

대중교통수단에서 PM₁₀, PM_{2.5} 및 CO₂의 농도 현황과 저감기술 개발에 관한 연구

박덕신^{1)*} · 권순박¹⁾ · 조영민¹⁾ · 장성기²⁾ · 전재식³⁾ · 박은영^{1),4)}

¹⁾한국철도기술연구원 철도환경연구실, ²⁾국립환경과학연구원 실내환경과

³⁾서울시보건환경연구원 생활환경팀, ⁴⁾과학기술연합대학원대학교(UST)

(2010년 1월 15일 투고; 2010년 2월 9일 수정; 2010년 2월 11일 게재확정)

Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5} and CO₂ Concentration in Public Transportations and Development of Control Technology

Duck Shin Park^{1)*}, Soon Bark Kwon¹⁾, Young Min Cho¹⁾, Seong Ki Jang²⁾
and Jae Sik Jeon³⁾, Eun Young Park^{1),4)}

¹⁾Railroad Environment Research Department, Korea Railroad Research Institute

²⁾Indoor Environmental Research Division, National Institute of Environmental Research

³⁾Indoor Air and Noise Team, Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment

⁴⁾University of Science and Technology

(Received 15 January 2010; received in revised form 9 February 2010; accepted 11 February 2010)

Abstract

This study examined the concentration level of the major air pollutants in public transportation. The study was conducted between February 2009 and March 2008 at Suwon-Yeosu line in Korea. PM₁₀ concentration level was 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ on average. The PM_{2.5} to PM₁₀ ratio in transport is 0.37, which was lower than the results published by other researches. The result also demonstrated that outdoor PM₁₀ concentration was about 56~60% level compared to that of the cabin. CO₂ concentration level in the cabin was 1,359ppm, which does not exceed 2,000ppm, which is the guideline concentration level according to the Ministry of Environment. CO₂ concentration level in the cabin was $\text{CO}_2 = 23.4 \times N + 460.2$, and about 23.4ppm in CO₂ concentration level increased every time one passenger was added on.

The experiment conducted on the train demonstrated that the average PM₁₀ concentration level was 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in case of the reference cabin while average PM₁₀ concentration level of the modified vehicle was 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Likewise, effect of the particle reduction device for the reduction of PM₁₀ concentration level was approximately 21%. Meanwhile there was almost no difference in the concentration level between reference and modified cabin in case of PM_{2.5}. Using zeolite as an adsorbent was made to reduce the CO₂ concentration level in the cabin. Number of passengers was factored in, to calculate the effect of the adsorption device, which demonstrated that about 36% of CO₂ concentration level was reduced in the modified cabin effect of the CO₂ reduction device. This research analyzed the current status concerning the quality of air in the public transportation and technologies were developed that reduces major air pollutants.

Keywords : Indoor Air Quality, Air Cleaner, Railroad Passenger Cabin, Public Transportation

* Corresponding author.

Tel : +82-31-460-5367, E-mail : dspark@krii.re.kr

1. 서 론

현대인의 생활양식을 분석한 Klepeis 등(2001)의 자료에 따르면 미국인들은 하루 중 87%의 시간을 실내에서, 8%의 시간을 실외에서 그리고 5%의 시간을 교통수단(승용차, 버스, 철도, 비행기 등)에서 보낸다고 밝힌 바 있다. 유럽인들도 미국인들의 생활패턴과 유사하게 하루 중 90%의 시간을 실내에서 그리고 6%, 4%의 시간을 각각 실외와 교통수단에서 보내는 것으로 조사되었다(Aliaga and Winqvist (2003)). 국내에서 조사된 결과에 따르면 하루 중 가정에서 13.2 시간, 사무실에서 3.7 시간, 학교에서 1.3시간을 보내고, 실외에서 2.1 시간, 교통수단에서 1.2 시간을 보낸다고 보고되어(노출계수핸드북, 환경부 2001), 성인의 경우 하루 중 교통수단에서 보내는 시간은 대략 56~72 분 정도인 것으로 조사되었다.

최근 국내외에서 수행된 철도차량 관련 연구로는 Abadie 등(2004)이 TGV 고속열차에서 승객의 흡연에 의한 객실에서의 입자 농도 분포와 필터를 이용한 입자의 저감효과와, 박덕신 등(2007)이 KTX, 새마을호, 무궁화호 등 운행 차량을 대상으로 한 실내공기질 측정 및 오염원분석 연구, Park and Ha(2008) 등이 역사와 전동차에서 측정위치에 따른 실내공기질 상관관계 규명 연구 등이 있으나 최근까지의 연구는 오염수준을 파악하거나 오염원 규명에 대한 것이 대부분으로 철도차량의 공기질 개선 및 쾌적성 향상 등에 대한 연구는 진행된 바 없다.

통계연보(국토해양부, 2007)에 의하면 2006년 한 해 동안 91 억 명이 버스를, 약 9.7 억 명이 일반철도를 이용했으며, 약 20 억 명이 지하철을 이용하여 일 년 동안 버스의 약 32%에 해당하는 승객이 철도를 이용한 것으로 조사되었다. 그리고 일반철도의 경우 이용객이 2004년 9.2억 명, 2005년에는 9.5억 명에서 2006년 9.7억 명으로 매년 이용객이 증가하는 것으로 나타났다.

객실에서 주요 오염물질은 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})와 이산화탄소(CO₂) 등이다. 본 연구에서도 객실의 미세먼지 중 PM₁₀, PM_{2.5}와 CO₂를 연구대상 물질로 선정하였다. 열차가 운행되는 동안 객차에 탑승하여 PM₁₀, PM_{2.5}와 CO₂ 등의 농도를 측정하여 분석했으며, 객실의 PM 농도를 저감하기 위해서 원심력의

원리를 이용한 CPS(cyclone particle separator)와 롤필터를 개발하였다. CO₂는 객차에 탑승한 승객의 호흡에 의해 배출되며, 객차 제작사양서(철도청, 2003)에 승객 1인당 1시간에 배출되는 CO₂의 양은 0.013(m³/h · P)이라고 언급했다. CO₂는 대기오염의 지표물질로 알려져 있으며, 출퇴근 시간에 이용 승객의 수가 급증할 경우 고농도를 보인다.

PM 및 CO₂ 저감장치는 개발 후 실험실에서 처리 효율, 풍량, 소음 등 항목에 대한 실험을 수행하였다. 단품에 대한 실험 후 철도공사의 협조를 얻어서 동일한 시기에 출시된 객차 2량에 저감장치를 장착하여 운행노선에서 저감효율을 파악하였다. 본 연구는 최근 실내공간으로 새롭게 인식되고 있는 대중교통수단 중 객차에서 주요 오염물질인 PM 및 CO₂ 농도를 측정 및 분석하여 오염 원인을 파악하였으며, 저감장치 개발을 통해 이들 물질을 효율적으로 줄일 수 있는 방안을 연구하였다. 개발된 장치는 영업용 철도차량에 장착하여 실차실험을 수행한 후 저감장치에 의한 객실에서의 공기질 개선 효과를 분석하였다. 본 연구를 통해 개발된 저감장치는 향후 버스, 전동차 등 타 대중교통수단에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 시험차량 및 측정노선

2000년 출고된 신형무궁화호 객차 2량을 PM 및 CO₂ 저감장치의 성능평가를 위해 시험차량으로 사용하였다. 시험차량은 2량 1편성으로 1량은 개조차량, 1량은 비교차량으로 편성하였다. 표 1에서와 같이 PM의 샘플링을 위해 두 차례에 걸쳐 시험차량에서 공기질을 측정하였다. 1차 측정은 2008년 3월 18일 평택역을 출발해서 여수역에 도착하는 262.1km 구간에서 4시간여 동안 수행하였다. 2차 측정은 여수역을 출발해서 평택역에 도착하는 1차 측정과 동일한 구간을 정착역이 다소 추가되어 25분가량 더 소요된 4시간 25분 동안 공기질을 측정하였다. 평택역-여수역 구간은 그림 1에서 보듯이 평택역과 남한의 최남단에 위치한 여수역까지 운행되는 구간으로 천안시, 익산시, 전주시 등 지방 중규모 도시를 통과한다. CO₂의 경우 2월 14일부터 2월 23일까지 10일

Table 1. Sampling information.

Pollutant	Date	Lines	Distance	Journey time	Characteristics of route
PM ₁₀	2008.3.18	Pyeongtaek -Yeosu Line	262.1km	4hr	Traverse between Seoul metropolitan area and southern part of Korea peninsula. Crossing mid and small city such as Cheonan, Iksan and Jeonju.
		Yeosu- Pyeongtaek Line		4hr 25min	
CO ₂	2008.2.14 ~2.23	Suwon-Iksan Line	215.3km	4hr 20min	This line crossing mid and small city such as Cheonan, Daecheon and Janghang.
		Iksan-Suwon Line		4hr 20min	

동안 수원역-익산역 구간 215.3km에서 측정을 하였다. 수원역-익산역 구간은 수도권인 수원역에서 남한의 중앙에 위치한 익산역까지 운행되며, 지방 중소도시를 통과하는 4시간 20분가량 소요되는 구간이다.

2.2 샘플링방법 및 측정기기

PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 측정을 위해 광산란 방식의 Dust-Trak(MetOne Model GT-331)을 사용하였다. 이 측정기기는 5분 간격으로 호흡성먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})를 동시에 측정할 수 있어서 널리 사용되고 있다(Leutwyler et al.(2002), Chan et al.(2002), Park et al.(2008)). PM₁₀의 농도 측정범위는 0~1,000µg/m³으로서 측정기기는 승객이 앉았을 때 코 높이인 1m 지점에 설치하여 객차의 운행 중에 측정하였다.

CO₂는 NDIR(Non-dispersive infrared) 방식의

Multi-gas monitor(RAE Model PGM-54))를 사용하여 DustTrak과 동일한 위치에 측정 장비를 설치하여 측정을 하였다. PM의 경우 측정기기 상호간에 오차가 크므로 동시에 두 대 이상의 측정 장비로 측정을 하고, 측정을 시작하기 전 보정을 하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 수집된 PM 및 CO₂ 측정데이터는 SPSS Ver. 12를 사용하여 분석하였으며, 측정된 각 오염물질(PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂) 사이의 상호관계는 상관 분석을 통해 확인하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 PM 저감장치 개발

철도차량은 고속화되면서 차체의 무게중심을 낮추기 위해 공조기를 객차의 하부에 장착하는 추세

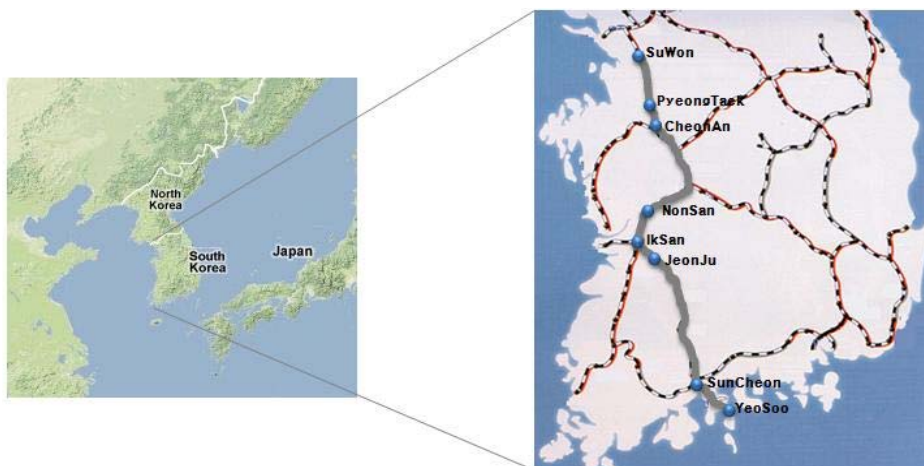


Figure 1. Location of sampling routes and main cities.

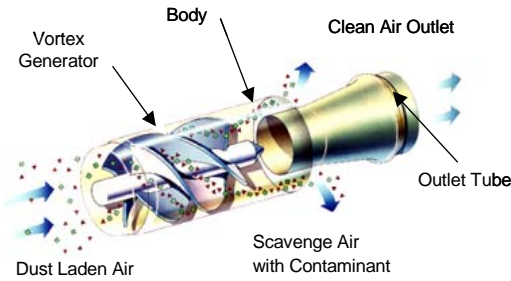


Figure 2. Dust separation concept by cyclone particle separator.

이다. 공조기 앞단의 신선공기 유입구가 객차하부에 위치하면 열차풍에 의해서 먼지, 제동디스크 마모에 의한 금속 분진 등이 객실로 유입될 가능성이 높아진다. 객차로 유입되는 공기의 양은 순환공기량(return air) 20 CMM(cubic meter per minute)과 신선공기량(fresh air) 6 CMM을 합쳐 총 26 CMM으로 전체 공급 공기의 23% 가량이 신선공기이다. 사이클론 방식의 집진원리를 이용하는 CPS는 그림 2와 같이 와류 생성기(vortex generator)에 의해 생성된 선회유동으로 유입공기 중의 먼지나 이물질을 제거하는 원리를 이용한다.

CPS는 표준먼지입자에 대해서 95% 이상의 먼지 제거성능을 가지며, 앞단에 송풍 팬(booster fan)을 장착하여 흡입공기 및 먼지 토출 유량을 발생시키도록 하였다. 장치 내부로 도입된 공기는 장치를 거

치면서 먼지를 함유한 15%의 공기는 외부로 배기(scavenge)되고, 85%의 신선공기만이 공조기를 통과해서 객실로 공급된다. 표 2에서와 같이 CPS의 최대 유량은 400 ℓ/sec이며, 표준먼지입자를 대상으로 한 포집효율시험에서 98.8%의 효율을 나타내었다. 단품을 기준으로 소음은 86 dB(A) 이하였으며, 중량은 알루미늄을 재질로 사용하여 35 kg 이하로 제작하였다. 장치에 대한 성능시험은 15~35℃의 온도범위, 최대 85%의 습도, 840~1,070 kPa의 압력범위에서 수행하였다.

필터는 필터 재료가 롤 형태로 감겨있어서 타이어나 차압센서에 의해 일정 간격으로 필터가 자동으로 공급되므로 유지보수 측면에서 장점이 있다. 롤필터는 다른 철도 부품의 교체주기를 고려하여 6개월로 설정하였다. 롤필터의 재료로는 SUS, PP(polypropylene), 정전기 나일론 등을 주로 사용하며, 본 연구에서는 대상 자료에 대해 ISO 12103 A2 fine dust로 집진효율을 평가하고 차압계를 사용하여 통기저항을 평가하였다. 각 재료는 DIN 71460 PART-1 규격의 필터시험장비로 측정하였으며, 필터시험기는 laser particle counter(TOTAS, LAP320), 분진 공급장치(TOPAS, SAG410) 유속 조절 팬 등으로 구성된다. 필터시험기의 여과속도는 1 m/sec로 실제 롤필터의 여과속도를 고려하여 산정하였다. 필터의 재료는 표 3에 나타난 것과 같이 SUS(180, 300, 400메시)와 정전기 나일론필터(electret nylon) 등 두 가지 타

Table 2. Specification and test results of CPS.

Items	Specifications	Test results
Fluid	Air	-
Air flow rate	Max. 400 ℓ/sec	400 ℓ/sec
Test particle	SAECTD	-
Dust separation efficiency	More than 95%	98.8%
Particle concentration	1.0g/m ³	-
Motor specification	Power	440VAC, 3상, 60Hz
	Current(normal)	6.5A
	Current(max.)	52A
Material	Aluminum	-
Dust separation tube	Polypropylene	-
Noise standard	Less than 86dB(A)	85dB(A)
Weight	Max. 35kg	-

Table 3. Basic specification of selected filter medias(1st step).

Media type	SUS			Electret nylon	
	180	300	400	24	68
Mesh size(mm)	0.088	0.049	0.037	0.710	0.210
Mesh diameter(mm)	0.053	0.040	0.030	0.350	0.110
Initial pressure drop(mmAq)	1.100	3.100	3.700	0.150	0.400

입으로서 이들 필터 재료를 대상으로 집진성능을 평가하였다. SUS 타입의 경우 초기 차압(mmAq)은 1.1(SUS 180메시), 3.1(SUS 300메시), 3.7(SUS 400메시)로서 정전 필터의 0.14~0.4 mmAq보다 높은 수준이었다.

롤필터는 기본적으로 프리필터 개념으로서 체눈수가 높은 사양을 제외하고는 PM에 대한 집진성능을 얻기가 어렵다. 그러나 정전기가 하전된 체눈수가 적은 Electret nylon 24, 68 메시의 경우 SUS 180보다 효율이 다소 높게 평가되었다. 그러나 SUS 400메시 필터와 효율을 비교해보면 0.3µm에 대한 효율은 유사했으나 1~3µm 크기의 먼지에 대해서는 효율이 낮게 평가되었다. 이런 이유로 정전 하전된 24, 68 메시의 필터는 기계적인 메커니즘인 확산, 차단, 관성보다는 전기적 영향인 쿨롱력, 영상력, 분극력(지준호, 2001)이 있어 1µm 이하의 분진에 대해 집진 효율이 높게 평가되었고, 1µm 이상의 먼지에 대해서는 체 눈 크기가 200µm 이상으로 여과 없이 통과한 것으로 사료된다.

그림 3에서 모두가 정전처리된 필터와 SUS 타입의 필터에 대한 1차 평가결과에서는 SUS400이 3µm 이하의 PM에 대한 먼지의 포집효율이 가장 높았다. 그러나 SUS 타입의 재료를 롤필터에 적용한 결과, 구부러짐이 발생하여 재생에 어려움이 있어서 고려

대상에서 제외하였다. 정전처리된 68메시의 필터 재료를 롤필터에 장착하여 실차평가한 결과, 성능이 다소 떨어져서 폴리에스테르 재질의 150메시 필터 재료와 부직포를 추가로 검토하였다. 표 4에서 150메시 필터 재료의 분진포집효율이 중량법 기준으로 67.0%로서 68메시의 필터 재료보다는 다소 높고, 부직포(84%) 보다는 낮은 것으로 나타났다. 그러나 분진포집량은 150 메시의 재료가 260.7 g/m²으로 부직포의 34.9 g/m² 보다 7배가량 높은 값을 보였다. 재질, 산소지수, 압력손실, 분진포집효율 및 분진포집량 등을 종합적으로 검토한 결과, 폴리에스테르 재질의 150메시 필터가 필터 재료로 가장 적합한 것으로

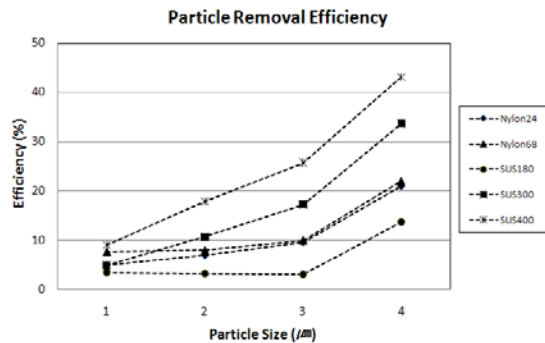


Figure 3. Particle removal efficiency by type of filter media.

Table 4. Basic specifications of selected filter media(2nd step).

Media type	Mesh		Non-woven fabric	Standard
	68mesh	150mesh	30g/m ²	-
Mesh type	68mesh	150mesh	30g/m ²	-
Material	Nylon	PE	PET	-
Antimicrobial(%)	-	99.9	99.9	KS K 0693
Oxygen Index(LOI,%)	34.0	30.2	34.2	ISO 4589-2
Pressure drop(mmAq)	0.3	1.3	2.6	ASHRAE 52-1 (1m/sec)
Particle removal efficiency(%)	62.2	67.0	84.0	
Particle holding capacity(g/m ²)	321.8	260.7	34.9	

로 판단되었다. 선정된 필터 재료에는 구리를 코팅하여 항균력이 90% 이상 유지되도록 하였다.

3.2 PM 측정결과

표 5에 평택역-여수역 구간에서 측정된 비교차량과 개조차량에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 값을 나타내었다. 시험기간 동안 평택역-여수역 구간에서 49개의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 샘플을 얻었으며, 열차의 운행 시간이 25분가량 더 소요된 상행선에서는 54개의 PM 측정 데이터를 얻었다.

측정결과 PM₁₀의 평균 농도 값은 평택역-여수역 구간에서 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여수역-평택역 구간에서 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 표 6의 환경부의 대중교통수단 실내 공기질 가이드라인에서는 평상시 PM₁₀의 경우 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 권고기준을 제시하고 있다. 표에서 측정된 PM₁₀ 농도 값은 권고기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 표 7에 PM₁₀의 농도수준을 타 연구결과와 비교하여 나타내었다. 본 연구에서 구한 PM₁₀의 측

정결과는 Park et al.(2008)이 서울의 전동차에서 측정한 값인 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 다소 낮았으며, Chan et al.(2002)이 홍콩에서 KCR(60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), MTR(44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), LRT(41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 등에서 측정한 값보다는 다소 높은 수준이었다. 또한, Chan et al.(2002)의 트램에서의 측정 값인 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하면 60% 수준인 것으로 조사되었다. 이런 결과는 본 연구에서 실험대상으로 사용한 차량은 일반 객차로서 이용객의 수가 전동차나 트램에 비해 상대적으로 적고, 표 1에서 언급한 바와 같이 개찰지나 지방 소도시를 통과했기 때문으로 분석된다.

평택역-여수역 구간의 비교차량에서 측정된 PM_{2.5}의 농도 값은 평균 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율이 0.37인 것으로 나타났다. 이 값은 전동차를 대상으로 한 Park et al.(2008)의 0.82, Chan et al.(2002)의 MTR(0.75) LRT(0.83), Tram(0.62)에 대한 측정 값 보다 훨씬 낮은 수준으로 객실에서 측정된 PM의 대부분은 PM₁₀에 가까운 조대입자인 것으로 판단된다.

Table 5. Statistical results of PM in reference cabin and modified cabin.

Cabins		PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		n	Mean	Range	S.D	n	Mean	Range	S.D
Reference cabin	Pyeongtaek→ Yeosu	49	96	44~333	51	49	38	18~106	15
	Yeosu→ Pyeongtaek	54	104	43~241	44	54	36	18~60	10
Average			100				37		
Modified cabin	Pyeongtaek→ Yeosu	49	68	35~164	23	49	35	18~74	11
	Yeosu→ Pyeongtaek	54	89	37~160	27	54	41	16~74	12
Average			79				38		

Table 6. Indoor air quality guideline for public transportations in Korea.

Parameter	Classification	Level 1 ¹⁾	Level 2 ²⁾
CO ₂	Electric rail car	2,500ppm	3,500ppm
	Railway passenger cabin, bus	2,000ppm	3,000ppm
PM10	Electric rail car	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Railway passenger cabin, bus	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

(Average value during a route) 1) Level 1 : normal times, 2) Level 2 : rush hours.

Table 7. Comparison of PM concentration with other studies.

	Location	PM size	Mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} /PM ₁₀ ratio
Current study	Railway	PM ₁₀	100 ± 48	0.37
		PM _{2.5}	37 ± 13	
Park et al. (2008)	Subway Train	PM ₁₀	144 ± 13	0.82
		PM _{2.5}	118 ± 15	
Chan et al. (2002)	KCR	PM ₁₀	60 ± 12	0.77
		PM _{2.5}	46 ± 11	
	MTR	PM ₁₀	44 ± 16	0.75
		PM _{2.5}	33 ± 10	
	LRT	PM ₁₀	41 ± 7	0.83
		PM _{2.5}	34 ± 6	
Tram	PM ₁₀	175 ± 36	0.62	
	PM _{2.5}	109 ± 31		

1) KCR : Kowloon-Canton Railway, 2) LRT : Mass Transit Railway, 3) LRT : Light Rail Transit

PM_{1.0}/PM₁₀은 0.11, PM_{2.5}/PM₁₀은 0.37, PM_{7.0}/PM₁₀은 0.94로서 분석결과, PM_{2.5}~PM_{7.0}의 입자가 PM₁₀ 입자의 50% 이상을 차지하여 객실에 부유하는 초미세입자의 비율은 타 연구자들의 측정결과와 비교했을 때 낮은 수준이었다.

3.3 객실과 외기와의 PM 측정결과 비교

객실의 경우 기계 환기에 의해 약 30%의 신선공기가 객실로 공급되며, 타 연구자의 연구결과에서도 객실의 공기질은 외기에 의해서 큰 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(환경부, 2009). 외기와 비교한 객실의 PM 농도수준을 확인하기 위해서 대기오염자동측정망(TMS) 자료와 객실에서의 PM 측정값을 비교하였다. 그림 1에서 본 측정노선에 위치한 주요 도시 중에서 TMS가 있는 곳은 천안, 익산, 전주 등이다. 전주에는 총 3곳이 있으며, 그 중 두 곳이 측정노선과 인접하여 두 곳(완산구 태평동 32번지 중앙동사무소 옥상과 완산구 효자동 2가 296-35 효자2동사무소 옥상)의 값을 평균하여 비교 값으로 사용하였다. 익산과 천안의 경우 각각 남중동 1가 60 익산시청 옥상과 상황동 35-13번지 문성시립보육시설 옥상의 TMS 자료를 사용하였다.

그림 4에서 보듯이 열차가 천안을 통과할 때 객실에서의 측정값은 177 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이 때 천안시

TMS 측정값은 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 객실 측정값의 73% 수준인 것으로 나타났다. 열차가 익산시와 전주시를 통과할 때도 객실에서의 측정값이 다소 높은 것으로 분석되었다. 평균값을 비교해 보면 하행선의 경우 TMS의 값이 99.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인데 반해서 객실에서의 측정값은 179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 56% 가량 높았으며, 상행선의 경우 TMS에서의 값이 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인데 객실에서의 측정값이 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 60% 가량 높은 결과를 보였다.

3.4 PM 저감효율 분석

그림 5에서와 같이 PM₁₀의 경우 평택역→여수역 구간의 비교차량에서 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여수역→평택역 구간에서 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 비교차량의 경우 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 평택역→여수역 구간의 개조차량에서 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여수역→평택역 구간의 개조차량에서 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 평균 79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 나타났다. 비교차량과 개조차량에서의 측정값을 비교할 경우 PM 저감장치에 의한 PM₁₀ 농도의 저감효과는 약 21%인 것으로 나타났다.

PM_{2.5}의 경우 비교차량에서 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 개조차량에서는 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개조차량에서 PM 저감장치를 장착한 효과가 없는 것으로 판단된다. CPS는 제작비용과 유지비용이 저렴하고 고온의 환경에서 사

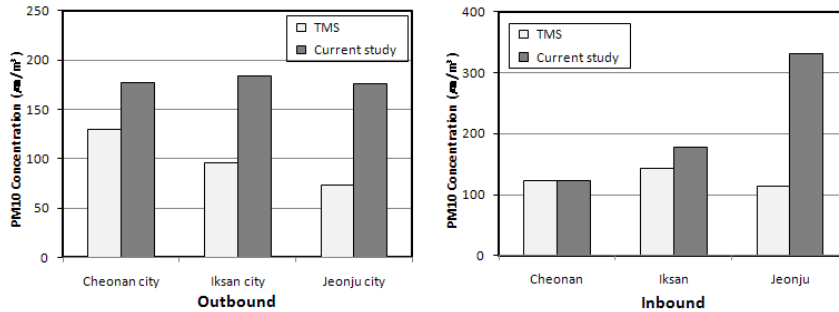


Figure 4. Comparison of PM₁₀ concentration with TMS and current study.

용할 수 있다는 장점 때문에 일반적으로 전처리장치로 사용되고 있으며, 장치의 분리효율은 5µm 이상의 입자에 대해서는 98% 이상이지만 그 이하나 초미세입자에 대해서는 현저히 저하되는 특성이 있다 (Cooper and Alley(1986), Iozia and Leith(1989))는 연구결과와 본 연구의 결과가 유사한 것으로 나타났다. 본 연구에서 객차에 CPS와 롤필터를 장착하여 실험한 결과 PM₁₀에 대한 처리효율이 20% 이상으로 비교적 높았지만 PM_{2.5}에 대한 처리효율은 비교차량과 개조차량에서 거의 차이가 없었다. 이런 현상은 CPS의 경우 PM_{2.5}에 대한 입자의 저감효율이 낮고, 롤필터도 압력강하를 줄이기 위해 메시가 일정 크기 이상인 재료를 사용하여 PM₁₀에 대해서는 효과가 있지만 PM_{2.5}에 대해서는 입자의 분리효율이 현저히 떨어지는 것으로 사료된다.

3.5 CO₂ 저감장치 개발

CO₂ 회수공정은 크게 습식공정과 건식공정으로 나눌 수 있다. 습식공정은 흡수제의 열화, 높은 재생열, 장치의 부식, 흡수제의 손실 등의 요인으로 운영비가 높기 때문에 최근 건식공정에 대한 관심이 높다. 그림 6에서 보듯이 건식 흡착제를 이용한 CO₂ 회수공정은 가스가 공정을 통과하면서 흡착제에 의해 CO₂가 흡착되며, CO₂가 흡착된 흡착제는 재생탑으로 전송되어 재생된다. 이때 재생에는 열, 압력, 다른 종류의 가스 등이 사용되며, 재생된 흡착제는 다시 흡착탑으로 공급되어 반응에 참여한다. 일반적으로 일정주기 이상으로 사용하여 활성점을 잃은 흡착제는 폐기되며 부족한 만큼의 흡착제는 추가한다. 또한 흡착제를 순환시키는 방법 외에 유입되는

가스의 경로를 바꾸어 흡·탈착을 할 수도 있다. 건식공정은 장치가 간단하고, 소량의 가스처리에 응용가능한 장점이 있다. 그러나 대용량의 가스를 처리하기 어렵고, 탈착에 많은 에너지를 소모하는 단점이 있다.

흡착법에 주로 사용되는 흡착제로는 활성탄, 분자체, 실리카겔, 알카리 금속 등이 있다. 제올라이트는 결정성 알루미늄 실리케이트로서 단일 크기의 미세공극을 가지고 있어 친수성, 극성분자에 대한 우수한 흡착성을 나타낸다(김진태 등, 2002). 본 연구에서는 CO₂에 대해 선택적 흡착능이 높은 고체입상형태의 X-타입 제올라이트에 흡착력을 높이고, 탈착시 구조를 보다 견고하게 유지하기 위해 화합물질을 첨가하여 CO₂ 흡착제를 제조하였다.

제올라이트는 구조가 Al₂O₃와 SiO₃ 사면체로 된 삼차원 입체구조이며, 내부의 열린 기공과 채널로 구성되어 있으며, 구형의 시료는 직경이 2mm와

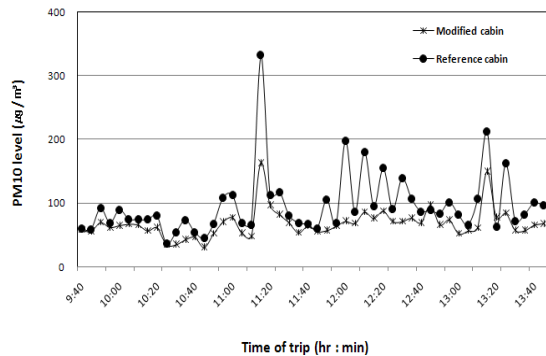


Figure 5. Influence of the particle removal devices on the PM₁₀ level at modified cabin and reference cabin.

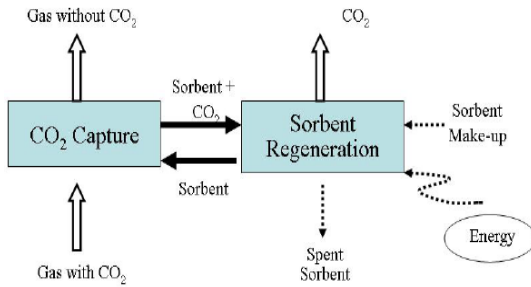


Figure 6. Schematic diagram of CO₂ capture and regeneration process.

5mm 크기였다. 시제품은 물리적 전처리를 한 후에 흡착제로 사용하였다. 전처리과정은 제올라이트를 오븐에 넣고 200℃에서 5시간 동안 가열하여 제올라이트 미세공극을 막고 있는 이물질이 제올라이트 밖으로 배출되도록 하였다. 그리고 압력용기에 충전한 후 고압으로 purge 공정을 거쳐서 흡착성능을 높였다.

CO₂ 저감장치를 설계하기 전 소형 반응기를 이용하여 제올라이트의 CO₂에 대한 흡착능 실험을 수행하였다. N₂와 CO₂를 혼합하여 5,000ppm으로 만들어 MFC(mass flow controller)로 유량을 조절하면서 반응기에 유입시켰다. 초기농도와 배출농도는 NDIR 방식의 CO₂ 분석기(SenseAir(사), Sweden)를 사용하여 공기 유입구와 토출구의 농도변화를 확인하였다. 탈착농도 조건은 추후 실제차량에 장착될 경우에 짧은 시간에 탈착공정을 끝내기 위한 적절한 온도를 찾고자 하였다.

반응기의 흡착 포화농도는 2,000ppm으로 설정하였다. 초기에 5,000ppm으로 유입되는 CO₂ 농도는 반응기를 통과하면서 1분 이내에 600ppm 미만까지 농도가 급격히 감소하였으며, 한 시간 가량은 일정한 성능을 유지하면서 완만한 농도곡선을 유지하였다. 그러나 점차 시간이 지나면서 배출구의 농도가 상승하였으며, 2시간 정도 시간이 경과하자 2,000ppm에 도달하였다. 탈착은 히터 코일을 반응기에 설치하여 히터 코일에 의한 열풍으로 탈착이 이루어지도록 하였다. 탈착시험시 초기에 고농도로 농축되어 있던 CO₂가 높은 온도에서 급격히 탈착이 진행되면서 배출구에서 측정된 CO₂ 농도가 10,000ppm 이상으로 배출되었다. 60분가량 고농도의 CO₂가 배출되

고, 이시간이 지난 후에는 저농도의 CO₂만이 배출되었다. 즉, 60분이 경과한 후에는 대부분의 탈착이 완료되었으며, 200분이 경과한 시점에는 더 이상 농도가 떨어지지 않아서 재사용을 위한 탈착이 완료되었다고 판단하였다.

실제 객차에 장착될 CO₂ 저감장치는 먼저 장착될 공간을 고려하여 내부 용적을 산출하였다. 장치가 설치될 내부 공간은 객차의 천정으로서 시스템과 탈착 단트를 포함하여 800×500×250mm의 크기범위였다. CO₂의 흡착에 가장 영향을 미칠 수 있는 변수로는 충전될 흡착제의 충전량, 내부 압력 및 온도조건 등이다. 동일한 공간에서 CO₂ 저감장치의 효율을 최대화할 수 있도록 베드크기, 형태 및 유량과 차압 등을 고려하여 설계한 후 제작하였다. 베드 형상 설계시 내부 흡착제와 유입된 유체와의 표면속도(face velocity)를 낮게 하기 위해서 접촉면적을 최대한 크게 하였다.

3.6 CO₂ 측정결과

평택역-여수역 구간에서 측정된 승객수와 CO₂ 농도의 평균값을 표 8에 나타내었다. 환경부의 대중교통수단 공기질 가이드라인에는 정상시 CO₂의 경우 2,000ppm의 권고기준을 제시하고 있다 (환경부, 2006). 위 구간에서의 측정결과 평균값은 1,359ppm으로서 권고기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 표 7에 평택역-여수역 구간에서 승객수의 평균 값, 표준편차(standard deviation), 최소 및 최대값의 범위를 제시하였다. 승객수는 평균 38명으로 정원인 64명의 60%로 적은 수준이었다. 승객수의 표준편차는 24명으로서 구간에 따라 승객 수의 변동 폭은 큰 편이었다.

그림 7에 수원역→군산역 구간에서 정차역별 승객수와 CO₂ 농도 변화를 나타내었다. 그림에서 보듯이 CO₂의 농도는 승객수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림에서 승객수가 정원인 64명을 초과하는 구간에서 CO₂의 농도가 2,000ppm을 초과하였으며, 60명 미만에서는 1,500ppm 이하로 유지되었다. 그림 9에 CO₂ 농도와 승객수와의 상관관계를 분석한 결과를 제시하였다. 그림에서 보듯이 승객수와 CO₂ 농도의 상관관계, R²는 0.8007로서 승객 1명이 증가할 때마다 약 23.4ppm의 CO₂농도가 증가하는 것으로 나타났다 (CO₂ = 23.4 × N + 460.2). 권순

Table 8. Statistical result of CO₂ concentration and number of passengers in reference cabin and modified cabin.

Cabins	No. of passengers			Mean	Range	S.D	
	Avg.	Std. dev.	Range				
Reference cabin	Pyeongtaek → Yeosu	35	24	3~84	1,342	438~2,715	637
	Yeosu → Pyeongtaek	40	23	6~89	1,376	414~3,496	710
	Avg.	38			1,359		
Modified cabin	Pyeongtaek → Yeosu	31	25	3~84	1,156	472~2,649	578
	Yeosu → Pyeongtaek	38	26	2~97	1,251	313~4,283	805
	Avg.	35			1,204		

박 등 (2008)은 전동차 측정에서 유사한 연구를 수행하여 승객수와 CO₂ 농도간의 선행적 상관관계 (R² = 0.577)를 보고하였으며, Li et al. (2006)도 중국 베이징 도시철도 (Beijing Ground Railway Transit System)를 대상으로 수행한 승객수와 CO₂ 농도 사이의 상관관계연구에서 R² = 0.807의 높은 상관관계가 있다고 보고한 바 있다.

3.7 CO₂ 저감효율

표 8에 나타낸 바와 같이 비교차량에서의 CO₂ 평균 농도는 1,359ppm 이었으며, 개조차량에서의 평균농도는 1,204ppm으로 개조차량에서의 CO₂ 농도가 150ppm 가량 낮은 것으로 나타났다. 그러나 CO₂의 농도는 승객수에 비례하여 증가하므로 승객수가 각기 다를 경우 두 차량에서 CO₂의 농도차이가 저감장치의 장착에 의한 것이라고 보기는 어렵다. 그래서 CO₂ 저감장치에 의한 저감효과를 보다 객관적으로 분석하기 위해서 그림 8에서와 같이 CO₂ 농도를 동일한 시간대에 파악한 승객수와의 상관관계를 구한 후 두 값을 비교하여 CO₂의 제거효율을 구하였다.

그림에서 비교차량의 경우 CO₂ 농도와 승객수의 상관관계, R²는 0.8007 (CO₂=23.4×N + 460.2)이었으며, 개조차량의 경우 R²는 0.7041(CO₂=15.0×N + 470.4)이었다. 즉, 비교차량의 경우 승객 1명 증가할 때마다 CO₂가 23.4ppm 증가했으나 CO₂ 흡착장치를

장착한 차에서는 승객 1명 증가할 경우 15ppm이 증가하는 것으로 나타났다. CO₂ 저감장치를 장착할 경우 CO₂의 저감효율은 (식 1)과 같이 구할 수 있다. 즉, 실제 영업 운행 중인 철도차량 객실에 CO₂ 저감장치를 장착하여 실험을 한 결과 개조차량에서 약 36%의 CO₂를 저감할 수 있었다.

$$\frac{(23.4 - 15.0)}{23.4} \times 100 \approx 35.9\% \quad (\text{식 1})$$

4. 결 론

본 연구에서는 대중교통수단 중 객차를 연구대상

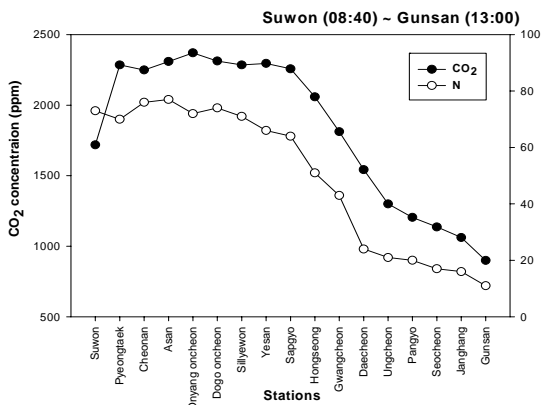


Figure 7. The typical concentration profile with number of passengers on board of the reference cabin.

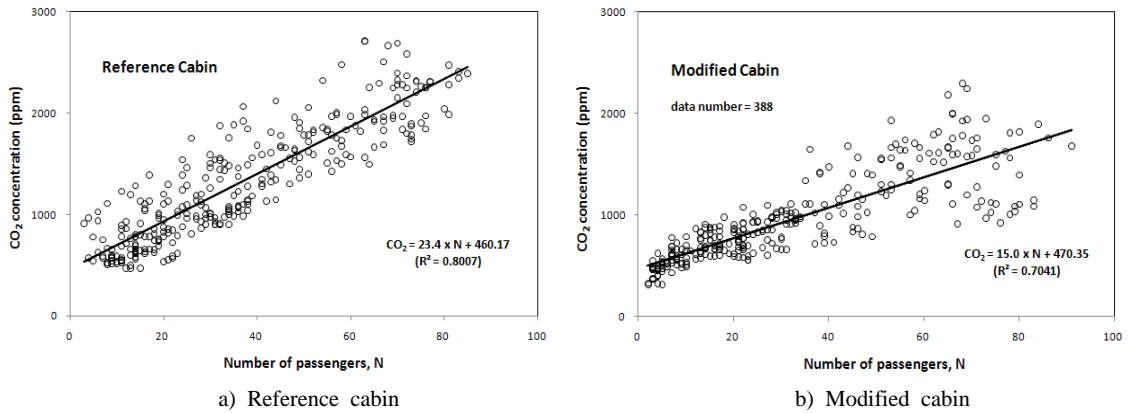


Figure 8. Correlation between CO₂ concentration and number of passengers and influence of the removal devices on the CO₂ concentration level.

으로 하여 PM₁₀, PM_{2.5} 및 CO₂ 등 주요 오염물질의 농도현황을 파악하였다. 객실 공기질 측정은 전라선 평택역-여수역 및 수원역-익산역 구간을 운행하는 신형무궁화호 객차에서 수행되었다. 공기질 측정결과 PM₁₀은 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 Park et al.(2008)이 보고한 서울의 전동차에서의 측정값인 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 다소 낮고, Chan et al.(2002)이 보고한 홍콩의 KCR(60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), MTR (44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), LRT(41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 등에서 측정된 값보다는 다소 높은 수준인 것으로 나타났다. PM_{2.5}와 PM₁₀의 비율은 0.37로서 Park et al.(2008)의 0.82, Chan et al.(2002)의 KCR(0.77), MTR(0.75), LRT(0.83) 보다 낮은 수준으로 객실에서 측정된 대부분의 PM은 조대입자인 것으로 조사되었다. 열차가 운행되는 주요 도시 대기오염자동측정망의 PM₁₀ 측정값과 객실에서의 PM₁₀ 측정값을 비교하여 외기에 의한 객실에서 PM₁₀의 농도영향을 파악한 결과, 외기의 PM₁₀ 농도가 객실의 56~60% 수준이었다. 측정결과 CO₂의 농도는 1,359ppm으로서 환경부의 가이드라인 기준치인 2,000ppm을 초과하지 않은 것으로 나타났다. 분석결과 R²는 0.8로서 객실에서 CO₂의 농도는 승객의 수와 밀접한 상관성이 있는 것으로 판단된다.

사이클론 입자분리기의 원리를 이용한 CPS를 개발하여 공조기로 유입되는 PM의 농도를 줄이고자 하였다. CPS는 최대유량이 400 ℓ/sec 이며, 표준면지입자를 이용한 포집효율실험에서 98.8%의 효율을 보였다. 객실에서 부유하는 PM을 저감하기 위한 목

적으로 롤필터를 개발하였으며, 교체주기를 6개월로 설정하여 유지보수 비용을 절감할 수 있도록 하였다. 롤필터의 재료는 재질, 산소지수, 압력손실, 분진포집효율 및 분진포집량 등을 종합적으로 검토하여 폴리에스테르 재질의 150 메시 필터로 선정하였다.

PM 저감장치의 효율을 측정하기 위해 운행열차 2량 중 한량에 저감장치를 장착한 후 실차실험을 수행하였다. 측정결과 비교차량에서 PM₁₀의 평균 농도는 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 개조차량에서 PM₁₀의 평균농도는 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 PM 저감장치에 의한 PM₁₀ 농도의 저감효과는 약 21% 인 것으로 나타났다. 반면 PM_{2.5}의 경우 비교차량과 개조차량에서 농도차이가 거의 없었다.

제올라이트를 흡착제로 사용하여 객실에서 CO₂의 농도를 저감하고자 하였다. 실험실에서 수행한 CO₂의 흡착 및 탈착 실험결과 초기 5,000ppm으로 유입되는 CO₂ 농도는 반응기를 통과하면서 1분 이내에 600ppm 미만까지 급격히 감소하였다. 흡착된 CO₂는 60분간 열풍으로 탈착되도록 하였다. 승객의 수를 고려하여 CO₂ 흡착장치의 효율을 계산한 결과 CO₂ 저감장치에 의해 개조차량에서 약 36%의 농도저감 효율을 보였다. 본 연구를 통해 대중교통수단에서의 공기질 현황을 파악했으며, PM 및 이산화탄소 등 주요오염물질의 제거 기술을 개발하였다. 향후 본 연구에서 개발된 기술이 타 대중교통수단에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2005) 철도차량안전기준.
- 국토해양부(2008) 2007년 통계연보.
- 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영(2008) 출입문 개폐에 의한 전동차 객실 CO₂ 저감효과 분석, 한국 대기환경학회지 24(2), 153-161.
- 김진태(2002) 제올라이트 X/활성탄 복합체의 CO₂ 흡착특성 연구, 한국공업화학학회지, 13(4), 345-350.
- 박덕신, 김동술, 조영민, 권순박, 박은영(2007) 철도차량에서의 공기질 현황 및 PM₁₀ 오염원 분석, 한국대기환경학회지 23(3), 311-321.
- 지준호(2001) 입자퇴적이 승용차용 정전필터의 미세 입자포집특성에 미치는 영향, 대한기계학회 논문집 B권, 26(8), 1102-1114.
- 한국철도기술연구원(2007) 차세대 객차용 청정시스템 개발, 4차년도연차보고서.
- 환경부(2001) 노출계수핸드북.
- 환경부(2006) 대중교통수단 실내공기질 가이드라인.
- 환경부(2009) 대중교통수단 실내공기질 실태조사 및 효율적 관리방안 연구.
- Abadie, M., K. Limam, J. Bouilly, D. Génin(2004) Particle pollution in the French high-speed train(TGV) smoker cars: measurement and prediction of passengers exposure, Atmospheric Environment 38, 2017-2027.
- Aliaga, C., Winqvist, K.(2003) Comment les femmes et les hommes utilisent leurs temps-Résultats de 13 pay européens. Eurostat, KS-NK-03-012-FR-N.
- Chan, L.Y., W.L. Lau, S.C. Lee, and C.Y. Chan(2002) Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, Atmospheric Environment 36, 3363-3373.
- Cooper, C.D., and F.C. Alley(1986) Air Pollution Control.
- Ioza, D.L., and D. Leith(1989) Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency, Aerosol Sci. Technol., 10, 491-500.
- Jang, M.S., Koh, C.D., and Moon, I.S.(2007) Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels, Building and Environment, 42, 55-61.
- Leutwyler, M., Siegmann, K., Monn, C.(2002) Suspended particulate matter in railway coaches, Atmospheric Environment, 36, 1-7.
- Li, T.T., Bai, Y.H., Liu, Z.R., Liu, J.F., Zhang, G.S., and Li, J.L.(2006) Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China, Sci. Total Environ, 367, 89-95.
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., Engelmann, W.H.(2001) The national human activity pattern survey(NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, J. of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 11(3), 231-252.
- Park, D.U., and K.C. Ha(2008) Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, Environmental International 34, 629-634.
- Pierce, W.M., Janczewski, J.N., Roethlisberger, B., and Janczewski, M.G.(1999) Air quality on commercial aircraft. ASHRAE J. 41(9), 26-34.
- UIC Code 553(2004) Ventilation, heating and air-conditioning in coaches.