

지상과 지하역사의 실내공기질 특성과 외기영향 평가

남궁형규¹, 송지한¹, 김수연¹, 김희만¹, 권순박^{*}

¹한국철도기술연구원 교통환경연구팀, ²한국철도공사 환경경영처

Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations

Hyeong-Kyu Namgung¹, Ji-Han Song¹, Soo-Yeon Kim¹, Hee-Man Kim²,
Soon-Bark Kwon^{*}

¹Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute,

²Environmental Management Team, Korea Railroad Corporation

요약 본 연구에서는 지하역사와 지상역사에서의 실내공기질을 측정하고, 외부 공기에 의한 영향 정도를 확인하고자 하였다. 측정된 물질은 ‘실내공기질 관리법’상에서 유지기준과 권고기준으로 지정된 항목 중, 농도가 검출되지 않은 석면을 제외한 미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 폼알데하이드(HCHO), 오존(O₃), 총부유세균(TAB), 총휘발성유기화합물(TVOC), 라돈 등 9종이다. 또한 미세먼지, 이산화질소, 오존 등 세 가지 물질은 I/O ratio를 통해 외기에 의한 영향을 확인하였다. 공기질 측정결과 지상역사에 비해 지하역사에서 미세먼지, 폼알데하이드, 총휘발성유기화합물, 이산화질소, 라돈 등이 높은 농도로 검출되었으며, 이는 지하역사 내부에 그 오염물질의 발생요소가 존재하기 때문으로 판단된다. 오존 농도는 지상역사에서 지하역사보다 높은 농도로 검출되었으며, 특히 외부로 노출되어있는 지상역사 승강장에서 높은 농도를 보임으로써 외기 유입에 의한 영향이 있는 것으로 확인되었다. 따라서, 외기에 의한 영향을 받는 오염물질은 역사의 기계환기시 제거 과정을 거쳐 오염물질의 실내유입을 차단하고, 지하역사에서 기인한 미세먼지 등의 물질들은 실내에서 그 발생원에 따른 별도의 처리가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, the air quality of underground and overground railway stations was evaluated focusing on the degree of influence of the outside air quality. The measured components were particulate matter (PM₁₀), carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), formaldehyde (HCHO), ozone (O₃), total airborne bacteria (TAB), total volatile organic carbon (TVOC), and Radon (Rn), which are included in the maintenance standards and recommended standards of the Indoor Air Quality Management Act. Also, the indoor/outdoor concentration ratios of PM10, NO₂, and O₃ were calculated to estimate the influence of the outdoor air quality. The concentrations of PM10 HCHO, TVOC, NO₂, and Rn in the underground stations were found to be higher than those in the overground stations. These results indicate that the (present) generation of contaminants are caused by the indoor source of the underground station. The ozone concentration of the overground stations was higher than that of the underground stations, which indicates that the outdoor ozone concentration influenced that of the overground stations directly. Thus, methods of improving the IAQ should take into consideration the types of contamination

Keywords : Railway, Overground station, Underground station, Indoor Air Quality, I/O ratio

1. 서론

전국 도시철도(지하철)는 2014년 기준으로 연간 약

2,527 백만명이 이용하는 대표적인 대중교통 수단이다

[1]. 하지만 지하철은 대부분의 역사가 지하공간에 위치

하여 자연환기가 어렵고, 밀폐된 좁은 공간에 다수의 이

이 연구는 국토교통부의 철도기술연구사업(15RTRP-B074139-03)의 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Soon-Bark Kwon(KRRI)

Tel: +82-31-460-5375 email: sbkwon@krri.re.kr

Received March 29, 2016

Revised April 20, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

용객이 밀집되면서 실내공기 오염에 대한 우려가 높아지고 있다. 이에 따라 1996년 12월 30일 지하생활공간을 대상으로 ‘지하생활공간 공기질관리법’(법률 제5224호)이 제정 되었고 이는 2003년 5월 29일 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”(약칭: 실내공기질법, 법률 제 6911호)으로 전문 개정되었다[2].

실내공기질법에서는 다중이용시설에서의 관리가 필요한 오염물질을 미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소(CO₂), 폼알데하이드(HCHO), 총부유세균, 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 라돈(Rn), 총휘발성유기화합물(TVOC), 석면, 오존(O₃)으로 지정하였으며, 이는 실내공기질 유지기준항목과 권고기준항목으로 구분된다[3].

세계적으로 지하역사에서의 실내환경은 주로 미세먼지의 발생과 농도특성을 위주로 연구되었다[4-6]. 국내 선행연구에 따르면, 지하철 미세먼지 오염원은 내부발생원 중 철 관련 오염원과 브레이크 마모관련 오염원이 기여도가 매우 높으며, 미세먼지의 농도는 외부대기 < 승강장 < 객차 순으로 높게 나타난다고 보고된 바 있다 [7-9]. 또한 시간대별 미세먼지의 농도는 지하철 이용객에 의해 오전 출근시간에 그 농도가 증가한 뒤, 점차 낮아지다가 퇴근 시간에 다시 농도가 높아지는 특성을 갖는 것으로 확인되었다[7]. 환경부에서 발간된 ‘제2차 지하역사공기질 개선 5개년 대책(2013~2017)’을 통해 지하역사 공기질 오염현황을 살펴보면, 전국 소재 지하역사 미세먼지(PM₁₀) 평균값은 96.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2007년), 81.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2012년)으로 조사되었다. 서울소재 지하역사 미세먼지 평균값은 110.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2007년), 88.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2012년)으로 전국 평균 미세먼지 농도보다 높게 나타났지만, 점차 감소하는 추세에 있다[10].

Cheng et al.(2008)와 Kam et al.(2011), Son et al.(2013)에서는 국가별 지하역사(승강장) 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 측정값이 요약 정리되어 있다. 철도역사에서의 미세먼지 농도는 부다페스트 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 534 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 프라하 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 스톡홀름 212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 722 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 타이베이 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었으며, 초미세먼지 농도범위는 헬싱키 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 스톡홀름 105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 388 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 타이베이 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 런던 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다[5, 11, 12]. 이와 같은 여러 기존 연구의 결과로 보아, 지하역사(승강장)에서는 초미세먼지보다 미세먼지 농도가 비교적 높게 형성되어 있는 것을 알 수

있다.

미세먼지 이외에도 실내환경에서는 이산화탄소, 이산화질소 등의 다양한 오염물질들에 대한 연구가 이루어지고 있다. Lee et al.(2012)의 연구에서는 이산화탄소의 주 발생원이 지하역사 이용객이며, 이산화탄소 농도의 증가는 이용자 수 증가와 유의한 상관성이 있다고 보고한 바 있다[13]. Son et al.(2000)은 지하철역사에서의 이산화질소 농도를 측정하고 역무원의 이산화질소 개인 흡입량을 산정하였다[14]. 이 연구에서 이산화질소의 주 발생원은 지하역사 출구 근처 도로의 자동차이며, 공조기를 통한 오염원 유입 외에도 외기와 인접한 출입구, 계단 등을 통해 유입되는 오염물질이 이산화질소 농도와 상관성이 있다고 보고된 바 있다. Moreno et al.(2014)의 연구에서는 이산화질소 이외에도 지하역사에서의 일산화탄소 농도가 도로상 차량 운행에 의하여 농도 영향을 받는 것을 확인하였으며, 이산화탄소 농도는 승객수와 열차횟수에 영향을 받는 것으로 보고하였다[15].

이처럼 기존의 많은 연구에서 실내공기질 농도를 측정하고, 외기와의 연관성에 대해 규명하였다. 본 연구에서는 승강장과 대합실이 지하에 위치한 지하역사와 승강장이 외부로 노출되어 있는 지상역사에서의 실내공기질을 측정하고, 외부 공기에 의한 영향 정도를 확인하고자 하였다. 측정이 실시된 물질은 ‘실내공기질 관리법’상에서 유지기준과 권고기준으로 지정된 항목 중, 농도가 검출되지 않은 석면을 제외한 미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 폼알데하이드(HCHO), 오존(O₃), 총부유세균(TAB), 총휘발성유기화합물(TVOC), 라돈 등 9종이다. 해당 오염물질의 농도 비교·분석을 통해 지상 및 지하역사의 쾌적한 공기질을 확보하고, 역사의 공기질 관리 및 유지에 필요한 기초자료로 활용할 수 있도록 심층적인 분석을 실시하였다.

2. 실험 방법 및 측정

2.1 선정 역사 및 측정 방법

본 연구에서 실내대기질 측정에 사용된 역사는 총 8 곳으로써, 승객 유동량이 많은 지상역사 3곳(O1, O2, O3)과 지하역사 5곳(U1, U2, U3, U4, U5)이 선정되었다. 역사에서의 공기질 측정에 관한 기본 정보를 Table 1에 표기하였다.

Table 1. Detailed information of investigation sites

Items	Contents	
Station	Overground	O1, O2, O3
	Underground	U1, U2, U3, U4, U5
Measurement location	Concourse (2 spot), Platform (2 spot)	
Date of measurement	First measurement	2014.09.25. - 2014.10.07.
	Second Measurement	2014.10.22. - 2014.10.31.
Time	15:00 ~ 21:00 (6hr)	

각 역사에서는 2014년 9월25일 - 10월7일, 10월22일 - 10월31일에 걸쳐 역사별로 2회씩, 대합실과 승강장에 각각 두 지점씩을 선정하여 실내공기질을 측정하였다. 또한, 실내공기질의 측정은 각 역사 선정지점에서 15:00부터 21:00까지 총 6시간동안 연속으로 이루어졌으며, 동일 시간대 외기의 공기질은 도시대기오염측정망정보 (airkorea)를 활용하였다[16].

2.2 측정기기 및 분석 방법

실내공기질은 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’에서 규정한 관리대상 오염물질 항목 중 유지기준 5종(PM₁₀, CO, CO₂, HCHO, 총부유세균)과 권고기준 4종(NO₂, Rn, TVOCs, O₃)을 측정하였다. 각 항목에 대한 측정 장비와 분석방법 등은 다음 Table 2에 표기하였다.

먼저 미세먼지 농도는 광산란법과 중량법으로 측정하였다. 미세먼지의 광산란법 측정은 Optical Particle Sizer(Model 3330, TSI, USA)을 이용하였으며, 중량법 측정은 MiniVol-TAS(Airmetrics, USA)를 이용하여 샘플을 포집하고 저울을 이용하여 무게를 측정하였다. 일산화탄소와 이산화탄소는 비분산적외선분석법(IQ-610, TSI, USA)으로 측정되었다. 포름알데히드(HCHO)는 카트리지(2,4-DNPH Cartridge, Top Trading ENG, Korea)를 이용하여 선택적으로 포집하였으며, HPLC(Series 1100, HP, USA)를 이용하여 그 농도를 분석하였다. 총부유세균은 미생물샘플러(KAS110, KEMK, Korea)를 이용하여 포집하였으며, 한천배지배양법을 이용하여 측정하였다.

Table 2. Analytical methods and instruments

	Contents	Sampling and analytical instrument
Standard	PM ₁₀	Mini Volume Air Sampler / OPS
	CO ₂	CO, CO ₂ analyzer/ Non-Dispersive InfraRed
	CO	
	HCHO	2,4-DNPH Cartridge / HPLC
Recommendation	TAB	Agar plate / CFU
	VOCs	Tenax tube / GCMS
	NO ₂	NOx analyzer/ Chemiluminescence
	O ₃	Ozone analyzer/ UV Photometry
	Radon	Sun nuclear

권고기준에 속해있는 휘발성유기화합물(TVOCs)은 SIBATA사의 minipump(MP-Σ30, SIBATA, Japan)를 이용하여 Tenax tube(Tenax TA, Supelco(Sigma-Aldrich), USA)에 포집하였고, TD-GC/MS(TD-20, MS-QP2010, Shimadzu, Japan)를 이용하여 성분을 분석하였다. 라돈(Rn)은 부착형 연속모니터측정법(Rn-1027, Sun Nuclear, USA)을 이용하여 1시간 동안 연속 측정하였다. 그 밖에 NO₂는 화학발광법(KN-210, KENTEK, Korea), O₃는 자외선흡광광도법(KN-410, KENTEK, Korea) 으로 농도를 측정 및 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 역사 실내공기질

다음 Fig. 1에는 지상역사 3곳과 지하역사 5곳에서의 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’에서 제시하는 유지기준 및 관리기준 물질 항목들에 대해 대합실과 승강장에서의 평균값과 표준편차를 나타내었다.

3.1.1 미세먼지(PM10)

Fig. 1의 (a)는 서울시 지상역사(O-station)와 지하역사(U-station)를 대상으로 미세먼지 농도에 대한 평균값과 표준편차를 표시하였다.

역사 내 미세먼지는 지상역사의 경우 대합실은 57 - 100 μg/m³, 승강장은 61 - 84 μg/m³의 범위로 나타났으며, 지하역사의 경우에는 대합실이 59 - 83 μg/m³, 승강장은 76 - 119 μg/m³의 범위로 조사되었다. 평균값으로 비교해보면 지상역사에서의 미세먼지 농도는 승강장과 대합실이

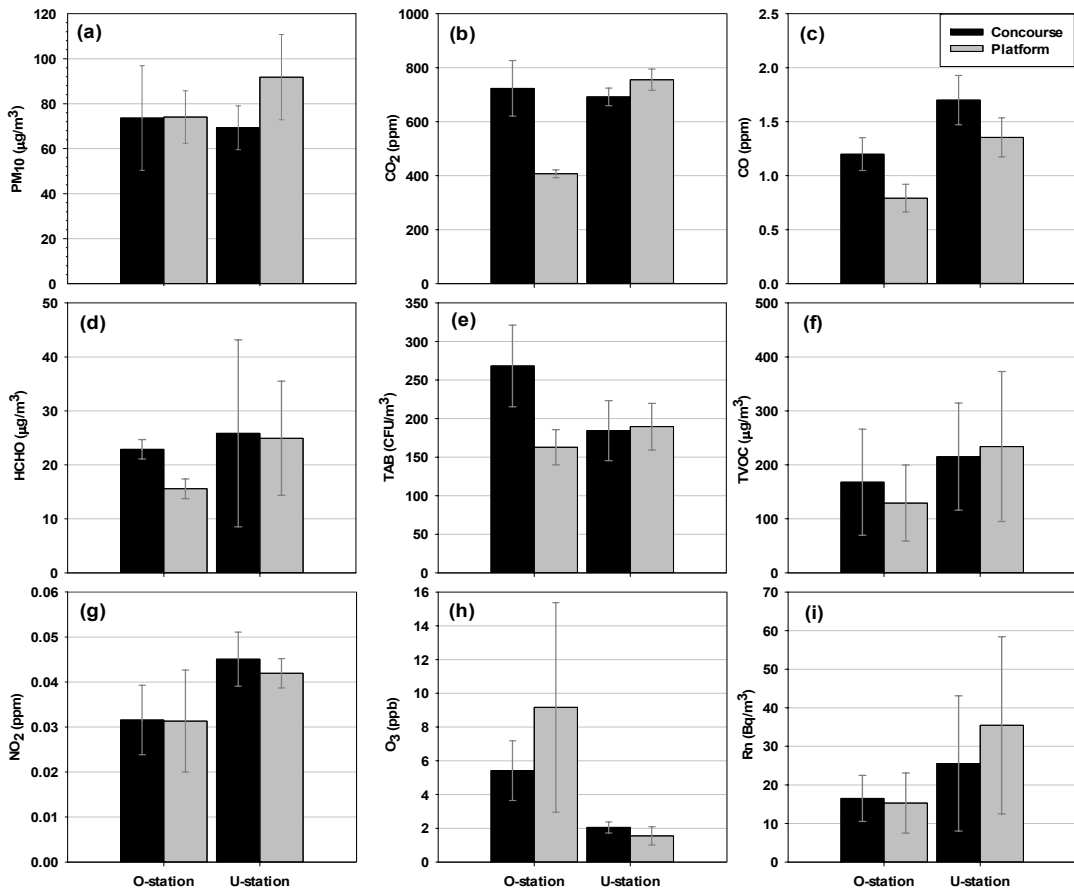


Fig. 1. Comparison of air quality at overground and underground railway, (a)PM₁₀, (b)CO₂, (C)CO, (d)HCHO, (e)TAB, (f)TVOC, (g)NO₂, (h)O₃, (i)Rn.

비슷한 수준으로 나타났지만, 지하역사의 경우에는 대합실보다 승강장이 약 20 µg/m³ 이상 미세먼지 농도가 높게 나타났다. Park et al.(2010)의 연구에서는 터널과 승강장 대합실에서 열차운행에 따른 미세먼지 농도변화를 확인한 결과, 터널에서 미세먼지 농도가 가장 높고 승강장, 대합실 순으로 농도가 낮아지는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 열차운행에 따라 발생한 미세먼지가 승강장과 대합실으로 확산하기 때문이라고 할 수 있다.[4].

3.1.2 이산화탄소(CO₂)

지상역사와 지하역사를 대상으로 대합실과 승강장의 이산화탄소를 측정하여 그래프를 Fig. 1의 (b)에 나타내었다. 지상역사(3개)의 이산화탄소는 대합실이 614 ppm - 818 ppm이었으며, 외부에 위치한 승강장은 400 ppm -

424 ppm으로 일정한 수준의 농도를 보였다. 지하역사(5개)의 대합실 이산화탄소 농도는 645 ppm - 724 ppm이었으며, 승강장은 706 ppm - 807 ppm의 범위로 대합실과 큰 차이를 보이지 않았다.

지상역사(O1, O2, O3)는 외부에 위치한 승강장에 비해 실내공간인 대합실의 이산화탄소 농도가 적게는 1.6배에서 크게는 2배 이상 높았으며, 지하역사의 경우 대합실과 승강장의 농도차이가 거의 없었다.

3.1.3 일산화탄소(CO)

Fig. 1의 (c)에 지상 및 지하역사의 일산화탄소 농도의 평균값과 표준편차를 표시하였다. 지상역사의 일산화탄소 농도는 대합실이 1.0 ppm - 1.3 ppm, 승강장은 0.7 ppm - 1.0 ppm으로 거의 같은 수준을 보였으며, 지하역

사의 일산화탄소농도는 대합실이 1.4 ppm - 2.0 ppm, 승강장이 1.2 ppm - 1.7 ppm으로 나타났다. 거의 대부분의 역사에서 대합실에서의 일산화탄소 농도는 승강장에서의 농도보다 1.2 - 1.5배 높은 수준을 나타냈으며, 지하역사의 경우가 지상역사보다 높은 일산화탄소 농도를 보였다. 철도 역사 승강장에서의 일산화탄소 농도는 도로를 운행하는 차량 등에 의해 발생하는 일산화탄소 농도와 유의한 상관관계가 있는 것으로 생각되며, Moreno et al.(2014)은 도로상 차량 운행에 의하여 지하역사의 일산화탄소 농도가 영향을 받는다고 조사한 바 있다[15]. 하지만, 대합실에서의 일산화탄소 농도는 대합실내 위치한 상가 또는 구조물의 영향에 의한 것일 수도 있으므로 외부 도로상 차량운행에 의한 영향으로 단정지을 수 없으며, 배출원에 대한 면밀한 조사를 필요로 한다.

3.1.4 폼알데하이드(HCHO)

지상역사 대합실의 폼알데하이드는 각각 $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $24.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위를 보였으며, 승강장은 $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다. 반면 지하역사 대합실과 승강장에서의 폼알데하이드 농도는 각 역사별로 큰 차이를 보였으며, $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도범위를 보였다. 지상역사는 외기의 영향으로 역사 내부에 존재하는 폼알데하이드 농도의 편차가 크지 않지만, 지하역사의 경우에는 각 역사 상가 또는 인테리어 공사여부에 따라 폼알데하이드 농도의 차이가 매우 큰 것으로 확인되었다. 지하역사 중, U1, U2의 대합실과 승강장 농도는 지상역사와 큰 차이를 보이지 않았지만, U3역사는 대합실과 승강장 모두에서 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 매우 높은 농도를 보였다. 반대로 U4, U5 역사 승강장에서의 폼알데하이드 농도는 각각 $15.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 지상역사와 큰 차이를 보이지 않았지만, 대합실에서의 폼알데하이드 농도는 약 $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 낮게 나타났다.

Kim et al.(2005)에서는 대구 지하철 역사와 지하상가를 중심으로 실내공기질 측정 및 평가한 결과, 전체 역사에서의 폼알데하이드는 모두 유지기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 접착제나 목재 사용이 많은 지하상가 내 신발가게 등에서는 휘발성유기화합물(VOCs)과 폼알데하이드에 대한 수치가 상당히 많이 분출된다고 보고한 바 있다[17].

3.1.5 총부유세균(TAB)

지상역사와 지하역사에서의 총부유세균(Total airborne bacteria, TAB)농도는 Fig. 1의 (e)에 표시되었다. 지상역사의 경우 대합실이 $214 \text{CFU}/\text{m}^3$ - $320 \text{CFU}/\text{m}^3$ 이며, 승강장은 $141 \text{CFU}/\text{m}^3$ - $187 \text{CFU}/\text{m}^3$ 의 농도범위를 보였다. O1, O2, O3의 측정값을 살펴보면, 대합실이 승강장에 비해 각각 1.6배, 2.2배, 1.1배 높았으며, 특히 O1과 O2 대합실의 경우 총부유세균 농도가 각각 $272 \text{CFU}/\text{m}^3$, $319 \text{CFU}/\text{m}^3$ 로 타 역사에 비해 높은 수치를 보였다.

지하역사 대합실의 총부유세균 농도는 $120 \text{CFU}/\text{m}^3$ - $229 \text{CFU}/\text{m}^3$ 이고, 승강장은 $157 \text{CFU}/\text{m}^3$ - $220 \text{CFU}/\text{m}^3$ 의 농도 범위를 보였다. 지하역사 승강장 사이의 평균농도는 3.7%의 차이를 보이는 반면에, 지상역사의 대합실과 승강장 평균농도의 차이는 64.4%로 지상역사의 총부유세균 농도 차이가 더 크게 나타났다.

서울지하철 역사 16곳을 대상으로 시간대별로 총부유세균을 측정된 Hwang et al.(2014)은 17시-18시까지 지하평균 농도가 $360 \text{CFU}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났으며, 8시-10시까지 측정된 지하평균농도는 $110 \text{CFU}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다[18]. Hwang et al.(2014)과 본 연구에서 측정 시간 측면에서 차이는 있지만, 최고·최저 농도는 유사한 농도 분포를 보이고 있다. Cho and Paik(2009)은 가을철 서울시 지하철역 승강장의 공기 중 진균을 측정된 결과 지하 평균값 $466 \text{CFU}/\text{m}^3$ 으로 WHO의 기준 $150 \text{CFU}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 역사의 온도, 습도, 승강장의 깊이, 건축년도 등이 TAB의 농도와 유의한 상관관계가 있다고 보고하였다[19].

3.1.6 총휘발성유기화합물(TVOC)

지상역사와 지하역사를 대상으로 대합실과 승강장에서의 총휘발성유기화합물 농도를 측정된 결과, 전 역사 평균값은 $196 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었다. 지상역사의 경우 대합실은 $55 - 126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위를 보였으며, 승강장은 $70 - 256 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 조사되었다.

지상역사에서의 총휘발성유기화합물 농도는 승강장보다 대합실이 평균 1.3배 높은 것으로 나타났으며, O1에서 최대 1.4배 높게 조사되었다. 이는 대합실 내에 위치한 지하상가 등의 매장 인테리어로 인한 목재 및 접착제 사용이 증가함에 따라 분출되는 오염물질이 총휘발성유기화합물 농도의 증가에 영향을 주는 것으로 보인다. Kim et al.(2005)의 연구에서는 인테리어를 새로하지 않

은 매장은 실내의 총휘발성유기화합물(TVOC) 농도가 낮은 반면, 신축 및 인테리어를 위해 무늬목과 접착제를 사용한 매장은 농도가 높게 나타났다고 보고한 바 있다 [17].

지하역사에서 U1 (대합실 : 306 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 승강장 : 396 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 U2 (대합실 : 340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 승강장 : 374 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 특히 높은 휘발성유기화합물 농도를 보였다. 기존 Choi et al.(2005)의 연구에서 U2역사는 여러 환승역 중 가장 높은 VOC 농도 값을 가지며, 정확한 원인을 파악하기 위해서는 오염원에 대한 추가적인 분석이 요구된다고 보고한 바 있다[20].

3.1.7 이산화질소(NO_2)

지상역사 3곳과 지하역사 5곳을 대상으로 대합실과 승강장의 이산화질소 농도를 Fig. 1의 (g) 그래프에 나타내었다. 이산화질소 농도는 지상역사와 지하역사에 관계없이 약 0.02 - 0.05 ppm 수준을 보였으며, 이는 다중이용시설 등의 실내공기질관리법 시행규칙 상의 이산화질소 권고기준(0.05 ppm)을 만족하는 수준으로 나타났다. Son et al.(2000)의 연구에서 측정된 지하철 역사의 이산화질소 농도 역시 약 0.03 ppm 수준을 나타냈으며, 이산화질소 농도는 환기를 통한 외부 유입에 의한 영향이 가장 높을 것으로 판단하였다[14].

3.1.8 오존(O_3)

Fig. 1의 (h)는 지상역사와 지하역사의 지점별 오존 평균값을 나타내었다. 지상역사 평균 오존 농도는 지상역사의 대합실이 4 - 7 ppb, 승강장이 2 - 13 ppb의 수준으로 조사되었으며, 지하역사의 경우 대합실 오존 농도는 2 - 3 ppb, 승강장은 1 - 2 ppb 수준으로 지점별 오존 농도의 차이가 적게 나타났다. 오존 농도의 결과로 보면 외부로 유출되어 있는 지상역사의 승강장의 오존농도가 일반적인 지하역사의 오존농도보다 약 7 - 10배 높은 것을 확인할 수 있다.

3.1.9 라돈(Rn)

Fig. 1의 (i)에 지상역사와 지하역사의 대합실과 승강장의 라돈 농도를 측정된 결과에 대한 평균값과 표준편차를 나타내었다. 지상역사 평균 라돈 농도는 대합실이 10 Bq/m^3 - 22 Bq/m^3 , 승강장이 11 Bq/m^3 - 24 Bq/m^3 로 대합실과 승강장 사이의 라돈 농도는 큰 차이를 보이지

않았다. 지하역사에서의 평균 라돈 농도는 대합실이 12 Bq/m^3 - 50 Bq/m^3 승강장이 20 Bq/m^3 - 76 Bq/m^3 의 범위를 보여 대합실과 승강장 간 농도차이가 지상역사 보다는 큰 것으로 나타났다. PSD 설치 전 5호선과 7호선의 라돈농도분포를 조사한 Lee et al.(2004)의 연구에서는 승강장 평균 라돈 농도가 61.8 Bq/m^3 , 대합실은 38.2 Bq/m^3 를 보인다고 조사한 바 있으며, 이는 본 연구의 결과와 거의 유사하다[21]. PSD 설치 후 59개 역사 라돈 농도의 변화 특성을 연구한 Jeon et al.(2012)은 승강장에서 평균 라돈농도를 54 Bq/m^3 , 대합실 평균 라돈농도는 34 Bq/m^3 으로 보고한 바 있다[22]. Lee et al.(2004)과 Jeon et al.(2012) 등의 연구결과와 본 연구의 라돈(Rn)농도는 유사한 수준이며, U2를 제외한 지하역사는 대합실보다 승강장이 높은 농도를 보이는 경향도 유사하다[21, 22].

3.2 Indoor/outdoor ratio(I/O ratio)

실내공기질 분석 항목중 Air Korea에서 확보할 수 있는 PM_{10} , NO_2 , O_3 에 대해서 외기가 역사 실내대기질에 어느 정도의 영향을 미치는지 확인하고자 하였다. 외기 농도는 도시대기측정망 정보를 활용하여 인접구간의 평균 값을 산정하여 적용하였다. I/O ratio는 외기의 실내공기질 영향 정도를 판단하는 기준으로 사용되며, 1에 가까울수록 외기에 의한 영향을 많이 받는 것으로 판단 할 수 있다. 대부분 1 보다 큰 수치가 나오면 실내에 오염원이 있는 것으로 파악되고, 0에 가까운 수치가 나오면 외기에 의한 영향을 거의 받지 않는 것으로 판단 할 수 있다.

3.2.1 미세먼지

다음 Fig. 2에는 지상과 지하 각 역사에서 측정된 미세먼지 농도를 외기와 비교하여 I/O ratio로 표시하였으며, 지상역사와 지하역사에 대한 평균 I/O ratio를 표기하였다. 미세먼지의 경우에는 모든 역사의 I/O ratio가 양의 값을 가짐으로써, 실내대기질에서의 미세먼지 농도가 외기 미세먼지보다 높은 것을 확인할 수 있다. 지상역사 대합실에서의 미세먼지 농도는 외기 미세먼지 농도 기준으로 최소 1.7배에서 최대 3.1배 까지 차이가 났으며, 승강장은 최소 1.5배에서 최고 4.2배 차이가 났다. 지하역사의 대합실은 외기 미세먼지와 농도 기준으로, 대합실은 최소 1.1배에서 최고 2배, 승강장은 최소 1.7배에서 최고 2.6배의 차이가 났다. 이와 같은 미세먼지의 I/O ratio는 지하역사에서의 미세먼지는 외기의 미세먼

지에 의한 영향보다는 철도 운행에 따른 미세먼지 발생에 의한 영향을 많이 받는 것을 알 수 있게 한다.

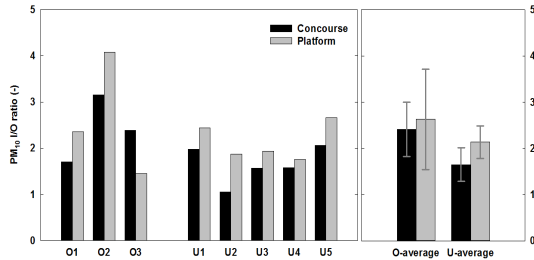


Fig. 2. Indoor/Outdoor ratio of PM₁₀ concentration (I/O ratio).

3.2.2 이산화질소

지상역사와 지하역사의 승강장과 대합실에서의 이산화질소 I/O ratio는 다음 Fig. 3에 나타내었다. O2역과 U5역을 제외한 대부분의 지상역사와 지하역사에서 이산화질소의 I/O ratio는 1에 가까운 수치를 보임으로써, 외기에 의한 영향을 많이 받는 것으로 판단할 수 있다. Son et al.(2000)이 측정한 서울시 지하철 5호선과 7호선의 일부 역사(승강장)의 이산화질소 I/O ratio의 범위는 0.49 ~ 0.93으로 조사되었으며, 지하철 역사내 이산화질소의 주발생원은 실외 농도에 기인한 것으로 여겨진다고 보고한 바 있다[14]. Lee et al.(2012)의 연구에서도 이산화질소의 주 발생원이 도로 위를 운행하는 자동차와 공조기를 통해 유입 되는 이산화질소 외에도 외기와 접해 있는 출입구, 계단 등을 통한 오염물질 유입 가능성이 높아, 외기 > 승강장 > 대합실 순으로 농도를 보이며 이로 인한 관리대상 오염물질의 확산을 방지하기 위해 에어커튼 등의 추가 설비가 필요하다고 보고한 바 있다[13].

이처럼 승강장의 이산화질소 농도는 외기농도와 통계학적으로 유의한 상관성을 보여, 역사의 심도, 급기량, 배기량 및 승강장의 용적 등의 변수에 비해 외기가 이산화질소 농도에 지배적인 영향을 미치는 것으로 보고한 바 있다. 본 논문에서도 U5를 제외한 역사의 경우, 외기 농도와 지상, 지하역사의 이산화질소 농도 사이에 유의한 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

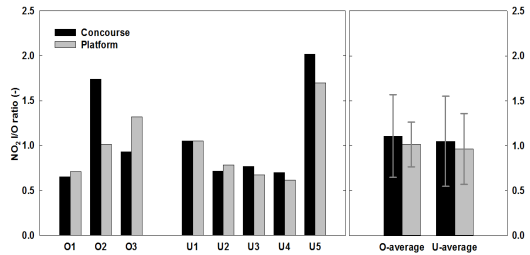


Fig. 3. Indoor/Outdoor ratio of NO₂ concentration (I/O ratio).

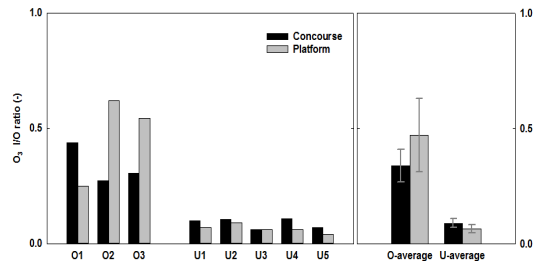


Fig. 4. Indoor/Outdoor ratio of O₃ concentration (I/O ratio).

3.2.3 오존(O₃)

역사 인근 도시대기측정망에서 측정한 오존농도는 O1(8 ppb), O2(21 ppb), O3(23 ppb), U1(25 ppb), U2(19 ppb), U3(36 ppb), U4(16 ppb), U5(25 ppb)으로, 평균 21.6 ppb 수준으로 나타났다. O1 역사를 제외한 지상역사 승강장(외부)에서의 오존농도는 일반적으로 대합실(실내)보다 높은 수준을 나타냈으며, 각각 0.62, 0.54의 I/O ratio를 보여 외기농도와 어느 정도 연관성이 있는 것으로 판단된다. 반면 지하역사에서의 오존 농도는 모든 역에서 2.5 ppb 이하로 측정되었고, I/O ratio는 0.1 이하로 외기와 연관성이 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 지상역사와 지하역사에서 ‘실내공기질 관리법’상의 유지기준과 권고기준으로 지정된 9가지 물질에 대한 농도 측정과 비교를 수행하였다. 또한 미세먼지, 이산화질소, 오존 등 3가지 물질은 외기와 농도비교를 통해 I/O ratio를 확인하였다.

공기질 측정결과 미세먼지, 폼알데하이드, 총휘발성 유기화합물, 이산화질소, 라돈의 농도가 지상역사에 비

해 지하역사에서 높은 농도로 검출되었으며, 이는 지하역사 내부에 그 오염물질의 발생요소가 존재하기 때문으로 판단된다. 오존 농도는 지상역사에서 지하역사보다 높은 농도로 검출되었으며, 특히 외부로 노출되어있는 지사역사 승강장에서 높은 농도를 보임으로써 외기에서 유입에 의한 농도 영향이 확인되었다. I/O ratio를 통해 미세먼지는 외기에 의한 영향이 미미하며, 이산화질소는 외기 농도에 의해 결정되는 것을 확인하였다. 또한 외기의 오존 농도는 지하역사의 승강장과 대합실 모두에 큰 영향을 끼치지 않지만, 지상역사의 승강장과 대합실의 농도에는 영향을 준다. 따라서, 외기에 의한 영향을 받는 오염물질들에 대해서는 기계환기시 적절한 제거 과정을 통해 실내로의 유입을 차단하고, 지하역사에서 기인한 미세먼지 등의 물질들은 그 발생원에 대한 조사와 처리가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Annual transport performance of urban rail [Internet]. National Index System, Available from: http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1259 (accessed Feb, 25, 2016)
- [2] *The Ministry of Environment in Korea*, The Act of Indoor Air Quality Management in Multiplex facility, 2004 (Act No.12216, 2014.1.7. Amendment)
- [3] *The Ministry of Environment in Korea*, The Enforcement Rules of the Act of Indoor Air Quality Management in Multiplex facility, [Attached table 2], [Attached table 3], 2015 (No. 620, 2015.11.18., Amendment)
- [4] Park, J. H., Park, J. C. and Um, S. J., Estimation of diffusion direction and velocity of PM10 in a subway station(for Gaehwasan station of subway line 5 in seoul), *Journal of Korean Society of Transportation*, 28(5), pp.55-64, 2010.
- [5] Son, Y. S., Salama, A., Jeong, H. S., Kim, S., Jeong, J. H., Lee, J., Sunwoo, Y. and Kim, J. C., The effect of platform screen doors on PM10 levels in a subway station and a trial to reduce PM10 in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), pp.38-47, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2013.7.1.038>
- [6] Martins, V., Moreno,T., Minguillon, M. C., van Drooge, B. L., Reche, C., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S. and Querol, X., Origin of inorganic and organic components of PM2.5 in subway station of Barcelona, Spain. *Environmental Pollution*, 208, pp.125-136, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.004>
- [7] Park, D. U., Yun, K. S., Park, S. T. and Ha, K. C., Characterization of PM10 and PM2.5 levels inside train and in platform of subway, *Kor. J. Env. Hlth.*, 31(1), pp.39-46, 2005.
- [8] Park, S. B. S. N., Lee, T. J., Ko, H. K., Bae, S. J., Kim, S. D., Park, D. S., Sohn, J. R. and Kim, D. S., Identification of PM10 chemical characteristics and sources and estimation of their contributions in a Seoul metropolitan subway station, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(1), pp.74-85, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.1.74>
- [9] Won, S. R., Lim, J. Y., Shim, I. K., Kim, E. J., Choi, A. R., Han, J. S. and Lee, W. S., Characterization of PM2.5 and PM10 concentration distribution at public facilities in Korea. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 9(3), pp.229-238, 2012.
- [10] *The Ministry of Environment*, the second measures to improve air quality in underground station during 5 years(2013-2017), 2013.
- [11] Cheng, Y. H., Lin, Y. L. and Liu, C. C., Levels of PM10 and PM2.5 in Taipei rapid transit system. *Atmospheric Environment*, 42, pp.7242-4249, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.011>
- [12] Kam, W., Cheung, K., Daher, N. and Sioutas, C., Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro, *Atmospheric Environment*, 45, pp.1506-1516, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.049>
- [13] Lee, J. Y., Jang, K. J. and Han, H., Study of pollution concentration source and its change pattern in underground station. *Conference of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, pp.547-550, 2012.
- [14] Son, B. S., Jang, B. K., Park, J. A. and Kim, Y. S., Indoor and outdoor NO2 concentrations at subway station and personal NO2 exposure of subway station workers. *Korean J. Sanitation*, 15(4), pp.134-141, 2000.
- [15] Moreno, T. Perez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillon, M. C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X. and Gibbons, W., Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design, *Atmospheric Environment*, 92, pp.461-468, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.043>
- [16] The public homepage of real-time air pollution, AirKorea, [Internet], Seoul (Korea), *The Ministry of Environment*, Available From: <http://www.airkorea.or.kr>, (accessed Mar, 14, 2016)
- [17] Kim, T. W., Kim, H. T., Seo, S. M. and Hong, W. H., A study on the measurement and evaluation of indoor air quality in crowd facilities. *Conference of Architectural Institute of Korea*, 25(1), pp.471-574, 2005.
- [18] Hwang, S. H., Ahn, J. K. and Park, J. B., Concentration of airborne fungi and environmental factors in the subway station in Seoul Korea. *J. Environ. Health. Sci.*, 40(2), pp.81-87, 2014.
- [19] Cho, J. H. and Paik, N. W., Assessment of airborne fungi concentrations in subway stations in Seoul, Korea. *J. Env. Hlth.*, 35(6), pp.478-485, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5668/jehs.2009.35.6.478>
- [20] Choi, W. G., Bae, S. H., Park, D. S., Jeong, W. S. and Kim, T. O., Evaluation of VOCs in subway. *Conference of The Korean Society for Railway*, pp.572-576, 2002.

[21] Lee, C. M., Kim, Y. S., Kim, J. C. and Jeon, H. J., Distribution of radon concentration at subway station in Seoul. *J. Env. Hlth.*, 30(5), pp.469-480, 2004.

[22] Jeon, J. S., Yoon, J. C., Lee, H. C., Eom, S. W. and Chae, Y. Z., A noticeable change in indoor radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(1), pp.59-67, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.1.059>

남궁 형 규(Hyeong-Kyu Namgung) [정회원]



- 2010년 8월 : 세종대학교 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 세종대학교 건설환경공학과 (공학박사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 박사후연구원

<관심분야>
대기환경, 실내환경, 미세먼지, 악취

송 지 한(Ji-Han Song) [정회원]



- 2004년 2월 : 서울시립대학교 환경공학 (공학석사)
- 2012년 2월 : 국립인천대학교 건설환경공학 (공학박사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 선임연구원(PostDoc.)

<관심분야>
실내환경, 미세먼지

김 수 연(Soo-Yeon Kim) [정회원]



- 2014년 2월 : 용인대학교 산업환경보건학과 (보건학학사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원(KRRI) 교통환경연구팀 위촉연구원

<관심분야>
실내환경, 환경보건

김 희 만(Hui-man Kim) [정회원]



- 1989년 2월 : 부산수산대학교 환경공학과 (공학학사)
- 1993년 8월 : 부산대학교 환경시스템 (이학박사)
- 2005년 1월 ~ 현재 : 한국철도공사 본청 환경팀장, 부경본부 안전환경팀장, 부산청도차량정비단 신뢰성팀장 근무 등

<관심분야>
대기환경, 실내환경, 미세먼지

권 순 박(Soon-Bark Kwon) [정회원]



- 1997년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2003년 2월 : 광주과학기술원 환경공학과 (공학박사)
- 2004년 4월 ~ 2006년 1월 : 일본 산업기술총합연구소(AIST) JSPS 박사후연구원
- 2006년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>
대기환경, 실내환경, 미세먼지