보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( ),
발간등록번호(11-B551201-000127-01), ISBN(979-11-89761-72-1)

철도기술연구사업 제5차년도 최종보고서

R&D/18RTRP-B082486-05

나노기술을 적용한 지하구간 오염물질 제거기술 개발 최종보고서

2019. 8. .

총괄연구기관 / 한국철도기술연구원
주관연구기관 / 한국철도기술연구원
케이엔제이엔지니어링㈜
재료연구소

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

18RTRP-B082486-05

나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발 최종보고서

2019

국토교통과학기술진흥원

국 토 교 통 부

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( ),
발간등록번호(11-B551201-000128-01), ISBN(979-11-89761-73-8)

철도기술연구사업 제5차년도 최종보고서

R&D/18RTRP-B082486-05

도시철도 터널 Hot Spot 구간 관리기술 개발 최종보고서

2019. 8. .

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / 경희대학교
케이엔제이엔지니어링㈜
재료연구소
위탁연구기관 / 성균관대학교
가천대학교
서울교통공사
대구도시철도공사

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

18RTRP-B082486-05

도시철도 터널 Hot Spot 구간 관리기술개발 최종보고서 2019

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'도시철도 터널 Hot Spot 구간 관리기술 개발 '(연구개발 기간 : 2014. 9. 8 – 2019. 05. 30) 과제의 요약보고서 2부를 제출합니다.

2019. 8.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원 나 희 승 (인)

공 동 기 관 명 : 경희대학교 산학협력단 이 범 석 (인)

재료연구소 이 정 환 (인)

케이엔제이엔지니어링(주) 이 인 정 (인)

주관연구기관책임자 : 한국철도기술연구원 박 덕 신 (인)

공 동 기 관 책임자 : 경희대학교 김 동 술 (인)

재료연구소 정 수 호 (인)

케이엔제이엔지니어링(주) 안 희 석 (인)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18RTRP-B082486-05	해당 단계 연구 기간	2018-01-01 ~ 2019-05-30	단계구분	5/5
연구사업명	중사업명	철도기술연구사업			
	세부사업명	철도기술연구사업			
연구과제명	대과제명	나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술			
	세부과제명	도시철도 터널 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발			
연구책임자	박덕신	해당단계 참여연구원 수	총: 52 명 내부: 34 명 외부: 18 명	해당단계 연구비	정부:1,304,000천원 민간: 440,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 1,744,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 명 내부: 명 외부: 명	총 연구비	정부: 4,699,800천원 민간: 1,620,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 6,319,800천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국철도기술연구원, 경희대학교, 재료연구소			참여기업명 KNJ엔지니어링㈜	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 성균관대학교 가천대학교 서울교통공사 대구도시철도공사			연구책임자: 김태성 이영철 오태석 김원달	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

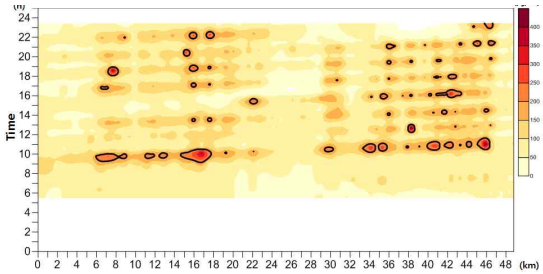
요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수

요약문

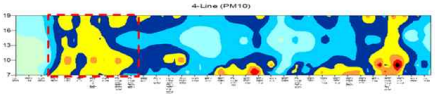
연구개발목표	○ 본 연구과제의 최종목표는 국민이 체감할 수 있는 수준의 지하구간 공기질 확보를 위한 실시간 오염물질 제거기술 개발이며, 이를 위해서 1세부과제는 다음의 목표를 설정하였음. ● 도시철도 터널 공기질 Map 작성 및 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발 ● 시범노선 초미세먼지/미세먼지 농도 30% 이상 저감
연구개발내용	○ 연구개발 목표 : 도시철도 터널 공기질 Map 작성 및 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발 ● 초미세먼지/미세먼지 제거를 위한 전도성 및 자기장 융합 필터기술 개발 ● 터널 공기질 실시간 모니터링 시스템 제작 및 도시철도 공기질 Map 작성 ● Hot Spot 구간 공기질 모니터링 시스템 구축 ● 1, 2, 3세부과제 연구성과 시제품의 시범노선 구축 및 현장 성능평가
연구개발성과	○ 도시철도 터널 공기질 관리기술 ● 도시철도 터널 공기질 오염도 MAP ● 도시철도 터널 공기질 측정장치 ● 도시철도 Hot Spot 구간 공기질 모니터링 시스템 ● 미세먼지 제거용 전도성 필터 및 기능성 필터 ● 도시철도 운영기관 중장기 환경개선 로드맵
활용계획 및 기대효과	○ 정부에서 추진하는 지하철공기질 개선계획에 대한 현실적인 해결책으로 활용 가능 ○ 도시철도 운영기관의 환경 관리지침으로 사용 가능 ○ 전국 도시철도의 공기질을 통합하여 관리 할 수 있는 프레임 제공 ○ 외국 지하철에 본 연구의 개발품을 수출 가능 ○ 전국 도시철도 공기질 오염원 파악 및 모니터링으로 통합 관리 가능 ○ Hot spot 구간의 미세먼지/초미세먼지 제거 시스템으로 활용 ○ 전국 도시철도의 공기질 지도 제공을 통한 대국민 홍보자료 이용 ○ 도시철도 터널의 유형별 관리 기술 발전에 기여 ○ 다양한 오염 유형별 특성평가를 통한 최적 관리방안 활용 가능 ○ 수도권뿐만 아니라 전국적으로 운행중인 도시철도 터널의 공기질 개선을 위한 장치로서 지하터널 내 공기질 개선을 통한 이용승객 및 근로자의 건강증진 ○ 전 세계적으로 지상구간의 사용율 증대와 교통 혼잡을 예방하기 위해 대도시를 중심으로 도시철도 가동율이 증가하고 있음. 이에 따른 지하공간 공기질 개선을 위한 기술로 활용이 가능함

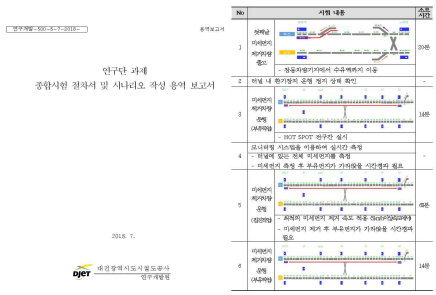
중심어 (5개 이내)	나노기술	공기질 지도	초미세먼지 (PM2.5)	미세먼지(PM10)	필터시스템

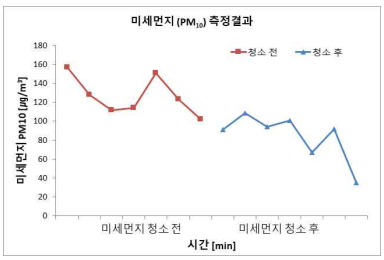
연구개발 성과 요약문

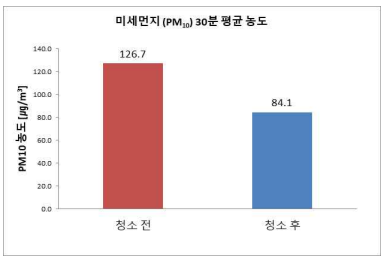
<table>
<tr>
<td>도시철도 Hot Spot
구간 공기질
관리기술 개발</td>
<td>
○ 전국 도시철도 터널 공기질 오염도 지도 작성 (PM_{10}, $PM_{2.5}$)


< 도시철도의 터널 PM_{10} 오염도 지도 >

○ 연구단 개발기술의 종합평가를 위한 도시철도 시범노선 선정 및 평가 시나리오 작성
<table>
<tr><th>호선</th><th>구간</th><th>PM10 농도</th><th>차량기지 접근성</th><th>환기 조건</th><th>선정 순위 (안)</th></tr>
<tr><td>2호선</td><td>시청-충정로-아현-이대-신촌</td><td>△</td><td>○</td><td>○</td><td>3</td></tr>
<tr><td>3호선</td><td>가락시장 - 수서 - 일원 - 학여울</td><td>△</td><td>◎</td><td>◎</td><td>2</td></tr>
<tr><td>4호선</td><td>수유-미아-미아사거리-길음
-성신여대입구</td><td>◎</td><td>◎</td><td>◎</td><td>1</td></tr>
</table>
◎ 상, ○ 중, △ 하


<도시철도 시범노선 선정>

<시범노선 종합평가 시나리오>

○ 시범노선의 연구 성과물 복합적용에 따른 미세먼지 저감 성능평가 및 터널 미세먼지 33.6% 저감 달성 (공인시험기관의 성적서 확보)


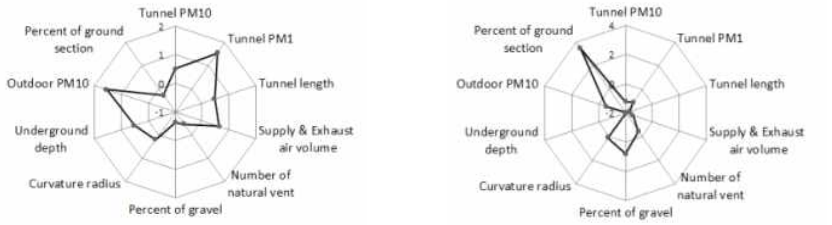


< 개발 기술의 시범노선 적용에 따른 미세먼지 농도 감소 >
</td>
</tr>
<tr>
<td>도시철도 Hot Spot
구간 공기질 모니터링
시스템 개발</td>
<td>
○ 철도 터널 환경에 적합한 미세먼지 측정 장비 개발
○ 도시철도 실시간 공기질 모니터링 시스템 구축 및 운용 (서울지하철 2호선, 4호선)

<미세먼지 측정장비>




<공기질 모니터링 시스템 설치 및 웹 페이지>
</td>
</tr>
</table>

<table>
<tr>
<td>도시철도 터널
미세먼지의 특성 및
오염원 파악</td>
<td>○ 시범노선 터널 구간 내 미세먼지의 물리 화학적 특성 파악
○ 다변량 통계분석을 이용한 전국 도시철도 터널의 오염원 유형 분류
 

<전국 도시철도 터널의 오염원 유형 분류 예시></td>
</tr>
<tr>
<td>도시철도 공기질 개선
중장기 로드맵 작성</td>
<td>○ 도시철도 환경협의회, 전문가 자문을 통한 도시철도 공기질 개선 중장기 로드맵 작성
○ 전문가 자문을 통한 중장기 로드맵의 타당성 검증
 

<도시철도 공기질 개선 중장기 로드맵></td>
</tr>
<tr>
<td>나노기술을 적용한
전도성 필터 및 기능성
필터 개발</td>
<td>○ 전도성 필터, 자성 필터를 포함한 기능성 필터 시스템 개발 및 도시철도 현장 테스트
 

<기능성 필터 시스템 제작 및 도시철도 현장 성능평가></td>
</tr>
</table>

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 01

가. 연구개발의 필요성 ····· 01

나. 연구개발의 중요성 ····· 05

다. 연구개발의 최종목표 ····· 10

2. 연구개발 동향 분석 ····· 15

가. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과 ····· 15

나. 국내외 관련 기술 특허 동향 ····· 16

다. 국내외 시장 분석 및 산업 동향 ····· 20

라. 종합결론 ····· 23

3. 연구수행내용 ····· 24

가. 나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 ····· 24

나. 도시철도터널 Hot Spot 구간 공기질 종합관리기술 ····· 32

다. 나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발 ····· 71

라. 중장기 환경개선 로드맵 ····· 82

4. 연구 성과 ····· 94

가. 기술적 성과 ····· 94

나. 경제적 성과 ····· 95

다. 연구 개발 성과 ····· 96

5. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 102

가. 연구목표 달성도 ····· 102

나. 정책제안가능성 ····· 104

6. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 105

가. 기술수요처 대상 성과알림 홍보 및 사업화 추진 ····· 105

나. 상용화 계획 ····· 106

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 필요성

○ **지하철 운영 측면**에서 보면 전국 도시철도 노선은 20개, 역사는 564개소, 1일 이용객 수는 7,068천명 수준임.

< 전국 도시철도 운행현황 >

(2013년말 기준)

구 분	전국 (총계)	수도권			부산	대구	광주	대전
		소계 (전국대비)	서울.경기	인천				
노선수(개)	20	12(60%)	11	1	4	2	1	1
역사수(개소)	564	356(63%)	327	29	107	59	20	22
1일 이용객수(천명)	7,068	5,675(80%)	5,405	270	868	367	49	109

※ 수도권 도시철도 운영은 서울메트로 (1~4호선), 서울도시철도공사 (5~8호선), 서울9호선운영(주) (9호선), 인천교통공사 (1호선), 한국철도공사 (과천선, 분당선, 일산선)에서 수행

○ **미세먼지 (PM_{10}) 농도 측면에서 수도권 대기질**의 경우 연도별 PM_{10} 농도는 감소추세이나, 2013년 들어 중국발 스모그 영향 등으로 PM_{10} 농도가 증가하고 있음.

○ **도시철도 역사**의 경우 2013년 PM_{10} 평균 농도 (81.7 ㎍/㎥)는 실내공기질 유지기준 (150 ㎍/㎥) 이하이나, **수도권 대기질 평균 (49 ㎍/㎥)**보다 **1.67배 정도 높은 수준**임.

< 도시철도 역사 미세먼지 농도 >

(2013년말 기준, 단위 : ㎍/㎥)

구 분	평 균	서울메트로	서울 도시철도공사	인천 교통공사
PM10 농도	81.7	91.0	79.5	68.4

※ 측정방법 : 「실내공기질 공정시험기준」 의거, 승강장, 대합실, 연결통로 등을 대상으로 외부 측정전문기관에서 측정 (연 1회, 중량법으로 측정)

○ **터널의 공기질**은 대체적으로 **지하역사 보다 2배가량 높은 수준**으로 서울메트로 도시철도 (1~4호선) 터널의 경우, 2013년 PM10 평균 농도 (178.1 ㎍/㎥)가 지하역사 (91 ㎍/㎥)보다 1.96배 높고, 수도권 대기질 평균 (49 ㎍/㎥)보다는 3.63배 높음.

※ 터널 공기질 측정의무에 대한 강제규정은 없으나, 서울메트로의 경우 자체적으로 전문기관에 의뢰하여 측정 (베타선흡수법)

○ 서울 도시철도 5호선 개화산역 터널의 경우 2009년 PM_{10} 농도가 307 ㎍/㎥ (평일)~276 ㎍/㎥ (일요일) 수준으로 측정된 바 있음*.

* 출처 : 대한교통학회지 제28권 제5호, 2010

○ 그 간 미세먼지 저감대책 추진 내용을 보면 **「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」**에 의거, 지하역사 내 공기질만 관리 (1997~)하고 있으며, 적용대상은 도시철도 지하역사*이며, 관리내용으로 실내공기질 유지기준 (PM_{10} 150 ㎍/㎥) 및 실내공기질 측정의무 (연 1회) 등을 규정.

* 지하역사 : 출입통로, 대합실, 승강장 및 환승통로와 이에 딸린 시설을 포함

○ 도시철도 지하역사는 관리 규정에 따라 연 1회 측정하나, **터널은 관리 규정에서 배제**되어 자체측정을 실시함.

※ 이용객이 많은 지하역사는 자동측정망을 설치하여 상시 모니터링 실시

(환경부 2개소(수유역, 동대문역), 서울메트로 4개소(시청역,동대문역사역,충무로역, 서울역)

○ 환경부에서 **「제2차 지하역사 공기질 개선 5개년 대책 (2013~2017)」**을 수립하여 시행중으로 도시철도 지하역사 PM_{10} 농도저감 목표 : 75 ㎍/㎥(2015년), 70 ㎍/㎥ (2017년).

○ 미세먼지 관리강화를 위해 **미세먼지 발생 차단, 발생 미세먼지 저감, 모니터링 및 평가시스템 구축** 등의 추진과제를 마련하였음.

○ **도시철도 운영기관에서는 지하역사 공기질 개선을 위해** '70~80년대 건설된 자갈도상 구간을 단계적으로 콘크리트로 개량하고, 열차풍에 의한 미세먼지의 지하역사 확산차단을 위해 스크린도어의 설치를 완료하였고, 환기 송풍기 교체, 공기 여과장치 교체 및 신설 등 역사 내 환기 용량을 증대하고, 외부유입 공기질 관리를 위해 지상 높이가 1m 미만인 환기구에 대한 입지조건 평가 및 개선 등의 대책을 마련하여 시행중임.



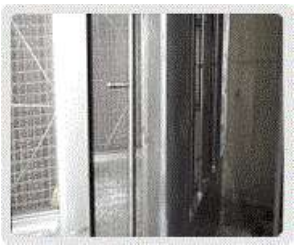
콘크리트 도상 개량 | 스크린 도어 설치 | 환기구 높이 인상 | 환기구 조형화

<지하역사 공기질 개선을 위한 도시철도 운영기관의 대책 예시>

○ **도시철도 터널 공기질 개선을 위해** 고압 물청소 차량 및 분진 흡입차량 운영, 전기집진장치 등 고효율 집진장치 시범 설치 및 운영 등을 시행 중임.


고압 물청소 차량


분진 흡입차량


전기집진장치


공기정화장치

<지하 터널 공기질 개선을 위한 도시철도 운영기관의 대책 예시>

○ 도시철도 **터널의 미세먼지 농도는 수도권 대기질에 비해 높아서 환기를 통해 외부로 직접 배출시 도시 대기질 악화요인으로 작용**할 수 있음.

※ 수도권 대기 (49 ㎍/㎥) > 지하역사 (81.7 ㎍/㎥) > 터널 (178.1 ㎍/㎥, 서울메트로)

○ **터널**에서 **발생**하는 **고농도 미세먼지**는 승강장을 통해 대합실로 확산*되는 등 **지하역사 전체로 이동**.

* 출처 : "지하철 역사 미세먼지 (PM_{10})의 확산방향과 확산속도 추정" 논문 (2010, 박종헌 등)

○ **2014년 3월 23일부터 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」에 대중교통수단이 포함**되었고, **미세먼지 및 이산화탄소의 관리기준이 강화**되었으며, 지하철 및 지하도상가 실내공기질이 실내환경관리시스템(http://cleanindoor.seoul.go.kr)에 공개, 언론보도 등으로 시민들의 관심이 집중되고 있음.

< 대중교통수단 실내공기질 관리기준 >

(노선 1회 운행시 평균값 기준)

교통수단	미세먼지 (PM_{10})	이산화탄소 (CO_2)	
도시철도	200 ㎍/㎥	2,500 ppm 이하	2,000 ppm 이하
철도, 버스	150 ㎍/㎥		

※ 도시철도 : 혼잡시간 (주중 7:30~9:30, 또는 18:00~20:00
철도, 버스 : 혼잡시간 (주말, 휴일 또는 성수기)

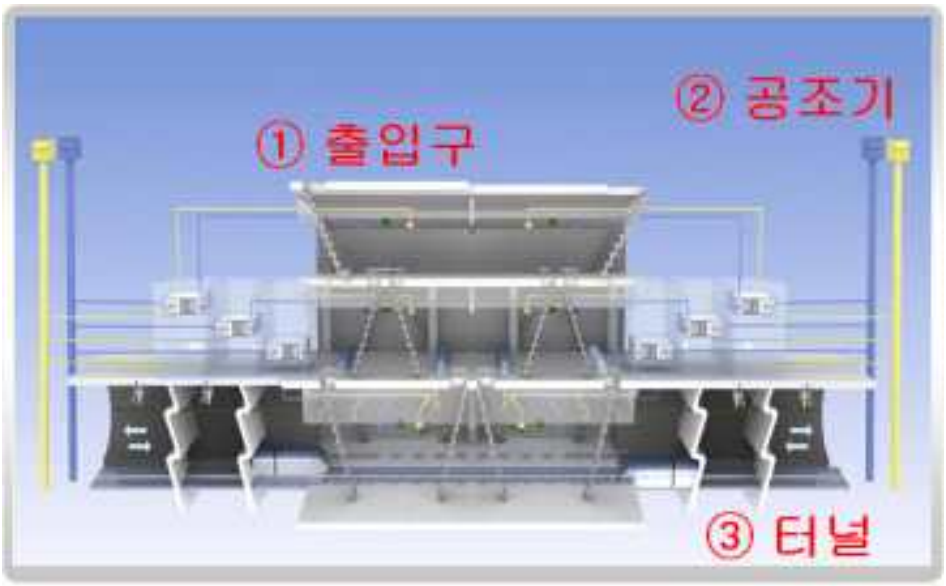
○ **환경부**에서는 관련 연구*를 통해 지하역사 및 전동차의 **미세먼지 및 초미세먼지에 대한 대중교통수단 실내공기질 관리목표를 단계별로 강화**하고 있음.

* 출처 : 제3차 지하역사 공기질 개선대책 (2018~2022)

< 지하역사 및 전동차 실내공기질 관리목표 >

구 분		현행 (2014)	1단계 (2018)	2단계 (2023)
전동차	PM_{10}	200 ㎍/㎥	70 ㎍/㎥	50 ㎍/㎥
지하역사		140 ㎍/㎥	70 ㎍/㎥	50 ㎍/㎥
역사.전동차	$PM_{2.5}$	기준없음	45 ㎍/㎥	45 ㎍/㎥

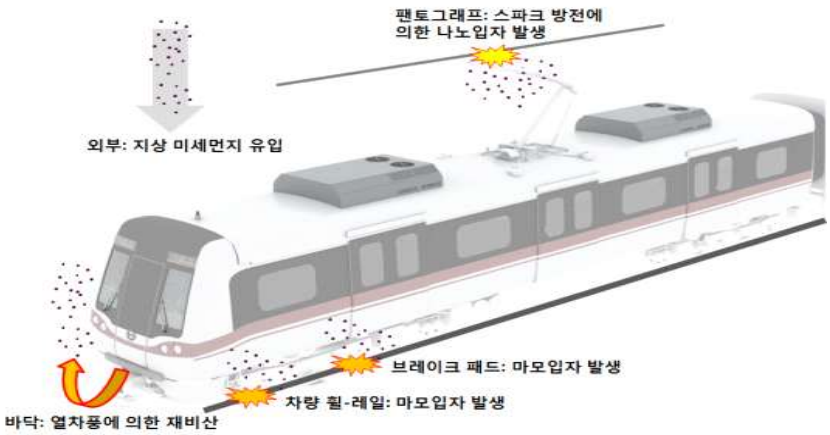
○ 수도권 도시철도 터널 환기시스템의 경우 1호선과 2호선 일부는 자연환기시스템으로 운영되고 있고, 2호선 일부와 3~9호선은 강제 환기시스템으로 운영되고 있음.



< 도시철도 오염물질 유입경로 >

○ 당초 도시철도 지하역사 및 터널 공기질 관리를 위해 **환기시스템을 24시간 가동하였으나 피크시간대 전력요금 등 에너지절약을 위해** 평상시 급.배기 시스템의 가동시간을 **일평균 4~15시간 가동**하고 있음.

○ 열차가 운행하면서 레일과 차륜 그리고 팬토그래프와 급전시설의 마찰과 마모 등에 의해 발생하거나, 레일 연마작업과 지하구조물 유지보수작업 등으로 바닥에 쌓여있던 미세먼지가 운행하는 전동차의 열차풍에 의해 비산되는 것이 주요한 발생원임.



< 전동차 운행에 의한 초미세먼지/미세먼지 발생 메커니즘 >

○ 터널 내 미세먼지의 근본적 저감 뿐만 아니라, 실제 탑승객의 미세먼지 노출 피해를 저감

할 수 있는 기술이 필요함.

○ 본 연구과제를 통해 기존 도시철도가 가지고 있는 공기질 측면에서의 근본적인 문제점을 파악하여 현실적인 해결방안을 제시하고, 공간적, 예산적으로 해결할 수 없는 문제점들은 새로운 방법을 제시하여 해결하고자 함.

○ 다양한 유형의 도시철도에 동일한 관리방안을 적용해서는 모든 구간에서 효과적인 개선효과에 도달할 수 없음. 따라서 전 구간에 대한 오염도를 조사하고, 오염도가 높은 hot spot 구간에 대한 여러 가지 특성, 즉, 터널길이, 심도, 곡선도, 도상차이, 환기방법 및 주변 외기 오염도 등을 적용한 hot spot의 유형을 분리하여, **맞춤형(customized management) 관리방안을 제시**하고자 함.

나. 연구개발의 중요성

(1) 기술적 측면

○ 2015년부터 대기질 기준에 초미세먼지 ($PM_{2.5}$)가 추가되며, 2016년부터 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」 관리기준에도 $PM_{2.5}$가 추가될 것으로 예상되므로 **도시철도 지하역사 및 터널에서도 $PM_{2.5}$에 대한 오염원 현황 및 제어방법에 대한 연구가 필요**함.

○ $PM_{2.5}$의 경우 기존의 PM_{10}의 제거에 사용되었던 일반적인 필터링 방법으로는 제거가 어려우므로 도시철도 터널에서 전동차의 운행에 따라 발생하는 $PM_{2.5}$의 오염원이 일반 대기에서의 발생과는 다르므로 **터널에 비산하는 $PM_{2.5}$의 특성을 파악하여 현장 상황에 맞는 제거방법을 개발하여 적용**해야 함.

○ 집진차량 및 운행하는 전동차에 부착하여 고속으로 미세먼지를 저감하기 위해서는 **기존의 필터가 가진** impaction, diffusion, interception **기능 외에 정전기력 및 자기력 특성을 지닌 기능성 필터 시스템 기술 개발로 압력강하를 최소화**할 수 있으며 **미세먼지에 대한 포집율은 높게 유지**할 수 있음.

○ **도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선사업 (1단계 연구단사업)에서 조사된 바에 따르면 Hot Spot 구간**은 전동차 가속시 전차선 마모, 전동차 감속시 브레이크 패드의 마모, 터널 오르막 구간, 전차선 연결 (용접부) 개소, 전차선과 전동차 팬터그라프 유격 구간에서의 아크 발생, 선로 곡선부, 분기부 (4호선 사당역 종점부 등) 등에서 발생된 초미세먼지/미세먼지가 열차풍에 의해 터널 전체로 확산되는 것으로 나타남.

○ 도시철도 터널 Hot Spot 구간에서 미세먼지/초미세먼지의 **오염원 유형에 따른 맞춤형 저감 기술을 개발**할 경우 보다 현실적이고 효율적인 공기질 개선 효과를 거둘 것으로 기대됨.

○ **GIS 및 다변량 통계분석을 이용**할 경우 전국 공기질 모니터링 망 (TMS; Tele Metering System)에서 제공하는 대기질 자료, 도시철도 지하역사 터널의 오염원 분석 자료, 기타 도시철도 지하역사 시설물 자료 등을 종합적으로 분석할 경우 **보다 입체적인 도시철도 공기질 관리 계획을 수립**할 수 있음.

○ 그동안 도시철도 지하역사 공기질 개선 대책은 부처별 (국토부, 환경부, 서울시 등)로 별도의 계획을 수립, 추진하여 투입 예산에 비해서 실효성이 미약했지만 본 연구를 통해 **범부처가 참여하는 "도시철도터널공기질협의회" 를 구성하여 역량을 통합할 필요**성이 있음.

○ 도시철도 터널은 초미세먼지/미세먼지 농도가 높고, 열차풍에 의해서 발생된 먼지가 고속으로 비산되어 처리에 어려움이 있으며, 유지보수 측면에서도 도시철도 운영기관에서 유지보수 인력을 감축하면서 **유지보수를 현실화 할 수 있는 필터시스템에 대한 접근이 요구**됨.

○ 지하철 HVAC 시스템의 경우 터널구간의 환기가 필요하지만 오염된 터널공기를 정화하여 실내로 급기하지 못하고 **단순히 HVAC 장치 보호 목적의 거름망이 적용**되고 있는 실정임.

○ 국내 전동차의 경우 고속철도 차량과 달리 차량의 차체 기밀도가 낮아 차량운행 시 외부 공기의 유입이 발생하고 있으나, 이를 통해 유입되고 있는 오염물질의 실태가 파악되지 않고 있음.

○ 객실 및 승강장에서 이용객들에게 쾌적한 환경을 제공하기 위하여 **전동차에 부착하여 실시간으로 미세먼지를 제거할 수 있는 집진장치의 개발이 요구**됨.

○ 서울메트로를 비롯한 일부 지하철에 고압살수차에 의한 세척을 시행하고 있으나, 미세먼지가 물입자에 의해 일부 세척되어 떨어져도 집수정까지 가지 못하고 자갈도상이나 바닥에 고인 후 마르면 지하철 운행시에 **다시 비산되는 현상**을 보이므로 이를 개선하기 위하여 살수차량으로 세척을 하지만 **광범위한 노선에 물청소로 먼지를 씻어내는 데는 한계**가 있음.

○ **서울메트로에는 1997년 대형 디젤 분진포집차량을 프랑스에서 60여억 원에 도입하여 운영**하고 있으나 바닥의 자갈도상의 미세먼지를 포집하는 데는 미흡하고, **초미세먼지는 집진장치를 통과**하며, **디젤 엔진** (구동장치 280kW, 발전기 306kW) **자체가 새벽 시간대에 오염원으로 작용**함.

○ 따라서 건강에 심각한 영향을 주는 초미세먼지/미세먼지를 대량으로 포집하는 효과적인 친환경형 도시철도 터널 미세먼지 제거차량을 개발하는 것이 필요함.

○

○ 이러한 목표를 달성하기 위해서는, **친환경 대형 축전지차를 개발해야 함**. 구성은 1량당 40~50톤의 차량을 2량 편성하고 40km/h의 속도로 구동하기 위한 300kw정도의 축전지형 구동장치와, 추가로 고압공기압축기를 구동하고 대용량 집진팬을 가동하는 300kW 정도의 추가 동력이 필요하므로, 도합 600kW 정도를 구동하는 축전지, 고성능 고효율 전동모터, 모터구드라이브, 충전장치, 제어장치가 필요한데, **현재 산업용으로 개발된 장치로는 이런 시스템을 구성할 수 없음**.

○ 터널바닥과 터널공간에 있는 미세먼지를 효과적으로 포집하고 연속, 반복적으로 포집할 수 있는 집진장치의 개발이 필요함. **기존의 해외도입장비는 바닥의 자갈속의 먼지를 효과적으로 불어내어 포집하는 성능이 부족**하며, 포집과정에서 일으킨 먼지를 포집하는 능력이 떨어져 오히려 먼지를 터널공간에 비산시키는 상태여서 불만족스런 상황이고, **디젤엔진구동이라 초미세먼지와 질소산화물 (NOx)을 다량 방출**함.

○ 따라서 자갈속의 먼지까지 불어내고 이를 효과적으로 포집할 뿐만 아니라 공간에 부유하는 먼지까지 대규모로 빨아들여 정화할 수 있는 효과적인 미세먼지 포집장치의 개발이 필요함.

○ 초미세먼지는 일반적인 필터링 방법으로는 포집이 불가능하며, **아직까지 초미세먼지 집진이 가능한 집진차량은 개발되어 있지 않으므로** 집진차량에 탑재하여 집진필터를 거쳐 빠져나오는 초미세먼지를 대량으로 포집할 수 있는 효율적인 초미세먼지 집진장치의 개발이 필요함.

○ 대용량의 미세먼지 및 초미세먼지집진장치를 탑재하고 터널내의 먼지를 효과적으로 포집하는 친환경형의 도시철도 터널 미세먼지 제거차량의 개발이 필요함.

(2) 경제 · 산업적 측면

○ 전국 도시철도의 역사 수는 총 564개소이며, 전체 역사에 공기질 모니터링시스템을 설치하여 관리하기에는 막대한 예산이 소요되므로 집중관리 구간 개념인 Hot Spot **구간을 설정하여 해당 구간에만 모니터링시스템을 설치하여 관리할 경우 운영 예산 및 인력 측면에서 효율적**일 것으로 판단됨.

○ 전국 도시철도 터널의 공기질 모니터링을 통해 Hot Spot 구간이 정해지면 Hot Spot **구간의 오염 유형**에 따라 적절한 **맞춤형 제어기술을 선정하여 적용**할 경우 비용 효과적으로

공기질을 개선할 수 있을 것으로 기대됨.

○ 전동차는 1985년과 비교할 때 2009년 기준으로 약 7배인 2000대 수준으로 증가한 만큼 지하터널의 미세먼지 발생량도 증가한 것으로 추정되어 고정형 공기정화장치만으로 지하터널의 오염도를 저감하기 위해서는 막대한 비용이 투입되어야 할 것으로 판단되므로, **나노기술을 이용한 이동형 집진기술을 운행차량에 적용함으로써 비용을 절감**할 수 있을 것으로 기대됨.

○ 최근 중국발 스모그, 잦은 황사의 유입으로 대기질이 악화되고 있으며, 하루 7백만명 이상의 시민이 이용하는 **지하철을 청정한 공간으로** 바꿀 경우 시민의 건강뿐만 아니라 **도심공간의 효율적인 이용** 측면에서도 중요한 과제가 될 것으로 판단됨.

○ 시민의 오염물질 노출 측면에서는 **도시철도 지하 역사 및 승강장에 대한 투자보다** 실제 대부분의 초미세먼지/미세먼지, 라돈, NO_2 등의 **오염원인 터널을 청정하게 하는 것이 비용대비 효과를 극대화** 할 수 있음.

○ 도시철도 터널의 초미세/미세 먼지 처리기술 개발은 선진 환기정화기술 확보와 기술경쟁력 향상을 통한 수입대체 및 미세먼지 오염도에 관심이 높은 일본, 미국, 유럽 등의 수출효과가 가능.

○ 서울메트로가 1997년 프랑스에서 도입한 집진차량은 초미세먼지 집진기능이 없는데, 대당가격이 60억 원 가량으로 고가라 국내에 1편성이 도입되어 사용되고 있으므로 본 과제를 통하여 집진성능이 우수하고, 초미세먼지 포집기능까지 갖춘 집진차량이 개발되어 적정가에 공급되면 터널내 공기질을 획기적으로 개선할 수 있고, 개발된 제품을 수출까지 할 경우 경제적, 산업적 효과는 클 것으로 기대됨.

(3) 사회 문화적 측면

○ 지하역사의 폐쇄성, 내·외부 오염물질 등으로 인한 실내공기 오염으로 이용객 및 종사자의 건강을 위협하고, 불만을 야기시키며, 자연환기가 어렵고, **밀폐된 좁은 공간에 다수의 이용객이 밀집되어 쾌적성을 저해**함.

○ 특히, ' 70~80년대 개통된 1기 지하철(서울 1~4호선, 부산 1호선) 일부역사의 석면뿜칠, 라돈 유출 등에 따른 국민들의 불안이 가중되고 있음.

○ 최근 언론에서도 지하역사의 미세먼지·석면·라돈 문제, 출퇴근 혼잡 시간대 지하철 차량 실

내오염 문제를 집중보도하여 **도시철도 공기질 개선을 촉구하는 사회적 요구가 증대**되고 있음.

○ 오염원의 근원적 차단, 투자확대 등으로 **국민이 만족하는 쾌적한 지하철 환경을 조성하고 서민생활 안정에도 기여**할 수 있음.

○ 지하공간의 안전과 관련된 요소는 매우 다양하고 복잡하기 때문에 개별요소에 대한 기준과 함께 종합적인 기준 마련이 필요하나, **국내에서 지하공간과 관련하여 해당 시설과 안전에 관한 규정은 각각의 개별법에 따르도록 되어 있으며, 통일된 지침을 제시하지 못하고** 있고, 더욱이 대심도 지하 공간 이용에 대해서는 공학적·법률적으로 명확히 정의된 바가 없음.

○ **일본의 경우** 2000년에 '대심도지하의 공공적 사용에 관한 특별조치법' 을 제정하고 2001년 '대심도 지하사용기술지침' 을 마련하는 등 **대심도 지하에 대한** 정량적 정의와 사용목적, 안전의 확보 및 환경의 보전 등에 대해 **필요한 사항을 규정**하고 있음.

○ 지하공간의 초미세먼지/미세먼지는 지하구간 종사자와 시민의 건강을 크게 위협하고 있으며, 특히 최근에 지하철 공기질이 건강에 심각한 영향을 미친다는 매스컴의 보도가 사회적 이슈가 되면서 지하 공기질의 개선에 대한 요구가 지하철노조를 중심으로 거세지고 있는 상황임.

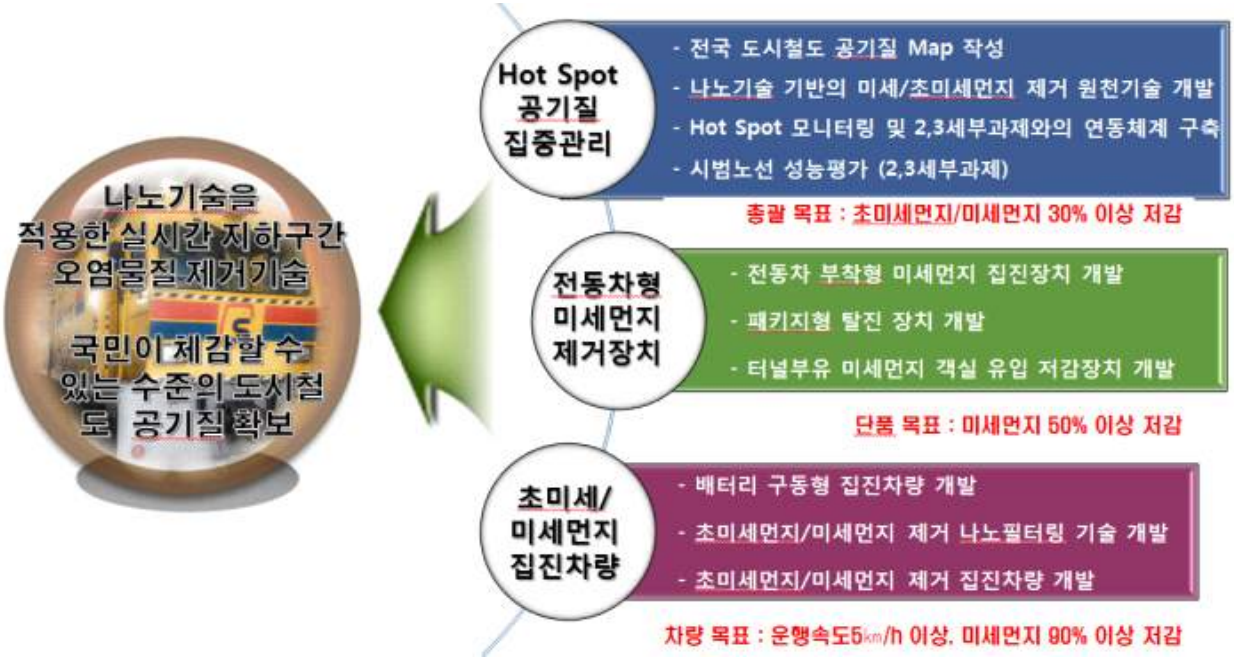
○ 각국의 지하철의 공기질과 청정도에 대한 관심이 높아지며 세계 주요도시의 지하철 공기질 비교자료가 인터넷을 통해 전 세계적으로 전파되며 세계인의 관심이 높아지고 있어, 국가 이미지 개선 측면에서도 지하공간에서 지속적인 공기질의 개선이 필요한 실정임.

○ 이러한 시점에 **획기적인 터널 초미세먼지 제거차량이 개발되어 경제적인 가격에 보급되고 실용화된다면 세계적으로 좋은 이미지를 심어주어 국가 위상을 높여 관광객을 유치하는데도 좋은 영향**을 줄 것임.

다. 연구개발의 최종목표

(1) 최종목표

○ 본 연구과제의 최종목표는 **국민이 체감할 수 있는 수준의 지하구간 공기질 확보를 위한 실시간 오염물질 제거기술 개발**이며, 이를 위해서 각 세부과제는 다음의 목표를 설정함.



<연구개발의 최종 목표>

○ 1세부과제 : **도시철도 터널 공기질 Map 작성 및 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발**

- **초미세먼지/미세먼지 제거를 위한 전도성 및 자기장 융합기술 개발**
  - 0.3 ㎛(DOP) 제거율: 99.97% @ 압손 20 mmAq 이하
  - 필터 시스템의 사용 전·후 기능성 변화율: 10% 미만 (전기저항, 자력)
  - 기능성 필터 시스템의 탈진율 : 99% 이상

- **실시간 이동형 터널 공기질 모니터링 시스템 제작 및 공기질 Map 작성**
  - 전국 도시철도 터널 공기질 측정 및 평가 (초미세먼지, 미세먼지, 라돈, NO2 등 포함)
  - 초미세먼지/미세먼지의 경우 오염도 단계별로 Map에 표시 (0~50, 50~100, 101~150, 151~200, 201~250, 251~300 ㎍/㎥)

- **Hot Spot 구간 공기질 모니터링 시스템 구축**
  - 무선통신의 경우 데이터 전송시 오차율 1% 미만
  - 전자파 (EMI/EMC)에 의한 데이터 전송 오류 1% 미만

• **도시철도 시범노선 구축 및 연구 성과물의 종합 현장 평가**

– 전문가 자문에 의해 구성된 테스트 베드 구간에 1, 2, 3세부 과제의 성과물을 종합 적용하여 공기질 모니터링 시스템 및 공인시험법으로 측정 시 초미세먼지/미세먼지 저감율 30% 이상

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

○ 지하역사의 미세먼지 유지기준 기준치는 150 ㎍/㎥이나 터널의 오염도는 2배 이상 높은 것으로 나타남.

○ 터널 공간의 미세먼지 오염도를 지하역사 수준으로 낮추는 것이 바람직하지만 터널 공간은 사람의 직접적인 접촉이 없으므로 이보다는 낮은 기준치로 설정해도 무방할 것으로 사료됨.

※ 대중교통수단 실내공기질 권고기준(환경부, 2014.3)

PM_{10} : 200 ㎍/㎥(혼잡시), 200 ㎍/㎥(비혼잡시)

CO_2 : 2,500 ppm(혼잡시), 2,000 ppm(비혼잡시)

○ 유, 무선 방식의 공기질 모니터링 시스템을 현장에 설치하여 종합사령실에서 데이터를 취합한 후 2, 3세부과제에서 개발된 집진장치 및 집진차량에 해당 정보를 전송할 경우 데이터의 오차가 1% 미만이고, EMI/EMC 등에 의한 영향을 받지 않아야 데이터의 신뢰성을 확보할 수 있음.

○ 미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 필터로 사용되는 HEPA filter의 기준이 0.3 ㎛(DOP)를 99.97% 효율로 제거할 수 있어야 함. 그러므로 본 연구의 기능성 필터 및 필터 시스템은 기존 HEPA filter 수준으로 0.3 ㎛(DOP) 입자를 99.97% 이상 제거할 수 있어야 하며 반면 필터 및 필터 시스템에 의한 압력손실로 HEPA filter의 절반 수준인 20 mmAq 이하로 끌어내려 운전비용을 최소화 하고자 함.

○ HEPA filter와는 달리 탈진율을 99% 이상으로 높이고 사용전후의 필터 및 필터 시스템의 기능성 변화를 10% 미만으로 유지함으로써 재활용을 가능하게 하여 유지, 보수비용 또한 최소화 시키고자 함.

(3) 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	○ 수도권 도시철도 공기질 조사 및 터널 내 공기질 현황 파악 ○ 수도권 도시철도 터널 공기질 측정을 통한 터널 오염지도 및 터널 유동해석 ○ 도시철도 터널 Hot Spot 모니터링 시스템 사양 정립 및 시스템 설계 ○ 전도성 필터 제조 공정기술 개발 ○ 자성필터 최적 소재 선정 ○ 중장기 환경개선 로드맵을 위한 도시철도터널 공기질 협의회 구성	○ 수도권 도시철도 터널내 공기질 특성 및 현황 파악 ○ 터널 공기질 특성을 통한 Map 작성 및 Hot Spot 구간 선정 ○ Hot Spot구간의 (초)미세먼지 오염원 유형 분석 ○ 역사 내의 입자거동에 따른 터널 유동해석 ○ 모니터링 시스템 제작을 위한 설계도면 및 사양서 작성 ○ 실시간 정보 이용을 위한 통신교구사항 추출 ○ 유무선 개발 시스템 설계를 위한 개념설계 ○ 고전도성 선유필터 전기 면저항 50 Ω/sq 이하 및 압력손실 20 mmAq 이하 일 때 10 ㎛ 입자제거율 99.97% ○ 기공크기 5 mm이하 Ferrite 및 Nd계 소재 ○ 세부과제 평가계획 수립 ○ 전국 도시철도 운영기관 “도시철도 터널 공기질 협의회” 구성
2차년도	○ 전국 도시철도 터널 내 공기질 현황 파악(Ⅰ) ○ 전동차 운행에 따른 터널구간 유동해석 ○ 중장기 환경개선 로드맵을 위한 운영기관 협의회 개최 ○ 전도성 필터시스템 기술개발 ○ 자성필터 구조 설계 및 제조 ○ 광산란 측정분석 시스템 모듈제작 ○ Hot Spot 구간 무선네트워크 설계	○ 도시철도 터널구간 공기질 측정 및 Map 작성(수도권 및 일부 지자체 구간) ○ 수도권 도시철도 터널 Hot Spot 구간 (초)미세먼지 오염원 분석 ○ 정적 및 동적 상태에서의 미세먼지 수치해석 ○ “도시철도 터널 공기질 협의회” 개최를 통한 운영기관 의견 수렴 ○ 전도성 필터 미세먼지 집진 특성 평가 및 시스템 설계 ○ Fe계 분진 제거용 자성필터 구조 설계 및 샘플 제조 ○ 광산란 측정 모듈 시제품 개발 및 테스트 ○ 모니터링 시스템 내 모듈 간 통신규격 통일 ○ Hot spot 구간 무선네트워크 시스템 설계
3차년도	○ 전국 도시철도 터널 내 공기질 현황 파악(Ⅱ) ○ 도시철도 터널 Hot Spot 구간 집중 공기질 측정 및 오염원 파악	○ 전국 도시철도 터널구간 공기질 측정 및 Map 작성(수도권 및 일부 지자체 구간) ○ 전국 도시철도 터널 Hot Spot 구간 (초)미세먼지 오염원 분석

연차	연구목표	주요연구내용
	○ 오염원에 따른 미세먼지 유동 해석 ○ 중장기 환경개선 로드맵을 위한 전문가 자문회의 개최 ○ 터널 오염도 지도 작성 및 오염원별 입자 거동 관찰 ○ 전도성 필터 시스템 최적화 ○ 자성필터 구조설계 및 제조 ○ Hot Spot 상시 모니터링 시스템 시작품 제작	○ 수도권 도시철도 터널 Hot Spot 구간 중 집중관리구간 선정 ○ 전동차 발생입자 및 재비산 입자에 대한 수치해석 ○ 중장기 로드맵을 위한 도시철도 터널 최적 공기질 개선기술 선정 ○ 도시철도 터널 공기질 개선기술에 대한 전문가 의견 수렴 ○ 전산모사를 통한 초미세먼지 제거용 전도성 필터 시스템 설계 및 제작 ○ 자성 다공체 필터의 자기적 특성 평가 ○ Fe계 분진의 탈진 공정 시스템 개발 ○ Hot Spot 상시모니터링 시스템 시제품 제작 및 성능 평가
4차년도	○ Hot Spot 구간 입자 거동해석 ○ 도시철도 터널 Hot Spot 구간 오염원 모델링 수행 ○ 시범역사 구간 미세먼지 유동 특성 분석 ○ 터널 환경 개선을 위한 중장기 로드맵 작성 ○ 미세먼지 제거용 기능성 필터 시스템 구축 완료 ○ 자성필터 성능 최적화 ○ Hot Spot 상시모니터링 시스템 현장 구축 및 평가	○ 시범노선 선정 ○ 시범노선에서의 2,3세부 시제품 성능평가 방법 및 기준 마련 ○ 개발기술을 포함한 중장기 환경개선 로드맵 초안 작성 ○ 전국 도시철도 터널 집중관리 구간 선정 ○ Hot Spot 구간 미세입자 유동 수치해석 ○ 시범역사 구간 (초)미세먼지 Hot Spot 구간입자 거동해석 분석 ○ 도시철도 터널 hot spot 구간의 오염원인 규명 및 기여도 평가 ○ 기능성 필터 시스템의 최적화 ○ 자성필터 성능 시험 ○ Hot Spot 구간 상시 공기질 모니터링 시스템 현장 구축 및 운영
5차년도	**○ 연구 성과물의 시범노선 종합 적용 및 성능 평가** **○ 도시철도 터널 오염농도 및 변화 추적** **○ 도시철도 운영기관 중장기 환경개선 로드맵 작성**	**○ 도시철도 시범노선 구축 및 종합 평가 시나리오 작성** **○ 시범노선의 연구 성과물 종합 성능평가 및 터널 미세먼지 30% 이상 저감 달성 (공인시험기관 시험성적서 확보)** **○ 전국 도시철도 터널 Hot Spot 구간 공기질 관리 계획 수립**

연차	연구목표	주요연구내용
	○ Hot Spot 상시 모니터링 시스템 개발 ○ 시범터널 공기질 개선효과에 따른 터널 유동해석 ○ 터널 공기질 개선 효과 분석 ○ 유형별 맞춤형 공기질 관리 방안 제안 ○ 미세먼지 제거용 기능성 필터 시스템 구축 ○ 기능성 필터 성능 최적화	○ 도시철도 운영기관 중장기 환경개선 로드맵 작성 ○ 터널 공기질 모니터링 측정장비 성능 개선 ○ 도시철도 공기질 상시 모니터링 시스템 상용화 및 운영 ○ (초)미세먼지 오염원에 따른 Hot Spot 구간 공기질 개선 효과 분석 ○ 터널 유형별 맞춤형 공기질 관리 방안 제안 ○ 미세먼지 제거용 기능성 필터 시스템 수정·보완 ○ 기능성 필터 시스템의 장기간 운전을 통한 Hot Spot 미세먼지 변화 추이 조사 ○ 기능성 필터 시스템의 재활용 인증시험

2. 연구개발 동향 분석

가. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

(1) 국가 연구개발사업 유사연구 실적

< 국내 연구개발 실적 >

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산	비 고 (연구기간)
국토교통부	미래도시철도기술개발사업	도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선기술 개발연구	96	2009~2014
		1세부과제 : 사업총괄 및 평가	30	
건설교통부	건설핵심기술 연구개발사업	지하공간 환경개선 및 방재기술연구사업	35	2003~2008

○ 도시철도 터널 및 차량의 공기질 개선기술 개발연구(2009~2014) : 터널에 설치되는 전기집진 시스템 및 에어커튼의 성능을 평가하기 위해 도시철도 4호선 일부 구간에 공기질 모니터링 시스템을 설치하여 공기질 개선 정도를 평가한 바가 있으나, 실제 오염도가 현저하게 높은 Hot Spot 구간을 선정하여 전국 도시철도를 대상으로 공기질 모니터링 시스템을 설치하는 본 연구의 내용과는 개념이 다름.

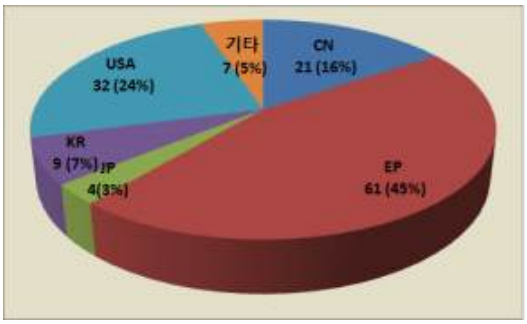
○ 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구단 사업(2003-2008) (건설교통부) : 낙후된 지하공간의 환경/방재기술과 획일적인 사양 지향적인 기준에 의한 활용성 제약으로 유사 시 대형피해가 발생할 수 있는 국내 지하공간에 대해서 각 지하공간 형태에 따른 화재발생과 확산, 내화구조 · 재료, 방재설비, 피난 · 대피, 환기시스템 및 환경제어기술에 대한 체계적이고 종합적인 연구개발을 수행하여 지하공간의 환경개선과 화재안전을 확보하는 설계/시공기술 개발과 합리적인 기준/지침을 만드는 연구사업임. Hot Spot 구간을 선정하여 수용모델링 통해 오염원인을 규명하고 해당 구간에 적합한 공기질 개선 기술을 적용하는 본 연구와는 차별됨.

(2) 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

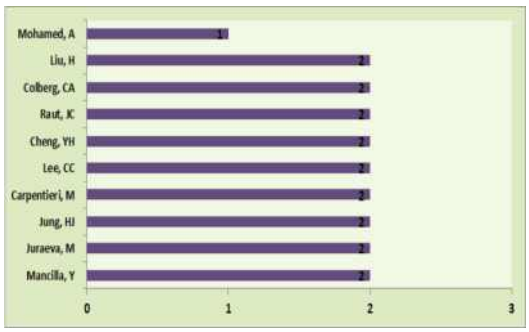
○ 도시철도 터널 Hot spot 구간 공기질 관리기술 개발 분야 논문 추이를 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 134건의 관련 논문이 발표되고 있으며, 일부 증감이 있지만 대체적으로 2000년대 중반 이후 증가하는 추세를 나타내고 있음.

○ 터널 공기질 개선 기술(B기술) 분야의 논문이 많이 발표되고 있으며, 저널별로는 Professional Engineering Publishing, Sage Publications LTD, Pergamon- Elsevier Science LTD 등 유럽, 미국의 저널에서 많은 논문이 발표되고 있음.

○ 도시철도 터널 Hot spot 구간 공기질 관리기술 개발 분야 논문은 유럽 쪽의 기관에서 많이 발표(45%)되고 있으며, 한국은 논문 실적이 저조한 상황임.



< 논문 발표 주요 국가 >



< 논문 발표 주요 저자 >

나. 국내 외 관련 기술 특허 동향

○ 국내 기술 및 산업 동향

✓ 지하 환경의 공기질은 과거 수십 년 동안 환경관련 문제의 핵심 중 하나로써 국내에서는 지하철 및 지하상가 등을 대표적으로 그 관리체계를 첨단화하기 위한 지속적인 노력을 하고 있음.

✓ 특히, 환경부에서는 2008~2012년까지 지하역사 공기질 개선 5개년 대책 등을 수립하여 수행함으로써 미세먼지, 석면 및 라돈 등 오염물질 사전차단, 저감시설 확충 등 근원적인 공기질 개선대책 마련하고 대책의 실효성 제고를 위한 투자확대 및 국고지원 정책에서 5년간 총 1조 7,900억 원을 투자하고 공기질 개선효과가 크고 시급한 사업에는 국고지원 추진하고 있음.

✓ 최근에는 지하 공간에서의 공기질 문제는 단순 처리나 환기 등에 의한 것뿐만 아니라 관

리가 부실할 경우 주요 오염원으로 작용할 수 있는 덕트 등 연계 공간에서의 환경 관리 또한 주요 이슈임.

✓ 그럼에도 불구하고 정기 또는 상시 모니터링을 실시하는 곳은 거의 없고 청소도 1년 동안 미루어 먼지를 방치함으로써 지하환경 개선시설이 지하환경을 악화시키는 주요 원인으로 작용하여 이를 효과적으로 관리할 관련 기술이나 제도적 장치가 마련되어야 할 필요가 있음.

✓ 또한, 지하공간의 경우 일반 건물에 비해 폐쇄적이어서 발생 가능한 환경문제를 예방하고 일정 수준 이상으로 유지관리하기 위한 시스템의 마련이 필요한데, 지하 공기질의 유지관리를 위해 핵심 환경인자를 파악하고 지속적인 모니터링을 실시할 수 있는 감시체계의 구축하고 덕트 및 연계공간의 환경인자에 대한 보다 신속하고 정확한 대응 및 관리 시스템, 관련 기술 및 기기 등의 확보, 관련 제도 등의 마련이 절실히 요구됨.

○ 국외 기술 및 산업 동향

✓ 유럽의 터널 공기질 현황

- 유럽에서는 오래전부터 터널의 화재안전에 깊은 관심을 가지고, Eureka · MTFVTP 등의 실규모 실험과 터널공학의 개발을 통해 터널화재현상에 대한 분석을 수행하여 왔으며, 이를 바탕으로 화재방지(Fire Prevention)기술과 방재/환기설비의 운용에 바탕을 둔 화재제어(Fire Control)기술, 화재위험도추정(Fire Risk Assessment)기법 등의 핵심기술개발을 통해 안전성 확보와 설치비용 문제를 동시에 고려하는 터널화재안전 설계방법 등을 개발함.
- 스웨덴의 Equa사, 프랑스의 Scetauroute사, 영국의 Dundee 대학에서는 정상류, 천이유동, 갱구순환확산 분석이 가능한 터널 환기 모델을 개발함.
- 유럽 국가들은 각국의 특성에 맞는 터널환기분야의 설계 자료와 운전 자료를 정립하여 지속적인 개선과 보완작업을 추진하고 있음.
- 유럽에서는 각국의 설계방법이 있으며, PIARC에서 제시한 방법과 독일에서 적용되고 있는 도로터널의 운영지침 (RABT)이 중심적 역할을 하고 있음. 유럽방식은 차종과 차속을 세분화하여 오염물질별 배출계수를 제시하고 있으며, PIARC기준은 4년 주기로 차량의 성능향상 등을 반영하여 차량오염물질 배출자료를 재산정하고 있음.
- 터널내 열차의 속도가 증가하면서 Tunnel-Train 유동현상에 해석의 필요성이 대두되어 영국의 BR, 독일의 GR 등에 의해 Train Drag, Pressure Transient, Tunnel Velocity에 대해 1차원적 해석과 실험적 연구가 수행되었음.
- 터널 내 화재확산에 대하여 Froude Scaling의 터널화재 축소모형실험기법과 Eureka, Memorial Tunnel 등의 실규모 실험을 바탕으로 Parsons Brinkerhoff사는 근사적 임계속도 설계식을 제시하고 이를 SES 소프트웨어에 적용함.
- 최근의 유럽터널참사를 계기로 UNECE의 터널 안전 확보를 위한 프로그램으로 FIT, DARTS, UPTUN과 같이 터널화재안전기준 정립과 기존터널의 안전성 향상을 위한

연구가 수행되고 있으며, 도시철도 분야가 비중있게 다루어지고 있음.

- 선진 도시철도의 경우, 설계 및 건설단계에서부터 도시철도 역사의 환배기 시스템 및 대피 구난 시설들이 유기적으로 결합된 기능적인 공간 설계를 하며 이는 구체적인 화재 및 대피 시나리오가 이미 파악되어 설계에 반영됨.

✓ 미국의 터널 공기질 분야

- 70년대 중반 미국 연방교통국의 주도아래 도시철도의 열차운행에 따른 기류, 압력, 온도분포에 대한 축소모형실험과 이론적 해석이 수행되고 이를 바탕으로 1차원적 도시철도 환기시스템 설계프로그램인 Subway Environmental Simulation (SES)가 개발되어 현재까지 수정보완 되면서 다수의 도시철도 설계과정에 이용되고 있음.
- 미국의 FHWA에서는 축소모델실험과 터널을 이용한 실규모 화재실험을 통해 환기 및 배연시스템의 합리적인 운영을 위한 화재현상과 연기유동확산의 변화에 대한 연구를 수행함.

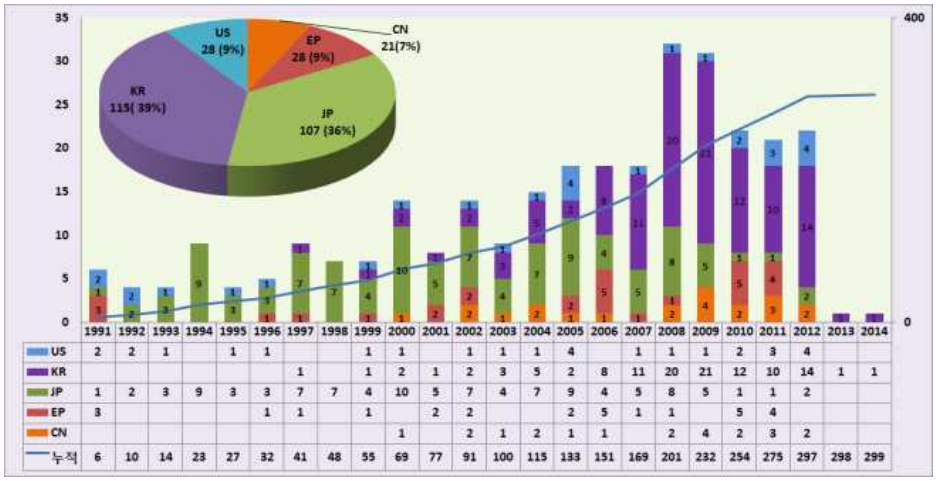
✓ 일본의 터널 공기질 분야

- 일본에서는 일본도로협회, 일본도로공단, 수도고속도로공단을 중심으로 터널환기설계 기술을 개발하고 있으며, 각 기관의 주요관리도로의 특성과 교통량조건 등을 반영하여 소요환기량 예측기법을 개선 · 세분화하고 있음.
- 선진외국에서는 대규모 실험결과와 터널 환기/화재공학에 대한 지속적인 연구개발을 바탕으로 축소모형실험기법을 확립하고 신뢰성 있는 수치해석기법을 발전시키고 있으며, 도시철도 환기/방재설비의 설계 및 운영기술을 각국의 특성에 부합하도록 확립하여 적용하고 있음.
- 일본의 Ebara사는 Boundary Shift법 기반 터널 환기 시뮬레이션 기술을 개발하였고, Sohatsu사는 그래프이론기반 시뮬레이션 기술을 개발함.

○ 국내외 특허

✓ 국가별 특허출원 동향

- 도시철도 터널 공기질 관리기술 개발 분야의 특허동향을 살펴보면, 1990년부터 현재까지 총 299건의 관련 유효특허가 출원되고 있음.
- 국가별로는 한국이 38 % (115건)로 최다이며, 일본, 미국, 유럽, 중국의 순으로 출원수가 높음.
- 최다 출원국인 우리나라는 2006년 이후 출원 특허가 전체 특허의 80 % 이상을 차지하는 등 최근 관련 분야에 대한 관심이 증가하고 있는 것으로 보임.
- 일본은 2008년 이후 특허출원이 감소하고 있는 추세이며, 미국, 유럽과 중국은 연평균 1-2건의 특허를 출원하고 있음.



	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
US	2	2	1		1	1			1	1		1	1	1	4		1	1	1	2	3	4		
KR							1		1	2	1	2	3	5	2	8	11	20	21	12	10	14	1	1
JP	1	2	3	9	3	3	7	7	4	10	5	7	4	7	9	4	5	8	5	1	1	2		
EP	3					1	1		1		2	2			2	5	1	1		5	4			
CN										1		2	1	2	1	1		2	4	2	3	2		
누적	6	10	14	23	27	32	41	48	55	69	77	91	100	115	133	151	169	201	232	254	275	297	298	299

< 공기질 관리기술 개발 분야의 국가별 출원 추이 >

✓ 주요 출원인 분석

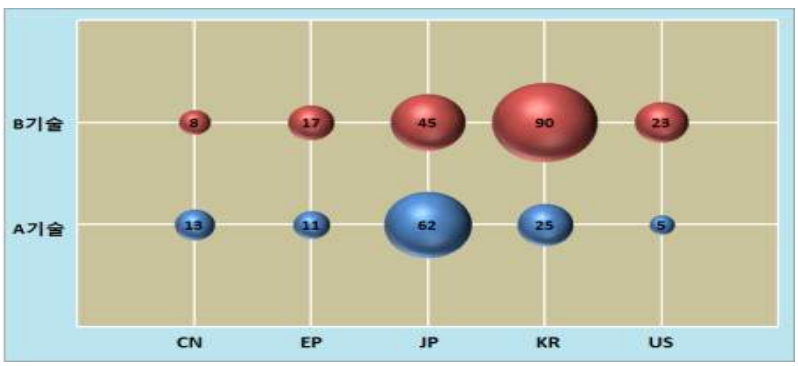
– 특허를 많이 출원한 상위 10개의 출원인 (Top 10 Assignee)을 분석해 보면, 한국철도기술연구원, 건국대학교 산학협력단, ㈜알엔테크 박영웅, 한국지질자원연구원, 한국기계연구원 등 한국의 연구기관들이 많이 차지하고 있으며, Toshiba, Matsushita Electric IND, Hitachi, Panasonic 등 일본 업체들이 출원을 많이 하고 있음.

– 주요 출원인의 연도별 특허출원을 보면 최다 출원인인 한국철도기술연구원과 건국대학교에서 최근까지 꾸준히 많은 수의 특허를 출원하고 있어 관련 분야 기술을 선도하고 있음을 알 수 있음.

✓ 국가별 기술 분포

– 출원 국가별 세부기술 특허분포를 살펴본 결과 한국, 일본, 미국이 터널 공기질 개선 기술(B기술) 분야 특허가 많이 나타나고 있으며, 해당 분야는 최다 출원국인 한국이 가장 많은 특허를 출원하고 있는 것으로 나타남

– 일본의 경우 도시철도 터널 공기질 모니터링 기술 개발(A기술)에 특허를 가장 많이 출원 하고 있으며, 한국은 A기술에서는 상대적으로 출원 건수가 낮아 향후 기술 확보가 필요한 것으로 판단됨.

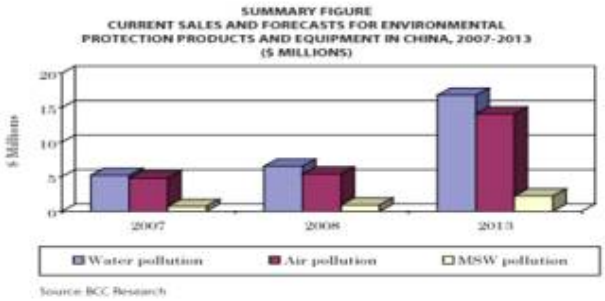


< 공기질 관리 관련 특허의 기술별/국가별 분포 >

다. 국내외 시장분석 및 산업동향

○ 최근 대기오염 제어 및 공기정화 관련 국내시장 동향을 요약하면 다음과 같음.

- **한국의 산업분야 대기오염 제어시장은 2010년에서 2016년 사이 年 평균 2.4% 증가할 것으로 예상됨** ※ 출처 : Industrial Air Pollution Controls Market in South Korea, 2010, Companies and Markets
- **중국의 대기오염 관련 제품 및 장비 매출은 2008년 54억 달러(약 6조원)에서 年 20.5% 증가하여 2013년 141억 달러(약 15.8조원)에 달할 것으로 전망됨** ※ 출처 : The Environmental Protection Market in China, 2008, BCC Research
- **미국의 공기정화 장비시장은 2017년 48억 달러(약 5.4조원)에 이를 것으로 예측됨** ※ 출처 : Air Purification Equipment : A North American Market Report, 2011, Companies and Markets

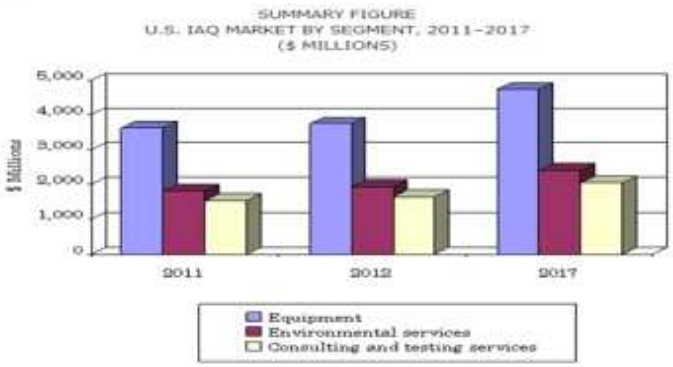


< ※ 출처 : The Environmental Protection Market in China, BCC Research, 2008 자료 >

< 국내 대기오염 제어 및 공기정화 관련 시장 동향 >

○ 최근 대기오염 제어 및 공기정화 관련 국외시장 동향을 요약하면 다음과 같음.

- **미국 실내공기질 (IAQ) 시장은 2012년 73억 달러(약 8.2조원)에서 年 4.6% 증가하여 2017년 92억 달러(약 10.3조원)에 달할 것으로 전망됨**
  ※ 출처 : U.S Indoor Air Quality(IAQ) Market , 2012, BCC Research
- **이 중 장비부문은 年 4.8% 증가하여 2017년 47억 달러(약 5.3조원), 환경서비스 부문은 年 4.4% 증가하여 2017년 24억 달러(약 2.7조원)에 이를 것으로 예측됨** ※ 출처 : U.S Indoor Air Quality(IAQ) Market , 2012, BCC Research

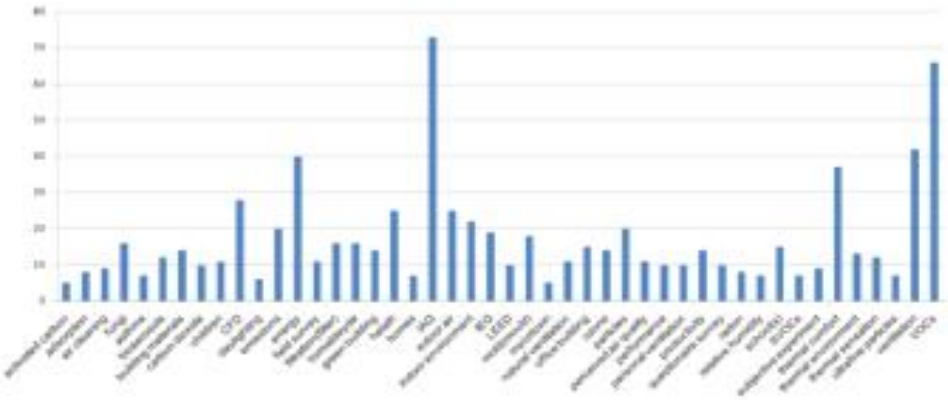


< ※ 출처 : U.S Indoor Air Quality(IAQ) Market, BCC Research, 2012 자료 >

< 국외 대기오염 제어 및 공기정화 관련 시장 동향 >

○ 유망기술예측 - 실내공기질 (IAQ; Indoor Air Quality)

- ✓ 2009년 9월 미국 시라큐스에서 개최된 Healthy Building 2009 국제학술대회는 친환경적이고 인체위해성이 낮은 건강한 건축물의 실내환경에 관한 국제적 학술대회로 쾌적성과 무해성에 영향을 미치는 IAQ (Indoor Air Quality), VOCs (Volatile Organic Compounds), 환기, 에너지 문제가 가장 주요한 이슈로 부각되었으며, 향후에도 이러한 문제를 해결할 수 있는 기술이 세계시장을 선도할 것으로 예상됨.
- ✓ 실내환경 전문가집단 (국제학술대회 발표논문기준)의 선도적 연구동향은 실내공기질 개선 및 유해오염물질 제거기술 분야가 각광받고 있는 추세임.
- ✓ 실내공간에서 활동시간이 늘어남에 따라 쾌적한 실내공기의 유지가 더욱 요구되므로, 환기시설이나 실내공기청정기의 수요가 급격하게 증가하고 있음.
- ✓ 시장규모도 2003년부터 2005년까지 매년 평균 30 % 이상 고속성장을 하였으며, 2005년 생산액은 1,030억 원에 이르고, 2003년의 590억 원에 비해 75 %나 급증함 (통계청 2007 “광업 · 제조업 통계 조사보고서”).



< 향후 유망기술예측 도표 (Healthy Building 국제학술대회, 2009) >

○ 세계 대기설비 환경시장

- ✓ 세계 대기설비 환경시장을 살펴보면, 2010년 117.1억 달러 (약 12조원)에서, 2015년 135.5억 달러까지, 연평균 3.0% 성장할 것으로 전망됨. 중국과 중남미를 중심으로 탈질·탈황 설비 시장의 급성장이 예상됨[1].
- ✓ 중국의 대기오염 관련 제품 및 장비 매출은 2008년 54억 달러 (약 6조원)에서 연간 20.5 % 증가하여 2013년 141억 달러까지 성장한 것으로 보고됨[2].
- ✓ 한국의 산업분야 대기오염 제어시장은 2010년에서 2016년 사이 연평균 2.4% 증가할 것으로 예상됨[3].

1) 제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획안 (2013~2017), 2012, 국가과학기술위원회
2) The Environmental Protection Market in China, 2008, BCC Research
3) Industrial Air Pollution Controls Market in South Korea, 2010, Companies and Markets

✓ 미국의 공기정화 장비시장은 2017년 48억 달러에 이를 것으로 예측됨[4].

○ 국내 지하철, 터널 공기질 시장전망

✓ 지하철 관련 공기청정 기술은 일본, 독일, 미국 등의 선진기술의 영향을 많이 받고 있지만, 이들 관련 기술에 대한 개발을 통해 국산화를 할 경우 선진 환기정화기술 확보와 기술경쟁력 향상하며 관련 부품의 수입대체 및 수출증대가 기대됨. 또한 요소기술 확대 적용에 따른 협력업체의 기술 강화, 생산성 향상에 따라 경쟁력을 갖추게 되어 경제에도 긍정적인 파급효과를 기대할 수 있음[5].

< 세부 분야별 경제적 성과 목표 >

세부분야	경제적 성과 목표	산출근거
지하철 공조설비	수입 대체 효과 100억원	* 산출근거 : 한국 냉동공조공업협회 2006년 통계자료(냉동. 공조. 공기기기) 총 공조기기 수입규모의 0.25%
지하철 공조설비	시장창출 100억원	* 산출근거 : 한국 냉동공조공업협회 2006년 통계자료(냉동. 공조. 공기기기) 총 공조기기 국내시장 규모의 5%
입자 제거 기술	시장창출 110억원	빌트인 가전 국내시장 5500억원의 20% (2007년 기준)

✓ 환경부에서도 지하철 차량 공기질 관리를 위해, 전동차 공기조화설비, 청소강화, 냉방장치 및 환기장치 정비·점검을 강화하고 있으며, 미세먼지, 이산화탄소 등에 대한 실태조사를 실시하도록 했음. 지하철 역사 공기질 개선을 위해 미세먼지, 석면, 라돈 저감대책을 시행하고, 차량 공기질 모니터링 등의 대책을 추진하고 있으며, 2013~2017년까지 약 7,447억원이 소요될 것으로 전망됨. 미세먼지 저감을 위한 고효율 필터설치, 환경개선공사, 스크린도어설치, 고압 물청소차량, 환기설비 개선 등에 대부분의 예산이 투입됨[6].

✓ 우리나라는 범부처 차원의 '제2차 환경기술개발 종합계획(2008~2012)의 경제적 성과로서 매출액 3조 632억원, 수출액 3,434억원을 창출하였으며, 계속하여 환경분야 기술개발에 투자를 확대하고 있음. 제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획(2013~2017)에서 중점과제 중 하나로 '생활환경 유해인자 관리기술로서, 실내 공기질 관리 및 모니터링'을 설정하여 추진하고 있음[7].

✓ 도시철도의 경우 신규 터널 공사계획에 따라 공기정화장치 등의 수요는 유동적이나, 실내 공기질 관리에 대한 규정이 강화되면서 기존 시설 및 설비에 대한 교체 수요가 지속적으로 발생할 것으로 예상됨.

4) Air Purification Equipment : A North American Market Report, 2011, Companies and Markets
5) 도시철도 터널·차량 공기질 개선연구 기획보고서, 2009, 한국건설교통기술평가원
6) 제2차 지하역사 공기질 개선 5개년 대책(2013~2017), 2013, 환경부
7) 제3차 환경기술 및 환경산업 육성계획안 (2013~2017), 2012, 국가과학기술위원회

라. 종합결론

○ ‘도시철도 터널·차량 공기질 개선’ 분야에서 주요국가들 중 일본의 영향력이 가장 크며 한국은 뒤늦게 출원함.
○ 한국은 주로 국내 시장에 비중을 두고 있음.
○ 한국은 최근 정부의 지원 아래 도시철도 역사, 터널 및 차량 공기질 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음.
○ 환경 센서 및 모니터링 기술, 냉난방/환기(HVAC)기술 관련 시장 등의 계속적인 성장이 예상되며, iBOT, Segseat 등 교통 약자 (노인, 장애인 등)를 위한 보조 이동수단도 계속적으로 개발/개량됨에 따라 향후 교통수단 이용객의 편의성 향상(환경개선, 이동환승 등)을 위한 기술이 매우 중요해질 것으로 판단됨.

< 도시철도 터널 공기질 개선기술 개발의 SWOT 분석표 >

S (강점)	W (약점)
○ 연구개발 노하우 축적 ○ 핵심기술 역량보유 ○ 철도유관기관 협조체계 ○ 국가과제로 수행 ○ 장기간 유지보수경험 ○ 국내 운영기관에 대한 안정된 시장 확보 ○ 국내 IT 기반기술의 세계 경쟁력 확보	○ 관련 산업체 취약 ○ 기술연구실적 적음 ○ 기술기반의 약함 ○ 철도분야의 한정된 시장 ○ 핵심 원천기술 축적 미흡
O (기회)	T (위협)
○ 실내공기질의 관심 및 중요성 증대 ○ 도시철도 적용확대 ○ 유지보수수요증가 ○ 지하철시스템 도입 등 시장의 확대	○ 국외기술의 시장선점 ○ 철도 운영처 예산 ○ 국외 기술 높은 경쟁력 ○ 미국 등 IT 원천기술 보유기업의 국내 철도 분야 진출 ○ 외국 글로벌 기업의 핵심기술 주도

3. 연구수행내용

가. 나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술

(1) 연구단 평가를 위한 시범노선 선정

(가) 시범노선 선정

○ 본 연구단의 **1, 2, 3세부과제 성과물의 종합 성능평가를 위한 시범노선을 선정**함. **시범노선 선정 시 고려사항 및 우선순위 기준**은 다음과 같음.

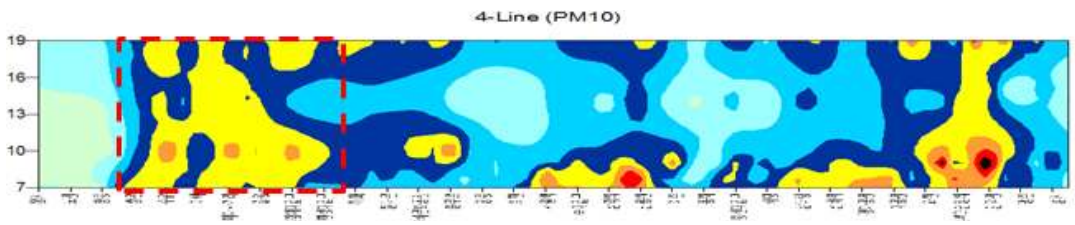
1. **운영기관의 협조**: 3세부 협동기관인 구 서울메트로(현 서울교통공사)의 노선 구간
2. **PM_{10} 고농도 구간**: 농도가 200 ㎍/㎥ 이상인 연속 5개 터널 구간
3. **차량기지 접근성** 및 대피선로 보유 여부 (집진차량 접근성 고려)
4. **환기조건**: 기계 환기 구간 (자연환기구 개수가 적은 곳)

○ 시범노선 선정 시 가장 중요한 요인은 바로 운영기관의 협조임. 이에 3세부 협동운영기관인 서울교통공사의 노선 중에 시범노선을 선정하기로 함. 또한 3세부 성과물인 터널 (초)미세먼지 집진차량의 접근이 용이해야 하며, 기계 환기 위주로 구성되어야 외부 공기질에 따른 터널 공기질의 외란을 줄일 수 있음. 또한 시험 평가를 위한 터널 길이를 확보하기 위하여 4-5개 역사가 연속하며, PM_{10} 농도가 200 ㎍/㎥ 이상으로 유지되어야 함. 위 조건을 토대로 3개의 시범노선 후보를 선정하였음.

< 연구 성과물의 성능 평가를 위한 시범노선 후보 선정 >

호선	구간	PM_{10} 농도	차량기지 접근성	환기 조건	선정 순위 (안)
2호선	시청-충정로-아현-이대-신촌	△	○	○	3
3호선	가락시장 - 수서 - 일원 - 학여울	△	◎	◎	2
4호선	**수유-미아-미아사거리-길음-성심여대입구**	**◎**	**◎**	**◎**	**1**

◎ 상, ○ 중, △ 하



< 4호선 터널 오염도 지도 - 강조 부분: 수유~성신여대입구 구간의 고농도 구간 >

○ 4호선의 수유~성신여대입구 구간의 경우 터널 내 미세먼지가 200 ㎍/㎥ 이상의 고농도로 유지되며, 창동차량기지가 근접하여 3세부 과제의 터널 (초)미세먼지 집진 시제차량의 접근이 용이함. 이에 **4호선의 수유~성신여대입구 구간**을 연구단 성과물의 종합 성능평가를 위한 **시범노선으로 선정**함.

(나) 시범노선 구간의 기본정보 및 운영정보

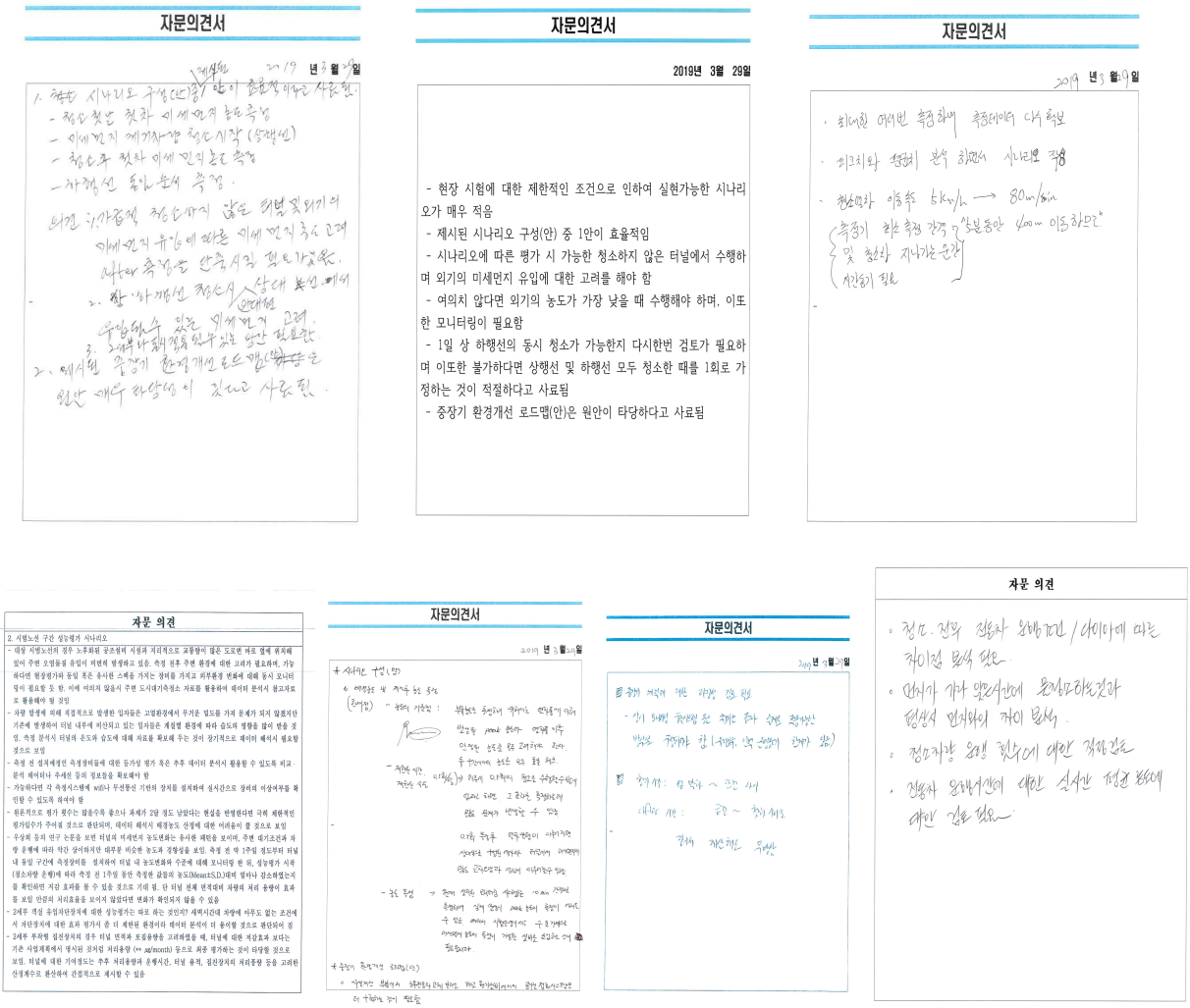
○ 시범노선으로 선정된 수유~성신여대입구 구간 및 터널 (초)미세먼지 집진차량이 출고되는 창동차량기지 출고선의 역사형태, 역간 거리, 터널 구조 등의 조사결과를 별첨*에 수록함.
(*별첨 1. 연구단 종합시험 절차서 및 시나리오 작성 용역 보고서)

(다) 연구단 성과물의 시범노선 현장평가

○ 연구 성과물의 종합 성능평가를 위한 평가 시나리오를 별첨*과 같이 작성하였으며, 서울교통공사와 함께 시나리오의 수행 가능성에 대하여 논의함. 또한 전문가 자문회의를 통해 시범노선 평가의 최종 시나리오를 결정함.
(*별첨 1. 연구단 종합시험 절차서 및 시나리오 작성 용역 보고서)



< 시범노선 평가 시나리오 선정을 위한 전문가 자문회의 자료 >



< 시범노선 평가 시나리오 선정을 위한 전문가 자문의견서 >

○ 터널 (초)미세먼지 집진차량의 경우 지하철 운행이 끝난 단전시간에 본선 투입이 가능함. 이에 시범노선 평가를 위해 활용할 수 있는 최대시간은 일요일 새벽 00:30 ~ 03:30 까지 총 3시간이라는 제약이 있음. 그러나 **집진차량의 시범노선 입·출고 시간을 고려**하면 **실제 평가에 활용할 수 있는 시간은 약 2시간** 정도임. 이에 **시범노선 평가구간을 미아-미아사거리 구간으로 축소**하여 **(초)미세먼지 집진차량의 최종 평가 시나리오를 아래와 같이 확정**함. 본 평가 시나리오 확정 시 관련 전문가의 자문을 통해 충분한 의견을 수렴하였음.

< 시범노선 구간의 터널 (초)미세먼지 집진차량 평가 시나리오 >

1. 시범노선 구간에 미세먼지 측정기를 터널 중앙 기둥에 설치하고 터널 공기질 연속 측정을 시작함

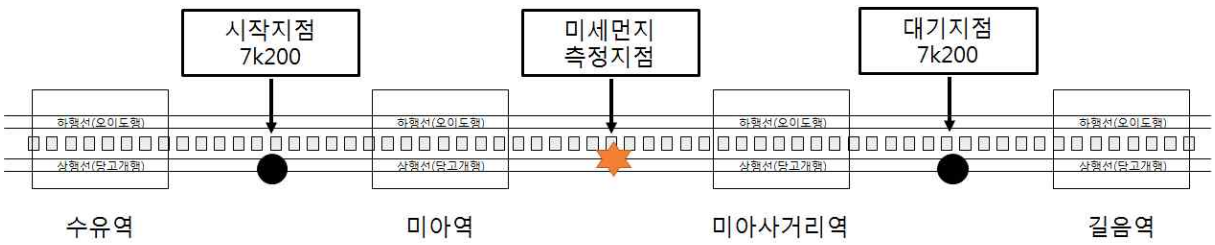
2. 미세먼지 부유 단계: 터널 (초)미세먼지 집진차량을 BLOW 가동 모드*로 운전하며 미세먼지 측정기가 설치된 터널 구간(측정지점)을 10km/h 속도로 통과하면서 터널 내 미세먼지를 부유시킴
(*BLOW 가동 모드: 집진차량의 하부 흡진시스템 내 블로우 모듈을 가동하여 에어를 분사해 터널 바닥에 가라앉은 미세먼지를 부유시킴)

3. 미세먼지 측정 단계: 터널 내 부유된 미세먼지 농도를 30분* 동안 측정하며, 이 시간동안 집진차량은 대기지점에서 정차함 (*5분 간격으로 6회 측정)

4. 미세먼지 집진 단계: 터널 (초)미세먼지 집진차량을 청소 가동 모드*로 운전하며 측정지점을 5 km/h 속도로 통과함
(*청소 가동 모드: 집진차량의 전기집진장치를 가동하여 터널 내 미세먼지를 제거함)

5. 미세먼지 측정 단계: 집진차량이 측정지점을 통과한 후 30분* 동안 터널 내 미세먼지 농도를 측정한 후 시험을 종료함 (*5분 간격으로 6회 측정)

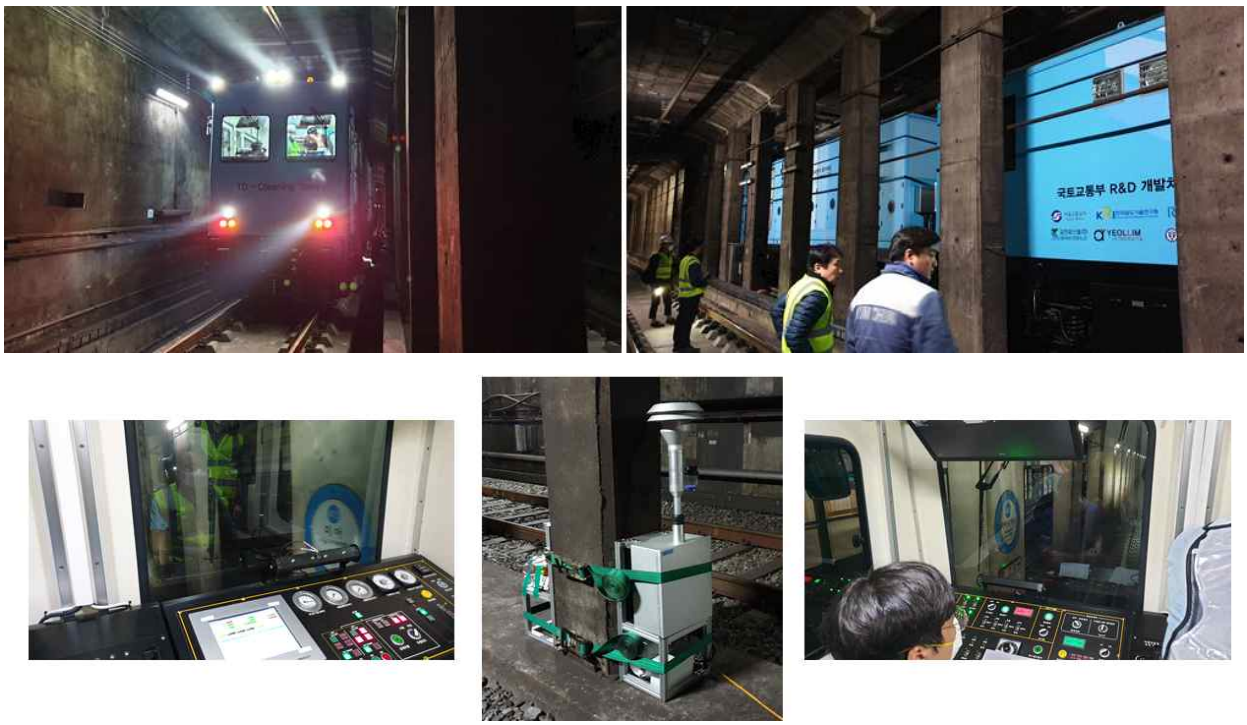
6. 미세먼지 부유 후 30분 동안 측정된 평균농도를 청소 전 시범노선의 미세먼지 농도로, 미세먼지 집진 후 30분 동안 측정된 평균농도를 청소 후 미세먼지 농도로 하여 저감 성능을 산정함



< 시범노선 구간의 평가 시나리오 모식도 >

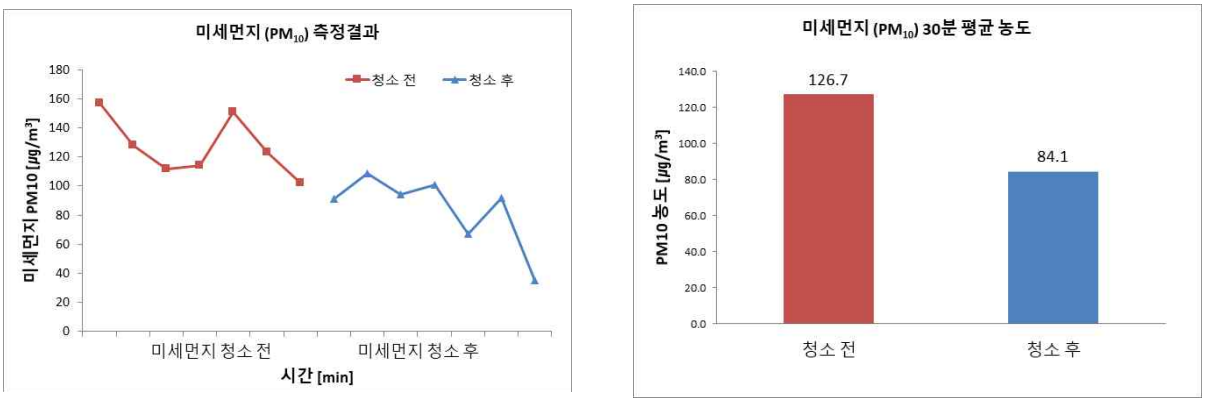
○ 미세먼지 측정지점에는 1세부 과제의 성과물인 터널 공기질 측정장비 시제품과 공인인증 시험장비인 베타레이 방식의 E-BAM(Met One Instrument)을 설치하여 터널 내 미세먼지 농도를 측정함.

○ 상기의 평가 시나리오를 적용하여 2019년 5월 12일(새벽 00:30 ~ 03:30)에 **터널 (초)미세먼지 집진차량의 시범노선 성능평가**를 수행함. 본 현장시험에는 **공인시험기관인 한국산업기술시험원(KTL)이 입회**하여 형식승인 장비인 베타레이 E-BAM 장비를 이용하여 미세먼지 저감성능을 평가함.



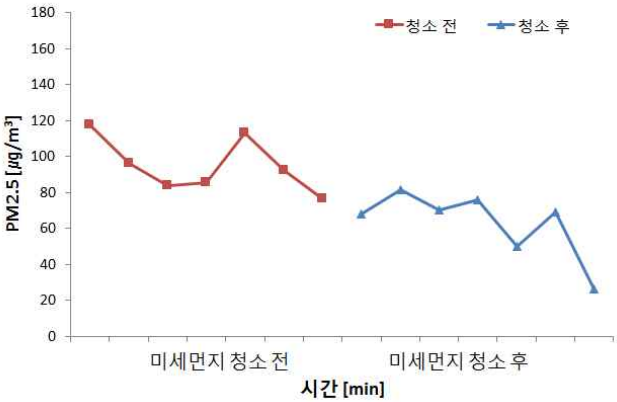
< 시범노선 구간의 터널 (초)미세먼지 집진차량 평가 사진 >

○ 터널 (초)미세먼지 집진차량의 시범노선 성능 평가 결과는 아래 그림과 같음. **집진 전 터널 내 미세먼지(PM_{10}) 농도는 126.7 ㎍/㎥, 집진 후 농도는 84.1 ㎍/㎥**로 측정되었으며, (초)미세먼지 집진차량의 운행을 통해 **시범노선 터널 구간 내 미세먼지 농도를 약 33.6% 저감**함.



< 터널 (초)미세먼지 집진차량의 시범노선 적용 전, 후의 미세먼지 농도 비교 >

○ 본 연구단의 서울 지하철 미세먼지 측정 결과, 시범노선 구간이 속한 4호선 터널의 $PM_{2.5}$/PM_{10} 농도 비율은 75%임(상세 내용은 보고서 3-나-(3)절 참조). 이에 (초)미세먼지 집진차량의 집진 전 터널 $PM_{2.5}$ 농도는 95 ㎍/㎥으로 추정되며, 집진차량을 통해 약 33.6%의 저감이 가능하므로 집진 후 농도는 63 ㎍/㎥으로 추정됨.



< 터널 (초)미세먼지 집진차량의 시범노선 적용 전, 후의 초미세먼지 농도 >

○ 터널 (초)미세먼지 접진차량의 **터널 미세먼지 저감성능에 대한 시험 성적서를 공인시험기관인 한국산업기술시험원(KTL)에서 발급**받아 연구개발 성과물의 성능을 객관적으로 인증함.

시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 19-026553-01-1
Report No.

페이지 (1)/(총 5)
Page of Pages

ktl KOREA TESTING LABORATORY 한국산업기술시험원

1. 의 뢰 자 (Client)

기 관 명 (Name) : 한국철도기술연구원

주 소 (Address) : 경기도 의왕시 철도박물관로 176 (월암동)

의뢰일자 (Date of Receipt) : 2019. 04. 23.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : 연구과제 관리용

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)

제 품 명 (Description) : 도시철도 터널 초미세먼지 제거차량

제작회사 (Manufacturer) : * * *

모 델 명 (Model Name) : * * *

제조번호 (Serial Number) : * * *

기 타 (Remark) : * * *

4. 시험기간 (Date of Test) : 2019년 05월 11일 ~ 2019년 05월 12일

5. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 의뢰자 제시 시험방법 / 실내공기질공정시험기준 참고

6. 시험환경 (Testing Environment)

온도 (Temperature) : (20.0 ± 5.0) ℃, 습도 (Humidity) : (50 ± 20) % R.H.

7. 시험결과 (Test Results) : 첨부 시험결과 참조

비고(Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 한하며, 법적 및 기타분쟁의 근거 등으로의 사용을 금합니다.
2. 이 성적서는 원본만 유효하며, 임의로 재 가공된 사본 및 전자인쇄본 등은 유효하지 않습니다.
('원본'이란 KTL에서 정해진 절차에 따라 보안성을 포함하여 제공하는 모든 성적서를 의미합니다.)

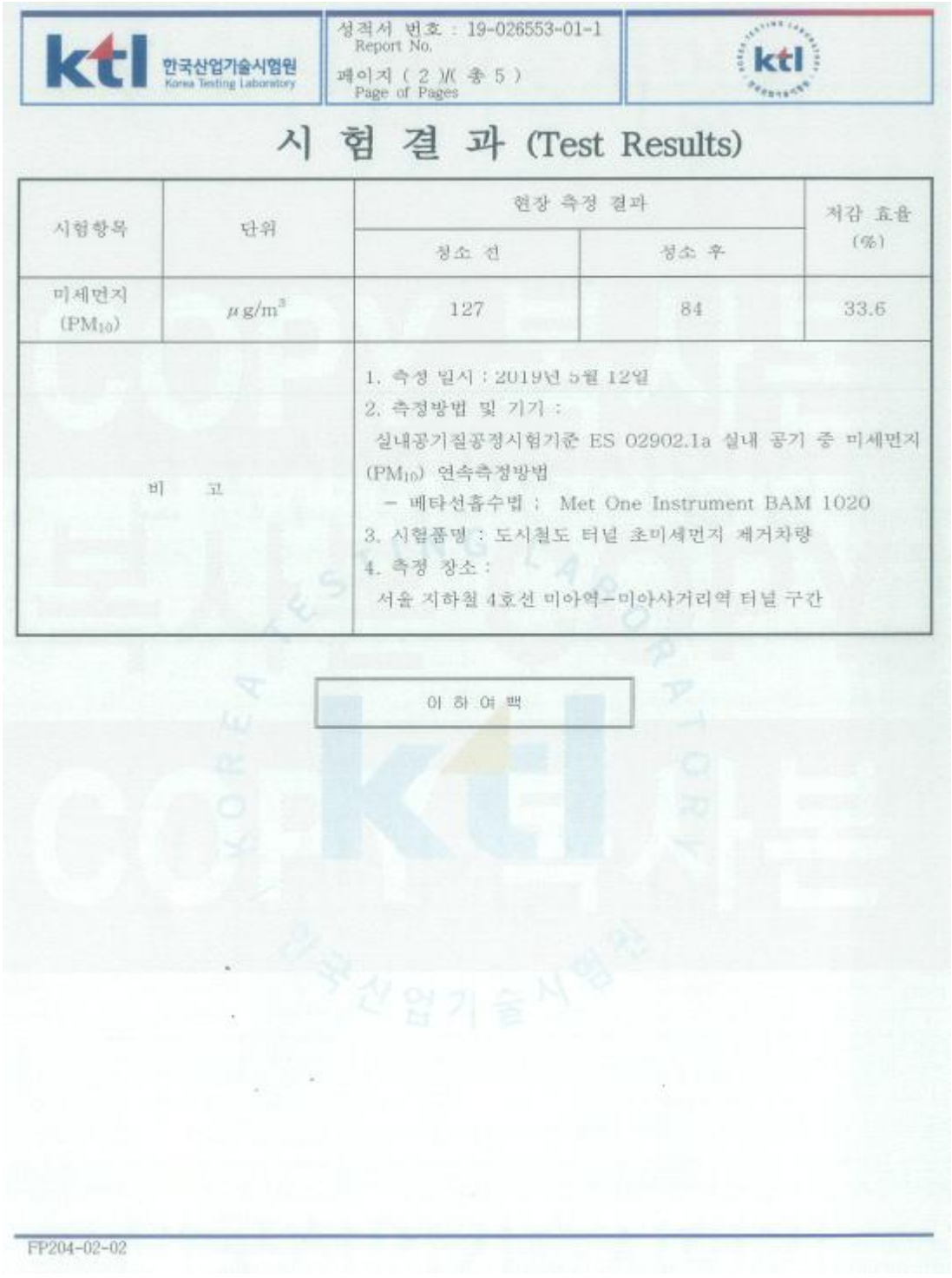
확 인 Affirmation	작성자(Tested by)	기술책임자(Technical Manager)
	성 명(Name): 차채두 (Signature)	성 명(Name): 홍길환 (Signature)

2019. 07. 08.

한국산업기술시험원장

서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동) (87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, KOREA) Tel.02-860-1505 Fax. 02-860-1699

FP204-01-04



ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 19-026553-01-1
Report No.

페이지 (2)/(총 5)
Page of Pages

ktl

시 험 결 과 (Test Results)

시험항목	단위	현장 측정 결과		저감 효율 (%)
		청소 전	청소 후	
미세먼지 (PM_{10})	$\mu g/m^3$	127	84	33.6
비 고		1. 측정 일시 : 2019년 5월 12일 2. 측정방법 및 기기 : 실내공기질공정시험기준 ES 02902.1a 실내 공기 중 미세먼지 (PM_{10}) 연속측정방법 - 베타선흡수법 : Met One Instrument BAM 1020 3. 시험품명 : 도시철도 터널 초미세먼지 제거차량 4. 측정 장소 : 서울 지하철 4호선 미아역-미아사거리역 터널 구간		

이 하 여 백

FP204-02-02

< 연구 성과물 적용에 따른 시범노선 구간의 미세먼지 저감성능 공인 시험성적서 >

나. 도시철도 터널 Hot Spot 구간 공기질 종합관리기술

(1) 도시철도 Hot Spot 구간 공기질 모니터링 시스템

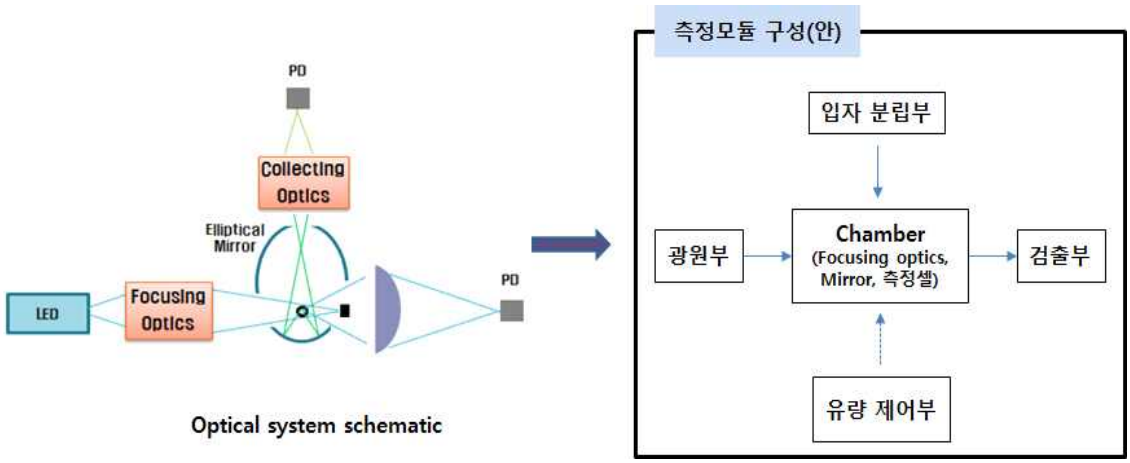
(가) 도시철도 터널 공기질 모니터링 측정장비 개발

① 모니터링 측정장비 제작

○ 미세먼지/초미세먼지 측정장비는 적용 지역이 터널이란 점을 감안하여 외부 환경을 견딜 수 있는 실외형으로 제작하여 설치 위치가 불안정하며 측정 환경이 열악해도 설치 측면에서는 큰 이점을 가질 것으로 판단됨. 모니터링 시스템법을 기본으로 하여 실시간 측정이 가능하고 전단에 입자분립장치인 싸이클론(PM_{10} 또는 $PM_{2.5}$)을 이용하거나 측정환경 및 목적에 따라 대기/실내 등 다양한 환경에서 측정 가능하도록 개발함.

○ 기존 연구를 통하여 도출한 모니터링 시스템 측정기기의 성능 사양 중 유량범위에 대하여 1.0 ~ 3.5 ℓ/min의 유량으로 개발 사양을 도출하였으나, 여러 문헌 및 1단계 연구내용을 검토 한 끝에 설치 및 구현장소가 지하철 터널 내라는 것을 감안하여 16.7 ℓ/min 으로 유량범위를 조절하여 최종사양을 도출함.

○ 터널 공기질 모니터링 시스템의 측정 모듈 설계 및 구성은 아래 그림과 같음.

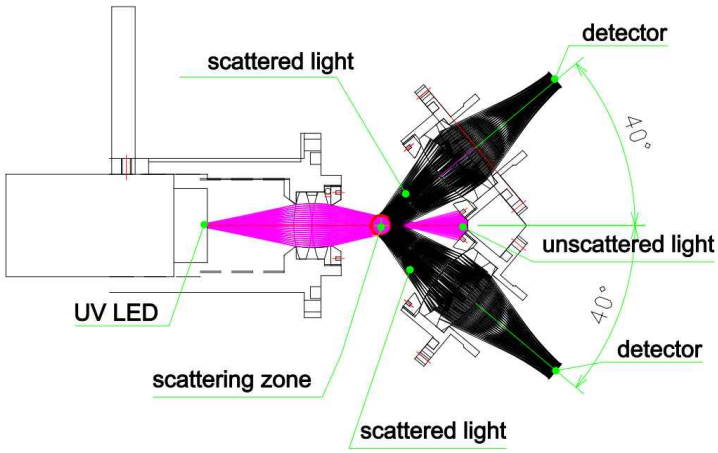


< 터널 모니터링 측정장비의 광산측정 모듈 Processor 설계 >

○ 모니터링 시스템 측정 모듈의 내부 구성은 광원부, 반응부, 검출부로 나뉘며 세부구성은 Light Source(UV LED), Focusing Optics, 반응챔버, Beam Stopper(Beam Dump),검출부(Photo Detector+Pre-Amp), Pipe 어댑터로 구성됨.

○ 모니터링 시스템 측정모듈의 분석 원리는 다음과 같음. 최초 광원부에서 UV Beam이 조사되면 그 빛이 Focusing Optics를 통하여 빛이 모이고 Focusing Optics를 통과한 빛이 반응부로 들어오면 유입된 입자에 빛이 조사됨. 입자에 빛이 통과하면서 빛의 산란이 일어나게 되고 산란된 빛은 Collecting Lens를 통하여 수집되게 되며 이렇게 수집된 빛들은 검출부(PMT+Pre-AMP)로 이송되어 산란된 빛의 양을 검출하게 됨.

○ 기존 시스템의 측정모듈인 전방산란 측정방식은 잡광에 의한 노이즈에 큰 영향을 받는 한계가 있으므로 측방산란방식의 측정모듈을 개발함. 측방산란 검출방법은 광원에서 나오는 빛의 진행방향에 따라 detector를 위치시키지 않기 때문에 수차나 회절 현상에 의해 생기게 되는 잡광에 의한 Background noise가 적다는 장점이 있음.



< 모니터링 측정장비 내 측방산란 측정모듈의 검출 원리 >

○ 측방산란 측정모듈을 적용하여 터널 모니터링 측정장비 시제품(KN-LS25)을 완성함.



< 터널 공기질 모니터링 측정장비의 시제품(KN-LS25) >

< 터널 공기질 모니터링 측정장비(KN-LS25)의 사양 >

구분	사양
측정범위	0.001 ~ 2mg/m3
광원 (파장대)	UV LED Nominal Wavelength 365 nm
Detector	Photo-Diode S12698-02
	Wavelength 190~1000 nm
표출단위	㎍/m3 or mg/m3
정밀도	±0.2%
정확도	±5%
유량범위	16.7 liters/minute
농도표출변환간격(전면판넬)	10초
디스플레이부	터치패드, 800 x 600 화소, 24 비트 RGB 컬러.
농도표출변환평균 (시리얼 디지털통신)	5 ~ 60분
기록데이터	1시간 평균농도, 24시간 평균농도, 온도, 습도, 절대기압, 시간/날짜
실시간 Digital Output	RS232,TCP/IP
실시간 아날로그 시그널	0~5V, 0~10V
저장장치	USB 메모리, Micro SD card 지원.
작동온도	-10 ~ 50℃
소비전력	AC220V/60Hz, 60W
크기	640mm(H) × 410mm(W) × 380mm(D)
무게	18kg

② 등가성 평가

○ 제작 완료된 터널 모니터링 측정장비 시제품의 성능을 평가하기 위하여 형식승인 장비인 베타게이지 장비(Thermo Scientific – Model 5014i)와 같은 장소, 같은 조건에서 미세먼지를 측정하여 성능을 테스트 함.

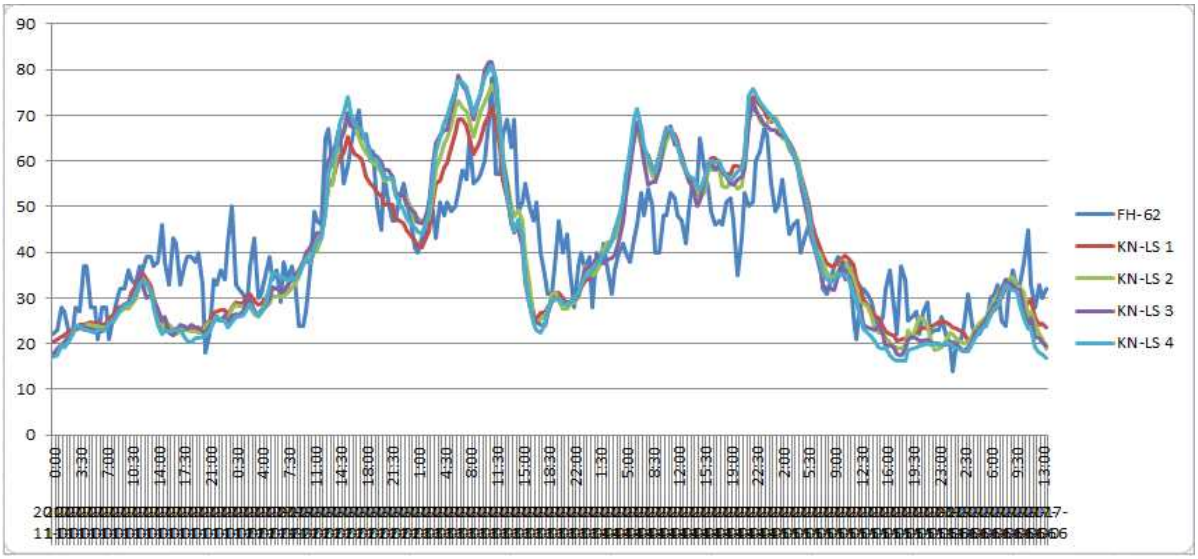


< 공기질 모니터링 측정장비 시제품의 성능 비교검증 >

○ 공기질 모니터링 측정장비 시제품은 베타게이지 장비(FH62C14)와 비교하여 PM_{10}은 10% 이내, $PM_{2.5}$는 12% 이내의 오차를 나타냄. 또한 측정 데이터의 추이 측면에서 연구개발 시제품은 베타게이지 장비와 비슷한 경사도를 보임. 연구개발 시제품은 기존 장비와 지속적인 등가성평가를 하는 동시에 중량법 장비와의 비교를 통해 장비 신뢰성을 확보함.

< 공기질 모니터링 측정장비 시제품과 베타게이지 장비의 데이터 비교 - PM_{10} >

[㎍/㎥]	FH-62C14	시제품1	시제품2	시제품3	시제품4
2017-11-03	49.64583	47.10324	49.88286	51.00009	50.77749
2017-11-04	47.0625	57.49537	56.02019	55.80701	57.86409
2017-11-05	35.04167	37.86771	36.28029	34.79768	34.55322



< 공기질 모니터링 측정장비 시제품과 베타게이지 장비의 데이터 비교 - PM_{10} >

[㎍/㎥]	FH-62C14	시제품1	시제품2	시제품3	시제품4
2017-11-07	25.437	22.748	22.846	22.679	23.152
2017-11-08	38.625	37.552	39.760	37.854	37.568
2017-11-09	41.645	44.882	44.000	43.976	44.777



< 공기질 모니터링 측정장비 시제품과 베타게이지 장비의 데이터 비교 - $PM_{2.5}$ >

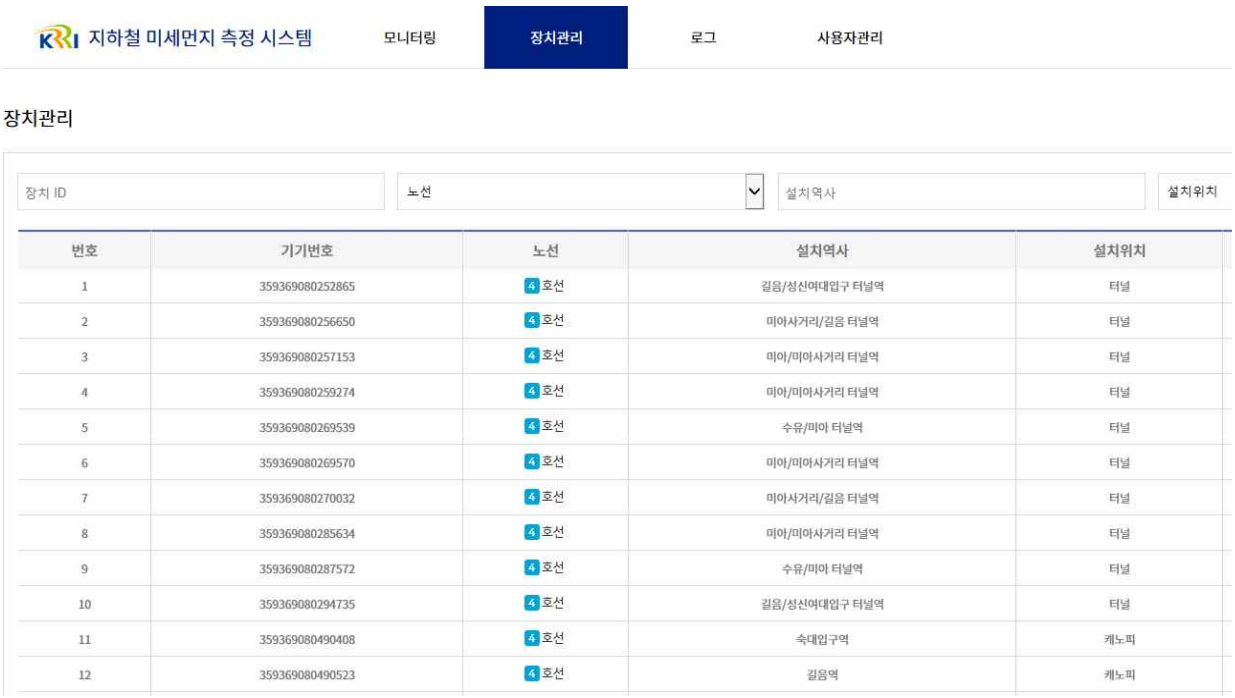
③ **공기질 모니터링 측정장비의 시범노선 구간 설치** 및 테스트 결과



< 도시철도 터널 내 공기질 모니터링 측정장비 시제품 설치 >

○ 공기질 모니터링 측정장비를 시범노선 구간에 설치하여 터널 공기질 측정 성능을 시험함. 터널 중앙부에 PM_{10} 측정장비 1대, $PM_{2.5}$ 측정장비 1대를 설치하여 **시범노선 구간에 총 8대를 설치**하였으며(2대/터널구간 * 4구간 = 8대), 장비의 전원은 터널 내 배전반 전원을 직접 공급받아 사용함.

○ 측정장비는 **미세먼지 농도를 실시간 측정한 후 10분 단위 평균값으로 제공**하며 미세먼지 외 온·습도, 이산화탄소, 충격 감시가 가능함. 측정 데이터는 이동통신 서비스(NB-IoT, LoRa 등)를 사용하여 전송함.



번호	기기번호	노선	설치역사	설치위치
1	359369080252865	4호선	길음/성신여대입구 터널역	터널
2	359369080256650	4호선	미아사거리/길음 터널역	터널
3	359369080257153	4호선	미아/미아사거리 터널역	터널
4	359369080259274	4호선	미아/미아사거리 터널역	터널
5	359369080269539	4호선	수유/미아 터널역	터널
6	359369080269570	4호선	미아/미아사거리 터널역	터널
7	359369080270032	4호선	미아사거리/길음 터널역	터널
8	359369080285634	4호선	미아/미아사거리 터널역	터널
9	359369080287572	4호선	수유/미아 터널역	터널
10	359369080294735	4호선	길음/성신여대입구 터널역	터널
11	359369080490408	4호선	숙대입구역	케노피
12	359369080490523	4호선	길음역	케노피

< 시범노선 내 공기질 모니터링 측정장비 시제품의 설치 위치 >

○ 측정장비 시제품을 이용하여 **시범노선의 미세먼지 농도를 실시간으로 확인**할 수 있음. 날짜, 시간을 설정하여 원하는 기간의 데이터를 추출하여 Hot Spot 구간과 같이 공기질 관리가 시급한 구간의 미세먼지 추이를 분석할 수 있으며, 지하철 운행 수가 많은 출퇴근 시간이나 자갈 궤도와 같은 환경에서 미세먼지 농도가 높음을 관찰함.



2019-04-29	01:30:00	51.2	52.1
2019-04-29	01:40:01	31.7	39.8
2019-04-29	01:50:00	45.9	48.3
2019-04-29	02:00:01	24.4	37.7
2019-04-29	02:10:00	18.4	24.7
2019-04-29	02:20:01	36.8	50.4
2019-04-29	02:30:00	102.2	31.8
2019-04-29	02:40:01	68.5	57.1
2019-04-29	02:50:00	32.1	67
2019-04-29	03:00:01	18.8	55.4
2019-04-29	03:10:00	34.9	64
2019-04-29	03:20:00	19.1	64.8
2019-04-29	03:30:01	18.2	70.9
2019-04-29	03:40:00	29.1	102.6
2019-04-29	03:50:01	22	84.7
2019-04-29	04:00:00	30	122
2019-04-29	04:10:01	23	136.3
2019-04-29	04:20:00	31	101.3
2019-04-29	04:30:01	20.7	120
2019-04-29	04:40:00	32.8	104.3
2019-04-29	04:50:00	26.7	142.9
2019-04-29	05:00:01	15.5	180.6
2019-04-29	05:10:00	14.6	189.6

	수신일시	KNJ2.5	KNJ10
2	2019-04-29	71.8	173.7
3	2019-04-29	79.3	173.7
4	2019-04-29	79.6	136.9
5	2019-04-29	76.9	11.3
6	2019-04-29	75.3	259.7
7	2019-04-29	68.2	142.5
8	2019-04-29	71.9	19.1
9	2019-04-29	76.6	454.4
10	2019-04-29	70.9	168.3
11	2019-04-29	58.2	176.7
12	2019-04-29	56.8	269.8
13	2019-04-29	67.2	193.2
14	2019-04-29	68.1	90
15	2019-04-29	64.7	340
16	2019-04-29	59.3	203.9
17	2019-04-29	69.1	5.5
18	2019-04-29	63	237.2
19	2019-04-29	59	83.8
20	2019-04-29	64.2	281.7
21	2019-04-29	1	151.3
22	2019-04-29	46.3	86.5
23	2019-04-29	52.6	23.9
24	2019-04-29	48.8	402.7
25	2019-04-29	45.4	321.6
26	2019-04-29	46.4	97.1
27	2019-04-29	50.8	276.5
28	2019-04-29	45.8	278.8

< 모니터링 측정장비를 이용한 시범노선의 미세먼지 및 공기질 측정 데이터 분석 >

④ 보완사항

○ 도시철도 터널 내 작업자의 진입이 자유롭지 않으므로 원격으로 장비를 제어하여 장비의 안정성을 확보할 필요가 있음. 또한 미세먼지 상시 모니터링 시스템을 구성한다면 도시철도 터널 내 미세먼지 실시간 측정을 할 수 있을 뿐 아니라 분석 프로그램과 연동하여 발생원을 감시 또는 차단할 수 있을 것으로 예상됨.

(나) NB-IoT 기반 도시철도 터널 공기질 실시간 모니터링 시스템 구축

① 도시철도 터널 내 무선 네트워크 선정

○ 공기질 모니터링 시스템을 구축할 공간이 지하철 터널이라는 제약으로 인해 터널 내에 설치될 장비의 데이터를 수집하는데 통신문제가 발생됨. 이에 도시철도 터널 내 통신 공사에 대한 비용을 획기적으로 절감하고 효율적인 무선통신 프로토콜을 개발, 적용함으로써 공기질 모니터링 데이터를 신뢰성 있고 합리적인 방법으로 수집할 필요가 있음.

○ 다음은 도시철도 터널 내 열악한 무선통신 환경을 극복하기 위한 항목으로 무선통신 프로토콜을 제안한 내용임.

< 도시철도 터널 내 열악한 무선통신 환경을 극복 위한 프로토콜 제안 >

항목	무선통신 프로토콜 제안
서버 클라이언트	· 지하철 터널내의 무선모듈들은 클라이언트로서 역할을 수행하며 중앙의 모니터링 시스템이 서버가 되어야 한다.
클라이언트 간 통신	· 지하철 터널내의 무선모듈들은 서버와 클라이언트로서 역할을 수행하며 서로 간의 데이터 송수신 기능을 할 수 있어야 한다.
접속 유지	· 지하철 터널내의 접속유지 방법은 데이터 송신이 필요할 때만 클라이언트에서 서버로 연결을 수립하고 데이터 송신이 끝나면 연결을 해제한다.
검증 바이트	· 지하철 터널내의 무선모듈은 CRC 방식을 사용하여 검증바이트를 생성하고 송신데이터에 검증바이트를 추가해서 송신해야만 한다.
노이즈 데이터	· 서버 역할을 하는 지하철 터널 내 무선모듈들과 모니터링 서버에서는 지하철 터널 내 무선모듈들의 수신 데이터를 검증바이트 이전에 체크하여 무선에서 자주 발생하는 노이지 문자들을 파악하여야 한다.
자동 덤프	· 지하철 터널 내의 무선모듈들은 서버와 통신이 단절 되었을 때 전송데이터를 덤프리스트에 저장해 놓아야 하며 중앙의 모니터링 서버에서는 덤프데이터를 위해 최소 일주일 이상의 수신버퍼를 확보해야 한다.
대화형 프로토콜	· 지하철 터널 내 무선통신 프로토콜에서는 무선통신 모듈에서 서버 쪽으로 연결을 수립하고 연결이 수립되면 서버 쪽에서는 ACK 신호를 전송한다. · 연결이 수행되면 무선모듈에서 데이터를 전송한다. 서버 측에서는 데이터를 정상적으로 받았으면 ACK 신호를 못 받았으면 NAK 신호를 전송하고 재전송을 기다린다. · 재전송이 정상적으로 이루어지고 모든 데이터의 처리가 완료되었다면 무선모듈에서는 모든 데이터가 정상적으로 전송되었다는 EOT 문자를 전송한다. EOT 문자를 전송받은 서버 측에서는 연결을 해제한다.
원격 명령	· 지하철 터널 내 원격명령에서는 서버에서 무선모듈로 접속을 시도하고 접속이 연결되면 원하는 데이터의 시작날짜와 끝 날짜를 명령으로 보내고 이들 데이터를 수신한다.

② NB-IoT Network의 특징

○ 국내의 IoT 통신 방식의 특성, 규격 및 적용 범위는 아래와 같음. NB-IoT 통신의 경우 저렴한 비용으로 통신 구축이 가능하고 표준화된 통신기술로써 LTE 통신 대역에서 사용이 가능하여 통신의 안정성을 가지고 있음. 또한 저전력의 사용으로 배터리 동작 환경에서 장시간의 통신 실현이 가능하여 다양한 위치에 센서의 부착과 데이터 모니터링 서비스 운영에 유리함.

○ 도시철도 터널 구간에 설치되어 센서를 통해 공기질 데이터를 수집하고, 이 측정된 데이터를 전송하여 모니터링을 구현하기 위한 통신방식으로 소용량의 안정적인 데이터 통신이 가능한 NB-IoT 통신이 가장 적합함. 이에 NB-IoT 통신을 적용하여 도시철도 공기질 실시간 모니터링 시스템을 구축함.

< 국내 IoT 통신의 특성 비교 >

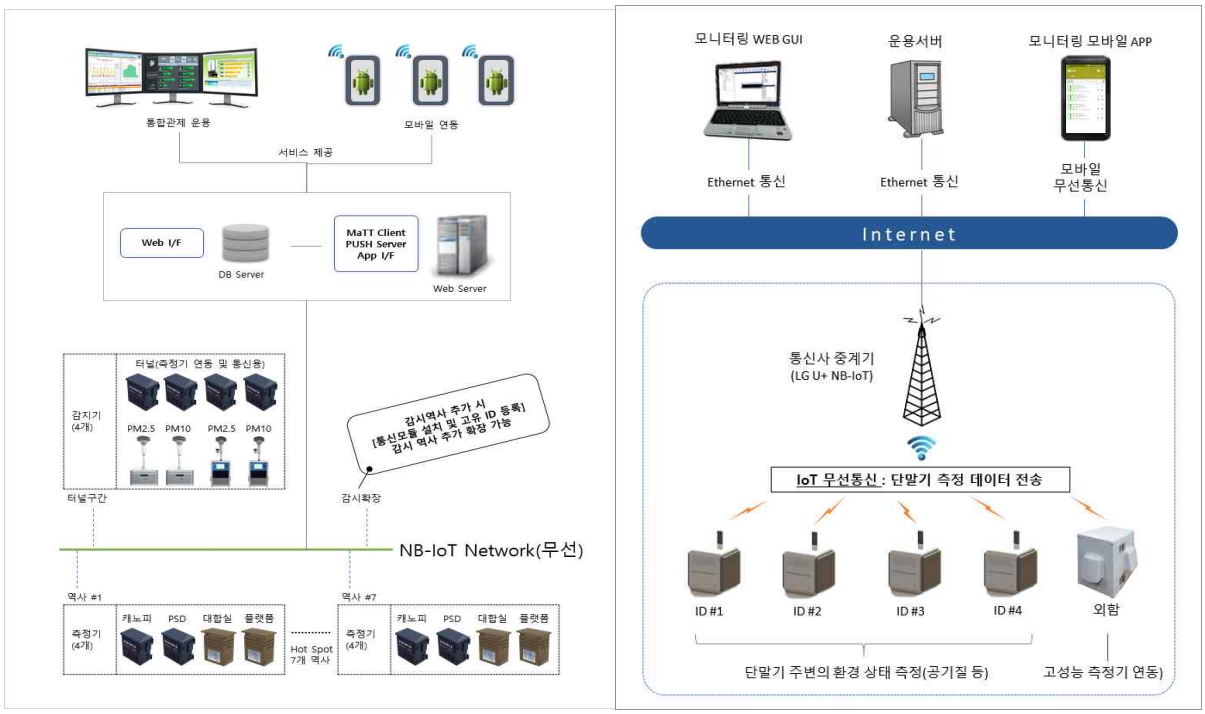
구분	LTE-M	Cat. M1	NB-IoT	LoRa
국제 표준	Rel-8/Rel-12	Rel-13	Rel-13	비표준 (LoRa Alliance)
사용 대역 / 대역폭	LTE 면허대역 20MHz	LTE 면허대역 1.4MHz	LTE 면허대역 200 kHz	920MHz
최대 속도	10/5 Mbps	1 Mbps	150 kbps	5 Kbps
커버리지	최대 11Km	최대 11Km	최대 15Km	최대 15Km
적용용도	비교적 많은 데이터 사용량에 적용 데이터, 음성, 사진, 영상		소량 데이터 사용에 적용 센서 측정 결과	

③ 도시철도 공기질 실시간 모니터링 시스템의 서울 지하철 2호선, 4호선 구축

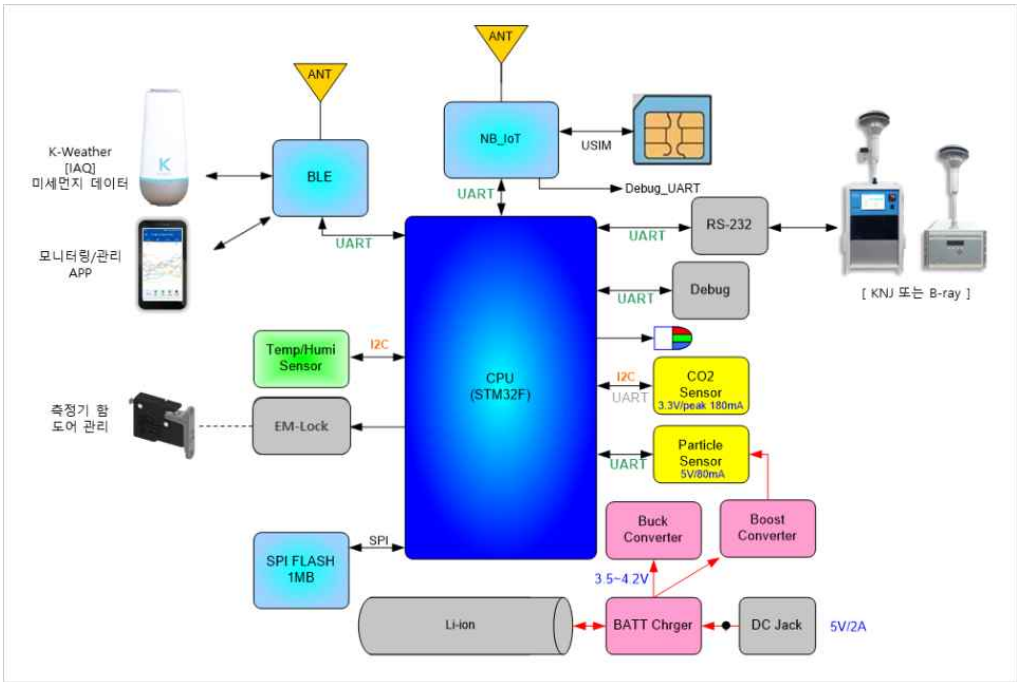
○ 승객이 이용하는 도시철도 공간 및 터널의 공기질 상태를 실시간으로 모니터링 하고, 공기질 개선을 위한 실효성 있는 데이터를 수집하기 위해 **서울 지하철 2호선, 4호선을 대상으로 공기질 실시간 모니터링 시스템을 구축**함.

< NB-IoT 기반 도시철도 공기질 모니터링 시스템의 구성요소 >

No.	구분		내용	비고
1	통합모듈	통신방식	데이터 전송 : LGU NB-IoT	USIM(1년 통신비 포함)
2			기기연동 : BLE	
3		기본측정	PM2.5 & PM10 먼지농도 측정	내장센서
4			CO2 농도 측정	내장센서
5			온습도 측정	내장센서
6		연동측정	무선 통신 연동	BLE
7			유선 통신 연동	시리얼 포트
8		관리제어	EM-Lock 제어 연동(BLE)	측정기함 관리
9		전원	DC 5V 2A	아답터(상시전원)
10			리튬전지(3400mA)	배터리(백업전원)
11	측정연동	IAQ	미세먼지 측정 데이터 연동	BLE 통신
12		LS-25/10		시리얼 통신
13		BAM-1020		시리얼 통신
14	측정기함	실내용	대합실, 플랫폼 설치	
15		실외용	캐노피, PSD, 터널 설치	

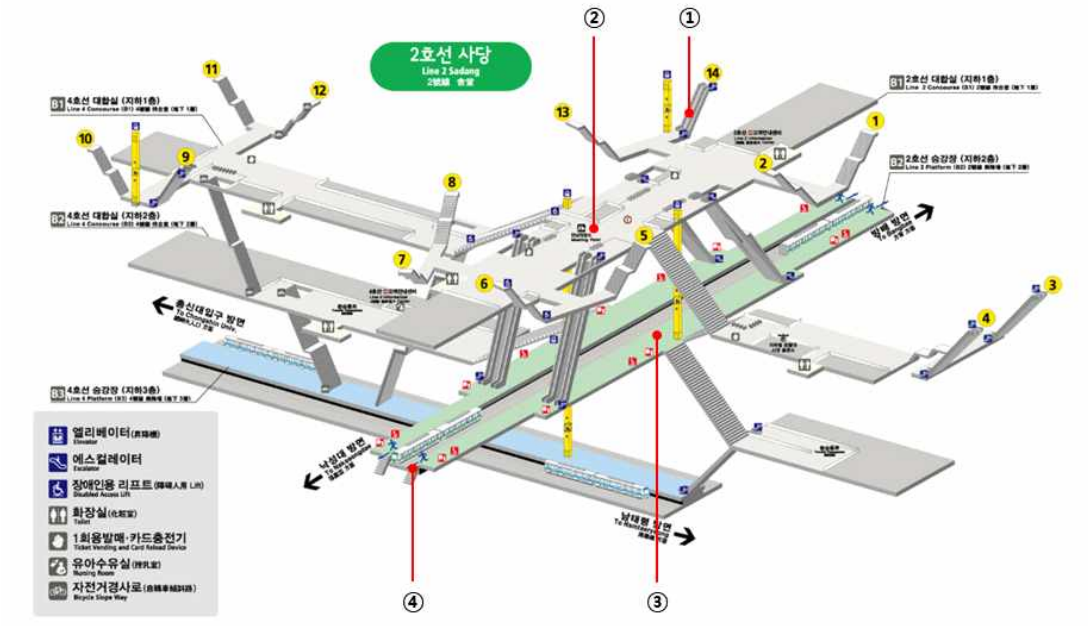


< 도시철도 공기질 모니터링 시스템의 개발 구성도 및 구성요소 >



< 공기질 모니터링 시스템 모듈의 다이어그램 >

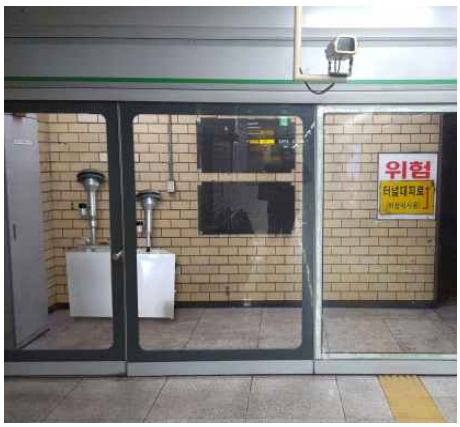
○ 도시철도 공기질 모니터링 시스템은 **대합실, 승강장, 터널(PSD 더미부)에 설치**되어 PM_{10}, $PM_{2.5}$, **이산화탄소, 온도, 습도를 10분 간격으로 측정**함. 측정 데이터는 NB-IoT 통신을 통해 **한국철도기술연구원이 보유한 데이터 서버에 저장**되며, Web 상의 운영 프로그램을 통해 데이터를 실시간 조회 및 다운로드 할 수 있음.



< 도시철도 공기질 모니터링 시스템의 역사 별 설치 위치 >







< 도시철도 공기질 모니터링 시스템의 위치 별 현장 설치 >

○ 도시철도 공기질 모니터링 시스템을 통해 축적된 데이터는 본 연구단 3세부에서 개발한 '터널 초미세먼지 제거차량'의 작업 계획 수립 및 오염도 저감 성능 상시 확인에 활용됨.

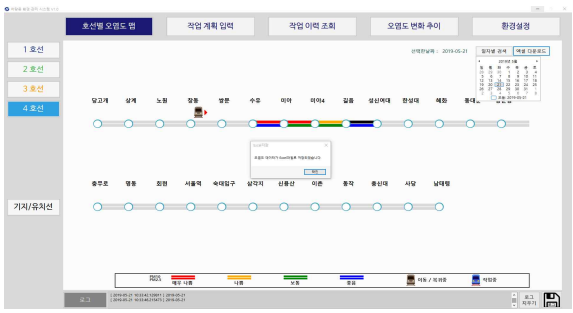
✓ 공기질 데이터는 터널 초미세먼지 제거차량의 환경관리 시스템에 주기적으로 전송되며 터널 구간별 오염도 평균값을 계산한 후 차량 단말 화면에 표출함 (오염도 좋음: 파랑, 보통: 녹색, 나쁨: 주황색, 매우 나쁨: 빨강색 4단계로 표시). 오염도 정보는 PM_{10}과 $PM_{2.5}$로 나뉘며 상단에는 PM_{10}, 하단에 $PM_{2.5}$ 오염도를 표시함.

✓ 초미세먼지 제거차량의 터널 작업 시 공기질 모니터링 시스템을 통해 측정된 PM_{10}, $PM_{2.5}$ 농도 변화를 차량 단말 화면 및 차량 환경관리 시스템 서버에 표출함.

✓ 공기질 모니터링 시스템을 통해 축적된 데이터 중 오염도가 높은 구간을 초미세먼지 제거차량의 작업 시작 지점 및 종료 지점으로 설정하여 터널 작업계획을 수립할 예정임.

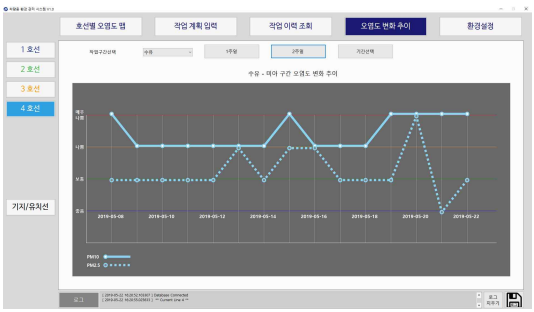


(ㄱ) 호선별 오염도 맵 화면

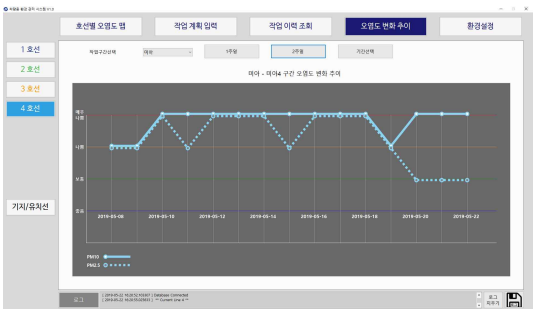


(ㄴ) 오염도 일자별 검색

<공기질 모니터링 데이터의 터널 초미세먼지 제거차량 운전의 활용 - 오염도 맵 표출>



수유-미아 구간



미아 - 미아사거리 구간



미아사거리 - 길음 구간



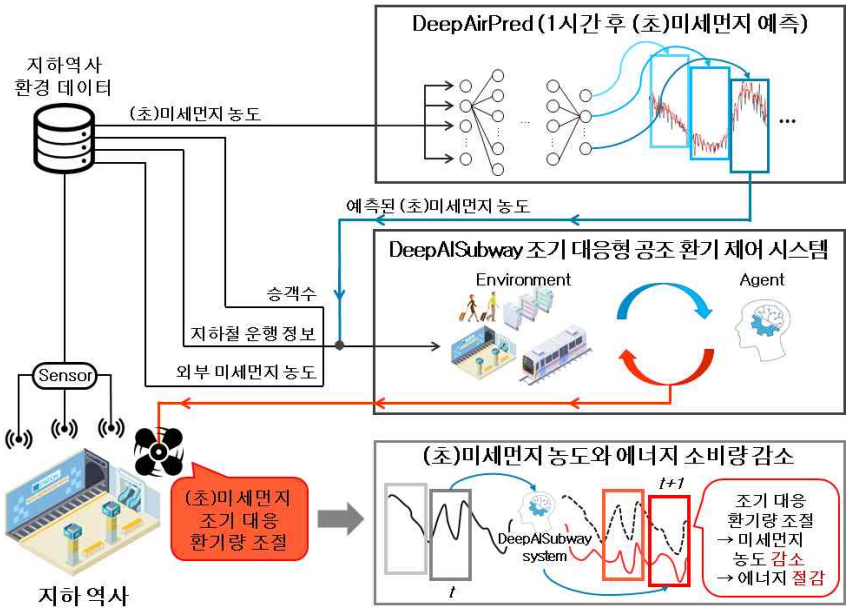
길음 - 성신여대 구간

<공기질 모니터링 데이터의 초미세먼지 제거차량 운전의 활용 - 오염도 변화 추이>

○ 도시철도 공기질 모니터링 시스템을 통해 구축된 데이터는 한국철도기술연구원이 총괄 연구기관으로 수행 중인 「인공지능 기반 지하철 이용객의 (초)미세먼지 노출 저감기술 개발」 연구단 과제의 빅데이터로 활용 예정임.

✓ 지하철 (초)미세먼지 농도 변화에 능동적, 지능적으로 대처하기 위해서는 추후 발생 가능한 문제의 사전 감지가 필요함. 이에 도시철도 공기질 모니터링 시스템을 통해 구축된 빅데이터를 활용하여 추후의 (초)미세먼지 농도를 예측하는 인공지능 기술을 개발할 예정임.

✓ 또한 상기 인공지능 기술을 통해 예측된 (초)미세먼지 농도를 기반으로 지하철 공기질이 악화되기 전에 공조설비를 조기에 가동하는 공조 환기 제어기술을 개발할 예정임.

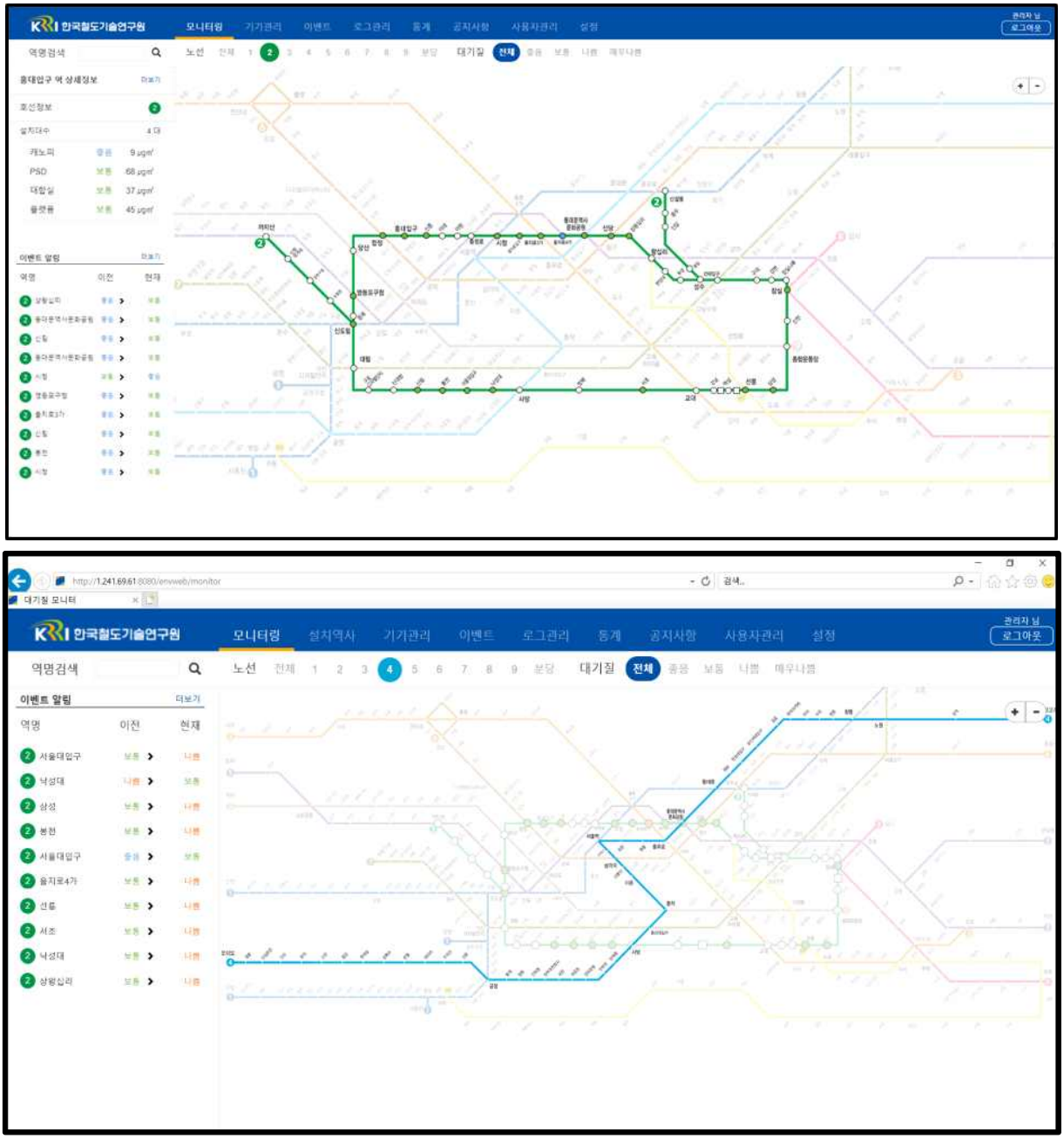


< 도시철도 공기질 모니터링 데이터의 후속 과제 활용 방안 -
빅데이터 및 인공지능 기반 (초)미세먼지 예측 · 제어 >

④ 도시철도 공기질 모니터링 시스템의 Web 운영 프로그램

(1) 2호선 및 4호선 모니터링

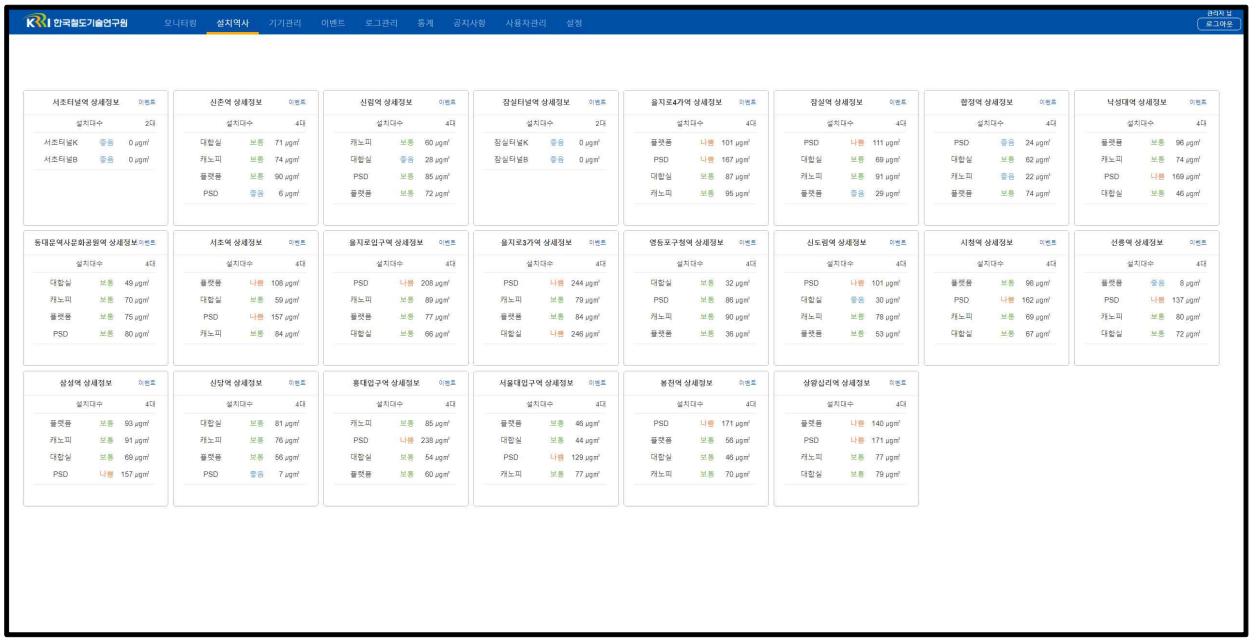
1. 모니터링 시스템이 설치된 위치의 공기질 상태를 15분 단위로 측정 모니터링
2. 공기질 상태의 변화를 색상의 변화로 표시
3. 공기질 상세 확인: 역사 선택 시 위치별 공기질 상태 확인



< 공기질 모니터링 시스템의 web 프로그램을 통한 호선 별 공기질 상태 조회 >

(2) 모니터링 시스템 부가기능

1. 통계기능



2. 다운로드 기능

– 데이터는 위치별, 항목별 조회/확인이 가능하며, 별도 파일로 다운로드하여 자료로 활용



(2) 도시철도 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발

(가) 수도권 및 전국 도시철도 터널 공기질 측정

① 측정일자 및 방법

○ 수도권 및 전국 도시철도 노선에 대한 열차 운행 시간 및 운행 조건의 조사 내용을 바탕으로, 각 역차 운행기관의 협조를 통해 아래와 같이 터널 공기질 측정 일정을 확정함.

< 도시철도 노선별 터널 공기질 측정 스케줄 (2015년도) >

6/29	6/30	7/1	7/2	7/3
			서울 3호선	
7/20	7/21	7/22	7/23	7/24
	서울 4호선	서울 5호선	서울 6호선	서울 7호선
7/27	7/28	7/29	7/30	7/31
	8호선	공항철도	분당선	9호선
8/3	8/4	8/5	8/6	8/7
	대구 1호선	대구 2호선		서울 1호선 서울 2호선
8/10	8/11	8/12	8/13	8/14
	인천 1호선		광주 1호선, 대전 1호선	
8/17	8/18	8/19	8/20	8/21
		부산 1호선 부산 3호선	부산 2호선 부산 4호선	

○ 미세먼지 측정장비(Grimm 1.108 Aerosol Spectrometer)를 외함에 넣은 측정 박스를 총 5세트 준비함. 측정 박스를 아래 그림과 같이 노약자석에 설치한 후 미세먼지 측정 프루브를 창문 밖으로 내어 터널 내 공기질을 측정함.



< 터널 공기질 측정박스의 열차 내 설치 위치 및 열차 진행 방향 >



미세먼지 측정장비
(Grimm 1.108
Aerosol Spectrometer)



측정박스 내부



측정박스 외부



노약자석 좌석이 있을 경우 설치

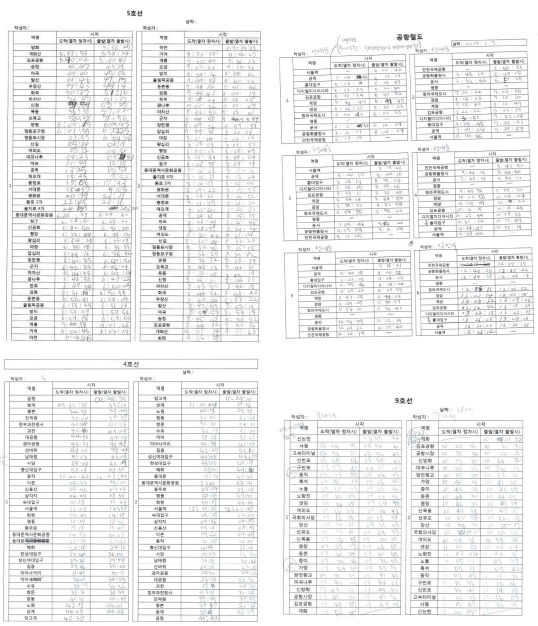


노약자석이 없는 경우 설치

< 터널 공기질 측정박스 제작 및 열차 내 설치 >

○ 공기질 측정 시간은 해당 노선의 첫차부터 막차까지 1시간 간격으로 실시함. 터널 구간 및 역사 구간을 구분하기 위하여 측정 시트를 준비하여 각 역사의 출발 및 도착시간을 초 단위로 기록함.

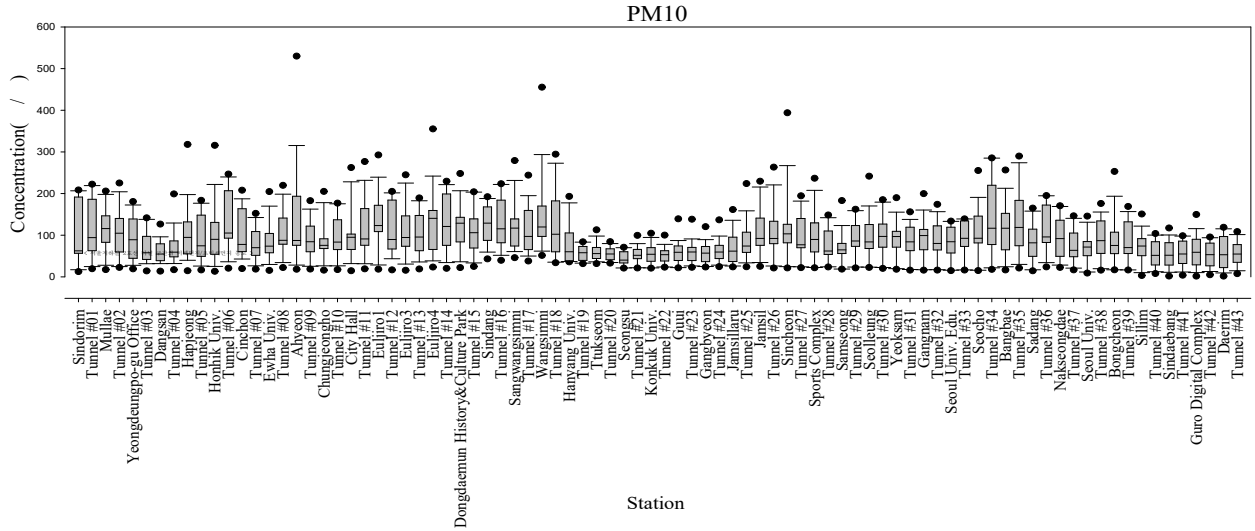
5호선	
상행선	하행선
05:31-07:00(5502, 마천 -> 방화)	05:36-07:04(5519, 방화 -> 마천)
05:38-06:15(5004, 공덕 -> 방화)	05:57-06:10(5505, 강동 -> 마천)
06:28-07:55(5512, 마천 -> 방화)	06:31-07:59(5537, 방화 -> 마천)
07:32-09:02(5530, 마천 -> 방화)	07:30-09:00(5557, 방화 -> 마천)
08:29-09:58(5550, 마천 -> 방화)	08:28-09:57(5577, 방화 -> 마천)
09:30-10:57(5562, 마천 -> 방화)	09:28-10:55(5589, 방화 -> 마천)
10:26-11:53(5570, 마천 -> 방화)	10:24-11:51(5597, 방화 -> 마천)
11:36-13:03(5580, 마천 -> 방화)	11:34-13:01(5607, 방화 -> 마천)
12:32-13:59(5588, 마천 -> 방화)	12:30-13:57(5615, 방화 -> 마천)
13:28-14:55(5596, 마천 -> 방화)	13:26-14:53(5623, 방화 -> 마천)
14:24-15:51(5604, 마천 -> 방화)	14:36-16:03(5633, 방화 -> 마천)
15:34-17:01(5614, 마천 -> 방화)	15:32-16:59(5641, 방화 -> 마천)
16:30-17:57(5622, 마천 -> 방화)	16:28-17:55(5655, 방화 -> 마천)
17:29-18:56(5632, 마천 -> 방화)	17:30-18:57(5671, 방화 -> 마천)
18:34-20:01(5650, 마천 -> 방화)	18:27-19:54(5687, 방화 -> 마천)
19:31-20:58(5662, 마천 -> 방화)	19:33-21:00(5703, 방화 -> 마천)
20:34-22:01(5674, 마천 -> 방화)	20:36-22:03(5715, 방화 -> 마천)
21:36-23:03(5684, 마천 -> 방화)	21:27-22:54(5723, 방화 -> 마천)
22:34-24:01(5692, 마천 -> 방화)	22:23-23:50(5731, 방화 -> 마천)
23:18-24:45(5696, 마천 -> 방화)	23:20-24:47(5737, 방화 -> 마천)
24:29-24:59(5702, 마천 -> 왕십리)	24:15-24:52(5211, 방화 -> 애오개)



< 노선별 역사 출발, 도착시간 측정시트 및 특이사항 기록 >

② 측정결과

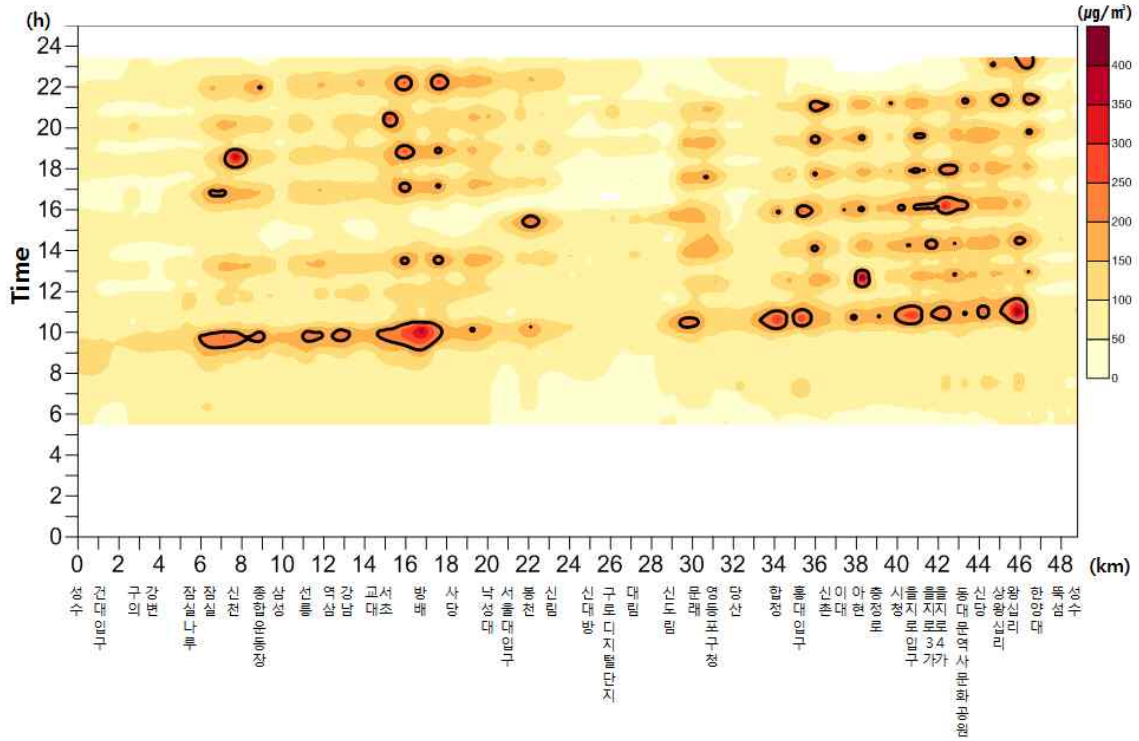
○ 전국 지하철 터널 공기질 측정 결과를 각 노선별로 정리하였으며, 아래 그림은 서울 2호선의 터널 공기질 측정 결과를 나타냄. 그 외 노선의 공기질 측정 결과는 별첨*에 수록함.
(*별첨 2. 전국 도시철도 노선의 터널 공기질 측정 자료)



(나) 수도권 및 전국 도시철도 터널 오염도 지도 작성

○ 1시간 간격으로 측정된 터널 미세먼지 농도를 이용하여 터널 오염도 지도를 작성함. 오염도 지도의 가로 축은 노선의 구간 정보를, 세로 축은 측정 시간을 나타내며 미세먼지 농도를 색으로 표시함.

○ 아래의 그림은 서울지하철 2호선의 터널 오염도 지도임. 그 외 노선의 오염도 지도는 별첨*에 수록함.
(*별첨 3. 전국 도시철도 노선의 터널 오염도 지도)



< 서울지하철 2호선의 터널 PM_{10} 오염도 지도 >

○ 서울지하철 2호선의 오염도 지도(2015년 8월 7일 측정)를 보면 지상구간(성수-잠실, 신림-신도림, 당산, 한양대-성수)을 제외한 지하구간은 오전 9시 이전에는 100 ㎍/㎥ 이하의 농도를 보인 반면, 오전 9시 이후에는 대체로 100 ㎍/㎥ 이상의 농도를 보임.

○ 특히 잠실-종합운동장, 서초-사당, 홍대입구-한양대 구간은 시간에 관계없이 200 ㎍/㎥ 이상의 농도를 보여 공기질 관리가 시급한 Hot Spot인 것으로 사료됨.

○ 각 노선별로 살펴보면 특정 구간의 경우 다른 역에 비해 미세먼지 농도가 지속적으로 높음을 확인함. 이러한 구간은 터널 공기질 Hot Spot으로 명명하여 미세먼지의 특성 및 오염원을 파악함 (결과는 아래 절에 나타냄).

(3) 도시철도 Hot Spot 구간의 미세/초미세먼지 특성 및 오염원 파악

(가) 서울시 지하철 터널 내 입자상물질 농도 특성

○ 서울시 지하철의 총 길이는 331.6 km이며, 총 307개의 역으로 지하역사 283개, 지상역사 24개로 이루어짐. 지하철 공기질 문제는 환기시설의 노후화 및 이용승객과 열차운행 빈도가 급증하면서 지하 역사 및 터널의 분진 오염도가 증가하는 것이며, 지상의 자동차 배출가스 등 외기의 대기오염물질이 지하로 유입되어 지하역사 및 터널 공기의 오염을 가중시키는 요인으로 작용함.

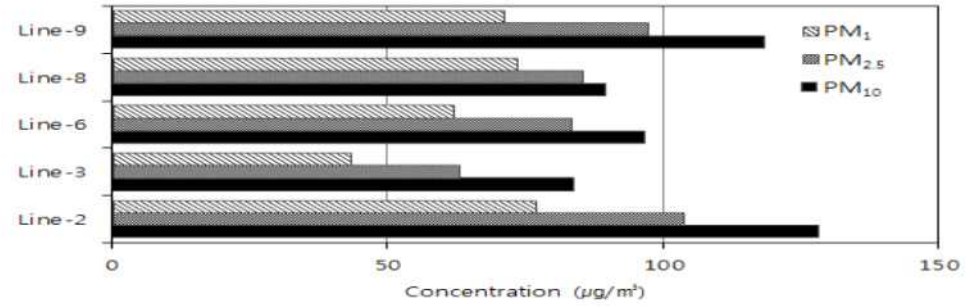
< 서울 지하철 1호선~9호선의 현황>

Line No.	Line Color Symbol	Opening year	Section	Operation Distance (km)	Total No. of Stations		Total No. of Passengers Carried (1,000persons/yr)	Train Operation Frequency on Weekdays
					Ground	Under-ground		
1	Navy	1974	Seoul Station ~Cheongnyangni	7.8	-	10	164,139	517
2	Green	1980	Seongsu	60.2	13	37	761,807	551
		1985	Sinseol-dong~Seongsu					
		1985	Sindorim~Kkachisan					
3	Orange	1995	Jichuk~Ogeum	38.2	2	32	286,361	410
4	Blue	2000	Danggogae~Namtaeryeong	31.7	5	21	302,565	496
5	Purple	1996	Banghwa~Sangildong/Macheon	52.3	-	51	308,501	465
6	Ocher	2000	Eungam~Bonghwasan	35.1	-	38	196,924	356
7	Olive	1996	Jangam~Bupyeong-gu Office	57.1	3	48	374,340	421
8	Pink	1996	Amsa~Moran	17.7	-	17	89,238	306
9	Gold	2009	Gaehwa~Sports Complex Station	31.5	1	29	156,652	484
Total	-			**331.6**	**24**	**238**	**2,640,527**	**4,006**

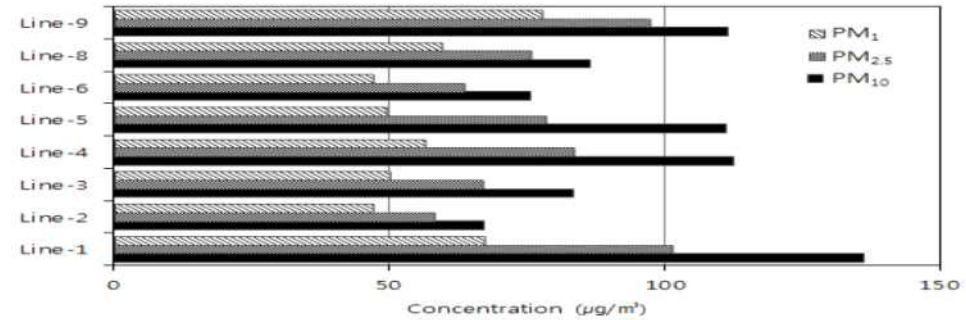
※ Reference :Web site of Seoul Metropolitan Government (updated: 2015. 10.).

○ 다음은 서울 지하철의 여름철과 겨울철의 평균 미세먼지(PM_{10}, $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$) 농도, 농도별 발생 빈도, 질량 비율의 특성을 나타냄.

(a) Winter

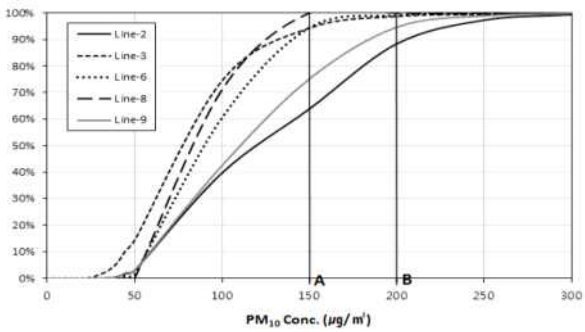


(b) Summer

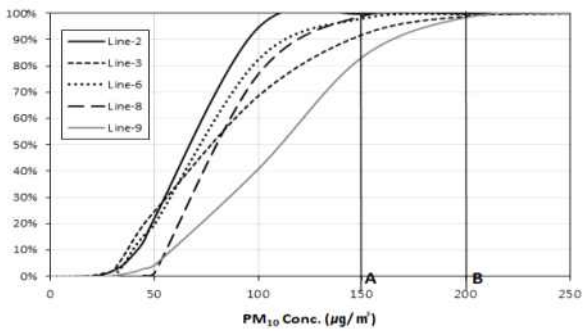


< 서울 지하철의 (a) 겨울철, (b) 여름철 평균 PM 농도 >

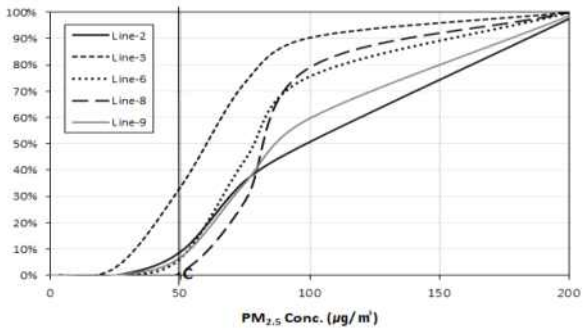
(a) PM_{10} (Winter)



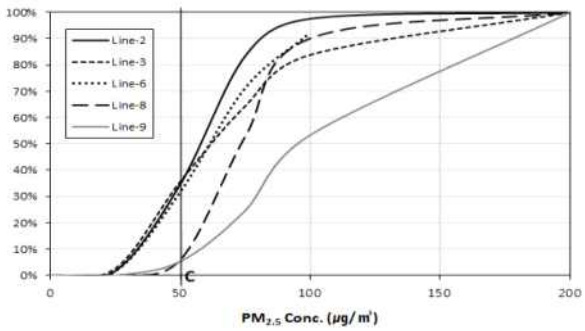
(b) PM_{10} (Summer)



(c) $PM_{2.5}$ (Winter)



(d) $PM_{2.5}$ (Summer)



< 서울 지하철의 계절별 PM_{10}, $PM_{2.5}$ 농도 발생 빈도(누적분포곡선) >

< 연구기간 동안 서울 지하철의 평균 PM_{10}, $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 농도 >

[㎍/㎥]	Line No.	Total No. of Station	PM_{10}				$PM_{2.5}$				PM_{1}			
			Max.	Min.	Mean	STD	Max.	Min.	Mean	STD	Max.	Min.	Mean	STD
Winter	1	12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	43	348.5	30.5	128.1	58.2	262.7	27.3	103.8	45.3	183.7	25.2	77.1	27.8
	3	44	330.1	21.4	83.9	37.5	247.4	41.3	63.1	37	114.2	11.0	43.2	16.0
	4	35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	5	46	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	6	39	270.4	34.4	96.7	31	222.4	27.9	83.2	25.9	149.6	22.5	60.5	18.7
	7	42	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	8	17	192.3	45.4	106.2	27.5	133.6	41.5	85.4	15.8	106.2	37.9	71.0	14.0
	9	25	308.3	33.0	118.4	46.1	254.1	28.0	97.3	39.2	175.0	23.4	69.0	28.2
Summer	1	12	369.0	30.9	136.0	55.5	273.3	22.8	101.7	39.7	151.2	19.7	67.3	20.9
	2	43	165.2	21.3	67.1	20.9	139.3	19.3	58.4	18.3	102.8	16.2	47.3	13.6
	3	44	292.1	12.5	83.4	41.3	197.1	11.2	67.5	31.3	142.4	9.8	50.1	23.4
	4	35	303.1	28.3	112.6	41.5	226.5	9.3	83.7	32.0	155.6	7.4	56.6	21.2
	5	46	346.7	23.9	111.1	50.6	238.9	8.2	78.7	35.0	136.1	7.5	49.5	21.6
	6	39	314.7	30.0	75.7	30.0	238.8	18.0	63.6	24.2	147.1	15.1	47.1	16.7
	7	42	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	8	17	200.2	42.3	86.4	21.4	158.4	34.3	76.0	18.7	119.9	25.2	59.5	14.2
	9	25	235.4	29.0	111.4	37.7	196.3	27.8	97.4	30.3	152.1	24.3	77.9	21.8
Total			282.8	29.5	101.3	38.4	214.5	24.4	81.5	30.2	141.2	18.9	59.7	19.9

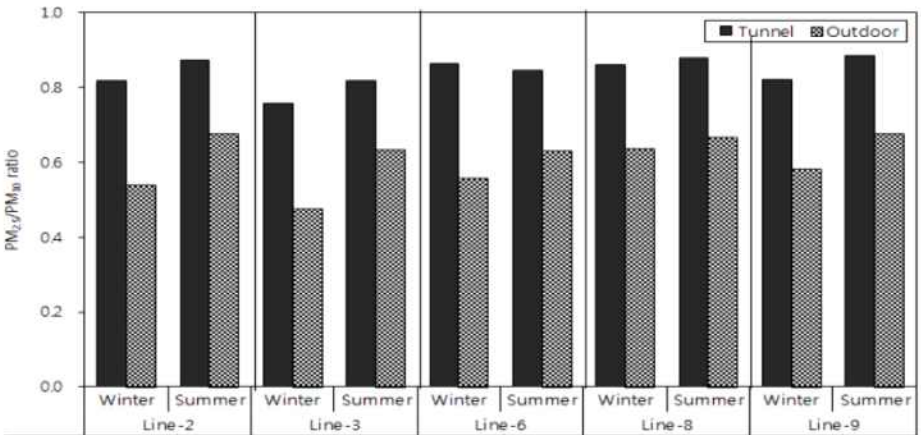
< 연구기간 동안 서울 지하철의 PM 질량 비율 비교 (여름철, 겨울철) >

	ratio	Section	Line No.							
			1	2	3	4	5	6	8	9
Winter	$PM_{2.5}/PM_{10}$	Ground		0.83	0.72			–	–	–
		Underground		0.81	0.76			0.86	0.86	0.82
	PM_1/PM_{10}	Ground		0.69	0.54			–	–	–
		Underground		0.61	0.53			0.65	0.63	0.61
	$PM_1/PM_{2.5}$	Ground		0.83	0.74			–	–	–
		Underground		0.75	0.69			0.75	0.73	0.74
Summer	$PM_{2.5}/PM_{10}$	Ground	–	0.86	0.82	0.71	–	–	–	–
		Underground	0.76	0.87	0.81	0.75	0.71	0.85	0.88	0.88
	PM_1/PM_{10}	Ground	–	0.74	0.65	0.53	–	–	–	–
		Underground	0.52	0.70	0.62	0.50	0.46	0.64	0.69	0.70
	$PM_1/PM_{2.5}$	Ground	–	0.86	0.78	0.74	–	–	–	–
		Underground	0.68	0.80	0.75	0.66	0.64	0.75	0.79	0.79

< 연구기간 동안 서울 지하철 지상, 지하구간의 PM 질량 비율 비교 >

	Winter			Summer		
	$PM_{2.5}/PM_{10}$	PM_1/PM_{10}	$PM_1/PM_{2.5}$	$PM_{2.5}/PM_{10}$	PM_1/PM_{10}	$PM_1/PM_{2.5}$
Ground	0.78	0.62	0.79	0.84	0.70	0.82
Underground	0.82	0.61	0.73	0.86	0.67	0.78
Overall mean	0.80	0.61	0.76	0.85	0.69	0.80

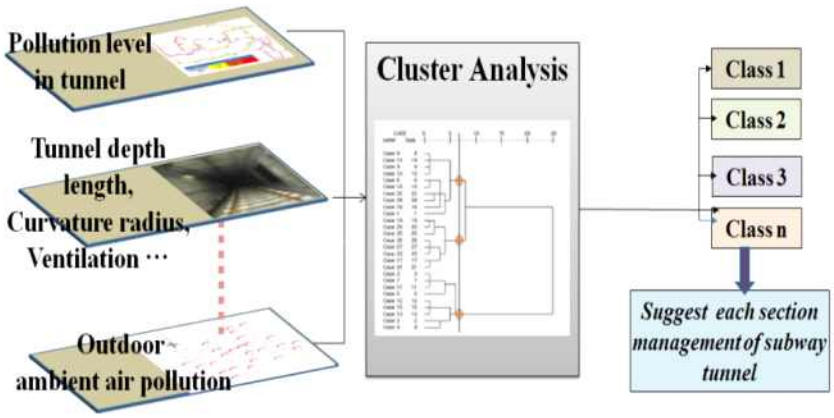
○ 아래 그림은 서울시 대기 측정망 자료를 이용하여 역사 주변의 외기에 대한 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율과 지하터널 내 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율을 계절별로 비교한 결과임. 터널 내 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율은 0.76~0.89 이었으며, 역사 주변 외기의 비율은 0.48~0.68 임.



< 계절별 지하철 터널과 지하철 주변 외기의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율 >

(나) 도시철도 터널 오염특성 분류

○ 서울시 지하철 측정자료와 각 터널의 자료, 외기농도 등의 상관분석, 군집분석 등의 통계분석법을 이용하여 터널 오염도, 터널 심도, 길이, 구배 및 대기오염도 등을 종합하여 오염 특성을 분류함. 본 연구의 서울시 지하철 호선별 지하터널 구간에 대한 농도자료 및 오염 특성 분류 및 분석 자료는 향후 지하철 터널 내 공기질 관리를 위한 기초자료로 활용할 수 있음.



< 지하철 터널 오염특성 분석 절차 >

< 서울 지하철의 노선별 터널 유형 및 특성 >

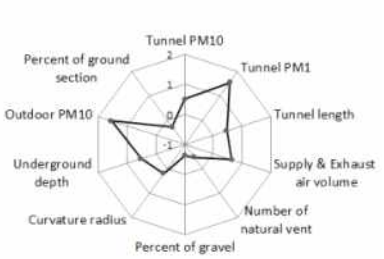
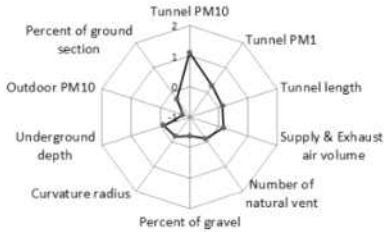
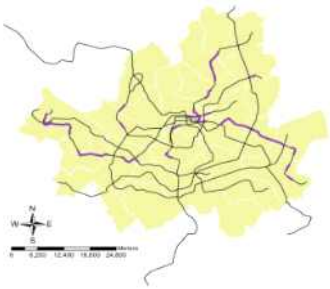
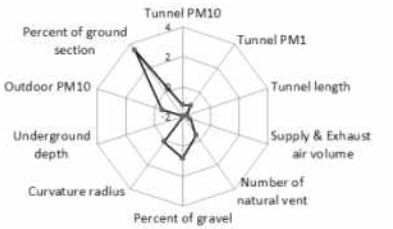
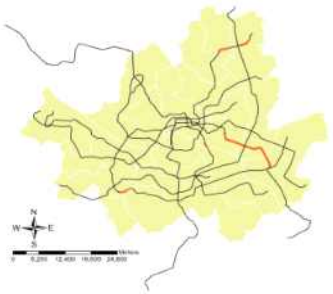
	Line-1	Line-2	Line-3	Line-4	Line-5	Line-6	Line-8	Line-9
Tunnel PM_{10} ($\mu g/m^3$)	135.57 ± 18.64	66.47± 13.84	82.72± 9.44	106.94 ± 15.45	109.27 ± 21.24	75.284 ± 11.53	84.62± 7.22	112.09 ± 11.05
Tunnel $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	102.42 ± 15.78	57.92± 12.49	66.32± 6.69	79.52± 12.66	77.28± 14.16	63.18± 9.51	74.73± 5.94	97.82± 9.81
Tunnel PM_1 ($\mu g/m^3$)	67.91± 9.82	46.90± 8.68	49.39± 3.98	54.09± 6.92	48.70± 7.43	46.73± 6.44	58.91± 4.18	78.19± 6.92
Outdoor PM_{10} ($\mu g/m^3$)	40.71± 2.35	35.56± 1.88	53.08± 1.33	28.62± 2.39	36.91± 1.55	37.08± 1.52	55.98± 1.57	57.27± 1.59
Number of Natural Vent	6	4	1	1	0	0	0	0
Percent of Gravel (%)	34	58	60	58	all concrete	all concrete	all concrete	all concrete
Curvature Radius (m)	875.6	529.1	542.9	516	663.9	1295.2	5660.2	919.5
Underground Depth (m)	10.93	10.72	16.76	12.43	21.64	20.55	16.64	25.38
Supply & Exhaust Air Volume (CMM)	0	4210.37	12129.09	7529.166	16504.44	15521.05	11706.25	19060.83
Tunnel Length (m)	662.78	653.73	872.12	880.08	901.14	789.04	461.90	494.79
Percent of Ground Section (%)	10	23	6	21	all under-ground	all under-ground	all under-ground	all under-ground

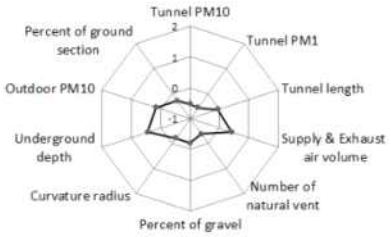
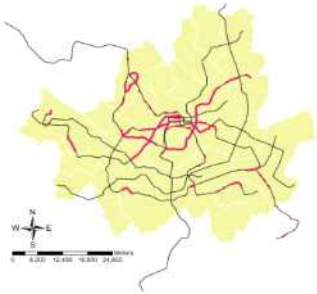
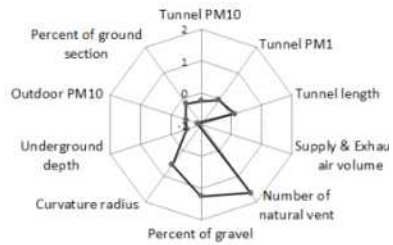
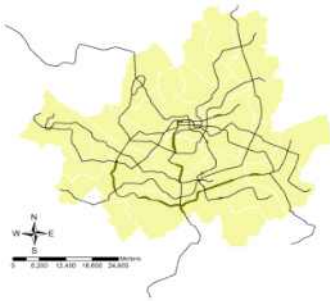
○ 군집분석 결과 **서울 지하철 터널은 5개의 군집으로 분류**됨.

- ✓ **군집 1**: 전부 지하구간으로 심도가 가장 깊은 구간의 터널들이 속함. 특히 $PM_{1.0}$의 평균농도가 가장 높았으며, 터널 주변의 외기 PM_{10} 농도도 가장 높은 구간으로 군집됨. 특히 강제환기인 급 · 배기량이 많은 9호선이 대량 속한 군집으로 평소 9호선 주변에 교통량이 많은 것이 특징임. 따라서 외기의 PM_{10}은 터널 내 $PM_{1.0}$에 영향을 주는 것으로 사료되며, 강제환기 시 입경이 작은 PM도 포집할 수 있는 여과장치가 필요한 것으로 판단됨.
- ✓ **군집 2**: PM_{10}의 평균농도가 가장 높은 구간들로 군집됨. 전 구간이 지하구간으로 심도가 깊었으며 자연환기구의 개수가 매우 적거나 없었고, 따라서 강제환기인 급 · 배기량은 많은 편임. 또한 군집 2의 도상은 자갈이 차지하는 비율이 11.78%로 군집 1의 1.38%에 비해 높은 편임. 자갈도상으로 인해 발생되는 분진의 크기는 크므로 $PM_{1.0}$보다는 PM_{10}에 영향을 준 것으로 판단됨.
- ✓ **군집 3**: 전부 지하구간에 속하며, 심도가 깊은 구간의 터널들이 속하였으나 터널 내 평균 PM_{10}과 $PM_{2.5}$의 농도가 각각 78.67 $\mu g/m^3$과 46.51 $\mu g/m^3$로 비교적으로 낮은 편에 속함. 자연환기구는 거의 없었으며, 강제환기인 급 · 배기량이 상대적으로 많은 구간들이 속함.
- ✓ **군집 4**: 전 구간이 지상구간으로 터널 내 PM_{10}, $PM_{1.0}$의 평균 농도가 가장 낮았고, 급 · 배기량이 매우 적었으며, 자갈도상의 비율이 56.63%로 가장 높았다. 이는 서울시 지하철의 경우 지상구간을 지나는 구간에는 아직 자갈 도상이 많이 남아있기 때문이다.
- ✓ **군집 5**: 군집 5에 속하는 전체 터널 구간 중 2.6%가 지상구간이었으며, 대부분이 지하구간에 속한 구간임. 가장 큰 특징은 자연환기구의 수 평균 5.4개로 매우 높으며, 그에 비해 강제환기인 급 · 배기량은 매우 적은 편임. 또한 도상 중 자갈이 77.26%로 매우 높은 편임.

< 각 군집별 특성 변수의 평균 (터널길이, 심도, 구배, 급배기량, 도상, 외기오염도 등) >

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
Tunnel PM_{10} ($\mu g/m^3$)	104.0	118.4	61.7	78.7	85.2
Tunnel $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	90.6	87.1	50.0	63.4	69.9
Tunnel PM_1 ($\mu g/m^3$)	71.8	56.4	40.4	46.5	52.7
Tunnel Length (m)	1056.9	909.1	113.3	832.2	897.0
Supply & Exhaust Air Volume (CMM)	16771	13043	280	15037	2946
Number of Natural Vent	0.0	0.9	0.1	0.2	5.4
Percent of Gravel (%)	1.4	11.8	59.20	18.5	77.3
Curvature Radius (m)	2880.3	1006.5	462.7	845.9	545.9
Underground Depth (m)	21.8	16.5	0.0	21.2	12.8
Outdoor PM_{10} ($\mu g/m^3$)	56.6	34.2	36.31	43.2	36.8
Percent of Ground Section (%)	0.0	0.0	100.0	0.0	2.6

	Standardization Values	Map for Each Line	Pollution Pattern	Station
Class 1			• All sections are underground sections and underground depth is the deepest section. • This class has the highest average concentration of PM_1 and the highest concentration of PM_{10} in the outdoor. • The amount of forced ventilation was also the largest, and especially Line-9 is characterized by a lot of traffic around the this line.	3 대청, 일원, 가락시장 8 강동구청, 남한산성입구, 몽촌토성, 문정, 복정, 산성, 신흥, 장지, 천호 9 가양, 고속터미널, 공항시장, 구반포, 국회의사당, 김포공항, 노들, 노량진, 당산, 동작, 등촌, 사평, 샛강, 선유도, 신목동, 신반포, 신방화, 양천향교, 여의도, 염창, 증미, 흑석
Class 2			• These sections are all underground sections and deep in underground depth. • The number of natural vent is small and the amount of forced ventilation is large. • The concentration of PM_1 in the tunnel is not high because the PM_{10} concentration in the outdoor is not high. • This class is clustered with the highest PM_{10} concentration. • This class has a high percentage of gravel statues.	1 동묘앞, 신설동, 종로3가, 종로5가 2 신당 4 길음, 동대문, 대문역사문화공원, 명동, 미아, 미아사거리, 삼각지, 수유, 신용산, 쌍문, 총신대입구, 충무로, 한성대입구, 혜화, 회현 5 개롱, 광나루, 군자, 김포공항, 답십리, 둔촌동, 마곡, 마장, 목동, 발산, 방이, 송정, 신길, 신정, 아차산, 양평, 여의도, 영등포구청, 영등포시장, 오목교, 올림픽공원, 왕십리, 우장산, 장한평, 천호 6 마포구청, 월드컵경기장, 증산, 태릉입구
Class 3			• All sections are ground sections.	2 강변, 건대입구, 구로디지털단지, 구의, 당산, 뚝섬, 성수, 신대방, 잠실나루, 한양대 3 옥수, 지축 4 노원, 상계, 창동

	Standardization Values	Map for Each Line	Pollution Pattern	Station	
Class 4			• These sections are all underground and the amount of forced ventilation is large. • The concentration of outdoor PM_{10} is slightly higher. • The percentage of gravel is 18.4 %. • This class is the low concentration of PM_{10} and PM_1.	2	시청, 신림, 신촌, 아현, 왕십리, 이대, 충정로
				3	가락시장, 경복궁, 경찰병원, 고속터미널, 교대, 구파발, 남부터미널, 녹번, 대치, 도곡, 독립문, 동대입구, 매봉, 무악재, 불광, 수서, 신사, 안국, 압구정, 연신내, 을지로, 종로, 충무로, 학여울, 홍제
				5	개화산, 공덕, 광화문, 까치산, 동대문역사문화공원, 마포, 서대문, 신금호, 애오개, 여의나루, 을지로4가, 종로3가, 청구, 충정로, 행당, 화곡
				6	고려대, 공덕, 광흥창, 녹사평, 대흥, 독바위, 돌곶이, 동묘앞, 디지털미디어시티, 망원, 버티고개, 보문, 불광, 삼각지, 상수, 새절, 석계, 신당, 안암, 약수, 역촌, 연신내, 월곡, 응암, 이태원, 창신, 청구, 한강진, 합정, 화랑대, 효창공원앞
				8	단대오거리, 석촌, 송파, 수진, 잠실
Class 5			• The average number of natural vents is 5.4, and the amount of forced ventilation is small. • Line−1 is all natural ventilation and Line−2~Line−4 are semi−forced ventilation. • The percentage of gravel is high at 77.3%.	1	동대문, 서울역, 시청, 제기동, 종각
				2	강남, 교대, 낙성대, 대림, 동대문역사문화공원, 문래,방배, 봉천, 사당, 삼성, 상왕십리, 서울대입구, 서초, 선릉, 신도림, 신천, 역삼, 영등포구청, 을지로3가, 을지로4가, 을지로입구, 잠실, 종합운동장, 합정, 홍대입구
				3	금호, 약수, 양재, 잠원
				4	동작, 서울역, 성신여대입구, 숙대입구, 이촌
				6	마포구청, 월드컵경기장, 증산, 태릉입구

(다) 터널 내 미세먼지의 물리화학적 특성

① 측정 개요

○ 시범노선 중 미아-미아사거리 구간을 측정지점으로 선정하여, 두 역사의 기관사 측 더미부에서 측정을 진행함. PM_{10}, $PM_{2.5}$를 대상으로 포집하였고, 측정 기간은 2017년 4월 19일부터 2017년 6월 15일까지 진행되었으며, 1개의 필터에는 매일 16시부터 익일 16시까지 24시간 동안 먼지를 포집하여서 필터에 일별 특성을 나타낼 수 있도록 함.

○ 측정장비는 Low volume sampler(PMS-104)와 Mini volume sampler(TAS)를 사용하였으며, 측정 지점 당 2대씩 총 4대를 설치하여 측정을 진행함.

○ PMS-104는 Zefluor filter를 사용하여 PM_{10}, $PM_{2.5}$를 포집함. Zefluor filter의 전처리는 먼지 포집 전 데시게이터에서 48시간 동안 항량한 후, 무게를 3회 측정하였고, 먼지 포집 후 포집 전과 동일하게 48시간 동안 항량한 후 무게를 3회 측정하여서 중량농도를 산출하였고, 필터를 반으로 잘라 이온분석과 중금속분석을 진행함.

○ TAS는 Quartz filter를 사용하여 PM_{10}, $PM_{2.5}$를 포집하였다. Quartz filter의 전처리는 850℃의 조건에서 2시간 이상 열처리 하여 필터에 존재하는 유기물을 제거함. 그리고 페트리디쉬에 넣고 파라필름으로 처리한 후 냉동고에 보관하였다가 먼지 포집 시 사용함.

< 측정 지점 및 장비 현황 >

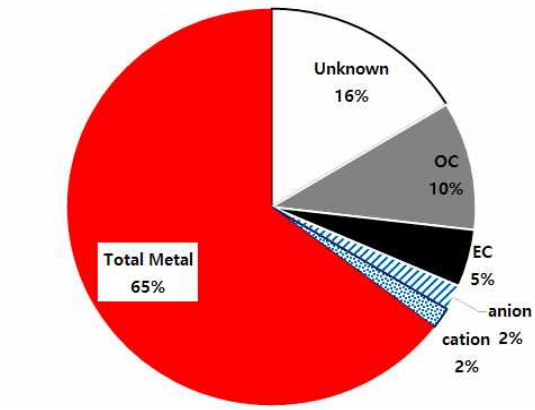
측정지점	측정장비	필터	측정대상	유량 (ℓ/min)	비고
미아 사거리	PMS-104	Zefluor filter	PM10	16.7	중량, 이온, 금속
	PMS-104	Zefluor filter	PM2.5	16.7	
	TAS	Quartz filter	PM10	5.0	탄소
	TAS	Quartz filter	PM2.5	5.0	
미아	PMS-104	Zefluor filter	PM10	16.7	중량, 이온, 금속
	PMS-104	Zefluor filter	PM2.5	16.7	
	TAS	Quartz filter	PM10	5.0	탄소
	TAS	Quartz filter	PM2.5	5.0	

② 측정결과

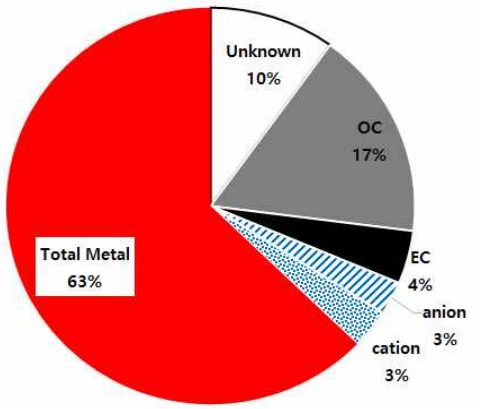
(1) 중량농도 및 성분분석 결과

○ PM_{10}의 경우에는 약 200~300 ㎍/㎥ 정도의 중량농도를 나타내었고, $PM_{2.5}$의 경우 미아사거리는 약 100~150 ㎍/㎥ 의 농도로 보임.

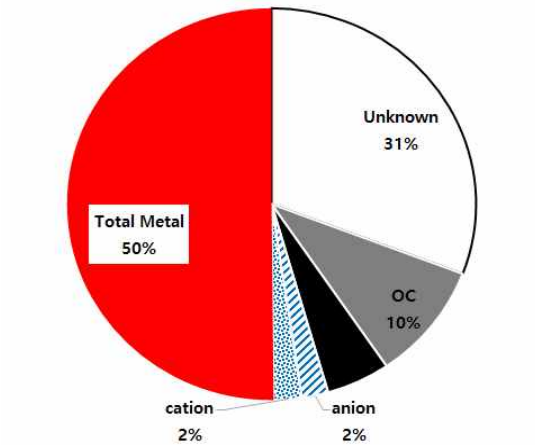
○ 각 지점 별 미세먼지의 구성비를 파이그래프로 나타냄. 지점 별 미세먼지에 대하여 전체적으로 금속성분에 해당하는 물질이 가장 많은 비율을 차지함. 그러나 미아역에서의 금속성분 비율은 미아사거리역에 비해 상대적으로 낮게 구성됨.



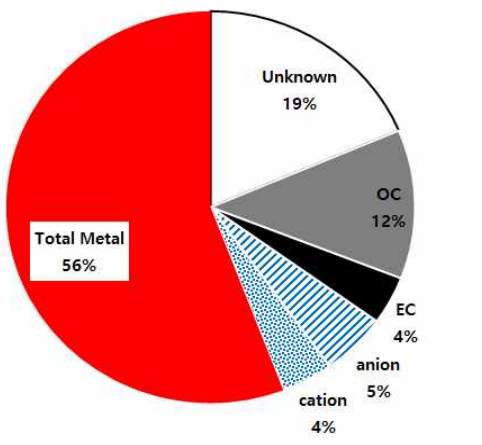
< 미아사거리 PM_{10} 구성비 >



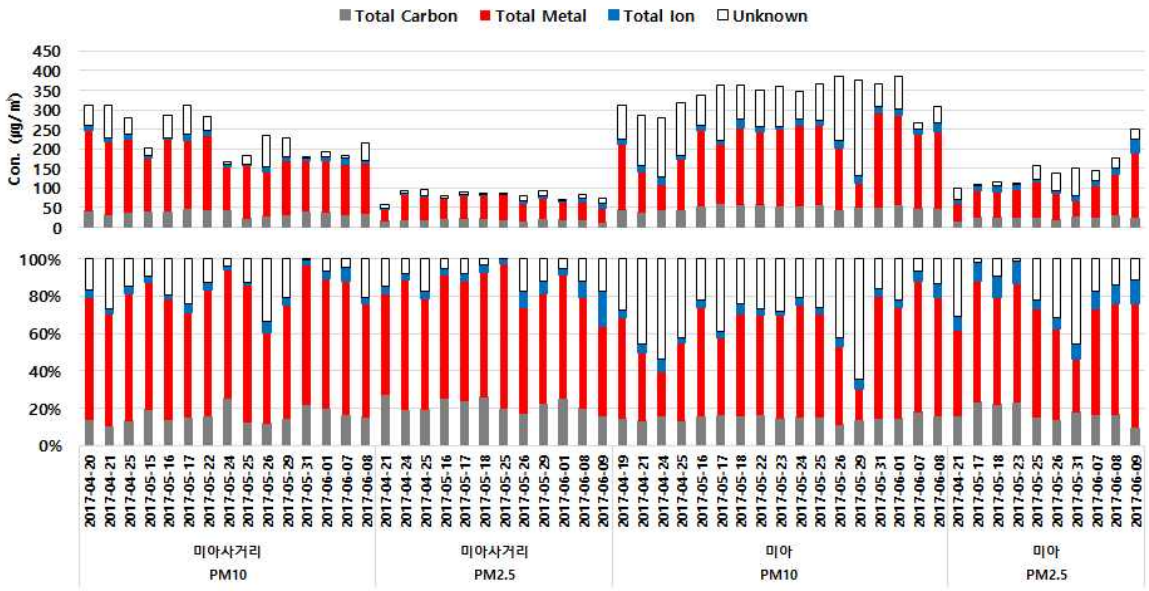
< 미아사거리 $PM_{2.5}$ 구성비 >



< 미아 PM_{10} 구성비 >



< 미아 $PM_{2.5}$ 구성비 >

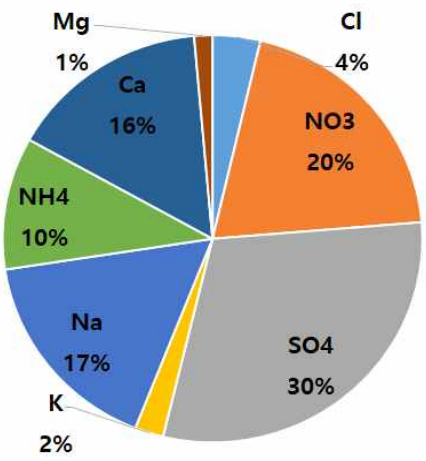


< 측정지점의 일별 PM_{10}, $PM_{2.5}$ 농도 현황 >

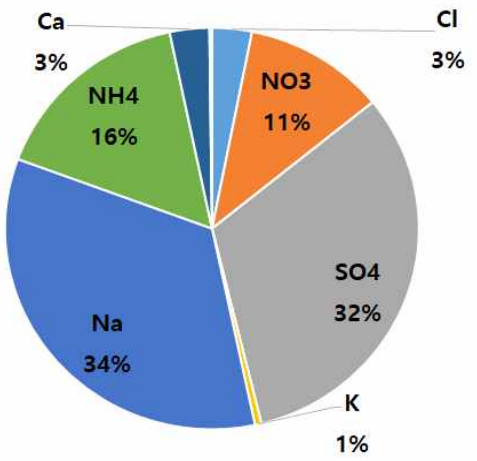
(2) 이온성분 분석결과

○ 미세먼지의 중량농도 중 총 이온에 해당하는 농도는 미아역 PM_{10}에서 14.6 ㎍/㎥ 로 가장 크게 분석되었고, 차등으로 미아역 $PM_{2.5}$에서 13.5 ㎍/㎥ 가 분석되었으며, 다음으로 미아사거리역 PM_{10}에서 9.1 ㎍/㎥, 미아사거리역 $PM_{2.5}$에서 4.9 ㎍/㎥ 가 분석됨. 이를 통해 이온성분의 영향은 입경 크기가 아닌 측정지점의 특성에 대한 영향이 큰 것으로 사료됨. 미아역의 내·외부적 환경적 특성이 이온성분의 농도에 큰 영향을 끼친 것으로 예상됨.

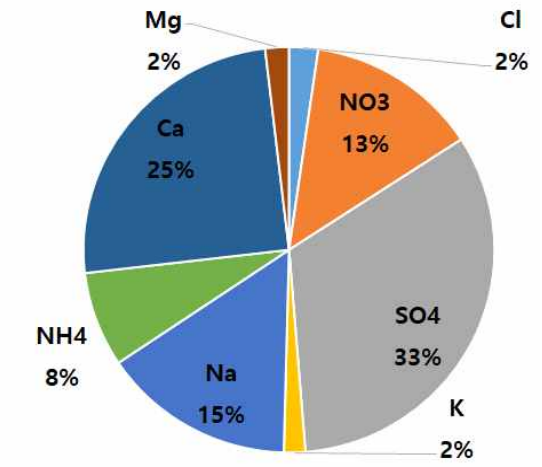
○ 각 측점지점의 이온성분 비율을 아래에 파이그래프로 나타냄. 가장 많은 양을 차지하는 것은 모든 그래프에서 SO_4^{2-}로 나타났으며, 다음으로 미아역 PM_{10}을 제외하고는 모두 NA^{+} 성분이 높게 나타남. 미아역 PM_{10}은 Ca^{2+} 성분이 두 번째로 높은 비율을 나타냄.



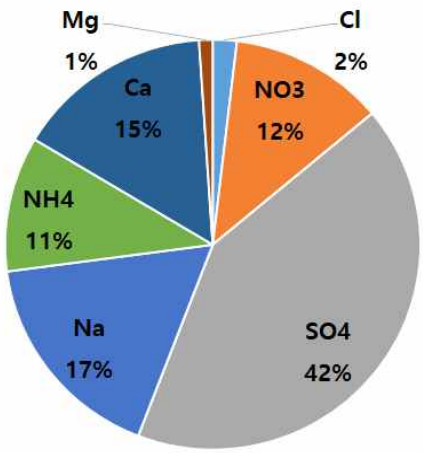
< 미아사거리역 PM_{10} 이온성분 >



< 미아사거리역 $PM_{2.5}$ 이온성분 >



< 미아역 PM_{10} 이온성분 >

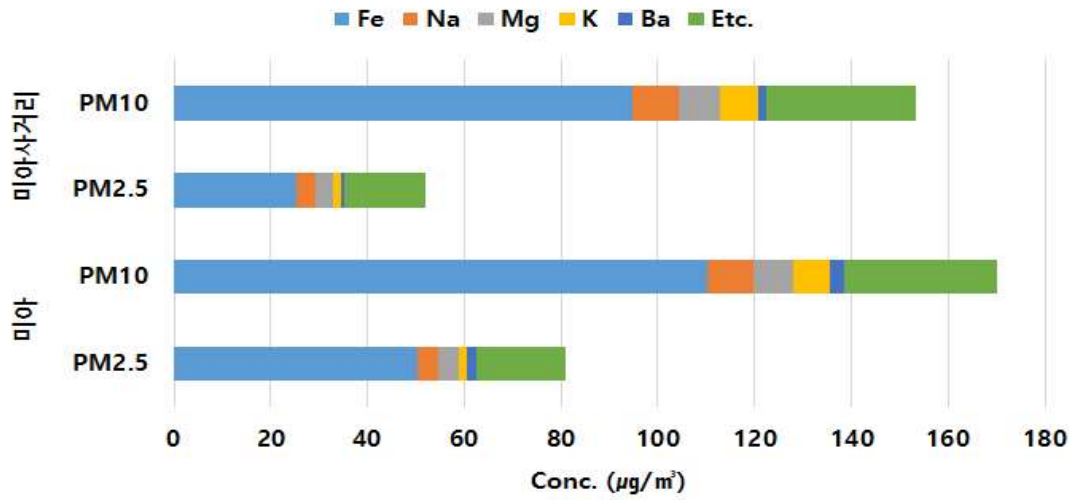


< 미아역 $PM_{2.5}$ 이온성분 >

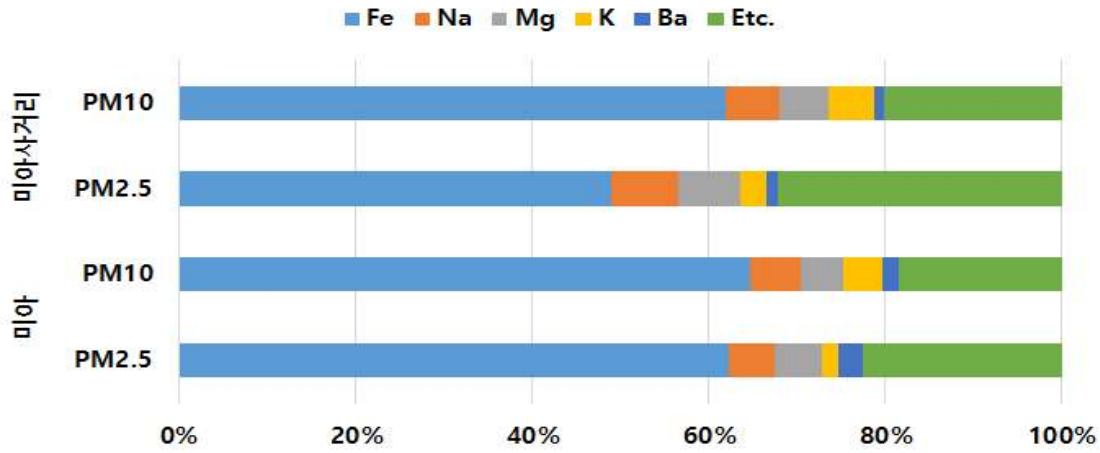
(3) 금속성분 분석결과

○ 도시철도 터널 내 미세먼지의 구성성분 중 가장 많은 비중을 차지하는 것은 금속성분임. 본 연구의 측정지점 역시 금속성분이 미세먼지의 구성비 중 가장 많은 양을 차지하는 것으로 나타남. 미세먼지의 중량농도 중 금속성분에 해당하는 농도는 미아역 PM_{10}에서 170 ㎍/㎥ 이고, 차등으로 미아사거리 역의 PM_{10}에서 153 ㎍/㎥ 로 나타남. 다음 순서로 미아역 $PM_{2.5}$가 81 ㎍/㎥, 미아사거리역 $PM_{2.5}$가 52 ㎍/㎥ 로 분석됨. 이를 통하여 금속성분의 농도는 입경별 크기에 영향을 받는 것으로 사료됨.

○ 다양한 금속성분 중 철(Fe) 성분이 가장 높은 농도를 나타냄. 미세먼지의 중량농도 중 Fe 성분의 농도는 미아역 PM_{10}은 110 ㎍/㎥, 미아사거리역 PM_{10}은 95 ㎍/㎥, 미아역 $PM_{2.5}$는 50 ㎍/㎥, 미아사거리역 $PM_{2.5}$는 25 ㎍/㎥ 로 분석됨. 미세먼지 내 금송석분은 Fe 다음으로 Na, Mg, K 순으로 나타남.



< 시범노선 측정지점 별 금속성분 농도 현황 >

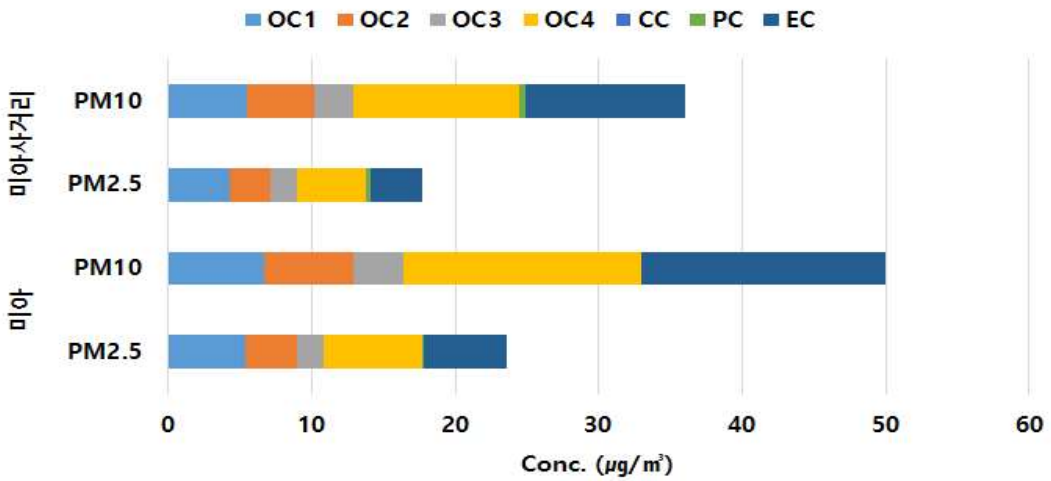


< 시범노선 측정지점 별 금속성분 농도 비율 현황 >

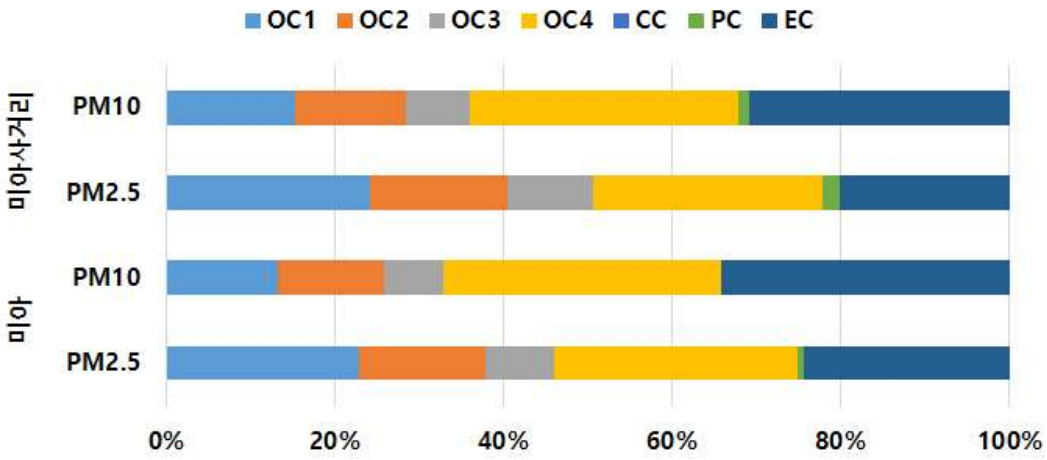
(4) 탄소성분 분석결과

○ 탄소성분은 금속성분과 마찬가지로 미아역 PM_{10}에서 50 ㎍/㎥ 로 가장 높은 농도를 보였고, 차등으로 미아사거리역 PM_{10}에서 36 ㎍/㎥ 의 농도를 보임. 다음으로 미아역 $PM_{2.5}$에서 24 ㎍/㎥, 미아사거리역 $PM_{2.5}$에서 18 ㎍/㎥ 의 값을 나타냄.

○ 탄소는 크게 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC)로 분류가 되며, 일반적으로 OC의 양이 탄소성분에서 주를 이룸. PM_{10}의 경우 OC/EC의 비율은 약 2배정도 차이가 나는 반면, PM2.5에서는 약 3배정도의 차이를 보이는 것으로 나타남. 이를 통해 미세먼지 중 EC가 차지하는 비율은 PM_{10}에서 더 높은 것을 알 수 있으며, 입자의 크기가 2.5 ㎛ 보다 큰 것이 주를 이룰 것으로 사료됨.



< 시범노선 측정지점 별 탄소성분 농도 현황 >



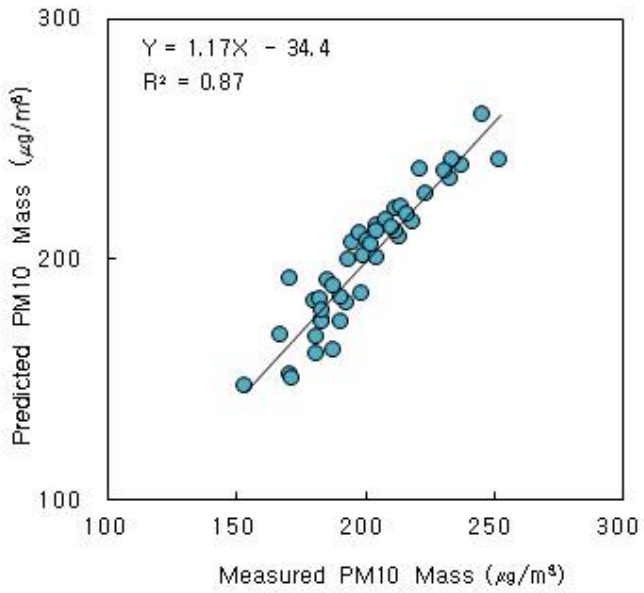
< 시범노선 측정지점 별 탄소성분 농도 비율 현황 >

(라) PMF를 오염기여도 평가 결과

○ 서울시 지하철 터널 내 PM_{10}의 오염 특성을 정량적으로 비교 · 분석하기 위하여 hot spot 구간인 서울지하철 4호선 M역-K역 사이의 터널에서 PM_{10}의 오염특성을 심도 있게 조사함. 터널에서 PM_{10} 시료를 채취하여 질량농도, 무기원소 및 이온성분을 분석하였으며, 수용모델 중의 하나인 PMF 모델을 이용하여 지하철 터널 내 미세먼지 오염원의 기여도를 추정함.

○ PMF (positive matrix factorization: 양행렬 인자화법) 모델은 오염원 자료 (source inventory)의 확보가 어려운 경우 다수의 측정자료를 이용하여 오염원 기여도를 정량적으로 평가하는 방법임.

○ 아래 그림은 지하철 터널 내 미세먼지의 무기원소, 이온성분 분석 결과를 이용하여 PMF 모델링을 수행하여 예측된 PM_{10}의 추정 농도와 실제 측정된 농도의 상관관계를 나타냄. PMF 모델링을 통해 얻은 추정치와 실측치 사이의 상관계수 R^2는 0.87로 이는 PMF 모델의 정확도가 높음을 의미함 (정확도 약 87%).

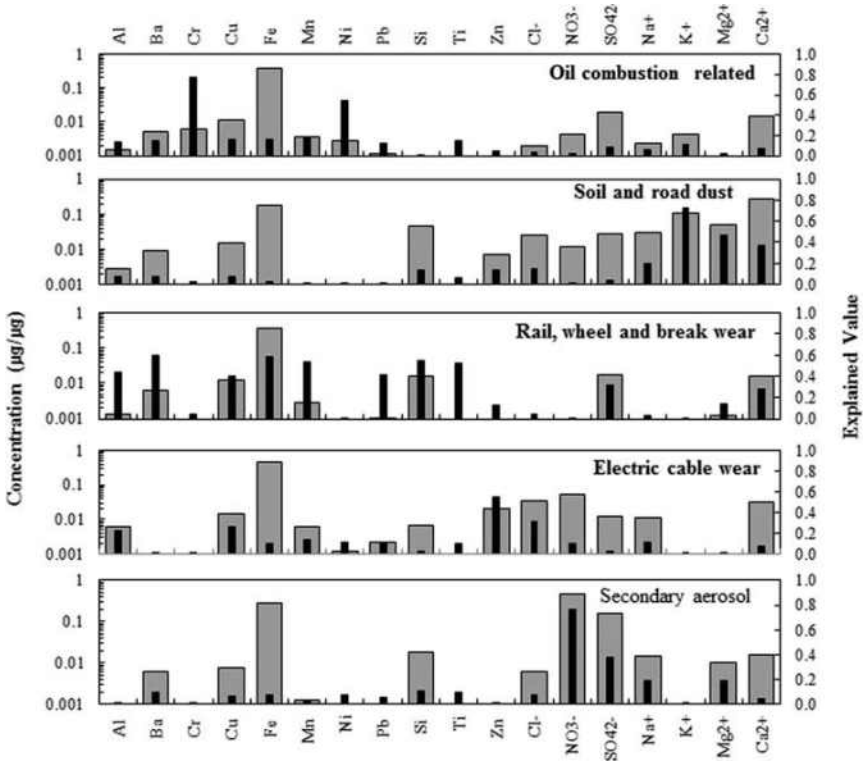


< 측정값과 예측값의 상관성 분석 >

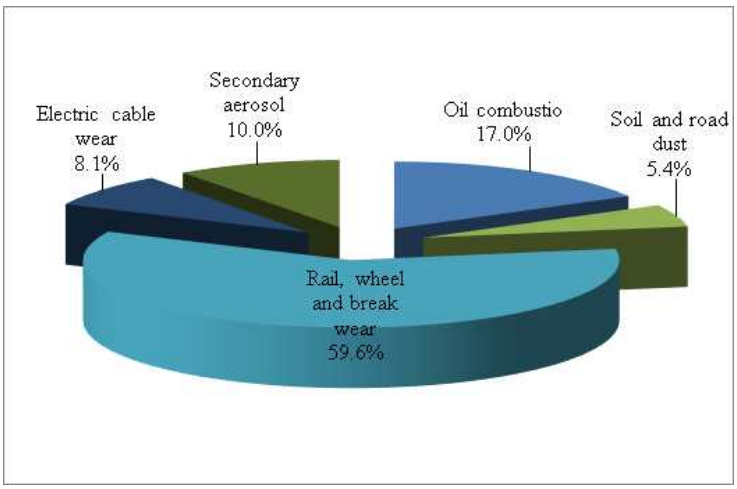
○ PMF 모델링 결과 M 터널에서의 PM_{10} 주요 오염원은 ① 기름 연소 관련 오염원 (Ni, Cr, SO_4^{2-}, Ca^{2+}), ② 토양 및 도로 관련 오염원 (Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}, Si, $SO_4$2-), ③ 레일 및 브레이크 마모 관련 오염원 (Fe, Mn, Si, Ba, Ca^{2+}), ④ 전기 케이블 마모 관련 오염원 (Zn, Cu, Cl^-, Ca^{2+}), ⑤ 2차 입자관련 오염원 (SO_4^{2-}, NO^{3-}, NH_4^+) 으로 확인됨.

○ 분류된 오염원 중 철(Fe)이 가장 많이 부분을 차지하여 레일, 바퀴 및 브레이크 마모 관련 오염원이 59.6%로 높은 기여도를 차지함. 전력 케이블 마모에 의한 기여율도 8.1%로 지하철 터널 내부의 오염원이 67.7%로 높은 비율을 차지함을 확인함.

○ 특히 오일 관련 오염원은 외부에서 유입될 뿐만 아니라 디젤을 이용하는 터널 청소차량의 운행에 의해 일부 영향을 받게 됨. 따라서 오일 관련 오염원을 고려하면 지하철 터널의 미세먼지 관련 오염원 중 70% 이상은 내부 기인 오염원으로 확인됨.



< 지하철 터널 미세먼지의 오염원 분류표 >



< 지하철 터널 미세먼지의 정량적 오염원 기여도 >

(마) 승강장에서의 미세먼지 농도가 10 ㎍/㎥ 증가 시 피해 경제성 평가

○ Cost-of-illness (COI) 모델을 이용하여 지하철 역(10개 역사로 한정) 이용객을 대상으로 미세먼지 농도가 10 ㎍/㎥ 증가 시 직접적(의료, 비의료) 및 간접적(조기 사망률, 생산성 감소) 피해 경제성을 평가함.

○ 미세먼지의 피해를 폐암과 심장질환 카테고리로 한정하여 지하철 미세먼지에 의한 사회경제학적 손실을 평가함.

< 미세먼지에 의한 피해 대상 질환의 카테고리 >

Types of Disease	Sub-Types of Disease	ICD-10 Codes
All lung cancer	Malignant neoplasm of trachea	C33
	Malignant neoplasm of bronchus and lung	C34
Cardiovascular diseases	Acute rheumatic fever	I00–I02
	Chronic rheumatic heart diseases	I05–I09
	Essential (primary) hyper tension	I10
	Other hypertensive diseases	I11–I15
	Acute myocardial infarction	I21–I22
	Other ischemic heart diseases	I20, I23–I25
	Pulmonary embolism	I26
	Conduction disorders and cardiac arrhythmias	I44–I49
	Heart failure	I50
	Other heart diseases	I27–I43, I51–I52
	Intracranial hemorrhage	I60–I62
	Cerebral infarction	I63
	Stroke (not specified as hemorrhage or infarction)	I64
	Other cerebrovascular diseases	I65–I69
	Atherosclerosis	I70
	Other peripheral vascular diseases	I73
	Arterial embolism and thrombosis	I74
	Other diseases of arteries, arterioles and capillaries	I71–I72, I77–I79
	Phlebitis, thrombophlebitis, venous embolism and thrombosis	I80–I82
	Varicose veins of lower extremities	I83
	Hemorrhoids	I84
	Other diseases of circulatory system	I85–I99

○ 폐암과 심장질환을 기반으로 미세먼지 피해의 직접적 비용, 간접적 비용을 계산하여 아래 표에 정리함.

< 폐암과 심장질환과 연관한 데이터 소스 카테고리 >

Types of Cost	Categories		Estimation Variables	Data Sources
Direct costs	Direct medical costs	Benefit sector	Treatment amount of hospitalization and outpatient	National Health Insurance Statistical Yearbook [31]
		Non-benefit sector	Treatment amount and non-benefit rate of hospitalization and outpatient	
	Direct non-medical costs	Transportation	Outpatient-visit days, Round-trip transportation cost	National Health Insurance Statistical Yearbook [31], The Third Korea National Health and Nutrition Estimation Survey [32]
		Caregiver	Hospitalization days, Average daily care-giver cost	National Health Insurance Statistical Yearbook [31], The Korea Patient Helper Society [33]
Indirect costs	Future income loss due to premature death		Number of deaths, Number of years , Employment rate, Average annual real wage, Discount rate	Cause of Death Statistics [34], Economically Active Population Survey [35], Survey Report on Labor Conditions by Employment Type [36]
	Productivity loss resulting from absence from work		Hospitalization days, Outpatient visit days, Employment rate, Average daily wage	National Health Insurance Statistical Yearbook [31], Economically Active Population Survey [35], Survey Report on Labor Conditions by Employment Type [36]

○ 미세먼지의 직접적 피해 비용은 아래 식을 이용하여 계산함.

$$\sum_{a}\sum_{i}\sum_{j}\left(\frac{E_{ij}^{a}}{1-\alpha}+\frac{OE_{ij}^{a}}{1-\beta}\right)+\sum_{a}\sum_{i}\sum_{j}(O_{ij}^{a}\times OM)+\sum_{a}\sum_{i}\sum_{j}\{N_{ij}^{a}\times(M+I)\}$$

where

$a = 1, 2, \ldots, n$ diseases;

$i = 1, 2$ genders;

$j = 0, 1, \ldots, n$ age;

E_{ij}^{a} is the total treatment amount of inpatients for a, i and j in the health insurance data;

OE_{ij}^{a} is the total treatment amount of outpatients for a, i and j in the health insurance data;

α is the percentage of hospitalization expenses borne by the patient;

β is the percentage of outpatient expenses borne by the patient;

O_{ij}^{a} is the number of outpatient-visit days for a, i and j;

OM is the average round-trip transportation costs per outpatient visit;

N_{ij}^{a} is the number of hospitalization days for a, i and j;

M is the average round-trip transportation costs of admission, and

I is the daily average costs of caregivers for inpatients.

○ 미세먼지의 간접적 피해 비용은 아래 식을 이용하여 계산함.

$$\sum_{a}\sum_{j}\sum_{i}\{F_{ij}^{a}\times\frac{Y_{j}^{t+\tau}\times p_{ij}\times e_{ij}}{(1+r)^{i}}\} \quad (2)$$

where

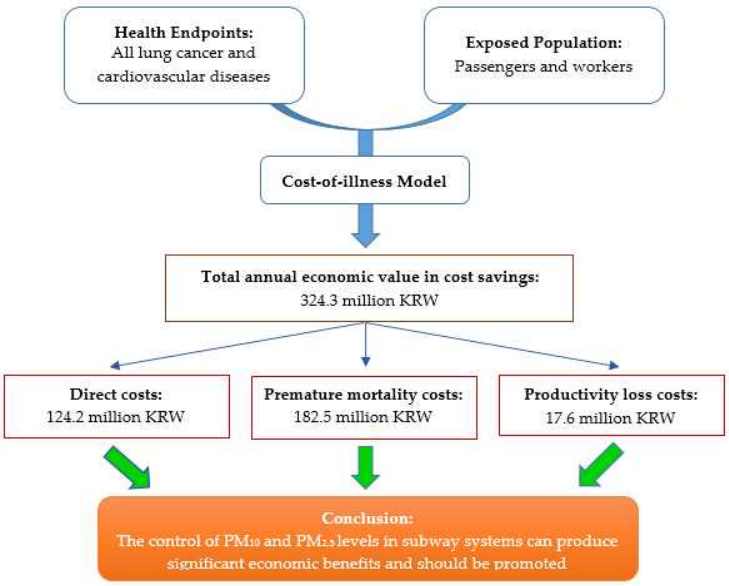
$a = 1, 2, \ldots, n$ diseases;
$i = 1, 2$ genders;
$j = 0, 1, \ldots, n$ age;
t is the age at time of death;
τ is the number of years;
F_{ij}^{a} is the number of deaths;
$Y_{j}^{t+\tau}$ is the annual expected income at $t + \tau$;
p_{ij} is the labor force participation rate;
e_{ij} is the employment rate, and
r is the discount rate.

$$\sum_{a}\sum_{j}\sum_{i}\{(N_{ij}^{a}+\delta\times O_{ij}^{a})\times p_{ij}\times e_{ij}\times y_{ij}\} \quad (3)$$

where

$a = 1, 2, \ldots, n$ diseases;
$i = 1, 2$ genders;
$j = 0, 1, \ldots, n$ age;
N_{ij}^{a} is the number of hospitalization days for a, i and j;
δ is the non-production rate for an outpatient vs. a hospitalized patient;
O_{ij}^{a} is the number of outpatient-visit days for a, i and j;
p_{ij} is the labor force participation rate;
e_{ij} is the employment rate, and
y_{ij} is patients' daily average income.

○ 미세먼지 농도가 10 ㎍/㎥ 증가 시 직접적 비용 소비는 1억 2천 4백만원, 조기 사망률에 의한 손실은 1억 8천 2백만원, 생산성 감소에 따른 손실을 1천 7백만원 가량으로 예측되어, 총 3억 2천 4백 3십만원의 피해 경제성 평가 결과가 나옴.



< 피해 경제성 COI 모델 평가 모식도 및 예측 비용 결과 >

다. 나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발

(1) 전도성 필터 개발

(가) 전도성 필터 제조

① 알루미늄 전구체 잉크 제조

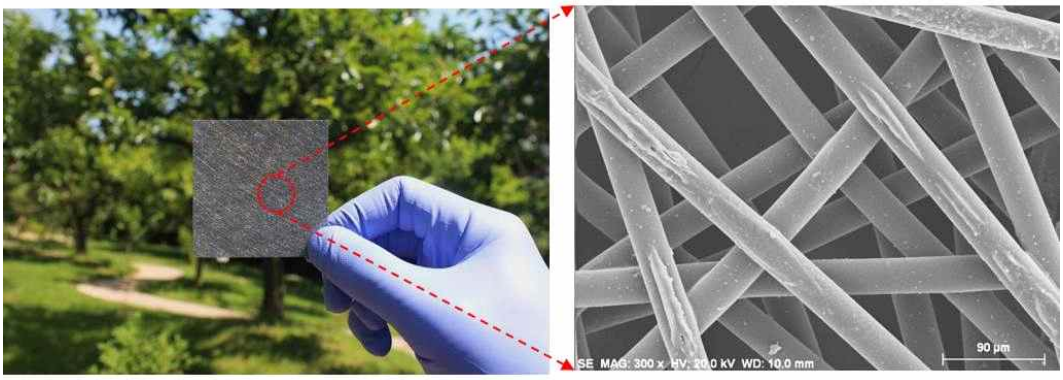
○ 전도성 필터 제조에 사용된 알루미늄(Al) 전구체 잉크(precursor ink)는 알루미늄 디부틸 에테르($O(C_4H_9)_2$) 용매에 분산된 $AlCl_3$와 $LiAlH_4$의 에테르 반응에 의해 제조하고 여과하여 제조함.

② 알루미늄 전도성 섬유필터 제조

○ 전도성 섬유필터의 기판 필터로는 다양한 여과 시스템에 전처리 필터로 사용되는 폴리에스터 섬유 필터를 이용함. 제작된 필터는 기판으로 사용하는 섬유의 물성이 그대로 반영되기 때문에 필요에 따라 다른 섬유로 교체가 가능함.

○ 전도성 섬유필터의 제조 과정은 다음과 같음. 건조된 필터는 $Ti(O-i-Pr)_4$ (Titanium isopropoxide) 희석 촉매에 침지하여 촉매처리를 하고 상온에서 건조함. 이후 일정시간 동안 촉매 처리된 필터를 알루미늄 전구체 잉크에 침지한 뒤 상온에서 건조를 함. 이러한 알루미늄 코팅 공정은 아르곤 가스 분위기에서 이루어짐.

○ 아래 그림은 알루미늄이 코팅된 폴리에스터 섬유 필터와 그것의 미세구조에 대한 전자주사현미경 관찰 결과를 나타냄. 코팅 공정 후에 육안상으로는 섬유필터의 색 변화만 일어나며, 전자주사현미경 관측 결과상으로도 미세조직의 표면구조변화는 거의 없음을 확인함.



< 알루미늄 전도성 섬유 필터 사진 및 전자주사현미경 미세구조 관찰결과 >

③ 전기적 특성

○ 전도성 필터의 전기적 특성은 알루미늄 전구체 잉크의 코팅시간을 조절하여 간단히 제어할 수 있음. 섬유 필터의 전기적 특성은 코팅시간에 지수적으로 감소하며, 상온에서 2시간 남짓의 코팅만으로도 200 mΩ/sq 의 낮은 면저항 값을 가짐.

(나) 전도성 필터의 입자제거효율 측정

① 입자제거효율 평가 시스템

○ 전도성 필터를 고정하며, 미세먼지가 전도성 필터를 통과하기 전에 입자를 대전시키고, 전도성 필터에 고전압을 인가할 수 있는 필터 챔버를 설계 제작함. 제작 내용과 평가 방법에 관한 내용은 별첨*에 수록함.
(*별첨 4. 나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발 및 평가)

② 전도성 필터 기판(PET)의 입자제거율 평가 – 기계적 집진 특성

○ 본 연구에서 사용한 폴리에스터 부직포 필터의 경우 30 ㎛의 상대적으로 큰 섬유직경, 높은 다공성 및 얇은 필터두께로 인해 입자 부착효율은 10 % 전후로 기계적 집진 원리에 의한 포집효율은 매우 저조함.

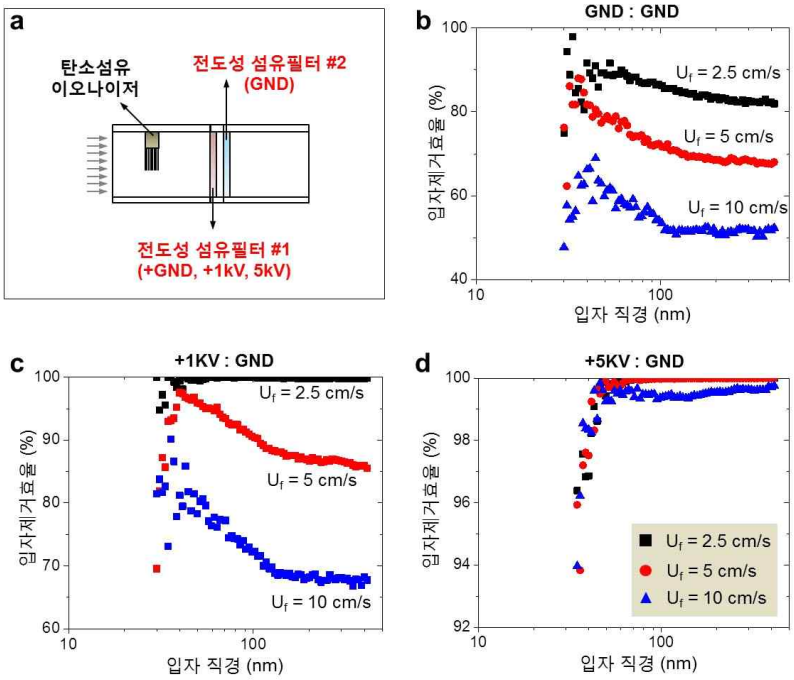
③ 전도성 필터의 입자제거율 평가 – 전기집진 특성

(1) 입자 제거 효율

○ 효율 측정을 위해 아래 그림 (a)와 같이 전도성 필터 전단부에 입자 하전을 위한 탄소섬유 이오나이저를 설치하였고 전도성 필터는 5 mm의 간격으로 평행하게 배치함. 입자가 필터를 통과하기 전 탄소섬유에 −10 kV 의 고전압을 가해 음이온을 발생시켜 유입된 입자를 대전시킴과 동시에 전기장을 형성함. 전단에 위치한 전도성 필터에는 양극의 고전압을 인가하고 후단에 부착된 전도성 필터는 접지를 시킴으로써 전도성 필터 사이에도 강한 전기장이 발생하도록 함.

○ 면속도가 증가할수록 전기장 내에서 입자의 체류시간이 감소함. 따라서 입자 하전효율 및 관성력 대비 정전기력의 상대적인 효과가 감소하여 입자 제거효율이 저하됨.

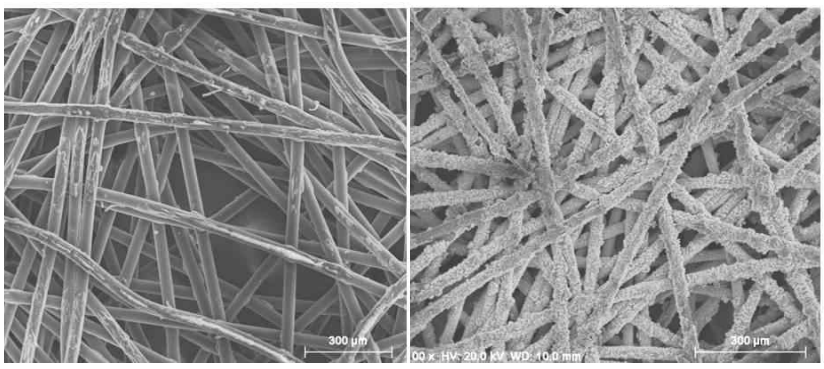
○ 또한 전단부의 전도성 필터에 인가된 전압이 증가하면 입자에 작용하는 쿨롱력에 의한 전기집진 효과가 증대됨. HEPA 필터와의 집진성능 비교 기준이 되는 300 nm 입자의 경우, 면속도 5 cm/s 이하에서는 인가전압 5 kV에서 99.99% 이상의 제거효율을 달성함.



< 인가전압에 따른 입자 제거 효율 >

(2) 필터 표면 분석 및 분진 유지용량

○ 아래 그림은 KCl 나노입자의 전도성 섬유필터 표면 부착 전후의 형상을 전자주사현미경 분석한 결괴임. 일반적인 에어필터의 경우에 입자들은 불규칙한 체인형태로 형성되는 수상돌기 구조로 섬유 표면에 부착되는 반면, 전도성 필터 표면으로 정전기력에 의해 포집된 입자들은 반구형 응집체의 형태로 섬유표면뿐만 아니라 필터의 깊이 방향으로 고르게 부착됨. 이러한 정전기력 효과에 의한 입자의 균일한 증착은 수상 돌기의 성장을 느리게 하므로 집진 효율의 저하 없이 더 많은 양의 입자를 포집할 수 있음.



< 입자 포집 전 후의 필터 형상 >

○ 이는 분진 유지 용량 측정 결과에서도 확인 가능함. 초기 압력 강하가 대략 3배정도 증가했을 때, 여과시험을 종료하고 측정된 입자의 중량을 필터 면적으로 나누어 DHC 값을 계산함. 전도성 필터의 DHC 값을 파악하기 위해 한 장의 전도성 필터가 사용되었고, 10 kV를 인가함. 분진 유지 용량 테스트 결과 전도성 필터와 헤파필터의 DHC 값은 각각 12.5와 3.4 μg/

mm^2 이며, 전도성 필터가 헤파필터에 비해 더 오랜 시간동안 더 높은 효율로 작동함을 확인함.

(3) 압력 손실

○ 큰 유동 저항은 집진과정에서 상당한 양의 팬 동력 에너지를 소모하기 때문에 에너지 효율 측면에서 높은 제거 효율과 필터의 낮은 압력손실 특성을 함께 고려해야 함. 일반적으로 에어 필터는 제거 효율과 압력 손실 사이의 비례관계를 나타내며, 공기청정에 소비되는 에너지의 저감을 위해서는 필터의 압력 손실은 최소화하고 제거효율은 향상시켜야 함. 전도성 섬유 필터의 압력 손실은 헤파필터보다 10배 이상 적음. 면속도 10 cm/s 및 10 kV 조건을 인가했을 경우, 압력 손실 ~300 Pa (30 mmAq) 보다 훨씬 낮은 압력 손실을 보이며, 300 nm 입자의 집진효율 99.99%를 달성함.

(다) 전도성 필터 시스템 제조 및 최적화

① 전도성 필터 추가 물성 평가

○ 모듈 제작 이전에 다양한 상황 하에서 알루미늄 전도성 필터의 미세먼지 제거 효율 이외 물리적 성질에 대하여 평가를 진행함.

○ 필터의 굽힘성, 알루미늄 필름의 접착력, 세척에 대한 저항성과 이후 조성 변화에 대한 항목을 조사함. 이를 위해 각각 굽힘 반경 5mm 일 때 1,000번 반복 굽힘 실험, 3M 테이프를 이용한 접착력 실험, 다종의 화학 물질에 소니케이션 실시 후 전기적 물성 및 표면 물성 변화를 XPS로 확인하는 4종의 실험을 거침. 각 실험에서 주어진 가혹한 환경 하에서도 큰 물성 변화는 일어나지 않았으며, 세부 사항은 별첨*에 수록함.
(*별첨 4. 나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발 및 평가)

② 2D 평면 필터를 이용한 모듈 제작

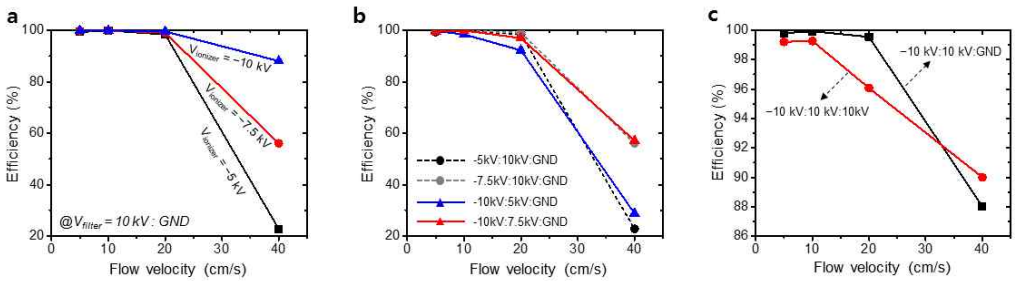
○ 300mm x 300mm 면적의 모듈을 목표로 2D 평면 필터를 이용한 모듈을 설계 제작함. 해당 모듈의 후면에는 공기 유동을 만들어 주기 위한 팬을 부착할 수 있도록 설계 되었으며, 팬의 부피를 제외한 모듈 사이즈는 300 mm x 300 mm x 110mm 로 설계함.



< 전도성 필터 모듈 >

③ 전도성 필터 시스템 성능 시험평가

○ 위와 같이 고안된 전도성 필터 시스템의 성능 시험 평가를 위해 1차적으로 재료연구소에서 입자 제거 효율을 위한 최적 조건에 대한 조사를 실시함. 탄소 섬유 이오나이저, 전도성 필터, 접지 혹은 2차 전도성 필터를 조합하고 전압의 폭을 바꾸어 가며 최적 조건을 확인함. 아래 그림에서 세부 사항을 확인 할 수 있으며, 유속이 느릴수록, 그리고 이오나이저와 전도성 필터의 전압 차이가 클수록 성능이 증가됨을 볼 수 있음.

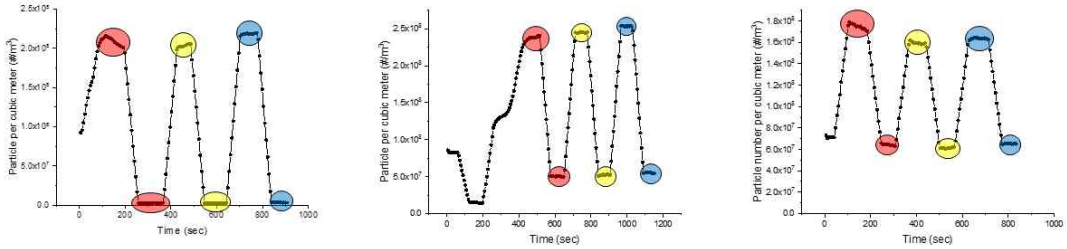


< 유속, 전압 변화에 따른 전도성 필터 성능 테스트 >

○ 최종적으로는 이오나이저의 전압을 −10 kV, 전도성 필터의 전압을 10 kV, 그 이후에는 접지를 시키는 형태로 공인 인증 테스트를 실시함. 해당 테스트는 한국기계연구원에서 진행함. 시험 대상 분진은 입경 300nm의 KCl 입자였고, 열차 주행 시 빠른 유속을 고려하여 21 cm /s ~ 64 cm/s (1 ~ 3 m3/min) 로 실험을 진행함.

○ 일정 시간당 발생하는 입자 발생 총량을 측정하고 전압 인가 / 제거를 3회 반복하여 필터에서 빠져나가는 입자 총량을 확인하고 효율을 계산, 평균을 내는 방식으로 성능을 계산함. 아

래 그림에서 측정된 데이터를 확인 할 수 있으며, 붉은 원 내의 수치가 1회 차, 노란 원 내의 수치가 2회 차, 파란 원 내의 수치를 3회 차 측정 결과임. 최종 시험 결과, 유속이 21 cm/s 일 때 나타나는 평균 효율이 98.6%이고 이 때 압손은 1.55 Pa (0.158 mmAq)로 파악되어 목표치에 근접하였음을 확인 가능함. 또한 최대 64 cm/s 의 속도에서도 전도성 필터가 61.6%의 효율을 가짐을 확인함.



< 전도성 필터 성능 테스트 (전압을 3회 인가 / 제거) >

시험결과보고서

KIMM 한국기계연구원 KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS | 페이지(2) / 총페이지(5)

1	시험명	전기집진 필터의 입자 포집율 시험	
2	의뢰자명 및 주소	재료연구소 [51508] 경상남도 창원시 성산구 창원대로 797 재료연구소 연구1동 분말기술연구실 1304호	
3	제조자명 및 주소	재료연구소 [51508] 경상남도 창원시 성산구 창원대로 797 재료연구소 연구1동 분말기술연구실 1304호	
4	시험품	1) 품명/모델명	전도성 필터 공기청정 시스템 시제품
		2) 사양	크기 : 300 mm x 300 mm x 110 mm 시험 유량 : 1 ~ 3 m^3/min 하전부 인가전압/전류 : -10 kV / -0.45 mA 집진부 인가전압/전류 : +10 kV / +0.02 mA
5	시험방법	KS B 6141 : 2002 (환기용 공기필터 유닛) 시험분진은 업체 요구조건에 따른다.	
6	시험일자	2017.11.01. ~ 2017.11.03.	
7	시험환경	항 목 / 온도 (℃) / 상대습도 (%) 입자 포집율 / 22 ± 1 / 55 ± 2	
8	시험결과	항 목 / 시험 입경 (μm) / 시험 유량 (m^3/min) / 압력 손실 (Pa) / 성 능 (%) 입자 포집율 / 0.3 / 1.0 / 1.55 / 98.6 2.0 / 10.12 / 78.5 3.0 / 19.12 / 61.6	
9	용도	성능확인용	
10	기타사항	-	
11	시험 및 보고 : 시험실무자 : 홍 기 정	검토 및 승인 : 시험검토자 : 우 창 규	

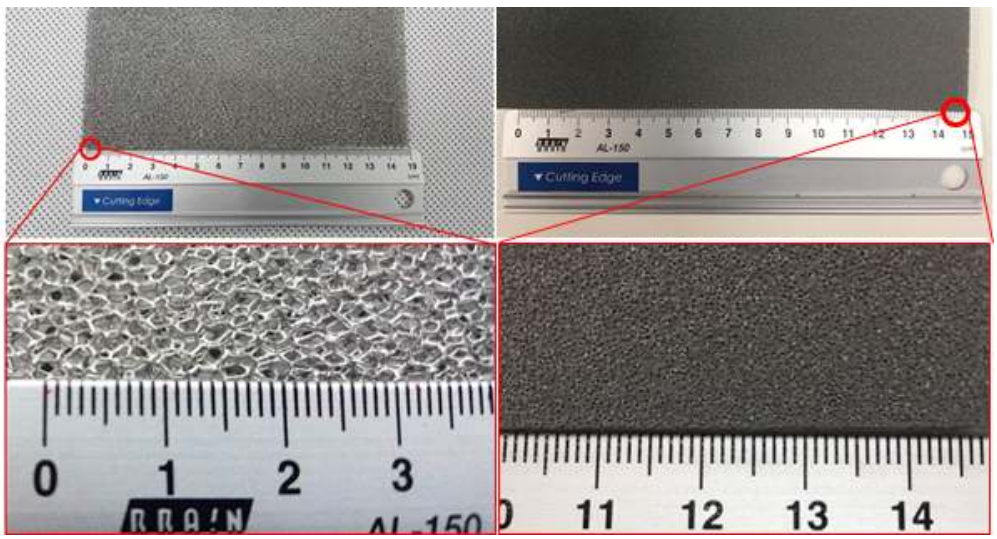
<전도성 필터의 미세먼지 제거 성능 공인시험 성적서>

(2) 자성필터 개발

(가) 자성필터의 제조

○ 철도관련 시설에서 많이 발생하는 Fe계 분진은 여러 가지 원인으로 비산되어 철도시설의 전기 사고를 유발하는데 그 발생량 또한 많음. 이를 사전 제거하기 위해 프리필터(prefilter)를 사용 할 수 있으나 일반 프리필터의 낮은 분진 제거율로는 후속 필터에 부담을 크게 주게 됨. 이에 자성물질로 구성된 다공체를 제조하여 Fe계 분진을 효과적으로 제거하려 함.

○ 다양한 크기의 기공을 지닌 우레탄폼에 연자성 특징을 지니는 Fe 계열의 자성분말 슬러리를 스프레이 코팅하고 열처리를 하여 그림과 같이 높은 자기력을 지니는 금속 다공체를 디자인 함. 최종적으로는 Fe 계 분진 제거율을 90% 이상으로 유지하기 위하여 폴리우레탄(PU) 폼 중 그 기공 크기가 580 μm 인 것을 뼈대로 선택함. 또한 해당 폼 표면에 Fe-Cr-Al 입자를 코팅한 이후 환원 분위기에서의 열처리를 실시하여 이에 대한 성능 평가를 진행함.



< 다양한 기공별로 제작된 (3 mm, 0.58 mm) 금속 메쉬 비교 >

(나) 자성 필터 성능 평가 모듈 제작

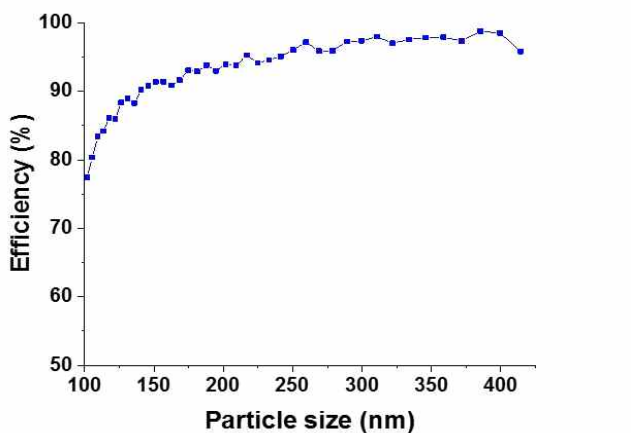
○ 영구자석 혹은 전자석을 이용하여 자성필터에 자기장을 형성하고 유도 자기력에 의해 Fe계 분진을 포집하기 위한 자성필터 시스템을 설계함. 최종적으로는 에너지 소비를 줄이고 작동 편의성, 구조 간소화 등을 위해 영구자석을 이용함. 세부 사항은 별첨*에 수록함.
(*별첨 4. 나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발 및 평가)

(다) 자성 필터 성능 평가

○ 상기의 자성필터 모듈을 이용하여 여러 변수들을 변경해가며 실험을 실시함. 해당 실험에서 조정 가능한 변수는 면속도(Face velocity), 자석 개수, 필터 장수 3가지로 요약 할 수 있으며, 해당 변수들을 조정하여 미세먼지 제거율을 관찰함. 미세먼지의 측정 범위는 100 nm ~ 400 nm 로 설정함.

○ 전도성 필터 실험에서와 비슷하게 필터 장 수 증가에 따라, 그리고 자기력이 증가할 때 성능이 강화 되는 것을 확인 할 수 있음. 사용하는 필터의 기공 사이즈가 580 ㎛ 로 상당히 큼에도 불구하고 1,450 ~ 5,800배 차이가 나는 입자를 효과적으로 제거 가능함을 입증함.

○ 자석과 필터 개수, 면속도를 최대로 설정 하였을 때 나타나는 최대 성능은 다음 그림과 같음. 이때의 자성 필터는 3장, 자석은 2장 사용하였으며, 면속도는 최대 속도인 10 cm/s 임. 이때 나타나는 차압은 3.2 Pa 이었으며, 측정결과 100 ~ 400 nm 범위 측정 효율은 92.68%, 300 nm 효율은 97.36% 로 높게 나타남.

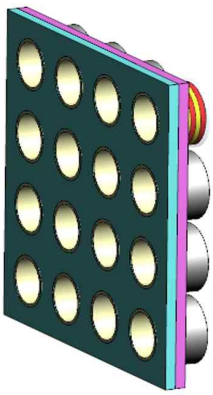


< 자성 필터의 미세먼지 제거 성능 측정 결과 >

(3) 기능성 필터 시스템 개발

(가) 전도성 및 자성 필터 대용량 모듈 제작

○ 300mm x 300mm 면적의 모듈을 목표로 하여 설계를 진행하였으며, 전도성 및 자성 필터 모듈설계에 대한 상세 내용은 별첨*에 수록함. 아래 그림에서 전도성 필터 모듈과 자성 필터 모듈 및 팬이 결합된 기능성 필터 시스템 사진을 확인 할 수 있음.
(*별첨 4. 나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발 및 평가)



자성 필터 최종 결합도



< 자성 필터 및 기능성 필터 시스템 최종 조립 >

(나) 기능성 필터 시스템 장기간 운전 및 현장 평가

○ 기능성 필터 시스템의 현장 성능 시험 평가를 위하여 대구도시철도공사의 협조를 얻어 현장 실험을 진행함. 이를 위하여 대구도시철도 1호선 설화명곡역의 PSD(Platform Screen Door)에서 본선으로 내려가는 계단부에 복합 시스템을 설치함.

○ Hot spot인 지하철 본선에 복합 시스템을 설치하여 미세먼지 여과 이후에 배출되는 농도가 미세먼지 감소 목표치인 99% 이상 지속적으로 유지 되는지를 확인함.

○ 실험은 다음과 같이 실시함. 미세먼지 측정기 1대를 이용하여 터널 내부의 공기 질을 1차로 측정하고, 연이어 필터 시스템을 통과한 청정한 공기의 공기 질을 2차 측정하여 효율을 계산함. 총 실험 목표 시간인 12시간을 달성하기 위하여 총 이틀 동안 측정을 진행하면서, 첫째 날에 8시간, 둘째 날에 4시간 연속 구동을 실시하였으며, 필터 성능이 떨어지거나 장비에 이상이 생기지 않는지 여부를 확인함. 미세먼지 측정기의 1 cycle은 1분으로 설정하였고, 0.3 ㎛ ~ 20 ㎛ 범위 입자 총합을 이용하여 필터 효율을 계산함.

○ 입자 크기가 커지면 커질수록 필터 효율이 올라가는 것을 확인 할 수 있었으며, 미세먼지 제거 총 효율 99%를 달성하는데 성공함. 12시간 연속 구동 시의 미세먼지 저감효율 평균은 99.003%를 달성함.



복합 시스템 설치 현장



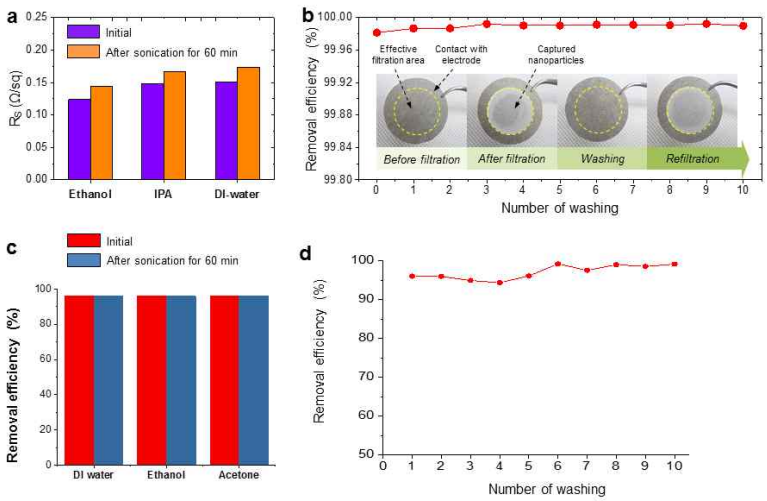
측정 장비 : Grimm dustmonitor 1.108

< 기능성 필터 시스템 설치 현장 및 측정 장비 >

(다) 기능성 필터 시스템의 재활용 시험

○ 재활용 인증 시험을 위해 원하는 형태의 시험이 가능한 기관에 접촉을 시도 하였으나, 원하는 형태의 재활용 인증시험이 불가능 하다는 답변을 받음. 이는 필터 성능 시험기 미보유, 표준화된 시험 방법 확보 불가 등이 이유였으며, 이에 자체적인 재활용 성능 테스트로 대체하였음.

○ 결과적으로 증류수, 에탄올, IPA, 아세톤 등의 다양한 용매에서 초음파 세척을 10회 실시 하여도 필터의 성능 변화가 거의 없음을 확인함. 아래 그림에서 자세한 결과를 확인 할 수 있음.



< 다양한 용매에서의 세척에 따른 필터 성능변화 >

(라) 전도성 및 자성 필터 제공을 통한 협업 - 2세부 전동차 부착형 미세먼지 집진장치

○ 2세부에서 연구개발 한 ‘전동차 부착형 미세먼지 집진장치’ 의 전기 집진부 성능 증진을 위하여 전도성 필터 및 자성 필터를 적용하여 평가를 진행함. 상대적으로 대용량이 필요하여 전도성 필터는 폭 30 cm x 15 m 급 롤을, 자성 필터는 수장의 A4 사이즈 샘플을 제공하는 것으로 협업을 진행하였으며, 절곡 등의 상세 가공은 2세부에서 직접 실시함.

○ 전도성 및 자성 필터가 결합된 전동차 부착형 미세먼지 집진장치의 현장 실험 결과는 2세부 최종보고서에서 확인 가능함.



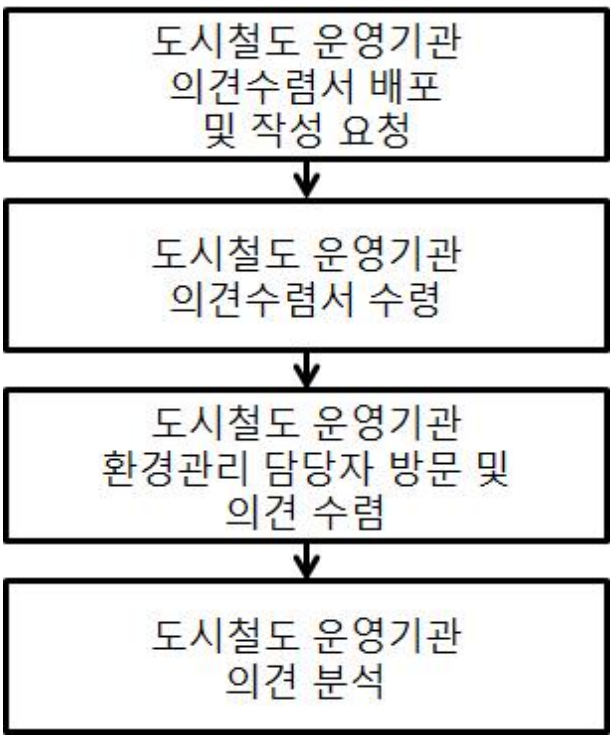
< 2세부 전동차 부착형 미세먼지 집진장치의 전기 집진부 구성품 및 전도성 필터 적용 >

라. 중장기 환경개선 로드맵

(1) 운영기관 의견 수렴 개요

(가) 운영기관 의견수렴 목적 및 방법

○ 도시철도 공기질 개선 중장기 로드맵 작성을 위해서 먼저 도시철도를 운영하는 운영기관의 의견을 수렴하여 방향을 설정함. 이에 본 연구에서는 전국의 11개 도시철도 운영기관 환경관리 담당부서의 의견을 수렴하였으며 그 절차는 다음과 같음.



< 도시철도 운영기관 의견수렴 절차 >

(나) 운영기관 의견 수렴 항목

○ 운영기관의 의견 수렴을 위하여 각 기관의 환경관리 담당부서에 「도시철도 터널 및 전동차 공기질 개선 마련을 위한 운영기관 의견 수렴」 설문 작성을 요청하였으며, 설문 항목은 아래 표와 같음.

< 도시철도 터널 및 전동차 공기질 개선 마련을 위한 운영기관 의견 수렴 항목 >

항목 대분류	항목 소분류	내용
A		도시철도 시설의 공기질 수준 파악
	1	도시철도 시설물의 실내 공기질 수준 평가
	2	도시철도 시설물 중 관리 우선 순위 평가
B		전동차 객실 및 터널의 공기질 관리 문제점 파악
	1	전동차 객실 내부의 공기질 정기적 측정 여부
	2	전동차 객실 내부의 공기질에 미치는 영향 순위 파악
	3	운영기관의 터널 공기질 수준에 대한 파악 여부
	4	터널 공기질 관리에 있어 어려운 점 파악
C		전동차 객실 및 터널 내부 공기질 관리 방안 수요 조사
	1	전동차 객실 및 터널 내부 공기질 관리를 위해 운영기관에서 우선적으로 추진하고자 하는 방안 조사
	2	C1 항목에 대한 연도별 필요 물량 및 필요 예산액 조사
기타		[일반자료 조사] 1. 연도별 연간 총 예산 2. 연도별 연간 환경관련 예산 3. 연도별 총 근무인원 수 4. 연도별 환경관련 근무인원 수 5. 연도별 총 이용 승객 수 6. 총 보유 고압 물청소차 수 7. 자갈도상 보유 역 수

(2) 운영기관 의견수렴 분석

○ 전국 11개 도시철도 운영기관에 대해 의견수렴을 실시하였으며, 서울교통공사를 포함하여 10개 기관에서 의견을 전달 받음.

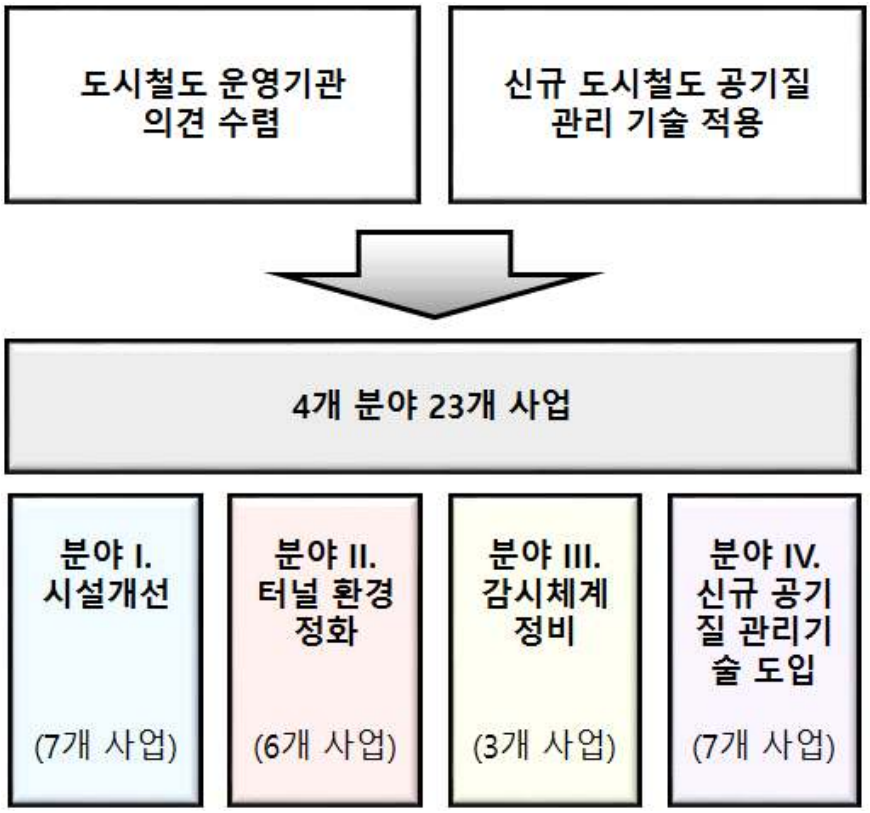
○ 운영기관의 설문결과 및 의견 수렴 분석 내용은 별첨*에 수록함.
(*별첨 5. 도시철도 공기질 개선 마련을 위한 운영기관의 의견 분석)

(3) 로드맵 작성 및 타당성 검증

(가) 중장기 환경개선 로드맵(안)의 구성

○ 중장기 환경개선 로드맵(안)은 각 도시철도 운영기관에서 계획하고 있는 환경개선 사업과 본 연구를 통해 도출될 신규 도시철도 공기질 관리 기술을 적용하여 구성함.

○ 중장기 환경개선 로드맵(안)은 Ⅰ. 시설개선, Ⅱ. 터널 환경 정화, Ⅲ. 감시체계 정비, Ⅳ. 신규 공기질 관리기술 도입의 4개 분야 총 23개 사업으로 구성함. 아래 그림은 중장기 환경개선 로드맵(안)의 구성의 개요도를 나타냄.



< 중장기 도시철도 공기질 개선 로드맵(안)의 구성 >

(나) 분야별 중장기 환경개선 로드맵(안)

① 분야 1 : 시설 개선

○ 시설 개선 분야에서는 (1)노후전동차 교체, (2)궤도콘크리트 도상화, (3)본선 노후환기 설비 교체, (4)레일연마, (5)전차선 ALT-Bar 및 애자 세척, (6)본선 환기실 바닥 방진도장, (7)공조기 필터 세척 등 7개 사업으로 구성되었으며 연차별 추진 계획은 다음 표와 같이 구성함.

< 시설 개선 분야의 사업별 중장기 환경개선 로드맵(안) >

사업명	대상	2018	2019	2020	2021	2022
노후전동차 교체	서울교통공사	200 대		224 대		196 대
궤도콘크리트 도상화	서울교통공사	4.5 km	4 km	잔여 132.2 km 순차적 실시		
본선 노후환기 설비 교체	서울교통공사		20 대		20 대	79 대
레일연마	인천교통공사					
전차선 ALT-Bar 및 애자 세척	인천교통공사					
본선 환기실 바닥 방진도장	대전도시철도공사	68 개소				
공조기 필터 세척	대전도시철도공사					

○ 상기 사업 중 ‘본선 노후환기 설비 교체’는 환경부 「제3차 지하역사 공기질 개선대책 (2018~2022)」의 지하역사 외부 미세먼지 유입 차단 추진 방안에 포함됨.

1 지하역사 [승강장, 대합실]

[1] 지하역사 공기질 관리체계 강화

○ 실태조사 등을 거쳐 미세먼지(PM10) **유지기준**(현재 150㎍/㎥) **강화** 및 **미세먼지(PM2.5) 기준 신설** ('18년 상)

○ 오염도가 높고, 유동인구가 많은 **주요역사**에 **미세먼지 자동측정기기 설치를 의무화**('19)하여 **실시간 오염정보 제공**

○ **'실내공기질 관리사**(가칭)' **전문자격 제도를 도입**('20년 시행)하여 지하역사 공기질의 체계적 관리 추진

실내공기질 관리사(가칭) 제도 개요

▪ (개요) 국가시험을 통해 전문지식·기술을 가진 자에게 실내공기질 관리사 자격증을 발급하고, 중점관리가 필요한 시설군에 채용 의무화

▪ (주요업무) 실내공기질 관리계획 수립·집행, 실내공기질 모니터링 및 관리일지 작성, 환기설비(필터) 및 자동측정기기 유지·관리, 고농도시 비상조치 시행 등

[2] 외부 미세먼지 유입 차단

○ **(노후설비 개선)** 서울·부산·대구 등 20년 이상 노후화되어 효율이 떨어진 **환기설비**(136대) **및 자동세정장치·필터**(622대) **개선**

* 필터 및 자동세정장치 노후화시 여과효율 40% 이상 감소(부산교통공사)

○ **(방풍문)** 황사 등 외부 미세먼지 역사내 오염물질 유입 억제를 위해 **역사 방풍문 추가 설치** ('20년까지 17개 역사)

○ **(흡기구 높이 조정)** 신설 역사(28개, 서울, 부산)는 **흡기 환기구를 1.5m 이상 높이 설치**하여 외기 미세먼지 유입량 최소화

< 시설 개선 분야 중장기 로드맵의 ‘제3차 지하역사 공기질 개선대책(환경부)’ 반영 결과>

○ 또한 서울교통공사는 2022년까지 228억 원의 예산을 편성하여 ‘본선 노후환기 설비 개량’ 하는 방안을 서울 지하철 미세먼지 관리계획에 포함하였음.



< 시설 개선 분야 중장기 로드맵의 ‘서울 지하철 미세먼지 관리계획’ 반영 결과>

② 분야 2 : 터널 환경 정화

○ 터널 환경 정화 분야에서는 (1) 분진흡입차량 운용, (2) 터널 진공청소, (3) 고압 살수차량 운용, (4) 고압세척기 운용, (5) 물청소차량 운용, (6) 인력에 의한 터널 물청소 등 6개 사업으로 구성되었으며 연차별 추진 계획은 아래 표와 같이 구성함.

< 터널 환경 정화 분야의 사업별 중장기 환경개선 로드맵(안) >

사업명	대상	2018	2019	2020	2021	2022
분진흡입차량 운용	서울교통공사	2 회/년	2 회/년	2 회/년	2 회/년	2 회/년
터널 진공청소	대구도시철도공사	2 회/년	2 회/년	2 회/년	2 회/년	2 회/년
고압 살수차량 운용	서울교통공사	2 회/월	2 회/월	2 회/월	2 회/월	2 회/월
	공항철도공사	1회/월	1회/월	1회/월	1회/월	1회/월
고압세척기 운용	대전도시철도공사	1 회/년	1 회/년	1 회/년	1 회/년	1 회/년
물청소차량 운용	서울교통공사	2 회/월	2 회/월	2 회/월	2 회/월	2 회/월
인력에 의한 터널 물청소	서울메트로9호선 공항철도공사 인천교통공사 부산교통공사 대구도시철도공사 광주도시철도공사 대전도시철도공사	2 회/년	2 회/년	2 회/년	2 회/년	2 회/년

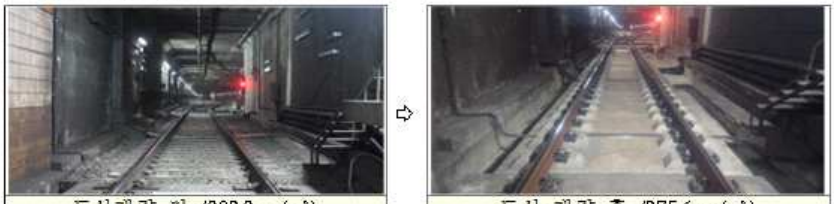
○ 상기 사업 중 ‘고압 살수차량 운용’, ‘물청소차량 운용’ 등 물청소 관련 내용은 환경부 「제3차 지하역사 공기질 개선대책 (2018~2022)」의 터널 내부 물청소 강화 추진 방안에 포함됨.

2 터널

1 미세먼지 발생원 제거

○ 잔여 자갈도상(210.2km) 중 25.3km 개량추진(고농도 구간 우선 선정)

* 콘크리트 개량시 27.9%의 미세먼지 저감효과 확인(382.3㎍/㎥→275.6㎍/㎥, 서울교통공사)



도상개량 전 (382.3㎍/㎥) | 도상 개량 후 (275.6㎍/㎥)

○ **흡음몰탈** 단계적 제거 ('22년까지 47개역, 113,000㎡)

* 흡음몰탈 : 전동차 진·출입 운행소음 감쇄를 위해 승강장 선로 천장 및 승강장 연단하부에 설치 → 흡음몰탈 부착 먼지가 열차 운행시 비산

○ 경유사용 **점검용 모터카**를 **축전지식**으로 전환 ('22년까지 28대)

2 터널 내부 물청소 강화

○ 집진차량(2대) 및 고압 살수차량(2대) 도입·운영

* 집진차량 및 고압 살수차량 운행후 약 15%~20% 미세먼지 저감효과 분석(철기원)

○ 全 노선에 대해 **연 1회 이상 인력 활용 물청소** 실시

* 인력물청소 중인 부산의 경우 터널 미세먼지 농도가 타 기관의 50% 미만
** 터널 미세먼지 평균농도(㎍/㎥) : 서울(169.6), 부산(78.9), 대전(142.0)

○ 터널 물청소를 위한 **살수배관 설치** 확대(21개역, 146.3km)



살수차량 | 살수배관 | 물청소

< 터널 환경 정화 분야 중장기 로드맵의 ‘제3차 지하역사 공기질 개선대책’ 반영 결과>

③ 분야 3 : 감시체계 정비

○ 감시체계 정비 분야에서는 (1) 객실 및 터널구간 상시 모니터링 시스템 구축, (2) 객실 및 터널 공기질 감시체계 강화, (3) Hot Spot 상시 모니터링 시스템 도입 등 3개 사업으로 구성되었으며 연차별 추진 계획은 아래 표와 같이 구성함.

< 감시체계 정비 분야의 사업별 중장기 환경개선 로드맵(안) >

사업명	대상	2018	2019	2020	2021	2022
객실 및 터널구간 상시 모니터링 시스템 구축	한국철도공사					
객실 및 터널 공기질 감시체계 강화	서울메트로9호선					
Hot Spot 상시 모니터링 시스템 도입	서울교통공사					
	한국철도공사					
	서울메트로9호선					
	공항철도공사					
	인천교통공사					
	부산교통공사					
	대구도시철도공사					
	광주도시철도공사					
	대전도시철도공사					

○ 상기 사업 중 ‘Hot Spot 상시 모니터링 시스템 도입’은 환경부 「제3차 지하역사 공기질 개선대책 (2018~2022)」의 터널 모니터링 및 Hot Spot 관리 추진 방안에 포함됨.

2 터널

① 미세먼지 발생원 제거

○ 잔여 자갈도상(210.2km) 중 **25.3km** 개량추진(고농도 구간 우선 선정)

* 콘크리트 개량시 27.9%의 미세먼지 저감효과 확인(382.3㎍/㎥→275.6㎍/㎥, 서울교통공사)



도상개량 전 (382.3㎍/㎥) | 도상 개량 후 (275.6㎍/㎥)

○ **흡음몰탈*** 단계적 제거 ('22년까지 47개역, 113,000㎡)

* 흡음몰탈 : 전동차 진·출입 운행소음 감쇄를 위해 승강장 선로 천장 및 승강장 연단하부에 설치 → 흡음몰탈 부착 먼지가 열차 운행시 비산

○ 경유사용 **점검용 모터카**를 **축전지식**으로 전환 ('22년까지 28대)

② 터널 내부 물청소 강화

○ 집진차량(2대) 및 고압 살수차량(2대) 도입·운영

* 집진차량 및 고압 살수차량 운행후 약 15%~20% 미세먼지 저감효과 분석(철기원)

○ 全 노선에 대해 **연 1회 이상 인력 활용 물청소** 실시

* 인력물청소 중인 부산의 경우 터널 미세먼지 농도가 타 기관의 50% 미만
** 터널 미세먼지 평균농도(㎍/㎥) : 서울(169.6), 부산(78.9), 대전(142.0)

○ 터널 물청소를 위한 **살수배관 설치** 확대(21개역, 146.3km)



살수차량 | 살수배관 | 물청소

③ 터널 모니터링 및 Hot spot 관리

○ 터널 map과 도시철도 기관 자체조사 결과를 토대로 지속관리가 필요한 터널구간에 대해 **정기적인 모니터링** 실시

○ 오염도를 토대로 터널내 **Hot spot 구간 지정**, 집진·살수차량 운행 증회, 터널 본선구간 환기량 및 환기가동 시간 증대 등 **집중관리**

* Hot spot 구간 : 지하터널 특정구간내 환기량 부족, 열차운행 조건에 따라 오염도가 높게 나타나서 일정시간 지속되는 구간

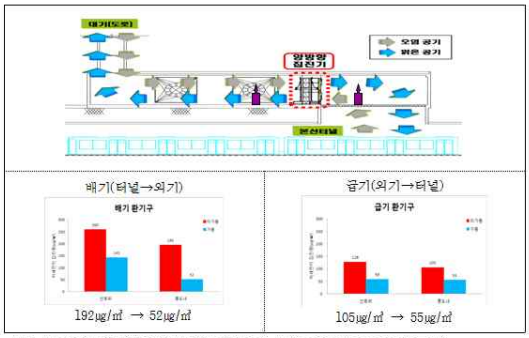
④ 첨단기술 활용 미세먼지 저감

○ 평소 운행시 금속 미세먼지와 열차풍에 날리는 비산먼지를 제거하는 **전동차 하부 부착형 저감기술 적용** 시범사업 추진('20)

* 한국과학기술연구원에서 서울 일부 차량에 대해 현장 실증사업 예정('18~'19)

○ **터널 본선환기구**에 설치하여 급·배기시 이동공기를 정화하는 **양방향 집진 시스템 적용 시범사업 추진** ('18~, 대구 118대)

* 대구 시범사업 후 서울 등으로 확대



* 시범 설치중인 양방향 집진시스템 저감효과 실증 결과(대구도시철도공사)

< 감시체계 정비 분야 중장기 로드맵의 ‘제3차 지하역사 공기질 개선대책’ 반영 결과>

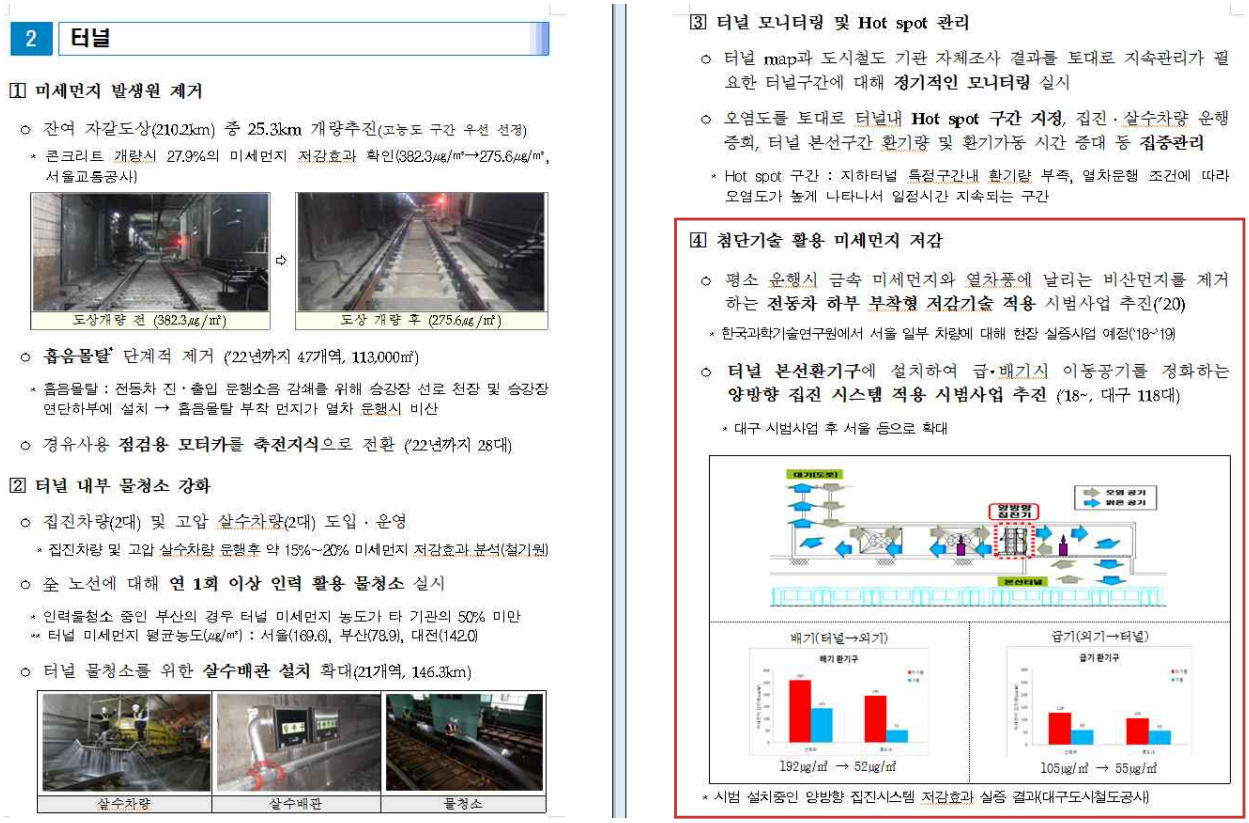
④ 분야 4 : 신규 공기질 관리 기술 도입

○ 신규 공기질 관리 기술 도입 분야에서는 (1) 객실 내 PM_{10}, CO_2 농도 감지시스템 구축 및 연계를 통한 환기설비 작동시스템 구축, (2) 터널구간 내 오염물질 전동차 객실 내 유입차단 기술 도입, (3) 기존 환기시스템을 활용한 PM_{10}, CO_2 등 객실 내 오염물질 저감기술 개발, (4) 양방향 전기 집진기 설치, (5) 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 도입, (6) 배터리 구동 친환경 집진차량 도입, (7) 기능성 필터 도입 등 7개 사업으로 구성되었으며 연차별 추진 계획은 아래 표와 같이 구성함.

< 신규 공기질 관리기술 도입 분야의 사업별 중장기 환경개선 로드맵(안) >

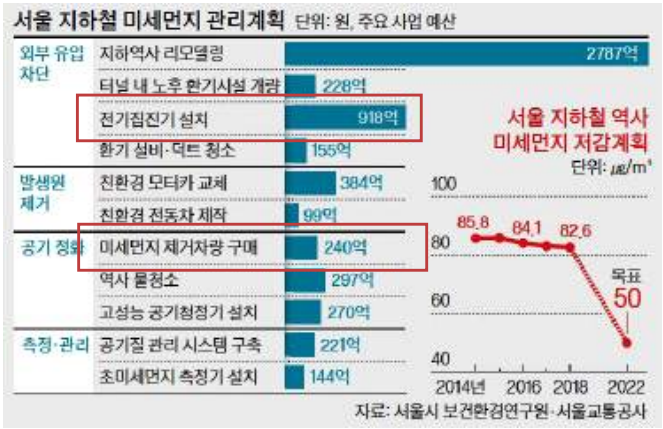
사업명	대상	2018	2019	2020	2021	2022
객실 내 PM_{10}, CO_2농도 감지시스템 구축 및 연계를 통한 환기설비 작동시스템 구축	한국철도공사					
			■			
터널구간 내 오염물질 전동차 객실 내 유입차단 기술 도입	한국철도공사					
			■	■		
기존 환기시스템을 활용한 PM_{10}, CO_2 등 객실 내 오염물질 저감기술 개발	한국철도공사					
			■			
양방향 전기 집진기 설치	대구도시철도공사					
			■	■		
전동차 부착형 미세먼지 제거장치 도입	서울교통공사					
				■	■	
배터리 구동 친환경 집진차량 도입	서울교통공사					
					■	■
기능성 필터 도입	서울교통공사					
				■	■	

○ 상기 사업 중 ‘양방향 전기 집진기 설치’, ‘전동차 부착형 미세먼지 제거장치 도입’은 환경부 「제3차 지하역사 공기질 개선대책 (2018~2022)」의 터널 첨단기술 활용 미세먼지 저감 추진 방안에 포함됨.



< 신규 공기질 관리 기술 도입 분야 중장기 로드맵의 ‘제3차 지하역사 공기질 개선대책’ 반영 결과>

○ 또한 서울교통공사는 2022년까지 전기집진기 설치(918억 원), 미세먼지 제거차량 구매(240억 원)하는 방안을 서울 지하철 미세먼지 관리계획에 포함하였음.

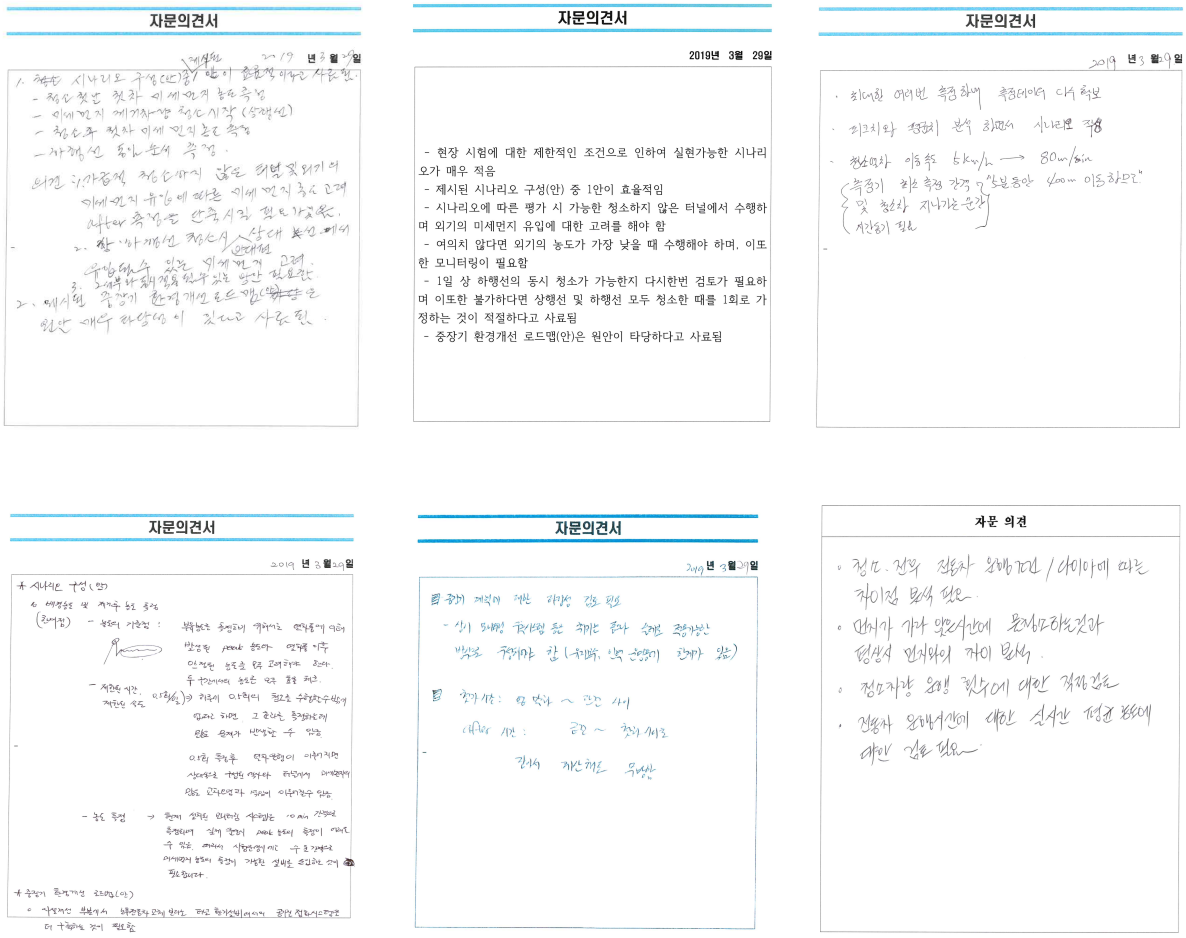


< 신규 공기질 관리 기술 도입 분야 중장기 로드맵의 ‘서울 지하철 미세먼지 관리계획’ 반영 결과>

(4) 중장기 환경개선 로드맵 타당성 검증

○ 본 연구에서 도출된 도시철도 터널 중장기 환경개선 로드맵(안)에 대한 타당성을 검증하기 위하여 자문의원을 초청하여 의견을 수렴함.

○ 아래와 같이 자문의견 수렴을 통해 도시철도 터널 중장기 환경개선 로드맵이 적절하다는 결과를 도출하였으며, 이에 본 연구에서 작성한 중장기 환경 개선 로드맵이 타당하다고 사료됨.



< 전문가 자문회의를 통한 중장기 환경개선 로드맵의 타당성 검토 >

4. 연구개발성과

가. 기술적 성과

■ 도시철도 터널 Hot Spot 구간의 공기질 관리 기술 개발

○ 도시철도 공기질 모니터링 시스템 개발

✓ 도시철도 터널의 측정 환경(고농도 미세먼지, 열차풍 등)에 적합한 미세먼지 측정장비를 개발함. 연구개발 시제품은 시범노선 터널 구간에서의 현장 성능검증 및 공인 시험장비와의 비교를 통해 장비 신뢰성을 확보함. 도시철도 터널의 공기질 모니터링 시 고가의 공인 시험장비를 대체하여 활용이 가능할 것으로 판단됨.

✓ IoT 기반의 도시철도 공기질 모니터링 시스템을 개발하여 서울 지하철 2호선, 4호선에 구축함. 10분 간격으로 도시철도의 공기질을 모니터링 하며, 측정 데이터는 서버에 저장되어 빅데이터를 구축하고 있음. 본 모니터링 시스템을 도시철도 운영기관에서 운영하는 모니터링 시스템과 연계한다면 도시철도 공기질의 효율적인 파악이 가능할 것으로 판단됨.

○ 전국 도시철도 터널 오염도 지도 작성

✓ 전국 도시철도 터널의 미세먼지 농도를 측정하여 터널 오염도 지도를 작성함. 이를 통해 공기질 관리가 시급한 Hot Spot 구간을 도출하였으며, 이는 도시철도 운영기관의 터널 공기질 관리계획 수립 시 활용이 가능한 것으로 판단됨.

○ 도시철도 터널의 미세먼지 특성 및 오염원 규명

✓ 도시철도 터널 내 미세먼지의 물리 화학적 특성 분석을 통해 터널 미세먼지의 오염원을 규명함. 또한 도시철도 터널의 오염특성을 분류하였으며, 상기 자료는 도시철도 운영기관의 터널 공기질 관리계획 수립 시 기초자료로 활용이 가능한 것으로 판단됨.

○ 전도성 필터 및 기능성 필터 개발

✓ 금속 성분이 높은 터널 미세먼지의 효율적인 제거를 위해 전도성 필터 및 자성 필터를 개발함. 연구개발 시제품은 2세부 연구성과인 전동차 부착형 미세먼지 저감장치에 설치되어 도시철도 터널 구간에서 미세먼지 저감성능을 검증함. 본 기능성 필터 개발의 원천기술의 현장 적용을 통해 터널 미세먼지 저감의 효율성 증대가 가능할 것이라 판단됨.

○ 도시철도 공기질 개선 중장기 로드맵 작성

✓ 도시철도 운영기관의 의견을 수렴하여 공기질 개선을 위한 중장기 로드맵을 작성함. 본 로드맵은 ‘지하철 공기질 개선 5개년 계획’ 등 정부 주도의 정책 추진 시 활용이 가능할 것이라 판단됨.

나. 경제적 성과

○ 도시철도 터널의 공기질 Hot Spot 구간에 대한 원인 규명 및 공기질 개선 중장기 로드맵의 제시로 도시철도 운영기관의 미세먼지 관리 예산을 효율적으로 사용할 수 있는 계기를 마련함.

○ IoT 기반의 공기질 모니터링 시스템을 이용하여 도시철도 뿐만 아니라 다중이용 공공시설의 미세먼지를 실시간으로 측정, 모니터링 할 수 있는 활용도 높은 공기질 관리시스템을 제공할 것으로 기대됨.

○ 도시철도 미세먼지의 특성을 고려한 기능성 필터 원천기술을 개발함으로써 터널 내 부유 미세먼지를 효율적으로 제거하여 도시철도 운영기관의 예산 절감에 기여함.

○ 연구기간 중 2번의 국제 기술박람회(UITP 2017, InnoTrans 2018)에 본 연구 성과물을 출품하였으며, 국내외 관련 기관 및 업체가 방문하여 개발 기술에 구매의사를 보여 연구 성과물의 세계 시장 경쟁력을 검증함. 전 세계적인 이슈로 대두된 공기오염 문제에 대응 가능한 미세먼지 관리기술 개발 완료를 통해 국내외 관련분야의 시장 선점이 가능함. 또한 도시철도 개발이 활발한 아시아 국가(중국, 인도 등)에 개발기술 수출이 가능함.

○ 본 연구의 성과물 중 하나인 전도성 필터를 주력 상품으로 스타트업 기업인 ㈜알링크를 창업하였음.

다. 연구개발 성과

(1) 논문 게재 성과

순번	게재연도	논문명	저자			학술지명	국내외 구분	SCI 구분
			주저자	교신저자	공동저자			
1	2014	A study on the characterization of deposited dust on HVAC ducts in subway stations	정준식	박덕신	권순박 최성호 김성미 이우석 전형진	International Journal of Environmental Monitoring and Analysis	국외	
2	2015	Method of removing Fe particulate matters from subway	박종헌	박덕신		International Journal of Environmental Monitoring and Analysis	국외	
3	2015	Evaluation of the Combustion Characteristics of Railroad Waste using a Cone Calorimeter	박덕신			International Journal of Environmental Monitoring and Analysis	국외	
4	2015	Prediction of CO2 concentration in Korea train express (KTX) cabins	이용일	박덕신	정원석 모나로레인	International Journal of Environmental Monitoring and Analysis	국외	
5	2015	서울시 지하철 시스템 내의 입자상물질(PM10, PM2.5) 농도 특성	이태정	김동술	임효지 김신도 박덕신	한국대기환경학회지	국내	
6	2015	서울지역 미세먼지(PM) 중 이온성분의 존재형태 추정	이경빈	김신도	김동술	대한환경공학회	국내	
7	2015	Identification of the sources of PM10 in a subway tunnel using positive matrix factorization	박덕신	이기영	이태정 황도연 정원석 이용일 조기철 김동술	Journal of the Air & Waste Management Association	국외	SCI
8	2015	Chemical Properties and Source Profiles of Particulate Matter Collected on an Underground Subway Platform	마창진	마창진	이경빈, 김신도, Koichiro Sera	Asian Journal of Atmospheric Environment (AJAE)	국외	SCOPUS
9	2015	Thermal and Hygroscopic Properties of Indoor Particulate Matter Collected on an Underground Subway Platform	마창진	마창진	이경빈 Daizhou Zhang, Mariko Yamamoto, 김신도	Asian Journal of Atmospheric Environment (AJAE)	국외	SCOPUS
10	2016	터널 내 전동차 운행에 따른 전기집진기 주위에서의 유동 및 오염입자 거동해석	김명준	김태성	권순박, 양성준, 박덕신, 김형우	실내환경 및 냄새학회지	국내	KCI
11	2016	서울시 지하철 2호선 본선구간의 입자상물질 농도 특 성 및 미세분진의 오염지도 개발	이은선	김동술	박민빈, 이태정, 김신도, 박덕신	한국대기환경학회지	KCI	KCI

12	2016	지하철에서 탄산염을 고려한 이온성분의 구성비율 추정에 관한 연구	이용일	김신도	이경빈, 김진식, 박덕신	실내환경 및 냄새학회지	KCI	KCI
13	2016	Particulate Matters Levels in Subway Tunnels and Cabins	정원석	박덕신	이용일 최교민	실내환경 및 냄새학회지	KCI	비SCI
14	2016	Generation of nanoparticles from friction between railway brake disks and pads	남궁 형규	권순박	김종범, 우상희, 박세찬, 김민혜, 김민수, 배귀남, 박덕신	Environmental Science & Technology	국외	SCI
15	2016	우리나라, 미국 및 유럽의 대기환경기준 강도에 관한 비교 연구	박민빈	김동술	이태정 이은선	한국대기환경학회	국내	KCI
16	2016	Kriging 분석법을 이용한 지하철 터널 미세먼지 추정	이용일	박덕신	정원석 최교민 김태성	실내환경 및 냄새학회지	국내	KCI
17	2016	지하철에서 탄산염을 고려한 이온성분의 구성비율 추정에 관한 연구	이용일	김신도	이경빈 김진식 박덕신	실내환경 및 냄새학회지	국내	KCI
18	2016	The Size-Oriented Particulate Mass Ratios and Their Characteristics on the Seoul Metropolitan Subway Lines	Eun-Sun Lee	Dong-Sool Kim	Tae-Jung Lee, Min-Bin Park, Duckshin Park, Shin-Do Kim	Asian Journal of Atmospheric Environment	국외	SCUPUS
19	2017	Effect of a fuel activation device (FAD) on particulate matter and black carbon emissions from a diesel locomotive engine	Duckshin Park	Kiyoung Lee	Taejeong Lee, Yongil Lee, Wonseog Jeong, Soon-Bark Kwon, Dongsool Kim	Science of the Total Environment	국외	SCIE
20	2017	A Study on the Energy and Environmental Efficiency of Urban Train System,	Jin Sik Kim	김신도	Im Hack Lee, Jin Soo Park, Kyoung Bin Lee,	American Journal of Traffic and Transportation Engineering	국외	
21	2017	Mycosporine like Amino Acid-Assisted Solvethermal Synthesis of MoS2-Graphene Nanocomposite as Photocatalyst	Hyeong-U Kim	Taesung Kim	Soohyun Ha, Divesh Amalnerka, Sun-Young Kim, Chisung Ahn, Lim Yong Taik Lim, Min-Ho Lee, Byun Joon Moon, Sukang Bae, Sang Hyun Moh, Atul Kulkarni	NANO	국외	SCIE
22	2017	Al-coated conductive fibrous filter with low pressure drop for efficient electrostatic capture of ultrafine particulate pollutants	Dong Yun Choi	Hye Moon Lee	Soo-Ho Jung, Dong Keun Song, Eun Jeong An, Duckshin Park, Tae-Oh Kim, Jae Hee Jung	American Chemical Society	국외	SCIE
23	2017	대면적 Fecralloy 코팅층의 표면 거침도 극대화를 위한 정전분무 및 열처리 공정 연구	이혜문	윤중렬	구혜영 양상선 박다희 정수호	한국분말야금학회	국내	KCI

24	2017	전동차 운행시 발생되는 PM10의 특성에 관한 연구	박종헌	박덕신		한국실내환경학회	국외	KCI
25	2017	Particulate Matter (PM10 and PM2.5) in Subway Systems: Health-based Economic Assessment	Thanh Ngoc Nguyen,	Young-Chul Lee	Duck shin Park, Y ongil Lee	MDPI AG	국외	SCIE
26	2017	Systematic review and meta-analysis of human skin diseases due to particulate matter	Le Thi Nhu Ngoc,	Young-Chul Lee	Duckshin Park, Yongil Lee,	MDPI AG	국외	SCIE
27	2017	서울시 지하철 터널 내 입자상물질의 농도 특성 및 오염형태 분류	이은선	김동술	이태정	한국대기환경학회	국내	KCI
28	2017	Numerical analysis of particle concentration around the air-inlet of a train in a tunnel by using a discrete phases model	Jihye Choi,	Taesung Kim	Hyeong-U Kim, Sungjun Yang	Springer	국외	SCIE
29	2018	Generation Characteristics of Nanoparticles Emitted from Subways in Operation	Yongil Lee	Duckshin Park	Kyomin Choi, Wonseog Jung, Michael E. Versoza, Mona Loraine M. Barabad, Taesung Kim	Aerosol and Air Quality Research	국외	
30	2018	Aminoclays for biological and environmental applications: An updated review	Vu Khac Hoang Bui	Young-Chul Lee	Duckshin Park,	Chemical Engineering Journal	국외	
31	2018	Effective Peroxidase-Like Activity of Co-Aminoclay [CoAC] and Its Application for Glucose Detection	HanPil l Song	Moon Il Kim and Young-Chul Lee	Yongil Lee, Vu Khac Hoang Bui, You-Kwon Oh, Hyun Gyu Park,	Sensors	국외	
32	2018	Washable antimicrobial polyester/aluminum air filter with a high capture efficiency and low pressure drop	Dong Yun Choi	Hye Moon Lee, Jae Hee Jung	Ki Joon Heo, Juhee Kang, Eun Jeong An, Soo-Ho Jung, Byung Uk Lee	Journal of Hazardous Materials	국외	
33	2018	Al-Coated Conductive Fiber Filters for High-Efficiency Electrostatic Filtration: Effects of Electrical and Fiber Structural Properties	Dong Yun Choi		Eun Jeong An, Soo-Ho Jung, Dong Keun Song, Yong Suk Oh, Hyung Woo Lee & Hye Moon Lee	Scientific reports	국외	
34	2018	Sources and Characteristics of Particulate Matter in Subway Tunnels in Seoul, Korea	Yongil Lee	Duckshin Park	Young-Chul Lee, Taesung Kim, Jin Seok Choi	International Journal of Environmental Research and Public Health	국외	
35	2019	Development of a magnetic hybrid filter to reduce PM10 in a subway platform	Youn-Suk Son	Jo-Chun Kim	Yong-Hwan Oh, In-Young Choi, Trieu-Vuong Dinh, Sang-Gwi Chung, Jai-hyo Lee, Duckshin Park	Journal of Hazardous Materials	국외	

(2) 특허 출원 및 등록

No	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등 록		
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호
1	자기력과 개방형 사이클론을 이용한 전동차 하부 부착형 터널 미세먼지 제거장치	대한민국	한국철도기술연구원	2015.04.03.	10-2015-0047538			
2	전자기장을 이용한 터널에 부유하는 미세먼지 포집장치	대한민국	한국철도기술연구원	2015.04.03.	10-2015-0047598			
3	실내 공기질 모니터링 시스템	대한민국	김중구	2015.02.17.	10-2015-0024148			
4	전도성 필터를 이용한 공기여과 장치	대한민국	한국기계연구원 외 1인	2015. 03. 26	10-2015-0042425	한국기계연구원	2016. 03. 09	10-1603645
5	전도성 필터 및 전도성 필터의 제조 방법	대한민국	한국기계연구원 외 1인	2015. 03 26	10-2015-0042426			
6	WebRTC기반의 다중접속 CCTV시스템	대한민국	주식회사 넷시즌	2015. 03. 30	10-2015-044287			
7	지하철 미세먼지 다단 모니터링 장치	대한민국	한국철도기술연구원	2016.03.18.	10-2016-0032845			
8	지하철 미세먼지 모니터링장치	대한민국	김중구, 한국철도기술연구원	2016. 03. 18	10-2016-0032831			
9	도시철도 승강장 스크린 도어 취부형 객실 외기유입 최소화 장치 및 그 방법	대한민국	한국철도기술연구원	2015. 09 11	10-2015-0129171	한국철도기술연구원	2017.11. 09	10-1798152
10	전도성 필터를 이용한 공기여과 장치	대한민국	재료연구소, 한국철도기술연구원	2016. 07. 21	10-2015-0042425	한국기계연구원	2016.3	10-1603645
11	지하철 터널 내 전동차 운행에 따라 발생되는 열차풍 및 압력 저감장치	대한민국	한국철도기술연구원	2016. 10. 31	10-2016-0092383			
12	미세먼지 측정장치	대한민국	케이앤제이엔지니어링(주) 외	2016. 10. 31	10-2016-0143507			
13	자기력과 개방형 사이클론을 이용한 전동차 하부 부착형 터널 미세먼지 제거장치	대한민국	한국철도기술연구원	2015. 04. 03	10-2015-0047538	한국철도기술연구원	2016. 10. 05	10-1665092

14	전자기장을 이용한 터널에 부유하는 미세먼지 포집장치	대한민국	한국철도기술연구원 외	2015. 04. 03	10-2015-0047598	한국철도기술연구원 외	2016. 10. 05	10-1665096
15	전도성 필터 및 전도성 필터의 제조 방법	대한민국	한국기계연구원 외	2015. 03. 26	10-2015-0042426	한국기계연구원 외	2016. 12. 05	10-1684860
16	도시철도 객실의자 하부취부형 객실 외기유입 최소화 장치	대한민국	한국철도기술연구원	2016. 02. 04	10-2016-0014410 호	한국철도기술연구원	2017.11. 09	10-1798152
17	미세먼지 제거용 필터 모듈 및 이를 포함하는 미세먼지 제거용 공기청정 시스템	대한민국	한국기계연구원	2017. 09.14	10-2017-0118076			
18	열차풍 차단벽 구조체	대한민국	한국철도기술연구원	2017. 02. 13	10-2017-0019571			
19	지하철 미세먼지 모니터링 장치	대한민국	케이앤제이엔지니어링 주식회사 외 1명	2017. 11. 30	10-2017-0163141			
20	지하철 미세먼지 모니터링 방법	대한민국	케이앤제이엔지니어링 주식회사 외 1명	2017. 11. 30	10-2017-0163096			
21	미세먼지 측정방법	대한민국	케이앤제이엔지니어링 주식회사 외 1명	2017. 11.30	10-2017-0163167			
22	열차풍 차단벽 구조체	대한민국	한국철도기술연구원	2017. 02. 13	10-2017-0019571	한국철도기술연구원	2019. 01. 29	10-1945227
23	지하환경 및 터널의 미세먼지 집진차량 및 이를 이용한 미세먼지 제거 방법	대한민국	한국철도기술연구원	2017. 02. 13	10-2017-0019585	한국철도기술연구원	2019. 01. 29	10-1945240

(3) 소프트웨어 등록

No.	SW명칭	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명
1	지하철 터널 내 미세먼지 모니터링 프로그램	20160113	KNJ 엔지니어링	20160307	C-2016-005855	KNJ엔지니어링
2	지하철 터널 내 통신프로토콜 프로그램	20151221	KNJ 엔지니어링	20160307	C-2016-005856	KNJ엔지니어링
3	지하철 터널 내 미세먼지 TMS 프로그램	20161020	KNJ 엔지니어링	20161220	C-2016-033415	KNJ엔지니어링
4	지하철 터널 내 미세먼지 전광판 프로그램	20161006	KNJ 엔지니어링	20161220	C-2016-033416	KNJ엔지니어링
5	지하철 터널 내 미세먼지 데이터로거 프로그램	20161216	KNJ 엔지니어링	20170113	C-2017-001333	KNJ엔지니어링
6	지하철 터널 내 미세먼지 모니터링 스마트폰 앱 프로그램	20170522	KNJ 엔지니어링	20170907	C-2017-021552	KNJ엔지니어링

5. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구 목표 달성도

연구 목표	자체평가	달성도(%)
도시철도 Hot Spot 구간 공기질 관리기술 개발	- Hot Spot 구간 오염농도 모니터링 및 데이터 축적 - 연구단 목표달성 검증을 위한 **시범노선 구축** 및 **평가 시나리오 작성** - 연구 성과물의 시범노선 적용, 현장 평가 및 **터널 미세먼지 33.6% 저감** (**공인시험기관 시험성적서** 확보, 연구목표: 터널 미세먼지 30% 저감))	100
도시철도 Hot Spot 구간 공기질 모니터링 시스템	- 서울 지하철 **2호선, 4호선의 공기질 모니터링 시스템 구축** 및 운용 - 4호선의 모니터링 시스템 구축 시 시스템 기능 보완 및 개선 (데이터 로그, 기본 통계기능 등)	100
도시철도 Hot Spot 구간의 미세/초미세먼지 특성 및 오염원 파악	- 도시철도 터널 내 미세먼지의 물리화학적 특성 및 주요 오염원 분석 - 클러스터 기법 등 다변량 통계기법 기반의 **도시철도 터널 오염원 유형별 분류** - 도시철도 터널 오염원 유형에 따른 관리방안 제시	100
도시철도 공기질 개선 중장기 환경개선 로드맵	- 도시철도 운영기관 및 전문가 자문을 통한 **중장기 환경개선 로드맵의 타당성 검증**	100
미세먼지 제거용 기능성 필터 시스템 구축 및 성능 최적화	- 전도성 및 자성필터 시제품의 도시철도 **터널 내 미세먼지 제거효율 및 내구성 검증**	100

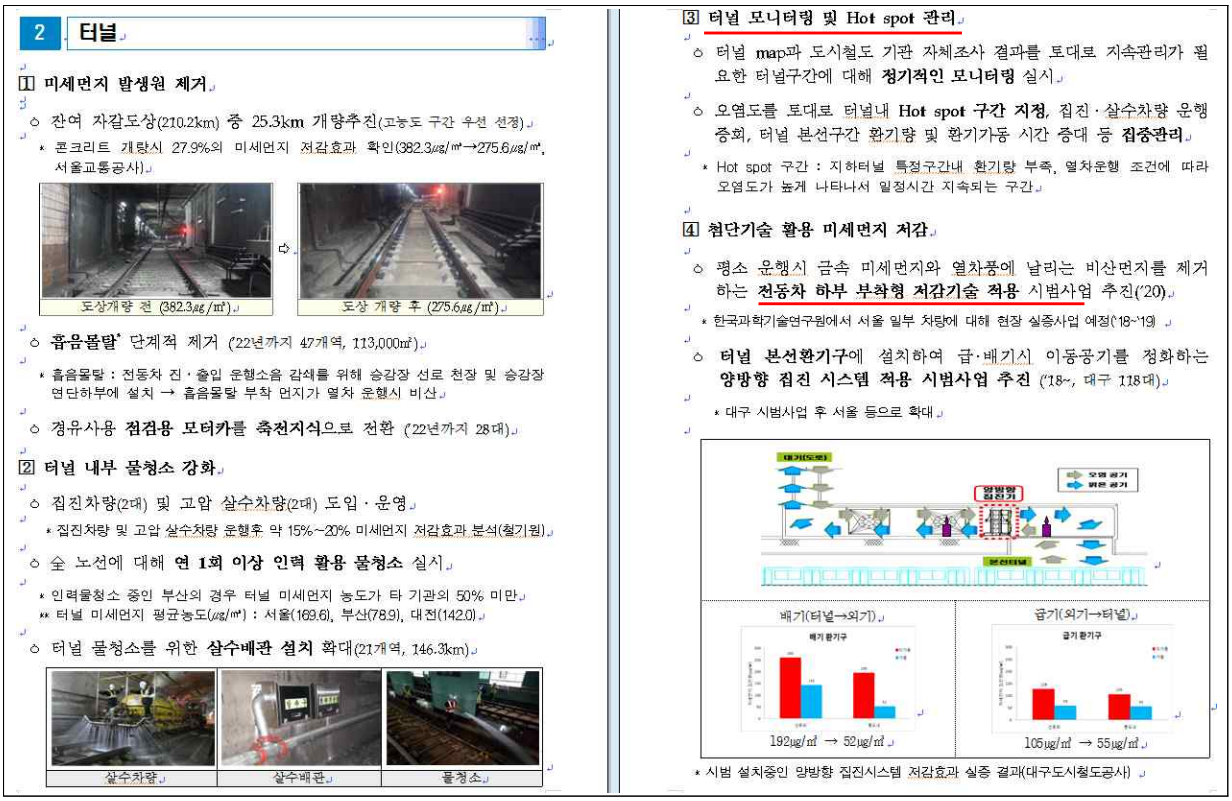
핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		총괄 성과점검기준						해당 기관	양적 성과목표 (달성치/목표치)
					질적 성과지표	목표치	측정방법	검증방법	가중치		
A	도시철도 터널 Hot spot 구간 공기질 종합관리 기술	A-1	도시철도 Hot spot 구간 공기질 관리기술 개발	①	터널오염도 지도	Hot spot 구간 선정	미세먼지 농도	보고서	1	철도기술 연구원	특허: 출원 4/3건 등록 3/1건 논문: 11/9건 시제품: 건 S/W: 건
				②	유동해석	터널 및 입자 거동 유동해석	수치해석 결과	보고서	0.5		
				③	Hot spot 및 시범노선구간선정	구간선정	구간선정	보고서	1		
				④	터널공기질개선효과분석	터널공기질미세먼지 30% 저감	측정방안 제시	보고서	3		
		A-2	도시철도 Hot spot 구간 공기질 모니터링 시스템	①	모니터링 시스템 사양정립	모니터링 시스템 사양서 작성	증빙자료	보고서	0.5	철도기술 연구원/KNJ 엔지니어링/넷시큰	특허: 출원16/15건 등록 3/2건 논문: 4/2건 시제품: 2/2건 S/W: 7/7건
				②	모니터링 시스템 설계	모니터링 시스템 설계도면 제작	증빙자료	보고서	1.5		
				③	네트워크 시스템	데이터 Loss율 < 1%	패킷분석	보고서	2		
		A-3	도시철도 Hot spot 구간의 미세/초미세먼지 특성 및 오염원 파악	①	오염원 파악 및 유형 분류	오염원 파악 및 유형 분류	PMF 모델링 수행	보고서	0.5	철도기술 연구원/경희대학교/서울시립 대학교	특허: 출원 건 등록 건 논문: 11/8건 시제품: 건 S/W: 건
				②	터널 내 공기질 현황 파악	미세먼지 특성 파악	미세먼지 특성 및 분석	보고서	1		
B	중장기 환경개선 로드맵	B-1	중장기 환경개선 로드맵	①	공기질 협의회 구성	2회 개최	증빙자료	보고서	1	철도기술 연구원/서울시립 대학교	특허: 출원 건 등록 건 논문: 4/4 건 시제품: 건 S/W: 건
				②	전문가 자문단 구성	2회 개최	증빙자료	보고서	1		
				③	터널 공기질 개선기술 선정	개선기술 선정	증빙자료	보고서	1.5		
				④	중장기 로드맵 작성	작성 로드맵 제시	증빙자료	보고서	1.5		
C	나노기술을 적용한 전도성 필터 및 기능성 필터 개발	C-1	미세먼지 제거용 고전도성 섬유필터	①	전기저항	면저항 5Ω/sq 이하	4 point probe 측정법	보고서	0.5	철도기술 연구원/한국재료 연구소	특허: 출원 3/3건 등록 2/2건 논문: 2/2건 시제품: 3/1건 S/W: 건
				②	입자제거율	압력손실20mmAq 이하일때0.3 ㎛ 입자제거율99.97%	필터시험법	보고서	1.5		
		C-2	Fe계 분진 제거용 자성 프리필터	①	자기력 부여 및 제거	기공 크기 1mm 이하	광학현미경 관찰	보고서	0.5		특허: 출원 1/1건 등록 1/1건 논문: 3/3건 시제품: 건 S/W: 건
				②	Fe 계 분진 제거효율	분진제거율	필터시험법	보고서	1.5		
계				특허 : 출원 24 건 (목표 22건) 등록 9 건 (목표 6건) 논문 : 35 건 (목표 28건) 시제품 : 5 건 (목표 3건) S/W : 7 건 (목표 7건)							

나. 정책 제안 가능성

○ 연구책임자인 박덕신 수석연구원은 **국토교통부 철도시설안전과**에서 주관하는 **국가철도역사 미세먼지 저감 종합대책 수립 TF 위원으로 참여**하여 본 연구개발 성과를 바탕으로 지하철 공기질 개선기술에 대한 의견을 개진함.

- ✓ 1차 회의: '19.3.6. (정부세종청사), 국가철도역사 미세먼지 저감대책 시행현황 및 추진방향 논의
- ✓ 2차 회의: '19.3.22. (대구도시철도공사), 터널구간 (초)미세먼지 제거 집진차량 개발 사례
- ✓ 3차 회의: '19.4.23. (창동차량기지), (초)미세먼지 집진차량 성과보고 및 현장시연
- ✓ 4차 회의: '19.7.9. (정부세종청사), 설계 건설단계 역사 터널 미세먼지 저감대책 및 차량분야 미세먼지 저감대책 논의

○ 환경부 '**제3차 지하역사 공기질 개선대책(2018~2022)**'의 세부 실행계획에 **본 연구과제의 핵심 기술이 포함**됨.



< 제3차 지하역사 공기질 개선대책(2018~2022)에 포함된 본 연구과제의 핵심 기술 >

6. 연구개발성과의 활용 계획

가. 기술수요처 대상 성과 알림 홍보 및 사업화 추진

○ 지하철의 PM_{10} 기준이 100 ㎍/㎥, $PM_{2.5}$ 기준이 50 ㎍/㎥ 로 강화됨에 따라 본 연구개발 기술에 대한 전국 도시철도 운영기관의 구매 의사가 높은 것을 확인함. 터널 공기질 모니터링 장비와 기능성 필터 시스템의 성능 입증과 적정 판매가격을 기준으로 사업화를 추진하여 개발 기술의 보급을 노력 할 예정임.

○ 서울지하철 2호선, 4호선에 구축된 IoT 기반의 공기질 모니터링 시스템의 경우 과제종료 이후에도 운영기관에서 지속적으로 활용할 계획임.

< 주요 수요처: 도시철도 운영기관 >

구분	운영기관	노선수	역사수	영업거리(km)
1	서울교통공사	8	277	300.1
2	서울9호선	1	38	40.7
3	인천교통공사	2	56	58.5
4	신분당선주식회사	1	13	31.3
5	코레일공항철도	1	13	63
7	우이신설경전철(주)	1	13	11.3
8	부산교통공사	4	114	118.6
9	대구도시철도공사	3	91	81.9
10	광주도시철도공사	1	20	20.5
11	대전도시철도공사	1	22	22.6
합계		23	657	748.5

나. 상용화 계획

○ 전도성 필터 원천기술 (기술 이전 완료)

✓ 전도성 필터는 섬유와 같은 물체 표면에 알루미늄 나노 박막을 코팅하여 전기집진기의 집진판을 대신할 수 있는 기술임. 본 기술은 재료연구소의 스타트업 기업인 (주)알링크에 기술 이전하였으며, (주)알링크에서는 전도성 필터의 대량 제작에 성공하여 관련 업체에 마케팅을 진행 중에 있음.

○ IoT 기반 도시철도 공기질 모니터링 시스템 (기술 이전 추진)

✓ IoT 기반 공기질 모니터링 시스템은 센서를 이용하여 대합실, 승강장 등 도시철도의 여러 공간의 공기질을 실시간으로 측정하여 운영기관에 그 결과를 전송하는 기술임. 본 기술은 (주)알엠테크에 기술이전을 추진 중이며, (주)알엠테크에서는 본 기술을 활용한 공기질 모니터링 시스템을 경기도청 용역사업에 입찰함.



< 연구개발 기술의 상용화 및 사업화 추진 방안 >

○ 개발기술 상용화 시 도시철도 운영기관의 운영 시나리오 제시

✓ 도시철도 공기질 개선 중장기 로드맵 작성 시 수집한 운영기관의 자료(터널 길이, 역사 수, 열차 편성 등)를 활용하여 본 연구단의 2세부에서 개발한 '전동차 부착형 미세먼지 집진장치' 와 3세부에서 개발한 '터널 (초)미세먼지 제거차량' 의 운영 시나리오를 제안함 (상기 개발기술의 내용 및 상용화 계획은 각 세부 최종보고서 참조 요망).

✓ 전동차 부착형 미세먼지 집진장치: 전국 도시철도 운영기관의 전동차 중 8량 이상으로 편성된 463대를 대상으로 전동차 1대 당 미세먼지 집진장치를 1~2대 부착하여 하루 왕

복 4회, 월 25일 운행함. 장치 내 집진판의 세척을 위한 카트리지 세정장치는 1호선 당 1대를 차량기지에 설치하여 1달 주기로 집진판을 세정함.

✓ 터널 (초)미세먼지 제거차량: 노선별로 전동차 영업시간은 차이가 있으나, 미세먼지 제거차량의 터널 투입이 가능한 시간은 01:00 ~ 04:30 로 약 4시간임 (청소차량 등의 특수차량은 지하철 단전 이후 투입이 가능). 특수차량의 터널 내 최대 이동속도는 30 ㎞/h 로 제한되며 서울지하철 1~9호선의 경우 총 연장이 30~60 ㎞ 이므로, 미세먼지 제거차량의 원활한 운용을 위해 각 노선의 시점과 종점 차량기지에 충전설비를 구축함.

붙임. 참고문헌: 없음

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( ),
발간등록번호(11-B552989-000141-01), ISBN(979-11-954396-7-6)

철도기술연구사업 제5차년도 최종보고서

R&D / 18RTRP-B082486-05

전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발 최종보고서

2019. 8. .

협동연구기관 / 한국과학기술연구원
공동연구기관 / 한국철도기술연구원
디케이(주)
(주)애니텍
위탁연구기관 / 서울교통공사
한양대학교
동양대학교

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

18RTRP-B082486-05

전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발

최종보고서

2019

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발 '(연구개발 기간 : 2014. 9. 8 ~ 2019. 05. 30) 과제의 요약보고서 2부를 제출합니다.

2019. 8.

주관연구기관명 : 한국과학기술연구원 이 병 권 (인)

공 동 기 관 명 : 한국철도기술연구원 나 희 승 (인)

디케이(주) 김 보 곤 (인)

(주)애니텍 이 주 열 (인)

주관연구기관책임자 : 한국과학기술연구원 이 승 복 (인)

공 동 기 관 책임자 : 한국철도기술연구원 조 영 민 (인)

디케이(주) 안 은 섭 (인)

(주)애니텍 박 병 현 (인)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18RTRP-B082486-05	해당 단계 연구 기간	2018-01-01 ~ 2019-05-30	단계구분	5/5
연구사업명	중사업명	철도기술연구사업			
	세부사업명	철도기술연구사업			
연구과제명	대과제명	나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술			
	세부과제명	전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발			
연구책임자	이 승 복	해당단계 참여연구원 수	총: 52명 내부: 35명 외부: 17명	해당단계 연구비	정부: 959,370천원 민간: 340,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,299,370천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총:105명 내부: 명 외부: 명	총 연구비	정부:4,002,070천원 민간:1,387,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:5,389,070천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술연구원, 한국철도기술연구원			참여기업명 디케이(주), ㈜애니텍	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 한양대학교 동양대학교 서울교통공사			연구책임자: 육세진 박종헌 윤화현	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	33	11									

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

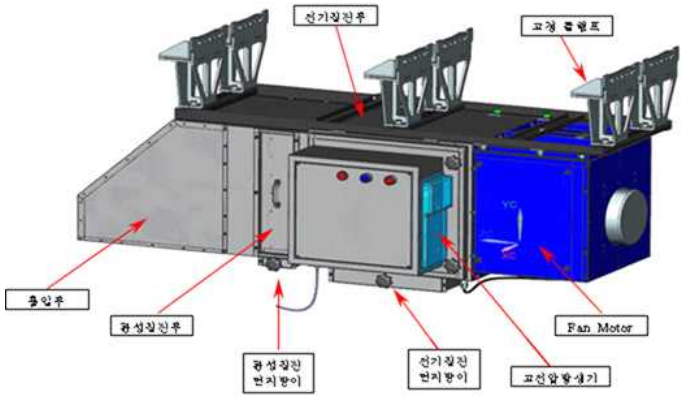
요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)	보고서 면수 102쪽

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 연구 목적 운행 중인 도시철도 차량에 부착이 가능한 터널 내 오염물질 제거기술 개발 ○ 연구 내용 - 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 시제품 개발 - 재생형 집진 카트리지 세정장치 시제품 개발 - 터널부유 미세먼지 객실유입 차단장치 시제품 개발				
연구개발성과	- 나노기술 기반 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 - 재생형 집진카트리지 세정장치 - 터널부유 미세먼지 객실유입 차단장치				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	● 도시철도 터널 내 공기질을 관리하기 위하여 부착형 고효율 미세먼지 제거장치를 운행 전동차에 부착하여 터널 내 열차풍에 의한 비산 미세먼지 및 신규 발생 차륜 마모 미세먼지의 신속한 제거에 활용하여 전동차의 운행에 지장을 주지 않고 에너지 효율적으로 터널 내 공기청정 작업을 상시 실시 가능 ● 터널부유 미세먼지 객실유입 차단장치를 운행 전동차 상부의 HVAC 시스템에 장착하여 터널 내 부유 미세먼지가 객실로 유입되는 것을 방지하는데 활용 가능 ● 부착형 미세먼지 제거기술의 핵심이 되는 컴팩트 전기집진 기술, 관성집진 기술 등은 최신 공기청정기술로 운행 전동차의 객실 내 공기청정, KTX, 고속버스, 비행기, 선박 등 교통수단 내 공기청정장치 개발에 활용 가능 ● 터널부유 미세먼지 객실유입 차단기술의 핵심이 되는 전기적 먼지차단 기술은 유사한 공조시스템을 가지고 있는 대중교통차량(일반철도, 트램, 버스, 선박 등)에 적용할 수 있는 요소기술로 활용 ● 전동차 부착형 미세먼지 제거장치는 살수차 및 집진차량 등 전용 청소차량과 함께 사용하여 도시철도 터널 내부 미세먼지 오염도 저감에 기여 ● 전동차 부착형 미세먼지 제거장치에 대한 전산유체역학기반 시뮬레이션 기술은 타 교통수단용 집진장치의 신속한 설계 및 성능 검증에 활용 가능				
중심어 (5개 이내)	집진장치	전동차	터널	미세먼지	차단장치

연구개발 성과 요약문

<table>
<tr>
<td>전동차 하부 부착형
집진장치 개발</td>
<td>
○ 전동차 하부 부착형 집진장치 개발품 제원



<table>
<tr><th>품 명</th><th>SIZE</th><th>무 게</th><th>비 고</th></tr>
<tr><td>동력 미세먼지
제거장치</td><td>1086*554*1210</td><td>80Kg</td><td>클램프 제외</td></tr>
</table>
<table>
<tr><th>구분</th><th>Spec.</th></tr>
<tr><td>정격전압</td><td>220V, 50/60HZ</td></tr>
<tr><td>최대풍량(m^3/min)</td><td>4500m^3/h</td></tr>
<tr><td>소비전력</td><td>1500W/1600 W</td></tr>
<tr><td>고전압</td><td>-12KV, -14KV</td></tr>
<tr><td>저전압</td><td>-7KV, -8KV</td></tr>
</table>
○ 전동차 부착형 집진장치의 단품 성능 결과 <u>미세먼지 집진효율 51.8% 이상</u> 달성


<개발 기술의 전동차 하부 설치 및 현장 성능검증>
</td>
</tr>
<tr>
<td>집진 카트리지
세정장치 개발</td>
<td>○ 세정장치 개발품 제원</td>
</tr>
</table>



품 명	SIZE	무 게
집진 카트리지 세정장치	1838*960*2755	약 250 Kg

구분	정격전압	정격주파수	소비전력
초음파	220V	4KHz	1600W
급수용펌프	220V/380V	60Hz	680W
블로워	380V	60Hz	1500W

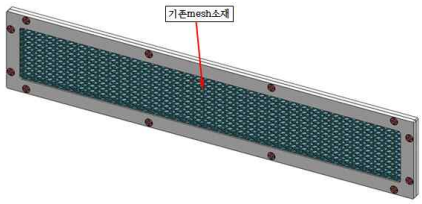
○ 전동차 부착형 집진장치 내 집진판 세정 시 세정시간 20초, 건조시간 30초를 소요하며, 세정효율 90% 이상을 만족

미세먼지 객실유입 차단장치 개발

○ 미세먼지 객실유입 차단장치 개발품 제원



이온발생장치를 설치한 유동유도부



전기메쉬필터

품 명	SIZE	무 게	비 고
미세먼지 객실유입 차단시스템	497*112*62	10 kg	미세먼지 차단장치 + 냉방기 내부 인터페이스

분류	품명	재질	크기 (mm)	무게 (kg)
미세먼지 차단장치	유동유도부	STS304	497*112*62	3
	이온발생장치	Carbon Fiber	490*25*5	0.2
	전압인가필터	MC, sus	465*90*10	1
고전압 발생 및 전원차단장치	케이스	STS304	300*200*150	4
	고전압 발생장치	복합	42*25*18	0.035
	SMPS	복합	111*78*36	0.26
	습도 센서	복합	93*Ø12	0.02
	컨트롤러	복합	72*36*83	0.211

○ 서울지하철 5호선(방화행, 상일동행/마천행) 전동차에 부착한 현장 성능시험 결과 PM_{10}, $PM_{2.5}$의 차단효율 74.5%, 82.5% 달성

○ 현장 성능시험 시 미세먼지 차단장치의 차압은 100 Pa 이하 달성

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 108

가. 연구개발의 목적 ····· 108

나. 연구개발의 필요성 ····· 108

다. 연구내용 및 범위 ····· 110

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 111

가. 연구 내용 ····· 111

나. 연구개발 성과 ····· 204

다. 연구 결과 ····· 206

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 211

가. 목표 ····· 211

나. 목표 달성여부 ····· 211

다. 목표 미달성 원인 및 차후대책 ····· 214

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 215

가. 기술이전 ····· 215

나. 실용화 사업계획 ····· 216

붙임. 참고 문헌 ····· 220

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발의 목적

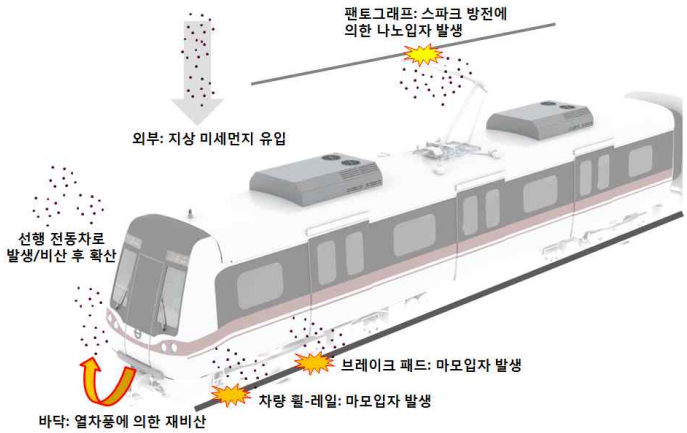
○ 플랫폼 스크린 도어의 설치로 승강장 및 대합실의 공기질은 개선되었으나 오히려 지하터널과 객실 내부의 오염도 악화 우려가 높아짐에 따라, 열차운행에 의해 지속적으로 발생하는 미세먼지의 발생원 근처에서 확산되기 전에 실시간 제거할 수 있으면서, 폐에너지인 열차풍을 활용한 에너지 절감형(무동력형) 미세먼지 제거기술과 최신 나노기술에 기반한 입자 성분 맞춤형, 탈부착형 미세먼지 저감장치를 개발하여 지하터널공간의 오염도를 저감함으로써 객차 실내의 공기질을 개선하고자 하였다.

○ 도시철도 이용자가 미세먼지에 장시간 노출되는 객실 내부의 공기질을 개선하기 위해 차량의 운행 중 터널 상부의 미세먼지 특성을 파악하고, 차량으로 유입되는 경로를 분석하여 터널 오염물질의 객실 유입을 방지할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

나. 연구개발의 필요성

○ **지하공간 공기질 개선을 위해 범정부 차원의 대책 강구** : 환경부에서는 1996년 12월 30일 '지하생활공간 공기질 관리법'을 제정한 후 2003년 '다중이용시설 등의 실내공기질관리법'으로 전문 개정하여 지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실 등의 지하공간에 대한 실내 공기질을 개선하기 위해 미세먼지, 이산화탄소, 포름알데히드, 총부유세균 및 일산화탄소의 5개 항목은 유지기준을, 이산화질소, 라돈, 휘발성 유기화합물, 석면 및 오존은 권고기준으로 제시하였고, 2008년부터 2013년까지 지하역사 공기질 개선 5개년 대책 사업을 통해 시민건강에 영향이 큰 미세먼지, 석면, 라돈 등을 중점 관리하고자 지속적인 노력을 기울이고 있음. 그러나 현재 지하역사의 미세먼지(PM_{10})의 실내공기질 유지기준은 150 ㎍/㎥ 이하로 연간 대기질 환경기준에 비하여 약 3배 높으므로, 미세먼지를 저감시키기 위하여 국토교통부, 지자체(서울시 등) 등 유관부처의 다각적인 노력이 필요하다.

○ **운행하는 도시철도가 미세먼지의 주요 발생원** : 외부 지상으로부터 유입되는 미세먼지도 지하터널의 미세먼지 오염도에 영향을 미치지만, 열차가 운행하면서 레일과 차륜 사이의 마찰과 긁힘으로 인한 마모, 팬토그래프와 급전시설의 마찰로 인한 마모 등에 의해 발생하거나, 레일 연마작업과 지하구조물 유지보수작업 등으로 바닥에 쌓여있던 미세먼지가 운행하는 전동차의 열차풍에 의해 비산되는 것이 주요한 발생원이다.



<전동차 운행에 의한 미세먼지 발생 개념도>

○ **플랫폼 스크린 도어 설치로 승강장 공기질은 개선된 반면 지하터널의 오염도는 악화** : 서울시는 2009년 12월까지 약 4년에 걸쳐 289개 서울 지하철 전체 역사에 플랫폼 스크린 도어(platform screen door, PSD)를 설치하여 운영 중인데, PSD 설치로 승강장의 PM_{10}, $PM_{2.5}$, 라돈 농도는 각각 47%, 18%, 56% 감소한 것으로 보고된 바 있으나, 전동차 실내의 미세먼지는 15~23% 증가한 것으로 보고된 바 있다. 즉, 오염된 지하터널 공기가 승강장과 대합실로 확산되는 것을 PSD가 차단하여 승강장의 공기질은 개선된 반면에 지하터널에서 발생되는 오염물질들이 외부로 배출되지 못하고 축적되어 지하터널의 오염도는 PSD 설치 전보다 더 악화될 우려가 있다. 이에 따라 터널 내부 미세먼지 제거가 더욱 중요한 현안 이슈로 대두된다.

○ **운행전동차에 탈부착이 가능하도록 나노기술이 적용된 실시간 이동형 집진기술 필요** : 최근 연구결과에 의하면 지하철 터널과 지하역사의 미세먼지는 대부분 터널 내 열차운행에 의해 지속적 발생하므로 실시간 제거기술을 운행전동차에 적용하여 미세먼지 발생원 근처에서 확산되기 전에 실시간 제거할 수 있으면서, 열차풍(폐에너지)을 활용한 에너지 절감형(무동력형) 집진기술과 최신 나노기술에 기반한 입자 성분별 맞춤형 탈부착형 제거장치를 개발하여, 노선별 오염도 특성에 따라 제거장치를 전략적으로 운영함으로써 지하터널공간의 오염도를 효과적으로 저감시킬 필요가 있다.

○ **전동차 주변 공기유동 및 미세먼지 거동 수치해석 기술의 적용 필요** : 터널공간의 열차풍을 활용하기 위하여 집진장치의 설계 단계에서 전동차 주변의 공기유동 및 발생된 미세먼지의 거동을 예측하고, 시제품의 성능을 사전에 예측할 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술의 활용을 통해 기술 개발에 필요한 비용과 시간을 절감할 수 있어야 한다.

○ **실제 탑승객의 미세먼지 노출 피해를 저감할 수 있는 기술이 필요** : 터널 내 부유하는 미세먼지의 근본적 저감을 통해 객실유입 미세먼지를 저감할 수 있을 뿐만 아니라, 이와 더불어 터널 미세먼지의 객실 유입을 차단할 수 있는 기술개발이 요구된다. 이러한 기술은 지하철 시스템의 공기질 개선의 요소인 터널정화, 객실정화와 더불어 차량과 터널간 인터페이스 요소에 해당하는 기술로 경제적이면서 실질적인 탑승객 미세먼지 노출 피해 최소화에 기여할 수 있는 기술개발이 요구된다.

다. 연구내용 및 범위

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	■ 나노기술 기반 전동차 부착형 미세먼지 제거장치의 개념설계	-전동차 부착형 미세먼지 제거장치 개념설계
		-전산유체역학(CFD) 기반 전동차 주위 유동해석
		-미세먼지 제거장치의 탈부착 방식 개념설계
		-전동차의 운행특성 및 차량구조 분석
	■ 터널상부 및 차량유입 미세먼지 오염원 분석	-터널, 객실 미세먼지 오염현황 및 발생요인 분석
		-터널 미세먼지의 객실유입경로 파악
		-미세먼지 객실유입 차단장치 개념설계
2차년도	■ 전동차 부착형 미세먼지 제거장치의 Lab-scale 시제품 제작 및 성능평가	-하이브리드형 미세먼지 제거장치 Lab-scale 시제품 제작 및 성능평가
		-미세먼지 제거장치의 장착에 따른 전동차의 동특성 변화 분석
		-CFD 이용 Lab-scale 시제품의 성능해석
	■ 재생형 집진 카트리지 세정장치 기본설계	-전기집진판 세정장치 기본설계
	■ 미세먼지 객실유입 차단 요소기술 개발	-차단장치 핵심요소 설계 및 제작
		-실험실 성능평가 및 성능개선
3차년도	■ 전동차 부착형 미세먼지 제거장치의 시제품 제작 및 실험실 성능평가	-하이브리드형 미세먼지 제거장치 시제품 제작 및 성능평가
		-CFD 이용 하이브리드형 미세먼지 제거장치 시제품의 성능해석
		-세정형 복합고분자필터 제조
		-전동차 부착형 미세먼지 제거장치의 인증절차 준비
	■ 재생형 집진 카트리지 세정장치 시제품 제작	-전기집진판 세정장치 시제품 제작
		-복합고분자필터 세정장치 기본설계
	■ 미세먼지 객실유입 차단장치 상세설계	-미세먼지 객실유입 차단장치 상세설계
		-전동차 상부 인터페이스 검토
4차년도	■ 전동차 부착형 미세먼지 제거장치의 최적화	-다단필터형 미세먼지 제거장치 Lab-scale 시제품 제작 및 성능평가
		-하이브리드형과 다단필터형 미세먼지 제거장치의 비교 : 성능, 경제성 등
		-미세먼지 제거장치의 인증시험 : 공인기관 의뢰
	■ 재생형 집진 카트리지 세정장치의 최적화	-복합고분자필터 세정장치 시제품 제작
		-세정장치의 최적화
	■ 미세먼지 객실유입 차단장치 시제품 제작	-미세먼지 객실유입 차단장치 시제품 제작
		-전동차 상부 인터페이스 장치 제작
		-시제품 사전 성능평가
5차년도	■ 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 시제품의 전동차 장착 현장평가	-미세먼지 제거장치 최종 시제품의 전동차 장착 현장평가
		-CFD 이용 최종 시제품의 실적용 성능해석
		-미세먼지 제거장치의 운영관리 지침 작성
	■ 재생형 집진 카트리지 세정장치 현장평가	-세정장치 최종 시제품의 현장평가
		-세정장치의 운영관리 지침 작성
	■ 미세먼지 객실유입 차단장치 시제품의 운행전동차 장착 및 현장평가	-운행전동차 장착
		-운행전동차 현장시험 및 시스템 성능평가
		-시스템 운영관리 지침 작성

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구 내용

(1) 연구 수행 내용

1)지하철 환경 사전조사

(가) 운영처의 유지관리 현황

가) 서울교통공사(구 서울메트로, 구 서울도시철도공사) 공기질 관리 현황

① 스크린도어 설치 : 2009년 1-4호선 120개역 모든 역사에 설치하였다.
② 고성능 에어클리너 설치 : 역사 및 터널 외기 도입부 환기구에 고성능 공기여과장치 설치
③ 콘크리트 도상 개량 : 미세먼지의 발생원이 되는 자갈도상을 콘크리트 도상으로 교체 (1-4호선 137.5km 2014년 12월 개량)
④ 노후 환기설비 개량 : 환기 송풍기 교체, 공기여과장치 교체/신설 (1-4호선 71개 역사 완료)
⑤ 환기구 조형화 인상 : 환기구 높이를 인상하여 양질의 공기가 지하역사로 유입 유도
⑥ 미세먼지 제거: 분진 흡입차(전구간 년 1회), 고압살수차 (전구간 년 12회) 운영 및 역사 물청소(역사별 월 2회), 전동차 부착용 마그네틱 집진장치 활용, 싸이클론 집진장치

나) 대전광역시 도시철도공사 공기질 관리 현황

① 지능형 환기시스템: 실시간 미세먼지 농도 측정값에 따라 환기설비를 제어 시스템 구축/운영
② 실내공기질 모니터링시스템 운영: 측정항목-미세먼지, 초미세먼지, 일산화탄소, 이산화탄소, 이산화질소
③ 스크린도어 설치 : 1호선 22개 전역사(판암 ~ 반석)
④ 공기필터 자동세정 및 고압세척기를 활용한 필터세척
⑤ 고압살수차를 이용한 터널 물청소

다) 대구광역시 도시철도공사 공기질 관리 현황

① 송풍기 및 공기조화기 운영: 총 59개 역사에 1호선 212개소, 2호선 222개소
② 지하역사의 공기흐름: 공기를 강제로 넣어주고 빼낼 수 있도록 급기/배기용 송풍기 이용
③ 공기여과설비 현황: 1, 2호선 240개 (데미스터, 오토필터, 세정형 필터, 대전 미립자)
④ 1호선 상인역-월촌역 사이 터널 급/배기 환기구에 양방향전기집진기 총 3대를 설치하여, 열차풍으로 양방향 집진이 가능하지만, 집진량을 증가시키기 위해 팬을 하루 5시간 316일 가동시 총 21 kg(1대당 0.7 kg/월)집진함 (1대 설치비 약 2억원, 팬 가동비용 하루 5시간 약 1000만원 수준, 1년 약 30억원 수준)

라) 광주광역시 도시철도공사 공기질 관리 현황

① 지하역사 공기질 원격 감시시스템(TMS) 상시 운영: 6개 역사에서 24시간 연중 감시
② 환경측정치 대시민 공개를 위한 환경전광판 운영: 4개역에서 실시간 측정치(PM_{10}, CO, CO_2)표출
③ 공기정화장치(공기여과기) 운영: 외기 도입기 3단 공기정화장치를 거친 청정공기 공급
④ 지하역사 공조환기설비 미세먼지 자동제어시스템 운영
⑤ 스크린도어 설치: 1호선 19개 역사 중 11개 역사 설치 완료
⑥ 터널구간 물청소 등 누적먼지 제거: 고압세척기와 터널 내 설치된 본선살수 설비 이용
⑦ 공기유입구 계통 청결관리: 급기환기탑, 데미스트 필터 및 공조기 등 물청소를 실시

마) 부산교통공사 공기질 관리 현황

① 환기설비 운영

② 공기여과장치 주기적 필터 세척: 자동세척(1회/일), 수동세척(1회/월), 고압세척(1회/년)

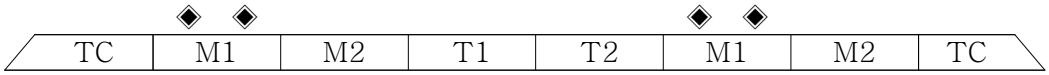
③ 지하터널 내 물청소

④ 노후 환기설비 개량 및 교체 : 환기 송풍기 교체, 역사 환기덕트 개량, 공기여과장치 교체

(나) 전동차의 구조분석 및 기존 자석식 집진장치 운영 현황

가) 전동차의 구성

- 전동차의 주요 차종은 TC(제어차), M(동력차), T(승객차)카로 구성되어 있다.



<5~7호선 8량 조성>

나) 서울도시철도공사 마그네틱 집진장치 운영현황 분석

① 서울도시철도공사 마그네틱 집진장치 운영 현황

전동차에 설치하고 지하터널에서 열차운행으로 일어나는 바람(이하 열차풍)으로 비산되는 쇳가루 등 금속성 미세먼지를 강력한 마그네틱 필터에 의해 연속적으로 흡착하여 지하터널 내 오염된 공기를 정화시킨다. 이 장치는 지하철 터널내 공기질을 향상시키기 위한 마그네틱 드럼 필터 기술을 현장에 적용한 것이다.

구 분	호퍼 드럼형	3단 드럼형	8단 봉형
중 량	1단(550 kg)	3단(450 kg)	8단(80 kg)
크 기	Φ260×2400×1단	Φ165×1200×3단	Φ26.5×1200×1단
자 력	4,000 Gauss	4,000 Gauss	8,000 Gauss
집진성능	0.024 g/km	0.054 g/km	0.045 g/km
단가	13,970 천원	12,705 천원	3,483 천원
설치사진			

<봉형 집진장치 전동차 포집 실험: 측정편성 : 503편성 측정기간 : 2015.02.23 ~ 2015.03.15>

측정 편성	503편성	
측정 기간	2015.02.23 ~ 2015.03.03	2015.03.03 ~ 2015.03.15
주행 거리	1650 km	3157 km
금속성 물질 포집량	33 g	44.5 g
포집 성능	0.020 g/km	0.015 g/km

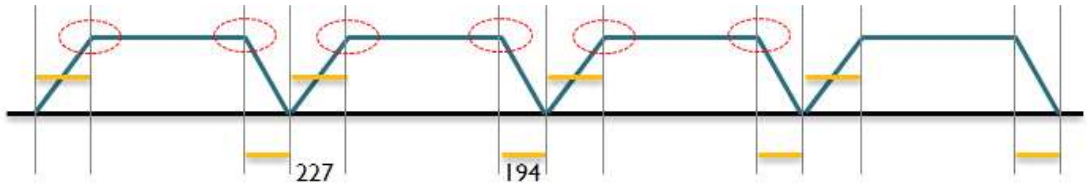
7일차의 효율(0.020g/km)이 14일차의 효율(0.015g/km)에 비해 더 높은 것으로 판단된다. 이는 마그네틱 집진장치의 집진성능이 주행거리 및 주행시간에 정비례하지 않음을 알 수 있다. 2015년에 측정한 자석봉 집진기의 평균 집진 성능은 **0.017 g/km** 이었다.

(다) 전동차의 운행 특성 및 집진장치 설치 위치

① 전동차의 운행특성

도시철도를 운행하는 전동차는 역간 거리가 짧아 가속 및 감속 특성이 우수하나 승차감을 고려하여 가속도는 3.0km/h/sec, 감속도는 3.5km/h/sec를 일반적으로 적용한다. 일반적으로 도시철도의 최고속도 70km/h를 가정할 때 가속거리와 제동거리는 각각 227m와 194m가 되고, 속도 프

로파일은 다음 그림과 같다.



<전동차 운행 속도 프로파일>

② 집진장치의 최적 설치위치 선정

전동차는 노선에 따라 6량에서 10량이 1편성으로 구성되어 있으며, VVVF 인버터로 제어되는 전동차의 경우 열차 구성은 다음 표와 같다. 집진장치 설치위치에 대해 평가한 결과 집진장치의 설치위치는 **T차량 하부**가 적합하였다.

편성 길이	구성	적용 예
6량	TC – M – M' – T – M' – TC	서울9호선
8량	TC – M – M' – T – T – M – M' – TC	서울5~8호선
10량	TC – M – M' – T – M' – T – T – M – M' – TC	서울1~4호선

※ TC: 제어차, T: 부수차, M: 구동차, M': 팬터그래프가 있는 구동차

- 차량에 따른 적절성 평가

구분	안전성	작업성	공간 확보	효율성
TC	X	X	△	△
T	**O**	**O**	**△**	**O**
M, M'	X	X	X	X

- 차량 내 위치에 따른 적절성 평가

구분	안전성	작업성	공간 확보	효율성
차량 옥상	X	X	O	△
차량 하부	**O**	**O**	**△**	**O**
차량 전면	X	O	△	O

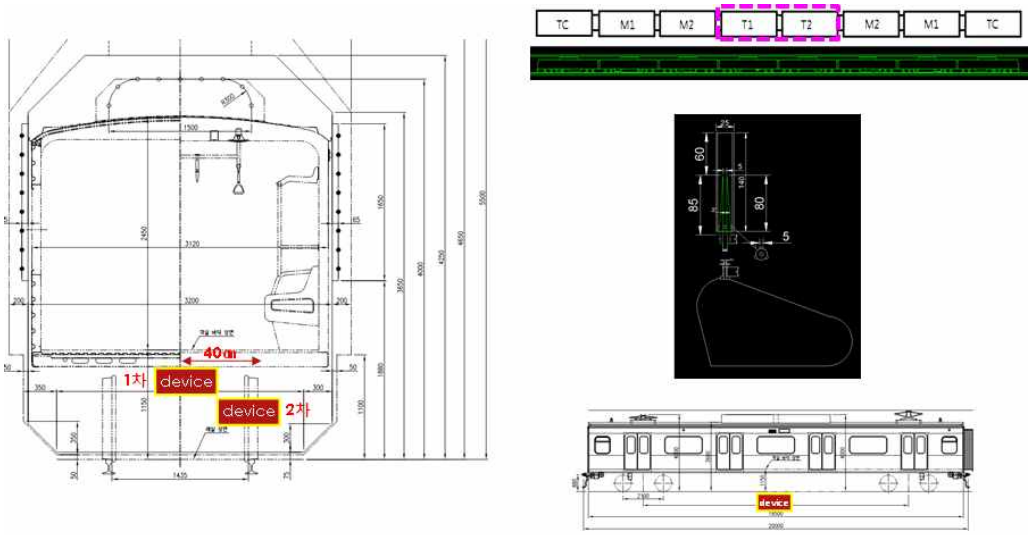
(라) 전동차 하부 풍속 및 미세먼지 특성 조사

가) 서울도시철도 5호선 하부 측정

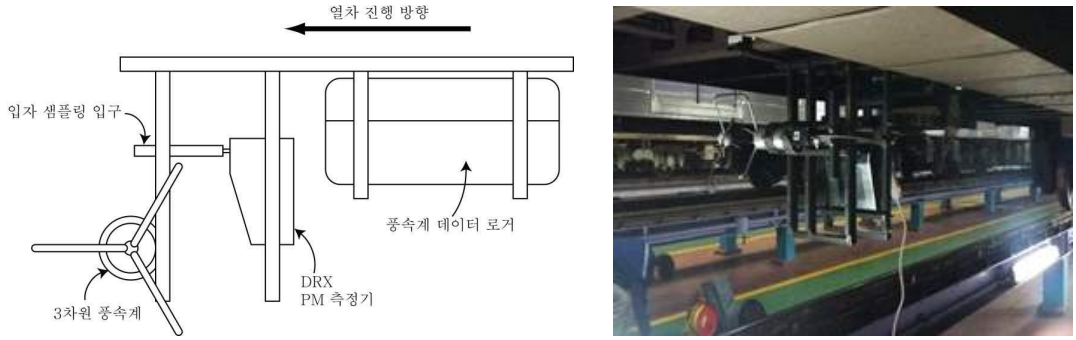
① 전동차 하부 공기유동 및 오염물질 측정 개요

수도권 지하철 5호선 상일동-방화 구간의 하부 공기유동 및 오염물질을 측정하기 위해 3차원 풍속계(3-axis wind sensor, model 81000)와 미세먼지 측정기(DustTrak DRX Aerosol Monitor, model 8533, TSI)가 전동차 하부(1차 측정: 5호차, 2차 측정 : 4호차, 3차 측정 : 5호차)에 설치되었다. 측정장비의 설치를 위해 디케이산업(주)에서 측정장비를 전동차 하부에 부착할 수 있는 고정 프레임을 설계하였고, 이를 외부 전문기관에서 제작하여 실험에 사용하였다.

측정 구분	측정시기	전동차	비 고
1차	2015년 2월 10일 17:33-23:44	516호	
2차	2015년 2월 26일 17:33-23:43	510호	미세먼지 측정기용 입구(inlet) 설치
3차	2015년 3월 25일 17:33-23:43	530호	집진장치 시험 병행



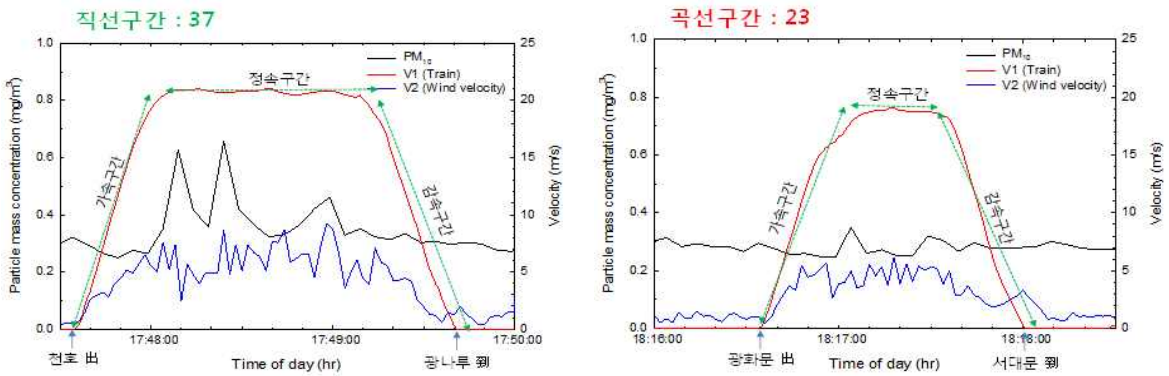
<전동차 하부 풍속 및 미세먼지 측정위치>



<전동차 하부에 장착된 풍속 및 미세먼지 측정장비의 배치도 및 설치된 모습>

② 전동차 하부 공기유동 및 오염물질 측정 결과

전동차 운행구간의 전형적인 운행패턴을 도식화하여 각 구간별 전동차의 속력, 전동차 하부 풍속 및 미세먼지(PM_{10}) 농도 분포를 분석하였다. 하부 풍속은 열차속도의 20-30% 수준이었으며, 외곽으로 갈수록 입자 농도와 풍속이 높았다.

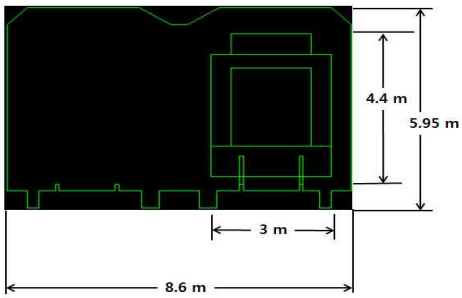


<1차 측정 시 상일동→방화 방향 운행 중 전동차의 속력, 전동차 하부에서 풍속 및 미세먼지 농도 변화>

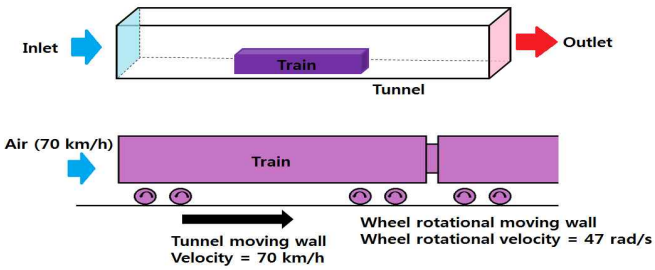
나) CFD 기반 서울도시철도 5호선 전동차 주위 유동해석

① 지하터널 내 운행하는 전동차 주위의 유동해석

전동차 하부에서 정확한 유동해석을 위해 브레이크 패드를 포함한 차륜의 형상은 실 도면을 참고하여 도식화하였고, 하부에 부착되어 있는 구조물은 유동의 결과에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 단순화하여 도식화하였다. 수치해석에서 결정한 터널의 총 길이는 1160 m이고, 전동차 전단, 후단의 터널 길이를 각각 500 m로 설정하였다. 사용한 격자의 개수는 약 25,000,000개이다. 생성된 격자는 열유동 해석용 상용코드인 ANSYS FLUENT *Release 14.5*를 사용하여 전동차 주위의 유동을 해석하였다. 난류모델인 realizable $k-\varepsilon$ model을 사용하였다. 속도와 압력을 coupling 하기 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 해의 정확도를 높이기 위해 double precision solver를 선택하였다. 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식의 수렴 조건은 각각 10^{-3} 및 10^{-6}으로 설정하였다.



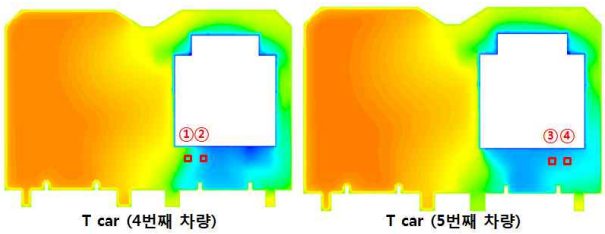
<수치해석을 위해 도식화된 터널과 전동차의 단면도>



<Wind tunnel과 전동차의 경계조건>

② 유동해석 결과

수치해석과 실험 데이터 간의 비교에서 속도 벡터의 방향과 경향성은 매우 잘 일치하였다. 상대적으로 하부 구조물이 적게 존재하는 T Car 하부에서 다른 객차보다 상대적으로 넓은 범위에 걸쳐서 속도가 고르게 분포하는 것을 확인하였다. 차량의 중심부로 갈수록 유속이 느려지고 차량의 벽면 쪽으로 갈수록 유속이 빨라지는 경향성을 확인할 수 있었다.



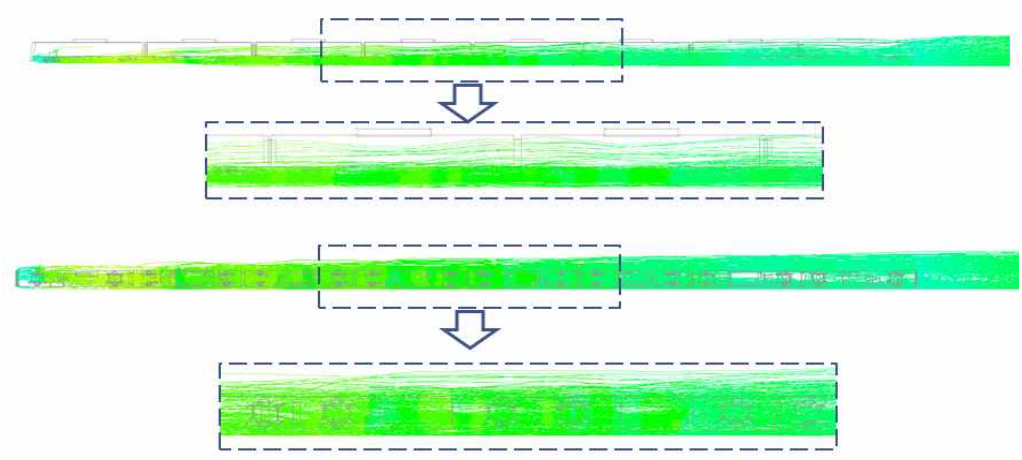
<1차 실험과 2차 실험에서 측정한 위치>

<측정결과와 수치해석 결과의 비교>

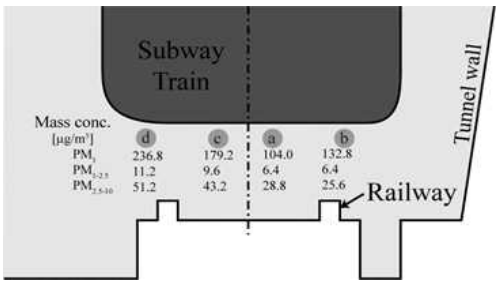
수치해석 결과	측정결과
① 13 m/s	9.5±1 m/s
② 7 m/s	5.8±0.7 m/s
③ 6.5 m/s	5.3±1 m/s
④ 8 m/s	9.3±0.8 m/s

③ 전동차 차륜 뒤에서 입자거동 해석결과

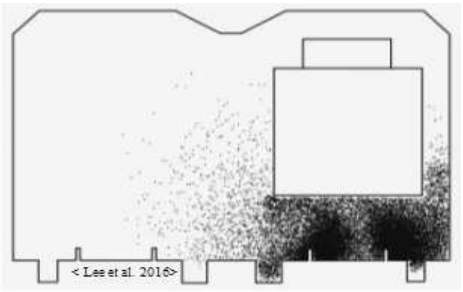
대다수의 입자는 전동차의 하부에서 이동하고 다섯 번째 객차 이후로는 입자가 점점 상승하여 최종적으로 전동차의 높이까지 비산되는 것으로 예측되었다. 전동차의 위에서 관찰한 결과를 보면, 입자가 전동차 하부의 전 범위에 걸쳐서 넓게 비산되어 이동하는 것으로 예측되었다. 열차 하부 중에서도 레일 근처에서 입자 농도가 높을 것으로 예측되었다. 입자의 크기가 커질수록 전동차의 뒷부분에서 높은 곳까지 비산되는 비율이 상대적으로 줄어드는 것으로 예측되었다.



<열차의 옆면 및 윗면에서 바라본 2 ㎛ 입자의 궤적>



<열차하부 입자농도 측정결과>



<열차하부 입자농도 시뮬레이션결과>

(마) 지하철 터널 내 비산먼지 특성 측정 및 분석

가) 터널, 객실 미세먼지 오염현황 및 발생요인 분석

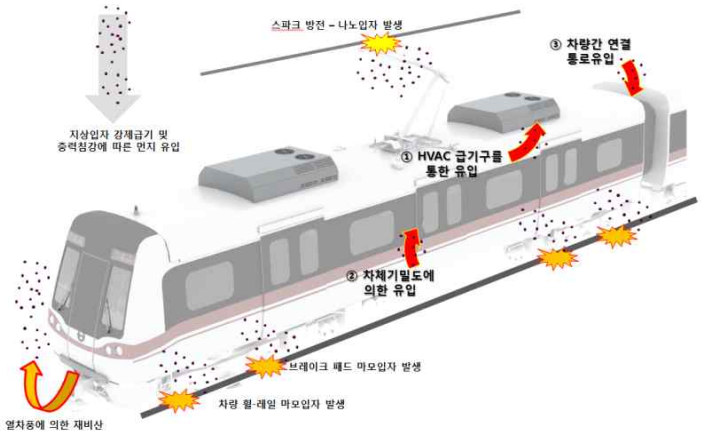
① 지하철 객실 미세먼지 오염현황 문헌조사 및 내/외부 발생요인 분석

국내외 발표된 연구 결과(SCI급 논문, 국내 등재논문급)의 경우 지하철 미세먼지(PM_{10}) 농도가 최대 324㎍/㎥(베이징 지하철)에서 런던지하철(157㎍/㎥~247㎍/㎥) 등으로 보고되고 있다. 외부 발생요인으로 도로차량 배출오염물질, 황사 등이 역사 출입구, 설비 등을 통해 대합실과 승강장으로 순차적으로 유입되고 차량의 정거장 도착과 함께 개방되는 PSD로 인해 승강장 공기와 차량공기가 혼합되면서, 외기의 초미세먼가 객실로 유입될 수 있다. 내부(터널) 발생요인으로 터널내를 운행하는 지하철 차량의 경우 휠과 선로의 마찰, 휠과 브레이크 패드의 마찰, 전력선과 집전설비(판토그라프)의 지속적 마찰로 인하여 입자상오염물질이 발생되고 있으며, 터널구간의 환기를 목적으로 설치되는 강제환기구 혹은 자연환기구를 통해 외부의 먼지가 유입될 수 있다.

나) 터널 미세먼지 객실유입경로 파악

① 지하철 객실 환기 목적의 개방구로부터의 유입

차량상부에 설치되어 있는 HVAC 유닛에는 외기도입을 위한 급기구가 위치해 있으며, 빗물 등이 유입되지 않도록 커버가 설치되어 있다. 따라서, 외부공기는 유닛의 하부 틈으로 유입되어 급기구 철망메쉬필터를 통해 HVAC으로 유입된다. 사진에는 철망메쉬필터의 낮은 입자포집효율을 개선하기 위하여 부직포필터가 추가적으로 설치되어 운영되고 있은 모습이다(신분당선 차량 적용). 송풍팬을 설치한 강제환기구의 경우에는 송풍팬 가동시 객실내부공기를 외부로 배출할 수 있지만, 송풍팬이 가동되지 않는 경우, 오히려 외부의 공기가 객실로 유입될 가능성이 있다.



<터널구간 내 미세먼지 오염원 및 객실 유입경로>



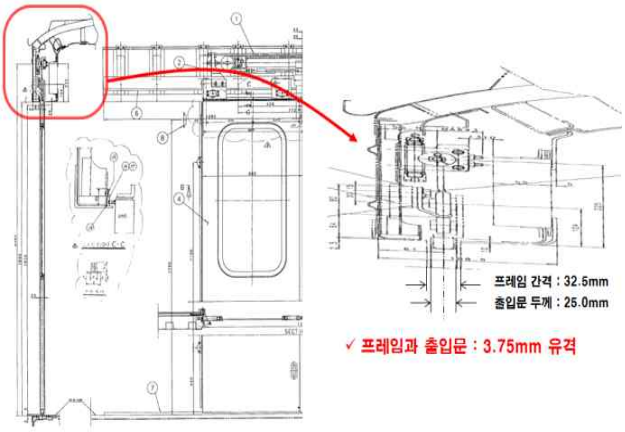
<HVAC시스템 급기구로 유입되는 미세먼지의 이동경로>

② 차량 기밀도 및 출입문 개방에 따른 유입

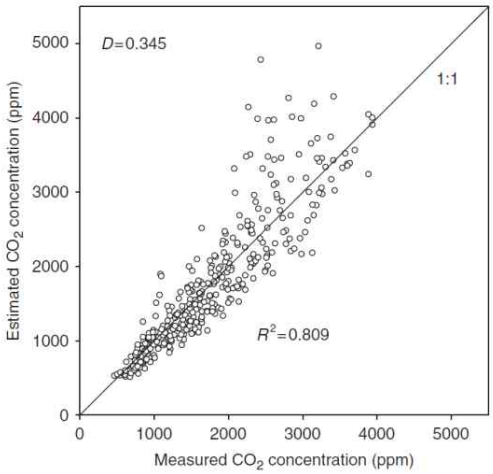
지하철 차량의 기밀도가 높지 않기 때문에 출입문의 틈과 객실간 연결통로(갱웨이)의 틈을 통해 터널 공기가 유입되면서 먼지도 함께 유입될 수 있다(프레임과 출입문 3.75 mm 유격 유지). 지하역사 승강장에서 승객의 승하차를 위해 차량 출입문이 개방되며(평균 20초 개방), 이때 승강장, 터널, 차량내 공기가 일정부분 혼합되면서 상대적으로 오염된 터널 공기 중 미세먼지가 승강장과 차량 객실에 유입될 수 있다.

다) 철도차량 축적 미세먼지 성분분석

중금속 분석결과, 철도 축적 미세먼지에 포함된 중금속 종류와 비율을 확인하기 위하여 다음 표와 같이 유도결합플라즈마 발광분석기(ICP-MS: Inductively Coupled Plasma with Mass Spectrometer)를 이용한 중금속 분석을 실시하였다. 대부분의 축적 미세먼지에서 철(Fe)농도가 매우 높게 나타났다. 철 성분은 휠과 레일, 브레이크의 주요 성분으로 휠-레일 마모 또는 제동시 마모에 의해 발생하는 미세먼지가 축적 되었다는 것을 확인할 수 있다. 그 밖에 망간(Mn), 바륨(Ba), 몰리브덴(Mo)과 안티모니(Sb) 등은 브레이크의 주요 성분으로 모터로 유입되어 축적된 미세먼지에서 검출되었다. 제륜자를 제외한 모터 등의 샘플에서 구리(Cu) 성분이 높게 검출되는 것은, 전차선 등의 마모에 의한 입자발생과 연관이 있을 것으로 판단된다.

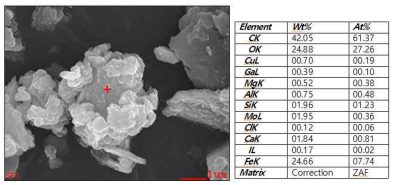


<전동차 출입문 구조>



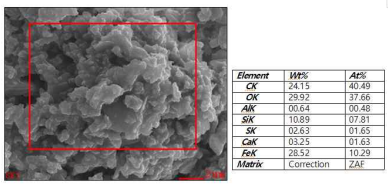
<출입문 개방에 따른 자연환기효율(D=0.345) 산정결과-Kwon et al.(2010)>

부품	중금속 농도 (ppm)															
	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Mo	Sr	Zn	Fe	Si	Sb
모터	165	0.317	21.6	0.563	0.43	18.5	72.9	95.5	2.27	1.08	3.45	1.42	20.7	39511	232	0
모터	139	0.307	18.6	0.488	0.46	12.3	62.2	65.1	1.98	1.2	3.02	1.64	19.3	8020	156	0.048
MTR	247	0.356	22.3	0.511	0.545	19.2	108	92.3	2.24	1.28	3.54	1.91	26.4	12762	253	0.056
MTR	267	0.323	20.5	0.502	0.528	19.1	112.1	93.9	2.11	1.21	3.4	2.03	31.1	13485	232	0.076
대차	208	0.254	7.02	0.475	0.472	16.6	93.8	96.3	1.98	1.11	3.07	1.5	31.8	12276	249	0
제륜자	169	0.254	1.43	0.552	0.293	16.1	14	93.8	2.04	0.49	3.08	1.33	2.8	14421	235	0
함유량 (%)	0.46-0.89							0.3						44	0.75	



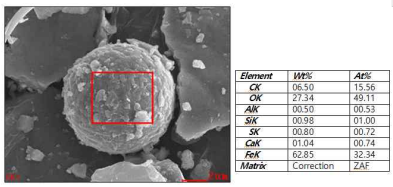
Element	Wt%	At%
CK	42.05	61.37
OK	24.88	27.26
CuL	00.70	00.19
GaL	00.39	00.10
MgK	00.52	00.38
AlK	00.75	00.48
SiK	01.96	01.23
MoL	01.95	00.36
ClK	00.12	00.06
CaK	01.84	00.81
IL	00.17	00.02
FeK	24.66	07.74
Matrix	Correction	ZAF

<대차>



Element	Wt%	At%
CK	24.15	40.49
OK	29.92	37.66
AlK	00.64	00.48
SiK	10.89	07.81
SK	02.63	01.65
CaK	03.25	01.63
FeK	28.52	10.29
Matrix	Correction	ZAF

<HVAC>



Element	Wt%	At%
CK	06.50	15.56
OK	27.34	49.11
AlK	00.50	00.53
SiK	00.98	01.00
SK	00.80	00.72
CaK	01.04	00.74
FeK	62.85	32.34
Matrix	Correction	ZAF

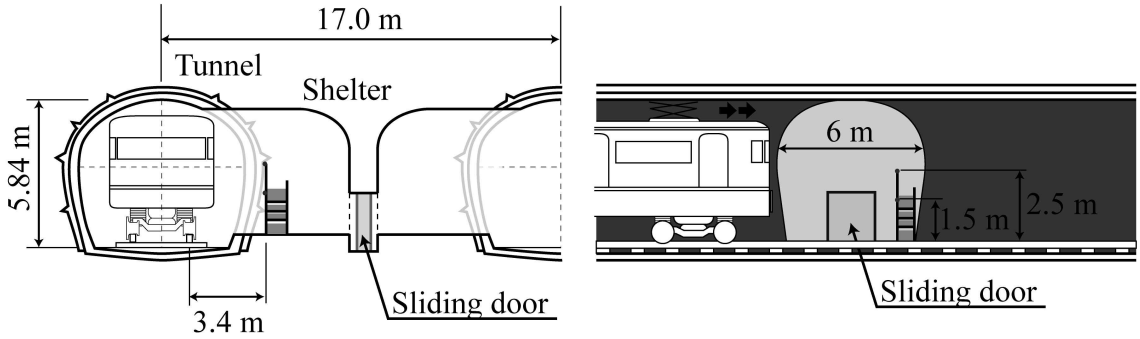
<HVAC 급기구>

라) 터널 내 비산먼지 직접 측정 및 분석

터널 내 미세먼지 무게농도, 크기 및 열차풍의 세기 및 차압측정을 위해서 5호선 장한평-군자하선 기준지점 36.525 km 지점의 임시대피소에서 측정이 이루어졌다. 측정은 1차로 2015년 8월 7일(금)부터 8월 19일(수)까지 12일간 이루어졌으며, 2차로 2016년 1월 27일(수)부터 2월 5일(금)까지 9일간 이루어졌다. 측정 장치로는 APS, OPC, FMPS, DustTrak, 3차원 풍속계, 차압측정기가 사용되었다.



<단선터널 내 미세먼지 측정 및 공기유동 측정>

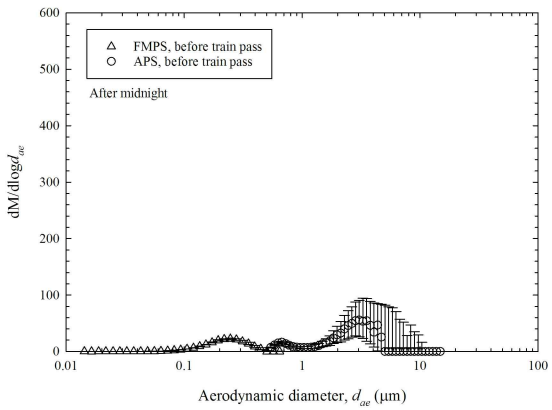


<터널측정 장소 개요도>

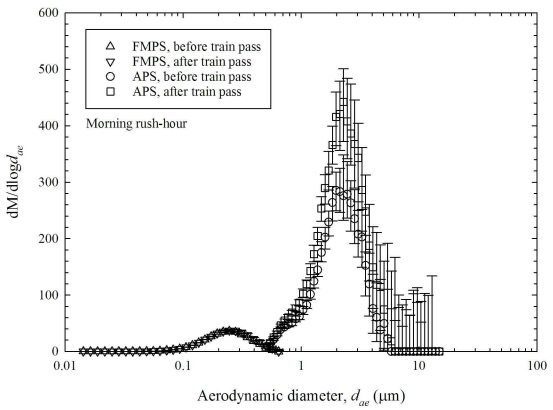
<측정장비의 개요>

측정기기	측정 항목	측정 범위	시간분해능	제조회사 및 모델
Ultrasonic anemometer	풍속, 풍향	0-10 m/s, 360°	2 sec	81000 YOUNG COMPANY
Indoor Air Quality	온도, 상대습도	-	1 sec	GrayWolf
DustTrak	입자 무게농도	PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1	6 sec	8533, TSI
OPC	입자 개수농도	0.25-34 ㎛ (32채널)	6 sec	1.109, GRIMM
APS	입자 개수농도	0.5-19.8 ㎛ (51채널)	1 min	3321, TSI
FMPS	입자 개수농도	5.6-560 nm (16채널)	1 sec	3091, TSI

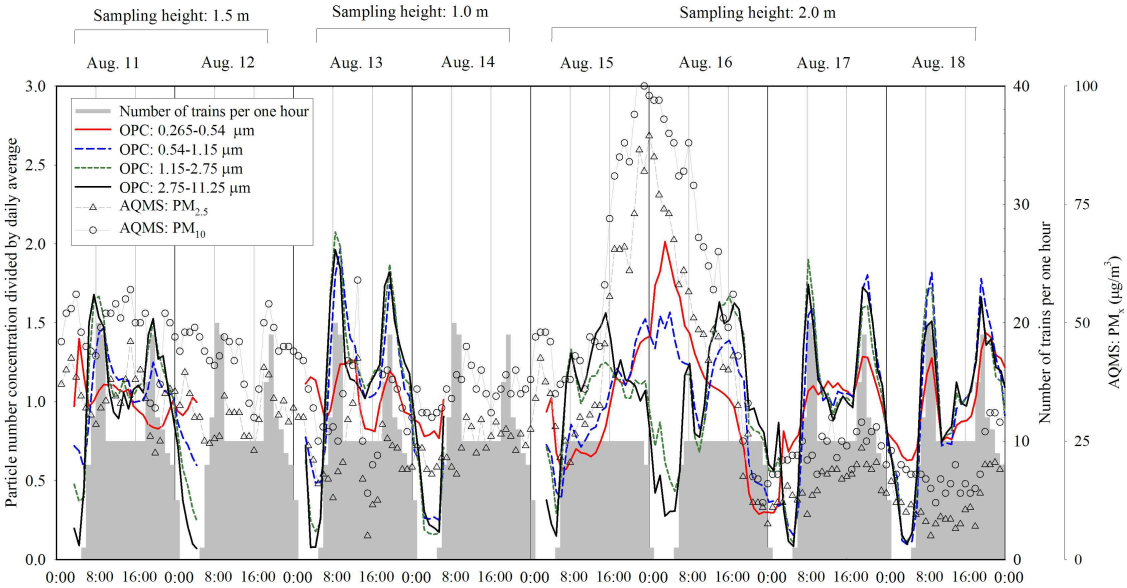
터널 내부 측정결과, 열차가 운행할 때는 열차가 운행하지 않는 새벽보다 터널 내 비산 마이크로 입자 농도가 5-6배 높았으며, 나노 입자 농도는 큰 차이가 없었다. 따라서 열차 주행 시간에 터널 비산먼지 농도가 높으므로 열차 주행시간에 집진이 필요하였다. 입경농도를 살펴보면 마이크로 입자의 농도가 높았으므로, 열차 운행에 의한 비산먼지를 잡기위해서는 마이크로 입자 집진에 집중해야 한다. 특이한 점은 열차 바람에 의해 증가하는 터널 입자농도는 48 $\mu g/m^3$ 으로 일정하였으며, 터널 농도에 영향을 받지 않았다. 그러므로 열차가 지나갈 때마다 열차풍에 의해 항상 같은 양이 바닥으로부터 비산된다고 유추되었다. 터널 입자 농도가 열차 운행 빈도수에 비례해서 나타나는 것은 열차 한 대 한 대가 지나갈 때 증가하고 감소하는 패턴이 반복되고 누적되어서 나타나는 현상임을 밝혀내었다. 부착형 집진장치로 열차 한 대 한 대가 지나갈 때 입자 농도 증가량이 감소한다면, 터널 전체의 입자 농도를 낮출 수 있을 것으로 예상되었다.



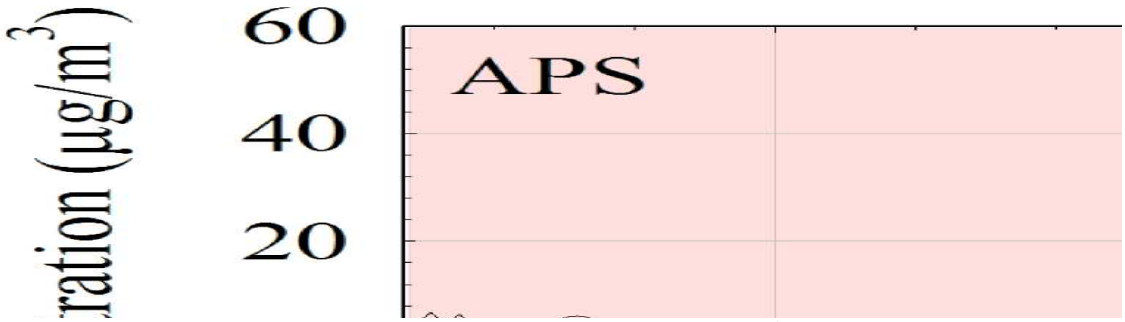
<열차 운행 전 터널 입자 농도 분포>



<열차 운행 후 터널 입자 농도 분포>



<터널 입자 농도 분포 일변화>



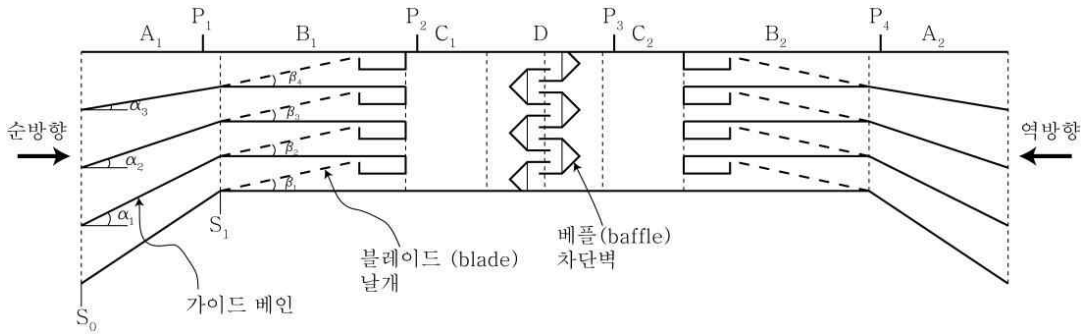
<열차 위치에 따른 터널 입자 농도 변화 >

2)전동차 부착형 미세먼지 제거장치 개발

(가) 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 개념설계

가) 집진장치 타입 및 특징

① 무동력 집진장치 최초 컨셉



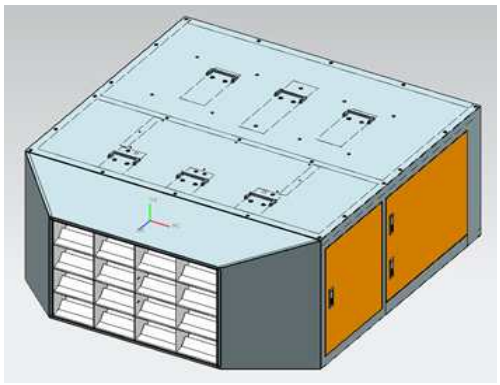
<무동력 미세먼지 집진장치 시스템 최초 구성도>

무동력 집진장치의 최초컨셉은, 기존 전동차의 운행에 지장을 주지 않으면서 공기역학직경(aero dynamic diameter)이 2.5 μm 이상인 미세먼지를 제거할 수 있도록 전동차의 운행 환경(전동차 유도 열차풍, 양방향 운행)을 고려하여 미세먼지의 관성력을 이용하는 방향으로 미세먼지 제거장치를 설계하였다.

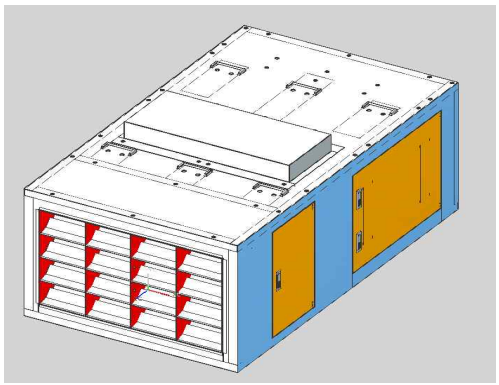
② 무동력 하이브리드 집진장치 설계

최초 컨셉의 무동력 집진장치는 전동차 하부에 부착되어 별도의 동력이 없어도 주행풍으로 큰 먼지를 집진할 수 있지만, 전동차의 운행속도가 느려지면 집진성능이 크게 저하된다. 따라서 느린 유속조건에서 집진성능을 보완하기 위해 전기집진기가 결합된 하이브리드 집진장치 고안하였다.

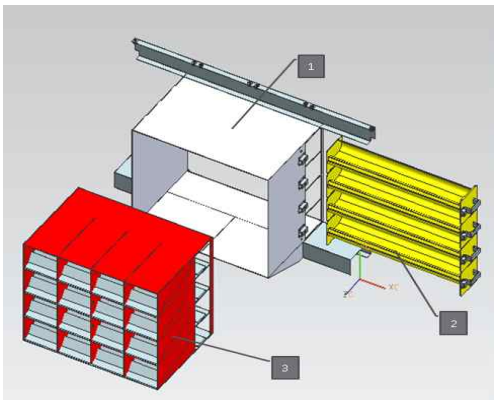
항 목	시 방
구성	루버집진기, 전기집진기, 고전압전원장치
루버집진기 및 전기집진기의 단면적	60 cm × 40 cm
처리유량	28.8 m^3/min @70 km/h
전체 크기	폭 101 cm, 높이 44 cm, 길이 130 cm
소비전력	전기집진기 100 W 이하
전기집진기 인가전압	13 kV
전기집진기 인가전류	5 mA 이하



<초기 하이브리드 집진장치 시제품>



<개선 하이브리드 집진장치 시제품>



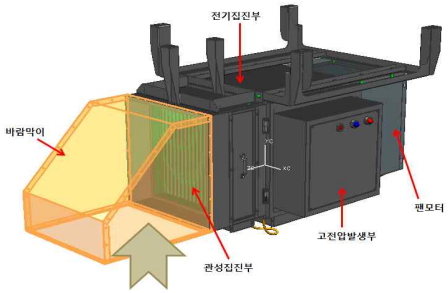
<루버 관성집진장치>



<전기집진기>

③ 동력 하이브리드 집진장치 설계

무동력 미세먼지 집진장치로는 성과목표를 달성하기 위한 충분한 집진유량이 불가능하며, 열차가 멈춰있을 경우 집진이 수행되지 않는다는 단점이 존재하였다. 따라서 팬을 추가한 동력 집진장치를 설계하였다. 무동력 집진장치와 달리 팬을 사용하기 때문에 큰 전력이 소모되지만, 열차 운행 전력에 비해서는 극소량이며, 무동력 미세먼지 집진장치보다 더 많은 유량을 처리할 수 있었다. 동력팬 사용으로 큰 차압에도 충분한 유량을 발생시킬 수 있어서 루버 관성집진장치를 집진효율이 더 좋은 배플 관성집진장치로 교체하였으며, 전기집진기도 2단으로 교체하였다.





<동력 하이브리드 집진장치 컨셉 및 시제품 외관>



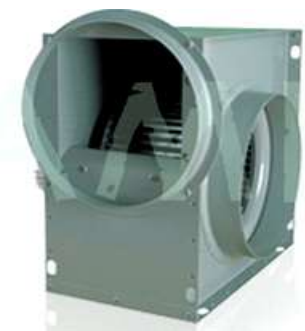


<동력 하이브리드 집진장치 내부 구성품: 왼쪽부터 배플 관성집진장치, 2단 전기집진기, 동력 팬>

④ 전기식 미세먼지 제거장치 설계

1세부 재료연구소에서 개발한 전도성필터의 집진향상 효과를 얻으려면 입자를 단극 하전시켜야 한다. 전기집진기는 입자를 코로나 차징으로 단극 하전시킨다. 그러므로 전도성필터의 상류에 전기집진기가 배치되면 하전된 입자를 전도성필터에서 제거할 수 있으며, 전기집진기가 집진하지 못한 입자나 집진되었다가 떨어져 나간 입자도 전도성필터에서 제거할 수 있다. 하지만 교체용 필터에 전기장을 걸어주는 방법이 매우 어려우며, 스파크에 의해 필터에 화재가 일어날 위험성이 높기 때문에, 전도성필터는 접지전극만을 가지도록 적용하였다. 전도성필터의 차압을 낮추기 위해서 여재를 절곡하여 전도성필터를 제작하였다.

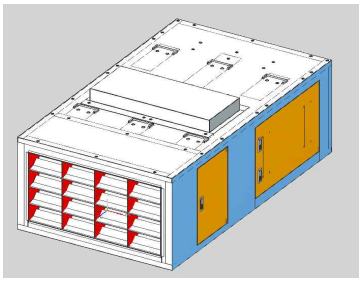
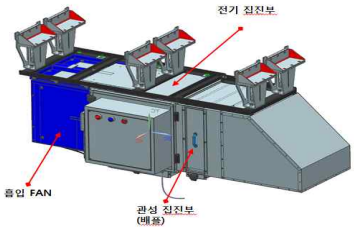
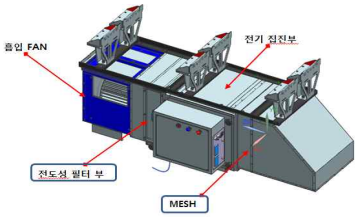




<전기식 집진장치 내부 구성품: 왼쪽부터 2단 전기집진기, 전도성필터, 동력 팬>

나) 집진장치 타입별 성능 비교

추가 전력 소비측면에서는 무동력형 하이브리드 집진장치가 가장 좋지만, 집진효율은 가장 낮았다. 전기식 미세먼지 제거장치와 동력식 하이브리드 집진장치는 소모 전력이 비슷하였으나, 집진효율 측면에서 전기식이 더 우수할 것으로 예상되었다. 하지만 전기식은 필터가 소모성으로 사용되므로 동력 하이브리드 집진장치보다 유지비용이 더 많다. 각 장치들이 고유의 장점과 단점을 가지고 있으므로, 운영기관의 상황에 맞게 집지장치를 선택적으로 사용할 수 있다.

	하이브리드형(무동력)	하이브리드형(동력)	전기식 미세먼지 제거장치
		 동력미세먼지 제거장치	 전기식 미세먼지 제거장치
구성	루버, 1단 전기집진기	2단 전기집진기, 배플, 팬	2단 전기집진기, 전도성필터, 팬
추가 필요 구성품	고전압 파워 서플라이어(PS) 1개, 차단기 1개	고전압 PS 2개, 차단기 3개	고전압 PS 2개, 차단기 3개
교체 주기	주기적인(1-2개월) 세정만 필요함	주기적인(1-2개월) 세정만 필요함	주기적인 세정과 필터 교체가 필요함
소모품	없음	없음	전도성 필터
집진 성능	400 $\mu g/m^3$ 터널 기준 0.015 g/km	400 $\mu g/m^3$ 터널 기준 0.1 g/km	400 $\mu g/m^3$ 터널 기준 0.2 g/km
소모 전력	고전압 PS: 200W	고전압 PS: 30W 팬: 1,500 W	고전압 PS: 30W 팬: 1,500 W

다) 전동차 하부 부착방법 개발

① 클램프 부착 방법

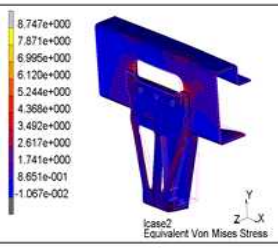
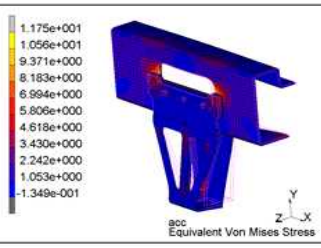
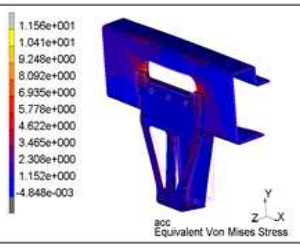
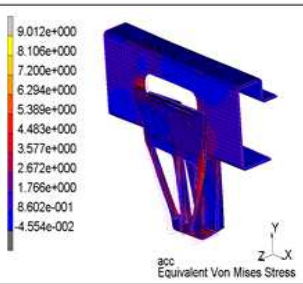
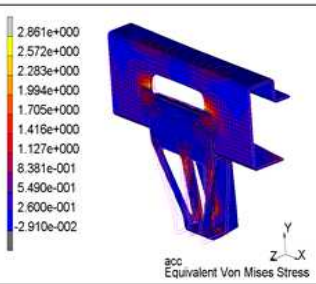
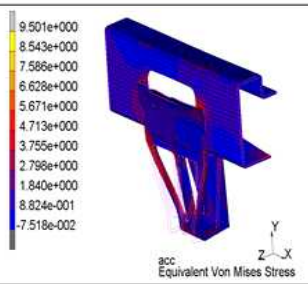
서울교통공사 차량들은 하부에 구멍이 뚫린 프레임이 열차방향으로 나열되어 있다. 기존 차량의 하부에 집진장치를 부착할 경우 본체를 훼손하지 않고 부착하기 위하여 열차 하부 프레임에 연결할 수 있는 클램프를 자체적으로 개발하였다. 강도 시뮬레이션 결과 안전율 15 이상으로 클램프의 수명 및 파괴에 문제가 없다고 판단되었다.



<상/하부 클램프>



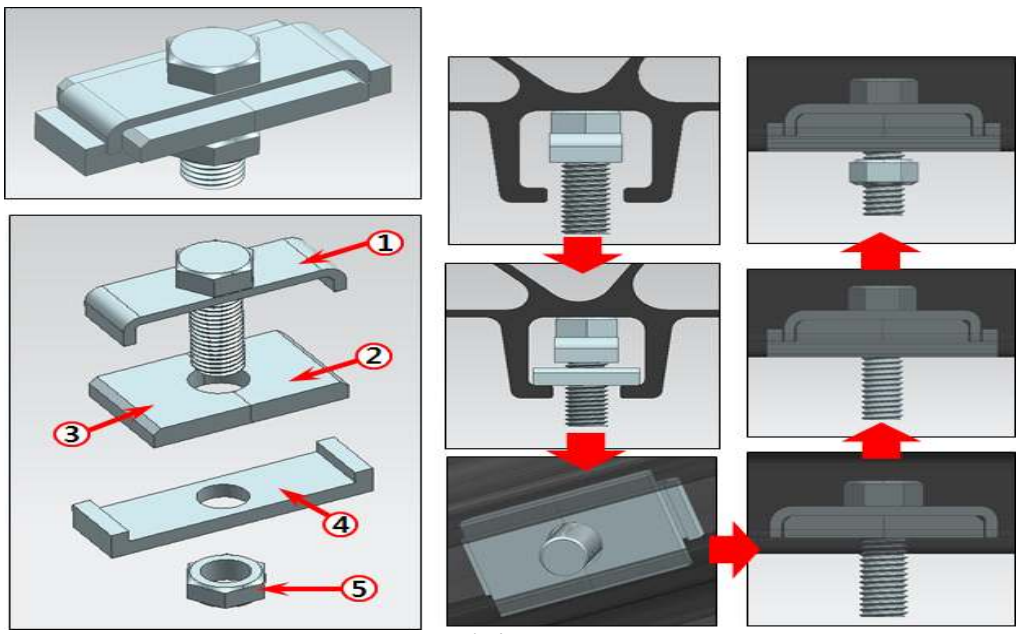
<클램프 장착 사진>

Clamp 1	Clamp 2	Clamp 3
		
응력 : 8.75 Mpa	응력 : 11.75 Mpa	응력 : 11.56 Mpa
안전율 : 24	안전율 : 17.87	안전율 : 18.17
Clamp 4	**Clamp 5**	**Clamp 6**
		
응력 : 9.01 Mpa	응력 : 2.86 Mpa	응력 : 9.5 Mpa
안전율 : 23.3	안전율 : 73.4	안전율 : 22.1

<클램프 응력 해석결과 >

② 볼트캐리어 부착 방법

광주도시철도 차량은 서울교통공사 차량과 달리, 하부에 구멍 뚫린 프레임이 아닌, 레일 형식의 부착유도물이 설치되어 있다. 광주도시철도 차량 전장물들은 이러한 레일에 Bolt Carrier 방식으로 차량 하부에 부착되어 있다. 현재 광주 철도차량에 사용 중인 Bolt Carrier와 유사한 형상으로 다양한 위치에 부착이 가능한 별도의 Bolt Carrier 제작이 필요하다고 판단되었으며, 광주도시철도 차량들에 적용 가능한 Bolt Carrier를 고안하였다.



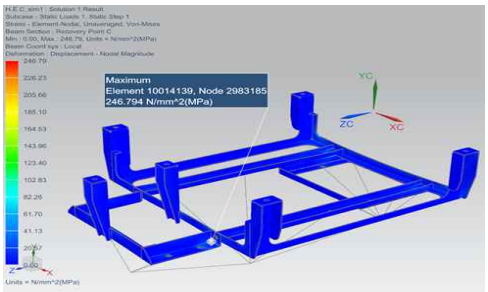
<볼트캐리어 조립 방법>



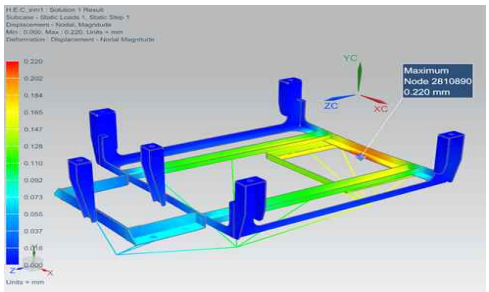
<Bolt Carrier 조립 사진>

③ 전동차와 집진장치의 부착 연결을 위한 프레임

앞서 개발한 클램프, 볼트캐리어와 집진장치를 연결해주는 중간 프레임을 개발하였다. 2배의 무게가 작용하고 차량이 2 m/s로 가속하고 있는 경우 최대 응력은 재질의 파괴응력치에 도달하지 않으므로 안전하다고 판단되며, 변형량도 팬 모터가 장착된 부위에서 0.22 mm로 변형이 극히 미미하였다. 그러므로 안전상 문제는 없다고 판단되었다.



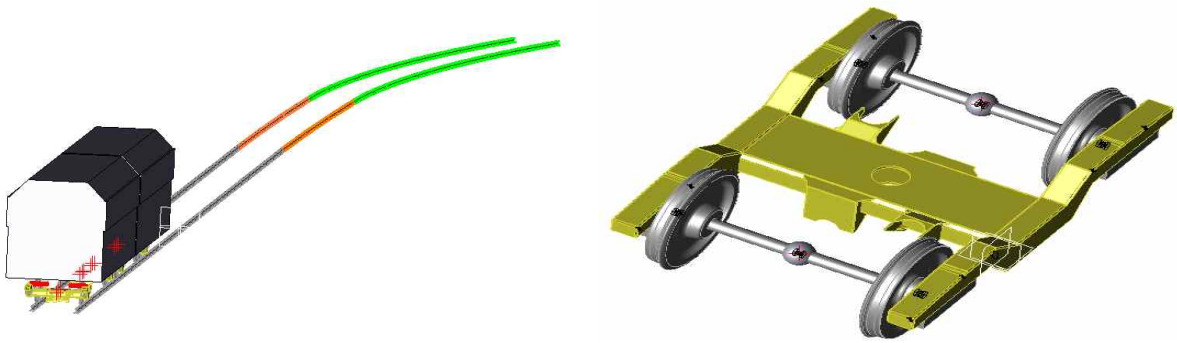
<프레임 최대 응력 발생 지점과 크기>



<프레임 최대 변형량과 위치>

라) 집진장치 장착에 따른 전동차의 동특성 변화 분석

집진장치를 기존 운행차량에 장착 시 차량 본체에 미칠 수 있는 동특성 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 곡선주로 주행 시 동특성, 집진장치 위치 및 무게에 따른 바퀴의 횡방향 하중 변화를 살펴보았다. 그 결과, 중앙에 집진장치를 설치하면 횡하중 변화는 1% 수준이므로, 철도차량 동특성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.



<동특성 해석모델>

집진장치 무게	부착위치	곡선부 평균 횡하중	집진장치 장착 전 후 횡하중 변화비율
70 kg	중앙	19,400 N	1% 상승
	전방부	18,400 N	4% 하락
	후방부	20,000 N	4% 상승
5,000 kg	중앙	22,000 N	14% 상승
10,000 kg		24,000 N	25% 상승
20,000 kg		28,200 N	45% 상승

(나) 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 성능 평가

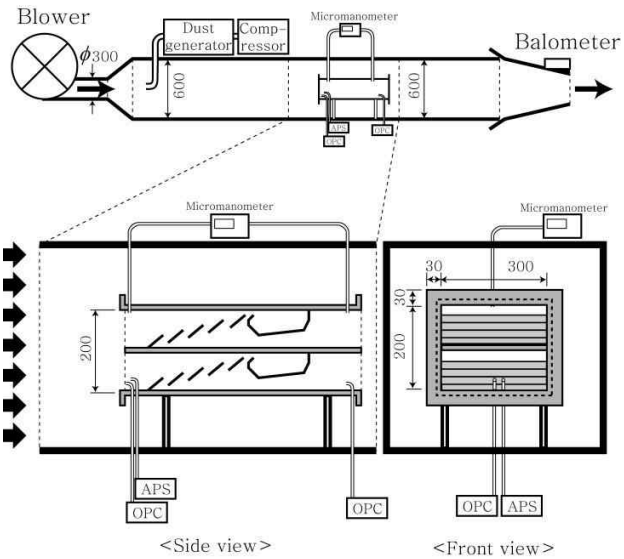
가) 무동력형 하이브리드 집진장치 개발 및 성능 평가

① 루버 관성집진장치 개발

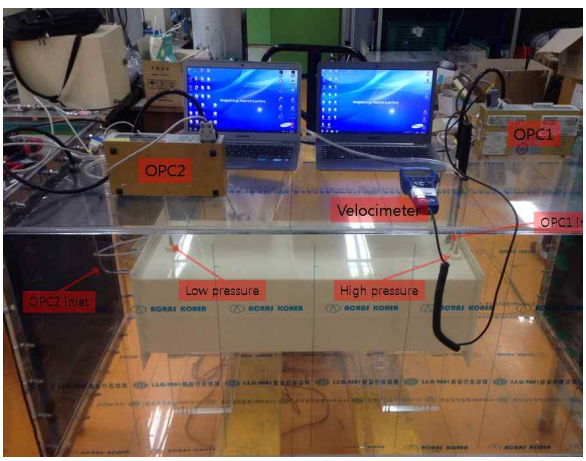
루버 관성집진장치 성능예측을 위해 풍동 실험을 진행하였다. 루버의 각도(models 1, 2, 3), 루버의 길이-개수(models 2, 4, 5)를 변화시킨 5개 모델을 제작하여 풍동실험을 실시하였다. 루버 집진기 모형의 2,900 mm 상류에 먼지 발생기(Dust generator, TOPAS Grimm)를 설치하고, 시험먼지를 공급하여 집진효율을 평가하였다. 집진효율 계산식은 루버 관성집진장치 상류(C_{up})/하류(C_{down}) 입자 농도를 아래같이 계산하여 구하였다.

$$\eta_{louver} = 1 - \frac{C_{down}}{C_{up}}$$

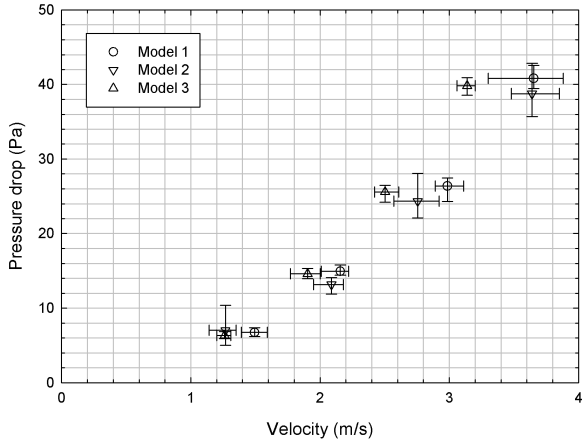
풍동 실험결과, 루버 각도의 비교에서는 루버 각도가 가장 큰 model 3의 유동저항이 가장 컸으며, 루버 길이와 개수의 비교에서는 루버 날의 길이가 가장 긴 model 5가 유동저항이 가장 컸다. 유입되는 유량 측면에서 model 2가 가장 효율적이었다. 루버 각도에 따른 차이를 보면, 3 μm 이하인 먼지의 경우 루버의 각도가 증가함에 따라 집진효율이 증가하며, 3 μm 이상인 먼지의 경우 루버의 각도가 증가함에 따라 집진효율이 감소한다. 이것은 유속의 영향과 마찬가지로 루버의 각도가 증가하면 3 μm 이하인 먼지가 루버 날에 부딪히는 각도가 커지기 때문에 충돌 효과가 더 커지기 때문으로 추측된다. 3 μm 이상인 먼지는 루버의 각도가 커질수록 루버 날에 튕겨서 뒤쪽 루버 날로 가는 경로가 길어지기 때문에 감소하는 것으로 추측된다. 루버의 길이 및 개수에 따른 집진효율의 차이는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.



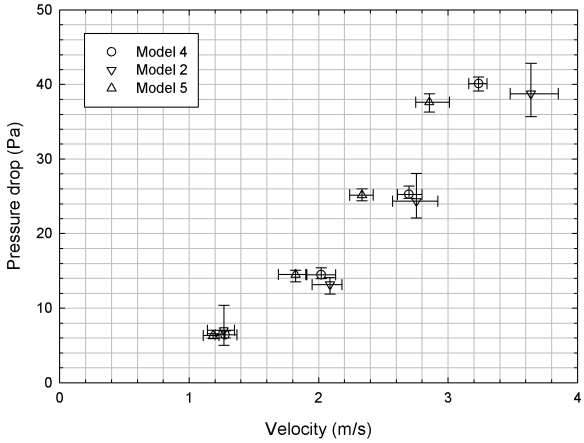
<오픈 채널 풍동실험장치의 개략도>



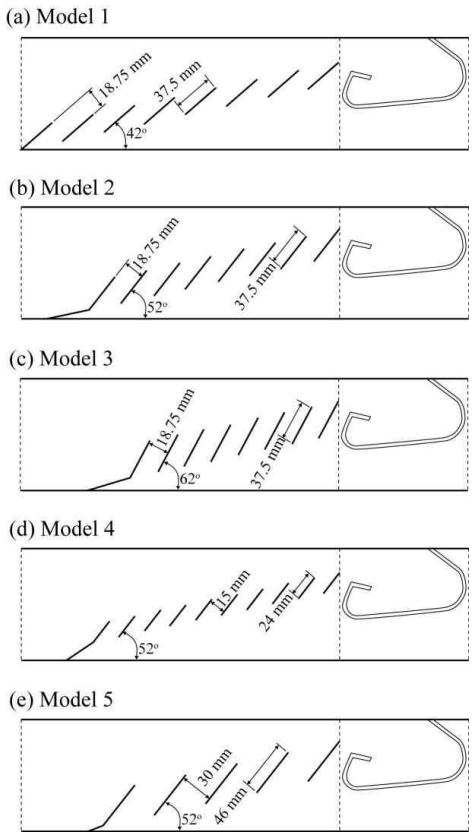
<오픈 채널 풍동실험장치의 모습>



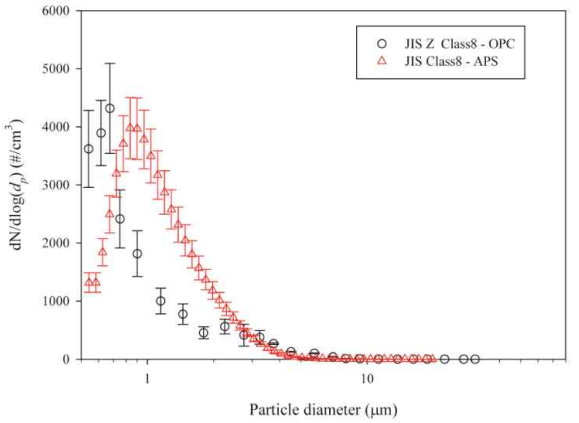
<루버 각도의 영향>

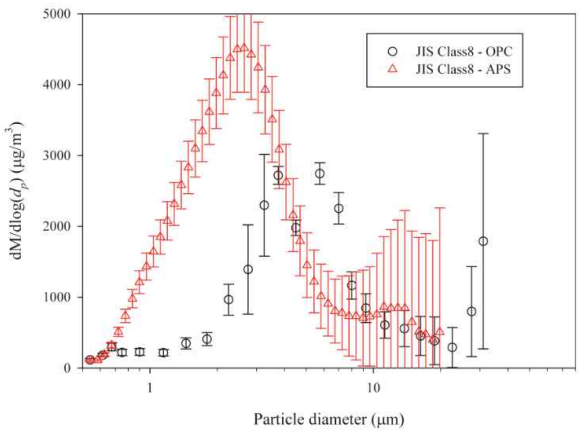


<루버 개수-길이의 영향>

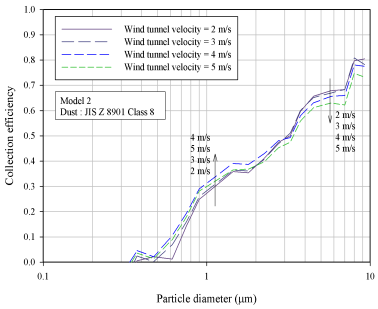


<루버 관성집진장치 실험 모델들>

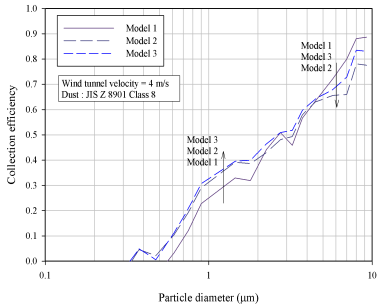




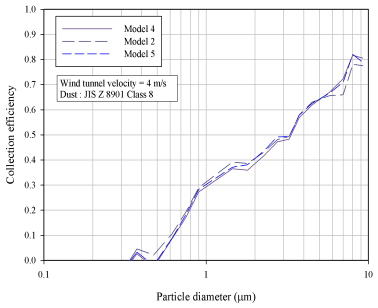
<풍동실험 입자 분포도: JIS Class 8>



<유속의 영향>



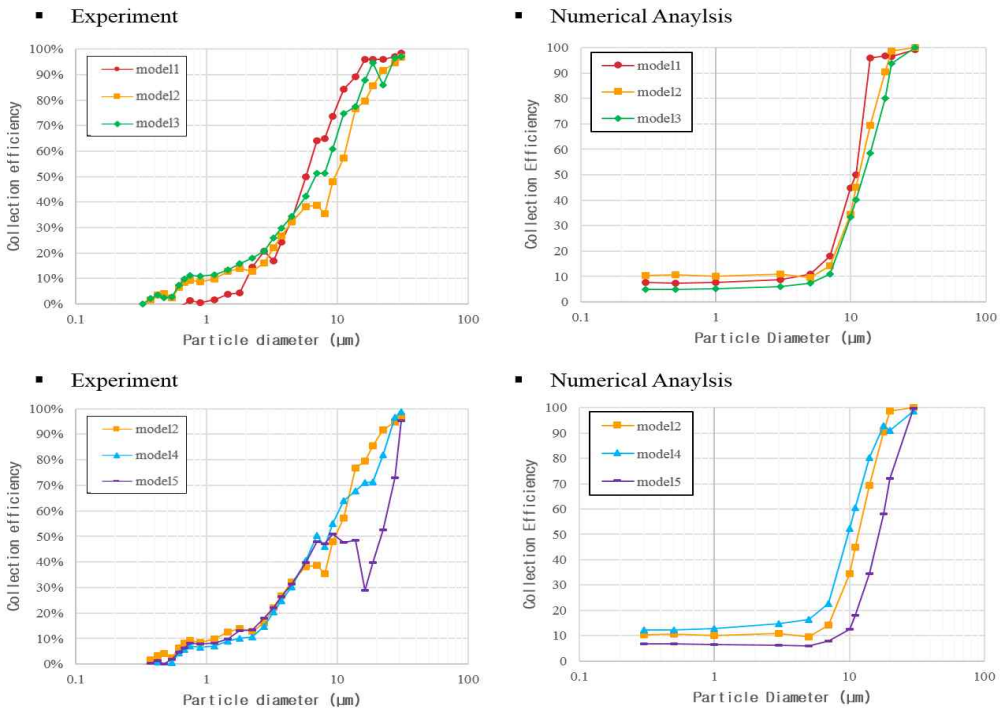
<루버 각도의 영향>



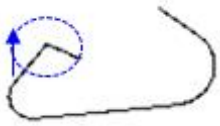
<루버 길이-개수의 영향>

풍동실험 결과를 바탕으로, 루버 관성집진장치 실험결과를 바탕으로 더 다양한 조건의 루버 관성집진장치의 집진효율 및 차압, 그리고 실제 지하철에 달았을 때의 효과 등에 대해 파악하기 위해서 시뮬레이션이 활용되었다. 열유동 해석용 상용코드인 *ANSYS FLUENT Release 14.5*를 사용하여 170,000개 수준의 메쉬를 해석하였다. 유체의 유동은 정상상태, 비압축성, 난류인 것으로 가정하였고, standard $k-\varepsilon$ 난류모델을 사용하였다. 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지방정식의 수렴 조건은 각각 10^{-3} 및 10^{-6}으로 설정하였다. 모델별 차압의 오차가 16% 이내로 실험값과 수치해석값이 잘 일치하였다. 그래프는 모델별 집진효율에 대하여 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 실험과 수치해석에서 모두 루버 날의 각도가 가장 낮은 model 1에서 cut-off size가 가장 작게 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 실험과 수치해석을 통하여 model 1의 집진효율이 가장 뛰어난 것으로 동일하게 평가하였다. 위에서 평가한 루버 관성집진장치는 루버날에 의해 상향식 유동이 형성되기 때문에 아래로 향하는 중력가속도(9.81 m/s^2)로 인하여 서로 상쇄 효과가 나타났다. 이에 루버 관성집진장치의 상하 반전 형태의 루버 모델에 대한 집진효율을 평가하였다. 그리고 추가로 루버 집진장치의 먼지통 등의 형상을 다양하게 변형하여 시뮬레이션 하였다.

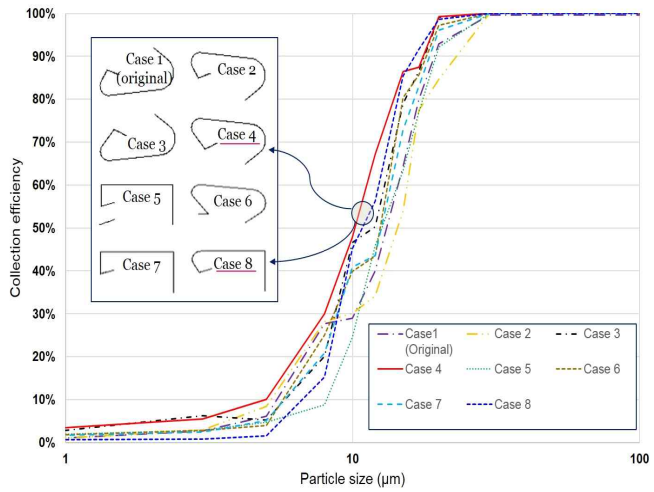
구분	Pressure drop (Pa)		
	Experiment	Numerical analysis	Error (%)
Model 1	26.37±2.04	27.84	5.57
Model 2	24.59±0.32	28.46	15.73
Model 3	25.58±0.89	28.35	10.82
Model 4	25.25±1.14	28.58	13.18
Model 5	25.16±0.83	28.24	12.24



<성능평가용 루버집진기 모델에 따른 집진효율>

구분	형 상	구분	형 상
Case 1 (Original)		Case 5	
Case 2		Case 6	
Case 3		Case 7	
Case 4		Case 8	

<여러가지 루버 먼지통 형상>



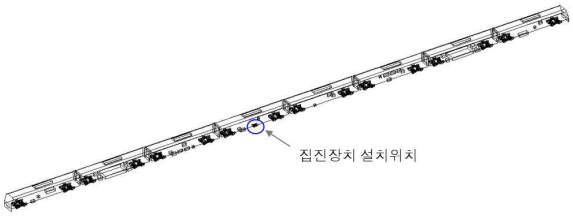
<다양한 형상의 먼지통의 포집효율 비교>

Case	Pressure drop (Pa)	Cut-off size (㎛)
1	50	13.7
2	50	14.4
3	50	12.0
4	50	**10.2**
5	67	12.7
6	50	12.5
7	67	12.1
8	50	**10.9**

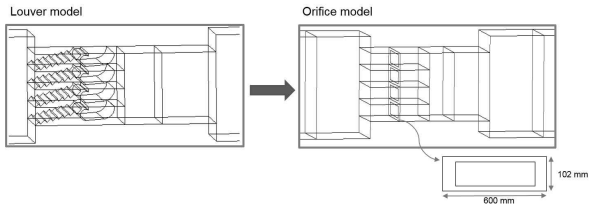
<루버 먼지통 형상에 따른 차압(pressure drop)과 분리입경(cut-off size)>

8가지 먼지통 Case 중 가장 포집효율이 좋은 모델은 Case 4와 8로 나타났다. Case 3과 4는 먼지통 입구부위가 좁아지는 형태이므로 입자들이 대부분 먼지통 입구 쪽에 포집되어 수치해석상 정량적인 포집효율이 증가할지라도 재비산의 우려가 컸다. Case 8은 기존 모델에 비해 포집효율은 약 20.4% 증대되었으며, 먼지통의 오른쪽 곡선부위가 직선으로 변형되며 제작이 용이해졌다. 또한, 중력가속도를 고려했을 때 지면에 깔린 입자들이 먼지통 방향으로 지속적으로 흐르는 유동에 의해 먼지통으로 유입되어 먼지통에 계속 쌓이게 되므로 재비산 방지 측면에서도 보다 효과적일 수 있다.

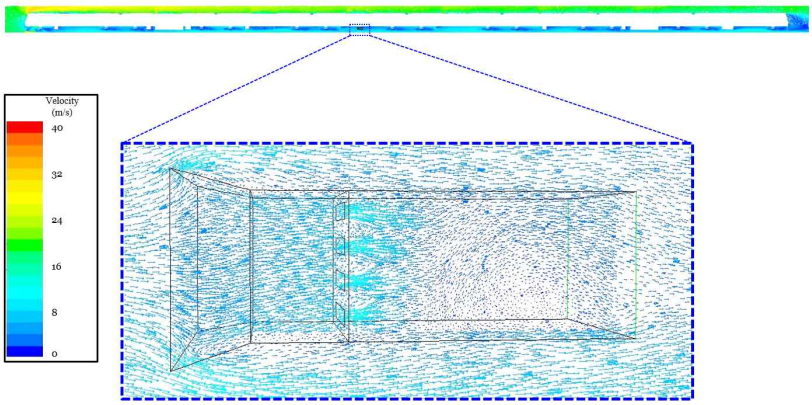
루버 관성집진장치가 하부에 부착되었을 때 열차풍을 얼마나 받아들일 수 있을지에 대해서 시뮬레이션과 실험을 진행하여 알아보았다. 전동차의 총 길이 160 m에 비해 루버 관성집진장치의 길이는 0.75 m로 상대적으로 매우 작기 때문에 전동차와 루버 관성집진장치를 함께 full scale로 해석을 진행하기 어려우며, 따라서 그 해결책으로 루버 관성집진장치를 오리피스 형태로 변형시켜서 루버 관성집진장치의 실제 유입 유량을 계산하였다.



<전동차에서 루버집진기의 위치>



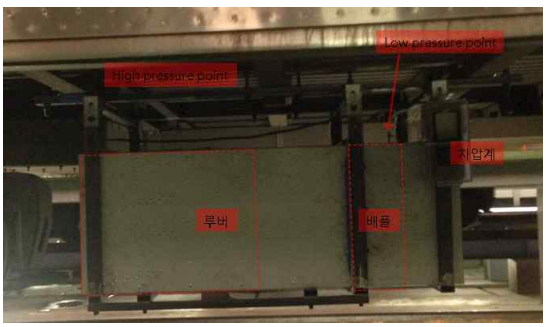
<루버집진기와 오리피스 모델>



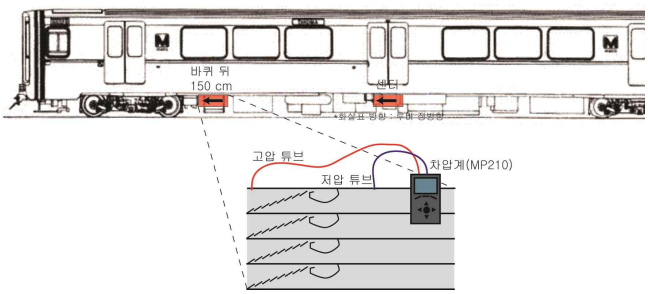
<전동차 하부에 설치된 루버집진기 주위의 유동>

계산 결과와 실제 유입 유량 결과를 비교하기 위해서, 루버 관성집진장치 현물을 전동차 하부에 부착하여 전동차 속도에 따른 차압을 측정하였다. 측정 결과, 시뮬레이션과 큰 차이가 없는 것으로 나타나서 시뮬레이션의 정확성이 검증되었다. 추가로 루버 관성집진장치 앞쪽에 가이드 베인을 넓힐 경우 인렛 유량이 증가하는지 시뮬레이션과 실험을 통해 살펴보았으나, 가이드베인 면적 대비 터널의 면적이 넓기 때문에 큰 효과를 거두기 어려운 것으로 나타났다. 집진장치가 추가되어도 열차 앞뒤 차압은 크게 변하지 않았으므로, 상대적으로 지하철 전체 유동저항은 변하지 않는다고 판단되었다.

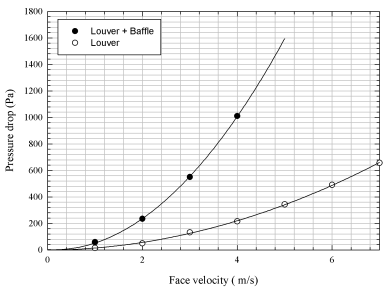
구분	실험결과	수치해석
Pressure drop, △ P (Pa)	51-77 Pa	65 Pa
Velocity	60-70 km/h	69.6 km/h



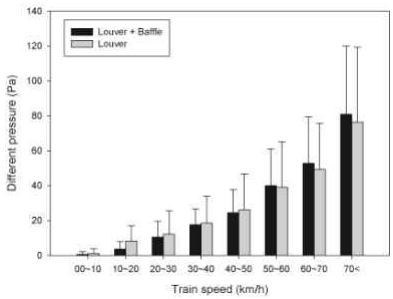
<전동차 장착 차압 측정 모습>



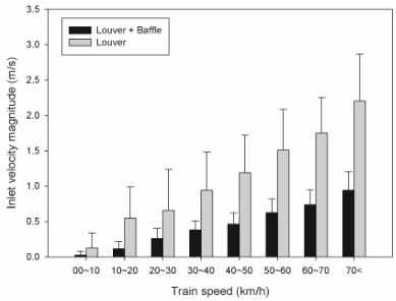
<전동차 장착 차압 측정장치의 개략도>



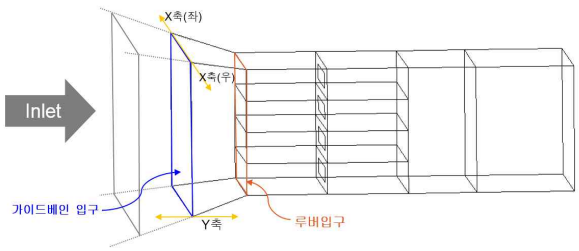
<유속별 차압 특성 곡선>



<전동차 운행속도별 차압 특성>



<집진장치의 유입 유속>



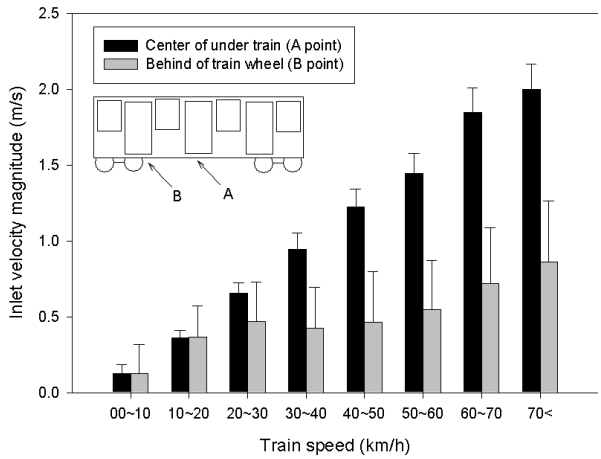
<가이드베인 시뮬레이션 형상>



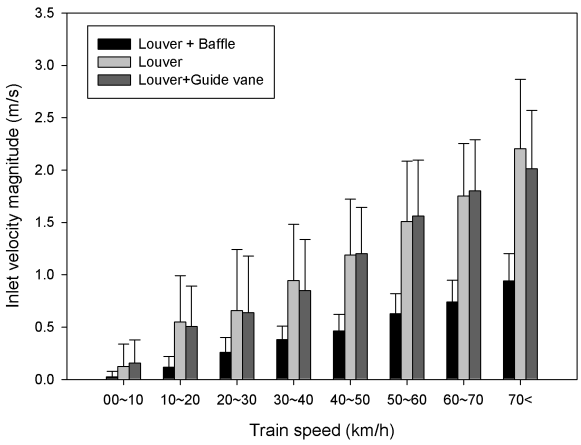
<가이드베인 효과 측정 모습>

<가이드베인 효과 시뮬레이션 결과>

구분	가이드베인 입구 넓이(m^2)	루버입구 평균속력 (m/s)	루버입구 유량 (m^3/s)
Original	0.48 (0.96×0.5)	4.96	1.214
Case 1	0.53 (1.06×0.5)	4.94	1.209
Case 2	0.58 (1.16×0.5)	4.87	1.192



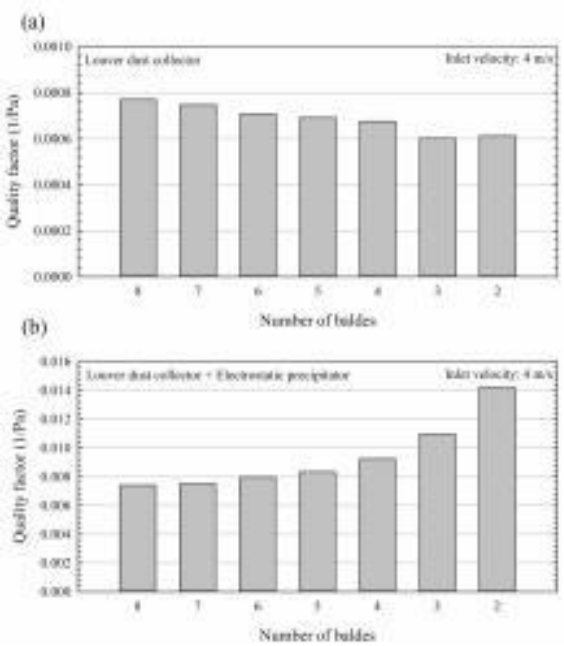
<장착 위치에 따른 집진장치의 유입 유속 비교>



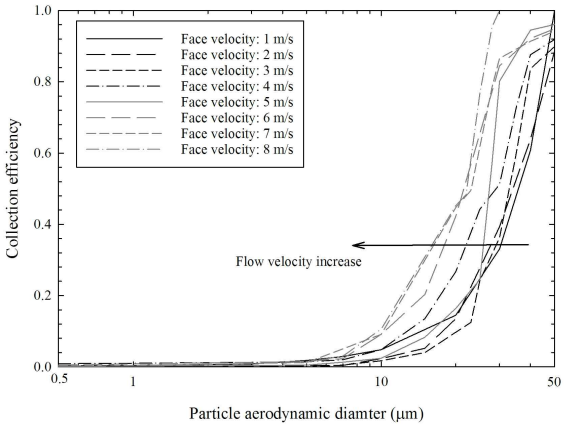
<가이드베인 유무에 따른 유입 유속 비교>

무동력 하이브리드 집진장치를 구성하는 관성(루버) 집진장치와 전기집진장치의 효율이 높기 위해선 먼지의 집진량 관점에서 봤을 때, 각각의 효율이 조금 떨어지더라도 더 많은 유량 유입을 유도해야 먼지의 집진량을 늘릴 수 있다. 그러므로 총 집진량을 늘릴 수 있는 루버 관성집진장치의 날개(blade)의 개수를 알아보았다. 날개(blade)의 개수가 줄어들어서 유입유량이 늘어날수록 무동력 하이브리드 집진장치의 총 집진량은 늘어날 것으로 예상되었다. 그러므로 최종적으로 Model

2의 날 길이와 각도를 가지며, 날개간격이 18.27 mm에서 증가하여 날개가 3개인, case8의 먼지통을 가진 루버 관성집진장치가 최종 선택되었다.



<루버 관성집진장치 blade 개수에 따른 QF>



<유입 유속에 따른 3 blade 루버 집진효율>

② 전기집진기 개발

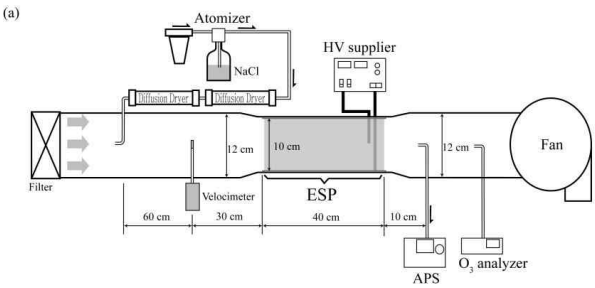
전기집진기(ESPs, Electrostatic Precipitators)는 무동력 집진장치와는 다르게 에너지가 추가로 필요한 단점이 있으나, 유동 유입 등에 필요한 팬 에너지에 비해 코로나 방전에 소모되는 에너지는 매우 적으며, 유동저항 또한 거의 없고 관성집진기로 집진하기 힘든 작은 먼지를 집진할 수 있는 장점이 있다. 이러한 전기집진기는 크게 2가지 형태로 나뉘며, 각각의 특징은 아래 표와 같다.

항목	1단 전기집진기	2단 전기집진기
구성	하전과 집진이 같은 구역에서 이루어짐	하전과 집진이 다른 구역에서 이루어짐
인가전압	Negative voltage: 10-100 kV	Positive voltage: 5-15 kV
처리 유량	100 m^3/min 이상	2 m^3/min 이하
전극-접지 간격	30-100 cm	5 cm 이하
장점	- 높은 전압을 이끌어낼 수 있으며, 동일한 전력에서 집진효율이 좋다.	- 낮은 전압에서도 집진이 가능하며, 오존이 비교적 적게 발생한다.
단점	- 오존이 많이 발생한다. - 높은 인가전압이 필요하다.	- 처리 유량이 적다. - 집진효율이 낮다.
사용 환경	- 큰 입자를 집진하는 경우 - 많은 유량을 처리하는 경우	- 적은 유량을 처리하는 경우 - 오존 누적이 치명적인 환경인 경우
사용처	대형 플랜트 시설	실내 등 건물 내부, 가정용

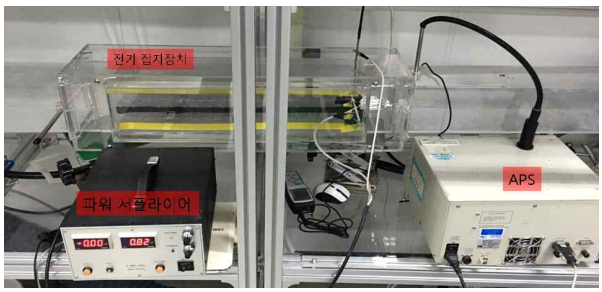
전동차가 운행하는 지하철 터널은 일반 실내공간과 달리 발생된 오존이 직접적으로 인체에 흡입되지 않으며, 터널 내부에 우선적으로 확산된다. 또한, 2단 전기집진기로 처리하기에는 전동차의 운행 속도가 빠르며, 터널의 미세먼지 분포를 보면 거대입자의 농도가 높기 때문에 1단 전기집진

기를 이용하는 것이 더 효과적이라고 판단된다. 하지만 대형 사업장에 많이 사용되는 1단 전기집진기의 형상 크기를 그대로 적용하기에 전동차의 하부 공간이 협소하므로 전동차의 하부 공간에 적합한 크기로 보통의 1단 전기집진기보다 작게 전기집진기를 설계하였다.

전기집진기 제작에 앞서, 전기집진기의 시방(집진효율, 전압, 전력, 오존 발생량 등)을 결정하기 위하여 소형 전기집진유닛을 제작하여 성능실험을 수행하였다. 풍동의 단면 크기는 12 cm × 12 cm이었고, 전기집진부의 단면 크기는 12 cm × 10 cm이었다. 풍동 입구에는 외부 입자를 배제하기 위해 HEPA filter가 설치되었다. 시험 입자는 NaCl 입자였으며, Atomizer를 통해 분사되었다. 하나의 APS를 이용해서 전기집진기 전방과 후방을 이동하며 측정하였기 때문에, 시간에 따라 풍동 내부 입자농도가 일정해야 했다. 그러므로 10분 이상 상부에서 입자농도를 측정하였으며, 10 ㎛ 이하인 입자의 표준편차가 평균의 10% 이하이었다. 전기집진기 설계에 앞서, 두 가지 전극형태, wire-plate type과 saw-plate type의 비교 실험을 통해 장단점과 차량 하부에 적용할 수 있는 치수, 인가전압 범위를 파악하고자 하였다. Wire-plate type 전기집진기의 집진효율은 최고 94%에서 집진환경이 나빠질수록(유속 증가, 인가전압 감소) 19%까지 감소한 반면에, saw-plate type 전기집진기의 집진효율은 최고 95%에서 집진환경이 악화되어도 최저 62%로 높은 수준을 유지하였다. 집진성능과 오존 발생량은 2타입 모두 선형적이었으나, 같은 집진효율에서 오존 발생량은 saw-plate type 전기집진기가 wire-plate type 전기집진기에 비해 절반 이상 낮았다.

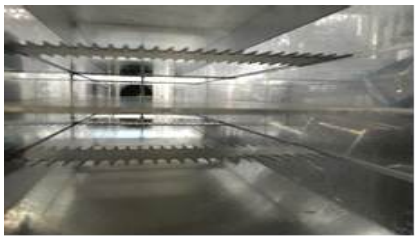


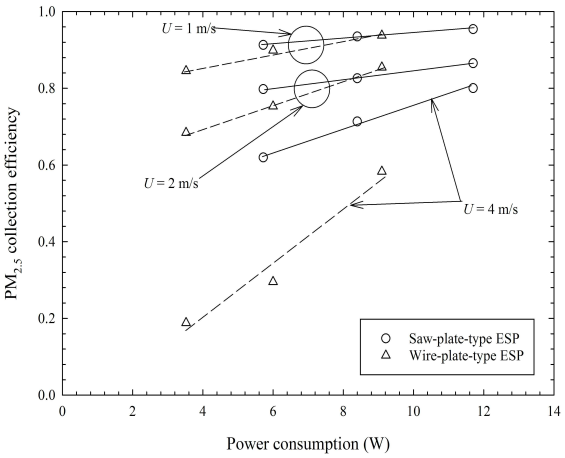
<전기집진기 실험장치의 개략도>



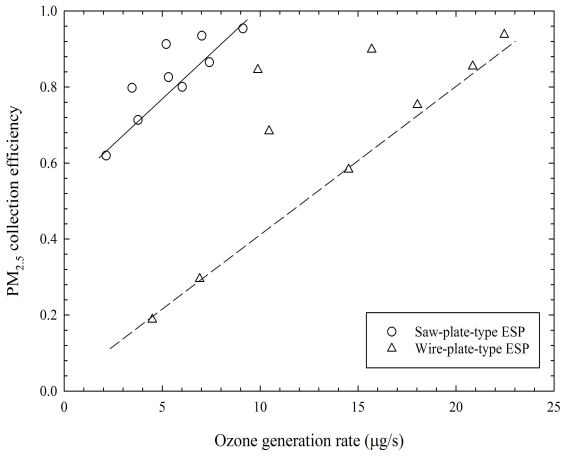
<전기집진기 실험장치의 모습>


<Wire-plate type ESP>

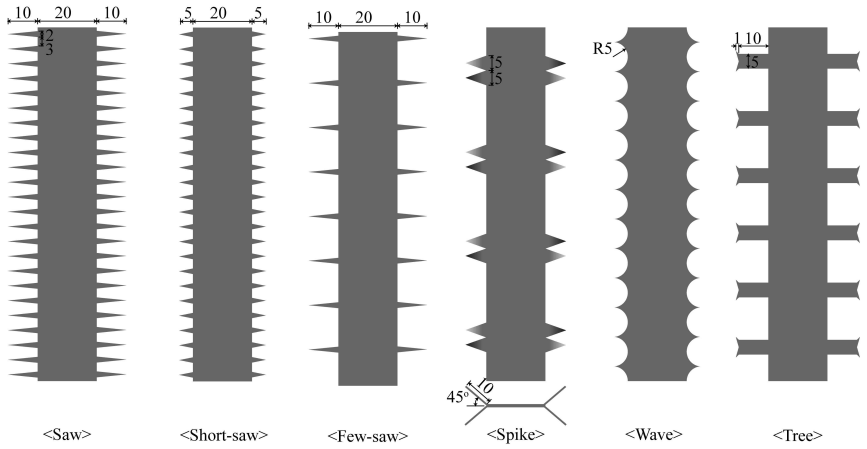

<Saw-plate type ESP>



<소비전력 대비 집진효율 비교>



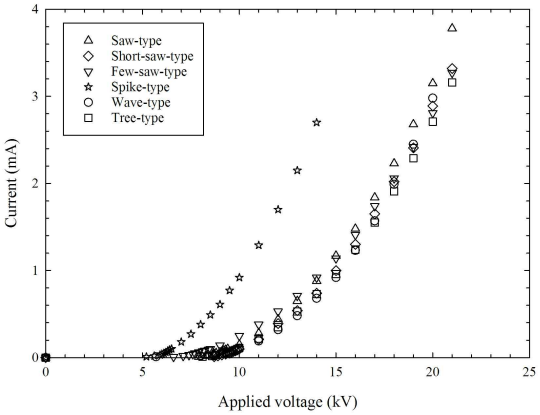
<오존 발생량 / 집진효율 비교>



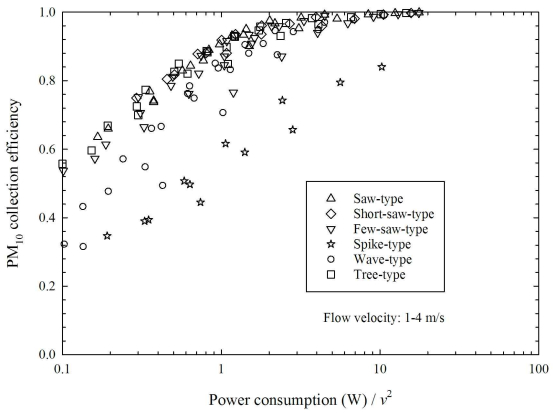
<집진효율 향상을 위한 실험에 사용된 다양한 전극형상>

전기집진기의 전극형상 개선을 위해 6가지 형상(saw-type, short-saw-type, few-saw-type, spike-type, wave-type, tree-type)이 실험되었다. 접지와 거리가 가까웠던 spike-type만 breakdown 전압이 낮고 같은 전압에서 전류값이 높았으며, 나머지 형상들은 전압-전류 곡선이 비슷하였다. NaCl 입자와 지하철 터널 입자의 주요 성분인 산화철의 유전율과 밀도를 이용하여 전기적 이동도의 차이를 살펴본 결과, 두 입자간 차이가 10% 이하로 나타났으므로, NaCl 풍동실험 결과를 지하철 입자에 적용할 수 있다고 판단하였다. 앞서 측정하였던 지하철 터널 평균 입경분포를 활용하여 입경별 집진효율을 PM_{10} 집진효율로 치환하여 전극 형상끼리 비교하였다. 유속정보도 소비전력에 제곱으로 나누어 표준화하였다. Spike-type의 경우 breakdown 전압이 낮은 만큼 집진효율도 낮았다. 다른 형상들은 같은 인가전압*전류에서 비슷한 집진효율을 보여주었다. 모든 전극형상에서 오존은 전력(인가전압*전류)에 비례해서 발생하였다. 기존 saw-type 대비 오존발생량/집진효율이 크게 향상된 형상이 없었다. power consumption/flow velocity^{2}가 1.0보다 높으면 전기집진기 방전극 두께 증가나, 집진판 간격 증가에 따른 집진효율 감소가 12% 이내로 큰 차이가 없었지만, 0.3보다 낮은 조건에서는 방전극 두께 증가(1 mm->2 mm)에 따라 집진효율이 14-28% 감소하였다. 집진판 간격이 5 cm이고 방전극 두께가 2 mm로 두꺼운 경우 전기장의 불안정성으로 오존발생량이 크게 증가하였다.

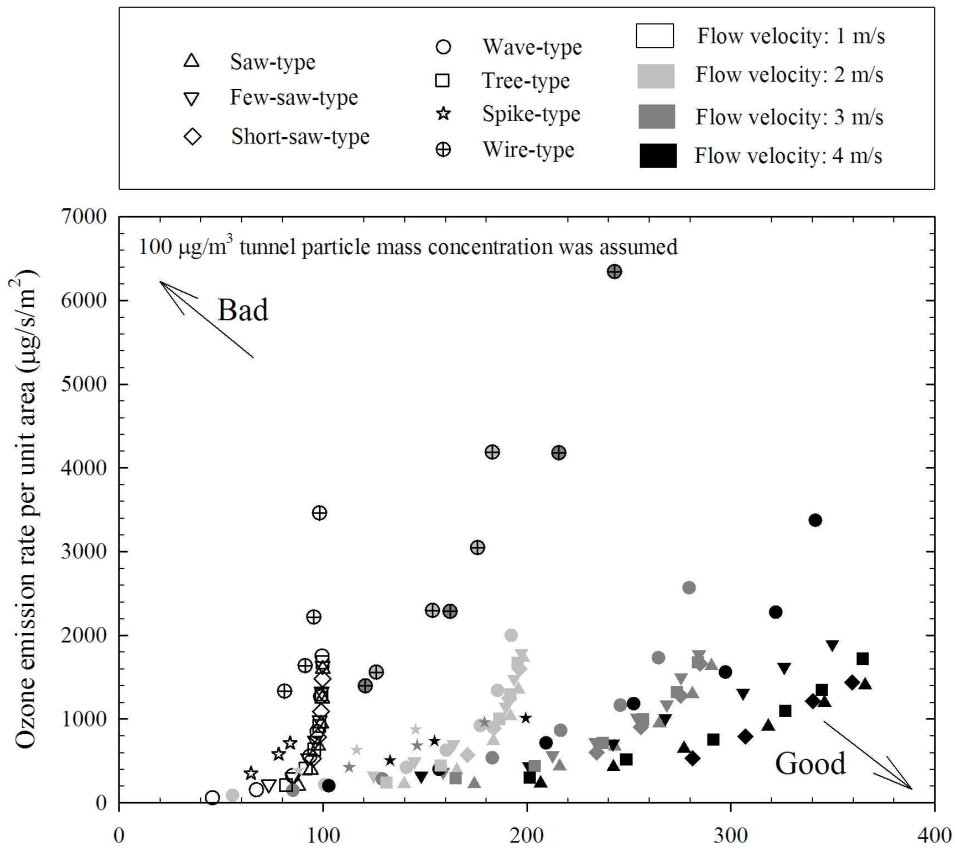
	Relative Permittivity	Density	Shape factor
NaCl	5.62	2.16 g/cm^3	1.2
Oxide iron(Subway)	14.2	3-4 g/cm^3	1.4



<전극 형상에 따른 전압-전류 곡선>

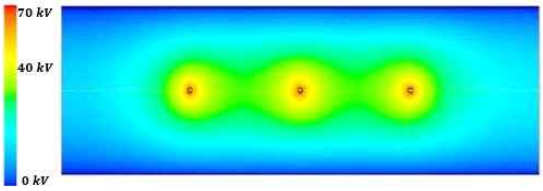
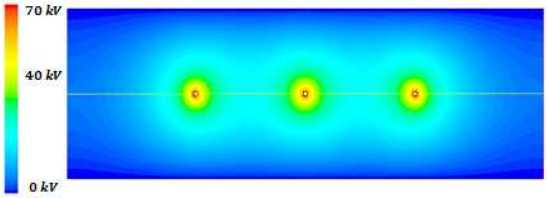
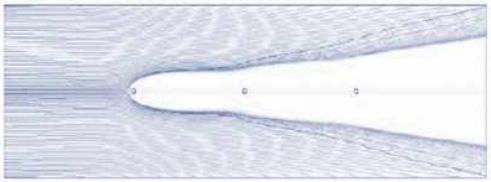
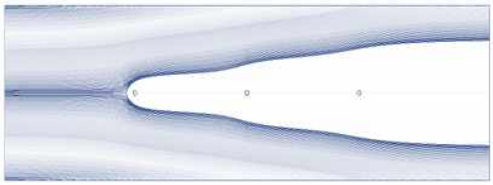


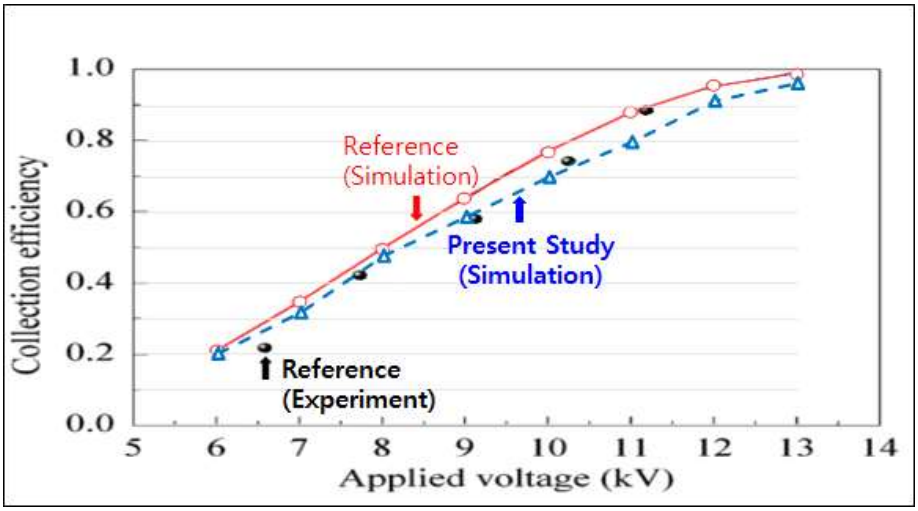
<전극 형상에 따른 집진효율 표준화 그래프 >



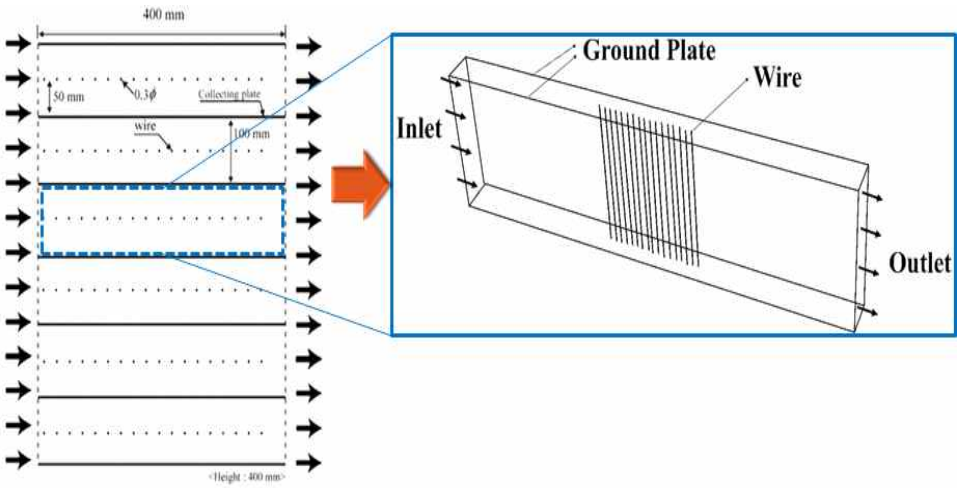
<전극 형상별 지하철 입자 집진효율 및 오존발생량 비교>

실험으로 수행하지 못한 유속 등 환경에서의 전기집진기 성능을 예측하기 위해서 CFD 시뮬레이션 동원되었다. 전기집진기 시뮬레이션은 기체의 유동, 전기장, 입자의 하전 및 거동과 같은 상호작용을 고려해야하는 시뮬레이션이다. 본 연구에서는 유동장은 독립적으로 계산되었으며, 전기장은 유동장의 영향을 받으며, 입자 궤적은 유동장과 전기장 영향을 모두 받는 것으로 계산하였다. 전기장 및 입자궤적을 기존 논문과 비교한 결과, 시뮬레이션이 잘 이루어졌음을 알 수 있었다. 효과적으로 실제 전기집진기 형상을 시뮬레이션하기 위해서, 전기집진기 중 일부 영역만 따서 시뮬레이션을 진행하였다. 평행 유동에 유속이 고르게 분포한다면 한 스택만 시뮬레이션 하는 것이 계산 자원 활용 측면에서 효율적이다.

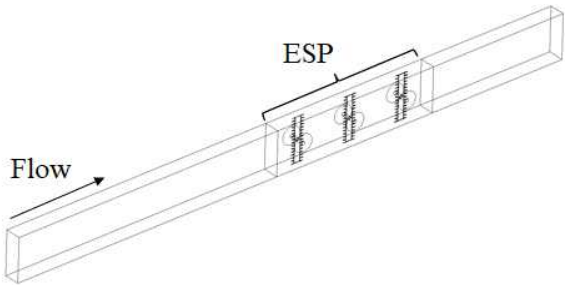
기존 논문(Skodras et al. 2006)	검증(Present study)
	
(a) Electric potential [kV]	
	
(b) Particle trajectory	



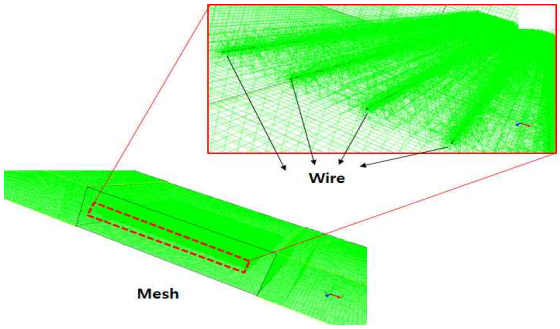
<전압에 따른 실험과 입자 하전 모델 시뮬레이션 결과의 비교>



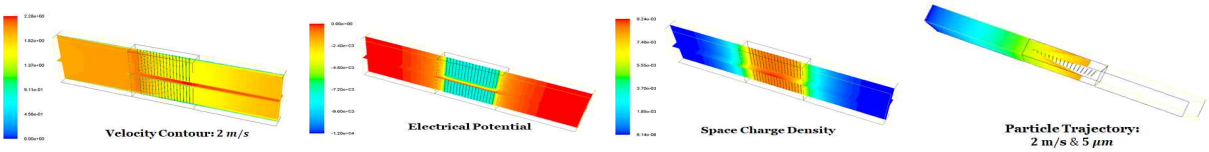
<와이어 전기집진기 해석 형상>



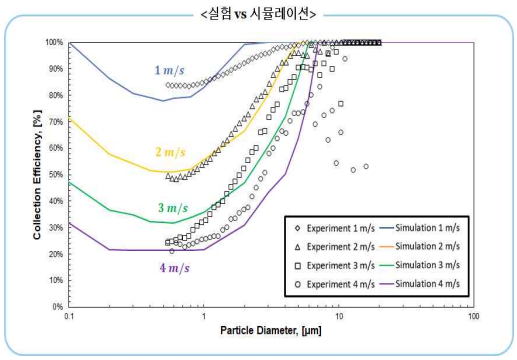
<Saw-type 방전극 전기집진기 해석 형상>



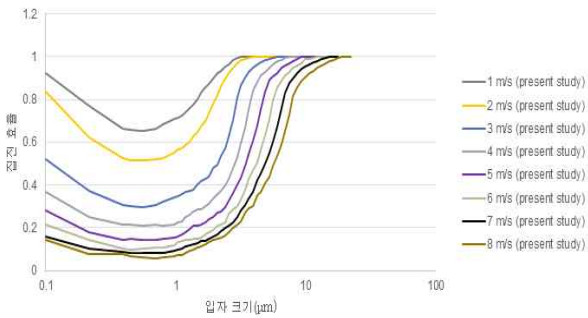
<해석 형상 mesh geometry>



<전기집진기 해석 결과: 왼쪽부터 유동장, 전기장, 전류밀도장, 입자 궤적>



<실험과 시뮬레이션의 집진 효율 비교>



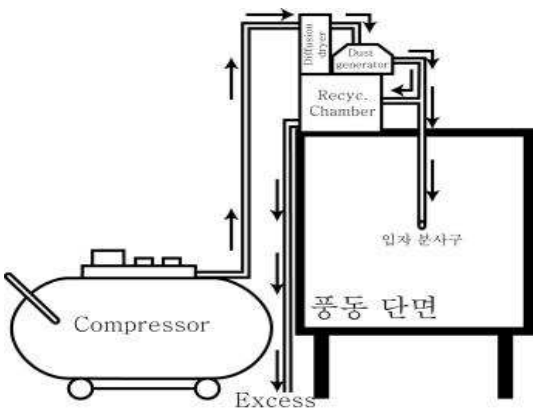
<1-8 m/s에서 전기집진기 효율>

③ 무동력 하이브리드 집진장치 실제크기 풍동실험

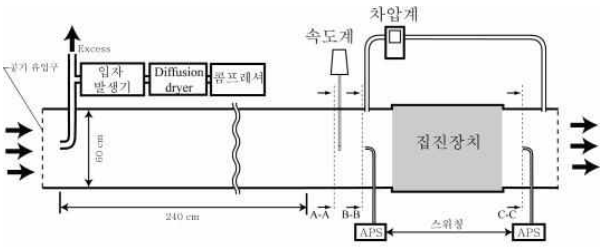
실제크기로 제작한 시제품이 소형풍동실험 및 시뮬레이션 결과와 일치할 것인지 확인하기 위해서 60 cm X 60 cm 단면적을 가지는 대형 풍동에서 집진효율 및 유속/차압을 측정하였다. 입자측정기인 aerodynamic particle sizer (APS 3321, TSI, USA)로 입자농도를 측정하였다.



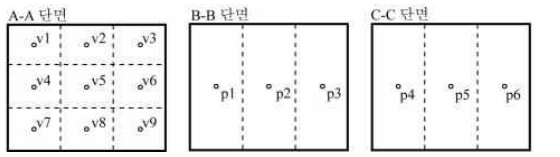
<입자 발생 시스템의 모습>



<입자 발생 시스템의 개략도>



<실크기 풍동 실험 개요도>



<실크기 풍동 속도 및 입자 농도 측정 단면>



<풍동 upstream 부분>



<풍동에 연결된 실크기 집진장치>

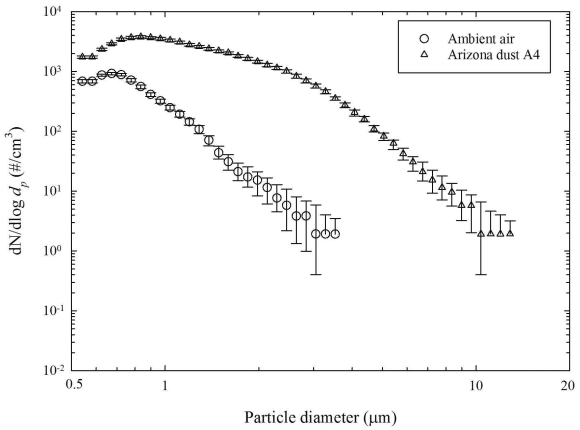


<풍동 downstream 부분>

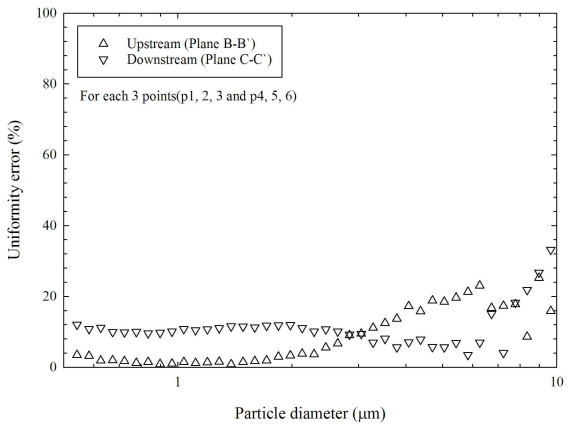
A-A 단면의 9곳에서 속도를 측정하여 유속분포가 10% 이하로 매우 균일하였으며, B-B 단면과 C-C 단면의 3곳에서 입자 농도를 측정하여 8 ㎛ 입자의 농도가 30% 이내로 균일하였다. 본 실험은 p2와 p5 지점에서 측정하여 아래 식과 같이 집진효율을 계산하였다.

$$\text{집진효율} = 1 - \frac{\text{입자농도}_{p5}}{\text{입자농도}_{p2}}$$

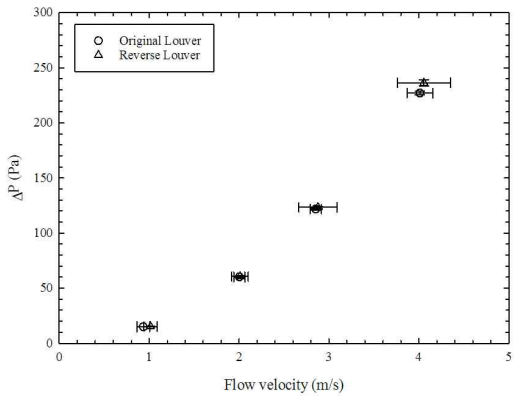
Arizona dust A4를 시험입자로 사용하였다. upstream (p2)에서 측정한 입경분포는 0.8 ㎛에서 피크가 나타났다. 대기 중 입경분포보다 10-100배 이상 시험입자의 농도가 높았으므로, 시험입자로 집진효율을 평가하는데 문제가 없었다. 10분 이상 측정하였을 때 입자 농도 변화가 5% 이내였으므로, APS 한 대를 이용한 alternatively 측정을 사용할 수 있었다. 4 m/s에서 루버관성집진장치 차압이 전기집진기의 10배 이상이었고, 차압은 3 m/s까지는 선형적으로 증가하였으나, 그 이후에는 지수적으로 증가하였다. case8 루버 관성집진장치가 case1(original) 루버 관성집진장치에 비해 차압이 약간 증가하였다.



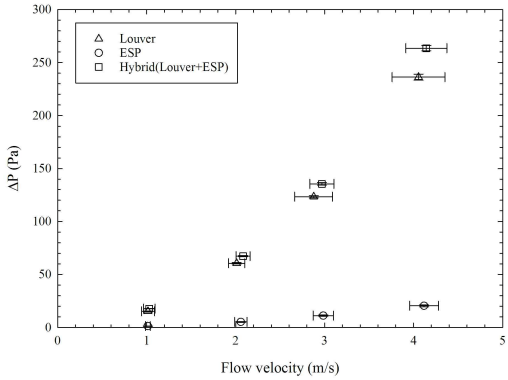
<10분 평균 입자 발생 안정성>



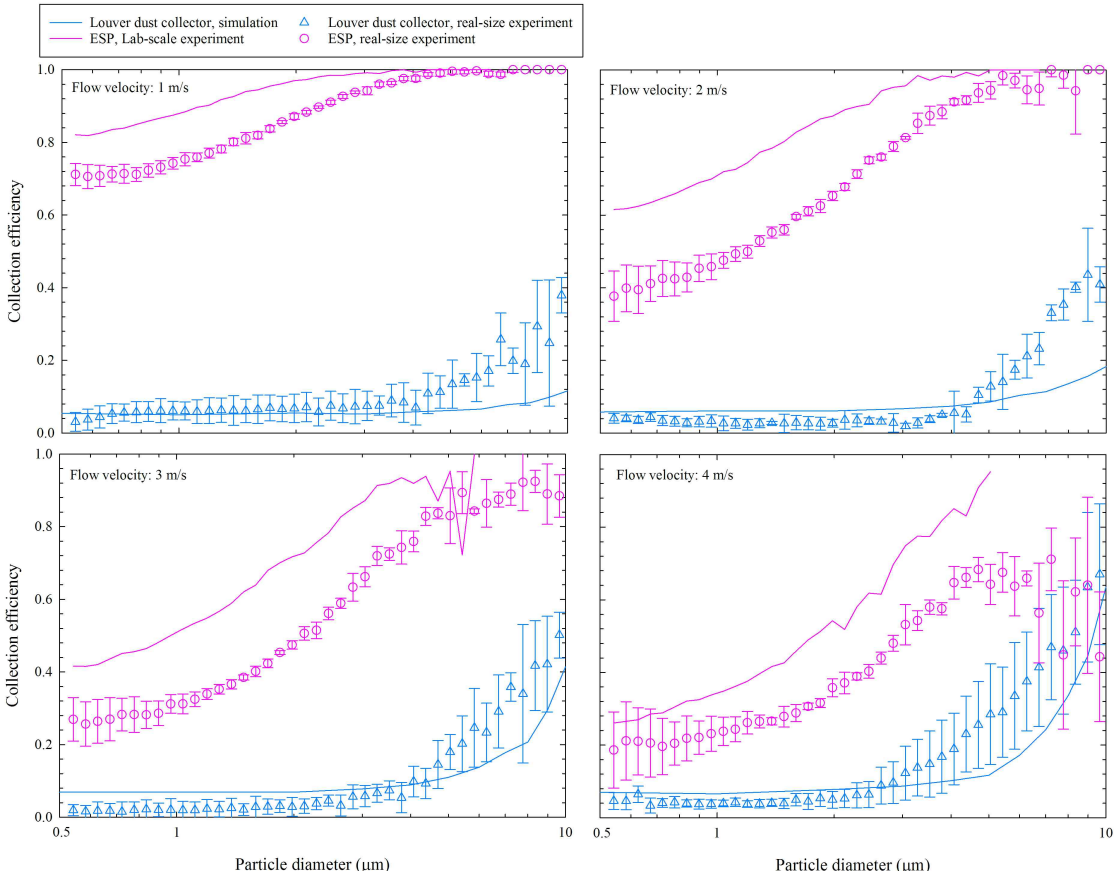
<입자 농도 분포 균일성>



<루버 관성집진장치 종류별 유량 및 차압>



<하이브리드 집진장치 부품별 유량 및 차압>



<실크기 집진장치 집진효율 실험결과와 시뮬레이션 결과 비교>

실크기 집진장치 집진효율 실험결과가 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였으므로, 시뮬레이션 결과들이 실제 크기 집진장치에서도 잘 적용된다고 판단된다. 지하철 터널입자 무게농도 기준 입경분포를 바탕으로 실크기 무동력 하이브리드 집진장치의 PM_{10}과 $PM_{2.5}$ 집진효율을 추정하였다. 12 kV의 고전압을 인가하여야 2-3 m/s에서 과제 목표인 PM_{10} 50%, $PM_{2.5}$ 30% 집진효율이 나타났다.

<도시철도 터널의 미세먼지 입경분포를 가정하여 계산한 PM_{10} 집진효율(%)>

	Applied voltage	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s
Hybrid	10 kV	**65.54**	39.09	35.05	11.63
	11 kV	**78.25**	**58.88**	48.04	26.44
	12 kV	**85.41**	**71.65**	**60.35**	38.65

<도시철도 터널의 미세먼지 입경분포를 가정하여 계산한 $PM_{2.5}$ 집진효율(%)>

	Applied voltage	1 m/s	2 m/s	3 m/s	4 m/s
Hybrid	10 kV	**53.70**	27.98	21.84	5.10
	11 kV	**69.26**	**45.91**	**32.59**	16.47
	12 kV	**78.46**	**59.85**	**45.20**	27.26

나) 동력 하이브리드 집진장치 개발 및 성능 평가

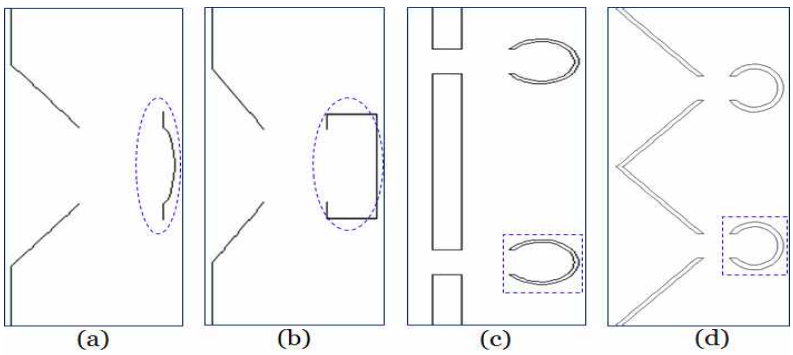
① 동력 하이브리드 집진장치 구성

광주도시철도 같은 경우, 하부 구조가 협소하여 열차풍이 작기 때문에, 팬의 동력이 필요하였다. 팬을 추가한 동력 집진장치는 큰 차압을 견딜 수 있기 때문에 집진효율이 루버 관성집진장치보다 더 높은 배플 관성집진장치로 교체하였다.

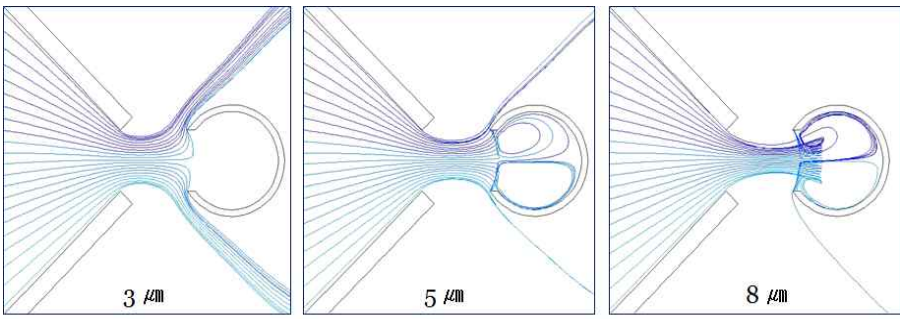
② 배플 관성집진장치 개발

배플 관성집진장치는 루버 관성집진장치와 마찬가지로 공기 중 입자의 관성을 이용하여 입자를 포집한다. 배플의 형상을 변형하여 원하는 유량과 차압에 맞는 형상을 도출할 수 있으며, 빠르게 유입되는 입자에 대해 높은 포집효율을 나타낸다. 아래 그림에서 유동이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동한다고 가정했을 때, (a) 모델은 오목한 포집판으로 입자를 포집하게 되며, (b) 모델은 컵 형태의 포집판으로 입자를 포집하게 된다. 그리고 나머지 (c)와 (d) 모델은 원형 파이프에 구멍을 낸 형태의 포집판이다.

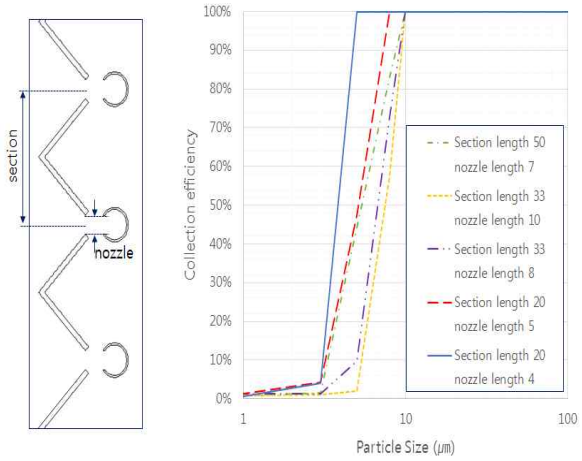
배플 관성집진장치 뒤에 부착될 시로코 팬의 성능과 잘 부합하는 크기를 찾기 위해 세부치수에 따른 차압과 분리입경(cut-off size)을 시뮬레이션과 실험으로 예측하였으며, section 길이 33 mm, nozzle 길이 10 mm의 크기 모델이 비교적 적합한 것으로 예측되었다.



<다양한 형상의 배플(baffle)>



<(d) 형상에 대한 입자의 궤적>



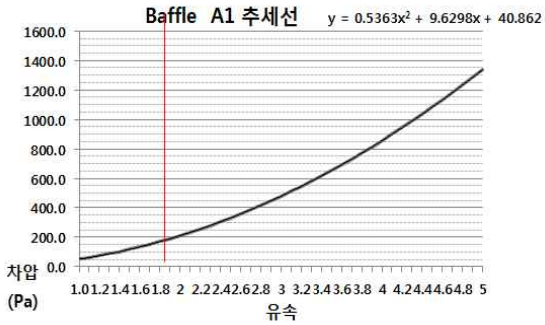
<Section, nozzle 치수에 따른 포집효율 비교>

S/N	No.	Inlet speed	Pressure drop (Pa)	Cut-off size (㎛)
S: 50mm N: 7mm	A1	5 m/s	1368	5.49
S: 33mm N: 10mm	A4		**282**	**7.6**
S: 33mm N: 8mm	A2		468	6.92
S: 20mm N: 5mm	A5		323	5.15
S: 20mm N: 4 mm	A3		660	3.96

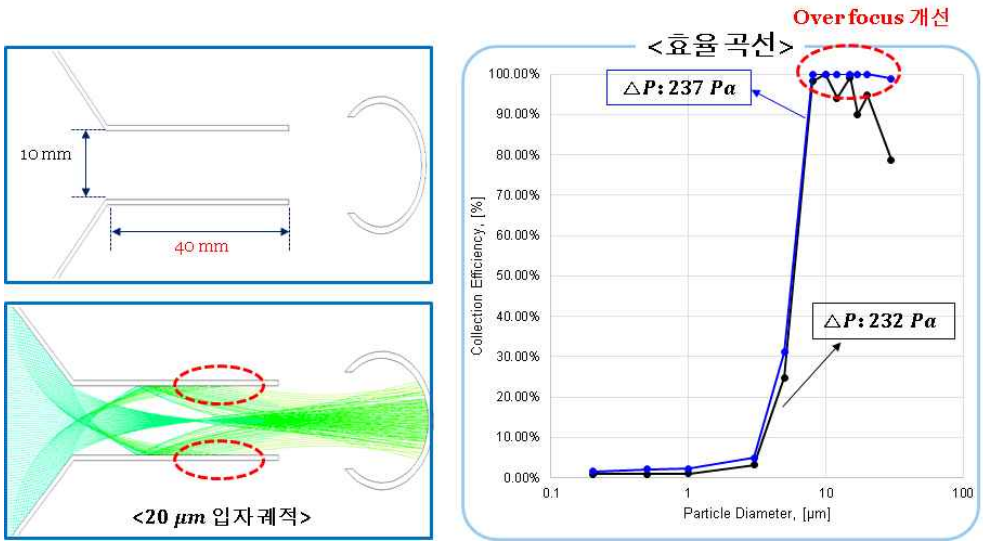
<배플 Section(S)과 Nozzle(N)에 따른 효율>



<배플 풍량 측정기>



<배플 풍량/차압 관계 곡선 측정결과>

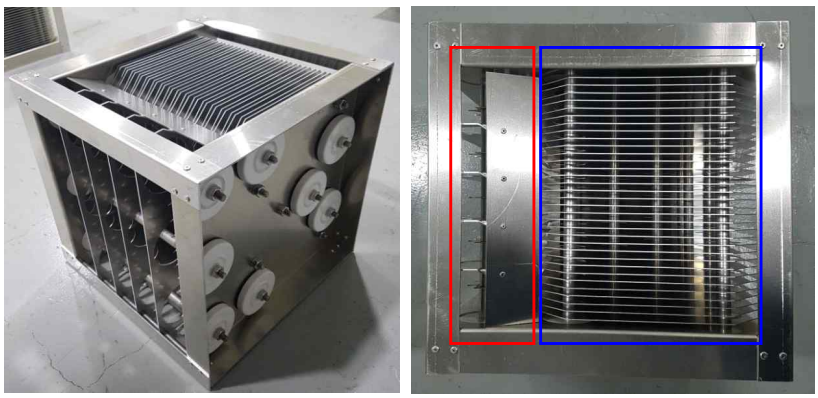


<배플 관성집진장치의 오버포커싱 방지효과>

일정 크기 이상 입자는 노즐에서 오버포커싱 되었으나, 노즐 목을 늘려주어서 오버포커싱이 방지되도록 하였다. 그 결과 10 μm 이상의 거대 입자가 파이프로 잘 들어감이 시뮬레이션으로 확인되었다.

③ 2단 전기집진기 제작

동력 하이브리드 집진장치에 사용되는 팬의 크기가 40 cm X 40 cm 였기 때문에 전기집진기도 이 크기에 맞추어 40 X 40 X 40 크기로 제작하였다. 빠른 유속과 짧은 이동거리를 가지기 때문에 낮은 전압으로 집진효율이 높을 수 있는 2단 전기 집진기를 택하였다.



<동력 하이브리드 집진장치용 2단 전기집진기>

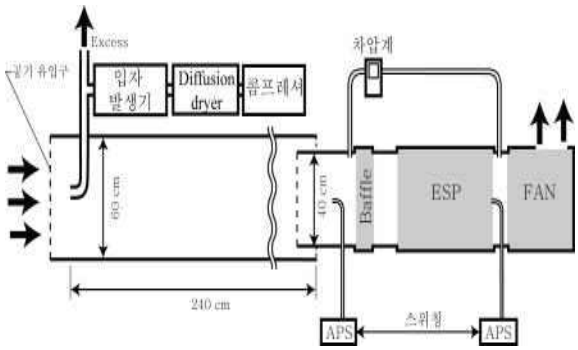
④ 실크기 풍동 실험 및 시뮬레이션을 통한 성능 예측

동력 하이브리드 집진장치를 제작하고, 실제 성능이 어떻게 나오는지 판단하기 위해서 실크기 풍동 실험을 진행하였다. 팬은 항상 최대 파워로 가동한다고 가정하고, 각 배플 모델이 바뀔 때마다 팬의 유량과 차압 관계를 측정하였다. 유속 측정 시 앞단은 같은 단면적의 60 cm 길이의 채널을 덧붙였으며, 유입구는 대기압으로 설정하였다. 배플 앞 20 cm 지점에서 단면적을 9등분한 중심에서 1분간 유속을 측정하여 평균하였다. 유속분포의 오차가 20% 이내였다. 무동력 하이브리드 집진장치의 집진효율을 측정할 때와 마찬가지로 upstream과 downstream에서 각각 입자측정기(APS)를 이용해서 1분간 측정하여 계산하였다.

5 m/s에서 280 Pa 차압을 목표로 설계한 A4 배플 모델은 4.88 m/s, 250 Pa의 차압-유량 관계를 나타내었다. 선정한 F29FSA/FTA 시로코팬으로 설계한 배플의 유동저항을 견디고 충분히 유량을 유입시킬 수 있음을 확인하였다. A4 배플 모델의 50% cut-off size가 8 ㎛로 나타났다. 50% cut-off size 크기 이상은 입자 농도가 적고, 재비산등의 문제로 인해 제대로된 측정이 수행되지 못하였다. 1~5 ㎛는 전기집진기의 효율이 지배적인 영향을 나타내고, 그 이후는 배플의 영향으로 시뮬레이션에서 예측한 효율이 상승하였다. 시뮬레이션결과도 실험결과와 잘 일치하였다.

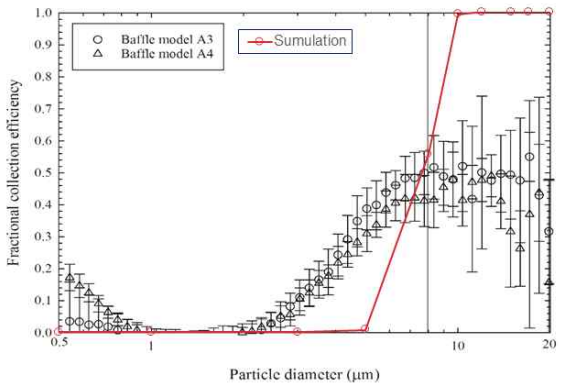


(a) 집진효율 실험

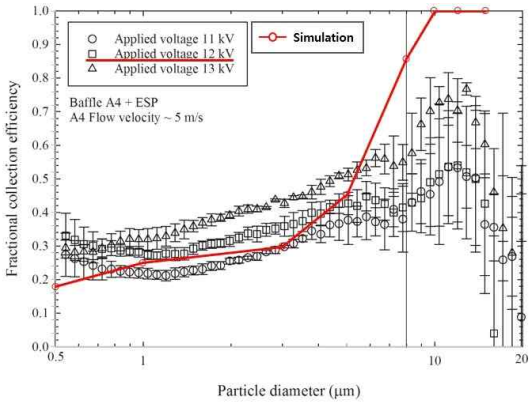


(b) 실험장치 개략도

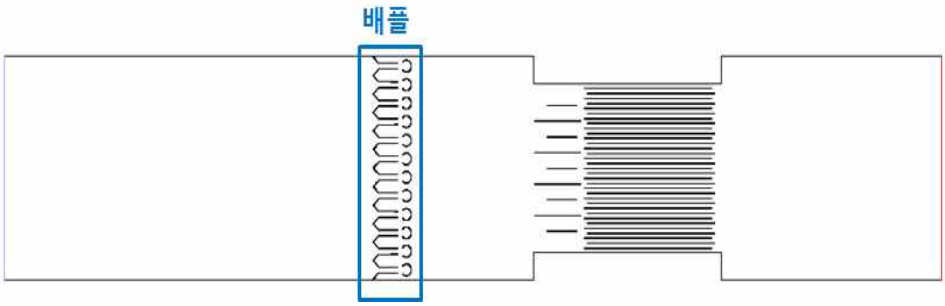
<동력 하이브리드형 집진장치의 성능평가 실험장치>



<배플 실험결과와 시뮬레이션 결과 비교>

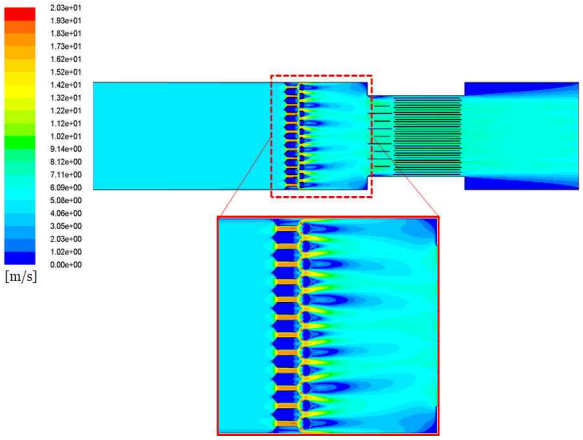


<동력 하이브리드형 집진장치 포집효율 비교>

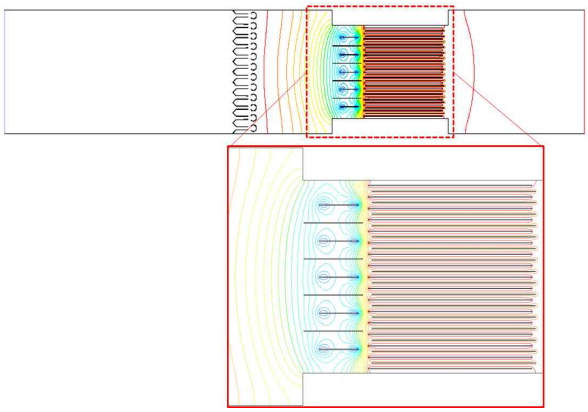


<동력 하이브리드 집진장치 시뮬레이션 형상>

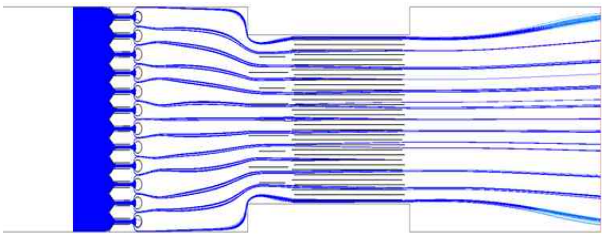
앞에서 검증한 전기집진기 시뮬레이션 방법을 동원하여 동력 하이브리드형 집진장치의 배플 관성집진장치와 연결하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션의 형상은 동력 하이브리드형 집진장치의 위에서 바라본 2D top view 형상이다. 전반적으로 실험과 시뮬레이션의 두 결과의 경향성이 일치하며, cut-off size는 약 4.4%의 근소한 오차를 나타낸다. 다만, cut-off size 이상의 크기에서 두 결과의 오차가 커진다. 이러한 오차는 실제 실험에서 진동으로 인한 배플의 떨림 및 입자의 재비산 영향 등에서 기인한 오차이다. 시뮬레이션으로 구한 전체 입경분포에서 동력 하이브리드 집진장치의 경향성을 살펴보면 전형적인 집진장치의 집진효율 경향성을 나타낸다. 대략 8 μm 근처에서 100 %의 효율을 나타낸다.



<동력 하이브리드 집진장치의 유동장>



<동력 하이브리드 집진장치의 전기장>



<동력 하이브리드 집진장치의 입자 궤적>

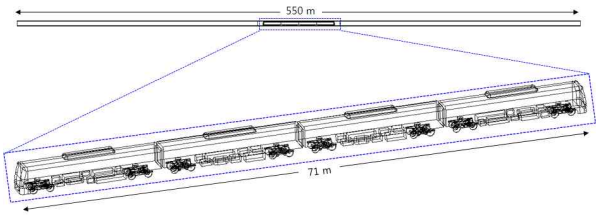


<동력 하이브리드 집진장치의 집진 효율>

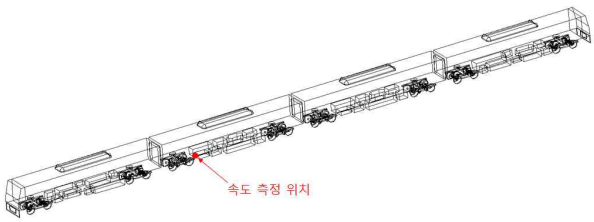
⑤ 지하철 부착 환경 예측

▷ 광주도시철도 하부 유동해석 및 속도 검증

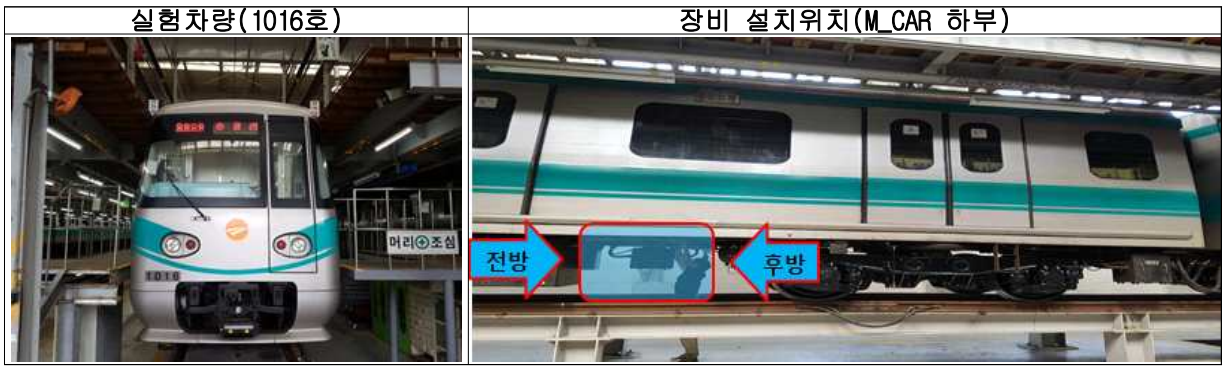
광주도시철도에 동력 집진장치를 부착하기로 되었으며, 시코로팬을 가동한 채 주행하는 광주도시철도 하부에서 집진장치로의 유입유량을 예측하고, 나아가 유입유량에 따른 집진효율을 예측하고자 시뮬레이션을 진행하였다. 이에 앞서 먼저 유동해석을 실시하고, 유속 측정결과와 비교하여 수치해석의 정확도를 검증하였다. 전동차 속도 70 km/h를 기준으로 측정값과 수치해석 결과를 비교하였다. 측정값의 표준편차를 고려해보았을 때 수치해석 결과 값이 오차범위 내로 수렴하였다.



<수치해석을 위한 광주도시철도 전동차 모델링>

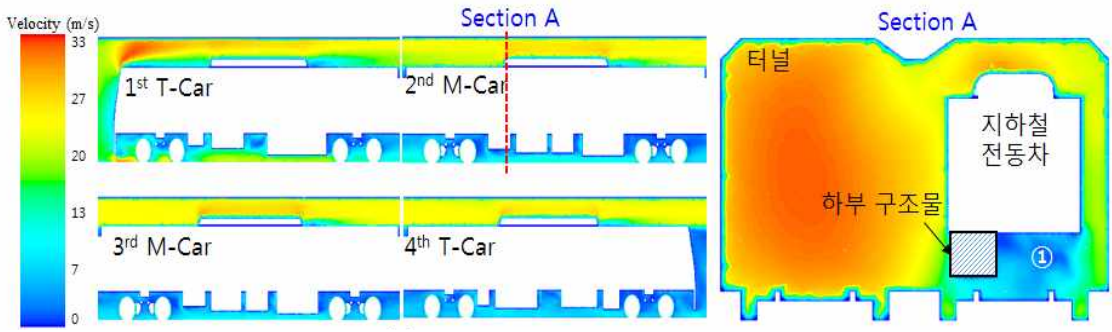


<광주도시철도 전동차 하부 속도 측정 위치>





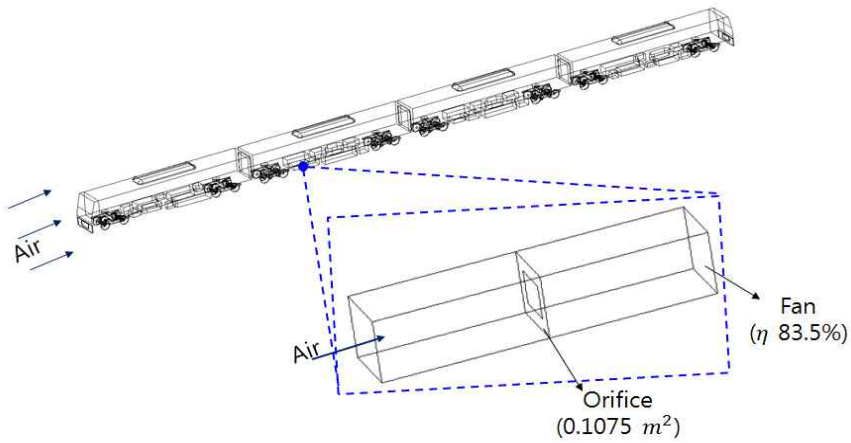
<광주도시철도 차량 하부 유속 및 미세먼지 측정>



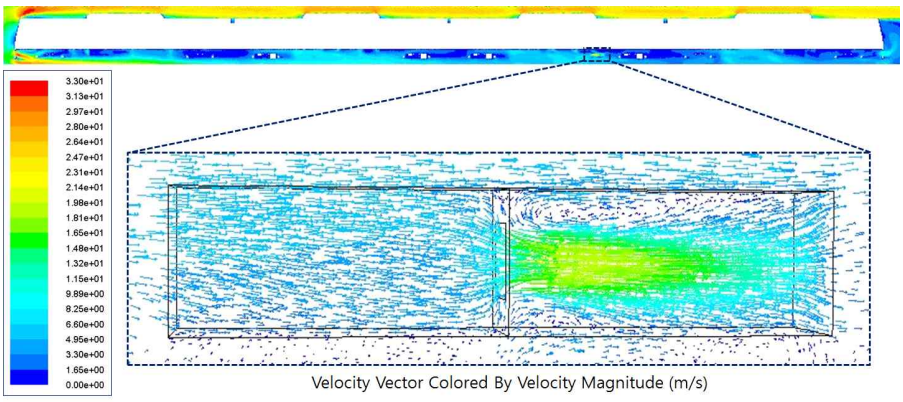
<시뮬레이션 유동해석 결과>

전동차 속도	구분	① 구간 속도
70 km/h (19.4 m/s)	실제 측정값 (mean±S.D.)	4.65±1.0 m/s
	수치해석	**5.08 m/s**

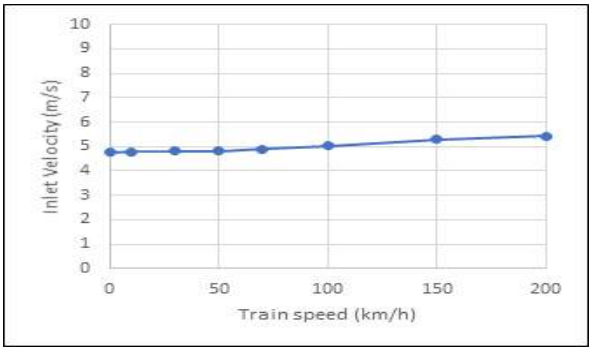
동력 하이브리드 집진장치의 유입유량 예측을 위해, 무동력 하이브리드 집진장치와 마찬가지로, 집진장치를 일정한 차압을 가지는 오리피스로 가정하고, 일정 동력을 가지는 팬 경계조건을 활용해서, 동력 하이브리드 집진장치가 광주지하철 하부에 부착되었을 때 유입유량을 시뮬레이션으로 예측하였다. 시뮬레이션 결과, 전동차 속도 0-70 km/h 분포에서 유입 속도는 4.75-4.88 m/s로 예상되었으며, 전동차의 주행속도가 빨라질수록 유입 유량이 증가되었으며, 정차에 비해 고속 주행 시 유입 유속의 상승폭은 0.13 m/s 수준으로 나타났다. 고속전철에 해당하는 차속 범위(100-200 km/h)에서도 흡입 유량이 유사하였다.



<전동차 하부에 부착된 오리피스 형상의 집진장치>



<전동차 하부에 부착된 오리피스형 집진장치 주위 유동해석>



<전동차 속도에 따른 집진장치 유입속도 비교>

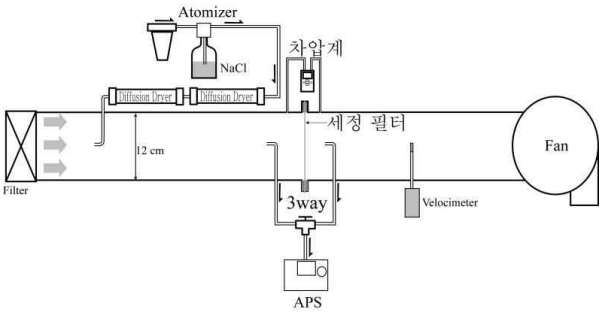
전동차 주행속도	집진장치 유입속도(m/s)
0 km/h	4.75
10 km/h	4.78
30 km/h	4.80
50 km/h	4.82
70 km/h	4.88
100 km/h	5.02
150 km/h	5.29
200 km/h	5.44
역방향 70 km/h	4.55

다) 전기식 미세먼지 집진장치 개발 및 성능 평가

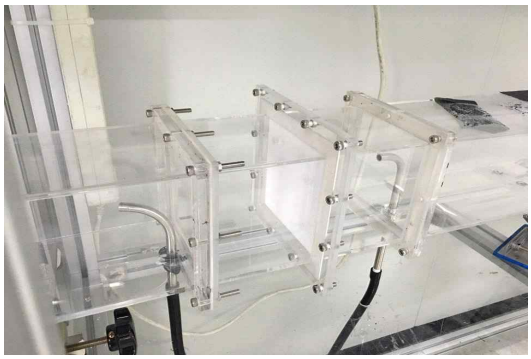
전기식 미세먼지 집진장치에는 전기집진기로부터 하전된 입자나 재비산된 입자를 집진하기 위한 필터가 전기집진기 하류에 배치되어 있다. 이 필터의 재생성과 효율을 시뮬레이션과 실험을 통해 성능 평가하였다. 고분자필터와 전도성필터, 2가지의 필터가 시험되었다.

① 세정형 고분자 필터 성능예측 소형 풍동 실험

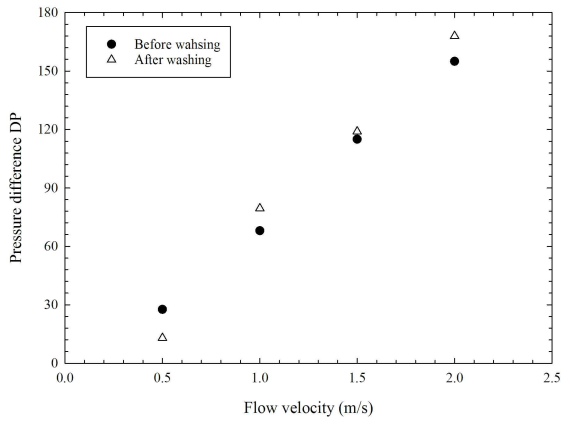
시판되는 고분자필터의 세정 전후의 집진효율 변화를 평가하기 위해 소형 덕트 시스템을 사용하였다. 세정 전 필터의 집진효율을 측정한 후 필터를 꺼내 세정액으로 깨끗이 씻은 후 12시간 이상 건조 후 다시 실험장치에 끼워서 동일한 방법으로 측정/평가하였다.



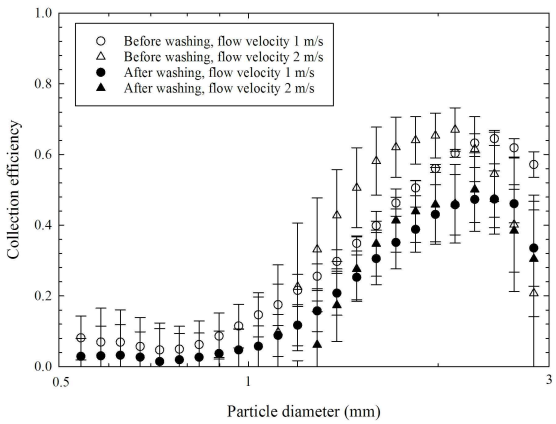
<고분자필터의 평가 실험장치 개요도>



<고분자필터의 세정 영향 평가 실험장치>



<세정형 고분자필터의 유속-차압 특성>



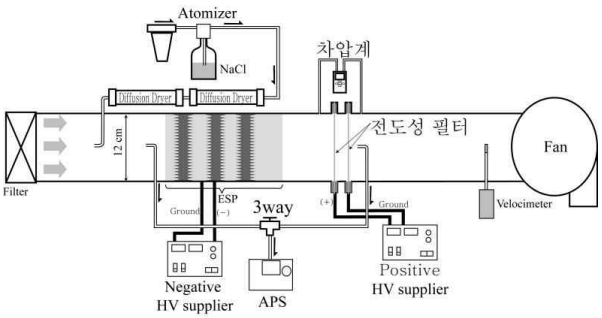
<세정 전후 고분자필터의 집진효율 변화>

실험 결과, 세정 전 필터의 차압은 2.0 m/s 유속에서 약 155 Pa이었으나, 세정 후에는 168 Pa

로 약 8% 증가하였다. 전체적인 유속-차압 특성 곡선을 보면 이러한 차이는 오차 범위로 볼 수 있기 때문에, 세정 후 고분자필터의 유속-차압 관계가 크게 변하지 않았다고 판단된다. 세정 후에는 모든 유속에 대해서 10-20% 가량 입자 제거효율이 감소하였다. 세정으로 인한 필터 손상이 입자 제거효율에 다소 영향을 미친 것으로 생각되므로 재생필터로 활용이 어렵다.

② 전도성필터 성능예측 실험 및 시뮬레이션

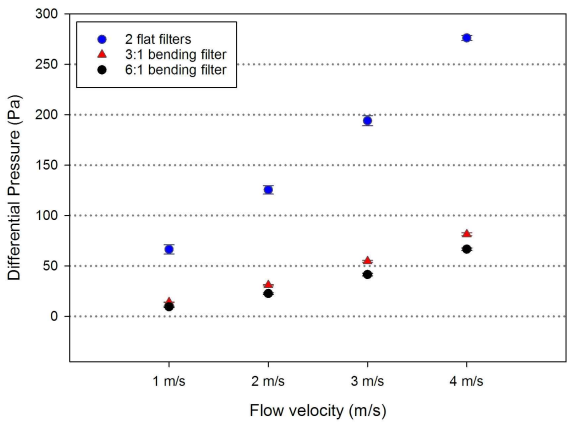
기존 전기집진기 소형 풍동 실험 장치의 하부에 전도성 필터를 장착할 수 있는 추가 모듈을 제작하여 덧대어 실험하였다. 따라서 시험 입자는 전기집진기 실험 때와 마찬가지로 NaCl 입자를 사용하였다.전도성필터는 동 사업단의 1세부 재료연구소에서 개발한 소재로, 전기집진기가 상단에 배치되는 본 과제의 하이브리드형 집진장치와 알맞다고 판단되었다. 전기집진기에는 음의 전압을 걸어 주었으며, 전도성 필터는 2장을 끼워서 전단 필터에는 양극을, 후단 필터는 접지시켰다. 전도성 필터간 간격은 1 cm 였으며, +18 kV의 전압을 인가했다.



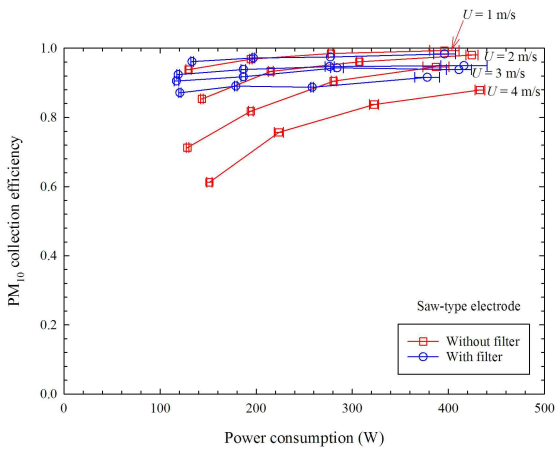
<전기식 집진장치 소형 풍동 성능평가 개요도>



<전도성 필터 소형 풍동 설치 모습>



<전도성필터의 유량-차압 관계>



<전기집진기+전도성필터 집진효율>

실험 결과, 기존의 전기집진기는 유속이나 인가 전압에 따라 집진효율이 60-95%로 분포하였다. 전도성필터를 전기집진기 뒤에 추가 배치하자, 집진효율이 90% 이상으로 유지되었다. 유속이 빨라서 전기집진기가 미처 잡지 못한 입자를 전도성필터가 집진하여 전체 집진효율이 증가하였다. 전도성필터 전기장 유무에 독립적으로 같은 집진효율결과가 나왔으므로, 전도성필터의 전기장 효과는 미미한 것으로 예측되었다. 전도성 필터를 절곡시켜서 통과유량을 감소시켜 차압을 낮추고자 하였다. 전도성 필터의 전기장 효과가 미미하였기 때문에 전도성 필터의 접지 효과만 이용하기로 하였다.1단 전도성 필터를 1:3 비율로 절곡 하면 차압은 기존 2겹 전도성필터의 25% 수준으로 감소하였다. 전도성필터를 접지 후 절곡하여 사용하면 효과가 있을 것으로 기대된다.

(다) 전기집진기 고전압 공급용 고전압 전원장치 제작

가) 집진장치용 고전압 전원장치 개발 개요

전기집진기용 전원장치는 범용적으로 사용할 수 있도록 사용조건에 따라 출력전압을 −10kV부터 −15kV 범위에서 조정할 수 있고, 필요 시 출력전압의 극성도 최소한의 수정을 통하여 '+'로 변경할 수 있도록 개발하였다. 새로 개발한 제품은 기존 고전압전원장치에 비해 무게가 가볍고(1.0kg / 5.4kg), 크기가 작고(254 x 120 x 61 mm^3/ 400 x 400 x 140mm^3), 가격도 (10만원 / 180만원)로 저렴하게 제작하였다.



<전기집진기용 전원장치 제품 사진>

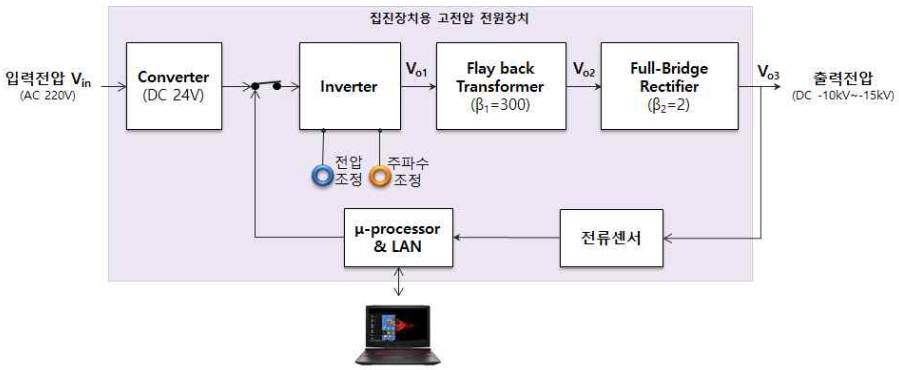

<전기집진기용 전원장치 내부 조립사진>

나) 집진장치용 고전압 전원장치 특징

① 특징 1: 프로그래머블 고전압 전원장치

고전압전원장치는 집진판에 환경적 변화로 절연이 약해질 경우 플라즈마와 기기 손상이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 출력전류가 갑자기 증가할 경우 이를 검지하여 일정시간 출력전압을 차단 후 다시 가동하도록 하였다. 사용자는 고전압전원장치와의 네트워크 접속을 통해 출력전류의 변화 이력을 다운받아 확인할 수 있고, 과전류 발생 시 자동으로 차단되는 조건과 시간을 프로그래밍 할 수 있다.

- 네트워크를 통한 원격감시 및 제어
- 전류 변화량 모니터링(샘플링 주기 조정 가능)
- 이상전류 발생 시 일정시간(3초, 수정 가능) 자동 차단



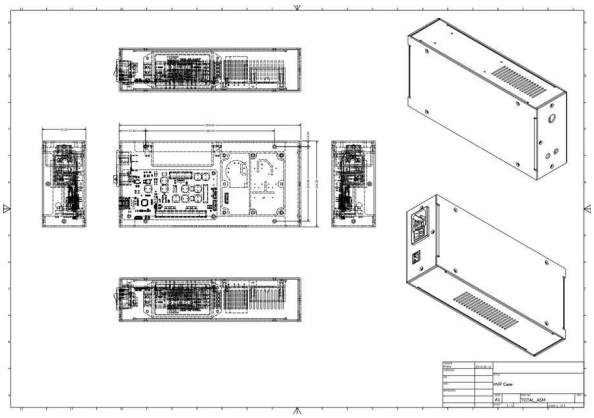
② 특징 2:우수한 가성비의 아날로그형 인버터

가성비와 안전성을 고려하여 인버터는 타이머IC를 이용하여 주파수를 가변시킬 수 있는 구형파를 발생시킨 후, 저전압의 구형파를 고배율 플라이백 트랜스포머를 통과시켜 전압이 286배 증폭된 고전압의 교류를 만들고, 고전압 교류는 전파정류기를 통과하면서 전압은 두 배 더 증폭되고 직류로 변성된다. 직류로 변성된 고전압 출력에 포함된 정류과정에서 발생된 맥류성분은 π필터를 통과시켜 제거하였다.

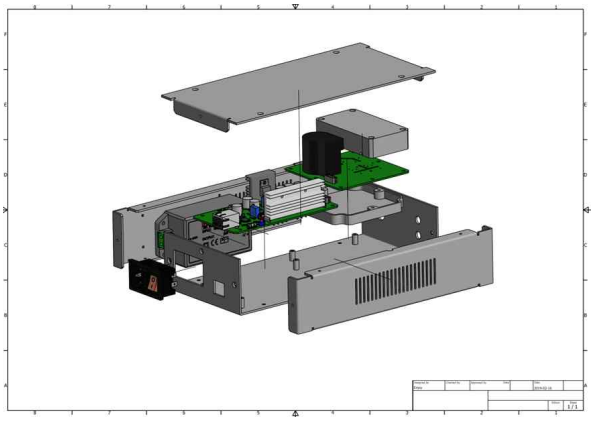
- 우수한 범용성(출력전압 −10kV ~ −15kV 조정가능, 주파수 조정 가능)
- 우수한 가성비(10만원/대) vs 컨버테크 제품 30만원/대
- 낮은 노이즈 특성(리플율 0.13% 이하)

③ 고전압 전원장치 설계도

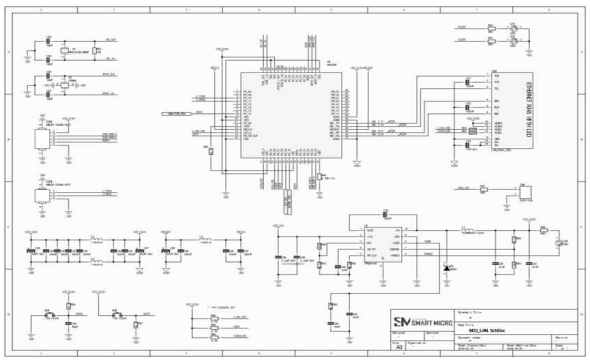
고전압 전원장치는 디지털 회로와 아날로그 회로로 구성되어 있으며, 디지털 회로는 연산처리와 네트워크 통신을 담당하는 원-칩 마이크로컴퓨터로 구성되어 있다. 마이크로컴퓨터는 피드백 회로를 이용하여 출력전류를 모니터링 하며, 사용자 PC와는 네트워크를 통하여 인터페이스가 가능하다. 아날로그 회로는 저압부와 고압부로 구분된다. 저압부는 직류전압을 교류(펄스) 전압으로 변환하는 인버터 회로로 가변저항을 이용하여 인버터에 입력되는 직류전압의 크기를 조절함으로써 출력전압을 10kV 부터 15kV 까지 변경시킬 수 있다. 고전압전원장치 케이스는 견고성과 가성비 등을 고려하여 콘버터, 디지털부, 저전압부, 고전압부 PCB를 하나의 케이스 내에 모두 내장시켰으며, 재질은 내후성과 가공성을 고려하여 알루미늄 판으로 설계하였다. PCB의 고전압부 영역은 안전성을 고려하여 상하부를 오일콤파운드(KS-64)로 절연시키고, 별도의 상부 케이스와 하부 케이스를 덧대 절연 오일콤파운드를 고정시켰다.



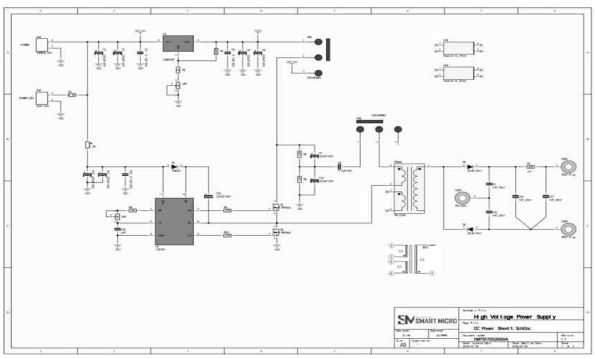
<전기집진기용 전원장치 기구 설계도>



<전기집진기용 전원장치 부품 배치도>



<디지털 회로도(마이크로컴퓨터, 피드백)>



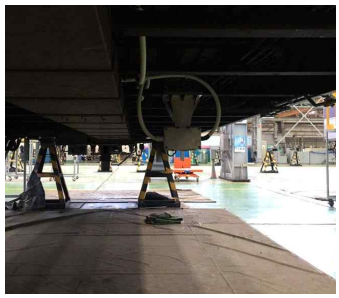
<아날로그 회로도(인버터부, 고전압부)>

(라) 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 현차실험 성능평가

가) 서울교통공사 5호선 1차 현차 평가

풍동실험과 시뮬레이션을 통해 설계된 무동력/동력 하이브리드 집진장치를 실제 차량에 달고 시험하기 위해서 서울교통공사 5호선 운행차량에 두 장치를 부착하고 2017년 11월 14일부터 12월 27일까지 43일간 시험을 진행하였다. 무동력 하이브리드 집진장치는 343시간 동안 10,290 km를 운행하였으며, 동력 하이브리드 집진장치는 약 50시간 동안 1,500 km를 운행하였다. 두 장치를 한 차량의 5번째와 4번째 T-Car에 각각 부착하였으며, 중정비로 입창되는 전동차 중에서 작업일정이 용이한 565편성이 선택되었다. 무동력 하이브리드 집진장치 고전압 발생장치 전원과, 동력 하이브리드 집진장치 팬 전원 등을 전동차 내 일반배전설비에 연결하여 사용하였다. 도시철도 차량에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 전원 인입부에 차단기를 별도로 장착하여 문제가 발생 시 전원이 차단될 수 있도록 하였다. 사용전력은 동력 하이브리드 기준 하절기/동절기 예비전력의 1.5%/1% 수준으로 전동차 운행에 영향이 없음을 확인하였다.





무동력 하이브리드 동력 하이브리드 차단기

<5호선에 설치된 현차 평가용 하이브리드 집진장치와 차단기>

집진량은 간접적인 방법과 직접적인 방법, 2가지로 측정되었다. 먼저 간접적인 방법은, 전기집진기 표면에 집진된 지하철 입자를 면봉으로 긁어내고 발란스(ax324, Ohaus, USA)를 이용해서 긁어낸 입자의 무게를 측정하는 방법이다. 그리고 긁어낸 면적을 측정하여 집진된 입자의 표면적 무게 밀도를 측정하고, 전체 집진면적을 곱하여 전체 집진된 입자의 무게를 추정하였다. 루버 관성집진장치와 배플 관성집진장치의 경우 일부만 긁어내기에는 집진량이 적었으므로, 전체 면적의 입자를 긁어내서 집진된 입자의 무게를 측정하였다. 무동력 하이브리드 집진장치의 1단 전기집진기에 2017년 12월 14일, 12월 27일 총 2회 실시하였으며, 동력 하이브리드 집진장치의 2단 전기집진기에 2017년 11월 29일, 12월 14일 2회 실시하였다.

직접적인 무게측정 방법은 실험이 끝난 전기집진기 혹은 루버/배플 관성집진장치를 분리하여 전체 무게를 측정하고, 깨끗이 집진된 입자를 씻어낸 후 다시 전체 무게를 측정하여, 두 측정값의 차이를 통해 집진되었던 입자 무게를 측정하였다. 직접 측정방법의 무게 측정용 발란스는 HS30-1C (최대 30 kg, 1 g 단위)였다.



<전기집진기 표면 먼지 무게 측정>



<긁어낸 먼지 무게 측정 발란스>

시험 후, 간접 집진무게 측정결과, 현장에서 무동력 하이브리드 집진장치의 1단 전기집진기 뒷면만 긁어서 집진량을 간접 측정한 결과, 2번에 걸친 측정에서 집진성능이 크게 변하지 않았으므로, 무동력 하이브리드 집진장치의 전기집진기 성능이 한 달 이상 변하지 않고 유지되는 것으로 파악되었다.

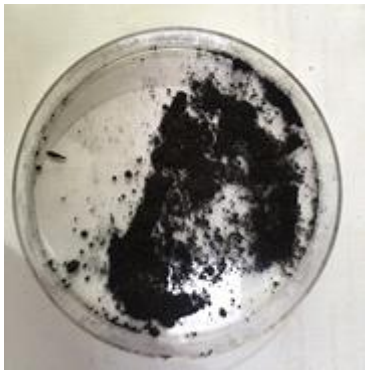
측정일	가동시간	운행 거리	집진량	집진성능
12월 14일	285 시간	8,565 km	64.4 g	0.0075 g/km
12월 27일	343 시간	10,290 km	79.4 g	0.0077 g/km

동력 하이브리드 집진장치는 아크로 인한 브레이크 다운이 자주 발생하였기 때문에 정확한 가동시간을 알지 못하였다. 따라서 전동차 운행시간의 절반만 작동하였다고 가정하였다. 무동력 하이브리드 집진장치의 집진량은 현장 무게 측정결과 보다 매우 높게 나타났다. 이는 현장 무게측정에서는 전기집진기의 뒷면만 측정하였던데 비해서, 실험실에서는 유동방향으로 고르게 집진입자 무게농도 분포를 구하였기 때문이다. 동력 하이브리드 집진장치의 전기집진기는 무동력 하이브리드 집진장치의 전기집진기보다 우수한 집진성능을 가지는 것으로 측정되었다. 하지만 무동력 하이브리드 집진장치에 사용된 1단 전기집진기가 174 g의 입자가 집진될 동안 포화되지 않은 것에 비해, 동력 하이브리드 집진장치에 사용된 2단 전기집진기는 30-40 g의 입자 이후로는 잦은 아크 발생으로 인해 더 이상 집진이 불가능하였다. 당시 동력 하이브리드 집진장치의 배플 관성집진장치는 오버포커싱이 고려되지 않은 설계였기 때문에 무게 입자의 큰 부분을 차지하는 거대 입자들이 집진이 안되어서 집진성능이 낮은 것으로 판단되었다.

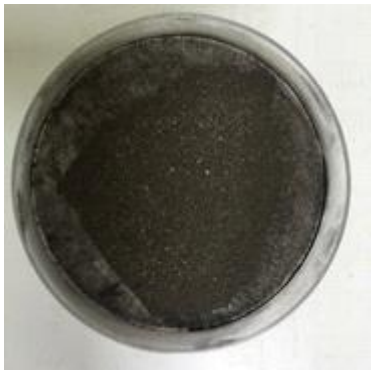
직접 세정 전후 의 집진장치 무게를 측정해서 집진된 입자 무게를 계산한 결과, 실험실 무게측정 결과와 매우 유사한 값을 얻을 수 있었다. 면봉으로 긁어서 간접적으로 집진무게를 측정하는 방법이 신뢰성이 있다는 것을 증명하였다.

	무동력 하이브리드 집진장치-1단 전기집진기	동력 하이브리드 집진장치-2단 전기집진기	
측정일	12월 27일 측정	11월 29일 측정	12월 14일 측정
가동시간	343시간	0-40시간	0-60시간
운행거리	10,290 km	600 km(20시간 가정)	900 km(30시간 가정)
집진량	174 g	24.32 g	36.10 g
집진성능	0.017 g/km	0.04 g/km	0.04 g/km

	무동력 하이브리드 집진장치 -루버 관성집진장치	동력 하이브리드 집진장치 -배플 관성 집진장치
측정일	12월 27일 측정	12월 14일 측정
가동시간	343시간	0-60시간
운행거리	10,290 km	900 km(가정)
집진량	1.043 g	2.03 g
집진성능	0.101 mg/km	2.0 mg/km



<무동력 하이브리드 집진장치-루버 관성집진장치에서 긁어낸 입자>



<무동력 하이브리드 집진장치-1단 전기집진기에서 긁어낸 입자>





<동력 하이브리드 집진장치 배플 관성집진장치에서 집진된 입자>



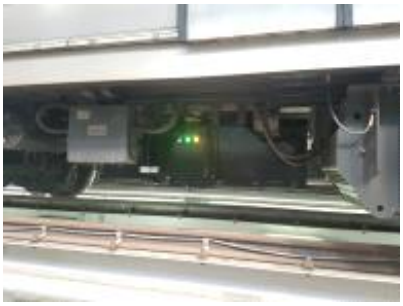


<동력 하이브리드 집진장치 배플 관성집진장치 먼지통에서 집진된 입자>

나) 광주도시철도 1호선 1차 현차 평가

광주도시철도 차량에서 전기식 미세먼지 제거장치 및 동력 하이브리드 집진장치의 집진성능을 측정하기 위해서 2018년 3월 1일부터 3월 31일까지 31일간 시험 하였다. 같은 외함에 전도성필터와 배플 관성집진장치를 갈아 끼워서 실험하였으며, 2단 전기집진기+전도성 필터는 112시간 운행에 3800 km 주행하였으며, 2단 전기집진기+배플 관성집진장치는 187시간 운행에 6400 km 주행하였다. 일정 주기로 운행을 끝마치고 검사고로 입고한 전동차 집진장치의 전기집진기와 전도성 필터 및 배플 관성집진장치를 분리하여 집진된 먼지의 무게를 측정했다. 입구로 들어오는 이물질이 전기집진기에 아크등을 일으키지 않도록 타공판을 가이드베인부에 설치하였다. 집진장치의 동력을 충당하기 위해 전동차 배전반으로부터 전력을 끌어와서 사용했다.

실험 결과, 타공판으로 인해 유입 유량이 설계 (5 m/s)보다 낮은 3 m/s 였을 것으로 추정된다. 그러므로 집진량이 설계치의 절반으로 추정되므로, 실제 집진량은 0.11-0.14 g/km 이상 예상된다. 2단 전기집진기의 첫날 운행(280 km 주행)에 17 g (**0.06 g/km**)이 집진되었으며, 이는 기존 자석 봉 필터의 2배 이상의 집진량을 보여주었다. 타공판을 제거해서 유입 유량을 늘리면 더 증가할 것으로 예상된다. 필터와 전기집진기에 먼지가 누적되면서 집진성능이 점차 감소하였다. 첫날에 비해 시험 후반으로 갈수록 집진성능이 1/10이하로 크게 감소하였다.



<집진장치 부착 모습>

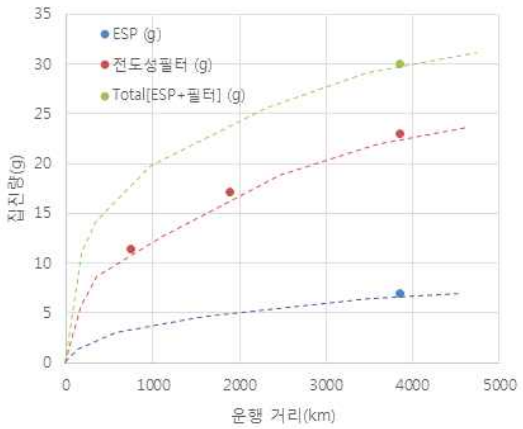


<전동차 하부 배전반 및 집진장치의 위치>

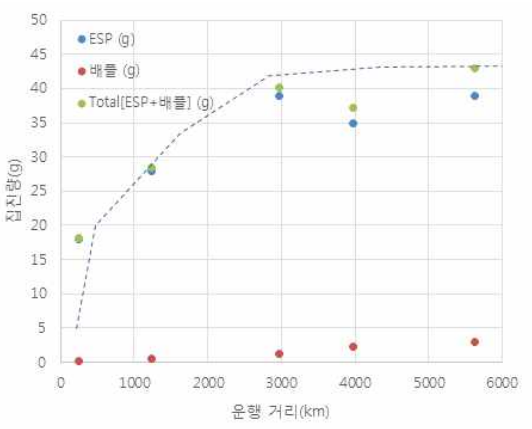


<집진장치 부품 집진 무게 측정 모습: 왼쪽부터 2단전기집진기, 3:1 절곡 전도성필터, 전기집진기 먼지통, 배플 관성집진장치 먼지통>

	시험 초기 (180-280 km)		시험 후반(3800-6400 km)	
	집진량 (g)	집진성능 (g/km)	집진량 (g)	집진성능 (g/km)
2단 전기집진기 + 필터	13	0.072	30	0.007
2단 전기집진기 + 배플	17	0.061	42	0.006



<전기집진기+필터 112시간, 3800 km>



<전기집진기+배플 187시간, 6400 km>

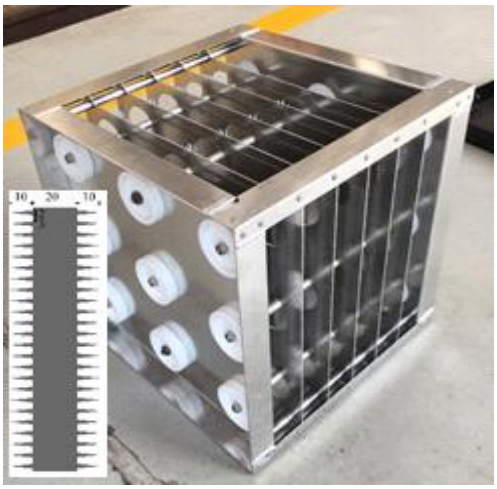
다) 광주도시철도 1호선 2차 현차 평가

광주도시철도 1호선 1차 현차평가에서 타공판으로 충분한 유량이 발생하지 않았고, 필터 파과가 빨리 일어났으므로, 전기집진기를 1단으로 교체하여 고효율 집진성능을 유지하며 세정주기를 증가시키기 위해 2차 현차평가가 2018년 6월 14일부터 7월 11일까지 28일간 이루어졌다. 총 136시간 운행하고 4600 km를 주행하였으며, 일정 주기로 운행을 끝마치고 검사고로 입고한 전동차 집진장치의 전기집진기와 전도성 필터를 분리하여 집진된 먼지의 무게를 매일 측정해서 집진량을 측정하였다. 전기집진기의 세정 주기를 증가시키기 위해서 150 g 이상 집진이 가능하였던 1단 전기집진기로 교체하고, 유입유량을 감소시켰던 타공판을 제거하였다. 장마로 인하여 비가 온 날이 많았다. 전기식 미세먼지 제거장치 시험과 함께 지하철 역사 터널에서 베타레이를 이용해서 입자 농도 측정도 동시에 진행되었다. 입자 농도 측정은 6월 20일-6월 28일, 7월14일-7월19일 두 번에 걸쳐 이루어졌다.

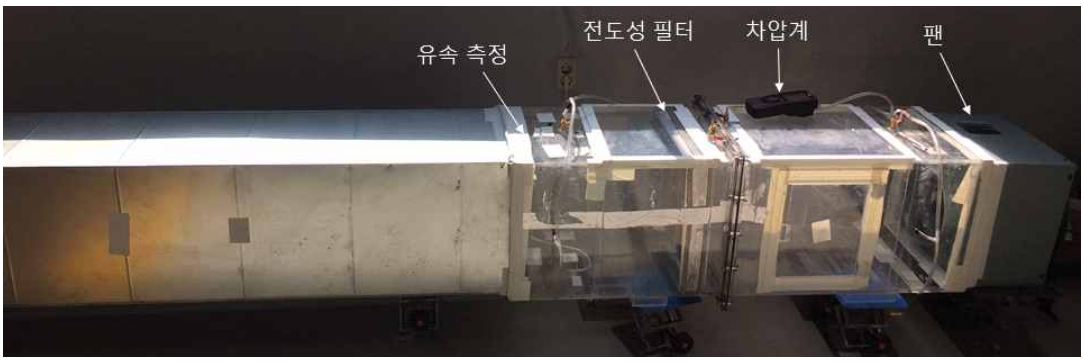
집진 무게 측정은 1차 광주도시철도 현차평가와 같은 방식으로 이루어지되, 측정주기를 하루로 바꾸어 매일 집진된 무게를 측정하였다. 전도성 필터는 집진장치로부터 매일 분리하여 임시풍동에 설치해서 유량 차압을 측정하였다. 임시풍동에는 동력 하이브리드 집진장치와 동일한 팬이 사용되었으므로, 구조가 다른데서 오는 유량 오차는 크지 않다고 가정하였다. 전도성 필터는 절곡하여 더 높은 집진효율을 가지도록 설계하였으며, 평면 필터와의 차이점을 알아보기 위해 몇 가지 다른 절곡 비율의 전도성필터도 실험되었다.



<광주도시철도 1차 실험에서 사용하였던 2단 전기집진기 및 전극 모양(wave-type)>



<광주도시철도 2차 실험에서 사용하였던 1단 전기집진기 및 전극 모양(saw-type)>



<전도성필터 차압측정용 임시풍동>



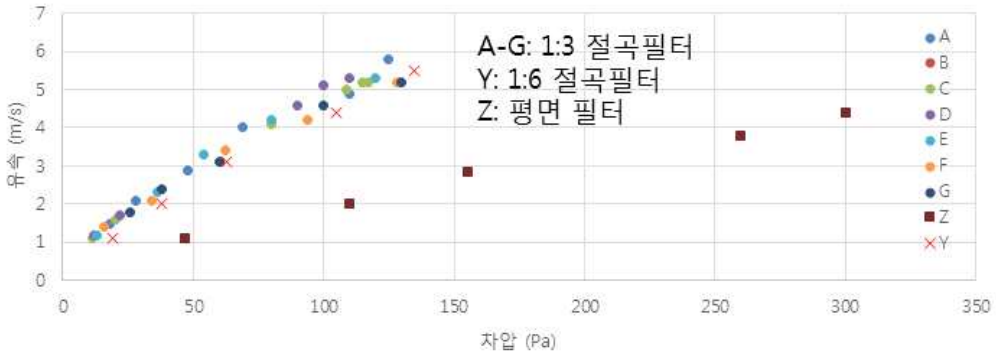
(a) 평면 필터 (b) 1:3 절곡필터 (c) 1:6 절곡필터

<집진 전(위) 후(아래) 전도성 필터 모습>

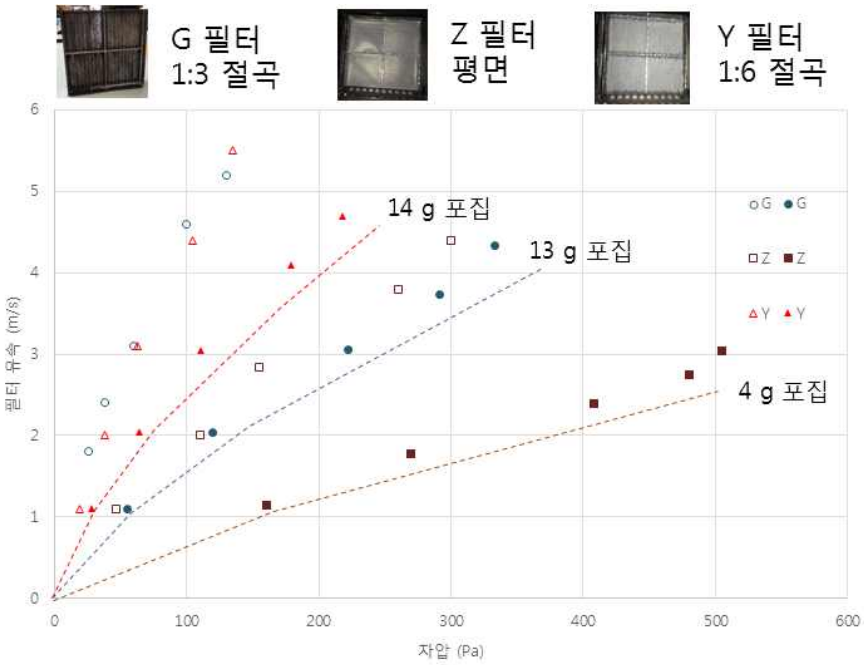
현차 평가 결과, 전도성 필터의 유량-차압 관계를 우선 비교하였다. 1:3 절곡필터와 1:6 절곡필터는 차압-유량 곡선이 크게 차이 나지 않았으나, 평면필터는 같은 차압에서 유량이 2-3배 이상 낮았다. 1:3 까지 절곡하여도 절곡 효과가 충분히 나타나는 것으로 판단되었다.

1:6 절곡필터와 1:3 절곡필터는 처음에 차압-유량 그래프가 거의 비슷하였으나, 1:6 절곡필터의 표면적이 1:3 절곡필터의 2배인 만큼, 입자가 집진되었을 때 늘어나는 차압은 1:6 절곡필터가 1:3 절곡필터보다 낮았다. 하지만 필터 소모량을 고려하면 1:3절곡이 효율적으로 판단되었다.

같은 절곡 비율의 필터면 잡힌 무게에 따라 감소하는 유동 면속도는 일정하였다. 최대 30 g이 집진되면 절곡필터가 파과되는 것으로 파악되었다. 터널 입자 농도가 200 ㎍/㎥ 으로 높았을 때는 10시간 운행으로(A, B, C 필터) 필터가 파과되었으며, 터널 입자 농도가 100 ㎍/㎥ 으로 낮았을 때는 20 시간 운행하여도(G필터) 파과되지 않았다.

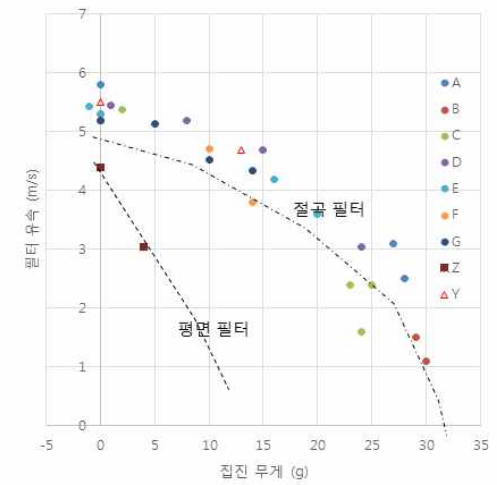


<전도성필터의 절곡비율 별 유량과 차압관계>

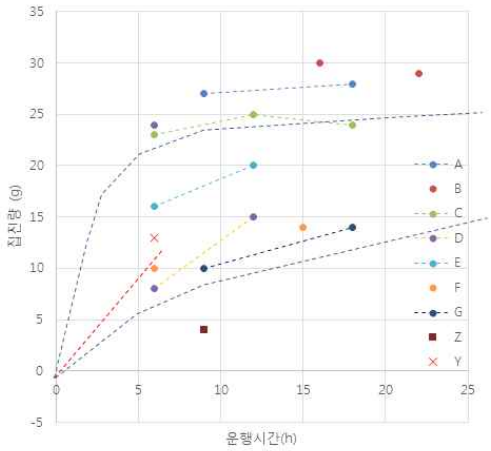


<집진 후의 전도성 필터 차압 변화>

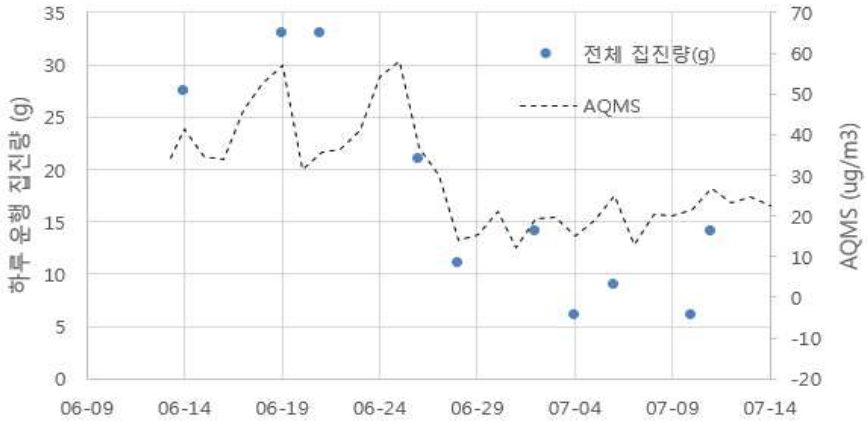
전기식 집진장치의 현차시험 시작과 종료시 구성요소별 무게 차이는 전기집진셀 10 g, 전기집진기 먼지통 < 1 g, 전도성필터 164 g으로 총 174 g의 입자가 집진되었다. 즉, 10일간 총 79시간 동안 2370 km 주행 중 총 집진량은 174 g이었다. 집진장치의 집진성능은 터널 환경(미세먼지 농도, 습도, 기상조건 등)에 따라 변동하므로, 강수가 있었거나 터널 미세먼지 실측 농도가 없었던 날을 제외하면, **2일간 12시간 동안 360 km 주행 (일평균 6시간 180 km 주행) 중 흡입면적 0.16 m^2인 전기식 집진장치 1대에 의한 집진량은 54 g이었고, 집진성능은 평균 0.150 g/km** (0.117~0.183 g/km 범위)이었다. 계획서상 집진장치의 흡입면적을 2 m^2으로 개발하고자 하였으나, 전동차 하부의 공간이 협소하고 차량한계를 초과할 수 없는 관계로 흡입면적이 0.16 m^2인 집진장치를 개발하였기에, 집진장치 2대를 각각 다른 호차에 장착하여 흡입면적을 0.32 m^2으로 증가시키는 경우 계획서상 터널 미세먼지 농도(400 ㎍/㎥) 조건으로 집진성능을 환산하면 평균 0.425 g/km (0.379~0.471 g/km 범위)가 된다. 이 환산 집진성능으로 25 km 터널을 하루 4회 왕복하면서 (하루 총 운행거리 200 km), 한 달 (25일) 집진하면, 0.425 g/km x 200 km/일 x 25 일/월 = 2125 g/월 = 2.13 kg/월이므로 **터널 미세먼지 농도가 400 ㎍/㎥일 때 흡입면적이 0.32 m^2인 전기식 집진장치를 사용하면 미세먼지 수거량 성과목표인 2 kg/월을 달성할 수 있다.**



<잡힌 입자 무게에 따른 필터 유속 변화>



<운행 시간에 따른 필터별 집진량>



<시간에 따른 집진장치 일 집진량 변화>

날짜	운행 거리 (km)	운행 시간 (h)	집진량 (g)	집진성능* (g/km)	환산 집진성능** (g/km)
2018-06-14	270	9	27	0.102	-
2018-06-19	480	16	33	0.069	-
2018-06-21	180	6	33	0.183	0.471
2018-06-26	180	6	21	0.117	0.379
평균				0.150	0.425
2018-06-28	180	6	11	0.061	-
2018-07-02	180	6	14	0.078	-
2018-07-04	270	9	6	0.022	-
2018-07-06	180	6	9	0.050	-
2018-07-10	270	9	6	0.022	-
2018-07-11	180	6	14	0.078	-
합계	**2,370**	**79**	**174**		
일평균	**237**	**8**	**17.4**		

*** 1개 편성에 2개 집진장치 부착 및 터널 미세먼지 농도 400 $\mu g/m^3$ 조건으로 환산. 터널 미세먼지 농도 데이터가 없는 6월 14일부터 19일까지 데이터와 장마로 인해 많은 강수가 있었던 6월 27일부터 7월 2일까지 데이터는 분석에서 제외함.**

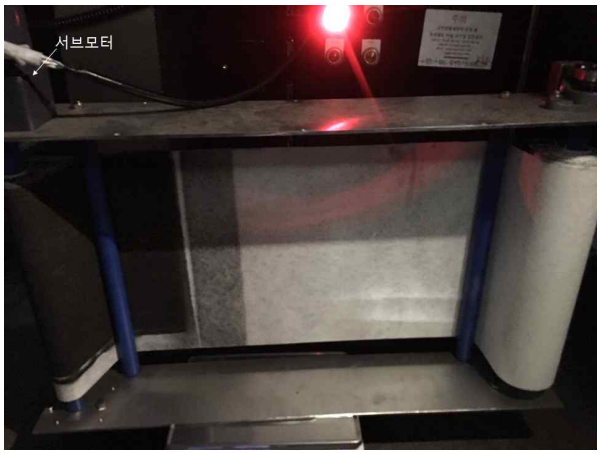
라) 사이즈-업 전기식 집진장치 및 자동롤필터 시험

집진장치의 흡입유량을 증가시키기 위해 흡입구의 폭을 기존 40cm에서 60cm로 1.5배 증가시켜서 흡입면적을 0.16 m^2에서 0.24 m^2로 1.5배 증가시키고, 흡입유량이 약 10% 많은 시로코팬 모델로 교체한 사이즈-업 모델을 개발하였다. 또한, 전도성필터를 적용한 전기식 집진장치의 경우 집진량이 증가함에 따른 차압의 증가로 흡입유량이 감소하므로, 전도성필터를 자동으로 교체해주는 자동롤필터를 개발하여 사이즈-업 전기식 집진장치에 장착하였다. 사이즈-업 전기식 집진장치 및 자동롤필터의 작동성 테스트를 광주도시철도 1호선 쌍촌역 플랫폼 외곽 터널에서 2019년 5월 8일부터 5월 30일까지 22일간 수행하였다. 자동롤필터가 적용된 사이즈-업 집진장치를 직접 열차에 부착하여 실험하기 위해서는 개정된 철도안전법에 따라 개조신고를 다시 신청하여야 하지만, 인증시험, 개조신고 사전협의 등의 과정을 과제기간내에 완료하기 어려웠으므로, 개조신고가 필요 없는 터널 고정 위치에서의 실험으로 대체하였다. 플랫폼 외곽 터널에 집진장치를 설치하고 48시간 연속 작동시켜서 자동롤필터가 주기적으로 자동으로 교체되면서 집진하는지 시험하였다.

시험 결과 자동롤필터의 차압결과를 통해서 필터여재 교체가 자동으로 잘 이루어지고 있음을 확인하였다. 개발한 자동롤필터는 필터여재의 총 길이가 18 m 이상이고, 하루 6시간 집진, 1일 1회 자동 필터 교체하는 조건에서 30일 동안 연속 사용할 수 있다. 따라서 전도성필터를 자동롤필터의 필터여재로 사용한다면, **전기식 집진장치의 세정주기는 1개월이 가능**함을 확인하였다.



<사이즈-업 집진장치/롤필터 실험 모습>



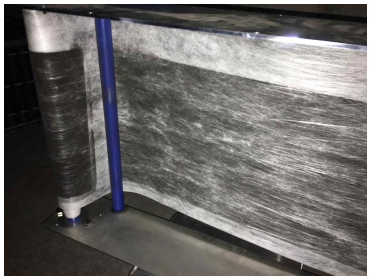
<롤필터 서브모터로 필터가 감기는 모습>



E11등급(95%효율)



85%효율



937필터(50%효율)



<롤필터의 차압 변화-6시간 마다 교체>

마) 서울교통공사 5호선 2차 현차 평가

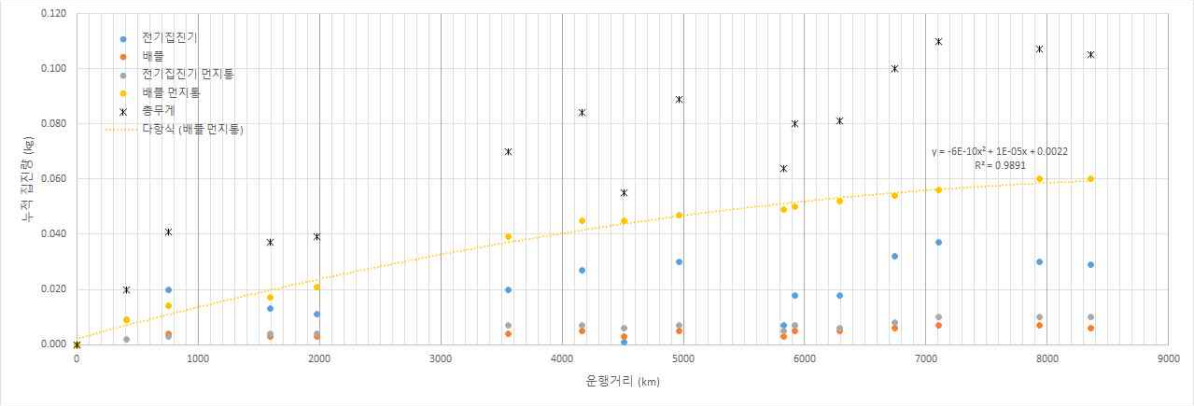
동력 하이브리드 집진장치는 개정된 철도안전법에 따라 국토교통부로부터 개조신고를 승인 받았으며, 이를 현차시험 하기 위해서 서울교통공사 5호선에 2019년 4월 25일부터 5월 20일 까지 25일간 현차 평가를 진행하였다. 전동차가 일정 주기로 운행을 마치고 검사고로 입고한 후 집진장치의 전기집진셀과 배플을 분리하여 집진된 먼지의 무게를 측정하였다. 270시간 운행하며, 8255 km 주행하였다.

현차시험 시작과 종료시 구성요소별 무게 차이는 전기집진셀 37 g, 전기집진기 먼지통 10 g, 배플 표면 7 g, 배플 먼지통 56 g으로 총 110 g의 입자가 집진되었다. 점검시마다 전기집진셀을 분리하고 장착하는 과정에서 발생한 자체 무게 감소 약 18 g과 외함 덮개에 집진된 14 g을 포함하면 총 집진량은 142 g이었다. 이 값과 매 점검시 집진량을 모두 더한 값과의 차이(29 g)를 집진되었던 입자가 집진장치를 빠져나간 손실량이라고 간주하였다. 요약하면, **23일간 258시간 8255 km 주행 (일평균 11시간 358 km 주행) 중 흡입면적 0.16 m^2인 동력 하이브리드 집진장치 1대에 의한 집진량은 142 g이었다.**

현차 시험 당시 안전상의 이유로 터널 미세먼지 농도를 측정하지 못하여서 농도 조건을 알 수 없었으나, 미세먼지 객실유입 차단장치 성능평가를 위해 전동차 상부 HVAC 유입경로에 설치한 OPC로 측정한 미세먼지 농도(92-275 $\mu g/m^3$)를 시험 당시 터널 농도와 유사하다고 간주한다면, 터널 미세먼지 농도가 400 $\mu g/m^3$ 조건에서 1편성 2대의 동력 하이브리드 집진장치를 설치하여(총 흡입면적 $0.16\times2=0.32$ m^2)로 25일간 160시간 5000 km 주행시 집진량은 약 $142\times(400/200)\times(0.32/0.16) = 568$ g으로 추정된다.

배플의 집진성능은 4000 km 주행까지 약 0.026 g/km이다가 그 이후부터 약 0.005 g/km로 낮아졌는데, 이는 배플로 집진되는 약 7 μm 이상 크기 입자의 터널 농도가 배플에 의해 저감되었기 때문으로 추정된다.

배플 먼지통에 집진된 입자의 무게분율을 측정한 결과, 집진한 입자 중 25 μm 이하 입자의 비율이 38%로 기존 봉형 자석봉에 채취된 입자 중 25 μm 이하 입자 비율(10%)보다 약 4배 높았으므로, 동력 하이브리드 집진장치의 미세먼지 저감에 기존 봉형 자석보다 더 효과적이라고 판단된다. 전기집진셀에 채취된 입자는 세정실험을 위해서 무게 분율을 측정하지 못하였지만, 풍동실험 및 시뮬레이션 결과에 따르면 작은 입자에 대한 집진효율의 경우 배플보다 전기집진기에서 높으므로, 전기집진기에 채취된 입자까지 함께 고려한다면 25 μm 이하 입자 비율이 더 증가할 것으로 추정된다.



<운행거리에 따른 집진장치 일 집진량 변화>

날짜	운행 거리 (km)	운행 시간 (h)	집진량 (g)	집진성능 (g/km)	터널 농도 추정값* ($\mu g/m^3$)	기준조건 환산 집진성능** (g/km)
2019-04-26	407	14	20	0.049		
2019-04-27	339	11	21	0.062		
2019-04-29	816	27				
2019-05-01	385	3	2	0.021		
2019-05-04	1,566	52	31	0.020	275	0.058
2019-05-08	589	14	13	0.022	92	0.191
2019-05-09	339	11				
2019-05-10	453	15	34	0.075	180	0.334
2019-05-12	854	28				
2019-05-13	95	3	18	0.189		
2019-05-14	362	12	3	0.008		
2019-05-15	453	15	19	0.042	265	0.126
2019-05-16	362	12	10	0.028		
2019-05-17	311	10				
2019-05-18	508	17				
2019-05-19	181	6				
2019-05-20	235	8				
추정 손실량			-29			
합계	8,255	258	142			
일평균	358	11	7	0.056	203	0.226

*** 미세먼지 객실유입 차단장치 평가를 위해 전동차 상부 HVAC 유입경로에 설치된 OPC로 측정한 미세먼지 농도를 터널 농도로 간주함**

**** 1개 편성에 2개 집진장치 부착 및 터널 미세먼지 농도(400 $\mu g/m^3$) 조건으로 환산**



<기존 봉형 자석필터와 배플 관성집진장치의 집진 입자 무게 분율>



<배플 먼지통에 집진된 입자>





<2단 전기집진기에 집진된 입자들 (왼쪽: 하전부, 오른쪽: 집진부)>





<전기집진기 먼지통 (왼쪽: 격벽설치 전, 오른쪽: 격벽 설치 후)>

3)집진판 카트리지 세정장치 개발

(가) 세정장치 기본사양 및 기본설계

가) 세정장치 기본 사양 및 작동법

① 세정장치 기본 사양

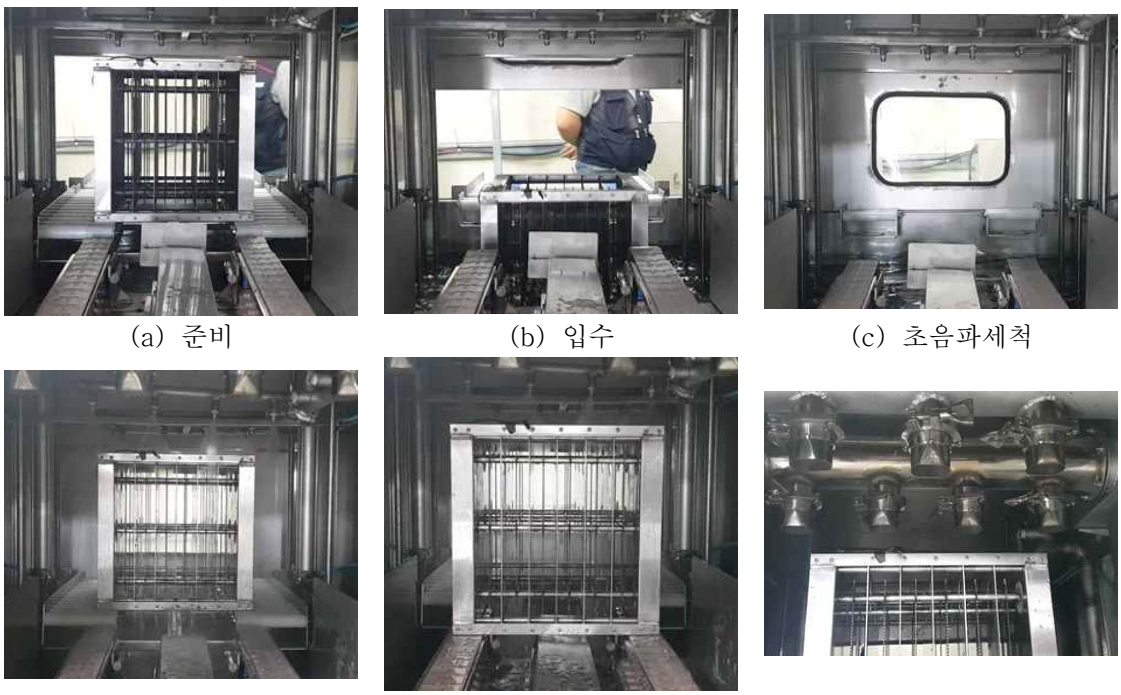


<전기집진셀 세정장치 1차 시제품>

품 명	SIZE	무 게	소비전력
집진판 세정장치	760*1880*1768	약 200 Kg	3780 W

② 세정장치 작동 순서

– 세척시간 단축을 위해서 작동 순서를 최소화



(a) 준비 (b) 입수 (c) 초음파세척

(d) 출수 (e) 건조부로 이동 (f) 건조

<세정장치의 세정 순서>

(나) 세정장치 성능평가 실험 및 결과

가) 테스트 입자 세정 실험

세정 전후에 전기집진기의 성능이 회복되는지 집진실험을 통해 확인하였다. 세정 전후에 집진효율, 소비전류를 비교하였다. 세정 실험에 사용된 입자는 Arizona dust이며, 실크기 풍동실험시 오염된 전기집진기를 세정하였다. 세정 시험 결과, 30초만 세정하였을 경우, 하전부의 집진 입자가 잘 씻기지 않는 것이 관찰되었다. 집진부도 집진 입자가 얇게 벗겨지지 않고 있었다. 60초를 세정하면 육안상 집진된 입자는 대부분 탈리되었다.



(a) 세정 전 (b) 30초 세정 (c) 60초 세정

<세정 전후 전기집진기>

나) 1차 지하철 입자 세정 실험

실제 지하철 입자가 집진된 전기집진기의 세정실험을 위해서, 서울교통공사 5호선 1차 현차 평가에서 사용된 2단 전기집진기의 세정을 시험하였다. 세정시간은 1분, 건조시간은 2분 이었다. 세정 시험 결과, 지하철 입자로도 부위별 세정율이 98% 이상으로 나타났으므로, 성과 목표인 90% 이상을 충분히 달성할 수 있음을 보여주었다. 단, 목표치를 초과하는 세정시간, 건조시간을 가졌으므로 이를 개선하여 2차 세정장치 시제품을 제작하였다.

	세정 전 무게	세정 후 무게	세정 효율
집진부-집진판	14.15 g	0.40 g	97%
집진부-전극판	7.51 g	0 g	100%
하전부	2.66 g	0.3 g	89%
합계	24.32 g	0.43 g	98%

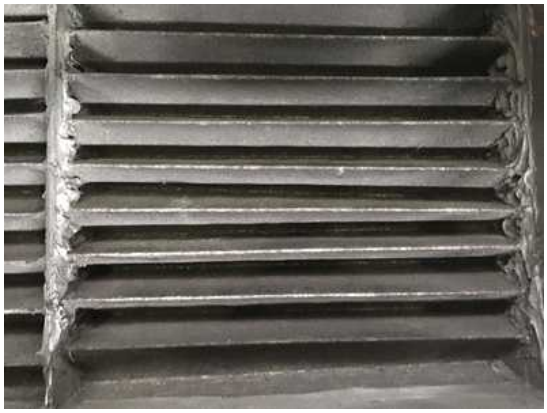
다) 2차 지하철 입자 세정 실험(1차 개선형 세정장치)

1차 지하철 입자 세정 실험의 단점을 극복하기 위해, 1차 개선형 세정장치를 제작하였다. 세척조 하부에 부착된 초음파로 인한 세척조 불순물 부유로 초음파를 측면으로 이동 부착하되 1개의 초음파에서 2개의 초음파로 초음파 세척 극대화하였다. 세척조의 온도를 상승시켜 집진셀의 세척 효율 상승시켰다. 세척조의 내부물을 필터링 할 수 있는 별도의 필터링 라인 구성 하였다.

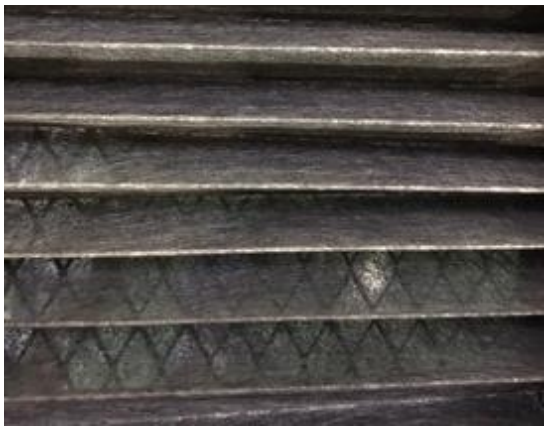
2차 세정장치 시제품 세정실험을 위해서, 광주교통공사 2차 현차 평가에서 사용된 1단 전기집진기의 세정을 시험하였다. 고온수조 기능을 설계하였으나, 실험 당일에는 전기적 문제로 가동시키지 못하였다.

2차 지하철 입자 세정 실험결과, 지하철 먼지에 포함된 유분으로 인해 테스트입자 만큼 제거 효율이 나오지 않았다. 세정 후 집진 성능이 100% 복원에는 문제가 없었다. 전도성필터 세정결과, 세정효율이 90% 이상으로 나타나서 성과 목표를 만족하였다.

	세정 전 집진 무게	세정 후 집진 무게	세정효율
전도성필터 A	24 g	2 g	92%
전도성필터 B	24 g	1 g	96%
전도성필터 C	20 g	0 g	99%



<전도성필터 세정 전>



<전도성필터 세정 후>

라) 3차 지하철 입자 세정 실험(2차 개선형 세정장치)

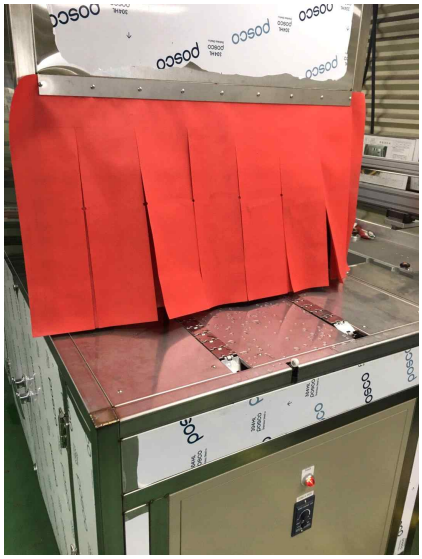
1차 개선형 세정장치의 문제점을 보완하여, 2차 개선형 세정장치를 제작하였다. 2차 개선형 세정장치는 수조 온도와 건조 온도를 각각 60°C, 80°C 로 상승하도록 하였다. 전 과정이 자동으로 이루어지도록 구성되었다. 2차 개선형 세정장치 시제품 세정실험을 위해서, 서울교통공사 5호선 2차 현차 평가에서 사용된 2단 전기집진기의 세정을 시험하였다.

입수 후 **20초간 초음파로 세정**하였으며, 목표 세정 시간 내에 세정 후에 **세정 효율이 93%**로 성과목표를 초과달성하여 나타났으므로 성과목표를 만족하였다. 세정시간 20초(초음파 작동시간) 및 건조시간 30초 후에 집진장치에 넣어 물기가 충분히 말라서 이전상태와 마찬가지로 스파크 없이 작동이 이루어졌다. **30초의 80°C 고온 건조** 후 집진장치에 삽입 후 스파크 없이 작동이 이루어졌으므로 세정장치 **건조시간 성과목표를 달성**하였다.

	집진 전	집진 후, 세정 전	세정 후	세정효율
집진 무게 (g)	0	44	3	93%



<2차 개선형 세정장치 전체 모습>



<건조부 출구>

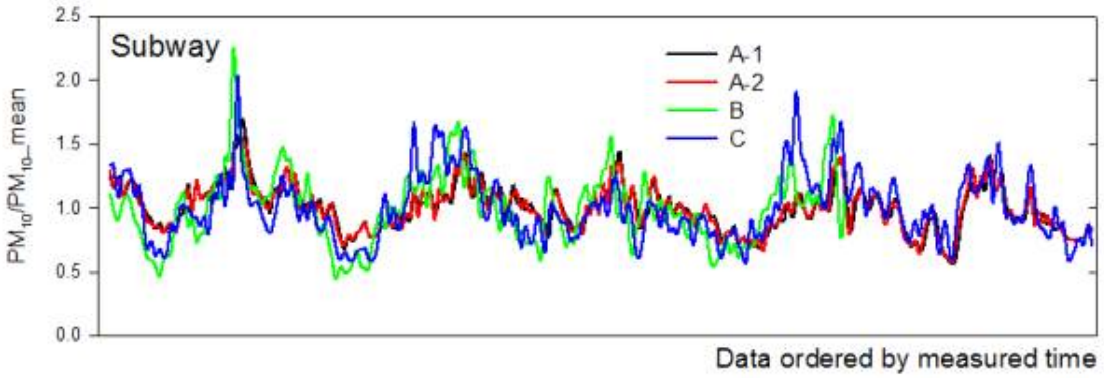
4)객실유입 미세먼지 차단장치 개발

(가) 터널 미세먼지의 객실 유입경로 파악

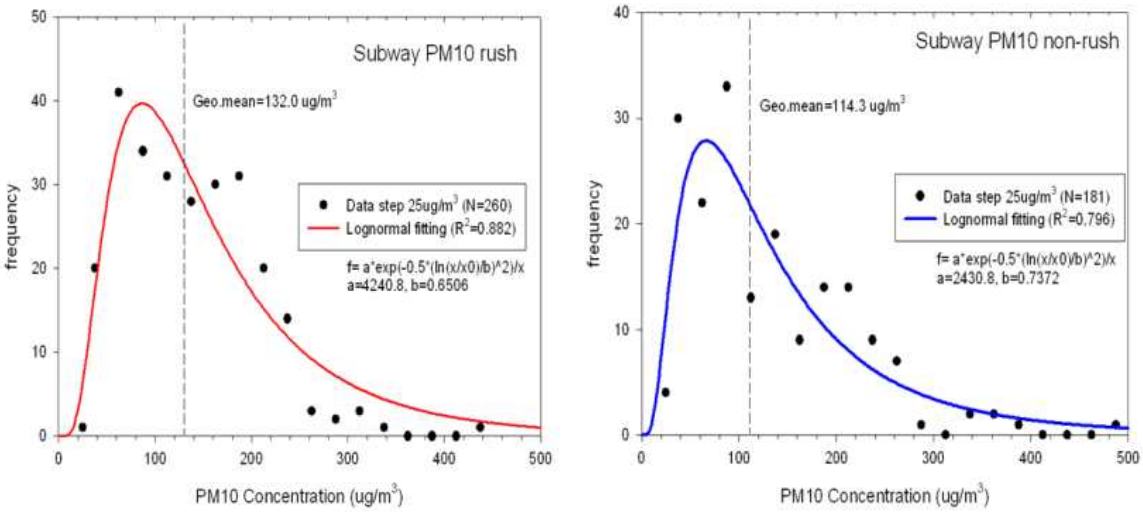
가)지하철 객실 미세먼지 측정 및 결과분석

①지하철 객실 미세먼지 분포특성 측정결과

도시철도 객실 내 미세먼지(PM10)를 측정을 하기 위하여 사당역(2호선)을 기점으로 신도림 방면(2호선)으로 향하는 차량에 대하여 객차 중앙부 좌석 상부에 위치한 선반에 광산란장비 4대를 설치하고, 평일 12:00부터 16:00까지 4시간 연속 측정하였다. 측정당시 서울시 외기 PM10 평균농도는 39㎍/㎥ 로, 지하철 객실내 미세먼지 농도가 외기보다 상대적으로 2배 이상 높게 측정되었다. 장비간 편차가 발생하나, 객실내 미세먼지의 변화양상은 특정패턴을 가지고 있음을 확인하였다. 도시철도 객실 미세먼지(PM10) 농도분포는 대수정규분포(lognormal distribution)을 보였다. 기하평균값을 기준으로 최대 400㎍/㎥ 이 넘는 높은 농도가 꼬리처럼 길게 우측으로 향하고 있는 것으로 나타났으며, 분포특성은 혼잡시간대와 비혼잡시간대 모두 동일하게 나타났다.



<도시철도 차량내 미세먼지 농도 변화>



(a) 혼잡시 (b) 비혼잡시

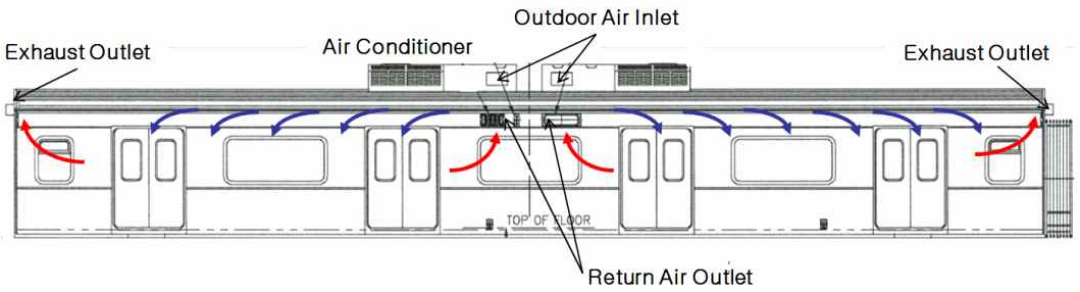
<혼잡시와 비혼잡시 지하철 객실내 PM10 분포 특성>

도시철도 운행 구간 중 혼잡시간에 유동인구가 많고, 환승구간이 많은 역사를 운행하는 경부선(광운대-신창), 분당선(왕십리-수원), 경인선(인천-소요산)을 선정 한 후 미세먼지를 조사한 결과, 3개 노선을 운행하는 도시철도 미세먼지(PM10) 평균값은 68 ㎛/㎥이며, 외기 농도는 41

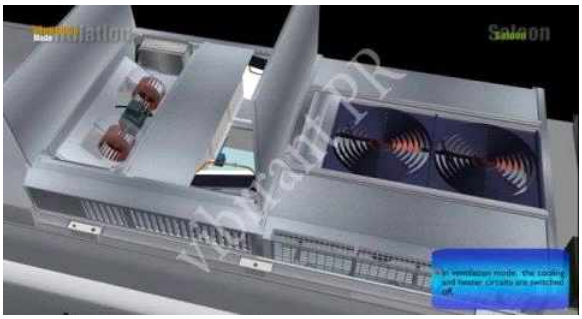
㎛/㎥였다. 혼잡시간대 상행선과 하행선을 운행하는 도시철도 내에서 미세먼지를 측정한 결과, 경인선(64 ㎛/㎥) < 분당선(67 ㎛/㎥) < 경부선(73 ㎛/㎥) 순으로 높은 농도를 보이고 있으나, Indoor/Outdoor를 분석하면 경부선(1.75) < 경인선(2.46) < 분당선 (3.69)순으로 나타났다. 출근시간(07:27-09:58)대에 인천역에서 소요산 방향으로 운행하는 미세먼지(PM10) 농도 범위는 20.4-151.7 ㎍/㎥이며, 도화역에서 최고값(151.7 ㎍/㎥)이 나타났다. 승객의 증가추세를 보여주는 부평-시청 구간에서는 미세먼지 농도가 패턴의 변화 없이 낮은 농도를 나타내고 있으며, 미세먼지가 높게 나타나는 종각-회기구간은 탑승인원이 감소하는 것으로 나타남에 따라 실시간 미세먼지농도와 객차 내 탑승인원은 크게 상관관계가 없는 것으로 판단었다.

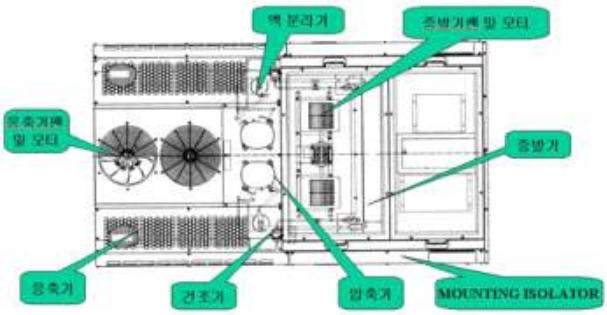
나) 지하철 객실차량 급배기 환기구조 분석

철도차량 공조 설비는 기본적으로 운행열차의 객차별로 이루어지고 있으며, 운전실에서 전체를 제어하거나 객차별로 제어하는 방식을 취하고 있다. 일반적으로 철도차량용 공조장치는 냉방장치의 설치위치에 따라 천정형(ceiling-mounted type), 상판거치형(floor-mounted type), 하부형(under floor-mounted)으로 크게 구분된다. 천정형의 경우 냉방장치(에어컨)의 개수와 천정 위치에 따라 분산식(distributed type), 반집중식, 집중식으로 구분될 수 있다. 도시철도 차량의 경우 2대의 냉방장치가 지붕위에 설치되어 있고 천정 내에 설치된 2열의 에어덕트를 이용해 객실에 균등하게 공기를 분배하는 방식을 취하고 있으며, 객실 중앙부 리턴그릴로 순환공기를 유입하여 재공급한다. 객실 상부에 위치한 배기구(exhaust outlet)의 역할은 냉방시 유입된 외기를 자연 배기하는 것으로, 차량내가 양압으로 유지된다는 조건에서 설계되었다(서울메트로 2호선 신조차량 기준). 객차 공조의 목적은 냉방과 환기에 있으며 차량의 운행속도 및 운행구간의 특성(터널)에 따라 제어특성이 달라지며, 철도차량 공기조화 시스템은 신선한 공기를 공급하는 환기장치와 실내를 쾌적한 온도로 유지하는 난방. 냉방장치, 온도조절기 등의 부속장치, 각부에 난방, 냉방공기를 보내는 덕트 등으로 구성되었다.



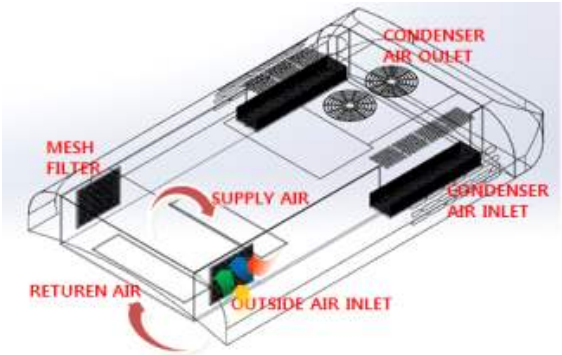
<도시철도 차량의 일반적인 공조 환기 방식>

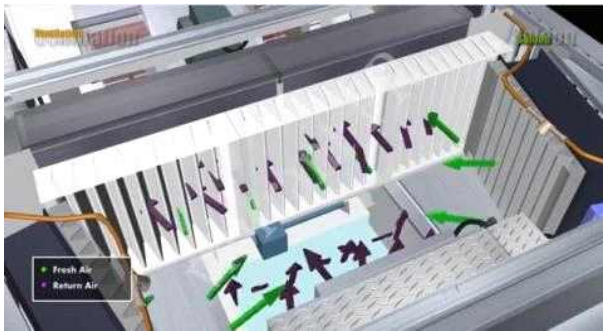
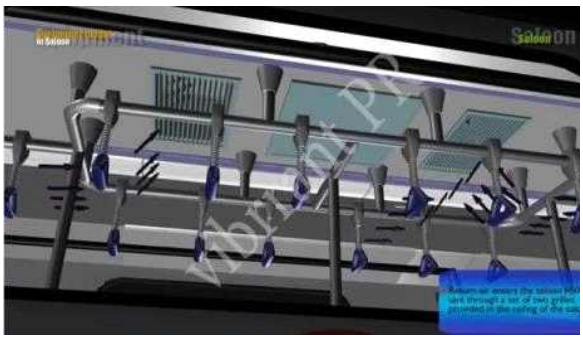






<HVAC 구조 파악>



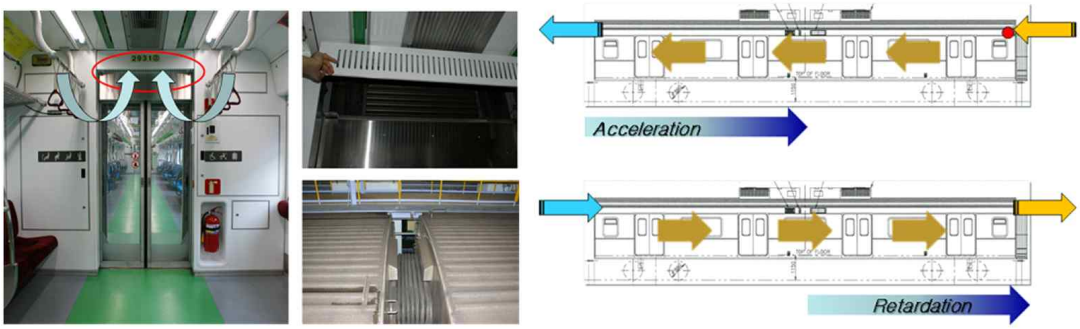
<HVAC 내부구조 및 객실 연계부분>

다) 터널 미세먼지의 객실유입경로 검토

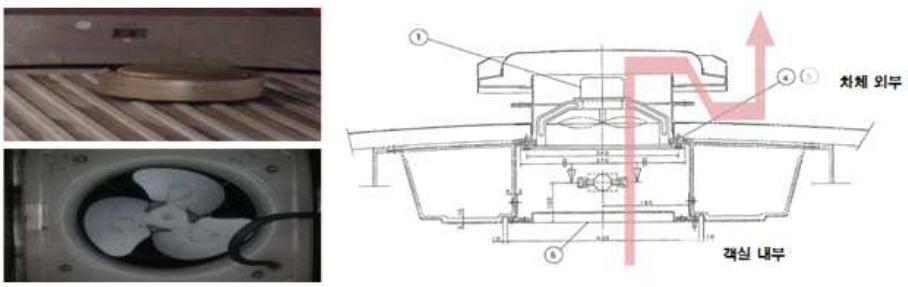
① 지하철 객실 환기목적의 개방구로부터의 유입

지하철 차량은 환기를 위하여 외부공기를 유입할 수 있는 급기구와 차량 실내공기를 배출할 수 있는 배기구가 설치되어 있다. 차량의 종류 및 제작년도에 따라 다양한 급배기 방식이 적용되고

있다(예: 강제팬 이용 배기, 자연배기, HVAC 송풍기 활용 급기, 개별급기, 댐퍼 설치 유무 등). 자연환기 방식의 배기구 설치는 차량의 출발과 정차 등 차량 가속도 변화에 따라 실내공기의 관성효과로 인해 가속시 차량뒷편으로 감속시 차량앞편으로 공기의 이동이 발생함. 따라서, 자연환기 방식의 배기구 설치 위치에 따라 가감속시 터널외부공기가 역류하여 유입될 가능성이 있다(도시철도 공기질 개선연구단 1단계 연구결과 참조). 송풍팬을 설치한 강제환기구의 경우에는 송풍팬 가동시 객실내부공기를 외부로 배출할 수 있지만, 송풍팬이 가동되지 않는 경우, 오히려 외부의 공기가 객실로 유입될 가능성이 있다(역류방지 댐퍼 일부차량 적용). HVAV 급기구를 통한 미세먼지의 유입경로는 아래 그림과 같다. 차량상부에 설치되어 있는 HVAC 유닛에는 외기도입을 위한 급기구가 위치해 있으며, 빗물 등이 유입되지 않도록 커버가 설치되어 있다. 따라서, 외부공기는 유닛의 하부 틈으로 유입되어 급기구 철망메쉬필터를 통해 HVAC으로 유입된다. 사진에는 철망메쉬필터의 낮은 입자포집효율을 개선하기 위하여 부직포필터가 추가적으로 설치되어 운영되고 있은 모습이다(신분당선 차량 적용).



<객실 상부에 설치되어 있는 자연배기구의 모습>



<지하철 객실에 설치되어 있는 강제 환기구>

② 차량 기밀도에 따른 유입

H지하철 차량의 기밀도가 높지 않기 때문에 출입문의 틈과 객실간 연결통로(갱웨이)의 틈을 통해 터널 공기가 유입되면서 먼지도 함께 유입될 수 있다(프레임과 출입문 3.75mm유격 유지).

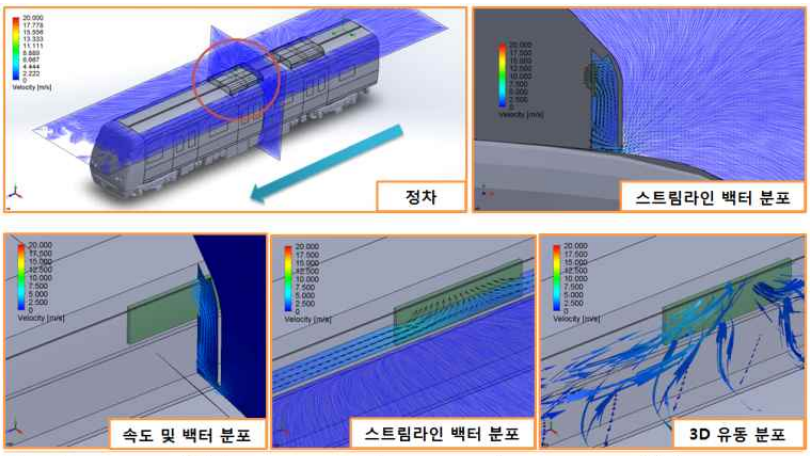
③ 출입문 개방시 유입

지하역사 승강장에서 승객의 승하차를 위해 차량 출입문이 개방되며(평균 20초 개방), 이때 승강장, 터널, 차량내 공기가 일정부분 혼합되면서 상대적으로 오염된 터널 공기중 미세먼지가 승강장과 차량 객실에 유입될 수 있다. 기존 연구결과에서, 객실내 이산화탄소 농도변화를 기준으로 분석한 결과 지하철 출입문 개방을 통해 외부공기가 객실공기의 약 35%를 환기시킬 수 있다고 보고하였다. 또한, 차량 출입문 개방과 PSD개방으로 인해 터널에서 발생한 7.5~10um 입경의 미

세먼지가 승강장으로 급격히 유입되는 것으로 나타나고 있음. 따라서, 차량 정치시 출입문 개방으로 인해 객실로 터널먼지가 유입될 가능성이 높다. 승강장 PSD 개방으로 발생되는 이러한 조대입자 영역의 미세먼지를 차단하기 위한 기술로 터널공기 유입방지장치 특허가 등록(철도연, 10-1092903)되어 있으며, 차량내 유입차단을 위하여 본 과제의 제안기술과 병행하여 운영할 경우 터널부유 미세먼지 차단에 효과적일 것으로 판단되었다.

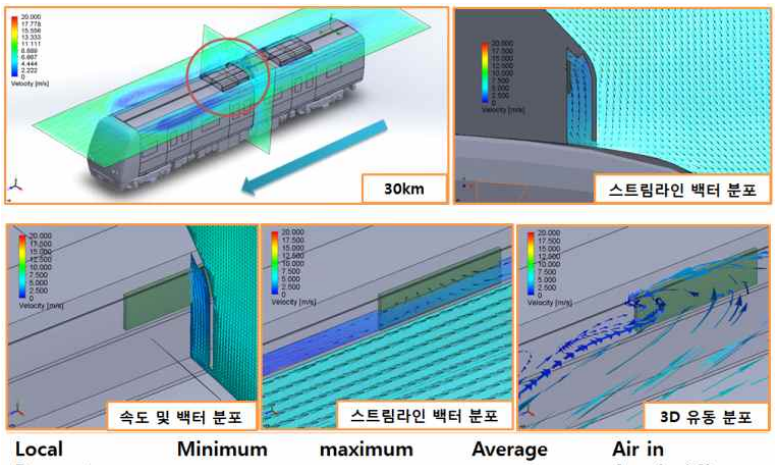
④ HVAC시스템 급기구 인근 유동해석 - 경계조건 분석

HVAC시스템이 가동할 때, 급기구 인근의 유동특성을 차량 속도에 따라 분석하였다. 급기구를 통해 실내로 유입되는 실외공기의 유량은 5m^3/min(CMM) 수준이며, 차량은 정차중(Case A), 30km/h 주행(Case B), 70km/h 주행(Case C)로 구분하여 해석하였다. 유동해석 프로그램은 Solid Work사의 Flow Simulation 이다.

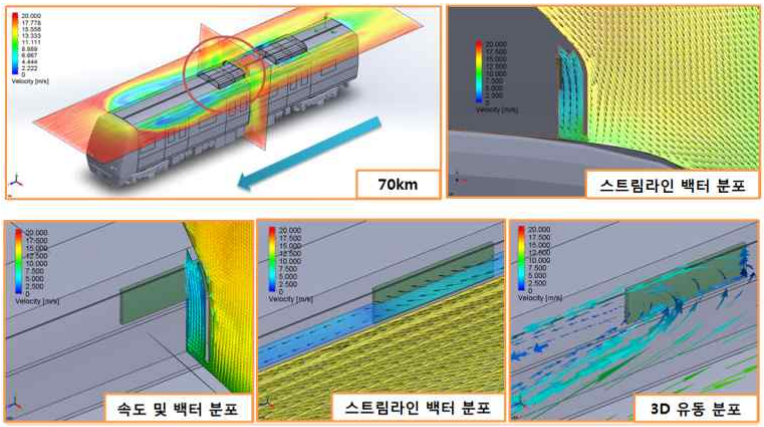


Local Parameter	Minimum	maximum	Average	Air in Area(m^2)
Velocity(m/s)	1.91	4.21	3.07	0.0332

(a) Case A: 정차중인 차량



Local Parameter	Minimum	maximum	Average	Air in Area(m^2)
Velocity(m/s)	0.65	4.62	3.46	0.0332



Local Parameter	Minimum	maximum	Average	Air in Area(m^2)
Velocity(m/s)	1.06	5.65	4.10	0.0332

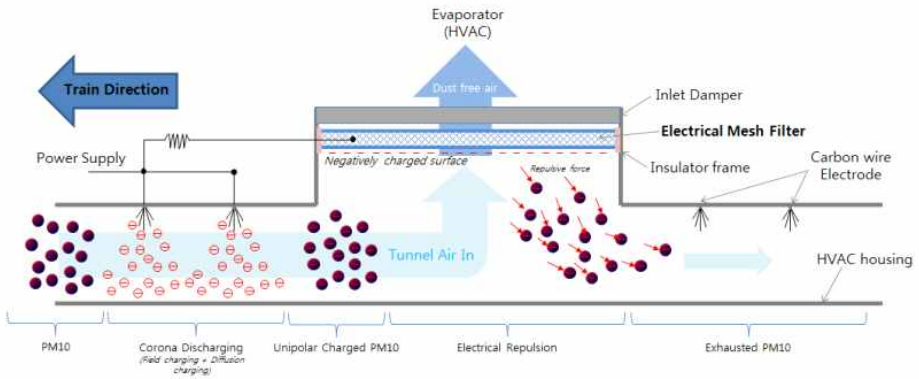
<지하철 차량 운행속도(위 30 km/h, 아래 70 km/h)에 따른 HVAC급기구 인근의 유동분포 특성>

(나) 미세먼지 객실유입 차단장치 개념설계

가) 미세먼지 객실유입 차단장치 개요

① HVAC시스템의 급기구 차단기술

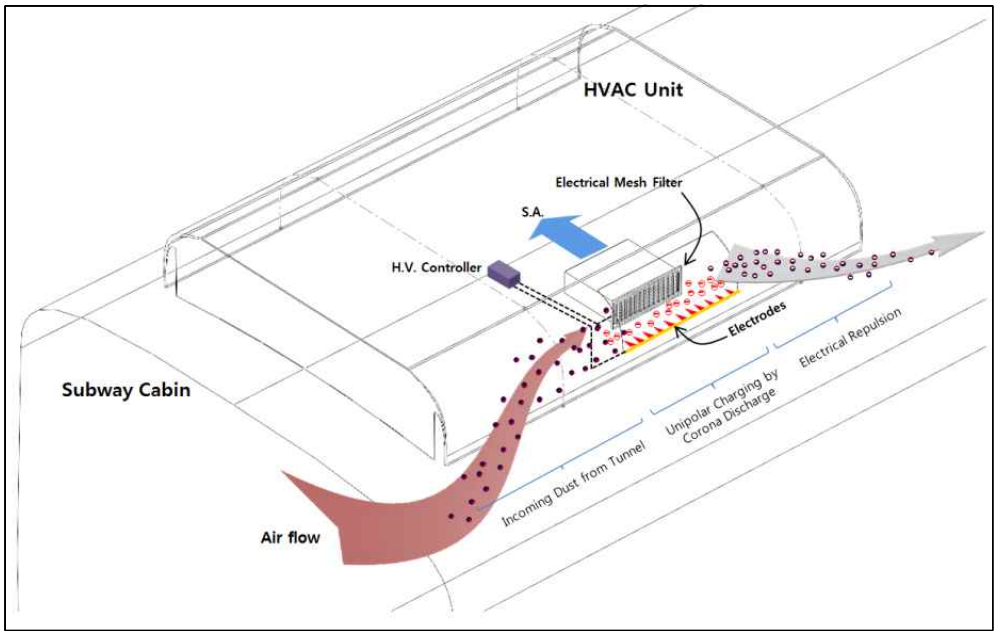
객실환기를 위해 터널공기가 HVAC시스템 급기구를 통해 유입되고 있다. 유입되는 공기중 먼지와 이물질을 제거하기 위하여 철망메쉬필터가 적용되고 있다. 본 제안기술에서는 유입되는 먼지의 전기적 반발력을 인가하여, 철망메쉬필터를 통과하는 먼지를 저감시키고자 하였다. 이를 위해 먼지의 전기적 하전력을 인가하는 기술(단극이온발생 및 입자하전)과 철망메쉬필터에 동일 극성의 저전압을 인가함으로써 먼지와 필터의 반발력을 일으키는 기술이다.



<터널부유 미세먼지 객실유입 차단기술 개요>

나) 개념설계도 작성

HVAC 시스템 급기구 형상 및 미세먼지 유입경로의 파악과 HVAC 시스템의 전원 등을 검토하여, 장착가능한 구조의 터널부유 미세먼지 유입차단장치의 개념설계도 작성하였다. 객실로 공급되는 외기량(5m3/min)으로 인해, 유입구 인근의 유속은 최대 5.65m/s까지 도달할 수 있으며(차량 속도 70km 운행조건-수치해석 결과), 이때 유입 미세먼지의 하전효율을 90%까지 달성할 경우, 전기적메쉬필터(electrical mesh filter)의 포집효율을 포함한 전기적 반발효과는 약 80% 수준으로 예측되며, 따라서, 하전효율(90%)과 차단효율(80%)로 인한 미세먼지 차단효과는 약 72% 수준으로 달성 가능하였다.



<HVAC 급기구에 설치되는 터널부유먼지 유입차단 장치 개념설계도>

(다) 미세먼지 객실유입 차단장치 상세설계

가) 미세먼지 객실 유입차단장치 개별 구성요소 설계 및 제작

① 단극하전기

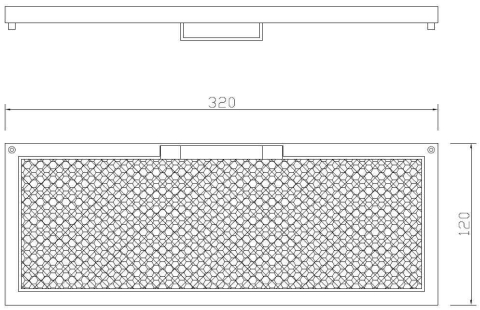
이온발생을 위한 하전 시 방전극의 재질, 형태에 따라 필요 전압이 상이하다. 실험을 통하여 Carbon Fiber의 Brush 형태의 방전극이 상대적으로낮은 2 kV이하에서 이온이 발생하기 시작하였다. 낮은 전압을 활용함으로써, 고전압 사용시 발생하는 오존을 줄일 수 있다. 이를 통하여 차량 내부의 승객들이 오존에 노출되는 것을 방지할 수 있다. 전극은 Brush 형태이며, 절곡면 내부에 전원케이블과 Carbon Fiber가 맞닿은 상태로 있다.



<Carbon Fiber Brush 방전극과 설계도면>

② 전기메쉬필터

외기도입필터는 HVAC 본체에 외기도입 부분에 브라켓을 달아 슬라이드 방식으로 조립되어 있다. 본체와의 절연을 위해서 필터 케이스 테두리를 따라 절연물로 감싸서 절연을 하고자 한다. 필터에 전원을 인가하기 위하여 전선의 터미널이 필터 케이스에 부착이 되도록 너트와 볼트로 체결하고자 한다. 기존의 위로 향했던 손잡이를 정면방향으로 옮김으로써, 필터 테두리에 절연물을 전체적으로 덮을 수 있도록 하였다.



<전기메쉬필터 설계도면>

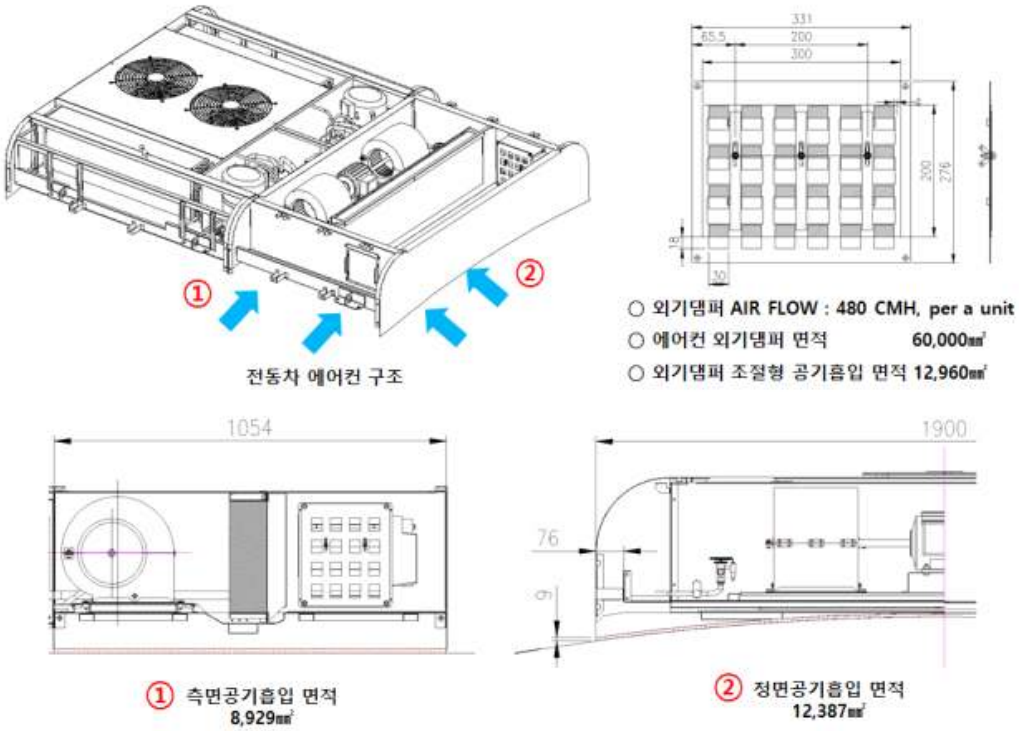
형명 / 사양규격	SMP 5500VD		비고
출 력 전 압	CH1:DC 0~5000V	CH2:DC0~500V	
출 력 전 류	CH1:DC 0~50mA	CH2:DC0~100mA	
정전압 안정도	0.005%+3mV이하	0.008%+ 100mV	
정전압 Ripple전압	3mV r.m.s 이하		
정전류 안정도	0.05%+10mV이하(입력과부하의모든변동에대하여)		
정전류 Ripple전류	최대전류동작치+10 / Z	mV r.m.s (Z:60Hz부하 임피던스)	
입력 전압	AC 220VOLT ±10V 50/60Hz 1Ø (단상)		
입력 최대 전력	300VA		최대부하
지시 계기 (F.S 2.5급)	DC 5000 Volt	DC 500 Volt	Digital
	DC 50.00 mA	DC 100.0 Ma	Digital

<전원제어부 스펙>

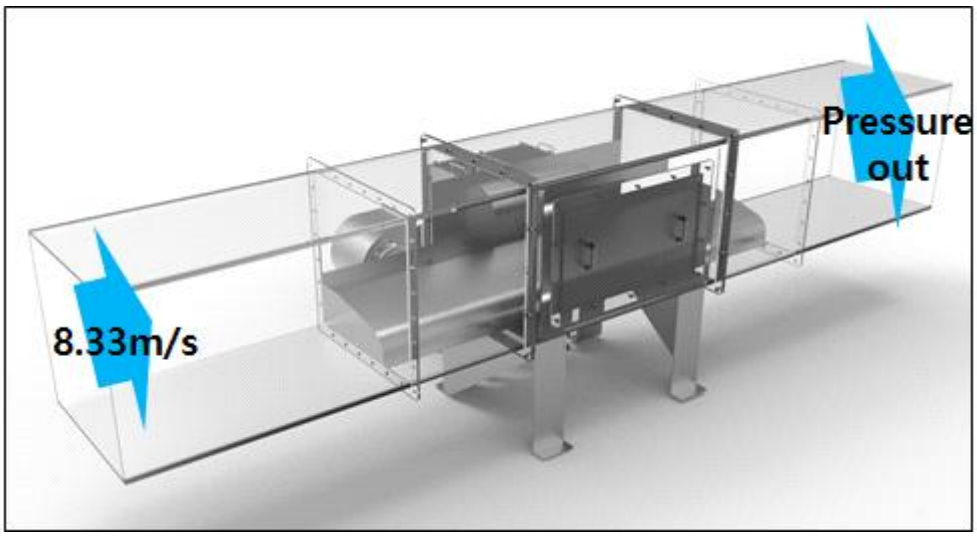
③ 전원제어부

본 전원공급장치는 고정도 고신뢰성의 안정화 전원이다. SMP 전원에 내장된 정전압 정전류 자동절환기능 (Automatic VC Limiter)은 각각 독립된 OP AMP를 가지며 고정도와 Smooth한 절환이 맞물려서 정전압 및 정전류 양용의 직류전원으로서 사용 할 수 있으며 접속기기와 전원 쌍방에 대한 보호가 되어있다. 전압은 상황에 따라 조절하기 위해서 가변할 수 있게 제작하였다. OVP 기능(설정값의 전압이 Over가되면 OVP Lamp(Yellow)가 켜지면서 출력전압이 자동으로 Down 된다. 이때 Power S/W를 Off한후 2-3 Sec 후에 다시 On한다), 본CP 기능 (전류 설정치가 Over 되면 C/C Lamp(Red)가 켜진다), 습도 연계 차단기능 (주변 습도가 90% 이상일 때 output off.)이 포함되었다.

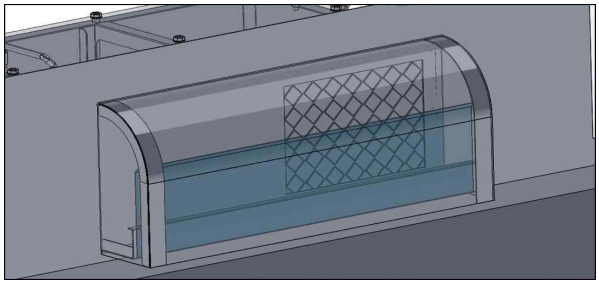
수치해석을 활용하여 유동유도부 형상별 미세먼지 차단효율과 차압을 확인, 유입먼지의 하전 효율 향상과 먼지 유입을 최소화로 하는 기류분포 형성을 파악하고 최대 미세먼지 차단 성능 확보하였다. HVAC 시스템의 외부공기 유입은 다음 그림에서 보는 것과 같이 HVAC 시스템 커버와 차량과의 Gab에 의해 유입되며, Gab의 높이는 차량모양이나 설치방법, HVAC 제조사마다 상이하지만, 외기댐퍼 이상으로 설계되는 것으로 조사되었다.



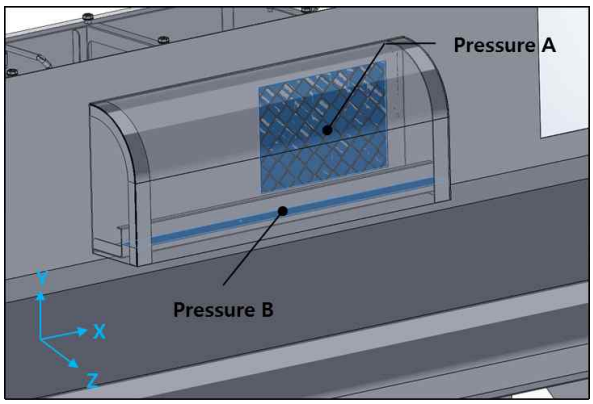
<전동차 HVAC Gab 사이즈 및 외기댐퍼 면적 검토>



< 해석을 수행한 HVAC 1/2 축소모형 시제품 >



<유동유도부 설치후 미세먼지 저감 및 방지모듈 해석 모델링>



<압력해석 위치>

Fan 사양에 따라 덕트 내부 면적(590 mm X 590 mm)에서 낼 수 있는 예상 최대 풍속은 8.95 m/s이며, 이에 따라 32.22km/h 까지 모사 할 수 있으므로 전동차의 운행속도는 30km로 가정 하였으며, 또한, 덕트 외부로의 유출되는 공기의 경계조건은 대기압 조건을 경계조건으로 하여 해석을 수행 하였다. 객실 내부로의 유입 모사는 실제 전동차 설계조건에 따라 8 CMM으로 결정하여 해석을 수행하였다.

해석 결과, HVAC 내부에서의 유동을 분석하기 위해 유속분포, 속도벡터, 스트림라인 분포 등을 분석하였으며, 각각의 슬라이스 파일은 F1은 HVAC 세로방향 중간위치, F4는 유입 댐퍼의 중간위치, F3는 HVAC 가로방향 중간위치, F2는 전면에 위치하여 데이터를 분석하였다. HVAC 내부로의 미세먼지 유동 및 흡입량을 분석하기 위해 그림에서 보는 것과 같이 유입시 통과되는 구역에 PM1, PM2.5, PM10을 각각 100개씩 발생하는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 각각의 파티클은 Fe 성분이라 가정하였다. 압력손실에 대한 수치해석은 다음과 같은 지점을 설정하여 수행하였다. 미세먼지 저감 및 방지장치 설치 시 HVAC 내부 압력변화를 분석하기 위해 입자가 유입되는 유입지점(Pressure B)와 유입 후 필터를 통과한 지점(Pressure A)의 압력 차이를 해석하였다.

<HVAC 1/2 축소모형 시제품에 설치된 공기유입 Fan 사양>

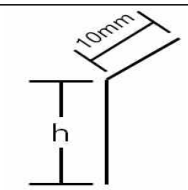
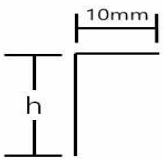
마력	20 HP
풍량	200 CMM
풍압	200 mmAQ
회전속도	2030 rpm

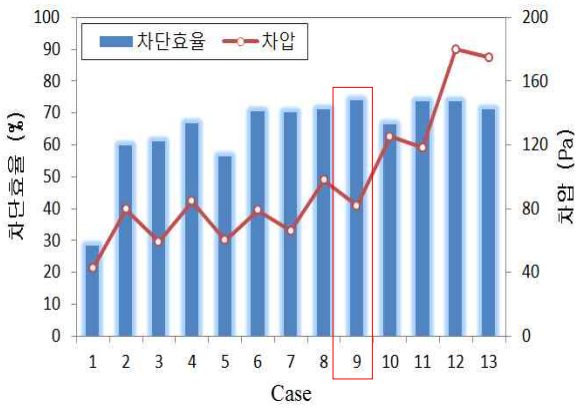
유동해석 대상은 향후 실험과의 비교분석을 위해 HVAC 1/2 축소모형 실험 장치를 대상으로 유동해석을 수행하였다. 속도, 속도벡터, 스트림라인, 파티클 유동, 파티클 유입수 등을 해석 대상으로 선정하고, 차량의 운행속도는 현재 설치된 실험장치의 조건에 맞추어 30km/h 운행조건으로 가정하였다. HVAC 외기덕트에 의한 풍량은 일반적인 설계 기준인 8 CMM으로 설정하여 해석을 수행하였다. 아래 표는 유동유도부(가이드베인) 높이와 블레이드 각도별 Case를 나타내었다. 유동유도부의 높이는 50 mm부터 시작하여 100 mm까지 설치할 수 있으며, 블레이드 각도는 90° 와 135° 로 설정하여 총 13가지 case로 해석을 수행하였다. 각 case별 해석 결과, 가이드베인 설치 시 56.3~74%의 차단효율을 나타내었으며 Case 9에서 74%로 가장 높은 차단효율을 나타내었다. 차압은 59~179.8 Pa를 나타내었으며 Case 3에서 59 Pa로 가장 낮은 차압을 나타내었다. 다음 그림에 각 case별 차압과 효율을 그래프로 나타내었다.

아래 그래프는 미세먼지 저감 및 방지 모듈을 설치하였을 때 유동해석 결과이며 아래 그림과 같

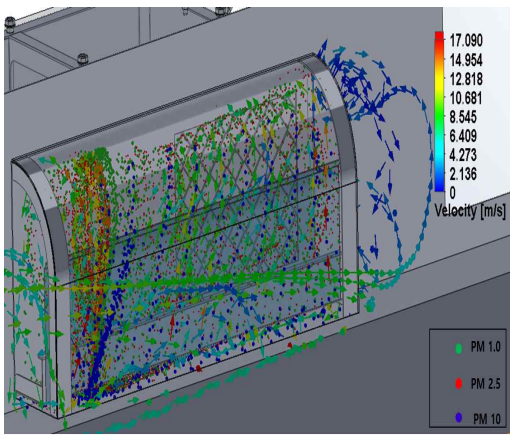
이 설치하였다. 유동해석은 유속, 유속벡터, 파티클 유입수(PM1, PM2.5, PM10) 등을 분석하였다. 입자 제거효율이 74%로 가장 높은 효율을 나타내었으며, 81.82 Pa로 이번 차년도 목표치인 120 Pa보다 낮게 해석되는 것을 확인하였다. 급기구를 통해 유입되는 먼지를 고성능의 필터를 적용하지 않으면서 유입을 저감시키는 방법은 급격한 공기의 흐름(기류)을 유발하여, 먼지의 관성(inertia)에 의해 기류를 그대로 따라가지 못하게 하는 방법이 적용될 수 있다. 이러한 방법은 기류의 흐름을 방해하는 높은 차압을 발생시킬 수 있기 때문에 압력을 감소시키면서 입자를 차단시키는 방안이 모색되어야 한다. 먼지의 관성효과(inertia effect)를 활용하여 유입을 차단하면서 동시에 차압을 최소화하도록 설계하였다. 위 그림은 먼지유입차단 가이드베인을 설치하여 외기 먼지의 직접적 유입 차단을 실행하는 개념도를 나타내고 있다. 가이드베인에 의하여 외기가 HVAC 커버의 곡면을 타고 유입되면서 기류방향의 변화가 구현되고, 이때 먼지는 기류를 쫓아가지 못하면서 벽면측에 부딪혀 포집되거나 바닥으로 하강하게 된다. 이러한 효과는 가이드베인의 치수(높이)에 따라 크게 영향을 받으며 최적의 가이드베인은 먼지 유입차단율이 높으면서, 차압은 낮게 생성되도록 하는 것이다.

<가이드베인 높이와 블레이드 각도별 분류>

h(mm)		
미설치	Case 1	
50	Case 2	Case 3
60	Case 4	Case 5
70	Case 6	Case 7
80	Case 8	Case 9
90	Case 10	Case 11
100	Case 12	Case 13



<case별 차단효율과 차압 비교 그래프>



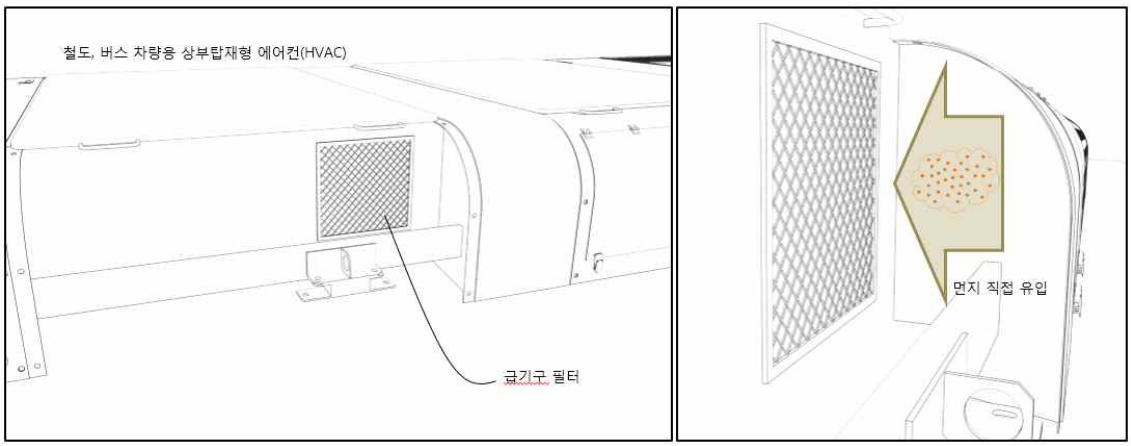
<3D 유속 분포 및 파티클 유동분포(case 9)>



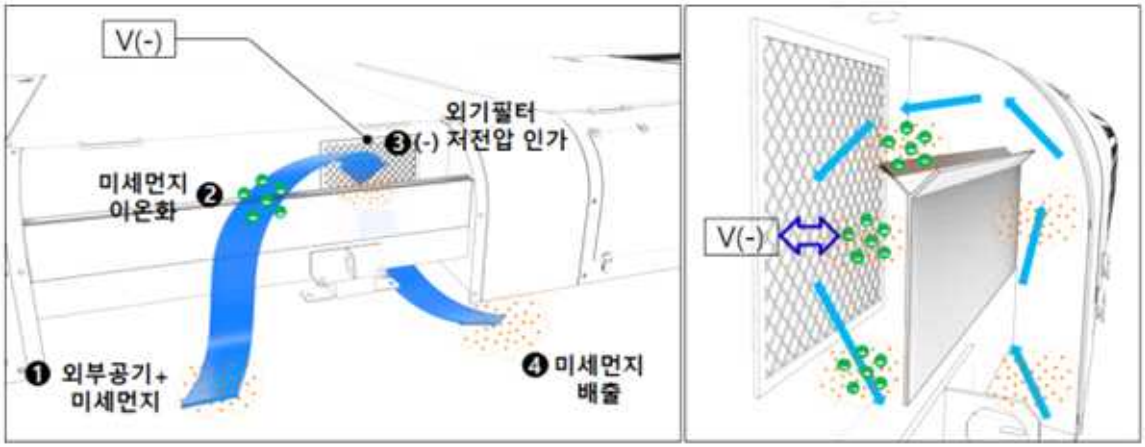
<축소모형에 설치한 유동유도부>

나) 3D 개념도 작성

미세먼지 객실유입 차단장치는 단극하전기, 전기메쉬필터, 전원제어부, 유동유도부로 구성된다. 현재 운행중인 HVAC의 유동 및 미세먼지 유입 경로 파악 후 이를 차단할 수 있는 장치개발을 하는 것이 목적이다. 외기는 HVAC 커버 하부를 통해 공기와 미세먼지가 HVAC 내부로 유입되고 있다. 이에 미세먼지는 내부 형상을 따라 유동 후 외기덕트를 통해 객차내부로 유입된다. 냉각장치의 보호를 위하여 큰 먼지 등을 거를 수 있는 철망메쉬 등이 적용된 저성능필터가 설치되어 운영되고 있다. 전기력에 의한 반발력을 통해 입자의 유입을 차단하는 방법 외에, 유동유도를 통해 필터 내부로 유입되는 입자를 줄여주기 위해 유동유도부를 제작하여 설치하였다. 기존에 약 20 mm정도로 구성되어 있는 유동부 프레임을 높이 70 mm로 직선 기류 구간을 증가시켜주고 끝단에 10 mm(135°)의 Blade 통해 유속을 빠르게 해줘서 입자 유동을 빠르게 해준다.



<기존 HVAC 시스템 구조 개념도>

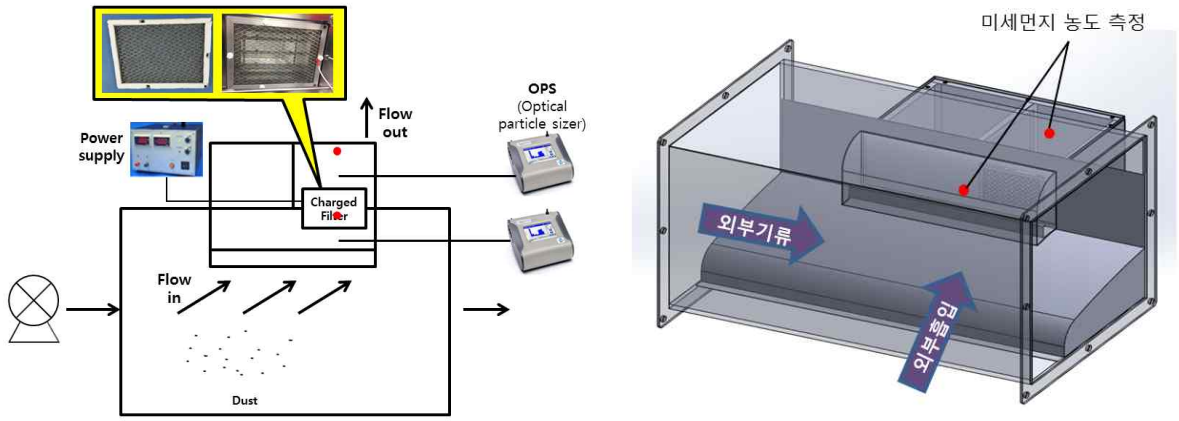


<유동유도부 설치 후 입자하전 및 입자유동 3D 개념도>

(라) 미세먼지 객실 유입차단장치의 실험적 성능평가 (1/2 축소모형 시제품 대상)

가) 미세먼지 차단효율 (미세먼지 차단효율 > 70%)

미세먼지 차단효율 시험은 터널 내부를 축소시켜 만든 시제품에 정전필터를 설치하여 실험을 수행하였으며, 실제 측정기기와 장치를 그 아래에 제시하였다. 지하철 객실 급기구에 적용되는 mesh 필터와 동일한 재질로 가로 217 mm, 세로 150 mm 크기로 제작하여 필터 평가 시스템에 설치하였다. 유동유도부는 해석결과 가장 좋은 결과를 나타내었던 case 9를 제작하여 설치하였고, 설치 후 단극이온을 발생시키기 위한 방전극을 설치하여 실험을 수행하였다.



<미세먼지 차단효율 실험장치 구성도>




<미세먼지 차단효율 실험사진(왼쪽부터 전면, 후면)>

설치한 유동유도부 상단부에 brush형태의 방전극을 활용한 코로나 방전을 통해 단극이온발생장치(음이온)를 설치하였고, Solid Aerosol Generator(TOPAS, SAG 410)를 통해 입자를 투입하였다. 시험입자는 A2 Fine Test Dust를 사용하였으며, 시간당 일정량을 주입하기 위해 주입 유량을 고정하였다. 터널을 모사한 풍동 농도를 외기조건으로 설정하였으며, 3000 $\mu g/m^3$ 이 유지되도록 하였다. 풍동 유속은 열차풍 60 km/h에 해당하는 16.6 m/s로 설정되었다. 공기를 흡입하는 팬은 실제 5호선 전동차 냉방기 성능(720-950W)에 맞추어 사용하였다. 급기구 적용 샘플필터는 가운데 철망메쉬가 주변 프레임과 절연되도록 프레임을 제작하여 필터를 설치하였으며, 철망메쉬에 약 -0.5 kV의 직류전압을 인가하였다. 필터로 유입되기 전후의 미세먼지 개수농도를 파악하기 위하여 필터 전단과 후단에 각각 미세먼지 개수농도를 측정할 수 있는 Optical Particle Sizer (OPS)를 설치하여 동시에 측정할 수 있도록 구성하였다. 두 대의 OPS장비는 사전에 동시 가동하여 상호 오차가 5% 이내임을 확인한 후 사용하였다. 시험절차는 음이온을 발생시키지 않는 조건(Base Case), 음이온을 발생시키는 조건(Charge Case), 철망메쉬에 직류전압을 가하는 조건(Target Case)으로 구분하여 동일 시험을 진행하였다. 철망메쉬의 미세먼지 차단효율은 Target Case에서의 측정값에서 Base Case의 측정값을 보정하여 계산하였다. 샘플링 프로브는 필터 뒷부분 정중앙에 10 cm 떨어져 있었다.

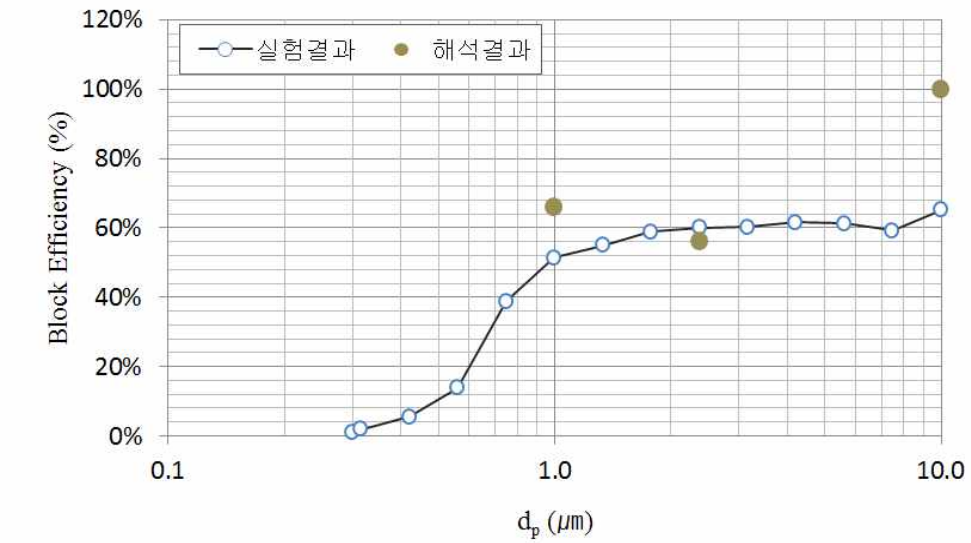
유동유도부 설치 전후 효율과 차단효율 시스템 가동 전후의 효율을 통해 최종적인 차단효율을 산정할 수 있다. 기존 필터일 때의 미세먼지 농도를 기준 값으로, 유동유도부 혹은 차단시스템을 설치한 후 저감되는 질량농도로 성능평가 값을 도출하였다. 다음은 두 가지 차단 효율을 최종 차단효율(E)을 산정하는 식을 나타내었다. E_1은 유동유도부의 차단효율을 나타내고, E_2는 차단효율 시스템 가동 전후 효율을 나타내었다.

$$E = 1 - (1-E_1) \times (1-E_2)$$

위의 식으로 계산된 각 입경별 최종 차단효율(E)의 결과값을 다음 표와 그래프에 나타내었다.

구분	효율		
	가이드베인 (E1)	차단시스템 (E2)	최종효율 (E)
0.3 ㎛	1.0%	51.0%	51.4%
0.316 ㎛	2.0%	63.5%	64.3%
0.422 ㎛	5.6%	75.3%	76.7%
0.562 ㎛	13.9%	79.5%	82.3%
0.75 ㎛	38.9%	84.1%	90.3%
1 ㎛	51.3%	84.7%	92.6%
1.334 ㎛	55.0%	85.1%	93.3%
1.778 ㎛	58.8%	85.5%	94.0%
2.371 ㎛	60.1%	85.5%	94.2%
3.162 ㎛	60.2%	86.2%	94.5%
4.217 ㎛	61.6%	86.2%	94.7%
5.623 ㎛	61.2%	87.5%	95.2%
7.499 ㎛	59.3%	89.2%	95.6%
10 ㎛	65.2%	89.1%	96.2%
평균효율	42.44	80.89	86.81

정전필터에 의한 미세먼지 차단효율을 확인하기 위하여, 필터에 전압을 가하기 전과 전압을 가한 후의 입자의 농도를 비교하였다. 필터에 전압을 가하지 않는 경우 평균 42.44%의 미세먼지 제거효을을 나타내고 있다. 차단시스템이 작동하면 평균 80.89%로 미세먼지 제거효율이 증가하였다. 입자의 크기별로 분류하여 검토해보면, 10 ㎛ 이상의 미세먼지는 약 96.2%로 가장 높은 제거율을 보여주었다.

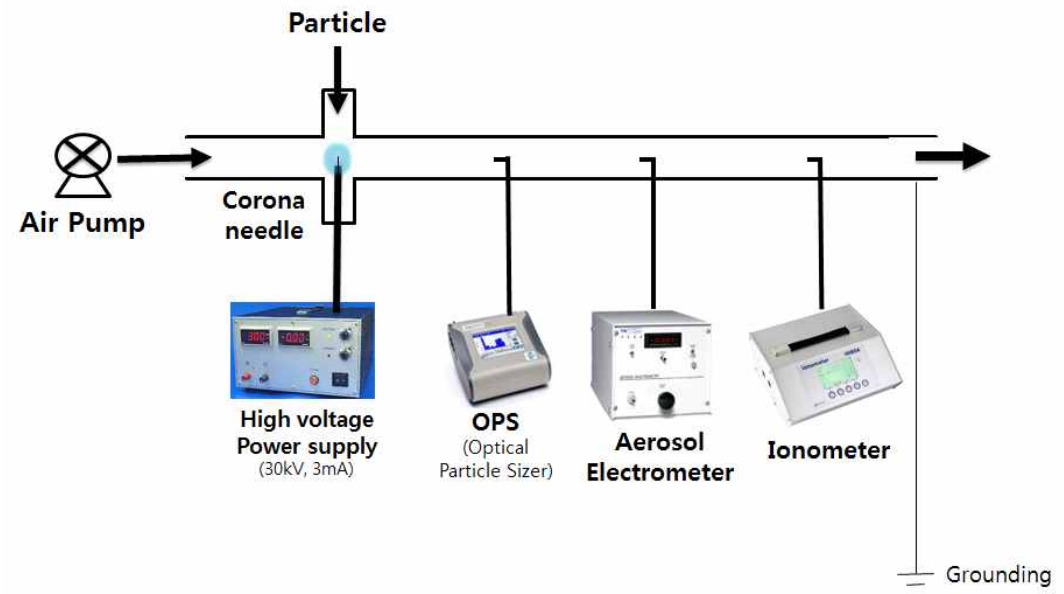


<유동유도부에 대한 실험결과와 해석결과 비교>

필터가 하전되지 않았을 경우에는 입자제거효율이 15%에 그쳤지만, 음이온을 발생시켜 입자를 하전시킨후 전압이 가해진 필터를 통과할 경우 평균 73.9%의 제거효율을 나타내었다.

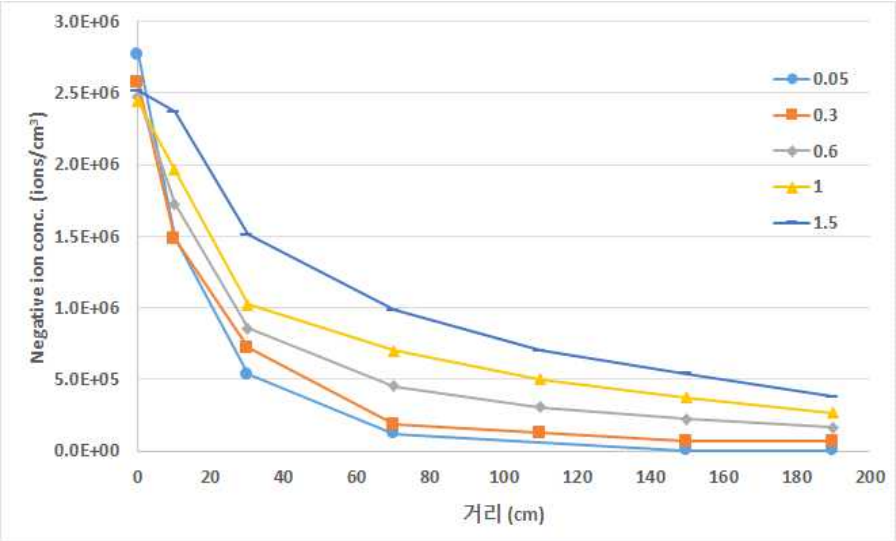
나) 단극하전효율 평가 시험 (하전효율 > 90%)

미세먼지의 객실 유입 차단을 위한 하전 효율에 대한 평가하기 위해 단극하전 효율 평가시험을 진행하였다. 전동차에 부착한 상태로 실험을 할 수 없는 조건이기 때문에 실험실에서 단극하전효율 평가하였다. 코로나방전을 통한 음이온 발생장치를 활용한 미세먼지 단극하전(음하전) 효율 평가시험 장치는 크게 음이온 발생부, 테스트 먼지 유입부, 미세먼지 개수농도 측정기(OPS, TSI 3330), 하전입자 전류측정기(Aerosol Electrometer, TSI 3068)로 구성된다. 아래 그림은 관련 시험장치도와 실제 측정시스템의 모습을 보여주고 있다. 음이온 발생장치에 의한 이온발생농도는 이온측정장치인 독일 U.H GmbH사의 이온측정기(Ionometer, IM806)를 이용하여 확인되었다. 시험장치내 음이온과 입자의 하전공간 확보와 불필요한 손실을 저감시키기 위하여 별도의 챔버를 구성하여 시험하였다. 모든 시험은 클린룸에서 이루어졌으며, 배경농도는 전체 입자크기에서 총 10/cm^3 이하 수준을 유지하고 있다. 송풍기를 통해 클린룸 내부의 청정공기가 시험장치로 유입되면, 음이온발생장치를 작동시키고, 시험입자를 투입한다. 1초단위로 저장되는 OPS와 Aerosol Electrometer의 측정값을 저장하여 데이터 분석하였다.



< 단극하전효율 평가시험 장치 구성도 >

코로나방전을 통해 발생되는 음이온 농도는 아래 그림과 같다. 시험입자는 Arizona Dust이며, 총 발생농도는 약 1,500 개/cm^3로 나타났다.



< 음이온 발생농도 (측정위치 또는 유속별 데이터) >

하전 입자 전류 측정 결과, 시험입자와 음이온의 확산충돌에 의한 Diffusion Charging효과로 하전된 입자는 Aerosol Electrometer를 통해 전류가 측정된다. Aerosol Electrometer에서 측정된 전류값은 아래 수식(1)에 따라 입자의 개수농도로 전환될 수 있다.

$$N=I/(Q*e) \qquad \text{수식 (1)}$$

여기에서 N은 입자의 개수농도(#/cm3), I는 Aerosol Electrometer에서 측정한 전류값(amp), 이며 Q는 유량(cm3/s), e는 단위하전량(=$1.6x10^{-19}$C)이다. 시험입자 자체가 가지는 하전량으로 인한 측정불확도를 확인하기 위하여, 동일한 시험조건에서 음이온 발생장치만을 가동시키지 않고 입자의 전류량을 측정하였으며, 입자의 전류량이 zero임을 확인하였다. 따라서, 입자에 의한 전류량은 음이온에 하전된 경우에만 발생하는 것으로 확인되었다.

단극 하전효율 측정 결과, 측정 기기의 설치위치에 따라 두 가지 방법으로 진행된 시험결과로 AO는 Aerosol Electrometer로 먼저 하전입자의 전류량을 측정하고 Optical Particle Sizer로 전체개수농도를 측정하는 방식이며, OA는 전체개수농도를 먼저측정하고 후단에서 전류량을 측정하는 방식이다. AO의 경우 모든 입자가 이중으로 하전(n=2)되어 있다고 가정했을 경우에도 76.3%의 하전효율을 나타내고 있다. 반면, OA의 경우에는 평균하전효율이 110.3%의 하전효율을 나타내고 있다. 실제 입자의 손실과 음이온 손실 등을 고려할 경우, 본 연구에서 개발한 시스템은 AO와 OA방식의 평균값을 따를 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 개발중인 단품에 대한 단극하전효율은 약 93.3%까지 나타나는 것을 알 수 있다.

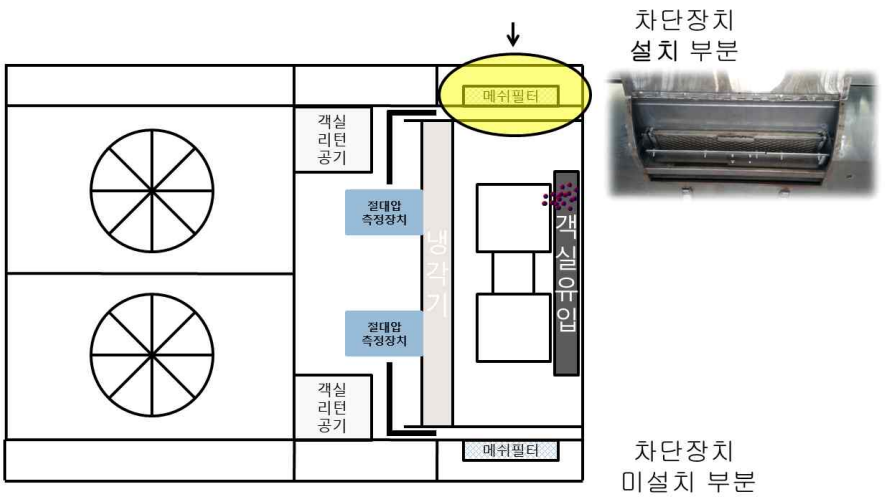
▷ 단극하전효율 측정결과표

		Total Particle Conc. (#/cm^3)	Aerosol Current (pA)	Charge Particle Conc.(#/cm^3)	Charging Eff.(%) (n=2)
AO	AO1	2.31E+03	−0.043	3.23E+03	69.9
	AO2	1.50E+03	−0.03	2.25E+03	74.9
	AO3	1.49E+03	−0.025	1.88E+03	62.9
	AO4	1.19E+03	−0.031	2.33E+03	97.6
	AO Avg.	1.62E+03	−0.032	2.42E+03	76.3
OA	OA1	1.46E+03	−0.032	2.40E+03	82.3
	OA2	1.29E+03	−0.05	3.75E+03	144.9
	OA3	1.48E+03	−0.041	3.08E+03	103.6
	OA Avg.	1.41E+03	−0.041	3.08E+03	110.3
Total Avg.		1.52E+03	−0.039	2.75E+03	**93.3**

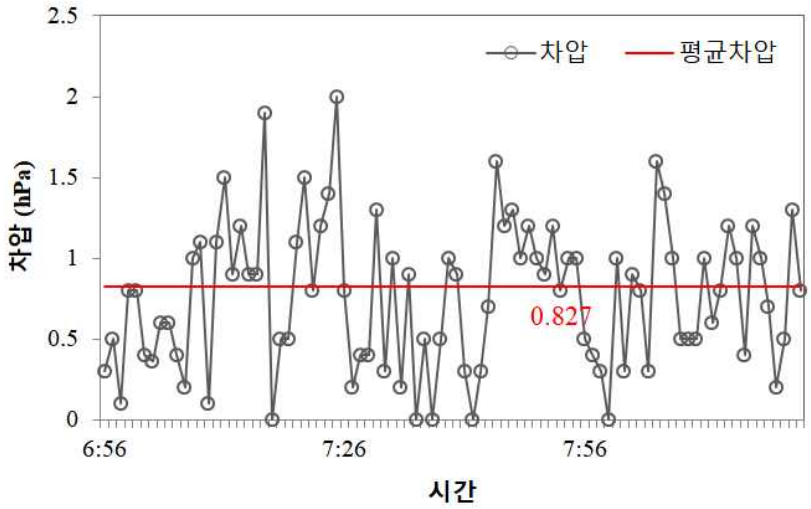
다) 압력손실 (100 Pa 이하, 통과압력)

미세먼지 차단효율 실험과 함께 서울 지하철 5호선에 시제품을 설치하여 차압 측정을 수행하였다. 미세먼지 차단장치를 설치한 부분과 설치하지 않은 부분의 절대압을 비교하여 차압을 측정하였다. 메쉬필터 뒷면에 압력센서를 설치하였으며, 10초 간격으로 측정되는 압력값을 기록하였다. 시험 일자는 미세먼지 차단장치 성능시험과 동일한 날짜에 수행되었다.

냉방기가 가동될 때의 측정결과를 아래 그림에 나타내었다. 아래 그래프의 데이터는 2019년 방화역에서 상일동 방면으로 운행하는 편도구간 측정 데이터이다. 최소 0 hPa에서 최대 2.1 hPa의 압력손실을 확인하였으며, 운행기간 중 평균 차압은 0.827 hPA을 확인하였다. 이 수치는 82.7 Pa로, 연구과제의 최종 목표치인 100 Pa보다 낮은 압력손실을 나타내 목표치를 달성하였다.



<압력손실 테스트 개요도>



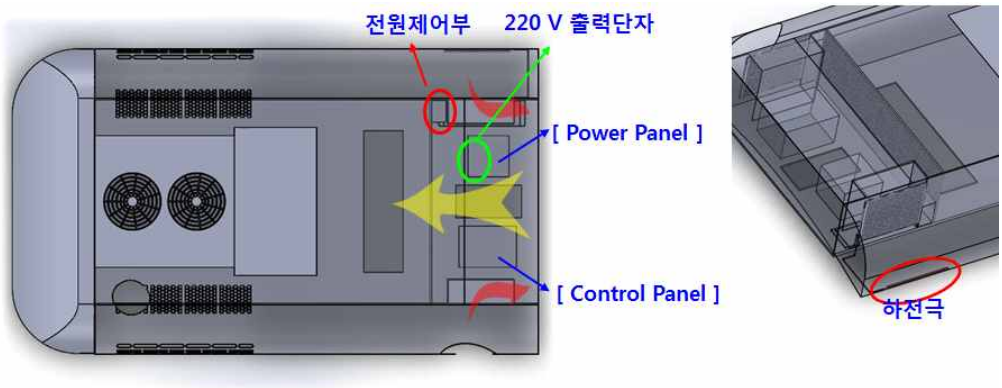
<실차 압력 테스트>

(마) 전동차 상부 인터페이스 검토

가) 상부 인터페이스 검토

① 차단장치의 설치 방안

기존 설치 차량의 내부를 확인하여 설치하기 적절한 공간을 확보하고자 하였으며, 차량의 변경 및 손상을 최소화하기 위한 방안으로 설치를 진행하고자 하였다.



<차단장치 설치 방법>

시제품 단계의 장치를 제작이 완료된 철도차량에 설치하기 위해서는 기존 장치의 성능 및 인터페이스를 최대한 간섭하지 않은 방안을 마련하고자 하였다. 장치 개발 이후, 실제 차량에서의 성능 평가시 탈부착이 용이한 위치와 방법을 찾고자 하였다. 실제 차량의 HVAC 상부를 확인하여 외기 및 실내 공기가 순환하는데 영향을 최소화할 수 있는 곳을 확인하였으며, 협소한 내부 공간에서 파워서플라이를 고정할 만한 위치를 찾고자 하였다.

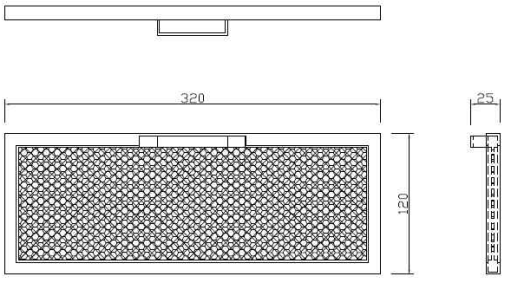


<전원제어부 설치 공간 및 위치>

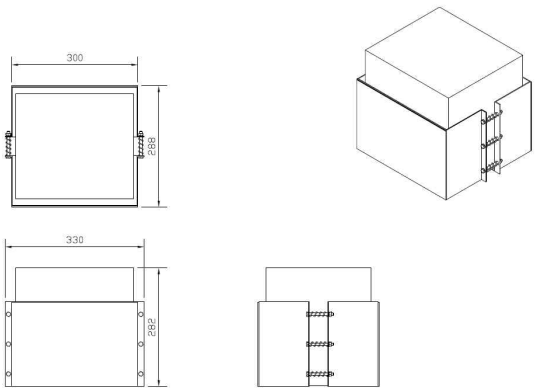
철도차량의 외기도입 필터가 있는 협소한 공간 내에 하전극을 설치해야 하며, 외기의 유입이 HVAC과 철도차량 루프의 간극으로 이루어지고 있으므로 하부와 가까이 설치하는 것이 적절하다고 사료되었다. 하전극은 'ㄷ' 형태의 브라켓을 제작하여 차량의 커버 모서리에 꼽는 방식으로 하고자한다. 커버가 차량에 고정이 되면서 압착이 되는 방식으로 차량에 별도의 가공없이 장착하였다.

기존 철도차량의 외기도입필터는 Stainless steel 재질로 도체이다. 전기를 인가하면 차량에 흐르게 되어 절연처리를 해야 한다. 필터의 테두리를 따라서 절연 재질로 감싸는 형태가 기존필터의 통기도를 해치지 않고, 유지관리가 용이할 것으로 판단되었다. 전기를 인가하기 위해 볼트를 용접하여 전원선의 터미널등을 체결하기 용이하게 하였다.

전원공급장치를 설치하기 위해 기존 HVAC 상부의 내부를 확인한 결과, 외벽 쪽에 하단 그림과 같은 공간을 확인할 수 있었다. 외기가 유입되는 통로 뒷부분으로 외부 영향을 최소화할 수 있는 위치로 판단된다. 설치방안은 기존의 벽면에 손상을 주지 않기 위해서 스프링의 탄성을 이용해서 설치하고자 한다. 벽면에 고무패드를 부착 후, 전원제어부가 부착된 박스타입의 브라켓을 양쪽에서 힘을 가한 상태에서 설치공간에 넣으면, 스프링의 복원력에 의하여 브라켓이 벽면 압착되는 형태로 고정시키고자 하였다.



<전기메쉬필터 제작 설계도>



<브라켓 제작도면>

② 차단장치의 전원 인가방안

차량의 Control Panel에 있는 220 V 전원을 이용하여 전원인가가 가능하다. 단, 차량내부에서 HVAC상부까지 전원케이블을 포설해야 하는 단점이 있었다. 철도차량 상부에 위치한 HVAC 내부에 Power Panel이 있으며, 하단 그림의 7번이 외부에 노출된 220 V, 단상 전원이다. 차단장치 파워서플라이 고전압에 의한 차량의 손상 방지를 위하여 보호회로를 적용하였다. 고전압의 인가로 인하여 습도가 높은 환경에서 동작 시 절연성이 떨어져 차량에 전기를 흐를 수 있다. 따라서 습도센서를 연계하여 외기의 습도가 90% 이상시 전원인가를 차단하는 회로를 적용하고자 하였다. 파

워서플라이에 설정한 일정한 전류 및 전압이 흐르지 않게 전기 회로를 설계 하였다.



<HVAC 상부 내부 구조 및 Power Panel>

(마) 철도차량 형식승인 관련 기술기준 검토

가) 도시철도 차량(전동차) 기술기준 검토

도시철도차량에 적용되는 철도차량기술기준(KRTS-VE-Part51-2016(R1))은 철도안전법 제26조제3항에 따른 도시철도차량 형식승인, 법 제26조의6제1항에 따른 도시철도차량 완성검사, 법 제31조제1항 및 제32조제1항에 따른 형식승인 사후관리에 필요한 기준을 규정하고 있다. 도시철도차량을 구성하는 부품 또는 구성품은 크게 차체 및 설비, 주행장치, 제동장치, 추진장치, 보조전원장치, 차상신호장치, 종합제어장치, 연결장치로 구성되며 본 세부과제에서 개발하고자하는 HVAC급기구 미세먼지 유입차단장치는 차체 및 설비에 포함될 수 있다. 차체 및 설비는 다시 구조체 설계, 구조체 안전, 실내설비, 리프팅, 장애물 제거기, 부식억제, 출입문, 출입문-스크린도어 연계, 차량간 통로문, 냉난방환기장치, 등구류, 의자 및 선반, 전면유리창, 측면유리창 및 기타 유리창, 운전실 및 비상탈출구, 승객용 비상출구, 경적, 열차비상용품의 18가지 세부 장치로 구분된다. 이 중 냉난방환기장치에 관한 기술기준을 참고하여 검토하였다.

4.2.10 냉난방환기장치

1) 객실에는 환기장치와 냉난방장치가 설치되어야 한다.
2) 냉방장치는 객실별로 자동온도제어가 가능해야 하고, 동시 또는 개별운전이 가능해야 한다. 개별운전의 경우에는 “환기”, “반냉방”, “전냉방”, 등 3가지 이상의 모드로 제어될 수 있어야 한다.
3) 난방장치는 동시 또는 개별 운전할 수 있고, 3가지 이상의 모드로 제어될 수 있어야 한다.
4) 냉난방환기장치는 파손되는 경우 유해물질이 객실내부로 유입되지 아니하는 구조이어야 한다.
5) 승객과 승무원들이 탑승하고 있는 차량 구역 내부에 제공되는 공기의 양과 질은 외부 대기의 질로부터 비롯되는 것에 추가하여 승객이나 승무원들의 건강에 어떤 위험도 전개되지 않는 것 이어야 한다.
6) 환기장치는 CO_2 및 미세먼지 등 실내공기질의 수준을 모든 정상 운행 조건에서 “실내공기질 관리를 위한 대중교통차량의 제작·운행 관리지침(환경부고시 제2013-186호)”을 만족되도록 설계할 것을 권고한다.
7) 냉난방환기장치의 설계 및 입증에 관하여 신청자는 EN 14813-1, EN 14813-2, EN14750-1, EN14750-2, KS R 9198, KS R 9200, UIC 553-1 등을 참고하여 적합하다고 판단되는 규격으로 기술기준의 요구 사항을 입증할 수 있다.

<냉난방환기장치 기술기준>

4.2.10항을 검토해보면, 7가지 세부 기술기준이 제시되고 있으며 이 가운데 도시철도차량 냉난방환기장치의 기본성능과 관련된 1~4번 항목과 7번 항목은 본 세부과제의 개발과 직접적인 관련

이 없었다. 5번 항목의 경우, 승객과 승무원들이 외부대기질로부터 유입되는 공기에 대하여 어떤 위험도가 전개되지 않아야 한다고 명시되어 있는바, 본 세부과제의 연구개발 목표달성이 중요한 요소임을 알 수 있었다. 기술기준이 추구하는 도시철도차량 제작방향과 잘 일치하고 있었다.

나) 냉난방 환기장치 부품, 구성품 단위 형식승인 검토

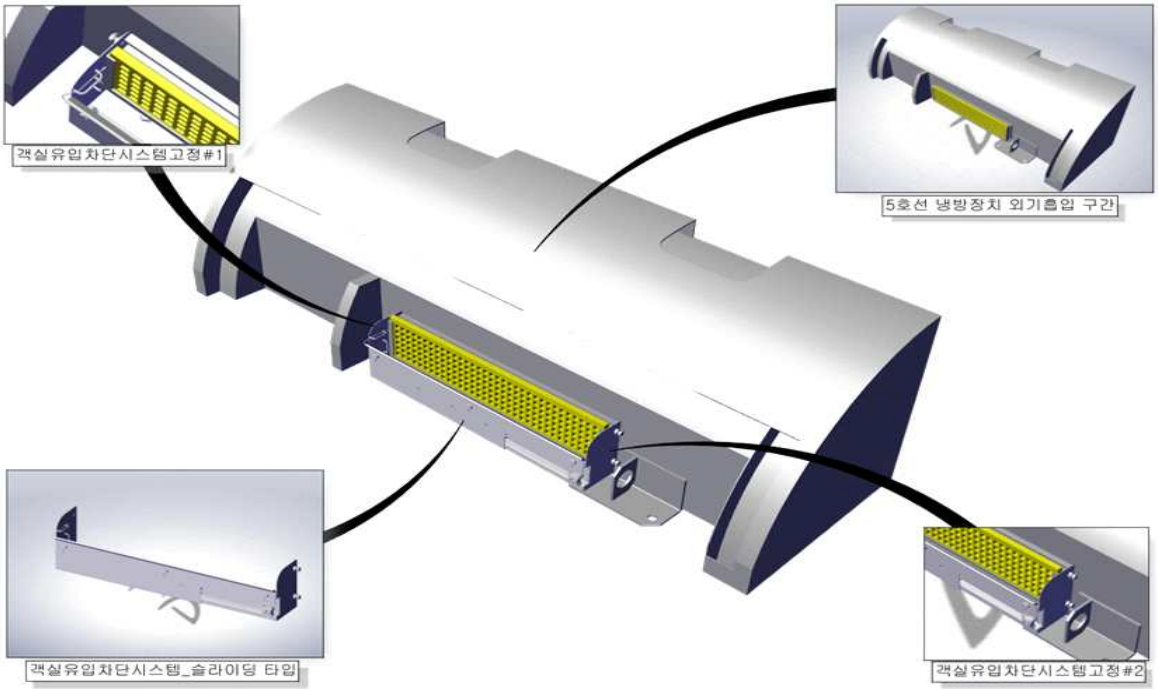
본 과제에서 개발하는 시스템이 철도차량 형식승인에 부합하기 위해서는 부품 및 구성품 단위시험에서 형식승인 기준에 적합하여야 한다. 현재 기술기준에 따르면, 냉난방환기장치의 부품단위 형식승인 기준은 전자제어기기시험 기준을 만족해야 하며, 이에 따른 절연시험, 전원변동, 전자파 적합성, 온도시험, 진동, 충격시험 등을 해당 기준을 따라야 한다. 미세먼지 유입차단 기술의 경우, 관련 전자제어기기는 모두 기존 냉난방 제어기에 포함되어 관련 요구 성능 만족 가능하다. 냉난방환기장치 구성품 단위 시험에서는 현재 구성품 단위에서 전원전압변도시험, 절연저항시험, 내전압시험, 냉방능력시험, 난방능력시험, 소음시험, 냉매압력 및 누설시험, 송풍계통 기밀시험, 열교환기 내압시험, 응축수 밸브작동시험, 안전장치 작동시험, 환경시험, 진동시험, 충격시험, 조합시험에 대한 시험기준이 제시되고 있으며, 이 가운데 미세먼지 유입자단장치의 경우는 안전장치 작동시험 중 '다' 항 필터 성능시험에 연계하여 시험기준을 만족할 필요가 있다. 상기 검토항목은 2016년 개정된 기준으로 아직까지 필터 성능시험에 대한 세부 시험절차 및 적용사례가 없는 실정이다. 필터 성능시험에 적용될 시험기준은 KS R 9200: 철도차량-환기 성능시험이 현재 제시된 참고기준이나 HVAC 급기구 필터에 적용할 수 있는 세부적 기술기준은 부재한 상황이다. 향후, 기술기준 개정시 HVAC 급기구 필터에 대한 세부적 기술기준을 포함시켜야 할 필요가 있다.

(바) 미세먼지 객실유입 차단장치 시제품 제작

가) 5호선 대상 시제품 제작을 현장조사

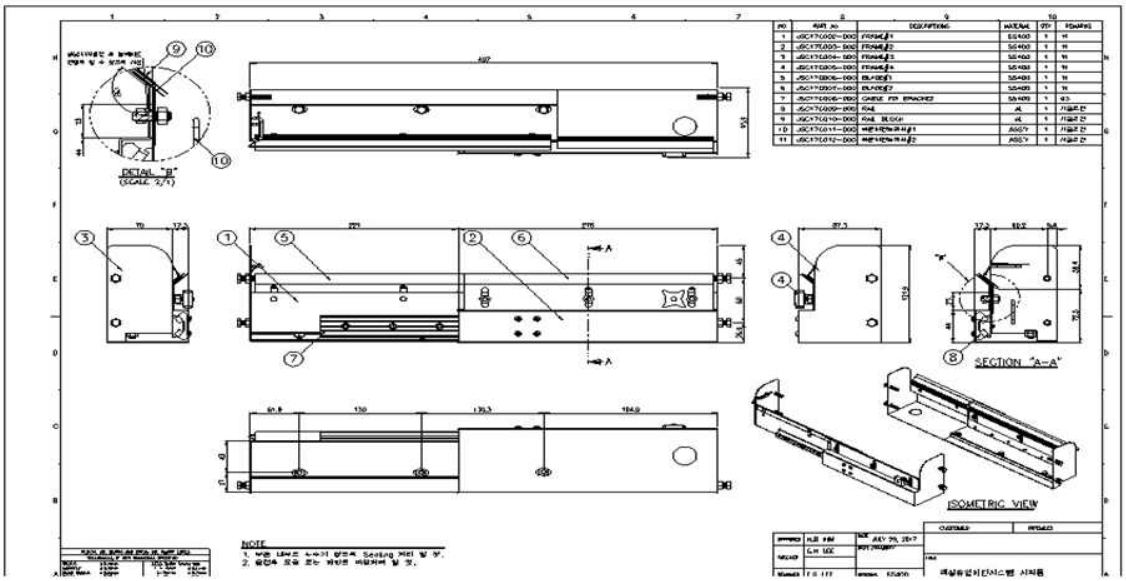
① 차단장치 시제품 상세설계

미세먼지 차단장치는 고정할 수 있는 공간이 협소하여, 필터프레임 하단에 있는 빗물 · 먼지 제거용 구멍을 활용하여 하단을 고정하고, 필터프레임 옆면을 볼트로 고정하여 진동의 영형을 덜 받도록 설계하였다. 또한 제작한 차단장치 시제품은 도시철도 5호선 대상으로만 사용하는 것이 아니라 지하철 전반에 범용적으로 활용하기 위하여 좌우 사이즈 가변형으로 설계하였고, 유동유도부의 높이 또한 조절가능하게 제작하였다. 이를 활용하여 차단장치 시제품은 가로길이가 최대 585 mm, 최소 355 mm까지 조절이 가능하게 설계하였다.차단장치의 상세 개념도를 살펴보면, 유동유도부의 blade끝단에 brush형 방전극을 설치할 수 있도록 설계하였다. 설치한 방전극에 전원을 공급할 수 있도록 전선홀을 따로 마련하였으며, 차단장치 설치와 좌우길이 조절에 용이하도록 차단장치 시제품을 분리하여 설계하였다. 차단장치의 옆면은 좌측에 필터프레임과 고정할 수 있는 볼트를 설치하였고, 손잡이를 설치하여 이동의 편리성을 추가하였다.설계한 시제품은 슬라이딩 거리조절타입이며, 포켓타입 프레임으로 구성하여 탈거가 용이하게 제작하여 필터 프레임에 창착하기 편하게 하였다. 또한 블레이드에는 PC계열 재질을 적용하였으며 높이 및 조절용 블레이드를 설치하였다. 롤러슬라이딩 레일을 적용하여 좌-우 거리조절이 용이하게 설계하였으며, 거리조절 후 볼트로 고정하여 차단장치의 좌우길이를 고정한다.



<차단장치 구성요소별 상세 개념도>

차단장치의 개념도를 활용하여 다음과 같은 도면을 작성하였다. 시제품 프레임의 재질은 STS304로 전해연마로 마감하였는데, 이는 냉방장치 설치용으로서 스텐레스 스틸 적용으로 부식방지 및 내식성 강화를 고려하였다. 유동유도부 끝단의 블레이드는 방전극을 장착할 수 있도록 설계하였다. 방전극을 장착할 수 있는 방전극홀더는 PC(폴리카보네이트)재질을 적용하였다. 이는 열가소성 플라스틱 계열로서 전기절연성 , 내충격성, 내열성, 내후성, 투명성의 특징이며 유연성 및 가공성 우수하기 때문이다.



<차단장치 제작도면>

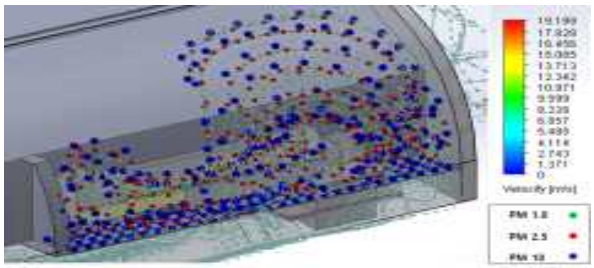



<차단장치 시제품 제작>

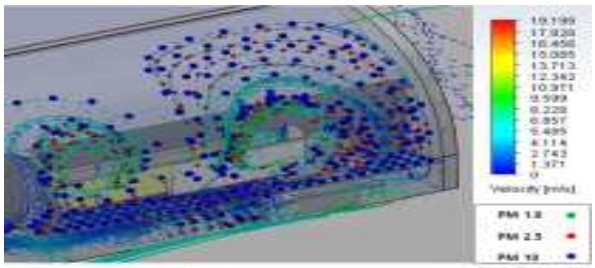
② 차단장치 시제품 설치에 따른 미세먼지 유입차단 수치해석 검토

냉방장치 시스템에 있어서 외부공기유입으로 인한 미세먼지를 저감 및 방지하기 위한 객실유입 차단시스템 설계를 위한 유동해석을 수행하였으며, 유동해석을 통한 기초자료를 통해 최적화된 시제품 제작에 그 목적이 있다. 해석방법은 5호선 전동차량(옥상구조)을 모델링 하고 냉방장치 구조에 의한 유동을 해석을 통해 기존 냉방장치 증발구간 외기흡입구의 외부공기 유입 유동장 및 미세먼지(PM1, PM2.5, PM10)의 유동경로 및 흡입량 등을 분석하였으며, 분석결과를 바탕으로 최적화된 미세먼지 방지 및 저감 방법을 연구하였다. 전동차의 운행속도는 60km로 가정 하였으며, 객실 내부로의 유입량 실제 전동차 설계조건에 따라 8CMM으로 결정하여 해석을 수행하였다. 유동해석 경계조건은 다음 그림에서 보는 것과 같이 모델링 작업하여 수행하였다.

Case1은 기존 냉방장치에서의 유동해석 결과이며, 유속, 유속벡터, 파티클 유입수(PM1, PM2.5, PM10) 등을 분석하였다. 미세먼지 저감모듈의 길이가 길어짐에 따라 흡입압력이 상승하는 결과를 보였다. 파티클 흡입 저감효율은 Case1 ~Case3 영역으로 이는 저감장치의 높이가 외기덕트 높이 98mm 보다 58mm 높은 영역부터 효율이 증가함을 알 수 있었다. 미세먼지 흡입 저감 효율은 Case1.에서 가장 높았으며, 흡입압력차도 56.59pa 이하로 분석되어 가장 최적화된 구조로 결정하였다. 이상의 유동해석 분석결과를 통해 최적설계 방안을 도출 하였으며, 이를 통해 시작품 최적설계 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 참고하였다. 다음 그림에 case별 유동해석 결과를 나타내었다.



<Case1(기존 메쉬필터) – 3D 유속, 파티클 분포 및 유입량 분석결과>



<Case3 – 3D유속, 파티클 분포 및 유입량 분석결과>

<유동유도부만 설치한 유동해석 결과 요약표>

해석 Case	파티클흡입량(100개 기준)			효율(%) (total)	Pressure A (Pa)	Pressure B (Pa)	⊿P (Pa)
	1 um	2.5 um	10 um				
Case1	45	43	34	59.3	289.13	232.54	56.59
case2	47	47	28	59.3	306.76	232.26	74.5
case3	58	55	36	50.3	328.48	231.72	96.76

(사) 전동차 상부 인터페이스 제작

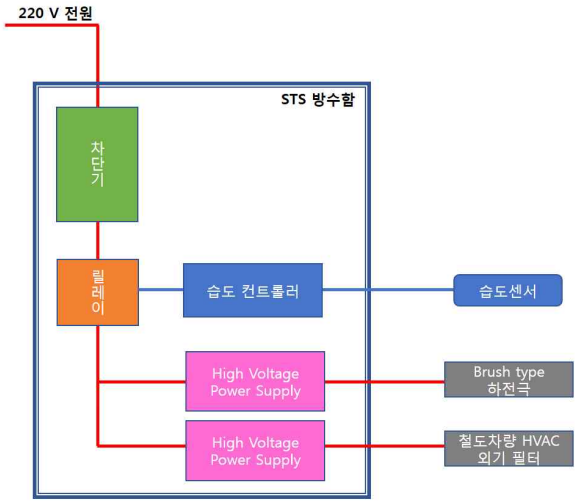
가) 미세 먼지 차단 장치 전원 공급 방법

① HVAC 내부 인터페이스 설치공간

전원공급장치 및 미세먼지 측정기를 설치한 공간을 검토한 결과, 냉각팬 앞에 넓은 공간이 존재함을 확인하였다. 양쪽으로 객실리턴공기 유입부를 확인하였고, 터널에서 유입되는 외기와 객실리턴공기가 만나는 지점을 확인하였다. 전원공급장치나 미세먼지 측정기를 고정할 수 있는 방안이 없기 때문에 설치장치들을 고정할 수 있는 방안을 모색이 필요하였다.



<5호선 냉방기 내부 설치지점 검토>



<전원공급장치 모식도>

② 외기 변화를 고려한 안전적인 전원공급

차량에서 공급받은 전원은 고전압 발생 장치에 인가되어 고전압을 발생시킨다. 전압이 높아질수록 절연성을 상실하게 되어 합선 등 전기적인 문제를 발생시킬 수 있다. 더욱이, 외기가 유입되는 곳에서 고전압으로 하전을 시키고 있는 하전극은 강우 시 빗물이 유입되거나 높은 습도가 유지되는 상황에서 문제가 발생될 소지가 크다. 따라서 외부의 기후 상태에 따라 미세먼지 차단장치에 인가되는 전기를 유동적으로 차단시킬 방법으로 외기의 습도와 연계하여 기준 습도 이상시 전원이 차단되는 방법을 사용하고자 한다. 전원공급은 차량 내부의 220 V전원으로 합선이나 누전 등 이상발생 시 전원을 차단할 수 있는 안전장치에 해당되는 차단기에 우선 연결된다. 이후 릴레이를 통하여 Power Supply에 전원을 공급하게 되는데, 이때 상시전원으로 연결된 습도센서와 컨트롤러에 연계되어 외기의 습도를 측정한다. 습도센서가 기준치 이상의 습도 확인 시 릴레이가 열려 전원을 차단하게 되며, 기후가 건조해져서 기준치 미만으로 습도 강하 시 릴레이가 닫혀 전원이 다시 흐르는 방식이다. 이러한 시스템을 통하여 외기에 따라 전원을 유동적으로 인가할 수 있으며, 고전압에 의한 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

전원공급장치 외부 케이스는 스테인리스 재질을 이용하여 충격 및 화재 등에 대한 대비를 하였으며, 주기적인 HVAC 상부의 내부 세척을 대비해서 방수가 되도록 기밀도를 높이는 형태로 제작하였다. 전원공급장치의 습도와의 연계 작동성을 확인하기 위해서 8 ㎥ 챔버에서 습도를 조절하며 전원 차단이 되는 지를 확인하였다. 차단하는 습도 기준치를 80%로 설정하였으며, 수치에 따라 릴레이가 개폐되는 것을 확인함으로써 정상작동 여부를 확인할 수 있었다.

③ 차단 장치 전원공급

철도차량 객실 내부에 위치한 전원판넬에는 차량 내 각종 전기장치에 전원을 인가하는 전원판넬이 차량의 선두에 위치해 있다. 이 판넬 내부에는 220 V용 플러그를 연결할 수 있는 여분의 콘센트가 존재하고 있다. 이 콘센트는 별도의 전원이 필요한 곳에 공급하기 위한 것으로, 메인전기회로에 대한 영향을 최소화시켜 전원을 공급받을 수 있는 방안이라 할 수 있다.

따라서 객실 내부 전원판넬에서 HVAC의 상부에 위치해 있는 전원공급장치까지 전원을 연결하기 위해서 천정의 빈 공간을 이용하기로 했으며, 그 중 설치가 용이한 형광등 설치 상부공간을 활용하기로 하였다. 전원케이블은 외부 손상 및 기타 외부 요인으로부터의 안전을 위해서 주름관에 넣어서 포설하였다. HVAC 하부 부근까지 포설을 한 후, 이후는 리턴공기가 HVAC으로 올라가는 공간으로 전원케이블을 포설하여 전원공급장치와 연결하였다.



<객실 내부 전원판넬>

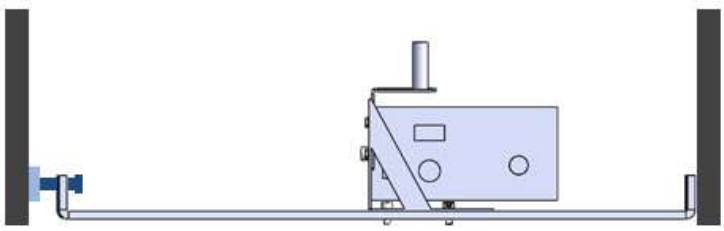


<객실 상부 전원케이블 포설>

나) 미세먼지 차단장치 차량 설치 방법

① 차단장치 전원 공급 장치 설치

미세먼지 차단장치는 크게 미세먼지 차단장치와 전원공급장치로 나뉜다. 이중 전원공급장치는 고전압을 발생시켜야 하는 관계로 하전극과 가까운 곳에 위치해 있는 것이 중요하다. 따라서 외기유입통로를 활용하여 외기필터 및 하전극에 전압을 인가하고자 하였다. 철도 차량의 HVAC 상부에 기존에 없던 장치를 설치해야 하고, 차량에 손상이 가지 않게 척력을 이용하여 장치를 고정시키고자 하였다. 아래의 개념도는 미세먼지 측정 장치 또는 전원공급장치를 'ㄷ' 형태의 지그에 고정시킨 그림이다. 지그에 나사산을 내어 볼트를 조이면, 볼트가 벽방향으로 이동하면서 볼트에 의해 전체 길이가 늘어나게 되고 결국 벽에 부딪혀 척력으로 밀게 된다. 이때 벽에 네모 판을 부착시켜 넓은 면에 척력이 가해지도록 설계하였다.



<차량 내부 설치 개념도>

아래 그림은 실제 HVAC 상부에 미세먼지 측정장치와 전원공급장치를 설치한 그림이다. 스테인리스 박스 내부에 전원공급장치 및 미세먼지 측정장치를 설치하였으며, 지그를 통해 박스들을 단단히 고정을 시켰다. 미세먼지 측정장치가 들어있는 박스는 냉매 배관 밑에 설치를 해서 고정이 풀려도 배관에 의해 이동이 안되도록 하였다.



<HVAC 상부 전원공급장치 및 미세먼지 측정 장치 설치 모습>

(아) 시제품 성능평가

가) 5호선 차량 설치를 통한 시제품 적용성 평가 및 현장부설

① 차단장치 시제품 현장 적용성 사전평가(2017년 11월)

기존 필터프레임의 빗물·먼지 제거용으로 타공되어 있던 구멍을 활용하여 시제품을 설치해야 한다. 또한 옆면을 볼트로 조여서 차단장치를 고정해야 하기 때문에 두가지 부분을 면밀하게 검토하였다. 또한, 시제품을 설치하였을 때 기존의 기류흐름에 방해요소가 없는지, HVAC 덮개를 덮는데 방해가 되지 않는지 검토하였다. 검토한 결과, 좌우 길이를 조절하기 위해 시제품에 부착한 슬라이딩 부분이 유동을 방해하는 것을 파악하였다. 또한, 길이조절 래버 또한 HVAC 덮개의 닫힘을 방해함을 확인하였다. 이러한 방해요소와 문제점들을 보완하여 보완된 시제품을 제작하였다.



<현장 적용성 사전평가(2017년 11월)>



<보완된 시제품>

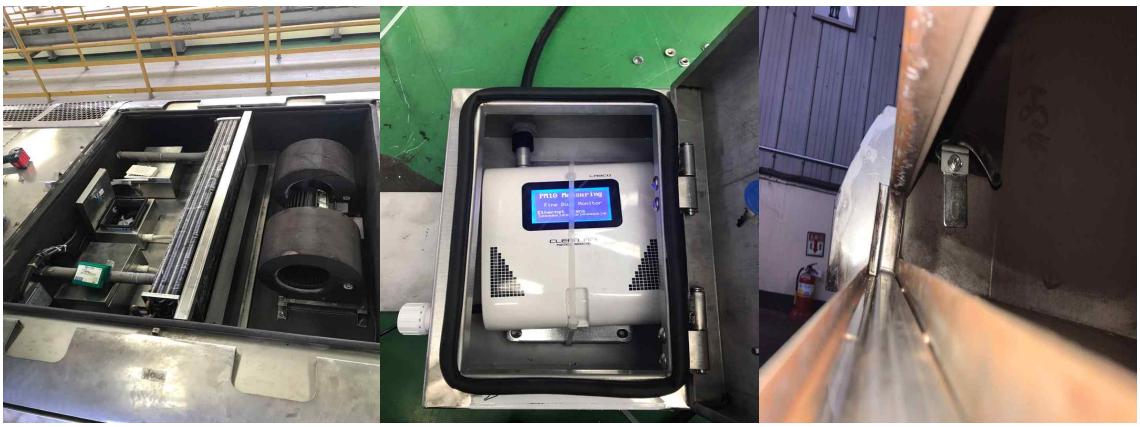
② 최종 시제품 현장 적용(2019년 4월)

방전극, 파워서플라이, 미세먼지 측정기, WIFI공유기를 설치하기 위해서 전원공급 방안을 검토하였다. 제작한 최종 시제품을 점검중인 HVAC 필터부분에 설치를 하였다.



<차단장치 시제품 미설치부분(좌)과 설치부분(우)>

전원공급장치 및 미세먼지 측정장치를 냉각팬 앞부분에 설치하였다. 바닥을 고정할 수 있는 프레임을 제작하여 전원공급장치와 미세먼지 측정장치를 프레임을 냉각팬 앞쪽에 설치하였다.가운데 전원공급부에서 전원을 공급받으며, 양쪽의 외기 유입구에서 유입되는 미세먼지 개수농도를 측정하기 위하여 양쪽에 미세먼지 측정장치를 한 대씩 설치하였다. 미세먼지 측정장치는 광산란장비인 Particle Monitor(model LDU-100, LABCO)를 활용하여 질량농도 및 개수농도를 측정하였다. 미세먼지를 측정하기 위한 샘플링 프로브는 메쉬필터 바로 뒷단에 설치하였으며, 제작한 필터고정용 프레임을 활용하여 샘플링 프로브를 고정하였다.



<상부인터페이스 제작 및 샘플링 프로브 설치>

나) 도시철도 5호선 운행 중 사전 성능평가 평가방법

HVAC유입구에서부터 살펴보면, 외기와 함께 HVAC 유입구로 유입되는 터널부유 미세먼지는 가이드베인을 통하여 유동이 제어되고, 가이드베인 끝단에 설치된 단극하전장치에서 발생하는 (-)이온과 하전된다. (-)극으로 하전된 미세먼지 입자는 (-)전압이 인가된 메쉬필터와 만나 repulsive force를 형성하여 필터에서 포집되지 않고 HVAC유입구 밖으로 나가게 된다. HVAC 내부에는 전원공급장치가 설치되어 있다. 전원공급장치는 단극하전장치와 실시간 미세먼지 측정장치, Wifi송신기에 전원을 공급한다. 이 과정에서 높은 습도조건일 때 발생되는 누전을 방지하기 위하여 전원공급장치 안에 습도감지센서가 설치되어 있으며, 이는 차단기와 연결되어 높은 습도조건일 경우 전원공급을 차단한다. 또한 HVAC 내부에는 실시간 미세먼지 측정장치가 설치되어 있다. 측정장치의 데이터는 Wifi송신기를 통하여 통신이 가능하다. 차단장치가 설치된 차량 객실 안에서 실시간으로 질량농도 및 개수농도를 확인할 수 있다.

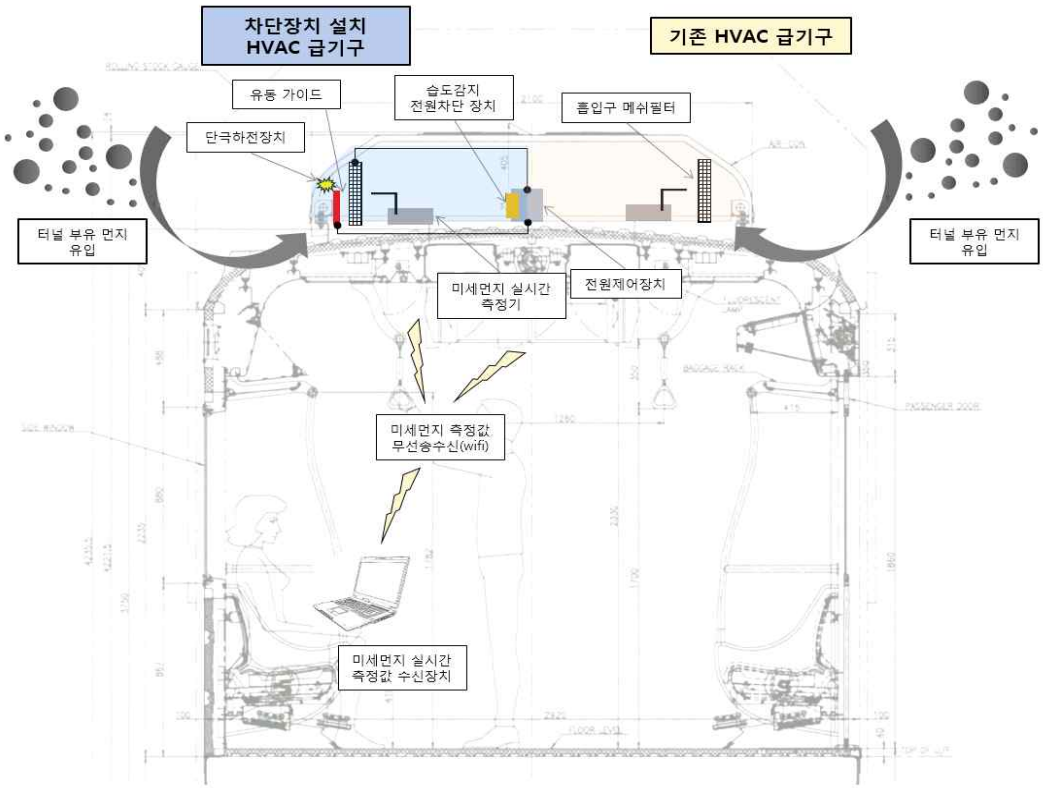
다) 미세먼지 차단효율 시험 결과 (미세먼지 차단효율 > 70%)

① 미세먼지 차단장치 차단효율 시험 개요

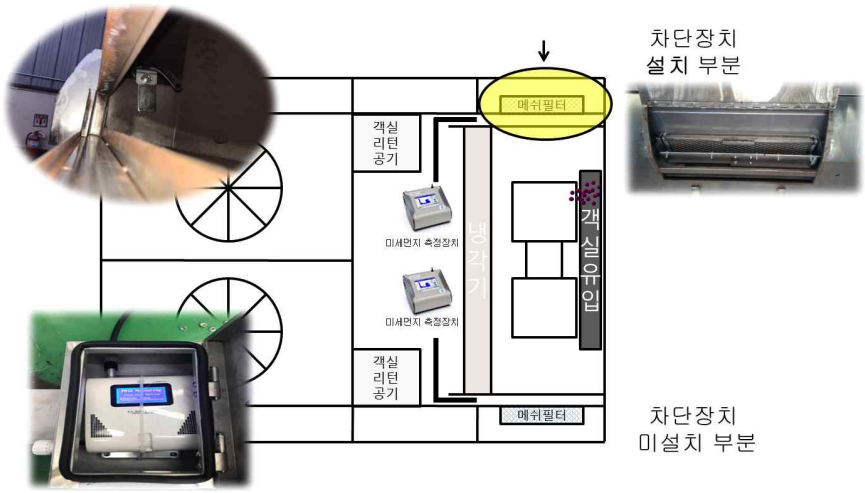
미세먼지 차단효율은 도시철도 5호선 HVAC에 설치한 미세먼지 차단장치의 실시간 데이터를 실험데이터로 활용하였다. 실험에는 광산란장비인 Particle Monitor(model LDU-100, LABCO)를 활용하였으며, 8개의 채널의 미세먼지 개수농도로 차단효율을 산정하였다. 아래 그림에 미세먼지 차단효율 실험의 개요도를 나타내었다. 외기는 양쪽 메쉬필터를 통과하여 HVAC 내부로 유입된다. 본 실험에서는 양쪽의 메쉬필터 중 한쪽에만 차단장치를 설치하여 차단장치가 설치된 부분의 개수농도와 차단장치가 설치되지 않은 기존의 메쉬필터에서의 개수농도를 비교하였다. 차단장치가 설치된 부분의 측정 농도를 C_{block}, 차단장치가 설치되지 않은 부분의 측정농도를 C_{tunnel}라고 할 때, 차단장치 차단효율은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{차단효율} = \frac{C_{tunnel} - C_{block}}{C_{tunnel}}$$

샘플링 프로브는 객실에서 들어오는 리턴공기의 영향을 최소화하도록 메쉬필터 바로 뒷단에 설치를 하였으며, 프로브의 곡선부가 최소화되도록 설치하였다. 미세먼지 측정장치는 Wifi 통신을 활용하여 객실에서 실시간으로 미세먼지 농도와 개수농도를 확인가능 하도록 설치하였다. 아래 사진은 시운전중인 도시철도 5호선 565차량 내부에서 측정을 수행하는 사진을 나타내었다. 시제품 제작단계에서 수행되었던 유동해석 결과와 실제 실험을 통한 차단효율을 비교하였다.



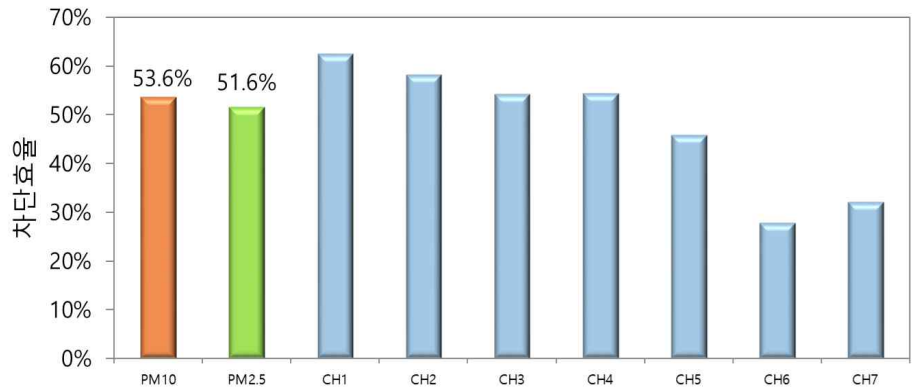
<현장시험 모식도>



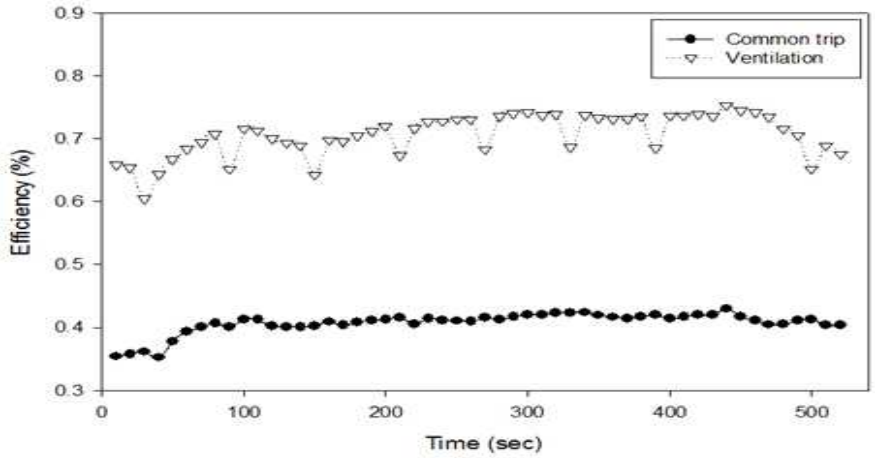
<현장시험 실험 개요도>

② 미세먼지 차단장치 차단효율 시험 결과

측정기간 중 운행중인 5호선 차량은 하절기가 지나 냉방기를 가동하지 않고 전구간을 운행하였다. 때문에 냉방기 내부로 유입되는 유량을 확보하기 위하여 환기팬 가동을 요청하였다. 아래 그림에 환기를 가동하지 않는 일반 운행(Common Trip)과 환기를 가동한 상태(Ventilation)에서 측정한 차단요율을 나타내었다. 운행중에 측정된 질량농도로 비교하였을 경우, 전체 구간에서 PM10은 평균 53.6%, PM2.5는 51.6%의 차단성능을 나타내었다. 향후 압력센서를 활용하여 실제 유입되는 유량분포도 확인하였다. 환기를 가동한 구간에서 차단효율은 평균 70.6%를 나타내었고, 환기를 가동하지 않는 구간에서 차단효율은 40.7%을 나타내었다.



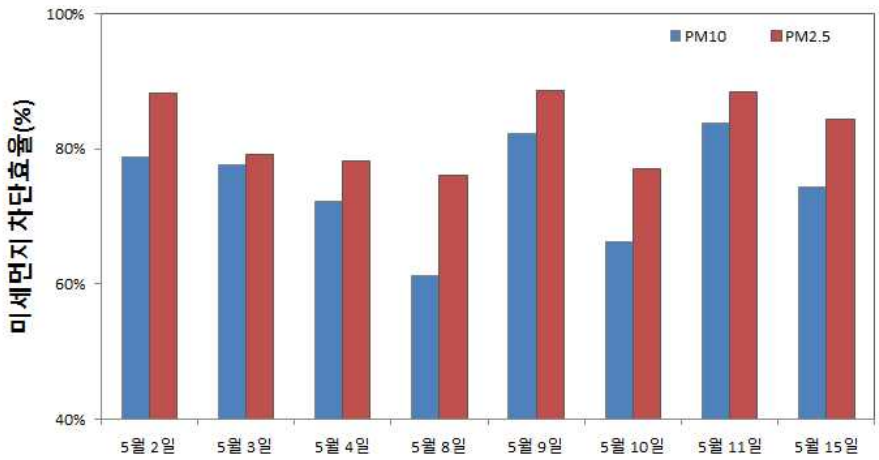
<물리적 차단장치만 활용한 성능시험 결과(2017년 11월-12월 시험)>



< 환기시설 가동(Ventilation)/미가동(Common trip)시 차단효율 >

최종 시제품 차단효율은 2019년 4월 측정이 수행된 5호선 전 구간(방화행, 상일동행/마천행)에서 **PM10과 PM2.5의 차단효율은 각각 74.5%, 82.5%의 차단효율**로 확인하였다. 측정이 수행된 8일 중, 5월 8일을 제외한 나머지 7일이 목표치인 70%를 달성한 것을 확인하였다. 5월 8일 데이터를 살펴본 결과, 5월 8일 측정이 수행된 시간(6시~12시)에는 냉방기가 가동되지 않아 유입되는 유량이 적은 것으로 확인되었으며, 압력분포를 통하여 냉방기 내부의 공기가 터널로 빠져나가는 기류분포를 확인하였다.

	PM10 (μg/m^3)			PM2.5 (μg/m^3)		
	설치	미설치	차단효율(%)	설치	미설치	차단효율(%)
2019-05-02	58	295	79%	34	277	88%
2019-05-03	38	175	78%	26	149	79%
2019-05-04	76	275	72%	56	255	78%
2019-05-08	36	92	61%	20	84	76%
2019-05-09	34	189	82%	21	182	89%
2019-05-10	61	180	66%	38	166	77%
2019-05-11	43	266	84%	30	258	88%
2019-05-15	58	265	74%	39	252	84%



<물리적 차단장치와 전기적 차단장치를 모두 활용한 성능시험 결과(2019년 4월)>



<사용 전 전압메쉬필터(좌)와 사용 후 전압메쉬필터(우)>

③ 차단장치 교체주기

서울교통공사 5호선의 경우, 미세먼지 및 각종 이물질 제거를 위하여 연 2회 청소를 실시하고 있으며, 냉방기가 집중적으로 사용되는 하절기에 2회 청소를 진행한다. 냉방기가 가동되는 하절기에는 메쉬필터를 2주에 한번씩 세정해서 사용하고 있으며, 본 연구를 통하여 2주의 세정주기를 3달로 늘릴 수 있도록 연구를 수행하였다.

각 필터의 무게는 사용 전/후에 수분의 영향을 제거하기 위하여 데시게이터에 이틀 보관 후 무게를 측정하여 냉방기에 설치하였다. 기존 메쉬필터의 경우, 교체주기인 14일을 사용하였으며, 시제품인 전압메쉬필터는 15일간 사용하여 그 무게를 측정하였다. 기존 메쉬필터의 먼지 포집량은 4.45g으로 확인되었으며, 시제품의 먼지 포집량은 0.65으로, 시제품을 3개월간(90일) 수행한 것으로 가정하였을 경우, 3.9g이 포집됨을 추정할 수 있다. 이는 기존 메쉬필터의 포집량은 4.45g보다 적은 양으로써 3개월에 한번씩 세정해도 기존 메쉬필터와 유사한 기능을 할 수 있을 것으로 사료된다.

구분	포집기간	사용 전 필터무게(g)	사용 후 필터무게(g)	무게차이(g)
기존 메쉬필터	14일	755.23	759.68	4.45
전압메쉬필터	15일	233.86	234.51	0.65

5)시제품 개조신고

(가) 공인인증 시험

가) 진동/충격 시험

동력 미세먼지 제거장치(TDC-G01)의 진동/충격시험을 디티앤씨에서 받았다. 2019년 5월 28일, 29일에 IEC 61373:2010 (1종 A)로 시험 받았으며, 시험 결과 이상이 없는 것으로 나타났다.



시 험 성 적 서

(주)디티앤씨

17042 경기도 용인시 처인구 유림로 154 번길 42(유방동)
Tel : 031-321-2664, Fax : 031-321-0220

1. 성적서 번호 : DRCKREL1906-0375
2. 신 청 인
• 상 호 : 디케이주식회사
• 주 소 : 광주광역시 광산구 평동산단로 360
3. 시험성적서의 용도 : 과제제출 및 성능인증용
4. 제품명 / 모델명 : 미세먼지 제거장치 / TDC-G01
5. 시험방법 : IEC 61373 : 2010
6. 시험기간 : 2019 년 05 월 28 일 ~ 2019 년 05 월 29 일
7. 시험환경 : 온 도 (25 ± 4) °C, 습 도 (37 ± 7) % R.H.
8. 시험결과 : 본문 참조

이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

확인	시험자	기술책임자
	성 명 : 정 희 관	성 명 : 정 재 한

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협력(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2019 년 06 월 11 일

한국인정기구 인정 (주)디티앤씨 대표이사 (인)

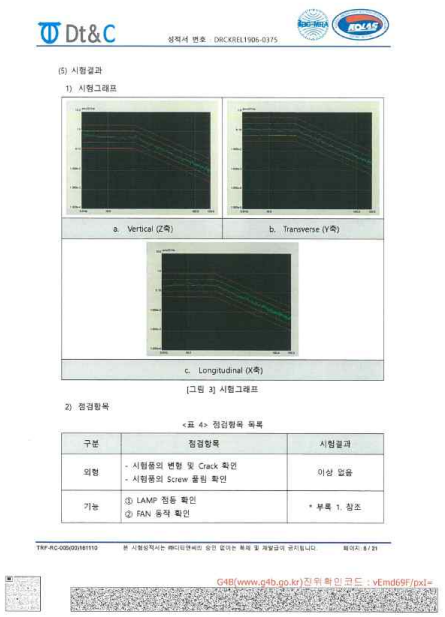
KS-12-0430/RE-17025-91 KOLAS 인정

* 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.

시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 report@dtnc.net 으로 문의 부탁 드립니다.

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 21

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : vEmd69F/pxI=



Dt&C 성적서 번호 : DRCKREL1906-0375

(5) 시험결과

1) 시험그래프

a. Vertical (Z축) b. Transverse (Y축)

c. Longitudinal (X축)

[그림 1] 시험그래프

2) 점검항목

<표 4> 점검항목 목록

구분	점검항목	시험결과
외형	- 시험품의 변형 및 Crack 확인 - 시험품의 Screw 풀림 확인	이상 없음
기능	① LAMP 점등 확인 ② FAN 동작 확인	* 부록 1. 참조

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 8 / 21

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : vEmd69F/pxI=

차단장치(DPI-001)의 진동/충격시험을 디티앤씨에서 받았다. 2018년 6월 18일, 7월 23일에 KS R 9146:2002, KS R 9144: 2014로 시험 받았으며, 시험 결과 이상이 없는 것으로 나타났다.



시 험 성 적 서

(주)디티앤씨

17042 경기도 용인시 처인구 유림로 154 번길 42(유방동)
Tel : 031-321-2664, Fax : 031-321-0220

1. 성적서 번호 : DRCKREL1808-0339
2. 신 청 인
• 상 호 : (주) 에니텍
• 주 소 : 경기도 수원시 영통구 신원로 88, 101 동 1301 호(신동, 디지털엠파이어 II)
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리용
4. 제품명 / 모델명 : 미세먼지 객실유입 차단장치 / -
5. 시험방법 : KS R 9146 : 2002
6. 시험기간 : 2018 년 07 월 23 일
7. 시험환경 : 온 도 (27 ± 2) °C, 습 도 (54 ± 5) % R.H.
8. 시험결과 : 본문 참조

이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

확인	시험자	기술책임자
	성 명 : 문 선 기	성 명 : 정 재 한

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협력(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2018 년 08 월 13 일

한국인정기구 인정 (주)디티앤씨 대표이사 (인)

* 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.

시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 report@dtnc.net 으로 문의 부탁 드립니다.

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 10

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : oXjdPoTxQok=



시 험 성 적 서

(주)디티앤씨

17042 경기도 용인시 처인구 유림로 154 번길 42(유방동)
Tel : 031-321-2664, Fax : 031-321-0220

1. 성적서 번호 : DRCKREL1806-0266
2. 신 청 인
• 상 호 : (주) 에니텍
• 주 소 : 경기도 수원시 영통구 신원로 88, 101 동 1301 호(신동, 디지털엠파이어 II)
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리용
4. 제품명 / 모델명 : 미세먼지 객실유입 차단장치 / DPI - 001
5. 시험방법 : KS R 9144 : 2014, 철도 차량 부품의 진동 시험방법 (2 종 B 종)
6. 시험기간 : 2018 년 06 월 18 일
7. 시험환경 : 온 도 (25 ± 2) °C, 습 도 (45 ± 5) % R.H.
8. 시험결과 : 본문 참조

이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

확인	시험자	기술책임자
	성 명 : 문 선 기	성 명 : 정 재 한

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협력(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2018 년 06 월 29 일

한국인정기구 인정 (주)디티앤씨 대표이사 (인)

* 표시된 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임을 밝힙니다.

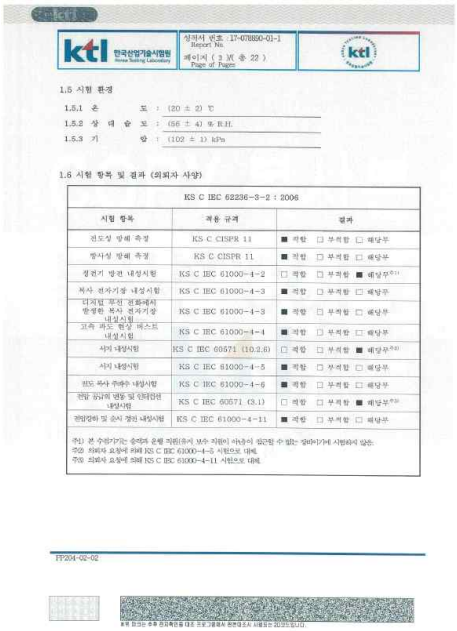
시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 report@dtnc.net 으로 문의 부탁 드립니다.

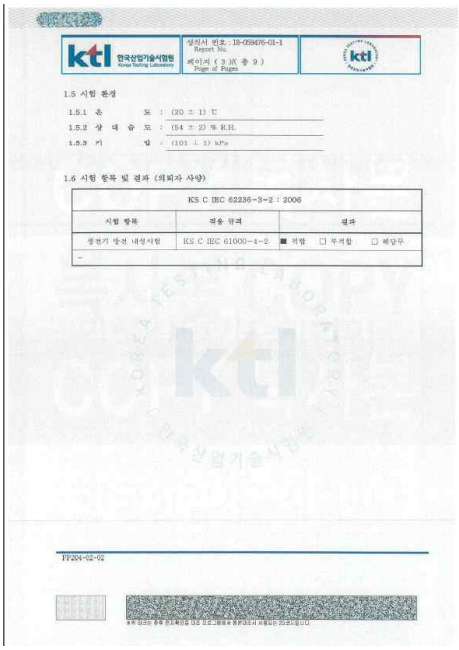
TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 18

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : XRtT4L2sgDs=

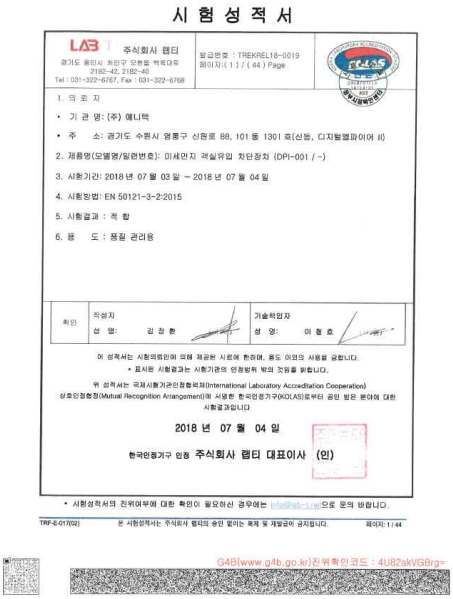
나) 전자파시험

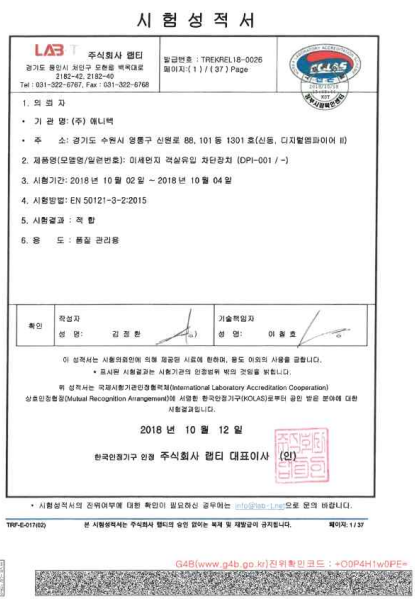
동력 미세먼지 제거장치(TDC-G01)의 전자파시험을 한국산업기술시험원 에서 받았다. 2018년 5월 28일부터 6월 4일까지 1차시험을 받고, 2018년 10월 2일에 추가 시험을 받았다. 전기자기적합성(EMC) (KS C IEC 62236-3-2:2006)에 따라 전도성 방해, 방사성 방해, 정전기 방전 내성시험, 복사 전자기장 내성시험, 디지털 무선 전화에서 발생한 복사 전자기장 내성시험, 고속과도 현상 버스트 내성시험, 서지 내성시험, 전도 복사 주파수 내성시험, 전압강하 및 순시 정전 내성시험을 시험받았따. 시험결과 모든 항목에서 적합 판정을 받았다.





차단장치(DPI-001)의 전자자기적합성 시험을 주식회사 랩티에서 받았다. 2018년 7월 3일-4일, 2018년 10월 2일-4일에 EN50121-3-2:2015로 시험 받았으며, 시험 결과 적합한 것으로 나타났다.





다) 환경시험

동력 미세먼지 제거장치(TDC-G01)의 환경시험을 디티앤씨에서 2018년 7월 31일부터 8월 6일까지 진행하였다. KS C IEC 60068-2-1: 2010, KS C IEC 60068-2-2: 2014, KS C IEC 60068-2-14: 2014, KS C IEC 60068-2-30: 2014, KS R 9146: 2002 시험을 진행하였으며, 시험결과 이상 없음으로 판정받았다.



시 험 성 적 서

(주)디티앤씨

17042 경기도 용인시 처인구 유림로 154 번길 42 (유방동)
Tel : 031-321-2664, Fax : 031-321-0220

1. 성적서 번호 : DRCKREL1808-0344
2. 신 청 인
 • 상 호 : 디케이주식회사
 • 주 소 : 광주광역시 광산구 평동산단로 360(장록동)
3. 시험성적서의 용도 : 품질 관리 및 성능 인증용
4. 제품명 / 모델명 : 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 / TDC-G01
5. 시험방법 : KS C IEC 60068-2-1 : 2010, KS C IEC 60068-2-2 : 2014,
 KS C IEC 60068-2-14 : 2014, KS C IEC 60068-2-30 : 2014,
 KS R 9146 : 2002
6. 시험기간 : 2018 년 07 월 31 일 ~ 2018 년 08 월 06 일
7. 시험환경 : 온 도 (26 ± 4) °C, 습 도 (48 ± 18) % R.H.
8. 시험결과 : 본문 참조

이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

확인	시험자	기술책임자
	성 명 : 임 규 진	성 명 : 정 재 한

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협력(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2018 년 08 월 21 일

한국인정기구 인정 ㈜디티앤씨 대표이사 (인)

* 표시한 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임

시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 report@dtnc.net으로 문의 부탁 드립니다.

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 36

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : 3r6t7zd37Ne=



Dt&C 성적서 번호 : DRCKREL1808-0344

(4) 시험장면사진

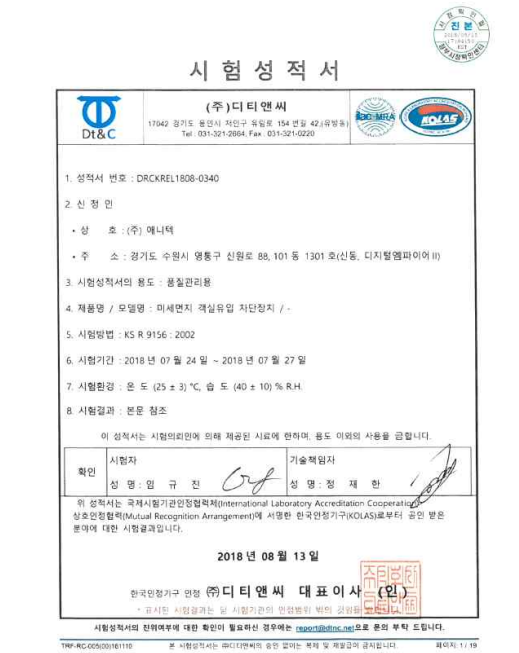
a. 시험 전

b. 시험 후

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 19 / 36

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : 3r6t7zd37Ne=

차단장치(DPI-001)의 환경시험을 디티앤씨에서 2018년 7월 24일부터 7월 27일까지 진행하였다. KS R 9156:2002 (2종 A)시험을 진행하였으며, 시험결과 이상 없음으로 판정받았다.



시 험 성 적 서

(주)디티앤씨

17042 경기도 용인시 처인구 유림로 154 번길 42 (유방동)
Tel : 031-321-2664, Fax : 031-321-0220

1. 성적서 번호 : DRCKREL1808-0340
2. 신 청 인
 • 상 호 : (주) 에너텍
 • 주 소 : 경기도 수원시 영통구 신원로 88, 101 동 1301 호(신동, 디지털엠파이어 II)
3. 시험성적서의 용도 : 품질관리용
4. 제품명 / 모델명 : 미세먼지 객실유입 차단장치 / -
5. 시험방법 : KS R 9156 : 2002
6. 시험기간 : 2018 년 07 월 24 일 ~ 2018 년 07 월 27 일
7. 시험환경 : 온 도 (25 ± 3) °C, 습 도 (40 ± 10) % R.H.
8. 시험결과 : 본문 참조

이 성적서는 시험의뢰인에 의해 제공된 시료에 한하며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

확인	시험자	기술책임자
	성 명 : 임 규 진	성 명 : 정 재 한

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협력(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인 받은 분야에 대한 시험결과입니다.

2018 년 08 월 13 일

한국인정기구 인정 ㈜디티앤씨 대표이사 (인)

* 표시한 시험결과는 당 시험기관의 인정범위 밖의 것임

시험성적서의 진위여부에 대한 확인이 필요하신 경우에는 report@dtnc.net으로 문의 부탁 드립니다.

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 1 / 19

G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : rJKUi847lf8=



Dt&C 성적서 번호 : DRCKREL1808-0340

(계속)

c. 시험품 Set-up

[그림 3] 시험장면사진

TRF-RC-005(00)161110 본 시험성적서는 ㈜디티앤씨의 승인 없이는 복제 및 재발급이 금지됩니다. 페이지: 7 / 19

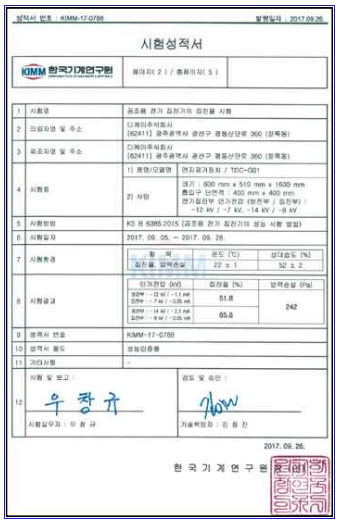
G4B(www.g4b.go.kr)진위확인코드 : rJKUi847lf8=

라) 집진시험

동력 미세먼지 제거장치(TDC-G01)의 집진시험을 한국기계연구원에서 2017년 9월 5일부터 26일까지 시험받았다. 공조용 전기집진기의 성능시험 방법(KS B 6385:2015)에 따라 시험받았으며, 시험결과 집진율 51.8% 이상으로 판정받았다.

인가전압 (kV)	집진율 (%)	압력손실 (Pa)	비 고
방전부 : -12 kV / -1.1 mA 집진부 : -7 kV / -0.05 mA	51.8	242	1. 시험 규격 : KS B 6385 : 2015 2. 시험 유속 : 면속도 4.0 m/s 3. 시험 유량 : 38.4 m^3/min 4. 시험 분진 : 0.3 μm (KCl 1%) 5. 시험품의 크기 : 600 mm x 510 mm x 1600 mm 6. 흡입구 단면적 : 400 mm x 400 mm
방전부 : -14 kV / -2.1 mA 집진부 : -8 kV / -0.05 mA	65.6		

인가전압 (kV)	시험 입경 (μm)					비 고
	0.30	0.37	0.42	0.61	0.75	
방전부 : -12 kV / -1.1 mA 집진부 : -7 kV / -0.05 mA	51.8	58.1	66.9	71.8	81.2	1. 시험 규격 : KS B 6385 : 2015 2. 시험 유속 : 면속도 4.0 m/s 3. 시험 유량 : 38.4 m^3/min 4. 압력 손실 : 242 Pa 5. 시험 분진 : 0.3 μm 외 (KCl 1%) 6. 시험품의 크기 : 600 mm x 510 mm x 1600 mm 7. 흡입구 단면적 : 400 mm x 400 mm
방전부 : -14 kV / -2.1 mA 집진부 : -8 kV / -0.05 mA	65.6	71.8	80.8	84.2	87.7	



시험성적서

KIMM 한국기계연구원

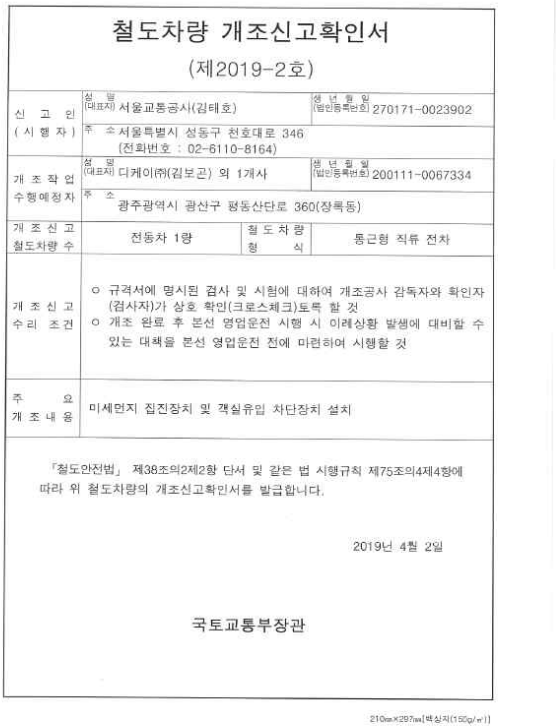
1	시험명	공조용 전기 집진기의 집진율 시험
2	의뢰자명 및 주소	디케이주식회사 [62411] 광주광역시 광산구 평동산단로 360 (장록동)
3	피조자명 및 주소	디케이주식회사 [62411] 광주광역시 광산구 평동산단로 360 (장록동)
4	시험품	기 종명/모델명 : 연구용기정치 / TDC-G01 기 사양 : 크기 : 600 mm x 510 mm x 1600 mm, 흡입구 단면적 : 400 mm x 400 mm, 전기집진부 인가전압 (방전부 / 집진부) : -12 kV / -7 kV, -14 kV / -8 kV
5	시험방법	KS B 6385:2015 (공조용 전기 집진기의 성능 시험 방법)
6	시험일자	2017. 09. 05. ~ 2017. 09. 26.
7	시험환경	항 목 / 온도 (℃) : 22 ± 1 / 상대습도 (%) : 50 ± 2
8	시험결과	인가전압 (kV) / 집진율 (%) / 압력손실 (Pa) : -12 kV / -7 kV, -14 kV / -8 kV : 51.8 / 65.8 / 242
9	성적서 번호	KIMM-17-0708
10	성적서 용도	성능인증용
11	기타사항	-
12	시험 및 보고 : 우 창 규 (시험실무자) / 검토 및 승인 : (기술책임자 : 김 용 진)	

2017. 09. 26.

한 국 기 계 연 구 원

(나) 개조신고 결과

철도안전법 시행규칙 제75조의4제1항제8호에 따라 철도 부착물은 개조승인/신고 승인서를 국토교통부로부터 받아야 하였다. 미세먼지 집진장치 및 객실유입 차단장치는 모두 구조체안전, 주행안전, 전기안전, 화재안전, 위험도분석 등을 거쳐 2019년 4월 2일부로 동력 하이브리드 집진장치에 대한 개조신고 승인서를 발급받았다.



철도차량 개조신고확인서

(제2019-2호)

신 고 인 (시 행 자)	성 명 (대표자) 서울교통공사(김태호)	생 년 월 일 (법인등록번호) 270171-0023902	
	주 소 서울특별시 성동구 천호대로 346 (전화번호 : 02-6110-8164)		
개 조 작 업 수행예정자	성 명 (대표자) 디케이㈜(김보곤) 외 1개사	생 년 월 일 (법인등록번호) 200111-0067334	
	주 소 광주광역시 광산구 평동산단로 360(장록동)		
개 조 신 고 철도차량 수	전동차 1량	철 도 차 량 형 식	통근형 직류 전차
개 조 신 고 수 리 조 건	○ 규격서에 명시된 검사 및 시험에 대하여 개조공사 감독자와 확인자(검사자)가 상호 확인(크로스체크)토록 할 것 ○ 개조 완료 후 본선 영업운전 시행 시 이례상황 발생에 대비할 수 있는 대책을 본선 영업운전 전에 마련하여 시행할 것		
주 요 개 조 내 용	미세먼지 집진장치 및 객실유입 차단장치 설치		

「철도안전법」 제38조의2제2항 단서 및 같은 법 시행규칙 제75조의4제4항에 따라 위 철도차량의 개조신고확인서를 발급합니다.

2019년 4월 2일

국토교통부장관

210mm×297mm[백상지(150g/㎡)]

본 문서의 불법유출 시, 관계법과 규정에 의해 처벌됩니다. /10.15.33.110/2019.06.17 14:21/21714094

나. 연구개발 성과

(1) 논문 게재 성과

순번	게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분	SCI 구분
			주저자	교신저자	공동저자				
1	2015	지하터널에서 주행하는 전동차의 하부에서 발생한 입자의 이동경로 예측	이경란	육세진	김원근, 우상희, 김종범, 배귀남, 박형구, 윤화현	한국입자에어로졸학회지	11(1)	국내	비SCI
2	2015	광산란 측정장치에 따른 대중교통차량 미세먼지 측정 특성	권순박	권순박	정우태, 박덕신	한국입자에어로졸학회지	11(1)	국내	비SCI
3	2015	Antimicrobial air filters using natural *Euscaphis japonica* nanoparticles	황기병	정재희	허기훈,윤지호, 이정은,이희주, 노주원,배귀남	PLOS ONE	10(5) e126481	국외	SCI
4	2015	Herbal extract incorprated nanofiber fabricated by an electrospinning technique and its application to antimicrobial air filtration	최정안	정재희	양병준,배귀남	ACS Applied Materials & Interfaces	7	국외	SCI
5	2015	Synthesis of hybrid carbon nanotube structures coated with S*ophora flavescens* nanoparticles and their application to antimicrobial air filtration	황기병	정재희 배귀남	심경미	Journal of Aerosol Science	86	국외	SCI
6	2015	Antimicrobial nanoparticle-coated electrostatic air filter with high filtration efficiency and low pressure drop	심경미	정재희	박현설,배귀남	Science of the Total Environment	533	국외	SCI
7	2016	Antimicrobial air fabrication using a continuos high-throughput aerosol-based process	강준상	배귀남 정재희	김한나,최정안, 리 학,서성철, 배귀남	Aerosol and Air Quality Research	16	국외	SCIE
8	2016	Effect of antimicrobial air filters on the viability and culturability of airborne bacteria	황기병	정재희	권보미,이승재, 이병욱,심경미, 배귀남	CLEAN - Soil, Air, Water	10	국외	SCIE
9	2016	Investigation of airflow and particle behavior around a subway train running in the underground tunnel	이경란	육세진	김원근,우상희, 김종범,배귀남, 박형구,윤화현	Aerosol Science and Technology	50(7)	국외	SCI
10	2015	Non-powdered dust removal device attached underneath a train cabin in a subway tunnel	배귀남	배귀남	김종범,우상희, 육세진,박형구, 윤화현	The Built Environment	168 (1)	국외	비SCI
11	2016	루버 집진기의 성능특성	우상희	배귀남	김종범,박통일, 육세진,권순박	Particle and Aerosol Research	12(1)	국내	비SCI
12	2016	지하철 미세먼지 제거용 1단 전기집진기의 성능특성	김민락	배귀남	우상희,김종범	실내환경 및 냄새 학회지	15(2)	국내	비SCI
13	2016	도시철도 터널 내 부유먼지의 일변화 특징	우상희	배귀남	김종범, 황문세, 탁길현, 윤화현, 육세진	Journal of the Korean Society for Railway	19(3)	국내	비SCI
14	2016	Performance of saw-plate-type electrostatic precipitator for removal of fine particles in subway tunnels	우상희	배귀남	오재호, 김종범, 육세진	International Journal of Advanced Railway	4(4)	국내	비SCI
15	2016	Size distribution analysis of airborne brake wear particles	남궁형규	권순박	김종범, 김민수, 김민해, 박세찬, 우상희, 배귀남, 박덕신	Wear	372-373	국외	SCI

16	2017	A new method for the real-time quantification of airborne biological particles using a coupled inertial aerosol system with in situ fluorescence imaging	최정안	정재희	강준상, 홍승찬, 배귀남	Sensors and Actuators B: Chemical	244	국외	SCI
17	2017	Evaluation of Aerosolization Characteristics of Biocontaminated Particles from Flood-damaged Housing Materials	이정은	정재희	이병욱, 배귀남	Journal of Aerosol Science	106	국외	SCI
18	2017	도시철도 차량 하부의 풍속 및 미세먼지 농도 특징	김종범	배귀남	우상희, 장홍량, 최진원, 황문세, 박형구, 윤화현, 정준식	Journal of the Korean Society for Railway	20(1)	국내	비SCI
19	2017	실내 에어로졸의 거동 및 제어 연구동향	배귀남	배귀남	김종범	실내환경 및 냄새학회지	16(2)	국내	비SCI
20	2017	단선 터널구간에서 차량운행에 따른 미세먼지 농도 변화	김종범	배귀남	우상희, 황문세, 윤화현, 정준식	Journal of the Korean Society for Urban Railway	5(1)	국내	비SCI
21	2017	도시철도 터널 미세먼지 제거용 하이브리드형 집진장치의 성능평가	우상희	배귀남	김종범, 장홍량, 권순박, 육세진	한국철도학회	20(4)	국내	비SCI
22	2017	Performance estimation of a louver dust collector attached to the bottom of a subway train running in a tunnel	심정보	육세진	우상희, 김원근, 김종범, 배귀남, 윤화현	Aerosol and Air Quality Research	17	국외	SCIE
23	2017	Prediction PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural netwo가 (ANN)	박세찬	권순박, 조경화	김민정, 김민해, 남궁형규, 김기태	Journal of Hazardous Materials	341	국외	SCI
24	2017	A study on HVAC Performance Impreovement through Fine Dust Blocking Device	박세찬	권순박	김민해, 남궁형규	International Journal of Advanced Railway	5(1)	국내	비SCI
25	2017	Electrospun magnetic nanoparticle-decorated nanofiber filter and its applications to high-efficiency air filtration	김주영	정재희	홍승찬, 배귀남	Environmental Science and Technology	51	국외	SCI
26	2017	Effects of wall thickness and material property on inverse heat conduction analysis of a hollow cylindrical tube	노정훈	육세진	곽동빈	Inverse Problems in Science & Engineering	26(9)	국외	SCI
27	2017	Enhancement of louver dust collector efficiency using modified dust container	심정보	육세진	여운학, 정광훈, 박수범, 배귀남	Powder Technology	325	국외	SCI
28	2017	운행 도시철도 객실의 입자오염 특징	김종범	배귀남	우상희, 김창혁, 임형진, 황문세, 윤화현, 이승복, 정준식	한국도시철도학회지	5(4)	국내	비SCI
29	2018	Baffle dust collector for removing particles from a subway tunnel during the passage of a train	심정보	육세진	우상희, 김종범, 배귀남, 오상곤	Journal of Mechanical Science and Technology	32(3)	국내	SCIE

30	2018	Investigation of diurnal pattern of generation and resuspension of particles induced by moving subway trains in an underground tunnel	우상희	배귀남, 육세진	김종범, 황문세, 탁길훈, 윤화현	Aerosol and Air Quality Research	18	국외	SCIE
31	2018	Size-dependent characteristics of diurnal particle concentration variation in an underground subway tunnel	우상희	배귀남, 육세진	김종범, 황문세, 탁길훈, 윤화현, 권순박, 박덕신	Environmental Monitoring and Assessment	190:740	국외	SCIE
32	2018	도시철도 환경의 미세먼지 오염 현황	김종범	배귀남	이승복	Journal of Odor and indoor Environment	17(4)	국내	비SCI
33	2018	고전압 전극 두께와 집진판 간격에 따른 전기집진기의 미세먼지 집진효율 및 오존발생 특성	이재인	이승복	우상희, 김종범,배귀남	한국입자에어로졸학회지	14(4)	국내	비SCI
34	2019	Performance evaluation of a hybrid dust collector for removing particles during subway train operation	우상희	배귀남, 육세진	천태원, 이기혁, 김종범, 권순박, 장홍량	Aerosol Science and Technology	53(5)	국외	SCI

(2) 특허 성과

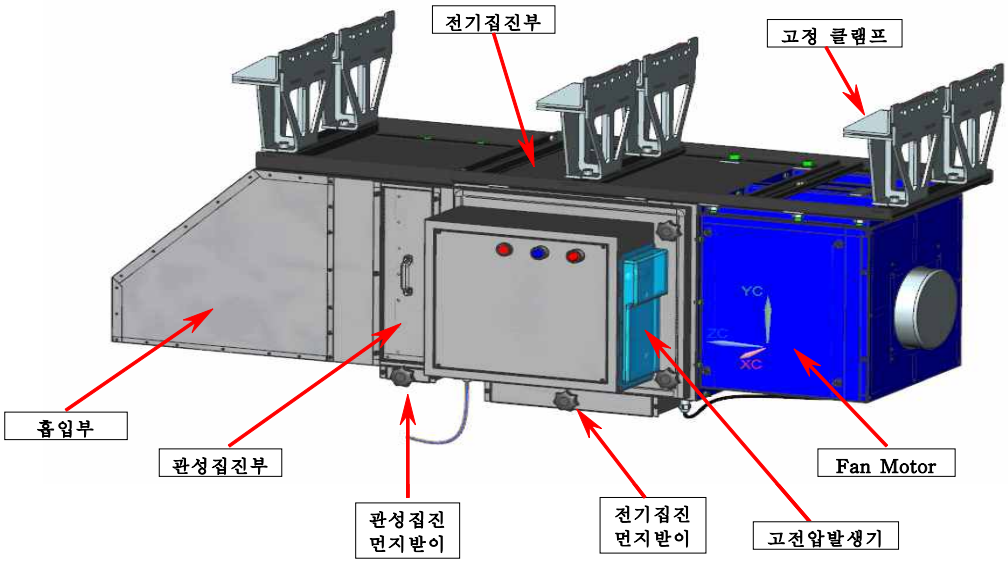
No	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국 명	출원			등 록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	전기하전을 통한 미세 부유물의 메쉬 필터 흡착현상 저감기능과 미세 부유물 흡입 최소화 기능을 가지는 차량용 공기흡입장치 및 차량용 공기흡입 구조	대한민국	한국철도기술연구원	2015.04.07	10-2015-0048926	한국철도기술연구원	2017.04.04	101725241	100
3	차량용 미세먼지 필터링 장치	대한민국	㈜애니텍	2015.06.24.	10-2015-0089767	㈜애니텍	2016.10.10	10-1666460	100
3	전기하전을 통한 미세 부유물의 흡착 저감기능을 가지는 평판장치 및 이를 이용한 방열판	대한민국	한국철도기술연구원	2015.04.14	10-2015-0052608	한국철도기술연구원	2017.01.26	10-1702592	100
4	무동력집진장치	대한민국	한국과학기술연구원	2015.06.22	10-2015-0088319	한국과학기술연구원	2016.12.02	10-1684353	100
5	철도차량의 부착물용 클램프	대한민국	디케이 주식회사	2016.03.22.	10-2016-0034067	디케이 주식회사	2017.10.31.	10-1793965	100
6	전동차 내부의 철분진 유입을 방지하기 위한 필터	대한민국	주식회사 애니텍	2016.03.24	10-2016-0035078	주식회사 애니텍	2018.10.23	10-1912700	100
7	전기집진기 제어시스템 및 제어방법	대한민국	한국과학기술연구원, 동양대학교 산학협력단	2016.03.25.	10-2016-0035825호	한국과학기술연구원, 동양대학교 산학협력단	2017.08.25.	10-1773407	100
8	복합식 집진 장치	대한민국	한국과학기술연구원	2016.03.31.	10-2016-0038856	한국과학기술연구원	2017.11.21.	10-1801748	100
9	Complex type dust collector	중국	한국과학기술연구원	2016.10.13	201610894604.4				100
10	무동력집진장치	대한민국	한국과학기술연구원	2016.11.30	10-2016-0161384	한국과학기술연구원	2018.09.06	10-1898010	100
11	Nonpowered dust collector	중국	한국과학기술연구원	2016.05.12	201610313463.2	한국과학기술연구원	2018.12.04	ZL201610313463.2	100
12	Nonpowered dust collector	일본	한국과학기술연구원	2016.05.18	2016-099425	한국과학기술연구원	2018.04.06	6317782	100
13	먼지유입차단 가이드베인을 구비하여 먼지흡입 최소화기능을 가지는 차량용 공기흡입장치 및 차량용 공기흡입구조	대한민국	한국철도기술연구원	2017.01.17.	10-2017-0008038	한국철도기술연구원	2017.07.24.	10-1762839	100
14	철도차량용 HVAC 시스템의 전원 제어 시스템	대한민국	주식회사 애니텍	2017.12.07	10-2017-0167211	주식회사 애니텍	2019.03.06	10-1957262	100
15	철도 차량용 볼트 캐리어	대한민국	디케이 주식회사	2017.11.14.	10-2017-0151468				100
16	비산먼지 집진장치	대한민국	한국과학기술연구원	2017.12.11	10-2017-0169463	한국과학기술연구원	2019.07.09	10-2000020	100
17	자성나노섬유 집진에어필터 장치	대한민국	한국과학기술연구원	2018.05.14	10-2018-0054751				100
18	전동차 비산 미세먼지 집진장치	대한민국	한국과학기술연구원, 동양대 산학협력단	2018.12.18	10-2018-0163828				100

다. 연구 결과

(1) 기술적 성과

(가)전동차 하부 부착형 집진장치

① 부착형 집진장치 개발품 제원



제품명 : TDC-S01

동력 미세먼지 제거장치

품 명	SIZE	무 게	비 고
동력 미세먼지 제거장치	1086*554*1210	80Kg	클램프 제외

◆ 제원

구분	Spec.
정격전압	220V, 50/60HZ
최대풍량(m^3/min)	4500m^3/h
소비전력	1500W/1600 W
고전압	−12KV, −14KV
저전압	−7KV, −8KV

② 부착형 집진장치 개발품 성능

단품 성능 측정 결과, 미세먼지 집진효율 51.8% 이상



(나) 집진 카트리지 세정장치

① 세정장치 개발품 제원



집진 카트리지 세정장치

품 명	SIZE	무 게	비 고
집진 카트리지 세정장치	1838*960*2755	약 250 Kg	

◆ **제원**

구분	정격전압	정격주파수	소비전력
초음파	220V	4KHz	1600W
급수용펌프	220V/380V	60Hz	680W
블로워	380V	60Hz	1500W

② 세정장치 개발품 성능

- 세정시간 20초, 건조시간 30초를 소요하며, 세정효율 90% 이상을 만족하였다.

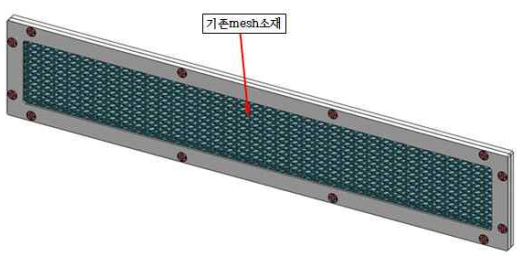
(다) 미세먼지 객실유입 차단장치

① 미세먼지 차단장치 제원

품 명	SIZE	무 게	비 고
미세먼지 객실유입 차단시스템	497*112*62	10 kg	미세먼지 차단장치 + 냉방기 내부 인터페이스



이온발생장치를 설치한 유동유도부



전기메쉬필터

<미세먼지 객실유입 차단장치 사양>

NO	분류	품명	재질	크기 (mm)	무게 (kg)
1	미세먼지 차단장치	유동유도부	STS304	497*112*62	3
		이온발생장치	Carbon Fiber	490*25*5	0.2
		전압인가필터	MC, sus	465*90*10	1
2	고전압 발생 및 전원차단장치	케이스	STS304	300*200*150	4
		고전압 발생장치	복합	42*25*18	0.035
		SMPS	복합	111*78*36	0.26
		습도 센서	복합	93*Ø12	0.02
		컨트롤러	복합	72*36*83	0.211

② 미세먼지 차단장치 성능

2019년 방화역에서 상일동 방면으로 운행하는 편도구간 측정결과 미세먼지 차단장치가 최소 0 hPa에서 최대 2.1 hPa의 압력손실을 확인하였으며, 운행기간 중 평균 차압은 0.827 hPA(82.7Pa)로 본 연구에서 개발한 미세먼지 차단장치는 **100 Pa 이하의 차압**을 발생시킨다. 단극 이중하전 실험결과 **93.3%의 이중 단극 하전효율**을 보였다. 측정이 수행된 5호선 전 구간(방화행, 상일동행/마천행)에서 **PM10과 PM2.5의 차단효율은 각각 74.5%, 82.5%의 차단효율**을 확인하였다.

(라) 연구의 정량적 성과

총 34건의 논문이 출판되었으며 이 중에서 19건은 SCI(SCIE)급으로, 목표치를 초과달성하였다. 총 18건의 특허를 출원하였으며, 이중에서 13건이 등록되어서 목표치를 초과 달성하였다. 시제품을 4종 7건 이상 제작하여 목표치를 달성하였다. 총 4건의 운영지침서가 작성되었으며, 목표치를 달성하였다.

특허		논문 실적		시제품	운영지침서
출원	등록	비SCI	SCI(SCIE)		
18	13	15	19	4종 10건 이상	4건

(2) 경제적 성과

기존 고정식 집진설비에 비해 이동식 집진장치를 사용함으로써 적은 비용으로 터널 내 부유 미세먼지를 발생원 근처에서 신속하게 제거하여 비용을 절감 할 수 있다. 신제품(전동차 부착형 미세먼지 제거장치, 미세먼지 객실유입 차단장치)을 개발하여 도시철도 터널 미세먼지 관리 분야의 신규시장 창출할 것으로 기대된다.

미세먼지 제거장치 : 서울시 전동차 2,000대 × 0.2 (설치율) × 2,500만원 = 100억원

미세먼지 차단장치 : 서울시 전동차 2,000대 × 0.5 (설치율) × 100만원 = 10억원

(전동차 외 유사 HVAC 시스템을 사용하는 철도차량, 버스 등 적용 확대)

또한, 도시철도 터널 집진장치에 대한 중국, 인도 등 개발도상국에 수출을 할 수 있다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

(1)최종목표

○ 운행 중인 도시철도 차량에 부착이 가능한 터널 내 오염물질 제거기술 개발

- 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 시제품 개발
  - ✓ 미세먼지 제거율 : 50% 이상
  - ✓ 미세먼지 수거량 : 2×10^9 μg/월 이상
  - ✓ 세정주기 : 1개월 (약 25일)
  - ✓ 주요 구성품 : (1안) 하이브리드형 : 유동 가이드베인 + 관성집진 + 전기집진
    (2안) 다단필터형 : 유동 가이드베인 + 세척형 고분자복합필터

- 재생형 집진 카트리지 세정장치 시제품 개발
  - ✓ 미세먼지 세정효율 : 90% 이상
  - ✓ 세정시간 : 20초 이내
  - ✓ 건조시간 : 30초 이내
  - ✓ Batch당 집진 카트리지 수 : 4 set
  - ✓ 세정대상 : (1안) 전기집진판, (2안) 복합고분자필터

- 터널부유 미세먼지 객실유입 차단장치 시제품 개발
  - ✓ 미세먼지 차단율 : 70% 이상
  - ✓ 압력손실 : 100 Pa 이하
  - ✓ 단극하전효율 : 90% 이상
  - ✓ 세정주기 : 3개월 이상
  - ✓ 주요 구성품 : 단극하전기 + 전기메쉬필터 + 전원제어부 + 유동유도부

나. 목표 달성여부

(1) 전동차 부착형 미세먼지 제거장치 시제품 개발

(가) 미세먼지 제거율: 50% 이상

한국기계연구원(KIMM)에서 집진성능 공인인증 시험을 의뢰하여 2가지 전압 조건에서 인증시험을 완료하였다. 면 속도는 동력 집진장치의 가동조건을 따랐다. 인증시험 결과 500 nm 이상 입자 크기에서 집진효율이 모두 50% 이상이므로, 미세먼지 제거율 (PM_{10}) 50% 이상 성과목표를 달성하였다고 볼 수 있다.



성적서 번호 : KIMM-17-0788 발행일자 : 2017.09.26.

시험성적서

KIMM 한국기계연구원 | 페이지(2) / 총페이지(5)

1	시험명	공조용 전기 집진기의 집진율 시험	
2	의뢰자명 및 주소	디케이주식회사 [62411] 광주광역시 광산구 명동산단로 360 (장록동)	
3	제조자명 및 주소	디케이주식회사 [62411] 광주광역시 광산구 명동산단로 360 (장록동)	
4	시험품	1) 품명/모델명	먼지제거장치 / TDC-G01
		2) 사양	크기 : 600 mm x 510 mm x 1600 mm 흡입구 단면적 : 400 mm x 400 mm 전기집진부 인가전압 (방전부 / 집진부) : -12 kV / -7 kV, -14 kV / -8 kV
5	시험방법	KS B 6385:2015 (공조용 전기 집진기의 성능 시험 방법)	
6	시험일자	2017. 09. 05. ~ 2017. 09. 26.	
7	시험환경	항 목	온도 (℃) / 상대습도 (%)
		집진율, 압력손실	22 ± 1 / 52 ± 2
8	시험결과	인가전압 (kV)	집진율 (%) / 압력손실 (Pa)
		방전부 : -12 kV / -1.1 mA 집진부 : -7 kV / -0.05 mA	51.8 / 242
		방전부 : -14 kV / -2.1 mA 집진부 : -8 kV / -0.05 mA	65.6
9	성적서 번호	KIMM-17-0788	
10	성적서 용도	성능인증용	
11	기타사항	-	
12	시험 및 보고 : 우 창 규 / 시험실무자 : 우 창 규	검토 및 승인 : / 기술책임자 : 김 용 진	

2017. 09. 26.

한 국 기 계 연 구 원

2/5

<미세먼지 제거율 50% 이상 공인인증 시험 성적서>

(나) 미세먼지 수거량: 2×10^9 ㎍/월 이상

- 월 2 kg 포집 설정 근거(과제 계획서 상)

○ 지하터널의 미세먼지 농도(C)는 약 400 ㎍/㎥, 터널의 단면적(A)은 2 ㎡, 터널의 길이(L)는 25×10^3 m, 하루 4회 왕복 운행(N)을 하면서 미세먼지 제거효율(E) 50% 성능의 부착형 미세먼지 제거장치가 1개월(약 25일) (T) 동안 제거하는 미세먼지 수거량은 아래와 같이 계산되며, 이는 기존 자석식 흡착기보다 약 20배 이상 높은 성능임

미세먼지 수거량 = C × A × L × N x 2 x E x T

= 400 × 2 × (25×10^3) × 4 × 2 × 0.5 × 25 = 2×10^9 ㎍/월 이상

= 2 kg/월 이상

- 시제품 집진량 결과

○ 광주 1호선 2차 현차평가에서 전기집진기와 전도성필터가 결합된 전기식 집진장치 1대(흡입면적 0.16 m^2)가 2일 중 12시간 동안 360 km 주행시 집진량은 54 g이었으므로, 집진성능은 평균 0.150 g/km임

○ 전기식 집진장치 2대를 전동차에 부착하고 (흡입면적 0.32 m^2), 터널 미세먼지 농도를 계획서상 기준인 400 ㎍/㎥ 조건으로 환산하는 경우 집진성능은 0.425 g/km임

- 성과 목표 달성 여부 결과

○ **전기식 집진장치 2대를 전동차에 부착하여 (흡입면적 0.32 m^2) 25 km 터널을 하루 4회 왕복하면서 (하루 총 운행거리 200 km) 한달간 (25일) 집진하면,**
0.425 g/km x 200 km/일 x 25 일/월 = 2125 g/월 = 2.13 kg/월이므로 성과목표인 2 kg/월을 달성하였다.

(다) 세정주기: 1개월(25일)

전기식 집진장치에 적용된 전도성필터가 매일 자동으로 교체되면서 집진성능이 유지되도록 하기 위해 자동롤필터를 개발하였다. 개발한 자동롤필터의 정상적인 작동 여부를 터널 공간의 고정된 위치에서 테스트한 결과 매 6시간마다 자동으로 필터 교체가 이루어지는 것을 확인함으로써,

필터여재 총 길이 18 m, 하루 6시간 집진, 1일 1회 자동 필터 교체하는 조건에서 30일 동안 연속 사용이 가능하므로, 세정주기 1개월(25일)의 성과목표를 달성하였다.

(2) 재생형 집진 카트리지 세정장치 시제품 개발

(가) 미세먼지 세정효율: 90% 이상 (세정시간 20초, 건조시간 30초)

60℃ 고온 수조에서 **초음파 세정(20초)**와 80℃ **고온 건조(30초)**를 이용해서 지하철 입자를 집진한 전기집진셀/전도성필터 세정 결과 **93%의 세정효율**이 나타났으므로 성과목표를 만족했다.

(나) Batch당 집진카트리지 수: 4 set

당초 성과 목표상 집진카트리지 1 set는 pre-filter/medium filter 등이 결합 된 단위 유닛(unit)의 개념으로 사용하여 4개 set를 동시에 세정하는 것을 목표로 설정하였으나, 본 연구에서 개발된 전기집진셀은 5개의 unit으로 구성된 일체형이므로 당초 목표였던 집진카트리지 개수를 달성하였다.

(3) 터널부유 미세먼지 객실유입 차단장치 시제품 개발

(가) 미세먼지 차단율: 70% 이상

① 서울 도시철도 5호선 현장 테스트 결과

미세먼지 차단장치를 서울 5호선에 설치하여 2019년 5월 1일부터 5월 17일 중 약 8일간 측정이 진행되었으며, 열차 운행 스케줄에 따라 하루에 6시간씩 측정을 수행한 결과, 측정이 수행된 5호선 전 구간(방화행, 상일동행/마천행)에서 **PM10과 PM2.5의 차단효율은 각각 74.5%, 82.5%으로 성과목표치를 달성하였다**.

(나) 압력손실: 100 Pa 이하

냉방기가 가동되고 있을 때의 측정결과를 살펴보면, 최소 0 hPa에서 최대 2.1 hPa의 압력손실을 확인하였으며, 운행기간 중 평균 차압은 0.827 hPA을 확인하였다. 이 수치는 **82.7 Pa**로, 연구과제의 최종 목표치인 100 Pa보다 낮은 압력손실을 나타내어 목표치를 달성하였다.

(다) 단극하전효율: 90% 이상

단극 하전 효율 실험실 측정결과, 성과점검기준치인 단극하전효율 70%이상에 대하여, 본 과제에서 개발중인 단품의 **단극 하전효율은 93.3%**수준인 것으로 평가되어 2차년도 성과점검 기준치를 충분히 달성하였다.

(라) 세정주기: 3개월 이상

기존 메쉬필터의 먼지 포집량(14일)은 **4.45g**으로 확인되었으며, **시제품의 먼지 포집량(15일)**은 **0.65g**으로, 시제품을 **약 100일간** 수행하였을 때, **4.4g**이 포집됨을 추정할 수 있다. 이는 세정/교체 주기를 100일로 잡을 수 있으므로 성과목표인 3개월(90일)을 초과하였다고 볼 수 있다.

(4) 종합 평가

세부 연구목표	달성내용	달성도(%)
전동차 부착형 집진장치(단품) 미세먼지 저감효율 >50%	- **공인인증 시험**을 의뢰한 결과 **집진효율 51.8%** 이상으로 성과목표를 달성함.	100
전동차 부착형 집진장치 미세먼지 수거량 > 2×10^9 μg/월	- 광주도시철도 현차실험 결과인 집진성능 0.150 g/km을 계획서 조건(터널 농도 400μg/㎥, 흡입면적 0.32 m^2)으로 계산하면 미세먼지 수거량은 **2.13×10^9 μg/월**이므로 성과목표를 달성함	100
전동차 부착형 집진장치 세정주기 1개월(25일)	- 전도성필터 대신 **하루 6시간 운행 후 필터여재가 자동 교체되어 30일 동안 사용**이 가능한 자동 롤필터(18 m)를 개발하여 터널환경 테스트를 완료하였으므로 성과목표를 달성함	100
집진장치 운영관리 지침 (상세사양서)	- 집진장치 운영관리와 관한 지침서 작성 (동력하이브리드 집진장치)	100
세정장치 세정효율 >90%, 세정시간 <20초, 건조시간 <30초, batch당 집진 카트리지 수 : 4 set	- 4개 unit 일체형인 전기집진셀 1개에 대해 고온수조 **20초 초음파 세정과 30초 고온 건조** 조건으로 세정했을 때 **93%의 세정효율**이 나타났으므로 성과목표를 달성함.	100
세정장치 운영관리 지침 (상세사양서)	- 세정장치에 대한 운영관리 지침서 작성	100
객실유입 차단장치(단품) 미세먼지 차단효율 >70%	- 객실유입 차단장치 현차실험 결과 미세먼지 **차단효율이 82.5%**이었으므로 성과목표를 달성함	100
객실유입 차단장치(단품) 단극하전효율 >90%	- 실험실 측정결과 단품의 **미세먼지 단극하전효율은 93.3%**로 나타났으므로 성과목표를 달성함	100
객실유입 차단장치(단품) 압력손실 <100 Pa	- 5호선 현차실험 중 냉동기 가동시 차단장치에 의한 압력손실은 평균 **82.7 Pa**이었으므로 성과목표를 달성함	100
세정주기 : 3개월 이상	- 먼지 포집량 기준으로 **기존 필터(14일 사용)** 대비 **100일(3개월 이상)** 사용가능하므로 성과목표를 달성함	100
차단장치 운영관리 지침 (시스템 인터페이스 지침서)	- 차단장치와 전원공급장치(습도차단기능 포함)에 대한 운영관리 지침서 작성	100

다. 목표 미달성 원인 및 차후대책: 해당 없음

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 기술이전

기술이전 확약서

과제명(책임자)	전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발(배귀남, 이승복)				
과제수행기간	2014.09.03. ~ 2019.05.30.				
기술 권리 소유 기관	기 관 명	한국과학기술연구원	대 표 자		이병권
	사업자 등록번호	209-82-03522	기술이전 담당자	성명	박광현
				연락처	02-958-6395
기술 이전 대상 기관	기 관 명	디케이 주식회사	대 표 자		김보곤
	사업자 등록번호	410-81-35632	기술이전 담당자	성명	이상민
				연락처	062-600-1787

특허1	특허명	무동력 집진장치			
	특허등록 상태	등록(✓)	등록(출원)일자	등록(출원)번호	등록(출원)국가
		출원( )	2016.12.02.	10-1684353	대한민국
특허2	특허명	무동력 집진장치			
	특허등록 상태	등록(✓)	등록(출원)일자	등록(출원)번호	등록(출원)국가
		출원( )	2018.04.06.	6317782	일본
특허3	특허명	무동력 집진장치			
	특허등록 상태	등록(✓)	등록(출원)일자	등록(출원)번호	등록(출원)국가
		출원( )	2018.12.04.	ZL201610313463.2	중국
특허4	특허명	복합식 집진 장치			
	특허등록 상태	등록(✓)	등록(출원)일자	등록(출원)번호	등록(출원)국가
		출원( )	2017.11.21.	10-1801748	대한민국
특허5	특허명	비산먼지 집진장치			
	특허등록 상태	등록( )	등록(출원)일자	등록(출원)번호	등록(출원)국가
		출원(✓)	2017.12.11.	10-2017-0169463	대한민국

기술 이전 관련 내용	□ 기술양도 □ 전용실시 ▣ 통상실시 □ 무상실시 - 계약체결 당사자(기관명): 한국과학기술연구원 및 디케이㈜ - 계약체결 일자: 2019. 6-7월 예정(과제 최종 평가 결과 발표 후 1개월 이내) - 기술이전 조건: ▪ 정액기술료: 70,000천원(부가세 별도) ▪ 실시권: 독점적 통상실시권 ▪ 실시기간: 특허 만료일까지 ▪ 정액기술료 납부 시기 및 방법은 상호협의하여 체결예정

위 내용과 같이 '철도기술연구사업(과제명: 전동차 부착형 도시철도 터널 오염물질 제거기술 개발)' 연구성과의 기술이전계약을 체결할 것을 확약합니다.

2019년 4월 3일

기술 권리 소유기관명 :한국과학기술연구원 대표자 : 이 병 권 (인)

기술 이전 대상기관명 : 디케이 주식회사 대표자 : 김 보 곤 (인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

공동연구기관 디케이(주)에서 협동연구기관 한국과학기술연구원의 집진장치 개발기술에 대한 기술이전을 하기로 확약석를 작성하였다

- 기술명: 터널구간 미세먼지 저감을 위한 운행 전동차 부착형 집진기술
- 기술이전의 형태: 기술실시 허락/독점적 통상실시권
- 이전대상 기술의 형태: 특허
- 기술의 내용: 도시철도 터널구간의 미세먼지 오염도를 개선하기 위해 실제 운행하는 전동차 하부에 부착하여 미세먼지를 실시간으로 제거할 수 있는 집진장치
- 기술이전의 범위
  운행하는 전동차에 의해 발생하는 열차품을 이용하는 무동력 집진장치
  관성집진부와 전기집진부를 결합한 복합식 집진장치
  충분한 처리유량을 위해 Fan을 이용하는 비산먼지 집진장치
- 기술이전 기술료: 착수액 70,000,000원 (2회 분납)
- 기술이전 대상 특허

발명의 명칭	출원국	출원번호 (출원일)	등록번호 (등록일)
무동력 집진장치	한국	10-2015-0088319 (2015.06.22.)	10-1684353 (2016.12.02.)
무동력 집진장치	일본	2016-099425 (2016.05.18.)	6317782 (2018.04.06.)
무동력 집진장치	중국	2016103134632 (2016.05.12.)	ZL201610313463.2 (2018.12.04.)
복합식 집진 장치	한국	10-2016-0038856 (2016.03.31.)	10-1801748 (2017.11.21.)
비산먼지 집진장치	한국	10-2017-0169463 (2017.12.11.)	10-2000020 (2019.07.09.)

나. 실용화 사업계획

(1) 최종성과 실용화 현황 및 계획

최종성과명	실용화 계획	실용화 전략
전동차 부착형 미세먼지 제거장치 시제품 개발 재생형 집진 카트리지 세정장치 시제품 개발	■ 운영기관 대상 기술설명회 국내외 박람회 참가 홍보 ■ 운영기관과 협의를 통하여 2019년~2021년에 걸쳐 일부 차량을 대상으로 장기 현차평가 또는 시범사업을 추진하여 성능 입증 ■ 제작품의 지속적인 테스트를 통한 성능 업그레이드	■ 디케이(주)에 집진장치에 대한 기술이전 실시계약 협의를 통한 기술이전 확약서 확보 ('19년 4월) ■ 현차 평가 ('19.5월)를 통한 실용화 가능성 확인 함 ■ 전국 도시철도 운영기관의 집진장치 수요조사 및 대응 (홍보) ■ 초기에는 기존 차량 대상 판매에 집중하고, 신조 차량으로 적용 범위 확대
터널부유 미세먼지 객실유입 차단장치 개발	■ ㈜애니텍에서는 기존 철도차량용 미세먼지 저감장치 등의 제품군을 확보하고 있어, 기존의 거래처를 기반으로 신차 제작 시 지하철 미세먼지 유입차단을 위한 신규제품이 적용될 수 있도록 홍보 ■ 차량에 설치 가능한 금액으로 제작사에 제공하기 위하여 추가적인 제품 개발을 진행	■ 추가적인 철도차량용 HVAC 제조사에 대한 기술홍보를 통해 신규 지하철 미세먼지 객실 유입 차단장치에 대한 적용 사업화를 추진 ■ 기술 적용에 따른 지하철 내부의 공기질 개선 효과 등에 대한 설치 당위성을 적극적으로 홍보

▷ 유지관리비용

도시철도 터널용 고정형 대형 공기정화장치 (예: 대형 전기집진기 등)의 설치비가 수억 원이고, 1시간 팬 운전비용이 수백 만원인것에 비해, 본 전동차 하부 부착형 집진장치는 1대당 2500만원으로 저렴하며, 전력 소모량도 1.5-2.0 kW로 지하철 부하율 상승이 1%미만이며, 시간당 200원 정

도의 비용만 소모된다. 그리고 한 달에 한 번 집진 카트리지의 재생이 필요한데, 월 300만원의 노동자가 하루 동안 수십 대의 집진장치 집진 카트리지를 재생한다고 계산하면 수십 만원/월 수준으로 유지관리 비용 또한 저렴하며, 고용창출효과도 파생된다. 물론, 세정용 물과 세정 후 폐수처리 비용 등이 추가 되지만, 고정형 대형 공기정화장치보다 경쟁력이 있는 것으로 판단된다.

▷ 매출전략

내용
* 미세먼지 제거장치 1. 적용범위 : 전국 도시철도 운영기관의 전체 편성수 중 8량이상 편성수인 463편성을 대상으로 1편성당 1대 적용, 제품단가 대당 25백만원 기준으로 판매계획 설정 하였다 2. 판매전략 : 초기에는 기존 차량을 대상으로 판매 집중하고 신조 차량으로 적용 범위 확대 1) 과제 종료 이후, 서울교통공사와 협의를 통하여 2020년~2021년에 걸쳐 서울교통공사의 일부 차량을 대상으로 시범사업을 추진하여 미세먼지 제거장치에 대한 안전성 및 효과성 입증 2) 서울교통공사 시범사업을 기반으로 2022년~2029년에 걸쳐 서울교통공사 전체 편성수 중 8량 이상 편성수인 378편성을 대상으로 확대 적용하고 신조 차량으로 적용 범위 확대 3) 서울교통공사 시범사업을 실시한 이후, 부산교통공사와 협의를 통하여 2022년 부산교통공사 일부 차량을 대상으로 시범사업을 추진하고 2023년~2024년에 걸쳐 부산교통공사 8량 1편성으로 운행하는 1호선 51편성을 대상으로 확대 적용하고 신조 차량으로 적용 범위 확대 4) 부산교통공사 시범사업을 실시한 이후, 인천교통공사와 협의를 통하여 2024년 인천교통공사 일부 차량을 대상으로 시범사업을 추진하고 2025년~2026년에 걸쳐 인천교통공사 8량 1편성으로 운행하는 1호선 34편성을 대상으로 확대 적용하고 신조 차량으로 적용 범위 확대 * 집진 카트리지 세정장치 1. 적용범위 : 미세먼지 제거장치 적용 호선을 대상으로 1호선 당 1대 적용, 제품단가 대당 70백만원 기준으로 판매계획 설정 2. 판매전략 : 각 운영기관 시범사업 실시 이후, 차년도부터 순차적으로 적용 1) 서울교통공사 시범사업 실시 이후, 미세먼지 제거장치를 확대 적용하는 호선을 대상으로 세정장치를 1호선 당 1대씩 단계적으로 적용하여 2021년~2029년에 걸쳐 총 7대 적용 2) 부산교통공사 시범사업 실시 이후, 미세먼지 제거장치를 확대 적용하는 부산교통공사 1호선을 대상으로 2023년에 세정장치 1대 적용 3) 인천교통공사 시범사업 실시 이후, 미세먼지 제거장치를 확대 적용하는 인천교통공사 1호선을 대상으로 2025년에 세정장치 1대 적용

▷ 연도별 추진 일정

연도	추진 일정	투자 규모
2019	시제품 제작 및 검증	50,000,000원
2020	시범사업(서울교통공사)	80,000,000원
2021	양산 설비 구축	100,000,000원
2022	시범사업(부산교통공사)	60,000,000원
2024	시범사업(인천교통공사)	50,000,000원

▷ 예상 매출계획

제품명	구분	2021년	2023년	2025년	2027년	2029년	합계
1. 미세먼지 제거장치	생산량(대)	50	92	132	118	71	463
	예상매출액(백만원)	1,250	2,300	3,300	2,950	1,775	11,575
2. 집진 카트리지 세정장치	생산량(대)	1	2	3	2	1	9
	예상매출액(백만원)	70	140	210	140	70	630

* 미세먼지 제거장치 산정 기준 : [8량이상 편성수 기준] 1편성당 1대 적용 기준, 대당 25백만원 기준
* 집진 카트리지 세정장치 산정 기준 : 1호선당 1대 설치 기준, 대당 70백만원 기준

(2) 실용화 필요 사항

참여기업과의 기술 이전 실시 계약 등을 통해 실용화 체계를 구축할 예정이나, 성능 향상 모델의 집진장치에 대한 철도규격 공인 인증 시험 및 개조 신고/승인 절차 등으로 인한 소요 기간이 필요하며, 철도운영기관의 예산 확보 문제 등에 대한 세밀한 검토가 필요하다. 실용화를 위해 환경부와 연계한 도시철도 운영기관 지원사업으로 집진장치 구입을 장려하는 지원과, 시범사업 과제 예산 지원 등이 필요하다.

(3) 운행차 집진장치 및 차단장치 상용화시 기대효과

○ **터널 미세먼지 오염도 저감효과**

지하 터널 25 km의 바닥에서 부유될 수 있는 미세먼지 총량을 약 5000 g이라고 가정하고, 1회 주행시 마모입자 발생량은 약 1.25 g이라고 가정하고, 최대 부유 농도를 400 $\mu g/m^3$이라고 가정하면, 전동차 1편성에 2대의 집진장치를 부착하여 하루 왕복 4회, 월 25일 운행하면 (편도 총 200회 운행), 초기 농도 400 $\mu g/m^3$이던 PM_{10} 농도는 약 63일 후부터 400 $\mu g/m^3$ 이하로 낮아지기 시작하여 65일 후에 280 $\mu g/m^3$가 되어 약 30% 저감될 것으로 추정된다.

※ 부유될 수 있는 미세먼지 총량이 위 가정보다 약 10배 많은 경우, 위의 효과가 나타나는 시기가 10배 지연될 수 있으므로, 전동차 10편성에 2대씩 집진장치를 부착해야 위의 효과를 얻을 수 있을 것으로 추정되며, 마모입자 생성량이 가정값보다 훨씬 많은 경우 저감 효과가 더 지연되어 나타날 수 있다.

○ **국내 시장 진출 효과 – 차단장치**

철도차량 한 량에 4세트 설치를 고려하고 있다. 서울시 전동차의 기존 리트로핏 차량대수를 이용하여 해당 시장을 추산하면 다음과 같다.

– 서울시 전동차 약 3,700량 × 4 × 100만원 = 148억원

[전동차 HVAC 부착형 미세먼지 저감장치 사업화 방안]



ㅇ 수출 효과

– 집진장치: 한 편성 당 2 대 0.5억 X 10편성 X 10개국= 50억원

– 세정장치 대당 약 0.7억 X 1대 X 10개국= 7억원

– 차단장치: 한 편성 당 약 0.4억 X 10대 X 10개국= 40억원

세계 각종 철도박람회(이노트랜스, 세계대중교통박람회, 중국 등)을 통해 적극적인 대외 홍보 및 판매 루트확보 필요하다 (특히 중동 및 중국시장에 관심).

• International Metro Report의 지하철 제작 및 구매 계획 보고서에 따르면, 2016년 지하철 제작 및 구매 계획이 2015년 대비 성장했다고 보고하고 있으므로, 운행 전동차 부착형 미세먼지 저감장치의 잠재적인 해외 시장의 규모 역시 성장하고 있는 추세로 판단되며, 시장 개척 가능성을 기대할 수 있다. • 선진국일수록 지하철 연령이 많아 미세먼지 오염도가 심한 수준을 나타내지만 아직 환경규제가 없어서 운행 전동차 부착형 미세먼지 저감장치에 대한 상용 제품이 시장에 출시되지 않은 상황이지만, 미세먼지 오염 문제 해결 요구가 많으므로 선제적인 시장 개척이 가능할 것으로 판단된다. • 특히 GCC 6개국(사우디아라비아, 아랍에미리트, 바레인, 카타르, 오만, 쿠웨이트)을 연결하는 철도 개발과 이란(테헤란) 등 중동국가 대도시에 지하철이 건설 중에 있으므로, 터널 미세먼지 문제 해결을 위한 운행 전동차에 적용할 수 있는 솔루션이 요구된다. • 박람회에 참석한 중국 바이어들이 터널 미세먼지 저감기술에 대한 관심이 높으므로, 시장 개척 가능성이 높다, • 특히 Taipei Metro의 경우 터널 내 미세먼지 오염 문제를 해결하기 위한 기술을 찾고 있으며, 실제 터널 PM10 또는 PM2.5를 저감 효과에 대한 실증 자료가 있으면 구매를 검토하겠다고 한다.

(4) 개발 집진장치 및 시제품의 활용 계획

①집진장치

연구과제 성과물인 집진장치 및 세정장치 시제품에 대해 국토교통부 R&D 목표달성을 위한 단기 현차 시험을 실시중이며, 향후 시범사업 등을 통해 철도 운영기관의 노선에서 장기 테스트를 할 수 있는 방안을 모색하고 있다. 개발 시제품의 현장 활용을 위한 향후 계획은 아래 표와 같다.

기간	추진 일정
2019. 6월 1주–8월 4주 (3개월)	시제품 최적화 및 제작
2019. 9월 1주–11월 4주 (3개월)	철도규격 공인 인증 시험 및 보완
2019. 12월 1주–2월 4주 (3개월)	국토부 개조 승인/신고 및 납품
2020. 3월 1주–6월 4주 (4개월)	시범사업 (예: 서울교통공사 4호선 단기 현차평가) 및 보완
2020. 7월 1주–12월 4주 (6개월)	시범사업 (예: 서울교통공사 4호선 중기 현차평가)
2021. 1월 1주–6월 4주 (6개월)	양산 설비 구축
2022. 7월 1주–2023. 6월 4주 (12개월)	시범사업(예: 부산교통공사 장기 현차평가)
2023. 7월 1주–12월 4주 (6개월)	업그레이드 모델 개발
2024. 1월 1주–12월 4주 (12개월)	시범사업(예: 인천교통공사 장기 현차평가)

②차단장치

본 연구에서 개발된 미세먼지 차단장치와 모니터링 시스템은 과제종료 이후에도 운영기관에서 지속적으로 활용할 계획이다. 도시철도 터널 공기질 모니터링을 위해 운영기관에서는 본 연구에서 개발된 시제품을 설치할 수 있도록 마케팅 계획이다.

붙임. 참고 문헌

Kwon, S. B., Park, D., Cho, Y., Park, E. Y., 2010. Measurement of natural ventilation rate in Seoul Metropolitan Subway Cabin, *Indoor and Built Environment*, 19(3) 366-374.

Skodras, G., Kaldis, S. P., Sofialidis, D., Faltsi, O., Grammelis, P., Sakellaropoulos, G. P., 2006. Particulate removal via electrostatic precipitators-CFD simulation, *Fuel Processing Technology*, 57(7) 623-631.

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

210㎜×297㎜[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( ),
발간등록번호(11-B553766-000002-01), ISBN( )

철도기술연구사업 제5차년도 최종보고서

R&D / 18RTRP-B082486-05

초미세먼지 제거차량 시스템 개발 최종보고서

2019. 8. .

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
협동연구기관 / 서울교통공사
공동연구기관 / 한국철도기술연구원
금천씨스템(주)
(주)리트코
(주)열림정보기술
위탁연구기간 / 연세대학교

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

18RTRP-B082486-05

초미세먼지 제거차량 시스템 개발 최종보고서 2019

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'초미세먼지 제거차량 시스템 개발'(연구개발 기간 : 2014. 9. 8 ~ 2019. 05. 30) 과제의 요약보고서 2부를 제출합니다.

2019. 8.

주관연구기관명 : 서울교통공사 김 태 호 (인)

공 동 기 관 명 : 한국철도기술연구원 나 희 승 (인)

금천씨스템(주) 박 판 상 (인)

㈜리트코 정 종 승 (인)

㈜열림정보기술 고 동 민 (인)

주관연구기관책임자 : 서울교통공사 김 영 수 (인)

공 동 기 관 책임자 : 한국철도기술연구원 정 우 태 (인)

금천씨스템(주) 곽 수 태 (인)

㈜리트코 오 주 식 (인)

㈜열림정보기술 고 동 민 (인)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

연구의 목적 및 내용	○ 본 연구과제의 최종목표는 국민이 체감할 수 있는 수준의 지하구간 공기질 확보를 위한 실시간 오염물질 제거기술 개발이며, 이를 위해서 3세부는 미세먼지 제거차량을 개발하여 터널 내 미세먼지를 저감하는 목표임 ○ 3세부과제 : 초미세먼지 제거차량 시스템 개발 ● 미세먼지 제거차량 개발 ● 부유먼지/미세먼지(PM2.5) 제거차량에 적용 가능한 나노입자 필터링기술 개발 (미세먼지 저감 효율 90% 이상) ※ 연구단 테스트 베드 종합 시험 평가기준에 따른 성능 입증 **(RFP 제안목표인 저감 효율 90%이상에 대한 객관적 평가기준 마련 및 검증)**
연구개발성과	○ 3세부과제 : 초미세먼지 제거차량 시스템 개발 ● 미세먼지 제거차량 개발 - 미세먼지/초미세먼지 제거 차량시스템 개발 ※ 작업운영속도 5㎞/h 이상 - 미세먼지/초미세먼지 제거차량 기본 구조 설계 - 미세먼지/초미세먼지 집진기술 개발 - 궤도 집진구조 메커니즘 설계 및 차량 인터페이스 - 미세먼지/초미세먼지 제거차량 시작품 제작(2량 이상) ● 미세먼지/초미세먼지 제거차량에 적용 가능한 나노입자 필터링기술 개발 - 나노기술을 이용한 필터링 및 집진기술 개발 - 시작품 제작 및 공인 시험평가 ● 작업차량용 환경관리 시스템 개발 - 지능형 실시간 차량 관리 및 모니터링 시스템 개발(위치 측위 시스템 탑재)
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 정부에서 추진하는 지하철공기질 개선계획에 대한 현실적인 해결책으로 활용 가능 ○ 도시철도 운영기관의 환경 관리지침으로 사용 가능 ○ 전국 도시철도의 공기질을 통합하여 관리 할 수 있는 프레임 제공 ○ 외국 지하철에 본 연구의 개발품을 수출 가능 ○ Hot spot 구간의 미세먼지 제거 시스템으로 활용 ○ 도시철도 터널의 유형별 관리 기술 발전에 기여 ○ 수도권뿐만 아니라 전국적으로 운행중인 도시철도 터널의 공기질 개선을 위한 장치로서 지하터널내 공기질 개선을 통한 이용승객 및 근로자의 건강증진 ○ 전세계적으로 지상구간의 사용율 증대와 교통 혼잡을 예방하기 위해 대도시를 중심으로 도시철도 가동율이 증가하고 있음. 이에 따른 지하공간 공기질 개선을 위한 기술로 활용이 가능함 ○ 차량이 운행하지 않는 새벽시간대 집진차량을 터널구간에 신속하게 투입하여 Hot Spot 구간과 주요 터널구간의 오염물질 개선작업을 수행함

국문핵심어 (5개 이내)	나노기술	초미세먼지 (PM2.5)	미세먼지(PM10)	전기배터리 모터카	전기집진 필터시스템
영문핵심어 (5개 이내)	Nano Technology	Ultra fine dust	Fine dust	Battery motor car	Electrostatic precipitator

〈주요 성과 요약〉

(1) 기술적 성과

■ 지하구간 초미세먼지 저감을 위한 차량 시스템의 국산화 기술 개발

◦ 대형 전기배터리 구동 철도 장비차량 개발

철도 운영기관에서 사용 중인 기존 디젤엔진 기반의 철도장비차량은 배기가스 오염 문제로 전기 배터리 모터카로 전환추세에 있으나, 대용량 배터리·고출력 모터 등을 탑재한 경우는 국내외 모두 없는 상황이다. 처음으로 시도된 이번 연구는 해당 출력과 용량, 안전성 등을 확보하기 위해 리튬 인산철 배터리를 사용하였으며 인버터, 변속장치 등 주요 시제품을 자체 개발하여 적용하였다. 외국에 의존하고 있는 철도장비 특수차량을 대상으로 향후 교체시 적용 가능한 기술 개발에 큰 의미가 있다고 판단된다.

◦ 고효율 흡진 모듈 개발

레일면 특성을 고려해 단순 흡입 형태를 개선하여 먼지 비산을 줄이고 흡입 효율을 높일 수 있는 구조의 흡진모듈과 유동 흐름과 원심력을 이용한 싸이클론 장치 등을 개발하였다. 설계단계에서 유동해석 등으로 구조적 특성과 효율을 고려하여 최적 흡입 구조를 적용하였으며, 각종 논문과 특허 등으로 연구개발의 실효성을 높였다. 현장시험 등으로 효율입증을 진행해 왔으며, 차후 부유 공기의 흡진이 필요한 분야에 적용 가능한 실용화 기술로 기대되고 있다.

◦ 초미세먼지 제거기술 개발

터널 내 환풍 시설 등 고정된 위치에 주요 적용되던 전기집진장치를 차량에 적용하여 이동성을 확보하였고, 미세먼지 저감 성능이 탁월한 전기집진장치를 사용편의성, 유지보수 편의성 등 사용자 요구조건에 맞게 개발하였다. 공인인증시험 등으로 주요 연구목표인 초미세먼지 저감 효율 97% 이상(터널 내 저감 성능 33.6%)을 달성하여 수요처 기반의 실용화가 가능할것으로 판단하고 있다.

◦ 지능형 차량관리기술

사물인터넷(IoT), 무선원격 데이터 송수신 기술 등을 개발 적용하여, 1세부의 실시간 터널 오염도 데이터를 수신 받아 미세먼지 오염이 심한 장소에 우선 투입 할 수 있도록 하였다. 위치기반 서비스(LBS)가 플랫폼(비콘, 타코미터)을 활용해 궤도신호와 무관하게 정확한 차량의 이동 위치를 실시간으로 파악할 수 있으며, 향후 실용화 이후에는 차량의 상태관리 및 이력정보를 통해 데이터화 된 차량시스템을 제시할 수 있는 주요 기술을 개발하였다.

(2) 경제적 성과

개발 차량은 미세먼지가 사회적 이슈로 매일 논의 되는 현재 시점에서, 수요처인 철도운영기관 등에 판매가능한 미세먼지 저감 솔루션이 될 수 있는 경쟁력을 가지고 있다. 실제 차량의 개발 진행 상황을 도시철도운영협의체 등과 지속적으로 공유하였고, 구매의사를 확인 할 수 있어, 향후 사업화를 통한 수익을 창출 할 수 있을 것으로 기대된다.

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 221

가. 연구개발 목표 ····· 221

나. 연구개발 필요성 ····· 222

다. 연구추진 체계 및 역할 ····· 223

라. 연차별 연구범위 및 내용 ····· 224

2. 연구수행내용 ····· 227

가. 주요 연구개발 내용 ····· 227

(1) 미세먼지 제거차량 개발 ····· 227

(2) 초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발 ····· 246

(3) 터널 내 유해입자 제거 성능 평가 ····· 266

(4) 초미세먼지 제거차량 전기집진시스템 개발 ····· 270

(5) 차량용 환경관리 시스템 개발 ····· 287

나. 차량 주행 시험 및 테스트 베드 운영 평가 ····· 302

3. 연구 결과 (성과) ····· 307

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 310

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 317

가. 기술수요처 대상 성과 알림 홍보 및 사업화 추진 ····· 317

나. 실용화 계획 및 향후 운영계획 ····· 318

6. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적 ····· 318

7. 기타사항 ····· 318

8. 참고문헌 ····· 318

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표

Ⅰ. 미세먼지 제거차량 개발

- 미세먼지/초미세먼지 제거 차량시스템 개발
  ※ 작업운영속도 5km/h 이상
- 미세먼지/초미세먼지 제거차량 기본 구조 설계
- 미세먼지/초미세먼지 흡진기술 개발
- 궤도 흡진구조 메커니즘 설계 및 차량 인터페이스
- 미세먼지/초미세먼지 제거차량 시작품 제작(2량 이상)

Ⅱ. 미세먼지/초미세먼지 제거차량에 적용 가능한 나노입자 필터링기술 개발

- 나노기술을 이용한 필터링 및 집진기술 개발
- 시작품 제작 및 시험평가

Ⅲ. 미세먼지/초미세먼지 제거차량/환경관제 시스템 현차시험 및 평가

※ 미세먼지 저감율 90% 이상 효을 입증



그림 1. 초미세먼지 제거차량 형상

❑ 본 과제에서 연구 개발하는 터널 내 초미세먼지 제거차량은

o 세계최초로 기존의 디젤엔진 구동 대신에 축전지와 전동모터를 이용하는 친환경 차량으로 설계하여 배기가스에 의한 자체 오염물질 배출을 방지하고,

o 도시철도 운영기관 수요처에 적극 확대 보급할 수 있도록 소형화시켜 길이 30m 내외, 3량 1편성 구성의 양방향 작업 차량으로 범용성을 갖도록 하며,

o 기존의 단순한 먼지 흡입 대신 터널시설물과 궤도 구조 특성에 맞춰 고효율의 흡진구조체 모듈을 적용하여 흡진 효율을 최적화시키고, 프리필터로 큰 먼지를 걸러낸 후 나노기술을 적용한 입자 하전장치와 전기 집진장치를 이용하여 초미세먼지(PM2.5)의 입자크기를 키워 제거할 수 있는 하이브리드형 차량을 목적으로 개발코자 하였음

나. 연구개발 필요성

● 미세먼지(PM2.5) 관리 중요성 증대

- 2015년부터 대기환경기준에 포함
- 2016년부터 "다중이용시설 등의 실내공기질관리법" 적용
- **도시철도 터널 미세먼지 오염원 파악 및 근본적 저감을 위한 나노기술 적용 필요**

● 대중교통차량 실내공기질 관리 중요성 증대

- 지하철 공기질 개선을 위해서는 터널공기질 관리가 근본적 해결책임
- **모든 터널구간의 공기질 개선보다는 Hot Spot 구간을 파악하여 집중개선하는 것이 효율적임**
- 이용객 노출위해성 저감을 위한 경제적 관리방안 필요

● 국민이 체감할 수 있는 공기질 개선효과 요구

- **투자비용 대비 체감할 수 있는 실용적 공기질 개선연구 필요**
- 도시철도 운영기관이 바로 적용할 수 있는 수준의 상용화 기술개발 필요
- 시범역사 운영을 통해 국민이 직접 체감할 수 있는 기술요구

❑ 도시철도 본선 터널의 미세먼지 집진시스템

o 사회적 주요 이슈로 대두된 미세먼지 관리문제에 비슷한 환경에 놓인 국내 도시철도 운영기관(부산, 인천, 대구 대전 등의 대도시 지하철과 경전철, 공항철도)들은 미세먼지 저감을 위해 다양한 노력을 기울이고 있으며 효율적인 미세먼지 관리기술이 개발 및 현장적용 필요성을 지속적으로 요구하고 있음

o 도시철도 운영기관의 본선 터널 미세먼지 농도는 높은 데 반해 이를 제거할 수 있는 집진설비가 취약한 상태이며, 본 연구의 결과와 성과를 토대로 도시철도 중 심도가 깊은 본선 터널의 미세먼지 집진설비로 적극적으로 활용할 필요가 있음

❑ 도시철도 본선 터널의 미세먼지 집진차량

o 본 연구개발과제로 개발되는 친환경형 초미세먼지 제거차량은 협동연구기관인 서울교통공사의 현장설비에 적용하여 시험 사용될 예정이며, 그 효과가 충분하다고 평가되면 추가 예산을 확보하여 추가제작 구매를 의뢰할 예정임

o 기존 프랑스에서 도입한 분진흡입차량의 경우 궤도상의 먼지흡입은 블로워(Blower)와 흡입구를 이용한 단순흡입 구조로 이루어져 먼지 비산율이 높은 편이고, 선로청소를 위해 백필터 방식을 적용해 미세먼지 저감 효율이 높지 않은 설계/구조적 단점을 가지고 있음

o 이와 같은 구조적 단점을 보완하여 흡입력을 향상시키고, 흡진기의 효율을 높이기 위하여 다양한 궤도도상(자갈, 콘크리트) 새로운 방식의 흡입구조가 설계 될 필요가 있었으며, 전기집진방식을 이용하여 미세먼지 제거효율을 높이고 모터카 철도차량 동력으로 이용되고 있는 디젤엔진을 전기모터방식으로 변경하여 배기가스에 의한 2차 오염을 원천적으로 차단할 필요가 있었음



그림2. 도시철도 운영기관 보유 청소차량

다. 연구추진 체계 및 역할

연구단의 각 세부별 역할 추진체계를 기초로, 초미세먼지 제거차량 시스템 개발을 담당한 3세부는 산학연 조직 및 기술개발 단위별 참여기관을 구성하여 연구를 추진하였음

3 세부과제	
과제명	초미세먼지 제거차량 시스템 개발
협동기관	서울교통공사

총 참 여 연 구 원
협동 연구책임자 김영수 외 54명

협동연구기관	공동연구기관	공동연구기관	공동연구기관	공동연구기관
서울교통공사	한국철도기술연구원	금천씨스템㈜	㈜리트코	열림정보기술
참여연구원	**참여연구원**	**참여연구원**	**참여연구원**	**참여연구원**
주관연구책임자 김영수 외 14명 수석급 2명,책임급1명, 선임급4명, 원급 8명	공동연구책임자 정우태 외 4 책임급1명 선임급1명 원급3명	공동연구책임자 곽수태 외 15명 수석급 4명,선임급7명, 원급5	공동연구책임자 오주식 외 8명 수석급 2명,선임급1명, 원급 6명	공동연구책임자 고동민 외 6명 수석급 6명, 책임급1명, 원급 0명
담당연구개발내용	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**	**담당연구개발내용**
과제명: 초미세먼지 제거차량 시스템 개발 – 제거차량 개발 총괄 – 시험평가 기법, 기준 개발 – 테스트베드 구축 및 차량시험 성능평가	과제명: 미세먼지 제거차량 흡진환경 개발 – 미세먼지 제거차량 흡진 메카니즘 설계/해석 및 시험평가 – 시제차 미세먼지 흡입구조 가시화 시험 및 차량 환경시험 평가	과제명: 미세먼지 제거차량 개발 – 친환경 집진차량시제품 개발 – 프리필터 및 미세먼지집진장치 인터페이스 개발	과제명: 초미세먼지 집진 제어장치 개발 –전기집진 방식의 초미세 먼지 집진 시스템 시제품 개발 –시험 및 차량 인터페이스	과제명: 미세먼지 제거차량 지능형 환경관리 시스템 개발 – 작업 계획 알고리즘 개발 – 관제 시스템 개발 – 차량 정보 단말개발 – 통신 프로토콜 개발

위탁연구기관
연세대학교

참여연구원
위탁연구책임자 황정호 외 2명
책임급 1명, 원급 2명

담당연구개발내용	
과제명	전기적 입자 하전 및 응집 기술을 이용한 지하철 터널 내 미세/초미세 입자 제거 기술 개발
– 터널 내 유해 입자 모사 시험 입자 발생 시스템 개발 – 양극성 입자 하전 장치 개발 – 전기적 특성을 이용한 입자 응집 장치 개발 – 유해입자 제거 시스템 개발	

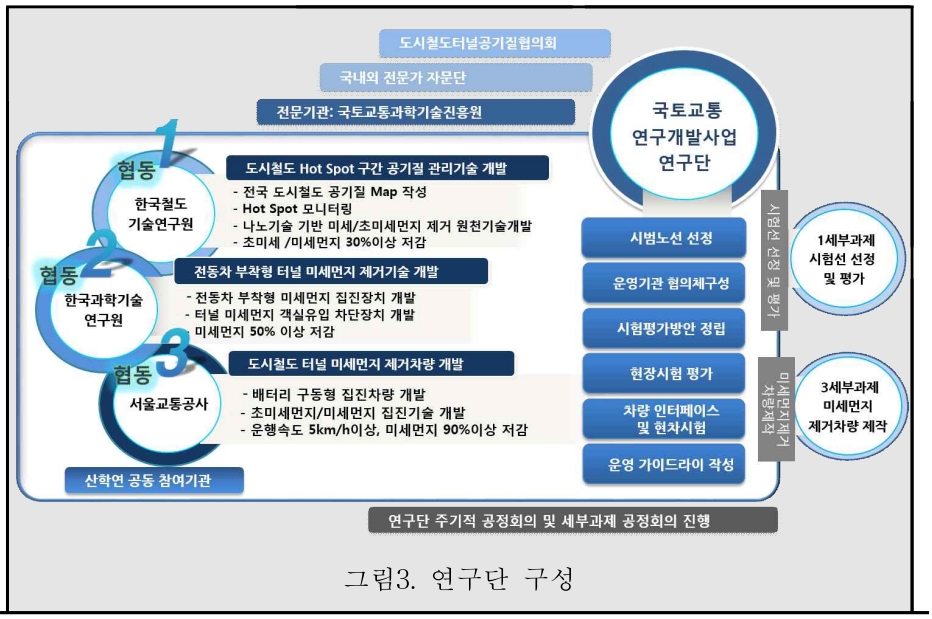


그림3. 연구단 구성

라. 연차별 연구범위 및 내용

구분 (연도)	연구목표	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
1차 년도 (2014) 3세부	기초자료 수집 개념설계 핵심 요구사항 도출	미세먼지제거차량 개발	■ 기본설계 요구사항 분석 ■ 차량기본 컨셉, 구성품 설계 ■ 구동관련 구성품 기본설계 ■ 집진장치, 나노필터 장치 등 연동 기능 전원 및 구성 기본설계	• 차량 기본 설계안 작성 및 3D모델링 • 집진/필터 연동을 위한 전원 기초 구조 설계서 작성
		초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발	■ 설계 요구사항분석 ■ 고효율 흡진구조 컨셉설계 ■ 흡진구조 기본 메카니즘 설계(안) 제시 ■ 차량 구조 및 궤도구조 인터페이스 방안	• 국내외 분진흡입차량 사례조사 • 적용궤도별, 터널유형별 적용방법 및 인터페이스 방안 • 기술요구사항을 만족하기위한 흡진구조 기본 메카니즘 설계 • 차량인터페이스를 위한 설계방안 • 지적재산권(특허 출원) 확보 • 학술대회 논문 발표
		초미세먼지 제거차량 시험평가	■ 국내/해외 차량기술 사례조사 ■ 운영기관 요구사항 도출	• 국내외 집지차량 자료 조사보고서 • 지식재산권 출원 • 요구사항 도출 자문회의 개최
		양극성 하전 응집시스템 개발	■ 미세먼지 발생시스템 개발 ■ 발생입자 평가	• 입자발생시험 및 먼지발생입자 특성평가분석 • SMPS, APS 이용 보고서 작성
		미세/초미세 먼지 포집·저감 효율장치	■ 초미세먼지 제어, 증배시험 ■ 초미세먼지 유속제어시험	• 주파수형 Power Pack개발 • 증배시험장비 제작 • 증배효과 시험,증배효율 시험 완료 • 초미세먼지 유속기제작
		차량용 환경관리 시스템 개발	■ 시스템 개념설계 및 기본설계	• 요구 조건 분석 및 사양 확정 • 시스템 표준 구성도 설계 • UI 구조 설계 • 시스템 기본 설계서 작성
2차 년도 (2015) 3세부	차량구성 기본설계	미세먼지제거차량 개발	■ 차량상세설계 및 주요구성품개발	• 차량기본 설계 (규격, 차량구성) • 추진(구동)시스템/주행시스템 설계 • 전기계통 시스템 설계 • 축전지시스템 설계 및 리튬전지 적용 검토 • 충전 및 회생제어장치 설계 • 차량 구동부 및 전기스템 설계 • 구동장치 및 시험기 시제개발 • 인버터, 배기팬, 전기장치 등 주요구성품 시제개발
		초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발	■ 집진 흡입 구조 인터페이스 ■ 구조 및 유동 해석	• 구조해석 완료(유동해석 결과 첨부) • 궤도 차량 인터페이스 설계 및 보완설계 완료 • 지적재산권(특허 출원 1건) • 국내 논문게재 2건
		초미세먼지 제거차량 시험평가	■ 현장시험 안정성 평가기준 ■ 현장시험 적용성 평가기준	• 평가기준 적성성 분석 및 평가기준서 작성
		양극성 하전 응집시스템 개발	■ Pilot Cell 설계 ■ 유속발생기 시험 ■ 포집시스템 시험	• 집진장치 단일셀 설계 • 차량 부착용 구성품 설계
		미세/초미세 먼지 포집·저감 효율장치	■ 양극성 하전 시스템 개발	• 양극성 하전 장치 설계 제작 함 • 설계할 하전장치의 내부 전기장 및 전압을 fluent를 통해 해석함 • I-V 커브를 이용하여 하전기 특성을 파악함 • 이론식을 이용하여 평균 하전수 도출 • Aerosol electrometer를 이용하여 하전수 도출
		차량용 환경관리 시스템 개발	■ 작업 차량 관제 시스템 구조 설계 ■ 핵심기술 개발 및 특허출원	• 시스템 UI 구조설계 • 시스템 DB 구조설계 • 위치검지 장치 개발 및 특허 출원 • 시스템 구조 설계서 작성

구분 (연도)	연구목표	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
3차 년도 (2016) 3세부	차량 상세설계 및 단위구성품 시제품 제작	미세먼지제거차량 개발	■ 차량 상세설계 ■ 차량구성품 개발 ■ 차량 프레임 제작	• 차량시스템/차량구성품 상세설계 • 차량 주요 구조체 제작(Frame) • 전장시스템 시험대제작 및 시험 • 구성품 시험품제작 및 시험
		초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발	■ 흡진 메카니즘 상세설계 ■ 흡진구조 시험품 제작 시험	• 흡진시스템의 기본구조 설계 및 유동해석을 통한 설계 최적화 완료. • 미세먼지 포집부 설계 및 유동해석을 통한 최적화 진행 • 흡진구조 시험품 제작 및 시험
		초미세먼지 제거차량 시험평가	■ 차량시스템 및 구성품 현장성능 시험 평가 ■ 현차 시운전계획	• 운영기관 도입기준 시험절차서 작성 • 현차시험계획서 작성
		양극성 하전 응집시스템 개발	■ 응집 시스템 개발 ■ 입자의 응집 특성 평가	• AC 전압 인가 장치를 이용한 양극성 하전 시스템 설계 제작 • 설계할 응집장치의 내부 전기장 및 유속을 Fluent를 통해 해석함 • SMPS를 이용하여 입자 농도 확인 • 응집 이론식을 이용하여 응집상수 K값 도출
		미세/초미세 먼지 포집·저감 효율장치	■ Pilot Cell 제작 ■ 시제품 상세 설계 ■ 풍동시험	• 시제품 상세설계 완료 • 유효유량 Cell 및 프레임 제작 완료 • 차량탑재용 시제품 제작 조립
		차량용 환경관리 시스템 개발	■ 작업 차량 관제 시스템 상세 설계 -통신 모듈 상세 설계 -차량 정보 단말 상세 설계	• 자료구조 및 DB 상세 설계 및 보고서 작성 완료 • 통신프로토콜, 시스템 상세설계 완료 • 관리서버, 차량단말, 위치검지장치 소프트웨어 개발 및 위치검지장치 H/W개발
4차 년도 (2017) 3세부	시제품 개발 조립시험	미세먼지제거차량 개발	차량구성품 제작, 시험 차량 시스템 시험 백필터 집진부 제작 시제 차량(동력차) 제작 차량 공장 검사	• 차량 각부 구성품 제작 완료 • 시스템 동작 및 연동 시험 • 5차년도 제작으로 일정 조정 • 구조체 및 차량 제작 완료 • 각부 동작 및 공장 시험
		초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발	■ 흡입 메카니즘 성능 시험 ■ 흡진 시스템 구성품 제작	• 차량 및 미세먼지 유동 가시화시험 (유동해석) 완료 • 초미세먼지 처리 시험평가 환경시험 방안 제시 • 차량하부 흡입구조 및 사이클론 집진기 제작 완료 • 흡진시스템 제작품 차량 조립 완료
		초미세먼지 제거차량 시험평가	■ 차량 디자인 ■ 차량시스템 및 구성품 현장성능 시험계획 ■ 현장시운전 시험계획	• 차량 제작 디자인 결과 반영 • 철도안전법 등 사전 법률 검토 및 차량인증 기관 대상 절차 준비 • 차량 검사, 안전항목 검토 • 시험 운영계획 절차서 작성
		양극성 하전 응집시스템 개발	■ 유해입자 제거 시스템 설계 ■ 발생 입자 하전특성 및 응집특성 평가	• 양극성 하전 응집장치 시험품 설계 제작 • SMPS와 APS를 이용한 입자 농도 및 분포 측정 및 확인 • 유해입자 제거시스템 하전 및 응집 시스템 성능평가
		미세/초미세 먼지 포집·저감 효율장치	■ 차량 탑재 모듈 시제품 제작 및 차량 탑재 ■ 유속발생기 시험제작 ■ 공인증서 취득	• 차량탑재용 전기집진시스템 제작완료 • 제어가능 유속기 제작 • 집진차량 공인 인증 절차 수행 완료
		차량용 환경관리 시스템 개발	■ 시제품 제작 ■ 시제품 기능 / 성능시험	• 작업차량 관리시스템 시스템 제작 • S/W 수정 및 기능 업그레이드 • 시스템 차량 설치 및 인터페이스 • 시스템 기능/성능 시험 및 보고서 작성

구분 (연도)	연구목표	세부연구목표	연구개발 수행내용	연구결과
5차 년도 (2018~ 현재) 3세부	종합시험 및 평가	미세먼지제거차량 개발	■ 차량시운전 및 보완	• 차량보완 작업 및 사용자 요구사항 반영 • 전기집진 및 필터집진차량 성능시험 협조 • 최종시운전 및 시험 완료
		초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발	■ 집진설비 차량 환경시험 ■ 흡진장치 현장시험평가	• 시제차량 환경시험 방안 제시 • 흡진장치 현차시험, 보완 및 평가 • 현장집진 성능평가 지원
		초미세먼지 제거차량 시험평가	■ 테스트베드 운영 및 시험평가 ■ 홍보활동	• 수서차량기지 예비주행시험 및 보완작업 • 테스트 베드 구간 충전시설 설치 • 주행시험항목 및 평가방법 검토 및 실행 • 테스트 베드 주행시험 완료 • 이노트랜스 국제 철도박람회 홍보 참가
		양극성 하전 응집시스템 개발	■ 전기 집진차량 환경시험	• 터널 내 유해입자 제거 성능 평가 • 증배장치 효율 시험
		미세/초미세 먼지 포집·저감 효율장치	■ 분진포집기 제작 ■ 증배포집 시험 ■ 터널 미세먼지 포집시험 연속운전 시험	• 집진차량 공인 인증 절차 수행 완료 • 현장시험운행 완료 • 테스트베드구간 운전시험 완료
		차량용 환경관리 시스템 개발	■ 개발시스템 현장시험 및 평가	• 예비시스템 설치 및 시험(신도림) • 1세부 연계시험 및 차량 단말 시험 완료 • 테스트베드 구간 시험 완료

2. 연구수행내용 및 성과

가.주요 연구 개발 내용

(1) 미세먼지 제거차량 개발

< 주요 연구개발 시제품 내역 >

구분	연구내용	세부연구개발 결과
차량설계	기능별 차량 설계 및 구성 3량 1편성 양방향 차량 (동력차량 2량, 집진차량 1량 구성) 길이 31m, 무게 87.1톤	1호차 : 동력차량 (제어부, 압축기 탑재)설계
		2호차 : 전기집진차량 (프레임설계)
		3호차 : 동력차량 (제어부, 배기팬 탑재) 설계
		4호차 : 백필터차량 (흡진장치, 필터부설계)
차량구조체	차량프레임 개발 및 제작	호차별 대차 프레임 제작 완료
주행장치	모터장치 개발	감속기, 모터드라이브 개발 완료
	차륜 및 차축	차량별 축상 장치 및 차륜 제작 조립 완료
	축상	
제동장치	상용제동, 주차제동, 제동유니트	제작 및 현장 제동 시험 완료
	공기압축기	제작 및 동작 시험 완료
전원장치	연결장치	연결장치 제작 완료 및 구원 연결시험 (입환기관차, 물탱크차) 완료
	완충장치	차량별 제작 및 보완 작업 완료
	탈선복구장치	차량별 제작 완료 및 탈선 복구 시험 완료
	외부전원 공급용 리셉터클	제작 및 연결 시험 완료
	냉난방장치	제작 완료
	서보모터	구동계 제작 및 조립 완료
부속설비	서보모터 제어장치	차량 내 전장 장치 등 제작 및 조립완료 동력용 배터리 부 제작 및 보완 완료
	충전장치	
	회생장치	
	주행용 축전지 및 수납상	
	제어용 축전지	
집진차량	전기집진장치 (2호차)	2호차 차대 프레임 제작 완료
	백필터집진장치 (4호차)	4호차 차량 제작 조립 완료
	배기팬 (3호차)	3호차 차량 제작 조립 완료
	블로워 (4호차)	4호차 차량 제작 조립 완료
차량조립제작	최종 조립 및 자체공장 시험	최종 공장 시험 완료 수서/창동 차량기지, 차량 시운전 시험완료

(가) 차량기본설계

집진차량 전체 구조는 3량 1편성 구성으로 1호차, 2호차, 3호차로 구분된다. 1호차와 3호차에서 차량의 주행 및 제어가 가능하며, 3호차의 대형배기팬의 흡입력을 이용하여 2호차의 집진장치 공기흡입 및 미세먼지 여과가 이뤄지는 구조이다. 동력원인 리튬배터리는 1호차와 3호차에 각각 탑재하고 동시 충전 및 방전이 가능한 병렬 구조로 설계하였다. 각종 제어 장치와 기계설비는 1호차와 3호차에 배치되며, 2호차에는 집진장치(블로워, 흡진, 집진)장치만을 탑재하여 역할별 차량의 구분이 가능하도록 설계하였다.



그림4. [차량구성]

1호차 (동력차량)	2호차 (집진차량)	3호차 (동력차량)
제어차량, 구동모터 제어장치, 배터리, 충전기, 공기압축설비	집진시스템 차량 흡진장치, 블로워 장치 전기집진장치/건식백필터장치 교환식	제어차량, 구동모터, 제어장치, 배터리, 대형배기팬

1) 차량 기본 제원 요약

- 주행속도 : 최대 60 km/h , 등판 구배 42, 일 주행 운용 거리 : 60~70km (5시간기준),
- 작업속도 : 5~10 km/h (최대 흡입 효율 가능 구간) / 최대 작업속도 25km/h
- 총길이 : 31m(연결기포함) / 무게 : 87.1톤(3량 1편성)
- 배기팬 용량 : 정격 110KW / 최대 용량 2000CMM / 실 사용구간 1000~1500CMM
- 배터리 : BOX 구성 (1 BOX :셀) / 1호차 - 8.5 BOX 3호차 8.5BOX / 1120AH x 650V
- 충전시간 : 380V 3상 교류 30A 병렬(1,3호차) 충전 완충 시 16시간 소요예상
  (사용 후 잔여 배터리 용량에 따라 충전시간 축소 가능, 일 약3~40% 소모)
- 모터 : 총 출력 268KW (1호차, 3호차 각 1 SET 구성 / 1 SET = 67KW 모터 2대)
- 집진방식 : 2호차 전기집진기 / 4호차 건식백필터 (교체 가능)

Brief Specification of Dust Collection Vehicle (집진차 성능 규격 요약서)

Item	Specification	항 목	규 격
Train Formation	3-Car Train Train-2: MC1-TE-MC2 Train-1: MC1-TF-MC2	차량편성	3량 1편성 (선택구성) 집진차1: 동력차1-전기집진차-동력차2 집진차2: 동력차1-섬유필터차-동력차2
Train Weight	Train1: 87.1ton Train2: 84.5ton	편성차량 총중량	집진차1: 84.5ton 집진차2: 87.1ton
Dimension	Length= 29,100mm Width= 2800mm Height= 3,850mm	크기	길이 = 29,100mm (커플러제외) 폭 = 2800mm 높이 = 4,100mm
Running Speed	Max. 60km/h both direction	주행속도	최고 60km/h, 양방향
Operation Speed	3~10km/h, both direction	집진속도	3~10km/h (양방향)
Power Source	100% Battery (Lithium)	동력원	100% 축전지 (리튬전지)
Traction	Electric Motor Nominal 268kW Maximum 360kW	추진장치	전기모터 연속정격 268kW 단시간정격 520kW
One charge Operation Time	5 hours / day	1회 충전 후 운용시간	5시간 / 일
One charge Operation distance	60~70km/day	1회 충전 후 운용거리	60~70km / 일
Wheel diameter	860mm	휠 직경	860mm
Dust suction Capacity	MAX 2,000 m^3/min	집진용량	MAX 2,000 m^3/min
Filtering dust size and efficiency	PM 2..5 99% (sample test result)	집진입자크기 및 집진효율	PM 2..5 99% (공인 시험결과)
Period of emptying dust box cleaning	Over 1 month	집진박스 청소주기	1개월 이상
Filter life	10 years	필터 수명	10년
Safety device	-Train Computer, monitor -Self re-railing system, -Automatic fire detection and fire fighting	안전장치	차량컴퓨터 자동 탈선복구장치 화재감지 및 자동소화장치
Design Life	25 years	차량설계수명	25년

[차량별 기본 설계도]

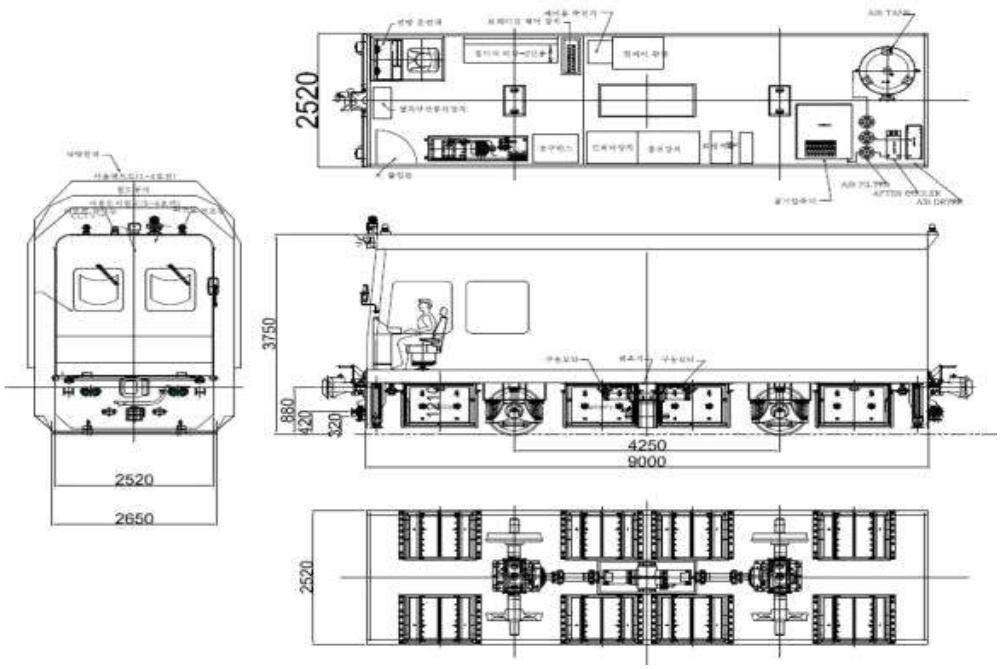


그림 6. 1호 차량 설계도

1호차	구동모터, 제어장치, 배터리, 충전기, 공기압축설비

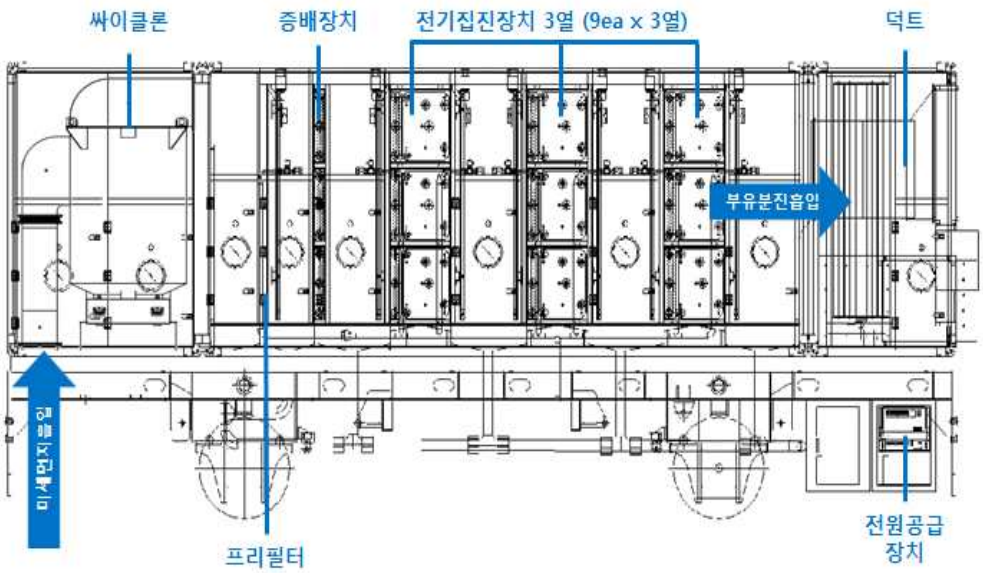


그림 7. 2호 차량 설계도

2호차	전기집진시스템 (고효율 흡입모듈 / 전기집진장치)

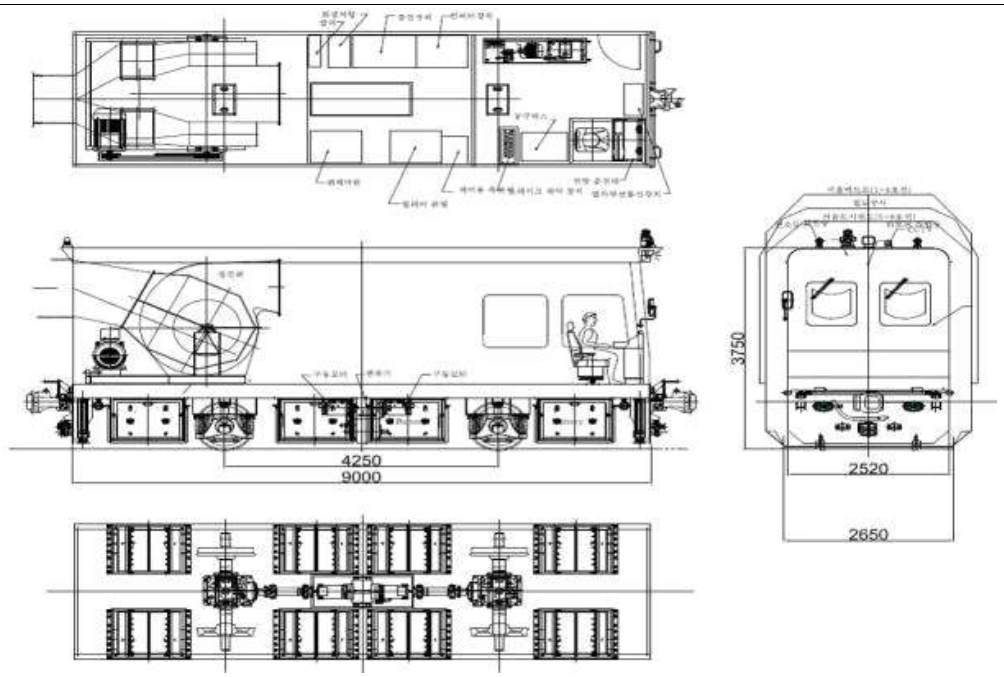


그림 8 3호 차량 설계도

3호차	구동모터, 제어장치, 배터리, 배기팬

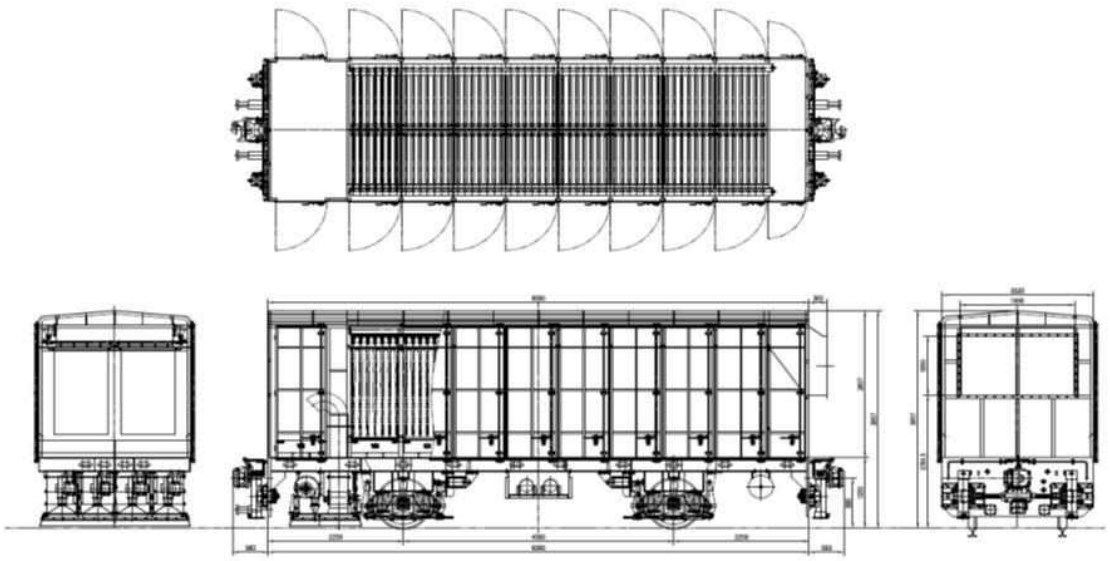


그림 9 4호 차량 설계도

4호차	건식필터시스템 (백필터 / 블로워 장치)

2) 차량별 주요 구성품 내역

① 1호차 : 운전 및 집진차량 작동제어, 충전시스템(3호차와 병렬), 구동부, 공기압축기, 배터리(하부 8 BOX, 내부0.5 BOX), 1세부 연동 작업차량 환경관리 시스템 등

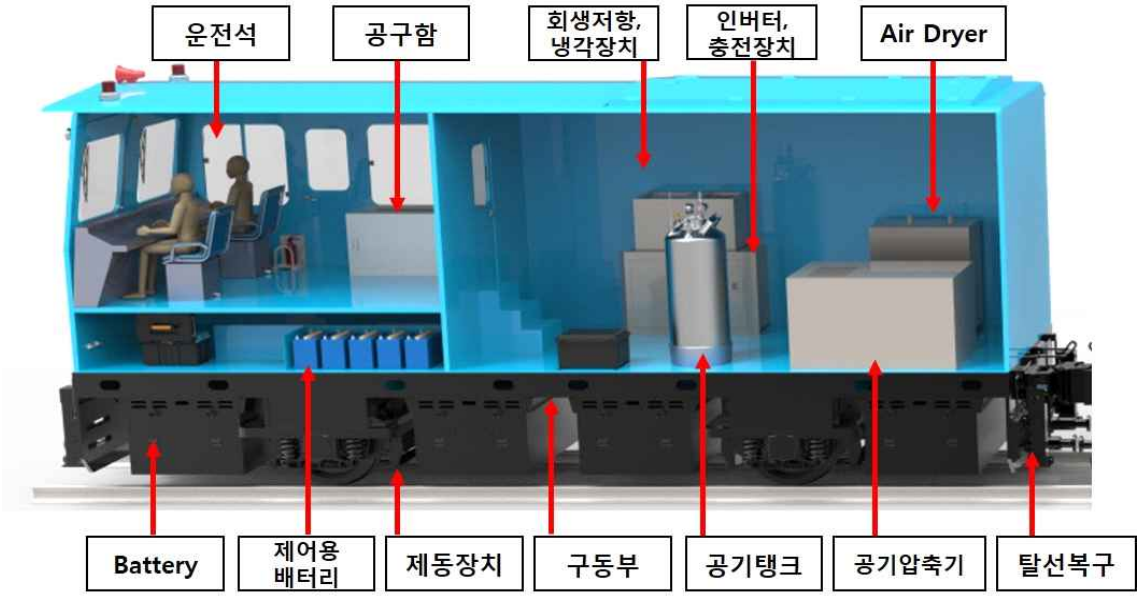


그림 10 1호차량 내부 주요 구성품

② 2호차 : 흡진모듈, 싸이클론장치, 프리필터, 증배장치, 전기집진장치, 세척장치 등

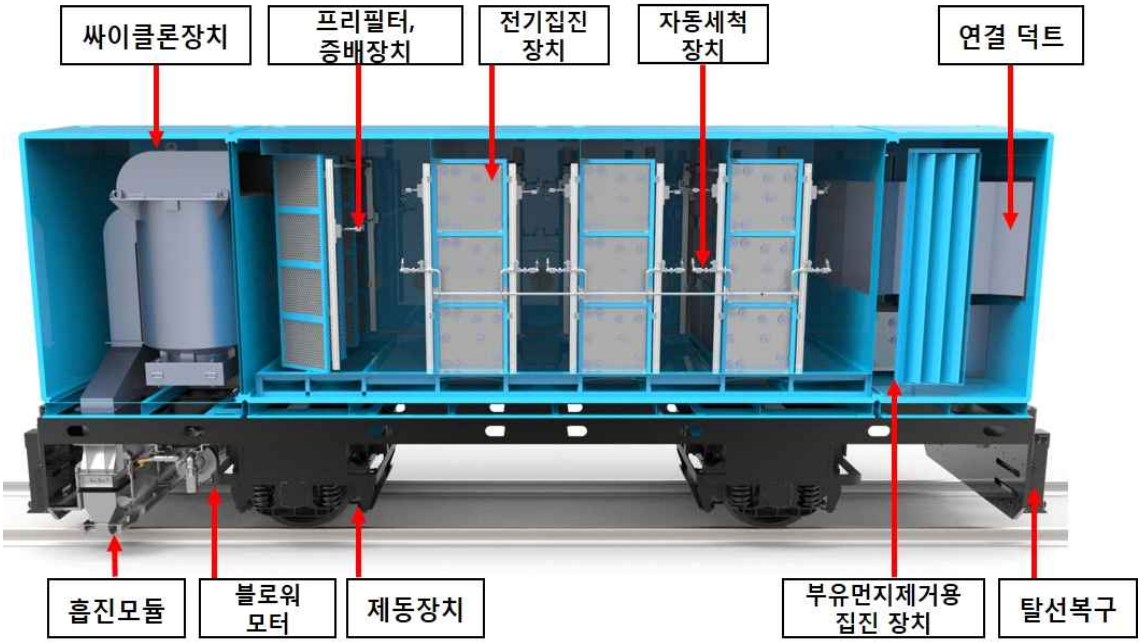


그림 11 2호 차량 내부 주요 구성품

③ 3호차 : 운전 및 집진차량 작동제어, 대형배기팬, 충전시스템(1호차와 병렬), 구동부 등

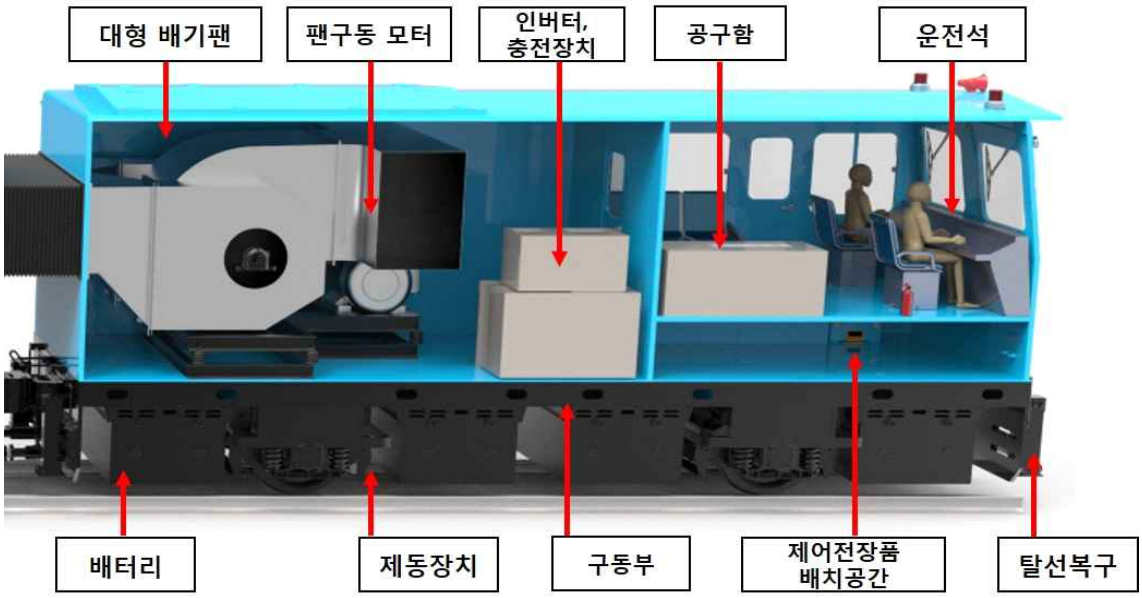


그림 12 3호 차량 내부 주요 구성품

④ 4호차 : 하부 흡진장치, 전처리부, 백필터 장치 등으로 구성

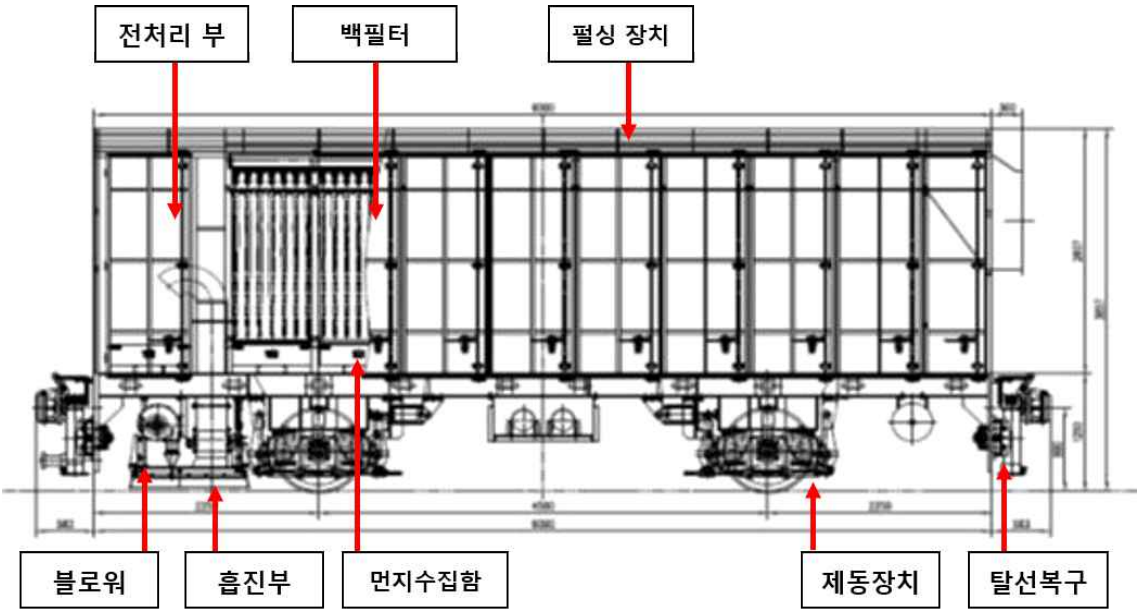


그림 13 4호 차량 내부 주요 구성품

(나) 차량 주요 구성품 개발

1) 차량 구조체 (프레임) 제작

① 대차(Under Frame)

□ 프레임은 형강 및 강판의 용접구조로 하중 및 차량양단의 충격에 대해 충분한 강도를 갖는 구조로 하고 상판(床板)에는 상판용 무늬강판을 사용

□ 프레임의 전후 양단부에는 탈선복구 장치용 취부대를 설치하여 차량 비상복구 장치 탑재가 용이하도록 함

□ 2호차의 경우 하부 프레임과 차륜을 조립 제작한 후 전기집진장치와 외부프레임은 ㈜리트코에서 제작 진행 함



그림 14 대차 및 차량 프레임 조립 모습

② 차체(운전실) 제작 조건

□ 운전실은 형강 및 강판의 용접구조

□ 충분한 시계가 확보되는 크기로 운전실의 전후 창유리는 고정식 강화 유리 사용

□ 운전실 출입문은 미닫이식으로 차량 양방향 각각 설치하고 각 문에는 쇄정장치를 설치

□ 양 측면은 미닫이식 창문 설치

□ 운전실 내 작업자 탑승을 위한 4인용 장의자 배치 설계

□ 차량의 전방 측면확인용 후사경 설치

□ 운전실 앞 창유리 2개소에는 와이퍼 설치

□ 운전제어대를 설치하여 전도주시가 용이하게 함

2) 주행장치 개발

□ 주행장치는 차륜, 차축, 감속장치, 축상, 코일스프링 등으로 구성

□ 축상은 주행 중 차체하부에 설치된 페데스탈 부위와 습동하는 구조로 이 부분의 마모를 방지하기 위하여 페데스탈 측면에 구리스 주입구가 설치되어 있음

구성요소	주요규격	비고
량당 축의 수량	• 2축	
Wheel	• 직경 860mm	
Axle	• 단조품	
축상	• 주강	
스프링	• 코일스프링	
댐퍼	• 수직형 오일댐퍼	
축베어링	• 테이퍼틀러베어링	
감속기	• 스파이럴베벨감속기 감속비 4.08:1	
동력전달장치	• 프로펠러샤프트	

① 차륜 및 차축

차륜은 차량한계를 감안, 최대한 낮게 설계하여야 하므로 직경 860㎜, 폭 140㎜를 사용하였으며 차륜의 답면 형상은 일반 표준 형태를 채택하였다. 차축의 중앙부에는 감속장치가 설치되고 인접하여 정지 캘리퍼용 디스크판이 차축에 입입되어 있다.



그림 15 제작된 차륜 및 차축 형상

② 감속기

□ 경량의 소출력 모터(65KW 급 ×2대)를 채택하였기 때문에 설계 요구 속도와 고구배에서의 큰 추진력을 확보하기 위해 감속과 변속이 모두 이루어지는 변속기를 적용하여 설계하고 주문제작 함

□ 변속기에 2개의 모터를 장착하고, 출력축 2개를 각각 프로펠러 사프트를 통하여 전후방 최종감속기에 연결되는 구조로 2축구동이 가능함

※ 각각의 요구사항에 적합한 주행이 가능하도록 감속/변속기를 개발하였고, 소형 모터로 높은 출력의 구동력을 확보하여, 비상운전이 가능하고 견인능력을 확보함

□ 무부하 조건/ 부하조건에서 최대 속도 등 변속 감속 특성치 시험 확인 완료

- 고속모드(이동) : 자체중량 80톤에서 30/1000에서 차량속도 60㎞/h로 주행가능
- 저속모드(작업) : 동일조건, 최대구배 42/1000에서 차량속도 최대 25㎞/h 주행가능
- 견인모드 : 구배 42/1000에서 외부트레일러 80톤을 견인하여 최대 12㎞/h로 운행가능
- 비상운전 : 동력차량 1량이 고장 시 나머지 1량으로 저속모드에서 최대구배 42/1000에서 비상운전이 가능(최대 12㎞/h속도)

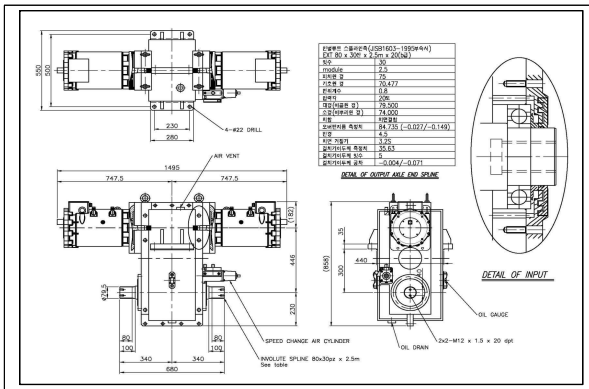


그림 16 모터 및 변속장치(감속기) 설계도



그림 17 구동부 시험(무부하조건) 모습



그림 18 감속기 제작 및 조립

③ 축상(軸箱, Axle Box)

□ 축상은 주철재를 사용하였고 차체의 페데스탈 부위와 습동하는 구조로 내부에는 테이퍼 롤러 베어링을 복열로 배열함

□ 축상의 뒷면에는 오일실의 이탈을 방지하기 위해 멈춤판이 설치하였음

□ 베어링의 윤활은 구리스를 사용하고 축상 하부에 별도 주입구를 설치



그림 19 축상 제작형상 및 차량 하부 장착 모습

3) 제동 유니트 장치 개발

전기제동(회생제동) 및 기계식 주차제동, 상용제동으로 구분하여 개발 적용하였다.

① 전기제동(회생제동)

□ 주제동 장치는 전기제동으로 운전제어대의 주간제어기를 감속위치로 이동시킨 조건에서 이루어지도록 설계

□ 평탄선에서 전기제동으로도 차량의 정차가 가능하며, 고속영역에서 좋은 특성을 발휘하며, 차량이 감속됨에 따라 상대적으로 제동력이 감소되므로 정지직전에는 유압제동으로 정차시킬 수 있는 일반적인 제동 기능을 수행함

② 상용제동

□ 상용제동은 차량이 저속상태에 있을 때 정차목적으로 주로 사용되며 조작은 각 차량의 운전제어대 측면에 설치된 제동레버 조작에 의하도록 함

□ 제동용 밸브는 작동되는 각도에 비례하여 제동압력이 상승하도록 설계 적용함

□ 본 차량의 공기 제동장치는 단독제동 및 관통제동이 가능한 구조로 되어있음

③ 주차제동

□ 주차제동은 전위 감속장치 입력축에 설치된 주차제동용 디스크를 사용하여 기계적인 정지가 가능하도록 스프링의 힘으로 제동을 체결하는 구조임

□ 주차제동의 완해는 각 운전제어대에 설치된 주차제동 완해 버튼의 조작에 의하며 버튼 동작 시 전기적 신호에 의하여 공기압력을 공급하여 주차제동을 체결하고 있는 스프링의 장력을 극복하면서 완해상태를 유지하도록 하였음

□ 주차제동이 체결되어있는 상태에서는 버튼스위치에 적색등이 점등되고 공기압축기에 의해 제동공기 압력이 형성된 상태로 되며 반대로 다시 한번 주차제동 버튼을 조작하면 배기음과 함께 적색등이 소등되면서 제동압력이 배기되는 구조임

④ 주차제동의 강제완해

□ 주차제동이 완해되지 않을 시 수동으로 강제 완해시킬 수 있도록 함

□ 제동유니트 내에 배관용 컨넥터에 운전실 내 비치된 공기펌프의 배관과 접속시킨 후 주차제동용 차단변을 차단시킨 상태에서 펌프를 수동으로 작동시켜 압력공기를 공급하면 전자변에 의하여 압력공기가 공급된 것과 동일한 효과로 주차제동이 완해됨



그림 20 제동 유니트(차량내 장착 모습)

⑤ 공기압축기

공기압축기는 1호차(MC1)와 3호차(MC2)에 기계실 입구 좌측에 배치하고 3상전동기 V벨트로 구동되는 구조로 설계 제작하였다

<주요제원>

□ 사용 압력 : 9bar

□ 전원 : AC380V, 3-P, 60Hz

□ 모터 : 22kw, AC380V/3P/60Hz, IP54

□ 모터 운영 모드 : 자동/연속/원격/일정

□ 구동드라이버 : 3상인버터 440V

□ 입력 DC 650V, 최대전압 750V, TRIP 전압 820V)



그림 21 공기압축기

4) 전기·전원장치 개발

① 서보모터

□ 서보모터는 양축 돌출형으로 하여 각 단부에 추진축을 거쳐 감속장치를 구동하는 방식으로 전륜(全輪)구동방식으로 되어 있다.

□ 서보모터에는 저속운전 시 대전류로 인한 과열을 방지하기 위해 냉각용 송풍장치가 설치되어 있으며 정속운전을 위한 레졸버(Resolver)설비가 내장되어 있다.

□ 모터의 제어는 각 운전제어대에 설치되어 있는 무단제어식 속도제어기에 의하며 속도제어 방식은 지정속도 신호 지령 방식으로 선로조건에 관계없이 정속운전이 가능하다.

서보모터 사양

구분	단위	최대토크한계	정상토크한계 최대구배 주행속도	상시최대속도 상시주행속도	평탄최대속도 평탄직선 정상주행
모터속도	rpm	2660	4000	7500	9000
차량속도	km/h	17.7	26.7	60	60
모터 정상토크	N-m	160	160	100	-
모터 최대토크	N-m	430	280	175	-
모터 정상파워	kW	45	67	67	-
모터 최대파워	kW	120	120	120	-



그림 22 서보 모터 및 서보모터 제어기

② 서보모터 제어장치

□ 서보모터 제어장치는 각 운전제어대에 설치된 속도제어기로 부터 신호전압을 받아 주행용 축전지의 직류전원을 모터가 필요로 하는 교류로 변환하여 필요전류를 공급하는 설비이다.

□ 제동 시에는 서보모터가 일시적으로 발전기화 하여 발생된 전류를 제어장치를 경유하여 축전지를 재충전시키는 역할을 한다.

□ 급격한 서보모터의 회생전류로 인한 축전지의 손상을 방지하기 위하여 기계실 안쪽에 회생저항을 설치하여 써지(Surge) 전류를 소모시킨다.

③ 충전장치

□ 기계실 내 설치한 충전장치는 아래의 기능을 가진다.

- 충전장치는 외부전원 또는 비상발전기 전원인 3φ,380V,60Hz의 전원을 입력으로 하고 변환장치를 거쳐 DC703V로 축전지를 충전시키는 기능을 가지며 충전방식은 정전류방식이다.
- 충전은 두 대(1호차, 3호차)의 축전지를 병렬로 연결하여 동시에 충전/방전하는 방식으로 장치하고, 만약 1대의 축전지 계통에 문제가 생길 경우 문제가 된 축전지 계통을 차단하고, 다른 1개의 축전지 계통만을 사용하여 두 대의 기관차가 운행되도록 하여, 고장에 대한 대비책을 마련하였다.
- 충전방식은 CCCV(Constant Current-Constant Voltage) 방식으로 충전하며, BMS(Battery management System)에 의해 상시 감시하고, 불균일이 생길 경우, 자체튜닝을 통하여 균일화하도록 하여 축전지의 수명을 늘리고, 안전성을 보장하고자 하였다.
- 정상적인 외부전원에 의한 충전 시에 충전상태에서 조작키를 취거하여도 충전은 계속되며 일정시간이 경과하면 자동적으로 차단되는 구조이다.
- 주행 및 제어용 축전지 잔량이 부족한 상태가 되면 경보를 발생하여 운전자가 상태를 확인할 수 있는 구조로 설계되었다.
- 운전에 필요한 주행용 축전지의 전압 및 전류상태를 파악할 수 있는 계기가 각 운전제어대에 설치되어 있다.

□ 본 장치의 설계 정격은 다음과 같다.

구분	정격	비고
입력	• 상용전원 : AC, 3상 380V±10%, 60Hz±10%	
충전부	• 방식 : DC/DC Converter • 전력회로 방식 : Buga • 제어기능 : 전류제어, 전압제어 • 출력 정격 전압 : 612Vdc • 출력 정격 전류 : 112Adc • 출력 최대 전압 : 750Vdc • 출력 최대 전류 : 150Adc(30초) • 전류 리플 : ±5% 이내	
회생제어부	• 방식 : Chopper • 제어기능 : 전압제어 • 개시전압 : 710V • 정지전압 : 698Vdc	
보호기능	• 과전압 : 820Vdc 순시 • 과전류 : 200Adc 순시 • 과부하 : 정격 출력의 130%에서 30초 • 방열판 과열 : 85℃ • 기타 : CPU, IGBT 고장	
Interface	• 입력 : 수동 및 RS485 겸용 • 출력 : 충전중, 충전완료, 고장 등	

④ 회생 제어장치

□ 설계 저항 : 1.15옴 - 2개

□ 용　　량 : 698Volt에서 422kW

□ 설치 위치 : 1호차 실내

□ 완충 상태에서 급작스런 제동이나 내리막 구배에서의 급격한 감속으로 인해 큰 회생제동력이 발생하여 축전지의 전압이 설정치 이상으로 올라갈 경우, 모터드라이버의 자체보호 기능이 동작하여 회생제동 불능상태가 되고 DC에 연결된 각종 전원사용기기의 고장을 유발시킬 수 있으므로, 이를 방지하기 위한 회생제동제어장치와 회생저항을 장착했다.

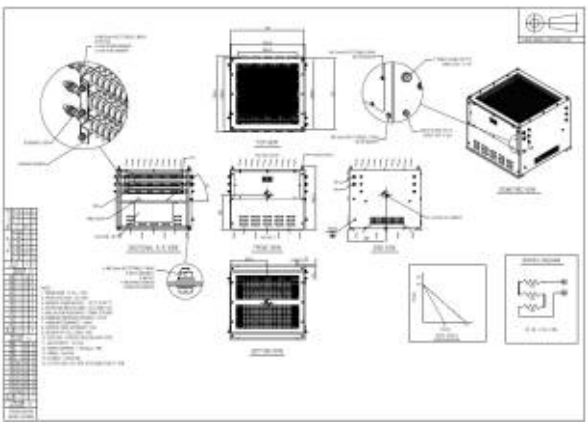


그림 23 회생제어장치 설계도면



그림24 회생저항 장치 제작 형상

⑤ 주행용 축전지 및 BMS

□ 각 주행차량(1호차, 3호차)에 28P24S Module 8box와 28P12S 1box를 직렬로 연결 하여 28P204S의 Battery System을 장착했다.

□ 각 수납상에는 축전지 상태를 검출하는 검측장치가 설치되어 있어 축전지 이상 시 운전 제어대에 설치된 상태표시등에 적색 LED 경보등이 점멸된다.

□ 차량별 축전지의 탑재용량은 DC 652.8V-560AH 이다.

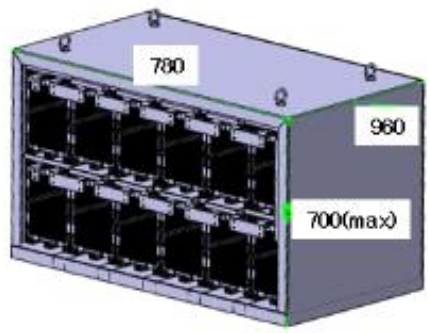


그림 25 28P24S Battery Module

(Size : 960 x 780 x 700)

구분	단위	24s module	12s module	pack 사양
cell	-	20Ah LFP	20Ah LFP	20Ah LFP
Configuration	-	28P24S	28P12S	30P192S
공칭전압	[Vdc]	76.8	38.4	652.8
동작전압	[Vdc]	48 - 86.4	24 - 43.2	408-734.4
공칭용량	[Ah]	560	560	560
용량	[kwh]	43.008	21.504	365.568



그림 26 축전지 수납함 및 연동 모습

□ BMS 구성도는 각각의 Pack에 24S Slave X 8EA, Master BMS X 1EA 장착했다.

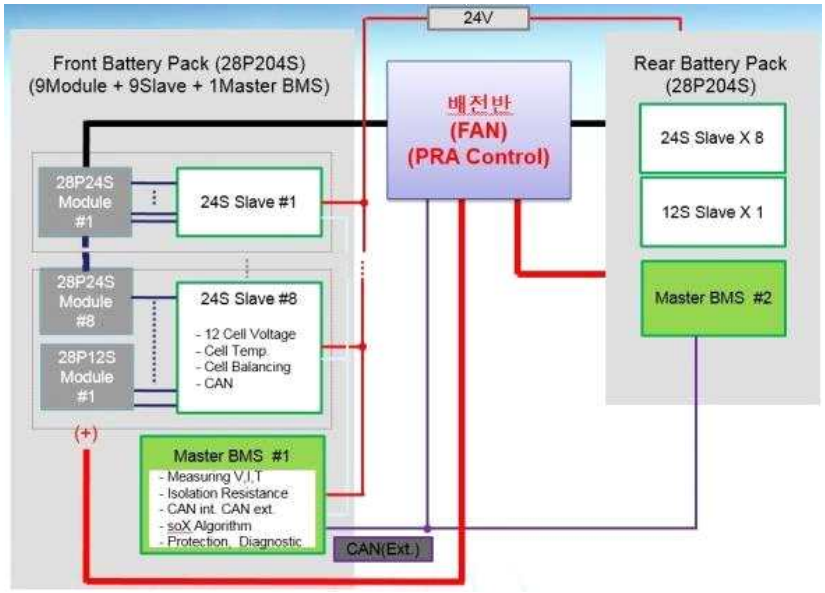


그림 27 축전지 제어 계통도

5) 부속설비 개발

① 연결장치

□ 기계연결장치는 AAR 시바타식 자동연결기를 사용한다.

□ 기계연결기의 해방은 수동레버를 이용한다.

□ 전기연결은 전기연결박스와 점퍼연결기를 사용한다.

구분	내용	비고
구성	• COUPLER BODY, KNUCKLE, LOCK, THROWER, LOCK LIFTER, SPRING YOKE	
Wheel	• SC450, SM45C, SUP9	

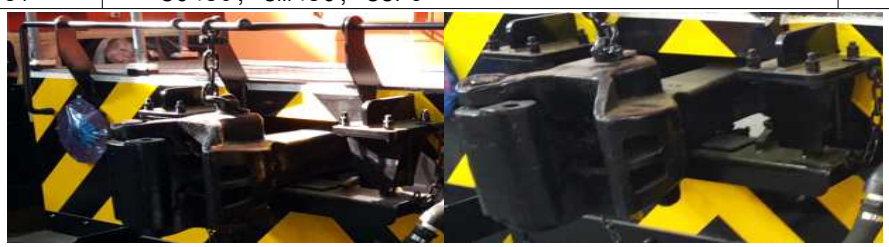


그림 28 연결기 제작 및 취부 모습

② 완충기 : 각 차량의 전후방에 스프링식 완충기 제작 장착

③ 탈선복구장치

탈선복구장치는 제어차량 설치한 유압장치를 사용하여 차량탈선 시 차량을 궤도에 복구하는 설비로 차량의 전후좌우에 이동(이송)장치가 설치되어 있으며, 수직작동 및 수평작동용 유압실린더가 있다. 조작은 차량측면에 전기식 조작반의 스위치를 사용하며, 집진차량은 유압모터만을 기동하여 복구장치의 조작은 기계식 레버조작으로 이루어진다.

□ 조작방식

MC차량내부 유압선택 스위치를 조작하여 탈선복구장치 유압을 살려준 후 각 차량 스위치 박스 및 기계식 유압레버를 조작하여 복구작업을 진행한다.

□ 작동방식

차량탈선 시 지면으로부터의 높이도 차이가 나고 지지면에 장애물로 인하여 작업이 곤란한 경우에 대비하여 기본적으로 좌우유압실린더가 동시에 작동하나 필요한 경우에는 한쪽 지정실린더만 각개 제어가 가능하도록 설계하였음



그림 29 탈선복구장치

④ 외부전원공급용 리셉터클 및 플러그 (접속단자 및 케이블)

충전을 위해 1호차와 3호차에 각각 설치 되어 있음

외부전원공급장치 사양	
Ampere	125 A
Poles	4 p
Voltage	400V
Earth position	6 h
Hertz	50-60 Hz
Connection technology	Screw terminals
Contact	nickel plated contacts, highly heat resistant contact carrier
Protection type	IP 67

7) 대형 배기팬

3호차량에 설치된 미세먼지 흡진을 위한 대형 배기팬은 아래의 기능 제원을 갖도록 제작

□ 배기팬 모터의 구동은 주축전지로부터 전원을 공급받아 속도제어를 하는 인버터를 이용하여 필요에 따라 풍량과 풍압을 조절할 수 있게 한다.

□ 110KW 380V 4P 모터 / 110KW DC 입력용 인버터

□ 집진배기팬은 집진한 분진을 최대한 배출할 수 있는 용량과 규격으로 선정하며 소음과 진동을 방지하기 위해 방진장치를 장착하였다.

구분	내용	비고
용량	• 120000[CMH], 2000[CMM]	
온도	• 20℃	
ST. 압력	• 200[mmAq]	



그림 30 대형배기팬 및 인버터 장치

(다) 차량 최종 조립 완료 및 현장시험

최종 차량 조립 완료 확인을 위해 참여기관 입회 후 개발품 담당 기관별 차량 점검 목록 작성 및 자체 공장 기능 시험 진행 (2회 / 2018.7.2., 2018.7.25.)



그림 31 차량 외부 및 기계실 내 장비 점검



그림 32 운전실 내부 기능 점검



그림 33 대형 배기팬 및 하부 흡진장치 기능점검

(라) 현장 시험 및 미비점 보완

1) 예비 주행 현장 시험 - (서울교통공사 수서차량기지)

① 차량 반입 : 서울교통공사 수서차량기지 반입 완료 / 2018.7.28.

테스트 베드 투입 전 사전시험과 보완작업을 위해 수서차량기지에 차량 반입



그림 34 차량반입

② 예비 주행 시험 및 보완작업



그림 35 수서차량기지 시험선 예비 시험주행

수서차량기지 시험선로 및 유치선을 이용하여 차량 예비주행 시험

(2019년 3월 1일 현재 / 누적거리 150㎞) 및 보완 작업 실시

- 주행데이터 분석 : 이동/작업모드 변경하며 구동시험을 진행. 차량 구동시 서보드라이버에서 보내는 정보를 모니터링하여 모터의 이상여부를 파악하였으며 제동 및 주행성능 정상확인.

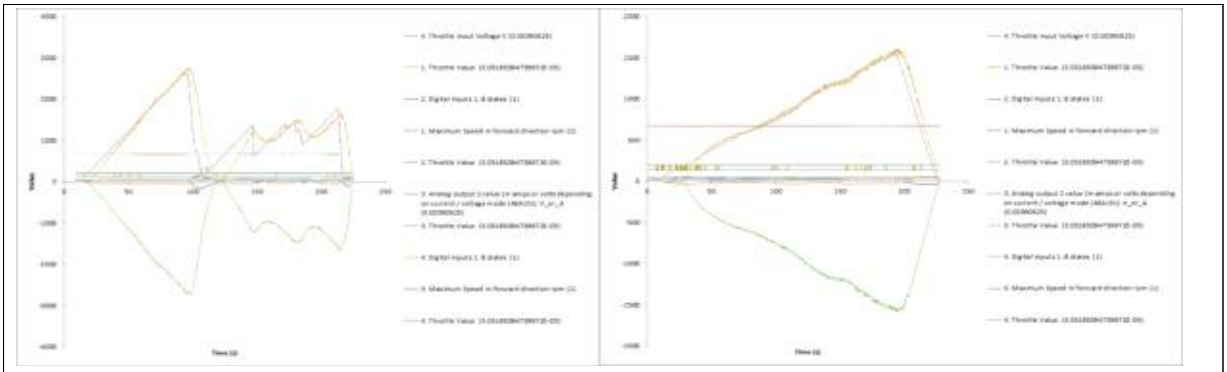


그림 36 가/감속 셋팅작업

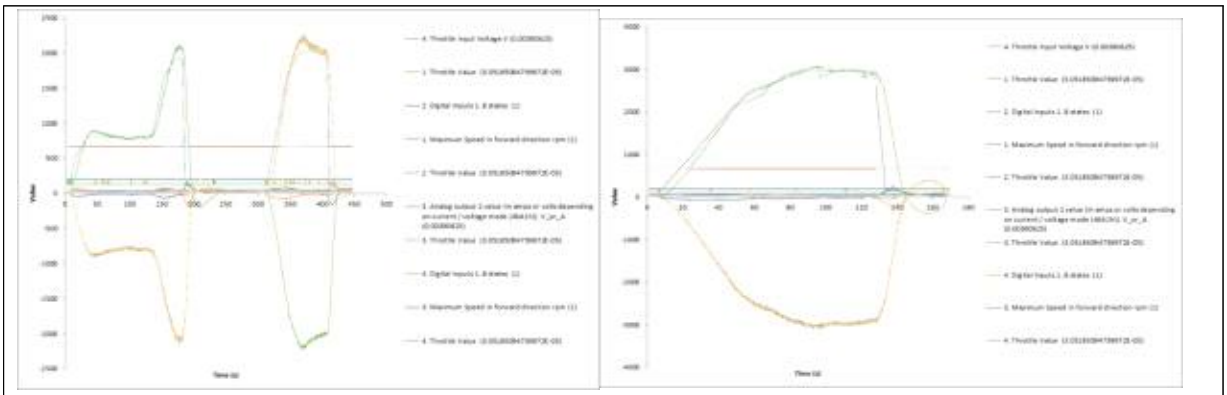


그림 37 주행/정지 셋팅작업

2) 보완작업



그림 38 기계제동 압력 설정값 수정



그림 39 BMS 세팅값 수정

① 에어컨 실외기에 의한 기계실 내부 온도상승을 방지 하기 위해 환풍기 추가설치
② 충전장치 충전전압과 전류를 현장 환경과 요구조건 반영하여 변경 및 세팅 조정
③ 기계제동 제동력 강화 요청에 따라 제동공기압을 높혀 제동력을 향상시킴.
④ BMS 통신이 간헐적으로 끊기는 현상을 보완하였음.
⑤ 서울교통공사 사용자 요구사항에 따른 차량 시험 주행 시행 (누적거리 200㎞)
→ 본선 주행, 최고속도, 제동거리, 구배등판, 견인, 탈선복구 등 요구시험 항목 확인 및 보완 작업 진행

(2) 초미세먼지 제거차량 흡진환경 개발

본 연구의 연차별 연구목표 및 내용은 다음과 같다.

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 기본설계 요구사항분석	▪ 국내외 흡진장치 사례분석 ▪ 적용 궤도구조, 차량속도, 집진처리량, 흡입량에 따른 기술요구사항 분석
	▪ 고효율 흡진구조 컨셉설계	▪ 흡진구조 기본 메카니즘 설계
2차년도	▪ 집진 흡입 구조 인터페이스	▪ 궤도 인터페이스 설계 ▪ 차량 인터페이스 설계
	▪ 구조 및 유동 해석	▪ 흡입 메커니즘 구조 및 유동 해석
3차년도	▪ 흡진 메카니즘 상세설계	▪ 설계 보완 및 차량 인터페이스 모델제시 ▪ 단품 집진 및 흡입 성능해석
4차년도	▪ 흡입 메카니즘 성능시험	▪ 차량하부 흡입구조 구성품 제작(차량제작 일정과 조율) ▪ 차량 및 미세먼지 유동가시화 시험 ▪ 초미세 먼지 처리 시험평가 ▪ 환경시험방안 제시
5차년도	▪ 집진설비 차량 환경시험	▪ 시제차량 환경시험 방안 제시
	▪ 흡진장치 현장시험평가	▪ 흡진장치 현차시험 및 평가 ▪ 현장집진 성능평가 지원

(가) 1차년도 연구수행 결과

1) 기본 설계요구사항 분석 (선행기술조사)

기존의 터널 내의 미세먼지를 제거하는 시스템은 다음과 같이 크게 두가지로 나뉜다.

□ **습식 제거시스템**: 고압의 물 분사 시스템을 사용하여 터널 내에 부착 및 부유 분진을 물방울에 흡착시켜 제거하는 방식으로, 순간 효율은 좋지만 철로에 버려진 폐수가 터널의 지하 온도에 의해 건조된 후 다시 부유할 수 있다는 문제점이 있음

□ **건식 제거시스템**: 흡진장치를 통해 직접적으로 흡입하게 되므로 2차 폐기물에서 발생하는 부유분진의 문제점이 발생되지 않는 장점을 지님

미세먼지 제거 시스템 관련 기술의 국내 특허 동향은 대부분 도로상의 건식 및 습식 방식을 겸용하여 청소기능을 갖추거나 원통형 브러시를 구비한 공기 재순환 방식을 이용하여 노면에 고착된 이물질을 제거하는 특장차 기술에 국한되어 있다. 또한 고압 살수차를 이용한 습식

방식과 터보팬을 이용하여 집진기 내부로 유입된 외부공기를 다수의 적축된 필터층으로 통과시켜 정화하는 기술이 있으나 초미세먼지저감 처리기능을 가진 기술은 건물 혹은 특정 설비에 고정된 형태로 개발되고는 있으나 차량 탑재형은 개발되지 않았다. 해외 특허의 경우에도 노면청소차 및 철도용 먼지 흡입차, 살수차량 등의 차량 개발이 다수 존재하지만, 국내와 마찬가지로 초미세먼지 처리를 위한 철도차량 탑재형 시스템은 발견되지 않고 있다.

2) 기술 요구사항 분석

터널 내에 비산되거나 축적되어 있는 초미세먼지의 발생원인은 외부로부터의 유입도 존재하지만 철도차량의 철제 차륜 및 레일의 접촉으로 인한 마모와 같은 내부 원인이 큰 비중을 차지한다. 이 때문에 터널 내의 미세먼지는 일반 외기중의 미세먼지 구성과는 다르게 금속성분이 차지하는 비중이 높으며, 특히 철금속(Fe)이 전체의 40% 이상을 차지한다. 지하철 공기질 관련 연구 결과에 따르면 이러한 지하 터널의 미세먼지는 열차 통과 시 열차풍에 의해 비산되었다가 하부에 침전되며, PM2.5 크기의 초미세먼지의 경우에도 비산된 이후 두 시간 이내 추가적인 유동이 발생하지 않을 경우에는 하부에 침전된다. 따라서 집진차량의 운행은 일반 열차 운행이 끝난 시간대에 이루어지는 것을 고려하여 미세먼지 흡진 시스템은 궤도 하부를 대상으로 설계하는 것이 바람직하다. 기존에 제시된 건식 흡진 구조는 침하되어 누적된 미세먼지를 에어블로어를 이용해 비산시킨 후 흡입구를 통해 흡입하는 방식이다. 그런데 이 때 궤도 형상에 대한 고려가 이루어지지 않고 일정한 압력으로 흡입이 이루어지는 장치를 적용하게 되면 흡입되지 못 한 채 재비산되는 먼지량이 증가하게 된다. 따라서 국내 운영중인 지하철 터널 및 궤도에 대한 적용성을 높이기 위해서는 가변 길이 및 방향 조절이 가능한 흡진 기구가 요구된다.

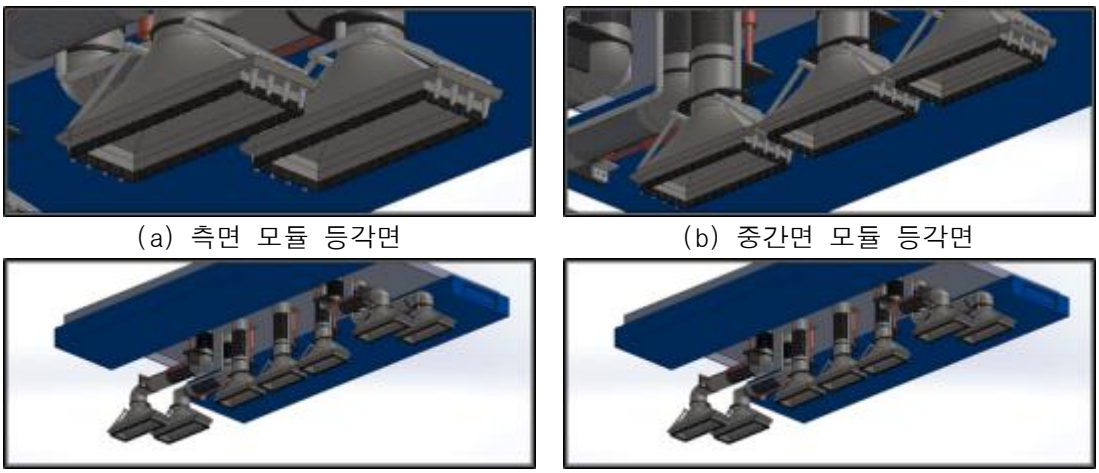
3) 고효율 흡진구조 컨셉설계

기술 요구사항들을 반영한 고효율 흡진구조의 컨셉설계는 그림 45과 같다. 에어 블로어와 흡입시스템이 동시에 적용되어 있으며, 기존의 흡진구조와 달리 흡입구의 양 옆에 에어 블로어를 설치함으로써 분사 공기가 블로윙과 동시에 에어커튼의 기능을 수행하게 함으로써 흡입되지 못 한 채 비산되는 먼지량을 최소화할 수 있다.



그림 40 고효율 흡진 메커니즘 개념

또한 그림 41과 같이 7개의 모듈로 구성하여 터널 및 궤도 단면에 가변적으로 적용할 수 있는 방식을 채택하였으며, 이들은 각각 수직길이의 조정이 가능하도록 설계되었다.



(a) 측면 모듈 등각면 (b) 중간면 모듈 등각면

(c) 하부 등각면 (d) 하부면

그림 41 모듈화 된 하부 흡진구조 메커니즘 배치

(나) 2차년도 연구수행 결과

1) 집진 흡입 구조 인터페이스

차량 하부 흡진시스템 설계시 국내 지하철도 터널의 궤도 및 플랫폼 시설 인터페이스가 다음과 같이 고려되었다.

□ 궤도 인터페이스

- 자갈 도상 궤도: 브러쉬 적용 시 매설된 자갈 비산에 따른 궤도 손상 우려
- 콘크리트 궤도 : 슬리퍼(sleeper)가 노출된 형태와 도상에 매설된 경우로 구분
- 슬리퍼가 노출된 경우, 흡진 노즐의 가변 길이 운전이 필요함

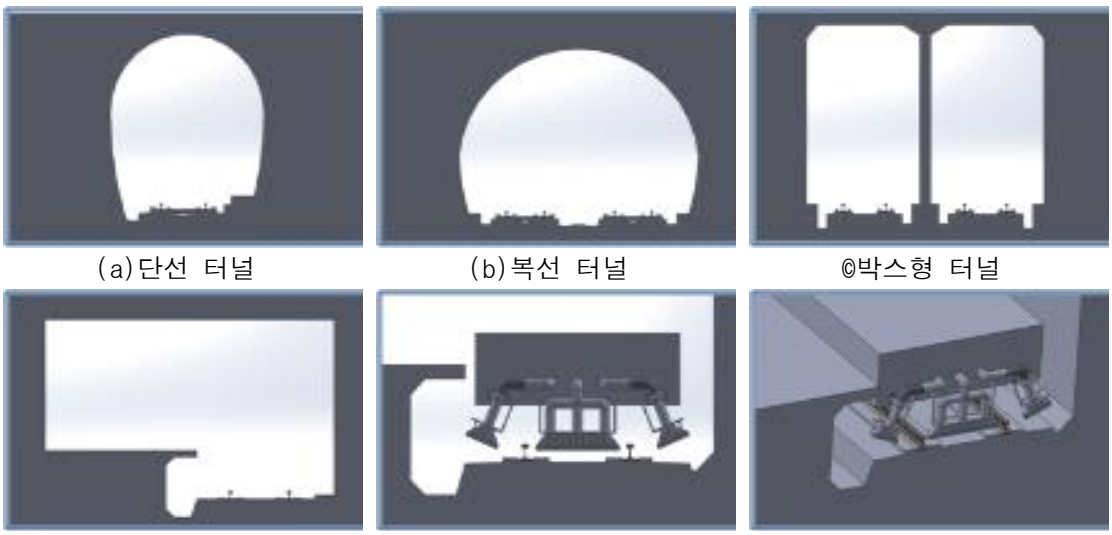


자갈도상 궤도 콘크리트도상 궤도

그림 42 운용중인 지하철 궤도 종류

□ 터널 단면 인터페이스

- 단선형 터널, 일체형 복선 터널, 박스형 복선 터널 구간이 혼재
- 궤도 하부 및 배수로 설치 공간에 미세먼지 침전
- 정거장의 경우 플랫폼이 튀어나온 구조 : 흡입 노즐의 휘어짐 제어 고려



(a)단선 터널 (b)복선 터널 ©박스형 터널

(d)정거장 플랫폼 (e)정거장 인터페이스 개념

그림 43 터널 단면 및 플랫폼 형상을 고려한 흡진 구조 인터페이스

- 차량설계한계와 배수로를 고려한 미세먼지 제거차량의 흡진구조 인터페이스

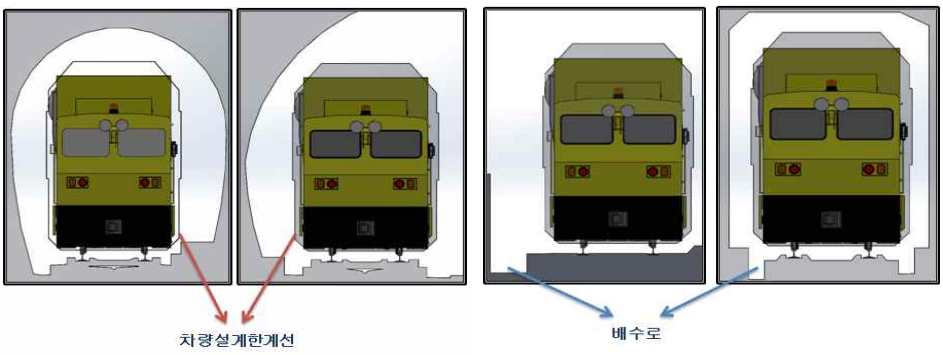
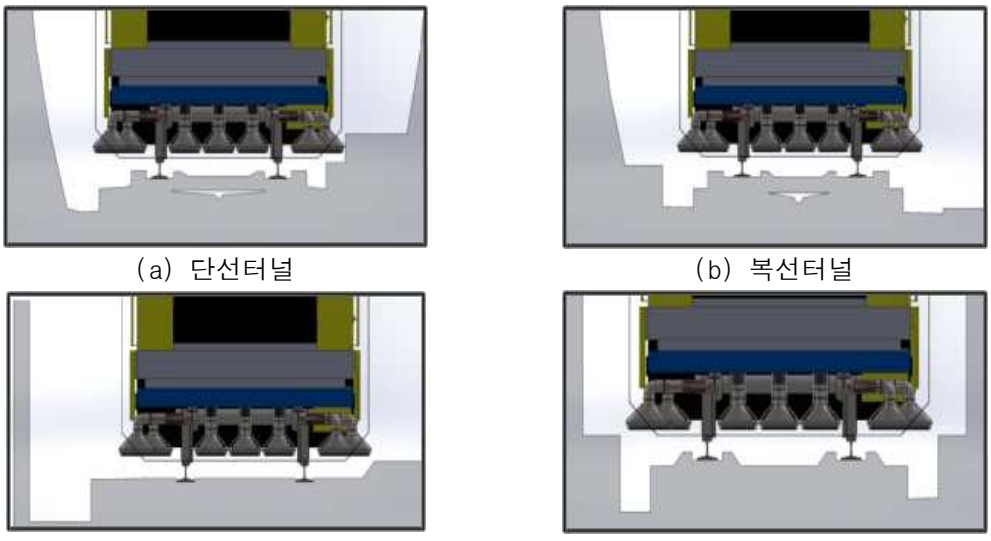


그림 44 터널 단면 인터페이스를 고려한 미세먼지 흡진 환경



(a) 단선터널 (b) 복선터널

(c) 궤도 하부도상 단차 적용 (d) 박스형 터널

그림 45 터널 단면 인터페이스를 고려한 하부 흡진구조 개념 설계

2) 흡입 구조 유동해석

집진 차량의 흡입시스템을 CFD해석을 통해 시뮬레이션을 수행하고 실차 설계시 차량 하부 흡입구조의 최적화를 위하여 다음과 같이 흡입구 먼지 유동해석을 실시하였다.

① 유동해석 개요

□ 흡입시스템에 있어서 흡입 및 분사 모듈의 각도, 흡입대상과의 높이, 간격, 노즐의 크기 등 구조적인 변화에 따른 영향을 CFD 해석을 통해 분석하며, 구조적으로 최적화된 설계 데이터를 도출

□ 상기 위의 데이터를 바탕으로 운행(5㎞/h) 시 시스템의 효율을 검증 및 보완해석을 수행

□ CFD 해석데이터는 흡입 및 분사량(풍량, 유속, 압력)데이터를 출력하며, 레일과 흡입모듈 사이의 유속분포, 미세먼지(㎛1이하, ㎛10이하, ㎛100이하) 흡일경로 및 유출경로, 흡입량 데이터를 계산

□ 해석시 고려사항

- 집진차량 흡입시스템 차량 및 흡입시스템 모듈 설계도면(2D 및 3D)
- 분사노즐 크기(사양), 흡입구 크기(사양)
- 분사 및 흡입량, (풍량, 유속, 압력)
- 집진대상(레일, 배수구 등) 과 흡입시스템 모듈과의 기준이 되는 거리 및 한계거리
- 기준이 되는 흡입 및 분사노즐의 각도(초기값 및 한계값)
- 차량 주행속도
- 흡입대상(미세먼지 등) 크기 및 무게, 재질

- 해석대상 모델링

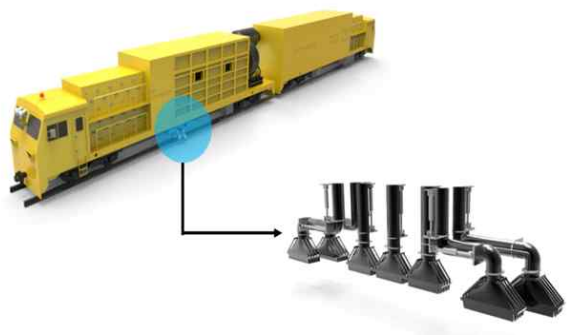


그림 46 집진차량 흡입시스템 및 흡입모듈



그림 47 흡입모듈

□ 흡입모듈 테스트

해석품질을 높이기 위해 3D_CAD 정리와 흡입 및 블로우 유량, 흡입모듈과 레일 바닥면과의 간격 등을 검토하였다.

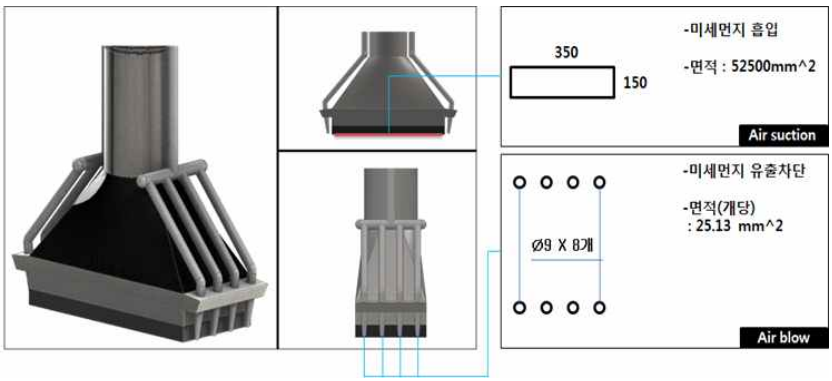


그림 48 흡입 모듈 및 블로우 모듈 설정

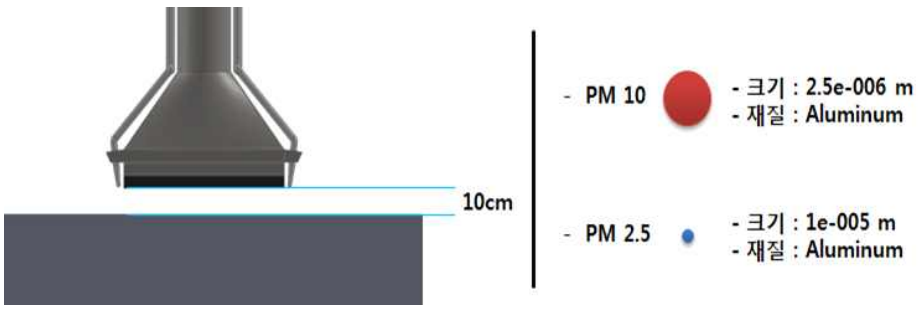


그림 49 흡입모듈 미세먼지(PM 10, PM 2.5) 설정

② 유동해석 결과 분석

□ 5km/h 주행, 블로워 유량 0.2m^3/s, 노즐각 변화(0-30도)

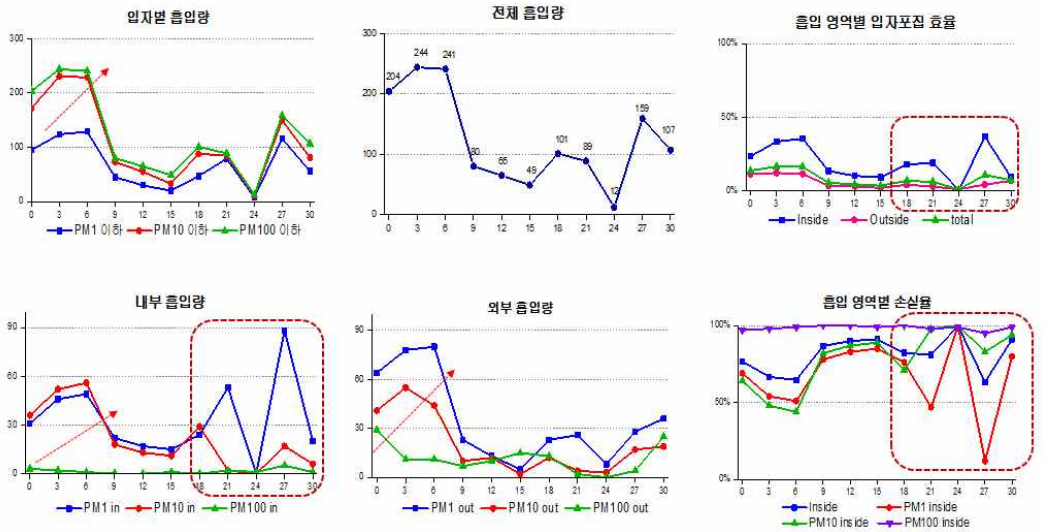


그림 50 차량 주행시 노즐각 변화(0-30도)에 따른 유동해석 결과

: 높은 노즐각, 입자의 비산, 블로어의 에어커튼 교차등으로 인하여 흡입효율이 불안정한 구간

: 그 외 구간 - 노즐각 6도까지 효율상승 후 변화없음

☐ 정지상태, 블로워 유량 0.025-0.15m^3/s, 노즐각 0-30도

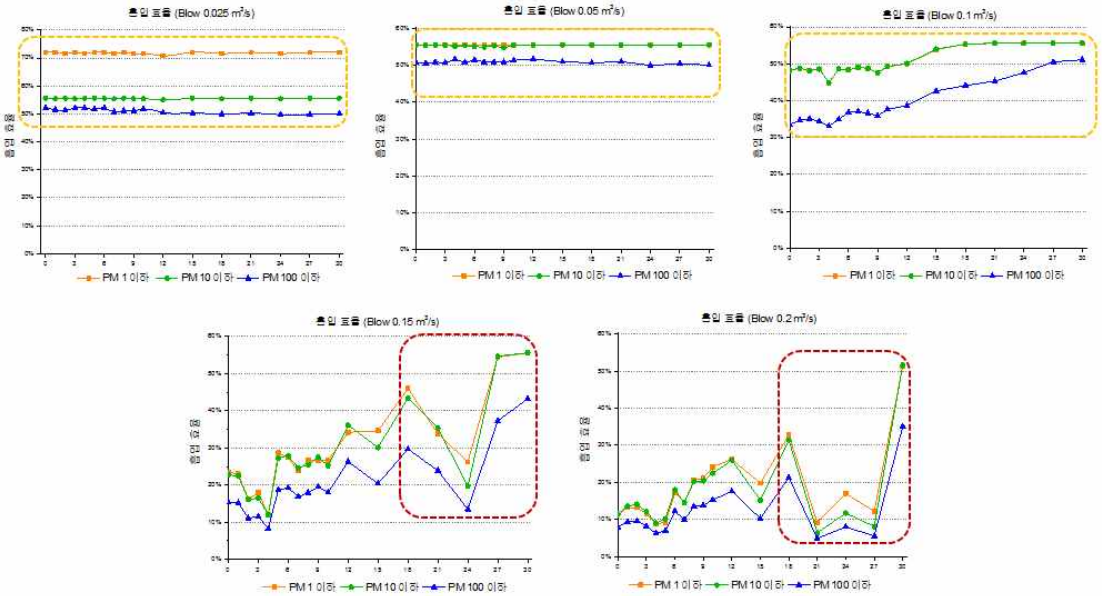


그림 51 차량 정지시 블로워 유량 및 노즐각 변화에 흡입효율(블로워 유량 중심)

☐ : 높은 노즐각, 입자의 비산, 블로어의 에어커튼 교차등으로 인하여 흡입효율이 불안정한 구간

☐ : 블로어의 노출유량이 적은 경우, 흡입효율은 일정하고 높게 보이나 블로어의 효과를 떨어뜨리므로 노즐당 유량은 0.15~0.2m^3/s 정도가 적절

☐ 정지상태, 블로어 유량 0.025-0.2m^3/s, 노즐각 0-30도

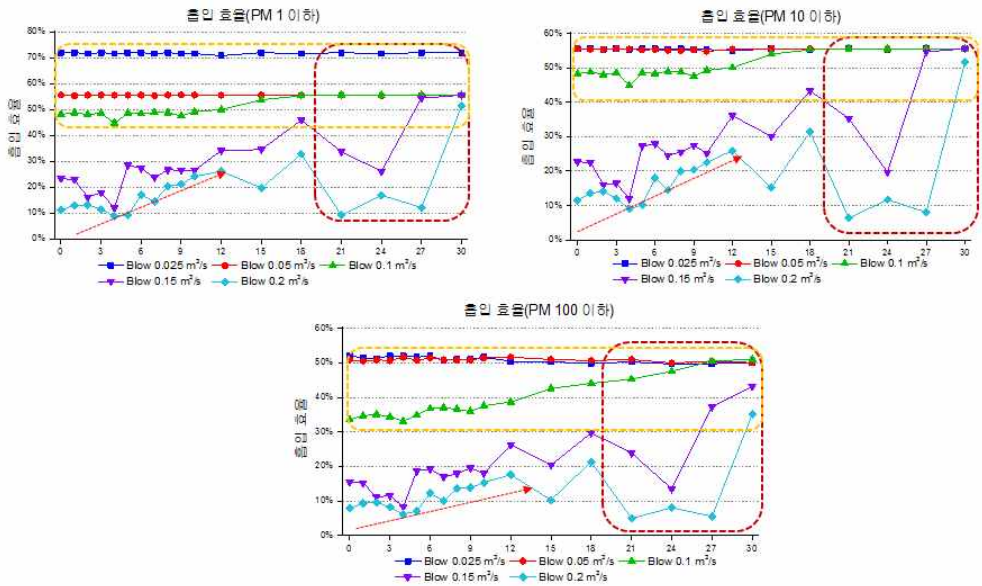


그림 52 차량 정지시 블로워 유량 및 노즐각 변화에 따른 흡입 효율(흡입 입자 중심)

☐: 높은 노즐각, 입자의 비산, 블로어의 에어커튼 교차 등으로 인하여 흡입효율이 불안정한 구간

☐: 블로어의 노출유량이 적은 경우, 흡입효율은 일정하고 높게 보이나 블로어의 효과가 없음

↑ : 그 외 구간 - 노즐각 6도까지 효율상승 후 변화 없음

□ 흡입구 시스템 레벨(7모듈 흡입유동 최적화)

· 바닥에서의 높이: 10cm

· 블로어 노즐각도: 6도 고정

· 흡입노즐 풍량: 2m^3/s, 블로어 노즐 풍량: 0.2m, 0.15, 0.1m^3/s

· particle in (pm1, pm10, pm100 각 100개) / particle out (pm1, pm10, pm100 각 200개)

· 레일집진 청소장치 모듈 (M1~M7)

· 정지시 0km/h, 흡입유량 4.0m^3/s, 블로어 유량 0.2m^3/s (최적 블로어 노즐각 6도 적용)

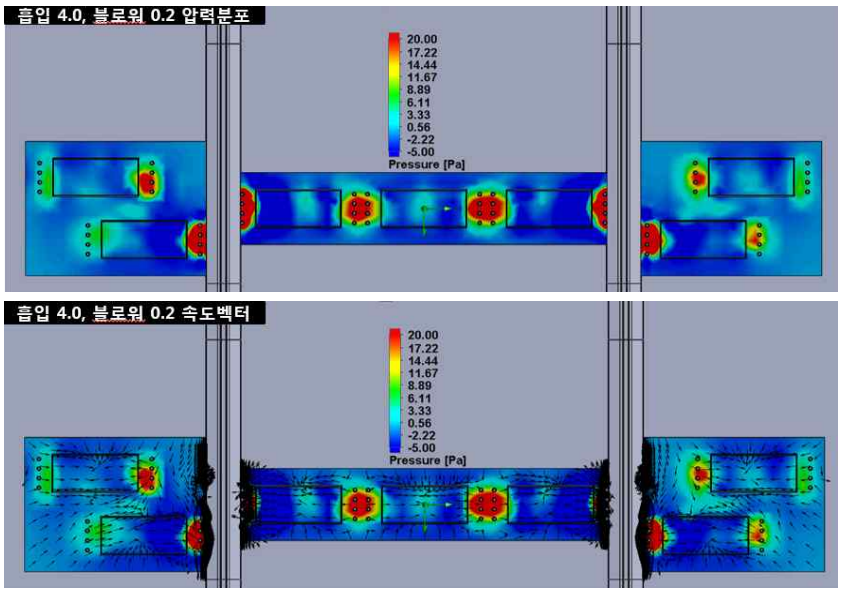


그림 53 7모듈 최적화 유동해석

③ 흡입먼지 유동해석 결과

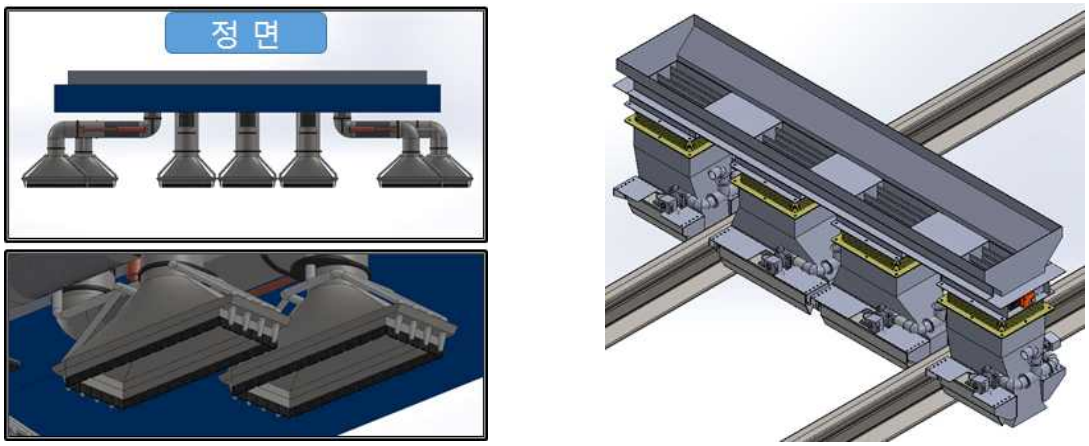
- 흡입구 모듈당 8개의 압축공기 노즐을 가진 흡입구조를 설계하였으며, 비선형 난류유동을 가진 먼지유동의 수치해석을 통하여 블로어 노즐의 설치각이 약 6° 내외에서 흡입효율이 최적화 될 수 있음을 확인하였다.
- 블로어 노즐각의 최적화와 더불어, 차량의 이동속도에 따른 개별 흡입구의 상대적인 흡입유량과 공기 블로어의 토출 유량을 산출하였으며, 최대 분진청소속도인 5 km/h의 분진흡입차량에 적용시에 미세먼지 제거효율을 10 %이상 높일 수 있음을 확인하였다.
- 특히 모듈로 설계된 흡입구조는 먼지를 비산시키는 블로어와 흡입구조를 동시에 가지는 독특한 구조로 설계하고 두 가지의 기능이 상호효과를 보여줄 수 있도록 노즐의 유량, 설치각 및 흡입구의 흡입유량을 최적화 하였다.
- 이러한 모듈화된 흡입시스템의 설계는 차량의 설계 변경시에도 적용이 간편하여 새롭게 개발중인 분집흡입차에 적용시에 터널내부의 궤도상의 레일틈과 바닥에 집중적으로 누적된 미세먼지와 초미세먼지의 제거에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(다) 3차년도 연구수행 결과

1) 하부 흡진시스템 설계 보완

흡진차량의 상용설계시 효율성과 편리성을 위하여 흡입시스템의 설계를 보완하였다.

따라서 그림 54과 같이 노즐식 에어블로어를 에어나이프를 이용한 블로어로 변경하여, 하나의 모듈 당 여덟 개씩 장착되었던 블로어를 하나의 모듈 당 두 개로 줄였다. 또한 레일 안쪽에 세 개, 바깥쪽 네 개로 총 7모듈 1세트였던 흡진구조를 레일 안쪽과 바깥쪽 각각 두 개씩 총 4모듈 1세트의 구조로 변경하였다.



기존 설계 (변경 전) 당해년도 설계 (변경 후)

그림 54 차량하부 흡진시스템 설계 보완

흡진시스템의 전체적인 구조는 그림 55와 같다. 각 모듈은 플렉서블관을 통하여 수직길이의 조절이 가능하며, 링블로어와 에어나이프를 이용한 블로윙 시스템이 적용된 구조이다. 에어나이프의 경우, 슬릿의 폭 및 각도 조절을 통해 토출구의 사이즈와 공기의 토출각도를 조절할 수 있다.

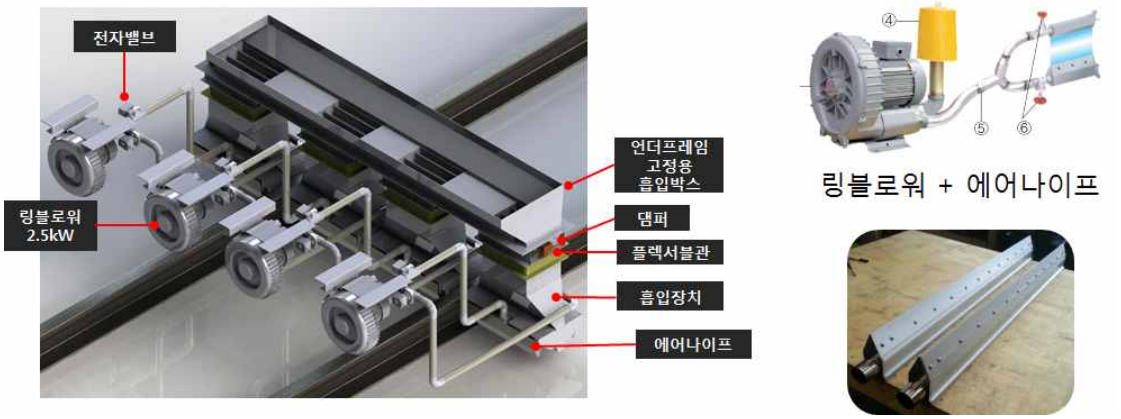


그림 55 차량 하부 흡진 시스템의 구조

2) 집진 성능 해석

설계보완된 차량하부 흡진시스템의 효율을 높이기 위해 조건을 달리하며 다음과 같이 유동해석을 통해 각 집진 성능을 확인하고 최적화 설계를 도출하였다.

① 해석 모델

본 해석에서는 블로우 각도, 흡입모듈과 블로우 모듈 사이의 거리, 흡입모듈 시스템과 바닥 사이의 거리 분석을 수행하였다. 그림 56과 같은 모델에서 레일 내측 흡입모듈(M)과 레일 외측 흡입모듈(S)의 흡입영역에 PM1, PM10, PM100의 파티클을 각각 100개씩 분포시켜 흡입량 해석을 수행하였다.

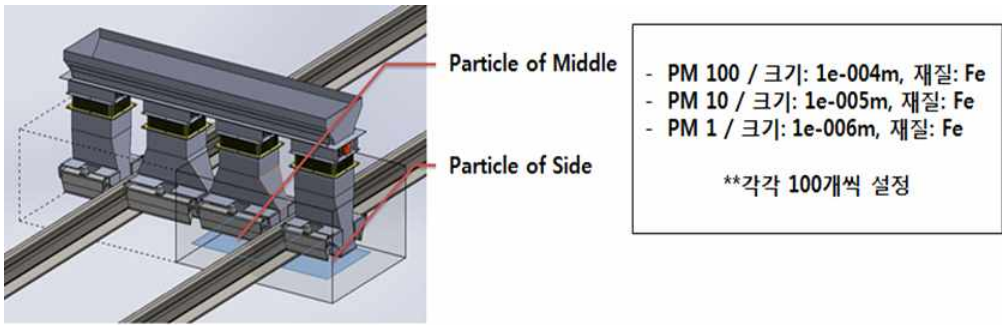


그림 56 집진 성능해석의 해석 모델

② 해석조건 1

□ 공통조건

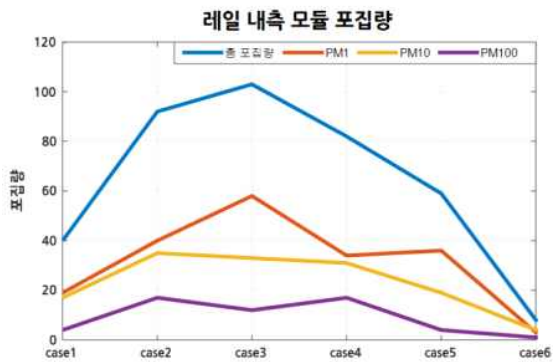
- 레일 바닥면과 흡입모듈 사이 간격: 100㎜
- 흡입구와 에어나이프 사이의 간격 : 250㎜
- 흡입 유량 : 1400CMM (레일 내측, 레일 외측)
- 에어나이프 토출유량 : 30CMM(레일 내측), 20CMM(레일 외측)

① 세부 조건

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
열차속도(km)	0	5	5	5	5	5
에어나이프 각도(도)	0	-2	0	2	4	6

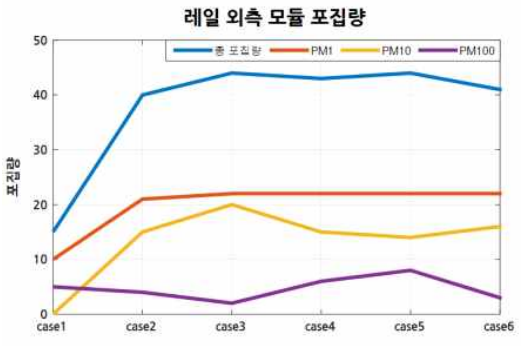
□ 포집량 분석

레일의 내측(M)과 외측(S)모듈 모두 전체적으로 포집량이 낮은 것으로 나타났다. 이는 에어나이프의 토출유량이 너무 많기 때문인 것으로 보여, 토출유량을 절반으로 줄여 재분석이 필요하다.



	total	PM1	PM10	PM100
case1	40	19	17	4
case2	92	40	35	17
case3	103	58	33	12
case4	82	34	31	17
case5	59	36	19	4
case6	8	3	4	1

그림 57 해석조건 1의 내측모듈 해석결과



	total	PM1	PM10	PM100
case1	15	10	0	5
case2	40	21	15	4
case3	44	22	20	2
case4	43	22	15	6
case5	44	22	14	8
case6	41	22	16	3

그림 58 해석조건 1의 외측모듈 해석결과

③ 해석조건 2

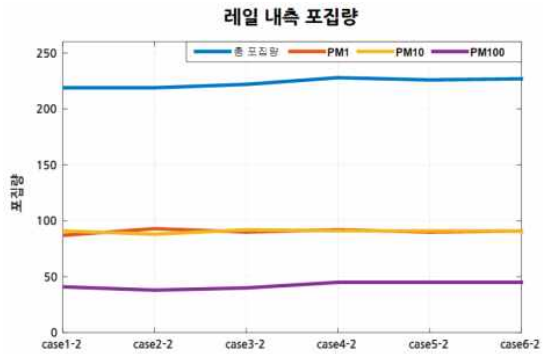
□ 공통조건

- 에어나이프 토출유량 : 15CMM(레일 내측), 10CMM(레일 외측)
- 그 외: 해석조건 1과 동일

□ 세부 조건

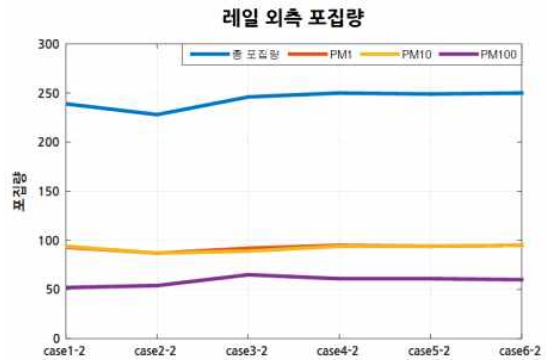
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
열차속도(㎞)	0	5	5	5	5	5
에어나이프 각도(도)	0	-2	0	2	4	6

□ 포집량 분석



	total	PM1	PM10	PM100
case1-2	219	87	91	41
case2-2	219	93	88	38
case3-2	222	90	92	40
case4-2	228	92	91	45
case5-2	226	90	91	45
case6-2	227	91	91	45

그림 59 해석조건 2의 내측모듈 해석결과



	total	PM1	PM10	PM100
case1-2	239	93	94	52
case2-2	228	87	87	54
case3-2	246	92	89	65
case4-2	250	95	94	61
case5-2	249	94	94	61
case6-2	250	95	95	60

그림 60 해석조건 2의 외측모듈 해석결과

[해석조건 1]과 비교하여 포집량이 상당히 증가한 것을 확인 할 수 있다.

④ 성능 해석 결과

□ 에어나이프 유량: 레일 내측 15CMM, 레일외측 10CMM이 적절

□ 흡입모듈 유량: 1400CMM 유량은 적당하다고 판단됨.

□ 블로어 노즐 각도: 차량 주행시(5km/h) 4~6도가 가장 효율이 높을 것으로 판단됨.

- 레일 면과의 거리는 가까울수록 효율이 좋지만, 레일 구조물 및 안전을 위해 100~200mm 가 적절한 것으로 판단됨.

3) 코안다 효과를 이용한 에어나이프 설계

에어나이프 방식으로 설계된 에어 블로워는 그림 61과 같이 두 개의 유동 분리판을 거쳐 토출구를 통해 분사된다. 이 때 에어나이프의 양 끝단의 유속이 다소 감소하여 레일 주변부의 블로윙 효과가 감소할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 그림 62과 같이 에어나이프 내부의 양 끝단에 지그를 설치하였다.

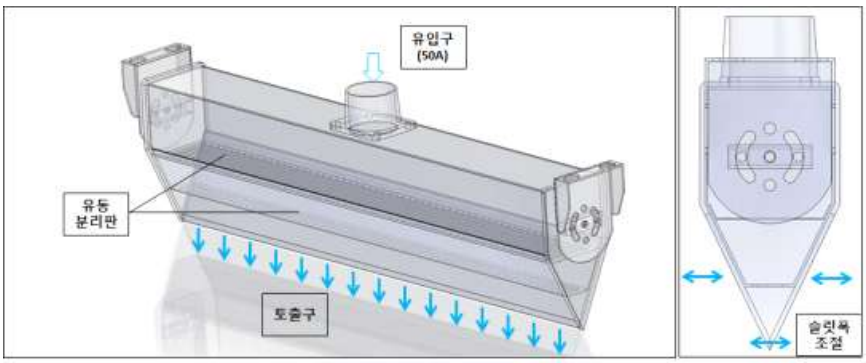


그림 61 에어 나이프의 구조

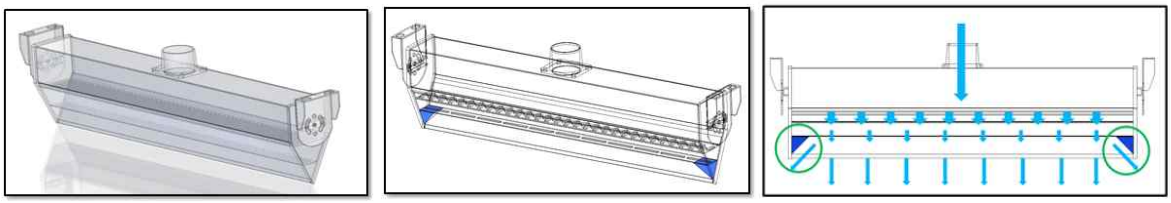
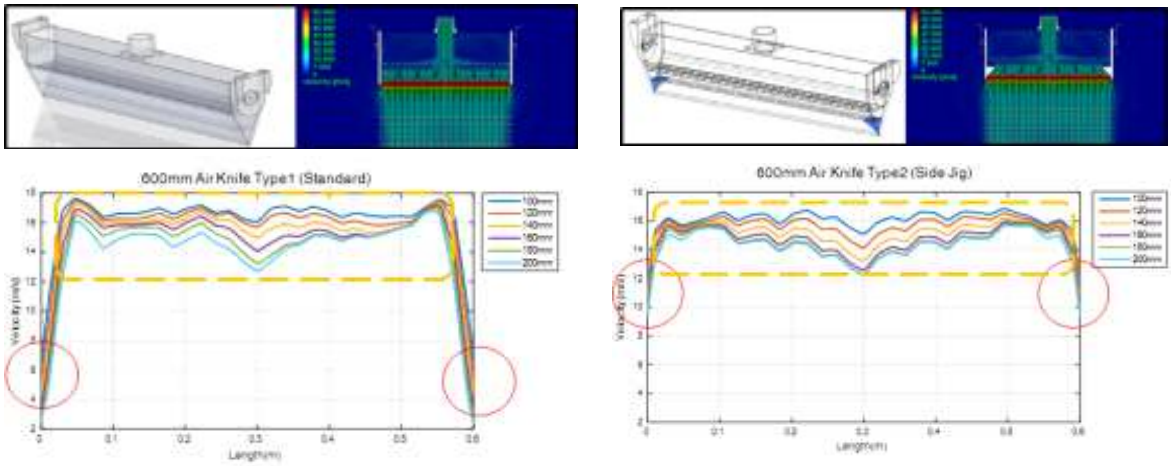


그림 62 코안다 효과를 이용한 에어나이프 설계

이러한 설계를 적용할 경우 그림 67과 같이 코안다 효과에 의하여 공기가 지그의 면을 타고 흐르면서 에어나이프의 양 끝단 유속을 증가시키는 것을 유동해석을 통하여 확인하였다.



가. 기존 에어나이프의 유속　　나. 지그를 설치한 에어나이프의 유속

그림 63. 코안다 효과를 이용한 에어나이프의 유속 비교

(라) 4차년도 연구수행 결과

1) 흡입먼지 전처리부 설계

차량의 흡입먼지 진입부는 단순히 진공 흡입구를 직렬로 배치가 구조로, 사이클론 프리필터를 설치 함으로써 흡입 먼지의 1차적인 필터링을 실시할 수 있어 집진효율을 높이고 후단에 설치된 전기집진기에 걸리는 부하를 최소화 할 수 있다.

사이클론 프리필터는 설계공간을 고려하여 그림 64와 같이 두 개의 대칭형 구조로 구성하였으며, 토출구 쪽에 가이드 커버를 설치하여 토출되는 입자의 유동방향을 제어할 수 있도록 하였다. 또한 포집박스 상단에 포집 가이드를 설치하여 박스로 포집된 먼지가 재비산 하는 것을 방지하였다. 이는 그림65에 유동해석에서 확인할 수 있었다.

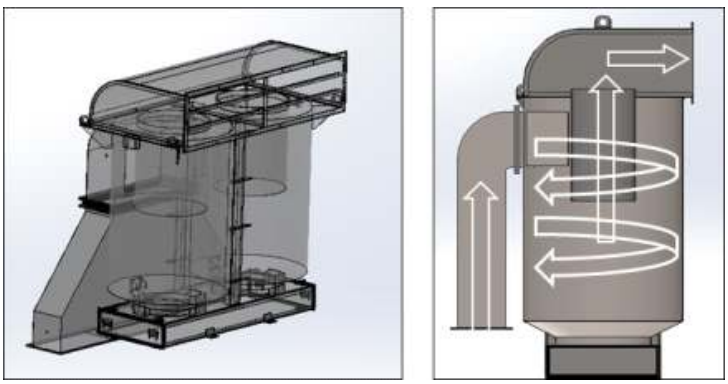
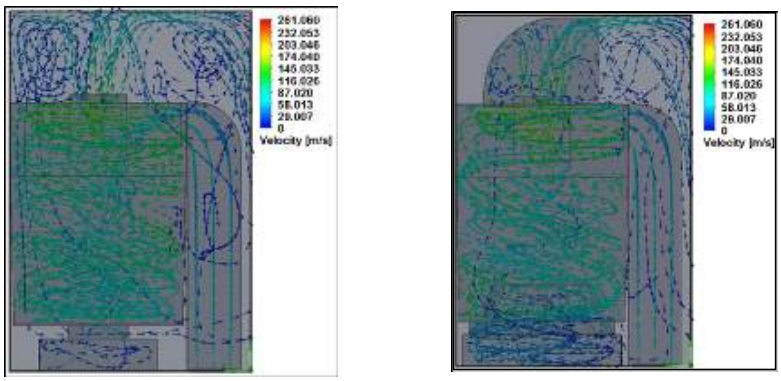


그림 64 듀얼 사이클론 프리필터



[토출/포집 가이드 미설치] [토출/포집 가이드 설치]

그림 65 사이클론 프리필터 가이드에 따른 유동 패턴

2) 차량 및 미세먼지 유동 가시화 시험

위와 같이 설계된 차량의 흡진부의 성능확인과 최적 흡입 조건을 도출하기 위하여 흡진부 및 차량 전반에 걸친 유동해석을 실시하였다.
시뮬레이션 모델은 그림 66와 같으며 하부 흡입시스템의 높이별 집진 성능과 차량의 흡입 유량별 집진성능, 그리고 최적 집진 조건을 적용했을 때의 집진효율을 분석하였다.

① 하부 흡입시스템의 높이에 따른 집진 성능 분석
흡입모듈은 바닥에 가까울수록 흡입 성능이 높아지지만, 궤도와 노면의 설계한계를 고려하면 흡입모듈과 레일의 거리(H)는 100㎜가 최소한계이다. 따라서 H값이 증가하더라도 흡입 성능에 큰 영향을 미치지 않는 범위를 찾을 필요가 있다.

- 입자 크기 : PM10, PM100
- 흡입 유량 : 1500CMM
- 레일로부터 흡입모듈까지의 거리(높이)(H)
  :100㎜, 200㎜

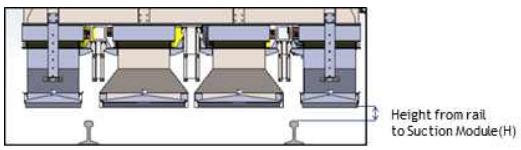


그림 66. 레일과 흡입모듈 사이의 거리(H)

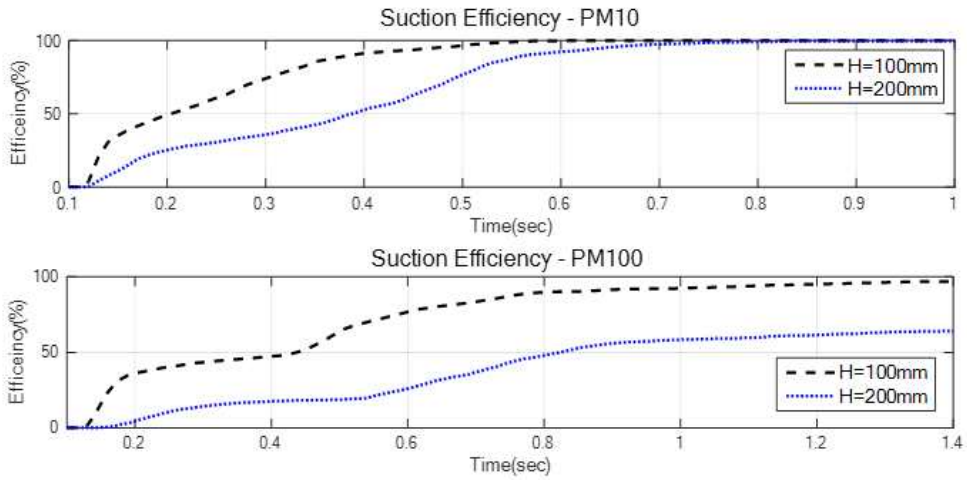


그림 67. 하부 흡입시스템의 높이에 따른 집진 성능 분석

그림 67을 통해 레일로부터 하부 흡입시스템까지의 거리 H가 100㎜일 때 집진 성능이 훨씬 높은 것을 확인할 수 있다. 다만, PM10의 경우 H가 100㎜일 때와 200㎜일 때의 집진 효율 차이가 크지 않았다. 따라서 일반먼지가 아닌 미세먼지와 초미세먼지를 대상으로 하는 본 차량에서는 H값이 200㎜까지 증가하여도 집진 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

② 흡입 유량에 따른 집진 성능 분석

흡입 유량이 클수록 흡입량이 많아질 수는 있으나, 일정값을 초과하면 블로워의 효과를 상쇄시켜 흡입효율을 저하시킬 수 있다. 따라서 적절한 흡입 유량을 선정할 필요가 있다.

- 입자 크기 : PM100
- 레일로부터 흡입모듈까지의 거리(높이)(H) : 100㎜
- 흡입 유량(Q) : 1000CMM, 1500CMM(Maximum)

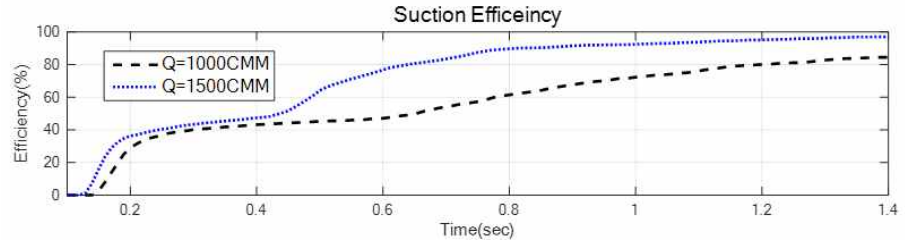


그림 68 흡입 유량에 따른 집진 성능 분석

그림 68를 통해 흡입 유량에 따른 집진 성능을 확인할 수 있다. 차량의 최대 흡입 유량은 1500CMM이며, 해석 결과 해당 유량범위는 집진성능에 악영향을 끼치지 않는 것을 확인할 수 있다.

③ 최적 조건이 적용된 흡진부의 유동해석

위의 두 해석을 통해 설정된 최적값을 적용하여 흡진부 및 차량 전반에 걸친 유동해석을 실시하여 집진 성능과 유동패턴을 확인하였다.

- 입자 크기 : PM2.5, PM10, PM100
- 레일로부터 흡입모듈까지의 거리(높이)(H) : 100㎜
- 흡입 유량(Q) : 1000CMM, 1500CMM(Maximum)

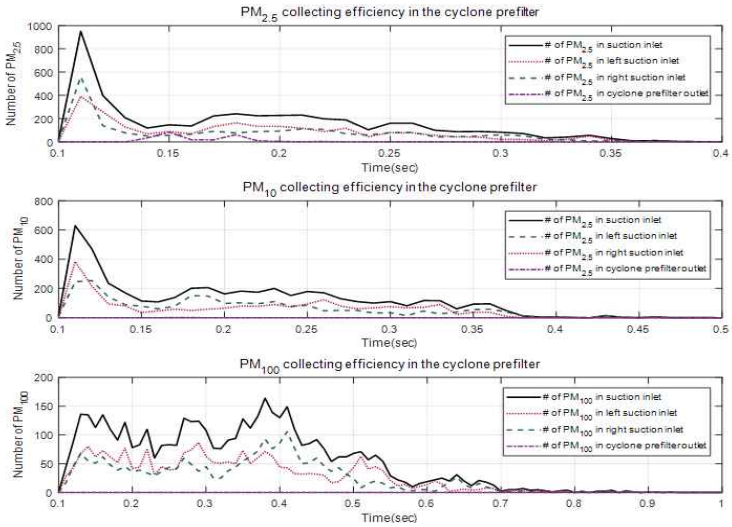


그림 69 흡진부의 집진 성능 분석

그림 69을 통해 최적 흡입 조건이 적용됐을 때 입자 크기별 집진 성능을 확인할 수 있다.

위에 언급된 조건이 적용됐을 때 비산된 대부분의 입자는 1초 이내에 흡입덕트를 통해 흡입될 수 있음을 확인 할 수 있다. 사이클론 프리필터의 대칭면을 중심으로 좌/우 섹션은 집진량의 차이가 다소 존재하지만 유사한 입자 거동을 보이고 있다. 사이클론 프리필터의 집진효율을 확인하기 위해서는 흡입구를 흡입된 먼지의 입자 수와 사이클론 프리필터의 토출구를 통해 토출된 입자의 수를 비교해 보아야 한다. 그 결과 PM2.5 입자는 0.1초에서 0.2초 사이에 토출입자가 소량 확인되지만,PM10과 PM100입자의 경우 육안으로 확인하기 어려울 정도로 극소량의 토출입자만 확인되었다. 따라서 사이클론 프리필터의 집진 성능이 우수함을 검증할 수 있었다.

(라) 차량 전체의 유동흐름 해석

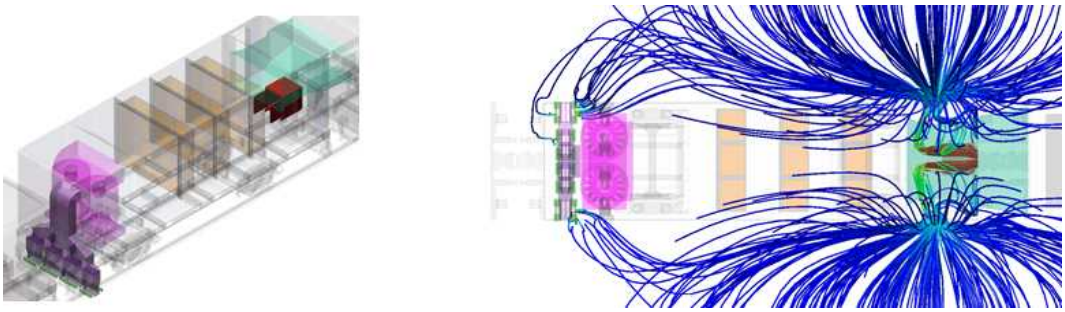


그림 70 측면 부유먼지 흡입장치 유동패턴

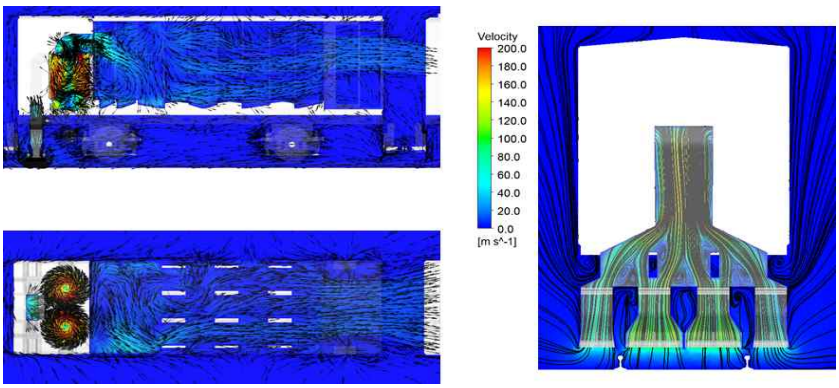


그림 71 흡입시스템 유동 패턴

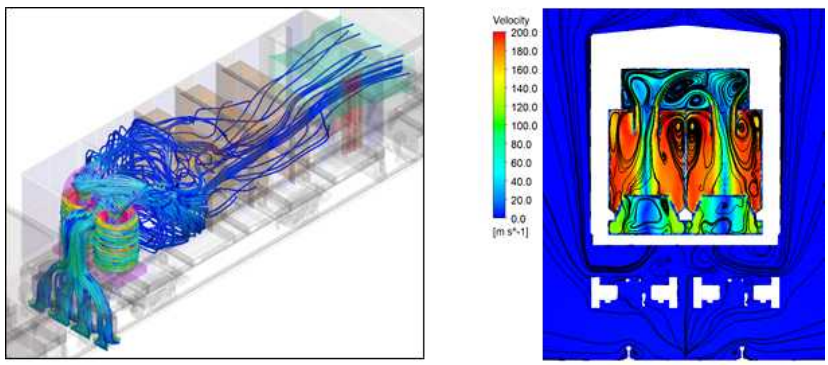


그림 72 차량 전체 공기흐름(좌)과 사이클론 프리필터에서의 유동해석(우)

3) 차량 흡진시스템 구성품 제작

다음과 같이 한국철도기술연구원에서 연구/개발한 차량 흡진시스템의 구성품을 제작 완료하였다.




그림 73 듀얼 사이클론 프리필터




그림 74 사이클론 프리필터 흡입구 및 연결 덕트



그림 75 사이클론 프리필터 가이드 커버



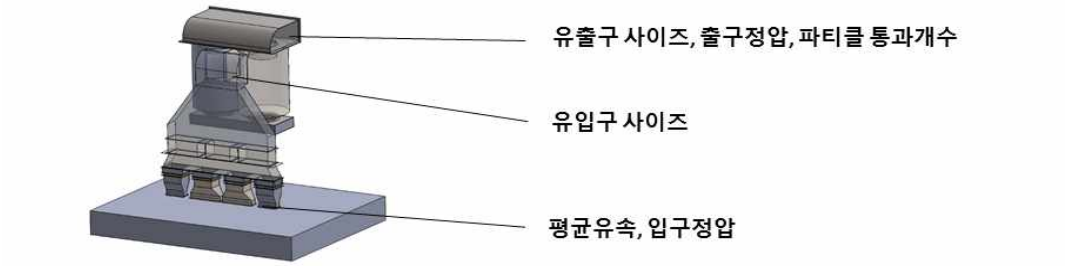
그림 76 차량 하부 흡입 시스템

(마) 5차년도 연구수행 결과

1) 차량 흡진시스템 구성품 보완 제작 / 설치

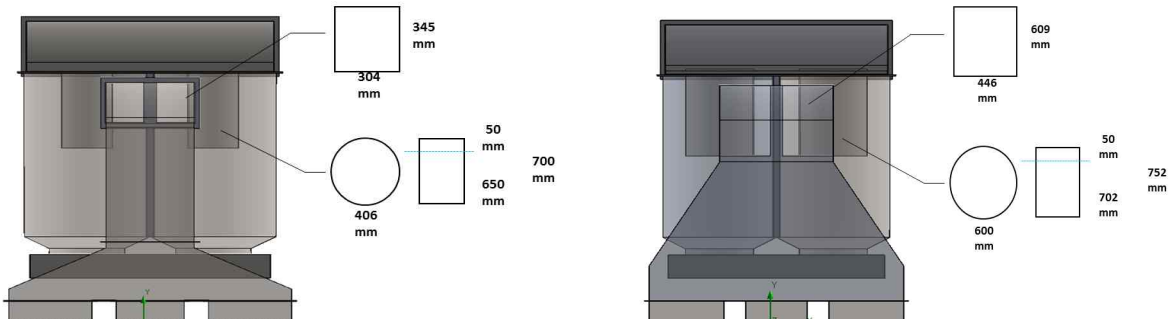
① 듀얼 사이클론 필터 보완

차량의 동작 테스트 결과 사이클론 프리필터에서 발생하는 차압이 비교적 커 충분한 흡입유속이 나오지 못 하고 있는 것을 확인하였다. 따라서 그림 77과 같이 보완 먼지의 이동통로를 넓혀 차압을 감소시킬 수 있는 보완설계를 적용하고 유동해석을 통해 효과를 검토하였다.



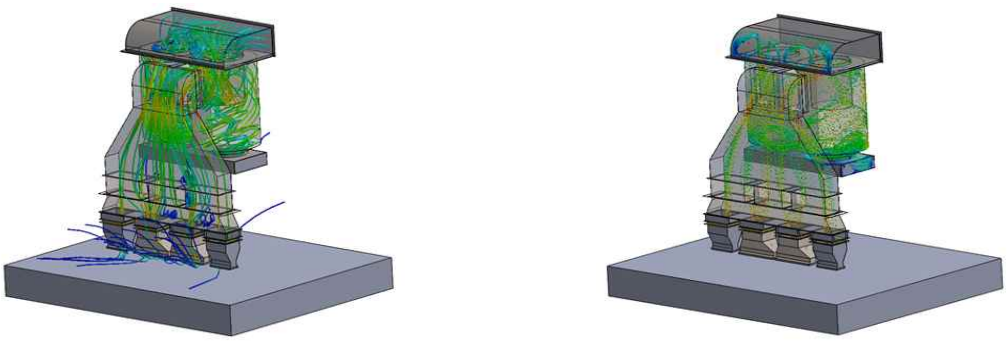
	유입구 사이즈(mm)	유출구 사이즈 (mm, mm *높이)	평균최대 유속(m/s)	유량 (m3/min)	차압 (pa) (출구 - 입구)	흡입압력 (pa) (입구)	파티클 유입 (PM10) (출구)
Case_01(기존)	304X345	406, 700	19.03	382.8	3024.02	112.51	0
Case_02	446X609	600, 600	34.86	698.4	2032.05	418.93	26
Case_03	446X609	600, 900	33.64	672	2384.32	385.87	21
Case_04	446X609	600, 752	34.49	688.2	2236.83	408.99	12

그림 77. 보완설계에 따른 유동해석 결과값



가. 기존 설계 통로 규격 나. 보완 설계 통로 규격

그림 78. 듀얼 사이클론 필터의 설계 변경



가. 유동 스트림라인 나. 파티클 경로

그림 79. 보완 설계된 듀얼 사이클론 필터의 유동 패턴

먼지 이동통로의 면적을 변경한 결과 차압이 감소하여 흡입구의 유속이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

② LM가이드 위치 조정

기존 설계에서 흡진시스템의 상하 위치제어를 담당하는 LM가이드가 차량의 옆면으로 돌출되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이럴 경우 차량 운행시 터널 내의 구조물과의 충돌 위험이 있기 때문에 LM가이드의 위치를 차량 안쪽으로 이동시켰다. 이는 그림 80에서 확인할 수 있다.



그림 80 LM가이드 위치 조정

③ 하부 흡진장치 길이 수정

제작된 흡진장치를 실제 장착한 결과 레일과의 거리가 예상보다 훨씬 가까워 충돌의 위험이 있다고 판단되어 길이를 수정하여 재제작 하였다.

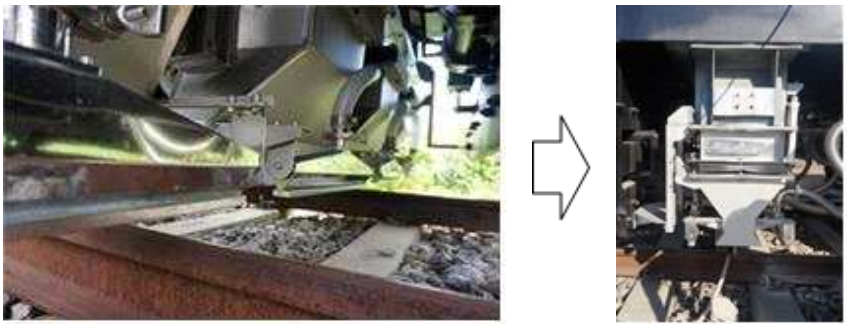


그림 81 하부 흡진장치 길이 수정

2) 흡진 성능 시험

미세먼지 집진차량의 집진효율 확인을 위한 테스트를 진행하였다.

① 실험 방법

미세먼지 농도 측정을 위해 다음 다섯개의 포인트에 측정기(pDR-1500) 설치

• Point 1 : 흡입덕트 • Point 2 : 사이클론 후단 • Point 3 : 전기 집진장치 1열 후단

• Point 4 : 전기 집진장치 2열 후단 • Point 5 : 전기 집진장치 3열 후단

두 개의 입자 발생기를 이용하여 비산시킨 A2표준입자를 차량을 통해 집진한다. 이후 각 포인트에 설치된 미세먼지 농도 측정기의 데이터를 분석하여 집진 효율을 확인한다.



그림 82 전기집진차량 성능 효율 시험 계측기 설치




그림 83 입자발생기와 A2표준입자

② 실험 결과 분석

그림 88은 측정된 미세먼지의 농도를 그래프로 나타낸 것이다. 흡진부와 증배장치 전단의 값을 비교하면 사이클론 집진기의 집진효과를 확인할 수 있는데, 그림에서 확인할 수 있듯이 미세먼지 농도값이 50% 이상 현저히 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

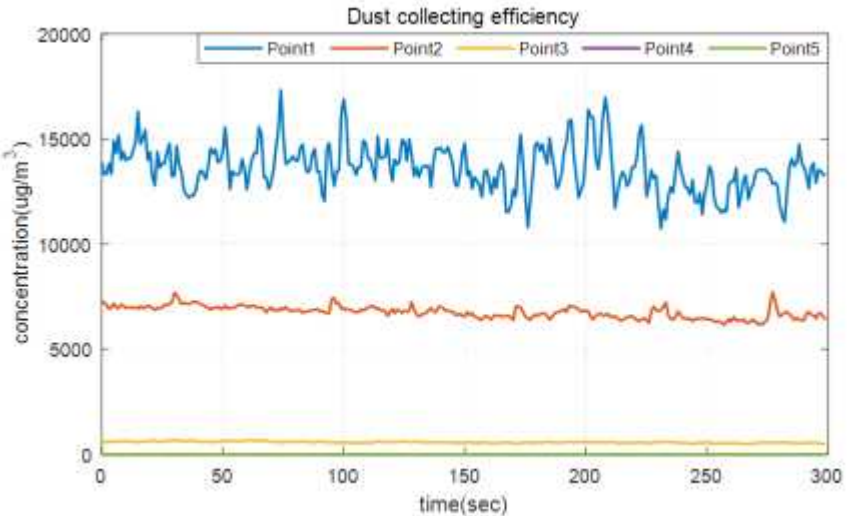


그림 84 집진효율 성능테스트 시험 결과

측정위치	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5	미세먼지 제거 효율
미세먼지 농도(PM10, ㎍/㎥)	13614	6769	579	2	0	99.9% 이상

(3) 터널 내 유해입자 제거 성능 평가

터널 내 유해입자 제거 성능 평가를 하기 위해, 모사입자로 크기대가 비슷한 NaCl과 PSL 입자를 선택함. 그림85의 실험 스키메틱에서 알 수 있듯이 Tube furnace를 통해 NaCl 입자를 발생시키고 Dust feeder를 통해 A4입자를 발생시킴. 두 입자를 다이류터를 통해 1차적으로 섞이게 한 후 섞인 입자들은 덕트(4cm x 4cm) 안에 흘려보내줌. 일부 입자들은 위로 일부는 아래로 입자들이 흩어지게되고 위로 간 입자들은 플러스 전극에 의해 플러스로 하전을 띄게 되고, 아래로 이동한 입자들은 마이너스 하전에 의해 음극으로 하전을 띄게 된다. 하전기는 wire to rod 타입으로 wire에 고전압을 걸어주고 rod에 그라운드를 걸어 방전시킨다.

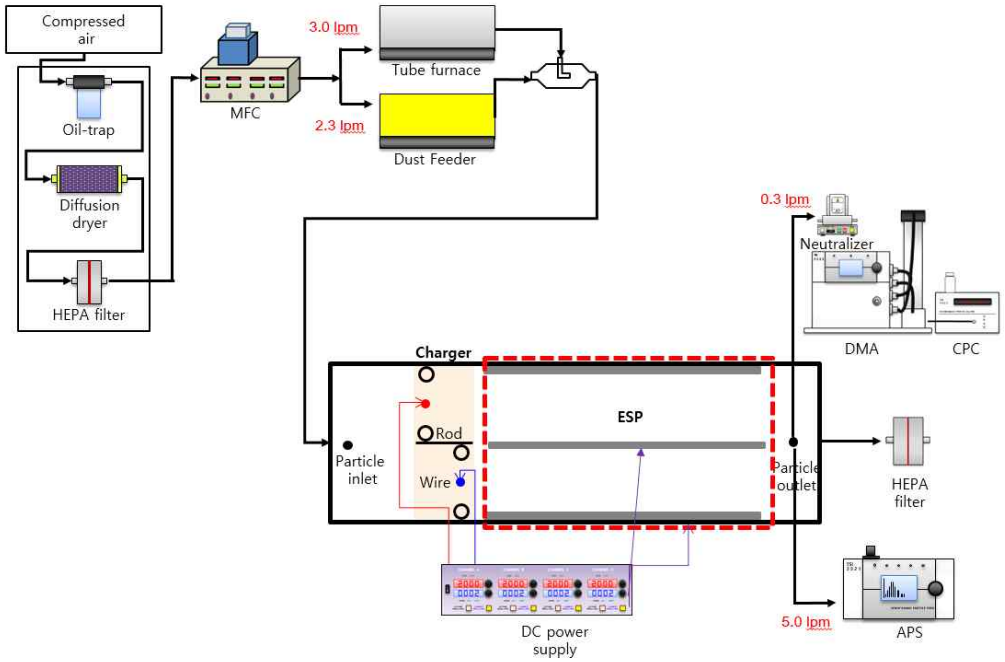


그림 85 입자 제거 성능 평가 계통도 (Schemetic)

그 후에 2cm간격으로 철판이 놓여있는 전기집진기를 설치하여 입자들을 포집시킨다. 전기집진기의 ON/OFF에 따라 SMPS와 APS의 수농도를 측정하여 입자의 포집효율을 알 수 있다. 그림86 (a) 는 NaCl입자의 수농도 변화 그래프이다. 검은색선은 하전기와 집진기를 off 했을 때, 주황색선은 하전기만 on 시킨상태, 초록색선은 하전기와 전기집진기 둘다 on한 상태이다. 초기 수농도는 1.65e+7승 이고 하전기를 켰을 때 벽손실이 24%정도 일어났다. 그후 전기집진기를 켜면 67%의 입자 감소 효율을 얻었다.

그림86 (b)는 NaCl 입자 대신에 PSL 입자를 사용하였고 전체 수농도는 3.27e+4승 이고 하전기를 켰을 때 37%의 벽손실이 일어났으며 2kV의 전기집진기에서 71%의 입자 감소효율을 보였다. 그 다음 응집기의 유무에 따른 입자 저감 효율 테스트를 하기위해 그림81과 같은 실험스케메틱을 설정하였고 그림85와 다른점은 덕트에 반을 응집기에 할당하였고, 반은 집진기로 두었다.

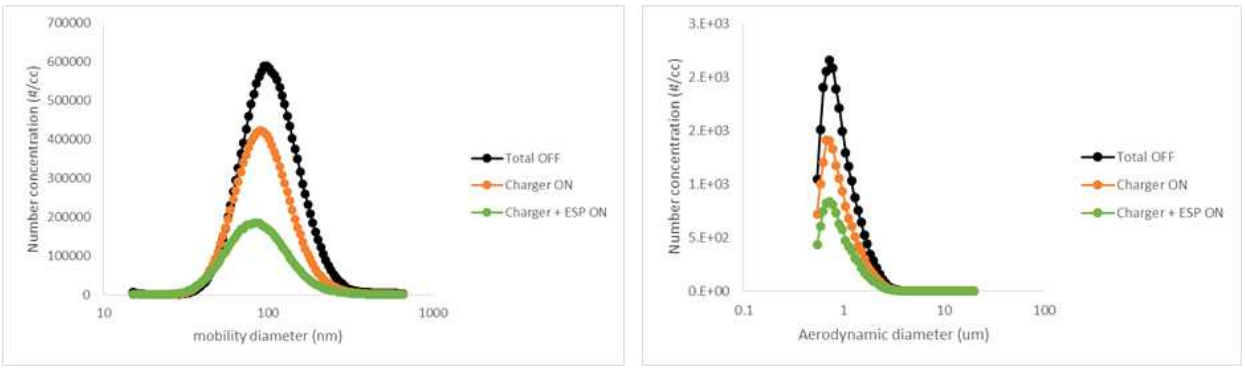


그림 86 발생입자 계측비교 (좌)-(a) / (우)-(b)

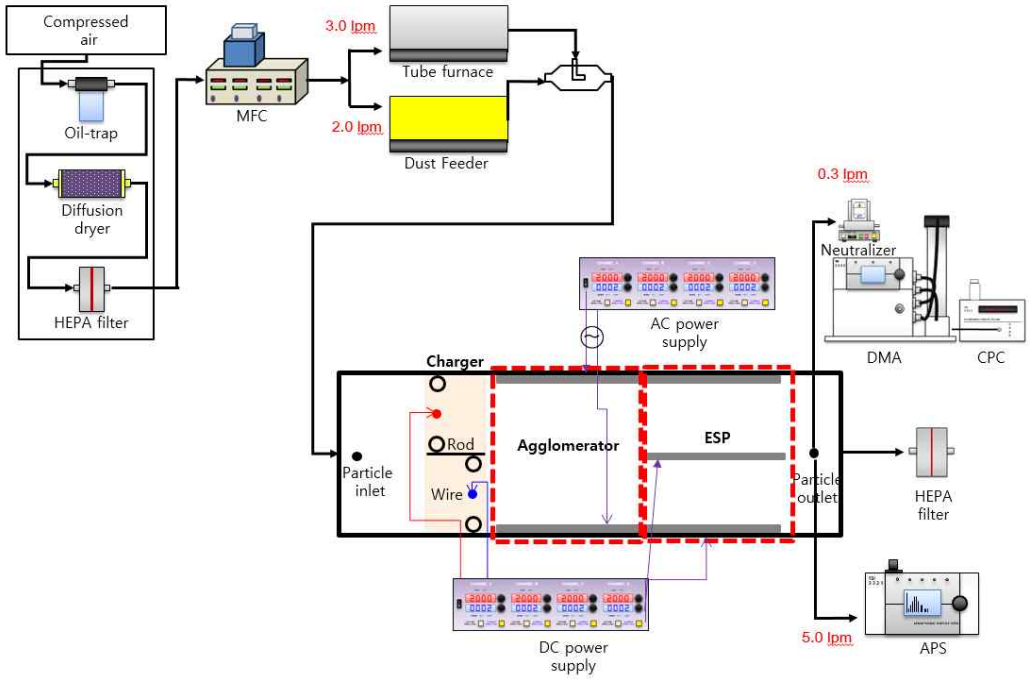


그림 87. 시험 조건 변경

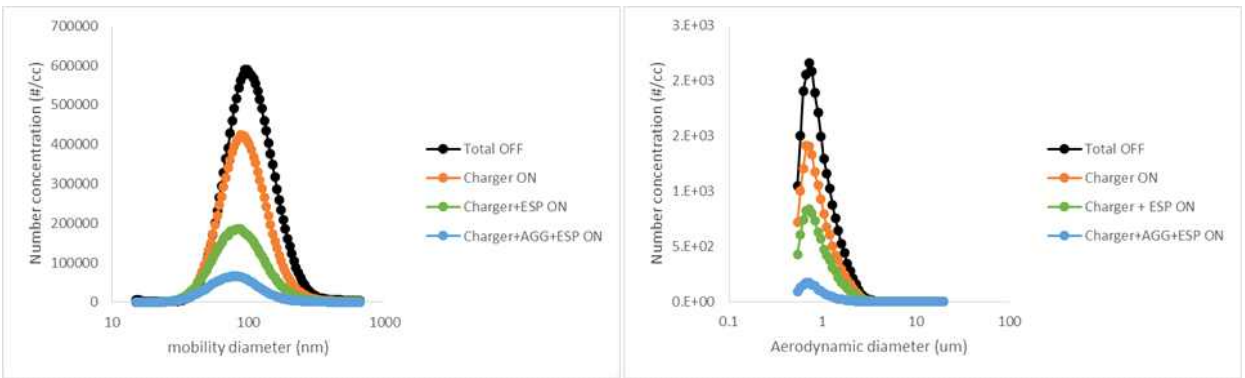


그림88. 응집장치 전후비교

응집기에 AC전압을 걸어주었고 주파수는 50Hz, 전압은 peak to peak로 40kV의 사인파를 걸어 주었다. 응집기를 추가하여 전기집진기의 효율을 관찰 한 결과, 그림88처럼 입자농도

변화를 관찰 할 수 있다.

그림 89(a,b) 는 전과 마찬가지로 각각 NaCl과 PSL입자를 발생시킨 결과고 거기에 추가로 파란색 선이 하전기,응집기,집진기 전체를 ON 시킨 결과이다. 전기집진기 내부 전기장은 rms 3.5kV/cm 로 4cm간격이다. 응집기를 추가한결과 그전 67%, 71%의 각각 효율을 가지던 전기집진기의 효율이 91%, 95%로 급 상승하였다. 이는 응집기에서 작은입자들을 달라 붙게 만들고 크게만들어, 입자들이 더쉽게 집진기에 달라 붙었다는 것을 알 수있다. 따라서 응집기의 효과만을 보기위해 집진기는 off상태로 응집기의 on/off에 따른 입자수농도 변화를 관찰 하였다.

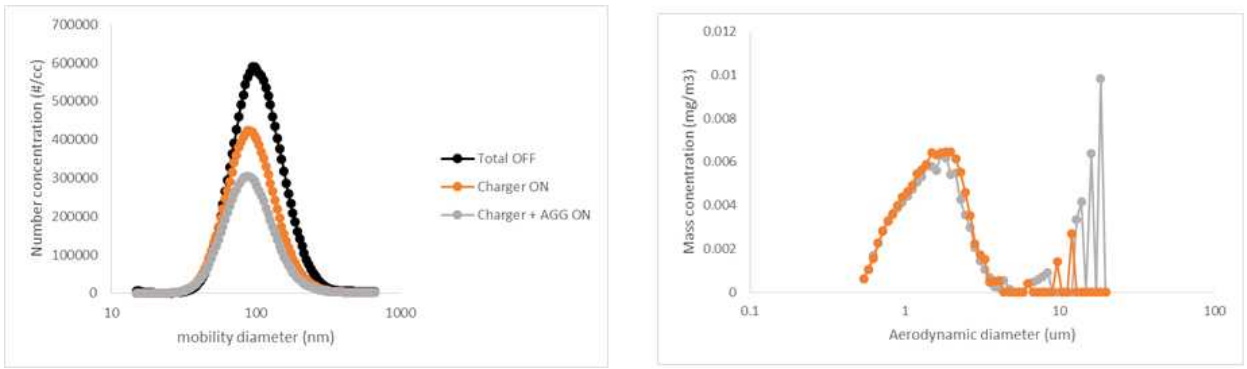


그림 89. 입자별 농도변화

그림89은 NaCl입자의 농도 그래프인데, 응집기를 켜면 30%로 감소하였다. 이감소가 벽손실인지 아니면 응집이 되어 저감된것인지 정확히 알아보기위해 PSL입자를 바꿔 측정해보았고, mass분포로 입자들을 관찰한 결과, 주 입경대인 1~5um 입자들에서는 큰변화가 없었지만 10um이상의 입자에서 입자들이 발생된 것을 볼수 있었다. 이는 감소된 NaCl입자들이 마이크로대 입자인 PSL입자에 달라 붙게되면서 크기가 커졌다고 보았고, 이를 증명하기위해 SEM이미지를 촬영하였다.

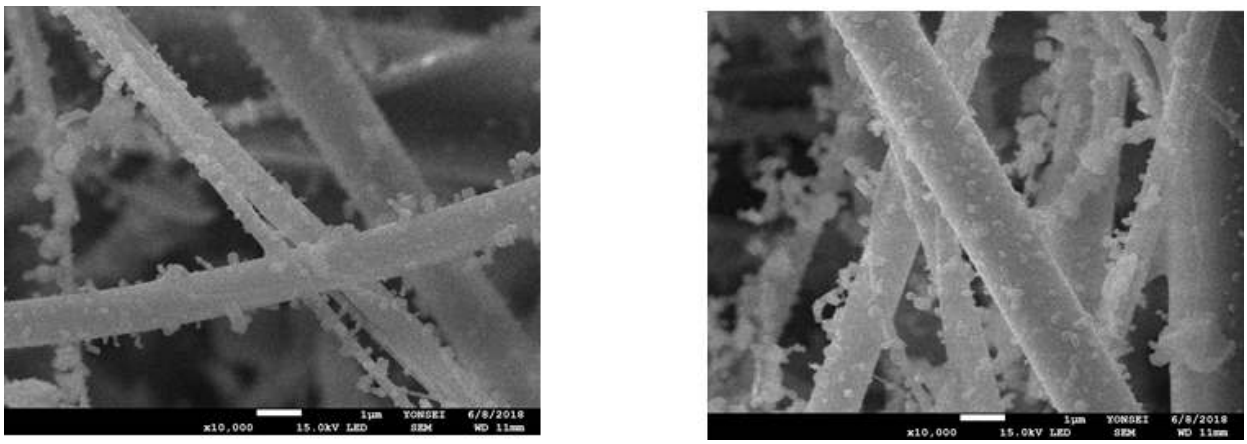


그림 90 SEM 이미지 촬영 (응집기 Off 상태)

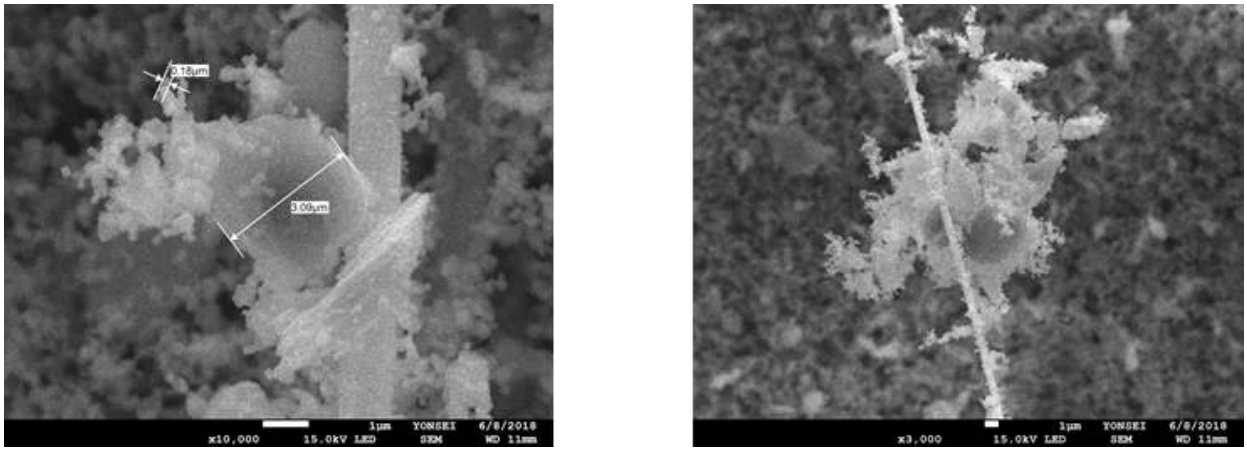


그림 91. SEM 이미지 촬영(응집기 On 상태)

그림 90은 응집기를 켜지 않았을 때 촬영, 그림 91은 응집기를 켜고 입자들을 촬영 하였다. 응집기를 켰을 때 입자들이 훨씬 많이 서로서로 달라 붙는 것을 눈으로 쉽게 확인 할 수 있었고 입자들이 10um까지 커진것도 확인 할 수 있었다. 마지막으로 전기집진기의 전압별 입자감소율을 알아보기 위하여 전압을 2kV에서 4kV까지 1kV씩 높여서 실험을 진행하였고 마지막은 4kV와 응집기를 동시에 켠 경우에 대하여 실험을 진행하였다. 그 입자효율 곡선은 그림 92 에 나와 있다.

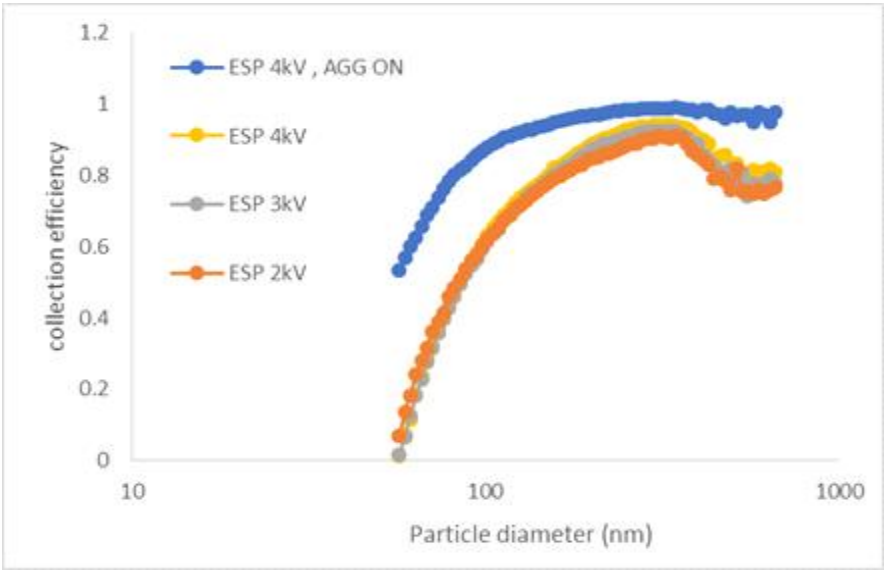


그림 92 입자효율 곡선

그림 92에서 확인 할 수 있는 것은 전기집진기에 전압을 올려도 크기가 작은 50-100nm입경대의 입자들은 효율이 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 응집기와 집진기를 동시에 켠 경우 50-100nm입자들의 효율이 급격하게 최대 55%까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 전에 확인한 것과 같이 입자들의 응집으로 인한 크기가 작은 나노입자대의 감소와 크기가 커진 입자들의 집진효율로 인하여 전체적인 효율이 증가한 것으로 보여, 100nm 부근의 입자들을 효율적으로 제거하기 위해서는 전단에 응집기 설치해야 하는 것으로 판단된다. (제작완료: 리트코)

(4) 초미세먼지 제거차량 전기집진시스템 개발

현재 미세먼지를 제거하는 필터는 많지만 대용량의 공기 유량에 대해 초미세먼지까지 제거할 수 있는 성능을 가진 필터는 그리 많지 않다. 섬유필터 중 헤파필터가 PM2.5의 미세먼지를 제거 할 수 있는 성능을 가지고 있으나 철도차량에 탑재되어 운영하기 위해서는 가격이나 유지보수 면에서 현실적으로 문제점이 많음을 운영기관 조사를 통해 확인할 수 있었다. 이를 해결하기 위해 설치 및 미세먼지 후처리 방법, 유지보수 용이성 등 전기집진시스템을 차량에 탑재하여 미세먼지를 제거하는 방법을 사용하였다.

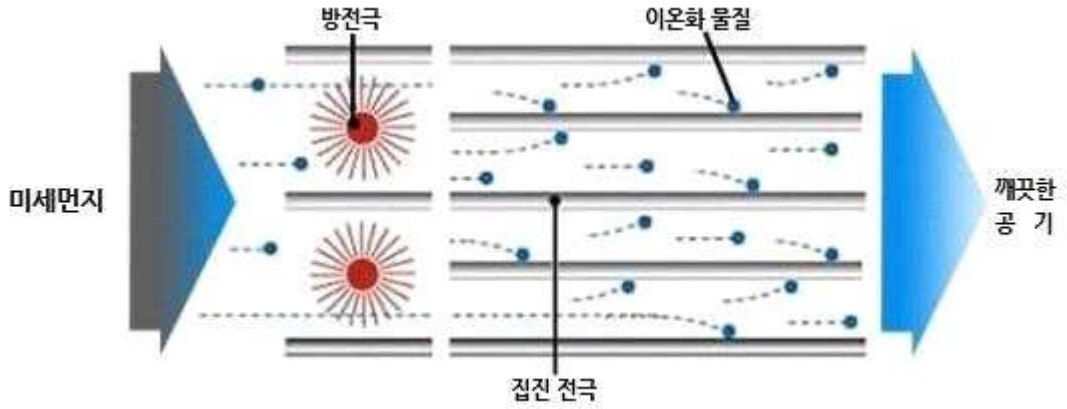


그림 93. 전기집진 개념도

개발되는 차량의 요구사항은 5km/h 이상의 주행 중 작업 운행속도를 가지며, 대용량의 공기 중 초미세먼지를 제거할 수 있어야 한다. 기본설계 단계에서 협업을 통해 한국철도기술연구원에서 개발 중인 흡입모듈은 먼지를 흡입하고 싸이클론 장치를 통과하면서 부피가 큰 쓰레기를 걸러내며, 싸이클론 장치 통과 후 남은 미세먼지(PM10이하)만을 남게한 후 증배부에서 입자의 크기를 키워 집진부에서 포집하는 방식이다. 전기집진장치는 대전부에서 (-)의 고압전원을 인가하여 미세먼지에 극성을 띄게 한 후 집진부에 (-) 고압전원을 인가하여 유도전압을 발생시켜 정전기력에 의해 미세먼지를 포집한다. 전기집진기를 사용함으로써 빠른 유속에서도 고효율의 집진이 가능하게 된다.

1) 전기집진 시스템 설계

① 단위셀 설계

전기집진차량의 주요 구성물로 전기집진기 단일셀을 적층하는 방식으로 구성된다. 단위셀은 최대 13m/s의 통과풍속에서 미세먼지(PM10) 및 초미세먼지(PM2.5)를 90% 이상 집진할 수 있게 설계 되었다.

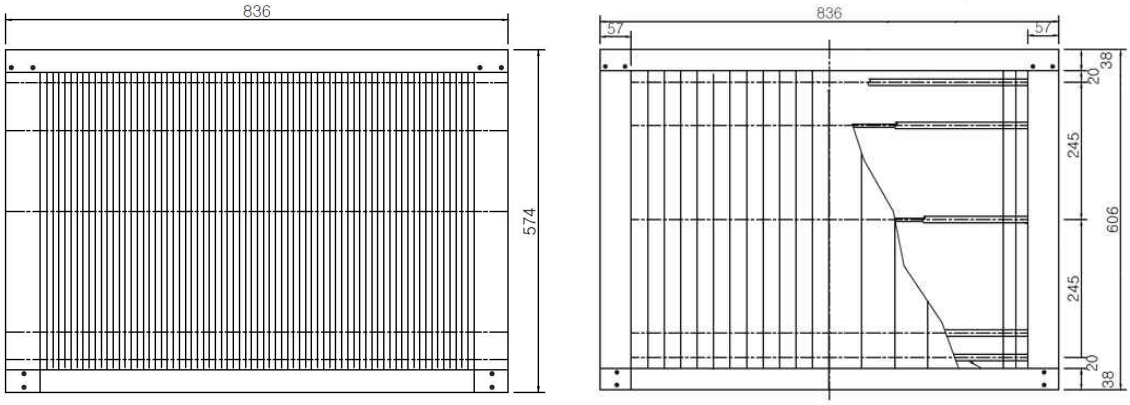


그림 94. 전기 집진기 단위셀 설계

② 전기집진장치 구성

전기집진장치는 미세먼지를 집진하는 집진부와 집진된 먼지를 세척하는 세척부로 구성된다. 집진부는 전기집진기의 단일셀을 3개씩 3단으로 쌓아 9개의 단일셀이 1열을 이루며 총 3열로 구성되어 미세먼지 집진효율을 최대로 하였다. 자동세척장치는 세척파이프 이송장치, 세척파이프, 세척 솔밸브, 세척 급수관, 배수관으로 구성된다. 자동화된 습식세척을 통하여 전기집진기의 집진효율을 지속적으로 유지할 수 있도록 하였으며, 유지관리가 쉽도록 하였다. 세척 후 사용되어진 폐수는 하부로 배출되며 별도로 폐수 처리한다.

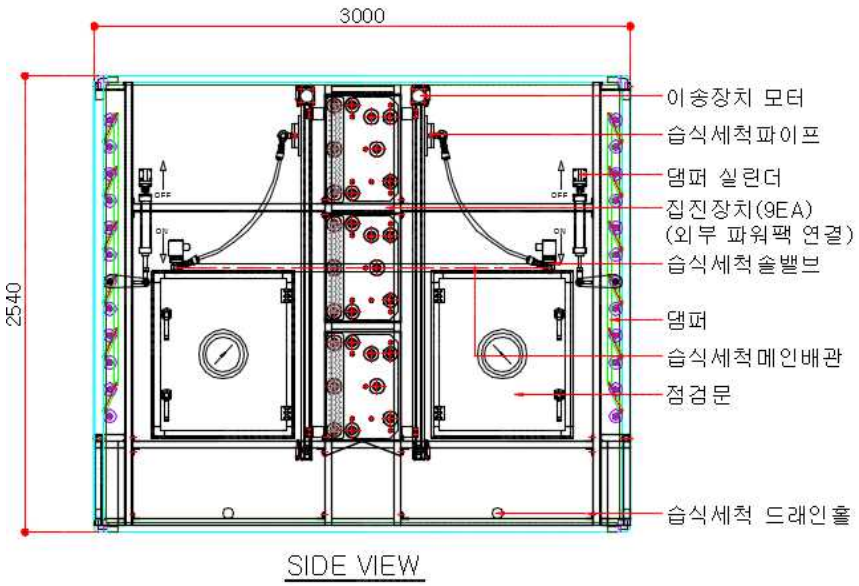


그림 95. 자동세척장치 설계

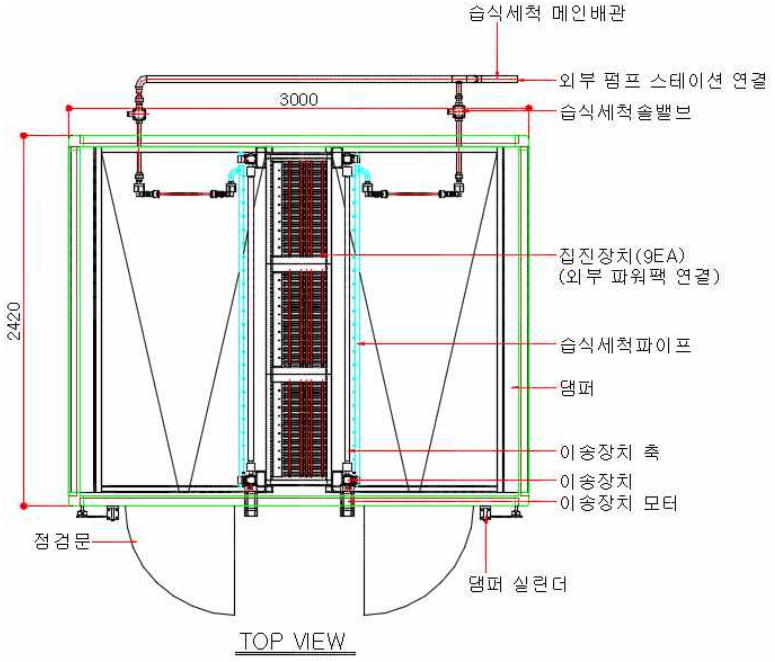


그림 96. 전기집진부 단면 상세 설계도

③ 전기집진차량 설계

전기집진차량은 흡진부와 집진부 및 덕트부로 구성된다. 흡진부는 하부에서 미세먼지를 빨아들여 큰 먼지(PM10이상)를 싸이클론 필터를 통해 걸러내는 역할을 한다. 집진부는 프리필터, 증배기, 전기집진장치로 구성된다. 덕트부는 정화된 공기가 빠져나가는(팬에의한 흡입) 덕트와 부유분진을 흡입하기 위한 팬, 흡입된 부유분진의 미세먼지를 집진하는 전기집진장치, 전원공급장치 및 제어반, 차량용 소화설비로 구성된다. 흡진부에서 큰 먼지가 걸러진 후 초미세먼지(PM2.5) 및 미세먼지(PM10)는 전기집진 부로 이동되어 전기집진장치에 집진된다. 초기 설계에서는 전기집진장치를 4열로 배치하여 집진을 하게 하였으나 터널 내부의 부유먼지 집진의 필요성에 따라 1열을 부유먼지 집진을 할 수 있도록 변경하였다.

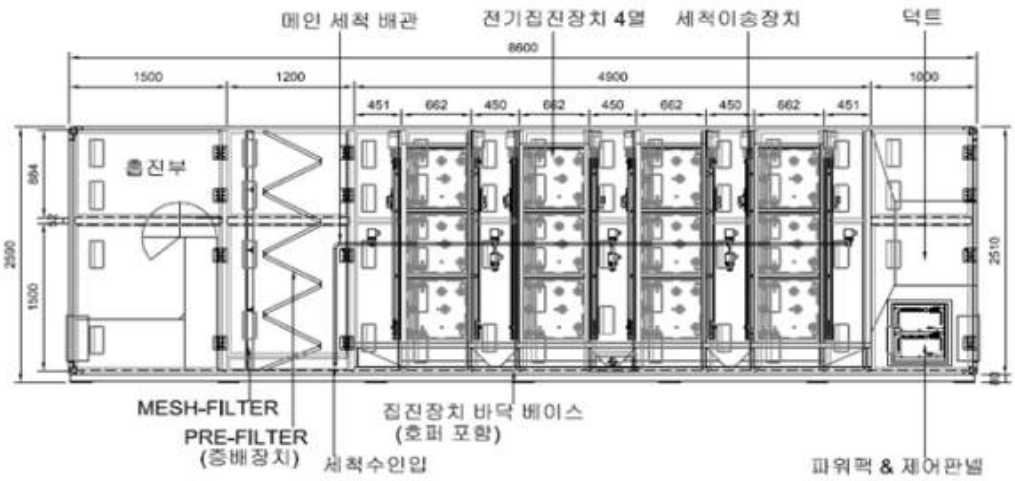


그림 97. 설계 변경 전 전기집진차량 설계도

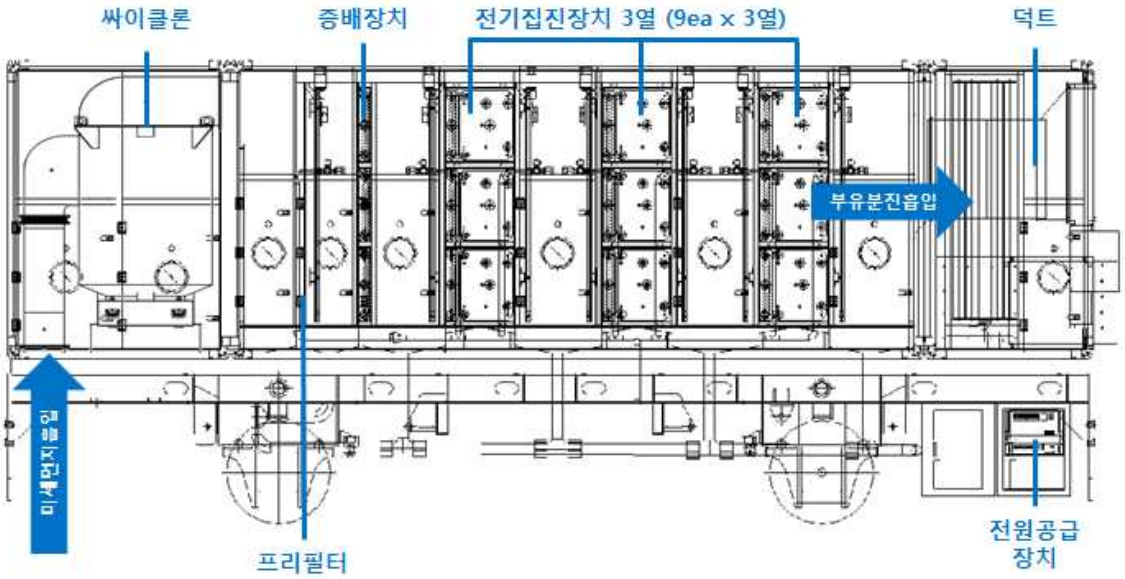


그림 98. 설계 변경 후 전기집진차량 설계도

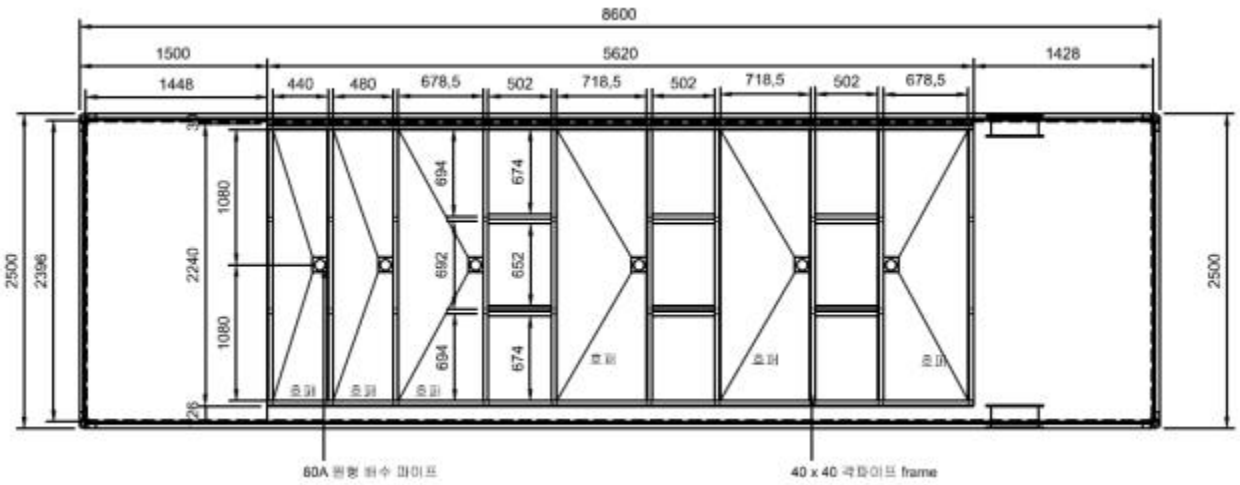


그림 99. 전기집진차량 세척장치 하수 배관 설계

2) 전기집진시스템 시제품 제작

① 전기집진장치 구성품 제작



그림 100 차량 프레임 제작



그림 101 전기집진장치 단위셀 제작



그림 102 전기집진장치



그림 103 세척장치 부품

② 전기집진장치 차량 탑재



그림 104. 차량탑재 작업

③ 부유분진 흡진 및 처리장치

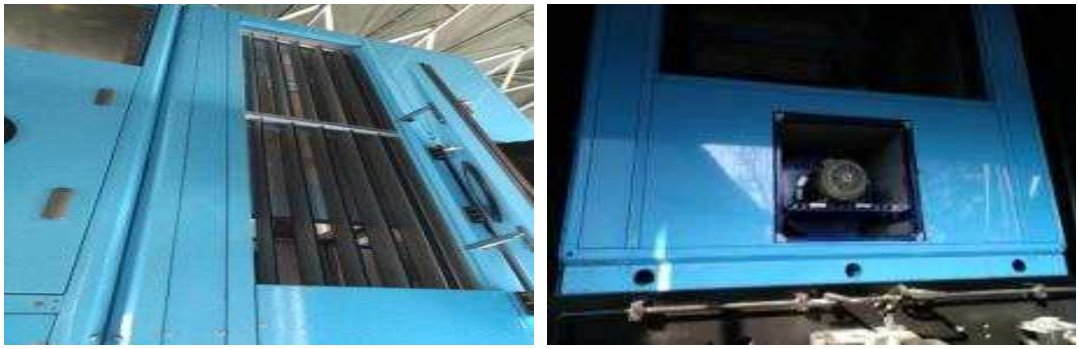


그림 105 측면 부유분진 흡진 및 처리장치 설치

④ 세척장치 및 하수처리시설

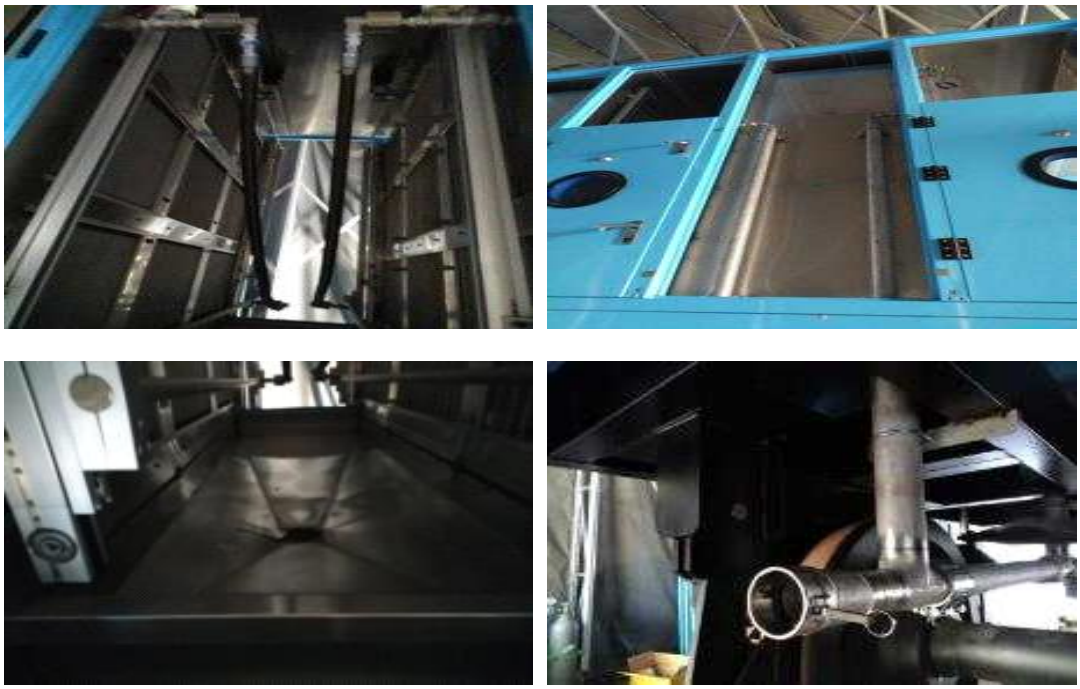


그림 106 자동 세척장치 및 하수처리 시설

3) 성능테스트

① 단위셀 테스트

□ 기본설계 제원

- 설계풍량(차량 하부 흡진 구조 메커니즘 구조:9모듈1set):최대풍량 2000CMM(≒33.34CMS)
- 차량 내부 면적 : 6.24m2 (차량 폭 2600mm / 차량 내부높이 2400mm)
- 집진셀 설치수량:9ea
- 집진장치 유효면적 : 2.7m2 (0.3m2 x 9ea)
- 풍량 및 풍속관계:
  - 차량내부 통과풍속 : 5.34m/s (33.34m3/s ÷ 6.24m2)
  - 집진장치 통과풍속:12.3m/s(33.34m3/s÷2.7m2)

□ 효율테스트 내용

- 테스트 설비(닥트) 면적 : 1m2 (가로 1m x 세로 1m)
- 테스트 집진셀 수량 : 1ea
- 단위 집진셀 유효면적 : 0.3m2
- 집진셀 통과 풍속 : 12.3m/s (기본설계의 집진장치 통과풍속과 동일한 조건 적용)
- 단위 집진셀과 테스트 닥트의 풍량 및 풍속 관계 : 동일한 풍량을 기준으로 통과풍속을 계산함
- 테스트 설비(닥트) 통과 풍속 : 0.3m2 x 12.3m/s = 1m2 x (3.69)m/s
- 풍량은 3.69m3/s로 동일함

□ 효율테스트 적용 풍속

테스트용 닥트내부 풍속이 3.69m/s일때 집진셀 통과 풍속은 12.3m/s로 차량탑재용 집진셀과 동일하나, KCL(공인기관) 효율테스트는 닥트내부 풍속을 3.9m/s로 상향시켜 집진셀 통과 풍속을 13m/s 기준으로 실시함 (통과 풍속은 낮을수록 집진효율은 높아지고, 통과 풍속이 높을수록 집진효율은 낮아짐으로 풍속을 높혀 집진효율을 검증함)

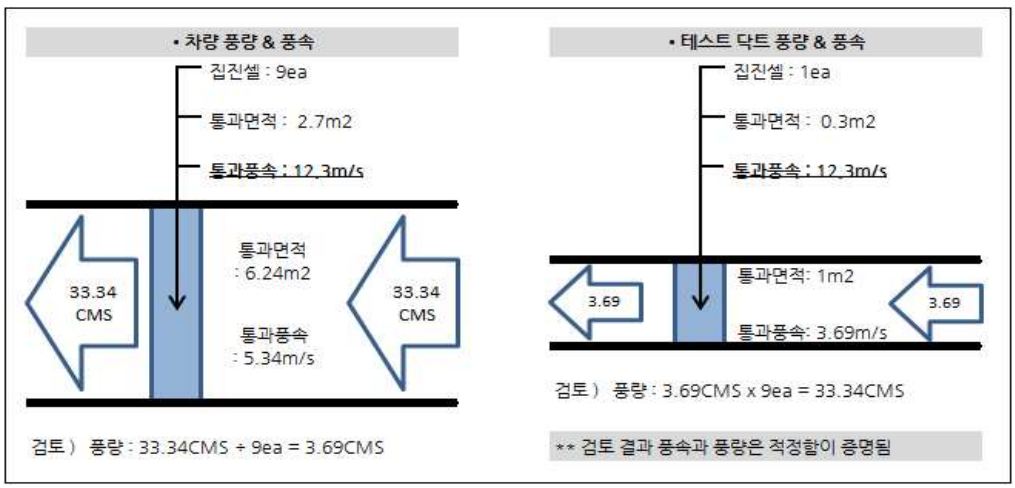
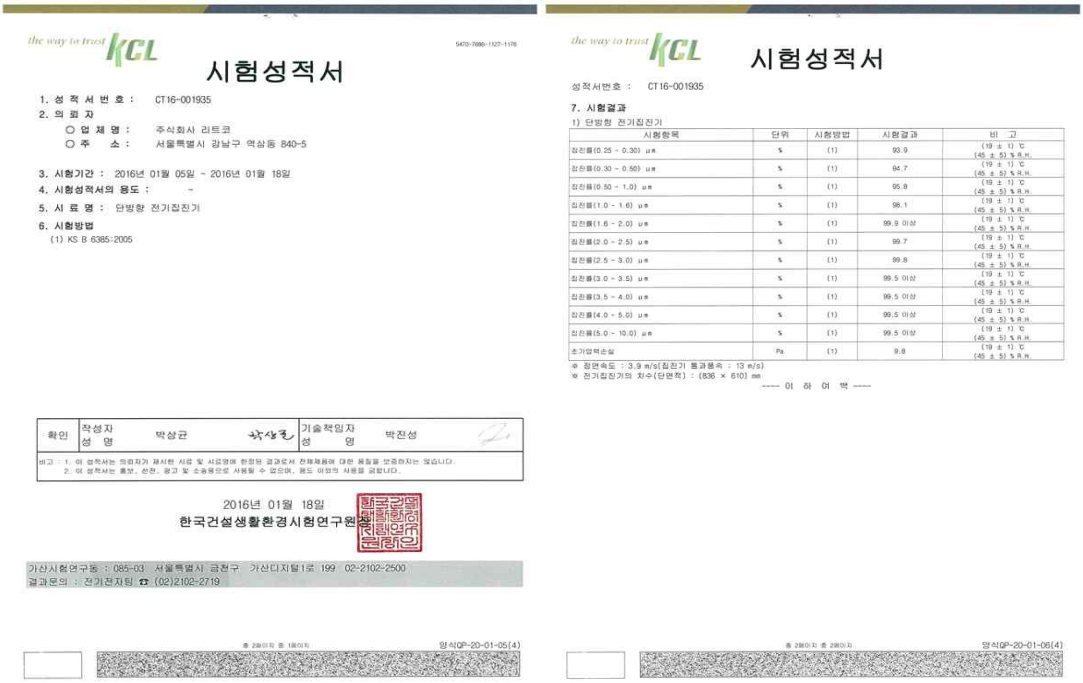


그림 107. 테스트 조건

□ 효율테스트 결과 : PM 2.5 기준 99.5 % 이상효율 확인

시험항목	시험결과(%)	시험방법
집진률(입자크기: 0.25μm~0.3μm)	93.9	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 0.3μm~0.5μm)	94.7	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 0.5μm~1.0μm)	95.8	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 1.0μm~1.6μm)	98.1	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 1.6μm~2.0μm)	99.9 이상	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 2.0μm~2.5μm)	99.7	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 2.5μm~3.0μm)	99.8	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 3.0μm~3.5μm)	99.5 이상	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 3.5μm~4.0μm)	99.5 이상	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 4.0μm~5.0μm)	99.5 이상	KS B 6385:2005
집진률(입자크기: 5.0μm~10.0μm)	99.5 이상	KS B 6385:2005



시험성적서

1. 성 적 서 번 호 : CT16-001935
2. 의 뢰 자
○ 업 체 명 : 주식회사 리트코
○ 주 소 : 서울특별시 강남구 역삼동 840-5
3. 시험기간 : 2016년 01월 05일 ~ 2016년 01월 18일
4. 시험성적서의 용도 : -
5. 시 료 명 : 단방향 전기집진기
6. 시험방법
(1) KS B 6385:2005

확인 | 작성자 성 명 박상균 | 기술책임자 성 명 박진성

2016년 01월 18일
한국건설생활환경시험연구원장

가산시험연구동 : 085-03 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 02-2102-2500
결과문의 : 전기전자팀 ☎ (02)2102-2719

양식QP-20-01-05(4)

시험성적서

성적서번호 : CT16-001935

7. 시험결과
1) 단방향 전기집진기

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비 고
집진율(0.25 ~ 0.30) ㎛	%	(1)	93.9	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(0.30 ~ 0.50) ㎛	%	(1)	94.7	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(0.50 ~ 1.0) ㎛	%	(1)	95.8	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(1.0 ~ 1.6) ㎛	%	(1)	98.1	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(1.6 ~ 2.0) ㎛	%	(1)	99.9 이상	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(2.0 ~ 2.5) ㎛	%	(1)	99.7	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(2.5 ~ 3.0) ㎛	%	(1)	99.8	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(3.0 ~ 3.5) ㎛	%	(1)	99.5 이상	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(3.5 ~ 4.0) ㎛	%	(1)	99.5 이상	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(4.0 ~ 5.0) ㎛	%	(1)	99.5 이상	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
집진율(5.0 ~ 10.0) ㎛	%	(1)	99.5 이상	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.
초기압력손실	Pa	(1)	9.8	(19 ± 1) ℃ (45 ± 5) % R.H.

※ 정면속도 : 3.9 m/s(집진기 통과풍속 : 13 m/s)
※ 전기집진기의 치수(단면적) : (836 × 610) ㎜

---- 이 하 여 백 ----

양식QP-20-01-06(4)

그림 108 공인 시험성적서 (단위셀)

② 시제품 테스트 (1차: 전체 차량 최종 조립전)

□ 전기집진차량 테스트(1량)

㉮ 시험방법

- 전기집진장치의 통과 풍속은 15m/s
- 미세먼지를 증배장치 전단에 투입
- 전기집진장치 가동 시 증배장치의 전단과 전기집진장치 후단에서 미세먼지를 측정하여 제거 효율 측정
- 차압측정기를 설치하여 전기집진기 가동 시 열차 내의 차압 측정

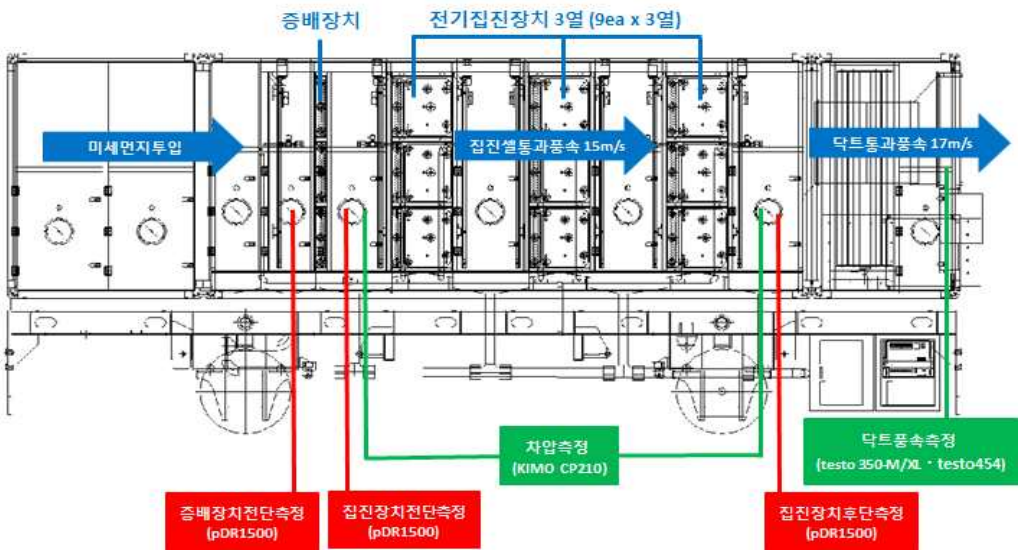


그림 109. 전기집진장치 공인시험 측정방법

㉰ 시험 결과

• 초미세먼지(PM2.5)

항목	측정 DATA (㎍/㎥, 10분평균)			집진 효율(%)
결과	①증배장치 전단	②집진장치 전단	③집진장치 후단	(①-③)/②x100
초미세먼지 (PM2.5)	294.07	33.28	0.36	99.88%
압력손실 (Pa)	33Pa			

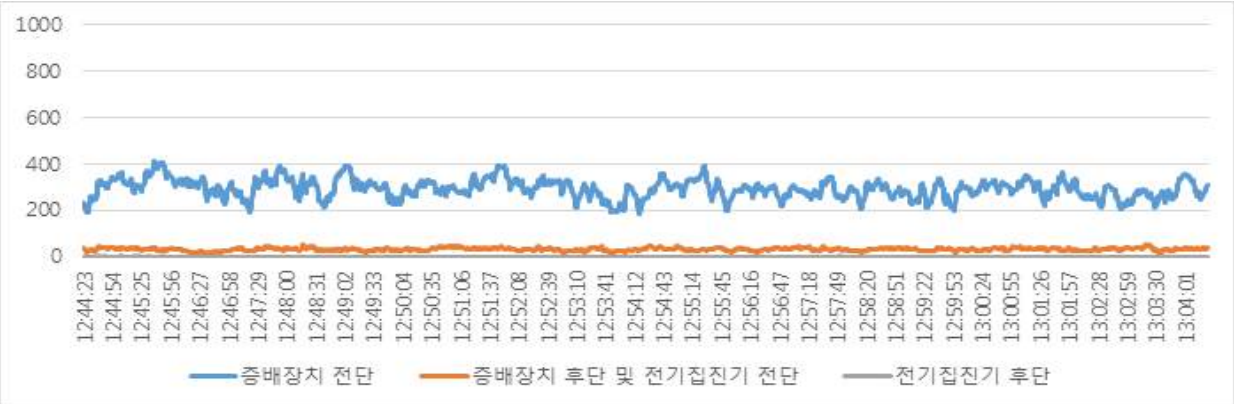


그림 110. 시간대별 초미세먼지(PM2.5) 농도 측정 그래프

• 총 부유분진(TSP)

항목	측정 DATA (㎍/㎥, 10분 평균)			집진 효율(%)
결과	①증배장치 전단	②집진장치 전단	③집진장치 후단	(①-③)/②x100
초미세먼지 (PM2.5)	358.79	84.74	0.33	99.91%
압력손실 (Pa)	33Pa			

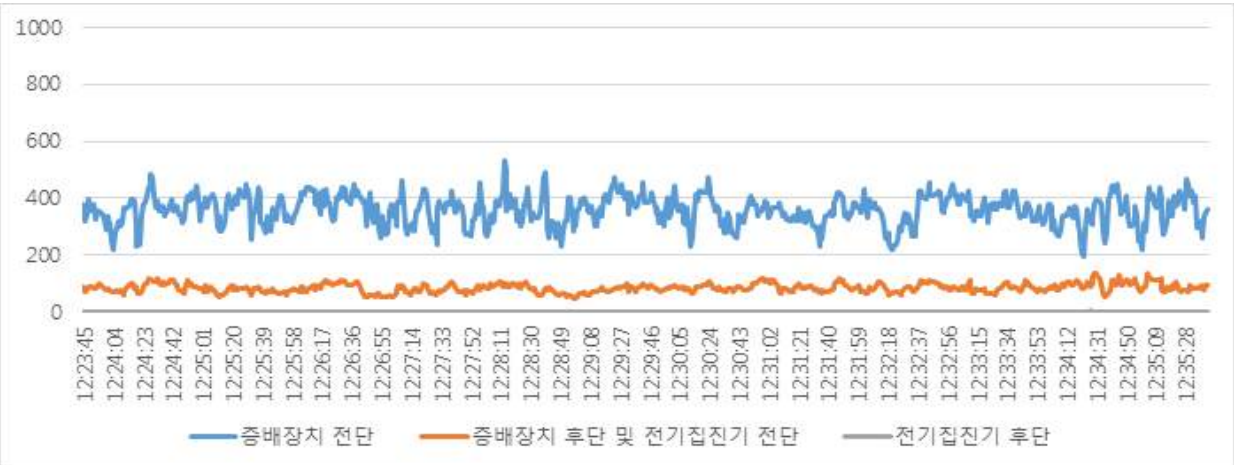


그림 111. 시간대별 총 부유분진 농도 측정 그래프

㉰ 시험 사진

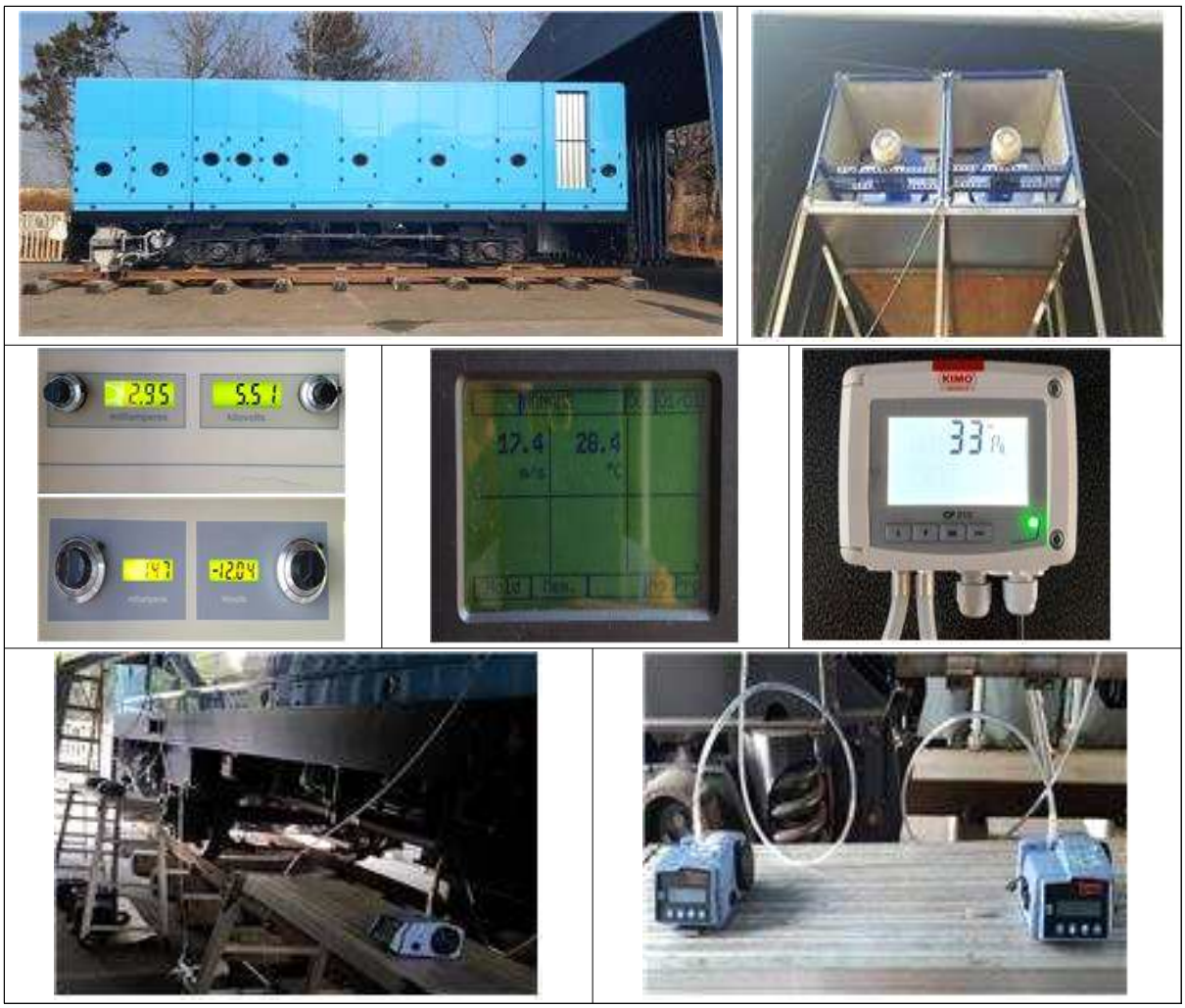


그림 112 측정 장치 설치/계측 모습

㉱ 공인성적서



시 험 성 적 서
(TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원

1. 의 뢰 자 (Client)
2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) :
3. 시험대상품목/품질/시료명 (Test Sample)
4. 시험기간 (Date of Test) : 2018년 06월 08일 ~ 2018년 06월 08일
5. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) :
6. 시험환경 (Testing Environment)
7. 시험결과 (Test Results) : 별첨결과 참조 (Refer to the attached results)

2018. 06. 15.

한국산업기술시험원

시 험 결 과 (Test Results)

1. 시험 결과

1.1 처리효율

항 목	중대장치 전단($\mu g/m^3$)	중대장치 후단 및 전기집진장치 전단($\mu g/m^3$)	전기집진장치 후단($\mu g/m^3$)	처리효율(%)
총 부유분진(TSP)	358.57	84.80	0.33	99.99
초미세먼지(PM 2.5)	296.35	33.01	0.37	99.99

※ 현장 시험 사진

이 하 여 백

그림 113. 공인 시험성적서 (차량 최종 조립 전)

③ 시제품 테스트 (2차: 차량조립완료 / 수서차량기지 차량 반입 후 2회 실시)

㉮ 시험방법

- 미세먼지를 미세먼지 제거차량의 흡진부에 투입
- 전기집진기를 가동하여 전기집진기 전 · 후단 미세먼지 농도 및 압력 손실을 측정
- 대전부에 2 kVDC를 공급하여 대전부를 통과하는 미세먼지에 (-)전기를 전하하고, 집진부에 5.5 kVDC를 공급하여 (-)전기를 띤 초미세먼지를 (+)집진판에 포집하는 방식
- 흡진부, 사이클론 집진기 후단, 전기집진기 1열 후단, 전기집진기 2열 후단 및 전기집진기 3열 후단에 미세먼지 측정기(pDR-1500)를 설치하여 미세먼지 제거성능을 측정
- 차압측정기를 설치하여 압력 손실(mmH20)을 측정
- 전기집진기 후단에 오존측정기(Model 400E)를 설치하여 발생되는 오존 농도를 측정

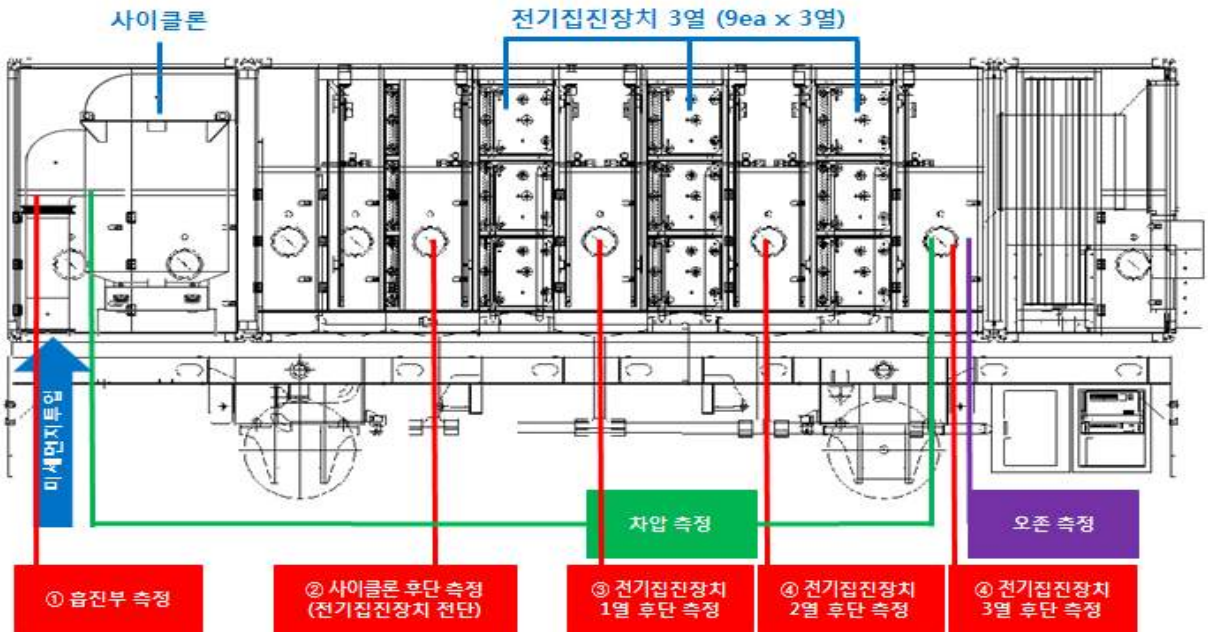


그림 114 전기집진차량 미세먼지 저감 성능 측정방법 구성도

㉯ 시험결과

□ 1차 측정

항목	측정 DATA (㎍/㎥, 5분 평균)					미세먼지 제거차량 효율(%)
측정위치	①흡진부	②사이클론 후단 (전기집진기 전단)	③전기집진기 1열 후단	④전기집진기 2열 후단	⑤전기집진기 3열 후단	(①-⑤)/①×100
미세먼지 (PM_{10})	13614	6769	579	2	0	99.99% 이상
압력손실	52mmH20					

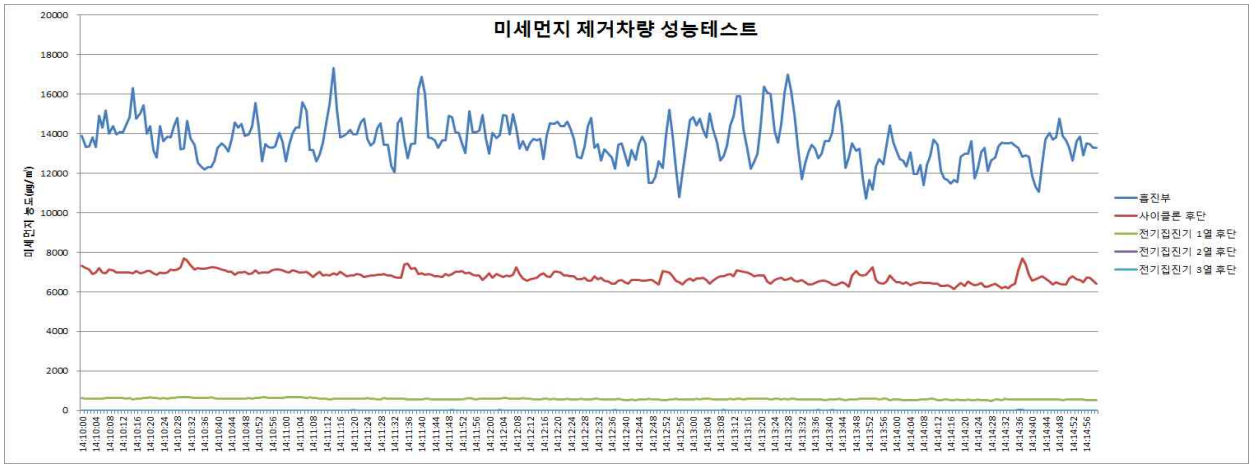


그림 115 미세먼지 저감 효율 측정 (1차)

□ 2차 측정

항목	측정 DATA (㎍/㎥, 5분 평균)					미세먼지 제거차량 효율(%)
측정위치	①흡진부	②사이클론 후단 (전기집진기 전단)	③전기집진기 1열 후단	④전기집진기 2열 후단	⑤전기집진기 3열 후단	(①-⑤)/①×100
미세먼지 (PM_{10})	6585	3276	254	3	0	99.99% 이상
압력손실	52mmHq					

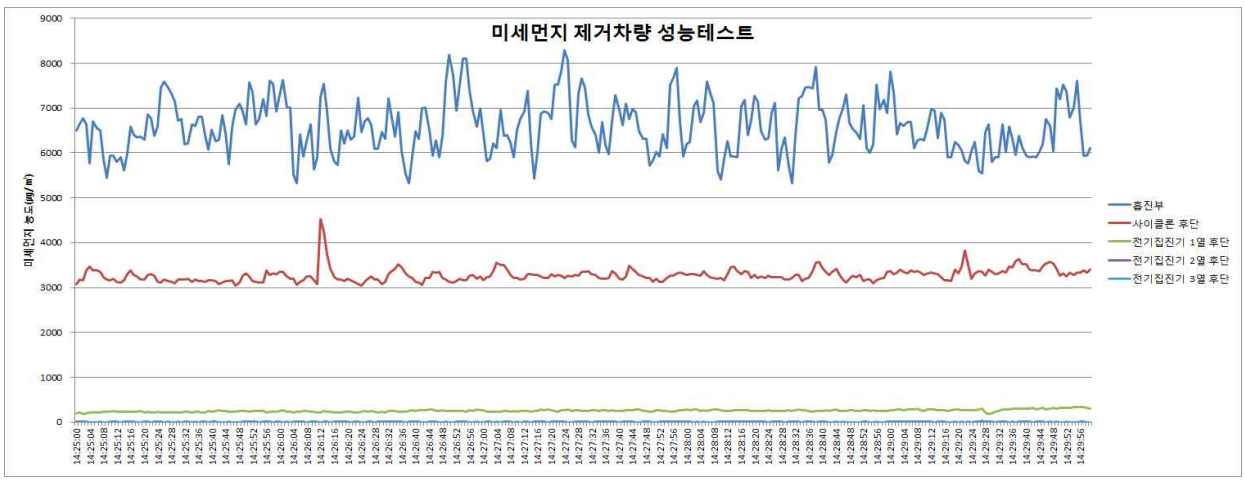


그림 116. 미세먼지 저감 효율 측정 (2차)

• 오존농도 측정

	1분 평균										10분 평균
오존농도 (ppb)	45.50	43.80	43.10	42.40	43.40	46.50	47.80	47.00	49.60	51.40	46.05

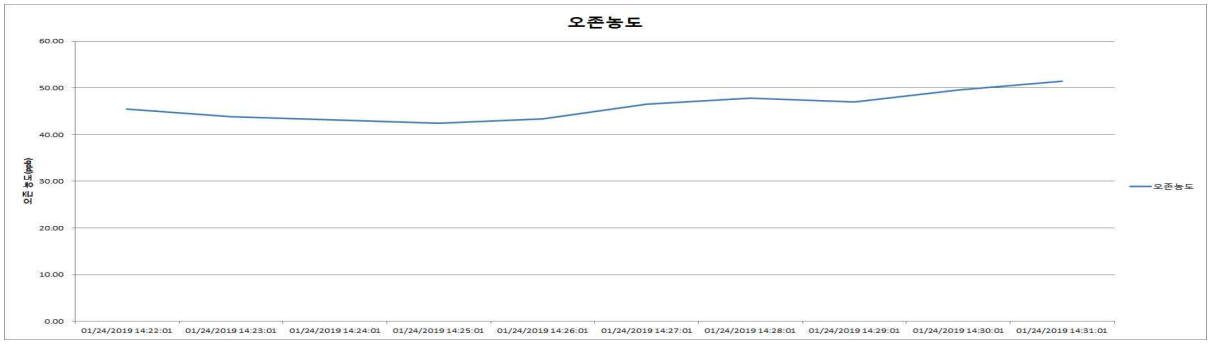


그림 117. 오존 농도 변화 (2차 공인인증시험)

㉰ 시험사진



그림 118 전기집진차량 공인인증시험 (2차)

※ 공인 시험성적서(KTL) : PM10 제거 효율 99.99% (발부일 2019.2.20.)

시 험 결 과 (Test Results)

1. 미세먼지(PM_{10}) 제거효율 및 압력손실

1.1. 1차 측정

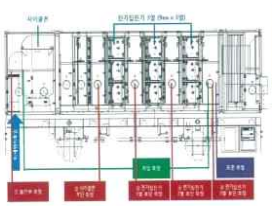
항목	측정별 PM_{10} 측정값 (㎍/㎥, 5분 평균)					미세먼지 제거차량 효율(%)
측정위치	①흡진부	②사이클론 후단	③전기집진기 1열 후단	④전기집진기 2열 후단	⑤전기집진기 3열 후단	(①-⑤)/①×100
미세먼지 (PM_{10})	13 614	6 769	579	2	0	99.99%
압력손실	52 mmH_2O					

1.2. 2차 측정

항목	측정별 PM_{10} 측정값 (㎍/㎥, 5분 평균)					미세먼지 제거차량 효율(%)
측정위치	①흡진부	②사이클론 후단	③전기집진기 1열 후단	④전기집진기 2열 후단	⑤전기집진기 3열 후단	(①-⑤)/①×100
미세먼지 (PM_{10})	6 585	3 276	254	3	0	99.99%
압력손실	52 mmH_2O					

2. 오존 발생 농도(ppb)

측정횟수	측정값 (1분 평균)	평균측정값 (10회 측정 평균)
1	45.50	46.05
2	43.80	
3	43.10	
4	42.40	
5	43.40	
6	46.50	
7	47.80	
8	47.00	
9	49.60	
10	51.40	





이 하 여 백

④ 시제품 테스트 베드 구간 투입 및 성능 시험 완료

제작된 초미세먼지 제거차량의 실제 터널 내 현장시험 진행 및 연구단 공인인증시험 진행
-시험 일시: 4월 말~ 5월 초 (2회 실시)
-시험 구간: 4호선 성신여대~수유 구간
-시험 결과: 연구단 테스트베드 구간 공인 시험성적서 참조 (33% / 저감 목표 달성)



그림 119 초미세먼지 제거차량의 터널 내 현장시험

4) 건식 필터 집진장치 개발

3세부 기본 연구 개발 차량은 3량 1편성 구성의 전기집진방식 차량으로, 금천씨스템(주)에서 주행차량 개발 역할을 담당하고 있으나, 미세먼지 상황에 따른 차량 운영 효율을 높이고 기존 집진방식과 전기집진방식의 저감효율 검토를 위해 별도 건식 필터 차량을 추가로 개발 하였다.

① 필터집진장치

□ 흡진장치, 송풍팬, 건식집진필터 로 구성

□ 미세먼지 흡진장치는 흡입된 공기를 미세먼지 집진장치로 보내는 장치로서 필터에 의해 분진을 걸러주는 건식(필터식)집진장치와 필터 표면에 달라붙은 먼지를 털어주는 펄싱 장치, 수집된 먼지를 처리하기 위한 수거장치, 연결 닥트 및 배기 닥트 등으로 구성된다.

- 형식: 건식 집진장치
- 처리용량 : 최대 1,500㎥/min
- 포집먼지의 폐기방법: 필터하부에 포집통을 설치하고 서랍을 빼서 비우는 방식으로 한다.

건식 백필터 사양	
폭	0.9m
높이	1.37m
수량	84ea
필터면적	207.144m²
통과속도	9.66m/min
속도비	1.93배
압력강하예측	38.62mmAq



그림 120 건식필터 차량 구성 도면



그림 121 필터장치 시험 및 차량탑재용 필터장치 제작

② 하부 먼지 부유용 블로워 팬

구분	내용	비고	
전원	• 3상, 220-380V, 60Hz	전류	• 5.32/2.98 A
극수	• 2P	소비전력	• 1750W
풍량	• 1620㎥/h	소음	• 80dB
중량	• 24Kg		

< 필터식 초미세먼지집진차 제작 규격요약 >

No.	항 목	
1	집진방식	섬유필터에 의한 물리적 집진
2	집진 미세먼지 대상	0.3μm 이상 초미세먼지 ~ 200mm
3	필터효율(제조사스펙)	0.3μm - 99%, 0.5μm - 99.8% (필터 규격)
4	공기흡입량	1000~2000 CMM (m^3/min)
5	흡입구 먼지비산	고무재질 박스 형태의 차단막 설치
6	필터세정 방식	차량 운행 중 고압 Jet Pulsing 에 의한 자체 자동세정 (필터소재가 특수표면처리되어 먼지가 달라붙지 않고 고압 공기 펄싱에 의해 먼지가 탈락하여 분진통에 수집되며, 눈매꿈이 거의 없어 공기저항이 적고, 수명이 오래감)
7	수집분진의 폐기	분진수집통을 3~6개월에 한 번씩 수거 후 폐기
8	공급동력	압축공기 8bar (자동pulsing용)AC220V 100W
9	필터의 교체 주기	최소 5년 ~ 10년 예상 / 1회 교체비용: 2000만원 예상
10	필터식 집진차 적용사례	서울메트로보유 분진흡입집진차 (1997년 프랑스 VTRAK사) 뉴욕, 파리, 뮌헨, 브뤼셀, 산티에고 등 디젤차량



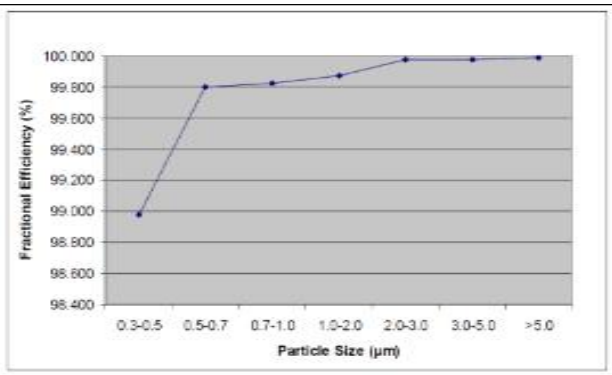
그림 122 건식필터 차량 편성사진

□ 필터 효율 검토사항

필터소재의 시험에 의한 기술 규격치는 50-80 (l/dm^2/min @ 200Pa) 이며, 이를 단위환산하면, 풍속 (5~8) m/min 에서 압력강하가 200Pa 가 예측됨. 즉, 풍속(필터링속도) 0.083 ~0.133 m/sec 시에 200Pa (=20mmAq)의 압력강하를 예상할 수 있다. 백필터 집진차의 필터링속도를 계산해 보면 2000 ㎥/min 풍량이 122개의 필터면적 358.7 m^{2}을 통과하므로 통과속도가 0.0925 m/sec 가 나옴. 필터소재의 기술규격치와 일치하는 풍속으로서 약 200Pa (20mmAq) 의 압력강하를 예측할 수 있다. 상기 연세대학교 시험실 시험결과를 필터링속도 0.093 m/sec 에서 보간법으로 계산해보면 차압 = 88 +(0.093-0.046)/(0.23-0.046) x (590-88) = 216.3 Pa = 22.1 mmAq로서, 상기 소재규격서와 일치함을 알 수 있다. 따라서 실제 집진차에 사용한 필터소재에 대해 최대 필터링속도 0.093m/sec를 적용하면 약 20 mmAq의 압력강하 계산결과를 예측가능하다. 이는 실제 차량에서 배기팬을 최고속도로 가동하며 측정한 필터 전후의 압력강하 측정 결과인 약 25mmAq와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.
극초미세먼지(0.3~0,5μm)를 98.9% 집진하며, 초미세먼지(2.5 μm)를 99.9% 효율가지는 필터소재 회사의 기술규격치를 토대로 연세대학교의 시험실에서 시험하여 2015년 1월 미세먼지 자문회의에서 발표한 PM0.3 (0.3μm) 입자대상 시험 결과인 아래표와 거의 일치함을 알 수 있어 상당량의 집진성능을 가질 수 있을것으로 예측된다.

필터링 속도	차압		필터 예측 효율
m/sec	Pa	mmAq	%
0.046	88	8.97	97.64%
0.23	590	60.16	94.30%
1.06	3050	311.01	89.10%

□ 사용된 FILTER 소재의 집진효율 규격



Media Status	Loaded
Particle Size (μm)	Fractional Efficiency (%)
0.3-0.5	98.977
0.5-0.7	99.801
0.7-1.0	99.825
1.0-2.0	99.872
2.0-3.0	99.973
3.0-5.0	99.978
>5.0	99.986

그림 123 필터 집진 효율 (필터소재 규격서 기준)

(5) 차량용 환경관리 시스템 개발

(가) 시스템 구성

도시철도 터널 구간의 오염도 데이터를 수신하여 오염도에 따른 작업 계획을 수립하고 차량위치검지장치에서 전송하는 타코메타와 비컨 정보를 수집, 가공하여 차량 위치를 산출하는 관리 서버, 차량에 설치된 타코메타 정보와 터널 내에 설치된 비컨에서 나오는 신호를 수신하여 서버로 전송하는 위치검지장치. 관리서버에서 수립한 청소 계획을 사용자에게 전달하는 차량 단말로 구성된다.

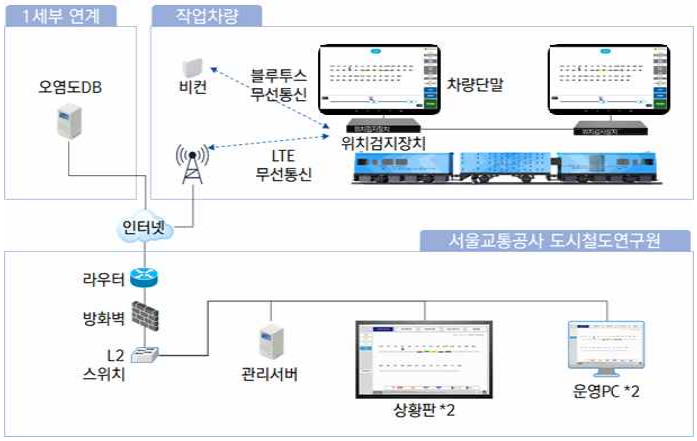


그림 124 시스템 구성도

(나) S/W 구성 및 데이터 흐름도

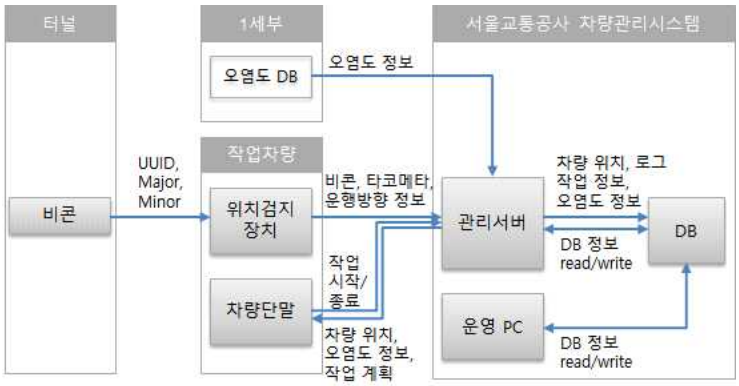


그림 125 데이터 흐름도

(다) 구축 장비

① 네트워크 및 모니터링 시스템 구축

- 대형 모니터 및 운영 PC 각 2대



그림 126 모니터링 시스템

- 방화벽, 라우터, 스위치 각 1식



그림 127 네트워크연결

② 관리 서버

	항 목	사 양
1	OS	Windows Server 2012 (64bit)
2	CPU	Intel Xeon CPU E3-1231 v3 3.40GHz
3	RAM	4.0 GB
4	해상도	1920 x 1080

[관리 서버 세부 규격 및 사양]

③ 차량 위치검지 장치 및 차량 단말

- 차량 단말 고정 장치 및 차량단말 설치
- 위치검지장치 설치
- 타코메타 및 운행 방향 신호선 인터페이스 연결

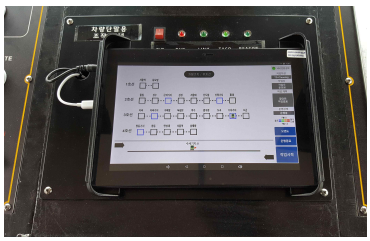


그림 128 1호차 차량단말



그림 129 3호차 차량단말

	항 목	사 양	
		MPGIO Athena	SM-T580
1	외관(mm)	258mm x 173mm x 10mm	155.3(W)x254.2(L)x8.2(H)
2	중량(g)	520 g	525 g
3	LCD 규격	10.1 inch IPS 1280*800(16:10)	255.4 mm/ WUXGA(1920X1200)
4	CPU	ARM Cortex-A7 Octa-core@2.0GHz	S5E7870XH0(8코어, 1.6GHz, 64Bit)
5	OS	안드로이드 6.0(마쉬멜로)	안드로이드 6.0(마쉬멜로)
6	RAM	LPDDR3 1GB/2GB	2.0 GB
7	저장용량	16GB/32GB	32 GB
8	Battery	5,000mAh	7,300mAh 일체형

[차량단말 세부 규격 및 사양]



그림 130 위치검지장치(외관)

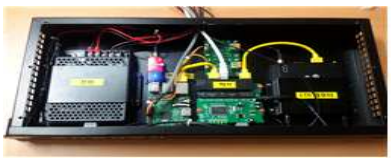


그림 131 위치검지장치(내부)

	항 목		사 양
1	외관(mm)		485mm(W)*220mm(L)*66 mm(H)
2	소비 전력		80 W
3	재질		철판(두께: 1.2t)
4	구성품	LTE 라우터	LTE Release 9, LTE FDD Category 4 1 port Ethernet Switch

	항 목		사 양
		스위칭허브	10/100 Mbps RJ-45 5 Port
		전원 모듈	DC input: 24V/3.8A, DC output: 5V/10A
		메인 보드	· 1.2GHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A53 CPU (BCM2837) · 1GB RAM (LPDDR2 SDRAM) · 10/100 Ethernet · microSD(16GB)
		타코메타 I/F 보드	· 24V input / 3.3V output
5	외장 안테나	LTE 안테나	2 × 2 MIMO Dipole (SMA Type)
		비컨 안테나	5 dBi Dipole (RP-SMA Type)

[위치 검지 장치 세부 규격 및 사양]



그림 132 1호차 설치 형상



그림 133 위치검지장치



그림 134 차량단말 고정장치



그림 135 타코메타



그림136 타코메타 형상



그림137 회전날개

④ 비콘 설치 : 4호선 수유역, 미아역, 미아사거리역, 길음역, 성신여대역 승강장 진입점 양쪽에 비콘 설치



그림 138 4호선 시험구간 비콘 설치

	항 목	사 양
1	Size	75 × 105 × 55mm (W×D×H)
2	Battery	AA battery 4개
3	Wireless Technology	Bluetooth® Smart 4.1 (CSR1010 chipset)
4	Operating temperature range Storage temperature range	-20℃ ~ 60℃ -40℃ ~ 85℃
5	Temperature & Humidity Sensor	Accuracy : -10℃<tA<85℃ (Typ ±0.3) 0 - 80% RH(Typ ±2)
6	RTC[Real Time Clock]	Built-in clock correction function

	항 목	사 양
7	난연성	ABS : 94-HB | Polycarbonate(PC) : 94-V-0, 5VA, HB
8	방수,방진 보호등급/충격테스트	IP 66/67 / IK 07/08

[비콘 세부 규격 및 사양]

(라) 장치별 SW 개발 – 구성 및 기능

① 관리 서버

㉮ 주요기능

- 작업차량 위치 산출: 위치검지장치로부터 받은 타코메타 및 운행 방향 정보, 수신한 비컨 신호 정보를 수집하고 이를 토대로 작업차량의 현재 위치를 보정하여 산출
- 작업차량 위치 화면 표출: 화면에 작업차량 위치 표시
- 차량단말에 작업차량 위치정보 전송
- 1세부 오염도 DB 정보 수집 및 표출: 1세부 오염도 DB 정보를 주기적으로 가져와서 구간별 평균값을 구하여 오염도 레벨을 계산한 후 관리서버화면 및 차량 단말 화면에 표출
- 작업 계획, 작업 이력 조회, 차량 관리 등을 위한 관리자 화면 제공: 작업차량에 대한 작업계획입력, 작업이력저장 및 표출, 차량, 차량단말, 비컨 등에 대한 환경설정 제공

㉯ DB 구성

DB 명	테이블 명	설 명
pollution	beacon_info	beacon 정보
	device	차량 단말 정보
	log_info	로그
	pollution_info	미세먼지 오염도 정보
	polserver_info	미세먼지 오염도 서버 정보
	scanner	위치검지장치 정보
	station	역사 정보
	station_pol	역사별 미세먼지 센서 정보
	taco_beacon_log	비컨, 타코메타, 운행방향 정보 로그
	train	차량 정보
	train_loc	차량별 작업자 정보
	user	작업자 정보
	user_account	운영PC 계정 정보
	workhistory	작업 이력 정보
	workplan	작업 계획 정보

[관리 서버 DB 구성]

㉰ 세부 메뉴 및 UI 구성

- 호선별 오염도 맵: 터널의 오염도를 좋음(파랑), 보통(녹색), 나쁨(주황색), 매우 나쁨(빨강색)의 4단계로 표시하고 오염도 정보가 없는 구간은 회색으로 표시한다. 오염도 정보는 PM10과 PM2.5로 나뉘며 상단에 PM10 오염도, 하단에 PM2.5를 표시한다. 차량 위치를 표시하고 차량 아이콘을 선택 시 해당 차량의 상세 정보를 표시한다.



그림 139 호선별 오염도 맵 화면



그림 140 차량 상세 정보 표시

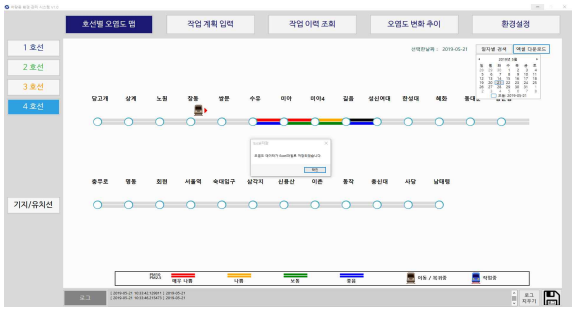


그림 141 오염도 일자별 검색

	A	B	C	D	E
1	일자	호선	구간	오염도(PM10)	오염도(PM2.5)
2	2019-05-21 오전 12:00:01	4호선	수유	매우나쁨	좋음
3	2019-05-21 오전 12:00:01	4호선	미아	매우나쁨	보통
4	2019-05-21 오전 12:00:01	4호선	미아4	나쁨	보통
5	2019-05-21 오전 12:00:01	4호선	길음	정보없음	좋음

그림 142 오염도 Excel 다운로드

- 작업 계획 입력: 호선별로 작업 시작 지점 및 종료 지점의 킬로정 위치, 작업 방향, 작업 차량 및 작업 일자 및 시작 시간을 입력한다. 하단에는 등록된 차량 정보를 표시한다.
- 작업 이력 조회: [1일/1주일/1개월/기간 설정] 버튼으로 입력한 기간 동안 완료한 작업 내역을 표시하고 조회한 작업을 엑셀 파일로 저장할 수 있다.
- 오염도 변화 추이: 선택한 작업 구간과 기간 내의 PM10의 경우는 실선으로 PM2.5인 경우는 점선으로 표시한다.

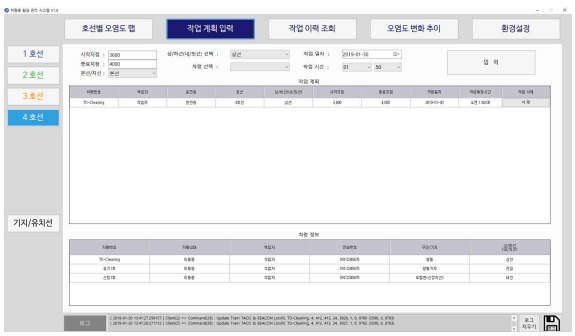


그림 143 작업 계획 입력



그림 144 오염도 변화 추이

- 환경 설정: 차량 정보, 작업자 정보, 차량단말, 비컨 정보, 오염도 서버 정보, 위치검지장치 정보 메뉴로 구성된다.

㉮ 관리서버와 위치검지장치 간 인터페이스: 위치검지장치에 전원이 공급되어 위치검지장치 프로그램이 구동되면 초기에 서버로 CONFIG정보를 보내고 이후 1초 주기로 타코메타 및 감지된 비컨 정보를 전송한다.

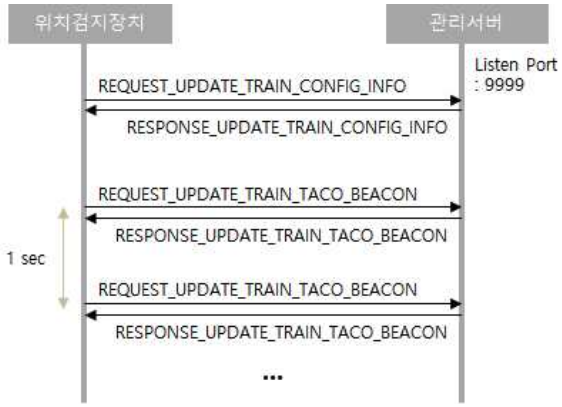


그림 145 관리서버와 위치검지장치 간의 메시지 흐름도

㈑ 위치검지장치로부터 받은 타코메타 및 비콘 정보를 이용한 위치 보정

❍ 감지된 비콘 신호가 없는 경우: “위치탐색중” 으로 표시하고 타코메타 Pulse 로 계산한 위치 표시

- 위치검지장치에서 1초마다 보내오는 타코메타 Pulse 값을 이용하여 이동 거리 계산
- 한 Pulse 당 Meter 값 = (2 × Л × 반경) ÷ (바퀴당 Pulse 수)
- 차량 이동 거리 = Pulse Count × (한 Pulse 당 Meter 값)

❍ 감지된 비콘 신호가 있는 경우: 감지된 비콘 신호의 Major, Minor 값을 이용하여 차량 키로정 위치 및 진행 방향을 판단하고, 비콘 신호 수신 감도 및 마지막 타코메타 Pulse 값을 이용하여 차량의 위치를 보정한다.

- 수신한 비콘 신호 데이터 중 일정 시간 내에 가장 큰 RSSI를 가지는 비컨 신호를 구한다.
- 선정된 비콘 신호의 RSSI 레벨이 일정 수준 이하이면 버린다.
- 선정된 비콘 RSSI 값이 기존에 기준값으로 선정된 비콘 정보의 Major, Minor 값과 같은 경우 기존값 보다 RSSI 값이 크면 새로운 기준값으로 선정한다. 기존값보다 RSSI 값이 작으면 해당 정보는 버린다. (최대 RSSI 값을 가진 비콘 신호를 선정하는 알고리즘)
- 기준값으로 선정된 비컨의 RSSI를 이용하여 해당 비컨에 매핑된 킬로정 위치 정보를 보정한다.
- 비콘 RSSI를 이용한 비컨과 작업 차량 간 거리 계산

Distance = 10 ^ ((Tx Power - RSSI) / (10 × n)) (Tx Power:1m 거리에서의 수신 감도, n = 2)

- 비콘 RSSI를 이용해 계산한 거리값에 기준값으로 선정된 비컨 수신 시의 Pulse값과 현재 마지막으로 위치검지장치에서 보내온 Pulse 값과의 차만큼의 거리값을 보정하여 현재 차량의 위치를 구한다.
- 감지된 비컨 신호 중 가장 큰 RSSI를 가진 비컨 신호의 minor 값이 0이면 상선(내선) 순방향 진입, 1인 경우는 상선(내선) 역방향 진입으로 판단한다.
- 감지된 비컨 신호 중 가장 큰 RSSI를 가진 비컨 신호의 minor 값이 10이면 하선(외선) 순방향 진입, 11인 경우는 하선(외선) 역방향 진입으로 판단한다.
- 새로 감지된 비콘 신호가 기준값으로 선정된 비컨과 Major 값은 동일하고 Minor 값만 다른 경우

(기준값의 minor가 0이나 1 인 경우 10 또는 11, 기준값의 minor가 10이나 11인 경우 0이나 1) 해당 비콘 신호를 무시한다.

㉮ 관리서버와 차량단말 간 인터페이스: 차량 단말 앱이 구동되면 초기에 관리 서버로 단말 고유 ID를 보내 인증 절차를 수행하고, 관리 서버로부터 작업 계획 정보를 받아서 차량 단말에 표시한다. 차량 단말이 “운행 중” 상태로 진입하면 오염도 정보 및 차량 운행 상태 변경을 관리 서버로 요청하여 받고, 이후 1초 주기마다 관리 서버로 차량 위치 정보를 요청하여 차량단말에 표시한다.

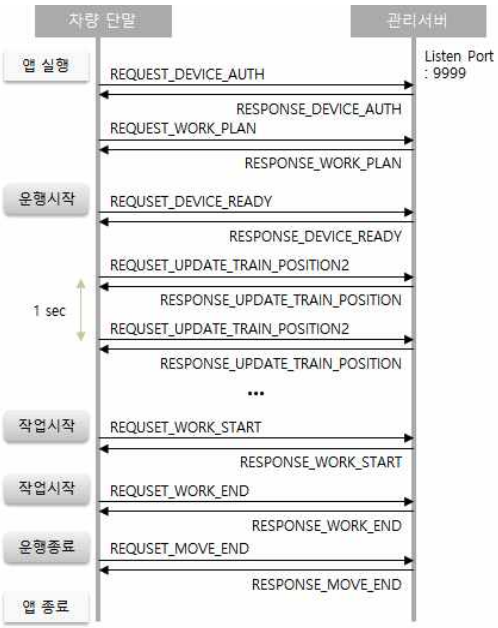


그림 147 관리서버와 차량단말 간 메시지 흐름도

㉯ 1세부 오염도 DB 연동

: 관리서버 프로그램 실행 중 10초마다 오늘 날짜 pollution DB 정보 존재를 확인하여 없으면 1세부 오염도 DB에 접속 후 하루 전 시간별 오염도 정보를 쿼리하여 평균값으로 오염도 단계를 산출한다.

오염도 단계	단계값	범위	색상 표시
좋음	1	0 < 오염도 평균 <= 30	
보통	2	30 < 오염도 평균 <= 80	
나쁨	3	80 < 오염도 평균 <= 150	
매우나쁨	4	오염도 수치 > 150 이상	

[오염도 단계별 범위 및 색상 표시]

② 차량단말

㉮ 프로그램 구성

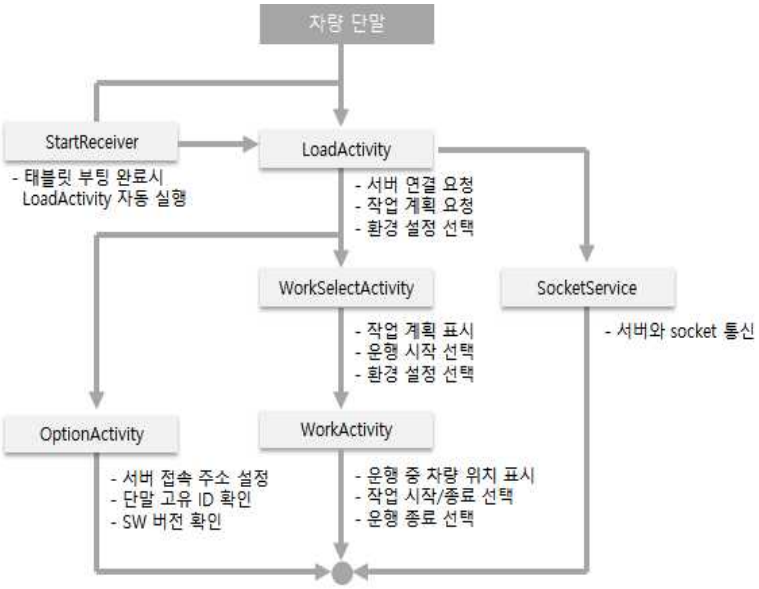


그림 148 차량 단말 프로그램 구조도

㉯ 기능 및 UI 구성

- 작업환경 설정: 차량 단말이 접속할 서버의 IP주소 및 포트번호를 설정한다. 또한 해당 단말 고유의 단말ID 값 및 단말의 어플리케이션 버전을 확인할 수 있다. 서버의 환경설정에서 차량단말 환경설정에 단말ID가 등록되어야 차량단말이 관리 서버에 접속 시 유효한 차량단말로 인증되어 정상적으로 연결된다.
- 오늘의 작업 표시 : 서버로부터 전송받은 오늘의 작업 계획을 표시한다.
- 운행 중 기능: 운행 중 화면의 오른쪽은 서버로부터 전송받은 작업 계획 정보가 표시되고 하단에는 작업차량의 위치 및 킬로정 정보를 표시한다. 화면 중앙에는 오염도 정보와 차량 위치를 표시한다. 역 구간 연결선은 오염도의 레벨에 따라 좋음(파랑), 보통(녹색), 나쁨(주황색), 매우나쁨(빨강색)으로 표시하며 오염도 정보가 없는 경우는 회색으로 표시한다. PM10에 대한 오염도는 위쪽에 PM2.5에 대한 오염도는 아래쪽에 표시된다. 노선도에 표시되는 차량 아이콘을 누르면 해당 차량에 대한 상세 정보를 표시한다.

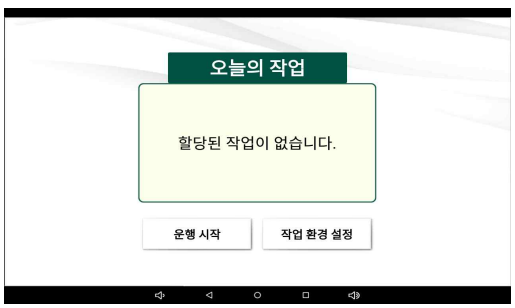


그림 149 등록된 작업 계획이 없을 때

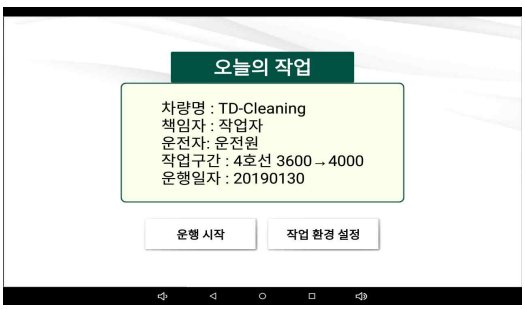


그림 150 등록된 작업 계획이 있을 때

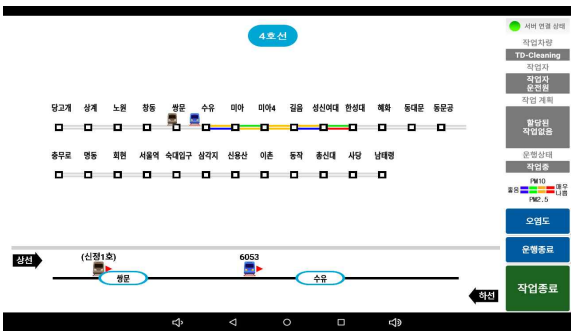


그림 151 운행 중 화면

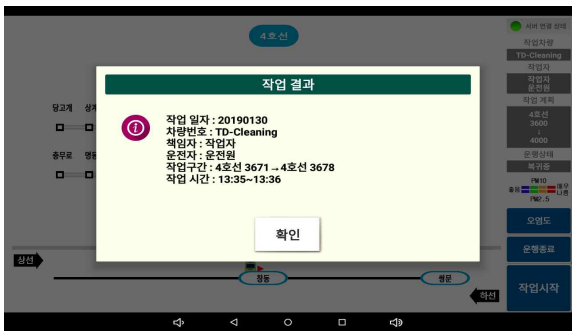


그림 152 작업완료

- 근접 알람 표시: 작업 위치에서 다른 차량이 주변 300m 이내로 접근하면 근접 알람을 표시한다. 근접알람이 발생하면 전체 화면이 빨간색으로 깜빡이며 위험 알림 소리를 재생한다.

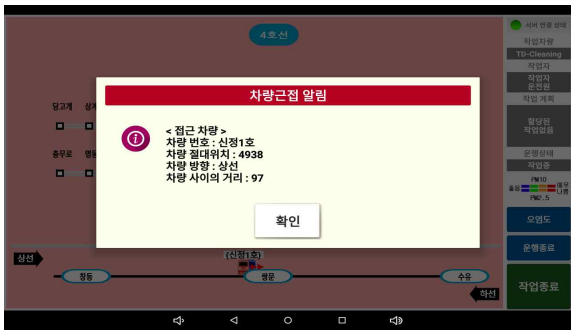


그림 153 근접 알람 표시

- 운행 종료 처리: [운행종료] 버튼을 누르면 복귀 기지 선택 메뉴가 나타난다. 비컨이 설치되지 않은 기지 등의 위치에서 운행 종료 시 위치 정보를 보정하기 위해 현재 위치 외에 유치선이나 차량기지를 별도로 선택할 수 있다.

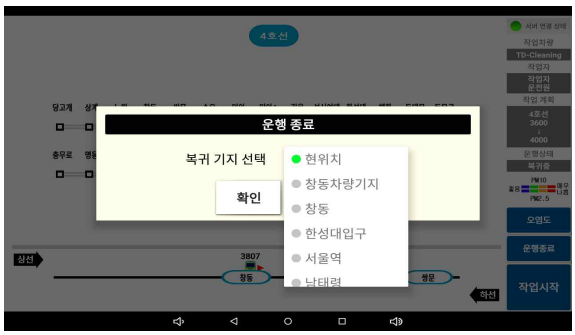


그림 154 운행종료 화면(복귀기지선택)

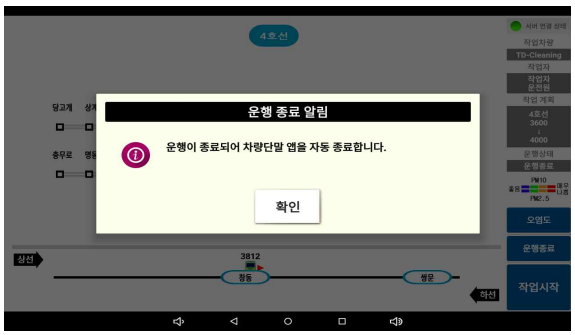


그림 155 운행종료 화면

- 전원 켠 후 자동 시작 기능: 차량단말의 전원을 켜면 일정 시간 후 자동으로 차량용 환경관리 시스템 앱을 실행한다. 자동 실행 후 “오늘의 작업” 화면이 표시되고 있을 때 일정시간동안 입력이 없으면 자동으로 [운행시작] 버튼을 누른 것으로 처리하여 운행 중 화면

표시 상태로 진입한다.

③ 위치검지장치

㉮ 프로그램 구성

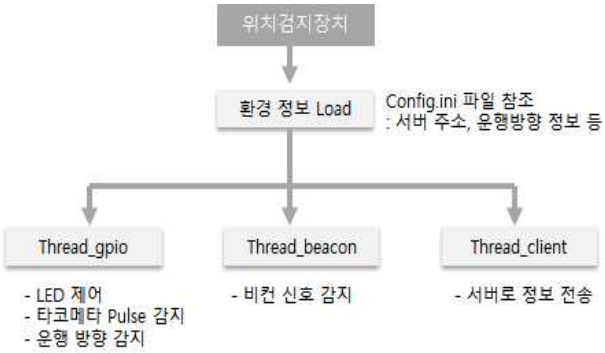


그림 156 위치검지장치 프로그램 구조도

㉯ 기능

- LED 동작: 위치검지장치의 상태는 위치검지장치로부터 연결되어 차량단말 고정 장치에 부착된 4개의 LED(RUN, LINK, TACO, BEACON)에 표시된다.
- 비컨 신호 감지: 비컨 신호를 감지하면 위치검지장치의 BEACON LED를 깜빡인다. 비컨에서 수신된 Advertizing Message는 서버로 전송되고 서버에서 타코메타 Pulse, 운행 방향 정보를 조합하여 위치를 보정한다. 비컨으로부터 받는 정보는 비컨 MAC, UUID, Major, Minor, Battery, RSSI 값이 있으며 정보는 서버로 전송한다.

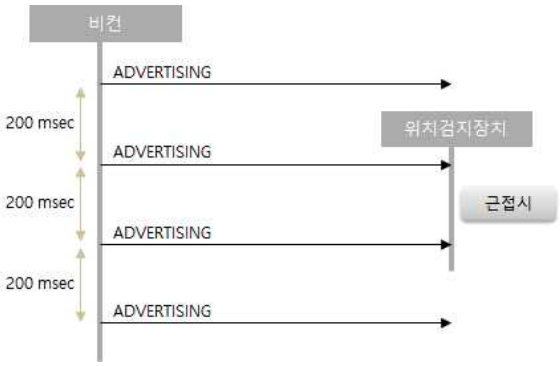


그림 157 비콘 신호 수신 흐름도

- 타코메타 신호 감지: 타코메타 장치 연동을 위해 차량의 방향을 인지하는 방향감지입력포트와 타코메타pulse를 감지하는 입력포트가 있다. 방향감지입력포트가 High이면 순방향으로 처리하고 low이면 역방향으로 처리한다. 타코메타 pulse 신호는 PWM 신호의 falling edge에 1개의 pulse가 감지된 것으로 처리한다.
- 서버로 정보 전송: 위치검지장치의 전원이 켜지면 위치검지장치는 서버로 TCP 연결을 시도

하며 서버와 접속되면 1초 주기마다 위치검지장치의 타코메타 Pulse 정보, 운행 방향 정보 및 비컨 감지 시 감지된 비컨 정보를 전송한다. 서버가 해당 데이터를 분석하여 위치 계산 및 위치 보정을 한다.

④ 비컨

㉮ 송출 정보 설정

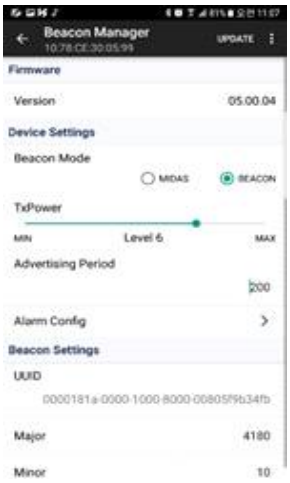


그림 158 비콘 설정 화면

< 유효한 비컨 설정 >

- Beacon Mode: BEACON
- Tx Power: Level 8(설치 환경에 따라 조정)
- Advertising Period: 200 ms
- Major: 역사 번호 * 10
- Minor: 방향 정보
  (상선: 0/1, 하선: 10/11, 기지/유치선:40/50)
- UUID: 비컨 유효 여부 Check 및 킬로정 정보 지정

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4d	45	54	52	4f	00	00	00	mm	mm	00	00	yy	yy	yy	yy
M	E	T	R	O				Major				All 0 / 킬로정 값			

※ 감지된 비컨이 유효한지 check하는 기준
- UUID가 METRO 로 시작해야 허용
- Major의 Hex값과 UUID의 9, 10번째 값이 일치해야 함

※ UUID에 킬로정 정보 지정 방법
- UUID의 마지막 4 byte값이 모두 0인 경우는 서버에서 지정된 킬로정 값 사용, 아닌 경우는 UUID에 지정된 킬로정값을 위치 설정에 사용함(필요시)

㉯ 비컨 설치 위치

❍ 승강장 상선/내선 진입부 및 하선/외선 진입부에 설치

❍ 감지된 비컨 신호 중 rssi 값이 가장 큰 것을 찾아 위치 및 운행 방향 판단에 사용함
- minor 0: 상선/내선 순방향 진입(화살표 1)
- minor 1: 상선/내선 역방향 진입(화살표 3)
- minor 10: 하선/외선 순방향 진입(화살표 2)
- minor 11: 하선/외선 역방향 진입(화살표 4)

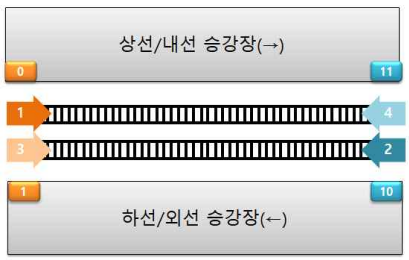


그림 161 상대식 승강장



그림 162 섬식 승강장

(마) 사전 운영 시험

① 신정지선/신정1호차

- 테스트베드 구간 구축 기간이 지연됨에 따라, 서울교통공사의 신정차량기지의 모터

- 카 차량을 지원 받아 사전 운영 검증 시험을 시행 함. 동일 기능 개발품을 탑재하고 서버에서 원격 데이터 수집 및 기능 상태 점검
- 신정1호차 위치검지장치 및 차량 단말 설치



그림 164 신정 1호차 형상



그림 165 설치 작업



그림 166 설치 사진



그림 167 운전석 전진/후진 LED



그림 168 전진/후진 LED 선 연결



그림 169 타코메타 연결

(바) 연구단 테스트 베드 운영 시험

① 시험 환경: 테스트베드 구간의 승강장 진입점에 비콘을 설치한다.

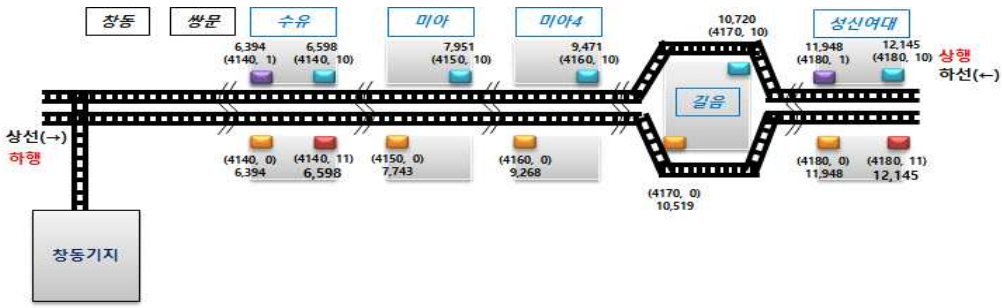


그림 170 테스트베드 구간 비콘 설치 위치

② 1세부 오염도 DB 정보 연동

1세부 오염도 DB에서 가져온 시간별 오염도 정보를 이용한 터널 구간 별 오염도 변화 추이는 아래와 같다.

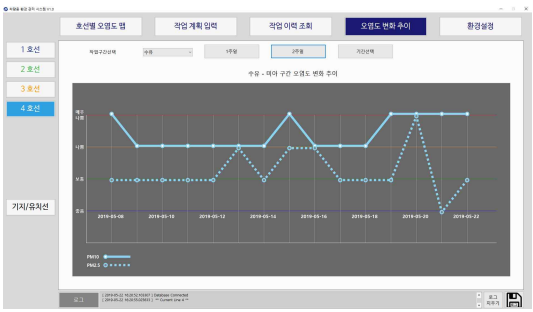


그림 171 수유/미아구간 오염도변화추이



그림 172 미아/미아사거리구간 오염도변화추이

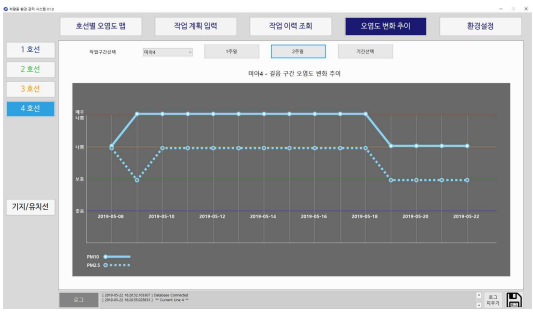


그림 173 미아사거리/길음구간 오염도변화추이



그림 174 길음/성신여대구간 오염도변화추이

③ 타코메타 감지

타코메타 Pulse 감지 결과를 분석해보면 현재 타코메타 Pulse를 통한 이동거리 측정 시 평균 3.5%의 오차가 발생한다. 바퀴 슬립이나 노이즈로 인한 Pulse 오 인식 등에 따른 타코메타 Pulse 감지 시의 오차는 타코메타 설치 위치 재조정이나 로직 보완을 통해 개선 가능하나 차량의 이동거리가 길어지면 오차 거리가 누적된다. 또한, 타코메타 Pulse 감지만으로는 작업 차량의 방향을 판단할 수 없기 때문에 비콘 정보가 필요하다.

시험구간	키로정 거리	타코메타 측정 거리	거리 차이	오차
미아사거리역↔미아역	1,520 m	1,579.52 m	59.52 m	3.91 %
미아역↔수유역	1,353 m	1,391.07 m	38.07 m	2.81 %
수유역↔창동역	2,821 m	2,919.93 m	98.93 m	3.50 %

4호선 시험구간 타코메타 Pulse 감지 결과

④ 비콘 신호 수신

거리별 비콘 신호 수신 그래프를 분석하면 비콘신호 수신감도에 편차가 있지만 전체적으로 비슷한 형태를 가지며 비콘 설치위치에 가장 근접할 때 가장 높은 비콘신호 수신감도를 가진다. 야외에서 거리별 비콘신호 수신감도를 측정한 결과도 비콘신호 수신감도의 편차가 있지만, 근접 거리에서 비콘신호를 수신한 경우 비콘신호 수신감도를 이용한 거리 계산 공식에 따른 값과 근사하다. 따라서 ±10m 이내에서 감지되는 비콘 신호 감도를 기준값으로 정하여 기준값 이상의 비콘 신호만을 위치 보정에 사용하고, 수신된 비콘 신호 감도를 거리 보정하여 오차를 줄인다. (±10m보다 근거리 거리에서 감지되는 비콘 신호 감도를 기준값으로 정하면 위치 보정의 정확도는 개선되나 차량 운행 속도가 빠를 경우 비콘 신호가 감지되는 않을 확률이 있다)

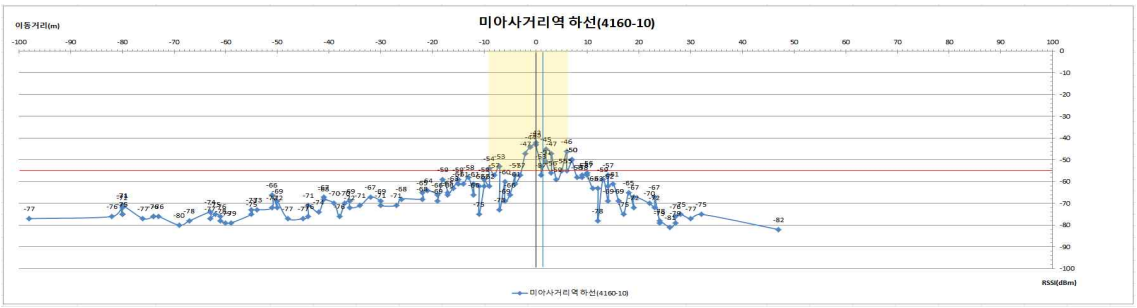


그림 175 거리별 비콘 신호 수신 그래프(시속 2.56 km/h)

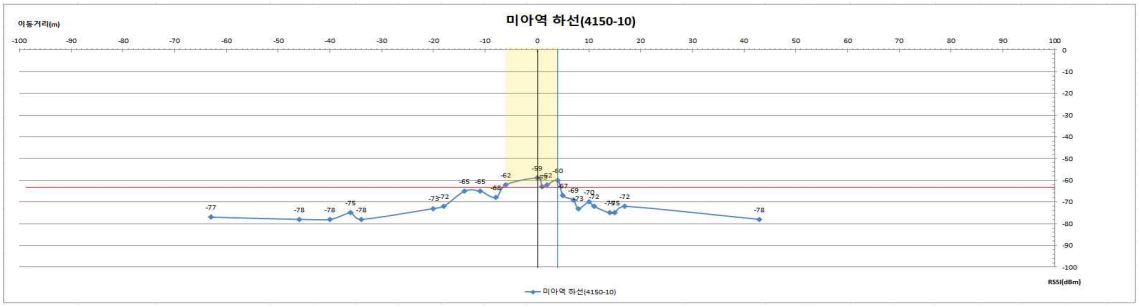


그림 176 거리별 비콘 신호 수신 그래프(시속 25.53 km/h)

⑤ 비콘 신호 감도 및 타코메타 Pulse 값을 통한 차량 위치 보정

- 위치검지장치는 1초마다 주기적으로 위치정보를 관리서버로 보내는데 전송 시점에 감진된 최종 타코메타 Pulse 값과 감지된 비콘 신호 List를 함께 전송한다.
- 관리서버는 기준값 이상의 비콘 신호 List를 받으면 그중 가장 높은 RSSI값을 가진 비콘 신호를 구한 후 해당 비콘의 키로정에 RSSI 값을 이용한 거리차를 보정한 후 다시 위치검지장치에서 보내온 마지막 타코메타 Pulse값과 해당 비콘 신호 수신 시점의 타코메타 Pulse 값을 이용하여 다시 위치를 보정한다. 기준값은 실측 데이터를 분석하여 기준 위치에서 ± 10m 이내에 들어오는 비콘 신호 감도를 보고 정한다.
- 새로 수신한 RSSI가 기존에 위치 보정에 사용한 RSSI값보다 크면 다시 새로 수신받은 RSSI값을 이용하여 킬로정 위치를 보정하고 기준값보다 작으면 해당 비콘신호를 무시한다.
- 비콘 신호 감도를 이용한 비콘 설치 위치와 작업 차량 간의 거리 계산은 아래 공식을 통해 이루어진다. Tx Power(1m RSSI)값은 실제 비콘 수신되는 거리 범위를 보고 결정된 기준값에 따라 결정된다. (위치검지장치 안테나가 차량 실내의 중앙의 위쪽 부분에 설치되어 있고 비콘은 터널 아래 부분에 설치되어 있고, 차량은 레일로만 움직일 수 있으므로 이 부분을 고려하여 거리 계산 시 3m 정도 보정함)

수신한 비컨 RSSI 감도를 이용해 비컨과 작업 차량과의 거리 계산에 사용하는 공식
Distance = 10 ^ ((Tx Power - RSSI) / (10 × n)) (Tx Power : 1m 거리에서의 수신 감도, n = 2)

- 관리 서버에서는 감지되는 비콘 신호의 major 값을 통해 기준 킬로정 위치를 파악하고 감지되는 minor 값의 순서를 보고 작업 차량의 진행 방향을 판단한다.
- 실제 운영 시험 후 결정된 위치 보정을 위한 비콘 신호 기준값을 기준으로 수신된 비콘 신호 수신 감도를 이용하여 차량의 위치를 보정해보면 표시되는 거리 오차가 ± 5 이내로 들어옴을 확인할 수 있다. (근접 거리의 비콘 신호 수신시 보다 정확한 차량 위치 보정 가능)

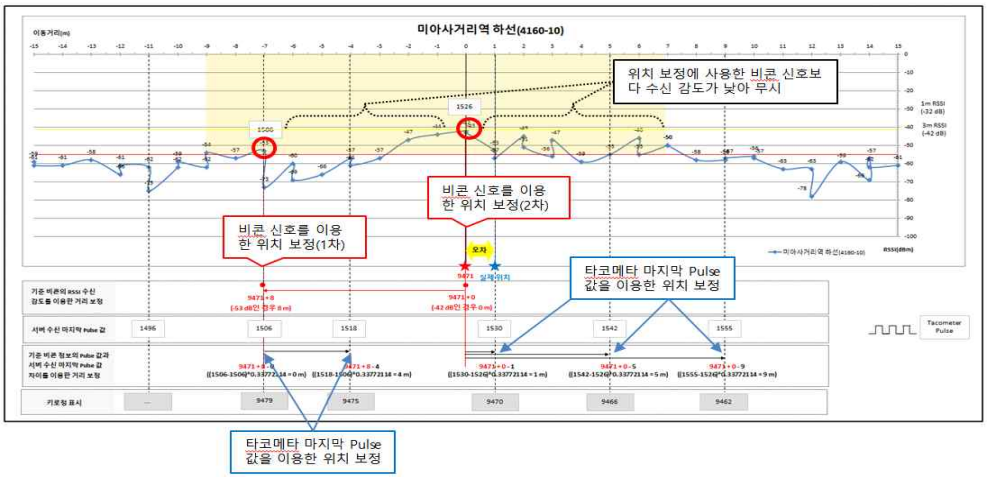


그림 177 설치 비콘 근처의 높은 감도 비콘 신호 수신시의 차량 위치 보정

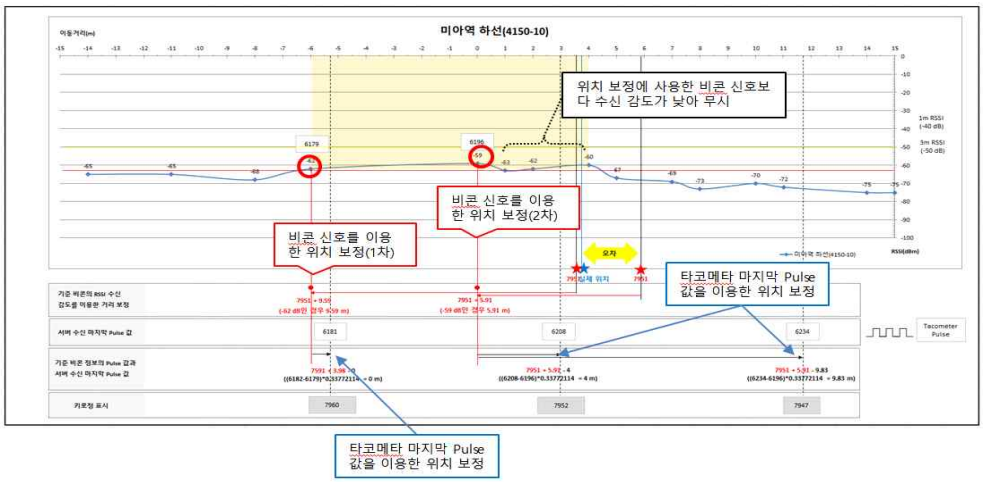


그림 178 기준값 근처의 낮은 감도 비콘 신호만 수신시의 차량 위치 보정

⑥ 시험 결과

차량 운행 시험 시 타코메타 Pulse만 사용하면 차량 이동 방향과 위치를 파악할 수 없으며 또한 차량의 이동거리가 길어지면 거리 오차가 누적되는 문제점이 있다. 이에 작업 차량 운행 구간의 역사 승강장에 비콘을 설치하여 작업 차량 운행 시 감지되는 비콘 신호 정보를 이용하면 차량 이동방향을 알 수 있고 또한 비콘 신호 새로 감지시마다 위치 보정이 새로 이루어짐으로써 이동 거리가 늘어나도 오차가 누적되지 않으며. 또한 감지되는 비콘 신호 감도 및 타코메타 Pulse값을 이용한 위치 보정을 추가하면 최대오차 ±5 m이내로 줄어 비교적 정확한 차량 위치 파악이 가능함을 확인할 수 있었다.

나. 차량 주행 시험 및 테스트 베드 운영 평가

연구단 테스트 베드인 4호선 수유~성신여대 구간은 서울교통공사의 실제 영업구간으로 본선 투입 전, 차량의 안전과 성능 검증 절차를 사전에 완료해야만 투입 가능하다. 이에 따라, 수서차량기지에 개발차량을 반입하여 시험선 및 일부 본선구간을 대상으로 사전 주행시험을 실시하여 요구 시험조건에 따른 검증 절차를 통과 한 후, 테스트 베드 구간에서 종합시험을 실시하기로 하였다.



그림 179. 개발 차량 사진

(1) 사전 주행 시험

(가) 시험선 주행 시험

누적거리 200㎞ 주행목표로 차량의 기본 주행성능을 주 2회 이상 검증 절차 수행

서울교통공사	시운전 시험 체크리스트	터널 초미세먼지 제거차량

동력차량(MC1/MC2) 시험

구 분	검 사 항 목			측정내용	시험결과
1. 시운전대비 사전점검 /측정	구분	시운전시작	시운전종료	거리/전압비	Km/V
	1) 배터리전압	/ V	/ V	전압강하량	V
	2) 적산기록계	Km	Km	주행거리	Km
	3) 모터온도	℃	℃	온도상승량	℃
	4) 축상온도	℃	℃	온도상승량	℃
	5) 앰프온도	℃	(Max) ℃	온도상승량	℃
	※ 준비사항	비접촉식 레이저 온도계			
2. 공압장치	주행중 메인 콤프레샤 정상 동작/정지 확인 주행중 (비상시) 보조 콤프레샤 동작/정지 확인				
	항목	동작확인	충기압력	비고	
	메인콤프레샤(MC1)		bar		
	보조콤프레샤(MC2)		bar		
3. 통신확인 (BMS)	주행중 MC1/MC2 차량과 메인 배터리와의 통신이 원활한지 확인				
	항목	동작확인		비고	
	데이터 모니터링				
	WIRE 출력				
4. 주행시험	레버를 정위치에 두고 정속운행 확인 (시운전구간에서 낼 수 있는 최대 속도까지 시험한다)				
	설정속도	선로조건	부하전류	속도편차	비고
	1) Km/h		A		
	2) Km/h		A		
	3) Km/h		A		
	4) Km/h		A		

2. 전기집진부 (시스템동작)	집진부의 전기집진장치 및 댐퍼가 정상 동작하는지 확인한다.		
	1)집진기 동작 신호	운전석에서 집진기 동작신호 시 정상동작 확인	
	2)부유분진 흡진댐퍼	부유분진 흡진부 댐퍼 열림 확인	
	3)고압전원공급장치	대전부 및 집진부 고압전원장치 동작 확인	
	4)부유분진 팬 동작	부유분진 흡진부 팬 가동 확인(부유분진 흡진 댐퍼 열림 후 30초 이후 동작)	
3. 세척부 (시스템동작)	전기집진 후 세척이 정상적으로 동작하는지 확인한다.		
	2)자동세척 동작 신호	자동세척 동작 신호 확인	
	3)자동세척	자동세척 정상동작 확인(프리필터, 1단, 2단, 3단 순차 동작)	
	4)배수 확인	배수관 연결 및 배수 확인	
4. 흡입시스템 및 사이클론	1)링블로어 풍량	집진팬 가동(2,000CMM)시	
	2)차압, 흡입속도 등		
	3)기타		
집진효율 테스트			
집진효율	터널 운행시험시 동일 방식 사용 (디젤엔진 확보 및 발생먼지의 흡입구 연결 덕트 필요)		
위치검지장치			
위치검지장치	1) 위치검지장치의 전원 공급 상태		
	2) 차량의 이동 방향 Signal 출력		
	3) 차량의 타코메타 Pulse 파형 분석		
비컨	1) 시그널 강도측정		
	2) 도달거리, 반응속도		

그림 180. 개발 차량 시험운전 검사항목(체크리스트)

□ 시험 내용

- 시험 위치 : 유치선, 기지내 시험선 내 수시 실시
- 시험 항목 : 기본 주행 성능, 배터리, 제동장치 등 시험 항목 관련 주행기록일지 작성
- 시험 결과 : 누적거리 200㎞ 달성 및 주행 중 미비점 보완 사항 지속 수정 중
- 창동차량 기지 테스트 베드 운영 중 주행시험 운행거리는 별도 산정

2) 구배 시험 (차량 제원 기준 42/1000 구배 등판 시험 / 수서기지 입출고선)

차량의 주행 성능 평가 항목 중, 고구배 구간의 등판 능력을 확인하여 차량 성능 검증

□ 시험 내용

- 시험 위치 : 수서 차량기지 입출고선 (오금역 방향)
- 시험 일시 : 2019.02.24. (야간 단전 후)
- 시험 항목 : 해당 구간은 구배율 42/1000 의 서울교통공사 최대구배 구간으로 등판 주행 가능 여부 주행동작 시험 실시
- 시험 결과 : 총 2회 왕복 시험 시 자력 주행 가능 (소모전류 최대 100AH)



그림 181 구배시험 및 차량계기판 모습

4) 연결기 견인 시험

자립 운전이 불가능한 비상 상황 발생에 대비하여 서울교통공사의 입환기관차, 물탱크차 등과 연결하고 견인 시험을 진행함

□ 입환기관차 연결 시험

- 장소/일시 : 수서차량기지 유치선 / 2019.02.15.
- 시험 방법 : 입환기관차~개발차량 간 연결 구성 후 견인 주행 시험 각 2회 실시
  (입환기관차 동력 견인주행, 개발차량 동력 견인주행 200m)
- 시험 결과 : 평지 주행 조건 이상 없음, 구원 차량간 연결은 어댑터가 필요
  견인 상태 평지중행 시 배터리 소모전류는 약 40~50AH 내외 사용 확인



그림 182 구원연결 모습



그림 183 견인시험 (개발차량~입환기관차간 각 1회 실시)

□ 장비관리단 물탱크차 연결 시험

- 장소/일시 : 수서차량기지 입출고선(오금역방향) / 2019.02.24.
- 시험 방법 : 개발 차량 구배 시험 완료 후 물탱크 차 구원 연결 후 구배 견인 등판 시험
- 시험 결과 : 구원 연결 시 연결기간 결합 문제로 추후 재점검 예정
  42/1000 구배에서 물탱크차의 구원 견인 등판 시 40구배까지 가능 확인



그림 184. 물탱크차 견인기 연결

5) 탈선복구 시험

신호기 이상, 차량 이상 등에 의해 차량이 궤도를 탈선할 경우를 대비해 장착한 비상복구장치의 자립 복구 가능 여부를 시험

□ 시험 내용

- 장소/일시 : 수서차량기지 유치선 / 2019.02.21.
- 시험 방법 : 1호차, 3호차 전면 부 탈선 복구장치 이용 탈선 후 복귀 시험
  → 2호차의 경우 차량이 상호 연결되어 있어 인위적 탈선 불가 (추후 확인)
- 시험 결과 : 1호차 동작 정상 판정, 3호차 유압장치 압력 문제로 보완작업 실시



그림 185. 탈선복구장치→ 차량 상하 및 좌우 이동

(나) 테스트 베드 운영 구간 종합시험 (연구단 공인시험 및 자체 시험 수행)

1) 자체 주행 시험 (수서차량기지~창동차량기지) / 2019.04.08.

- 시험 방법 : 완충 상태 수서기지~창동차량기지 간 약 39㎞ 자력 운행
- 시험 결과 : 주행 이상 유무 확인, 배터리 소모량 : 30% 내외



그림 186 수서~창동 기지간 주행 시험

2) 자체 동작 확인 시험 (테스트베드 사전 점검) / 2019.04.13

- 시험 방법 : 4호선 본선구간(수유~쌍문역) 작업속도 5㎞/h로 주행하여 상태 확인
- 배기팬 풀부하로 가동하여 이상유무 상태 점검
  - 본선 운행구간 지장물 등 이상 유무 확인
  - 흡입구 집진유량/유속 확인
- 쌍문터널 구배구간에서 정차 후 배기팬 풀부하시 기동상태 점검
  - 배터리 소모전류량 확인 및 개발차량 상태 점검



그림 187 개발차량 본선구간 집진 동작테스트

시험항목			측정값
배터리 전압		시운전 시작	683V
		시운전 종료	677V
배터리 전류	평탄선	주행(25km/h)	최대 20A
		배기팬 가동(5km/h)	최대 20A
		배기팬 기동전류	최대 40A
	구배	주행(25km/h)	최대 55A
		배기팬 가동(5km/h)	최대 44A
		배기팬 기동전류	최대 70A
운행시간		시작시간(12시39분)/종료시간(2시33분)	1시간 56분
작업시간		시작시간(1시32분)/종료시간(1시52분)	총 22분
		시작시간(2시02분)/종료시간(2시04분)	
운행 거리		총 8km	

3) 연구단 공인인증 시험 (2회 실시)

❍ 일 시 : 2019.5.11.(토) 22:00~익일 06:00

❍ 본선구간 운행 시나리오 : 사전협의된 시나리오를 기반으로 KTL 담당자 입회하에 진행

00:30분 : 창동차량기지 출발 → 노원역 입출고선 출차 → 00:40분 : 노원역 상선 출발 → 01:10분 : 미아역 500M 전 지점 도착 → 배기팬 작동 → 01:25분 : 미아사거리역 500M 이후 지점 도착 → 전기집진장치 작동 → 01:40분 : 당고개방향 출발 → 집진시험 실시 → 02:10분 미아역 500M 전지점 도착 → 02:30분 오이도방향 출발 → 배기팬 작동 → 03:00분 미아사거리역 500M 이후지점 도착 → 시험종료 → 03:20분 당고개방향 출발 → KTL 장비 회수 → 03:50분 창동차량기지 복귀 완료



그림 188 테스트 베드 공인인증시험

□ 시험 결과 : 저감 효율 33% 달성 확인 (연구단 공인인증 참조)

❍ 연구단 목표 달성으로 개발 차량의 미세먼지 제거효과 입증 완료

터널 내 미세먼지 저감 성능 33%, 전기 필터 효율 97%(PM2.5)이상

3. 주요 연구결과(성과)

(1) 연구개발 성과

가) 논문게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	The Stable Trajctory Tracking Control of a Skid-steered Mobile Platform with Dynamic Uncertainties	International Journal of Advanced Robotic System	Seungwoo Jeon, Wootae Jeong	https://doi.org/10.5772/61241	United States	SAGE Journals	SCI	2015.07
2	에어 블로어와 흡입기능을 가진 미세먼지 흡입시스템의 최적화	한국산학기술학회 논문지	정우태, 권순박, 고상원, 박덕신	17권 1호	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2016.01.31
3	코안다 효과를 이용한 에어 블로어와 흡입구의 유동 제어	한국산학기술학회 논문지	정우태	18권 3호	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2017.03.31
4	Computational Fluid Dynamic Modelling of Particle Charging and Collection in a Wire-to-Plate type Single-Stage Electrostatic Precipitator	Aerosol and Air Quality Research	Ji-Woon Park	AAQR-17-05-OA-0176	국외	AAQR (Aerosol and Air Quality Research)	SCI	2017.12
5	사이클론 전처리부를 지닌 터널집진차량의 집진효율 최적화	한국산학기술학회 논문지	정우태	19권 3호	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2018.03.31
6	터널 초미세먼지 제거차량의 흡진부 유동제어	제어로봇시스템학회 논문지	신지선, 정다해, 정우태	24권 9호	대한민국	제어로봇시스템학회	비SCI	2018.09

나) 특허 출원 등록

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국 명	출원			등 록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	공기분사 노즐과 흡입구가 일체로 모듈화된 철도궤도 집진 청소장치 및 이를 구비한 철도궤도 청소차량	대한민국	한국철도기술연구원	2015.03.03	10-2015-0029707				100%
2	지하철용 건식 미세먼지 포집 시스템	대한민국	서울교통공사	2015.04.14	10-2015-0052372	서울교통공사	2016.09.27	10-1662200	100%
3	축전지구동형 습식미세먼지집진차	대한민국	금천씨스템(주)	2015.04.16	10-2015-0053514				100%

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국 명	출원			등 록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
4	축전지구동형 건식미세먼지집진차	대한민국	금천씨스템(주)	2015.04.16	10-2015-0053513				100%
5	흡입 유도장치가 구비된 공기분사 노즐・흡입구 일체형 철도궤도 집진기, 이러한 철도궤도 집진기로 이루어진 철도궤도 청소장치 및 이를 구비한 철도궤도 청소차량	대한민국	한국철도기술연구원	2015.10.13	10-2015-0142777				100%
6	지하철용 미세먼지 원심 포집시스템	대한민국	서울교통공사	2015 11.06	10-2015-0155832	서울교통공사	2016.09.27	10-1662203	100%
7	철도차량변속추진시스템	대한민국	금천씨스템(주)	2016.04.01	10-2016-0039884				100%
8	집진철도차량의 집진장치	대한민국	금천씨스템(주)	2016.04.15	10-2016-0045853				100%
9	철도차량의 위치 검지 방법과 시스템	대한민국	서울교통공사	2016.04.06	10-2016-0042409	서울교통공사	2018.02.05	10-1827987	100%
10	철도차량용 미세먼지 제거장치	대한민국	서울교통공사	2016.12.14	10-2016-0170030	서울교통공사	2018.02.19	10-1831941	100%
11	철도차량 위치 측정 시스템 및 방법	대한민국	열림정보기술	2016.03.24	10-2016-0035544				
12	초미세먼지 제거용 공기정화 무동력 열차	대한민국	(주) 리트코	2016.11.24	10-2016-0157173	㈜리트코	2018.02.28	10-1835788	100%
13	듀얼원통형 회전집진장치에 의한 수집먼지 전처리부와 전기집진부를 구비한 철도궤도 집진청소차량	대한민국	한국철도기술연구원	2017.1.13	10-2017-0006185				100%
14	다중전원을 활용한 집진용 작업 차량의 전원관리 시스템	대한민국	서울교통공사	2017.11.03	10-2017-0146035	서울교통공사	2019.07.02	10-1997725	100%
15	자율 운행체를 이용한 도시철도 안전운행 시스템	대한민국	서울교통공사	2017.11.17	10-2017-0154114				100%
16	집진기능을 갖는 철도차량	대한민국	금천씨스템(주)	2017.11.16	10-2017-0152889				100%

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국 명	출원			등 록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
17	후방으로 누설되는 미세먼지를 제거하는 공기 정화 무동력 열차	대한민국	리트코	2017.11.27	10-2017-0159470	㈜리트코	2018.12.06	10-1928671	100%

다) 소프트웨어 등록

No	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	차량용 환경관리 시스템	2017.11.02	㈜열림정보기술	2017.11.09	C-2017-027606	㈜열림정보기술	100%
2	차량용 환경관리 시스템 V2.0	2018.12.05	㈜열림정보기술	2018.12.10	C-2018-037065	㈜열림정보기술	100%

라) 관련 보고서 목록 / 해당없음

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

① 1차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		1차년도 성과점검기준						양적지표 목표/달성
					질적성과지표		목표치	측정방법	검증방법	달성치	가중치	
3세부	A	미세먼지 제거차량 개발	A-1	차량기본설계	①	기초자료수집	5종	건수	조사보고서	5	1	특허: 출원 2/2 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
					②	개념설계	1 종	건수	개념설계서	1	1	
					③	기본설계	1 종	건수	기본설계서	1	2	
			A-2	고효율 흡진구조 기술개발 및 내환경 시험	①	제거차량 흡진 구조 사례분석	1건	국내외사례보고서 작성여부	보고서	1	1	특허: 출원 1/1 건 등록 건 논문: 1/2 건 시제품: 건 SW: 건
					②	흡진구조기술 요구사항분석	1건	기술요구사항 작성여부	보고서	1	2	
			A-3	초미세먼지 제거 차량 시험 평가	①	국내외도시철도 사례조사및분석	1건	조사분석 여부	보고서	1	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
					②	차량 제작사양	1건	제작사양서 여부	사양서	1	3	
	B	미세/초미세먼지 제거 시스템	B-1	미세먼지/초미세먼지 포집,저감 효율장치	①	기초설계 및 시험품 제작	1건	설계도면 작성 및 시험품 제작여부	설계도	1	2	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
			B-2	입자발생 장치개발	①	Fe 입자크기 측정	수nm~수um조절	SMPS로 측정	SEM, TEM 이미지분석	1	1	특허: 출원 1/1 건 등록 건 논문: 1/1 건 시제품: 건 SW: 건
					②	보고서	1건	논문참고	해외논문비교	1	1	
					③	Fe 입자특성 분석	수nm~수um조절	SMPS로 측정	SEM, TEM 이미지분석	1	1.5	
					④	미세먼지 입자특성분석	수nm~수um조절	SMPS로 측정	SEM, TEM 이미지분석	1	1.5	
	C	미세먼지 작업차량 환경관제 시스템	C-1	미세먼지 작업차량 환경관리 시스템	①	자료 조사 및 사양 확정	1건	보고서	보고서	1	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
					②	시스템 기본 설계	1건	보고서	보고서	1	1	
계										20	20	특허: 출원 4/4 건 등록 건 논문: 2/3 건 시제품: 건 SW: 건

② 2차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		2차년도 성과점검기준						양적지표 목표/달성
						질적성과지표	목표치	측정방법	검증방법	달성치	가중치	
3세부	A	미세먼지 제거차량 개발	A-1	상세설계 및 주요구성품개발	①	차량시스템상세설계	1 식	건수	시스템설계도	1식	2	특허: 출원 2/2건 등록 건 논문: 건 시제품: 11/11 건 SW: 건
					②	차량구성품 상세설계	1 식	건수	규격서, 도면	1식	2	
					③	차량 주요 구성품 시제개발	1 식	건수	시제품	1식	2	
			A-2	고효율 흡진구조 기술개발 및 내환경 시험	①	흡진구조 메카니즘 자유도	2건	흡진구조의 자유도	메카니즘 자유도(DOF)	2건	1	특허: 출원 1/1건 등록 건 논문: 1/1건 시제품: 건 SW: 건
					②	흡진구조 기본설계	1건	흡진구조 기본설계 도면 작성여부	설계도	1건	2	
					③	기본구조 먼지흡입 유동해석	1건	유동해석 결과서	보고서	1건	2	
			A-3	초미세먼지 제거 차량 시험 평가	①	현장시험 안정성 평가	1건	평가기준 적정성	평가기준서	1건	1	특허: 출원 2/2건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
						차량현장적용성 평가	1건	평가기준 적정성	평가기준서	1건	1	
	B	미세/초미세먼지 제거 시스템	B-1	미세먼지/초미세먼지 포집,저감 효율장치	①	시험품 제작 및 테스트	1건	공인시험	시험성적서	1건	3	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 1/1건 SW: 건
			B-2	양극성 하전 장치 개발	①	인가전압에 따른 하전특성분석	1건	보고서	해외논문비교	1건	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1/1건 시제품: 1/1건 SW: 건
					②	내부유동장 및 전기적 특성 분석	1건	보고서	해외 논문 비교	1건	1	
					③	하전수 평가	평균하전수 3 이상	Aerosol electrometer 를 이용한 측정	해외논문에서의 입자 하전수 비교	평균 하전수3 이상	1	
	C	미세먼지 작업차량 환경관제 시스템	C-1	미세먼지 작업차량 환경관리 시스템	①	구조설계서	1건	보고서	보고서 제출여부		1	특허: 출원 1/1건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
계											20	특허: 출원 6/6건 등록 건 논문: 2/2건 시제품: 13/13 건 SW: 건

③ 3차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		3차년도 성과점검기준						양적지표 목표/달성
					질적성과지표		목표치	측정방법	검증방법	달성치	가중치	
3세부	A	미세먼지 제거차량 개발	A-1	상세설계 및 주요구성품 제작	①	차량 구성품 상세설계	1 식	건수	규격서 도면	1 식	1	특허: 출원 1/0건 등록 건 논문: 건 시제품: 2/2 건 SW: 건
					②	차량 주요 구성품 시제개발	1 식	건수	시제품	1 식	2	
					③	차량구성품 제작	1 식	완성도	시험결과서	1 식	2	
			A-2	고효율 흡진구조 기술개발 및 내환경 시험	①	흡진구조 메카니즘 자유도	2	흡진구조의 자유도	시제품 구조 자유도	2	1	특허: 출원 1/1건 등록 1/0건 논문: 1/0건 시제품: 0/1건 SW: 건
					②	흡진구조 시제품제작	1건	흡진구조 장치 시제품	설계도	1건	2	
					③	흡입 유동가시화 시험 요구조건 작성	1건	시험요구조건 작성 여부	시험조건 보고서	1건	1	
			A-3	초미세먼지 제거 차량 시험 평가	①	차량시스템 및 구성품 현장성능 시험	1건	시험 절차서	시험결과서	1건	2	특허: 출원 1/1건 등록 1/2건 논문: 건 시제품: 건 SW: 건
					②	현차시험전 시험계획	1건	시험조건 제시여부	시험계획서	1건	1	
	B	미세/초미세먼지 제거 시스템	B-1	미세먼지/초미세먼지 포집,저감 효율장치	①	모듈,시제품 제작	1건	제작여부	시제품 제작보고서	1건	2	특허: 출원 0/1건 등록 건 논문: 건 시제품: 1/1건 SW: 건
					②	공인인증서 취득	1건	공인시험	시험성적서	1건	1	
			B-2	응집장치개발	①	전기적특성분석	1건	보고서	논문비교 및 시뮬레이션	1건	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1/1 건 시제품: 1/1 건 SW: 건
					②	최적화된 응집챔버 구조 및 크기 도출	1건	보고서	시뮬레이션	1건	1	
					③	입자특성분석	수nm~수um조절	SMPS로 측정	SEM, TEM 이미지 분석	수nm~수um 조절	1	
	C	미세먼지 작업차량 환경관제 시스템	C-1	미세먼지 작업차량 환경관리 시스템	①	시스템 상세설계 및 구현	1건	보고서	SW 제출	1건	2	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 건 SW: 1/1 건
계											20	특허: 출원 3/3 건 등록 2/2 건 논문: 2/1 건 시제품: 4/5 건 SW: 1/1 건

④ 4차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		4차년도 성과점검기준						양적지표 목표/달성
					질적성과지표		목표치	측정방법	검증방법	달성치	가중치	
3세부	A	미세먼지 제거차량 개발	A-1	시제차 제작	①	미세먼지집진시스템 제작	1 식	건수	시험결과서	1 식	2	특허: 출원 0/1 건 등록 1/0 건 논문: 건 시제품: 1/1 건 SW: 건
					②	미세먼지집진 차량제작완료	3량 1편성	댓수 성능	검사서	3량 1편성	3	
			A-2	고효율 흡진구조 기술개발 및 내환경 시험	①	흡진구조메카니즘유동가시화시험	1건	먼지유동을 시각화 여부	시험 보고서	1건	2	특허: 출원 건 등록 1/0건 논문: 1/1 건 시제품: 건 SW: 건
					②	내환경시험 요구조건 작성	1건	내환경시험요구조건 작성 여부	시험조건 보고서	1건	2	
			A-3	초미세먼지 제거 차량 시험 평가	①	차량시운전시험	1건	시험절차서	시험보고서	1건	1	특허: 출원 1/2 건 등록 1/0 건 논문: 건 시제품: 0/1 건 SW: 건
					②	차량성능평가	1건	성능기준(안) 작성	성능평가서	1건	2	
	B	미세/초미세먼지 제거 시스템	B-1	미세먼지/초미세먼지 포집,저감 효율장치	①	설치공사 및 시운전	1건	설치여부	보고서	1건	1	특허: 출원 1/1 건 등록 건 논문: 건 시제품: 1/1 건 SW: 건
					②	공인인증서 취득	1건	공인시험	시험성적서	1건	2	
			B-2	*고효율 하전 및 응집 성능 도출 및 평가*	①	고효율의 응집 챔버 구조 도출	1건	보고서	시뮬레이션	1건	1	특허: 출원 건 등록 건 논문: 1/1 건 시제품: 1/1 건 SW: 건
					②	고효율 하전 챔버 구조 도출	1건	보고서	시뮬레이션	1건	2	
	C	미세먼지 작업차량 환경관제 시스템	C-1	미세먼지 작업차량 환경관리 시스템	①	시작품제작 및 성능시험	1건	보고서	시연	1건	2	특허: 출원 건 등록 건 논문: 건 시제품: 1/1 건 SW: 1/1 건 운영지침: 건
계											20	특허: 출원 2/4 건 등록 3/0 건 논문: 2/2 건 시제품: 4/5 건 SW: 1/1 건 운영지침: 건

⑤ 5차년도

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		5차년도 성과점검기준						정량목표
					질적성과지표		목표치	측정방법	검증방법	달성치	가중치	
3세부	A	미세먼지 제거차량 개발	A-1	시험	①	시운전시스템 구축	1건		시운전계획서	1	1	특허 : 출원 건 등록 1/0 건 논문 : 건 시제품 : 건 S/W : 건
					②	시운전	목표성능	성능	시운전결과서	1	1	
					③	보완	1식	보완정도	보완결과서	1	1	
					④	시험평가	1식	성능	시험평가서	자체 시험	2	
			A-2	고효율 흡진구조 기술개발 및 내환경 시험	①	흡진구조메카니즘유동가시화시험	1건	먼지유동을 시각화 여부	시험 보고서	1	2	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 1/1 건 시제품 : 건 S/W : 건
					②	시제차량 내 환경 시험(집진 효율)	90%	작업환경 요소별 집진장치 효율	시험결과서	1	2	
			A-3	초미세먼지 제거 차량 시험 평가	①	기술실용화를 위한 정책제안	1건	정책 제안서	정책제안서 제출여부	1	2	특허 : 출원 건 등록 1/3 건 논문 : 건 시제품 : 건 정책제안: 1/1건
					②	기술경제성, 타당성분석	1건	기술실용화분석	분석서	1	1	
	B	미세/초미세먼지 제거 시스템	B-1	미세먼지/초미세먼지 포집,저감 효율장치	①	설치공사 및 시운전	1건	설치여부	보고서	1	1	특허: 출원 1/0 건 등록 0/1건 논문 : 건 시제품 : 건 S/W : 건
					②	공인인증서 취득	1건	공인시험	시험성적서	1	1	
			B-2	터널 내 유해입자 제거 시스템 개발 및 평가	①	통합시스템 내 유동 평가	입자손실 10%이내	보고서	시뮬레이션	1	1	특허: 출원 1/0 건 등록 건 논문 : 건 시제품 : 건 S/W : 건
					②	입자 하전수 및 크기	하전수3 이상 입자크기수 마이크론	SMPS로 측정	SEM, TEM 이미지 분석	1	1	
					③	입자포집효율 측정	포집효율상승20%	SMPS로 측정	이론과 비교 및 SEM, TEM 이미지 분석	1	1	
	C	미세먼지 작업차량 환경관제 시스템	C-1	미세먼지 작업차량 환경관리 시스템	①	테스트 베드 적용	1건	보고서	시연	1	1	특허 : 출원 건 등록 건 논문 : 건 시제품 : 건 S/W : 1/1 건 운영지침 : 1/1 건
						시험 결과 보고서	1건	보고서	보고서	1	2	
계											20	특허 : 출원 2/0 건 등록 2/4 건 논문 : 1/1 건 시제품 : 건 S/W : 1/1 건 정책제안: 2/2 건

나. 관련분야 기여도

가. 기술적 측면

현재 각 도시철도 운영기관은 물청소, 환기시설 필터 설치, 전동차 객실 내 필터 설치 등 실현가능한 모든 수단을 동원하여 지하 터널 구간의 미세먼지를 낮추기 위해 노력중이다. 이러한 기존 공기질 관리 방법과 병행하여 미세먼지 취약구간에 선택적으로 집중 투입할 수 있는 본 개발차량기술은 터널 내 집진 성능과 효율을 대폭적으로 향상 시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다. 서울교통공사에서 운영 중인 터널관리용 청소차량은 아래와 같다.

구 분	개발차량	고압살수차(2대)	분진흡입차(1대)
제 원	○길이 : 31m ○무게 : 87톤 ○구성 : 3량 1편성 ○작업속도 : 5~10km/h ○제작사 : 자체개발	○길이 : 18.5m/18.5m ○무게 : 60톤/58톤 ○물탱크용량 : 25톤/27톤 ○구성 : 1량 ○작업속도 : 6~10km/h ○제작사 : 자체(대동상공) ○도입시기 : 2006~2007년	○길이 : 47m ○무게 : 102톤 ○구성 : 4량 1편성 ○작업속도 : 2~10km/h ○제작사 : NEU(프랑스) ○도입시기 : 1994년
방 식	○동력 : 전기모터 추가 구매 시 호선별 유지관리 가능하나 통상 6개월 이내 예상, Hot Spot 구간 집중 투입 목적으로 개발	○동력: 디젤엔진 2대 보유 중으로 같은지점 6개월~1년에 1회	○동력: 디젤엔진 1대 보유 중으로 같은지점 6개월~1년에 1회
효과	전기집진장치의 특성으로 미세먼지 저감효과 높음	터널 구조물 전체에 물을 분사하여 수용성 미세먼지 입자의 저감효과 높음	선로 청소 목적으로 차량 운영 중이며, 미세먼지 저감효과는 일부(15~20%) 있는 것으로 자체 시험결과 확인하였으나 배기가스에 의한 2차오염 발생
단 점	충전시설 인프라 필요	물 적재량 제한으로 투입 구간이 제한적이며, 충분한 물분사가 어려워 배수로에 먼지가 건조된 상태로 유입될 수 있어 배수로 물분사를 위한 별도 물탱크차량 추가 투입필요	노후화로 인한 차량 유지관리 힘듦(수입차량)

미세먼지 관리를 위해 투입 가능한 기존 고압살수차는 위 표와 같이 미세먼지 저감효과는 높은 편이나 적재할 수 있는 물 용량의 제한이 있어 분사 가능한 구간의 제한(1~2개역)이 있고, 충분한 물분사가 이루어지지 않아 배수로에서 고인물이 다시 건조되어 미세먼지가 재 비산되는 문제가 있어 추가적으로 별도 배수로에 물분사용 물탱크차량을 투입하고 있는 실정이다. 고정된 형태의 전기집진설비에 대한 고정관념을 깨고 터널 내 미세먼지 발생원인과 철성분에 가장 효과적인 전기집진기술을 이동할 수 있는 전기 배터리차량에 탑재하여, 오염이 심한 지역을 우선 선택하여 작업할 수 있어 미세먼지 관리효율을 더 높일 수 있고 유지보수 구조를 단순화시켜 운영기관의 운영 부담을 줄일 수 있도록 하였다.

나. 경제적 · 산업적 측면

개발 된 미세먼지 제거차량의 개발비를 포함한 원가조사 결과는 47억 수준으로 충전시설과 기업의 이윤을 감안할 때 60억 수준(옵션축소에 따라 차량가격 변동가능)으로 판매가가 정해질 것으로 예상된다. 터널 내 청소를 위해 가장 최근에 차량을 도입한 베이징 지하철의 경우 약100억원에 건식 백필터 차량을 독일 Schorling社에서 2014년에 구입하였다. 뉴욕 지하철은 기존 서울교통공사와 비슷한 시기에 프랑스로부터 동종모델을 97억원에 구입하였으며, 현재 차량 노후화에 따른 개량계획으로 크기를 줄인 동일 사양의 차량을 도입 중에 있다. 해외 사례의 경우, 서울교통공사에서 운영 중인 분진흡입차량과 동일하게 건식섬유 백(Bag)필터 방식의 차량만 있으며 미세먼지 관리보다 선로청소에 목적을 두고 중국, 미국, 칠레 등의 운영기관에서 운용 중이다. 대만, 일본 등은 아직까지 도입사례가 없는 상황으로 개발 중인 차량의 가격경쟁력과 기술차별성은 충분할 것으로 판단되고 있다. 작년 이노트랜스 전시회 참가에서 대만, 중국, 인도 등에서 개발품에 대한 큰 관심과 에이전시를 통한 판매관련 문의가 많이 있어 국외 수요측면에서도 희망적인 상황이며 미세먼지 관련 터널 환경개선에 대한 관심과 변화가 유럽(독일, 프랑스 등)에서도 시작되고 있음을 알 수 있었다. 국내의 경우 하루 작업거리 15km(시속5km/h, 3시간) 성능의 현차량은 전국 지하철 노선 길이가 약750km를 감안할 때, 수요측면에서 지속적인 유지관리에는 40~50대가 필요하지만 기관별 예산 상황 등을 고려할 때, 10~20대가 최대 판매 대수 일 것으로 판단하고 있다. 외국 차량 대비 대당 10~40억원 정도의 비용절감과 유지보수에 대한 국내 기술지원 등 경제적 가치와 함께 공기질 개선에 대한 사회적 비용 편익을 감안한다면, 선로청소와 미세먼지 저감이 가능한 본 개발차량에 대한 경제적 성과가 충분한 의미가 있다고 판단된다.

초기 구매비용이 운영기관에 부담이 될 수 있으나, 현재 추진 중인 환경부 매칭펀드 지원사업과 지방자치단체의 연계 등을 통해 도입비용 부담을 경감시킬 수 있다. 철도분야를 비롯한 사회적 미세먼지 저감 기술에 대한 관심이 집중된 가운데, 강화된 미세먼지 관리기준을 만족하기 위한 다양한 기술과 연구개발이 이루어지고 있으며, 전폭적인 예산투자와 개선방법 모색에 집중된 현 상황을 고려할 때, 국내외 수요처를 대상으로 한 차량판매를 통해 기업의 이윤을 창출하고 산업계의 관심을 유도하여 확대된 시장을 개척할 수 있을 것으로 전망된다.

다. 사회적 측면

지하구간이 많은 도시철도의 경우, 역사 공기질 관리를 위해 터널 내 먼지 유입을 최소화 시키고 있으며 이용승객 위주의 관리에 초점을 맞추고 있다. 개발차량은 직접적인 터널 내 미세먼지 저감효과를 통해 유지보수와 시설공사를 위해 매일 투입되는 터널 내 작업자에게 개선된 환경을 보장할 수 있으며, 나아가 운영기관 전체의 공기질 개선에도 효과를 줄 수 있어 사회적 편익 증대 및 안전한 터널 환경을 위해 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

다. 목표 미달성 시 원인(사유) : 없음

5. 연구개발성과의 활용 계획

가. 기술수요처 대상 성과 알림 홍보 및 사업화 추진

비슷한 문제에 직면해 있는 전국 도시철도 운영기관의 경우, 해당 개발차량에 대한 충분한 구매 의사를 가지고 있는 것을 지속적으로 확인하여 왔다. 개발차량의 효율 입증과 적정 판매가격을 기준으로 사업화를 추진하여, 차량의 보급에 노력할 예정이다. 한편 사업화 시 재정 부담을 가지고 있는 각 운영기관의 상황을 고려하여, 국토부•환경부 등 주요부처와 지방자치단체 등의 예산 및 정책 지원을 요청하여 차량 도입을 활성화 할 수 있는 환경이 절실한 상황이다.

<주요 수요처 : 도시철도 운영기관>

구분	운영기관	노선수	역사수	영업거리(km)
1	서울교통공사	8	277	300.1
2	서울9호선	1	38	40.7
3	인천교통공사	2	56	58.5
4	신분당선주식회사	1	13	31.3
5	코레일공항철도	1	13	63
7	우이신설경전철(주)	1	13	11.3
8	부산교통공사	4	114	118.6
9	대구도시철도공사	3	91	81.9
10	광주도시철도공사	1	20	20.5
11	대전도시철도공사	1	22	22.6
	합계	23	657	748.5

위와 같이 지하구간이 포함된 750km 선로구간에 대한 주요 도시철도 운영기관들은 외부 유입과 내부 요인으로 발생되는 미세먼지 처리에 상당한 어려움을 호소하고 있어 향후 개발 차량의 개발 완료 여부를 지속적으로 문의 중에 있다. 서울교통공사의 경우 현재 차량의 개발 결과 및 성능 입증 상황에 따라 차량의 추가 구입이 가능하도록 서울시 등에 예산지원을 요청하여 미세먼지 저감 예산 계획에 반영된 상태이며, 미세먼지 저감을 위한 대책의 일환으로 연구성과가 지속 추진될 수 있도록 내부 방침 및 조직 등을 준비 중에 있다. 기술개발 검증 및 효과 입증이 완료됨에 따라. 최종 평가 이후에도, 지속적으로 기술수요처를 대상으로 성과 알림 홍보활동과 보급 사업화를 위해 노력할 예정이다.

나. 실용화 계획 및 향후 운영계획

○ 기술 이전 사업 추진

참여기관 대상 사업화를 위한 기술 이전 계약 및 사업추진 네트워크 체계를 구축하고 역할별 공급제작 및 사업화 시스템을 마련하고 아직까지 진출 기업이 없는 현재의 수요시장 선점에 주력하도록 할 계획이다.

○ 국내 철도 운영기관 대상 기술 보급을 위한 정책 제안

대부분의 도시철도 운영기관은 지방자치단체 산하로 건설부채·운영적자 등 재정 여건이 취약하여 정부지원 등 예산 지원 환경 없이는 불가능한 상황이다. 연구성과의 적극적인 실용화를 위해서는 현실적인 도입 필요성을 강조하고 환경부 지원정책 등 유관부서와 긴밀한 협조가 가능 하도록 정책적인 제안을 통해 해당 문제를 해결한다면, 성과활용목표를 달성할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

○ 서울교통공사 시제품 활용 계획 검토 및 대책 마련 : 예산 반영 및 계획 방침 수립 중

→ 차량 성능에 대한 입증자료를 토대로 서울시의 차량 구매예산 계획을 반영하였으며, 개발 차량 지속 운영을 통한 차량 현장 운용실적 확보 및 개선 요구사항 도출을 위해 방침 수립 및 계획을 진행 중에 있으며 시제품 활용을 다각도로 검토추진 중이다.

○ 실용화 과제 추진을 통한 프로토타입 시제품 성능 개선 및 현장 적용 기술 검증

이용승객의 안전을 최우선으로 하는 도시철도 현장 운영여건을 감안할 때 현재 프로토타입의 개발 차량을 실제 사용하기 위해서는 차량 공인시험 등 많은 제약과 검증과정이 필요한 상태이다. 추가적인 실용화 연구를 통해 개발차량의 표준화와 검증 작업, 기술개선 등을 실시하여 차량의 완성도를 높이고 경쟁력을 확보할 수 있도록 과제 종료시점에서 채택 및 추진 될수 있도록 노력하고자 한다.

6. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적

○ 연구실 안전 보안시설 및 장비 보유 - 소방시설 및 시건장치, 안전보호구 등
○ 연구실 외부 기관 안전점검 실시 : 연 1 회
○ 연구종사자 온오프라인 안전교육 실시 : 연 2 회 이상
○ 연구종사자 건강검진 실시 : 연 1 회
○ 문서 작성 : 연구실 출입대장, MSDS, 안전관리규정, 안전관리자 지정 등
:

7. 기타사항 : 해당 없음

8. 참고문헌 : 없음

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 철도기술연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

210㎜×297㎜[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]