

## 입경 분류에 입각하여 목표변환 인자분석법을 이용한 수원지역 분진 오염원의 정량적 기여도 추정

### Quantitative Source Estimation of Particulate Matters in Suwon Area Using the Target Transformation Factor Analysis Based on Size Segregation Scheme

김 동 술 · 이 태 정

경희대학교 환경학과 대기오염연구실  
(원고접수 : 1993. 2. 22)

Dong-Sool Kim and Tae-Jung Lee

Dept. of Environmental Science, Air Pollution Lab.,  
Kyung Hee University-Suwon Campus  
(Received 22 February 1993)

#### Abstract

The suspended particulate matters had been collected by a cascade impactor having 9 size fragnated stages for 2 years (Dec. 1989 to Nov. 1991) in Kyung Hee University-Suwon Campus. The particulate matters were then collected on each stage by membrane filters. The weight concentration on each stage was estimated by a microbalance and further chemical element concentrations were determined by an XRF system. The study focused on developing of a receptor model using the TTFA (target transformation factor analysis) to apportion aerosol mass with the 30 ambient data sets. Each data set consists of the 8 size-ranged subdata sets characterized by 13 element variables. Even though a couple of sources could not be identified, three to five sources were extracted from each aerosol size-range, and then 9 statistical source profiles were generated. Finally, source contribution of particulate matters on each size-range could be estimated in Suwon area.

#### 1. 서 론

대기 환경의 개선과 환경기준의 목표달성을 위해, 환경연구자들은 최적제어 기술을 개발하기 위해 각종 모델을 이용하고 있다. 초기 단계에서는 각종 오염원의 배출자료를 이용하여, 공기 중 분진의 농도를 추정하는 분산모델(dispersion model)이 오랜 기간동안 활발하게 이용되어 왔다. 분산모델을 응용하기 위해서는, 연구 대상 지역의 오염원(source) 조사와 기상학적 자료가 필요하며, 분산 변수(dispersion parameter)를 결정하기 위해 현장실험, 화학분

석 및 오염물의 물리·화학적 제거과정 규명을 위한 동력학적 연구 등이 필요하다. 뿐만 아니라, 모델 자체의 유효성 검사도 선행되어야 한다. 그러나 이 과정에서 배출자료의 오차, 수직·수평적 분산 변수의 불확실도, 복잡한 모델 개발에 따른 시간과 비용 등의 문제점을 가지고 있으며, 모델에 포함된 변수에 의해 특성화 된 오염원에 대해서만 농도의 추정이 가능하다(Budiansky, 1980; Gordon, 1980, 1988). 이러한, 분산모델의 한계성 및 결점때문에, 대기오염물질의 환경기준목표 달성을 위한 새로운 전략개발 차원에서, 수용모델(receptor model)이라

는 새로운 도구가 개발되었으며, 최근까지 발전해 오고있다.

수용모델은 각종 오염원의 질량기여도(mass contribution)를 결정하는데 중요한 역할을 하고 있다. 수용모델은 수용체(receptor)에서 오염물질의 크기, 모양, 색, 입경분포, 유기·무기화학 성분 및 성질, 시공간 변수 등, 오염물질의 고유특성을 분석한 후, 특정 오염원의 정량적 기여도를 각종 응용통계를 이용하여 추정하는 방법이다. 오염물질의 고유특성을 확인하기 위한 기본적 방법으로는 입자별 분석을 위한 현미경적 방법과 전량분석을 위한 화학적 방법 등이 있다. 화학적 방법중 가장 널리 이용되는 수용모델은 화학질량 수지법(chemical mass balance; CMB)이다. CMB 모델은 대기분진의 화학적 조성의 합은 각 오염원이 기여한 질량의 합과 같다는 가정하에, 다중회귀분석(multiple regression) 등의 방법을 이용하여, 각 오염원의 기여도를 산출하는 방법이다. 그러나 CMB 모델을 이용하기 위해서는, 먼저 오염원에 대한 정보, 즉, 오염원의 수와 화학적 조성을 알아야 한다.

수용모델의 또 다른 방법으로 다변량 통계분석법이 있다. 이 방법 중 인자분석법(factor analysis)은 수용모델 개발 초기부터 광범위하게 이용되어 왔다. 하지만, 이 모델은 일반대기 시료중 오염원을 확인하는데는 큰 역할을 하였지만, 오염원의 기여도를 정량적으로 추정할 수는 없었다. 그러나, Hopke와 Alpert(1980)는 인자분석법의 새로운 형태인 목표 변환 인자분석법(target transformation factor analysis; TTFA)을 이용하였다. 이 모델의 특성은 CMB 모델과 유사하나, 오염원의 수 또는 특성에 관한 초기 정보가 필요하지 않으며, 일반 인자분석법과는 달리, 오염원 성분표(source profile)를 추정할 수 있어, 오염원의 기여도를 정량적으로 계산할 수 있다. 현재, 인자분석법은 2차원 자료를 이용하는 방법에서, 시공간의 3차원 변수를 동시에 이용하는 3-극 인자분석법(three-mode factor analysis; TMFA)으로 한 단계 발전하고 있다. 3-극 인자분석법은 변수들이 3-극(화학원소, 시간, 공간)에 어떻게 분리 및 분포되어 지는지를 three two-mode matrix(즉, 인자가중 행렬)이나 one three-mode matrix(즉, 핵심행렬)로 차원을 줄여나가는 방법이다(Zeng and Hopke 1992).

TTFA는 오염원의 정량적 기여도 추정을 가능하게 하므로, 분진의 제어전략에서 중요한 수단으로 이용될 수 있으며, 이미 국내에서도 김태오 등(1990)에 의해 부산시 분진오염원의 기여도 추정에 이용된 바 있다. 그러나 현재까지 이용된 분진시료

의 자료는 총부유분진(TSP)에 대하여 고려하였을 뿐, 분진의 특성중 가장 중요한 변수인 입경을 고려하지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 수원지역에서 다단분진포집기(cascade impactor sampler)로 분진을 입경별로 포집하고, X-선 형광분광기로 원소분석한 자료(이태정, 김동술; 1992)를 TTFA 모델로 응용하여, 분진오염원의 기여도를 입경별로, 정량적으로 추정함을 목적으로 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 시료 포집장치 및 방법

대기분진 시료는 1989년 11월에서 1991년 9월까지 경부고속도로 신갈지점에서 서측으로 2km, 수원시에서 동측으로 10km에 위치해 있는 경희대학교 수원캠퍼스 공과대학 옥상에 9단의 다단분진포집기(미국 Andersen사: Model KA-200)를 설치하여 입경별로 포집하였다. 여지의 교체는 7일에서 30일 간격으로 대기분진의 부하량에 의해 25ℓ/min 이하로 유속이 급격히 떨어질 때 교체하였다. 포집기의 1단은 공기역학적 직경으로 0.43~0.65 $\mu$ m, 2단은 0.65~1.1 $\mu$ m, 3단은 1.1~2.1 $\mu$ m, 4단은 2.1~3.3 $\mu$ m, 5단은 3.3~4.7 $\mu$ m, 6단은 4.7~7 $\mu$ m, 7단은 7~11 $\mu$ m, 8단은 11 $\mu$ m보다 큰 입자가 포집되었으며, 마지막 단인 backup 필터에는 0.43 $\mu$ m보다 작은 입자가 포집되었다. 이 기간 동안 채취된 총 시료의 수는 30개 set이며, 각 set는 9장의 여지로 이루어져 있다. 본 실험에 사용된 여지는 바탕 오염도가 낮고, 미량 원소의 분석에 적절한 직경 80mm, pore 크기 0.45 $\mu$ m 인 membrane filter(미국 Gelman Science사: Model GN-6)를 사용하였다. 분진을 포집한 여지는 데시케이터내에 보관한 후 원소분석을 하였다.

### 2.2 시료분석 장치 및 방법

X-선 형광분광법(x-ray fluorescence spectrometry; XRF)은 x-선 발생 장치에서 발생된 강력한 1차 x-선이 분석시료에 흡수되어 목표원소의 내부 전자가 여기상태로 이온화되고 높은 에너지의 전자가 기저상태로 전이될 때, 2차 특성의 각 원소에서 방출되는 고유한 형광 x-선의 파장 및 세기를 측정하여 정성·정량 하는 분석법이다.

본 연구에 사용된 X-선 형광분광기는 일본 Rigaku사의 x-ray fluorescence spectrometer(Model 3063)이다. 대기분진 시료의 원소분석은 backup filter(< 0.43 $\mu$ m)를 제외한 제 1단에서 8단까지의 membrane 여지시료만을 분석하였다. Membrane 여지는 전처리 과정을 거치지 않고 직경 3cm 크기로

절취하여 holder에 넣고, 포집된 분진의 비산을 막기 위해 투명한 mylar막으로 덮어 샘플러위에 6개씩 설치한 후, 진공상태에서 Pb, Zn, Ca, Cu, Fe, Mn, Si, Al, K, Na, Co, V, Ti 등의 13개 원소를 측정하였다. 표준시료는 미국의 NIST사의 표준 시료물질 SRM 1832(일련번호 195)와 SRM 1833(일련번호 1207)을 사용하였다. 두개의 표준시료는 0.55 $\mu$ m의 균일한 얇은 막으로서 여러가지 기지농도의 원소를 포함하고 있다. 이 때 이용된 x-선의 노출시간은 20초가 적합한 것으로 보고된 바 있다 (이태정과 김동술, 1992).

### 2.3 목표변환 인자분석법(target transformation factor analysis)

XRF로 분석된 분진의 화학원소의 자료를 통계분석하기 위하여, Hopke 등(1983)이 개발한 FORTRAN 프로그램인 FANTASIA(factor analysis to apportion sources in aerosols)를 이용하였다. FANTASIA는 주 실행 file과 일련의 보조 실행 file로 구성되어 있으며, TTFA의 응용을 위해서 여러 단계의 반복작업이 필요 하다. 첫번째 단계는 측정자료의 가중치 계산과 대각화 과정으로 고유값(Eigenvalue), RMS, Chi-Square, Exner함수등을 이용하여 적합한 인자의 수를 결정하는 단계이다 (Hopke, 1985). 두번째 단계는 목표변환 회전과정으로 반복적 작업에 의해 오염원성분 vector를 구하는 과정과 이들을 정규화(normalization)시키는 단계로써 정규화된 vector를 분류시킬 수 있다. 이 과정에서는 군집분석법(cluster analysis)이 이용된

다. Vector의 최종 선택이 끝난 후, 이들을 완성된 오염원 성분표로 scaling한 후, 회귀분석법에 의하여 질량기여도를 산출하게 된다. 분진의 입경에 따른 화학적 정보자료에 기초한 TTFA의 적용은 입력자료의 변환과정과 적절한 인자수의 결정과정이 중요하다. 경희대학교 수원캠퍼스는 오염원이 다양한 도시보다 주변 지역의 오염원이 비교적 뚜렷하고, 오염원의 숫자가 적어 비교적 용이하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 XRF에 의한 화학원소의 측정

30개 set의 분진시료에 대하여, 제 1단에서 8단 까지 각 단의 평균농도의 합은 Si 2,420, Fe 977, Ca 958, K 760, Na 391, Pb 237, Ti 164, Zn 152, Al 133, Mn 30, V 26, Cu 21 및 Co 1.7ng/m<sup>3</sup>순으로 표 1과 같다. 구체적으로 살펴본다면 Pb, Zn, Cu는 1.1~2.1 $\mu$ m의 범위에서 76.9, 40.3, 4.4 ng/m<sup>3</sup>으로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 총부유분진 중 미세입자의 비율을 나타낸 F/T값은 Pb 0.80, Zn 0.71, Cu 0.68로서 미세입자쪽에 높게 분포하였다. Ca, Fe, Si, Al, K, Na은 입경 4.7~7.0 $\mu$ m의 범위에서 고농도를 보였으며, F/T값은 Al 0.16, Si 0.17, Ca 0.18, Fe 0.27, K 0.35 및 Na 0.45로서 거대입자쪽에 치우쳐 있음을 알 수 있다. 그러나, Mn, Co, V 및 Ti의 입경별 농도 분포경향은 일정하지 않았다. XRF로 분석된 분진시료의 화학원소의 입경별 농도결과에 대해 이태정 (1992) 등이 보고한 바 있다.

Table 1. Mean concentration of inorganic elements in particulate matters collected on each stage of a cascade impactor during Dec 1988 to Nov. 1991.

(Unit : ng/m<sup>3</sup>)

| Sage            | 1             | 2            | 3           | 4           | 5           | 6           | 7            | 8     | Fine  | Coarse | TSP    | F/T  |
|-----------------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------|-------|--------|--------|------|
| Size ( $\mu$ m) | 0.43<br>~0.65 | 0.65<br>~1.1 | 1.1<br>~2.1 | 2.1<br>~3.3 | 3.3<br>~4.7 | 4.7<br>~7.0 | 7.0<br>~11.0 | >11.0 | <3.3  | >3.3   |        |      |
| Pb              | 26.0          | 53.6         | 76.9        | 32.9        | 19.0        | 12.8        | 9.3          | 6.2   | 189.4 | 47.2   | 236.0  | 0.80 |
| Zn              | 16.5          | 28.4         | 40.3        | 23.1        | 14.6        | 12.2        | 9.4          | 7.4   | 108.3 | 43.6   | 151.6  | 0.71 |
| Ca              | 8.8           | 15.4         | 45.4        | 102.9       | 187.5       | 249.2       | 208.8        | 139.9 | 172.5 | 785.4  | 957.9  | 0.18 |
| Cu              | 3.6           | 4.1          | 4.4         | 2.3         | 2.0         | 1.7         | 1.8          | 1.4   | 14.4  | 6.9    | 21.3   | 0.68 |
| Fe              | 21.2          | 43.1         | 83.8        | 118.3       | 184.2       | 233.5       | 176.1        | 116.9 | 266.4 | 710.7  | 977.1  | 0.27 |
| Mn              | 3.6           | 5.1          | 3.3         | 4.8         | 2.3         | 3.7         | 2.1          | 5.1   | 16.8  | 13.2   | 30.0   | 0.56 |
| Si              | 27.8          | 55.5         | 106.5       | 216.4       | 405.0       | 612.0       | 590.4        | 406.4 | 406.2 | 2013.8 | 2420.0 | 0.17 |
| Al              | 1.7           | 2.0          | 4.8         | 12.2        | 23.5        | 35.0        | 32.8         | 20.9  | 20.7  | 112.2  | 132.9  | 0.16 |
| K               | 44.4          | 61.9         | 94.8        | 65.3        | 107.4       | 141.1       | 129.3        | 115.5 | 266.4 | 493.3  | 759.7  | 0.35 |
| Na              | 36.3          | 40.6         | 51.0        | 47.5        | 54.3        | 55.6        | 53.0         | 52.2  | 175.4 | 215.1  | 390.5  | 0.45 |
| Co              | 0.1           | 0.1          | 0.2         | 0.1         | 0.5         | 0.3         | 0.3          | 0.1   | 0.5   | 1.2    | 1.7    | 0.29 |
| V               | 4.7           | 4.8          | 3.2         | 2.5         | 3.6         | 2.9         | 2.4          | 2.1   | 15.2  | 11.0   | 26.2   | 0.50 |
| Ti              | 11.7          | 27.9         | 11.8        | 22.5        | 21.0        | 25.9        | 15.5         | 28.1  | 73.9  | 90.5   | 164.4  | 0.45 |

3.2 TTFA에 의한 오염원 기여도 산출

분진의 크기별로 FANTASIA 1단계를 실행하였다. 1단계는 최적의 인자(factor)수를 결정하는 과정으로, 어느정도 주관적 판단이 작용할 수 밖에 없다. 제 1단부터 제 8단계까지 각각의 실행결과 고유값(eigenvalue), Chi-Square, RMS, Exner 함수등을 얻었다. 표 2은 8개의 단 중에서 제 1단(0.43-0.65  $\mu\text{m}$ )에 대한 1단계 실행 결과이다. 도표에서 각 값의 낙차폭이 크게 떨어진 곳은 3-5개였다. 최적의 인자수를 결정하기 위해서는 먼저 최대의 인자수를 검토한 후 인자의 수를 줄여나가는 방법을 이용하였다. 잠정적인 인자수를 선택할 때나 대표적인 인자수를 결정하는데 도움이 되는 방법으로 군집 분석법이 많이 이용되며, 그림 1은 8단계중에서 1, 4, 8단의 각 군집의 유사도(degree of similarity)를 표시하는 수상도(dendrogram)이다.

구체적으로, 제 1단의 입력자료에 대한 TTFA의 응용절차를 설명하기 위해, 표 2에서 각 오차의 낙차폭이 큰 인자 5개를 결정하고 그림 1(A)를 이용하여 인자 3,4,6,8,9를 목표변환 회귀분석을 이용하여 검토하였다. 검토결과 이들 인자를 선택할 때 질량과 scaling factor가 음의 값으로 계산되었으며, 이러한 결과는 물리적으로 해석이 불가능하기 때문에 알맞은 인자의 수라고 할 수 없다. 다시 5개의 군집을 유지하며 대표 인자를 재결정한 후 같은 작업을 반복하였으나, 질량과 scaling factor가 음의 값으로 계산되었다. 이와 같이, 가능한 모든 경우에

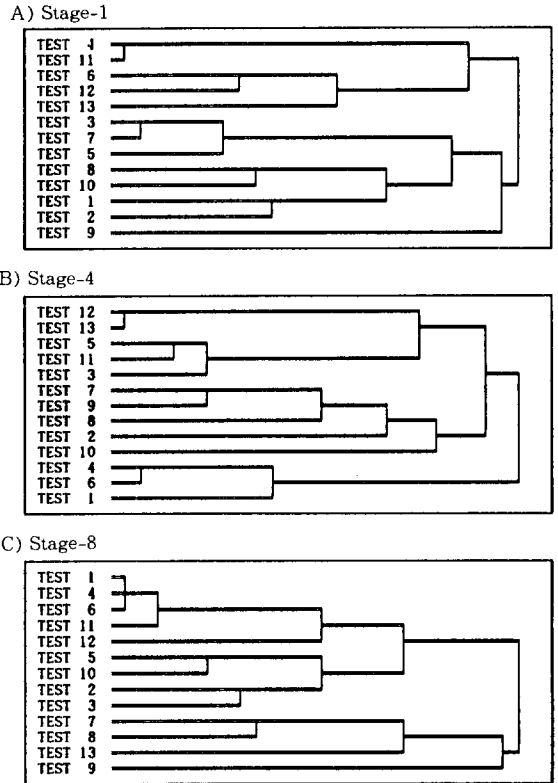


Fig. 1. Dendrograms to obtain proper combinations for a) stage-1, b) stage-4, and c) stage-8.

Table 2. Result of dimensionality for the stage-1 samples (particle size from 0.43  $\mu\text{m}$  to 0.65  $\mu\text{m}$ ) in a cascade impactor using TTFA.

| Factor | Eigenvalue | RMS        | Cgi-Square | EXNER   | Average % Indicator | Average Error % |
|--------|------------|------------|------------|---------|---------------------|-----------------|
| 1      | 1.9254E+01 | 1.2464E-03 | 6.7895E-04 | .765542 | 1.1992E-03          | 123.53          |
| 2      | 6.3587E+00 | 8.0174E-04 | 3.1743E-04 | .488816 | 9.5181E-04          | 86.10           |
| 3      | 1.7402E+00 | 6.9684E-04 | 2.7355E-04 | .379401 | 9.3753E-04          | 79.43           |
| 4      | 1.2519E+00 | 5.1430E-04 | 1.7193E-04 | .274968 | 8.8422E-04          | 69.29           |
| 5      | 7.8632E-01 | 2.1318E-04 | 3.4562E-05 | .180784 | 7.8041E-04          | 57.09           |
| 6      | 2.3084E-01 | 1.6290E-04 | 2.4025E-05 | .141709 | 8.5416E-04          | 47.98           |
| 7      | 1.5557E-01 | 1.3002E-04 | 1.8634E-04 | .107653 | 9.5397E-04          | 44.56           |
| 8      | 9.6130E-02 | 1.0240E-04 | 1.4499E-04 | .079633 | 1.1132E-03          | 38.02           |
| 9      | 5.2805E-02 | 7.0363E-05 | 8.9647E-06 | .058812 | 1.4362E-03          | 39.32           |
| 10     | 4.1876E-02 | 3.2891E-05 | 2.7424E-06 | .034247 | 1.7168E-03          | 13.20           |
| 11     | 1.6677E-02 | 1.4106E-05 | 7.9640E-07 | .016202 | 2.2381E-03          | 5.79            |
| 12     | 4.5495E-03 | 4.0912E-06 | 1.4143E-07 | .003763 | 2.9404E-03          | 1.91            |

대해 대표인자를 선택하려 했으나, 만족스러운 결과를 얻지 못했다. 따라서 인자의 수를 4개로 줄여, 위의 필요조건을 만족시킬 때까지 같은 작업을 거듭하였다. 최종적으로 제 1단에 대한 분석결과, 4개

의 인자 4,9,10,12를 이용하여 목표변환을 시도한 결과, 각 인자별 총 질량과 scaling factor가 양의 값으로 계산되었으며, 표 3과 같은 오염원 성분표를 얻을 수 있었다. 오염원 성분표에 명시된 각 오염원

**Table 3.** Estimated source profile matrix for the stage-1 (particle size from 0.43 $\mu$ m to 0.65 $\mu$ m) at Kyung Hee University-Suwon Capus.

(Unit :  $\mu$ g/m<sup>3</sup>)

| Element | Auto Related Source | Coal Burning Source | Glass Related Source | Titanium Source | Average Prdcted Contibut. | Average Observed Contribut. | Average Percent Error |
|---------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1 Pb    | .196E-01            | .486E-02            | .440E-02             | .268E-04        | .289E-01                  | .280E-01                    | 23.4                  |
| 2 Zn    | .930E-02            | .777E-02            | .213E-02             | .199E-04        | .192E-01                  | .184E-01                    | 37.1                  |
| 3 Ca    | .191E-02            | .147E-02            | .145E-02             | .687E-07        | .483E-02                  | .716E-02                    | 102.0                 |
| 4 Cu    | .272E-02            | .136E-02            | .704E-05             | .489E-05        | .409E-02                  | .412E-02                    | 43.4                  |
| 5 Fe    | .117E-01            | .843E-02            | .569E-03             | .232E-04        | .207E-01                  | .222E-01                    | 116.9                 |
| 6 Mn    | .310E-02            | .122E-02            | .322E-06             | .172E-04        | .434E-02                  | .538E-02                    | 48.8                  |
| 7 Si    | .896E-02            | .112E-01            | .213E-02             | .254E-04        | .223E-01                  | .269E-01                    | 57.0                  |
| 8 Al    | .210E-03            | .672E-03            | .830E-03             | .197E-05        | .171E-02                  | .171E-02                    | 382.2                 |
| 9 K     | .167E-02            | .401E-01            | .196E-02             | .445E-04        | .438E-01                  | .449E-01                    | 84.6                  |
| 10 Na   | .139E-04            | .150E-01            | .253E-01             | .168E-04        | .403E-01                  | .405E-01                    | 50.1                  |
| 11 Co   | .143E-03            | .270E-05            | .307E-04             | .523E-06        | .177E-03                  | .237E-03                    | 35.3                  |
| 12 V    | .259E-02            | .316E-02            | .109E-03             | .144E-04        | .587E-02                  | .556E-02                    | 77.9                  |
| 13 Ti   | .186E-02            | .122E-01            | .113E-02             | .101E-03        | .153E-01                  | .148E-01                    | 87.6                  |

은 오염원 자료(source library) (Hopke, 1985)를 참고하여 검토하였으나, 확인하기 어려운 독립된 오염원도 존재하였다. 마찬가지로 제 2단부터 8단까지의 응용통계분석도 제 1단의 분석과 같은 시행착오를 거쳐, 2단에서 5개, 3단에서 5개, 4단에서 4개, 5단에서 5개, 6단에서 3개, 7단에서 4개, 8단에서 3개 등, 3개에서 5개까지 오염원을 추정할 수 있었다.

입자의 크기가 가장 작은 제 1단에서는 4개의 오염원이 추출되었다. 첫째 인자는 유연휘발유를 사용하는 자동차 관련 오염원(auto related source using leaded gas)으로서 Pb의 농도가 매우 높았으며, Fe, Zn, Ca, Cu, K 역시 높은 농도를 보였다. 두번째 인자는 석탄 관련인자로서 연탄을 비롯한 석탄등의 배출물로 사료된다. 이 인자는 K, Si, Na, Fe, Zn, Pb등이 높은 농도를 보였다. 세번째 인자는 Na와 동시에 높은 농도의 Pb를 함유하고 있었다. 일반적으로 해염은 고농도의 Na를 함유하지만, 저농도의 Pb를 함유한다. 따라서 이 오염원은 고온에서 방출되는 미세분진으로서 광학유리 공정업체 및 관련 산업체에서 배출되는 것으로 사료된다. 마지막 인자는 titanium 오염원으로 매우 높은 Ti 농도를 보인다. 이 오염원은 Ti 관련 산업체로서 Ti제조업체, 화장품, 제지 페인트 관련업체의 분진으로 사료된다. 제 2단에서는 5개의 오염원이 분리되었다. 1단의 4개 인자와 함께 토양인자가 분리되었다. 토양 오염원(soil source)은 Si, Al, K, Ca, Mg, Na, Fe 등의 원소와 관계가 깊었으며, 2단에서 추정된 토양 인자는 Si, Fe, K, Na, Ca, Zn의 농도 순이었다. 원

자료(raw data) 전반에 걸쳐 Al농도가 낮게 측정되었으며, 이는 시료의 화학분석 오류가 생기지 않았나 사료된다.

제 3단에서는 토양 오염원, 석탄연소 오염원, 유리 관련 오염원, 자동차 관련 오염원, 철 관련 오염원이 분리되었다. 제 4단에서는 4개의 오염원이 분리되었으며, 자동차 관련 오염원, 토양 오염원, 해양 오염원 및 Ti 오염원으로 추정되었다. 제 5단에서는 해양 오염원, 토양 오염원, 철 관련 오염원, Ti 관련 오염원 및 기름 연소 관련 오염원이 분리되었다. 기름 연소오염원은 다량의 Ca, Fe, Si, Na, V를 함유하며, 석유, 중유 및 폐유의 연소배출물로 사료된다. 철 관련 오염원은 Fe만이 강하게 추출되었다. 제 6단에서는 철 관련 오염원, 기름 연소 오염원 및 노천소각 오염원으로 추정되었다. 노천소각 오염원은 농작물 소각, 목재 및 생활폐기물과 같은 식물성 폐기물의 연소산물로 사료되며, Ca, K, Fe등이 고농도로 나타났다. 제 7단에서는 기름연소 오염원, 노천소각 오염원, 토양오염원 및 해양오염원으로 추정되었다. 마지막으로 입경이 큰 분진이 포함되는 제 8단에서는 토양 오염원, 노천소각 오염원 및 기름 오염원등이 분리되었다. 이상과 같은 오염원을 확인 및 추정하기 위하여 문헌을 참고하였다(Hopke, 1985; USEPA source library).

다음 단계로 시료채취 기간별 각 오염원에 대한 기여도를 얻을 수 있었다. 표 3에서 만들어진 오염원 분류표에 의거하여 각 시료를 회귀분석하여 얻은 오염원의 질량기여도를 %로 나타낸다. 여기서 얻은 질량기여도는 각 단에서의 분진중량에 대한

백분율이 된다. 즉, 시료채취 기간별 분진의 크기에 따른 각 오염원이 경희 대학교 수원캠퍼스에 미치는 기여의 정도를 정량적으로 표시된다. 일반적으로 자동차 관련오염원, 석탄 연소 오염원, Ti 관련 오염원 및 유리 관련 오염원은 미세입자군에 밀집되어 있었으며, 이들은 모두 인체의 호흡기 침투도 및 시야·시정에 영향을 주는 인위적 오염원이다. 반면, 노천 소각 오염원, 기름 관련 오염원 및 해양오염원은 비교적 입자의 크기가 큰 단에서 포집되었다. 토양오염원은 거의 모든 단에서 분리되었으며, 매우 강한 인자로 분리되었다. 모든 기간동안 토양오염원은 총부유분진의 20% 이상을 차지하여 해양

오염원과 더불어 자연적 오염원으로서 큰 역할을 하였다. 특히 황사의 영향이 비교적 심하였던 1990년 5월 초에는 토양오염원이 56.3%의 기여도를 보였으며, 1991년 5월 초 당시에는 비교적 약한 황사 현상을 보여 42.2%의 기여도를 보였다.

표 4는 앞에서 분석된 각 기간별 오염원의 기여도를 계절별로 조사한 평균치이다. 여기에서 봄은 3, 4, 5월, 여름은 6, 7, 8월, 가을은 9, 10, 11월, 겨울은 12, 1, 2월로 나누어 산출하였다. 표에서 보는 바와 같이, 토양오염원은 봄에, 석탄 연소 오염원은 가을에, 자동차 관련 오염원은 겨울에, 유리 관련 오염원은 가을과 겨울에, 노천소각 오염원은

Table 4. Source apportionment results of seasonal average obtained from multiple regression analyses for the 30 ambient samples collected at the Kyung Hee University-Suwon Campus.

| Sampling Period | Auto Related Source | Coal Burning Source | Titanium Related Source | Glass Related Source | Soil Source | Ferrous Related Source | Marine Source | Oil Burning Source | Field Burning Source |
|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|-------------|------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| 900309-900329   |                     | 19.652              | 3.892                   | 16.147               | 41.071      |                        | .792          | 9.988              | 8.458                |
| 900330-900427   | 7.456               | 24.415              | .678                    | 4.170                | 40.968      | .038                   | .160          | 8.317              | 13.728               |
| 900504-900529   | 4.913               | 7.730               | .793                    | .798                 | 56.332      |                        | 4.357         | 13.705             | 11.342               |
| 910307-910321   | 21.968              | 7.354               | 6.822                   |                      | 28.766      | 1.606                  |               | 17.073             | 16.360               |
| 910321-910408   | 31.445              | 15.432              | 1.303                   |                      | 29.498      | 1.358                  | .018          | 9.811              | 11.150               |
| 910408-910422   | 26.451              | 17.444              | .735                    |                      | 30.373      | 1.148                  | .063          | 12.695             | 11.078               |
| 910422-910506   | 16.610              | 14.170              | 8.573                   |                      | 34.747      | 1.073                  |               | 10.330             | 14.400               |
| 910506-910520   | 11.947              | 15.530              | 6.069                   |                      | 42.425      | .179                   | .066          | 15.551             | 8.254                |
| 910520-910603   | 12.855              | 8.102               | 17.199                  | 9.007                | 23.964      | .233                   | 4.959         | 21.639             | 2.054                |
| Spring Average  | 14.859              | 14.425              | 5.118                   | 3.347                | 36.460      | 0.626                  | 1.157         | 13.234             | 10.758               |
| 900605-900704   | 7.971               | 26.707              | 1.273                   | 10.348               | 36.167      |                        | 3.733         | 7.864              | 5.927                |
| 900712-900809   | 25.014              | 13.436              | 1.511                   | 9.005                | 33.698      | .365                   | .112          | 13.840             | 3.025                |
| 900816-900915   | 3.898               | 23.369              | 5.790                   | 6.066                | 32.131      | 6.058                  | 14.313        | 6.365              | 2.020                |
| 910603-910617   | 19.972              | 24.545              | 7.374                   | .080                 | 25.659      | .768                   | .073          | 13.202             | 8.318                |
| 910617-910701   |                     | 18.340              | .449                    | 27.223               | 25.786      |                        | 3.737         | 21.202             | 3.254                |
| 910707-910714   | 9.599               | 9.955               | 22.692                  | 11.273               | 24.974      | .099                   | 1.882         | 17.512             | 1.991                |
| 910729-910828   | 18.787              | 19.505              | 6.358                   | 4.504                | 29.492      | .922                   | .023          | 7.009              | 13.391               |
| Summer Average  | 12.177              | 19.408              | 6.492                   | 9.786                | 29.701      | 1.173                  | 3.410         | 12.428             | 5.418                |
| 891111-891124   |                     | 23.672              | 4.458                   | 25.458               | 26.749      |                        | 4.668         | 14.353             | .602                 |
| 900922-901021   | 4.361               | 26.036              | 6.515                   | 6.926                | 41.416      | .064                   | .169          | 14.459             | .059                 |
| 910828-910919   | 20.731              | 18.157              | 3.682                   | 1.617                | 31.688      | .175                   | .066          | 12.077             | 11.787               |
| Fall Average    | 8.364               | 22.622              | 4.885                   | 11.334               | 33.284      | 0.080                  | 1.634         | 13.630             | 4.149                |
| 891125-891209   |                     | 14.595              | .112                    | 23.406               | 28.715      |                        | 8.697         | 20.959             | 3.542                |
| 891209-891223   | 1.326               | 17.468              | 1.195                   | 35.230               | 20.103      |                        | 6.757         | 14.105             | 3.813                |
| 891224-900106   |                     | 15.309              | 4.078                   | 33.159               | 34.011      |                        | 1.264         | 6.886              | 5.292                |
| 900107-900120   | 4.542               | 21.843              | 1.543                   | 10.285               | 36.267      |                        | 2.411         | 12.387             | 10.716               |
| 900124-900209   | 33.433              | 21.099              | 3.928                   |                      | 29.345      | .045                   | .029          | 3.888              | 8.203                |
| 900209-900223   | 25.445              | 18.984              | 5.206                   |                      | 30.503      | .078                   | .043          | 6.393              | 13.337               |
| 900223-900309   | 8.386               | 15.105              | .656                    | 16.676               | 28.582      |                        | 15.435        | 14.140             | .991                 |
| 910116-910129   | 20.529              | 12.646              | .396                    | 13.534               | 25.880      | 1.706                  | .228          | 18.392             | 6.666                |
| 910129-910206   | 37.282              | 4.511               | 2.988                   |                      | 26.014      | 3.167                  |               | 14.461             | 11.585               |
| 910207-910217   | 40.633              | 2.751               | 8.281                   |                      | 25.208      | 1.881                  |               | 18.439             | 2.800                |
| 910219-910306   | 18.604              | 10.761              | 8.642                   |                      | 33.820      | 1.107                  | .056          | 14.912             | 12.102               |
| Winter Average  | 17.289              | 14.097              | 3.366                   | 12.027               | 28.950      | 0.726                  | 3.174         | 13.178             | 7.186                |

봄에 높은 백분율 농도를 보였다. 그러나 이 도표를 해석할 때 유의할 점은 여기에서의 기여 백분율이란 각 오염원에 대한 상대적인 농도라는 것이다. 즉, 계절별 기준 오염원의 백분율농도는 첫째, 시료 채취 장소에서의 풍향, 풍속에 따라, 둘째, 타 오염원에 따라 상대적으로 차이를 보일 수 있다는 점에 유의해야 한다. 결과적으로 수원지역은 1989년 11월 부터 1991년 9월까지 2년 동안 사계절 평균으로 토양오염원 32.1%, 석탄 연소 오염원 17.6%, 유연휘발유를 사용하는 자동차관련 오염원 13.2%, 기름연소 오염원 13.1%, 유리 관련 오염원 9.1%, 노천소각 오염원 6.9%, Ti 관련 오염원 5.0%, 해양 오염원 2.3%, 철 관련 오염원 0.7% 등에 기여를 받았다.

#### 4. 결 론

경희대학교 수원캠퍼스에서 1989년 11월에서 1991년 9월까지 2년 동안 포집한 입경별 분진시료를 X-선 형광분광기에 의하여 원소분석한 결과를 목표변환인자분석법(TTFA)을 응용하여 오염원 성분표를 인위적으로 작성하였으며, 질량기여도를 양적으로 추정하였다. 수원지역의 2년 동안의 각 오염원의 평균기여도는 토양 오염원 32.1%, 석탄 연소 오염원 17.6%, 유연 휘발유를 사용하는 자동차 관련오염원 13.2%, 기름연소 오염원 13.1%, 유리 관련 오염원 9.1%, 노천소각 오염원 6.9%, Ti 관련 오염원 5.0%, 해양 오염원 2.3%, 철 관련 오염원 0.7%이었다.

본 연구에서는 TTFA를 이용한 수용모델의 개발 및 응용에 많은 제약점이 있었다. 이 연구에 이용된 원소분석 자료는 수용모델 자료에 완벽하지 못하였다. 예를 들어 수용모델에서 필수적으로 분석되어야 할 C, S, Cl, Ni, Br, Mg 등의 원소분석이 이루어지지 않았다. 또한, 국내의 오염원 배출자료의 미비로 오염원의 확인 및 분류에 어려움이 있었다. 그러나, 본 연구에서 다단분진포집기에 의한 분진시료의 입경별 화학원소를 이용하여 개발된 수용모델 응용방법은 독창적이며 기존의 TSP에 입각한 수용모델과 비교하였을 때, 매우 양호한 오염원 분리도와 민감도를 보였다. 또한 여기서 추정분리된 오염원 분류표는 국내의 수용모델 개발 및 오염원의 실측시에도 기본자료로 이용될 수 있다. 이 분류표는 최소한

수원지역의 오염원에 대한 기여도의 정량적추정에 이용할 수 있다.

#### <감 사>

본 연구는 1990년도 한국과학재단 연구비(KOSEF 901-1304-007-2)의 일부지원에 의하여 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- 김태오, 김동술, 나진균(1990) TTFA를 이용한 부산시 분진오염원의 양적추정. 한국대기보전학회지, 6(1), 134-146.
- 이태정, 김동술(1992) X-선 형광분광법을 이용한 대기부유분진중 중금속의 농도 분포에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 8(1), 20-28.
- Alpert, D. J. and P. K. Hopke (1980) A Quantitative Determination of Sources in Boston Urban Aerosol. Atmos. Environ. 14, 1137.
- Budiansky S.(1980) Dispersion Modeling. Envir. Sci. Technol. 14, 370-374.
- Gordon, G. E.(1980) Receptor Models. Envir. Sci. Technol. 14, 792-800.
- Gordon, G. E. (1988) Receptor Models. Envir. Sci. Technol. 22, 1132-1142.
- Hopke, P. K., D. J. Alpert and B. A. Roscoe (1983) FANTASIA-A Program for Target Transformation Factor Analysis for Resolving Sources of Environmental Samples, Computers & Chemistry 7, 149-155.
- Hopke, P. K. (1985) Receptor Modeling in Environmental Chemistry, John Wiley and Sons, New York.
- Liu, C. K., B. A. Roscoe, K. G. Sever and P. K. Hopke (1982) The Application of Factor Analysis to Source Apportionment of Aerosol Mass. Ame. Indu. Hygi. Ass. J. 43, 314-318.
- Zeng, Y. and P. H. Hopke (1992) The Application of Three-Mode Factor Analysis(TMFA) to Receptor Modeling of Scenes Particle Data, Atmos. Environ., 26A(9) 1701-1711.