

## 수원지역 입자상 오염물질의 오염원 기여도의 추정

### Estimation of Source Contribution for Ambient Particulate Matters in Suwon Area

이 태 정 · 김 동 술<sup>1)</sup>

경희대학교 자연과학종합연구원

<sup>1)</sup>경희대학교 환경학과 및 환경연구소

(1997년 5월 8일 접수, 1997년 7월 30일 채택)

Tae-Jung Lee, Dong-Sool Kim<sup>1)</sup>

*Institute of Natural Science, Kyung Hee University*

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Science and Institute of Environmental Studies Kyung Hee University*

(Received 8 May 1997; accepted 30 July 1997)

#### Abstract

The suspended particulate matters had been collected on quartz fiber filters by a cascade impactor having 9 size stages for 4 years (Sep. 1991 to Dec. 1995) in Kyung Hee University-Suwon Campus. Membrane filters were used to collect the particulate matters on each stage. The weight concentration on each stage was obtained by a microbalance and further chemical element levels were determined by an x-ray fluorescence system.

Based on these chemical information, our study focused on applying the target transformation factor analysis (TTFA), a receptor model, to identify aerosol sources and to apportion quantitatively their mass contribution. There are total of 63 ambient data sets. Each data set consists of the 8 size-ranged subdata sets characterized by 16 elemental variables. By the results, four to five sources were extracted from each size range and some sources reappeared in other size ranges. Then total of 8 source profiles were statistically generated from all the ranges, such as oil burning source, soil source, field burning source, gasoline related source, coal burning source, marine source, glass related source, and unknown sources.

Apportioning aerosol mass to each source was intensively examined by investigating emission inventories near the study area. The results showed that soil particle source was the most significant contributor. However, coal and oil burning sources were the major anthropogenic ones. The study finally proposed some air quality control strategies to achieve the clean air quality in Suwon area.

**Key words** : Suwon, aerosol, receptor model, TTFA, mass contribution, source profile

#### 1. 서 론

20세기 후반 우리나라를 비롯한 많은 국가들은

인구의 도시 집중화와 산업화 과정에서 야기된 환경오염이 사회의 중요한 문제로 부각되고 있다. 특히 도심지역은 한정된 공간에서의 연료 사용량 증가 및 자동차 통행량의 급증으로 대기질의 악화가

초래되고 있다. 다양한 인위적 오염원에 의해 대기 중으로 방출된 오염물질은 인체에 심각한 영향을 미치며, 가시광선 산란에 의한 시정악화 및 산성침착(acid deposition) 등 지역규모의 대기오염문제를 야기시켰으며, 더 나아가 오존층 파괴와 지구기후변화 등 지구규모의 환경문제를 심화시키고 있다. 이와 같은 총체적인 대기 환경문제는 일반인들의 환경에 대한 관심을 고조시켰으며, 환경문제 해결을 위한 기술적, 경제적, 행정적 연구와 투자를 증대시켰다. 또한, 많은 연구자들은 대기오염물질의 방지대책 및 환경기준 달성을 위해 오염물질의 물리적 이동현상 및 화학적조성 등의 제반 특성을 연구하고 있으며, 특히 오염원이 수용체(receptor)에 미치는 영향을 밝히기 위하여 여러 가지 모델을 사용하고 있다. 대기오염물질의 효율적 제어를 위해서는 오염원에 대한 정성·정량분석이 선행되어야 하는데, 이는 오염원의 정성·정량분석이 일괄적인 오염원 규제가 아닌 개별 오염원 중심의 규제를 가능하게 하여 효율적이고 합리적인 환경정책 수립에 도움을 주기 때문이다.

각 오염원이 대기환경에 미치는 영향에 대한 연구 중 하나는 오염원의 질량 기여도(mass contribution) 추정에 관한 연구인 수용모델이다. 대기오염학 연구초기에는 오염원 배출자료와 기상변수들을 기초로 한 오염원 위주의 분산모델이 다양하게 이용되어 왔으나, 연구대상 지역의 배출원 조사, 기상자료의 확보, 분산 변수(dispersion parameter)의 결정을 위한 현장 실험, 오염물질간의 물리·화학적 반응에 대한 동력학적인 연구 등 각종 입력자료의 오차, 수직·수평적 분산변수의 불확실도, 복잡한 모델 개발에 따른 시간과 비용 등의 문제점이 심각하게 제기된 바 있다(Budiansky, 1980; Gordon, 1980, 1988). 비록, 분산모델은 수용모델보다 대기질 예측 및 오염원 평가 분야에서 오랜 시간 동안 이용되어 왔으며, 우리나라에서도 주로 환경영향평가 등 대기질 평가에 사용되고 있으나, 위와 같은 분산모델의 각종 한계점 때문에 최근 분산모델의 보조적 수단이었던 수용모델에 대한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다. 또한 분석기술 및 샘플링 장치의 발전과 컴퓨터의 확산으로 대량의 자료를 쉽게 얻을 수 있으며, 자료의 분석도 용이하여 방대한 자료를 바탕으로 다양한 응용 통계학을 활용하는 수용모델의

영역이 확대되고 있다. 현재 수용모델은 대기질 평가 및 오염원의 효율적인 방지대책을 위한 주요 방법으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 수원시 외곽 지역에 위치한 경희대학교 수원캠퍼스에서 장기간 입상 오염물질을 입경별로 포집하고 화학적 분석을 실시하였으며, 수용모델 중 우리나라 실정에 적합한 목표변환 인자 분석법(target transformation factor analysis : TTFA)의 응용방법을 제시하였다. 특히 대기 부유분진의 입경에 따른 오염원의 특성을 파악하여 기여도를 추정하였으며, 마지막으로 추정된 오염원의 기여도를 바탕으로 효율적인 방지대책 및 대기환경기준 달성을 위한 합리적 대기질 관리방안을 제시하였다.

## 2. 시료포집 방법 및 분석 방법

경기도 수원시와 용인시의 경계면에 위치한 본 연구지역은 인구증가와 산업발달, 생활수준 향상 및 다양화 등으로 도시규모가 거대화되고 있으며, 다양한 환경문제에 직면하고 있다. 시료채취는 경희대학교 수원캠퍼스 자연과학대학 옥상(5층)에서 1991년 9월부터 1995년 12월까지 4년 연속으로 수행되었다. 이 지점은 경부고속도로 신갈 인터체인지 수원 톨게이트로부터 서쪽으로 약 4km에 위치해 있으며, 수원시와 오산을 잇는 국도와 간선도로가 잘 발달되어 있다. 또한, 1994년 후반부터 농경지였던 학교주변에 영동지구 택지개발에 의한 대단위의 주택단지 개발이 진행되고 있는 실정이다. 본 시료포집 지역은 거대도시인 서울시의 주변도시로서, 현재 개발이 진행되고 있는 여러 위성도시와 유사한 형태로 개발도시의 대기질을 대표할 수 있는 지역이다.

본 연구지역은 공업지역과 주거지역, 농지로 구분되어 있으며, 대규모 배출시설 및 소규모 공업시설이 위치해 있다. 연구지역 주변에는 농업용수 공급을 위해 1954년에 준공된 저수면적 211만 m<sup>2</sup>의 신갈호수가 있으며, 크고 작은 산업시설들이 신갈호수 및 지천유역에 위치해 있다. 시료채취 위치를 중심으로 반경 10 km 이내 지역에 위치한 배출업소를 업종별로 구별하여 보면 표 1과 같다.

대기 부유분진의 포집은 9단의 입경별포집기인 cascade impactor (Japan Dylec사 : Model KA-200)를

Table 1. Classification of emission inventory near the study area.

|                         |      |                                   |      |
|-------------------------|------|-----------------------------------|------|
| Food Processing         | : 7  | Chemical and Rubber Manufacturing | : 30 |
| Machine Manufacturing   | : 26 | Textile and Paper Manufacturing   | : 7  |
| Non Metal Manufacturing | : 8  | Electronic Manufacturing          | : 37 |
| Wood Processing         | : 10 | Metal Manufacturing               | : 24 |

사용하였으며, 공기역학적 직경에 따라 분진을 일정한 크기로 손쉽게 포집할 수 있다. Cascade impactor는 1~9단에 대한 유효절단직경 (efficiency cutoff diameter,  $D_p$ )은 각각 11, 7.0, 4.7, 3.3, 2.1, 1.1, 0.65, 0.43, 0.08  $\mu\text{m}$ 이다. 또한 입자의 bouncing을 최소화하기 위해 충돌판 (impaction surfaces)은 직경 80 mm, pore size 0.43  $\mu\text{m}$ 의 membrane filter (USA, Gelman Science Co., Model GN-6)를 사용하였다. 부유분진의 무기원소 분석은 x-선 형광분광기 (x-ray fluorescence spectrometer; XRF) (Japan Rigaku사; Model 3063)를 이용하였다. XRF는 시료의 전처리가 필요 없는 비파괴분석법으로 액체 및 고체시료의 원소분석이 가능하며, 습식분석법 이상의 정확도로 분석할 수 있다 (Frechette *et al.*, 1977; Li and Winchester, 1990). 이와 같은 XRF는 합금, 토양, 수질분석에 널리 이용되며, 또한, 대기 중 입자상 오염물질의 원소분석에 매우 유용한 분석법이다 (Dzubay and Stevens, 1975; Dzubay, 1977; Sturges and Harrison, 1985).

부유분진의 무기원소 분석을 위한 전처리는 XRF의 경우 전처리가 필요 없는 건식분석방법이므로 일정한 크기로 절취하여 바로 분석하였다. 부유분진 중 입경별로 9장의 여지로 구성된 cascade impactor의 XRF 분석절차는 다음과 같다. 시료가 포집된 membrane filter는 직경 38 mm의 펀처 (puncher)를 이용하여 일정한 크기로 절취한 후 시료 holder에 넣고 mylar막으로 덮어 측정하였다. 분석 조건은 표 2와 같다. 표준시료 (standard reference material)는 미국의 NIST사의 표준시료물질 SRM 1832 (일련번호 195)와 SRM 1833 (일련번호 1207)을 사용하였다. 각 원소별 불확실도 (uncertainty)는 표준물질의 평균과 표준편차를 이용한 상대표준오차 ( $RSE=SE/\text{mean} \times 100$ )로 나타내었으며, Si 0.15, Ca 0.39, Mn 0.42, Fe 0.26, Cu 0.04, Zn 0.24, Pb 0.11, Co 0.47, V 0.09, K 0.41%이다. XRF의 검출한계는 본 연구에 사용된 filter의 바탕시험에 대한  $3\sigma$  (3 standard de-

Table 2. XRF analytical conditions.

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Primary X-ray | X-ray Tube Target Voltage Current Power Beam path | Rh<br>50 kV<br>50 mA<br>25 kW<br>Vacuum                 |
|               | Fluorescent X-rays                                | Analytical Crystal<br>LiF(200), EDDT, RX-4 TAP, GE, ADP |
| Detection     | Detector  | Scintillation Counter (SC)<br>Proportional Counter (PC) |

viation)으로 Si 29.8, Ca 133.2, Mn 278.3, Fe 154.8, Cu 2.7, Zn 32.6, Pb 109.1, Co 20.9, V 36.8, K 116.3  $\text{ng}/\text{cm}^2$ 이다.

원자료는 포집된 전체 분진 중 직경 0.43  $\mu\text{m}$  이하의 분진이 포집되는 back up 필터를 제외한 8단에 대하여 XRF로 분석한 Si, Ca, Co, K, Na, Mn, Pb, Co, V, Fe, Zn, Br, Ba, Cr, Ni, Mg 등 16개의 무기원소의 자료를 사용하였으며, 총 시료 수는 63 set였다. 또한 전체 자료는 계절별로 분류하여 오염원 기여도를 분석하였으며, 각 계절별 시료 수는 봄철 (3, 4, 5월) 15개, 여름철 (6, 7, 8, 월) 18개, 가을철 (9, 10, 11월) 19개, 겨울철 (12, 1, 2월) 11개였다.

### 3. 목표변환 인자분석법의 연구 결과 및 고찰

#### 3.1 목표변환 인자분석법의 진행 과정

여러 가지 수용모델 중 목표변환 인자분석법은 오염원 성분표가 존재하지 않는 국내 실정에 적합한 응용통계분석 방법으로 본 연구지역 대상자료의 오염원 기여도 산출을 위하여 응용하였다. 목표변환 인자분석법에 의하여 연구지역의 입자상 오염물질의 오염원을 확인하고 기여도를 산출하기 위하여 1982년 Hopke 등이 개발한 FANTASIA (factor analysis to apportion sources in aerosols)라는 FORTRAN 프로그램을 이용하였다. FANTASIA는 다음 프로그램

램의 순서로 진행된다. 먼저 WEIGHT 프로그램에 의해 각 원소의 가중치가 계산되며, 계산된 가중치는 FANTASIA의 입력자료의 뒤에 연결된다. 다음으로 원자료 행렬에 대한 상관행렬 (correlation matrix) 계산과 대각화 (diagonalization)가 실시되며, 그 결과는 인자수를 결정하기 위한 측정값이 산출된다. 이 단계에서 상관행렬의 고유벡터는 EIGENV라고 불리는 질량저장 (mass storage) 파일에 저장된다. 원자료의 상관분석은 시료간의 상관을 이용하는 Q-mode 분석법을 이용하였다.

시료 중심의 상관행렬은 다음 식 (1)과 같다.

$$C_0 = (XV^{-1})^T XV^{-1} \quad (1)$$

여기서 V는 대각행렬 (diagonal matrix)이며, 각 원소는 식 (2)에 의해 정의된다.

$$V_{ij} = \left[ \sum_{i=1}^m X_{ij}^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

위의 상관행렬은 표준화된 프로그램에 의해 대각화된다. 각 단계에서 RMS (root-mean-square) Error, Chi-Square, Exner 함수 등의 무차원 값이 산출된다.

다음 단계로 고유벡터를 선택한 후에 목표변환 회전을 실시한다. 한 원소가 1.0이고 나머지 원소는 0인 초기 시험벡터 (test vector)는 고유벡터와의 차이가 특정값 이하가 될 때까지 반복 회전된다. 반복 과정에 의하여 생성된 시험벡터는 질량저장파일인 ITER에 저장된다. 이 벡터는 원자료의 초기값의 차이로 서로 다르게 스케일되기 때문에 직접적인 상호비교가 어렵다. 따라서 반복회전에 의해 얻어진 벡터는 상호비교를 위해 정규화된다. 정규화된 시험벡터는 벡터간의 유사도를 결정하기 위하여 군집분석 (cluster analysis) (Hopke, 1980, 1988)을 수행한다. 군집분석은 다양한 기준에 의해 표준화된 벡터들을 군집화한다 (Miller *et al.*, 1983). 대부분의 경우 시험벡터의 개수 (number)와 조합 (combination)에 따라 자료의 적합도에 영향을 주게 되며, 최적의 선택을 위한 시험이 필요하다. 여러 개의 벡터의 조합 중에서 최적의 벡터조합을 선택하기 위해서는 중요한 기준값인 음의 mass 값의 수와 평균오차의 최소화가 필요하다. 벡터의 최종 선택이 끝나면, scaling factor를 계산하는데 사용되는 mass value를 산출하

기 위하여 FANTASIA 프로그램을 수행한다. FANTASIA에 의해 계산된 이러한 값들은 질량저장파일인 LOADMX에 저장된다. 이 분석에서 측정된 시료의 질량은 scaling factor를 얻기 위하여 f-value에 대해 회귀된다 (Hopke, 1982). 이 때 다중회귀 프로그램이 이용된다. 이 분석을 통하여 적합도를 추가로 시험할 수 있다. Scaling 변수는 양의 값이어야 하며, 통계적으로 유효해야 한다. 그렇지 못하면, 시험벡터가 잘못 선택되어 사용되었음을 나타내며, 재평가가 필요하게 된다. 그러나 scaling 값이 합리적이면, 마지막 단계로 오염원 분류표가 계산되고 각 오염원에 대한 원소별 질량기여도를 계산하기 위하여 FANTASIA를 수행한다. 오염원 분류표와 질량기여도의 불확실도는 프로그램 OERROR를 이용하여 계산할 수 있다. 이 프로그램의 과정은 Roscoe & Hopke (1981b)의 논문에 자세히 설명되어 있다.

### 3.2 오염원 추정연구 결과 및 고찰

#### 3.2.1 자료 처리과정

연구 기간동안 측정된 분진 중 각 원소의 입경별 가중평균농도는 표 3과 같다. 자료의 처리과정은 입자를 크기별로 8개의 집단으로 분리하여 실시하였다. 채집된 분진 중 입경이 가장 작은 제 1단 (0.43 ~ 0.65  $\mu\text{m}$ )부터 FANTASIA 1단계를 실행하였다. 1단계는 factor 수를 결정하는 과정으로, 어느 정도 주관적 판단이 작용된다. 제 1단부터 제 8단까지 1단계 실행결과 고유값을 비롯한 Chi-Square, RMS, Exner 함수 등 인자수를 결정하는데 사용할 수 있는 변수를 얻을 수 있었다. 표 4는 전체 8단 중 1단에 대한 1단계 실행 결과이다. 각 값들이 큰 낙차폭을 보이는 부분에서 잠정적인 인자수를 결정하였으며, 최대의 인자수를 선택하여 검토과정 중 적합하지 않을 경우 차수를 줄여 나가는 방법을 택하였다. 도표에서 각 값의 낙차폭이 크게 떨어진 곳은 4~6개였다. 최적의 인자수를 결정하기 위해서는 먼저 최대의 인자수를 검토한 후 인자의 수를 줄여 나가는 방법을 이용하였다. 잠정적인 인자수를 선택할 때나 대표적인 인자수를 결정하는데 도움이 되는 방법으로 군집분석법이 많이 이용되며, 각 군집의 유사도 (degree of similarity)를 표시하는 수상도 (dendrogram)는 좌측으로 갈수록 군집의 수는 증가하지만,

유사도는 높아진다. 구체적으로, 제 1단의 입력자료에 대한 TTFA의 응용절차를 설명하기 위해, 표 4에서 각 오차의 낙차폭이 큰 인자 6개를 결정하고 수상도를 이용하여 인자 6개를 목표변환 회귀분석을 실시하여 검토하였다. 검토 결과 이들 인자를 선택할 때 질량과 scaling factor가 음의 값으로 계산되었으며, 이러한 결과는 물리적으로 해석이 불가능하기 때문에 알맞은 인자의 수라고 할 수 없다. 다시 6개의 군집을 유지하며 대표인자를 재결정한 후 같은 작업을 반복하였으나, 질량값과 scaling factor

가 음의 값으로 계산되었다. 이와 같이 가능한 모든 경우에 대해 대표인자를 선택하려 했으나, 만족스러운 결과를 얻지 못했다. 따라서 인자의 수를 5개로 줄여, 위의 필요조건을 만족시킬 때까지 같은 작업을 거듭하였다. 최종적으로 제 1단에 대한 분석결과, 5개의 인자 1, 4, 7, 10, 15를 이용하여 목표변환을 시도한 결과, 각 인자별 총 질량과 scaling factor가 양의 값으로 계산되었으며, 각 인자를 중심으로 한 오염원 성분표를 작성하고 회귀분석에 사용하였다. 즉, TTFA의 최종 결과를 통해 도출된 인자를 특정

Table 3. Average elemental concentration (ng/m<sup>3</sup>) for each size range.

| Stage     | 1         | 2        | 3       | 4       | 5       | 6       | 7        | 8     | Fine  | Coarse | Total  |
|-----------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|--------|--------|
| Size (μm) | 0.43~0.65 | 0.65~1.1 | 1.1~2.1 | 2.1~3.3 | 3.3~4.6 | 4.7~7.0 | 7.0~11.0 | >11.0 | <2.1  | >2.1   |        |
| Ba        | 3.9       | 5.8      | 9.6     | 18.4    | 24.6    | 25.1    | 15.5     | 9.9   | 19.2  | 93.4   | 112.6  |
| Br        | 4.5       | 10.9     | 5.7     | 2.1     | 1.7     | 1.3     | 1.3      | 1.2   | 21.2  | 7.7    | 28.9   |
| Ca        | 17.9      | 21.4     | 49.0    | 119.7   | 221.4   | 287.6   | 223.1    | 162.8 | 88.2  | 1014.7 | 1102.9 |
| Cr        | 4.6       | 3.3      | 2.3     | 4.2     | 3.4     | 3.3     | 4.2      | 5.9   | 10.2  | 20.9   | 31.1   |
| Co        | 1.0       | 1.1      | 1.2     | 1.2     | 1.3     | 1.3     | 1.2      | 1.1   | 3.3   | 6.2    | 9.4    |
| Cu        | 4.2       | 6.4      | 5.2     | 3.3     | 2.6     | 2.2     | 1.9      | 1.9   | 15.8  | 12.0   | 27.8   |
| Fe        | 17.5      | 32.6     | 61.0    | 116.6   | 180.4   | 217.8   | 147.2    | 104.5 | 110.7 | 766.6  | 877.3  |
| K         | 41.9      | 88.9     | 76.3    | 66.7    | 105.4   | 140.5   | 113.2    | 78.8  | 207.1 | 504.7  | 711.8  |
| Mg        | 1.7       | 1.5      | 4.3     | 15.6    | 27.7    | 40.1    | 33.3     | 14.9  | 7.6   | 131.5  | 139.1  |
| Mn        | 5.0       | 5.1      | 4.9     | 5.9     | 4.2     | 4.2     | 4.2      | 5.4   | 15.0  | 23.8   | 38.8   |
| Na        | 13.9      | 12.8     | 24.9    | 15.7    | 27.9    | 28.6    | 27.1     | 25.7  | 51.7  | 125.1  | 176.8  |
| Ni        | 13.0      | 15.0     | 10.8    | 11.8    | 11.8    | 10.4    | 8.5      | 8.2   | 38.9  | 50.7   | 89.6   |
| Pb        | 26.3      | 58.3     | 68.8    | 37.1    | 21.0    | 15.0    | 10.6     | 8.1   | 153.3 | 91.7   | 245.0  |
| Si        | 23.5      | 59.5     | 107.8   | 252.9   | 457.4   | 671.2   | 600.2    | 401.3 | 190.7 | 2383.1 | 2573.8 |
| V         | 9.7       | 8.4      | 7.9     | 9.6     | 8.8     | 7.8     | 8.0      | 8.2   | 26.0  | 42.3   | 68.3   |
| Zn        | 18.1      | 39.8     | 36.2    | 22.3    | 13.8    | 10.3    | 7.0      | 5.4   | 94.2  | 58.8   | 153.0  |

Table 4. Diagonalization results and reproduction summary for Q-mode analysis of stage 1.

| Factor | Eigenvalues | RMS        | Chi-Square | Exner   | Average % Indicator | Average % Error |
|--------|-------------|------------|------------|---------|---------------------|-----------------|
| 1      | 4.3432E+01  | 4.9574E-04 | 2.6850E-04 | .715425 | 6.3954E-04          | 96.22           |
| 2      | 7.8511E+00  | 3.7524E-04 | 1.6753E-04 | .553598 | 5.8804E-04          | 55.61           |
| 3      | 3.4453E+00  | 2.7338E-04 | 9.7353E-05 | .465134 | 5.9464E-04          | 56.32           |
| 4      | 3.0068E+00  | 2.3132E-04 | 7.6790E-05 | .371079 | 5.7949E-04          | 49.96           |
| 5      | 1.4887E+00  | 1.9780E-04 | 6.2307E-05 | .314262 | 6.1002E-04          | 41.65           |
| 6      | 1.2006E+00  | 1.7038E-04 | 5.1748E-05 | .259533 | 6.3933E-04          | 37.55           |
| 7      | 8.2424E-01  | 1.4769E-04 | 4.3974E-05 | .214004 | 6.8604E-04          | 30.65           |
| 8      | 6.1839E-01  | 9.7188E-05 | 2.1812E-05 | .172111 | 7.4066E-04          | 24.58           |
| 9      | 3.3801E-01  | 8.4563E-05 | 1.9221E-05 | .144156 | 8.6621E-04          | 20.15           |
| 10     | 2.1348E-01  | 7.2127E-05 | 1.6622E-05 | .123275 | 1.0890E-03          | 18.21           |
| 11     | 1.8647E-01  | 5.6707E-05 | 1.2567E-05 | .101583 | 1.4156E-03          | 15.04           |
| 12     | 1.4268E-01  | 4.4657E-05 | 9.9328E-06 | .081161 | 1.9758E-03          | 11.18           |
| 13     | 1.3869E-01  | 2.9950E-05 | 6.0760E-06 | .054401 | 2.7185E-03          | 9.46            |
| 14     | 1.0191E-01  | 9.0831E-06 | 8.5539E-07 | .017139 | 2.3602E-03          | 4.15            |
| 15     | 8.5029E-03  | 5.1054E-06 | 5.5175E-07 | .008446 | 6.5791E-03          | 2.76            |

오염원으로 지정하기 위해 실측된 오염원 자료(Hopke, 1985)를 검토하였다. 마찬가지로 제 2단부터 8단까지의 응용통계분석도 제 1단의 분석과 같은 시행착오를 거쳐, 2단에서 5개, 3단에서 5개, 4단에서 5개, 5단에서 4개, 6단에서 5개, 7단에서 4개, 8단에서 5개 등, 4개에서 5개까지 오염원을 추정할 수 있었다.

### 3. 2. 2 오염원의 분류

각 단에서 결정된 인자의 구성원소의 농도 및 각 원소간 분율을 기준으로 여러 가지 source profile 자료를 참고하여, 결정된 인자를 특정 오염원으로 확인 및 결정하는 과정을 수행하였다. 이 과정에서 국내 오염원에 대한 자료의 부족으로 오염원의 확인은 주로 외국의 자료를 참고로 하였다. 토양과 해염 등의 자연적 오염원에 대한 자료뿐만 아니라 주요 인위적 오염원인 석탄이나 oil 등 화석연료에 대한 기초 조사 역시 매우 미흡한 상태이기 때문에 오염원 분류에 어려움이 있었다. 또한 본 연구지역의 특성상 군소 오염원이 다양하고 오염원의 패턴이 유사하여, 오염원의 확인 작업은 어려움이 따랐다. 본 연구에서 오염원 결정을 위해 오염원 분류표 중 Hopke(1985)에 의한 오염원 분류표를 참고하였다.

각 단에서 추출된 인자에 대한 오염원 확인과정에서 총 8개의 오염원이 확인되었으며, 자연적 오염원으로는 토양 오염원과 해염 오염원이 각각 분류되었고, 인위적 오염원은 기름관련 오염원을 비롯하여 5개의 오염원이 분류되었다. 또한, 2단을 제외한 각 단에서는 정확한 오염원이 확인되지 않은 기타 오염원이 각각 분류되었다. 추정된 인자를 특정 오염원으로 결정하기 위해 고려된 사항은 다음과 같다. 기름관련 오염원 역시 원유의 산지와 정제 상태에 따라 그 성분의 차이가 큰 오염원으로 본 연구에서는 기름관련 오염원으로 주로 산업시설에서 사용되는 B-C유를 기름관련 오염원으로 분류하였다. 석탄관련 오염원의 경우, 가정에서 사용되는 무연탄과 산업시설에서 주로 사용되는 유연탄의 구성성분이 분석되지 않았기 때문에 이러한 오염원을 모두 합하여 석탄관련 오염원으로 분류하였다. 휘발유관련 오염원은 유연휘발유와 무연휘발유를 사용한 자동차를 포함한 오염원으로 본 연구에서 사용된 자료 중 41%에 해당되는 26개의 자료는 유연휘발유

를 무연휘발유와 함께 사용한 시점의 자료에 해당된다. 본 연구에서 자동차관련 오염원은 디젤차량을 제외한 gasoline을 사용하는 자동차만을 포함한다. 노천소각관련 오염원은 농사관련 소각과 목재, 제지 등의 각종 식물성 쓰레기의 연소뿐만 아니라 유해 중금속 발생의 원인이 되는 여러 가지 혼합 폐기물 소각을 포함하여 노천소각 및 불법소각관련 오염원으로 분류하였다. 마지막 오염원으로 유리관련 오염원이 분류되었다. 그 외에 각단에서 인자로 분류되었으나 오염원 확인이 어려운 인자들은 미확인 오염원으로 분류하였다.

1단의 추출된 인자에 대한 성분표는 표 5와 같이 전체 원소농도의 함에 대한 각 원소의 비율로 나타내었으며, 기존의 오염원분류표를 토대로 최종 확인하였다. 인자의 크기가 가장 작은 제 1단에서는 5개의 인자가 추출되었다. 첫째 인자는 Ca, Na, V, Pb, Zn, Fe를 함유하고 있어 오염원 분류표와 비교 확인한 결과 주로 산업시설에서 사용되는 B-C유의 미세분진에서 배출되는 원소의 구성비와 유사한 추이를 보였다. 따라서 제 1단의 첫 번째 인자는 중유를 사용하는 산업시설의 연소 배출물로 기름관련 오염원으로 사료된다. 두 번째 인자는 고농도의 K를 포함하여 Si, Zn, Na 등이 높게 포함되어 있다. 일반적으로 이러한 원소는 농작물 소각, 목재 및 생활폐기물과 같은 식물성 폐기물의 연소산물에서 주로 배출된다. 따라서 두 번째 인자는 노천소각 오염원으로 분류하였다. 세 번째 인자는 Pb의 농도가 매우 높았으며, Zn, Ni, Si 역시 높은 농도를 보였다. 일반적으로 gasoline 자동차에 높은 농도로 배출되는 Br의 농도는 낮았으나 다른 인자보다는 높게 포함되어 있었다. 따라서 세 번째 인자는 자동차 관련 오염원으로 무연, 유연휘발유를 사용하는 자동차만 포함되므로 gasoline 관련 오염원으로 분류하였다. 따라서 gasoline 관련 오염원에는 자동차관련 오염원 중에서 오염물질의 배출량이 많은 디젤차량은 제외되었다. 네 번째 인자는 Na와 동시에 높은 농도의 Pb이 함유되었다. 일반적으로 해염은 고농도의 Na를 함유하지만, 저농도의 Pb를 함유한다. 따라서 이 오염원은 고온에서 방출되는 미세분진으로서 광학유리 공정업체 및 관련 산업체에서 배출되는 것으로 사료된다. 마지막 인자는 K, Fe, Si, V, Zn, Na 등이 높은 인자로 오염원의 확인이 어려워 미확인

Table 5. TTFA estimated source profile (mass fraction) for each source of stage 1.

| Element               | FACTOR 1           | FACTOR 2             | FACTOR 3                | FACTOR 4             | FACTOR 5       |
|-----------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| Si                    | 0.0116             | 0.0725               | 0.0920                  | 0.0321               | 0.1306         |
| Ca                    | 0.5224             | 0.0099               | 0.0019                  | 0.0709               | 0.0000         |
| Cr                    | 0.0211             | 0.0000               | 0.1606                  | 0.0051               | 0.0003         |
| Mn                    | 0.0433             | 0.0010               | 0.0493                  | 0.0001               | 0.0160         |
| Fe                    | 0.0147             | 0.0000               | 0.0810                  | 0.0299               | 0.1811         |
| Ni                    | 0.0334             | 0.0323               | 0.0943                  | 0.0141               | 0.0464         |
| Cu                    | 0.0087             | 0.0067               | 0.0350                  | 0.0067               | 0.0157         |
| Zn                    | 0.0245             | 0.0583               | 0.1116                  | 0.0269               | 0.0691         |
| Pb                    | 0.0478             | 0.0000               | 0.2169                  | 0.0659               | 0.0546         |
| Br                    | 0.0000             | 0.0058               | 0.0198                  | 0.0510               | 0.0242         |
| Co                    | 0.0042             | 0.0003               | 0.0088                  | 0.0032               | 0.0031         |
| V                     | 0.0606             | 0.0092               | 0.0815                  | 0.0345               | 0.1284         |
| Ba                    | 0.0113             | 0.0015               | 0.0101                  | 0.0282               | 0.0174         |
| Na                    | 0.1672             | 0.0459               | 0.0062                  | 0.6270               | 0.0570         |
| K                     | 0.0007             | 0.7278               | 0.0200                  | 0.0008               | 0.2559         |
| Mg                    | 0.0285             | 0.0288               | 0.0110                  | 0.0035               | 0.0001         |
| Source Identification | Oil Burning Source | Field Burning Source | Gasoline Related Source | Glass Related Source | Unknown Source |

오염원으로 분류하였다.

제 2단에서는 5개의 인자가 분류되었으며, 첫 번째 인자는 높은 농도의 Ca를 포함하며, V, Zn, Fe이 높은 인자로서 중유의 연소 배출물로 기름관련 오염원으로 사료된다. 두 번째 인자는 높은 농도의 K를 포함하고 있어 노천소각 오염원으로 분류하였으며, 세 번째 인자는 제 1단계에서와 마찬가지로 높은 농도의 Pb를 포함한 gasoline 관련 오염원으로 분류하였다. 네 번째 인자는 주로 석탄관련 오염원에서 배출되는 Si, K, Ca, Fe이 유사한 조성으로 함유되어 있으므로 석탄관련 오염원으로 분류하였다. 마지막 인자는 고농도의 Na과 Pb이 포함된 유리관련 오염원으로 분류하였다.

제 3단에서는 미확인 오염원을 포함하여, 석탄연소 오염원, 유리관련 오염원, 자동차관련 오염원, 노천소각 오염원이 분리되었다. 마지막 인자인 미확인 오염원은 Si, Fe, Zn, Ca, Mn, V 등이 높은 인자로 기름관련 오염원과 일부 원소의 추이는 유사하나 높은 농도의 Si를 포함하고 있는 인자로서 미확인 오염원으로 분류하였다. 제 4단에서는 미확인 오염원을 포함하여 5개의 오염원이 분리되었으며, 유리관련 오염원 대신에 토양 오염원이 확인되었다. 토양 오염원은 Si, Fe, K, Ca, Mg, Pb 등의 원소와 관계가

깊었으며, 4단의 토양인자는 Si, Fe, Pb, Cr, K, Ca, Zn의 농도 순이었다. 따라서 제 4단의 네 번째 인자는 토양 오염원으로 분류하였다. 마지막 인자는 Si, K, Ca, Mg이 높게 추출된 인자로 노천소각으로 분류하기에는 Si의 농도가 높았으며, 석탄관련 오염원으로 분류하기에는 Fe의 농도가 낮았기 때문에 미확인 오염원으로 분류하였다.

제 5단에서는 미확인 오염원을 포함하여 노천소각 오염원, 토양 오염원 및 기름관련 오염원 등 4개의 오염원이 분리되었다. 제 6단에서는 노천소각 오염원, 토양 오염원, 석탄연소 오염원, 기름관련 오염원과 미확인 오염원 등 5개의 오염원이 추정되었다. 미확인 오염원은 Mg, Na, Si의 분율이 높아 해염 입자의 가능성이 있으나, Mg의 분율이 높아 본 연구 지역에 Mg와 관련된 오염원의 가능성 높은 것으로 사료된다. 제 7단에서는 기름연소 오염원, 토양 및 석탄관련 오염원과 6단과 마찬가지로 미확인 오염원 등 4개의 오염원이 추정되었다. 7단의 미확인 오염원은 Fe, Na, Ca, Mg 등이 높은 오염원으로 해염 입자와의 연관성이 사료되나 일반적으로 해염 입자의 경우 매우 높은 Na의 분율을 보이므로 본 연구에서는 미확인 오염원으로 분류하였다. 11  $\mu\text{m}$  이상의 분진이 포집되는 제 8단에서는 한 개의 미확인 오염원을 포함하여 토양 오염원, 석탄연소 오염원, 기름 오염원 및 해염 등이 분리되었다. 네 번째 인자는 Na, K, Mg의 농도가 높은 인자로서 해염 오염원으로 분류하였다. 마지막 인자인 미확인 오염원은 전체 오염원 중 가장 낮은 농도를 차지하였으며, 고농도의 Cr을 포함하고 있다.

### 3.2.3 오염원의 기여도 평가 및 고찰

연구지역에서 포집된 입자상 오염물질의 총 질량에 대한 오염원 기여도를 산출하기 위해서 대표값이라는 개념을 사용하였다. 측정된 16개 항목의 원소가 전체의 분진질량을 대표한다는 가정으로 측정된 원소만을 변수로 사용하였다. 이 같은 가정 하에 연구에 사용된 측정 항목이 16개의 무기원소이지만 이 항목을 기준으로 전체의 분진양을 추정하여 기여도를 산출하였다. 오염원 분류표를 이용하여 가중최소자승법을 수행하면, 전체 연구기간에 대한 입경에 따른 오염원의 기여도를 산출할 수 있게 된다.

추정된 각 단별 오염원의 특징은 표 6과 같다. 표

Table 6. Average source contribution for each stage.

| Stage  | Oil Burning Source |      | Soil Source       |      | Field Burning Source |      | Gasoline Related Source |      | Coal Burning Source |      | Marine Source     |      | Glass Related Source |     | Unknown Source    |      | Total     |
|--------|--------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------------|------|---------------------|------|-------------------|------|----------------------|-----|-------------------|------|-----------|
|        | μg/m <sup>3</sup>  | %    | μg/m <sup>3</sup> | %    | μg/m <sup>3</sup>    | %    | μg/m <sup>3</sup>       | %    | μg/m <sup>3</sup>   | %    | μg/m <sup>3</sup> | %    | μg/m <sup>3</sup>    | %   | μg/m <sup>3</sup> | %    |           |
| ST-1   | 0.6±1.9            | 6.1  | 0.0±0.0           | 0.0  | 1.8±3.2              | 18.7 | 4.2±8.9                 | 45.1 | 0.0±0.0             | 0.0  | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.3±0.6              | 2.8 | 2.6±2.6           | 27.3 | 9.4±17.2  |
| ST-2   | 1.3±2.0            | 8.5  | 0.0±0.0           | 0.0  | 1.5±1.1              | 0.1  | 1.6±2.1                 | 10.6 | 10.2±3.6            | 68.0 | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.4±0.9              | 2.8 | 0.0±0.0           | 0.0  | 15.0±9.7  |
| ST-3   | 0.0±0.0            | 0.0  | 0.0±0.0           | 0.0  | 4.4±2.0              | 42.0 | 1.2±1.9                 | 10.9 | 1.2±1.2             | 11.2 | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.04±0.1             | 0.4 | 3.8±10.7          | 35.5 | 10.6±15.9 |
| Fine   | 1.9                | 5.3  | 0.0               | 0.0  | 7.7                  | 22.1 | 6.9                     | 19.9 | 11.4                | 32.6 | 0.0               | 0.0  | 0.7                  | 2.0 | 6.3               | 18.0 | 34.9      |
| ST-4   | 3.1±1.1            | 37.9 | 0.9±1.7           | 11.1 | 0.0±0.0              | 0.0  | 1.8±6.9                 | 22.6 | 1.4±1.4             | 17.5 | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.0±0.0              | 0.0 | 0.9±1.7           | 10.9 | 8.1±12.8  |
| ST-5   | 2.9±6.7            | 27.3 | 6.1±1.5           | 56.5 | 1.6±1.1              | 14.9 | 0.0±0.0                 | 0.0  | 0.0±0.0             | 0.0  | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.0±0.0              | 0.0 | 0.1±0.3           | 1.3  | 10.8±9.6  |
| ST-6   | 0.1±0.2            | 1.2  | 7.7±1.1           | 77.6 | 0.9±1.1              | 9.9  | 0.0±0.0                 | 0.0  | 0.03±0.1            | 0.3  | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.0±0.0              | 0.0 | 1.1±1.6           | 11.1 | 9.9±4.1   |
| ST-7   | 2.8±2.1            | 42.6 | 0.9±0.5           | 14.2 | 0.0±0.0              | 0.0  | 0.0±0.0                 | 0.0  | 0.9±2.4             | 13.8 | 0.0±0.0           | 0.0  | 0.0±0.0              | 0.0 | 1.9±2.8           | 29.4 | 6.6±7.8   |
| ST-8   | 1.1±1.5            | 15.1 | 3.8±2.9           | 51.7 | 0.0±0.0              | 0.0  | 0.0±0.0                 | 0.0  | 1.6±2.6             | 22.2 | 0.7±2.7           | 10.0 | 0.0±0.0              | 0.0 | 0.1±0.2           | 0.9  | 7.4±9.9   |
| Coarse | 10.1               | 23.5 | 19.4              | 45.5 | 2.6                  | 6.0  | 1.8                     | 4.3  | 3.9                 | 9.3  | 0.7               | 1.7  | 0.0                  | 0.0 | 4.1               | 9.6  | 42.7      |

6은 각 단에서 확인된 오염원의 질량기여도(μg/m<sup>3</sup>)와 각 단의 총 분진농도에 해당 오염원의 % 기여도를 나타내었다. 또한 미세입자군과 거대입자군의 평균화 작업과정으로 제 1, 2, 3단의 각 오염원의 질량기여도의 합을 미세입자군의 오염원 질량기여도로 나타내었으며, 제 4, 5, 6, 7, 8단의 각 오염원의 질량기여도의 합을 거대입자군의 오염원 질량기여도로 나타내었다. 전체 단 중 일부 단을 제외하고 기름 관련 오염원, 석탄 관련 오염원과 노천소각 오염원이 확인되었다. Gasoline 관련 오염원은 주로 미세분진 영역에서 확인되었다. 특히, 고온의 연소과정에서 배출되는 자동차 관련 오염원은 직경 3.1 μm 미만인 제 4단까지에서 확인되었다. 특히 0.43~0.65 μm에서는 1단에서 차지하는 오염원 중 45%의 높은 분율을 차지하였다. 또한 고온에서 방출되는 유리관련 오염원 역시 3단까지인 직경 3.1 μm 미만인 미세분진에서는 확인되었다. 이와 같이 휘발유 관련 오염원, 유리관련 오염원은 미세입자군에 밀집되어 있었으며, 이들은 모두 인체의 호흡기 및 시정에 영향을 주는 인위적 오염원이다. 반면, 기름관련 오염원과 노천소각 관련 오염원, 석탄연소 오염원은 거의 모든 단에서 분리되었다. 자연적 오염원으로 확인된 두 인자인 토양오염원과 해염오염원은 2.1 μm 이상의 거대입자군에서 확인되었다. 토양 오염원은 제 4단에서부터 분류되었으며, 입경이 커지면서 전체 차지하는 분율이 점차 증가하여 제 6단에서 76%의 가장 높은 값을 보였다. 이러한 경향은 원자로

에서 토양관련 원소가 5, 6, 7단에 편중되는 현상과 일치하였다. 해염관련 오염원은 마지막 단인 제 8단에서 확인되었으며, 이와 같은 결과는 해염의 입경이 10 μm 이상인 것과 일치한다. 따라서 입경별로 포집된 분진에서 측정된 각 원소는 입경별로 특성을 나타내며, 이러한 원소의 입경별 특성은 영향을 미치는 각 오염원에서 발생하는 원소의 특성을 반영한다. 따라서 각 수용체에서 입경별로 분석된 분진의 정보는 수용체 환경에 영향을 미치는 오염원에 대한 유용한 정보를 제공하므로써 오염원 확인 및 기여도 확인에 합리적인 결과를 산출할 수 있었다.

다음 단계는 시료채취 기간별 각 오염원에 대한 질량기여도를 얻을 수 있었다. 기간별 각 오염원에 대한 질량기여도는 각 단별로 만들어진 오염원 분류표와 측정기간 동안 분진의 총 mass에 의거하여 각 시료를 회귀분석하여 얻은 입경에 따른 오염원의 질량기여도와 각 단별 분진중량의 백분율을 나타내었다. 즉, 시료채취 기간별 분진의 크기에 따른 각 오염원이 경희대학교 수원캠퍼스에 미치는 기여의 정도를 정량적으로 표시한 것이다. 전체 기간동안 분류된 오염원의 기여도와 각 기간별 오염원의 기여도를 계절별로 조사한 평균치는 표 7과 그림 1과 같다. 봄철은 3, 4, 5월, 여름철은 6, 7, 8월, 가을철은 9, 10, 11월, 겨울철은 12, 1, 2월로 나누어 산출하였다. 모든 기간동안 토양 오염원은 총부유분진의 20% 정도를 차지하여 자연적 오염원으로서 큰 역



할을 하였다. 특히, 황사의 영향이 비교적 심한 4, 5월의 토양오염원의 기여도는 30% 이상의 높은 기여도를 보였다. 해양 오염원은 자연적 오염원 중의 하나로 토양 오염원과는 달리 기간별 차이를 보이지 않았으며, 전체 기간 중 기여율이 약 1%로 본 연구지역의 대기오염에 큰 영향을 미치지 못하였

다. 인위적 오염원에 의한 기여도는 석탄관련 오염원의 기여도가 가장 높게 조사되었으며, 기름관련 오염원, 노천소각관련 오염원, gasoline 관련 오염원, 유리관련 오염원 순으로 조사되었다. 13%의 미확인 오염원의 경우 미세입자군에 포함된 기름관련 오염원 및 노천소각과 관련된 오염원일 가능성이 높았

Table 7. Source contribution results of seasonal mean mass.

| Stage  | No. of Sample | Oil Burning Source       |      | Soil Source              |      | Field Burning Source     |      | Gasoline Related Source  |      | Coal Burning Source      |      | Marine Source            |     | Glass Related Source     |     | Unknown Source           |      | Total |
|--------|---------------|--------------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|-----|--------------------------|-----|--------------------------|------|-------|
|        |               | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %    | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %    | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %    | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %    | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %    | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %   | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %   | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | %    |       |
| Winter | 11            | 14.9                     | 13.0 | 27.6                     | 24.4 | 17.1                     | 15.1 | 13.0                     | 11.5 | 22.2                     | 19.6 | 0.8                      | 0.7 | 1.1                      | 0.9 | 16.8                     | 14.8 | 113.4 |
| Spring | 15            | 12.1                     | 13.9 | 27.3                     | 31.4 | 11.9                     | 13.8 | 7.9                      | 9.0  | 15.1                     | 17.4 | 0.6                      | 0.7 | 0.9                      | 1.0 | 11.1                     | 12.8 | 86.9  |
| Summer | 18            | 9.6                      | 15.9 | 13.7                     | 22.6 | 7.6                      | 12.6 | 7.6                      | 12.5 | 12.0                     | 19.9 | 0.8                      | 1.3 | 0.7                      | 1.2 | 8.5                      | 14.0 | 60.5  |
| Fall   | 19            | 12.9                     | 18.2 | 15.9                     | 22.4 | 8.1                      | 11.4 | 8.6                      | 12.2 | 15.5                     | 21.9 | 0.8                      | 1.2 | 0.4                      | 0.6 | 8.6                      | 12.1 | 70.8  |
| Total  | 63            | 11.9                     | 15.3 | 19.7                     | 25.2 | 10.3                     | 13.2 | 8.8                      | 11.3 | 15.4                     | 19.8 | 0.7                      | 0.9 | 0.7                      | 0.9 | 10.4                     | 13.4 | 77.9  |

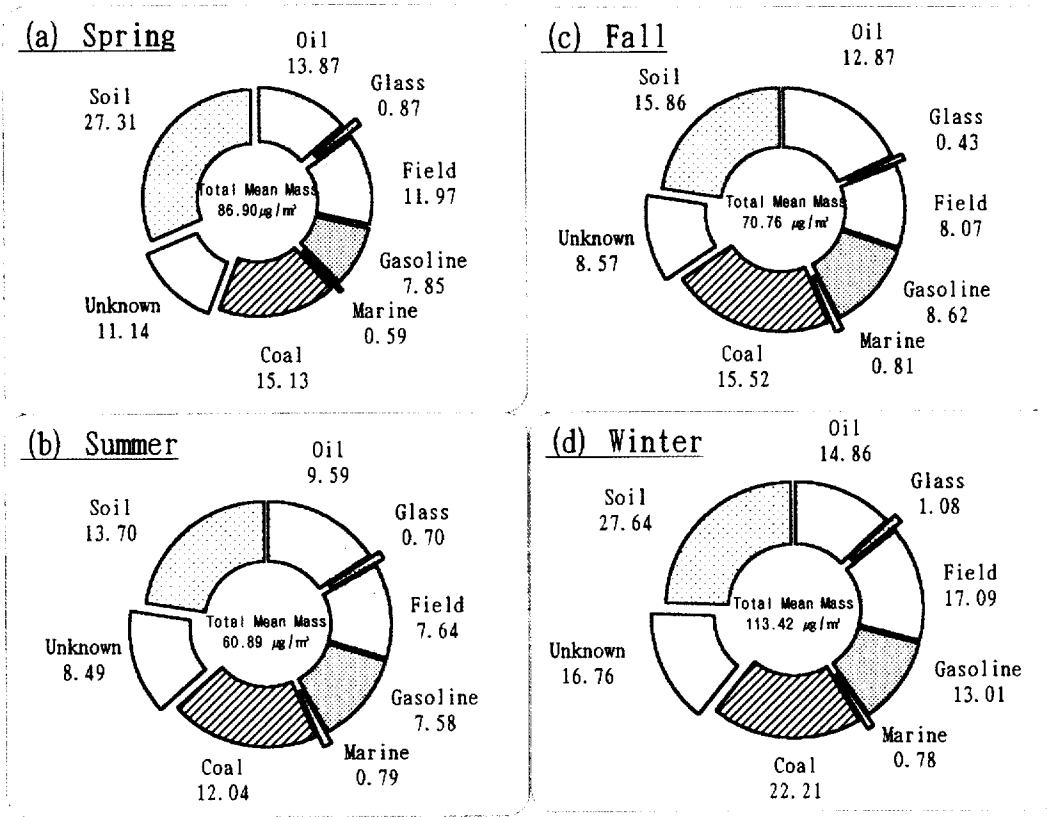


Fig. 1. Results of source contribution ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) for each season.

으나 정확한 분류가 어려웠으며, 추후 계속적 연구가 필요하다. 석탄관련 오염원은 전체 분진농도  $77.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  중 19.7%에 해당하는  $15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 큰 질량 기여도를 나타내었다. 석탄관련 오염원은 무연탄의 경우 가정에서 난방용으로 사용되며, 유연탄은 산업용으로 주로 사용된다. 두 번째로 높은 기여율을 보인 인자는 기름관련 오염원으로 전체 분진농도 중 15%에 해당하는  $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기여율을 보였으며, 연구지역 주변의 산업시설에서 사용되는 산업용 중유인 B-C유가 주로 포함되었다. 본 연구 지역에서 기름과 석탄의 기여율의 차이는 일반적으로 전체 기름의 사용량은 많으나, 기름의 경우 본 연구에서 분류된 기름관련 오염원은 크게 휘발유를 사용하는 자동차와 산업시설에서 사용되는 중유로 분류되었다. 그 외 난방용으로 사용되는 등유와 디젤 자동차에서 사용되는 경유는 확인에 어려움이 있어 본 연구에서 제외되었다. 따라서 미확인 오염원의 경우 등유 및 경유를 사용하는 기름관련 오염원일 가능성이 높으며, 이러한 이유로 석탄관련 오염원이 가장 큰 기여율을 보였던 것으로 사료된다. 노천소각관련 오염원은 전체적으로 13% 이상의 기여율을 보였다. 주로 노천 관련 인자로는 농사 관련 소각을 포함하여, 각 중 생활쓰레기의 불법소각 및 건축현장의 건축 폐기물의 소각 등 다양한 노천소각이 포함된다. 따라서 높은 노천소각의 기여율은 본 연구 지역의 주변에는 농지가 발달되어 봄철과 가을철에 농사관련 소각이 행해지며, 특히, 연구 지점이 학교라는 특수성에 의하여 주로 발생하는 쓰레기에는 종이류가 대부분을 차지한다. 또한, 건설공사가 활발하게 진행되면서 목재 등의 불법소각 역시 증가되는 추세이다. 특히 쓰레기 종량제가 실시된 1995년 이후 노천소각관련 오염원의 기여율은 급증하였다. 휘발유를 사용하는 자동차만을 포함하는 자동차관련 오염원은 전체 기간동안 11.3% 정도의 기여율을 보였다. 유리관련 오염원은 전체적으로 1% 미만의 낮은 기여율을 보였다.

토양오염원은 겨울철에  $27.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 봄철에  $27.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에의 높은 질량기여율을 보였으며, 특히 봄철에는 전체 오염원의 기여율 중 토양이 31.4%로 가장 높은 기여율을 보였으며, 봄철의 높은 기여율은 우리나라의 기상학적 특징으로 봄철에 가장 높은 빈도로 관측되는 서풍과 북서풍의 영향으로 중국

대륙으로부터 불어 오는 황사현상에 의한 것으로 추정된다. 또한 봄철의 바람의 속도가 타계질에 비하여 빠르기 때문에 토양의 비산 역시 봄철에 토양의 높은 분율에 영향을 미치게 된다. 석탄관련 오염원은 6, 7, 8월인 여름철에 질량기여도  $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮은 기여율을 보였다. 이는 산업시설의 유연탄의 사용량의 차이는 없더라도 무연탄의 경우 주로 가정 난방용으로 사용되므로 여름철에 매우 낮은 기여율을 나타내는 것으로 사료된다. 그러나 석탄과 같은 화석 연료인 기름관련 오염원은 본 연구에서는 가정 난방용 이외에도 주변 지역의 산업장에서 사용되는 중유 연소배출물의 영향으로 계절별 차이를 보이지 않았다.

노천소각 관련 오염원은 겨울철에  $17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 봄철에  $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 기여율을 보였다. 이는 겨울철의 경우 건설 현장에서 목재 등의 불법연소의 증가와 봄철의 농사와 관련된 소각에 의한 영향으로 사료된다. 인위적 오염원 중 자동차 관련 오염원은 봄철과 가을철에 높은 기여율을 보였다. 이러한 결과는 각종 학교가 밀집된 본 연구 대상지역의 경우 방학기간동안 차량의 통행량이 현저히 감소되므로 여름철과 겨울철의 기여율 감소에 의한 영향으로 사료된다. 산업시설과 관련된 인위적 오염원인 유리관련 오염원은 꾸준히 일정한 영향을 미쳤다. 이는 산업시설의 경우 일정하게 오염물질을 배출하므로 기간별 편차를 보이지 않으며, 연구지역의 대기질에 영향을 미치는 주요 오염원으로 사료된다. 그러나 이 도표를 해석할 때 유의할 점은 여기에서의 기여 백분율이란 각 오염원에 대한 상대적인 농도라는 것이다. 즉, 계절별 기준 오염원의 백분율 농도는 첫째, 시료채취 장소에서의 풍향, 풍속에 따라, 둘째, 타 오염원에 따라 상대적으로 차이를 보일 수 있다는 점에 유의해야 한다.

그림 2는 시료 포집기간인 1991년부터 1995년까지 5년 동안 분진 농도에 따른 기여율을 연도별로 나타낸 것이다. 전체 기간동안의 연도별 분진의 농도는 1994년에  $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 1995년에  $67.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 보였다. 전체 기간동안에 토양 오염원이 25% 이상의 높은 기여율을 나타내었으며, 석탄 관련 오염원이 20%의 높은 기여율을 보였다. 본 연구에서 기름관련 오염원은 주로 산업시설에서 사용되는 B-C유로 경기도지역에서

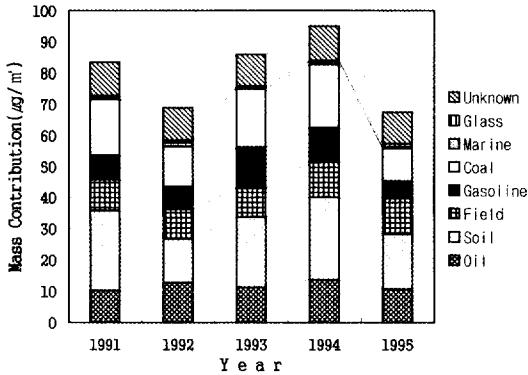


Fig. 2. A stacked chart of source apportionment results from 1991 to 1995.

사용되는 중유의 소비량은 1990년에  $15,672 \times 10^3$  Bbl에서 1995년  $28,184 \times 10^3$  Bbl로 44.4% 증가되는 추세로 본 연구지역에서는 1992년을 제외하고 전체적으로 기름관련 오염원의 기여도가 증가하고 있다. 토양 오염원의 기여도는 1991년 30.7%로 가장 높은 기여율을 보였으나 전체 년도 동안 큰 차이는 보이지 않았으며, 자연적 오염원으로서 본 연구지역에 지속적인 영향을 미치는 것으로 사료된다. 노천소각 관련 오염원은 1993년 이후 점차적으로 증가하여 1995년에 17.1%로 가장 큰 기여율을 보였다. 이러한 결과는 주변 지역의 공사의 증가 및 1995년 1월 1일부터 전국적으로 동시에 실시된 쓰레기 종량제가 불법소각 증가의 주원인으로 사료된다. 가솔린관련 오염원의 기여율은 1993년에 15%로 가장 높은 기여율을 보였으며, 1995년 8.2%로 낮은 기여율을 보였다. 일반적으로 증가된 자동차 통행량에 비하여 낮은 기여율의 원인은 1995년에 나타난 미확인 오염원의 높은 기여율에 의한 휘발유관련 오염원의 기여도에 영향을 준 것으로 사료된다. 인위적 오염원 중 가장 큰 기여율을 보인 석탄관련 오염원은 점차적으로 감소하여 1995년에 15.7%로 가장 낮은 기여율을 보였다. 석탄 오염원의 기여도 추이는 난방 및 산업용 연료로 고체연료에서 액체 및 기체연료의 대체에 의한 것으로 사료된다(대기오염물질배출량, 1991~1996).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 경기도 용인시에 위치한 경희대학교 수원캠퍼스에서 포집된 입경별 분진 자료를 바탕으로 수용모델의 한 방법인 목표변환 인자분석법(TTFA)을 응용하여 오염원 성분표를 통계적으로 작성하였으며, 질량기여도를 양적으로 추정하였다. 수원지역에서는 1991년 9월부터 1995년 12월까지 5년 동안의 분진 자료를 이용하여 확인된 각 입경별 오염원은 미확인 오염원을 제외하고 총 7개였다. 각 단별로 오염원의 개수는 제 1단계 5개, 2단계에서 5개, 3단계에서 5개, 4단계에서 5개, 5단계에서 4개, 6단계에서 5개, 7단계에서 4개, 8단계에서 5개 등, 4개에서 5개까지 오염원을 추정할 수 있었다. 수원 지역에서는 1991년 9월부터 1995년 12월까지 4년 동안 전체 평균 분진 기여율은 토양오염원 25.2%, 석탄연소 오염원 19.8%, 기름연소 오염원 15.2%, 노천소각 오염원 13.2%, 휘발유관련 오염원 11.3%, 해양 오염원 0.95%, 유리관련 오염원 0.92%순이었다. 미확인 오염원 역시 13.4%의 높은 분율을 보였다.

연구지역의 대기질에 영향을 미치는 오염원의 확인 및 기여도 산출에 의하면 전체 대기오염물질의 약 26%가 자연적 오염원에 의한 영향이었으며, 나머지는 인위적 오염원에 의한 영향이었다. 따라서 본 연구지역의 대기질 개선을 위해서는 전체의 13% 이상을 차지하는 불법소각과 관련된 규제 및 감시가 요구되며, 특히 쓰레기 종량제가 실시된 이후 급증하는 불법소각이 커다란 문제점으로 지적되었으며 이에 대한 규제제도의 보완이 요구된다. 또한 연구기간 동안 11.3%의 기여도를 보인 자동차 오염원의 저감 대책이 필요하며, 인위적 오염원 중 15.3%의 높은 기여도를 보인 기름관련 오염원에 대한 대책도 시급하다. 본 연구에서 기름관련 오염원은 주로 산업장에서 사용되는 B-C유의 기여도이며, 만약 가정 난방시설의 등유 및 트럭, 버스 등의 경유 등이 포함되면 전체 대기에 미치는 기름관련 오염원의 영향은 크게 증가하리라 사료된다. 따라서 각 산업시설에 대한 방지시설의 규제강화 및 청정연료로의 대체가 요구된다. 마지막으로 가장 높은 19.2%의 기여율을 보인 석탄연소 오염원은 산업시설에서 사용되는 유연탄에 대한 규제강화 및 방지시설이 불가능한 가정난방에 대한 청정연료 교체

등을 통하여 대기질 개선이 가능하리라 사료된다.

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, Cl의 원소분석이 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구의 오염원 기여도는 분석된 원소에 의해서 추정 가능한 오염원 기여도이며, 따라서 secondary pollutant 및 VOC 등의 가스상 오염물질의 분석이 실시된다면 본 연구지역의 오염도에 영향을 미친 추가의 오염원의 확인이 가능하다. 또한, 국내의 오염원 배출자료의 미비로 오염원의 확인 및 분류에 어려움이 있었다. 그러나, 본 연구에서 다단분진포집기에 의한 분진시료의 입경별 화학원소를 이용하여 개발된 수용모델 응용기법은 독창적이었으며, 기존의 TSP에 입각한 수용모델과 비교하였을 때, 매우 양호한 오염원 분리도와 민감도를 보였다.

## 사 사

본 연구는 경희대학교 교비연구비지원 및 일부 삼성전자(주)의 연구지원에 의해 수행되었으며, 이에 재정적 도움을 주신 경희대학교 및 삼성전자(주)의 임직원께 감사드린다. 또한, 연구과정에서 고귀한 학술적 의견을 주신 서울시립대학교 김신도 교수, 아주대학교 홍민선 교수께 감사드린다.

## 참 고 문 헌

대기오염물질배출량(1991-1996) 환경부

Budiansky, S.(1980) Dispersion modeling, Environ. Sci. & Technol., 14, 370-374.

Dzubay, T.G.(1977) *X-Ray Fluorescence Analysis of Environmental Samples*, Ann Arbor Science Publishers, 3-7.

Dzubay, T.G. and R.K. Stevens (1975) Ambient air analysis with dichotomous sampler and x-ray fluorescence spectrometer, Environ. Sci. & Technol., 9, 663-668.

Frechette, G., J.C. Hebert, and T.P. Thinh (1977) X-ray fluorescence analysis of cements, Anal. Chem., 51(7), 957-961.

Gordon, G.E.(1980) Receptor models, Environ. Sci. & Technol., 14, 792-800.

Gordon, G.E.(1988) Receptor models, Environ. Sci. & Technol., 22(10), 1132-1142.

Hopke, P.K.(1980) *The application of factor analysis to quantitative source apportionment in atmospheric aerosol: source/air quality relationships*, American Chemical Society Symposium Series No. 167.

Hopke, P.K.(1985) *Receptor Modeling in Environmental Chemistry*, John Wiley & Sons.

Hopke, P.K.(1988) Target transformation factor analysis as an aerosol mass apportionment method, A review and sensitive study, Atmospheric Environment, 9, 1777-1792.

Hopke, P.K., D.J. Alpert, and B.A. Roscoe (1982) FAN-TASIA program for target transformation factor analysis to apportion source in environmental samples, Computers & Chemistry, 7(3), 149-155.

Li, S.M. and J.W. Winchester(1987) Particle size distribution and chemistry of late winter arctic aerosols, J. Geograph. Reser., 95, 897-908.

Miller, M.S., S.K. Friedlander, and G.M. Hindy (1972) A Chemical element balance for the Pasadena aerosol, J. Colloid and Inter. Science, 39(1), 165-176.

Roscoe, B.A. and P.K. Hopke (1981) Error estimation of factor loadings and scores obtained with target transformation factor analysis, Anal. Chemi. Acta., 160, 121-134.

Sturges, W.T. and R.M. Harrison (1985) Development of a technique for the determination of lead and bromin in atmospheric particles by x-ray fluorescence, Atmospheric Environment, 19(9), 1495-1502.