지하역사의 실내공기질 정화시스템 적용성 연구
Study on the applicability of the indoor air purification system for subway stations

조영민* 박덕신* 박병현** 박은영**
Cho, Young Min Park, Duckshin Park, Byung Hyun Park, Eun Young

---

ABSTRACT

Spending time at indoor place is getting longer due to the civilization. As a result, the management of indoor air quality is getting more important in respect of life quality and health. The pollution of indoor air increases because of the emissions of pollutants from interior materials and the inflow of the outdoor pollutants. Especially, the accumulation of pollutants in the indoor space is often reported because most of the space is air-tight. The Ministry of Environment began to regulate the indoor air quality of the public places. As for now, the subway stations and waiting rooms are now under the regulation of this law. In this study, we installed a air purification system in a subway station, and evaluated the applicability of our system for the removal of volatile organic compounds (VOCs).

---

1. 서론

도시화에 따라 현대인들의 실내공간에서의 활동시간이 더욱 증가하고 있으며, 이에 따라 실내공기질 관리는 삶의 질과 건강 측면에서 매우 중요해지고 있다. 실내공기는 실내 자체의 오염원과 실외 오염물질의 유입으로 오염도가 증가되고 있으며, 특히 밀폐되어 있다는 공간적 특성으로 인하여 오염물질의 축적도 빈번히 발생하고 있다. 이에 따라 쾌적한 실내 활동이 저해되고, 심지어는 건강까지도 위협받고 있다. 미국에서는 1990년대부터 실내공기오염을 가장 시급히 처리해야 할 5대 환경문제 중의 하나로 보고 실내공기질에 대한 연구의 권장과 지원을 시작하였다.

국내에서도 생활수준의 향상과 더불어 건강 및 환경문제에 대한 인식이 고취됨에 따라 지하역사 및 지하상가의 실내공기질을 대상으로 한 “지하 생활공간 공기질 관리법”을 여객터미널·도서관·의료기관 등 다중이용시설과 신축되는 공동주택으로 관리 대상을 확대한 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”을 개정 및 공포하기에 이르렀다 (환경부, 2003).

지하공간에서 문제가 되고 있는 실내오염물질은 미세먼지 (PM-10), 이산화질소 (NO_2), 일산화탄소 (CO), 이산화탄소 (CO_2), 포름알데히드 (HCHO), 미생물성 물질, 휘발성유기화합물(VOC), 악취 등을 들 수 있다. 이와 같은 오염물질은 외부공기의 상태·환기율·실내에서의 미세기후 등의 요인에 의해 일반적으로 발생되며, 공기 중에 장시간 체류하면서 이용 승객들에게 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 지하역사를 대상으로 이러한 오염물질의 농도를 측정하여 오염현황을 파악하고자 하였다. 아울러 본 연구의 주관기관에서 개발하고 있는 지하공기질 정화용 접촉면적등대 촉매 시스템의 제어시스템 개발을 위하여 유동해석을 이용한 지하역사에 대한 적용성을 평가하고자 하였다.

---

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 연구원

2. 실험

2.1 CATIA 형상 설계

본 연구에서는 720CMH급 pilot-scale의 공기정화시스템을 설계, 제작하였다. 이를 위해 CATIA V5R10을 이용한 3차원 형상 설계를 수행하였다. 그림 1은 pilot-scale 공기정화시스템의 3차원 형상 설계를 나타낸 것으로 설계된 공기정화시스템의 정면, 측면, 그리고 후면의 모습이다. 시스템 하부에서 오염된 공기가 유입되면 오존이 분사되고, 촉매 표면에서 오염물질의 분해가 일어나게 된다. 처리된 공기는 잔류오존 제거촉매를 통과하여 실내공기에 적합하도록 오존의 농도를 줄인 후에 상부를 통하여 실내로 유입되도록 하였다.

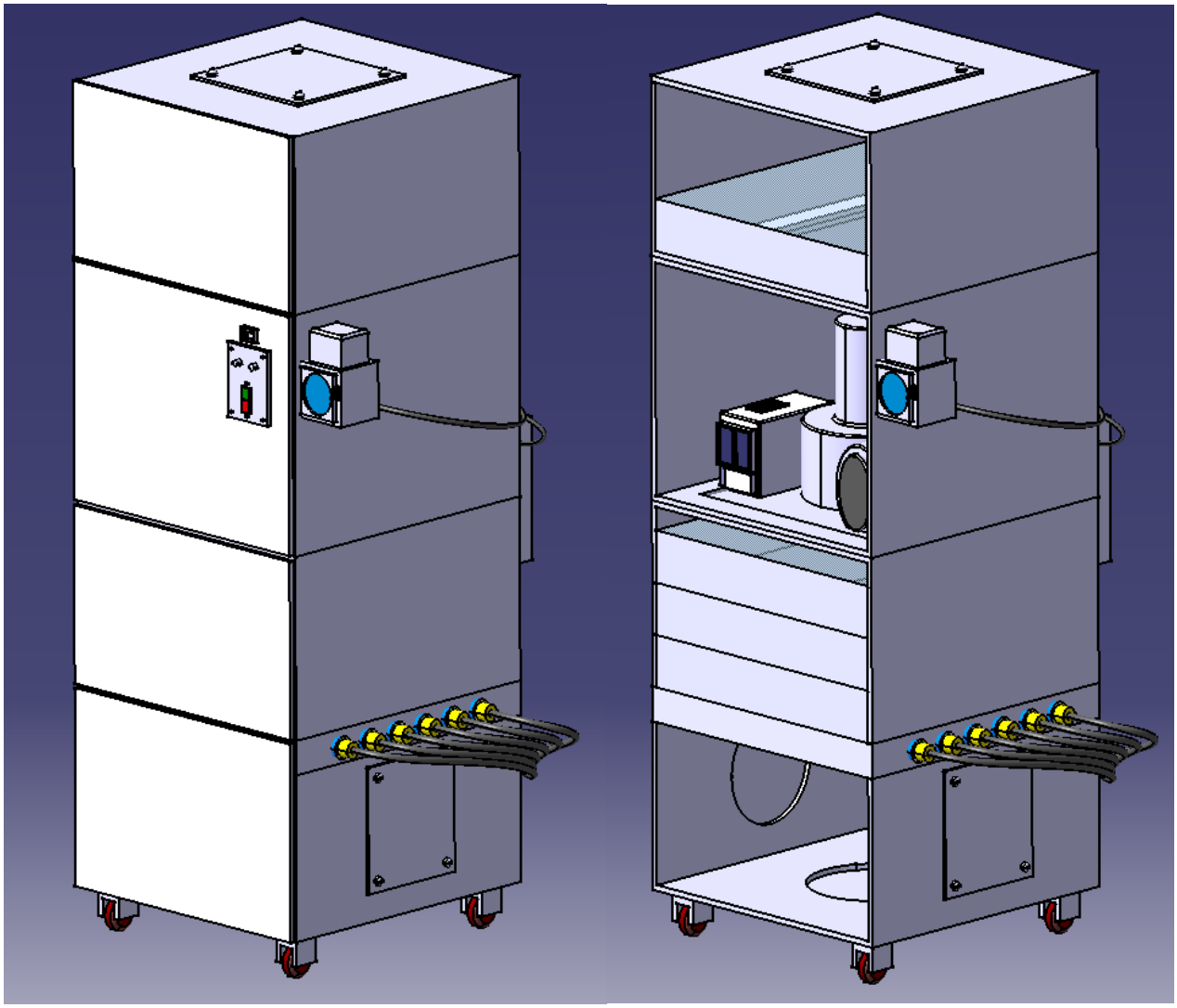

그림 1. Pilot-scale 공기정화시스템의 3차원 형상 설계(좌:겉면, 우:내부)

2.2 시스템 설치역사 선정

사전 자료조사를 통해 시작품을 설치하기에 적합한 장소로 수도권 지하역사인 A역, B역, C역의 3군데를 선정하였고, 그 중 시작품의 설치효과를 확인하기에 최적의 장소를 찾기 위해 각 역사별로 VOCs 배출량 측정 실험을 수행하였다. 이때, VOCs는 채취용 Canister can (SILONITE coated 6ℓ, Entech)을 이용하여 채취하였고, 분석은 GC-MS (HP6890)를 이용하였다.

2.3 시스템 성능실험

본 시스템은 선정역사의 공조실에 설치하였다. 본 공기청정 시스템의 정화효과를 최대한 정확히 확인하기 위해서 장치의 전단과 후단에 연결되어 있는 배관에 측정공을 뚫은 후 측정라인을 연결하였고, 각각의 끝단에 대기샘플 채취용 캐니스터 캔을 설치하여 동시에 테스트용 시료를 채취하였다. 공기청정장치의 시제품은 외부의 공기가 배관을 통해 내부로 공급되는 위치에 설치하였으며, 장치의 용량을 고려하여 처리용량이 비교적 작은 체력단련실로 연결되는 배관을 차단하여 유입공기가 공기청정장치를 통하여 내부로 공급될 수 있도록 설치하였다.

3. 실험결과

다음 표 1은 각 역사별 VOCs 측정결과를 나타낸 것이다. 이 표에 나타난 것과 같이, A역에서 B역과 C역에 비해 Freon 12, Methyl chloride, Ethylchloride, Dichloromethane, 1,1-Dichloroethane, 1,2-Dichloroethane, Benzene, Trichloroethylene, Toluene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, o-Xylene, 1,3,5-Trimethylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene, m-Dichlorobenzene, o-Dichlorobenzene, p-Dichlorobenzene 등의 농도가 높은 것으로 나타났다. 특히, Benzene, Toluene은 다른역에 비해 2배이상 높은 수치를 보였고, Ethylchloride, m-Dichlorobenzene, o-Dichlorobenzene, p-Dichlorobenzene와 같은 물질은 다른 역에서는 검출되지 않고 A역에서만 측정된 것으로 나타났다. 이 결과를 통해 이번 과제를 통해 검증해야할 시제품의 설치장소로 A역을 선정하였고, A역 지하 공조실에 공기청정장치 시제품을 설치하였다.

3.2 처리성능

표 2는 두 차례에 걸쳐 시제품 전·후단에서 측정한 VOCs 측정결과를 나타낸 것이다. 1차 실험 결과를 보면, 시스템 전단에서 포집된 공기에서는 Freon 12, Methyl chloride, Freon 114, Vinyl chloride, Freon 11 , Acrylonitrile, 1,1-Dichloroethene, Dichloromethane, 1,1-Dichloroethane, Chloroform, Methyl chloroform, Benzene, Carbon tetrachloride, cis-1,3-Dichloropropene, trans-1,3-Dichloropropene, 1,1,2-Trichloroethane, Toluene, Chlorobenzene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, Styrene, o-Xylene, 1-Ethyl-4-methylbenzene, 1,3,5-Trimethylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene, m-Dichlorobenzene, p-Dichlorobenzene, o-Dichlorobenzene, 1,2,4-Trichlorobenzene, Hexachlorobutadiene 등의 농도가 높았으나, 시스템을 통과한 후에는 대부분의 물질의 농도가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 특히, Freon 114, Vinyl chloride, 1,1-Dichloroethene, 1,1-Dichloroethane, Chloroform, Methyl chloroform, Benzene, Carbon tetrachloride, cis-1,3-Dichloropropene, trans-1,3-Dichloropropene, 1,1,2-Trichloroethane, Chlorobenzene, m,p-Xylene, Styrene, 1,3,5-Trimethylbenzene, m-Dichlorobenzene, p-Dichlorobenzen, o-Dichlorobenzene, Hexachlorobutadiene 등은 분석결과 공기청정장치 전단부에서 유입된 유해물질이 100% 제거되었고, Freon 11, Acrylonitrile, Toluene, Ethylbenzene, o-Xylene, 1-Ethyl-4-methylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene, 1,2,4-Trichlorobenzene 등은 최대 90% 제거되는 것으로 나타났다.

표 1. 각 지하역사별 VOCs 배출량 측정결과

Compounds	A역	B역	C역
Freon 12	0.25	0.24	0.23
Methyl chloride	0.25	0.20	0.18
Freon 114	ND	ND	ND
Vinyl chloride	ND	ND	ND
Methyl bromide	ND	ND	ND
Ethylchloride	0.06	ND	ND
Freon 11	0.11	0.26	0.49
1,1-Dichloroethene	0.05	ND	0.21
Dichloromethane	11.74	10.07	9.28
Freon 113	0.03	0.03	0.03
1,1-Dichloroethane	0.27	0.14	0.04
cis-1,2-Dichloroethylene	0.52	0.59	0.81
Chloroform	0.04	ND	0.04
1,2-Dichloroethane	0.08	0.05	0.04
Methyl chloroform	0.15	0.23	0.27
Benzene	5.29	2.11	1.12
Carbon tetrachloride	0.03	0.06	0.05
1,2-Dichloropropane	ND	ND	0.04
Trichloroethylene	1.27	1.15	1.13
cis-1,3-Dichloropropene	ND	ND	ND
trans-1,3-Dichloropropene	ND	ND	ND
1,1,2-Trichloroethane	0.87	0.86	ND
Toluene	11.02	6.22	6.26
1,2-Dibromoethane	ND	ND	ND
Tetrachloroethylene	1.81	1.80	1.81
Chlorobenzene	2.19	2.20	2.19
Ethylbenzene	2.88	2.64	2.62
m,p-Xylene	3.61	3.33	3.38
Styrene	3.68	3.72	3.58
o-Xylene	3.31	3.03	3.06
1,3,5-Trimethylbenzene	3.92	3.88	3.87
1,2,4-Trimethylbenzene	4.68	4.57	4.56
m-Dichlorobenzene	4.76	ND	ND
o-Dichlorobenzene	5.03	ND	ND
p-Dichlorobenzene	4.90	ND	ND
1,2,4-Trichlorobenzene	ND	0.03	ND
Hexachlorobutadiene	ND	ND	ND

(ND : Not detected 0.01 ppbv 미만)

2차실험의 VOCs 분석결과에서도 거의 동일한 결과가 나타났다. 시스템의 전단과 후단의 비교해봤을 때, Methyl chloride, 1,3-Butadiene, Ethylchloride, Freon 11 , Acrylonitrile, Benzene, Carbon tetrachloride, Toluene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, Styrene, o-Xylene, 1-Ethyl-4-methylbenzene, 1,3,5-Trimethylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene, m-Dichlorobenzene, p-Dichlorobenzene, o-Dichlorobenzene, 1,2,4-Trichlorobenzene, Hexachlorobutadiene 등의 제거 효과가 나타났다. 특히, Ethylchloride, Carbon tetrachloride, m,p-Xylene, Styrene, o-Xylene, 1-Ethyl-4-methylbenzene, 1,3,5-Trimethylbenzene, p-Dichlorobenzen, 1,2,4-Trichlorobenzene, Hexachlorobutadiene 등은 100% 제거되는 것으로 나타났다.

표 2. VOCs 제거 성능 실험 결과

(단위 : ppbv)

	1차 측정		2차 측정	
Compounds	처리 전 농도	처리 후 농도	처리 전 농도	처리 후 농도
Freon 12	0.77	0.34	0.70	0.73
Methyl chloride	1.10	0.77	1.03	1.00
Freon 114	0.23	ND	ND	ND
Vinyl chloride	0.17	ND	ND	ND
1,3-Butadiene	0.33	0.51	0.07	0.05
Freon 11	0.90	0.24	0.32	0.29
Acrylonitrile	5.93	2.68	3.22	2.33
1,1-Dichloroethene	0.20	ND	ND	ND
Dichloromethane	0.45	0.33	0.31	0.32
1,1-Dichloroethane	2.93	ND	ND	ND
Chloroform	0.29	ND	ND	ND
Methyl chloroform	0.16	ND	ND	ND
Benzene	1.26	ND	0.83	0.05
Carbon tetrachloride	0.11	ND	0.14	ND
cis-1,3-Dichloropropene	0.44	ND	ND	ND
trans-1,3-Dichloropropene	0.56	ND	ND	ND
1,1,2-Trichloroethane	0.46	ND	ND	ND
Toluene	6.16	2.38	3.98	1.72
Chlorobenzene	0.62	ND	ND	ND
Ethylbenzene	0.86	0.04	0.50	0.15
m,p-Xylene	0.85	ND	0.48	ND
Styrene	0.68	ND	0.38	ND
o-Xylene	0.78	0.11	0.44	ND
1-Ethyl-4-methylbenzene	0.72	0.12	0.15	ND
1,3,5-Trimethylbenzene	0.46	ND	0.24	ND
1,2,4-Trimethylbenzene	0.84	0.25	0.72	0.11
m-Dichlorobenzene	1.05	ND	0.61	0.12
p-Dichlorobenzene	2.54	ND	1.56	ND
o-Dichlorobenzene	1.63	ND	0.21	0.06
1,2,4-Trichlorobenzene	2.05	0.68	1.31	ND
Hexachlorobutadiene	0.39	ND	0.16	ND
TVOC	36.92	8.45	19.36	6.93

(ND : Not detected 0.01 ppbv 미만)

3.3 적용성 평가

공기정화시스템의 성능을 평가하고, 시스템의 운전편의성, 안전성 등을 분석함으로써 적용가능성을 평가하였다. 시작품의 성능은 위 결과에 나타난 바와 같이 우수한 것으로 나타났다. 시스템의 운전편의성 측면에서도 비교적 용이한 것으로 나타났으며, 소음도 매우 적은 것으로 나타났다. 안전성 측면에서는 인체에 해로운 오존을 사용한다는 측면에서 다소 위험성이 있으며, 특히 일부 오존이 외부로 유출되어 시스템 표면의 오존농도가 비교적 높게 나타나기도 하여, 이 부분에 대한 보완이 필요한 것으로 보인다. 이러한 문제점이 개선된다면 본 시스템의 규모를 크게 확대하여 지하역사에 설치할 경우, 전체 역사의 공기질을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서 개발한 공기정화시스템 시작품에 대하여 CATIA V5R10을 이용한 3차원 형상 설계를 수행하여 하부의 신선공기 유입구와 상부의 정화공기 유출구 설계를 통하여 하단으로 유입된 신선공기에 오존 노즐을 통하여 오존이 공급되고, 촉매 부분에서 오염물질 분해반응이 일어난 후에 오존분해촉매를 통하여 잔류오존이 분해되도록 설계하였다. 오염도가 높은 A역, B역, C역의 3군데를 우선 선정하였고, 세 역사에 대하여 VOCs 배출량 측정 실험을 수행한 결과, A역의 농도가 높아서 A역을 설치장소로 선정하였다. 시스템의 성능실험을 위하여 A역 공조실에 공기정화시스템 시작품을 설치하고 성능실험을 실시하였으며, 실험결과 시작품 가동시 대부분의 VOCs 농도가 90~100% 감소하는 것으로 나타났다. 특히, halogenated organic compounds와 styrene, xylene, 그리고 benzene계 물질들의 제거효율이 높게 나타나서, 본 연구에서 제작한 시작품의 현장적용성은 우수한 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

건설교통부 보고서 (2002) 지하전철구간의 환경관리방안 및 오염도 저감에 관한 연구.

김동술, 오형석 (1990) Pattern Recognition을 이용한 지하상가에서의 대기오염물질의 농도 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회, 6(1), 1-10.

김진석 (2001) 지하철도의 공기질 향상을 위한 방안연구, 서울산업대학원 학위논문.

배귀남 (2003) 공기청정박람회 논문집, 공기청정기기인용.

서울특별시지하철공사 (2003) "지하공기오염 저감방안에 관한 연구" 보고서

한국철도기술연구원 (2002) “실내쾌적성 향상기술개발” 1차년도 최종보고서.

환경부 (2002) “실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방법 연구” 최종보고서.

환경부 (2003) 지하생활공간 공기질 관리법 개정법률 (다중이용시설 등의 실내공기질 관리법).

H.S. Adams, M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, M.A.S. McMullen, P. Khandelwal, "Fine particle ($PM_{2.5}$) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK", *Sci. Total Environ.* 2001, *279*, 29-44.

J.E. Gómez-Perales, R.N. Colvile, M.J. Nieuwenhuijsen, A. Fernandez-Bremauntz, V.J. Gutiérrez-Avedoy, V.H. Páramo-Figueroa, S. Blanco-Jiménez, E. Bueno-López, F. Mandujano, R. Bernabé-Cabanillas, E. Ortiz-Segovia, "Commuters' exposure to $PM_{2.5}$, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City", *Atmos. Environ.* 2004, *38*, 515-519.

L. Y. Chan; W. L. Lau; X. M. Wang; J. H. Tang, “Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China”, *Environ. Int.*, 2003 *29*, 429-435