

서울시 지하역사 실내오염물질 농도자료의 통계분석을 통한 실내공기질 특성 평가

Evaluation on Indoor Air Quality by Statistical Analysis of Indoor Air Pollutants Concentration in a Seoul Metropolitan Underground Railway Station

임봉빈* · 이규성 · 김주인 · 홍현수 · 김장원¹⁾ · 조경호¹⁾

정을규¹⁾ · 김인규¹⁾ · 안연순²⁾

(주)나인에코 기업부설연구소, ¹⁾한국환경공단 대기환경처 생활환경팀

²⁾한국환경공단 기후대기본부

(2014년 3월 12일 접수, 2014년 4월 8일 수정, 2014년 5월 17일 채택)

Bongbeen Yim*, Kyusung Lee, Joojin Kim, Hyunsu Hong, Jangwon Kim¹⁾,

Kyung-Ho Jo¹⁾, Eulgyu Jung¹⁾, Inkyu Kim¹⁾ and Yeonsun An²⁾

R&D Center, NINECO Inc.

¹⁾Indoor Air Quality & Noise Monitoring Network Team, Korea Environment Corporation

²⁾HQ of Climate & Air Quality Management, Korea Environment Corporation

(Received 12 March 2014, revised 8 April 2014, accepted 17 May 2014)

Abstract

The objective of this study was to explore the characteristics of concentration of indoor air pollutants, such as PM₁₀, CO₂, and NO₂, measured by tele-monitoring system in a Seoul Metropolitan underground railway station from January 1, 2008 to December 31, 2012. The annual average concentration of indoor air pollutants actually varied over a wide range and was found to exhibit marked variation with time and measurement sites (tunnel inlet, platform, and concourse). After installing platform screen doors, the average PM₁₀ concentration on platform and concourse was decreased by 43.8% and 31.2%, respectively during the study periods. The relationship between the concentration of PM₁₀ and meteorological parameters (relative humidity and rainfall) or the Asian dust events was regarded as statistically significant. The correlations between the number of boarding/alighting passengers and PM₁₀, CO₂, and NO₂ were calculated. A p-value of less than 0.01 was regarded as significant except NO₂. The I/O ratio of PM₁₀ concentration was elevated after a congested time (about 08:00 am). The average I/O ratios of NO₂ were observed in concourse and platform on 03:00 am with 1.76 ± 0.91 and 1.50 ± 0.51 , respectively. The average daily variation of standard excess rate of PM₁₀ and NO₂ concentration in concourse and platform was investigated. The highest standard excess rate was observed on 21:00 (09:00 pm).

Key words : Underground railway station, Tele-monitoring system, Indoor air quality, PM₁₀, CO₂

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)42-931-5730, Email : yim-b@daum.net

1. 서 론

우리나라의 대표적인 대중교통수단 중 지하철은 수도권에 9개 노선 327.1 km(국철: 106.3 km)가 설치되어 있고 총 302개역(전동차 3,691대)이 운영되고 있으며, 현재에도 지속적으로 노선확장이 추진되고 있는 상황이다(Seoul, 2013). 일반 도로 위를 달리는 자동차와 달리 궤도 위를 달리는 지하철은 주변 교통상황의 영향을 받지 않고 정확하고 안전한 교통수단으로서 많은 장점을 가지고 있기 때문에 대중교통수단에서 차지하는 비중이 점점 더 증가하고 있다.

지하역사는 시설의 확장과 지하철 운행거리의 증가로 불특정 사람들이 자주 이용하는 대표적인 다중이용시설이 되었다. 이러한 지하역사는 폐쇄적인 공간환경 때문에 이용자들에게 미치는 오염물질의 영향이 큰 것으로 알려져 있으며, 특히 터널 내 열차운행, 환기를 위한 외기 유입, 이용자들의 왕래 및 지하에 위치한 점포 등 오염물질의 발생 및 유입을 예상할 수 있는 조건들이 존재한다.

지하역사의 오염물질 농도에 대한 조사는 미세먼지(Park *et al.*, 2013; Cheng and Yan, 2011; Lee *et al.*, 2010; Salma *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2008; Park and Ha, 2008)를 중심으로 이루어졌으며, 지하공간이라는 특이성 때문에 라돈(Jeon *et al.*, 2012; Espinosa and Gammage, 1995)에 대한 조사연구도 이루어졌다. 그러나 장기간의 연속측정(5년) 결과를 활용한 실내오염물질의 농도 특성을 연구하여 보고한 사례는 거의 없다.

한국환경공단에서는 지하역사를 비롯한 다중이용시설 시설군별 실내공기 오염 원인을 정확하게 파악 및 분석하여 체계적이고 과학적인 실내공기질 관리대책을 수립하고, 신뢰성 있는 정책의 기초자료를 확보하기 위하여 2006년부터 연차별로 다중이용시설군별 대표시설에 대한 실내공기질자동측정망을 구축 및 운영하고 있다. 현재 14개 시설(13개 시설군)의 38개 지점(76항목)에서 자동측정망을 운영하고 있으며, 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」의 유지 및 권고기준 중 연속자동측정 가능한 PM₁₀(30개 지점), CO₂(25개 지점), CO(5개 지점), NO₂(13개 지점), O₃(3개 지점) 등 5개 항목을 대상으로 시설군 및 대상지점 실내공기질 특성을 고려하여 측정항목을 선정하고 운영하고 있다(KECO, 2012).

본 연구에서는 실내공기질자동측정망에 의해 장기간 연속적으로 측정되고 있는 지하역사를 대상으로 대합실, 승강장, 터널 유입부 및 외기의 PM₁₀, CO₂ 및 NO₂ 농도자료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 또한, 실내오염물질 농도에 영향을 미칠 수 있는 다양한 조건과의 상관성을 분석하여 장래 실내공기질을 관리하는 측면에서 쾌적한 공기질을 확보하기 위한 지하역사의 체계적이고 과학적인 관리 및 유지에 필요한 기초자료로 활용할 수 있도록 보다 심층적인 분석을 실시하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상

본 연구의 연구대상인 지하역사는 지하철 4호선에 위치한 역으로 1985년 준공되었으며, 총 면적은 6,994 m²이고 구조는 지상 0층 및 지하 2층으로 이루어져 있다. 대상 지하역사의 2012년도 수송인원은 33,057,079명(승하차기준)이며(Seoul Metro, 2014a), 일일 평균 이용객수는 90,319명/일(승하차기준)이다. 2006년부터 실내공기질자동측정망을 구축하여 PM₁₀, CO₂ 및 NO₂ 농도를 측정하고 있다. 지하역사의 환기를 위해서 일간 상시 기계환기를 운영하고 있으며, 환기방식은 지하역사 중앙부를 기준으로 좌/우측 환기시설을 개별적으로 운영하고 있다. 즉 그림 1의 8번 출입구 부근 외기 도입부에서 좌측 대합실과 좌측 승강장으로 공기를 공급하는 형태이다.

2.2 측정항목 및 방법

연구대상인 지하역사에서는 시설 및 대상지점의 실내공기질 특성을 고려하여 대합실과 승강장에서는 PM₁₀, CO₂와 NO₂를 측정하고 있으며, 터널 유입부에서는 PM₁₀, 외기 측정지점에서는 PM₁₀과 NO₂를 측정하고 있다. 본 연구에서는 2008년 1월 1일부터 2012년 12월 31일까지 각 물질별로 365일 24시간 측정된 측정자료의 1시간 평균농도를 이용하여 통계분석을 수행하였다. 빈도분석을 포함한 모든 통계분석은 SPSS (v.12.0) 프로그램을 이용하였으며, 실내공기오염물질과 영향인자와의 상관성은 피어슨 상관분석(Pearson correlation analysis)을 이용하였고, 회귀분석은 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 이용

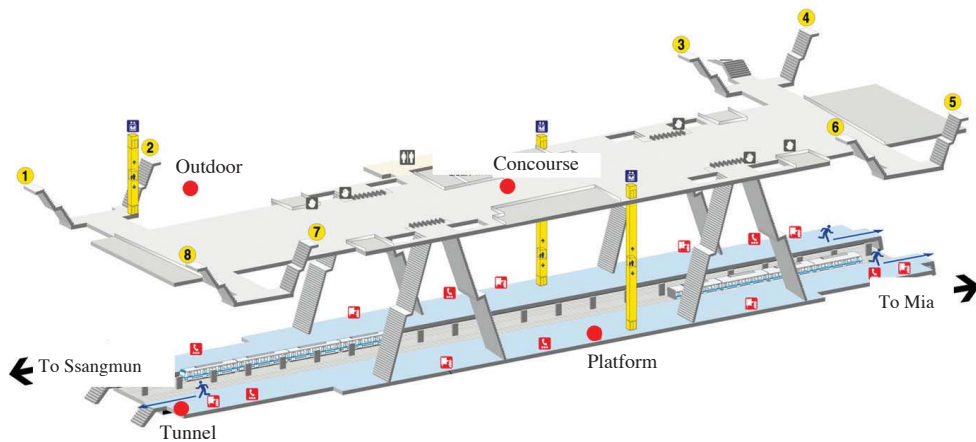


Fig. 1. Installation location of the tele-monitoring system in underground railway station (Seoul Metro, 2014b).

하였다.

실내공기질자동측정기기는 실내공기질공정시험기준에 근거하여 그림 1과 같이 대합실 및 승강장 중앙부 지점, 외기 도입부 부근 지점 및 터널 유입부에 설치하여 측정, 분석하였으며, 시료채취 높이의 경우 외기는 2.5 m이고 대합실, 승강장 및 터널유입부는 1.5 m이다. 측정지점별 설치목적은 보면, 외기 도입부 부근 지점은 실내 환기를 위해 도입되는 외부 공기질을 확인하고, 대합실 및 승강장 시설 중앙부 지점은 시설 내 실내공기질을 대표할 수 있는 공기질을 확인하기 위한 것이다. 설치된 자동측정기를 이용하여 PM₁₀은 베타산흡수법 (E-BAM, Metone, USA), NO₂는 화학발광법 (200E, API, USA), CO₂는 비분산적외선법 (360 EM, API, USA)으로 측정하였으며, 측정자료는 무선모뎀 (E802F, ISO Wireless, Korea)을 이용한 무선통신으로 전송되고, 무정전전원장치 (B6KVA, Daenongenc, Korea)를 설치하여 측정장치에 대한 전력공급을 제어하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 측정지점별 연평균 및 월평균 농도 추이

그림 2는 2008년부터 2012년까지의 시간평균 농도를 이용하여 산정한 각 측정지점별 연평균 농도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 2(a)의 PM₁₀ 연평균 농도는 터널 유입부를 제외하고 전체적으로 실내공기질 유지

기준인 150 µg/m³ (MOE, 2012)을 만족하는 것으로 나타났다. 터널유입부와 외기의 PM₁₀ 농도는 각각 150 ~ 168 µg/m³과 61 ~ 69 µg/m³으로 연도별로 큰 변화가 나타나지 않았지만, 지하역사 내부 측정지점인 대합실과 승강장의 경우 PM₁₀ 농도가 최근에 오면서 점차 감소하는 경향이 나타났다. 특히 2008년과 2009년 이후의 농도를 비교하면 각각 84 µg/m³과 37 ~ 59 µg/m³ (대합실) 및 135 µg/m³과 54 ~ 75 µg/m³ (승강장)으로 차이가 큰 것으로 나타났다. 또한 2008년도 농도는 외기보다 시설내부에서 측정된 농도가 상대적으로 큰 것으로 나타났으나, 2009년 이후에는 외기 농도와 실내농도가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

그림 2(b)의 NO₂ 연평균 농도는 전체적으로 실내 공기질 권고기준인 0.05 ppm (MOE, 2012)을 초과하는 경우가 많았으며, 2008년과 2011년에는 외기의 농도와 함께 대합실의 농도가 높게 나타났다. 특히 2011년 대합실에서 측정된 평균농도는 0.100 ± 0.040 ppm으로 상당히 높게 나타났다. 또한 자동차의 통행량이 많은 도로변에 위치한 외기 측정지점의 결과와 비교해서도 2011년과 2012년 대합실의 연평균 농도가 상대적으로 높게 나타나 NO₂의 외부유입뿐만 아니라 실내에 배출원이 존재하거나 유입된 NO₂의 정체가 가능성을 생각할 수 있다. 이와 관련하여 태양광이 존재하지 않는 지하역사 내부 측정지점에서는 배출되거나 유입된 NO₂가 광화학반응에 의한 질소산화물 순환이 이루어지지 않기 때문에 광분해에 의해 감소되지 않고 어느 정도 농도가 유지될 수 있다는 연구

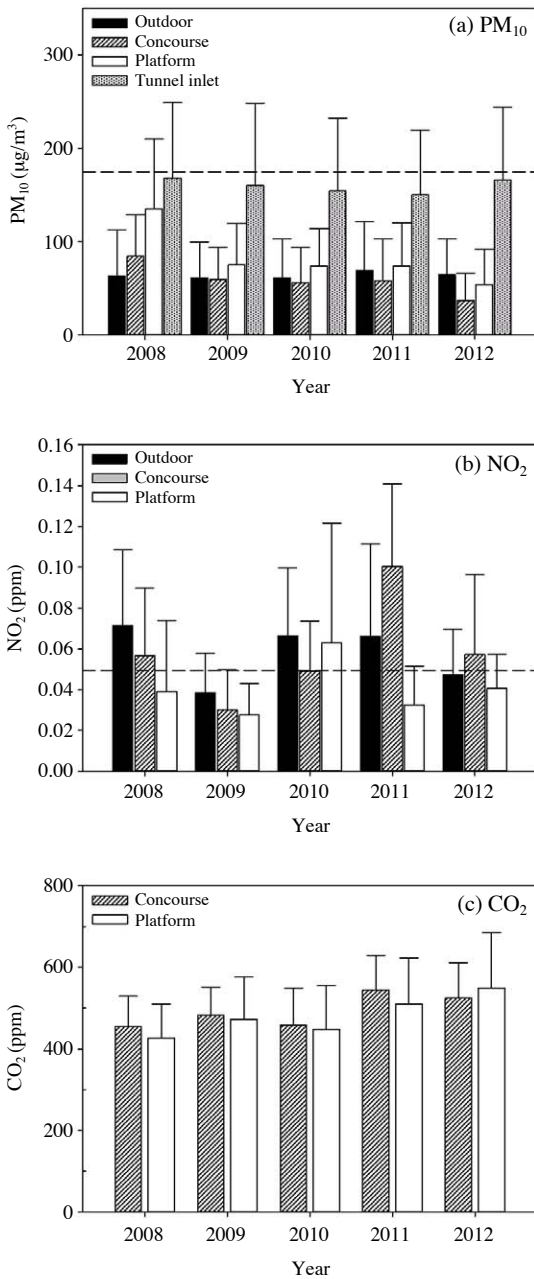


Fig. 2. Variation of annual average concentration of (a) PM_{10} , (b) NO_2 and (c) CO_2 in underground railway station.

결과가 보고되었다 (Kim *et al.*, 2009). 한편 지하역사의 심도, 강제환기를 통한 급기량 및 배기량과 승강

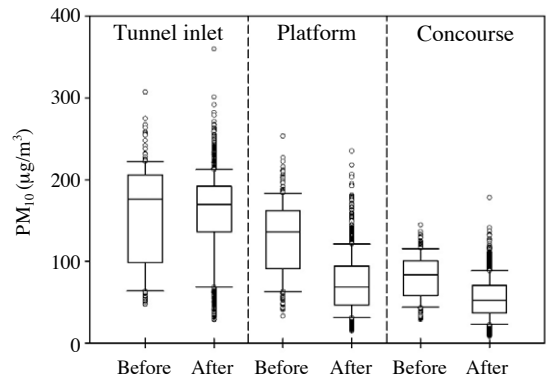


Fig. 3. Box plot of PM_{10} concentration measured at tunnel inlet, platform, and concourse before or after installing platform screen door.

장의 용적 등은 NO_2 농도에 지배적으로 영향을 미치지 않는다는 보고도 있다 (Son *et al.*, 2000).

그림 2(c)의 CO_2 연평균 농도는 대합실이 456~544 ppm, 승강장이 426~549 ppm으로 전반적으로 실내공기질 유지기준인 1,000 ppm 이하를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 승객 이외의 특정 배출원이 없는 지하역사의 경우 일평균 승하차인원이 측정기간 동안 89,310~91,478명 (Seoul Metro, 2014a)이었으며, CO_2 의 연평균 농도는 2008년부터 점차 약간 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 승강장 스크린도어 설치에 따른 PM_{10} 농도 변화 특성

지하역사의 PM_{10} 농도에 영향을 미치는 요인 중 열차풍에 의해 터널내부에 축적된 PM_{10} 이 전동차 도착 시 승강장 등으로 상당부분 운송될 수 있다. 본 대상 지하역사도 2008년 11월에 승강장 스크린도어를 설치, 운영하여 지하역사의 공기질을 개선시키고 있다. 본 연구에서는 승강장 스크린도어 설치 전후에 지하역사 내 PM_{10} 농도의 변화 특성을 비교, 분석하였다.

그림 3은 2008년 1월 1일부터 2012년 12월 31일까지의 PM_{10} 농도자료를 이용하여 지하역사 각 측정지점별 승강장 스크린도어 설치 전후의 농도 분포 특성을 나타낸 것이다. 승강장 스크린도어 설치 전 (2008년 1월 1일부터 2008년 10월 31일까지) 승강장과 대합실의 PM_{10} 농도는 80~130 $\mu g/m^3$ 이고 설치 후에는 55~73 $\mu g/m^3$ 으로 조사되었다. 측정지점별로 보면, 승

Table 1. Correlations between relative humidity (RH), rainfall and the concentration of PM₁₀ measured at outdoor, concourse, platform, tunnel inlet.

	Outdoor	Concourse	Platform	Tunnel inlet	RH	Rainfall
Outdoor	1.000					
Concourse	0.439 ^{a)}	1.000				
Platform	0.359 ^{a)}	0.910 ^{a)}	1.000			
Tunnel inlet	0.502 ^{a)}	0.356 ^{a)}	0.461 ^{a)}	1.000		
RH	-0.706 ^{a)}	-0.302 ^{b)}	-0.281 ^{b)}	-0.446 ^{a)}	1.000	
Rainfall	-0.514 ^{a)}	-0.309 ^{b)}	-0.277 ^{b)}	-0.416 ^{a)}	0.775 ^{a)}	1.000

^{a)}p-value < 0.01 by Pearson correlation.

^{b)}p-value < 0.05 by Pearson correlation.

강장의 경우 스크린도어 설치 전 $130 \pm 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 설치 후 $73 \pm 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소되었으며, 대합실의 경우 설치 전 $80 \pm 27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $55 \pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소되었다. 따라서 승강장 스크린도어 설치에 따른 PM₁₀ 농도의 감소율은 승강장이 43.8%, 대합실이 31.2%로 나타나 PM₁₀ 농도에 대한 저감효과는 상당히 큰 것으로 나타났다. 한편 동일한 시기에 측정된 외기와 터널유입부의 PM₁₀ 농도를 보면, 스크린도어 설치 전에 $64 \pm 22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (외기) 및 $164 \pm 64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (터널 유입부) 이고, 설치 후 $64 \pm 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (외기) 및 $159 \pm 51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (터널 유입부)으로 외기와 터널 유입부의 PM₁₀ 농도는 변화가 없지만, 스크린도어의 설치로 지하역사 내 승강장 및 대합실의 PM₁₀ 농도는 상당량 감소하는 것으로 나타났다.

또한 스크린도어 설치 전후, 승강장 PM₁₀ 농도의 실내외 비(indoor/outdoor ratio, I/O비)를 비교한 결과, 설치 전 평균 I/O비 값은 4.60이었으며, 설치 후에는 I/O비 값이 1.58로 나타나 스크린도어 설치 전에 터널에서 유입된 PM₁₀과 같이 내부오염원에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으며, 스크린도어 설치 후 내부오염원의 영향이 크게 감소한 것으로 나타났다.

한편 서울시 지하철 7호선상의 J지하철역에서 승강장 스크린도어 설치 전후에 측정된 PM₁₀ 농도를 보면, 설치 전후 평균농도 감소율이 20.5%로 나타나 스크린도어 설치에 따른 지하역사의 실내공기질 개선효과가 있는 것으로 조사되었다(Lee *et al.*, 2010).

3.3 기상요소 및 황사와 PM₁₀ 농도와의 관계

지하역사의 PM₁₀ 농도는 열차운행에 의한 발생뿐만 아니라 환기장치 운용을 통한 외기로부터의 유입 및 지하역사를 이용하는 승객에 의한 운반 등 외부

로부터 복합적으로 영향을 받을 수 있다(Choi *et al.*, 2004). 표 1은 지하역사 각 측정지점에서 2008~2012년에 걸쳐 측정된 PM₁₀ 농도와 기상청으로부터 수집한 강우량 및 상대습도와의 상관성을 조사한 결과이다. 대합실과 승강장에서 측정된 PM₁₀ 농도의 경우, 상관계수는 0.910 (p-value < 0.01)으로 매우 유의한 상관관계를 나타내어 두 지점의 PM₁₀ 농도는 서로 지배적으로 영향을 미치는 것으로 생각된다. 한편 강우량 및 상대습도와 PM₁₀ 농도는 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 외기의 PM₁₀ 농도와 상대습도 및 강우량은 유의한 음의 상관관계를 나타내어 여름철 강우량이 많거나 높은 상대습도 조건에서는 PM₁₀의 농도가 낮아진다고 생각할 수 있으며, 이러한 영향은 지하역사 내의 PM₁₀ 농도에도 일부 영향을 미친 것으로 생각된다. 따라서 지하역사 내에서 적절한 상대습도의 유지는 PM₁₀의 비산 등을 억제하여 PM₁₀에 의한 실내공기질 악화를 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 4는 2011년 황사발생일이 6회로 가장 많았던 5월의 일반 대기 중 PM₁₀ 농도(그림 4의 Seoul)와 동일한 기간에 지하역사에서 측정된 PM₁₀ 농도의 1시간 변화를 나타낸 것이다. 일반 대기 중 PM₁₀ 농도가 황사주의보 수준인 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 관측된 날은 3일로 이 시점의 외기와 대합실 및 승강장의 PM₁₀ 농도변화를 보면 유사하게 변동하고 있는 것으로 나타났다. 5월 전체 PM₁₀ 평균농도는 $75 \pm 76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (대기환경기준 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 대한 기준초과율 16.8%)이며, 그 중 황사발생일(5월 1~3일과 5월 12~13일) 평균 PM₁₀ 농도는 $180 \pm 134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기준초과율 63.6%)이며, 황사발생일을 제외한 기간의 평균 PM₁₀ 농도는 $55 \pm 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기준초과율 7.5%)으로 나타났다.

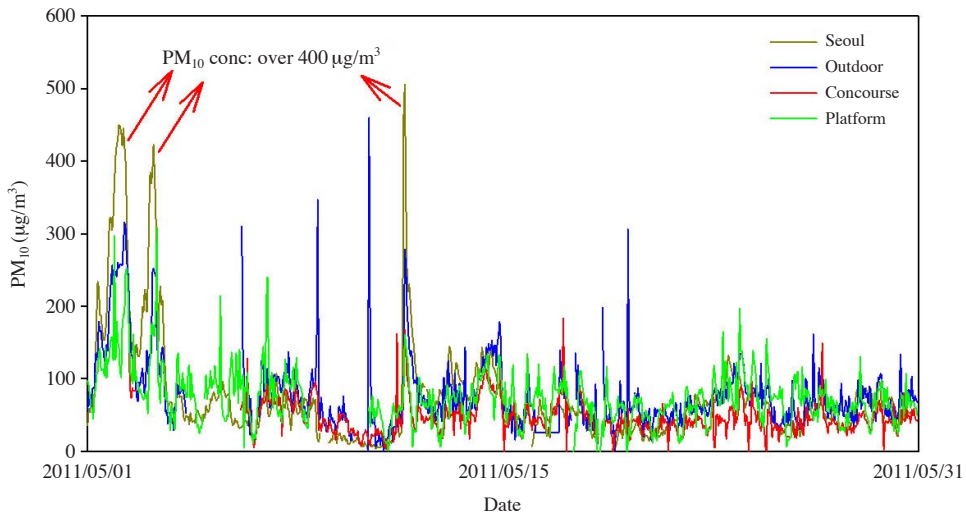


Fig. 4. Time-based variation of PM₁₀ concentration in underground railway station and ambient air.

이와 같이 일반 대기 중에서 황사발생 유무에 따른 PM₁₀ 농도의 변화가 명확하기 때문에 일반 대기 중의 PM₁₀ 농도와 지하역사에서 측정된 PM₁₀ 농도와의 관계를 살펴보기 위해 회귀분석을 실시하여 그림 5에 그 결과를 나타내었다. 그림 5(a)는 황사발생일의 대기 중 PM₁₀ 농도와 지하역사 내에서 측정된 PM₁₀ 농도와의 관계를 나타낸 것으로 결정계수(r^2)를 보면, 0.533(대합실)과 0.483(승강장)으로 비교적 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 황사의 발생에 의한 대기 중의 PM₁₀ 농도의 증가로 지하역사 내 PM₁₀ 농도의 증가를 어느 정도 설명할 수 있을 것으로 생각된다. 한편 그림 5(b)와 같이 황사발생일을 제외하면, 일반 대기 중 PM₁₀ 농도와 지하역사 내 PM₁₀ 농도의 관계에서 결정계수(r^2)가 0.214(대합실) 및 0.097(승강장)으로 두 농도사이의 상관성이 상당히 낮은 것으로 나타났다. 또한 외기의 PM₁₀ 농도는 황사발생일의 PM₁₀ 농도와 상관성($r^2=0.805$)이 높은 것으로 나타나 외기를 유입시켜 실내공기질을 개선할 때 주의가 필요할 것으로 판단된다.

3. 4 승하차 인원과 오염물질과의 상관관계

표 2는 2012년 5월 1일에서 31일(이용시간대: 새벽 05시~다음날 새벽 01시)까지 대상 지하역사를 이용한 시간별 승하차 인원과 동일한 시간에 측정된 오염물질과의 회귀분석 결과를 나타낸 것으로 승하

차 인원과 대합실 및 승강장에서 측정된 PM₁₀과 CO₂ 사이에는 유의한 상관관계를 보이고 있었다. 특히 CO₂의 경우 승하차 인원과의 상관계수가 0.815(대합실) 및 0.904(승강장)으로 상당히 높은 상관성(p-value < 0.01)을 나타내었다. 한편 대합실에서 측정된 PM₁₀ 및 CO₂와 승강장에서 측정된 PM₁₀ 및 CO₂ 등 오염물질간의 상관성도 높은 것으로 나타나 동일한 오염원의 영향을 받을 것으로 생각된다. 그러나 NO₂의 경우는 승하차 인원 및 다른 오염물질과의 상관성이 낮은 것으로 나타나 PM₁₀ 및 CO₂에 영향을 미치는 오염원 이외에 별도의 오염원이 존재하거나 지하역사 내에서 다른 물질과 다른 거동을 나타내고 있을 가능성이 있는 것으로 생각된다.

그림 6은 시간별 평균 승하차 인원과 오염물질의 평균농도 변화를 나타낸 것으로 PM₁₀과 CO₂의 경우 출퇴근 혼잡시간인 아침 07~08시와 저녁 18~20시의 농도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 하루 중 평균 승하차 인원의 변화와 상당히 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 NO₂는 오전부터 서서히 농도가 증가하여 16시에 최고점을 나타내고 점차 감소하는 경향을 나타내고 있어 시간별 평균 승하차 인원의 변화와는 다른 양상을 보이고 있다.

그림 7은 전동차가 운행하지 않아 승객의 이동이 없는 시간인 새벽 03시(비혼잡시)와 전동차를 이용하는 승객이 많은 시간인 08시(혼잡시)의 PM₁₀, CO₂,

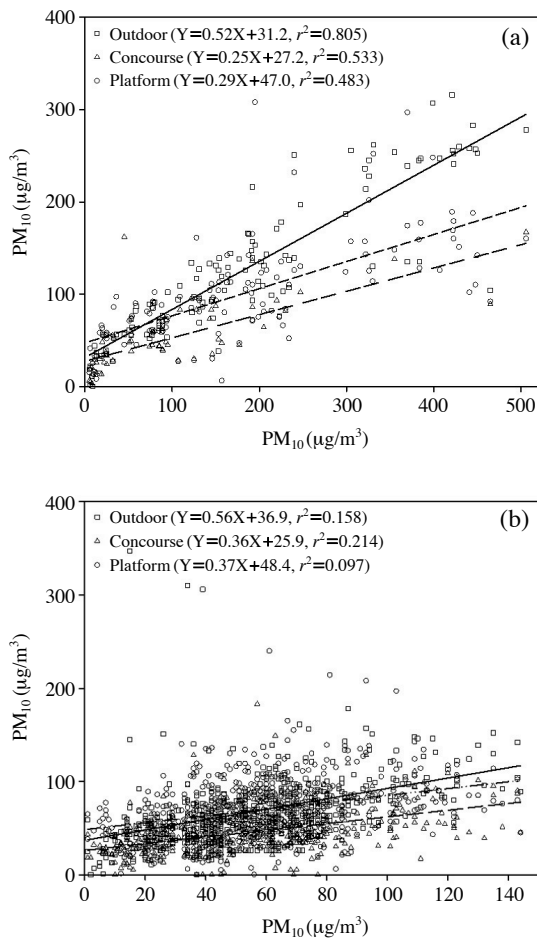


Fig. 5. Correlation between the PM₁₀ concentration in underground railway station (y axis) and ambient air (x axis). (a) during asian dust events, (b) except asian dust events.

NO₂의 농도(2008~2012년)별 빈도분포를 히스토그램으로 나타낸 것이다. PM₁₀과 CO₂의 경우 혼잡시에 농도가 넓게 분포하고 있으며, 가장 높은 빈도를 나타내는 히스토그램의 정점이 비혼잡시보다 상대적으로 높은 농도에 위치하고 있다. 특히 CO₂의 경우 승객의 유무(혼잡시/비혼잡시)에 따른 농도분포가 명확하게 차이가 나고 있으며, 대합실보다 승강장의 경우 혼잡시에 분포도 곡선의 폭이 크고 고농도에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 NO₂의 경우는 대합실이 승강장보다 농도가 넓게 분포하고 있는 것으로 나타났으나, 혼잡시 및 비혼잡시의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이것은 전동차의 운행에 따른 승객의 유출입에 의한 영향이 적고, 환기 등을 통한 외기의 유입에 의해 영향을 받은 것으로 생각된다. 또한 전동차가 운행하지 않는 새벽시간대에 선로 및 시설물 보수를 위한 유지보수차량 및 청소차량이 운행하는 경우가 있기 때문에 이러한 디젤엔터를 사용하는 차량에 의해 배출된 NO₂의 영향이 있을 것으로 생각된다. 이와 같이 시간별 오염물질 농도의 빈도분포를 통해 각 측정지점에서의 오염물질 분포 특성을 쉽게 파악할 수 있을 것이다.

3.5 실내공기 오염물질 농도의 실내외 비

실내공기 오염물질 농도의 실내외 비는 외부 오염물질이 실내로 유입되어 미치는 영향과 실내에 존재하는 오염원에 의한 영향을 정량화 할 수 있는 수단으로 널리 이용되고 있다(Tippayawong *et al.*, 2009; Chan, 2002).

그림 8은 1시간 측정값을 이용하여 계산한 I/O비

Table 2. Correlations between the number of boarding/alighting passengers and the concentration of PM₁₀, CO₂, and NO₂ measured at concourse and platform.

Contents	N ^{a)}	Concourse			Platform		
		PM ₁₀	CO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO ₂	NO ₂
	N ^{a)}	1.000					
Concourse	PM ₁₀	0.747 ^{b)}	1.000				
	CO ₂	0.815 ^{b)}	0.727 ^{b)}	1.000			
	NO ₂	0.203	0.229	0.377	1.000		
Platform	PM ₁₀	0.748 ^{b)}	0.944 ^{b)}	0.805 ^{b)}	0.383	1.000	
	CO ₂	0.904 ^{b)}	0.713 ^{b)}	0.628 ^{b)}	0.032	0.684 ^{b)}	1.000
	NO ₂	0.032	0.082	0.304	0.968 ^{b)}	0.246	-0.157

^{a)}The number of boarding/alighting passengers.

^{b)}p-value < 0.01 by Pearson correlation.

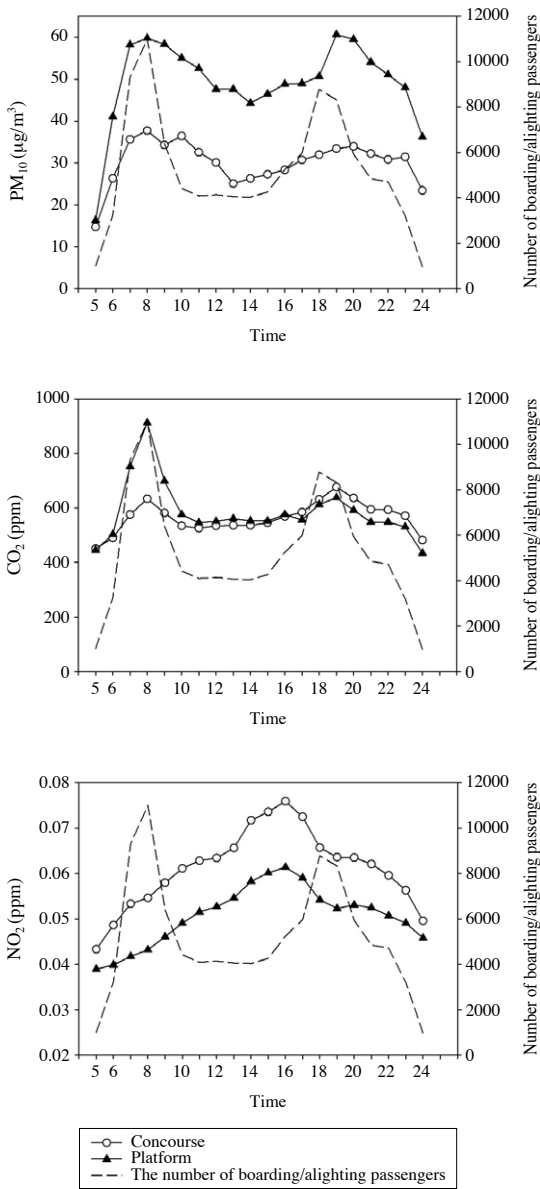


Fig. 6. Average daily variation of PM₁₀, CO₂, and NO₂ concentration and the number of boarding/alighting passengers on weekdays (May 2012).

값의 연평균 변화를 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우 2008년도 대합실 및 승강장의 I/O비가 각각 2.59 및 4.39로 실내에서 측정된 농도가 상대적으로 외기 농도보다 높은 것으로 나타났다. 이것은 승강장 스크린도어 미설치에 따른 터널 내에 존재하거나 열차풍에 의해

비산하는 PM₁₀의 영향을 많이 받은 것으로 보인다. 또한 2008년도에 비해 2009년부터는 I/O비가 상당히 감소하여 전동차 운행에 의한 PM₁₀의 유입 영향이 뚜렷하게 감소된 것으로 나타났다. 2012년에는 I/O비가 1 이하로 나타났기 때문에 강제환기에 의한 외기 도입 및 승객 등에 의한 외부로부터의 영향을 고려하여 실내공기질을 관리하는 데 주의할 필요가 있다.

NO₂의 경우 2010년 승강장, 2011년 및 2012년 대합실을 제외하고 전체적으로 I/O비가 1 이하로 나타났다. 그러나 2011년과 2012년 대합실의 I/O비는 각각 2.10과 1.29로 지하역사 내부의 오염원에 의한 영향을 받거나 외기의 NO₂ 농도가 지하역사 내부보다 훨씬 낮았던 것으로 생각된다. 그러나 대합실에서 NO₂가 높게 유지되는 원인은 명백하게 밝혀지지 않아 지하역사 등과 같은 실내에서의 NO₂ 거동에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

그림 9는 I/O비의 시간별 변화를 나타낸 것으로 시간대별 실내외의 영향을 파악하였다. PM₁₀의 경우 전동차가 운행을 시작하는 시간을 중심으로 I/O비가 상승하기 시작하여 운행이 마칠 때까지 I/O비는 1 이상을 기록하였으며, 대합실 및 승강장의 평균 I/O비는 각각 1.32 ± 0.75 와 1.96 ± 1.38 이었다. 하루 중 가장 큰 I/O비를 나타낸 시간은 대합실(I/O비=1.76) 및 승강장(I/O비=2.69) 모두 오전 10시이며, 가장 작은 I/O비를 나타낸 시간은 대합실이 오전 06시(I/O비=0.83)이고 승강장이 오전 05시(I/O비=1.03)로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 전동차의 운행에 따른 승객의 이동이 실내 PM₁₀ 농도의 증가에 의한 영향을 미친 것으로 생각된다.

NO₂의 경우 대합실 및 승강장의 전체 평균 I/O비는 각각 1.20 ± 0.55 와 0.81 ± 0.23 으로 나타났으며, 전동차가 운행하지 않는 시간인 오전 03시에 대합실과 승강장의 I/O비는 각각 1.76 ± 0.91 및 1.50 ± 0.51 로 다른 시간대와 비교하여 확실히 구별될 정도로 높았다. 이것은 새벽 시간대에 자동차 등 NO₂를 배출하는 오염원이 상대적으로 적은 상황이기 때문에 외기의 NO₂ 농도가 낮았기 때문이라고 생각된다. 따라서 NO₂의 농도를 낮추어 실내공기질을 개선하려면 새벽시간대에 환기가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 한편, 새벽시간대를 제외하고는 대합실과 승강장의 NO₂ I/O비는 거의 일정하게 유지되었다.

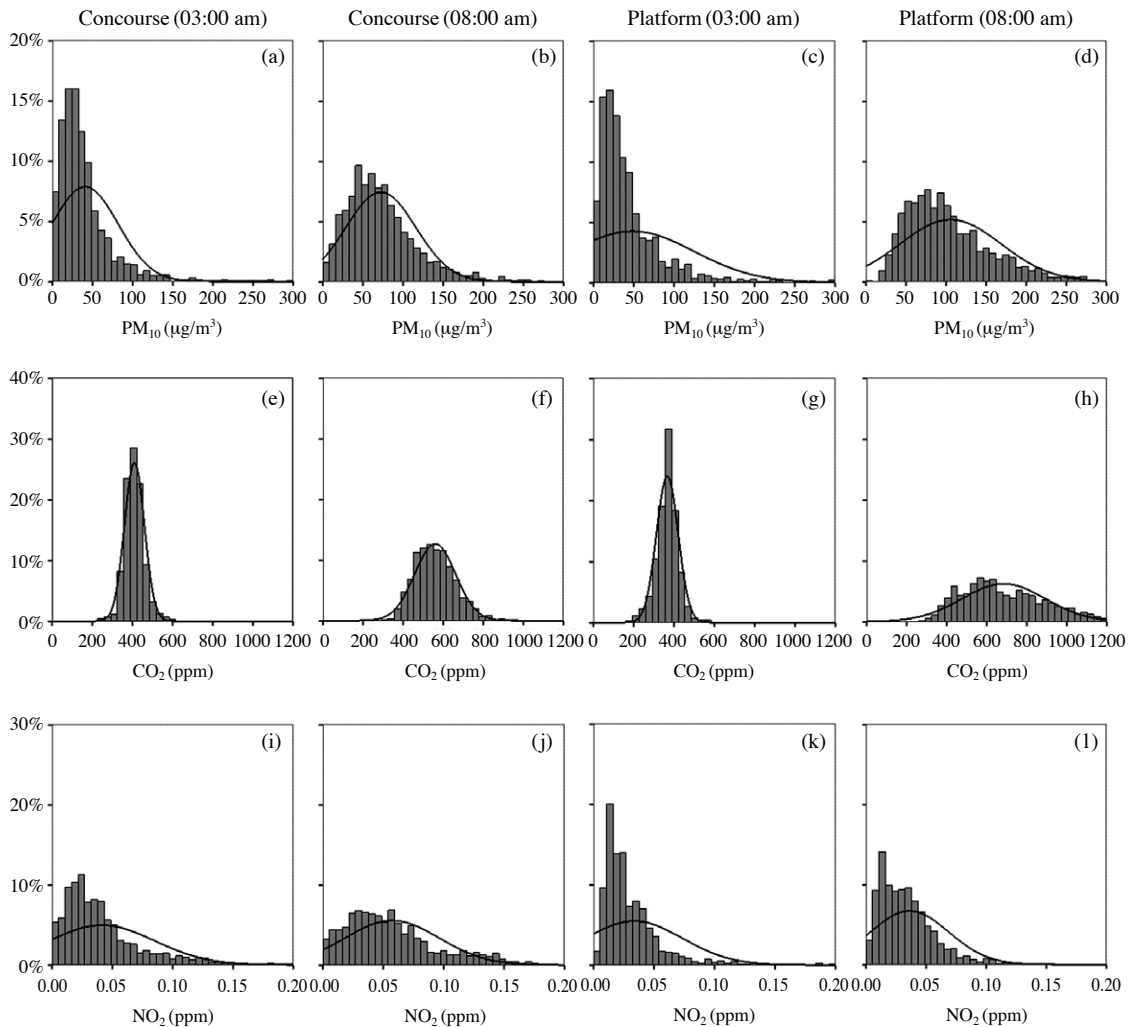


Fig. 7. Frequency histogram of PM_{10} , CO_2 , and NO_2 concentration at 03:00 (an uncongested time) and 08:00 (a congested time) in concourse and platform.

3. 6 측정지점 및 오염물질별 기준초과율

2008~2012년 1시간 평균 농도의 실내공기질 유지/권고기준 초과율을 조사한 결과, 표 3과 같이 실내공기질의 지표인 CO_2 농도의 기준초과율은 0~1.1%로 상당히 낮은 값을 나타냈지만, 외기 및 대합실 NO_2 와 터널 유입부 PM_{10} 농도의 기준초과율이 각각 24.8~72.5%, 9.4~85.4%, 53.2~64.0%로 상당히 큰 것으로 나타났다. 그러나 대합실과 승강장 PM_{10} 농도의 기준초과율은 2008년에 각각 6.7%, 37.1%로 컸지만 점차 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 기준초과율

의 관점에서 보면, 대합실 및 승강장의 NO_2 와 터널 내부의 PM_{10} 에 대한 대책을 수립해서 지하철역사의 실내공기질을 개선해야 할 것으로 생각된다.

그림 10은 2008년부터 2012년까지 대합실과 승강장에서 측정된 PM_{10} 과 NO_2 의 1시간 농도자료를 이용하여 시간대별 기준초과율을 산정하고, 전체 24시간 중 기준초과율이 가장 높은 시간에 1점을 주고, 가장 낮은 시간에 24점을 주어 순위(rank)를 정해 연도별로 나타낸 것이다. 즉 순위가 낮을수록 기준초과율이 높은 시간이다. 그리고 시간대별로 계산된 연

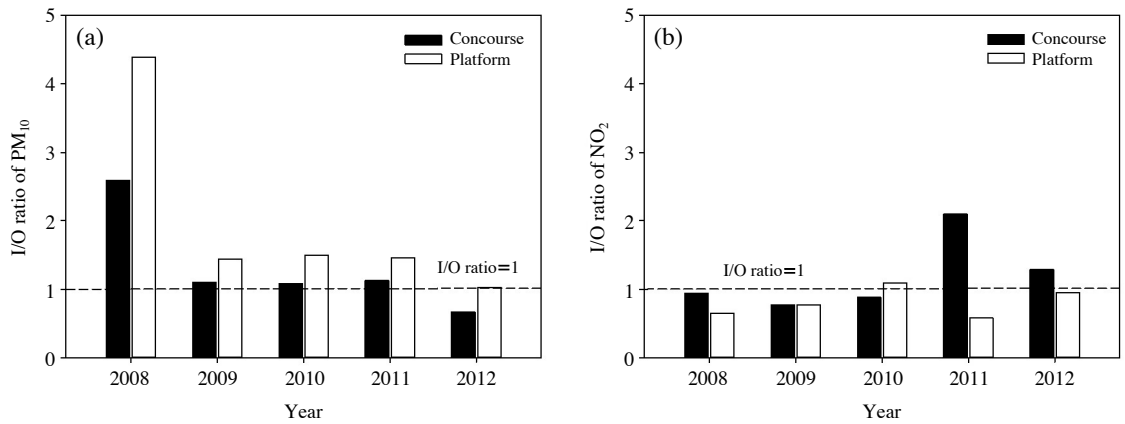


Fig. 8. Variation annual average I/O ratio of PM₁₀ and NO₂ in concourse and platform.

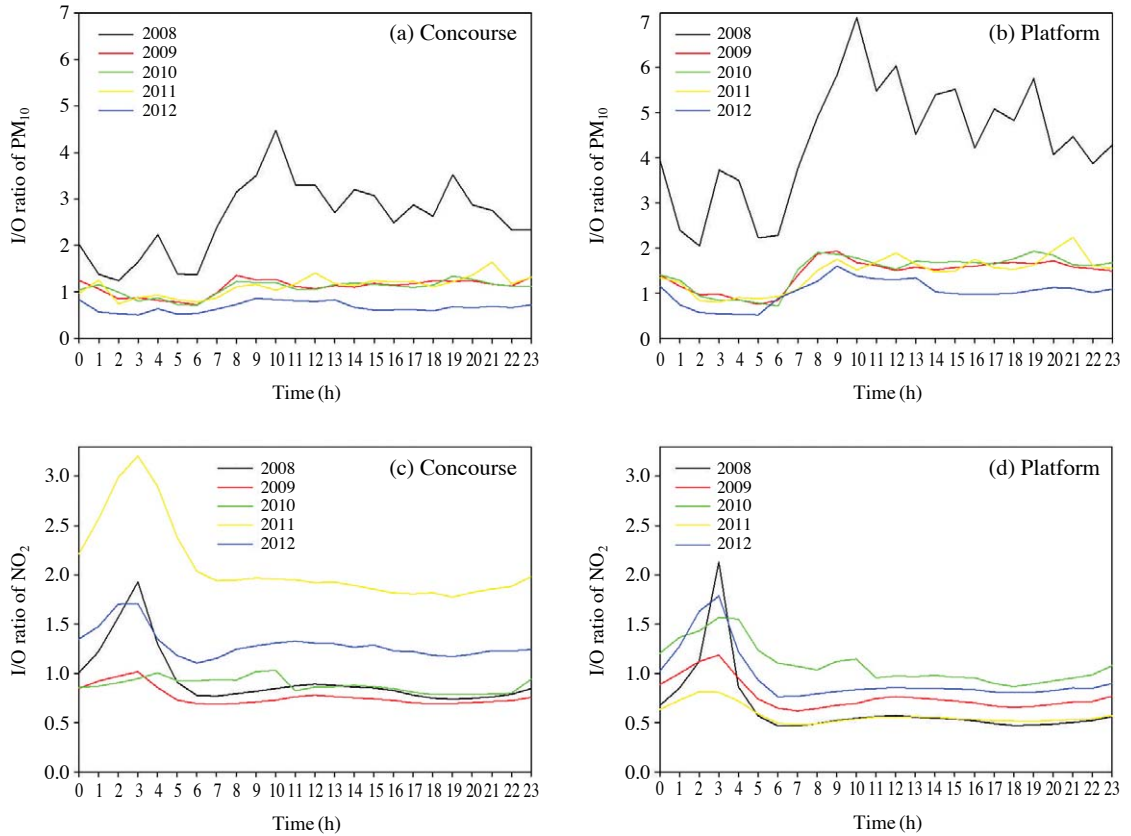


Fig. 9. Average daily variation of I/O ratio of PM₁₀ and NO₂ concentration in concourse and platform.

도별 순위를 합한 것이 그림 10의 분홍색선(rank sum)이다. 이 결과를 보면, 기준초과율이 높은(rank sum

이 낮은) 시간대는 09, 10, 15, 21시로 나타났다. PM₁₀과 NO₂의 시간대별 농도분포 특성이 다르기 때문에

Table 3. Annual average standard excess rate of PM₁₀, NO₂, and CO₂ concentration.

Sampling site	Pollutant	Standard excess rate (%)				
		2008	2009	2010	2011	2012
Outdoor	PM ₁₀	4.5	2.7	3.2	5.0	3.3
	NO ₂	72.5	24.8	66.7	56.2	38.1
Concourse	PM ₁₀	6.7	1.9	2.2	3.3	0.7
	CO ₂	0	0	0	0	0
	NO ₂	47.6	9.4	38.0	85.4	50.3
Platform	PM ₁₀	37.1	5.2	3.7	6.5	2.5
	CO ₂	0	0.1	0.2	0.5	1.1
	NO ₂	22.3	6.7	43.1	13.8	22.0
Tunnel	PM ₁₀	62.5	60.7	58.8	53.2	64.0

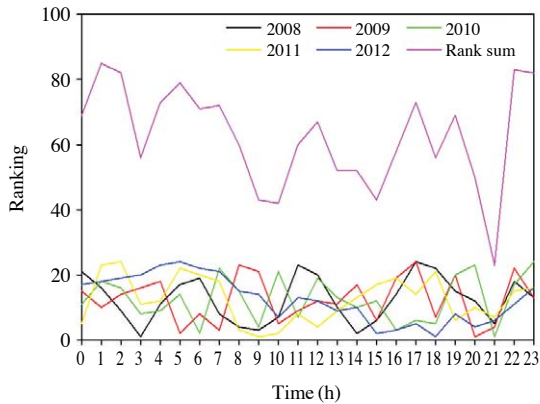


Fig. 10. Average daily variation of standard excess rate of PM₁₀ and NO₂ concentration in concourse and platform.

일정한 경향은 나타나고 있지 않지만, 기준초과율을 이용한 순위를 종합적으로 검토함으로써 실내공기질 개선을 위해 참고할 수 있을 것을 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실내공기질자동측정망에 의해 장기간 연속적으로 측정되고 있는 지하철역을 대상으로 대합실, 승강장, 터널 유입부 및 외기의 PM₁₀, CO₂ 및 NO₂ 농도자료를 이용하여 오염물질 농도의 특성을 다양하게 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

연평균 농도의 변화를 보면, PM₁₀은 2008년 말 승강장 스크린도어 설치 이후 지속적으로 농도가 감소

하고 있으며, NO₂는 전체적으로 실내권고기준을 초과하는 경우가 많았으며, 특히 대합실에서 측정된 농도가 외기의 농도를 초과하는 경우가 나타났다. CO₂는 연평균 농도로 보면 실내공기질 유지기준을 만족하는 것으로 나타났지만, 2008년 이후 매년 지속적으로 상승하는 경향이 나타났다.

승강장 스크린도어 설치로 터널 내 PM₁₀의 유입억제 효과가 지속적으로 나타났으며, PM₁₀의 경우 기상요소(강수량, 상대습도)와 황사와 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타나 환기장치에 의한 외기 유입시 주의가 필요할 것으로 생각된다.

승하차 인원과 오염물질과의 상관관계를 보면, 대합실과 승강장에서 측정된 PM₁₀ 및 CO₂ 농도와 유의한 상관관계가 나타났으나 NO₂는 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시간별 평균 승하차 인원과 오염물질의 평균농도 변화에서도 뚜렷한 경향을 보였다. 또한 비혼잡시(오전 03시)와 혼잡시(오전 08시)의 오염물질 농도의 빈도분포를 보면, 승객의 유무에 따른 농도분포의 특성이 뚜렷하게 나타났다. 따라서 시간별 오염물질 농도의 빈도분포를 통해 각 지점에서의 분포 특성을 쉽게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

PM₁₀과 NO₂ 농도의 실내외 비를 보면, 시간대별 변화에서 뚜렷한 시간대별 특성이 나타나고 있다. 따라서 지하철역사 실내공기질을 개선하기 위해서는 오염물질 농도가 증가하는 시간대별로 적절한 환기장치의 운용이 필요할 것으로 생각된다.

지하역사의 공기질 개선을 위한 검토사항으로 시간별 기준초과율을 조사한 결과 CO₂는 낮은 기준초

과율을 나타내고 있지만, 일부 측정지점에서 NO₂와 PM₁₀의 기준초과율은 상당히 크게 나타났다. 또한 시간대별로 보면 종합적으로 기준초과율이 높은 시간대는 09, 10, 15, 21시 등으로 나타나 출퇴근 혼잡시에 오염물질의 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 막대한 양의 실내오염물질 농도자료를 이용하여 지하역사의 오염물질 배출 특성을 살펴 본 것으로 실제 지하역사의 실내공기질 상황과 앞으로 대응해야 할 과제 등을 도출할 수 있었으며, 지하역사에서 기준초과율이 높고 거동이 명확하지 않은 오염물질에 관해서는 공간분포 파악 등 실내에서의 거동을 규명할 수 있는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

- Chan, A.T. (2002) Indoor-outdoor relationships of particulate matter and nitrogen oxides under different outdoor meteorological conditions, *Atmos. Environ.*, 36, 1543-1551.
- Cheng, Y.H. and J.W. Yan (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.
- Choi, H.W., I.J. Hwang, S.d. Kim, and D.S. Kim (2004) Determination of source contribution based on aerosol number and mass concentration in the Seoul Subway Station, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(1), 17-31. (in Korean with English abstract)
- Espinosa, G. and R.B. Gammage (1995) Radon levels survey in the underground transport metro system in Mexico city, *Radiation Protection Dosimetry*, 59(2), 145-148.
- Jeon, J.S., J.C. Yoon, H.C. Lee, S.W. Eom, and Y.Z. Chae (2012) A Noticeable change in indoor radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(1), 59-67. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.Y., Y.S. Kim, Y.M. Toh, C.M. Lee, and C.N. Kim (2008) Spatial distribution of particulate matter (PM-10 and PM2.5) in Seoul metropolitan subway stations, *J. Hazard. Mater.*, 154, 440-443.
- Kim, Y.T., J.W. Jeong, and T.U. Jeong (2009) Comparison of indoor air quality and urban air quality in Busan, The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, 19(1), 168-176. (in Korean with English abstract)
- KECO (2012) <https://www.keco.or.kr/01kr/business/climate/02/03/index03.jsp>.
- Lee, T.J., J.S. Jeon, S.D. Kim, and D.S. Kim (2010) A Comparative study on PM₁₀ source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(5), 543-553. (in Korean with English abstract)
- MOE (Ministry of Environment) (2012) Indoor air quality control in public use facilities, etc. act, Article 5 (Standards for maintenance of indoor air quality, etc) and Article 6 (Standards for recommendation of indoor air quality).
- Park, D.U. and K.C. Ha (2008) Characteristics of PM-10, PM2.5, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environ. Int.*, 34, 629-634.
- Park, S.B.S., T.J. Lee, H.K. Ko, S.J. Bae, S.D. Kim, D. Park, J.R. Sohn, and D.S. Kim (2013) Identification of PM₁₀ chemical characteristics and sources and estimation of their contributions in a Seoul metropolitan subway station, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(1), 74-85. (in Korean with English abstract)
- Salma, I., M. Pósfai, K. Kovács, E. Kuzmann, Z. Homonnay, and J. Posta (2009) Properties and sources of individual particles and some chemical species in the aerosol of a metropolitan underground railway station, *Atmos. Environ.*, 43, 3460-3466.
- Seoul (2013) <http://traffic.seoul.go.kr/archives/1551>.
- Seoul Metro (2014a) <http://www.seoulmetro.co.kr/board/bbs/list.action?bbsCd=28&mCode=G030030000>.
- Seoul Metro (2014b) <http://www.seoulmetro.co.kr/station/outlinemap.jsp?linecode=0414>.
- Son, B.S., B.K. Jang, J.A. Park, and Y.S. Kim (2000) Indoor and outdoor NO₂ concentration at subway station and personal NO₂ exposure of subway station workers, *Korean J. Sanitation*, 15(4), 134-141. (in Korean with English abstract)
- Tippayawong, N., P. Khuntong, C. Nitatwichit, Y. Khunatorn, and C. Tantakitti (2009) Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments, *Build. Environ.*, 44, 188-197.