

부산지역 지하철역사 PM-2.5의 농도분포 및 화학적 조성에 관한 연구

강태연, 유숙진, 정승열, 정은지, 이정인, 정희욱, 조은정

대기환경연구부 미세먼지안전팀

A Study on the Concentration Distribution and Chemical Composition of PM-2.5 at Subway Stations in Busan

Kang Tae-yeon, Yu Suk-jin, Jeong Seung-yeol, Jeong Eun-ji, Lee Jeong-in, Jeong Hui-uk and Cho Eun-jeong

Particulate Matter Safety Team

Abstracts

In this study, the concentration distribution of PM-2.5 in the automatic air quality measurement network of an subway station in Busan and the chemical characteristics of ions, carbon, and inorganic elements included in PM-2.5 were investigated, and the pollutants of PM-2.5 were quantitatively evaluated. The average concentration measured by an automatic measuring device at the platforms of 91 subway stations was $18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which was 36% of the indoor air quality maintenance standard. Line 1 ($22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Line 3 ($17.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Line 2 ($16.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Line 4 ($15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) showed.

As a result of analyzing the chemical composition of PM-2.5, ions accounted for 55.1%, carbon 18.1%, other 15.5%, and inorganic elements 11.3% in the order, and ionic components were NO_3^- $3.217 \mu\text{g}/\text{m}^3$ > SO_4^{2-} $2.791 \mu\text{g}/\text{m}^3$ > NH_4^+ $1.314 \mu\text{g}/\text{m}^3$ was found, carbon component was OC $2.382 \mu\text{g}/\text{m}^3$ > EC $0.494 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and inorganic component was Fe $0.924 \mu\text{g}/\text{m}^3$ > Si $0.297 \mu\text{g}/\text{m}^3$ > Al $0.180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ showed.

As a result of identifying the source of pollution in the subway station and analyzing the contribution by pollution source using PMF model, road movement and road dust (42.3%) > secondary aerosol (37.0%) > Soil (14.7%) > Sea salt (6.0%) were investigated.

Key words : PM-2.5, Subway station, Indoor air quality

서 론

부산 지하철은 일평균 6.8만명이 이용하는 대표적인 대중교통수단의 하나로, 1985년 1호선의 운영을 시작으로 현재 총 4개 노선 114개 역사를 운영 중에 있고, 편리성과 쾌속성의 이유로 계속 노선 확장이 진행 중이다. 하지만 지하역사는 고농도 미세먼지가 축적되어 있는 터널 구간을 운행하며 위치적으로 지하공간에 위치하고 있어 자연환기가 어렵고, 다수의 이용객이 밀폐된 공간에 밀집되어 실내공기오염이 심화될 경우 시민 건강을 위협할 수 있다는 문제점이 지속적으로 제기되고 있다.¹⁾

실내공기오염 물질 중 미세먼지는 2016년 WHO 국제암연구소에서 1급 발암물질로 지정함에 따라 초미세먼지 관리에 대한 관심이 더욱 증가하고 있다.²⁾ 특히 초미세먼지는 PM-10에 비해 중금속과 같은 오염물질을 보다 많이 흡착할 수 있으며, 심·뇌혈관 질환, 호흡기질환의 이환율, 사망률의 관련성이 높은 인체건강의 환경적 리스크 요인 중 하나로 알려져 있다.³⁾ 초미세먼지는 자연적인 발생보다 인위적인 발생이 더 많은 양을 차지하고 있다. 인위적인 발생원에서 가스상 오염물질이 대부분 배출되나, 이 물질이 대기 중에서 광화학작용에 의해 입자상으로 전환되어 대기 중에 부유하게 된다.⁴⁾

최근 이러한 미세먼지에 대한 사회적 관심과 실내오염도에 대한 우려로 인해 실내공기질관리법 중 PM-10의 기준은 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화되었고, PM-2.5의 기준은 '18년도 신설되었다.⁵⁾ 이전에는 오염도가 높고, 유동인구가 많은 주요 역사에만 자동측정기가 설치되어 있었으나, 「실내공기질관리법」 제4조의 7항에 따라 전국 지하역사에 초미세먼지 자동측정기를 부착하여 그 측정결과가 '21.4.1.부터 실내

공기질관리 종합정보망 및 승강장내 측정기 표출장치를 통해 실시간 시민들에게 공개하고 있다.⁶⁾

지하역사는 역사 내 급기된 외부 공기 중 오염물질과 이용객들의 이동 중 발생하는 먼지, 터널내의 축적되어 있는 먼지가 열차 운행으로 인해 승강장 내로 유입되어 발생하는 경우가 대부분인데,⁷⁾ 이를 강제환기 시스템 및 공기청정기의 설치·가동 등 실내공기질 개선 노력을 통해 공기질을 기준 이내로 유지하게 된다. 하지만 전동차 차륜과 레일마모 및 자갈도상에서 발생하는 고농도 미세먼지, 그리고 노후화되어 효율이 떨어진 환기시설로 인해 오염도가 높은 일부 역사에 대해서는 개선이 꾸준히 필요한 실정이다.^{8,9)}

불특정 다수의 사람들이 이용하는 다중이용시설에 대한 실내공기질이 중요하게 인식되면서 다중이용시설군 중 오염도가 높은 편인 지하역사의 공기질에 대한 연구사례도 늘어나고 있는 실정이다.^{10,11,12)} 이에 본 연구는 부산지역 지하역사 승강장에 설치된 공기질 모니터링시스템의 실시간 자료를 이용하여 초미세먼지의 농도분포 특성 및 PM-2.5 중의 함유된 성분물질의 화학적 조성을 정량적으로 분석하는데 목적을 두고 있다. 초미세먼지는 이온성분, 탄소성분, 무기원소 성분 등으로 이루어져 있으며, 이와 같은 각 성분별 상관관계를 PMF 모델을 활용하여 부산지역 지하역사 PM-2.5의 오염원을 확인하고, 오염원별 기여도를 추정하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구기간 및 대상

□ 지하역사 PM-2.5의 농도분포

지하역사 PM-2.5의 농도분포를 조사하기 위해 부산 도시철도 1 ~ 4호선(91개) 지하역사 승강장에 설치되

Table 1. Characteristics of busan metro by line

Line	No. of station (No. of measuring station)	Length of station (km)	Area of station (m ²)	Average depth of station (m)	Number of passenger (/day)	Number of subway sevice (/day)	The first year of opened year
Line 1	40 (32)	39.9	47,992	11.5	333,060	354	1985
Line 2	43 (37)	45.2	54,824	19.4	246,157	341	1999
Line 3	17 (13)	18.1	17,391	30.7	73,075	320	2005
Line 4	14 (9)	12.0	5,451	22.9	23,642	310	2011
Total	114 (91)	115.2	125,658	21.1	675,934	1,325	-

어 있는 지하역사공기질 모니터링 시스템의 2020년 11월부터 2021년 10월까지 베타선탄흡수법(Met one, BAM-1020)으로 측정된 자료를 Indoor(Platform)로 활용하였고, 외기자료는 대기측정소의 동네자료를 Outdoor(Ambient)로 활용하였다. 또한, Table 1은 1~4호선의 시설적(연장, 연면적, 평균심도, 개통년도), 환경적(승객수, 운행횟수) 특징을 나타낸 표로 부산교통공사 운영자료를 이용하였다.

□ 지하역사 PM-2.5의 화학적 조성 (성분조사)

본 연구는 대기 초미세먼지 성분조사 자료와 비교하기 위해 대기 자동성분분석시스템을 운영 중인 연산

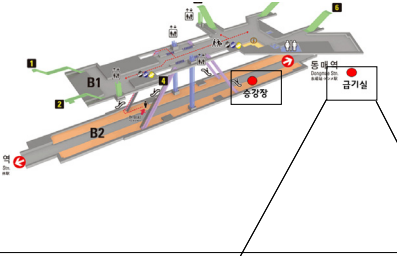


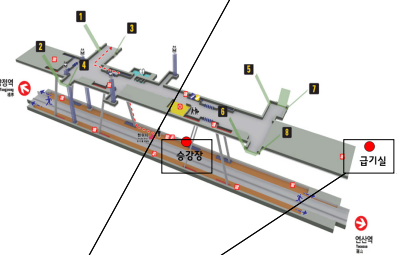


동, 장림동 대기측정소와 인접한 1호선 장림역과 시청역 2개 역사를 대상으로 선정하였고, 1년 중 초미세먼지 농도가 높은 봄철기간(2021년 2월 ~ 4월) 장림역은 총 48개, 시청역은 총 90개의 시료를 채취하였다.

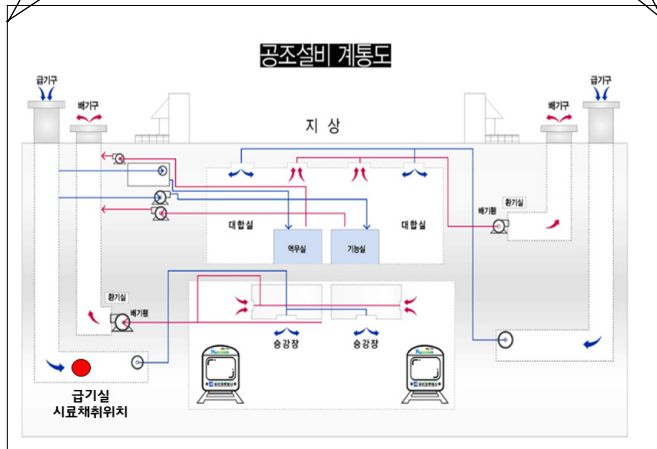
시료채취지점은 대상역사의 (실외)급기실, (실내)승강장과 2지점에서 각각 시료 채취하였고, Table 2에 나타내었다. 또한 지하역사의 정전이나 샘플러 고장으로 24시간 동시에 채취하지 못한 날짜의 시료는 제외하였다. 대상역사가 대기측정소와의 거리가 있어 실외 성분의 차이가 발생할 수 있기에 역사 내 급기실의 공기여과장치 전단에서 추가로 시료 채취하였다.



Fig. 1. Busan subway station air quality monitoring system

Table 2. Sampling location for this study

구분	Sampling site	Outdoor (Air supply room)	Indoor (Platform)
Jangnim			
City Hall			



2. 시료채취 및 분석

□ 지하역사 PM-2.5의 화학적 조성 (성분조사)

(실외)급기실, (실내)승강장의 각 지점에서 PM-2.5의 시료채취를 위해 APM社 Low volume air sampler를 사용하여 16.7 L/min로 24시간 연속 채취하였다. 무기원소 분석을 위해 Teflon Filter와 이온성분과 탄

소분석을 위해 Quartz Filter 2가지 사용하였고, 2가지의 Filter 사용을 위해 지점별로 2대의 샘플러를 설치하여 채취하였다. 이온성분은 양이온 5항목, 음이온 3항목, 탄소성분은 2항목, 무기원소 성분은 23항목 분석하였다. 전처리 및 분석방법은 국립환경과학원 '미세먼지(PM2.5) 성분분석 가이드라인'을 참고¹³⁾하였으며, 항목 및 분석방법은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Analytical item and method

Sampler	Flow rate	Item	Detailed items	Analytical instrument
Low volume air sampler (APM)	16.7 L/min	PM-2.5	PM-2.5 (gravimetric method)	PM Filer weighing robot system
		Ion component	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ Mg ²⁺	Ion Chromatograph (Dionex)
		Carbon component	OC, EC	Carbon-analyzer (Sunset Laboratory)
		Inorganic element component	Li, Be, Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb	ICP-MS, ICP-AES (PerkinElmer, Varian)

□ PMF 모델

PMF(Positive Matrix Factorization) 모델은 수용체에서 채취한 입자상 및 가스상 대기오염물질의 화학적 특성을 분석한 후, 대기질에 영향을 미치는 오염원을 1차적으로 확인하고, 통계방법을 활용하여 오염원별 기여도를 정량적으로 추정하는 방법이다.¹⁴⁾

PMF 모델식은 식 2.1과 같다¹⁵⁾

$$X = GF + E \tag{식 2.1}$$

위 식에서 X는 n × m 행렬로서 n는 시료의 수, m는 분석화학종의 수를 의미한다. G는 n × p 행렬로서 p는 추출된 인자수(오염원의 수)를 의미하며, 오염원이 수용체에 미치는 기여도(Source Contribution)를 나타낸다. F는 p × m 행렬로서 배출오염원에 관한 정보를 지니고 있기 때문에 오염원 분류표(Source Profile)를 의미한다. E는 잔차행렬(Residual Matrix)을 의미하며, 식 2.2과 같다.

$$E_{ij} = X_{ij} - \sum_{h=1}^p G_{ih}F_{hj} \quad (i=1 \sim n, j=1 \sim m, h=1 \sim p) \tag{식 2.2}$$

PMF 모델에서 행렬 G와 F의 값들은 항상 양의 값을 갖도록 설계되어 있으며, Q값을 최소화시키는 조건에서 모델의 해를 구하고 있다. 또한 Q값은 적정수의 인자수를 결정하는 데 유용하게 사용되고, 식 2.3과 같다. 여기서 u_{ij}는 X_{ij}의 불확도를 나타낸다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \tag{식 2.3}$$

모델링 수행을 위해 입력자료는 농도(Concentration)와 불확도(Uncertainty)가 필요하며, 농도는 각 시료를 분석한 화학성분 분석자료를 입력하고, 불확도 자료는 각각의 분석자료에 가중치를 부여한다. 신뢰도가 낮은 화학종은 삭제하였고, 이온발란스의 오차범위는 ±50%를 벗어나는 시료와 측정된 PM2.5의 중량농도와 PM2.5 성분의 합의 차이가 ±50% 넘는 시료는 삭제하였다. 이온과 무기원소 성분이 중복되는 성분들은 한 가지 화학종만을 선택하여 사용하였다.

본 연구에서는 조사기간 동안 채취한 총 시료 중 (실외)급기실에서 채취한 시료를 제외한 (실내)승강장에서 채취한 68개 시료를 가지고, PM-2.5의 구성성분 중 이온성분 6개 항목 (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺), 탄소성분 2개 항목 (OC, EC), 금속성분 10개 항목 (Mg, Al, Si, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Pb)의 화학종을 이용하였다. 측정 항목 중 검출한계(MDL, Method Detection Limit) 미만의 자료는 1/2 × MDL의 값으로 대체하였고,¹⁶⁾ 불확도(Uncertainty) 계산은 아래의 식을 이용하였다. 또한, Error Fraction는 선행연구를 참고하여 10%로 설정하였다.¹⁵⁾ (EPA PMF 5.0 User guide)

① 화학종의 농도가 MDL보다 작거나 같은 경우,

$$Unc = \frac{5}{6} \times MDL$$

② 화학종의 농도가 MDL보다 큰 경우

$$Unc = \sqrt{(ErrorFraction \times concentration)^2 + (0.5 \times MDL)^2}$$

결과 및 고찰

1. 지하역사 PM-2.5 농도분포 특성

1.1. 호선별 PM-2.5 농도 분포

Table 4는 1 ~ 4호선의 호선별 PM-2.5 농도분포 (평균값, 표준편차, 최소값, 최대값) 및 PM-2.5 유지기준 초과횟수를 나타낸 것이고, 현재 「실내공기질 관리법」 지하역사의 PM-2.5 유지기준은 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이다.

2020년 11월 ~ 2021년 10월까지 1년간 지하역사 전 호선의 승강장 평균 농도는 $18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고, 1호선($22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 3호선($17.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 2호선($16.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 4호선($15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났다. 1호선은 최초 개통년도 1985년으로 시설물이 가장 노후화되었고, 운행횟수(평일 기준) 354회, 유동인구(일평균 승객인원) 33만명으로 타호선 대비 유동인구는 1.4 ~ 14배 많은 호선이다. PM-2.5 농도와 호선별 특성을 비교해보면, 개통년도와 운행횟수와는 상관성이 낮게 나타났고, 일 승객수와는 양의 상관성(0.63)을 나타내며 역사의 유동인구에 따라 PM-2.5 농도에 영향을 미칠 수 있음을 보였으며, 이는 타 연구결과^{11,12)}와도 유사하였다. 또한 1호선의 24시간 평균농도 초과횟수도 251회로 전 호선의 초과율의 74%를 차지하였다. 이는 환기설비 노후화로 단계적 개량공사가 진행됨에 따라 공사기간 동안 환기설비가 정상 가동되지 않아 초과율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

또한 심도와 PM-2.5 상관성 분석결과, 전 호선에 대해서는 상관계수가 0.39로 낮게 나타났으나, 평균심도가 깊은 3호선 역사만 비교해봤을 때는 상관계수가 0.54로 양의 상관성이 있음을 보였다. 3호선의 경우 고심도로 인해 환기에 취약할 수 있어 비교적 높게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 2는 호선별 지하역사(Indoor)과 외기(Outdoor)의 PM-2.5 농도를 비교하였고, 실내/실외

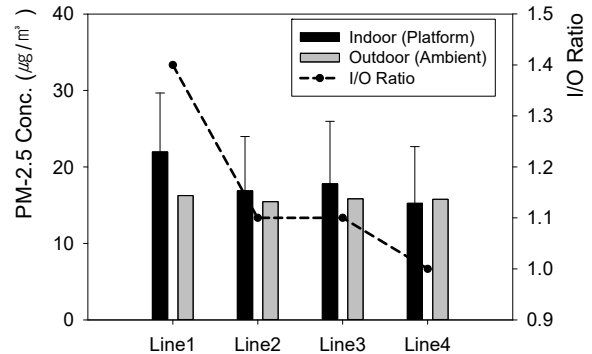


Fig. 2. PM-2.5 concentration & I/O Ratio by Line

비(I/O Ratio)를 나타내었다. I/O Ratio는 실내공기질 관리실태 평가의 지표로 주로 사용된다. 값이 1 이상인 경우 환기 및 실내공기질 관리가 필요하고, 1 미만인 경우 환기 및 실내공기질이 양호하다고 판단하는 지표가 된다.⁹⁾ I/O Ratio는 1호선(1.35) > 3호선(1.12) > 2호선(1.09) > 4호선(0.96) 순으로 나타났다. 1호선의 경우 조사기간 동안 공조시설 노후화로 지속적인 공사가 실시하고 있어 I/O Ratio가 높았던 것으로 판단된다.

1.2. 시계열 PM-2.5 농도 분포

1.2.1. 월별 PM-2.5 농도 분포

2020년 11월 ~ 2021년 10월까지의 지하역사 호선별 월 평균농도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 전 호선의 PM-2.5 평균농도는 2월($23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 12월($23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 3월($22.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 1월($20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났고, 7 ~ 9월($12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 평균적으로 가장 낮은 농도가 나타났다. 호선별로 비교해보면, 12월부터 농도가 증가, 1월에 약간 감소하였다가 다시 2 ~ 3월에 증가하는 양상으로 전 호선에서 유사하게 나타났다. 외기와 비교해보면, 외기 PM-2.5 농도는 3월(21.3

Table 4. Statistical summary of PM-2.5 concentration by Line (2020. 11. ~ 2021. 10.)

Line	PM-2.5 concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Number of exceedances
	Mean	SD	Min	Max	
Line 1	22.0	7.7	9.3	84.1	251
Line 2	16.9	7.1	6.8	63.5	50
Line 3	17.8	8.2	6.1	67.6	28
Line 4	15.2	7.4	4.7	61.8	10

$\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 12월($21.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 2월($20.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 1월($18.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났고, 지하역사와 동일하게 7 ~ 9월($9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 농도가 낮게 나타났다. 월별 I/O Ratio를 비교해보면, 7월(1.50) > 9월(1.39) > 8월(1.30) 순으로 높게 나타났고, 외기와 지하역사에서 가장 높은 초미세먼지 농도를 나타낸 3월은 I/O Ratio가 1.06으로 1에 가장 가깝게 나타났다. 이는 지하역사 환기시스템은 실내공기질의 농도에 따라 조절하는데 고농도 기간에는 역사내 공기질이 나빠 환기시간과 횟수를 증가시키기 때문에 외기와 비슷한 수준을 나타낸 것으로 판단되고, 여름철에는 냉방으로 인해 환기량이 충분하지 못해 높게 나타난 것으로 보인다.

1.2.2. 계절별 PM-2.5 농도 분포

Fig. 4는 봄철(3 ~ 5월), 여름철(6 ~ 8월), 가을철(9 ~ 11월), 겨울철(12 ~ 2월)로 구분하여 계절별 지하역사의 PM-2.5 농도 분포를 나타내었다. PM-2.5 평균 농도는 겨울철 $22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($9.3 \sim 49.5$), 봄철 $19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($7.1 \sim 84.1$), 여름철 $15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($5.3 \sim 37.7$), 가을철 $14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($4.7 \sim 35.0$)으로 겨울철과 봄철에 농도가 높았고, 여름철과 가을철에 농도가 낮게 나타났다. 겨울철은 미세먼지주의보 2일(1/13, 1/16), 초미세먼지주의보 1일(2/2) 발생하였으며, 봄철은 미세먼지

주의보 7일(3/23, 3/29, 3/30, 4/17, 5/8, 5/9, 5/25), 초미세먼지주의보 3일(3/29, 3/30, 5/8) 발생하여 높은 외기 농도로 인해 지하역사에도 높은 농도가 나타난 것으로 판단된다. 또한 3월에 이틀간(3/29 ~ 3/30) 발생한 초미세먼지로 인해 지하역사의 일평균 PM-2.5 농도가 1호선 $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2호선 $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 3호선 $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4호선 $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1년 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 또한, 여름철은 월 평균 강수량이 371mm로 연평균 강수량 149mm 보다 2.5배 많음으로 인해 대기 중 미세먼지의 세정효과로 지하역사에서 낮은 농도로 측정된 것으로 판단된다.

1.2.3. 시간대별 PM-2.5 농도 분포

1년간 호선별 시간 평균농도를 이용하여 지하역사의 시간대별 PM-2.5 농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 1호선은 오전 9시(평균 $27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 열차운행시간 중 가장 높은 농도가 나타났고, 이후 농도가 떨어졌다가 오후 5시부터 농도가 상승하기 시작하여 오후 8시에 가장 높게 나타났다. 또한 비운행시간을 제외하고 2호선은 오전 8시($18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 3호선은 오전 8시($20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 4호선은 오전 9시($17.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 가장 높게 나타났으며, 1호선과 유사하게 출퇴근 시간에 상승하였다가 그 이후 감소하는 양상을 나타내었다. 이

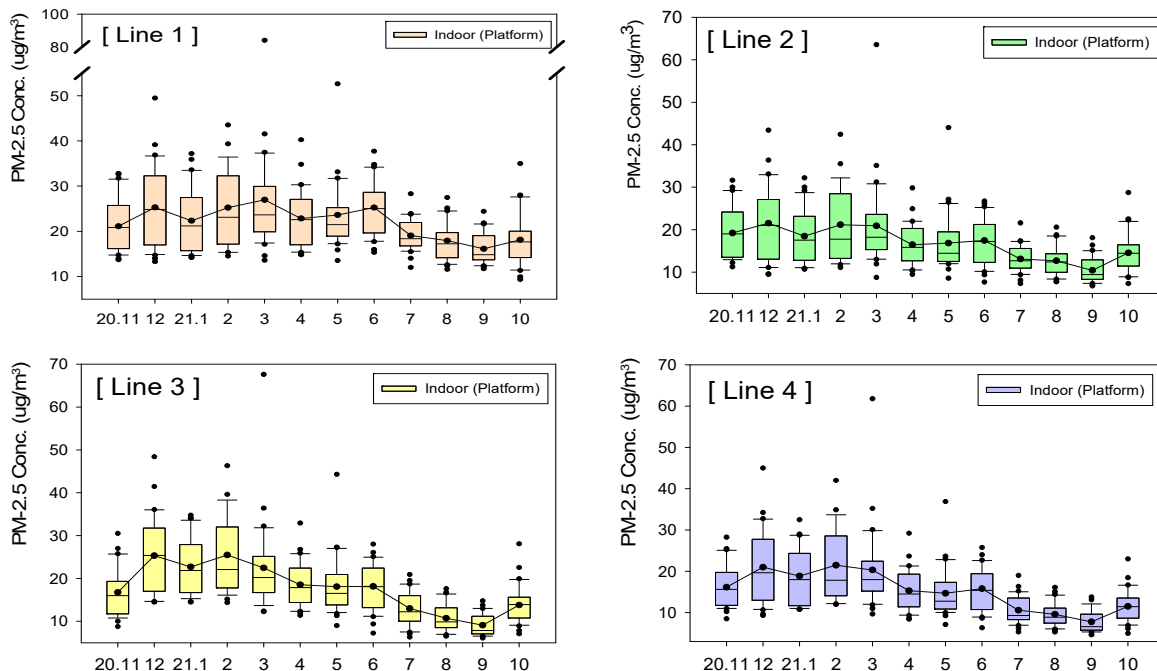


Fig. 3. Distribution of PM-2.5 concentration by month

는 도시철도는 출근시간(8시 전후)과 퇴근시간(18시 전후)에 승하차 인원 증가에 대비해 배차간격을 조절(1호선 : 6.5분 → 4분, 2호선 : 7분 → 4.5분)하여 단축 운행된다. 이와 같이 열차 운행횟수 증가함에 따라 터널내의 고농도 미세먼지의 역사 내 유입으로 미세먼지 발생량이 증가한 것으로 판단된다.¹¹⁾

33개, (3·4호선) 모든 역사가 밀폐형으로 설치되어 있다. PSD 설치형태에 따른 PM-2.5 농도분포를 비교해 보기 위해 1, 2호선으로 구분하여 밀폐형과 반밀폐형 설치역사의 외기와 지하역사 농도를 Fig. 5에 나타내었다.

1호선의 경우, 밀폐형 13개 지하역사 평균농도(18.1

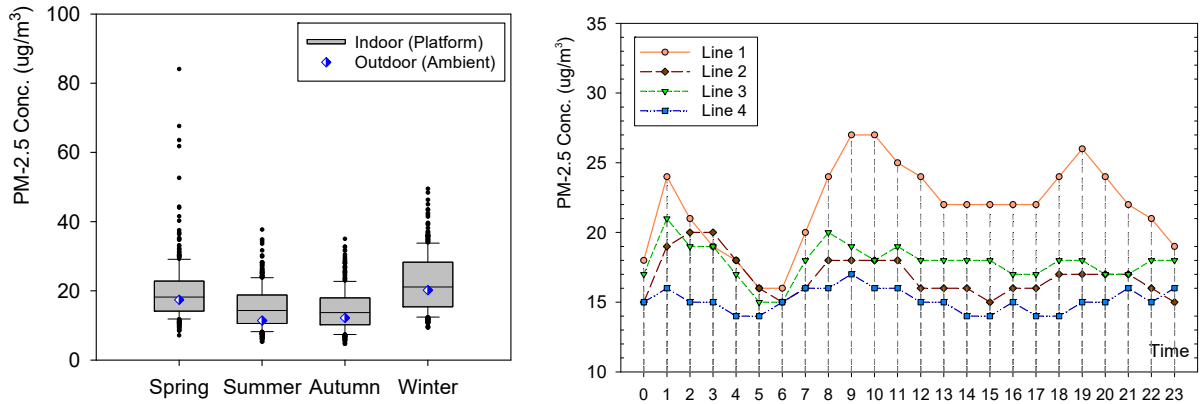


Fig. 4. Distribution of PM-2.5 concentration by season and hour

3. 시설별 PM-2.5 농도 분포

1.3.1. 스크린도어(PSD, Platform Screen Door) 설치형태에 따른 PM-2.5 농도 분포

지하역사 스크린도어는 승객들의 안전을 위한 것만 아니라 열차풍에 의해 발생하는 미세먼지가 승강장에 들어오지 못하게 하는 효과도 있다. 스크린도어는 밀폐형(Full), 반밀폐형(Half), 개방형(Open)의 세 종류가 있는데 현재 부산지역 도시철도는 (1호선) 밀폐형 13개, 반밀폐형 19개, (2호선) 밀폐형 4개, 반밀폐형

$\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 외기 평균농도(18.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비슷하게 나타났고, 반밀폐형 19개 지하역사 평균농도(24.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 외기 평균농도(14.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 66% 높게 나타났다. 2호선의 경우, 밀폐형 4개 지하역사 평균농도(14.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 외기 평균농도(15.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 9% 낮게 나타났고, 반밀폐형 33개 지하역사 평균농도(17.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 외기 평균농도(15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 12% 높게 나타났다.

1·2호선 밀폐형 지하역사는 외기의 농도와 비슷한

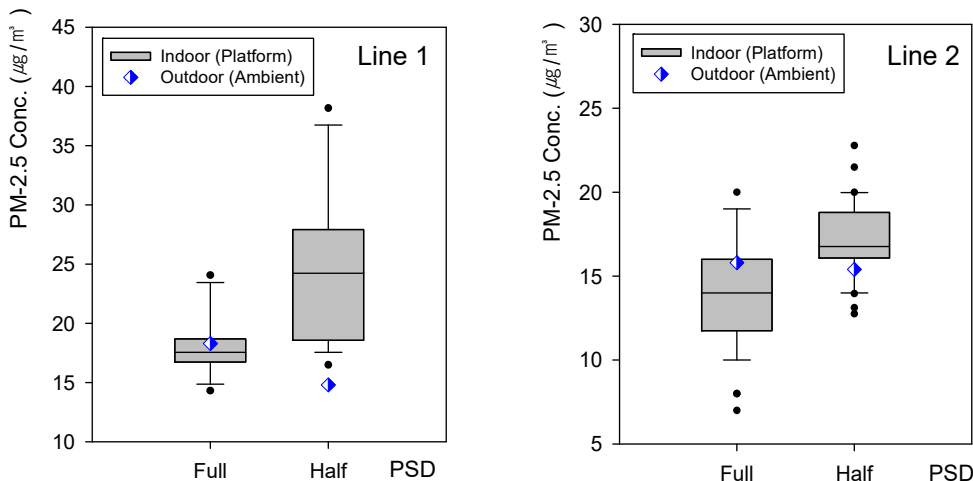


Fig. 5. Distribution of PM-2.5 concentration by PSD installation type

것으로 보아 터널의 고농도 미세먼지로 인한 내부 오염원의 차단효과가 있는 것으로 판단되고, 반밀폐형 지하역사는 외기의 농도보다 12 ~ 66% 상승하는 것으로 보아 열차풍으로 인한 영향이 많은 것으로 보인다. 그리고 2호선 보다 1호선의 상승폭이 큰 것은 2호선은 전 구간 콘크리트 도상으로 설치되어 있으나, 1호선은 일부 (다대포해수욕장 ~ 신평) 6개 역사만 콘크리트 도상이고, 나머지 구간은 자갈도상으로 설치되어 있어 궤도구조에 따른 농도차이로 보인다.

1.3.2. 궤도구조(자갈도상/콘크리트도상)에 따른 PM-2.5 농도 분포

1호선 콘크리트 도상 6개 지하역사의 평균농도(19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 외기 평균농도(21.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 비슷하게 나타났으나, 자갈도상 26개 지하역사의 평균농도(22.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 외기 평균농도(15.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 49% 높게 나타났다. 궤도구조에 따른 외기와 지하역사의 PM-2.5 농도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 콘크리트 보다 자갈도상을 통과하는 역사에서 PM-2.5 농도 증가 폭이 크게 나타나는 것으로 보아 자갈 및 흙 등에 분쇄에 의해 지하역사의 초미세먼지의 농도를 증가시킨 것으로 판단된다. 현재 노후 궤도시설은 일부 개량공사가 진행 중에 있으나, 역사 내 발생하는 미세먼지 최소화를 위해서는 콘크리트 도상으로의 개량이 필요하며, 전면 개

량을 위해서는 막대한 예산과 시간이 소요된다. 개량이 완료될 때까지 자갈도상 구간 역사에 대해서는 환기설비 가동 확대 및 물청소, 고농도 미세먼지 포집방안 강구 등 집중관리가 필요할 것으로 판단된다.

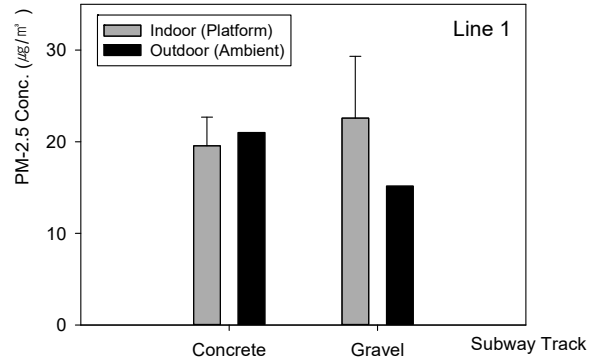


Fig. 6. Distribution of PM-2.5 concentration by subway track type

1.4. 외기농도에 따른 PM-2.5 농도 분포

2020년 11월 1일 부터 2021년 10월 31일까지 외기와 지하역사 승강장의 PM-2.5 일평균 농도를 일자별로 Fig. 7에 나타내었다. 3월 29일은 외기 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 승강장 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1년 중 가장 높은 농도를 나타내었고, 5월 8일은 외기 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 승강장 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두

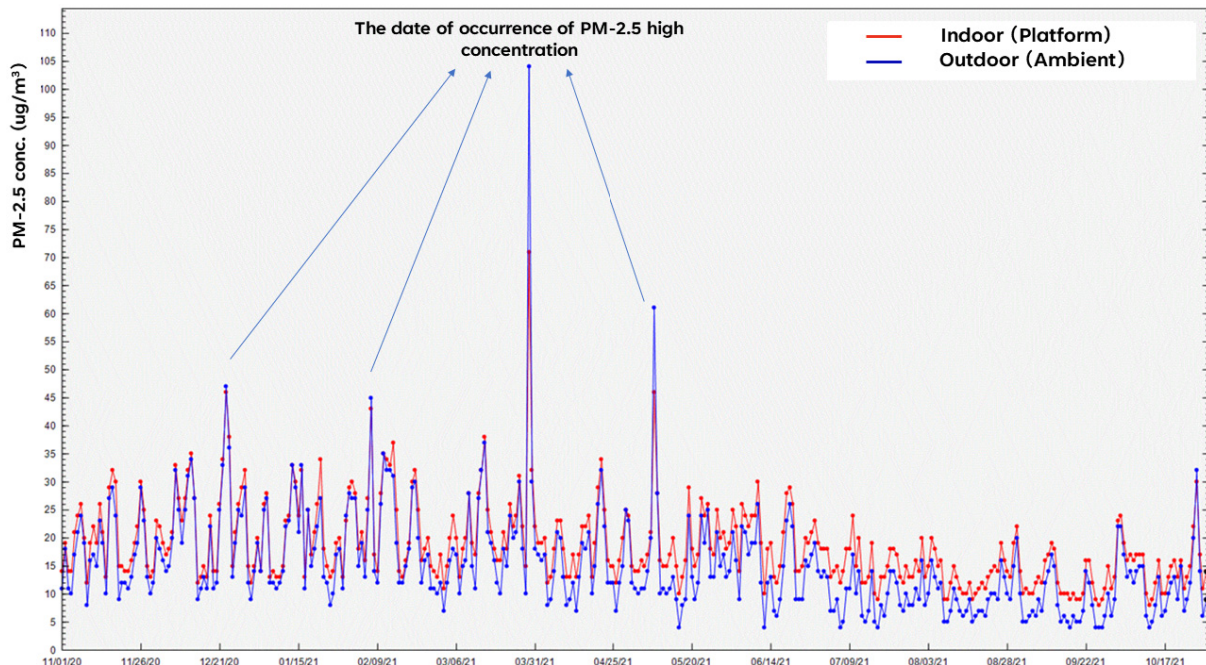


Fig. 7. Distribution of PM-2.5 concentration in subway station and Ambient air

번째로 높은 농도를 나타내었다. 이는 대기 중 초미세먼지가 높은 날에 승강장의 초미세먼지도 고농도를 나타내며, 실외와 실내 PM-2.5 농도가 유사하고 변동되고 있음을 확인할 수 있었다.

외기와 지하역사의 PM-2.5 농도의 상관성을 알아보기 위해 고농도 시기(미세먼지주의보, 초미세먼지주의보 발령일 등 11일)와 그 외 시기(11일 제외)를 구분하여 외기농도에 따른 지하역사 농도를 산점도를 그려 회귀분석하였고, 히스토그램을 통해 농도분포를 확인하여 Fig. 8에 나타내었다.

시기별 상관계수(r^2)는 고농도 시기 중 외기가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하일 때는 0.89, $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상일 때는 0.91, 평균시 0.79로 나타났으며, 모두 외기와의 상관성이 높게 나타났고, 부산 지하철의 미세먼지 특성을 조사한

타 연구사례에서도 PM-2.5 농도가 외기의 영향을 많이 받는다는 결과¹⁷⁾와도 유사하게 나타났다. 특히, 고농도 시기에는 외기의 농도 상승으로 인해 지하역사의 농도도 같이 상승함을 확인할 수 있었고, 상관성이 높은 만큼 고농도 시기에 외기를 유입시켜 환기시스템을 가동할 때 환기방법 및 환기시간의 조절이 필요할 것이고, 외기 중 초미세먼지의 유입을 최소화할 수 있는 공기여과필터의 개량이 필요할 것으로 판단된다.

2. 지하역사 PM-2.5 화학적 조성 (성분조사)

2.1. 지하역사 PM-2.5 농도와 구성성분

2021년 2월 ~ 4월동안 장림역, 시청역 (실내)승강장에서 조사한 PM-2.5 중량농도 및 구성성분의 농도는 Table 5와 같다. (실내)승강장 PM-2.5 평균 농도는 장

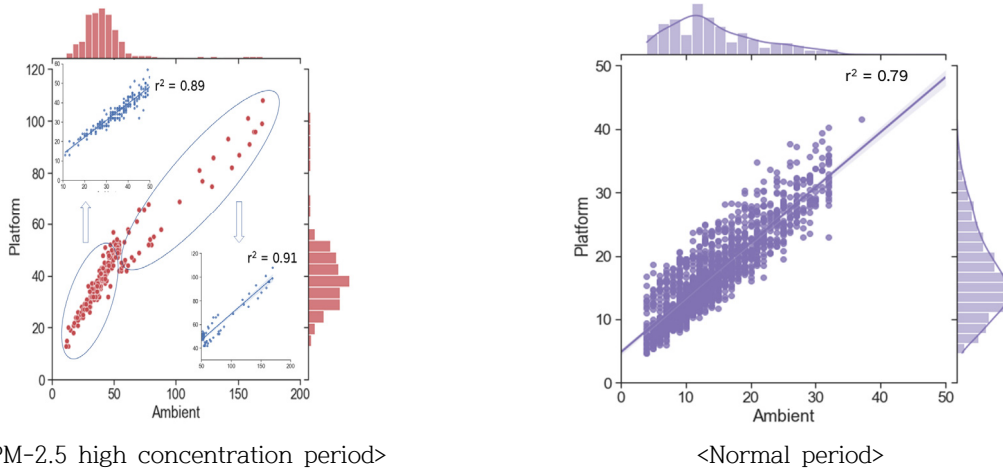


Fig. 8. PM-2.5 concentration in subway according to PM-2.5 concentration in ambient air

Table 5. Concentration and ratio of components in PM-2.5 of subway station platform

Species	Average		Jangnim		City Hall		
	Conc.($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ratio(%)	Conc.($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ratio(%)	Conc.($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ratio(%)	
PM-2.5	15.9		19.3		12.4		
Ion	Na ⁺	0.576	3.6%	0.66	3.4%	0.492	4.0%
	NH ₄ ⁺	1.314	8.3%	1.737	9.0%	0.89	7.2%
	K ⁺	0.123	0.8%	0.151	0.8%	0.095	0.8%
	Mg ²⁺	0.104	0.7%	0.115	0.6%	0.093	0.8%
	Ca ²⁺	0.241	1.5%	0.255	1.3%	0.226	1.8%
	Cl ⁻	0.363	2.3%	0.423	2.2%	0.303	2.4%
	NO ₃ ⁻	3.217	20.3%	4.050	21.0%	2.384	19.2%
SO ₄ ²⁻	2.791	17.6%	3.301	17.1%	2.281	18.4%	
Carbon	EC	0.494	3.1%	0.588	3.0%	0.399	3.2%
	OC	2.382	15.0%	2.534	13.1%	2.229	18.0%
Inorganic element	1.792	11.3%	2.071	10.7%	1.512	12.2%	

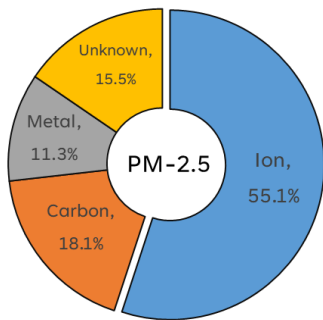
림역 19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 시청역 12.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, (실외)급기실 PM-2.5 평균 농도는 장림역 20.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 시청역 11.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 역사의 여건에 따라 시료채취날짜가 다르고, 역사별 실외 농도의 차이가 나서 실내 농도도 차이가 발생한 것으로 보인다. (실내)승강장의 PM-2.5 중 구성성분은 이온(55.1%) > 탄소(18.1%) > 기타(15.5%) > 무기원소(11.3%) 순으로 구성비율이 높게 나타났다. 33종의 화학성분을 분석하였으나 확인되지 못한 성분이 15.5%를 차지하는 것으로 조사되었다.

또한 (실내)지하역사 PM-2.5 중 이온, 탄소, 무기원소의 구성 성분비와 역사별 구성 성분비 차이를 Fig. 9에 나타내었다. 장림역/시청역 이온성분은 55.3%/54.6%, 무기원소 성분은 10.7%/12.2%로 비슷하게 나타났으나, 탄소성분은 장림역은 16.1%, 시청역은 21.2%로 시청역에서 높게 조사되었다. 탄소성분 중 원소탄소(EC)는 유사하였으나, 유기탄소(OC)는 시청역이 장림역 대비 5% 차이를 나타냈다. 원소탄소 성분은 배출원에서 직접 배출되나, 유기탄소 성분은 직접 배출 또는 대기 중 2차 생성에 의해 생성되는 특징이 있는 것으로 보아 시청역은 외기 중 유기탄소의 2차 생성에 의한 탄소성분이 상대적으로 높은 것으로 판단된다.¹⁸⁾

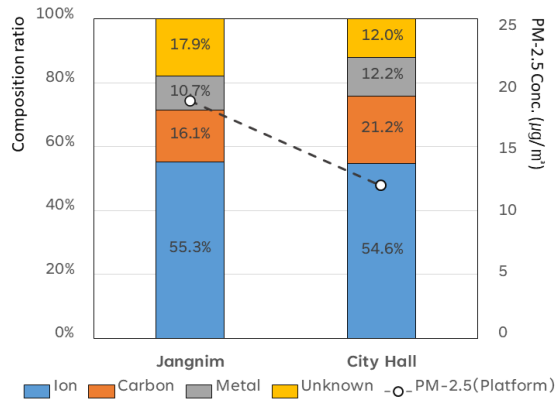
NO_3^- 3.217 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (36.9%) > SO_4^{2-} 2.791 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (32.0%) > NH_4^+ 1.314 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (15.0%) > Na^+ 0.576 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (6.6%) > Cl^- 0.363 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.2%) 순으로 높은 비율을 차지하고 있다. 이들은 2차 입자로 SO_2 , NO_2 , NH_3 의 직접적인 배출로 인한 형성과 NO_3^- , SO_4^{2-} 등의 가스상 오염물질이 화학 반응을 통해 입자상 오염물질로 전환되어 실외 중에 발생하는 특징을 가지고 있다.¹⁹⁾

(실내)지하역사와 (실외)급기실의 농도를 비교해보면, 급기실의 농도가 NO_3^- 3.797 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_4^{2-} 3.045 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지하역사 대비 NO_3^- 는 18% 높게, SO_4^{2-} 는 9% 낮게 나타났다. 이는 지하역사 내부에서는 이온성분의 광화학 반응 등 화학반응이 잘 일어나지 않지 때문에 내부적인 요인에 의한 증가는 거의 없고, 실외에서 생성된 2차입자의 실내 유입에 의한 것으로 판단된다.

SO_4^{2-} 는 대기 중에서 광화학반응이 활발한 여름철에 높게 나타나고, NO_3^- 은 연료의 사용에 의해 주로 발생하는 것으로 전구물질인 NO_2 가 여름에는 대기 중 잔류시간이 짧아 농도가 낮아지기 때문에 겨울철에 높은 농도로 나타난다고 알려져 있다. 조사기간인 2 ~ 4



<Composition ratio of PM-2.5>



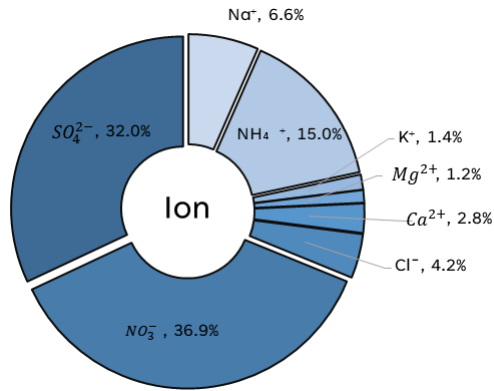
<Composition ratio of PM-2.5 by station>

Fig. 9. Composition ratio of PM-2.5 in subway station platform

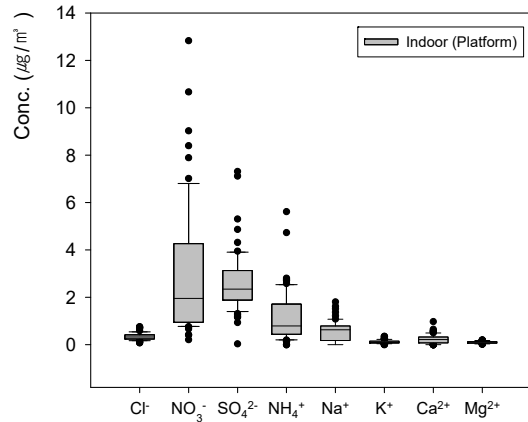
2.1.2. 이온성분

PM-2.5 중 이온성분은 음이온과 양이온으로 나누어 분석을 실시하였고, Fig. 10은 (실내) 지하역사의 PM-2.5 중 이온성분비와 이온성분별 농도분포를 나타낸 그래프이다. 이온성분은 PM-2.5 중 55.1%로 가장 많은 부분을 차지하였고, 전체 이온을 100%로 볼 때

월 동안 NO_3^- 가 SO_4^{2-} 보다 더 높은 비율을 차지하며 겨울 ~ 봄에 외기 중에 NO_3^- 더 높다는 연구결과와 유사하게 나타났다.⁴⁾ 또한 두 이온은 다른 이온에 비해 상대적으로 높은 농도로 측정되었고, NO_3^- 0.210 ~ 12.829 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_4^{2-} 0.037 ~ 7.313 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 농도 변화가 큰 것으로 나타났다.



<Ion Composition ratio of PM-2.5>



<Concentration distribution of ion>

Fig. 10. Ion composition ratio of PM2.5 and Concentration distribution by component

PM-2.5와 이온성분간의 상관성을 알아보기 위해 SPSS를 이용하였으며, 피어슨 상관 분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. 상관계수는 -1에서 1사이의 값을 가지며 1에 근접할수록 양의 상관성, -1에 근접할수록 음의 상관성이 높음을 의미한다. PM-2.5 농도와 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, K⁺은 상관계수가 0.444 ~ 0.761로 모두 양의 상관관계를 가지고, 특히 SO₄²⁻, NH₄⁺는 0.7 이상의 높은 상관성을 나타내었다. 또한 NO₃⁻와 SO₄²⁻은 상관계수가 0.720, NH₄⁺는 NO₃⁻, SO₄²⁻와 0.892, 0.852로 성분 간의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 이는 PM-2.5 중 NH₄⁺은 주로 음이온인 NO₃⁻과 SO₄²⁻ 모두와 결합하여 입자를 형성하는 양이온이기 때문에 PM-2.5 농도와 이온들 사이에 매우 높은 상관관계를 보인 것으로 판단된다.^{18,19)}

2.1.3. 탄소성분

PM-2.5 중 탄소성분(Total Carbon, TC)는 유기탄소(Organic Carbon, OC)와 원소탄소(Element Carbon, EC)로 나누어 분석을 실시하였고, Fig. 11는 (실내)지하역사의 PM-2.5 중 탄소성분비과 OC와 EC의 농도분포를 나타낸 그래프이다. 탄소성분은 전체 성분의 18.1%를 차지하였고, 전체 탄소를 100%로 볼 때 OC 2.382 µg/m³ (82.8%) > EC 0.494 µg/m³ (17.2%) 순으로 높은 비율을 차지하고 있다. OC/EC 비율은 장림역 4.3, 시청역 5.6로 역사에 따라 차이가 나타났으며, 평균적으로 4.8로 OC가 높게 나타났다.

EC는 대부분 화석연료의 연소에 의해 대기 중으로 배출, 2차 화학반응을 일으키지 않고 축적에 의해서 농도가 증가하는 1차 물질로 (실외)급기실의 농도 0.537 µg/m³, (실내)지하역사의 농도 0.494 µg/m³로 비슷하게 나타났으며, 조사기간 동안 농도 변화폭도 적었다.

Table 6. Correlation analysis results of PM-2.5 and ionic ingredients

	PM-2.5	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
PM-2.5	1								
Cl ⁻	0.444***	1							
NO ₃ ⁻	0.677***	0.343**	1						
SO ₄ ²⁻	0.750***	0.520***	0.720***	1					
NH ₄ ⁺	0.761***	0.418***	0.892***	0.852***	1				
Na ⁺	0.021	0.323**	0.248*	0.082	0.295*	1			
K ⁺	0.505***	0.431***	0.672***	0.496***	0.642***	0.461***	1		
Ca ²⁺	0.014	-0.074	0.156	0.047	0.049	-0.303*	0.310*	1	
Mg ²⁺	0.251*	-0.023	0.223	0.296*	0.289*	-0.277*	0.284*	0.721***	1

p* < 0.05 p** < 0.01, p*** < 0.001

OC는 자연적, 인위적 발생원으로부터 직접 배출되거나, 대기 중에서 기체상 유기화합물이 광화학반응에 의해 입자상 물자로 변환되어 생성되는 물질¹⁸⁾로 (실외)급기실의 농도는 2.325 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.324 ~ 5.458 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), (실내)지하역사의 농도는 2.382 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.249 ~ 5.294 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 비슷하게 나타났으나, 조사기간 동안 EC와 달리 OC는 농도 변화폭은 컸다. 하지만 각 성분 농도를 실내/실외비로 비교해보면 OC는 1.0, EC 0.9로 비슷하게 나타나는 것으로 보아 내부적인 요인에 의한 발생량보다 실외의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

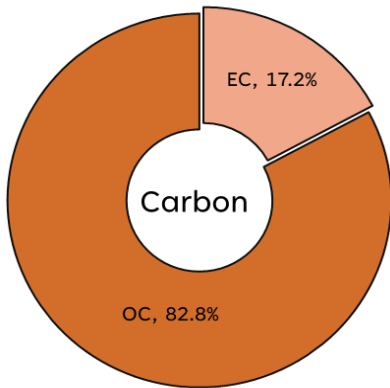
초미세먼지와 탄소성분간의 상관성을 알아보기 위해 SPSS를 이용하였으며, 피어슨 상관 분석한 결과 Table 7에 나타내었다. PM-2.5 농도와 OC와 EC는 상관계수가 0.723, 0.648로 모두 유의한 양의 상관관계를 나타내었다. 또한 OC와 EC 성분 간의 상관계수도 0.701로 상관성이 높은 것으로 나타났다.

2.1.4. 무기원소

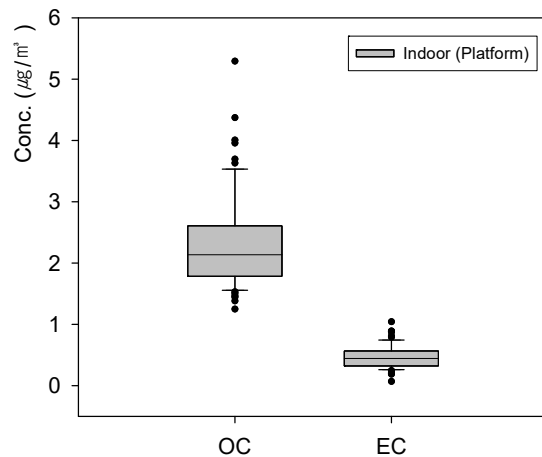
Fig. 12는 (실내)지하역사 PM-2.5 중 무기원소 성분 비와 정량한계 이하의 물질을 제외한 무기원소의 농도

분포를 나타낸 그래프이다. PM-2.5 중 무기원소성분은 전체 성분의 11.3%를 차지하였고, 전체 무기원소를 100%로 볼 때 Fe 0.924 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (51.6%) > Si 0.297 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (16.6%) > Al 0.180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10.1%) 순으로 높은 비율을 차지하고 있다. 지하역사에서 발생하는 Fe은 지하역사에서 열차와 레일사이의 마찰로 인해 발생하는 물질으로 (실외)급기실에서 측정된 결과보다 평균 2.7배 (최소 0.8 ~ 최대 14.0) 농도가 증가하였고, 타 연구결과^{20,22,23)}에서도 지하역사 초미세먼지 무기원소 성분 중 가장 높은 비율을 차지하였다. 지각 및 토양기원 성분 중 Si, Al, Zn은 두 역사간 비슷한 농도분포를 나타내었다. 토양관련 오염원은 주로 지하역사 이용객에 의해 내부로 유입되는 경우와 외기를 도입하는 환기설비를 통하여 도로 분진이나 토양성분이 유입에 의한 것으로 판단된다.²⁰⁾

「2020년 부산지역 다중이용시설 초미세먼지 농도 특성 및 위해성 평가」에서의 결과와 비교해보면, 지하역사의 PM-2.5 농도는 15.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM-2.5 중 무기원소 농도는 2.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (전체의 13.5%)로 본 연구와 유사한 결과를 보였다.²⁴⁾ 그 중에서 인체에 위해성이 있는 것으로 알려진 미량금속 Cr, Mn, Pb의 농도분포는



<Carbon composition ratio of PM-2.5>



<Concentration distribution of carbon>

Fig. 11. Carbon composition ratio of PM2.5 and Concentration distribution by component

Table 7. Correlation analysis results of PM-2.5 and carbon ingredients

	PM-2.5	OC	EC
PM-2.5	1		
OC	0.723***	1	
EC	0.648***	0.701***	1

$p^* < 0.05$, $p^{**} < 0.01$, $p^{***} < 0.001$

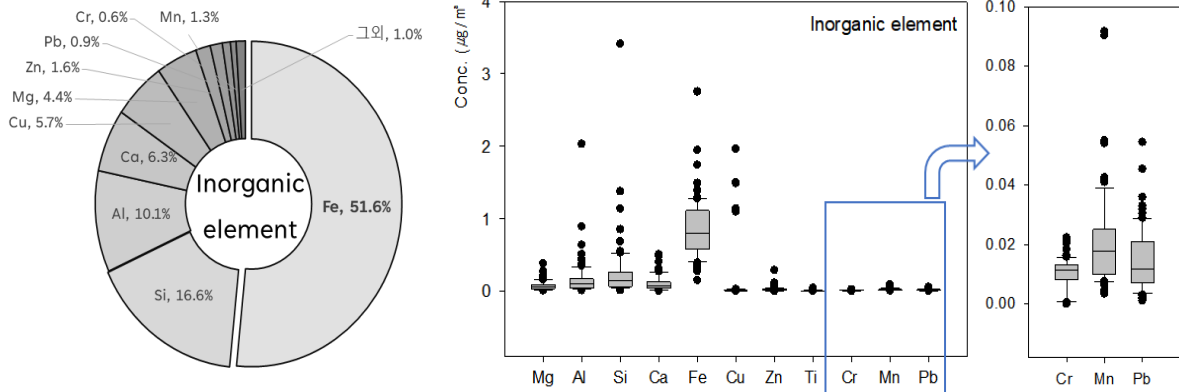
Y축 scale을 조절하여 따로 그래프로 표현하였고, Cr 0.010 µg/m³, Mn 0.021 µg/m³, Pb 0.015 µg/m³로 농도는 낮았지만, 다른 미량금속 (As, Se 등)보다 높게 나타났다.

초미세먼지와 무기원소간의 상관성을 알아보기 위해 SPSS를 이용하였으며, 피어슨 상관 분석 결과를 Table. 8에 나타내었다. PM-2.5와 Fe은 유의성 있는 양의 상관성($r^2 = 0.643$)을 나타내지하역사 초미세먼지 농도가 높아질수록 철 성분이 많아질 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 토양기원 성분(Al, Si, Mg, Ca) 간에도 양의 상관성이 높게 나타났다.

2.2. 실외(급기실)과 실내(승강장)의 PM-2.5 농도 및 구성성분 변화

Fig. 13에 역사별 측정날짜에 따른 실내외 공기비 (I/O Ratio)를 나타내었다. 장림역은 다대포해수욕장 ~ 신평역 연장구간으로 2017년 개통되어 밀폐형 스크린도어, 콘크리트 궤도로 설치되어 있고, 일평균 2,778명의 승객이 이용하는 역사이다. 조사기간 동안 PM-2.5 중량농도 측정결과 (외기)장림대기측정소 21.3 (8.0 ~ 59.0) µg/m³, (실외)급기실 20.8 (7.8 ~ 48.4) µg/m³로 두 지점의 농도가 비슷하게 나타났다. (실내)지하역사는 19.3 (7.4 ~ 38.7) µg/m³로 장림역의 실내외 공기비는 평균 0.93 (0.77 ~1.28)로 양호한 환기수준을 보였다. 이는 스크린도어와 궤도구조, 최신 환기시스템과 공조시설로 인해 내부적인 오염원의 발생을 최소화시키기 때문이라고 판단된다.

이에 반해 시청역은 1985년 개통되어 반밀폐형 스



<Inorganic element ratio of PM-2.5>

<Concentration distribution of Inorganic element>

Fig. 12. Inorganic element ratio and Concentration distribution by component

Table 8. Correlation analysis results of PM-2.5 and Inorganic element

	PM-2.5	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
PM-2.5	1										
Mg	0.384**	1									
Al	0.462***	0.677***	1								
Si	0.479***	0.697***	0.982***	1							
Ca	0.125	0.806***	0.232	0.241*	1						
Cr	0.421***	0.131	0.066	0.073	0.058	1					
Mn	0.600***	0.352**	0.354**	0.396**	0.101	0.525***	1				
Fe	0.643***	0.378**	0.436***	0.456***	0.174	0.506***	0.645***	1			
Cu	0.068	0.100	0.302*	0.198	0.044	0.102	0.005	0.166	1		
Zn	0.329**	0.202	0.024	0.052	0.167	0.426***	0.794***	0.338**	0.015	1	
Pb	0.300*	0.187	0.172	0.138	0.103	0.415***	0.464***	0.334**	0.260*	0.405**	1

p* < 0.05 p** < 0.01, p*** < 0.001

크린도어, 자갈궤도로 설치되어 있고, 수송인원이 일 평균 11,573명으로 장림역 대비 4배 정도로 많은 편이다. 조사기간 동안 PM-2.5 중량농도 측정결과 (외기) 연산대기측정소 12.5 (6.0 ~ 26.0) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (실외)급기실 11.8 (5.6 ~ 23.0) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. (실내)지하역사는 12.4 (3.7 ~ 24.1) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 시청역의 실내외 공기비는 평균 1.05로 실외보다 실내가 더 높은 농도를 나타냈고, 공기비의 범위가 0.59 ~ 1.91로 편차가 크게 나타났다. 이는 반밀폐형 스크린도어로 인한 열차풍으로 터널 내 고농도 미세먼지의 유입 및 자갈도상에 침적된 미세먼지의 비산 등 내부적인 요소로 인해 증가

한 것으로 판단된다.⁸⁾

Fig. 14에 (실외)급기실, (실내)지하역사 승강장에서 중량법과 베타선흡수법으로 측정된 농도를 비교하여 나타내었다. 베타선흡수법은 미세먼지에 흡수되는 베타선의 양으로 농도를 자동측정하는 방법으로 현재 지하역사공기질측정망에서 측정하는 방법이고, 중량법은 시료채취기를 통해 포집된 미세먼지의 중량을 저울로 재는 방법으로 본 연구에서 측정하는 방법이다. 총 69일의 PM-2.5 농도를 비교해보면, 베타선흡수법으로 측정된 값(21.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 중량법으로 측정된 값(15.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 27.0% 높게 측정되었으나, 일평균 농도 변화

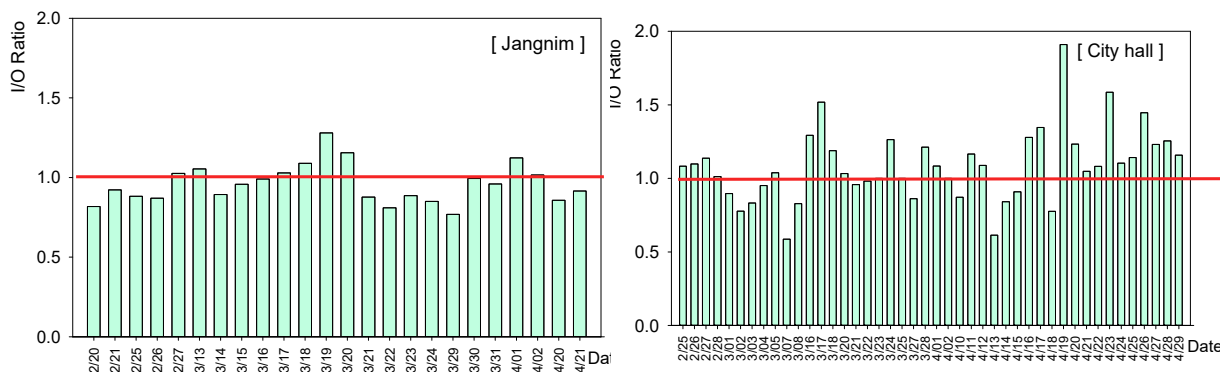


Fig. 13. I/O Ratio in indoor(Platform) and outdoor(Air supply room)

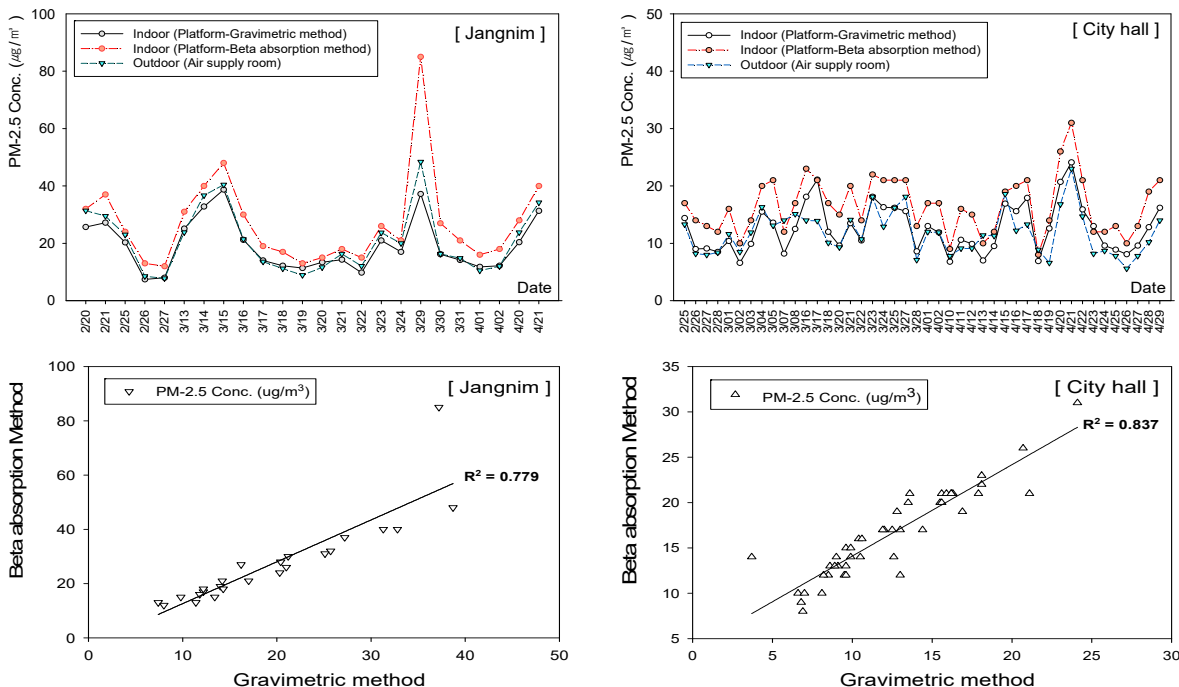


Fig. 14. Comparison of PM-2.5 concentration and correlation measured by gravimetric method and beta absorption method

는 유사하게 나타났다. 저농도나 고농도에서 측정법간의 최대 56%까지 편차가 났고, 타 연구사례^{27,28)}에서 베타선흡수법은 유입부 가운데부나 가운데조건에 따라 측정값이 과대평가되는 발생하는 경우가 많다는 결과와 유사하게 중량법 대비 대부분 양의 오차를 발생하게 나타났다. 하지만 중량법과 베타선흡수법으로 측정된 PM-2.5 농도간의 상관성을 나타낸 Fig. 14를 보면 상관계수가 0.779, 0.837로 양호하게 나타났다. 두 장비 모두 주기적인 검교정 및 정도검사를 실시하고 있으나, 이와 같은 오차가 발생할 수 있으니 측정방법간에 지속적인 비교를 통해 신뢰성 있는 데이터 확보가 필요하다.

대상역사의 (실외)급기실와 (실내)지하역사에서 각각 채취한 PM-2.5 중 주요 구성성분의 변화를 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. 이온성분, 탄소성분은 두 지점에서 비슷하게 조사되었으나, Fe 성분의 경우 장림역은 2.3%에서 5.2%로 2.5배, 시청역은 2.1%에서 6.1%로 3배 증가하는 것으로 나타나 Fe은 내부적인 발생원이 있을 것으로 판단된다. 또한 Cu 성분의 경우 장림역은 두 지점에서 비슷하게 조사되었으나, 시청역

은 0.2%에서 1.5%로 6.6배 정도 높아졌다.

Cu는 지하역사에서 전선의 마모나 레일의 마모를 통해 주로 발생하는 것으로 알려져 있다.²⁰⁾ 장림역은 실외와 실내간의 농도 변화가 거의 없었으나, 시청역은 시료채취기간 45일 중 5일(평균 1.270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 지하역사 승강장에서 급기실(평균 0.006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 212배 높은 고농도를 나타냈고, 그 외 기간(평균 0.008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 급기실 대비 비슷한 농도분포를 나타냈다. Cu가 고농도를 나타낸 기간의 시청역사 내 레일 연마나 개량공사가 없는 것으로 보아, 노후화된 시설 구조물로 열차운행으로 인한 마모가 불규칙적으로 일어난 것으로 판단된다.

2.3. 초미세먼지 농도에 따른 구성성분 비율 변화

조사기간 동안 지하역사 승강장에서 측정된 PM-2.5 중량농도의 범위에 따라 각 구성성분의 비율 변화를 Fig. 16에 나타내었다. 초미세먼지 농도가 높아지면 이온성분 비율은 점점 커졌고, 탄소성분 비율은 점점 작아지는 양상을 나타내었다. 이는 PM-2.5 농도가 증가할 때 2차 생성반응에 의해 입자가 급격히 생성되는

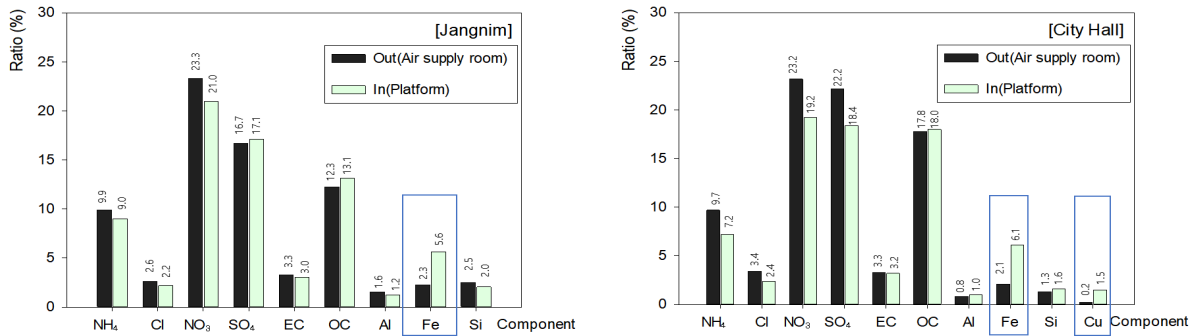


Fig. 15. Variation in the components of PM-2.5 in outdoor(Air supply room) and indoor(Platform)

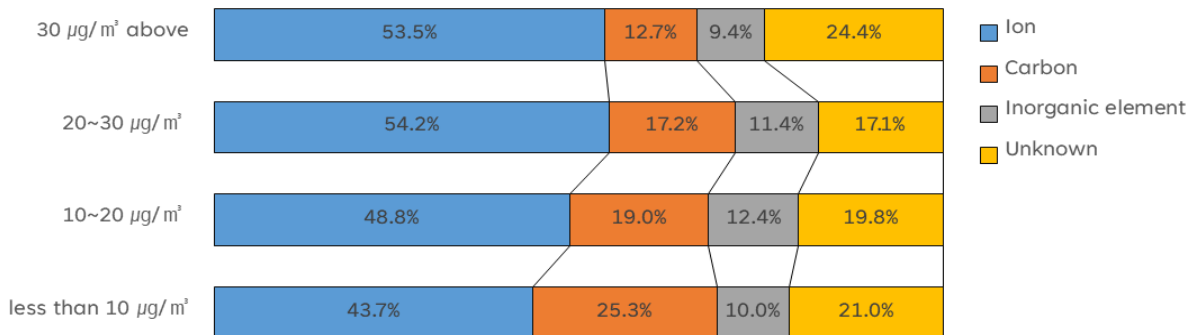


Fig. 16. Variation in component ratio according to PM-2.5 weight concentration

이온과 달리 직접 배출에 의해 증가하는 1차 입자인 EC, 1차와 2차 입자의 합으로 구성되는 OC의 농도는 상대적으로 천천히 증가하기 때문으로 판단된다.¹⁸⁾ 무기원소 역시 1차 물질로 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만을 제외하고는 PM-2.5 농도가 증가할수록 구성비율이 낮아졌다.

2.4. 고농도 발생일에 지하역사 농도 변화

고농도 발생시기의 지하역사의 PM-2.5 농도 및 화학 성분 농도 변화를 조사해보고자 미세먼지주의보 3회(3/23, 3/29, 4/17)과 초미세먼지주의보 1회(3/29) 발생한 날의 시료 채취하였던 역사의 농도 변화에 대해서 비교하였다.

사례 1. 3월 23일 (미세먼지주의보)

PM-2.5 농도변화는 (장림역) 21.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주의보 직전 7일간 평균 농도 (12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 1.7배 증가하였고, (시청역) 18.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주의보 직전 7일간 평균 농도 (12.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 1.4배 증가하였다. 화학성분 농도변화는 (장림역) NO_3^- 는 6.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3.4배 증가, NH_4^+ 는 2.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2.5배 증가, SO_4^{2-} 는 유사하게 나타났고, (시청역) NO_3^- 는 6.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3.1배 증가, NH_4^+ 는 2.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2.2배 증가, SO_4^{2-} 는 유사하게 나타났다. 두 역사에서 NO_3^- , NH_4^+ 의 농도가 유사한 변화를 나타냈으며, 두 물질간의 화학반응으로 인해 입자상 물질로 형태 전환함에 따라 PM-2.5 농도 상승에 기여한 것으로 판단된다.

사례 2. 3월 29일 (미세먼지주의보, 초미세먼지주의보)

PM-2.5 농도변화는 (장림역) 37.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주의보 직전 7일간 평균 농도 (14.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 2.6배 증가하였다. 화학성분 농도변화는 (장림역) Al 2.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 15.2배 증가, Si 3.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 15.5배 증가, Ca 0.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4.6배 증가, Mg 0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 7.3배 증가하였고, NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} 는 이전과 비슷하게 나타났으며, Al, Si, Ca, Mg 등 토양기원 성분의 영향으로 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

사례 3. 4월 17일 (미세먼지주의보)

PM-2.5 농도변화는 (시청역) 17.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주의보 직전 7일간 평균 농도 (10.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 1.6배 증가하였다. 화학성분 농도변화는 (시청역) SO_4^{2-} 는 3.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1.8배 증가, NH_4^+ 는 1.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1.8배 증가, Al 0.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4.9배 증가, Si 0.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 9.6배 증

가, Cu 1.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3배 증가 등 해당일에는 SO_4^{2-} , NH_4^+ 의 화학반응 및 토양기원 성분의 영향으로 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

2.5. 오염원 Profile 및 기여도 추정

본 연구의 대상역사인 장림역, 시청역 PM-2.5 농도와 구성성분을 바탕으로 PMF를 수행한 결과 총 4개의 오염원이 분류되었다. 각 오염원에서 발생하는 특정 원소의 농도와 분율을 바탕으로 오염원을 확인하였고, 각각의 오염원 기여도를 추정하였다. 산출된 각 오염원에 대한 명명과 확인은 EPA의 Speciate 5.1 Source profile browser와 국내의 문헌을 참고하여 작성하였다. PMF 모델을 통해 산출된 오염원의 농도와 분율의 결과는 Table 9에 나타내었고, 오염원 분류 표(Profile)와 오염원별 기여도는 Fig. 17와 Fig. 18에 나타내었다. 그 결과는 Road movement and Road dust (40.2%) > Secondary aerosol (38.4%) > Soil (15.2%) > Sea salt (6.2%) 순으로 나타났다. 본 자료를 이용하여 모델링을 수행하고 얻은 예측한 PM-2.5 농도와 실측한 농도와의 관계를 Fig. 19에 나타내었고, 예측치와 실측치 사이의 상관관계수 r^2 값은 0.89로 양호한 결과를 나타냈다.

첫 번째 오염원(Secondary aerosol)은 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 등의 분율이 높게 나타나 2차 에어로졸에 의한 오염원으로 판단되며, 본 오염원은 PM-2.5에 38.4% 기여하는 것으로 분석되었다. 2차 질산염은 가스상의 화학반응을 통해 생성되는 오염원이기 때문에 연소 등의 발생원에서 방출된 NOx 등이 암모니아와 결합하여 질산염 형태로 존재하며, 황산염은 광화학반응을 일으켜 2차 입자 형성되어 존재하는 물질이다.¹⁴⁾

두 번째 오염원(Sea salt)은 주요 기여물질이 Na^+ , Cl^- 로 해염입자의 주성분으로 본 연구에서 해염에 의한 PM-2.5 기여도는 6.2%로 나타났다.

세 번째 오염원(Road movement and Road dust)은 OC, EC, Zn, Pb, Fe, Cr, Mn의 분율이 높게 나타나 도로이동 및 도로먼지 관련 배출원으로 분류하였다. OC와 EC는 본 오염원의 대표적인 기여물질이며, Fe는 가솔린 차량에서 사용하는 촉매제와 브레이크 라이닝 마모시 배출되고, Zn은 타이어 마모로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다.²⁶⁾ 본 오염원은 PM-2.5에 40.2% 기여하는 것으로 분석되었다. 또한, 앞서 지하역사 성분조사에서 승강장의 Fe, Cu의 농도가 외기보다 높게 측정된 것으로 보아, 외부의 도로이동 및 도로

먼지외에도 내부적인 요인(브레이크 마모 등)에 의한 영향도 있는 것으로 판단된다.

네 번째 오염원(Soil)은 주요 토양 기원물질인 Al, Si, Ca, Mg이 주로 기여하는 것으로 높은 분율을 나타

내었다. 토양입자는 도로 및 건설공사 현장과 같은 발생원으로부터 대기 중으로 재비산 되는 것²⁵⁾으로 판단되며, 본 오염원은 PM-2.5에 15.2% 기여하는 것으로 분석되었다.

Table 9. Average source concentration and contribution

Source	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Contribution (%)
Secondary aerosol	5.561	38.4
Sea salt	0.891	6.2
Road movement & Road dust	5.809	40.2
Soil	2.204	15.2
Total	14.465	100

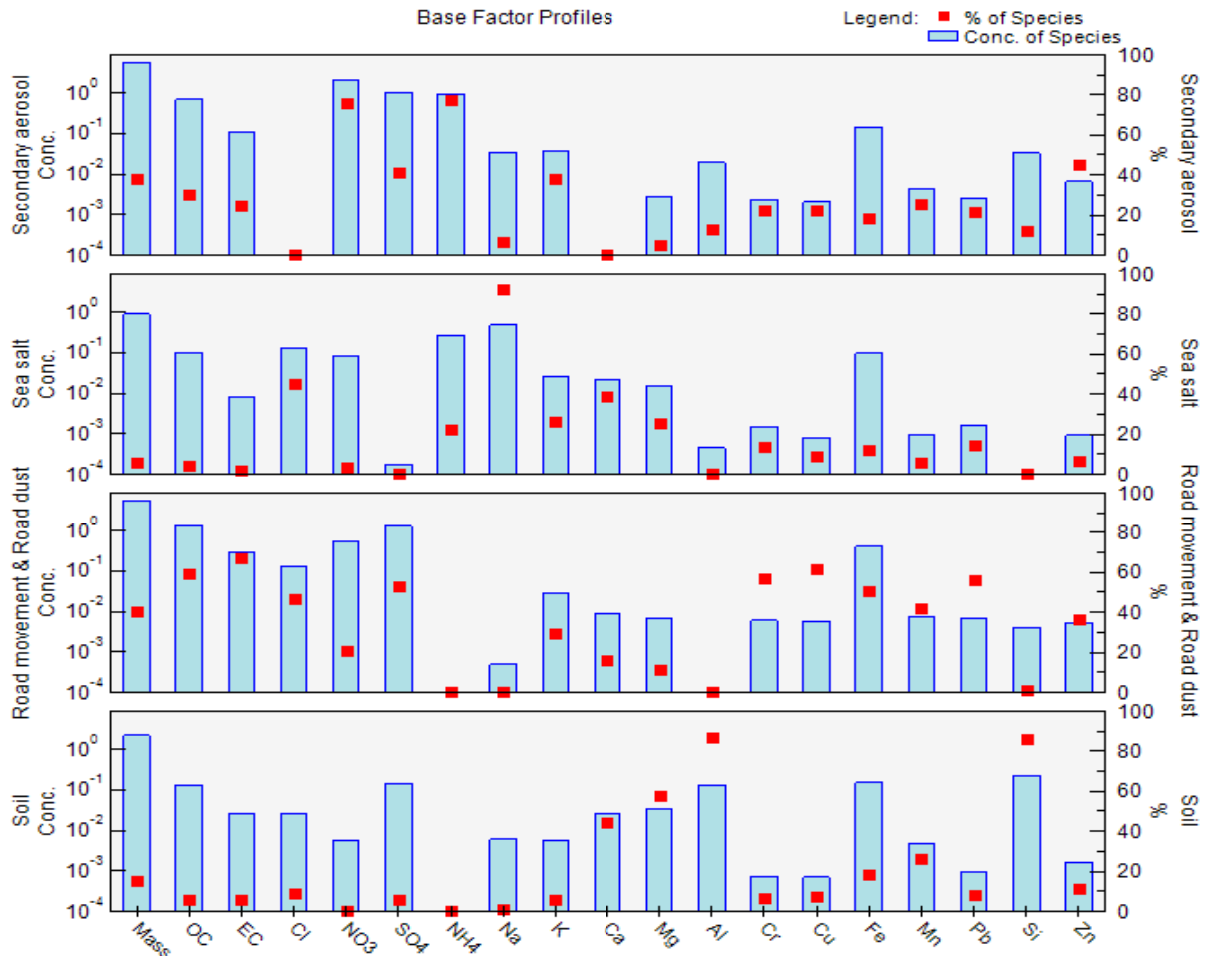


Fig. 17. Source profiles resolved from PM-2.5 in this study

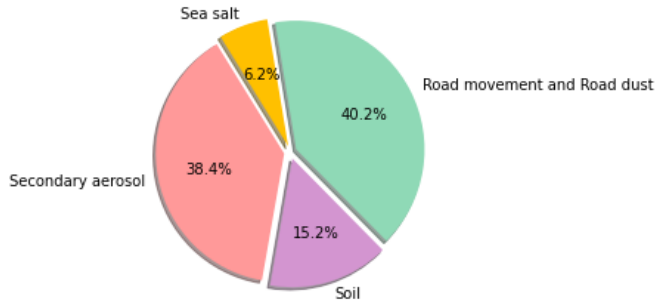


Fig. 18. Average source contribution of PM-2.5 estimated by PMF model

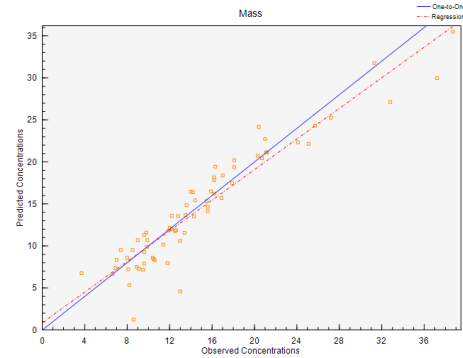


Fig. 19. Comparison of measured and predicted PM-2.5 mass concentrations

결론

본 연구는 부산지역 지하역사 공기질 자동측정기가 설치된 91개 지하역사의 PM-2.5 농도분포 특성을 조사하고, 1호선 2개 역사를 대상으로 PM-2.5의 화학적 조성을 분석하였다. 또한, 그 결과를 바탕으로 PMF 모델을 이용한 오염원 확인 및 오염원별 기여도 분석을 수행한 내용은 다음과 같다.

- 91개 지하역사의 평균 농도는 $18.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 유지 기준($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 36% 수준으로 1호선($22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 3호선($17.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 2호선($16.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 4호선($15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났다. 또한 I/O Ratio는 1호선(1.35) > 3호선(1.12) > 2호선(1.09) > 4호선(0.96) 으로 조사기간 동안 시설 노후화로 지속적인 개량공사가 진행 중인 1호선의 실내공기질 관리가 원활하지 않은 것으로 나타났다.
- 계절별로는 겨울철($22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 봄철($19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름철($15.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을철($14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났다. 이는 겨울철과 봄철에 높은 외기의 영향으로 지하역사내 높은 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 시간대별로는 출퇴근시간대 높은 농도를 나타냈고, 특히 1호선 오전 9시 시간평균농도가 $27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타냈다.
- 스크린도어(PSD) 밀폐형 설치역사는 외기의 농도와 지하역사의 농도가 비슷하게 조사되었으나, 반밀폐형 설치역사는 지하역사의 농도가 외기대비 1호선 66% 상승, 2호선 12% 상승하였다. 또한 1호선 자갈도상 26개 지하역사의 농도가 외기대비 49% 상승하였다. 이처럼 지하역사에서 초미세먼지의 발생 최소화를 위해 PSD 반밀폐형 역사와 자갈도상 구간의 역사의 시설개량이 필요할 것으로 판

단된다.

- 지하역사 PM-2.5 중 화학적 조성을 분석한 결과, 이온(55.1%) > 탄소(18.1%) > 기타(15.5%) > 무기원소(11.3%) 순으로 나타났다. PM-2.5 중 이온성분은 이온만 100%로 볼 때, NO_3^- $3.217 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (36.9%) > SO_4^{2-} $2.791 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (32.0%) > NH_4^+ $1.314 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (15.0%) 순으로 높은 비율을 차지하고 있다. PM-2.5와 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 은 상관계수가 0.677, 0.750, 0.761로 유의성 있는 양의 상관관계를 나타냈다.
- PM-2.5 중 탄소성분은 탄소만 100%로 볼 때, OC $2.382 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (82.8%) > EC $0.494 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (17.2%)의 비율을 차지하고 있다. EC는 조사기간 동안 비슷한 농도로 측정되었고, OC는 외기 중에서 기체상 유기화합물이 광화학반응에 의해 입자상 물질로 변환되어 생성되는 2차 오염물질로 초미세먼지 중 차지하는 비중이 크게 나타났다.
- 전체 무기원소를 100%로 볼 때 Fe $0.924 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (51.6%) > Si $0.297 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (16.6%) > Al $0.180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (10.1%) 순으로 높은 비율을 차지하고 있다. Fe은 열차와 레일사이의 마찰로 인해 발생하는 것으로 (실외)급기실에서 측정된 결과보다 평균 2.7배 농도가 증가하였다. 토양관련 오염원(Al, Si)은 주로 지하역사 이용객에 의해 내부로 유입되는 경우와 외기를 도입하는 환기설비를 통하여 도로 분진이나 토양성분이 유입에 의한 것으로 판단된다. 발생량이 적고 농도는 미량이지만 다른 구성성분에 비해 인체위해성이 있으므로 관리가 필요하다.
- (실외)급기실과 (실내)지하역사 승강장의 PM-2.5 농도 및 구성성분을 비교해보면 장림역의 I/O Ratio가 평균 0.93(0.77 ~ 1.28)로 양호한 환기수준

을 보였고, 시청역은 I/O Ratio가 평균 1.05(0.44 ~ 1.91)로 편차가 크게 나타났다. 또한, 이온성분 및 탄소성분은 실내외 비슷하게 조사되었고, Fe은 지하역사 승강장에서 2.5 ~ 3배 증가하였고, Cu은 시청역 지하역사 승강장에서 6.6배 높게 검출되었다.

8. PMF 모델을 이용하여 지하역사 PM-2.5에 대한 오염원 확인 및 오염원별 기여도를 분석한 결과, Road movement and Road dust(40.2%) > Secondary aerosol(38.4%) > Soil(15.2%) > Sea salt (6.2%) 순으로 나타났다. 도로이동 및 도로먼지는 OC, EC, Zn, Pb, Fe, Cr, Mn의 분율이 높게 나타났고, 2차 에어로졸은 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 이 주로 기여하는 것으로 나타났고, 토양은 Al, Si, Ca, Mg 등 토양 기원물질의 분율이 높게 나타났고, 해염은 Na^+ , Cl로 해염입자의 분율이 높게 나타나 오염원으로 분류하였다.

1년간 지하역사 공기질 측정망과 대기측정망 PM-2.5 측정값을 비교 및 지하역사 PM-2.5 중 화학적 조성에 대해 조사한 결과, 외기와 지하역사 승강장의 농도가 유사하게 변동하고 있었고, 외기와 상관성도 평상시 0.79, 고농도시 0.91로 높게 나타나며 지하역사의 공기질에 외부적인 요인의 영향이 상당히 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 내부적인 요인은 스크린도어 형태(반밀폐형, 밀폐형)나 궤도구조(자갈도상, 콘크리트 도상)에 따라 농도분포가 다르게 나타난 것으로 보아 환기방법 개선 뿐만 아니라 시설의 개량을 통해서도 상당 부분 공기질이 개선될 것으로 판단된다. 성분조사에서 (실내)지하역사 승강장이 (실외)급기질의 구성과 다르게 나타났던 Cu, Fe등 거동이 명확하지 않은 물질에 대해서는 내부적인 요인에서의 오염물질의 거동을 규명할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한, 효과적인 지하역사 초미세먼지 관리방안을 마련하기 위해서 장기적인 분석자료 확보를 통해 PMF 수용모델을 이용한 오염원 추정 및 예측하는데 도움이 되리라 판단된다.

참고문헌

- 이형돈, 서울시 지하철 미세먼지 특성분석 및 양방향전기집진기 성능평가, 한국유체기계학회지 제23권 제2호 (2020)
- 이진숙, 인천지역의 초미세먼지에 대한 오염특성 평가, 인천보건환경연구원 (2021)
- 구태완, PMF 모델을 이용한 도심지역 PM2.5 오염원 기여도 분석, 한국응용과학기술학회지 제36권 제3호 (2019)
- 박기형, 부산지역 미세먼지(PM-2.5)의 발생원 기여율 추정에 관한 연구, 부산보건환경연구원(2014)
- 환경부, 제3차 지하역사 공기질 개선대책 (2018~2022)
- 환경부, 실내공기질관리법 (2021)
- 박슬바첸나, 서울시 지하철역에서 PM10의 화학적 특성과 오염원의 확인 및 기여도 추정, 한국대기환경학회지 제29권 제1호 (2013)
- 김인원, 지하역사 내 스크린도어 설치에 따른 미세먼지 농도 저감 효과, 한국공기청정협회 제23권 제2호 (2010)
- 임봉빈, 서울시 지하철역 실내오염물질 농도자료의 통계분석을 통한 실내공기질 특성 평가, 한국대기환경학회지 제30권 제3호 (2014)
- 조진경, 경기도내 지하철역 실내공기질 특성 평가, 한국내새환경학회 제20권 제2호 (2021)
- 전병일, 부산지역 지하철역의 최근 3년간 (2015~2017년) PM10과 PM2.5 농도 특성, 한국환경과학회지 제28권 제7호 (2019)
- 황성호, 지하철역사의 호선별로 미세먼지의 노출 특성에 대한 평가, 한국환경보건학회지 제43권 제1호 (2017)
- 국립환경과학원, 미세먼지(PM2.5) 성분분석 가이드라인 (2014)
- 허종원, PMF 수용모델 적용 및 포천/평택 미세먼지 기여율 산정, 경기도보건환경연구원(2020)
- EPA, EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide (2014)
- 황인조, 수용모델의 국내외 연구동향과 대기질 관리를 위한 발전방향, 한국대기환경학회지 제29권 제4호 (2013)
- 손운석, 부산 지하철 내 미세먼지의 시·공간적 특성, 한국대기환경학회지 제36권 제5호 (2020)
- 서울시보건환경연구원, 2019년 서울시 초미세먼지 성분분석보고서 (2019)
- 박황수, 지하철 역사내 공간 구획에 따른 미세먼지 질량 및 이온성분 분포에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문 (2010)
- 고현기, PMF 모델을 이용한 수도권 지하철에서의

- PM10 및 PM2.5 오염원 확인과 기여도 추정, (2011)
21. 류성민, 지하철 지하 구간 도상형태에 따른 터널 내 공기질 비교분석에 대한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문 (2018)
 22. 도화석, 대구지역 지하철역사 공기여과필터 포집 먼지에 함유된 중금속성분의 특성평가, 대한 환경 공학회지 제31권 1호 (2009)
 23. 손운석, 지하철 미세먼지 포집을 위한 기술적 진보, 한국공업화학회지 제21권 제2호 (2019)
 24. 유숙진, 2020년 부산지역 다중이용시설 초미세먼지 농도 특성 및 위해성 평가, 부산보건환경 연구원 (2020)
 25. 이가혜, 다변량 통계 분석과 PMF모델을 이용한 대기 중 초미세먼지(PM2.5) 오염원 확인 및 기여도 추정, 경희대학교 석사학위논문(2021)
 26. 국립환경과학원, 미세먼지의 국내외 기여율 산정 및 수용모델 적용 가이드라인 마련(Ⅱ) (2017)
 27. 국립환경과학원, PM2.5 자동측정장비 비교 및 정도관리 방안, 한국대기환경학회지 제33권 6호 (2017)
 28. 이복진, 중량법과 베타선 흡수법을 이용한 온라인 광산란 미세먼지 측정기의 PM10과 PM2.5의 정확도 평가, 한국대기환경학회지 제35권 제3호 (2019)