

분진의 개수농도 및 질량농도에 입각한 서울시 지하철 역사내 오염원의 기여도 결정

Determination of Source Contribution Based on Aerosol Number and Mass Concentration in the Seoul Subway Stations

최형욱 · 황인조¹⁾ · 김신도²⁾ · 김동솔*

경희대학교 환경응용화학대학 대기오염연구실 및 환경연구센터

¹⁾경희대학교 산학협력기술연구원, ²⁾서울시립대학교 환경공학부

(2003년 5월 27일 접수, 2003년 10월 17일 채택)

Hyung-Wook Choi, In-Jo Hwang¹⁾, Shin-Do Kim²⁾ and Dong-Sool Kim*

Air Pollution Lab., School of Environment & Applied Chemistry and

Center for Environmental Studies, Kyung Hee University

¹⁾*Industrial Liaison Research Institute, Kyung Hee University*

²⁾*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

(Received 27 May 2003, accepted 17 October 2003)

Abstract

The subway play an important part in serious traffic problems. However, because subway system is a closed environment, many serious air pollution problems occurred in subway stations and injured passenger's health. Therefore, it is a necessary to identify sources and to estimate pollutant sources in order to protect passenger's health and to keep clean subway environment. The purpose of this study was to analyze a air quality in the subway stations and to apply a new receptor methodology for quantitatively estimate of PM10 sources. In this study, the size distributions of particulate matters has been measured by using Aerosizer LD (U.S.A., API, Inc.). It's real-time measurement capability of time-of-flight technique offers a significant advantage of user convenience and air pollution management. Also, the mass concentrations of PM10 has been measured by using mini-vol portable sampler (U.S.A., Airmetrics Co.). The sampling performed in Seoul subway stations during the period of February 2000 and April 2000. The number distribution data used in this study consisted of 26 raw data sets in the Jongno-sam-ga station. Correlation Analysis can be used in subway stations for source separation and identification. Then, number contribution from each source is determined by the particle number balance (PNB). The mass concentration data used in this study consisted of 31 raw data in the 8 different stations. The mass contributions of PM10 sources in the concourse by using PMF/CMB model.

Key words : Receptor methodology, Subway, PM10, PMF, PNB

* Corresponding author
Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

1. 서 론

경제의 성장으로 산업의 구조는 급변하였으며, 사회는 대량 생산과 대량 소비가 가능하게 되었다. 경제 규모의 확대는 도시로의 인구증가를 야기시켰으며, 그 부작용으로 심각한 교통난과 만성적인 토지의 과부족이 발생하였다. 세계 각국의 주요 대도시와 마찬가지로 서울시 역시 만성적인 토지 부족과 심각한 교통문제라는 도시문제에 직면해 있으며, 이를 해소하기 위하여 효율적이고 입체적인 토지이용이 강구되었다. 그 대표적인 예로 지하철의 운영을 들 수 있다. 서울시 지하철은 1974년 1호선 9개 역을 시발로 현재는 8호선까지 총 263개 역사를 운행하고 있으며, 연간 승승 인구는 2000년 기준 18억 명에 달하고 있다. 또한 2011년에는 3기 지하철이 완공되어 서울시 교통분담률의 절반에 가까운 48%를 기록할 것으로 예상하고 있다.

기존 연구문헌에 의하면, 현대인의 대부분은 하루 중 80~95%를 다양한 실내 공간에서 생활하고 있다(Wiley *et al.*, 1991). 따라서 대기오염물질이 시민에게 노출될 가능성은 실외보다 실내에서 높으며, 특히 지하공간의 경우 인위적인 급·배기 설비에 의존하여 공기를 순환하는 특성을 가지고 있기 때문에, 외부의 오염된 공기가 유입되거나 내부에 오염원이 존재할 경우 매우 심각한 공기오염을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 서울시의 대표적인 지하활용공간인 지하철 역사에서 분진의 오염도 현황을 파악하고자 미세분진의 물리·화학적 특성을 분석하였다. 특히, 분진의 크기는 화학성분과 함께 가장 중요한 물리적 변수이기 때문에 분진의 입경별 개수농도와 무기원소 농도를 모두 측정하여 다양한 분석을 시도하였다. 최종적인 목적으로, 분진 오염원 확인과 기여도를 계산하기 위해서 다양한 응용통계기법을 이용한 수용모델을 개발하고 분석하였다. 연구의 결과는 지하역사 내 오염물질의 저감대책 수립에 기초적인 자료로 활용될 것으로 사료되며, 개수농도에 입각한 일반대기에서의 실시간 기여도 추정 방법론을 제시하고자 하였다.

2. 연구 및 방법

2.1 시료의 채취

서울의 도심 한가운데에 위치한 종로3가역에서

개수농도 분포를 측정하였다. 종로3가역은 1호선, 3호선, 5호선이 연결되어 있는 환승역으로서 지하 5층까지 건설되어 있다. 1호선 승강장은 종각역과 565 m, 종로5가역과 875 m 떨어져 있으며 심도는 14 m이다. 3호선 승강장은 안국역과 800 m, 을지로3가와 390 m 떨어져 있고 심도는 21 m이다. 최근에 완공된 5호선 승강장은 광화문역과 1,040 m, 을지로4가역과 820 m 떨어져 있으며 심도는 33 m이다. 종로3가역에는 약간의 간이 상점이 있으나, 규모가 큰 지하상가는 존재하지 않으며, 평일에도 환승인구가 251,870 명으로 많은 유동인구가 이용하는 역사이다(서울특별시 지하철건설본부, 2001). 개수농도 측정은 역사의 외기, 대합실, 승강장, 터널의 24개 지점에서 측정하였으며, 한 지점에서 2~3번씩 반복 측정하여 총 72개의 자료를 확보하였다. 터널의 경우 승강장에서 약 35 m 정도 떨어진 곳에 위치한 환기실과 철로 주변에서 측정하였으며, 대합실과 승강장은 역사의 끝과 끝을 이동하면서 중간 중간 임의로 정한 장소에서 측정하였다. 외기는 출구 근처 20 m 이내의 도로에서 측정하였다. 한편 분진의 무게 농도와 무기원소를 측정하기 위해서 종로3가역을 포함한 서울시 8개 환승역사에서 PM10을 채취하였다. 측정 위치는 외기, 대합실, 승강장이었으며 승강장의 경우 각각의 호선별로 측정하였다.

2.2 개수농도의 측정

2000년 2월에 종로3가역에서 분진의 입경분포에 따른 개수농도(number concentration)를 측정하였다. 측정기기는 미국 API(The Amherst Process Instruments, Inc.)사의 particle size analysis system(U.S.A., API, Aerosizer LD)을 사용하였다. 사용된 기기는 0.1~700 μm 범위의 입경에서 초당 100,000개의 입자 측정이 가능하다. 본 연구에서는 0.1~200 μm 의 범위를 측정하였으며, 통계 분석에는 0.1~10 μm 범위 입자의 개수농도를 사용하였다. 흡입유량은 평균 1 L/min의 유량으로 60~100초간 흡입하였으며, 지점별 1~3번의 반복 측정을 하였다. 측정조건으로 측정입자의 밀도를 1 g/cm³으로 가정하고 공기역학적 직경 분포에 따른 입자의 개수농도를 측정하였다. 또한 PMT voltage는 기본설정값인 1100 V로 측정하였다. 1200 V로 측정할 경우 미세입자의 측정 효율이 높아지나 배경 노이즈(background noise)가 증가하

는 문제가 발생할 수 있다(Thornburg *et al.*, 1999).

Aerosizer는 분체 및 에어로졸 연구에 많이 사용되는 기기로서, 입자가속 노즐과 광학산란장치를 조합하여 입자의 공기역학적 크기를 측정한다. 진공펌프(vacuum pump)에 의해서 흡입된 입자는 sonic nozzle에서 가속되어 측정 지점(measurement region)으로 이동되어지는데, 유체와 입자는 거의 음속에 가깝게 가속된다. 여기서 빠른 속도로 유체와 함께 가속된 입자는 입경, 모양, 밀도 등에 따라 항력(drag force)의 영향을 받는다. 작은 입자들은 빠르게 유체의 속도에 근접하며, 상대적으로 큰 입자는 늦게 유체의 속도에 근접하게 된다. 입자의 크기에 따라 순차적으로 측정 지점에 도달한 입자는 1 mm 간격의 두 개의 레이저(dual laser beam optical sensor system)에 의하여 산란시키는 빛의 펄스(pulse) 간격을 측정하여 입자속도를 구하고, 입자속도로부터 공기역학적 입경을 산출한다(Thornburg *et al.*, 1999; API, Inc., 1995). Aerosizer는 측정과 동시에 실시간으로 입자의 개수와 입경 범위를 연결된 컴퓨터와 모니터로 결과를 출력시킨다.

2.3 질량농도의 측정

2000년 4월에 서울시내 전철역 중 환승역을 중심으로 한 8개 역사에서 PM10을 여지에 채취하였다. 측정기기는 Mini-vol sampler(U.S.A., Airmetrics Co., Model 4.1)를 사용하였다. 채취유량은 5 L/min으로 24시간 측정하였으며, 각 측정 지점의 질량농도를 비교하기 위해서 외기 1지점, 대합실 1지점, 그리고 각 노선의 승강장 1지점씩을 측정하였다. Mini-vol의 PM10 측정 원리는 임팩터를 사용하여 공기역학적 직경이 10 μ m 이상의 분진을 제거한 후, 여지에 PM10을 채취하는 방법이다. 채취시간은 기기에 부착된 timer를 이용하여 조절하였으며, 과부하 등의 이유로 기기가 멈추는 경우를 대비하여 기기에 설치되어있는 시간 기록계를 시작과 끝의 수치를 기록하여 정확한 채취시간을 계산하였다. 시료채취에 이용된 여지는 미국 Corning Costa사의 47 mm 멤브레인 여지(U.S.A., Corning Costa, Membra-Fill, pore size 0.2 μ m)를 사용하였다. 시료채취 후 여지는 전자 테시계이터에서 24시간 이상 항량시켰으며, 전자저울을 이용하여 칭량한 후 시료 채취 전·후의 무게차를 채취 유량으로 나누어 질량농도를 계산하였다. 분

진의 질량농도를 계산한 후에 오염원의 정량적 평가를 위해서 무기원소를 측정하였다. 측정방법은 미국 EPA에서 1992년에 고시한 CWA(Clean Water Act)의 microwave 전처리법인 Questron을 사용한 질산 전처리법을 이용하였다. 이 장치는 용매를 고온, 진공·가압하는 장치로서 전처리 시간을 단축할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 채취한 여지를 PFA liner에 넣은 후 질산 10 ml를 넣고 극초단파 전처리 장치(U.S.A., Questron Corp., Model Q15 Microprep)를 이용하여 전처리 하였다. 전처리가 끝난 시료는 ICP-MS(U.S.A., HP, HP 4500, 수원대학교 환경청정기술연구센터)를 이용하여 분석하였다.

2.4 오염원의 정량적 평가

수용방법론은 수용체(receptor)에서 배출된 오염물질의 물리적 특성인 크기, 모양, 색, 입경분포 분석 또는 화학적 특성인 유기·무기화학 성분 및 성질 등의 오염물질의 고유특성을 분석한 후, 특정 오염원의 정량적 기여도를 각종 응용통계를 이용하여 추정하는 방법이다. 오염물질의 고유한 특성을 확인하기 위한 대표적인 방법으로는 현미경적 분석방법과 화학적 분석방법 등이 있다. 현미경적 분석방법은 입자 단위의 분석을 하기 때문에 입자별 분석(individual particle analysis or particle by particle analysis)이라고 한다. 토양 분진, 석면, 꽃가루, 미생물 등 제반 분진을 정성적으로 확인하는데 유용하게 사용할 수 있으며, 광학현미경, 전자주사현미경 및 자동전자주사현미경 등으로 분석할 수 있다. 화학적 분석방법은 전량분석(bulk analysis)이라고 하며, 여지 단위의 분석을 기본으로 한다. 전량분석은 대기시료를 분석하는 가장 보편적인 방법이다. 화학분석법은 시료를 채취하고 각종 분석장비를 이용하여 물리화학적 정보를 얻은 자료를 사용하여 각종 응용통계학을 이용하여 오염원의 정량적 기여도를 추정하는 방법이다. 분석 방법으로는 x-ray 형광법, 중성자 활성화법, 원자흡광법, 유도결합 플라즈마, HPLC, 가스크로마토그래프 등의 방법이 있다. 과거에는 주로 무기원소의 성분농도를 이용한 수용모델이 주종을 이뤘으나, 최근에는 오염원에 대한 다양한 측정기법과, 분석방법을 이용하여 수용모델의 범위는 확대되고 있다.

입자별 분석 및 전량분석에 의해 얻어진 이화학 정보는 통계분석을 통해서 정량적으로 오염원을 추

정하게 된다. 수용방법론이 적용된 초기에는 농축계수법이나 시계열분석법 등을 많이 사용하였다. 최근까지 가장 많이 사용되는 통계분석방법은 화학질량수지법 (chemical mass balance: CMB)이나 인자분석법 (factor analysis) 등의 다변량 통계분석이며 다양한 방법으로 응용·개발되고 있다. 인자분석의 경우 오염원을 확인하는데 큰 역할을 했지만, 몇 가지 한계점을 나타내어 새로운 형태로 개발되었다. 오염원의 정량적 기여도 추정을 위해서 TTFA (target transformation factor analysis)가 Alpert and Hopke (1980)에 의하여 개발되었으며, 기존의 인자분석의 단점인 음수의 인자부하량 발생, 불충분한 정보 제공 등의 문제점을 개선한 PMF (positive matrix factorization) 모델이 Paatero and Tapper (1994) 등에 의해 개발되어 국내에 적용된 바 있다 (황인조와 김동술, 2003, 2003a; 황인조 등, 2001). 이렇듯 수용방법론은 연구가 진행됨에 따라 새로운 형태의 분석방법으로 개발되고 있는데, 최근에 국내에서 분진의 물리적 특성을 이용한 수용모델이 다양하게 적용되고 있다. 전자주사현미경을 (SEM/EDX) 이용하여 석면의 종류에 따른 오염원을 분류하는 방법이 김수환과 김동술 (1999)에 의해서 개발되었으며, 순수 황사입자군의 분류법칙이 강승우와 김동술 (2000)에 의해서 개발되었다. 본 연구에서는 분진의 물리적 특성인 입경크기에 따른 개수농도 분포 자료를 이용하여 국내에서 적용된 바 없는 새로운 수용모델인 PNB (particle number balance) 모델을 적용하고자 하였다.

PNB 모델은 개수농도 분포 자료를 이용하여 측정된 분진의 총합은 오염원 전체의 분진 개수와 같다는 가정 하에 개수 기여도를 추정하는 방법이다. 1989년과 1990년 Tian 등에 의해 clean room에서 미세 입자의 부피 농도분포를 이용한 오염원의 기여도 산출을 위해서 PCA (principal component analysis)와 함께 PCB (particle concentration balance)란 이름으로 적용된 바 있다. 최근까지 가장 많이 사용되고 있는 화학적 정보를 바탕으로 한 CMB가 분진에서 조사된 화학원소에 질량수지와 질량보존의 법칙을 기본 원리로 하여 질량 기여도를 추정하는 방법인데 반하여 PNB는 분진의 입경 분포별 개수농도 자료를 바탕으로 각각의 오염원에서 방출되는 고유의 입경 범위를 찾아내어 오염원분류표 (source profile)를 작성하고 최소자승법 (least square method)과 회귀분석

(regression analysis) 등을 이용하여 오염원의 기여도를 산출하는 방법이며 이를 식 (1)에 나타내었다.

$$P_i = \sum_{k=1}^n S_{ik} \cdot C_k \quad (i = 1, m) \quad (1)$$

여기서 m 은 측정된 입경별 채널 수이고, n 은 오염원의 수이다. 또한 P_i 는 어떤 지점에서 측정된 분진의 i 번째 채널에서의 개수농도가 되며, S_{ik} 는 k 번째 오염원으로부터의 i 번째 채널의 개수농도로서 오염원분류표 (source profile)를 의미한다. C_k 는 k 번째 오염원으로부터의 개수농도 기여도 (number concentration contribution)가 된다. 위의 식에서 측정 질량농도 P_i 와 오염원 농도 S_{ik} 는 기지수이며 기여도 C_k 는 미지수로서 회귀분석법으로 구할 수 있다. 결국 PNB 모델을 응용하기 위해서는 반드시 연구대상지역의 오염원 배출자료인 S 행렬의 파악이 매우 중요하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 개수농도의 분포

2000년 2월 종로3가역에서 분진의 입경분포에 따른 개수농도를 측정하였다. 외기, 대합실, 승강장, 터널의 24개 지점에서 총 72회 측정하였으며, 터널을 제외한 각각의 지점을 평균하여 구한 26개의 자료를 원자료 (raw data)로 사용하였다. $100 \mu\text{m}$ 까지의 TSP (total suspended particulates)에 대한 빈도분포곡선을 그림 1에 나타내었으며, 외기, 대합실, 각 호선별 승강장과 터널에서의 평균 입경별 개수농도를 표 1에 나타내었다. 일반대기에서 개수농도 분포는 쌍극 분포를 나타내며, 본 연구에서 사용한 Aerosizer LD 기기는 응핵영역 (nuclei mode)의 측정이 불가능하기 때문에 응핵영역은 포함되지 않았다. 본 연구의 개수농도 분포는 Despiau *et al.* (1996)과 Tuch *et al.* (2000)이 일반 대기에서 개수농도를 측정한 결과와 비교하여 총 개수농도가 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있는데, 이는 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 범위를 측정하지 않았기 때문이며, 또한 본 연구에서 사용된 Aerosizer의 측정범위가 $0.1 \sim 200 \mu\text{m}$ 이지만 본 연구에서는 PM10만을 고려했기 때문으로 (즉, $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 의 범위) 사료된다. Qian *et al.* (1995)의 연구에 의하면 Aerosizer의 측정 한계 범위인 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 범위

에서 높은 개수농도의 나타내는 것으로 확인되었다. 분진의 총 개수농도는 측정 범위의 설정과 측정 환경에 크게 의존하기 때문에 측정 조건이 다른 연구

들을 총 개수농도만으로 서로 비교하기에는 무리가 있다. 즉, 본 연구의 총 개수농도 자료가 연구지역 분진의 총 개수농도를 대표하는 것은 아니다. 그러나 본 연구의 주된 목적인 측정 지점간에 있어서 분진의 개수농도의 경향을 비교하고, 오염원의 분리를 통한 기여도 추정에는 무리가 없다고 사료된다.

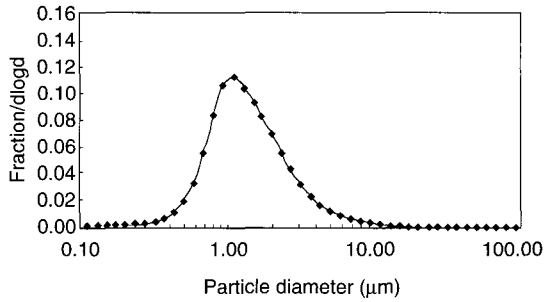


Fig. 1. Frequency number distribution measured in the Jongno-3ga station (logarithmic size scale).

측정 범위인 200 μm 중에서, 대부분의 시료는 0.1 ~ 20 μm까지의 분포를 나타내었으며, 본 연구에서는 10 μm까지의 PM10만을 고려하였다. 개수농도 분포는 1 μm 크기에서 최대값을 나타내는 형태를 대부분의 시료에서 나타내었다. 측정 지점에 따라서 다소의 변동은 있지만, 입경별 농도 분포는 1.0 ~ 1.2 μm에서 첫 번째 극을 보이고 감소하다가 1.8 ~ 2.2 μm 범위에서 두 번째 극을 나타내었다. 외기와 대합실의 경우 1.0 ~ 1.2 μm 범위의 봉우리가 1.8 ~ 2.2 μm 범

Table 1. Average number distribution of each location in the Jongno-3ga station. (unit : number/cm³)

Size range (μm)	Outdoor	Conourse	Line-1 platform	Line-3 platform	Line-5 platform	Tunnel	Station average
0.10~0.12	0.013	0.029	0.127	0.175	0.216	0.085	0.091
0.12~0.14	0.013	0.026	0.118	0.160	0.196	0.083	0.085
0.14~0.16	0.010	0.021	0.096	0.136	0.165	0.084	0.073
0.16~0.18	0.008	0.018	0.085	0.122	0.142	0.100	0.066
0.18~0.22	0.017	0.041	0.172	0.240	0.268	0.161	0.128
0.22~0.25	0.019	0.046	0.143	0.198	0.216	0.178	0.115
0.25~0.29	0.045	0.085	0.232	0.295	0.331	0.307	0.189
0.29~0.34	0.110	0.173	0.381	0.444	0.493	0.509	0.313
0.34~0.40	0.255	0.361	0.657	0.683	0.760	0.787	0.535
0.40~0.46	0.428	0.598	0.914	0.896	1.036	1.154	0.783
0.46~0.54	0.778	1.238	1.670	1.629	2.053	1.873	1.474
0.54~0.63	1.134	1.995	2.665	2.660	3.675	3.148	2.427
0.63~0.74	1.882	3.431	4.669	4.663	6.912	6.422	4.392
0.74~0.86	2.708	4.834	6.500	6.528	9.720	12.941	6.637
0.86~1.00	3.366	6.133	8.518	8.511	12.684	20.366	8.994
1.00~1.20	3.783	7.448	11.896	11.967	18.110	22.081	11.404
1.20~1.40	2.676	5.305	10.279	10.593	16.223	15.568	9.121
1.40~1.60	2.061	3.828	8.474	8.907	13.561	9.990	7.046
1.60~1.80	1.672	2.872	6.906	7.408	11.064	7.206	5.573
1.80~2.20	2.453	3.912	10.077	11.155	16.043	6.707	7.620
2.20~2.50	1.286	1.901	5.159	5.930	8.022	3.323	3.854
2.50~2.90	1.212	1.700	4.814	5.668	7.270	2.862	3.530
2.90~3.40	0.998	1.299	3.904	4.733	5.741	2.238	2.823
3.40~4.00	0.755	0.915	2.957	3.650	4.189	1.564	2.083
4.00~4.60	0.503	0.534	1.909	2.412	2.647	1.085	1.333
4.60~5.40	0.431	0.415	1.642	2.129	2.322	0.880	1.136
5.40~6.30	0.322	0.256	1.211	1.593	1.753	0.622	0.822
6.30~7.40	0.268	0.160	0.966	1.336	1.493	0.416	0.652
7.40~8.60	0.207	0.085	0.705	1.015	1.146	0.133	0.459
8.60~10.0	0.152	0.042	0.522	0.782	0.939	0.030	0.337
Total	29.565	49.701	98.368	106.618	149.390	122.903	84.095

위에 비하여 각각 1.5배, 1.9배 정도 높은 농도 비율을 나타내었으나, 승강장은 두 개의 극이 거의 비슷한 농도 비율을 나타내었다. 터널의 경우 1.0~1.2 μm 범위에서 뚜렷하게 높은 농도를 나타내었는데 1.8~2.2 μm 크기의 입경 범위에 비하여 3.3배의 높은 농도 비율을 나타내고는 급격히 개수농도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 다른 지점에 비하여 터널 내부의 오염원은 한정되어 있기 때문에 특정 입경 범위의 분진이 상대적으로 많이 측정되었다고 사료된다.

종로3가역의 측정지점별 총 개수농도의 평균은 84개/cm³로 나타났다. 26개의 원자료 중에서 가장 높은 농도를 나타낸 시료는 지하 2층에 위치한 1호선 승강장이었으며, 이 지점은 터널에서 5m 떨어진 지점으로 196개/cm³가 측정되었다. 가장 낮은 개수농도를 나타낸 장소는 외기로서 19개/cm³로 조사되었다. 개수농도의 입경별 분포를 살펴보면, 외기와 대합실은 비슷한 경향으로 분포하고 있으며, 모든 입경분포에서 10개/cm³ 미만의 낮은 농도로 고르게 분포하였다. 그러나 승강장의 경우 비교적 많은 양의 분진이 측정되었으며, 특히 1.8~2.2 μm 범위에서 높은 농도의 분진이 측정되었다. 호선별 평균 개수농도는 1호선, 3호선, 5호선에서 각각 98개/cm³, 10⁷개/cm³, 149개/cm³로 측정되었다. 총 개수농도는 지하로 내려갈수록 더 높은 농도로 측정되는 경향을 보였다. 외기의 평균 개수농도가 30개/cm³인데 반하여 승강장 5호선의 평균 개수농도는 149개/cm³로 조사되어 거의 5배의 농도 차이를 나타내었다.

3. 2 개수농도에 입각한 오염원의 분리와 오염원 분류표의 개발

종로3가역에서 측정한 26개의 개수농도 원자료를 이용하여 오염원을 분리·확인하기 위해서 다양한 자료 변환을 시도하였다. 일반적으로 인자분석 등의 다변량 통계분석을 이용한 정성적 오염원의 분류시 자료가 한 방향으로 치우치거나 변수간의 편차가 클 경우 통계적으로 분석하기가 곤란하다. 따라서 통계적으로 분석하기에 적당한 형태로 자료를 변환하는 작업이 필요하며, 환경자료에는 보통 제곱근(square root) 변환이나, 로그(logarithmic) 변환을 주로 사용한다. 본 연구에서는 로그변환을 수행한 후, 동일한 조건에서 입경범위들 사이의 농도 비율을 비교하기

위하여 빈도분포함수로 통계적 전처리를 수행하였다. 즉, 원자료를 그림 1과 같은 형태로 변형시켰는데, 이 곡선은 수학적으로 취급하기 쉬운 형태이며 분포된 어떤 양의 성질을 나타내기 위하여 매우 유용한 함수이다.

오염원을 분리하기 위해서, 두 변수간의 선형관계를 조사하는 통계기법인 상관분석을 사용하였다. 상관분석은 인자분석 등의 다변량 통계분석에서 기초적으로 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 상관계수가 높은 시료들을 군집화하고 서로 다른 오염원들을 분리하는 작업을 수행하고자 하였는데, 원자료를 사용하여 상관분석을 할 경우 대부분이 0.8 이상의 높은 상관계수를 나타내었기 때문에 오염원의 분리가 사실상 불가능하였다. 개수농도 분포 자료는 대부분의 시료가 1 μm 근처에서 최대값을 나타내는 동일한 경향을 나타내기 때문에 원자료의 상관분석을 통한 오염원의 분리는 적합하지 않았다. 또한 입경 크기에 따른 농도 비율을 고려하기 위해서 빈도분포함수로 변환을 수행한 자료를 이용하여 상관분석을 하였지만, 마찬가지로 높은 상관계수를 나타내어 오염원을 분리할 수 없었다(표 2).

개수농도 분포 자료를 이용한 오염원의 분리는 각각의 오염원은 특정한 입경 범위의 분진을 배출한다는 가정하에 가능한 방법이다. 결국 오염원의 분리를 위해서는 각각의 오염원들은 구분되어지는 특징적인 입경 분포를 나타내야 한다. 그런데, 개수농도 분포 자료는 질량농도에 입각한 무기원소자료를 사용하는 경우와는 자료의 형태가 다르기 때문에, 오염원의 분리를 위해서는 다른 방법이 필요하였다. 그 이유는 개수농도 분포 자료의 경우 원자료가 정규 분포(normal distribution)와 유사한 형태의 분포도를 가지고 있으며, 자료들간의 입경별 농도 차이도 매우 작은 범위에서 변화하기 때문에 통계적으로 구별하기가

Table 2. A result of correlation analysis based on the raw data (fraction/dlogdp).

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
Class 1	1.000				
Class 2	0.969*	1.000			
Class 3	0.965*	0.872*	1.000		
Class 4	0.949*	0.995*	0.836*	1.000	
Class 5	0.974*	0.982*	0.908*	0.965*	1.000

* : p<0.05, ** : p<0.01

불가능하기 때문이다. 따라서 오염원에 따라서 배출되는 독립된 인자(factor)를 찾기 위한 자료의 전처리 방법을 찾기 위해서 다양한 방법의 자료 변환을 시도하였다.

여러 번의 시행착오를 거쳐서 최종적으로 사용된 자료의 전처리 방법은, 입경별 농도의 차이를 확대하고, 자료들 사이의 입경별 농도 비율을 구하여 오염원 분리를 용이하게 하는 방법을 선정하였다. 개수농도 분포 자료는 각각의 입경별 농도 변화를 구별하기 위해서 원자료에 4승을 하여 첨도(kurtosis)를 과장하였다(식 2).

$$K_{ij} = (N_{ij})^4 \tag{2}$$

여기서 N_{ij} 는 j번째 시료의 i번째 입경범위의 개수 농도를 의미한다. K_{ij} 는 원자료를 4승하여 첨도를 확대한 자료를 의미한다. 그러나 과장된 자료 역시 극점을 중심으로 한 농도의 경향은 동일하기 때문에, 다시 각각의 자료에 입경별 평균 농도와의 비율을 계산하여 오염원의 상대적인 특성을 부각시키고자 하였으며, 이를 식 (3)에 나타내었다. 첨도의 과장은 모든 대상 자료에 동일하게 적용되었으며, 이러한 과정은 불분명해 보이는 오염원간의 상관관계를 조금 더 확실하게 파악할 수는 결과를 초래한다. 즉, 원자료의 전처리를 통하여 전체적인 결과는 동일하지만, 좀더 안정적이고 유용한 자료로의 변환이 가능하게 되는 것이다.

$$Nt_{ij} = \frac{K_{ij}}{\left(\sum_{j=1}^n K_{ij}\right) / (n)} \tag{3}$$

K_{ij} 는 j번째 시료의 i번째 입경범위의 과장된 개수 농도를 의미한다. n은 측정된 시료의 개수를 의미하며, 지점별로 평균한 26개의 측정자료이다. Nt_{ij} 는 K_{ij} 의 개수농도와 전체 평균 농도와의 비율을 나타낸 것이다. Nt_{ij} 는 상관분석을 통하여 오염원을 5개의 군집으로 분리하였으며, 생성된 군집들은 다시 한번 상관분석을 통해서 오염원의 분리 정도를 확인하였다. 그 결과는 표 3에 나타내었으며, 5개 오염원의 Nt_{ij} 값을 그림 2에 나타내었다.

그림 2는 분리된 5개의 오염원의 경향을 그림으로 나타낸 것이다. 개수농도 분포나 지점별 농도 비교에서는 뚜렷한 오염원의 특징이 나타나지 않았지만, 자료의 전처리를 통하여 분석한 결과 그림과 같

Table 3. A result of correlation analysis based on the transformed data.

	Con-course	Platform -A	Platform -B	Residual soil	Outdoor
Concourse	1.000				
Platform-A	-0.549**	1.000			
Platform-B	-0.244	0.408*	1.000		
Residual soil	0.175	-0.849**	-0.700**	1.000	
Outdoor	-0.311	0.696**	-0.120	-0.450*	1.000

* : p<0.05, ** : p<0.01

은 오염원간의 특징적인 차이를 확인할 수 있었다. 첫 번째 오염원은 외기 오염원(outdoor source)으로 전반적으로 매우 낮은 농도 비율을 나타내고 있으며, 2.5 μm 이상의 거대입자의 농도가 다른 입경 범위에 비하여 비교적 높은 농도로 나타났다. 따라서 외부에서 지하철 역사 내에 영향을 미치는 오염원은 거대입자 영역의 분진이라고 사료된다. 두 번째 오염원은 대합실 오염원(concourse source)으로 외기 오염원과 마찬가지로 전반적으로 평균 농도의 1/2에 미치지 못하는 낮은 농도 분포를 나타냈으며, 0.4~0.7 μm 의 입경 범위에서 비교적 높은 농도를 나타내었다. 거대입자의 영향이 외기에 비하여 적은 점으로 미루어, 대합실은 외기의 영향보다는 지하철 역사내의 오염원에 더 많은 영향을 받을 것이라고 사료된다. 세 번째 오염원은 승강장A 오염원(platform-A source)으로, 지하 2층과 지하 3층의 승강장에서 측정된 자료로 구성되어 있다. 승강장A 오염원은 0.74~1.20 μm 범위에서 낮은 농도 비율을 나타내었지만, 미세입자와 거대입자의 농도 비율이 상대적으로 매우 높았다. 따라서 승강장 내부에서 오염물질이 배출되고 있다고 사료되며, 거대입자의 경우 열차풍에 의하여 응집된 거대입자가 비산되는 것으로 추정된다. 네 번째 오염원은 승강장B 오염원(platform-B source)으로, 주로 지하 5층에서 측정된 오염원이다. 승강장A 오염원과 비슷한 농도 분포를 나타내고 있으나, 0.54~0.74 μm 와 1.60~2.20 μm 에서 특징적인 높은 농도 비율을 나타내었다. 마지막 오염원은 잔류토양 오염원(residual soil source)으로 주로 철로 근처에서 측정된 오염원이다. 잔류토양 오염원의 경우, 측정 당시 많은 인원이 철로에서 기기를 끌고 가면서 비산된 지하철 내부의 토양 오염원으로 추정된다. 전체적으로 고농도의 비율로 분석되었으며, 특히

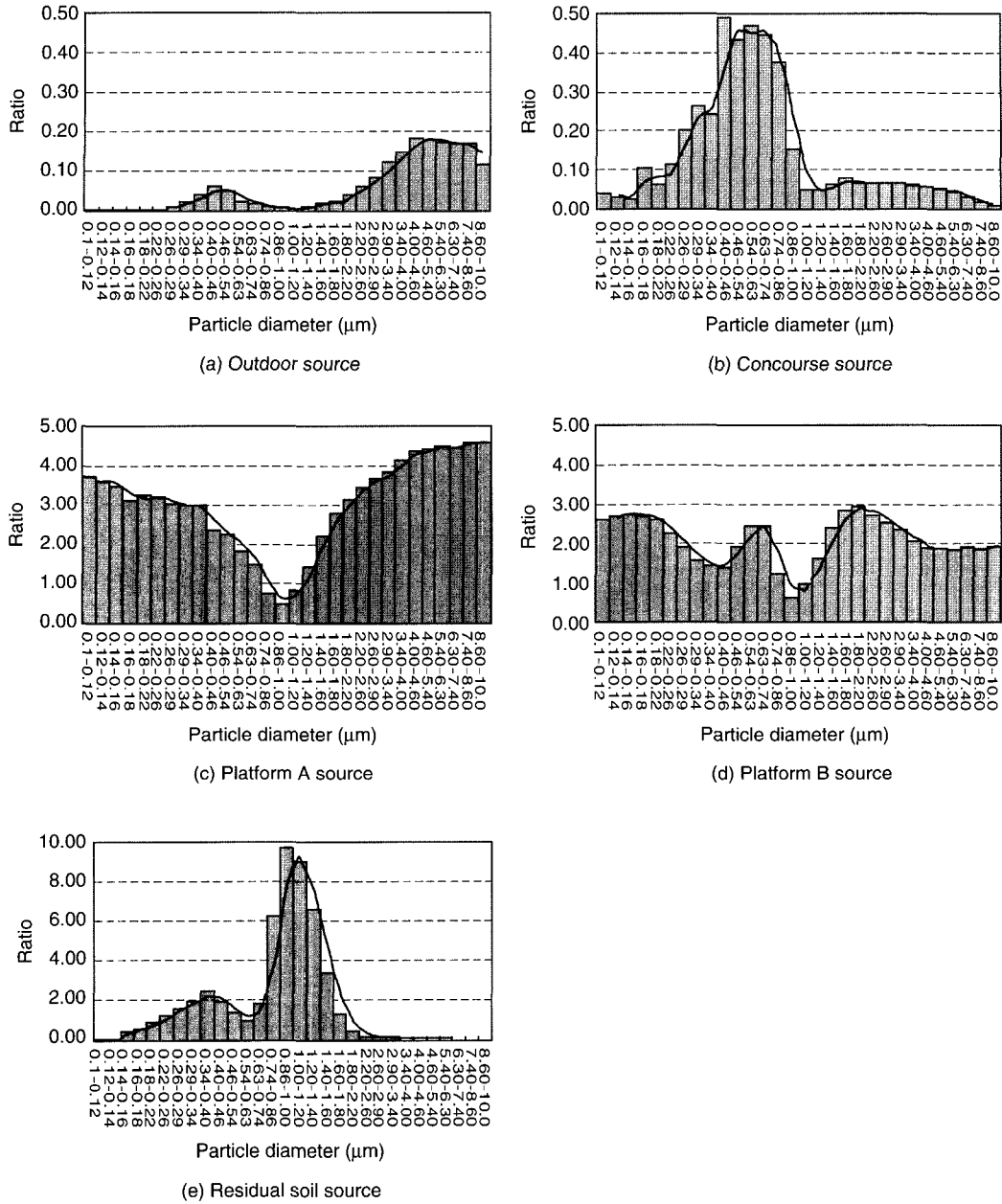


Fig. 2. Patterns of 5 separated sources based on the transformed data calculated by eq (2), eq (3).

0.84 ~ 1.20 μm 범위에서 매우 높은 농도 비율을 나타내었다. 승강장이나 대합실 오염원에 비하여 다소 큰 범위에서 고농도를 나타내었다. 거대입자 범위는 낮은 농도 비율로 나타났는데, 이는 전철이 운행하지

않는 야간에 측정되었기 때문에 외기의 영향을 받지 않았기 때문이라고 사료된다.

두 번의 상관분석을 통하여 분리된 오염원 자료는 오염원 분류표에 사용하기 위해서 표준화하였으며

Table 4. Source profiles (%) used in PNB modeling.

Size range (μm)	Concourse	Platform A	Platform B	Residual soil	Outdoor
0.10~0.12	0.846	4.120	4.184	0.130	0.179
0.12~0.14	0.742	3.995	4.363	0.203	0.239
0.14~0.16	0.636	3.815	4.447	0.695	0.133
0.16~0.18	2.511	3.455	4.352	1.044	0.096
0.18~0.22	1.448	3.594	4.195	1.572	0.147
0.22~0.25	2.678	3.538	3.652	2.311	0.233
0.25~0.29	4.827	3.339	3.090	3.037	0.479
0.29~0.34	6.341	3.306	2.497	3.635	1.116
0.34~0.40	5.713	3.303	2.294	4.486	2.232
0.40~0.46	11.700	2.575	2.202	3.610	3.457
0.46~0.54	10.405	2.477	3.140	2.520	2.584
0.54~0.63	11.181	2.011	3.958	1.761	1.206
0.63~0.74	10.645	1.630	3.969	3.387	0.908
0.74~0.86	9.020	0.822	1.940	11.993	0.511
0.86~1.00	3.634	0.470	0.959	18.791	0.238
1.00~1.20	1.199	0.877	1.582	17.368	0.246
1.20~1.40	1.161	1.541	2.598	12.670	0.367
1.40~1.60	1.400	2.447	3.881	6.326	0.773
1.60~1.80	1.900	3.049	4.544	2.348	1.304
1.80~2.20	1.504	3.464	4.704	0.750	2.178
2.20~2.50	1.521	3.796	4.384	0.324	3.498
2.50~2.90	1.529	4.020	4.076	0.247	4.845
2.90~3.40	1.484	4.248	3.746	0.228	6.964
3.40~4.00	1.348	4.586	3.295	0.175	8.596
4.00~4.60	1.315	4.804	2.980	0.152	10.560
4.60~5.40	1.123	4.836	2.996	0.120	10.480
5.40~6.30	0.950	4.933	2.917	0.077	10.266
6.30~7.40	0.682	4.879	3.084	0.039	9.834
7.40~8.60	0.367	5.041	2.944	0.001	9.653
8.60~10.0	0.188	5.029	3.027	0.000	6.678

이는 식(4)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1} S_{ik} = 1 \quad (4)$$

표준화한 자료는 % 단위로 변환하여 오염원분류표(source profile)의 작성에 사용하였으며, 각 입경별 불확실도는 1%로 입력하였다(표 4).

3.3 개수농도에 입각한 오염원의 기여도 산출

분리된 오염원 자료는 PNB 모델의 입력자료인 오염원분류표로 사용되어 개수 기여도를 산출하였다. 본 연구에서는 분진의 개수농도를 이용한 수용모델을 적용하였는데 국내외적으로 아직까지 적용된 사례가 전무한 수용방법론이며, 외국의 경우 clean room에서 내부의 오염원을 대상으로 주성분분석(PCA)을 통한 오염원의 기여도를 추정된 사례가 있다(Tian et

al., 1989). 그러나 일반 대기에서의 적용 사례는 전무하므로, 기존에 작성된 오염원분류표를 참고하여 기여도를 산출할 수는 없었으며, 따라서 측정된 자료를 바탕으로 다양한 통계적인 방법을 통하여 오염원분류표를 작성하였다.

그림 3은 본 연구에서 PNB 모델을 이용한 개수 기여도를 지점별로 나타낸 것이다. 종로3가역의 평균 오염원 기여도는 승강장A 오염원이 57.8%이며 승강장B 오염원은 35.3%로 분석되어, 총 93.1%가 승강장 관련 오염원에서 기여한 것으로 분석되었다. 반면에 대합실 오염원은 2.9%, 외기 오염원은 3.1%, 잔류토양 오염원은 1.0%를 차지하여 상대적으로 낮은 기여율을 나타내었다.

대합실인 지하 1층의 개수농도 기여도는 대합실 오염원이 71.8%이고 승강장B 오염원이 13.8%로 가장 많은 기여율을 나타내었다. 외기 오염원은 8.4%로, 승강장에 비하여 비교적 높은 기여율을 나타내었다. 지하 2층은 주로 승강장A 오염원이 89.7%의 기여도로 분석되어, 주 오염원으로 나타났으며, 다음으로 승강장B 오염원이 4.3%, 외기 3.4%, 대합실 2.5%를 나타내었다.

지하 3층은 3호선 승강장이 건설된 층으로 주 오염원은 승강장A 오염원이었으며, 90.7%로 분석되었다. 승강장B 오염원과 외기 오염원은 3.3%로 동일한 기여도를 나타내었으며, 대합실 오염원은 2.5%, 잔류토양 오염원은 0.3%의 기여도를 나타내었다. 지하4층은 3호선 승강장과 5호선 승강장을 연결하는 계단 부분이며, 승강장B 오염원이 83.5%로 높은 기여도를 나타내었다. 지하 5층은 승강장 5호선으로, 승강장B 오염원이 85.5%, 승강장A 오염원이 9.6%로 분석되었다. 합산하면 승강장 관련 오염원이 총 95.1%의 매우 높은 기여도로 나타났다. 본 연구 대상 역사인 종로3가 역사에서의 주 오염원은 승강장 관련 오염원으로 추정된다. 승강장A 오염원과 승강장B 오염원을 합산한 승강장 관련 기여도는 승강장에서 모두 90%를 상회하는 높은 기여도로 조사되었으나, 대합실과 계단 부분인 지하 4층서는 비교적 낮은 85.6%와 83.5%의 기여도를 나타냈다. 반면, 외기 오염원은 대합실에서만 8.4%로 비교적 높은 기여율을 나타내었으며, 다른 지점에서는 3.0% 내외의 낮은 기여율로 조사되었다.

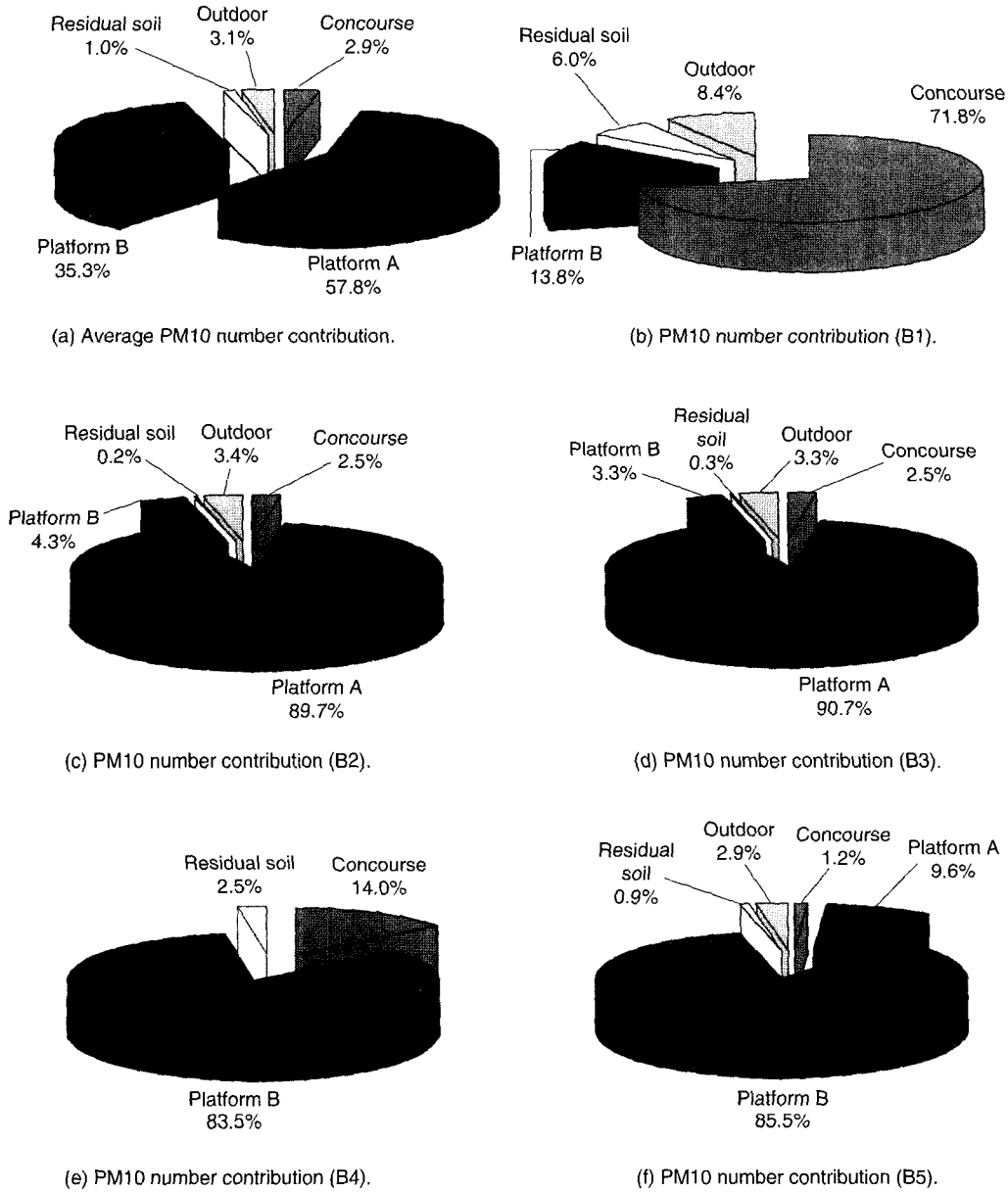


Fig. 3. A result of particle number contribution in the Jongno-3ga station.

3.4 PM10 질량농도의 측정

측정 지역 중 가장 높은 농도는 4호선 동대문운동장역 승강장에서 254.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, 측정 지점 31개 중 17개 지점에서 PM10의 24시간 지하공간환경기준치인 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 승강장

대합실, 외기의 평균농도는 각각 182.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 139.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 125.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정되어, 승강장 > 대합실 > 외기의 순으로 나타났다.

호선별 PM10 농도를 분석한 결과, 1호선의 경우 종로3가역 승강장에서 204.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 시청역 대합실에

서 191.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기준치 이상을 보였으며, 시청역 승강장에서 66.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 전체 측정 지점 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 2호선의 경우 다섯 개 역사에서 15개 지점을 측정을 하였는데, 10개 지점에서 기준치를 상회하였다. 가장 높은 PM10 농도는 왕십리역 승강장으로서, 216.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도값을 나타내었다. 왕십리역의 경우 외기, 대합실의 PM10 농도 또한 각각 170.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 211.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모두 기준치 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과했다. 외기의 경우 측정 지점인 canopy 근처에 공사장이 있었기 때문으로 사료된다. 2호선 승강장은 152.9~216.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포로 평균 186.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 매우 높은 PM10 농도를 나타냈는데, 이는 유동인구가 많으며, 시설이 노후화되었기 때문으로 사료된다. 3호선은 종로3가역을 측정하였는데, 외기의 PM10 농도가 124.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 대합실이나 승강장 농도인 87.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 95.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 수치를 보였다. 주변에 상가가 밀집되어 있고 차량통행이 빈번하여 높은 농도를 나타냈다고 사료된다. 4호선은 동대문운동장역 승강장이 254.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며, 사당역 승강장도 244.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 높은 농도를 보였다. 5호선의 경우 동대문운동장역 승강장이 205.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 종로3가 대합실이 가장 낮은 농도인 87.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 7호선 태릉역은 외기, 대합실, 승강장이 65.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 195.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 236.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 차차 분진농도가 높아졌다. 태릉역에서는 외기와 승강장의 분진 농도차가 171 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 큰 차이를 나타내었는데, 이는 역사 지하에서 6호선 환승역 공사로 인하여 많은 양의 분

진이 발생하였기 때문으로 사료된다. 8호선 잠실역은 외기가 157.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았으며, 대합실 136.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 승강장 127.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 농도가 낮아져 차량통행이 많은 외부로부터 분진이 유입되었다고 사료된다. 측정위치별 측정결과를 그림 4에 나타내었다.

3.5 PMF에 의한 오염원 확인 및 분류 및 기여도 산출

총 20개의 무기원소를 ICP-MS를 이용하여 측정하였으며 이 중에서 검출한계 이하의 농도값이 많거나 농도값이 0으로 검출된 항목을 제외하여 11개의 무기원소 항목을 분석에 선택하였다. 원자료 (raw data)는 통계적으로 해석하기 좋은 자료로 변환하기 위해서 제곱근 (square root)변환, 로그 (logarithmic)변환 등의 자료변환을 수행하였으며, 최종적으로 본 연구에서는 원자료를 로그 (logarithmic) 변환한 후 PMF 모델링을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 PMF 모델은 scaled residual 행렬인 R을 이용하여 오염원의 수를 결정하며, 행렬 R로부터 2개의 변수 IM (maximum individual column mean)값과 IS (maximum individual column standard deviation)값을 얻을 수 있었다. 인자의 수가 임계값으로 증가할 때 IM값과 IS값이 현저하게 감소하는데 (황인조 등, 2001), 본 연구에서는 IM값과 IS값이 인자수 4개에서 현저하게 감소하는 것으로 조사되었다. 따라서 최적의 오염원 수를 4개로 결정하였다.

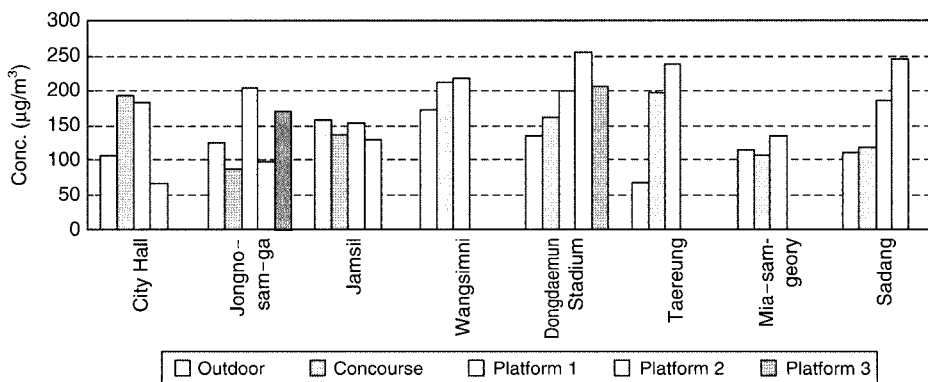


Fig. 4. PM10 mass concentration measured in the 8 different stations.

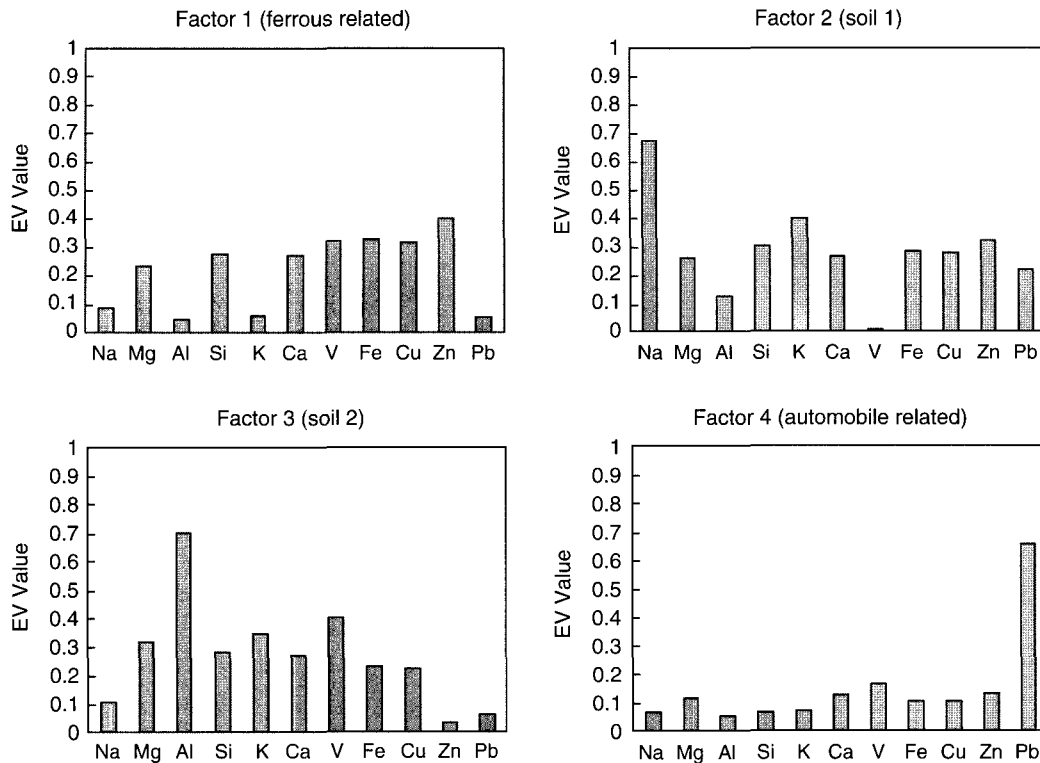


Fig. 5. EV values of 4 sources in this study.

결정된 오염원의 정성적 분류에는 EV값(explained variation value)을 이용하였으며(황인조 등, 2001), 이를 그림 5에 나타내었다.

첫 번째 오염원은 Fe, Cu, Zn 등이 주로 기여하는 것으로 조사되어 철 관련 오염원으로 추정하였다. 지하철 역사 내에서의 철 관련 오염원은 지하철의 운행에 따른 레일과의 마찰, 브레이크의 마모, 전선의 마모 등에 의해서 주로 배출되는 것으로 알려져 있다(서울특별시 지하철공사, 1998). 두 번째 오염원은 Na, K, Zn, Si 등의 무기원소와 그리고 일정량의 Pb 이 기여하는 것으로 조사되었다. 따라서 대표적인 토양 관련 오염원에, 자동차 관련 오염원을 포함한 도로 비산 분진 오염원이 혼합된 토양 오염원으로 사료된다. 세 번째 오염원은 마찬가지로 토양 관련 오염원으로 분류되었는데 Al, V, K, Mg, Si, Ca 등이 주로 기여하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 순수 토양 관련 오염원으로 사료된다. 세 번째 오염원의 경우 지하철을 이용하는 승객과 지하역사에 근무하는 사

람들에 의해서 신발이나 옷 등에 묻은 토양성분이 내부로 유입되었거나, 환기에 의해 외부의 토양성분이 역사 내부로 유입되는 경우 등에 의한 토양 관련 오염원이라고 사료된다. 네 번째 오염원은 Pb가 주로 기여하는 것으로 조사되었으며, 다른 항목들은 낮은 수준으로 기여하는 것으로 나타났다. Pb의 경우는 무연휘발유로 대체 후 배출되는 양이 현저하게 감소하였지만, 아직 무연휘발유에서도 일정한 양의 Pb는 지속적으로 포함되어 있는 것으로 알려져 있기 때문에 자동차 관련 오염원으로 추정하였다.

PMF 모델링에 의해 구해진 각 오염원에 대한 오염원분류표와 지하철 역사에서 측정된 무기원소 자료는 정량분석을 위해서 CMB 모델의 입력자료로 사용되었다. CMB 모델을 통하여 산출된 승강장과 대합실에서의 PM10 오염원의 질량기여도를 그림 6에 나타내었다. PMF 모델링에 의해서 4개의 오염원을 정성적으로 분류하였는데, 기여도 산출에는 토양1 오염원과 토양2 오염원의 기여도를 합하여 토양 관

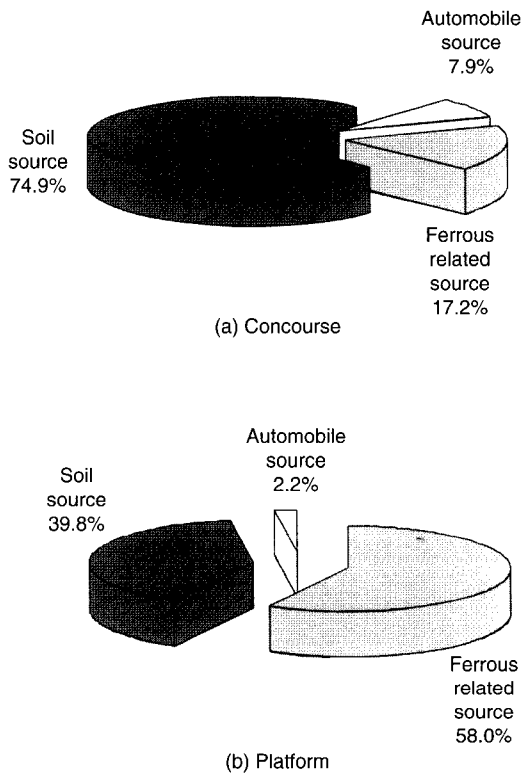


Fig. 6. PM10 mass contributions.

런 오염원의 기여도로 간주하였다. 토양I 오염원과 토양2 오염원은 다른 참고문헌들을 조사하였지만 구별하기가 어려워서 합하여 토양 오염원으로 기여도를 산출하였다. 본 연구의 수용체인 각 역사의 승강장, 대합실에 영향을 미치는 PM10은 4개의 오염원에서만 배출된다는 가정하에 산출하였으며, 각 기여도의 단위는 백분율로 조정하였다. 8개 역사의 평균 기여도는 대합실의 경우, 철 관련 오염원, 토양 관련 오염원, 자동차 관련 오염원의 기여도가 각각 17.2%, 74.9%, 7.9%로 계산되었다. 승강장의 경우는 철 관련 오염원, 토양 관련 오염원, 자동차 관련 오염원의 기여도가 각각 58.0%, 39.8%, 2.2%로 계산되었다.

4. 결 론

본 연구를 위해 2000년 2월과 4월 미세분진의 개수농도 분포와 질량 농도를 측정하였다. 입경분포에

따른 개수농도의 측정은 종로3가역에서 수행하였으며, 서울시내 전철역 중 환승역을 중심으로 선정된 8개 역사에서 PM10을 채취하여 질량농도와 무기원소농도를 측정하였다. 개수농도 분포자료를 이용하여 오염원의 정성분석을 하였으며, PNB 모델을 수행하여 정량적인 오염원의 기여도를 산출하였다. 한편, 무기원소농도 자료는 PMF 모델을 이용하여 분진의 질량기여도를 산출하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 종로3가 역사에서의 개수농도는 평균 84개/cm³였으며, 최고 농도는 196개/cm³으로 측정되었다. 최고농도로 측정된 지점은 지하 2층의 2호선 승강장이었으며, 터널에서 약 5m 떨어진 지점이었다. 최소 농도는 외기에서 측정되었으며, 19개/cm³으로 조사되었다. 층별 평균 농도는 지상 30개/cm³, 지하 1층 대합실 50개/cm³, 지하 2층 1호선 승강장 98개/cm³, 지하 3층 3호선 승강장 107개/cm³, 지하 5층 5호선 승강장 149개/cm³으로 측정되었다. 질량농도는 외기, 대합실, 승강장, 터널에서 각각 125.1 µg/m³, 139.5 µg/m³, 182.9 µg/m³, 터널 123개/cm³의 평균 농도를 나타내었고, 측정된 31개 지점 중 17개 지점에서 지하공기질 24시간 기준치인 150 µg/m³을 초과하였다.

2. 개수농도에 입각하여 분리된 오염원의 패턴은 5개로 나뉘었다. 외기 오염원은 전체적으로 매우 낮은 농도 분포로 조사되었지만, 거대입자 범위가 비교적 높은 농도 비율을 나타내었다. 대합실 오염원은 0.4~0.7 µm 입경 범위에서 비교적 높은 농도지만 전체적으로 낮은 농도를 나타내었다. 승강장A 오염원은 0.74~1.20 µm의 범위에서 낮은 농도 비율을 나타내었지만, 미세분진과 거대분진의 농도 비율은 상대적으로 매우 높았다. 승강장B 오염원은 0.54~0.74 µm 범위와 1.60~2.20 µm의 범위에서 특징적인 고농도 비율을 나타냈다. 잔류토양 오염원은 0.84~1.20 µm 범위에서 매우 높은 농도 비율을 나타냈다.

한편, 대합실에서의 개수농도 기여도는 대합실 오염원 71.8%, 승강장B 오염원 13.8%, 외기 오염원 8.4%, 잔류토양 오염원 6.0%로 산출되었으며, 지하2층부터 지하 5층까지의 승강장에서의 개수농도 기여도는 승강장A 오염원 58.4%, 승강장B 오염원 35.5%, 외기 오염원 3.0%, 대합실 오염원 2.4%, 잔류토양 오염원 0.5%으로 분석되었다. 승강장에서의 승강장 관련 오염원은 총 93.9%로 매우 높은 기여도를 나

타내었는데, 이는 지하 역사 내부에서 발생한 분진이 제거되지 않은 상태로 재순환하면서 농축되고 있기 때문으로 사료된다.

3. 질량농도에 입각한 오염원은 4개로 분리되었으며 최종적으로 두 번째 오염원과 세 번째 오염원을 합하여 3개의 오염원으로 분류하였다. 첫 번째 오염원은 Fe, Cu, Zn 등이 주로 기여하는 것으로 조사되어 철 관련 오염원으로 추정하였다. 두 번째 오염원은 Na, K, Zn, Si 그리고 일정량의 Pb이 주로 기여하는 것으로 조사되어 토양 관련 오염원과, 토양 성분과 일정량의 자동차 관련 오염원을 포함한 도로 비산 먼지 오염원으로 사료된다. 세 번째 오염원의 경우 Al, V, K, Mg, Si, Ca 등이 주로 기여하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 순수 토양 관련 오염원으로 사료된다. 네 번째 오염원은 Pb가 주로 기여하는 것으로 조사되어 자동차 관련 오염원으로 추정하였다. 대합실에서의 질량농도 기여도는 토양 오염원 75.3%, 철관련 오염원 16.9%, 자동차 오염원 7.8%로 산출되었다. 승강장에서의 질량농도 기여도는 철관련 오염원 58.0%, 토양 오염원 39.8%, 자동차 오염원 2.2%를 나타내었다. 개수농도 기여도에서와 마찬가지로 승강장 오염물질의 질량기여도는 역사 내부에서 발생하는 철관련 오염원이 매우 높은 기여율로 나타났다. 대합실에서 토양 오염원이 높게 나타난 것은 황사 등의 영향을 받아 외기의 분진 농도가 높은 시기에 측정을 하였기 때문이라고 사료된다.

4. 기존의 수용모델링 방법은 전량분석과 입자별 분석에 의존하였다. 전량분석은 정량분석이 가능하지만, 오염원의 극히 한정된 숫자에 의존하는 단점이 있고 분석 단계가 많고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 입자별 분석은 개별 입자를 평가하는 유용한 방법이지만, 정량적인 평가를 위해서는 많은 노력과 시간이 필요하다. 본 연구에서는 전통적인 수용모델링 방법인 전량분석과 함께 오염원의 개수기여도를 산출하였다. 개수농도 분포는 공기역학적 입자계수기에 의하여 실시간으로 측정하여 컴퓨터로 출력된다. 따라서 기존의 수용모델링 방법에서의 분석 시간상의 한계점을 극복할 수 있다고 사료된다. 이는 대기관리 측면에서 매우 유리한 방법으로 사용될 수 있다는 점을 시사한다. 즉, 빠르게 산출되는 정량분석 결과를 바탕으로 오염원의 발생 즉시 시정 명령 등의 조치를 취할 수 있다. 본 연구에서는 지하공간에서의

개수농도에 입각한 새로운 수용방법론을 제시하는 성과를 얻었다. 또한 앞으로 지속적인 연구를 수행한다면, 일반 대기질에서도 사용 가능한 진보된 수용모델 개발의 가능성을 제시하였다.

사 사

본 연구의 일부는 1999년 한국건설기술연구원 산·학·연 공동연구개발사업 지원과제 (과제번호 : R & D/99토목II-02) 및 2000년 서울시 지하철공사 지원과제 '지하공기오염 저감방안에 관한 연구'의 (과제번호 : 0002-0035) 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 본 연구의 일부는 1999년 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 지원과제 (99-005-E00025)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강승우, 김동술 (2000) 황사의 오염원분류표 개발을 위한 개별입자 분석, 한국대기환경학회지, 16(6), 565-572.
- 김수환, 김동술 (1999) 실내공기 중 석면섬유의 분류 및 확인을 위한 전문가 시스템의 개발, 한국대기환경학회지, 15(6), 703-712.
- 서울특별시 지하철건설본부 (2001) <http://www.subway.seoul.kr>.
- 서울특별시 지하철공사 (1998) 서울시 지하철 환경개선 방안 연구.
- 황인조, 김동술 (2003) PMF 모델을 이용한 대기 중 PM-10 오염원의 확인, 한국대기환경학회지, 19(6), 701-717.
- 황인조, 김동술 (2003a) PMF 모델을 이용한 대기 중 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기환경학회지, 19(6), 719-731.
- 황인조, 김태오, 김동술 (2001) PMF를 이용한 수원지역 PM-10 오염원 확인, 한국대기환경학회지, 17(2), 133-145.
- Alpert, D.J. and P.K. Hopke (1980) A Quantitative determination of source in Boston urban aerosol, Atmospheric Environment, 14A, 1137-1146.
- API, Inc. (1995) Aerosizer LD User Manual Version 7.03. API Inc., 7 Poneroy Lane, Anherst, MA 01002,

- U.S.A.
- Despiau, S., S. Cougnenc, and F. Resch (1996) Concentrations and size distributions of aerosol particles in coastal zone, *Journal of Aerosol Science*, 27(3), 403-415.
- Paatero, P. and U. Tapper (1994) Positive matrix factorization : A non-negative factor model with optical utilization of error estimates of data value, *Environmetrics*, 5, 111-126.
- Qian, Y., K. Willeke, V. Ulevicius, S.A. Grinshpun, and J. Donnelly (1995) Dynamic size spectrometry of airborne microorganisms : laboratory evaluation and calibration, *Atmospheric Environment*, 29(10), 1123-1129.
- Thornburg, J., S.J. Cooper, and D. Leith (1999) Counting efficiency of API Aerosizer, *Journal of Aerosol Science*, 30(4), 479-488.
- Tian, Y., P. Biswas, S.E. Pratsinis, and W.M. Hsieh (1989) Principal component analysis for particulate source resolution in cleanroom, *The Journal of Environmental Science*, 32(6), 22-27.
- Tian, Y., P. Biswas, S.E. Pratsinis, and J.J. Wu (1990) Receptor modeling for contaminant particle source apportionment in clean room, *Aerosol Science and Technology*, 12, 805-812.
- Tuch, Th., A. Mirme, E. Tamm, J. Heinrich, J. Heyder, P. Brand, C. Roth, H.E. Wichmann, J. Pekkanen, and W.G. Kreyling (2000) Comparison of two particle-size spectrometers for ambient aerosol measurements, *Atmospheric Environment*, 34, 139-149.
- Wiley, J.A., P.J. Robinson, T. Piazza, K. Garrett, Y. Cheng, and G. Marti (1991) Activity Patterns of California Residents, Final Report for the Research Division, California Air Resources Board. Contact N. Sacramento, CA, A6, 173.