

서울지역 지하역사의 미세먼지 현황

생활환경팀

김창모 · 한규문 · 이호찬 · 전명진 · 신정업 · 홍종수 · 전재식 · 김주형 · 김민영

Characteristics of PM₁₀ Monitored at Subway Stations in Seoul

Indoor Air and Noise Team

**Chang-mo Kim, Gyu-mun Han, Ho-chan Lee,
Myung-jin Jun, Jung-up Shin, Jong-soo Hong, Gyu-mun Han,
Jae-sik Jeon, Joo-hyung Kim and Min-young Kim**

Abstract

This study was conducted to investigate the concentration of PM₁₀ in stations within the Seoul Metropolitan Subway network (lines 1 - 8 and the Bundangline). A total of 311 subway stations were measured from 2005 until 2009. The mean concentrations of PM₁₀ at subway stations by year were 107.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2005), 91.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2006), 93.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2007), 89.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2008) and 61.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2009), respectively. These results indicate that the particulate materials gradually decreased. The order of the mean concentration of PM₁₀ for each line was line 1 > Bundang line > line 4 > line 2 > line 8 > line 3 > line 5 > line 6 > line 7. The concentrations of line 1 (126.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and Bundang line (108.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) were higher than those measured in other lines. The order of the mean concentration of PM₁₀ for each season was spring (99.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > winter (95.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > summer (91.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > fall (85.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Statistical analysis indicated that seasonal factors significantly influenced the PM₁₀ concentrations at each subway station ($p < 0.02$).

Key words : PM₁₀, subway stations

서론

현재 지하역사의 실내공기질 (Indoor Air Quality, IAQ)은 2003년 5월에 제정된 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”의 규제를 받고 있다. 대규모점

포, 의료기관 및 보육시설 등과 같은 다중이용시설은 이 법이 제정된 이래로 규제대상에 편입되었지만 지하역사는 이 법이 제정된 이전부터 “지하생활공간공기질관리법(1996년 제정)”과 같은 법에 의해서도 지속적으로 규제를 받아 왔다(1). 그 이

유는 다른 다중이용시설과 비교하여 지하역사라는 실내공간이 많은 시민이 유동하는 공간으로 규모와 이용면에서 타 시설을 능가하는 중요도를 갖고 시민의 건강에 만성적으로 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 또한 쾌적한 지하 환경을 바라는 시민들의 욕구 증대도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

지하역사의 실내공기질을 규제하는 법이 시행된 이래 지하 환경을 개선하기 위하여 여러 가지 조치들이 시행되었다. 공기질과 관련하여 최근의 눈에 띄는 변화 중에는 주로 지하공간을 운행하는 전동차의 객실 공기질을 관리할 수 있는 근거를 마련하게 된 점(2)과 서울 지역의 경우 2010년까지 전 지하역사에 스크린도어(Platform Screen Door, PSD) 설치 도입(3) 등을 들 수 있다. 특히 PSD의 설치의 지하역사의 공기질에 영향을 주는 요인 중 하나로 향후 이에 대한 면밀한 조사가 필요할 것이다.

지하역사의 실내 환경에 대해 전부터 많은 시민들과 학계에서 관심을 가져 왔지만 서울 지역의 지하역사 실내 환경으로 국한하여 살펴보면, 실내 공기질 관련 학회의 학술대회 등에서 다수의 논문이 발표되었음에도(4~7) 불구하고 이에 대해 체계적이고 심도 있게 국내에 발표된 논문은 드문 편이다. 조 등(4)은 수도권 전철 노선인 과천선의 일부 노선에 대해 조사한 바 있으며, 하(8)는 대전 지하철 지하역사를 연구하여 승강장이 평균 $86.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 개찰구가 평균 $73.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 승강장이 개찰구보다 평균 20% 정도 높게 분석되었으며 계절적으로 봄·가을보다 여름의 미세먼지 농도가 낮게 분석되었다고 보고하였다. Aarnio 등(9)은 헬싱키의 지하철에서 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)를 모니터링하여 이곳의 $\text{PM}_{2.5}$ 수나 크기 분포가 자동차가 수시로 운행하는 거리의 $\text{PM}_{2.5}$ 와 유사하며 이의 주 성분은 철이라고 보고한 바 있다.

현재 지하역사의 실내공기질은 유지기준 물질인 미세먼지(PM_{10}), 이산화탄소(CO_2), 일산화탄소(CO) 및 포름알데하이드(HCHO) 4항목과 권고기준 물질인 라돈(Rn), 총휘발성유기화합물(TVOC), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3) 및 석면(asbestos)으로 구분하여 관리를 하고 있다. 본 연구에서는 지하역사 실내공기 오염도를 대표적으로 반영하는

지표항목인 미세먼지(PM_{10})에 한정하였다. PM_{10} 이 선정된 이유는 호흡성 분진으로도 불리는 미세먼지의 경우 대기 중에 오랫동안 부유하면서 기도를 통해 체내에 들어와 폐 깊숙이 침착하여 각종 호흡기 질환 및 심폐질환을 일으켜 건강에 영향을 미치기 때문이었다.

본 논문에서는 서울 지역 지하역사의 PM_{10} 농도에 대해 2005년부터 2009년까지 연도별 추이 및 현황, 지하철 노선별 PM_{10} 농도 현황 및 지하역사 PM_{10} 농도의 계절별 유의성 등을 고찰하였다.

연구방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구는 2005년부터 2009년까지 서울 지역에 위치한 지하역사를 대상으로 하였다. 조사가 이루어진 지하역사의 연도별 지하역사 수는 2005년 70개소, 2006년 57개소, 2007년 74개소, 2008년 76개소 및 2009년 34개소로 총 311개소이었다(표 1). 매년 대상 지하역사는 전년도 기준초과 시설, 검사를 받지 않은 시설에 대해 우선적으로 선정하는 원칙 등에 준하여 각 구청으로부터 의뢰받아 선정하였으며, 이 중 2009년은 각 구청으로부터 의뢰된 지하역사가 34개소로 다른 연도에 비해 적었다.

2. 대상항목 및 측정방법

본 연구의 대상항목은 PM_{10} 으로 시료 채취 및 측정은 실내공기질공정시험기준에 준해서 수행했다. 먼저 실내의 공기질을 대표할 수 있는 지점을 승강장과 대합실에서 각각 1개소씩 선정하여 소용량 공기포집기(Airmetrics, USA)를 설치한 후 매회 5 L/min의 유량으로 20시간 동안 연속하여 포집하였다. 이어서 시료 채취한 여과지는 48시간 동안 항량한 후 0.001 mg 이상의 감도를 갖는 분석용 전자저울(Mettler Toledo AG245, Switzerland)로 정확히 칭량하여 시료 채취 전후의 여과지 무게 차이를 표준상태(20°C , 1 atm)로 환산한 총 포집유량으로 나누어 농도를 계산하였다. 통계 분석은 SPSS 17.0 버전의 통계프로그램을 사용하

여 검정하였으며 일원배치 분산분석(One-Way ANOVA), 독립표본 T-검정(Independent T-test), 대응표본 T-검정(Paired T-test) 및 상관분석(Correlation Analysis) 등을 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 서울시 지하철역사의 연도별 미세먼지 추세 및 현황

2005~2009년간 지하철역사의 연평균 PM₁₀ 농도는 점차적으로 감소 경향을 보여 2009년에는 2005년에 비해 43.3%까지 낮아진 것으로 나타났다(표

2). 이러한 경향은 지하철역사의 승강장과 대합실에서도 유사하게 나타났으며 지하철역사의 PM₁₀ 수준을 좌우하는 승강장의 농도가 대합실보다 23.2~45.4% 높았다. 지하철역사의 공기질이 개선된 요인에는 서울시의 대기질 개선 대책 시행, 지하철역사 선로의 자갈 도상 교체, 승강장의 PSD 설치 등을 꼽을 수 있다. 이 중 PSD의 설치는 직접적으로 지하철역사의 공기질을 개선시킨 요인 중의 하나로 추정되는 데 표 3에서 보는 바와 같이 PSD가 설치된 지하철역사의 승강장 평균 PM₁₀ 농도가 PSD가 설치되지 않은 곳에 비해 낮았으며 통계적으로도 유의하였다.

본 연구와 유사한 서울지역 지하철역을 대상으

Table 1. Numbers of annual sampling point

Year(No. of samples)	Line(No. of samples)	Season(No. of samples)
2005(70)	1(4), 2(18), 3(8), 4(7), 5(15) 6(11), 7(7), 8(-*), B**(-)	Spring(27), Summer(32) Fall(11), Winter(-)
2006(57)	1(3), 2(7), 3(5), 4(7), 5(11) 6(10), 7(12), 8(2), B(-)	Spring(19), Summer(25) Fall(4), Winter(9)
2007(74)	1(3), 2(17), 3(11), 4(7), 5(15) 6(5), 7(10), 8(4), B(2)	Spring(27), Summer(36) Fall(11), Winter(-)
2008(76)	1(3), 2(17), 3(12), 4(4), 5(8) 6(17), 7(9), 8(3), B(3)	Spring(-), Summer(-) Fall(62), Winter(14)
2009(34)	1(1), 2(4), 3(5), 4(4), 5(9) 6(3), 7(5), 8(-), B(3)	Spring(3), Summer(7) Fall(23), Winter(1)
Total(311)	1(14), 2(63), 3(41), 4(29), 5(58) 6(46), 7(43), 8(9), B(8)	Spring(76), Summer(100) Fall(111), Winter(24)

* Not examined.

** Bundang line.

Table 2. Annual comparison of PM₁₀ concentration at subway stations (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Year	Platform			Waiting Room			Total		
	Mean	S.D	Range	Mean	S.D	Range	Mean	S.D	Range
2005	118.8	33.3	20.5~205.3	96.4	31.1	40.2~175.0	107.6	26.6	56.4~186.7
2006	107.8	34.8	49.8~196.7	74.1	29.4	12.9~143.9	91.0	29.7	31.4~170.3
2007	110.5	36.2	41.5~186.6	76.7	26.6	38.3~147.0	93.6	28.0	46.4~144.1
2008	105.1	37.1	41.5~201.1	73.6	31.3	21.8~167.2	89.4	31.8	31.7~184.2
2009	68.7	27.2	21.8~147.8	53.3	23.5	12.5~103.0	61.0	21.6	22.5~114.1

로 한 선행연구를 보면 이 등(10)은 서울 시내 34개 역사를 2002년 2~12월에 걸쳐 PM₁₀ 농도를 측정하여 1~4호선 운행구간의 미세먼지 평균농도가 각각 승강장 131 μg/m³, 매표소 108 μg/m³으로 5~8호선 운행구간의 승강장 120 μg/m³, 매표소 97 μg/m³보다 높은 것으로 보고하였다. 2003년에도 PM₁₀ 평균 농도는 1기 지하철(1~4호선) 승강장 147 μg/m³, 매표소 115 μg/m³, 2기 지하철(5~8호선) 승강장 109 μg/m³, 매표소 89 μg/m³으로 1기 지하철이 2기에 비해 높았고 2001~2003년간 전역사의 평균 미세먼지 농도가 각각 122 μg/m³, 115 μg/m³ 및 116 μg/m³으로 보고한 바 있다(11). 이와 같이 타 연구자들에 의해 수행된 2001~2003년 및 2005~2009년의 문헌

및 자료 비교를 통해 지하역사의 PM₁₀ 농도 수준이 서서히 낮아지고 있음을 알 수 있었다.

2. 서울시 지하역사의 노선별 미세먼지 현황

2005~2009년 측정 자료를 분석한 결과 노선별 평균 PM₁₀ 농도는 1호선(126.8 μg/m³) > 분당선(108.7 μg/m³) > 4호선(98.6 μg/m³) > 2호선(97.3 μg/m³) > 8호선(93.8 μg/m³) > 3호선(87.4 μg/m³) > 5호선(87.2 μg/m³) > 6호선(85.0 μg/m³) > 7호선(81.2 μg/m³) 순으로 나타났다(그림 1). 지하역사의 미세먼지 수준을 좌우하는 승강장의 평균 PM₁₀ 농도도 1호선 > 분당선 > 8호선 > 2호선 > 4호선 > 6호선 > 3호선 > 5호선 > 7호선 순으로 유사한 경향을 보였다. 전체 노선 중에서

Table 3. PM₁₀ comparison platform not being installed PSD with platform installed PSD

Year	No. of samples	Without PSD(n=253)		With PSD(n=58)		p-value*
		No. of samples	mean(μg/m ³)	No. of samples	mean(μg/m ³)	
2005	70	70	118.8	0	-	
2006	57	54	108.6	3	93.7	
2007	74	65	111.1	9	106.9	0.000
2008	76	56	110.2	20	90.8	
2009	34	8	88.1	26	61.2	

* statistically significant(p<0.05).

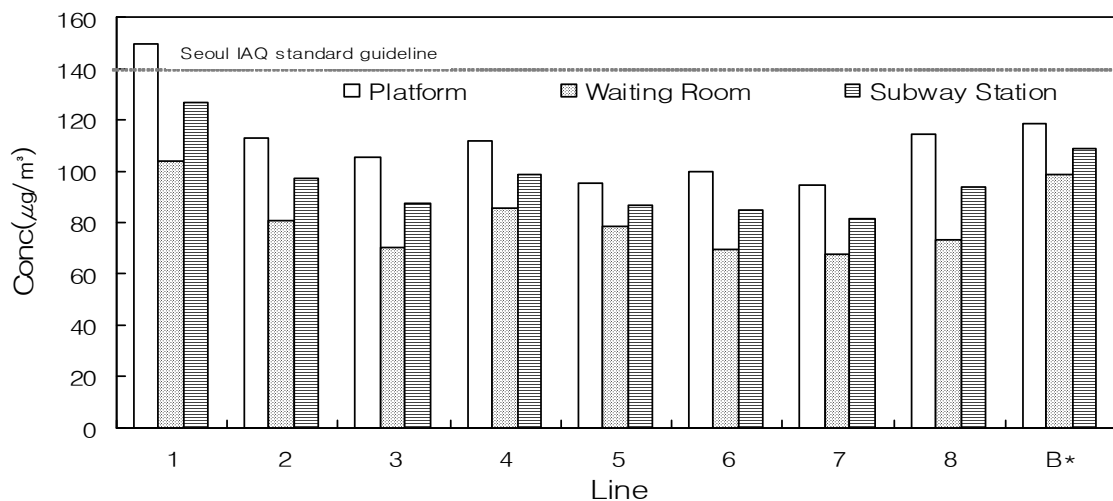


Fig. 1. Comparison of PM₁₀ concentration among subway lines. B* is Bundang line.

1호선의 PM₁₀ 농도가 가장 높게 나타났는데 이는 건설 연도가 오래되어 시설이 노후된 점, 시내 중심을 관통하여 외부의 많은 교통량으로 인한 외기의 영향 및 역사 내 유동인구가 많아 지하역사 내부에서 발생하는 미세먼지 농도가 높은 점 등이 영향을 주기 때문으로 사료된다.

이러한 결과는 2002년 1호선 > 2호선 > 3호선 > 7호선 > 6호선 > 8호선 > 5호선 > 4호선 순, 2003년 1호선(150 μg/m³) > 3호선(130 μg/m³) > 2호선(126 μg/m³) > 7호선(115 μg/m³) > 4호선(109 μg/m³) > 8호선, 5호선(96 μg/m³) > 6호선(88 μg/m³) 순으로 보고한 2002~2003년의 선행 연구와 유사하였다(10~11). Park과 Ha(12)도 가장 오래된 노선인 1호선 지하역사를 대상으로 연구한 결과에서 조사 대상 지하역사 12개소 중 10개소가 유지기준을 초과하였고 이 중 가장 높게 측정된 농도는 207.5 μg/m³라고 보고한 바 있다.

3. 서울시 지하역사의 계절별 미세먼지 현황

그림 2에 계절별 지하역사의 PM₁₀ 농도 수준을 나타내었다. 승강장의 평균 PM₁₀ 농도는 봄 115.6 μg/m³, 여름 103.8 μg/m³, 가을 99.9 μg/m³ 및 겨울 113.4 μg/m³으로 봄 > 겨울 > 여름 > 가을 순으로 나타났다. 대합실의 경우도 이보다 농도는 낮지만 유사한 경향을 보였다. 지하역사 PM₁₀ 평균 농도는 봄 99.9 μg/m³, 여름

91.1 μg/m³, 가을 85.8 μg/m³ 및 겨울 95.2 μg/m³으로 봄과 겨울이 높고 가을과 겨울이 낮게 나타났다. 위와 관련된 자료를 바탕으로 계절에 따른 지하역사의 PM₁₀ 농도가 통계적으로 의미가 있는지를 알아보기 위해 일원배치 분산분석을 수행하였다. 검정결과 검정통계량(F)의 유의확률(p-value)은 0.020으로 계절에 따른 지하역사의 미세먼지 농도 간에 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 차이가 어느 계절들의 차이에서 기인하는지를 검토하기 위해 Duncan의 다중범위검정(multiple range test)에 의해 사후 분석을 수행하여 봄과 가을의 지하역사 PM₁₀ 농도가 통계적으로 유의한 차이가 있음을 알 수 있었다.

통상적으로 지하역사의 PM₁₀ 발생 오염원은 외부와 내부 오염원으로 구분할 수 있으며 본 연구에서 봄의 PM₁₀ 농도가 가장 높게 측정된 배경에는 황사와 같은 외기의 영향을 받았기 때문으로 보이며 여름에는 장마, 가을에는 고기압에 의한 청명한 날씨가 지속되는 점, 겨울에는 저기압에 의한 오염물질의 정체나 축적 등과 같은 외기나 기상 조건으로 위와 같은 결과가 나온 것으로 추정할 수 있다. 이러한 경향은 서울 시내에 소재한 3호선 양재역에서 PSD 설치 전·후의 실내 환경질 평가에 관한 연구를 수행하여 외기 PM₁₀ 농도와 승강장 PM₁₀ 농도 간에 r=0.79로 높은 상관성을 보였으

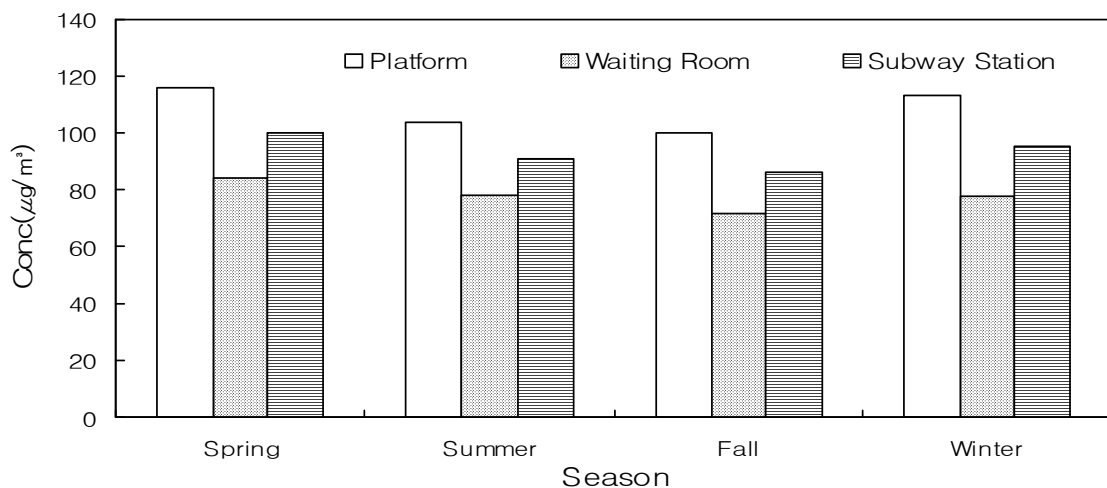


Fig. 2. Seasonal variation of PM₁₀ concentration at subway station.

Table 4. Estimation between outdoor-PM₁₀ and in-PM₁₀ in the subway station (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Season	Outdoor-PM ₁₀			Indoor-PM ₁₀			r	p-value
	Mean.	S.D	Range	Mean	S.D	Range		
Spring	64.6	31.6	21.0~179.0	99.9	27.2	49.3~170.3	0.27	0.000
Summer	47.5	23.1	11.0~113.0	91.1	32.1	28.6~186.7	0.40	0.000
Fall	53.5	27.4	17.0~150.0	85.8	31.0	22.5~184.2	0.39	0.000
Winter	60.3	28.4	31.0~138.0	95.2	33.1	46.0~139.7	0.50	0.000

며 p-value < 0.05로 승강장 PM₁₀ 농도가 외기의 영향을 받는다고 보고한 한 등(13)의 연구와 유사한 결과를 보였다. 또한 서울시의 TMS 자료를 참고하여 외기 일평균 PM₁₀과 지하역사의 일평균 PM₁₀를 비교한 바 계절별로 유의한 차이가 있었으며 r도 0.27~0.50 범위로 나타났다(표 4).

도 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 지하역사의 미세먼지를 저감시키기 위해서는 PM₁₀이 높게 측정된 1호선 지하역사 등에 대한 지속적인 모니터링과 지하역사의 환기 시스템 개선 등이 필요하다고 판단된다.

결론

본 연구에서 2005~2009년까지 서울 지역의 지하역사 PM₁₀를 모니터링 하여 연도별, 노선별, 계절별로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 확인하였다.

1. 2005~2009년까지 연도별 지하역사의 PM₁₀ 평균 농도는 각각 $107.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $91.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $93.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $89.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 $61.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 점차적으로 낮아지는 경향을 보였다.
2. 노선별 PM₁₀ 평균 농도는 1호선 > 분당선 > 4호선 > 2호선 > 8호선 > 3호선 > 5호선 > 6호선 > 7호선 순이었으며 이 중 1호선 $126.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났다.
3. 계절별로는 봄이 $99.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높고 가을에는 $85.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 나타나 계절에 따라 지하역사의 PM₁₀ 농도가 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

위의 결과를 종합하면 서울 지역 지하역사의 평균 PM₁₀ 농도는 점차적으로 낮아지고 있으나 1호선의 PM₁₀ 농도가 높게 나타났고 계절적인 요인

참고문헌

1. 환경부 : 실내공기질관리 업무편람. 2004.
2. 환경부 : 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인. 2006.
3. 관계기관 합동(국무조정실 외 12기관) : 지하철역 공기질 개선대책. 2007.
4. 조영민, 박덕신, 박병현, 박은영 : 수도권 전철 과천시 지하역사의 실내공기질 연구. 한국 대기환경학회 05년 춘계학술대회 논문집, p463~464, 2005.
5. 송지한, 이희관, 김신도, 박성규 : 지하역사내 실내공기질 예측을 위한 모델 개발. 한국 대기환경학회 06년 춘계학술대회 논문집, p189~190, 2006.
6. 김남진, 이상수, 전재식, 김주형, 김민영 : 지하역사 미세먼지농도에 미치는 요인의 평가. 한국 대기환경학회 06년 춘계학술대회 논문집, p571~572, 2006.
7. 신은경, 조영민, 조기철, 권순박, 박덕신, 구혜영, 양성수, 김세영, 빈형구 : 지상과 지하역사의 미세먼지 농도 상관관계 분석. 한국 대기환경학회 09년 추계학술대회 논문집, p364~365, 2009.

8. 하덕호 : 대전지하철 지하역사의 실내공기질 특성평가에 관한 연구. 대전대학교 대학원 공학박사학위논문, 2008.
9. Aarnio P, Yli-Tuomi T, Kousa A, Mäkelä T, Hirsikko A, Hämeri K, Räisänen M, Hillamo R, Koskentalo T and Jantunen M : The concentrations and composition of and exposure to fine particles(PM_{2.5}) in the Helsinki subway system. Atmospheric Environment, 39:5059~5066, 2005.
10. 이동식, 하광태, 정병학, 김동일 : 서울지역 지하역사내 미세먼지 현황에 관한 조사연구. 서울특별시보건환경연구원보, p306~312, 2002.
11. 류인철, 이호찬, 이향덕, 이동식, 이상수, 조기찬, 김동일, 김민영 : 서울지역 지하역사내 미세먼지 현황에 관한 조사연구(II). 서울특별시보건환경연구원보, p353~361, 2003.
12. Park DU and Ha KC : Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea. Environment International, 34:629~634, 2008.
13. 한규문, 김창모, 이진, 서광석, 박영만, 전재식, 김주형 : PSD 설치전·후의 실내환경질 평가. 한국실내환경학회 08년 연차학술대회 논문집, p281~284, 2008.