

ORIGINAL ARTICLE

부산지역 지하역사의 최근 3년간(2015~2017년) PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 특성

전병일*

신라대학교 에너지화학공학부

Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations at Subway Stations in Busan for 3 years (2015~2017)

Byung-Il Jeon*

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

Abstract

This research investigated the characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations at the main subway stations in Busan. Annual mean PM₁₀ concentrations at the Seomyeon 1- waiting room and platform were 51.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 47.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, and the annual PM_{2.5} concentration at the Seomyeon 1- platform was 28.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. PM_{2.5}/PM₁₀ ratio at Seomyeon 1-platform and Dongnae station were 0.58 and 0.53, respectively. Diurnal variation of PM₁₀ concentration at subway stations in Busan was categorized into four types, depending on the number of peaks and the times at which the peaks occurred. Unlike the areas outside of the subway stations which reported maximum PM₁₀ concentration mostly in spring across the entire locations, the interiors of the subway stations reported the maximum PM₁₀ concentration in spring, winter, and even summer, depending on their location. PM₁₀ concentration was highest on Saturday and lowest on Sunday. The numbers of days when PM₁₀ concentration exceeded 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ per day over the last three years at the subway stations in Busan were 36 and 239, respectively. The findings of this research are expected to enhance the understanding of the fine particle characteristics at subway stations in Busan and be useful for developing a strategy for controlling urban indoor air quality.

Key words : PM₁₀, PM_{2.5}, Subway station, Waiting room, Platform

1. 서론

부산의 대표적인 대중교통수단인 지하철은 4개 노선 115.8 km가 설치되어 총 114개역이 운영되고 있으며, 지속적으로 노선이 확장되고 있다. 궤도 위를 달리는 지하철은 일반 도로 위의 자동차와는 달리 정확하고 빠르고 안전한 교통수단으로 많은 장점을 가지고 있어 대중교통

에서 차지하는 비중이 점점 증가하고 있다(Yim et al., 2014). 1985년 7월 범내골에서 범어사까지 1호선 구간이 최초로 개통하여 운행을 시작한 부산 지하철은 2016년 기준으로 1~4호선의 승차 승객수는 일평균 89만명에 달한다. 이중 50%에 달하는 44만 8천명은 1호선을 이용한 승객이며, 2호선이 36.1%, 3호선이 10.3%, 4호선이 3.3%를 차지하고 1호선과 2호선의 환승역인

Received 7 May, 2019; Revised 27 May, 2019;

Accepted 12 June, 2019

*Corresponding author: Byung-Il Jeon, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

Phone : +82-51-999-5056

E-mail : bijeon@silla.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서면역의 이용객이 일평균 6만 5천여명으로 가장 많다. 1호선이 개통한 1989년부터 2016년까지 부산 도시철도의 승차기준 승객수는 9만 9천명에서 거의 10배 수준으로 증가하였으며, 개통 초기 5~6%대에 불과했던 수송 분담율이 2016년 현재 18%를 돌파하였고 점차 증가 추세에 있다(Busan Transportation Corporation, 2017).

지하역사는 시설 확충과 지하철 운행거리 및 운행 횟수가 증가함으로써 어린이와 노약자를 비롯한 불특정 사람들이 자주 이용하는 대표적인 다중이용시설이다. 이러한 지하역사는 폐쇄된 공간환경으로 인한 고농도의 미세먼지는 인간의 건강에 악영향을 미쳐 심장혈관질환, 폐 손상 그리고 신경퇴행성 질환을 일으킬 수 있다(Campbell, 2004). 특히 터널 내 열차의 운행, 환기를 위한 외기 유입, 이용자들의 왕래 및 지하에 위치한 점포 등 오염물질의 발생 및 유입을 예상할 수 있다(Yim et al., 2014).

지하철 역사에서의 미세먼지 특성에 대한 연구는 서울 지하철을 대상으로 한 연구가 대부분을 차지한다. Namgung et al.(2016)은 승강장과 대합실이 지하에 위치한 지하역사와 승강장이 외부로 노출되어 있는 지상역사에서 외부 공기의 영향을 평가하였다. Yim et al.(2014)은 2008년 1월부터 2012년 12월까지 4년간 지하철 4호선에 위치한 지하역사를 대상으로 대합실, 승강장, 터널유입부 및 외기에서 1시간 평균농도 자료를 이용하여 통계적으로 분석하였다. Park et al.(2013)은 지하철 역사내 PM₁₀의 오염거동을 정량적으로 비교 분석하기 위해 2010년과 2011년에 걸쳐 4호선 M역에서 4계절을 대상으로 외기, 승강장, 역사내 터널, 역사간 터널 등에서 측정을 실시하였다. Park et al.(2005)은 지하철 1, 2, 4, 5호선을 대상으로 2005년 1월중 3일간 호선별로 1회씩 일정구간의 객차와 승강장에서 PM₁₀과 PM_{2.5}를 조사하여 지하철의 운행특성과 장소별로 특성을 비교 평가하였다. Lee et al.(2015)은 지하철 시스템 내 PM의 오염도 및 거동 특성을 평가하기 위해 지하철 4호선 M역을 선정하여 2010년부터 2013년까지 PM₁₀과 PM_{2.5}를 동시에 측정하여 분석하였다. Lee et al.(2016)은 열차 내부 농도에 영향을 미치는 지하철 터널 내 PM의 오염도 및 특성을 평가하기 위해 지하철 2호선 본선 구간의 입자상물질 농도 특성 및 미세분진의 오염지도를 개발하였다. Yu et al.(2015)은 대규모 환승역인 왕십리 역사 내의 4개의 지하철 호선(2호선, 5호선, 중앙선, 분당선)

의 오염현황을 스크린의 개방여부, 유동인구상황, 플랫폼의 깊이, 주중/주말 특성을 중심으로 평가하였다. Hwang et al.(2017)은 2014년 5월부터 2015년 9월까지 지하철 역사 면적, 건설 연도, 역사 깊이, 승객수와 같은 지하역사 특성을 고찰하기 위해 지하철 100개 역사를 선정하여 미세먼지를 측정하였다. Son et al.(2013)은 지하철 승강장 스크린 도어의 설치가 PM₁₀ 농도에 미치는 영향과 터널 내부의 PM₁₀ 농도에 환기 시스템의 효과를 조사 평가하였다. Kim et al.(2008)은 2004년 11월부터 2005년 2월까지 지하철 1~4호선의 8개 지상역사와 14개 지하역사의 대합실, 매표소, 휴게실, 승강장, 객차 내에서 PM₁₀과 PM_{2.5}를 측정하여 공간적인 분포를 조사하였다.

부산 지하철 역사에서의 미세먼지 연구는 매우 미약하나, Kim et al.(2009)은 2008년 10월부터 2009년 9월까지 1년간의 부산도시철도 3호선 역사 중 가장 이용객이 많은 수영역, 연산역, 미남역, 덕천역의 대합실에 구축 운영 중인 실내공기질측정망과 도로변 측정소 2개소(온천동, 초량동), 도시대기오염측정소 2개소(전포동, 연산동)을 선정하여 대기오염도 수준을 비교 평가한 바 있다. 그리고 Kwak et al.(2011)은 도시철도 1, 2, 3, 4호선 전동차 객실을 대상으로 춘계와 하계, 동계로 구분하여 실내공기질 측정방법에 따라 혼잡도와 평상시로 구분하여 시료를 채취하여 특성을 평가하였다.

그러나 현재 측정중인 모든 부산지역 지하역사에서 몇 년간의 미세먼지 농도 자료를 이용하여 지하역사의 시간적 공간적 미세먼지 특성을 고찰한 연구는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 3년간 부산지역 주요 지하역사의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도자료를 이용하여 미세먼지의 특성을 체계적으로 고찰하였다. 본 연구 결과는 유동인구가 많은 지하역사 내의 실내공기질을 적정하게 유지하여 시민의 건강보호 및 환경상의 위해를 예방할 수 있고, 또한 효율적인 실내공기질 관리를 위해 과학적인 측정 자료를 근거로 시정정책 방향 수립, 시민들의 환경관심 유도과 알권리를 충족할 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

부산지역 지하역사의 미세먼지 농도 특성을 고찰하기

Table 1. Annual mean of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration observed at Busan subway station for 3 years (2015~2017)

Station	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	2015	2016	2017	Mean	2015	2016	2017	Mean
Nampo	52.7±14.1	45.6±13.3	44.0±12.0	47.5±13.7			26.4±9.2	26.4±9.2
Deokcheon	51.3±20.9	49.3±18.3	37.5±11.9	45.9±18.4				
Dongnae	36.1±13.1	36.2±10.8	36.0±10.0	36.1±11.4	17.7±7.6	19.6±7.8	19.8±8.3	19.0±8.0
Minam	41.1±19.1	37.7±17.0	30.5±12.0	36.4±16.8				
Sasang	37.6±13.8	32.4±11.1	33.2±8.6	34.4±11.6			14.4±4.5	14.4±4.5
Seomyeon 1-W*	53.0±15.1	48.9±13.3	46.9±11.4	49.6±13.6	30.3±10.0	27.7±14.0	28.3±10.2	28.8±11.6
Seomyeon 1-P**	53.9±17.6	53.8±15.0	46.0±14.0	51.3±16.0	26.1±10.4	30.5±11.8	24.9±11.4	27.2±11.5
Seomyeon 2-W	47.9±15.3	46.5±14.3	42.7±11.2	45.6±13.8			24.6±8.8	24.6±8.8
Seomyeon 2-P	45.0±13.9	41.4±15.1	38.2±14.6	41.4±14.8			25.1±11.4	25.1±11.4
Suyeong	35.0±12.7	38.2±14.2	32.4±12.7	35.2±13.4				
Yeonsan	37.9±14.8	38.8±14.3	28.1±9.4	34.9±13.9				

*Waiting room **Platform

가능하다. 전동차가 무인운영방식으로 운용되므로 운전실이 없으며 승객이 전동차의 앞 뒤를 자유롭게 볼 수 있고, 영업 총연장 12.0 km 구간이며, 모두 14개역이 운영 중이다.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 부산지역 주요 지하철역에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 농도를 나타낸 것이다. 가장 높은 PM₁₀ 농도를 나타낸 지점은 서면 1호선의 승강장으로 51.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 두 번째는 서면 1호선의 대합실로 49.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 다음으로 남포동이 47.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 가장 낮은 농도를 보인 지점은 사상역으로 34.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 지점과 16.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보였다. 최근 3년간의 농도추이를 보면, 동래역은 거의 변화가 없었으며, 수영역과 연산역은 2016년에 가장 높았으나, 그 외의 모든 지점은 2015년부터 최근(2017년)까지 점차 농도가 낮아지는 추세를 보였다. 특히 덕천역과 미남역의 감소폭이 각각 13.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 10.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 컸으며, 전반적으로 부산시 지하철역의 PM₁₀ 농도는 매년 감소하고 있는 것으로 나타났다. 최근 3년간의 PM_{2.5} 농도 자료가 있는 동래역, 서면 1호선 대합실과 승강장의 농도를 보면, PM₁₀ 농도와는 달리 서면 1호선 대합실이 28.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 다음이 서면 1호선 승강장이 27.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 동래역

은 19.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 2017년만의 자료를 보면, 남포동이 26.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 서면 1호선 대합실과 비슷한 농도를 나타내었다. 3년간의 변화추세를 보면, 동래역은 최근까지 소폭이나마 농도가 증가하고 있으며, 서면 1호선 대합실과 승강장은 뚜렷한 추세를 보여주지 못했다. 지하철역에서 미세먼지 농도에 영향을 미칠 수 있는 오염원으로는 ① 지하철 이용 승객들의 이동 중 발생하는 미세먼지, ② 열차의 운행에서 배출되는 미세먼지, 그리고 ③ 환기를 위해 도입되는 외부 공기 속에 포함된 미세먼지 등이 대표적이라고 할 수 있다(Choi et al., 2004).

Fig. 2는 부산지역 주요 지하철역에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 연평균 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비를 나타낸 것이다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 PM₁₀ 중에 포함된 PM_{2.5}의 기여율을 알아본다는 의미에서 매우 가치가 있다고 판단된다. 서면 1호선 대합실이 가장 큰 0.58을 나타내었으며, 동래역과 서면 1호선 승강장이 0.53이었으며, 동래역과 서면 1호선 대합실은 매년 농도비가 증가하는 추세를 보여주고 있다. 홍콩의 지하철의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.72~0.78로 비교적 높았으며, 지하철에서 발생하는 PM_{2.5}의 주요 발생원은 외부대기에서 유입되는 자동차 연소 배출물로 이동거리를 통해 지하철 내부로 투입되어 무거운 입자는 도중에 낙하되거나 제거되고 상대적으로 입자크기가 작은 입자가 지하까지 유입되어 PM_{2.5}의 비율이 높은 원인 중이 하나라고 하였다(Chan et al., 2002). 지하철로 유입되는 PM의 근원은 지하철 입구와

출구 그리고 환기장치로서 외부공기가 들어오는 환기장치의 위치의 적정성, 정화장치(필터 등)의 성능을 평가할 필요가 있다(Park et al. 2005). 타이완의 지상과 지하 승강장에서 PM_{2.5}/PM₁₀비는 각각 0.75와 0.67~0.78이었으며(Cheng et al., 2008), 미국 LA의 지상과 지하 승강장에서의 비는 0.76과 0.73이었다(Kam et al., 2011). Park and Ha(2008)는 서울 지하철 지상과 지하의 승강장에서의 비는 0.94와 0.81이었고, Kim et al.(2008)은 지상과 지하의 비가 0.39와 0.36로 상당히 다른 결과를 보여 주었는데, 이런 차이는 지하철 시스템의 다른 환경적인 조건에 의한 것이라고 하였다. 부산 지역의 지하역사의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 부산지역 대기오염자동측정망에서 측정된 실외의 2011년과 2012년 평균 PM_{2.5}/PM₁₀ 비인 0.57~0.70에 비해 다소 낮은 값을 나타내었다(Jeon and Hwang, 2014).

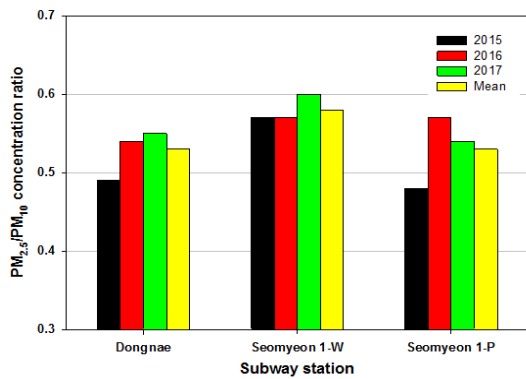


Fig. 2. PM_{2.5}/PM₁₀ concentration ratios Busan subway station for 3 years (2015~2017).

Fig. 3은 부산지역 지하역사에서 가장 유동인구가 많은 서면 1호선과 2호선의 대합실과 승강장에서 PM₁₀와 PM_{2.5}의 상관관계를 나타내었다. 서면 1, 2호선 대합실은 개찰구가 있는 지하 1층에 위치하여 승하차하는 승객과 서면 지하상가를 이용하는 쇼핑객들이 이동하는 공간이라고 할 수 있다. 서면 1호선 승강장은 지하 2층, 서면 2호선 승강장은 지하 3층에 승객이 객실에서 승하차하는 곳에 위치하고 있다. 두 승강장은 스크린 도어가 모두 설치되어 있기 때문에 전동차에 의한 영향은 미미할 것으로 보인다. 그림 3-(a)(b)는 서면 1호선 대합실과 승강장에서 측정된 PM₁₀와 PM_{2.5}의 상관관계를 나타낸 것

이다. 1호선의 대합실과 승강장 사이의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 상관계수는 각각 0.88와 0.81이었고, 그림 3-(c)(d)의 2호선 대합실과 승강장 사이의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 상관계수는 각각 0.88과 0.91이었다. 2호선의 대합실과 승강장의 PM_{2.5}는 2017년 1년간의 자료로 한계가 있지만 0.91의 높은 값을 나타내었다.

Table 1에서 서면 1호선과 2호선의 승강장의 PM₁₀ 농도가 각각 51.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 41.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 1호선 승강장이 2호선보다 9.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았는데, 이는 1호선 승강장이 지하 2층에, 2호선 승강장이 지하 3층에 위치하여 지하철 이용객수의 차이 외에도 측정소 깊이에 따른 지상의 외부 배출원 도달이 상대적으로 작아서 낮은 농도를 보였을 가능성이 있다(Yu et al., 2015).

Fig. 4는 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 PM₁₀ 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 11개 지점에서 측정된 자료를 peak가 나타내는 개수와 시점을 중심으로 분석한 결과, 다음과 같이 네 개의 type으로 분류할 수 있다. 먼저, 아침에 peak가 나타난 다음 지속적으로 농도가 감소하는 type(Fig. 4a), 두 번째로 하루 중 오전과 저녁에 두 번의 peak가 나타나는 type(Fig. 4b), 세 번째로 하루 중 오전과 오후 그리고 저녁에 세 번의 peak가 나타나는 type(Fig. 4c), 마지막으로 오전부터 저녁까지 특별한 peak 없이 톱니바퀴같이 들쭉날쭉하게 고농도를 유지하는 type(Fig. 4d)으로 나눌 수 있다.

첫 번째 type(Fig. 4a)은 연산역과 미남역 그리고 서면 2호선 승강장에서 나타났는데, 서면 2호선 승강장의 경우, 0700 LST에 54.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최대 농도를 나타낸 후 지속적으로 감소하여 오전과 오후 중에 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 전후의 농도를 유지하다가 1900 LST 이후 급격히 농도가 감소하였다. 미남역과 연산역 역시 0800 LST와 0900 LST에 각각 41.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 37.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타낸 후 지속적으로 감소하는 형태를 보이고 있다. 이 type에 해당하는 연산역, 미남역, 서면 2호선 승강장은 출근 시간대에 환승하는 이용객으로 인해 PM₁₀ 농도가 급작스럽게 증가했다고 판단되며, 퇴근시간대에도 약간의 농도 증가가 있지만 미미한 상태이었다. 두 번째 type(Fig. 4b)은 동래역과 덕천역 그리고 서면 1호선 대합실에서 나타났는데, 서면 1호선 대합실의 경우, 출근 시간대인 0800 LST와 퇴근 시간대인 1900 LST에 각각 55.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 62.2

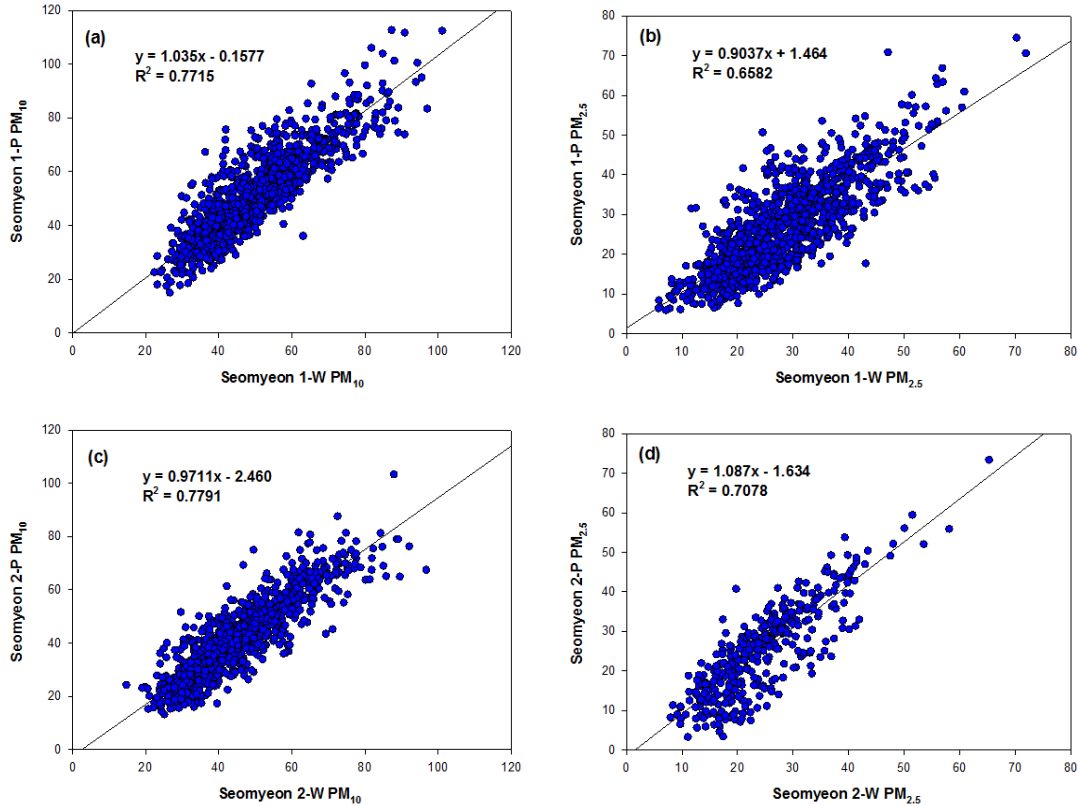


Fig. 3. Scattering diagram of PM₁₀ and PM_{2.5} between Seomyeon 1 line waiting room and platform, and between Seomyeon 2 line waiting room and platform for 3 years (2015~2017).

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내 전형적인 도시형 형태를 보여주고 있다. 덕천역은 0800~1000 LST와 2000 LST에, 동래역은 0900 LST와 1900 LST에 두 번의 peak를 보여주고 있다. 이 type이 나타난 동래역, 덕천역, 서면 1호선 대합실은 출·퇴근 시간대의 이용객이 뚜렷하다는 것을 나타내고 있다. 다른 지점에서 출·퇴근 시간대에 농도의 증가가 있지만 이 type에서 탁월하게 나타나고 있다.

세 번째 type(Fig. 4c)은 사상역과 수영역 그리고 서면 2호선 대합실에서 나타났는데, 서면 2호선 대합실의 경우, 0700 LST에 $49.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1100 LST에 $53.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 1900 LST에 $50.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 세 번의 peak를 나타내고 있다. 사상역은 0800 LST, 1400 LST, 1900~2000 LST에 peak를 나타내었고, 수영역은 1000 LST경과 1600 LST경 그리고 2100~2200 LST에

peak를 나타내었다. 이 type은 출·퇴근 시간대 외에 한번 더 peak가 나타나는 것으로 출·퇴근 승객 외에 지하상가 또는 지상상가 그리고 실외 버스터미널을 이용하는 사람들로 인한 영향으로 판단된다. 특히 사상역은 부산외곽으로 가는 시외버스를 이용하는 승객과 터미널 주변의 쇼핑물을 이용하는 사람들에 의한 영향으로 판단된다.

네 번째 type(Fig. 4d)은 남포역과 서면 1호선 승강장에서 나타났는데, 두 지하역사 모두 0900 LST부터 2100 LST까지 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도가 상승과 감소를 5~6회 정도 나타나고 있다. 이 type은 사람들이 활동하는 출근시간부터 퇴근시간에 걸쳐 지속적으로 고농도를 유지하는 형태로서 남포역과 서면 1호선 승강장은 하루 종일 사람들이 붐빈다고 할 수 있다. 특히 남포역은 남포지상가와 대합실을 공유하고 있고, 서면 1호선 승강장은

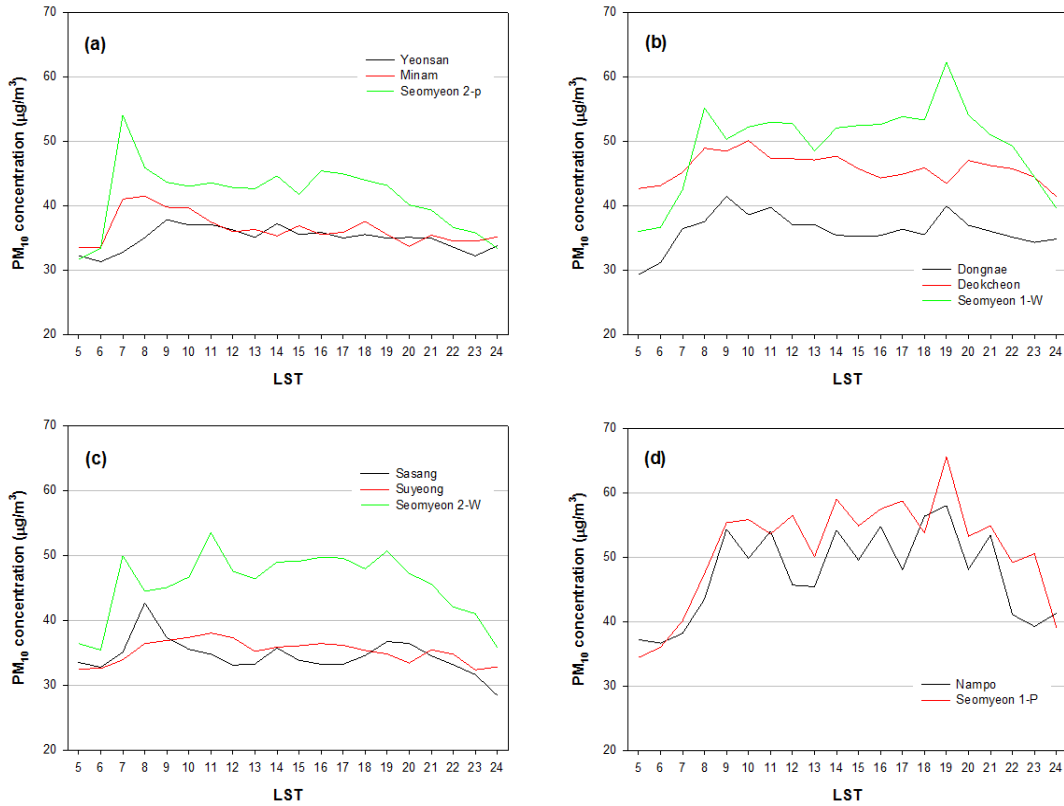


Fig. 4. Diurnal variation of PM₁₀ concentration at Busan subway station for 3 years (2015~2017).

부산지역 지하역사 중에서 가장 승하차 인원이 많은 역이다.

Fig. 5는 부산지역 도시철도 주요 지하역사의 2017년도 이용 승객수(승·하차)의 일변화를 나타낸 것이다 (Busan Transportation Corporation, 2018). 대부분의 지하 역사에서 출근 시간인 0800~1000 LST와 퇴근 시간인 1800~1900 LST에 이용객이 높은 double peak를 보여주었고, 퇴근 시간의 이용객이 출근 시간보다 높았다. 다만, 서면 1호선의 이용객이 약 3천 1백만명/년으로 다른 지하역사에 비해 월등히 높은 이용률을 보였으며, 다음으로 연산역(약 2천 3백만명/년)과 서면 2호선(약 2천 1백만명/년)이었다. Yu et al.(2015)은 서울시 대규모 환승역의 호선별 PM_{2.5}에 대한 오염 연구에서 지하에 위치한 차단형인 2호선과 5호선에서 유동인구가 많은 시간에 미세먼지 농도가 높았는데, 이는 지하철을 이용하는

사람들의 옷에 묻어있던 먼지나, 보행 중 바닥 등에 쌓여 있는 먼지를 발생시켜서 농도가 높게 나타났다고 하였다. 그러나 개방형인 중앙선과 분당선에서는 오히려 유동인구가 적은 이른 오후시간에 미세먼지 농도가 높게 나타났는데, 개방형 역사는 유동인구의 영향보다는 외부 미세먼지의 농도가 더 크게 작용하는 것으로 보인다고 하였다.

Table 2는 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 계절변화를 나타낸 것이다. 먼저, 봄철에 가장 높은 PM₁₀ 농도를 나타낸 지점은 남포역, 서면 1호선 대합실과 승강장, 서면 2호선 대합실과 승강장 그리고 수영역이었다. 겨울철에 가장 높은 농도를 나타낸 지점은 동래역, 사상역 그리고 연산역이었고, 여름철에 가장 높은 농도 나타낸 지점이 덕천역과 미남역이었다. 실외의 경우 대부분이

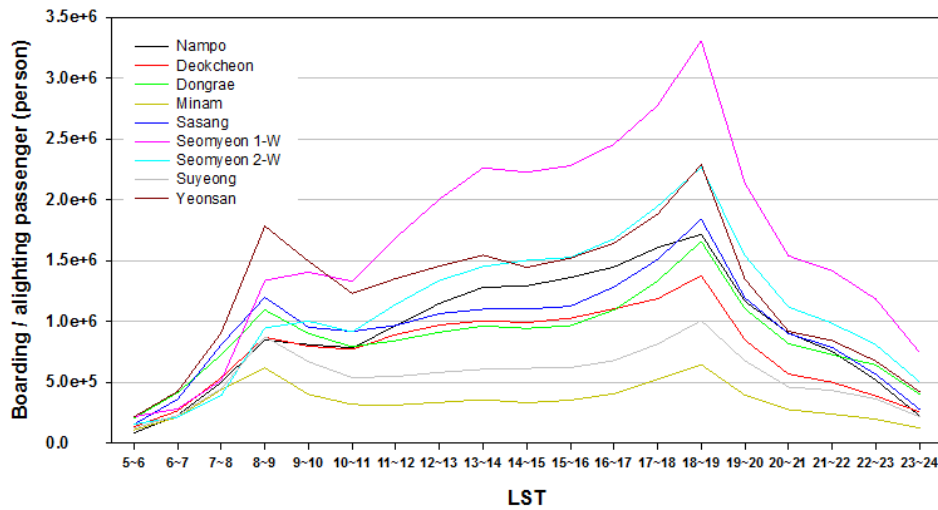


Fig. 5. Diurnal variation of the number of boarding/alighting passengers at Busan subway station (2017).

봄철에 가장 높은 농도를 보이는 형태와는 특이한 결과를 보여주었다. 서면 1호선과 2호선의 대합실과 승강장에서 겨울철이 두 번째로 높은 농도를 나타내었고, 남포역과 수영역은 여름철, 덕천역은 가을철, 동래역, 미남역, 사상역, 연산역은 봄철에 두 번째 높은 농도를 보였다. 가장 낮은 농도를 보인 계절은 남포역과 덕천역이 겨울철, 서면 2호선 승강장이 여름철인 것을 제외하고 다른 모든 지점이 가을철에 나타났다. 실외에서는 가장 낮은 농도를 보이는 계절이 여름철인 것을 감안한다면 매우 특이

한 현상이다.

그리고 $PM_{2.5}$ 농도를 보면, 동래역은 겨울철, 서면 1호선의 대합실과 승강장은 봄철에 가장 높은 농도를 나타내었고, 세 지점 모두 가을철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 가장 높은 계절의 농도와 가장 낮은 계절의 PM_{10} 농도 차이는 서면 1호선과 2호선의 승강장이 각각 $15.5 \mu g/m^3$ 와 $14.5 \mu g/m^3$ 로 가장 큰 차이를 보였고, 남포역과 덕천역이 각각 $9.9 \mu g/m^3$ 와 $8.3 \mu g/m^3$ 로 낮은 값을 보였다. $PM_{2.5}$ 농도 차이는 서면 1호선 대합실과 승강장이

Table 2. Seasonal mean of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration observed at Busan subway station for 3 years (2015~2017)

Station	$PM_{10}(\mu g/m^3)$				$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Nampo	54.1±18.3	46.7±16.1	44.5±18.3	44.2±21.0				
Deokcheon	45.9±21.1	49.2±27.4	46.7±22.1	40.9±18.5				
Dongnae	38.3±12.4	32.7±12.1	31.7±16.4	41.9±20.7	19.0±9.3	18.4±10.8	17.1±9.4	21.5±11.4
Minam	39.7±19.7	40.3±23.3	31.4±16.5	34.1±18.3				
Sasang	37.5±13.2	30.0±10.5	30.2±10.4	40.3±18.6				
Seomyeon 1-W	55.3±14.6	46.2±13.3	43.1±15.1	53.8±20.5	33.2±11.3	25.2±10.8	24.1±10.3	32.5±19.9
Seomyeon 1-P	58.8±16.6	49.0±16.4	43.3±18.1	53.8±22.6	30.3±12.5	26.9±13.4	21.3±12.1	30.3±20.1
Seomyeon 2-W	52.6±15.1	41.8±16.1	39.7±14.5	47.9±19.3				
Seomyeon 2-P	48.7±14.0	34.2±13.1	34.7±19.7	47.3±19.5				
Suyeong	38.5±15.6	36.6±17.4	30.7±14.8	34.3±16.1				
Yeonsan	38.6±20.5	34.0±15.2	27.8±12.9	39.1±19.5				

Table 3. Weekly mean of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration observed at Busan subway station for 3 years (2015~2017)

Station	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
Nampo	47.6±14.4	47.5±13.6	47.7±12.8	47.5±12.8	47.3±13.3	49.1±15.5	45.5±13.3
Deokcheon	46.4±17.8	46.5±19.4	45.9±17.6	46.4±18.0	45.7± 18.7	47.6±21.1	42.4±15.2
Dongnae	36.4±12.0	36.6±11.0	36.3±11.4	36.8±11.6	36.1±11.1	36.6±11.0	33.9±11.4
Minam	36.8±14.9	37.7±21.1	36.6±16.3	35.7±14.7	35.3±15.6	37.8±18.5	34.9±15.9
Sasang	34.3±11.9	34.5±11.5	34.6±12.1	35.1±11.9	34.2±11.2	35.4±10.9	32.7±11.4
Seomyeon 1-W	49.3±14.4	49.9±13.8	49.8±13.5	50.7±13.3	50.4±13.7	51.2±13.7	45.9±12.1
Seomyeon 1-P	51.1±17.4	52.0±15.6	51.9±16.3	52.6±16.0	52.5±16.6	51.2±15.5v	47.6±14.3
Seomyeon 2-W	45.4±14.1	45.6±14.1	45.4±13.7	45.9±14.0	45.8±13.1	48.3±14.5	43.0±12.6
Seomyeon 2-P	41.2±15.1	41.9±15.0	42.0±15.8	41.8±14.8	41.5±14.7	42.9±14.8	38.8±13.3
Suyeong	35.9±14.4	35.5±13.3	35.1±12.6	36.0±13.8	35.0±13.7	35.7±13.8	33.3±12.1
Yeonsan	35.5±13.4	35.1±13.6	35.2±13.6	36.2±14.7	34.8±14.1	34.5±14.4	32.8±13.6
Dongnae*	19.3±8.4	19.2±7.9	19.3±8.3	18.9±8.5	18.7±7.5	19.4±7.6	18.5±7.6
Seomyeon 1-W*	29.1±12.9	29.6±12.0	28.6±10.2	28.8±10.4	29.6±14.6	29.1±10.8	26.5±9.1
Seomyeon 1-P*	27.0±12.1	27.8±11.6	27.3±11.1	27.5±11.6	27.9±11.9	27.4±11.4	25.5±10.7

*PM_{2.5} concentration

9 µg/m³ 이상의 차이를 동래역이 4.4 µg/m³를 보였다.

Table 3은 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 요일별 변화를 나타낸 것이다. 먼저 PM₁₀ 농도의 경우, 주중인 목요일에 가장 높은 농도를 보인 동래역, 서면 1호선 승강장, 수영역, 연산역을 제외하고 모두 주말인 토요일에 가장 높은 농도를 보였다. 가장 낮은 농도를 보인 요일은 예상대로 유동인구가 가장 작은 일요일에 나타났다. PM_{2.5}의 경우, 동래역은 토요일, 서면 1호선 대합실과 승강장은 주중인 금요일에 가장 높은 농도를 보였다. PM₁₀의 최대농도와 최저농도의 차이가 가장 크게 나타난 지점은 서면 1호선 대합실과 서면 2호선 대합실로 5.3 µg/m³이었으며, 다음이 덕천역으로 5.2 µg/m³이었고 가장 낮은 차이를 보인 지점은 사상역과 수영역으로 2.7 µg/m³이었다. PM_{2.5}의 경우는 서면 1호선 대합실이 3.1 µg/m³로 가장 큰 차이를 보였고, 사상역이 0.9 µg/m³로 가장 작았다. Jeon and Hwang(2014)은 부산 지역 실외 미세먼지의 주중/주말 특성 연구에서 PM₁₀은 수요일과 목요일에 높은 농도를, 일요일에 가장 낮은 농도를 보였고, PM_{2.5}는 대체로 수요일에 높은 농도를, 일요일에 낮은 농도를 보여, 최대농도 발생일에서 차이를 보였다. Yu et al.(2015)도 유동인구가 많은 주중의 농도가 주말의 농도보다 20.3% 증가하였고, 토요일은 평일 평균의

76.1%, 일요일은 54.3%를 나타내며, 따라서 주중 지하철 이용객 증가가 PM_{2.5} 농도 상승의 원인이라고 하였다.

Fig. 6은 부산지역 주요역사의 2017년 승하차 승객수의 요일별 변화를 나타낸 것이다. 토요일에 가장 높은 승하차 승객수를 나타낸 지점은 남포, 사상, 서면 2호선 이었고, 금요일은 덕천, 동래, 미남, 서면 1호선, 수영, 연산역이었다. 따라서 토요일에 최대농도를 나타낸 것은 지하철을 이용하는 승객수 즉 유동인구가 미세먼지 농도에 미치는 영향이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 부산 서면 1호선 대합실에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 주중(월요일~금요일)과 토요일 그리고 일요일로 나누어 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 토요일의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 주중에 비하여 0800~1100 LST는 낮으나 1100~1800 LST는 주중에 비해 높은 농도를 나타내었다. 특히 1400~1800 LST의 PM₁₀은 4.1~5.8 µg/m³ 이나 높은 농도를 나타내었다. 이는 Fig. 6의 요일별 승하차 승객수 현황과 같이 토요일의 유동인구와 미세먼지 사이에는 밀접한 관계가 있다는 것을 나타내고 있다. 또한 일요일의 경우는 주중과 토요일에 비해 월등히 낮은 농도를 보여 위의 사실을 뒷받침하고 있다. 그리고 PM_{2.5}의 경우, 주중의 1000 LST 피크가 토요일과 일요일은 2시간 늦은 1200 LST경에 피크를 나타내고 있는 것이 특징적이다.

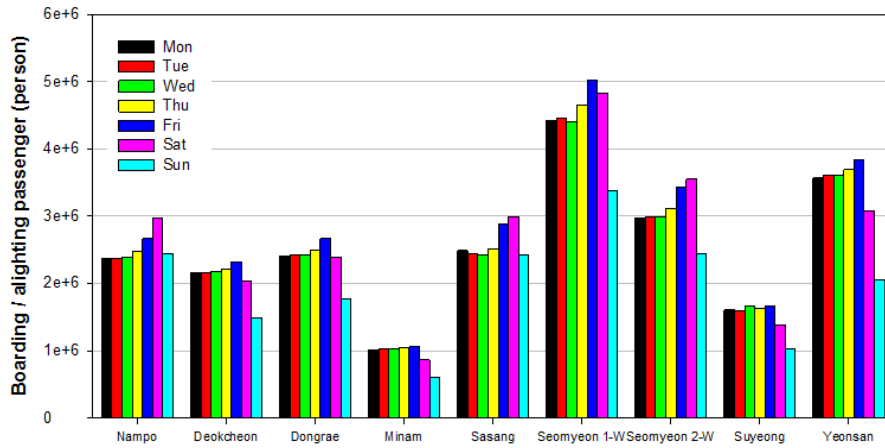


Fig. 6. Weekly variation of the number of boarding/alighting passengers at Busan subway station(2017).

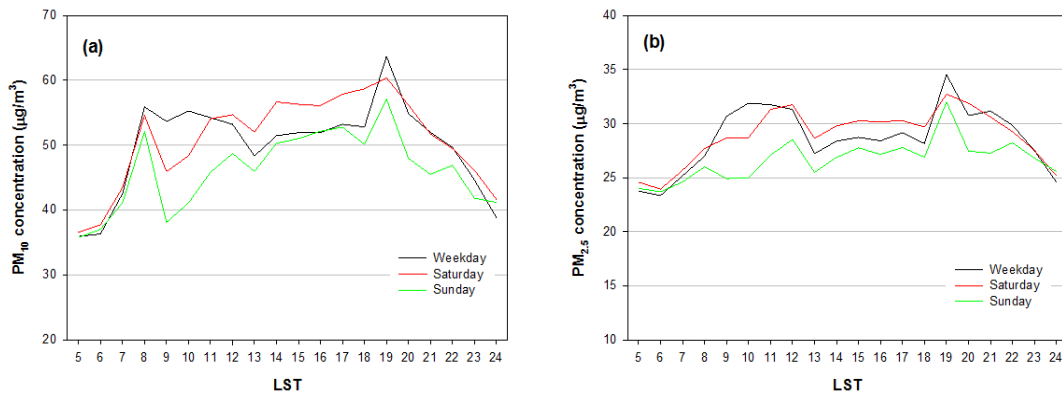


Fig. 7. Diurnal variation of weekday, Saturday and Sunday for PM₁₀ and PM_{2.5} at Seomyeon 1 line waiting room.

PM₁₀의 경우도 0800 LST 피크 후 토요일과 일요일은 1200 LST경에 또 한번의 피크를 나타내고 있다.

Table 4는 부산지역 주요 지하역사와 인근의 지상 대기질측정소에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 상관계수를 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우, 서면 1호선 및 2호선 대합실과 전포동사이에 0.78로 가장 높은 상관을 보였으며, 다음으로 동래역과 온천동이 0.77, 남포역과 광복동이 0.74, 덕천역과 덕천동이 0.60, 연산역과 연산동사이가 0.58으로 비교적 낮은 값을 보였다. PM_{2.5}의 경우, 동래역과 온천동사이가 0.81, 서면1호선 대합실과 전포동이 0.86으로 비교적 높은 상관을 나타내었다. 지하역사와 외기의 미세먼지 농도를

비교하면 PM₁₀의 경우, 남포동은 광복동의 1.04배, 덕천역은 덕천동의 1.08배, 서면 1호선 대합실은 전포동의 1.10배로 지하역사가 외기보다 높은 농도를 보였다. PM_{2.5}의 경우, 서면 1호선 대합실이 전포동의 1.06배로 실외보다 높았으나, 도로변의 온천동은 동래역에 비해 PM₁₀은 1.46배, PM_{2.5}는 1.34배로 외기의 농도가 높은 결과를 보였다. 실내 PM₁₀ 농도는 외기의 PM₁₀ 농도가 증가할 때 동시에 증가하고 지하철의 PM₁₀은 주변의 외기 PM 농도에 상당히 영향을 받는다고 하였다(Branis, 2006; Cheng et al., 2008; Kim et al., 2012). 더욱이 Cheng et al.(2008)은 실내와 실외의 PM₁₀ 농도는 양의 상관(0.53~0.91)이 있음을 제시하였고, Jung et al.

Table 4. Correlation coefficient between subway and ground station for PM₁₀ and PM_{2.5} concentration observed at Busan for 3 years (2015~2017)

Subway station	Ground station	Correlation coefficient
Nampo PM ₁₀	Kwangbokdong PM ₁₀	0.74
Deokcheon PM ₁₀	Deokcheon PM ₁₀	0.60
Dongnae PM ₁₀	Oncheondong PM ₁₀	0.77
Seomyeon 1-W PM ₁₀	Jeonpodong PM ₁₀	0.78
Seomyeon 2- W PM ₁₀	Jeonpodong PM ₁₀	0.78
Yeonsan PM ₁₀	Yeonsan PM ₁₀	0.58
Dongnae PM _{2.5}	Oncheondong PM _{2.5}	0.81
Seomyeon 1-W PM _{2.5}	Jeonpodong PM _{2.5}	0.86

(2010)은 승강장에서의 PM₁₀ 농도는 외기의 농도가 증가할 때 일반적으로 증가한다고 하였다. Aarnio et al. (2005)는 지하철의 미세먼지 입자수 농도와 크기분포는 도시배경지점에서 측정된 것과 매우 비슷하여, 지하철사의 먼지의 원인은 도로교통이라고 하였고, Branis(2006)는 외기의 에어로졸 농도는 환기계통, 지하철사 에스컬레이터 터널과 복도를 통해서 지하로 수송되어 지하 대기질에 영향을 미친다고 하였다.

Table 5는 부산지역 주요 지하철사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 일평균 (0500~2400 LST) PM₁₀ 농도가 80 µg/m³과 100 µg/m³을 초과한 일수를 나타낸 것이다. 80 µg/m³과 100 µg/m³을 선정하 이유는 비

교적 고농도를 나타내는 지표라고 할 수 있고, 100 µg/m³은 대기환경기준으로 이용하고 있다. 부산의 지하철사에서 지난 3년간 100 µg/m³를 초과한 횟수는 총 36일이었고, 이 중에서 가장 높은 발생빈도를 보인 지점은 덕천역으로 16일이었고, 다음으로 미남역과 서면 1호선 승강장이 6일이었으며, 그 외 역사는 미미한 발생을 보여주었다. 80 µg/m³를 초과한 일수는 총 239일이었으며, 덕천역이 61일로 가장 높았으며, 다음으로 서면 1호선 승강장이 54일, 서면 1호선 대합실이 34일로 그 다음이었다. 연도별로 100 µg/m³를 초과일수는 2015년이 24일, 2016년이 11일, 2017년 1일로 점점 감소하였고, 80 µg/m³를 초과한 경우도 2015년 125일, 2016년 94일, 2017년

Table 5. Number of exceedances per year of the daily value for 80 µg/m³ and 100 µg/m³ of PM₁₀ at Busan for 3 years (2015~2017)

Station	PM ₁₀ ≥ 80 µg/m ³				PM ₁₀ ≥ 100 µg/m ³			
	2015	2016	2017	Total	2015	2016	2017	Total
Nampo	11	10	5	26	1	2		3
Deokcheon	29	29	3	61	12	4		16
Dongnae	1		1	2				
Minam	13	9	1	23	5	1		6
Sasang	3			3	1			1
Seomyeon 1-W	20	12	2	34	1			1
Seomyeon 1-P	37	14	3	54	3	3		6
Seomyeon 2-W	8	9	1	18	1			1
Seomyeon 2-P	1	3	4	8			1	1
Suyeong	1	5		6				
Yeonsan	1	3		4		1		1
Total	125	94	20	239	24	11	1	36

Table 6. Number of exceedances per year of the daily value for 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of $\text{PM}_{2.5}$ at Busan for 3 years (2015~2017)

Station	$\text{PM}_{2.5} \geq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$				$\text{PM}_{2.5} \geq 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$			
	2015	2016	2017	Total	2015	2016	2017	Total
Dongnae		1	1	2				
Seomyeon 1-W	16	13	7	36			1	1
Seomyeon 1-P	9	19	7	35		1	1	2
Total	25	33	15	73		1	2	3

20일로 점점 감소하는 경향을 보였다. 따라서 최근 부산 시 지하역사의 미세먼지의 환경은 개선되고 있다는 것을 보여주고 있다.

Table 6은 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수를 나타낸 것이다. 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수는 총 3일로 서면 1호선 승강장에서 2016년과 2017년에 1일씩 발생하였다. 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수는 총 73일로 서면 1호선 대합실과 승강장에 35일 이상이 발생하였다. PM_{10} 농도와는 다르게 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도 발생이 2015년에 없었는데 2017년에 2일이 나타난 것이 다소 특징적이다.

4. 요약 및 결론

2015년부터 2017년까지 3년간 부산지역 주요 지하역사의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도자료를 이용하여 미세먼지의 특성을 체계적으로 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연평균 PM_{10} 농도는 서면 1호선 승강장(51.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 서면 1호선 대합실(49.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 남포동(47.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순이었으며 사상역(34.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮았고, 전반적으로 PM_{10} 농도는 매년 감소하는 경향을 보였다. 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 서면 1호선 대합실(28.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높았고 동래역(19.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 가장 낮았다.

2) 연평균 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 농도비는 서면 1호선 대합실(0.58)이 높았고, 동래역과 서면 1호선 승강장이 0.53이었고, 동래역과 서면 1호선 대합실은 매년 농도비가 증가하는 추세를 보여주었다. PM_{10} 농도의 일변화를 peak가 나타내는 개수와 시점을 중심으로 분석한 결과, 네 개의 type으로 분류할 수 있었고, 이는 지하역사 이용객수의

일변화와 지하역사 주변환경의 영향으로 판단된다.

3) PM_{10} 농도의 계절변화를 보면, 실외의 경우 대부분 봄철에 가장 높은 농도를 보이는 형태와는 달리, 지하역사는 봄철(남포역, 서면 1호선 대합실과 승강장, 서면 2호선 대합실과 승강장, 수영역), 겨울철(동래역, 사상역, 연산역), 심지어 여름철(덕천역, 미남역)에 가장 높은 농도를 보이기도 하였다. 또한 실외는 여름철이 가장 낮은 농도를 보였으나 지하역사는 가을철에 가장 낮은 농도를 보인 지점이 많이 나타났다.

4) 요일별 PM_{10} 농도를 보면, 목요일에 가장 높은 농도를 보인 동래역, 서면 1호선 승강장, 수영역, 연산역을 제외하고 모두 주말인 토요일에 가장 높은 농도를 보였으며, 가장 낮은 농도를 보인 요일은 예상대로 유동인구가 가장 작은 일요일에 나타났다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우, 동래역은 토요일, 서면 1호선 대합실과 승강장은 주중인 금요일에 가장 높은 농도를 나타내었다.

5) 지하역사와 주변 외기의 미세먼지 농도를 비교하면, PM_{10} 의 경우, 남포동은 광복동의 1.04배, 덕천역은 덕천동의 1.08배, 서면 1호선 대합실은 전포동의 1.10배로 지하역사가 외기보다 높은 농도를 보였고, $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우, 서면 1호선 대합실이 전포동의 1.06배로 실외보다 높았으나, 도로변의 온천동은 동래역에 비해 PM_{10} 은 1.46배, $\text{PM}_{2.5}$ 는 1.34배로 외기의 농도가 높은 결과를 보였다.

6) 부산의 지하역사에서 지난 3년간 PM_{10} 이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과일수는 총 36일이었고, 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과일수는 총 239일이었으며, 연도별로 초과일수는 감소하는 경향을 보였다. $\text{PM}_{2.5}$ 경우, 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수는 총 3일이었으며, 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수는 총 73일로 서면 1호선 대합실과 승강장에 35일 이상 발생하였다.

7) 향후 본 연구는 유동인구가 많은 지하역사 내의 실

내공기질을 적정하게 유지하여 시민의 건강보호 및 환경상의 위험을 예방하고, 또한 효율적인 실내공기질 관리를 위해 과학적인 측정 자료를 근거로 시정정책 방향 수립, 시민들의 환경관심 유도과 알권리를 충족하는데 통찰력을 제공할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Aarnio, P., Yli-Tuomi, T., Kousa, A., Mäkelä, T., Hirsikko, A., Hämeri, K., Päisänen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T., Jantunen, M., 2005, The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system, *Atmos. Environ.*, 39, 5059-5066.
- Branis, M., 2006, The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmos. Environ.*, 40, 348-356.
- Busan Transportation Corporation, 2017, <https://www.humetro.busan.kr>.
- Busan Transportation Corporation, 2018, The number of boarding/alighting passengers at Busan subway station, 2017.
- Campbell, A., 2004, Inflammation, neurodegenerative diseases, and environmental exposures, *Protec. Strate. Neuro. Disea.*, 1035, 117-132.
- Chan, L. Y., Lau, W. L., Lee, S. C., Chan, C. Y., 2002, Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 36, 3363-3373.
- Cheng, Y. H., Lin, Y. L., Liu, C. C., 2008, Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei rapid transit system, *Atmos. Environ.*, 42, 7242-4249.
- Choi, H. W., Hwang, I. J., Kim, S. D., Kim, D. S., 2004, Determination of source contribution based on aerosol number and mass concentration in the Seoul subway stations, *Kor. Atmos. Environ.*, 20, 17-31.
- Hwang, S. H., Park, W. M., Park, J. B., Nam, T. G., 2017, Characteristics of PM₁₀ and CO₂ concentrations on 100 underground subway station platforms in 2014 and 2015, *Atmos. Environ.*, 167, 143-149.
- Jeon, B. I., Hwang, Y. S., 2014, Characteristics of metallic and ionic concentration in PM₁₀ and PM_{2.5} in Busan, *Environ. Sci. Inter.*, 23, 819-827.
- Jung, H. J., Kim, B., Ryu, J., Maskey, S., Kim, J. C., Sohn, J., Ro, C. U., 2010, Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis, *Atmos. Environ.*, 44, 2287-2293.
- Kam, W., Cheung, K., Daher, N., Sioutas, C., 2011, Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro, *Atmos. Environ.*, 45, 1506-1516.
- Kim, K. Y., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., Kim, C. N., 2008, Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul metropolitan subway stations, *Hazard. Mater.*, 154, 440-443.
- Kim, Y. T., Jeong, J. W., Jeong, T. U., 2009, Comparison of indoor air quality and urban air quality in Busan, *Busan Heal., Environ.*, 19, 168-176.
- Kwak, J., Cho, E. J., Yoo, E. C., Kim, K. S., 2011, Evaluation of the air quality characteristics inside train cabin in Busan, *Busan Heal., Environ.*, 20, 138-148.
- 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, *Kor. Atmos. Environ.*, 32, 216-232.
- Namgung, H. K., Song, J. H., Kim, S. Y., Kim, H. M., Kwon, S. B., 2016, Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations, *Kor. Acade. Indus. Coop. Soc.*, 17, 17-25.
- Park, D. U., Ha, K. C., 2008, Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environ. Int.*, 34, 629-634.
- Park, D. U., Yun, K. S., Park, S. T., Ha, K. C., 2005, Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} levels inside train and in platform of subway, *Kor. Env. Hlth.*, 31, 39-46.
- Park, S. B. S. N., Lee, T. J., Ko, H. K., Bae, S. J., Kim, S. D., Park, D. S., Sohn, J. R., Kim, D. S., 2013, Identification of PM₁₀ chemical characteristics and sources and estimation of their contributions in a Seoul metropolitan subway station, *Kor. Atmos. Environ.*, 29, 74-85.
- 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 PM₁₀ levels in a subway station and a trial to reduce PM₁₀ in tunnels, *Asian*

- Atmos. Environ., 7, 38-47.
- Yim, B. B., Lee, K. S., Kim, J. I., Hong, H. S., Kim, J. W., Jo, K. H., Jung, E. G., Kim, I. K., An, Y. S., 2014, Evaluation on indoor air quality by statistical analysis of indoor air pollutants concentration in a Seoul metropolitan underground railway station, Kor. Atmos. Environ., 30, 233-244.
- Yu, J. G., Kim, J. H., Kim, K. P., Jung, S. Y., Na, K. I., Jo, H. J., Sul, K. H., Kim, K. H., 2015, Comparison of PM_{2.5} Pollution status at a major transit subway station in Seoul, Kor. Atmos. Environ., 31, 201-208.
-
- 전병일, 신라대학교 에너지화학공학부 교수
bijeon@silla.ac.kr