

지하역사 덕트 오염과 클리닝 기술

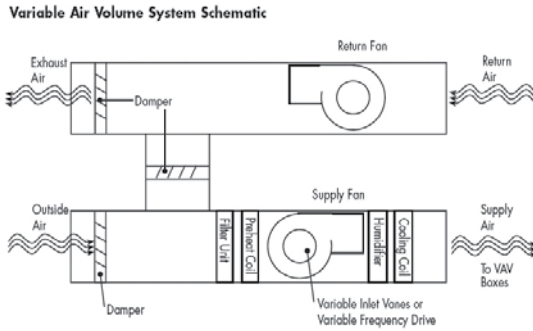
지하역사에 외부공기를 급기하고 내부공기의 순환은 복잡하게 설치된 덕트를 통해서 이루어진다. 본 연구는 덕트내의 오염과 클리닝 기술을 분석하고 한국철도기술연구원에서 개발 중인 자동화된 덕트 청소로봇의 필요성과 그 개발현황에 대해 소개하고자 한다.

지하공간 내에 폐쇄적으로 운영되고 있는 지하역사, 지하상가의 환기 및 급기는 덕트와 공기조화기 등 각종 설비를 통하여 이루어진다. 일반적으로 공조용 덕트는 천장 내에 은폐되어 설치된다. 그리고 공조기에서 각 실의 흡입구 및 취출구에 이르기까지 그 형태와 치수가 변화하게 됨에 따라 굴곡부가 생기게 되며, 또한 이외에도 많은 분기부와 댐퍼류가 설치된다. 덕트 내 통과하는 외부의 공기 및 재순환 공기 중 함유되어 있는 부유분진이 덕트의 굴곡부 내면에 부착, 침강과 더불어 흡착이나 응집 과정을 통하여 서서히 축적되어 실내공기의 오염을 시키는 간접적 요인으로 작용하고 있다.

덕트내의 축적된 오염물질의 조성은 모래, 흙, 합성섬유, 인모 등의 섬유질, 매연 등의 탄소질이 주류를 이루고 있다. 급기덕트 내에 결정질 등의 무기성분과 섬유질 등의 유기성분이 퇴적하고 있으며, 환기덕트 내에는 섬유질이 대부분이고 외기취입 덕트는 모래 등의 결정질 및 탄소질이 퇴적되고 있는 것으로 보고되었다. 덕트의 구조와 특성으로 볼 때 공조장치의 운전 시 생기게 되는 덕트 내의 진동과 기류의 충격에 의해 오염물질의 일부는 덕트 내에서 재비산하게 되는데 이는 다시 취출구를 통해 실내로 배출되게 되며 실내의 오염도가 상승될 수밖에 없게 된다. 덕트 내 마찰을 감소시키기 위하여 표면에 오일을 바르는 작업을 실시하기도 하는데 점성이 높은 오일이 남아있을 경우 덕트 표면에 분진의 축적을 가속화시키기도 한다. 건물용도와 환경, 덕트의 용도와 에어필터의 종류와 관리상황 등이 퇴적물의 조성과 농도의 요인이 된다. 국내에서는 환기

정우태

한국철도기술연구원
에코시스템연구실
wjeong@krti.re.kr



[그림 1] HVAC 시스템의 덕트 환기시스템과 덕트 구조



Dirty duct



Clean duct

[그림 2] Before and after duct cleaning

덕트는 공기를 천장속에서 흡입하여 재순환시키는 천장순환(ceiling return) 방식이 상당부분을 차지하므로 천장속의 오염물질이 덕트 내에 퇴적하게 되는 상황은 더욱 심각하므로 덕트 내의 퇴적물 클리닝이 중요하다.

덕트 클리닝은 HVAC 시스템의 오염원 제거를 위하여 상업적으로 권장되어 왔다. 덕트 클리닝에 의하여 실내공기질의 향상과 산업체 직업병의 감소, 환기시스템의 성능향상 및 수명연장, 에너지 절약, 시스템의 유지관리를 위한 비용절감 등의 이익이 있는 것으로 알려져 있다. **그림 1**은 공기조화시스템의 덕트 환기시스템과 실제 설치된 환기장치 실내의 덕트의 모양을 보여준다(Brosseau et al., 2000; EPA, 1997; NEMI, 2002). **그림 2**는 오염된 덕트의 내부와 청소후의 덕트내부를 비교하였다.

덕트 오염원과 영향

환기시킨 오염된 공기 중 일부는 재유입되어 실내공기 오염을 가중시킬 우려가 있으므로 덕트 내부와 공조기의 청결유지가 필요하다. 해외의 학술보고에 의하면 덕트가 오염되었을 경우 호흡기 질환이 증가한 것으로 분석되었으며(Siever et al., 1996), 산업체 사례조사 결과 오염된 환기시스템에 노출된 두 명의 근로자에게서 과민성 폐렴이 발생하였는데 이는 근무 중에 증가하였다가 휴일에 증상이 감소하는 것을 발견하였다(Bernstein et al., 1998). 국내외의 여러 연구결과에 따라서 덕트의 내부는 그 오염원이 다양하며, 각각의 오염원에 따른 클리닝의 방법도 분리되어야 한다. 덕트의 오염을 발생원인에 따라 분류하면 다음과 같다.

미생물에 의한 오염

도시 내 판매 및 업무시설의 복합용도를 가진 건물을 대상으로 덕트 및 공조기의 주된 오염원인 미생물성 오염물질을 대상으로 오염현황을 측정하는 연구에 의하면 덕트 클리닝이 실내공기환경 개선에 다음과 같이 타당성이 있는 것을 알 수 있다(정영호, 2003). 대상 건물의 클리닝 전과 클리닝 직후, 45일 경과후에 공조기 에어필터 전후단과 덕트의 중간 및 말단에서의 콜로니수를 측정한 결과 클리닝 전후의 콜로니수는 평균 31.4% 감소, 클리닝 후 45일 경과 후 경미한 증가를 보였다. 외기도입 덕트 및 환기덕트를 통하여 실내외의 오염물질이 공기조화기 내부로 유입되어 축적되며 공기조화기 내부의 습기 등에 의하여 세균이 증식하기 때문에 판단된다. 덕트 내부는 미생물 증식의 환경을 제공할 수 있으므로 주의가 요구된다.

분진축적이 세균 번식에 중요한 영향을 미친다는 연구에 의하면, 습도 90%, 분진축적 10~20 g/m²의 조건에서 균류가 성장하는 것을 관찰하였으며(Foarde et al., 2002), 분진축적이 발생하지 않은 덕트인 경우 균류의 성장이 일어나지 않았음을 관찰하였다. 이로 인하여 덕트 내 축적된 분진이 세균 번식에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 환기덕트의 경우 급기덕트에 비해 더 높은 농도로 균류가 서식하는 것이 관찰되고 있는데 이는 환기덕트에서 균류가 서식하기에 알맞은 수분과 영양조건이 더 안정적으로 제공되기 때문으로 판단되고 있다.

급기용 덕트에 축적된 분진의 성분 중 유기물이 약 16-20%, 무기물은 약 12%, 철은 약 0.4%, 마그네슘은 약 4%, 실리콘은 약 14%를 이루고 있는 것으로 나타나서 외부 공기 중 분진의 구성성분과 유사한 것으로 분석되었다. 축적된 분진 내 박테리아의 농도는 1-320,000 CFU/m² 였으며, 균류의 경우 1-250,000 CFU/m² 로 분석되었다. (Pasanen et al. 1997)에 의하면 덕트 내 미생물은 약 5%

이하를 차지하고 있다. HVAC의 구성요소(heat exchanger, cooling coils or humidifiers)에 비해 덕트 내에서의 박테리아 농도는 낮게 관찰되는데, 이것은 미생물 번식 및 성장이 덕트 내 분진 축적뿐만 아니라 온도, 습도 등도 중요한 외부 요인인 것으로 알 수 있다.

덕트 내 분진의 재비산과 실내공기질에 미치는 영향을 분석해 보면, 팬 작동 후 5분 내에 축적된 분진의 재부유가 발생한다. 그러나 덕트 클리닝 후 이러한 현상은 감소하였고, 특히 2 μm 이상의 입자에서 두드러지게 나타났다. 공기의 유속은 덕트 내 분진의 재부유에 직접적인 영향을 미치며, 분진뿐만 아니라 분진 내에 포함된 미생물도 다시 재유입되게 된다. 특히 재부유 시 1 μm 미만의 초미세분진 내에서 Penicillium은 약 400배, Aspergillus는 9.4배, Cladosporium은 약 6.3배 증가하였다. 해외 연구 결과에 의하면 실내 공기 중 1g의 분진 내 백만 마리의 균류가 있는 것을 관찰하였으며, 이는 외부의 약 10배 높은 수치이다. 즉 오염된 HVAC 시스템은 실내 공기오염의 주요 원인이 될 수 있다.

분진축적에 의한 오염

덕트 내 축적되는 분진량은 연간 약 1 g/m²으로 추정되고 있으며, 일부 건축물에서 건축 후 1년 이내에 최대 5.1 g/m²까지 축적되었다는 보고도 있다(Pasanen, 1998). 환기덕트의 경우 중력 침강에 의한 영향으로 다른 덕트의 표면에서 보다 약 2배 이상 높은 분진축적률을 보인다. 일반적으로 높은 유입 속도, 덕트 표면의 거칠기, 덕트의 굽힘 정도, 디퓨저, 댐퍼 등 공기흐름의 방해요인이 있을 경우 덕트 내 분진의 축적이 가속화되는 것으로 알려져 있으며 특히 습도가 증가할수록 분진의 축적이 가속화되는 경향이 있다.

표 1은 덕트 내 축적분진의 평균 농도를 나타낸다. 평균 분진 축적 농도는 0.2-13.2 g/m²였고, 최대 158 g/m²으로 나타난 경우도 있음을 알 수 있

〈표 1〉 Summary of the results on dust settled in the inner surfaces of building air ducts

(DL: Detection Limit).

Survey Year	Building types	Building age(yr)	Mean (range) dust conc. (g/m ²)	Annual dust accumulation (g/m ²)
1990	office, school	3-29	6.8 (1.1-50.9)	0.7
1994	residential	0-45	0.2 (<DL-2.7)	<0.1
1995	office	3-34	13.2 (1.2-158)	1.0
1995	residential	19-37	2.6 (1.9-3.0)	0.2
1997	residential	9-35	6.4 (1.5-26.0)	-
2002	office, school, daycare, cinema	0	0.9 (0.4-2.9)	-
2005	office	4-26	8.8	-

다. 연간 분진축적량은 약 1.0 g/m²로 나타난다. 사무실의 경우 거주지에 비해 높게 축적되는 현상을 보였으며, 여과기 사용 유무와, 효율, 건물의 연수 등 운전 및 관리 상황이 분진의 축적에 중요한 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

덕트 클리닝 기술

오염된 덕트 내부를 청소하기 위한 덕트 클리닝 방법은 건식방법과 습식방법으로 크게 분류된다. 건식방법에는 접촉식 진공방법, 압축공기 이용방법, 기계적 브러싱 방법으로 분류되며, 습식방법은 수동워싱방법, 제트물분사방법, 화학제 이용방법으로 분류될 수 있다.

접촉식 집진방법 (Contact vacuum method)

점검구를 통해서 집진기를 가지고 덕트 내부면을 클리닝하는 전통적인 방법이며 적절하게 관리를 해준다면 효율적인 방법이다. 집진장비가 건물 내부에서 작동되는 경우 고성능 미세분진 제거용 에어필터가 HEPA filter (high efficiency particulate air filter) 장착된 집진 장비는 미세 입자를 포집하기보다는 대기 중으로 다시 살포시키는 경향이 발생한다. 이때 재부유된 분진이 건물 내부를 오염시키는 요인이 되기도 한다.

에어워싱 방법 (Air sweep method)

집진기는 미리 뚫어진 점검구를 통해 클리닝되는 부분의 아래쪽 끝에 연결되며 응축 공기는 스킵 노즐이 끝에 달린 호스를 통하여 덕트로 유입된다. 이 노즐이 축적된 분진이나 부스러기를 털어 공기 중에 섞이게 한 후 덕트를 통해 아래쪽 방향으로 내려가게 한 다음, 집진기가 시스템 바깥쪽으로 흡입해 낸다. 이때 축적분진은 덕트 표면에서 떨어져 공기에 섞여야 덕트시스템 밖으로 배출될 수 있다. 집진기가 옥내의 거주공간으로 배기되는 경우에는 HEPA filter를 사용해야 한다.

파워 브러싱 방법 (Mechanical brush method)

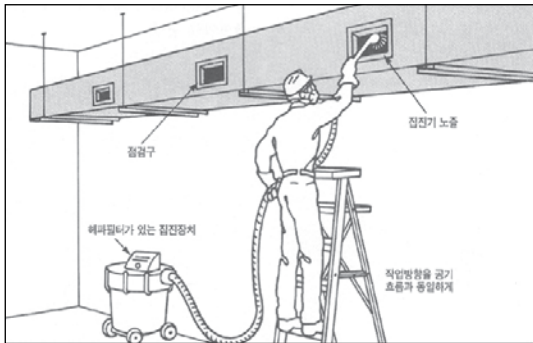
에어워싱과 마찬가지로 집진 장치는 클리닝 중인 구간의 아래쪽 방향 끝 부분의 사전 결정된 점검구를 통해 연결한다. 로터리 브러시를 사용하여 분진과 분진을 털어 공기에 섞이도록 한 후, 덕트 시스템을 통해 아래쪽 방향으로 끌어간 다음 집진기로 흡입한다. 그러나 유리섬유 보강재가 있는 덕트의 경우 덕트 표면을 손상시킬 수 있으므로 주의가 필요하다.

화학적 위생처리제 사용방법 (Chemical disinfection)

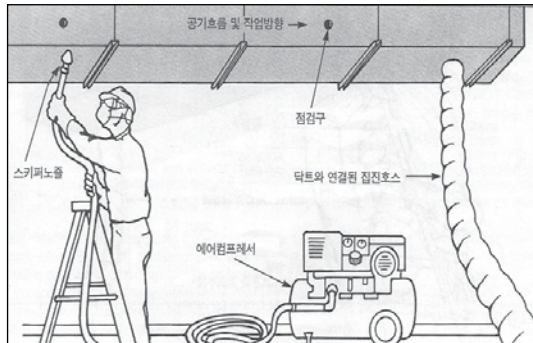
화학적 위생처리제를 넣어 박테리아, 세균, 균

〈표 2〉 DC(duct cleaning) performance in reducing surface dusts, microorganism and residual oil

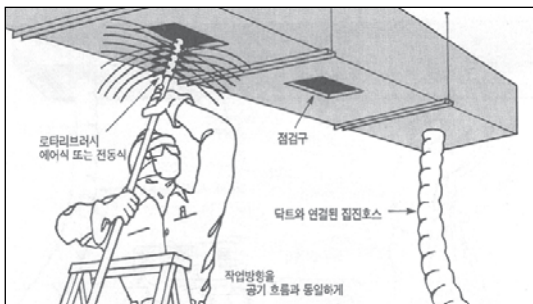
Study	DC method	Pollutant	Pre-cleaning concentration (unit)	Post-cleaning concentration (unit)	Efficiency (%)
Surface dust	Mechanical brush	Dust	2 (g/m ²)	1 (g/m ²)	50.0
	Mechanical brush	Dust	7.3-96.5 (g/m ²)	3.5-13.3 (g/m ²)	32.1-93.6
	Mechanical brush	Dust	0.6-0.9 (g/m ²)	0.1-0.2 (g/m ²)	66.6-87.5
	Compressed air	Dust	5.4 (g/m ²)	0.3 (g/m ²)	94.4
	Mechanical brush	Dust	6.0-8.6 (g/m ²)	0.2-0.8 (g/m ²)	95.0-97.7
	Compressed air		5.3-7.2 (g/m ²)	0.1-1.0 (g/m ²)	86.1-98.6
Microorganisms	Mechanical brush,	Fungi and Bacteria	3.2(CFU/cm ²)	2.3(CFU/cm ²)	26.6
	Contact vacuum	Penicillium chrysogenum	0.01-41 (CFU/cm ²)	0.08-4.8 (CFU/cm ²)	-35.7 to 99.7
	Contact vacuum	Aspergillus versicolor	0.01-1800 (CFU/cm ²)	0.01-0.1 (CFU/cm ²)	0-99.9
Residual oil	Mechanical brush	Residual oil	33-119 (mg/m ²)	16-52 (mg/m ²)	95.0-99.0
	Compressed air	Residual oil	9 (mg/m ²)	15 (mg/m ²)	



[그림 3] 접촉식 집진방법 (ref. NCL Cop.)



[그림 4] 에어워싱 (ref. NCL Cop.)



[그림 5] 파워브러싱 (ref. NCL Cop.)



[그림 6] 브러싱 방법(실사용 예)

류 등을 살균하는 방법이다. 화학적 위생처리제 살포 시 그 효과는 지속적이지 못하며, 덕트시스템을 통해 일부 실내공간으로 유입되어 실내공기 환경을 더욱 악화시킬 우려가 있다. 미생물에 의한 오염에 효과적으로 대처하기 위해서는 덕트 표면의 주요 부분을 항균 처리하는 것이 더 바람직하다.

그림 3~6은 각각의 덕트 클리닝 방법을 나타낸다.

덕트 클리닝 각 방법에 따른 분진제거율은 일반적으로 압축공기 이용방법과 기계적 브러싱방법이 50~99%의 제거 효율을 보이고 있으며 접촉식 진공법은 다른 덕트 클리닝법에 비해 효율이 낮은 것으로 분석되었다(표 2 참조). 덕트 클리닝 각 방법에 따른 미생물 제거율은 환경조건에 따라서 차이가 있지만 대략 압축공기 이용방법과 기계적 브러싱 방법의 효율은 26.6%였으며 접촉식 집진 방법의 효율은 36~99%로 분석되었다. 덕트 클리닝 각 방법에 따른 오일제거율은 기계적 브러싱 방법이 95~99%의 높은 효율을 보이고 있으나, 압축공기 이용방법은 효과가 없는 것으로 나타났다(Holopainer et al., 2003).

기계적 브러싱 방법의 경우 압축공기 이용방법의 경우보다 클리닝 속도가 약 1.6~4.7배 더 빠른 것으로 나타났으며, 그 이유는 압축공기 이용방법의 에어노즐이 매우 좁아 덕트 내부의 모든 지점에 직접 분사시키기가 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 압축공기를 통한 에어노즐 분사 시 매우 심한 소음이 발생하는 단점이 있다.

덕트 내 오일잔여물 제거 시 오일의 끈적임으로 인하여 기계적 브러싱 방법의 경우 일반적으로 양호한 제거효율을 보이거나 일부에서 효과가 없는 것으로 나타났으며, 압축공기 이용방법은 효과적이지 못한 것으로 보고된다. 따라서 초기 건설 시 덕트 내 오일 잔여물의 유입을 차단하는 것이 더욱 바람직한 것으로 판단된다.

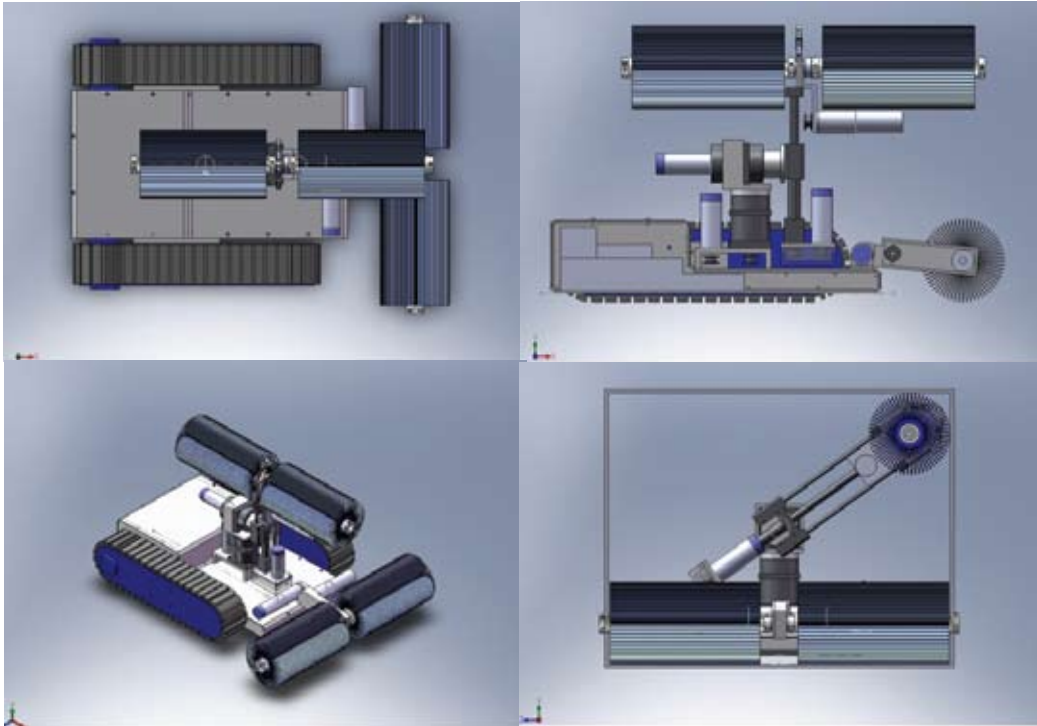
자동화 로봇을 이용한 덕트 클리닝

현재 국내외의 덕트 클리닝 기술은 브러시를 이용한 기계적인 방안이 주를 이루고 있으며, 압축공기를 이용한 에어워싱 방법과 접촉식 진공클리닝 방법이 대안으로 사용되고 있다. 따라서 국내외 기술개발은 주로 클리닝용 로봇을 이용한 형태이며 방법으로는 브러시 방식과 압축공기를 이용한 에어워싱 방식을 동시에 채택한 기술이 주를 이루고 있다. 또한 브러시와 압축공기를 채택한 방안에 외관심사를 위한 카메라 장착 또는 국외에서 일부 채택하는 방안으로 로봇 내 미생물 살균을 위한 화학제를 이용한 청소 방안을 추가적으로 적용하고 있다.

로봇을 이용한 덕트 클리닝 작업

덕트 청소로봇의 개발에는 시스템의 청소를 위한 작업 프로세스가 고려되어야 한다. 국내외의 일반적인 클리닝 작업순서와 조건은 아래와 같다.

1. 클리닝 대상 덕트를 완전 밀봉 및 고출력 집진기 설치 후 로봇을 덕트 내 삽입하여 조정장치를 이용한 수동조작으로 덕트 클리닝을 수행한다.
2. 브러시가 장착된 이동로봇을 클리닝 디바이스로 사용하며 이 때 압축공기를 이용한 에어워싱 방법을 동시 채택하였고 부유분진과 축적분진은 집진하여 제거한다.
3. 로봇의 클리닝 수행절차는 원격조정에 의하여 모니터를 통해 감시할 수 있다.
4. 사각수평 덕트는 일반적으로 좌우회전 최대 90도, 상하경사도 최대 30도, 가로 폭 50~80 cm, 세로높이 30~50 cm이다.
5. 축적분진은 다양한 여기장비를 통해 덕트 내부표면에서 흡착력을 감소시켜 떨어뜨린다. 이때 여기장비 및 수단으로는 브러쉬, air whip, 압축공기노즐, skipper ball등을 이용하거나 수동식 또는 접촉식 진공청소장비를 이용한다.



[그림 7] 개발중인 자동화된 덕트 클리닝 로봇

6. 클리닝을 하는 동안 덕트 내에 오염물질이 재비산되어 외부로 유출되는 것을 예방하기 위하여 연속적으로 부압상태에 있게 한다.

7. 부압상태에서 여기된 미세분진은 실내공간으로 재비산되어 유입되지 않으며 클리닝 이후 시스템이 가동시 실내유출을 막기 위하여 집진하여 제거한다.

덕트 클리닝 로봇

효율적인 덕트 청소로봇은 4면에 도달이 가능한 로봇암의 설계가 필요하며 브러시를 일정한 접촉력을 유지하면서 덕트면에 접촉시키기 위해서는 브러시와 로봇암사이에 컴플라이언스 디바이스를 이용하여 접촉력을 제어할 필요가 있다. 그림 7은 4면 청소를 가능하게 하는 청소로봇의 기본 설계를 보여 준다. 또한 클리닝시 이동로봇의 횡방향 위

치 및 진행각도는 3개 이상의 접촉식 거리센서 또는 초음파 센서를 사용한다.

이때 이동로봇 플랫폼 상에 장착된 로봇암의 위치제어 시 이동로봇의 위치측정은 매우 필수적이다. 이러한 위치측정을 기반으로 이동로봇을 덕트 중앙으로 위치제어하면서 일정한 속도로 전후진을 제어하는 자율주행 기능을 포함할 필요가 있다.

결론

최근 관심이 증대되고 있는 지하역사 공기질 문제는 대상공간의 환기설비가 중요한 역할을 하며, 특히 공조기와 연결된 덕트내의 오염은 지하공간의 공기질에 직접적 영향을 미친다. 본 연구를 통해 덕트의 여러 오염원과 영향을 살펴보고, 다양한 클리닝의 방법과 효과에 대해서 살펴보았다. 일반적으로 덕트 내부의 공기는 공조기나 유입구 등

에 설치된 필터에 의해서 1차적으로 정화되고 있으나, 시간이 지날수록 그 오염도는 심각한 수준에 도달되고 있다. 특히 덕트 내부의 오염물과 먼지의 관리에 대한 규정이 미비하고, 공조 덕트의 경우 천장 등 밀폐공간에 설치되어 지속적인 청소를 위한 관리가 어렵다. 이러한 문제점을 인식하여 최근에는 자동화된 기계적 클리닝 방법의 개발이 많이 이루어지고 있으며, 특히 한국철도기술연구원에서는 자동화 및 자율화, 고속 클리닝, 오염실태 파악을 위한 내부모니터링 및 감시기술을 통합한 형태의 자동화된 클리닝 로봇을 개발하고 있다. 이 연구를 통해 보다 실용적이고 이용이 쉬운 덕트 클리닝 기술 보급이 기대되며, 로봇을 통한 효과적인 덕트 클리닝 기술은 공조시스템 운영의 에너지 절약효과와 함께 쾌적한 실내공기질 유지에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 말

본 연구는 환경부의 환경산업선진화기술개발 사업의 지원으로 이루어졌으며, 기술적 도움을 주신 분들과 지원에 대해 지면을 빌어 감사드립니다.

참고문헌

1. 정용호, 안병욱, 공조시스템의 오염 현황에 대한 실측, J. Korean Soc. Living Environ. Sys. Vol.10, No.1, pp.41-46, 2003.
2. Foarde, K. Menetrez, M., Evaluating the potential efficacy of three antifungal sealants of duct liner and galvanized steel as used in HVAC systems, Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, Vol.29, pp.38-43, 2002.
3. Holopainen, R., Asikainen, V., Tuomainen, M., Bjorkroth, M., Pasanen, P., Seppanen, O., Effectiveness of duct cleaning methods on newly installed duct surfaces, Indoor Air, Vol.13, pp.212-222, 2003.
4. Morey, P.R., Experience on the contribution of structure to environmental pollution, In: Kundisin, R.B. (ed.), Architectural Design and Indoor Microbial Pollution, New York, Oxford University Press, pp.40-79, 1988.
5. Pasanen, A.L., Kujanpaa, L., Pasanen, P., Kalliokoski, P., Blmquist, G., Culturable and vital fungi in dust accumulated in air ducts in single-family houses, Indoor Air, Vol.7, pp.121-127 (1997).
6. Pasanen, P., Emissions from the filters and hygiene of air ducts in the ventilation systems of office buildings, Doctoral dissertation, University of Kuopio, Japan (1998). 
1. 정용호, 안병욱, 공조시스템의 오염 현황에 대한 실측, J. Korean Soc. Living Environ. Sys.