

碩士學位論文

CMB모델을 이용한 황사시 제주지역
PM10의 오염원 규명



濟州大學校 大學院

環境工學科

康 春 喜

110 519

2000年 12月

CMB모델을 이용한 황사시 제주지역 PM10의 오염원 규명

指導教授 許 喆 九

康 春 喜

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



康春喜의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 이 기 호

委 員 감 상 규

委 員 허 철 구



濟州大學校 大學院

2000年 12月

Source Apportionment of PM10 Using a CMB Model during Yellow Sand Periods in Cheju Area

Chun-Hee Kang
(Supervised by Professor Chul-Goo Huh)

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

2000. 12.

THIS THESIS HAS BEEN EXAMINED AND APPROVED

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary

I. 서론	1
II. 이론적 배경	4
1. 입자상물질의 특성	4
2. 황사의 특성	5
2-1. 황사의 발원지	5
2-2. 황사의 관측사례	8
2-3. 황사 수송시의 기압패턴	10
3. 수용모델의 개론	16
4. CMB 모델	18
4-1. CMB모델의 원리	18
4-2. CMB의 해법	19
4-3. CMB모델의 가정	20
4-4. CMB모델의 안정성 평가	22
III. 실험 및 분석방법	26
1. 시료의 채취	26
2. 시료의 전처리 및 분석방법	29
IV. 결과 및 고찰	31
1. PM10의 농도	31
2. PM10의 화학적 조성특성	34
2-1. 수용성 이온성분의 조성	34
2-2. 미량원소의 조성특성	41

3. CMB모델을 이용한 PM10의 오염원 할당	45
3-1. 모델 입력자료 선정	45
3-2. PM10의 오염원 할당 결과	49
V. 결론	59
VI. 참고문헌	61



List of Figures

Fig. 1. The surface level maps when yellow sand was transported on 26 March 2000 : a) 03UTC b) 09UTC c) 18UTC d) 21UTC.	12
Fig. 2. The surface and upper level maps when yellow sand was transported in 12UTC 26 March 2000 : a) surface b) 500hpa c) 700hpa d) 850hpa.	14
Fig. 3. The location of sampling sites.	27
Fig. 4. Preparation procedure for water soluble ions and elements.	30
Fig. 5. PM10 concentrations of Site M.	32
Fig. 6. PM10 concentrations of Site U.	32
Fig. 7. Composition of water soluble ions in PM10 at Site M.	35
Fig. 8. Composition of water soluble ions in PM10 at Site U.	36
Fig. 9. Average concentrations of elements at Site M.	43
Fig. 10. Average concentrations of elements at Site U.	43
Fig. 11. Average source contribution for PM10 during yellow sand period at Site M.	56
Fig. 12. Average source contribution for PM10 during normal period at Site M.	56
Fig. 13. Average source contribution for PM10 during yellow sand period at Site U.	57
Fig. 14. Average source contribution for PM10 during normal period at Site U.	58

List of Tables

Table 1. Number of yellow sand days in the source regions in spring for the period of 1980~1994	7
Table 2. Monthly mean number of yellow sand days for the period of 1980~1994	7
Table 3. Number of yellow sand days in South Korea for the period of 1967~1996	9
Table 4. Total number of yellow sand days at ten stations in South Korea during 30 years(1967~1996)	10
Table 5. Number of days with the pattern of pressure system when yellow sand was transported	11
Table 6. Stability evaluation of model results	24
Table 7. Sampling condition	28
Table 8. Analytical method used this study	30
Table 9. Variation of PM10 concentrations	32
Table 10. Content of water soluble ions for PM10 during yellow sand period in Cheju area	38
Table 11. Content of water soluble ions for PM10 during normal period in Cheju area	39
Table 12. Seawater enrichment factor calculated for PM10 during yellow sand period	41
Table 13. Average elements concentrations in PM10	42
Table 14. List of source types is to be applied in Cheju area	48
Table 15. Classified source by the important species	48
Table 16. CMB performance test results for fine particle at Site M	50
Table 17. CMB performance test results for coarse particle at Site M	51
Table 18. CMB performance test results for fine particle at Site U	52
Table 19. CMB performance test results for coarse particle at Site U	53

Summary

The purpose of this study is to measure the concentrations of the trace elements and the water-soluble ions contained in PM10 during yellow sand periods and to estimate the contributions of emission sources using CMB model in Cheju area.

PM10 particles were collected by cascade impactor at two sampling sites, named as Site M and Site U, for the 9 months from Dec. 1999 to Aug. 2000. Twenty two elements and 10 major ionic species were analyzed.

A yellow sand phenomenon was observed in Cheju area for the sampling periods of 12 days. The dominant wind direction was the north west to the west north west, and the wind speed was 3.1~8.7 m/s during these periods. The average PM10 concentration was 66.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Site M and 63.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Site U during yellow sand period, and 25.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Site M and 23.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Site U during normal periods. The average PM10 concentration during the yellow sand period increased over 2.6 times at Site M and 2.7 times at Site U higher than that during normal period.

It can be show that: The concentrations of species such as Cl⁻, NO₃⁻, K⁺, Ca²⁺, Na⁺ and Mg²⁺ in the fine particles and F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Na⁺ and Mg²⁺ in the coarse particles is increased during the yellow sand period. Especially, The Ca²⁺ concentration is remarkably increased over 5.5~7.7 times Site M, 4.3~7.9 times at Site U. In order to evaluate the effect of sea salt on the water soluble ionic species, the enrichment factor of each ionic species based on Na⁺ was calculated. The result showed that during the yellow sand period Ca²⁺ might be attributed only and during normal period Ca²⁺ might be attributed to both of sea salt and non-sea salt at the same time.

It was found that trace elements contained in PM10 were affected by soil-originated elements(Si, Al, Ca, Fe, K), marine-originated elements(Na, Mg), and anthropogenic-originated elements(S). Total concentration of trace

elements during yellow sand period was 2.2~4.6 times higher than those during normal period. Especially, Si, Al, Ca, Fe, K, Na, Mg and S showed relatively. In that case, the rate of increase in coarse particles was higher than that in fine particles.

The CMB model tests showed that fractional source contributions for coal briquette external combustion, heavy oil external combustion, gasoline vehicle and soil dust had negative value. These case are found when a source profile has collinear with another profile or when the source contribution is close to zero.

The fraction of source contributions during yellow sand period at Site M are Yellow sand of 40 %, Diesel vehicle of 31 % and Ammonium sulfate of 13 % in the fine particles, and Yellow sand of 57 %, Diesel vehicle of 27 % and Marine of 14 % in the coarse particles. On the other hand, the fraction of source contribution at Site U are Yellow sand of 37 %, Diesel vehicle of 37 % and Ammonium sulfate of 11 % in the fine particles, and Yellow sand(68 %), Diesel vehicle of 19 % and Marine of 14 % in the coarse particles.

I. 서론

매년 봄에 발생하는 황사현상 때에는 약 20 Mton의 토양입자가 동북아시아의 건조지역으로부터 중국, 한반도, 일본을 거쳐 심지어는 하와이섬까지 장거리 수송되고 있다. 국지적인 대기오염 문제는 각 국가에서 자체적인 대책 수립이 가능하며 실제로 선진국에서는 대기중 오염물질의 농도가 낮아지고 있는 실정이다. 따라서 최근의 대기오염 문제의 중요성은 국지 규모의 문제로부터 대륙간 또는 전 지구적인 규모로 확대되고 있다(이 등, 1995; 김 등, 1996).

대기중에 부유하고 있는 입자의 크기가 큰 경우에는 대기중에 체류하는 시간이 짧아 장거리 수송이 불가능하지만 20 μm 이하의 크기를 갖는 입자는 장거리 수송이 가능하다. 황사는 직경이 대략 0.2~20 μm 정도이며 대부분 0.4~12 μm 에 분포한다고 알려져 있다(Laurent, 1993; 정 등, 1994; 이 등, 1995; 이 와 허, 1995). 황사는 그 지역의 시정을 악화시키고 인간의 활동에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 이 중 미세한 입자는 태양광의 산란, 흡수 등에 의해 대기의 복사수지에 영향을 미치며, 구름 내에서는 응결핵의 역할을 하기도 한다. 토양에서 유래한 분진의 주성분은 Si, Ca, Al, Fe, K 등으로 지구화학적 순환에 매우 중요한 역할을 하며, 심해 퇴적물에서 발견되는 점토광물입자의 주원인이기도 하다(Duce 등, 1980; Prospero 와 Carlson, 1986). 따라서 토양입자의 장거리 수송에 의해 생성된 황사현상에 관한 연구는 우리 나라 대기중 에어로졸에 미치는 영향을 해명할 뿐만 아니라 중국에서 배출된 대기오염물질의 장거리 수송에 대한 지표로서 그 해석의 필요성이 대두되는 등 여러 측면에서 연구의 중요성이 인식되고 있다(이 와 허, 1995).

제주지역은 한반도, 중국대륙, 일본의 경계지역에 위치하고 있어 장거리 수송되는 황사의 관측 및 대기중 분진조성에 기여하는 영향을 평가하기에 적임지라 할 수 있다. 대기중 분진 농도에 영향을 미치는 각종 발생원을 정성적으로 파악하고 그 영향을 정량화 하기 위한 일반적인 접근방법으로는 오염발생원(source)을 중심으로 하는 분산모델(dispersion model)과 수용지점(receptor)를 중심으로 한 수용모델(receptor model)이 있다. 연구 초기에는 오염원배출자료(emission

inventory)와 기상변수들을 기초로 수용지점에 대한 오염물질의 농도를 예측하는 분산모델이 다양하게 이용되어 졌으나 근래에는 분진에 함유된 미량 성분에 대한 시료채취 장치 및 분석기법의 발달과 컴퓨터의 보급 확산 그리고 다양한 수리통계학적 모델의 개발 등으로 수용모델의 응용영역은 급속히 확대되어 최근에는 분산모델의 결과를 확인 및 검증하는 상호 보완적인 관계로 발전하였다.

수용모델은 수용지점에서 주어진 자료의 물리적, 화학적 정보를 통계모델에 적용하여 수용지점에 대한 오염원의 정량적인 기여도를 추정하는 방법으로 서로 다른 유형의 배출원이 대기 에어로졸에 대한 상대적인 기여도를 추정하는데 널리 이용되어진다(Gordon, 1988). 수용모델은 오염물질의 분석방법에 따라 크게 현미경적분석법(microscopic method)과 화학분석법(chemical method)으로 구분할 수 있다. 현미경법은 입자단위의 분석을 기본으로 하여 수많은 오염원을 쉽게 확인할 수는 있으나, 정량적인 분석에 어려움이 있다. 화학분석법은 응용되는 통계기법에 따라 여러 가지 분석법이 있으나 최근 가장 많이 이용되는 방법은 화학질량수지법(CMB; chemical mass balance analysis)과 다변량 분석법(multivariate analysis)이다(Henry 등, 1984). 화학질량수지법은 대기 분진의 화학적 조성 분석 결과의 합은 각각의 모든 오염원이 기여한 질량의 합과 같다는 가정 하에 최소자승법 등의 방법을 이용하여 각 오염원의 기여도를 산출하는 방법이다(Watson, 1984).

이러한 CMB모델의 적용은 1987년 7월 미국에서 총부유분진(TSP)의 기준을 폐지하고 PM10에 대한 기준으로 전환되면서 PM10에 대한 CMB의 적용이 매우 폭넓은 지역에서 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Cheng 등(1989)은 1973년 워싱턴시에서 이전 연구에서 보다 많은 39개 원소의 분석자료를 CMB모델에 적용하여 토양, 해양, 석탄, 오일, 쓰레기, 자동차 배출물질등 6개의 오염원에 대한 기여도를 산정하였다. Sheff 등(1990)은 기존의 TSP중심의 연구를 RP(Respirable Particle)와 병행하여 연구하기 시작하였으며, Kronborg 등(1987)은 1983년에 코펜하겐에서 5개의 자동측정망에 포집된 TSP를 이용하여 오염원의 기여도를 추정하였다.

국내의 연구동향을 살펴보면, 김 등(1990)은 충남에 있는 화력발전소에 인접한 마을을 대상으로 분진이 마을에 미치는 영향을 조사하기 위해 강하분진

을 포집하고 화학성분을 분석하여 CMB모델에 적용하였고, 서 등(1992)은 대전시 대화동 공업단지와 주거지역의 분진입자중 금속, 비금속, 음이온 성분을 각각 분석하여 기여도를 산출하였다. 정 등(1994)은 부산시 대기중 PM10과 TSP를 각각 분류 포집하여 중금속, 음이온, 탄소, 황 성분을 분석하여 기여도를 산정 하였으며, 류 등(1997)은 대전공업단지내 중금속 농도 분석을 실시하고 총 부유분진에 대한 기여도를 추정하였다.

국내의 경우 이와 같이 CMB모델을 이용하여 인위적 오염원이 밀집되어 있는 대도시지역과 공업단지지역을 대상으로 오염원의 영향을 추정한 연구사례는 있었으나 인위적 오염원이 적어 청정한 제주지역을 대상으로 하여 황사의 영향을 고려한 사례는 아직 없었다.

따라서, 본 연구에서는 황사시 제주지역 대기중 PM10 농도를 측정하고, 수용성 성분과 미량원소 성분을 분석하여 조성특성을 살펴본 후 이러한 분석자료를 CMB모델에 적용하여 황사시 제주지역 대기중 PM10에 대한 각 오염원의 정량적인 기여도를 규명하고자 하였다.



II. 이론적 배경

1. 입자상물질의 특성

일반적으로 대기중에서 발견되는 입자상물질은 매우 다양하며 입자의 입경, 화학적 조성, 액적과의 친화도, 빛의 산란 및 흡수 특성 등으로 인하여 인체에 유해한 영향과 각종 오염현상을 유발한다. 그러나, 입자상물질의 다양한 특성으로 인하여 아직까지 모든 입경범위에 대한 정보나 화학적 특성을 측정하기는 불가능하고 현재까지 알려진 입자의 특성으로는 대기중 입경분포, 호흡과 관련되는 입자의 크기, 배출원 배출물질중 입자의 화학적 특성, 인체에의 영향과 관련된 화학적 조성이나 시·공간에 따른 인체에의 노출변화 등과 같은 협소한 범위의 입자특성에 대해서만 알려져 있을 뿐이다.

대기중의 입자상 오염물질은 대략 0.005~500 μm 의 크기를 가지고 있으며 오염생성원의 종류에 따라 독특한 크기 범위를 가지고 있다. 분진은 입경에 따라 크게 2가지로 분류할 수 있으며, 대략 2.0~5.0 μm 미만의 입자를 미세입자(fine particle)라고 하며, 그 이상의 입자를 조대입자(coarse particle)라고 한다. 조대입자는 바람에 날린 토양의 먼지 및 해염을 비롯하여 기계적 분쇄과정을 거쳐 주로 생성되는데, 자연적 발생원으로부터 방출된 것이 대부분이다. 이러한 조대입자는 방출 후, 수 분 또는 수 시간 내에 지표면에 떨어지기 때문에 미세입자에 비해 오염 피해에 대한 기여도는 낮다. 하지만, 조대입자 중 직경이 2.5~10 μm 인 입자는 호흡기 질환을 가진 사람의 입을 통해 호흡할 경우 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 반면에, 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차의 배출가스 및 화학물질의 제조과정 등과 같은 인위적 발생원에 의한 것파, 아황산가스나 휘발성 유기화합물 등이 응축과정을 거쳐 가스상에서 입자상으로 변환된 2차 입자상 물질(secondary particle)이 대부분으로, 오염된 도시지역의 분진 수(number)의 90~99 %를 차지한다.

가장 일반적인 2차 입자상물질로는 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 으로 이들은 SO_2 , NO_x 와

NH₃등의 가스상 오염물질로부터 생성된다. 이차입자상물질들의 환경 대기중 농도는 가스-입자 전환율의 차이나 가스-입자간의 평형 특성 때문에 항상 각 전구물질의 배출량에 비례하지는 않는다. 미세입자 중에서 발견되는 SO₄²⁻와 NO₃의 가능한 형태는 주로 NH₄⁺와 반응하여 NH₄NO₃, (NH₄)₂NO₃, (NH₄)HNO₃등의 결합형태를 보이는 반면에 조대입자의 경우는 질소산화물과 황산화물이 주로 Na와 반응하여 NaNO₃, Na₂SO₄등으로 결합하는 것으로 알려져 있다(Chow 등, 1996).

Appel 등(1978)에 의하면 SO₄²⁻과 NO₃은 주로 NH₄⁺으로 표현된다는 것을 밝힌 바 있으며, Kadowaki 등(1977)은 나고야에서 측정된 결과 NO₃은 미세입자에서 주로 NH₄NO₃형태이고, 조대입자에서는 NaNO₃형태로 존재한다고 보고하였다.

2. 황사의 특성

2-1. 황사의 발원지



봄철 대륙에서 불어오는 먼지폭풍을 황사라 한다. 황사의 발원지를 조사하기 위해 Gao(1992)는 모래보라 자료를 분석하여 지리적 분포를 조사하였는데, 황토고원의 북부가 주요 발원지이고 티벳고원의 북서쪽이 그 다음의 주요 발원지임을 보였다. 이들 지역에서 부유된 황사가 서쪽으로부터 한국과 일본 쪽으로 통과해 가기 때문에 한국과 일본은 기상학적으로 같은 특성을 갖는 동일 지역으로 분류되었다. Ishizaka(1979)와 Murayama(1988)는 정지기상위성 연구자료를 이용하여 황사의 이동을 분석하였으며 특히 황사구름의 이동스케치를 토대로 황사의 발원지를 추정하였고, 일본 기상연구소(1990)에서는 황사의 발원지를 하나의 점원으로 가정하여 수송 및 확산의 수치 모의를 시도하였다. 또한 Ishizaka(1981)는 황사 시료를 채취하여 X선 분석으로 황사의 발원지를 조사하였다. Iwasaka(1983)와 Kai(1988)는 일본에서 Lida 관측으로 황사가 연직으로 여러 층이 되어 수송되고 있음을 제시한 바 있으며 또한 오염물질 추적 모형으로 황사 발원지를 하나의 점원으로 가정하여 3차원 수치 실험을 행하였다.

국내의 경우, 황사의 발원지로 주로 일컬어지는 곳은 고비사막, 황토지대, 타클라마칸사막, 오르도스사막, 알라산사막 순이다. 이것은 주로 유적 분석(윤 과 박, 1991; 정 과 윤, 1994)과 일기도에 기입된 일기 현상을 참고(윤, 1990; 정 과 박, 1995)한 결과들이다. Table 1은 이들 발원지에서의 황사 발생빈도를 조사하기 위하여 편의상 각 발원지의 범위를 단순화시켜 즉, 타클라마칸 사막은 35 °N~42 °N, 75 °E~90 °E로, 고비사막은 40 °N~48 °N, 95 °E~110 °E, 황토고원은 34 °N~40 °N, 105 °E~114 °E로 그 범위를 정하여 일본 기상청 발행 일기도에서 위 범위 안에 황사기호가 적어도 1번 이상 나타나면 황사 발생일로 계산하여 작성한 것이며, Table 2는 동일 자료를 이용하여 각 발원지에서 황사 발생빈도를 월별 평균치로 나타낸 것이다(전 등, 1999). 발원지에서의 황사는 타클라마칸 사막에서 봄철에 평균적으로 52.5일 발생하였으며, 그 중 3월에 제일 많이 발생하였다. 고비 사막에서는 봄철에 황사가 약 29일 발생하였으나, 타클라마칸 사막에서와는 달리 4월에 제일 많이 발생하였으며, 황토고원에서는 황사발생이 7.5일로 두 사막지역의 발원지에 비하여 현저하게 낮았다.

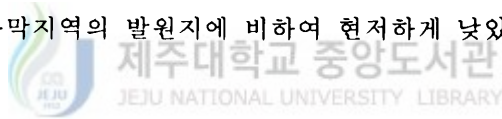


Table 1. Number of yellow sand days in the source regions in spring for the period of 1980~1994

Year	Taklamakan desert	Gobi desert	Loess area
1980	73	48	12
1981	80	46	16
1982	82	35	11
1983	82	32	8
1984	84	29	11
1985	65	31	11
1986	50	32	10
1987	44	36	5
1988	36	22	11
1989	37	19	4
1990	29	24	6
1991	20	22	0
1992	31	22	4
1993	32	24	4
1994	42	15	0
Average	52.5	29.1	7.5

Table 2. Monthly mean number of yellow sand days for the period of 1980~1994

Month	Taklamakan desert	Gobi desert	Loess area
March	19.8	7.8	1.8
April	16.3	11.5	3.7
May	16.2	9.7	2.0

2-2. 황사의 관측사례

Table 3은 우리 나라 10개 관측소에서 관측된 30년간 총 황사일수 자료를 이용하여 연도별 황사 일수와 황사 발생 회수(괄호 속의 수)를 나타낸 것이다. 자료는 1967년부터 1996년까지 30년간 우리 나라 봄철(3~5월)에 10개 기상 관측소(서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 전주, 청주, 춘천, 강릉, 제주)에서 관측된 황사 자료를 사용한 것이다(전 등, 1999). 이 표에서 나타낸 숫자는 앞에서 언급한 10개 관측소 중 적어도 1개 관측소에서 관측된 황사 일수와 황사 발생 회수를 의미한다. 황사 발생 회수는 황사현상이 10개 관측소를 통틀어 1일 이상 계속되는 경우의 회수를 나타낸 것으로 우리 나라의 봄철 평균 황사 일수는 약 8.4일이고, 그 중에서 4월에 봄철 전체의 약 50 %정도인 4.1일 황사현상이 나타났으며, 그 다음 5월, 3월 순 이었다. 연도별 황사 일수는 그 변화가 대단히 컸는데 1989년에는 황사가 한번도 발생하지 않았고, 1995년에는 19일로 이 기간 중 가장 많았다. 황사 발생 회수는 봄철 평균 3.4회이고 4월에 1.5회로서 약 절반을 차지하고 있으며 이것도 역시 5월, 3월 순 이다. 대략적으로 우리 나라 황사는 봄철에 월 1회씩 관측된 셈이다.

Table 4는 동일 자료를 사용하여 총 황사 일수의 월별 분포를 나타낸 것이다. 우리 나라 10대 도시 중 황사 관측이 가장 많이 된 곳은 서울이며, 황사가 가장 적게 관측된 곳은 부산으로 나타났다. 황사 현상은 대체적으로 서울, 광주 등 서쪽에 위치한 도시에서 더 많이 관측되었고, 부산이나 강릉 등 동쪽에 위치한 도시에서 상대적으로 적은 빈도로 나타났다. 그리고 모든 도시에서 월별 황사 빈도는 4월, 5월, 3월의 순으로 많이 관측되었다.

Table 3. Number of yellow sand days in South Korea for the period of 1967~1996

Station	Month			Total (Seasonal Mean)
	March	April	May	
1967	4(2)	4(1)	1(1)	9(4)
1968	2(2)	3(1)	5(1)	40(4)
1969	3(2)	7(2)	1(1)	11(5)
1970	0(0)	1(1)	0(0)	1(1)
1971	2(1)	6(2)	5(4)	13(7)
1972	1(1)	1(1)	4(2)	6(4)
1973	1(1)	5(2)	5(2)	11(5)
1974	4(3)	4(3)	1(1)	9(7)
1975	1(1)	7(2)	0(0)	8(3)
1976	2(1)	7(2)	9(3)	18(6)
1977	8(3)	2(1)	1(1)	11(5)
1978	0(0)	4(3)	2(1)	6(4)
1979	0(0)	5(2)	0(0)	5(2)
1980	0(0)	2(1)	3(1)	5(2)
1981	2(1)	3(1)	9(2)	14(4)
1982	0(0)	0(0)	10(1)	10(1)
1983	3(2)	4(1)	6(1)	13(4)
1984	2(1)	2(1)	1(1)	5(3)
1985	2(1)	1(1)	0(0)	3(2)
1986	0(0)	1(1)	0(0)	1(1)
1987	1(1)	0(0)	0(0)	1(1)
1988	0(0)	10(2)	1(1)	11(3)
1989	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
1990	1(1)	7(3)	0(0)	8(4)
1991	0(0)	0(0)	7(2)	7(2)
1992	0(0)	9(3)	1(1)	10(4)
1993	0(0)	12(3)	5(1)	17(4)
1994	0(0)	3(2)	0(0)	3(2)
1995	3(2)	12(3)	4(0)	19(5)
1996	1(1)	2(1)	3(2)	6(4)
Average	1.4(0.9)	4.1(1.5)	2.8(1.0)	8.4(3.4)

Table 4. Total number of yellow sand days at ten stations in South Korea during 30 years(1967~1996)

Station	Month			Total (Seasonal Mean)
	March	April	May	
Seoul	23	66	39	128(4.3)
Chunchon	12	48	37	97(3.2)
Kangnung	10	49	29	88(2.9)
Chungju	12	55	34	101(3.4)
Taejon	13	53	27	93(3.1)
Chonju	18	49	35	102(3.4)
Kwangju	20	66	40	126(4.2)
Taegu	26	55	29	110(3.7)
Pusan	13	47	21	81(2.7)
Cheju	17	49	29	95(3.2)



2-3. 황사 수송시의 기압패턴

황사가 발생할 당시의 기후 패턴은 대체로 몽고 부근에서는 저기압이 자리하고 중국 내륙에서는 고기압이 형성되면서 돌풍을 동반한 강한 바람이 불게 된다. 이때 해빙기를 맞은 고비 사막과 주변 황토지역에서 토양의 비산이 일어나 편서풍을 타고 한반도를 거쳐 일본을 지나가게 된다. 우리 나라에 나타난 황사현상은 주로 대개 1~3일 정도 지속된 후 양쯔강 부근에서 생긴 이동성 고기압이나 북태평양에서 확장된 고기압에 밀려 소멸된다고 보고 있다(박 등, 1993).

Table 5는 황사가 한반도에 수송되어 올 때의 기압패턴을 나타낸 것으로 대부분의 경우 지상에서는 한랭전선을 동반한 저기압이 통과할 때로서 그 중에서도 만주지방을 통과하는 경우가 대부분이었다. 그리고 상층에서는 30~50 knots의 W-NW풍이 불며 특히 500 mb층에서 냉핵(cold core)의 남하가 뚜렷하였다. 이러한 기압계가 갖추어지지 않으면 발원지에서 황사가 발생하여도 한반도에서는 전혀 황사가 관측되지 않았던 것으로 보고하고 있다(윤, 1990; 이 와 허, 1995).

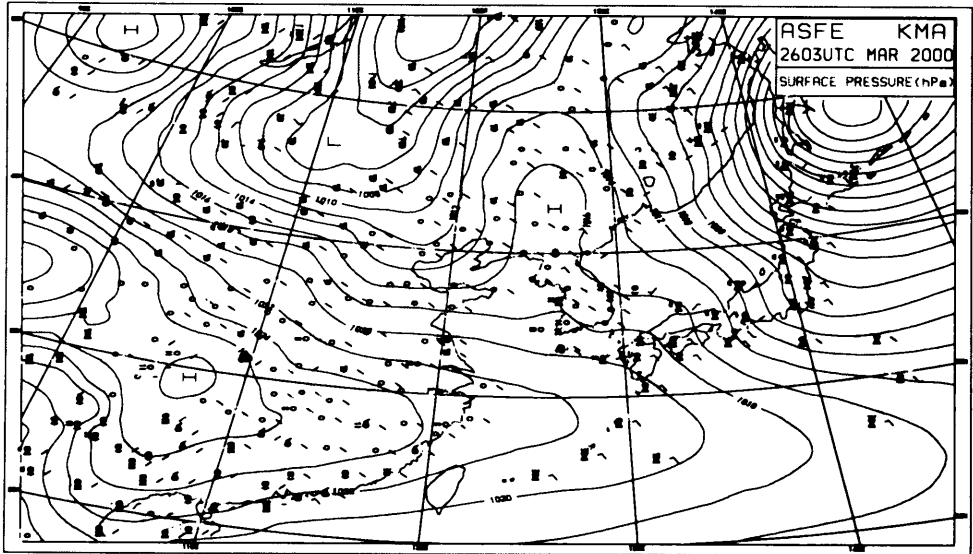
정 과 김(1991)도 1990년 4월에 발생된 황사의 경우 한랭전선 후면의 고기압대에서 황사가 발생하여 발해와 황하를 거쳐 중국 북부의 황토지대에와 몽고에서 유입된 것으로 제시한 바 있다. 이런 경우에 대한 사례로서 1993년 4월 23일~24일 청주에서 관측한 황사의 경우 발원지가 고비사막 남동부와 황하상류 건조지역이었으며, 강수없이 발달한 저기압 후면에서 돌풍과 함께 발생하여 남동진하다가 남서기류를 타고 한반도로 유입된 것으로서 황사가 소멸된 24일에는 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa 상층기류는 한반도의 북쪽인 북만주와 몽고 동쪽에서 유입되므로써 기온이 5~6도 하강하였고, 이 때 북서풍이 불었던 것으로 보고되었다(정 등, 1994; 이 와 허, 1995).

Table 5. Number of days with the pattern of pressure system when yellow sand was transported

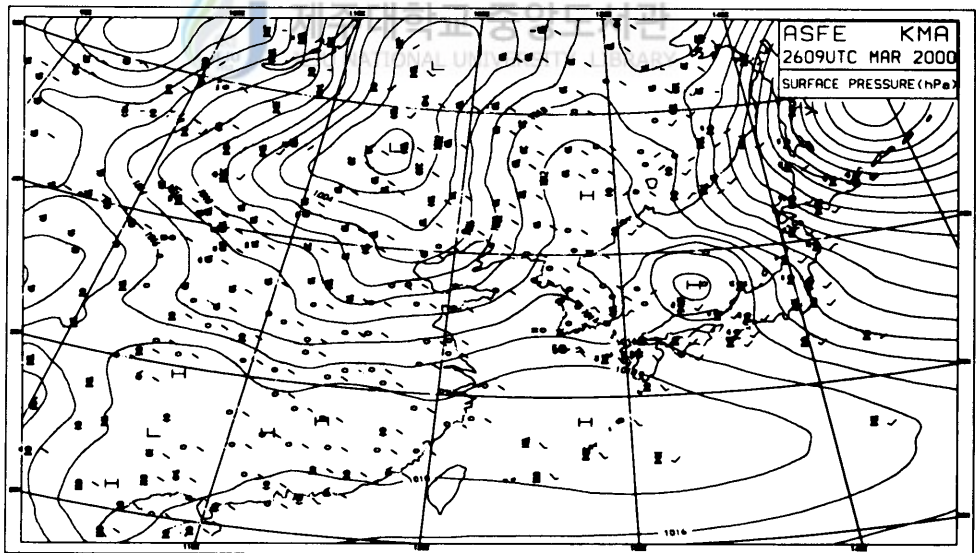
Pressure feature	Month				Total	Ratio
	Feb.	Mar.	Apr.	May		
Low passed over the Manchuria(with cold front)	1	4	9	7	21	80.8
Low passed over the Korean peninsula(with cold front)	-	1	1	1	3	11.5
Trough(the edge of high)	-	-	1	1	2	7.7
Total	1	5	11	9	26	100

과거 20년 동안 한반도에서 황사현상이 관측되지 않았던 해에도 당시의 일기도를 살펴보면 황사발원지에서는 황사가 빈번하게 발생하였으나 앞에서 언급한 수송 기압계를 갖추지 못하여 한반도에서는 황사현상이 없었다고 보고되었다(이 와 허, 1995). Tanaka 등(1983)도 저기압의 활동에 따라서 황사현상이 일본에서는 나타나지 않아도 한국과 중국에서는 관측된다고 보고한 바 있다.

Figure 1은 측정기간 중 황사가 관측된 26일의 지상일기도를 시간대별로 나타낸 것이다. 03UTC에 중국의 서북쪽에 위치해 있던 저기압 중심부가 09UTC에는



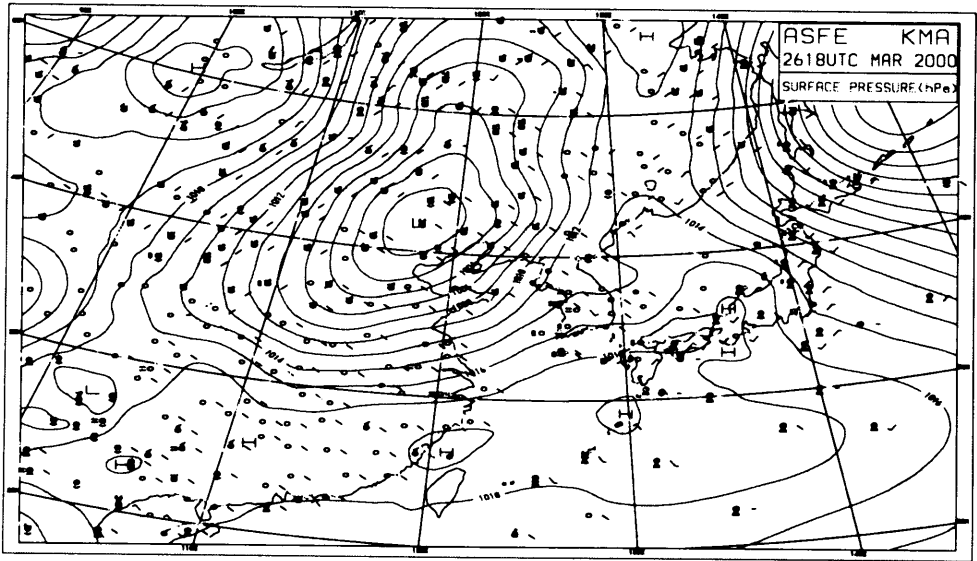
(a)



(b)

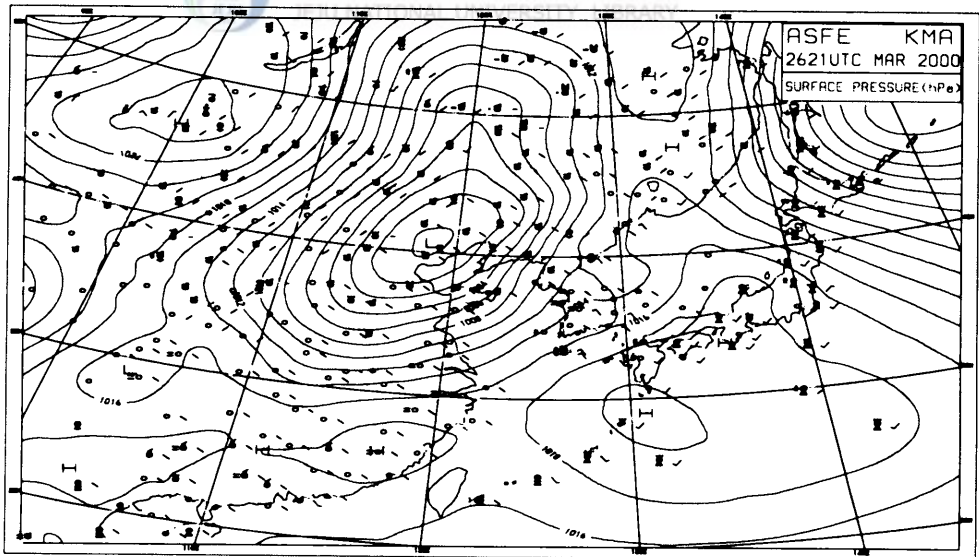
Fig. 1. The surface level maps when yellow sand was transported on 26 March 2000 : a) 03UTC b) 09UTC c) 18UTC d) 21UTC.

Continued

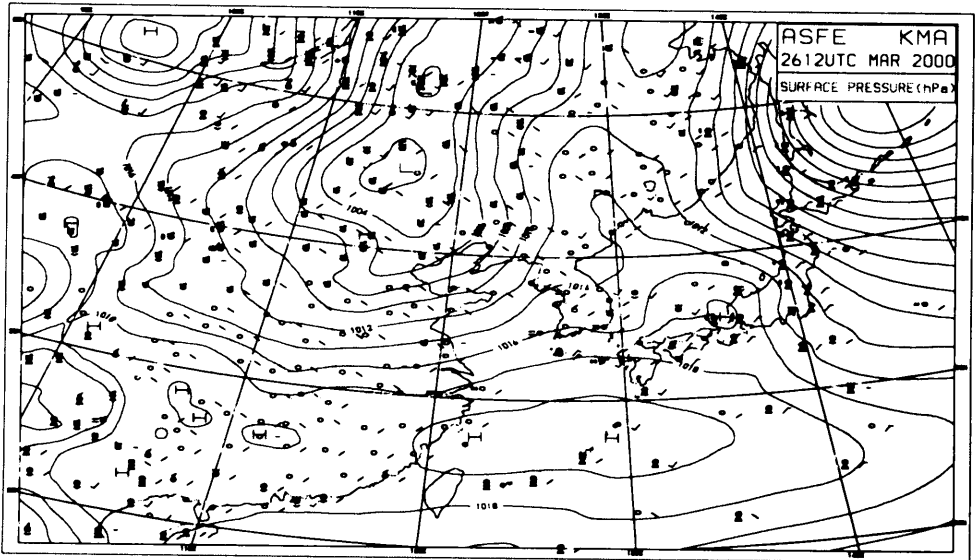


(c)

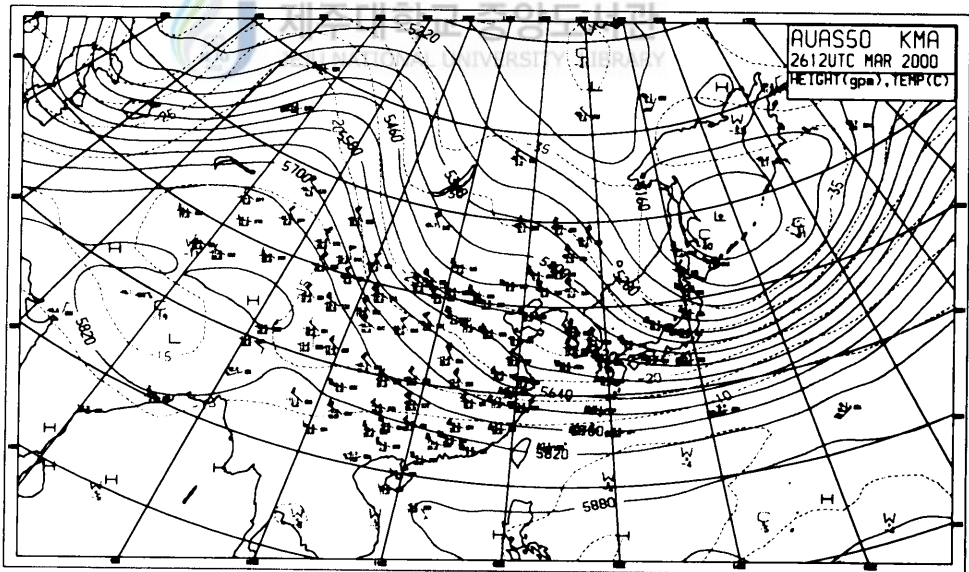
제주대학교 중앙도서관



(d)



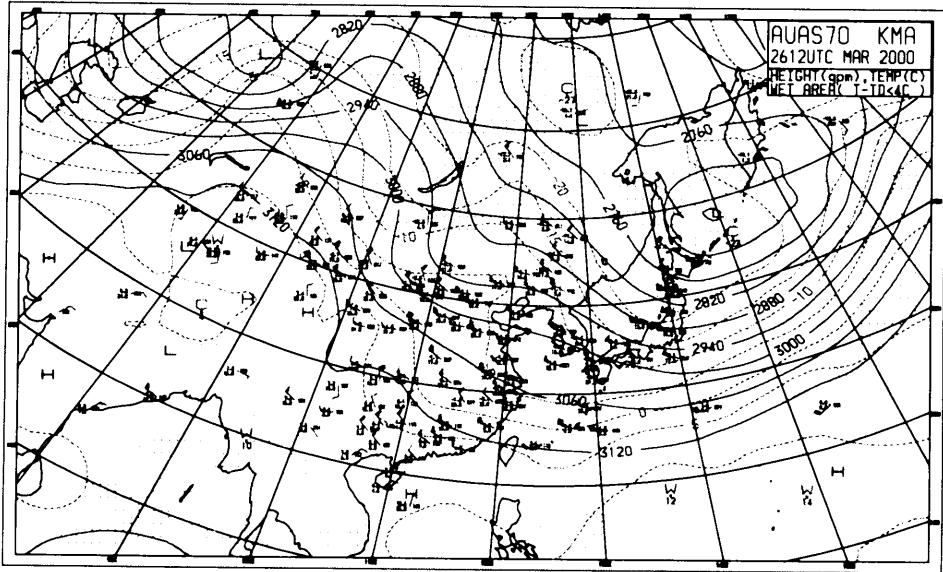
(a)



(b)

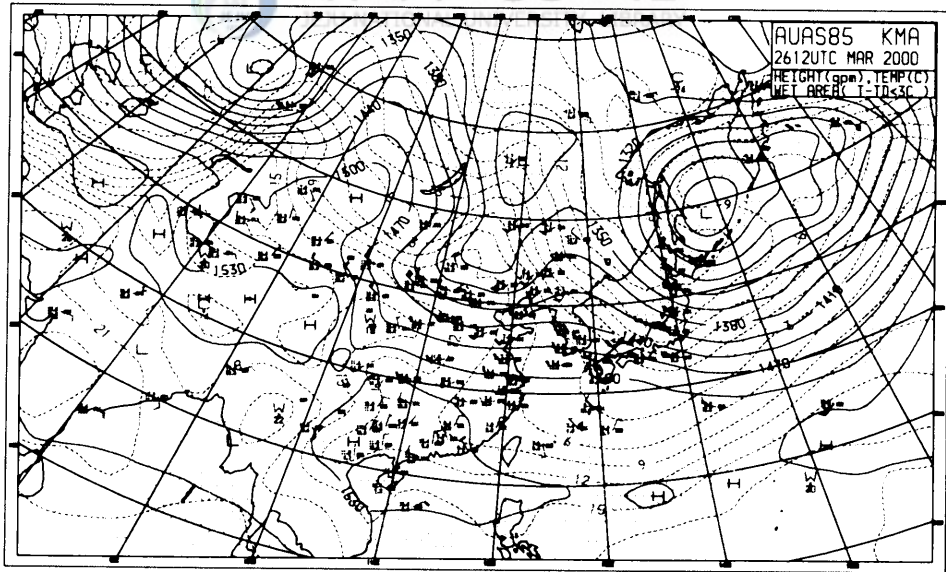
Fig. 2. The surface and upper level maps when yellow sand was transported on 12UTC 26 March 2000 : a) surface b) 500hpa c) 700hpa d) 850hpa.

Continued



(c)

제주대학교 중앙도서관



(d)

고비사막부근을 거쳐서 서서히 남동진하고 있으며 18UTC와 21UTC에는 베이징을 통과하여 한반도 부근으로 접근하고 있다. Fig 2는 26일 12UTC의 종관기상 구조를 지상, 500 hpa, 700 hpa, 850 hpa면에 대해 각각 나타낸 것으로 저기압이 한반도 북쪽에 중심을 두고 순압구조의 형태를 지니고 있으며 상층에서는 북서풍계열의 바람이 불고 있다. 이와 같은 종관구조는 중국의 황사가 우리 나라로 수송되기에 좋은 조건으로 한랭핵과 연관되는 각 층에서의 강한 경압성이 형성되고 이와 수반되는 강한 바람장이 한랭전선 후면에서 발생하여 황사의 발생원에서 모래입자를 쉽게 상승시키고, 서풍 내지 북서풍의 바람이 중국으로부터 우리 나라로 황사를 유입시키게 된다.

3. 수용모델의 개론

지난 수 십 년간 수용모델은 대기중 입자상 물질의 주요 오염원을 밝히고 그들의 기여도를 계산하는데 적용되어져 왔으며(Cooper 와 Watson, 1980; Hopke, 1985) 분산모델과 함께 대기오염지역의 PM10에 대한 새로운 대기질 기준을 설정하는데 이용되어져왔다.

수용모델은 수용지점에 대한 주어진 자료의 물리적, 화학적 정보를 통계모델에 적용하여 수용지점에 대한 오염원의 정량적인 기여도를 추정하는 방법으로 초기 수용모델의 적용은 입자상물질(TSP, PM10)에 초점을 두었으나, 최근에는 여러 분야로 확대되어 가시장해(visibility impairment)물질, 독성물질, 오존의 전구물질인 VOC(volatile organic compound), 산성침적 에어로졸 등에 적용되어지고 있다(Hopke, 1991).

수용모델은 크게 검경적(microscopic), 물리적(physical), 화학적(chemical)방법으로 분류된다.

검경적 방법은 입자크기, 형태, 색깔 등의 특성을 조사하여 입자를 확인하기 위해 널리 사용되어져 온 방식으로 광학적방식(optical method), SEM(scanning electron microscopic)과 SEM-XRF(X-ray fluorescence)방식이 여기에 속한다.

광학적 방식의 경우 색깔, 표면구조 등 광학적 성질을 이용한 기법으로써 입자의 크기가 최소 1~2 μm 이상 되어야 하며, 상대적으로 낮은 정확도와 다량의 시료를 분석할 경우 비경제적이다. 그에 비해 SEM방식은 더욱 작은 크기의 입자, 즉 1 μm 이하의 입자에 대해서는 분석이 가능하다는 장점이 있지만, 비결정체에는 적용이 불가능하다. 그러나, SEM-XRF는 입자크기, 입자형태, 화학구성성분을 분석할 수 있다는 장점 때문에 향후 주된 분석법으로 응용될 전망은 높지만 현재 상당히 많은 비용이 들기 때문에 사용이 제한되고 있는 상태이다.

물리적 방법에는 결정체요소(crystalline component)의 정량에 주로 사용되는 X선 회절법(X-ray diffraction method)과 장거리 수송(long range transport)과 관련된 대기 미세입자의 양을 산정하는데 사용되어지고 있는 궤도분석(trajec-tory analysis)법 그리고 각 수용모델이 가지고 있는 단점을 보완하기 위해 여러 개의 수용모델의 기법 혹은 분산모델의 기법을 서로 혼합시켜 적용하는 혼합모델(hybrid model)이 있다. XRD 방법의 경우 결정체를 가진 입자에 대해 직접적인 정량을 할 수 있다는 장점이 있으며, 유기물이나 산성입자와 같은 비결정체 입자에 대한 정량이 불가능하다는 단점 때문에 주로 조대입자에 대한 오염원 기여도 평가를 위해 널리 사용되고 있다. 그리고, 궤도분석법은 장거리 수송에 관련된 미세입자의 근원을 효율적으로 추적할 수 있으나 특정 오염원에 대한 기여도 산정은 불가능하다. 혼합모델의 경우는 분산모델과 수용모델의 단점을 보완하여 결합된 형태로서 모델적용시 작업량이 방대해지는 단점이 있다.

이처럼 검경적 방법과 물리적 방법의 경우 단시간 내에 입자의 구성이나 크기, 조성, 형태 등에 관한 다양한 정보를 얻을 수 있어 대기오염물질을 파악하기가 용이하나 대기 분진시료의 불균일도에서 오는 측정값의 부정확도를 배제할 수 없는 단점이 있다.

화학적 방법으로는 농축계수법(enrichment factor analysis), 시계열 분석법(time series analysis), 공간계열 분석법(spatial series analysis), 다변량 방법과 화학질량수지법 등이 있으며, 그 중에서도 다변량 분석법과 화학질량수지법이 가장 우수하다고 평가되어 주로 이용되어 지고 있다. 다변량 분석법은 대상지역 오염원에 대한 사전정보가 충분치 못한 경우에도 측정지점에서 채취한 시료를 바탕으로 화학성분간의 상관성 혹은 변동성을 통계적으로 분석하여 측정된 분진농

도에 영향을 미칠 수 있는 발생원들을 정성적으로 파악 할 수 있으나, 많은 양의 측정자료를 필요로 하며 오염원의 영향을 단기간에 정량화 할 수 없다는 단점이 있다. 반면, CMB모델은 대상지역의 분진관련 농도자료와 각종 발생원과 발생원에 대한 분진의 화학적 조성성분비가 파악가능해야 한다는 제약조건이 있으나, 실제자료에 근거하여 정량적인 오염원 기여도를 산정할 수 있으며 오염원 프로파일이나 대기질 측정자료가 더 정확하고 구체적으로 확보되어 있을수록 보다 강력한 기여량 산정이 가능해 진다.

4. CMB 모델

CMB방법은 1972년 Miller 등에 의해 4개 원소 및 4개의 오염원을 가지고 개발되어 초기에는 화학원소수지법(CEB ; chemical element balance)이라 불리웠으나, 원소 및 오염원의 숫자가 증대되면서 화학질량수지법으로 개명되었다. 이 방법은 1979년 Watson에 의해 이론적으로 체계화되면서 대기오염학의 큰 비중을 갖기 시작하였으며, 개발 초기부터 U.S. EPA에 의해 꾸준히 연구 개선되어 사용되고있다.

4-1. CMB모델의 원리

CMB모델은 수용지점에서 측정된 성분질량의 총합은 각 오염원 기여량의 합과 같다는 질량수지식과 질량보존의 법칙을 기본 개념으로 한 선형방정식을 푸는 것이다.

만일 p개의 오염원이 존재하고, 오염발생원에서 수용지점까지 도달하는 과정에서 물질의 제거, 축소가 발생하는 상호반응이 없다면, 그때 수용지점에서 측정된 총 오염물질(M)은 모두 각 오염원에 대한 기여도(S_j)의 합으로서 식(1)과 같이 표현된다(Thurston 과 Lioy, 1987).

$$M = \sum_{i=1}^p S_i \quad (1)$$

마찬가지로 에어로졸 성분 i 에 대한 농도 C_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^p \alpha_{ij} f_{ij} S_j \quad (2)$$

여기서 f_{ij} 는 오염원에서 i 성분을 갖는 j 오염원의 질량분율이고 α_{ij} 는 오염원과 수용지점 사이에서 i 성분의 분율이다. 실제로 같은 형태의 오염원으로부터의 오염물질간의 구분은 불가능하다. 그래서 j 는 통상 오염원의 어떤 부류로 본다. 성분분율(α_{ij})은 오염원의 형태, 위치, 시간에 따라 다르며, 오염원에서 수용지점으로 수송되는 과정에서 오염물질성분의 손실 혹은 축소의 효과를 설명한다.

오염원 할당에서 식(2)를 활용하기 위한 대부분의 시도는 짧은 수송거리 즉, 도시대기 안에서 $\alpha_{ij}=1.0$ 이라고 가정한다. 결과적으로 수용지점(a_{ij})에서 i 성분을 가진 j 오염원 기여도의 질량분율을 알면, 그때 모델식은 식(3)과 같이 표현된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^p a_{ij} S_j \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

식(3)에서 a_{ij} 는 $\alpha_{ij}f_{ij}$ 이다. 식(2)와 (3)의 결과는 n 에 대한 연립방정식으로 $n \geq p$ 일 때, 즉 미지수가 방정식의 수보다 적거나 같을 때 식(3)은 수용지점에서 전체 오염물질에 대한 p 오염원 기여도를 풀 수 있다 (Henry, 1984; Thurston and Liou, 1987).

4-2. CMB의 해법

CMB식을 풀기 위해 제안되는 해법으로는 아래의 6가지 방법이 있다.

- 1) 단일 화학종을 찾는 추적자 해법(trace solution)
- 2) 선형 프로그래밍 해법(linear programming solution)
- 3) 가중선형 최소자승법(OWLS ; ordinary weighted least squares solution)
- 4) 능형회기 가중 최소자승법(ridge regression weighted least squares solution)
- 5) 유효분산 최소자승법(EVWLS ; effective variance weighted least squares solution)

일반적으로 가중선형 최소자승법의 경우 CMB모형의 가정이 만족 될 경우 모형의 제약방식에 대해 가장 적절한 해를 구할수 있으며, 모든 형태의 화학적인 측정에 대해 적용될 수 있고, 오염원 기여도에 대한 불확실성을 추정할 수 있다는 상대적인 장점 때문에 추적자 해법이나 선형 프로그래밍 해법보다 더 좋은 해를 구하는 방법이다. 최근에 모형의 최상위 버전인 CMB7과 8에 적용된 수학적 해석 방법은 유효분산 최소자승법으로 가중선형 최소자승법(식 4)이 측정 오차에따른 가중치(σc_i)를 부여함으로써 측정치의 정확도가 다소 떨어질 경우 모형의 해에 영향을 덜 미치도록 한데 비해 유효분산 최소자승법은 식 5)를 최소화시키는 제약조건을 이용하여 그 해를 구하는 것으로 이는 오염원 구성성분비의 오차항($\sigma f_{ij}S_j$)도 고려하여 그 해의 정확도를 제고시킨다.

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - \sum_{j=1}^p f_{ij} S_j)^2}{\sigma^2 C_i} \quad (4)$$

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - \sum_{j=1}^p f_{ij} S_j)^2}{\sigma^2 C_i + \sum_{j=1}^p \sigma f_{ij}^2 S_j^2} \quad (5)$$

4-3. CMB모델의 가정

모델의 개발은 환경에 영향을 미치는 모든 변수를 효과적으로 다룰 수 없기 때문에 각 변수들간의 상호 관련 정도를 파악하여 자연현상의 실체를 표현하기 위해 이루어 졌다. 그러나 모델 자체의 한계성 즉 몇 개의 변수는 모델에서 제외되어 질 수 있으며 때로는 모델의 풀이 과정에 있어서 많은 가정을 하므로 실제 자연현상과 많은 차이를 유발한다. 따라서 모델 결과와 실제 사이의 차이를 줄이기 위해 모델의 개량이 필요하여 지금까지 끊임없이 발전해 오고 있으며 CMB모델을 수행하기 위해서는 다음과 같은 가정이 성립해야 한다.

- 1) 오염원 구성성분비는 오염원으로부터 수용지점에 도달하는 도중 변형이나 결합 등의 과정을 보이지 않는다.
- 2) 화학종간 상호반응은 없다.
- 3) 수용지점(receptor)에 기여하는 모든 잠재적인 오염원은 확인 가능하며, 이에 대한 오염원 프로파일은 파악 가능해야 한다.
- 4) 오염원의 수 혹은 오염원군의 수는 화학종의 수보다 작거나 같아야 한다.
- 5) 오염원 프로파일은 서로 선형 독립적이다.
- 6) 측정 불확실성은 무작위하고, 서로 독립적이며, 정규분포를 갖는다.

실제 대기조건의 경우 위의 가정과는 상당한 정도로 차이가 있기 때문에 이와 같은 가정을 파악하는 것이 상당히 중요하다.

가정 1)은 오염원에서 배출된 성분들이 수용지점에 도달하는 과정상에 변형이나 침적 등의 변화가 없어야 한다는 것이다. 그러나 연료의 종류, 운전조건에 따라서 같은 오염원이라도 시간에 따라 어느 정도차이를 보이는 것은 거의 확실하다. 그러므로 오염원 구성성분비가 항상 일정하다는 것은 성립되지 않지만 각 오염원 항목별로 구성성분이 일정한 패턴을 지닌다는 것을 의미한다. 무작위로 혼합된 오염원 프로파일을 구성하는 모든 성분들 사이의 변화를 CMB결과와 비교를 통해 평가 연구한 바에 의하면 한 오염원 프로파일의 모든 구성성분들 사이의 편의(biases)에 의해 발생하는 이러한 오차는 그 편이의 크기에 정비례하며,

오염원 기여에 대한 오차는 구성성분을 증가시킴으로서 감소시킬 수 있다 (Henry, 1984).

가정 2)는 대기중 분진을 포집하기 전에 오염원 구성성분비의 치환에 대한 내용이다. 상호반응의 한 예로는 배출물질이 수용지점에서 포집되기 전에 아황산가스가 황산염으로 치환됨을 들 수 있다. 만일 아황산가스나 황산염이 모델의 구성성분으로 사용되었다면 오염원 구성성분비는 광화학적으로 반응이 있을 때에는 변화가 일어날 수 있다. 이에 대한 해결방안은 단일 구성성분으로 총 황(아황산가스 + 황산염)을 모델에 사용하는 방법이 있으며, 이에 대한 많은 연구의 필요성이 논의되고 있다.

가정 3)은 통계적인 관점에서 모델은 실제로 존재하는 모든 오염원들을 정확하고 구체적으로 파악해야 함을 의미한다. Watson(1979)이 오염원의 수를 변화시키면서 최소자승법으로 자신의 모형자료를 가지고 연구한 바에 의하면 오염원의 수를 과소평가해도 누락된 오염원의 주 화학종이 해석에서 제외된다면 기여도 계산에 거의 영향을 미치지 않으며, 오염원의 수가 과소평가되고 누락된 오염원의 주 화학종이 기여도 계산에 포함된다면 누락된 오염원과 유사한 성질을 갖는 오염원의 기여량이 과대평가된다고 하였다.

가정 4)와 5)는 유사한 화학조성을 보이는 오염원들을 하나의 오염원군으로 조합해야 한다는 것을 나타낸다. 이는 모델해법의 제한성 때문에 유사한 화학조성을 보이는 오염원 프로파일들은 상호 유사성으로 인해 신뢰 가능한 모델결과를 얻을 수 없기 때문이다. 유사한 화학조성을 보이는 오염원 프로파일들을 입력 자료로 하였을 경우에는 오염기여도가 양수와 음수 값으로 나타나며, 이때 오염원 프로파일이 거의 동일하지 않다면 이 두 값의 합은 거의 실제 기여량의 합에 접근한다.

가정 6)에 대해 연구된 결과는 거의 없다. 실제 오염원조성과 대기농도에 대한 오차분포는 거의 알 수 없으며 정규분포보다 대수정규분포를 따른다는 사실정도는 알려져 있으며 정규분포의 값들은 음수를 상당량 허용하지만, 대수정규분포는 어떠한 음수 값도 허용치 않는다. 20 %이내의 작은 오차는 실제 분포에서 중요하지 않지만, 큰 오차는 중요하다.

4-4. CMB모델의 안정성 평가

CMB 수용모델은 대기오염물질의 화학질량수지를 기초로 하여 미세분진 성분의 측정치와 모델치의 차가 최소가 될 때까지 최적의 오염원 할당을 위하여 미세분진의 화학적 구성성분에 대한 회귀분석에 근거를 둔 모델이다(Vega 등, 1997). 따라서, 수용지점에서의 농도자료를 이용하여 CMB모델을 수행하면 첫 번째 결과로써 오염원기여량(SCE), 오염원기여량의 표준편차, 모델 수행으로 산출된 화학종 농도가 나타난다. 연속해서 모델에 의해 산출된 화학종 농도가 잘 지정이 되었는지, 배출농도 측정이 잘 되었는지를 평가하기 위한 통계치로서 % Mass, R-Square, Chi-Square 값이 함께 산출된다. 그리고, 최적의 값을 얻기 위해 잘 지정되지 않은 데이터를 확인하는데 도움을 줄 U/S Clusters, Ratio C/M, Ratio R/U 등이 나타나는데 모델결과의 안정 여부를 판단할 수 있는 범위는 Table 6에 제시하였다.

SCE의 평가는 CMB모델의 가장 중요한 결과이다. 이 기여량의 합은 측정된 질량농도에 접근해야 한다.

R-Square 값은 지정 화학종에 대한 측정치와 계산치를 선형회귀분석을 통해 얻을 수 있으며 이 값이 1.0에 근접할수록 모델이 측정한 화학종 농도를 잘 설명한 것으로 보며, 0.8보다 작으면 모델예측능력에 문제가 있는 것으로 판단한다.

Chi-Square가 나타내는 값은 오염원 프로파일이나 대기질 측정농도자료의 화학종에 대한 불확실성을 제공한 것에 반비례한다. 이 값은 반드시 양수이어야 하고 1.0에 접근할수록 최적의 지정임을 의미하며, 4.0보다 큰 값은 모델이 대기질 측정농도자료를 제대로 설명하지 못하고 있음을 의미한다. Chi-Square는 R-Square와 깊은 관계가 있으며 대체로 Chi-Square의 제공이 적합한 지정을 나타낼 때 R-Square의 제공은 1.0에 근접하게 된다.

% Mass는 모델에 의해 계산된 화학종농도의 합을 대기질 측정농도자료에 대한 비율로 나타낸 것으로 이 값은 100에 접근해야 하며, 20 %의 오차가 생긴 경우는 모델이 질량을 과소 혹은 과대 평가한 것으로 평가한다.

DF는 지정된 화학종의 수에서 오염원의 수를 제한 값으로 이값이 1보다 작으면 모델의 통계값이 적절하지 못하다는 것을 의미한다.

Table 6. Stability evaluation of model results

Display	Description
SCE(Source Contribution Estimates)	<ul style="list-style-type: none"> • The estimate, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of each source or source category's contribution to the fitted ambient data. • SCE>0
R-Square	<ul style="list-style-type: none"> • Used to measure the variance in the ambient species concentrations which is explained by the calculated species concentrations. • R^2 : 0.8~1.0
Chi-Square	<ul style="list-style-type: none"> • Similar to R-SQUARE except that it also considers the uncertainties of the calculated species concentrations. A high CHI-SQUARE suggests that the model has not explained the species data well. • χ^2 : 0.0~4.0
Percent Mass	<ul style="list-style-type: none"> • Used to track the % of ambient mass (in the size fraction being analyzed) explained by the sum of the SCE's. • % MASS : 80 %~120 %(100 %\pm20 %)
DF(Degrees of Freedom)	<ul style="list-style-type: none"> • Number of species in fit minus number of sources in fit. • DF>5
C/M Ratio	<ul style="list-style-type: none"> • The simple ratio of CALC/MEAS and the uncertainty of the ratio. Used to identify species that are over/under accounted for by the model. • Ratio C/M : 0.5~2.0
Ratio R/U	<ul style="list-style-type: none"> • The signed difference CALC-MEAS divided by the uncertainty of that difference. • Ratio R/U < 2.0
U/S Clusters	<ul style="list-style-type: none"> • Summary of singular value decomposition analysis. It shows clusters of source which the model cannot easily distinguish between and that are likely to be interfering with the model's ability to provide a good set of SCE's. • U/S Clusters : No clusters.

Protocol for applying and validating the CMB model, EPA, 1987

C/M Ratio는 모델계산치와 측정치의 비율로 이 값이 1에 가까울수록 모델결과가 적합함을 의미한다.

Ratio R/U는 화학종에 대한 모델계산치와 측정치사이의 잔차와 그 잔차에 대한 불확실성과의 비이다. 이 값에 대한 절대값이 작을수록 모델이 그 화학종을 잘 표현해 주고 있음을 의미하며, R/U값이 $|2|$ 보다 크면 잔차가 상당히 크다는 것을 의미한다.

U/S(Uncertainty/Similarity) Cluster는 오염원 프로파일들 사이의 지나친 유사성으로 인해 혹은 개개의 프로파일들의 높은 불확실성으로 인해 발생한다.



Ⅲ. 실험 및 분석방법

1. 시료의 채취

제주지역 PM10의 오염원을 규명하기 위한 시료채취지점은 Fig. 3에서 보는 바와같이 제주시 건입동(북위 33°31' 동경126°32')에 위치한 제주지방기상청(Site M)과 제주시 아라동 제주대학교(Site U)로 선정하였다. Site M은 시내중심가에 위치하는 지점으로 북쪽 300 m 지점의 바다와 접해 있으며, Site U는 해발 300 m인 중산간 지대로서 북쪽에 위치한 해안에서 7 km이상 떨어져 있으며, 주변이 삼림으로 둘러싸여 있는 지점이다.

시료 채취는 1999년 12월부터 2000년 8월까지 9회에 걸쳐 이루어졌으며, 매회 시료포집기간은 12~20일로 연속하여 포집하였으며 측정기간동안의 시료채취조건을 Table 7에 나타내었다.

본 연구에 사용된 미세입자의 포집장치는 다단계분진포집기(8 stage non viable cascade impactor)로 유량은 $1 \text{ ft}^3/\text{m}$ 이 유지되도록 하였으며, 여지는 직경 80 mm, Pore size 1.0 μm 인 Membrane filte를 사용하였다. 각 측정지점에 설치된 포집 장치는 PVC판을 이용하여 자체 제작한 높이 50 cm, 폭 30 cm, 넓이 20 cm의 shelter안에 설치하여 강우나 태양열로부터 기기와 모터의 손상을 방지하였다. 다단계 포집장치의 원리는 유선(streamlines)을 따라 흐르는 미세입자들이 각 단 표면에 충돌하여 큰 입자는 단 표면에 부착되어 포집되고, 미세입자는 관성력에 의해 빠른 속도로 다음 단면으로 이동하는 것으로, 펌프 유입구쪽으로 공기를 흡입하면 공기 중의 입자들은 크기별로 각 단의 여지에 포집되는데, 포집기의 0단은 공기역학적 직경이 9.0~10 μm , 1단은 5.8~9.0 μm , 2단은 4.7~5.8 μm , 3단은 3.3~4.7 μm , 4단은 2.1~3.3 μm , 5단은 1.1~2.1 μm , 6단은 0.65~1.1 μm , 7단은 0.43~0.65 μm 범위의 크기를 가진 입자가 포집되며, 마지막 단인 backup filter에는 0.43 μm 이하의 미세 입자가 포집된다.

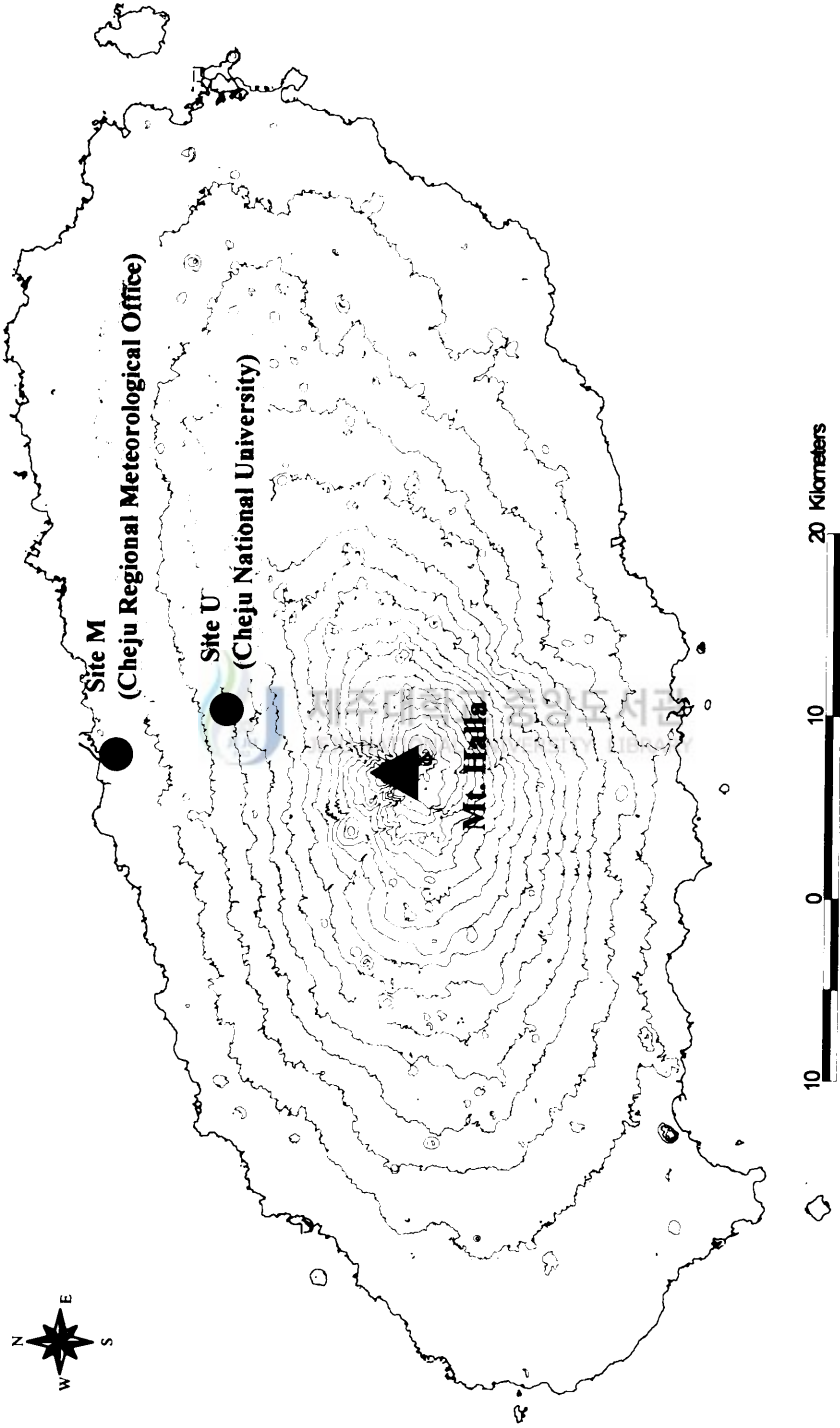


Fig 1. The location of sampling sites.

Table 7. Sampling condition

Sampling site	Sample No.	Sampling Period	Wind direction	Wind speed(m/s)	Yellow sand days
Site M.	M1	12/09/99-12/23/99	N	4.57	-
	M2	01/19/00-02/02/00	N	6.12	-
	M3	02/02/00-02/16/00	NNW	5.11	-
	M4	03/17/00-03/31/00	NW	4.94	23, 24, 26, 27, 28, 29
	M5	04/03/00-04/17/00	WNW	3.99	7, 8, 10
	M6	04/17/00-04/29/00	WNW	4.10	21, 26, 27
	M7	06/09/00-06/29/00	W	2.50	-
	M8	07/07/00-07/29/00	ENE	3.23	-
	M9	08/11/00-08/24/00	S	2.30	-
Site U.	U1	12/09/99-12/23/99	N	4.57	-
	U2	01/19/00-02/02/00	N	6.12	-
	U3	02/02/00-02/16/00	NNW	5.11	-
	U4	03/17/00-03/31/00	NW	4.94	23, 24, 26, 27, 28, 29
	U5	04/03/00-04/17/00	WNW	3.99	7, 8, 10
	U6	04/17/00-04/29/00	WNW	4.10	21, 26, 27
	U7	06/09/00-06/29/00	W	2.50	-
	U8	07/07/00-07/29/00	ENE	3.23	-
	U9	08/11/00-08/24/00	S	2.30	-

2. 시료의 전처리 및 분석방법

포집된 시료는 즉시 회수하여 데시게이터에 넣고 항량하여 시료채취 전·후의 무게를 측정하여 분진량을 구하였고, 각 단별로 포집된 분진은 공기역학적 직경 2.1 μm 을 기준으로 하여 2.1 μm 이하의 입자는 미세입자(fine particle)로, 2.1 μm 보다 큰 입자는 조대입자(coarse particle)로 구분하였다. 각 단별로 포집된 여지는 항량하여 무게를 측정한 후 분진 중에 함유된 각종 성분의 분석을 위해 각 여지를 1/2로 절단하여 한 부분은 불용성 성분 분석에 나머지는 수용성 성분 분석에 이용하였다.

Figure 4는 각 항목의 분석에 필요한 시료의 전처리 과정을 나타낸 것으로서 수용성 이온성분의 전처리는 시료여지를 알맞게 절단하여 50 ml 초순수 증류수를 가하고 6시간 동안 진탕한 용출액을 Pore size 0.45 μm membrane filter로 거른 후 이를 수용성 성분 분석용 시료로 이용하였다. 미량원소의 분석을 위한 전처리 과정은 절단한 여지를 플라스크에 넣고 질산 15 ml와 1:1 염산 70 ml를 가하고 환류냉각기를 부착하여 1.5시간 동안 수욕상에서 중탕한 후 membrane filter로 여액을 거른 후 이를 분석용 시료로 이용하였다.

각 성분들은 Table 8에 나타낸 방법으로 분석을 행하였으며, 분석 성분은 제주 지역의 주요 오염원에서 배출되는 성분과 CMB모델의 수행시 적합성을 고려하여 수용성 9개 성분, 미량원소 21개 성분으로 총 30개 성분을 선정하였으며, 이는 EPA source profiles에서 추출된 성분중 질량분율이 0인 성분과 중요하지 않은 성분은 제외한 것으로 분석기기의 검출한계 또한 고려하여 선정하였다.

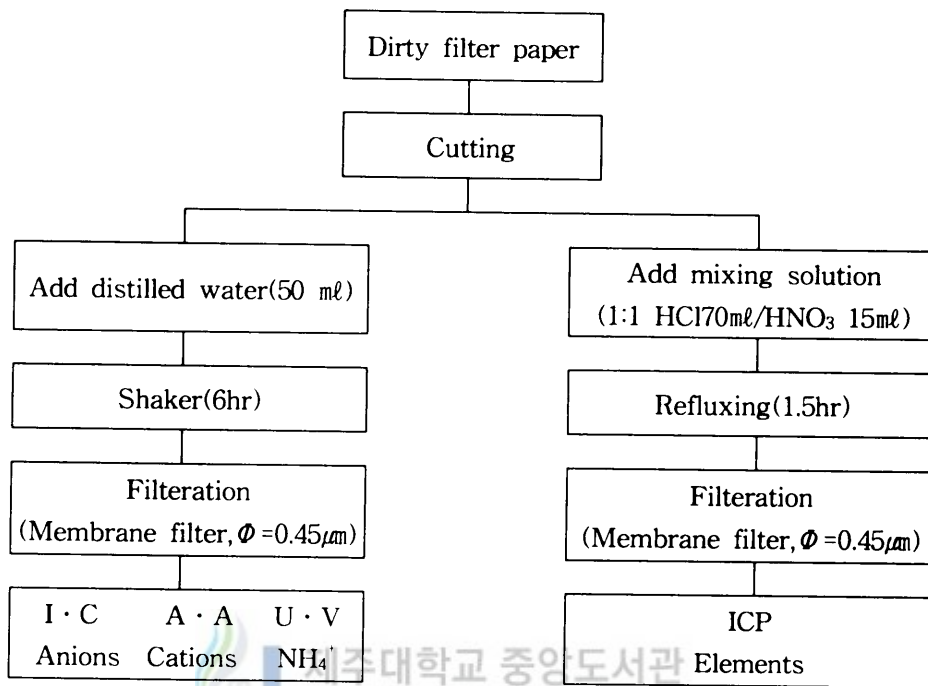


Fig 4. Preparation procedure for water soluble ions and elements.

Table 8. Analytical method used this study

Species	Analytical method	Model name
Na, Mg, Si, S, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Ba, Pb, Hg, Al, K, Ni, Mo, P, Sr	Inductively Coupled Plasma (ICP)	IRIS Advantage
NH ₄ ⁺	UV/VIS Spectrophotometry (Indophenol Blue Method)	UV 8452
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , F ⁻	Ion Chromatography (IC)	DIONEX DX500
Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺	Atomic Absorption Spectrophotometry(AAS)	AA-6701F

IV. 결과 및 고찰

1. PM10의 농도

PM10 시료의 측정은 1999년 12월부터 2000년 8월 사이에 제주지방기상청 (Site M)과 제주대학교(Site U)에서 이루어졌으며, 측정 결과를 Table 9에 나타내었다.

Site M에서 측정기간 동안의 PM10농도 범위는 19.60~73.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 평균은 38.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (S.D.=21.17)으로 나타났고, Site U에서 농도 범위는 13.40 ~ 71.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 평균 36.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (S.D.=21.65)으로 두 지점이 서로 비슷한 농도분포를 나타냈다. 이는 제주지역의 대기오염 자동측정망인 제주시 이도동과 고산리에서 본 실험과 비슷한 기간에 측정한 평균 PM10농도 31.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 37.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비슷한 수치로 우리나라의 연평균 대기환경기준이 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것과 비교해 볼때 제주지역의 대기질이 청정함을 알 수 있다(환경부, 2000). 이러한 결과들은 서울지역 83.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 수원지역 111.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (김 과 김, 2000), 경기도 용인지역의 111.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (신 과 김 등, 1996) 등과 비교해 볼 때 훨씬 낮은 농도이다.

측정기간 중 황사가 발생한 날은 12일이었으며, 황사시 풍향은 주로 북서에서 서북서풍이 우세하였으며, 풍속은 3.1~8.7 m/s로 비교적 강한 바람이 불었다. 황사시 Site M에서 평균 PM10농도는 66.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, Site U에서 63.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 이는 평상시 Site M이 25.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Site U가 23.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것에 비해 각각 2.6배와 2.7배 더 높은 것이다. 이는 이도동과 고산리의 대기오염 자동측정망에서 측정한 결과 황사시가 평상시에 비해 각각 1.6배와 1.7배 더 높았고, 서울지역에서 황사시 측정한 PM10농도는 평상시에 비해 2.4배 더 높았으며(장 등, 1999), 강화지역의 경우 1.8배 더 높게 나타난 것과 비슷한 경향을 보였다(강 등, 1998).

Table 9. Variation of PM10 concentrations

Sites	Sampling period	Item	PM10	Fine	Coarse
Site M.	Yellow sand period	Range	59.69	20.60	39.10
			73.43	24.72	48.86
		Mean	66.19	23.30	42.90
			S.D.	6.90	2.34
	Normal period	Range	19.60	9.74	8.53
			30.69	19.56	14.41
		Mean	25.03	14.64	10.39
			S.D.	4.50	3.34
Site U.	Yellow sand period	Range	50.77	22.20	28.57
			71.10	26.87	44.52
		Mean	63.61	24.51	39.10
			S.D.	11.17	2.34
	Normal period	Range	13.40	7.37	5.67
			32.35	23.74	8.63
		Mean	23.42	16.12	7.30
			S.D.	7.36	6.54

S.D. : Standard deviation

Figure 5와 6은 각 측정지점에서 PM10농도의 변동특성을 그림으로 나타낸 것이다. Site M에서 미세입자의 농도범위는 9.74~24.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 조대입자의 농도범위는 8.53~48.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며 Site U에서 미세입자의 농도범위는 7.37~26.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 조대입자의 농도범위는 5.67~44.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 두 지점 모두 미세입자보다는 조대입자에서 농도의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 측정기간 중 황사가 발생한 시기는 4회, 5회, 6회로 Site M의 경우 M4, M5, M6 그리고 Site U의 경우는 U4, U5, U6이 황사시 채취한 시료이며, 그림에서 보는 바와 같이 황사시에는 PM10농도에 대한 미세입자농도의 비율은 Site M이 35.0 %, Site U가 38.5 %로 조대입자가 미세입자 보다 PM10에 대해 차지하는 비율이 높은 것으로 나타났다. 반면, 평상시에는 Site

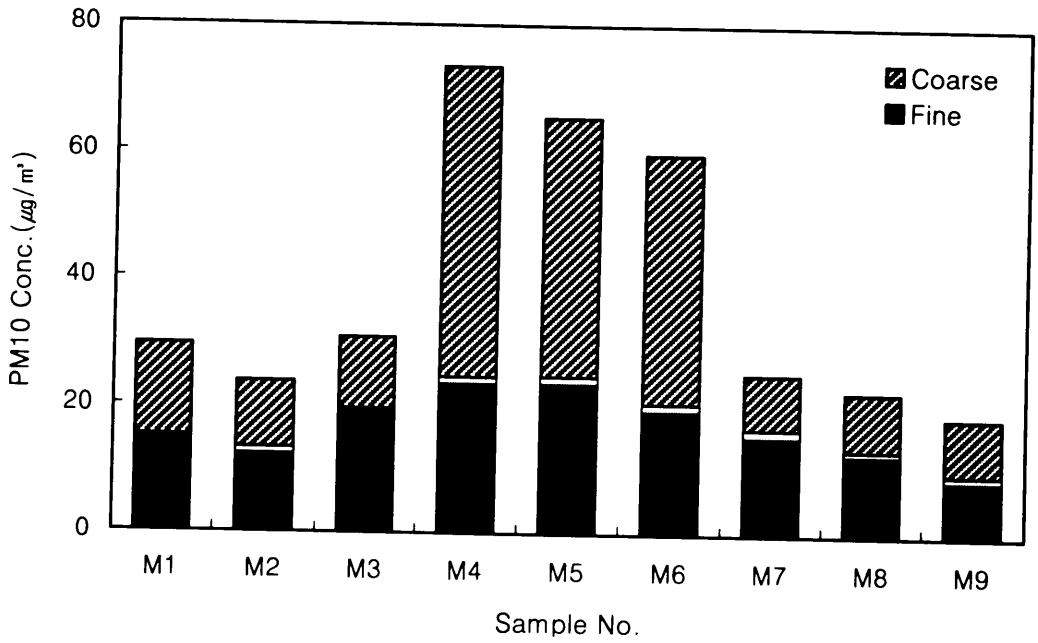


Fig. 5. PM10 concentrations at Site M.

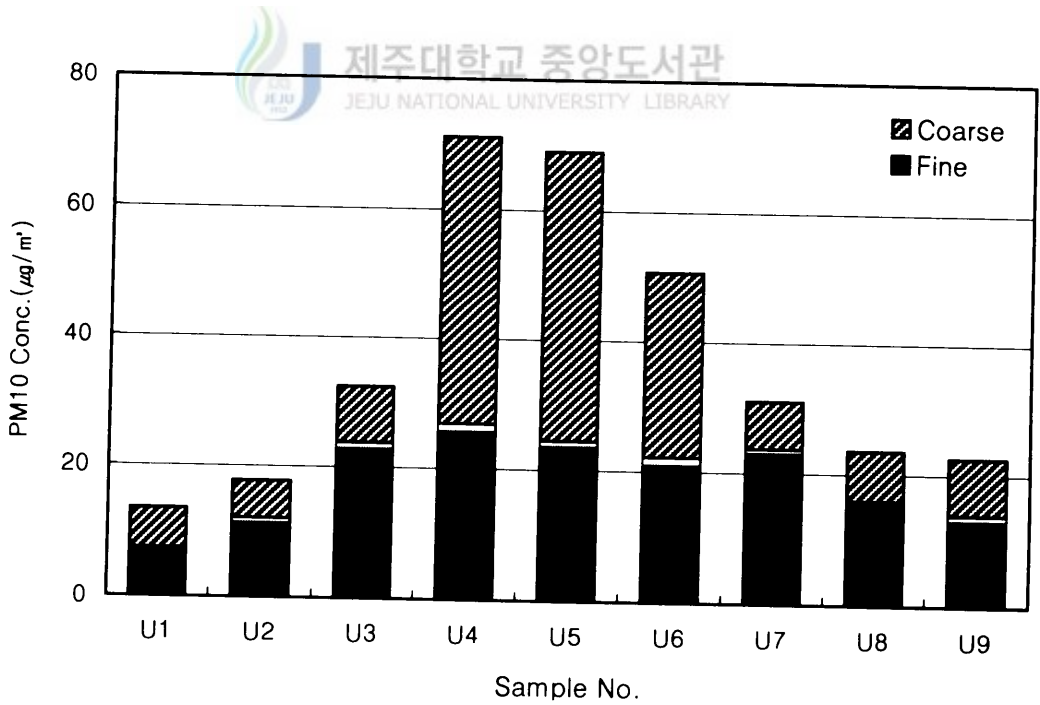


Fig. 6. PM10 concentrations at Site U.

M이 58.0 %, Site U가 68.9 %로 나타나 미세입자가 조대입자 보다 PM10에 대해 차지하는 비율이 더 높은 것으로 나타났다. 황사입자의 경우 자연적인 토양 발생원으로서 입경분포가 주로 1~3 μm 이상의 조대입자군에 속하는 것으로 알려져 있으며(신 등, 1992), 전 등(1999)이 서울과 충남 안면도에서 관측한 에어로졸의 수(number) 농도에 의하면 황사기간 중 에어로졸의 수 농도는 1~10 μm 범위에서 급격히 증가하며 특히, 입자의 크기가 2~6 μm 의 범위에 집중된 것으로 나타났다.

2. PM10의 화학적 조성특성

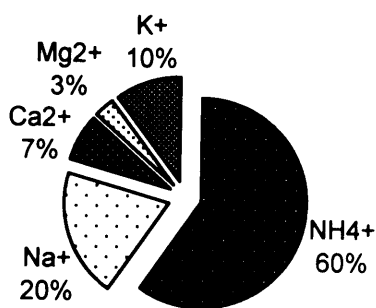
2-1. 수용성 이온성분의 조성

PM10 시료의 수용성 이온성분 농도분포 경향을 알아보기 위해 수용성 음이온 성분 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- 과 양이온성분 NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 을 각각 분석하였다.

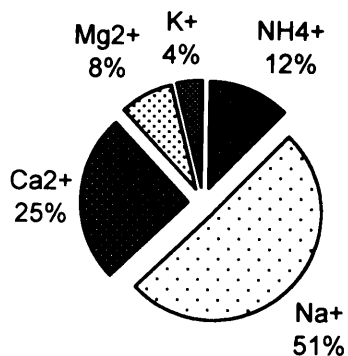
Figure 7과 8은 각 측정지점에서 수용성 성분의 조성비를 미세입자와 조대입자별로 구분하여 나타낸 것이다. Site M에서 PM10에 대한 양이온 성분의 조성을 살펴보면 미세입자의 경우 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타났으며, 조대입자의 경우는 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 의 순으로 나타나 미세입자에서는 NH_4^+ 가 총 수용성 성분 중 60 %를 차지하여 가장 높은 조성비를 보였으며, 조대입자에서는 Na^+ 가 51 %로 높은 조성비를 나타냈다.

음이온 성분의 조성을 살펴보면 미세입자의 경우 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 의 순으로 나타났으며, 조대입자의 경우는 $\text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{F}^-$ 의 순으로 나타나, 미세입자 중에서 SO_4^{2-} 의 조성비가 68 %로 가장 높게 나타났으며, 조대입자의 경우는 Cl^- 이 41 %, NO_3^- 가 38 %로 높은 조성비를 보였다.

Site U에서 PM10에 대한 양이온 조성을 살펴보면 미세입자의 경우 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타났으며, 조대입자의 경우는 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ >$

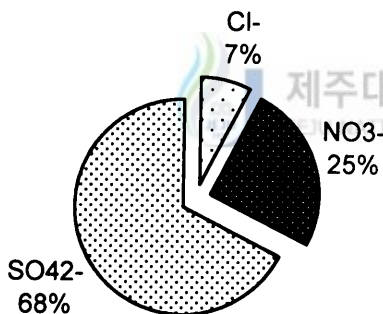


Fine

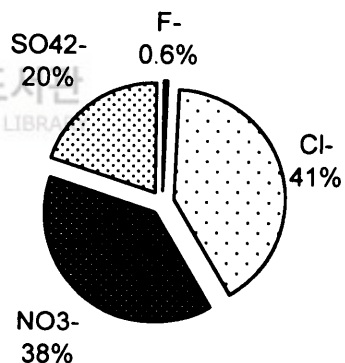


Coarse

<Cations>



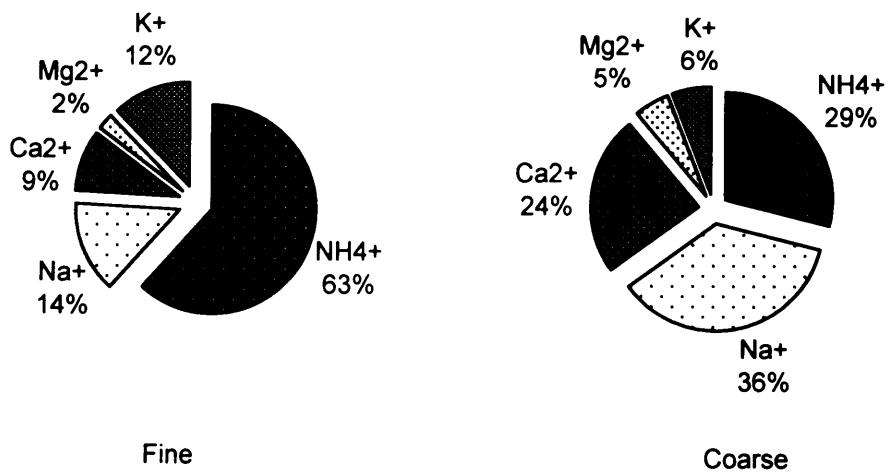
Fine



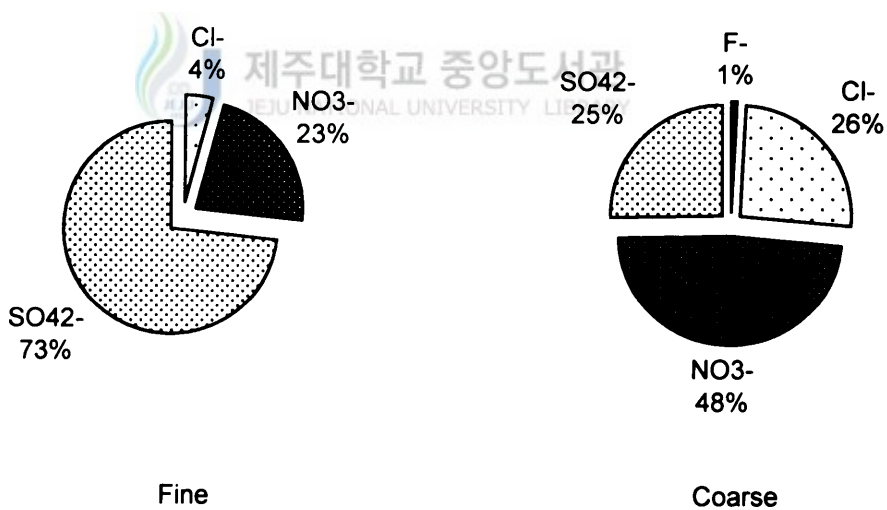
Coarse

<Anions>

Fig. 7. Composition of water soluble ions in PM10 at Site M.



<Cations>



<Anions>

Fig. 8. Composition of water soluble ions in PM10 at Site U.

$\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타나, 미세입자에서는 NH_4^+ 의 비율이 63 %로 가장 높게 나타났으며, 조대입자에서는 Na^+ 가 36 %로 가장 높았고 NH_4^+ 가 29 %, Ca^{2+} 가 24 %으로 나타났다.

음이온 성분의 조성을 살펴보면 미세입자는 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 의 순이며, 조대입자는 $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{F}^-$ 의 순으로 나타나, 미세입자의 경우는 SO_4^{2-} 가 73 %로, 조대입자의 경우는 NO_3^- 가 48 %로 Cl^- 이 26%, SO_4^{2-} 가 25 %로 높은 조성비를 보였다.

SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 성분이 미세영역에서 높은 농도를 보이는 것은 이러한 성분은 대부분 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 등의 형태로 존재할 가능성이 크며, 이들 입자의 경우는 주로 2 μm 이하의 미세영역에 속하기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 Cl^- , NO_3^- , Na^+ 의 성분이 조대영역에서 높은 농도를 보이는 것은 이들 성분이 대체로 NaCl , NaNO_3 등의 형태로 존재할 가능성이 크며, 이들 입자의 경우 대체로 조대영역에 속하기 때문인 것으로 사료된다(Chow 등, 1996).

Table 10은 황사시 수용성 성분의 농도와 총 수용성 성분농도에 대한 각 수용성 성분의 조성비를 나타낸 것이다. Site M에서 PM10에 대한 수용성 음이온 성분은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 의 순으로 나타났으며, 양이온 성분은 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타났다. 이를 미세입자와 조대입자별로 살펴보면 미세입자에서 수용성 음이온 성분은 SO_4^{2-} 가 3.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (42.80 %)으로, 양이온 성분은 NH_4^+ 가 1.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (15.39 %)로 가장 높은 농도를 보인 반면, 조대입자에서 음이온 성분은 Cl^- 이 1.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 %), 양이온은 Na^+ 가 0.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (17.73 %)로 가장 높게 나타났다.

Site U의 경우 PM10에 대한 수용성 음이온 성분은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 의 순으로 나타났으며, 양이온 성분은 $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타났다. 이를 미세입자와 조대입자별로 살펴보면 미세입자의 경우 수용성 성분은 SO_4^{2-} 가 3.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (47.29 %), 양이온 성분은 NH_4^+ 가 1.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (13.06 %)으로 가장 높게 나타난 반면, 조대입자에서는 양이온의 경우 NO_3^- 가 1.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (27.23 %)으로 음이온의 경우는 Ca^{2+} 가 0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (17.66 %)으로 가장 높게 나타났다.

Table 10. Content of water soluble ions for PM10 during yellow sand period in Cheju area

		(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
Item		Water soluble anions				Water soluble cations					
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	
PM10	Conc.	0.041	1.709	2.597	3.887	0.327	1.099	1.378	0.195	1.227	
	wt(%)	0.33	13.72	20.84	31.20	2.63	8.82	11.06	1.57	9.85	
Site M	Fine	Conc.	0.000	0.492	1.442	3.162	0.284	0.322	0.478	0.070	1.137
		wt(%)	0.00	6.65	19.52	42.80	3.84	4.36	6.48	0.95	15.39
	Coarse	Conc.	0.041	1.217	1.155	0.725	0.044	0.777	0.899	0.125	0.090
		wt(%)	0.80	24.00	22.77	14.30	0.86	15.31	17.73	2.46	1.77
PM10	Conc.	0.041	1.149	2.780	4.453	0.416	1.203	1.040	0.171	1.116	
	wt(%)	0.33	9.29	22.48	36.00	3.36	9.73	8.40	1.38	9.02	
Site U	Fine	Conc.	0.000	0.368	1.501	3.629	0.382	0.374	0.351	0.066	1.002
		wt(%)	0.00	4.80	19.56	47.29	4.97	4.88	4.58	0.86	13.06
	Coarse	Conc.	0.041	0.781	1.278	0.824	0.034	0.829	0.688	0.105	0.114
		wt(%)	0.86	16.63	27.23	17.55	0.73	17.66	14.66	2.42	2.43

Table 11은 평상시의 수용성 성분의 농도와 총 수용성 성분에 대한 각 수용성 성분의 조성비를 나타낸 것이다. 두 지점 모두 PM10에 대한 수용성 음이온의 조성은 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 의 순으로, 양이온 성분은 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타나 미세먼지의 경우 두 지점 모두 Cl⁻, NO₃⁻, K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ 성분이 황사시에 평상시 보다 높은 농도를 보였으며, 그 중에서도 Ca²⁺ 성분의 증가율이 가장 높아 Site M과 Site U에서 각각 5.5배와 4.3배 더 높은 것으로 나타났다. 반면 SO₄²⁻, NH₄⁺ 성분은 황사시가 평상시보다 더 낮은 것으로 나타났다.

조대입자의 경우 두 지점 모두 F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺ 성분이 황사시에 평상시 보다 높은 농도를 보였으며, 역시 Ca²⁺ 성분이 가장 큰 증가율을 보여 Site M과 Site U에서 각각 7.8배와 7.9배 더 높은 농도를 보인 반면 K⁺,

NH₄⁺ 성분은 황사시가 평상시보다 더 낮은 농도를 보였다.

한편 이 등(1993)이 서울, 부산, 대구, 광주 의 4개 도시에서 황사시에 총 부유 분진 중 금속성분과 수용성 성분을 측정 한 바에 의하면 수용성 성분의 경우는 어떤 이온 성분은 최고농도와 최저농도의 차이가 2배를 나타내기도 하지만 황사 시와 평상시에 현저한 화학적 특징으로서의 농도 차이는 볼 수 없었으며, 다만 F⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺ 성분의 농도는 황사시에 더 높게 측정된다고 보고하였다.

장 (1999)은 황사시에 Cl⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 성분은 거의 변화를 보이지 않았으며 K⁺, Na⁺, Ca²⁺ 성분은 두 배 이상의 차이를 보였고, Mg²⁺, SO₄²⁻ 성분은 약 1.5배 더 높게 나타났다고 하였다.

Table 11. Content of water soluble ions for PM10 during normal period in Cheju area

Item		(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)								
		Water soluble anions				Water soluble cations				
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
PM10	Conc.	0.006	1.389	2.157	3.923	0.216	0.157	0.867	0.145	1.409
	wt(%)	0.06	13.53	21.00	38.20	2.11	1.53	8.44	1.41	13.72
Site M Fine	Conc.	0.000	0.313	1.151	3.459	0.163	0.059	0.348	0.055	1.218
	wt(%)	0.00	4.62	17.01	51.13	2.41	0.87	5.14	0.81	18.01
Coarse	Conc.	0.006	1.077	1.006	0.464	0.053	0.099	0.519	0.090	0.191
	wt(%)	0.17	30.72	28.70	13.25	1.52	2.82	14.80	2.57	5.46
PM10	Conc.	0.000	0.486	1.724	4.064	0.278	0.193	0.675	0.100	1.868
	wt(%)	0.00	5.17	18.37	43.29	2.96	2.05	7.19	1.07	19.90
Site U Fine	Conc.	0.000	0.124	0.960	3.736	0.169	0.088	0.237	0.040	1.302
	wt(%)	0.00	1.86	14.43	56.13	2.54	1.32	3.56	0.60	19.57
Coarse	Conc.	0.000	0.362	0.764	0.328	0.109	0.105	0.438	0.061	0.565
	wt(%)	0.00	13.25	27.97	12.00	3.98	3.84	16.04	2.22	20.70

신 등(1991)은 황사시 Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 성분이 모두 2.1~7.0 μm 범위에서 증가하였으며 F^- , NO_3^- 의 농도는 평상시와 황사시 모두 입경에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다고 하였으며, 이 등(1988)에 의하면 황사현상시 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 성분의 입도분포는 조대입자의 형태로 F^- , NH_4^+ 성분은 미세입자의 형태로 나타났다.

미세분진에는 일반적으로 해염성분이 상당량 함유되어 있으며, 제주지역은 지리적 특성상 비산 해염입자의 영향을 많이 받을 것으로 예상된다. 특히 봄철에는 황사가 북서 계절풍을 타고 중국 대륙으로부터 우리 나라로 수송되어오는 도중 해염성분을 함유하게 되므로 그 영향이 클 것으로 예상되어 해염입자의 영향을 정량적으로 고려할 필요가 있다. 이를 확인하기 위해 Na^+ 을 지표성분으로 하여 황사시와 평상시의 수용성 성분에 대한 농축계수(Enrichment factor; EF)를 다음의 식(Davis, 1972; Chesselet 등, 1972; Nishikawa 등, 1986; 이 등, 1995)에 의해 계산하고, 그 결과를 Table 12에 나타내었다.

$$EF = (C_i/C_{Na^+})_{Aerosol} / (C_i/C_{Na^+})_{Seawater} \quad (6)$$

식(6)에서 $(C_i/C_{Na^+})_{Aerosol}$ 과 $(C_i/C_{Na^+})_{Seawater}$ 는 입자상물질과 해염성분의 성분비이고, C_i 에서 i 는 각 이온성분의 농도이다. 일반적으로 각 이온성분에 대해 구한 EF 값이 1에 가까울수록 그 성분의 기원은 지표성분의 것과 같음을 의미한다. EF 값이 지표성분에 따라 차이를 보이기 때문에 일반적으로 3~5이하의 원소들은 지표성분과 같은 기원을 갖는 것이므로 그 이상의 값은 인위적 발생원에 기원된 원소라고 간주한다.

Cl^- 의 경우 EF 값이 0.29~1.16으로 대체로 1보다 작은 값을 보이고 있는데 이는 해염에서 기원된 Cl^- 이 산성물질인 $H_2SO_4^{2-}$ 나 HNO_3 와 화학반응을 일으켜 HCl 로 전환되면서 Cl^- 이 일부 손실되었을 가능성이 있음을 의미한다. SO_4^{2-} 와 K^+ 의 경우 미세입자에서는 각각 26.22~62.65와 12.68~29.35으로 나타났고 조대입자에서는 2.97~4.75와 1.31~6.70으로 나타나 두 성분 모두 미세입자는 해염의 영향보다 다른 요인에 의해 대기중으로 기원되었으며, 조대입자는 주로 해염입자의 형태로 유래될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

Table 12. Seawater enrichment factor calculated for PM10 during yellow sand period

Species	$(C_i/C_{Na^+})_S$	$(C_i/C_{Na^+})_{Aerosol}/(C_i/C_{Na^+})_{Seawater}$			
		Site M		Site U	
		Fine	Coarse	Fine	Coarse
Cl	1.80	0.57(0.50)	0.75(1.16)	0.58(0.29)	0.63(0.46)
SO ₄ ²⁻	0.25	26.22(39.45)	3.20(3.55)	40.97(62.65)	4.75(2.97)
K ⁺	0.04	16.03(12.68)	1.31(2.77)	29.35(19.34)	1.35(6.70)
Ca ²⁺	0.04	17.73(4.43)	22.73(5.02)	28.02(9.77)	31.70(6.30)
Mg ²⁺	0.12	1.23(1.32)	1.16(1.45)	1.56(1.40)	1.27(1.15)

() : Normal period

Ca²⁺ 성분은 황사시에는 17.73~31.70으로 나타나 비해양기원의 영향으로 유래될 가능성이 큰 반면, 평상시에는 4.43~9.77로 해양기원과 비해양기원의 영향을 동시에 받아 유래된 것으로 추정된다. Mg²⁺ 성분은 1.15~1.56으로 나타나 대부분 해양기원으로 유래된 것으로 보여진다.

2-2. 미량원소의 조성특성

Table 13은 측정기간동안 미량원소의 조성분포를 나타낸 것이다. Site M과 Site U 두 지점 모두 토양기원성분인 Si, Al, Ca, Fe, K 과 해양기원 성분인 Na, Mg 그리고 인위기원성분인 S가 미량원소의 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 미량원소의 총농도는 황사시가 평상시에 비해 2.2~4.6배 더 높게 나타났으며 그 중에서도 Si는 3.1~4.8배, Al은 8.2~10.7배, Ca은 3.7~7.2배, Fe은 4.2~9.2, K은 2.9~5.1배, Na은 1.3~2.1배, Mg는 3.5~4.7배 S이 1.5~4.7배로 황사시에 더 높은 것으로 나타났다.

이 등(1993)에 의하면 황사시 금속성분의 농도는 평상시에 비해 1.9배~2.1배로 높게 측정되었으며, 미량원소의 경우 황사시에 평상시보다 2.2~4.6배정도 더 높게 나타났으며 Ca, Fe, Mn, Mg, K 등의 토양기원 성분이 높은 농도

Table 13. Average elements concentrations in PM10

Elements	(unit : ng/m ³)							
	Yellow sand period				Nomal period			
	Site M		Site U		Site M		Site U	
	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse	Fine	Coarse
Si	519.6	1063.7	552.4	1191.6	126.0	248.3	160.4	245.9
Al	252.2	753.0	308.1	777.7	23.4	80.7	42.0	94.8
Ca	581.1	1445.8	636.0	1449.7	156.8	217.6	152.6	201.0
Fe	376.7	1188.5	459.6	861.3	90.7	171.0	56.6	93.4
K	382.5	254.7	418.6	261.8	132.0	72.3	145.7	51.3
Ti	6.8	27.9	7.6	25.0	6.2	13.12	6.4	50.0
Cr	60.6	163.2	67.2	157.6	24.0	41.4	17.7	28.7
Na	452.4	890.5	432.9	819.8	264.4	525.7	343.3	390.3
Mg	161.7	320.8	154.9	219.8	44.4	90.5	32.7	57.5
Pb	29.1	5.7	29.7	9.6	12.0	3.6	12.2	2.4
V	11.3	0.0	0.5	2.6	1.3	3.6	0.00	0.9
S	1743.2	595.5	1972.4	753.8	1068.9	156.8	1316.0	162.6
Zn	72.4	28.6	67.0	57.8	30.7	23.4	30.9	17.8
Ba	10.5	14.0	10.2	22.9	10.6	11.7	17.1	25.9
Mn	36.5	95.2	37.9	90.1	3.3	10.3	3.1	3.2
Cu	4.4	4.3	4.6	3.4	1.9	1.9	1.8	1.3
Sr	2.7	6.6	2.9	5.0	1.3	1.9	1.2	1.6
Co	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.8	0.7	0.7
Ni	1.1	1.7	1.2	2.2	2.3	3.3	0.9	4.7
Cd	0.6	0.00	0.6	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0
Mo	24.3	57.6	25.4	59.9	5.0	9.8	4.2	6.2
P	28.8	49.7	30.0	22.02	31.4	28.9	31.7	29.5

를 보였다고 했으며, 신과 김(1992)과 장(1999)도 황사시에 Fe, Al, Ca성분이 평상시보다 높은 농도를 보여 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

한편 미세입자의 미량원소 중 가장 높은 농도를 보인 성분은 S로 평균 농도는 Site M과 Site U에서 각각 904.4 ng/m³, 1267.3 ng/m³으로, 이는 PM2.1 농도의 6.8 %, 7.6 %에 해당된다. 황의 농도를 국내의 자료와 비교하면, 대전시 주거지역에서 TSP기준으로 2367 ng/m³ (서, 1992), PM2.5기준으로 청주시 1135.8 ng/m³ (강, 1998)으로 지역별로 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 외국의 오염지역의 PM2.5와 비교하면 Boston 1840 ng/m³(Thurston 등, 1985), Santiago 2100 ng/m³ (Rojas 등, 1989)로 본 측정결과에서의 황의 농도는 결코 낮은 값이 아닌 점을 미루어보아 겨울철 측정기간 동안 어떤 오염원의 영향을 받고 있음을 짐작할 수 있다.

Figure 9와 10은 각 측정지점에서의 미량원소 농도분포를 미세입자와 조대입자별로 나타낸 것이다. 황사시에 두 지점 모두 토양기원 원소인 Si, Al, Ca, Fe, K과 해양기원 원소인 Na, Mg가 미세입자 보다는 조대입자쪽에서 더 높은 농도를 보이고 있다. 반면, 평상시에는 S를 제외한 대부분의 성분들이 미세입자와 조대입자의 농도수준이 비슷한 것으로 보아 황사시 유입되는 성분은 대부분이 토양이나 해양기원 성분이며, 이러한 성분들은 주로 조대입자의 형태로 유입되고 있음을 알 수 있다.

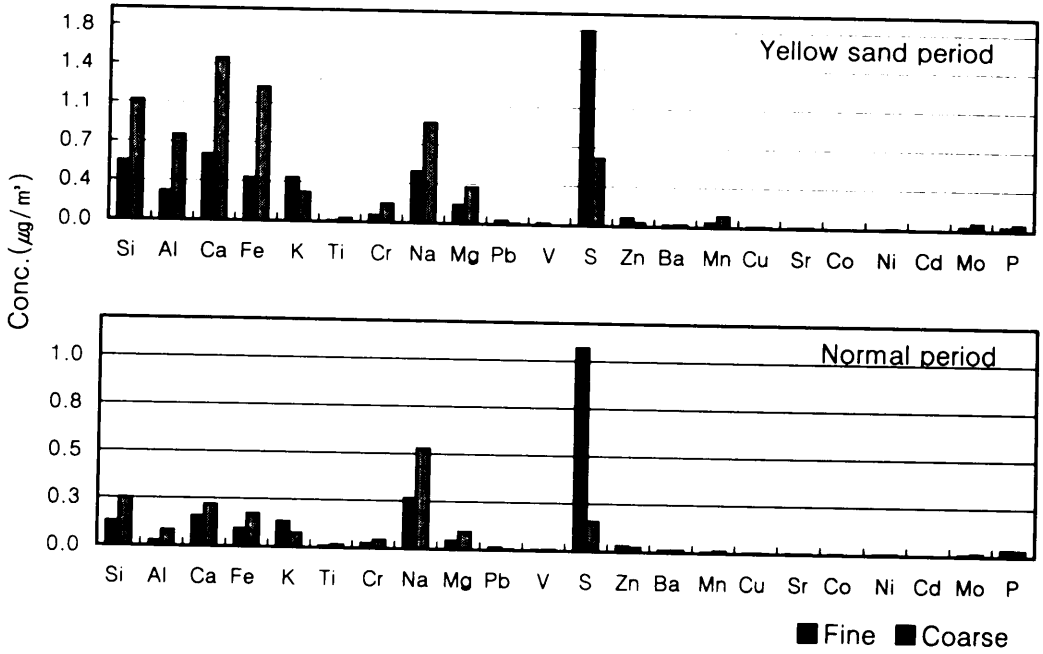


Fig. 9. Average concentrations of elements at Site M.

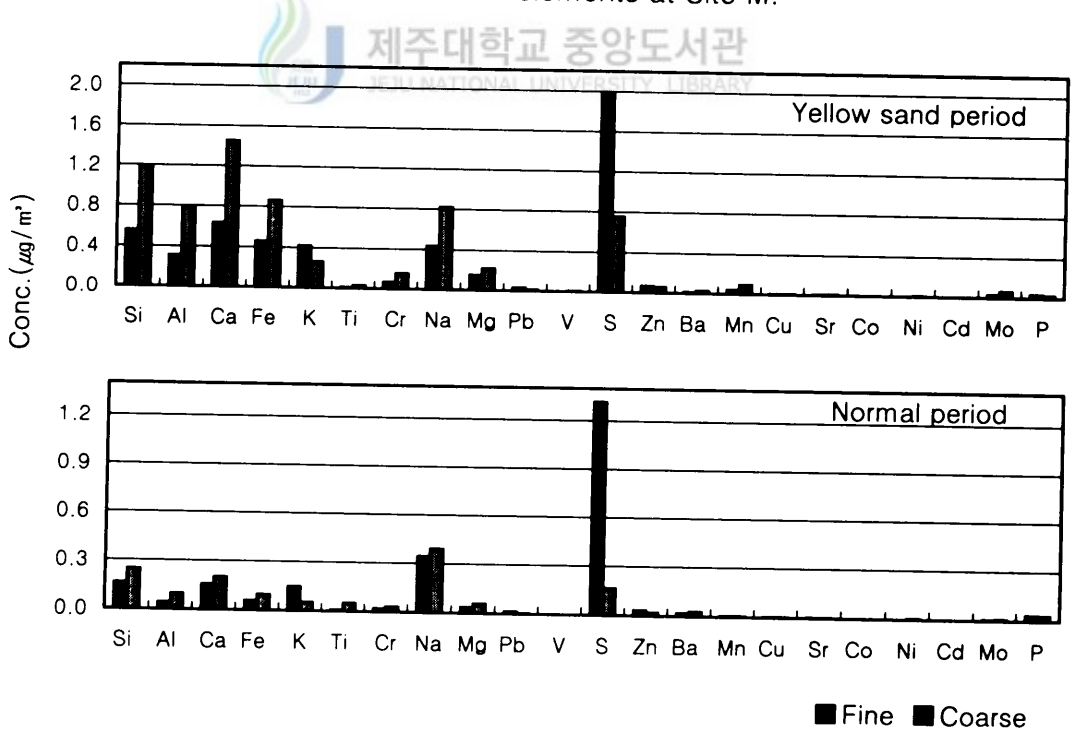


Fig. 10. Average concentrations of elements at Site U.

3. CMB모델을 이용한 PM10의 오염원 할당

제주지역 대기중 PM10에 대한 각 오염원의 정량적인 기여도를 산정하기 위해 CMB모델을 사용하였다. 모델의 입력자료로는 오염원형(source types), 오염원 프로파일(source profiles), 오염원구성 화학종(chemical species), 대기질 농도자료(ambient concentrations)를 필요로 하며, 이들 입력자료를 선정하여 CMB Program에 적용하면 오염원 기여도 추정치(source contribution estimates)가 산정된다. 이때, 여러 통계자료(statistics and diagnostics)가 기여도와 함께 산출되어 모델계산치의 적합성(good-of-fit)여부를 평가하게 되며, 이를 토대로 하여 적합한 모델결과가 산출될 때까지 입력자료의 수정과 교체를 반복하게 된다.

3-1. 모델 입력자료 선정

황사시 제주지역 대기중 PM10에 기여하는 각 오염원의 기여도를 규명하기 위해 우선 제주지역의 주요 오염원을 자연기원 오염원과 인위기원 오염원으로 분류하여 조사하였다. 그리고 대기중 가스상 오염물질의 대부분을 차지하고 있는 SO₂와 NO_x 등의 일차 오염물질의 경우 NH₄⁺과 같은 선형물질과 반응하여 대기중에서 수송이나 변환 등의 과정을 통해 이차오염물질을 형성하여 대기중 PM10을 상승시키는 원인이 되므로 NH₄NO₃와 (NH₄)₂SO₄를 이차 오염원으로 선정하였다. Table 14는 제주지역 대기중 PM10에 기여하는 각 오염원군을 분류하여 나타낸 것이다. 자연적인 오염원의 경우 봄철 황사현상시 우리나라에 주로 영향을 미치는 황사의 발원지인 타클라마칸사막, 고비사막, 황토지역의 토양을 오염원으로 선정하였으며, 제주지역의 자연적 지리적 특성을 고려하여 토양과 해양을 각각 선정하였다. 인위적인 오염원의 경우 우선 배출업소의 주요 사용 연료와 연료사용량을 파악하기 위해 1997년 제주통계연보를 근거로 오염원의 형태를 사업장종별로 살펴본 결과 경유연소시설, 중유연소시설을 오염원으로 선정하였다.

하지만 제주지역 배출업소의 경우 4, 5종이 대부분을 차지하고 있어 연료 사용량에 따른 오염물질 배출량이 적을 것으로 예상되어, 제주지역의 인위적인 오염원 중 큰 비중을 차지할 것으로 보이는 자동차를 사용 연료의 종류에 따라 디젤

자동차와 가솔린 자동차로 분류하여 선정하였다. 그리고 겨울철 가정 난방을 고려하여 등유연소 보일러와 석탄연소 보일러를 오염원으로 선정하였다.

CMB모델을 이용하여 측정지점에 기여하는 각 오염원의 기여도를 규명하기 위해서는 대상지역에 맞는 오염원 프로파일의 구성과 대기질 화학종자료의 정확한 측정이 매우 중요하다. 오염원 프로파일은 대상지역 오염원의 특성 및 조성비를 조사하여 오염원군의 종류와 수를 산정하고 측정된 오염원군의 배출물질 및 조성성분비를 실측하는 등 정확한 조사가 선행 되어야 한다. 하지만 제주지역의 경우 오염원 프로파일의 개발이 거의 전무한 실정이며, 본 논문에서 각 오염원에 대한 오염원 프로파일의 분류 및 구성성분비를 직접 측정하고 분석하기에는 너무 많은 시간과 경비를 요하게 된다. 따라서 각 오염원에 대한 오염원 프로파일을 U.S. EPA의 VOC/PM Speciate data system에서 추출하여 적용하였으며, 토양과 해양에 대한 프로파일의 경우는 강(1998)이 청주에서 측정하고 분석한 자료와 EPA의 자료를 조합하여 구성한 프로파일을 적용하였다. 황사에 대한 프로파일의 경우는 황사현상시 우리 나라에 주로 영향을 미치는 것으로 알려진 황사의 발원지인 타클라마칸사막과 고비사막 그리고 황토지역의 토양분석 자료를 중국해양연구소 논문집과 Mukai 등(1990)의 논문에서 발췌하여 적용하였다.

한편 CMB모델의 가정에 의하면 대기질 측정농도와 오염원 프로파일을 구성하고 있는 구성성분들 중 주요 화학종은 반드시 모델에 지정되어야 한다고 하였으며, 유사한 화학구성성분비를 보이는 오염원 프로파일들 사이에는 상호 유사성으로 인해 적절한 모델결과를 얻기가 힘들다고 하였다. 따라서 선정된 오염원형과 오염원 프로파일에 대한 주요 화학종을 살펴보았으며 이를 Table 15에 나타내었다.

Table 14. List of source types is to be applied in Cheju area

Source Types	Optional Comments	Mnemonics
Anthropogenic sources	External Combustion - Coal Briquette	EXCOA
	Oil Fired Power Plant - Heavy Oil	OFPPH
	External Combustion - Heavy Oil	EXCOH
	External Combustion - Light Oil	EXCOL
	Domestic Boiler - Kerosene	DOBOK
	Municipal incinerator	INCIN
	Diesel Vehicles	DIESL
	Gasoline Vehicles	GASL
	Cement Dust	CDUST
	Paved Road Dust	ROAD
	Agricultural Field Burning	AGBUN
	Field Burning	FBURN
Secondary sources	Ammonium Sulfate	AMSUL
	Ammonium Nitrate	AMNIT
Natural sources	Marine Aerosol	MARIN
	Soil Dust	SOILD
	Yellow Sand	YESD

Table 15. Classified source by the important species

Mnemonics	Species	Size
EXCOA	Al, Ca	F*, C**
OFPPH	Al, Si, S, Ca, V	C
EXCOH	S, Na	F, C
EXCOL	Al, Si, S, Ni	C
DOBOK	Fe, Ba, S	F, C
INCIN	Na, S, Cl, K, Zn, Pb	F, C
DIESL	SO ₄ ^z , S, Si, Pb, Al,	C
GASL	Pb	C
CDUST	Al, Si, Ca, Fe	F, C
ROAD	Al, Si, Ca, Fe	C
AGBUN	Cl, K, SO ₄ ^z	F, C
FBURN	Cl, K, Ca	C
AMSUL	SO ₄ ^z , NO ₃	F, C
AMNIT	NO ₃ , NH ₄ ⁺	F, C
MARIN	Na, Mg, S, Cl, SO ₄ ^z	F, C
SOILD	Al, Si, Ca, Fe	F, C
YESD	Si, Ca, Fe, K, Na, Mg	F, C

* : Fine particle (<2.1 μ m)

** : Coarse particle (2.1-10 μ m)

3-2. PM10의 오염원 할당 결과

CMB모델을 이용하여 제주지역 대기중 PM10의 오염원 기여도를 산정하기 위해 각 오염원군에 대한 오염원 프로파일 17개 항목과 이들 프로파일을 구성하고 있는 30개 화학종에 대한 분진 농도자료를 입력자료로 하였다. 17개 오염원군과 30개 화학종을 모두 지정하였을 경우에는 안정한 모델결과를 얻을 수 없었으며, 입력자료의 선택과 제거를 반복적으로 수행한 결과 가장 안정적인 결과를 나타내는 오염원군 13개 항목에 대한 기여도를 산출 할 수 있었다.

13개 오염원군은 황사(YESD), 석탄연소 보일러(EXCOA) 중유연소 외연기관(EXCH), 경유연소 외연기관(EXCL), 도시소각로(INCIN), 시멘트먼지(CDUST), 가솔린 자동차(GASL), 디젤 자동차(DIESL), 농작물소각(AGBUN), 토양(SOILD), 해양(MARIN), 황산염(AMSUL), 질산염(AMNIT)이었다. 이중 YESD는 황사현상이 있었던 시기에만 적용하였으며, AGBUN의 경우도 봄철이 시기적으로 유채나 보리 등의 농작물 소각이 빈번하게 이루어지는 3월~4월에만 적용하였다. 한편 EXCOA는 겨울철 가정난방을 고려하여 12월~2월에만 적용하였다.

Table 16~19는 CMB모델의 수행결과를 미세입자와 조대입자별로 나타낸 것이며, 모델결과를 통계학적으로 평가할 수 있는 R-Square(R^2), Chi-Square(χ^2), DF, C/M Ratio를 함께 나타내었다.

대부분의 경우 EXCH, GASL, SOILD는 대체로 음의 기여도를 나타냈다, 음의 기여도를 보이는 경우는 실제로 기여량이 0에 가까울 정도로 매우 낮거나, EXCH와 EXCL 그리고 SOILD, YESD, CDUST 등의 오염원 프로파일들 사이의 유사성으로 인하여 이러한 결과를 보이기도 한다. 제주지역의 경우 지역 실정에 맞는 오염원 프로파일의 부재로 인하여 외국자료 및 타 지역자료의 적용으로 인한 영향도 작용하였을 것으로 고려되며, 좀 더 나은 모델결과를 얻기 위해서는 제주지역의 실정에 맞는 오염원 프로파일의 구성에 대한 연구가 요구된다.

Site M에서 미세입자의 경우(Table 16) R^2 는 0.99~1.0, χ^2 은 0.28~3.14, C/M Ratio는 1.2~2.9로 나타나 R^2 의 경우는 매우 안정적이었으나 χ^2 과 C/M Ratio는 다소 변동폭이 큰 것으로 나타났다. YESD의 기여도가 11.30~14.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, DIESEL의 기여도 2.21~14.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났으며 다음으로 EXCL이 0.1

Table 15. CMB performance test results for fine particle at Site M

CMB results	Normal period			Yellow sand period			Normal period		
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
R-Square	0.99	0.99	1.0	0.99	1	1	0.99	0.99	1
Chi-Square	0.87	1.71	0.28	2.97	1.66	1.05	3.14	1.05	1.13
DF	6	6	7	5	6	5	5	5	7
EXCOA	-	-	-0.9326	-	-	-	-	-	-
EXCH	-1.8744	-	-0.5006	-0.3093	-0.7365	-0.5692	-1.8157	-1.5696	-1.5601
EXCL	6.3712	0.6692	1.9363	0.0955	0.2551	0.2170	6.6019	5.6145	5.9421
INCIN	0.1582	0.0025	0.0896	0.5199	0.3662	0.6743	0.2161	0.0551	0.2169
CDUST	0.2658	0.0840	0.1796	-	-	-	0.2568	0.2714	0.2957
GASL	1.2582	0.4131	0.5127	-1.2575	-2.6269	-2.9111	-3.2124	-5.7302	-0.8047
DIESL	6.5605	6.0742	2.9878	3.3499	14.2484	11.8499	7.4627	13.2977	2.2118
AGBUN	-	-	-	3.3190	4.2025	1.3292	-	-	-
SOILD	-1.1113	-0.4435	0.1070	-7.3919	-5.0843	-5.6139	-1.0109	-1.6814	-0.9089
MARIN	1.0546	1.6403	0.7445	2.0687	1.0256	0.6971	0.2960	0.9284	0.4456
AMSUL	2.5759	1.8620	5.4598	4.8884	3.2178	3.8871	5.1780	5.0995	4.2729
AMNIT	1.6451	0.6458	2.3354	-	-	-	-	-	-
YESD	-	-	-	14.4636	12.9314	11.3008	-	-	-
C/M Ratio	2.1	1.7	1.2	1.5	2.9	2.0	1.5	1.5	1.4

Table 16. CMB performance test results for coarse particle at Site M

CMB results	Normal period			Yellow sand period			Normal period		
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
R-Square	0.99	0.97	0.99	1	1	1	0.97	0.96	0.98
Chi-Square	1.31	2.98	3.6	0.35	0.29	0.1	1.85	2.47	1.68
DF	9	8	5	5	5	5	7	7	7
EXCOA	-	-	1.4792	-	-	-	-	-	-
EXCH	-1.2277	-4.5639	-1.7896	-0.3430	-0.8628	-0.5232	-0.3186	-0.0585	-0.8561
EXCL	2.2401	1.5721	0.4512	-0.1210	0.23367	0.1039	1.14477	0.2124	0.7598
INCIN	-	-0.0595	0.2212	-	-	-	0.0511	0.0127	0.1123
CDUST	1.3573	-0.1225	0.0671	-	-	-	0.2022	0.5011	0.4554
GASL	-0.0804	-0.4836	-1.0157	-3.2882	-1.6747	-7.4047	0.6974	0.2582	-1.0423
DIESL	10.3482	3.2800	7.4719	8.4296	6.6139	15.1903	2.6699	5.0546	3.4727
AGBUN	-	-	-	0.6963	-2.7847	-3.5611	-	-	-
SOILD	-0.4109	3.2777	1.4532	-6.8173	-5.4638	-8.9554	1.0304	1.2159	-0.5836
MARIN	4.8697	2.6054	1.7919	6.9345	4.8611	4.3340	1.2787	2.6260	2.1760
AMSUL	0.0953	-0.3234	0.0914	0.5920	0.3126	0.0706	0.3009	0.0313	0.2066
AMNIT	0.5810	0.6581	0.8987	-	-	-	-	-	-
YESD	-	-	-	21.6853	20.9388	23.0871	-	-	-
C/M Ratio	2.99	1.1	1.98	2.2	2.5	2.5	1.5	1.4	1.3

Table 17. CMB performance test results for fine particle at Site U

CMB results	Normal period			Yellow sand period			Normal period		
	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
R-Square	0.99	1.0	0.99	1	1	1	1	1	1
Chi-Square	3.18	0.73	1.60	0.55	0.67	1.97	2.54	1.01	0.98
DF	5	6	6	6	4	5	6	5	5
EXCOA	-0.0849	-5.8613	-1.0166	-	-	-	-	-	-
EXCH	-0.8547	-2.2814	-0.5624	-0.3228	0.5399	-2.4078	-1.1444	-1.1681	-1.0237
EXCL	2.9657	7.8191	1.9245	0.1403	-0.1086	0.7775	4.5064	4.1664	3.6108
INCIN	0.0285	0.1388	0.1336	0.4586	0.4649	0.4806	0.3498	0.2456	0.3227
CDUST	0.2187	0.3291	0.2254	-	-	-	0.3114	0.3334	0.4520
GASL	0.6704	1.5129	0.6115	-2.6124	-2.9385	-2.2899	-0.8432	-1.9276	-1.7626
DIESL	3.4650	6.7043	3.6242	13.5306	13.9451	11.8526	1.7150	4.0870	3.0583
AGBUN	-	-	-	4.8381	4.0237	1.5963	-	-	-
SOILD	0.1075	0.9230	0.2052	-6.4217	-2.9914	-6.8508	-0.7394	-0.8374	-0.3423
MARIN	0.7167	0.7157	0.4866	1.1912	0.6881	0.4333	0.0123	0.1092	0.1089
AMSUL	2.2662	2.8241	7.0301	4.8842	3.6087	3.1723	6.1097	6.2102	4.6000
AMNIT	0.6014	0.5213	2.1735	-	-	-	-	-	-
YESD	-	-	-	13.6185	10.0299	11.7424	-	-	-
C/M Ratio	1.99	1.9	1.1	2.1	2.6	1.95	1.0	1.1	1.1

Table 18. CMB performance test results for coarse particle at Site U

CMB results	Normal periods			Yellow sand periods			Normal periods		
	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
R-Square	0.99	0.97	0.98	0.99	0.96	0.96	0.97	0.97	0.99
Chi-Square	1.28	3.83	1.31	1.01	3.21	2.51	2.44	2.08	1.43
DF	6	6	6	5	6	6	7	7	6
EXCOA	-2.6904	-5.4543	-0.1402	-	-	-	-	-	-
EXCH	1.0662	0.1652	0.0142	0.7110	-0.3603	-0.4667	-3.3630	0.2334	-0.5048
EXCL	-2.5789	0.6464	-	-0.2460	0.0728	0.3103	1.3828	-0.7189	1.6938
INCIN	-	-	-	-	-	-	0.1595	0.0929	0.0761
CDUST	-	-	-	-	-	-	0.4257	0.4033	0.4726
GASL	-0.2105	0.4198	0.0544	-3.9853	-1.8934	-2.2518	1.8253	0.4530	-1.2767
DIESL	2.9412	8.6572	0.1034	8.4261	4.9979	6.3165	2.7082	4.1615	3.5837
AGBUN	-	-	-	-1.6704	1.0103	-0.9649	-	-	-
SOILD	2.5373	2.0420	1.9486	-6.2024	-3.7342	-5.5506	2.3048	2.3549	-0.6757
MARIN	2.0341	2.4879	1.9855	4.7977	3.4991	1.8599	0.2304	1.0521	1.1919
AMSUL	0.0069	-0.1578	0.3119	0.5713	0.5680	0.1434	0.30136	0.0008	0.1143
AMNIT	0.2235	0.5718	0.2046	-	-	-	-	-	-
YESD	-	-	-	20.6796	24.9927	22.3701	-	-	-
C/M Ratio	1.3	2.6	1.3	1.9	2.3	2.0	1.4	0.96	1.2

0~6.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, AMSUL가 1.86~5.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 조대입자의 경우(Table 17) R^2 은 0.96~1, χ^2 은 0.1~2.98, C/M Ratio는 1.1~2.99로 나타났으며, YESD의 기여도가 20.94~23.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 가장 높았으며 다음으로 DIESL이 2.67~15.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, MARIN이 1.28~6.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 높게 나타났다. YESD는 미세입자와 조대입자 모두 높은 기여도를 나타냈으나 특히 조대입자의 경우 월등히 높은 기여도를 보이고 있으며, 이는 황사시 미량원소의 분석 결과 Si, Al, Ca, Fe 등의 토양기원 성분이 미세입자 보다는 조대입자에서 더 높은 농도를 보인 것과 일치하는 것으로 황사입자의 경우 대기중 PM10에 대해 대체로 조대입자의 형태로 기여하고 있음을 알 수 있다. DIESL역시 조대입자와 미세입자 모두에서 높은 농도를 보이고 있는데, 제주지역의 자동차 등록대수 현황을 살펴보면 디젤 자동차 118,602대(58%), 가솔린 자동차 77,056대(38%), LPG차 7,169대(4%)로 디젤 자동차가 가장 많았으며(제주통계연보, 1998), 지역적 특성상 자동차를 제외한 인위적인 오염원 배출업소가 적은 편이기 때문에 디젤 자동차의 기여도가 큰 것으로 보여진다. 디젤 자동차 다음으로 높은 기여도를 보이는 성분은 EXCL로서 조대입자보다 미세입자에서의 기여도가 더 높게 나타났다. 제주지역의 유류 사용량은 중유 40,898 kl/yr, 경유 396,582 kl/yr로 중유에 비해 경유 사용량이 9배정도 더 많이 사용하고 있으며(제주통계연보, 1997), 특히 중유에서는 배출되는 먼지 중에서 미세입자의 비율은 전체의 23%인 반면 경유의 연소과정에서 배출되는 먼지 중 미세입자의 비율은 42%로 2배정도 더 높기 때문에 EXCL의 기여도가 높게 나타난 것으로 보인다(EPA, 1995). 제주도의 배출시설현황 조사 결과에 의하면 유류의 사용량이 가장 많은 곳은 난방시설용 보일로 나타났으며, 서 등(1992)에 의하면 100여 중소기업체가 위치한 대전시 대화동과 문화동지역에서 포집한 TSP에 대해 CMB모델을 적용한 결과 공업단지의 대기분진은 난방연료와 자동차 배기에 의해 25%정도가 기여되고, 64%가 공업적인 특정 배출원에 의해 기여되고 있으며, 주택지역에서는 난방에 기인한 영향이 크게 나타났다고 하였다. AMSUL의 기여도는 미세입자에서 더 높게 나타났으며 SO_4^{2-} 의 생성메카니즘은 연소과정에서 배출된 SO_2 가 시간이 경과함에 따라 대부분 SO_4^{2-} 형태로 산화되며 이 반응 과정은 대기 중의 수분이나 태양광의 강도 및 유기산화물, 탄소, 암모니아 등의 타 오염물질의 농도에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(일본

과학기술정보센터, 1979). MARIN의 경우 미세입자 보다는 조대입자에서의 기여도가 더 높게 나타났으며, 이는 Site M이 북쪽으로 300 m거리에 바다와 접해 있는 지점이며 해염입자의 경우 주요 구성성분인 Na, Cl, Mg등이 대체로 조대입자의 형태로 존재하기 때문에 조대입자에서의 기여가 높게 나타난 것으로 사료된다(Yoshizumi 와 Asakuno, 1986). 정 등(1994)이 주거 및 인구가 밀집되어 있는 부산시 지역의 PM10에 대해 교통, 토양, 해양을 오염원으로 하여 CMB모델을 적용한 결과 교통 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (39 %), 해양 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6 %), 토양 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 %)정도 기여하는 것으로 나타나 바다와 인접한 지역에서 자연적 오염원인 해염의 기여도는 배제할 수 없는 부분임을 알 수 있었다. 한편 AGBUN은 미세입자가 조대입자 보다 기여도가 더 높았으며 INCIN, CDUST, GASL, SOILD, AMNIT의 기여량은 조대입자와 미세입자 모두 낮게 나타났다.

Site U에서 미세입자의 경우(Table 18) R^2 은 0.99~1, χ^2 은 0.55~3.18, C/M Ratio는 1.0~1.99로 비교적 안정한 결과를 보였으며, YESD의 기여도가 10.03~13.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, DIESL이 1.72~13.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높았으며 다음으로 AMSUL가 2.27~7.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, EXCL이 0.14~7.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 조대입자의 경우(Table 19) R^2 은 0.96~0.99, χ^2 은 1.01~3.83, C/M Ratio는 0.96~2.3이였으며, YESD의 기여도가 20.68~25.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며 다음으로 DIESL의 기여도가 0.10~8.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높았고 MARIN이 0.23~4.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, SOILD은 1.95~2.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. Site U역시 미세입자와 조대입자 모두 YESD의 기여도가 높았으며, 특히 조대입자에서 전체 기여량의 절반이상을 차지하였다. DIESL도 미세입자와 조대입자 모두에서 높은 기여도를 보였으며, MARIN과 SOILD는 미세입자보다 조대입자에서의 기여도가 조금 높았으며, AGBUN의 경우는 미세입자가 조대입자보다 더 높은 기여도를 보였다. 한편 INCIN, CDUST, GASL, AMNIT는 미세입자와 조대입자 모두 낮은 기여도를 보였다.

Figure 11~14는 모델의 평균 기여량에 대한 비율을 미세입자와 조대입자별로 나타낸 것이다. Site M에서 미세입자의 경우(Fig. 11) 황사시 오염원의 기여도는 YESD > DIESL > AMSUL > AGBUN > MARIN > INCIN > EXCL의 순으로 나타났으며 YESD의 기여율이 40 %, DIESL이 31 %로 대부분을 차지하였으며 조대입자의 경우는 YESD > DIESL > MARIN > AGBUN, AMSUL > EXCL의 순으로

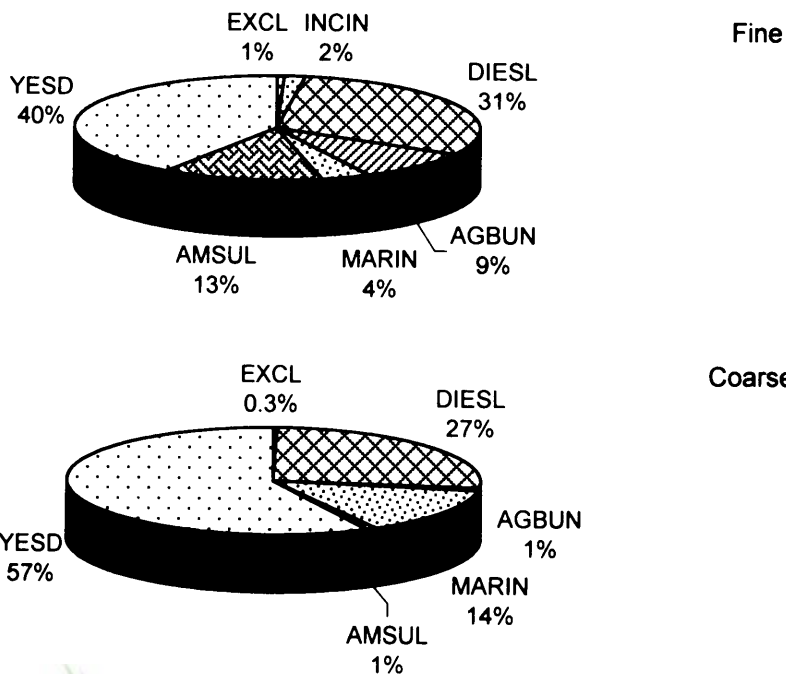


Fig. 11. Average source contribution for PM10 during yellow sand period at Site M.

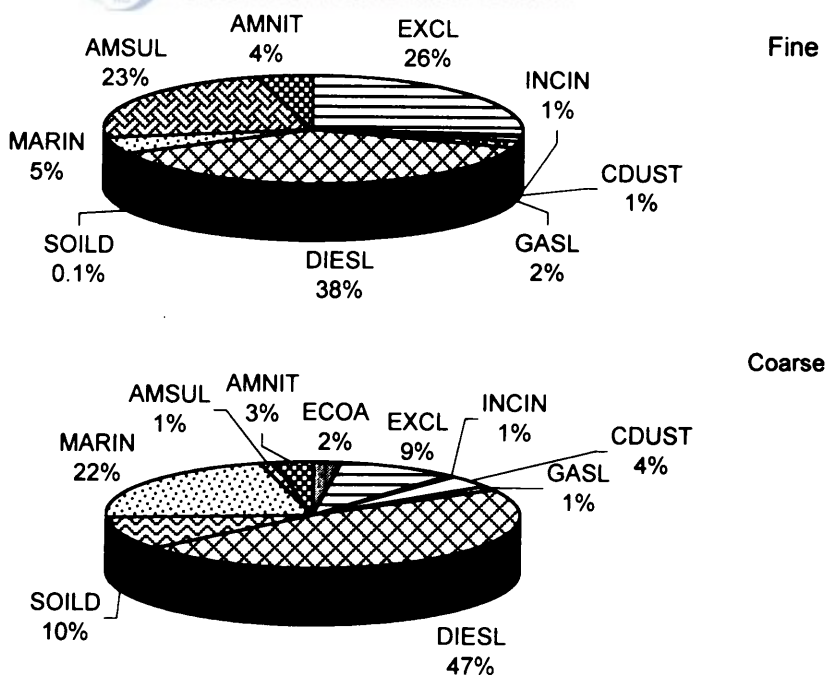


Fig. 12. Average source contribution for PM10 during normal period at Site M.

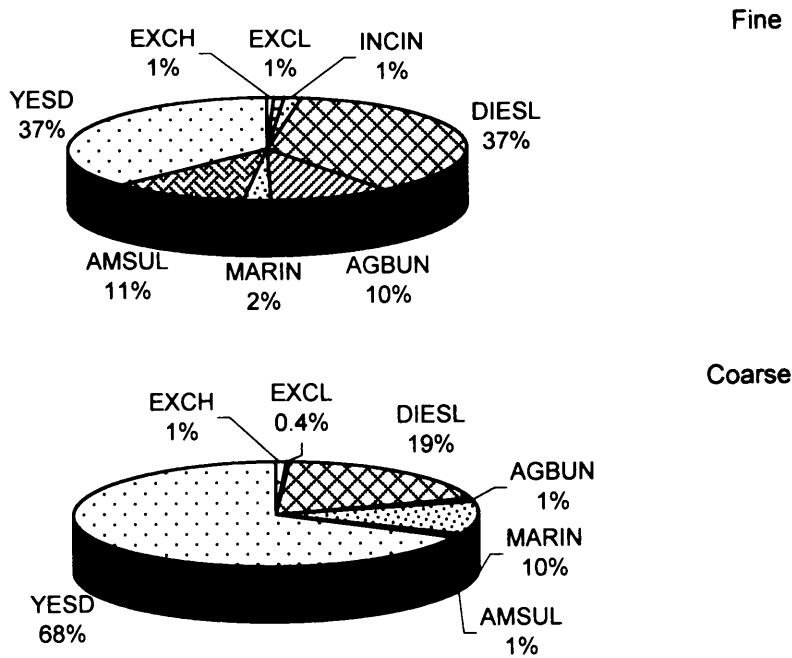


Fig. 13. Average source contribution for PM₁₀ during yellow sand period at Site U.

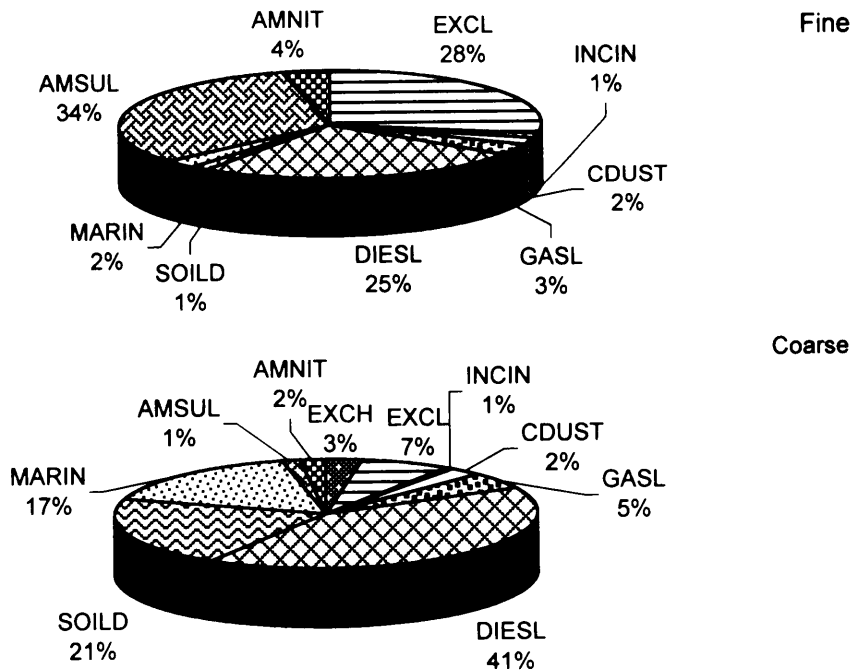


Fig. 14. Average source contribution for PM₁₀ during normal period at Site U.

나타나 YESD의 기여율이 57 %로 절반이상의 기여율을 차지했으며, DIESL은 27 %, MARIN 14 %으로 나타났다.

Site M에서 황사시 미세입자에 대한 기여도는 YESD와 DIESL의 기여율이 높게 나타난 반면 평상시(Fig. 12)에는 DIESL이 38 %, EXCL이 26 %, AMSUL이 23 %로 비슷하게 높은 기여율을 보였다. 조대입자에서는 황사시 YESD의 기여율이 가장 높았고 다음으로 DIESL과 SOILD의 기여도가 높았으나 평상시에는 DIESL의 기여율이 47 %로 월등히 높았으며 다음으로 MARIN이 22 %, SOILD가 10%로 나타났다.

Site U에서 미세입자의 경우(Fig. 13) 황사시에 YESD> DIESL> AMSUL> AGBUN> MARIN> EXCL, EXCH, INCIN의 순으로 YESD의 기여율이 37 %, DIESL이 37 %로 비슷한 수준으로 높게 나타났으며 AGBUN이 10 %로 AMSUL가 11 %로 나타났다. 조대입자의 경우는 YESD> DIESL> MARIN> AGBUN, AMSUL, EXCH> EXCL의 순으로 나타나 YESD의 기여율이 68 %로 월등히 높았으며 다음으로 DIESL의 기여율이 19%로 나타났다.

Site U에서 미세입자의 경우 황사시에는 YESD와 DIESL의 기여도가 높게 나타난 반면, 평상시(Fig. 14)에는 AMSUL이 34 %, DIESL이 25 %로 높게 나타났으며 조대입자의 경우 황사시에는 YESD의 기여율이 가장 높았고 다음으로 DIESL과 MARIN의 기여도가 높게 나타난 반면, 평상시에는 DIESL이 41 %로 가장 높았으며 SOILD가 21 %, MARIN이 17 %로 나타났다.

V. 결론

황사시 제주지역 대기중 PM10에 기여하는 각 오염원의 정량적인 기여도를 규명하기 위해 수용성 성분과 불용성 성분을 분석하여 조성특성을 살펴보았으며, 이러한 분석자료를 토대로 CMB모델을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정기간 중 황사가 발생한 날은 12일로 발생 당시 풍향은 북서에서 서북서풍이 우세하였으며, 풍속은 3.1~8.7 m/s로 비교적 강한 바람이 불었다. 황사시 PM10의 평균농도는 Site M에서 66.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Site U에서 63.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 평상시에는 각각 25.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 23.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나, Site M에서 황사시 평균농도가 평상시보다 각각 2.6배 더 높게 나타났으며 Site U에서는 2.7배 더 높은 것으로 나타났다.
2. 측정기간 동안의 수용성 이온 성분은 Site M의 경우 미세입자 중에서는 SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분이, 조대입자 중에서는 Cl^- , Na^+ 성분이 높게 나타났다. Site U의 경우 미세입자 중에서는 SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분이, 조대입자 중에서는 NO_3^- , Ca^{2+} 성분이 높게 나타났다. 황사시에 두 지점 모두 미세입자에서는 Cl^- , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 성분이, 조대입자에서는 F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 성분이 평상시보다 더 높은 농도를 보였으며, 그 중에서도 Ca^{2+} 성분의 증가율이 가장 높아 Site M에서는 5.5~7.7배, Site U에서는 4.3~7.9배 더 높게 나타났다.
3. 수용성 성분에 대한 해염입자의 영향을 고려하기 위해 Na^+ 을 지표성분으로 한 농축계수를 구해 본 결과, Cl^- 의 경우 산성물질과의 반응으로 인하여 Cl^- 이 일부 손실되었을 가능성이 있는 것으로 나타났으며, SO_4^{2-} 와 K^+ 성분의 경우 미세입자에서는 비해염기원으로, 조대입자에서는 해염기원으로 유래될 가능성이 높은 것으로 나타났다. Ca^{2+} 이온의 경우 황사시에는 비해염기원으로, 평상시에는 해염과 비해염기원의 영향을 동시에 받아 유래될 가능성이

높으며, Mg^{2+} 은 미세입자와 조대입자 모두 해양기원으로 유래될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

4. 측정기간 동안 미량원소는 대부분 토양기원 성분인 Si, Al, Ca, Fe, K와 해양기원 성분인 Na, Mg 그리고 인위기원 성분인 S가 대부분의 조성을 차지하는 것으로 나타났다. 황사시에 미량원소의 총 농도는 평상시 보다 2.2~4.6배 더 높게 나타났으며, 그 중에서도 Si, Al, Ca, Fe, K, Na, Mg, S성분들의 증가율이 높은 것으로 나타났다. 이러한 성분들의 증가율은 미세입자 보다는 조대입자에서 더 큰 것으로 나타났다.
5. CMB모델의 수행 결과 대부분의 경우 EXCOA, EXCH, GASL, SOILD는 대체로 음의 기여도를 나타냈으며 음의 기여도를 보이는 경우는 실제로 기여량이 0에 가까울 정도로 매우 낮거나 오염원 프로파일들 사이의 유사성으로 인해 이러한 결과를 보이는 것으로 사료되며, 제주지역의 경우 지역 실정에 맞는 오염원 프로파일의 부재로 외국자료 및 타 지역자료의 적용도 음의 기여도를 나타나게 하는 원인이 된 것으로 사료되어 좀더 정확하고 구체적인 모델 결과를 얻기 위해서는 제주지역 실정에 맞는 오염원 프로파일의 구성에 대한 연구가 요구된다.
6. 각 오염원의 기여율은 Site M에서 미세입자의 경우 황사(YESD) 40 %, 디젤 자동차(DIESL) 31 %, 황산염(AMSUL) 13 %로 나타났으며, 조대입자는 황사 57 %, 디젤 자동차 27 %, 해양(MARIN) 14 %로 나타났다. Site U에서 미세입자의 경우 황사 37 %, 디젤 자동차 37 %, 황산염 11 %로 나타났으며 조대입자는 황사 68 %, 디젤 자동차 19 %, 해양 10 %로 나타났다.

VI. 참고문헌

- 강공언, 이상윤, 강병욱, 김희강, 1994, 해안지역 대기부유 입자상 물질의 특성에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 20(4), 1~9.
- 강병욱, 1998, 수용모델을 이용한 PM2.5의 배출원 추정, 건국대학교 대학원, 박사학위논문.
- 김동술, 김희강, 김신도, 김태오, 1990, 수용모델을 이용한 강하분진의 농도분포에 관한 연구, 대기환경공학회지, 12(1), 2~9.
- 김병화, 김동술, 2000, 수원지역 대기중 PM2.5와 PM10의 환경거동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 16(2), 89~101.
- 김용표, 박세옥, 김진영, 심상규, 문길주, 이호근, 장광미, 박경윤, 강창희, 1996, 고산에서의 1994년 3월~4월 추정연구:(I) 입자상 물질의 이동, 한국대기보전학회지, 12(1), 79~80.
- 류영태, 1997, ICP-MS에 의한 대전공단내 중금속 분진농도분석 및 CMB7 모델을 이용한 총 부유분진의 오염원 기여도 평가, 충남대학교 대학원 석사논문집.
- 박경윤, 서명석, 이호근, 장광미, 최숙정, 허철구, 강창희, 박관석, 현종훈, 박용이, 1993, 인공위성에 의한 황사이동 추적 및 청정대기 감시 체제 구축에 관한 연구(I), 한국과학기술원 부설시스템공학연구소 보고서.
- 서영화, 구자공, 1992, 대기분진의 무기화학적 조성 분석과 Chemical Mass Balance에 의한 오염원 기여도 산출, 대기환경보전학회지, 8(2), 112~120.
- 신은상, 김희강, 1992, 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보전학회지, 8(1), 52~57.
- 신찬기, 박태숙, 김윤신, 1991, 황사현상시 서울지역 대기부유분진의 성분에 관한 연구, 한국위생학회지, 6(1), 47~62.
- 신훈중, 이태정, 김동술, 1996, 대기부유분진중 미량 금속원소의 입경별 농도분포에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(1), 67~77.

- 윤순창, 박경선, 1991, 등엔트로피 궤적에 의한 황사의 장거리 이동경로 분석, 한국대기보전학회지, 7(2), 89~95.
- 윤용황, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 111~120.
- 이기호, 허철구, 1995, 제주도에 수송되는 황사의 사례분석, 제주대학교 환경연구소논문집, 3(1), 5~26.
- 이민희, 1988, 황사현상이 분진의 입도분포와 화학조성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 4(2), 57~66.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 김상균, 1993, 황사현상시 대기 에어로졸중 무기물질의 동태, 한국대기보전학회지, 9(3), 230~235.
- 이상미, 1994, 황사의 이동 경로 분석, 서울대학교 대기과학과 석사학위논문.
- 이선기, 최재천, 이민영, 최만식, 1995, 소비산 대기중 입자상 물질의 화학적 특징에 관한 연구(I), 한국대기보전학회지, 11(2), 179~184.
- 이호근, 박경윤, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 1995, 제주도 고산에서 수용성 에어로졸의 화학적 성분분석, 한국대기보전학회지, 11(3), 245~252.
- 日本氣象研究所, 1990 : 廣域酸性雨計算委託報告書, 1-121.
- 장희남, 1999, 서울지역 에어로졸의 화학적 조성과 발생원 추정에 관한 연구, 한양대학교, 환경대학원, 석사학위논문.
- 전영신, 1996, 황사 발원지의 배출조건을 고려한 황사의 장거리 수송에 관한 연구, 서울대학교 대기과학과 대학원 논문.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식, 1999, 황사시 서울과 안면도의 대기중 에어로졸 수농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575~586.
- 전종갑, 예상옥, 권민호, 정용승, 1999, 황사의 장거리 수송과 관련된 대기순환 유형의 분류, 한국기상학회지, 35(4), 575~586.
- 정용승, 김태균, 1991, 대기오염이 장거리 이동 사례연구: 황사, TSP, Sulfate의 발원지 추적, 한국대기보전학회지, 7(3), 197~202.
- 정용승, 유마병, 1994, 황사의 사례분석과 한반도 유입량, 한국대기보전학회지, 10(4), 233~244.
- 정장표, 정창용, 1994, 분진오염원 할당을 위한 CMB모형의 적용, 한국환경과학회

지, 3(4), 393~402.

제주도 대기배출시설현황 조사표, 1996

제주도, 1997, 37회 제주통계연보

Appel, B. R., E. L. Kothny, E. M. Hoffer, G. M. Hiddey and J. J. Wesolwski, 1978, Sulfate and Nitrate Data from the California Aerosol Characterization experimental(ACHEX), Environ. Sci. Technol., 12, 4518~4525.

Britt H. I. and Luecke, R. H., 1973, The Estimation of Parameters in Non-Linear, Implicit Models, Technometrics, 15, 233~247.

Cheng, M. D. and Hopke, P. K., 1989, Identification of Markers for Chemical Mass Balance Receptor Model, Atmospheric Environment, 23, 1373~1384.

Chesselet R., J. Morelli and P. Buat-Menard, 1972, Variations in Ionic Ratios Between Reference Sea Water and Marine Aerosols, 77(27), 5116~5131.

Chow, J. C., Watson, J. G., Z. Lu, Lowenthal, D. H., C. A. Frazier, P. A. Solomon, R. H. Thuiller and K. Magaloano, 1996, Descriptive Analysis of PM10 at regionally representative Locations during STVAQS/AUSPEX, Atmospheric Environment, 30(12), 2079~2112.

Cooper, J. A. and Watson, J. g., 1980, Receptor oriented methods of air particulate source apportionment, JAPCA, 30, 1160~1125.

Davis, R. A., 1972, Principles of Oceanography, Addison-Welsey, 134~145.

Duce, R. A., C. K. Unni. B. J. Ray. J. M. Prospero. and J. T. Merill, 1980, Long Range Atmospheric Transport of Soil Dust from Asia to the North Pacific: Temporal Variability, Science, 209, 1522~1524.

Friendlander, S. K., 1973, Chemical Elements Balance and identification fo air pollution sources, Environ. Sci. Technol., 7, 234~240.

Gao, Y., R. Arimoto, M. Y. Zhou, J. T. Merill and R. A. Duce, 1992, Relationships between the Dust Concentrations over Eastern Asia and Remote North Pacific, J. Geophys. Res., 97, 9867~9872.

- Gordon, G. E., 1998, Critical Review-Receptor models, *Environ. Sci. Technol.*, 22, 1132~1142.
- Henry, R. C., and Lewis, C. W., 1984, Review of receptor model fundamentals, 18(8), 1515~1984.
- Henry, R. C., Lewis, C. W., Hopke, P. K., and Williamson, H. j., 1984, Review of receptor model fundamentals, *Atmospheric Environment*, 18, 1507~1515.
- Hopke, P. K., 1991, *Receptor Modeling for Air Quality Management*, Elsevier science publishers.
- Hopke, P. K., *Receptor modeling in environmental chemistry*, 1985, Wiley & Sons, INC., NEW YORK.
- Ishizaka, S., 1979, Yellow sand event observed in April, 1979, *Tenki*, 26, 725~729.
- Iwsaka, T., 1972, Dust storm over central China, April, 1969, *Weather*, 37, 136~145.
- Kadowaki, S., 1977, Size distribution and chemical composition of atmospheric particulate nitrate in the Nngoya area, *Atmospheric Environment*, 11, 671~675.
- Kai, K., Y. Okada, O. Yshina, I. Tabata and H. Nakamura, 1988, Lidar observation and numerical simulation of a Kosa(Asian Dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986, *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 457~472.
- Krongborg, D., F. P. Jensen, K. Keiding and N. Z. Heidam, 1987, Determination of source of atmospheric aerosol in Copenhaggen based on receptor models, *Atmospheric Environment*, 21(9), 1877~1899.
- Laurent, G. A., 1993, Comparison of characteristics of arosol from dust storm in central Asia with soil-derived dust from other Reagons, *Atmospheric Environment*, 27A(16), 2539~2544.
- Miller, M. S., Friedlander, S. K., Hind, and G. H., 1976, A chemical element

- balance for the pasadena aerosol, J. Coll. Inter. Science, 39, 165~176.
- Mukai, H., A. Yoshinari and S. Keiko, 1990, Long-term variation of chemical composition of atmospheric in the sea of Japan, Atmospheric Environment, 24, 1379~1390.
- Mukai, H., Y. Ambe and K. Shibata, 1990, Long-term variation of chemical composition of atmospheric aerosol on the Oki Island in the Sea of Japan, Atmospheric Environment, 24(6), 1379~1390.
- Murayama, N., 1988, Dust clouds kosa from the east Asian dust sorm in 1982~1988 observed by the GMS satellite, Met. Sat. Center Tech. Note, 17, 1~8.
- Nishikawak, M., T. Ambe, and S. Chubachi, 1986, Concentrations of trace elements insurface snow in the area near Syowa station, Antarctica, Mem. Natl. Polar Res., spec, 47~55.
- Prosopero, J. M. and T. N. Carlson, 1972, Vertical and the areal distribution of Sahara dust over the western equator, equatorial north Atlantic. J. Geophys, 77, 5255~5265.
- Scheff, P. A. and C. Valiozis, 1990, Characterization and source identification of respirable matter in Athens, Greece, Atmospheric Environment, 24(1), 203~211.
- 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 Surby Network) data, J. Japan Soc. Air Pollut. 18(3), 263~270.
- Thurston, G. D. and P. J. Lioy, 1987, Receptor modeling and aerosol transport, Atmospheric Environment, 21, 687~698.
- Vega, E., I. Garcia, Apam, D., M. E. Ruiz and M. Barbiaux, 1997, Application of a model to reseirable particulate matter Mexico city, J. Air Waste Management Assoc., 47, 524~529.
- Watson, J. G., 1984, Overview of receptor model principles, 1984, Journal of

the Air Pollution Control Association, 34(6), 619~623.

Watson, J. G., J. A. Cooper and J. J. Huntzicker, 1984, The effective variations applied to the mass balance receptor Model, Atmospheric Environment, 18(7), 1347~1355.

Yoshizumi, K. and K. Asakano, 1986, Characterization of Atmospheric aerosols in Chichi of the Ogasawara(Bonin) Island, Atmospheric Environment, 20, 151~155.

<http://www.gov.airs/criteria.html>



감사의 글

이 작은 한편의 논문이 완성되기까지 논문의 구성에서 마무리 단계까지 채찍과 격려로 저를 이끌어 주신 허철구 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

늘 깊은 관심과 조언을 아끼지 않으셨던 이기호 교수님과 세심하게 논문을 심사해 주신 감상규 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 학업에 전념 할 수 있도록 격려를 아끼지 않으신 오윤근 교수님, 허목 교수님, 이용두 교수님, 조은일 교수님께 감사를 드립니다.

바쁘신 와중에도 실험에 힘써주신 강창희 교수님과 고선영 님에게도 감사 드립니다.

대학원생활의 시작을 올바르게 이끌어 주신 박용이 선배님과 2년 동안 항상 곁에서 힘들 때마다 의지가 되어 주고 논문이 완성되기까지 충고와 격려를 아끼지 않은 순미 언니에게 깊은 감사를 전합니다. 국은일 마다하지 않고 실험 때마다 도와준 동진, 대준, 정화, 순희, 국현, 정훈, 옥경, 유정 후배님들 너무 고맙습니다. 취업준비 하느라 정신없는 와중에도 항상 관심을 가져 주었던 익표, 회준, 진호, 김수미, 양수미 에게도 고마움을 전합니다. 서로에게 격려하며 위안을 받았던 명훈, 정미, 성수, 병철, 지영, 병현, 병남, 진영, 회경 학형과 김창현 선배님, 김길성 선배님, 류성필 선배님, 한지용 선배님 그 외 여러 선배님과 후배님께 감사를 포함합니다.

업무가 바쁘신 와중에도 불구하고 실험장비 설치에 도움을 주셨던 강태진 선배님, 송문호 선배님, 그 외 제주지방기상청 관계자 분들께 감사 드립니다.

제가 하고자 하는 일에 대해 항상 말없는 격려와 용원을 보내 주신 아버님, 어머님, 언제나 나에게 가장 큰 위안을 주는 가족 모두에게 이 작은 결실을 드립니다.