

## 신분당선 전동차 실내공기질 향상에 관한 연구

### A study of improving the indoor air quality by EMU in Shinbundang Line

임용찬\*, 이영진\*, 정영만\*, 한준희\*, 정영택\*, 박종문†

Yongchan Lim\*, Youngjin Lee\*, Youngman Jung\*, Junhee Han\*, Youngtaek Jung\*, Jongmoon Park†

**Abstract.** Everyday metro is main transportation used millions of passengers who stays at least 30 minutes or more than 1 hours in rolling stock cabins. Most of subway ventilation systems are formed in complicated underground sections which indoor air quality of station lobby, platforms, and rolling stock cabins some factors are causing amenity and passenger's health.

The inflowing dusts(PM10) inside the tunnel are blocked by installed PSD(Platform Screen Door) at platforms in Shinbundang Line. Also by the ventilation systems are installed which fresh air are supplied by in-outdoor air and exhausting CO<sub>2</sub>. The passengers breath and dust concentration from the inside tunnel could change the air of rolling stock cabin. This paper will analyze concentration change of CO<sub>2</sub> due to passengers breath and PM10, furthermore reduction measures of CO<sub>2</sub> and PM10 concentration in Shinbundang Line.

**Keywords :** Shinbundang Line, Inside Air-Quality, PM10, CO<sub>2</sub>

**초 록** 도시철도는 하루에 수백만의 시민이 이용하는 주요 교통수단으로 적게는 30분, 많게는 1시간 이상 승객이 체류한다. 도시철도는 대부분 환기가 어려운 지하구간으로 되어 있어 대합실, 승강장, 전동차 실내의 공기질은 승객의 쾌적성과 건강에 큰 영향을 미치는 요소로 부각되고 있다. 신분당선 승강장과 대합실은 승강장에 설치된 스크린 도어가 터널 내부에서 발생되는 미세먼지 유입을 차단하고, 환기시스템을 통해 외부공기 및 실내공기를 유입, 배출하고 있다. 전동차 실내 공기는 터널 내부의 공기 유입에 의한 미세먼지 농도와 승객에 의한 이산화탄소 농도에 의해 공기질이 변화된다. 본 논문에서는 신분당선 전동차 실내 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 미세먼지(PM10) 농도 변화에 대해 분석하고, 이산화탄소와 미세먼지 농도 저하 방안에 대해 연구한다.

**주요어 :** 신분당선, 실내공기질, 미세먼지, PM10, 이산화탄소

### 1. 서 론

중국발 황사, 환경오염에 의한 대기 미세먼지 증가에 따른 주의보 등 현대 시민들의 생활 수준이 높아짐에 따라 공기질에 대한 관심도도 높아지고 있다. 수도권 시민들이 주요 이동수단으로 이용하는 도시철도는 대부분 환기가 어려운 지하구간이며, 전동차 객실은 이용객이 90% 이상의 시간을 체류하는 공간이다. 전동차 실내공기질은 승객의 쾌적성과 건강에 큰 영향

† 교신저자: 네오트랜스(주) 기술본부 (Jongmoon.park@doosan.com)

\* 네오트랜스(주) 기술본부 차량팀

을 미치는 주요 요소이다. 이에 환경부는 2003년 ‘다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법 (법률 제 6911호)’ 을 공포하여 지하생활공간을 포함한 실내공간의 공기질 관련 관리법을 마련하였고, 2013년 ‘실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작, 운행 관리 지침 (환경부 고시 제2014-186호)’ 으로 관리하도록 고시하였다. 본 논문에서는 승객의 쾌적성과 건강에 큰 영향을 미치는 자동차 실내 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 미세먼지(PM10) 농도 변화를 분석 하고, 이산화탄소와 미세먼지의 농도를 저감시키는 방안 및 적용 사례에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 지하철 실내공기질 관련 기준

2013년 ‘실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작, 운행 관리지침’ 에서 제시하고 있는 권고기준은 이산화탄소의 경우 혼잡시 2500ppm 이하, 평상시 2000ppm 이하, 미세먼지(PM10)는 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하(혼잡/평시 동일)로 규정하고 있다(표 1).

표 1 지하철 실내공기질 권고기준(대중교통차량의 제작, 운행 관리 지침, 2013)

지표오염물질	2006년 ~ 2013년 변경 전		2013년 변경 후	
	Level1(평상시)	Level2(혼잡시)	Level1(평상시)	Level2(혼잡시)
이산화탄소(CO <sub>2</sub> )	2,500 ppm 이하	3,500 ppm 이하	2,000 ppm 이하	2,500 ppm 이하
미세먼지(PM10)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	
비고	다중시설이용 기준: 이산화탄소- 1,000 ppm, 미세먼지- 148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하			

이 기준은 2006년 ‘대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인’ 에서 권고한 기준보다 강화되었다(이산화탄소 평상시/혼잡시 2500/3500 ppm 이하, 미세먼지(PM10) 평상시/혼잡시 200/250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하, 2006~2013년). 이렇게 지하철내 실내공기질에 대한 권고기준치 강화는 2005년부터 수행되었던 실태조사 결과, 기존 권고기준 초과율이 낮고, 미세먼지의 경우 혼잡과 비혼잡간 유의미한 결과차이가 나타나지 않았기 때문이다(국립환경과학원(2013), 지하철 미세먼지 현황 과 개선기술(권순박, 2013))[1].

### 2.2 신분당선 전동차 구조

신분당선 전동차는 고속으로 운행하는 광역전철로서 주행 소음을 최소화하기 위하여 외부와 차폐설비인 플러그인 도어(Plug-in Door)와 이중 주름막 구조의 차량통로연결막(Gangway Plate)을 적용하였다(그림 1). 이로 인해 외부에서 유입되는 공기는 공기조화장치(HVAC)의 신선공기댐퍼(Fresh Air Damper)를 통해서만 유입된다.

표 2 신분당선 운영 현황

구분	최고속도	표정속도	총 길이	편도 운행시간
현황	90km/h	62km/h	17.7 km	16분 52초



(1) 차량통로연결막(Gangway Plate)



(2) 출입문장치(Plug-in Door)

그림 1. 신분당선 차량통로연결막(Gangway) 및 출입문(Plug-in Door)

신분당선 전동차의 냉방 또는 자동환기 가동시 공기흐름도는 그림 2와 같다. 신분당선 전동차는 배기댐퍼(Exhaust Damper)로 내부 공기가 배출되고, 신선공기댐퍼로 외부공기와 리턴그릴로 순환공기가 유입되어 증발기 팬을 통해 객실로 공급한다. 배기댐퍼는 평상시 닫혀 있어, 배기댐퍼를 통해서 외부 공기 유입은 차단되기 때문에, 순수하게 신선공기댐퍼를 통해서 외부 공기가 유입됨을 알 수 있다.

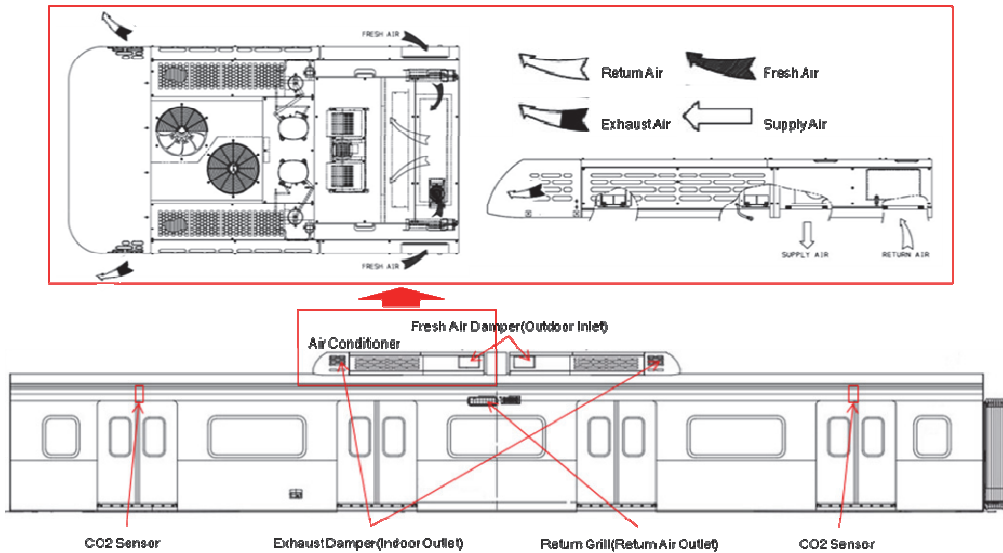


그림 2. 냉방 및 자동환기시 공기 흐름도

신분당선 전동차 실내에는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 센서가 객차당 2개씩 부착되어 있다. 두 개 센서의 평균 이산화탄소 농도 값을 모니터링하여 셋팅된 농도(ppm) 이상이 되면, 자동환기가 작동하며, 배기댐퍼와 신선공기 댐퍼가 개방되고, 배기팬이 가동되어 강제로 실내공기를 배출하고, 신선공기댐퍼를 통해 유입된 외부공기가 이산화탄소 농도를 낮춰준다.

## 2.3 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도 분석 및 개선 방안

### 2.3.1 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도 분석

2012년 신분당선 전동차 실내 이산화탄소 농도(ppm)는 환경부에서 제시한 권고기준에 만족한다(표3). 하지만 외부공기가 차단된 상태로 역간 거리가 6분 이상이 소요되는 구간에서는 객실내 쾌적성이 일부 낮아짐을 확인할 수 있었다(2013년 환경부 ‘실내공기질 관리를위한 대중교통차량의 제작, 운행 관리지침’ 고시 기준 평상시 만족, 혼잡시 불만족 (표4)).

표 3 이산화탄소 관리기준 및 측정결과

구분	혼잡시(ppm)	평상시(ppm)	비고
권고기준	3,500.0	2,500.0	환경부 가이드라인(2006)
1~4호선 평균	1,770.7	1,092.2	환경부 보도자료 (2009. 9.2)
5~8호선 평균	1,567.9	904.8	
분당선	2,004.2	1,044.2	
신분당선	3,000.4	1,328.5	2012년 측정결과

표 4 이산화탄소 농도에 의한 졸음 현상 상관관계(2012.10.25 SBS뉴스 보도, 뉴욕주립대 조사결과)

구분(이산화탄소 농도)	증상(졸음 현상)
1,000 ppm	증상 시작
2,500 ppm	집중력과 판단이 흐려지고 졸음 증상
3,000 ppm	졸음과 현기증 증상, 두통까지 유발

자동환기 시스템의 구동 조건은 2003년 ‘다중이용시설 등의 실내 공기질 관리법(법률 제6911호)’ 기준인 혼잡시 3,500ppm, 평상시 2,500ppm 일 때 구동하여 기준 대비 500ppm 미만으로 떨어질 때 정지하도록 셋팅되어 있었으며, 정상적으로 동작하여 혼잡시 3,000ppm 이하를 유지하고 있음을 확인했다.

### 2.3.2 개선방안 및 적용사례

개선 전 자동환기방식은 이산화탄소 농도 검지센서의 셋팅(혼잡시/평상시 3,500/2,500 ppm 이상 동작, 3,000/2,000 ppm 이하 정지)에 맞게 동작하며, 동작방식은 배기팬으로 내부 공기를 강제배출하여 압력차이에 의해 외부공기를 유입시키는 방식이다. 이는 이산화탄소 농도가 혼잡시/평상시 3,500/2,500 ppm 이상일 때 동작하여 표4의 현상을 유발할 가능성이 높고, 공기 순환이 빠르지 않은 단점이 있다. 실제 승객 증가에 따른 이산화탄소농도 증가로 답답함, 불쾌감 등의 민원이 다수 발생하였다. 이에 이산화탄소 농도 셋팅을 표1의 다중시설이용기준에 맞춰 항상 1,000 ppm 이하를 유지하도록 변경하고, 내부 공기 강제배출 방식이 아닌, 공기 순환이 빠른 강제유입 방식으로 변경하였다. 이 방식은 신선공기덤퍼만 개방하여 증발기 팬을 동작시켜 외부 공기를 실내로 강제 유입, 이산화탄소 농도를 낮추는 방식이다(표5). 자동환기

방식 변경 후 전동차 실내 이산화탄소 농도는 1,000 ppm 이하로 쾌적하게 유지되었으며, 실제 민원 또한 감소되었다.

표 5 자동환기 작동 범위 및 로직(개선 전/후)

구분	개선 전	개선 후
작동범위	정상시 : 2,000~2,500ppm 혼잡시 : 3,000~3,500ppm	정상시/혼잡시 : 700~1,000 ppm
자동환기 작동로직	신선공기댐퍼 : ON 증발기 팬 : OFF 배기 팬 : ON	신선공기댐퍼 : ON 증발기 팬 : ON(70% 운전) 배기 팬 : OFF

## 2.4 미세먼지(PM10) 농도 분석

### 2.4.1 미세먼지(PM10) 농도 현황

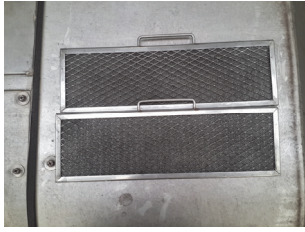
신분당선 전동차 미세먼지 농도(PM10)는 2013년 환경부에서 제시한 미세먼지농도(PM10) 기준에 만족한다(표6). 터널 내부 미세먼지 발생 원인은 터널 환기에 의해 유입되는 외부공기, 터널의 시멘트 분진, 전동차 판토티그래프, 고체도유기, 차륜 마모 등에 의해 생성된다. 신분당선의 미세먼지 농도는 자동환기 가동방식 변경 전후로 구분할 수 있으며, 강제 공급 및 이산화탄소농도 기준을 낮게 셋팅하여 구동하는 방식으로 변경 후 터널 내 공기가 실내로 유입되는 비율이 높아졌으며, 이는 미세먼지 농도 증가에 원인이 되었다. 터널 내부의 공기가 신선공기필터를 통해 필터링되어 증발기 코일을 거쳐 객실로 공급되며, 필터는 금속 재질의 메쉬망 구조(그림3)로 되어 있어 미세먼지의 필터링은 거의 이뤄지지 않는다. 이렇게 유입된 다량의 미세먼지는 객실 공기질을 저하시키고, 증발기 코일에 고인 수분에 부착되어, 코일을 오염시키고 객실 내부 악취의 원인이 된다.

표 6 자동환기 방식 변경 전후 미세먼지(PM10) 농도 변화

구분	미세먼지농도(PM10)	환경부 권고기준
변경 전	99.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
변경 후	118.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

### 2.4.2 개선방안

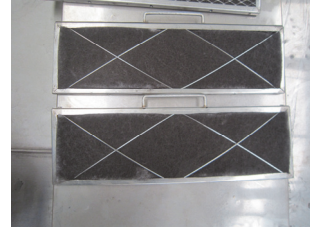
이산화탄소농도 감소를 위한 자동환기 방식 변경으로 외부 공기유입이 증가되어, 실내 미세먼지 농도가 증가되었고, 이를 방지하기 위해 신선공기필터에 부직포 필터(두께:5mm)를 추가 부착 하였다(그림3). 신분당선 전동차 실내의 유입공기는 대부분이 신선공기댐퍼로 유입되며, 증발기 팬과 바로 통하는 곳에 추가적인 필터를 설치함으로써 미세먼지 유입을 최소화할 수 있기 때문이다.



(1) 부직포 설치 전



(2) 부직포 설치 직후



(3) 부직포 설치 2주 후



(4) 신선공기필터(개선) 취부 상태

그림 3. 신선공기필터 부직포 추가 설치

### 2.4.3 측정방법

전동차 내부 미세먼지농도 측정은 2014년 9월에 대중교통수단 실내공기질 관리가이드라인에 맞춰 측정하였다(표1). 미세먼지농도의 영향인자인 외기조건(온도, 습도, 풍속, PM10)과 객실 조건(승객수, 온도, 습도, 역간운행시간)에 대한 자료도 수집하여 분석자료로 활용하였다. 미세먼지농도(PM10)은 광산란 연속측정법을 사용하는 LD-3B(SIBATA)로 측정하였다[2]. 환경부가이드라인에 맞춰 동일하게 측정하였으며, 신분당선의 특징에 맞춰 6분 이상 주행하는 구간(판교~청계, 약 8.2km)을 따로 측정하였다. 이는 승강장을 통한 외부공기 유입을 배제하고, 순수하게 신선공기댐퍼를 통한 외부공기로 유입된 미세먼지농도를 측정하기 위함이다. 또한 필터 부착으로 인한 내부 공기 흐름 변화를 확인하여, 외부 공기 유입량이 감소되는지 여부와 객실 공기 공급에 영향이 있는지 확인하였다.

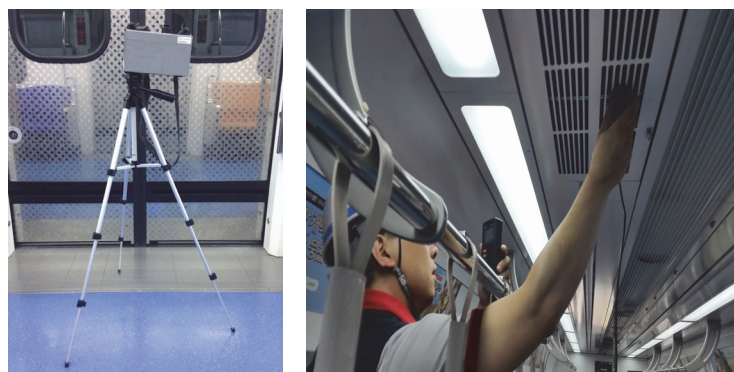


그림 4. 미세먼지농도 측정기(LD-3B) 위치 및 공기공급량 확인

### 2.4.4 결과분석

미세먼지(PM10) 농도 측정 대상은 부직포를 부착한 편성과 미부착 편성을 동일 구간에서 반복 측정하였다(표7). 신분당선 전구간(17.6km, 6개 역사, 16분 52초)에서 측정 결과는 미부착 편성이 부착 편성보다 54.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  높은 평균 값을 보였으며, 승강장에 의한 영향을 최소화한 판교~청계 구간(8.2km, 6분 8초)에서의 측정 값은 44.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  높은 평균 값을 보였다. 미세먼지 감소량은 전구간 46.1%, 판교 ~ 청계 구간 42.7% 감소되었다.

표 7 신분당선 전동차 실내 미세먼지(PM10) 농도 측정 결과

구분	길이(m)	구간	정차역	평균 미세먼지 농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	평균 차이	감소량
정자~강남	17,677	미부착	6	118.4	54.6	46.1%
		부착	2	63.8		
판교~청계	8,177	미부착	6	104.5	44.6	42.7%
		부착	2	59.9		

측정시 평균 승객은 약 40명이었고 냉방 가동상태로 유지하였으며, 객실내 평균 온/습도는 24°C/60%를 유지하도록 하였다. 측정시 승강장 및 외기 미세먼지 농도 및 평균 온/습도는 표8과 같다. 한국환경 공단의 공식 홈페이지 에어코리아에서 제공한 성남시 정자동 미세먼지 측정 결과는 그림 5와 같다. 최저 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최고 67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기록되어 있으며, 부직포를 부착한 편성은 외부 대기 미세먼지 기준과 동일한 수준으로 유지됨을 확인할 수 있다.

표 8 승강장 및 외기 온/습도 및 미세먼지 농도

측정위치		온도(°C)	습도(%)	미세먼지( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
정자역	승강장	25.8	63.3	39.6
	역사 외부	25.6	63.1	39.7
판교역	승강장	24.9	66.5	43.9
	역사 외부	26.1	65.1	38.9
청계산역	승강장	24.8	66.1	36.0
	역사 외부	23.9	70.4	39.5
매현역	승강장	24.7	68.1	40.3
	역사 외부	24.2	68.2	35.1
양재역	승강장	24.1	66.3	33.1
	역사 외부	25.3	69.4	41.8
강남역	승강장	24.0	67.6	26.4
	역사 외부	25.8	62.1	39.2
평균		24.9	66.3	승강장 36.5 / 외기 39.0

미세먼지( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) - 대기환경기준(24시간 평균치:100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

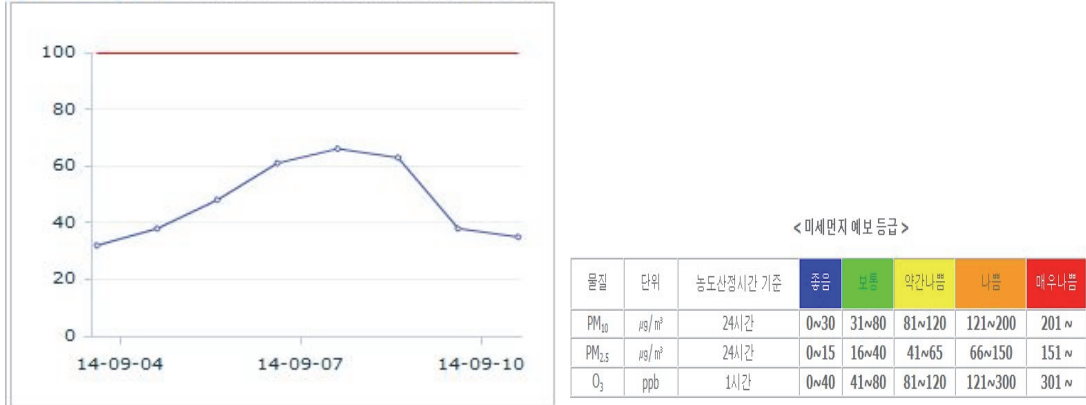


그림 5. 환경공단 에어코리아 미세먼지 측정치 및 기준

실내 공급공기 및 리턴그릴 유입공기 풍량을 비교한 결과는 표9와 같다. 표와 같이 공급공기 풍량의 편차는 0.01m/s 이고, 리턴그릴 유입공기 풍량은 부착편성이 0.17m/s 높게 측정되었다. 이는 외부에서 유입되는 공기량이 부직포에 의해 감소되면서 리턴그릴에서 더 많은 공기가 유입되었고, 공급공기량은 동일한 수준으로 유입됨을 확인할 수 있었다.

표 9 신분당선 전동차 실내 공급공기 및 리턴그릴 유입공기 풍량

구분	부착	미부착	편차
공급공기	2.70 m/s	2.69 m/s	0.01 m/s
리턴그릴	2.65 m/s	2.48 m/s	0.17 m/s

### 3. 결론

신분당선 전동차 실내 공기질은 환경부 권고기준 이하로 운영되고 있으나, 승객의 쾌적성과 편의를 위해 실내 공기질 개선을 위한 연구를 시행하여 적용하였다. 이산화탄소 농도는 승객의 수, 외기 환기여부에 따라 변동폭이 크다. 신분당선 전동차는 실내 이산화탄소 농도 1,000ppm 이하로 유지하기 위해 프로그램을 수정(혼잡시/평상시 동일)하여, 강제 유입방식으로 변경하고, 센서에 의한 자동환기 셋팅 값(1,000ppm 이상 동작, 700ppm 이하 정지)을 최적화하였다. 변경 후 이산화탄소 농도는 1,000ppm 이하로 유지되었으나, 외부 공기 유입량이 증가하여 터널내부의 미세먼지 유입이 증가하였다. 신분당선 전동차 구조의 특징을 분석하여 미세먼지 감소를 위한 방안으로 추가 필터를 부착하여 적용하였고, 평균 40% 이상의 미세먼지를 필터링하여, 전동차 객실의 미세먼지 수준을 외부 대기 미세먼지 기준(보통, 31 ~ 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 동일한 수준까지 낮추게 되었다. 이로 인해 쾌적한 실내 공기질을 유지하고, 증발기 코일 오염이 최소화되어 에어컨 가동시 악취에 의한 승객 민원 감소 등의 효과로 돌아왔으며, 운영적으로는 증발기 코일 청소 감소 등의 유지보수의 편의성까지 증가하였다.



## 참고문헌

- [1] Soon-Bark Kwon(2014) Air Quality in the Subway Cabins of Metro and enhancement technology, *Magazine of Korea Society of Hazard Mitigation*(2014, 3~4) , pp. 37-44.
- [2] Eun-Young Park, Duckshin Park, Youngmin Cho, Soon-Bark Kwon et al., Air Quality in the Subway Cabins of the Seoul Metropolitan Area and Analysis of Its Influencing Factor Using Multivariate Statistics, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol 27, No. 2(2011), pp. 142-151.