
석사학위논문

황사시와 평상시에 제주지역
부유분진의 조성 비교

제주대학교 대학원
해양환경공학과



1995년 12월


황사시와 평상시에 제주지역 부유분진의 조성 비교

지도교수 이 기 호

김 형 철

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

1995년 12월

 제주대학교 중앙도서관
김형철의 공학석사학위 논문을 인준함.

심사위원장	허	목	(인)
위	원	허 철 구	(인)
위	원	이 기 호	(인)


제주대학교 대학원

1995년 12월

**A Comparison of Composition of TSP
at Cheju Area during Yellow Sand
and Normal Periods**

Hyung-Cheol Kim

(Supervised by professor Ki-Ho Lee)

 제주대학교 중앙도서관
A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MARINE ENVIRONMENTAL
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1995. 12.

목 차

Summary

I. 서 론	3
II. 문 헌 연 구	5
1. 한반도의 기압배치	5
2. 황사사례 분석	6
3. 황사의 영향	21
III. 실험방법	26
1. 시료 채취지점	26
2. 시료채취 및 분석	26
IV. 결과 및 고찰	30
1. 부유분진의 변동 특성	30
2. 황사 사례분석	31
3. 부유분진에 대한 황사의 영향	40
가. 농도에 대한 영향	40
나. 조성에 대한 영향	43
V. 결 론	56
VI. 참 고 문 헌	58

Summary

This study is carried out at Cheju city located at the unpolluted and coastal region, from October 1994 to October 1995, in order to characterize the influence of yellow sand on the composition of TSP and to compare the composition of TSP at this city with those of other coastal and inland regions. The collection and the analyses of major water soluble ions and metal elements of TSP are conducted by using a High Volume Air Sampler, ion chromatograph and atomic absorption spectrophotometry, respectively. The results obtained from this study are summarized as follow :

By the analysis of weather maps, it can be seen that the yellow sand occurred at Cheju city is transported from Shanghai region on March 1995 and Shangtung peninsula of China continent on April 1995.

When yellow sand occurred at Cheju city, the level of TSP concentration is 1.5~5 times than the level of annual average. The concentration of water soluble ions in TSP at Cheju city are relatively higher than those of other coastal and inland regions. Especially, the annual average of sulfate is $8.14\mu\text{g}/\text{m}^3$, and this level at Cheju city is higher than that at other regions.

Compared with normal period, the contribution ratios of Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Mg^{2+} and F are increased and the enrichment factors of SO_4^{2-} and Ca^{2+} are largely increased during yellow sand period. Especially, the enrichment factor of SO_4^{2-} is increased in the whole region of Korea whereas that is decreased in Japan.

The levels of Al, Fe and Mn in TSP at Cheju city are similar to those of

the other coastal and inland regions whereas Cu, Pb and Cd are not. Compared with normal period, the concentration of metals are clearly increased and the enrichment factor values of metals is, however, decreased during yellow sand period. The range of the soil content of TSP is 4~97%. It can be seen that the enrichment factor values of Cu, Pb and Cd are sharply decreased as the soil content of TSP is increased.



I. 서론

최근 대기오염물질 장거리 수송에 의한 대기오염물질 거동에 관해서 광역적이고 범지구적으로 집중 연구되고 있으며, 특히 아시아 지역에서 황사와 같은 뚜렷한 수송형태가 발원지역이나 인접지역에서 배출된 오염물질을 흡수, 흡착하여 한반도, 일본등지로 이동하는 사례들이 있다. 더욱이 중국 동부해안 지역의 공업화 추진으로 황사의 기류가 이 지역을 통과 할 경우 인위적 오염물질의 수송 가능성은 더욱 높다(Tanaka, 1983 ; 정과 김, 1991).

황사는 이동성 고기압이 3, 4월에 중국 황토지대나 고비사막등 발원지역을 통과하면서 황토가 비산되어 지상 3~6km까지 상승되어 풍하층으로 이동되는 현상이다. 중위도 편서풍대에 위치한 한반도에서는 이 기류를 타고 2, 3일 사이 수백 km이상 이동되어 온 황사의 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다(Chung, 1986 ; Lee 등 1986 ; Tanaka 등 1983). 황사가 이동되어 오면 황토 성분이 증가되므로 대기중 에어로졸 성분의 조성에도 커다란 변화를 주게 된다. 이러한 황사현상에 대해 수년전부터 대기중 에어로졸 성분변화, 궤적 (trajectory)을 이용한 수송경로등 여러 분야에서 연구되어 왔으며 특히 에어로졸의 조성 변화에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다(윤과 박, 1991 ; 이 등 1995).

지금까지 황사에 의한 대기중 에어로졸의 조성 변화 과정에 관한 우리나라의 연구는 대부분 육지지역에서 행해져 왔다. 그렇지만 육지 지역에서는 주변에 산재된 자체오염원에 의한 영향을 무시할 수 없기 때문에 자연현상인 황사에 의한 영향을 평가하는데는 주변에 인위적 오염원의 영향이 상대적으로 적은 청정지역에서 평가하는 것이 보다 타당하다고 생각된다. 제주도는 이러한 인위적 오염원이 거의 없는 청정지역으로서 황사현상에 의한 대기 에어로졸 조성변화를 평가함에 있어 최적지라 볼 수 있다. 또한 아직까지 제

주지역에서 황사의 영향에 대한 연구가 수행되지 못해 기초자료가 부족한 실정으로 기초자료 확보가 시급할 뿐 아니라 황사가 청정지역인 제주지역에서 대기 에어로졸 구성에 미치는 영향 또는 그 특징을 평가하는 것은 중요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 1994년 10월부터 1995년 10월까지 1년에 걸쳐 제주 시 외곽지역에 위치한 두지점에서 대기중 부유분진을 채취하여 부유분진중 수용성 이온성분과 금속성분의 분석을 행하여 이들 성분의 농도수준 및 분포 특성을 파악함으로써 제주지역 부유분진에 대한 황사의 영향을 검토하고자 했다. 이와 아울러 이들 결과를 타지역의 부유분진 조성과의 비교하고자 하였다.



II. 문헌 연구

1. 한반도의 기압배치

중국과 일본 사이에 위치한 우리나라는 온대본순지대에 속하므로 우리나라를 통과하는 기류의 방향은 주변지역에서 계절별로 형성되는 기단의 성질에 따라서 결정된다. 우리나라를 중심으로 동북아시아 지역의 대기순환을 황사 현상이 자주 관측되는 봄철을 중심으로 살펴보고자 한다.

봄철에 태양의 고도가 높아지면 강한 대륙성의 한랭 건조한 시베리아 기단의 세력이 약화되면서 다양한 형태의 기압계가 형성된다. 가장 전형적인 기압계 패턴은 4~5월에 자주 나타나는 고온 건조한 양쯔강 기단에서 떨어져 나오는 이동성 고기압이 완전히 변질되어 우리나라를 주기적으로 통과하는 것이다. 이 때에는 주로 서풍계열이 우세한 편이며, 풍속은 대체로 강하지 않다. 간혹 고기압 가장자리와 한랭전선 가까운 곳에서 돌풍이 발생할 경우도 있으나 오래 지속되지 않으며, 제트기류의 영향으로 상층기류를 타고 황사가 우리나라로 유입될 가능성이 크다. 다음으로 출현빈도가 높고 봄철을 대표하는 기압계로서는 일본 남쪽해상에 이동성 고기압이 위치하여 남서기류가 유입되는 형태로서 년중을 통해 자주 출현하지만 특히 3~5월경에 주로 나타나는 기압계 형태이다. 세번째 유형은 봄철에만 나타나는 기압계 형태로서 이동성 고기압 후면에 들어서 남서기류를 유입시킨다. 두번째와 세번째 유형의 기압계 하에서는 일본쪽 대기오염물질의 유입가능성이 예상되지만 겨울철 북서기류처럼 강력하지는 못한 편이다. 그밖에 년중을 통해 평균적으로 나타나는 형태로서 일본 남해상과 발해만에 저기압이 형성되고 우리나라에 기압골이 형성되어 우세한 기류가 나타나지 않는 경우다.

봄철을 통해 전반적으로 나타나는 두가지 기압형태가 있는 데, 첫째는 우리나라 남부와 중부에 남북으로 저기압이 형성되는 경우와 둘째는 우리나라 남서부 내지 남쪽해상에 저기압이 형성되는 경우가 있으며, 두 경우 모두 기류의 이동이 거의 없다. 그리고 한냉 다습한 오오츠크해 기단이 확장하면서 제주도 부근에 정체전선이 형성되는 경우가 있으며, 이때에는 북한과 소련의 대기오염물질이 유입될 가능성이 있으나 오래 지속되지는 않는다.

2. 황사사례 분석

황사는 지상 기상 관측 지침에 의해 관측되며 그 강도를 시정과 하늘의 상태에 따라 0, 1, 2로 나타낸다. 이러한 지상에서의 황사 관측은 대개 목측에 의존하기 때문에 관측자에 따라서 다소의 견해차이가 존재하며, 일몰 후나 강수현상시에는 관측이 불가능하다. 따라서 일부 황사 연구에서는 항공기상의 정밀한 관측장비를 이용하여 정확한 시정을 관측하고 있으므로 이를 이용하거나 사진관독에 의해 황사를 분석하기 위해 GMS-4 가시광선영역의 구름사진과 NOAA 위성사진을 이용하여 분석하기도 한다.

1) 황사관측일

한반도에서 관측된 황사사례에 대한 이전의 문헌을 중심으로 살펴보고자 1970년부터 1994년까지 우리나라에서 관측된 황사 일수를 Table 1에 나타냈다. 표에서의 자료들은 지상관측에 의한 것이고 괄호속의 자료는 서울에서 관측된 자료이며(김 등 1995), 나머지는 춘천지방에서 관측된 자료(윤, 1990)이다.

춘천에서 1970년~1989년에 걸쳐 과거 20년동안 지상 관측된 황사사례를 보면, 총관측일수는 61일로서 연간 3일정도이며, 주로 3~5월에 나타나며 그

중에서 4~5월에 전체의 77%를 보였고, 77년에는 2월에도 5일간이나 황사가 관측되었다.

Table 1. The occurrence number of days on which the yellow sand was observed during the period of 1970~1989(Chuncheon) and 1986~1993(Seoul)

Year	Month				Sum
	Feb.	Mar.	Apr.	May	
70	-	-	-	-	-
71	-	-	1	-	1
72	-	-	-	2	2
73	-	-	-	2	2
74	-	-	-	-	-
75	-	-	4	-	4
76	-	1	3	-	4
77	5	4	-	-	9
78	-	-	-	-	-
79	-	-	4	-	4
80	-	-	2	3	5
81	-	-	-	8	8
82	-	-	-	8	8
83	-	-	2	-	2
84	-	2	2	1	5
85	-	2	-	-	2
86	-	-	-	-	-
87	-	(1)	-	-	(1)
88	-	-	6(8)	-	6(8)
89	-	-	-	-	-
90	-	-	(3)	-	(3)
91	-	-	-	(7)	(7)
92	-	-	(8)	-	(8)
93	-	-	(10)	(4)	(14)
94	-	-	-	-	-
Sum	5	9(1)	24(29)	23(11)	61(41)
Ratio	8.2	14.8(2.4)	39.3(70.7)	37.7(26.8)	100.0

1986년부터 1993년까지 8년동안 서울에서 관측된 황사일수를 보면 총 41일로써 년평균 5일 정도이며 1989년이후로 매년 꾸준히 증가하여 1993년에는 14일로 가장 많이 관측되었다. 서울에서의 월별 관측일수를 보면 4월에는 총 29일로 전체의 71%, 5월에는 11일이 발생하여 27%를 차지 하였다. 황사현상은 그 범위가 광범위하며 대개는 한반도 전체의 종관적인 기상상황의 상관성을 고려하여 볼 때 우리나라에서는 매년 평균 4회 정도의 황사가 관측되는 것으로 나타나고 있다.

2) 발원지

Yutaka(1981) 등은 일본 상공에 운반된 모래먼지의 성분을 분석하여 그 발원지가 Taklamakan 사막으로부터 Gobi, A-la shan 사막 등지와 황하상류의 황토지역 부근이라고 추정한 바 있으며 현재는 이들 지역이 황사의 발원지로 널리 알려져 있다. 황사의 지리적 위치는 Fig. 1과 같다. 황사는 주로 3~5월에 발생하며, 특히 4월에는 몽고와 그 주위의 사막과 토양 표면이 해빙과 함께 강한 바람이 모래와 토양 표면을 들어 올려 우세한 기류를 타고 풍하층으로 이동된다. 황사는 대개 강한 이동성 저기압이 한랭전선을 동반하고 발원지를 통과할 때 발생한다고 알려지고 있다. 강수를 동반하지 않는 비교적 건조한 저기압이 발원지를 이동해 나올때 황사가 시작되며 6월 이후에는 대개 발생하지 않는다. 여름철에는 황사가 발생하지 않는 것은 극전선대의 저기압이 습기를 많이 포함하고 토양표면의 생태적 변화가 비교적 크기 때문이다.

고도 3,000~5,000m의 능선이 이어진 Tienshan, Altai, Sayan 산맥 등을 편서풍이 가로질러 동진하게 되면 큰 산맥의 동쪽에서는 Fohn 현상이 발생하므로 산맥의 동쪽지역은 대개 매우 건조한 지역이 된다. 앞에서 이미 언급한 Taklamakan, Gobi 사막들 그리고 몽고의 서부, 중부 및 남부지역에 놓인 사막들이 바로 Fohn 현상이 발생하는 풍하층에 위치하고 있다. 따라서 이 지역에서 형성·이동되는 이른 봄철의 저기압은 전선을 동반하여도 건조하기 때문

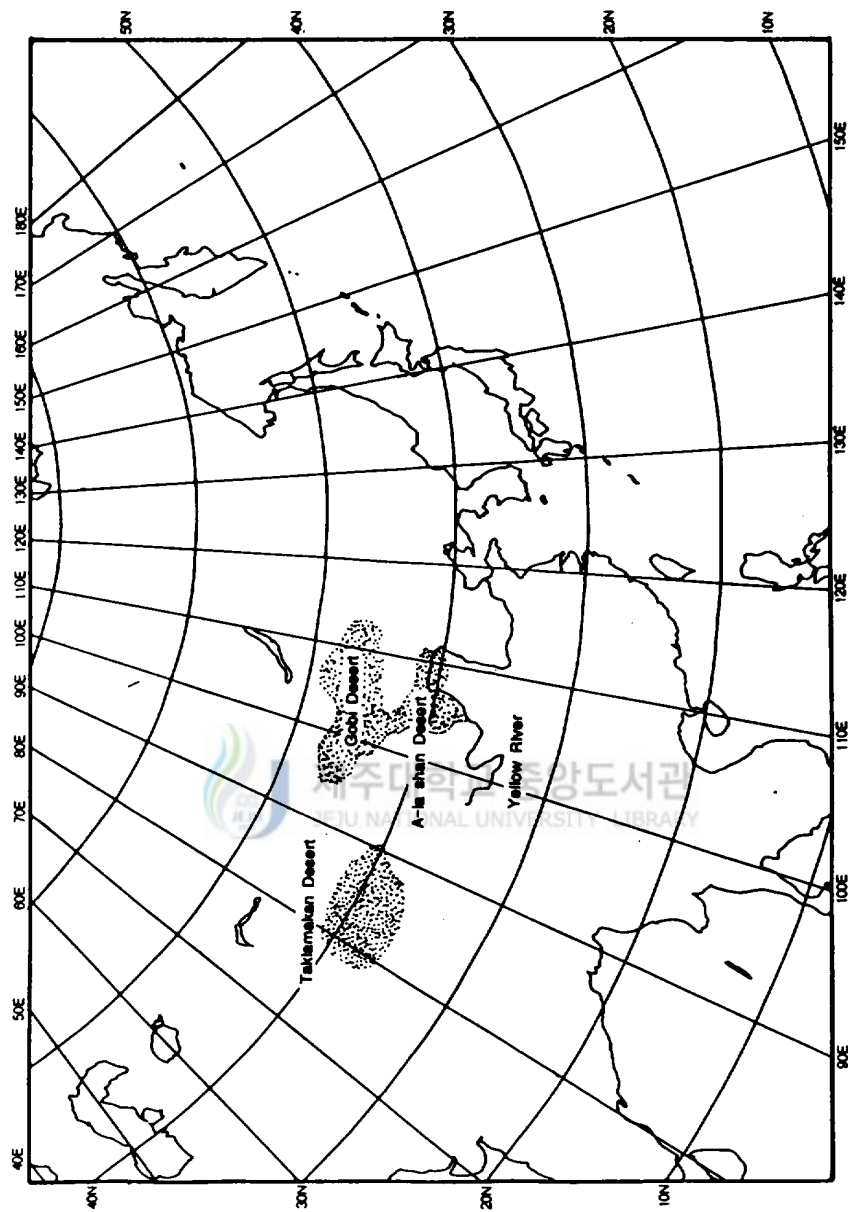


Fig. 1. Main origins of the yellow sand.

에 강수가 적거나 발생하지 않게 된다. 그리고 이 지역에서 형성된 지형성 저기압은 곧 이동성 저기압이 되어 남동-동남동진하여 만주지역을 자주 통과하는 것으로 관찰되고 있다.

이 거대한 지역의 범위는 1,500,000km² 이상이며, 연평균 강수량은 고작 300~500mm로서 한국의 1/3 정도수준이다. 이동성 저기압이 만주를 통과하면 동반된 한랭전선의 남서쪽끝 가장자리 부분이 발해만과 황해를 통과하고 곧 이어 황사구름은 찬 북서기류에 밀려 한반도로 이동해 올 수 있다. 이러한 기상 구조하에서 황해에서 습기를 얻으면 응결되고 누런 모래먼지와 흙을 포함한 강수가 발생하기도 한다. 황사는 대개 전선을 동반한 저기압의 통과 후 대륙성 고기압의 세력확장에 의해서 발생하므로 황사의 발생빈도는 3월말부터 5월초까지 통과하는 기상구조의 출현회수에 좌우된다. 그러므로 황사는 4~5회 발생하며 그 중 한반도로 이동 및 침적되는 황사구름은 평균 1~2회 발생한다. 조(1990)는 1976년부터 1985년까지 서울에서 관측한 황사현상의 빈도가 평균 1~3회임을 이미 밝힌 바 있다.

1970년에서 1989년까지 춘천지방에서 20년 동안 관측된 26회의 황사를 발원지별로 구분해 보면(Table 2), 10회가 황하상류지역 및 A-la shan 사막에서, 9회가 Taklamakan 사막에서, 7회가 Gobi 사막에서 발생한 것으로 나타나고 있다(윤 1990).

3) 황사 지속시간

한반도에서의 황사지속시간을 조사한 윤(1990)의 결과(Table 3)를 보면, 평균 지속시간은 32시간이며, 조(1990)는 서울지역을 중심으로 한 지속시간을 약 2일로 발표한 바 있다. Table 3에서 보는 바와 같이, 과거 20년동안 춘천지방에서 관찰된 황사의 경우, 지속시간이 24시간 미만인 경우는 46.2%이고, 24시간 이상이 53.8%였으며 그 중에서도 1~3일이 42.3%로 가장 많았음을 알 수 있다. 1993년 청주에서 관찰된 황사를 보면, 총 5회의 황사중에서 2회

가 24시간 미만의 지속시간을 보였고 3회는 1~3일의 지속시간을 보인 것으로 보고한 바도 있다(정과 윤, 1994).

윤(1990)은 황사의 지속시간을 발원지와 관련지어 살펴본 결과(Table 4), Taklamakan 사막에서 발생한 황사는 한반도에서 평균 59.7시간이 지속되었고, Gobi 사막에서 발원한 황사의 경우에는 22.3시간, 황하상류 및 A-la shan 사막에서 발원된 황사는 13.8시간인 것으로 보고한 바 있다. 즉, 윤(1990)에 의하면, 발원지가 한반도에서 멀수록 한반도에서 황사의 지속시간이 길게 나타난다는 것이다. 이는 발원지가 먼 곳에서 발생한 황사는 상층의 풍속에 연관되어 오랜 시간동안 수송되어 오면서 넓은 지역으로 분포되기 때문인 것으로 추정하고 있다.

Table 2. Number of occurrence for the main origins of the yellow sand

Source Region	Month				Total	Ratio
	Feb.	Mar.	Apr.	May		
Taklamakan Desert	1	-	5	3	9	34.6
Gobi Desert	-	2	2	3	7	26.9
Upstream of the Yellow River and A-la shan Desert	-	3	4	3	10	38.5
Total	1	5	11	9	26	100.0

Table 3. Monthly number of occurrence for each duration class of the yellow sand over Korean peninsula

Hour	Month				Total	Ratio
	Feb.	Mar.	Apr.	May		
< 3	-	-	1	2	3	11.5
3~6		1	2	-	3	11.5
6~12		1	1	1	3	11.5
12~24		1	2	-	3	11.5
24~48		2	2	3	7	26.9
48~72		-	2	2	4	15.4
72~96	1	-	-	1	2	7.7
96 ≤		-	1	-	1	3.8
Total	1	5	11	9	26	99.8
Average	84.0	18.4	30.1	36.1	32.0	(1.3 days)

Table 4. Number of occurrence for each duration class of the yellow sand over the Korean peninsula depending on each origin

Hour	Source region			Total
	Taklamakan	Gobi	Yellow river & A-la shan	
< 3	-	2	1	3
3~6	1	-	2	3
6~12	-	1	2	3
12~24	-	1	2	3
24~48	1	3	3	7
48~72	4	-	-	4
72~96	2	-	-	2
96 ≤	1	-	-	1
Total	538	156	138	832
Average	59.7	22.3	13.8	32.0

4) 황사의 수송

Murayama(1987)는 발원지에서부터 황사가 수송되기 위해서는 3가지의 수송단계를 갖는다고 했다. 첫째는 지면에서의 creeping, 둘째는 saltation, 끝으로 공중으로의 부상(suspension)이라는 수송단계를 제시하였다. 그리고 각 발생형태에서의 입자크기는 0.5~1.0mm 이상, 50 μ m에서 0.5~1.0mm, 50~100 μ m 이하라고 주장하였다. 그리고 saltation 입자는 1회 비행에 수 10cm의 거리를 운동하며 반복운동을 한다고 하더라도 10m 이상은 이동하지 못하지만 일단 부유상태가 되면 수 km는 수송된다고 하였다. 따라서 0.02~0.03mm 입자는 고도 5km까지 상승하며 상승한 입자는 한반도 상공부근에서 큰 입자는 작은 입자보다 비교적 침강속도가 빠르고 약 0.02mm 입자들은 2,000km까지 수송되고 0.005mm보다 작은 입자들은 약 9일후에 하와이 섬까지 수송된다고 하였다.

가. 수송시간

황사의 발원지로부터 한반도까지 수송되는데 소요되는 시간을 알기 위해서 지상일기도를 근거로 수송시간을 파악한 결과를 Table 5에 제시했다. 표에서 보면, 한반도에서 가장 먼 곳에 위치한 Taklamakan 사막으로부터는 평균 85.8시간, Gobi 사막으로부터는 55.3시간, 황하상류역과 A-la shan 사막으로부터는 43.3시간으로 나타나고 있다(윤, 1990). 1990년 4월 8일부터 한국에 3~4일간 지속된 황사와 4월 26일에 관측된 황사의 수송경로를 분석한 결과를 보면, 2000~3000km의 거리를 2~4일에 이동한 후 한국에 상륙한 것으로 보고된 바 있으며(정과 김, 1991), 1993년 4월 23일 오전부터 29시간정도의 지속시간을 보인 청주에서 관측된 황사의 경우 한반도까지 이동하는데 48~60시간이 경과한 것으로 보고된 바 있다(정과 윤, 1994).

Table 5. Number of required time(hours) for the transportation of the yellow sand from origins to Korea

Hour	Source region			Total
	Taklamakan	Gobi	Yellow river & A-la shan	
96~108	3	-	-	3
84~96	4	-	-	4
72~84	1	1	-	2
60~72	1	1	1	3
48~60	-	4	3	7
36~48	-	1	5	6
24~36	-	-	1	1
Total(hr)	772	387	434	1593
Average	85.8	55.3	43.4	61.5

나. 황사 수송시의 기압패턴

황사가 한반도에 수송되어 올때의 기압패턴을 살펴보면(Table 6), 대부분의 경우 지상에서는 한랭전선을 동반한 저기압이 통과할 때로서 그 중에서도 만주지방을 통과하는 경우가 대부분이었던 것으로 보고되어 있다. 그리고 상층에서는 30~50 knots의 W-NW풍이 불며 특히 500mb층에서 냉핵(cold core)의 남하가 뚜렷하였다고 보고되어 있다. 이러한 기압계가 갖추어지지 않으면 발원지에서 황사가 발생하여도 한반도에서는 전혀 황사가 관측되지 않았던 것으로 보고하고 있다(윤, 1990). 정과 김(1991)도 1990년 4월에 발생된 황사의 경우 한랭전선 후면의 고기압대에서 황사가 발생하여 발해와 황하를 거쳐 중국 북부의 황토지대와 몽고에서 유입된 것으로 제시한 바 있다. 이런 경우에 대한 사례로써 1993년 4월 23일~24일 청주에서 관측된 황사를 보면 발원지가 고비사막 남동부와 황하상류 건조지역이었으며, 강수없이 발달한 저기압 후면에서 돌풍과 함께 발생하여 남동진하다가 남서기류를 타고 한반도로 유

입된 것으로서 황사가 소멸된 24일에는 500hPa와 700hPa, 850hPa 상층기류는 한반도의 북쪽인 북만주와 몽고 동쪽에서 유입되므로서 기온이 5~6도 하강하였고 이때에 북서풍이 불었던 것으로 보고되었다(정과 윤, 1994).

과거 20년 동안 한반도에서 황사현상이 관측되지 않았던 해(Table 1)에도 당시의 일기도를 살펴보면 황사발원지에서는 Table 7과 같이 황사가 빈번하게 발생하였으나 앞에서 언급한 수송 기압계를 갖추지 못하여 한반도에서는 황사현상이 없었다고 보고되었다. Tanaka 등(1989)도 저기압의 활동에 따라서 황사현상이 일본에서는 나타나지 않아도 한국과 중국에서는 관측된다고 보고한 바 있다.

Table 6. Number of days with the pattern of pressure system when yellow sand was transported

Pressure feature	Month				Total	Ratio
	Feb.	Mar.	Apr.	May		
Low passed over the Manchuria (with cold front)	1	4	9	7	21	80.8
Low passed over the Korean peninsula (with cold front)	-	1	1	1	3	11.5
Trough (the edge of high)	-	-	1	1	2	7.7
Total	1	5	11	9	26	100.0

Table 7. Number(day) of the yellow sand occurrences in non-yellow sand years of Korea

Year	Month			Total
	Mar.	Apr.	May	
70	2	13	7	22
74	2	5	3	10
78	5	12	3	20
86	7	9	9	25
89	9	7	5	21
Total	25	46	27	98

Fig. 2는 중국대륙에서 황사가 발생하여 한반도에 수송된 경우의 지상 및 500mb의 분석 일기도이고 Fig. 3은 중국대륙의 황사가 한반도로 수송되지 못한 경우에 대한 지상 및 500mb의 일기도를 나타낸 것이다(윤, 1990). Fig. 2에서 보면 발달한 지상 저기압 뒷면의 중국대륙에는 황사구역(음영부분)이 뒤따르고 있고, 500mb 고도에서는 40~80knots 정도의 W-NW 풍이 한반도로 유입되고 있으며 특히 냉핵(cold core)의 남하가 뚜렷함을 알 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 2의 기압 패턴을 비교해 보면, 지상기압계는 비슷하지만 상층에서는 유입되는 바람의 속도와 방향이 다르며 냉핵의 남하도 없음을 알 수 있다. 다시 말하면 상층풍계는 강한 W-NW류가 아닌 20~30knots 정도의 SW류가 지배적이며 냉핵의 중심부는 상당히 고위도에 북편해 있음을 알 수 있다(윤, 1990). 1994년 4월과 5월의 봄철에도 중국의 북동부 건조지대와 고비사막 근처에서 7회의 강한 먼지폭풍 또는 황사가 1~3일간 지상에서 관측되었으나 한반도의 기상관측소에서는 한 차례의 황사현상도 관측되지 않은 것으로 기록되었다. 통상 황사의 관측은 목측에 의존하기 때문에 인식할 만한 황사에 의한 시정감소가 초래될 때만 황사현상으로 간주하게 되므로 다분

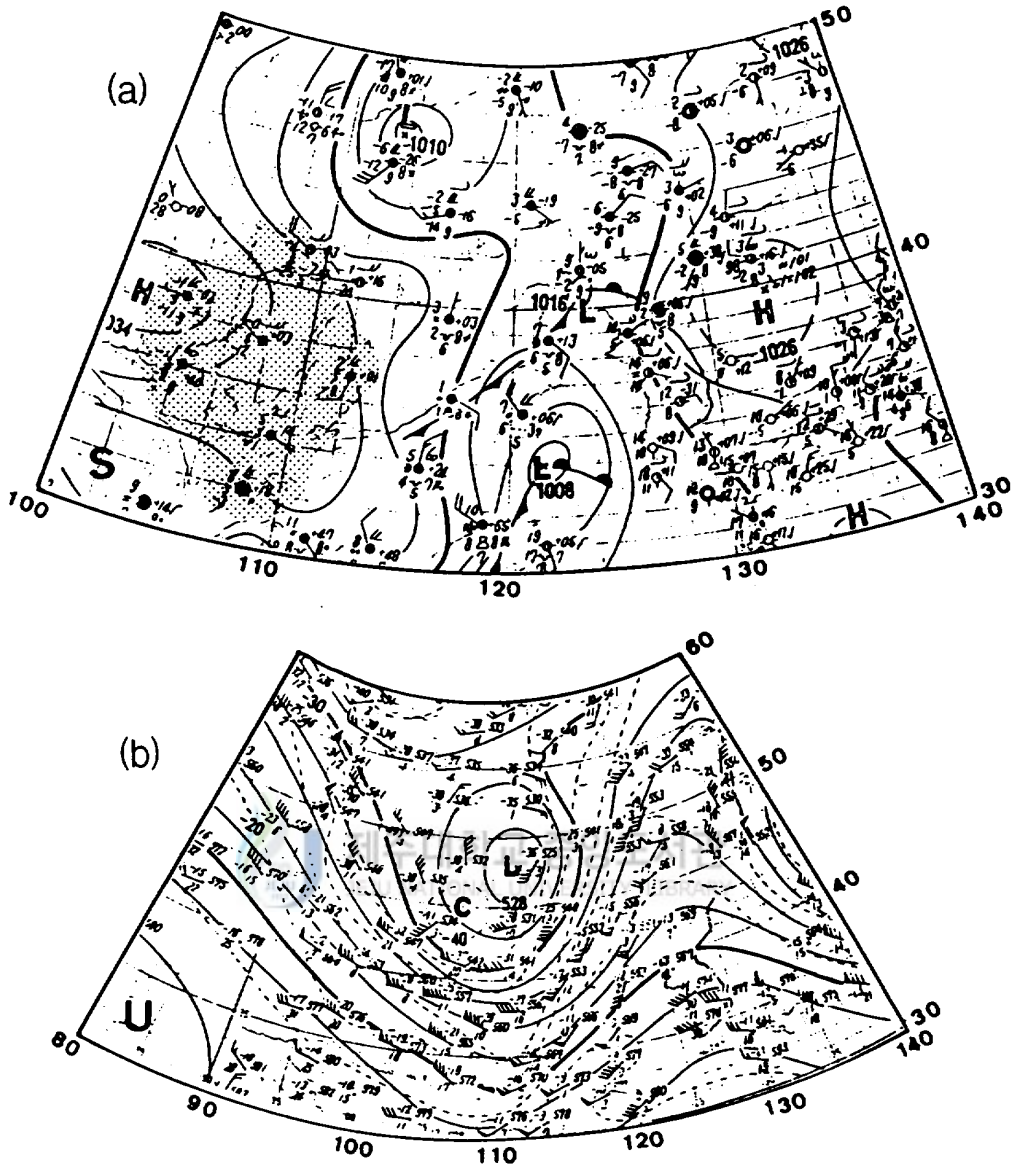


Fig. 2. The typical weather maps of sea and 500hPa levels when yellow sand was transported to Korean peninsular. The shaded area is a region of the yellow sand observed(윤, 1990) : (a) sea level (b) 500 hPa.

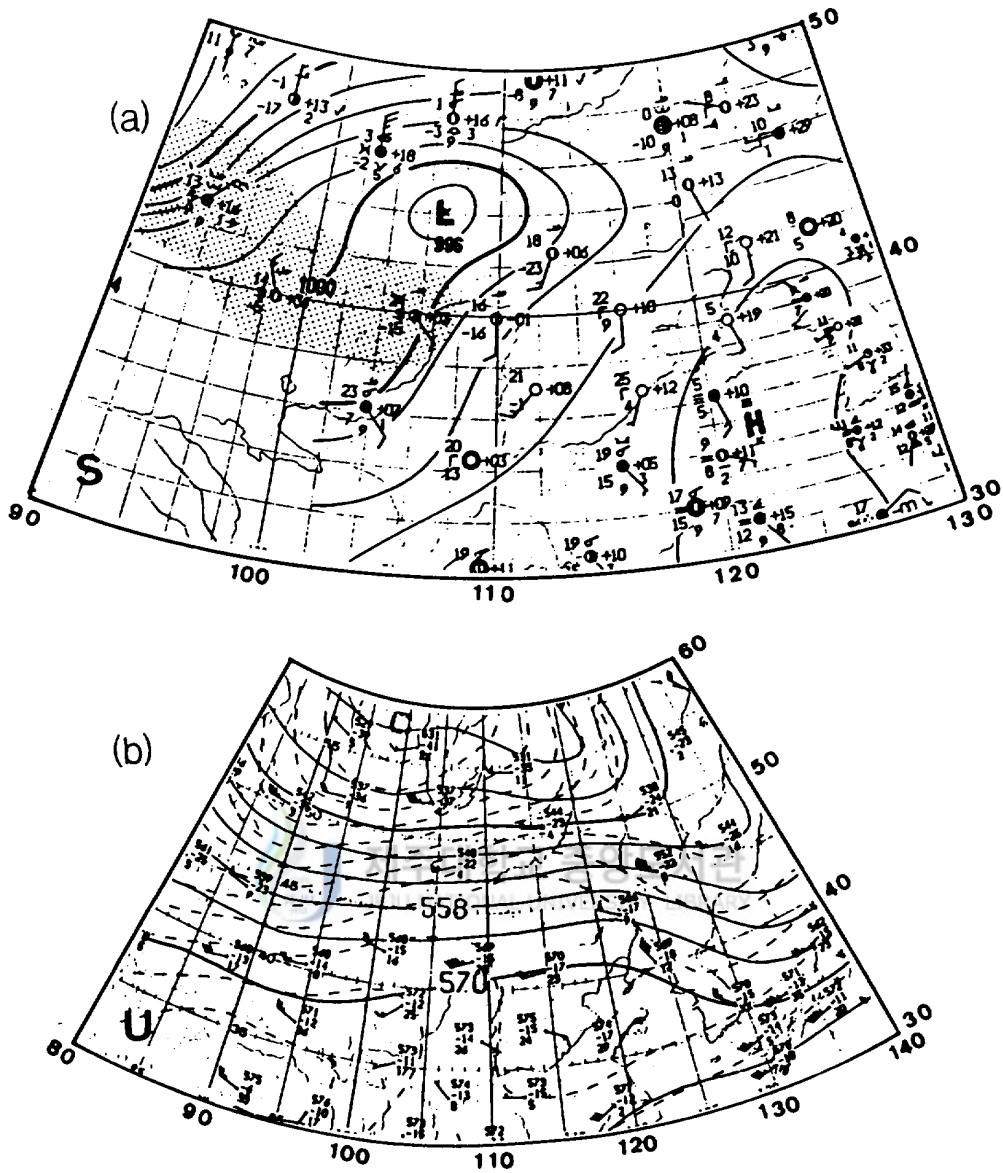


Fig. 3. The typical weather maps of sea and 500hPa levels to Korean peninsular when yellow sand was not transported. The shaded area is a region of the yellow sand observed (윤, 1990) : (a) sea level (b) 500 hPa.

히 주관적인 면이 내재된 때문일 수도 있다. 1994년 봄철에 상공에서 항공기로 관측한 결과에 의하면 한반도 상공에 세차례의 황사유입이 있었던 것으로 보고되었다(정과 윤, 1994). 결국 한반도에서 황사현상이 기상관측소에 의해 관측되지 않더라도 상층의 황사 주 흐름대에서는 황사의 유입이 있고, 상층의 황사는 지상에서 기록된 황사보다 훨씬 많이 나타나고 있음을 알 수 있다.

황사현상시에 소위 土雨를 가져오는 강수동반여부를 보면(Table 8), 황사와 동반되는 강수횟수는 65.4%로 많은 편이었고 이때 강수량이 5mm 미만인 경우가 절반이 넘어 강수량은 적은 것으로 나타나고 있는데 이는 황사를 수송해오는 저기압이 북쪽으로 지나면서 주로 한랭전선상에서 소낙성 강수가 나타나기 때문인 것으로 알려지고 있다(윤, 1990).

Table 8. Number(day) of the yellow sand occurrences accompanied by soil precipitation

Precipitation (mm)	with beginning of yellow sand	during yellow sand	Total	Ratio
0.0	2	2	4	23.5
0.1~1	3	3	3	17.6
1~5	3	3	3	17.6
5~10	1	3	4	23.5
10~20	1	2	3	17.6
Number	10	7	17	99.8

5) 대기오염물질의 장거리 수송경로 분석

우리나라에서 해마다 봄철에 나타나는 황사현상은 바람에 의한 대기오염물질의 장거리 수송문제의 대표적인 예라고 할 수 있다. 대기오염물질의 장거

리 수송은 대기의 운동 즉 바람에 의해서 이루어지는 현상을 말하는 것으로 그 이동경로는 실제로 공기괴(air parcel)의 Lagrangian trajectory를 밝히므로서 알 수 있다.

장거리 수송에 관한 국내 연구로 정과 김(1991), 윤과 박(1991), 국립환경연구원(1991)의 보고서에서는 상층 일기도의 바람장을 수작업을 통해서 계산을 하거나 황사현상이 일어난 2~3일간의 등온위 궤적을 구하여 이동경로를 추정하고 있다. 등압면에서 나타나는 바람장으로서 공기의 이동경로를 계산할 경우에는 각 시각의 등압면상의 공기는 이미 동일한 공기가 아니므로 어떤 특정 공기괴의 이동경로를 추적할 수 없다(윤과 박, 1991). 등압면에서의 바람장으로 공기괴의 궤적을 계산했을 경우 등온위 궤적(isentropic trajectory)과 비교하여 불과 24시간 후에 1300km 정도나 다른 경로를 보일 수도 있다고 알려진바 있다(Danielsen, 1961). 그리고 2~3일 정도의 단기간에 대한 유적선은 실제 장거리 수송경로는 계산에 따라서 하루에 수백 km나 차이가 있을 수 있기 때문에 오염원과 피해지점간의 이동경로를 밝히는데는 크게 도움이 되지 않는다고 보고되기도 했다(강 등, 1993).

Trajectory를 추적하는 계산방법으로는 등온위(isentropic) 방법과 등압면(isobaric) 방법으로 나눌 수 있는데 각 방법간에는 장단점이 있다. 등온위 방법은 공기가 단열적 운동을 한다는 가정하에 추적하는 방법으로 Merrill 등(1986)과 Danielson(1961)이 사용하였다. 이 방법에는 많은 입력자료와 전산기의 계산시간이 소요되고, 강수현상이나 복사열의 방출시에 단열과정을 고려하지 못하는 단점이 있다. 그리고 윤과 박(1991)의 결과를 보면, 현재와 같이 12시간 간격보다는 매 6시간 간격의 위도, 경도 1.125°, 연직 14층의 격자 분석자료가 이용되어야 바람직하고 보다 경제적이고 정확도 높은 알고리즘의 개발 및 검증이 필요한 것으로 나타나고 있다.

등압면 방법은 과거의 관측자료를 사용하여, 기상청이 12시간 간격으로 계산한 각 바람을 이용하는데, 일정한 기압 표면위로 공기괴가 이동한다는 가정

하에 추적하는 방법으로서 입력자료가 비교적 적게 요구되고 강수현상을 고려하여 계산할 수 있어 실용적일 뿐만 아니라 성능이 우수하므로 오염물질의 추적과 발원지 연구에 많이 이용되고 있다. 그리고 유적의 계산에는 크게 전진형(forward)과 후진형(backward)이 있다. 전진형은 시간을 앞으로 추적하여 얻어지는 유적선으로서 자연적 또는 인위적인 오염물질의 유출사고가 발생할 경우에 환경피해를 예측하는데 주로 사용하고 있으며, 후진형은 대기오염의 발원지를 추적하는데 널리 이용되고 있다. 후진형 등압면 분석에 의한 이동경로 추적에는 기압 850hPa면이 널리 이용되고 있다. 통상 기압 850hPa면은 대략 1500m 상공에 위치하는 등압면으로서, 하층 제트기류가 흐르고 있으며, 지표면의 국지적 영향을 받지 않는 최저의 높이로 오염물질의 장거리 수송에 커다란 영향을 주는 대표적 등압면이라고 볼 수 있다.

장 등(1993)은 장기간에 걸친 월별, 계절별의 이동경로 특성을 파악하여 장거리 이동경로에 의한 오염원의 영향을 알아보기 위해 여러 특정지역에서의 trajectory를 계산하여 비교한 바 있다. 그 결과를 보면, 중국에서 발생한 오염물질은 2~3일 내에 한반도를 통과하게 되므로 우리나라의 대기환경에 직접적인 피해를 주게 될 것으로 보고하였다. 이러한 이동경로는 계절적으로 뚜렷한 양상을 나타냈고, 우리나라에 미치는 전체적인 경향은 북서쪽에서 위치한 북경 및 요녕성 지역, 산둥성 지역 순으로 보고되고 있었으며, 또한 여름철에는 중국과 함께 일본의 영향도 무시할 수 없을 것이라고 제시하였다.

3. 황사의 영향

중국의 황토지역, 고비 사막 등에서 발생한 모래먼지의 대규모 이동현상인 황사는 대기물리학, 지구화학 및 기상학 등 다양한 분야에서 논의되고 있다. 황사는 대기의 혼탁도 증대, 태양에너지 유입의 감소, 강수 빙정핵으로서의

역할외에도 미세 입자의 침투로 인한 정밀기계 손상과 호흡기 질환, 안질환 등 건강과 일상생활에 미치는 영향이 크다(신과 김, 1992 ; 이 등 1986 ; Tanaka 등 1983 ; Nishikawa 등 1991 ; 정과 윤, 1994).

대기중에 부유하고 있는 입자의 크기가 큰 경우에는 대기중에 체류시간이 짧아 장거리 수송이 불가능하지만 $20\mu\text{m}$ 이하의 크기를 갖는 입자는 장거리 수송이 가능하다고 알려져 있다. 황사의 크기는 직경이 $0.2\sim 20\mu\text{m}$ 이며, 대부분은 $0.4\sim 12.0\mu\text{m}$ 에 분포한다고 보고하고 있다. 통상 황사는 $1\sim 2\mu\text{m}$ 이상의 조대입자군에 속하며, 이들 입자는 대기 에어로졸의 주요한 성분이 된다고 알려져 있다(이 등 1995 ; Laurent, 1993 ; 大氣汚染研究協會, 1989).


황사현상시 대기중에는 토양성분인 금속성분 즉 Si, Al, Fe, Cu, Mn, Na, Mg, Ca, K, Pb, Cd 등의 산화물이 많이 함유되어 있다(이 등 1988). 그외에도 해염유래 성분들인 Na, Mg, Cl 성분들도 수송중에 함유될 수 있다. 그리고 대기중에서 화학적인 현상으로는 대기중에 상승한 토사가 장거리 이동시에 대기중의 SO_2 를 황산으로 산화시키는 촉매의 역할을 한다고 알려지고 있다(김 등 1995, Seinfeld, 1986). 더욱이 최근 중국의 공업발전에 따른 황해연안의 개발과 에너지 수요의 증가로 인해 대규모의 대기오염물질이 방출되고 있으므로 이들 물질이 우리나라에 미치는 영향이 우려되고 있어 토양입자의 장거리 이동에 의해 생성된 황사현상에 관한 연구는 우리나라 대기중 에어로졸에 미치는 영향을 해명할 뿐 아니라 중국에서 배출된 대기오염물질의 장거리 이동에 대한 지표로서 그 해석의 필요성이 대두되는 등 여러 측면에서 연구의 중요성이 인식되고 있다.

국립환경연구원(1989, 1990, 1991)이 서울, 강화, 태안에서 3년간 황사현상이 발생할 경우에 대기중 부유분진 농도를 측정한 결과를 보면 평상시 농도보다 통상 2배 이상으로 높게 나타나고 있다. 그리고 금속성분의 경우, 황사현상시 Al의 농도는 비황사시보다 약 5배 정도의 높은 농도를 보이며, Ca은 황사시에 약 2배 정도 높은 것으로 보고했다. 그리고 부유분진의 입경분포를 보면

황사기간중에 1.1 μ m 이상의 조대입자가 총부유분진 농도의 79.2%이고 비황사 기간중에는 약 54.8%를 차지하여 황사입자가 주로 1.1 μ m 이상의 조대입자군에 속하는 것으로 보고했다(신과 김, 1993).

이 등(1993)이 우리나라의 서울, 부산, 대구, 광주의 4개 도시에서 황사시에 총부유분진중 금속성분과 수용성 성분의 농도를 측정하 바 있다. 그 결과를 보면, 금속성분의 경우 평상시에 비해서 2배 정도 높게 나타났고, Ca, Fe, Mn, Mg의 순으로 토양유래 금속성분이 높게 나타났다. 수용성 성분의 경우 어떤 이온성분은 최고농도와 최저농도의 차이가 2배를 나타내기도 하지만 황사시와 평상시에 현저한 화학적 특징으로서의 농도 차이는 볼 수 없었다고 했다. 다만 F, Ca²⁺, SO₄²⁻ 이온성분의 농도는 평상시에 비해 황사시에 높게 측정된다고 보고되고 있다. 이러한 결과는 이 등(1988)에 의해서도 확인된 바 있었다.

대기중의 에어로졸 성분의 기원을 알기 위해서 일반적으로 농축계수(enrichment factor; EF)를 널리 이용하는데 농축계수의 산정시에는 어떤 기준물질을 선택하여 그 물질중의 농도와 대기중의 농도를 다음과 같이 비교하는 것이다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$\begin{aligned}
 \text{Enrichment factor (E.F)} &= \frac{(X/AI)_{aerosol}}{(X/AI)_{crust}} \\
 &= \frac{(X/Na)_{aerosol}}{(X/Na)_{seawater}}
 \end{aligned}$$

여기서 $(X/AI)_{aerosol}$: 대기중 AI 농도에 대한 대상금속원소의 농도비

$(X/AI)_{crust}$: 지각중 AI 농도에 대한 대상금속원소의 농도비

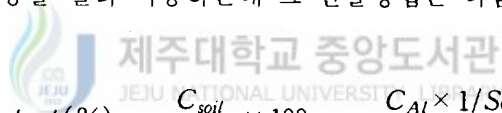
$(X/Na)_{seawater}$: 해수중 Na 농도에 대한 대상금속원소의 농도비

통상 대상성분이 토양기원인 경우 지각물질 혹은 토양중의 값과 비교하여

대기중의 농축정도를 판단하게 된다. 그리고 해양기원의 성분들에 대해서는 해수중의 농도와 비교하기도 한다(Terada, 1991).

평상시에 대기중 에어로졸의 모든 성분에서 EF값은 지역간, 성분간에 상이한 값을 보인다. 그렇지만 황사가 유입될 시에는 토양기원 성분들의 농도는 지역간에 차이를 보이지만 EF값은 황사의 영향권에 있는 지역에서는 균일한 수치 즉 1에 근접하는 값을 보인다고 보고하고 있다. 이는 토양내에 함유되어 있는 토양기원 원소들의 조성구와 대기중 에어로졸의 조성이 비슷하다는 의미로서 부유분진중 각종 성분의 기원을 평가할 수가 있다. 그러나 인위기원 원소로 알려진 Cd, Pb, Zn 등의 원소들의 EF값은 그 범위가 대단히 넓게 나타나고 있다. 이는 원위적인 오염원에서 배출되어 대기중에 상당량이 농축되어 있음을 의미한다(이 등 1993 ; 大氣汚染研究協會, 1989 ; 이 등 1995 ; 신과 김, 1992). 수송되어온 황사중 Cl, Mg, Na과 같은 수용성 성분은 해염의 비산으로 황사에 함유될 수 있으며, 내륙지역보다는 해안지역의 경우 그 기원은 대부분 해양으로 볼 수 있다.

부유분진중에서 토양입자의 기여율을 평가하기 위해서 토양의 지표원소인 Al, Fe, Mn, Ca 등을 널리 이용하는데 그 산출방법은 다음과 같다.



$$\text{Soil content (\%)} = \frac{C_{\text{soil}}}{C_{\text{TSP}}} \times 100 = \frac{C_{\text{Al}} \times 1/\text{Soil}_{\text{Al}}}{C_{\text{TSP}}} \times 100$$

여기서 C_{TSP} : 부유분진 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{soil} : 분진중 토양에서 기여된 성분의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{Al} : 분진중 Al의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Soil_{Al} : 토양성분중 Al의 중량농도비(g/g)

토양기여율은 지역에 따라 차이는 있으나 평상시에 토양입자의 기여율은 20~30% 정도이며, 황사시에는 황사의 수송규모에 따라서 40~70%정도로 평

상시에 비해서 증가하는 경향을 보인다고 보고되고 있다.(일본환경청, 1989 ; 신과 김, 1992). 서울, 태안, 강화에서 추정된 토양입자의 기여율은 비황사기간중에 각각 평균 29.56%, 22.0% 및 26.25% 이었으나 황사기간중에는 서울과 태안이 각각 평균 58.72%와 31.44%로 평상시에 비해 높은 기여율을 보였다. 그리고 분진입자의 형태분석에 의하여 황사시에 토양입자로 보이는 결정체가 다수 확인된 것으로 보고되었다(국립환경연구원, 1991).



Ⅲ. 실험방법

1. 시료채취 지점

채취지점은 Fig. 4와 같다. 총부유분진(TSP) 농도의 채취는 주변에 인위적 오염원이 없는 제주대학교(S1) 및 비교지점으로 선정된 제주시 외도동(S2)에서 실시하였다. 제주대학교는 해발 300m 정도에 위치하고 있으며 주변지역은 산림지역이고 북쪽의 해양선과 7km 떨어져 있으며 북쪽으로 제주시 중심부가 위치해 있다. 그리고 비교지점으로 선정된 외도동은 북쪽의 해양선과는 1km 거리를 두고 있으며 주변이 농경지로 이루어져 있고 동쪽으로 제주시 중심부와 8km 떨어져 있다. 그리고 본 연구에서는 환경부에서 운영하고 있는 제주시 대기질 자동 측정소(S3)에서 연속 측정하고 있는 PM-10 자료도 참고로 이용하였는데 이 S3지점은 제주시청으로서 제주시의 구 시가지 해발 70m 지점에 위치하고 있으며 주변에 차량왕래가 빈번한 상가지역이다.



2. 시료채취 및 분석

1) 시료채취 방법

대기중 총 부유분진의 채취에는 2대의 High volume air sampler(Andeson B/M 2000A)를 이용하여 두 지점에서 24시간 분진을 포집하였다. 분진의 포집시 흡입유량은 $1.2\text{m}^3/\text{min}$ 으로 등속 흡입하였으며 유량은 수은 마토미터를 이용하여 보정하였다. 이때 여지는 사각 유리섬유여지(8"×10")를 사용하였다.

분진시료의 채취기간은 제주지역의 일상적인 분진 농도 및 조성을 알아볼

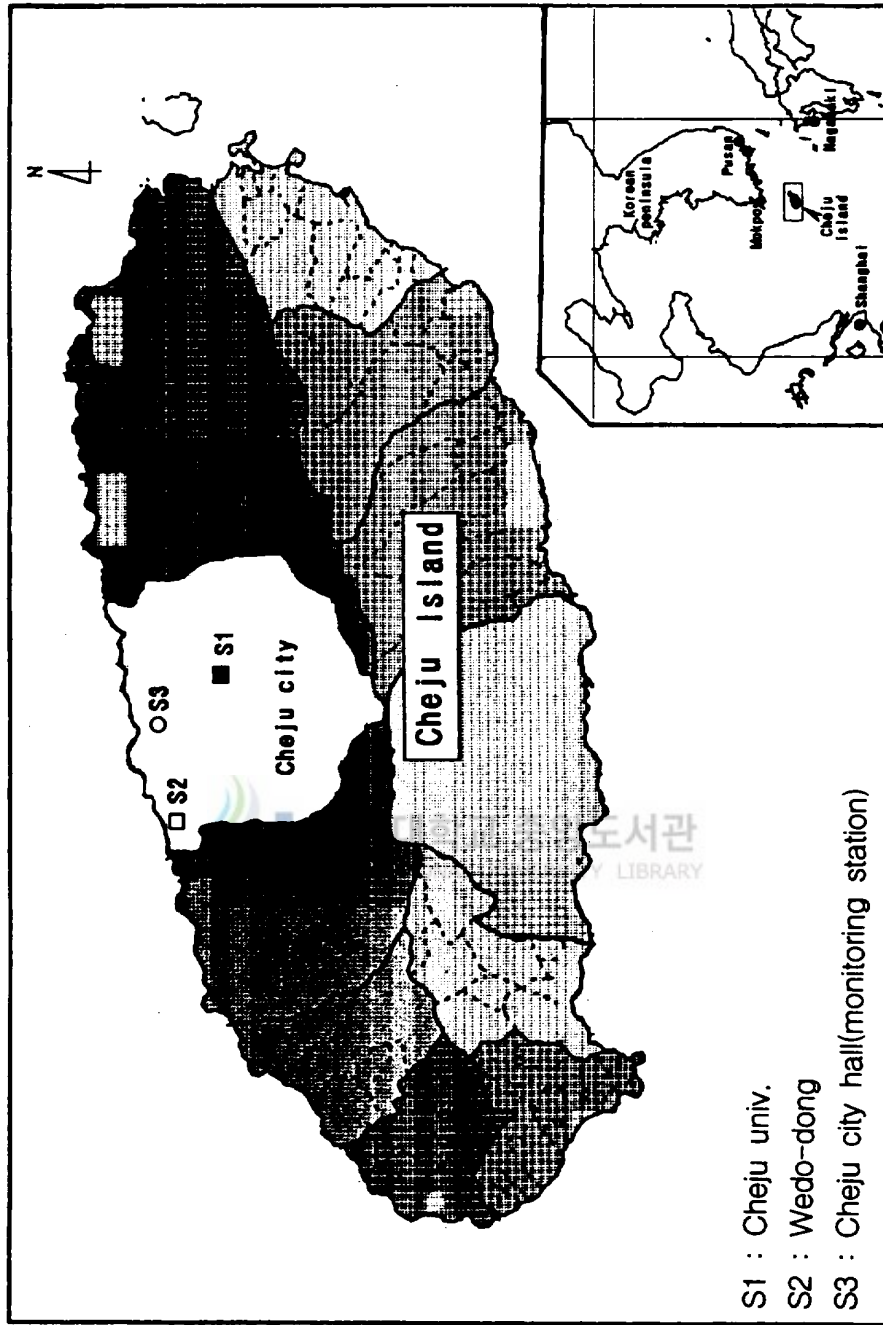


Fig. 4. The sampling station.

수 있도록 1994년 10월부터 1995년 10월까지 계절별로 4회를 기준으로 설정하였다. 그리고 황사로 인한 제주지역 대기중 부유분진에의 영향을 관찰하기 위해 황사시기를 전후로 8일간(4월 3일~4월 10일) 연속 포집도 실시하였다. 본 조사 기간 동안에 채취된 부유분진의 시료수는 S1 지점에서 총 23개, 비교지점(S2)에서 총 14개를 채집하였다. 두 지점에서 시료수의 차이는 4월 황사시에 채취장치의 고장으로 비교지점에서 시료를 채취하지 못했기 때문이다.

2) 분석방법

채취가 완료된 여지는 즉시 회수하여 Dry Oven에 넣고 110℃에서 항량하여 시료채취 전,후의 무게를 측정하여 부유분진량을 구하였고, 부유분진중에 함유된 각종 성분의 분석을 위해 여지를 중량비로 1/2 절단하여 한 부분은 불용성중금속 성분 분석에 이용하였고 나머지 여지는 수용성 이온성분 분석에 이용하였다. 분석 대상 성분중 중금속은 토양기원 원소로 잘 알려진 Al, Fe, Mn과 인위원소로 알려진 Ni, Cu, Pb, Cd를 선정하였고, 수용성 이온은 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- 를 선정하였다. 각 성분들은 Table 9에 나타난 방법에 의해 분석을 행하였다. 각 항목의 분석에 필요한 시료 여과지의 전처리 과정은 Fig. 5와 같다.

Table 9. Analytical method for each component of TSP employed by this study

Species	Analytical method	Model
Metals :		
Al, Fe, Mn, Ni Cu, Pb, Cd	Atomic Absorption (AAS)	GBC(Model:908PBT)
Water soluble species :		
NH ₄ ⁺	Indophenol Blue Method	UV(Model:8452A)
Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Atomic Absorption(AAS)	GBC(Model:908PBT)
SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , F ⁻	Ion Chromatography Method(I.C)	DIONEX (Model:DX-500)

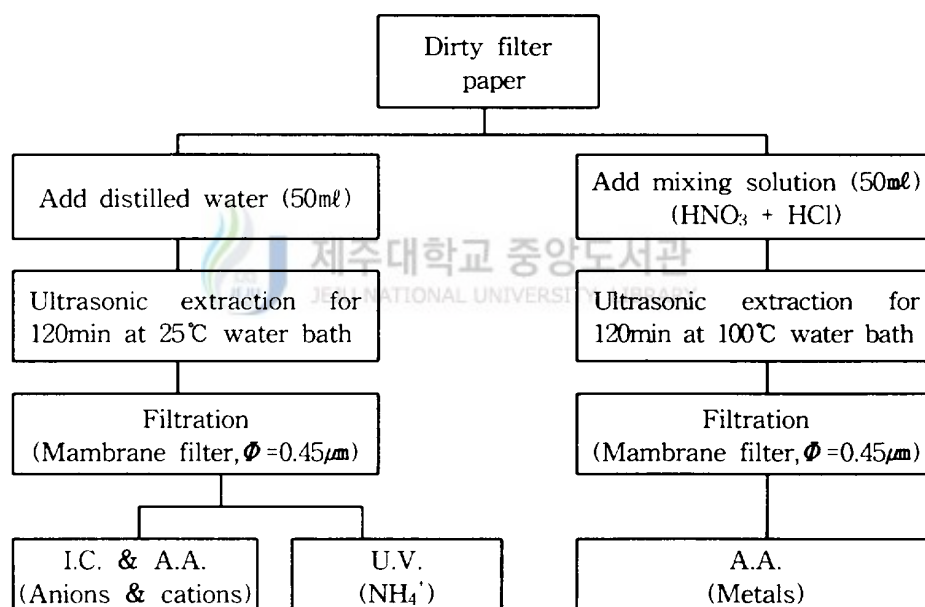


Fig. 5. Procedure of sample treatment for analysis.

IV. 결과 및 고찰

1. 부유분진의 변동 특성

제주시 지역의 대기중 부유분진의 계절별 변동 특성을 파악하고자 1994년 11월부터 1995년 10월까지 제주시 대기질 자동측정망(S3)에서 측정된 부유분진 (PM-10) 자료를 타 연안지역에서 측정된 자료와 비교하여 Table 10에 나타냈다.

제주시 지역에서의 계절별 부유분진 농도 변화를 표에서 보면, 봄철에 부유분진의 농도가 비교적 높고 여름철에 낮아지는 경향임을 알 수 있다. 우리

Table 10. Seasonal variation of suspended particulate matter at various cities($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Site Season	This study**	Cheju (1)*	Pusan (2)**	Changwon (3)**	Taeon (4)**	Nagasaki (5)*
Spring	71.3	50.3	123.0	68.0	75.0	40.0
Summer	33.3	34.3	96.7	42.0	36.0	32.0
Autumn	46.8	43.7	102.0	65.3	40.5	34.3
Winter	28.4	33.9	102.0	64.3	57.0	34.0
Average	44.9	40.6	105.9	59.9	52.1	35.1

(1) : Cheju City (Monitoring Data), 1994. 11. ~ 1995. 10.

(2),(3) : 환경부, 1994 (TSP monitoring data)

(4) : 국립환경연구원, 1992

(5) : 日本長崎縣保健環境部, 1992

* : PM-10 data

** : TSP data

나라의 다른 연안지역 및 일본의 연안도시에서도 비슷한 변동 특성을 보임을 알 수 있다. 여름철에 전반적으로 부유분진의 농도가 감소하는 것은 여름철에 강수가 타 계절에 비해 잦은 관계로 강수에 의한 세정효과가 크기 때문이다. 그리고 봄철에 부유분진 농도가 증가하는 추세는 제주지역을 포함한 한반도 및 일본 등 동북 아시아 지역에서 봄철에 빈번하게 출현하는 황사와 같은 자연적인 요인때문으로 생각된다(Tanaka 등 1983 ; Masataka 등 1991 ; 환경부, 1995).

2. 황사 사례분석

1995년 봄철에 기상청에 의해 3회의 황사를 예보하였으나, 제주지역에서는 실제적으로 3월과 4월에 각각 1회씩 황사의 관측이 이루어진 것으로 기상대에 나타났다(제주기상대, 1995). 제 2장에서도 이미 살펴본 바와 같이, 황사의 지상관측은 대개 목측에 의존하고 있기 때문에 일몰 후에 출현하는 황사를 관측하기 어려울 뿐 아니라 관측시에 관측자의 주관적 판단이 내재될 수 있을 뿐만 아니라 황사의 정도를 정량적으로 관측할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 황사가 출현하면 대기중 부유분진 농도가 평상시에 비해 증가하는 특징을 뚜렷하게 보이므로 제주시 대기질 측정망의 부유분진(PM-10기준) 연속 측정자료와 기상대의 지상관측 자료(기상일기도)를 이용하여 황사의 발생상황을 구체적으로 파악하고자 했다.

(가) 1995년 3월 황사 분석

Fig. 6에는 환경부에서 운용하고 있는 제주시 대기질 측정망에서 1995년 3월에 시간별로 측정된 부유분진의 농도 변동 상황을 나타냈다. Fig. 6에서 보면 3월 11일 23시부터 부유분진 농도가 급격히 증가되어 12일 04시에는

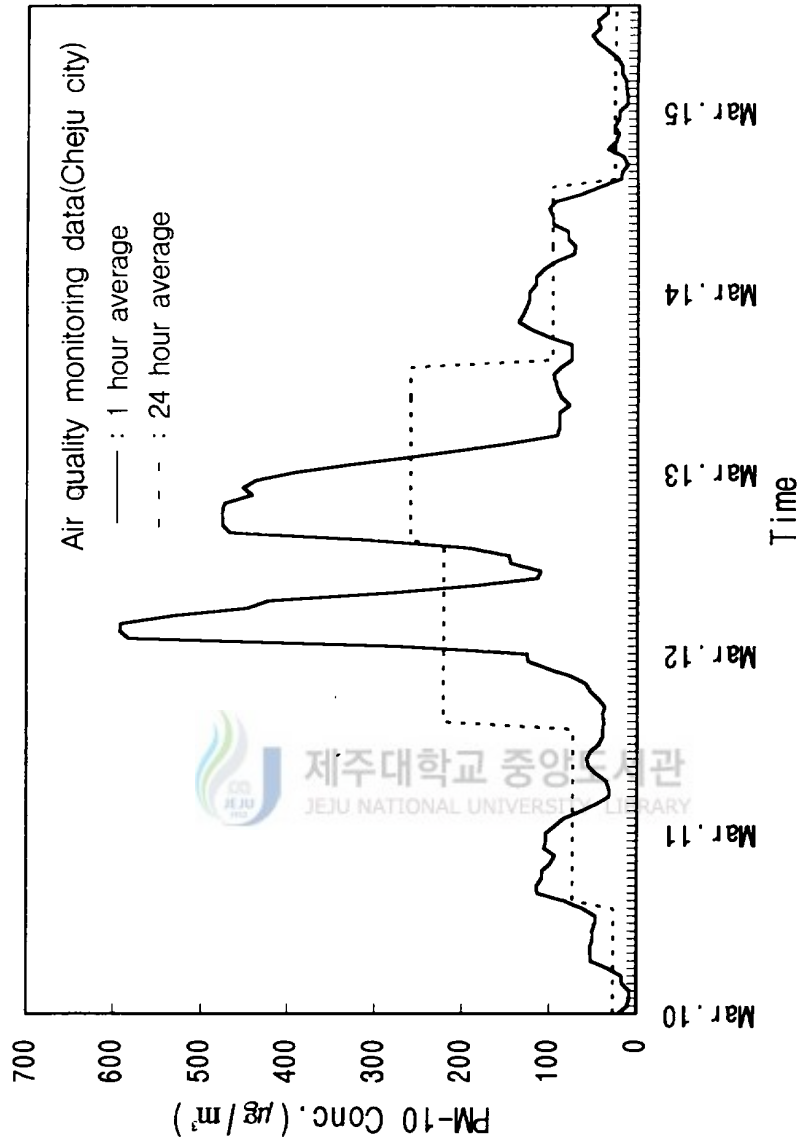


Fig. 6. Daily variation of PM-10 concentration at Cheju city (Mar. 10 ~ 15, 1995).

592.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 크게 증가되었다가 일시적으로 감소된 후 다시 12일 15시경부터 급격히 상승하여 23시경에는 452 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하였고 13일 06시 이후부터 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 떨어지고 있음을 볼 수 있다. 이 때에 제주 기상대의 지상관측 자료(일기상 통계표)를 분석해 보면, 3월 12일 16시 20분부터 3월 13일 06시 30분까지 황사가 기록되고 있고, 이 시기의 시정은 평균 8km 정도로서 대기질이 크게 악화된 것으로 나타났다. 이런 두 관측 결과를 볼 때 3월 11일 야간에 출현한 황사는 목측으로 관측되지 않았던 것으로 평가된다. 따라서 3월 황사의 지속시간은 실질적으로 32시간 정도인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 1995년 3월12일 오후에 제주지역에서 관찰된 황사와 저기압 중심부의 이동 경로를 지상 일기도로써 분석하여 추적한 것이다. 그림에서 보면 황사는 제주에 도달하기 2일전에 Taklamakan 사막으로부터 A-la shan 사막 및 황하상류의 건조지역을 거쳐서 중국 북부 지역을 지나면서 서서히 남하하여 중국 상해 지방을 통과한후 제주에 유입된 것으로 나타나고 있다. 이때에 저기압 중심부는 고비사막을 거쳐서 북만주 지방을 통과하여 남하하고 11일부터 한반도를 가로질러 대한 해협을 거쳐 남동진함을 알 수 있다. 이로써 볼 때 제2장에서 이미 언급한 바와 같이 저기압의 이동에 따라 저기압 후면에 위치한 황사대가 한반도로 이동해 왔음을 알 수 있다. 그렇지만 Fig. 8에서 제주에 황사가 발생된 하루전날의 지상의 저기압과 한랭전선의 배치상황에서 바람장을 보면, 유적선이 한반도까지는 일치하지 않으므로 Fig. 7에서와 같이 황사가 수송된 것으로 보기에 다소 무리가 있다고도 생각되지만 700 hPa면을 보면 40knots 전,후의 W~NW풍이 불고 이때의 황사는 중국의 상해 상공을 거쳐서 유입된 것임을 알 수 있다.

(나) 4월 황사 분석

Fig. 9는 Fig. 6의 경우와 마찬가지로 4월에 제주시에서 관측된 부유분진의 시간별 농도 변화에 대한 자료이다. Fig. 9에서 보면 4월 6일 16시경부터 부

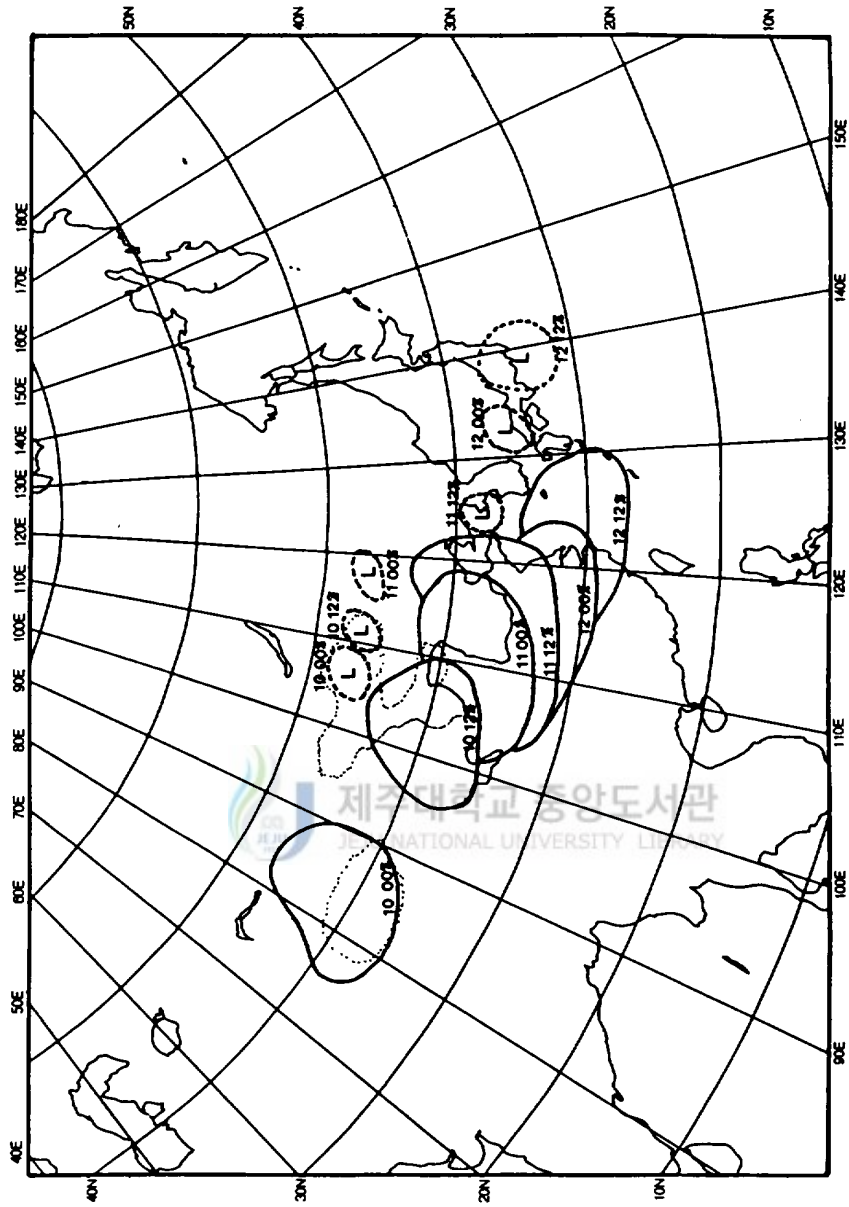


Fig. 7. Transportation region(solid circles) of the yellow sand occurred on 12 March 1995 at Cheju city and time evolution of low center(dot circles) at surface on 10~12 March 1995.

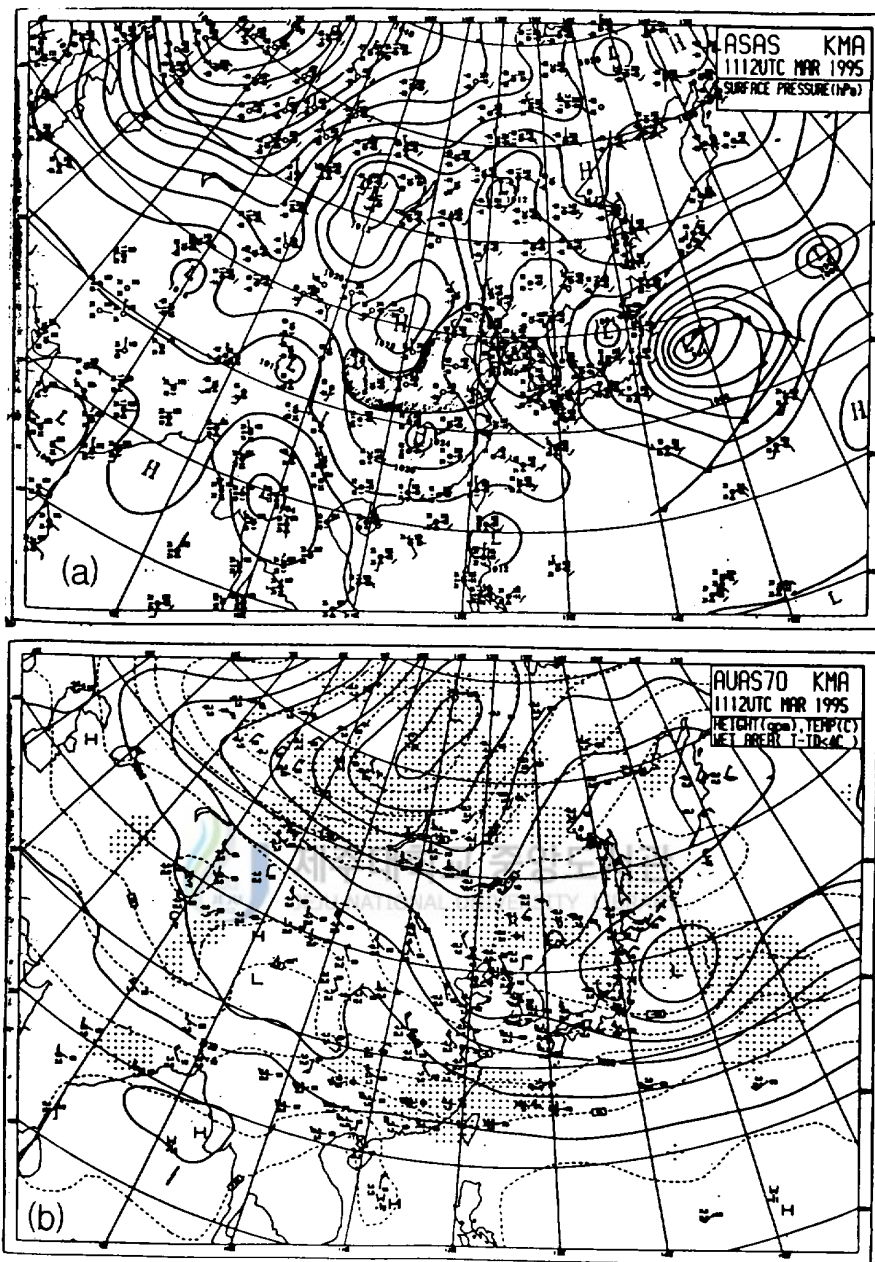


Fig. 8. The sea and upper level weather maps when yellow sand was transported on 1200GTM 11 March 1995 : (a) sea level, (b) 700hPa.

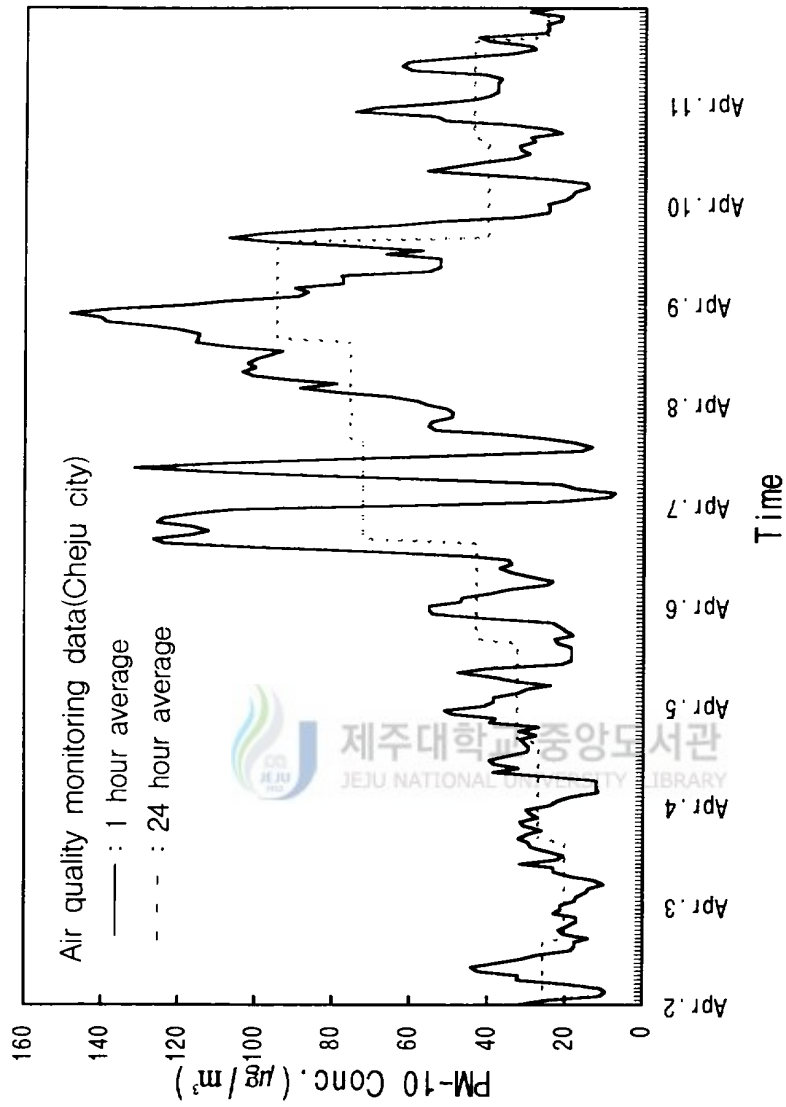


Fig. 9. Daily variation of PM-10 concentration at Cheju city (Apr. 2~11, 1995).

유분진의 농도가 증가하여 21시경에 $125.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가한 후, 18시간 동안은 평상시 수준으로 감소한 후에 다시 서서히 증가하여 8일 23시경에 $148.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로까지 증가하였으나 그 이후 강수로 인해 농도가 다시 떨어짐을 볼 수 있다. 제주기상대의 관측결과를 분석해 보면, 4월 7일 08시 10분부터 황사가 기록되어 10시 40분까지 지속되고, 2차로 8일 07시 10분부터 19시 40분까지 지속된 것으로 기록되고 있다. 4월 황사 관측시에 시정은 10~12km 정도였다. 이를 종합해 볼 때 제주시에서 4월에 발생한 황사는 3월에 발생한 황사에 비해 그 정도가 비교적 약했으나 4월 6일 오후부터 4월 9일 20시경까지 약 80시간 가까이 긴 시간 동안 지속이 되었던 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 10은 4월 7일에 제주시에 관측된 황사의 이동경로와 저기압 및 한랭전선의 이동상황을 지상일기도에 의해 분석한 것이다. 그림에서 보면 한랭전선의 남서단이 우리나라를 통과하면서 후면에 위치한 황사대를 한반도로 유입시키고 있다. 제주시에서 황사가 출현하기 하루 전날의 지상과 상층부 기류흐름을 Fig. 11에서 살펴보면, 기압패턴은 제2장(Fig. 2)과 비슷하고 700hPa면에서는 NW풍이 45knots로 불고 있음을 알 수 있다. 이로써 보면 4월 7일의 황사는 산둥반도 근처에 위치한 황사대가 이 기류를 타고 다음 날 제주지역으로 이동한 것으로 예상된다. 그리고 Fig. 11에서 상층의 기상도를 보면 6일 12Z에 북위 55N 근처에 위치하던 냉핵이 7일에는 대략 48N까지 남하했고 다음날에는 다시 43N까지 남하하고 있음도 확인할 수 있었다. 만주지역에 위치한 저기압이 약화되면서 중국 서쪽의 고기압 세력이 동쪽으로 팽창함에 따라 4월 8일에는 중국 중동부 지역과 한반도 전역에 걸친 넓은 지역에서 황사가 관측되고 있음도 확인할 수 있었다. 이런 상황으로 인해 4월 7일부터 관측된 황사는 비교적 장시간 동안 제주지역에 영향을 미친 것으로 생각된다.

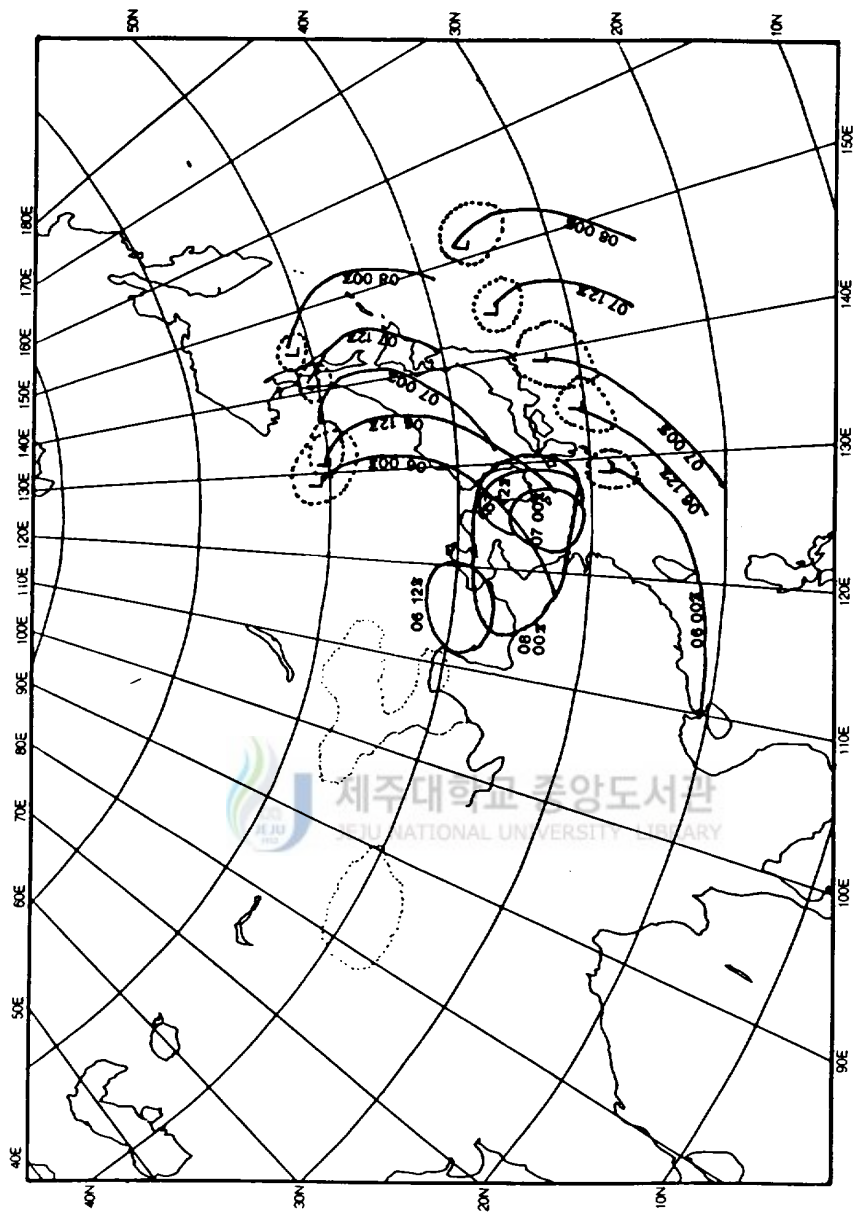


Fig. 10. Transportation region(solid circles) of the yellow sand occurred on 7~8 April 1995 at Cheju city and time evolution of low center(dot circles) and fronts(solid line) at surface on 6~8 April 1995.

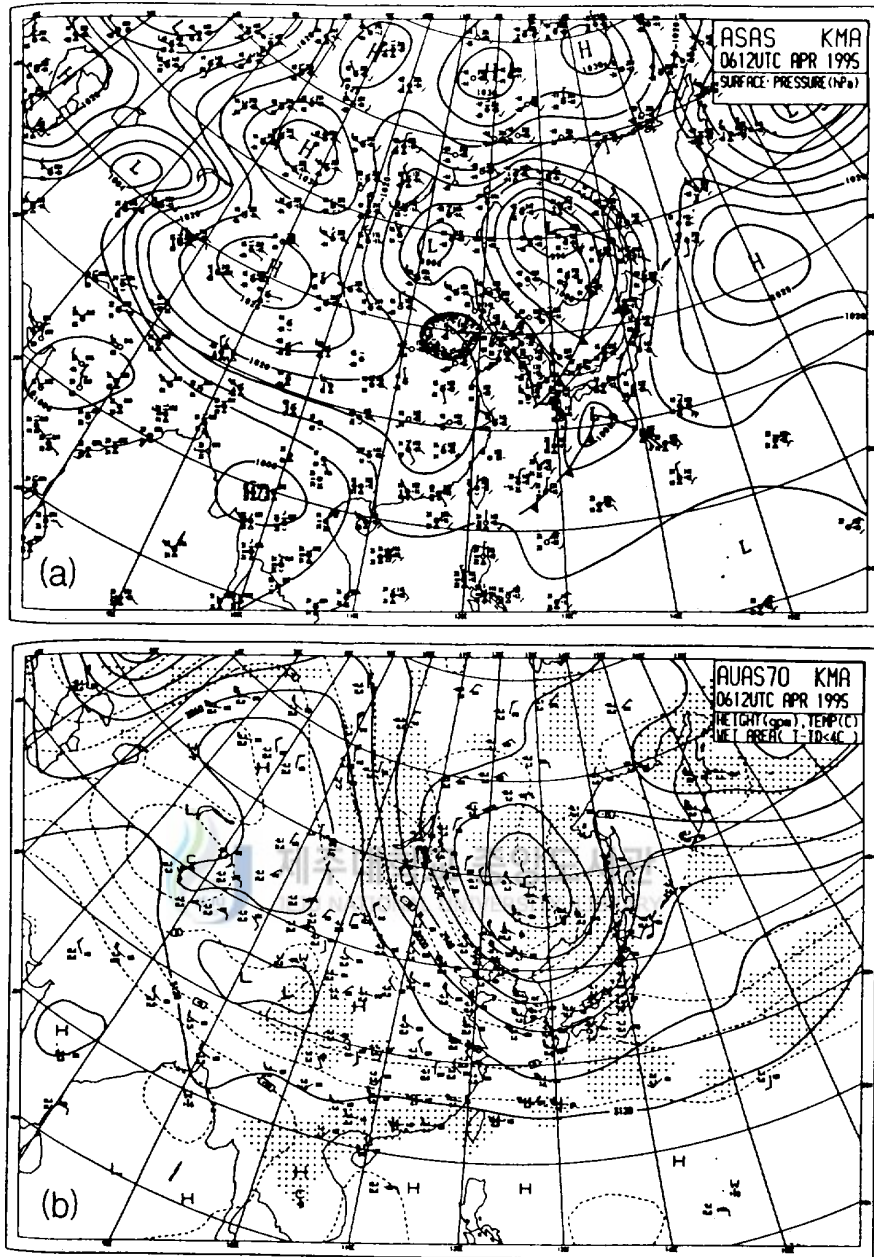


Fig. 11. The sea and upper level weather maps when yellow sand was transported on 1200GTM 7 April 1995 : (a) sea level (b) 700hPa.

3. 부유분진에 대한 황사의 영향

본 조사기간 동안에 제주에서 출현한 황사가 부유분진의 구성에 미치는 영향을 본 조사지점중 S1 지점에서의 측정·분석 결과를 토대로 검토해 보고자 한다.

가. 농도에 대한 영향

Fig. 12는 본 S1지점에서 측정된 총부유분진의 계절별 평균농도를 연 평균 농도와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 평상시 봄철에 총부유분진의 농도수준은 연 평균치의 약 1.5배 정도로 타 계절에 비해 다소 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 그리고 봄철 황사시에는 연 평균의 4배 이상 증가됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 Table 10의 PM-10 농도변화 양상과 비슷함을 알 수 있다. 이로써 보면 제주지역은 3월과 4월에 집중적으로 출현하는 황사현상으로 인해 봄철 부유분진의 농도가 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

황사시에 총 부유분진의 변동상황을 구체적으로 살펴보기 위해 황사를 전, 후한 일별 TSP농도 변화를 Fig. 13에 나타냈다. Fig. 13은 4월 2일 16시부터 4월 11일 15시까지 24시간 간격으로 연속 측정된 결과이다. Fig. 13에서 보면 황사가 시작되기 전 3일간의 부유분진 농도는 낮고 그 변동폭이 적은 반면에 황사가 출현하면 총부유분진의 농도가 급격히 상승함을 볼 수 있다. 그리고 황사가 물러가면서 부유분진의 농도는 다시 현저히 낮아져 다시 황사이전의 수준으로 떨어지는 경향을 보임을 알 수 있다. 그리고 황사시에 총부유분진 농도 증가는 황사 직전(6일)의 농도에 비해 3.1~4.5배, 연평균 농도 수준의 1.5~5.7배에 달하는 것임을 알 수 있다. 4월 9일 역시 황사의 영향권에 속했던 시기였으나 8일 자정부터 내리기 시작한 강수의 영향으로 총부유분진의 농도는 크게 떨어진 것으로 나타났다.

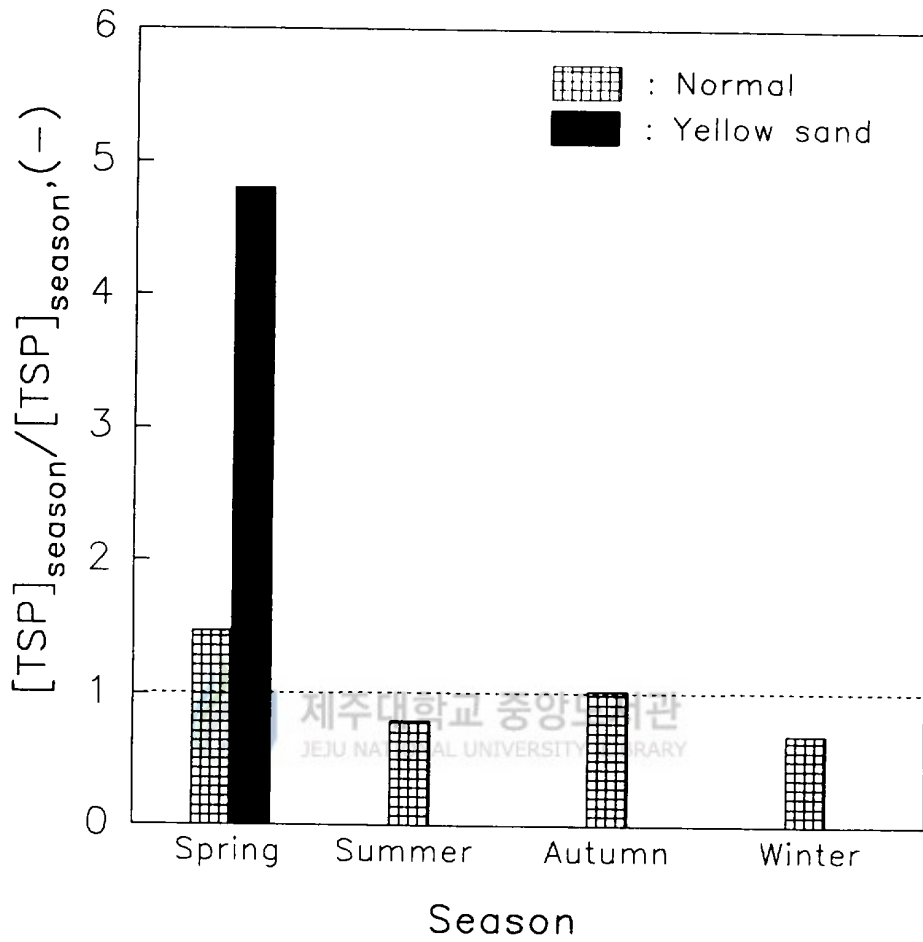


Fig. 12. Concentration ratio of TSP annual average for each season.

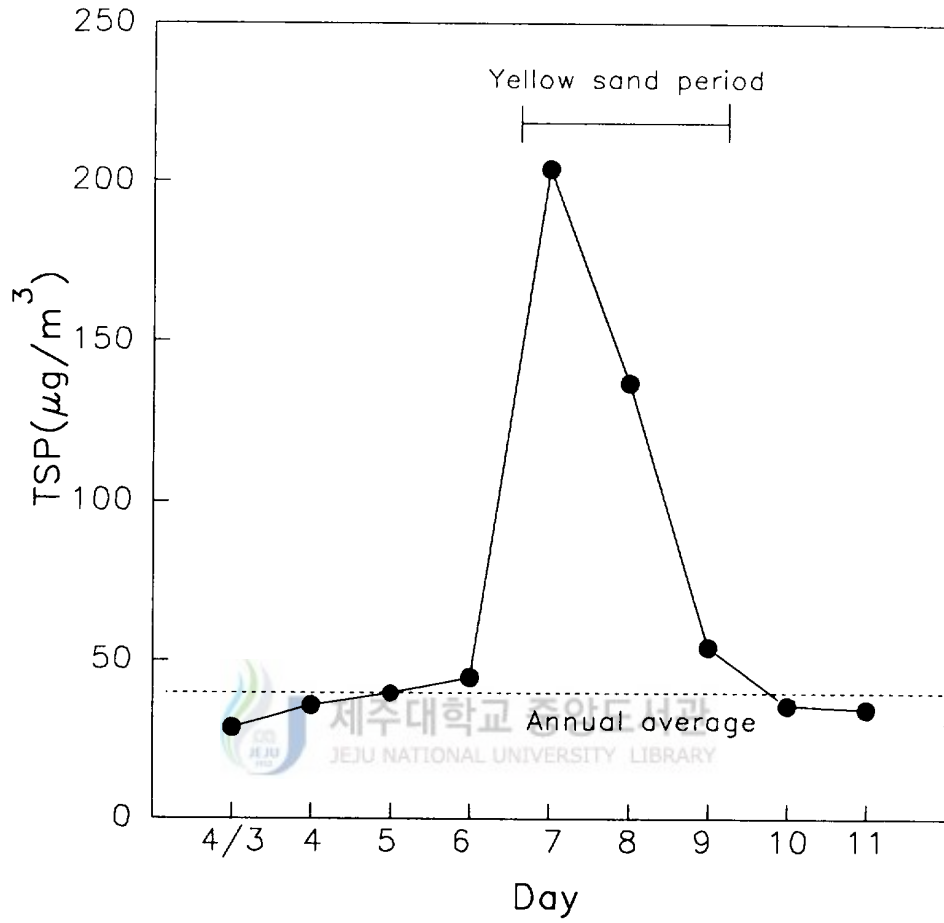


Fig. 13. Daily variation of the TSP concentration.

나. 조성에 대한 영향

(1) 수용성 이온성분

Table 11은 S1 지점에서 분석된 총부유분진 중 수용성 이온성분의 농도를 나타낸 것이다. 본 조사결과와 내륙 및 타 해안지역의 자료는 측정기간이 일치하지는 않으나 제주시 지역과 같이 해안지역이거나 청정한 내륙의 고산 지역에서 측정되었기 때문에 본 연구에서 분석한 자료와 비교하기 위해 Table 11에 함께 제시하였다.

Table 11. Comparison of annual mean concentration of water soluble ions in TSP at other coastal and inland sites ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Ions	Coastal reigon			Inland region	
	This study	Taeon	Kanghwa	Fukue	Mt. Sobaek
Na ⁺	2.27	1.49	2.20	3.54	0.11
Mg ²⁺	0.20	0.16	0.23	0.51	0.08
Ca ²⁺	0.84	0.38	0.66	2.77	0.70
K ⁺	0.50	0.14	0.26	0.34	0.31
NH ₄ ⁺	0.91	0.84	1.46	0.55	2.13
Cl	1.71	-	-	3.93	0.40
SO ₄ ²⁻	8.14	4.59	7.27	5.61	4.33
NO ₃	3.11	0.89	1.44	1.38	3.11
F	0.03	-	-	-	0.07

표에서 보면, 총부유분진중의 각 이온성분의 평균 농도값은 전반적으로 제주시 지역이 타 지역보다 높은 값을 보이고 있다. 양이온을 보면, 본 연구 대상지역인 제주시와 같이 해안지역에 위치한 곳에서는 Na⁺가 가장 큰 값을

보이고 다음으로 NH_4^+ 인 반면에 내륙지역인 소백산에서는 NH_4^+ 가 가장 높은 값을 보이고 있다. 내륙지역인 소백산에서의 분석자료가 해안지역과 차이가 나는 것은 내륙의 내륙지역과 해안지역이라는 입지적 여건의 차이 때문으로 생각된다. 즉, 소백산 측정지점 주변의 남쪽으로는 과수원을 포함한 농경지가 분포하고 있고 북쪽편으로는 소규모 광산과 비료공장 등이 분포하고 있어 NH_4^+ 가 가장 높게 나타난 반면에 해안지역에서는 해양의 영향을 직접적으로 받으므로 Na^+ 가 가장 높게 나타난 것이라고 생각된다. 그리고 해안지역 및 내륙지역에서 Ca^{2+} 의 농도도 비교적 큰 값을 보임을 알 수 있다. 이에 대해 이 등(1995)은 소백산 주변지역에는 석회암 지대가 발달해 있어 주변에 시멘트 공장군이 많이 산재하고 있다는 사실과 오염물질의 장거리 이동에서 그 기원을 추정하고 있으나, 제주지역을 포함한 해안지역은 소백산과는 주변 여건이 차이가 있기 때문에 Ca^{2+} 의 기원은 주로 후자에 기인하는 것으로 생각된다. 특히 본 조사의 분석결과에서도 Ca^{2+} 이 높은 값을 보인 사실을 볼 때 외부로부터의 유입에 기인하는 것으로 생각된다.

음이온에 대해서 보면, 본 조사지역인 제주시에서는 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 의 순으로 나타나고 있다. 태안과 강화지역도 양이온의 농도로서 미루어 볼 때 제주도 지역과 비슷한 경향일 것으로 추정된다. 내륙지역인 소백산 지역도 같은 경향성을 보이지만 일부 이온의 농도수준에 있어 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 제주시에서의 SO_4^{2-} 는 소백산의 약 2배정도로 높게 나타나고 있으며 이는 서울에서 조사한 한 등(1993)의 결과와 비교할 때 비교적 높은 수준임을 알 수 있다. 비해염 황산염(non sea salt sulfate)을 계산해 보면 $7.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이는 총 SO_4^{2-} 농도의 약 93%를 차지하고 있다. 제주도 지역의 대기중 SO_2 가스의 농도가 연평균 10ppb 이하로 대단히 낮다는 사실로 미루어 제주 자체의 인위적 오염원용 거의 없는 것으로 판단됨에도 불구하고 높게 나타나는 것은 김 등(1995) 등이 제주도 고산에서 부유분진의 입경별 분석결과에서도 지적했듯이 제주지역 이외의 지역에서 제주로 유입된 것으로

생각된다. 지리적 여건상 타 해안지역에 비해 인근지역에 위치한 대도시의 영향이 비교적 클 것으로 생각되는 강화지역에서는 SO_4^{2-} 가 높게 나타나는 사실로서도 알 수 있다.

그리고 해안지역인 제주시 지역과 내륙 고산지역인 소백산의 지리적 여건의 차이로 인해 Cl 농도에 있어서도 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 12는 각 이온의 질량농도를 당량농도로 환산하여 평상시와 황사시에 대한 이온 구성비를 나타낸 것이다. 평상시와 황사시를 비교해보면, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NH_4^+ 는 황사시에 각각 13%, 9.3%, 6.3%의 비교적 큰 폭으로 증가된 구성비를 보이고 있으며 Mg^{2+} , F 등도 증가된 구성비를 보임을 알 수 있다. 신과 김(1992)도 황사시에 이러한 성분들의 증가를 보고한 바 있다. 그 외 다른 이온 성분들은 감소된 구성비를 보임을 알 수 있다. Ca^{2+} 의 증가는 황사시의 일반적인 현상으로서 Ca^{2+} 가 토양기원 원소임을 입증하는 것이다. 특히 화석연료의 연소등이 그 기원인 것으로 알려진 F와 SO_4^{2-} 의 비율이 증가하는 것은 황사기류가 중국의 공업지역을 통과하므로서 중국에서 배출된 오염물질의 운반체로서의 역할을 수행할 우려가 있음을 보이고 있다.

Table 12. Contribution ratio of ion composition in TSP(%)

Cases	Ions								
	F	Cl	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Normal	0.4	20.7	19.9	59.0	54.8	18.0	6.6	7.2	13.4
Yellow sand	0.7	14.2	16.9	68.3	35.9	24.3	5.1	8.3	26.4

해안지역에서 부유분진중에서 Na^+ , Mg^{2+} 및 Cl 과 같은 해염기원의 성분들의 증감은 금속성분이나 다른 인위기원 성분들과는 달리 해안으로부터의

거리나 그때의 풍향과 풍속 등에 크게 영향을 받을 것으로 생각된다. 여기서는 해안선으로부터의 거리에 따른 해염기원 성분들의 변동을 알아보기 위하여 북서풍(지상풍)이 평균 8.4m/s로 강하게 불었던 3월 황사시에 해안 가까이에 위치한 S2지점에서 조사한 자료와 비교하여 Table 13에 나타냈다. 표에서 해안선으로부터 대략 7km 떨어진 S1지점과 해안선으로부터 1km 정도 떨어진 S2지점을 비교해 보면, 대표적인 해염기원 성분인 Na⁺, Cl⁻ 그리고 Mg²⁺은 타 성분들에 비해 해안에서 비교적 먼 거리에 위치한 S1지점에서의 농도수준이 비교지점에서의 70~80% 정도로 낮아짐을 알 수 있다.

Table 13. Variation of ion concentration in TSP with distance from coastline during yellow sand period(11~13 March 1995)

Species	Site S1 (7 km)	Site S2 (1 km)
Na ⁺	4.01	5.00
Mg ²⁺	0.48	0.64
K ⁺	0.59	0.63
Ca ²⁺	1.81	1.86
NH ₄ ⁺	0.33	0.45
Cl ⁻	3.98	5.66
SO ₄ ²⁻	14.04	14.42
NO ₃ ⁻	3.57	3.32
F ⁻	0.05	0.08

() : Distance from coastline

Table 14. Comparioson of E.F value in suspended particulate matter at various locations

Ions	Coastal					Inland region
	This study	Taeon	Fukue	Oki Is.	Thushima	Mt. Soback
SO ₄ ²⁻	12.26 (17.66)	12.14 (12.18)	8.76 (5.23)	3.35	6.96	156.32
Ca ²⁺	4.85 (16.76)	6.64 (14.59)	4.61 (27.09)	8.18	5.58	166.35
Mg ²⁺	0.55 (1.03)	0.90 (1.45)	1.55 (1.04)	0.89	0.98	6.07
K ⁺	5.52 (6.55)	2.54 (5.71)	3.34 (2.28)	2.61	4.39	76.07
Cl	0.45 (0.38)	-	0.42 (0.70)	0.36	0.37	2.03

() : Yellow sand periods

제주지역의 대기 분진중 수용성 이온성분들의 E.F값(해수성분 기준)을 타 해안지역 및 내륙지역(Mt. Soback)과 비교하여 Table 14에 나타냈다. 해안지역에 위치한 지점들에서의 E.F값은 대부분 비슷한 수준이나 내륙지역과는 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 여기서 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 Cl의 E.F값을 보면 대부분이 지각 또는 해양에 기인한 원소임을 알 수 있다. 여기서 지각 및 해양의 구성성분인 Ca²⁺의 E.F값이 클수록 해양성 보다는 육지에서 발생된 에어로졸의 영향을 받는 것으로 생각할 수 있는데(이 등 1995), 주변에 석회암 지대가 분포하고 있는 소백산의 자료에서도 확인할 수 있다. 그리고 Ca²⁺의 E.F값이 평상시에 비해 황사시에 크게 증가하는 것으로 볼 때 황사시 부유분진 중에는 토양입자의 함량이 많음을 알 수 있다.

인위적으로 화석 연료를 태우므로서 발생될 가능성이 가장 큰 SO₄²⁻는 일

본 섬지역의 3~9보다 제주지역을 포함한 한반도 전역에서 높음을 알 수 있다. 특히 황사시에 일본지역에서는 E:F값이 감소하는 반면 제주를 포함한 우리나라 전역에서는 증가함을 보임을 알 수 있다. 이런 결과를 보이는 것은 중국 대륙의 동부 연안지방을 중심으로 다량 배출된 가스상 황산화물이 대기 중에서 2차 오염물질인 황산염으로 바뀌면서 수송 도중에 침착(deposition)되어 감소되는 것으로도 예상할 수 있다. 그렇지만 이를 밝히기 위해서는 동일한 황사기간에의 자료가 요구되므로 앞으로의 동북아 3개국의 대기오염물질 장거리 수송에 관한 공동 연구로써 해결해야 할 것이라고 본다.

Fig. 14는 각 시료에 대한 총 음이온과 총 양이온의 이온수지를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 음이온과 양이온간에는 양호한 선형관계를 보임을 알 수 있다. 음이온과 양이온의 평균 당량농도비(Anion/Cation)는 총 시료에 대해서 1.25로 음이온의 함이 양이온의 함보다 다소 많은 음이온 과잉의 상태를 보이고 있다. 황사시와 평상시의 당량농도비를 비교해 볼때 평상시(평균 1.35)에 비해서 황사시(평균 1.11)에 양이온의 함이 다소간 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이 등(1995), 일본 환경청(1989) 그리고 Sakamoto 등(1991)의 조사결과에 의하면 평상시에는 음이온 과잉을 보이지만 황사시에는 양이온 과잉으로 나타나고 있다. 이들에 의하면 평상시에 음이온 과잉을 보이는 것은 탄산염과 같은 다른 음이온이 존재하고 있거나 H^+ 이온 성분등을 고려하지 않으므로서 발생한 오차로 추정하고 있으며, 황사시에 양이온 과잉을 보이는 것은 CO_3-C 와 Ca^{2+} 는 평상시보다 황사시에 높은 상관성을 보인다는 조사결과를 근거로 하여 황토중에 다량의 탄산염 존재 가능성을 원인으로 추정하고 있다. 이러한 경향을 구체적으로 살펴보기 위해 본 조사기간중에 4월에 발생한 황사를 전후하여 제주대학교에서 연속조사 결과를 토대로 총 음이온과 총 양이온의 이온 당량 농도비의 변화추세를 Fig. 15에 나타냈다. 그림에서 보면, 황사가 유입되기 전날에는 음이온 과잉상태를 보이지만 황사가 출현하면서 양이온 과잉으로 반전되고 있음을 알 수 있다. 그리고 황사 영향

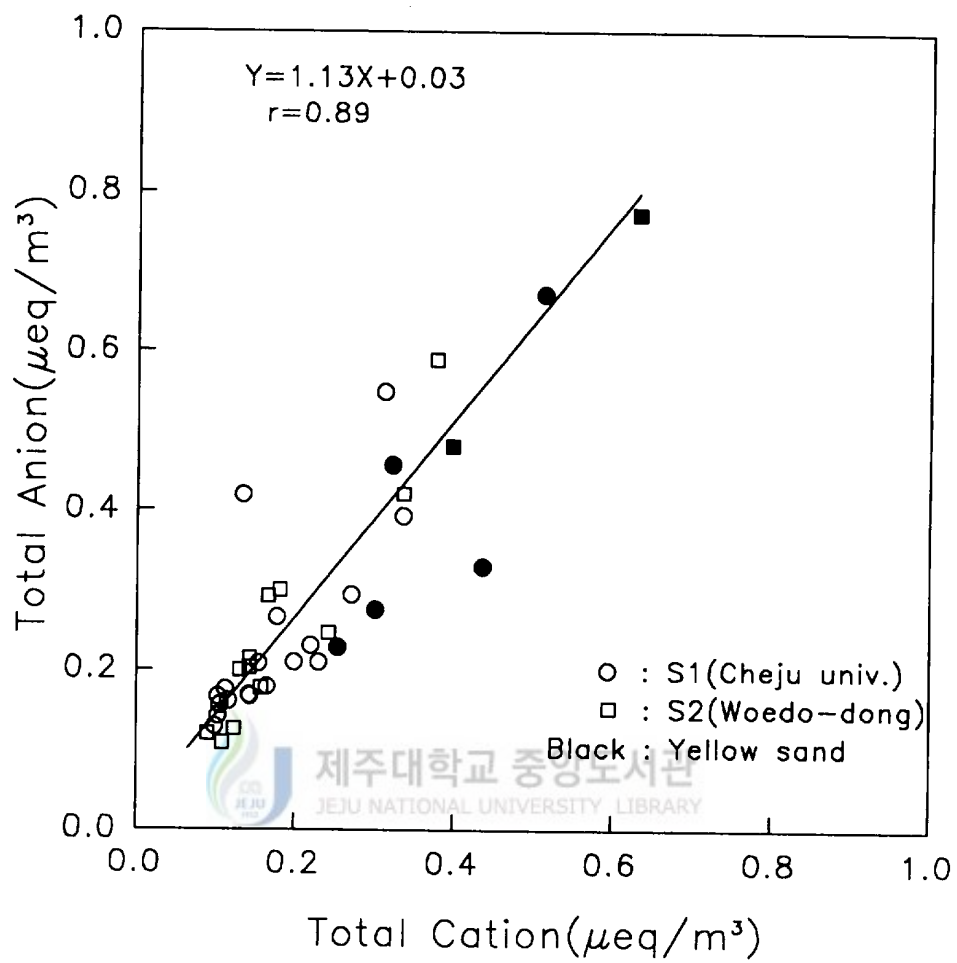


Fig. 14. Relationship between total anion and total cation in TSP sampled by this study.

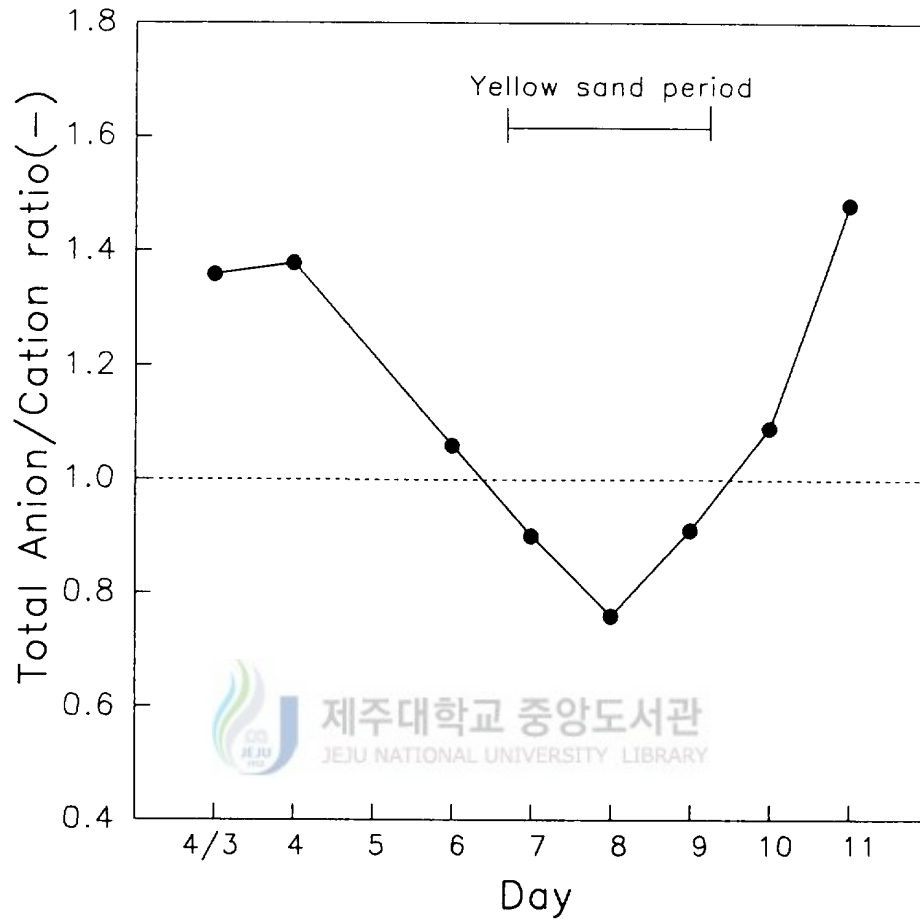


Fig. 15. Daily variation of ratio of total anion to total cation in TSP.

권에서 벗어나면서 다시 황사유입전과 같이 음이온 과잉의 상태로 되돌아 가는 경향을 보이고 있다. 그렇지만 3월에 출현한 황사시 채취된 부유분진에서는 음이온이 과잉으로 나타나므로서 4월의 황사시 채취된 부유분진의 분석결과와는 상반된 결과를 보였다. 이에 대한 장기적이고 면밀한 검토가 필요하다고 생각된다.

(2) 금속성분

Table 15는 대기중 금속농도 수준을 다른 지역과 비교하기 위하여 오염원이 없는 만리포 해안과 내륙지역인 소백산 그리고 일본의 해안지역에서 채취된 대기 분진중의 금속농도를 비교군으로 선정하여 나타낸 것이다. 비록 동일한 시기에 얻어진 자료가 아니므로 직접적인 비교는 힘들지만 전체적인 경향성은 검토할 수 있는 것으로 생각된다.

먼저 토양기원의 지표성분으로 알려져 있는 Al, Fe 및 Mn의 농도수준은 지역간에 비슷한 수준으로 나타나고 있으나 Cu, Pb은 지역에 따라 농도차이가 큰 것을 알 수 있다.

각 성분들의 농축계수(지각성분 기준)를 살펴보면, Al, Fe, Mn 등은 E.F값이 1에 가까운 수치를 보임으로써 토양기원원소임을 보이고 있으며 Cu, Pb, Cd은 E.F값이 토양기원원소들에 비해 크므로써 인위기원원소임을 알 수 있다. 또한 일본지역보다는 제주를 포함한 우리나라 전역에서 대체로 높게 나타남을 알 수 있다.

각 금속성분들의 농도를 보면 평상시에 비해 황사시가 크게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그렇지만 E.F값을 보면 평상시보다 황사시에 낮아짐을 알 수 있다. 이는 황사시에는 부유분진중에 토양입자의 기여가 평상시에 비해 상대적으로 크기 때문이다.

Fig. 16은 S1지점과 S2지점에서 채취된 총 부유분진중 토양성분의 기여율을 Al의 농도와 총 부유분진의 농도로서 구하여 토양성분의 기여율에 따른

Table 15. Comparison of metal concentration and enrichment factor in TSP at other locations

Speices	Geometric mean concentration					Enrichment factor value(-)				
	Coastal			Inland		Coastal			Inland	
	This study	Mallipo	Fukue	Mt. Soback		This study	Mallipo	Fukue	Mt. Soback	
Al ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.36 (1.94)	1.43	0.44 (28.5)	0.64 (3.30)		1.0	1.0	1.0	1.0	
Fe ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.23 (1.35)	0.92	0.23 (15.1)	0.37 (1.77)		1.0	1.11	0.85 (0.86)	0.94 (0.87)	
Mn (ng/m^3)	12.0 (53.6)	22.60	8.9 (382)	14.1 (60.86)		2.9 (2.4)	1.60	1.70 (1.1)	1.33 (1.58)	
Ni (ng/m^3)	1.5 (2.2)	2.50	-	1.98 (3.18)		4.5 (1.2)	2.00	- (0.77)	2.48 (1.04)	
Cu (ng/m^3)	40.0 (58.5)	4.68	73.0 (88.6)	5.10 (5.95)		164.2 (44.6)	4.84	2.40 (4.4)	8.96 (2.67)	
Pb (ng/m^3)	31.0 (46.5)	78.0	13.0 (16.6)	40.90 (52.80)		538.5 (149.9)	358	180 (3.6)	675 (100.06)	
Cd (ng/m^3)	0.6 (0.8)	0.55	-	0.64 (0.73)		677.5 (167.6)	158	-	827 (89.9)	

() : Yellow sand

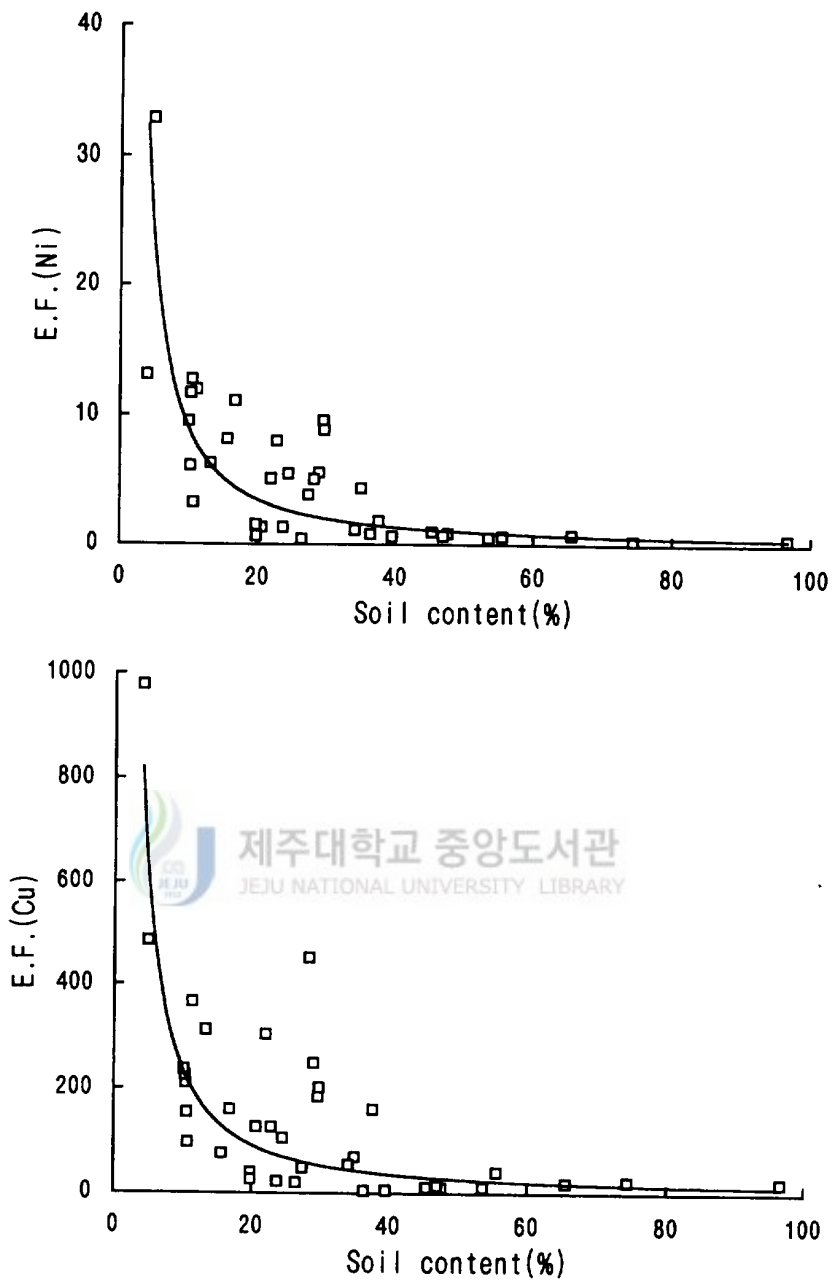


Fig. 16(a). Relationship between soil content and enrichment factor(E.F).

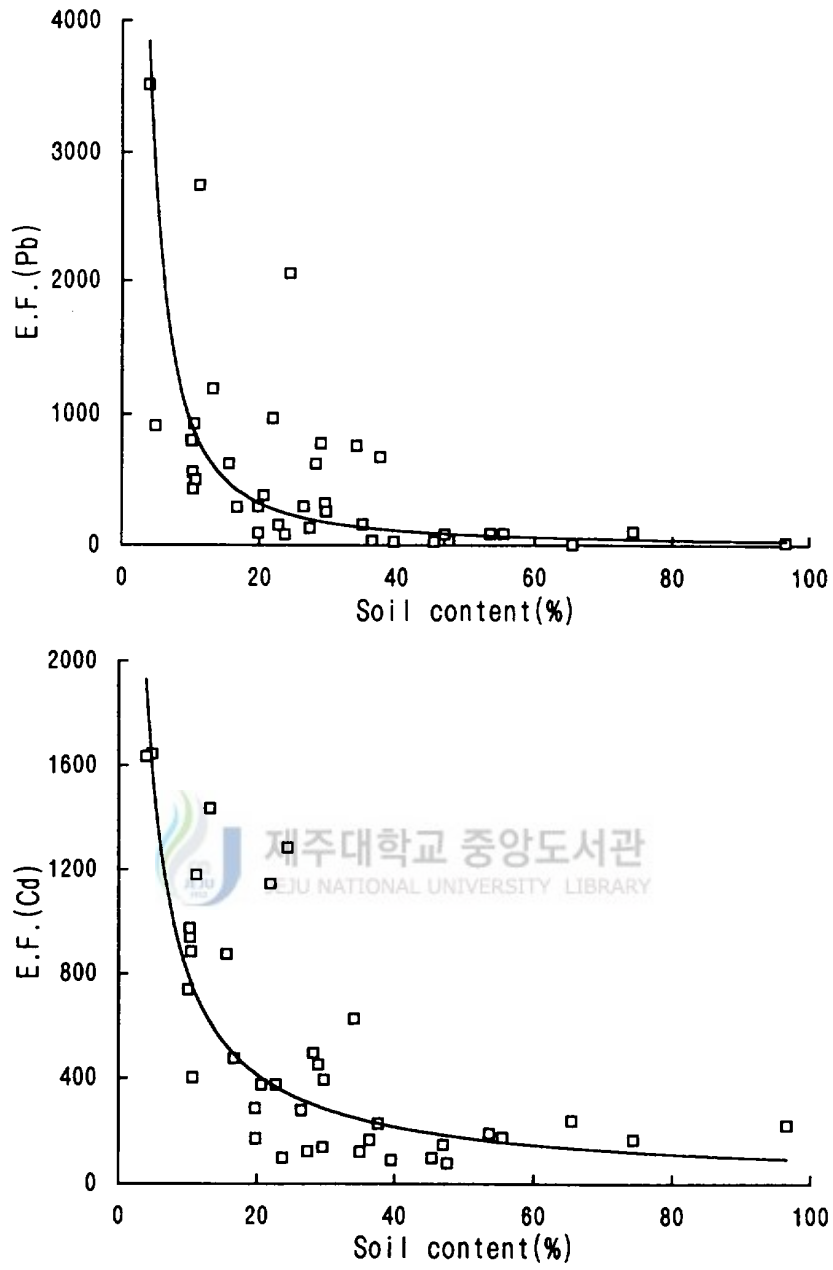


Fig. 16(b). Relationship between soil content and enrichment factor(E.F).

인위기원성분으로 알려진 금속들의 E.F값과의 관계를 나타냈다. 그림에서 보면 토양성분의 기여율은 4~97%까지의 넓은 범위의 값을 보이고 있다. 그리고 토양입자의 기여율이 증가함에 따라 대기중에 농축된 원소들(Cu, Pb, Cd)의 농축계수는 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 이는 대기중 토양입자의 함량이 증가하므로써 이들에 의해 대기중 금속들이 희석되는 효과를 보임을 알 수 있다.

V. 결 론

인위적 오염원이 거의 없는 청정지역으로 알려진 제주시 외곽지역에 위치한 두 지점에서 1994년 10월부터 1995년 10월까지 1년간 대기중 부유분진을 채취, 분석한 자료를 타 지역 자료와 비교함과 동시에 황사가 제주지역 부유분진의 구성에 미치는 영향을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일기도 분석을 통해 제주도에 95년 3월에 발생한 황사는 중국의 상해지방을 거쳐 유입되었고, 4월 황사는 중국 산둥반도를 거쳐 제주도에 유입된 것으로 파악되었다.
2. 제주지역에서 황사시에 총부유분진 농도는 연평균 농도의 1.5~5배 수준으로 증가함을 알 수 있었다.
3. 제주지역의 총부유분진중 각 이온성분의 농도수준은 전반적으로 타 지역보다 높은 수준이었다. 특히 부유분진중 sulfate의 연평균 농도는 $8.14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수준으로써 타 해안 및 내륙지역에 비해 높게 나타났다.
4. 평상시에 비해 황사시에 부유분진중 이온 구성비가 증가하는 성분은 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Mg^{2+} , F 이었으며, 이들 성분중 SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} 의 농축계수값은 평상시에 비해 황사시에 크게 증가하였다. 특히 SO_4^{2-} 의 경우 일본 지역에서는 감소하는데 반해 제주를 포함한 한반도 전역에서는 증가하는 것으로 나타났다.
5. 제주지역 대기의 금속성분중에서 토양기원원소인 Al, Fe, Mn은 타 해안지역이나 내륙지역과 비슷한 농도 수준을 보였으나 인위기원원소인 Cu, Pb, Cd은 지역간에 서로 다른 농도수준을 보였다. 그리고 이들 금속 성분들의 농도는 평상시에 비해 황사시에 뚜렷이 증가하였으나 농축계수값은 평상

시보다 감소하는 경향을 보였다.

6. 제주지역 부유분진중 토양성분의 함량은 4~97%로 넓은 범위의 값을 보였으며 부유분진중 토양성분의 함량이 증가함에 따라 인위기원원소인 Cu, Pb, Cd의 농축계수 값은 급격히 낮아짐을 알 수 있었다.



VI. 참 고 문 헌

- Carlson, T. N. and S. G. Benjamin, 1980, Radiative Heating Rate for Sahara Dust, *Atmos. Sci.*, 37, pp.193~213.
- 조희구, 1990, 황사현상, 환경보전학회지, 209호, pp.4~6.
- 최만식, 조성록, 이동수, 1989, 서해안 대기분진의 화학조성 및 기원에 관한 연구(I), 한국대기보전학회지, 5(2), pp.72~83.
- 최만식, 이선기, 최재천, 이민영, 1995, 소백산 대기중 입자상 물질의 화학적 특성에 관한 연구(II), 한국대기보전학회지, 11(2), 191~198.
- Chung, Y. S., 1986, An pollution Detection by satellies : The Transport and Deposition of Air Pollutants over Ocean, *Atmos. Environ.*, 20, pp.617~630.
- 정용승, 김태군, 1991, 대기오염의 장거리 이동 사례연구 : 황사, TSP, Sulphate의 발원지 추적, 한국대기보전학회지, 7(3), pp.197-202.
- Chung, Y. S., 1992, On The Observations of Yellow Sand(Dust Storms)in Korea, *Atmos. Environ.*, 26A(15), pp.2743~2749.
- 정용승, 윤마병, 1994, 황사의 사례분석과 한반도 유입량, 한국대기보전학회지, 10(4), pp. 233-244.
- 大氣汚染研究協會, 1989, 黄砂エアロゾルに関する調査研究, 日本環境廳委託業務結果報告書:エアロゾル中の炭素成分等の分析に関する調査, pp.1~147.
- Danielsen E. F., 1961, Trajectories : Isobaric, Isentropic and actual, *J. Meteor.*, 18, pp.479~486.
- George G. and D. A. Gillette, 1993, Introduction: A Joint Soviet-American Experiment for the Study of Asian Desert Dust and its Impact on

- Local Meteorological Conditions and Climate, *Atmos. Environ.*, pp.2467~2470.
- 한진석, 한의정, 최덕일, 김신도, 1993, 에어로졸 이온성분간의 분포 특성, 93 추계 환경 종합 학술대회 요지집, III-10, 468~471.
- 환경부, 1994, 환경연감, pp.44~53.
- 환경부, 1995, 환경백서.
- 허철구, 강창희, 1994, 해안지역 강수와 부유분진의 화학적 조성 비교, 제주대학교 환경연구소, 환경연구논문집, 2(1), pp.59~75.
- 日本長崎縣保健環境部, 1992, 大氣環境調査結果, pp.39~79.
- Iwamoto S. and T. Shimohara, 1993, Relationship Between High Concentration of SPM Meteorological Conditions-Comparison Within Three Cities in Fukuoka Prefecture, *J. Japan Soc. Air Pollut.*, 28(6), pp. 330-340.
- 강동근, 김선태, 김정욱, 1993, 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), pp.329-339.
- 김우규, 전영신, 이원환, 김현미, 1995, 서울 부유분진 농도와 황사 특성에 관한 사례 연구, 한국대기보전학회지, 11(2), pp.199~209.
- 김용표, 심상규, 문길주, 백남준, 김성주, 허철구, 강창희, 1995, 제주도 고산지역 입자 특성 : 1994년 3월 11일 ~17일 측정 결과, 한국대기보전학회지, 11(3), pp.263~272.
- 국립환경연구원, 1989, 대기오염물질의 장거리이동과 산성비강하에 관한 연구 (I), 과학기술처, pp.107~168.
- 국립환경연구원, 1990, 대기오염물질의 장거리이동과 산성비강하에 관한 연구 (II), 과학기술처, pp. 111~253.
- 국립환경연구원, 1991, 대기오염물질의 장거리이동과 산성비 강하에 관한 연구(III), 과학기술처, pp.133~317.

- Laurent G., 1993, A Comparison of Characteristics of Aerosol from Dust Storms in Central Asia with Soil-Derived Dust from other Regions, *Atmos. Environ.*, 27A(16), pp.2539~2544.
- 이호근, 박경윤, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 1995, 제주도 고산에서 수용성 에어로졸의 화학적 성분 분석, 한국대기보전학회지, 11(3), pp.245~252.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 1988, 황사현상시 분진의 입도 분포와 화학적 조성에 관한 연구, 대기보전학회지, 4(2), 57~68.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 김상균, 1993, 황사현상시 대기 에어로졸중 무기물질의 동태, 한국대기보전학회지, 9(3), pp. 230-235.
- 이선기, 최재천, 이민영, 최만식, 1995, 소백산 대기중 입자상 물질의 화학적 특성에 관한 연구(I), 한국대기보전학회지, 11(2), 179~184.
- Merill J. T., R. Black and D. Boudra, 1986, Techniques of Lagrangian Trajectory Analysis in Isentropic Coordinates, *Mon. Wea. Rev.*, 114, pp.571~581.
- Mizuno T. and H. Kondo, 1990, Relation between Concentration of Suspended Particulates and Relative Humidity in Early Winter, *J. Japan Soc. Air pollut.*, pp.359~404.
- Murayama N., 1987, Production and Long-Range Transport of Kosa Aerosols, *天氣*, 34(3), pp.44~47.
- Nishikawa M., S. Kanamori, N. Kanamori and T. Mizoguchi, 1991, Environmental Significance of Aerosol(Yellow Sand Dust) Collected in Japan, *IUAPPA*, 2, pp.35~41.
- Noriko Y., H. Nishiura, T. Honjo, Y. Ishikawa and K. Suzuki, 1995, A Long-Term Study of Atmospheric Ammonia and Particulate Ammonium concentrations in Yokohama, *J. Atmos. Environ.*, 29(1),

pp.97-103.

- Sadasivan S., 1978, Trace Elements in Size Size Separated Aerosols over Sea, *Atmos. Environ.*, pp.1677~1683.
- Sasaki K., H. Kurita, K. Murano, M. Mizuochi, H. Ueda, 1986, Behaviors of Sulfate, Nitrate and Other Pollutants in Long-Range Transport of Air Pollutants, *Japan Soc. Air Pollut.*, 21(3), pp. 216-225.
- Seinfeld J. H., 1986, Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Willey and Sons, New York, U.S.A..
- Settsuko W. and K. Nobuhide, 1973, Chemical composition of maritime aerosols, *J. Geo. Res.*, 6, pp.131-139.
- 신은상, 김희강, 1992, 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국 대기보전학회지, 8(1), pp. 52-57.
- 손동헌, 정원태, 박종필, 김덕희, 정성윤, 도시 토사중 중금속 함량, 한국대기보전학회지, 8(4), pp. 221~228.
- Tanaka S., S. Tamura, Y. Hashimoto and T. Otoshi, 1983, Long Range Transportation of Soil Dust from Asian Continent to Japan and its Influence to the Atmosphere in Japan, by the Results of NASN(National Air Surbey Network) Data, *J. Japan Soc. Air Pollut.*, 18(3), 263~270.
- Terada K., 1991, Contribution of Air Borne Sea Salts to Chemical Composition of Pond Waters Located in Central Area of Noto Peninsula. Bullutention of the Japan Sea Reserch Institute, Kanazawa Univ, 23, pp.59~76.
- Tsunogai S., O. Saito, K. Yamada and S. Nakaya, 1972, Chemical Composition of Oceanic Aerosol, *J. Geo. Res.*, 77(27), pp.5283~5292.

- Tsunogai S., 1975, Sea Salt Particles Transported to the Land, *Tellus XXXII* 1, pp.51 ~58.
- Wada. S., and N. Kokubu, 1973, Chemical Composition of Maritime Aerosols, *Geo. J.* pp.131 ~139.
- 윤순창, 박경선, 1991, 등엔트로피 궤적에 의한 황사의 장거리 이동 경로 분석, *한국대기보전학회지*, 7(2), pp.89~95.
- 윤용황, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, *한국기상학회지* 26(2), pp. 111-120.
- Yutaka I., O. Akira, and K. Satoshi, 1981, Size Distribution and Mineral Composition of Yellow Sand in the Air over Japan and its Main Origins, *天氣*, 28(10), pp.57~60.



감 사 의 글

본 논문이 완성되기까지 저의 모자란 부분들을 세세하게 지도와 조언을 아끼지 않으신 이기호 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문 심사과정에서 미진한 부분들을 일일이 다듬어 주시고 학업에 진력할 수 있도록 격려를 아끼지 않으신 허 목 교수님, 허철구 교수님께 감사를 드리며, 오윤근 교수님, 감상규 교수님, 이용두 교수님께도 감사할 드립니다.

논문의 구성과 자료편집을 위해 밤늦게까지 도와준 박용이 선생에게 특히 감사를 드리며, 곁에서 조그마한 부분들까지 도와주고 걱정해준 대기오염실험실 후배들에게도 감사를 드립니다.

학업의 어려움을 느끼는 가운데 서로 도와주고 밀어주고 했던 제주도환경출장소 윤남호 계장님, 박관석, 강봉래, 송문호, 현익현, 임진숙 선생님께도 감사를 드립니다.

업무가 바쁜 와중에도 불구하고 저의 학업에 시간적 배려와 격려를 아끼지 않으신 제주도보건환경연구원의 고용구 원장님, 그리고 감병모 과장님, 김식유 과장님, 조인숙 선생님, 송상택 선생님을 비롯한 전직원 여러분들께 진심으로 감사할 드립니다.

기상자료의 해석등 많은 자료를 제공해주신 제주기상대의 한경훈 후배와 기상대 직원 여러분들께도 감사할 드립니다.

끝으로 매일 마음속으로 빌어주고 격려를 해준 사랑하는 상희와 형님, 누님, 형수님들께도 고마움을 드립니다. 마지막으로 매일 곁에서 안스러움과 걱정을 하면서도 학업에 충실할 수 있도록 밤늦게까지 건강을 염려해 주신 어머님께 이 자그마한 보람을 드립니다.