

한반도 중부지방에서 관측된 1992-1993년 산성비의 특성과 공기 이동 경로 분석

Trajectory Analysis on Acid Rain Observed in the Central Part of Korea During 1992 to 1993

전 영 신 · 조 하 만 · 권 원 태¹⁾

기상연구소 응용기상연구소실

¹⁾기상연구소 예보연구소실

(원고접수: 1994. 4. 7)

Young-Sin Chun, Ha-Man Cho, Won-Tae Kwon

Applied Meteorological Research Laboratory,

¹⁾ Forecast Research Laboratory,

Meteorological Research Institute

(Received April 7 1994)

Abstract

Backward trajectory analysis was carried out for 41 cases at 850 hPa level and 47 cases at 700 hPa level during the period from May 1992 to August 1993 in order to understand the impact of long-range transported pollutants from the neighboring countries on the distribution pattern of acid rain in Korea. The occurrence frequencies of acid rain were also investigated using the rainwater data observed at 5 stations in the central part of Korea; Kangwha, Seoul, Yangpyong, Hongchon, and Inje.

The trajectory analysis showed that westerlies were dominant on 700 hPa level and southwesterlies on 850 hPa level in Korea. The pH values were also often lower when the trajectory was stagnant in the upper air over Korea. However, pH values were normally higher in all directions of flows during the Yellow Sand period due to the increase of positive ion components such as Ca^{+2} . The pH values were also normally higher when air flows from north or northeast.

1. 서 론

최근 급속한 경제 발전으로 인한 산업활동의 증가로 대기 중 오염물질의 방출량 증대에 따른 산성비의 강하 현상은 토양의 산성화 및 산림 생태계의 파괴를 유발시켜 시급히 해결해야 할 문제로 부각되고 있다. 특히 산성비는 국지적인 오염원에 의한 영향 이외에도 오염물질의 장거리 이동에 따른 영

향을 받고 있음이 알려짐에 따라 이 문제는 인접국가 사이에 해결 되어져야 하는 국제적인 문제로도 부각되고 있다.

Chung(1977)은 1973년부터 1976년 사이 캐나다 남부 온타리오에서 관측된 지표 오존자료와 중관기압계의 상관성을 분석하면서, 매시간 지상 기상관측자료를 이용한 유적선 계산 결과, 지표 오존의 고농도 시기가 남풍내지 남서풍과 뚜렷한 관련이 있

고 저농도 시기는 북풍과 관련 된 사례를 언급한 바 있다. 또 Chung *et al.*(1985)은 오산, 광주 등의 고층 기상자료를 4차 다항식법을 이용한 내삽과정으로 격자 자료로 만들어 6시간마다 공기의 이동을 추적하고 유적선의 정확도를 평가하였다. 최근 정용승과 김태군(1991)은 1990년 1월부터 1991년 2월 사이에 태안에서 관측된 6개의 사례에 대해 기상조건을 분석하고 1000, 850, 700 hPa 면의 유적선이 중국, 한국, 일본을 통과해 온 것과 관련된 장거리 수송 효과를 언급하였고, 윤순창과 박경선(1991)은 1988년 4월 황사에 대해 등온위면상의 바람으로 유적선을 계산하였으며, 김정수 등(1992)은 1989년 9월부터 1990년 6월 사이에 서울, 강화, 태안에서 부유분진, 산성비가 동시에 관측된 사례 5가지를 세정이론을 이용하여 오염물질별 이동 범위를 평가하고, 상층 일기도를 통한 유적선 분석을 실시하였다. 또한 강동근 등(1993)은 1986년 5월부터 1987년 4월까지 1년간의 850 hPa 면의 바람자료를 이용하여 서울, 부산, 북경, 상해, 오사카를 기점으로 하는 월별 유적선을 분석하였다.

이 연구에서는 최근 1992년 5월부터 1993년 8월까지 한반도 중부지방에서 관측된 65개 사례에 대한 산성비와 기류의 유적선을 분석하여 우리나라 주변국의 오염원이 한반도 중부지방에 영향을 미칠 가능성을 평가하였다.

2. 사례 선정과 유적선 계산 방법

1992년 5월부터 1993년 8월까지 16개월 동안에 한반도 중부지방의 5개 관측 지점(강화, 서울, 양평, 홍천, 인제)에서 수동 강수 채수기를 이용하여 적은 양의 비나 눈이 올 경우에도 강수를 채취하였다. 이 때 관측 지점 사이의 직선 거리는 40 내지 50 km 정도이며 채취된 강수의 수소 이온 농도, 전기 전도도는 현지에서 측정하였고 이온은 강수 채집병을 냉암소에 보관한 후 기상연구소의 소백산 기상 관측소에서 분석했는데, 1992년 강수에 대한 분석결과는 이미 정순화 등(1993)에 의해 보고된 바 있다. 이 연구에서는 이를 이상 연속해서 강수 현상을 보였거나 하루만 강수가 있었어도 공간적으로 두 지점 이상 강수 현상이 나타난 중간 규모 이상의 총 65개 강수 사례를 선정하였으며 각 사례의 강수 종료일의 pH값은 표 1과 같다.

유적선(流跡線; Trajectory)이란 공기의 작은 덩어리가 바람을 타고 지나가는 길을 말하며, 궤적선이라고 부르기도 한다(김광식, 1992). 이러한 유적선은 등압면에 나타나는 바람장을 이용하여 계산되는

것과 등엔트로피 궤적선(Dutton, 1976; 윤순창과 박경선, 1991)이 있다. 이 연구에서는 기상연구소(1992)에서 한반도 여름철 악기상 특성사례 연구에서 사용된 등압면 유적선 분석 프로그램을 이용하였다. 그리고 강수가 종료된 날을 기준으로 서울로 유입된 공기의 그 전 시간의 이동 경로는 일본 기상청의 위·경도 2.5도 간격의 GPV(Grid Point Value) 자료를 이용하여 계산되었다. 유적선 계산은 우선 바람 벡터를 동서와 남북 방향의 성분으로 분해한 다음, 관심점(P)의 바람을 주위 4개의 격자점의 바람값을 내삽하여 구하였고, 계산된 바람을 30분간 뒤로 이동시켜 P₁을 구하였다. 이 때 점 P₁에서의 바람은 또 주위 4개 격자점의 해당 시간과 12시간 이전의 바람을 시간 간격에 따라 선형 내삽하여 30분 이전의 바람을 구하여 1시간 전인 P₂를 구하였다. 이와 같이 계속 뒤로(Backward type) 유적선을 구하여 우리나라 주변 기류의 이동에 관해 조사하였다.

2.1 구름대 및 강수의 pH 특징 분석

지상일기도 및 위성 사진에 의한 구름대 분석

표 1의 각 사례의 강수 종료일로부터 4일 이전까지 총 5일 동안의 지상일기도(00 UTC)에서 구름 가득(OVERCAST)인 영역을 위성 사진에서 나타난 구름의 규모와 함께 분석함으로써 아시아 상공의 대류권내 전반적인 풍속과 구름대의 규모를 파악하였다. 그 결과 3000 km×2000 km 이상의 지역을 덮는 구름대가 52개 사례로 많은 수를 차지하였다. 약 3 km고도의 평균 풍속이 11 m/s 임(전영신과 조하만, 1993)을 감안하여 구름대의 동쪽 경계선이 하루에 경도 10도의 속도(약 13 m/s) 이상으로 통과되는 경우를 빠르다고 정의할 경우, 이 연구에서 선정한 65개 사례중 구름대가 빠르게 이동하는 경우는 13개 사례에 불과하였다. 따라서 한반도 중부 지방에 비가 내린 경우는 중관 규모의 구름대가 비교적 천천히 통과하는 경우였음을 알 수 있었다.

강수의 pH 발생빈도의 특징

1992년 5월부터 1993년 8월까지 각 관측 지점에서 관측된 모든 강수의 pH값을 수소이온농도의 10배에 해당하는 구간으로 나누어 발생 빈도를 조사하였다(표 2). 즉 여기에서 이용한 자료는 표 1에 정리된 강수 종료일의 pH 자료를 포함한 모든 강수에 대한 pH 값을 뜻한다. 표 2에서 보면 서울의 경우 pH 3.6~4.6 사이의 구간이 32회(56%)로 가장 많이 관측되었고 pH 3.6이하인 경우도 4회(7%)

가 관측되고 있다. 이에 비해 강화, 양평, 홍천, 인제 등 4개 지역에서는 대체로 pH 4.6~6.6 사이의 구간이 많이 관측되고 있어, 서울이 다른 지역보다 강한 산성비가 관측되는 경향을 찾아 낼 수 있다. 또 pH가 6.6을 넘는 경우가 양평, 인제, 홍천에서 종종 나타나고 있으나, 서울과 강화의 경우는 관측되지 못하였다. 즉 서울에서는 pH가 3.6보다 크고 4.6이하인 산성비의 발생빈도를 정점으로 산성비가

분포하며 산성비의 발생비율이 매우 큼을 알 수 있다. 한편 인제, 강화, 홍천은 pH가 5.6이하 부근의 약산성비가 최고 발생빈도를 나타내고 있어 서울과는 아주 다른 특징을 보였다. 또한 양평에서는 산성비의 발생 비율이 50%미만으로 산성비가 내릴 가능성은 관측 지점 중에 비교적 작은 편임을 알 수 있었다.

Table 1. The list of precipitation cases and their pH values.

pH values in 1992							pH values in 1993						
CASE	DATE	KW	SE	YP	HC	IJ	CASE	DATE	KW	SE	YP	HC	IJ
1	5/ 7	5.00	4.23	5.00	4.57	4.65	34	20			4.19		
2	13	4.58	3.45	4.09	4.25	4.21	35	12/ 7			4.24	4.54	
3	16	4.95					36	12				4.60	
4	26	5.43		5.02	4.41	5.38	37	14					4.32
5	6/ 4	5.08	5.15	5.09	4.61	5.66	38	29				5.16	
6	10	5.18	5.45	6.30	5.99	4.87	pH values in 1993						
7	18		5.68	5.59			39	1/15				6.01	5.74
8	21					7.82	40	2/16	4.13	4.15		5.95	6.35
9	27			4.39			41	21			5.46	6.04	
10	7/ 3		4.41	4.01	5.98		42	3/ 6		3.64	4.76		
11	11	5.42	3.93	4.83	5.58		43	24		4.33	4.77	5.18	5.16
12	17	5.96	4.34	5.44	5.03	5.12	44	31	5.86	5.08	6.02	6.08	6.34
13	22	5.14		5.78	5.09		45	4/10	6.48	3.92	5.82		5.38
14	27		4.76	5.62			46	23				6.13	6.90
15	30			5.05	5.01		47	29			4.88		
16	8/ 2				4.92		48	5/13		3.48	6.20	4.52	5.30
17	7		4.24	5.39		5.33	49	17		4.45	6.06	4.08	4.72
18	14	5.64	4.20	5.24	4.43	4.72	50	21	5.73	4.69	7.42	4.44	
19	17		4.96				51	25	5.83	4.75	7.56		
20	24	4.90	4.32		6.07	4.98	52	6/ 2		4.17	6.88	5.06	4.94
21	28	5.60	4.30				53	8				5.97	
22	9/ 2				5.43		54	13	4.53	5.10	7.18	5.93	5.42
23	7	5.06	3.50				55	28		4.11	5.69	5.83	
24	12				4.86		56	29				5.31	
25	24		4.93	5.29	4.79	5.72	57	7/ 8	4.90	4.16	6.39		5.14
26	29		4.70	4.54	5.79	5.82	58	13		4.74	5.55	5.43	
27	10/ 4				4.26		59	17		3.87	5.69		
28	17			4.24	3.90		60	25		4.10	6.45		5.49
29	23	4.80					61	29		4.70			
30	30		5.20				62	8/ 1		4.54			
31	11/ 3			4.60			63	9		4.36		5.28	
32	9	4.10		5.93			64	20		3.80		5.63	
33	13	6.20					65	24	4.90	4.06			

KW : Kangwha, SE : Seoul, YP : Yangpyong, HC : Hongchon, IJ : Inje

Table 2. Frequency of each pH value class during the period from May 1992 to August 1993.

	pH ≤ 3.6	3.6 < pH ≤ 4.6	4.6 < pH ≤ 5.6	5.6 < pH ≤ 6.6	6.6 < pH ≤ 7.6	7.6 < pH ≤ 8.6	Total case
Kangwha	0	7	28	16	0	0	51
Seoul	4	32	19	2	0	0	57
Yangpyong	0	9	19	21	8	0	57
Hongchon	0	15	32	24	1	0	72
Inje	0	2	28	15	1	1	47

3. 유적선 분석 결과

3.1 관측 기간 중의 유적선 분포

앞에서 대류권 전체의 구름대의 규모를 파악하고, 구름대의 이동 속도로써 강우 때 대류권 전체의 전반적인 풍속을 가늠하였다. 그러나 대기오염물질의 이동은 주로 대류권의 중하층에서 이루어지고 있음이 이미 기존의 연구에서 밝혀지고 있으므로 여기서는 850 hPa 면과 700 hPa 면에서의 2.5도 격자 간격의 풍향·풍속 자료를 토대로 유적선을 분석하였다. 그러나 유적선 분석에 이용되는 GPV 자료가 종종 빠져 있어서 총 65개 사례 중 700 hPa에서 47개의 사례, 850 hPa에서는 41개의 사례에 대해서만 후진 유적선(Backward trajectory)을 구했으며 서울로부터 48시간 이전의 유적선 위치에서 서울로 향하는 방향을 기류의 유입 방향이라 정의하고, 또 두 지점 사이의 직선 거리가 위·경도 10도 거리 이하일때 정체하는(stagnant) 경우라 하여, 이에 따른 발생 빈도율을 그림 1에 나타내었다. 즉 서울 상공 700 hPa 면을 통과한 유적선의 방향(그림1(a))을 추적해 보면, 서쪽 31.9%, 북서쪽 19.1%, 남서쪽 19.1%, 남동쪽 4.3%, 북동쪽 2.1%였다. 그런데 한반도 부근 상공에서 정체하는 경우가 11회 발생으로 23.4%를 차지한 것이 특이했다.

마찬가지로 서울 상공 850 hPa 면을 통과한 유적선의 유입 방향(그림1(b))을 추적해 보면, 남서쪽 22.0%, 서쪽 12.2%, 북쪽과 북서쪽과 남쪽이 4.9%였다. 그런데 한반도 부근 상공에서 맴도는 경우는 18회 발생으로 43.9%를 차지했다.

서울의 경우 700 hPa 면에서는 남서쪽 보다는 서쪽으로부터 유입된 유적선의 경우 관측된 pH 값의 평균이 3.8, 850 hPa 면에서는 평균 5.4로 낮은 편이었고 한반도 상공에서 유적선이 맴도는 경우도 700 hPa 면에서는 평균 4.3, 850 hPa면에서는 평균 5.1로 역시 낮은 편에 속하였다.

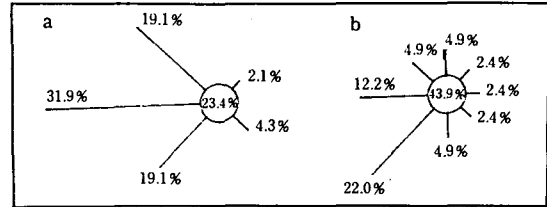


Fig. 1. Wind rose for trajectories with occurrence rate(%) on (a)700 hPa level and (b)850 hPa level. The number in the circle represents the stagnant case.

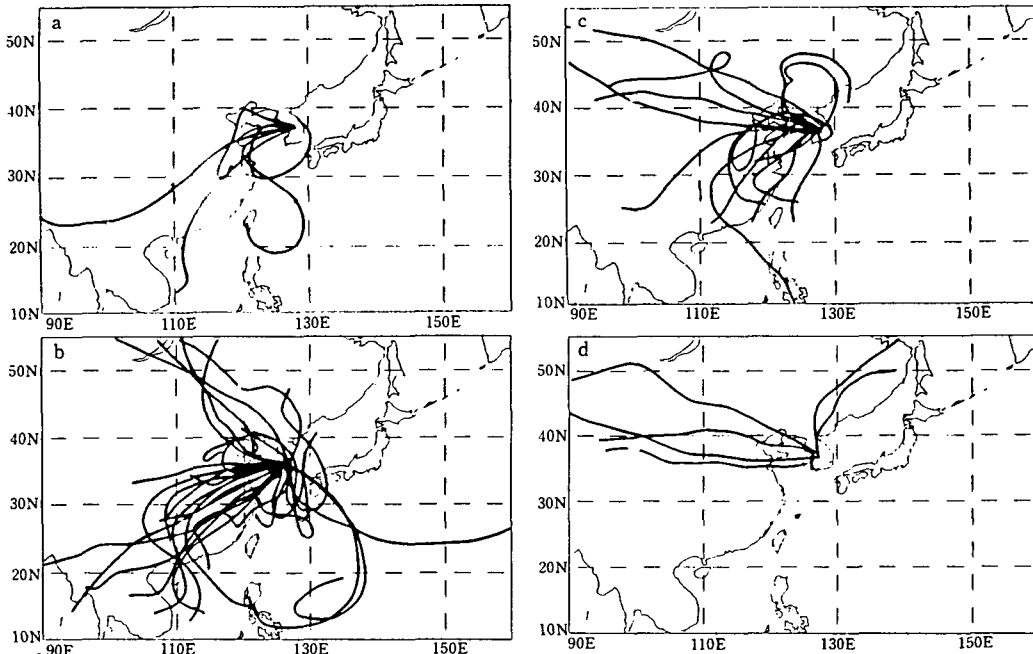


Fig. 2. Backward trajectories arriving at Seoul with classified pH value; (a) pH≤3.6, (b) 3.6<pH≤4.6, (c) 4.6<pH≤5.6, (d) 5.6<pH≤6.6.

3.2 pH값에 따른 유적선 분포

서울의 경우 각 pH 등급 구간(표 2)에 따른 850, 700 hPa 면의 유적선의 형태를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 pH가 3.6 이하로 강 산성인 경우이며, 그림 2(b)는 pH가 3.6 보다 크고 4.6 이하, 그림 2(c)는 pH가 4.6 보다 크고 5.6 이하로 산성비에 속하고 그림 2(d)는 pH가 5.6 보다 크고 6.6 보다 작은 강수가 관측된 경우의 유적선 형태이다. 5일 동안의 유적선 형태가 매우 다양하고 pH 등급에 따른 큰 차이가 보이지 않으나, 그림 2(d)의 경우 서쪽에서 유래한 유적선들은 황사 기간 중에 나타나 pH 값이 높게 나타난 것이고, 또 북쪽내지 북동쪽으로부터 기류가 유입된 경우에 pH가 높게 나타났다.

3.3 특정 사례에 대한 분석 결과

평균 pH 값이 극값을 보인 경우

한반도 중부지방에 내린 강수의 전반적인 pH 값 특징에 따라 유적선을 분석하였다. 서울(기호 □)을 중심으로 한반도가 포함되도록 동,서,남,북으로

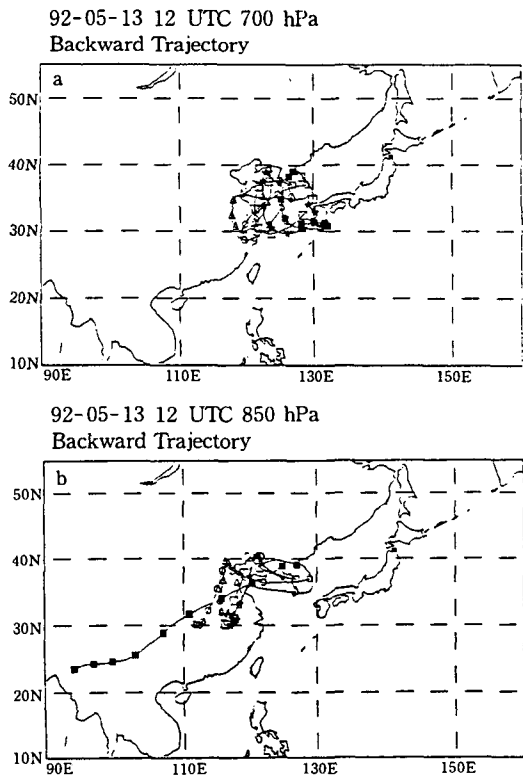


Fig. 3. Backward trajectories on (a)700 hPa level and (b)850 hPa level (b) for case 2 showing the low pH values in 5 sites.

각각 2도 거리 만큼 떨어진 지점(동점,○; 서점,☆; 남점,△; 북점,■)에서 강수 종료일로부터 4일 이전까지 총 5일 동안의 공기 궤적을 추적하였다. 유적선 분석을 위해 선정된 case는 표 1에서 중부지방 전 지역 pH 평균이 4.12로 낮게 기록된 case 2의 경우(그림 3)와, 반대로 6.67로 높게 나타난 case 46(그림 4)이다. 전자의 경우는 대규모 구름대가 서서히 이동하면서 유적선은 한반도 700 hPa 상공에서 뱅글뱅글 맴도는 패턴을 보였으며(그림 3(a)) 기류의 속도는 거의 정체된 상태였다. 이에 비해 후자의 경우는 12시간 간격으로 표시된 기호의 개수가 적음으로 보아 구름대가 비교적 빨리 통과하였으며 서쪽으로부터 유입되는 유적선의 패턴을 보였다(그림 4). 특히, 이 경우는 1993년 4월 22일부터 24일까지 총 38시간이상 황사 현상이 관측된 날 중의 하루인 23일에 강수가 내린 경우로서, 황사를 구성하는 양이온의 토양 성분 입자들에 의해 산성비가 중화된 결과로 pH가 높게 나타났던 것으로 생각된다.

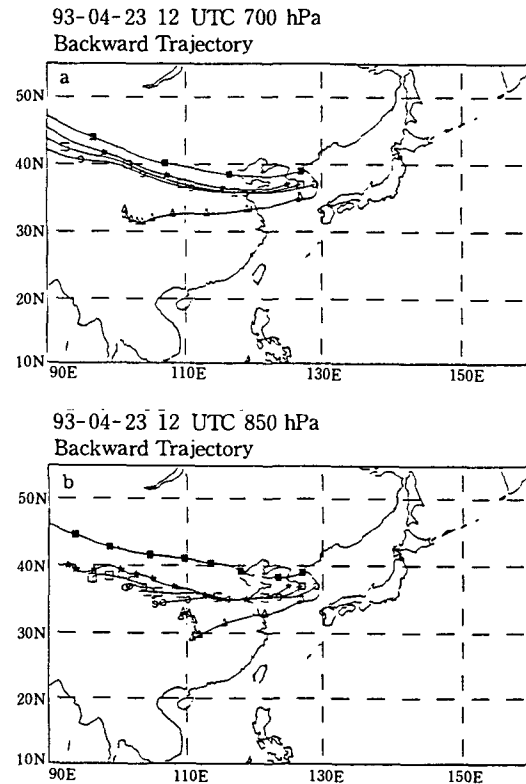


Fig. 4. Backward trajectories on (a)700 hPa level and (b)850 hPa level for case 46 showing the high pH values in 3 sites.

pH 값이 역전되어 나타난 경우

대체로 pH 평균값이 다른 지역보다 낮게 관측되는 서울이 5.68로 높게 나타난 case 7과, pH가 보통 높게 나타나는 편인 인제가 4.72로 낮게 나타난 case 49를 선정하여 유적선의 차이를 조사해 보았으며 각각 그림 5, 그림 6과 같다. 우선 전자의 경우는 유적선이 북쪽에서 유래하였고 황사 현상과는 무관한 경우였다. 따라서 오호츠크해로부터 오염원이 적은 지역을 통과하여 서울로 유입된 결과 pH가 높게 나타난 것으로 생각된다. 이에 비해 후자는 인제에서 pH가 4.72, 홍천이 pH 4.08로 낮았던 경우로 유적선 형태가 한반도 850 hPa 상공에서 맴도는 패턴(그림 6(b))이었으며, 따라서 기류의 수송 효과가 작아 국지적인 오염 효과가 적은 관측지점임에도 pH가 낮게 나타난 것으로 생각된다.

황사

1993년 4월에는 서울에서 총 10일 동안의 황사 발생 기록으로 1981년 4월중 10일간의 황사 이후

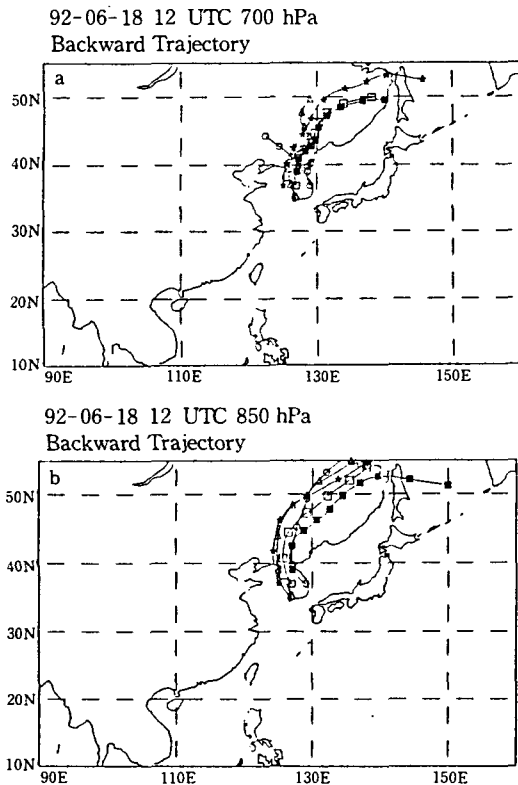


Fig. 5. Backward trajectories on (a)700 hPa level and (b)850 hPa level for case 7 showing the very high pH values in Seoul.

가장 많은 발생일을 기록하였다. 1993년 4월 1~3일은 전국에 걸쳐, 4일에는 영남, 제주, 충청, 강원, 영동 지방을 제외한 지방에서 황사 현상이 나타났으며, 7~8일에도 거의 전국적으로 황사 현상이 있었다. 22일에는 서울, 경기, 강원, 영서, 충청, 전남, 영남, 제주도 지방에서 황사 현상이 나타났고, 23~24일은 전국적으로 황사 현상이 있었다. 또한 27일은 강원 영동과 제주도를 제외한 지방에서, 28일은 서울, 강원도와 제주도를 제외한 지방에서 지역에 따른 황사가 있었다. 이처럼 한달 동안 4차례나 발생하였는데 일부 지방에서는 강도가 1(하늘이 혼탁하고 황색 먼지가 물체 표면에 약간 쌓이는 정도)인 경우도 있었으나 주로 강도가 0(시정이 다소 혼탁한 상태)인 날이 많았다(기상청, 1993).

서울에서 황사가 연속해서 발생했던 1993년 4월의 날들을 표 3에 나타내었다. 가장 오랜 시간 동안 황사 현상이 지속된 경우는 황사I로 총 73시간 30분이나 지속되었다. 특히 3일에는 강도가 1인 경우가 기록되어 서울에서 4월 중 가장 황사 현상이 심

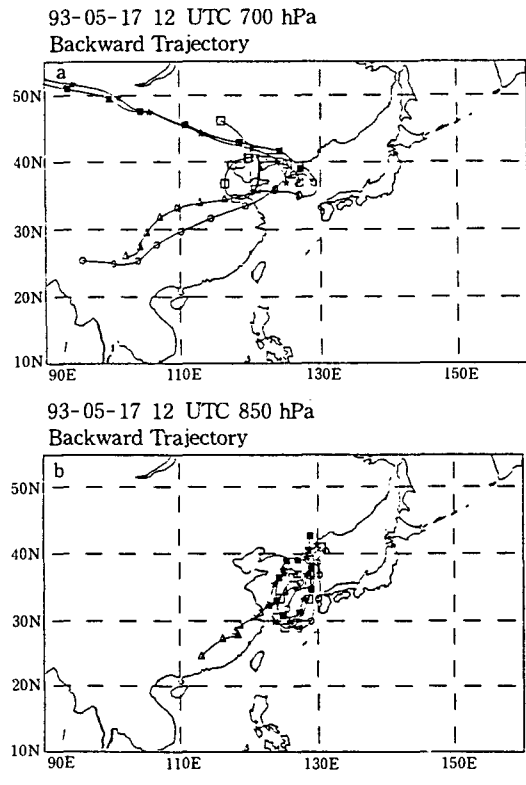


Fig. 6. Backward trajectories on (a)700 hPa level and (b)850 hPa level for case 49 showing the very low pH value in Inje.

하게 나타난 날로 이재규 등(1993)과 이민희 등(1994)에 의해 분석되었다. 이 황사I과 관련된 비가 없었지만, 나머지 황사 사례는 황사 현상 이후, 혹은 황사 현상 중에 강수 현상이 있었으므로(case 45, 46, 47) 이 연구에서는 표 3의 황사II, III, IV와 관련된 산성비의 유적선을 분석해 보았다.

Table 3. Cases when Yellow Sand was observed at Seoul during April in 1993.

Case	Date	Period	Duration
I	1, 2, 3, 4	1, 12:50~ 4, 14:20	73 hour 30 min
II	7, 8	7, 06:21~ 8, 06:20	23 hour 59 min
III	22, 23, 24	22, 11:20~ 17:55	6 hour 35 min
		23, 10:30~24, 18:26	31 hour 56 min
IV	27	27, 08:20~ 20:10	11 hour 50 min

그림 7은 황사II가 있는 이틀 후인 4월 10일에 모든 관측지점에서 비가 내린 경우로 2mm 안팎의 적은비가 10일만에 내렸다. 이 때 서울에서 pH가 3.92로 낮게 나타난 것은 SO_4^{2-} 가 494 $\mu eq/l$ 로 4월

평균 255 $\mu eq/l$ (최재천 등, 1993) 보다 많았고, NO_3^- 도 139 $\mu eq/l$ 로 4월 평균 43 $\mu eq/l$ 보다 많았으나, 황사현상과 함께 나타난 강수 시료중 Ca^{+2} 이온이 395 $\mu eq/l$ 로 4월 황사 때의 평균 556 $\mu eq/l$ 보다 적었기 때문에 생각된다. 즉 황사II는 8일 아침 6시 20분에 종료되었고 10일 저녁 9시를 최종시각으로 하는 유적선과는 75시간 정도의 차이가 있었으므로 SO_4^{2-} 나 NO_3^- 가 많은 것에 비해 Ca^{+2} 이온이 적은 편이어서 pH가 3.92로 낮게 나타난 것으로 풀이된다. 또한 중부지방 전체가 높은 pH를 보인 경우로서 이미 앞에서 살펴보았던 그림 5의 경우(황사 III)에는 편서 기류가 비교적 빨리 유입되었고, 서울의 pH는 6.57로 높았다. 이 때 SO_4^{2-} 가 416 $\mu eq/l$, NO_3^- 도 68 $\mu eq/l$ 로 황사II 보다는 적었으나, Ca^{+2} 은 683 $\mu eq/l$ 으로 많았기 때문에 pH값이 높게 나타난 것으로 생각된다. 따라서 황사에 의한 산성비의 중화 현상이 있었던 것으로 보여진다. 한편 황사IV후 이틀 동안 계속 비가 내렸던 그림 8의 경우에는 850 hPa 면의 유적선도 남서쪽에서

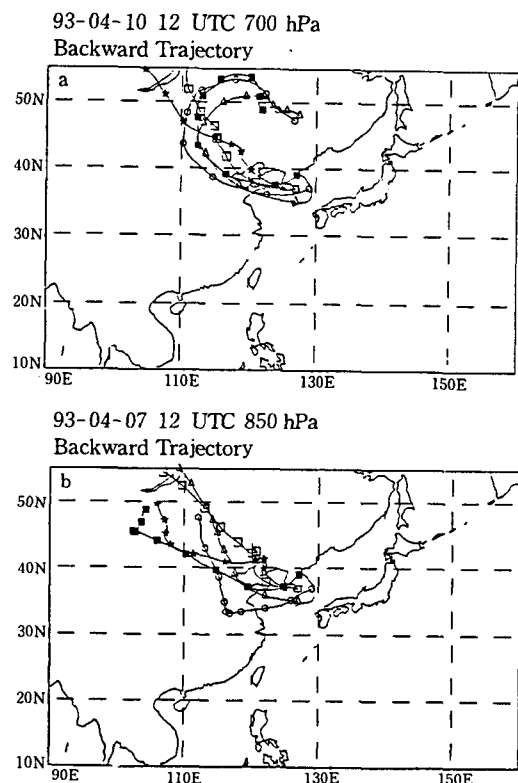


Fig. 7. Backward trajectories on (a)700 hPa level and (b)850 hPa level for case 45 during Yellow Sand.

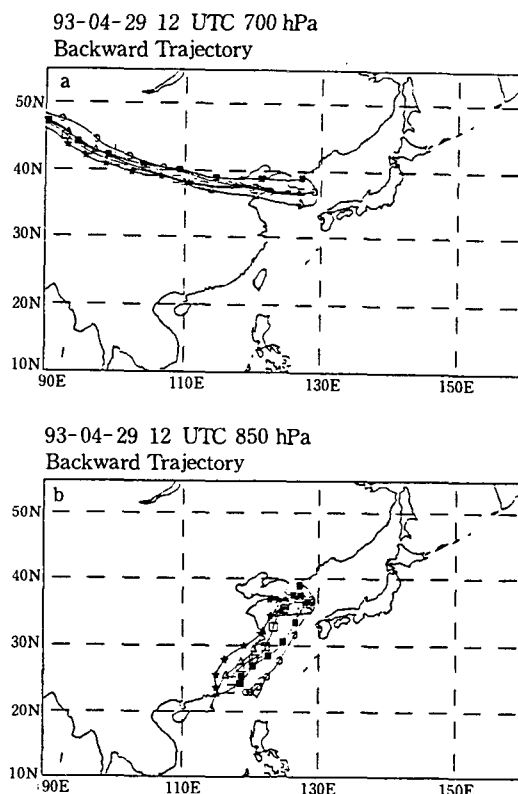


Fig. 8. As in Fig. 9. except for case 47.

유래하였으며 SO_4^{2-} 가 $223 \mu\text{eq/l}$, NO_3^- 는 $37 \mu\text{eq/l}$, Ca^{+2} 이 $139 \mu\text{eq/l}$ 로 이온 성분의 양이 매우 적은 편이었다. 따라서 이 때 서울의 pH가 4.88로 기록된 것은 기류가 남서쪽에서 유래하며 강수에 의한 세정 효과(wash out effect)로 pH가 평균값에 가깝게 나타난 것으로 생각된다.

4. 결 론

서울 상공 700 hPa 면과 850 hPa 면에 대한 공기 유입 방향은 서쪽 31.9%, 남서쪽 19.1%, 북서쪽이 19.1%, 남동쪽이 4.3%, 방향을 구분하기 힘든 경우가 23.4%로서 대체로 남서와 북서를 포함한 편서 기류의 유입이 약 70%의 분포를 보였다. 또한 서울 상공 850 hPa 면을 통과한 유적선의 유입 방향은 남서쪽 22.0%, 서쪽 12.2%, 북서쪽 4.9%, 남쪽 4.9%, 북쪽 4.9%였고 한반도 부근 상공에서 정체하는 경우는 18회 발생으로 43.9%를 차지했다.

유적선을 분석하고 기류의 유입 방향에 따른 pH값의 평균을 조사한 결과 서울의 경우 대체로 편서 기류일 때 pH값이 낮은 경향이었으며 한반도 상공에서 유적선이 정체하는 경우도 pH값이 대체로 낮게 나타났다.

그러나 황사 기간 중에는 기류가 서쪽에서 유입되었어도 pH가 높은 경향을 보였는데 이는 황사기간 중에 내린 강수의 이온 분석 결과 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 같은 음이온도 증가하였지만 Ca^{+2} 이 보다 현격히 증가하여 양이온에 의한 중화 작용이 현저했기 때문으로 생각된다.

또 북쪽내지 북동쪽에서 기류가 유입된 경우는 서울에서 pH가 높게 나타났는데 이는 역시 비오염지역으로부터의 청정 대기의 유입 때문으로 생각된다.

지금까지 유적선 분석 결과와 강수의 특징을 관련시켜 장거리 수송 효과를 논의하여 보았는데, 산성비 분석 결과를 정확히 언급하기에는 여러 한계가 있었다. 따라서 앞으로는 산성비를 야기하는 국지오염 효과와 장거리 수송효과의 상대적 기여도를 판정할 수 있는 방법을 모색하되 인접 국가가 서로 공인할 수 있는 적절한 분석법을 강구하여야 할 것으로 생각된다.

5. 감 사

산성비 관측을 해 주신 강화, 양평, 홍천, 인제 기상관측소의 직원과 GPV 자료를 주신 기상청 수취예보과 이영복님, 그리고 귀중한 조언을 해 주신 정순화, 남재철, 최재천님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강동근, 김선태, 김정옥(1993) 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339.
- 국립환경연구원(1991) 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(Ⅲ), 과학기술처, 359pp.
- 기상연구소(1992) 악기상 특성 사례 연구(Ⅲ), MR 92-1, 133pp.
- 기상청(1992-1993) 기상월보.
- 김광식(1992) 기상학 사전, 향문사, 735pp.
- 김정수, 강인구, 장성기(1992) 세정이론을 통한 산성비의 평가와 발원지 추적, 한국대기보전학회지, 8(2), 121-127.
- 윤순창, 박경선(1991) 등엔트로피 궤적에 의한 황사의 장거리 이동 경로 분석, 한국대기보전학회지, 7(2), 89-95.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 김상균(1993) 황사 현상시 대기 에어로졸 중 무기물질의 동태, 한국대기보전학회지, 9(3), 230-235.
- 이재규, 김영화, 김정선(1993) 1993년 4월 1~3일에 관측된 황사 현상의 사례 연구, 기상연구논문집, 10(1), 51-73.
- 전영신, 조하만(1993) 한반도 상공 850 hPa 면과 700 hPa 면 사이의 바람과 기온 분포의 특성, 기상연구논문집, 10(1), 93-101.
- 정순화, 남재철, 최병철, 이선기, 최재천, 이민영(1993) 한반도 중부지방의 1992년 하계 산성비 분포, 기상연구논문집, 10(1), 75-91.
- 정용승, 김태군(1991) 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 203-207.
- 최재천, 이민영, 이선기, 유근배(1993) 배경 대기 강수의 화학 성분 특성, 기상연구논문집, 10(1), 111-118.
- Chung, H. S., W. J. Lee, H. J. Seang, W. K. Kim (1985) A Regional Scale Transport Model by Using the Air trajectory method(Part I), Res. Pap. of MRI, 17-24.
- Chung, Y. S.(1977) Ground-level ozone and Regional Transport of Air Pollutants, J. Appl. Meteo. 16(11), 1127-1136.
- Dutton, J.A. (1976) The Ceaseless Wind: Air In Motion: Models of the Winds, McGraw-Hill Inc., 324-327.