

## 주성분/중회귀분석을 이용한 대구지역 대기중 부유분진의 발생원별 특성평가

### Source Characterization of Suspended Particulate Matter in Taegu Area, Using Principal Component Analysis Coupled with Multiple Regression

백 성 옥 · 황 승 만

영남대학교 환경공학과 대기오염연구실  
(원고접수; 1992. 6. 20)

Sung-Ok Baek, Seung-Man Hwang

Air Pollution Laboratory, Dept. of Environmental Engineering  
Yeungnam University  
(Received 20 June 1992)

#### Abstract

This study was carried out to characterize sources of atmospheric total suspended particulates (TSP) in urban and sub-urban areas of metropolitan Taegu. The sources were tentatively identified by a multivariate technique, i.e. principal component analysis (PCA), and the source contributions to the atmospheric concentrations of TSP were further estimated by stepwise multiple regression analysis. A total of 5 sources was identified in the urban area of Taegu (soil dust resuspension, fuel combustion, secondary aerosol, traffic related aerosol, and refuge burning), while 4 sources were found to be significant in the sub-urban area as following: fuel combustion/secondary aerosol, soil dust resuspension, traffic related aerosol, and wood/agricultural burning. The largest contributor to the atmospheric TSP appeared to be the soil dust resuspension in both areas. The source apportionment of the extractable organic matter (EOM) was also carried out for the Taegu data. The EOM was determined with respect to the solvent polarity, i.e. cyclohexane (non-polar), dichloromethane (semi-polar), and acetone (polar). In addition, the source profiles for the TSP in Taegu area were estimated using a PCA-based algorithm, and the validity was evaluated tentatively by comparing the data in the literature.

#### 1. 서 론

대기중 부유분진의 농도에 영향을 미치는 각종 발생원을 정성적으로 파악하고 그 영향을 정량화하는 작업은 분진에 관련된 대기질 관리의 측면에서 매우 중요한 과정이다. 이를 위한 일반적인 접근 방법으로는 발생원을 중심으로 하는 대기확산 모델링

과 시료의 채취지점에서 발생원을 역으로 추정하는 수용(Receptor)모델링으로 대별할 수 있으며 양자는 상호보완적인 장단점을 가지고 있다.

1980년대에 들어서면서 분진에 함유된 미량성분의 기기분석 기법의 발달 및 여러가지 수학적 방법의 개발에 힘입어 수용모델은 괄목할 만한 진전을 보여 왔는데 이를 다시 대별하면 화학질량수지

(Chemical Mass Balance 이하 CMB)모델과 다변량해석에 기초한 모델로 나눌 수 있으며 이외에도 현미경 분석법 및 대기확산모델과의 혼합형 모델의 개발이 같은 맥락에서 연구되고 있다. 여러가지 유형의 수용모델에 관한 특징과 장단점들은 기존 문헌에서 찾을 수 있다 (Henry et al., 1984; Watson, 1984; Gorden, 1988).

유형에 관계없이 수용모델링의 공통된 선행조건은 측정지점에서 신뢰성 있게 획득된 분진농도 자료의 수가 충분히 많아야 한다는 사실이다. 그러나 CMB 모델에서는 대상지역의 분진관련 농도자료 이외에도 각종 발생원 조사와 각 발생원에서의 분진의 화학적 성분과 그 구성비에 관한 정확한 내용이 사전에 파악되어야 하는데 이러한 전제조건을 충족시키기에는 현실적으로 많은 어려움이 따르게 되며 결과적으로 CMB모델의 보편적인 적용을 제한하는 요인이 되고 있다 (Watson, 1984). 이와는 대조적으로 다변량모델은 비록 대상지역의 오염원에 대한 사전 정보가 충분치 못할 경우에도 측정지점에서 획득된 일련의 분진시료를 바탕으로 화학성분간의 상관성 혹은 변동성을 통계적으로 분석하여 측정된 분진농도에 영향을 미칠 수 있는 발생원들을 정성적으로 파악하고 나아가 오염원 성분표를 역으로 추정할 수 있는 방법론적인 가능성을 제시해 준다는 장점이 있다 (Hopke, 1985).

주성분분석(Principal Component Analysis 이하 PCA) 혹은 일반인자분석 (Factor Analysis 이하 FA)등을 이용하는 다변량적 Receptor모델링에 내재된 가장 큰 문제점은 추정된 오염원들에 대한 분진농도 기여도를 정량화하기 어렵다는 점이었다 (Cooper & Watson, 1980). 이 점을 해결하기 위하여 여러 연구자들에 의해 제시된 몇가지 방법들을 요약하면 목표변환 인자분석법(Target Transformation Factor Analysis 이하 TTFA), 선형중회귀분석법(Multiple Linear Regression 이하 MLR), 절대주성분분석법(Absolute PCA 이하 APCA)등으로 분류할 수 있는데, 각각의 방법에는 모두 특징적인 문제점들이 내재되어 있다.

Alpert와 Hopke(1980)에 의해 시도된 TTFA에서는 인자분석을 위한 상관행렬을 구성함에 있어서 각 변수들간의 평균에 대한 상관을 이용하는 일반적인 R-mode 분석 대신에 각 시료간의 원점(절대영)에 대한 상관을 이용하는 Q-mode분석법을 택하고 있으며, 인자분석을 통하여 도출된 발생원 관련인자를 그 발생원의 성분벡터(검정벡터)에 대하여 인자의 축과 입력된 성분벡터가 겹치도록 축을 회전시킴으로써 새로운 오염원 성분표를 계산해 나

간다. 일단 오염원성분표가 새로이 작성되면 CMB 모델에서와 같이 가중최소자승법을 통하여 각 오염원의 질량기여율을 계산할 수 있게 된다. 따라서 TTFA는 기존의 인자분석법과 CMB의 특징을 혼용한 것으로 요약할 수 있으며 결국 TTFA를 통하여 얻어진 결과의 신뢰성은 선택된 검정벡터의 대변성에 크게 의존하게 된다 (Koutrakis & Spengler, 1987). 국내에서는 김태오등(1990)이 최초로 부산지역에 TTFA를 적용한 바 있으며 보다 자세한 이론적 내용은 문헌에 나타나 있다 (Henry et al., 1984; Koutrakis & Spengler, 1987; Hopke, 1988).

CMB와 종래의 FA모델이 체계화 되기 이전에 보다 간편한 방법으로 제안된 MLR은 각종 분진발생원에 고유한 Tracer들을 선정하여 분진농도를 종속변수로, Tracer들을 독립변수로 중회귀분석을 함으로써 분진농도에 대한 각 발생원의 기여도를 추정하는 기법으로서 Kleinman 등(1980)이 New York에, Morandi 등(1987)이 New Jersey주의 도시지역에 각각 적용한 바 있다. MLR의 중요한 단계는 Tracer의 선정단계로서 일반적인 정보를 이용하거나 FA등과 같은 통계적방법을 통하여 특정 발생원과 높은 상관을 갖는 변수를 선정하게 되는데 이들 Tracer들은 가급적 서로 독립적인 변수들이어야 하며 그렇지 못할 경우 회귀분석과정에서 변수들간의 상관성으로 인하여 추정된 결과가 매우 불안정할 수 있다는 문제점이 내재되어 있다.

보다 최근들어, Thurston과 Spengler(1985)는 PCA에 기초하여 발생원별 질량기여도를 정량화할 수 있는 새로운 방법, 즉 절대주성분분석법(APCA)을 제안하였는데, 이 방법의 특징적인 내용은 정규화한 자료로부터 얻어진 주성분특점치(PC Score 이하 PCS)들도 역시 정규화되어 있으므로 도출된 각 주성분별로 분진의 모든 화학성분 농도가 영인 가상의 자료(Dummy Sample)를 이용하여 절대 영인 PCS를 먼저 계산하고 이어서 정규화된 PCS에 각 주성분별 절대 영을 고려하여 절대주성분 특점치(Absolute PCS 이하 APCS)를 계산하는 과정으로 요약된다. 이렇게 새로이 계산된 APCS에 차원을 부여하기 위한 Scalling Factor로는 분진농도와의 중회귀분석을 통하여 얻어진 회귀계수를 이용하며, 결과적으로 분진의 전체농도는 도출된 주성분별 APCS에 각각의 회귀계수를 곱한 값들의 선형결합으로 표현된다.

APCA를 이용한 분진발생원의 정량적 추정은 SAS나 SPSS와 같은 기존 통계Package에서 쉽게 수행할 수 있다는 장점은 있으나 자료의 분포합수

혹은 개형(특히 비대칭일 경우)이 정확히 파악되지 못한 경우에는 절대영의 추정으로 인한 불확실성을 배제할 수 없는 문제점이 지적되고 있다(Hopke, 1988). 그럼에도 불구하고 APCA는 특히 분진발생원이나 오염원성분표등에 대한 기존 자료가 미약한 지역에 적용할 수 있다는 가능성과 계산상 편리함의 측면에서 최근들어 여러 지역에서 이용되고 있으며(Pratsinis et al., 1988; Rojas et al., 1990; Keeler et al., 1990; Morandi et al., 1991), Keiding et al.(1986, 1988)에 의하여 그 수학적 논리성도 비교·검증된 바 있다.

본 연구의 목적은 첫째, 대도시인 대구와 인근지역을 대상으로 대기중 총부유분진(Total Suspended Particulates 이하 TSP)의 발생원을 파악하고 그 영향을 정량화하기 위하여 수행되었으며 각종 분진 발생원별 오염원 성분표에 대한 신뢰성 있는 자료가 축적되지 못한 국내의 실정을 감안하여 비교적 사전 정보에 구애 받지 않는 방법으로서 앞서 언급한 APCA기법을 적용하였다. 두번째, 분진 농도에 대한 발생원별 기여도의 정량화와 더불어 국내에서는 처음으로 분진에 함유된 유기성용매 추출가능물질(Extractable Organic Matter 이하 EOM)에 대한 오염원별 특성을 평가하고자 하였으며, 마지막으로 APCA결과 추정된 대구지역의 각종 분진발생원에 대한 오염원 성분표를 제시하고자 하였다.

## 2. 이 론

Receptor모델은 공통적으로 물질보전의 원리에 기초하고 있다. 만약 p개의 서로 독립적인 발생원에서 배출된 분진들이 혼합되어 있는 대기중 부유분진을 채취한 시료의 수를 m이라고 하고 각 시료에 대하여 n개의 성분들을 분석하여 물질수지식을 적용한다면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$X_{ik} = \sum_{j=1}^p A_{ij} C_{jk} \quad (1)$$

여기서,  $X_{ik}$ 는 k번째 시료에서 측정된 i번째 성분의 농도( $ng/m^3$ ),  $A_{ij}$ 는 j번째 발생원에서 배출된 분진중 i번째 성분의 함량농도( $ng/\mu g$ )이며,  $C_{jk}$ 는 k번째 시료에 대한 j번째 발생원에서 배출된 분진의 농도기여량( $\mu g/m^3$ )이다. 한편, k번째 시료의 총부유분진농도  $Y_k(\mu g/m^3)$ 에 대해서는 다음식이 성립한다.

$$Y_k = \sum_{i=1}^p C_{ik} \quad (2)$$

일반적으로 CMB모델에서는 식(1)에 포함된 변수들중 분진의 화학성분농도 X와 오염원성분계수 A는 미리 입력되므로 C는 가중최소자승법을 통하여 구할 수 있다. 그러나 A를 모를 경우에는 FA 혹은 PCA와 같은 다변량해석적 기법을 적용하여 발생원 수 p의 결정 및 A와 C에 연관되는 새로운 변수들을 추정하여 접근할 수 밖에 없다. PCA는 FA의 특수한 경우로서 일반적인 FA와의 가장 큰 차이점은 인자도출시에 특수인자(Unique Factor)를 고려하지 않는다는 점이다. 일반적으로 PCA는 서로 다른 차원을 갖는 (혹은 서로 농도 수준이 다른) 변수들에 동등성을 부여하기 위하여 아래와 같이 각 변수들에 대한 정규화로부터 시작한다.

$$Z_{ik} = (X_{ik} - \bar{X}_i) / S_{X_i} \quad (3)$$

여기서,  $Z_{ik}$ 는  $X_{ik}$ 의 정규화된 값이며  $\bar{X}_i$ 와  $S_{X_i}$ 는 각각 i번째 성분농도의 평균과 표준편차이다. 한편, 각 성분의 평균에 대하여 식(1)을 적용하면,

$$\bar{X}_i = \sum_{j=1}^p A_{ij} \bar{C}_j \quad (4)$$

여기서,  $\bar{C}_j$ 는 j번째 발생원의 평균적인 농도기여분이며 식(1)과 (4)를 (3)에 대입하면,

$$Z_{ik} = \sum_{j=1}^p \frac{A_{ij}}{S_{X_i}} (C_{jk} - \bar{C}_j) \quad (5)$$

또한,  $S_{C_j}$ 를 j번째 발생원으로 인한 농도기여량의 표준편차라고 한다면, 식(5)는 다음과 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$Z_{ik} = \sum_{j=1}^p W_{ij} P_{jk} \quad (6)$$

여기서,  $W_{ij} = S_{C_j} A_{ij} / S_{X_i}$  (7)

$$P_{jk} = (C_{jk} - \bar{C}_j) / S_{C_j} \quad (8)$$

식(6)는 PCA의 전형적인 표현으로서 정의에 의해  $W_{ij}$ 는 i번째 변수의 j번째 PC에 대한 인자부하량(Factor Loading)으로서 각 변수들과 PC와의 상관관계를 나타내며,  $P_{jk}$ 는 j번째 발생원에 연관된 주성분의 k번째 시료에 대한 주성분특점치(PCS)로서

아래와 같이 구해진다.

$$P_k = \sum_{i=1}^n B_i Z_{ik} \quad (9)$$

여기서,

$$B_i = W_i / \lambda_i \quad (10)$$

이며  $\lambda_i$ 와  $B_i$ 는 각각  $P_i$ 에 연관된 고유치와 고유벡터로서 원자료의 상관행렬  $R$ 로부터 구할 수 있다. 그러나 PCA를 통하여  $W$ 와  $P$ 를 구하여도 식(7), (8)에서 볼 수 있듯이  $S_{ci}$ 와  $C_i$ 가 여전히 미지수이므로 오염원 성분계수  $A$ 와 농도기여량  $C$ 를 계산할 수는 없다. 한편, 일반적인  $R$ -mode 분석을 통한 PCA에서는 PCS가 각 변수의 평균에 대해 정규화된 자료로부터 얻어졌으므로 그 역시 정규화되어 있다. 따라서 분진농도  $Y$ 에 대해 회귀분석을 하면

$$Y_k = \bar{Y} + \sum_{i=1}^p \alpha_i P_k \quad (11)$$

와 같이 되어 평균분진농도( $\bar{Y}$ )에 대한 특정발생원이 미치는 상대적인 영향은 추정할 수 있으나 직접적인 절대기여량은 추정할 수 없다. 식(11)에서 회귀계수  $\alpha_i$ 는 무차원인  $P_i$ 에 분진농도차원을 부여하는 환산계수가 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 접근방법으로서 Thurston과 Spengler(1985)가 제안한 방법을 요약하면, 먼저 모든 성분농도가 영인 가상의 시료에 대해 정규화된 변수  $Z$ 의 값( $Z_0$ )을 계산하고, 식(9)을 이용하여 각 주성분별로 절대영에 상응하는 주성분 득점점( $P_0$ )를 추정한다. 이와 같이 구해진  $P_0$ 에 대해 PCS각각을 평행이동하여 절대주성분득점점(APCS)로 환산한 후, 마지막으로 분진농도( $Y$ )에 대한 각 발생원의 절대적인 기여량은 다음과 같이 회귀분석을 통하여 추정할 수 있다.

$$Y_k = \sum_{i=1}^p \alpha_i APCS_{ik} + \alpha_0 \quad (12)$$

여기서,  $(\alpha_i APCS_{ik} = C_k)$ 는  $k$ 번째 시료에 대한  $j$ 번째 발생원의 농도기여분이며, 절편  $\alpha_0$ 는 PCA를 통하여 파악된 발생원만으로는 설명되지 않는 미확인 발생원의 농도기여분으로서 만약 PCA가 성공적이라면  $\alpha_0$ 는 영에 가까워져야 한다. 여기서 식(12)를 분진의 각 성분에 대해 반복하면 결과적으로 식(1)중의 오염원성분표  $A$ 도 추정할 수 있다. 한편, Keiding et al.(1986)에 의해 제안된 방법은 오염원

성분표  $A$ 를 먼저 추정한 뒤 CMB에서와 같이 가중최소자승법을 통하여 농도기여량  $C$ 를 계산하는 방법으로 요약되며 오염원 성분표  $A$ 는 식(7)에 의해 추정될 수 있다. 그러나 식(7)에서  $W$ 는 PCA를 통하여 구할 수 있으나 각 발생원의 분진농도 기여분의 표준편차  $S_{ci}$ 는 미지수이므로 이를 추정하기 위하여 먼저 식(2)를 평균( $Y$ )과 표준편차( $S_y$ )에 대해 정규화된 분진농도( $M$ )에 대하여 표현하면,

$$M_k = \frac{\sum_{j=1}^p C_{jk} \bar{C}_j}{S_y} \\ = \frac{\sum_{j=1}^p S_{cj} (C_{jk} \bar{C}_j)}{S_y S_{cj}} \quad (13)$$

한편,  $c_j = S_{cj}/S_y$ 로 치환하면 식(13)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$M_k = \sum_{j=1}^p c_j P_{jk} \quad (14)$$

식(14)에서  $c_j$ 는 정규화된 변수들인  $P$ 와  $M$ 에 대하여 회귀분석을 통하여 구할 수 있으며 이 경우  $c_j$ 는 회귀계수인 동시에  $P$ 와  $M$  사이의 상관계수가 된다. 일단  $c_j$ 가 구해지면  $Sc_j$ 가 계산되며 결과적으로 식(7)을 이용하여 오염원 성분계수  $A_{ij}$ 를 추정할 수 있게 된다.

이상에서 설명한 두 방법은 서로 독립적으로 제안되었으나 단지 계산과정상의 차이만 있을 뿐 동일한 결과를 얻게 해 준다. 만약 PCA의 수행시에 결과해석을 용이하게 하기 위하여 도출된 PC들을 VARIMAX나 OBLIMIN등과 같은 방법으로 좌표축 회전(Rotation)을 할 경우에는 회전된 PC들과 그에 관련된 변수들을 위의 식들에 대입하면 된다.

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 분진시료의 모집

대기중 부유분진시료는 90년 2월에서 91년 3월의 기간중 도시 주거지역인 대구시 대명동(영남대의과대학 5층 옥상)과 대구인근의 전원지역인 경산시 대동(영남대 공과대학 4층 옥상)에서 일정유량 조절기가 부착된 표준 High-Volume Sampler (Sierra Andersen Model)와 유리섬유필터(Whatman EPM2000, 8"x10")를 이용하여 각 시료당 23-24시간동안 모집되어 졌다. Sampler는 유량이 1.2에서 1.4 m<sup>3</sup>/min정도로 운전되어 시료

당 포집된 공기량은 대략 1,800m<sup>3</sup>가 유지되도록 하였다. 시료채취 지점 및 주변 환경에 대한 자세한 사항은 문헌에 나타나 있다 (백성욱 등, 1991).

### 3.2 화학성분 분석

포집된 시료여지는 TSP농도 측정을 위해 평량한 후 4등분하여 각각 미량 원소성분(Trace Elements), 무기성 음이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>)과 양이온(K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 및 유기성용매추출가능성물질(EOM)의 분석에 이용하였다. 분진에 함유된 미량 성분원소는 질산-염산법(Lodge, 1988)으로 추출하여 다원소분석이 가능한 Inductively Coupled Plasma분광광도계(Labtam 8440)로 19개 항목(Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mg, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sn, V, Ti, Zn)에 대하여 두번씩 반복 분석하였으며 수용성무기이온류(K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>)는 Ion Chromatograph(Dionex 2000i/SP)로 분석하였다. EOM은 극성이 다른 용매에 대하여 Soxhlet장착상에서 8시간씩 연속 추출하였으며 추출용매로는 Cyclohexane(CHX), Dichloromethane(DCM), Acetone(ACT)을 각각 비극성, 반극성, 극성용매로 사용하였다. 수용성무기이온류와 EOM 분석에 관한 보다 자세한 내용은 문헌에서 찾을 수 있다 (백성욱 등, 1991).

### 3.3 자료의 통계처리

분석된 화학성분 농도자료에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 검출한계 추정, Blank시험 및 Recovery시험등을 수행하였다. 결과적으로 Al, Ca, Si 및 Na는 유리섬유필터 자체에 함유된 농도가 높을 뿐만 아니라 매 필터당 함량농도의 편차가 매우 커서 Blank농도를 고려한 실제 측정치의 환산이 사실상 불가능하여 통계처리에서 제외하였으며, Cr, Sn, Sb와 Cd(경산지역에 한하여)의 경우에는 많은 측정치가 검출한계 이하로 나타나 자료해석에 포함시키지 않았다. 한편, Cu는 High-Volume Sampler의 Motor Brush에 의한 인위적 오염이 높은 것으로 관측되어 역시 자료해석 과정에서 제외하였다. 이외에도 강우등으로 인해 분진농도가 현저히 낮은 시료들은 화학분석은 하였으나 본 연구에서는 제외하였으며 최종적으로 통계처리에 포함된 자료의 수는 대구지역이 92개(하절기 40개 및 동절기 52개), 경산지역이 70개(하절기 37개 및 동절기 33개)였다. PCA를 포함한 모든 자료의 통계처리는 SPSS-X와 자체 개발한 Fortran프로그램을 이용하였다.

### 3.4 주성분분석

PCA의 주된 목적은 결국 원자료의 통계적 특성을 잃지 않는 소수의 독립적인 변수들을 도출하기 위함이며, 이 과정에서 도출된 새로운 변수들, 즉 주성분(PC)의 해석이 쉽지 않을 경우가 실제에는 많이 나타나게 된다. 따라서 도출된 PC의 해석을 용이하게 하기 위해서 좌표축 회전기법이 흔히 적용되고 있는데, 본 연구에서는 VARIMAX기법을 채택하였다. 이 방법은 PC 부하량이 양극화(1과 -1에 접근)되도록 좌표축을 직교변환해 나가는 방법으로서 일반적으로 가장 많이 이용되고 있는 방법으로 알려져 있다.

한편 PCA에서는 최종적으로 PC의 수를 결정하는 것이 매우 중요한 과정으로서 고유치에 기초하는 방법, Chi Square를 계산하는 방법, Root Mean Square를 계산하는 방법, Exner함수를 이용하는 방법등 여러가지 방법이 제안되었으나(Malinowski, 1977; Hopke, 1988), 어느 방법도 절대적인 비교우위를 가지지 못하고 결국 여러가지 방법을 적용하여 총괄적으로 판단하는 것이 바람직하다고 알려져 있다(Hopke, 1985). 따라서 최종적인 PC의 수를 결정함에 있어서 연구자의 경험과 어느 정도의 주관적인 판단이 완전히 배제될 수는 없으며 도출된 PC의 해석가능성이 중요한 척도가 되기도 한다(Thurston & Liroy, 1987). 본 연구에서는 일차적으로는 고유치에 기초하여 VARIMAX회전 후 그 값이 1 이상으로 유지되는 PC들을 선정하였으며(Roscoe et al., 1982), 경우에 따라서는 도출된 PC의 해석가능성의 측면에 중점을 두어 비록 고유치가 1 이상으로 나타났더라도 하더라도 전체 분산에의 기여도가 적고 패턴 해석이 불명확하거나 다른 PC의 패턴 해석에 영향을 미치는 PC는 회전에 포함시키지 않았다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 부유분진의 화학성분농도

대도시 대구의 도시지역과 전원지역의 대기중 부유분진 농도와 분진에 함유된 화학성분의 함량농도를 분석한 결과는 Table 1에 나타내었다. 측정항목별 농도 분포는 대체로 도시지역의 농도가 전원지역에 비해 높게 나타나고 있으나 특히 As, V, Se, Ni, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>등과 같은 인위적 오염원과 연계된 항목들에 대해서는 두 지역간의 농도차이가 크게 나타난 반면, Fe, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Mn, Zn등과 같이 연소원과 연계되지 않고 자연적인 오염원과 관련되는 성분들의 농도는 두 지역에서 비슷한 수준을 나타내고 있음

Table 1. Ambient concentrations (Mean  $\pm$  S.D.) of chemical fractions of TSP in Taegu and Kyungsan areas.

Variable	Unit	Taegu area	Kyungsan area
As	ng/m <sup>3</sup>	25.9 $\pm$ 16.4	13.0 $\pm$ 8.2
Cl <sup>-</sup>	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	3.1 $\pm$ 2.6	2.8 $\pm$ 1.4
Cd	ng/m <sup>3</sup>	4.8 $\pm$ 3.5	2.5 $\pm$ 2.0
Fe	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	1.2 $\pm$ 0.5	1.1 $\pm$ 0.6
K <sup>+</sup>	ng/m <sup>3</sup>	710.1 $\pm$ 274.2	702.7 $\pm$ 332.9
Mg	ng/m <sup>3</sup>	709.7 $\pm$ 446.6	478.0 $\pm$ 290.9
Mn	ng/m <sup>3</sup>	54.1 $\pm$ 27.1	50.1 $\pm$ 24.1
Ni	ng/m <sup>3</sup>	25.7 $\pm$ 14.3	16.0 $\pm$ 10.3
Pb	ng/m <sup>3</sup>	193.2 $\pm$ 101.8	134.9 $\pm$ 84.6
Se	ng/m <sup>3</sup>	17.9 $\pm$ 10.7	8.3 $\pm$ 6.2
Ti	ng/m <sup>3</sup>	30.8 $\pm$ 13.6	20.1 $\pm$ 10.8
V	ng/m <sup>3</sup>	38.7 $\pm$ 24.1	25.9 $\pm$ 18.6
Zn	ng/m <sup>3</sup>	318.3 $\pm$ 196.0	287.3 $\pm$ 133.1
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	23.1 $\pm$ 10.2	17.4 $\pm$ 11.9
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	5.1 $\pm$ 2.7	3.6 $\pm$ 2.6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	3.2 $\pm$ 3.4	2.8 $\pm$ 2.5
CHX	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	9.6 $\pm$ 5.4	( 3.5 $\pm$ 1.4)*
DCM	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	5.1 $\pm$ 3.5	( 2.1 $\pm$ 1.0)*
ACT	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	17.7 $\pm$ 6.9	( 10.5 $\pm$ 3.7)*
EOM	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	32.4 $\pm$ 13.7	( 16.1 $\pm$ 6.0)*
TSP	$\mu$ g/m <sup>3</sup>	113.8 $\pm$ 47.7	82.8 $\pm$ 35.7
Number of Cases		92	70

\* Number of cases is 28

을 알 수 있다. 대구지역의 경우 분진중 EOM의 중량함량은 약 28%로 나타났으며 다음으로 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 각각 20% 와 5% 정도인 것으로 분석되었으며, 전원지역인 경산에서는 EOM이 약 20%인 반면에 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 대구지역과 유사한 수준으로 나타났다.

#### 4.2 주성분분석(PCA) 결과

대구지역과 경산지역의 측정자료에 대하여 PCA를 적용한 결과는 Table 2와 3에 각각 나타내었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 대구지역의 경우 15개의 변수에 대해 최종적으로 5개의 PC를 선택하였으며 선택된 5개의 PC에 의해 전체분산의 85.4%가 설명되고 있다. 첫번째 PC는 Fe, Mn, Ti등과 높은 상관(0.85-0.89)을 나타내고 있어 토사 혹은 도로상의 재비산먼지에 연관된 변수로 파악하였으며, 두번째 PC는 중유와 연관된 V 및 Ni과 높은 상관을 갖는 동시에 Se과 As등 석탄연소와 연관된 변수(Gorden, 1988)들과 비교적 높은 상관을 나타내고 있어 화석연료의 연소시 발생하는 분진배출원으로 추정하였다. 한편, 두번째 PC는 K<sup>+</sup>와도 중정도의

상관을 나타내고 있는데 이는 대구지역 및 인근 외곽지역에서 여전히 난방과 취사용연료로 많이 이용되고 있는 신탄(Fire Wood)의 사용량과 무관하지 않은 것으로 추정되었다 (Rojas et al., 1990). 실제 1989년도의 전국적 에너지 총조사결과 대구지역이 6대 대도시중 가장 많이 신탄를 사용하는 것으로 조사되었으며(년간 36,606ton) 그 사용량은 농촌을 제외한 국내 도시지역 전체 사용량중 27%를 점유하는 것으로 나타났다 (동력자원부, 1990). 또한 두번째 PC는 다른 PC와는 달리 계절적 편차가 심하게 나타나 이 지역에서 난방등의 목적으로 사용되는 화석연료 연소원과 밀접한 관계가 있는 것으로 보아진다.

세번째 PC는 Cl<sup>-</sup>이 가장 높은 인자부하량(0.92)을 나타내었으며 Cd 및 Zn과는 비교적 높은 상관성(0.68 및 0.72)을 나타내고 있다. 문헌에 의하면 일반적으로 대기중에서 검출되는 Cl<sup>-</sup>는 해염입자와 Zn과 Cd은 도시지역의 쓰레기 소각장과 연계되어 해석되고 있다 (Hopke, 1985; Thurston & Spengler, 1985). 대구지역에는 아직 대규모 도시쓰레기 소각장이 가동되지는 않고 있으나 위의 세 변

**Table 2.** Result of VARIMAX-rotated PCA for Taegu(urban) TSP data.

Variable	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	Communality
As	0.32	<u>0.73*</u>	0.37	0.01	0.13	0.78
Cl <sup>-</sup>	0.13	0.21	0.92	0.06	0.02	0.91
Cd	0.22	0.43	<u>0.68</u>	0.31	0.16	0.82
Fe	<u>0.85</u>	0.14	0.24	0.25	0.03	0.86
K <sup>+</sup>	0.41	<u>0.51</u>	0.28	0.41	0.18	0.71
Mg	<u>0.71</u>	0.35	0.15	0.30	0.14	0.77
Mn	<u>0.88</u>	0.32	0.12	0.06	0.13	0.91
Ni	0.30	<u>0.82</u>	0.21	0.29	0.16	0.92
Pb	0.11	0.31	0.22	0.29	<u>0.85</u>	0.96
Se	0.22	<u>0.75</u>	0.20	0.24	0.19	0.75
Ti	<u>0.89</u>	<u>0.27</u>	0.14	0.20	0.06	0.92
V	0.30	<u>0.80</u>	0.21	0.30	0.17	0.90
Zn	0.28	<u>0.26</u>	<u>0.72</u>	0.23	0.39	0.86
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	0.25	0.32	0.24	<u>0.81</u>	0.11	0.89
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.34	0.25	0.10	<u>0.73</u>	0.35	0.84
Eigenvalue	3.63	3.54	2.40	2.02	1.22	
% Variance	24.2%	23.6%	16.0%	13.5%	8.1% (Total=85.4%)	
Source Class	Soil/road dust	Fuel combustion	Refuge burning	Secondary aerosol	Traffic related	

\* Underlined values indicate component loadings greater than 0.50

**Table 3.** Result of VARIMAX-rotated PCA for Kyungsan(suburban) TSP data.

Variable	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	Communality
As	<u>0.86*</u>	0.24	0.04	-0.08	-0.15	0.83
Cl <sup>-</sup>	-0.12	0.01	0.18	0.92	-0.02	0.90
Fe	0.19	0.93	0.22	0.11	0.03	0.96
K <sup>+</sup>	0.14	0.15	0.07	0.02	0.93	0.91
Mg	0.33	<u>0.50</u>	-0.16	0.68	0.15	0.87
Mn	0.22	<u>0.80</u>	0.16	0.12	0.24	0.79
Ni	<u>0.88</u>	0.27	0.19	0.06	0.14	0.91
Pb	0.41	0.21	<u>0.74</u>	0.26	0.07	0.83
Se	<u>0.89</u>	0.24	0.20	0.03	0.18	0.92
Ti	0.35	<u>0.88</u>	0.08	0.04	0.07	0.90
V	<u>0.83</u>	0.26	0.34	0.05	0.18	0.90
Zn	0.43	0.43	<u>0.50</u>	-0.09	0.06	0.64
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	<u>0.74</u>	0.20	0.31	0.14	0.44	0.89
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<u>0.64</u>	0.22	0.52	0.01	0.34	0.88
Eigenvalue	4.66	3.13	1.50	1.45	1.38	
% Variance	33.3%	22.4%	10.7%	10.4%	9.9% (Total = 86.7%)	
Source Class	Fuel combustion/ secondary		Soil dust	Traffic related	Marine aerosol	Agricultural/ wood burning

\* Underlined values indicate component loadings greater than 0.50

수의 공통점을 이루어 볼 때 세번째 PC는 측정지점 인근에 위치한 병원 폐기물 소각장이나 생활쓰레기의 불규칙적인 노천소각시에 발생하는 분진의 영향과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정하였다. 네

번째 PC는 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 높은 상관(0.81 및 0.73)을 나타내어 대기중에서 이차적으로 형성되는 입자상 물질과 연관되었으며, 전체분산의 약 8%를 설명하고 있는 다섯번째 PC는 Pb와 높은 상관

(0.85)을 나타내고 다음으로는 Zn 및  $\text{NO}_3^-$ 와 중정도(0.39–0.35)의 상관성을 보이고 있어 자동차배기 및 타이어의 마모등과 같은 교통관련 분진배출원으로 추정하였다.

Table 3에 나타낸 경산지역의 PCA결과도 대체로 대구지역자료와 유사한 방법으로 해석하였다. 그러나 경산지역의 경우 몇몇 PC의 인자부하량 Pattern이 대구지역과는 판이한 양상으로 나타났는데 첫번째 PC의 경우 화석연료 사용에 관련된 변수들과  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{NO}_3^-$  등의 변수들이 공통적으로 높은 상관성을 나타내었다. 따라서 첫번째 PC는 측정지점의 위치가 대도시인 대구도심과는 동서로 20–30Km, 전원도시인 경산시와는 남북으로 약 2km 떨어진 배치관계를 이루어 볼 때 화석연료사용과 관련된 국지적인 배출원과 대구지역의 대규모 배출량의 영향이 혼합된 것으로 평가하였으며, 또한 네번째 PC의 경우  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Mg}$ 이 높은 상관성을 보여 일단 해염입자의 영향으로 파악하였다. 다섯번째 PC는 특이하게  $\text{K}^+$  변수에 대한 인자부하량이 다른 변수들에 비해 월등히 크게 나타났고  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{NO}_3^-$  와도 중정도의 상관성을 나타내었다. 따라서 추정가능한 분진 발생원으로는 측정지점 주변지역이 평활한 농경지로 둘러싸인 주변상황을 감안하여 인근 및 원거리지역에 위치한 농가에서의 신탄사용과 농경지에서의 농업상 소각등과 연계하여 해석하였다.

#### 4.3 대기중 부유분진의 발생원별 기여도

Table 2와 3에서 추정된 대구와 경산지역의 각종

발생원에 대하여 대기중 분진농도 기여도를 계산한 결과는 Table 4에 나타내었다. 대구지역의 경우 5개 분진 발생원의 농도기여도가 측정농도 평균치의 약 96%를 설명하고 있으며 계산치와 실측치간의 평균상대오차 및 중상관계수는 각각 14.7%와 0.89로 나타나 비교적 예측 정확성이 높은 것으로 평가된다. 한편, 경산지역에서는 중회귀 분석에서 유의적인 변수로 선택된 4개의 발생원에 의한 전체 기여율은 약 91%로 계산되었으며 중상관계수는 0.92로서 대구지역보다는 높게 나타났으나 평균상대오차는 17.8%로 나타나 정확성의 측면에서는 약간 떨어지고 있다.

분진농도 기여도가 가장 큰 발생원으로는 두 지역에서 공통적으로 토사 혹은 도로먼지의 재비산으로 파악되었으며 약 35% 전후의 기여율을 나타내고 있다. 이외에도 대구지역에서는 대기중 이차생성 입자의 기여분이 약 24%, 화석연료의 연소가 약 15%, 교통관련 분진 발생량이 약 14%를 점유하는 것으로 추정되었으며 폐기물 소각에 관련된 분진 발생량은 약 7%정도로 나타났다. 대구지역과 비교하여 경산지역의 특징적인 사항은 신탄사용 및 농업상의 소각으로 인한 분진발생량이 전체의 약 20%를 점유하는 것으로 추정된 사실이다. 신탄이나 농경상 소각과 같은 분진 발생원은 일반적인 대기오염물질 배출량 조사과정에서 흔히 간과되기 쉬운 항목들로서 국내에서는 그 중요성이 거의 인식되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 본 연구 결과에 의하면 이들 비 점원 분진 발생원(Non-point source) 들은 특히 도시근교지역이나 농촌지역에서의 대기

Table 4. Mean source contributions to TSP concentrations in Taegu and Kyungsan areas.

	Taegu (urban area)		Kyungsan (suburban area)	
	Mean ± S.E. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Percent of measured TSP	Mean ± S.E. ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Percent of measured TSP
Soil dust	41.2 ± 2.5*	36.2%	28.5 ± 2.2	34.4%
Fuel combustion	17.2 ± 2.0	15.1%	17.0 ± 2.2	20.5%
Secondary aerosol	27.4 ± 2.0	24.1%		
Traffic related	15.4 ± 1.7	13.5%	13.3 ± 1.4	16.1%
Refuge burning	7.8 ± 1.2	6.9%	Not identified	
Marine aerosol	Not identified		Not significant**	
Agricultural/wood burning	Not identified		16.7 ± 1.6	20.2%
Estimated TSP (ETSP)	109.0 ± 4.4	95.8%	75.5 ± 3.9	91.2%
Unexplained TSP	4.8 ± 2.3	4.2%	7.3 ± 1.8	8.8%
Measured TSP (MTSP)	113.8 ± 5.0	100.0%	82.8 ± 4.3	100.0%
Mean relative error		14.7%		17.8%
Multiple R <sup>2</sup>	0.80		0.85	

\* Uncertainty is the standard error of estimates.

\*\* Not selected as a significant variable at a significance level of 0.05.



중 분진에 실질적으로 상당한 기여를 하고 있을 것으로 추정된다.

4.4 부유분진중 EOM의 발생원별 기여도

대기중 분진농도에 대하여 중회귀분석에 의한 발생원별 기여도를 산정한 방법과 동일하게 이번에는 중속변수를 극성별 유기성용매 추출가능물질로 하여 이들 유기물질에 대한 발생원별 농도기여도를 계산하였으며 대구지역자료에 적용한 결과는 Table 5에 요약하였다. 비극성용매인 Cyclohexane에 대한 추출잔류물농도(CHX)와 5% 수준에서 유의적인 상관성을 갖는 변수로는 토사(혹은 도로먼지)의 재비산, 연료의 연소, 이차생성입자 및 교통관련 분진으로 나타났으며 각각의 기여도는 연소관련 분진이 27%로서 가장 크고 다음으로 토사의 재비산(26%), 교통관련분진(24%) 및 이차생성입자(17%)의 순으로 나타났다. 반극성용매인 Dichloromethane에 대한 추출잔류물(DCM)의 경우에도 역시 토사(혹은 도로먼지)의 재비산이 45%로서 가장 큰 기여율을 보이고 있으며 다음으로는 이차생성입자와 연소관련 분진의 순으로 나타나고 있다. EOM의 세성분 중 함량이 가장 큰 Acetone용매추출물(ACT)은 발생원별 기여도에 있어서 앞의 두 성분과는 다른 양상을 나타내고 있는데 이차생성입자와의 상관성이 가장 높게 나타나 전체 농도중 약 26%가 이차생성입자에서 기인한 것으로 추정되었으며 토사의 재비산이나 연소관련 분진으로 인한 기여분은 CHX나 DCM에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이러한 사실은 EOM중 특히 극성용매 추출성분이 대기중에서 이차적으로 생성된 유기 및 무기성 물질과의 상관성이 가장 높다는 기존의 조사 결과와도 일치한다 (Liroy & Daisey, 1987; 백성욱등, 1991).

4.5 부유분진의 오염원 성분표

PCA를 통하여 추정된 대구지역 부유분진의 오염원 성분표를 분진의 단위중량당 화학성분물질의 중량비(mg/g)로 환산하여 Table 6에 예시하였다. 국내에는 아직 신뢰할 만한 오염원성분자료가 축적되지 못한 상태여서 그 정확성이나 신뢰성에 대한 절대적인 검증은 어려운실정이다. 또한 지역적 특성과 적용 기법등을 고려할 때 국외의 연구결과를 준용하는 데도 많은 문제점들이 내재되어 있다. 따라서 본 연구에서는 추정된 오염원성분표에 대한 검증을 위하여 발생원 동정에 이용된 주요 성분을 중심으로 문헌상의 자료(Hopke, 1985; Morandi et al., 1987; Thurston & Spengler, 1985)를 참고로 단지 정성적인 평가에 국한하였다.

Morandi et al(1987)은 토사 및 도로먼지의 화학성분을 연구한 기존의 결과들을 검토하여 Mn의 경우 중량비가 0.06%에서 0.32%의 분포를 보이는 반면 Fe는 약 3%에서 8%의 분포를 보인다고 요약하고 있다. 한편 Watson(1979) 및 Thomae(1977)등 (in Thurston & Spengler, 1985)에 의하면 Ti의 중량비는 0.36%(토양) 및 1.0%(도로먼지)의 분포를 보인다고 보고되었다. Table 6에서 나타낸 바와 같이 본 연구에서 추정된 위의 세성분에 대한 중량비는 Mn이 0.98%, Fe가 1.8% 및 Ti가 0.05%로 나타나 Mn은 문헌상의 범위에 일치하고 있으나 Fe와 Ti는 비교적 낮은 농도로 추정되었다. 이러한 차이점에 대한 원인은 현재로서는 정확히 파악하기 어려우나 적어도 다음과 같은 두가지 사항들과는 관련이 있을 것으로 추정된다. 첫째, 본 연구에서는 토사 혹은 도로먼지의 주요성분인 Al, Ca 및 Si등의 자료가 포함되지 않았으므로 이에 연관된 분진발생원의 Emission profile 자체가 불확실 할 수 있으며, 둘째는 분진시료 채취지점이

Table 5. Source apportionment of extractable organic matter(EOM) in Taegu area.

	Cyclohexane		Dichloromethane		Acetone		Total EOM	
	µg/m³	(%)	µg/m³	(%)	µg/m³	(%)	µg/m³	(%)
Soil dust	2.5	( 26.0)	2.3	( 45.1)	3.2	( 18.2)	8.0	( 24.7)
Fuel combustion	2.6	( 27.1)	0.9	( 17.6)	2.2	( 12.5)	5.8	( 17.9)
Secondary aerosol	1.6	( 16.7)	1.5	( 29.4)	4.6	( 26.1)	7.7	( 23.8)
Traffic aerosol	2.3	( 24.0)	N.S.	( - )	1.6	( 9.1)	4.1	( 12.7)
Refuge burning	N.S.*	( - )	0.2	( 4.0)	0.7	( 4.0)	1.1	( 3.4)
Unexplained	0.6	( 6.2)	0.2	( 3.9)	5.3	( 30.1)	5.7	( 17.6)
Total concentration	9.6	(100.0)	5.1	(100.0)	17.6	(100.0)	32.4	(100.0)
Multiple R²	0.72		0.38		0.55		0.69	

\* Not significant at a level of 0.05.

Table 6. PCA-derived mean source profiles (mg/g) for TSP in the urban area of Taegu.

	Soil/road dust	Fuel combustion	Secondary aerosol	Traffic related	Refuge burning
As	0.22 ± 0.03*	0.59 ± 0.04	N.S.**	0.12 ± 0.05	0.51 ± 0.07
Cd	0.03 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.01
Cl <sup>-</sup>	14.56 ± 3.44	26.82 ± 4.14	N.S.	N.S.	206.77 ± 7.13
Fe	18.46 ± 0.87	3.63 ± 1.04	6.71 ± 1.07	N.S.	10.70 ± 1.79
K <sup>+</sup>	4.65 ± 0.65	6.95 ± 0.78	5.77 ± 0.80	2.98 ± 0.95	6.43 ± 1.34
Mg	13.05 ± 0.96	7.80 ± 1.15	6.90 ± 1.18	3.73 ± 1.40	5.74 ± 1.99
Mn	0.98 ± 0.04	0.43 ± 0.04	0.09 ± 0.04	0.21 ± 0.05	0.28 ± 0.07
Ni	0.18 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.13 ± 0.03	0.25 ± 0.04
Pb	0.47 ± 0.09	1.58 ± 0.11	1.49 ± 0.11	5.18 ± 0.14	1.89 ± 0.19
Se	0.10 ± 0.02	0.40 ± 0.03	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.18 ± 0.05
Ti	0.49 ± 0.02	0.18 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.05 ± 0.02	0.16 ± 0.04
V	0.30 ± 0.03	0.96 ± 0.04	0.36 ± 0.04	0.24 ± 0.05	0.43 ± 0.07
Zn	2.26 ± 0.32	2.52 ± 0.39	2.29 ± 0.40	4.60 ± 0.47	11.93 ± 0.66
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	37.66 ± 4.79	33.18 ± 5.76	101.60 ± 5.92	58.04 ± 7.00	22.55 ± 9.92
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	105.73 ± 14.61	162.41 ± 18.06	416.40 ± 18.06	68.65 ± 21.38	210.96 ± 30.27

\* Uncertainty is the standard error of estimates

\*\* Not significant at a level of 0.05

5층 건물 옥상에 위치하고 있어 토사등 조대입자의 기여분이 상대적으로 적게 나타날 수 있다는 점들이다.

본 연구에서 계절변동이 가장 심한 것으로 나타난 연료의 연소관련 분진발생원은 석탄과 석유류의 혼합형태로 파악되었으며 Tracer로서는 Se와 As(석탄) 및 V과 Ni(석유류)를 이용하였다. Koutrakis와 Spengler(1987)는 Ohio주의 Steubenville에 다변량 Receptor모델을 적용하여 석탄과 석유연소원이 혼합된 분진 발생원을 동정하고 오염원 성분표를 작성하였는데 그 결과 Se와 As가 0.06% 및 0.04%, V과 Ni이 각각 0.06% 및 0.02%로 추정하였다. 본 연구결과 위의 네 원소성분의 중량비는 각각 0.04%, 0.06%, 0.1% 및 0.06%로 나타나 비교적 유사한 분포를 보이고 있다. 더우기 석유와 석탄은 원산지와 황함량규제등에 따라 연료중 원소성분에 상당한 차이를 보일 수 있으므로(Thuston & Spengler, 1985) 서로 다른 지역 혹은 서로 다른 시기에 조사된 결과를 직접적으로 비교하기는 어려우나 본 연구의 결과는 문헌상의 일반적인 분포범위(Hopke, 1985)에 포함되거나 근접하는 것으로 나타났다.

한편 황산염과 혼합된 이차생성입자에 연관된 분진의 화학성분에 관해서는 거의 연구되지 않았으나 최근들어 Morandi et al (1987, 1991)에 의해 수행

된 연구결과에 의하면 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>의 농도가 약 48%를 차지한다고 보고되었으며 Thurston과 Spengler(1985)의 연구결과도 약46%(SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>로 환산하여)로 보고되고 있다. 이러한 결과들은 본 연구의 42%와 상당히 근접하고 있으며 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 약 10%정도를 차지하는 것으로 추정되었다. 문헌에 따라 가장 편차가 심하게 나타날 수 있는 발생원이 교통관련 배출원과 폐기물의 소각으로서 전자의 경우 차종의 구성비와 무연휘발유의 공급량에 따라, 후자의 경우는 폐기물의 성상과 대형 도시쓰레기 소각로의 유무에 따라 Emission profile이 지역에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 대구지역 대기중 Pb의 약 43%가 자동차관련 발생량으로 추정되었으며 중량비 0.5%는 80년대 초반 미국에서 조사된 결과(Hopke, 1985)인 7%에서 21%의 범위에는 크게 미치지 못하고 있다. 폐기물 소각에 관련된 Cl<sup>-</sup>의 경우는 문헌(Hopke, 1985)의 일반적인 분포범위인 14%에서 27%의 범주내에 포함되는 약 21%정도로 추정되었다. 그러나 전술한 바와 같이 분진의 발생원별 성분자료는 각 지역의 특성과 연구된 시기에 따라 큰 차이가 있을 수 있으므로 이와 관련된 자료의 해석시에 상당한 주의가 요구되는 부분이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대도시 대구지역과 인근의 전원지역인 경산에 주성분분석에 기초한 다변량 Receptor 모델을 적용하여 대기중 부유분진의 주요한 발생원을 규명하고 각 발생원별 분진농도 기여도를 정량적으로 산출하였다. 대구지역의 경우 토사(혹은 도로먼지)의 재비산, 연료의 연소, 이차생성입자, 교통관련 분진 및 쓰레기의 소각등에 관련된 5개 발생원을 동정하였으며 경산지역에서는 연료의 연소/이차생성입자의 혼합성분과 토사의 재비산, 자동차관련 및 신탄/농업상의 소각등이 유의적인 발생원들로 추정되었다. 부유분진과 함께 대구지역 대기중 유기성용매 추출가능한 입자상 유기물에 대한 발생원별 기여도를 계산한 결과 비극성유기물의 경우 연료의 연소가, 극성유기물의 경우는 이차생성입자가 기여도가 가장 큰 발생원으로 파악되었다. 또한 본 연구의 결과 각종 분진 발생원에 대한 오염원 성분표가 계산될 수 있었으며 국내의 관련자료 미비로 인해 그 타당성에 대한 결론은 내릴 수 없었으나 문헌상의 자료들을 참고로 비교검토했던 결과 몇가지 주요 성분에 대해서는 기존 조사된 자료의 농도분포범위를 크게 벗어나지 않음을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구는 국내에서는 아직은 그 연구사례가 많지 않은 Receptor 모델링 연구분야에서 하나의 방법론을 제시할 수 있었으며 Receptor 모델링을 위한 자료의 품질관리에 내재된 문제점들도 지적할 수 있었다.

(본 연구는 1990년도 학술진흥재단 지방대육성연구비 지원으로 수행되었음)

## 참 고 문 헌

김 태오, 김 동술, 나 진균 (1990) TTFA를 이용한 부산시 분진오염원의 양적 추정. 한국대기보전학회지, 6(1), 134-146.

백 성욱, 박 갑성, 정 재필, 황 승만, 임 동준 (1991) 대구지역 대기중 입자상 유기물질 농도의 지역적 특성 및 계절적 변동. 대한환경공학회지, 13(2), 79-90.

동력자원부 (1990) 에너지총조사결과보고서 제 1 권. 동력자원부, 389p.

Alpert, D.J. and P. K. Hopke (1980) A Quantitative Determination of the Sources in the Boston Urban Aerosol. Atmos.

Environ., 14, 1137-1146.

Cooper, J.A. and J. G. Watson (1980) Receptor Oriented Methods of Air Particulate Source Apportionment. JAPCA, 30, 1116-1125.

Gorden, G. E. (1988) Receptor Models. Environ. Sci. Tech., 22, 1132-1142.

Henry R.C., C. W. Lewis, P. K. Hopke, and H. J. Williamson (1984) Review of Receptor Model Fundamentals. Atmos. Environ., 18, 1507-1515.

Hopke, P. K. (1985) Receptor Modeling in Environmental Chemistry. John Wiley & Sons, New York, 319 pp.

Hopke, P. K. (1988) TTFA as an Aerosol Mass Apportionment Method - A Review and Sensitivity Study. Atmos. Environ., 22, 1777-1792.

Keeler, G. K., S. M. Japar, W. W. Brachaczek, and W. R. Pierson (1990) The Sources of Aerosol Elemental Carbon at Allegheny Mountain. Atmos. Environ., 24A, 2795-2805.

Keiding, K., F. P. Jensen, and N. Z. Heidam (1986) Absolute Modeling of Urban Aerosol Elemental Composition by Factor Analysis. Anal. Chim. Acta., 181, 79-85.

Keiding, K., J. Pedersen, and J. P. Jensen (1988) A Comparison of Two Procedures for Modelling of Absolute Source Contributions in Urban Air. Atmos. Environ., 22, 763-767.

Kleinman, M. T., B. S. Pasternack, M. Eisenbud, and T. J. Kneip (1980) Identifying and Estimating the Relative Importance of Sources of Airborne Particulates. Environ. Sci. Tech., 14, 62-65.

Koutrakis, P. and J. D. Spengler (1987) Source Apportionment of Ambient Particles in Steubenville, OH Using Specific Rotation Factor Analysis. Atmos. Environ., 21, 1511-1519.

Lioy, P.J. and J. M. Daisey (1986) Toxic Air Pollution. Lewis Pub. Inc., 47-62.

Lodge, J.P.(ed)(1988) Methods of Air Sampling and Analysis (3rd), Lewis Pub., 763 pp.

Malinowski, E.R. (1977) Determination of the

- Number of Factors and the Experimental Error in a Data Matrix. *Anal. Chem.*, 49, 612-617.
- Morandi, M.T., J. M. Daisey, and P. J. Liroy (1987) Development of a Modified Factor Analysis/Multiple Regression Model to Apportion Suspended Particulate Matter in a Complex Urban Airshed. *Atmos. Environ.*, 21, 1821-1831.
- Morandi, M. T., J. M. Daisey, and P. J. Liroy (1991) Comparison of Two Multivariate Modeling Approaches for the Source Apportionment of Inhalable Particulate Matter in Newark, N.J. *Atmos. Environ.*, 25A, 927-937.
- Pratsinis, S.E., M. D. Zeidin, and E. C. Ellis (1988) Source Resolution of the Fine Carbonaceous Aerosol by Principal Component-Stepwise Regression. *Environ. Sci. Tech.*, 22, 212-216.
- Roscoe, B.A., P. K. Hopke, S. L. Dattner, and Jenks J. M. (1982) The Use of Principal Component Factor Analysis to Interpret Particulate Compositional Data Sets. *JAPCA*, 32, 637-642.
- Rojas, C. M., P. Artaxo, and R. V. Grieken (1990) Aerosols in Santiago De Chile: A Study Using Receptor Modeling with XRF and Single Particle Analysis. *Atmos. Environ.*, 24B, 227-241.
- Thurston, G. D. and P. J. Liroy (1987) Receptor Modeling and Aerosol Transport. *Atmos. Environ.*, 21, 687-698.
- Thurston, G.D. and J. D. Spengler (1985) A Quantitative Assessment of Source Contributions to Inhalable Particulate Matter Pollution in Metropolitan Boston. *Atmos. Environ.*, 19, 9-25.
- Watson, J.G. (1984) Overview of Receptor Model Principles. *JAPCA*, 34, 619-623.