

## 지하철 터널내 운행열차에 의한 열차풍의 산정

김 신 도, 송 지 한, 이 회 관\*

서울시립대학교 환경공학과, \*인천대학교 토목환경시스템공학과

### Estimation of Train-Induced Wind Generated by Train Operation in Subway Tunnels

Shin-Do Kim, Ji-Han Song, Heekwan Lee\*

Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

\*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea

(Received January 26, 2004; revision received May 13, 2004)

**ABSTRACT:** Development of underground space in urban area has a huge amount of potential to ease the limitations on the land use and the efficiency especially in urban area. Considering public transportation in urban area, subway system could be one of the most efficient and practical approaches. Subsequently this leads the public to have more chances to experience the indoor air quality (IAQ) in subway systems. In this study, it was aimed to produce useful data for the IAQ control in subway environments. Specifically the train-induced wind has been investigated by means of field survey and analysis. The recent updates including the quantified characteristics of train-induced wind are presented in this paper.

**Key words:** Subway environment(지하철 공기질), Indoor air quality(IAQ), Train-induced wind (열차풍), Field survey(현장조사)

#### 기 호 설 명

- $A_t$  : 열차저항면적 [ $12.8 \text{ m}^2 = 3.98 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$ ]
- $A_T$  : 터널 단면적 [ $18.6 \text{ m}^2 = 5.15 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ ]
- $g$  : 중력가속도 [ $9.8 \text{ m/s}^2$ ]
- $Q_t$  : 교통환기량 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $V_t$  : 열차주행속도 [ $\text{m/s}$ ]
- $\overline{V_T}$  : 평균 열차풍속 [ $\text{m/s}$ ]

#### 그 리 스 문 자

$\Delta P$  : 교통 환기력 [ $\text{mmH}_2\text{O}$ ]

#### 1. 서 론

현재 전 세계적으로 진행되고 있는 도시화(urbanization)라는 현상은 상당부분의 인구를 도시 지역으로 이동시키는 역할을 하고 있으며 이에 상응하는 토지에 대한 요구와 함께 그 이용효율의 증대 또한 급속히 진행되고 있다. 대도시에서 흔히 찾아볼 수 있는 고층건물들을 그 좋은 예로 들 수 있다. 이와 같이 밀집화되어 가고 있는 도시구조를 지원하고 있는 교통 측면에서 기존의 제한된 토지이용에 대응하는 지하공간의 개발과 그에 대한 효율적인 활용에 대한 노력이 팔목할 만하다. 특히 최근 국내 일부 지하철과 관련된 큰 사고가 있었음에도 불구하고 지하철 시스템의 개발은 아직도 미래의 대중교통수단으로서의 잠재 가능성으로 인해 그 개발이 계속해서 추진되고 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-32-770-8468; fax: +82-32-777-8468

E-mail address: hlee@incheon.ac.kr

최근에 수행된 한 연구결과에 의하면 지하철 역사 내에서의 공기질은 크게 역사 내에 존재하는 오염발생원, 즉 이용승객과 운행열차와 실내공기 환경관리를 위해 도입되고 있는 환기시스템에 의해 결정되는 것으로 보고되었다. 이외에도 역사 밖의 공기오염 수준이 역사내 공기질 개선을 위해 필요한 환기요구량(ventilation demand)을 변화시켜 가상의 오염원(imaginary source)으로 작용하고 있다.<sup>(10)</sup>

이와 같은 지하 역사내 공기질에 영향을 미치는 인자들은 이외에도 역사에 존재하는 출입구 계단과 단순 개구부 등을 통한 자연환기량을 들 수 있다. 더욱이 운행열차에 의해 발생하는 열차풍(train-induced wind)은 역사 승강장 내의 공기를 본선 터널로 유출 또는 터널 내부의 공기를 승강장으로 유입시키면서 지하 역사내 공기질 관리에 여러 가지 어려움을 주고 있다.<sup>(3,4,6,7)</sup>

따라서 본 연구에서는 지하철 역사내 공기질 인자들 중 정확하게 평가되지 않고 있는 열차풍의 효과를 연구하여 역사내 공기질 관리에 활용하도록 하고자 하였다. 현장실험을 통하여 측정된 자료를 분석하여 열차풍의 발생 패턴을 파악하였으며 기존의 교통환기력 이론을 도입하여 실측자료로부터 열차풍을 정량화하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 교통환기력 이론

유체 내에서 임의의 속도로 운동하는 물체는 그 표면의 저항과 마찰로 인하여 진행방향의 유체운동을 발생시키게 된다. 터널과 같이 제한된 공간을 운동하는 자동차의 경우도 마찬가지로 공기의 움직임을 유발시키게 되며 이를 교통환기력( $\Delta P$ )이라 하고 식(1)과 같이 나타낸다.<sup>(2,3,5)</sup> 식(1)

에서도 알 수 있듯이 교통환기력을 주어진 임의의 조건하에서 차량 주행속도( $V_t$ )의 제곱에 비례함을 가리킨다.

$$\Delta P = \frac{A_t}{A_T} \frac{\gamma}{2g} V_t^2 \tag{1}$$

식(1)에서와 같이 정의된 교통환기력은 터널 내에서 교통환기량( $Q_t$ )을 발생시키며 식(2)에 나타난 바와 같다. 이와 같은 교통환기량은 주어진 임의의 조건에 대해 발생한 교통환기력의 제곱근과 비례하는 것을 알 수 있다.

$$Q_t = A_T \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \sqrt{\Delta P} \tag{2}$$

또한 식(1)과 식(2)를 정리하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_t = \sqrt{A_t A_T} V_t \tag{3}$$

식(3)을 간략히 표현하면 교통환기량( $Q_t$ )는 차량 주행속도( $V_t$ )에 비례하는 것을 알 수 있다. 이때의 비례상수는 열차의 저항단면적( $A_t$ )과 터널의 단면적( $A_T$ )에 의해 결정되어지며, 본 연구에서는  $15.4 \text{ m}^2 (= \sqrt{12.8 \text{ m}^2 \times 18.6 \text{ m}^2})$ 이다.

2.2 운행열차에 의한 열차풍

일반적으로 열차풍이란 운행하는 열차의 교통환기력에 의해 발생하는 바람을 가리키며, 외부의 신선한 공기를 역사내 유입시키기도 하고, 터널내의 축적된 오염물질을 역사 내로 이동시키는 역할을 하기도 한다.<sup>(1,8)</sup>

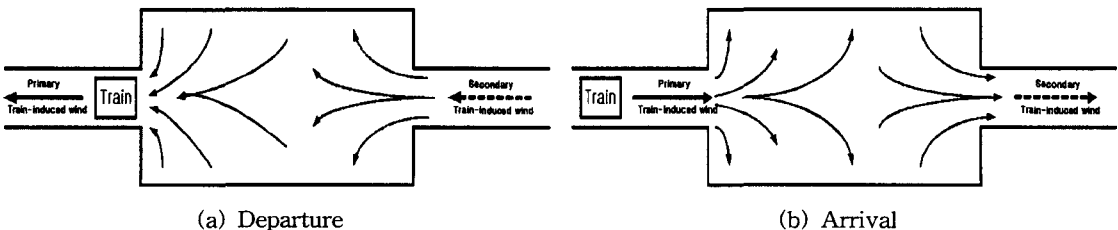


Fig. 1 Generation of train-induced wind by arriving subway trains.

Table 1 Influence of the train-induced wind

	Advantage/Dis-advantage
Platform	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cause defense reaction to the passengers due to the train-induced gust</li> <li>• Pollute the air in platform by transporting the pollutants in subway tunnels</li> <li>• Reduce the durability and capability of subway facility</li> </ul>
Tunnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport the air-conditioned air in platforms into tunnels</li> <li>• Improve the ventilation effect in tunnels</li> <li>• Decrease the efficiency of supply air fan</li> </ul>

역사 내에서의 열차풍을 그 발생지점에 따라 살펴보면, Fig. 1(a)에서도 나타난 바와 같이 열차가 출발하는 경우, 승강장의 공기가 본선 터널로 빠져나가게 되는데 이를 1차 열차풍(primary train-induced wind)이라 한다. 또한 발생한 1차 열차풍으로 인한 공기유출을 보상하기 위하여 승강장 반대편 터널로부터 공기가 유입되는데 이를 2차 열차풍(secondary train-induced wind)이라 한다. 반대로 열차가 역사로 진입하는 경우에는 Fig. 1 (b)에 나타난 바와 같이 역사로 유입된 열차풍, 즉 1차 열차풍의 일부가 2차 열차풍의 형태로 반대편 터널로 유출되고 있는 것을 나타내고 있다. 이와 같이 열차가 운행되면서 발생한 열차풍이 환기시설과 승객들에게 미치는 영향은 Table 1에 나타난 바와 같이 승강장과 터널에서 다르게 나타나고 있다.<sup>(9)</sup>

3. 연구방법

3.1 측정 역사 개요

측정 역사 선정에 있어서는 Table 2에 정리된 바와 같은 조건들을 고려하였으며 4호선 중의 미아삼거리 역사가 선정되었다.

이 역사는 Fig. 2의 역사이용안내도에서 나타난 바와 같이 지상, 지하 1층에 대합실(concourse), 지

Table 2 Considering aspects for the selection of field survey site

• Simple geometric structure of the subway station
• Distance from an exchanging station
• Distance from a station crossing surface and underground
• Plenty of passengers

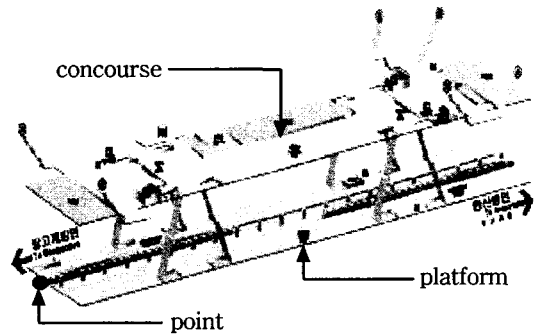


Fig. 2 Map of Miasamgeori station.

하 2층에 승강장(platform)으로 구성되어 있으며 역사의 외부도 상가와 학교·병원 및 은행 등을 포함하는 전형적인 도시환경으로 이루어져 있다. 측정역사는 도로변에 인접하여 상당한 교통량이 존재하고 있다.<sup>(1)</sup>

3.2 현장측정

현장측정은 2003년 5월 9일~11일까지 3일간 이루어졌으며, 측정은 Figs. 2~3에 나타난 바와 같이 미아삼거리 역사 경계선에서 열차가 출발하는 방향으로 65.3 m 떨어진 ①·②지점에서 실시하였다. 참고로 이 지점을 본선 터널 내에서 순수한 터널로 이루어져 있는 구간이다. 열차가 역사

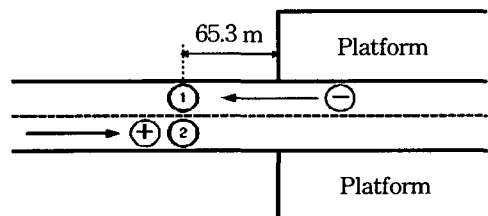


Fig. 3 Measurements for the train-induced wind.

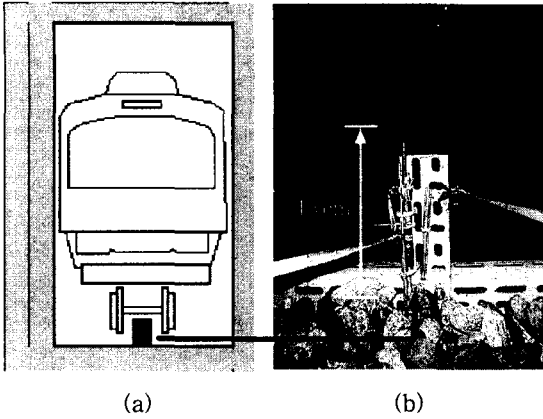


Fig. 4 Sampling location (a) and the installed velocity sensor (b).

에서 출발할 때 ①지점에서 주 열차풍이 산정되고, ②에서는 주 열차풍에 의해 형성되는 부 열차풍이 측정되었다. 열차가 역사로 진입할 때에는 ②지점에서 주 열차풍이며, ①지점에서 부 열차풍이 측정되었다. Fig. 3에서 ⊕의 의미는 본선 터널로부터 역사 안으로 유입되는 공기의 흐름을 가리키며, ⊖는 역사에서 터널로 유출되는 공기의 흐름을 가리킨다.

운행열차에 의한 열차풍의 측정은 터널의 중앙부에서 이루어지는 것이 바람직하나, 직접 측정에 의한 방법은 거의 불가능하다. 더욱이 Fig. 4(a)에도 나타난 바와 같이 본선 터널과 전동차 사이의 공간이 매우 좁기 때문에 현장측정에 상당한 제한이 따르고 있다.

따라서 본 연구에서는 열차가 운행하는 선로 바닥 중앙부(Fig. 4(a))에 Fig. 4(b)와 같이 풍속계를 바닥으로부터 15 cm 높이에 설치하여 운행열차에 의한 열차풍을 측정하였다. 여기에서 15 cm

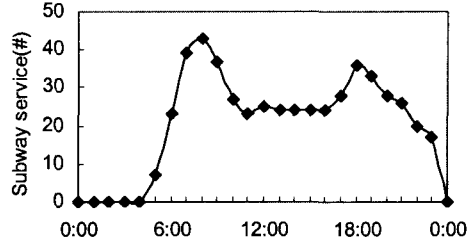


Fig. 5 Daily service schedule at the subway station (Note: The numbers on the y-axis counts the services for both directions).

는 Fig. 4(a)에서와 같이 전동차체의 최하부와 선로 하부와의 공간에 해당된다.

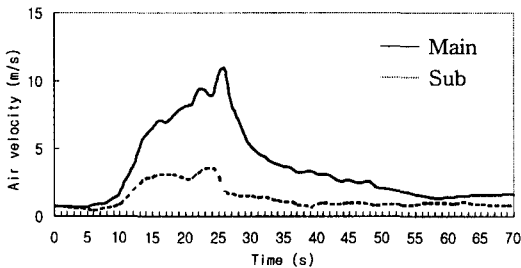
측정에 이용된 센서는 바람에 접촉하면서 발생하는 열의 전류량 차이에 의해 풍속을 나타내는 무지향성 다점풍속계(multichannel anemometer, Kanomax) 장비로 0.1~50 m/s까지 측정이 가능하다.

#### 4. 열차풍 측정결과 및 고찰

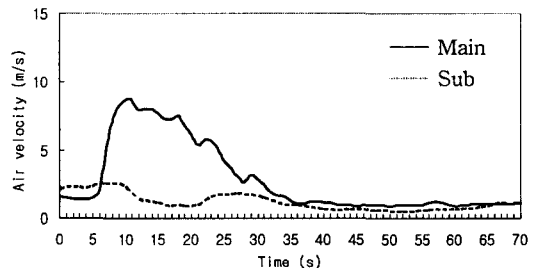
##### 4.1 전동차 운행과 열차풍속

본 연구에서 이용된 바닥에서 측정된 열차풍속 자료와 열차운행횟수를 조사한 자료 중 Fig. 5는 열차운행횟수를 시간대별로 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 6 : 00 AM부터 열차운행횟수가 점차 증가하면서 8 : 00~9 : 00 AM 기점으로 최고점으로 이른 다음 점차 감소하다가 6 : 00 PM부터 증가하는 추세를 나타내고 있다. 참고로 평일 시간당 28회 정도의 운행횟수를 기록하고 있다.

본선 터널의 바닥에서 측정된 열차풍속을 살펴 보면 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 그림에서 알 수



(a) Departure



(b) Arrival

Fig. 6 Train-induced wind occurrence on the subway route.

있듯이 열차 출발시(Fig. 6(a))에는 최대 열차풍속이 10.9 m/s를 기록되었으며, 열차가 진입시(Fig. 6(b))에는 8.7 m/s로 기록되었다. 또한 주 열차풍 즉 열차가 운행되는 선로 측에서 발생하는 열차풍에 의한 최대 부 열차풍은 열차 출발과 진입시에 각각 3.6 m/s와 2.6 m/s로 기록되었다. 이는 전 반적으로 열차가 역사를 출발하는 경우에 발생하는 열차풍이 강한 것을 나타내기도 한다.

#### 4.2 평균 열차풍속 산정

교통환기력 이론을 적용하여 열차속도 인자의 값을 구하고 평균 열차풍속을 산정하였으며, 열차풍을 산정하는 과정에서 열차가 측정구간 내에서는 등가속도 운전을 하는 것으로 가정하였다. Table 3에서와 같이 승강장과 터널 경계선으로부터 측정점까지의 거리(65.3 m)와 열차운행의 소요 시간이 측정/분석되었다.

$$S = \frac{1}{2} at^2 \rightarrow a = \frac{2S}{t^2} \quad (4)$$

$$V_t = a \times t \quad (5)$$

$$\overline{V}_T = \sqrt{\frac{A_t}{A_T}} \times V_t \quad (6)$$

Table 4는 식(3)~(5)를 이용하여 산정된 열차풍 관련 자료를 정리한 것이다. 또한 운행열차의 주행속도( $V_t$ )와 평균 열차풍속( $\overline{V}_T$ )는 식(6)과 같이 정의되며 지하터널의 단면적( $A_T$ )과 열차의 저항단면적( $A_t$ )를 고려할 때 0.83이 된다. 즉, 지하철 본선 터널 내에서는 열차 주행속도의 83%에 해당하는 평균 열차풍속이 발생함을 가리킨다.

산정된 열차 주행속도( $V_t$ )를 식(6)에 적용하면 표에서도 정리된 바와 같이 본선 터널 내에서의 평균 열차풍속( $\overline{V}_T$ )을 구할 수 있다. 또한 열차

Table 3 Time duration to travel the section between the station and the measurement site (65.3 m)

Measurements (#)	Departure (s)	Arrival (s)
1	14.0	15.4
2	14.6	16.6
3	9.4	16.1
4	16.1	16.0
5	13.4	16.4
Average	13.5	16.1

운행시 최대 열차풍속의 발생은 열차가 측정지점을 통과하기 시작하는 순간에 발생하게 된다. 앞 Fig. 6에서의 결과인 열차 출발과 진입시에 각각 10.9 m/s와 8.7 m/s를 이용하여 바닥에서 측정된 열차풍속을 터널 내의 평균 열차풍속으로 산정하는 계수를 구해 보면, 열차출발과 진입시에 각각 1.47과 1.59로 산정되었다. 예를 들어 열차 출발시 바닥에서 측정된 10.9 m/s의 풍속은 16.0 m/s의 평균 열차풍속으로, 열차 진입시 8.7 m/s는 13.8 m/s의 평균 열차풍속으로 환산될 수 있음을 의미한다.

앞에서도 언급한 바와 같이 역사 내에서 열차 운행에 따른 열차풍의 발생(1차 열차풍)은 부가적으로 2차 열차풍을 발생시키게 된다. Fig. 7(a)는 열차가 승강장으로부터 출발하는 경우 발생하는 1차 열차풍(-)과 2차 열차풍을 나타낸 것으로 각각 9,409 m<sup>3</sup>과 2,240 m<sup>3</sup>으로 계산되었다. 이는 1차 열차풍의 24%(약 1/4)에 해당하는 2차 열차풍이 발생하고 있는 것을 의미한다.

열차가 승강장으로 진입하는 경우는 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 8,491 m<sup>3</sup>의 1차 열차풍이 역사 내로 유입되고 이중 50%에 해당하는 4,210 m<sup>3</sup>의 2차 열차풍이 터널방향으로 유출되고 있음을 가리킨다.

Table 4 Calculation of mean train-induced wind

	Departure	Arrival
Acceleration ( $a$ )	+0.7 m/s <sup>2</sup>	-0.5 m/s <sup>2</sup>
Running speed ( $V_t$ )	19.3 m/s	16.6 m/s
Mean velocity of train-induced wind ( $\overline{V}_T$ )	16.0 m/s	13.8 m/s
Flow rate of train-induced wind ( $Q_t$ )	297.8 m <sup>3</sup> /s	256.1 m <sup>3</sup> /s

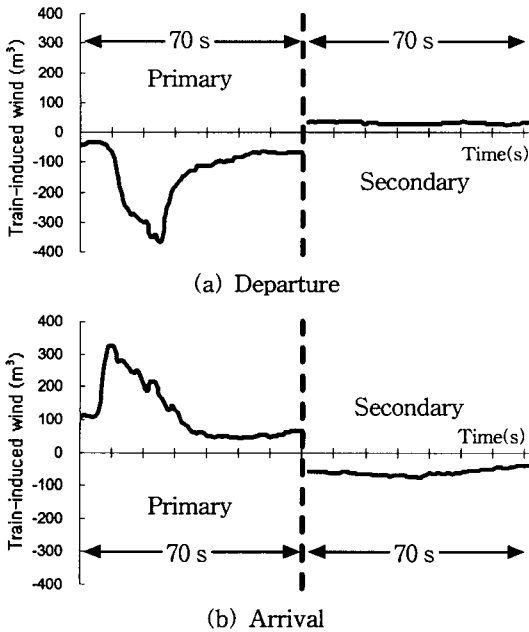


Fig. 7 Primary and secondary train-induced wind by subway train operation.

5. 결 론

지하철 역사에서 열차의 진·출입에 따라 발생하는 열차풍량을 측정하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

본 연구에서 이용된 터널의 현장조건을 고려할 때, 이론적으로 열차주행속도의 83%에 해당하는 평균 열차풍속이 발생하고 있다. 또한 열차운행시 터널 바닥에서 측정한 풍속을 본선 터널 내에서의 평균 열차풍속으로 환산하기 위한 계수가 열차 출발시와 진입시에 각각 1.47과 1.59로 산정되었다.

지하철 시스템에서 열차의 운전상태는 역사와의 상대적인 위치에 따라 크게 열차 출발시와 진입시로 나눌 수 있다. 운행열차에 의한 열차풍에 있어서는 열차가 역사를 출발하는 경우 9,409 m<sup>3</sup>의 공기가 1차 열차풍의 형태로 유출되며 2,240 m<sup>3</sup>의 공기가 2차 열차풍 형태로 유입된다. 또한 열차가 역사로 진입하는 경우에 8,491 m<sup>3</sup>의 1차 열차풍이 유입되고 4,281 m<sup>3</sup>의 2차 열차풍이 터널로 유출되는 것으로 나타났다. 이는 열차운행중 열차출발시에 발생한 열차풍이 도착시보다 많음을 나타내며, 열차가 도착하는 경우 발생하는 2차 열차풍의 비율이 높음을 가리킨다.

참고문헌

1. Cha, C. H., 1995, Study on the Effect of Train-Induced Wind on the Air Quality in Subway Platform, Master Thesis, Hanyang University.
2. Chen, T. Y., Lee, Y. T. and Hsu, C. C., 1998, Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 73, pp. 99-100.
3. Gerhardt, H. J. and Kruger, O., 1998, Wind and train driven air movements in train stations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 74, pp. 589-597.
4. Ke, M. T., Cheng, T. C. and Wang, W. P., 2002, Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system, Building and Environment, Vol. 37, pp. 1139-1152.
5. Kim, J. H., Lee, S. H., Do, Y. J. and Kim, S. D., 1995, Estimation of ventilation volume by traffic ventilation force in tunnel, Journal of Korea Air Pollution Research Association, Vol. 11, No. 3, pp. 273-278.
6. Kim, K. H., 2002, A study on the reduction strategies of trainwind in subway stations, Architectural Institute of Korea, Vol. 18, No. 1, pp. 259-265.
7. Kim, K. H., 2002, An experimental study on the air movement characteristics generated by train wind in the subway tunnel and station, Architectural Institute of Korea, Vol. 18, No. 7, pp. 153-160.
8. Lee, M. H., 1999, Study on Ventilation Characteristic in a Subway Station according to the Train Incoming, Master Thesis, University of Seoul, Korea.
9. Oh, M. D. and Nam, J. S., 1999, A study on train wind in the subway platform, Architectural Institute of Korea, Vol. 15, No. 7, pp. 177-185.
10. Seoul Metropolitan Subway Corporation, 2003, Study on the Air Quality Improvement in Subway System.