

# 서울시 지하철 터널 내 입자상물질의 농도 특성 및 오염형태 분류

## Characteristics of Particulate Matter Concentration and Classification of Contamination Patterns in the Seoul Metropolitan Subway Tunnels

이은선 · 이태정 · 박민빈 · 박덕신<sup>1)</sup> · 김동술\*

경희대학교 환경응용과학과, <sup>1)</sup>한국철도기술연구원 교통환경연구팀  
(2017년 11월 20일 접수, 2017년 12월 1일 수정, 2017년 12월 5일 채택)

Eun-Sun Lee, Tae-Jung Lee, Min-Bin Park, Duck-Shin Park<sup>1)</sup> and Dong-Sool Kim\*

*Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University,*

<sup>1)</sup>*Transport Environment Research Team, Korea Railroad Research Institute*

(Received 20 November 2017, revised 1 December 2017, accepted 5 December 2017)

### Abstract

The suspended particulate matter (PM) was measured in subway tunnel of Seoul Line 1 to 9 in order to evaluate the pollution degree and characteristics of the PM in the subway tunnel. Also, to analyze the effect of outdoor aerosol concentration on the PM concentration of subway tunnels, the ambient PM concentration around the subway station was extracted by spatial analysis using PM<sub>10</sub> data of Seoul air pollution monitoring network. Finally, in order to understand pollution pattern in the Seoul subway tunnels, cluster analysis was performed based on input data set such as PM levels in tunnel, tunnel depth, length, curvature radius, outdoor ambient air pollution levels and so on. The average concentration of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub> on subway tunnels were  $98.0 \pm 37.4$ ,  $78.4 \pm 28.7$ , and  $56.9 \pm 19.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. As a result of the cluster analysis, tunnels from Seoul subway Line-1 to Line-9 were classified into five classes, and the concentrations and physical properties of the tunnels were compared. This study can provide a method to reduce PM concentration in tunnel for each pollution pattern and provide basic information about air quality control in Seoul subway tunnel.

**Key words** : PM, Subway, Tunnel, Cluster analysis, Pattern recognition

## 1. 서 론

오늘날 대도시는 급격히 늘어나는 자동차로 인한 교통시설 부족으로 극심한 교통문제를 겪고 있다. 이러

한 교통문제를 해결하기 위해서는 대중교통 체계의 합리적인 관리 및 편리성을 확대하므로 자가용 이용자를 대중교통 이용자로 전환시키는 것이 필요하다. 서울시의 2016년 대중교통 이용객 수는 총 49억 명, 하루 평균 약 1,349만 명으로 전년 대비 0.7% (9만 4천 명) 감소했다. 그중 버스 이용객은 10만 8천 명 (1.9%) 감소한 반면, 지하철 이용객은 하루 평균 7,999천 명으로

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

전년 대비 1만 4천 명(0.2%) 증가했다. 대중교통수단별 이용 비율은 지하철 59.3%, 버스 40.7%으로 지하철 이용객은 꾸준히 증가하고 있다. 이는 지하철의 정시성 및 이용의 편리성뿐만 아니라 지속적인 추가 개통으로 대중교통의 이용수단이 지하철로 전환되는 것으로 볼 수 있다.

이와 같이 많은 유동인구가 지하철을 이용하므로 지하철의 공기질 관리가 매우 중요하다. 그러나 지하철 시스템의 공기질 문제는 환기시설의 노후화 및 이용승객과 열차 운행 빈도가 급증하면서 지하 역사 및 터널의 분진 오염도가 증가하고 있다. 특히, 내부 요인으로 터널에서 열차가 운행하면서 발생하는 레일과 차륜 사이의 마찰과 급침으로 인한 마모, 팬터그래프와 급전시설의 마찰로 인한 마모, 지하구조물 유지 보수작업 등으로 각종 오염물질이 지속적으로 발생되어 열차풍에 의해 흩어지게 된다(Lee *et al.*, 2015, 2010; Son *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2012). 또한 지상의 자동차 배출가스 등 외기의 대기오염물질이 지하로 유입되어 지하 역사 및 터널 공기의 오염을 가중시키는 요인으로 작용한다. 일반적으로 입자상 물질(PM; particulate matter)은 지하철 지하공간의 공기질 오염에 가장 심각한 영향을 미치는 오염물질로 인식되고 있다(Park and Ha, 2008; Kim *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2007). 따라서 지하철을 이용하는 승객의 건강 보호와 깨끗한 지하 환경을 유지하기 위해서는 지하공간의 PM 농도와 외기와의 연관성을 확인하고 오염 특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 지하철 터널 내 입자상 물질의 오염도 및 특성을 평가하고자 서울시 지하철 1호선부터 9호선까지 PM 농도를 측정하였으며, 구간별 농도의 변화를 비교·분석하였다. 또한, 지하철 터널 내 PM 농도에 대한 외기의 영향을 파악하기 위해 서울시 대기 오염 측정망 PM<sub>10</sub> 자료를 이용하여 공간분석을 통해 서울시 각 호선별 지하철 역사 주변의 외기 농도를 추출하여 지하철 터널 내 농도와 비교하였다. 마지막으로 상관분석과 군집분석 등의 통계분석법을 이용하여 터널 오염도, 터널 심도, 길이, 구배 및 대기오염도 등을 종합하여 오염 특성을 분류하였다. 본 연구의 서울시 지하철 호선별 지하터널 구간에 대한 농도 자료 및 오염 특성 분류 및 분석 자료는 향후 지하철 터널 내 공기질 관리를 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 서울시 지하철 본선구간의 공기질 조사

서울시 지하철은 서울특별시 도시기반 시설본부가 관리하는 노선으로 지하철 1·2·3·4호선은 서울메트로에서 지하철 5·6·7·8호선은 서울특별시 도시철도공사에서 운영하고 있으며 지하철 9호선은 서울메트로9호선(주)와 서울9호선운영(주)에서 공동으로 운영 중에 있다. 1974년 8월 15일에 개통한 서울시 지하철은 1호선 서울역~청량리까지의 7.8 km 구간을 시작으로 서울시 첫 지하철이 개통되었으며, 그 후 2009년까지 9호선의 개통으로 서울의 급성장하는 교통인구를 해결하고 경기도의 주요 도시와 연결하는 등 대도시권의 중요한 교통수단으로 자리매김하였다. 서울시 지하철의 총 길이는 331.6km이며, 총 307개의 역으로 지하역 283개, 지상역 24개로 이루어져 있다(표 1).

서울시 지하철 본선 구간 터널의 공기질 측정에서 사용한 장비는 광산란 방식의 더스트 모니터(Dust monitor; Grimm Tech. 1.108, Germany)이다. 더스트 모니터는 약 1.2L/min의 공기 시료를 유입하여 레이저 광원에서 발생하는 빛이 각 입자에 의해 산란되는 신호를 이용하여 입자의 크기를 15개 구간으로 구분하여 측정 한 후, 각 구간별 입자의 수를 질량분포로 전환하여 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>과 같은 입경별 질량농도를 측정한다. 이후 측정된 모든 입자는 장치 후단의 47 mm PTEE 여지에 여과되며 중량 측정을 통해 장치의 보정이 이루어진다. 더스트 모니터는 휴대가 용이하고 실시간으로 입경별 농도 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Oh, 2007; Kim and Jo, 2004; Viana *et al.*, 2003; Colls and Micallef, 1999). 본 연구에 사용한 더스트 모니터의 자세한 사양은 Lee *et al.*(2016)을 참조할 수 있다.

지하철 터널 내 PM 측정을 위한 실험방법은 다음과 같다. 운행하는 전동차의 첫 번째 칸의 제일 앞쪽에 더스트 모니터를 설치한 후 노약자석에 설치된 창문을 통하여 채취관(probe)과 도관을 빼서 전동차 외부측면에 고정하였으며, 창문은 테이프를 이용하여 밀폐시켰다(그림 1 참조).

더스트 모니터의 측정 간격은 6초이며, 열차 운행 동안 각 역의 도착과 출발시간을 기록하여 측정역과 터널과 승강장 구간을 구분하였다. 측정기간은 2015년 7월 2일~8월 7일에 걸쳐 1호선부터 9호선까지 하루에

**Table 1. Details of the Seoul Subway Line-1 to Line-9.**

Line No.	Opening year	Section	Operation distance (km)	Total No. of stations		Total No. of passengers carried (1,000 persons/yr)	Train operation frequency on weekdays
				Ground	Under ground		
1	1974 1980	Seoul station~Cheongnyangni Seongsu	7.8	—	10	164,139	517
2	1985 1985	Sinseol-dong~Seongsu Sindorim~Kkachisan	60.2	13	37	761,807	551
3	1995	Jichuk~Ogeum	38.2	2	32	286,361	410
4	2000	Danggogae~Namtaeryeong	31.7	5	21	302,565	496
5	1996	Banghwa~Sangildong/Macheon	52.3	—	51	308,501	465
6	2000	Eungam~Bonghwasan	35.1	—	38	196,924	356
7	1996	Jangam~Bupyeong-gu Office	57.1	3	48	374,340	421
8	1996	Amsa~Moran	17.7	—	17	89,238	306
9	2009	Gaehwa~Sports Complex station	31.5	1	29	156,652	484
Total			331.6	24	238	2,640,527	4,006

Reference: Web site of Seoul Metro (updated: 2015. 10.)



**Fig. 1. Photos for a sampling location and an inlet tube in a subway passenger cabin.**

한 노선씩 측정하였으며, 측정시간은 각 노선별 열차 운행시간인 첫차시간부터 막차시간까지이다. 모든 노선에 대해 PM을 측정하였으나 7호선은 측정 오류로 인해 통계분석에서 제외하였다. 다음 표 2는 PM 측정에 대한 구간 및 측정 날짜를 나타내었다.

**2.2 공간분포분석을 이용한 본선 구간 상의 외기 농도 추출**

지하철 터널 내 PM 농도에 대한 외기 농도의 영향을 파악하기 위해 서울시 대기오염측정망의 PM<sub>10</sub> 자료를 이용하였으며, 공간분포분석 (spatial analysis)을 통

해 서울시 지하철 전체 역사 주변의 PM<sub>10</sub> 외기 농도를 추정하였다. 서울시 대기오염측정망은 도시의 평균 대기질을 측정하는 도시대기 측정소 (urban sites)와 도로변 측정소 (road sites)가 있으며, 2015년 현재 총 40개소 (도시대기 25개소, 도로변 15개소)가 운영되고 있다. 본 연구에서는 각 호선의 터널 공기 측정과 동일한 날과 동일한 시간대의 대기오염측정소 40곳의 PM<sub>10</sub> 1시간 농도 자료를 공간분포분석의 입력 자료로서 활용하였다.

공간분포분석은 각 측정소를 중심으로 동일 시간에 측정된 자료를 평면상에 시각화할 수 있는 방법으로,

**Table 2. Information of PM sampling for this study.**

Line No.	Section	Sampling date
		Summer
Line-1	Hoegi-Namyong	2015. 8. 07.
Line-2	Seongsu-Konkuk Univ.	2015. 8. 07.
Line-3	Dachwa-Ogeum	2015. 7. 02.
Line-4	Danggogae-Geumjeong	2015. 7. 21.
Line-5	Bangwha-Sangil	2015. 7. 23.
Line-6	Eungam-Bonghwasan	2015. 7. 23.
Line-8	Amsa-Moran	2015. 7. 28.
Line-9	Gachwa-Simnonhyeon	2015. 7. 31.

대상 지역의 대기질 대표성을 분석하기 위하여 활용된다(Yoon and Kim, 1997). 공간 자료로부터 추가적인 의미를 추출하기 위하여 원자료를 다른 형태의 자료로 조작하는 분석 기법으로 다양한 모델이 이용되며, 대기 환경 분야에서는 거리반비례평균법(IDW: Inverse distance weighted averaging)과 kriging 법이 주로 이용되고 있다(Fortheringham *et al.*, 2000; Yoon and Kim, 1997). 적용 모델의 불확도는 일반적으로 측정지점 수에 따라 차이를 보이는데, 측정지점 수가 100개 이상으로 충분히 확보된 조건에서는 IDW법이, 측정지점의 개수가 100개 미만에서는 kriging법의 불확도가 낮아 우수한 추정능을 보인다(Baek *et al.*, 2008; Yoon and Kim, 1997). 본 연구는 대기오염측정소 수가 40개소로 kriging법을 이용하여 분석하였으며, 본 연구에 적용한 kriging 분석과정에 대한 자세한 내용은 Lee *et al.* (2016)을 참조할 수 있다.

### 2.3 통계분석을 통한 지하철 오염특성 분류

상관분석(correlation analysis)은 연구하고자 하는 변수들 간의 관련성을 분석하기 위해 사용된다. 즉, 한 변수가 다른 변수와 관련성이 있는지와 관련성이 있다면 어느 정도 관련성이 있는지를 파악하고자 할 때 이용하는 분석기법이다. 두 변수 간의 관련성을 정도를 계량화하는 것으로 보편적으로 이용되는 척도는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient;  $r$ )로서, 아래의 식(1)과 같이 구해지며,  $-1 \leq r \leq +1$ 의 값을 갖는다.

$$r = \frac{\sum[(Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})]}{\sqrt{[\sum(Y_i - \bar{Y})^2][\sum(X_i - \bar{X})^2]}} \quad (1)$$

상관계수( $r$ )의 절댓값이 1.0이면 완전한 상관관계, 0.9이면 매우 높은 상관관계, 0.7~0.8이면 상관관계가 높다고 말할 수 있으며, 0.5~0.6이면 보통의 상관관계, 그리고 0.4 이하이면 약한 상관관계가 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 터널 내 PM 농도와 외기와의 영향을 확인하는데 뿐만 아니라, 각 터널 구간별 오염원 특성 분류를 위한 군집분석에 앞서 터널 유형별 상관성을 확인하는데 응용하였다.

군집분석법(cluster analysis)은 각 개체(object)의 유사도(similarity)를 측정하여 유사성이 높은 대상 집단을 분류하고, 같은 군집에 속한 개체들의 유사성과 다른 군집에 속한 개체 간의 상이성을 규명하는 통계분석법으로, 대상들을 분류하기 위한 명확한 기준이 존재하지 않거나 기준이 밝혀지지 않은 상태에서 다양한 특성을 지닌 대상들을 집단으로 분류하는데 사용되는 기법이다. 군집분석은 군집의 개수, 내용, 구조 등이 완전히 알려지지 않은 상태에서 개체 사이의 거리 또는 비유사도에 근거하여 군집을 형성하고, 형성된 군집의 특성을 파악하며, 군집들 간의 관계를 분석하는 것으로 집단 간 분산(between-group variance)을 최대화 시키며, 집단 내 분산(within-group variance)을 최소화시키는데 목적이 있다(Dorling *et al.*, 1992). 즉, 두 개체 사이의 거리를 기준으로 공간에서 비유사도를 측정함으로써, 동일한 패턴을 가진 개체를 규명하는 것이며, 거리 또는 비유사도가 작은 두 개체는 동질집단(homogeneous class)으로 결정된다(Hopke, 1991). 군집분석은 일반적으로 위계적 군집분석법(hierarchical clustering method)과 비위계적 군집분석법(non-hierarchical clustering method)으로 나눌 수 있다. 비위계적 군집분석법은 군집의 수를 가정할 수 없거나 알고 있을 때, 군집의 중심으로부터 가까운 개체를 포함하면서 군집을 형성하는 방법이다. 위계적 군집분석법은 대상 간 거리에 의해 가장 가까이 있는 대상들로부터 시작해 결합해 감으로써 군집을 형성하는 방법으로 나무모양의 위계적 구조를 형성함으로써 이 과정에서 군집의 수가 감소하게 된다. 군집분석을 할 경우, 원자료가 지니고 있는 물리화학적 변수의 선정과 자료의 변환이 중요하다. 이는 특정 변수의 변량의 분포도가 치우쳐 있을 경우나 변수 사이에 심한 상관관계를 보일 경우, 군집분석의 결과는 과장되거나 오류를 범할 수 있다. 변량의 분포 정도가 치우쳐 있거나, 상관관계가

발견되었을 경우, 자료를 표준화하는 작업을 거쳐야 하며, 심한 상관관계를 보이는 변수는 분류작업에서 제외해야 한다. 표준화는 식(2)와 같이 z-score를 이용하여 표준화를 수행하였다. 여기서  $Z_{ik}$ 는  $X_{ik}$ 의 표준화 된 값이며,  $\bar{X}_i$ 와  $\bar{S}_i$ 는 각각  $i$ 번째 변수의 평균과 표준편 차이이다.

$$Z_{ik} = \frac{(X_{ik} - \bar{X}_i)}{\bar{S}_i} \quad (2)$$

지하철 터널의 오염패턴 분류 과정에 대한 순서도를 그림 2에 제시하였다. 1차적으로 적절한 군집의 수를 결정하기 위하여 위계적 군집분석을 이용하였다. Hopke(1976)는 환경 관련 자료로부터 해석 가능한 군 집 분류를 하기 위해 squared-Euclidian 거리를 비유사

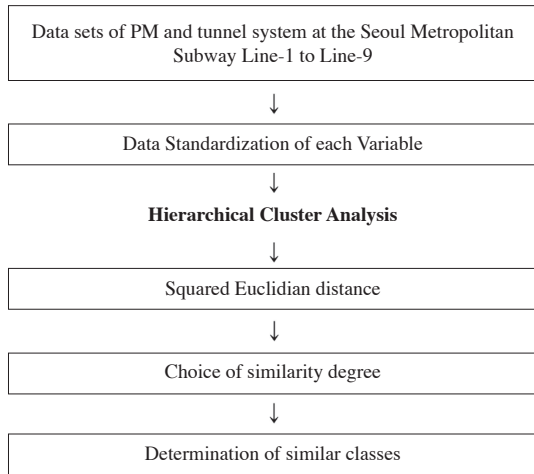


Fig. 2. A flow diagram for the cluster analysis procedure in this study.

도로 사용했다. 즉, 군집 속에서 개체간 거리 제곱의 합 이 최소 증가를 보일 때, 이미 군집화된 자료를 해석하 는데 가장 유용함을 보인 바 있다. 본 연구에서도 squared-Euclidian 거리를 이용하였으며, 군집 추출방 법으로는 Ward의 법을 수행하여 적절한 군집의 수를 결정하였다. Ward의 법은 군집분석의 각 단계에서 개 체들을 하나의 군집으로 묶음으로써 생기는 정보의 손 실을 해당하는 군집의 평균과 개체들 사이의 편차들의 제곱합으로 측정하는 방법이다(Kim and Jeon, 1997). 2차적으로 비위계적 군집분석을 수행하였으며, 이때 정해지는 군집들의 할당은 k-평균법을 이용하였다. k 는 군집의 수를 의미하며, 사전에 정해진 숫자에 따라 대상들이 군집들에 할당되는 것이다. k-평균법은 순차 적으로 군집화 과정을 반복하여 군집화 과정에서 발생 할 수 있는 오류를 최소화할 때까지 군집화를 계속한 다(Massart and Kaufman, 1983). 본 연구에서 군집분 석을 응용하기 위해 통계분석 프로그램인 SPSS ver22 를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 서울시 지하철 터널 내 PM 농도 특성

본 연구의 목적은 열차 내부 농도에 영향을 미치는 지하철 터널 내 입자상물질의 오염도 및 특성을 평가 하는 것으로 서울시 지하철 1호선부터 9호선까지 지하 터널 구간의 PM 농도를 측정하였다. 표 3은 노선별 측 정한 역의 개수, PM 농도에 대한 산술평균과 표준편차 값을 나타내었다. 서울시 지하철 터널 전 구간의  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ 의 평균농도는  $98.0 \pm 37.4$ ,  $78.4 \pm 28.7$ ,

Table 3. Average concentrations of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , and  $PM_1$  in Seoul subway lines during sampling periods. (unit:  $\mu g/m^3$ )

Line No.	Total No. of station	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$PM_1$
		Mean $\pm$ STD	Mean $\pm$ STD	Mean $\pm$ STD
1	12	136.0 $\pm$ 55.5	101.7 $\pm$ 39.7	67.3 $\pm$ 20.9
2	43	67.1 $\pm$ 20.9	58.4 $\pm$ 18.3	47.3 $\pm$ 13.6
3	44	83.4 $\pm$ 41.3	67.5 $\pm$ 31.3	50.1 $\pm$ 23.4
4	35	112.6 $\pm$ 41.5	83.7 $\pm$ 32.0	56.6 $\pm$ 21.2
5	46	111.1 $\pm$ 50.6	78.7 $\pm$ 35.0	49.5 $\pm$ 21.6
6	39	75.7 $\pm$ 30.0	63.6 $\pm$ 24.2	47.1 $\pm$ 16.7
8	17	86.4 $\pm$ 21.4	76.0 $\pm$ 18.7	59.5 $\pm$ 14.2
9	25	111.4 $\pm$ 37.7	97.4 $\pm$ 30.3	77.9 $\pm$ 21.8
Total		98.0 $\pm$ 37.4	78.4 $\pm$ 28.7	56.9 $\pm$ 19.2

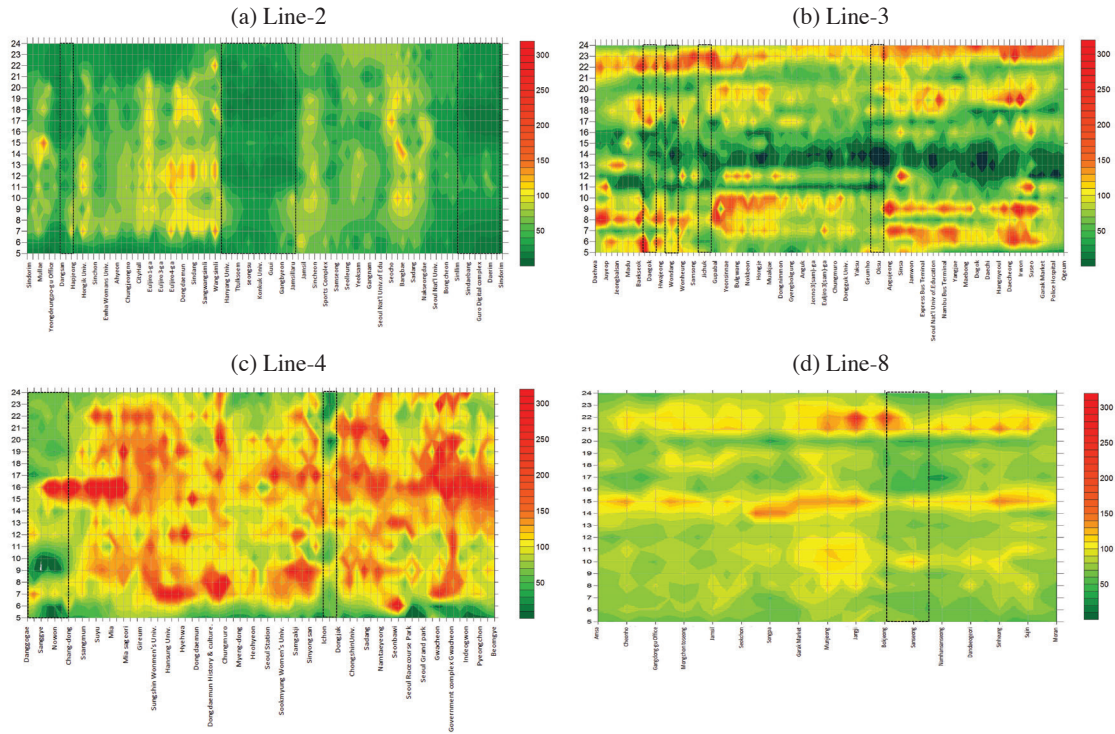


Fig. 3. 2-D contours for PM<sub>10</sub> mass concentrations on the basis of each section on the Seoul subway Line-2, 3, 4, 8. The unit of color scale is µg/m<sup>3</sup>.

56.9 ± 19.2 µg/m<sup>3</sup>의 농도를 보였다. 노선별 PM<sub>10</sub> 농도 범위는 1호선 30.9~369.0 µg/m<sup>3</sup>, 2호선 21.3~165.2 µg/m<sup>3</sup>, 3호선 12.5~292.1 µg/m<sup>3</sup>, 4호선 28.3~303.1 µg/m<sup>3</sup>, 5호선 23.9~346.7 µg/m<sup>3</sup>, 6호선 30.0~314.7 µg/m<sup>3</sup>, 8호선 42.3~200.2 µg/m<sup>3</sup>, 9호선 29.0~235.2 µg/m<sup>3</sup>이었다. 노선별 PM<sub>10</sub> 평균농도를 비교해본 결과, 농도가 높은 순으로는 1호선(136.0 µg/m<sup>3</sup>) > 4호선(112.6 µg/m<sup>3</sup>) > 9호선(111.4 µg/m<sup>3</sup>) > 5호선(111.1 µg/m<sup>3</sup>) > 8호선(86.4 µg/m<sup>3</sup>) > 3호선(83.4 µg/m<sup>3</sup>) > 6호선(75.7 µg/m<sup>3</sup>) > 2호선(67.1 µg/m<sup>3</sup>) 순이었다. 모든 노선에서 PM<sub>10</sub> 평균농도는 지하역사 유지기준인 150 µg/m<sup>3</sup>를 만족하고 있다. 그러나 PM<sub>10</sub> 유지기준을 초과하는 빈도 퍼센트를 비교한 결과 6호선이 지하역사의 PM<sub>10</sub> 농도 유지기준인 150 µg/m<sup>3</sup>을 약 30% 정도 초과하였다. PM<sub>2.5</sub>는 하루 평균 대기환경기준인 50 µg/m<sup>3</sup>와 비교 시 2호선과 8호선에서 약 95% 초과하였다.

국내 지하철 터널 내 입자상 오염물질 농도에 관한 연구 결과에 의하면, Son *et al.* (2013)은 서울시 지하철

3호선 일원역과 대청역 사이, 대청역과 학여울역 사이의 터널에서 측정된 PM<sub>10</sub>의 농도범위는 각각 9~535 µg/m<sup>3</sup> (평균 177 ± 113 µg/m<sup>3</sup>), 10~339 µg/m<sup>3</sup> (평균 111 ± 74 µg/m<sup>3</sup>)이고, Lee *et al.* (2015)은 서울시 지하철 4호선 미아사거리역과 길음역 사이의 터널에서 측정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도범위는 각각 131.9~319.3 µg/m<sup>3</sup> (평균 204.8 ± 43.7 µg/m<sup>3</sup>), 25.3~143.4 µg/m<sup>3</sup> (평균 83.1 ± 26.7 µg/m<sup>3</sup>)라고 보고했다. 본 연구에서 측정된 3호선과 4호선 전체 터널의 평균 PM<sub>10</sub> 농도는 단일 터널에서 측정된 PM<sub>10</sub> 농도보다는 비교적 낮은 농도 범위를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 3은 서울시 지하철 2, 3, 4, 8호선의 PM<sub>10</sub> 질량 농도 경향을 2-D로 시각화한 것으로, 불규칙한 XYZ 데이터 파일을 규칙적인 간격을 갖는 격자 데이터 파일로 만들어 이것을 기초로 하여 contour map을 통해 시각화하였다. X에는 지하철 역사와 터널의 위치 자료를, Y에는 시간대, Z에는 측정된 PM<sub>10</sub> 농도를 입력하여 각 노선별 공기질 오염지도를 작성하였으며, 각 노

**Table 4. Comparison among PM mass ratios each Seoul subway line during the study period.**

Ratio	Section	Line No.							
		1	2	3	4	5	6	8	9
PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	Ground	—	0.86	0.82	0.71	—	—	—	—
	Underground	0.76	0.87	0.81	0.75	0.71	0.85	0.88	0.88
PM <sub>1</sub> /PM <sub>10</sub>	Ground	—	0.74	0.65	0.53	—	—	—	—
	Underground	0.52	0.70	0.62	0.50	0.46	0.64	0.69	0.70
PM <sub>1</sub> /PM <sub>2.5</sub>	Ground	—	0.86	0.78	0.74	—	—	—	—
	Underground	0.68	0.80	0.75	0.66	0.64	0.75	0.79	0.79

선에 지상구간을 점선으로 표시하였다. 공기질 오염지도는 지하터널 및 역사 위치별 및 시간대별 PM<sub>10</sub> 농도의 변화를 파악할 수 있으며, 각 노선별로 하루 운행시간 동안의 지하터널 내 오염 정도를 대략적으로 파악할 수 있다는 이점이 있다. 그림 3을 통해 지상구간에서 일시적으로 PM의 농도가 낮아지는 경향을 볼 수 있었다. 이는 지하터널 내에 갇혀있던 입자상물질들이 지상구간을 지나면서 확산되기 때문으로 판단된다. 특히 2호선은 지상구간이 가장 많이 존재하는 노선으로 지상구간에서 PM<sub>10</sub> 농도가 확연히 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 지하철 2, 3, 4, 8호선의 지상구간으로는 2호선은 당산, 한양대-잠실나루, 신대림-대림구간이며 3호선은 대곡, 원당, 지축, 옥수역, 4호선은 당고개-쌍문과 이촌-충신대, 8호선은 산성-북정역 사이 터널 구간이다.

입자상물질의 입자의 크기는 물리적으로 매우 중요한 인자로 이는 입경에 따라 분진의 발생원, 생성 및 소멸 과정, 구성 성분, 체류시간, 이동거리 등의 물리적 특성이 현저하게 차이가 있기 때문이다(US EPA, 1999). 본 연구에서는 분진의 입경에 따른 질량농도의 비율을 계산하여 분진의 물리적 특성을 정성적으로 분석하고자 하였다. 표 4는 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub> 비율을 지상과 지하터널구간으로 나누고 평균한 값을 기술하였다. 우선 지상구간과 지하터널구간을 비교한 결과, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율은 지상구간 0.84와 지하구간 0.86으로 지하구간에서 높은 값을 보였다. PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>의 경우 지상구간 0.70, 지하구간 0.67로 지상구간이 더 높았다. PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub>의 경우에도 마찬가지로 지상구간 0.82와 지하구간 0.78로 지상에서 높은 값을 보였다. 즉, 지상구간에 역사 주변의 이동오염원과 각종 인위적 오염원으로 인해 미세입자의 비율이 증가한

것으로 판단된다.

지하철 터널 내에서의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>과 PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub> 높은 비율은 동력장치 및 제동장치 등의 내부요인 및 환기 시설에서 유입되는 외부 발생원 등에서 영향을 받는다. 특히 지상구간의 높은 PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub> 비율은 외기에서 자동차 등의 이동오염원 및 각종 인위적 연소과정에서 배출되는 초미세입자의 영향, 이들 오염원에서 배출된 가스상 물질의 2차 분진(secondary aerosol)으로의 변환(gas-to particle), 여름철 높은 태양강도 및 기온으로 인한 2차 분진화의 가속화 등으로 1.0 μm 이하인 분진(submicron particle)의 질량농도가 높아지는 것으로 보고되었다(Lee et al., 2016). 이 결과를 통해 지상 및 지하 환경에서 차지하는 PM<sub>10</sub> 중 PM<sub>2.5</sub>의 기여율은 매우 높음을 알 수 있었고, PM<sub>2.5</sub> 중 PM<sub>1</sub>의 기여율은 더욱 높음을 알 수 있었다.

### 3.2 공간분포분석에 의한 외기농도와의 관계

지하철 지하터널 구간의 분진오염도에 미치는 외기의 영향을 평가하기 위하여 서울시 대기오염측정망 총 40개 지점에 대한 PM<sub>10</sub> 농도자료를 입수하고 kriging 법을 이용하여 서울시 지하철 1호선부터 9호선까지 각 호선 역사 주변의 시간대별 외기농도를 추출하였다. 각 호선별 측정된 날짜와 동일한 날의 서울시 측정망 PM<sub>10</sub> 농도 자료를 이용하였으며, 역사 주변의 추출한 외기농도를 이용하여 외기와 지하터널 내 PM과의 상관성을 평가하였다.

상관분석은 두 변수간의 관계를 나타내는 분석법으로, 본 연구에서는 노선별 각 역사 주변의 추출한 외기농도를 이용하여 외기의 미세먼지가 지하터널 공기질에 미치는 영향을 검토하기 위해 이용하였다. 전 호선에 대한 역사 주변 외기의 PM<sub>10</sub>과 터널 내 PM<sub>10</sub>,

**Table 5. The result of Pearson's correlation analysis between PM in tunnels and outdoor PM<sub>10</sub> for all lines.**

		Tunnel			Outdoor	
		PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	PM <sub>10</sub>	
Tunnel	PM <sub>10</sub>	(r)	1	.931**	.698**	0.035
		p-value		0.00	0.00	0.602
		N	233	233	233	225
	PM <sub>2.5</sub>	(r)	.931**	1	.903**	.220**
		p-value	0.00		0	0.001
		N	233	233	233	225
	PM <sub>1</sub>	(r)	.698**	.903**	1	.446**
		p-value	0.00	0.00		0.00
		N	233	233	233	225

\*\*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 간의 상관성을 분석하여 상관계수 값을 표 5에 나타내었다. 상관분석은 Pearson 상관계수를 이용하여 두 변수 간의 상관성을 해석하였다. 외기에서의 PM<sub>10</sub> 농도와 터널 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 농도와의 상관 분석 결과 외기에서의 PM<sub>10</sub>과 터널 내 PM<sub>10</sub>은 통계적으로 유의하지 않았으며, 외기에서의 PM<sub>10</sub> 농도와 가장 높은 양의 상관성이 있는 것은 터널 내 PM<sub>1</sub> 농도로 상관계수  $r=0.45$ ,  $p<0.01$ 로 조사되었다. 이는 앞서 터널 내 1.0  $\mu\text{m}$  이하의 분진은 외기의 영향을 받는 것과 연관이 있는 것으로 보인다. 각 노선별 역사 주변 외기의 PM<sub>10</sub> 농도와 터널 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 농도간의 상관성을 분석한 결과 입자의 크기가 작을수록 외기 농도와 높은 상관성의 경향을 보였으며, 특히 3, 4, 5호선은 외기 PM<sub>10</sub>과 터널 내 PM<sub>1</sub>과의 상관계수가 0.60~0.66,  $p<0.01$ 로 가장 높은 상관성을 보였다. 외기 PM<sub>10</sub> 농도와의 상관계수 값의 범위는 각각 터널 내 PM<sub>10</sub>과는 0.17~0.40, 터널 내 PM<sub>2.5</sub>와는 0.17~0.47, 터널 내 PM<sub>1</sub>과는 0.24~0.67이었다. Kim *et al.* (2009)에서도 서울시 대기오염 측정망 자료를 참고하여 외기 일평균 PM<sub>10</sub>과 지하역사의 일평균 PM<sub>10</sub>을 비교한 바  $r$  값이 0.27~0.50로 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

### 3.3 지하철 터널의 오염유형 분류

군집분석은 관측 값들 사이의 거리 또는 유사거리를 이용하여 전체를 몇 개의 그룹 또는 군집으로 나누는 통계기법으로 군집의 특성 파악 및 군집들 간의 관계를 분석하는 것을 주요 목적으로 한다. 본 연구에서는 지하철 터널의 오염패턴을 분류하기 위해 각 호선 별

평균 터널길이, 심도, 구배, 급·배기량, 자연환기횟수, 도상비율, 외기오염도 등을 표 6과 같이 조사하였다.

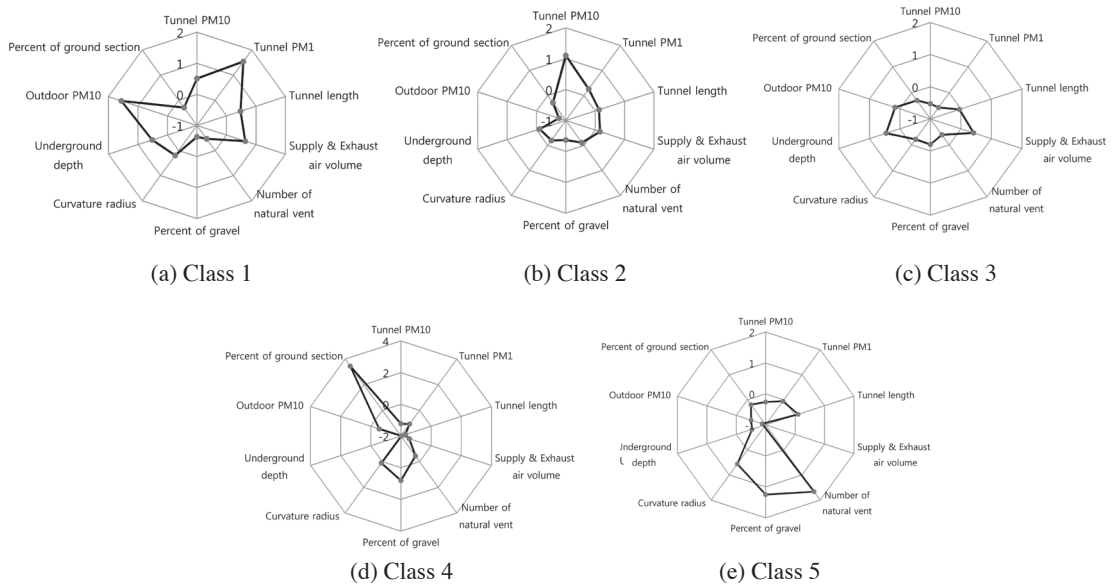
군집분석을 할 경우, 원자료가 지니고 있는 물리학적 변수의 선정과 자료의 변환이 중요하다. 이는 특정변수의 변량이 농도에 대해 분포도에 치우쳐 있을 경우나 변수 사이에 심한 상관관계를 보일 경우, 군집 분석의 결과는 과장되거나 오류를 범할 수 있다. 변량의 분포 정도가 치우쳐 있거나, 상관관계가 발견되었을 경우, 자료를 표준화하는 작업을 거쳐야 하며, 심한 상관관계를 보이는 변수는 분류작업에서 제외해야 한다. 군집분석에 앞서 우선적으로 개체들 간의 상관성을 파악하였으며, 터널 내 PM<sub>2.5</sub> 값은 터널 내 PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>1</sub>과 높은 상관관계를 보여 군집분석에서 제외하였다. 또한 측정단위는 군집분석 결과에 큰 영향을 미친다. 따라서 측정 단위의 의존성을 최소화하기 위해 데이터를 표준화함으로써 모든 변수에 같은 비중을 주었다. 표준화는 관측값  $X_i$ 에  $X$ 의 평균을 빼고  $X$ 의 표준편차로 나눈 값이다.

본 연구에서는 1단계로 위계적분석법의 squared-Euclidian 거리를 이용하였으며, 군집 추출방법으로는 Ward의 법을 수행하여 적절한 군집의 수를 결정하였다. Squared-Euclidian 거리를 비유사도 기준으로 군집 분석을 수행한 결과 얻은 수상도에서 임의의 직선을 그렸을 때 좌측에 위치한 개체의 집단들이 각기 다른 군집을 형성한다. 수상도에서 비유사도의 준위를 선정하고 군집의 수를 결정하는 과정은 군집분석에서 가장 중요한 과정이다. 하지만 분석자의 주관적인 판단에 전적으로 의존하기 때문에 많은 주의가 필요하다. 군



**Table 6. The structural characteristics of underground sections in the Seoul subway.**

	Line-1	Line-2	Line-3	Line-4	Line-5	Line-6	Line-8	Line-9
Number of natural vent	6	4	1	1	0	0	0	0
Percent of gravel (%)	34	58	60	58	all concrete	all concrete	all concrete	all concrete
Curvature radius (m)	875.6	529.1	542.9	516	663.9	1295.2	5660.2	919.5
Underground depth (m)	10.9	10.7	16.8	12.4	21.6	20.6	16.6	25.4
Supply & exhaust air volume (CMM)	0	4,210.4	12,129.1	7,529.2	16,504.4	15,521.1	11,706.3	19,060.8
Tunnel length (m)	662.8	653.7	872.1	880.1	901.1	789.0	461.9	494.8
Percent of ground section (%)	10	23	6	21	all underground	all underground	all underground	all underground



**Fig. 4. Radar charts showing standardization values for the objects in each class.**

집분석에 의한 군집화는 5개로 분류되었으며, 군집분석을 통해 도출된 군집별 특성은 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 각 단위가 다른 변수들 간에 표준화된 값으로 나타난 것으로 모든 관측 값의 평균은 0이다. 표 7은 형성된 군집들에 대한 지하터널 내 오염도와 터널

의 길이, 심도, 구배, 급·배기량, 자연환기횟수, 도상, 외기오염도의 평균자료를 나타낸 것이며, 다음 터널별 형성된 군집의 특성은 다음과 같다.

군집 1은 전부 지하구간으로 심도가 가장 깊은 구간 의 터널들이 속하였다. 특히 PM<sub>1</sub>의 평균농도가 가장

Table 7. The mean values of each variable in each class.

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
No. of object	34	49	84	15	39
Tunnel PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	104.0	118.4	78.7	61.7	85.2
Tunnel PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	90.6	87.1	63.4	50.0	69.9
Tunnel PM <sub>1</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	71.8	56.4	46.5	40.4	52.7
Tunnel length (m)	1056.9	909.1	832.2	113.3	897.0
Supply & exhaust air volume (CMM)	16,771	13,043	15,037	280	2,946
Number of natural vent	0.0	0.9	0.2	0.1	5.4
Percent of gravel (%)	1.4	11.8	18.5	59.20	77.3
Curvature radius (m)	2,880.3	1006.5	845.9	462.7	545.9
Underground depth (m)	21.8	16.5	21.2	0.0	12.8
Outdoor PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	56.6	34.2	43.2	36.31	36.8
Percent of ground section (%)	0.0	0.0	0.0	100.0	2.6

높았으며, 터널 주변의 외기의 PM<sub>10</sub> 농도도 가장 높은 구간으로 군집되었다. 강제환기인 급·배기량도 가장 많은 구간으로 특히 9호선이 많이 속한 구간으로 평소 9호선 주변에 교통량이 많은 것이 특징이다. 따라서 앞서 기술하였듯이, 외기의 PM은 터널 내 PM<sub>1</sub>에 영향을 주는 것으로 사료되며, 강제환기(급·배기)시 입경이 작은 PM도 포집할 수 있는 여과 장치가 필요한 것으로 판단된다.

군집 2는 PM<sub>10</sub>의 평균농도가 가장 높은 구간들로 군집되었다.

군집 2는 군집 1과 마찬가지로 전 구간이 지하구간으로, 지상구간이 없었기 때문에 심도가 깊었으며 자연환기구의 개수가 매우 적거나 없었고, 따라서 강제환기인 급·배기량은 많은 편이었다. 또한 PM<sub>10</sub>의 농도가 높았던 군집 2의 도상은 자갈이 차지하는 비율이 11.8%로 군집 1의 1.4%에 비해 높은 편이었다. 지하철 터널 내 도상은 대부분이 콘크리트와 자갈로 이루어져 있는데, 대부분의 구간에서 분진을 줄이고자 콘크리트화 하였으나 일부분 구간에선 아직 자갈도상이 남아있는 상태이다. 자갈도상으로 인해 발생하는 분진의 크기는 크기 때문에 PM<sub>1</sub>보다는 PM<sub>10</sub>에 영향을 준 것으로 판단되어 진다.

군집 3은 전부 지하구간에 속하며, 심도가 깊은 구간의 터널들이 속하였으나 터널 내 평균 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 각각 78.7 µg/m<sup>3</sup>과 46.5 µg/m<sup>3</sup>로 비교적으로 낮은 편에 속하였다. 자연 환기구의 개수는 거의 없었으며, 강제환기인 급·배기량이 상대적으로 많은 구간들이 속하였다. 군집 4는 전 구간이 지상구간으로 터널 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub>의 평균 농도가 가장 낮았고, 급·배기량

이 매우 적었으며, 자갈도상의 비율이 56.6%로 가장 높았다. 이는 서울시 지하철의 경우 지상구간은 아직 자갈 도상이 많이 남아있기 때문이다. 마지막 군집 5의 경우에는 군집 5에 속하는 전체 터널 구간 중 2.6%가 지상구간이었으며, 대부분이 지하구간에 속한 구간이었다. 가장 큰 특징은 자연 환기구의 수가 평균 5.4개로 매우 높으며, 그에 비해 강제환기의 급·배기량은 매우 적은 편이었다. 또한 도상 중 자갈이 77.3%로 매우 높은 편이었다.

각각의 군집으로 비교·평가하였을 때, 군집 1은 외기의 영향으로 인해 터널 내 PM<sub>1</sub>의 농도가 높아진 것으로 판단되며, 외기의 농도가 높은 날에는 터널 내 급기량을 줄인다거나 여과시설을 거친 후 지하터널 내부로 급기 시키는 등의 방안이 필요하다. PM<sub>10</sub>의 평균농도가 가장 높은 구간들로 형성된 군집 2는 자갈 도상인 터널구간을 콘크리트로 바꾸는 것이 필요할 것으로 판단된다. 반면 군집 3의 경우 지하구간으로 심도가 깊은 편이고 자갈 도상의 비율도 18.5%로 군집 2보다도 높은 편이었으나 터널 내 PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub>의 농도가 낮아 5개의 군집 중 가장 관리가 잘 된 곳으로 여겨지며, 좀 더 심층적인 원인을 파악하기 위한 세부적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

서울시 지하철 터널 내 입자상물질의 오염 현황과 오염 형태를 파악하기 서울시 지하철 1호선부터 9호선까지 터널 내 PM 농도를 2015년 7월 2일부터 8월 7일

까지 측정하였다. 측정 자료를 이용하여  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ 에 대한 평균농도 및 입경에 따른 질량농도의 비율을 계산하여 분진의 물리적 특성을 정석적으로 분석하였다. 서울시 지하철 전 노선의  $PM_{10}$  평균농도는 지하역사 유지기준인  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였으나, 6호선은  $PM_{10}$  유지기준을 약 30% 정도 초과하였으며,  $PM_{2.5}$ 는 24시간 대기환경기준인  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 2호선과 8호선에서 약 95% 초과하였다.

대기 환경에서 입경에 따라 분진의 생성원, 생성 및 소멸 과정, 구성 성분 등의 물리적 특성이 현저하게 차이가 있기 때문에 본 연구에서는 분진의 입경에 따른 질량 농도의 비율을 계산하였다. 우선 지상구간과 지하터널 구간을 비교한 결과  $PM_{2.5}/PM_{10}$  비율은 지하터널 구간에서,  $PM_1/PM_{10}$ 과  $PM_1/PM_{2.5}$  비율은 지상구간에서 높은 값을 보였다. 지하터널 구간의  $PM_1$ 은 외기의 이동오염원 및 각종 인위적 연소과정에서 배출되는 초미세 입자의 영향으로 고려된다. 또한, 서울시 지하철 터널 구간의 PM 오염도에 미치는 외기의 영향을 평가하기 위해 서울시 대기오염측정망을 이용하여  $PM_{10}$  농도자료를 수집하고 kriging법을 이용하여 서울시 지하철 1호선부터 9호선까지 각 노선 역사 주변의 시간대별 외기 농도를 추출하였으며, 이를 통해 외기와 지하터널 내 PM과의 상관성을 평가해보았다. 터널 내 PM 입자의 크기가 작을수록 외기 농도와 높은 상관성을 보였으며, 각 노선별 외기와 연관성을 비교하였을 때 3, 4, 5호선이 가장 높은 상관성을 보였다.

한편, 본 연구에서는 서울시 지하철 터널 구간의 오염의 패턴을 파악하기 위해 측정을 통해 얻은 지하터널 내 오염도와 터널의 길이, 심도, 구배, 급·배기량, 자연환기횟수, 도상, 외기 오염도 등을 대상으로 군집 분석을 수행하였다. 총 5개의 군집으로 분류할 수 있었으며, 각 분류된 터널구간들의 특성을 통해 오염원인을 파악할 수 있었다. 본 연구의 서울시 지하철 호선별 지하터널 구간에 대한 농도자료 및 오염 특성 분류 및 분석 자료는 향후 지하철 터널 내 공기질 관리를 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술연

구사업(17RTRP-B082486-04)의 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### References

Baek, S.A., Lee, T.J., Kim, S.D., Kim, D.S. (2008) Studies on the spatial analysis for distribution estimation of radon concentration at the Seoul area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(5), 538-550. (in Korean with English abstract)

Colls, J.J., Micallef, A. (1999) Measured and modelled concentrations and vertical profiles of airborne particulate matter within the boundary layer of a street canyon, *Science of the Total Environment*, 235(1), 221-233.

Dorling, S.R., Davies, T.D., Pierce, C.E. (1992) Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry - Method and application, *Atmospheric Environment*, 26A(14), 2575-2581.

Fotheringham, A.S., Brunson, C., Charlton, M. (2000) *Quantitative geography: perspectives on spatial data analysis*, London: Sage Publications.

Hopke, P.K. (1976) The application of multivariate analysis for interpretation of the chemical and physical analysis of lake sediments, *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 11(6), 367-383.

Hopke, P.K. (1991) *Receptor modeling for air quality management*, Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.

Kim, C.M., Han, G.M., Lee, H.C., Jun, M.J., Shin, J.U., Hong, J.S., Han, G.M., Jeon, J.S., Kim, J.H., Kim, M.Y. (2009) Characteristics of  $PM_{10}$  monitored at subway stations in Seoul, *Seoul Metropolitan Government Health and Environment Research Institute*, 45, 131-137

Kim, K.H., Ho, D.X., Jeon, J.S., Kim, J.C. (2012) A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station, *Atmospheric Environment*, 49, 219-223.

Kim, K.Y., Jeon, M.S. (1997) Analysis of multivariate statistical data, *Free Academy*, 145-229.

Kim, M.Y., Jo, S.J. (2004) Estimation of practical use for portable aerosol spectrometer, *Korean Society Atmospheric Environment Spring Conference*, 93-97.

Kim, Y.S., Kim, C.N., Kim, K.Y., Roh, Y.M., Lee, C.M.

- (2008) Spatial distribution of particulate matter ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ) in Seoul metropolitan subway stations, *Journal of Hazardous Materials*, 154(1), 440-443.
- Lee, E.S., Park, M.B., Lee, T.J., Kim, S.D., Park, D.S., Kim, D.S. (2016) Characterizing particle matter on the main section of the Seoul subway Line-2 and developing fine particle pollution map, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 216-232. (in Korean with English abstract)
- Lee, T.J., Jeon, J.S., Kim, S.D., Kim D.S. (2010) A comparative study on  $PM_{10}$  source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 543-553. (in Korean with English abstract)
- Lee, T.J., Lim, H., Kim, S.D., Park, D.S., Kim, D.S. (2015) Concentration and properties of particulate matters ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ) in the Seoul metropolitan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 164-172. (in Korean with English abstract)
- Li, T.T., Bai, Y.H., Liu, Z.R., Li J.L. (2007) In-train air quality assessment of the railway transit system in Beijing: a note, *Transportation Research Part D*, 12, 64-67.
- Massart, D.L., Kaufman, L. (1983) *The interpretation of analytical chemical data by the use of cluster analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- Oh, S.W. (2007) Concentrations of atmospheric fine particles measured during 2005 in Chungnam, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 132-140. (in Korean with English abstract)
- Park, D.U., Ha, K.C. (2008) Characteristics of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$  and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environment International*, 34(5), 629-634.
- Seoul Metro (2015) <http://www.seoulmetro.co.kr/board/bbs/view.action?bbsCd=61&mCode=C080000000&idxId=20173>.
- Son, Y.S., Salama, A., Jeong, H.S., Kim, S., Jeong, J.H., Lee, J., Sunwoo, Y., Kim, J.C. (2013) The effect of platform screen doors on  $PM_{10}$  levels in a subway station and a trial to reduce  $PM_{10}$  in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), 38-47.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999) *Air quality criteria for particulate matter*, Vol. 1, EPA600/P-99/002a.
- Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Menendez, M. (2003) PM levels in the Basque Country (Northern Spain): analysis of a 5-year data record and interpretation of seasonal variations, *Atmospheric Environment*, 37, 2879-2891.
- Yoon, H.J., Kim, D.S. (1997) Spatial distribution analysis of metallic elements in dust fall using GIS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 13(6), 463-474. (in Korean with English abstract)