

## 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적연구

### On the Sources of Acid Rain Observed in the West Coast of Korea

정 용 승 · 김 태 군

한국교원대학교 환경과학연구소  
(원고접수: 1991. 10. 21)

**Yong-Seung Chung, Tae Koon Kim**

Environmental Science Institute, Korea National University of Education,  
Khangnae, Chongwon, Choongbook 363-791, Korea  
(Received 21, October 1991)

#### Abstract

Scientists in the National Institute of Environmental Research had carried out air and precipitation sampling. According to the data analysed, the acidity (pH) measured was in the range of 3.7~5.5. Detailed analysis indicated that observed acid rain was associated with westerlies generally coming out of the mainland of China and with a cyclone formed therein. Emission of air pollution from Korea and Japan also appeared to contribute in the observed high acidity in some cases. The one of chief reasons for the occurrence of acid rain in the west coast of Korea was due to the increase in the total emission of air pollution in China. In 1990, China was the world's top producer of coal amounting in 1.05 B tons with an annual increase of 10%, and she produced 100 M tons of crude oil. SO<sub>2</sub> emission from all energy usage in China was estimated at 25~50 M ton per year.

#### 1. 서 론

인위적인 대기오염은 영국의 산업혁명 이후인 1860년경 부터 문제가 되기 시작하였으며, 1960년도 이후 많은 국가들이 공업화되었고 특히 한국과 같은 농업국들이 공업국으로 전환함에 따라 1970년대 이후 세계도처에는 대기오염이 그 사회의 중요문제로 부각되었다. 유럽과 북미의 과학자들은 대기오염물질이 수십~수백 km 이동한다는 연구결과를 밝혔다 (Chung, 1977, 1978).

한편 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>와 같은 오염체가 대기중에서 광화학반응을 일으키며 산성강수를 발생시킨다는 발견이 유럽에서 나오기 시작하였다(Oden, 1976). 북미

에서는 미국과 캐나다의 국경을 넘어가는 오염물질이 황산과 질산 등이 되고, 이것은 산도가 강한 산성비로 둔갑되어 캐나다의 남동부, 미국의 동부와 아파라치안 산맥일대에 피해를 주는 것이 밝혀졌다 (MOI, 1983).

대기오염의 장거리 이동과 산성강수는 1980년 후반기에 들어 일본, 한국, 중국에서도 관심거리로 취급되기 시작하였으며, 이 3개국에서도 산도가 매우 높은 산성비가 자주 수집되었다(김양균 등, 1989). 중국과 한국의 수평적 최소거리는 170~500 km로 대기오염 물질들은 황해를 1~2일간 통과하면서 수분과 함께 광화학반응을 하여 제 2 차적인 오염물질과 함께 산성비의 생성을 가능케 한다(정용승, 1990).

본 연구는 서해안의 태안 등에서 관측된 산성비의 trajectory 분석을 통하여 산성비의 발원지와 장거리 이동을 추적 및 분석하였다.

2. 산성비의 분석 및 해석

국립환경연구원이 1990~91년 태안반도(TAP)에서 수집한 비의 산도(pH) 및 이온관측 자료 중 6개의 사례를 표 1에 수록하였다. 첫번째 사례(C1)는 산도 3.7,  $SO_4^{2-}$  3.6 mg $l^{-1}$ ,  $NO_3^-$  8.6 mg $l^{-1}$ 를 기록하였다. 동해에 위치한 약한 저기압의 영향으로 한국에서 곳에 따라 내린 비는 강한 산성을 나타냈다. 기온은 -1~10°C의 분포로서 겨울철에 눈대신 비를 오게 하였다. 그리고 북경의 북북서에 위치한 1,044 mb의 강한 대륙성 고기압의 영향으로 한반도에는 북-북서풍의 바람이 유입되기 시작하였다. 그림 1에 분석된 trajectory에 의하면 한국에 유입되는 지상 및 1,500 m의 기류는 대체적으로 매우 느린 서-북서 기류이고, 상층에는 비교적 빠른 기류가 북서쪽인 북경지방과 몽고쪽에서 유입되었다. 중국의 발해만, 북경지역 및 산둥반도에는 많은 공업지대와 인구 밀집지역이 있으므로 정체적이거나 매우 약한 하층의 기류는  $SO_2$ 와 같은 많은 오염물질들을 동반하게 된다. 그러므로 이 사례는 중국에서 발생된 오염물질의 장거리 이동과 한반도 유입에 관한 좋은 예로서 평가된다.

두번째 사례(C2)는 1990년 2월 15일 산도 4.3,  $SO_4^{2-}$  10.0 mg $l^{-1}$ ,  $NO_3^-$  7.9 mg $l^{-1}$ 를 기록한 것이다. 2월 13일에 상하이와 대만의 동부해상에 위치한 1,014 mb 저기압의 영향으로 한국에는 하층에 동풍

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)  
90005-1/5/90 AT 12Z  
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

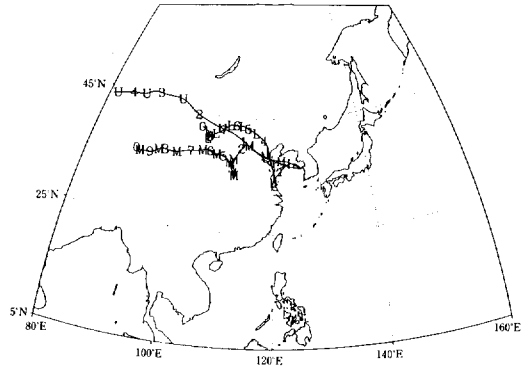


Fig. 1. Backward trajectories arriving at the west coast in central Korea (12 GMT, 5 January 1990).

계열의 바람이 유입되었고 14일에는 이 저기압이 일본 규슈 동쪽에 위치하여 한국에는 계속적인 북동계열의 바람이 유입되었다. 2월 15일 일기도에 의하면, 저기압 중심이 일본 동경 동쪽해상으로 이동하고 만주에 놓인 고기압대의 영향으로 우리나라는 동북동의 하층풍과 함께 비가 왔다. 그림 2의 trajectory 분석에 의하면, 태안반도(TAP)에 유입되는 하층의 기류는 한국 자체와 동해, 북한 그리고 남만주와 중국 북부지역을 지나왔다. 1,500 m의 기류는 남해안과 황해 및 요동반도, 그리고 외몽고와 몽고지역에서 유입되었다. 상층 3,000 m의 기류는 산둥반도와 산서성, 그리고 인도 동부에서 유입된

Table 1. Chemical analysis of rain collected at Tae-Ahn Peninsula (TAP).

Case number	trajectory	date	rain** (mm)	acidity (pH)	$SO_4^{2-}$ (mg $l^{-1}$ )	$NO_3^-$ (mg $l^{-1}$ )
C1	China	90.1.05	7.2	3.7	3.6	8.6
C2	Korea China	90.2.15	3.1	4.3	10.0	7.9
C3	Korea China	90.3.28	14.1	4.2	3.6	3.1
C4	China	90.4.07	11.6	3.9	23.3	8.6
C5	Korea China Japan	90.6.08	37.0	5.5 (*5.1)	4.5	2.6
C6	China	91.2.08	4.9	4.4 (*4.1)	29.0	9.5

\* represents values observed in Chongju and

\*\* rainfall observed at Seosan.

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)  
90046-2/15/90 AT 12Z  
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

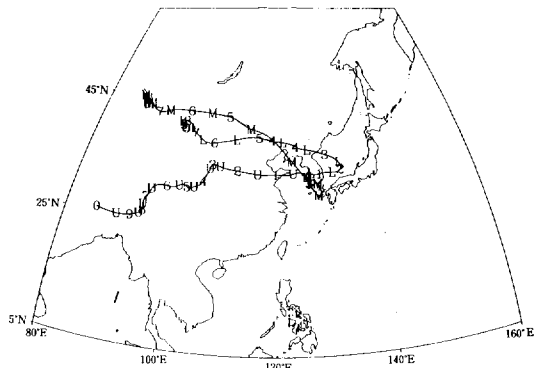


Fig. 2. Same as Fig. 1, but for 15 February 1990.

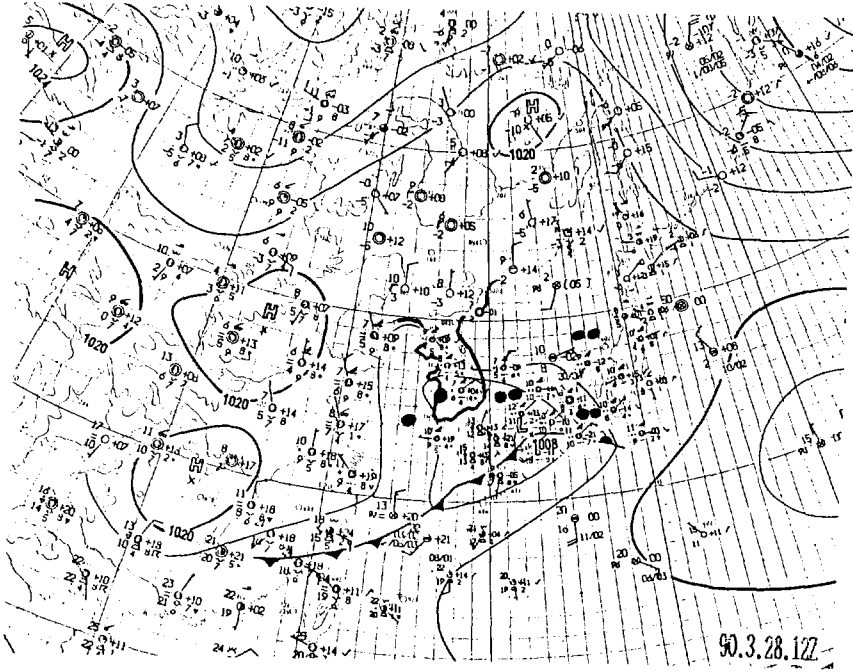


Fig. 3. A surface map of the Japan Meteorological Agency showing observations of rain at the west coast in central Korea (12 GMT, 28 March 1990).

것으로 분석되었다. 이들 자료에 의하면 이 경우는 한반도 자체와 중국에서 배출된 오염체의 유입이 태안의 산성비에 주요원인이 된 것으로 분석된다.

세번째 사례(C3)는 1990년 3월 28일 내린 14.1 mm의 강우로서 산도 4.2,  $SO_4^{2-}$  3.6  $mg\ l^{-1}$ ,  $NO_3^{-}$  3.1  $mg\ l^{-1}$ 를 기록하였다. 3월 27일에 중국 상하이 부근에 위치한 1,014 mb 저기압이 북동진하여 한국으로 접근하고 있어 서해안에 강우가 내리기 시작하였고 황해는 물론 중국 동해안까지 비가 광범위하게 내리고 있었다. 그림 3은 3월 28일의 산도 4.2의 강수현상을 보여주고 있으며, 일본 규슈쪽으로 이동한 저기압의 영향으로 전국적인 비가 오고 있었다. 그림 4의 3월 28일 trajectory 분석에 의하면, 지면부근의 기류는 3일간 정체상태에 있어 한국에서 배출되는 대기오염물이 산성비에 기여했음을 제시하며, 4~10일 전의 기류는 동해와 함경북도 그리고 만주의 남부 및 북부에서 유입되었다. 이에 비해 1,500 m의 기류는 상하이의 중국남부의 팡조우 및 인도차이나 반도에 근원을 두었다. 상층 3,000 m의 기류는 산둥반도와 청킹, 그리고 방글라데시 부근에서 유입되고 있었다. 그러므로 이 사례는 한국에서 생성된 오염 및 중국에 근원을 둔 오염체가 서해안의 산성

비에 큰 영향이 되었던 것으로 해석된다.

사례 C4는 4월 7일 11.6 mm의 비가 산도 3.9,  $SO_4^{2-}$  23.3  $mg\ l^{-1}$  그리고  $NO_3^{-}$  8.6  $mg\ l^{-1}$ 를 기록한 것이다. 4월 6일 만주에 위치한 994 mb 저기압은 강한 전선대를 동반하며 남동진하고 있었다. 이날 고기압 후면에 있는 한국은 남풍계열의 따뜻한 바람이 불었

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)  
90087-3/28/90 AT 12Z  
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

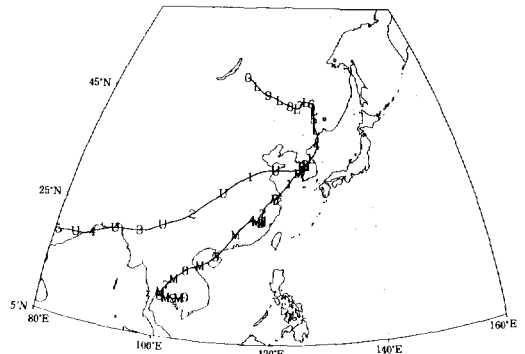


Fig. 4. Same as Fig. 1, but for 28 March 1990.

으나 전선의 접근과 함께 북서풍으로 바뀔 예정이었다. 한랭전선의 후면인 중국의 북부 황토지대는 강풍과 함께 황사현상이 발생하고 있었다. 4월 7일 강한 한랭전선대가 한반도를 통과할 때 전국적인 강우가 발생하면서 태안에서 산도 3.9를 기록하였다. 하층기류는 뚜렷한 북서기류가 한국에 유입되었다. 한편, 양자강 중류 및 북경지방에는 황사현상이 발생되었으며, 서북서 기류에 편승하여 다음날에는 황사구름이 한반도에 유입되었다. 그림 5에 의하면, 서해안에 도착되는 하층의 기류는 상하이를 포함한 중국 동해안지대와 화북 및 바이칼호 부근에서 유입되었다. 1,500 m 및 3,000 m 상공의 기류는 산둥반도, 북경, 화북, 외몽고 및 중국 북부의 황토지대를 지나오는 것이었다. 그러므로 이 사례는 태안반도에 내린 산성비가 중국에 근원을 둔 것으로 해석된다.

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)  
90097-4/7/90 AT 12Z  
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

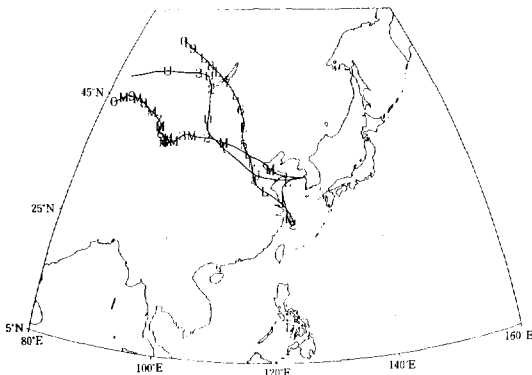


Fig. 5. Same as Fig. 1, but for 7 April 1990.

사례 C5는 6월 8일 비교적 많은 강우량(37.0 mm)과 함께 태안에서 산도 5.5(청주 5.1),  $SO_4^{2-}$  4.5  $mg\ l^{-1}$  그리고  $NO_3^-$  2.6  $mg\ l^{-1}$ 를 기록한 것이다. 7일에 1,000 mb의 저기압이 상하이 서쪽에서 발달하며 접근하고 있었다. 이 저기압의 중심은 8일에 고기압이 물러감에 따라 한반도에 상륙하였으며, 하층의 기류는 일본, 만주와 중국에서 유입되었음을 알 수 있다. 이와 같은 조건에서 분석된 그림 6의 trajectory는 하층의 기류가 주로 한국과 일본에서 유입되었음을 보여주고 있다. 그리고 1,500 m에 유입되는 기류는 상하이 남부의 중국 동해안과 남중국해 그리고 인도차이나 반도에서 오고 있었다. 3,000 m의 기류는 상하이 북부와 꺾밍, 그리고 땡갈만 부

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)  
90159-6/8/90 AT 12Z  
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

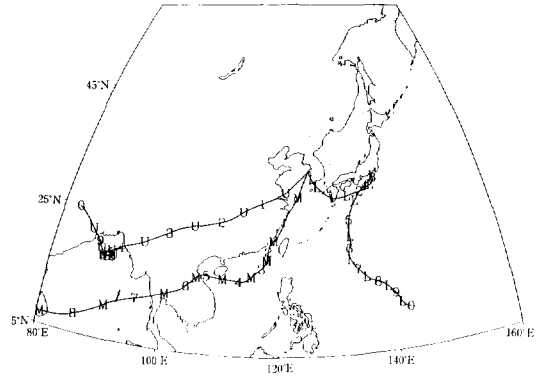


Fig. 6. Same as Fig. 1, but for 8 June 1990.

근 지역에서 유입되었다. 그러므로 이 사례의 오염원은 한국의 남서지방과 일본의 남해안지방 및 중국의 남부지방에 근원을 둔 것으로 평가된다.

사례 C6은 1991년 2월 8일의 강우중 태안에서 pH 4.4(청주 4.1),  $SO_4^{2-}$  29.0  $mg\ l^{-1}$ 과  $NO_3^-$  9.5  $mg\ l^{-1}$ 을 기록한 것이다. 2월 7일 약한 저기압이 동해에 위치하였고, 한반도 후면에 위치한 고기압대는 8일에 동해로 이동하여, 이 저기압이 일본 동해로 전진하였다. 이와같은 기압배치는 한반도의 하층에 북북서기류를 유입시켰다. 그림 7은 한국으로 유입되는 하층의 기류가 비교적 느린 것으로 요동반도와 북경지방에서 유입되었음을 보여준다. 한편, 1,500 m의 기류 역시 매우 느린 것으로 발해만과 북경지역, 그

TRAJECTORIES TO TAP (36.44N, 126.08E)  
91039-2/8/91 AT 12Z  
L: 1000 MB M: 850 MB U: 700 MB

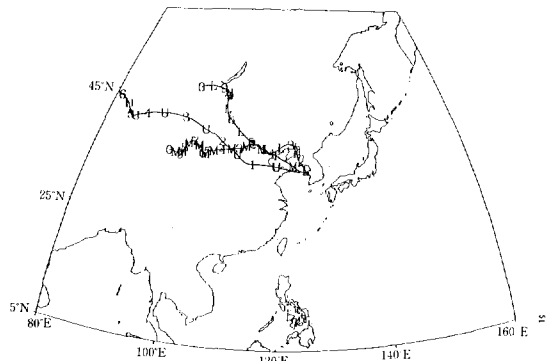


Fig. 7. Same as Fig. 1, but for 8 February 1991.

리고 서쪽의 란쵸지역에 근원을 둔 것으로 분석되었다. 3,000 m의 기류는 산둥반도와 시안지역, 그리고 중국의 북서지역에서 오는 것이었다. 그러므로 이 산성비는 주로 중국에 근원을 둔 대기 오염물질에 큰 영향을 받은 것으로 해석된다.

### 3. 토 의

1990년 서해안의 태안반도에서 수집된 강수의 분석에 의하면, pH 5.5~3.7의 산성비가 내렸다. 한국 서해안의 태안반도에서 관측한 6개의 사례를 들어 위에서 논의한 산성비에 관한 분석과 해석을 다음과 같이 종합정리할 수 있다.

1) 서풍계열의 바람과 중국에서 이동되는 저기압의 영향 및 중국 발원 대기오염물질(precursor)에 근원을 둔 사례는 C1, C4, C6의 3개이다.

2) 한국에서 발원되는 대기 오염물질과 중국에서 오는 대기오염의 합성으로 형성된 산성비는 C2, C3의 2개이다.

3) 한국, 일본, 중국의 3개국에 근원을 둔 것은 사례 C5로 해석된다.

일반적으로 태평양과 대서양상에서 관측되는  $SO_4^{2-}$ 와  $NO_3^-$  값은 비교적 적은 값이 관측된다(Chung, 1978). 그러나 한국 서해안에서 수집된 빗물의 음이온과 양이온 값은 이들 대양상에서 관측되는 background 값보다 높게 분석된다. 예를 들어 표 1에 표시된  $SO_4^{2-}$  3.6~29.0  $mg\ l^{-1}$ 와  $NO_3^-$  2.6~9.5  $mg\ l^{-1}$ 은 오염물질이 없는 경우에서 관측된 것보다 높은 것을 뜻한다. 특히 C2, C4, C6 사례는 저기압의 서~북서 기류와 함께 중국에 근원을 둔 대기오염물질이 많이 포함된 것으로 해석되었다.

중국은 1990년 현재 1,050 M ton의 석탄 생산국이며 원유도 100 M ton 이상을 생산하고 있다. 그들의 석탄 생산량은 매년 10%씩 증가하고 있으며, 공업활동이 증대되고 자동차의 수도 늘어나고 있다. 석탄은 대개 1~4%의 유황을 포함하며, 원유도 4.4% 정도의 유황을 포함하여 많은 양의  $SO_2$ 를 발생시킨다. 석탄에서 나오는  $SO_2$  배출량만 21~42 M ton으로 추산되며 기타 연소물을 포함하면  $SO_2$ 의 총 배출량은 25~50 M ton 이상이 된다. 이와 같은 오염물질은 황해를 지나 한반도에 상류하는 저기압에 수렴되어 내리는 산성비에 큰 원인이 되는 것으로 평가된다.

### 4. 결론 및 제언

1990~91년 서해안의 태안에서 수집된 산성비 분석에 의하면, 그 발원지가 중국에 근원을 둔 것이 50% 정도이며 나머지는 한국과 중국의 합성은 물론 일본의 영향도 있는 것으로 해석되었다.

중국은 현재 세계 제일의 석탄생산국이며 원유는 세계 5위의 생산국으로 중국에서 배출되는  $SO_2$  등의 총 배출량은 25~50 M ton(영국 6.4 M ton)을 능가한다. 이 중 10~20% 이상이 편서풍에 의해 중국대륙을 떠나고 동진하여 한반도를 포함한 동북아시아 지역 및 북태평양 지역에 침전되는 것으로 평가된다.

대기오염의 장거리 이동 및 산성비에 관한 연구는 아직 미흡하므로 여러개의 연구가 병행하여 계속 수행될 것을 제안한다. 특히 TSP,  $SO_2$ ,  $NO_x$  등의 1차적인 오염물질들과 이들 오염물질들의 대기중 산화작용에 의해 생성된 제 2차 대기오염물질들에 의한 산성비 등은 국경을 무시하고 장거리로 이동하는 것이 밝혀졌으므로 한·중·일 등의 국제협력체의 구성과 환경개발이 착수될 것을 아울러 제안한다.

### 참 고 문 헌

- 김양균 등(1989) 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(I), 국립환경연구원보, 168 p.
- 김양균 등(1990) 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II), 국립환경연구원보, 253 p.
- 정용승(1990) 대기오염물질의 장거리 이동사례 및 황사 발원지 추적. 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II) 중에서 국립환경연구원보, 195 - 253.
- Chung Y.S. (1977) Ground-level ozone and regional transport of air pollutants. J. Appl. Meteor. 16, 1127 - 1139.
- Chung Y.S. (1978) The distribution of atmospheric sulphate in Canada and its relationship to long-range transport of air pollutants. Atmos. Environ. 12, 1471 - 1480.
- MOI (1983) U.S.-Canada Memorandum of Intent on Transboundary Air Pollution. Final Report, Impact Assessment Group.
- Oden S. (1976) The acidity problem-an outline of concepts. Water Air Soil Poll. 6, 137 - 166.