

지하철 공기정화시스템 개선에 관한 연구

A study of improvement on the air filtering system of the subway

김용선*
Kim, Yong-Sun

ABSTRACT

The subway in Seoul, Korea has been constructed and operating 8 lines and 265 subway stations since 1974. And now it' been operated in the metropolis like Busan, Daegu, Gwangju, Incheon. The subway system is being given a great deal of weight on the public transportation system. It means that the citizens of seoul are getting exposed to the underground environment more and more. As the quality of life is getting better, the desire for a pleasant(healthy) environment has been increased. so we have to study effective environment management plans for the subway, When considering Indoor air pollution as another serious environment problem.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

1974년 서울에 지하철이 건설·운영된 이래 현재 서울에는 8개 노선 265개 역사 287km에 이르는 지하철이 건설되어 운영되고 있으며, 부산, 대구, 광주, 인천 등 대도시에도 지하철이 건설되어 운영되고 있다. 지하철이 대중교통에서 차지하는 비중은 날로 증가하고 있으며, 이는 바로 지하철을 이용하는 서울시민이 지하철 이용에 따른 지하환경에 노출되는 확률이 높아짐을 의미하고 있다. 지하철 운영 초기 단계에서는 지하철 역사내 환경 오염 문제는 대두되지 않았으나 지하철 이용 승객의 지속적인 증가와 시설의 노후화 및 역사 주변의 개발 등으로 인한 환경오염과 삶의 질이 향상됨에 따라 건강에 대한 욕구도 커지게 되어 실내공기오염을 또 다른 환경문제로 인식하게 됨에 따라 환경부에서는 1989년 지하공간 환경기준치를 설정한 후 1996.12월 지하생활공간 공기질관리법(2003년 개정)을 제정하였고, 실내공기질의 통합적 관리를 위해 환경부, 보건복지부, 건설교통부, 교육인적자원부, 노동부 등으로 나누어 관리되었던 관리시설을 통합하여 다중이용시설과 신축되는 공동주택의 실내공기질을 알맞게 유지하고 관리함으로써 그 시설을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상의 위해를 예방함을 목적으로 2005.5월 다중이용시설등의 실내공기질관리법으로 법제명 변경 및 대상 관리시설을 확대 시행하게 되었다. 따라서 효율적인 지하철 공기질 관리를 위한 공기정화시스템 개선에 대한 검토가 필요하게 되었다.

2. 지하역사 실내공기질

일반적으로 실내공기는 외기와는 달리 폐쇄성으로 인해 희석이나 확산 할 수 있는 공간이 크지 않아 한번 오염이 되면 비교적 쉽게 악화되어 정화가 어려운 특성을 가지며 자연환기나 공기조화설비에 의해 어느 정도 개선이 될 수는 있으나 오염물질의 지속적인 유입과 누적이 계속되면 호흡기 질환등 일시적, 만성적으로 건강에 관련된 다양한 질환을 유발 하게되어 실내환경이 인간에게 미치는 영향도 매우 크다고 할 수 있다.

* 서울메트로, 기술연구센터, 회원

E-mail : nuripapa@seoulmetro.co.kr

TEL : (02)6110-5835 FAX : (02)6110-5839

도표1. 환경부 실내공기질 관리 현황

구분	주요내용	비고
지하공간 환경기준 권고치	-지하상가, 지하주차장 등 다양한 지하공간에 대한 환경기준 권고치를 설정하여 각 시/도 내 적정관리 -아황산가스, 먼지, 납등 14개 오염물질에 대한 권고치 설정	시행:1989.9.18
지하생활공간 공기질관리법	-다중이용하는 지하역사, 지하도상가를 규제대상 (관계부처 이견으로 통합실내공기질관리법 제정 실패)	제정:1996.12.30 시행:1997.12.31
다중이용시설등의 실내공기질 관리법	- 대상시설 확대 (2시설→17시설) *공중위생관리법, 주차장법,소방법 등의 관리대상 시설물 *교육부 학교보건법, 노동부 산업안전보건법의 관리대상 시설 제외 - 다중이용시설에 대한 유지기준과 권고기준 설정 - 신축 공동주택 측정공고의무 반영 등 *개정안:신축공동주택 권고기준 마련	제정:2003.5.29 시행:2005.5.30

2.1 지하역사 실내공기 오염원

지하역사 실내공기 오염원에 영향을 미치는 요인들로는 크게 오염물질의 외부 유입에 의한 요인과 열차 운행에 의하여 자체적으로 발생하는 요인으로 나눌 수 있다.

도표2. 지하역사 오염원에 기여하는 주요 요인

외부 유입	자체 발생	오염물질의 확산
지하철 이용승객 지하보도 유동인구 강제(기계)환기 시스템 자연환기(외기 출입구)	열차마퀴 마모 레일 마모 브레이크 마모 전차선 마모	열차풍 환기시스템

2.2 오염인자

지하역사 환경오염의 주요 오염원은 지하 역사를 이용하는 승객이나 유동인구의 신발과 옷 등에 묻어 유입되는 토양관련(soil related) 오염원(Ca, Fe, Si, Al, Na, K, Mn 등)과 외부의 자동차 운행에 따른 연소물질 및 마모, 도로분진 등 유입되는 외부복합(outdoor source) 오염원(Cr, Fe, Si, Na, K, Mn, Ni 등), 전동차 운행시 브레이크, 레일마모 등에 의한 철 관련(ferrous related) 오염원(Fe, Cu 등)으로 구분된다.

도표3. 지하역사 주요 오염원

구분	Soil related	Outdoor source	Ferrous related
대합실	20.2%	55.6%	24.2%
승강장	14.4%	29.9%	55.7%
터널	16.0%	18.6%	65.4%
오염원 유입 크기	·PM10 이상 거대입자 ⇒ 외부출입구로 유입 ·2.5<PM10<10 ⇒ 강제 환기로 인한 유입	·미세분진(PM2.5) ⇒ 외부출입구로 유입 ⇒ 자연환기와 강제 환기로 유입	·열차운행과정에서 발생 ⇒ PVT영향으로 승/대 유입 - 크기 : PM

2.3 지하역사 실내공기질

지하역사의 실내공기질은 지하철을 이용하는 승객과 열차운행에 의한 오염발생원 이외에 외기를 들 수 있다. 이러한 지하역사 오염원을 고려하여 환기시 도입되는 외기 중의 대기오염물질을 제거함으로써 지하역사내의 공기질을 개선시킬 수 있다. 지하역사내의 필요 환기량은 이용인원당 25이상(m³/인·h), 환

기횡수는 0.5이상(회/h)으로 법제화 되어 있다. 따라서 외기 급기설비에 필터와 같은 여과장치를 부착하거나 성능을 강화하여 공기오염도를 저감시킬 수 있다. 필터 여과에 의해 미세먼지가 70~90%(비색법)까지 제거 될 수 있다.

도표4. 2007년 서울메트로 공기질 측정결과

구분	항목	PM10	CO2	HCHO	CO	NO2	Rn	VOC	석면	O3
	기준치	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	1,000ppm 이하	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	10ppm 이하	0.05ppm 이하	4pCi/l 이하	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	0.01개/cc 이하	0.06ppm 이하
대합실	최대치	140.8	810.0	30.1	2.1	0.045	2.00	350.4	0.0051	0.032
	최소치	57.3	391.7	13.4	0.1	0.005	0.10	70.6	0.0002	0.001
	평균	99.0	548.8	15.1	0.9	0.023	0.54	178.1	0.0013	0.013
승강장	최대치	170.2	842.6	26.8	2.2	0.040	2.30	355.6	0.0032	0.042
	최소치	92.3	409.8	13.4	0.1	0.005	0.10	66.4	0.0001	0.002
	평균	126.6	558.5	14.1	0.8	0.021	0.67	150.3	0.0013	0.012

3. 지하역사 공기정화 시스템 검토

3.1 지하역사의 공기질 제어

현재 운영되고 있는 지하철의 가장 일반적인 구조는 지하1층에 대합실, 지하2층에 승강장인 구조로 되어 있다. 이와 같은 지하철 역사 내에서의 공기질은 실내공기오염물질의 발생원과 이를 개선하기 위한 제어수단(주로 환기)에 의해 크게 영향을 받게 된다. 지하철 역사내에 존재하고 있는 오염원은 크게 지하철을 이용하는 승객, 운행되고 있는 열차, 그리고 역사밖의 외기 등으로 구분할 수 있다. 지하역사내의 공기질 개선을 위한 제어측면에서는 현재 설치·운전되고 있는 환기장치들을 들 수 있다. 지하역사에 대한 환기는 크게 기계설비에 의한 강제환기와 일반적인 개구부(계단출입구, 환기장치가 설치되어 있지 않은 일반 개구부)를 통한 자연환기를 들 수 있다. 이중 자연환기에 의한 환기효과는 역사내에서의 조건에 영향을 많이 받게 되며, 강제환기에 비해 그 제어가 어렵다.

도표5. 지하철 역사내의 공기오염원 및 공기질 제어

실내공기 오염원	공기질의 제어
지하철 이용승객 지하철의 지하보도 통행인 환기장치에 의해 유입되는 대기오염물질 열차운행에 의한 열차풍	기계설비를 이용한 환기 순수 개구부와 계단출입구를 통한 자연환기 열차운행에 의한 열차풍

3.2 공기정화 시스템 Air Filter 특성 및 설치 사례

도표6. Filter의 특성비교

분류	성능	종류	압력손실 (mmAq)	포집율 (%)	보수방식	오염원제거
건식 (여과식)	초급	패널형	8~13	70(중량법)	정기세정	입경이 큰 분진
	초급	자동로울형	8~13	80(중량법)	여과제체	입경이 큰 분진
	초급	잔공식 Auto Filter	10~25	80(중량법)	자동재생	입경이 큰 분진
충돌접착식	초급	대미스퍼	7~14	70(중량법)	자동세정	Oil Mist, 입경이 큰 분진
정전식	중상능	Cell Filter	15~30	80(비색법)	정기교환	미세먼지, 세균, 담배연기
	중상능	여과정전식필터	8~15	90(비색법)	자동재생	미세먼지, 세균, 담배연기
	중상능	전기집진필터	4~11	90(비색법)	자동세정	미세먼지, 담배연기, 박테리아

도표7. 설치 사례

구 분	데미스터	자동세정형 데미스터	진공식 오토필터	패널형 정전식필터	자동세정형 여재정전식필터	자동세정형 전기집진기	비 고
서울메트로	중량법 70%이상	-	-	중량법 90%이상	중량법 90%이상	-	사용중
	중량법 70%이상			중량법 90%이상		(광촉매) 비색법90%	
도시철도공사	중량법 70%이상	-	중량법 80%이상	-	-	-	사용중
부산지하철	-	중량법 70%이상	중량법 80%이상	-	중량법 90%이상	-	사용중
대구지하철	중량법 70%이상	-	중량법 50%이상	비색법 85%이상	-	-	사용중
인천지하철	-	중량법 80%이상	중량법 85%이상	-	중량법 90%이상	-	사용중
광주지하철	-	중량법 50%이상	-	-	-	비색법 90%이상	사용중
대전지하철	-	중량법 70%이상	-	-	중량법 90%이상	-	사용중
인천국제 공항철도	-	중량법 80%	-	-	-	(광촉매) 비색법90%	설계적용
서울지하철 9호선	중량법 70%이상	-	중량법 80%이상	-	-	(광촉매) 비색법90%	설계적용
서울지하철 3호선연장		중량법 80%	중량법 80%이상			(광촉매) 비색법90%	설계적용

4. 공기정화(Air Filter) 기술

서울메트로에서 사용한 공기정화방식은 외기를 필터로 정화하여 역사에 공급하는 방식으로 지하역사 내부의 공기질(IAQ) 청정도를 유지하기 위해 1,2,3차 공기여과장치를 설치하여 외부에서 유입되는 도로 상의 분진을 제거하여 청정한 공기를 공급하여 실내환경 기준을 유지할수 있도록 하였다.

4.1. 에어필터의 조건

에어필터는 제진용에서부터 반도체 Clean room, 원자력 설비에 이르기 까지 광범위한 용도로 사용되고 있다. 그러나 각 필터는 각기 가지고 있는 특성과 능력을 갖고 있다.

1) 압력손실(resistance(mmAq:H₂O))

Air filter에 공기가 통과할 때 발생하는 손실로 통상 통과하는 풍속의 증가에 따라 압력손실도 비례하여 증가되고 있으며, Air filter에 먼지가 포집되면서 압력손실은 증가하게 된다. 수명과 관련된 최종 압력손실의 결정은 Air Filter의 설치 이후 송풍기의 능력, 효율 등을 고려하여 초기정압의 3배미만(이론적으로 2배정도)이 적절하다. .

2) 분진 포집율/분진 제거율/집진 효율/흡착율(%)

Air filter의 여과전의 분진량에 대한 여과후의 분진량의 비로써 표시하며 여과재의 섬유직경, 충전밀도에 따라 분진 포집율이 변화를 보이거나 여과재의 섬유직경이 작고 충전밀도가 높은 경우 분진 포집율이 대부분 높다. 송풍기를 내장한 장치의 집진효율은 한국공기청정기협회의 실내용 공기청정기 시험규격에 정해진 시험방법에 따라 시험하였을 때 기계식(여재/일반 filter방식)은 70%이상이고, 전기식(전기 집진식)은 85% 이상이어야 한다

3) 정격 풍량

공기조화 시스템에서의 각 필터의 풍속은 초기용(Pre) 및 중성능(medium)의 경우는 2.5m/sec로, 고성능(HEPA) Filter의 경우는 0.8m/sec를 기준으로 하고 있다, 풍속이 증가하면 풍량도 증가하며 또한 압력손실도 증가하게 된다.

4) 분진유지용량(dust holding capacity)

사용시간에 따라 필터에 분진부하가 높아지면 궁극적으로 압력손실이 증가하거나 효율이 감소하게 되어 인위적으로 교체 또는 재생할 필요가 있다. 다음의 3가지 조건 가운데 어느 하나가 도달될 경우 교체 또는 재생한다.

- ① 시험체 필터의 유동 저항인 압력손실이 규정 치에 도달하였을 경우(초기 압력손실의 2배)
- ② 필터의 분진부하에 따른 중량법 입자 포집효율 시험에서 연속적인 두 개의 포집 효율이 최대 포집 효율의 85% 이하일 때
- ③ 중량법 입자 포집율이 최댓값의 75% 도달될 경우
- 5) 에어필터의 교체시기 결정

일반적으로 공기조화 시스템에 사용되는 Air filter의 사용기간은 초기압력손실의 2배 시점을 분진유지용량의 포화시점으로 보아 교체시기를 결정하게 된다.

$$\text{사용기간(Hr)} = \text{분진용량(g)/풍량(m}^3\text{/hr)} \times \text{분진농도(mg/m}^3\text{)} \times 10^{-3} \times \text{포집효율(\%)}$$

※ 여기서 포집효율은 실제 공조시스템의 운전 시에 발생하는 평균효율을 말한다.

6) 에어필터 포집이론

Air filter는 공간율이 높은 섬유 층이기 때문에 입자는 Filter 내의 먼지를 섬유로부터 주로 4가지 효과로서 포집된다.

① 관성효과(inertia)

공기 흐름을 타고 섬유에 접근한 입자는 자신의 관성에 의해 기류로부터 벗어나 Filter의 섬유에 충돌되어 포집된다. 입경, 여과속도가 클 때 이 효과가 나타난다.

② 확산효과(brownies diffusion)

작은 입자는 공기의 흐름과 관계없이 Brown운동을 하고 있다. 따라서 기류를 타고 여재 사이를 통과하는 큰 입자까지도 여재 사이에서 이동거리가 길고 방향성이 없기 때문에 섬유에 걸려 포집된다. 입자 여과속도가 적을 때 효과가 크다.

③ 차단효과(interception)

입자가 공기의 흐름을 타고 운동을 하고 있어도 입자에는 크기가 있기 때문에 Filter의 섬유에 부딪쳐 포집된다. 입경과 섬유공의 비가 클 때 이 효과가 나타난다.

④ 중력효과(gravitational setting)

공기의 흐름을 타고 섬유에 접근한 자신의 중력 때문에 기류로부터 벗어나 Filter의 섬유상에 침착되어 포집된다. 입경이 크고 여과속도가 작을 때 이 효과가 나타난다.

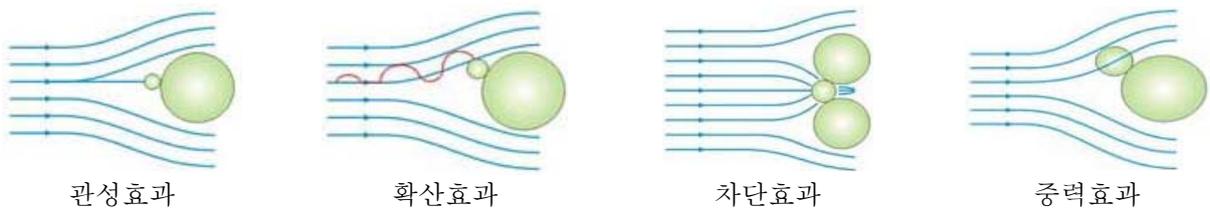


그림1. 에어필터 포집이론

7) 포집효과의 경향

실제로는 위의 효과가 중첩된 입자는 Filter 섬유에 포집되지만, 각각의 효과입자경이나 속도에 의한 변화는 아래 왼쪽 그림과 같은 경향으로 나타난다. 실제의 현상으로 나타나는 Filter 포집효과율도 아래 오른쪽과 같은 경향으로 된다.

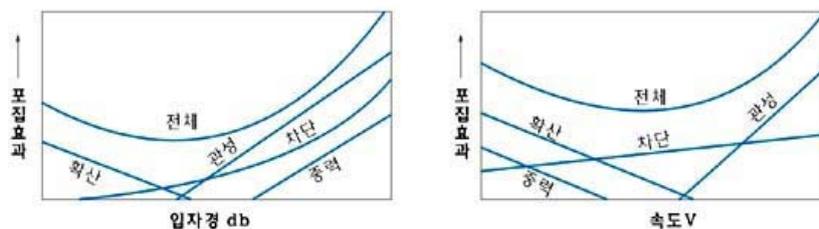


그림2. 포집효과의 경향

5. 서울메트로 적용 에어필터의 종류

서울메트로 공기정화시스템에 사용된 에어필터시스템은 판넬형 부직포 필터, 롤형 부직포 필터, 백

(bag)형 부직포 필터, 코사트론, 오토필터, 연속세정형 전기집진 필터, 자동세정형 여재정전식 필터를 거쳐 현재는 역사냉방화 공사시 미세먼지뿐만 아니라 자동차에서 배출되는 NOx, SO2등 가스상 오염물질을 제거할수 있도록 UV광촉매 전기집진형 복합식 여과 필터를 채택하여 적용하고 있다.



그림3. 서울메트로 에어필터 시스템 변천

5.1 자동재생형 UV광촉매 전기집진형 복합식 여과 필터 구성

UV-광전자/광촉매 공기정화장치는 입자상 분진과 가스상 오염 물질을 동시에 제거하기 위한 공기정화 시스템으로 기존의 전기집진, 여과필터 등의 방식에 비하여 성능과 기능 및 내구성 등을 증대시킨 것으로, 유입되는 공기 중의 먼지를 일차적으로 제거하는 전처리 필터부, 전처리 필터에서 제거되지 않은 먼지를 하전시키면서 유해가스를 플라즈마에 의해 분해시키는 하전/플라즈마부, 하전된 먼지를 집진시켜 포집 후 수세정으로 제거하는 자동재생형 전기집진부, UV와 TiO₂ 광촉매로 코팅된 메쉬(mesh)에 의해 냄새 및 가스를 분해하는 UV-광전자/광촉매부와 전체시스템을 제어하는 제어반 등으로 구성된다.

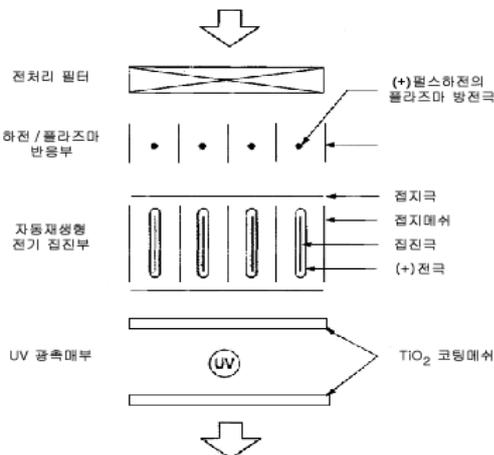


그림4. 공기정화장치 구성도

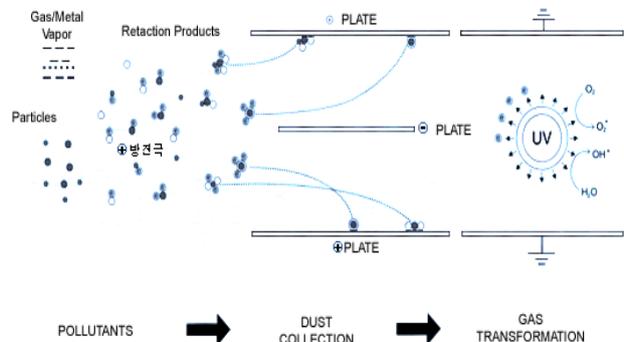


그림5. 분진 및 가스 제거반응 원리도

5.2 필터 시스템 선정시 반영사항

1) 기능적 측면

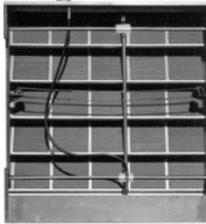
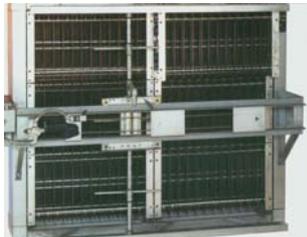
① 관련 법규 및 분진 포집효율

- 다중이용시설등의 실내공기질 관리법 (2005.5.29일부터 시행)
- 매년 발생하는 황사를 제거할 수 있는 필터 시스템
- ② 유해물질 제거 기능
 - 쾌적한 지하 공기질 향상을 위한 미세먼지 및 유해물질을 제거할 수 있는 필터 시스템
- 2) 유지관리측면
 - ① 유지관리의 편리성
 - 유지관리인원을 최소화하는 완전 자동 관리 필터 시스템
 - 잔고장이 없는 간단한 구조의 필터 시스템
 - ② 유지관리비용 절감
 - 필터의 교환 및 폐기가 필요 없는 필터 시스템
 - 자동타이머에 의한 주기적 세정
 - ③ 환경보호
 - 필터의 폐기가 필요 없는 필터 시스템
- 3) 향상된 공기정화장치 시스템
 - ① 집진 효율의 향상
 - ② 에너지절약형 필터 시스템(압력손실이 적은 필터 시스템)
 - ③ 미세먼지(PM10, PM2.5) 및 유해가스 제거가 가능한 필터 시스템

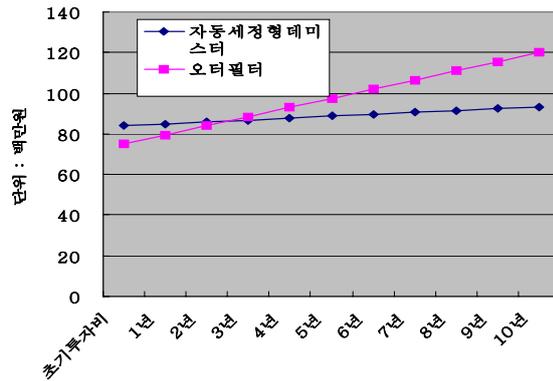
5.3 냉방화공사 역사의 공기정화 시스템 선정

지하철에서의 주요오염원에 대한 조사 자료에 의하면 미세먼지(PM-10)가 기준치를 초과하는 경우가 빈번히 발생하나 기타오염물질은 대부분 기준치 이하로 나타난다(도표4 참조). 따라서 공기정화 시스템은 1차로 외기도입구에 자동세정 데미스터를 설치하여 입경이 비교적 큰 분진 및 Oil Mist를 제거하고, 2차로 공기조화기에 전기집진기+UV필터로 미세먼지, 세균 및 일부 가스상 유해물질 제거가 가능한 공기정화 시스템을 적용하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

도표8. 지하역사 공기정화 시스템

구 분	자동세정 데미스터	자동세정형 전기집진기+UV광촉매
개 요	·데미스터 필터를 경사지게 설치하여 먼지 및 각종 오염물질을 제거	·플러스 플라즈마 고전압에 의하여 하전을 띤 입자가 접지극판에 부착되어 물(세정액)세척에 의하여 제거되며, 유해가스 오염물은 UV광촉매에 의하여 제거
구조사진		
여재재질	STS304 철선	알루미늄 플레이트
집진효율	중량법 70%이상	비색법 90%이상
압력손실	7~14mmAq	8~20mmAq
장점	·여재교환 불필요 ·압력손실이 낮음	·자동운전(타이머), ·여재교환 불필요 ·미세먼지 및 각종 유해가스 제거 ·구조가 간단하여 광범위 사용
단점	·장시간사용시 효율저하 ·물세척에 의한 2차 오염 유발 ·물사용에 따른 유지관리 비용증가 ·동절기 동파방지시설 필요 ·세정수 비산으로 주변 장비 및 덕트 부식	·물세척에 의한 2차 오염 유발 ·물사용에 따른 유지관리 비용증가 ·동절기 동파방지시설 필요 ·세정수 비산으로 주변 장비 및 덕트 부식 ·초기투자비 과다

L.C.C
분 석



기준풍량 : 3,000CMM기준
자동세정형 데미스터가
초기투자비는 오존필터보다
다소 소요되나 유지관리비가
저렴하여 2년2개월 기점으로
경제적으로 나타남

그림6. L.C.C 분석

6. 결론

우리나라에 지하철이 도입된지 30년이 지났을 뿐만 아니라 서울 및 수도권을 비롯한 부산, 대구, 인천, 광주 및 대전등 대도시에는 지하철이 운행 되고 있고 계속해서 연장 및 신규노선을 추가건설 중에 있어 대중교통에서 차지하는 비중은 날로 증가하고 있으며 이는 바로 지하철 이용승객의 지속적인 증가와 더불어 지하환경에서 일상중의 상당부분을 보내고 있는 시민이 증가하고 있음을 의미한다.

일반적으로 지하 실내공기는 외기와는 달리 폐쇄성으로 인해 한번 오염이 되면 비교적 정화가 어려운 특성을 가지고 있다. 따라서 시설 노후화 및 지하철 주변개발등 환경의 변화로 인한 외기의 오염도도 악화되고 있어 쾌적한 실내환경을 유지하기 위하여는 외기 도입시 부터 공기정화를 철저히 하여 청정한 공기를 공급할 필요가 있다

서울메트로에서는 1993년 지하철 1호선을 시작으로 건설된 지 20년이 지난 역사를 대상으로 매년 4~5개 역사의 시설개량이 이루어지고 있으며 시설개량 시에는 당시의 가장 개량된 공기정화 시스템을 검토하여 적용하고 있다. 따라서 공기질개선을 위한 지하철 공기정화시스템은,

- 외기 도입부에는 초기투자비는 다소 증가되나 주기적인 여재교환이 불필요할 뿐 아니라 L.C.C분석 효과가 우수한 자동세정형 데미스터형 필터를 선정하고,
- 공조기 내부 1차측 필터는 미세먼지 및 세균등 입자상물질의 제거가 가능한 자동세정전기집진기를, 2차측 필터는 UV 광촉매를 부착하여 냄새 및 일부 가스상 유해물질 제거가 가능한 UV광촉매 방식을 선정하여 설치하고 있다.

더불어 역사내 공기질 개선을 위하여 급기 환기구 인상, 승강장 스크린도어 설치, 프로그램화된 환기가동을 하고 있으며, 터널내 공기질 개선을 위해서는 분진흡입차 및 고압살수차를 도입 운영하여 상당한 공기질 개선 효과를 보이고 있다.

참고문헌

1. 서울메트로 기술연구센터, 2007, 지하철 공기질개선 기술 제고(공기정화시스템 개선방안 연구)
2. 서울메트로, 2007, 2호선 방배역등 2개역사 냉방화공사 (기계부분) 설계보고서
3. 서울메트로, 2007, 2007년도 지하역사 공기질 측정결과
4. 서울특별시지하철공사, 2003, 지하공기오염 저감방안에 관한 연구
5. 환경부, 2004, 실내공기질관리 업무편람