

■ 論 文 ■

# 지하철 역사 미세먼지(PM10)의 확산방향과 확산속도 추정

(서울 지하철 5호선 개화산역을 대상으로)

Estimation of Diffusion Direction and Velocity of PM10 in a Subway Station  
(For Gaehwasan Station of Subway Line 5 in Seoul)

박 종 현

(서울도시철도공사 기술본부장)

박 재 철

(서울도시철도공사 환경관리팀)

음 성 직

(서울도시철도공사 사장)

## 목 차

I. 서론

- 1. 연구배경 및 목적
- 2. 연구범위 및 방법

II. 연구방법

- 1. 측정장소 및 기간
- 2. 측정방법

III. 결과 및 고찰

- 1. 미세먼지농도의 시간대별 변화패턴
- 2. 미세먼지의 확산방향 및 확산속도

IV. 결론

참고문헌

Key Words : 지하철역사, 미세먼지, 확산방향, 확산속도, 환기시스템  
Subway Station, PM10, Diffusion Direction, Diffusion Velocity, Ventilation System

## 요 약

지하역사 미세먼지의 효율적 저감방안 마련을 위하여 서울지하철 5호선 개화산역 대합실, 승강장, 본선터널 3곳의 미세먼지 농도를 동시간대에 30분 단위로 측정하고, 각 위치에서 측정한 미세먼지농도 변화패턴 사이의 상관관계 분석을 통하여 지하철역사에서의 미세먼지 확산방향과 확산속도를 추정하였다.

지하역사의 미세먼지농도는 본선터널이 가장 높고, 승강장, 대합실 순으로 낮아진다. 본선터널과 승강장, 대합실의 미세먼지농도는 열차운행이 많은 혼잡시간대에는 증가하고 비 혼잡시간대에는 감소하는 패턴을 보인다. 위치에 따른 미세먼지농도의 상대적인 크기와 변화패턴에 대한 통계적 분석결과 본선터널의 높은 미세먼지농도가 승강장으로 확산되고, 승강장의 미세먼지 중 일부가 대합실로 확산되는 것으로 나타났다.

따라서 지하철역사의 미세먼지를 효율적으로 감소시키기 위해서는 본선터널 내 미세먼지 집중발생지점과 발생원, 확산경로, 확산수단 등을 정확하게 파악하여 발생원을 제거하거나 발생량을 저감시키는 것이 중요하며, 환기시스템 가동을 위치별로 미세먼지농도가 높아지는 시간대에 맞추어 가동시킴으로써 전력사용량과 피크전력을 줄일 수 있다.

In order to prepare an efficient solution for PM10 reduction in underground stations, the authors measured PM10 concentration levels every 30 minutes in the concourse, platform, and tunnel of Gaehwasan Station of Seoul's subway line 5. Through a correlation analysis of each changing pattern of PM10 concentration, the direction and velocity of diffusion in underground stations were estimated.

The PM10 concentration levels were highest in the tunnel, followed by the platform and concourse. PM10 concentrations in the tunnel, platform, and concourse showed a pattern of increasing in the rush hours and decreasing in the non-rush hours. According to the statistical analysis of PM10 concentrations and changing patterns in each location, the higher PM10 concentration in the tunnel expanded to the platform, and some from the platform expanded to the concourse.

Therefore, to efficiently reduce PM10 concentrations, it is essential to detect the centralized generation, diffusion factor, expanding route, expanding measure, and other variables and to remove or reduce the diffusion factor and level. Through operating the ventilation system in the right time frame while the PM10 concentration level increases, the power consumption and peak power consumption can be reduced.

# 1. 서론

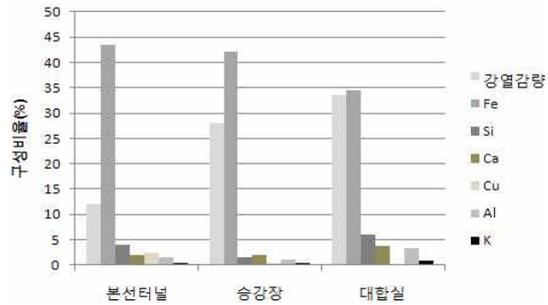
## 1. 연구의 배경 및 목적

최근 서울에 지하철 9호선이 신설되고 모든 버스와 지하철의 무료 환승이 실시되면서 수도권의 1일 지하철 이용은 2009년에 약 730만 명으로 증가되었고 지하철 이용시간도 1회 평균 46분인 것으로 조사되었다. 지하철 이용객 증가와 역사개발 등으로 시민들의 지하역사 이용빈도와 이용시간이 증가하고 있다.

국민의 삶의 질과 건강에 대한 관심이 높아짐에 따라 정부는 실내공기질의 합리적 관리를 위하여 다중이용시설등의실내공기질관리법(2004.5)과 지하생활공간공기관리법(1996.12)을 제정하였다. 동 법에서 지하역사(승강장, 대합실)의 미세먼지농도를 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 관리하도록 규정하고 있다. 서울시는 보다 강화된 미세먼지 관리기준(140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하)을 조례로 제정하여 시행하고 있으며, 연간 1회 이상 미세먼지농도 측정을 실시하여 지하역사에 대한 공기질 관리 감독을 강화하고 있다.

이에 서울시는 지하역사 공기질 개선을 위하여 2009년 말까지 서울지하철 1~9호선 전 역사에 스크린도어 설치를 완료하였다. 서울시 산하 각 지하철 운영기관(서울메트로:1~4호선, 서울도시철도공사:5~8호선, 서울메트로9: 9호선)은 환경관리 전담조직을 두어 지하역사의 공기질 관리를 강화하고 있다. 효과적인 청소방법 개발, 최적의 환기시스템 운영방법 및 운영시간 개발 등을 통하여 기존 기술을 보다 효율적으로 활용함으로써 지속적으로 지하역사 공기질을 개선하고 있다(김민정 등, 2004).

박준환 등(2007)이 연구한 환경정의를 고려한 교통 운영 전략으로 환경적 위험과 건강위험으로부터 모든 사람들이 동등하게 보호 받아야함을 보고한 바 각 지하철 운영기관에서는 지하역사 출입구와 대합실, 승강장을 수시로 청소하여 외부로부터 유입되는 먼지를 제거하고 있다. 본선터널 내 차륜과 레일 사이의 마찰/미끄러짐 등으로 발생하는 철성분의 미세먼지와 소음을 줄이기 위하여 곡선구간 레일에 도유를 하거나 레일의 선형을 개선하는 노력을 지속적으로 하고 있다. 열차운행이 끝나고 나면 고압살수차를 운행하여 터널 내 구석구석에 쌓인 먼지에 고압의 물을 분사하여 털어내고, 뒤이어 물청소 차로 물을 터널바닥에 뿌려 떨어진 먼지를 밖으로 배출



<그림 1> 역사 지하공간 내 미세먼지의 주요 구성원소 비율 (화학시험연구원 시험결과, 2009)

하고 있다(서울도시철도공사, 2010).

서울도시철도공사(2010)는 지하역사의 공기질 관리 개선을 위하여 터널 내 미세먼지의 성분분석을 실시한 결과 <그림 1>과 같이 철(Fe) 성분이 많았다. 여기에 착안하여 열차하부에 10,000 Gauss 이상의 강력한 회도류계 영구자석을 설치하여 열차가 운행하면서 터널 내에 부유되어 있는 철 성분의 미세먼지를 흡착시켜 제거하는 시스템을 도입하여 터널 내 미세먼지를 효과적으로 줄여가고 있다.

열차가 터널 내를 달릴 때 열차의 피스톤 효과로 인해 열차 전방에 발생하는 강한 열차풍이 터널 내 탁한 공기를 밖으로 배출시키며, 반대로 열차 후부에 발생하는 음압에 의해 밖으로부터 맑은 공기가 유입되어 터널 내 탁한 공기가 희석된다(김신도 등, 2004 : 김종호 등, 1995 : Gerhart et al, 1998 : Chen et al, 1998 : Salma et al, 2007 : Johansson et al, 2003). 그러나 서울 제2기 지하철(5~8호선)의 경우 터널의 심도가 깊어 열차운행 시 피스톤 효과에 의한 외부공기와 환기량이 적어, 지하역사 환기는 대부분 본선터널과 승강장, 대합실에 설치된 급기/배기 시스템에 의한 강제환기에 의존하고 있다. 강제환기는 전력소모가 많아 연속적으로 가동하기에는 비용부담이 크므로 환기효과를 극대화하면서 비용을 최소화할 수 있는 최적의 공기질 관리 기술 개발이 요구된다.

지금까지 지하역사 공기질과 관련한 연구는 국가, 도시, 역, 작업장 등에서의 미세먼지농도와 계절/요일에 따른 미세먼지농도 변화(노영만 등, 2007 : Kim et. al.,2008 : Cheng et.al., 2008 : Sohn et.al., 2008 : Bukowieck et.al., 2007) 등을 조사/분석하고, 장소에 따른 미세먼지 구성 및 구성비(송희봉 등, 1999 : Kang et.al., 2008 : Lorenzo et.al., 2006) 등을 조

사/분석하였다. 그러나 미세먼지를 발생시키는 원인과 발생지점을 찾는 연구, 미세먼지 발생을 막거나 줄이는 연구, 발생된 미세먼지가 승강장과 대합실, 열차객실 등으로 확산되는 것을 막거나 줄이는 연구, 발생된 미세먼지를 효율적으로 제거하거나 저감시키는 연구 등은 부족한 실정이다.

## 2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 미세먼지 측정기를 대합실, 승강장, 본선터널에 각각 1대씩 동시에 설치하여 동시간 30분 단위로 30분간의 평균 미세먼지농도를 측정하였다. 각 장소에서 측정된 미세먼지농도의 상대적 크기와 시간대별 변화패턴 분석을 통해 지하역사에서 발생하는 미세먼지의 주된 발생장소와 발생된 미세먼지의 확산방향, 확산속도 등을 파악함으로써 지하역사의 공기질 개선을 위한 노력과 비용을 최소화 할 수 있는 보다 효과적인 전략을 제시하는 것에 연구목적이 있다. 1장 서론에 이어, 2장 연구방법에서는 미세먼지 측정장소와 측정기간, 측정방법 등을 기술하였다. 3장 결과 및 고찰에서는 미세먼지 측정장소 (대합실, 승강장, 본선터널) 에서의 미세먼지 농도 측정결과와 미세먼지 확산방향 및 확산속도 등을 분석하였다. 4장 결론에서는 지하역사에서의 효율적인 미세먼지 관리방안을 정리하였다.

## II. 연구방법

### 1. 측정 장소 및 기간

미세먼지 측정역사는 서울지하철 5호선 개화산역으로 선정하였다. 개화산역은 <그림 2>에서와 같이 역사 외부에 상가, 아파트단지 등이 위치해 있으나 서울 도심에 비해 한적하며 녹지대가 많고, 환기구 주변 도로에는 교통량이 적어 지하역사 공기질에 영향을 줄 수 있는 외부 오염원들을 최대한 배제할 수 있어 지하철 운행으로 발생된 미세먼지의 변화추이 분석을 통해 지하역사 내 미세먼지의 확산방향과 확산속도를 파악하는 데 용이하다.

개화산역은 <그림 3> (a)와 같이 지하1층 대합실과 지하2층 승강장이 연결된 구조로, 심도가 12m 인 비교적 얕은 지하 2층 규모의 역사다. 측정지점은 <그림 2> (b),(c),(d)에서와 같이 승강장과 대합실은 열차운행 시 발생하는 열차풍에 의해 직접적으로 영향을 받지 않도록

통로(계단)를 피하고, 각각의 독립성과 대표성을 확보할 수 있는 승강장 중앙부근과 대합실 중앙부근의 한 지점씩을 측정지점으로 선정하였다. 본선터널은 스크린도어가 설치되어 있어 승강장과는 분리되어 있으므로 측정장비 설치가 용이하고 전원공급이 용이하도록 승강장 끝에서 김포공항 방향으로 약 44 m 떨어진 터널 내 한 지점을 측정지점으로 선정하였다.

대기 중 미세먼지농도가 지하역사에 미치는 영향을 비교하기 위하여 개화산역 외기의 미세먼지농도는 강서구 푸른들청소년도서관에 설치되어 있는 서울시 대기오염자동측정망의 실시간 모니터링 (<http://air.seoul.go.kr>) 값을 인용하였다. 미세먼지 측정은 2009년 9월 11일부터 2009년 10월 17일까지 총 35일간 실시하였다.



<그림 2> 서울지하철 5호선 개화산역 주변 현황



<그림 3> 개화산역 미세먼지 측정지점

2. 측정방법

다중이용시설 등의 실내공기질공정시험기준 중 미세먼지(PM10) 농도의 연속측정은 시료채취용 여과지에 β-ray를 투과시킬 때 β-ray가 흡수되는 양을 측정하여 미세먼지의 중량농도를 측정하는 베타선흡수법(β-Ray Absorption Method)을 사용하였다(환경부, 2010). 측정장비는 FH62C14 Particulate Monitor (Thermo, USA)로 연속적으로 Single Filter Spot에 채취된 미세먼지의 중량농도를 30분 단위로 측정하여 현시하도록 하였다. 측정기의 공기 흡입량은 14.7 l /min으로 일정하고, 시료채취용 테이프 여과지는 Glass Fiber Filter 30 mm Roll (Thermo, USA)을 사용한다.

베타선흡수법으로 24시간 연속하여 시료를 채취하는 동안 입자성분 사이의 상호작용과 습도(수분)의 영향 등으로 미세먼지농도 측정값에 차이가 있을 수 있어 검증 을 위해 소용량 공기포집기(Air Metric, USA)도 같이 설치하여 중량법에 의한 측정을 10회 이상 반복 실시하여 보정하였다[17].

III. 결과 및 고찰

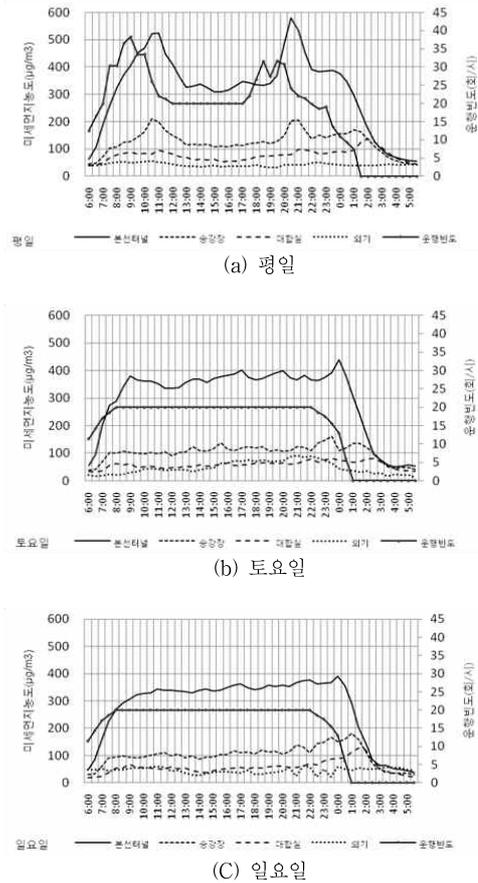
1. 측정지점별 미세먼지농도의 시간대별 변화패턴

<그림 4> 는 개화산역의 열차운행빈도<sup>1)</sup>와 대합실, 승강장, 본선터널, 외기에서 30분 단위로 측정된 미세먼지농도를 평일, 토요일, 일요일로 나누어 각 지점에서의 미세먼지농도 변화를 나타냈다.

개화산역의 열차운행빈도는 평일은 출퇴근 시간대에 높고, 낮 시간대 (11:00~17:00) 에는 일정하며, 야간 (22:00 이후) 에는 급격히 감소하는 패턴을 보인다. 휴일인 토요일과 일요일의 미세먼지농도는 08:00~22:00 사이에 일정하나 야간에는 평일보다 빠르게 감소한다.

본선터널과 승강장, 대합실의 미세먼지농도 변화패턴과 열차운행빈도 변화패턴은 일정한 시간차이가 있을 것을 제외하고는 요일과 관계없이 매우 유사하게 나타난다.

<그림 4> (a)에서와 같이 평일 본선터널의 미세먼지농도는 11:00 와 20:30 에 피크를 보이는 반면, 승강장은 10:30 과 21:00 에 피크를 나타내고, 대합실은



<그림 4> 측정역사 미세먼지농도와 열차운행 빈도

21:30 이후에 가장 높게 나타났다.

대합실, 승강장, 본선터널의 시간대별 미세먼지농도 변화패턴은 측정 장소에 따라 상대적인 크기와 시간에는 차이가 있으나, 열차운행시간 (06:00~24:00) 중에는 장소와 관계없이 열차운행빈도 변화패턴과 유사하다. 열차운행이 끝난 시간 (01:00~03:00) 에 승강장과 대합실의 미세먼지농도가 일시적으로 증가하는 것은 본선터널 환기 가동과 역사청소 등에 의해 먼지가 비산되기 때문인 것으로 추정된다.

개화산역의 측정위치와 요일에 따른 미세먼지농도 변화를 <표 1>에 요약하였다. 본선터널의 경우 법에서 정한 환경관리기준은 없으나 미세먼지 1일 평균농도는 본선터널의 경우 307 µg/m³(평일) ~ 276 µg/m³(일요일) 로 높으며, 승강장의 경우 120 µg/m³(평일) ~ 100µg/m³(일요일) 로 나타났고, 대합실의 경우 74 µg/m³(평일) ~

1) 열차운행빈도=1시간동안 터널을 통과한 총 열차운행횟수(양방향 모두 포함)

<표 1> 개화산역의 요일별 미세먼지농도

구분	평균±표준편차 (μg/m³)			환경기준 (μg/m³)/hr
	평일 (n=1411)	토요일 (n=288)	일요일 (n=288)	
본선터널	307±159	298±134	276±131	없음
승강장	120±54	102±40	100±43	150이하 / 6
대합실	74±27	57±34	57±34	150이하 / 6
외기	42±21	47±31	46±27	100이하 / 24

<표 2> 개화산역 요일별 일일 이용승객 및 열차운행횟수

구분	이용승객 (명/일)	열차운행횟수 (회/일)
평일	13,174	442
토요일	8,886	350
일요일	6,385	350

57 μg/m³(일요일) 로 환경관리 기준 150 μg/m³ 내에서 관리되고 있으며, 외기는 주중 평균이 45 μg/m³ 로 유지 되는 것으로 나타났다.

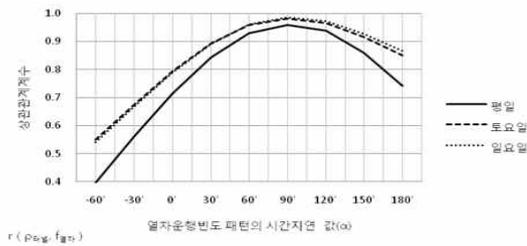
개화산역은 <표 2>에서와 같이 일요일에 비해 평일의 열차운행횟수는 27% 많고, 이용승객은 83% 많은 것으로 조사되어 열차운행횟수의 증가와 이용승객의 증가가 평일 미세먼지농도 증가에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

2. 미세먼지의 확산방향 및 확산속도

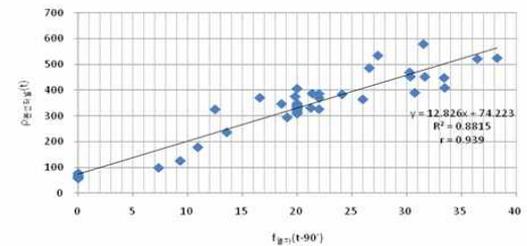
본 논문에서는 개화산역 대합실, 승강장, 본선터널에서의 미세먼지농도를 30분 단위로 측정하고, 각 장소에서 측정된 미세먼지농도의 크기와 시간에 따른 변화패턴을 분석하였다. 그 결과 <그림 4> 에서와 같이 열차운행빈도  $f_{열차}(t)$  변화가 선행하면, 본선터널 미세먼지농도  $\rho_{터널}(t)$  의 변화패턴이 일정시간  $\alpha$  만큼 지연되어 열차운행빈도 변화패턴을 따라간다. 승강장 미세먼지농도가  $\rho_{승강장}(t)$  변하면 일정시간  $\beta$ 만큼 지연되어 본선터널 미세먼지농도 변화  $\rho_{터널}(t)$  패턴을 따라간다. 이러한 두 선행관계로부터 지하역사에서의 미세먼지의 확산방향과 속도를 추정하였다.

<그림 5>와 <그림 6>은 식 (1)에서와 같이 열차운행빈도 변화  $f_{열차}(t-\alpha)$  의 시간지연 값  $\alpha$ 에 따른 본선터널 미세먼지농도 변화  $\rho_{터널}(t)$ 와의 상관관계계수( $r$ , Pearson product-moment correlation coefficient) 를 나타낸 것으로, 열차운행빈도 변화패턴의 시간지연 값이

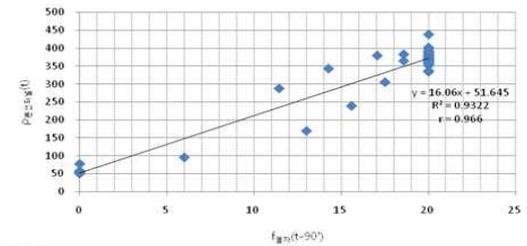
$\alpha = 90$ 분일 때 본선터널 미세먼지농도 변화패턴과의 상관관계계수가 0.948(평일) ~ 0.968(토요일, 일요일)로 최대가 되어 가장 높은 상관성을 보였다. 따라서 개화산역 본선터널의 미세먼지는 열차운행빈도에 비례하여 발생하나 열차운행빈도 보다 약 90분 지연되어 나타나는 것으로 추정된다.



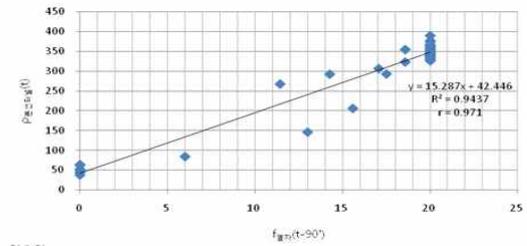
<그림 5> 열차운행빈도의 시간지연 값에 따른 본선터널 미세먼지농도와의 상관관계계수



(a) 평일



(b) 토요일



(c) 일요일

<그림 6> 열차운행빈도와 터널미세먼지농도 사이의 산포도,  $f_{열차}(t-90') vs \rho_{터널}(t)$

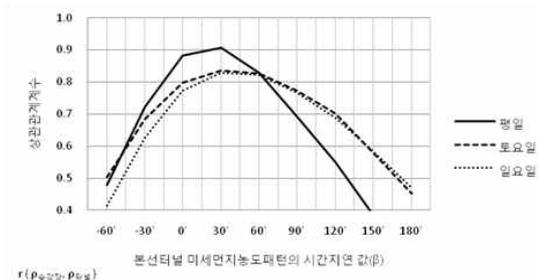
$$r_{\text{열차,터널}} = \text{상관관계계수}(f_{\text{열차}}(t-\alpha), \rho_{\text{터널}}(t)) \quad (1)$$

<그림 7>과 <그림 8>은 식(2)에서와 같이 본선터널 미세먼지농도 변화  $\rho_{\text{터널}}(t-\beta)$  의 시간지연 값  $\beta$  에 따른 승강장 미세먼지농도 변화  $\rho_{\text{승강장}}(t)$  와의 상관관계 계수를 나타낸다. <그림 7>로부터 요일과 관계없이 본선터널 미세먼지농도 변화의 시간지연 값이  $\beta=30$ 분일 때 승강장 미세먼지농도 변화와의 상관관계계수가 가장 높다. 요일별로는 열차운행빈도가 높은 평일이 상관관계가 높게 (R=0.907) 나타났으며, 열차운행빈도가 낮은 휴일은 평일보다 상관관계가 다소 낮게 (토요일: R=0.836, 일요일: R=0.829) 나타났다.

$$r_{\text{터널,승강장}} = \text{상관관계계수}(\rho_{\text{터널}}(t-\beta), \rho_{\text{승강장}}(t)) \quad (2)$$

본선터널과 승강장 미세먼지농도 변화패턴의 상관관계 분석을 통하여 본선터널의 높은 미세먼지 농도가 열차풍 등에 의해 승강장으로 확산되는 것으로 유추할 수 있다. 스크린도어 설치로 인해 열차풍이 승강장으로 직접 전달되는 것은 차단되었으나, 스크린도어의 개폐나 틈새 등을 통하여 미세먼지가 본선터널 측정지점에서 승강장 측정지점까지 확산되는 데는 30분 소요되는 것으로 추정된다.

그러나 <그림 4>에서와 같이 평일 오전 본선터널의 미세먼지농도 피크는 11:00에 발생하나 승강장은 10:30에 피크가 발생하여 마치 시간지연 값이 -30분인 것처럼 보인다. 그러나 이것은 열차운행빈도와 본선터널 미세먼지농도의 곱으로 표현되는 열차풍에 의한 본선터널 미세먼지 확산량이 10:00에 피크가 되고 이후에는 열차운행빈도가 급격히 감소하여 본선터널의 높은 미세먼지농도가 승강장으로 확산되는 세기가 감소하면서 승강장의 미세먼지농도 피크가 일찍 발생하게 되어 나타나



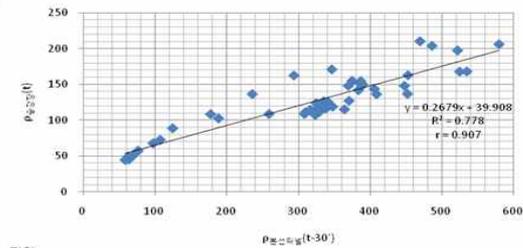
<그림 7> 본선터널 미세먼지농도의 시간지연 값에 따른 승강장 미세먼지농도와의 상관관계계수

는 현상이다. 전체적으로는 본선터널의 영향이 승강장에 30분 지연되어 나타난다.

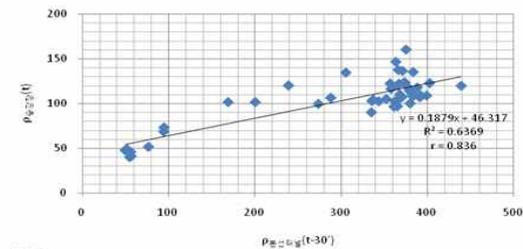
<그림 9>와 <그림 10>은 식 (3)에서와 같이 승강장 미세먼지농도 변화  $\rho_{\text{승강장}}(t-\epsilon)$  의 시간지연 값  $\epsilon$  에 따른 대합실 미세먼지농도 변화  $\rho_{\text{대합실}}(t)$  와의 상관관계 계수를 나타낸다. 승강장 미세먼지농도 변화의 시간지연 값이  $\epsilon = 30$ 분일 때 상관관계계수가 0.677(평일), 0.839(토요일), 0.899(일요일) 로 가장 높게 나타나 승강장의 미세먼지가 대합실로 확산되는 데 약 30분 소요되는 것으로 추정된다.

$$r_{\text{승강장,대합실}} = \text{상관관계계수}(\rho_{\text{승강장}}(t-\epsilon), \rho_{\text{대합실}}(t)) \quad (3)$$

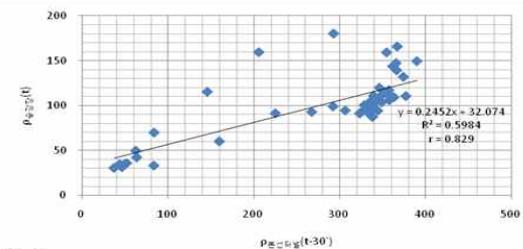
지하역사 내 위치별 미세먼지의 확산방향과 확산속도에 영향을 미치는 요인 중 중요하게 작용되는 것은 열차 운행 시 강하게 발생하는 열차풍과 위치별 온도차에 의



(a) 평일

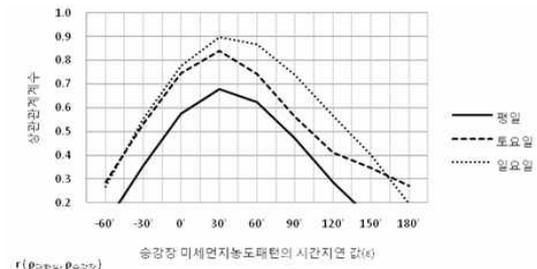


(b) 토요일

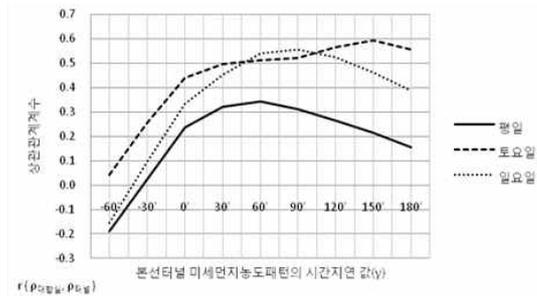


(c) 일요일

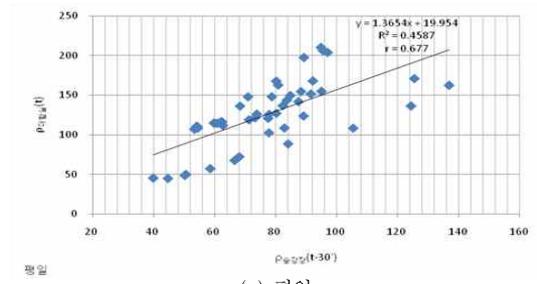
<그림 8> 본선터널과 승강장 미세먼지농도 사이의 산포도,  $\rho_{\text{승강장}}(t)$  vs  $\rho_{\text{터널}}(t-30')$



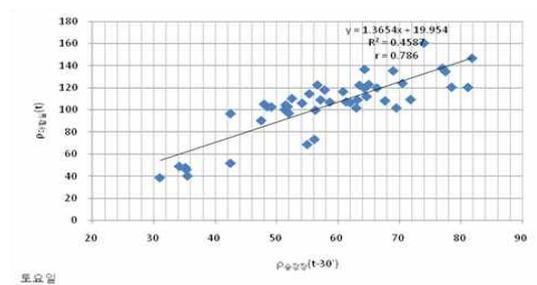
<그림 9> 승강장 미세먼지농도의 시간지연 값에 따른 대합실 미세먼지농도와의 상관관계계수



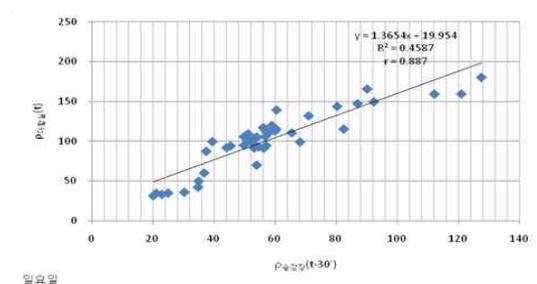
<그림 11> 본선터널 미세먼지농도의 시간지연 값에 따른 대합실 미세먼지농도와의 상관관계계수



(a) 평일



(b) 토요일



(c) 일요일

<그림 10> 승강장과 대합실 미세먼지농도 산포도,  $\rho_{\text{승강장}}(t)$  vs  $\rho_{\text{대합실}}(t-30')$

한 기류형성, 환기에 의한 내외 공기의 교환, 미세먼지농도 차이에 의한 확산 등을 꼽을 수 있다. 그러나 <그림 4>에서와 같이 각 장소에서의 미세먼지농도 변화 패턴이 열차운행빈도 변화 패턴과 상관관계가 높은 것으로 나타

나 열차풍에 의한 요인이 가장 큰 것으로 보이며, 그 외의 다른 요인들에 의해 일시적인 변화가 나타나는 것으로 추정된다.

<그림 11>은 식 (4) 와 같이 본선터널 미세먼지농도 변화  $\rho_{\text{터널}}(t-\gamma)$ 의 시간지연 값  $\gamma$ 에 따른 대합실 미세먼지농도 변화  $\rho_{\text{대합실}}(t)$ 와의 상관관계계수를 나타낸다. 평일일 경우 본선터널 미세먼지농도 변화의 시간지연 값이  $\gamma = 60$ 분일 때 상관관계계수가 0.343으로 가장 높으며, 일요일은 시간지연 값이 90분 이상일 때 상관관계계수가 0.556으로 가장 높고, 토요일은 시간지연 값이 증가할수록 상관관계수가 증가한다.

본선터널과 대합실 미세먼지농도 변화패턴의 상관관계 분석을 통하여 본선터널의 높은 미세먼지 농도가 열차풍 등에 의해 승강장을 거쳐 대합실로 확산되는 것으로 추정된다. 본선터널 측정지점에서의 미세먼지가 승강장 계단을 거쳐 대합실 측정지점까지 확산되는 데는 열차풍의 영향과 출입구로부터 유입되는 외기의 영향 등으로 인해 약 60분(평일) ~ 90분(일요일) 소요되는 것으로 나타났다.

$$r_{\text{터널, 대합실}} = \text{상관관계계수}(\rho_{\text{터널}}(t-\gamma), \rho_{\text{대합실}}(t)) \quad (4)$$

<표 3> 비교 통계량 간 시간지연 값과 상관관계계수

비교 통계량		최대 상관관계 형성 시	
A	B	시간지연(분)	상관관계계수
$f_{\text{열차}}(t-\alpha)$	$\rho_{\text{터널}}(t)$	90	0.968
$\rho_{\text{터널}}(t-\beta)$	$\rho_{\text{승강장}}(t)$	30	0.907
$\rho_{\text{승강장}}(t-\epsilon)$	$\rho_{\text{대합실}}(t)$	30	0.899
$\rho_{\text{터널}}(t-\gamma)$	$\rho_{\text{대합실}}(t)$	60(평일) 90(휴일)	0.556

이상의 관계로부터 본선터널의 미세먼지는 열차운행에 비례하여 발생되고, 본선터널에서 발생된 많은 양의 미세먼지 중 일부가 승강장을 거쳐 대합실로 확산되는 것으로 추정된다.

개화산역의 경우 비교통계량 간에 최대 상관관계가 형성될 때의 시간지연 값과 그 때의 상관관계수를 정리하면 <표 3> 과 같다. 본선터널의 미세먼지는 열차운행빈도 보다 약 90분 지연되어 발생되며, 본선터널의 미세먼지가 승강장으로 확산되는 데 30분 소요되고, 승강장의 미세먼지가 대합실로 확산되는 데 30분이 소요되어 결과적으로 본선터널의 미세먼지가 승강장을 거쳐 대합실로 확산되는 데 평일일 경우 약 60분이 소요되는 것으로 추정된다.

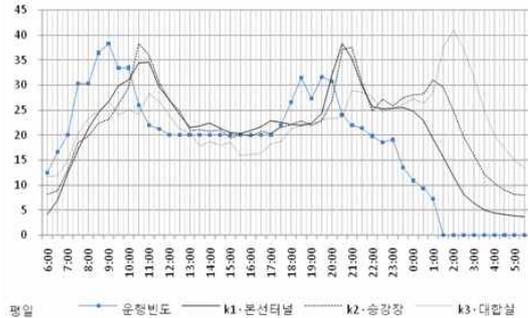
또한, 열차운행빈도와 대합실, 승강장, 본선터널 미세먼지농도 사이의 상관관계를 확인하기 위하여 열차운행빈도 값의 크기를 기준으로 요일별로 대합실, 승강장, 본선터널의 미세먼지농도의 변화패턴을 비교하였다. 미세먼지농도와 열차운행빈도 값에 대해 scale factor를 <표 4>와 같이 정하였고, 이를 적용한 결과를 <그림 12>에 나타냈다.

<그림 12>에서와 같이 전체적으로는 요일에 관계없이 대합실, 승강장, 본선터널의 미세먼지농도가 열차운행빈도 보다 일정시간 지연되어 나타나며, 열차운행빈도와 유사한 패턴으로 변한다.

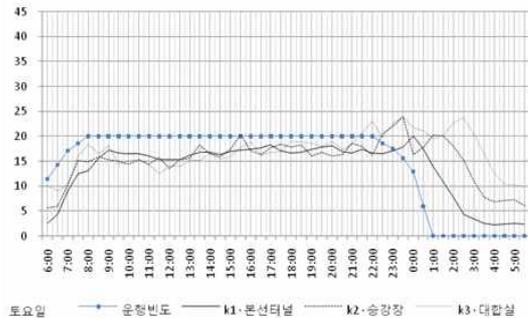
아침에 열차가 운행을 시작하면 대합실, 승강장, 본선터널의 바닥에 가라앉은 먼지가 열차풍에 의해 비산하므로 위치와 관계없이 미세먼지농도가 같은 속도로 증가하여 위치에 따른 시간지연이 적게 발생한다. 이후 시간대부터는 비산된 미세먼지와 새로 생성되는 미세먼지가 열차운행 시 발생하는 열차풍에 의해 이동되거나 확산되므로 위치에 따라 일정시간 지연이 발생하는 것으로 추정된다.

<표 4> 패턴비교를 위한 미세먼지농도 scale factors

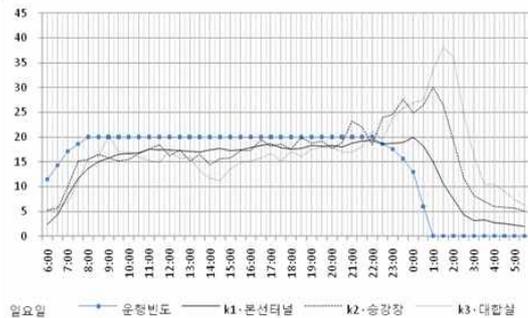
구분	미세먼지농도 scale factor		
	k1(본선터널)	k2(승강장)	k3(대합실)
평일	0.066	0.182	0.299
토요일	0.046	0.150	0.293
일요일	0.051	0.166	0.298



(a) 평일



(b) 토요일



(c) 일요일

<그림 12> 열차운행빈도 패턴을 기준으로 한 본선터널, 승강장, 대합실의 미세먼지농도 패턴 비교

#### IV. 결론

본 논문에서는 지하역사의 효율적인 공기질 관리방법을 개발하기 위하여 대합실, 승강장, 본선터널 사이의 미세먼지 확산방향과 확산속도를 구하였다. 서울지하철 5호선 개화산역을 중심으로 대합실, 승강장, 본선터널에 대한 시간대별 미세먼지농도를 측정하고, 각 장소에서의 미세먼지농도 변화패턴 사이의 상관관계 분석을 통하여 지하역사 내 미세먼지의 시간적, 공간적 확산특성을 파악하였다.

- 미세먼지 측정결과 : 지하철 운행시간 (06:00~24:00) 동안 개화산역 각 측정지점에서의 미세먼지농도는 본선터널이  $294 \pm 156 \mu\text{g}/\text{m}^3$  로 가장 높았고, 승강장과 대합실은 각각  $107 \pm 52.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $63 \pm 37.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  순으로 낮았으며, 외기는  $45 \pm 23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다.
- 미세먼지 발생원 : 열차운행빈도 패턴과 본선터널의 미세먼지농도 변화패턴 사이의 상관관계 분석 결과 열차운행빈도가 90분 선행할 때 두 패턴사이의 상관관계계수가 가장 높은  $r_{\text{열차,터널}} = 0.968$  로 나타났다. 이로써 본선터널의 미세먼지 발생은 열차운행빈도와 매우 밀접한 것으로 나타났다.
- 미세먼지 확산방향 : 본선터널, 승강장, 대합실 미세먼지농도 사이의 상관관계 분석 결과 본선터널의 미세먼지농도 변화가 승강장 미세먼지농도 변화보다 30분 선행한다( $r_{\text{터널,승강장}} = 0.907$ ). 승강장의 미세먼지농도 변화도 대합실 미세먼지농도 변화에 비해 30분 선행한다( $r_{\text{승강장,대합실}} = 0.899$ ). 따라서 평일일 경우 본선터널의 미세먼지농도 변화는 대합실 미세먼지농도 60분 선행하는 것으로 나타나( $r_{\text{터널,대합실}} = 0.556$ ) 결국 본선터널 내 발생된 미세먼지는 승강장을 통해 대합실로 확산되는 것으로 추정된다.
- 미세먼지 확산속도 : 본선터널, 승강장, 대합실 미세먼지농도의 상관관계 분석 결과 본선터널의 미세먼지가 승강장으로 확산되는 데 30분 소요되고, 승강장의 미세먼지가 대합실로 확산되는 데 30분 소요되어, 본선터널의 미세먼지가 승강장을 거쳐 대합실로 확산되는 데 약 60분 소요되는 것으로 나타났다.  
본 연구를 통하여 열차운행에 따라 발생된 미세먼지가 본선터널 내에 확산되고, 본선터널의 미세먼지가 다시 승강장과 대합실로 확산되는 것으로 추정된다. 따라서 역사 전 공간을 동일하게 관리하기 보다는 오염발생원인 본선터널의 환경관리를 중점적으로 선행하는 것이 지하역사 환경관리에 효율적이다.  
또한 열차운행에 따라 발생된 지하역사의 미세먼지가 본선터널과 승강장, 대합실로 확산되는 시간이 다르므로 환기시스템도 지하역사 전 공간을 대상으로 같은 시간대에 동시에 가동하는 것은 비효율적이다. 역과 장소에 따라 미세먼지농도가 최대가 되는 시간대에 맞춰 환기시스

템을 가동함으로써 환기효율을 높일 수 있고, 전력사용 부하의 시간적, 공간적 분산으로 피크전력<sup>2)</sup>을 감소시켜 전력 사용료도 줄일 수 있다.

### 참고문헌

1. 김신도 · 송지한 · 이희관 (2004), 지하철 터널내 운행 열차에 의한 열차풍의 산정, 설비공학논문집 vol. 16, no. 7, pp.652~657.
2. 김종호 · 이상철 · 도연지 · 김신도 (1995), 교통환기력에 의한 터널내 환기량 추정에 관한 연구, J. KAPRA vol. 11, no. 3, pp.273~278.
3. 김현명 · 신동호 · 임용택 · 백승걸(2001), “이질적 지하철승객 기반의 동적 출발시간선택모형 개발 (도심을 목적지로 하는 단일 지하철노선을 중심으로)”, 대한교통학회지, 제19권 제5호, 대한교통학회, pp.119~134.
4. 김운수 · 엄진기 · 황기연 · 장지희(1999), “교통수요 관리 기법을 활용한 환경오염비용의 내부화 방안연구”, 대한교통학회지, 제17권 제4호, 대한교통학회, pp.99~110.
5. 김민정 · 김성수(2004), “한국 도시철도 운영기관의 생산성 : 비모수적 Malmquist 접근법에 의한 분석”, 대한교통학회지, 제22권 제6호, 대한교통학회, pp.35~46.
6. 노영만 · 박화미 · 이철민 외 (2007), 서울시 지하철 객차내에서의 미세먼지 농도 평가, J. of Korean Soc. Occup. Environ. Hy. vol. 17, no. 1, pp.13~20.
7. 박성규 · 김신도 · 이영인(2001), “자동차 대기오염물질 산정 방법론 설정에 관한 비교 연구 (강남구의 실시간 교통량 자료를 이용하여)”, 대한교통학회지, 제19권 제4호, 대한교통학회, pp.35~47.
8. 박준환 · 김원호 · 남두희 · 이영인(2007), “환경정의를 고려한 교통운영 전략 및 평가에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.7~17.
9. 서울도시철도공사(2010), 제34회 서울시 투자출연기관 고객감동 창의경영 우수사례발표 - 최우수상
10. 송회봉 · 신동철 · 황승만 외 (1999), 대구지역 지하철역사의 실내공기질 특성평가, J. of KSEE vol. 21,

2) 100kW이상 사용하는 고압 수용가에 징수되는 전기요금은 검침 당월을 포함한 직전 12개월 중 7, 8, 9월 및 검침 당월 중의 15분 단위 최대 사용전력(피크전력)을 향후 1년간 기본요금으로 적용함.

- no. 9, pp.1673~1688.
11. 황희진 · 오미정 · 강선이 외 (2005), Low-Z particle EPMA 단일입자 분석법을 이용한 지하철 승강장에서 미세입자 특성 분석, 한국대기환경학회지, vol. 21, no. 6, 한국대기환경학회, pp.639~647.
  12. 환경부 실내공기질공정시험법, 고시 제2010-24호 (2010).
  13. Christer Johansson, Per-Åke Johansson (2003), Particulate matter in the underground of Stockholm, Atmospheric Environment 37, pp.3~9.
  14. H.J. Gerhart, O. Kruger (1998), Wind and train driven air movement in train stations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, pp.589~597.
  15. Imre Salma, Tamás Weidinger, Willy Maenhaut(2007), Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station, Atmospheric Environment 41, pp.8391~8405.
  16. Jong Ryeul Sohn, Jo-Chun Kim, Min Young Kim et al (2008), Particle Behavior in Subway Airspace Asian Journal of Atmospheric Environment vol. 2-1, pp.54~59.
  17. Ki Youn Kim, Yoon Shin Kim, young Man Roh et al (2008), Spatial distribution of particle mater (PM10 and PM2.5) in Seoul Metropolitan Subway stations, Journal of Hazardous Materials 154, pp.440~443.
  18. Nicolas Bukowiecki, Robert Gehrig et al (2007), Iron, manganese and copper emitted by cargo and passenger trains in Zürich (Switzerland): Size-segregated mass concentrations in ambient air, Atmospheric Environment 41, pp.878~889.
  19. R. Lorenzo, R. Kaegi, R. Gehrig, B. Grobety (2006), Particle emissions of a railway line determined by detailed single particle analysis, Atmospheric Environment 40, pp.7831~7841.
  20. Sunni Kang, Heejin Hwang, Yoomyung Park et al (2008), Chemical Compositions of Subway Particles in Seoul, Korea Determined by a Quantitative Single Particle Analysis, Environ. Sci. Technol. 42, pp.9051~9057.
  21. T.Y. Chen, Y.T. Lee, C.C. Hsu (1998), Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 73, pp.99~110.
  22. Yu-H Cheng, Yi-Lun Lin, Chia-Chen Liu (2008), Levels of PM10 and PM2.5 in Taipei Rapid Transit System, Atmospheric Environment 42, pp.7242~7249.
  23. 서울특별시도시철도공사  
홈페이지(<http://www.smrt.co.kr>)
  24. 서울메트로공사(<http://www.seoulmetro.co.kr>)
  25. 서울특별시 대기환경정보서비스홈페이지  
(<http://air.seoul.go.kr>)
- ☞ 주 작성자 : 박종현  
 ☞ 교신저자 : 박종현  
 ☞ 논문투고일 : 2010. 6. 23  
 ☞ 논문심사일 : 2010. 8. 13 (1차)  
                   2010. 10. 12 (2차)  
                   2010. 10. 18 (3차)  
                   2010. 10. 21 (4차)  
 ☞ 심사판정일 : 2010. 10. 21  
 ☞ 반론접수기한 : 2011. 2. 28  
 ☞ 3인 익명 심사필  
 ☞ 1인 abstract 교정필