

도심터널 보행로 안전벽 설치 전후의 미세먼지, 블랙카본, 소음 수준 비교

이명호 · 박종민 · 강소현 · 박정연 · 권태홍 · 윤충식^{1*}
서울대학교 보건대학원, ¹서울대학교 보건환경연구소

Comparative Analysis of Particulate Matter, Black Carbon, and Noise Levels Before and After Installation of a Safety Wall in a Pedestrian Walkway within an Urban Tunnel

MyoungHo Lee · Jongmin Park · Sohyun Kang · Jeongyeon Park · Taehong Kwon · Chungsik Yoon^{1*}

*Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health,
Seoul National University, Republic of Korea*

¹Institute of Health and Environment, Seoul National University, Republic of Korea

ABSTRACT

Objectives: People using pedestrian walkways within tunnels may be exposed to environmental hazards that can have adverse effects on their health. This study aimed to measure changes in the levels of particulate matter (PM₁₀), black carbon (BC), and noise after the installation of safety walls on pedestrian walkways within tunnels.

Methods: Measurements were taken at the entrances on both sides of a tunnel and at the central point, both before and after the installation of pedestrian safety walls. Additionally, measurements were conducted by distinguishing between non-rush hour and rush hour periods to account for variations in the number of vehicles using the tunnel. A SidePak was used for PM₁₀ measurements, an aethalometer for BC, and a sound level meter for noise.

Results: PM₁₀ showed the highest concentrations at the center of the tunnel at both pre- and post-installation of safety walls, as well as during rush hour periods. After the installation, the concentration at the center was $31.09 \pm 14.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($19.44 \pm 8.02\%$ increase). During rush hour, BC concentration reached $2.28 \pm 1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicating a $26.71 \pm 13.19\%$ increase compared to non-rush hour. As for noise, installation of safety walls reduced noise levels about 3 – 6 dB ($8.10 \pm 3.31\%$ decrease).

Conclusions: It was confirmed that installing safety walls on pedestrian walkways within the tunnel can reduce noise levels. However, the interior of a tunnel is a poorly ventilated environment, and exposure levels vary depending on the length of the tunnel. Therefore, the development of safety measures related to this issue is warranted, and further research on harmful substances within the tunnel should be conducted.

Key words: Black carbon, noise, particulate matter (PM₁₀), safety wall

I. 서 론

상품 운송과 같은 필요성이 증가함에 따라 각 국가별로 도로 교통량이 지속적으로 증가하고 있다. 또한, 교

통의 효율성을 위해 도심 간의 그리고 도심 내에서의 터널의 수도 같이 증가하게 되었으며 향후 몇 년간 계속 증가할 것으로 예상된다(Cigada et al., 2005; Ma et al., 2009). 그러나 이로 인하여 도심에 거주중인 인

*Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2704, E-mail: csyoon@snu.ac.kr

Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Republic of Korea

Received: April 30, 2024, Revised: May 27, 2024, Accepted: August 20, 2024

 MyoungHo Lee <http://orcid.org/0000-0009-8638-2163>

 Sohyun Kang <http://orcid.org/0000-0002-8735-9758>

 Taehong Kwon <http://orcid.org/0000-0002-7522-9745>

 Jongmin Park <http://orcid.org/0009-0008-4649-345X>

 Jeongyeon Park <http://orcid.org/0009-0001-2133-5980>

 Chungsik Yoon <http://orcid.org/0000-0001-7822-0079>

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.

구 중 대다수는 터널에서 발생한 유해인자에 노출되고 있으며 이 농도는 환경에 해로운 영향을 미칠 수 있는 농도 수준으로 보고되었다(EEA, 2021). 터널 내 환경은 개방 도로에서의 주행 조건이 다르기 때문에 터널 내에서 발생한 입자상 물질, 블랙카본(black carbon, BC), 소음, 빛번짐, 과불화알킬물질(polyfluorinated substances) 등 수많은 유해인자가 인체에 영향을 미칠 수 있으며 환기가 잘 이루어 지지 않는 특징을 가져 축적될 가능성이 있다(Kirytopoulos, 2014).

먼저, 도심에서의 대기 오염물질 중 주요 원인 중 하나는 도로 및 교통에서 발생하는 입자상 물질이다(Amato et al., 2016; Custódio et al., 2016). 특히, 터널과 같은 반밀폐 장소에서의 공기 중 입자상 물질 발생의 주요 원인은 타이어 마모로 인한 분진, 브레이크, 노면 마모 분진, 그리고 배기가스 등이 있다(Querol et al., 2004; Thorpe & Harrison, 2008). 이러한 문제를 해결하기 위하여 배기가스에 대한 기준을 상향시키는 등의 여러 규제를 통하여 다양한 기술들이 차량에 도입되었으나 실제 이러한 기술이 적용된 차량의 주행에서 분진이 감소했다는 것에 대한 논문 결과는 거의 없는 것이 실정이다(Alves et al., 2015). 이러한 입자상 물질에 지속적으로 노출된다면 대표적으로 선천성 심장 약화, 호흡기 및 순환기 사망, 조산위험, 폐 염증반응 등의 건강위험에 직면할 수 있다(Silbajoris et al. 2011; Agay-Shay st al., 2013; Li et al. 2013; Schifano et al. 2013).

BC는 개인이 노출되었을 때의 건강영향 중 가장 유해한 영향을 발생시켰을 것으로 의심되는 물질이며, 도로 및 교통에서 발생하는 유해물질로 인한 건강위험을 평가하는데 적합한 지표로서 주로 사용된다(Jansen et al., 2011; US EPA, 2012). 터널 내에 존재하는 입자상 물질 중 탄소성분 연료의 불완전연소로 발생하는 BC는 입자상 물질과 더불어 건강상의 중요 유해물질이 될 수 있다(Moreno et al., 2015). BC 노출은 심혈관계 질환과 호흡기 질환을 유발할 수 있으며 사망률과도 관련이 있다고 알려져 있다(Patel et al., 2010; Gan et al., 2011; Wellenius et al., 2012). 벨기에에서 진행된 도로주행 중 운전자가 BC에 노출되는 농도는 일반 가정에서보다 2-5배 더 높은 것으로 나타났기에 반밀폐공간인 터널 등에서 노출되는 정도는 더욱 심할 것으로 예상된다(Dons et al., 2012).

마지막으로 전체도시 소음의 약 55%는 차량운행에

의하여 발생하며 그 중 터널 주행시 발생하는 소음은 터널 내 보행로를 이용하는 사람들과 주변에 거주하는 사람 등에게 부정적이고 불편한 감정을 유발할 수 있다(Lokhande et al., 2018; Pathak et al., 2018). 특히, 지속적으로 소음에 노출될 경우에는 편두통, 심장질환, 고혈압 등의 건강영향과 밀접한 관련이 있다고 밝혀졌다(Xing et al., 2021).

이러한 유해인자들로 인한 건강상의 영향을 줄이기 위해 도로 확장, 차단막 설치, 차량무게 및 속도 제한 등 여러 방안이 제시되어 있다. 그 중에서 터널 내에 설치되고 있는 안전벽은 서울특별시에서 터널 내에 존재하는 보행자 통로의 환경개선을 위하여 2009년부터 설치사업을 진행하고 있으며, 이 사업의 일차적인 목표로 사고예방을 들고 있지만 도로와 보행자 통로를 완전히 구별하기 때문에 도로에서 발생하는 유해인자에 직접적으로 노출되는 영향을 줄여줄 수 있을 것으로 기대하고 있다(Cho, 2010). 또한, 터널 내 안전벽 설치에 따른 보행자 노출 관련 연구보다 터널을 이용하는 차량에서 발생하는 오염물질의 농도 및 성분 분석 연구에 집중되어 있어, 안전벽 설치로 인한 보행로에서의 유해물질의 평가가 미흡하였다(Lough, 2005; Chiang, 2009). 따라서 본 연구는 터널 보행로에 안전벽 설치 전·후의 터널 내 보행로에서의 입자상 물질(particulate matter, PM₁₀), BC, 그리고 소음을 측정하고 비교하고자 한다.

II. 연구방법

1. 측정장소 및 방법

측정은 낙성대터널(길이: 119.7 m, 폭: 10.8 m)에서 진행되었다. 해당 장소는 왕복 2차로로 되어 있으며 양쪽으로 보행로가 설치되어 있다. 따라서 한 쪽의 보행로를 선택하여 동일하게 측정을 진행하였다. 안전벽 공사에 사용된 재질은 플라스틱 재질의 투명판이 사용되었으며 본 공사에 약 5개월(2022.12~2023.05)의 시간이 소요되어 공사 전 후의 온습도 및 측정대상물질을 모두 측정하였다. 공사 전후 모두 보행로에 환기용 팬은 존재하지 않았으며 보행로의 통로는 사람 1명이 다니기에 적합하였다. 설치된 안전벽은 하부부터 상부까지 완전히 밀폐하여 도로와 보행로 사이의 공기 교환이 이루어지지 않게 하였다. 터널을 기준으로 주거단지와 출근장소가 구분되어 있기에 해당 장소에서 측정은 낮 시간(non-rush hour)와 퇴근시간(rush-hour)로 나누



Figure 1. The places where measurement was conducted. Left is before the safety walls were installed and right is after installation

어 진행되었다. 낮시간은 터널을 이용하는 차량이 적을 것이라고 예상되는 오후 2시이며 퇴근시간은 차량의 이동량이 많은 오후 5시를 측정시작시간으로 정하였다. 측정은 터널 양쪽 입구로부터 1 m안의 위치인 site1과 3, 그리고 터널 중앙지점(입구로부터 약 60 m 지점)인 site 2로 진행되었다. 터널의 양쪽 입구인 site1에서 site3까지 편도로 3번 움직이며 진행되었고 site1에서 site3까지 편도로 움직일 때, 이동시간 및 각 site에서 멈춰 2분간 농도측정을 진행하여 12분간 진행되었으며 이를 3번 반복 측정하였기에 1회 측정 당 총 36분이 소요되었다. Figure 1은 측정을 진행한 터널모습으로 보행로 안전벽 공사전·후 모습으로 공사 전(2022년 12월)과 후(2023년 6월)로 나누어 각각 5회씩 측정(각 site 당 15개의 데이터 확보)을 진행하였다.

2. 측정항목

본 연구에서는 온습도, 입자상 물질로써 PM₁₀을 대상으로 하였으며 이와 함께 BC, 그리고 소음을 측정하였다. 모든 측정은 보행로의 중앙지점, 그리고 지면으로부터 1.5 m위에서 진행되었다. 온습도는 Onset HOBO Data logger(UX100-003, Onset Computer Corporation, USA)으로 측정하였다. PM₁₀은 광산란 측정방식인 SidePak AM520 (TSI, USA)가 사용되었으며 검출한계는 1.48 µg/m³이었다. 측정유량은 1.7 L/min으로 유지되었다. BC측정은 광학적 흡수 방법으로 측정을 진행하는 Aethalometer (AE-51, Aethlabs, USA)가 사용되었다. 측정유량은 150 mL/min으로 진행되었다. 소음측정은 Sound Level Meter NL-42(IEC 61672-1, Class 1,

RION, Japan)을 사용하였다. 측정범위는 A-weighting (25-138 dB), inherent noise는 17 dB, 반응특성은 환경부 소음 측정방법에 따라 fast로 설정하였다. 세 기기 모두 측정간격은 10 초로 통일되었다. 측정이 Figure 1의 특정 위치에서만 진행된 것이 아니라 site1부터 site3까지 이동하되 각 site에서 2분간 멈추면서 진행되었기에 각 site별 2분간의 데이터(12개의 평균)를 사용하여 site별 농도를 정리하였다. 각 site 별 터널을 이용한 차량수는 수동 카운트기 (FH102, China)를 이용하여 측정하였다.

3. 측정항목의 증감률 산출

본 연구에서는 측정항목들의 결과에 대하여 증감률을 아래 식을 통하여 산출하였다. C₁은 안전벽 공사 전 각 측정항목의 농도이며, C₂는 안전벽 공사 후 각 측정항목의 농도이다. 각 농도의 비교는 측정을 진행한 날의 순서대로 비교하였다.

$$\text{측정 항목별 농도 증감률(\%)} = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \times 100$$

4. 데이터 분석

통계분석은 R software v4.1.2 (R Development Core Team, Vienna, Austria)를 사용하여 분석하였다. 본 실험에서 측정된 시료의 수가 적었던 점을 보완하기 위하여 먼저 정규성 검정을 Shapiro-Wilk test로 실시한 후, Kruskal-Wallis test를 통하여 통계적으로 차이가 있는지 검정하였다. 사후검정으로 Bonferroni 방법이 사용되었으며 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 로 설정하였다.

III. 결 과

1. 터널 환경조건 및 이용차량 대수

Table 1에 터널 내부에서의 온도, 상대습도, 그리고 터널을 이용한 차량 대수를 정리하였다. 공사 전에는 낮시간의 온도가 퇴근시간보다 높았던 반면, 공사 후에는 퇴근시간 때의 온도가 더 높았다. 상대습도의 경우, 공사 후의 측정기간이 전보다 더 습한 여름 기간이었기에 차이를 보였다. 터널을 이용한 차량의 대수는 공사 전후로 비슷한 결과를 보였다.

2. 터널 내 위치별 농도

1) 위치별 측정대상인자 농도

터널내 위치별 측정대상인자 결과를 Table 2에 나타내었다. 안전벽 공사를 진행한 이후, PM₁₀과 BC 농도가 측정된 위치에서 모두 증가한 모습을 보였다. 특히, 터널 보행로 중간위치에서 측정을 진행했던 site2에서

는 공사이전 PM₁₀ 31.09 ± 14.02 µg/m³, BC 2.28 ± 1.55 µg/m³ 보다 PM₁₀ 31.09 ± 14.02 µg/m³, BC 2.28 ± 1.55 µg/m³로 통계적으로 유의미하게 (p<0.05) 증가하였다.

2) 안전벽 설치 후, 측정대상인자별 결과증감률 요약

안전벽 설치 공사 이후, 측정대상인자 별 결과증감률을 Figure 2에 요약하였다. Site 1과 2에서 PM₁₀과 BC 모두 공사 전에 비하여 약간 경우도 있었으나 전반적으로 모두 증가하는 경향을 보였다. 특히, 터널 site2에서는 PM₁₀ (낮시간 35.29 ± 14.56%, 퇴근시간 19.44 ± 8.02%)와 BC (낮시간 7.17 ± 5.06%, 퇴근시간 26.71 ± 13.19%)이 크게 증가하였음을 확인하였다. 소음의 경우, 안전벽 설치 공사 이후 모든 측정위치에서 감소한 모습을 보였다. 이 중에서도 site2에서의 소음은 퇴근시간에서 8.10 ± 3.31% 감소함으로써 가장 많이 소음을 줄여줄 수 있는 효과를 확인하였다.

Table 1. Conditions inside tunnel

	N [§]	Non-rush hour		Rush hour	
		B.C.**	A.C.***	B.C.	A.C.
Temp [†] (°C)	15	21.19 ± 2.08	27.77 ± 2.82*	20.6 ± 1.79	29.03 ± 1.11*
RH [†] (%)	15	35.4 ± 19.62	40.66 ± 11.15	33.46 ± 20.98	39.82 ± 9.12
Vehicles		50.0 ± 1.0	48.33 ± 4.16	100.33 ± 13.20	94.33 ± 11.59

*Statistically different values compared to each condition using t-test (p<0.05) [§]N: Number of samples, [†]Temp: Temperature, [†]RH: Relative humidity, ^{||}Vehicles: Number of vehicles using the tunnel, **B.C.: Before safety wall construction, ***A.C.: After safety wall construction

Table 2. Concentration of each measurement factor sorted by time period before and after construction (PM₁₀, BC: µg/m³, Noise: Leq dB(A))

	Non rush hour						Rush hour					
	PM ₁₀		Black carbon		Noise		PM ₁₀		Black carbon		Noise	
	B.C. [†]	A.C. [†]	B.C.	A.C.	B.C.	A.C.	B.C.	A.C.	B.C.	A.C.	B.C.	A.C.
Outside	20.13 ± 11.30	23.16 ± 5.60	1.03 ± 0.66	1.25 ± 0.59	61.04 ± 10.12	60.98 ± 7.85	25.81 ± 10.71	28.33 ± 13.46	1.51 ± 1.04	0.85 ± 0.81	56.04 ± 6.20	56.88 ± 4.47
Site1	20.58 ± 12.19	22.49 ± 8.30	1.34 ± 1.29	1.40 ± 0.71	62.61 ± 9.83	61.64 ± 6.08	23.69 ± 6.10	29.81 ± 12.89	1.78 ± 0.99	1.78 ± 1.02	66.49 ± 7.65	63.49 ± 5.77*
Site2	20.94 ± 12.73	28.33 ± 11.48*	1.58 ± 1.24	1.70 ± 1.08*	62.16 ± 9.91	61.28 ± 7.18	26.03 ± 6.88	31.09 ± 14.02*	1.80 ± 1.19	2.28 ± 1.55*	68.39 ± 6.73	62.86 ± 6.79*
Site3	21.27 ± 12.75	22.75 ± 8.01	1.313 ± 0.83	1.35 ± 1.07	63.58 ± 10.25	62.33 ± 5.22	24.04 ± 6.30	31.18 ± 13.56	1.93 ± 1.22	2.11 ± 1.68*	66.37 ± 7.81	63.77 ± 6.19*

*Statistical significance at after safety wall construction compared to before construction (p<0.05), [†]B.C.: Before safety wall construction, [†]A.C.: After safety wall construction

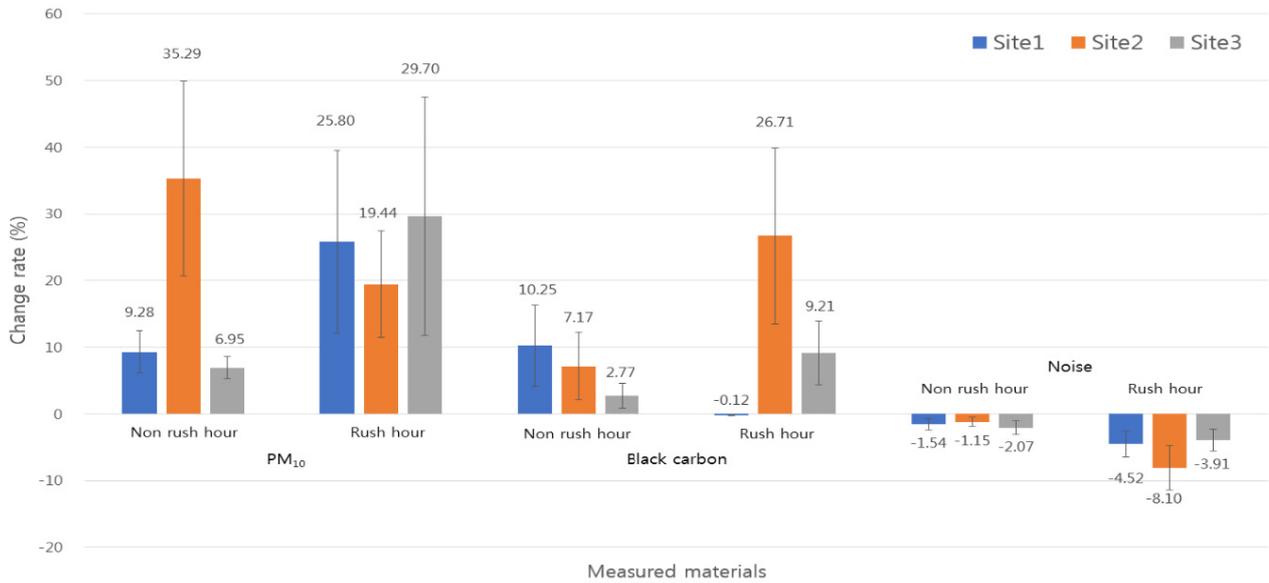


Figure 2. Change rate by each factor after installation of safety wall (%)

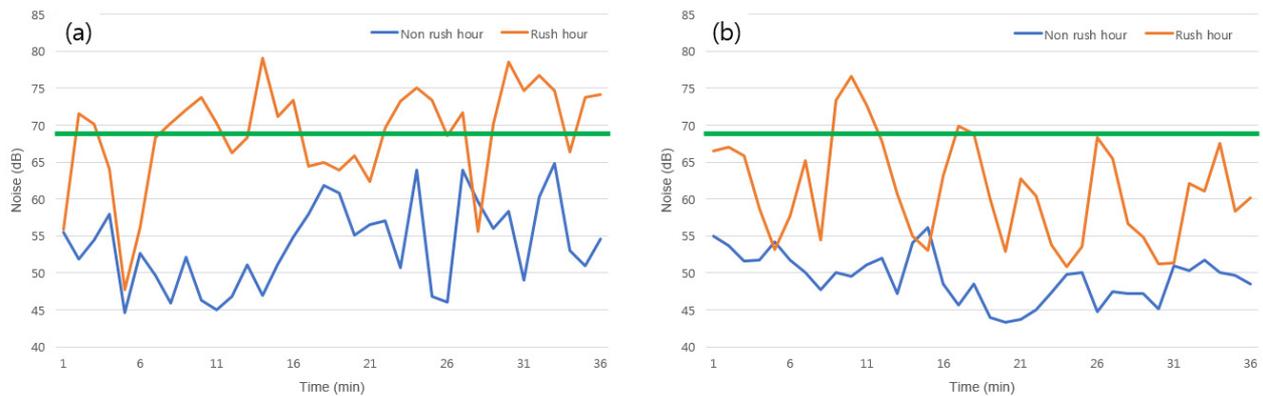


Figure 3. Measured total noise results: (a) before construction, (b) after construction. Green lines are noise standard regulated by the South Korean Ministry of Environment 68 dB(A)

3) 소음측정 실시간결과

전체 소음 결과를 측정을 진행시간에 따라 Figure 3에 나타내었다. 터널 내 소음은 대부분 차량에 의해서 발생하였기에 차량이 없는 경우에는 공사 전·후 모두 약 55 dB(A) 전후로 낮은 수준을 보였다. 그러나 터널 또는 터널안 보행통로에 대한 소음기준이 없어, 환경부의 「소음·진동관리법」에서 주거, 녹지 등의 부지경계선으로부터 50 m 이내에서 발생하는 주간소음의 수치를 제한하는 수치인 68 dB(A)을 적용하였다. 이는 낙성대 터널 바로 전후 50 m안에 아파트 시설이 있기 때문이다. 공사여부에 상관없이 해당 터널을 이용하는 차량의 대수는 거의 비슷하였으나 공사 이전에는 낮시간에

서는 기준 미만인 반면, 퇴근시간에서 기준을 초과하는 모습을 빈번히 확인할 수 있다. 그러나 공사 이후에는 낮시간에서는 공사 이전과 비슷한 모습을 보이면서 퇴근시간에서는 기준을 초과하는 경우 크게 감소시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

IV. 고 찰

본 연구는 터널보행로 안전벽 설치 전후의 PM₁₀, BC, 소음 수준에 대하여 측정 및 비교하였다. 터널 내에서 발생하는 수많은 유해물질 중 안전벽 설치 후 보행로에서 영향을 받을 수 있는 대표적인 물질을 측정하

고 평가한 국내사례가 거의 없어 본 연구가 갖는 의의가 있다.

터널보행로 안전벽 설치 이후, PM₁₀의 농도가 터널 중앙지점에서 측정될 수 있음을 확인하였다. 하현주 등(2011)의 연구에 따르면 터널 보행로에서의 안전벽 설치 후, 터널 중심부 위치의 보행로에서의 PM₁₀ 농도가 $36 \pm 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였으며 이는 도로에서의 측정값에 비하여 약 32% 감소율을 보였다고 밝혔다. 이는 본 연구의 터널 중앙지점에서의 측정값과 비슷한 결과($31.09 \pm 14.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보였으나 증감률에 있어서는 서로 반대되는 결과를 보였는데, 이는 짧은 터널의 길이로 인하여 낮시간대의 PM₁₀ 농도가 외부공기와 큰 차이를 보이지 않는 점과 안전벽 사이에 존재하는 비상문 틈으로 인하여 공기가 통할 수 있다는 점이 영향을 준 것으로 추측한다(Kim, 2004). 터널보행로 입구와 출구에서의 PM₁₀의 농도는 외부와 큰 차이를 안보일 수 있으나 터널보행로 중앙에서의 PM₁₀의 농도는 높았기에 터널의 길이가 길어 오랜 시간동안 이용하게 되는 경우, 마스크 착용 등을 통하여 호흡기를 보호하는 것을 권장하는 바이다.

터널을 이용하는 차량들의 시간대별 차이가 터널 보행로에 안전벽을 설치했음에도 PM₁₀과 BC 농도에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. PM₁₀은 퇴근시간에 모든 측정위치에서 농도가 증가하는 모습을 보였다. 그 중 퇴근시간의 두 외곽측정위치가 중앙부분보다 높은 모습을 보였는데 이는 측정 위치와 외부공기가 들어오는 곳에 직접적인 영향을 받을 수 있는 위치였음과 퇴근시간 때 이동하는 차량이 더욱 많았기 때문으로 추정된다. 그럼에도 PM₁₀의 농도는 중앙부분에서 가장 높았는데 이는 안전벽이 설치되고 난 이후, 보행자통로의 중앙지점에서는 바람이 거의 불지 않아 공기의 이동이 거의 없어 이로 인한 PM₁₀의 축적가능성을 보여주고 있다. BC 또한 차량의 이용이 많아지는 퇴근시간대의 농도가 낮시간대와 유사하거나 증가하는 모습을 보여줬으며 중앙지점에서는 높은 농도를 보임으로 보아 PM₁₀과 같은 요인들로 인하여 농도변화에 영향을 받는 것으로 파악된다. BC의 경우, 차량에서 발생하는 배기가스가 가장 큰 영향요인으로 작용되는데 측정위치를 통과하는 차량대수가 많을수록 높은 농도 결과를 보였기에 차량의 이동량이 상대적으로 많은 퇴근시간대, 아파트 진입로로 인한 정체현상, 터널과 바로 이어진 곡선주 도로 인하여 site 3에서 유독 높게 측정되었다. PM₁₀과

BC가 농도변화 경향에 있어서 유사하였으며, 특히 안전벽이 설치된 이후의 터널 보행로 중앙부분에서는 두 대상 모두 높은 농도 결과를 보였기에 공기정화시스템을 추가적으로 설치하거나 내부공기를 순환시킬 수 있는 부가적인 설비가 요구되는 바이다.

터널 내 보행자통로에 안전벽을 설치한 이후, 차량이동으로 인해 발생하는 소음의 크기가 줄어들 수 있음을 확인하였다(Cho, 2010). 이는 시간대의 구분과 상관없이 모두 확인 가능하였으며, 측정 위치에서 전부 감소하였다. 특히, 소리의 울림이 발생하는 site 2에서는 퇴근시간 기준 $8.10 \pm 3.31\%$ 감소한 모습으로 터널 내 보행로에서 가장 긴 시간으로 보내게 되는 위치에서 가장 큰 소음감소 효과를 보였다. 또한, 퇴근시간에서는 차량의 이용이 증가하고 이는 터널을 이용하는 차량 수의 증가로 더 높은 소음에 노출될 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 Figure 3에서 확인 가능하듯, 터널 또는 터널안 보행통로에 대한 소음기준이 없어, 환경부의 「소음·진동관리법」에서 주거, 녹지 등의 부지경계선으로부터 50 m 이내에서 발생하는 주간소음의 수치를 제한하는 수치인 68 dB(A)을 적용하였다. 이는 낙성대 터널 바로 전후 50 m안에 아파트 시설이 있기 때문이다. 환경부의 「소음·진동관리법」기준(68 dB)을 넘는 순간이 안전벽 설치 이후 크게 줄어든 모습을 확인할 수 있다. 이 외에도 도로 확장, 차량 속도제한, 무거운 차량의 운행 제한 등의 조치를 시행한다면 소음으로 인한 영향을 줄이는데 더욱 효과적인 것이다(EEA, 2021).

우리나라는 현재 「도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙」제42조에서 터널 내 공기질을 관리하고 있으나 일산화탄소(100 ppm 이하)과 질소산화물(25 ppm 이하)만 규제하고 있다. 그러나 이미 수많은 선행연구들을 통하여 터널 내에 존재가능한 오염물질이 다수 존재함은 밝혀져 있으며 이러한 환경에 조성되는 보행자 통로는 이를 이용하는 보행자에게 건강상의 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구를 통해 터널 내 보행자통로에 안전벽을 설치함으로써 PM₁₀, BC, 그리고 소음의 농도 변화를 확인할 수 있었으나 이 외의 유해물질에 대한 농도 변화 및 측정이 추가적으로 필요한 바이다. 또한, 터널의 길이가 길어짐에 따라 터널 보행로에 머무르는 시간이 증가하기에 관련된 규제 보완, 사용자를 위한 안내문구 부착, 환기설비 설치를 통한 환경개선 등이 필요하다.

본 연구가 갖고 있는 한계점으로는 먼저 측정대상물

질의 수가 터널 내에서 발생가능한 물질에 비하여적었다는 점이다. 터널 내에는 불완전 연소로 인한 배기가스, 일산화탄소, 질소산화물, 휘발성유기화합물, 다환방향족탄화수소, 2차 오염물질 등 다양한 오염물질이 존재한다(Marinello, 2020). 그렇기에 본 연구에서 측정된 PM₁₀, BC 그리고 소음만으로 터널 내 보행자통로에서의 환경영향여부를 결정 짓기에는 한계가 있다. 다만, 본 연구의 측정대상물질은 주로 차량에서 발생하는 배기가스와 주변 공기를 주 발생원으로 예측하고 측정하였기에 보행로 안전벽 설치로 인한 농도 변화여부를 파악하기에 적합하였다고 판단된다. 다음으로 측정장소가 도심 내의 터널이었기에 고속도로 터널에서의 환경과 차이를 보인다는 것이다. 터널을 이용하는 차량의 속도가 빠를수록 발생하는 소음의 크기가 커지게 되고 보통 터널 길이가 500 m 이상이 될 때, 통근자 및 터널 내 보행자에게 영향을 미칠 정도의 소음이 발생가능하다(Lokhande, 2023). 본 연구에서 측정을 진행한 곳의 터널 길이는 약 120 m로 터널을 이용하는 차량의 속도가 상대적으로 높지 않았다는 점이 터널 내 보행로에서의 소음 크기가 작게 측정되는 것에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 마지막으로 터널의 양 끝이 아파트 진입로, 그리고 곡선주 도로로 이어지는 점은 일반적인 터널의 형태와 차이를 보였다. 특히, 이러한 특징으로 인하여 차량의 감속이 유도되었는데 이 점은 해당 지점에서의 측정농도 증가에 영향을 준 것으로 판단된다.

V. 결 론

안전벽 설치 전후와 낮시간대와 퇴근시간대를 구분하여 각 측정대상물질의 농도를 측정하였다. PM₁₀과 BC는 안전벽을 설치한 이후 보행로에서의 농도가 모두 증가하였다. 반면, 소음은 안전벽 설치 이후 보행로에서의 소음수치가 약 3 - 6 dB(A) 감소하였다. 안전벽의 설치로 PM₁₀의 농도가 증가하는 경향을 확인하였으므로 이에 대한 대책이 요구되는 바이다.

References

- Agay-Shay K, Friger M, Linn S, Peled A, Peretz C et al. Air pollution and congenital heart defects. *Environ Res* 2013;124:28-34 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.03.005>
- Alves CA, Gomes J, Nunes T, Duarte M, Querol X et al. Size-segregated particulate matter and gaseous emissions from motor vehicles in a road tunnel. *Atmos Res* 2015;153:134-144 <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.08.002>
- Amato F, Alastuey A, Karanasiou A, Lucarelli F, Querol X et al. AIRUSE-LIFE+: a harmonized PM speciation and source apportionment in 5 Southern European cities. *Atmos Chem and Physics Discussions* 2015; 15(17) 23989-24039 <https://doi.org/10.5194/acp-16-3289-2016>
- Chiang HL, Huang YS. Particulate matter emissions from on-road vehicles in a freeway tunnel study. *Atmospheric Environment*, 2009;43(26):4014-4022 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.015>
- Cho H, Lee J, Liu X, Lee K. Impact of Soundproofing Wall of Tunnel on Particulate Matter and Noise. *Journal of Environmental Health Science*, 2010;36(5):411-417.
- Cigada A, Ruggieri D, Zappa E. Road and railway tunnel fire hazard: a new measurement method for risk assessment and improvement of transit safety. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Measurement Systems for Homeland Security* 2005:89-94
- Custódio D, Cerqueira M, Alves C, Nunes T, Querol X et al. A one-year record of carbonaceous components and major ions in aerosols from an urban kerbside location in Oporto, Portugal. *Sci of the Total Environ* 2016;562:822-833 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.012>
- Dons E, Panis LI, Van PM, Theunis J, Wets G. Personal exposure to black carbon in transport microenvironments. *Atmospheric Environment* 2012; 55:392-398 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.020>
- European Environment Agency (EEA). Reported data on noise exposure covered by EU Environmental Noise Directive 2002/49/EC. Directorate-General for Environment. 2021 Available from: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-to-and-annoyance-by-2/assessment-4>
- Gan W, Koehoorn M, Davies H, Demers P, Brauer M et al. Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of coronary heart disease hospitalization and mortality. *Epidemi* 2011;22(1):S30 <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000391750.38925.0f>
- Janssen NA, Hoek G, Simic-Lawson M, Fischer P, Cassee FR et al. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared

- with PM10 and PM2.5. *Environ Health Perspectives* 2011;119(12):1691-1699 <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>
- Kim SD, Song HH, Lee H. Estimation of Train-Induced Wind Generated by Train Operation in Subway Tunnels, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 2004;16(7):652-657
- Kirytopoulos K, Konstandinidou M, Nivolianitou Z, Kazaras K. Embedding the human factor in road tunnel risk analysis. *Process Safety and Environ Protection* 2014;92(4):329-337 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.03.006>
- Li P, Xin J, Wang Y, Wang S, Wang M et al. Time-series analysis of mortality effects from airborne particulate matter size fractions in Beijing. *Atmos Environ* 2013;81:253-262 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.004>
- Lokhande SK, Kale VB, Jain MC. Road tunnel noise: monitoring, prediction and evaluation of noise-induced hearing loss. *Environ Sci and Pollut Res* 2023;30(36):86338-86351 <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28558-x>
- Lokhande SK, Pathak SS, Kokate PA, Dhawale SA, Bodhe GL. Assessment of heterogeneous road traffic noise in Nagpur. *Arch Acoust* 2018;43(1):113-121 <https://doi.org/10.24425/2F118086>
- Lough GC, Schauer JJ, Park JS, Shafer MM, DeMinter JT et al. Emissions of metals associated with motor vehicle roadways. *Environmental Science & Technology*, 2005;39(3):826-836 <https://doi.org/10.1021/es048715f>
- Ma ZL, Shao CF, Zhang SR. Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Tech* 2009;24(3):350-355 <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.08.004>
- Moreno T, Reche C, Rivas I, Minguillón MC, Gibbons W et al. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environ Res* 2015;142:495-510 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.022>
- Patel MM, Chillrud SN, Correa JC, Hazi Y, Kinney PL et al. Traffic-related particulate matter and acute respiratory symptoms among New York City area adolescents. *Environ Health Perspectives* 2010;118(9):1338-1343 <https://doi.org/10.1289/ehp.0901499>
- Pathak SS, Lokhande SK, Kokate PA, Bodhe GL. Assessment and prediction of environmental noise generated by road traffic in Nagpur City, India. In *Environ Pollution: Select Proceedings of ICWEES-2016* 2018;167-180 https://doi.org/10.1007/978-981-10-5792-2_14
- Querol X, Alastuey A, Ruiz CR, Artiñano B, Schneider J et al. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities. *Atmos Environ* 2004;38(38):6547-6555 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.08.037>
- Schifano P, Lallo A, Asta F, De SM, Michelozzi P et al. Effect of ambient temperature and air pollutants on the risk of preterm birth, Rome 2001-2010. *Environ Int* 2013;61:77-87 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.005>
- Silbajoris R, Osornio-Vargas AR, Simmons SO, Reed W, Samet JM et al. Ambient particulate matter induces interleukin-8 expression through an alternative NF- κ B (nuclear factor-kappa B) mechanism in human airway epithelial cells. *Environ Health Perspectives* 2011;119(10):1379-1383 <https://doi.org/10.1289/ehp.1103594>
- Thorpe A, Harrison RM. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. *Sci of the Total Environ* 2008;400(1-3):270-282 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.007>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). Report to congress on black carbon. 2012; 388 Available from: <https://19january2017snapshot.epa.gov/www3/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>
- Wellenius GA, Burger MR, Coull BA, Schwartz J, Mittleman MA et al. Ambient air pollution and the risk of acute ischemic stroke. *Archives of Int Medicine* 2012;172(3):229-234 <https://doi.org/10.1001/archinternmed.2011.732>
- Xing X, Li H, Zhong B, Qiu L, Li L et al. Assessment of noise annoyance level of shield tunneling machine drivers under noisy environments based on combined physiological activities. *Applied Acoustics* 2021;179:108045 <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108045>

<저자정보>

이명호 (박사과정), 박종민 (석사과정), 강소현 (박사과정), 박정연 (석사과정), 권태홍 (석사과정), 윤충식 (교수)