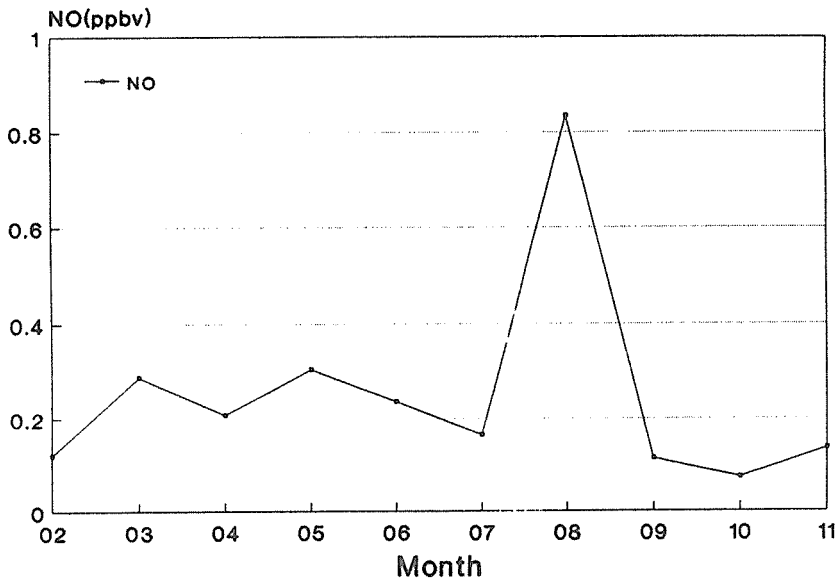


Fig 2. Monthly variation of NO, 1992

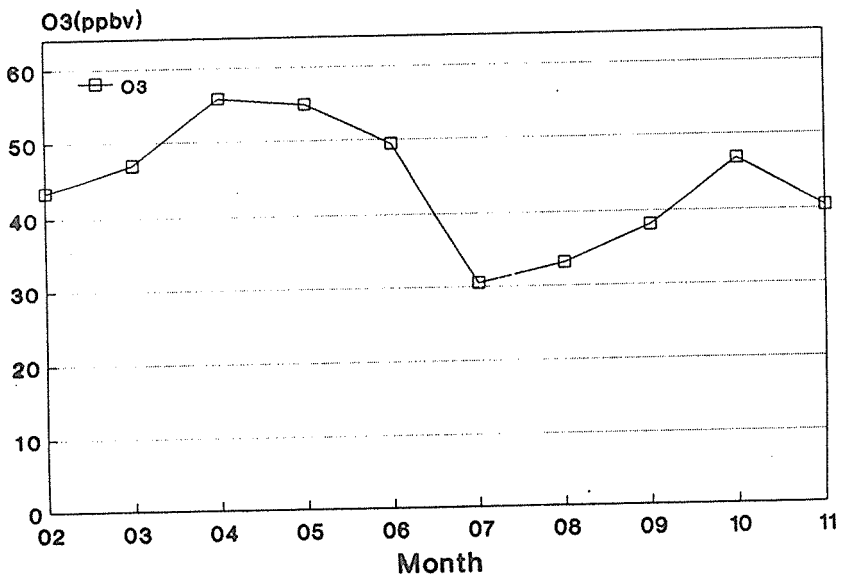


Fig 3. Monthly variation of O₃, 1992

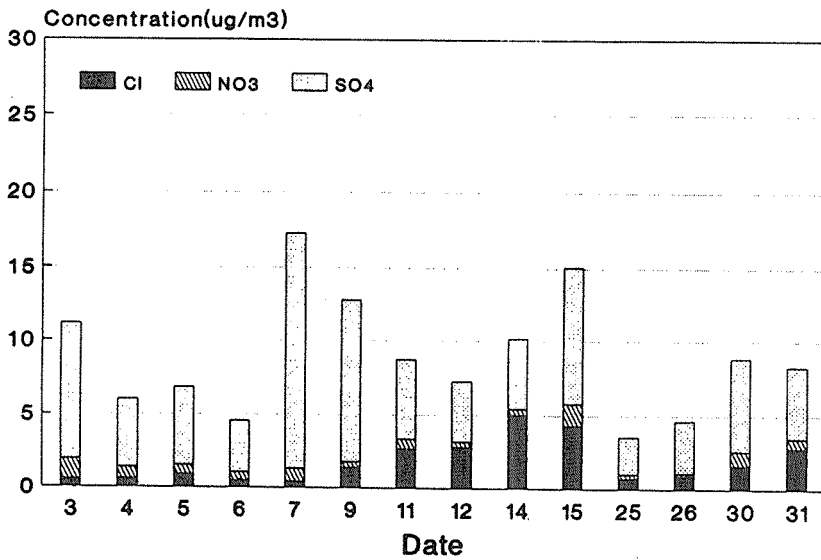


Fig 4. Anion Concentrations of December, 1992

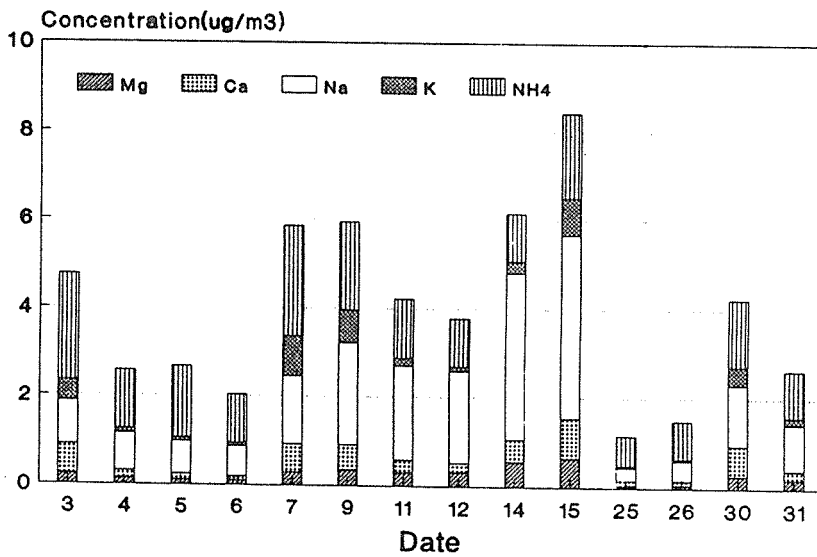


Fig 5. Cation Concentrations of December, 1992

정지역에서도 관찰되며 과거에는 봄에 성층권으로부터 오존이 유입되는 것으로 생각했으나

현재는 겨울동안 대류권에 축적된 화합물에 의해 봄에 오존농도가 높아지는 것이 확인 되었

다.

대기중의 부유하는 분진의 성분 가운데 이온 물질들의 생성과정을 살펴보면, SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 등은 인위적이거나 자연계의 해염입자 등으로 부터 반응하여 주로 생성되며, Na^+ 는 주로 해염입자나 소각시설, 혹은 토양에서 생성 되는 것으로 알려졌다.

또한 발생원이 자연계 또는 인위적으로 배출 되는 등 다양하므로 각 지역에 따라 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 농도는 뚜렷한 특징이 드러나지 않으나 NH_4^+ 은 화석연료의 연소와도 관련이 있으며 자연발생량도 많은 것으로 알려졌다.

이온농도는 1992년 12월의 측정결과를 나타냈다. 이는 이 기간동안 제주도 고산지역의 풍향이 북풍과 주풍(Prevailing Wind)이었기 때문이다. 조사 결과를 살펴보면, 오염물질의 이동이 중국에서 동쪽으로 이동, 혹은 중국에서 한반도를 경유하거나 한반도에서 남하되는 오염물질의 영향도 있는 것으로 사료된다.

본 연구 결과를 살펴보면, 음이온인 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 의 총량은 측정기간중 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 나타났으며 대체적으로 SO_4^{2-} 가 지배적으로 높게 나타났다.

양이온중 NH_4^+ 도 다른 이온들보다 대체로 비율이 높게 나타났다.

4. 結 論

본 연구에서 측정기간중 12월의 주풍(Prevailing Wind)을 조사해 본 결과 오염물질의 이동은 중국에서 동쪽 방향으로의 이동이 많았고, 다른 한편으로는 한반도를 경유해서 이동 되는 것으로 추정되었다. 지금까지의 연구결과로 장거리 이동의 모든 현상을 규명하기는 어려우나, 보다 많은 자료가 축적되면 다양한 해석이 가능하리라 생각된다.

본 연구결과와 대기오염물질의 장거리 이동에 대한 대책으로는 경제성장 속도와 연료사용량이 막대한 중국을 풍상 방향에 둔 우리나라로서는 대기오염 물질의 장거리 이동에 관한 연

구를 효율적, 지속적으로 수행할 필요가 있으며 관련 부처 및 학자간의 교류 협력이 활발히 이루어져야 할 것으로 사료된다.

또한, 대륙의 풍하방향에 위치한 일본과 공동으로 대처하여 중국 북서부 및 동부지역의 대기오염물질 배출저감을 유도하여 동아시아지역의 대기질 개선에 이바지 할 수 있으리라 믿어지며, 일본으로서는 대륙으로부터 유입오염물질에 의한 대기질 악화가 우려될 경우 대기오염방지기술 및 측정기술의 이전을 서두르리라 예상되어 국내관련산업 및 기기의 국산화에 일익을 담당하리라 믿어진다.

또한, 대기질 측정 및 방지시설 기술의 개발을 간접적으로 촉진할 수 있으며 한·중·일 동아시아 삼국의 협력체제를 구축할 수 있는 향후 동아시아 지역의 대기질 개선에 이바지할 수 있는 기틀을 마련할 수 있다. 그리고 최근 이유가 되기 시작해 경제활동의 커다란 제약이 될 온실가스 및 오존층 파괴와 같은 범지구적인 대기오염문제에 대처할 수 있으리라 믿어진다.

REFERENCES

1. S. Okamoto and K. Kobayashi(1991) "Characterization of aerosols in the Koshima area—A summary of IPCAJ Kasbinia SPM study." Atmos. Env., vol 25B, NO.1, pp. 134—142
2. Martin A. Cohen, P.Barry Ryan & John D. Spengler(1991) "Source—Receptor study of volatile organic compounds and particulate matter in the Kanawha valley, WV—I. Methods and descriptive statistics." Atmos. Env. Vol 25B, No.1, pp. 79—33
3. W.Baeyems & Dedeurwaerder(1991) "Particulate trace Methods above the southern bight of the north sea—I. analytical procedures and average aerosol

- concentration.” *Atmos. Env.* Vol 25A, No. 2, pp. 293–304
4. J. E. Sickles, II et al(1990) “Field comparison of methods for the measurement of gaseous and particulate contributors to acidic dry deposition.” *Atmos. Env.*, Vol 24A, No.1, pp. 155–165
 5. C. A. Pio et al(1991) “Particulate and gaseous air pollutant levels at the portuguese west coast.” *Atmos. Env.*, Vol 25A, No. 3/4, pp. 669–680
 6. Farm parunge et al(1990) “The investigation of air quality and acid rain over the gulf of Mexico.” *Atmos. Env.*, Vol 24A, No.1, pp. 109–123
 7. S. E. Lindberg et al(1990) “Atmospheric concentrations and major ions in conifer forests in the United States and federal republic of Germany.” *Atmos. Env.*, Vol 24A, No.8, pp. 22207–2220
 8. Sachio Ohta & Toshiich Okita(1990) “A chemical characterization of atmospheric aerosol in sapporo.” *Atmos. Env.*, pp. 815–882
 9. B. Lim, T. D. Jickells & T. D. Davies (1991) “Sequantial sampling of particles, major ions and total trace metals in wet deposition.” *Atmos. Env.*, Vol 25A, No. 3/4, pp. 745–762
 10. M. J. Harvey et al(1991) “Summertime aerosol measurements in the ross sea region of antarctica.” *Atmos. Env.*, Vol. 25A, No. 3/4, pp. 569–580
 11. Sinton, J. E.(ed.), *China Energy Data book, 1992 EDITION*, collaborat-ed by Lawrence Berkeley Laboratory and China State Planning Commis-sion, Revised, Nov.(1992)
 12. 中國環境科學出版社, 中國環境年監, 1990–1992
 13. Toshiichi Okita, Emission and Long-range Trans-*port of Pollutants, and Mit-igation of Acid Deposition Damage to Terrestrial Ecosystem(Development of Eulerian Model of Long-range Transport and Deposition of SO_x in the East Asia)*, International Workshop on Acid-ic Deposition in East Asia, Hakone, Japan, 24–26 Nov.(1993)
 14. Gao Xueqing, Study of Acid Deposition in China, International Workshop on Acidic Deposition in East Asia, Hakone, Japan, 24–26 Nov.(1993)
 15. Carmichael G. R., L. Peters and T. Kitata, A second generation model for regional scale transpot/chemistry/ depo-sition, *Atmos. Environ*, 20 : 173–188(1989)
 16. 角皆靜男, 品川高儀, *地球科學*, 11, 1–8 (1977)
 17. 田中一浩. 北田敏度, 第31回大氣污染 學會 講演要旨集, 366(1990)
 18. 김양균 등, 대기오염 물질의 장거리 이동 과 산성비 강하에 관한 연구, 국립환경연 구원보, 제12권 341–371(1990)
 19. 홍민선 등, 제주도 고산에서의 대기오염물 질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국 대기 보전학회지, 제8권 제4호(1992)
 20. 정용승, 이근준, 한국의 태안반도에서 관 측된 이산화 탄소의 배경농도에 관한 연 구, 한국 대기보전학회지, 제9권 제1호, 61–68(1993)
 21. 藤田愼一, *大氣污染學會誌*, 25, 155–162 (1990)
 22. 山口幸祐 等, *公害 と對策*, 27, 56–62 (1991)
 23. 地田有光, 小田克彦, 平岡正勝, 第31回大 氣污染學會 講演要旨集, 364–365(1990)
 24. 片谷教孝 等, 第31回 大氣污染學會 講演要 旨集, 367(1990)