

## 철도차량에서의 공기질 현황 및 PM10 오염원 분석

### Air Quality and PM10 Source Analysis on the Railway Vehicles

박덕신\* · 김동술<sup>1)</sup> · 조영민 · 권순박 · 박은영  
한국철도기술연구원 환경·화재연구팀, <sup>1)</sup>경희대학교 환경 및 응용화학과  
(2007년 1월 25일 접수, 2007년 5월 11일 채택)

Duckshin Park\*, Dongsool Kim<sup>1)</sup>, Youngmin Cho,  
Soonbark Kwon and Eunyoung Park  
*Environment and Fire Control Research Team, Korea Railroad Research Institute*  
<sup>1)</sup>*School of Environment and Applied Chemistry, Kyunghee University*  
(Received 25 January 2007, accepted 11 May 2007)

#### Abstract

Nowadays, concerns have much more growing regarding indoor air quality (IAQ) on the public transportation including railway vehicles. Last year Korea Ministry of Environment (ME) set new guideline for public transportation. In this study several factors were analyzed which may affect comfortableness of railway passenger cabin, and we monitored IAQ parameters (PM10, CO, CO<sub>2</sub>, VOCs, temperature and humidity) to investigate the present pollution in passenger cabin. In general, the railway air quality was satisfactory. The PM10 and CO<sub>2</sub> level on all passenger cabin were below the new guideline level 1 for PM10 (200 µg/m<sup>3</sup>) and CO<sub>2</sub> (2,000 ppm). Clustering method was carried out to classify the air polluting pattern of the cabin. As a result, the pollutants could be classified to 4 clusters and the origin of pollution is soil, diesel exhaust gas, abrasion of rail and plume.

**Key words** : Railway vehicle, Indoor air quality, Comfortableness, HVAC

#### 1. 서 론

대부분의 시간을 실내공간에서 생활하는 현대인에 있어 쾌적한 실내 환경은 일의 효율성을 증대시키고, 건강한 삶을 유지하는데 매우 중요하다. 인간의 생활 수준이 향상되면서 쾌적한 실내 환경에 대한 요구가

높아지고 있는 추세이며, 거주자의 건강과 쾌적함을 위해 다양한 연구와 기법들이 시도되고 있다. 자료조사를 통해 최근 전산유체해석(CFD: computational fluid dynamics)을 이용해서 강의실, 아파트, 자동차 내부 등 실내공간의 열쾌적성(thermal comfort)을 향상시키기 위한 연구(Zhang *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2006; Noh *et al.*, 2005; Carrilho *et al.*, 2002; Akihiro *et al.*, 2001)가 수행된 적이 있으며, Bin and Ping (2007), Tengfei and Chen (2007) 등 일부 연구자들은

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)31-460-5367, E-mail : dspark@krri.re.kr

실내공간의 환기시스템을 개선함으로써 실내공기질을 보다 쾌적하게 할 수 있다고 보고한 바 있다. 또한, Wang *et al.* (2004)은 빌딩에너지 절감과 실내공기질을 동시에 검토하기도 하였다.

국내에서도 생활수준의 향상과 더불어 건강 및 환경문제에 대한 인식이 높아짐에 따라 지하철역사 및 지하철상의 실내공기질을 대상으로 한 “지하생활공간공기질관리법”을 여객 터미널 · 도서관 · 의료기관 등 다중이용시설들과 신축되는 공동주택으로 관리대상을 확대한 “다중이용시설등의실내공기질관리법”을 개정 및 공포하였다(환경부, 2003). 2006년 환경부에서는 도시철도, 철도, 버스 등 대중교통수단의 실내공기질을 보다 효율적으로 관리하기 위해 가이드라인 제정을 위한 관련 연구를 수행하여 교통수단에서의 실내공기질 가이드라인을 제정하였다.

건설교통부 통계연감에 따르면 2004년 한 해 동안 버스 이용객수는 48억 명이며, 철도 여객수는 9억 명, 지하철 등 도시철도 이용객수는 20억 명으로 하루 평균 약 2천만 명 이상의 국민이 대중교통수단을 이용하고 있는 것으로 조사되었다(건설교통부, 2006). 철도차량의 경우 승객이 탑승하여 1시간 이상 여행을 하기 때문에 안락함과 편안함 이외에 쾌적한 환경이 요구된다. 객실의 환경이 나쁠 경우 공기오염의 원인이 되어 공기청정도에 심각한 영향을 미치게 되지만 이에 대해서 환경부에서 수행한 일부 연구(환경부, 2006)를 제외하고는 관련 연구가 거의 이루어지지 않고 있다. 또한, 이용 승객의 쾌적성도 여러 요소가 복합적으로 작용하므로 이를 한마디로 정의하고 정량적으로 평가하기가 용이하지 않아서 객실의 종합적인 쾌적성 평가 지표는 아직 뚜렷하게 확립되어 있지 않다. 일찍부터 교통수단의 환경에 많은 관심과 집중적인 투자를 하기 시작한 프랑스, 일본의 경우 쾌적성 평가지표를 차량의 설계에 반영하는 단계에 있다. 따라서 객실 공기오염으로 건강상 위해 요소에 대한 저감 방안 및 오염원에 대한 종합적인 관리방안의 마련이 시급한 실정이다(한국철도기술연구원, 2005).

본 연구에서는 일반 국민들이 이용하는 대중교통수단 중 철도차량 즉, KTX, 새마을호, 무궁화호 객실 등을 연구 대상으로 하여 실제 승객이 승차하여 운행하는 상태에서 오염현황을 파악하고, 오염원을 분석하여 어떤 경로를 통해 오염물질이 객실로 유입되

**Table 1. Comfort guideline for railway passenger cabin.**

Item	Guideline value
Temperature (°C)	17 ~ 28°C (Vertical temperature deviation: $\pm 2^\circ\text{C}$ , Horizontal temperature deviation: $\pm 3^\circ\text{C}$ )
RH (%)	40 ~ 70%
Air velocity (m/sec)	Less than 0.5 m/sec (Above from floor 1.1 m)
PM ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Less than 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO (ppm)	Less than 10 ppm
CO <sub>2</sub> (ppm)	Less than 1,000 ppm
Ventilation rate (m <sup>3</sup> /person-hr)	20 m <sup>3</sup> /person-hr

는지 여부를 분석하였다. 오염현황과 오염원 분석 자료는 향후 객실에서 공기청정장치를 설계하고 제작할 때 참고자료로 활용할 수 있을 것이며, 궁극적으로는 대중교통수단의 공기질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 및 방법

### 2.1 열차의 쾌적 요인

한국철도기술연구원(2002)에서는 실내쾌적성 향상기술개발 연구에서 국내외의 쾌적성 관련 자료조사, 기존 철도에 대한 실험 측정값과 제작자와의 협의 후 쾌적성과 관련된 인자들에 대한 가이드라인 설정, 차량의 설계와 제작에 이 가이드라인 반영을 위한 연구를 수행한 적이 있다.

철도 객실에서 냉난방 및 환기와 관련하여 쾌적성에 영향을 미치는 것은 담배연기, 음식물, 화장실, 공조의 순서로 조사되었다. 냉난방 및 환기에 대한 쾌적성 관련 요인들 중 물리적인 요인들에 대한 가이드라인은 표 1과 같다. 이는 국내 여러 기관에서 제시하고 있는 기준들을 조사한 결과(환경부, 2006)이며, 실내환경의 쾌적성 여부를 판단하는데 필요한 기준이 될 수 있다. 표에서 온도의 경우 17 ~ 28°C의 범위인데, UIC (International Union of Railways) code 553-1에서 실내공간에서 위치에 따른 수평온도분포는 2°C 이하로, 수직온도분포는 3°C 이하로 유지되도록 권고하고 있다. 유속은 승객에게 직접 닿는 풍속이 0.5 m/s 이하가 되도록 하였다. CO<sub>2</sub> 농도는 일반

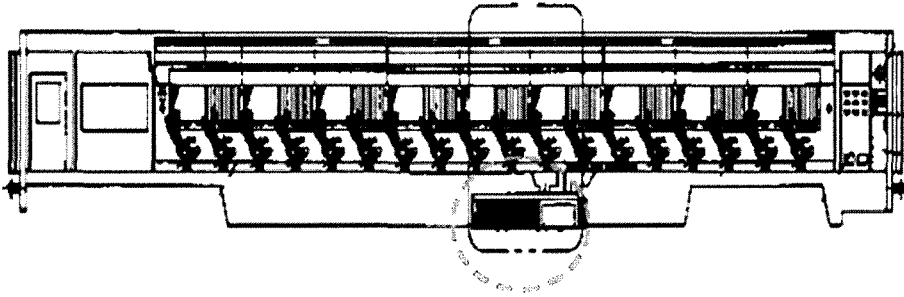


Fig. 1. Installation position of HVAC system in KTX and Mugunghwa passenger cabin.

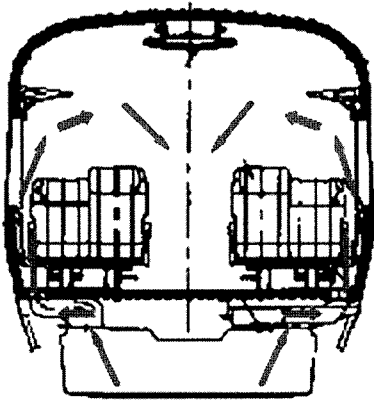


Fig. 2. Air flow in KTX and Mugunghwa passenger cabin.

건축물의 기준값과 동일한 1,000 ppm 이하이며, 환기 용량은 승객 1인당 1시간에 최소 20m<sup>3</sup> 이상이다. 열 충격을 최소화하기 위해 냉방의 경우 외기 온도와의 차이를 7°C 이하로 할 것을 권고하고 있는 것으로 조사되었다.

## 2.2 철도차량 공조시스템

철도 객실에서 공기질을 측정하고 평가하기 위해서는 공조시스템에 대한 이해가 선행되어야 하며, 이를 요약하면 다음과 같다. 철도차량의 공조장치는 냉방 및 난방장치, 환기설비를 총칭하는 것으로서 환기와 온도 유지를 위해 설치된다. 철도차량의 환기는 유닛 커버에 있는 통풍기를 통해 신선공기가 공급되고, 배기 팬에 의해 객실 외부로 배출된다. 철도차량용 냉방기는 장착위치, 냉방능력, 제어방식 등 냉방기의 특성과 근거리 통근객차용(지하철)과 장거

리 여객 객차용, 고속전철용 등과 같이 기능면으로 분류할 수 있다. 지하철용 냉방기는 터널높이, 주전원 선과의 절연거리 때문에 높이의 제한을 받으며, 장착 위치에 따라 냉방기를 차량의 지붕에 돌출이나 매립하여 장착시키고, 천장의 덕트와 연결하여 냉방을 한다. 고속용 차량이나 신형 객차의 경우 그림 1에서와 같이 차량의 무게 중심을 낮추기 위해 차량 하부에 냉방기를 장착하며, 그림 2에 냉방기를 차량하부에 장착한 상태에서의 공기흐름을 나타내었다. 표 2에 국내 철도차량용 공조시스템을 비교하여 제시하였다.

## 2.3 군집분석

군집분석법은 자연과학 분야에서 널리 사용되고 있는 응용통계분석법으로 대규모의 자료를 유사한 성질을 갖는 특정 그룹으로 분류하는데 이용한다. 군집 분석법은 사전에 어떠한 정보 없이 혹은 최소의 알고 있는 정보로 유용한 집단을 분류 및 확인할 수 있으며 대규모 자료에서 새로운 개념을 갖게 해준다(김동술과 김형석, 1990). 군집분석은 집단간 분산(between-group variance)을 최대화시키며, 집단내부의 분산(within-group variance)을 최소화시키는데 그 목적이 있다(Doring *et al.*, 1992). 이 분석법의 기본 원리는 두 대상사이의 거리를 기준으로 공간에서 비유사도(dissimilarity)를 측정함으로써 대상을 동일한 집단으로 분류시킨다(Johnson, 1967).

일반적으로 군집분석법에는 위계분석법(hierarchical clustering method)과 비위계분석법(non-hierarchical clustering method) 등이 있다. 위계분석법은 응집 위계분석법(agglomerative hierarchical method)과 분

**Table 2. Summary on characteristics of HVAC system installed in railway vehicles.**

Item	Korail ERC <sup>1)</sup>	Seoulmetro ERC <sup>1)</sup>	Hongkong ERC <sup>1)</sup>	Saemaoul PC <sup>2)</sup>	Mugunghwa PC <sup>2)</sup> (new type)	KTX PC <sup>2)</sup>	Greece adana right rail
Installation type	Upper projection	Upper projection	Ingression	Ingression	Lower attach	Lower attach	Upper projection
Number of installation	2	2	2	2	1	1	2
Air-conditioning capacity (Kcal/hr) per unit	20,000	21,000	36,980	15,000	34,000	34,400	40,400
Supply air volume (L/s)	916	933	1300	716	1500	917	1300
Return air volume (L/s)			1050	467	1200	584	985
Fresh air volume (L/s)			250	250	300	333	315
Weight (kg)	450	500	900	500	1050	1,630	790
Heater (Heating capacity, kW)	×	×	×	○ (3)	○ (27)	○ (36)	○ (9)
Refrigerants type	R22	R22	R134a	R22	R22	R134a	R134a

<sup>1)</sup>ERC: electric rail car, <sup>2)</sup>PC: passenger cabin

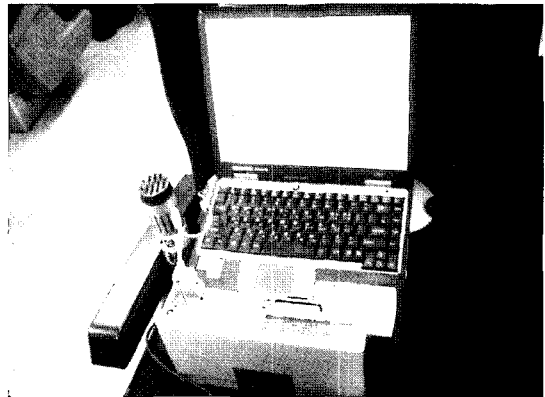
산위계분석법 (divisive hierarchical method)으로 세분된다. 비위계분석법은 군집의 수를 이미 알고 있거나 가정할 수 있을 때, 개체 (object)들을 정해진 특정한 군집으로 최적 분배하는 방법이다. 위계분석법은 한 군집이 다른 군집에 포함되지만, 군집간 중복이 허용되지 않고 계보형식의 나뭇가지와 같은 구조를 취하는 방식의 분석법이다. 위계분석법은 비위계분석법에 비해 비교적 알고리즘이 간단하고 계산시간이 상대적으로 짧으며, 전체 군집들간의 구조적인 관계를 수상도(dendrogram)를 통해 2차원상의 공간에 간단히 표현할 수 있다는 장점이 있다(Massart and Kaufman, 1983).

각 대상들의 유사도 계산에는 거리측정법을 이용하며, Euclidian 거리, Squarde Euclidian 거리 등의 측정법이 있다. 응집위계 분석법의 군집화 방법은 average linkage between groups, average linkage within method, single linkage method와 complete linkage method, centroid linkage method, Ward's method 등이 있다(Vogt and Nagel, 1987; Massart and Kaufman, 1983).

군집분석법은 연구 과정에서 자료의 형태 윤곽은 쉽게 파악할 수 있으나, 유사도 측정방법의 선정, 군집수를 결정하는 유사도 준위의 결정 등 분석자의 주관적인 판단이 개입할 수 있으므로 연구의 최종 결과를 얻고자 할 때 많은 주의가 필요하다(김동술과 김형석, 1990).

**2. 4 공기질 측정항목 및 기기**

본 연구에서는 철도 객실을 대상으로 환경부 가이



**Fig. 3. A picture shot of measuring indoor air quality in the railway passenger cabin.**

드라인에서 제시한 PM10과 CO<sub>2</sub>를 측정항목으로 선정했으며, CO, VOCs, HCHO 등도 측정하여 객실의 공기질 수준을 파악하였다. 그림 3에 나타난 것과 같이 측정기기는 UIC code 553-1, 철도차량의 공기조화장치 타입테스트의 측정위치에 따라 객실의 공기질을 가장 잘 대표할 수 있는 승객용 좌석의 중앙으로 하였다. 기기의 공기 유입구는 바닥으로부터 0.5~1 m 떨어진 곳에 위치하게 하여 오염물질의 바닥에서의 반사에 의한 영향을 배제하였다. 측정은 열차의 운행 중에 실시하였다.

온도와 습도는 열차를 이용하는 승객이 온열의 쾌적함을 느끼는데 있어서 가장 중요한 환경요인 중의 하나이다. 객실의 온·습도는 계절에 따라 냉·난방 시스템의 가동에 의한 영향이 가장 크다. 그리고 의

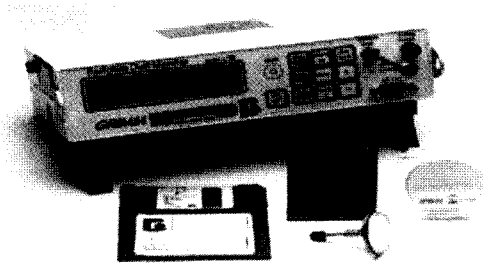


Fig. 4. Dust monitor for measuring PM1.0, PM2.5 and PM10.



Fig. 5. IAQ monitor for measuring indoor air quality.

부의 기상조건과 정차 시 객실 출구를 통한 외부공기의 도입도 온·습도의 변화에 영향을 줄 수 있다. 미국 GrayWolf사의 DirectSense IAQ (IQ-410)를 사용하여 객실에서의 온·습도를 측정하였다. 열차의 운행 중 객실에서 PM10의 농도변화를 측정하기 위해 그림 4의 독일 Grimm사의 dust monitor (model: 1108)를 이용하였다. 이 장비는 16 채널 먼지측정기로써 PM1.0, PM2.5, PM10을 동시에 계측할 수 있다.

CO<sub>2</sub>는 실내공기의 환기상태를 평가하는 지표로 이용된다. 환기가 불량하면 CO<sub>2</sub>의 농도가 높아지기 때문이다. 환기가 불량한 실내는 온도나 습도의 상승으로 불쾌감을 유발할 수 있으며, 공기 중의 분진이

Table 3. Items and devices for measurement of air quality in railway passenger cabin.

Contaminant	Measurement device
PM10s	Dust monitor (model: 1108, Grimm Co. Germany)
CO, CO <sub>2</sub> , temperature and humidity	IAQ monitor (model: IQ410, WolfSense Co., USA)
VOCs	Canister sampling and analyzed by GS-MSD (Canister: Silonite coated 6 L canister (Entech Co., USA), GC-MSD: GC (HP6980N) /MSD (HP5973)
HCHO	DNPH cartridge sampling and analyzed by UV/HPLC (HPLC/UV730DSP9300, Younglin)

나 세균 수의 증가 등으로 인하여 실내 공기질이 악화되기 때문에 환기가 반드시 필요하다. 일반적으로 CO<sub>2</sub>의 농도가 1,000 ppm 또는 1,500 ppm 이상이 되면 실내의 환기는 불량한 것으로 간주된다(환경부, 2006). 객실에서 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도는 그림 5에 나타난 IAQ 모니터를 이용하여 측정하였다. IAQ 모니터는 습도와 온도를 함께 측정할 수 있으며, 컴퓨터와 연결하여 농도 값을 실시간으로 확인할 수 있다. 측정 범위는 CO가 0~500 ppm, CO<sub>2</sub>가 0~10,000 ppm이다. VOCs의 채취에는 미국 Entech사의 6L 크기의 캐니스터 캔을 사용했으며, 전처리장치(Entech 7100)가 연결된 GC (HP6980N)/MSD (HP5973)를 이용하여 분석하였다. HCHO의 농도를 측정하기 위해서 2, 4-dinitrophenylhydrazine (DNPH)로 코팅된 실리카겔을 포함하고 있는 카트리지를 이용하였고, HCHO를 채취한 후 UV와 HPLC (HPLC/UV730D SP9300, Younglin)를 이용하여 분석하였다. 표 3에 객실의 공기질 측정에 사용된 기기와 측정 대상항목을 나타내었다.

2.5 공기질 측정일시 및 대상

철도차량 중 새마을호, KTX, 신형 및 구형 무궁화호 객차 등을 대상으로 표 4에 나타난 것과 같이 두 차례에 걸쳐서 공기질을 측정하였다. 1차 측정은 2004년 1월 12일부터 14일까지 3일간 기존선 객차 중 새마을호와 무궁화호 신형 및 구형 차량을 대상으로, 2차 측정은 2006년 7월 18일 고속열차인 KTX 객차를 대상으로 경부선 서울-부산 구간에서 수행하

**Table 4. Sampling information.**

Passenger cabin	Date	Duration (hour:minute)	Line	From → to	Stop stations
KTX	2006. 7. 18	10:00 ~ 12:42	Kyungbu	Seoul → Busan	Daejeon, Dongdaegu
	2006. 7. 18	14:00 ~ 17:00	Kyungbu	Busan → Seoul	Gupo, Milyang, Dongdaegu, Daejeon, CheonAсан, Gwangmyeong
Saemaul	2004. 1. 12	08:00 ~ 12:26	Kyungbu	Seoul → Busan	Yeongdeungpo, Jochiwon, Daejeon, Gumi, Dongdaegu, Gupo
	2004. 1. 12	16:00 ~ 20:10	Kyungbu	Busan → Seoul	Dongdaegu, Daejeon
Mugunghwa (new type)	2004. 1. 14	08:45 ~ 14:14	Kyungbu	Seoul → Busan	Yeongdeungpo, Suwon, Pyongtaek, Cheonan, Sintanjin, Daejeon, Okcheon, Yeongdong, Gimcheon, Gumi, Waegwan, Daegu, Dongdaegu, Gyeongsan, Cheongdo, Milyang, Samnangjin, Gupo
	2004. 1. 14	16:15 ~ 21:48	Kyungbu	Busan → Seoul	Gupo, Samnangjin, Milyang, Cheongdo, Gyeongsan, Dongdaegu, Daegu, Waegwan, Gumi, Gimcheon, Yeongdong, Okcheon, Daejeon, Sintanjin, Jochiwon, Cheonan, Pyongtaek, Suwon, Yeongdeungpo
Mugunghwa (old type)	2004. 1. 13	08:15 ~ 13:36	Kyungbu	Seoul → Busan	Yeongdeungpo, Suwon, Osan, Pyongtaek, Seonghwan, Cheonan, Daejeon, Yeongdong, Hwangsan, Gimcheon, Gumi, Waegwan, Daegu, Dongdaegu, Gyeongsan, Milyang, Gupo
	2004. 1. 13	16:15 ~ 21:48	Kyungbu	Busan → Seoul	Gupo, Samnangjin, Milyang, Cheongdo, Gyeongsan, Dongdaegu, Daegu, Waegwan, Gumi, Gimcheon, Yeongdong, Okcheon, Daejeon, Sintanjin, Jochiwon, Cheonan, Pyongtaek, Suwon, Yeongdeungpo

**Table 5. Summary of measuring result.**

Type of passenger cabin		Temp. (°C)	Humid. (%)	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
KTX	Max.	25.7	58.0	112.2	2.9	2,628
	Min.	25.2	44.7	27.2	0.4	460
	Avg.	25.5	51.1	50.5	1.5	1,411
Saemaul	Max.	25.9	34.3	147.6	7.7	2,365
	Min.	17.4	21.3	42.3	3.4	1,036
	Avg.	22.9	25.1	69.1	5.0	1,672
Mugunghwa (new type)	Max.	26.6	25.1	245.2	4.5	2,069
	Min.	18.8	20.4	35.5	2.6	808
	Avg.	25.1	23.1	70.4	3.7	1,723
Mugunghwa (old type)	Max.	25.0	24.8	175.8	6.7	2,145
	Min.	21.1	18.7	48.3	3.4	925
	Avg.	23.2	22.4	83.8	4.9	1,768

였다. 새마을호의 경우 서울-부산 구간의 운행시간은 4시간 10분가량, 무궁화호는 5시간 20분가량이 소요된다. KTX는 최고속도 300 km/h로 운행되는 고속열차로 서울-부산 구간의 운행에 2시간 40분가량이 소

요된다. 고속열차의 경우 정차 역은 2~7개 정도이며, 저속열차인 무궁화호는 최대 19개 역에 정차한다.

**Table 6. VOCs concentration in KTX passenger cabin.**

Compounds	Concentration (ppbv)
Freon 12	ND
Methyl chloride	ND
Freon 114	ND
Vinyl chloride	ND
Methyl bromide	ND
Ethylchloride	ND
Freon 11	ND
1, 1-Dichloroethene	ND
Dichloromethane	2.81
Freon 113	ND
1, 1-Dichloroethane	ND
cis-1, 2-Dichloroethylene	ND
Chloroform	ND
1, 2-Dichloroethane	ND
Methyl chloroform	0.08
Benzene	5.04
Carbon tetrachloride	ND
1, 2-Dichloropropane	ND
Trichloroethylene	1.85
cis-1, 3-Dichloropropene	ND
trans-1, 3-Dichloropropene	ND
1, 1, 2-Trichloroethane	ND
Toluene	12.93
1, 2-Dibromoethane	ND
Tetrachloroethylene	1.73
Chlorobenzene	ND
Ethylbenzene	1.81
m,p-Xylene	3.50
Styrene	3.04
1, 1, 2, 2-Tetrachloroethane	2.14
o-Xylene	3.66
1, 3, 5-Trimethylbenzene	1.96
1, 2, 4-Trimethylbenzene	2.24
1, 3-Dichlorobenzene	4.89
1, 4-Dichlorobenzene	5.94
1, 2-Dichlorobenzene	5.80
1, 2, 4-Trichlorobenzene	2.05
Hexachlorobutadiene	ND
Total	61.47

\*ND: not detected

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 온도 및 습도

객실 공기질 측정결과를 표 5에 나타냈으며, 측정 결과 온도의 경우 운행시간 동안 평균 22.9~25.5°C였으며, 습도는 22.4~51.1%로 나타났다. 표 2에 전술한 쾌적지수에서 온도는 17~28°C 범위에 있을 때

**Table 7. Indoor air quality guideline for public transportation in Korea.**

Parameter	Classification	Level 1	Level 2
CO <sub>2</sub>	Electric rail car	2,500 ppm	3,500 ppm
	Railway passenger cabin, bus	2,000 ppm	3,000 ppm
PM10	Electric rail car	200 µg/m <sup>3</sup>	250 µg/m <sup>3</sup>
	Railway passenger cabin, bus	150 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>

(Average value during a route)

\* Level 1: normal times; \*\* Level 2: rush hours

쾌적하다고 할 수 있으며, 측정값을 쾌적지수와 비교하면 네 가지 타입의 측정대상 차량의 온도범위는 쾌적한 것으로 조사되었다. 습도는 제어가 힘들기 때문에 외기에 의존할 수밖에 없다. 본 측정에서도 7월에 측정된 KTX에서는 44.7~58.0%의 범위였으나 1월에 측정된 새마을호, 무궁화호에서는 표 2의 습도 의 쾌적지수 범위 40~70%보다 낮은 18.7~34.3%로서 겨울철에는 다소 객차 내부가 건조한 상태인 것으로 나타났다.

#### 3.2 PM10

측정결과 객실에서의 PM10 농도는 해당구간에서의 운행시간동안 평균 50.5~83.8 µg/m<sup>3</sup>으로 표 7의 환경부의 대중교통수단 실내공기질 가이드라인에서 제시한 열차에서의 평상시 PM10 농도값인 150 µg/m<sup>3</sup>보다 낮은 것으로 나타났다. KTX 객실에서는 측정기간 중 최대 112.2 µg/m<sup>3</sup>을, 최소 27.2 µg/m<sup>3</sup>을 보여 농도 값에 편차가 심했다. 무궁화호 신형차량에서는 최대 245.2 µg/m<sup>3</sup>의 농도를 보였다.

그림 6에 부산과 서울구간을 운행하는 KTX 열차에서 측정된 PM10 농도값을 나타내었다. 이 열차는 14시에 부산역을 출발하여 구포(14:13), 밀양(14:37), 동대구(15:09), 대전(15:58), 천안아산(16:20), 광명(16:44)을 거쳐 출발 후 3시간만인 17시 정각에 서울역에 도착하는 열차이다. 운행 중 정차 역을 회색의 굵은 선으로 표시했으며, 열차는 보통 해당 역에 정차한 후 승객의 승하차를 위해 일본가람 정차한다. 객실에서 PM10의 농도변화는 외부와 연결된 창문 및 출입구를 통한 유입, 내부 발생원 그리고 기류의 변화 및 승객의 활동에 의한 재비산 등을 고려해 볼 수 있으며, 객실 바닥이나 닥트의 청소 상태에 따라

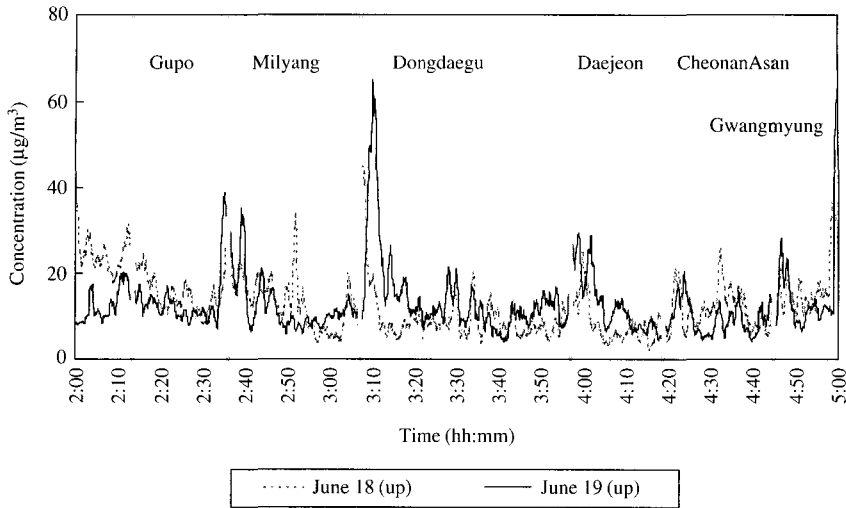


Fig. 6. PM10 levels and stop stations during the trip from Busan to Seoul. The stop stations (grey bar) are Gupo, Milyang, Dongsaeugu, Daejeon, CheonanAsan and Gwangmyung.

변화가 심하여 각 요인에 대한 정량화가 어려운 것으로 판단된다. 그림에서 PM10이 고농도로 나타난 시기는 대부분 열차가 역에 정차한 바로 직후인 것을 알 수 있다. 열차가 정차한 후 승객들이 승하차를 위해 움직임에 따라 먼지가 비산하여 PM10의 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.3 CO

CO의 농도는 표 5에서 새마을호 구형 객실에서 4.9 ppm, 무궁화호 신형 객실에서 3.7 ppm, 새마을호 객실에서 3.4 ppm으로 대체로 3~6 ppm 정도의 낮은 농도로 실내공기질 유지기준인 10 ppm 이하였다. 각 열차를 비교해보면, 정차역이 상대적으로 적은 KTX의 객실이 무궁화호 객실에서의 농도보다 낮았다. 이것은 정차시 출입구 개방으로 인해 외부로부터 CO가 유입되었기 때문으로 보인다.

### 3.4 CO<sub>2</sub>

측정결과, 객차별 CO<sub>2</sub>의 농도는 구형 무궁화호 (1,768 ppm) > 신형무궁화호 (1,723 ppm) > 새마을호 (1,672 ppm) > KTX (1,411 ppm)의 순으로 높은 것으로 조사되었다. 객차의 운행시간 동안 평균 CO<sub>2</sub> 농도 값은 1,644 ppm으로서 철도차량의 쾌적성 가이드라인 1,000 ppm보다는 높고, 열차에 대한 환경부 가이드

드라인 2,000 ppm에 근접하여 지속적인 관리가 필요한 것으로 사료된다. CO<sub>2</sub>의 농도는 측정시간동안 KTX의 경우 최대 2,628 ppm, 최소 460 ppm으로서 시간대별 농도의 변화가 심했다. CO<sub>2</sub>는 이용 승객의 호흡에 의해 배출되며, 객차를 설계할 때 새마을호의 경우 승객수 64명을 기준으로 환기 계산시 실내 CO<sub>2</sub> 허용 농도는 1,500 ppm, 외기중 CO<sub>2</sub> 농도는 0.03%를, 승객 1인당 CO<sub>2</sub> 토출량은 0.013 m<sup>3</sup>/h · P를 입력 자료로 사용하여 허용 농도에 따른 환기량 (QCO<sub>2</sub>)은 식 1에 의해 계산한다. 여기서, M은 작업 정도에 따른 CO<sub>2</sub> 토출량 (m<sup>3</sup>/h · P), K<sub>a</sub>는 정상상태에서의 실내 CO<sub>2</sub> 허용 농도(%), K<sub>o</sub>는 외기 중의 CO<sub>2</sub> 농도(%)를 뜻한다(철도청, 2000).

$$QCO_2 = \frac{100M}{K_a - K_o} \div 60 \text{ (m}^3/\text{min)} \quad (1)$$

### 3.5 포름알데하이드 (HCHO)

KTX 객실에서 열차 운행 중 포름알데하이드 방출량을 측정하였다. 포름알데하이드는 눈을 자극하고, 두통과 현기증, 만성피로, 불면증, 천식 등을 유발하는 대표적인 물질로 알려져 있다. 측정결과, 포름알데하이드 농도는 최대 33.1 µg/m<sup>3</sup>, 최소 19.6 µg/m<sup>3</sup>로서 운행시간 동안 평균 25.3 µg/m<sup>3</sup>으로 조사되어 국내



Table 8. Raw data used in clustering analysis .

(ng/m<sup>3</sup>)

Type of passenger cabin	No.	Li	Na	Mg	Al	K	Ca	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Ba	Pb
Saemaeul	2	11.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2597.8	ND	ND	ND	ND	ND	302.8	ND
	5	2.7	ND	ND	ND	ND	ND	125.4	4943.8	6.2	372.8	35.6	155.5	0.5	319.5	31.1
Mugunghwa (old type)	3	2.7	1702.5	125.1	1372.7	54.1	522.3	21.8	3052.1	ND	ND	43.9	ND	2.5	47.3	55.9
	4	4.7	962.0	1240.8	ND	ND	2375.2	52.1	3866.9	ND	ND	ND	ND	ND	442.6	ND
Mugunghwa (new type 1)	2	1.8	ND	184.7	ND	ND	ND	ND	2052.3	ND	ND	ND	ND	ND	219.1	ND
	4	3.1	ND	191.6	ND	ND	602.1	39.2	6266.7	ND	ND	51.7	ND	ND	455.3	2.7
Mugunghwa (new type 2)	3	2.2	ND	ND	ND	9.3	ND	ND	734.0	ND	ND	ND	ND	0.4	15.5	14.0
	4	2.4	ND	ND	ND	ND	ND	87.1	10541.9	3.0	0.8	9.4	ND	ND	834.4	ND

\* ND: Not Detected

의 실내공기질 유지기준 120 µg/m<sup>3</sup>에 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다.

### 3.6 휘발성유기화합물 (VOCs)

본 연구에서는 미국 EPA TO-14에서 규정한 독성 VOCs를 측정하였으며, KTX 객실에서 측정된 휘발성유기화합물의 농도는 평균 61.1 µg/m<sup>3</sup>였으며, 이중 톨루엔이 12.93 µg/m<sup>3</sup>, 벤젠이 5.04 µg/m<sup>3</sup>로서 다른 성분보다 농도 값이 다소 높았으니 이 정도의 농도는 일반 대기 중의 농도 수준과 유사한 수준으로 실내공기질 권고기준에서 정한 500 µg/m<sup>3</sup>보다는 훨씬 낮았다.

### 3.7 PM10의 오염원인 패턴 분석

본 연구에서는 객실에서의 오염원 파악을 위해 응집위계분석법을 적용하였다. 군집분석 수행시 자료의 해석에 적합한 거리 또는 비유사도의 기준을 결정하는 것은 매우 중요하다(유상준, 1996). 유사도를 계산하는 거리 측정법으로는 Euclidian 거리를 이용하였다. 분류된 그룹이나 case 사이의 거리를 표시하는 군집화 기준으로는 Ward's method를 이용하였고, Z-score를 이용하여 자료의 표준화를 수행하였다. 표 8에 군집분석에 이용된 데이터를 나타냈으며, 그림 2에는 군집분석의 결과에 대한 수상도를 도시하였다.

그림 7에서 기준선(line)을 설정했을 때 표 9에서와 같이 4개의 군집으로 조절되었으며, 이때 각 군집에 소속된 개체들은 동질적인 특성을 지니고 있다고 할 수 있다. 군집 1에 속하는 개체들은 무공화호 신형 (2) 3번 객차, 무공화호 구형 3번 객차로서 Na,

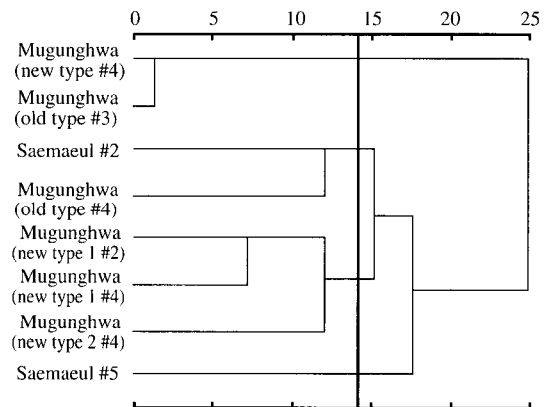


Fig. 7. Dendrogram of clustering analysis.

Al, Fe, Pb 등이 많이 포함되어 있다. 토양 성분과 관련된 보편적인 오염 형태이며, 그 농도는 보통의 경우보다 다소 낮은 것으로 조사되었다. 이들 성분은 주로 열차 바닥면지의 재비산이나 승객의 옷과 신발들에 묻어 토양분진이 운반된 것으로 추정된다. 군집 2는 새마을호 2번 객차, 무공화호 구형 4번 객차로서 Mg, Ca 등이 높게 나타났다. 군집 2는 토양과 디젤의 연소 배출물이 혼합된 형태로 볼 수 있다. 군집 3의 개체는 무공화호 신형 (1) 2번 객차, 무공화호 신형 (1) 4번 객차, 무공화호 신형 2 4번 객차이다. 이 군집의 특징은 모든 개체들이 무공화호 객차였으며, Ba, Fe, Cu가 많이 포함되어 있었다. 다른 군집에 비해 비교적 청정한 것으로 나타났다. 군집 3은 주로 열차 바퀴와 휠의 마모, 마찰에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 군집 4의 개체는 새마을호 5번 객차로서

**Table 9. Average element concentration by class 1, 2, 3 and 4. (ng/m<sup>3</sup>)**

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Li	2.5	7.9	2.4	2.7
Na	851.3	481.0	N.D.	N.D.
Mg	62.6	620.4	125.4	N.D.
Al	686.4	N.D.	N.D.	N.D.
K	31.7	N.D.	N.D.	N.D.
Ca	261.2	1187.6	200.7	N.D.
Ti	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
V	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Mn	10.9	26.1	42.1	125.4
Fe	1893.1	3232.4	6287.0	4943.8
Co	N.D.	N.D.	1.0	6.2
Ni	N.D.	N.D.	0.3	372.8
Cu	22.0	N.D.	20.4	35.6
Zn	N.D.	N.D.	N.D.	155.5
As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cd	1.5	N.D.	N.D.	0.5
Ba	31.4	372.7	502.9	319.5
Pb	35.0	N.D.	0.9	31.1

Zn, Mn, Ni 등이 높게 나타났다. 이러한 특징은 디젤 연소에 의한 배출물의 영향으로 오염원에 직접 노출이 되었거나 디젤기관차 배기가스(plume)에 의해 극심하게 오염된 형태로 볼 수 있다. 이에 대해 제기할 수 있는 가능성은 배기가스의 착지점이 5번 객차일 경우, 열차의 운행 중 배기가스의 풍하 방향에 직접적으로 노출된 경우 또는 출입문이 밀폐되지 않았을 경우 등을 추정해 볼 수 있다. 이상과 같이 운행 중인 열차에서 실내오염도 측정을 수행하여 객실에서의 오염패턴을 분류하였으며, 객실의 경우 주로 토양먼지, 배기가스, 유탄유류의 누유(leaking), 마모나 마찰 등에 의해 내부가 오염되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대중교통수단 중 KTX, 새마을호, 무궁화호 등 철도 객실을 대상으로 철도를 이용하는 승객의 쾌적성에 영향을 미칠 수 있는 요인을 온도와 습도를 중심으로 분석하고, PM10, CO<sub>2</sub>, HCHO, VOCs 등의 대기오염물질들을 측정, 분석하여 공기질 수준을 파악하였다. 또한 PM10의 오염패턴 분석을 위해 8량의 객실을 대상으로 미세먼지를 포집하고,

중금속을 분석하였다. 군집분석 중 응집위계분석법을 이용하여 정성적인 평가를 하여 오염원을 확인하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 공기질 측정결과 PM10의 경우 평균 50.5 ~ 83.8 µg/m<sup>3</sup>으로 대체로 농도가 낮았으나 역에서 승하차를 위해 승객이 움직일 때 미세먼지의 재비산으로 농도가 높아지는 것으로 추정된다. CO<sub>2</sub>는 1,411 ~ 1,768 ppm의 수준으로 환경부의 열차에 대한 가이드라인 값인 2,000 ppm 보다는 낮은 수준이지만 운행시 승객의 수에 따라 가이드라인 값을 초과하기도 하여 지속적인 관리가 필요한 것으로 판단된다. 그 이외 CO, 포름알데하이드, VOCs의 경우 유의할만한 농도 수준을 보이지 않았다.

군집분석을 수행한 결과 4개의 군집으로 분류할 수 있었다. 군집 1은 Na, Al, Fe, Pb 등이 많이 포함되어 있어 주로 토양성분에 의해 오염되었음을 알 수 있었다. 군집 2는 Mg와 Ca가 높게 나타났으며, 토양과 디젤의 연소 배출물이 혼합된 형태로 볼 수 있다. 군집 3은 모든 개체들이 무궁화호 열차였으며, Ba와 Fe 및 Cu가 많이 포함되어 있어 주로 철로의 마모, 마찰에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 군집 4는 Zn, Mn, Ni 등이 높게 나타났으며, 디젤 연소에 의한 배출물의 영향과 오염원에 직접 노출이 되었거나 디젤기관차 배출가스에 의해 극심하게 오염된 형태로 볼 수 있다.

객실은 144 m<sup>3</sup>의 공간에 다수의 승객이 승차하여 장시간 여행을 하므로 공기질 관리에 세심한 주의가 요구된다. 최근 열차가 고속화되고 조망권 확보를 위해 개별 창문을 없애는 추세여서 환기는 HVAC 시스템을 이용해서만 가능하다. 객실 공기질을 쾌적한 상태로 유지하기 위해서는 내부의 공기를 수시로 신선한 외부공기로 치환하거나 오염된 객실의 공기를 정화하기 위한 장치의 장착이 요구된다. 본 연구의 결과가 향후 객실의 공기질 관리에 유용하게 사용될 수 있기를 기대한다.

#### 참 고 문 헌

- 건설교통부(2006) 건설교통통계연보.
- 김동술, 김형석(1990) Pattern recognition을 이용한 지하상가에서의 대기오염물질의 농도분석에 관한 연구.

- 한국대기보전학회지, 6(1), 1-10.
- 유상준 (1996) 군집분석과 분산 주성분분석법을 이용한 대기 중 분진의 분류, 경희대학교 대학원 석사학위논문.
- 철도청 (2000) 무공화호객차 제작사양서.
- 한국철도기술연구원 (2002) 실내 쾌적성 향상기술 개발 연차보고서.
- 한국철도기술연구원 (2005) 차세대 객차용 청정시스템 개발 2차년도 연차보고서.
- 환경부 (2003) 지하생활공간공기질관리법 개정 법률(다중이용시설등의실내공기질관리법).
- 환경부 (2006) 지하철 등 대중운송수단의 실내공기질 실태 조사 및 관리방안 최종보고서.
- Akihiro, F., J. Kanemaru, H. Nakagawa, and Y. Ozeki (2001) Numerical simulation method to predict the thermal environment inside a car cabin, *JSAE Review*, 22 (1), 39-47.
- Bin, Z. and G. Ping (2007) Modeling particle dispersion in personalized ventilated room, *Building and Environment*, 42(3), 1099-1109.
- Carrilho, G., Q. Chen, L.R. Glicksman, and L.K. Norford (2002) Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai, *Energy and Buildings*, 34(1), 1-11.
- Doring, S.R., T.D. Davies, and C.E. Pierce (1992) Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-Method and applications, *Atmospheric Environment*, 26A(14), 2575-2581.
- Johnson, S.C. (1967) Hierarchical clustering schemes, *Psychometrika*, 32(3), 254-254.
- Massart, D.L. and L. Kaufman (1983) The interpretation analytical chemical data by the use of cluster analysis, John Wiley & Sons Ltd.
- Noh, K.C., J.S. Jang, and M.D. Oh (2005) Thermal comfort and indoor air quality in the lecture room with 4-way cassette air-conditioner and mixing ventilation system, *Building and Environment*, 42(2), 689-698.
- Tengfei, Z. and Q. Chen (2007) Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins, *Building and Environment*, 42(4), 1675-1684.
- Vogt, W. and D. Nagel (1987) Cluster analysis in clinical chemistry: a model, John Wiley & Sons Ltd.
- Wang, Z., Z. Bai, H. Yu, J. Zhang, and T. Zhu (2004) Regulatory standards related to building energy conservation and indoor-air-quality during rapid urbanization in China, *Energy and Buildings*, 36(12), 1299-1308.
- Zhang, L., T.T. Feng Jiang, T.T. Chow, C.F. Tsang, and W.Z. Lu (2006), CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange, *Building and Environment*, 41(3), 254-161.
- Zhang, L., T.T. Chow, and C.F. Tsang (2007) Effect of door opening on the performance of displacement ventilation in a typical office building, *Building and Environment*, 42(3), 1335-1347.