최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구(사회이슈해결 유형)
공고번호	공고-제2호	연구개발과제번호		21CTAP-C152276-03

국가과학기술 표준분류	EI0302 설계 정보화기술	70%	EI0409 생애주기가치평가	30%	-	-
연구주제	(대분류) 건설 교통		(중분류) 시설물 설계 해석기술		(소분류) 설계 정보화기술	

연구개발과제명	국문	IoT 기반 건설현장 미세먼지 예측·관리 통합 플랫폼 개발
	영문	Development of the particulate matter prediction and management integrated platform for construction site based on internet of things

주관연구개발기관	기관명	한양대학교 에리카산학협력단	사업자등록번호	134-82-10205
	주소	(15588) 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55	법인등록번호	131471-0017977

주관연구책임자	성명	태 성 호	직위	교수
	연락처 직장전화	031-400-5187	휴대전화	010-6730-2101
	연락처 전자우편	jnb55@hanyang.ac.kr	국가연구자번호	10146239

연구개발기간	전체 2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(33개월)
	1년차 2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(09개월)
	2년차 2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(12개월)
	3년차 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(12개월)

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	582,000	19,600	174,600	-	-	-	-	601,600	174,600	776,200	-
1년차	132,000	4,400	39,600	-	-	-	-	136,400	39,600	176,000	-
2년차	130,000	4,350	39,150	-	-	-	-	134,350	39,150	173,500	-
3년차	320,000	10,850	95,850	-	-	-	-	330,850	95,850	426,700	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	㈜대단	강건욱	대표이사	010-2594-1635	daedan79@gmail.com	수요	중소기업
위탁연구개발기관							
연구개발기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	임 효 진	직위	연구원	
	연락처 직장전화	031-400-4690	휴대전화	010-4460-2678	
	연락처 전자우편	hjlimc@hanyang.ac.kr	국가연구자번호	11507609	

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 03월 18일

연구책임자 : 태 성 호 (인)

주관연구개발기관의 장 : 한양대학교 에리카산학협력단 박 태 준 (직인)

공동연구개발기관의 장 : ㈜대단 대표이사 강 건 욱 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요 약 문 >

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="3">국토교통기술촉진연구사업</td><td colspan="2" rowspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2" rowspan="2">21CTAP-C152276-03</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="3">국토교통기술혁신연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술표준분류</td><td>EI0302
설계 정보화기술</td><td>70%</td><td>EI0409
생애주기가치평가</td><td>30%</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구주제</td><td colspan="2">(대분류)건설 교통</td><td colspan="2">(중분류)시설물 설계 해석기술</td><td colspan="2">(소분류)설계 정보화기술</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">IoT 기반 건설현장 미세먼지 예측·관리 통합 플랫폼 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(33개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 776,200천원
(정부지원연구개발비 : 582,000천원, 기관부담연구개발비 : 194,200천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="3">기초[ ] 응용[✔] 개발[ ]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="2">착수시점 기준(4)
종료시점 목표(8)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [ ] 자유공모 [✔]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">사회이슈 해결</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구
개발
목표
및
내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">본 연구개발은 건설현장 유형별 현장 측정을 통한 미세먼지 평가기술과 건설현장의 미세먼지 노출에 따른 미세먼지 계측 모듈 및 계측기술을 기반으로 하여, 건설현장 미세먼지를 평가 및 관리가 가능한 IoT 기반 건설현장 미세먼지 예측·관리 통합 플랫폼 개발을 목표로 한다.</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">본 연구의 연구목표에 대한 주요 연구내용은 다음과 같다.

<u>1) 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감관리 가이드라인 개발</u>
• 건설현장 미세먼지 배출량 계측을 통한 공사유형별 미세먼지 배출계수 개발과 건설현장 미세먼지 저감을 위한 가이드라인 개발연구를 수행함.
① 건설현장 유형별 미세먼지 배출계수 개발
② 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성
③ 건설현장 미세먼지 저감관리 가이드라인 개발

<u>2) IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발</u>
• 건설현장 미세먼지 모니터링을 위해 PM10 및 PM2.5 계측이 가능한 IoT 기반 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발 연구를 수행함.
① PM10, PM2.5 미세먼지 모니터링 계측 모듈 개발
② IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발
③ 미세먼지 측정 사업업역 중장기 활성화 체계

<u>3) 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발</u>
• 건설현장 미세먼지 측정 통합관리 시스템 개발 및 건설현장 관련 미세먼지 관리 제도개선 연구를 수행함.
① IoT 센서 적용 미세먼지 모니터링 플랫폼 구축
② 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 구축
③ 건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업 수행</td></tr>
</table>

	1년차	목표	**건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 정립**
		내용	① 미세먼지 배출계수 및 예측 모델을 위한 체계구축 ② IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 고도화를 위한 기반구축 ③ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 분석 및 모델 수립
	2년차	목표	**건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 개발 및 성능평가**
		내용	① 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 가이드라인 개발 ② IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발 ③ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발
	3년차	목표	**건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 검증 및 사업화**
		내용	① 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감가이드라인 기술검증 ② IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 현장적용 지원 및 사업화 전략 ③ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범적용 및 기술검증

연구개발성과

1) 정성 성과

- 본 연구를 통해 **①공사유형별 미세먼지 배출 계수, ②건물 및 건설 프로젝트 미세먼지 저감관리 가이드라인, ③ 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 모듈, ④ IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기, ⑤ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼**을 개발함.

2) 정량 성과

- 본 연구를 통해 아래의 정량 성과 도출을 목표로 함.

구분			1차년도	2차년도	3차년도	계
논문 게재		SCI	1	1	3	5
		비SCI	1	1	-	2
		계	**2**	**2**	**3**	**7**
지식재산권	출원	국내	1	1	1	3
		국외	-	-	-	-
		계	**1**	**1**	**1**	**3**
	등록	국내	-	-	1	1
		국외	-	-	-	-
		계	-	-	**1**	**1**

연구개발성과 활용방안 및 기대효과

[활용계획] 건설현장의 미세먼지를 저감관리하기 위해 정량적인 예측평가기법을 구축하였다는 점에서 의의가 있으며, 예측평가기법 및 건설현장에서의 미세먼지 저감 가이드라인을 통하여 미세먼지 발생을 억제하기 위한 시설의 설치 및 필요한 조치에 관한 기준반영에 효과적으로 활용함.

[기대효과] 건물 및 공사의 전과정에서 미세먼지 예측 평가 원천기술을 확보하고 건설현장 미세먼지 모니터링 시장을 활성화함.

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수

논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
							생명정보	생물자원		정보	실물
8	1	N	N	N	2	N	N	N	N	N	N

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황

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

국문핵심어 (5개 이내)	미세먼지	건설현장	사물인터넷	통합 플랫폼	예측관리
영문핵심어 (5개 이내)	Particulate matter	Construction project	Internet of Things	Integrated platform	Assessment

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 01

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 06

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 136

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 143

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 144

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 145

7. 참고 문헌 ····· 147

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발과제의 최종 목표

<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="3">내용</th></tr>
<tr><td>최종 목표</td><td colspan="3">본 연구는 건설현장 유형별 현장 측정을 통한 미세먼지 평가기술과 건설현장의 미세먼지 노출에 따른 미세먼지 계측 모듈 및 계측기술을 기반으로 하여, 건설현장 미세먼지를 평가 및 관리가 가능한 IoT 기반 건설현장 미세먼지 예측·관리 통합 플랫폼 개발을 목표로 함.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연차별 목표</td><td>1차년도</td><td rowspan="3">IoT 기반 건설현장 미세먼지 예측·관리 통합 플랫폼 개발</td><td>건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 정립</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 개발 및 성능평가</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 검증 및 사업화</td></tr>
<tr><td>연구개발 범위</td><td colspan="3">본 연구개발 과제는 IoT 기반 건설현장 미세먼지 예측·관리 평가 및 관리 기술에 관한 사회이슈 해결형 연구로서, 미세먼지 분석대상을 미세먼지(PM_{10})를 보다 위해성이 높은 초미세먼지($PM_{2.5}$) 및 온습도로 확장하며, 건설현장 미세먼지 평가기술 및 계측기술을 통합한 예측·관리 통합 플렛폼 개발과 이를 통한 시범사업 적용 및 사업화 모델 개발을 연구개발 범위로 함.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">주요 연구 내용</td><td>① PMF (주관)</td><td colspan="2">공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감 관리 가이드라인 개발
건설현장 미세먼지 배출량 계측을 통한 공사유형별 미세먼지 배출계수 개발과 건설현장 미세먼지 저감을 위한 가이드라인 개발연구를 수행함.
① 건설현장 유형별 미세먼지 배출계수 개발
② 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성
③ 건설현장 미세먼지 저감관리 가이드라인 개발</td></tr>
<tr><td>② PMM (공동)</td><td colspan="2">IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발
건설현장 미세먼지 모니터링을 위해 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 계측이 가능한 IoT 기반 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발 연구를 수행함.
① PM_{10}, $PM_{2.5}$ 미세먼지 모니터링 계측 모듈 개발
② IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발
③ 미세먼지 측정 사업영역 중장기 활성화 체계</td></tr>
<tr><td>③ PMS (주관)</td><td colspan="2">건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발
건설현장 미세먼지 측정 통합관리 시스템 개발 및 건설현장 관련 미세먼지 관리 제도개선 연구를 수행함.
① IoT 센서 적용 미세먼지 모니터링 플랫폼 구축
② 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 구축
③ 건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업 수행</td></tr>
<tr><td>최종성과물</td><td colspan="3">[1] 공사유형별 건설현장 미세먼지 배출 계수
[2] 건설현장 미세먼지 저감관리 가이드라인
[3] 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 모듈 개발
[4] IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기
[5] 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼</td></tr>
</table>

[PMF] : Particulate Matter of emission Factor in construction industry
[PMM] : Particulate Matter of Measurement in construction industry
[PMS] : Particulate Matter of integrated management System in construction industry

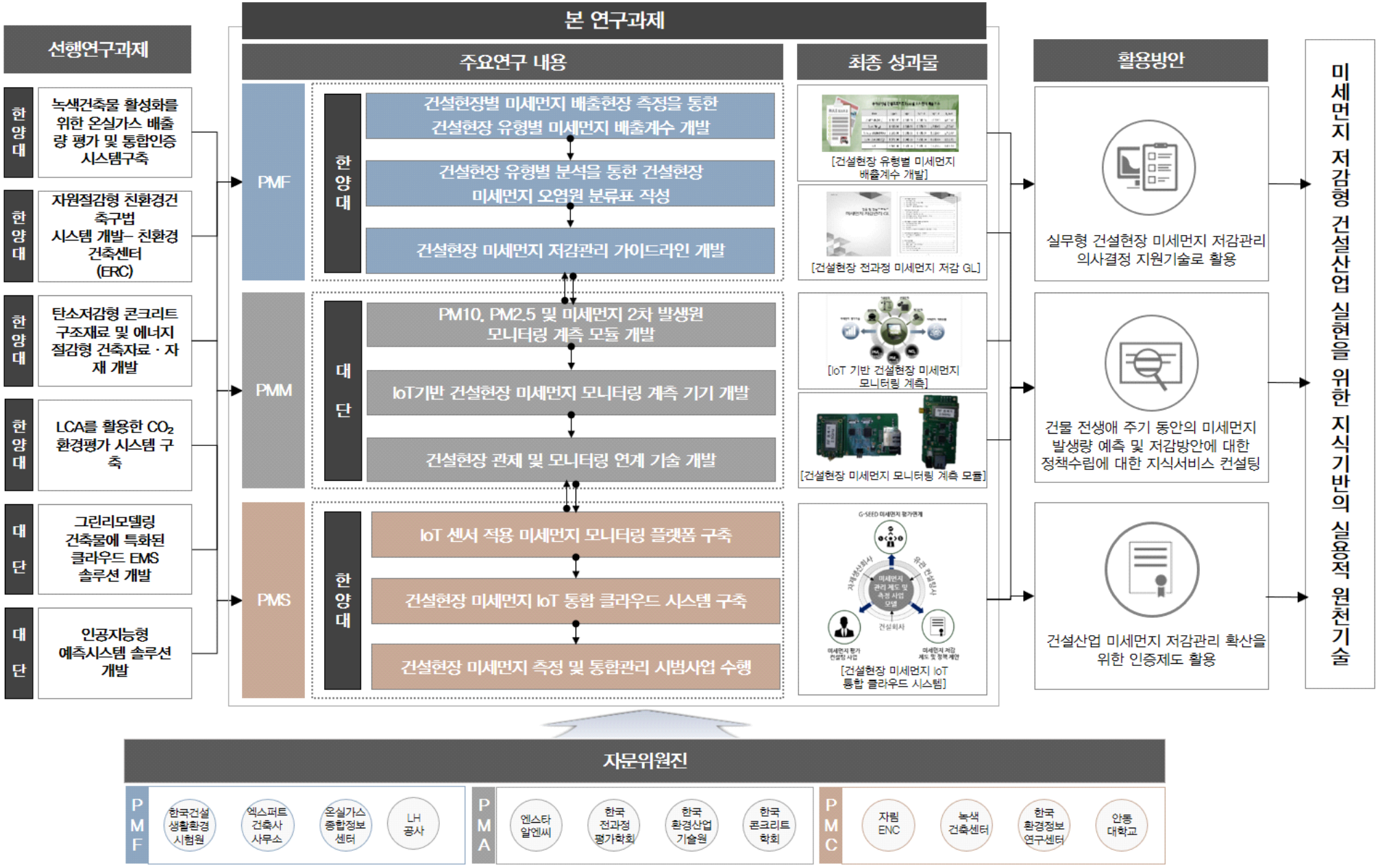


그림 1-1. 연구개발의 전체 구성도

1-2. 연구개발과제의 연차별 목표

○ 1차년도

1차년도 연구목표			건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 정립	*TBL 4단계 →* ***TBL 5단계***
1세부	주관	한양대	미세먼지 배출계수 및 예측 모델을 위한 체계구축	
2세부	공동	대단	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 고도화를 위한 기반구축	
3세부	주관	한양대	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 분석 및 모델 수립	

	주요 연구활동	내용 및 범위
	세부 연구목표 : 미세먼지 배출계수 및 예측 모델을 위한 체계구축	
주관 [한양대학교 에리카 산학협력단] PMF	■ 공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사를 위한 기존문헌 고찰	– 미세먼지 배출량 산정방법 조사분석 · NIER 방법론 및 US EPA 방법론 내 배출계수 예측방법론 및 계측방법론 고찰 – 미세먼지 대기분산 모델링 방법론 분석 · ICS3 모델을 통한 건설 현장 미세먼지 농도측정 방법론 고찰 · 미세먼지 대기분석 모델 및 배출계수 방법론 분석에 따른 미세먼지 배출량 산정방법 분석결과에 대한 벤치마킹
	■ 공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사를 위한 현장 측정	– 공사유형별 미세먼지 현장 측정실시 · 건설현장 주변 미세먼지 농도 측정 계측 실시(4개지점 별 각 10회 실시) · 공사현장 주변에 미치는 영향 판단을 위한 해당 현장 풍배도 측정
	■ 설계 단계 미세먼지 저감을 위한 체크리스트 개발	– 건축자재, 시공방법 관련 미세먼지 저감 및 관리방안 검토 · 국내외 건축자재 환경영향 DB에서의 미세먼지 영향도 자료 분석 · 공사특성 및 현장별 미세먼지 영향도 자료 분석 · 공사기간 및 위치에 따른 영향 자료 분석 – 설계단계 미세먼지 저감 체크리스트 개발 · 건축자재선정에 따른 미세먼지 저감 체크리스트 개발 · 시공공법 선정 관련 미세먼지 저감 체크리스트 개발
	세부 연구목표 : IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 고도화를 위한 기반구축	
공동 [㈜대단] PMM	■ 미세먼지 측정 계측 평가 방법 분석	– 미세먼지 측정 계측 평가 방법 · 실외 및 건설현장 미세먼지 및 환경 측정 분석 · 외부 및 특정지역 미세먼지 농도간 경향 평가 – 기상청 미세먼지 거동 시나리오 연동방안 구축 · 기존 문헌자료 수집 · 기상청 대기 먼지농도 정보와의 연동을 통한 환기외피시스템의 스마트화 방안 구축(IoT)
	■ 미세먼지 발생원 계측 모듈 개발	– 미세먼지 1차 발생원 계측 모듈 개발 · 비산먼지 (PM_{10})계측 모듈 개발 · 초미세먼지 ($PM_{2.5}$)계측 모듈 개발 – 미세먼지 2차 발생원 계측 모듈 개발 · 질소산화물 및 (SOx)계측 모듈 개발 · 아황산가스 (NOx)계측 모듈 개발
	■ 미세먼지 관리사업 모델 수립 및 요소 분석	– 미세먼지 예측 및 평가를 위한 사업 모델 수립 · 공사현장 분진 및 미세먼지 측정 및 관리를 위한 사업요소 검토 · 사업모델화를 위한 기업여건 및 시장 규모 예측 – 미세먼지 관리를 위한 제도 개선 및 관련 기준 수립 · 건설프로젝트에서 미세먼지 고려를 위한 사업승인 및 관리 절차 도입방안 검토 · 미세먼지 검토 절차 및 방법에 대한 대안 제안
	세부 연구목표 : 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 분석 및 모델 수립	
주관 [한양대학교 에리카 산학협력단] PMS	■ 미세먼지 관리 평가 플랫폼 개발	– IOT 센서 미세먼지 정보 수신 모듈 개발 · 센서부 + 마이컴부 + 통신부 + RF + LTE모듈 개발 · RF : Zigbee or Sub 1GH 무선통신을 이용한 데이터 전송 셋 개발 · LTE : 현장 데이터 무선인터넷 연계 전송셋 개발 – 미세먼지 관리 평가 플렛폼 미들웨어 개발 · IoT 기반 미세먼지 관리 평가 플렛폼 알고리즘 개발

❍ 2차년도

2차년도 연구목표			건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 개발 및 성능평가	*TBL 5단계 →* ***TBL 7단계***
1세부	주관	한양대	공사유형별 미세먼지 배출계수 및 가이드라인 개발	
2세부	공동	대단	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발	
3세부	주관	한양대	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발	

	주요 연구활동	내용 및 범위
	세부 연구목표 : 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 가이드라인 개발	
주관 [한양대학교 에리카 산학협력단] PMF	■ 공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사를 위한 현장 측정	– 공사유형별 미세먼지 발생원 측정 · 건설현장 발생원 미세먼지 배출농도 측정 · 건설기계장비 미세먼지 배출계수 분석
	■ 건설현장 미세먼지 배출농도 측량 분석	– 건설현장 미세먼지 배출농도 측량 분석 · 건설현장 미세먼지 배출농도 특성 분석 · 건설현장 미세먼지 배출농도 발생원별 분석 · 건설현장 미세먼지 배출농도 주변 대기환경 분석
	■ 시공 단계 미세먼지 저감을 위한 가이드 개발	– 공사현장 미세먼지 예측 및 평가를 위한 기준 개발 · 공사특성 및 규모별 분진 및 미세먼지 관리를 위한 절차 제안 – 공사현장 분진 및 미세먼지 저감 가이드(안) 개발 · 관리 일정 및 주기, 관리대상, 수준별 대응방안 등 검토
	세부 연구목표 : IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발	
공동 [㈜대단] PMM	■ IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발	– IOT 센서 모듈 개발 (센서부 + 마이컴부 + 통신부) · 센서부 : 온습도/미세먼지/CO2 기타 환경센서를 계측하여 · 마이컴부 : 센서에서 측정된 값을 메모리 및 연산 · 통신부 : 외부와 연결할수 있도록 Serial Communication UART
		– IoT 멀티센서 통합플랫폼 개발 지원 · 무선게이트웨이 설계 및 IoT 통합플랫폼 연계방안 구축 · Web&APP 소프트웨어 개발
	■ 사업화를 위한 시장여건 분석 및 사업화전략 수립	– 사업을 위한 기술 및 인력 보유 수준 검토 · 평가방법론, 현장측정기술 및 장비, 전문 인력의 수준에 대한 검토 · 서비스 제공 방법 및 범위, 절차 및 수준 등에 대한 여건 분석 – 기존 서비스와 연계방안 및 사업다각화 전략 수립 · 환경영향평가 등 기존 사업 병행 전략의 타당성 검토
	세부 연구목표 : 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발	
주관 [한양대학교 에리카 산학협력단] PMS	■ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발	– 클라우드 기반 미세먼지 통합관리 Platform 구성 · 건설 현장별 적용에 따른 각 지점별 소형 Gateway Device의 Network 구성 · 실시간으로 지점 환경, 설비 데이터 EMS 웹서버 전송 – 미세먼지 관리 평가 플랫폼 미들웨어 개발 · IoT 기반 미세먼지 관리 평가 플렛폼 미들웨어 개발

○ 3차년도

3차년도 연구목표			건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 검증 및 사업화	TBL 7단계 → **TBL 8단계**
1세부	주관	한양대	공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감가이드라인 기술검증	
2세부	공동	대단	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 현장적용 지원 및 사업화 전략	
3세부	주관	한양대	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범적용 및 기술검증	

	주요 연구활동	내용 및 범위
	세부 연구목표 : 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감가이드라인 기술검증	
주관 [한양대학교 에리카 산학협력단] PMF	■ 건설현장 미세먼지 배출계수 개발	– 공사유형별 미세먼지 배출계수 개발 · 미세먼지 배출계수 최종 개발 · 건설현장 장비별 미세먼지 배출 시나리오 검증
	■ 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성	– 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성 · 공사유형별 미세먼지 발생원 분석 · 공종별 미세먼지 발생원 분석 · 기계장비별 미세먼지 발생원 분석
	■ 건설현장에서의 미세먼지 관리 기술 개발	– 건설현장 단계별 미세먼지 관리 및 저감 가이드 개발 · 프로젝트 단계별 주요 검토 인자 및 고려 수준 제안 – 건설현장 미세먼지 관리 및 저감 가이드 개발 · 프로젝트 참여주체별 미세먼지 관리 및 저감을 위한 가이드 개발 및 검증 · 참여주체별 저감활동을 위한 체크리스트 개발
	세부 연구목표 : IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 현장적용 지원 및 사업화 전략	
공동 [㈜대단] PMM	■ IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 현장적용 검증	– IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 현장적용 지원 검증 · 센서모듈-게이트웨이-플랫폼 네트워크 적정성 검토 · 플랫폼 웹서버 효율성 검토 · 스마트시티 실증도시 테스트베드 연계 적합성 검토
	■ 사업화를 위한 시장여건 분석 및 사업화전략 수립	– 사업화 모델을 반영한 시범사업 수행 · 건설프로젝트 시범평가, 현장측정, 데이터 가용성 분석 등 관련 요소 검토 · 평가결과를 반영한 사업화모델 개선 및 대안 제시
	세부 연구목표 : 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범적용 및 기술검증	
주관 [한양대학교 에리카 산학협력단] PMS	■ 건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업	– 미세먼지 관리 평가 플랫폼 시작품 개발 · IoT 기반 미세먼지 관리 평가 플랫폼 시작품 개발 – 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범사업 수행 · 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시작품을 이용한 건설프로젝트 시범평가 수행 · 현장측정, 데이터 가용성 분석 – 관련 미세먼지 측정 모델의 중장기 추진 전략 수립 · 미세먼지 추진 여건 분석 및 관련 제도 개선사항 도출 · 중장기 전략 수립
	■ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 사용자 매뉴얼	– 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 사용자 매뉴얼 개발 · 프로젝트 참여주체별 미세먼지 관리 및 저감을 위한 가이드 개발 · 건설프로젝트 참여주체별 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 사용자 매뉴얼 개발

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2-1. 연차별 연구 수행 내용

2-1-1. 1차년도

1차년도 연구내용			건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 정립	*TBL 4단계 →* ***TBL 5단계***
1세부	주관	한양대	미세먼지 배출계수 및 예측 모델을 위한 체계구축	
2세부	공동	대단	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 고도화를 위한 기반구축	
3세부	주관	한양대	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 분석 및 모델 수립	

구분 (연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2019)	PMF 미세먼지 배출계수 및 예측 모델을 위한 체계구축 **주관 [한양대학교 에리카산학협력단]**	미세먼지 배출 특성 조사를 위한 기존문헌 고찰	- 미세먼지 배출량 산정방법 조사 분석	**건설현장 미세먼지 배출방법 구분**
		미세먼지 배출 특성 조사를 위한 현장 측정	- 미세먼지 현장 측정실시	**건설현장 주변 미세먼지 농도 측정 계측결과**
		설계 단계 미세먼지 저감을 위한 체크리스트 개발	- 건축자재, 시공방법 관련 미세먼지 저감 및 관리방안 검토 - 설계단계 미세먼지 저감 체크리스트 개발	**건축자재선정 및 시공공법 체크리스트**
	PMM IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 고도화를 위한 기반구축 **공동 [㈜대단]**	미세먼지 측정 계측 평가 방법 분석	- 미세먼지 측정 계측 평가 방법	**미세먼지 측정 방법론 분석**
		미세먼지 발생원 계측 모듈 개발	- 미세먼지 계측 모듈 개발 - 미세먼지 온습도 계측 모듈 개발	**건설현장 미세먼지 계측기**
	PMS 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 분석 및 모델 수립 **주관 [한양대학교 에리카산학협력단]**	미세먼지 관리 평가 플랫폼 개발	- IoT 센서 적용 미세먼지 모니터링 플랫폼 알고리즘 개발	**IoT 센서 적용 미세먼지 모니터링 플랫폼 구성 알고리즘**

2-1-2. 2차년도

2차년도 연구내용			건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 개발 및 성능평가	*TBL 5단계 →* ***TBL 7단계***
1세부	주관	한양대	공사유형별 미세먼지 배출계수 및 가이드라인 개발	
2세부	공동	대단	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발	
3세부	주관	한양대	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발	

구분 (연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2020)	PMF 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 가이드라인 개발 **주관 [한양대학교 에리카산학협력단]**	공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사	- 공사유형별 미세먼지 발생원 분석	**공사유형별 미세먼지 배출량 검증 결과**
		건설현장 미세먼지 배출량 산정 방법 도출	- 건설현장 미세먼지 배출량 예측 알고리즘 개발	**건설현장 미세먼지 배출량 예측 알고리즘**
		시공 단계 미세먼지 저감을 위한 가이드 개발	- 공사현장 미세먼지 예측 및 평가를 위한 기준 개발 - 공사현장 분진 및 미세먼지 저감 가이드(안) 개발	**건설현장 미세먼지 평가 알고리즘 및 저감 가이드라인**
	PMM IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발 **공동 [㈜대단]**	IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발	- IoT 센서 모듈 개발(센서부+마이컴부+통신부) - IoT 멀티센서 통합플랫폼 개발 지원	**IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템**
		사업화를 위한 시장여건 분석 및 사업화전략 수립	- 사업을 위한 기술 및 인력 보유 수준 검토 - 기존 서비스와 연계 방안 및 사업다각화 전략 수립	**건설현장 미세먼지 모니터링 시장여건 분석 결과**
	PMS 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발 **주관 [한양대학교 에리카산학협력단]**	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발	- 클라우드 기반 미세먼지 통합관리 플랫폼 구성 - 미세먼지 관리 평가 플랫폼 미들웨어 개발	**건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 미들웨어**

2-1-3. 3차년도

3차년도 연구내용			건설현장 미세먼지 예측 및 관리 기술 검증 및 사업화	*TBL 7단계 →* ***TBL 8단계***
1세부	주관	한양대	공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감 가이드라인 기술 검증	
2세부	공동	대단	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 현장적용 지원 및 사업화 전략	
3세부	주관	한양대	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범적용 및 기술검증	

구분 (연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
3차 연도 (2021)	PMF 공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감 가이드라인 기술 검증 **주관 [한양대학교 에리카산학협력단]**	건설현장 미세먼지 배출계수 개발	- 공사유형별 미세먼지 배출계수 개발	**미세먼지 배출계수DB**
		건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성	- 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성	**건설현장 미세먼지 오염원 분류표**
		건설현장에서의 미세먼지 관리 기술 개발	- 건설현장 단계별 미세먼지 관리 및 저감 가이드 개발 - 건설현장 미세먼지 관리 및 저감 가이드 개발	**건설현장 미세먼지 저감 관리 가이드라인**
	PMM IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 현장적용 지원 및 사업화 전략 **공동 [㈜대단]**	IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 현장적용 검증	- IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 현장적용 지원 검증	**IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 현장적용 테스트 결과**
		사업화를 위한 시장여건 분석 및 사업화전략 수립	- 사업화 모델을 반영한 시범사업 수행	**건설현장 특화형 사업화 전략**
	PMS 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범적용 및 기술검증 **주관 [한양대학교 에리카산학협력단]**	건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업	- 미세먼지 관리 평가 플랫폼 시작품 개발 - 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 시범사업 수행 - 관련 미세먼지 측정 모델의 중장기 추진 전략 수립	**건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼 시범사업 보고서**
		건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 사용자 매뉴얼	- 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 사용자 매뉴얼 개발	**건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼 사용자 매뉴얼**

2-2. 연구 내용

1세부	
PMF	공사유형별 미세먼지 배출계수 및 저감 관리 가이드라인 개발

연구 목표	건설현장 미세먼지 배출량 계측을 통한 공사유형별 미세먼지 배출계수 개발과 건설현장 미세먼지 저감을 위한 가이드라인 개발연구를 수행함.
연구 내용	① 건설현장 유형별 미세먼지 배출계수 개발 ② 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성 ③ 건설현장 미세먼지 저감관리 가이드라인 개발

연구 프로세스

1차년				2차년				3차년			
1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기
–	① 건설현장 유형별 미세먼지 배출계수 개발										
						② 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성					
						③ 건설현장 미세먼지 저감관리 가이드라인 개발					

개발 성과

①	건설현장 미세먼지 배출계수DB 및 배출량 예측 · 평가 모델 대표성과
②	건설현장 미세먼지 오염원 분류표
③	건설현장 미세먼지 저감 관리 가이드라인

수행 방법

연차	주요 연구활동	관련 성과 ①	②	③
1차 년도 (2019)	■ 공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사를 위한 기존문헌 고찰	■	■	
	■ 공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사를 위한 현장 측정	■	■	
	■ 설계 단계 미세먼지 저감을 위한 체크리스트 개발			■
2차 년도 (2020)	■ 공사유형별 미세먼지 배출 특성 조사	■	■	■
	■ 건설현장 미세먼지 배출농도 측량 분석	■	■	
	■ 시공 단계 미세먼지 저감을 위한 가이드 개발			■
3차 년도 (2021)	■ 건설현장 미세먼지 배출계수 개발	■		
	■ 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성		■	■
	■ 건설현장에서의 미세먼지 관리 기술 개발			■

(1) 건설현장 미세먼지 배출계수DB 및 배출량 예측·평가 모델 개발

1) 기존문헌 고찰

❍ 국내 미세먼지 관리제도 고찰

- 국내의 경우 초미세먼지의 연평균 오염도는 연평균 환경기준에 미달되며 관리에 대한 필요성이 크게 대두되고 있음. 국내 연평균 환경기준은 PM2.5 기준으로 15㎍/㎥으로써 2018년 기준으로 전국 모든 시·도가 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타남.
- 이러한 심각성으로 인해 국내 관계부처 합동으로 미세먼지 관리 종합계획을 수립하였으며, 고농도 미세먼지 발생에 대한 위험으로부터 대비하고 있음. 대표적인 정책으로는 미세먼지 비상저감조치가 있는데, 이는 고농도 미세먼지가 발생한 후 임시로 조치하는 제도로써 실질적으로 배출되는 PM의 양을 줄이는 데에 한계가 있음. 특히, 배출량이 적음에도 공기중 미세먼지의 순간 농도가 높은 경우가 많으며, 배출량이 많음에도 공기중 순간 농도가 기준치에 부합하는 경우가 있으므로 건설현장에서 배출되는 미세먼지를 효율적으로 관리하는 데에 한계가 있음.
- 이에 한국 정부는 미세먼지를 정량적으로 관리할 필요성을 인식하고 농도 중심이 아닌 배출총량 중심으로 관리하는 사업장 대기오염물질 총량관리제도를 2020년 4월부로 전국 단위로 시행하고 있음. 하지만, 현재는 해당 법에 사업장 배출량 관리에 대해서만 제정이 되었을 뿐, 건설현장에서 발생하는 미세먼지 배출량을 관리할 방법은 수립되지 못한 상태이며, 아직 명확한 건설현장 미세먼지 배출량에 대한 평가 방법이 제시되고 있지 않음. 효과적인 미세먼지 관리를 위해서는 농도 중심의 관리와 배출량 중심의 관리가 함께 이루어져야하며, 이에 대한 현행 국내 관련 대표 정책을 정리하면 표2-1과 같음.

표 2-1. 대기오염물질 관리 방법 별 국내 대표 정책

구분	대기오염물질 관리 방법	
	농도 중심 관리	배출량 중심 관리
관련 정책	미세먼지 비상저감조치	사업장 대기오염 총량관리제
관리 대상	농도	연간 배출량
관리 단위	㎍/m³	kg/yr
관리 기준	당일 및 익일 초미세먼지 농도	할당된 배출허용총량
대상 물질	PM2.5	NOx, SOx, TSP Emissions
건설현장 대상	○	X
성격	사후조치	예방적 조치

❍ 국외 미세먼지 관리제도 고찰

- 국가별 환경기준은 표2-2의 세계보건기구(WHO) 권고기준을 토대로 국민 건강영향, 국제기준, 오염도 현황, 달성가능성 등을 종합적으로 고려하여 설정되는 정책적 목표치로써 각 국가의 상황에 맞추어 환경기준을 설정하도록 하고 있음.

표 2-2. WHO PM 권고기준 및 잠정목표

구분	PM2.5(㎍/㎥)		PM10(㎍/㎥)		각 단계별 연평균 기준 설정 시 건강영향
	연평균	일평균	연평균	일평균	
잠정목표1	35	75	70	150	권고기준에 비해 사망 위험률이 약 15% 증가 수준
잠정목표2	25	50	50	100	잠정목표 1보다 약 6%(2~11%) 사망위험률 감소
잠정목표3	15	37.5	30	75	잠정목표 2보다 약 6%(2~11%) 사망위험률 감소
권고기준	10	25	20	50	심폐질환과 폐암에 의한 사망률 증가 최저 수준

- 우리나라는 2017년 연평균 농도(25㎍/㎥)와 환경기준 달성률 등을 고려하여 2018년에 초미세먼지 환경기준을 잠정목표2에서 3 수준으로 상향하여 채택하고 있으며, 일본과 미국이 우리나라와 유사한 수준의 기준을 설정하고 중국의 경우 높은 오염농도 수준으로 인하여 우리나라보다 완화된 기준을 설정하고 있음. 주요 국가별 미세먼지 대기환경기준을 비교한 결과 표2-3과 같음.

표 2-3. 국가별 미세먼지 대기환경기준

항목	기준	주요 국가					
		한국	미국	일본	중국	EU	WHO
PM2.5 (㎍/㎥)	연간	15	12	15	35	25	10
	24시간	35	35	35	75	-	25
PM10 (㎍/㎥)	연간	50	-	-	70	40	20
	24시간	100	150	100	150	50	50

- 이처럼 미세먼지 관리에 대한 기준이 농도이기 때문에 일반적으로 농도 중심의 미세먼지 평가 및 관리 정책들이 주류를 이룸.
- 농도 중심의 대표적인 해외 제도로는 미국의 National Ambient Air Quality Standards, 뉴질랜드의 Ambient Air Quality Guidelines, 호주의 National Environment Protection Measure for Ambient Air Quality, 캐나다의 Canadian Ambient Air Quality Standards 등이 있음. 아시아의 경우는 대표적으로 중국이 푸른하늘 보전 3년 행동계획 수립을 통해 미세먼지 농도를 관리하기 위해 노력하고 있으며, 이러한 미세먼지 농도 중심의 관리 정책들은 공통적으로 일정 PM 농도 초과 시 미세먼지 발생원의 운용을 통제하는 방식을 활용하고 있음.
- 반면, 일부 국가에서는 농도 중심이 아닌 배출량 중심의 관리 제도를 시행하고 있는데 배출량을 관리하는 대표적인 제도로는 US EPA의 CSAPR(Cross-State Air Pollution Rules)와 유럽의 NECD(National Emission Ceiling Directive)가 있음. 아시아의 경우 일본에서도 대기오염방지법을 통해 사업장에서 배출되는 황산화물을 양적으로 규제하는 정책을 시행하고 있으며, 이는 CSAPR와 마찬가지로 PM의 배출량을 직접적으로 규제하는 정책이 아닌 초미세먼지의 2차 발생을 야기하는 전구물질을 규제하는 정책으로써 1차 발생하는 미세먼지를 정량적으로 평가하는 데에는 한계가 있으나, 정량적인 관리를 시행하고 있는 면에서 큰 의미가 있는 것으로 사료됨.
- 배출량 중심의 관리에 대한 현행 국외 대표 정책을 정리하면 표2-4와 같음.

표 2-4. 대기오염물질 관리 방법 별 국외 대표 정책

국가	배출량 중심 관리	
	정책 및 제도 명칭	특징
미국	Cross-State Air Pollution Rules (CSAPR)	- 초미세먼지 형성에 기여하는 전구물질 규제 - 주요 발전소에서 배출되는 전구물질의 양을 산출하여 배출권 거래제로 연계
일본	대기오염방지법	- 사업장에서 배출 또는 비산하는 오염물질 '매연'에 대해 기준을 정함 ■ 매연 : 농도규제 ■ SOx : 양규제, 총량규제, 계절관리제 ■ NOx : 농도규제
유럽	National Emission Ceilings Directive (NECD)	- EU의 국가들이 2030년까지 이행할 것을 상정한 지침 - SO_2, NO_2, PM2.5, NH_3, 휘발성유기화합물에 대한 국가별 배출 상한 설정 - 블랙카본 배출을 우선적으로 검토

❍ 건설현장 특화 정책 및 제도 고찰

- 미세먼지 배출량 중심 관리 측면에서 국내 대기질 관련 최상위 법인 대기환경보전법은 먼지 발생사업 11종에 대해 규정하고 있으며, 이 중 하나인 건설현장은 비산먼지 발생 사업임을 지자체에 신고하고 먼지 배출량을 억제하기 위한 시설의 설치 및 필요한 조치를 취하여야 함. 국내 비산먼지 관리 매뉴얼을 통해 건설과 관련하여 주요 비산먼지 관리 대상으로 설정하고 있는 건설행위는 야적, 싣기·내리기, 수송으로써 방진덮개, 물뿌리기, 덮개 설치 등의 조치기준을 제시하고 있음.
- 그러나 이는 각 현장 상황에 따라 달라지는 배출량을 정량적으로 분석하여 조치하는 것이 아니기 때문에 과도한 조치가 이루어질 수 있으며, 현장 상황을 고려하여 효율적으로 먼지 관리를 하는 데에 한계가 있음. 또한, 건설현장에서의 미세먼지 발생은 비산먼지 발생으로 인한 비산배출 외에도 건설장비의 연료연소로 인하여 발생하는 직접배출에 의한 영향도 있는데, 현행 정책은 이를 고려하지 못하고 있는 실정임.
- 미세먼지 농도 중심 관리 측면에서는 미세먼지 비상저감조치를 시행하여 건설현장의 공사시간 단축·조정을 통해 현장 미세먼지 감축을 유도하고 있음. 공공 공사장의 경우는 공사시간 단축을 통해 공사를 중지하며, 민간 공사장의 경우 공사시간 조정을 통해 출근시간대에 공사를 회피하도록 조치하고 있음. 하지만 이는 비상조치 발령의 기준이 되는 농도가 공사로 인하여 발생한 경우가 아니더라도 적용이 되며, 실제로 먼지를 야기하는 공종이 아님에도 불구하고 조치에 응해야함으로써 공기가 매우 중요한 건설공사 특성상 공사 담당자들에게 불합리한 조치가 우려됨.
- 이에, 그림2-1의 현행 정책들을 보완하여 정량적인 배출량 평가와 정밀한 실시간 농도 평가가 가능한 합리적인 건설현장 특화형 미세먼지 관리 시스템이 필요한 것으로 사료됨.



그림 2-1. 현행 건설현장 미세먼지 관리 정책 및 제도

❍ 건설현장 미세먼지 배출방법 고찰

- 건설현장 미세먼지 배출방법은 표2-5와 같이 크게 직접배출(Primary Emission), 2차생성배출(Secondary Emission), 비산배출(Fugitive Emission)로 구분할 수 있음.

표 2-5. 건설현장 미세먼지 배출방법 구분

구분	건설현장 미세먼지 배출방법		
	Primary Emission	Secondary Emission	Fugitive Emission
측정 대상	건설장비	건설장비	건설장비의 활동
대상 물질	PM10, PM2.5	NOx, SOx, VOCs	PM10, PM2.5

- 직접배출은 건설장비의 연료연소로 인하여 직접적으로 배출되는 PM을 의미하며, 2차생성배출은 건설장비에서 배출되는 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 그리고 휘발성유기화합물(VOCs)이 전구물질로서 빛에너지와 반응하여 생성되는 PM임. 건설 미세먼지 직접배출량은 국내 국립환경과학원(NIER)에서 개발한 대기오염물질 배출계수를 활용하여 여러 연구를 통해 산정되고 있으며, 국외에서도 국가별 배출계수를 개발하여 활용하고 있음.
- 비산배출을 산출하는 대표적인 기술로는 United States Environmental Protection Agency(US EPA)에서 AP-42: Compilation of Air Emissions Factors(AP-42)를 통해 개발하여 제시하고 있는 배출계수 및 배출량 산정방법임. AP-42의 구성 챕터 중 특히 Heavy Construction Operation에서는 건설현장 주요 비산배출 행위에 대하여 구분되어 있으며, 정의된 비산배출 행위 별 비산배출계수 산출 실험식을 통해 각 행위 별 비산배출량을 산정할 수 있도록 구성되어 있음. 이를 기반으로 미국의 Midwest Research Institute(MRI) 및 유럽의 European Environment Agency(EEA)에서는 건설현장의 공기 및 면적에 따른 총 PM 비산배출량 산정식을 개발했으며, 국내 NIER에서도 이를 준용하여 한국 건설공사 통계자료에 근간한 건설현장 총 PM 비산배출량 산정 방법을 개발함.

❍ 기존문헌 고찰 결과

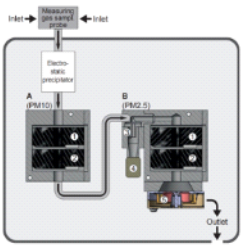
- 국내외적으로 PM 관리는 농도 중심으로 관리되고 있으나 정량적인 배출량 중심의 사전관리가 함께 이루어져야하는 것으로 고찰됨.
- 대기오염물질들에 대한 배출량 중심의 관리방법은 제도적으로 정립된 사례들이 있으나 PM 배출량을 관리할 수 있는 방법은 부재한 실정임. 특히, 건설현장에서 발생하는 미세먼지에 대한 현행 관리 제도들은 정량적인 배출량 평가를 통해서 관리를 하고 있지 못하여 공기가 매우 중요한 건설공사의 특성상 건설사에 매우 불합리한 실정임. 이에 따라, 건설현장 조성 전에 현장에서 발생할 것으로 예상되는 미세먼지 배출량을 정량적으로 예측하고 평가할 방법이 필요할 것으로 사료됨.
- 건설현장 미세먼지 배출방법은 직접배출, 비산배출, 2차생성배출로 구분되며, 배출량 산정을 위해 각 배출방법 별 배출계수를 모두 포함하는 배출계수DB를 개발해야 함.

2) 건설현장 미세먼지 배출 특성 조사를 위한 사전 현장 측정

○ 건설현장 미세먼지 측정 개요

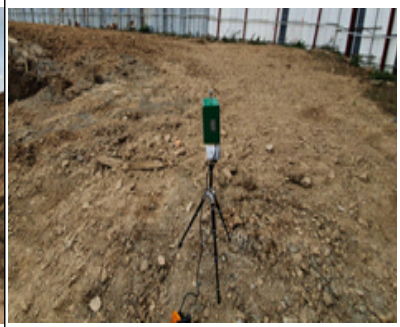
- 건설현장에서 발생하는 미세먼지의 주요 배출 특성을 확인하기 위하여 4개의 건설현장을 대상으로 사전 현장 측정을 실시함.
- 배출원으로부터 계측 시 이격거리는 20m, 25m, 30m로 설정하였으며, 부가적으로 50m 거리 및 기본 대기 중 미세먼지 농도를 파악하기 위한 현장 외부 측정을 실시함.
- 본 사전 현장 측정 시 사용된 측정장비는 표2-6과 같음.

표 2-6. 건설현장 미세먼지 사전 측정 장비

<table>
<tr><td rowspan="6"> 
</td><td rowspan="6">  </td><td>장비명</td><td>FDS-17 (독일 Dr. Födisch AG사 제품)</td></tr>
<tr><td>측정방식</td><td>광산란법</td></tr>
<tr><td>크기</td><td>200mm X220mm X 90mm</td></tr>
<tr><td>보호 등급</td><td>IP 53</td></tr>
<tr><td>측정 주변 온도</td><td>-20 ~ 50℃</td></tr>
<tr><td>상대 습도</td><td>0 ~ 95 %</td></tr>
<tr><td>장비 외관</td><td>장비 내부 구성도</td><td>측정 물질</td><td>PM_{10}, $PM_{2.5}$ 동시 측정</td></tr>
</table>

- 사전 현장 측정 대상 현장을 표2-7과 같음.

표 2-7. 건설현장 미세먼지 사전 측정 대상 현장

<table>
<tr><td rowspan="6">현장
1</td><td>현장</td><td>한양대학교 광장공사</td><td rowspan="6">  </td><td rowspan="6">  </td></tr>
<tr><td>위치</td><td>경기도 안산</td></tr>
<tr><td>용도/공종</td><td>교육시설/토공사</td></tr>
<tr><td>온도/습도</td><td>14.5℃/45.2%RH</td></tr>
<tr><td>최고풍속</td><td>3.15m/s</td></tr>
<tr><td>연면적</td><td>1,110.7㎡</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>현장측정</td><td>건설활동</td></tr>
<tr><td rowspan="6">현장
2</td><td>현장</td><td>대구 달성군 공동주택</td><td rowspan="6">  </td><td rowspan="6">  </td></tr>
<tr><td>위치</td><td>대구광역시 달성군</td></tr>
<tr><td>용도/공종</td><td>공동주택/토공사</td></tr>
<tr><td>온도/습도</td><td>13.7℃/70.0%RH</td></tr>
<tr><td>최고풍속</td><td>3.16m/s</td></tr>
<tr><td>연면적</td><td>113,443㎡</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>건설활동</td><td>현장측정</td></tr>
</table>

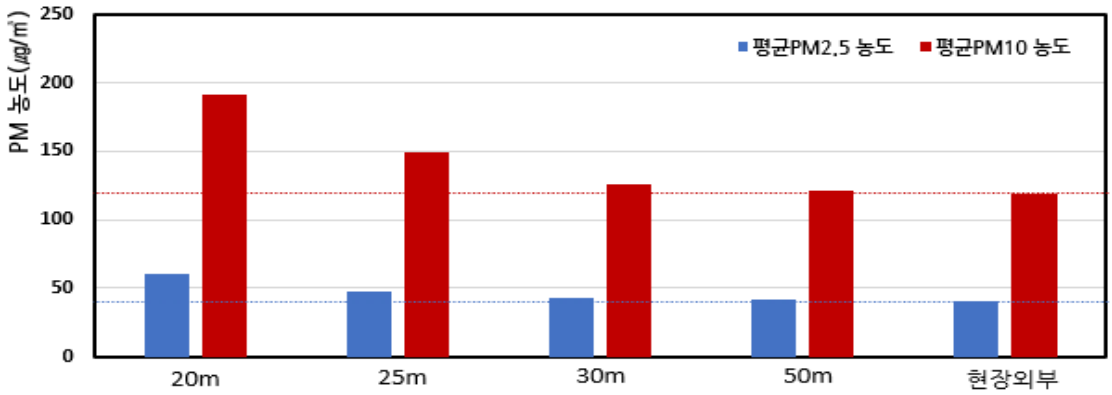
현장 # 3	현장	인천 송도 AT센터		
	위치	인천광역시 연수구		
	용도/공종	업무용건축물/토공사		
	온도/습도	15.7℃/33.1%RH		
	최고풍속	10.31m/s		
	연면적	99,173㎡	조감도	현장측정
현장 # 4	현장	한양대학교 제 5공학관 리모델링		
	위치	경기도 안산시 사동		
	용도/공종	교육시설/토공사		
	온도/습도	23.1℃/58.0%RH		
	최고풍속	2.5m/s		
	연면적	2,269.73㎡	건설현장	건설현장

❍ 건설현장 미세먼지 측정 결과

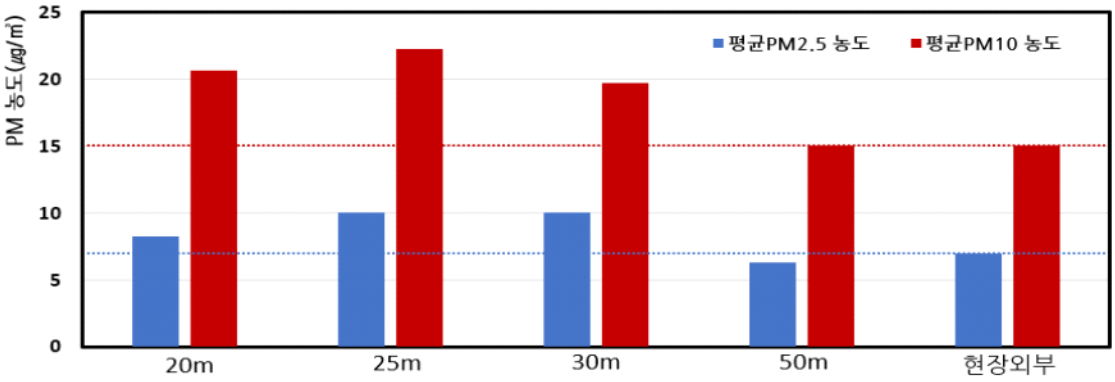
- 본 연구에서는 현장 실시간 모니터링 시 적정 계측 거리를 도출하기 위해 균일한 건설활동이 진행되었던 3개 현장(현장 #1,#2,#3)의 측정 데이터를 표2-8과 같이 선정하여 결과 분석을 진행하였으며, 현장 #4의 경우 측정 지점의 건설장비 및 활동이 측정 중 수시로 바뀐 관계로 균일한 측정을 수행하지 못함에 따라 분석 대상에서 제외함.
- 이에 따라, 해당 3개의 현장 측정 데이터(PM2.5, PM10 평균 농도)를 정리한 결과 그림2-2와 같이 나타남.

표 2-8. 건설현장 미세먼지 사전 측정 결과 분석용 대상 현장

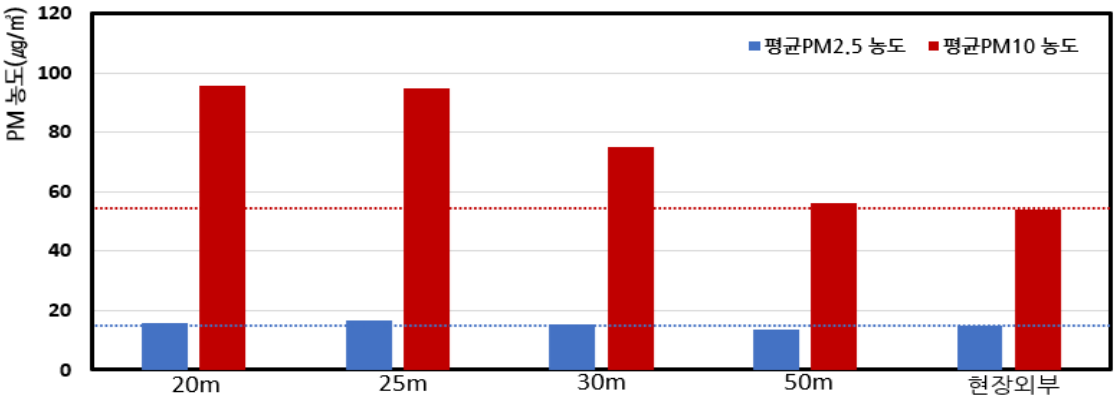
구분	한양대학교 광장 공사 (현장 #1)	대구 공동주택 (현장 #2)	인천 송도 AT센터 공사 (현장 #3)
공종	토공사	토공사	토공사
배출원	굴삭기	굴삭기	로우더
배출활동	고정 작업 배출	고정 작업 배출	이동 배출
온도	15℃	14℃	16℃
상대습도	45%	70%	33%
측정시간	2시간	1시간 20분	2시간
측정거리 배리에이션	20m, 25m, 30m, 50m, 현장외부		



(a) 현장 #1



(b) 현장 #2



(c) 현장 #3

그림 2-2. 미세먼지 농도 측정 결과

❍ 건설현장 미세먼지 측정 결과 분석

- 각 배출원으로부터 20m 거리에서는 계측기기와 배출원의 저촉 없이 정상 계측이 가능했으며, 배출원으로부터 거리가 멀어질수록 PM2.5와 PM10 모두 농도가 낮아지는 것을 확인함.
- 특히, 50m 거리에서 측정시 현장외부에서 측정한 결과와 유사한 정도로 나타남에 따라 현장 현장에서 발생한 PM은 현장으로부터 50m 이내의 반경에 포함되는 건설현장 근로자 및 인근 주민에 영향을 미칠 것으로 사료됨.
- 또한, 건설장비의 이동 및 작업 시 측정 PM 농도가 급격히 상승하는 것을 확인함에 따라 건설현장 미세먼지의 주요 배출원은 건설장비로 분석됨.
- 현장 #4에서는 측정 지점의 건설장비 및 활동이 바뀜에 따라 측정값이 변하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 건설장비 활동 별 배출계수를 별도로 개발해야 할 것으로 분석됨.

3) 건설현장 미세먼지 배출계수 개발

❍ 건설현장 미세먼지 주요 배출원 도출

- 국내 환경부에서는 대기오염 배출에 대한 통계 및 분석을 목적으로 대기오염물질 배출원을 크게 13가지 카테고리로 분류하여 배출량을 산정하며, 이중 10개의 카테고리(에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 폐기물처리, 기타 면오염원, 비산먼지, 생물성 연소)에 대하여 PM 배출량을 산정하고 있음.
- 특히 건설 관련 배출원 카테고리는 그림2-3과 같이 총3개 항목으로 각각 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 비산먼지임.

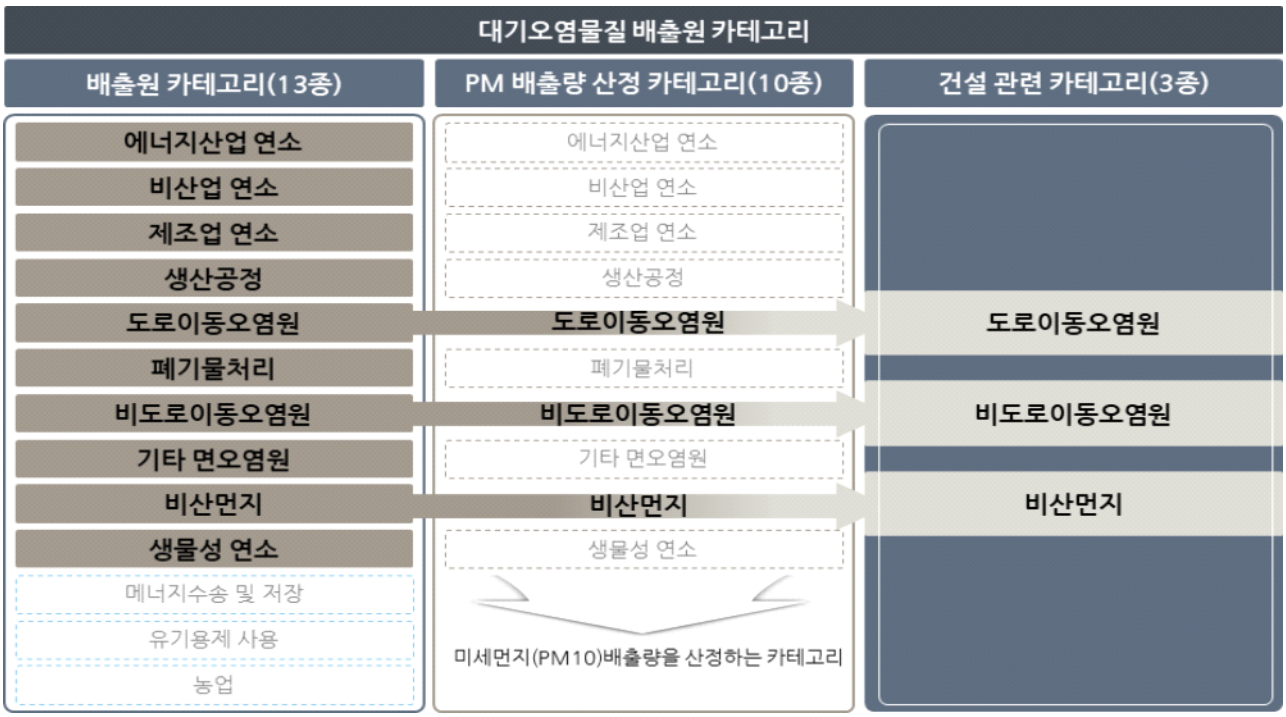


그림 2-3. 건설 관련 대기오염 배출원 카테고리

- 도로이동오염원은 도로에서 주행하는 자동차로 인한 대기오염 배출량을 산정하는 부문으로 차종 분류는 국내의 자동차 관리법 규칙에 따라 분류(승용차, 승합차, 화물차, 특수자동차, 이륜차)하며 차종에 따라 경형, 소형, 중형, 대형으로 나누어 차종별 엔진가열(hot-start) 배출량, 엔진 미가열(cold-start) 배출량, 증발 배출량 등으로 분류하여 산정하고 비도로이동오염원은 자동차 이외의 내연기관을 장착한 철도, 선박운항 및 항공기, 건설장비, 농기계로 분류하여 산정하는데 이 중 건설현장 배출원과 관련된 세부 카테고리는 화물차와 건설장비로서 각각의 카테고리 내 덤프트럭, 콘크리트 믹서트럭과 9종의 건설장비(불도저, 로우더, 지게차, 굴삭기, 기중기, 콘크리트 펌프, 로울러, 공기압축기, 천공기)를 주요 미세먼지 배출원으로 선정함.
- 다만, 비산먼지 카테고리의 경우 건설장비에 따른 배출계수가 아닌 건설공사로 인한 총배출량 산정식만을 제시하고 있으며, 이에 따라 본 연구에서는 도로이동오염원과 비도로이동오염원 카테고리에서 도출한 배출원들을 주요 배출원으로 그림2-4와 같이 선정함.

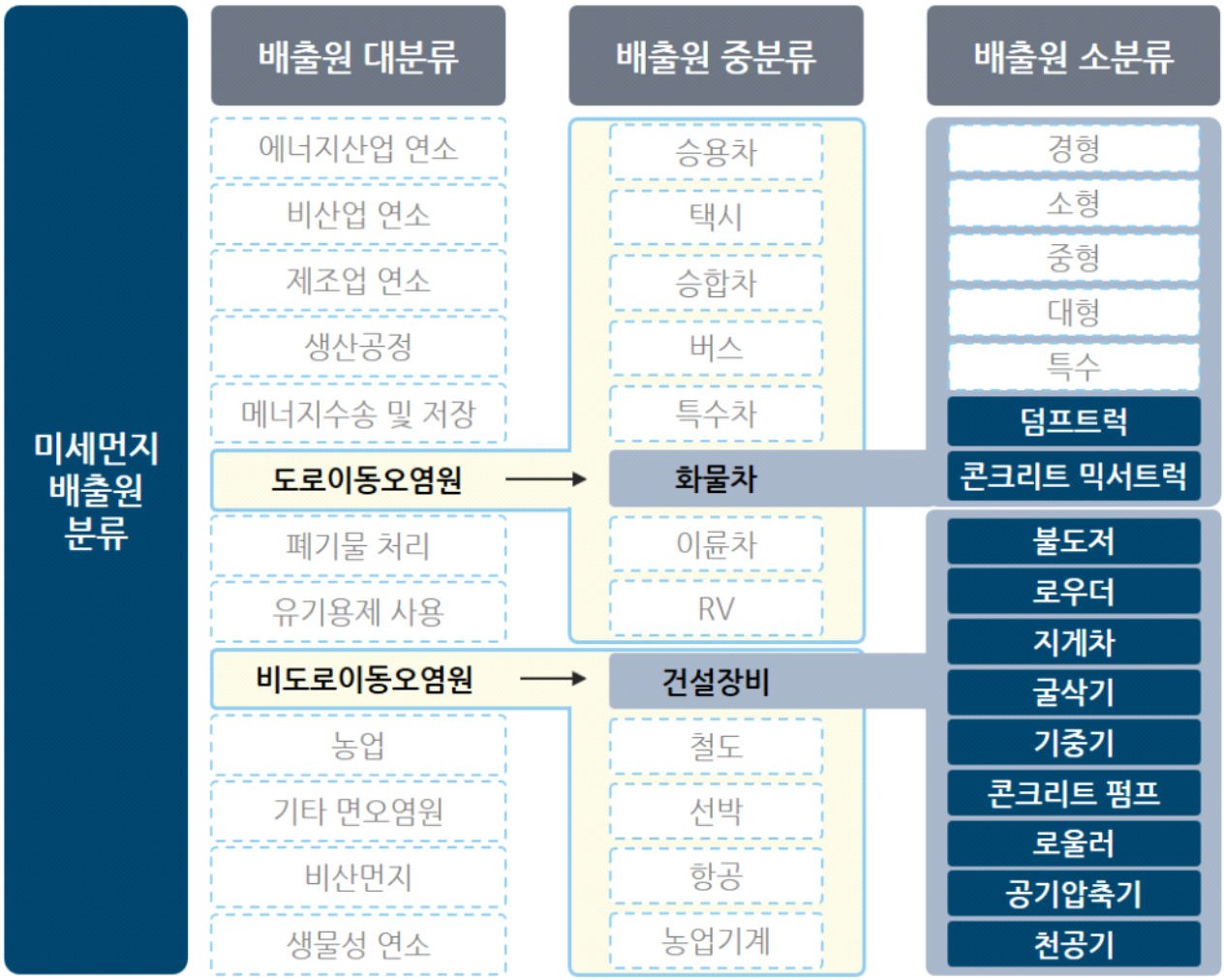


그림 2-4. 건설현장 미세먼지 배출원 분류

❍ 건설현장 미세먼지 배출계수 개발

- 건설현장에서 발생하는 PM 배출방법은 직접배출(primary emission), 2차생성배출(secondary emission), 비산배출(fugitive emission)로 구분됨.
- 본 연구에서는 건설현장 근로자 및 인근 주민에게 직접적인 피해를 야기하는 직접배출과 비산배출을 주 고려대상으로 설정했으며, 향후 건설현장에서 발생한 PM 전구물질로 인하여 발생하는 2차생성배출에 대한 연구 확장성을 고려하여 표2-9와 같이 건설현장 미세먼지 배출방법을 정리하고 배출계수 DB 개발을 수행함.

표 2-9. 본 연구 대상 건설현장 미세먼지 배출방법 분류

구분	건설현장 미세먼지 배출방법		
	주요 연구 대상		추가사항
	직접배출	비산배출	2차생성배출 (전구물질)
측정 대상	건설장비	건설활동	건설장비
대상 물질	PM10, PM2.5		NOx, SOx, VOCs

- 직접배출계수의 경우 NIER에서 트럭(덤프트럭, 콘크리트 믹서트럭, 트레일러) 및 9가지(불도저, 굴삭기, 로우더, 지게차, 기중기, 콘크리트펌프, 로울러, 공기압축기, 천공기)의 건설장비에 대한 PM10 배출계수를 개발하여 사용하고 있으며, PM2.5/PM10 분율 적용을 통해 PM2.5의 배출계수를 산정하여 활용하고 있음. 이 중 콘크리트펌프, 공기압축기, 천공기는 EEA에서 개발한 배출계수를 준용하고 있으며, 분율은 EPA를 준용하고 있음.
- 이에, 본 연구에서는 공신력 있는 직접배출계수로 NIER에서 제시하는 배출계수를 준용하였으며, 이 과정에서 2차생성배출 전구물질 배출계수에 대해서도 부가적으로 직접배출계수와 함께 준용함.
- NIER의 대기오염물질 배출계수에서 덤프트럭 및 트레일러에 대해서는 도로이동오염원의 화물차 카테고리에서 단위 이동거리에 따른 직접배출계수를 직접 명시하고 있으며, 건설장비에 해당하는 9종의 장비에 대해서는 각 장비의 정격출력에 따른 대기오염물질 배출계수를 정의하고 있음.
- 이에, 본 연구에서는 한국 건설현장에 적용하기 위해 한국의 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람에 따라 한국에서 제조되고 있는 건설장비 별 평균정격출력자료를 이용하여 직접배출계수 및 2차생성배출 전구물질 배출계수를 도출했으며, 그 값은 표2-10과 같음.

표 2-10. 건설장비별 직접배출계수 및 2차생성배출(전구물질)계수 도출

Equipment	Rated power (kW)	Emission Factor				
		직접배출		2차생성배출(전구물질)		
		PM10	PM2.5	NOx	SOx	VOCs
불도저	114	0.00022000	0.00020240	0.00367000	0.00000260	0.00011000
로우더	100	0.00022000	0.00020240	0.00367000	0.00000260	0.00011000
지게차	56	0.00028000	0.00025760	0.00369000	0.00000265	0.00017000
굴삭기	85	0.00019000	0.00017480	0.00354000	0.00000260	0.00013000
기중기	175	0.00012000	0.00011040	0.00345000	0.00000254	0.00016000
로울러	70	0.00034000	0.00031280	0.00380000	0.00000265	0.00022000
공기압축기	201	0.00010000	0.00009200	0.00341000	0.00000254	0.00017000
콘크리트 펌프	199	0.00002000	0.00001840	0.00200000	0.00000254	0.00046000
천공기	106	0.00012000	0.00011040	0.00340000	0.00000260	0.00012000
덤프트럭(8ton)	평균차속 V = 20km/h	0.0004300	0.00039600	0.01961343	0.00024580	0.00074572
덤프트럭(25ton)				0.01961343	0.00038511	0.00074572
트레일러				0.01961343	0.00038511	0.00074572
콘크리트믹서트럭				0.01961343	0.00024580	0.00074572

※ 단위 : kg/kWh, 덤프트럭, 트레일러, 콘크리트믹서트럭의 경우 kg/km

- 건설현장에서 건설장비의 활동으로 인하여 발생하는 비산배출계수에 대한 연구는 US EPA AP-42의 Heavy Construction Operation에서 제시하고 있는 배출계수 산정방법을 근간으로 진행되어 왔음. 그 결과, 미국의 MRI에서는 건설공사를 residential, non-residential, road construction으로 분류하여 공사면적 및 공사기간을 변수로 하는 PM 배출계수를 개발했으며, 이를 토대로 유럽의 EEA와 한국의 NIER에서도 자체적인 배출계수를 개발하여 활용하고 있음. 하지만, 이를 통해 PM 배출량을 산정하게 되면 단순히 공사면적 및 공사기간이 증가함에 따라 산정되는 PM 배출량도 선형적으로 증가하게 되어 건설현장의 다양한 환경을 반영하지 못하는 단점이 있음.
- 이에, 본 연구에서는 US EPA AP-42의 건설현장 비산배출 PM 계수 산정 방법을 활용하여 건설장비의 이동 및 작업으로 인한 활동량을 기반으로 한 배출계수를 도출함.
- EPA AP-42의 Heavy Construction Operation 항목에서는 건설현장 비산먼지 산정을 위해 건설단계를 크게 3가지인 해체과정, 부지조성공사, 일반공사로 분류하고 있으며, 각 건설단계별로 주요 먼지발생 활동(Dust-generating activities)을 명시하고 있는데 그 중 본 연구에 해당하는 항목을 구분한 결과 표2-11과 같이 나타남.

표 2-11. 본 연구 대상 건설현장 주요 먼지발생 활동

EPA AP-42 : Heavy Construction Operation		본 연구
Construction Phase	Dust-generating Activities	
1. Demolition and debris	(1) Demolition of buildings or other (natural) obstacles such as trees, boulders, etc.	
	a. Mechanical dismemberment of existing structures	-
	b. Implosion of existing structures	-
	c. Drilling and blasting of soil	○
	d. General land clearing	○
	(2) Loading of debris into trucks	○
	(3) Truck transport of debris	○
	(4) Truck unloading of debris	○
2. Site preparation (earth moving)	(1) Bulldozing	○
	(2) Scrapers unloading topsoil	○
	(3) Scrapers in travel	○
	(4) Scrapers removing topsoil	○
	(5) Loading of excavated material into trucks	○
	(6) Truck dumping of fill material, road base, or other materials	○
	(7) Compacting	○
	(8) Motor grading	○
3. General Construction	(1) Vehicular Travel	○
	(2) Portable plants	
	a. Crushing	-
	b. Screening	-
	c. Material transfers	-
	(3) Other operations	-

- 또한, 도출된 건설현장 주요 먼지발생 활동 항목 별로 각각에 대해 AP-42에서 제시하고 있는 비산배출계수 산정식을 본 연구의 주요 미세먼지 배출원 및 배출활동과 매칭하여 정리한 결과 표2-12와 같이 나타남.
- 변수로는 건설현장의 표토실트 함량, 함수율, 풍속 및 장비의 무게 등이 있는 것으로 분석되었으며, 각 변수는 NIER에서 국내 건설공사 비산먼지 배출계수 개발을 위해 수행한 “비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발” 연구를 토대로 표2-13과 같이 설정함.

표 2-12. 건설현장 주요 배출원 및 배출활동 별 비산배출계수 산정식

건설장비	건설활동	비산배출계수 산정식	
불도저	Bulldozing	PM10	$EF = 0.75 \times 0.45 \frac{s^{1.5}}{M^{1.4}}$
		PM2.5	$EF = 0.105 \times 2.6 \frac{s^{1.2}}{M^{1.3}}$
로우더	Loading	$EF = k(0.0016) \frac{(\frac{U}{2.2})^{1.3}}{(\frac{M}{2})^{1.4}}$	
지게차	Travel	$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$	
굴삭기	Dragline	$EF = \frac{0.0029h^{0.7}}{M^{0.3}}$	
	Loading	$EF = k(0.0016) \frac{(\frac{U}{2.2})^{1.3}}{(\frac{M}{2})^{1.4}}$	
기중기	Travel	$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$	
콘크리트 펌프	Pumping	N/A	
로울러	Compacting	$EF = K(0.10) \frac{s}{1.5} \frac{d}{235}$	
공기압축기	Compressing	N/A	
천공기	Drilling	$EF = k \times 0.59$	
덤프트럭, 트레일러	Travel	$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$	
콘크리트 믹서트럭	Travel	$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$	

비산배출계수 산정식 변수

EF : Emission factor (kg/unit)
s : Silt content (%)
M : Moisture content (%)
k : Scaling factors for PM10 or PM2.5 (Constant)
U : Mean wind speed (m/s)
h : Drop hight (m)
W : Mean weight (ton)
p : Number of days in a year with at least 0.254mm of precipitation (days)
K : Activity factor (Constant)

표 2-13. 비산배출계수 산정 시 변수 설정

계수	내용	사용 값	단위
s	Silt content (작업장)	1.6	%
	Silt content (이동로)	14.1	
M	Moisture content	0.7	%
k	Scaling factors for PM2.5	0.053	Constant
	Scaling factors for PM10	0.35	
U	Mean wind speed	1.0	m/s
h	Drop hight	4	m
p	Number of days in a year with at least 0.254mm of precipitation	98	days
K	Activity factor for PM2.5	0.01	Constant
	Activity factor for PM10	0.1	

- 이와 같이 도출된 건설현장 먼지발생 활동 항목 별 비산배출계수 산정식을 통해 주요 배출원 별 비산배출계수를 산정하기 위해서는 각 배출원 별 비산배출활동이 분류되어야 함. 여기서, 비산배출활동은 표2-14와 같이 크게 장비의 작업과 장비의 이동으로 나눌 수 있는데, 이러한 활동 분류에 따라 배출계수의 단위가 정해지게 됨. 장비의 작업으로 인한 비산배출계수는 단위 작업량 당 배출량을 의미하는 kg/ton으로 나타나며, 이동으로 인한 비산배출계수는 단위 이동거리 당 배출량을 의미하는 kg/VKT로 나타남.

표 2-14. 건설장비별 미세먼지 배출 건설활동 유형

건설장비	비산배출활동	유형
불도저	Bulldozing	작업
로우더	Loading material	작업
지게차	Travel	이동
굴삭기	Dragline	작업
	Loading material	
기중기	Travel	이동
콘크리트 펌프	Pumping	작업
로울러	Compacting	작업
공기압축기	Compressing	작업
천공기	Drilling	작업
덤프트럭	Travel	이동
트레일러	Travel	이동
콘크리트믹서트럭	Travel	이동

- 한편, 통합 배출계수 DB를 구축하기 위해서는 직접배출활동에 따른 계수의 단위도 함께 고려가 되어야 함. 장비의 작업으로 인한 직접배출계수는 단위 운용시간 당 배출량을 의미하는 kg/h로 나타나며, 이동으로 인한 직접배출계수는 이동 시 비산배출계수와 마찬가지로 단위 이동거리 당 배출량을 의미하는 kg/km로 나타남.
- 이에 따라, 각 건설장비의 활동을 분류하여 직접배출계수와 비산배출계수를 통합적으로 정리하고 이와 함께 2차생성배출 전구물질 배출계수를 정리한 결과 표2-15와 같이 건설현장 미세먼지 배출계수 DB를 도출함.

표 2-15. 건설현장 미세먼지 배출계수 DB

건설장비	건설활동	건설현장 미세먼지 배출계수 (kg/unit)									
		직접배출			비산배출			2차생성배출(전구물질)			
		PM10	PM2.5	unit	PM10	PM2.5	unit	NOx	SOx	VOCs	unit
불도저	Bulldozing	2.20E-04	2.02E-04	kWh	4.15E-03	2.81E-03	ton	3.67E-03	2.60E-06	1.10E-04	kWh
로우더	Loading	2.20E-04	2.02E-04	kWh	8.74E-04	1.32E-04	ton	3.67E-03	2.60E-06	1.10E-04	kWh
지게차(3t)	Travel	2.80E-04	2.58E-04	kWh	4.50E-01	4.50E-02	VKT	3.69E-03	2.65E-06	1.70E-04	kWh
굴삭기	Dragline	1.90E-04	1.75E-04	kWh	3.36E-03	2.10E-04	ton	3.54E-03	2.60E-06	1.30E-04	kWh
	Loading				8.74E-04	1.32E-04					
기중기	Travel	1.20E-04	1.10E-04	kWh	4.50E-01	4.50E-02	VKT	3.45E-03	2.54E-06	1.60E-04	kWh
콘크리트 펌프	Pumping	2.00E-05	1.84E-05	kWh	N/A	N/A	-	2.00E-03	2.54E-06	4.60E-04	kWh
로울러	Compacting	3.40E-04	3.13E-04	kWh	4.92E-02	4.92E-03	ton	3.80E-03	2.65E-06	2.20E-04	kWh
공기압축기	Compressing	1.00E-04	9.20E-05	kWh	N/A	N/A	-	3.41E-03	2.54E-06	1.70E-04	kWh
천공기	Drilling	1.20E-04	1.10E-04	kWh	7.26E-02	1.45E-02	hole	3.40E-03	2.60E-06	1.20E-04	kWh
덤프트럭(8t)	Travel	4.30E-04	3.96E-04	km	5.56E-01	5.56E-02	VKT	1.96E-02	2.46E-04	7.46E-04	km
덤프트럭(25t)	Travel	4.30E-04	3.96E-04	km	9.29E-01	9.29E-02	VKT	1.96E-02	3.85E-04	7.46E-04	km
트레일러(20t)	Travel	4.30E-04	3.96E-04	km	8.40E-01	8.40E-02	VKT	1.96E-02	3.85E-04	7.46E-04	km
콘크리트 믹서트럭(15t)	Travel	4.30E-04	3.96E-04	km	7.38E-01	7.38E-02	VKT	1.96E-02	2.46E-04	7.46E-04	km

※ Notes
N/A : Not Available
VKT : Vehicle Kilometer Traveled (equal to km)

4) 건설현장 미세먼지 배출계수 DB를 활용한 배출량 예측 기술 개발

○ 건설현장 미세먼지 배출량 예측식

- 배출원별 배출량 산정 일반식

$$E = A \times EF \times (\frac{1-ER}{100}) \quad (1)$$

E = 배출량
A = 작업률
EF = 배출계수
ER = 총 배출량 감소 효율(%)

*출처 : EPA, AP-42, 1995

- 미국 EPA AP-42에서는 배출계수를 활용하여 단일 배출원의 배출량을 산정하는 일반식을 식(1)과 같이 제시하고 있으며, 해당 식을 건설현장 미세먼지 총 배출량 예측식을 도출하는 데에 활용함.
- 여기서, 작업률은 본 연구에서의 배출원별 건설활동량을 의미하며, 배출계수로는 도출한 장비 및 활동별 배출계수 데이터베이스의 값을 적용할 수 있음.

- 건설현장 미세먼지 총 배출량 예측식

$$E_t = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} A_{i,j} EF_{i,j} (\frac{1-ER_{i,j}}{100})}{y} \quad (2)$$

E_t = 총 배출량(Total Emissions(kg/yr))
i = 건설장비
j = 건설활동
y = 공사기간(yr)

- 본 연구에서 식(2)와 같이 도출한 건설현장 미세먼지 총 배출량 예측식은 각 건설장비 및 건설활동별 미세먼지 배출량을 합하여 건설기간으로 나눈 것으로서 건설현장의 연간 평균 미세먼지 배출량을 예측하는 데에 활용됨.
- 단, 여기서 총 배출량 감소 효율(ER)은 미세먼지 감축기술 적용으로 인한 값으로서 본 연구에서는 이에 대한 기준이 명확하지 않은 관계로 미세먼지 감축기술이 적용되지 않은 경우를 대상으로 연구를 수행함.

❍ 건설현장 미세먼지 배출량 예측 방법

- 식(1)과 (2)의 주요 변수인 배출계수(EF)는 본 연구에서 앞서 구축한 건설현장 미세먼지 배출계수 DB 내 건설장비 별 건설활동에 따른 배출계수 값을 적용함.
- 작업률(A)은 각 건설장비 별 활동량(작업량, 이동량)을 나타내는데, 이는 일반적으로 건설프로젝트의 주요 설계도서인 공사 내역서를 도출하는 과정에서 투입자재의 수량을 결정하기 위하여 표준품셈을 근거로 산출할 수 있음.
- 다만, 소규모 공사의 경우 건설장비 별 활동량에 근거하여 내역 산출을 하지 않는 경우가 있으며, 이 경우 각 자재에 대한 산출근거를 확인할 수 없기 때문에 각 건설장비에 대한 가정된 활동 시나리오가 필요함.
- 본 연구에서는 그림2-5와 같이 내역서를 통해 건설장비 별 활동량을 정의할 수 있는 경우를 Case1로 정의하고 활동량을 정의할 수 없는 경우를 Case2로 정의하여 연구를 진행함.
- 본 연구에서는 실제 설계단계에서 계획된 건설장비 별 활동량을 정확하게 반영하기 위해 Case1을 기본 배출량 예측 방법으로 설정하였으며, 예외적으로만 Case2를 적용함.
- Case2를 위한 건설장비 별 활동 시나리오는 표준품셈에 정의된 각 장비 별 용도에 따라 정리할 수 있으며, 이에 따라 본 연구에서는 표2-16과 같이 Case2에서 장비 별 배출량을 산정하는 데에 보조적으로 활용할 수 있는 건설활동 시나리오를 도출함.

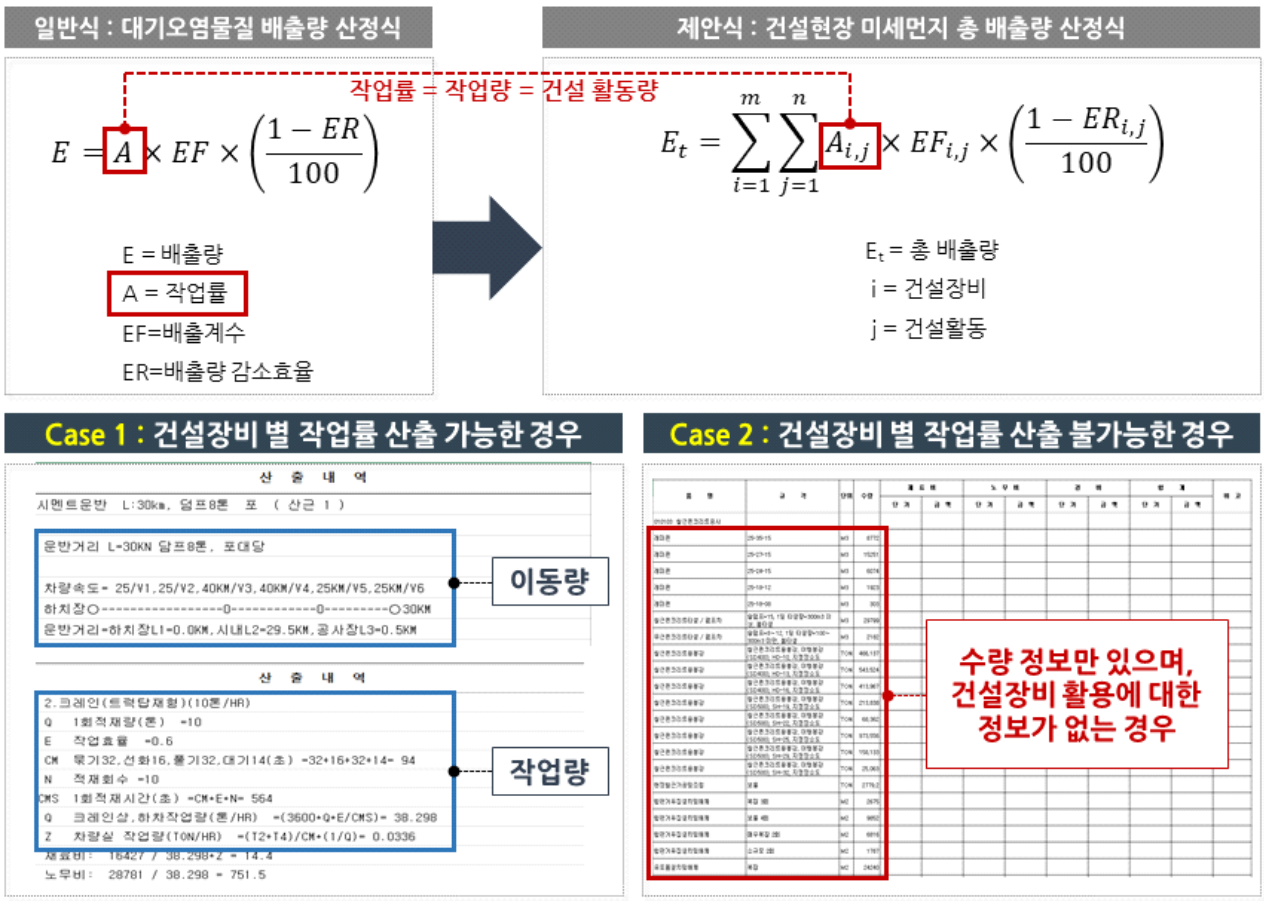


그림 2-5. 설계 도서를 통한 건설장비 별 활동량 산출 가능 여부에 따른 분류

표 2-16. 건설장비 별 건설활동 보조 시나리오

건설장비	시나리오	
불도저	■건설활동량 : 토공량 ■표토 불도징 작업 ■작업면적 = 건축면적 + 터파기 할증면적((0.3×구조물깊이)×건축면적둘레) ■작업깊이 = 20~30㎝	
로우더	■건설활동량 : 토공량 ■굴삭 작업 및 굴삭토 덤프트럭 싣기 작업	
지게차	■건설활동량 : 이동거리 ■현장 내 자재 운반에 따른 이동	
굴삭기	■건설활동량 : 토공량 ■굴삭 작업 및 굴삭토 덤프트럭 싣기 작업	
기중기	■건설활동량 : 이동거리 ■기중기 현장 내 이동	
콘크리트 펌프	■건설활동량 : 레미콘량 ■레미콘 투입량 타설 ■비산배출 활동 없음	
로울러	■건설활동량 : 토공량 ■대지면적 다짐 ■펴는 흙의 두께 = 30㎝	
공기압축기	■건설활동량 : 파일공 ■천공기 운행에 따른 직접배출 ■비산배출 활동 없음	
천공기	■건설활동량 : 파일공 ■파일 설치를 위한 지반 드릴 천공 작업	
덤프트럭	건축자재 운반	■건설활동량 : 이동거리 ■현장 주출입구에서 현장내 자재 운반 후 현장 주출입구로 퇴장
	외부 토사 운반	■건설활동량 : 이동거리 ■현장 주출입구에서 현장내 외부 토사 운반 후 현장 주출입구로 퇴장
	사토 운반	■건설활동량 : 이동거리 ■성토량이 절토량보다 적은 경우 주출입구에서 현장내 이동 후 사토를 현장중심에서 주출입구까지 운반
	(제외사항)	■주출입구에서 사토장 사이의 이동은 현장 외부 활동으로 미고려 ■사토장 토사 적재 및 하적은 현장 외부 활동으로 미고려
트레일러 (20ton)	■건설활동량 : 철근량, 철골량 등 자재량 ■현장 주출입구에서 현장내 자재 운반 후 현장 주출입구로 퇴장	
콘크리트 믹서트럭	■건설활동량 : 레미콘량 ■현장 주출입구에서 현장내 자재 운반 후 현장 주출입구로 퇴장	

3) 건설현장 미세먼지 배출계수 DB를 활용한 배출량 평가 기술 개발

❍ 건설현장 미세먼지 배출허용총량 기준 설정

- 사업장 대기오염물질 총량관리제도에서는 사업장 별로 배출허용총량을 할당하여 대기오염물질의 배출량을 관리하고 있으며, 여기서 제시하고 있는 배출량 할당 방법은 각 사업장에 매년 새로운 배출량 기준을 제시하는 데에 활용되고 있음.
- 건설현장 배출허용총량 기준 계산식
  - 건설현장의 경우 특정 제품을 특정 장소에서 지속적으로 생산하는 사업장에 해당되지 않기 때문에 사업장 대기오염물질 총량관리제도를 직접 적용하기 어려우나, 본 연구에서는 건설현장 자체를 하나의 사업장으로 가정하고 건설되는 단위 연면적을 생산되는 단위 제품으로 가정하여 식(3)과 같이 건설현장 미세먼지 연간 배출허용총량 기준 식을 도출함.

$$E_0 = C \times P \quad \text{여기서,} \quad C = \frac{E_{latest}}{a_{latest}}, \quad P = \frac{a}{y} \tag{3}$$

E_0 : 배출허용총량 (kg/yr)
C : 최근 연도 단위배출량 (kg/unit)
P : 평균 제품 생산량(unit/yr)
E_{latest} : 최근 연도 총배출량(kg/yr)
a_{latest} : 최근 연도 국내 총 건축허가연면적(㎡)
a : 건설현장 연면적(㎡)
y : 공기(yr)

- 최근 연도 단위배출량(C) 기준 산정
  - 식(3)의 E_{latest}와 a_{latest}를 산정하기 위해서는 국내 배출량 중 건설현장에 해당하는 배출량을 별도로 분류해야하며, 이를 위해, 본 연구에서는 2017년 대기오염물질 배출량 통계자료의 배출원 중 건설현장에 해당하는 배출원을 표2-17과 같이 분류함.

표 2-17. 건설현장 배출원 분류

건설현장 배출원 분류		
대분류	**중분류**	**소분류**
A. 비도로이동오염원	A-1. 건설장비	-
B. 도로이동오염원	B-1. 화물차	B-1-①. 덤프트럭
		B-1-②. 콘크리트믹서트럭
C. 비산먼지	C-1. 주거시설	-
	C-2. 비주거시설	-

  - 한국의 국토교통부의 건축허가면적 데이터를 분석한 결과 2017년도에 허가된 주거용 총 연면적은 70,254,000㎡, 비주거용 총 연면적은 101,618,000㎡으로 나타났으며, 이를 토대로 배출방법 및 배출물질 별 주거용 건축물의 단위배출량 및 비주거용 건축물의 단위배출량을 산정한 결과 표2-18과 같이 나타남.

- 최근 연도 총배출량(E_{latest}) : 환경부, 대기오염물질 배출량 통계자료, 2017

- 최근 연도 국내 총 건축허가연면적(a_{latest}): 국토교통부, 건축허가면적 통계, 2017

표 2-18. 최근 연도 단위배출량 기준 (2017년 데이터 기준)

단위 : kg/yr, kg/㎡-yr

배출 방법	배출원 분류	주거용 건축물					비주거용 건축물				
		PM10	PM2.5	NOx	SOx	VOCs	PM10	PM2.5	NOx	SOx	VOCs
직접배출 (kg/yr)	A-1	2.49E+06	2.29E+06	-	-		3.60E+06	3.31E+06	-	-	
	B-1-①	1.48E+05	1.36E+05	-	-		2.14E+05	1.97E+05	-	-	
	B-1-②	4.03E+04	3.71E+04	-	-		5.83E+04	5.36E+04	-	-	
비산배출 (kg/yr)	C-1	8.36E+06	8.36E+05	-	-		-	-	-	-	
	C-2	-	-	-	-		2.82E+07	2.82E+06	-	-	
2차 생성배출 전구물질 (kg/yr)	A-1	-	-	4.66E+07	2.91E+04	5.99E+06	-	-	6.74E+07	4.22E+04	8.66E+06
	B-1-①	-	-	4.94E+06	1.98E+03	2.21E+05	-	-	7.14E+06	2.86E+03	3.20E+05
	B-1-②	-	-	1.36E+06	5.57E+02	5.99E+04	-	-	1.97E+06	8.05E+02	8.66E+04
연간 총 배출량 (kg/yr)		1.10E+07	3.30E+06	5.29E+07	3.16E+04	6.27E+06	3.21E+07	6.38E+06	7.65E+07	4.59E+04	9.06E+06
단위배출량 (식(3)의 C) (kg/㎡-yr)		**1.57E-01**	**4.70E-02**	**7.53E-01**	**4.50E-04**	**8.92E-02**	**3.16E-01**	**6.28E-02**	**7.53E-01**	**4.51E-04**	**8.92E-02**

❍ 건설현장 미세먼지 배출량 예측 및 평가 모델

- 배출량 평가를 위한 프로세스는 그림 2-6과 같이 크게 배출량 예측 프로세스(Process#1)와 배출허용량총량 기준 프로세스(Process#2)로 나눌 수 있음.
- Process#1을 통해서는 배출계수 데이터베이스와 설계내역서 정보를 연계하여 건설현장에서 연간 발생할 것으로 예측되는 건설장비 별 배출량 및 총 배출량을 산출함.
- 이와 함께 Process#2를 통해서는 해당 건설현장에서 허용 가능한 연간 총 배출량을 산정하게 되는데, 궁극적으로 총 배출량이 배출허용총량 기준을 만족하는 현장의 경우 미세먼지 저감 가이드라인을 통해 배출량이 많은 것으로 예측된 건설장비 및 공정을 관리함.
- 최종적으로 총 배출량 평가를 만족하지 못하는 현장의 경우 공사계획 및 설계에 결과를 반영하여 능동적인 미세먼지 배출량 감축을 유도함.
- 다만, PM의 2차생성배출 전구물질인 NOx, SOx, 그리고 VOCs의 경우 확산을 통해 현장에서 장거리 이동하여 PM으로 변환되므로 현장 인근 지역의 PM 감축을 목표로 하는 경우 평가 대상에서 제외할 수 있음.

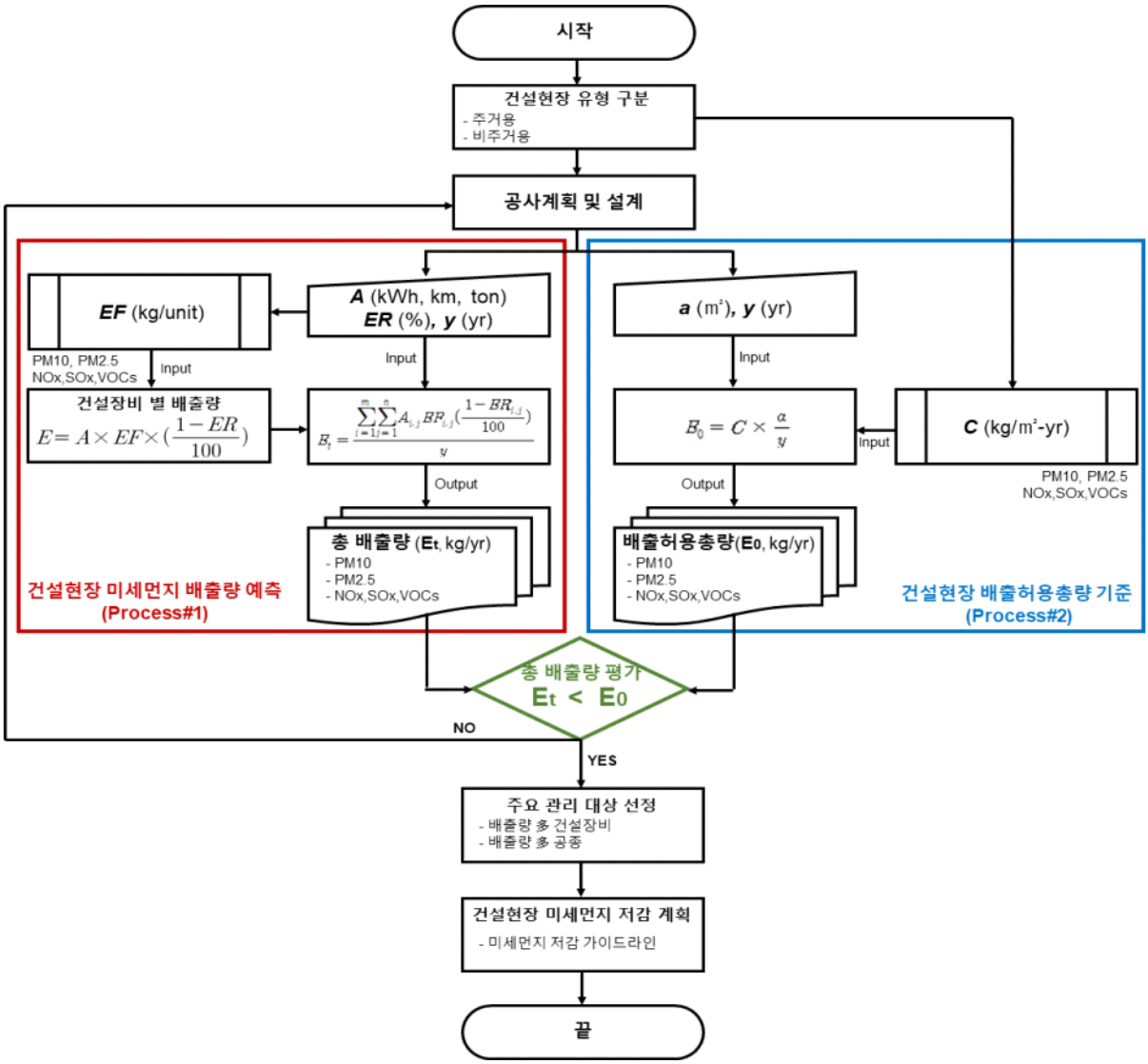


그림 2-6. 건설현장 미세먼지 배출량 예측 및 평가 알고리즘

❍ 건설현장 미세먼지 배출량 예측 및 평가 모델 검증

- 건설현장 미세먼지 배출량 평가 시스템 모델의 적절성을 검증하기 위하여 배출량 예측 프로세스(이하 Process #1)와 배출허용량 기준 프로세스(이하 Process #2)를 상호 비교하였으며, 이를 통해 배출계수 및 배출량 계산 방법의 적절성을 검토함. 또한, 사례평가를 통해 두 프로세스의 결과값을 비교하여 향후 개선사항을 도출함.
- Process #2에서는 국내 대기오염물질 통계자료를 토대로 기준을 설정하는데, 여기서 활용하는 건설장비 별 배출계수 및 배출량 계산 방법을 Process #1에서 활용하는 배출계수 및 배출량 계산 방법과 비교한 결과 직접배출과 2차생성배출은 동일한 계수 및 배출량 계산 방법을 사용하는 것으로 나타남. 하지만, 비산배출의 경우 Process #1에서는 각 장비 별 배출계수 및 배출량을 AP-42에 근거하여 산정하고 있는 반면, Process #2에서는 식(4) 및 표2-19의 배출계수를 통해 배출량을 산정하고 있음.

$$E = \sum A \times P \times EF \quad (4)$$

E : 건설공사 배출량 (kg/yr)

A : 연간 공사면적 (㎡)

P : 공사기간 (7개월/yr)

EF : 배출계수 (kg/㎡/월)

표 2-19. 국내 대기오염물질 통계용 비산배출계수 (식(4)의 EF)

내용					비고
분류		TSP	PM10	PM2.5	NIER, 대기오염물질 배출계수, 2015
주거시설	단독주택	0.0105	0.0072	0.00072	
	공동주택	0.036	0.0247	0.00247	
비주거시설		0.0621	0.0426	0.00426	
도로건설		0.1372	0.0941	0.00941	

- 이러한 배출계수는 US EPA와 MRI에서 개발한 건설공사 비산배출계수들 중 국내에 가장 적합한 계수를 선정하기 위한 국립환경과학원(NIER)의 “비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발” 연구를 통해 도출된 것이며, 가장 적합한 계수를 도출하기 위해 본 연구의 Process #1과 마찬가지로 AP-42를 활용하여 건설장비별 비산배출계수를 산정하였음.
- 하지만, NIER의 연구에서는 본 연구에 비하여 한정적인 건설장비 및 활동만을 고려하였으며, AP-42에 제시된 건설활동 별 PM10, PM2.5에 대한 Scaling factor를 활용하지 않고 일괄적인 PM2.5/PM10 분율을 적용하고 있다는 한계점이 있음.
- 이에 따라, 본 연구에서 도출한 Process #1이 Process #2에 비하여 더 정밀한 것으로 분석되며, 향후 Process #1의 비산배출 산출 방법과 통일된 건설현장 비산배출량 통계를 Process #2에 적용해야 될 것으로 사료됨.

- 본 연구의 Process #2에서 비산배출량 기준을 설정하는 데에 활용된 국내 대기오염물질 통계자료의 건설장비 별 비산배출계수 산정방법과 Process#1에서 설정된 비산배출계수 산정방법을 비교 검토한 결과 표2-20과 같음.

표 2-20. 건설현장 미세먼지 비산배출계수 검토

건설장비	건설활동	기존 연구(국립환경과학원, 2008)		본 연구		※참고
불도저	Bulldozing	PM10	$EF = 0.45\frac{s^{1.5}}{M^{1.4}}$	PM10	$EF = 0.75 \times 0.45\frac{s^{1.5}}{M^{1.4}}$	(a)
				PM2.5	$EF = 0.105 \times 2.6\frac{s^{1.2}}{M^{1.3}}$	
로우더	Loading	N/A		$EF = k(0.0016)\frac{(\frac{U}{2.2})^{1.3}}{(\frac{M}{2})^{1.4}}$		(b)
지게차	Travel	N/C		$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$		-
굴삭기	Dragline	$EF = \frac{0.0029h^{0.7}}{M^{0.3}}$		$EF = \frac{0.0029h^{0.7}}{M^{0.3}}$		-
	Loading	N/A		$EF = k(0.0016)\frac{(\frac{U}{2.2})^{1.3}}{(\frac{M}{2})^{1.4}}$		(b)
기중기	Travel	N/C		$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$		-
콘크리트 펌프	Pumping	N/A		N/A		(c)
로울러	Compacting	$EF = K(0.10)\frac{s}{1.5}\frac{d}{235}$		$EF = K(0.10)\frac{s}{1.5}\frac{d}{235}$		-
공기압축기	Compressing	N/A		N/A		(c)
천공기	Drilling	N/C		$EF = k \times 0.59$		-
덤프트럭, 트레일러	Travel	$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$		$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$		(b)
콘크리트 믹서트럭	Travel	N/C		$EF = 1.5(\frac{s}{12})^{0.9}(\frac{W}{3})^{0.45}\frac{365-p}{365} \times 0.2819$		-

비산배출계수 산정식 변수

EF : Emission factor (kg/unit)
s : Silt content (%)
M : Moisture content (%)
k : Scaling factors for PM10 or PM2.5 (Constant)
U : Mean wind speed (m/s)
h : Drop hight (m)
W : Mean weight (ton)
p : Number of days in a year with at least 0.254mm of precipitation (days)
K : Activity factor (Constant)

※참고

N/A : Not Available, N/C : Not Considered
(a) : 기존 연구에서는 AP-42에 제시된 Bulldozing의 PM15 배출계수를 PM10 배출계수로 적용하였으며, PM2.5/PM10 분율을 0.1로 일괄적으로 적용하여 PM2.5 배출량을 산정함. 반면, 본 연구에서는 AP-42의 Bulldozing 배출계수 산정방법을 활용함.
(b) : 기존 연구에서는 건설현장 전체 토공량에 대하여 AP-42의 aggregate storage piles 배출계수를 일괄적으로 적용하였으며, 본 연구에서는 건설장비 별로 따로 적용함.
(c) : 직접배출 및 2차생성배출은 이루어지나 비산배출은 이루어지지 않는 항목임.

- 추가적으로 사례평가를 수행한 결과 표2-21과 같이 비산배출의 경우 두 프로세스의 결과가 유사한 범위로 나타난 반면, 직접배출과 2차생성배출의 경우 두 프로세스 사이에 큰 결과 차이가 나타나는 것으로 분석됨.

표 2-21. 배출방법 별 미세먼지 배출량 사례평가 결과

사례평가 대상		
조감도	정보	
	용도	비주거용 건축물 (업무용 건축물)
	대지 위치	서울시 강서구 마곡동
	대지 면적	10,251.01 m^2
	연면적	17,226.47 m^2
	구조	RC 구조

단위 : kg/yr

사례평가 결과					
구분	PM2.5	PM10	NOx	SOx	VOCs
직접배출					
배출량	1.49E+00	1.62E+00	-	-	-
배출허용량 기준	6.04E+02	6.56E+02	-	-	-
2차생성배출					
배출량	-	-	7.53E+01	6.43E+01	7.19E+00
배출허용량 기준	-	-	1.30E+04	7.78E+00	1.54E+03
비산배출					
배출량	1.93E+02	1.89E+03	-	-	-
배출허용량 기준	2.41E+02	2.16E+03	-	-	-
종합결과					
배출량	1.94E+02	1.89E+03	7.78E+01	7.32E-01	7.28E+00
배출허용량 기준	8.44E+02	2.82E+03	1.30E+04	7.78E+00	1.54E+03

- 이러한 차이는 Process #1의 경우 사례평가의 대상인 건축공사현장에 한정하여 배출량을 산정한 반면, Process #2에 활용된 환경부 대기오염물질 배출량 통계자료의 경우 총 연간 장비 가동시간으로 배출량 통계값을 산정하는 데에서 비롯된 것임. 총 연간 장비 가동시간은 건축공사에 장비가 투입된 시간 외에 타 산업에도 투입된 시간을 모두 포함하고 있으며, Process #2에서는 이를 통해 산출된 국가의 총 배출량을 건축허가면적으로만 나누었기 때문에 Process #2의 직접배출량과 2차생성배출량 기준이 과도하게 산출된 것으로 분석됨.
- 이에 따라, 추후 연구에서는 건축공사에 한정된 연간 총 배출량 통계를 별도로 산출하여 Process #2의 기초자료로 활용해야할 것으로 사료됨.

(2) 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 작성

1) 건설현장 미세먼지 배출 공사유형 및 배출원

❍ 공사유형 분류

- 국내 비산먼지 관리 매뉴얼에서 건설업과 관련하여 주요 먼지 관리 대상 공정으로 설정하고 있는 건설행위는 싣기, 내리기, 야적, 절단, 연마, 채광·채취, 수송, 기타공정 등이 있음.
- 또한, 공사유형을 한국표준산업분류에 따라 건축물축조공사, 토목공사, 조경공사, 건축물해체공사, 토공사, 정지공사, 도장공사, 그리고 그 밖의 공사와 소규모 공사로 분류하고 있음.
- 이 중 그 밖의 공사 및 소규모 공사는 타 공사유형 중 해당되는 공사유형을 준용하므로 먼지 배출 공정에 따른 공사유형 분류표를 정리한 결과 표2-22와 같이 나타남.
- 특히, 해당 표를 분석한 결과 싣기, 내리기, 야적, 수송이 공통적으로 먼지를 다량 배출하는 공정인 것으로 분석되었으며, 이에 따라 필수 관리 대상으로 선정해야하는 것으로 사료됨.

표 2-22. 먼지 배출 공정에 따른 공사유형 분류

먼지 배출 공정		공사유형						
기본 분류	세분류	건축물 축조공사	토목공사	조경공사	건축물 해체공사	토공사	정지공사	도장공사
작업	싣기	■	■	■	■	■	■	-
	내리기	■	■	■	■	■	■	-
	야적	■	■	■	■	■	■	-
	절단	■	-	-	-	-	-	-
	연마	■	-	-	-	-	-	-
	채광·채취	-	■	-	-	-	-	-
	기타공정 (※참조)	■	■	-	■	■	■	■
이동	수송	■	■	■	■	■	■	-

※ 기타공정

■ 건축물축조공사
- 도장작업으로 주변 먼지 발생
- 바닥청소, 벽체연마, 도장공사 시 먼지 발생
- 건축구조물 해체 작업 시 먼지 발생 등

■ 토목공사
- 구조물 마감공사 시 분사방식에 의한 도장 및 표면 연마작업 시 먼지 발생 등

■ 건축물해체공사, 토공사 및 정지공사
- 기존 건축물 및 도로의 깨기 작업 시 먼지 발생 등

❍ 건축공사 공종별 미세먼지 배출원 분류

- 건축공사의 공종은 표준품셈을 기준으로 총 6개의 공통공종과 11개의 건축공종으로 구분되며, 본 연구에서는 각 공종 별 주요 미세먼지 배출원인 건설장비를 표2-23과 같이 분류함.

표 2-23. 건축공사 관련 공종 별 배출원 분류

공종		배출원
공통공종	가설공사	■ 지게차, 덤프트럭, 트레일러
	토공사	■ 불도저, 로우더, 굴삭기, 로울러, 덤프트럭
	조경공사	■ 굴삭기, 덤프트럭, 트레일러
	기초공사	■ 굴삭기, 기중기, 콘크리트 펌프, 공기압축기, 천공기, 덤프트럭, 트레일러, 콘크리트믹서트럭
	철근콘크리트공사	■ 지게차, 기중기, 콘크리트 펌프, 덤프트럭, 트레일러, 콘크리트믹서트럭
	돌공사	■ 덤프트럭
건축공종	철골공사	■ 기중기, 덤프트럭, 트레일러
	조적공사	■ 덤프트럭
	타일공사	■ 덤프트럭
	목공사	■ 지게차, 기중기, 덤프트럭, 트레일러
	수장공사	■ 지게차, 기중기, 덤프트럭, 트레일러
	방수공사	■ 덤프트럭
	지붕 및 홈통공사	■ 기중기, 덤프트럭, 트레일러
	금속공사	■ 기중기, 덤프트럭, 트레일러
	미장공사	■ 덤프트럭
	창호 및 유리공사	■ 지게차, 기중기, 덤프트럭, 트레일러
	칠공사	■ 덤프트럭

2) 건설현장 미세먼지 오염원 분류표 도출

❍ 공사유형 별 미세먼지 오염원 분류

- 본 연구에서는 공사유형 별로 주요 배출원을 분류하고 각각의 배출활동과 배출유형을 정의함으로써 건설현장에서 공사 시 공사유형에 따라 미세먼지 저감 관리를 효율적으로 수행할 수 있도록 표2-24와 같이 건설현장 미세먼지 오염원 분류표를 도출함.

표 2-24. 건설현장 미세먼지 오염원 분류표

공사유형		건설현장 미세먼지 배출원 분류									비고
유형	공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형			
			싣기	내리기	야적	수송(이동)	기타	직접배출	비산배출	2차생성배출	
토목공사 토공사 및 정지공사	토공사	■ 불도저	-	-	■	◧	◧	○	○	○	
		■ 로우더	■	■	■	◧	◧	○	○	○	
		■ 굴삭기	■	■	■	◧	◧	○	○	○	
		■ 로울러	-	-	-	■	■	○	○	○	
		■ 덤프트럭		■	■	■	-	○	○	○	
건축물축조공사	기초공사	■ 굴삭기	■	■	■	◧	◧	○	○	○	
		■ 기중기	◧	◧	-	■	◧	○	○	○	
		■ 콘크리트 펌프	-	-	-	-	■	○	-	○	
		■ 공기압축기	-	-	-	-	■	○	-	○	
		■ 천공기	-	-	-	-	■	○	-	○	
		■ 덤프트럭	-	■	■	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	-	-	■	-	○	○	○	
		■ 콘크리트믹서트럭	-	-	-	■	-	○	○	○	
	가설공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	-	-	■	-	○	○	○	
	철근콘크리트공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 콘크리트 펌프	-	-	-	-	◧	○	-	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 콘크리트믹서트럭	-		-	■	-	○	○	○	
	돌공사	■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
	철골공사	■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
	조적공사	■ 덤프트럭	-	◧	-	■	-	○	○	○	
	타일공사	■ 덤프트럭	-	◧	-	■	-	○	○	○	
	목공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
	수장공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
	방수공사	■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
	지붕 및 홈통공사	■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
	금속공사	■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
	미장공사	■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
	창호 및 유리공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	
	칠공사	■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○	
조경공사	조경공사	■ 굴삭기	■	■	■	◧	◧	○	○	○	
		■ 덤프트럭	-	■	■	■	-	○	○	○	
		■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○	

(3) 건설현장에서의 미세먼지 저감 관리 가이드라인 개발

1) 미세먼지 가이드라인 개발을 위한 기존문헌 고찰

❍ 미세먼지 발생 신고 대상사업

- 대기환경보전법 시행규칙에 따르면 건설업을 하려는 자는 미세먼지 발생신고서를 사업 시행 전에 특별자치장·특별자치도지사·시장·군수·구청장에게 제출하여야 하며, 세부항목은 표2-25와 같음.

표 2-25. 미세먼지 발생신고 대상사업

가. 건축물축조공사 (건축물의 증·개축 및 재축을 포함, 연면적 1,000제곱미터 이상인 공사만 해당함. 다만 굴정공사는 총연장 200미터 이상 또는 굴착토사량 200세제곱미터 이상인 공사만 해당함.)
나. 토목공사 (구조물의 용적 합계가 1,000세제곱미터 이상이거나 공사면적이 1,000제곱미터 이상 또는 총연장이 200미터 이상인 공사만 해당함.)
다. 조경공사 (면적의 합계가 5,000제곱미터 이상인 공사만 해당함.)
라. 지반조성공사 중 건축물해체공사 (연면적이 3,000제곱미터 이상인 공사만 해당하되, 농지정리를 위한 공사는 제외됨.)
마. 도장공사 (「공동주택관리법」에 따라 장기수선계획을 수립하는 공동주택에서 시행하는 건물 외부 도장공사만 해당함.)
바. 그 밖에 공사 (가목부터 라목까지의 공사에 준하는 공사로서 해당 가목부터 라목까지의 공사 규모 이상인 공사만 해당함.)

(대기환경보전법 시행규칙 [별표 13] 미세먼지 발생사업(제57조 관련))

❍ 미세먼지 저감 프로세스 및 법규

- 건설현장 품질환경 업무매뉴얼(2013,매경안전환경연구원)에 따르면 미세먼지 관련 주요업무는 그림 1과 같음. 현장이 개설되면 신고대상 유무를 판단해서 인허가 준비를 함. 대부분 현장은 신고기준 이상의 규모로 건설되고 있어 반드시 신고해야 함. 신고시저감계획을 수립·제출하게 되며, 엄격한 기준을 적용받는 특별대상 현장은 별도로 법에 제시된 기준에 맞도록 저감계획 수립 및 현장 관리를 실시해야 함. (한진건설기술집, 2015)

표 2-26. 법규 위반 행위별 벌칙

벌칙	세부위반사항	비고
■대기		대기환경보전법
100만원 이하의 과태료	- 미세먼지 발생사업 신고 및 변경신고 미이행 - 환경기술인의 준수사항을 이행하지 아니한 자	법43조1항 법40조2항
200만원 이하의 과태료	- 미세먼지의 발생 억제 시설의 설치 및 필요한 조치를 하지 아니하고 시멘트, 토사를 운송한 자	법43조1항
300만원 이하의 과태료	- 배출시설 등의 운영상황을 기록 · 보존하지 아니하거나 거짓으로 기록한 자 - 환경관리인을 임명하지 아니하거나 임명(바꾸어 임명한 것 포함)에 대한 신고를 하지 아니한 자	법31조2항 법40조1항
500만원 이하의 과태료	- 배출시설에 대해 오염물질을 측정하지 아니한 자 또는 측정결과를 거짓으로 기록하거나 기록 · 보존하지 아니한 자	법39조1항
300만원 이하의 벌금	- 미세먼지 발생사업 신고 미이행 - 미세먼지의 발생을 억제하기 위한 시설을 설치하지 아니하거나 필요한 조치를 하지 아니한 자 - 미세먼지의 발생을 억제하기 위한 시설의 설치나 조치의 이행 또는 개성명령을 이행하지 아니한 자	법43조1항 법43조1항 법43조1항
1년 이하의 징역 또는 1천만원 이하 의 벌금	- 배출시설의 가동개시신고를 하지 아니하고 조업한 자 - 사업중지, 시설의 사용중지, 사용제한 등의 명령에 위반한 자 - 관계공무원의 출입 · 검사를 거부, 방해 또는 기피한 자	법30조 법43조3항 법82조
5년 이하의 징역 또는 3천만원 이하 의 벌금	- 배출시설 신고를 하지 아니하거나 허위로 신고를 하고 배출시설을 설치 또는 변경하거나 그 시설을 이용하여 조업한 자 - 측적기기의 부착을 하지 아니한 자	법23조1항 법32조1항
7년 이하의 징역 또는 1억원 이하의 벌금	- 배출시설 허가 또는 변경허가를 받지 아니하거나 허위로 허가 또는 변경허가를 받아 배출시설을 설치 또는 변경하거나 그 배출시설을 이용하여 조업한 자 - 방지시설을 설치하지 아니하고 배출시설을 설치운영한 자 - 개선명령 미이행 또는 배출허용기준 초과로 인한 조업정지 명령을 위반하거나 조업시간 제한 조업정지 등의 명령을 이행하지 아니한 자 - 배출시설의 조업정지 또는 폐쇄명령을 위반한 자	법23조1항 법26조1항 법34조1항 법 36조

(건설 현장관리 업무 매뉴얼, 2016)

❍ 건설현장 미세먼지 발생 저감 방안 고찰

- 방진벽 및 방진망
  - 야적물질의 최고저장높이의 1/3 이상의 방진벽을 설치하고, 최고 저장 높이의 1.25배 이상의 방진망(막)을 설치하도록 되어있음. 다만, 건축물축조 및 토목공사장·조경공사장·건축물해체공사장의 공사장 경계에는 높이 1.8m(공사장 부지 경계선으로부터 50m 이내에 주거·상가 건물이 있는 곳의 경우에는 3m) 이상의 방진벽을 설치하되, 둘 이상의 공사장이 붙어 있는 경우는 공동경계면에는 방진벽을 설치하지 아니할 수 있음.
  - 방진벽 상단에 1.5m의 방진망 추가 설치하면 미세먼지 발생 추가억제 및 방음벽 주변의 미관을 향상시킬 수 있음. 또한 공사장 도로 경계에 2중 방진망을 설치하면 가옥밀집에 대한 미세먼지 영향을 최소화하고, 도로하량에 의한 먼지를 포함한 입자상 대기오염물질의 영향을 줄일 수 있음.



(a) 공사장 경계 1.8m이상 방진벽


(b) 미세분진 방지 천막


(c) 투명 방진벽

그림 2-7. 방진벽 및 방진망에 의한 미세먼지 저감 사례 [출처: 환경부 비산먼지 관리 매뉴얼]

- 방진덮개(복포)
  - 야적물질을 1일 이상 보관하는 경우 방진덮개로 덮고, 법면 보호나 야외 이송시설은 밀폐화하여 이송 중 먼지의 흩날림을 저감하도록 설치함. 용도, 설계조건, 시공환경 등을 고려하여 적절한 제품을 선정하고 햇빛이나 자외선을 방사하는 인공조명에 노출되지 않고 지면과 직접 닿지 않도록 하며 건조한 상태로 보관되도록 함. 방진덮개의 현장 봉합시 봉합사는 가급적 방진덮개의 구성 재질과 동일하게 함. 또한, 감독자의 승인을 얻어 봉합대신 일정길이 이상 단부를 겹치게 하는 방법으로 방진덮개를 연속적으로 설치 할 수 있음.

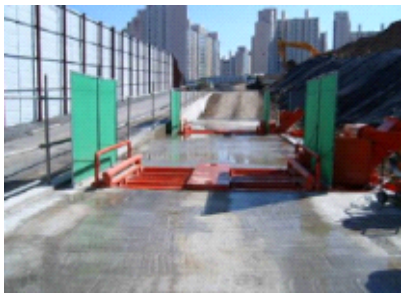

(a) 모래 및 토사 방진덮개


(b) 벽돌/폐타이어 고정 방진덮개


(c) 이동식 모래 보관소

그림 2-8. 방진덮개에 의한 미세먼지 저감 사례 [출처: 환경부 비산먼지 관리 매뉴얼]

- 세륜시설
  - 자동차의 바퀴에 묻은 먼지나 흙을 씻어내는 시설로 고압살수를 통한 자동식 세륜시설또는 수조식 세륜시설을 설치함. 자동식 세륜시설의 경우 매일 세륜시설 가동 전에 1일 출입차량 30대를 기준으로 침전제(황상반토, 고분자 응집제)를 투입하여 항시 세륜용수가 깨끗하도록 유지하고 대규모 건설현장의 경우 세륜시설을 2열 배치하여 대기시간을 최소화 할 수 있음. 수조식 세륜시설의 경우 수조의 세륜용수는 수송차량의 바퀴부분이 1/2정도 침수 될 수 있도록 항시 일정하게 유지해야 함.



(a) 자동식 세륜시설 2단설치



(b) 자동식+수조식 세륜시설 설치

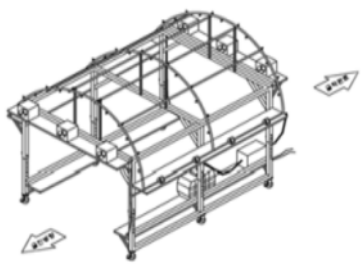


(c) 수조식 세륜시설 설치

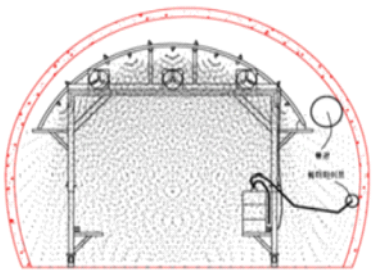
그림 2-9. 세륜장치에 의한 미세먼지 저감 사례

[출처: 환경부 비산먼지 관리 매뉴얼, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용 사례 비교 분석]

- 살수시설
  - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설(살수반경 5m 이상, 수압 3kg/㎠이상)을 설치·운영하여 작업하는 중 다시 흩날리지 않도록 함. 사업특성을 고려하여 이동식, 자동식 살수장치를 구분하여 설치해야 함. 야적물질 보관시설이 건설폐기물 임시 적환장 등 일 경우 고정식 살수장치를 설치하고 건설, 토목 현장의 경우 이동식 고압살수기를 주기적으로 살수함.
  - 적용 공법으로는 터널 내 분진 저감 살수시설인 Water Curtain 설치와 미국 EPA(40 CER Part 60)에서 입증된 최고 저감기술(Best Demonstrated Technology)인 Dry fog system설치가 있음.



(a) Water Curtain 설계도



(b) Water Curtain 설계도



(c) Water Curtain 설치 및 운영

그림 2-10. Water Curtain에 의한 미세먼지 저감 사례 [출처: 환경부 비산먼지 관리 매뉴얼]

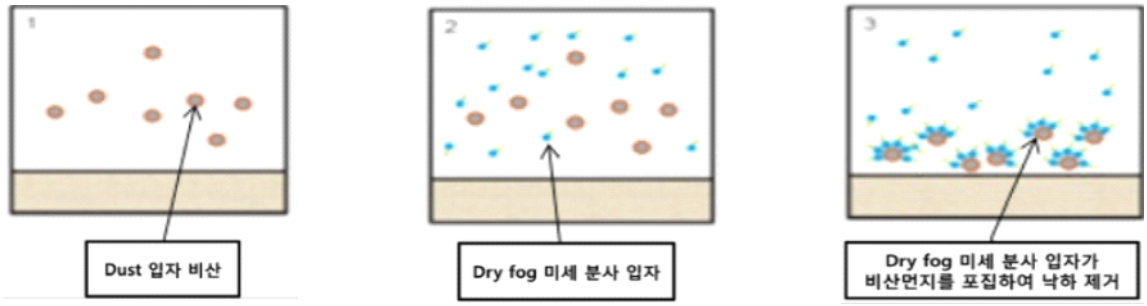


그림 2-11. Dry fog에 의한 미세먼지 저감 사례 [출처: 환경부 비산먼지 관리 매뉴얼]

- 살수차
  - 야적물질로 인해 미세먼지 발생억제를 위하여 물을 뿌리는 시설을 설치하도록 되어있음. (고철 야적장과 수용성물질, 사료 및 곡물 등의 경우는 제외함) 통행차량의 운행기간 중 공사장 안의 통행도로에는 1일 1회 이상 살수하고 공사장 안의 도로 뿐만 아니라 공사장에 인접한 도로에도 살수차를 운영하여 미세먼지를 저감함.



(a) 빗물 재활용 살수차



(b) 진입램프 포장 및 살수차운영

그림 2-12. 살수차에 의한 미세먼지 저감 [출처: 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용 사례 비교 분석]

- 풍속 측정
  - 풍속이 평균초속 8m 이상일 경우에는 작업을 중지해야 함. 사업장 내 풍속기를 설치하여 풍속을 측정하고 조치사항 등을 기록하는 관리일지를 작성함. 풍속계 설치 위치는 지면으로부터 1.5m 이상이어야 하며, 현장상황에 따라 미세먼지가 발생하는 지점에서 측정함.

표 2-27. 풍속별 작업범위

풍속(m/sec)	종 별	작 업 범 위
0 - 7	안전작업범위	전작업 실시
7 -10	주의경보	외부용적, 도장작업 중지
10 - 14	경고경보	건립작업 중지
14 이상	위험경고	고소작업자는 즉시 하강 안전대피

출처: 안전보건공단, “건설분야 one page 기술자료”



(a) 풍속계 설치



(b) 휴대용 풍속계

그림 2-13. 풍속측정에 의한 미세먼지 저감 사례 [출처: 환경부 비산먼지 관리 매뉴얼]

- 저속운행
  - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20㎞/hr 이하로 제한하고 비산먼지 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5㎝ 이하까지만 적재하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함.

표 2-28. 차량속도에 따른 미세먼지 감소효과

차량의 속도(㎞/hr)	감소효과(%)
48	25
32	65
24	80

출처: complication of air pollutant emission factors part, B.U.S EPA.
(감소효과는 차량속도64㎞/hr를 기준으로 한 수치임)

- 집진장치
  - 고철 등의 절단작업은 가급적 옥내에서 실시하고, 야외절단 시에는 미세먼지 저감을 위해 간이 칸막이 등을 설치하고 톱밥, 철가루 등이 흩날리지 않도록 미세먼지 발생 억제 효과가 높은 이동식 집진시설을 설치하여 작업함. 이동식 집진시설의 설치가 불가능한 경우에는 진공식 청소차량 등으로 현장에 대한 청소작업을 지속적으로 실시하여야 함.



(a) 옥내 가공장 및 이동식 집진기



(b) 진공식 청소차량 운영



(c) 연삭기에 진공청소기 부착

그림 2-14. 집진장치에 의한 미세먼지 저감시설 사례
[출처. 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용 사례 비교 분석, 환경부 비산먼지 관리매뉴얼]

• 건설현장 미세먼지 저감 관리 가이드라인 개발을 위한 저감 방안이 종합적으로 표2-29와 같이 도출됨.

표 2-29. 건설현장 미세먼지 발생 저감 방안

저감방안	기 준	참고문헌
방진벽 및 방진망	-야적물질의 최고저장높이의 1/3 이상의 방진벽을 설치 -최고 저장 높이의 1.25배 이상의 방진망(막)을 설치 -건축물축조·해체공사장는 공사장 경계에는 높이 1.8m 이상의 방진벽을 설치	(건설공사장 소음도 평가 및 예측기법 개발 연구, 대한주택공사 주택연구소, 1998) (환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017) (구자건, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용사례, 한국생태환경건축학회, 2009) (건설공사장 먼지저감대책,건설안전기술, 2018)
방진덮개 (복포)	-야적물질을 1일 이상 보관하는 경우 방진덮개로 덮을 것 -법면 보호나 야외 이송시설은 밀폐화할 것	(환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017) (구자건, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용사례, 한국생태환경건축학회, 2009)(한진건설기술집, 2015)
세륜시설	-자동식 세륜시설의 경우 세륜시설을 2열 배치하여 대기시간을 최소화 -수조식 세륜시설의 경우 수조의 세륜용수는 수송차량의 바퀴부분이 1/2정도 침수 될 수 있도록 항시 일정하게 유지	(환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017) (구자건, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용사례, 한국생태환경건축학회, 2009)
살수시설	-살수반경 5m 이상, 수압 3kg/㎠이상 -사업특성을 고려하여 이동식, 자동식 살수장치를 구분하여 설치 -Water Curtain과 Dry Fog System(DFS)공법으로 효율적인 미세먼지 발생 저감	(환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017) (구자건, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용사례, 한국생태환경건축학회, 2009) (한진건설기술집, 2015)
살수차	-통행차량의 운행기간 중 공사장 안의 통행도로에는 1일 1회 이상 살수 -공사장 안의 도로 뿐만 아니라 공사장에 인접한 도로에도 살수차 운영	(환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017) (구자건, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용사례, 한국생태환경건축학회, 2009) (건설공사장 먼지저감대책,건설안전기술, 2018)
풍속측정	-풍속이 평균초속 8m 이상일 경우에는 작업 중지 -사업장 내 풍속기를 설치하여 풍속을 측정하고 조치사항 등을 기록하는 관리일지를 작성 -풍속계 설치 위치는 지면으로부터 1.5m 이상	(비산먼지 미 건설폐기물 처리에 관한 기초 연구, 한국토지공사, 2005) (환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017)
저속운행	-차량운행 속도는 20km/hr 이하로 제한 -적재높이는 적재함 상단으로부터 5cm 이하 까지만 적재	(비산먼지 미 건설폐기물 처리에 관한 기초 연구, 한국토지공사, 2005)
집진장치	-고철 등의 절단작업은 옥내에서 실시 -야외절단 시에는 간이 칸막이 및 집진시설 설치 -이동식 집진시설의 설치가 불가능한 경우에는 진공식 청소차량 등으로 현장에 대한 청소작업을 지속적으로 실시	(환경부 미세먼지 관리 매뉴얼, 2017) (구자건, 건설사업장의 날림먼지 및 소음 저감기술 적용사례, 한국생태환경건축학회, 2009)

1) 건설현장 단계별 미세먼지 저감 관리 가이드라인

❍ 미세먼지 저감 체크리스트 개발

- 본 연구에서 수행한 건설현장 미세먼지 공사유형별 분석, 건설현장 미세먼지 실측결과, 건설현장 미세먼지 발생 저감 방안 분석과 기존문헌에 근거하여 공사유형 별 현장관리자의 사전 미세먼지 저감 관리 지원을 위한 체크리스트를 개발함.
- 단, 건축자재에 따른 미세먼지 영향 조사 결과 실제로 건설현장 내의 미세먼지는 선정된 건축자재의 종류에 영향을 받기 보다는 건설장비와 건설장비의 행위에 의한 영향이 큰 것으로 분석되어, 별도의 건축자재 선정리스트의 작성이 불필요함. 따라서, 최종적으로 아래와 같이 건설현장 미세먼지 저감 · 관리 체크리스트를 개발함.

건설현장 미세먼지 저감 · 관리 체크리스트

Rev : 2021.11

[토목공사 토공사 및 정지공사, 조경공사 미세먼지 저감 체크리스트]

공 사 명		공사유형	
체크날짜		체크시간	
확 인 자		담당부서	

구분	점 검 사 항	점 검 결 과			조 치 사 항
		준수	일부 준수	미 준수	
점검	비산먼지발생사업 신고 또는 변경신고를 이행하였는가?				
	비산먼지발생사업 신고 또는 변경신고 사항과 실제 시설이 일치하는가?				
	월 1회 이상 미세먼지 발생 점검을 하였는가?				
계측	미세먼지 계측장치를 설치하였는가?				
	풍속계를 설치하였는가?				
야적	야적장을 설치하였는가?				
	방진벽을 설치하였는가? (최고 저장높이의 1/3 이상)				
	방진망(막)을 설치하였는가? (최고 저장높이의 1.25배 이상)				
	1일 이상 보관하는 야적물질을 방진덮개로 덮어 보관하는가?				
	야외 이송시설은 밀폐화 하였는가?				
분무 시설	자동식 세륜시설을 설치하였는가?				
	수조를 이용한 세륜시설을 설치하였는가?				
	측면 살수시설을 설치하였는가? (수송차량 전체길이의 1.5배 이상의 살수길이)				
	1일1회 이상 살수차를 운영하는가?				
	살수시설을 설치·운영하는가? (살수반경 5m 이상, 수압 3kg/㎠이상)				

[건축물축조공사(일반) 미세먼지 저감 체크리스트]

공 사 명		공사유형	
체크날짜		체크시간	
확 인 자		담당부서	

구분	점 검 사 항	점 검 결 과			조 치 사 항
		준수	일부 준수	미 준수	
점검	월 1회 이상 미세먼지 발생 점검을 하였는가?				
계측	미세먼지 계측장치를 설치하였는가?				
	풍속계를 설치하였는가?				
야적	야적장을 설치하였는가?				
	방진벽을 설치하였는가? (최고 저장높이의 1/3 이상)				
	방진망(막)을 설치하였는가? (최고 저장높이의 1.25배 이상)				
	1일 이상 보관하는 야적물질을 방진덮개로 덮어 보관하는가?				
	야외 이송시설은 밀폐화 하였는가?				
분무 시설	자동식 세륜시설을 설치하였는가?				
	수조를 이용한 세륜시설을 설치하였는가?				
	측면 살수시설을 설치하였는가? (수송차량 전체길이의 1.5배 이상의 살수길이)				
	1일1회 이상 살수차를 운영하는가?				
	살수시설을 설치·운영하는가? (살수반경 5m 이상, 수압 3kg/㎠이상)				
집진 장치	야외 절단시 간이칸막이 또는 집진시설을 설치하였는가?				
	낙하, 출입구 및 국소배기부위에 적합한 집진시설을 설치하였는가?				
	집진시설의 설치가 불가능한 경우 청소작업을 지속적으로 실시하였는가?				
	야외 연마시 작업 부위 높이 이상의 이동식 방지막 또는 방진막을 설치하였는가?				
	야외 도장시 작업장 주변에 바닥보양을 실시하였는가?				

[건축물축조공사(실내마감) 미세먼지 저감 체크리스트]

공 사 명		공사유형	
체크날짜		체크시간	
확 인 자		담당부서	

구분	점 검 사 항	점 검 결 과			조 치 사 항
		준수	일부 준수	미 준수	
점검	월 1회 이상 미세먼지 발생 점검을 하였는가?				
계측	미세먼지 계측장치를 설치하였는가?				
	풍속계를 설치하였는가?				
야적	야적장을 설치하였는가?				
	방진벽을 설치하였는가? (최고 저장높이의 1/3 이상)				
	방진망(막)을 설치하였는가? (최고 저장높이의 1.25배 이상)				
	1일 이상 보관하는 야적물질을 방진덮개로 덮어 보관하는가?				
	야외 연마시 작업 부위 높이 이상의 이동식 방지막 또는 방진막을 설치하였는가?				
	야외 이송시설은 밀폐화 하였는가?				
분무 시설	측면 살수시설을 설치하였는가? (수송차량 전체길이의 1.5배 이상의 살수길이)				
	1일1회 이상 살수차를 운영하는가?				
	살수시설을 설치·운영하는가? (살수반경 5m 이상, 수압 3kg/㎠이상)				
집진 장치	야외 절단시 간이칸막이 또는 집진시설을 설치하였는가?				
	낙하, 출입구 및 국소배기부위에 적합한 집진시설을 설치하였는가?				
	집진시설의 설치가 불가능한 경우 청소작업을 지속적으로 실시하였는가?				

❍ 건설 단계별 미세먼지 저감 관리 가이드라인 개발

- 최종적으로 기 개발한 오염원 분류표를 토대로 각 공종/건설장비 별 미세먼지 저감 방안을 기술한 건설현장 미세먼지 저감 관리 가이드라인을 아래와 같이 개발하였으며, 이를 통해 실제 현장에서 배출량이 많을 것으로 예측된 공종 및 건설장비에 따라 현장관리자가 미세먼지 저감 관리를 수행함.
- 또한, 이를 통해 미세먼지 농도 모니터링 시 고농도 상황이 발생할 경우 현장관리자의 실시간 저감 대응을 지원함.

건설현장 미세먼지 저감·관리 가이드라인

Rev : 2021.11

1. 개 요

❍ 본 가이드라인은 환경 위해 요소인 건설현장 미세먼지를 저감하여 국민건강을 확보할 목적으로 건설현장 미세먼지 평가 및 저감·관리 방법을 제시하고 있다.

❍ 본 가이드라인은 건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 결과를 토대로 공종 및 건설장비 별 미세먼지 저감·관리 방법을 제공한다.

❍ 또한, 본 가이드라인은 건설현장 미세먼지 농도 모니터링 시 고농도 상황 발생에 대하여 현장관리자가 실시간으로 관리 할 수 있도록 저감 대응 방법을 제공한다.

❍ 본 가이드라인의 대상은 건설현장이며, 평가단계는 건축물의 전과정(Life Cycle) 4단계인 생산단계, 시공단계, 사용/유지관리단계, 해체/폐기단계 중 시공단계에 한정한다.

❍ 건설현장 미세먼지 배출량 평가 시 평가대상이 되는 배출유형은 직접배출과 비산배출이며, PM10과 PM2.5를 평가 대상 물질로 한다.

❍ 여기서 직접배출이라 함은 건설장비의 작업 및 이동 시 연료연소로 인하여 배기구를 통해 배출되는 미세먼지를 말하며, 비산배출이라 함은 건설장비의 작업 및 이동 시 물리적인 작용으로 발생하는 흙먼지를 의미한다.

2. 공종별 미세먼지 가이드라인

2-1. 토공사

2-1-1. 개요

○ 기초·지정 구축을 목적으로, 대상을 “흙”으로 한 대지조성에의 일련의 공사 총칭이며, 굴착, 되메우기, 절토·성토 부대공, 비탈면 보호공, 보강토 옹벽, 벌개제근, 개간, 유지보수 등을 포함한다.

2-1-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
토공사	▪불도저	-	-	■	◧	◧	○	○	○
	▪로우더	■	■	■	◧	◧	○	○	○
	▪굴삭기	■	■	■	◧	◧	○	○	○
	▪로울러	-	-	-	■	■	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	■	■	-	○	○	○

2-1-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명		불도저 (Bulldozer)
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 ■ 야적 ◧ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	■ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	구조물 터파기 작업 굴삭 및 압토 작업 집토 작업 (굴삭 보조)
미세먼지 저감방안		■ 야적 - 토사 송토 및 야적 작업 시, 비산먼지 포집 장치 등을 설치하여 확산을 억제한다. 야적물질은 최대한 밀폐된 시설에 저장 또는 보관하며, 보관 및 저장시설은 가능하면 3면이 막히고 지붕이 있는 구조가 되도록 함 - 야적물질의 최고저장높이의 1/3 이상의 방진벽을 설치하고, 최고 저장 높이의 1.25배 이상의 방진망(막)을 설치함 ◧ 수송 - 수송 및 작업차량 출입문을 설치함 - 먼지가 흩날리지 아니하도록 공사장안의 통행차량은 시속 20㎞ 이하로 운행함 ◧ 기타 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함

건설장비명	로우더 (Loader)	
건설활동	작업 분류	■ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ◧ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	■ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 트럭으로 적재 건설자재 운반
미세먼지 저감방안	■ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 야적 작업 후, 방진 덮개를 덮어 흙먼지 날림을 방지하며, 야적물질을 최대한 밀폐된 시설에 저장 또는 보관함. ◧ 수송 - 수송 및 작업차량 출입문을 설치함. - 먼지가 흩날리지 아니하도록 공사장안의 통행차량은 시속 20㎞ 이하로 운행함. ◧ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴 - 장비에 배출가스 저감장치(DPF)를 설치하여 엔진으로부터의 직접배출을 최소화함.	

건설장비명	굴삭기 (Excavator)	
건설활동	작업 분류	■ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ◧ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	■ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	굴착 작업 토사 적재 및 야적 작업
미세먼지 저감방안	■ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 적재 및 야적 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화하며, 작업 후, 방진 덮개를 덮어 흙먼지 날림을 방지함 ◧ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 ◧ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴	

건설장비명	로울러 (Roller)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 ■ 수송 ■ 기타
	공사 분류	■ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	지형 평탄화 작업 도로포장 작업
미세먼지 저감방안	■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 후, 바퀴 주변으로 살수 작업을 실시하여 미세먼지 확산을 억제함 ■ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴 - 장비에 배출가스 저감장치(DPF)를 설치하여 엔진으로부터의 직접배출을 최소화함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	■ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 적재 및 야적 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화하며, 작업 후, 방진 덮개를 덮어 흙먼지 날림을 방지함 ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

2-2. 기초공사

2-2-1. 개요

○ 구조물을 지탱할 수 있도록 지면을 단단히 하는 공사를 말하며, 흙막이 및 물막이, 연약지반 처리, 말뚝, 차수 등을 포함한다.

2-2-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
기초공사	▪ 굴삭기	■	■	■	◧	◧	○	○	○
	▪ 기중기	◧	◧	-	■	◧	○	○	○
	▪ 콘크리트 펌프	-	-	-	-	■	○	-	○
	▪ 공기압축기	-	-	-	-	■	○	-	○
	▪ 천공기	-	-	-	-	■	○	-	○
	▪ 덤프트럭	-	■	■	■	-	○	○	○
	▪ 트레일러	-	-	-	■	-	○	○	○
	▪ 콘크리트믹서트럭	-	-	-	■	-	○	○	○

2-2-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	굴삭기 (Excavator)	
건설활동	작업 분류	■ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ◧ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	굴착작업 토사 적재 및 야적 작업
미세먼지 저감방안	■ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 적재 및 야적 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화하며, 작업 후, 방진 덮개를 덮어 흙먼지 날림을 방지함 ◧ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 ◧ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴	

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함 ◧ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴 - 장비에 배출가스 저감장치(DPF)를 설치하여 엔진으로부터의 직접배출을 최소화함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 적재 작업 시, 비산먼지 포집 장치 등을 설치하여 확산을 억제하고, 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

건설장비명	콘크리트 펌프 (Concrete Pump)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 □ 수송 ■ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 □ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	콘크리트 타설 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴 - 장비에 배출가스 저감장치(DPF)를 설치하여 엔진으로부터의 직접배출을 최소화 함	

건설장비명	공기압축기 (Air Compressor)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 □ 수송 ■ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 □ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	채석, 점토굴착 및 파괴작업 타이어 공기주입 및 장비세척 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 기타 - 고철 등의 절단작업은 가급적 옥내에서 실시하고, 야외절단 시에는 미세먼지 저감을 위해 간이 칸막이 등을 설치하고 톱밥, 철가루 등이 흩날리지 않도록 미세먼지 발생 억제 효과가 높은 이동식 집진시설을 설치하여 작업함. 이동식 집진시설의 설치가 불가능한 경우에는 진공식 청소차량 등으로 현장에 대한 청소작업을 지속적으로 실시하여야 함.	

건설장비명	천공기 (Drilling Equipment)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 □ 수송 ■ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 □ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	천공 및 착암 작업
미세먼지 저감방안	■ 기타 - 풍속이 평균초속 8㎧ 이상일 경우에는 작업을 중지하여야 함. 사업장 내 풍속기를 설치하여 풍속을 측정하고 조치사항 등을 기록하는 관리일지를 작성함. - 풍속계 설치 위치는 지면으로부터 1.5m 이상이어야 하며, 현장상황에 따라 미세먼지가 발생하는 지점에서 측정함.	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

건설장비명	콘크리트 믹서트럭 (Concrete Mixer Truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	콘크리트 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

2-3. 가설공사

2-3-1. 개요

○ 공사 완성을 목적으로 공사기간 중 일시적으로 설비한 제반 시설 및 수단의 총칭으로, 가설건축물, 가설울타리 및 가설방음벽, 규준틀, 동바리, 비계, 방호시설, 현장관리 등을 포함한다.

2-3-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
가설공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	■ 트레일러	-	-	-	■	-	○	○	○

2-3-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	지게차 (Fork Lift Trucks)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 적재 및 적하 작업 자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설(살수반경 5m 이상, 수압 3kg/㎠이상)을 설치·운영하여 작업하는 중 다시 흩날리지 않도록 함. 사업특성을 고려하여 이동식, 자동식 살수장치를 구분하여 설치해야 함. 야적물질 보관시설이 건설폐기물 임시 적환장 등 일 경우 고정식 살수장치를 설치하고 건설, 토목 현장의 경우 이동식 고압살수기를 주기적으로 살수함. ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20km/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5cm 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함.	

2-4. 철근콘크리트공사

2-4-1. 개요

○ 철근 콘크리트 구조물의 시공에 있어서의 거푸집 공사, 철근공사 및 콘크리트 공사의 총칭으로, 거푸집, 포스트텐션 구조물, 교량 가설공, 교량 부대공, 조립식 구조물 설치공, 유지보수 등을 포함한다.

2-4-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
철근 콘크리트 공사	■ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	■ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	■ 콘크리트 펌프	-	-	-	-	◧	○	-	○
	■ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	■ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○
	■ 콘크리트믹서트럭	-		-	■	-	○	○	○

2-4-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	지게차 (Fork Lift Trucks)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 적재 및 적하 작업 자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/㎠이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 자동차의 바퀴에 묻은 먼지나 흙을 씻어내는 시설로 고압살수를 통한 자동식 세륜시설또는 수조식 세륜시설을 설치함. 자동식 세륜시설의 경우 매일 세륜시설 가동 전에 1일 출입차량 30대를 기준으로 침전제(황상반토, 고분자 응집제)를 투입하여 항시 세륜용수가 깨끗하도록 유지하고 대규모 건설현장의 경우 세륜시설을 2열 배치하여 대기시간을 최소화 할 수 있음. 수조식 세륜시설의 경우 수조의 세륜용수는 수송차량의 바퀴부분이 1/2정도 침수 될 수 있도록 항시 일정하게 유지해야 함.	

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	콘크리트 펌프 (Concrete Pump)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 □ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 □ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	콘크리트 타설 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴 - 장비에 배출가스 저감장치(DPF)를 설치하여 엔진으로부터의 직접배출을 최소화함	

건설장비명	콘크리트 믹서트럭 (Concrete Mixer Truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 □ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	콘크리트 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴 - 장비에 배출가스 저감장치(DPF)를 설치하여 엔진으로부터의 직접배출을 최소화함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

2-5. 돌공사

2-5-1. 개요

○ 석재의 가공 ·설치 ·포장 등에 관한 공사의 총칭으로, 돌붙임, 전석쌓기 및 깔기, 석재판 붙임 등을 포함한다.

2-5-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
돌공사	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○

2-5-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 및 야적 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함	

2-6. 철골공사

2-6-1. 개요

○ 철골구조물(강구조물)을 만들기 위한 공사의 총칭으로 철골부재의 제작, 조립, 설치에 관한 공사를 말하며, 철골 세우기, 데크플레이트, 부대공사 등을 포함한다.

2-6-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
철골공사	▪기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	▪트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-6-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함 - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20km/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5cm 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함.	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

2-7. 조적공사

2-7-1. 개요

○ 개체의 재료를 시멘트 모르타르와 같은 교착재를 사용해 적층 형성하는 공사로, 돌공사 · 벽돌공사만 아니라 콘크리트블록이나 속빈콘크리트블록공사, 제자리붓기 콘크리트 등을 포함한다.

2-7-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
조적공사	▪덤프트럭	-	◧	-	■	-	○	○	○

2-7-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	◧ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

2-8. 타일공사

2-8-1. 개요

❍ 판상형의 타일제품을 건축물의 미적감각을 요하는 부위에 붙이는 공사로, 점토, 고령토를 주된 원료로 하여 제조된 도자기 타일, 시멘트 타일, 비닐 타일, 아스팔트 타일 등을 포함한다.

2-8-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
타일공사	▪덤프트럭	-	◧	-	■	-	○	○	○

2-8-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	◧ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/㎠이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

2-9. 목공사

2-9-1. 개요

❍ 목재를 이용하여 가공, 조립, 설치 등에 관한 공사의 총칭으로, 구조목공사, 수장목공사, 부대목공사 등을 포함한다.

2-9-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
목공사	▪지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	▪트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-9-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	지게차 (Fork Lift Trucks)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 적재 및 적하 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	**작업 분류**	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함 - 자동차의 바퀴에 묻은 먼지나 흙을 씻어내는 시설로 고압살수를 통한 자동식 세륜시설또는 수조식 세륜시설을 설치함. 자동식 세륜시설의 경우 매일 세륜시설 가동 전에 1일 출입차량 30대를 기준으로 침전제(황상반토, 고분자 응집제)를 투입하여 항시 세륜용수가 깨끗하도록 유지하고 대규모 건설현장의 경우 세륜시설을 2열 배치하여 대기시간을 최소화 할 수 있음. 수조식 세륜시설의 경우 수조의 세륜용수는 수송차량의 바퀴부분이 1/2정도 침수 될 수 있도록 항시 일정하게 유지해야 함.	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	**작업 분류**	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

2-10. 수장공사

2-10-1. 개요

○ 건축물 내부의 치장을 하는 마무리에 관한 공사로, 바닥공사, 벽 및 천장공사, 단열공사 등을 포함한다.

2-10-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
수장공사	▪ 지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪ 기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪ 덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	▪ 트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-10-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	지게차 (Fork Lift Trucks)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 적재 및 적하 작업 자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화하고, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화하고, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함 - 야적물질로 인해 미세먼지 발생억제를 위하여 물을 뿌리는 시설을 설치하도록 되어있음.(고철 야적장과 수용성물질, 사료 및 곡물 등의 경우는 제외함) 통행차량의 운행기간 중 공사장 안의 통행도로에는 1일 1회 이상 살수하고 공사장 안의 도로 뿐만 아니라 공사장에 인접한 도로에도 살수차를 운영하여 미세먼지를 저감함.	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함 - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20㎞/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5㎝ 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함.	

2-11. 방수공사

2-11-1. 개요

○ 건물의 지붕, 바닥, 지하실, 수조 등에 방수층을 설치하여 물이 스며들거나 새는 것을 막기 위하여 하는 공사로, 공통공사, 도막방수, 시트 방수, 시멘트 모르타르계 방수, 기타방수, 부대공사 등을 포함한다.

2-11-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
방수공사	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○

2-11-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

2-12. 지붕 및 홈통공사

2-12-1. 개요

○ 건물의 최상부에 설치하는 덮개 또는 구조물인 지붕에 관한 공사의 총칭으로, 지붕공사, 홈통공사, 드레인공사 등을 포함한다.

2-12-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
지붕 및 홈통공사	▪기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	▪트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-12-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화하고, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

2-13. 금속공사

2-13-1. 개요

○ 금속류를 다루는 공사 중 철골, 철근, 판금, 창호, 설비 공사를 제외하는 것의 총칭으로, 보호물, 난간, 경량천장, 부대공사 등을 포함한다.

2-13-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
금속공사	▪기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	▪트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-13-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함 - 풍속이 평균초속 8m 이상일 경우에는 작업을 중지하여야 함. 사업장 내 풍속기를 설치하여 풍속을 측정하고 조치사항 등을 기록하는 관리일지를 작성함. 풍속계 설치 위치는 지면으로부터 1.5m 이상이어야 하며, 현장상황에 따라 미세먼지가 발생하는 지점에서 측정함. - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20km/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5cm 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함.	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함	

건설장비명	트레일러 (Trailer)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20㎞/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5㎝ 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함	

2-14. 미장공사

2-14-1. 개요

○ 벽 · 반자 · 바닥 등에 진흙 · 회반죽 · 모르타르 등을 바르는 공사로, 모르타르 바름 및 타설, 콘크리트면 마무리, 충전 등을 포함한다.

2-14-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
미장공사	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○

2-14-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함	

2-15. 창호 및 유리공사

2-15-1. 개요

○ 창과 문의 제작 및 (창문틀에) 달기에 관한 공사, 건축에 유리 끼우기 등의 공사에 관한 총칭으로, 창호, 부속자재, 유리, 커튼월 등을 포함한다.

2-15-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
창호 및 유리공사	▪지게차	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪기중기	◧	◧	-	■	-	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○
	▪트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-15-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	지게차 (Fork Lift Trucks)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	자재 적재 및 적하 작업 자재 수송 작업 장비 내 연료 연소로 인한 직접배출
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 - 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20㎞/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5㎝ 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함.	

건설장비명	기중기 (Crane)	
건설활동	작업 분류	◧ 싣기 ◧ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	장비 내 연료 연소로 인한 직접배출 ※단, 이동형(타이어, 무한궤도, 트럭탑재) 크레인에 한함
미세먼지 저감방안	◧ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리함	

<table>
<tr><td>건설장비명</td><td colspan="2">덤프트럭 (Dump truck)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">건설활동</td><td>작업 분류</td><td>□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타</td></tr>
<tr><td>공사 분류</td><td>□ 토목공사
토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사</td></tr>
<tr><td>배출 유형 분류</td><td>■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출</td></tr>
<tr><td>주요 미세먼지 발생 활동</td><td>토사 적재 및 야적 작업
자재 수송 작업</td></tr>
<tr><td>미세먼지 저감방안</td><td colspan="2">■ 내리기
- 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림.
- 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함.
- 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7㎙이상, 수압 5kg/㎠이상)
■ 수송
- 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함
- 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함
- 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>건설장비명</td><td colspan="2">트레일러 (Trailer)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">건설활동</td><td>작업 분류</td><td>□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타</td></tr>
<tr><td>공사 분류</td><td>□ 토목공사
토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사</td></tr>
<tr><td>배출 유형 분류</td><td>■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출</td></tr>
<tr><td>주요 미세먼지 발생 활동</td><td>자재 수송 작업
장비 내 연료 연소로 인한 직접배출</td></tr>
<tr><td>미세먼지 저감방안</td><td colspan="2">■ 내리기
- 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림.
- 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7㎙이상, 수압 5kg/㎠이상)
■ 수송
- 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함
- 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함
- 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20㎞/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5㎝ 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함</td></tr>
</table>

2-16. 칠공사

2-16-1. 개요

○ 칠바탕을 만들고 도료를 칠하는 공사로, 공통공사, 페인트, 스프레이 등을 포함한다.

2-16-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
칠공사	▪덤프트럭	-	■	-	■	-	○	○	○

2-16-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 ■ 건축물축조공사 □ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 - 통행차량의 운행기간 중 공사장 안의 통행도로에는 1일 1회 이상 살수하고 공사장 안의 도로 뿐만 아니라 공사장에 인접한 도로에도 살수차를 운영하여 미세먼지를 저감함	

2-17. 조경공사

2-17-1. 개요

○ 식물재료, 토목재료, 물 또는 조형물을 이용하여 인공적으로 자연·산수의 아름다운 경치가 나도록 정원·공원 등을 꾸미는 공사로, 잔디 및 초화류, 관목, 교목, 조경구조물, 유지보수 등을 포함한다.

2-17-2. 공종별 주요 미세먼지 배출원

공종	주요 배출원	배출활동 (■: 상관성 높음, ◧: 상관성 낮음)					배출유형		
		싣기	내리기	야적	수송 (이동)	기타	직접배출	비산배출	2차 생성배출
조경공사	▪굴삭기	■	■	■	◧	◧	○	○	○
	▪덤프트럭	-	■	■	■	-	○	○	○
	▪트레일러	-	■	-	■	-	○	○	○

2-17-3. 건설장비 미세먼지 관리 가이드라인

건설장비명	굴삭기 (Excavator)	
건설활동	작업 분류	■ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ◧ 수송 ◧ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 ■ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	굴착작업 토사 적재 및 야적 작업
미세먼지 저감방안	■ 싣기 및 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림 - 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함 - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함 (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 적재 및 야적 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화하며, 작업 후, 방진 덮개를 덮어 흙먼지 날림을 방지함 ◧ 수송 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함 - 굴삭 작업 전, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함 ◧ 기타 - 작업대기 중인 장비의 경우 엔진 가동을 정지시킴	

건설장비명	덤프트럭 (Dump truck)	
건설활동	작업 분류	□ 싣기 ■ 내리기 ■ 야적 ■ 수송 □ 기타
	공사 분류	□ 토목공사 토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 ■ 조경공사
	배출 유형 분류	■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출
	주요 미세먼지 발생 활동	토사 적재 및 야적 작업 자재 수송 작업
미세먼지 저감방안	■ 내리기 - 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림. - 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7m이상, 수압 5kg/cm2이상) ■ 야적 - 토사 적재 및 야적 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화하며, 작업 후, 방진 덮개를 덮어 흙먼지 날림을 방지함 ■ 수송 - 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함 - 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 굴삭 및 압토 작업 시, 분진흡입청소차 등을 함께 운용하여 미세먼지의 확산을 억제함	

<table>
<tr><td>건설장비명</td><td colspan="2">트레일러 (Trailer)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">건설활동</td><td>작업 분류</td><td>□ 싣기 ■ 내리기 □ 야적 ■ 수송 □ 기타</td></tr>
<tr><td>공사 분류</td><td>□ 토목공사
토공사 및 정지공사 □ 건축물축조공사 ■ 조경공사</td></tr>
<tr><td>배출 유형 분류</td><td>■ 직접배출 ■ 비산배출 ■ 2차생성배출</td></tr>
<tr><td>주요 미세먼지 발생 활동</td><td>자재 수송 작업
장비 내 연료 연소로 인한 직접배출</td></tr>
<tr><td>미세먼지 저감방안</td><td colspan="2">■ 내리기
- 최대한 밀폐된 저장 또는 보관시설 내에서만 자재를 싣거나 내림.
- 토사 적재 작업 시, 살수 장비를 사용하여 미세먼지 확산을 최소화함.
- 싣거나 내리는 장소 주위에 고정식 또는 이동식 물을 뿌리는 시설을 설치함. (물뿌림 반경 7㎜이상, 수압 5kg/㎠이상)
■ 수송
- 장비 운용 시, 이동 경로를 최적화하여 비산먼지 배출을 최소화함
- 장비 운용 시, 가급적 포장도로를 이용하고 비포장도로를 이용할 경우 살수 처리하고, 표토에 미리 살수 작업을 실시하여 작업 중 미세먼지 발생을 최소화함
- 통행차량의 운행기간 중 공사장 안의 통행도로에는 1일 1회 이상 살수하고 공사장 안의 도로 뿐만 아니라 공사장에 인접한 도로에도 살수차를 운영하여 미세먼지를 저감함
- 차량속도의 규제 없이 차량을 운행할 경우 적재물이 흩날릴 수 있으므로 작업장 내에서의 차량운행 속도는 20㎞/hr 이하로 제한하고 비산먼지의 발생을 적극 방지하기 위하여 적재높이는 적재함 상단으로부터 5㎝ 이하 까지만 적재토록하며 적재함은 반드시 덮개로 덮어야 함</td></tr>
</table>

3. 센서 설치 가이드라인

❍ 건설현장에서 효과적인 모니터링을 위해 네트워크를 구성할 때 계측기 노드의 설치 지점을 선정하고 세부적으로 각 지점 별 설치위치에 대한 기준이 정해져야 함.

❍ 본 연구에서는 환경부의 대기오염측정망 설치 · 운영지침의 도시대기측정망 측정소 위치 선정 기준을 준용하여 노드 설치 지점 별 권장 설치 위치 기준을 도출하였으며, 이를 통해 현장 네트워크 구성을 지원하고 필요에 따라 계측기 이동 시 신규 설치 위치를 지정하는 데에 보조 가능한 가이드라인을 개발함.

계측 지점	세부 설치 위치 (권장)
주출입구	■ 건설현장 경계 및 주출입로 경계로부터 1.5m 이상 이격하여 지면으로부터 1.5m 높이에 시료채취구 설치 ■ 주출입로 방향의 양측에 동일한 이격 거리로 시료채취구 설치
건설현장 경계	■ 현장 휀스로부터 1.5m 이상 이격하여 지면으로부터 1.5m 높이에 시료 채취구 설치 ■ 현장 경계에 설치되는 계측기 사이의 간격은 무선 네트워크 통신거리를 고려하여 정하되, 가급적 동일한 간격으로 설치
현장사무소	■ 현장사무소 외벽 및 출입구 경계로부터 1.5m 이상 이격하여 지면으로부터 1.5m 높이에 시료채취구 설치
	■ 현장사무소 실내 계측이 필요한 경우 실내 동선을 고려하여 작업자 이동으로 인한 계측 장해가 없는 위치에 바닥면으로부터 1.5m 높이로 시료채취구 설치
주요 배출원 (건설장비)	■ 주요 미세먼지 배출원(건설장비)의 미세먼지 농도 특별관리가 필요한 경우 해당 배출원에서 배출행위가 이루어지는 방향으로 약 1.5m 높이에 시료채취구 부착 설치 ■ 다만, 설치 높이 확보가 어려운 경우 배출행위가 이루어지는 방향으로 먼지의 확산 높이를 고려하여 설치
기타	■ 건설현장에 인접한 건물을 대상으로 농도 모니터링을 실시하는 경우 무선 네트워크 통신거리를 고려하여 해당 건물을 대표할 수 있는 높이에 시료채취구 설치

2세부	
PMM	IoT 기반 건설현장 미세먼지 계측 기술 개발

연구 목표	건설현장 미세먼지 모니터링을 위해 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 계측이 가능한 IoT 기반 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발 연구를 수행함.
연구 내용	① PM_{10}, $PM_{2.5}$ 미세먼지 모니터링 계측 모듈 개발 ② IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발 ③ 미세먼지 측정 사업영역 중장기 활성화 체계

연구 프로세스

1차년				2차년				3차년			
1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기
–	① PM_{10}, $PM_{2.5}$ 미세먼지 모니터링 계측 모듈 개발										
				② IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발							
						③ 미세먼지 측정 사업영역 중장기 활성화 체계					

개발 성과		
	①	건설현장 미세먼지 모니터링 계측기 센서 모듈
	②	IoT 기반 건설현장 특화형 미세먼지 모니터링 시스템 대표성과
	③	건설현장 미세먼지 모니터링 사업 활성화 전략

수행 방법

연차	주요 연구활동	관련 성과 ①	②	③
1차 년도 (2019)	■ 미세먼지 측정 계측 평가 방법 분석	■	■	
	■ 미세먼지 발생원 계측 모듈 개발	■	■	
2차 년도 (2020)	■ IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 개발		■	
	■ 사업화를 위한 시장여건 분석 및 사업화전략 수립		■	■
3차 년도 (2021)	■ IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기 현장적용 검증	■	■	
	■ 사업화를 위한 시장여건 분석 및 사업화전략 수립		■	■

(1) 건설현장 미세먼지 모니터링 계측기 센서 모듈 개발

1) 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 개발 방법 고찰

❍ 건설현장 적용을 위한 모니터링 시스템 개발 방법 고찰

- 미세먼지 모니터링 기술은 기본적으로 계측기를 통해 측정된 데이터를 네트워크를 통해 전송하여 사용자에게 서비스를 제공하는 형태로 구성됨. 이에 따라, 시스템을 구축하려는 대상의 특징을 고려하여 계측기, 네트워크, 그리고 서비스 측면의 검토가 이루어져야 함.
- 건설현장의 경우 모니터링 범위가 매우 넓고 다양한 위치에서 먼지 발생 활동이 일어나는 특징이 있으며, 이에 따라 현장 관리자가 먼지 발생 위치를 확인하여 실시간으로 조치할 수 있도록 시스템을 구성해야 함. 또한, 공사가 진행됨에 따라 주요 먼지 발생 위치가 변하고 실내뿐만 아니라 가혹한 실외 환경에 노출되기 때문에 다양한 위치에서 설치가 용이해야하고 충분한 내구성이 확보되어야함.
- 본 연구에서는 이러한 건설현장 모니터링 특징을 시스템 개발에 반영하기 위하여 기존 연구들을 통해 계측기 측면에서 이동성(소형화, 휴대성) 및 실외 내구성을 고찰하고 네트워크 측면에서는 통신방식 및 통신거리를 고찰했으며, 서비스 측면에서는 최종 사용자에게 제공되는 프로그램 서비스의 형태를 표2-30과 같이 고찰함.

표 2-30. IoT 기반 미세먼지 모니터링 시스템 연구 고찰

기존 연구 (※참고)	계측기			네트워크		서비스
	이동성		내구성	통신 방식	장거리 통신	프로그램 서비스
	소형화	휴대성				
①	X	X	X	RS485	O	Web, Mobile
②	O	O	X	-	X	Program
③	O	X	X	Wifi	X	Web
④,⑤	O	X	X	Wifi	X	Web

※참고자료

①: Kang, H.; Sung, S.; Hong, J.; Jung, S.; Hong, T.; Park, H.S.; Lee, D.-E. Development of a real-time automated monitoring system for managing the hazardous environmental pollutants at the construction site. J. Hazard. Mater. 2021, 402, 123483.

②: Smaoui, N.; Kim, K.; Gnawali, O.; Lee, Y.-J.; Suh, W. Respirable Dust Monitoring in Construction Sites and Visualization in Building Information Modeling Using Real-time Sensor Data. Sens. Mater. 2018, 30, 1775-1786.

③: Marques, G.; Ferreira, C.R.; Pitarma, R. A System Based on the Internet of Things for Real-Time Particle Monitoring in Buildings. Int. J. Environ. Res. Public Health 2018, 15, 821.

④: Jo, J.H.; Jo, B.; Kim, J.H.; Choi, I. Implementation of IoT-Based Air Quality Monitoring System for Investigating Particulate Matter (PM10) in Subway Tunnels. Int. J. Environ. Res. Public Health 2020, 17, 5429.

⑤: Jo, J.; Jo, B.; Kim, J.; Kim, S.; Han, W. Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform. J. Sens. 2020, 2020, 8749764.

- Kang et al. 은 건설현장에 적용하기 위하여 광산란 방식의 미세먼지 센서를 포함하고 있는 MONVID라는 실시간 환경오염 모니터링 시스템을 개발함. MONVID는 저렴하면서 넓은 범위의 통신이 가능한 Recommended Standard 485(RS485)를 통신방식으로 채택하고 있으며, 프로그램 서비스를 웹과 모바일을 통해 제공하는 특징이 있음. RS485의 경우 넓은 범위의 통신이 가능할뿐만 아니라 장애물에 의한 통신 방해를 적게 받는 특징이 있으므로 건설현장에 적합하며, MOVID의 data service 방식 또한 현장 관리자가 언제 어디서나 실시간 데이터를 확인할 수 있으므로 현장 관리에 용이하다는 장점이 있음.
- Smaoui et al. 은 location tracking 기술을 활용한 건설현장 먼지 센싱 기술을 개발하는 과정에서 이동 계측이 가능한 TSI DustTrack II를 채용함. 해당 계측기는 실시간 이동 계측이 가능한 소형 계측기기이며, 배터리를 통해 이동성을 확보한 제품임. 다만, 건설현장에서 지속적인 계측을 하는데에는 이러한 휴대형 제품으로는 한계가 있으며, 지속적인 전원공급과 장시간 설치에 따른 내구성 확보가 함께 고려되어야 한다.
- 이 외에도 PM 모니터링 시스템 개발에 대한 다양한 연구가 있는 가운데 대부분의 연구는 실내 환경에서의 시스템 구축에 관한 연구임. 실내용 PM 모니터링 시스템의 계측기는 일반적으로 실외 환경에서 눈과 비에 노출되지 않기 때문에 실외 내구성에 대한 고려가 구체적으로 되어 있지 않은 반면 이로 인하여 소형화하기에 유리함. 또한, 네트워크와 서비스 측면에서도 실내 환경에 유리한 Wifi 방식을 통한 웹기반의 프로그램 서비스를 제공하고 있는 것이 특징임. 이러한 실내 모니터링은 건설현장의 관리사무소나 현장 인근 피해 지역에 실내 모니터링 서비스 제공을 위하여 활용될 수 있을 것으로 사료됨.

❍ 건설현장 적용을 위한 계측기 측면 고찰

- 미세먼지 모니터링 기술 개발 시 최우선으로 고려되어야 할 사항은 PM농도 계측 방식이며, 이는 크게 중량농도법, 베타선법, 광산란법으로 구분된다. 각 계측 방식마다 특징이 있으며, 활용 용도에 따라 방식을 선택하게 되는데 이 중 베타선법과 중량농도법은 대기오염공정시험기준에서 정하고 있는 미세먼지 공인 측정법으로서 측정값의 정확도가 높아 계측 시 기준치로 사용되고 있음.
- 반면, 광산란법은 미세먼지 입자에 빛을 조사하고 산란되는 빛을 이용하여 입자의 농도를 측정하는 방식으로써 베타선법과 중량농도법에 비하여 오차율이 높은 편이지만 센서의 크기가 작고 저렴하며, 별도의 먼지 포집 절차가 필요 없어서 간단하게 데이터를 얻을 수 있다는 장점이 있음.
- 이에 따라, 건설현장과 같이 다양한 현장 상황의 변화에 대응하거나 일정 기간 동안 임시 계측을 수행하기 위해 건설현장 미세먼지 관련 국내외 연구에서 광산란법을 가장 적절한 계측방식으로 채택하고 있음.

- 건설현장에 적합한 계측 방식인지 판단하는 데에는 실시간 데이터 출력 여부, 이동성, 경제성, 정확성 등이 있으며, 해당 항목들 별 각 계측 방식의 적합성을 표2-31과 같이 검토한 결과 광산란법이 가장 적합한 것으로 나타남.

표 2-31. 건설현장 특성에 따른 계측 방식의 적합성

항목	건설현장 미세먼지 계측 방식		
	중량농도법	베타선법	광산란법
실시간 데이터 출력	X	X	O
이동성	X	X	O
경제성	장비, 분석비용 높음	장비비용 높음	비용 낮음
정확성	높음	높음	낮음

- 연구들을 통해 결과적으로 광산란법을 활용한 계측 방식이 건설현장 미세먼지를 모니터링 하는 데에 가장 적합한 것으로 나타나고 있으며, 이에 따라 광산란법의 가장 큰 단점인 데이터의 정확성에 대한 개선이 중요함.
- 국내에서는 2019년부터 국립환경과학원장이 기관을 지정하여 미세먼지 간이측정기 성능인증제도를 시행하고 있으며, 이를 통해 반복재현성, 상대정밀도, 자료획득률, 정확도, 결정계수를 평가하여 총 4개의 등급(1등급, 2등급, 3등급, 등급외)을 측정기 제품에 부여하고 있음.
- 미세먼지 간이측정기란 규정된 형식승인이나 예비형식승인을 받지 아니한 초미세먼지를 측정하는 기기를 말하며, 통상적으로 광산란 방식의 휴대가 가능한 미세먼지 계측기를 의미함.
- 미세먼지 간이측정기의 성능을 평가하는 데에 있어서 기준이 되는 측정기는 신뢰성이 확보된 Class Ⅰ과 Class Ⅱ 측정기이며, 각각 그림2-15와 같이 중량법과 베타선법을 사용함. 이는, 광산란법에 의한 계측 성능을 중량법과 베타선법에 근접하도록 하는 과정이며, 특히 평가항목 중 정확도 평가를 통해 광산란법의 단점인 데이터의 정확성을 확보하는 데에 크게 기여하고 있음. 정확도 평가에서 1등급을 획득한 경우 80%를 초과하는 정확도를 확보한 것으로 인증받으며, 건설현장에서 더욱 정확성 높은 데이터를 확보할 수 있음.

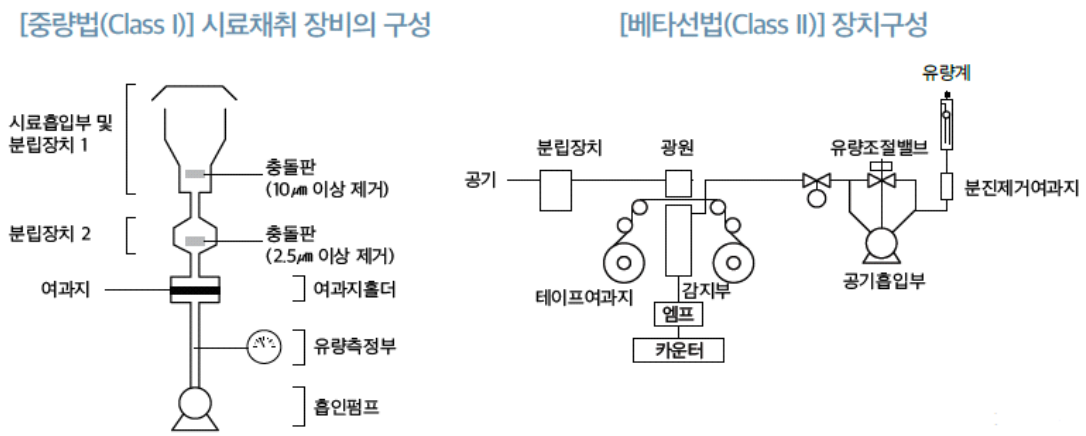


그림 2-15. 미세먼지 간이측정기 인증 Class1 및 Class2 측정기

❍ 건설현장 적용을 위한 IoT 네트워크 측면 고찰

- 사물인터넷(Internet of Things; 이하 IoT) 은 1999년 Kevin Ashton이 최초로 사용한 표현으로서 용어에 대한 개념 정의가 하나로 통일되어 있지 않다. 일부 연구에서는 IoT를 스마트 디바이스(사물)를 갖춘 통합적인 기술을 통해 자동으로 정보를 수집하고 이러한 정보를 통합하여 최종 사용자에게 새로운 서비스(사물, 사람)를 제공하는 하나의 서비스 관점으로 해석하기도 하며, 일부에서는 IoT를 기술 자체로써 사물간의 생태계 관점(pure technical perspectives) 또는 사물과 사람간의 생태계 관점(socio-technical perspectives)으로 구분하여 해석하기도 함.
- 이러한 관점의 차이는 결국 IoT의 개념을 정의하는 범위에 차이에서 비롯되나, 공통적으로 사물과 사물 또는 사물과 사람 사이의 유기적인 통신을 바탕으로 사물이 제반 상황을 인식하고 그 변화를 감지하여 대응하는 지능을 갖출 것을 요구함.
- 이에 따라, 연구 목적에 맞는 IoT 개념에 대한 범위 설정이 필요하며, 본 연구에서는 현장 근로자 , 지자체 및 건설사 등 최종 사용자에 서비스 제공을 목적으로 그림2-16과 같이 서비스 관점의 IoT 개념을 준용함.



그림 2-16. 본 연구의 IoT 개념 정의

- 계측기의 통신 방식을 선정함에 있어서 건설현장의 넓은 범위에서 IoT 네트워크를 구성할 수 있도록 통신거리에 대한 검토를 표2-32과 같이 진행함.
- 일반적인 IoT 기반 모니터링 시스템에서 주로 사용하는 통신 프로토콜로는 Zigbee, Bluetooth, Wifi가 있으며, 이 중 Zigbee와 Wifi가 건설현장에 적합한 통신거리를 확보할 수 있는 것으로 나타남.
- 다만, 건설현장의 특성상 건설장비 및 구조물로 인한 통신 간섭이 심하며, 해당 통신 방식들은 이러한 장애물의 영향을 많이 받기 때문에 현장 원거리 통신에는 적합하지 않은 것으로 검토됨.

- 본 연구에서는 최종적으로 장거리 통신이 가능하며 장애물로 인한 통신 간섭이 적은 RS485를 기본 통신 방식으로 채택했으며, 선택적으로 근거리의 경우 별도의 허브 없이 일반적으로 실내에서 사용되고 있는 공유기를 겸용할 수 있는 Wifi 방식을 채택하여 현장 사무소 또는 현장 인근 실내 공간에서 센서 모듈을 적용하는 데에 편리하도록 설치 편의성을 확보함.
- RS485 통신은 통신거리가 이론적으로 최대 1,200m까지 가능하다고 하나 안테나 종류, 장애물 등의 요소들로 인한 통신거리 편차가 있으므로 현장 통신거리 테스트를 별도로 실시해야함.

표 2-32. 통신방식 선정 검토

구분	통신 방식			
	Zigbee	Bluetooth	Wifi	RS485
거리	10-100m	10m	20-100m	최대 1,200m
노드	65,535개	7개	20개	32개
주요 사항	-원거리 : 장애물 간섭 큼 -근거리 : 별도 허브 필요	-	-원거리 : 장애물 간섭 큼 -근거리 : 공유기 활용	-원거리 : 장애물 간섭 적음 -근거리 : 별도 허브 필요
선정	X	X	**O (근거리 선택적으로 활용)**	**O (기본 채택)**

❍ 건설현장 적용을 위한 프로그램 서비스 측면 고찰

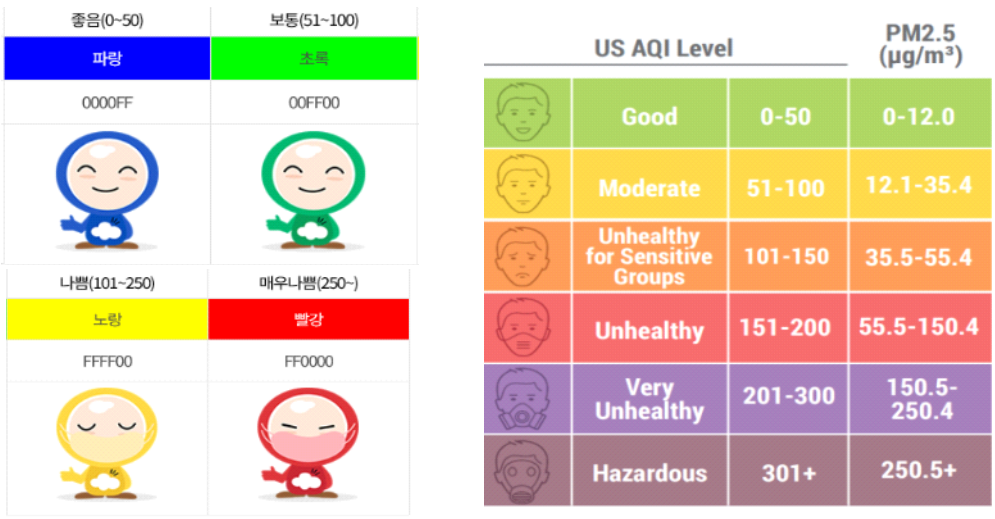
- 미세먼지 모니터링 기술의 프로그램 서비스 측면에서는 사용자에 따른 필요 기능(또는 인터페이스) 검토가 필요하며, 이를 사용자 디스플레이로 구현하는 방법이 검토되어야 함.
- 건설현장의 특성상 옥외작업자로 분류되는 건설현장 근로자들이 미세먼지에 장시간 노출되어 건강보호를 위한 조치가 필요한 주요 대상으로 파악되고 있으며, 도심지의 경우 현장 인근 주민들 또한 피해를 입을 수 있는 대상임. 이에 따라, 모니터링 소프트웨어의 주 사용자는 현장 미세먼지로 인한 직접적인 피해자이자 현장 인근 지역의 미세먼지 피해를 통제해야하는 현장 근로자(또는 관리자)로 분석됨. 또한, 비산먼지 관련 민원 중 약 90%에 이르는 민원 건이 건설현장에서 발생하는 먼지로 인한 민원임을 고려했을 때 민원 관리 주체인 지자체 및 건설사도 모니터링 소프트웨어의 주요 사용자가 될 것으로 사료됨.
- 이러한 사용자들이 필요로 하는 소프트웨어의 기능적인 측면에서는 기존에 개발된 국내·외 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템들을 검토한 결과 하나의 현장 내 여러 지점에 통합적인

계측기 노드 설치를 통한 모니터링 사례가 없는 것으로 나타났으며, 이에 본 연구에서 개발하는 시스템의 기능을 사용자에 맞도록 새롭게 정립할 필요가 있음.

- 소프트웨어의 디스플레이에서 결과를 구현하는 측면에서는 기존에 개발된 미세먼지 모니터링 시스템들이 활용하고 있는 방식은 농도 표기 방식과 지수화 방식임. 농도 표기 방식은 그림2-17에서와 같이 센서에서 실제로 측정한 데이터 수치를 그대로 디스플레이에 표기하는 방법이고 지수화 방식은 데이터를 지수로 환산하여 표기하는 방법인데, 지수화 방식의 대표적인 방법으로는 그림2-18과 같이 US EPA의 AQI(Air Quality Index)와 국내 통합대기환경지수(Comprehensive Air-quality Index; 이하 CAI)가 있음.
- 두 방식의 특성을 비교해 보면 농도를 직접 표기하는 방식의 경우 농도에 대한 기준값이 있는 고농도 비상저감조치 등의 상황에 대응하는 데에 적합한 반면, 지수화 방식은 사용자가 건강에 해로운 상황인지 여부를 직관적으로 판단하는 데에 유리하다. 이에 따라, 사용자 용도에 따른 디스플레이 상의 표기 방식에 대한 고려가 이루어져야 함.
- 본 연구에서 개발하는 프로그램 서비스의 경우 현장 근로자가 미세먼지 농도를 정량적인 수치로 정밀하게 관리할 수 있도록 농도 표기 방식을 기본으로 채택하였으며, 향후 서비스 사용자 확장 시 필요에 따라 지수화 방식을 겸할 수 있도록 함.



그림 2-17. 미세먼지 농도 표기 방식



한국 CAI 등급 미국 AQI 등급

그림 2-18. 미세먼지 지수화 방식

❍ 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 개발 방법 고찰 결과

- 건설현장에 적합한 미세먼지 모니터링 시스템 개발을 위해 기존 문헌을 고찰한 결과 아래와 같은 내용이 시스템 개발 시 고려되어야 하는 것으로 검토됨.
  - 광산란 방식의 특성상 미세먼지 농도 계측값의 정확성 검증이 필요함.
  - 건설현장 내 다양한 위치에서 먼지 발생 활동이 이루어지고 공정에 따라 지속적으로 먼지 발생 위치가 변화하여 계측기의 이동 설치가 용이해야하나 일반적으로 실외용 미세먼지 계측기기는 부피, 무게 및 전원공급 방식으로 인하여 이동이 어려움.
  - 건설현장의 특성상 계측기가 눈, 비와 같은 가혹한 기상상황과 고농도의 먼지 환경에 장기간 노출될 위험이 있음.
  - 건설현장의 범위가 넓으며, 통신에 영향을 미치는 지장물이 다수 존재함.
  - 현장관리자가 미세먼지 발생 위치를 실시간으로 파악하기 어려움.

❍ 모니터링 시스템의 건설현장 특화 방안 도출

- 본 연구에서는 상기의 건설현장 모니터링 시 문제점들을 해결하기 위하여 표2-33과 같이 다지점 계측, 내구성 확보, 계측성능 확보, 장거리 네트워크, 프로그램 서비스 측면에서 건설현장에 특화된 미세먼지 모니터링 시스템을 개발함.

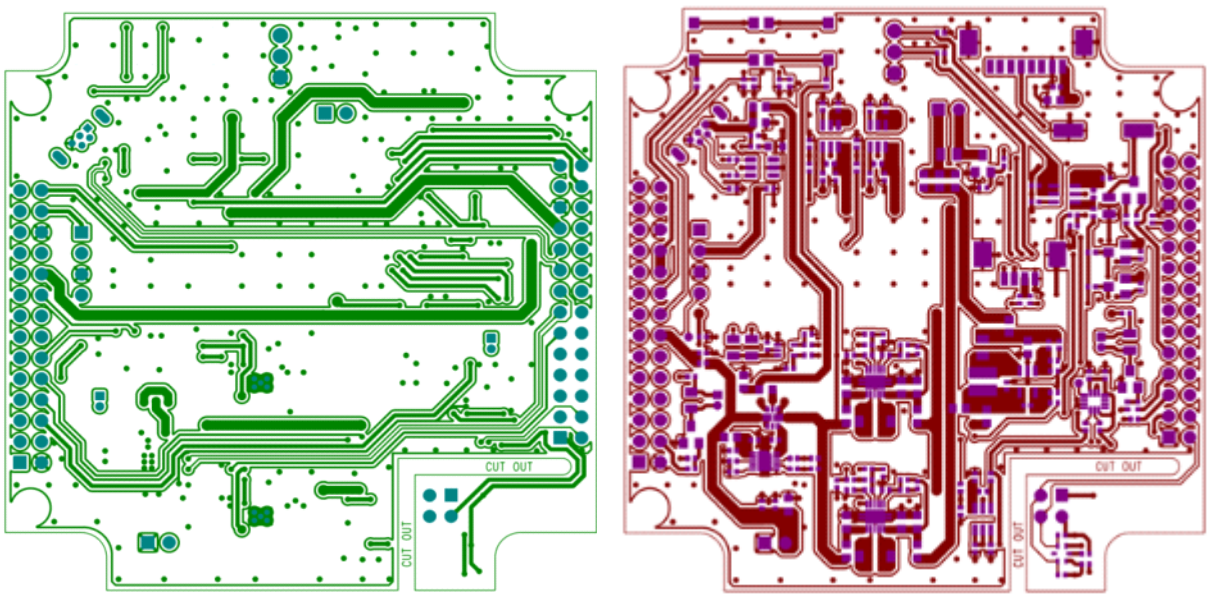
표 2-33. 미세먼지 모니터링 시스템의 건설현장 특화 개발 방법

No	특화점		연구/개발 실시
	항목	세부	
1	다지점 계측	소형화	저가형 PM센서 채용 및 소형 계측기 개발
		휴대성	전원/배터리 교차형 계측기
		이동성	이동오염원/고정오염원 적용성 테스트
2	내구성 확보	방진·방수 성능 확보	IP등급 확보, 방진·방수 아웃렛 개발
3	계측 성능 확보	계측기 성능 인증	미세먼지 간이측정기 성능인증
4	장거리 네트워크	통신방식 선정	통신 방식 검토, 통신거리 측정
5	프로그램 서비스	프로그램 구성	실시간 현장관리를 위한 기능

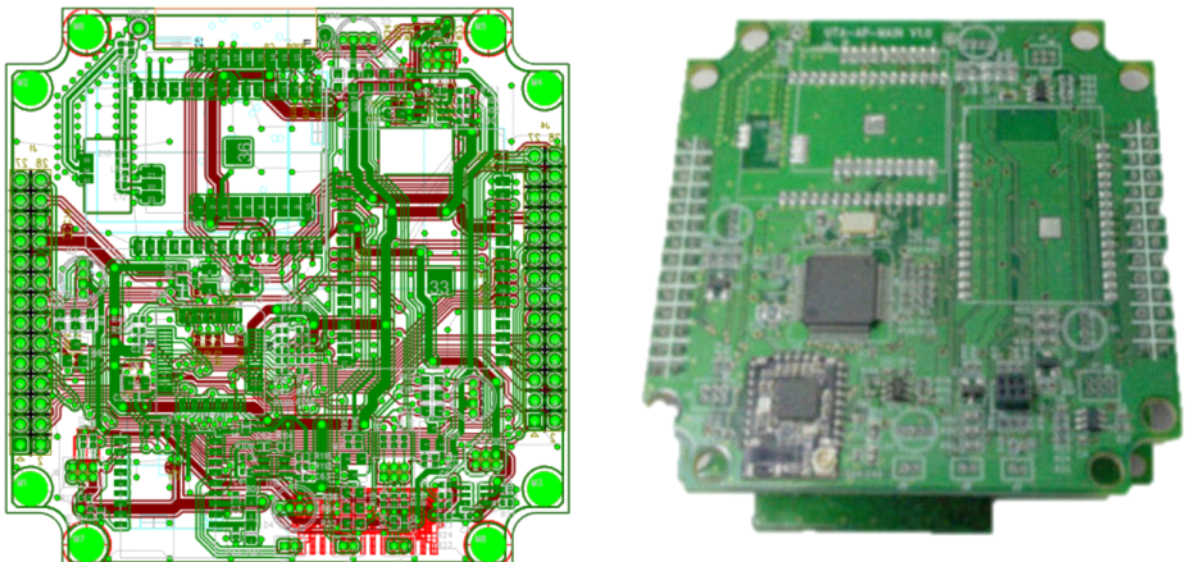
2) 건설현장 미세먼지 모니터링 계측기 모듈 개발

❍ 계측기 센서 모듈 제작

- 본 연구에서는 건설현장 미세먼지 모니터링을 위한 RS-485 Modbus Protocol RTU 및 저전력 기능이 탑재된 소형 계측기 개발용 멀티센서 모듈을 그림2-19와 같이 개발함.
- 모듈에는 광산란 방식의 저가형 PM센서(PM1.0,2.5,10)를 기본 탑재하고, 향후 종합 환경 분석이 가능하도록 온도, 습도센서를 채용함.
- 또한, 미세먼지와 함께 탄소중립에 대한 시장의 관심이 커짐에 따라 CO2 센서를 함께 채용하여 계측기의 활용성을 높임.



(a) IoT 멀티센서 ArtWork 1　　(b) IoT 멀티센서 ArtWork 2



(c) IoT 멀티센서 ArtWork 3>　　(b) IoT 센서 모듈

그림 2-19. 계측기 센서 모듈

❍ 계측기 센서 모듈 통신 테스트

- 본 연구에서 개발한 계측기 센서 모듈의 정상 통신 성능을 확인할 목적으로 통신성공률 테스트와 통신성능 테스트를 실시함.
- 테스트는 모두 총 3가지 제품의 PM센서를 채용한 센서 모듈들을 대상으로 실시함.
- 통신성공률 테스트 및 통신속도 테스트를 아래의 절차에 따라 실시하였으며, 시험 결과 표2-34과 같이 98.4%에 달하는 통신성공률을 확인하였으며, 통신속도는 200ms에 달하는 것으로 확인하였음.
- 통신성공률 테스트 절차
  - 노트북을Packet을 전송할 수 있는 프로그램을 구동
  - 설정에서 Port설정에서 통신주기를 200 ms로 설정
  - 이 후 200 ms에 통신하는 패킷을1189번 확인
  - 이 중 성공하는 횟수와 실패하는 횟수를 통합하여 성공률 확인

표 2-34. 통신성공률 테스트 결과

시험 횟수	성공 횟수	실패 횟수
1189	1170	19
최종 성공률		98.4 %

- 통신속도 테스트 절차
  - 노트북을 Packet을 전송할 수 있는 프로그램을 구동
  - 설정에서 Port설정에서 통신주기를 200 ms로 설정
  - 이 후 200 ms에 통신하는 패킷을 확인

- 최종적으로 본 연구에서 개발한 계측기 센서 모듈의 통신 성능은 표2-35과 같이 도출됨.

표 2-35. 계측기 센서 모듈 통신 테스트 결과 요약

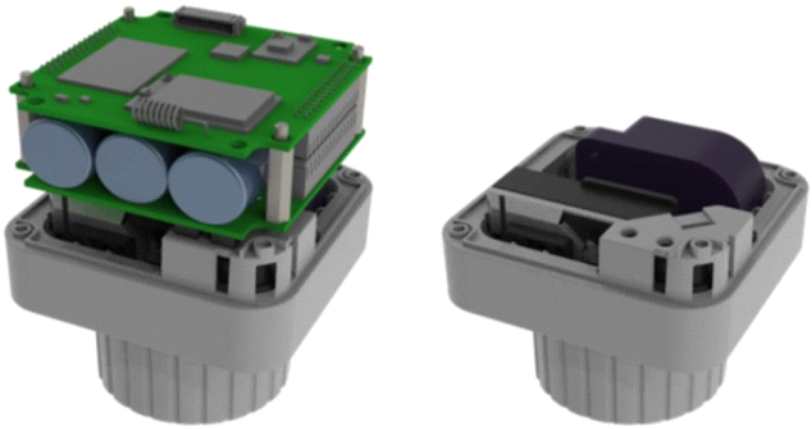
번호	테스트 항목	목표치	시험결과	만족여부
1	IoT멀티센서 통신 성공률	98 %이상	98.4 %	만족
2	IoT멀티센서 통신속도	200 ms	200 ms	만족
3	IoT 멀티센서3사 계측	3 건	3건 정상 확인	만족

(2) IoT 기반 건설현장 특화형 미세먼지 모니터링 시스템 개발

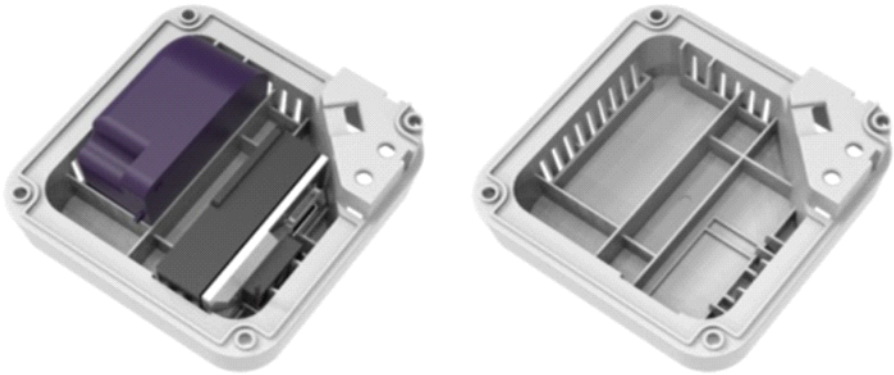
1) 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템의 다지점 계측

❍ 계측기의 소형화

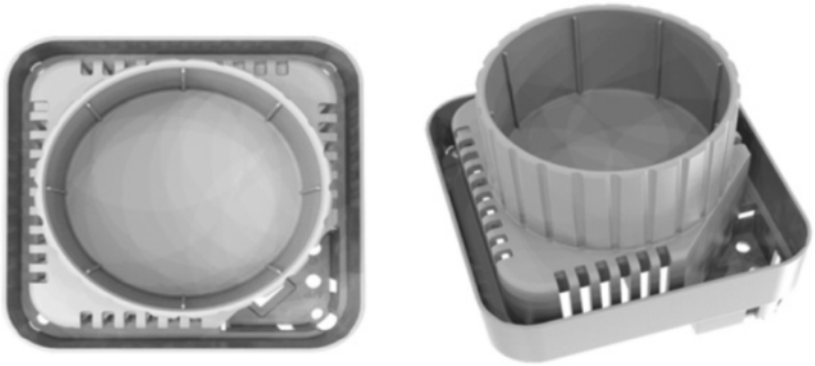
- 상기 개발된 센서 모듈을 포함한 계측기 개발에 있어서 건설현장 내 여러 지점에 용이하게 적용할 수 있도록 그림2-20과 같이 계측기 디자인 설계를 실시하여 최종적으로 115(W) X 75(H) X 75(D)㎜ 크기의 소형 계측기를 개발함.
- 특히, 계측기 하판의 경우 건설현장 내의 포스트바에 쉽게 장착할 수 있도록 포스트바 규격인 지름 48㎜의 내경으로 설계함.



(a) 계측기 내부



(b) 계측기 상판

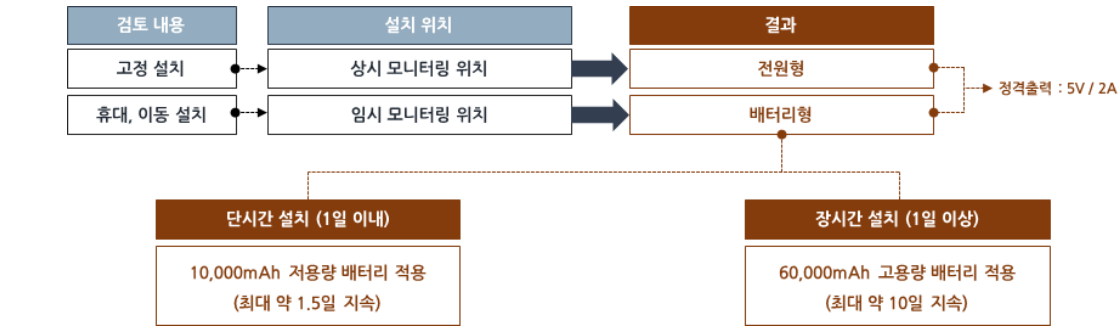


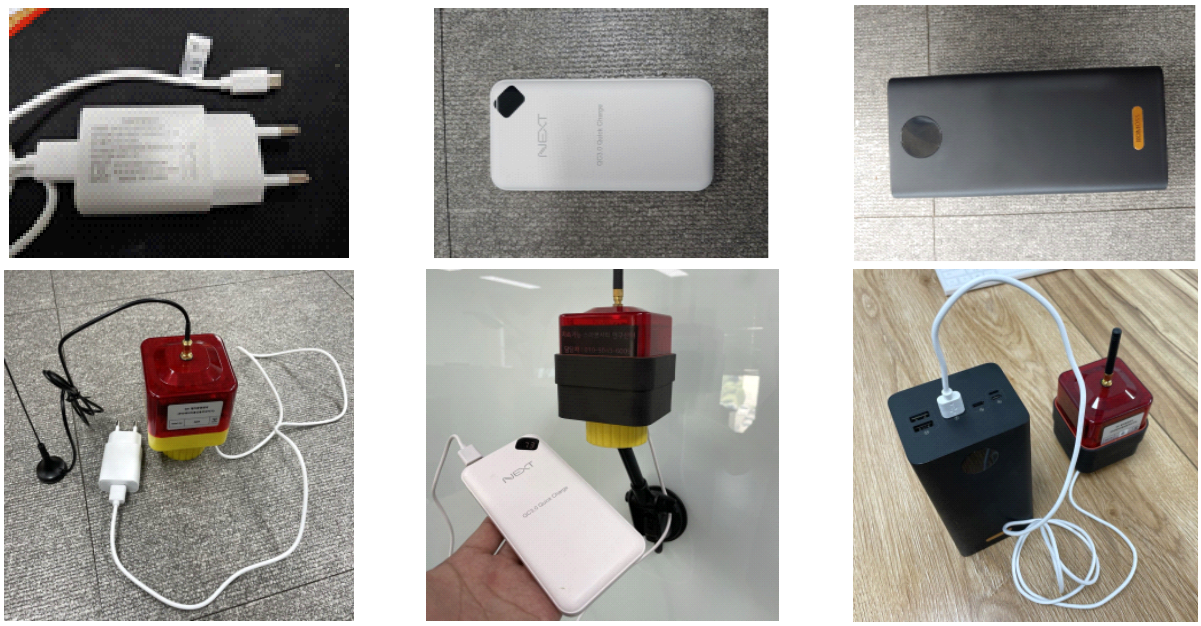
(c) 계측기 하판

그림 2-20. 계측기 디자인 설계

❍ 배터리 채용에 따른 계측기 휴대성 확보

- 멀티센서 모듈의 전원 연결 방식의 경우 상시 모니터링 시 고정 설치를 하고 임시 모니터링 시 이동 설치 또는 휴대가 가능해야함에 따라 그림2-21과 같이 전원형과 배터리형으로 구분하여 검토함.
- 하나의 모듈을 통해 상황에 따라 전원형과 배터리형으로 유동적으로 교체 사용할 수 있도록 정격출력 5V / 2A로 맞추고 전원 연결부를 USB 타입으로 설정함.
- 배터리형의 경우 10,000mAh의 저용량 배터리를 통해 최대 약 1.5일까지 지속 작동하는 것을 확인하였으며, 60,000mAh의 고용량 배터리를 통해 최대 약 10일까지 지속 작동하는 것을 확인함.
- 이에 따라, 몇시간에서 하루 정도의 계측 실험을 하는 경우 저용량 배터리를 활용하여 휴대성을 높이고 전원공급이 어려운 상시 모니터링 위치에서는 고용량 배터리를 약 일주일 단위로 교체 적용해줌으로써 전력공급을 원활하게 할 수 있을 것으로 검토됨.
- 한편, 배터리형의 경우, 배터리를 실외에 일정기간 거치해야하기 때문에 우천 시 및 건설현장 내 살수 작업 등으로 인한 방수성능 확보가 필요할 것으로 사료됨. 이에 밀폐형 배터리 케이스를 구입하여 배터리를 통한 안전사고에 대비하도록 함.





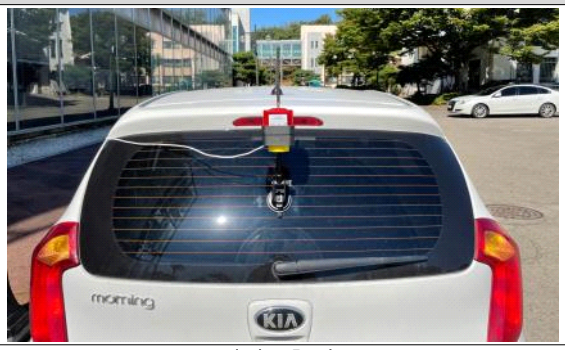
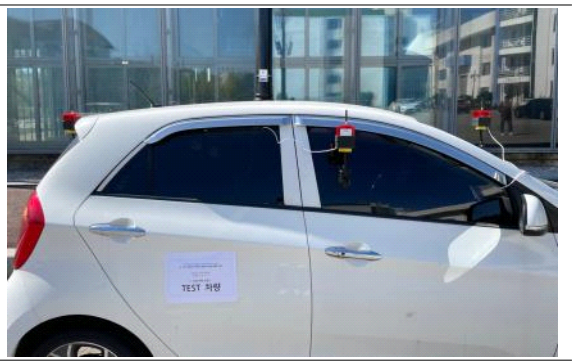
(a) 전원형 (b) 배터리형(저용량) (c) 배터리형(고용량)

그림 2-21. 전원 연결 방식

❍ 계측기의 이동성 확보

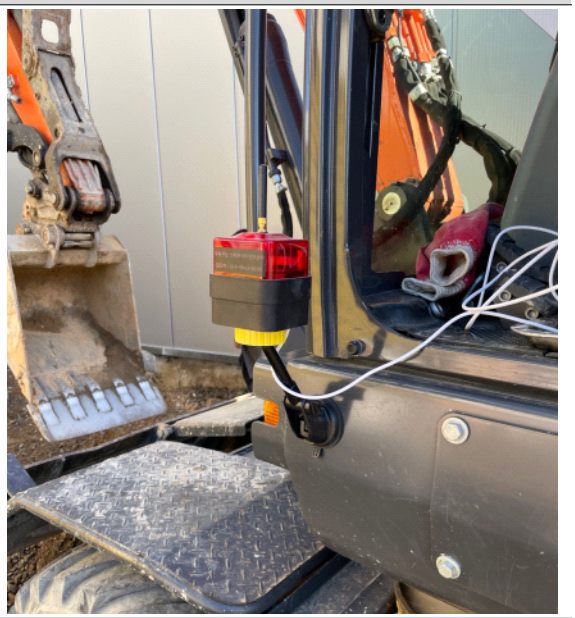
- 본 연구에서 개발한 계측기를 차량 및 건설장비에 시범 적용하여 이동오염원 계측 시 계측기의 설치 안정성을 테스트함.
- 본 테스트는 모니터링 대상 건설현장 내 주요 미세먼지를 발생시킬 것으로 예상되는 건설장비에 계측기를 설치하거나 현장 인근 도로에서의 모니터링 시 움직이는 환경에서 계측기의 안정성을 검토할 목적으로 실시함.
- 차량의 노면이동 계측 테스트의 경우 표2-36과 같이 한양대학교 ERICA캠퍼스 내 도로에서 시속 60㎞/h 이내의 속도에서 직선구간 테스트와 90° 의 커브구간에서 반복적인 안정성 테스트를 실시함. 계측기의 설치 위치는 차량 후면/측면/전면에 모두 적용했으며, 설치 높이는 설치 기준에 따라 집진부의 높이를 지면으로부터 약 1.5m로 설정하여 실시함.

표 2-36. 노면이동 계측 안정성 테스트

<table>
<tr><th>내용</th><th colspan="2">사진</th></tr>
<tr><td rowspan="4">계측기
설치
위치</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(a) 후면</td><td>(b) 측면</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(c) 전면</td><td>(d) 전체 설치 모습</td></tr>
<tr><td rowspan="2">테스트</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(e) 직선구간 테스트</td><td>(f) 커브구간 테스트</td></tr>
</table>

- 건설장비 작업 계측 테스트의 경우 표2-37과 같이 건설현장 미세먼지 주요 배출원인 굴삭기를 대상으로 고정오염원 작업시 계측기의 설치 안정성을 테스트 했으며, 계측기 설치 높이는 기준에 따라 집진부의 높이를 지면으로부터 약 1.5m로 설정하여 테스트를 실시함.

표 2-37. 건설장비 작업 계측 안정성 테스트

<table>
<tr><th>내용</th><th colspan="2">사진</th></tr>
<tr><td rowspan="2">계측기 설치 위치</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>(a) 대상 건설장비</td><td>(b) 계측기 설치 위치</td></tr>
<tr><td rowspan="2">테스트</td><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">(c) 작업 테스트</td></tr>
</table>

- 본 연구에서 개발한 계측기를 차량, 건설장비, 그리고 드론에 시범 적용하여 이동 계측 시 계측기의 안정성을 테스트한 결과 표2-38과 같은 결론을 도출함.

표 2-38. 계측기의 이동성 테스트 결과

내용	대상	결과
노면이동 계측 안정성	이동오염원 (차량)	■시속 60km/h 이내 직선이동 시 안정함. ■90° 곡선이동 시 안정함. ■다만, 요철이나 장애물 통과 시 20km/h 이내 속도 권장함.
작업 계측 안정성	고정오염원 (굴삭기)	■굴삭 작업 시 안정함. ■다만, 계측기 설치 위치는 장비 작업에 지장이 없도록해야함.

2) 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템의 내구성 확보

❍ PM 센서 선정 및 채용

- 멀티센서 모듈의 핵심 요소인 PM 센서는 건설현장의 실외 환경에서 긴 공사기간 동안 유지될 수 있는 제품으로 선정하여 채용하는 것이 중요하며, 우수 또는 현장의 흙먼지 축적으로 인한 오작동에 대비하여 충분한 방진 · 방수 등급을 확보하는 것이 필요함.
- 방진 · 방수에 대한 국제 표준인 IP 등급(IEC 60529)은 IPab의 형태로 표기되는데 여기서 a는 방진 등급을 의미하고 b는 방수 등급을 의미하며, 각각의 방진 등급과 방수 등급에 대한 정의는 표2-39와 같음.

표 2-39. 방진·방수 IP등급(IEC 60529)

등급	방진	방수
X	측정되지 않음	측정되지 않음
0	비보호	비보호
1	지름 50㎜의 고체로부터 보호	수직으로 떨어지는 물방울로부터 보호
2	지름 12.5㎜의 고체로부터 보호	수직면에 대해 양쪽으로 15° 이하 각도로 기울어져 떨어지는 물방울로부터 보호
3	지름 2.5㎜의 고체로부터 보호	수직면에 대해 양쪽으로 60° 이하 각도로 기울어져 떨어지는 물방울에 대해 작동
4	지름 1.0㎜의 고체로부터 보호	모든방향에서 분무되는 물방울에 대해 이상없이 작동
5	기기의 작동을 방해하지 않는 범위내에서 50㎛의 분진 침투 허용	모든방향에서 분사되는 물줄기에 대해 이상없이 작동(낮은 수압)
6	50㎛의 분진 침투 불허	모든방향에서 분사되는 물줄기에 대해 이상없이 작동(높은 수압)
7	-	0.15~1m 깊이 물속에서 정상 작동
8	-	1m 이상의 깊이에서 물 침투 불허
9	-	고압 및 고온으로 모든 방향에서 분사되는 물에 대해 정상 작동

- 이에, 본 연구에서는 외기 환경에서 연속 측정으로 4년 이상 지속 가능한 성능과 TSP 기준인 50㎛ 크기의 분진 침투와 모든방향에서 분사되는 물줄기에 대해 이상 없이 작동할 수 있는 IP65등급의 흡입구 성능을 보유한 PM 센서 제품(Cubic社 PM2009)을 그림2-22와 같이 최종 선정하여 채용함.



그림 2-22. PM 센서(Cubic PM2009)

❍ 방진 · 방수 아웃렛 개발

- 멀티센서 모듈의 내구성 증진을 위한 방수 · 방진 아웃렛의 경우 그림2-23과 같이 크게 방수 성능과 방진 성능 확보 관점에서 검토하였으며, 추가적으로 아웃렛 자체의 유지관리 용이성을 확보하기 위하여 아웃렛 개발 재료를 그림2-24와 같이 검토함.
- 방수 성능 확보 : 우수로부터 계측기를 보호할 수 있도록 집진부를 덮는 형태의 아웃렛을 디자인 했으며, 아웃렛과 센서 모듈의 체결 시 추가적인 방수를 위해 체결부에 방수 패킹을 적용함.
- 방진 성능 확보 : 건설현장에서 배출되는 큰 입자의 비산먼지가 센서 모듈 내부에 축적되지 않도록 필터링하며, 동시에 PM 계측값에는 영향이 없도록 10㎛ 미만의 미세먼지 입자는 통과가 가능한 메쉬 형태의 필터를 검토하여 적용함.
- 아웃렛 유지관리 용이성 확보 : 아웃렛의 경량화 및 아웃렛 자체의 내구성을 고려하여 PA12 소재를 채택하고 패킹 재료의 경우 일반 고무패킹에 비해 외기 내열성이 우수한 실리콘을 채용했으며, 탈착하여 물로 쉽게 세척 가능하도록 스테인리스 메쉬 필터망을 채용함.

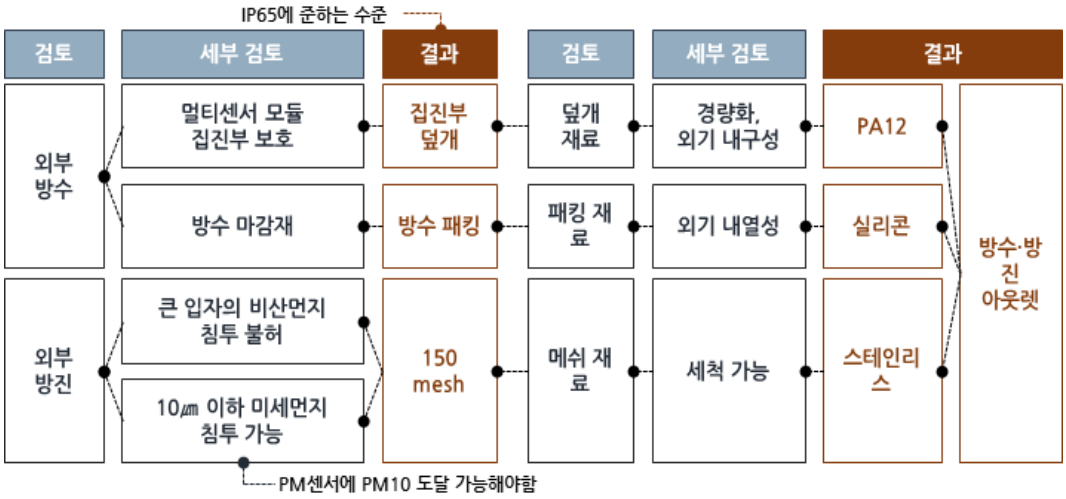


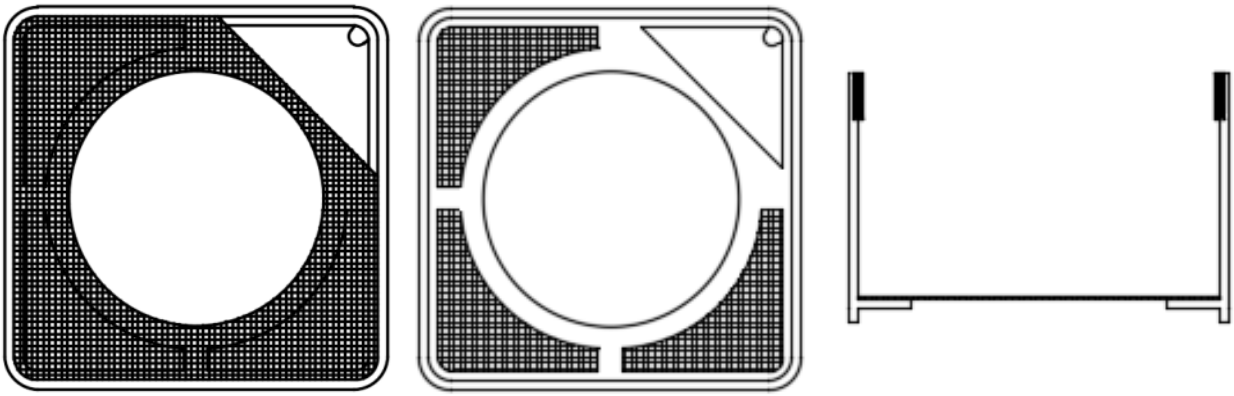
그림 2-23. 계측기 방진 · 방수 아웃렛 검토



(a) 집진부 덮개 (PA12 3D프린팅)　(b) 실리콘 패킹　(c) 스텐리스 메쉬 필터 (메쉬 150)

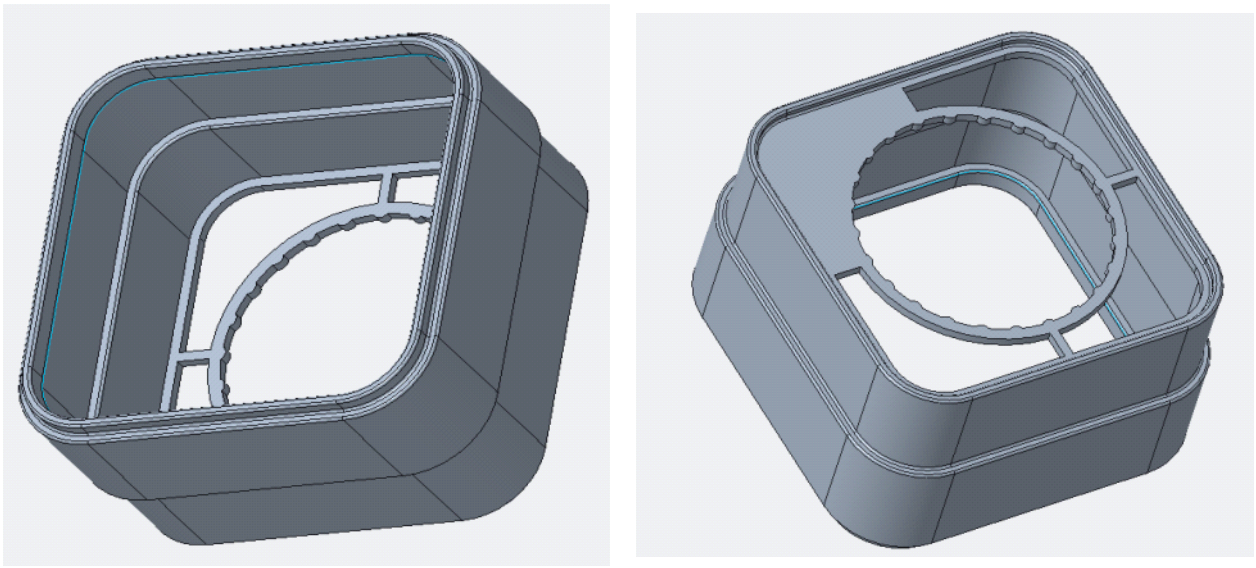
그림 2-24. 계측기 방진 · 방수 아웃렛 개발 재료 선정

- 최종적으로 그림2-25와 같이 디자인 드래프트, 3D 모델링, 3D 프린팅을 통해 아웃렛 본체를 제작하고 실리콘 패킹과 메쉬 필터를 적용하여 방진 · 방수 아웃렛 시작품을 개발함.



(a-1) 상면 (a-2) 하면 (a-3) 측면

(a) 방진 · 방수 아웃렛 드래프트



(b) 방진 · 방수 아웃렛 3D Model



(c) 방진 · 방수 아웃렛 시작품

그림 2-25. 계측기 방진 · 방수 아웃렛 시작품 제작

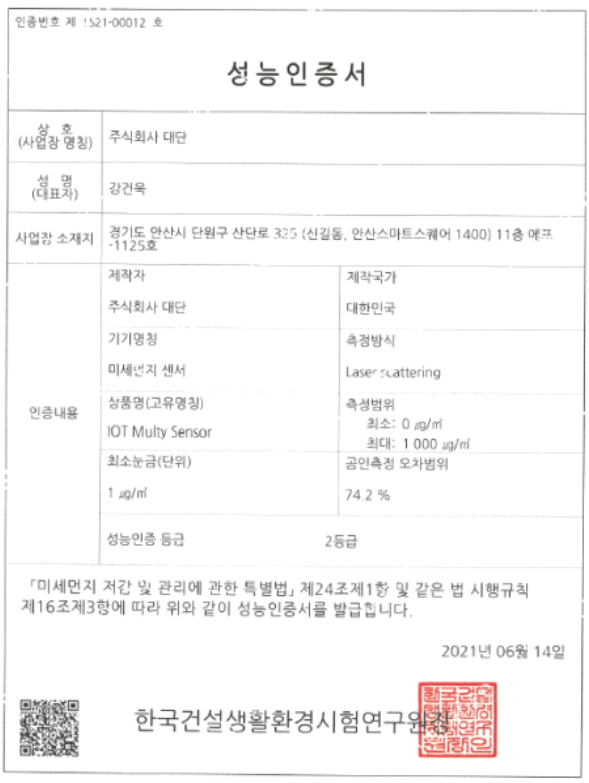
3) 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 계측 성능 확보

❍ 계측기 성능 인증

- 미세먼지 간이측정기 인증 평가항목 중 정확도 평가를 통해 광산란법의 취약점인 데이터의 정확성을 확인할 수 있음. 통상적으로 정확도 항목이 1등급(정확도 80% 초과)이거나 2등급(정확도 70% 초과)인 경우 신뢰할만한 정확도를 가진 것으로 평가되고 있으며, 이에 따라, 광산란 방식을 활용한 계측기의 정확도를 2등급 이상 확보하는 것이 중요함.
- 본 연구를 통해 개발한 미세먼지 계측 기기는 미세먼지 간이측정기 성능인증 시험을 통해 표 2-40 및 그림2-26과 같이 반복재현성 1등급, 상대정밀도 1등급, 자료획득률 1등급, 정확도 2등급, 결정계수 2등급의 성능을 인증 받았으며, 이에, 종합 2등급의 준수한 성능을 인증함.
- 특히, 이 중 정확도 항목의 경우 광산란 방식의 약점인 계측값의 정확성을 평가하는 항목으로써 본 연구에서 개발한 계측기의 경우 74.2%의 정확도를 가진 것으로 나타남.

표 2-40. 건설현장 미세먼지 계측기의 계측 성능

계측기 성능 구분	범위	등급
반복재현성	80% <	1
상대정밀도	80% <	1
자료획득률	80% <	1
정확도	70% <, ≤ 80%	2
결정계수	0.7 <, ≤ 0.8	2
종합 등급		**2**



인증번호 제 1S21-00012 호

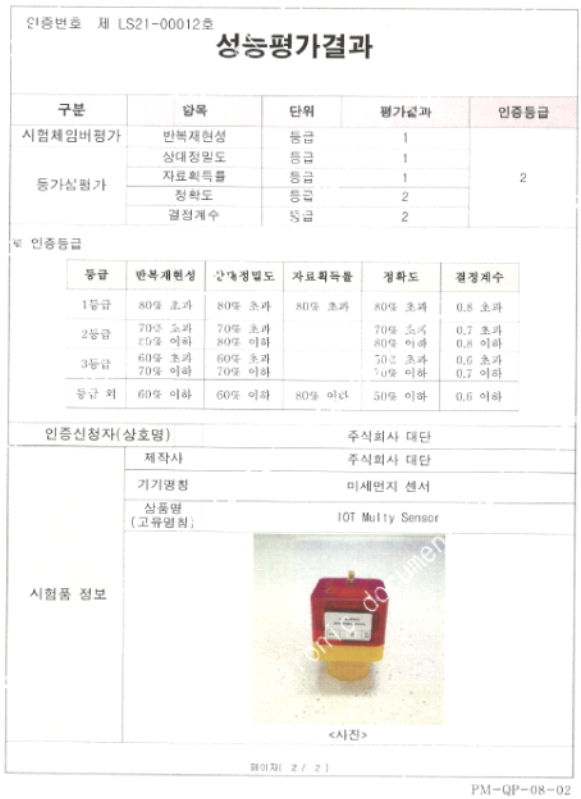
성능인증서

상 호 (사업장 명칭)	주식회사 대단	
성 명 (대표자)	강건욱	
사업장 소재지	경기도 안산시 단원구 산단로 325 (신길동, 안산스마트스퀘어 1400) 11층 에프 -1125호	
인증내용	제작자	제작국가
	주식회사 대단	대한민국
	기기명칭	측정방식
	미세먼지 센서	Laser scattering
	상품명(고유명칭)	측정범위
	IOT Multy Sensor	최소: 0 ㎍/㎥ 최대: 1 000 ㎍/㎥
	최소눈금(단위)	공인측정 오차범위
	1 ㎍/㎥	74.2 %
	성능인증 등급	2등급

「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 제24조제1항 및 같은 법 시행규칙 제16조제3항에 따라 위와 같이 성능인증서를 발급합니다.

2021년 06월 14일

한국건설생활환경시험연구원장



인증번호 제 LS21-00012호

성능평가결과

구분	항목	단위	평가결과	인증등급
시험체임버평가	반복재현성	등급	1	2
	상대정밀도	등급	1	
등가실평가	자료획득률	등급	1	
	정확도	등급	2	
	결정계수	등급	2	

※ 인증등급

등급	반복재현성	상대정밀도	자료획득률	정확도	결정계수
1등급	80% 초과	80% 초과	80% 초과	80% 초과	0.8 초과
2등급	70% 초과 80% 이하	70% 초과 80% 이하		70% 초과 80% 이하	0.7 초과 0.8 이하
3등급	60% 초과 70% 이하	60% 초과 70% 이하		60% 초과 70% 이하	0.6 초과 0.7 이하
등급 외	60% 이하	60% 이하	80% 이하	60% 이하	0.6 이하

인증신청자(상호명)	주식회사 대단	
시험품 정보	제작사	주식회사 대단
	기기명칭	미세먼지 센서
	상품명 (고유명칭)	IOT Multy Sensor

<사진>

PM-QP-08-02

그림 2-26. 미세먼지 간이측정기 성능인증서

4) 네트워크 성능 확보

❍ 통신거리 측정

- 본 연구에서는 모니터링 계측기기의 통신거리 측정을 위하여 그림2-27과 같이 RS485 게이트웨이 설치 지점으로부터 50m 단위로 계측기를 이동하여 통신 여부를 검토함.
- 본 측정은 통신 장애물이 없는 환경에서 실시하여 최대 통신거리를 확인할 목적으로 실시함.



(a) RS485 Gateway

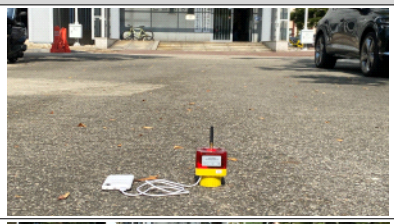
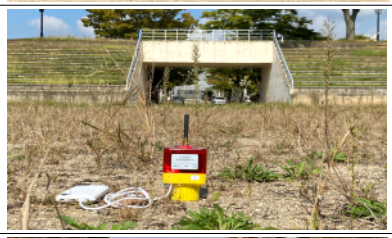


(b) 통신거리 측정 지점

그림 2-27. 통신거리 측정 방법

- 통신 여부는 본 연구에서 개발한 건설현장 미세먼지 모니터링 프로그램 CPMS의 계측기별 ON/OFF 확인을 통하여 표2-41과 같이 확인했으며, 그 결과 최대 통신거리는 300m로 분석됨.

표 2-41. 통신거리 측정 방법

No.	거리 (m)	측정 사진	통신 여부 확인	결과
1	50		환경센서05 온도°C 22.20 습도% 64.20 PM 1.0 6 PM 2.5 7 PM 10 9 CO2 1,374	통신양호
2	100		환경센서05 온도°C 26.50 습도% 42.50 PM 1.0 8 PM 2.5 9 PM 10 9 CO2 338	통신양호
3	150		환경센서05 온도°C 26.20 습도% 32.00 PM 1.0 8 PM 2.5 9 PM 10 9 CO2 338	통신양호
4	200		환경센서05 온도°C 32.20 습도% 29.40 PM 1.0 6 PM 2.5 6 PM 10 6 CO2 334	통신양호
5	250		환경센서05 온도°C 31.50 습도% 31.90 PM 1.0 6 PM 2.5 6 PM 10 9 CO2 329	통신양호
6	300		환경센서05 온도°C 31.50 습도% 31.90 PM 1.0 6 PM 2.5 6 PM 10 9 CO2 329	통신양호
7	350		환경센서05 온도°C 31.50 습도% 31.90 PM 1.0 6 PM 2.5 6 PM 10 9 CO2 329	통신불량

❍ 실시간 데이터 전송, 저장 및 관리

- 건설현장에 설치된 계측기기 노드들에서 계측된 데이터는 실시간으로 RS485 통신을 통해 게이트웨이로 전송되며, 이렇게 전송된 데이터를 활용하기 위해서는 서버로 한차례 더 데이터를 전송해야함.
- 본 연구에서 개발한 게이트웨이는 기본적으로 이더넷 포트를 통해 통신망과 연결할 수 있도록 개발하였으며, 이를 통해 기본적으로 유선 LAN을 연결하여 데이터를 서버로 전송할 수 있도록 개발함.
- 추가적으로 건설현장의 특성상 통신망 확장이 어렵거나 통신망 방화벽으로 인하여 접속이 어려운 경우를 고려하여 LTE 라우터 연결을 통해 무선 LTE망을 이용하여 언제 어디서나 계측 데이터를 쉽게 서버로 전송할 수 있도록 함. 건설현장의 특성상 현장 준비 초기 단계에 유선 네트워크망의 조성이 어려운 경우가 많으며, 이에 따라 별도의 무선망 이용이 불가피한 경우가 있으므로 LTE의 활용이 주요할 것으로 사료됨.
- 또한, 본 연구에서는 언제 어디서나 서버 유지관리가 용이한 웹클라우드를 데이터 서버로 선정하여 데이터의 효율적인 저장 및 관리가 이루어질 수 있도록 하였음.
- 본 연구에서 개발한 건설현장 모니터링 네트워크에서 계측 데이터를 웹클라우드 서버로 전송하기 위해 적용된 기술은 그림2-28과 같음.

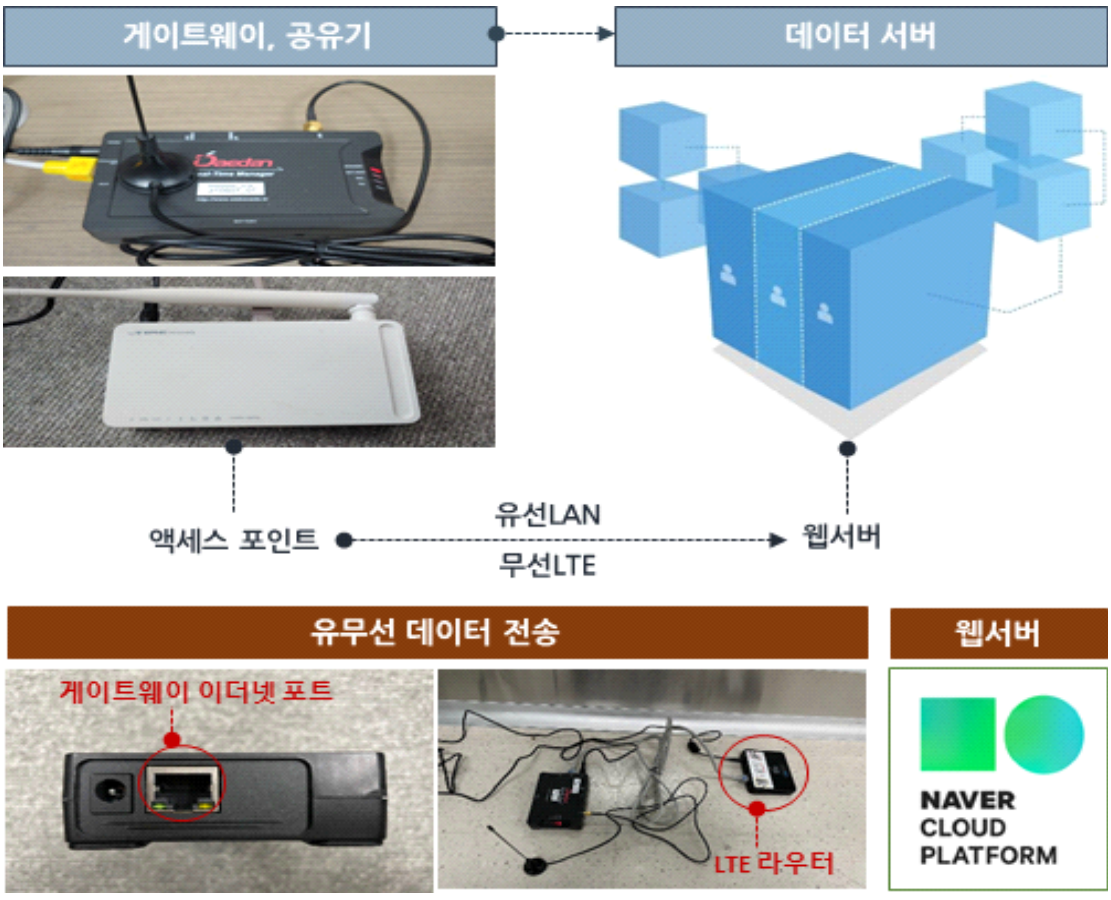


그림 2-28. 통신거리 측정 방법

5) 건설현장 미세먼지 모니터링 프로그램 서비스 개발

❍ 프로그램 명칭

- CPMS : Construction Particulate Monitoring System

❍ 프로그램 기능 검토

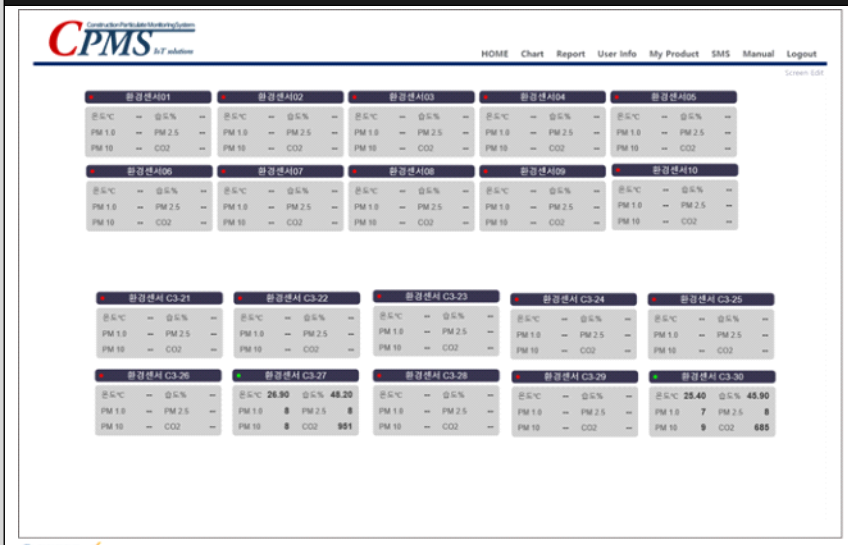
- 본 연구의 주요 서비스 대상인 현장관리자는 건설현장 내 다지점에서 발생하는 배출 이벤트를 동시에 확인할 수 있어야 하고 환경 데이터의 경향을 직관적으로 관리할 수 있어야하며, 특정 지점에서 고농도 상황 발생 시 실시간으로 해당 상황을 인지하고 대응할 수 있어야 함.
- 이에 본 연구에서는 모든 센서 지점 별 데이터를 동시에 확인할 수 있는 기능, 시간 별 데이터 차트 기능, 시간 별 데이터 저장 · 출력 기능, 그리고 고농도 SMS 알림 기능을 탑재한 현장관리자 맞춤형 건설현장 미세먼지 모니터링 웹기반 프로그램 CPMS를 개발함.
- 해당 기능들은 프로그램 내의 Home, Chart, Report, My Product, Manual, SMS 페이지로 나뉘어 구성되어 있으며, 이중 Home, Chart, Report, SMS 페이지가 주요 기능들을 담당함.
- 특히, 이 중 SMS의 경우 수신자 리스트를 등록하여 특정된 센서 모듈에서 특정 조건의 이벤트가 특정 기간 동안 지속 발생할 경우 해당 수신자에게 이벤트 발생에 대한 알림 서비스를 제공하는 기능을 하며, 이를 통해 사용자는 실시간으로 이벤트가 발생한 위치와 상황을 인지할 수 있고 즉각적인 관리 대응이 가능해진다. 본 기능은 PM 뿐만 아니라 온도, 습도, CO2 조건도 설정하여 통합적인 환경에 대한 알림을 실시간으로 제공받을 수 있도록 구성됨.
- 본 연구를 통해 개발한 CPMS의 기능 및 화면구성은 표2-42과 같으며, SMS 기능을 통해 서비스 수신자에게 제공된 실시간 알림문자 샘플은 그림2-29와 같음.

표 2-42. CPMS 기능 및 화면구성

No.	기능 및 화면구성
1	로그인 및 가입
	
	■ 프로그램 사용자 신규가입 또는 로그인

2

HOME



■ 계측기 별 실시간 데이터 및 전원 상태 확인

3

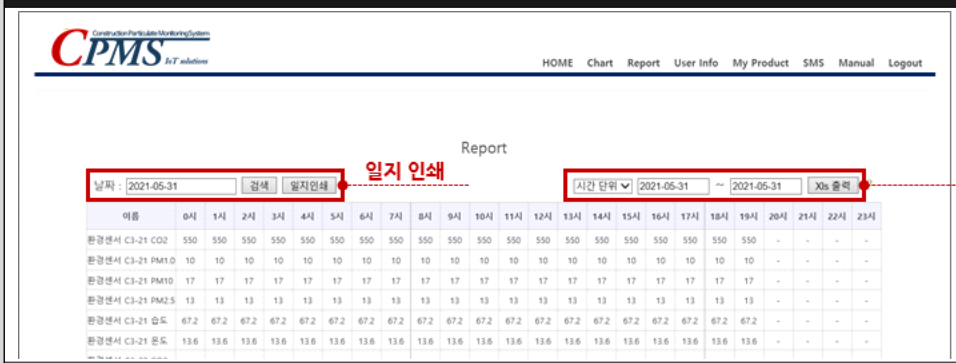
Char t



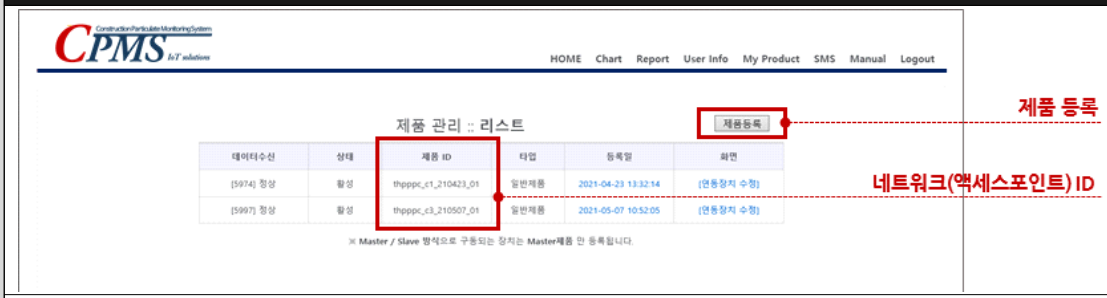
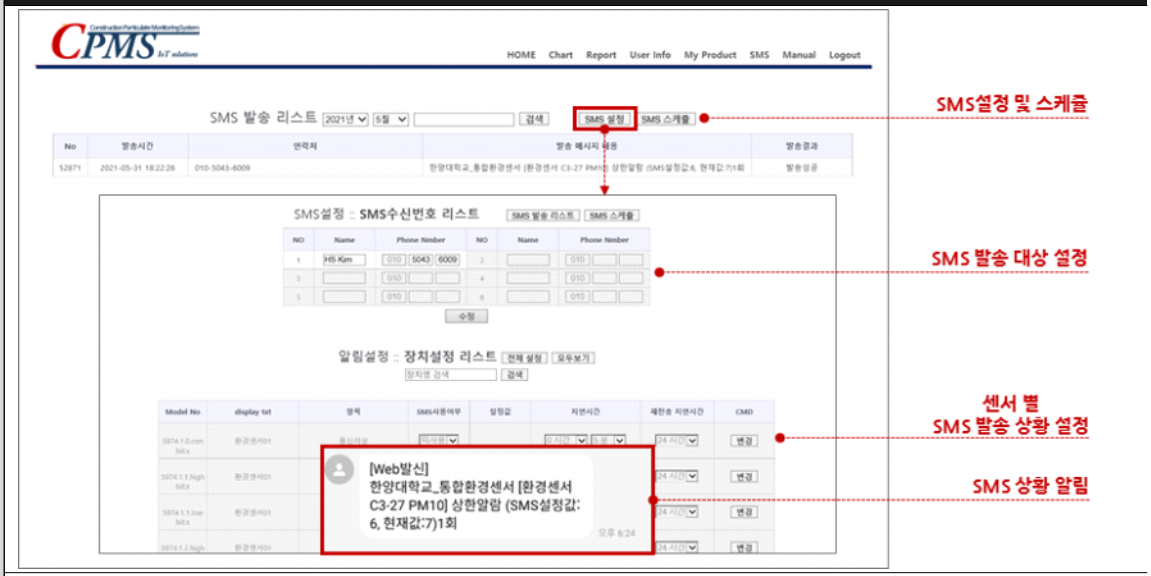
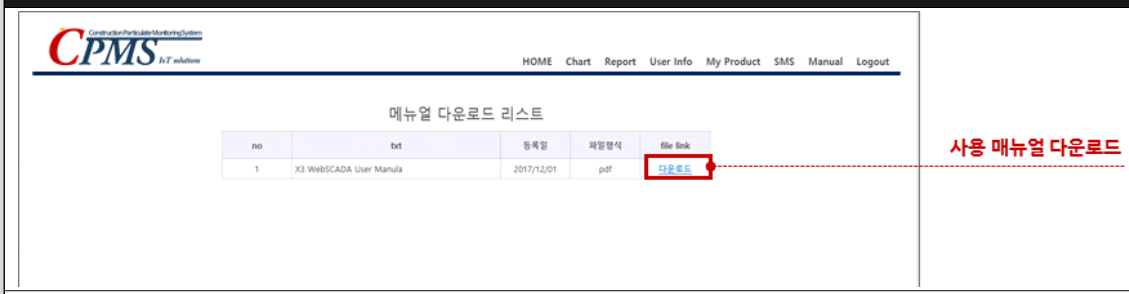
■ 사용자의 필요에 따라 원하는 센서 모듈 중 원하는 데이터를 선택하여 일정기간 동안의 해당 데이터의 변화를 직관적으로 확인할 수 있도록 그래프 제공

4

Repor t

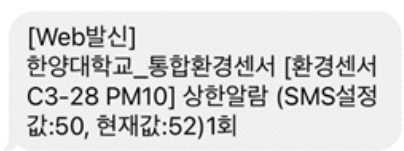


■ 원하는 날짜의 데이터 일지를 인쇄하거나 원하는 기간의 데이터를 1분 단위 또는 5분 단위의 Xls 파일 형태로 출력하는 기능

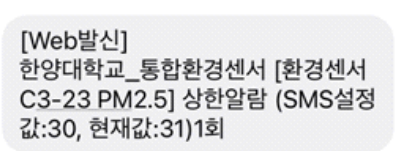
5	**My Product**  ▪ 액세스 포인트(게이트웨이)를 하나의 제품으로 등록하고 등록된 제품을 중심으로 연동된 장치들을 함께 등록함으로써 효율적인 네트워크 관리가 가능하도록 지원
6	**SMS**  ▪ 수신자 리스트를 등록하여 특정된 센서 모듈에서 특정 조건의 이벤트가 특정 기간 동안 지속 발생할 경우 해당 수신자에게 이벤트 발생에 대한 알림 서비스를 제공
7	**Manual**  ▪ 각종 매뉴얼 등 등록된 자료들을 링크를 통해 사용자 다운로드 지원

[Web 발신]
네트워크명 [센서명] 알람항목 (SMS 설정값:00, 현재값:00) 00회

SMS format



(a) PM10 sample



(b) PM2.5 sample

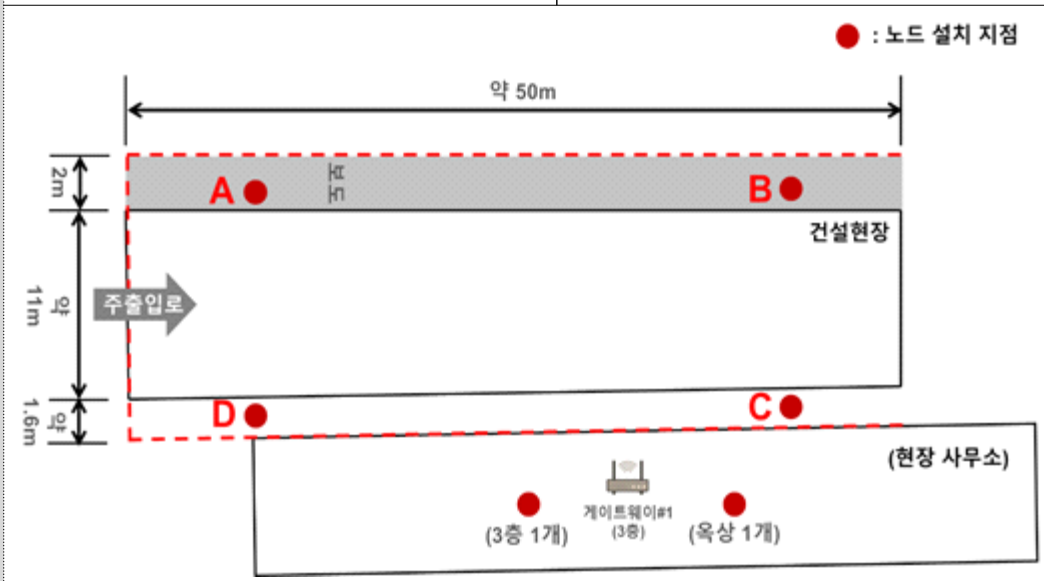
그림 2-29. SMS 알림문자 샘플

6) 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 현장적용

❍ 대상 현장 개요

- 본 연구에서 개발한 모니터링 시스템을 시범적용한 현장은 표2-43과 같음.

표 2-43. 대상 현장 개요

사 업 명	한양대학교 ERICA캠퍼스 스마트 건축관			
대지위치	경기도 안산시 상록구 한양대학로 55 외 4필지			
지역지구	도시지역, 자연녹지지역, 상대보호구역			
건축용도	교육연구시설 (대학교)	**연 면 적**	328,753,487	㎡
건축구조	철골조	**건 폐 율**	9.22	%
건축규모	지상2층	**용 적 률**	26.61	%
대지면적	1,121,128 ㎡	**건축면적**	13,319,580	㎡
사 진	 (a) 대상현장 완공 전경 (정면)		 (b) 대상현장 완공 전경 (후면)	
	 (c) 노드 설치 개요			

❍ 모니터링 시스템 현장적용 테스트 개요

- 본 연구에서 개발한 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템을 현장에 직접 적용하여 네트워크의 정상 작동 여부 및 내구성을 확인하는 테스트를 진행함.
- 건설현장에 별도 현장 사무소가 설치되지 않은 관계로 인접한 건물을 현장사무소로 가정하여 액세스 포인트를 설정하고 네트워크를 구성함.
- 건설현장 경계에는 총 4개의 지점에 계측기 노드를 설치하였으며, 현장 사무소 내 1개 지점과 현장 사무소 옥상에 노드를 설치함.
- 테스트는 2021년 6월 22일부터 8월 21일까지 2개월간 진행되었으며, 실외 환경에서의 장기간 노출을 통하여 내구성을 확인하고 먼지 배출 이벤트 발생 시 시스템의 작동 여부를 확인함.
- 테스트 현장의 네트워크 구성을 위한 노드 설치 지점은 그림2-30과 같음.



<A지점> <B지점> <C지점> <D지점>

(a) 건설현장 계측기 노드 설치 지점



현장사무소 옥상 현장사무소 실내

(b) 현장사무소 계측기 노드 설치 지점 별 계측기

그림 2-30. 테스트 현장 네트워크 구성

❍ 모니터링 시스템 현장적용 테스트 결과

- CPMS 프로그램의 Home 화면상에 그림2-31과 같이 네트워크를 통해 수집된 데이터가 정상적으로 실시간 서비스되는 것을 확인함.
- 특히, 테스트 기간 동안 외부에 설치된 계측기 노드들은 모두 고온 다습하고 비바람이 심한 여름 환경에서 정상 작동하는 것을 확인함.



그림 2-31. 센서 정상 작동 여부

- 공기 중 미세먼지의 기본 농도가 높거나 테스트 현장에서 먼지를 유발하는 건설행위가 이루어지는 경우 그림2-32와 같이 분명한 농도 변화가 관측되는 것을 확인함.

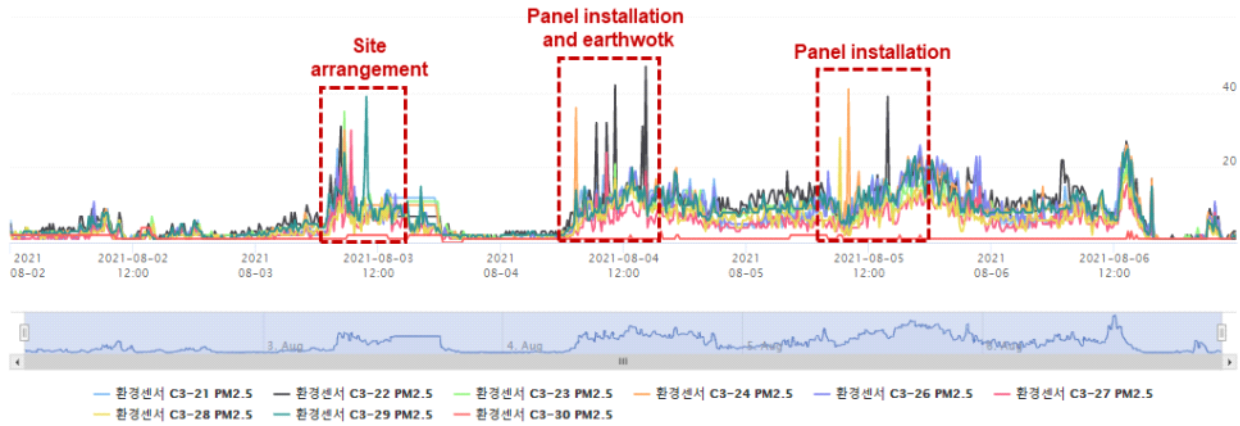
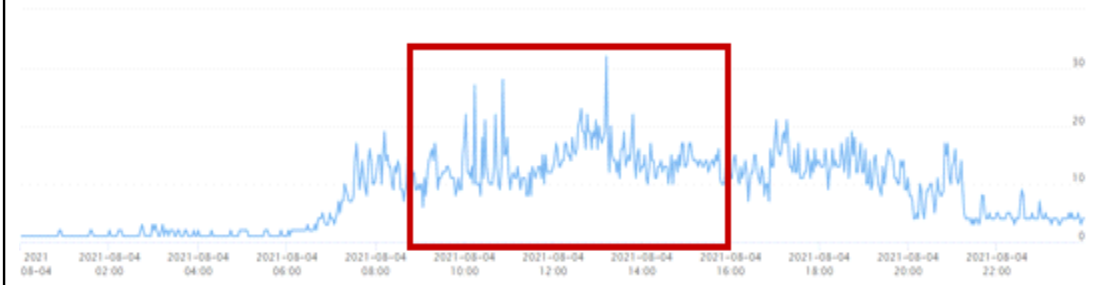
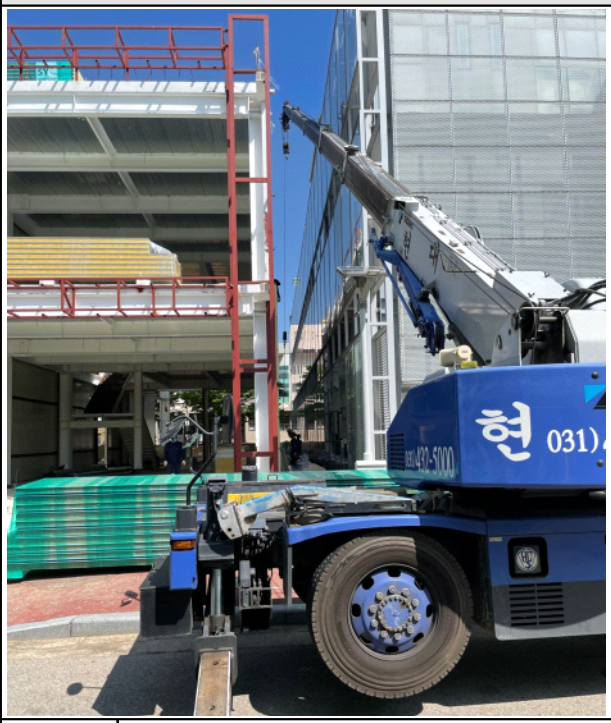
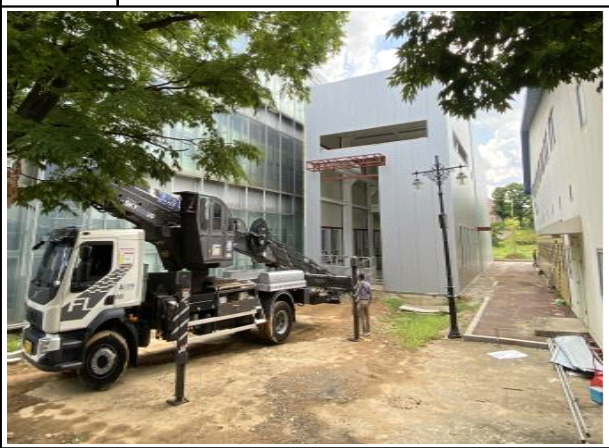


그림 2-32. PM2.5 농도 변화 (8월2일~8월6일)

- 특히, 본 테스트 기간 동안 4회의 현장 내 미세먼지 발생 이벤트가 확인되었으며, 주로 굴삭기와 기중기를 활용한 현장 내 작업 및 이동으로 인한 미세먼지 발생을 확인함.
- 각 이벤트가 이루어지는 위치 인근에 설치된 계측기를 통해 농도 변화 데이터를 표2-44와 같이 수집할 수 있었으며, 이에 따른 실시간 먼지발생 상황에 대한 정보를 효과적으로 획득할 수 있었음.

표 2-44. 모니터링 시스템 현장적용 테스트 관측 결과

미세먼지 이벤트	내용
이벤트 1	
	PM10 
이벤트 2	 
	싣기 지점 내리기 지점
	PM10 

미세먼지 이벤트	내용
이벤트 3	 
PM10	
이벤트 4	 
PM10	

(2) 건설현장 미세먼지 모니터링 활성화 전략

1) 시장여건 분석

❍ 건설현장 미세먼지 사회적 문제해결 니즈

- 국내 미세먼지 발생요인 중 1위는 국내 총 PM2.5 배출량의 38%에 해당하는 사업장 배출이며, 2위는 16%에 해당하는 건설장비 및 차량으로써 두 항목은 전체 배출량의 54%를 차지함.
- 환경부의 대기오염물질 배출원 분류 카테고리 중 건설현장과 직접적으로 관련된 카테고리는 비산먼지와 비도로이동오염원으로서, 배출원 별 대기오염물질 배출량 통계자료를 활용하여 두 카테고리의 2017년(최근 데이터) 1년간 PM10 배출량을 분석한 결과 각각 109,932ton/yr, 16,194ton/yr로 나타났다. 이는, 전체 PM10 배출량의 50.3% 및 7.4%에 해당하는 수치이며, 배출원 카테고리 중 1위와 3위에 해당하는 결과임.
- 특히, 이 중 건설현장에서 발생하는 PM10의 양은 비산먼지 카테고리의 세부 항목 중 건설공사 항목과 비도로이동오염원 카테고리의 세부 항목 중 건설장비 항목을 통해 산정되는데, 2017년에 각각 36.553ton/yr와 6.086ton/yr 배출한 것으로 나타났다. 이는 비산먼지 카테고리에서 가장 크고 비도로이동오염원 카테고리에서는 두 번째로 높은 수치로써 한국의 건설현장 미세먼지가 극심하다는 것을 의미함.
- 국외의 연구에서도 이와 유사한 결과를 확인할 수 있는데, 미국에서의 연구결과에 따르면 총 84개의 particulate matter(PM) emission source categories 중 건설공사 시 fugitive dust 발생에 가장 큰 영향을 미치는 Unpaved Road Dust 및 Construction Dust 카테고리가 각각 1위와 8위로 분석됨.
- 추가적으로 환경부의 통계에 따르면 먼지 발생사업장 관련 민원 현황 중 전체 사업장 민원의 약90%에 달하는 건설현장 먼지 민원이 발생하는 것으로 집계되며, 이는 건설현장에서 발생하는 먼지가 인근 주민 및 현장근로자의 건강에 악영향을 미칠 수 있다는 것을 의미함.
- 국내 건설현장 미세먼지 심각성에 대한 통계는 그림2-45와 같음.

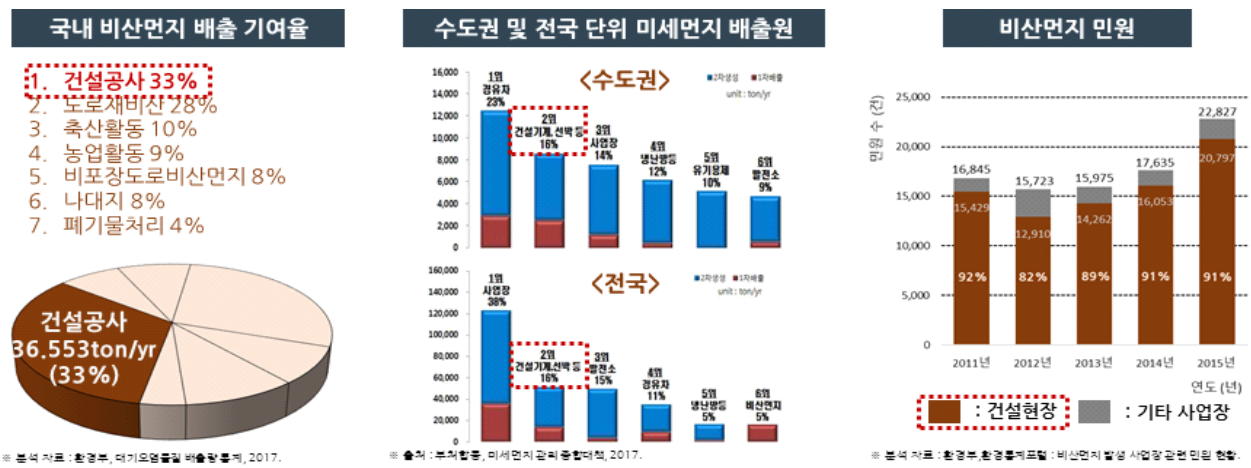
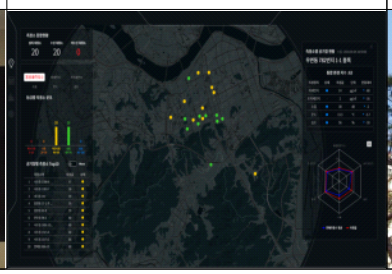


그림 2-45. 국내 건설현장 먼지의 사회적 심각성

❍ 건설현장 미세먼지 모니터링 기술의 시장 현황

- 최근 IoT를 활용한 미세먼지 관리와 관련된 연구가 다양하게 이루어지고 있는 가운데 2019년부터 지자체 공공시설물을 중심으로 기술 시범도입 사례가 늘고 있으며, 대표적인 사례로는 표2-45와 같이 인천시 서구, 서울시 서초구, 서울시 동작구가 있음.
- 2021년 경기도는 건설현장 미세먼지 측정 의무화에 대한 내용을 포함한 대기환경보전법 및 소음·진동관리법 개정 건의안을 정부에 제출하였으며, 이를 계기로 향후 수도권을 중심으로 건설현장 미세먼지 모니터링 시장이 본격적으로 활성화 될 것으로 예상됨.
- 또한, 최근 정부에서 국가재난안전통신망(Public Safety-Long Term Evolution; PS-LTE)을 구축하여 재난 대응 서비스의 효율화를 추진하고 있는 가운데 대기오염관리 또한 PS-LTE를 통해 정부 기관 또는 지자체에서 관리할 수 있도록 논의되고 있음.

표 2-45. 건설현장 미세먼지 모니터링 실시 대표사례

구분	대표사례1	대표사례2	대표사례3
사례	인천시 서구 (건설현장 21개소)	서울시 서초구 (건설현장 20개소)	서울시 동작구 (관내 연면적 10,000㎡ 이상 재개발·재건축)
사진			

- 현행 건설현장 미세먼지 모니터링은 주로 광산란 방식의 대형 실외용 계측기 설치를 통해 이루어지고 있음.
- 하지만, 이러한 계측기의 채용은 한 지점에서 고정계측만을 수행할 있다는 데에 한계가 있으며, 이로 인해 건설현장을 하나의 점오염원으로써만 모니터링 할 수 있기 때문에 실효성이 부족한 실정임.
- 또한, 계측기의 부피로 인하여 현장 내 실내 모니터링에 적용하기 부적절하고 높은 가격으로 인해 다수의 계측기를 동시 적용하기에 어려움이 있음.

❍ 본 연구 기술의 시장 특화점

- 현재 건설현장을 점오염원이 아닌 면오염원으로써 인지하고 현장 내 다양한 지점에서 발생하는 미세먼지에 대하여 정밀하게 모니터링 할 수 있는 기술이 시장에 없는 바, 표2-46과 같이 기존에 활용되고 있는 시스템과 대비되는 본 연구의 시스템의 특화점을 통해 수요가 높아질 것으로 예상되는 건설현장 미세먼지 모니터링 시장을 개척할 수 있을 것으로 사료됨.

표 2-46. 기존 미세먼지 모니터링 시스템 대비 본 연구개발 시스템의 특화점

구분		본 연구	기존 미세먼지 모니터링 시스템						
			LABCO 社 파티클 모니터링 시스템 (LPC-P6)	LABCO 社 미세먼지 모니터링 시스템 (LYS-100L)	㈜센서로닉 社 미세먼지 모니터링 시스템 (PM Scan 실외용)	뉴질랜드 Aeroqual 社 Dust & Particulate Monitors (Dust Sentry Pro)	미국 TSI 社 Dust Monitor (Dusttrak 8533)	유럽 EMS 社 Dust Monitor (DustSonde)	인도 OIZOM 社 Ambient Dust Monitor (Dustroid Smart)
센서 모듈 측면	측정방식	광산란 방식	광산란 방식	광산란 방식	광산란 방식	광산란 방식	광산란 방식	광산란 방식	광산란 방식
	주요측정항목	PM1.0/2.5, CO2, 온도, 습도	PM0.3/0.5/1.0/ 3.0/5.0/10	PM2.5/10	PM1.0/2.5/10, 온도, 습도	PM1.0/2.5/10, TSP	PM1.0/2.5/10, TSP	PM1.0/2.5/10, TSP	PM1.0/2.5/10, 온도, 습도
	적용대상	건설현장, 실내 등	지하철역 등	건설현장 등	학교, 공원 등	건설현장 등	건설현장 등	건설현장 등	건설현장 등
	전력공급 방식	전원/배터리	전원/배터리	전원	전원	전원	배터리	전원/태양광	전원/태양광
	적용방식	고정식/이동식	이동식	고정식	고정식	고정식	이동식	고정식	고정식
	휴대성	O	O	X	X	X	O	X	X
	상시 모니터링	O	X	O	O	O	X	O	O
	가격	저가	고가	고가	고가	고가	고가	고가	고가
	단가	2,500,000 ~ 3,000,000원	5,000,000 ~ 6,000,000원	5,000,000 ~ 6,000,000원	-	25,000,000원 ~	16,000,000원 ~ 18,000,000원	-	한화 약 4,300,000원
데이터 통신 측면	데이터 송신 방식	유선, 무선	유선	유선, 무선	유선, 무선	유선, 무선	유선	유선, 무선	무선
	데이터 기록 방식	LAN, LTE	데이터 내장형	이더넷, 블루투스	이더넷, 와이파이	내장형 하드드라이브, 이더넷, 와이파이	데이터 내장형	데이터 내장, 이더넷, 와이파이	이더넷, 와이파이
	데이터 출력 방식	Web 기반	자체 디스플레이, 프린트	전용 소프트웨어	자체 디스플레이, 전용 소프트웨어	자체 임베디드 PC, Web 기반, 전용 소프트웨어	자체 디스플레이, 전용 소프트웨어	-	Web 기반

본 연구 개발 모니터링 시스템의 특화점	건설현장에 특화된 모니터링 성능 확보		
	온도, 습도 센서 기본 탑재 및 가격	**상시 모니터링과 휴대성 동시 확보**	**언제 어디서나 모니터링 데이터 기록 및 출력 가능**
	■ 타 계측기기는 일반적으로 온도 및 습도 센서를 별도로 구성해야 함. ■ 본 계측기기는 이러한 기능을 기본으로 탑재하여 PM 농도 데이터와 온도/습도 데이터의 상관성을 분석할 수 있음. ■ 또한, 이와 같이 다양한 데이터를 동시에 모니터링함과 동시에 가격 측면에서도 타 시스템들 대비 경쟁력을 확보함.	■ 타 기술의 경우 상시 모니터링이 가능한 계측기기의 경우 고정형으로써 휴대성 확보가 어려우며, 휴대가 용이한 기기의 경우 상시 모니터링에 활용이 어려움. ■ 본 기술은 센서모듈 자체를 이동 할 수 있도록 구성하여 휴대성을 확보함과 동시에 상시 모니터링이 가능함.	■ 타 기술의 경우 대부분 계측기기 내 임베디드 PC를 통한 디스플레이나 전용 프로그램이 설치된 디바이스를 통해 데이터를 출력함. ■ 본 기술은 Web 기반으로 데이터를 출력하여 어떤 디바이스든 인터넷 사용만 가능하다면 실시간 모니터링이 가능함.

❍ 시장 여건 분석 결과

- 건설현장에서 발생하는 미세먼지의 심각성이 부각됨에 따라 건설현장을 대상으로 효율적인 모니터링 관리에 대한 시장의 니즈가 높으며, 이에 따라 실제 기술에 대한 수요조사가 이루어져야함.
- 최근 지자체와 정부부처를 중심으로 건설현장 미세먼지 모니터링 시범사업이 활성화되고 논의됨에 따라 모니터링 시스템의 초기 수요는 지자체와 정부가 될 것으로 사료됨.
- 국가 차원의 재난 안전 통신망인 PS-LTE의 확대에 따라 지자체 및 정부를 통해 시장 활성화를 하기 위해서는 해당 통신망을 통해 데이터를 전송할 수 있도록 구체적인 협의가 필요하며, 기존 PS-LTE 망을 통해 서비스하고 있는 데이터를 본 연구개발 시스템과 연계할 수 있도록 해야함.
- 현행 관련 시장에는 건설현장에 특화된 미세먼지 모니터링 기술이 부재한 바, 본 연구 개발 시스템의 특화점을 다양한 시범사업에 확대 적용하여 상품성 개선 요소를 도출하고 기술 보완을 진행해야할 것으로 사료됨.

2) 사업 활성화 전략

❍ 사업화 5개년 전략

- 본 연구 개발 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템의 실용화를 위해 표2-47과 같이 사업화 5개년 전략을 수립함.
- 특히 본 연구성과의 사업화는 본 연구과제의 공동연구기관인 주식회사 대단과 기술이전 및 사업화에 관한 구체적인 협의를 통해 진행하고자 함.
- 또한 본 연구에서 개발된 미세먼지 통합관리 시스템의 실내외 장기 모니터링 실험을 통해 수집된 데이터의 신뢰성 확보 및 유지관리 측면의 기술적 점검을 실시하고자함.
- 더불어 기술사업화에 필요한 시장분석 및 수요 조사를 통해 건설현장 뿐 만 아니라 이동 및 부착이 용이한 소형 미세먼지 측정 장치를 필요로하는 다양한 분양의 상용화를 검토할 예정임.

표 2-47. 기술 사업화 5개년 전략

구분		2022년		2023년		2024년		2025년		2026년	
		상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
공동기관 업무협약	사업화 전략 협의	■									
	기술이전 협의	■									
수요 조사	산업체 (건설사, 컨설팅사)	■	■								
	R&D연계 (국토교통기술사업화 등)	■		■		■		■		■	
기술 보완	센서 온도 보정 계수 연구	■	■								
	실내 장기 모니터링 실험	■	■	■	■						
	옥외 장기 모니터링 실험		■	■	■	■	■	■	■	■	
시범 사업	한양대 스마트 캠퍼스 시범사업		■	■	■	■	■				
	카카오 데이터 센터 시범 사업		■	■	■						
	한양대 허브 빌딩 시범 사업	■	■	■							
사업화	기술 홍보 자료 제작	■									
	기술 설명회 개최	■		■		■		■		■	
	기술이전	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	공동기관 통한 사업화 또는 창업		■	■	■	■	■	■	■	■	■

3세부	
PMS	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발

연구 목표	건설현장 미세먼지 측정 통합관리 시스템 개발 및 건설현장 관련 미세먼지 관리 제도개선 연구를 수행함.
연구 내용	① IoT 센서 적용 미세먼지 모니터링 플랫폼 구축 ② 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 구축 ③ 건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업 수행

연구 프로세스

1차년				2차년				3차년			
1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기	1분기	2분기	3분기	4분기
–	① IoT 센서 적용 미세먼지 모니터링 플랫폼 구축										
				② 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 구축							
									③ 건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업 수행		

개발 성과

①	건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼 대표성과
②	건설현장 미세먼지 통합관리 시범사업 수행 보고서

수행 방법

연차	주요 연구활동	관련 성과 ①	관련 성과 ②
1차 년도 (2019)	■ 미세먼지 관리 평가 플랫폼 개발		
2차 년도 (2020)	■ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 개발		
3차 년도 (2021)	■ 건설현장 미세먼지 측정 및 통합관리 시범사업		
	■ 건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 사용자 매뉴얼		

(1) 건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼 개발

1) 건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼 구성

❍ 건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼(CPM) 개요

- 건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼(CPM : Construction Particulate Management)은 건설현장 미세먼지의 배출 저감·관리를 목적으로 건설의 계획 및 설계단계에서 미세먼지 배출량을 정량적으로 예측 및 평가하고 평가 결과를 토대로 시공단계에서 건설현장 미세먼지 농도 모니터링을 실시하여 모니터링 결과에 따른 미세먼지 관리 솔루션을 제시함.
- 건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼의 핵심 기술은 그림2-46과 같이 크게 건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 기술과 건설현장 미세먼지 실시간 모니터링 관리 기술로 구분됨.
- 건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 프로그램(CPMA) : 건설 프로젝트의 개요 및 설계 정보를 토대로 현장에서 미세먼지를 야기하는 건설활동 정보를 구축된 건설장비별 미세먼지 배출계수 데이터베이스와 연결하여 총 배출량 및 건설장비별 배출량을 예측하며, 예측된 총 배출량은 해당 현장의 미세먼지 배출허용총량 기준에 부합하는지 평가함.
- 건설현장 미세먼지 실시간 모니터링 관리 시스템(CPMS) : 설계단계에서 도출된 주요 모니터링 대상 배출원 정보를 토대로 센서 네트워크 구성을 위한 계측기 설치 위치를 선정하고, 계측값이 기준을 초과한 경우 해당 계측기가 설치된 위치에서 근접한 주요 배출활동에 대한 미세먼지 저감·관리 솔루션을 제공함.

그림 2-46. 건설현장 미세먼지 통합관리 플랫폼 구성

❍ 건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 프로그램(CPMA)

- CPMA 프로그램의 경우 정보 입력 화면에 설계 도면을 통해 도출할 수 있는 일반정보와 공내역서를 통해 도출할 수 있는 토공량, 투입자재량, 그리고 건설장비 이동량 정보를 입력하며, 해당 정보를 건설장비 별 건설활동 배출계수와 연동하여 공종 별, 건설장비 별 배출량 및 총 배출량 예측 · 평가 결과를 출력하도록 구성함.
- 최종적으로 총 배출량에 대한 평가 결과는 배출허용총량 기준에 따라 적격과 부적격으로 구분되도록 구성함.
- CPMA의 화면 구성은 표지, 정보 입력, 결과 출력으로 이루어졌으며, 이는 각각 그림2-47, 그림2-48, 그림2-49과 같음.



그림 2-47. CPMA 표지

프로젝트 명	스마트 건축관 신축공사					연면적(㎡)	498.9
공사유형	건축(비주거용)	공사기간(일)	180	대지면적(㎡)		건축면적(㎡)	319.87

건축공사								
공종	건설장비	대상자재	작업유형	작업량	단위	작업시간	단위	비고
가설공사	mp truck(8ton)	가설자재	이동	0.30	km		미기입	
가설공사	mp truck(8ton)	가설자재	이동	0.30	km		미기입	
토공사	ncrete mixer(15t	레미콘	이동	0.10	km		미기입	
조경공사	cavator	흙	작업	723.00	ton		hr	
기초공사	cavator	흙	작업	48.00	ton		hr	
철근콘크리트공사	cavator	흙	작업	21.00	ton		hr	
들공사								
철골공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입	
조적공사	dump truck(8ton)	아스팔트	이동	1.40	km		미기입	
토공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입	

그림 2-48. CPMA 정보 입력 화면

스마트 건축관 신축공사

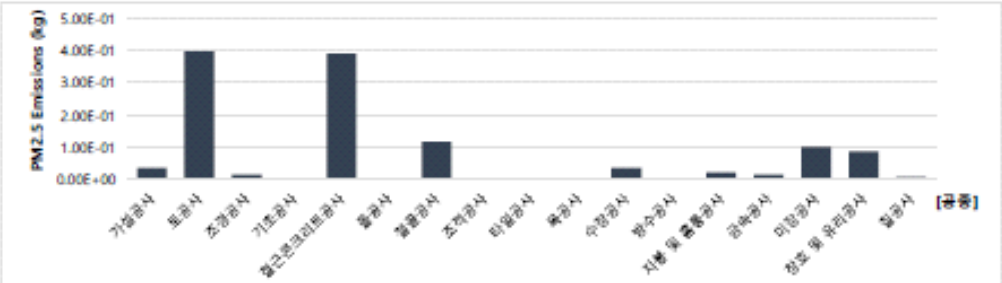
Construction site PM emission assessment results

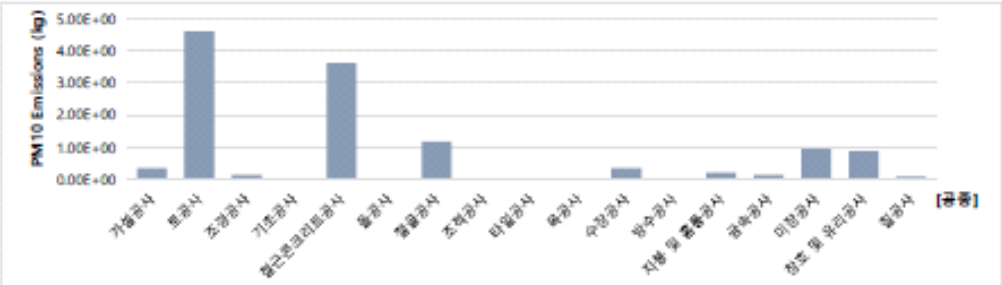
1. Project general information

프로젝트명	스마트 건축관 신축공사	
공사유형	건축(비주거용)	
대지면적	-	m²
건축면적	319.87	m²
연면적	498.90	m²
총 공사기간	0.49	yr

2. PM results (by construction work type)

공종	Fugitive emissions (kg)		Direct emissions (kg)		Total emissions (kg)	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
[건축공사]						
가설공사	3.34E-02	3.34E-01	2.38E-04	2.58E-04	3.36E-02	3.34E-01
토공사	3.96E-01	4.60E+00	8.32E-04	9.03E-04	3.97E-01	4.60E+00
조경공사	1.11E-02	1.11E-01	7.92E-05	8.60E-05	1.12E-02	1.11E-01
기초공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
철근콘크리트공사	3.57E-01	3.57E+00	3.24E-02	3.52E-02	3.90E-01	3.61E+00
돌공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
철골공사	1.14E-01	1.14E+00	6.73E-04	7.31E-04	1.15E-01	1.14E+00
조적공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
타일공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
목공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
수장공사	3.34E-02	3.34E-01	2.38E-04	2.58E-04	3.36E-02	3.34E-01
방수공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
지붕 및 홈통공사	1.95E-02	1.95E-01	1.19E-04	1.29E-04	1.96E-02	1.95E-01
금속공사	1.11E-02	1.11E-01	7.92E-05	8.60E-05	1.12E-02	1.11E-01
미장공사	9.24E-02	9.24E-01	6.35E-03	6.91E-03	9.87E-02	9.31E-01
창호 및 유리공사	8.49E-02	8.49E-01	5.64E-04	6.13E-04	8.55E-02	8.50E-01
칠공사	5.56E-03	5.56E-02	3.96E-05	4.30E-05	5.60E-03	5.56E-02
Subtotal	1.16E+00	1.22E+01	4.16E-02	4.52E-02	1.20E+00	1.23E+01
[기타 토목공사]						
도로포장공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
하천공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
터널공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
궤도공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
강구조공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
관부설 및 접합공사	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Subtotal	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	1.16E+00	1.22E+01	4.16E-02	4.52E-02	1.20E+00	1.23E+01

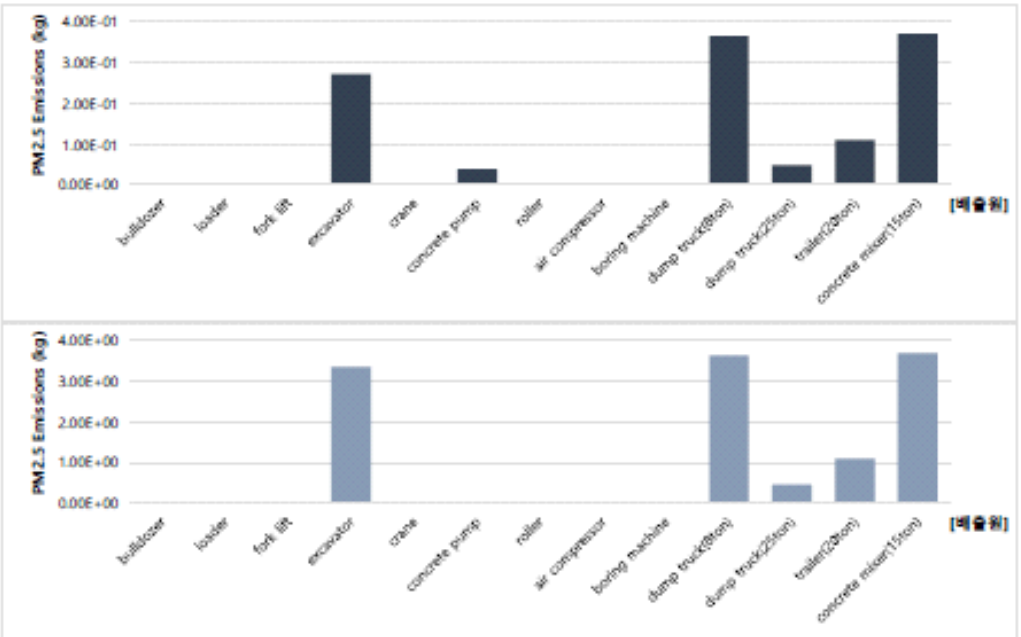




(a) Page 1

3. PM results (by construction equipment)

construction equipment	Fugitive emissions (kg)		Direct emissions (kg)		Total emissions (kg)	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
[건축공사]						
bulldozer	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
loader	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
fork lift	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
excavator	2.71E-01	3.35E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.71E-01	3.35E+00
crane	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
concrete pump	0.00E+00	0.00E+00	3.63E-02	3.95E-02	3.63E-02	3.95E-02
roller	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
air compressor	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
boring machine	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
dump truck(8ton)	3.63E-01	3.63E+00	2.58E-03	2.81E-03	3.65E-01	3.63E+00
dump truck(25ton)	4.64E-02	4.64E-01	1.98E-04	2.15E-04	4.66E-02	4.64E-01
trailer(20ton)	1.09E-01	1.09E+00	5.15E-04	5.59E-04	1.10E-01	1.09E+00
concrete mixer(15ton)	3.69E-01	3.69E+00	1.98E-03	2.15E-03	3.71E-01	3.69E+00
Subtotal	1.16E+00	1.22E+01	4.16E-02	4.52E-02	1.20E+00	1.23E+01
[기타 토목공사]						
bulldozer	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
loader	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
fork lift	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
excavator	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
crane	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
concrete pump	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
roller	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
air compressor	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
boring machine	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
dump truck(8ton)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
dump truck(25ton)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
trailer(20ton)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
concrete mixer(15ton)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Subtotal	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	1.16E+00	1.22E+01	4.16E-02	4.52E-02	1.20E+00	1.23E+01



4. 건설현장 미세먼지 총 배출량 평가 결과

단위배출량 기준 (kg/㎡)	주거용 건축물		비주거용 건축물		building type
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	
	4.70E-02	1.57E-01	6.28E-02	3.16E-01	건축(비주거용)
배출허용총량 기준 (kg/yr)	PM2.5	PM10	평가 결과		
	6.35E+01	3.20E+02	PM2.5		PM10
본 프로젝트 연간 총 배출량 (kg/yr)	PM2.5	PM10	적격		적격
	2.43E+00	2.49E+01			

(a) Page 2

그림 2-49. CPMA 결과 출력 화면

❍ 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템(CPMS)

- CPMS의 경우는 기본 구성이 크게 하드웨어 부문과 소프트웨어 부문으로 구분되며, 이에 대한 전체적인 구성은 그림2-50과 같음.
- 특히, 소프트웨어 부문에서는 그림2-51과 같이 실시간 건설현장 미세먼지 농도 모니터링 프로그램을 개발했으며, 이를 통해 현장관리자에게 실시간 모니터링 서비스를 제공함.

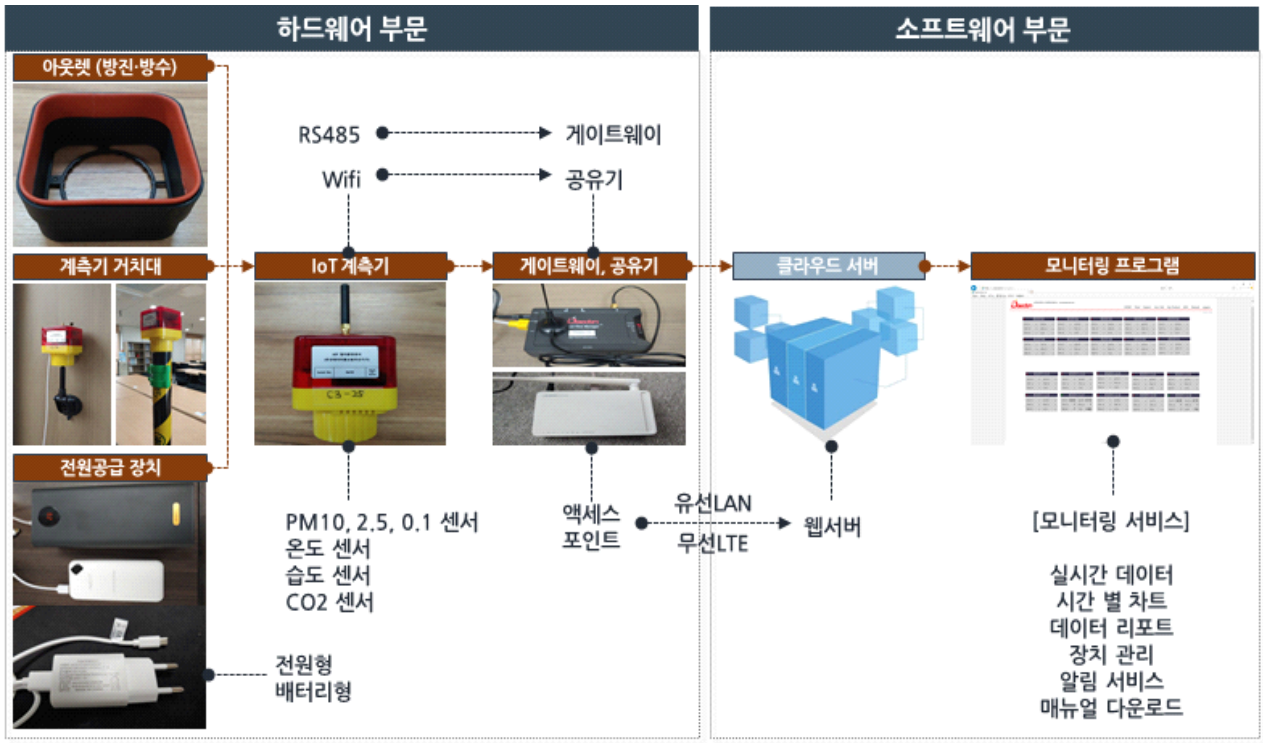


그림 2-50. CPMS 전체 구성

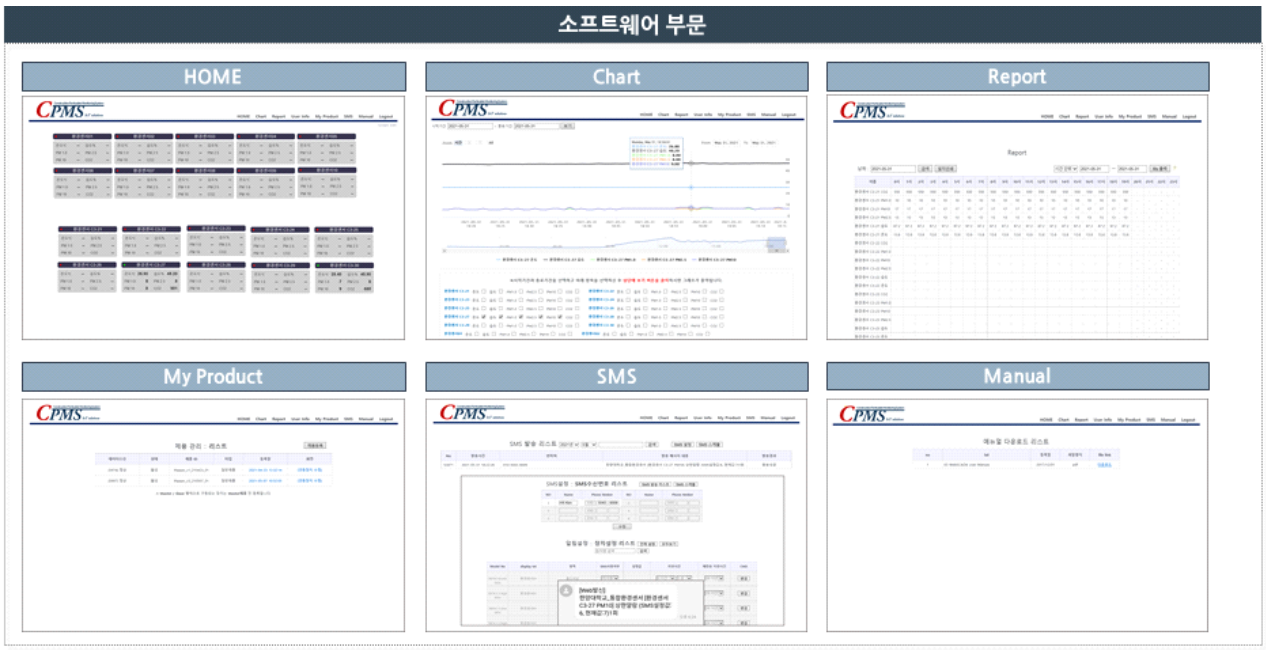


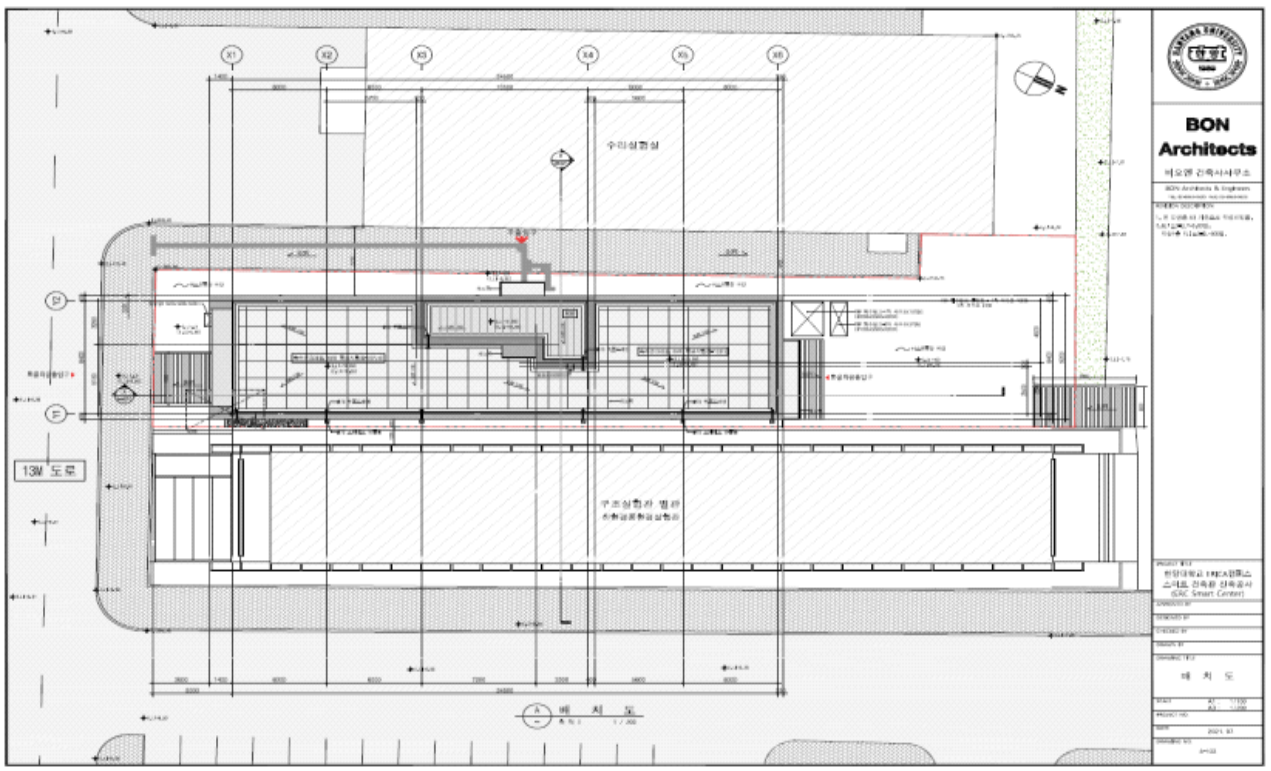
그림 2-51. CPMS 프로그램 주요 구성

2) 건설현장 미세먼지 통합 플랫폼 시범사업

❍ 시범사업 대상 개요

- 본 연구에서는 건설현장 미세먼지를 설계단계에서 정량적으로 관리하기 위하여 미들웨어1로 개발한 CPMA 프로그램을 활용한 건설현장 미세먼지 배출량 예측·평가를 수행하였으며, 이후 CPMS를 통한 시공단계 실시간 모니터링도 함께 수행함.
- 시범사업 대상 건축 프로젝트의 경우 경기도 안산시에 위치한 비주거용 건축물로써 대상 건축 프로젝트에 대한 기본 정보는 표2-48과 같음.

표 2-48. 시범사업 대상 개요

기본 정보	
프로젝트 명	스마트 건축관 신축공사
용도	비주거용 건축물 (교육연구시설)
대지 위치	경기도 안산시 사동
규모	지상2층 / 지하0층
연면적	498.90 m2
구조	철골조 (S조)
공사기간	약 180일
평면 배치도	
	

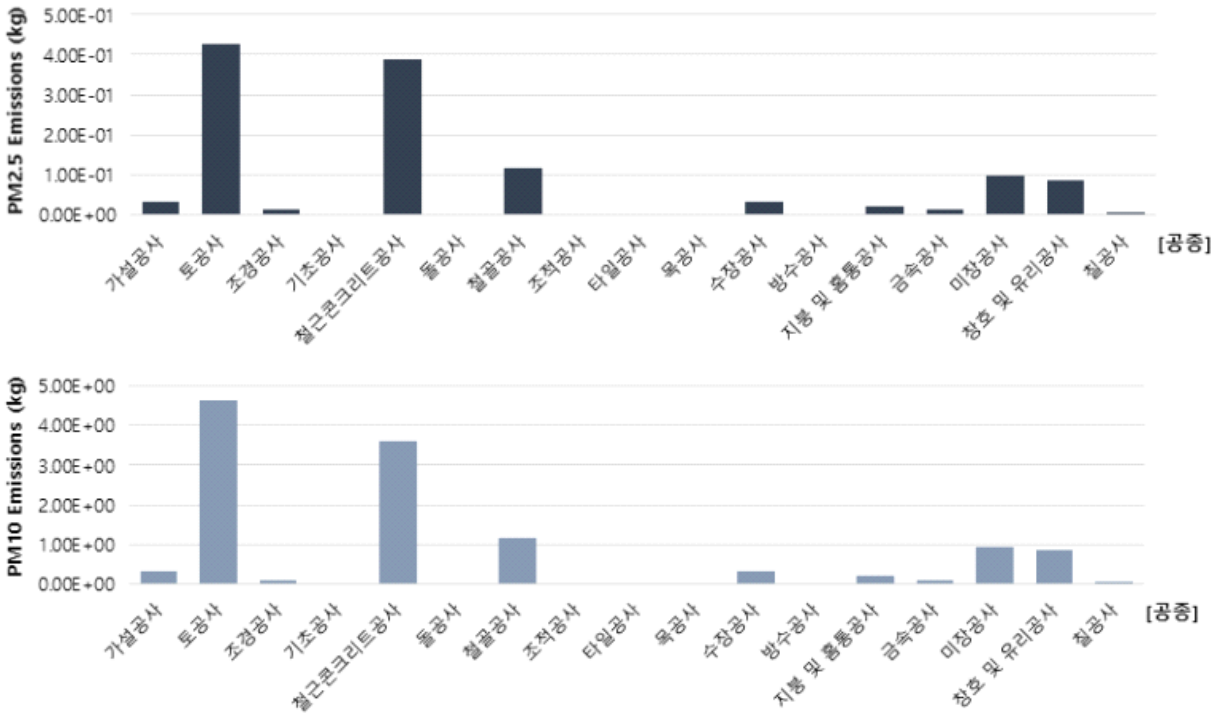
❍ CPMA 시범사업

- 본 대상 현장은 소규모의 건설현장으로써 건설장비의 이동 경로 산정의 어려움이 있어 현장 인근 먼지발생 영향권에 포함되는 진입도로 50m를 건설장비 이동거리로 가정하여 평가를 수행함.
- 공사 물량내역서를 토대로 공종 및 건설장비 별 작업량을 산정하여 입력한 화면은 그림 2-52와 같음.

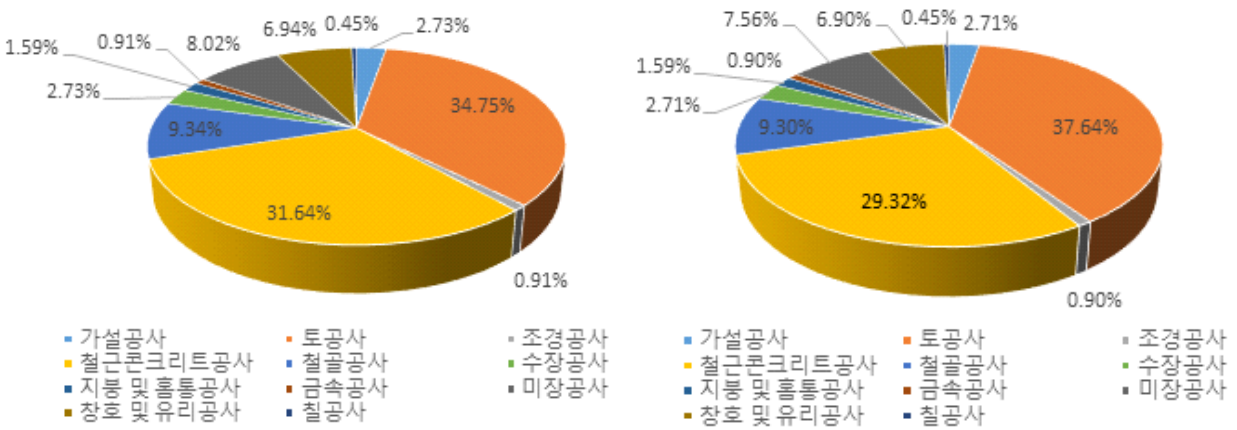
건축공사							
공종	건설장비	대상자재	작업유형	작업량	단위	작업시간	단위
가설공사	dump truck(8ton)	가설자재	이동	0.30	km		미기입
가설공사	dump truck(8ton)	가설자재	이동	0.30	km		미기입
토공사	concrete mixer(15t	레미콘	이동	0.10	km		미기입
토공사	excavator	흙	작업	723.00	ton	4.03	hr
토공사	excavator	흙	작업	48.00	ton	0.27	hr
토공사	excavator	흙	작업	21.00	ton	0.12	hr
토공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입
토공사	dump truck(8ton)	아스팔트	이동	1.40	km		미기입
토공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입
토공사	trailer(20ton)	콘크리트 구조체	이동	0.10	km		미기입
토공사	dump truck(8ton)	골재	이동	0.10	km		미기입
토공사	trailer(20ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입
토공사	dump truck(8ton)	석재	이동	0.10	km		미기입
철근콘크리트공사	trailer(20ton)	철근	이동	0.10	km		미기입
철근콘크리트공사	concrete mixer(15t	레미콘	이동	3.70	km		미기입
철근콘크리트공사	concrete pump	레미콘	작업		ton	15.67	hr
철근콘크리트공사	concrete mixer(15t	레미콘	이동	0.40	km		미기입
철근콘크리트공사	concrete pump	레미콘	작업		ton	1.71	hr
철근콘크리트공사	dump truck(25ton	골재	이동	0.50	km		미기입
철골공사	trailer(20ton)	철골	이동	0.30	km		미기입
철골공사	trailer(20ton)	철재	이동	0.40	km		미기입
철골공사	dump truck(8ton)	시멘트	이동	0.80	km		미기입
철골공사	dump truck(8ton)	철재	이동	0.20	km		미기입
미장공사	concrete mixer(15t	레미콘	이동	0.80	km		미기입
미장공사	concrete pump	레미콘	작업		ton	3.30	hr
미장공사	dump truck(8ton)	시멘트	이동	0.10	km		미기입
미장공사	dump truck(8ton)	시멘트	이동	0.40	km		미기입
미장공사	dump truck(8ton)	시멘트	이동	0.10	km		미기입
수장공사	dump truck(8ton)	단열재	이동	0.30	km		미기입
지붕 및 홈통공사	trailer(20ton)	철재	이동	0.10	km		미기입
지붕 및 홈통공사	dump truck(8ton)	철재	이동	0.10	km		미기입
창호 및 유리공사	trailer(20ton)	단열재	이동	0.10	km		미기입
지붕 및 홈통공사	dump truck(8ton)	철재	이동	0.10	km		미기입
창호 및 유리공사	trailer(20ton)	철재	이동	0.10	km		미기입
금속공사	dump truck(8ton)	철재	이동	0.10	km		미기입
수장공사	dump truck(8ton)	석고보드	이동	0.10	km		미기입
수장공사	dump truck(8ton)	석고보드	이동	0.10	km		미기입
창호 및 유리공사	dump truck(8ton)	유리	이동	1.13	km		미기입
창호 및 유리공사	dump truck(8ton)	유리	이동	0.10	km		미기입
금속공사	dump truck(8ton)	철재	이동	0.10	km		미기입
칠공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입
수장공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입
조경공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입
조경공사	dump truck(8ton)	기타자재	이동	0.10	km		미기입

그림 2-52. CPMA 작업량 입력 화면

- 최종적으로 CPMA를 활용하여 평가 수행 결과 본 대상 건축물은 PM2.5 및 PM10 연간 배출량 측면에서 적격한 것으로 평가되었으나 공종별 및 건설장비별 배출량을 별도로 분석한 결과 특정 공종과 건설장비에서 유독 많은 양의 PM을 배출하는 것으로 분석됨.
- 공종별 배출량을 분석한 결과 그림2-53과 같이 토공사가 공사기간 동안 총 4.28E-01kg의 PM2.5 및 4.63E+00kg의 PM10을 배출함으로써 가장 많은 양의 PM을 배출할 것으로 나타났으며, 철근콘크리트공사도 총 3.90E-01kg의 PM2.5 및 3.61E+00kg의 PM10을 배출함으로써 토공사에 이어 두 번째로 많은 PM을 배출할 것으로 분석되었는데, 토공사와 철근콘크리트공사에서 전체 PM 배출량의 65%를 상회하는 PM을 배출할 것으로 분석됨.



(a) 공종별 총 배출량 (상단: PM2.5, 하단: PM10)

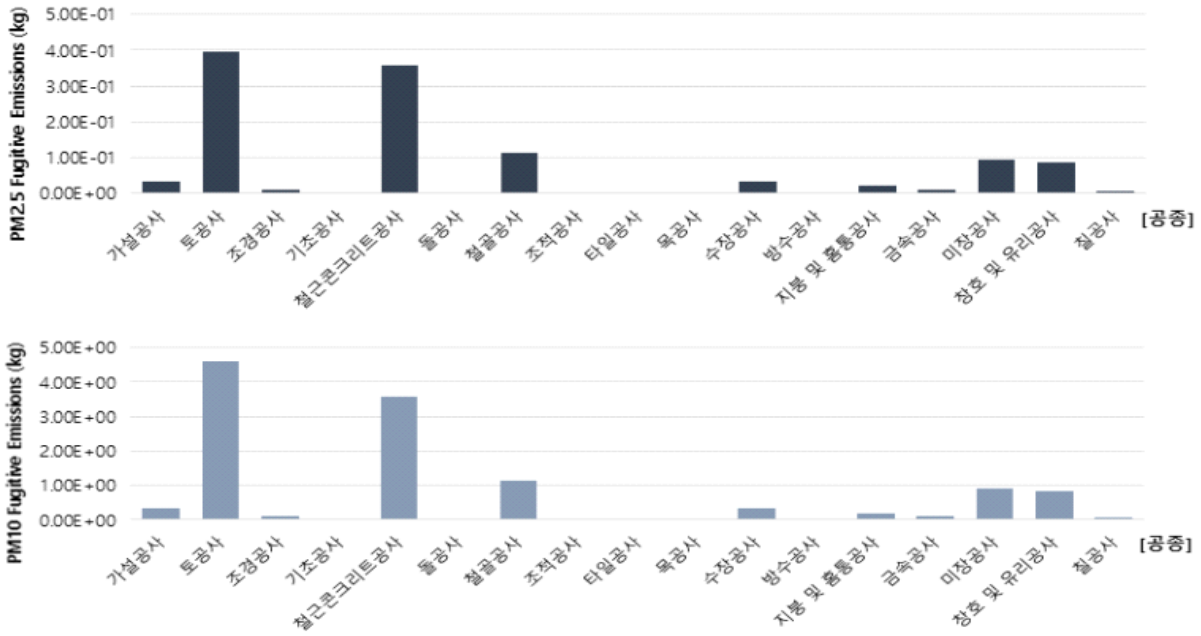


(b-1) PM2.5 (b-2) PM10

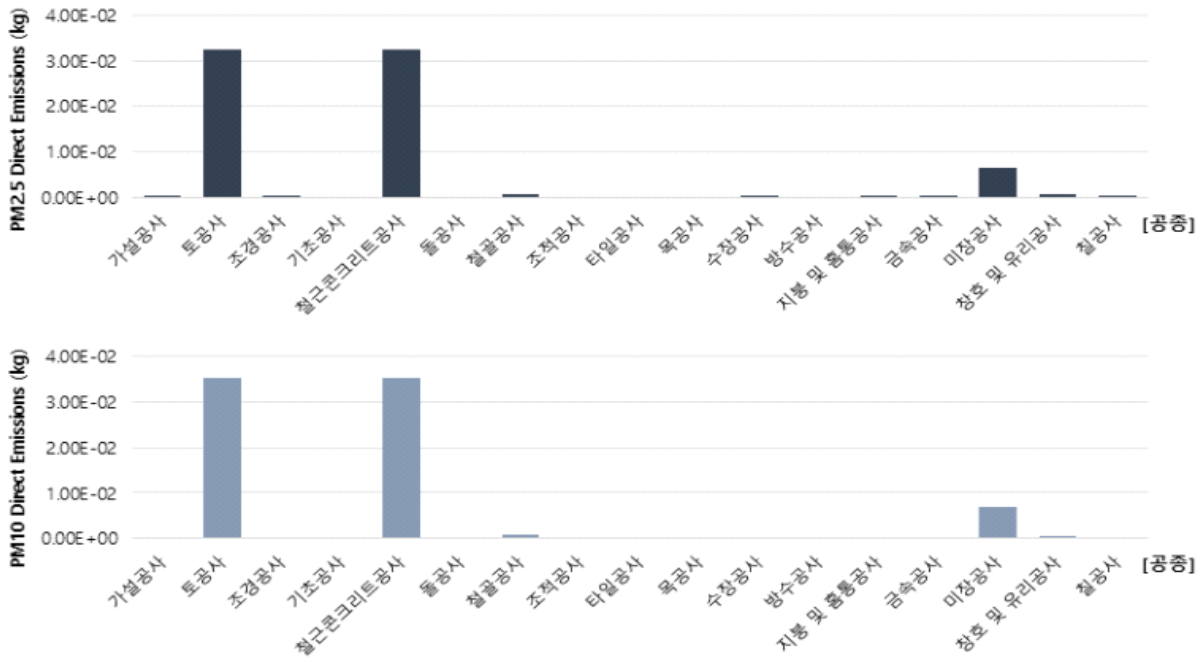
(b) 공종별 총 배출량 기여도

그림 2-53. 평가 대상 건설현장 공종별 총 배출량 분석

- 공종별 배출량을 비산배출량과 직접배출량으로 분리하여 분석한 결과 그림2-54와 같이 비산배출에서는 전체 배출량 분석 결과와 유사하게 토공사 및 철근콘크리트공사 공종에서 가장 많은 PM이 배출될 것으로 예측되었으며, 직접배출 또한 주로 철근콘크리트공사와 토공사에서 발생하는 것으로 분석됨.
- 이는 본 대상 현장에서 토공사 진행 시 주로 굴삭기 작업에 의한 배출이 많이 발생하고 철근콘크리트공사 시 다량의 레미콘 및 철근 운반으로 이동에 의한 비산배출 및 직접배출이 이루어지는 데에서 기인한 것임.



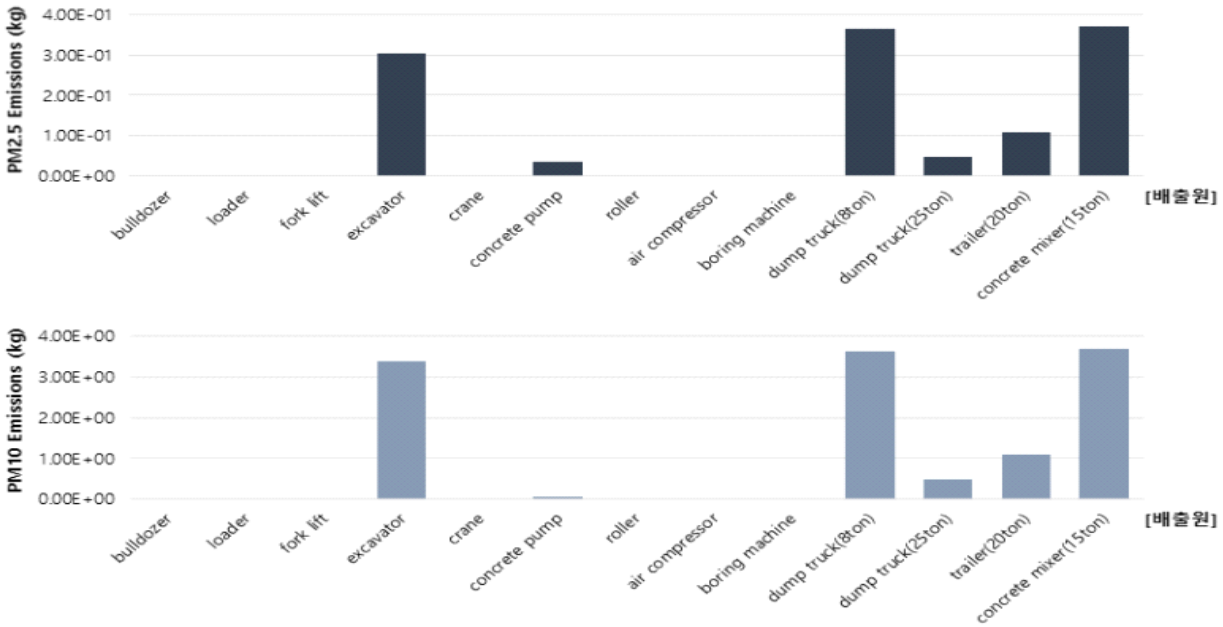
(a) 공종별 비산배출량 (상단: PM2.5, 하단: PM10)



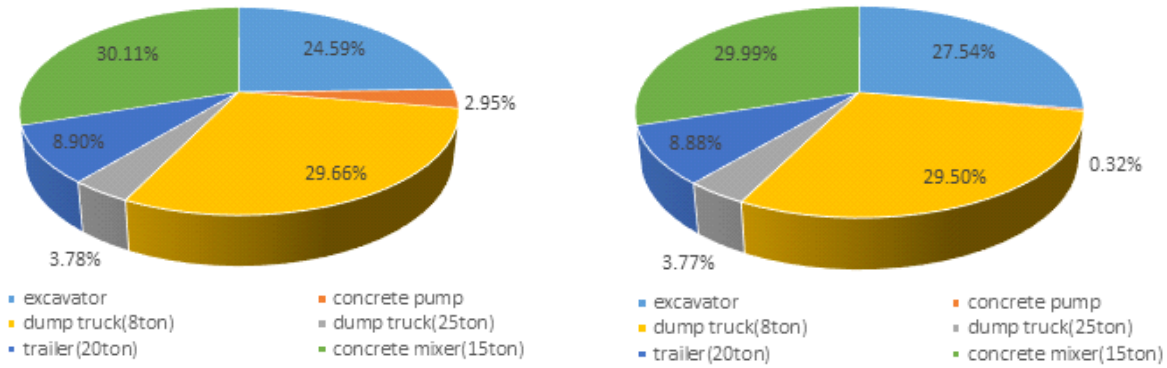
(b) 공종별 직접배출량 (상단: PM2.5, 하단: PM10)

그림 2-54. 평가 대상 건설현장 공종별 비산배출량 및 직접배출량 분석

- 건설장비별 총 배출량의 경우 그림2-55와 같이 주요 PM 배출원으로 굴삭기, 덤프트럭(8ton), 콘크리트믹서트럭이 도출되었으며, 각각의 PM2.5 배출량은 2.03E-01kg, 3.65E-01kg, 3.71E-01kg으로 예측되었고 PM10 배출량은 각각 3.39E+00kg, 3.63E+00kg, 3.69E+00kg으로 예측됨.
- 굴삭기의 배출량이 높게 나타난 것은 본 대상 건축물의 토공사 터파기량이 투입되는 자재량과 비교하여 상대적으로 많기 때문에 나타난 결과이며, 콘크리트믹서트럭 또한 많은 양의 레미콘을 운송하기 위해 이동 시 발생하는 먼지가 많기 때문에 나타난 결과임.
- 또한, CPMA 상에서 콘크리트를 제외한 타 건축자재들을 운반할 때에는 덤프트럭(8ton), 덤프트럭(25ton), 그리고 트레일러로 운반하는 것으로 가정하는데 본 평가 대상 현장의 경우 규모가 작고 건축자재 별 운반량이 적으므로 대체로 덤프트럭(8ton)을 자재 운반용으로 적용하여 해당 트럭의 이동에 의한 PM 발생량이 높게 예측된 것임.



(a) 건설장비별 총 배출량 (상단: PM2.5, 하단: PM10)

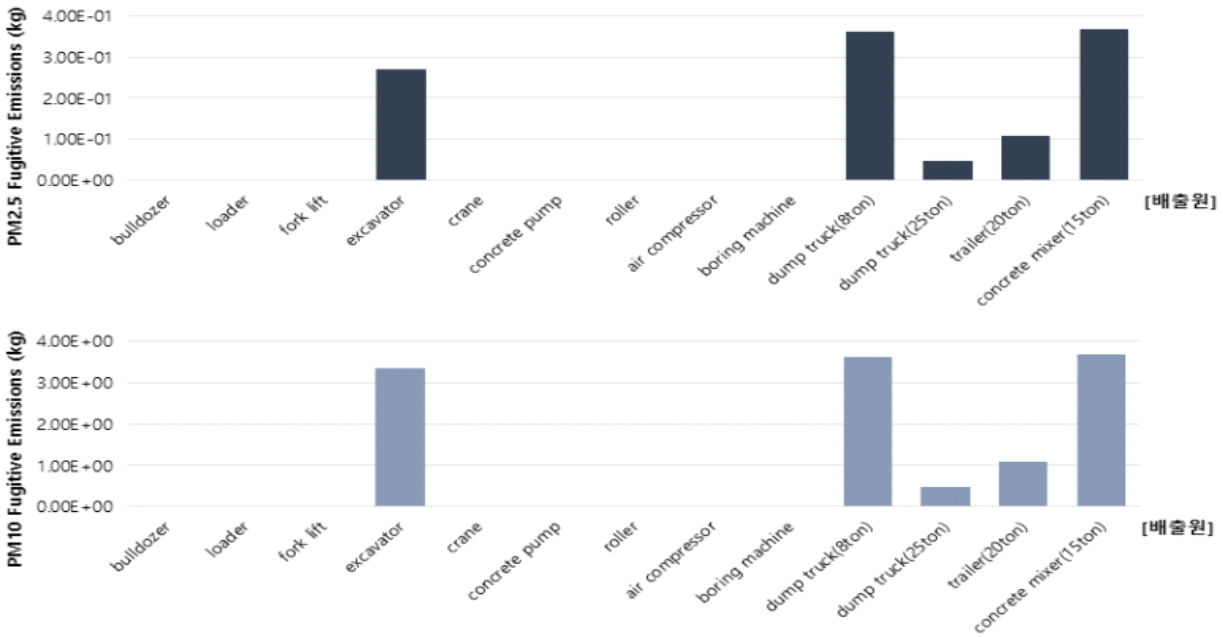


(b-1) PM2.5 (b-2) PM10

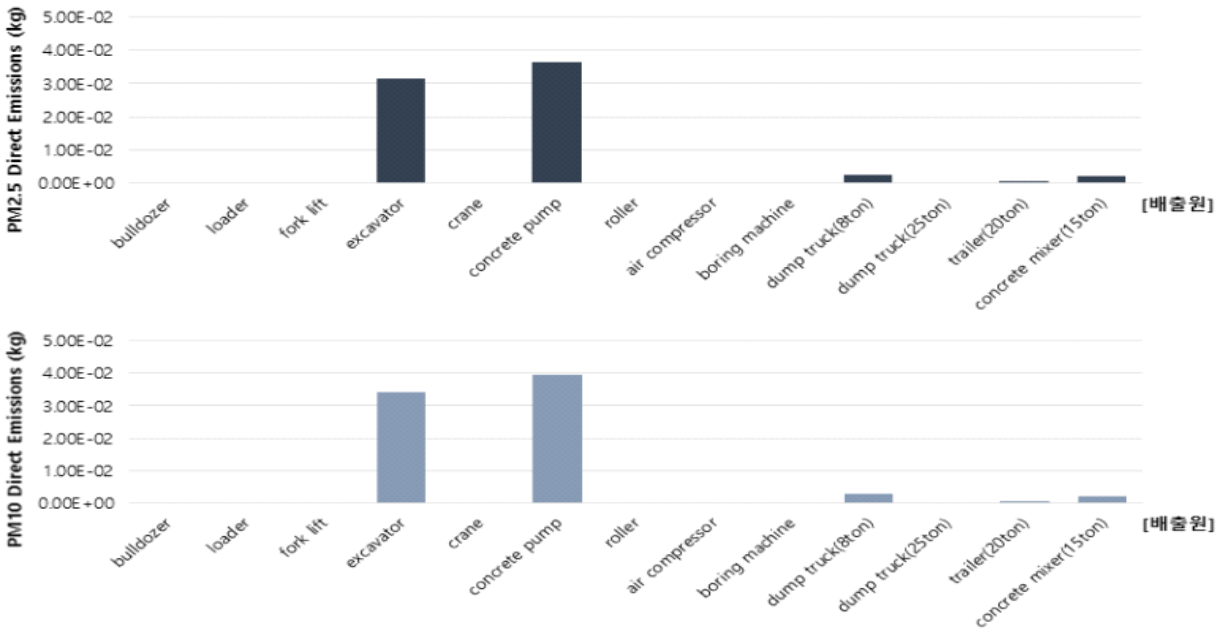
(b) 건설장비별 총 배출량 기여도

그림 2-55. 평가 대상 건설현장 건설장비별 총 배출량 분석

- 반면, 건설장비별 총 배출량을 비산배출량과 직접배출량으로 구분하여 그림2-56과 같이 분석한 결과 비산배출의 경우 총 배출량과 유사하게 굴삭기, 덤프트럭(8ton), 콘크리트믹서트럭이 주요 배출원인 것으로 나타난 반면, 직접배출의 경우 굴삭기와 콘크리트 펌프가 주요 배출원인 것으로 나타남.
- 콘크리트 펌프의 경우 이동이나 작업에 의한 비산배출은 없는 것으로 가정하고 있으나 작업에 따른 가동시간 동안에 연료연소로 인한 직접배출은 있는 것으로 가정하고 있음.
- 특히, 철근콘크리트공사 공종에서는 다량의 콘크리트를 압송하기 위하여 콘크리트 펌프를 사용하는데, 이러한 이유로 콘크리트 펌프로 인한 직접배출이 많은 것으로 나타난 것임.



(a) 건설장비별 비산배출량 (상단: PM2.5, 하단: PM10)

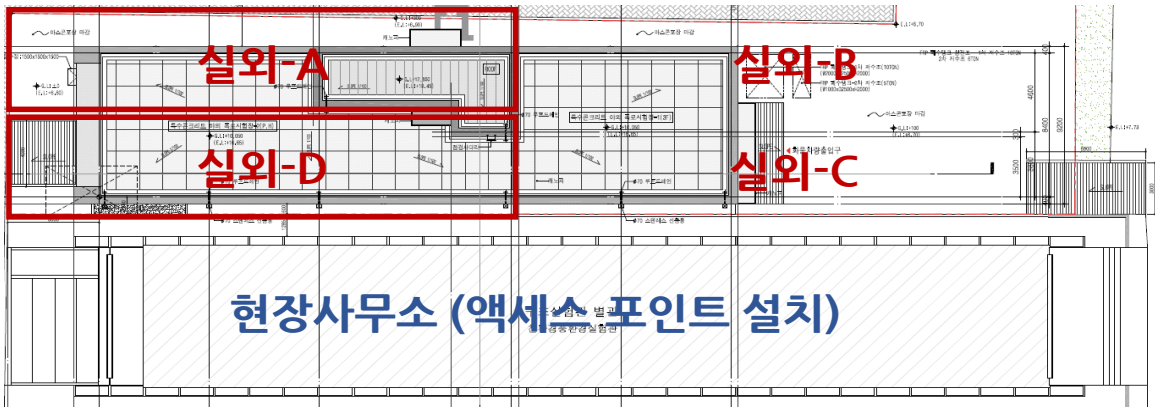


(b) 건설장비별 직접배출량 (상단: PM2.5, 하단: PM10)

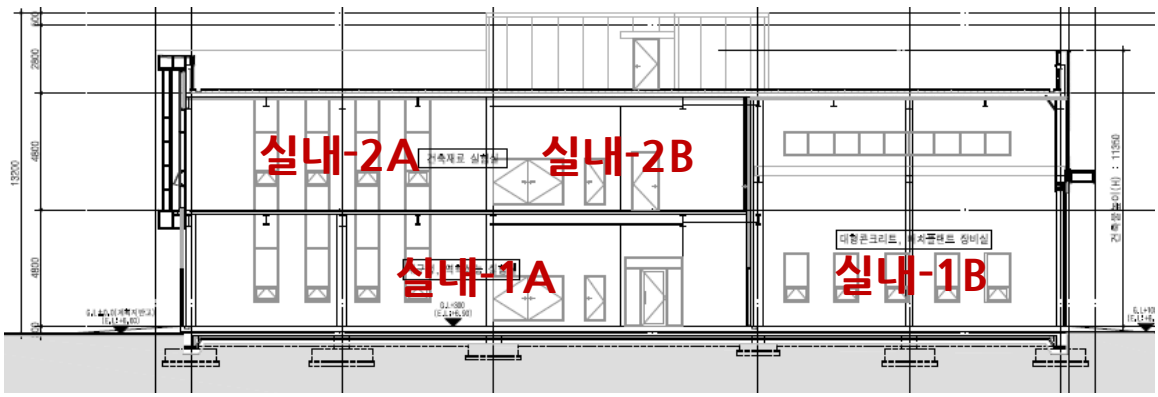
그림 2-56. 평가 대상 건설현장 건설장비별 비산배출량 및 직접배출량 분석

❍ CPMS 시범사업

- 본 연구에서 개발한 미들웨어2 CPMS를 평가 대상 건설현장인 스마트 건축관 신축 현장 실외에 적용하여 네트워크의 정상 작동 여부 및 내구성을 확인하는 테스트를 진행했으며, 건설현장에 별도 현장 사무소가 설치되지 않은 관계로 인접한 건물을 현장 사무소로 가정하여 액세스 포인트를 설정하고 네트워크를 구성함.
- 건설현장 경계에는 총 4개의 지점에 계측기 노드를 설치하였으며, 현장 사무소 내 1개 지점과 현장 사무소 옥상에 노드를 설치함.
- 추가적으로 본 연구에서는 동일한 건설현장에서 CPMS 노드를 현장 실내로 확대 적용하여 현장 실외 미세먼지와 함께 실내 미세먼지 발생에 대한 모니터링을 진행함.
- 현장 실내 구역은 총 4개 구분하여 계측기 노드를 설치했으며, 설치 높이는 모두 동일하게 해당 구역 지면으로부터 1.5m 높이에 설치함.
- 시범사업 기간은 실외 모니터링의 경우 2021년6월부터 2021년10월까지 약 5개월간 진행했으며, 현장 실내 모니터링의 경우 외벽 설치가 이루어진 시점인 2021년9월부터 2021년10월까지 약 2개월간 진행됨.
- 건설현장 내 모니터링 지점 구분은 그림2-57과 같으며, 각 지점 별 계측기 노드 설치 모습은 그림2-58과 같음.

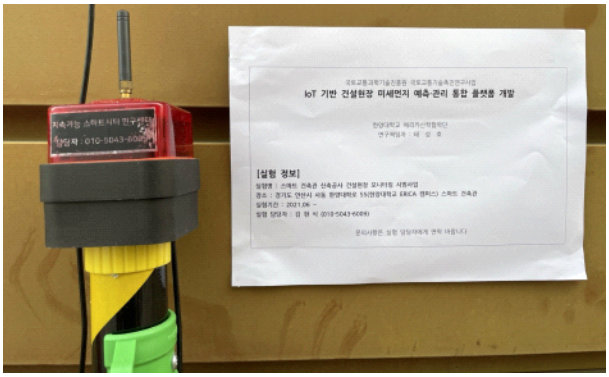


(a) 실외 모니터링 지점 (평면도)

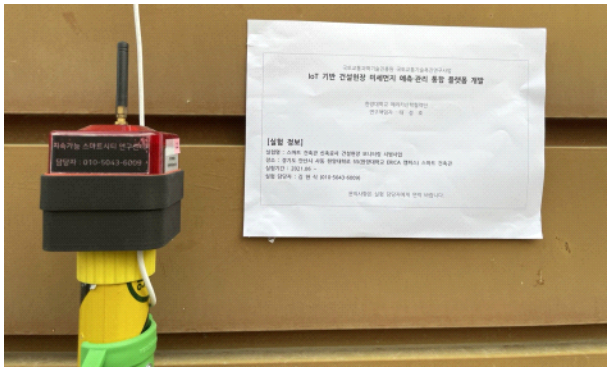


(b) 실내 모니터링 지점 (입단면도)

그림 2-57. 시범사업 모니터링 지점



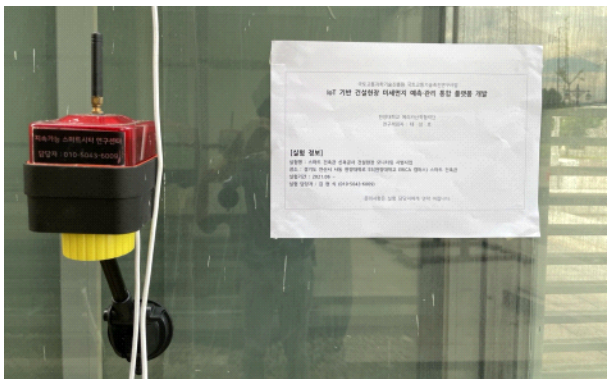
(a-1) 실외-A



(a-2) 실외-B



(a-3) 실외-C

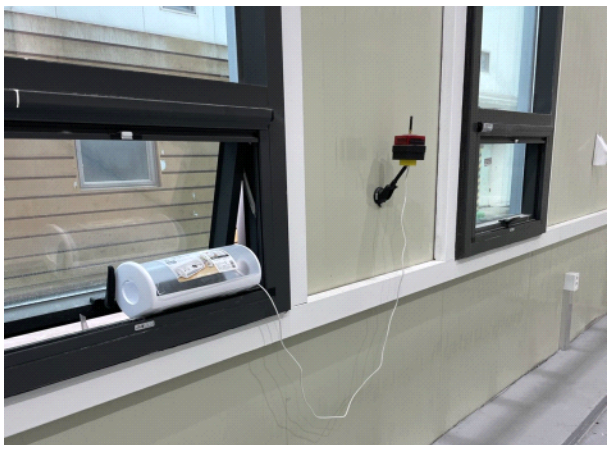


(a-4) 실외-D

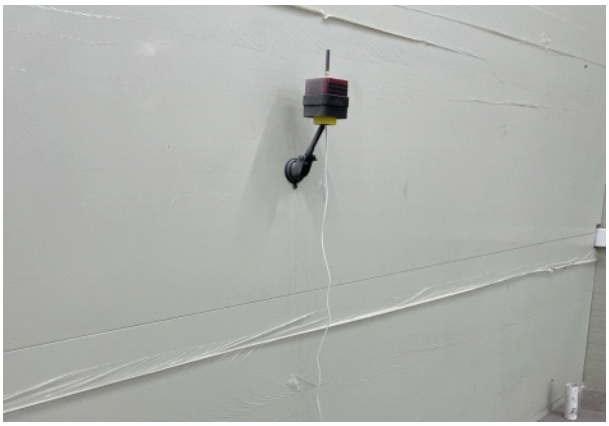
(a) 실외 모니터링



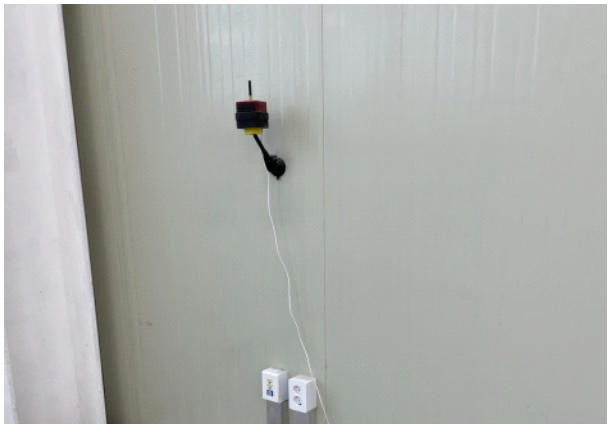
(b-1) 실내-1A



(b-2) 실내-1B



(b-3) 실내-2A



(b-4) 실내-2B

(b) 실내 모니터링

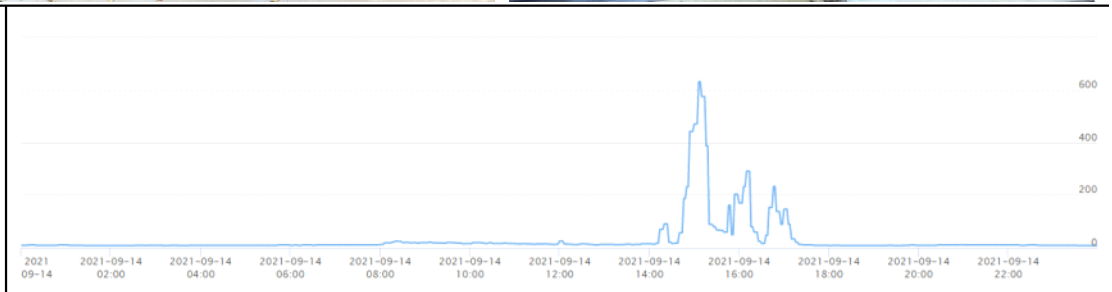
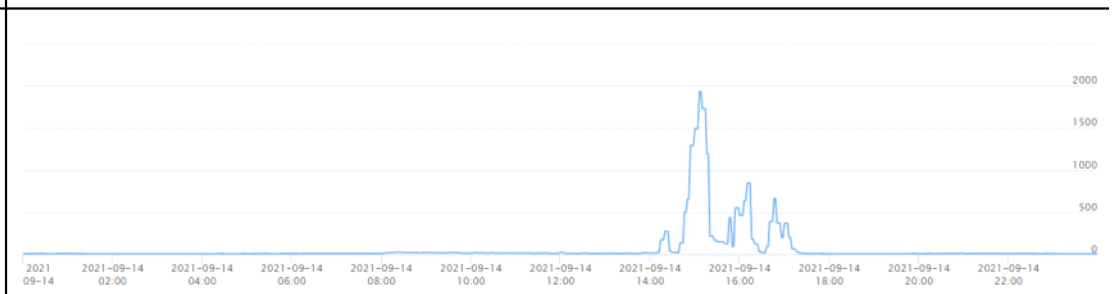
그림 2-58. 시범사업 모니터링 지점 별 계측기 노드 설치

- 본 연구의 시범사업을 통해 지속적으로 건설현장 실외와 실내 모니터링을 진행한 결과 먼지 발생 이벤트가 이루어지는 위치 인근에 설치된 계측기를 통해 농도 변화 데이터를 수집할 수 있었으며, 이에 따른 실시간 먼지발생 상황에 대한 정보를 효과적으로 획득할 수 있었음.
- 특히, 각 이벤트 발생 시 해당 이벤트가 계측된 노드의 설치 위치로 이동하여 실시간으로 이벤트 사유를 확인할 수 있었으며, 이를 바탕으로 표2-49와 같은 양식으로 현장 미세먼지 모니터링 일지를 작성하여 관리함.
- 일지에는 이벤트 날짜, 모니터링 된 지점의 위치, 공사유형, 공종, 배출원, 배출활동, 배출유형 및 기타 정보를 기술할 수 있도록 구성했으며, 시범사업 기간 동안 총 19건의 이벤트가 관측 기록됨.
- 특히, PM2.5 농도 기준으로 50㎍/㎥ 이상의 고농도가 5분 이상 연속적으로 관측된 이벤트는 총 9건이었으며, 해당 건들에 정보는 표2-50과 같음.

표 2-49. 시범사업 미세먼지 모니터링 일지 양식

<table>
<tr><th>No. 00</th><th colspan="4">배출정보</th></tr>
<tr><td>날짜</td><td colspan="2">YYYY.MM.DD.</td><td>위치</td><td>(모니터링 지점)</td></tr>
<tr><td>공사유형</td><td colspan="4">□토목/토공/정지공사 □건축물축조공사 □조경공사</td></tr>
<tr><td>공종</td><td colspan="4">□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사,
□조적공사, □타일공사, □목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사,
□금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사</td></tr>
<tr><td>배출원</td><td colspan="4">기중기, 기타(현장근로자)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">배출활동</td><td colspan="4">□싣기 □내리기 □야적 □수송(이동) □기타</td></tr>
<tr><td colspan="4">기타:
(기타 선택시 작성)</td></tr>
<tr><td>배출유형</td><td colspan="4">□직접배출 □비산배출 □2차생성배출</td></tr>
<tr><th colspan="5">상세정보</th></tr>
<tr><td>관련사진</td><td colspan="4">■ 사진 및 모니터링 그래프</td></tr>
<tr><td>상세내용</td><td colspan="4">■ 배출활동 및 모니터링 정보 상세 설명</td></tr>
</table>

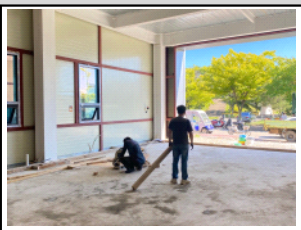
표 2-50. 시범사업 중 고농도 이벤트 (9건)

<table>
<tr><td>이벤트 1</td><td colspan="4">배출정보</td></tr>
<tr><td>날짜</td><td>2021.09.14.</td><td>위치</td><td colspan="2">실내-1B</td></tr>
<tr><td>공사유형</td><td colspan="4">□토목/토공/정지공사 ■건축물축조공사 □조경공사</td></tr>
<tr><td>공종</td><td colspan="4">□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, □목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, ■미장공사, □창호및유리공사, □칠공사</td></tr>
<tr><td>배출원</td><td colspan="4">기타(현장근로자)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">배출활동</td><td>□싣기</td><td>□내리기</td><td>□야적</td><td>□수송(이동)</td><td>■기타</td></tr>
<tr><td>기타:
(기타 선택시 작성)</td><td colspan="4">현장근로자 작업</td></tr>
<tr><td>배출유형</td><td colspan="4">□직접배출 ■비산배출 □2차생성배출</td></tr>
<tr><td colspan="5">상세정보</td></tr>
<tr><td>관련사진</td><td colspan="4">  
PM2.5 
PM10  </td></tr>
<tr><td>상세내용</td><td colspan="4">■ 실내 시멘트 바닥 줄눈 작업.
■ 오후에 작업 진행됨.
■ 고농도 미세먼지 발생 확인.</td></tr>
</table>

이벤트 2	배출정보		
날짜	2021.09.17.	위치	실내-1A, 실내-1B
공사유형	□토목/토공/정지공사	■건축물축조공사	□조경공사
공종	□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, ■목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, ■미장공사, □창호및유리공사, □칠공사		
배출원	기타(현장근로자)		
배출활동	□싣기	□내리기	□야적	□수송(이동)	■기타
	기타: (기타 선택시 작성)	현장근로자 이동 및 작업	
배출유형	□직접배출	■비산배출	□2차생성배출

상세정보

관련사진



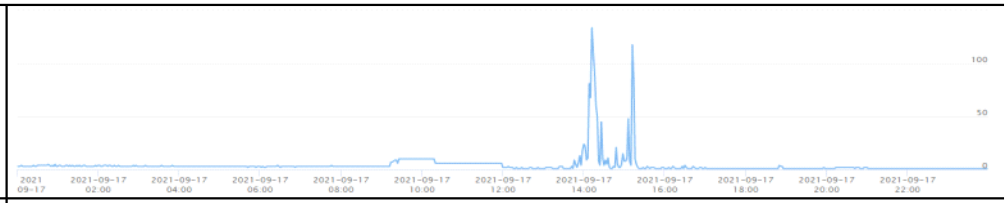

실내-1A




실내-1B

실내-1A

PM2.5

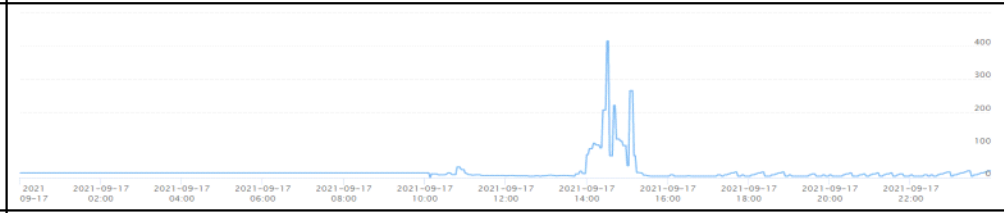


PM10

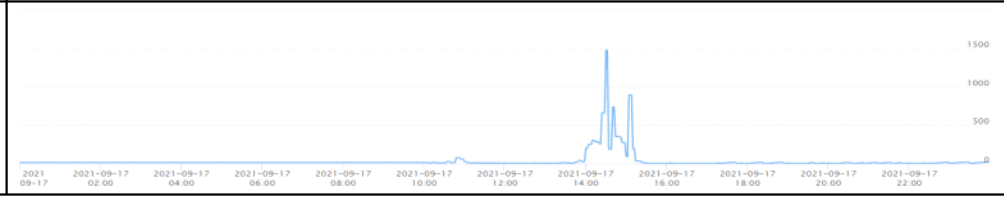


실내-1B

PM2.5



PM10



상세내용

- 실내 목공사, 미장공사, 현장정리.
- 실내-1A, 실내-1B 지점 동시 작업 진행 (약 13:00~16:00).
- 다수 현장근로자 동시 작업 진행.
- 고농도 미세먼지 발생 확인.

이벤트 3	배출정보		
날짜	2021.09.17.	위치	실외-A
공사유형	□토목/토공/정지공사	■건축물축조공사	□조경공사
공종	□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, ■목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, ■미장공사, □창호및유리공사, □칠공사		
배출원	기타(현장근로자)		
배출활동	□싣기	□내리기	□야적	□수송(이동)	■기타
	기타: (기타 선택시 작성)	현장근로자 이동 및 작업			
배출유형	□직접배출	■비산배출	□2차생성배출		

상세정보

관련사진

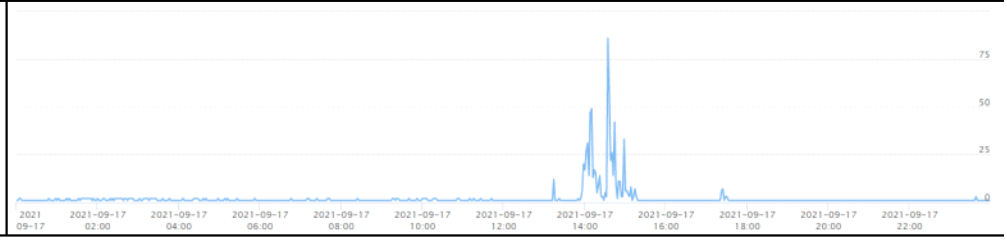




PM2.5

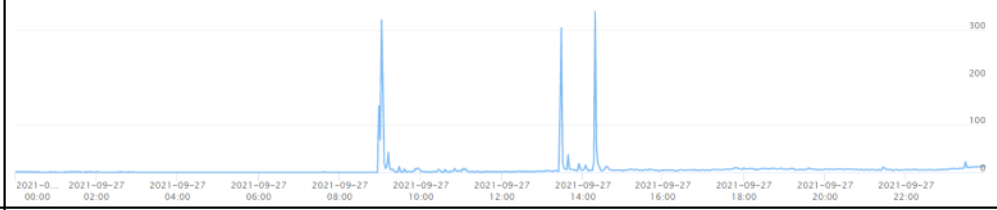
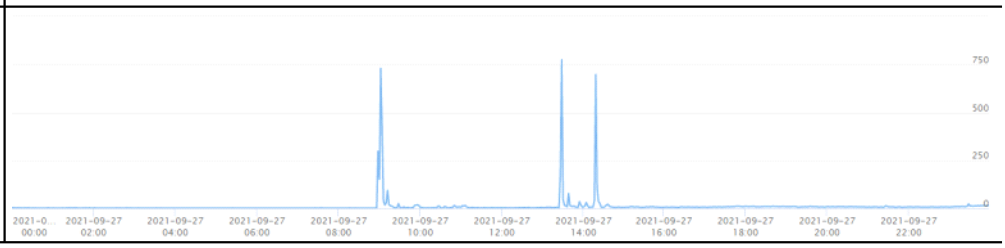


PM10



상세내용

- 목공사 및 미장공사 시 발생한 폐기물 정리.
- 목공사 및 미장공사와 동시 작업 진행 (약 13:00~16:00).
- 다수 현장근로자 동시 작업 진행.

<table>
<tr><td>이벤트 4</td><td colspan="3">배출정보</td></tr>
<tr><td>날짜</td><td>2021.09.27.</td><td>위치</td><td>실내-1A</td></tr>
<tr><td>공사유형</td><td colspan="3">□토목/토공/정지공사 ■건축물축조공사 □조경공사</td></tr>
<tr><td>공종</td><td colspan="3">□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, ■목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사</td></tr>
<tr><td>배출원</td><td colspan="3">기타(현장근로자)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">배출활동</td><td colspan="3">□싣기 □내리기 □야적 □수송(이동) ■기타</td></tr>
<tr><td colspan="3">기타:
(기타 선택시 작성) 현장근로자 이동 및 작업</td></tr>
<tr><td>배출유형</td><td colspan="3">□직접배출 ■비산배출 □2차생성배출</td></tr>
<tr><td colspan="4">상세정보</td></tr>
<tr><td rowspan="3">관련사진</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td>PM2.5</td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>PM10</td><td colspan="2">  </td></tr>
<tr><td>상세내용</td><td colspan="3">■ 실내-1A 지점 바닥 목공사 진행.
■ 약 9:00~16:00까지 실내-1A 구역 전반에서 공사 진행.
■ 현장근로자들의 이동 및 목공사 진행으로 고농도 미세먼지 발생.</td></tr>
</table>

이벤트 5	배출정보		
날짜	2021.10.13.	위치	실외-A, 실외-B
공사유형	■토목/토공/정지공사	□건축물축조공사	□조경공사
공종	■토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, □목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사		
배출원	굴삭기, 기타(현장근로자)		
배출활동	■싣기	■내리기	□야적	■수송(이동)	■기타
	기타: (기타 선택시 작성)	현장근로자 이동 및 작업			
배출유형	■직접배출	■비산배출	■2차생성배출		

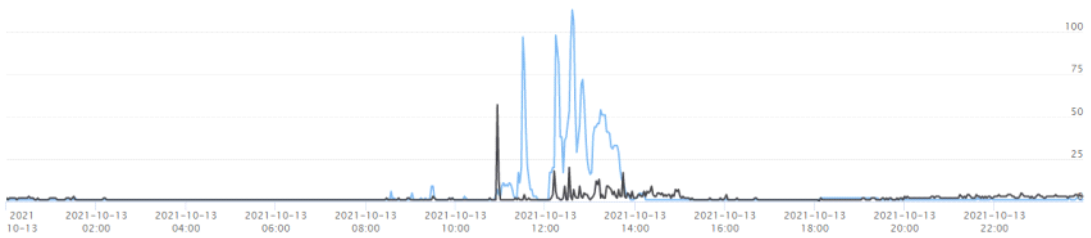
상세정보

관련사진

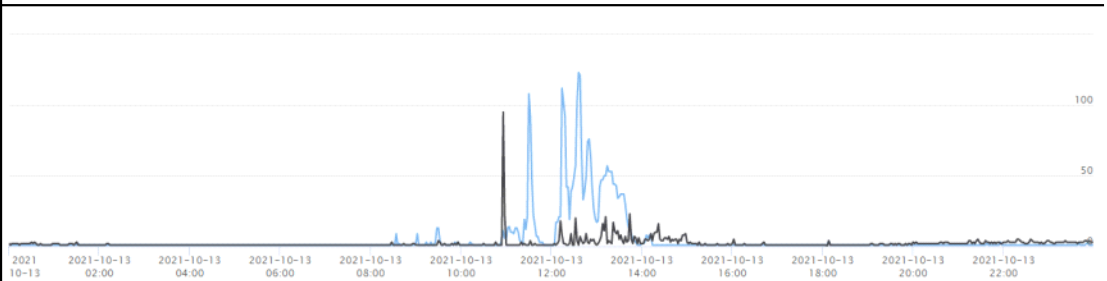




PM2.5

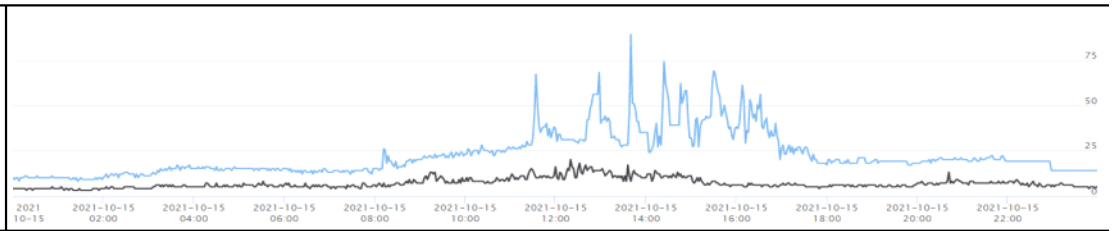
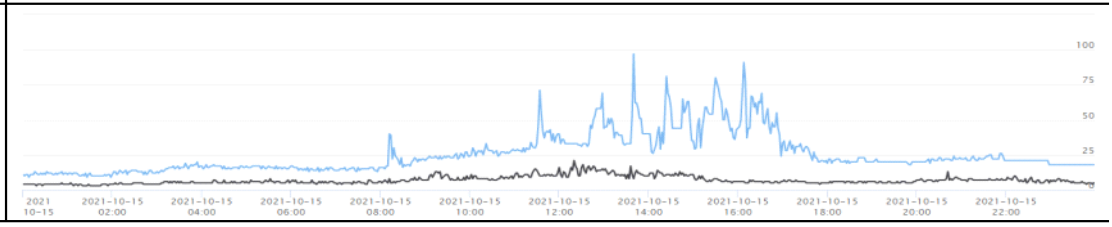


PM10



상세내용

- 배관작업을 위한 굴삭기 땅고르기 및 다짐.
- 현장근로자 이동 빈번.
- 10:00 이전 굴삭기 준비, 10:00~15:00 작업 진행.
- 실외-A에서 실외-B 지점으로 이동하며 진행. (실외-A:하늘색, 실외-B: 검은색)

<table>
<tr><td>이벤트 6</td><td colspan="4">배출정보</td></tr>
<tr><td>날짜</td><td>2021.10.15.</td><td>위치</td><td colspan="2">실내-1A, 실외-D</td></tr>
<tr><td>공사유형</td><td colspan="4">■토목/토공/정지공사 □건축물축조공사 □조경공사</td></tr>
<tr><td>공종</td><td colspan="4">■토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, □목공사, □수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사</td></tr>
<tr><td>배출원</td><td colspan="4">굴삭기, 덤프트럭, 기타(현장근로자)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">배출활동</td><td colspan="4">■싣기 ■내리기 □야적 ■수송(이동) ■기타</td></tr>
<tr><td colspan="4">기타: (기타 선택시 작성) 현장근로자 이동 및 작업</td></tr>
<tr><td>배출유형</td><td colspan="4">■직접배출 ■비산배출 ■2차생성배출</td></tr>
<tr><td colspan="5">상세정보</td></tr>
<tr><td rowspan="6">관련사진</td><td colspan="4">  </td></tr>
<tr><td colspan="4">외부 토사 싣기/운반</td></tr>
<tr><td colspan="4">  </td></tr>
<tr><td colspan="4">땅고르기 및 다짐</td></tr>
<tr><td>PM2.5</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td>PM10</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td>상세내용</td><td colspan="4">▪ 굴삭기, 덤프트럭을 통한 외부 토사 싣기/수송/내리기/다짐.
▪ 외부 토사 채취 위치는 현장에서 직선거리 약 150미터.
▪ 실외-D 계측값보다 실내-1A 지점으로 유입되는 값이 높음.(실내-1A:하늘색, 실외-D: 검은색)</td></tr>
</table>

이벤트 7	배출정보		
날짜	2021.10.15.	위치	실내-2A, 실내-2B
공사유형	□토목/토공/정지공사	■건축물축조공사	□조경공사
공종	□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, □목공사, ■수장공사, □방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사		
배출원	기타(현장근로자)		
배출활동	□싣기	□내리기	□야적	□수송(이동)	■기타
	기타: (기타 선택시 작성)	현장근로자 이동 및 작업			
배출유형	□직접배출	■비산배출	□2차생성배출		

상세정보

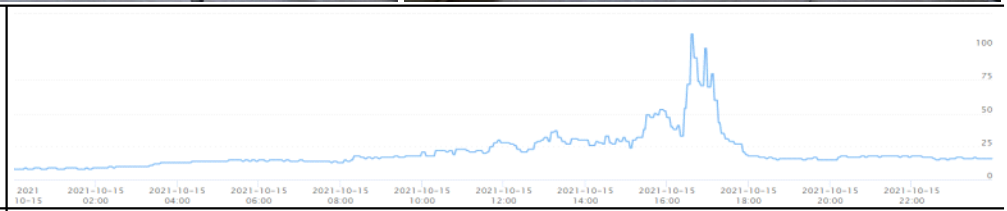
관련사진



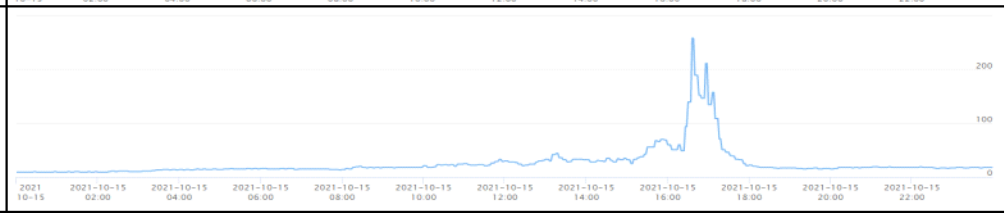


실내-2A

PM2.5

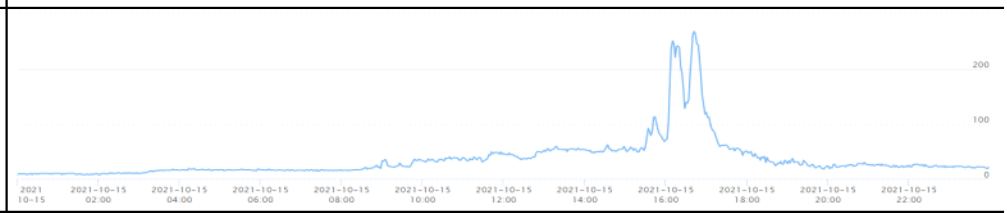


PM10

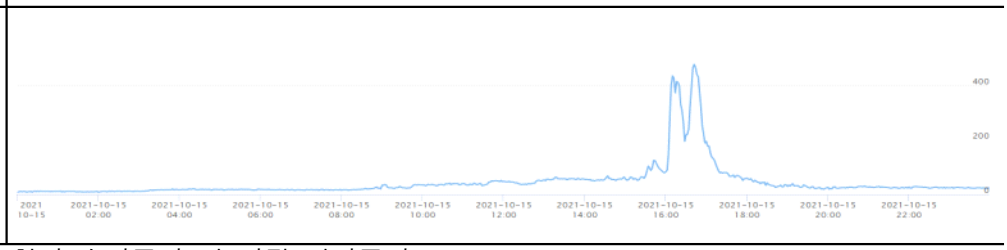


실내-2B

PM2.5

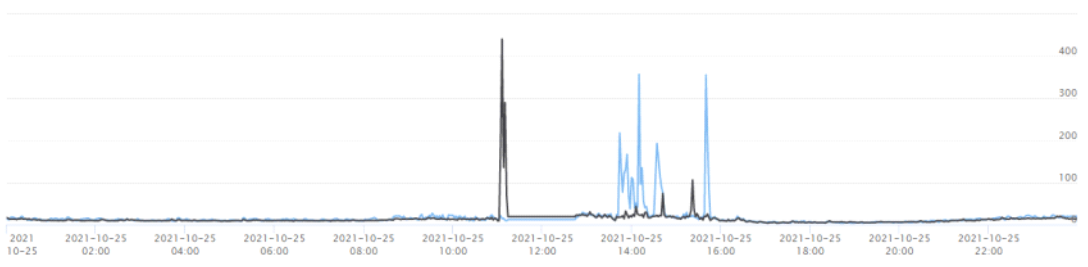
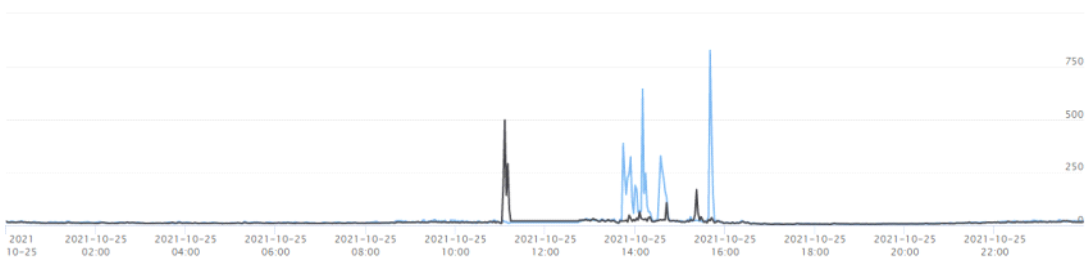


PM10



상세내용

- 현장 실내 2층 천장 수장공사 및 바닥 미장공사.
- 고농도 미세먼지 발생.
- 실내-2A 지점은 환기가 가능하며, 실내-2B 지점은 고립된 구조로 고농도 미세먼지 발생.

<table>
<tr><td>이벤트 8</td><td colspan="4">배출정보</td></tr>
<tr><td>날짜</td><td>2021.10.25.</td><td>위치</td><td colspan="2">실외-B,실외-C</td></tr>
<tr><td>공사유형</td><td colspan="4">□토목/토공/정지공사 ■건축물축조공사 □조경공사</td></tr>
<tr><td>공종</td><td colspan="4">□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, □목공사, □수장공사, ■방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사</td></tr>
<tr><td>배출원</td><td colspan="4">기타(현장근로자)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">배출활동</td><td colspan="4">□싣기 □내리기 □야적 □수송(이동) ■기타</td></tr>
<tr><td colspan="4">기타:
(기타 선택시 작성) 현장근로자 작업</td></tr>
<tr><td>배출유형</td><td colspan="4">□직접배출 ■비산배출 □2차생성배출</td></tr>
<tr><td colspan="5">상세정보</td></tr>
<tr><td rowspan="3">관련사진</td><td colspan="4">   </td></tr>
<tr><td>PM2.5</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td>PM10</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><td>상세내용</td><td colspan="4">■ 바닥 방수공사를 위한 줄눈공사 및 면갈이 작업.
■ 고농도 미세먼지 발생 확인.
■ 오전에는 실외-C 지점 주변, 오후에는 주로 실외-B 지점 주변 작업 진행.
(실외-B: 하늘색, 실외-C: 검은색)</td></tr>
</table>

이벤트 9	배출정보		
날짜	2021.10.28.	위치	실내-1A, 실내-1B
공사유형	□토목/토공/정지공사	■건축물축조공사	□조경공사
공종	□토공사, □기초공사, □가설공사, □철근콘크리트공사, □돌공사, □철골공사, □조적공사, □타일공사, □목공사, □수장공사, ■방수공사, □지붕및홈통공사, □금속공사, □미장공사, □창호및유리공사, □칠공사		
배출원	기타(현장근로자)		
배출활동	□싣기	□내리기	□야적	□수송(이동)	■기타
	기타: (기타 선택시 작성)	현장근로자 작업			
배출유형	□직접배출	■비산배출	□2차생성배출		

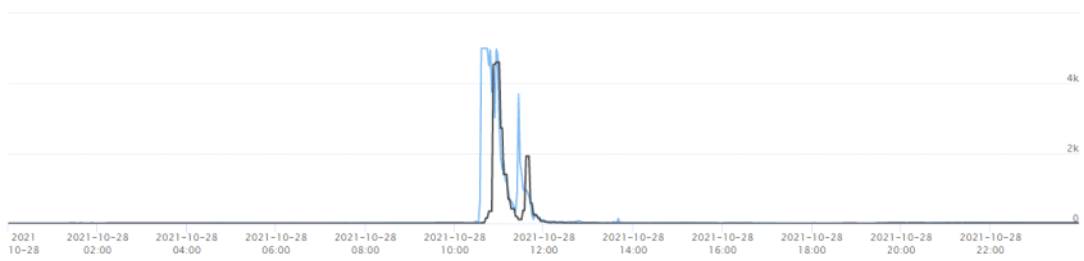
상세정보

관련사진

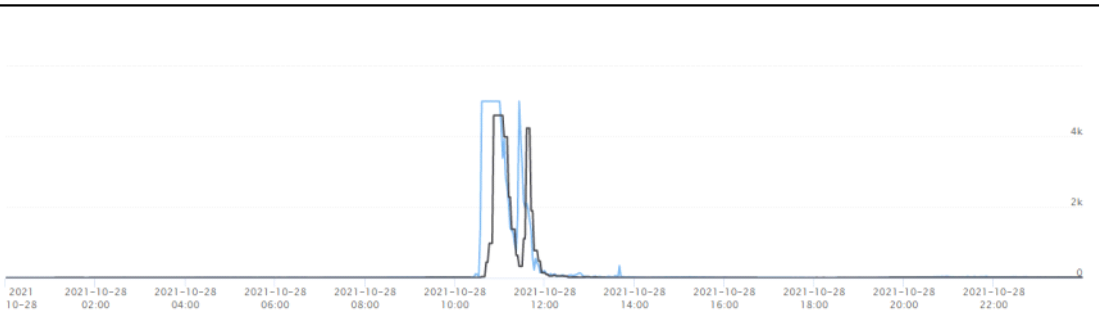




PM2.5



PM10



상세내용

- 바닥 방수공사를 위한 바닥면 정리 작업.
- 고농도 미세먼지 발생 확인.
- 실내-1A, 실내-1B 지점 동시 작업 진행. (실내-1A: 하늘색, 실내-1B: 검은색)

❍ 시범사업 수행 결과 평가

- 본 연구에서는 건설현장 미세먼지 통합관리 시스템(CPM)을 활용하여 스마트 건축관 신축 공사 현장을 대상으로 설계단계부터 시공단계까지 통합 PM 관리를 실시함.
- 특히, 설계단계에서는 본 연구에서 개발한 CPMA 프로그램을 통해 대상 현장에서 발생할 것으로 예상되는 미세먼지 배출량을 예측·평가 하였으며, 시공단계에서는 대상 현장에 시범적으로 본 연구에서 개발한 CPMS를 적용하여 공사기간 동안의 고농도 미세먼지 발생 이벤트를 모니터링함.
- 그 결과 설계단계에서는 건설공사 시 토공사 및 철근콘크리트공사 공종에서 많은 양의 미세먼지가 발생할 것으로 예측 되었으며, 이러한 미세먼지를 주로 발생시킬 건설장비는 굴삭기, 덤프트럭, 그리고 콘크리트믹서트럭인 것으로 분석됨. 실제 시공단계에서 모니터링 된 결과에 따르면 굴삭기, 덤프트럭에 의한 고농도 이벤트가 발생한 것을 확인했으며, 이는 CPMA를 통한 예측 결과에 부합하는 결과임. 다만, CPMS를 활용하여 모니터링 시 토공사 및 철근콘크리트공사 공종에 대한 모니터링이 원활하게 이루어지지 못했는데, 이로 인하여 콘크리트믹서트럭 사용에 의한 모니터링 결과를 도출하지 못한 한계가 있음.
- 이와는 반대로 설계단계에서 고려하지 못한 실내 미세먼지 발생을 CPMS를 통해 확인할 수 있었음. CPMA에는 실외 공사 시 건설장비에 의한 흙 비산 및 직접배출만이 반영되어 있는데, 실제 건설현장을 실시간으로 모니터링 한 결과 실외 미세먼지 외에도 실내에서 현장 근로자의 작업으로 인한 고농도의 미세먼지 이벤트가 다수 모니터링 되었음. 이는 현장근로자의 안전을 위해 CPMA 결과와는 별개로 건설현장의 실내 미세먼지가 실시간 모니터링을 통해 반드시 관리되어야 한다는 것을 의미함.
- CPMA 및 CPMS를 통해 도출한 주요 배출원 및 주요 배출 공종은 그림2-59와 같음.

(a) CPMA (b) CPMS

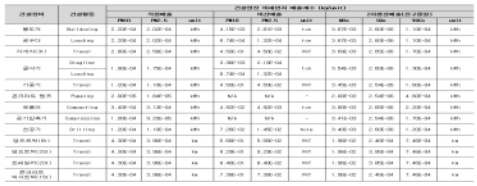
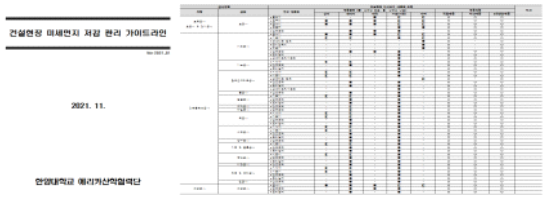
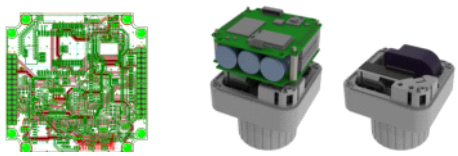
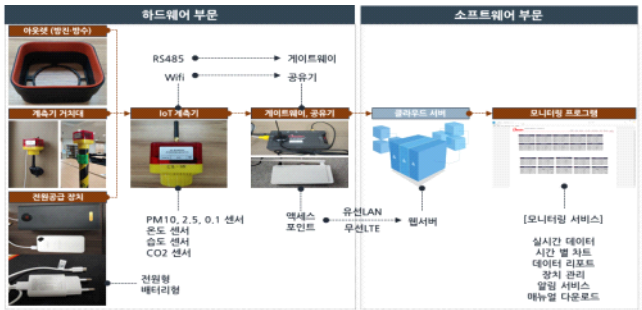
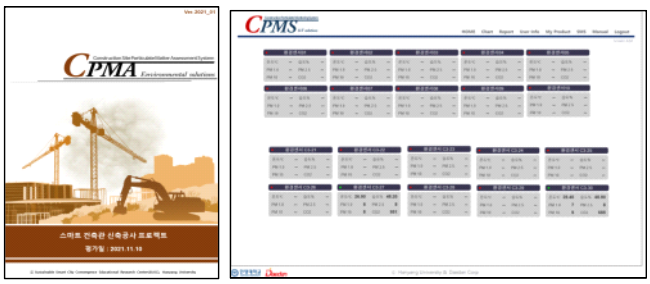


그림 2-59. 시범사업 결과

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

3-1. 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관
1	공사유형별 미세먼지 배출 계수	• 건설현장에 투입되는 건설기계장비(비도로이동오염원) 9종과 자재운반 등에 쓰이는 화물차량(도로이동오염원) 4종에 대한 건설현장 미세먼지 배출계수 DB 구축  [공사유형별 미세먼지 배출 계수 예시]	소프트웨어	한양대학교 에리카산학협력단
2	건물 및 건설 프로젝트 미세먼지 저감관리 가이드라인	• 건설현장 내 주요한 미세먼지 배출원에 대한 공종별 미세먼지 저감 관리 가이드라인 개발  [건설현장 미세먼지 저감관리 가이드라인 예시]	정책·제도	한양대학교 에리카산학협력단
3	건설현장 미세먼지 모니터링 계측 모듈	▪ 미세먼지 및 온습도 계측이 가능한 건설현장 미세먼지 모니터링 계측기 모듈 개발  [건물 및 공사에서 미세먼지 계측 모듈 예시]	장비 · 장치	㈜ 대단
4	IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기	▪ 하드웨어와 소프트웨어 부문을 통합한 IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 시스템 개발  [IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 예시]	시스템	㈜ 대단
5	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼	▪ 건설현장 미세먼지 측정 IoT 통합 플랫폼 제시  [건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼 미들웨어 예시]	시스템	한양대학교 에리카산학협력단

(2) 정량적 연구개발성과

❍ 연차별 정량 성과 목표

구분			1차년도	2차년도	3차년도	계
논문 게재		SCI	1	1	3	5
		비SCI	1	1	-	2
		계	**2**	**2**	**3**	**7**
지식 재산권	출원	국내	1	1	1	3
		국외	-	-	-	-
		계	**1**	**1**	**1**	**3**
	등록	국내	-	-	1	1
		국외	-	-	-	-
		계	-	-	**1**	**1**

❍ 정량 성과 달성

구분			1차년도	2차년도	3차년도	계
논문 게재		SCI	-	2	4	6
		비SCI	2	-	-	2
		계	**2**	**2**	**4**	**8**
국내외 학술발표		국내	4	2	2	8
		국외	6	-	1	7
		계	**10**	**2**	**3**	**15**
지식 재산권	특허 출원	국내	1	1	1	3
		국외	-	-	-	-
		계	**1**	**1**	**1**	**3**
	특허 등록	국내	-	-	1	1
		국외	-	-	-	-
		계	**-**	**-**	**1**	**1**
소프트웨어		저작권 등록	-	-	2	2
기타 성과		시제품	-	2	-	2
		일자리 창출	-	-	1	1
		제품 인증	-	-	1	1
		포상 및 수상	-	1	2	3

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Calculation of particulate matter formation of major building material in construction phase through life cycle impact assessment	International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development	Rakhyun Kim, Sungho Tae	10(2)	대한민국	ISC	비SCIE (SCOPUS)	2019.06.24	2093-761X	100%
2	A Study on Reduction of Fine Dust in Relation to National Greenhouse Gas Inventory	International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development	Sungkyun Ha, Sungho Tae	10(3)	대한민국	ISC	비SCIE (SCOPUS)	2019.09.30	2093-761X	100%
3	Scenarios for Life Cycle Studies of Bridge Concrete Structure Maintenance	Sustainability	Hyunsik Kim, Sungho Tae	12	스위스	MDPI	SCIE	2020.11.17	2071-1050	50%
4	Calculation Methods of Emission Factors and Emissions of Fugitive Particulate Matter in South Korean Construction Sites	Sustainability	Hyunsik Kim, Sungho Tae	12	스위스	MDPI	SCIE	2020.11.24	2071-1050	50%
5	Evaluation Model for Particulate Matter Emissions in Korean Construction Sites	Sustainability	Hyunsik Kim, Sungho Tae	13(20)	스위스	MDPI	SCIE	2021.10.15	2071-1050	100%
6	Prediction of the Energy Self-Sufficiency Rate of Major New Renewable Energy Types Based on Zero-Energy Building Certification Cases in South Korea	Sustainability	Sungjo Wang, Sungho Tae	13(20)	스위스	MDPI	SCIE	2021.10.19	2071-1050	50%
7	Development of IoT-Based Particulate Matter Monitoring System for Construction Sites	INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH	Hyunsik Kim, Sungho Tae	18(21)	스위스	MDPI	SCIE	2021.11.01	1660-4601	50%
8	Technology for Predicting Particulate Matter Emissions at Construction Sites in South Korea	Sustainability	Jihwan Yang, Sungho Tae, Hyunsik Kim	13	스위스	MDPI	SCIE	2021.12.14	2071-1050	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2019년 대한건축학회 추계학술대회	건설현장 광산란법 기반의 미세먼지 측정법에 관한 기초적 연구	양지환	2019.10.25	대전	대한민국
2	2019 한국전과정평가학회 학술발표회	건축물 전과정평가 데이터를 활용한 공조면적률에 따른 적정 지구온난화 평가 방법에 관한 연구	김현식	2019.12.05	부산	대한민국
3	2019 한국전과정평가학회 학술발표회	녹색건축인증제(G-SEED)를 위한 건축물 전과정평가 방법 및 사례	임효진	2019.12.05	부산	대한민국
4	2019 한국전과정평가학회 학술발표회	녹색건축인증 등급별 건축물 전과정 환경영향평가분석에 관한 연구	장형제	2019.12.05	부산	대한민국
5	SBE19	Deduction of Particulate Matter Formation of Major Waste in Construction Sites using Life Cycle Assessment	김낙현	2019.12.12	서울	대한민국
6	SBE19	A Study on the Environmental Performance Assessment Method of Green Remodeling Buildings	김대홍	2019.12.12	서울	대한민국
7	SBE19	Fundamental Study on the Proposal of Fine Dust Measurement Method in Construction Sites	양지환	2019.12.12	서울	대한민국
8	SBE19	A Study on the Automatic assessment of Materials and Resources in G-SEED	왕성조	2019.12.12	서울	대한민국
9	SBE19	Analysis of the environmental impact Emissions per step of the life cycle of the office building for sustainable construction in South Korea	임효진	2019.12.12	서울	대한민국
10	SBE19	Case study on Particulate matter Monitoring and Influence Factor on Construction Site	Ding YiWei	2019.12.12	서울	대한민국
11	2020년 대한건축학회 추계학술발표대회	주요 자재 운반에 따른 건설현장 비산먼지의 PM 배출계수 및 배출량 산정 방법에 관한 연구	김현식	2020.10.28	온라인	대한민국
12	2020 대한건축학회 추계학술대회	건설현장 미세먼지 배출계수 개발 및 배출량 산정방법에 관한 연구	양지환	2020.10.28	온라인	대한민국
13	DuraBI2021	Development of Particulate Matter Monitoring System for Construction Sites	김현식	2021.10.17	온라인	중국
14	2021년 대한건축학회 추계학술발표대회논문집	건설현장 미세먼지 배출량 평가 방법에 관한 연구	김현식	2021.10.28	온라인	대한민국
15	한국건축시공학회 2021 가을학술발표대회	IoT 기반의 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 개발에 관한 연구	김현식	2021.11.12	온라인	대한민국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	등록	건설 현장에서의 미세먼지 예측 방법 및 장치	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단	2020.10.13	10-2020-0131793	한양대학교 에리카산학협력단	2022.01.05	10-2349273	100%	
2	출원	시나리오 기반의 건설현장 및 공종별 미세먼지 예측관리기술	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단	2019.11.04	10-2019-0139621				100%	
3	출원	건설현장의 미세먼지 총 배출량 예측 및 배출허용총량 기준 설정을 통한 평가 방법	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단	2020.11.02	10-2020-0144538				100%	
4	출원	환경센서모듈을 위한 방수방진 장치	대한민국	한양대학교 에리카산학협력단	2021.10.21	10-2021-0140882				100%	

o 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1										√	
2										√	
3										√	
4										√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	건설현장 미세먼지 모니터링 프로그램 (CPMS)	2021.11.03	한양대학교에리카산학협력단, 주식회사 대단	2021.12.28	C-2021-058434	한양대학교에리카산학협력단, 주식회사 대단	100%
2	건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 프로그램 (CPMA)	2021.12.01	한양대학교에리카산학협력단, 주식회사 아키그린	2022.01.06	C-2022-001066	한양대학교에리카산학협력단, 주식회사 아키그린	100%

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		
1	공인시험	한국건설생활환경시험연구원	미세먼지 간이측정기 성능인증	LS21-00012호	2021.06.14	대한민국

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	건설현장 미세먼지 모니터링 IoT 멀티센서	2019.09.06	㈜대단	건설현장 부지 내	건설현장 미세먼지 모니터링 네트워크 구성	3년	-	-
2	건설현장 미세먼지 모니터링 유무선 게이트웨이	2019.09.17	㈜대단	건설현장 부지 내(인터넷 Lan 연결 가능 지역)	건설현장 미세먼지 모니터링 네트워크 구성	3년	-	-

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	건설현장 미세먼지 통합 관리 플랫폼	2021.06.22	한양대학교 ERICA	한양대학교 ERICA	스마트 건축관

[사회적 성과]

□ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)
1	주식회사 대단	2021.06.14	7개월	1	-

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	국내 수상	우수발표논문상 구두발표상	주요 자재 운반에 따른 건설현장 비산먼지의 PM 배출계수 및 배출량 산정 방법에 관한 연구	김현식	2020.12.01	대한건축학회
2	국외 수상	Best technical paper	Development of Particulate Matter Monitoring System for Construction Sites	김현식	2021.10.17	Henan University
3	국내 수상	최우수 학술상	IoT 기반의 건설현장 미세먼지 모니터링 시스템 개발에 관한 연구	김현식	2021.11.12	한국건축시공학회

<참고 1> 연구개발성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기를 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	지식재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등

<참고 2> 「국가연구개발혁신법」 시행령 제33조 제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설·장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상(부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보(소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함)
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

3-2. 목표 달성 수준

(1) 정성적 연구개발성과

연번	핵심성과목표	세부개발성과	달성도
1	공사유형별 미세먼지 배출 계수	■ 배출계수 DB 개발 ■ 배출량 예측 · 평가 알고리즘 개발	100%
2	건물 및 건설 프로젝트 미세먼지 저감관리 가이드라인	■ 오염원 분류표 도출 ■ 미세먼지 저감 관리 가이드라인 개발	100%
3	건설현장 미세먼지 모니터링 계측 모듈	■ PM/온도/습도/CO2 통합 모니터링 모듈 개발 ■ 유무선 게이트웨이 개발	100%
4	IoT 기반 건설현장 미세먼지 모니터링 계측 기기	■ 모니터링 소프트웨어 개발 ■ IoT 모니터링 시스템 개발	100%
5	건설현장 미세먼지 IoT 통합 플랫폼	■ 미들웨어(CPMA, CPMS) 개발 ■ 건설현장 미세먼지 통합 관리 플랫폼 개발 ■ 통합 관리 시범사업 수행	100%

(2) 정량적 연구개발성과

구분			목표	달성	달성도(%)	비고
논문 게재		SCI	5	6	120%	초과달성
		비SCI	2	2	100%	-
		계	**7**	**8**	**114%**	**-**
국내외 학술발표		국내	-	8	(부가성과)	-
		국외	-	7		-
		계	**-**	**15**		**-**
지식재산권	특허 출원	국내	3	3	100%	-
		국외	-	-	-	-
		계	**3**	**3**	**100%**	**-**
	특허 등록	국내	1	1	100%	-
		국외	-	-	-	-
		계	**1**	**1**	**100%**	**-**
소프트웨어		저작권 등록	-	2	(부가성과)	-
기타 성과		시제품	-	2	(부가성과)	-
		일자리 창출	-	1	(부가성과)	-
		기술 및 제품 인증	-	1	(부가성과)	성능인증
		포상 및 수상	-	3	(부가성과)	수상

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

- 해당 없음 -

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

최종 기여성과	민·관 모두 활용 가능한 효과적인 건설현장 미세먼지 저감 관리 솔루션 제공

		주요성과		기여내용
주요기여성과	기술 측면	■건설현장 미세먼지 통합 관리 플랫폼 ■건설현장 미세먼지 배출량 예측 기술	➡	■PM 배출량과 농도 모두 고려함 ■PM 배출량 예측 결과에 따른 대안설계
	경제 산업 측면	■CPMA 프로그램 ■미세먼지 배출허용총량 기준 ■CPMS 시스템	➡	■목표 수립 및 의사결정 지원 ■환경 컨설팅 지원 ■신규 시장 개척
	사회 측면	■건설현장 미세먼지 배출량 평가 기술 ■미세먼지 저감 관리 가이드라인 ■건설현장 특화형 모니터링 기술	➡	■정책적 저감 목표에 부합 ■건설 미세먼지 저감 정책 지원 ■건설현장 대상 모니터링 시범사업 지원

❍ 기술적 측면

- 기존의 국내외 건설현장 미세먼지 관리 방식인 농도 위주의 규제 방식에서 벗어나 정량적인 배출량과 농도 측면을 모두 고려하여 효율적인 미세먼지 관리 가능.
- 설계단계부터 건설현장의 설계안에 대한 미세먼지 발생량 용이하게 평가하고 이에 대한 관리가 가능함에 따라 달성 가능성이 높은 미세먼지 저감 방안 모색과 대안설계 가능.

❍ 경제적·산업적 측면

- 건설현장 초기단계에서 이해관계자간의 지속가능성 목표 수립과 의사결정 지원을 통해 경제적으로 합리적인 건설 계획과 설계 유도 가능.
- 건축 전반에 대한 미세먼지 등 환경성평가 및 녹색건축 인증 지원 컨설팅을 기술자립과 기술이전 저변확대 및 관련 산업 육성 추진가능.
- 건설현장의 특징을 실질적으로 고려한 최초의 미세먼지 모니터링 시스템의 보급을 통해 신규시장 활로 개척 가능.

❍ 사회적 측면

- 건설현장 미세먼지 예측이 가능함에 따라 건축사업 초기단계에서 국가 미세먼지 저감 목표 및 정책 방향에 부합하는 미세먼지 저감 관리 가능.
- 한국형 미세먼지 영향평가 방법론을 개발하고 이를 기반으로 한 건설현장 전생애 관점에서의 미세먼지 저감 매뉴얼 및 관련 사업화 모델 개발함으로써 미세먼지 저감형 평가 관련 정책 개발과 운영과정의 기초자료로 활용 가능.
- 지자체 및 정부 차원의 건설현장 미세먼지 모니터링 관리 시범 사업 추진에 있어 합리적인 모니터링 시스템 구축을 지원할 수 있음.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

❍ 본 연구의 연구결과는 국가/정책적, 산업/기술적, 환경/경제적 등의 분야에서 미세먼지 관리 제도개선 관련 국제 경쟁력 제고를 위하여 활용될 것임.

❍ 국가/정책 분야

- 설계단계부터 시공단계에 이르는 건설 프로젝트 전과정에 대한 미세먼지 예측 및 평가로 국가 저감 목표 및 정책방향에 부합하는 미세먼지 저감 관리를 실현하는 데에 활용.
- 매뉴얼 및 사업화 전략에 따라 건설현장 대상 미세먼지 관련 정책 개발과 운영과정의 기초자료로 활용.

❍ 산업/기술 분야

- 기존의 국내 대기오염물질 배출계수 개발 연구내용을 고려한 한국형 미세먼지 배출계수를 제공함으로써 국내 실정에 부합하는 정량적 미세먼지 평가에 활용.
- 설계단계부터 사전에 미세먼지를 저감하는 최적 설계 유도에 활용.

❍ 환경/경제 분야

- 국내 건설 산업 전반의 미세먼지 배출량 저감 유도에 활용.
- 독창적이고 독자적인 건설 미세먼지 관리 기술로써 기술자립과 기술이전 확대를 통한 관련 산업 육성.
- 미세먼지 관점의 지속가능성 목표수립과 의사결정 지원을 통해 경제적인 건설 유도.

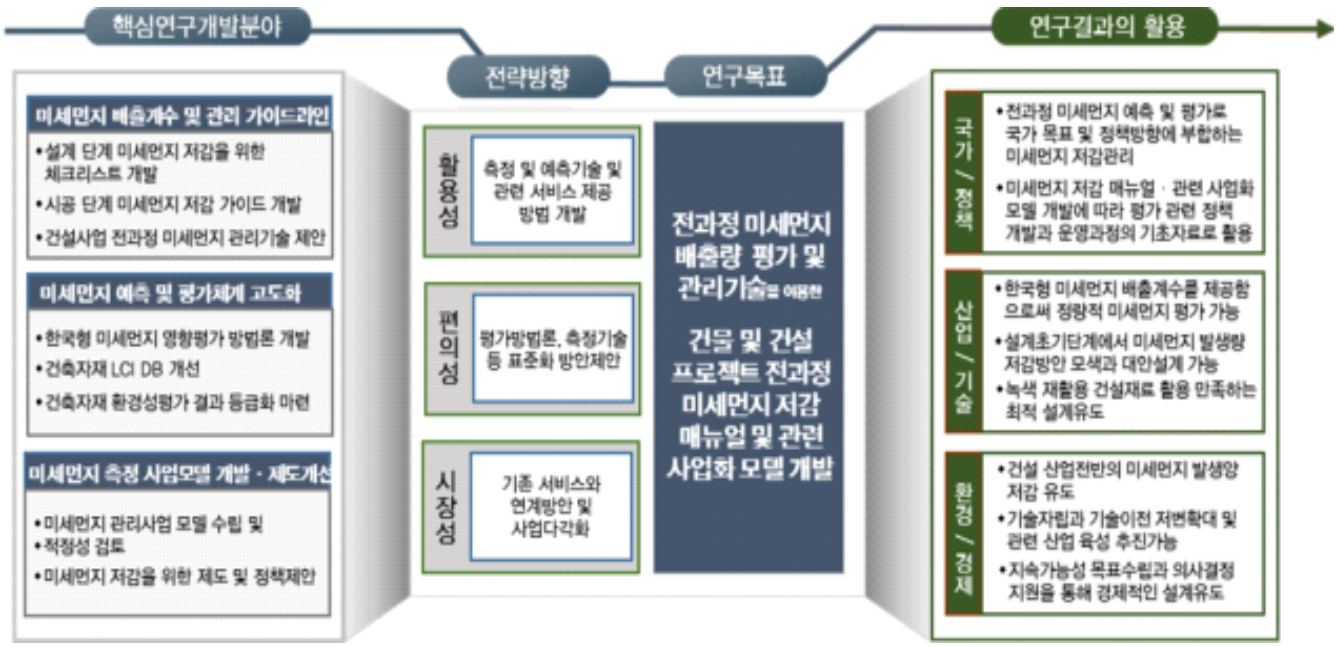


그림 6-1. 연구결과의 활용

6-2. 연구개발성과의 한계성 및 보완 사항

○ 미세먼지 측정치의 한계성 및 보완 사항

- 본 연구성과는 기존의 대형 및 고가의 미세먼지 센서 장비를 소형이며 이동이 가능한 저가의 미세먼지 센서를 활용한 미세먼지 측정 기술 개발을 목적으로 하고 있다.
- 기존의 미세먼지 센서는 습도의 영향을 최소하기 위해 별도의 히팅 장치가 부가적으로 필요한 반면, 본 연구에서는 히팅 장치가 필요 없는 미세먼지 측정 방식을 제안하고 있다. 이를 위해 소형과 경량화 및 비용 절감 측면에서의 목적은 발성했으나 측정된 미세먼지 측정장치에 대한 신뢰성 관점의 연구는 향후 보완될 필요가 있을 것으로 사료됨.
- 이를 위해 다양한 습도 환경에서도 신뢰 가능한 미세먼지 측정이 가능하도록 “습도 보정식” 산출을 위한 추가적인 실험적 연구가 필요할 것으로 사료됨.

○ 미세먼지 실시간 모니터링 시스템의 유지관리 측면의 한계성 및 보완 사항

- 본 연구에서 제시된 “건설현장 미세먼지 실시간 모니터링 시스템” 은 스마트 건축관을 대상으로 한 차례의 시범사업이 진행됨에 따라 다양한 환경에 대한 시범사업의 진행을 통해 측정 데이터 분석 및 모니터링 시스템의 신뢰성 확보가 요구됨.
- 이를 위해, 현재 다양한 건설현장(한양대학교 카카오 데이터 센터 신축현장, 캠퍼스 혁신파크 허브빌딩 등)에 대한 시범사업을 계획 중에 있음.
- 한편, 실내외 장기 모니터링 실험을 통해 모니터링 시스템의 유지관리 측면(필터 교체 주기 산정, 배터리 방식 교체 주기 등)의 추가 연구를 진행할 계획임.

○ 건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 프로그램의 예측치 한계성 및 보완 사항

- 본 연구에서 제시된 건설현장 미세먼지 배출량 예측 평가 기술은 실제 건설현장에서 발생시키는 미세먼지 발생량과의 보다 다양한 환경에 대한 비교 평가가 필요할 것으로 사료되며, 이를 위해 다양한 건설현장 사례를 대상으로 평가를 실시할 계획임.

7. 참고 문헌

[1] Rückerl, R.; Schneider, A.; Breitner, S.; Cyrys, J.; Peters, A. Health effects of particulate air pollution: A review of epidemiological evidence. Inhal Toxicol. 2011, 23(10), 555-592.

[2] Yang, X.; Lu, D.; Tan, J.; Sun, X.; Zhang, Q.; Zhang, L.; Li, Y.; Wang, W.; Liu, Q.; Jiang, G. Two-Dimensional silicon fingerprints reveal dramatic variations in the sources of particulate matter in Beijing during 2013-2017. Environ. Sci. Technol. 2020, 54, 7126-7135.

[3] Pande, P.; Dey, S.; Chowdhury, S.;, Choudhary, P.; Ghosh, S.; Srivastava, P.; Sengupta, B.. Seasonal Transition in PM10 Exposure and Associated All-Cause Mortality Risks in India. Environ Sci Technol. 2018, 52(15), 8756-8763.

[4] Morino, Y.; Chatani, S.; Tanabe, K.; Fujitani, Y.; Morikawa, T.; Takahashi, K.; Sato, K.; Sugata, S. Contributions of condensable particulate matter to atmospheric organic aerosol over Japan. Environ. Sci. Technol. 2018, 52, 8456-8466.

[5] Yoo, S.-Y.; Kim, T.; Ham, S.; Choi, S.; Park, C.-R. Importance of Urban Green at Reduction of Particulate Matters in Sihwa Industrial Complex, Korea. Sustainability 2020, 12, 7647.

[6] Kim, H.C.; Kim, S.; Kim, B.; Jin, C.; Hong, S.; Park, R.; Son, S.; Bae, C.; Bae, M.; Song, C.; Stein, A. Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. Sci Rep, 2017, 7, 4710.

[7] The Ministry of Environment(ME), Comprehensive Plan on Fine Dust Management, Korea Environmental Policy Bulletin, 2018, 15(2), 7.

[8] Lee, H.; Chang, I.; Kim, B.H.S.; Specialist perception on particulate matter policy in Korea: causal relationship analysis with Q-methodology and system thinking. Ann Reg Sci, 2019, 63, 341-373.

[9] The Ministry of Environment(ME), Status of Air Pollution, National Air Pollutants Emission Service, 2017.

[10] Reff, A.; Bhave, P.V.; Simon, H.; Pace, T.G.; Pouliot, G.A.; Mobley, J.D.; Houyoux, M. Emissions inventory of PM2.5 trace elements across the United States. Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 5790-5796.

[11] The Ministry of Environment(ME), Status of civil complaint related to fugitive dust. Available online : http://stat.me.go.kr/

[12] The Ministry of Environment(ME), 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024), 미세먼지특별대책위원회, 2019.

[13] The Ministry of Environment(ME), 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행 지침, 2019.

[14] National Assembly Research Service, 사업장 대기오염 총량관리제 현황과 개선방안, 입법·정책보고서, 2019.

[15] The Ministry of Environment(ME), 사업장 대기오염물질 총량관리제도 업무편람, 2020.

[16] The Ministry of Environment(ME), 미세먼지 팩트 체크 미세먼지! 무엇이든 물어보세요, 2019.

[17] United States Environmental Protection Agency (EPA). National Ambient Air Quality Standards

(NAAQS) for PM. 2020.

[18] Ministry for the Environment, Ambient Air Quality Guidelines, New Zealand Government, 2002.

[19] Department of the Environment, National Environment Protection (Ambient Air Quality) Measure standards, Australian Government, 2016.

[20] Canadian Council of Ministers of the Environment(CCME), Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS).

[21] The State Council of China. Three-Year Action Plan for Cleaner Air. 2018.

[22] United States Environmental Protection Agency (EPA). Cross-State Air Pollution Rule (CSAPR). 2011.

[23] European Union (EU). National Emission Ceilings Directive; European Environment Agency (EEA) Executive Office of Energy and Environmental Affairs. 2016.

[24] The Ministry of Environment (ME). Scattering Dust Management Manual; Ministry of Environment, 2021.

[25] The Ministry of the Environment (ME). Emergency Reduction Measures for Ultra-Fine Dust. 2019.

[26] Chang, J.; Tseng, C. Analysis of Correlation Between Secondary PM2.5 and Factory Pollution Sources by Using ANN and the Correlation Coefficient, IEEE Access, 2017, 5, 22812-22822.

[27] Lee, I.H.; Lee, K.B.; Kim, J.S.; Kim, S.D. Assessment of PM Emission Factors Made by Construction Machineries, J. KOSAE, 2014, 30(4), 311-318.

[28] Yang, J.; A Study on the Development of Prediction System for Fine Dust Emissions in Construction Sites, Hanyang Univ. 2021.

[29] Sandanayake, M.; Zhang, G.; Setunge, S.; Thomas, C.M. Environmental Emissions of Construction Equipment Usage in Pile Foundation Construction Process-A Case Study, Proceedings of the 19th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015, 327-339.

[30] Abolhasani, S.; Frey, H.C.; Kim, K.; Rasdorf, W.; Lewis, P.; Pang, S.; Real-World In-Use Activity, Fuel Use, and Emissions for Nonroad Construction Vehicles: A Case Study for Excavators, J. Air & Waste Manage. Assoc., 2008, 58(8), 1033-1046.

[31] World Health Organization(WHO), Health Effects of Particulate Matter - Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia, 2013.

[32] Park, M., Joo, H.S., Lee, K. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources. Scientific Reports, 2018, 8, 17007.

[33] Adams, K.; Greenbaum, D.S.; Shaikh, R.; van Erp, A.M.; Russell, A.G. Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects. J Air Waste Manag Assoc. 2015, 65(5), 544-558.

[34] Russell, A.G.; Brunekreef, B. A Focus on Particulate Matter and Health, Environmental Science & Technology, 2009, 43(13), 4620-4625.

[35] Richard, B.S. The Health Impact of Common Inorganic Components of Fine Particulate Matter (PM2.5) in Ambient Air: A Critical Review, Inhalation Toxicology, 2007, 19(10), 811-832.

[36] United States Environmental Protection Agency(US EPA), AP-42 : Compilation of Air Emissions Factors.

[37] Midwest Research Institute(MRI), Estimating Particulate Matter Emissions from Construction Operations, 1999.

[38] European Environment Agency(EEA), Air Pollution Emission Inventory Guidebook, 2019.

[39] National Institute of Environmental Research (NIER). Improvement in the Calculation Method of the Amount of Fugitive Dust Emission Amount and the Development of Real-Time Measurement Method of Resuspended Road Dust; Final Report, 2008.

[40] National Institute of Environmental Research (NIER). National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual III; 2013.

[41] National Institute of Environmental Research (NIER). Air Pollutant Emission Factors. 2015.

[42] National Institute of Environmental Research (NIER), 대기오염공정시험기준, 2020.

[43] 이누리, 엄현욱, 조현숙. 광산란 방식 실시간 미세먼지 측정 및 모니터링 시스템 개발. 한국화재소방학회 논문지, 2018, 32(3), 134-139.

[44] 양지환, 태성호, 이광수, 건설현장 광산란법 기반의 미세먼지 측정법에 관한 기초적 연구, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 2019, 39(2), 476-479.

[45] 임선영, 유정호, 건설현장 비산먼지 관리를 위한 비산먼지 측정기술 분석, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 2018, 38(1), 672-673.

[46] National Institute of Environmental Research (NIER), 미세먼지 간이측정기 성능인증 등에 관한 고시, 2019.

[47] Korea Conformity Laboratories (KCL), 미세먼지 간이측정기 인증신청 및 처리규정, 2019.

[48] National Institute of Environmental Research (NIER), 초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북, 2018.

[49] Kang, H.; Sung, S.; Hong, J.; Jung, S.; Hong, T.; Park, H.S.; Lee, D.-E. Development of a real-time automated monitoring system for managing the hazardous environmental pollutants at the construction site. J. Hazard. Mater. 2021, 402, 123483.

[50] Smaoui, N.; Kim, K.; Gnawali, O.; Lee, Y.-J.; Suh, W. Respirable Dust Monitoring in Construction Sites and Visualization in Building Information Modeling Using Real-time Sensor Data. Sens. Mater. 2018, 30, 1775-1786.

[51] Marques, G.; Ferreira, C.R.; Pitarma, R. A System Based on the Internet of Things for Real-Time Particle Monitoring in Buildings. Int. J. Environ. Res. Public Health 2018, 15, 821.

[52] Jo, J.H.; Jo, B.; Kim, J.H.; Choi, I. Implementation of IoT-Based Air Quality Monitoring System for Investigating Particulate Matter (PM10) in Subway Tunnels. Int. J. Environ. Res. Public Health 2020, 17, 5429.

[53] Jo, J.; Jo, B.; Kim, J.; Kim, S.; Han, W. Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform. J. Sens. 2020, 2020, 8749764.

[54] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60529: Ingress Protection (IP) Ratings; IEC: Geneva, Switzerland, 2013.

[55] 고용노동부, 옥외작업자를 위한 미세먼지 대응 건강보호 가이드, 2019.

[56] Kim, H.; Tae, S.; Yang, J. Calculation Methods of Emission Factors and Emissions of Fugitive Particulate Matter in South Korean Construction Sites. Sustainability, 2020, 12(23), 9802.

[57] Gubbi, J.; Buyya, R.; Marusic, S.; Palaniswami, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 2013, 7, 1645-1660.

[58] Lanotte, R.; Merro, M. A Semantic Theory of the Internet of Things. Coordination Models and Languages. COORDINATION 2016. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham., 2016, 9686.

[59] Lynn T., Endo P.T., Ribeiro A.M.N.C., Barbosa G.B.N., Rosati P. (2020) The Internet of Things: Definitions, Key Concepts, and Reference Architectures, The Cloud-to-Thing Continuum. Palgrave Studies in Digital Business & Enabling Technologies, 2020, 1-22.

[60] 이민석, 4차 산업혁명 기획시리즈 - IoT 활성화를 위한 고찰, 정보통신정책연구원, 2017.

[61] 한국전파진흥협회, 차세대 공공재난안전통신을 위한 한국형 PS-LTE 표준개발, 2016.

[62] 국가미세먼지정보센터, 국가 대기오염물질 배출량 서비스-배출량 산정방법.

[63] Statistics Korea (KOSTAT), Korean Standard Industrial Classification(KSIC), Korean Statistical Classification, 2021.

[64] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 국토교통 통계누리 - 건축허가 및 착공통계, 2017.

[65] Derek, E.D.; William C.M.; Sonia M.K. Aerosol Light Scattering Measurements as a Function of Relative Humidity, Journal of the Air & Waste Management Association, 50:5, 2000, 710-716.

[66] Di Antonio, A.; Popoola, O.A.M.; Ouyang, B.; Saffell, J.; Jones, R.L. Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter. Sensors, 2018, 18, 2790.

[67] Crilley, L.R.; Shaw, M.; Pound, R.; Kramer, L.J.; Price, R.; Young, S.; Lewis, A.C.; Pope, F.D. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. Atmos. Meas. Tech., 11, 2018, 709-720.

[68] Sioutas, C.; Kim, S.; Chang, M.; Terrell, L.L.; Gong, H., Jr. Field evaluation of a modified DataRAM MIE scattering monitor for real-time PM2. 5 mass concentration measurements. Atmos. Environ. 2000, 34, 4829-4838

[69] Shao, W.; Zhang, H.; Zhou, H. Fine Particle Sensor Based on Multi-Angle Light Scattering and Data Fusion. Sensors 2017, 17, 1033.

[70] Bulot, F.M.J.; Johnston, S.J.; Basford, P.J.; Easton, N.H.C.; Apetroaie-Cristea, M.; Foster,

G.L.; Morris, A.K.R.; Cox, S.J.; Loxham, M.. Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. Sci Rep 9, 2019, 7497.

[71] Lou, C.; Liu, H.; Li, Y.; Peng, Y.; Wang, J.; Dai, L. Relationships of relative humidity with PM2.5 and PM10 in the Yangtze River Delta, China. Environ Monit Assess 189, 2017, 582.

[72] Jayaratne, R.; X. Liu; P. Thai; M. Dunbabin; L. Morawska. The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. Atmos. Meas. Technol. 11(8), 2018, 4883-90.

[73] Ouyang, W.; Guo, B.; Cai, G.; Li, Q.; Han, S.; Liu, B.; Liu, X. The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing. Sci. Total Environ. 2015, 505, 306-314.

[74] Lee, C.H.; Oh, S.N. Effect of Atmospheric Humidity on Fine Dust Measurement Using the Light Scattering Method. J. Korean Soc. Hazard Mitig. 20(1), 2020, 391-399.

[75] Bauerová, P.; Šindelářová, A.; Rychlík, Š.; Novák, Z.; Keder, J. Low-Cost Air Quality Sensors: One-Year Field Comparative Measurement of Different Gas Sensors and Particle Counters with Reference Monitors at Tušimice Observatory. Atmosphere 2020, 11, 492.

[76] Jo, Y.-J.; Jang, M.-S. Suggestion and Verification of Architecture for Collecting Fine Dust using Drone. The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences, 15(1), 2020, 125-132.

[77] Alvarado, M.; Gonzalez, F.; Erskine, P.; Cliff, D.; Heuff, D. A Methodology to Monitor Airborne PM10 Dust Particles Using a Small Unmanned Aerial Vehicle. Sensors 2017, 17, 343.

[78] Tran, A.T.P. Drone in Particulate Matter Measurement - Particles behavior under the influence of the propellers of a drone. Tampere Univ. of App. Sci., 2019.

[79] X. Su, S. Wang, D. Zhu and Q. Zhu, "RS-485 serial port pseudo-full-duplex communication research and application," 2010 Prognostics and System Health Management Conference, 2010, pp. 1-5.

[80] The Ministry of Environment(ME) & National Institute of Environmental Research (NIER), 대기오염측정망 설치·운영지침, 2021.

[81] Ministry of the Interior and Safety(MOIS), Public Safety-Long Term Evolution(PS-LTE).

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '국토교통기술촉진연구사업' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

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