

## 세정이론을 통한 산성비의 평가와 발원지 추적

### Evaluation of Acid Rain through the Scavenging Theory and Application of Trajectory Model

김 정 수 · 강 인 구 · 장 성 기

국립환경연구원 대기연구부  
(원고접수 : 1992. 4. 17)

Jeong-Soo Kim, In-Goo Kang and Sung-Kee Chang

Atmospheric Research Department,  
National Institute of Environmental Research  
(Received 17 April 1992)

#### Abstract

This study was carried out to investigate the features of air pollutants in rainwater and trace their transported trajectories from other countries. Chemical analysis data of rainwater and suspended particulates collected at Seoul, Kanghwa, and Taeon for three years were used to evaluate the effects of long-range transport of air pollutants.

Scavenging theory on washout and rainout effect during a rainy period was applied to estimate whether pollutants in the precipitation were long-range transported or not. On the other hand, precipitation weighted surface wind were evaluated to analyze the effect from local sources on atmospheric concentrations.

As a result, contribution of air pollutants caused by anthropogenic sources in the precipitation which was identified to be long range transported was confirmed significantly high and trajectory of these pollutants was to be equivalent to 850mb isobar. Although concentration of acidifying components increased in the precipitation, neutralization by alkaline soil components such as  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  was conspicuous especially during Yellow-sand period.

#### 1. 서 론

지구의 대기는 인간의 보다 나은 생활을 영위하기 위한 각종 활동으로 인하여 점차 오염되고 있으며, 특히 개발도상국들의 경제개발 우선정책에 기인한 공업화로 급격히 가속화되고 있다. 대기오염물질은 어느 특정지역에만 정체하지 않고 대기의 운동에 의하여 광범위하게 이동·확산되기 때문에 국지오염문제와 더불어 오염물질의 장거리 이동 현상에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 우리나라를

비롯한 동북아시아 지역은 선진공업국인 일본과 급속히 발전하고 있는 한국, 그리고 최근 공업화에 박차를 가하고 있는 중국 등의 각종 배출원으로 부터 대량의 대기오염물질이 배출되고 있으며, 특히 중국은 세계 최대의 아황산가스 배출국으로 하북성, 하남성, 강서성 등지의 산업시설에서 사용되는 고유황 유연탄이나 중유등에서 발생된 각종 오염물질이 주변국가들에 영향을 줄 가능성이 매우 높다.

최근의 환경에 대한 국제적 관심은 지역오염 문제를 초월하여 지구온난화, 산성우 피해, 오존층 파

피등 인위적 오염에 따른 전 지구적인 환경과피 문제가 부각되고 있다. 특히 이 가운데 산성강우에 의한 생태계 파괴 문제는 단기간에 뚜렷한 피해를 줄 수 있기 때문에 국가간 분쟁의 소지가 매우 높다.

본 연구는 서울, 강화, 태안지역에서 3년간 지상 및 상층기상 관측과 부유분진, 산성우 등을 측정된 결과를 토대로 우수중 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 평가하기 위한 것으로서, 강수시의 세정이론을 이용하여 오염물질별 이동범위를 평가하고 상층 일기도 분석등을 통한 장거리 오염원 추정 및 지상 풍에 의한 국지오염원의 기여도를 조사하였다.

## 2. 분석방법

### 2.1 오염물질 강하현상

습성강하에 관한 효과는 구름내에서의 세정인 rainout과 비 또는 눈등의 습성강하물이 낙하시 흡수·흡착에 의해 일어나는 washout 으로 나뉜다 (Butler, 1979). 인위적인 배출원에 의한 오염물질은 일반적으로 배출후 이루어는 과정에서 지상에 침착되거나 대기중에 확산되면서 aerosol 등으로 변환된다. 그러나 이러한 과정은 대부분 지구경계층내에서 일어나며 이 고도 상층부의 비구름 내에서 rainout 이 일어나면서 장거리 지역까지 이동된다(大喜多敏一, 1988). 습성강하를 나타내는 인자로서는 세정계수(scavenging coefficient)  $K$ 와 세정인자(washout factor)  $W$ 가 중요하며, 세정인자는 대기중 물질의 농도  $C_A$ 와 우수중 물질의 농도  $C$ 의 比로서 다음과 같이 표시된다(Chamberlain, 1960).

$$W = \frac{C}{C_A} = \frac{C_w + C_r}{C_A} \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 각각 washout 과 rainout 에 의해 흡수된 우수중 물질의 농도  $C_w$  및  $C_r$ 의 합으로써  $C_r$ 의 변화에 따라  $W$ 값이 민감하게 변한다. 본 연구에서의 세정인자  $W$ 는 편의상 대기중 기온을  $10^\circ\text{C}$ 로 가정하여 대기  $1\text{m}^3$ 는  $1.25\text{kg}$ 으로 계산하였으며, 이로 인한 오차는 10% 이내로써 분석에 별 영향을 주지 않는다. 세정인자  $W$ 는 물질별 용해도, 기온, 수적의 직경 등에 따라 다르지만 대개 500-2,000 정도의 값을 보이며, 비가 형성되는 고도 부근의 농도가 지상농도보다 높을수록 큰 값을 가진다. 이는 이동되어 온 비구름 내의 농도가 높은 경우이거나(대개 장거리 이동), 배출된 오염물질이 혼합고도까지 고루 확산되면서 이동되어 온 경우(대개 중거리 이동)에 해당된다. 반면 낮은  $W$  값은 대부분 주변 지역으로 부터 생성된 오염물질이 혼합층 상부까지

확산되지 못한 경우라 할 수 있다. 오염물질의 수직 확산시간에 관한 연구로서 Sheih(1977)는 통계 유적선 모델을 이용하여  $\text{SO}_2$ 와 Sulfate에 대하여 계산한 결과 24시간 이후 지상과 2km 고도의 농도가 거의 동일해지는 것으로 분석하였다. 이는 혼합층내의 평균풍속을  $5\text{ m/s}$ 로 가정할 경우 430km 이상의 거리에서 수직확산이 완료된다는 뜻이 된다. 대도시 또는 넓은 공단지역에서는 인위적인 오염물질로 알려진  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  등이, 농촌이나 산악지역에서는 토양성분인 Al, Fe, Ca 등이, 그리고 해안지역에서는 해수성분인  $\text{Cl}^-$ 와  $\text{Na}^+$  성분들이 상대적으로 낮은  $W$  값을 갖는다. 만일 대기중 농도  $C_A$ 가 고도에 관해 일정하다면 세정계수는  $K = PW/h$  로 표시된다. 여기서  $P$ 는 강수 강도( $\text{mm/hr}$ ),  $h$ 는 강수고도(m)이다. 가스상 물질의 강하는 분자확산계수, 용해도 및 화학반응등이 중요하게 작용하며 입자상 물질의 경우는 입경, 형태, 흡수성등에 따라 달라진다. 소위 Aitken 입자라 불리는  $0.1\mu\text{m}$  이하의 입자들은 구름내에서 브라운 운동에 의한 확산을 하며  $10\mu\text{m}$  이상의 경우는 중력침강으로 지상에 침착되고,  $5-10\mu\text{m}$ 의 입자들은 우적의 단면적과 강수강도에 좌우되는 관성충돌에 의해 제거된다. 그러나  $0.1-5\mu\text{m}$  범위의 입자의 경우는 브라운 확산과 관성충돌의 어느 것에도 별로 영향을 받지 않는다. 이 범위를 "Greenfield Window"라 부르며(Greenfield, 1957) 풍동실험을 통한 연구에 의하면 모든 입경분포 가운데 이 범위의 입자들의 침강속도가 가장 작은 것으로 조사되었다(Chamberlain, 1975). 또한 Junge등(1965)에 의하면  $0.1\mu\text{m}$  이상의 aerosol의 확산은 시간에 따라 거의 변화가 없는 것으로 보고되었다. 빗방울의 입경을 동일시키고 대상지역의 오염도만을 고려할 경우, 반경  $r$ 인 aerosol 입자의 washout에 의한 세정계수  $K(r)$ 는

$$K(r) = Nf(r)\pi r^2 \eta v \quad (2)$$

가 된다. 여기서  $N$ 은 대기중 단위체적당 우적의 수,  $f(r)$ 는 우적의 빈도분포,  $\eta$ 는 빗방울과 aerosol간의 흡수율( $\text{mg/l}$ )이며,  $v$ 는 낙하속도( $\text{m/s}$ )이다. 위 식으로 부터 세정계수는 우적직경의 제곱에 비례하지만, 우적의 수는 직경의 3제곱에 반비례하므로 강우량이 일정할 경우 빗방울의 직경에 반비례하게 되며, 이는 빗방울이 가늘수록 washout이 잘 일어남은 물론 오염도가 심한 지역에서 안개가 형성될때 강한 산성안개로 나타날 가능성을 시사한다.

### 2.2 기류 이동 경로분석

본 연구에 이용된 자료는 서울(불광동)의 국립환

경연구원에 설치된 산성우 상설 측정장치를 통하여 채취한 우수의 성분 분석결과와, 강화 및 태안지역에서 측정된 부유분진 및 산성우 분석결과이다. 분석에 이용된 산성비 및 입자상 물질에 대한 성분분석은 국립환경연구원 및 건국대학교에서 각각 수행한 것이며(강인구등, 1991), 태안에서는 Radio Sonde 등의 장비로 상층기상 요소를 관측하여 상층 일기도분석에 이용하였다. 여기서는 서울등 세 측정 지점에서 대기중 부유분진과 우수를 동시에 측정할 날을 택하여 그날의 분석된 농도를 식 1에 따라 오염물질별로 세정인자  $W$ 를 산출하고, 이들 사례에 대한 우수중 오염물질의 배출원 파악을 위해 12시간 간격으로 측정된 850 mb와 700 mb의 상층일기도(기상청, 1989-1990)를 이용하여 기류유입 2-4 일전 부터 이동되어 온 경로를 추적하였다.

이동경로 추적을 위한 상층에서의 바람장은 일기도상의 고층기상 관측자료를 이용하며, 측정치가 없는 임의의 지점에서의 바람은 그림 1의 a)와 같이 측

정지점과 두 지점간의 거리  $d$  또는 두 지점간의 편각  $\phi$ 를 이용하여 내삽법으로 구한다. 대부분의 바람장 산출 모델(Draxler, 1979)의 경우는  $1/d^2$ 를, 일부 경우(Heffter, 1980)는  $1-0.5 |\sin\phi|$ 를 가중하여 바람장을 산정하며 본 연구에서는 전자의 방법을 사용하여 식 3과 같이 구하였다.

$$S = \frac{\sum S_i D_i}{\sum D_i} \quad (3)$$

여기서  $S$ 는 가중 평균풍속,  $D_i$ 는  $1/d^2$ ,  $S_i$ 는 실측 풍속이며, Heffter의 방법을 이용할 경우는  $D_i$ 를  $1-0.5 |\sin\phi|$ 로 대체하면 되고, 풍향의 경우에도 위의 방법으로 계산된다. 이때 기압계의 이동에 따른 경도풍의 진행방향을 반드시 고려하여야 한다. 북반구에서 저기압과 고기압 주변의 기류는 그림 1의 b)에 나타낸 바와 같이 각각 저기압에서는 시계 반대방향으로, 고기압에서는 시계 방향으로 회전하며 이동한다.

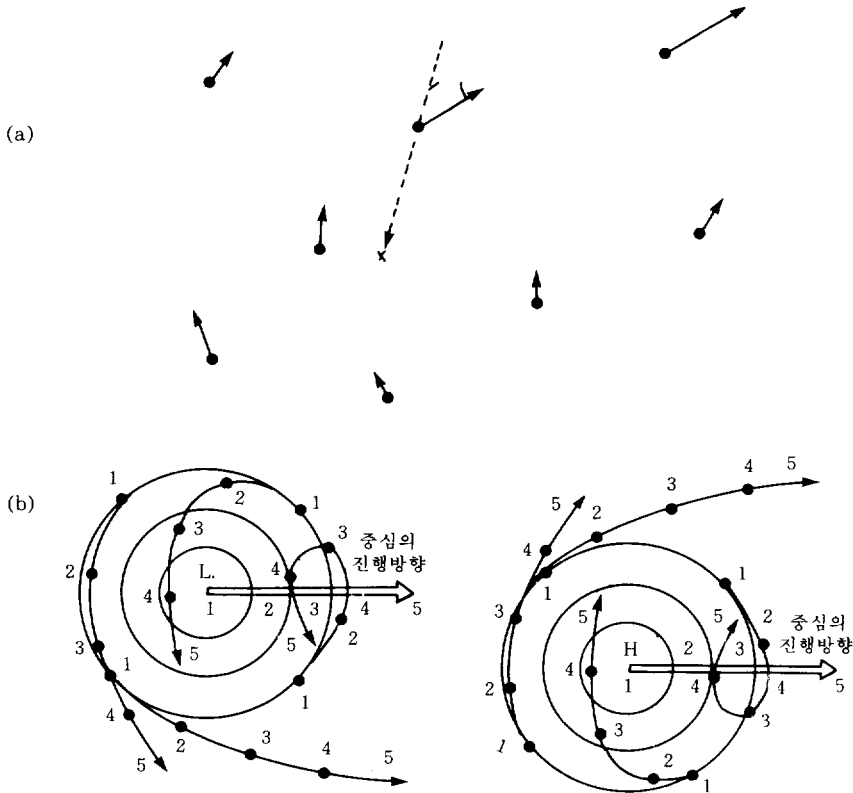


Fig. 1. Interpolation method for the trajectory analysis. The upper, (a), is a calculation example of wind vectors at fixed state with eight observed data. Each observation should be weighted by  $1/d^2$  or  $1-0.5 |\sin\phi|$ . The lower, (b), show the movement of pressure systems and trajectories at moving condition.

Table 1. Concentrations of components (atmosphere/rainwater), washout factors, and meteorological elements in each case

date	site	pH	Precip.	WD/WS	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
'89.9.27	Seoul	3.7	16.4								
	Kanghwa	5.2	12.5	NNW/1.2	1.08/2.75 3183	2.77/4.20 1895	0.43/1.92 5581	0.44/1.72 4886	0.40/0.28 857	0.87/0.03 43	0.26/0.12 577
	Taeon	4.7	17.9	SW/7.2	0.21/2.07 12321	3.96/5.29 1670	0.26/1.51 7260	0.73/2.20 3767	0.21/0.37 2202	0.24/0.40 2083	0.18/0.32 2222
'90.1.9	Seoul	4.1	3.9								
	Kanghwa	4.8	4.0	N/2.6	0.54/0.45 1042	3.05/1.93 791	0.85/1.09 1603	2.25/0.57 317	0.25/0.26 1300	0.58/0.05 108	0.28/0.26 1161
	Taeon	4.8	8.7								
'90.4.7	Seoul	5.2	15.3	E/2.4	9.69/3.76 485	32.66/14.33 548	3.84/4.73 1540	4.92/1.32 335	2.61/0.47 225	2.44/4.44 2275	1.80/0.36 250
	Kanghwa	5.0	8.5								
	Taeon	3.9	11.6	S/3.9	7.64/8.63 1412	17.97/23.29 1620	3.38/10.11 3739	5.86/18.46 3938	1.24/1.19 1200	3.27/0.39 138	1.02/0.92 1127
'90.4.28	Seoul	5.7	7.0	SW/1.6	4.73/3.42 904	14.15/28.05 2478	2.86/6.18 2701	2.85/2.71 1189	2.01/0.61 379	1.89/8.47 5602	1.72/1.02 741
	Kanghwa	5.8	1.0								
	Taeon	6.5	42.8								
'90.6.8	Seoul	5.4	39.7								
	Kanghwa	5.5	62.5	SSE/3.6	0.56/3.66 8170	2.52/6.32 3135	0.14/1.92 17143	7.58/2.28 376	0.57/0.22 482	1.33/1.49 1400	1.05/0.31 369
	Taeon	5.5	37.0	E/4.1	1.34/2.59 2416	2.11/4.50 2666	0.11/1.49 16932	1.72/1.044 759	0.20/1.146 913	1.28/3.41 3330	0.37/0.52 1757

The left side of two values divided by slash is the concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of pollutants in ambient air observed by high-volume air sampler, the right side is the concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in the rainwater, and the single value under the two concentrations is the washout factor, W (dimensionless). The unit of surface wind speed and precipitation amount are m/s and mm, respectively.

3. 이동경로 분석결과

〈사례 1〉 표 1에 나타난 바와 같이 '89년 9월 27일의 경우 세정인자 W로 살펴보면 대개 인위적인 오염원에 의한 것으로 알려진 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 값이 강화와 태안 모두 3,000 이상의 높은 값을 보였으며 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 경우도 각각 1,895 와 1,670의 비교적 높은 값으로 나타났으며 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 역시 높았다. 아울러 대표적인 해염 입자인 Na<sup>+</sup> 역시 매우 높게 나타났는데 이는 비록 이들지역이 해안에 위치하지만 우수중의 Na<sup>+</sup> 성분은 장거리 이동되어 온 것으로 판단된다. 한편 강화의 경우 주 배출원이 토양인 K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등은 W값이 낮은 것과 강우시의 평균풍향으로 미루어 측정소 주변에서 기인된 것으로 보여지며, 태안의 경우는 W값이 비교적 크고 지상풍이 바다쪽인 남서풍인 점으로 미루어 분석된 모든 성분이 외부로부터 유입된 것으로 분석되었다.

표 1의 내용중 강수량을 가중하여 구한 강수시간중 지상에서의 풍향과 풍속은 주변지역에 의한 대기중 물질성분 및 농도를 추정할 수 있는 참고 자료이다. 상층일기도 분석에 의하면, 지상에서의 기압배치는 이동성 고기압의 통과후 양쯔강 부근에서 발달한 저기압이 한반도로 이동하면서 전국적으로 비가 내렸다. 이때 850 mb 일기도에 의한 기류이동은 몽골로부터 북경지역과 발해만을 지나 한반도의 중부지방을 통과하였으며, 700 mb 고도의 기류는 북경 서부로 부터 산둥반도 남부를 감돌아 유입된 것으로써(그림 2) 이 사례의 경우는 중국으로부터의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다. 그날의 우수중 산성도(pH)는 서울에서 3.7, 강화에서 5.2, 태안에서 4.7을 나타내었다.

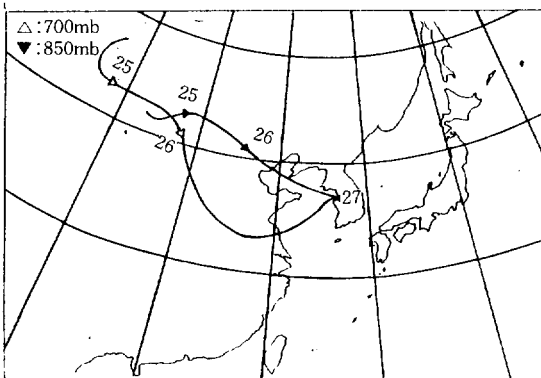


Fig. 2. Air mass trajectories analyzed with upper air weather charts at 850 mb and 700 mb, September 1989.

〈사례 2〉 '90년 1월 9일의 경우는 표 1의 W값으로 미루어 전반적으로 주변지역 영향을 많이 받았으며 외부로부터의 영향은 상대적으로 작았음을 알 수 있다. 그 가운데 Na<sup>+</sup> 와 Ca<sup>2+</sup>는 강수시간중 지상의 풍향·풍속이 시사하는 바와 같이 강화 측정소 주변의 해안 및 야산으로 부터의 영향이 강했던 것으로 판단되며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 및 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 동절기 난방을 위한 연료사용 증가에도 불구하고 우수중 농도가 낮은 것으로 미루어 배출원이 거의없는 지역으로부터 이동되어 온 것으로 추정된다. 당시 기상도에 의하면 한반도 전역에 영향을 주던 폭넓은 고기압이 일본열도를 지나 태평양쪽으로 빠져 나가고 양쯔강 부근으로 부터 따뜻한 저기압의 영향권에 들어서면서 비구름이 호남지역으로부터 북상하면서 전국에 비가 내렸다. 그림 3에 나타난 바와 같이 약 3,000m 고도에 해당되는 700 mb의 기류이동은 중국의 중북부로 부터 산둥반도를 통해 중부지방을 통과했으며, 850 mb 고도의 기류흐름은 중국남부의 광둥성 부근과 양쯔강 하구를 지나 한반도의 서해안을 통해 북부지방으로 이동하였다. 이 사례는 전국적인 강수 시간대로 미루어 이때의 비구름의 이동은 대체로 1,500m 고도의 기류이동과 일치하였다. 당시 관측된 서울, 강화, 태안의 산성도(pH)는 각각 4.1, 4.8, 4.8로 다소 강하게 나타났지만 중국 상하이 부근에 산재된 배출원으로 부터의 오염물질 유입은 거의 없고 우리나라 서해부근의 공단 및 주거지역으로부터 영향을 받은 것으로 판단된다.

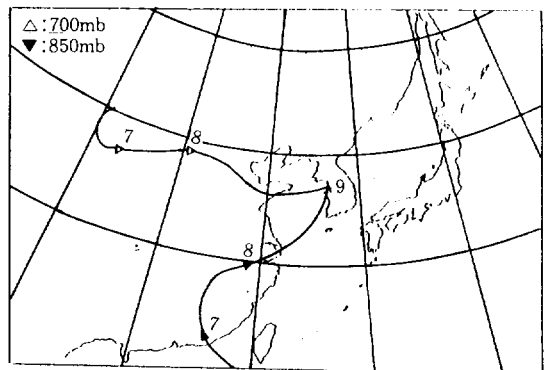


Fig. 3. Air mass trajectories at 850 mb and 700 mb, January 1990.

〈사례 3〉 '90년 4월 7일 서울의 경우 대기 및 우수중 성분농도 모두가 높은 값을 보였으며, 이는 서울 시내를 중심으로한 주변지역에서 배출된 오염물질

과 당시 출현하였던 황사현상시 대기중 오염물질이 응결핵으로 작용한 토양입자에 의해 많이 침착된 것으로 판단되며, 우수중 산성화의 주범인 황산 및 질산이온이 많음에도 불구하고 황사중  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  등 알칼리계 성분의 중화작용으로 산도(pH)는 5.2로 약하게 관측되었다. 태안의 경우는 황사출현은 없었으나 washout 인자 W값이 비교적 높은 것으로 미루어 우수중 성분은 외부로 부터 장거리 이동되어 온 것이 많은 것으로 추측된다. 또한 4월 7일은 황사현상이 관측되기 직전으로써  $NH_4^+$ 를 포함하여 인위적인 배출 오염물질인  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ 의 대기중 농도와 우수중 농도가 모두 높았으며, 이때의 오염물질은 지상부터 우적이 형성되는 2-3km 고도에 이르기까지 고르게 고농도로 이동되어 온 것으로 판단된다. 그림 4에 제시한 당시의 일기도분석에 의하면 850 mb, 700 mb 고도에서 모두 몽골의 황토지역으로부터 북경과 산둥반도 부근을 지나 한반도 중부지역으로 유입되었음을 알 수 있었고, 강수시간중 풍향도 남풍으로써 바다로 부터 불어왔다. 특히 오염원이 거의없는 태안지역에서 기록된 산도(pH) 3.9는 주목할만하며 중국으로 부터 유입된 기류의 영향이 큰 것으로 평가된다.

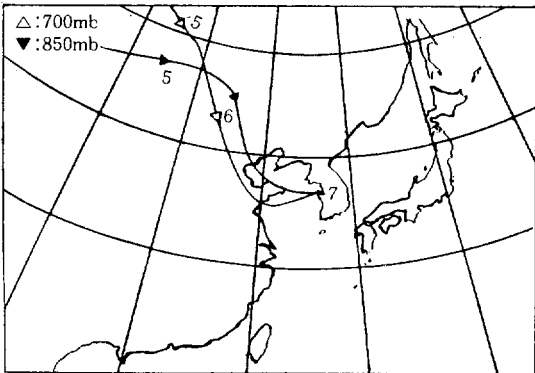


Fig. 4. Air mass trajectories at 850 mb and 700 mb, April 1990.

〈사례 4〉 '90년 4월 28일 서울에서 채취된 시료분석결과  $NO_3^-$ 의 경우 시내의 자동차 등에서 배출된 질소산화물로 부터 기인된 것으로 판단되며,  $SO_4^{2-}$ 와  $NH_4^+$  성분의 경우는 상대적으로 외부로 부터의 영향이 큰 것으로 나타났다. 한편 해염입자로 여겨지는  $Na^+$ 의 농도는 2.71 mg/l로 비교적 높았으며, 특히  $Ca^{2+}$ 의 농도가 매우 높아 표 1에서 보는 바와같이 산성도는 매우 약하게 나타난 것으로 분석되었다. 700 mb 상공의 기류는 바이칼호로 부터

타클라마칸 사막과 북경 및 발해만을 통하여 유입되었으며, 850 mb의 경우는 대만북부와 양쯔강 하류지역으로 부터 이동하여 왔다(그림 5). 당시 03시부터 09시 까지 내린 강수시간중 지상에서의 풍향은 남서풍으로써 인천방면의 오염물질이 상당량 이동되었을 것으로 판단되나 28일에 관측된 산성도(pH)는 서울에서 5.7 이었으며, 강화, 태안에서도 역시 각각 5.8, 6.5로 매우 약한 산도를 보였다. 이 사례에서 우수에 나타난 오염물질의 유입경로는 황해의 영향을 많이 받으며, 850 mb 부근의 고도로 이동되어 온 것으로 추정된다.

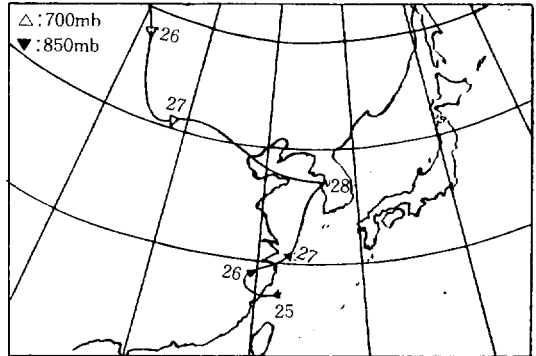


Fig. 5. Air mass trajectories at 850 mb and 700 mb, late of April 1990.

〈사례 5〉 '90년 6월 8일에 측정된 강화 및 태안지역의 오염물질은 두지역 모두 인위적인 오염물질인  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$  등은 대기중 농도보다 우수중의 농도가 높게 나타나 외부로 부터의 영향이 큰 것으로 분석되었다. 강수시간중 풍향 및 풍속을 살펴보면(표 1) 두지역 모두 하루종일 40mm 가량의 많은 비가 왔으며, 강화의 경우 지상풍은 3.6 m/sec의 남남동풍이었고, 태안의 경우는 4.1 m/sec의 동풍이었다. 이는 국지적인 영향을 많이 받은 것으로 분류된 해염입자인  $Na^+$  와 토양성분으로 추정되는  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ 의 발생성향이 두지역 측정소 주변환경과 지상풍과의 관계로 부터 잘 일치한다.

850 mb 고도에서의 기류이동은 중국남부와 타이완 서부로부터 양쯔강 하구 부근과 황해를 지나 태안반도로 유입되었으며, 700 mb 상공에서는 양쯔강 중류로 부터 상하이 북부를 통과하여 유입되었다(그림 6). 이때의 산성도(pH)는 서울, 강화, 태안에서 각각 5.4, 5.5, 5.5로 매우 약하게 나타났다.

참 고 문 헌

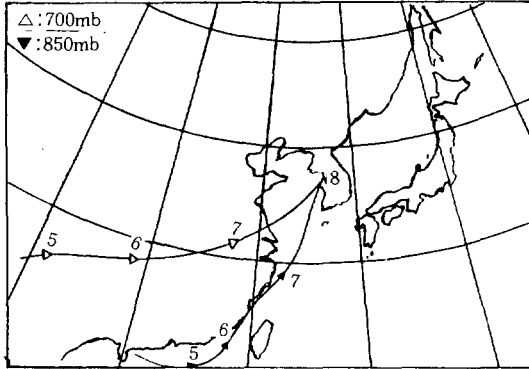


Fig. 6. Air mass trajectories at 850 mb and 700 mb, June 1990.

4. 결 론

대기중 성분농도와 우수중 농도로 표현되는 세정인자 W를 이용하여 오염물질별 우수성분의 장거리 또는 단거리 지역으로 부터의 유입여부를 판단하였으며, 이를 기류이동 특성으로 해석하기 위해 상층 일기도를 이용하여 850 mb, 700 mb 고도에서의 기류 유입경로를 추적하여 우수중 오염물질의 기원을 추정하였다.

또한 국지 배출원에 의한 영향을 파악하기 위하여 강수시간 중의 강수량을 가중하여 구한 지상풍과 주변지역의 지형 및 배출원을 비교하였다. 그 결과 동일한 우수중의 대기오염물질에 따라 발생기원이 다른 경우가 있었으며 장거리 이동된 기류의 우수중에 인위적 배출원에서 기인된 것으로 판단되는 다량의 오염물질이 포함되어 있는 사례가 확인되었다. 이러한 오염물질의 유입경로는 대체로 850 mb (약 1,500 m)의 기류이동과 일치하는 것으로 분석되었다. 황사현상시에는 전반적으로 오염물질의 농도가 높게 나타나나, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등 알칼리계 토양성분의 중화작용으로 산성도는 약하게 나타났다. 본 연구의 사례분석에 의하면 중국으로부터의 기류유입이 있었을 경우 양쯔강 이남 또는 타이완 부근에서 이동된 경우보다 북경 부근을 통과하여 온 경우에서 우수중 오염물질의 농도와 산성도가 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

강인구, 장성기 외 다수(1991) 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(Ⅲ), 국립환경연구원, 과학기술처 보고서.

기상청 (1989-1990) 상층 기상 일기도, 일기상 통계표, 기상월보.

홍성길 (1988) 기상분석과 일기예보, 교학연구사, 8, 113-120.

大塚多敏 · (1988) 대기오염물의 장거리 수송, 대기환경 개선을 위한 주요 과제와 대책-세계환경의날 세미나, 국립환경연구원등, 17-63.

Butler, J. D. (1979) Air pollution chemistry-Chapter 2, Academic Press, London, 50-124.

Chamberlain, A.C. (1960) Aspects of the deposition of radioactive and other gases and particles, International J. Air Pollution (London), 3, 63-88.

Chamberlain, A.C. (1975) The movement of particles in plant communities, Chapter 5 in vegetation and the atmosphere, 1, Academic Press, London, 50-124.

Draxler, R.R. (1979) Modeling the results of two recent mesoscale dispersion experiments, Atmospheric Environment, 13, 1523-1533.

Greenfield, S.M. (1957) Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere, J. Meteorology, 15, 115-125.

Heffter, J.L. (1980) Air resources laboratories atmospheric transport and parameters with time for travel periods of one hour or longer, J. Appl. Meteorol., 4(1), 153-156

Junge, C.E. and Abel, N. (1965) Modification of aerosol size distribution in the atmosphere and development of an ion counter of high sensitivity, University of Gotenburg., Mainz, Germany. Final technical report, Contract No. Da 91-591-EUC-3483, DDC No. AD 469376.

Sheih, C.M. (1977) Application of statistical trajectory model to the simulation of sulfur pollution over the northeastern United States, Atmospheric Environment, 15, 173-178.