

ORIGINAL ARTICLE

부산지역 지하역사의 최근 3년간(2015~2017년) CO, CO₂, NO₂ 농도의 특성

전병일*

신라대학교 에너지화학공학부

Characteristics of CO, CO₂, and NO₂ 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 CO, CO₂, and NO₂ concentrations at main subway stations in Busan. The annual mean CO concentrations at the Suyeong and Nampo stations were 0.75 ppm and 0.48 ppm, respectively. Annual CO₂ concentration at the Seomyeon 1- platform was 649 ppm. The NO₂ concentrations at the Seomyeon 2- waiting room and the Yeonsan station were 0.048 ppm and 0.037 ppm, respectively. CO concentration was highest at two times of the day, and was proportional to the number of passengers commuting to and from work. The CO and CO₂ concentrations were highest in winter, but NO₂ concentration was highest in spring. CO and CO₂ concentrations were highest on Saturday and lowest on Sunday. The correlation of CO and NO₂ concentrations measured at the subway stations with those at the ambient air quality station were highest at the Seomyeon 1 and 2- waiting room and Jeonpodong. The correlation was lowest at the Yeonsan and Yeonsandong station. The number of days when CO₂ concentration exceeded 700 ppm over the last three years at the Seomyeon 1- platform was 174. The findings of this research are expected to deepen 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 : CO, CO₂, NO₂, Subway station, Number of passengers

1. 서론

지하철은 우리나라 대도시의 대표적인 대중교통수단으로 부산시는 1985년 7월에 1호선 범내골에서 범어사까지 개통된 이래, 6개 노선 총 149개역이 운영되고 있으며, 현재도 지속적으로 노선확장이 추진되고 있다 (Busan Transportation Corporation, 2017). 자동차는

도로 위를 달리고 지하철은 궤도 위를 달리기 때문에 주변 교통상황의 영향을 거의 받지 않으면서 안전하고 정확한 대중교통수단으로 인식되어 많은 시민들이 이용하며, 그 비중이 점점 증가하고 있다. 따라서 지하역사는 시설의 확장과 지하철 운행거리의 증가로 불특정 사람들이 자주 이용하는 대표적인 다중이용시설이 되었고, 이러한 지하역사는 공간환경이 폐쇄되어 있어 이용자들은 오염

Received 7 May, 2019; Revised 30 May, 2019;

Accepted 19 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.

물질의 영향을 많이 받는다. 특히 터널 내 열차운행, 환기를 위한 외기 유입, 이용자들의 왕래 및 지하에 위치한 각종 점포 등에 의한 오염물질의 발생 및 유입을 예상할 수 있다(Yim et al., 2014).

지하역사에서 CO, CO₂ 그리고 NO₂에 대한 국내의 연구는 주로 서울지역에서 이루어졌는데, Park and Ha(2008)는 서울 지하철의 내부와 승강장에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ 그리고 CO의 특성을 연구하여, PM₁₀과 PM_{2.5}의 CO와의 상관관계는 각각 0.451, 0.520로, CO₂와의 0.154과 0.171보다 큰 값을 나타내었다고 하였다. Son et al.(2000)은 서울의 지하역사에서 NO₂농도를 측정하고 역무원의 NO₂ 개인 흡입량을 산정하여 NO₂의 주발생원은 지하역사 출구 근처 도로의 자동차이며, 공조기를 통한 오염원 유입 외에도 외기와 인접한 출입구, 계단 등을 통해 유입되는 오염물질이 NO₂농도와 상관성이 있다고 하였다. Lee et al.(2012)은 서울 지하철 CO₂의 주 발생원은 지하역사 이용객이며, CO₂농도의 증가는 이용자 수 증감과 유의한 상관성이 있다고 하였다. Yim et al.(2016)은 서울 지하철을 대상으로 대합실, 승강장, 터널 유입부 및 외기의 PM₁₀, CO₂ 및 NO₂ 농도 자료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. Namgung et al.(2016)은 승객 유동량이 많은 서울의 지상역사 3곳과 지하역사 5곳을 선정하여 유지기준 5종과 권고기준 4종을 측정하여 지상과 지하역사의 실내공기질 특성과 외기의 영향을 평가하였다. Hwang et al.(2017)은 2014년과 2015년에 서울 지하철 1호선~4호선 지하역사 100 곳에서 PM₁₀과 CO₂농도를 측정하여 특성을 조사한 바 있다.

국외의 연구를 보면, Chan et al.(2002)은 중국 광저우 도시지역을 경유하는 지하철, 버스 그리고 택시를 대상으로 CO와 호흡성미세먼지를 측정하여 특성을 조사하여 지하철이 도로 교통보다도 낮은 농도를 나타내었다고 하였다. Cheng et al.(2011)은 대만 타이베이의 고속철도의 지하역사와 지상역사에서 2010년 8월부터 11월까지 미세먼지, CO, 그리고 CO₂농도를 측정하여 그 특성을 비교하여, 지하 승강장의 CO는 외부보다 대략 0.3~0.6배 정도로 낮은 농도를 나타내었으나, CO₂는 실외 환경보다 1.1~2.4배 높은 농도를 나타내었다. Moreno et al.(2014)은 스페인의 바르셀로나에서 NO₂ 이외에도 지하역사에서의 CO 농도가 도로상 차량 운행에 의하여

농도 영향을 받는 것을 확인하였고, CO₂농도는 승객수와 열차횟수에 영향을 받는 것으로 조사되었다.

본 연구지역인 부산 지하철에서 CO, CO₂ 그리고 NO₂ 세 항목에 대한 연구는 Kim et al.(2009)가 2008년 10월부터 2009년 9월까지 1년간 부산도시철도 3호선 역사 중 가장 이용승객이 많은 수영역, 연산역, 미남역, 덕천역의 대합실에 구축 운영 중인 실내공기질측정망과 도로변 측정소 2개(온천동, 초량동), 도시대기오염측정소 2개소(진포동, 연산동)을 선정하여 NO₂, O₃, CO, PM₁₀의 농도를 비교 평가한 바 있다. Kwak et al.(2011)은 도시철도 1, 2, 3, 4호선 전동차 객실을 대상으로 층계와 하계, 동계로 구분하여 실내공기질 측정방법에 따라 혼합시와 평상시로 구분하여 PM₁₀, CO₂, 총부유세균, HCHO, VOCs 시료를 채취하여 특성을 평가하였다.

그러나 현재 측정 중인 모든 부산지역 지하역사의 다년간의 CO, CO₂ 그리고 NO₂농도 자료를 이용하여 지하역사의 시간적 및 공간적 특성을 고찰한 연구는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 3년간 부산지역 주요 지하역사의 CO, CO₂ 그리고 NO₂농도자료를 이용하여 기체상 오염물질의 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 위해서 Fig. 1과 같이 부산도시철도 1호선~4호선의 서면역, 연산역, 동래역, 수영역, 미남역, 사상역, 덕천역, 남포역에서 2015년부터 2017년까지 부산광역시 보건환경연구원에서 3년간 측정된 CO, CO₂ 그리고 NO₂농도 자료를 이용하였다. CO와 CO₂는 비분산적외선분석법, NO₂는 화학발광법으로 자동측정하였으며 일평균농도는 3분의 2이상(20시간 중 14시간이상) 측정된 자료를 사용하였다. 남포역을 제외한 모든 역은 환승역이며, 서면역은 1호선과 2호선의 대합실과 승강장에서 각각 측정되었으며, 나머지는 모두 대합실에서 측정된 자료이다.

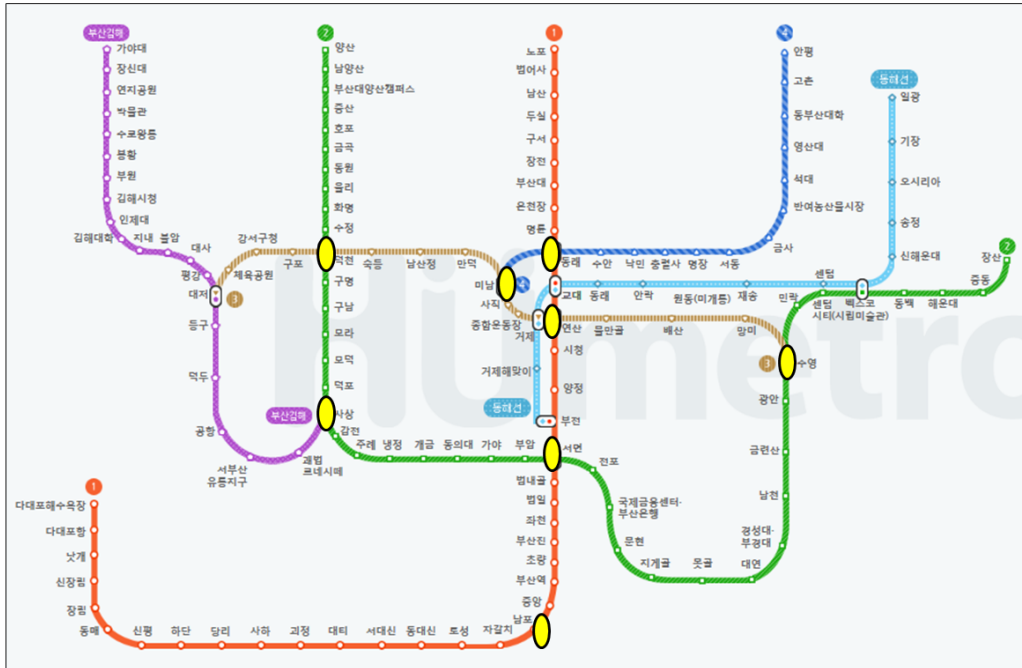


Fig. 1. A Map of the Busan metropolitan rail routes and monitoring stations (yellow circle).

측정시간은 지하역사의 청소, 보수 등 시설관리 등으로 실내공기질 평가에 영향을 줄 수 있는 심야시간대를 제외한 0500 LST부터 2400 LST까지(20시간)의 자료를 사용하였다. 또한 지하역사의 CO와 NO₂농도를 실외의 CO와 NO₂농도와 비교하기 위해서 각 지하역사와 가장 근접한 대기오염자동측정망 자료를 사용하였다. 서면역과는 전포동, 덕천역과는 덕천동, 동래역과는 온천동, 남포역과는 광복동 자료를 동일한 기간(2015년~2017년)과 시간(0500~2400 LST) 자료를 사용하여 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 1은 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 CO 및 CO₂ 그리고 NO₂의 연평균 농도를 나타낸 것이다. 먼저 CO농도를 보면, 3년간 평균하여 수영역이 0.75 ppm으로 가장 높은 농도를 보였으며, 두 번째는 0.65 ppm의 연산역이었고 세 번째는 0.63 ppm의 미남역이었으며, 가장 낮은 농도를 보인 지점은 0.48 ppm의 남포역, 서면 2호선 대합실과 승강장

이었다. 덕천역, 미남역, 사상역, 서면 1호선 승강장, 서면 2호선 대합실, 수영역은 매년 감소하는 경향을 보였으며, 반대로 동래역은 미소하게 증가하였다. 그리고 서면 1호선 대합실의 CO농도는 승강장보다 14% 높았는데, 이는 도로를 운행하는 차량 등에 의해 발생하는 CO가 승강장보다 대합실이 더 영향을 많이 받기 때문으로 보인다(Namgung et al., 2016). 또한 CO는 전반적으로 우리나라 실내공기질 유지기준 10 ppm을 상당히 만족하고 있으며 매년 감소하는 추세를 보여 크게 문제시할 필요가 없는 물질로 판단된다.

CO₂농도를 보면, 3년간 평균하여 서면 1호선 대합실이 649 ppm으로 가장 높은 농도를 보였으며, 서면 2호선 대합실이 644 ppm으로 두 번째였으며, 서면 2호선 승강장과 남포동이 559 ppm으로 세 번째 높은 농도를 보였다. 남포역, 덕천역, 사상역, 서면 2호선 대합실, 그리고 수영역이 매년 증가하는 추세를 보여, 매년 감소하는 CO와는 다른 양상을 나타내었다. 단, 서면 2호선 승강장은 2017년이 2015년보다 낮은 농도를 나타내어 다른 지하역사와 다른 결과를 나타내었다. CO₂의 주 발생

Table 1. Annual mean of CO, CO₂ and NO₂ concentration (ppm) observed at Busan subway station for 3 years (2015~2017)

Station	CO				CO ₂				NO ₂			
	2015	2016	2017	Mean	2015	2016	2017	Mean	2015	2016	2017	Mean
Nampo	0.52	0.43	0.48	0.48	541	561	575	559	0.041	0.044	0.043	0.043
Deokcheon	0.61	0.57	0.53	0.57	511	508	521	513	0.044	0.047	0.035	0.042
Dongnae	0.49	0.48	0.52	0.50	484	505	502	497	0.047	0.045	0.047	0.046
Minam	0.64	0.67	0.59	0.63	491	507	505	501	0.043	0.030	0.048	0.040
Sasang	0.56	0.46	0.45	0.49	522	536	549	536	0.040	0.042	0.050	0.044
Seomyeon 1-W*	0.54	0.62	0.54	0.57	627	674	647	649	0.039	0.040	0.044	0.041
Seomyeon 1-P**	0.54	0.52	0.45	0.50	549	571	558	559	0.040	0.042	0.046	0.043
Seomyeon 2-W	0.49	0.49	0.47	0.48	631	645	655	644	0.038	0.044	0.048	0.043
Seomyeon 2-P	0.47	0.49	0.48	0.48	572	560	555	562	0.045	0.050	0.049	0.048
Suyeong	0.87	0.71	0.67	0.75	503	530	562	532	0.035	0.043	0.040	0.039
Yeonsan	0.63	0.67	0.66	0.65	499	529	526	518	0.037	0.035	0.039	0.037

*Waiting room **Platform

원은 지하 역사나 지하철을 이용하는 승객이며, CO₂농도의 증가는 이용자 수의 증감과 유의한 상관성이 있다고 보고되었고(Lee et al., 2012; Moreno et al., 2014). 서면 1호선과 2호선의 대합실의 CO₂농도는 승강장보다 각각 16%, 15% 높은 값을 보여주었는데, 이는 위와 같이 전동차를 이용하는 승객뿐만 아니라 지하상가를 이용하는 쇼핑객들의 영향이라 판단된다(Yim et al., 2014).

NO₂농도를 보면, 3년간 평균하여 서면 2호선 승강장이 0.048 ppm으로 가장 높은 농도를 보였으며, 동래역이 0.046 ppm으로 두 번째였으며, 사상역이 0.044 ppm으로 세 번째 높은 농도를 보였다. 연산역이 0.037 ppm으로 가장 낮은 농도를 보였고, 사상역, 서면 1호선 대합실, 서면 1호선 승강장 그리고 서면 2호선 대합실이 매년 증가하는 추세를 보였으며, 3년 연속 감소하는 추세를 보인 지점은 없었다. 유일하게 덕천역이 2017년이 2015년보다 낮은 농도를 보였다. NO₂의 주발생원은 지하역사 출구 근처 도로의 자동차와 공조기를 통한 오염원 유입 외에도 외기와 인접한 출입구, 계단 등을 통해 유입되는 오염물질과 상관성이 높고 그 중에 환기를 통한 외부 공기의 유입이 가장 높은 영향을 미친다고 하였다(Son et al., 2000). 또한 NO₂농도는 지하역사의 심도, 급기량, 배기량 및 승강장의 용적 등의 변수에 비해 외기가 NO₂농도에 지배적인 영향을 미친다고 하였다(Lee et al., 2012).

Fig. 2는 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터

2017년까지 3년간 측정된 CO 및 CO₂ 그리고 NO₂농도의 일변화를 나타낸 것이다. 그리고 지상의 대기오염 특성과 비교하기 위해 주요 지하역사와 인접한 부산지역 대기오염자동측정망 자료를 이용하여 동일한 기간 내의 일변화를 나타내었다. 먼저 CO의 일변화를 보면, 전 지점 모두 아침과 저녁 하루 두 번의 피크를 보여주고 있다. 이는 지하역사를 이용하여 출퇴근하는 승하차 인원의 변화와 상당히 유사한 경향을 나타내고 있다(Yim et al., 2014). 0800 LST에 피크를 보인 지점은 덕천, 동래, 미남, 사상, 연산이었고, 0900 LST에 피크를 보인 지점은 수영, 서면 1호선 대합실과 승강장, 서면 2호선 대합실과 승강장, 수영역이었다. 1900 LST에 피크를 보인 지점은 미남역과 2100 LST에 피크를 나타낸 연산역을 제외하고 나머지 모든 지점은 2000 LST에 피크를 보였다. 저녁의 피크 농도가 오전의 농도보다 높았다. 주간의 최저농도는 1200~1500 LST에 나타났으며, 주로 1300 LST에 나타났다. 0100~0500 LST의 자료가 없어 비교하지 못했지만 추세를 볼 때 주간의 농도보다 더 낮은 값을 나타낼 것으로 보인다. 지하역사의 CO 농도와 비교하기 위해 지상의 광복동, 덕천동, 연산동, 온천동, 전포동의 일변화를 보면, 지상의 지점도 아침과 저녁 두 번의 피크를 나타내었으며, 광복동을 제외하고 아침의 농도가 저녁보다 높거나 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 아침보다 저녁이 높은 지하역사와는 다른 패턴을 보였다. 주간의 최저농도를 나타내는 시각은 도로변 지역인 온천동

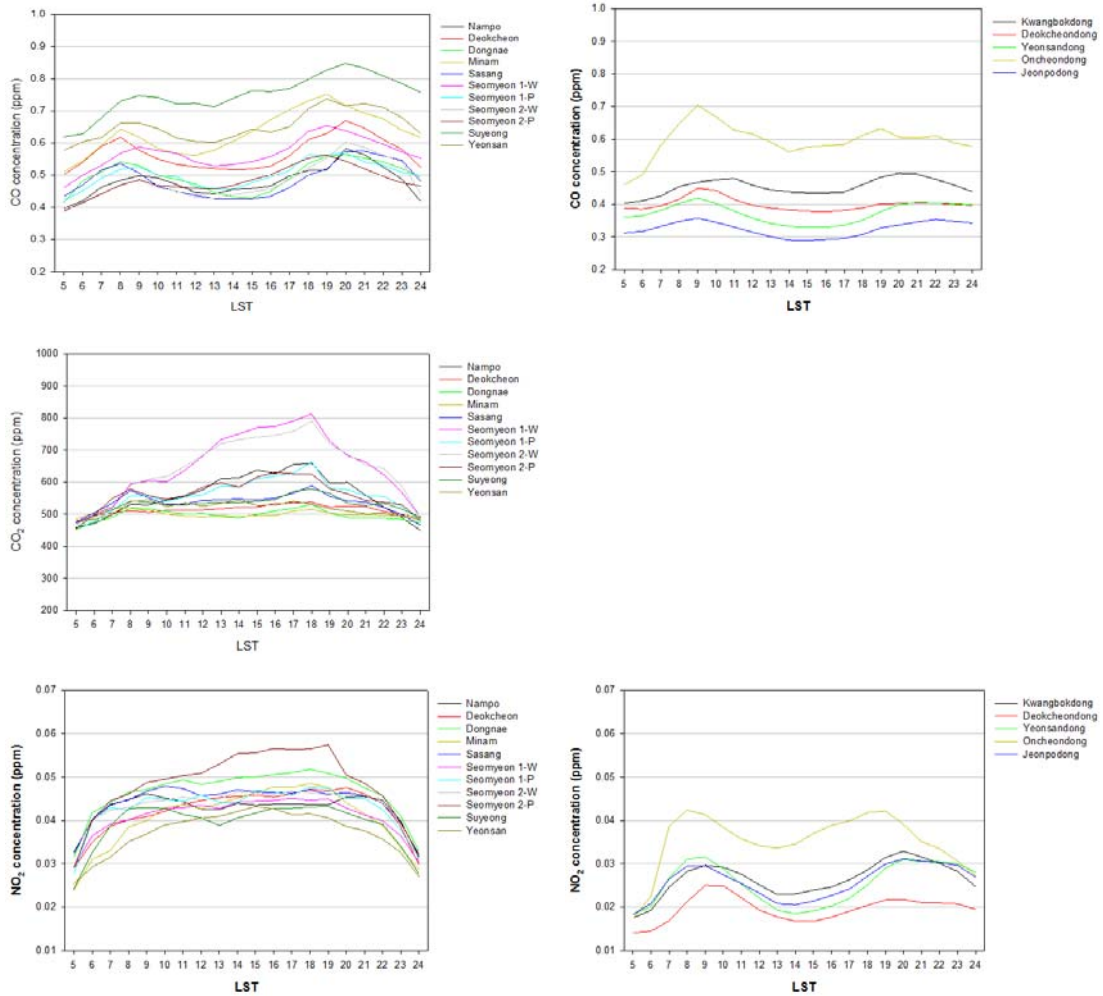


Fig. 2. Diurnal variation of CO, CO₂ and NO₂ concentration at Busan subway station and ground station for 3 years (2015~2017).

(1400 LST)을 제외하고 모두 1500~1600 LST에 나타나 지하역사에 비해 2시간 정도 지연되었다. 그리고 지하역사의 CO 농도는 도로변 지점인 동래역을 제외하고 지상의 농도보다 높은 값을 보였으며, 특히 연산역이 지상의 연산동보다 전시간대에 걸쳐 0.2 ppm 정도 높은 농도를 보였다. 또한 지하역사의 모든 지점이 지상보다 아침의 피크는 1시간 정도 빠르고 저녁의 피크는 1시간 지연되어 나타났다. Namgung et al.(2016)은 대부분의 지하역사 대합실의 CO 농도가 승강장보다 1.2~1.5배 높다고 하였으며, 지하역사 승강장의 CO 농도는 도로를 운행

하는 차량 등에 의해 발생하는 CO와 유의한 상관관계가 있다고 하였다. Moreno et al.(2014)도 도로 차량 운행에 의해 지하역사의 CO 농도가 영향을 받는다고 하였고, 대합실에서의 CO 농도는 대합실내에 위치한 상가 또는 구조물의 영향에 의한 것일 수도 있으므로 외부 도로상 차량운행에 의한 영향으로 단정 지을 수 없으며, 배출원에 대한 면밀한 조사를 필요로 한다고 하였다. Cheng and Yan(2011)은 대만의 타이베이 지하철 승강장의 CO 농도는 0.30~0.48 ppm으로 외부보다 대략 0.3~0.6 배 낮으며, 외부 도로와 승강장은 양의 상관성이 존재하고

Table 2. Seasonal mean of CO, CO₂ and NO₂ concentration (ppm) observed at Busan subway station for 3 years (2015~2017)

Station	CO				CO ₂				NO ₂			
	Spr.	Sum.	Fall	Win.	Spr.	Sum.	Fall	Win.	Spr.	Sum.	Fall	Win.
Nampo	0.48	0.45	0.50	0.49	542	562	569	563	0.049	0.038	0.040	0.044
Deokcheon	0.63	0.43	0.54	0.68	506	493	516	543	0.050	0.039	0.037	0.042
Dongnae	0.51	0.43	0.48	0.58	476	495	496	522	0.054	0.042	0.044	0.046
Minam	0.76	0.54	0.57	0.67	504	491	496	516	0.050	0.040	0.037	0.035
Sasang	0.51	0.39	0.46	0.60	523	518	545	555	0.047	0.039	0.045	0.045
Seomyeon 1-W	0.60	0.53	0.54	0.61	639	641	653	664	0.046	0.041	0.036	0.041
Seomyeon 1-P	0.53	0.41	0.45	0.61	572	544	550	572	0.050	0.039	0.041	0.042
Seomyeon 2-W	0.45	0.40	0.49	0.57	644	647	635	651	0.047	0.044	0.040	0.043
Seomyeon 2-P	0.49	0.42	0.46	0.55	572	522	555	595	0.057	0.046	0.042	0.047
Suyeong	0.93	0.58	0.69	0.83	549	516	526	538	0.048	0.040	0.035	0.033
Yeonsan	0.65	0.53	0.67	0.77	533	498	502	540	0.046	0.038	0.034	0.031

이것은 승강장의 CO는 외부 역사로부터 유입된 것이라고 하였다.

CO₂농도의 일변화를 보면, 출근 시간대인 0800 LST에 약한 피크를 보이다가 1000 LST에 약하게 감소한 후 지속적으로 상승하여 퇴근 시간인 1800 LST경에 최고 농도를 보였으며, 이후 급격히 하락하는 추세를 나타내었다. 새벽과 심야시간대에 상대적으로 매우 낮은 농도를 보였다. 특히 서면 1호선 및 2호선 대합실의 농도가 타 지점보다 탁월하게 높았으며 1300 LST부터 1800 LST까지 700 ppm이상의 고농도를 유지하였다. 그리고 남포역도 서면 1, 2호선 대합실보다는 낮지만 동일한 시간대에 600 ppm이상의 고농도를 나타내었다. 그리고 서면 1, 2호선 승강장도 주간시간대에 다소 높은 농도를 보였으나, 덕천, 동래, 미남, 연산의 일변화는 500 ppm정도로 위의 지점에 비해 매우 미미한 상태를 보여주었다. CO₂는 대기환경기준 물질이 아니어서 지상의 대기오염 측정소의 자료가 없어 서로 비교하지 못한 것이 매우 아쉽다.

NO₂의 일변화를 보면, 모든 지점에서 0500 LST부터 0900~1000 LST까지 급속히 증가하였으며, 이후 2000 LST까지는 다소 증감이 있지만 일정한 농도를 보여주었고 2200 LST이후 급속히 하강하는 추세를 나타내었다. 가장 높은 농도를 보인 지점은 서면 2호선 승강장으로 1400~1900 LST 사이에 0.055 ppm이상의 고농도를 나타내었다. 동래역도 다른 지점에 비해 비교적 농도를 나타내었다. 지상의 NO₂농도의 일변화를 보면, 0800~

1000 LST와 1900~2000 LST 두 번의 피크를 뚜렷이 나타내고 1300~1500 LST에 저농도를 보이고 있다. 그러나 지하역사의 일변화는 지상과는 달리 주간과 저녁의 농도의 변화가 거의 없는 양상을 보여주고 있다. 이러한 지하역사의 낮시간대의 높은 NO₂농도는 주 발생원인 차량의 배출가스가 도로변 환기시설 가동에 의해 지하공간으로 유입되어 도로변 수준으로 유지하면서 태양광이 없는 지하환경에서 광화학반응으로 생성되는 오존에 의한 소멸과 감소가 이루어지지 않아 NO₂가 높은 농도를 유지하는 것으로 사료된다(Kim et al., 2009). 한편, 지하역사의 심도, 강제환기를 통한 급기량 및 배기량과 승강장의 용적 등은 NO₂농도에 지배적으로 영향을 미치지 않는다는 보고가 있다(Son et al., 2000).

Table 2는 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 CO 및 CO₂ 그리고 NO₂농도의 계절변화를 나타낸 것이다. 먼저 CO농도를 보면, 대부분 겨울철이 가장 높은 농도를 보였고, 남포동은 가을철, 미남역과 수영역은 봄철이 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 모든 지점에서 여름철이 가장 낮은 농도를 나타내었다. CO₂농도를 보면, CO와 마찬가지로 겨울철이 대부분 최대농도를 나타내었으며, 남포역이 가을철, 수영역이 봄철에 최고농도를 나타내었고, 최저농도는 봄철과 여름철에 골고루 분포하여 나타났다. NO₂농도를 보면, CO와 CO₂와는 다르게 모든 지점에서 봄철에 최대농도를 나타내었으며, 최저농도는 여름철과 가을철에 걸쳐 나타났다. 수영역은 CO 및 CO₂ 그리고 NO₂농도

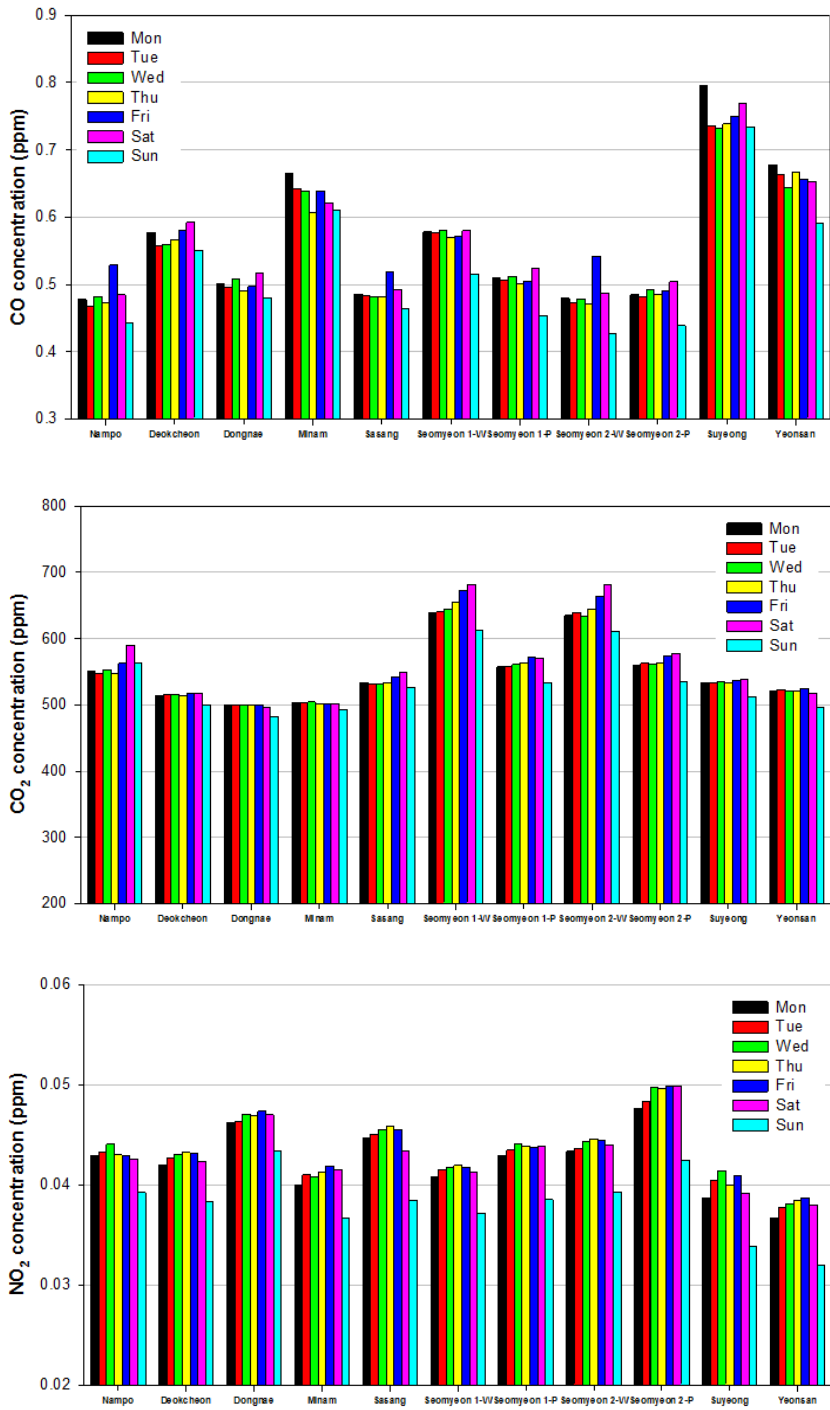


Fig. 3. Weekly variation of CO, CO₂ and NO₂ concentration observed at Busan subway station for 3 years (2015~2017).

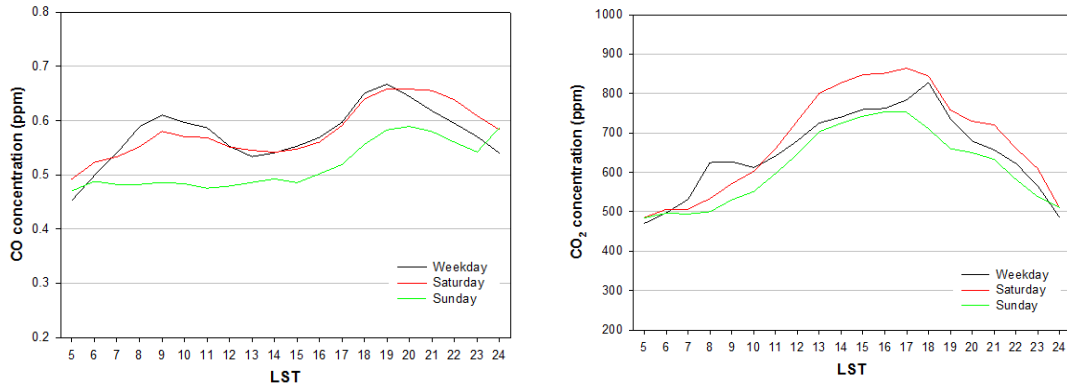


Fig. 4. Diurnal variation of weekday, Saturday and Sunday for CO and CO₂ at Seomyeon 1 line waiting room.

모두 봄철에 최대농도를 나타내었으며, 이에 대해서는 더 조사가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Fig. 3은 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 CO 및 CO₂ 그리고 NO₂농도의 요일별 변화를 나타낸 것이다. 먼저 CO 농도의 보면, 덕천, 동래, 서면 1호선 대합실과 승강장, 서면 2호선 승강장이 토요일에 가장 높은 농도를 나타내었고, 남포역, 사상역, 서면 2호선 대합실은 금요일에, 미남역, 수영역 그리고 연산역은 월요일에 최대농도를 나타내었다. 그리고 미남역(목요일)과 수영역(수요일)을 제외하고 모든 지점에서 일요일에 최저농도를 나타내었다. 월요일과 금요일의 고농도 발생은 교통정체가 심한 도시 간선도로변의 자동차에서 배출된 CO가 지하역사로 유입되어 나타난 것으로 사료된다(Kim et al., 2009). 특히 서면 2호선 대합실의 금요일(0.54 ppm)과 수영역의 월요일(0.80 ppm)의 CO 농도는 다른 요일에 비해 월등하게 높게 나타났다. CO₂농도를 보면, 남포, 사상, 서면 1호선 대합실과 승강장, 서면 2호선 대합실과 승강장, 수영역이 토요일에 가장 높은 농도를 보였고, 덕천역이 금요일, 동래역과 미남역이 화요일, 연산역이 금요일에 최대농도를 나타내었다. 그리고 모든 지점에서 일요일에 최저농도를 나타내었다. NO₂농도를 보면, 남포역, 서면 1호선 승강장 그리고 수영역은 수요일, 덕천역, 사상역, 서면 1호선과 2호선 대합실은 목요일, 동래역, 미남역, 서면 2호선 승강장은 금요일에 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 모든 지점에서 일요일에 최저농도를 나타내었다.

Fig. 4는 부산 서면 1호선 대합실에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 CO와 CO₂농도를 주중(월요일~금요일)과 토요일 그리고 일요일로 나누어 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 먼저 CO농도를 보면, 토요일은 주중에 비해 낮거나 비슷한 분포를 보여주지만 2000 LST이후는 토요일이 높은 농도를 보였다. 특히 오전 시간대는 주중의 농도가 토요일과 일요일에 비해 매우 높은 농도를 나타내었다. 이는 CO의 발생원이 주요 도시간선도로변의 자동차 통행에 의한 것으로 주중의 통행량이 주말보다 많은 것으로 보인다. CO₂농도를 보면, 토요일의 농도가 주중에 비해 높은 것을 알 수 있고, 특히 1000~1800 LST는 농도 차이가 월등히 높게 나타났다. 주중은 0800 LST와 1800 LST 두 개의 피크가 있으나 토요일과 일요일은 1700 LST 부근에 한 개의 피크가 존재한다. 이는 주말은 아침에 출근하는 승객이 없어 이러한 현상이 나타나는 것으로 보인다(Johansson and Johansson, 2003).

Fig. 5는 2017년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 부산도시철도 1호선 서면역을 이용한 승 하차 승객수의 시간별과 요일별 변화를 나타낸 것이다(Busan Transportation Corporation, 2018). 먼저 주중의 일변화를 보면, 출근 시간대인 0800~0900 LST에 피크를 보인 후 약간 감소하였다가 이후 지속적으로 증가하여 퇴근 시간대인 1800~1900 LST에 매우 높은 이용객수를 나타내었다. 토요일과 일요일을 보면, 아침의 출근 시간대의 피크는 없으며, 1300~1400 LST, 1700~1800 LST에서 약간

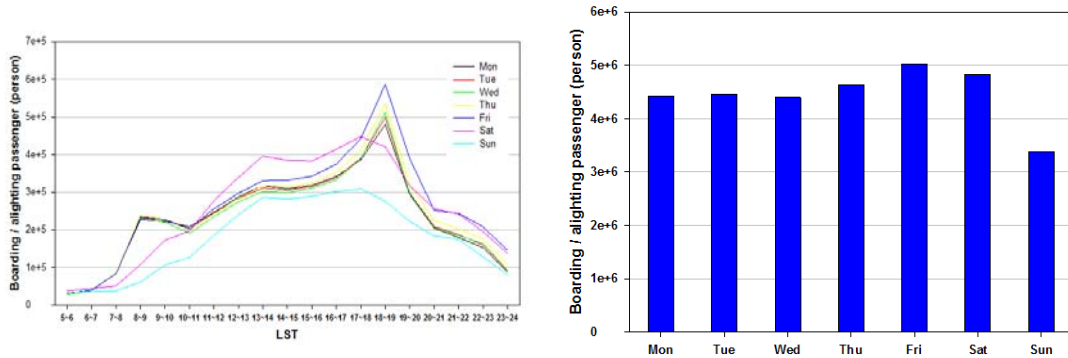


Fig. 5. Diurnal and weekly variation the number of boarding/alighting passengers at Seomyeon 1 line (2017).

의 피크를 나타내었다. 특히 토요일의 1100~1800 LST에는 주중보다 월등히 높은 이용객수를 나타내어 토요일 주간에 CO₂농도가 높게 나타내는 것과 상당한 상관이 있는 것으로 보인다. 요일별 총 이용객수를 보면, 금요일이 가장 높고 다음으로 토요일이며, 일요일에 가장 낮은 이용객수를 나타내고 있다.

Table 3은 2015년부터 2017년까지 3년간 부산지역 주요 지하철역사와 인접한 지상의 대기오염측정망에서 측정한 CO와 NO₂농도의 상관관계를 나타낸 것이다. 이는 지하철역사의 농도와 지상의 대기질을 비교하여 대기질 관리와 대책을 수립하는데 도움이 되리라고 본다. 남포역과 광복동의 CO와 NO₂농도의 상관계수는 각각 0.32와 0.60이었고, 덕천역과 덕천동은 각각 0.42와 0.46. 동래역과 온천동은 각각 0.59와 0.28, 서면 1호선과 2호선의 대합실 및 승강장과 전포동은 각각 0.56~0.64, 0.58

~0.69, 연산역과 연산동은 각각 0.30과 0.26으로 나타났다. 서면 1호선과 2호선의 대합실과 승강장이 전포동과 비교적 높은 상관을 나타내었고, 연산역과 연산동이 가장 낮은 상관계수를 나타내었다. 특히 서면 2호선 대합실과 전포동은 CO와 NO₂농도에서 가장 높은 상관을 보였다. 남포역과 광복동의 CO, 그리고 연산역과 연산동의 CO와 NO₂농도의 상관이 매우 낮아 나타났는데 이에 대한 조사가 좀 더 필요하리라 사료된다. 모든 항목에서 SPSS-25K를 이용하여 Pearson 양측검증을 통하여 유의수준을 평가한 결과 P<0.01로서 유의한 차이를 보였다.

Table 4는 부산지역 주요 지하철역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정한 일평균 CO₂와 NO₂농도의 일정 기준 초과회수를 나타낸 것이다. CO₂의 실내공기질 유지기준은 1시간 평균 1,000 ppm 이하이다. 그러나 본

Table 3. Correlation coefficient between subway and ground station for CO and NO₂ concentration observed at Busan for 3 years (2015~2017)

Subway station	Ground station	Correlation coefficient	
		CO	NO ₂
Nampo	Kwangbokdong	0.32	0.60
Deokcheon	Deokcheon	0.42	0.46
Dongnae	Oncheondong	0.59	0.28
Seomyeon 1-W	Jeonpodong	0.58	0.58
Seomyeon 1-P	Jeonpodong	0.46	0.61
Seomyeon 2-W	Jeonpodong	0.64	0.69
Seomyeon 2-P	Jeonpodong	0.56	0.65
Yeonsan	Yeonsan	0.30	0.26

Table 4. Number of exceedances per year of the daily value for 700 ppm and 0.05 ppm of CO₂ and NO₂ at Busan for 3 years (2015~2017)

Station	CO ₂ ≥ 700 ppm				NO ₂ ≥ 0.05 ppm			
	2015	2016	2017	Total	2015	2016	2017	Total
Nampo	1	11	9	21	57	110	87	254
Deokcheon					82	145	37	264
Dongnae	5			5	129	110	136	375
Minam					89	22	157	268
Sasang		1		1	64	78	162	304
Seomyeon 1-W	23	106	45	174	51	71	109	231
Seomyeon 1-P		3		3	63	84	140	287
Seomyeon 2-W		5	1	6	39	101	150	290
Seomyeon 2-P		1		1	131	182	177	490
Suyeong		1		1	31	95	68	194
Yeonsan					62	29	54	145
Total	29	128	55	212	798	1,027	1,277	3,102

연구는 지하역사의 공기질 특성을 고려한다는 측면에서 1시간 자료보다는 0500~2400 LST 사이의 평균농도를 사용하였고, 1,000 ppm보다 낮은 700 ppm을 사용하여 초과회수를 조사하였다. 3년간 가장 높은 초과회수는 서면 1호선 대합실이 174일로 전체 212일의 82%를 차지하여 가장 높은 빈도를 나타내었고, 다음이 남포역으로 21일을 나타내었다. 그 외 지점은 6일 이하로 매우 미미한 발생을 나타내었고 덕천역, 미남역, 연산역은 한차례도 700 ppm 이상을 나타내지 않았다. 2015과 2017년보다는 2016년의 발생빈도가 128일로 전체의 60%를 차지하여 높은 발생률을 보였다.

NO₂의 실내공기질 권고기준은 0.05 ppm이하로 본 연구에서도 이 기준을 따라 초과여부를 조사하였다. 0500~2400 LST사이의 평균농도가 0.05 ppm을 초과한 회수를 보면, 서면 2호선 승강장이 490일로 가장 높았으며, 다음으로 동래역이 375일로 두 번째이었고, 사상역이 304일로 세 번째이었다. 가장 낮은 발생률을 보인 지점은 145일의 연산역이었으며, 부산지역 지하역사의 NO₂농도는 비교적 높다고 할 수 있다. 연도별로 보아도 2015년에 798일, 2016년에 1,027일, 2017년에 1,277일로 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 이러한 NO₂의 고농도는 앞의 일변화에서 보았듯이 오전시간대의 증가 후 낮시간대에 감소하여 저녁시간대에 다시 증가하는 광화학반응에 의한 특성을 보이는 지상과는 달리

지하역사는 오전시간대의 상승이 낮시간대에도 큰 변화 없이 유지하기 때문에 판단된다(Kim et al., 2009). 서울의 지하역사에서 2008~2012년 1시간 평균 농도의 실내공기질 유지/권고기준 초과율을 조사한 결과(Yim et al., 2014), 실내공기질의 지표인 CO₂농도의 기준초과율은 0~1.1%로 상당히 낮은 값을 나타냈지만, 외기 및 대합실의 NO₂는 각각 24.8~72.5%, 9.4~85.4%으로 상당히 큰 것으로 나타났다.

Table 5는 부산지역 주요 지하역사에서 2015년부터 2017년까지 3년간 측정된 일평균 CO₂가 PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂농도와 어떠한 상관성이 있는지를 조사하여 나타낸 것이다. PM₁₀과는 서면 1호선과 2호선 승강장이 각각 0.60과 0.59로 매우 상관성을 나타내었고, PM_{2.5}와는 서면 1호선 승강장이 0.50으로 높은 상관성을 나타내었고 동래역도 0.43으로 다소 높은 상관성을 나타내었다. CO와는 서면 1호선 승강장과 남포역이 각각 0.53과 0.47로 비교적 높은 상관성을 나타내었고, NO₂와는 서면 1호선 승강장과 서면 2호선 대합실이 각각 0.52와 0.45로 비교적 높은 상관성을 보였다. 실내 환경의 CO₂농도는 실외환경보다 1.1~2.4배 높다. 이는 실내환경의 CO₂는 승객의 호흡에 의해 상승되었다고 본다. Cheng and Yan (2011)은 대만의 타이베이 지하철 대합실과 승강장의 CO₂농도는 대만 실내공기질 기준보다 높다고 하였으며, 이는 많은 승객들에 의해 영향을 받은 것이라고 하였다.

Table 5. Correlation coefficient between CO₂ and other substances (PM₁₀, PM_{2.5}, CO, NO₂) observed at Busan subway for 3 years (2015~2017)

	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO	NO ₂
Nampo	-0.04		0.47	-0.04
Deokcheon	0.05		0.28	-0.02
Dongnae	0.31	0.43	0.29	-0.14
Minam	0.23		0.21	0.06
Sasang	0.30		0.16	0.34
Seomyeon 1-W	0.20	0.09	0.40	0.01
Seomyeon 1-P	0.60	0.50	0.53	0.52
Seomyeon 2-W	0.37		0.43	0.45
Seomyeon 2-P	0.59		0.43	0.24
Suyeong	0.17		0.04	0.27
Yeonsan	0.30		0.29	0.27

또한 대합실과 승강장의 PM₁₀와 CO₂농도는 양의 상관관계를 보였다고 하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2015년부터 2017년까지 3년간 부산지역 주요 지하역사의 CO, CO₂ 그리고 NO₂농도자료를 이용하여 기체상 오염물질의 특성을 체계적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연평균 CO농도는 수영역이 0.75 ppm으로 가장 높았고, 0.48 ppm의 남포역, 서면 2호선 대합실과 승강장이 가장 낮았다. 연평균 CO₂농도는 서면 1호선 대합실이 649 ppm으로 가장 높았고, 남포역, 덕천역, 사상역, 서면 2호선 대합실, 그리고 수영역이 매년 증가하는 추세를 보였다. 연평균 NO₂농도는 서면 2호선 승강장이 0.048 ppm으로 가장 높았고 연산역이 0.037 ppm으로 가장 낮았다.

2) CO의 일변화는 전 지점 모두 아침과 저녁 하루 두 번의 피크를 보였으며, 지하역사를 이용하는 출퇴근하는 승하차 인원의 변화와 상당히 유사한 경향을 나타내었다. CO₂농도의 일변화는 0800 LST에 약한 피크를 보이다가 1000 LST에 약하게 감소한 후 지속적으로 상승하여 1800 LST경에 최고농도를 보였으며, 이후 급격히 하락하는 추세를 나타내었다. NO₂의 일변화는 모든 지점에서 0500 LST부터 0900~1000 LST까지 급속히 증가하였으며, 이후 2000 LST까지는 다소 증감이 있지만 일정한 농도를 보여주고 2200 LST이후 급속히 하강하는

추세를 나타내었다.

3) 계절별 CO농도는 대부분 겨울철이 가장 높았고 모든 지점에서 여름철이 가장 낮은 농도를 나타내었다. CO₂농도는 CO와 마찬가지로 겨울철이 대부분 최대농도를 나타내었고, 최저농도는 봄철과 여름철에 골고루 분포하였다. NO₂농도는 CO와 CO₂와는 다르게 모든 지점에서 봄철에 최대농도를 나타내었고 최저농도는 여름철과 가을철에 걸쳐 나타났다.

4) 요일별 CO 농도는 대부분 토요일에 가장 높았고 일부는 금요일과 월요일(연산역)에 최대농도를 나타내었고, 최저농도는 미남역(목요일)과 수영역(수요일)을 제외하고 모든 지점에서 일요일에 최저농도를 나타내었다. CO₂농도는 대부분 토요일에 가장 높았고 일부는 금요일, 화요일에 최대농도를 나타내었고, 모든 지점에서 일요일에 최저농도를 나타내었다. NO₂농도는 수요일, 목요일, 금요일에 골고루 최대농도를 보였고, 모든 지점에서 일요일에 최저농도를 나타내었다.

5) 지하역사와 인접한 지상의 대기오염측정망에서 측정한 CO와 NO₂농도의 상관관계를 보면, 서면 1호선과 2호선의 대합실과 승강장이 전포동과 비교적 높은 상관관을 나타내었고, 연산역과 연산동이 가장 낮은 상관관을 나타내었다.

6) 지난 3년간 CO₂농도가 700 ppm을 초과한 횟수는 서면 1호선 대합실이 174일로 가장 높았고, 다음이 남포역(21일), 그 외 지점은 6일 이하로 매우 미미하였다. NO₂의 실내공기질 권고기준인 0.05 ppm을 초과한 횟수는

서면 2호선 승강장이 490일로 가장 높았고 다음으로 동래역(375일), 사상역(304일) 순이었고, 연산역이 145일로 가장 낮았으며, 2015년에 798일, 2016년에 1,027일, 2017년에 1,277일로 점차 증가하는 추세를 보였다.

7) 본 연구 결과는 유동인구가 많은 지하역사 내의 실내공기질을 적정하게 유지하여 시민의 건강보호 및 환경상의 위험을 예방할 수 있고, 또한 효율적인 실내공기질 관리를 위해 과학적인 측정 자료를 근거로 시정정책 방향 수립, 시민들의 환경관심 유도 및 알권리를 충족할 수 있는 통찰력을 제공할 수 있다.

REFERENCES

- Busan Transportation Corporation, 2017, <https://www.humetro.busan.kr>.
- Busan Transportation Corporation, 2018, The number of boarding/alighting passengers at Busan subway station, 2017.
- Chan, L. Y., Lau, W. L., Zou, S. C., Cao, Z. X., Lai, S. C., 2002, Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China, *Atmos. Environ.*, 36, 5831-5840.
- Cheng, Y. H., Yan, J. W., 2011, Comparisons of particulate matter, CO, and CO₂ levels in underground and ground-level stations in the Taipei mass rapid transit system, *Atmos. Environ.*, 45, 4882-4891.
- 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.
- Johansson, C., Johansson, P. A., 2003, Particulate matter in the underground of Stockholm, *Atmos. Environ.* 37 (1), 3-9.
- 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, J. Y., Jang, K. J., Han, H., 2012, Study of pollution concentration source and its change pattern in underground station, *Con. Soc. Air-condi. and Refri. Eng. Kor.*, 547-550.
- Moreno, T., Perez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillon, M. C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Gibbons, W., 2014, Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design, *Atmos. Environ.*, 92, 461-468.
- 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.
- Son, B. S., Jang, B. K., Park, J. A., Kim, Y. S., 2000, Indoor and outdoor NO₂ concentrations at subway station and personal NO₂ exposure of subway station workers, *Kor. Sanita.*, 15, 134-141.
- 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.

• 전병일, 신라대학교 에너지화학공학부 교수
bijeon@silla.ac.kr