제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "**터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터 시스템 개발**에 관한 연구“ 과제의 보고서로 제출합니다.

2014 . 09 .

주관연구기관명 : 아주대학교
주관연구책임자 : 홍민선
연 구 원 : 김순태
〃 : 박일건
〃 : 김범석
〃 : 정장현
〃 : 정동균
공동연구기관명 : ㈜평화엔지니어링
공동연구책임자 : 강호근
연 구 원 : 김홍래
〃 : 이한주
〃 : 김경수
〃 : 송민태
〃 : 박진석
공동연구기관명 : ㈜리트코
공동연구책임자 : 오주식
연 구 원 : 박진섭
〃 : 김시은
〃 : 류석제

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>R&D/
11기술혁신
A03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.05.29.~
2014.09.28</td><td>단 계 구 분</td><td>(3차년)/
(3차년)</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td rowspan="4">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용
촉매필터 시스템 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="3">세부과제명</td><td>주관</td><td colspan="3">터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터 시스템 개발</td></tr>
<tr><td>공동</td><td colspan="3">미세먼지 및 유해가스 처리 시스템 적용방안 평가</td></tr>
<tr><td>공동</td><td colspan="3">미세먼지 및 유해가스 처리장치 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>홍민선</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 16명
내부 : 16명
외부 : 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 634,000천원
기업 : 212,170천원
계 : 846,170천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">아주대학교
㈜평화엔지니어링 기술연구원
㈜리트코</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">수도프리미엄엔지니어링</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">기존의 터널 환기방식을 통한 공기질 개선 및 단순 입자상오염물질인 미세먼지(PM-10) 저감 개념에서 한 단계 더 나아가 터널 내 통행 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 장치를 개발하였고, 기 운영 터널에 개발 장치를 적용한 현장평가(logn-term monitoring)를 통해 실제 적용 가능성을 도출하였음.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">도로터널, 환기장치, 미세먼지(PM-10),
유해가스, 복합처리 장치, 대기질 거동</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Road Tunnel, Ventilation System, Particulate(PM-10), Flue Gas, Particulate and Flue Gas Control System, Fluxes of air pollutants</td></tr>
</table>

요약문

Ⅰ. 제목

○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터 시스템 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

○ 국내의 경우 2011년 기준 1,465개소의 터널이 건설되었고, 연장 길이는 1,053km로 2001년 528개소에 비해 약 2.8배 이상 증가하였고, 그 중 1km 이상의 장대터널은 17%인 254개소에 이르고 있고, 향후 꾸준히 터널 건설이 증가할 전망됨.

○ 이러한 터널 건설의 증가로 터널 내 대기오염 및 터널 출구 주변의 국지적 대기오염은 지속적으로 일어나고 있음.

○ 터널내의 대기오염물질농도를 대규모로 조사한 사례는 아직까지 없으나 일부 연구사례에서 살펴보면 “부산시 터널내 공기질 조사”(부산광역시 보건환경연구원, 2003)에서는 2003년 부산시 터널 내 NOx, CO 및 PM-10을 측정하였음.

○ “서울시 터널 내 휘발성 유기화합물질 방출특성”(서울특별시 보건환경연구원, 2009)에서는 남산 3호 터널과 홍지문 터널에서 VOC를 측정하였고, 이를 처리할 필요성이 대두되었음.

○ 따라서 차량으로 인하여 발생되는 도로 터널 내 먼지 및 유해가스는 터널건설의 증가와 함께 오염수준이 높아 질 것으로 보여 처리기술의 수요가 증대할 것으로 판단됨.

○ 이에 본 연구에서는 터널 내 차량에 의해 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 공정 및 장치를 개발하고자 함.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

1. 공용 터널 현장조사

○ 국내 터널 현황조사

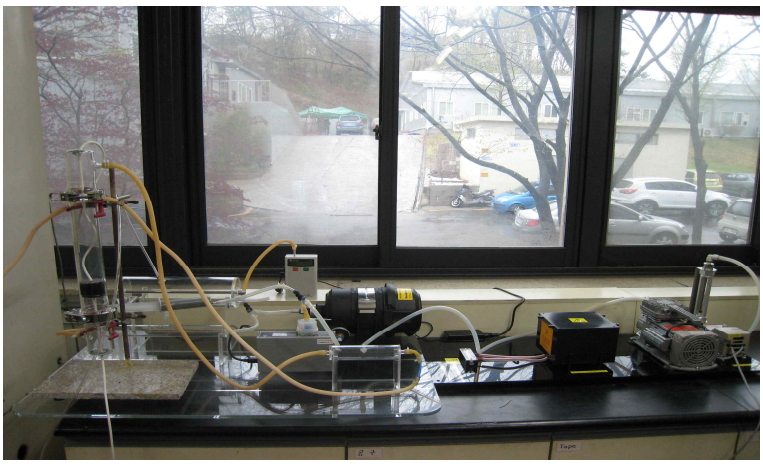
○ 터널 내 미세먼지 물리·화학적 특성 분석

○ 공용 터널 내 대기오염물질 현장 측정

○ 터널 내 대기오염물질 거동 특성 분석

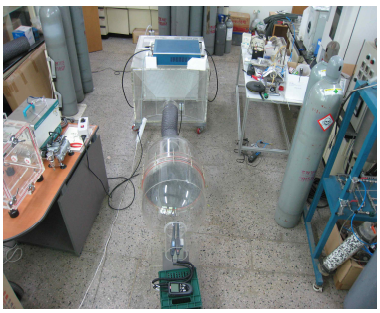
2. 미세먼지 및 유해가스 동시 처리장치 제작

○ 10L/min 규모의 동시 처리장치 제작(성능평가 수행)



○ 10m^3/min 규모의 동시 처리장치 제작(성능평가 수행)





○ 성능평가 수행 및 공정 최적화 도출

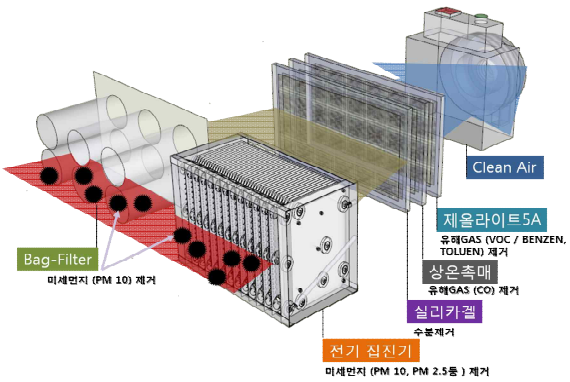
3. 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시스템 개발

○ 최적 저감기술 도출 및 적용 방안 연구

- 미세먼지 제거 모듈 : 전기집진기 & 여과집진기 Dual
- 유해가스 제거 모듈 : 상온촉매(CO) & 제올라이트(VOC)

○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 개발

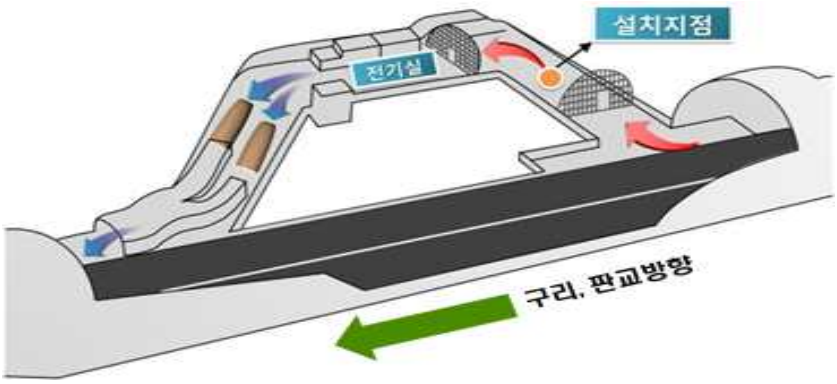
- 규격 : W 2.15m × D 2.10m × H 0.68m
- 용량 : 10m^3/min
- 시스템 구성 : 미세먼지 집진부 (전기집진/여과집진 Dual) + 유해가스 처리부 2단

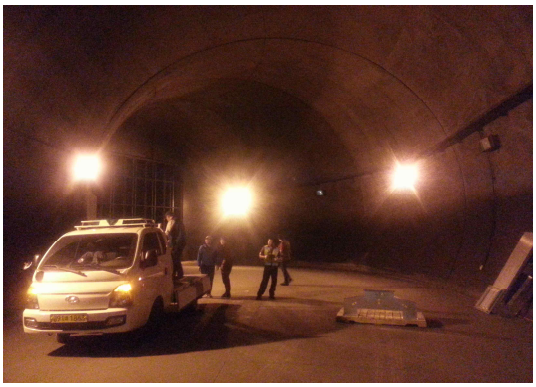




○ 시제품 현장적용 및 모니터링

- 서울외곽순환고속도로 수락산터널(구리방향) 내 바이패스 구간



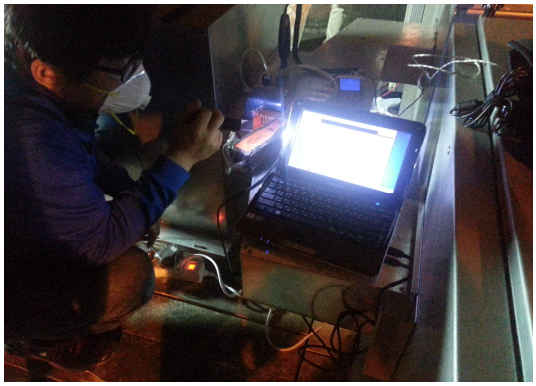


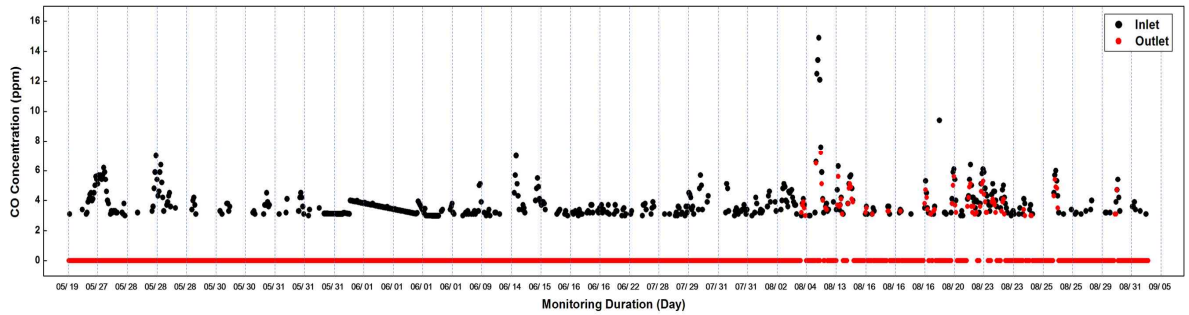


○ 성능 모니터링

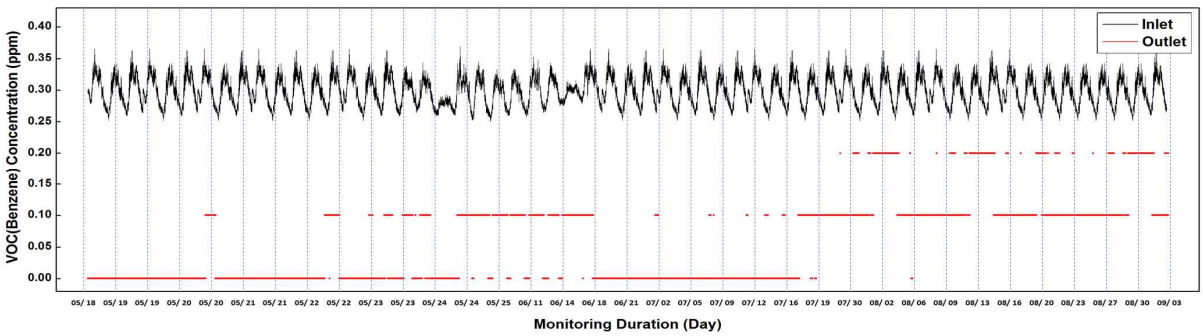
- 개발 시제품의 성능을 검증하고, 시스템의 최적화를 통한 터널 적용 가능성 평가 및 적용 기술 확보를 위하여 현장적용 모니터링을 수행하였음.
- 모니터링 기간 : 2014. 05 ~ 2014. 09
- 2주 간격으로 실시간 모니터링 data 확인 및 장비 점검
- data 분석을 통한 시스템의 최적화 및 적용 가능성 도출



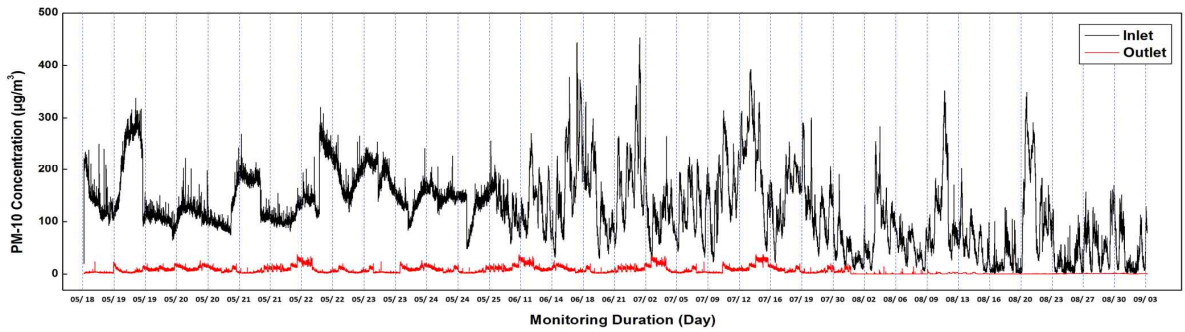




<일산화탄소(CO) 모니터링 결과>



<VOC 모니터링 결과>



<미세먼지 모니터링 결과>

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

○ 본 연구를 통해 도출된 최종 연구성과는 다음과 같음.

미세먼지 및 유해가스 처리 시스템 요소기술 개발

○ 터널 내 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 처리하기 위해 시스템의 최적화를 통한 터널 적용 가능성 평가 및 적용 기술 확보

미세먼지 및 유해가스 처리 시스템 도로 터널 적용 방안

○ 개발된 시제품에 대하여 공용중인 도로 터널에 적용·모니터링 하고, 실제 도로 터널 적용 시 적용할 수 있는 방안 수립

전기집진장치 핵심 유닛 적용기술 개발

○ 수입에 의존하던 기존 전기집진장치 국산화 기술 개발로 인한 초기 투자비 절감 및 유지관리 비용 최소화

미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 개발

○ 터널 내 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 복합적으로 처리함에 따라 터널 내 공기질 향상과 더불어 환경개선 및 설비·설계기술 국산화

미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 현장 적용

○ 개발된 시제품을 서울외곽순환고속도로 수락산터널(구리방향) 내 바이패스 구간에 설치하여 성능 검증

○ 실시간 모니터링 결과 미세먼지 및 유해가스(CO, VOC) 처리효율이 80% 이상으로 나타나 적용 가능성 도출

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	○ 유해가스(CO) 상온 처리용 시스템 선정	○ 최적시스템 선정을 위한 국내외 문헌자료 조사 ○ 유해가스 처리효율 도출을 위한 1L/min 규모의 반응기 제작 및 실험장치 구성 ○ 미세먼지 및 유해가스 처리효율 성능평가를 통한 최적 처리조건 도출	100%
2	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리 방법 및 현황조사	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 문헌조사・분석 ○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 농도분석 -미세먼지 특성 조사 ○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리방법 조사	100%
3	○ 국내외 미세먼지 및 유해가스 처리장치 현황 조사	○ 현재 국내외 터널에 적용되고 있는 미세먼지 및 유해가스 처리장치 시스템 현황 및 기존 터널 내 대기질 현황 조사 완료	100%
4	○ 미세먼지 및 유해가스 처리장치 최적사양 설정	○ 현황조사를 바탕으로 개발 가능한 시스템 사양 설정	100%
5	○ 유해가스 처리 시스템 개발	○ $10m^3$/min 규모의 유해가스 처리 장치 제작 -유해가스 처리장치 및 백필터 집진장치 제작 완료	100%
6	○ 미세먼지 및 유해가스 처리효율 향상을 위한 성능평가	○ $10m^3$/min 규모의 실험 장치를 이용한 실험 조건별 미세먼지 및 유해가스 처리효율 도출 ○ data 분석 및 연속운전을 통한 처리효율 향상을 위한 최적화 조건 도출	100%

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
7	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 특성 조사	○ 터널 유형별 현장조사를 통한 터널 내 미세먼지 및 유해가스 특성 조사・분석 -남산1호 터널, 구룡 터널, 우면산 터널, 수리 터널 현장조사 완료 -미세먼지 및 유해가스 농도 현황 조사・분석	100%
8	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리 장치 적용방안	○ 기존 터널 내 오염물질 제거 설비와의 경제성 분석 도출	100%
9	○ 전체 시작품 제작을 위한 구성 설계 작성	○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리장치 기초 설계도 작성 완료	100%
10	○ 미세먼지 필터 모듈 제작	○ 전기집진기 형태의 미세먼지 포집 장치 제작 -10m^3/min 규모의 전지집진 장치 제작 완료	100%
11	○ 터널 내 적용 가능한 복합장치 시스템 개발	○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 기술 개발 -미세먼지(PM-10) 처리 효율 : 97% 이상 -일산화탄소(CO) 처리 효율 : 80% 이상 -VOC(벤젠, 톨루엔) 처리 효율 : 80% 이상 ○ 흡착제 재생 성능평가를 통한 공정 최적화 도출 -VOC(벤젠, 톨루엔) 재생 성능 도출	100%
12	○ 모형 또는 소규모 터널 적용 및 모니터링	○ 시제품 성능검증을 위한 모형터널 적용 성능평가 완료 -미세먼지 및 유해가스의 처리 성능 검증 -시제품 성능검증을 통한 현장 적용 가능성 도출	100%
13	○ 실용화 가능한 시작품 개발	○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 개발 -규격 : W 2.15m×D 2.10m×H 0.68m -용량 : 10m^3/min	100%

Ⅵ. 연구성과 활용계획

○ 연구성과의 상용화·제품화를 위해 관련 분야의 기업과 컨소시엄을 구성하여 향후 사업화를 위한 방안을 모색함.

○ 개발기술의 해외진출을 위해 해외진출 희망 국내 건설사에 기술이전을 통해 해외사업 진출 지원이 될 수 있도록 기술을 제공함.

○ 연구논문 발표 및 기술 강습회를 통해 국내 터널 및 관련 시설 설계기술자들에게 기술 보급

○ 도로 터널 이외에 지하보도, 지하철(역사), 철도터널 등 지하공간의 대기오염물질 저감에 활용

○ 연구기관 자체 기술실시계약 추진 - 연구기관인 (주)리트코와 기술실시계약 추진

○ 기존 고속도로, 국도, 지방도, 도시부 도로의 터널 내 대기오염물질 저감 방안 수립 시 적용 될 수 있도록 마케팅 계획 수립

○ 향후 실용화 및 제품화 추진을 위한 추가연구 과제 제안

SUMMARY

Ⅰ. Title

○ Development of Catalyst and Filter System for Simultaneous Removal of Particulates and Gaseous Pollutants in the Tunnel.

Ⅱ. Purpose and Need of Research

○ During the last decade, air quality in and around tunnels are getting worse due to the increasing number of tunnels and vehicles running on the street.

○ The research works focuse on simultaneous removal of air pollutants, including particulates, carbon monooxide and volatile organic compounds in the tunnel by adopting air pollution control technology.

○ Control technology adopted are catalytic conversion, filtration and adsorption technology to remove CO, PM and VOCs, respectively.

Ⅲ. Contents and Range of Research and Development

○ Field investigation of tunnels.

- Air pollutants measurement in the tunnels.
- Prediction of temporal and spatial variation of air pollutants in the tunnel.

○ Bench and semi-pilot scale system for the removal of particulates and gaseous pollutants.

- Air volume : 10L/min and 10m^3/min
- Performance test and process optimization.

○ Development of catalyst and filter system for simultaneous removal of particulates and gaseous pollutants.

- Best Available Technology(BAT) derivation and application.
- Development of the prototype device for simultaneous removal of particulates and gaseous pollutants.
- The prototype device field application and monitoring.

Ⅳ. The plan to apply the result of research development

○ Developed system can be mounted in the road tunnels and underground commercial facilities to remove the above mentioned air pollutants.

CONTENTS

Chap. 1. Summary of Research and Development ····· 23
Section 1. Purpose and Necessity of R&D ····· 23
Section 2. Definition, Scope and Characteristics of R&D ····· 25
Section 3. Current Status of Domestic and Foreign Technologies ··· 26

Chap. 2. Contents and Results of Research & Development ··· 38
Section 1. Strategy and Methodology of R&D ····· 38
Section 2. Research Process and Contents(Theoretical, Experimental) ····· 41
Section 3. Verification Method of R&D Results ····· 42

Chap. 3. Application Cases of Achieved R&D Results ····· 142
Section 1. Indivisual Achievement of R&D ····· 142

Chap. 4. Achievement and Effect of R&D Results ····· 150
Section 1. Plan Versus Achievement ····· 150
Section 2. Analysis of Technical Effect of R&D Achievement ····· 152
Section 3. Analysis of Economic Effect of R&D Achievement ····· 152
Section 4. Analysis of Strategic Effect of R&D Achievement ····· 153

Chap. 5. Application of R&D Results and Necessity of Further Works ···· 154
Section 1. Further Application Method of R&D Results ····· 154
Section 2. Necessity of Further Investigation ····· 154

목차

제 1 장 연구개발과제 개요 ····· 23

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 23

1. 연구개발의 배경 ····· 23
2. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 24

제 2 절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 25

1. 연구개발의 정의 ····· 25
2. 연구개발의 범위 및 특징 ····· 26

제 3 절 국내·외 기술개발 현황 ····· 26

1. 국내 기술 및 시장 동향 ····· 26
2. 국외 기술 및 시장 동향 ····· 30
3. 특허 동향 ····· 34

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 38

제 1 절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 38

1. 연구수행 추진체계 ····· 38
2. 연구수행전략 ····· 39

제 2 절 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적) ····· 41

제 3 절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등 ····· 42

1. 터널 내 미세먼지 및 유해가스 현황 ····· 42
2. 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리기술 ····· 58
3. 터널 내 미세먼지 및 유해가스 발생 특성 ····· 75
4. 미세먼지 및 유해가스 동시 처리장치(10L/min) 제작 및 성능평가 ····· 92
5. 미세먼지 및 유해가스 동시 처리장치($10m^3$/min) 제작 및 성능평가 ····· 109
6. 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 개발 ····· 117
7. 모형터널 적용 성능평가 ····· 122
8. 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 현장적용 ····· 125
9. 시제품 현장적용 모니터링 ····· 132
10. 개발 시제품의 경제성 평가 ····· 136

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 142

제 1 절 개별 연구성과명 ····· 142

1. 개별 연구성과 설명 ····· 142
2. 핵심요소기술(Critical Technology Elements)별 성과물 ····· 143
3. 주요 연구성과 ····· 145
4. 기술 실시 및 적용사례 ····· 146
5. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 149

제 4 장 연구목표 달성 및 효과 ····· 150
제 1 절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 150
제 2 절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 152
제 3 절 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 152
제 4 절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 153

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 154
제 1 절 연구성과 향후 활용방안 ····· 154
제 2 절 추가연구 필요성 ····· 154

참 고 문 헌 ····· 155

<표 차례>

<표 1-1> 도시철도에 적용되는 미세먼지제거 시스템 ····· 28
<표 1-2> 국내 터널환기 관련 업체 현황 ····· 29
<표 1-3> 국내 터널 및 대기환경 전문가 현황 ····· 29
<표 2-1> 고속도로 장대터널 대기질 현황(각 터널 최고농도 기준) ····· 46
<표 2-2> 부산광역시 터널 내 대기질 현황 ····· 48
<표 2-3> 미세먼지 중금속 분석 결과 ····· 56
<표 2-4> 대기오염물질 저감기술 현황 ····· 58
<표 2-5> 미세먼지 저감기술 별 특성 ····· 58
<표 2-6> 질소산화물 저감기술 별 특성 ····· 59
<표 2-7> 황산화물 저감기술 별 특성 ····· 59
<표 2-8> 휘발성유기화합물 저감기술 별 특성 ····· 60
<표 2-9> 전기집진설비의 해외 적용사례 ····· 62
<표 2-10> Festings 터널 내 오염물질 처리 효율 ····· 64
<표 2-11> Kuko-kita 터널 내 산화 흡수·흡착 설비의 처리효율 ····· 66
<표 2-12> 케이힌지마 환기소 흡수·흡착 설비의 처리효율 ····· 66
<표 2-13> 한나터널 내 토양정화시설 설비 제원 ····· 69
<표 2-14> 한나터널 내 토양정화시설 설비 처리효율 ····· 69
<표 2-15> 터널 환기 방식 개요 ····· 70
<표 2-16> 종류식 환기 방식 ····· 71
<표 2-17> (반) 횡류식 환기 방식 ····· 74
<표 2-18> 국내 장대 터널 현황 ····· 75
<표 2-19> 남산1호 터널 대기질 측정 결과 ····· 77
<표 2-20> 우면산 터널 대기질 측정 결과 ····· 80
<표 2-21> 구룡 터널 대기질 측정 결과 ····· 83
<표 2-22> 수리 터널 대기질 측정 결과 ····· 86
<표 2-23> 유량 변화에 따른 CO 농도변화 및 처리효율 ····· 97
<표 2-24> 시간에 따른 미세먼지 입자크기별 농도변화 ····· 101
<표 2-25> VOC 성능평가 실험조건 및 처리효율 ····· 103
<표 2-26> 유량 변화에 따른 CO 농도변화 및 처리효율 ····· 105
<표 2-27> 시제품 사양 ····· 120
<표 2-28> 본 연구개발설비 설치비 및 유지관리비 소요금액 산정 ····· 136
<표 2-29> LCC 구성항목 ····· 137
<표 2-30> LCC 분석을 위한 실질할인 ····· 137

<그림 차례>

<그림 1-1> 연구개발의 필요성 ····· 25
<그림 1-2> 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 적용 시설 ····· 25
<그림 1-3> 전기집진기 구조 ····· 26
<그림 1-4> 터널 적용 전기집진기 구조 ····· 27
<그림 1-5> 전기집진 설비(터널 적용) ····· 30
<그림 1-6> 토양정화 설비 ····· 33
<그림 1-7> 터널 환기시스템 관련 특허 동향 ····· 34
<그림 2-1> 연구수행체계 ····· 38
<그림 2-2> 연구수행 추진전략 ····· 39
<그림 2-3> 연도별 국내 터널 건설 현황 ····· 42
<그림 2-4> 지역별 터널 현황(2010년 기준) ····· 42
<그림 2-5> 연도별 터널 연장별 국내 터널 현황 ····· 43
<그림 2-6> 터널 연장별 국내 터널 현황(2010년 기준) ····· 43
<그림 2-7> 국내 오염물질 환경 기준 ····· 44
<그림 2-8> 호주의 터널 내 대기오염물질 규제 기준 ····· 45
<그림 2-9> 도심지 터널 출구부에 설치된 환기시스템 ····· 45
<그림 2-10> 연도별 고속도로 터널 대기질 현황 ····· 46
<그림 2-11> 국외 터널 내 CO 농도 현황 ····· 49
<그림 2-12> 국외 터널 내 미세먼지 농도 현황 ····· 50
<그림 2-13> 터널 내 질소산화물(NO_2) 농도 현황 ····· 51
<그림 2-14> 터널 내부의 VOC 및 PAH 평균농도 ····· 52
<그림 2-15> 시간대별 VOC 농도 특성 ····· 53
<그림 2-16> 차량에 의해 배출되는 CO와 VOC의 상관성 ····· 53
<그림 2-17> 주행조건에 따른 차량 내 대기질 변화 ····· 54
<그림 2-18> 온도에 따른 미세먼지 질량변화(TGA) ····· 55
<그림 2-19> 측정지점별 미세먼지 중금속 분석 결과 ····· 56
<그림 2-20> 도로변 및 터널 내 미세먼지 SEM 사진 ····· 57
<그림 2-21> 전기집진기 구조 ····· 60
<그림 2-22> 터널용 습식 전기집진설비의 처리 계통도 ····· 61
<그림 2-23> 유럽식 전기집진기 ····· 63
<그림 2-24> 일본식 전기집진기 ····· 63
<그림 2-25> 산화 흡수·흡착설비 ····· 65
<그림 2-26> 산화 흡수·흡착설비의 시스템 구성도 ····· 67

<그림 2-27> 토양정화설비의 처리 원리 ····· 68
<그림 2-28> 토양정화설비의 시스템 구성 ····· 68
<그림 2-29> 남산1호 터널 전경 ····· 76
<그림 2-30> 반횡류식 개요도 ····· 76
<그림 2-31> 남산1호 터널 대기질 농도 현황 ····· 78
<그림 2-32> 우면산 터널 전경 ····· 79
<그림 2-33> 전기집진기 방식 개요 ····· 79
<그림 2-34> 우면산 터널 대기질 측정 현황 ····· 80
<그림 2-35> 우면산 터널 대기질 농도 현황 ····· 81
<그림 2-36> 구룡터널 전경 ····· 81
<그림 2-37> 반횡류식 개요도 ····· 82
<그림 2-38> 구룡 터널 측정 현황 ····· 83
<그림 2-39> 구룡 터널 대기질 농도 현황 ····· 84
<그림 2-40> 수리 터널 전경 ····· 84
<그림 2-41> 수리 터널 대기질 측정 현황 ····· 85
<그림 2-42> 수리 터널 대기질 농도 현황 ····· 86
<그림 2-43> 홍지문 터널 대기질 농도 현황 ····· 87
<그림 2-44> 분당-수서간 고속화도로 대기질 농도 현황 ····· 88
<그림 2-45> 터널 내 CO_2 농도 현장측정 결과 ····· 89
<그림 2-46> 모델모사에 적용된 터널 구간 세부모식도 ····· 90
<그림 2-47> 각 구간에서 실측 값과 모델 모사 값의 CO_2 농도 비교 ····· 91
<그림 2-48> 미세먼지 및 유해가스 동치처리 장치 개략도 ····· 92
<그림 2-49> 미세먼지 및 유해가스 동치처리 장치(전체구성도) ····· 94
<그림 2-50> 저온플라즈마 및 상온촉매 반응기, 집진기(HEPA Filter) ····· 94
<그림 2-51> 전원 공급장치 및 진공펌프 ····· 95
<그림 2-52> 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 실험장치 ····· 96
<그림 2-53> 유량 변화에 따른 CO 및 CO_2 농도변화 ····· 97
<그림 2-54> 유량 변화에 따른 CO 처리효율 ····· 97
<그림 2-55> 상대습도에 따른 CO 농도변화(R.H. 47% vs. R.H. 16%) ····· 98
<그림 2-56> 상대습도에 따른 CO 처리효율(R.H. 47% vs. R.H. 16%) ····· 98
<그림 2-57> 촉매 충진량에 따른 CO 처리효율(2cm vs. 3cm vs. 4cm) ····· 99
<그림 2-58> 촉매 충진량에 따른 CO 처리효율(2cm vs. 3cm vs. 4cm) ····· 99
<그림 2-59> 시간 변화에 CO 농도변화(R.H. 16%, 촉매 충진량 3cm) ····· 100
<그림 2-60> 미세먼지(PM-10) 포집효율 성능평가 실험장치 ····· 101
<그림 2-61> 시간에 따른 미세먼지 입자크기별 농도변화 ····· 102

<그림 2-62> VOC 처리효율 성능평가 실험장치 ····· 103
<그림 2-63> 시간 변화에 벤젠 농도변화 ····· 104
<그림 2-64> 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 실험장치 ····· 105
<그림 2-65> 유량 변화에 따른 CO 처리효율 ····· 106
<그림 2-66> VOC 처리효율 성능평가 실험장치 ····· 107
<그림 2-67> 제올라이트 흡착제를 이용한 벤젠 흡착 및 재생 ····· 108
<그림 2-68> 제올라이트 흡착제를 이용한 톨루엔 흡착 및 재생 ····· 108
<그림 2-69> 백필터 집진장치가 결합된 동시처리장치 ····· 109
<그림 2-70> 전기집진장치가 결합된 동시처리장치 ····· 109
<그림 2-71> 백필터 집진장치 ····· 111
<그림 2-72> 전기집진장치 ····· 111
<그림 2-73> 상온촉매 반응기 ····· 111
<그림 2-74> 동시처리 장치(좌 : 백필터, 우 : 전기집진기) ····· 112
<그림 2-75> 시간에 따른 CO 처리효율 ····· 113
<그림 2-76> 백필터 장치의 시간에 따른 미세먼지 농도 변화 ····· 113
<그림 2-77> 백필터 장치 처리 후 미세먼지 평균 농도 ····· 114
<그림 2-78> 백필터 장치의 미세먼지 처리효율 ····· 114
<그림 2-79> 전기집진 장치의 시간에 따른 미세먼지 농도 변화 ····· 115
<그림 2-80> 전기집진 장치 처리 후 미세먼지 평균 농도 ····· 115
<그림 2-81> 전기집진 장치의 미세먼지 처리효율 ····· 116
<그림 2-82> 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 개략도 ····· 119
<그림 2-83> 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치(시제품) ····· 120
<그림 2-84> 모형터널 적용 성능평가 ····· 123
<그림 2-85> 일산화탄소(CO) 처리효율 ····· 123
<그림 2-86> VOC 처리효율(좌: 벤젠, 우: 톨루엔) ····· 124
<그림 2-87> 미세먼지 처리효율(좌: 전기집진기, 우: 백필터) ····· 124
<그림 2-88> 수락산터널의 시간대별 교통량 ····· 125
<그림 2-89> 시제품 현장적용 모식도 ····· 125
<그림 2-90> 시제품 현장설치 전경 ····· 126
<그림 2-91> 터널 용 전기집진장치 수처리 설비 ····· 128
<그림 2-92> 현장적용 모니터링 ····· 132
<그림 2-93> 시간대별 교통량에 따른 PM-10 농도 변화 ····· 133
<그림 2-94> 시간대별 교통량에 따른 CO 농도 변화 ····· 133
<그림 2-95> 시간대별 교통량에 따른 VOC 농도 변화 ····· 134
<그림 2-96> 미세먼지(PM-10) 처리효율 ····· 134

<그림 2-97> 일산화탄(CO) 처리효율 ····· 135
<그림 2-98> VOC(벤젠) 처리효율 ····· 135
<그림 2-99> 기존 집진설비 설계도면 ····· 137
<그림 2-100> 전기집진기 설치 및 유지관리 금액 산정 ····· 137
<그림 2-10> 기존 설비와 본 연구개발 설비의 LCC 비교 ····· 140
<그림 3-1> 연구개발 Framework ····· 142

제 1 장 연구개발과제 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 배경

○ 우리나라의 대기오염 노출인구 중 조기사망비율이 0.09%로 프랑스 등 선진국에 비하여 높은 수준인 것으로 조사되었으며(연세대학교 환경공해연구소, 2000), 대기오염으로 인한 영아 사망률은 9% 증가하였고, 이 중 호흡기질환 사망률은 2배나 증가한 것으로 보고된 바 있음(이화여자대학교, 2002).

○ 이와 같은 대기오염으로 인한 사회적 피해비용은 연간 10조원으로 추정되며(KEI, 2002), 미국에서도 대기오염으로 인한 조기 사망자수는 교통사고 사망자수의 3배에 이르는 것으로 조사됨(US EPA, 1997).

○ 대기오염물질은 대부분 화석연료의 연소에 의해서 대기중으로 유입되는데 그 주요 배출원으로는 자동차, 발전, 난방 및 산업시설 등이 있으며 그 중 차량의 급격한 증가로 인하여 자동차로부터 배출량이 가장 많은 것으로 조사되고, 특히, CO(일산화탄소), NOx(질소산화물), PM-10(미세먼지) 등은 자동차로부터의 배출량이 절대량을 차지하고 있음.

○ 산업화 및 공업화에 의한 자동차 대수는 지속적으로 증가하고 있고 그에 따른 도로 및 터널의 건설도 함께 증가하고 있음. 근래에 건설되는 도로 사업은 고급화, 고속화를 목적으로 하여 산악지역 및 도심 통과구간 등에는 터널의 건설이 점증 하여왔음.

○ 근래에 들어서는 날로 증가되고 있는 도심지 교통량의 해소를 위한 방안으로 대심도 지하 교통시설을 추진하고 있으며, 서울시에서는 2009년 남·북축과 동·서축 각 3개 노선에 3×3 격자형의 연장 149㎞ U-smartway 지하도로 계획을 발표하여 추진 중에 있고, 부산시에서도 유사한 지하도로 건설을 계획하고 있음.

○ 터널 건설은 대규모 절토를 피할 수 있으며, 생태축 단절을 미연에 방지함으로써 생태계 보호 측면에서 많은 기여를 하고 있으나 대기오염 측면에서 살펴보면 터널내부에서 다수의 차량에 의해 배출된 오염물질이 터널의 출구를 통하여 집중적으로 배출됨으로서 터널 출구 주변 지역에 국지적으로 고농도 오염에 의한 피해를 야기 시킬 수 있음.

○ 앞에 기술하였듯이 도심지 교통량 해소를 위한 대심도 터널을 추진할 경우 도심 주거지에의 영향이 클 것으로 예측되며 출구쪽의 방지시설 필요성이 대두됨.

○ 그러나 아직까지 대기오염 측면에서 터널의 관리가 거의 이루어지지 않고 있으며, 현재 터널 건설시 설치되고 있는 대기오염물질에 대한 저감방안은 대부분 터널 내부에

초점이 맞추어져 환기의 개념에서 접근하고 있으며, 저감시설이 설치된 경우에도 터널 내부의 운전자 시야확보차원에서 먼지저감시설이 설치된 경우가 일부 있으나 차량에 의해 배출되는 가스상 오염물질에 대한 저감시설의 설치는 극히 제한적으로 이루어지고 있는 실정임.

○ 따라서, 터널시설에서의 대기오염물질의 외부 유출에 대한 처리공정개발이 필요하며, 특히 기존 미세먼지와 함께 처리가 어려운 대기오염물질인 CO(일산화탄소) 및 VOC(휘발성유기화합물) 처리가 가능한 복합공정개발이 시급한 실정임.

2. 연구개발의 목적 및 필요성

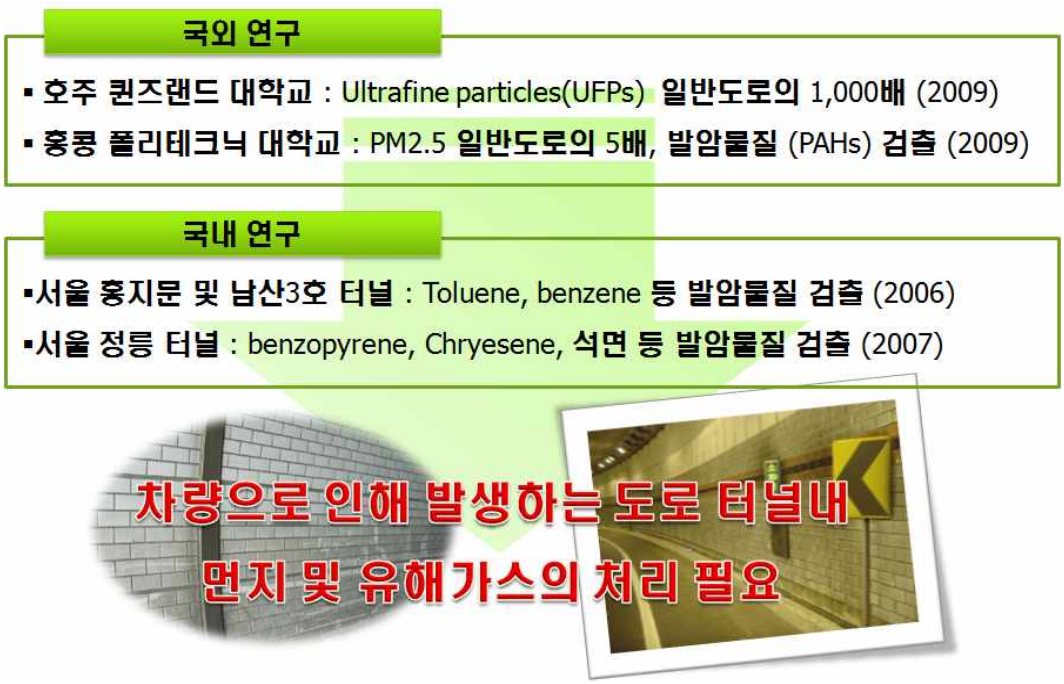
○ 국내의 경우 2011년 기준 1,465개소의 터널이 건설되었고, 연장 길이는 1,053km로 2001년 528개소에 비해 약 2.8배 이상 증가하였고, 그 중 1km 이상의 장대터널은 17%인 254개소에 이르고 있고, 향후 꾸준히 터널 건설이 증가할 전망됨.

○ 이처럼 터널 건설의 증가로 터널 내 대기오염 및 터널 출구 주변의 국지적 대기오염은 날로 점증하고 있어 터널 내 오염물질 관리가 중요하게 대두되고 있음.

○ 터널내의 대기오염물질농도를 대규모로 조사한 사례는 아직까지 없으나 일부 연구사례에서 살펴보면 “부산시 터널내 공기질 조사”(부산광역시 보건환경연구원, 2003)에서는 2003년 부산시 터널 내 대기오염물질을 조사하였으며 그 결과 주로 NOx와 CO 및 SO_2가 검출되었으며, 특히 VOC가 터널 외부 대기질 보다 높게 검출되어 처리할 필요성이 있는 것으로 판단되었고, “서울시 터널 내 휘발성 유기화합물질 방출특성”(서울특별시 보건환경연구원, 2009)에서는 남산 3호 터널과 홍지문 터널에서 VOC가 검출되었음.

○ 따라서 차량으로 인하여 발생되는 도로 터널 내 먼지 및 유해가스는 터널건설의 증가와 함께 오염수준이 높아 질 것이며, 터널 시설에서의 대기오염물질의 외부 유출에 대한 처리 공정개발이 필요하며, 특히 기존 미세먼지와 함께 처리가 어려운 대기오염물질인 CO(일산화탄소) 및 VOC(휴발성유기화합물) 처리가 가능한 복합공정개발이 시급한 실정임.

○ 이에 본 연구에서는 터널 내 차량에 의해 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 공정 및 장치를 개발하고자 함.

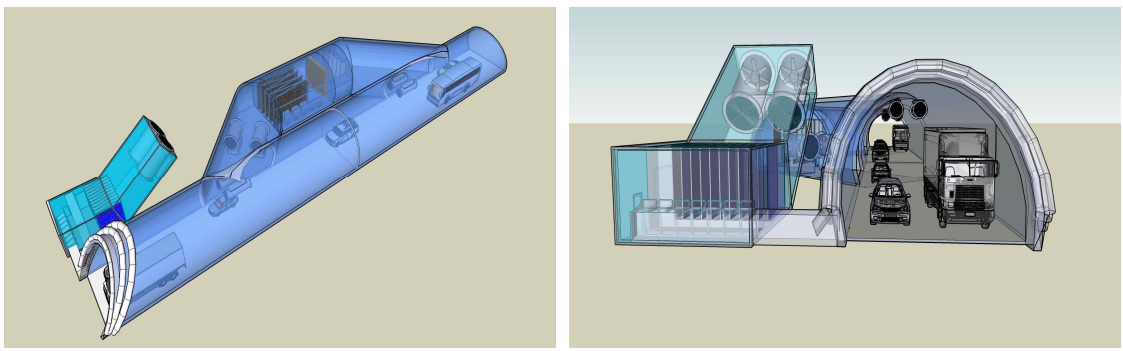


<그림 1-1> 연구개발의 필요성

제 2 절 연구개발의 정의, 범위, 특징

1. 연구개발의 정의

○ 본 연구는 “터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터 시스템 개발” 일환으로 기존 터널 환기방식을 통한 공기질 개선 및 단순 입자상오염물질인 미세먼지(PM-10) 저감 개념에서 한 단계 더 나아가 터널 내 통행 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 장치를 개발하였고, 기 운영 터널에 개발 장치를 적용한 현장평가(logn-term monitoring)를 통해 실제 적용 가능성을 도출하여 실용화를 추구하는 과제임.



<그림 1-2> 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 적용 시설

○ 도심지 교통량 해소를 위한 대심도 터널 건설을 추진할 경우 환기를 통해 외기로 배출되는 오염물질로 인해 주변 지역에 영향이 높아 환기시설과 더불어 방지시설 설치 필요성이 대두되고 있음.

○ 본 연구개발 성과품은 도심부 및 고속도로 터널 내 대기오염물질 저감을 위해 설치·적용이 가능하고, 이에 따라 터널 내 대기질 개선에 효과적으로 활용될 수 있음.

2. 연구개발의 범위 및 특징

○ 본 연구는 터널 내 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 처리할 수 있는 기술과 이를 적용할 수 있는 장치를 개발하는 것임.

○ 이에 따라, 본 연구에서는 터널 내 발생되는 미세먼지 및 유해가스(일산화탄소, 휘발성유기화합물) 처리가능 공정 메카니즘 확보와 터널 내 대기오염물질 발생 특성을 도출하여 적용 가능한 동시처리 복합장치 개발을 통한 적용성 평가를 연구방향으로 설정함.

제 3 절 국내·외 기술개발 현황

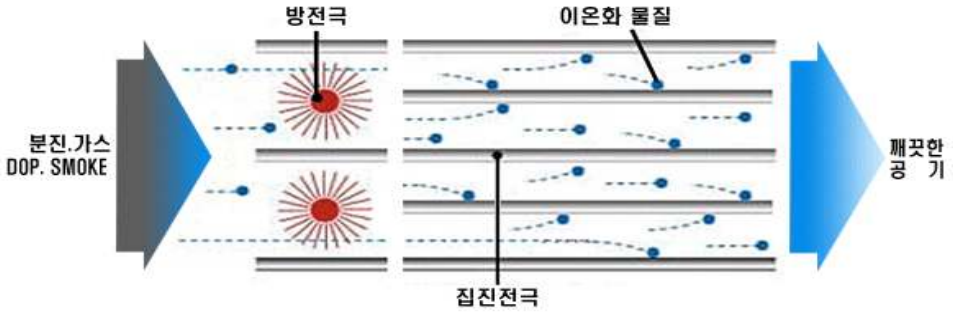
1. 국내 기술 및 시장 동향

1.1 국내 터널 내 미세먼지 제거 기술

○ 국내의 터널 대기 중 미세먼지 제거 기술은 외국기술을 들여와 국산화한 정도수준임.

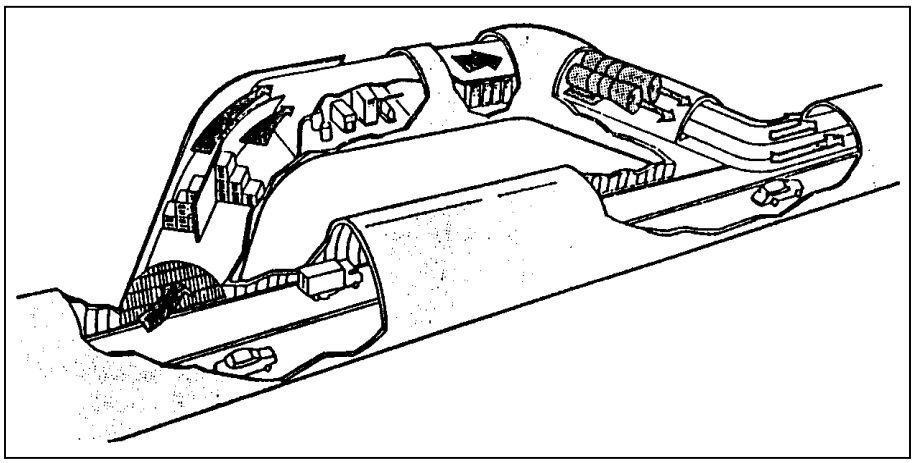
○ 국내 터널에서는 대부분 전기집진기를 이용한 먼지 저감 기술이 활용되고 있음.

○ 그림 1-3은 전기집진기의 구조를 나타낸 것으로 전기집진기는 직류고전압에 의한 코로나 방전에 의해 입자를 대전시켜 전계에 의한 정전방식을 이용하여 집진하는 것을 말함.



<그림 1-3> 전기집진기 구조

○ 현재 터널에 적용되는 전기집진기는 효율은 상대적으로 우수하나 그림 1-4에 제시된 바와 같이 by-pass 터널의 규모가 크기 때문에 공사비 및 유지관리비용의 소모가 많음.



<그림 1-4> 터널 적용 전기집진기 구조

○ 지하철 터널 및 역사에서는 이러한 전기집진기 방식 이외에 UV-광전자 공기청정기 및 자동 세정형 필터 등이 적용되어 사용되고 있음.

○ 도시철도 등에서 이용하는 방식은 대부분 미세먼지(PM-10)을 제거하는데 초점이 맞추어져 있으며, 도로 터널에서 발생하는 유해가스와 성분이 달라 도로터널에 적용에는 한계가 있음.

<표 1-1> 도시철도에 적용되는 미세먼지제거 시스템

구분	UV-광전자 공기청정기	Auto Air Filter	자동세정형 Filter	Auto Roll Filter	2단하전식 전기집진기	자동세정형 전기집진기
구조						
원리	◦ 일반분진은 Pule Plasma 고전압에 의하여 하전을 띤 입자로 집진판에 부착되어 세정수에 의하여 제거되며, 유해가스 오염물은 UV-TiO_2 광촉매의 Radical 반응에 의하여 입자화되어 제거됨.	◦ 구동모터가 가동하면 흡입노즐이 오염된 여재면을 상하좌우로 이동, 고압으로 흡진하여 Vacuum에 포집시켜 재생함. ◦ 한대의 Bag Filter Type집진기 또는 수여과 집진기에 여러대의 Filter Unit를 순차적으로 자동 재생함.	◦ 물리적 포집기능의 Demister 또는 정전력에 의한 포집기능을 갖춘 무전원 정전 Filter를 경사지게 설치하고, 분사Nozzle을 체인과 구동모터로 좌우 이동하며 물을 분사하여 자동적으로 세정 재생함.	◦ 차압과 Timer에 의해 Roll이 Geared Motor구동으로 회전하여 오염된 여재를 자동적으로 권취시켜 깨끗한 여재로 변경하여 포집함.	◦ 직류 12kV의 전압이 하전되고 있는 Ionizer의 코로나 방전으로 방전부를 통과한 Dust 입자가 양이온화 된다. ◦ 이렇게 하전된 입자는 집진극 판으로 들어가 접지극판(-)과 직류 6kV의 양극판(+)에 의해 생긴 강력한 전장의 영향으로 접지극판에 포집됨.	◦ 1차 집진부에 있는 Tungsten Wire에서 고압으로 Dust 및 오염물질들을 Ion화하여 1차 집진부인 대전판에서 1차포집을 하며 1차에서 포집하지 못한 미세먼지는 2차 집진판을 통하여 포집함. ◦ 1차에서 포집된 Dust 및 오염물질은 물을 흘려 내려보내어 세척함.
작동방법	◦ Timer에 의해 고전압부, UV 집진부, 집진 Cell이 자동 운전되며, 집진부의 회전에 의하여 항상 깨끗한 집진부가 Setting.	◦ 차압 또는 Timer에 의해 잔공 Blower가 작동하고 순차적으로 배관 Valve가 열려 Suction 구동부가 작동	◦ Timer에 의하여 작동하며 공조기와 연동하여 On·Off 됨.	◦ 차압 및 Timer에 의한 작동	◦ 공조기와 연동하여 On·Off	◦ Timer에 의하여 작동하며 공조기와 연동하여 On·Off 됨.
집진부	◦ 절연처리된 Al Plate	◦ 난연처리된 합성섬유 ◦ 유모직물포	◦ 정전식 Pre Filter ◦ Demister	◦ Glass Fiber ◦ Polyester	◦ AL Plate	◦ AL Plate
통과풍속	◦ 2.5㎧	◦ 2.5㎧	◦ 2.5㎧	◦ 2.5㎧	◦ 2.5㎧	◦ 2.5㎧
압력손실	◦ 10㎜Aq이하	◦ 초기12 ◦ 말기 20㎜Aq	◦ 8㎜Aq ◦ 3㎜Aq	◦ 12㎜Aq ◦ 20㎜Aq	◦ 2㎜Aq	◦ 4㎜Aq
효율	◦ ASHRAE 90% 이상	◦ AFI 75%	◦ AFI 90% ◦ AFI 85%	◦ AFI 85%	◦ NBS 90% 이상	◦ NBS 90% 이상

1.2 터널환기 관련 업체

○ 국내 터널환기 관련 업체를 살펴보면 다음과 같음.

<표 1-2> 국내 터널환기 관련 업체 현황

업체명	기술수준 및 특징	비 고
그린컨기술	○환기통로가 있는 아치형 도로터널	환기설비
리트코	○터널 전기집진기 및 Gas Cleaner 시스템	환기설비
케이아이씨	○터널 전기집진기 및 탈질설비(일본기술 제휴)	환기설비
비엔텍아이엔시	○터널환기설비 설계 및 모델링	터널설계
범창종합기술	○도로터널 환기 및 방재설비 설계, 위험성 분석 등	터널설계

1.3 터널 및 대기환경 전문가

○ 국내 터널 및 대기환경 전문가를 살펴보면 다음과 같음.

<표 1-3> 국내 터널 및 대기환경 전문가 현황

전문가	소속기관	기술개발 현황	수준 (국외대비)
배규진	한국건설기술연구원	○터널시공신소재 개발, 재해예방, 한국형 터널공법 등	100%
문현구	한양대학교	○터널안정성 평가, TBM굴편율평가, 암반 불연속체해석 등	100%
김창용	한국건설기술연구원	○터널안정성해석, 턴러설계기준 및 지침 등	90%
전석원	서울대학교	○TBM 굴착해석, 터널 안정성 평가 등	90%
홍민선	아주대학교	○대기오염방지공학, 온실가스 저감 및 처리기술, 대기오염물질 모델링 등	100%
장영기	수원대학교	○대기오염물질 발생량산출	100%

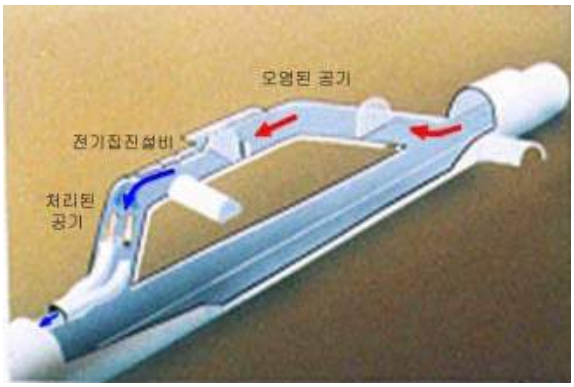
2. 국외 기술 및 시장 동향

○ 국내의 터널 내 대기오염물질 방지설비는 외국기술의 수입정도에 그치고 있으며 그 방식을 살펴보면 다음과 같음.

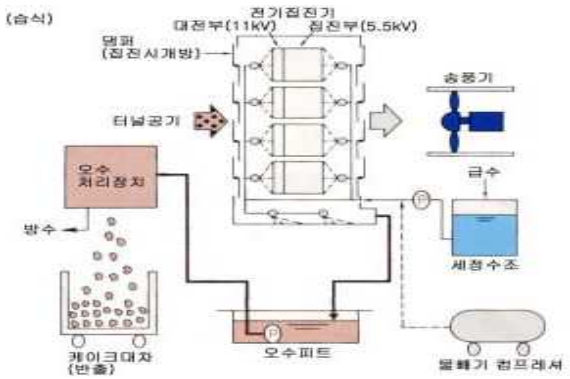
2.1 전기집진 설비

○ 전기집진설비는 터널 내 차도공간의 오염공기 중 매연의 일부를 제거하여 터널 내 환경을 개선하도록 하기위한 설비로서 터널내부에서 발생된 입자(분진, 매연)를 집진실로 유인 후 강한 전압으로 하전 되어있는 이온샤워공간을 통과시키면 입자를 유도 포집하는 방식임.

○ 그림 1-5는 유럽과 일본에서 현재 실용화되고 있는 대표적인 전기집진 설비로서, 두 방식에는 여러 차이점이 있으나 유럽식에는 중력필터가 추가적으로 설치되어 있음.



<전기집진기의 개념도>



<터널용 전기집진설비의 처리계통도>



<유럽식 전기집진기 개요>



<일본식 전기집진기 개요>

<그림 1-5> 전기집진 설비(터널 적용)

○ 현재 실용화되고 있는 전기집진설비는 크게 유럽식과 일본식으로 구분할 수 있으며, 두 방식에는 여러 차이점이 있으나 유럽식에는 중력필터가 추가적으로 설치되어 있음.

○ 유럽식은 터널 내 가시거리에 영향을 미치는 0.1㎛ 이하의 입자상 물질에 대한 집진 효율이 우수하며, 구동부가 거의 없기 때문에 고장 발생율이 적고, 집진 Cell이 고장 났을 경우 Cell 단위 교체가 가능하므로 유지보수가 용이한 장점이 있으나, 압력손실이 커 동력비가 증가함으로써 유지관리비가 높은 단점이 있음.

○ 현재 국내에서는 진부터널의 상행성에 설치되어 있으며, 노르웨이(Oslo 터널), 독일(ELbe터널), 스웨덴(Stockhole Ring) 등에 다수 설치되어 가동되고 있음.

○ 일본식은 압력손실이 작고 2계열로 나누어져 있어 1계열이 고장시 다른 1계열의 작동으로 대체할 수 있나 유럽식에 비하여 초기투자비가 높으며, 세척주기가 짧아 동력비가 다소 증가하는 단점이 있음.

○ 현재 국내에는 설치되어 있지 않으며 일본의 오리가봉터널, 해나산터널 등에 설치·가동중에 있음.

○ 이러한 전기집진설비는 비교적 시공성이 우수하고 자연훼손이 적은 장점을 갖고 있으나, 터널 내 입자상물질(먼지)만을 제거하기 때문에 입자상 물질에 대한 터널로 부터의 배출량을 감소시킬 수 있으나, 가스상 오염물질의 터널 내 농도에는 영향을 주지 못함.

2.2 Twin System

○ 환기공기 중 NOx 처리를 위하여 개발된 Twin system은 1992년 노르웨이 ABB ALSTOM POWER A/S 와 노르웨이 도로공단이 가스정화에 대한 연구를 시작하여 노르웨이 오슬로의 Festings 터널에 가스정화 시험설비를 설치하였음.

○ 전기집진기와 광촉매를 이용한 NOx 처리로 구성되어 있어 Twin system으로 알려져 있으며, 장기간 사용시 NOx 처리효율 저하를 위하여 활성탄 필터를 추가적으로 설치한 설비임.

○ 이 설비는 2000년 세계 최장 터널(24.5㎞)인 노르웨이 Laedal 터널에 설치되어 운영되고 있음.

○ 이 설비는 3단(전기집진기-촉매필터-활성탄필터)으로 구성되어 있어 초기 설치비가 상당히 고가이며, 주로 NO_2 형태의 질소산화물을 처리하므로 터널내부에서 질소산화물인 NO를 오존 등을 통하여 전처리로 산화시켜 NO_2 형태로 전환하여야 하며, 장시간 사용 후 필터 등에 막힘 현상이 발생할 수 있으므로 필터 교체비용 및 유지관리비용이 타 설비에 비하여 높은 편임.

2.3 산화 흡수・흡착 설비

○ 환기가스 중 NOx를 오존주입과 전자선조사를 병행하여 전처리하여 NO를 NO_2로 산화시켜 활성탄에 흡수・흡착시키는 설비임.

○ 1996년 일본 Metropolitan Express Bay Shore Route KuKo-Kita 터널 Keihinjima 환기소에 설치하여 가동 중에 있으며, 흡수・흡착 설비는 분진이 촉매반응을 저해하는 것을 방지하기 위하여 NO_2 정화기 상부에 전기집진기를 필수적으로 설치하여야 함.

○ NOx의 평균처리효율은 83~97%로 우수하며, 여러 가스상 오염물질을 동시에 처리할 수 있는 장점이 있으나 설비보호를 위하여 전처리 장치로 전기집진장치를 설치하여야 하며, 후처리 장치로 SCR을 설치해야 하는 등 설치비용이 높으며, 흡수탑의 유지관리 비용이 상당히 높은 것으로 판단됨.

○ 이와 유사한 설비로서 일본 수도고속도로 연안선 공항북터널 케이힌지마 환기소에 설치되어 가동중에 있음.

○ 이 설비는 흡착시스템과 흡수시스템으로 구성되어 있으며, 특수하게 제작된 MC벌집에 의해 대기 중의 유해한 NO_2를 제거하는 시스템으로 MC벌집(NO_2 흡수제)를 이용해 자동차의 배기가스에 포함되는 NO_2를 효과적으로 제거하여 정화된 공기를 터널 외부로 배출하는 시스템임.

○ 오염물질의 처리효율은 NOx는 80%, PM-10은 98%로 조사되었음. 이 흡수・흡착설비는 상온・상업의 조건에서 오염물질을 화학적으로 흡수・제거하므로 유해한 2차 오염물질 생성을 억제하며 컴팩트한 설비로 설치비용 및 유지관리비가 적은 장점이 있음.

○ 반면 앞서 언급한 흡수・흡착설비와 같이 전처리를 위한 전기집진기와 질소산화물을 NO_2형태로 전환해주어야 하는 설비가 필요하며, 흡수액(KOH)의 지속적인 보충이 필요한 단점이 있음.

2.4 건식흡착 설비

○ 터널에서의 환기가스를 흡착층에 통과시켜 질소산화물을 제거하는 설비로서 특수한 흡착제를 이용함.

○ 이 흡착제는 흡착제 표면에서의 산소와 가스상의 NOx를 반응시키는 촉매작용을 하며, NOx를 산화적으로 흡착하고, 동시에 산화적으로 흡착된 NO와 가스상의 NO를 반응시켜 복합물을 형성시키며, 최종적으로 활성 주변의 알카리로 복합물을 안정시키는 공정으로 구성되어 있으며 현재까지 적용된 사례는 없음.

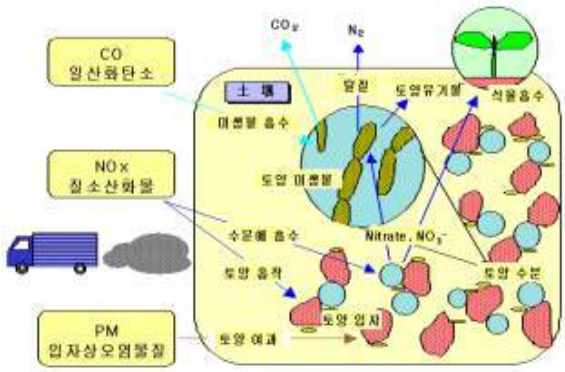
2.5 토양정화 설비

○ 토양정화설비(EAP, Earth Air Purifier)는 일본 오사카에서 도로변 자동차 오염저감 시설로써 개발되었으며, 저농도 자동차 배출가스가 토양층을 통과하면서 물리적·생물학적으로 처리되는 공정을 갖고 있음.

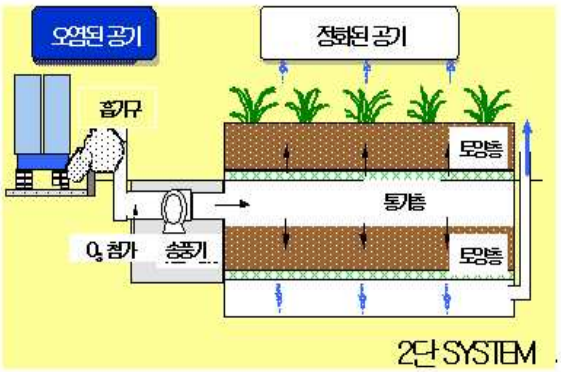
○ 토양정화설비는 가스상 물질 뿐만 아니라 입자상 물질도 토양의 필터작용에 의해 제거 가능하므로 전처리장치로써 전기집진기가 불필요하며, 초기가공비가 타 설비에 비해 저렴함.

○ 실증 실험결과 질소산화물의 처리효율이 90%이상을 나타냈으며, 기타 다른 유해가스 및 먼지 제거율도 우수한 것으로 조사되었음.

○ 다만, 이 설비는 처리기간이 오래 걸리며, 별도의 부지가 필요한 단점이 있음.



<토양처리설비 처리 원리>



<토양처리설비의 시스템 구성도>



<일본 오사카 한나터널 토양처리설비 전경>

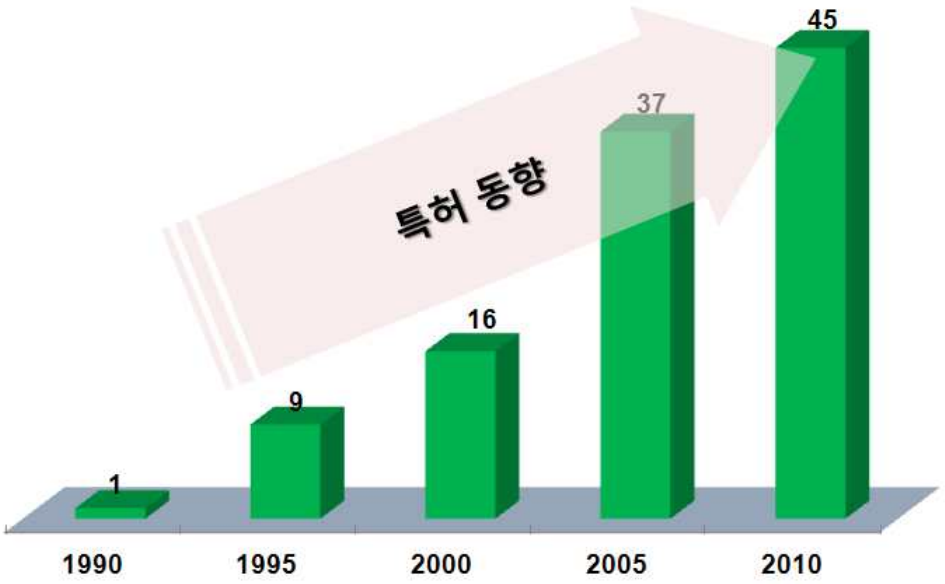
<그림 1-6> 토양정화 설비

3. 특허 동향

○ 터널환기 시스템에 대한 국내특허는 1990년 이후 총 108개로 지속적으로 늘어나고 있는 추세에 있음.

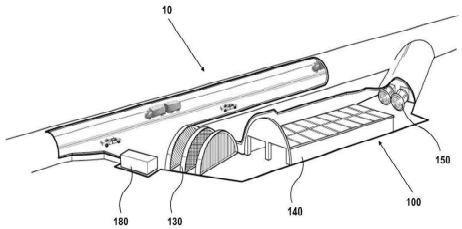
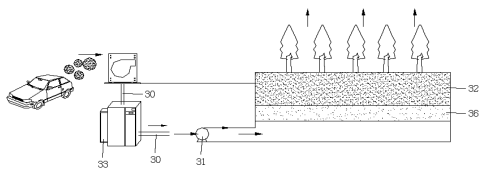
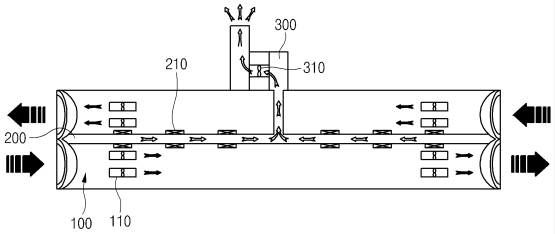
○ 2000년 이후 기술개발이 활발히 이루어지고 있어 현재 지속적으로 개발이 확대 될 것으로 예상됨.

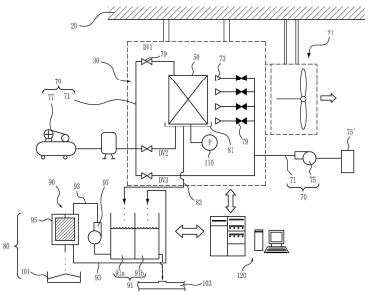
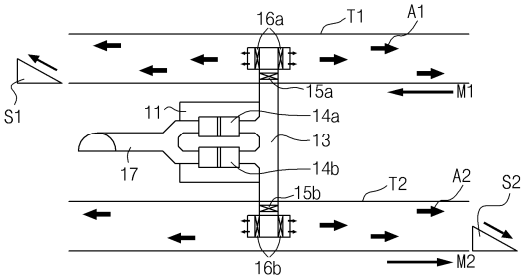
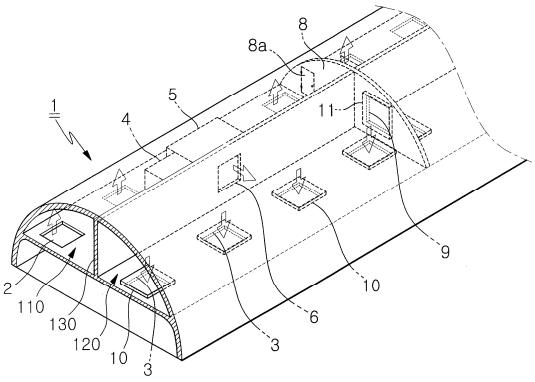
○ 그림 1-7은 터널 환기시스템과 관련한 특허 동향 추세를 나타낸 것임.

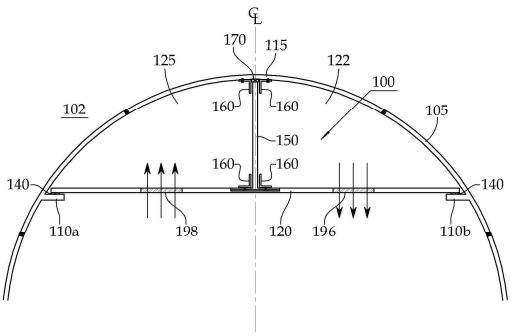
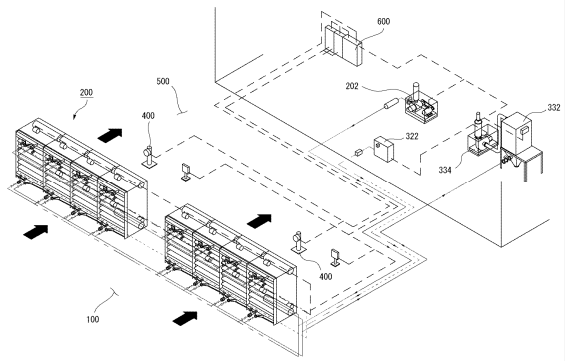


<그림 1-7> 터널 환기시스템 관련 특허 동향

○ 터널 환기 시스템에 대한 특허 중 주요 특허 내용은 다음과 같음.

관련 특허	관련성 검토 및 연계 방안
『터널오염물질 복합정화 시스템 (특허번호 : 10-0697305)』 ○ 메인터널로부터 유입되는 공기를 정화하기 위한 바이패스 터널에 설치되는 집진장치 및 공기정화장치 등을 포함 함.  	○ 외국 사례(Twin system)와 비슷한 개념에서 접근 한 특허로서 단점(설치비 및 면적 과다 등)또한 비슷함.
『대기 중 질소산화물 처리 장치 및 그 방법 (특허번호 : 10-0475612)』 ○ 도로, 지하주차장, 터널 등의 오염된 공기를 신속하고 대량으로 정화할 수 있도록 하기 위해 흡입 덕트로 부터 일산화질소를 이산화질소로 산화시키는 오존산화부와, 흡입 덕트에 설치되는 분무장치와, 분배판넬 및 통기관으로 이루어지는 것을 특징으로 함.  	○ 외국사례(EAP)를 가져온 것으로서 토양층의 여과를 통해 질소산화물 등의 오염물질을 제가하는 방법으로 설치면적이 많이 필요하고 처리속도가 느린 단점이 있음.
『방재용 터널 환기 구조물 및 그 제어방법 (특허번호 : 10-0912944)』 ○ 상호 평행하도록, 인접하여 형성된 복수의 터널; 복수의 터널 사이의 영역에 복수의 터널과 평행하도록 형성된 배기덕트; 터널과 배기덕트가 관통하도록, 터널의 길이방향을 따라 소정 간격을 두고 형성된 복수의 배기구 배기 덕트와 외부를 연결하는 외부 배기유로를 포함하는 방재용 터널 환기 구조물을 제시함.  	○ 단순 방재용 환기 시스템으로 대기오염 정화기능 없음. ○ 향후 본 연구를 통해 정화장치를 개발하여 접목할 수 있을 것으로 사료됨.

관련 특허	관련성 검토 및 연계 방안
『천정부착형 집진 시스템 및 이를 이용한 관리방법(특허번호 : 10-0960104)』 ○ 천정부착형 공기정화 집진시설 및 관리 시스템에 관한 것으로 종래 터널 내 바이패스통로를 통한 집진 및 공기정화 시스템의 시공 및 경제성부분 개선 	○ 기존 전기집진기를 바이패스 방식이 아닌 천장에 부착하는 형태로 개선하는 것으로서 유해가스 처리에 대한 방안이 없음. ○ 향후 본 연구개발 후 천정부착방식에 대한 검토 연계 가능
『인공지능형 선택 급배기 방식의 터널 환기시스템(특허번호 : 10-0886350)』 ○ 병설터널에 설치되는 환기시스템으로 평상시와 화재시 환기시스템을 선택적으로 적용함으로 기존 제트팬 방식에 비하여 운영효율을 높음. 	○ 단순환기 시스템으로 제트팬 방식의 효율 개선이 주를 이룸. ○ 대기오염정화기능이 없으므로 향후 본 연구개발 후 연계 가능성이 있을 것으로 사료됨.
『아치형 터널의 환기장치 (특허번호 : 10-1006564)』 ○ 터널 상부에 형성되는 아치형 환기통로에 송풍기 및 여과집진기를 설치하여 터널 내부 에서 오염공기를 직접 정화 것을 특징으로 함. 	○ 아치통로에 여과집진기를 설치하여 수직갱이나 제트팬 방식을 개선하였음. ○ 본 연구와 차별되는 점은 유해가스처리에 대한 내용이 없음. 본 연구개발 후 접목 가능성이 있음.

관련 특허	관련성 검토 및 연계 방안
『조립식 터널 풍도 및 형성방법과 조립식 터널 풍도 시공방법 (특허번호 : 10-0996400)』 ○ 터널 내부의 공기를 공급, 배기시켜 환기하는 조립식 터널 풍도에 관한 것으로 화재시 신속한 배연 처리 및 터널 내 환경 회복시간 최소화  	○ 앞서 설명한『아치형 터널의 환기장치 (10-1006564)』유사한 특허로서 환기에 중점을 둔 방식임. ○ 대기오염 정화기능 없음.
『공기정화 환기시스템 (특허번호 : 10-0951480)』 ○ 터널 내 제진장치의 접촉 면적을 확대시켜 공기정화 효율을 높임과 동시에 화재 시 제진장치를 거치지 않고 신속히 공기를 배출시켜 매연 및 부산물 확산으로 인한 인명피해 방지  	○ 터널 내 화재 발생 시 제진 시스템에 관련된 특허로 본 연구와 직접적인 연관은 그리 높지 않음. ○ 다만 본 연구 개발 완료시 연계가 가능할 것으로 판단됨.

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구수행 추진체계

○ 본 연구는 터널 내 통행 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 장치를 개발하고, 현장평가(logn-term monitoring)를 통해 실제 적용 가능성을 도출하는데 그 목적이 있음.

○ 따라서 본 연구에서는 다음의 연구추진 체계를 가지고 연구를 수행함.



<그림 2-1> 연구수행체계

○ 주관기관인 아주대학교는 대기환경 분야에서 20년 이상 연구경험을 보유한 홍민선 교수가 연구책임자로 참여하고 있음.

○ 특히, 산업공정 및 도로변 차량에서 배출되는 대기오염물질 저감・처리에 관련된 연구기술을 보유하고 있으며, 대기질 모델링 분야에서도 많은 연구경험을 가지고 있음.

○ 아주대학교는 우수한 연구 인프라를 구축하여 대기환경 분야에 다수의 연구인력을 배출하였고, 많은 연구경험을 바탕으로 본 연구를 추진하는데 있어 충분한 역량을 갖추고 있음.

○ 공동연구기관인 (주)평화엔지니어링은 도로건설 및 환경분야에서 특화된 기술력을 보유하고 있으며, 신기술 및 다수의 관련 특허를 보유하고 있는 우수한 기관임.

○ 특히 기술연구원에서는 다수의 국가 R&D 연구를 수행하고 있고, 관련 기술의 노하우를 보유하고 있음.

○ 공동연구기관인 (주)리트코는 전기집진기 제작에 있어 국내 최고의 기관으로써 국내 터널 내 다수의 전기집진기 제작 및 납품 실적을 보유하고 있음.

○ 특히, 전기집진기 국산화 기술을 보유하고 있으며, 우수한 인프라와 많은 경험을 바탕으로 본 연구를 추진하는데 있어 충분한 역량을 보유하고 있음.

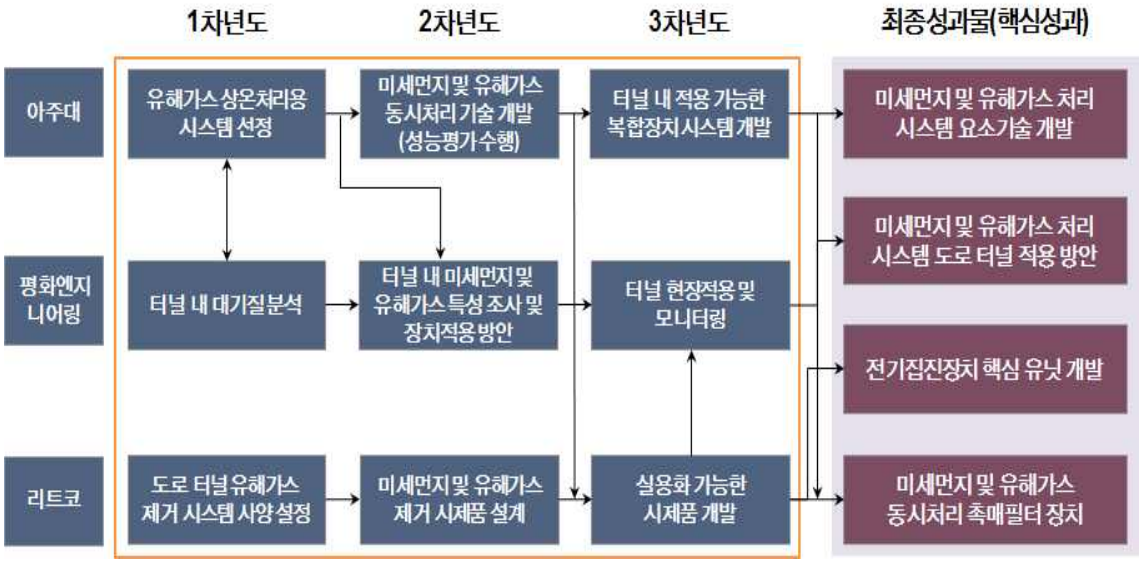
○ 참여기업인 (주)수도프리미엄엔지니어링은 오염물질 측정을 위한 센서개발 기술을 보유하고 있으며, 각종 대기오염물질을 비롯한 유해오염물질 측정을 위한 다양한 센서 방식을 수요처에 제공하고 있음.

○ 특히, 터널 내 다양한 환경조건에 부합하는 대기오염물질 오염도 측정을 위한 센서를 개발하여 본 연구에 역량을 발휘하고 있음.

○ 이러한 연구기관의 협력을 통하여 연구개발을 수행함.

2. 연구수행전략

○ 그림 2-2는 본 연구의 수행에 대한 전체적인 추진전략을 도식한 것임.



<그림 2-2> 연구수행 추진전략

○ 본 연구는 크게 3차년도 수행되었고, 1차년도에는 미세먼지 및 유해가스 처리를 위한 메카니즘 기술 확보, 터널 내 대기질 특성분석, 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리를 위한 시스템 기초 설계 연구를 수행함.

○ 2차년도에는 성능평가를 통한 동시처리 기술력을 확보하였고, 터널 내 대기오염물질의 특성 분석을 완료하여 장치 적용 방안을 수립하였음.

○ 또한, 기술력 확보를 통해 미세먼지 및 유해가스 동시처리 시제품 장치의 설계를 구축하였음.

○ 마지막 3차년도에는 연구결과를 통합하여 터널 내 통행 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 시제품 장치를 개발하여 현장평가(logn-term monitoring)를 통해 실제 적용 가능성을 도출하였고, 이를 통한 실용화 방안 등을 수립하여 기술개발을 완료함.

제 2 절 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적)

연차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	○터널 내 발생되는 유해가스 처리가능 시스템 선정	○미세먼지 및 유해가스 처리장치 최적사양 조사연구 ○터널 내 유해가스 처리 방법 조사 ○유해가스 상온처리용 시스템 선정
	○미세먼지 및 유해가스 처리 장치 현황 조사	○국내·외 미세먼지 및 유해가스 처리 장치 현황 조사 ○미세먼지 및 유해가스 처리 장치 최적 사양 설정
2차년도	○미세먼지 및 유해가스(CO, VOC) 동시처리 시스템 개발	○유해가스 처리 시스템 개발 - 유해가스 처리장치 모듈 및 제어장치 제작 ○미세먼지 및 유해가스 처리효율 향상을 위한 성능평가 - $10m^3/min$ 규모의 실험 장치를 이용하여 실험 조건별 미세먼지 및 유해가스 처리효율 도출 - data 분석을 통한 처리효율 향상을 위한 최적 조건 도출
	○터널 내 미세먼지 및 유해가스(CO, VOC) 처리 시스템 적용방안 모색	○미세먼지 및 유해가스 특성 조사 - 터널 유형별 4개 지점(교통량이 많은 도심터널 및 장대터널 중심) - 미세먼지, 유해가스 농도 분석 및 온도, 습도 측정 - 교통량이 많은 도심터널 및 장대터널 ○터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리장치 적용방안 모색 - 기존 터널 내 오염물질 제거 설비와의 경제성 비교 등
	○미세먼지 및 유해가스(CO, VOC) 처리장치 설계 개발	○전체 시작품 제작을 위한 구성설계 작성 ○미세먼지 필터 모듈제작
3차년도	○터널에 적용 가능한 복합장치 및 시스템 개발	○미세먼지 및 유해가스 처리시스템개발 ○성능평가 및 흡착제 재생 성능평가
	○모형 또는 소규모 터널 적용 및 모니터링	○모형 또는 소규모 터널 시작품 설치 ○모니터링 및 적용 가능성 조사
	○실용화 가능한 시제품 개발	○터널 환기소 적용 시제품 설치 ○모니터링 및 적용성 조사 ○실제 적용에 따른 경제성 평가(2차년도 보완) ○시제품 장치 시스템 구축을 통한 성능 도출

제 3 절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

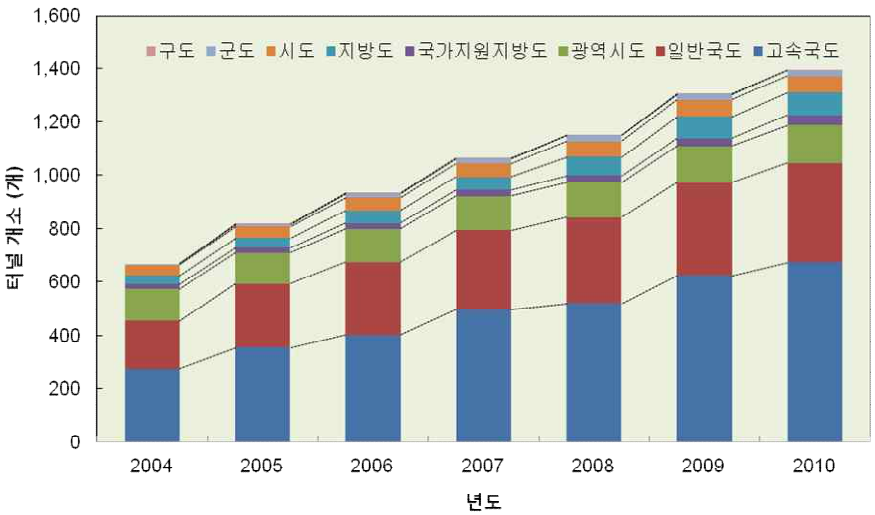
1. 터널 내 미세먼지 및 유해가스 현황

1.1 국내 도로 터널 현황

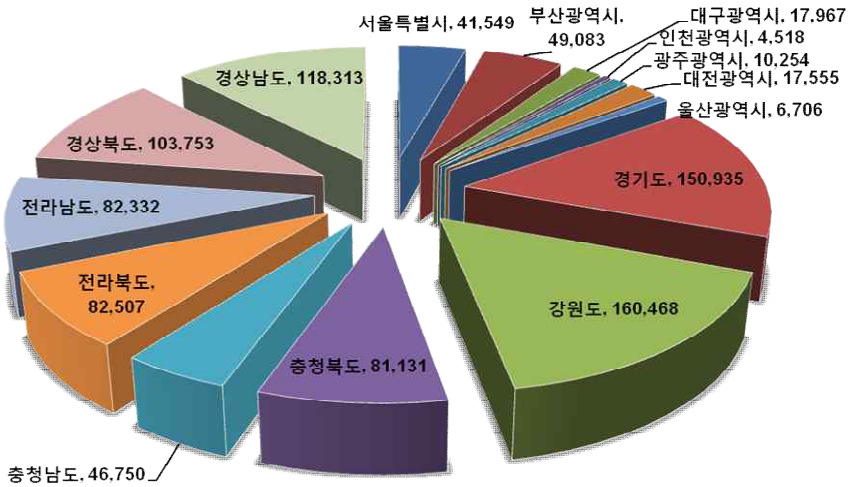
○ 2010년 기준 우리나라 도로에 설치된 터널은 1,383개소, 974㎞로서 2004년 667개소에 비하여 2배 이상 증가하였으며 매년 꾸준히 증가 추세에 있음.

○ 지역별로는 산악지역이 많은 강원도가 215개소, 160㎞로 가장 많은 터널이 건설되어 있으며, 경기도, 경상남도 순으로 나타났음.

○ 향후 도심지 지하터널 등 지속적으로 터널 건설은 증가할 전망임.



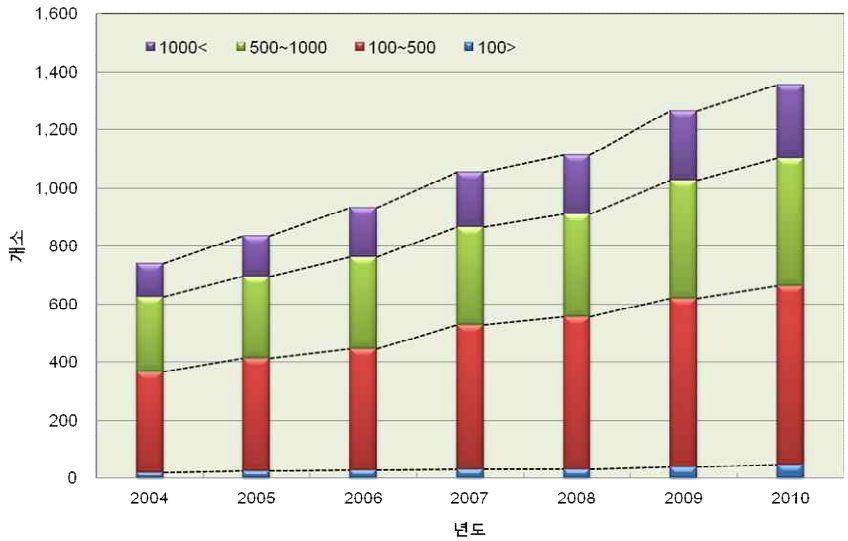
<그림 2-3> 연도별 국내 터널 건설 현황



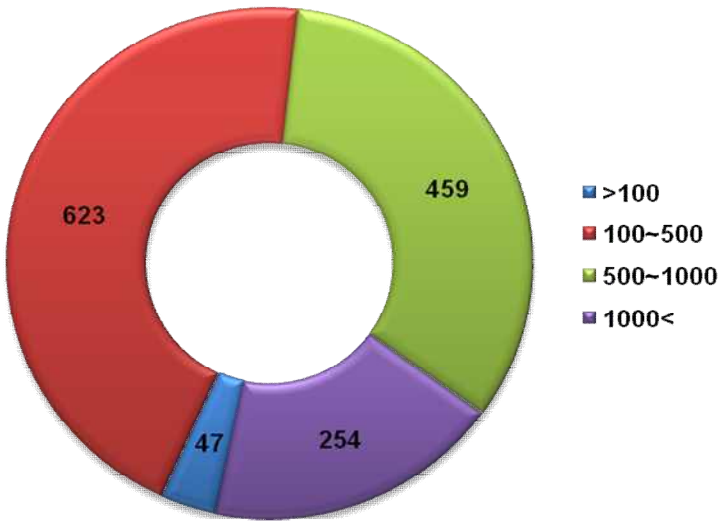
<그림 2-4> 지역별 터널 현황(2010년 기준)

○ 연도별로 살펴보면 2004년 이후 1,000m 이상의 장대터널의 비중이 증대하고 있음.

○ 또한, 터널 연장별로 살펴보면 100m~500m의 터널이 623개소로 전체의 45%를 차지하고 있으며 1,000m 이상의 장대 터널은 18%인 254개소 임.



<그림 2-5> 연도별 터널 연장별 국내 터널 현황



<그림 2-6> 터널 연장별 국내 터널 현황(2010년 기준)

1.2 국내·외 도로 터널 대기질 현황

가. 터널 대기질 관련 기준

○ 현재 국내 터널 내 대기오염물질 규제 기준은 설정되어 있지 않은 실정이나 국토교통부의 '도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙' 상에 CO 100ppm, NOx 25ppm 이하로 설계토록 권고하고 있고, 미세먼지에 대한 기준은 없는 실정임.

○ 또한, 대기환경 기준 및 작업환경 기준, 실내공기질 기준에서 유해가스인 CO 및 미세먼지에 대한 규제기준을 설정하여 관리하고 있으며 특히, 발암성 물질 인 VOC중 대표적인 물질인 벤젠과 톨루엔에 대한 규제를 강화하여 관리하고 있음.

구 분	CO	미세먼지 (PM-10)	벤젠	톨루엔
대기환경 기준[1]	9ppm 이하 (8시간)	100ug/m³ 이하 (24시간)	5ug/m³ 이하 (연간)	-
작업환경기준[2]	50ppm 이하	150ug/m³ 이하	3,000ug/m³ 이하	40ug/m³ 이하
실내공기질 기준[3] (지하주차장)	25ppm 이하	200ug/m³ 이하	1,000ug/m³ 이하 (TVOC)	
터널 환기시설 설계 기준[4]	100ppm 이하	-	-	-

1) 환경정책기본법 시행령(2012.4) [별표1]
2) 산업안전보건법(2011.7) 제32조의 2 [유해인자 허용기준의 준수]
3) 다중이용시설등의 실내공기질 관리법(2011.6)
4) 한국도로공사 [고속도로 터널 환기시설 설계 기준]

<그림 2-7> 국내 오염물질 환경 기준

○ 미세먼지의 경우 국내에서는 PM-10에 대한 규제가 이루어지고 있으나 경유 승용차와 RV차량 등 경유자동차에 의한 오염배출은 거의 대부분 PM-2.5인 것으로 알려져 환경부에서는 최근 선진국의 대기환경기준에 맞춰 PM-2.5에 대한 규제를 새롭게 도입하려는 준비를 하고 있음.

○ 특히, 2007년부터 PM-2.5의 기준설정을 위한 실태파악 및 성분조사에 대한 연구를 수행하였으며, 2010에 PM-2.5의 대기환경기준(안)으로 연간기준(장기)을 25 ug/m^3, 24시간 기준(단기)을 50 ug/m^{3}으로 제안하여 2015년에 본격적으로 시행하는 것을 목표로 하고 있음.

○ 반면, 호주의 경우 터널 내 차량에서 1시간 동안 배출되는 총량으로 터널 내 대기오염물질을 규제하고 있음.

○ 그림 2-8은 대기오염물질 별 차량에서 1시간 동안 배출되는 총량기준을 나타낸 것으로

입자상오염물질인 미세먼지의 경우 PM-2.5는 2.4kg/hr, PM-10은 2.6kg/kr이며, 가스상 오염물질인 NO_2의 경우 3.98kg/hr, CO의 경우 112kg/hr로 규제하고 있음.

Discharge Point No.	Discharge Description	Compound	Mass Rate (kg/h)	Licence Limit (kg/h)
1	Western ventilation stack	$PM_{2.5}$	0.35	2.4
		PM_{10}	0.92	2.6
		NO_2	0.76	3.98
		CO	25	112
2	Eastern ventilation stack	$PM_{2.5}$	0.38	2.4
		PM_{10}	1.3	2.6
		NO_2	0.81	3.98
		CO	27	112

<그림 2-8> 호주의 터널 내 대기오염물질 규제 기준

(자료 : Transfield Services PTY. LTD., EastLink Ventilation Stack Emission Monitoring Report(2012.10~12), Australia, 2013)

○ 호주의 경우도 도심지를 관통하는 터널 건설이 지속적으로 증가하고 있으나 국내의 경우와는 다르게 규제기준을 엄격히 정하고 있으며, 터널 내 오염물질의 발생 특성을 고려하여 터널 출구 지점에 환기시스템을 설치하여 운영하고 있음(그림 2-9).



<그림 2-9> 도심지 터널 출구부에 설치된 환기시스템

(자료 : Transfield Services PTY. LTD., EastLink Ventilation Stack Emission Monitoring Report(2012.10~12), Australia, 2013)

○ 이와 같이 국내에서도 지속적인 터널 건설의 증가에 따라 터널 내 대기오염물질에 대한 기준을 조속히 마련하여야 할 것이며, 기준 정립에 있어 오염물질별 정량적인 기준치를 설정하여야 함.

○ 특히, 터널 내 대기오염물질의 농도 분포는 기상상태 및 기타 환경적인 요인에 많은 영향을 받는 바 호주의 사례와 같이 배출총량으로 정량적인 기준을 마련하는 것이 적절할 것으로 판단됨.

나. 국내 터널 내 대기질 현황

○ 국내 도로 터널에 관련한 대기질 모니터링은 체계적으로 이루어지고 있지 않음.

○ 다만 일부 터널에 관련하여 각 지방자치단체 및 공공기관에서 산발적으로 측정을 통한 모니터링이 이루어지고 있음.

(1) 한국도로공사

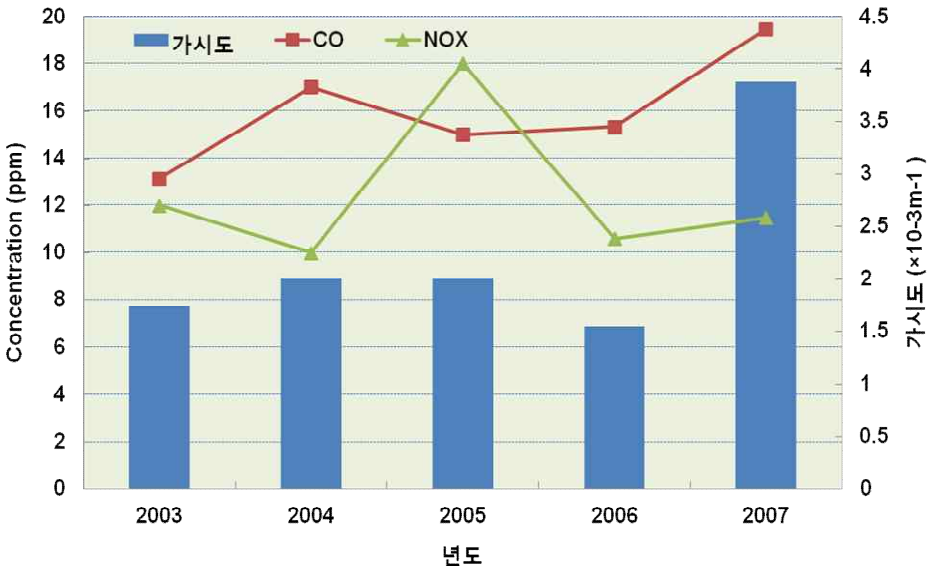
○ 한국도로공사에서는 관리되는 고속도로 터널에 관련하여 주기적으로 조사를 하고 있음.

○ 특히, 1,000m 이상의 장대터널에의 환기시설 설치기준에 부합되는지를 조사하고 있음.

○ 연도별 고속도로 장대터널의 대기질 현황 표 2-1과 그림2-10과 같음.

<표 2-1> 고속도로 장대터널 대기질 현황(각 터널 최고농도 기준)

구 분	가시도 ($\times 10\text{-}3m^{-1}$)			CO (ppm)			NOx (ppm)		
	min.	max.	avr.	min.	max.	avr.	min.	max.	avr.
2003년	0.6	3.3	1.7	9	22.5	13.2	12.0	12.0	12.0
2004년	0.9	3.0	2.0	5.9	35.0	17.0	10.0	10.0	10.0
2005년	0.9	3.7	2.0	5.2	30.2	15.0	14.4	22.0	18.0
2006년	0.3	3.0	1.6	5.3	28.8	15.3	9.5	11.7	10.6
2007년	0.9	11.4	3.9	4.3	32.5	19.8	8	17.5	11.5
평균	0.72	4.88	2.24	5.94	29.80	16.06	10.78	14.64	12.42



<그림 2-10> 연도별 고속도로 터널 대기질 현황

○ 고속도로 터널 내 대기질 현황을 살펴보면 CO의 경우 최대 29.8ppm을 나타내고 있어 터널 내부 환기기준에는 적합한 것으로 나타났으나 현행 대기환경기준인 9ppm(8시간), 25ppm(1시간)을 초과하는 것으로 나타남.

○ 질소산화물(NOx)은 환기기준인 25ppm을 만족하나 대기환경기준인 0.1ppm(1시간)을 200배 초과한 것으로 나타남.

○ 고속도로 터널 내부와 대기환경기준을 비교하기에는 무리가 있으나 터널 입·출구 부근은 이러한 터널 내 오염물질로 인하여 기준을 초과할 것으로 예상됨.

(2) 서울특별시

○ 서울특별시에서는 도심지 터널인 홍지문, 북악, 정릉, 남산3호 등의 터널에 대하여 기존 대기오염물질인 미세먼지, CO, NOx 와 더불어 VOCs, 발암물질인(PAHs) 등을 지속적으로 모니터링 하고 있음.

○ 2007년 기준 발암물질인 벤조피렌, 크리센, 벤조플로나신, 인데노, 파이렌, 벤조안트라센 및 벤젠 등이 검출되었음.

○ 또한, 이(2007, 한국대기환경학회 논문집)에 따르면 서울시 북악터널의 검댕(Black carbon)의 농도는 최대 47$\mu g/m^3$으로 나타났으며, 이때의 PM2.5 와 PM10 농도 평균은 84±24$\mu g/m^3$, 99±24$\mu g/m^3$로 조사되었음.

○ 또 다른 연구로는 Kwangsam Na(2006, Journal of Environmental Management)의 연구가 있는데 서울시 상도터널의 VOC 농도를 분석하였고, Total VOCs 의 농도는 평균 1152.3ppb를 나타내었음.

○ 또한, 발암물질인 벤젠의 농도 또한 6.3ppb로 나타나 상도터널을 이용하는 사람들의 인체에 유해성이 있는 것으로 분석됨.

(3) 부산광역시

○ 부산광역시에서는 부산 도심지 내 터널의 대기질 파악을 위하여 2003년 부산시내 터널 대기질 모니터링을 실시하였음.

○ 부산시내 도심지 8개 터널의 대기질 분석 결과 SO_2의 경우 28ppb로 나타났으며, NO_2의 경우 최저 54ppb에서 최고 223ppb로 평균 144ppb로 조사되었음. CO의 경우 최고 12.4ppm으로 나타났으며, 차량주행속도가 가장 낮은 터널이 가장 높은 수치를 보임. 미세먼지의 경우 425.4$\mu g/m^3$으로 나타났음.

○ 부산시내 도심지 8개 터널의 대기질 분석 결과(표 2-2) SO_2의 경우 28ppb로 나타났으며, NO_2의 경우 최저 54ppb에서 최고 223ppb로 평균 144ppb로 조사되었음.

○ CO의 경우 최고 12.4ppm으로 나타났으며, 차량주행속도가 가장 낮은 터널이 가장 높은 수치를 보임. 미세먼지의 경우 425.4㎍/㎥으로 나타났음.

<표 2-2> 부산광역시 터널 내 대기질 현황

터널명	SO_2 (ppb)	NO (ppb)	NO_2 (ppb)	O_3 (ppb)	CO (ppm)	THC (ppm)	PM10 (㎍/㎥)
대기환경기준 (1시간)	150	-	100	100	25	-	100
부산	37	501	105	7	10.3	2.5	-
만덕1	16	477	91	10	6.3	-	-
만덕2	34	498	188	10	9.2	-	-
광안	21	501	173	3	5.9	-	-
구덕	36	502	59	4	4.3	1.8	-
황령	18	501	205	3	6.4	-	-
백양	37	499	176	6	4.5	1.9	425
수정	24	487	154	5	2.8	1.6	318
평균	28	496	144	6	6.2	2.0	371
최대	37	502	205	10	10.3	2.5	425
최소	16	477	59	3	2.8	1.6	318

다. 국외 터널 내 대기질 조사 결과

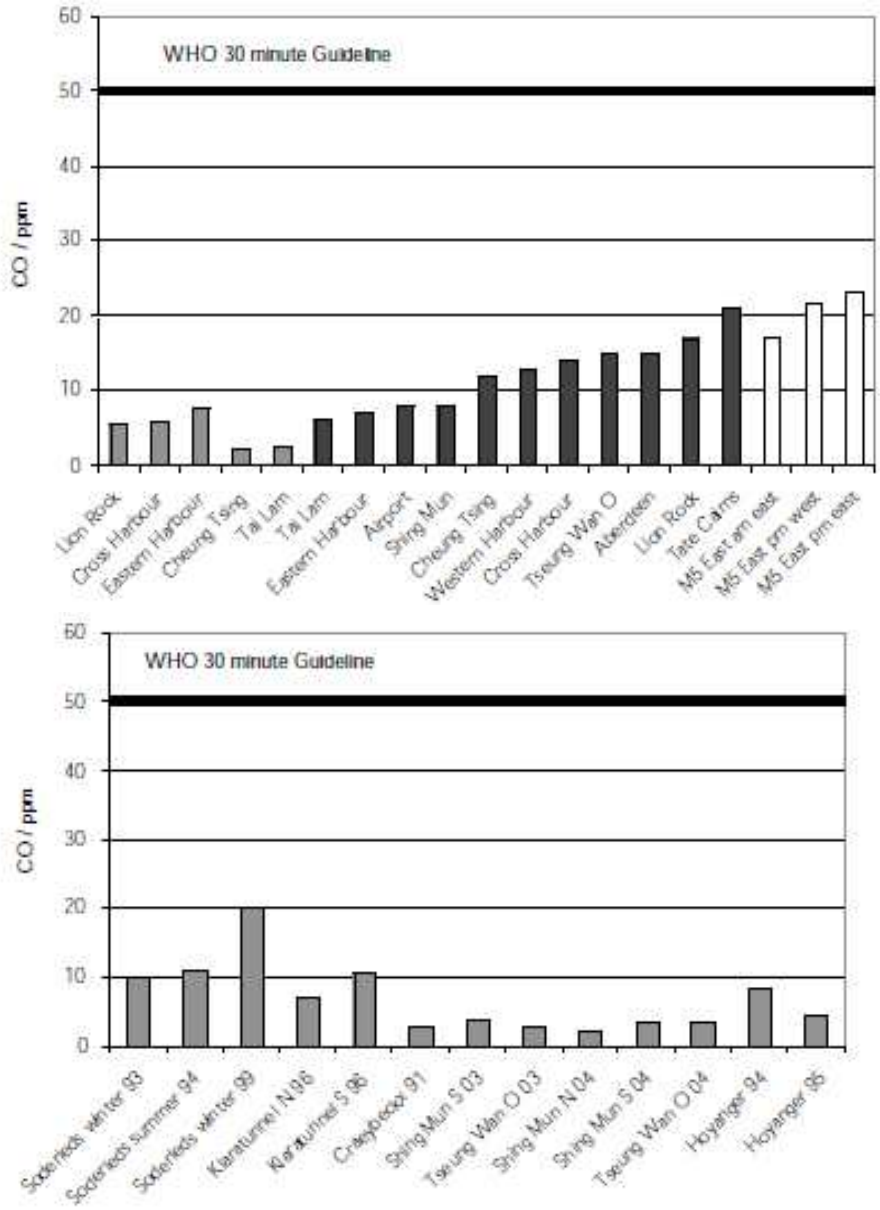
○ 외국 터널의 대기질은 여러 연구와 문헌을 통하여 지속적으로 조사되어 왔음.

○ 본 연구에서는 호주 National Health and Medical Research Council에서 발간한 Air Quality in and around traffic tunnels(2008)을 바탕으로 홍콩, 호주 등의 터널 대기질 문헌을 종합하였음.

(1) CO

○ 조사된 문헌을 종합하여 CO 농도의 현황을 살펴보면 아래 그림과 같음.

○ 가장 낮은 농도를 나타낸 곳은 Shing Mun tunnel(Hong Kong)으로 2.1ppm으로 나타남. 또한 가장 높은 농도로 조사된 곳은 M5 East tunnel(Australia) 로서 23.2ppm으로 조사됨.



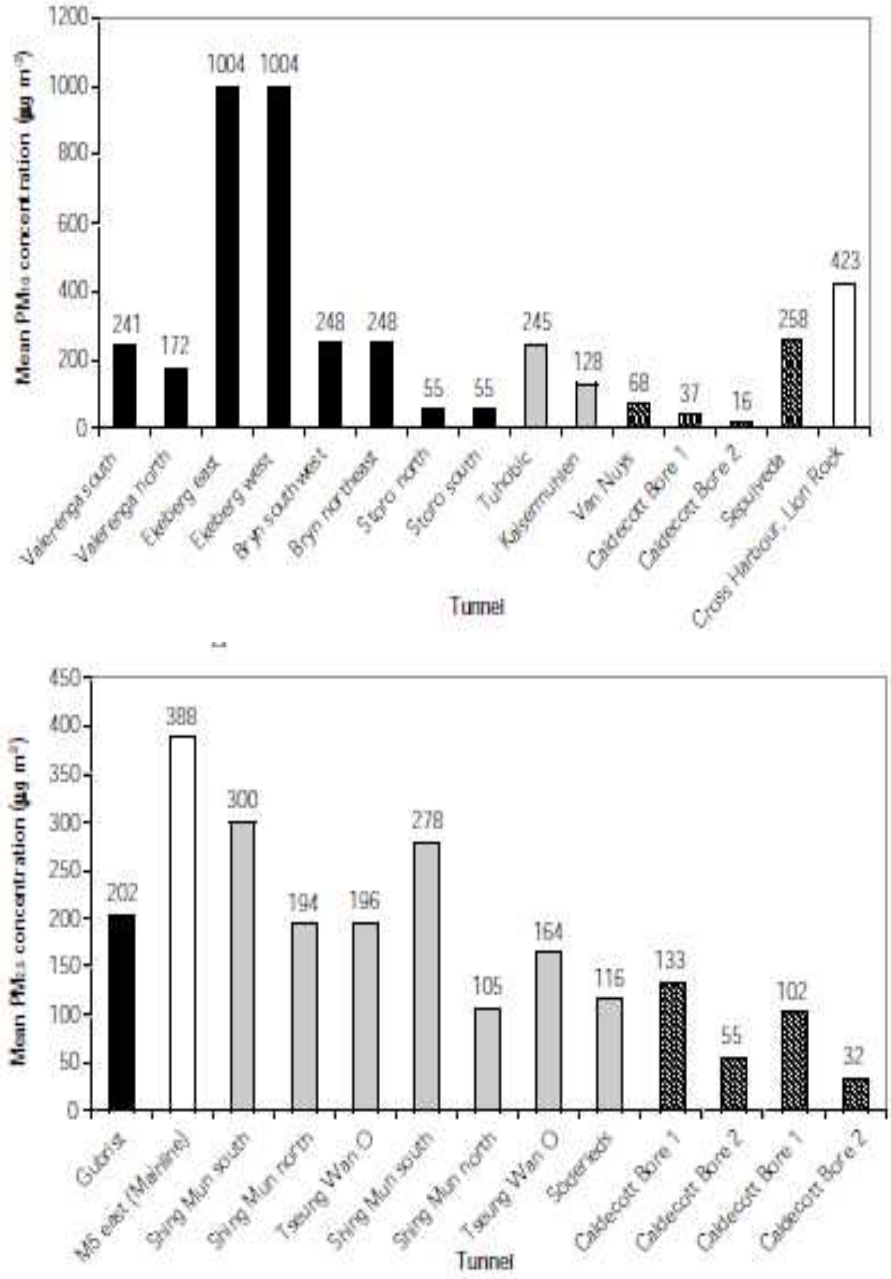
<그림 2-11> 국외 터널 내 CO 농도 현황

○ 분석된 지역이외에서 연구문헌에서는 가장 높은 농도를 보인 곳은 62ppm의 Cross Harbour tunnel 과 52ppm 의 Lion Rock tunnel 임(Chow an Chan 2003).

(나) 미세먼지

○ PM10에 대한 조사 문헌 분석 결과는 아래 그림에 나타나 있음. 가장 높은 농도를 보인 곳은 Oslo tunnel임.

○ PM2.5에 대한 조사 문헌 분석 결과 100~300$\mu g/m^3$으로 나타났으며, 가장 높은 농도를 보인 곳은 M5 East tunnel(Australia)로서 388$\mu g/m^3$로 나타남.

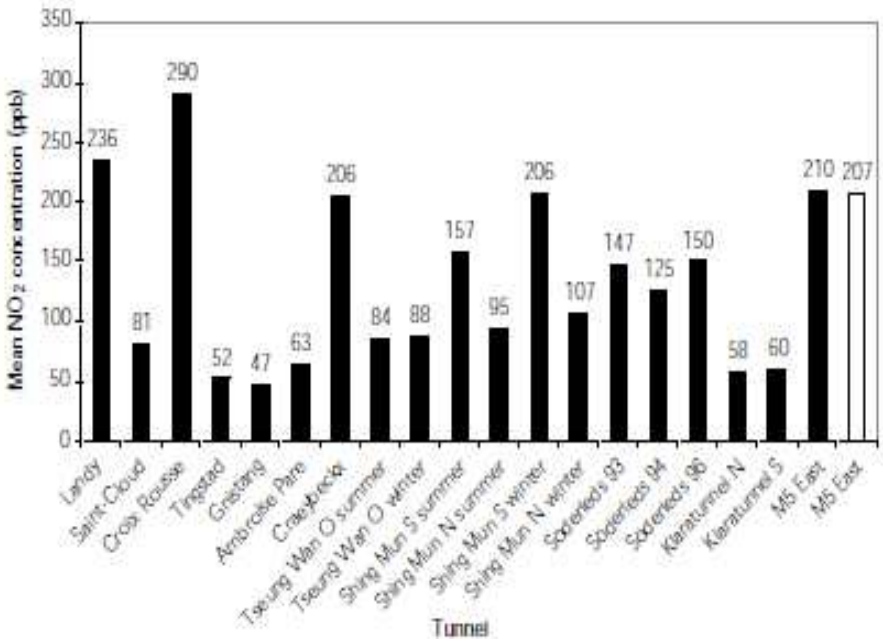


<그림 2-12> 국외 터널 내 미세먼지 농도 현황(위 : PM-10, 아래 : PM-2.5)

(3) 질소산화물(NO_2)

○ 질소산화물인 NO_2의 조사 분석 결과를 살펴보면 290 ppb를 보인 Croix Rousse 터널로 조사되었음.

○ 그러나 장대터널에 대한 질소산화물의 조사결과는 포함되지 않은 결과로서 Hoyanger tunnel(7.3㎞)은 730ppb를 나타내었으며, Mont Blanc tunnel 은 500ppb(11.6㎞)를 나타냄.



<그림 2-13> 터널 내 질소산화물(NO_2) 농도 현황

라. 터널 내 대기질에 따른 유해성

○ 터널 내 대기질은 CO, CO_2, NO, VOC 등을 주로 측정하고 있으며, 터널밖의 대기질에 비해 VOC(휘발성유기화합물)와 발암물질인 PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)는 물질에 따라 최대 90배의 고농도를 나타냄.

○ 그림 2-14는 벨기에의 크래벡 터널에서 측정한 휘발성유기화합물로서 터널 밖에 비해 터널 내부의 농도가 수백에서 수십배 높은 것으로 나타나 있음.

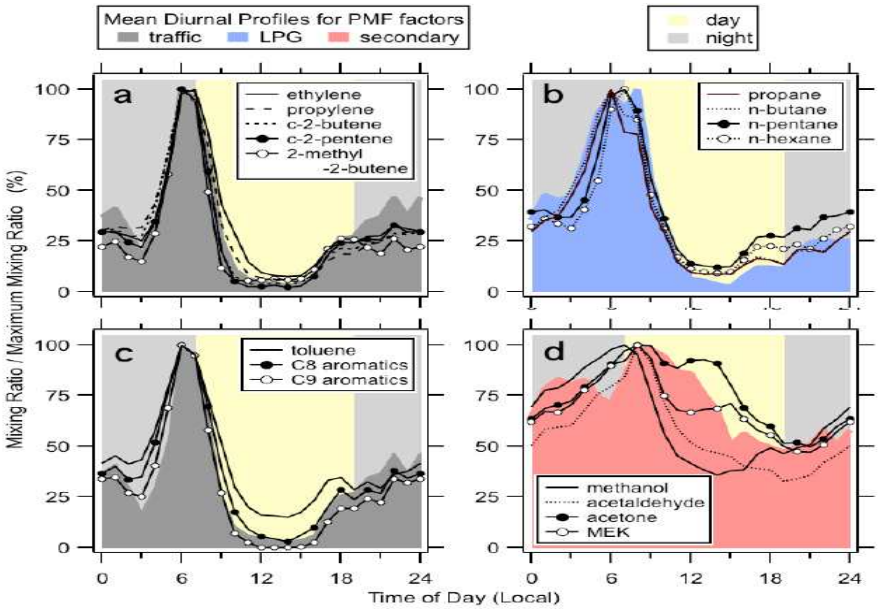
	Concentration, μg/m^3	
	Tunnel	Background
Methane	1021 ± 49	1075
Ethane	166 ± 58	30
Propane	26 ± 11	5.8
Isobutane	17 ± 5	6.8
1-Butene	13 ± 3.8	1.5
Butane	24 ± 10	4.1
Benzene	23 ± 9.6	1.3
Toluene	58 ± 24	4.2
Ethylbenzene	12 ± 5.7	1.2
m- and *p*-Xylene	34 ± 14	2.4
o-Xylene	17 ± 7	1.0
3-Ethyltoluene	23 ± 4	1.3
1,2,4-Trimethylbenzene	15 ± 7	1.0
Decane	13 ± 21	0.1
1,2,3-Trimethylbenzene	4.7 ± 3.7	0.0
Dodecane	2.9 ± 2	0.0
Pentadecane	1.9 ± 0.8	0.2
Pyrene	16 ± 3.5	0.9
Chrysene	9.5 ± 2.1	0.4
Benzo[*a*]anthracene	12 ± 2.9	0.1
Benzo[*b*]fluoranthene	12 ± 3.2	0.2
Benzo[*k*]fluoranthene	9 ± 2.3	0.1
Benzo[*a*]fluoranthene	2.8 ± 0.5	0.04
Benzo[*e*]pyrene	9.6 ± 2.8	0.1
Benzo[*a*]pyrene	9.6 ± 2.6	0.1
Perylene	1.5 ± 0.4	0.04
Indeno[1,2,3,*c*,*d*]pyrene	9.4 ± 3	0.3
Dibenzo[*a*,*c*]anthracene +dibenzo[*a*,*h*]anthracene	1 ± 0.3	0.03
Benzo[*g*,*h*,*i*]perylene	19 ± 6	0.4
Anthanthrene	1.5 ± 0.3	0.01
Coronene	7.5 ± 1.6	0.4

<그림 2-14> 터널 내부의 VOC 및 PAH 평균농도

(자료 : Raf De Fre etc., air Pollution Measuremensts in Traffic Tunnels, Environmental Health Perspectives, p.31~37, vol.102, 1994)

○ 이는 통행량과 차량 속도 등에 의해 영향을 받는데 아래 그림에 멕시코의 터널 내 시간대별 VOC 농도가 나타나 있음.

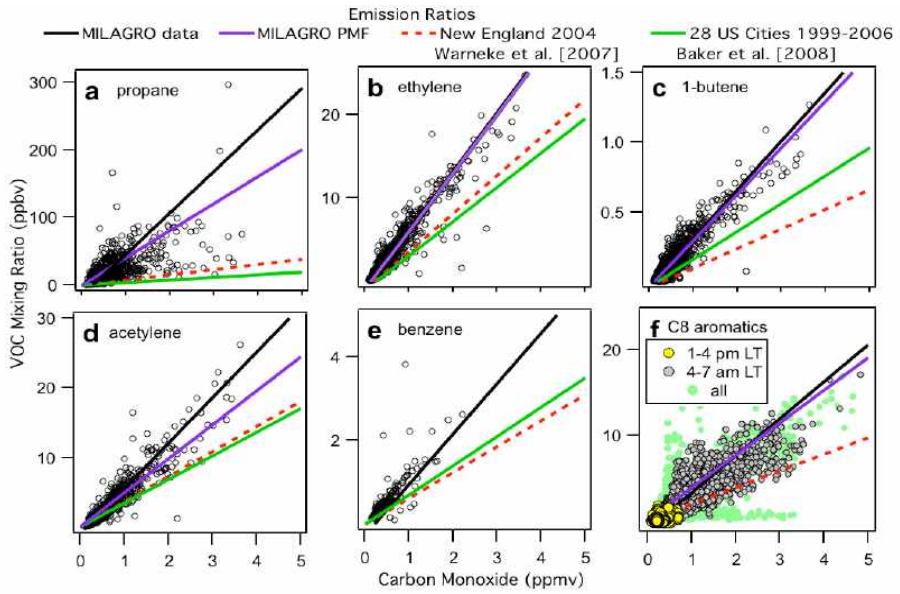
○ 특히, 출근시간대 농도가 정오에 비해 수십배 높은 것으로 나타남.



<그림 2-15> 시간대별 VOC 농도 특성

(자료 : D.M.Bon etc., Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site(T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign : measurement comparison, emission ratios, and surce attribution, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 2399~2421, 2011)

○ 터널 내 오염원은 자동차 배출가스로 CO와 VOC는 밀접한 상관성이 있는데 이는 아래 그림에 나타나 있음.

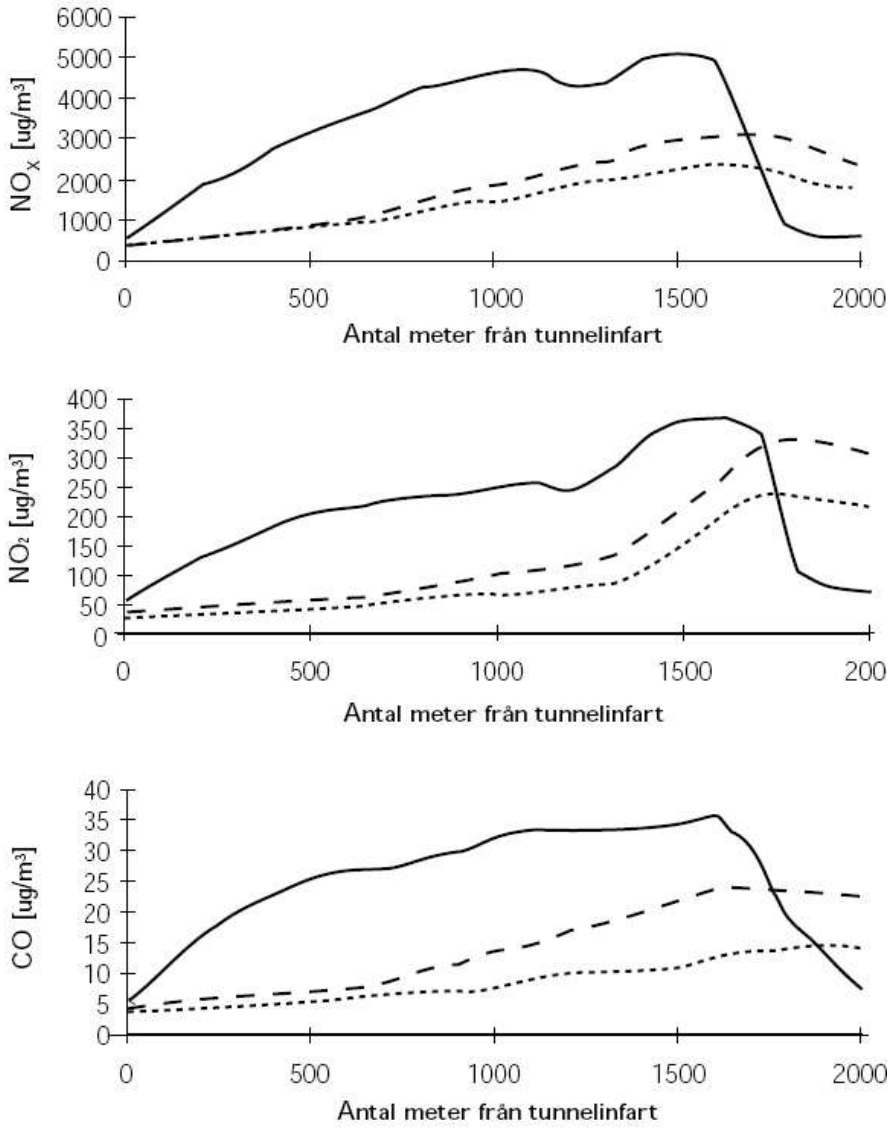


<그림 2-16> 차량에 의해 배출되는 CO와 VOC의 상관성

(자료 : D.M.Bon etc., Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site(T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign : measurement comparison, emission ratios, and surce attribution, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 2399~2421, 2011)

○ 터널 내 대기질과 운전 중 차량의 창문과 환기 시설의 개폐여부는 차량 내 대기질에 많은 영향을 미치는 것으로 조사되어 있음.

○ 그림 2-17은 1,500m 길이의 터널을 ① 창문을 열고 주행(solid line) 할 때, ② 창문을 닫고 환기장치를 켜고 주행(dashed line) 할 때, ③ 창문을 닫고 환기장치를 끄고 주행(dotted line) 할 때 차량 내 대기질 변화를 타나냄.



<그림 2-17> 주행조건에 따른 차량 내 대기질 변화

(자료 : National Health and Medical Research Council, Air Quality in and Around Traffic Tunnels, Final Report 2008)

○ ②의 경우 ①의 경우에 비해 70~80%까지 달하며, ③의 경우도 ①의 30~50%에 달해 현재 차량의 설계 기술로는 터널 내에서 차량 유입에 따른 대기질 저감에는 한계가 있는 것으로 나타남.

○ 터널을 통과하여 외부로 나갔을 때에는 ①의 경우 차량 내 오염물질이 급격히 감소하는 경향을 보이나 ②, ③의 경우는 차량으로 유입된 터널 내 오염물질이 일정시간 유지되고 있는 것으로 나타남.

1.3 터널 내 미세먼지 특성

○ 본 연구에서는 터널 내 미세먼지의 특성을 조사하기 위하여 경기도 S터널 내의 미세먼지 샘플을 1, 2차에 걸쳐 포집하여 습분함량 및 입자크기, 중금속 함량을 분석하였음.

○ 또한, 터널 내 미세먼지와 도로변 미세먼지의 특성을 비교 분석하기 위하여 일반 도로변의 미세먼지 샘플을 포집하여 동일한 항목에 대해서 분석하였음.



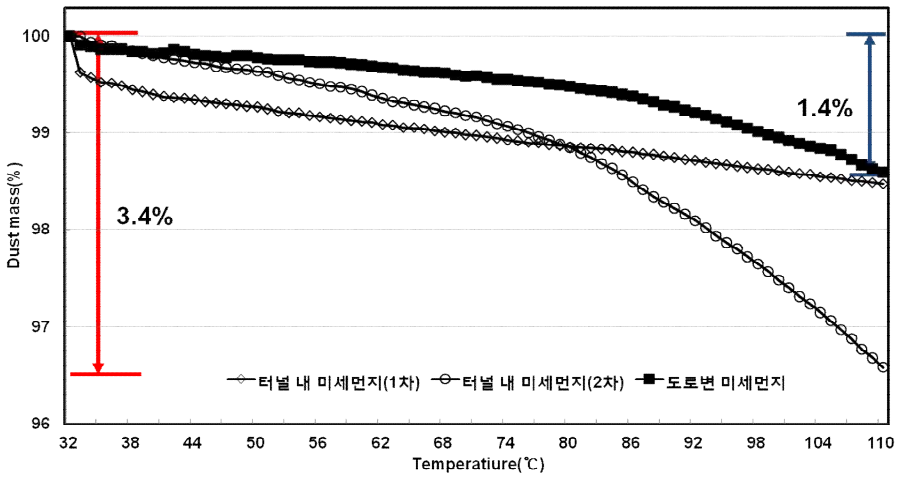
가. 터널 내 미세먼지 습윤 분석

○ 터널내의 미세먼지는 도로변 미세먼지와는 다른 특성을 보임. 대표적인 특성 중 하나가 수분함량임. 터널 내에 존재하는 수분은 발생되는 먼지와 결합되어 미세먼지를 이룰 것으로 예상됨. 이에 따라 본 연구에서는 도로변 미세먼지와 터널 내의 미세먼지의 수분함량을 비교하여 분석하였음.

○ 미세먼지의 수분함량은 열중량탈착(TGA) 분석 장치를 이용하여 110℃ 승온 후 무게 변화량에 따른 수분함량을 계산하였음.

○ 미세먼지의 수분함량 분석 결과 터널 내 미세먼지에서는 1차 1.5%, 2차 3.4%의 수분을 함유하는 것으로 분석되었고, 도로변 미세먼지는 1.4%로 분석됨.

○ 수분이 함유된 터널 내 미세먼지는 탈진 시 저감장치에 달라붙어 저감효율을 저해하는 영향을 미치므로 복합장치 시스템 개발 시 이에 대한 성능검증이 필요할 것으로 판단됨.



<그림 2-18> 온도에 따른 미세먼지 질량변화(TGA)

나. 터널 내 미세먼지 중금속 분석

○ 앞서 포집된 미세먼지에 대하여 차량에 의해 발생되는 미세먼지의 중금속 성분 함량 정도를 파악하기 위하여 총 6가지의 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn)을 유도결합플라즈마 분광광도계(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer; ICP-OES)를 이용하여 분석하였음.

○ 중금속 분석 결과 터널 내 미세먼지와 도로변 미세먼지 모두 Zn이 가장 많이 함유되어 있는 것으로 분석되었고, 그 다음으로 Cu, Pb, Cr 순으로 나타남.

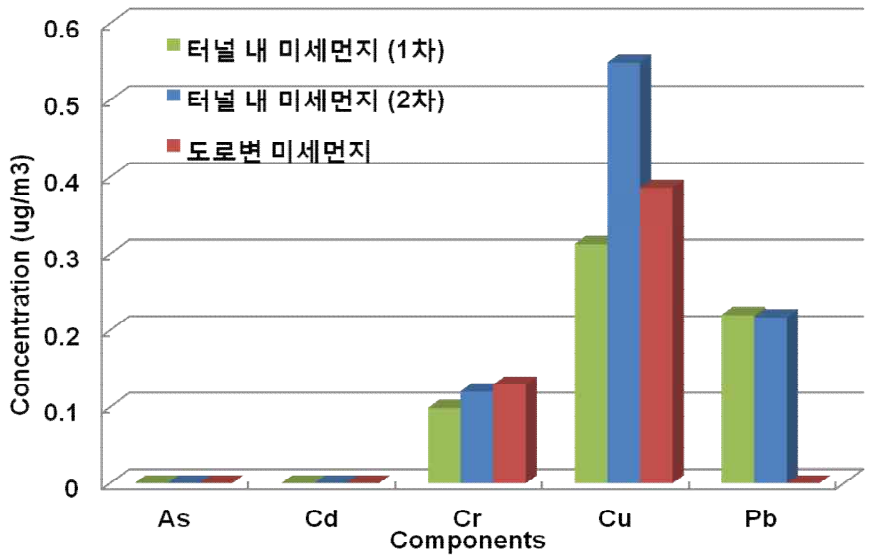
○ 특히, Zn의 경우 터널 내 미세먼지 보다 도로변 미세먼지가 상당히 높게 나타났는데 이는 대기 중에 포함되어 있는 중금속 농도가 도로변 미세먼지에 장시간 침착되어 영향을 미친 것으로 판단됨.

○ As, Cd는 터널 내 미세먼지와 도로변 미세먼지 모두 검출한계 이하로 분석되었음.

<표 2-3> 미세먼지 중금속 분석 결과

(unit : ㎍/㎥)

Sample site	Components					
	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
터널 내 미세먼지(1차)	N.D.	N.D.	0.099	0.313	0.220	3.833
터널 내 미세먼지(2차)	N.D.	N.D.	0.120	0.550	0.217	4.979
도로변 미세먼지	N.D.	N.D.	0.129	0.386	N.D.	8.927



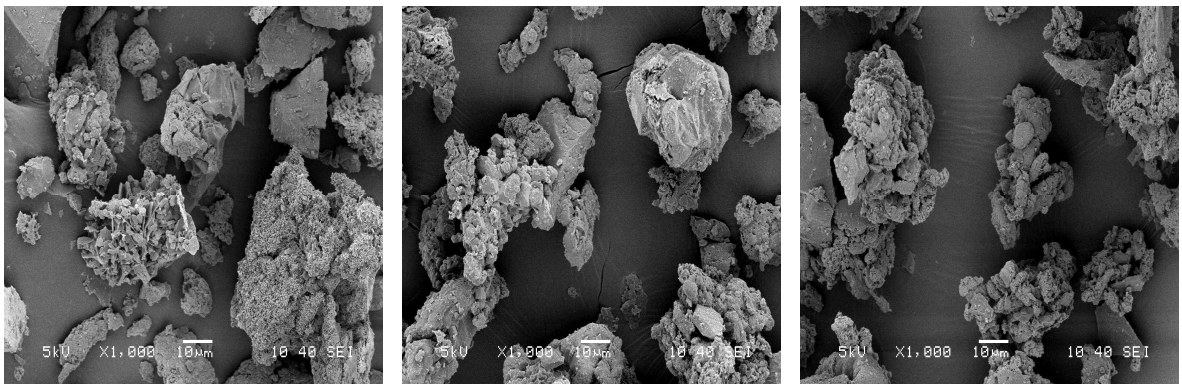
<그림 2-19> 측정지점별 미세먼지 중금속 분석 결과

다. 터널 내 미세먼지 표면분석

○ 본 연구에서는 터널 내 미세먼지와 도로변 미세먼지에 대하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)으로 미세먼지의 표면을 분석하여 입자크기를 조사하였음.

○ 그림 2-20은 SEM 분석 결과를 나타낸 것으로 터널 내 미세먼지는 직경 10um 이상의 조대입자들로 구성되어 있는 것을 알 수 있으며, 특히 터널 내 미세먼지는 도로변 미세먼지 보다 입자와 입자가 응집된 조대입자들이 많은 것을 볼 수 있는데 이는 수분함량과 더불어 차량에서 배출되는 유분의 성분이 도로변 미세먼지 보다 더 많이 함유되어 있기 때문인 것으로 판단됨.

○ 이와 같은 분석결과를 볼 때 미세먼지 및 유해가스 저감장치 개발 시 터널 내 미세먼지의 특성을 바탕으로 수분과 유분 등의 영향을 최소화 할 수 있는 탈진장치의 개발이 필요한 것으로 사료됨.



도로변 미세먼지 터널 내 미세먼지

<그림 2-20> 도로변 및 터널 내 미세먼지 SEM 사진

2. 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리기술

2.1 대기오염물질 저감기술

○ 표 2-4는 주요 대기오염물질 별 저감기술을 나타낸 것임.

<표 2-4> 대기오염물질 저감기술 현황

구 분	대상 기술
미세먼지 저감기술	○침강집진, 원심력집진, 세정집진, 전기집진, 여과집진
질소산화물 저감기술	○Low NOx법, 배기가스순환법, 2단연소, 물/수증기 분사법, 선택적 촉매 환원법, 선택적 무촉매 환원법
황산화물 저감기술	○건식법, 반건식법, 습식법, 순환 유동층 연소법
다이옥신 저감기술	○촉매분해, 플라즈마 분해, 아아크방전, 활성탄 흡착법

가. 미세먼지 저감기술

○ 주로 사용되는 것으로 중력을 이용하는 침강집진, 싸이클론(cyclone)과 같은 원심력집진, 벤튜리 스크러버(venturi scrubber)와 같은 세정집진, 전기집진기와 같은 전기집진, 백필터(bag filter)와 같은 여과집진 기술 등이 있음.

<표 2-5> 미세먼지 저감기술 별 특성

대상기술	내 용
침강집진	○주로 입경이 큰 먼지 제거에 사용되고 원리와 구조가 간단하여 설치, 가동비가 저렴함.
원심력집진	○설치비가 저렴하고 유지비도 적게 소요되나 입경이 10㎛ 이하인 경우에는 효율이 떨어짐.
세정집진	○물 등을 아주 작은 액체 입자로 만들어 먼지를 함유한 기체와 접촉시킴으로써 제거하는 기술로 배기가스 내에 함유된 유해기체를 함께 제거할 수 있는 장점이 있으나 폐수처리비용이 많이 소요됨.
전기집진	○정전기력을 이용하여 먼지를 포집하여 제거하는 기술로 작은 입자제거에 효과적임.
여과집진	○여과포 등을 이용하여 먼지를 제거하는 기술로 먼지 발생공정 및 연소설비 등에 광범위하게 적용

나. 질소산화물 저감기술

○ 질소산화물은 크게 연료내의 질소 성분이 연소하여 발생하는 fuel NOx와 연소용 공기 중의 질소와 산소가 반응하여 발생하는 thermal NOx로 구분됨.

○ 저감기술은 크게 Low NOx 버너, 배기가스 순환법, 2단연소, 물/수증기 분사 등과 같이 연소 방법을 변경시키는 것과 선택적 촉매·무촉매 환원법과 같이 배기가스 내의 질소를 제거하는 기술로 나눌 수 있음.

<표 2-6> 질소산화물 저감기술 별 특성

대상기술	내 용	효 율
Low NOx 버너	○연소실 내에서 버너의 위치를 잘 선택하여 연소실 내의 온도 분포를 균일하게 하여 고온 부분을 피함으로써 질소산화물을 저감시킴.	40~60%
배기가스 순환법	○배기가스를 순환시켜 연소용 공기에 혼합하여 연소실로 보냄으로써 배기가스가 불꽃을 냉각시키는 효과를 이용하는 방법	10~30%
2단 연소	○연소용 공기를 2단(버너부분과 버너 윗부분)으로 공급하여 불완전 연소와 완전 연소를 통해 저감시키는 방법	10~30%
물/수증기 분사법	○연소로 내에 물이나 수증기를 분무하면 산소와 수소로 분해되는 흡열반응이 일어나 연소 온도가 낮아지면서 질소산화물의 생성이 억제됨.	30%
선택적 촉매 환원법 (SCR : Selective Catalytic Reduction)	○암모니아 적정량을 배기가스에 분사하여 TiO_2 또는 V_2O_5 촉매층을 통과시켜 질소산화물을 질소와 물로 분해시키는 방법	99% 이상
선택적 무촉매 환원법 (SCNR : Selective Noncatalytic Reduction)	○촉매 없이 연소로 내에 암모니아 또는 암모니아수를 분사하는 방식으로 SCR에 비해 건설비, 유지관리비가 저렴	50~80%

다. 황산화물 저감기술

○ 물이나 액체 약품의 사용여부에 따라 건식법, 반건식법, 습식법으로 구분할 수 있고, 이밖에도 발전소에서 이용하는 순환 유동층 연소법이 있음.

<표 2-7> 황산화물 저감기술 별 특성

대상기술	내 용	효 율
건 식 법	○CaO, MgO와 같은 흡착제를 이용하여 황산화물을 제거하는 방법	50%
반건식법	○$Ca(OH)_2$ 슬러리 등을 이용하여 제거하는 방법	90%
습 식 법	○NaOH 등과 같은 용액을 이용하는 방법으로, 건설비와 운영비가 많이 들고 별도의 폐수처리시설이 필요함.	95%
순환유동층 연소법	○석탄을 석회석과 적정 비율로 혼합하여 보일러 내에 넣고 공기의 속도를 증가시키면서 연소하는 방법	90%

라. 휘발성유기화합물(다이옥신) 저감기술

○ 대표적인 다이옥신 배출시설로는 도시쓰레기 소각시설을 들 수 있고, 다이옥신을 저감시키는 기술로는 크게 소각 전에 쓰레기 내에 염소를 포함하고 있는 물질을 제거하는 방법과 소각로 내의 온도를 최소 800℃ 이상 유지하는 방법, 소각로 후단에서 활성탄 등을 이용하여 제거하는 방법 등이 있음.

○ 이 밖에 촉매분해, 플라즈마 분해, 아크방전 등의 방법이 있으나 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내 수준 또한 아직 초기단계임.

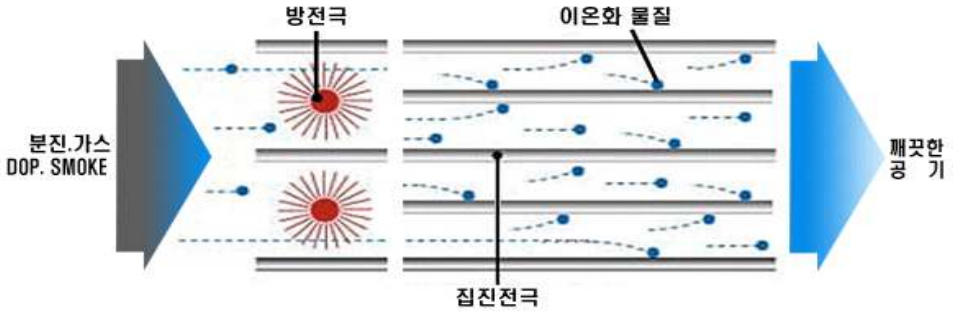
<표 2-8> 휘발성유기화합물 저감기술 별 특성

대상기술	내 용
활 성 탄 흡 착 법	○ 연소가스 중에 활성탄을 분사하거나, 연소가스가 활성탄층을 통과 하도록하여 다이옥신을 포함한 유해 유기물을 흡착하는 방법. 설치비가 저렴하여 국내에서 널리 사용
촉매분해	○ 다이옥신을 함유한 연소가스를 촉매층에 통과시켜 산화 분해시키는 방법으로 보통 300℃ 이상의 온도가 요구되며 촉매의 가격이 고가임.
플라즈마 분 해	○ 연소가스를 고온의 플라즈마에 통과시켜 다이옥신이 분해되도록 하는 방법으로 에너지 비용이 많이 소요
아 아 크 방 전	○ 연소가스를 고온의 아아크 불꽃에 통과시켜 다이옥신이 분해되도록 하는 방법으로 재합성의 우려가 있음.

2.2 터널 내 적용된 미세먼지 및 유해가스 저감 설비 시스템

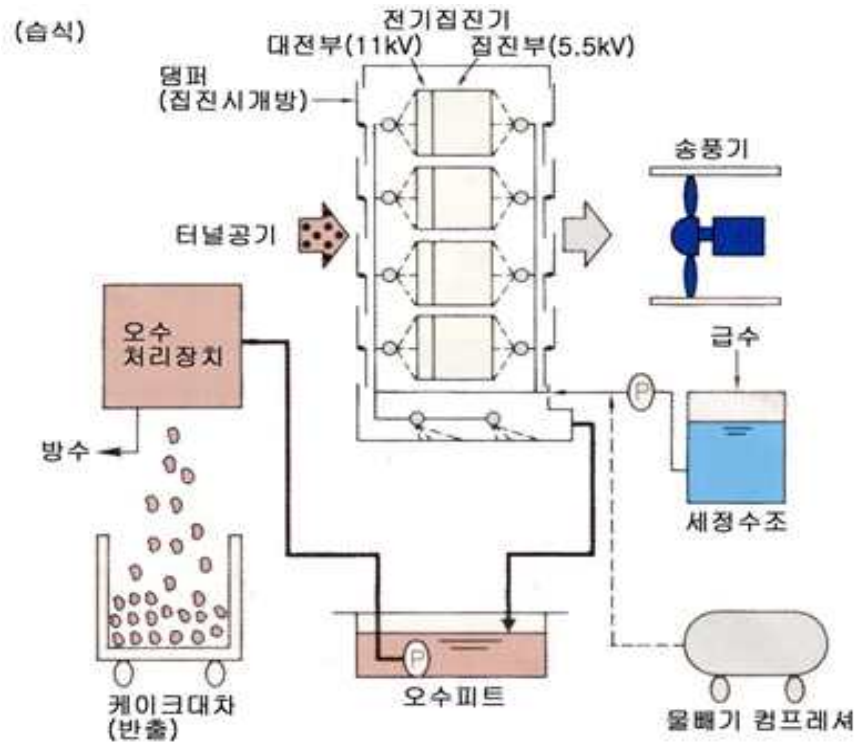
가. 전기집진설비(E.P Filter)

○ 전기집진설비는 원리는 축류팬에 의해 터널내부에서 발생된 입자(분진, 매연)를 집진실로 유인후 강한전압으로 하전 되어 있는 이온샤워공간을 통과시키면 미립자는 IONIZER의 코로나 방전으로 인해 방출되는 전자가 흡착되어 양이온화가 되며, 하전입자가 극판의 집진부를 통과하면서 접지극판으로 유도·포집되는 원리를 이용함.



<그림 2-21> 전기집진기 구조

○ 터널에서 주로 사용되는 습식설비의 처리계통도는 다음 그림과 같이 송풍기를 이용하여 터널공기를 전기집진설비내로 유입시켜 극판에 포집하며, 포집된 먼지를 습식세정하여 오수처리장치를 통해 케이크 형태로 반출하는 체계를 따름.



<그림 2-22> 터널용 습식 전기집진설비의 처리 계통도

○ 터널용 전기집진기는 2단식전기집진기에 속하며, 저농도의 매연 미립자를 함유한 대용량의 공기를 처리해야 하므로 집진 부분의 통과풍속을 터널 내의 일반적인 풍속인 1~5 m/s에 비해 고속인 7 m/s정도로 하는 것이 일반적임.

○ 터널용 집진기는 미세한 매연입자(대부분 입경 0.2㎛이하)를 함유한 공기에서 집진하기 때문에, 중량법(하이볼륨샘플러)에 의한 농도에서 구하는 집진율과 매연투과율에 의한 농도에서 구하는 VI 개선율과의 사이에 명료한 상관관계를 얻기 어렵다. 그러나 디젤차의 매연을 대상으로 한 집진기의 성능시험에 있어서 중량법으로 집진율을 80%이상 확보하면 매연투과율 개선율도 거의 80%를 기대할 수 있다는 시험결과가 보고된 바 있음.

○ 전기 집진기 설비(E.P Filter)은 크게 일본식과 유럽식으로 나눌 수 있으며, 각각의 항목별로 살펴보면 표 2-9와 같음.

<표 2-9> 전기집진설비의 해외 적용사례

항목		일본식	유럽식
개요		-전기집진기(EP Filter), 물세척 설비, 폐수처리장치(매연의 Cake화), 제어시스템 등으로 구성 -집진된 환기풍은 터널상부 Duct(Nozzle)를 통하여 차도로 송풍하는 시스템 -2계열 분할 설치가 원칙임	-프리필터, 전기집진기(EP Filter), 물세척 설비, 히트펌프, 전원 공급장치, 제어 시스템 등으로 구성 -집진된 환기풍은 터널 측벽에서 차도로 송풍하는 표준형과 송풍기 하류측에만 닥트를 설치하여 터널상부에서 송풍하는 방식으로 국내에서 변형시킨 변화형의 2가지 방식이 있음 -1계열 설치가 원칙이나 2계열 설치가능
설치실적 (by pass용)		-JAPAN Kanetsu 터널 외 -국내실적 : 수정산터널, 우면산터널 외	-NORWAY Granfoss 터널 외 -국내실적 : 진부터널 외
구조	유닛구성	-Cell의 규격은 5m3/s로 이것을 조합하여 10, 15, 20, 30, 40m3/s가 있으며, 각 Unit을 조합하여 집진기 소요풍량 만족 -중량 : 0.8 / 1.4 / 3 / 4 / 6 / 8ton/Unit	-Cell의 규격은 2.5m3/s (610 mm x 845mm)를 조합하여 집진기 소요풍량을 만족하고, 전단에는 프리필터 설치 -중량 : 82kg/Cell
	세정방법	-습식 수세정하며, 집진기를 부분적으로 세정하므로 세정 시 집진기 정지 없음 -수세정은 기본적으로 60m3/s Unit 단위마다 정기적으로 시행 -세정펌프, 세정수 저수조, 폐수저류조등의 세정용 기기로 구성 -세정시간: 60min/회 -세정수량: 5.5m3/회 -세척주기: 24hr/대	-습식 수세정하며, 집진기 전체를 동시에 세정하므로 세정 시 집진기 정지 -세정펌프, 세정수 저수조, 폐수저류조, Heat pump등의 세정용 기기로 구성 -세정시간: 225min/회(건조포함) -세정수량: 5m3/회/대(재생순환식 시스템 사용) -세척용제: 0.5m3/회/대 -세척주기: 300~500hr/대
	설치방법	집진기실 길이 방향으로 2계열로 나누어 소요풍량의 절반에 해당하는 집진기 용량을 설치하므로 집진기 설치부의 굴착단면적 축소	-집진기 전단에 프리필터를 설치 -집진기실 전체를 1계열로 하여 전체 소요풍량의 집진기를 설치하므로 집진기 설치부의 굴착단면적이 큼
사양	처리풍속	9m/s 이하	7.8 m/s 이하
	집진효율	디젤매연에 대해 중량법 80% 이상	EUROVENT 4/9의 계수법에 의해 0.3~10μm에 대해 90 %이상
	압력손실	20mmAq / 처리풍속 9m/s (집진기 전체)	56/ 처리풍속 약 6m/s(프리 필터부 : 15mmAq, 전기 집진기 : 6mmAq)
	대인가전압	DC + 11 ± 0.5kV	DC 11~15kV
	집인가전압	DC + 5.5 ± 0.5kV	DC 5.5~6.5kV
재질	프레임	강판제용접구조 t = 4.5mm 이상	스테인레스 강
	대전부	STS 304 상당 t = 0.5mm	스텐레스강 t = 1.0mm
	집진부	STS 304 상당 t = 0.5mm	Aluminium t = 1.0mm
	프리필터	없음	-초프레임: 에폭시코팅강판 -필터: Corten Steel
폐수 처리	방식	저류조, 여과기, 탈수기 등을 별도로 설치하여 폐수 Slurry를 Cake화하여 외부 반출	재생순환식 시스템을 채용하여 Slurry상태로 Tank에서 진공차로 외부 반출하는 방식
	방류수질	SS 40ppm 이하	재생순환식 시스템 채용
	1차분진	없음	프리필터에서 제거된 분진은 별도의 세척처리후 배출
	케익함수율	함수율 70%	액상 슬러지 상태
	소요동력	약 6.0kW	약 53kW
화재시 대응성		-집진기 자체는 연기제거가 가능하지만 집진기를 이용한 화재시 연기제거는 하지 않음 -화재시 화염이나, 연기의 제어는 집진기보다 제트팬 쪽이 유리함 -송풍기, 집진기실내 전기실 등의 부대설비가 화재시 소손될 우려가 있으므로 가동치 않음 -집진기의 매연부착능력에 한계가 있어 화재시 불과 수분만에 집진기의 기능을 상실함	-집진기 자체는 연기제거가 가능하지만 집진기를 이용한 화재시 연기제거는 하지 않음 -화재시 화염이나, 연기의 제어는 집진기보다 제트팬 쪽이 유리함 -송풍기, 집진기실내 전기실 등의 부대설비가 화재시 소손될 우려가 있으므로 가동치 않음 -집진기의 매연부착능력에 한계가 있어 화재시 불과 수분만에 집진기의 기능을 상실함

○ 일본식은 압력손실이 작고 2계열로 나누어져 있어 1계열이 고장나 사용이 불가능한 경우에도 다른 1계열의 작동으로 대체할 수 있음.

○ 그러나 유럽식에 비하여 초기투자비가 높으며, 세척주기가 짧아 동력비가 다소 증가하는 단점이 있음.

○ 현재 국내에는 수정산 터널, 우면산 터널 등에 설치되어 있으며 일본의 오리가봉터널, 해나산터널 등에 설치가동 중에 있음.

○ 유럽식은 터널내 가시거리에 영향을 미치는 0.1㎛이하의 입자상 물질에 대한 집진효율이 우수하며, 구동부가 거의 없기 때문에 고장 발생율이 적으며, 집진 Cell이 고장났을 경우 Cell단위 교체가 가능하므로 유지보수가 용이한 장점이 있으나, 압력손실이 커 동력비가 증가함으로써 유지관리비가 높은 단점이 있음.

○ 현재 국내에서는 진부 터널의 상행선 등에 설치되어 있으며, 노르웨이(Oslo 터널), 독일(ELbe터널), 스웨덴(Stockholm Ring) 등에 다수 설치되어 가동되고 있음.

○ 전기집진기는 오염물질 중 입자상물질의 제거에만 효율적이므로 타 설비의 전처리 장치로 활용되는 것으로 조사되었으며, 교통흐름에 영향을 주지않는 범위내에서 오염물질 처리를 위하여 최대환기량의 30~40%를 처리용량으로 설계되고 있음.

○ 터널에 적용되는 전기집진기의 경우 습식 전기집진장치이므로 폐수 및 폐케익의 2차 오염 저감시설이 추가적으로 요구되며, 집진기 설비 가격이외에 터널내부에 집진기 설치 공간마련을 위한 토목공사비가 필요하다. 유지관리비는 단위처리풍량(㎥)당 0.41kW의 전력소모가 있으며 폐수 및 폐케익의 처리비가 별도로 요구됨.



<그림 2-23> 유럽식 전기집진기



<그림 2-24> 일본식 전기집진기

나. Twin System

○ 환기공기 중 NOx 처리를 위하여 개발된 Twin system은 1992년 노르웨인 ABB ALSTOM POWER A/S와 노르웨이 도로공단이 가스정화에 대한 연구를 시작하여, 노르웨이 오슬로의 Festings 터널에 가스정화 시험설비를 설치하였음.

○ 전기집진기와 광촉매를 이용한 NOx 처리로 구성되어 있어 Twin system으로 알려져 있으며, 장기간 사용시 NOx의 처리효율 저하를 위하여 활성탄 필터를 추가적으로 설치한 설비임.

○ 노르웨이의 Oslo 터널에서 3년 동안 24,000시간이상 시험설비를 가동하였으며, NO2 정화시스템의 장시간 성능저하를 방지하기 위하여 특별한 형식의 활성탄 촉매를 사용한다. 입자상오염물질인 검댕과 먼지로 인해 장시간 사용시 활성탄 필터(carbon filter) 막힘 현상이 발생하였으며, 이에 따라 가스 정화시스템 전방에 효과적인 분진 제거가 필요하게 되었고, 이를 개선한 후, 1998년 터널 환기공기의 정화 시스템이 상용화하게 되었음.

○ 표 2-10은 Festings 터널에서 시험 검증된 결과를 타나낸 것임.

<표 2-10> Festings 터널 내 오염물질 처리 효율

구분	세부내용			
처리용량 및 규모	○ 10,000㎥/hr, Scale : 1:360			
가스정화 대상물질	○ 분진, NO_2, VOCs			
설비별 정화물질	○ 전기집진기 : Soot 및 Dust ○ Carbon Filter : VOCs ○ 필터 촉매작용 : NO_2 및 O_3			
처리 후 발생물질	N_2, NO, CO			
설비효율	Soot/Dust	NO_2	VOC	O_3
	90%	85~90%	-	-

○ 시스템의 구성은 분진이 촉매반응을 저해하는 것을 방지하기 위하여 NO_2 정화기 상류에 전기집진기를 필수적으로 설치하였으며, 촉매제로 채워진 베드(NO_2 filter) 밑으로 오염된 공기가 들어와 분산되어 통과하는 구조로 되어있으며, 전동댐퍼를 설치하였음.

○ 정화기 전·후에 NO_2 측정 장치를 설치하여 시스템의 효율을 모니터하며, 축류팬, 댐퍼, 측정 장치는 PLC에 의해 자동적으로 제어됨.

○ 시스템 성능은 오염된 공기 중 NO_2만을 처리하고 NO는 처리할 수 없으며, NO는 O_3에 의하여 NO_2로 산화될 수 있으나 장대터널의 경우는 터널 내에 O_3가 존재하지 않음으로 인하여 도심터널의 경우 NO_2만을 정화하는 것으로 충분한 것인지에 대한 논쟁의 여지가 발생할 수 있음.

○ NOx 중 NO_2의 구성비는 체적기준으로 7~10% 범위에 있으며, 터널제반조건(교통량, 차종 구성비, 종단경사, 터널연장 등)에 의존하지만 통상적인 터널 내에서 농도는 NO_2는 200~1,000ppb, NO는 3~10ppm 정도였으며, Twin system을 통과한 경우

NO_2는 40ppb 정도로 줄어드나 NO는 그대로 3~10ppm을 유지하였으며, 약 16,000시간 가동 후 필터의 압력상승 때문에 NO_2 필터 청소가 필요함.

○ 본 설비는 2000년 세계 최장 터널(24.5km)인 노르웨이 Laedal 터널에 설치되어 운영되고 있음.

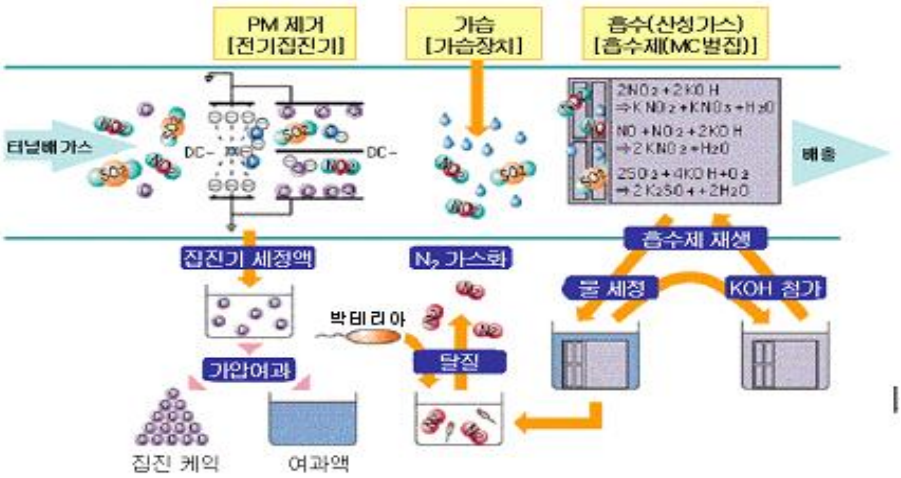
○ 이 설비는 3단(전기집진기-촉매필터-활성탄필터)으로 구성되어 있어 초기 설치비가 상당히 고가이며, 주로 NO_2 형태의 질소산화물을 처리하므로 터널내부에서 주 질소산화물인 NO(90%정도)를 오존 등을 통하여 전처리로 산화시켜 NO_2 형태로 전환하여야 하며, 장시간 사용 후 필터 등에 막힘 현상이 발생할 수 있으므로, 필터 교체비용 및 유지관리 비용이 타 설비에 비하여 높은 편임.

다. 산화 흡수·흡착 설비

○ 환기가스 중 NOx를 오존주입과 전자선 조사를 병행하여 전처리하여 NO를 NO_2로 산화시켜 활성탄에 흡수·흡착시키는 장치로 다량의 NO_2를 흡수·흡착한 활성탄을 재생하여 재사용함.

○ 흡수·흡착 설비를 이용한 저농도 탈질설비는 1991년부터 1994년까지 소규모 현장 시험설비(pilot plant)를 통하여 NOx 정화기술의 기본적인 효율을 정립하였으며 안전성, 내구연한, 공간 및 에너지 소모 등에 관한 문제를 검토하기 위하여 대형 시험설비를 1996년에 제작하여 Metropolitan Express Bay Shore Route Kuko-kita 터널 Keihinjima 환기소에 설비를 설치하여 가동 중에 있음.

○ 흡수·흡착 설비는 분진이 촉매반응을 저해하는 것을 방지하기 위하여 NO_2 정화기 상류에 전지집진기를 필수적으로 설치하여야 하며, 흡수탑 4개 중 3개는 NOx를 흡수하고 1개는 흡수된 NOx를 SCR 촉매장치와 반응시켜 N_2와 H_2O로 분해시키는 시스템으로 구성되어 있음.



<그림 2-25> 산화 흡수·흡착설비

○ 설비의 구성은 분진이 촉매반응을 저해하는 것을 방지하기 위하여 NO_2 흡수기 상류에 전지집진기를 필수적으로 설치하며, 흡수탑은 NOx를 흡수하고 흡수된 NOx를 SCR 촉매장치와 반응시켜 N_2와 H_2O로 분해시키는 시스템으로 구성되어 있음.

○ 설비의 성능을 검증하기 위하여 Kuko-kita 터널에서 시스템 성능을 시험하였으며, 시스템의 처리대상물질별 평균 처리효율은 다음과 같음.

<표 2-11> Kuko-kita 터널 내 산화 흡수·흡착 설비의 처리효율

처리 대상 물질	NOx	NO_2	SO_2	HC	CO
처리 효율 (%)	83~97	94~99	99	7~27	6~18

○ 산화 흡수·흡착설비의 경우 처리효율이 우수하며, 여러 가스상오염물질을 동시에 처리할 수 있는 장점이 있으나, 설비보호를 위하여 전처리 장치로 전기집진장치를 설치해야 하며, 후처리 장치로 SCR을 설치해야하는 등 설치비용이 높으며, 흡수탑의 유지관리비용이 상당히 높은 것을 판단됨.

○ 흡수제를 이용하여 상용화된 기술 중 하나가 수도고속도로연안선 공항북터널 케이힌지마(京浜島)환기소에 설치되어 가동 중에 있고, 이 설비는 흡착시스템과 흡수시스템으로 구성되어 있음.

○ 이 설비는 특수하게 제작된 MC벌집에 의해, 공기중의 유해한 NO_2를 제거하는 시스템으로 MC벌집(NO_2 흡수제)를 이용해, 자동차의 배기가스에 포함되는 NO_2를 효과적으로 제거하여 터널내의 공기를 깨끗하게 유지하며 정화된 공기를 터널외부로 배출하는 시스템임.

○ 공항북터널의 케이힌지마(京浜島)환기소에 설치된 시스템은 처리용량이 8㎥/s이며, 오염물질의 일평균 처리효율이 NO_2는 90%이상, PM은 80% 이상을 목표로하여 설치·가동되었음.

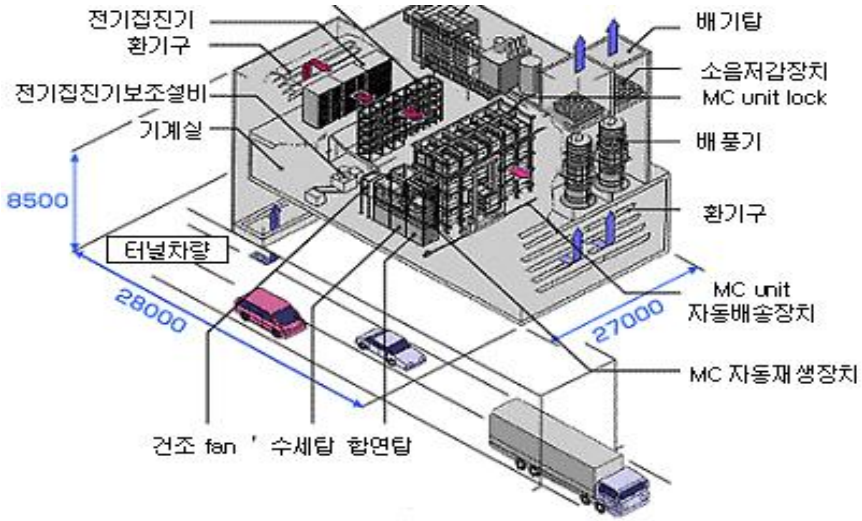
○ 현재 알려진 이 흡수·흡착설비의 오염물질 처리효율은 다음과 같음.

<표 2-12> 케이힌지마 환기소 흡수·흡착 설비의 처리효율

시스템		NO_2 탈질	NOx 탈질
대상시설		터널 또는 지하 주차장	
제거율(%)	NO	10	80
	NO_2	90	80
	SOx	80	99
	검댕	87	98
MC벌집의 주성분		활성탄, 석고, 결합제, KOH	

○ 이 흡수·흡착설비는 80%이상의 높은 NO_2 제거효율을 나타내며 또한, NO2 이외의 유해 오염물질의 제거가 가능한 설비임.

○ 상온·상압의 조건에서 오염물질을 화학적으로 흡수·제거하므로 유해한 2차 오염물질의 생성이 억제되며, 다음과 같은 컴팩트한 설비로 설치 비용이 저렴할뿐 아니라 유지관리비도 적은 장점을 갖음.



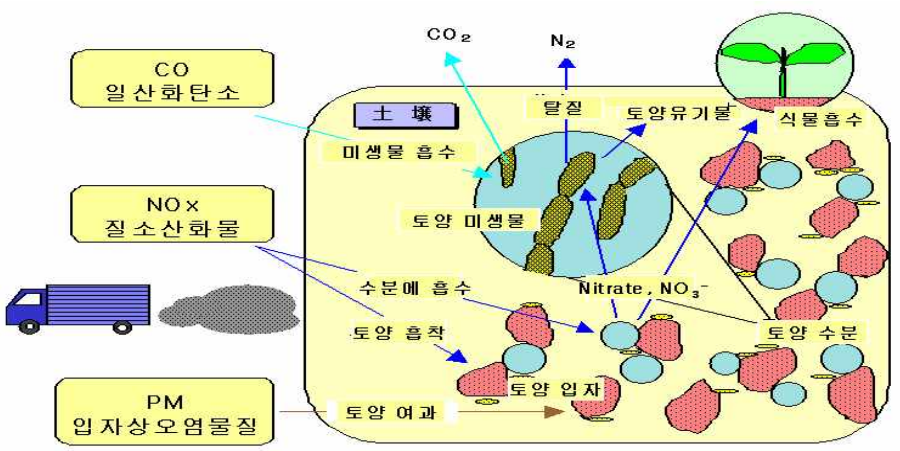
<그림 2-26> 산화 흡수·흡착설비의 시스템 구성도

○ 그러나 전처리를 위하여 전기집진기를 설치하여야 하며, NO_2의 처리는 용이하나 터널내 대부분의 질소산화물이 NO 형태이므로 질소산화물 전체에 대한 처리효율은 저하되므로 이를 극복할 수 있는 전처리 장치가 필요함.

○ 또한, 설비에서 발생하는 폐수 및 폐케익의 처리 비용이 추가되며 흡수액(KOH)의 지속적인 보충이 필요한 단점이 있음.

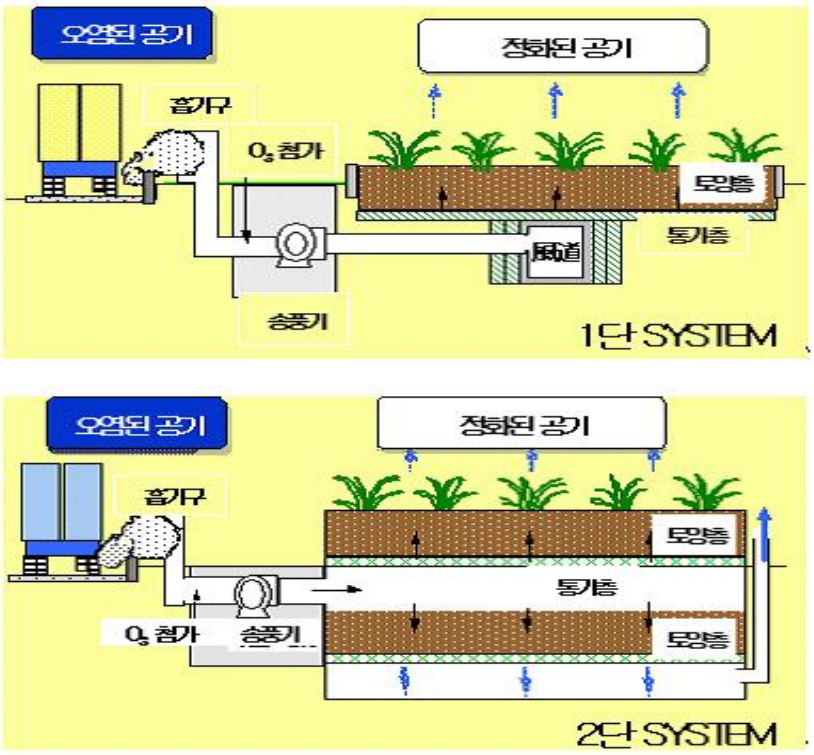
라. 토양정화설비(EAP System)

○ 토양정화설비(EAP, Earth Air Purifier)는 대기오염물질을 흡입장치를 통해 흡수하여 오존처리한 후 흙속에 있는 미생물 및 박테리아의 분해 작용과 물의 세척작용을 이용해 자동차 배기가스로 오염된 대기 중의 오염물질을 친환경적으로 정화하는 시스템임.



<그림 2-27> 토양정화설비의 처리 원리

○ 토양정화설비는 가스상 물질뿐만 아니라 입자상 물질도 토양의 필터작용에 의하여 제거 가능하므로 전처리장치로써 전기집진기가 불필요하여, 초기 공사비가 타 설비에 비하여 저렴함.



<그림 2-28> 토양정화설비의 시스템 구성

○ 토양정화설비의 시스템 구성은 1단 system, 2단 system 크게 2가지 형태로 구성할 수 있으며, 질소산화물 처리효율의 향상을 위하여 NO를 NO_2로 산화시키는 O_3처리 공정이 추가되어 있음.

○ 도로 또는 터널의 측면부에서 흡기구를 통하여 흡기된 오염 공기를 토양에 통과시켜 토양내 입자 및 수분에 흡수흡착 시키는 물리적 공정과 질소고정박테리아 등 미생물에 의해 처리되는 생물학적 처리공정을 거쳐 N_2의 형태로 대기중으로 유입되며, 질소산화물뿐만 아니라 CO, 미세먼지, VOCs 등 자동차 배출 오염물질의 동시 처리가 가능함.

○ 타 설비에 비하여 필터 교체, 폐수처리설비 등이 필요하지 않음으로 인해 저렴한 비용 유지관리가 가능하며, 설비의 수명이 반영구적이라 할 수 있으나, 유지관리에 고도의 기술력을 요구함.

○ 토양정화설비는 일본 오사카 소재 한나터널에서 실증시험을 수행하였고, 시험결과 질소산화물 뿐만 아니라 기타 오염물질에 대한 처리효율이 매우 우수하며 또한 유지관리비가 적게 소요되는 것으로 나타남.

○ 실증시험설비의 제원은 다음과 같음.

<표 2-13> 한나터널 내 토양정화시설 설비 제원

시설면적	400㎡ (200㎡ × 2개소)
처리풍량	29,000㎥/hr (14,500㎥/hr × 2개소)
Suction 방식	환기탑 점검실로부터 환기가스를 분리하여 suction
송풍기 규격	22kW
오존발생기	3.7kW (max. 130g/hr)

○ 실증시험에서 처리효율 조사결과 질소산화물의 제거효율이 90% 이상을 나타내었으며, 기타 오염물질을 포함하는 대기오염물질에 대한 처리효율은 다음과 같음.

<표 2-14> 한나터널 내 토양정화시설 설비 처리효율

항목	입구농도(ppm)	출구농도(ppm)	제거율(%)
SO_2	0.004	0.000	91.4
NO_2	0.070	0.001	98.7
NOx	0.793	0.011	98.7
PM10	0.159	0.003	98.0
NMHC	1.34	0.44	66.0
CO	10.8	0.07	99.4

○ 토양정화설비는 타 설비에 비하여 설치 부지를 많이 요구하므로 터널 출구 주변 지역에 여유부지가 전혀 없는 경우에는 설치가 곤란하다는 단점이 있음.

3.3 터널 환기 방식

○ 터널의 환기는 크게 자연환기와 기계환기 방식으로 분류할 수 있으며, 기계환기방식은 다시 종류식, 반횡류식, 횡류식으로 구분할 수 있음.

○ 터널의 환기 방식은 터널 내 차량에 의해 발생하는 대기오염물질을 외부로 확산시켜 내부의 공기를 정화하는 목적이 있음.

○ 국내의 경우 대부분의 터널 건설 시 지형적 특성에 맞는 환기 방식을 적용하고 있으나 터널 내 대기오염물질 발생 특성을 고려하지 않고 있음.

○ 이는 현재 국내의 터널 건설 시 오염물질의 규제 기준이 마련되어 있지 않고, 일부 CO, NOx에 대한 환기시스템 설치를 위한 권고 기준만이 제시되어 있는 실정임.

○ 이처럼 터널 내 공기질 개선을 위해 적용되는 환기 시스템은 터널의 특성과 더불어 오염물질의 발생 특성도 고려하여 환기 방식을 결정하는 것이 중요함.

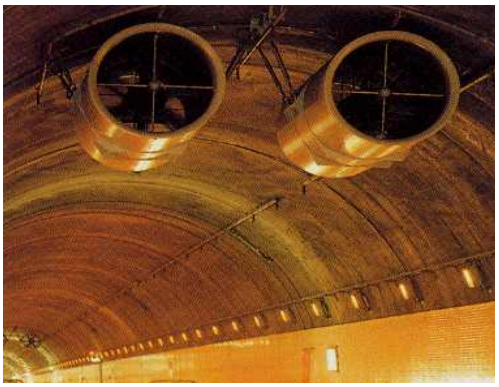
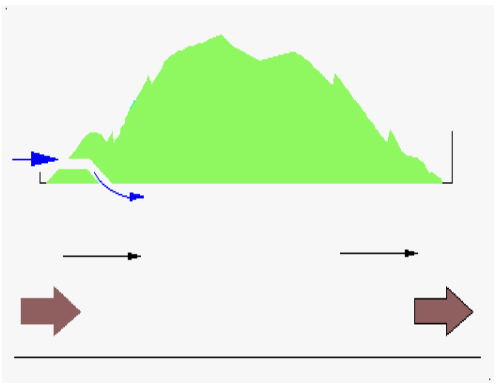
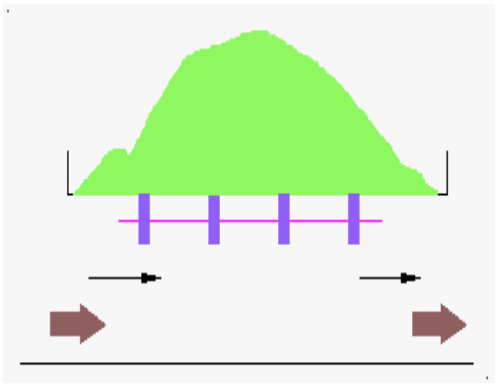
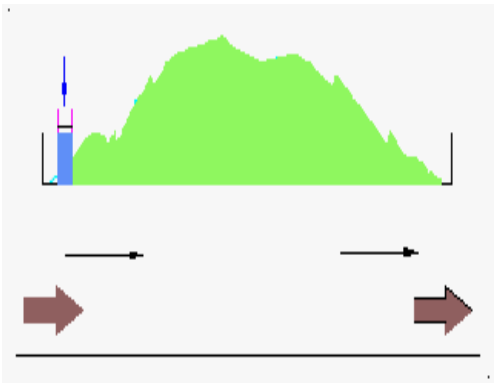
○ 따라서 터널 내 공기질 개선을 위해 적용되고 있는 환기 방식에 대한 특성을 검토하였고, 표 2-15는 터널에 적용되고 있는 환기 방식을 나타낸 것임.

<표 2-15> 터널 환기 방식 개요

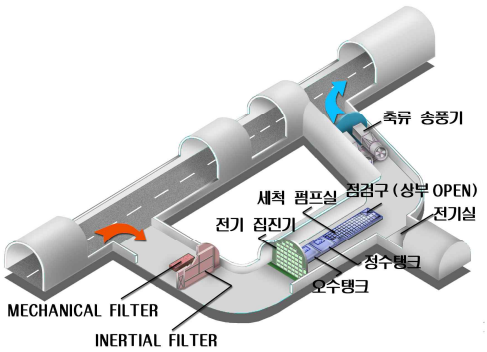
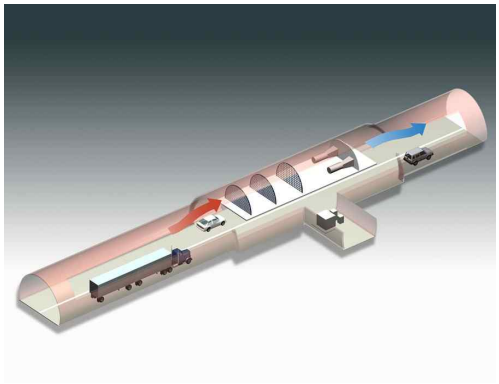
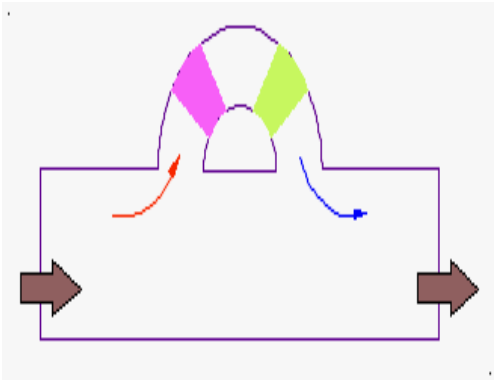
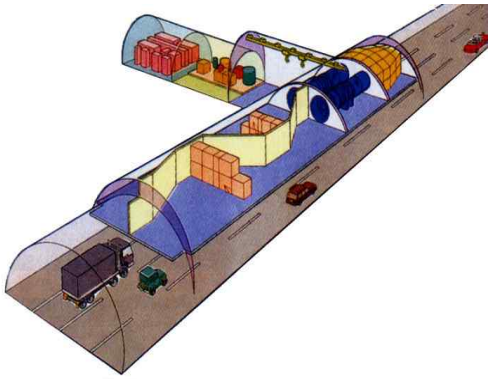
환기방식	특 징	비 고
종류식	○ 터널 내 차량진행(종)방향으로 기류가 발생하며, 교통환기력을 유효하게 이용할 수 있음. (터널 내 닥트가 필요하지 않음)	○ 제트팬방식, 삭칼드방식, 수직갱방식, 집진기방식, 집중배기방식 등
반횡류식	○ 터널에 평행하게 설치된 덕트에 의해서 송기 또는 배기되고 차도내 종방향의 흐름이 발생.	○ 송기방식, 배기방식
횡류식	○ 터널 덕트에 의하여 송기와 배기가 동시에 이루어지기 때문에 횡방향의 흐름이 발행하고 차도를 흐르는 풍량은 비교적 작음	-

○ 각 환기방식별 특징을 자세히 살펴보면 다음과 같음.

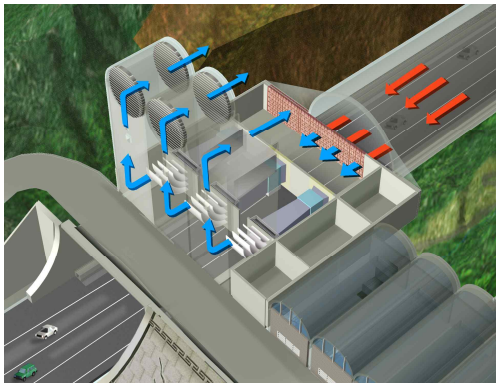
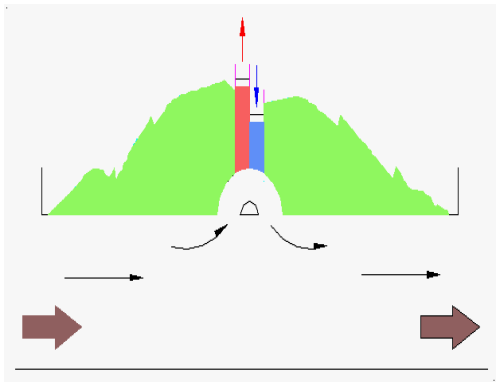
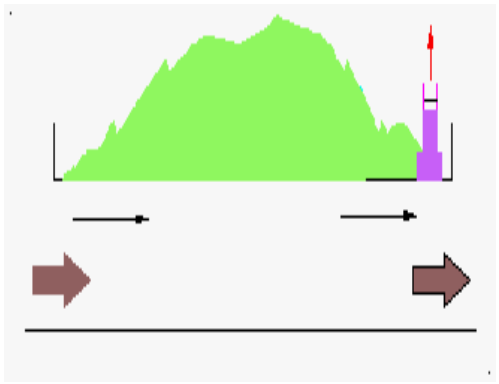
<표 2-16> 종류식 환기 방식

구분	JET FAN 방식	삭칼드 방식
환기방식		
개요도		
특징	○터널내 종방향으로 JET FAN을 설치하여 차량의 피스톤 효과를 유효하게 이용하는 방식	○터널 입구부의 환기소에서 대형송풍기로 깨끗한 공기를 급기 시켜 유인풍속과 차량의 피스톤 효과를 이용하는 방식
장점	○교통환기력을 유효하게 이용 ○개통후 환기설비 추가 설치 가능 ○덕트가 없으므로 경제적임.	○교통환기력을 유효하게 이용 ○일반적인 특성은 제트팬과 동일함.
단점	○오염물질 전량 배출 ○터널 내 제트팬을 장착함으로 미관상 좋지 못함.	○오염물질 전량 배출 ○입구부 대형분류장치를 설치함으로 굴착단면 확대됨. ○대풍량의 고속분류가 차도를 흐름
적용사례	○경부고속도로 마성터널(1.5 km) ○중부고속도로 상주터널(1.7 km)	- (국내 적용사례 없음)

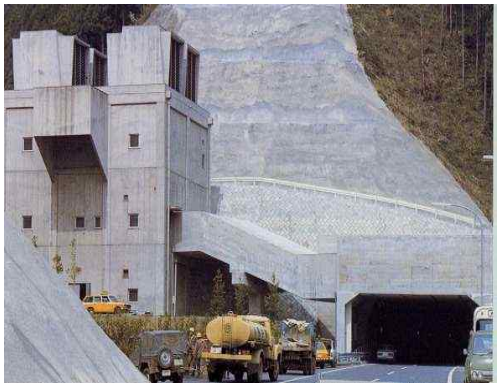
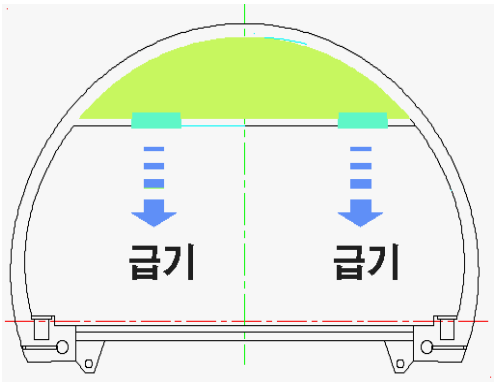
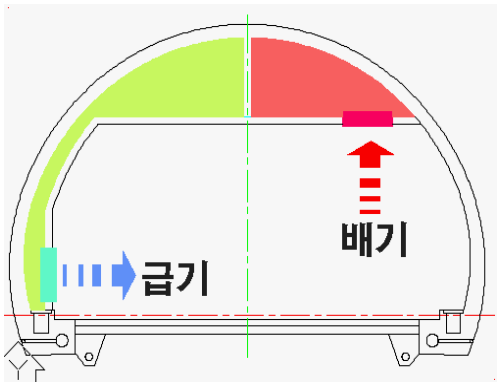
<표 계속>

구분	전기집진기 방식(바이페스형)	전기집진기 방식(천정형)
환기방식		
개요도		
특징	○ 터널 중간부에 전기집진기를 설치하여 정전기원리를 이용 터널내 발생매연을 집진시켜 깨끗한 공기로 재이용하는 환기방식	
장점	○ 천장형에 비하여 대용량 처리가능 ○ 출구부 오염물질 환경개선 ○ 시공사례가 많음	○ 바이패스방식에 비해 공기의 순환 효율이 좋음. ○ 환기저항이 적어 동력비 절감 ○ 출구부 오염물질 환경 개선
단점	○ 화재시 운전 정지 ○ 별도의 바이패스 갱 설치비 소요	○ 화재 시 운전 정지 ○ 본선 확폭 구간이 필요 ○ 바이패스 방식에 비해 설치용량이 작으며, 전문적인 시공기술이 요구됨
적용사례	○ 영동고속도로 진부터널(2.0 km) ○ 우면산터널(1.6 km)	- (국내 적용사례 없음)

<표 계속>

구분	수직갱 방식	집중배기 방식
환기방식		
개요도		
특징	○ 터널 중간부에 수직갱을 설치하여 배기와 급기를 시키는 방식으로 장대터널에 유리한 방식	○ 터널 출구쪽으로 배출되는 오염된 공기를 정화시켜 배출시키는 방식 (대도심지 환경보호용 환기방식)
장점	○ 신선한 외기를 공급함으로 오염물질 농도 조절이 가능 ○ 화재 시 대처가 용이함. ○ 이론적으로 터널길이에 제한 없음.	○ 출구부 오염물질의 방향을 조절할 수 있으며, 도심지에 적합
단점	○ 다른 종류식에 비해 공사비가 크고, 자연 훼손이 큼.	○ 교통 환기력을 유효하게 이용할 수 있으나, 오염물질을 전량 제거하기가 힘 듬. (교통량 및 자연풍의 적정한 운용이 비교적 곤란)
적용사례	○ 영동고속도로 둔내터널(3.3 km) ○ 중앙고속도로 죽령터널(4.5 km)	○ 황령산 제3터널(1.8 km, 설계중)

<표 2-17> (반) 횡류식 환기 방식

구분	반횡류 방식	횡류방식
환기방식		
개요도		
특징	○ 터널 입구에 설치된 환기소에서 터널 단면에 설치된 별도의 환기덕트에 깨끗한 공기를 송기하여 환기시키는 방법 (급기반횡류)	○ 터널 입출구에 설치된 환기소에서 터널 단면에 설치한 별도의 급배기 덕트를 이용하여 깨끗한 공기는 급기시키고, 오염된 공기는 배기시키는 환기방식
장점	○ 터널내 신선한 공기가 급기되어 오염물질이 희석됨. ○ 배기식에 비해 급기식이 터널 내 환경 양호	○ 화재시 대처가 용이함 ○ 종합적으로 볼 때 가장 신뢰성 있는 환기가 가능함.
단점	○ 오염물질은 출구부측에 전량배출 차량의 피스톤 작용을 고려하지 않기 때문에 에너지 효율면에서 종류식보다 떨어짐.	○ 덕트 공간이 커서 내공단면적이 가장 큼. ○ 설비동력이 반횡류식에 비해 고가임. ○ 공사비가 큼.
적용사례	○ 구룡터널(1.6 km) ○ 박달재터널(2.3 km)	○ 남산1호터널(1.5 km) ○ 대전-진주 고속도로간 육십령터널 (3.2 km, 설계 시)

3. 터널 내 미세먼지 및 유해가스 발생 특성

3.1 터널 현장 조사

○ 본 연구에서는 터널 내 미세먼지 및 유해가스의 특성을 조사하기 위하여 국내에 설치되어 있는 1km 이상의 장대터널을 조사하고 현장조사 지점을 확정하였음.

<표 2-18> 국내 장대 터널 현황

구분	노선명	연장	차선	폭원	교통량 (대/hr)	환기방식	관련기관
배후령터널	국도 46호선	5,057	2	11.0	-	횡류식 (급기, 배기)	원주지방국토관리청
능동터널	국도 24호선	4,580	2	12.2	-	수직갱종류식 (송기, 배기)	부산지방국토관리청
죽령터널	중앙고속도로	4,520	2	10.7	1,581	수직갱종류식 + 전기집진	한국도로공사
사패산터널	서울외곽	3,997	4	16.3	-	제트팬 종류식 + 전기집진	서울고속도로
미시령터널	-	3,565		10.8	-	-	-
육십령터널	-	3,171	2	10.9	-	수직갱종류식	한국도로공사
둔내터널	영동고속도로	3,300	2	11.1	2,002	수직갱종류식	한국도로공사
수인터널	국도 46호선	3,200	2		-		
차령터널	천안진주 고속도로	2,360	2	10.7	2,275	수직갱종류식	한국도로공사
창원터널	지방도1020호	2,345	2	11	1,334	반횡류식	경남도청
진부터널	영동고속도로	2,095	2	11.6	1,408	젯트팬종류식 + 집진시설	한국도로공사
경주터널	국도	2,040	2	11.4	130	젯트팬종류식 + 집진시설	부산지방국토관리청
박달재터널	국도38호선	1,960	2	9	-	반횡류식 + 횡류식	대전지방국토관리청
수리터널	서울외곽순환 고속도로	1,866	4	17.9	7,397	반횡류식	한국도로공사
구덕터널	특별시도	1,860	2	9.4	2,421	반횡류식	부산광역시청
남산2호터널	특별시도	1,630	2	9.6	-	젯트팬	서울특별시청
수락터널	서울외곽순환 고속도로	1,600			-	반횡류식	서울고속도로
남산1호터널	특별시도	1,530	2	10.8	3,500	반횡류식	서울특별시
다리재 터널	-	1,500	2	11.4	1,501	젯트팬 종류식	대전지방국토관리청
마성터널	영동고속도로	1,460	2	9.6	2,770	젯트팬 종류식	한국도로공사
수암터널	서울외곽순환 고속도로	1,254	4	17.9	7,397	젯트팬	한국도로공사
구룡터널	언주로	1,180	2	17	-	반횡류식	서울특별시
우면산터널	지방도 31호선	3,000	2	-	-	제트팬 종류식 + 전기집진	서울특별시

○ 본 연구에서는 조사된 장대터널 중 시가지와 인접하여 터널에서 발생하는 오염물질이 인근 주민에게 영향을 받을 것으로 예상되는 남산1호터널, 수리터널, 구룡터널, 우면산 터널에 대하여 터널 내 오염물질을 조사하였음.

가. 남산1호 터널

(1) 개요

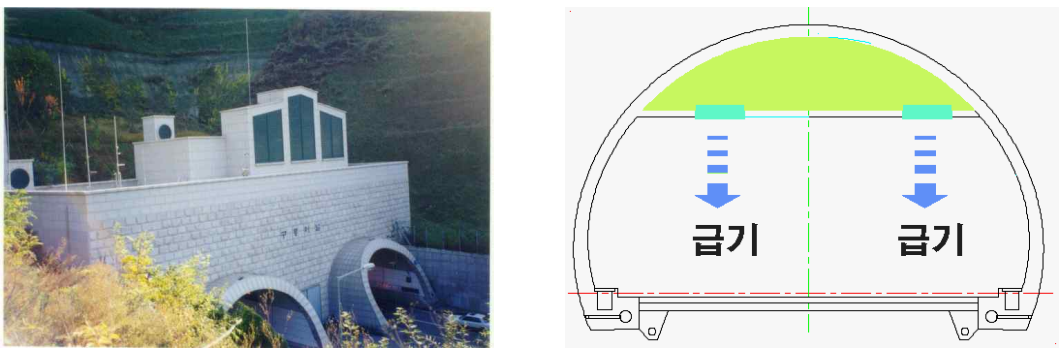
○ 남산 1호 터널은 아래 그림과 같이 서울특별시 중구 예장동~용산구 한남동을 연결하는 연장 1,530m 2차선 터널로서 강북 도심을 연결하는 주요 통로에 위치하고 있음.

○ 남산 1호 터널은 서울의 강남 및 강북을 연결하는 주요 연결통로로서 도심의 교통 뿐 아니라 경부 고속도로로부터 시내로 유·출입 하는 교통량을 처리하고 있어 출·퇴근 시간 시 매우 혼잡함.



<그림 2-29> 남산1호 터널 전경

○ 남산 1호 터널의 환기 방식은 반횡류식 방식을 채택하여 터널 내부 환기를 실시하고 있음.



<그림 2-30> 반횡류식 개요도

○ (반)횡류식 환기방식은 터널입구에 설치된 환기소에서 터널단면에 설치된 별도의 환기덕트에 깨끗한 공기를 송기하여 환기시키는 것이 특징임.

○ 터널 내 신선한 공기가 급기 되어 오염물질이 희석됨. 배기식에 비해 급기식이 터널 내의 환경이 양호한 것이 장점임.

○ 반면 오염물질은 피스톤 작용을 고려하지 않기 때문에 에너지 효율면에서 종류식보다 떨어지는 것이 단점임.

(2) 측정 대상물질 및 방법

○ 본 연구에서는 터널 내 온도, CO, CO_2, 벤젠농도 및 PM-10, PM-2.5, TSP를 각각 측정

○ 온도, CO, CO_2, 벤젠 농도의 경우 차량의 창문을 개방한 상태(차량외부)로 5초 간격으로 측정

○ PM-10, PM-2.5 ,TSP는 터널 입구에서 4분간 측정하여 평균값을 구함.

○ 온도 측정은 -15~65℃로 측정이 가능한 SATO사의 DATALOGGER을 사용함.

○ CO 농도의 측정 범위는 0~500ppm, CO_2 농도의 측정범위는 0~500ppm, air pressure 800~1,100hpa의 측정 조건을 가진 KIMO사의 AQ200을 사용함.

○ 벤젠측정 1ppb~10,000ppm이며 정확도가 ± -5%인 ION사의 PhoCheck TIGER을 사용하여 측정함.

○ 미세먼지 측정은 <2.5 micron, PM 2.5 mass concentration, <10 micron, PM 10 mass concentration 이 측정 가능한 GT-331을 이용하여 측정함.

(3) 측정결과

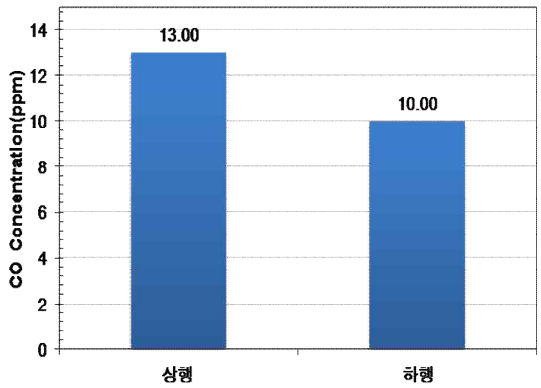
○ 남산 1호 터널의 대기질 측정결과 CO의 경우 최대 10ppm~13ppm이 검출되었고, 발암물질인 VOC(benzene) 또한 0.4ppm~0.5ppm이 검출되었음.

○ 이는 CO의 국내 대기환경기준인 8시간 평균 9ppm을 상회하고 있음.

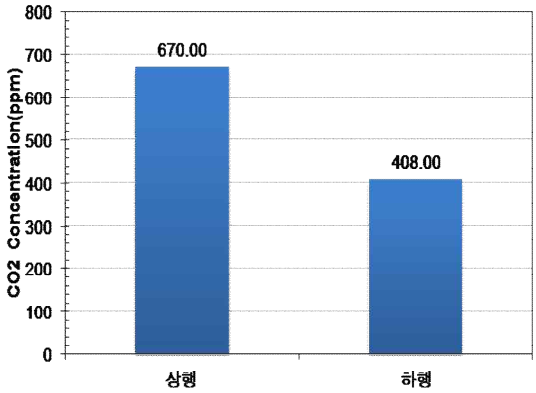
○ 또한, 미세먼지의 경우 PM-10이 111㎍/㎥ 으로 나타나 24시간 평균 대기환경기준인 100㎍/㎥은 물론 년평균 기준인 50㎍/㎥을 상회하고 있어 오염물질의 처리가 요구됨.

<표 2-19> 남산1호 터널 대기질 측정 결과

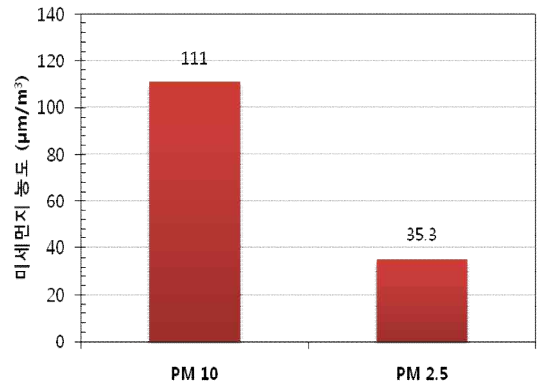
구분		온도	CO	CO_2	VOC(benzene)	미세먼지(ug/m^3)	
						PM-10	PM-2.5
차량 외부	상행	18.7℃	13ppm	670ppm	0.5ppm	111	35.3
	하행	18.5℃	10ppm	408ppm	0.4ppm	N.D	N.D



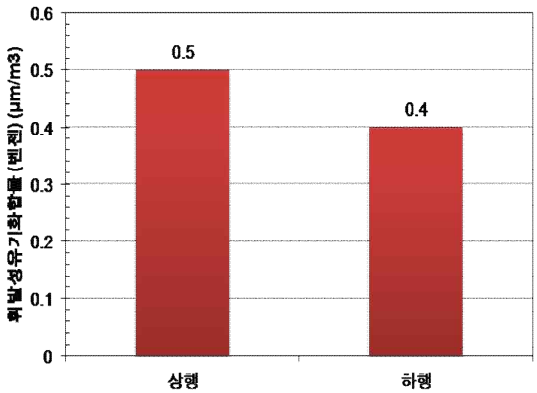
<CO 농도>



<CO_2 농도>



<미세먼지 농도>



<VOC 농도>

<그림 2-31> 남산1호 터널 대기질 농도 현황

나. 우면산 터널

(1) 개요

○ 우면산 터널은 서울특별시 서초구 우면동 선암로 나들목에서 서초3동 사거리를 잇는 연장 3,000 m 편도 2차선으로 2004년 1월 개통되었음.

○ 국도 제47호선과 서울특별시도 제31선을 접석하는 도로로서 민자사업으로 개통된 도로임.

○ 터널 개통으로 인하여 남태령 도로 교통 체증이 크게 해소되고 과천 도심 교통 체증을 개선하며 반포로와 과천, 안양 등의 진출입시간이 40분대에서 10분대로 단축되었음.

○ 강남대로와 동작대로 등 인근 서울시계 연결로 교통 정체도 완화시킴.



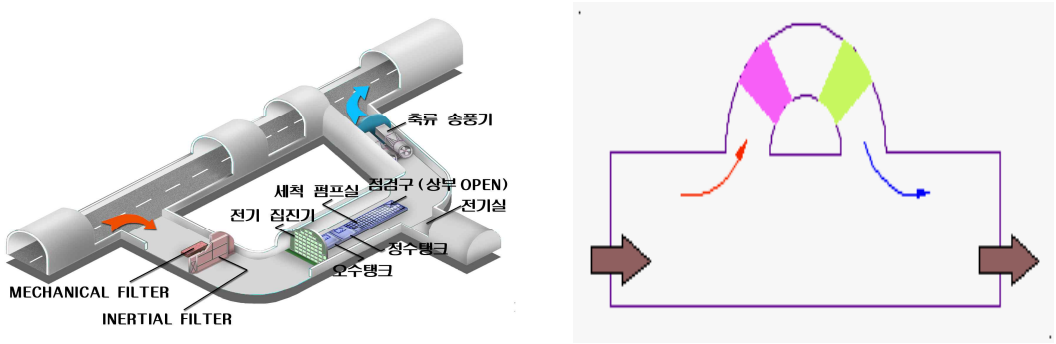
<그림 2-32> 우면산 터널 전경

○ 우면산 터널의 환기방식은 종류식을 채택하고 있으며 터널 내 차량진행(종)방향으로 기류가 발생하며, 교통 환기력을 유효하게 이용할 수 있음.

○ 또한 우면산 터널에는 전기집진기를 설치하여 발생된 오염물질 중 미세먼지를 저감하여 배출하고 있음.

○ 전기집진기 방식은 터널 중간부분에 전기집진기를 설치하여 정전기원리를 이용 터널 내 발생매연을 집진시켜 깨끗한 공기로 재이용하는 환기방식이 특징이며 대용량 처리가 가능하며 출구부 오염물질 환경개선이 특징이라 할 수 있음.

○ 반면 화재 시 운전이 정지되고 별도의 바이패스 갱 설치비가 드는 것이 단점임.



<그림 2-33> 전기집진기 방식 개요

(2) 측정 대상물질 및 방법

○ 본 연구에서는 터널 내 온도, CO, CO_2, 벤젠농도 및 PM-10, PM-2.5, TSP를 각각 측정

○ 온도, CO, CO_2, 벤젠 농도의 경우 차량의 창문을 개방한 상태(차량외부)로 5초 간격으로 측정

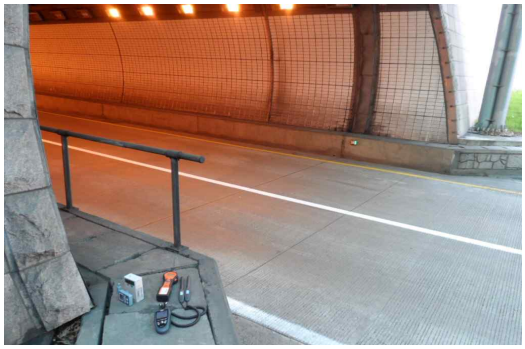
○ PM-10, PM-2.5 ,TSP는 터널 입구에서 4분간 측정하여 평균값을 구함.

○ 온도 측정은 -15~65℃로 측정이 가능한 SATO사의 DATALOGGER을 사용함.

○ CO 농도의 측정 범위는 0~500ppm, CO_2 농도의 측정범위는 0~500ppm, air pressure 800~1,100hpa의 측정 조건을 가진 KIMO사의 AQ200을 사용함.

○ 벤젠측정 1ppb~10,000ppm이며 정확도가 ± -5%인 ION사의 PhoCheck TIGER을 사용하여 측정함.

○ 미세먼지 측정은 <2.5 micron, PM 2.5 mass concentration, <10 micron, PM 10 mass concentration 이 측정 가능한 GT-331을 이용하여 측정함.

<그림 2-34> 우면산 터널 대기질 측정 현황

(3) 측정결과

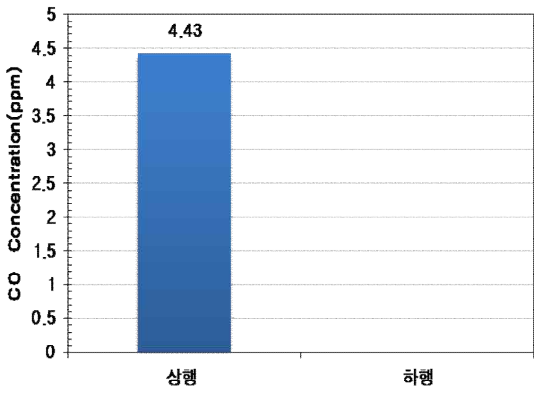
○ 우면산 터널의 대기질 측정결과 CO의 경우 최대 0ppm~4.4ppm으로 높지 않게 검출되었고, 발암물질인 VOC(benzene) 경우 0.3ppm~0.4ppm이 검출됨.

○ 그러나 미세먼지의 경우 PM-10이 268㎍/㎥ 으로 나타나 24시간 평균 대기환경기준인 100㎍/㎥ 은 물론 년평균 기준인 50㎍/㎥을 상회하고 있어 오염물질의 처리가 요구됨.

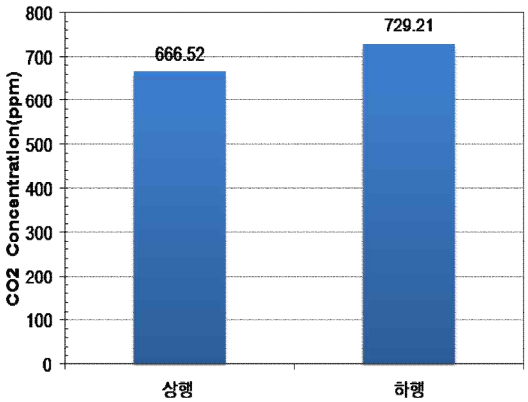
○ 또한, 2015년부터 규제가 예상되는 PM-2.5가 41.3㎍/㎥ 가 검출되었음.

<표 2-20> 우면산 터널 대기질 측정 결과

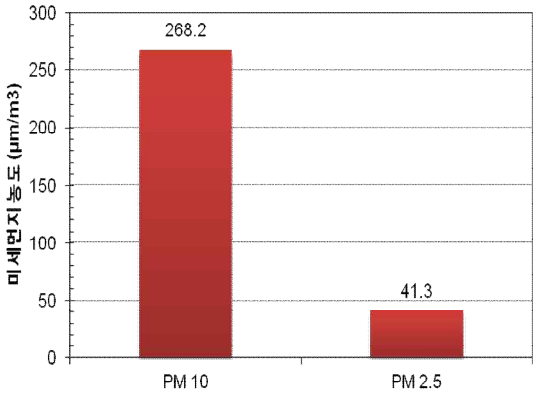
구분		온도	CO	CO_2	VOC(benzene)	미세먼지(ug/m^3)	
						PM-10	PM-2.5
차량 외부	상행	18.48℃	4.4ppm	666.5ppm	0.4ppm	268.2	41.3
	하행	18.27℃	0ppm	729.2ppm	0.3ppm	N.D	N.D



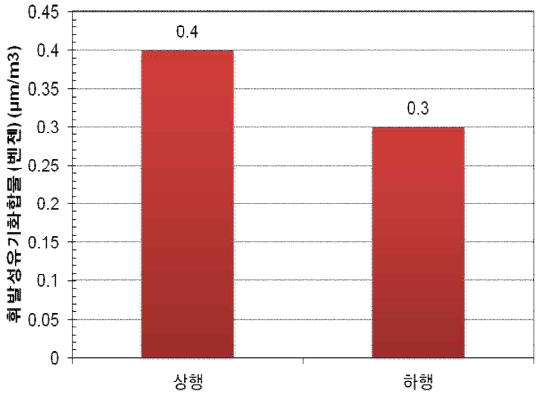
<CO 농도>



<CO_2 농도>



<미세먼지 농도>



<VOC 농도>

<그림 2-35> 우면산 터널 대기질 농도 현황

다. 구룡 터널

(1) 개요

○ 구룡터널은 강남구 개포동에서 서초구 내곡동에 이르는 언주로의 연장구간을 이루는 도로시설물로서 1998년 4월 준공되어 개통됨.

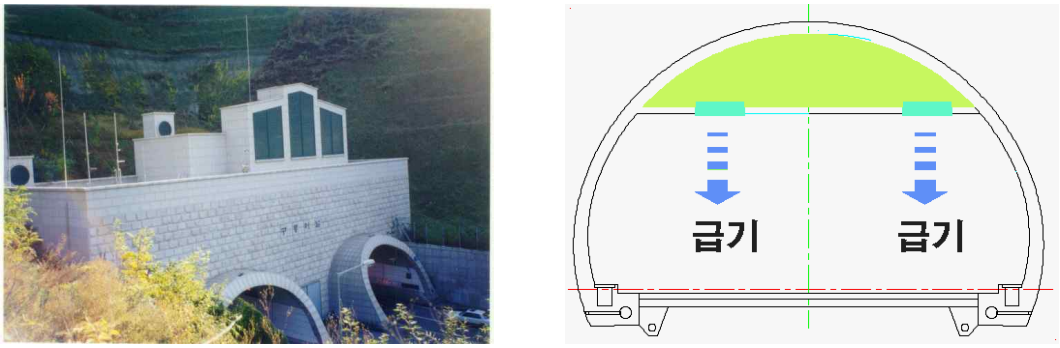
○ 터널 높이는 상행선이 6.8m, 하행선이 5.3m 이며, 편도 2차선으로 폭 17m, 연장은 1,180m임.

○ 양재대로와 언주로를 접속하고 있으며, 인근에 개포아파트 단지 등이 위치하고 있음.



<그림 2-36> 구룡터널 전경

○ 구룡 터널의 환기 방식은 반횡류식 방식을 채택하여 터널 내부 환기를 실시하고 있음.



<그림 2-37> 반횡류식 개요도

○ (반)횡류식 환기방식은 터널입구에 설치된 환기소에서 터널단면에 설치된 별도의 환기 덕트에 깨끗한 공기를 송기하여 환기시키는 것이 특징임.

○ 터널내 신선한 공기가 급기되어 오염물질이 희석됨. 배기식에 비해 급기식이 터널내 환경 양호한 것이 장점임.

○ 반면 오염물질은 피스톤 작용을 고려하지 않기 때문에 에너지 효율면에서 종류식보다 떨어지는 것이 단점임.

(2) 측정 대상물질 및 방법

○ 본 연구에서는 터널 내 온도, CO, CO_2, 벤젠농도 및 PM-10, PM-2.5, TSP를 각각 측정

○ 온도, CO, CO_2, 벤젠 농도의 경우 차량의 창문을 개방한 상태(차량외부)로 5초 간격으로 측정

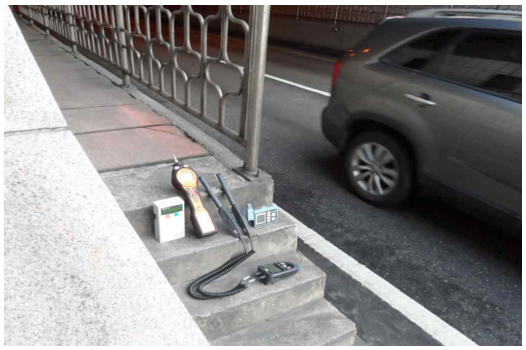
○ PM-10, PM-2.5 ,TSP는 터널 입구에서 4분간 측정하여 평균값을 구함.

○ 온도 측정은 -15~65℃로 측정이 가능한 SATO사의 DATALOGGER을 사용함.

○ CO 농도의 측정 범위는 0~500ppm, CO_2 농도의 측정범위는 0~500ppm, air pressure 800~1,100hpa의 측정 조건을 가진 KIMO사의 AQ200을 사용함.

○ 벤젠측정 1ppb~10,000ppm이며 정확도가 ± -5%인 ION사의 PhoCheck TIGER을 사용하여 측정함.

○ 미세먼지 측정은 <2.5 micron, PM 2.5 mass concentration, <10 micron, PM 10 mass concentration 이 측정 가능한 GT-331을 이용하여 측정함.




<그림 2-38> 구룡 터널 측정 현황

(3) 측정결과

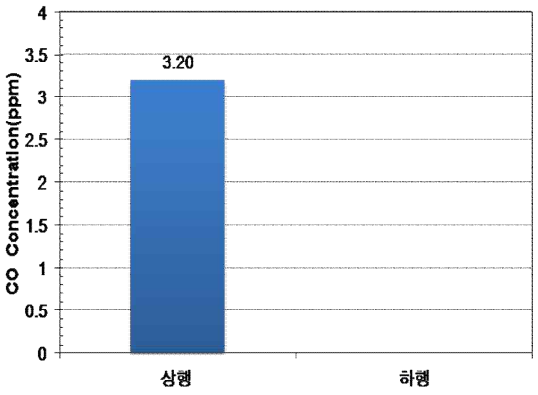
○ 구룡 터널의 대기질 측정결과 CO의 경우 최대 0ppm~3.2ppm으로 높지 않게 검출되었고, 발암물질인 VOC(benzene) 경우 0.2ppm~0.3ppm이 검출됨.

○ 그러나 미세먼지의 경우 PM-10이 111㎍/㎥ 으로 나타나 24시간 평균 대기환경기준인 100㎍/㎥ 은 물론 년평균 기준인 50㎍/㎥을 상회하고 있어 오염물질의 처리가 요구됨.

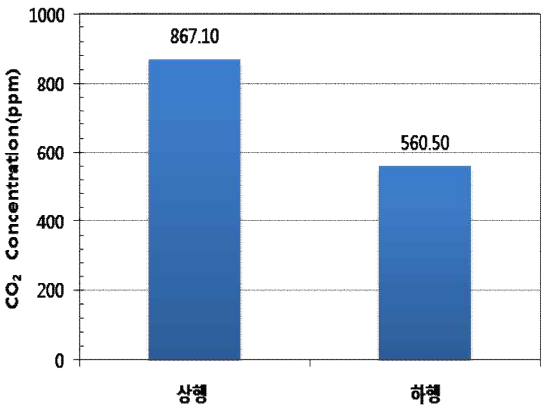
○ 또한 2015년부터 규제가 예상되는 PM-2.5가 35.3㎍/㎥ 가 검출되었음.

<표 2-21> 구룡 터널 대기질 측정 결과

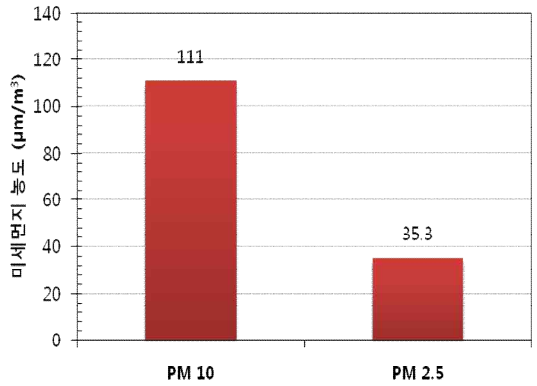
구분		온도	CO	CO_2	VOC(benzene)	미세먼지(ug/m^3)	
						PM-10	PM-2.5
차량 외부	상행	19.1℃	3.2ppm	867.1ppm	0.3ppm	111	35.3
	하행	18.6℃	0ppm	560.5ppm	0.2ppm	N.D	N.D



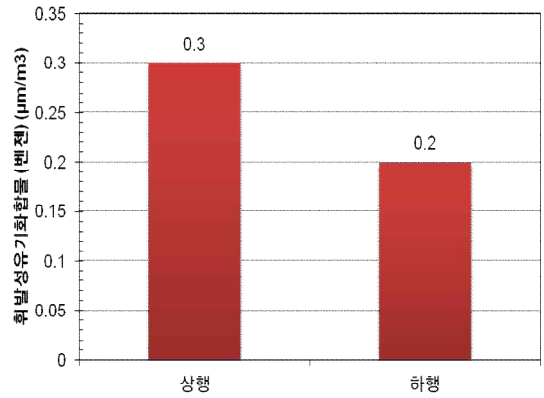
<CO 농도>



<CO_2 농도>



<미세먼지 농도>



<VOC 농도>

<그림 2-39> 구룡 터널 대기질 농도 현황

다. 수리 터널

(1) 개요

○ 수리 터널은 서울외곽순환도로를 잇는 상 하행 2차선으로 직거리 1,930m(상행), 1901m(하행)으로 수암터널과 이어져 수도권지역의 극심한 교통난 해소 및 신도시 건설로 인해 계속 증가 추세에 있는 교통수요를 대처하기 위해 건설됨.



<그림 2-40> 수리 터널 전경

○ 환기 방식은 남산 1호 터널과 마찬가지로 반횡류식 방식을 채택하여 터널내부 환기를 실시하고 있음.

(2) 측정 대상물질 및 방법

○ 본 연구에서는 터널 내 온도, CO, CO_2, 벤젠농도 및 PM-10, PM-2.5, TSP를 각각 측정

○ 온도, CO, CO_2, 벤젠 농도의 경우 차량의 창문을 개방한 상태(차량외부)로 5초 간격으로 측정

○ PM-10, PM-2.5 ,TSP는 터널 입구에서 4분간 측정하여 평균값을 구함.

○ 온도 측정은 -15~65℃로 측정이 가능한 SATO사의 DATALOGGER을 사용함.

○ CO 농도의 측정 범위는 0~500ppm, CO_2 농도의 측정범위는 0~500ppm, air pressure 800~1,100hpa의 측정 조건을 가진 KIMO사의 AQ200을 사용함.

○ 벤젠측정 1ppb~10,000ppm이며 정확도가 ± -5%인 ION사의 PhoCheck TIGER을 사용하여 측정함.

○ 미세먼지 측정은 <2.5 micron, PM 2.5 mass concentration, <10 micron, PM 10 mass concentration 이 측정 가능한 GT-331을 이용하여 측정함.



<그림 2-41> 수리 터널 대기질 측정 현황

(3) 측정결과

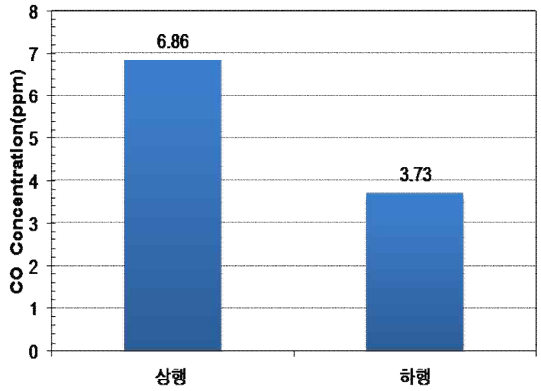
○ 수리 터널의 대기질 측정결과 CO의 경우 최대 3.73ppm~6.86ppm으로 검출되었고, 발암물질인 VOC(benzene) 경우 0.4ppm이 검출됨.

○ 미세먼지의 경우 PM-10이 120㎍/㎥ 으로 나타나 24시간 평균 대기환경기준인 100㎍/㎥은 물론 년평균 기준인 50㎍/㎥을 상회하고 있어 오염물질의 처리가 요구됨.

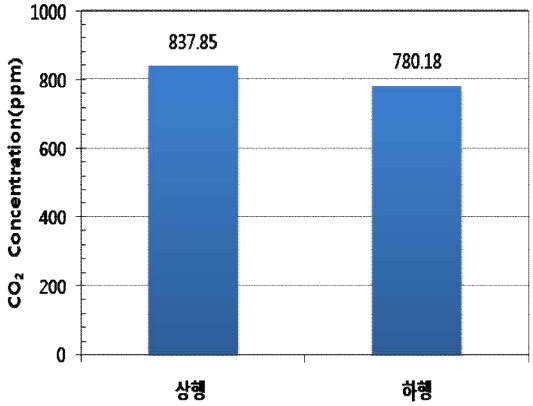
○ 또한 2015년부터 규제가 예상되는 PM-2.5가 65.4㎍/㎥ 가 검출되었음.

<표 2-22> 수리 터널 대기질 측정 결과

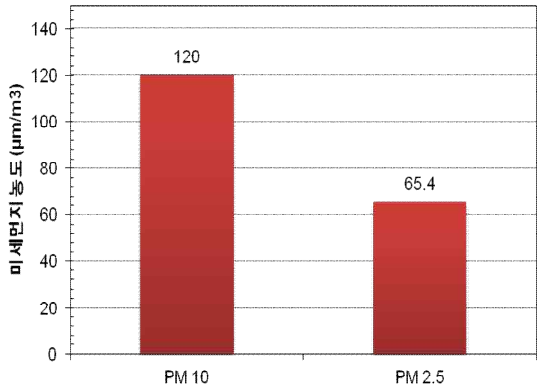
구분		온도	CO	CO_2	VOC(benzene)	미세먼지(ug/m^3)	
						PM-10	PM-2.5
차량 외부	상행	19.1℃	6.86ppm	837.9ppm	0.4ppm	120	65.4
	하행	18.6℃	3.73ppm	780.2ppm	0.4ppm	N.D	N.D



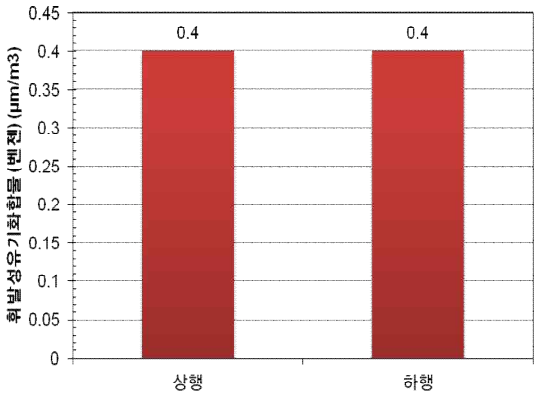
<CO 농도>



<CO_2 농도>



<미세먼지 농도>



<VOC 농도>

<그림 2-42> 수리 터널 대기질 농도 현황

라. 홍지문 터널

(1) 개요

○ 연결구간: 홍은동~정릉
○ 연장: 1.9 km
○ 환기방식: 횡류식



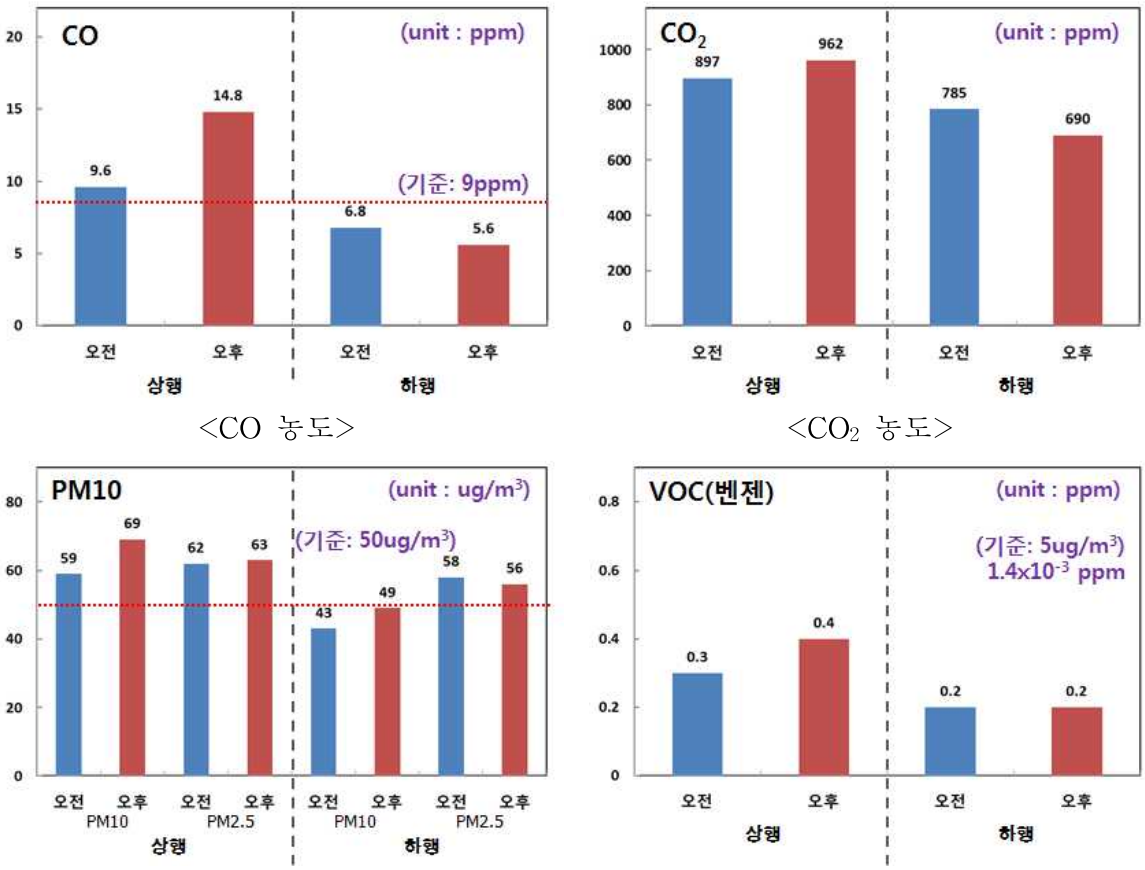


(2) 측정결과

○ 홍지문 터널의 대기질 측정결과 CO의 경우 상행선에서 최대 9.6 ppm~14.8ppm 으로 기준 농도인9 ppm을 상회하는 것으로 나타났으며 하행선에서는 기준농도 보다 낮게 검출 되었음.

○ CO_2의 경우 기준 농도는 없지만 일반 도로에서의 400ppm~500ppm 보다 높게 검출됨.

○ 미세먼지(PM10)와 VOC(벤젠)는 대부분 기준 농도를 상회하는 것으로 나타남.



<CO 농도> <CO_2 농도>

<미세먼지 농도> <VOC 농도>

<그림 2-43> 홍지문 터널 대기질 농도 현황

마. 분당-수서간 고속화도로

(1) 개요

○ 연결구간: - 죽전지하차도~매송지하차도	

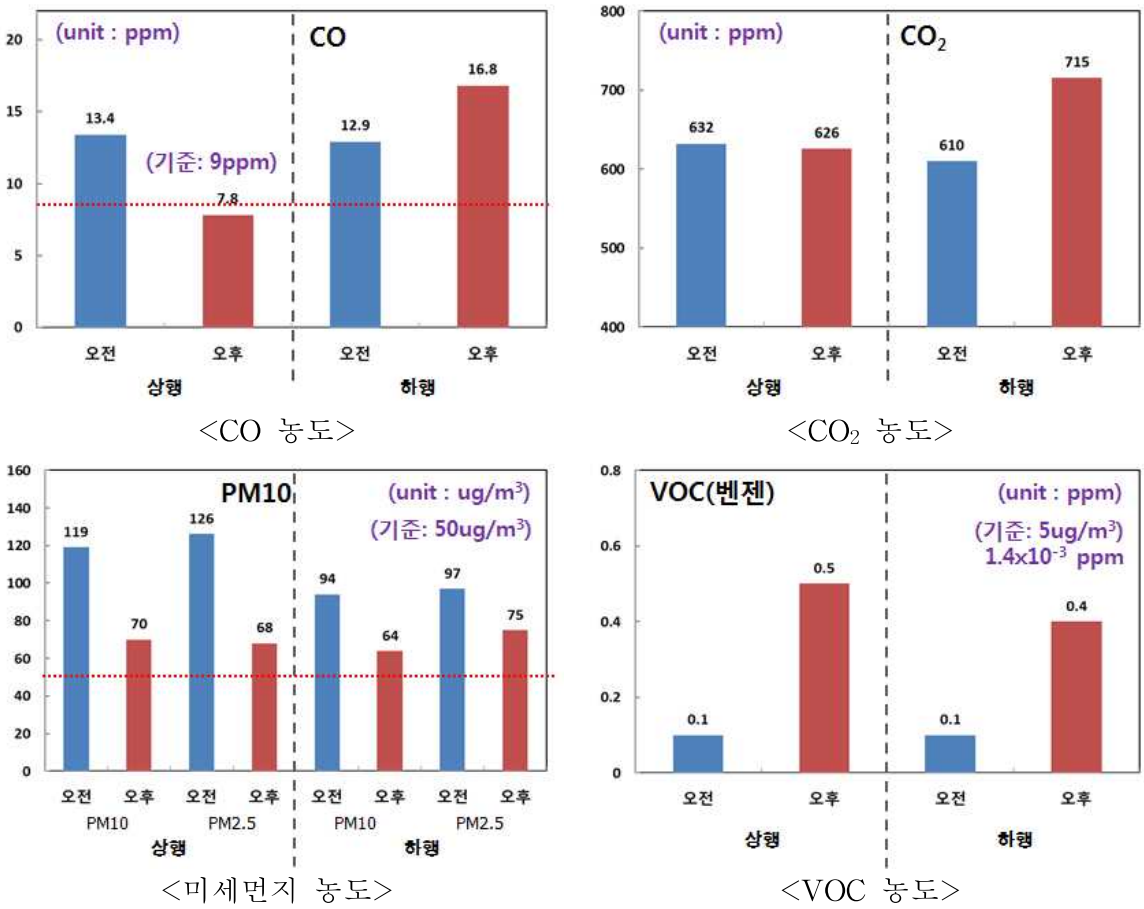
(2) 측정결과

○ 분당-수서간 고속화도로의 대기질 측정결과 CO의 경우 오후 상행에서의 농도를 제외하고 대부분 기준 농도인 9ppm을 상회하는 것으로 나타남.

○ CO_2의 경우 기준 농도는 없지만 일반 도로에서의 400ppm~500ppm 보다 높게 나타났으나 터널과 비교 시 상대적으로 낮은 농도를 나타냄.

○ 미세먼지(PM10)의 경우 전 시간대와 구간에서 기준농도를 상회하는 것으로 나타났고, 오후 보다는 오전에 대부분 농도가 높은 것을 알 수 있음.

○ VOC(벤젠) 역시 대부분 기준 농도보다 높게 검출되었으며 오전에 비해 오후에 농도가 높은 것으로 나타남.



<CO 농도> <CO_2 농도>

<미세먼지 농도> <VOC 농도>

<그림 2-44> 분당-수서간 고속화도로 대기질 농도 현황

3.2 터널 내 대기오염물질의 공간분포 예측

가. 현장측정 및 결과

○ 본 연구에서는 실제 터널 내 오염물질의 공간분포를 예측하기 위하여 교통량이 많은 출근시간 대에 측정실험을 통해 터널 내 차량에 의해 배출되는 오염물질의 농도 분포 특성을 제시하였으며, 모델 모사를 통해 이러한 현상을 평가하였음.

○ 본 모델 연구에서는 가장 안정된 CO_2를 대상으로 하였음.

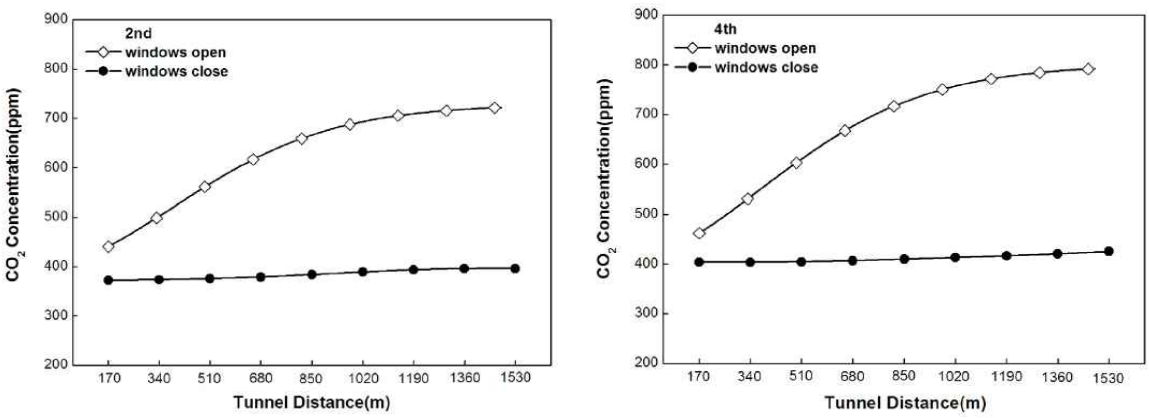
○ 현장측정 대상인 남산1호 터널은 서울시 중구 예장동~용산구 한남동을 연결하는 연장 1,530 m로 강남지역과 강북 도심을 연결하는 주요 통로에 위치하고 있어 도심의 교통뿐 아니라 경부고속도로로부터 시내로 유·출입하는 교통량을 처리하고 있어 상대적으로 도심 터널 중 교통량이 많고, 터널 통과 시 차량에 의해 배출되는 오염물질의 농도가 높을 것으로 판단됨.

○ 실제 현장측정 결과 창문개발 시 CO_2 농도가 400 ppm에서 최고 900 ppm까지 측정되었고, 특히 교통량이 집중되는 7시 30분에서 8시 사이에 터널 내 CO_2 농도가 가장 높게 나타났음.

○ 또한, 터널 입구와 출구에서의 CO_2 농도는 250 ppm에서 400 ppm 정도의 농도 차이를 보이는데, 이는 반 밀폐된 터널 내의 피스톤 효과에 의해 오염물질이 출구쪽으로 이동하는 경향을 나타냄.

○ 반면, 창문을 닫고 환기를 하지 않은 차량내부의 CO_2 농도는 380ppm에서 510ppm으로 외부 농도에 비해 200ppm에서 300ppm 정도 낮게 유지되고 있으며 터널 입구와 출구에서의 농도 차이가 거의 없는 것으로 나타났음.

○ 그림 2-45의 측정결과에서 보여 지는 바와 같이 차량내부는 차량외부에 비해 외부 공기의 영향을 덜 받는 것을 알 수 있으며, 이는 터널을 통과하는 차량의 운전조건에 따라 운전자가 오염물질에 노출되는 정도를 판단 할 수 있는 자료임.



<그림 2-45> 터널 내 CO_2 농도 현장측정 결과

나. 모델모사

○ 터널 내 대기질 거동은 차량에 의한 대기오염물질의 발생량, 풍속, 터널 내 환기시설 등에 영향을 받으므로 터널 내 차량이동 및 환기시설 등에 의해 나타나는 현상인 피스톤 효과에 의해 대기오염물질 농도는 터널 출구쪽으로 갈수록 높아질 것으로 예측됨.

○ 또한, 터널 내 오염물질은 이류확산에 의해서 이동·확산하게 되는데 오염물질의 농도 분포는 터널 내 공기 유동이 극히 발달된 난류유동이기 때문에 터널 단면상에서 공기의 유동속도와 마찬가지로 균일한 것으로 가정할 수 있음(Lew et al, 1999).

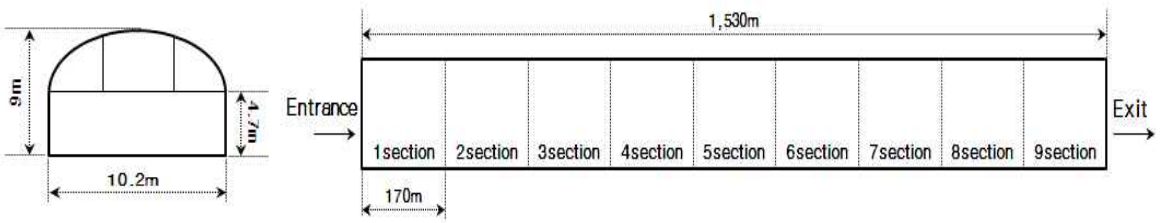
○ 본 연구에서는 터널 내 대기질 거동 예측을 위해 multi-box 모델을 적용하였으며, 풍향과 풍속이 일정하고, 일방향 기류유입 및 유출만을 고려할 시 오염물질의 질량 보전식은 다음과 같음(Seinfeld et al, 1998).

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = q(C_{i-1} - C_i) + Q_i.$$

○ Vi, Ci는 i번째 box의 부피, 오염물질 농도이며, q는 유량, Qi는 오염물질 배출량을 나타냄.

○ 모델 모사 시 multi-box 모델의 100개 box를 1/10로 축소하여 터널 입구에서 출구까지의 전체 길이를 9개 구간으로 세분화 하여 적용하였음.

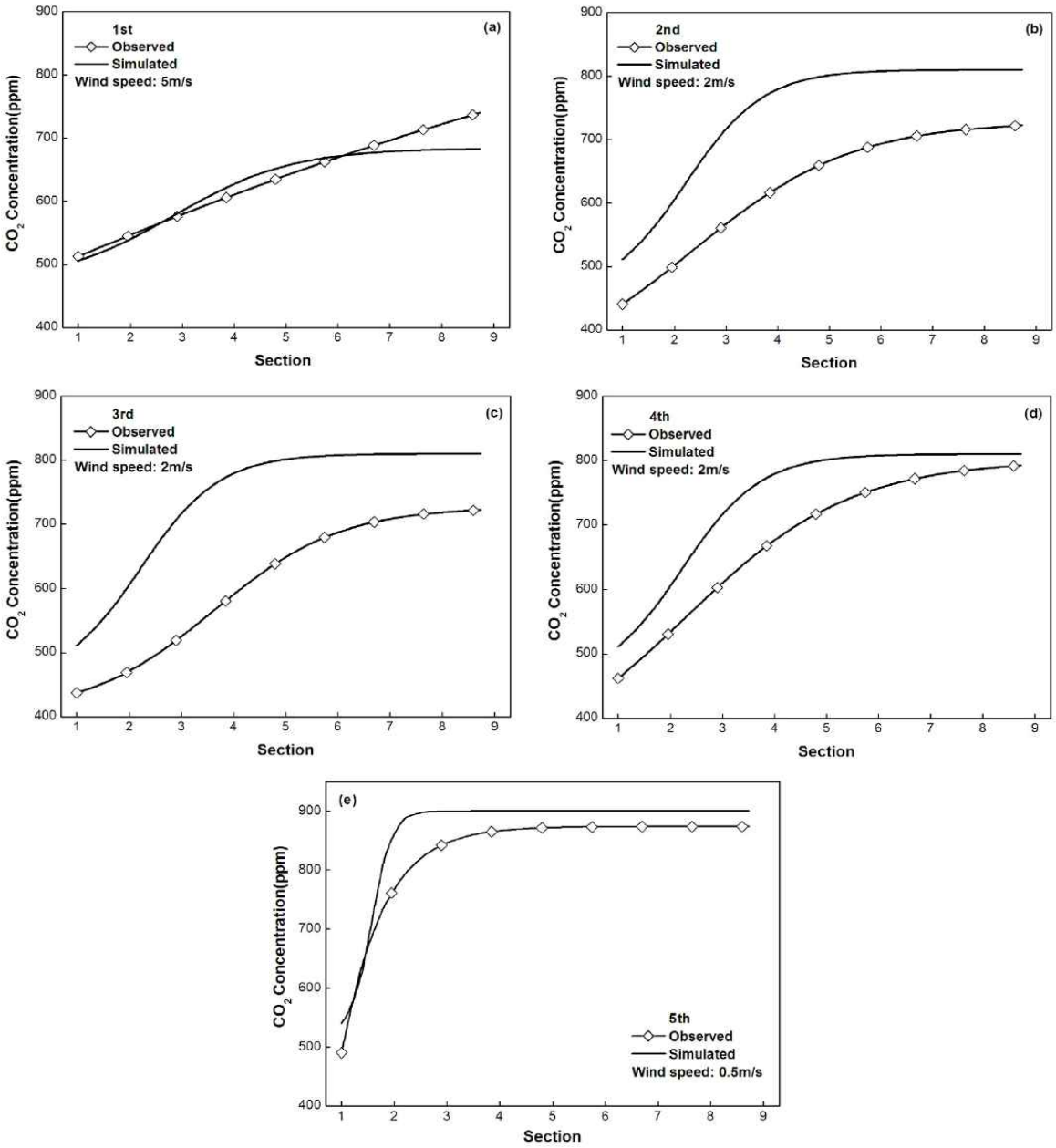
○ 그림 2-46은 모델 모사에 사용된 남산 1호 터널의 구간 세부모식도를 나타냄.



터널 정면 터널 측면

<그림 2-46> 모델모사에 적용된 터널 구간 세부모식도

○ 모델 모사결과 CO_2 농도가 출구쪽으로 갈수록 지속적으로 증가하는 것으로 나타났고, 이러한 결과는 터널 내 대기질 거동 특성이 터널 내 풍속 및 차량이동 속도에 따른 공기유속과 밀접한 상관관계가 있는 것을 알 수 있으며 향후 터널을 비롯한 지하공간에 대한 대기질 거동 특성을 파악하는데 응용이 가능할 것으로 기대됨.



<그림 2-47> 각 구간에서 실측 값과 모델 모사 값의 CO_2 농도 비교

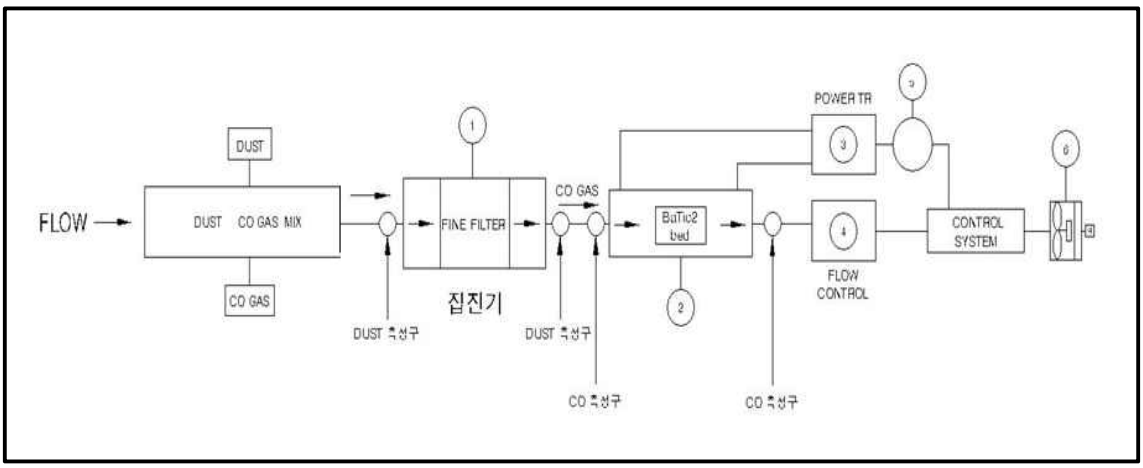
4. 미세먼지 및 유해가스 동시 처리장치(10L/min) 제작 및 성능평가

4.1 장치 개요

○ 터널 내 차량에 의해 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO)를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 성능평가를 위한 10L/min 규모의 미세먼지 및 유해가스 동시처리 장치를 제작하였음.

○ 동시처리 장치의 구성은 터널 내 미세먼지를 제거하기 위한 집진기와 유해가스를 제거할 수 있는 저온플라즈마 및 상온 촉매 반응기로 구성되어 있음.

○ 또한, 플라즈마 방전을 위해 고압트랜스를 슬라이드닥스로 연결하여 출력전압을 조절할 수 있도록 전원 발생장치를 구성하였고, 미세먼지 및 모사가스를 원활히 공급할 수 있도록 유량 조절장치 설치하였음.



번호	장비 명	용도	사양
1	집진기	미세먼지 제거	헤파 필터 적용
2	플라즈마발생기	CO 가스 제거	
3	파워 트랜스	프라즈마 발생	입력 220ACV, 60Hz 출력 23000ACV, 10mA
4	흐름 제어		0~50 리터
5	슬라이덕스		정격 1차 220ACV, 정격 2차 240ACV
6	펌프		220ACV 20리터/분

<그림 2-48> 미세먼지 및 유해가스 동치처리 장치 개략도

4.2 장치 구성 및 사양

○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 장치에 대한 각 장비 및 기능에 대한 구체적 사양은 다음과 같음.

가. 집진기

○ 집진효율 90% 이상을 달성하기 위해 원통형 HEPA Filter 설치

○ HEPA Filter

- 크기 : 직경 250mm, 길이 120mm

나. 저온플라즈마 및 상온촉매 반응기

○ 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 시험장치

○ 용량 : 10L/min

○ 크기 : 직경 50mm(내경), 길이 520mm

○ 재질 : 석영(quartz)

다. 고압트랜스

○ 고전압 발생 장치

○ 입력전압 : AC 220V

○ 출력전압 : AC 23kV

○ 출력전류 : 10mA

○ 주 파 수 : 60Hz

라. 슬라이드닥스

○ 출력전압 조절장치

○ 1차 전압 : AC 220V

○ 2차 전압 : AC 240V

마. 진공펌프

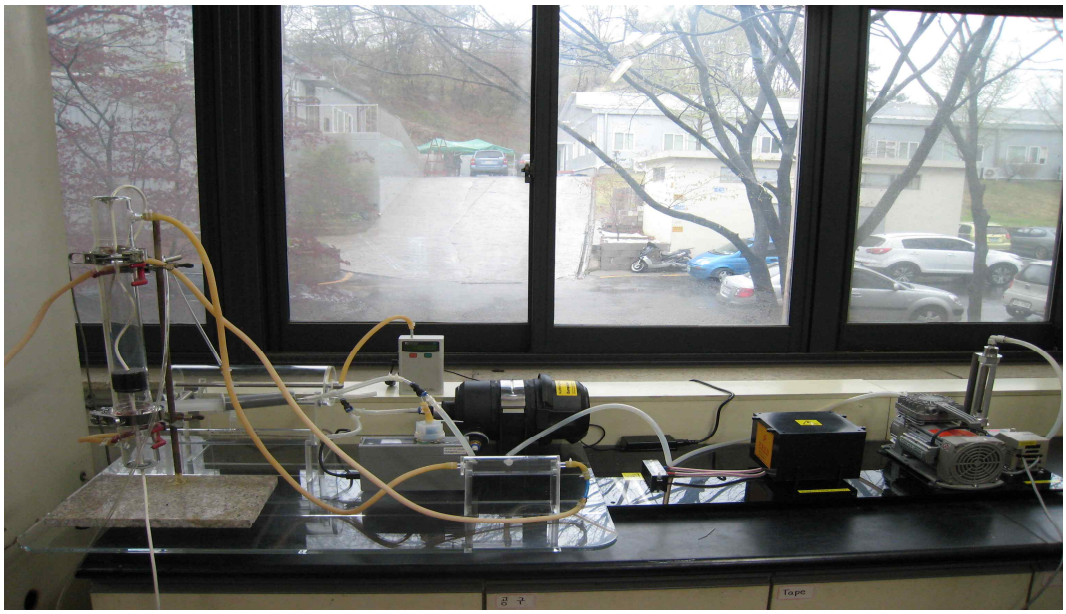
○ 미세먼지 및 모사가스 공급 장치

○ 진공 : 700mmHg

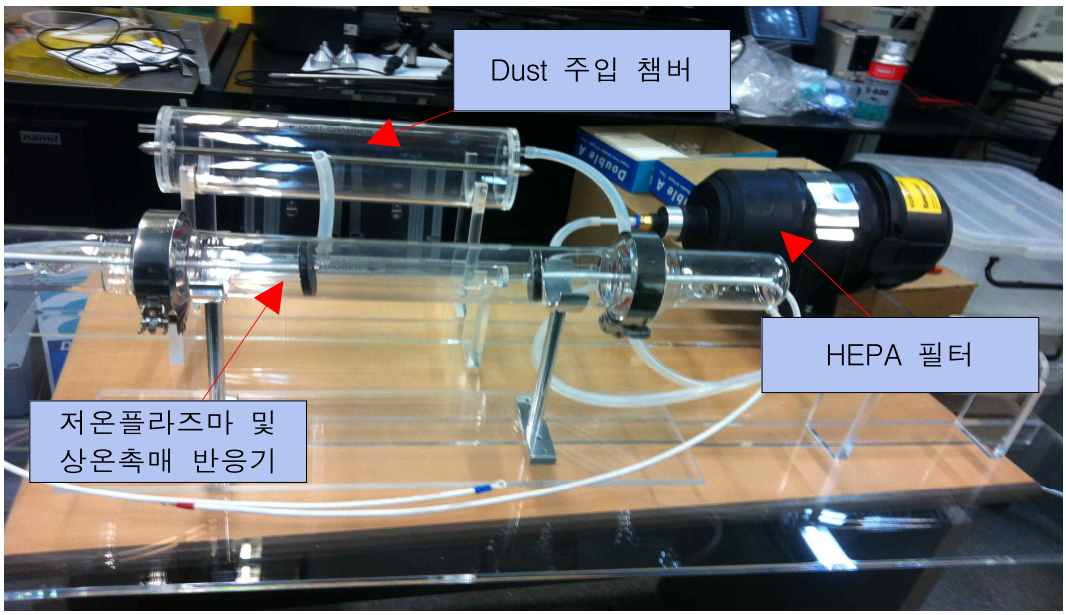
○ 압력 : 7kg/cm2

○ 전원 : 220V, 60Hz

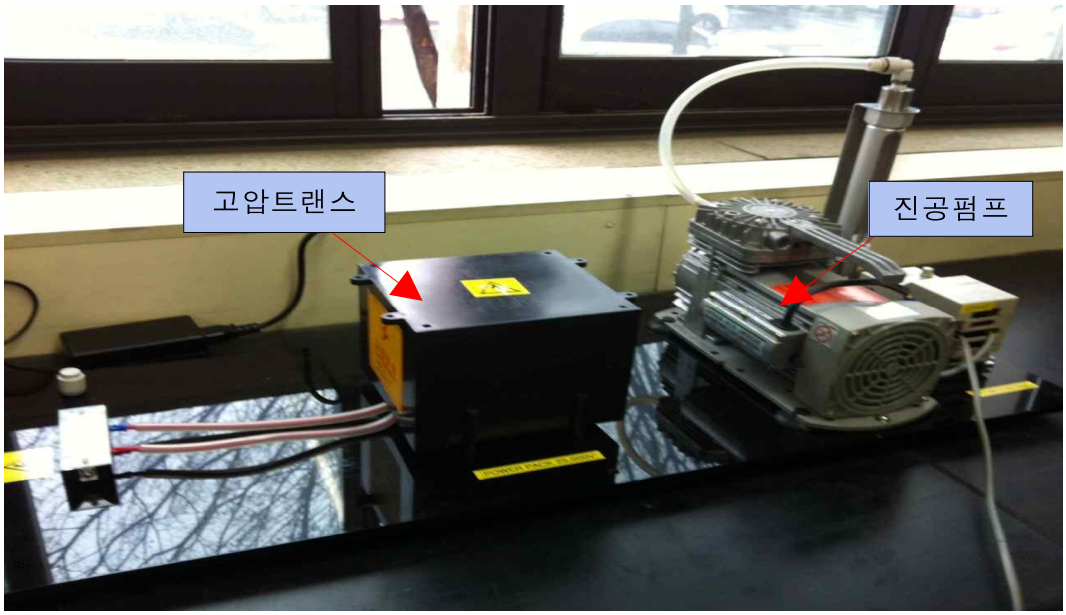
4.3 장치 사진



<그림 2-49> 미세먼지 및 유해가스 동치처리 장치(전체구성도)



<그림 2-50> 저온플라즈마 및 상온촉매 반응기, 집진기(HEPA Filter)



<그림 2-51> 전원 공급장치 및 진공펌프

4.4 동시 처리장치 성능평가

가. 일산화탄소(CO)

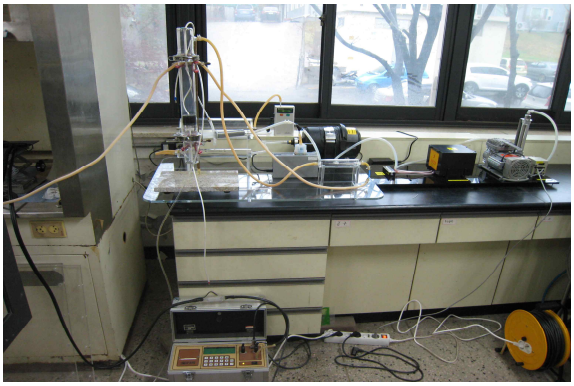
(1) 실험방법

○ 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 실험은 상온(25℃)에서 CO를 제거할 수 있는 상온 저온촉매를 이용하여 유입 유량에 따라 CO 저감 효율을 도출하였음.

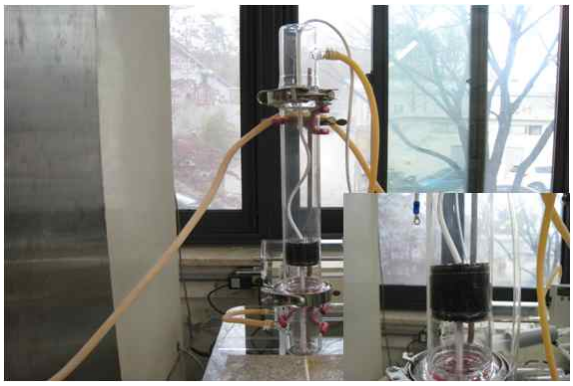
○ 실험장치는 직경 50mm(내경), 길이 520mm 크기의 석영(quartz) 재질의 반응기를 제작하여 성능실험을 수행하였고, 상온 저온촉매는 외부 습도에 영향을 최초화 하기 위하여 상대습도(R.H.) 40%이하로 조절된 건조기(dry keeper)에 보관하여 사용하였음.

○ 흡착질로 사용된 표준 CO 가스는 질소가스를 balance로 하여 반응기에 유입되기 전에 원하는 농도로 조절하였고, 터널 내 차량에 의해 발생되는 오염물질의 조건을 고려하여 상온, 상압 하에서 실험을 수행하였음.

○ 입구 및 출구에서의 CO 농도는 가스 분석기(IMR-2800)을 이용하여 10초 간격으로 실시간으로 데이터를 측정하였음.



복합 성능시험 장치



촉매 반응기(촉매충진)



가스측정(IMR-2800)

<그림 2-52> 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 실험장치

(2) 처리효율

○ 온도 25℃, 상대습도 45±5% 조건하에서 상온 촉매의 CO 처리 결과 초기농도 177ppm에서 가스 유입 유량이 2.5L/min일 때 CO 농도가 159ppm으로 가장 많이 저감되며, 유입 유량이 증가할수록 5L/min 일 때 140ppm, 7.5L/min 일 때 113ppm, 10L/min 일 때 89ppm, 15L/min 일 때 29ppm으로 저감량이 낮아지는 것을 알 수 있음.

○ 가스 유입 유량이 2.5L/min 일 때 90%의 높은 처리효율을 보이고 있으나 유량이 증가할수록 처리효율도 현저히 낮아지는 경향을 나타냄.

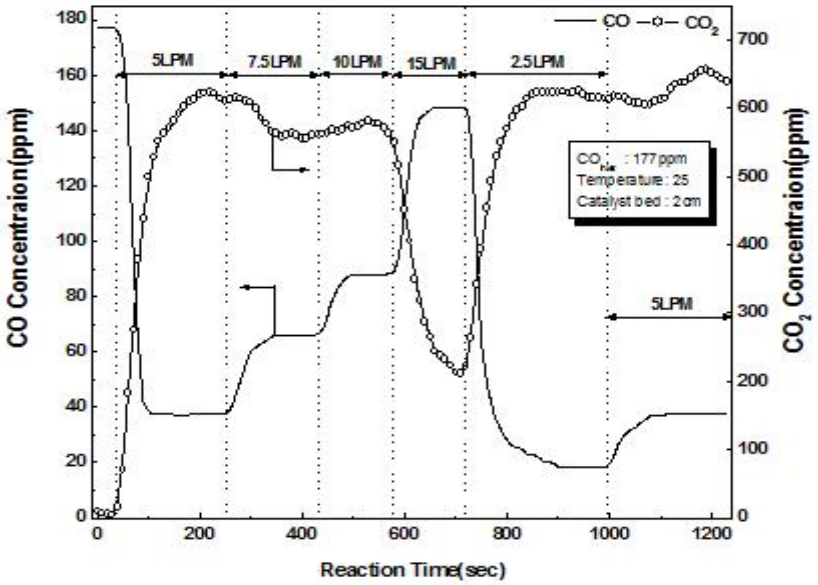
○ 이는 가스 유량이 증가할수록 반응기 내 촉매 층을 통과하는 가스의 접촉시간(체류시간)이 짧아져 산화반응(oxidation process)이 잘 일어나지 않는 것으로 판단됨.

○ 촉매에 의한 CO 저감은 산화반응의 메카니즘으로 설명이 되어 지는데 CO는 산화반응에 의해 최종산물인 CO_2로 전환됨.

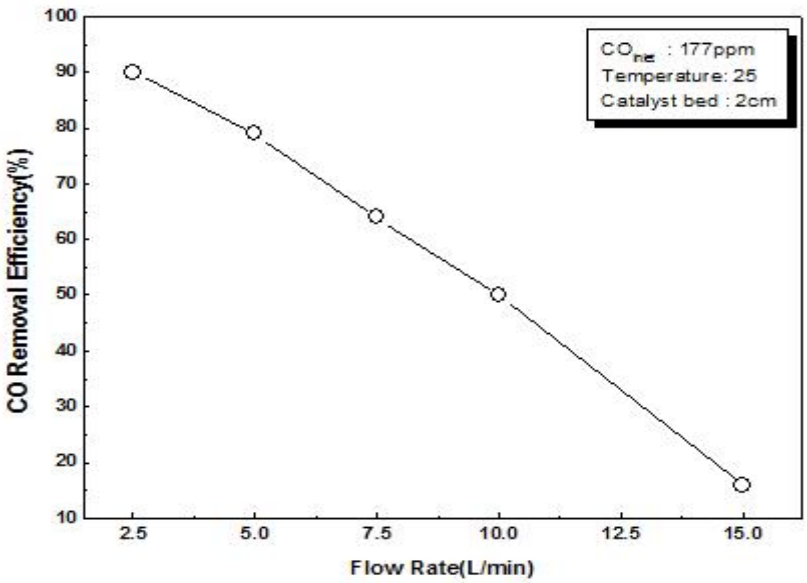
○ 그림 2-53에서도 나타나듯이 반응이 진행됨에 따라 CO 농도가 낮아지면 CO2가 증가하고, 반대로 CO 농도가 높아지면 CO2 가 낮아지는 것을 알 수 있음.

<표 2-23> 유량 변화에 따른 CO 농도변화 및 처리효율

구분	가스 유량(L/min)				
	2.5	5	7.5	10	15
처리 전 농도	177ppm				
처리 후 농도	18ppm	37ppm	64ppm	88ppm	148ppm
처리 효율	90%	79%	64%	50%	16%



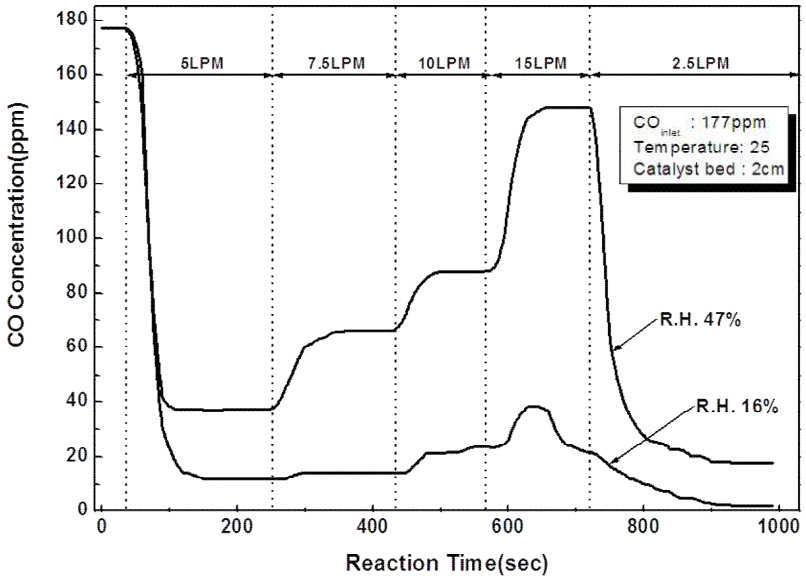
<그림 2-53> 유량 변화에 따른 CO 및 CO_2 농도변화



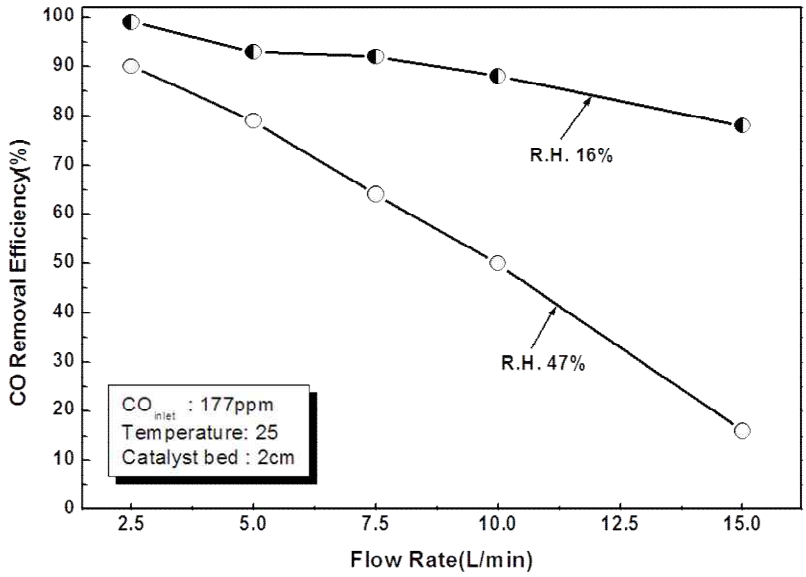
<그림 2-54> 유량 변화에 따른 CO 처리효율

○ 상대습도에 따른 CO 처리효율에서는 상대습도가 낮을수록 처리효율이 높은 것을 알 수 있음.

○ R.H. 16% 일 때 CO 처리효율은 2.5L/min에서 99.9%로 높은 처리효율을 나타내며, 유량 변화에 따른 처리효율 변화가 R.H. 47% 일 때 보다 상대적으로 적은 것을 알 수 있음.



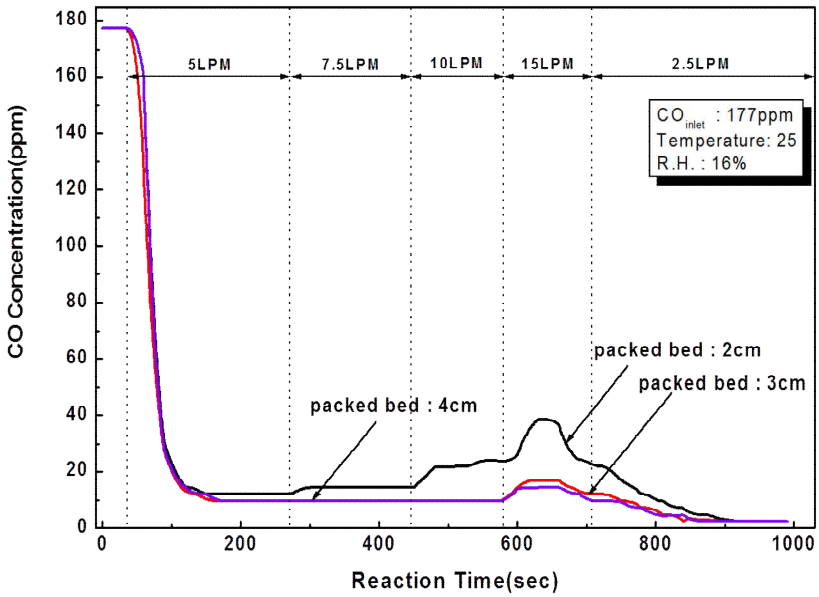
<그림 2-55> 상대습도에 따른 CO 농도변화
(R.H. 47% vs. R.H. 16%)



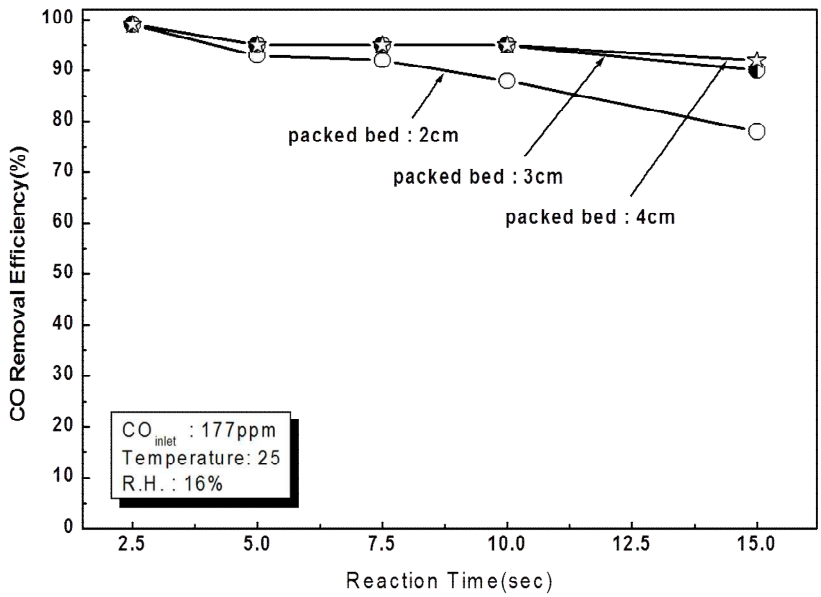
<그림 2-56> 상대습도에 따른 CO 처리효율
(R.H. 47% vs. R.H. 16%)

○ 촉매 충진량에 따른 CO 처리효율에서는 3cm~4cm 일 때 유량 증가 시에도 처리효율이 높은 것을 알 수 있음.

○ 이는 촉매의 충진밀도가 증가함에 따라 촉매를 통과하는 가스의 체류시간이 증가하여 산화반응이 잘 일어나는 것으로 판단됨.

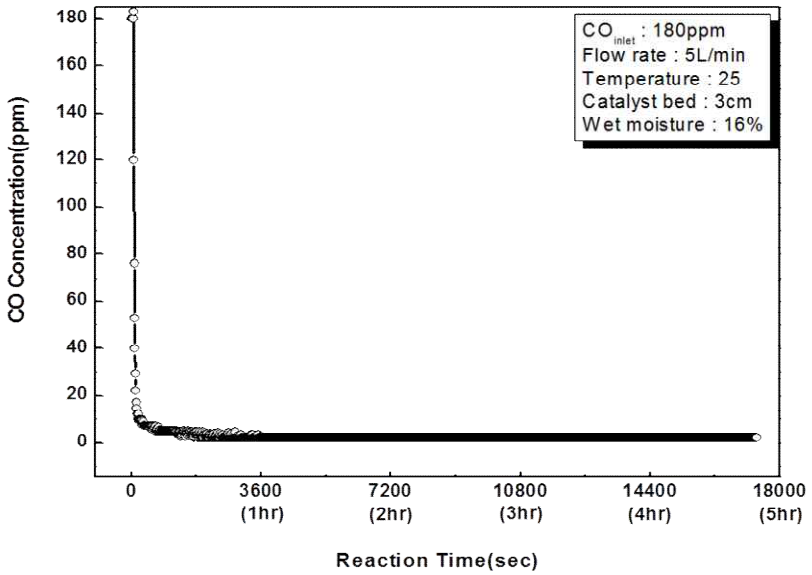


<그림 2-57> 촉매 충진량에 따른 CO 처리효율
(2cm vs. 3cm vs. 4cm)



<그림 2-58> 촉매 충진량에 따른 CO 처리효율
(2cm vs. 3cm vs. 4cm)

○ 상대습도 16%, 촉매 층 3cm, 유입유량 5L/min 조건에서의 시간 변화에 따른 CO 처리효율은 반응 시작과 동시에 급격하게 CO 농도가 저감되는 것을 알 수 있으며 5시간 후에도 처리효율이 99.9%를 유지하는 것으로 나타남.



<그림 2-59> 시간 변화에 CO 농도변화
(R.H. 16%, 촉매 충진량 3cm)

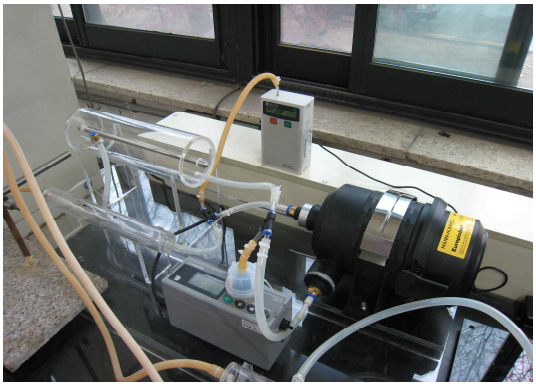
나. 미세먼지(PM-10)

(1) 실험방법

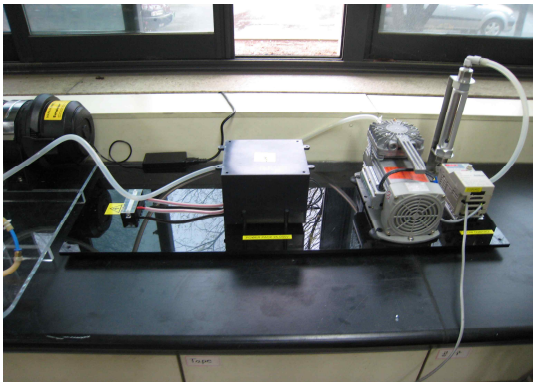
○ 미세먼지 포집효율 성능실험은 차량에 의해 실제 터널 내부에서 발생되는 먼지의 특성을 고려하여 S 터널 내부의 집진장치에서 탈진된 미세먼지 샘플을 포집하여 성능실험을 수행하였음.

○ 실험장치는 먼지 포집을 위한 필터와 먼지를 일정하게 공급해 줄 수 있도록 진공펌프를 연결하였고, 먼지 포집효율을 측정하기 위해 필터 후단에 측정기를 설치하였음.

○ 미세먼지는 5g을 정량하여 실린지를 이용하여 필터 내부로 일정하게 공급해 주었고, 분석기(GT-331)를 이용하여 5가지 크기별 미세먼지 농도변화를 5분 간격으로 실시간으로 데이터를 측정하였음.



성능시험 장치



진공펌프

<그림 2-60> 미세먼지(PM-10) 포집효율 성능평가 실험장치

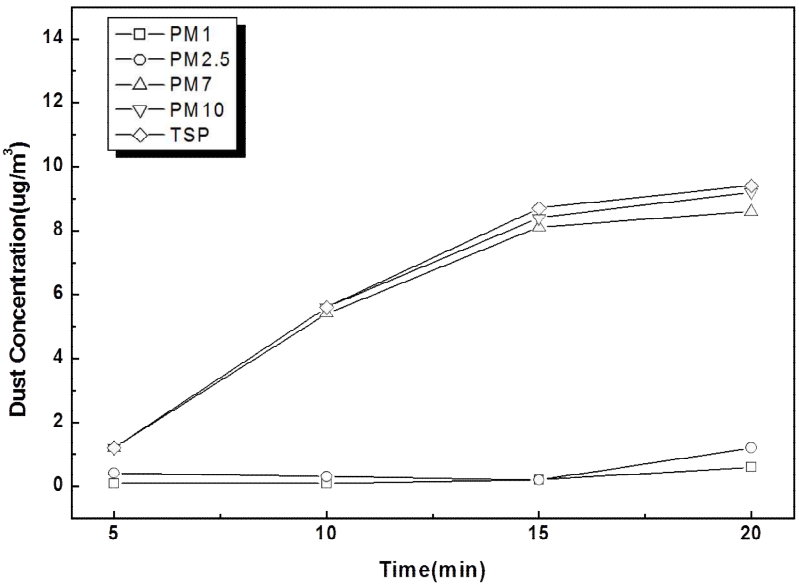
(2) 처리효율

○ 미세먼지 측정 결과 직경 7um 이상의 조대입자들은 측정시간에 따라 농도가 다소 증가하는 반면, 직경 2.5um 이하의 미세입자들은 농도가 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있음.

○ 본 연구의 성능실험에 사용된 S 터널 내 미세먼지는 10um 이상의 조대입자로 구성되어 있으나 공급된 미세먼지 양을 감안하면 90% 이상의 포집효율을 보이고 있음.

<표 2-24> 시간에 따른 미세먼지 입자크기별 농도변화

측정시간 (min)	입경별 농도(ug/m^3)				
	PM1	PM2.5	PM7	PM10	TSP
5	0.1	0.4	1.2	1.2	1.2
10	0.1	0.3	5.4	5.6	5.6
15	0.2	0.2	8.1	8.4	8.7
20	0.6	1.2	8.6	9.2	9.4



<그림 2-61> 시간에 따른 미세먼지 입자크기별 농도변화

다. 휘발성유기화합물(VOC)

(1) 실험방법

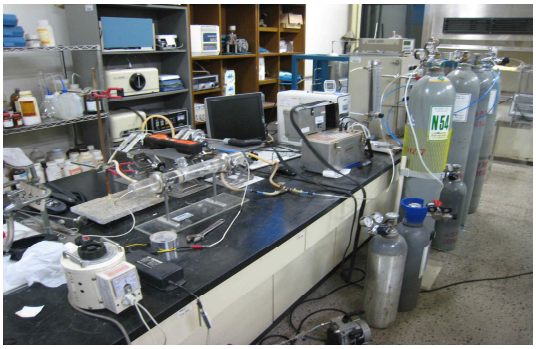
○ VOCs(Volatile Organic Compounds)를 처리할 수 있는 기술은 흡착, 흡수, 연소와 촉매 산화 등이 있으나 본 연구에서는 복합장치에 적용 가능하고, 타 처리기술에 비해 부산물 발생이 적은 저온플라즈마(Non-Thermal Plasma) 기술을 적용하여 처리효율 성능평가 실험을 수행하였음.

○ 실험장치는 직경 50mm(내경), 길이 520mm 크기로 부식을 방지하기 위해 석영(quartz) 재질로 반응기를 제작하였고, 플라즈마 방전을 위해 반응기 내부에는 고유전체의 바륨티타네이트($BaTiO_3$)를 충진 하였음.

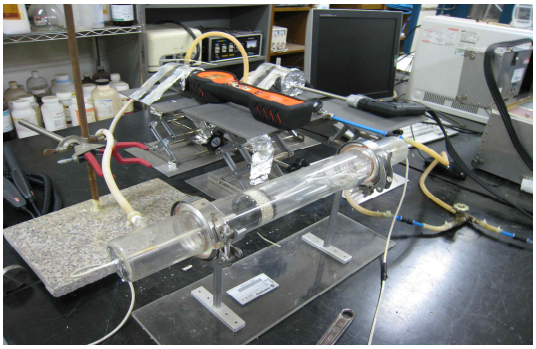
○ 전원공급 장치는 고전압 트랜스로 출력전압을 슬라이드닥스를 이용하여 3.5kV로 조절하였음.

○ 본 연구에서는 VOCs 중 선행연구를 통해 도출된 터널 내 고 농도로 배출되는 벤젠과 톨루엔을 대표물질로 선정하여 흡착질로 사용하였고, 벤젠과 톨루엔 가스는 질소가스를 balance로 하여 반응기에 유입되기 전에 원하는 농도로 조절하였음.

○ 입구 및 출구에서의 벤젠, 톨루엔 농도는 Ion-Science 사의 VOC 검출기(PhotoCheck Tiger)를 이용하여 5초 간격으로 실시간으로 데이터를 측정하였음.



성능시험 장치



반응기(바륨티타네이트 충진)





VOC 가스측정(PhotoCheck Tiger)

<그림 2-62> VOC 처리효율 성능평가 실험장치

(2) 처리효율

○ VOC 성능실험은 벤젠과 톨루엔의 초기농도를 각각 52ppm, 75ppm으로 조절하여 0.5L/min의 유량으로 반응기 내로 유입하였음.

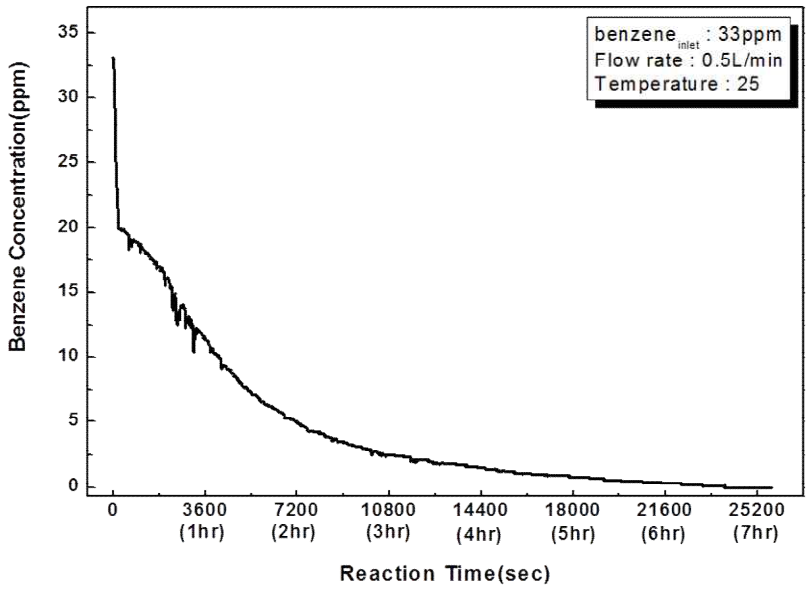
○ 반응기내 고유전체 바륨티타네이트($BaTiO_3$)를 2cm 충진하고, 고압 트랜스를 이용하여 출력전압을 3.5kV로 하였음.

○ 성능실험 결과 벤젠은 80%의 높은 처리효율을 나타낸 반면, 톨루엔의 경우 반응초기부터 완만하게 농도가 저감하는 경향을 보이고 벤젠의 높은 처리효율에 비해 톨루엔은 약 30% 정도의 처리효율을 나타냄.

○ 유입유량 0.5L/min에서 벤젠의 시간 변화에 따른 처리효율은 반응 시작과 동시에 급격하게 농도가 저감되는 것을 알 수 있으며, 7시간 후에도 높은 처리효율을 나타냄.

<표 2-25> VOC 성능평가 실험조건 및 처리효율

구분	초기농도	가스유량	출력전압	처리효율
벤젠	52ppm	0.5L/min	3.5kV	80%
톨루엔	75ppm			30%



<그림 2-63> 시간 변화에 벤젠 농도변화

4.5 동시 처리장치 성능평가(보완・검증)

가. 일산화탄소(CO)

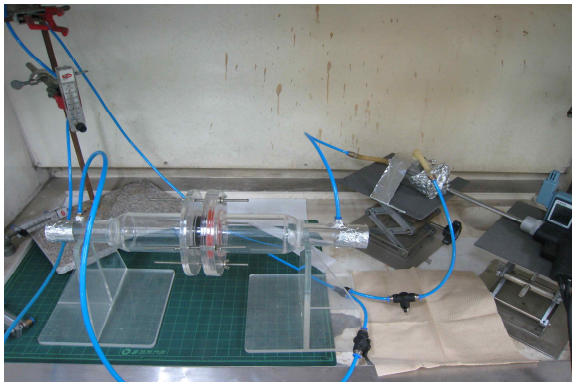
(1) 실험방법

○ 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 실험은 상온(25 ℃)에서 CO를 제거할 수 있는 상온 촉매를 이용하여 유입 유량에 따라 CO 저감 효율을 도출하였음.

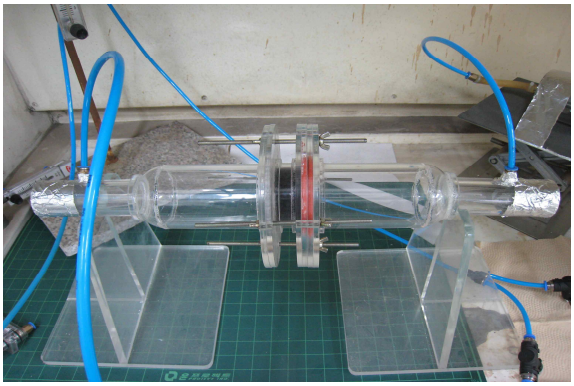
○ 실험장치는 직경 60mm(내경), 길이 500mm 크기의 아크릴 반응기를 제작하였고, 상온 촉매는 외부 습도에 영향을 최소화하기 위하여 상대습도(R.H.) 40%이하로 조절된 건조기(dry keeper)에 보관하여 사용하였음.

○ 표준 CO 가스는 질소가스를 balance로 하여 반응기에 유입되기 전에 원하는 농도로 조절하였고, 터널 내 차량에 의해 발생되는 오염물질의 조건을 고려하여 상온, 상압 하에서 실험을 수행하였음.

○ 입구 및 출구에서의 CO 농도는 가스 분석기(IMR-2800)을 이용하여 5초 간격으로 실시간으로 데이터를 측정하였음.



성능시험 장치



촉매 반응기(촉매충진)





가스측정(IMR-2800)

<그림 2-64> 일산화탄소(CO) 처리효율 성능평가 실험장치

(2) 처리효율

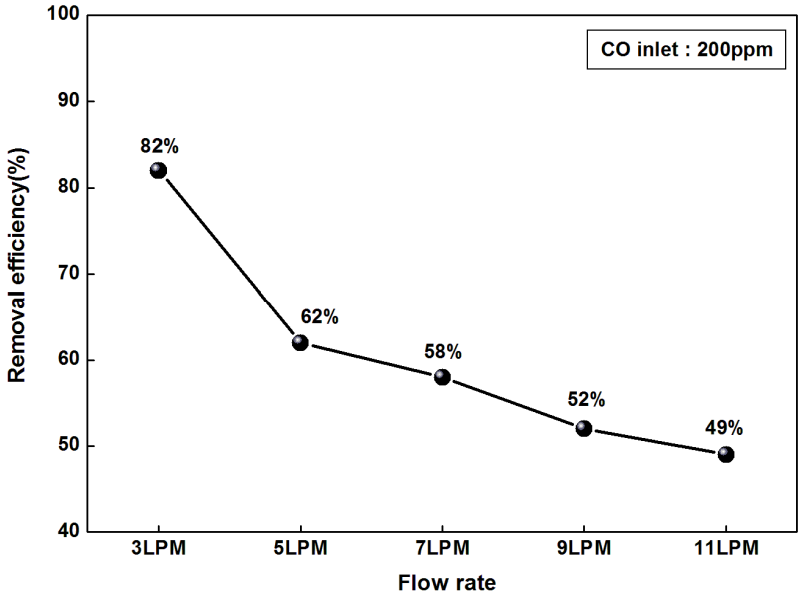
○ 온도 25℃, 상대습도 45±5% 조건하에서 상온 촉매의 CO 처리 결과 초기농도 200ppm에서 가스 유입 유량이 3L/min일 때 CO 농도가 37ppm으로 가장 많이 저감 되며, 유입 유량이 증가할수록 5L/min 일 때 70ppm, 7L/min 일 때 85ppm, 9L/min 일 때 97ppm, 11L/min 일 때 102ppm으로 저감량이 낮아지는 것을 알 수 있음.

○ 가스 유입 유량이 3L/min 일 때 82%의 높은 처리효율을 보이고 있으나 유량이 증가할수록 처리효율도 현저히 낮아지는 경향을 나타냄.

○ 이는 가스 유량이 증가할수록 반응기 내 촉매 층을 통과하는 가스의 접촉시간(체류시간)이 짧아져 산화반응(oxidation reaction)이 잘 일어나지 않는 것으로 판단됨.

<표 2-26> 유량 변화에 따른 CO 농도변화 및 처리효율

구분	가스 유량(L/min)				
	3	5	7	9	11
처리 전 농도	200 ppm				
처리 후 농도	37 ppm	70 ppm	85 ppm	97 ppm	102 ppm
처리 효율	82 %	62 %	58 %	52 %	49 %



<그림 2-65> 유량 변화에 따른 CO 처리효율

나. 휘발성유기화합물(VOC)

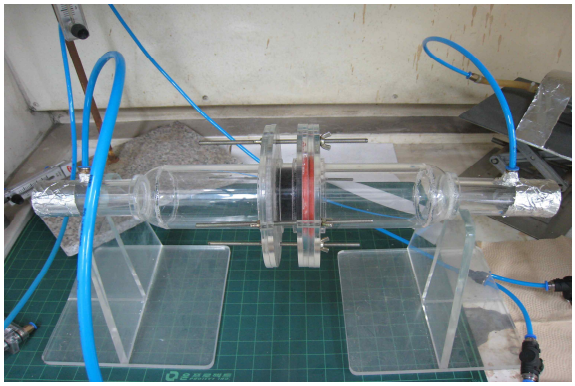
(1) 실험방법

○ VOC(Volatile Organic Compounds)를 처리할 수 있는 기술은 흡착, 흡수, 연소와 촉매 산화 등이 있으나 본 연구에서는 복합장치에 적용 가능하고, 타 처리기술에 비해 기술 적용이 쉬운 흡착 기술을 적용하여 처리효율 성능평가 실험을 수행하였음.

○ 실험장치는 직경 60mm(내경), 길이 500mm 크기의 아크릴 반응기를 제작하였고, 반응기 내부에는 VOC 제거를 위한 흡착제를 충진 하였음.

○ 본 연구에서는 VOC 중 선행연구를 통해 도출된 터널 내 고 농도로 배출되는 벤젠과 톨루엔을 대표물질로 선정하여 흡착질로 사용하였고, 벤젠과 톨루엔 가스는 질소가스를 balance로 하여 반응기에 유입되기 전에 원하는 농도로 조절하였고, 터널 내 차량에 의해 발생되는 오염물질의 조건을 고려하여 상온, 상압 하에서 실험을 수행하였음.

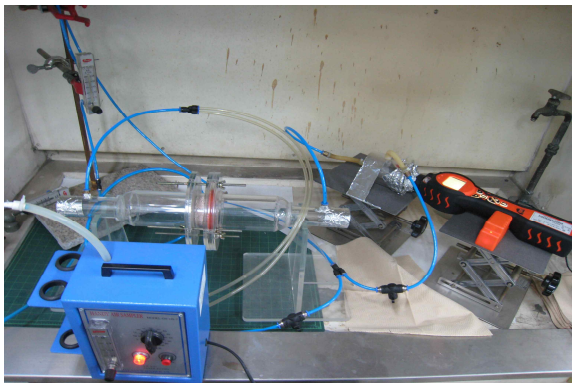
○ 입구 및 출구에서의 벤젠, 톨루엔 농도는 Ion-Science 사의 VOC 검출기(PhotoCheck Tiger)를 이용하여 5초 간격으로 실시간으로 데이터를 측정하였음.



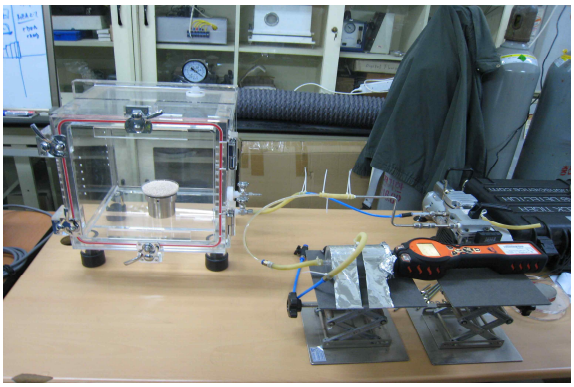
성능시험 장치



VOC 가스측정(PhotoCheck Tiger)



성능시험 장치



탈착 시험장치

<그림 2-66> VOC 처리효율 성능평가 실험장치

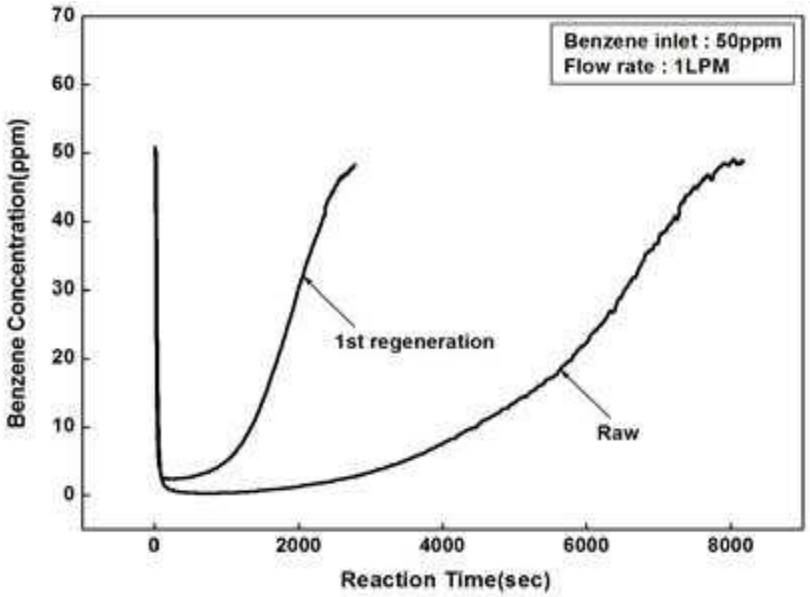
(2) 처리효율

○ VOC 성능실험은 벤젠과 톨루엔의 초기농도를 각각 50ppm, 10ppm으로 조절하여 흡착제 종류에 따른 처리효율을 도출하였음.

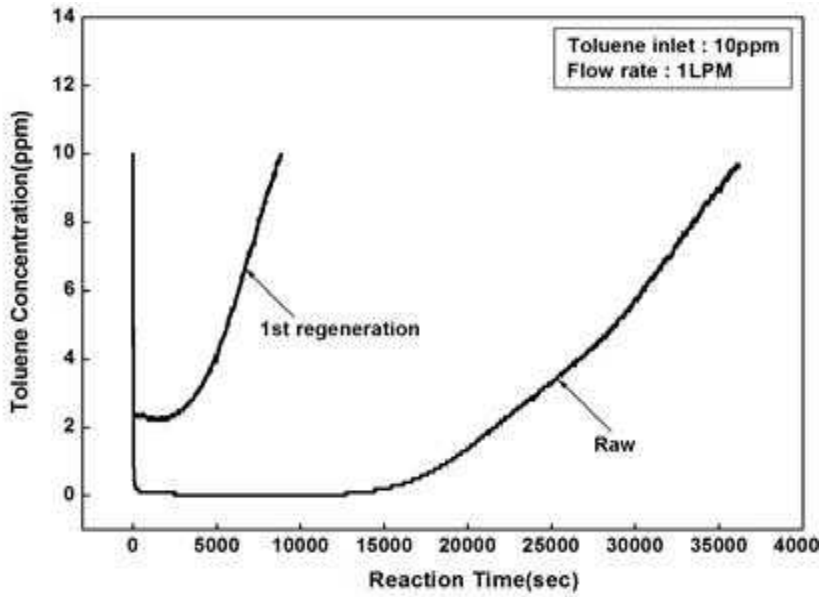
○ 그림 2-67과 그림 2-68은 제올라이트를 이용한 벤젠과 톨루엔의 흡착 성능평가 결과를 나타내는 것으로 유입 유량이 1L/min일 때 벤젠의 경우 파과시간이 50분, 톨루엔의 경우 파과시간이 250분으로 나타났고, 흡착량은 벤젠이 0.34mg/g, 톨루엔이 0.38mg/g 나타나 톨루엔이 벤젠에 비해 흡착이 잘 되는 것을 알 수 있음.

○ 흡착제의 재생 성능평가는 벤젠과 톨루엔이 포화 흡착된 제올라이트 흡착제를 그림 2-66의 감압장치를 이용해 0.2기압 하에서 탈착한 후 재생된 흡착제를 이용하여 동일한 방법으로 재 흡착 실험을 수행하였음.

○ 재생 성능평가 결과 벤젠과 톨루엔 모두 흡착 능력이 감소하는 것으로 나타났고, 특히, 재생 후 톨루엔 처리효율이 벤젠보다 낮은 것으로 나타났음.



<그림 2-67> 제올라이트 흡착제를 이용한 벤젠 흡착 및 재생



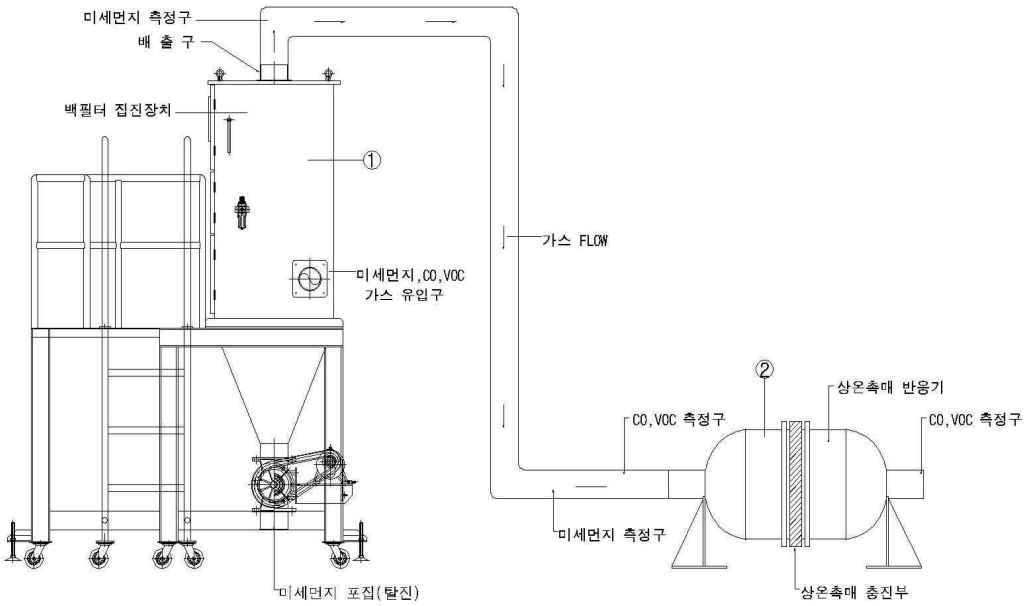
<그림 2-68> 제올라이트 흡착제를 이용한 톨루엔 흡착 및 재생

5. 미세먼지 및 유해가스 동시 처리장치(10m^3/min) 제작 및 성능평가

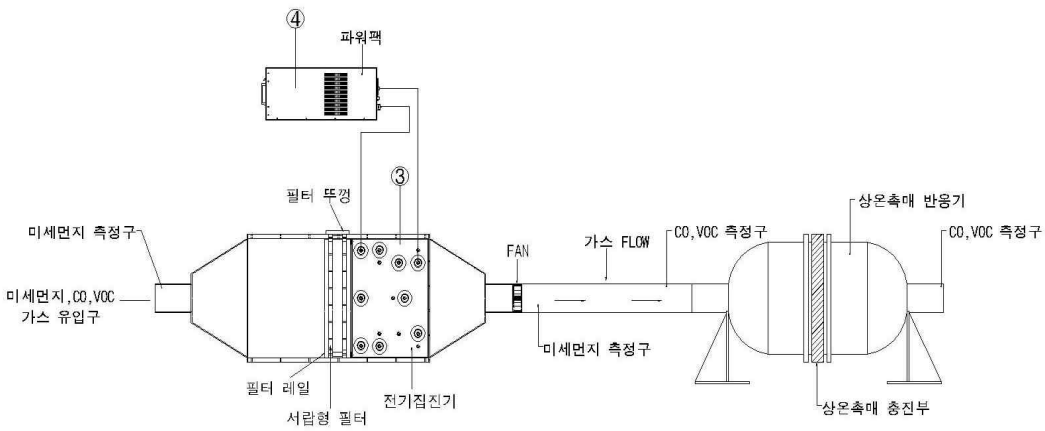
○ 터널 내 차량에 의해 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 10m^3/min 규모의 미세먼지 및 유해가스 동시처리장치를 제작하였음.

○ 동시처리 장치의 구성은 터널 내 미세먼지를 제거하기 위한 집진장치와 유해가스를 제거할 수 있는 상온 촉매 반응기로 구성되어 있음.

○ 집진장치의 경우 연속운전을 통해 최적의 공정을 도출하기 위하여 백필터 집진장치와 전기집진장치로 구분하여 제작을 하였음.



<그림 2-69> 백필터 집진장치가 결합된 동시처리장치



<그림 2-70> 전기집진장치가 결합된 동시처리장치

5.1 장치 구성 및 사양

○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리장치에 대한 각 장비 및 기능에 대한 구체적 사양은 다음과 같음.

가. 백필터 집진장치

○ 용　량 : 10 m3/min

○ 크　기 : 높이 2540 mm × 넓이 1960 mm

○ 출　력 : 0.75 kW

○ 정　압 : 230 mmAq

○ 재　질 : SS400

○ 필　터 : 울트라파인 웹

○ 필터부 크기 : Φ145 × 300L × 75

나. 전기집진장치

○ 용　량 : 50L/min

○ 크　기 : 가로 455 mm × 세로 858 mm × 높이 650 mm

○ 출　력 : 230V, 63 Hz

다. 상온촉매 반응기

○ 용　량 : 10 m3/min

○ 크　기 : Φ 500 mm × 길이 1000 mm

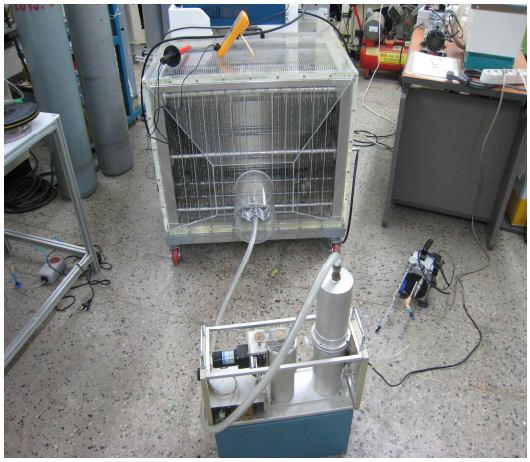
○ 재　질 : 아크릴

○ 충진부 : 탈부착이 용이한 3단 구성

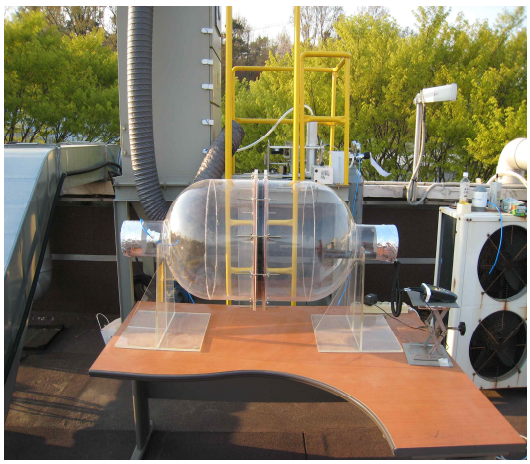
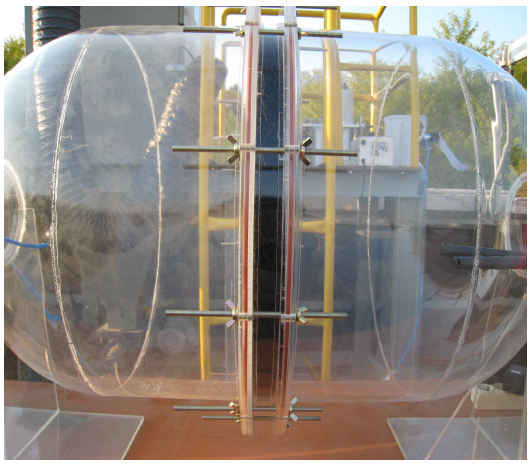
5.2 장치 사진



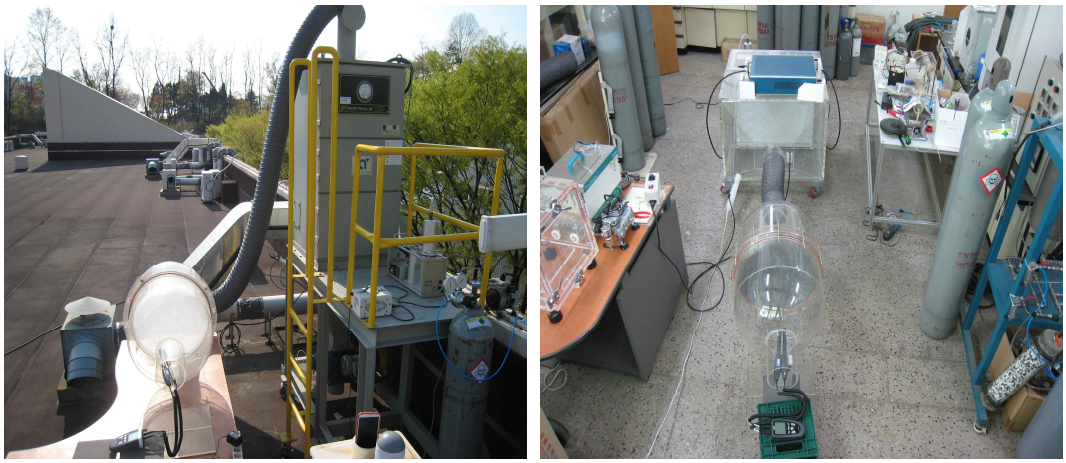

<그림 2-71> 백필터 집진장치




<그림 2-72> 전기집진장치

<그림 2-73> 상온촉매 반응기



<그림 2-74> 동시처리 장치(좌 : 백필터, 우 : 전기집진기)

5.3 동시 처리장치 성능평가

가. 실험방법

○ 터널 내 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 10m^3/min 규모의 복합처리장치 시스템을 운전하였음.

○ 복합처리장치는 두 가지 모드로 설계되었으며(그림 2-74), 첫 번째(좌)로는 백필터 집진장치와 직경 500 mm, 길이 1,000 mm의 상온촉매 반응기를 순차적으로 설치하였고, 두 번째(우)로는 전기집진장치와 상온촉매 반응기를 순차적으로 설치하여 미세먼지와 유해가스를 동시에 저감할 수 있되, 각각의 집진장치의 효율을 확인할 수 있도록 설계하였음.

○ 흡착질로 사용된 표준 CO 가스는 질소가스를 balance로 반응기에 유입되기 전에 원하는 농도로 조절하였고, 유입 유량은 CO의 경우 300L/min 으로 설정하였음.

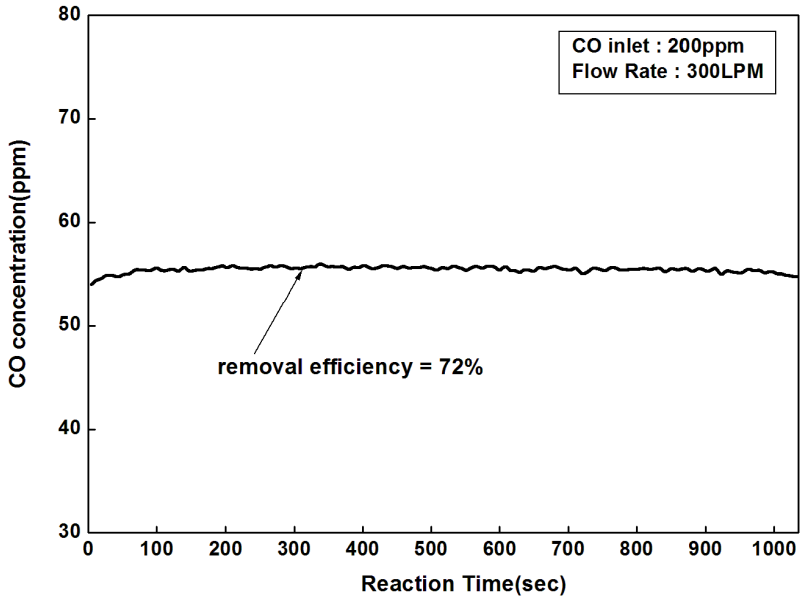
○ 실험에 사용되는 미세먼지는 터널 내 발생되는 미세먼지의 특성과 유사한 조건인 입경크기 2~10 um 이하, 입자밀도 1.95 g/cm^3로 공급하기 위하여 한국 산업규격에서 10종(flyash)으로 규정한 Test Powder를 사용하였고, 먼지 발생장치를 이용하여 일정한 양으로 반응기에 공급하였음.

○ 또한, 터널 내 차량에 의해 발생되는 오염물질의 조건을 고려하여 온도 25℃, 상대습도 45±5% 하에서 집진장치 유입부를 통해 미세먼지와 CO 및 VOC 가스를 유입하여 일차적으로 백필터 집진장치를 통해 미세먼지를 제거하였으며, 집진장치를 통과한 가스는 촉매반응기를 통해 제거하였음.

○ 입구 및 출구에서의 실시간으로 데이터를 측정하였음.

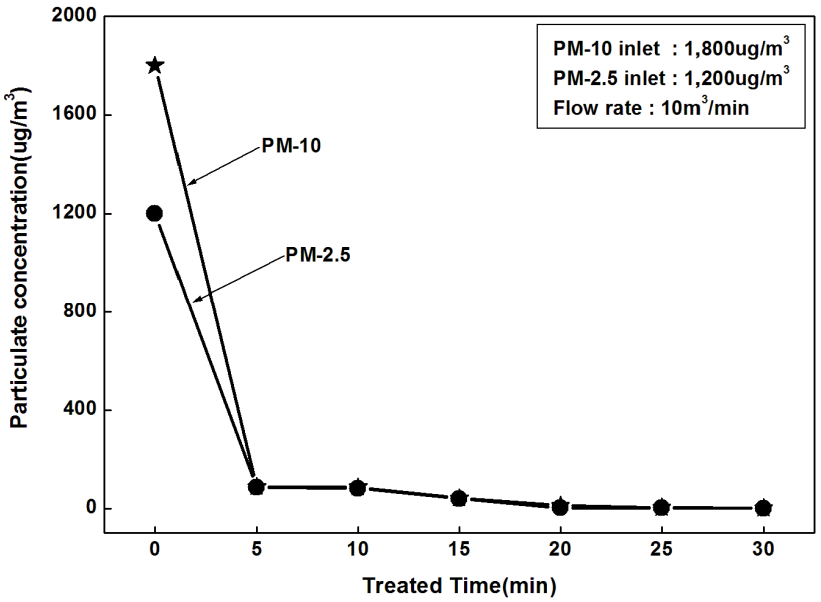
나. 처리효율

○ 복합처리 장치의 CO 성능평가 결과, 초기농도 200ppm에서 가스 유입 유량이 300L/min 일 때 CO의 농도가 55ppm로 처리효율은 72% 나타났고, 시간에 따라 처리효율이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있음.

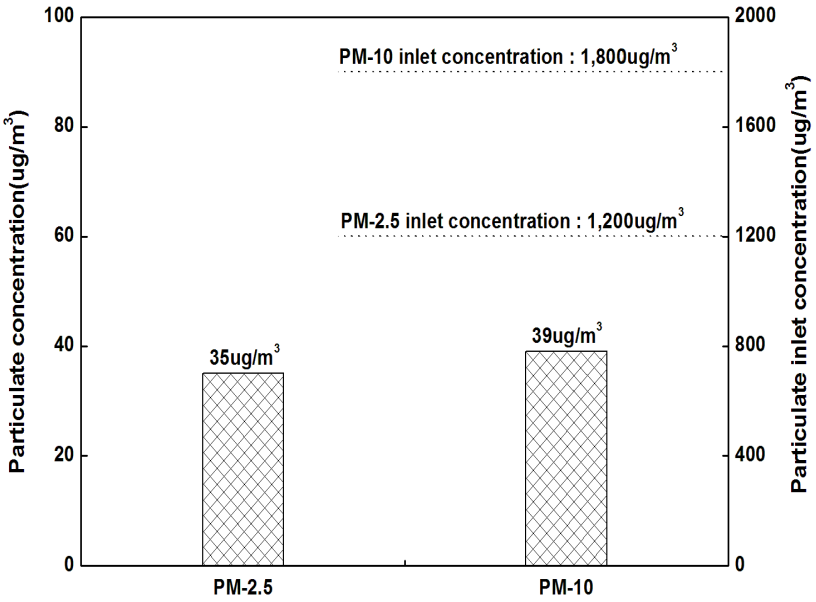


<그림 2-75> 시간에 따른 CO 처리효율

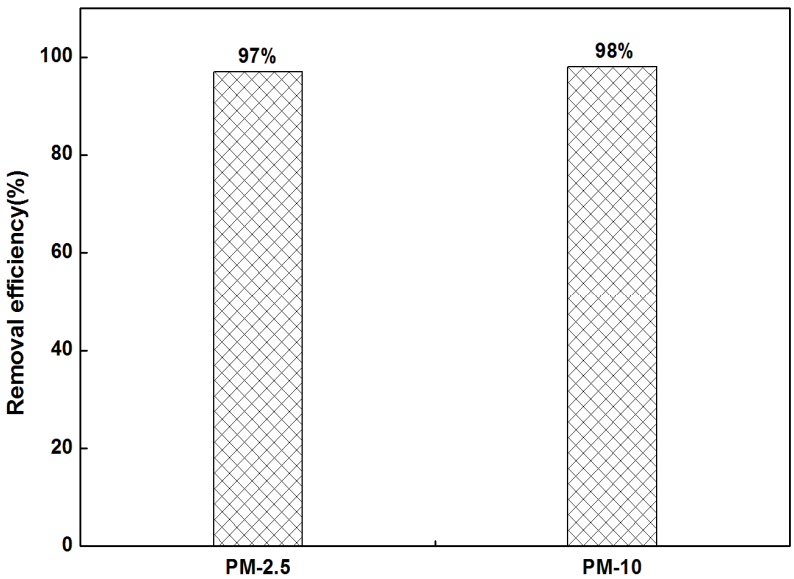
○ 백필터 장치(10m^3/min)의 미세먼지 포집 결과, PM-2.5과 PM-10의 초기농도는 각각 1,200ug/m^3, 1,800ug/m^3 이였으나 백필터에 의한 포집 후의 PM-2.5과 PM-10의 농도가 각각 35ug/m^3, 39ug/m^{3}로 포집효율은 PM-2.5가 97%, PM-10이 98%로 95% 이상의 포집효율을 보이고 있음.



<그림 2-76> 백필터 장치의 시간에 따른 미세먼지 농도 변화



<그림 2-77> 백필터 장치 처리 후 미세먼지 평균 농도

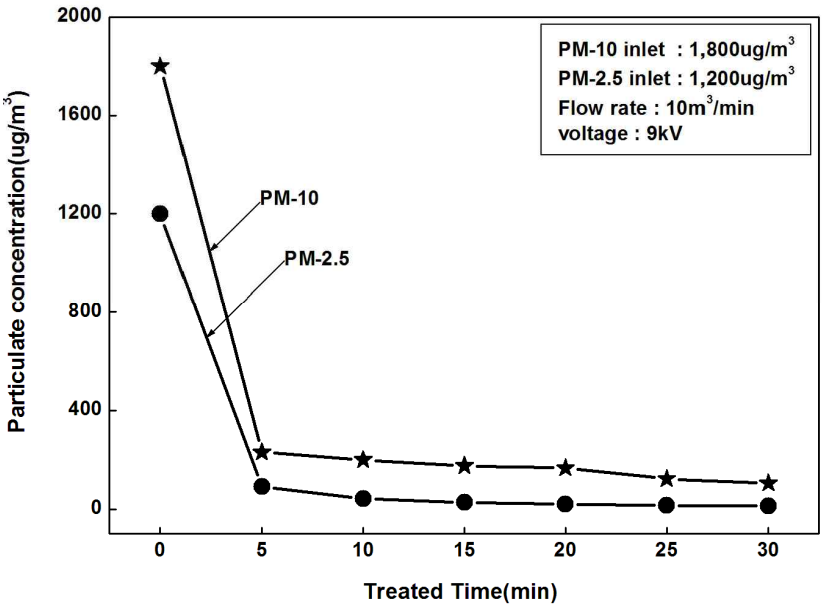


<그림 2-78> 백필터 장치의 미세먼지 처리효율

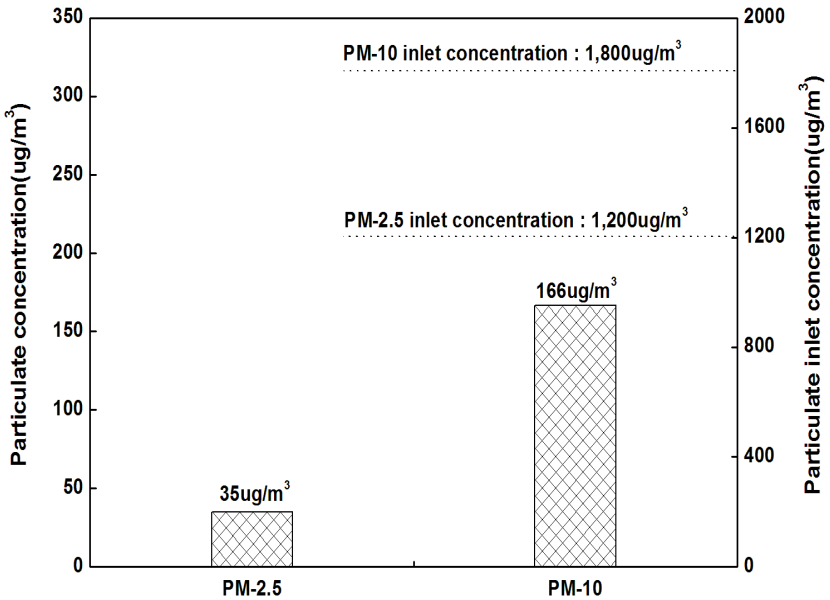
○ 전기집진 장치의 미세먼지 포집 결과, 포집 전 PM-2.5의 농도는 1,200ug/m^3, PM-10의 농도는 1,800ug/m^3 로 PM-2.5가 97%, PM-10이 91%로의 포집효율을 나타냄.

○ 백필터의 경우 PM-10이 PM-2.5 보다 처리효율이 1% 높은 것으로 나타났으나 전기집진 장치의 경우 PM-2.5가 PM-10 보다 처리효율이 6% 높은 것으로 나타남.

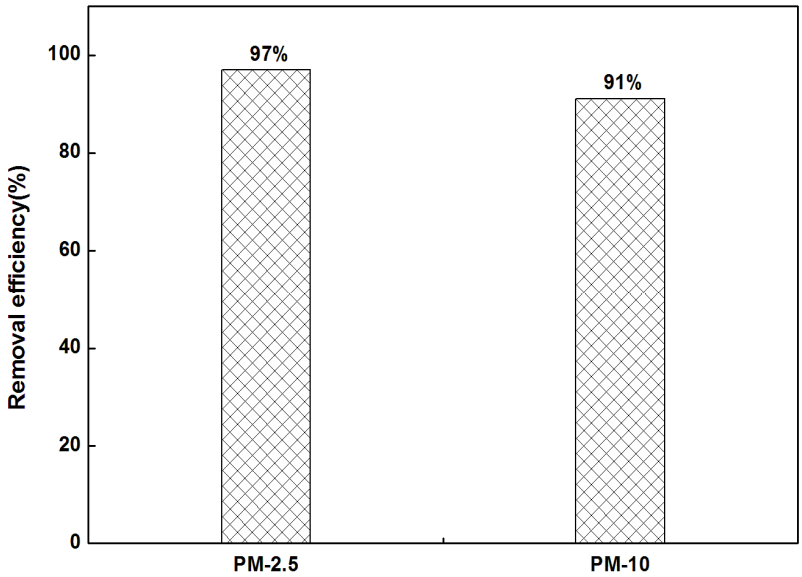
○ 미세먼지 포집 결과, 백필터가 전기집진 장치에 비해 다소 처리효율이 높은 것으로 나타났음.



<그림 2-79> 전기집진 장치의 시간에 따른 미세먼지 농도 변화



<그림 2-80> 전기집진 장치 처리 후 미세먼지 평균 농도



<그림 2-81> 전기집진 장치의 미세먼지 처리효율

6. 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 개발

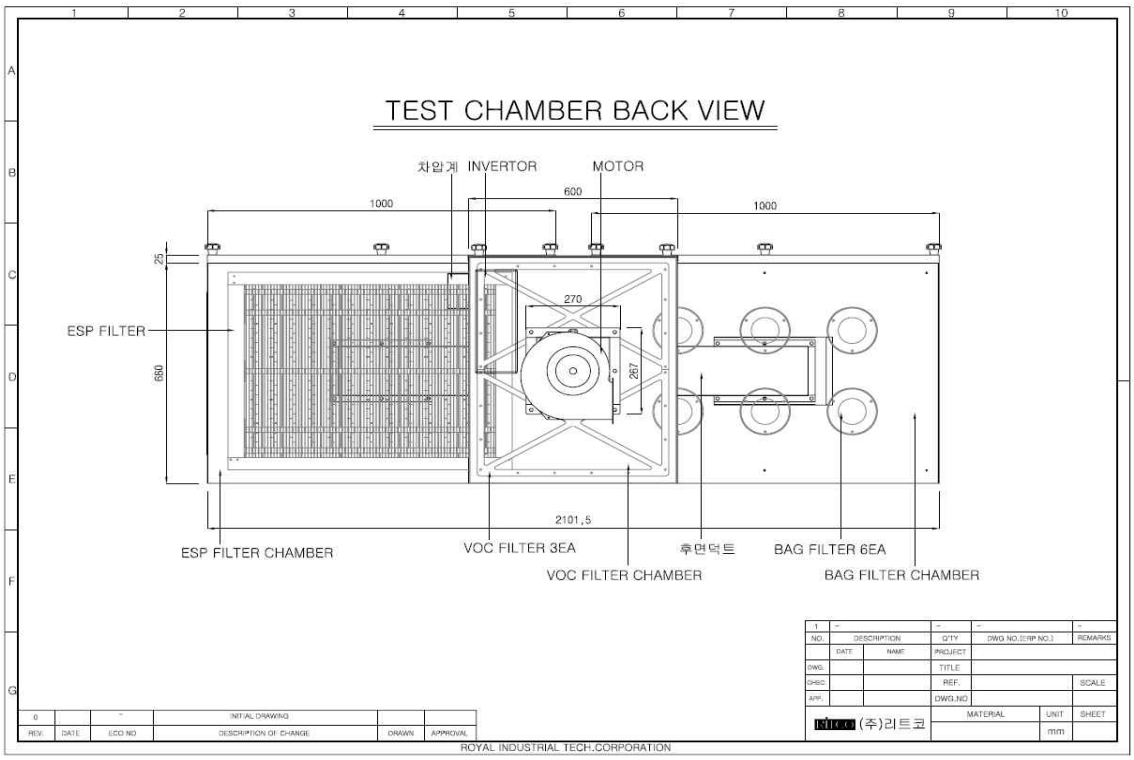
6.1 시제품 개발

○ 요소기술 개발을 바탕으로 터널 내 발생되는 대기오염물질(미세먼지 및 유해가스)을 동시에 처리할 수 있는 시제품을 개발하였음.

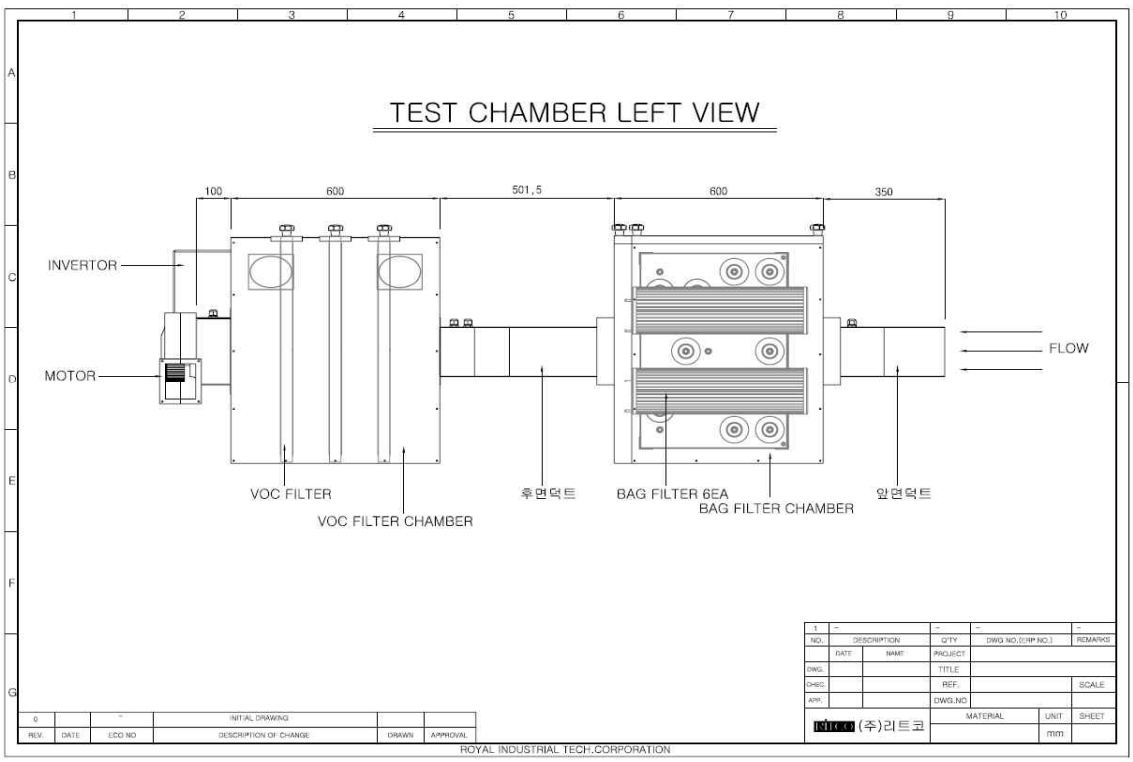
○ 시제품 장치는 앞단에서 1차적으로 미세먼지를 제거하고, 후단에서 2차적으로 유해가스를 제거하는 시스템으로 미세먼지 제거 모듈은 전기집진장치와 백필터 방식이 듀얼로 연결되어 있고, 유해가스 제거 모듈은 상온촉매 방식(CO 처리)과 흡착 방식(VOC 처리)으로 구성되어 있음.

- 미세먼지 제거 모듈 : 전기집진기 & 여과집진기 Dual
- 유해가스 제거 모듈 : 상온촉매(CO) & 제올라이트(VOC)

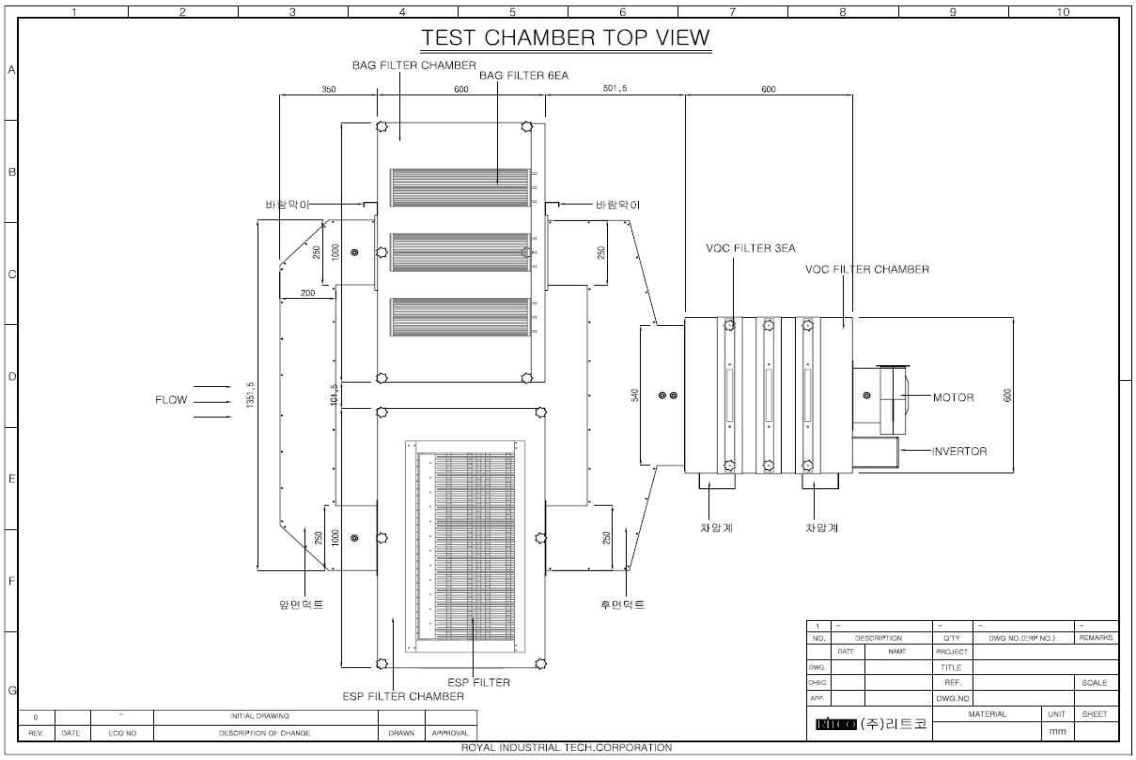
○ 그림 2-82는 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 개발을 위한 개략도를 나타낸 것이고, 그림 2-83는 본 연구에서 개발된 시제품 제작 사진임.



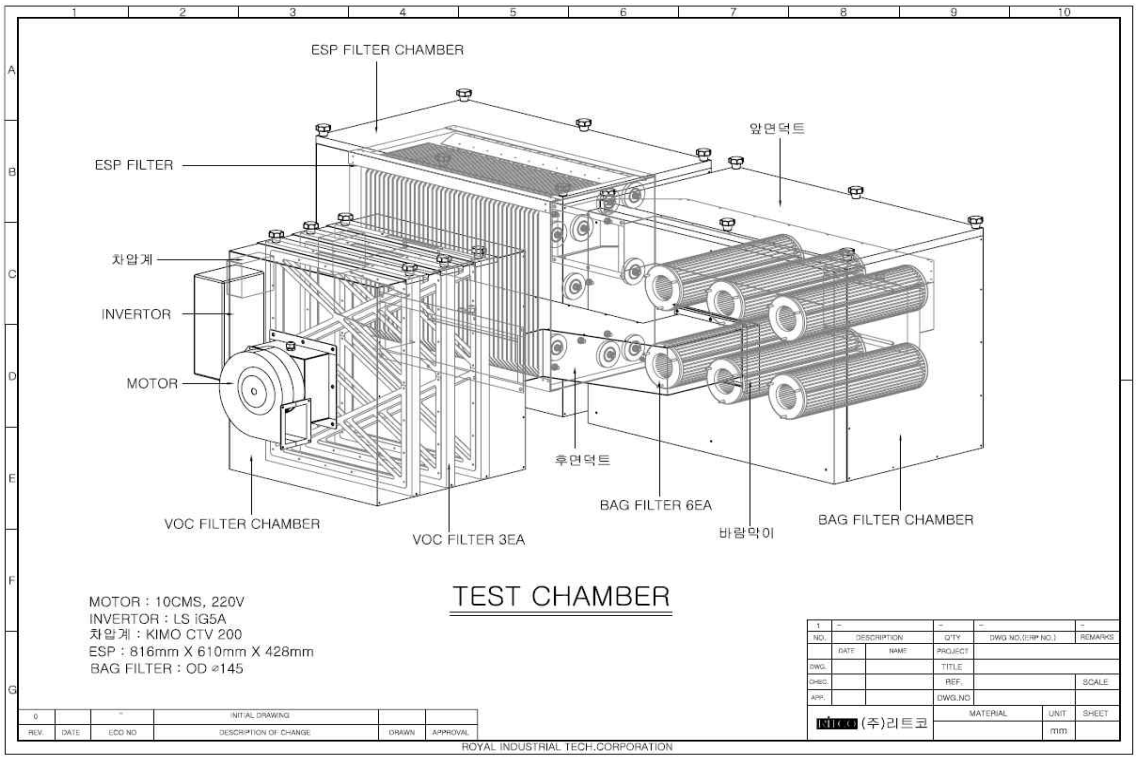
<back view>



<left view>

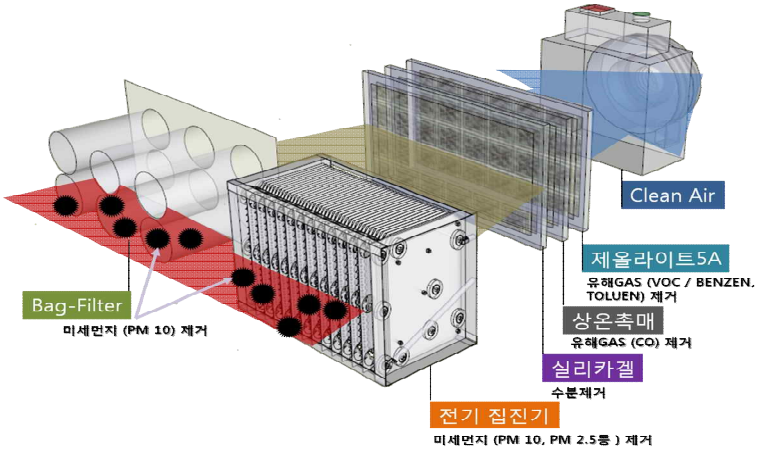


<top view>



<overall>

<그림 2-82> 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 개략도



<시제품 장치 개념도>



<시제품 장치>

<그림 2-83> 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치(시제품)

○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 시제품의 전체적인 사양은 표 2-27과 같음.

<표 2-27> 시제품 사양

구분	사양
규격	○ W 2.15m × D 2.10m × H 0.68m
용량	○ 10m^3/min
시스템	○ 미세먼지 집진부 (전기집진/여과집진 Dual) + 유해가스 처리부 2단
재질	○ 외관 : SUS / 촉매필터 : PE
소비전력	○ 최대소모 3KW(전기집진 가동시)
전원	○ 전기집진 360V/기본 장치 220V

6.2 기존 터널 전기집진 장치와의 차별성

구분	기존설비(전기집진장치)	본 연구개발 설비
설비 시스템	○ 전기집진장치	○ 전기집진장치+상온촉매필터+흡착필터
처리 물질	○ 미세먼지(PM10)	○ 미세먼지(PM10) ○ 유해가스(CO, VOC)
설치 대상 터널	○ 도로 장대터널(1.5km 이상)	○ 도로 장대터널(1.5km 이상) ○ 주요 도심터널, 지하차도 ○ 지하공간(다중이용시설 등)
초기 투자비 (시공비포함)	○ 전기집진장치 - 30억원 ○ 바이패스 터널공사 - 220억원 ○ 총 투자비 - 250억원	○ 전기집진장치 - 20억원(본 연구결과) ○ 본 개발품은 터널 내 어디에든 적용 가능하여 바이패스 터널의 추가 공사를 최소화함.
특징	○ 기존 전기집진장치는 대부분 일본, 유럽 등 수입에 의존 - 초기 투자비가 높고, 유지관리 어려움.	○ 수입에 의존하던 기존 전기집진장치 국산화 및 상온촉매필터 개발 - 초기 투자비 절감 및 유지관리 용이 - 미세먼지 및 유해가스 동시 처리

7. 모형터널 적용 성능평가

7.1 실험방법

○ 터널 내 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 처리하기 위해 개발된 시제품의 성능 검증 및 시스템의 최적화를 통한 터널 적용 가능성 평가 및 적용 기술 확보를 위하여 모형터널 적용 성능평가를 수행하였음.

○ 성능평가 수행 시 현장 터널과 유사한 조건으로 실험을 수행하였고, 발생 미세먼지 및 유해가스는 터널 현장조사 결과를 바탕으로 농도를 조절한 모사가스를 사용함.

○ 흡착질로 사용된 표준 CO 가스와 VOC 가스는 질소가스를 balance로 하여 반응기에 유입되기 전에 원하는 농도로 조절하였고, 유입 유량은 50 L/min 으로 설정하였음.

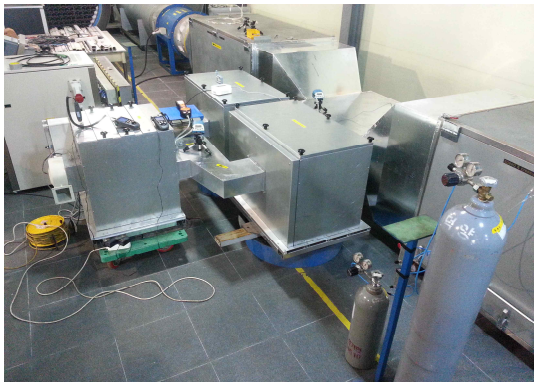
○ 실험에 사용되는 미세먼지는 터널 내 발생되는 미세먼지의 특성과 유사한 조건인 입경크기 2~10 um 이하, 입자밀도 1.95 g/cm^{3}로 공급하기 위하여 한국 산업규격에서 10종(flyash)으로 규정한 Test Powder를 사용하였고, 먼지 발생장치를 이용하여 일정한 양으로 반응기에 공급하였음.

○ 또한, 터널 내 차량에 의해 발생되는 오염물질의 조건을 고려하여 온도 25℃, 상대습도 45±5% 하에서 집진장치 유입부를 통해 미세먼지와 CO 및 VOC 가스를 유입하여 일차적으로 백필터 집진장치를 통해 미세먼지를 제거하였으며, 집진장치를 통과한 후 먼지가 제거된 가스는 촉매반응기를 통해 제거하였음.

○ 입구 및 출구에서의 실시간으로 데이터를 측정하였으며, CO의 측정은 KIMO COREA의 AQ-200, VOC의 측정은 ION SCIENCE의 PhotocheckTiger 그리고 미세먼지의 측정은 TSI의 AM500을 사용하여 데이터를 측정 및 분석하였음.



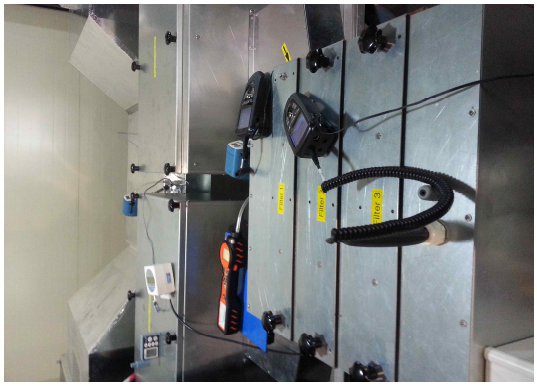
<모형터널 전경1>



<시제품 장치>



<모형터널 전경2>



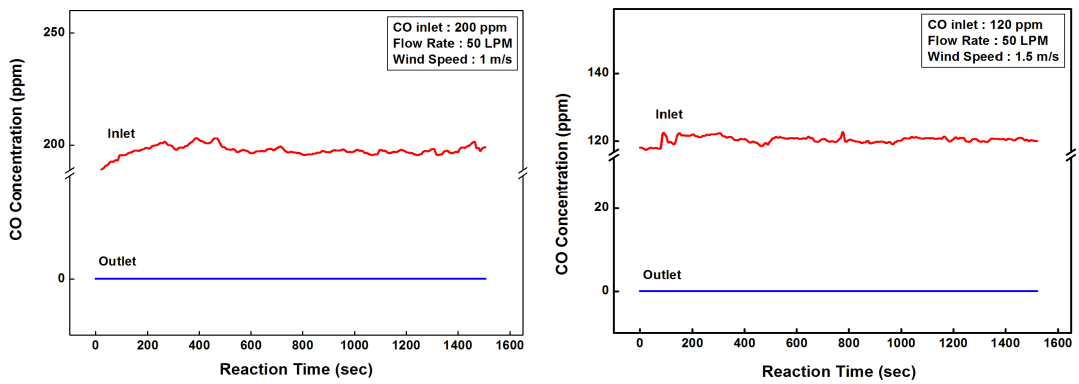
<오염물질 측정>

<그림 2-84> 모형터널 적용 성능평가

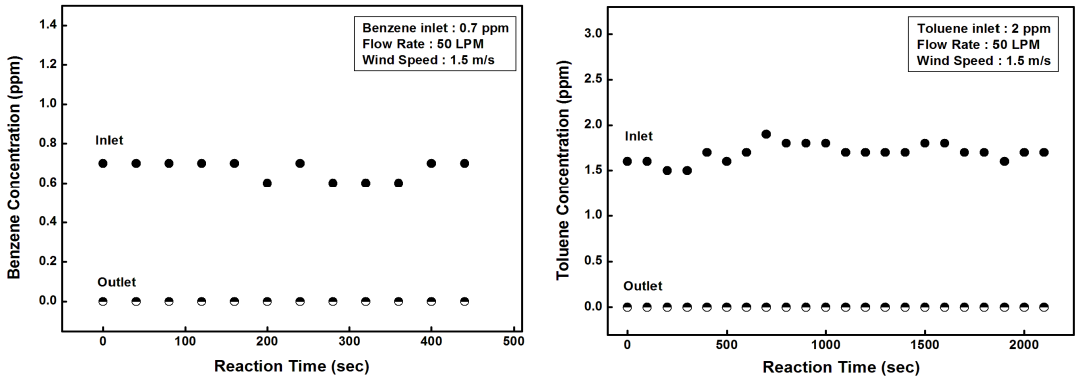
7.2 성능평가 결과

○ 성능평가 결과 유해가스(CO, VOC) 및 미세먼지가 터널 출구 부분에서 대부분 처리되는 것으로 나타남.

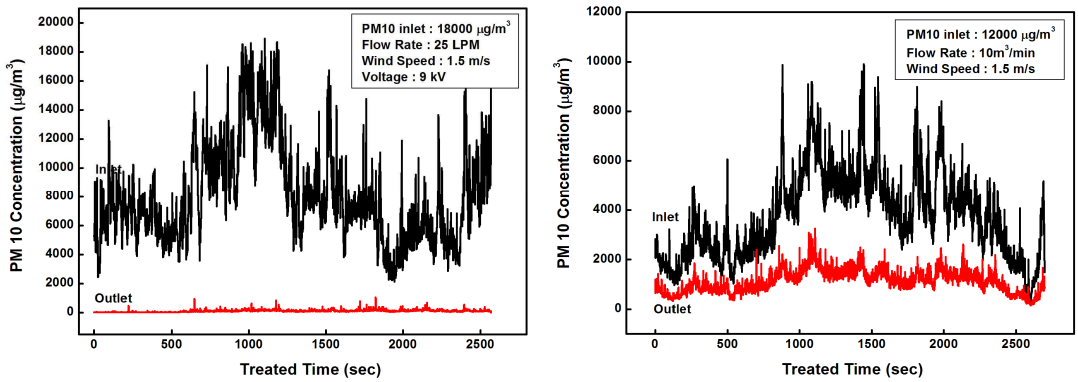
○ 백필터의 경우 전기집진장치에 비해 처리효율이 낮게 나타나 처리효율을 높이기 위해 HEPA 필터로 교체 후 현장 적용



<그림 2-85> 일산화탄소(CO) 처리효율



<그림 2-86> VOC 처리효율(좌: 벤젠, 우: 톨루엔)



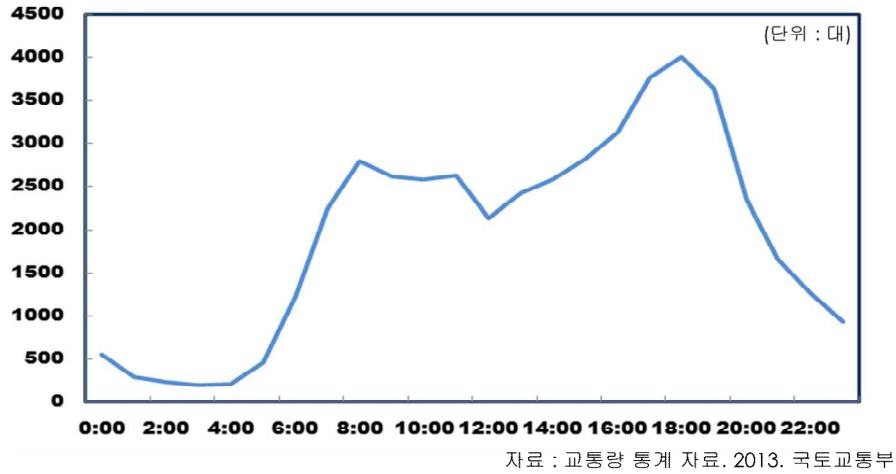
<그림 2-87> 미세먼지 처리효율(좌: 전기집진기, 우: 백필터)

8. 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 현장적용

○ 본 연구에서는 개발된 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품의 현장 성능 검증을 위하여 실제 운영 중인 터널에 설치하여 모니터링을 실시하고자 하였음.

8.1 터널 현장설치

○ 수락산 터널은 서울시 노원구 상계동과 경기도 남양주시 별내면을 잇는 길이 2,950m, 왕복 8차선 터널로서 2006년 개통되었으며 일평균 교통량은 약 94,900 대이고, 집진방식은 전기집진방식임.

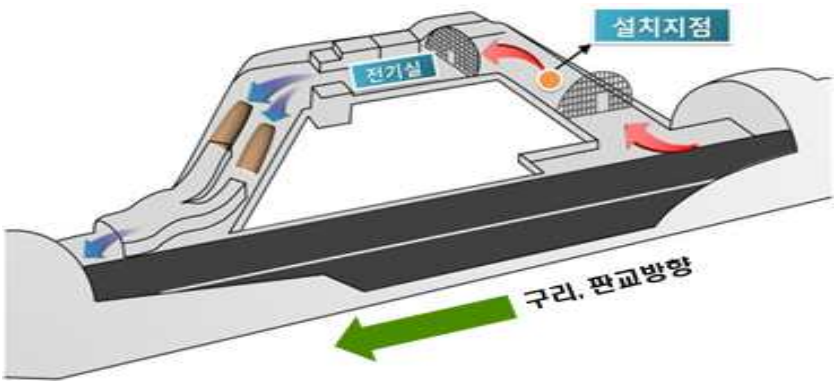


자료 : 교통량 통계 자료. 2013. 국토교통부

<그림 2-88> 수락산터널의 시간대별 교통량

○ 터널 현장설치는 서울외곽순환도로에 위치한 수락산터널로 설치 구간은 수락산터널(구리방향) 내 바이패스 구간에 설치함.

- 대상터널 : 서울외곽순환고속도로 수락산터널(구리 방향)
- 설치구간 : 수락산터널(구리 방향) 내 바이패스 구간



<그림 2-89> 시제품 현장적용 모식도

8.2 현장 시공

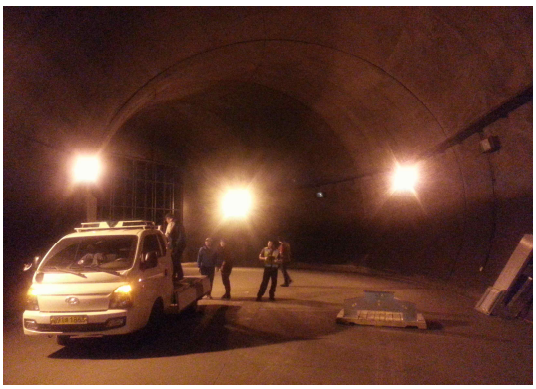
○ 수락산터널(구리방향) 내 바이패스 구간에 개발 시제품을 설치・시공하였음.

○ 개발 시제품은 10m^3/min(W 2.15m × D 2.10m × H 0.68m) 규모로 미세먼지를 처리하는 장치 모듈을 먼저 설시하고, 후단에 유해가스를 처리할 수 있는 장치 모듈을 설치함.

○ 설치・시공이 완료된 후 유해가스 처리 장치 모듈 내 상온촉매와 흡착제를 충진 함.



<수락산터널 by-pass 터널 입구>



<시제품 설치 준비>



<시제품 설치>



<시제품 설치 후 최종점검>



<최적 기능유지를 위한 위치 조정>



<시제품 설치 완료>

<그림 2-90> 시제품 현장설치 전경

8.3 터널 용 전기집진장치 수처리 설비

○ 기존 국내 터널의 경우 전기집진장치가 7군데 터널 내 설치되어 운영되고 있으며, 대부분이 습식제진장치로 유지관리 시 발생되는 폐수에 대한 처리 설비가 부수적으로 포함되어 있음.

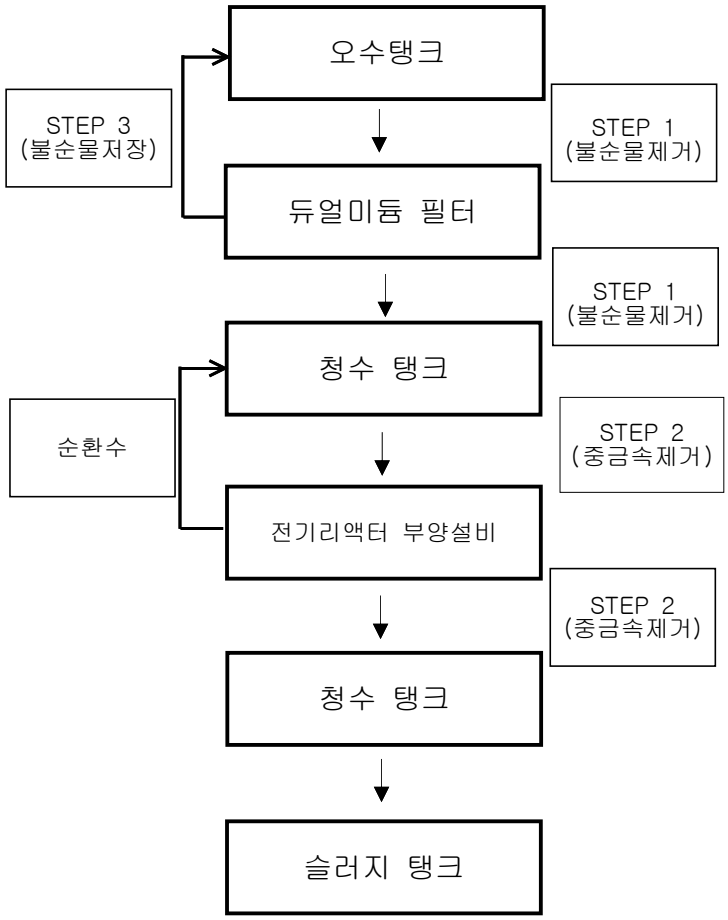
○ 본 연구에서 개발된 시제품도 향후 상용화가 이루어 질 시 전기집진장치의 유지관리를 위해 부수적으로 수처리 설비 가 필요한 바 이에 대해 현재 전기집진장치가 적용 된 터널을 기준으로 수처리 설비에 대한 내용을 검토하였음.

가. 설계사양

<table>
<tr><th colspan="2">항 목</th><th colspan="2">터널용 전기집진장치 수처리설비</th><th>비 고</th></tr>
<tr><td colspan="2">처리량</td><td colspan="2">[STEP1] 3.5m3/hr
[STEP2] 20.5m3/hr</td><td rowspan="10">수질 항목 중
처리수의 기준은
청정지역 기준임.</td></tr>
<tr><td rowspan="5">수 질
항 목</td><td>구분</td><td>원수(폐수)</td><td>처리수</td></tr>
<tr><td>PH</td><td>5.8~8.6</td><td>6.9~7.5</td></tr>
<tr><td>SS</td><td>2,000 or less</td><td>40 or less</td></tr>
<tr><td>BOD</td><td>-</td><td>40 or less</td></tr>
<tr><td>COD</td><td>-</td><td>50 or less</td></tr>
<tr><td colspan="2">슬러리 함수율</td><td></td><td>50% or less</td></tr>
<tr><td colspan="2">세척제 성분 및
중금속 제거율</td><td></td><td>95~99%</td></tr>
<tr><td colspan="2">박테리아 처리
미생물처리
산소공급</td><td></td><td>O</td></tr>
<tr><td colspan="2">처리 방법</td><td>[STEP 1]
듀얼미듐필터</td><td>[STEP 2]
전기리엑터 부양방식</td></tr>
</table>

나. 수처리 설비 공정

○ 터널 용 전기집진장치의 수처리 설비 공정도





<그림 2-91> 터널 용 전기집진장치 수처리 설비

○ 1단계(STEP-1) : 집진장치를 세척한 폐수를 오수탱크에 저장한 후 수처리 설비의 듀얼미듐 필터를 통해 불순물과 중금속을 제거하고 불순물이 제거된 물을 청수탱크로 이동시켜 저장한 후 집진장치 세척에 재사용하는 공정으로 방류되는 폐수가 없음.

○ 2단계(STEP-2) : STEP-1 공정을 거쳐 청수탱크에 저장된 물을 주기적으로 수처리 설비를 통해 반복 재순환시킴으로 물속에 산소를 공급하여 부패를 방지하고, 물속의 중금속과 박테리아, 미생물 등을 제거하는 공정

○ 3단계(STEP-3) : STEP-1 공정 시 듀얼미듐 필터에 걸러진 불순물을 청수탱크의 물을 이용한 back wash를 통해 불순물을 슬러지탱크로 이송하여 침전시켜 저장하고 침전된 불순물을 제외한 물은 오수탱크로 보내져 STEP-1을 거쳐 청수탱크에 저장한 후 세척에 재사용되는 공정

다. 수처리 설비 제원

○ 수처리 설비 규격 : 3,700 × 2,000 × 2,350(H)

○ 수처리 설비 설치용 지하구조물 규격 : 4,000 × 5,100 × 3,800(H)

항 목		터널용 전기집진장치 수처리 설비
1단계 (STEP-1)	목적	○ 부유물질(SS) 및 중금속 응집 및 부상처리
	처리용량	○ 3.5㎥/HR
	구성	○ 듀얼미듐 필터 및 챔버 ○ PLC SYSTEM ○ 오수펌프, SOL V/V 등
	소비동력	○ 0.55 kw
2단계 (STEP-2)	목적	○ 박테리아 및 미생물 처리, 산소공급
	처리용량	○ 20.5㎥/HR
	구성	○ 전기 리엑터 ○ 청수 탱크 ○ 듀얼 미듐 필터
	소비동력	○ 3.0 kw
3단계 (STEP-3)	목적	○ 슬러지 이송 및 저장 (BACKWASH 공정)
	처리용량	○ 20.5㎥/HR
	구성	○ 슬러지 펌프 ○ 슬러지 탱크
	소비동력	○ 3 kw
동력	총 동력	○ 6.55kw

라. 전기집진장치 세척 시 물 사용량 및 폐수 처리량

○ 전기집진장치의 세척수량(m^3)은 집진장치의 규모(집진셀의 설치수량)에 따라 설치되는 세척노즐 수량이 틀리므로 현장별로 맞춤 설계가 이루어지고 있고, 수락터널의 집집장치 세척노즐의 수량은 3,100ea로 설계되어 있음.

○ 세척주기는 집진기 가동 누적시간을 기준으로 200hr 가동 후 1회 세척하는 방식으로 프로그램 되었으며, 전기집진기 1일 가동시간은 차량 이동이 가장 많은 오전, 오후 출·퇴근 시 2시간씩 하루 4시간 가동함.

○ 수락터널 전기집진장치는 50일에 1회 세척하고, 1회 세척 시 세척수량은 약 10.5m^3의 수량이 필요함.

○ 집진장치 세척주기

- 200hr / 4hr(1day) = 50일/1회세척

○ 수락산 터널 기준 1회 세척 시 물 사용량(m^3)

- 노즐수량(ea) x 분사량(liter/min) x 분사시간(min) = 3,100ea x 3.4liter/min x 1min = 10,540L(약 10.5ton)

○ 세척 시 발생한 폐수는 오수탱크에 저장한 후 수처리 설비를 통해 폐수에 포함되었던 불순물만 슬러지탱크에 저장하고, 나머지는 깨끗한 물로 환원시켜 청수탱크에 저장한 후 세척에 재사용함으로 방류되는 폐수가 발생되지 않고, 슬러지탱크에 저장된 불순문은 Gel형태로 침전시킨 후 외부로 반출하여 폐기물로 처리하는 시스템임.

○ 폐수에 포함된 불순물은 수처리 설비의 듀얼미듐 탱크와 챔버에서 걸러진 후 back wash를 통해 슬러지 탱크로 보내짐.

○ 슬러지 탱크에서 침전작용을 거쳐 불순물은 슬러지 탱크 밑으로 가라앉고, 상부의 물은 오수탱크로 다시 보내져서 수처리 설비를 거쳐 청수탱크에 저장됨.

○ 슬러지탱크에 침전된 불순물은 10년에 1회 외부로 반출함.

○ 청수탱크의 물은 주기적으로 수처리 설비를 통해 반복 재순환시켜 중금속 제거 및 산소공급으로 박테리아와 미생물이 발생하지 않게 하고, 청정도를 유지하여 집진장치 세척에 재사용함으로 방류되는 폐수 발생량이 없음.

○ 청수탱크의 물은 한번 채움으로 계속 사용 가능하나 5년 주기로 교체가 필요함.

○ 청수탱크 지하구조물 규격 : 2,300 x 5,100 x 2,895(H)

○ 오수탱크 지하구조물 규격 : 2300 x 5,100 x 2,895(H) X 2(집진셀용, 프리필터용)

○ 슬러지 탱크(SUS) : 10,000liter(10ton)

○ 전기집진장치의 사용 년한을 30년 기준으로 하였을 때 필요한 용량은 다음과 같음.

기준	항목	용량	비고
1년	집진장치 가동 누적시간	1,460hr	○ 4hr(1day) x 365
	집진장치 세척 횟수	8회	○ 1,460hr ÷ 200hr
	세척에 사용된 수량	10.5m^3	○ 수처리 설비를 이용한 Recycle 방식
	청수탱크 담수량	30m^3	○ 2,300 x 5,100 x 2,895(H) : 1회 채움
	폐수 발생량	-	○ 수처리 설비로 폐수를 청수로 재활용
	슬러지탱크 담수량	10m^3	○ 수처리 설비를 통해 폐수의 불순물만 저장
10년	집진장치 가동 누적시간	14,600hr	○ 4hr(1day) x 365 x 10year
	집진장치 세척 횟수	73회	○ 14,600hr ÷ 200hr
	세척에 사용된 수량	60m^3	○ 청수 탱크물 교체 : 30m^3 x 2회(5년에 1회)
	폐수 발생량	10m^3	○ 슬러지탱크 불순물 반출 : 10m^3 x 1회 (10년에 1회)
20년	집진장치 가동 누적시간	29,200hr	○ 4hr(1day) x 365 x 20year
	집진장치 세척 횟수	146회	○ 29,200hr ÷ 200hr
	세척에 사용된 수량	120m^3	○ 청수 탱크물 교체 : 30m^3 x 4회(5년에 1회)
	폐수 발생량	20m^3	○ 슬러지탱크 불순물 반출 : 10m^3 x 2회 (10년에 1회)
30년	집진장치 가동 누적시간	43,800hr	○ 4hr(1day) x 365 x 30year
	집진장치 세척 횟수	219회	○ 43,800hr ÷ 200hr
	세척에 사용된 수량	180m^3	○ 청수 탱크물 교체 : 30m^3 x 6회(5년에 1회)
	폐수 발생량	30m^3	○ 슬러지탱크 불순물 반출 : 10m^3 x 3회 (10년에 1회)

9. 시제품 현장적용 모니터링

○ 개발 시제품의 성능을 검증하고, 시스템의 최적화를 통한 터널 적용 가능성 평가 및 적용 기술 확보를 위하여 현장적용 모니터링을 수행하였음.

9.1 모니터링 과정

○ 모니터링 기간 : 2014. 05 ~ 2014. 09

○ 모니터링 방법

- 2주 간격으로 실시간 모니터링 data 확인 및 장비 점검
- data 분석을 통한 시스템의 최적화 및 적용 가능성 도출



<그림 2-92> 현장적용 모니터링

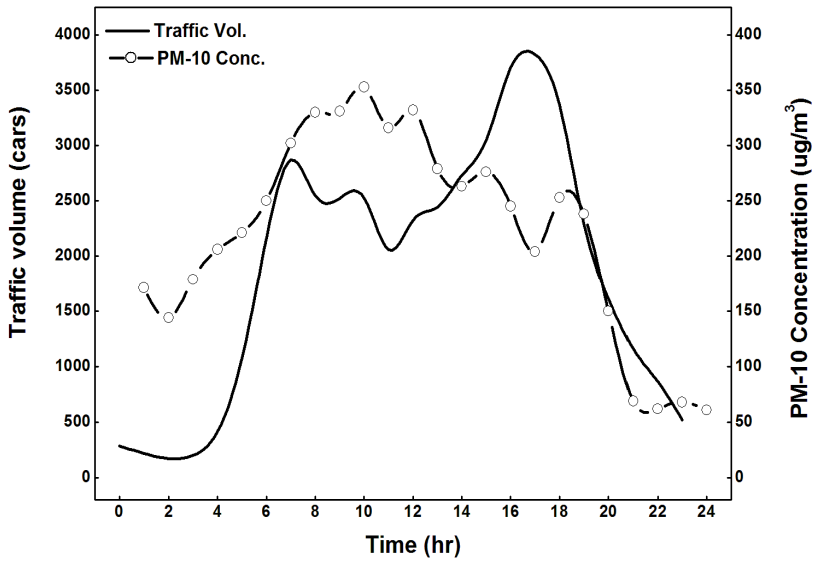
9.2 모니터링 결과

○ 시제품 장치 입구와 출구에 측정 장비를 설치하여 실시간 모니터링을 통한 오염물질의 농도 변화 및 특성을 분석하였음.

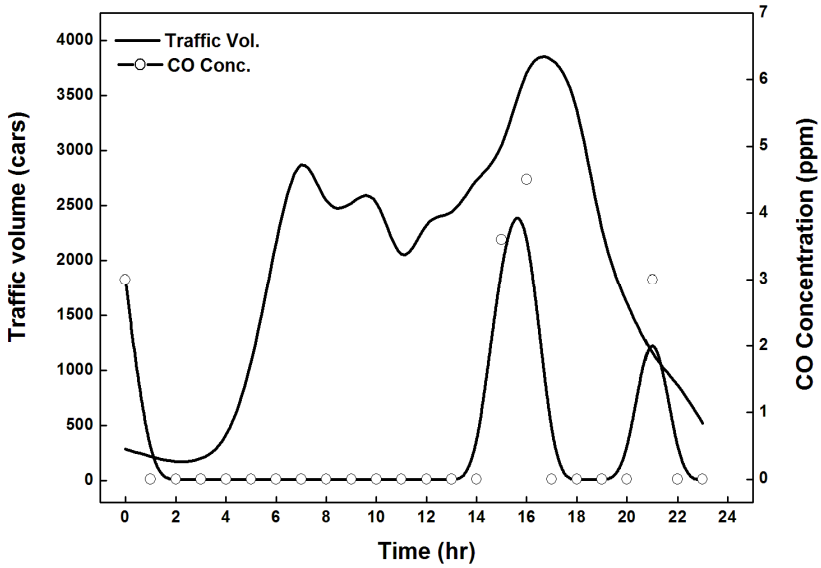
○ 시간대별 교통량에 따른 대기오염물질 발생 특성을 살펴보면 수락산 터널의 일일 교통량은 출근시간대인 6시~8시, 퇴근시간대인 17시~19시에 집중적으로 교통량이 증가하는 것을 알 수 있음.

○ 하지만, 그림 2-93~95에서 나타났듯이 교통량 증가가 오염물질의 발생량을 증가시키는 절대적인 영향요인은 아닌 것으로 나타남.

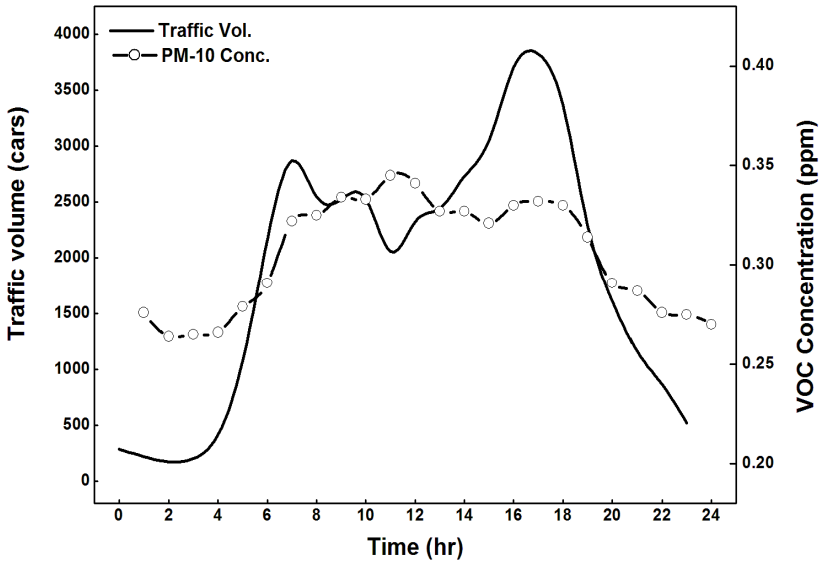
○ 따라서 오염물질의 발생량은 교통량 증가와는 크게 상관성이 없는 것으로 판단됨.



<그림 2-93> 시간대별 교통량에 따른 PM-10 농도 변화



<그림 2-94> 시간대별 교통량에 따른 CO 농도 변화



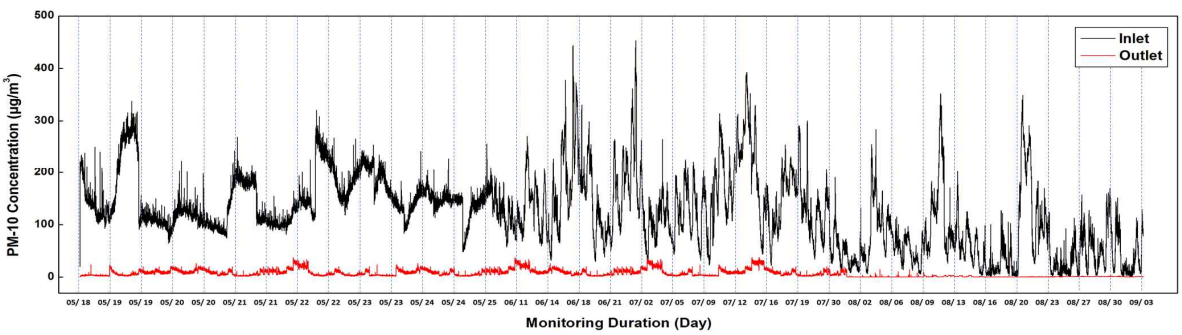
<그림 2-95> 시간대별 교통량에 따른 VOC 농도 변화

○ 현장적용 모니터링 결과 대부분의 가스상 오염물질이 차량 통행이 적은 자정~새벽 시간대에 측정이 되는 경향을 보이는데 이는 주행풍의 영향을 적게 받아 터널 내부에 정체되어 있던 유해가스들이 바이패스 구간을 통해 처리장치로 유입되기 용이하기 때문이라 판단됨.

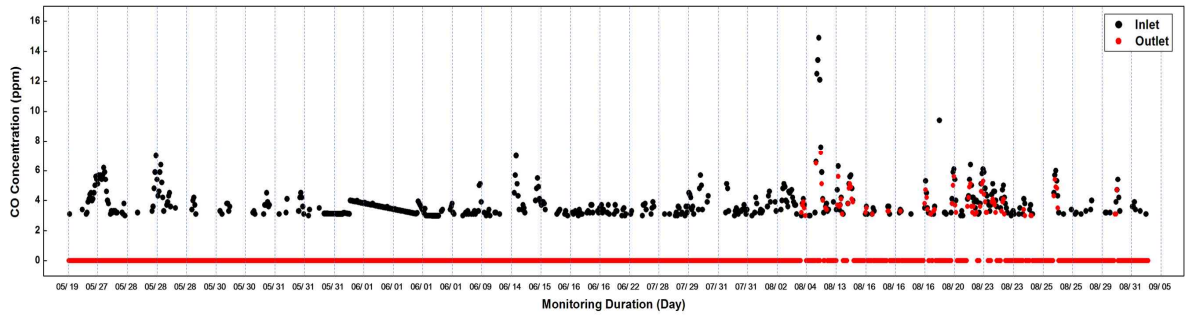
○ 수락산 터널의 경우 현장조사를 수행했던 도심터널과는 달리 고속도로라는 특성과 왕복 8차선으로 이루어져 있어 통행량은 많으나 터널 내부에서의 차량정체가 발생하지 않고 차선이 넓어 차량이 대부분의 시간대에 고속주행을 하게 되는데, 이로 인해 발생하는 주행풍의 속도가 바이패스로 유입되는 속도보다 빠르기 때문에 차량 통행이 적은 자정~새벽 시간대에 가스상오염물질들이 처리 장치로 유입되는 것으로 판단됨.

○ 대부분 가스상 오염물질(CO, VOC) 및 미세먼지는 모니터링 기간 동안 처리효율이 90% 이상인 것을 알 수 있음.

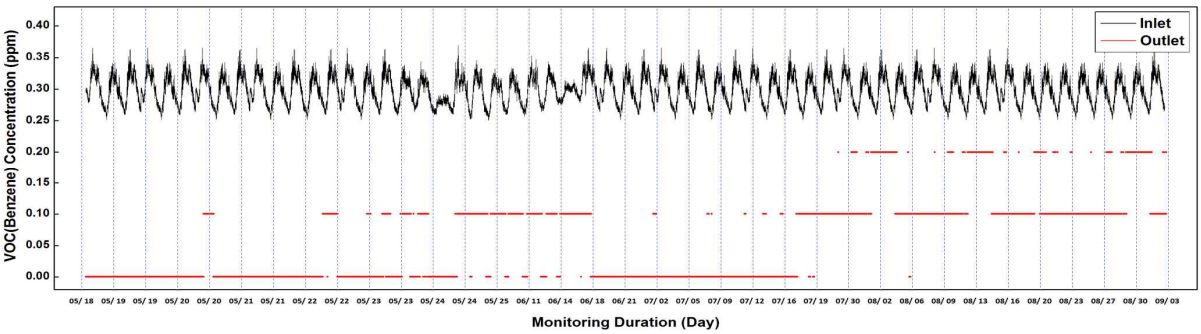
○ 다만, 초기 설치 이후 장기 모니터링으로 인한 필터 및 상온촉매, 흡착제의 성능이 다소 낮아지는 경향을 보이며 이러한 결과를 바탕으로 향후 개발 시제품의 성능 최적화를 도출하여 실용화를 추진할 계획임.



<그림 2-96> 미세먼지(PM-10) 처리효율



<그림 2-97> 일산화탄(CO) 처리효율



<그림 2-98> VOC(벤젠) 처리효율

10. 개발 시제품의 경제성 평가

○ 본 연구에서는 개발된 설비에 대한 현장 적용성 평가를 통하여 현재 터널 내 대기오염물질저감에 가장 많이 이용되는 전기집진기 방식과 본 연구개발 설비의 설치비 및 유지관리비용의 비교・검토를 통한 경제성 평가를 수행하였음.

○ 전기집진방식과의 비교 이유는 현재 터널 내에서 대기오염물질을 직접적으로 저감하는 방식은 전기집진방식이 유일하기 때문임.

○ 경제성 검토는 초기 설치비와 유지관리비용 등을 개략산정한 후 유지관리에 대한 사항을 검토하여 순현재가치(Net Present Value : NPV)를 적용하여 각 설비별 LCC(Life Cycle Cost)를 산출하였음.

○ 경제성 검토 대상에 대한 개요를 다음 표에 나타내었음.

구분	기존 설비	본 연구개발 설비
방식	○ 전기집진장치	○ 전기집진장치+상온촉매필터+흡착필터
용량	○ 100m^3/sec	○ 100m^3/sec
검토대상	○ 설치비 + 유지관리비 등 (Life Cycle Cost)	○ 설치비 + 유지관리비 등 (Life Cycle Cost)
유지관리비 항목	○ 전기료, 세척용 수도요금 등	○ 백필터 모듈 교체비 ○ 상온촉매, 흡착제 모듈 교체비 ○ 전기료 등

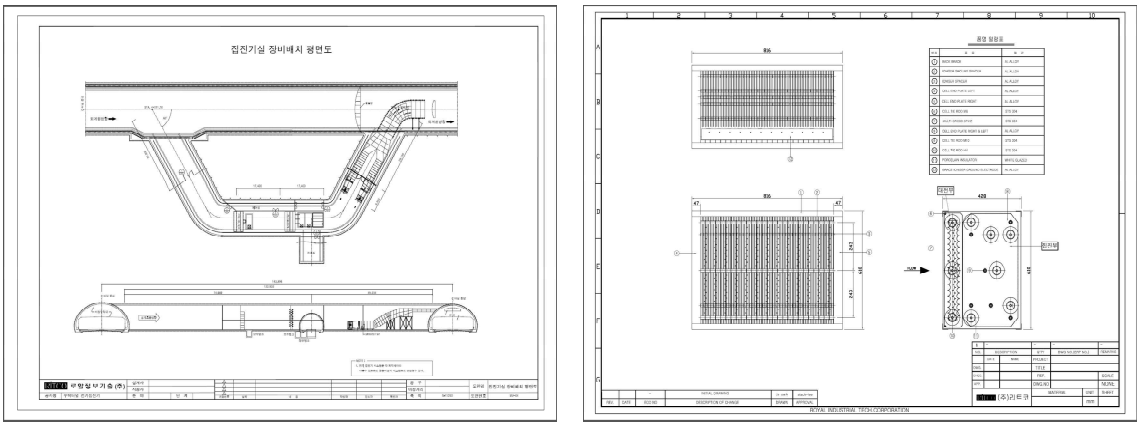
10.1 기존 설비(전기집진장치)

○ 기존 전기집진설비는 집진셀, 전원공급장치, 세척장치, 엑셀팬 등으로 구성되어 있으며 설치 금액은 28억(100m^3/sec 기준)원임.

○ 또한, 이를 운영하기 위한 운영 및 유지관리 비용은 집진셀에 공급하는 전기료와 세척용 수도요금 등이 소요되며 6백만원/년으로 추정

○ 전기집진설비는 입자상물질(PM-10 또는 PM-2.5)를 제거하는데 탁월하고 운전 및 유지 관리성이 좋다는 장점이 있음.

○ 반면 가스상물질 (CO, CO_2, VOC)는 제거가 불가능함.



<그림 2-99> 기존 집진설비 설계도면

■ 바이패스 터널 전기집진기 설치 금액

1. 설치 기준 : 6,000CMM (100CMS)

2. 설치 금액 : 2,800,000,000 (28억원)

3. 주요 구성품

1) 집진셀
2) 전원공급 장치 (파워팩)
3) 세척장치 (물탱크, 펌프, 노즐 및 노즐파이프 외)
4) 수처리장치
5) 프리필터
6) 액셀팬
7) 송풍용 철판 닥트
8) 기계설비공사
9) 전기 설비공사
10) 자동제어공사
11) 기타 공사

4. 년간 운영 및 유지보수 비용 : 약 300만원 (액셀팬 전기사용료 제외)

* 집진셀에 공급하는 전기료와 세척용 수도요금만 산정하였고, 기타 유지보수 비용은 거의 없음.

5. 공사 기간 : 약 3개월

<그림 2-100> 전기집진기 설치 및 유지관리 금액 산정

10.2 본 연구개발 설비

○ 본 연구개발 설비는 크게 2가지 모듈로 구분됨.

- First Module : PM-10 및 PM-2.5 제거를 위한 백필터, 전기집진기 모듈
- Second Module : CO 및 VOC 처리를 위한 모듈

○ 개발되는 설비를 100m^3/sec 기준으로 구성하면 설치비는 약 19억원 소요됨.

- 직접적인 비교를 위하여 기존 집진설비의 규격과 동일한 설비를 개발하는 것으로 가정함.
- 실제 개발 시제품(10m^3/min)의 제작 비용 및 현장적용에 따른 소요 운영비를 고려하여 산정

○ 또한 유지관리비는 크게 설비 구동 시 필요한 전기료와 백필터 및 상온촉매, 흡착제 재생 및 교체비용 등이 소요됨.

○ 구동 시 필요한 전기료는 앞서 산출된 전기집진기에서 수도요금 등을 제외한 2백만원/년으로 예상되며 백필터 및 상온촉매, 흡착제모듈 재생 및 교체 비용은 백필터 57,600,000원, CO 상온촉매 195,000,000원, VOC 흡착제 195,000,000원이 소요될 것으로 예상되며 그 교체주기는 5년에 1회 재생 및 15년에 1회 교체가 가능할 것으로 예상됨.

○ 본 연구개발 설비의 장점은 입자상물질 및 가스상물질을 동시에 제거할 수 있음.

○ 유지관리비가 다소 소요됨.

○ 이러한 구성으로 이루어진 본 연구개발 설비의 설치비 및 유지관리비를 산정하면 다음과 같음.

<표 2-28> 본 연구개발설비 설치비 및 유지관리비 소요금액 산정

구분		구성	설치비(원)
설치비 (장치 제작비 포함)	First Module	원형 bagfilter (1200cmm*500mmAq*215HP)	1,405,000,000
	Second Module	촉매탑 (CO 상온촉매 + VOC 흡착제)	490,000,000
	계		1,895,000,000
유지 관리비	First Module	cartridge(필터)/15년	57,600,000
	Second Module	CO 상온촉매/15년	195,000,000
		VOC 흡착제/15년	195,000,000
	전기료	설비가동 전기료/년	2,000,000

10.3 LCC 분석

○ 앞서 도출된 설치비 및 유지관리비를 바탕으로 하여 LCC 분석을 실시하였음.

○ 구성항목으로는 초기투자비용 및 유지관리비용을 구성하였고, 분석기간은 30년을 기준으로 하였음.

<표 2-29> LCC 구성항목

Level 1 (비용부담주체)	Level 2 (생애주기 단계별)	Level 3 (비용항목별)
관리주체비용	초기투자비용	시공비용(설치비)
	유지관리비용	일반관리비용
		교체비용

○ 할인율은 실질할인율 적용을 위하여 최근 10년간 은행 가중평균 대출금리의 기업대출금리로 명목이자율을 계산하였고, 물가지수는 2010년을 100을 기준하여 소비자 물가지수를 검색하였음. 또한 인플레이션(%)는 소비자 물기주의 변동율을 이용하여 계산하였음.

○ 그에 따른 실질할인율은 2.19%로 계산되었음.

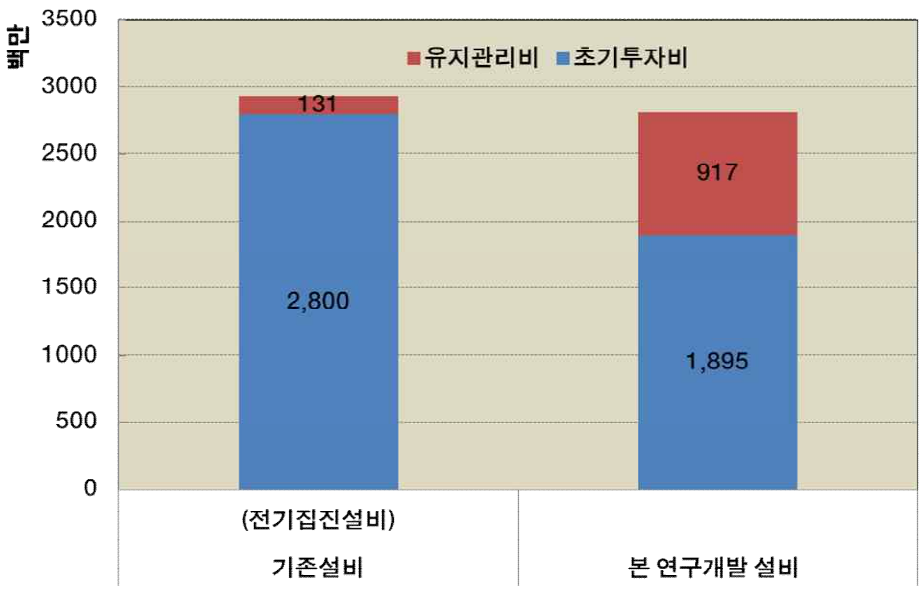
<표 2-30> LCC 분석을 위한 실질할인

년도	명목이자율(%)	물가지수 (2010=100)	인플레이션 (%)	실질할인율(%)
2004	5.62	80.924	3.5	2.05
2005	5.51	83.83	3.6	1.84
2006	4.91	86.139	2.8	2.05
2007	5.42	88.07	2.2	3.15
2008	5.65	90.302	2.5	3.07
2009	6.70	94.523	4.7	1.91
2010	5.21	97.129	2.8	2.34
2011	5.10	100	3.0	2.04
2012	5.20	104	4.0	1.15
2013	4.56	106.3	2.2	2.31
평균				2.19

○ 분석기간 30년을 기준으로 NPV를 적용한 LCC 분석 결과는 다음과 같음.

구분			기존설비 (전기집진설비)		본 연구개발 설비	
			분석비용	30년 기준 할인율 적용 비용	분석비용	30년 기준 할인율 적용 비용
초기투자비 (시공비용)			2,800,000,000	2,800,000,000	1,895,000,000	1,895,000,000
유지관리비	일반관리비		6,000,000 원/년	130,993,373 (30년)	2,000,000 원/년	43,644,457 (30년)
	교체비용	필터	-	-	57,600,000*2회	112,419,565 (30년)
		CO 촉매	-	-	195,000,000*2회	380,587,069 (30년)
		VOC 흡착제	-	-	195,000,000*2회	380,587,069 (30년)
총 LCC			2,930,933,373		2,812,238,160	

구분	기존설비 (전기집진설비)	본 연구개발 설비
초기투자비	2,800,000,000	1,895,000,000
유지관리비	130,933,373	917,238,160
총 LCC	2,930,933,373	2,812,238,160
상대비율	1.04	1.0
절감액	118,695,213	-



<그림 2-101> 기존 설비와 본 연구개발 설비의 LCC 비교

○ 앞서 제시한 기존설비와 본 연구개발설비의 NPV를 적용한 LCC를 평가하여 보면 전기집진설비의 총 LCC는 본 연구개발설비 대비 1.04배 높은 것으로 나타났음. 그에 따른 절감액은 118,695,213원으로 나타났음.

○ 이는 단순 초기투자 및 유지관리비만을 적용한 것으로서 유지보수 및 각종 비용(설계비, 감리비, 해체, 폐기비, 잔존가치 등)은 설정하지 않았음.

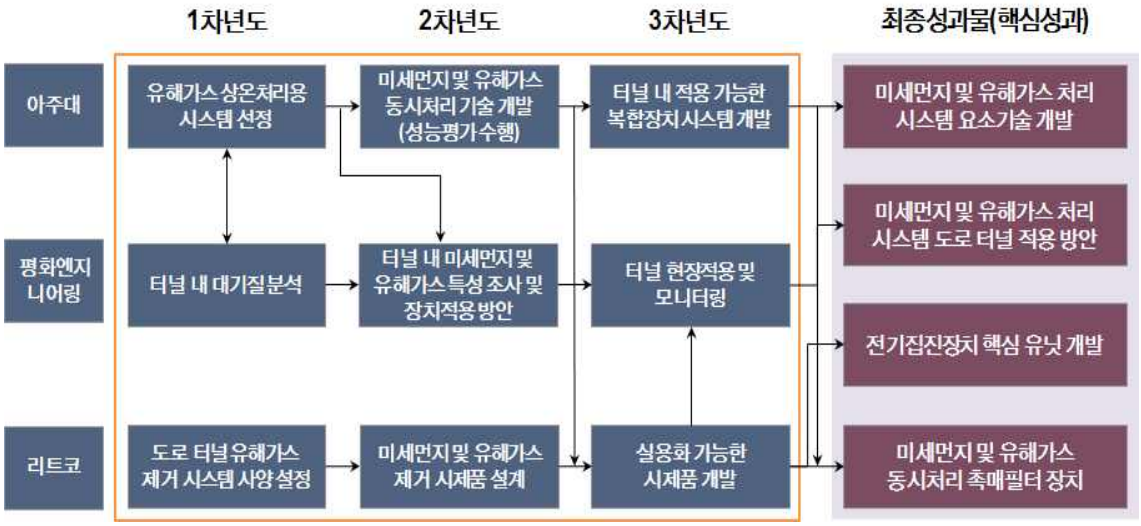
○ 또한, 적용성면에서 터널에서 발생하는 대기오염물질 중 가스상 물질까지 제거 가능한 설비임을 감안할 경우 성능향상에 따른 Value의 가치가 높을 것으로 예상됨.

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

제 1 절 개별 연구성과명

1. 개별 연구성과 설명

○ 본 연구는 “터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터 시스템 개발” 일환으로 기존 터널 환기방식을 통한 공기질 개선 및 단순 입자상오염물질인 미세먼지(PM-10) 저감 개념에서 한 단계 더 나아가 터널 내 통행 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 장치를 개발하고, 현장평가(logn-term monitoring)를 통해 실제 적용 가능성을 도출하고자 함.



<그림 3-1> 연구개발 Framework

2. 핵심요소기술(Critical Technology Elements)별 성과물

미세먼지 및 유해가스 처리 시스템 요소기술 개발

○ 성능수준 :
- 미세먼지 및 유해가스 동시처리 기술 개발
  - 미세먼지(PM-10) 처리 효율 : 97% 이상
  - 일산화탄소(CO) 처리 효율 : 70% 이상
  - VOC(벤젠, 톨루엔) 처리 효율 : 70% 이상

○ 양적성과 : 특허 2건(2차년도 출원 완료, 3차년도 출원 예정), 논문 3건(2차년도 2건, 3차년도 1건)

○ 기대효과 :
- 터널 내 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 처리할 수 있는 기술력 확보에 따른 특허권 획득에 의한 국내·외 시장 선점
- 유관 산업의 시장 확대를 통한 신산업 창출
- 연구논문 발표 및 기술 강습회를 통해 국내 터널 및 관련 시설 설계기술자들에게 기술 보급
- 실용화를 위한 수요처별 요소기술 최적화





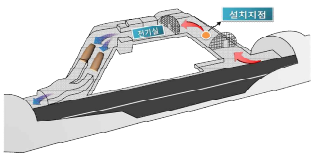
<미세먼지 및 유해가스 동시처리 시스템>
(미세먼지 제거 모듈
(전기집진기 & 백필터 Dual)
+ 유해가스 제거 모듈)

미세먼지 및 유해가스 처리 시스템 도로 터널 적용 방안

○ 성능수준 :
- 미세먼지 및 유해가스 동시 처리 가능(CO, VOC 등)
- 장대터널, 지하공간, 도심터널, 대심도 등 적용가능

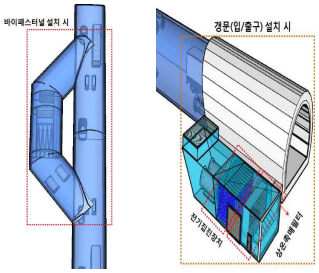
○ 양적성과 : 특허 2건(3차년도 출원 예정)

○ 기대효과 :
- 향후 건설될 도심지 통과 터널 및 대심도 등의 오염물질저감에 유용한 수단으로 이용가능
- 터널 운영 기관(한국도로공사, 광역지자체 시설 공단 등)에 제안하여 기존 장대터널 및 도심지 터널 등에 적용 가능
- 건설될 대심도(철도 포함) 터널의 환기구에 적용 가능
- 후속과제를 통한 실제 적용 평가





<시제품 적용 위치 및 설치/모니터링>



<터널 현장 적용 방안>

전기집진장치 핵심 유닛 적용기술 개발

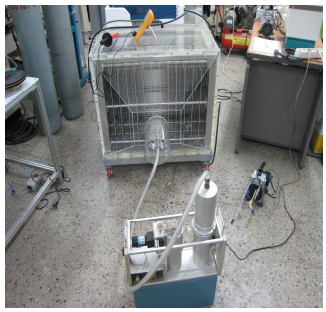
○ 성능수준 :

- 전기집진장치 핵심 유닛 적용기술 개발
  - 미세먼지(PM-10) 처리 효율 : 97% 이상
- 전기집진장치 제작 국산화 기술 확보
  - 초기 투자비 절감 및 유기관리 용이
- 전기집진장치 사양
  - 용 량 : 50L/min
  - 크 기 : 가로 455 mm × 세로 858 mm × 높이 650 mm
  - 출 력 : 230V, 63 Hz

○ 양적성과 : 특허 1건(2차년도 출원 완료)

○ 기대효과 :

- 수입에 의존하던 기존 전기집진장치 적용기술의 국산화에 따른 초기 투자비 절감 및 유지관리 용이
- 기술 개발을 통한 시제품 제작 완료
- 실용화를 위한 수요처별 핵심 유닛 모듈 최적화





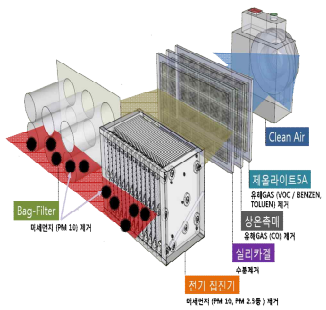
<전기집진기 핵심 유닛(국산화 제품)>

미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치

○ 성능수준 :

구분	개발기술
설비 시스템	○ 전기집진장치+상온촉매필터+흡착필터
처리 물질	○ 미세먼지(PM10) ○ 유해가스(CO, VOC)
설치 대상 터널	○ 도로 장대터널(1.5km 이상) ○ 주요 도심터널, 지하차도 ○ 지하공간(다중이용시설 등)
적용 지점	○ 본 개발품은 터널 내 어디에든 적용 가능하여 바이패스 터널의 추가 공사를 최소화함.
특징	○ 수입에 의존하던 기존 전기집진장치 국산화 및 상온촉매필터 개발 - 초기 투자비 절감 및 유지관리 용이 - 미세먼지 및 유해가스 동시처리

○ 양적성과 : 특허 1건(3차년도 출원 예정), 논문 1건(3차년도 게재 예정)





<미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 (시제품)>

○ 기대효과 :

- 터널 내 공기질 향상과 더불어 환경개선 및 에너지 절감 효과
- 다양한 환경에 적용 가능한 오염물질 저감 설비 설계 기술 확보
- 터널 운영 기관(한국도로공사, 광역지자체 시설 공단 등)에 제안하여 기존 장대터널 및 도심지 터널 등에 적용 가능
- 개별 수요처의 요구에 맞추어 터널뿐만 아니라 지하공간에도 적용 가능한 최적 제품 개발
- 실용화·사업화 후속과제 제안(KAIA)
- 후속과제를 통한 실제 적용 평가
- 실용화를 통한 개발기술의 실제 현장시공 추진



<시제품 현장적용 >

3. 주요 연구성과

3.1 특허 (출원 6건)

○ 터널 대기 정화장치 - 1020130014025(2013년 02월 출원)

○ 상온플라즈마와 촉매를 이용하여 유해가스를 제거하는 유해가스 제거 장치 - 1020130045947 (2013년 04월 출원)

○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 기능을 구비한 터널 대기 정화장치 - 1020140128274 (2014년 09월 출원)

○ 차량용 터널 출구 설치형 터널 공기정화 시스템 - 1020140129582(2014년 09월 출원)

○ 차량용 터널 출구 설치형 흡기 구조물 - 1020140129605(2014년 09월 출원)

○ 고효율 에너지 절약형 차량용 터널 출구 설치형 흡기 시스템 - 1020140139115(2014년 10월 출원)

3.2 학술논문 게재 및 발표(8건)

○ 터널 내 대기오염물질의 공간분포 예측, 한국터널지하공간학회, 2012

○ 활성탄소섬유를 이용한 CO_2 흡착에 관한 연구, 에너지기후변화학회, 2012

○ 제올라이트와 활성탄을 이용한 대기 중 CO_2 흡착 및 재생 특성, 대한환경공학회, 2013

○ 알카놀아민 수용액을 이용한 저농도 CO_2 흡수 특성, 대한환경공학회, 2014

○ 터널 내 일산화탄소와 미세먼지의 동시처리 기술, 한국대기환경학회 학술발표회, 2012

○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 동시처리를 위한 성능평가, 대한환경공학회 학술대회, 2012

○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스의 처리 기술, 한국청정기술학회 학술대회, 2014

○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스의 시간별 농도 변화, 한국청정기술학회 학술대회, 2014

3.3 시제품 개발 (1건)

○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치

3.4 현장 적용 (1건)

○ 서울외곽순환고속도로 수락산터널(구리 방향), 바이패스 구간 내 설치

4. 기술 실시 및 적용사례

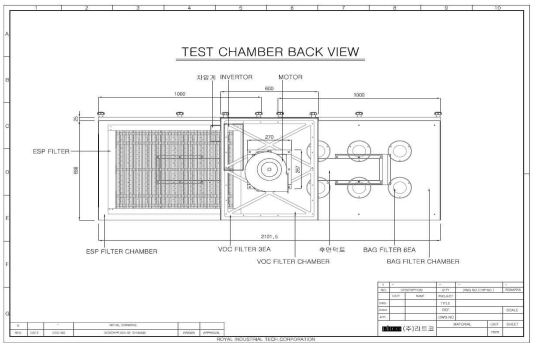
4.1 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 시제품 개발

○ 목적 : 터널 내 발생되는 미세먼지(PM-10) 및 유해가스(CO, VOC)를 동시에 복합적으로 처리함에 따라 터널 내 공기질 향상과 더불어 환경개선 및 설비·설계기술 국산화 확보

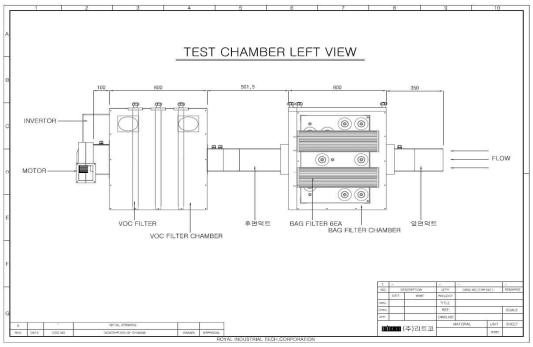
○ 촉매필터 장치 : 터널 내에서 발생되는 대기오염물질(미세먼지 및 유해가스)을 동시에 처리할 수 있는 시스템

- 미세먼지 제거 모듈 : 전기집진기 & 여과집진기 Dual
- 유해가스 제거 모듈 : 상온촉매(CO) & 제올라이트(VOC)

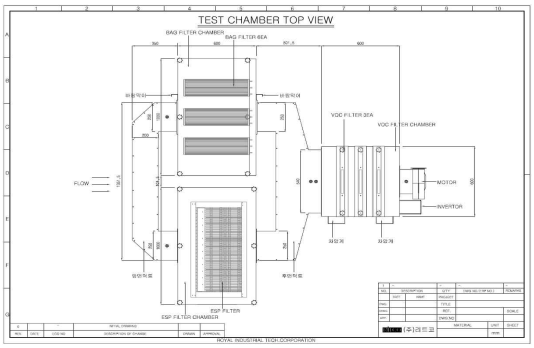
◉ 시설물 도면



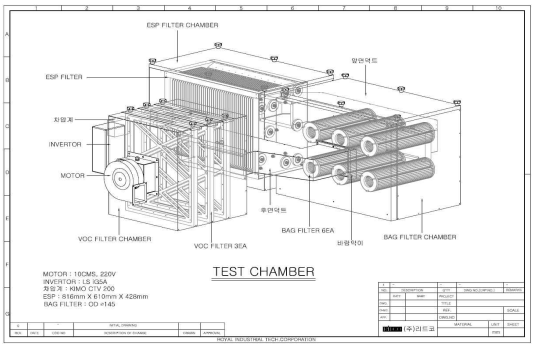
back view



left view

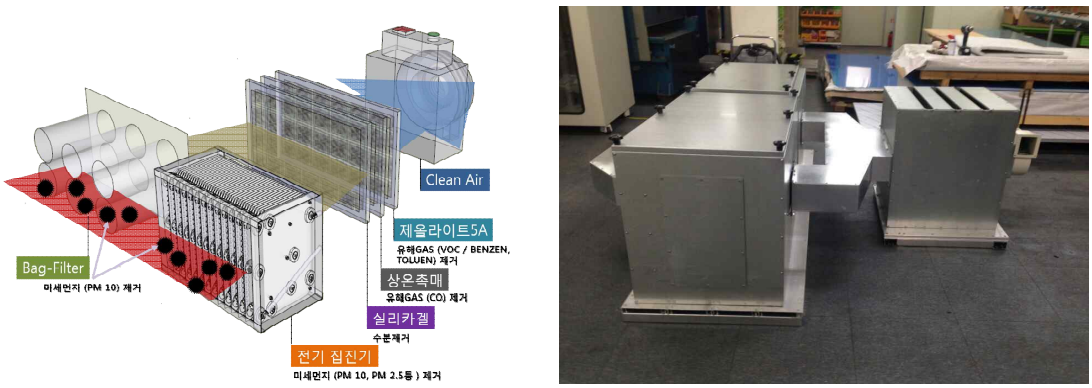


top view



overall

◉ 시제품 제작



<미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치(시제품)>

○ 시제품 장치 사양

구분	사양
규격	W 2.15m × D 2.10m × H 0.68m
용량	$10m^3/min$
시스템	미세먼지 집진부 (전기집진/여과집진 Dual) + 유해가스 처리부 2단
재질	외관 : SUS / 촉매필터 : PE
소비전력	최대소모 3KW(전기집진 가동시)
전원	전기집진 360V/기본 장치 220V

○ 성능수준

구분	기존설비	개발기술
설비 시스템	○ 전기집진장치	○ 전기집진장치+상온촉매필터+흡착필터
처리 물질	○ 미세먼지(PM10)	○ 미세먼지(PM10) ○ 유해가스(CO, VOC)
설치 대상 터널	○ 도로 장대터널(1.5km 이상)	○ 도로 장대터널(1.5km 이상) ○ 주요 도심터널, 지하차도 ○ 지하공간(다중이용시설 등)
적용 비용 및 지점	○ 전기집진장치 : 30억원 ○ 바이패스 터널공사 : 220억원 ○ 총 투자비 : 250억원	○ 본 개발품은 터널 내 어디에든 적용 가능(바이패스 터널 및 터널 갱문 등) ○ 바이패스 터널의 추가 공사를 최소화함.
특징	○ 기존 전기집진장치는 대부분 일본, 유럽 등 수입에 의존 - 초기 투자비가 높고, 유지관리 어려움.	○ 수입에 의존하던 기존 전기집진장치 국산화 및 상온촉매필터 개발 - 초기 투자비 절감 및 유지관리 용이 - 미세먼지 및 유해가스 동시처리

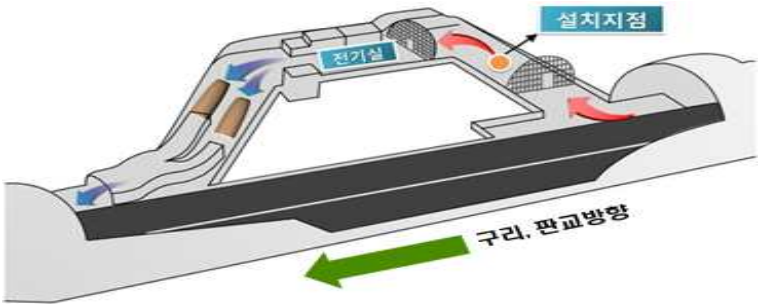
4.2 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 장치 현장 적용

○ 터널 현장적용

◉ 대상터널 : 서울외곽순환고속도로 수락산터널(구리 방향)

◉ 설치구간 : 수락산터널(구리 방향) 내 바이패스 구간

◉ 현장설치 : 2014. 05. 19



<현장적용 모식도>



<현장 설치 과정>

○ 현장적용 모니터링

◉ 모니터링 기간 : 2014. 05 ~ 2014. 09(4개월 간)



<모니터링 과정>

5. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

○ 터널환기 시스템에 대한 국내특허는 1990년 이후 총 108개로 지속적으로 늘어나고 있는 추세에 있음.

○ 2000년 이후 기술개발이 활발히 이루어지고 있어 현재 지속적으로 개발이 확대 될 것으로 예상됨.

○ 본 연구에서 분석한 기존설비와 본 연구개발설비의 NPV를 적용한 LCC 평가결과 전기집진설비의 총 LCC는 본 연구개발설비 대비 1.04배 높은 것으로 나타났고, 그에 따른 절감액은 118,695,213원으로 분석됨.

○ 이처럼, 적용성면에서 터널에서 발생하는 대기오염물질 중 가스상 물질까지 제거 가능한 설비임을 감안할 경우 성능향상에 따른 Value의 가치가 높을 것으로 예상됨.

○ 따라서 본 연구에서 개발된 미세먼지 및 유해가스 처리용 촉매필터 장치의 적용성은 우수하다고 할 수 있음.

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

제 1 절 연구개발 최종목표 달성도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	○ 유해가스(CO) 상온 처리용 시스템 선정	○ 최적시스템 선정을 위한 국내외 문헌자료 조사 ○ 유해가스 처리효율 도출을 위한 1L/min 규모의 반응기 제작 및 실험장치 구성 ○ 미세먼지 및 유해가스 처리효율 성능평가를 통한 최적 처리조건 도출	100%
2	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리 방법 및 현황조사	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 문헌조사・분석 ○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 농도분석 -미세먼지 특성 조사 ○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리방법 조사	100%
3	○ 국내외 미세먼지 및 유해가스 처리장치 현황 조사	○ 현재 국내외 터널에 적용되고 있는 미세먼지 및 유해가스 처리장치 시스템 현황 및 기존 터널 내 대기질 현황 조사 완료	100%
4	○ 미세먼지 및 유해가스 처리장치 최적사양 설정	○ 현황조사를 바탕으로 개발 가능한 시스템 사양 설정	100%
5	○ 유해가스 처리 시스템 개발	○ 10m^3/min 규모의 유해가스 처리 장치 제작 -유해가스 처리장치 및 백필터 집진장치 제작 완료	100%
6	○ 미세먼지 및 유해가스 처리효율 향상을 위한 성능평가	○ 10m^3/min 규모의 실험 장치를 이용한 실험 조건별 미세먼지 및 유해가스 처리효율 도출 ○ data 분석 및 연속운전을 통한 처리효율 향상을 위한 최적화 조건 도출	100%

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
7	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 특성 조사	○ 터널 유형별 현장조사를 통한 터널 내 미세먼지 및 유해가스 특성 조사・분석 -남산1호 터널, 구룡 터널, 우면산 터널, 수리 터널 현장조사 완료 -미세먼지 및 유해가스 농도 현황 조사・분석	100%
8	○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스 처리 장치 적용방안	○ 기존 터널 내 오염물질 제거 설비와의 경제성 분석 도출	100%
9	○ 전체 시작품 제작을 위한 구성 설계 작성	○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리장치 기초 설계도 작성 완료	100%
10	○ 미세먼지 필터 모듈 제작	○ 전기집진기 형태의 미세먼지 포집 장치 제작 -10m^3/min 규모의 전지집진 장치 제작 완료	100%
11	○ 터널 내 적용 가능한 복합장치 시스템 개발	○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 기술 개발 -미세먼지(PM-10) 처리 효율 : 97% 이상 -일산화탄소(CO) 처리 효율 : 80% 이상 -VOC(벤젠, 톨루엔) 처리 효율 : 80% 이상 ○ 흡착제 재생 성능평가를 통한 공정 최적화 도출 -VOC(벤젠, 톨루엔) 재생 성능 도출	100%
12	○ 모형 또는 소규모 터널 적용 및 모니터링	○ 시제품 성능검증을 위한 모형터널 적용 성능평가 완료 -미세먼지 및 유해가스의 처리 성능 검증 -시제품 성능검증을 통한 현장 적용 가능성 도출	100%
13	○ 실용화 가능한 시제품 개발	○ 미세먼지 및 유해가스 동시처리 촉매필터 시제품 개발 -규격 : W 2.15m×D 2.10m×H 0.68m -용량 : 10m^3/min ○ 터널 현장적용 시제품 설치 완료 ○ 모니터링 및 적용성 가능성 도출 ○ 실제 적용에 따른 경제성 평가(2차년도 보완)	100%

제 2 절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

○ 터널 내 차량에 의해 발생되는 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 혁신적인 기술 분야로 특허권 획득에 의한 국내·외 시장을 선점하고 이에 따른 미래 원천 기술을 확보

○ 터널환기 및 발생 대기오염물질 제어 기술을 국산화함으로써 터널 건설 및 운영비용의 대폭적인 절감

○ 도로터널에서의 발생되는 대기오염물질을 저감하여 터널 내·외부가 인체 및 환경요소에 안전하고 쾌적한 공간으로서 확보 가능

○ 실용화 및 제품화 주도 기업을 사전에 탐색하여 참여 유도

○ 개발 시스템은 특허 등록을 통하여 실용화 제품에 대한 권리 확보

제 3 절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

○ 유관 산업의 시장 확대를 통한 신산업 창출

○ 장대 터널 및 대심도로터널의 환경적 문제를 최소화함으로써 도로터널에 대한 부정적 인식을 개선하고 장대 도로터널 및 대심도로터널의 건설 촉진

○ 국가정책인 녹색성장 정책에 부합하여 온실가스 및 대기오염물질 저감을 통한 삶의 질 향상에 기여

○ 도로교통에 따른 대기오염은 국내만의 문제가 아니라 인구가 밀집되고 교통량이 많은 대도시의 환경문제로 본 연구과제의 연구성과는 터널 내 도로교통 환경문제의 일부분을 해결할 수 있는 해결방안이 될 것이며 국내는 물론 해외에서의 시장성을 고려할 때 그 경제적 파급효과도 상당히 크리라 판단됨.

○ 관련 기술개발 활성화 기대

○ 현재 환경성 및 경제성을 고려한 터널 내 오염물질 저감 분야의 연구가 미흡한 실정으로 이번 연구 및 개발로 인하여 관련 기술개발 활성화 기대

○ 본 연구개발은 터널 내 대기오염물질을 제거할 수 있는 혁신적인 기술 분야로 특허권 획득에 의한 국내·외 시장을 선점하고 이에 따른 미래 원천 기술력 확보에 이바지할 것으로 판단됨.

제 4 절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

○ 터널 내 대기오염물질 관리를 위한 규제 기준을 마련하는데 활용

○ 터널 내 오염물질 관리에 따른 운전자 인체 위해성 저감

○ 대기오염 방지기술과 시설물 설계의 융합과학으로서 녹색도로교통의 조력자 역할을 하게 될 것임.

○ 터널 내 공기질 개선을 통한 주변 지역 민원 발생 최소화 및 쾌적한 삶의 질 향상

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제 1 절 연구성과 향후 활용방안

○ 연구성과의 상용화·제품화를 위해 관련 분야의 기업과 컨소시엄을 구성하여 향후 사업화를 위한 방안을 모색함.

○ 개발기술의 해외진출을 위해 해외진출 희망 국내 건설사에 기술이전을 통해 해외사업 진출 지원이 될 수 있도록 기술을 제공함.

○ 연구논문 발표 및 기술 강습회를 통해 국내 터널 및 관련 시설 설계기술자들에게 기술 보급

○ 도로 터널 이외에 지하보도, 지하철(역사), 철도터널 등 지하공간의 대기오염물질 저감에 활용

○ 연구기관 자체 기술실시계약 추진 - 연구기관인 (주)리트코와 기술실시계약 추진

○ 기존 고속도로, 국도, 지방도, 도시부 도로의 터널 내 대기오염물질 저감 방안 수립 시 적용 될 수 있도록 마케팅 계획 수립

○ 향후 실용화 및 제품화 추진을 위한 추가연구 과제 제안

제 2 절 추가연구 필요성

○ 현재 터널 내 오염물질 제거는 환기시스템에 국한된 미세먼지 저감 시설이 대부분이나 터널 내 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 기술 개발을 통하여 효율적인 저감 시스템 최적화 필요

- 본 연구개발을 통해 실용화 사업화를 위한 후속 연구개발 추진

○ 복합 저감 시스템의 성능검증을 위한 현장 모니터링 및 실규모의 시스템 개발에 소요되는 제작비 등의 제한적인 부분이 있어 이에 대한 해결책 강구

○ 터널 내 미세먼지 및 유해가스를 동시에 복합적으로 처리할 수 있는 설비임을 감안할 경우 성능향상에 따른 Value의 가치가 높을 것으로 예상되는바 각종 유지보수 및 운영비용을 포함한 구체적인 경제성 평가 필요(VE 기법 도입)

○ 터널 내 오염물질의 유동해석을 통한 최적 설계 및 적용위치 최적화 도출

참고문헌

1. 강영현, 자동차 운행시 터널에서 발생되는 대기오염물질의 저감방안, 한국환경정책평가연구원, 2003
2. 국토해양부, 도로현황조서, 2009
3. 국토해양부, 지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업 보고서, 2006
4. 국토해양부, 터널환기시설에 대한 연구, 1996
5. 노수현, 도로터널내 오염농도 및 환기설비 설계평가에 대한 연구, 서울시립대학교 대학원 석사학위논문, 2001
6. 녹색성장위원회, 녹색성장 5개년 계획, 2009
7. 신현준 외, 고속도로터널 환기시설 설계기준, 1997, 한국도로공사
8. 쌍용건설, 외부환경을 위한 터널 환기 시스템 검토, 2006
9. 안종환, 도로터널의 효율적인 환기 및 제연에 관한 연구, 연세대학교 대학원 석사학위논문, 2001
10. 정대영, 고속도로 장대터널에서의 오염물질의 농도 및 분포 특성 연구, 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 2006
11. 환경부, 수도권 대기환경관리 기본계획, 2005
12. 한국도로공사, 고속도로 터널 내 오염물질 및 공기질 조사 및 결과 내역, 2009
13. 한국산업은행 산업기술부, 환경정책 변화에 따른 신기술 개발동향, 2002
14. Raf De Fre etc., air Pollution Measuremensts in Traffic Tunnels, Environmental Health Perspectives, p.31~37, vol.102, 1994
15. D.M.Bon etc., Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site(T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign : measurement comparison, emission ratios, and surce attribution, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 2399~2421, 2011
16. National Health and Medical Research Council, Air Quality in and Around Traffic Tunnels, Final Report 2008
17. CD. Cooper, FC Alley, Mobile Sources: An Overview. In. Air Pollution Control : A Desige Approach 2nd edition, 1994

18. L.Y.Chan, L.M.Zang, Y.Qin, S.C.lee, CO Concentration inside the Cross Harbor tunnel in Hong Kong, Environment International 22, 405～409, 1996

19. 노르웨이, LERDAL 터널 홍보자료집

20. W.K. Chow, Jojo S.M.Li, Case study:Vehicle fire in a cross-harbour tunnel in Hong Kong, Underground Space Techonology 16(1), 23～30, 2001

21. W.K. Chow, M.Y. Chan, Field measurment on transient carbon monoxide levels in vehicular tunnels, Building and Environment 38(2), 227～236, 2003

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술혁신사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.