

20CTAP  
-C143827  
-03

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호(11-B552555-000115-01)  
**국토교통기술촉진연구사업 최종보고서**

R&D / 20CTAP-C143827-03

최  
종  
보  
고  
서

미세먼지 Free Zone 구현을 위한 Passive/Active 통합 모듈형 장치개발 - 반경 3m 내 미세먼지 90% 저감 -

2020

국  
토  
교  
통  
부

국토교통과학기술진흥원

## 미세먼지 Free Zone 구현을 위한 Passive/Active 통합 모듈형 장치개발

-반경 3m 내 미세먼지 90% 저감-

# 최종보고서

2020. 12. 31.

주관연구기관 / 한국토지주택공사  
공동연구기관 / (주)에코이엔지

넥서스환경디자인연구원(주)

**국 토 교 통 부**  
국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토부장관 귀하

이 보고서를 '미세먼지 Free Zone 구현을 위한 Passive/Active 통합 모듈형 장치개발'(연구개발 기간 : 2018. 4. ~ 2020. 12.) 과제에 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 12. 31

주관연구기관명 : 한국토지주택공사

(대표자) 직축모

공동연구기관명 : (주)에코이엔지

(대표자) 황대성

넥시스환경디자인연구원(주)

(대표자) 이동하



주관연구기관책임자: 한국토지주택공사

이은엽

공동연구기관책임자: (주)에코이엔지

황대성

넥시스환경디자인연구원(주) 이동하

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 일람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

|                   |                     |                                                                           |                                |                            |                                                  |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호          | 20CTAP-C143827-03   | 해당 단계<br>연구 기간                                                            | 2018. 4. 17.~<br>2020. 12. 31. | 단계구분                       | 1 / 1                                            |
| 연구사업명             | 국토교통기술촉진연구사업        |                                                                           |                                |                            |                                                  |
| 연구과제명             | 대과제명                |                                                                           |                                |                            |                                                  |
|                   | 세부과제명               | 미세먼지 Free Zone 구현을 위한 Passive/Active 통합 모듈형 장치개발<br>-반경 3m 내 미세먼지 90% 저감- |                                |                            |                                                  |
| 연구책임자             | 이은엽                 | 해당단계<br>참여연구원 수                                                           | 총: 25명<br>내부: 25명<br>외부: 0명    | 해당단계<br>연구비                | 정부: 600,000천원<br>민간: 478,000천원<br>계: 1,078,000천원 |
|                   |                     | 총 연구기간<br>참여연구원 수                                                         | 총: 25명<br>내부: 25명<br>외부: 0명    | 총 연구비                      | 정부: 600,000천원<br>민간: 478,000천원<br>계: 1,078,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명 | 한국토지주택공사<br>토지주택연구원 |                                                                           | 참여기업명                          | (주)에코이엔지<br>넥서스환경디자인연구원(주) |                                                  |
| 국제공동연구            | 상대국명:               |                                                                           |                                | 상대국 연구기관명:                 |                                                  |
| 위탁연구              | 연구기관명:              |                                                                           |                                | 연구책임자:                     |                                                  |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

|                         |                                                                                                                    |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유 | 일반과제<br>본 연구개발사업은 <국토교통부소관 연구개발사업 운영규정> 제7장 연구개발사업의<br>보안 및 정보관리, 제47조의 4(보안등급 분류기준)에 명시된 보안등급 분류에 따라<br>일반과제로 구분됨 |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |    |    |           |              |            |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 |    |    |           |              |            |           |     |          |          |     |    |

### 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

### 요 약

보고서 면수

169

태양광 활용 집진패널을 이용한 Active 제거기술과 미세먼지 저감 성능이 우수한 식생을 활용한 Passive 미세먼지 저감 기술을 융합한 통합모듈형 미세먼지 저감장치 시작품을 개발했으며 실제 생활공간에 Test-Bed 운영을 통해 성능을 개선·보완하고 반경 3m 이내에서 미세먼지 프리존 구현 가능성을 검증함. 또한, 연구과제 종료 이후 지자체에 이관하거나 사업화가 이루어질 수 있도록 저감장치에 대한 최적의 유지관리 방안 및 운영관리 가이드라인을 마련하여 활용처를 다각화하고자 하였음

## 요약문

| 연구의<br>목적 및 내용            | <p>&lt;연구목적&gt;</p> <p>본 연구에서는 식물 흡착·흡수 기작과 하이브리드(관성충돌+전기집진) 집진패널 기술을 융합한 Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감 장치를 개발하여 설치반경 3m 이내 도시 미세먼지(PM10 기준) 노출을 90% 저감함으로써 사회적 이슈인 미세먼지 문제를 효과적으로 해결하는 것을 목표로 함</p> <p>&lt;연구내용&gt;</p> <p>식생을 활용한 미세먼지 Passive 저감기술 개발 : 미세먼지 저감 식생 DB 구축 및 저감효과 분석, 식생활용 미세먼지 저감 패널 제작 및 효율 최적화</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 집진패널을 이용한 Active 제거기술 개발 : 하이브리드(관성충돌+전기집진) 집진패널 제작 및 미세먼지 저감효과 규명, 집진패널 효율 최적화</li><li>• Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감장치 개발 및 운영 : 미세먼지 저감 통합 모듈형 장치 최적 디자인 설계, Test Bed 적용(공원, 횡단보도, 유동인구밀집지역, 버스정류장, 주거단지 쉼터 및 놀이터 등) 및 최적 운영방안 제시</li></ul>                                                                                                                                                 |    |           |                |            |       |                  |          |          |                            |    |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------|----------------|------------|-------|------------------|----------|----------|----------------------------|----|----|----|----|-----------|--------------|------------|-------|-----|------|--|-----|--|----------|----------|----|----|---------------|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|
| 연구개발성과                    | <ul style="list-style-type: none"><li>• 반경 3m 이내 도시 미세먼지 노출을 90% 저감할 수 있는 저전력 집진패널 기반의 Active 미세먼지 제거기술과 식생 기반의 Passive 저감기술을 융합한 통합모듈형 장치 시제품을 개발하고 이용빈도가 높은 도심 공간에 현장 실증(Test-Bed)을 거쳐 실용화 추진을 위한 토대 마련</li></ul> <p>&lt;예상되는 연구개발성과 유형&gt;</p> <table><tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서<br/>원문</th><th rowspan="2">연구시설<br/>· 장비</th><th rowspan="2">기술요약<br/>정보</th><th rowspan="2">소프트웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr><tr><th>생명<br/>정보</th><th>생물<br/>자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr><tr><td>예상성과<br/>(N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> |    |           |                |            |       |                  |          |          |                            |    | 구분 | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트웨어 | 화합물 | 생명자원 |  | 신품종 |  | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보 | 실물 | 예상성과<br>(N/Y) | Y | Y | Y | Y | Y |  |  |  |  |  |  |
| 구분                        | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비   | 기술요약<br>정보 | 소프트웨어 | 화합물              | 생명자원     |          | 신품종                        |    |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |           |                |            |       |                  | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보                         | 실물 |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
| 예상성과<br>(N/Y)             | Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Y  | Y         | Y              | Y          |       |                  |          |          |                            |    |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <ul style="list-style-type: none"><li>• Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감장치 확대 보급 및 적용을 통해 사회적 이슈인 미세먼지 문제 해결에 효과적으로 대응함으로써 국민 삶의 질 향상과 사회적비용 감소에 기여할 수 있음은 물론 국내 환경산업의 수준을 향상시키고 고부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대됨</li><li>• Test-Bed 운영 결과에 기반한 기술검증 및 성능 개선 단계를 거침에 따라 실제 현장에 적용시켜 운영하기 위한 실용화 단계로 발전할 수 있는 기술로 활용 기대</li><li>• 정부에서 계획하고 있는 2023년 미세먼지 대응 신시장(국내 17조, 해외 30조원) 창출에 기여할 수 있을 것으로 기대됨</li><li>• 기후위기, 환경문제 등에 대응한 그린 뉴딜 사업과 3기 신도시, 스마트 그린도시 조성시 새로운 청정 환경 사업으로 적용 기대</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |           |                |            |       |                  |          |          |                            |    |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)          | 도시 미세먼지                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |           | 모듈형 장치         |            |       | 미세먼지 흡수·흡착       |          |          | 하이브리드 집진패널                 |    |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)          | Urban particulate matter                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |           | Modular device |            |       | PM ab/adsorption |          |          | hybrid PM collecting panel |    |    |    |    |           |              |            |       |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |

## 〈 목 차 〉

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....         | 1   |
| 2. 연구수행 내용 및 성과 .....       | 5   |
| 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ..... | 161 |
| 4. 연구개발성과의 활용 계획 등 .....    | 165 |
| 붙임. 참고 문헌 .....             | 168 |

# 1. 연구개발과제 개요

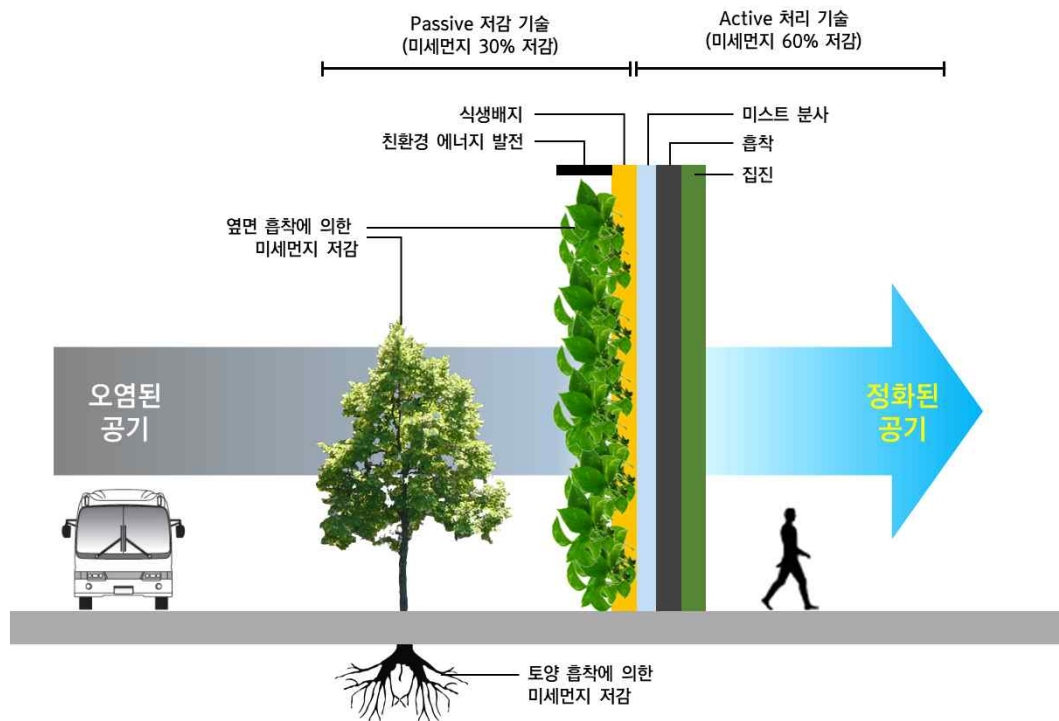
## (1) 연구필요성 및 목적

- 최근 국내 연중 미세먼지의 평균 오염도가 증가함에 따라 이를 저감하기 위한 적극적인 개선 대책이 요구되는 상황임
  - PM10 오염도는 2012년까지 개선 추세였으나, 2013년부터 악화 또는 정체되고 있음
  - 특히, 인체위해성이 더 높은 PM2.5 평균농도( $26\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 세계보건기구(WHO) 권고기준( $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 선진국 주요도시(도쿄 13.8, 런던  $11\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대비 1.8~2.6배 높으며, 최근 고농도 발생이 빈번했음
- 정부는 관계부처 합동으로 2016년 「미세먼지 관리 특별대책」을 수립·추진하였으며, 최근 「미세먼지 관리 종합대책」을 발표하는 등 미세먼지 저감에 대한 대책을 마련하고, 민생안전과 국민안전에 위한 최우선 해결 과제로 설정함
  - 2022년까지 국내 미세먼지 배출량 30% 감축목표 설정(총 7.2조원 투자)
  - 전국 미세먼지 나쁨( $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 초과일수 70% 감축목표 설정(16년: 258일 → 22년: 78일)
- 그러나 교통 및 대규모 배출원(발전, 산업, 수송) 등 거시적 차원에서의 획일적 규제에만 비중을 두고 있을 뿐 도시 내 생활권 공간단위에서의 구체적인 저감 대책은 미비한 실정임
  - KEI의 ‘국민환경 의식조사’ 시행결과, 미세먼지에 대한 관심도가 높으며(47.9%), 정부의 미세먼지 감축 노력이 충분하지 않다고 생각하고 있음(52.9%)
  - 국내 미세먼지 수준에 대한 불만족도는 55.2%로 과반 이상이며, 미세먼지가 건강에 미치는 영향에 대한 걱정 및 위협정도에 대해 응답자의 68.6%가 걱정한다고 응답함
- 도시 내 생활권에서 발생하는 미세먼지 문제 해결을 위해서는 사전에 미세먼지를 차단·저감하거나, 배출된 미세먼지의 경우 인체 노출 농도를 저감시키는 것이 중요함
  - 국내 미세먼지의 경우 중국 등 국외영향이 30~80%에 달하기 때문에 배출원 차단·저감 뿐만 아니라 도시 공간 내 노출농도 저감과 관련한 대책 마련이 필수적임
- 따라서, 도시의 거주자들이 실제 생활하는 공간에서의 미세먼지 저감을 위해 도시 공간단위의 특성에 따른 환경영향과 미세먼지 특성을 분석하여 효과적인 미세먼지 노출 저감 방안을 마련할 필요성이 있음
  - 국내 미세먼지대응기술 수준은 최고기술 보유국 대비 평균 70.5% 수준으로 나타남
  - 과학기술을 기반으로 기존 기술의 패키지화·공백기술 확보 및 기술실증 등 가시적 성과 창출을 위한 전략적 접근이 요구됨
- 이에 본 연구는 도시의 외부 환경에 노출되어 있는 미세먼지를 효과적으로 저감할 수 있는 생활밀착형 기술 개발을 통해 도시 주요 생활공간에 미세먼지 Free Zone을 구현하여 사회적 이슈에 효과적으로 대응하고 국민의 삶의 질 향상에 기여하고자 함



[그림 1-2] 연구개발 개요

- Passive 미세먼지 저감 기술과 관련하여 녹지 조성을 통한 옥상녹화, 벽면녹화 등 인공녹화 기술을 활용한 연구가 주를 이루고 있음
  - 식물에 의한 공기정화 연구들이 선행되고 있으나, 포름알데히드, 벤젠 등을 중심으로 이루어지고 있으며, 실내공간을 대상으로 진행되고 있는 한계를 지님
  - 도시 미세먼지 저감과 관련하여 인공녹화 기술의 효과(평균 31.13% 저감)를 언급하고 있으나, 구체적으로 식물의 미세먼지 저감 작용기작을 분석한 연구는 미흡함
- Active 미세먼지 제거 기술과 관련하여 미세먼지 집진시스템(전기집진 및 여과집진) 및 다공성 흡착소재 개발, 지능형 Active 환기시스템 도입 등이 추진되고 있음
  - 대부분의 Active 미세먼지 제거 기술은 대규모 미세먼지 배출원(화력발전소, 제조업 공장 등) 및 인구가 밀집된 내부 공간(도시터널, 지하철, 공항청사 등)에 적용되어 활용되고 있음
  - 주거환경에서 활용가능한 공기청정 관련 기술 분야는 고효율 미세공기 필터(HEPA: High Efficiency Particulate Air Filter) 개발 및 유해성 물질 성분 분석연구 등이 수행되고 있음
  - 하지만 도시민의 외부 주요 생활환경과 관련하여 미세먼지에 대응할 수 있는 Active 기술 개발 및 적용은 미흡한 상황임 (외출자제 및 미세먼지 방지용 마스크 착용만으로는 한계)
- 입체녹화를 기반으로 한 Passive 기술과 저전력 집진패널을 활용한 Active 미세먼지 제거 기술을 융합한다면 상호보완적 기술 요소의 접목을 통해 도시 주요 생활공간에서 미세먼지 저감에 시너지 효과를 얻을 수 있음은 물론 파생효과를 얻을 수 있음
  - 입체녹화 기술을 접목하면 동일하게 미세먼지 저감효과를 위해 Active 기술에 사용하는 에너지 사용량을 줄일 수 있으며, 심미감과 안정감 제공을 통해 도시민에게 정서적 휴양기능을 제공할 수 있음
  - 미스트 분사를 통한 미세먼지 응축성장과 태양광을 활용한 저전력 집진패널 기술의 융합을 통해 도시 녹화만으로 해결하는 데 한계가 있었던 미세먼지 노출 저감 효과를 향상시키고, 이를 바탕으로 활용 방안을 다각화 할 수 있음



[그림 1-3] 개발 기술의 미세먼지 저감 기작 모식도

- 본 연구에서는 입체녹화를 통한 식물 흡착·흡수 기작과 신소재 기반 태양광 활용 집진패널 기술을 융합한 Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감 장치를 개발하여 설치반경 3m 이내 도시미세먼지(PM10 기준) 노출을 90% 저감함으로써 사회적 이슈인 미세먼지 문제를 효과적으로 해결하는 것을 목표로 함
  - 식생을 활용한 미세먼지 Passive 저감기술 개발 : 미세먼지 저감 식생 DB 구축, 환경영향 인자(온도, 습도, 바람, 입체녹화 디자인 등)에 따른 미세먼지 저감효과 분석, 식생활용 미세먼지 저감패널 개발
  - 태양광 활용 집진패널을 이용한 Active 제거기술 개발 : 신소재 기반 저전력 집진필터 제작, 미세먼지 이온화 및 응축/흡착 메커니즘 규명, 집진필터 효율 최적화
  - Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감장치 개발 및 운영 : 미세먼지 저감 통합 모듈형 장치 최적 디자인 설계, Test Bed 적용(도로변, 유동인구밀집지역 등) 및 최적 운영방안 제시
- 본 연구에서 제안하는 Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감장치의 확대 적용·보급을 통한 도시 주요 생활공간 미세먼지 Free Zone을 구현하게 되면 사회적 이슈인 미세먼지 문제에 효과적으로 대응할 수 있을 것임
  - 탈부착이 자유로운 모듈형 장치 개발을 통해 다양한 도시 생활공간(도로변 방음벽, 버스정류장, 유동인구밀집지역, 주거단지 쉼터 및 놀이터 등)에 확대 적용·보급 가능
  - 도시민들이 실제 미세먼지 농도 분포에 큰 영향을 받는 위치(4m 이하)에 장치를 적용하게 되면 미세먼지 노출 저감 효과를 기대할 수 있음
  - 향후 기타 대기유해물질(VOC, NOx, CO, O3 등) 제어에도 확대적용 할 수 있으며, IoT 기술 접목을 통해 실시간 대기질 정보시스템 구축에도 활용할 수 있음
- 이를 통해 국민 삶의 질 향상과 사회적비용 감소에 기여할 수 있음은 물론 관련 환경산

업수준을 향상시키고 국가 신성장동력 창출에 기여할 수 있을 것으로 기대됨

- OECD 자료에 의하면, 우리나라는 2060년쯤이면 미세먼지로 인해 GDP의 0.6%가 감소하고 연간 22조 원의 경제적 손실을 입을 것으로 예측되어 있으며, 적극적 대응을 취하지 않을 경우 대기오염에 의한 한국인의 조기 사망률이 2060년에는 OECD 국가 중 가장 높아 의료비와 복지비용 증가로 경제적 손실을 초래할 것으로 전망
- 실제 생활환경 내 미세먼지 노출 저감을 통한 삶의 질 향상 및 사회적 비용 감소 : 미세먼지(PM10 농도  $75\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)에 일주일 노출 시 사망률 3.4% 증가, 미세먼지 농도 60% 감소 시 처리비용 1,800억 절감
- 미세먼지 저감 통합 시스템 개발과 관련된 환경산업(미세먼지 저감 식생 DB 구축, 지능형·에너지 저감형 미세먼지 제거장치 개발, 대기질 측정 및 모니터링, 친환경적 디자인 등) 육성 및 일자리 창출효과 기대 (2020년 환경 분야 일자리 : 2013년 대비 45~60% 증가 전망)
- 미세먼지를 방지하는 경우 발생하는 사회적 비용을 고려할 때 미세먼지로 인한 피해를 방지하기 위한 적극적 정책 대응이 필요함

## (2) 연구범위

### ○ 모듈형 미세먼지 저감 장치 제작 및 활용

- Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 장치 제작
- 모듈형 방식으로 설치 및 사이즈 변경이 용이하여 장소 및 처리 범위에 따라 시스템 변형이 가능하도록 시작품 구성
- Test-Bed 운영을 통한 현장 적용성 여부를 파악해 보고 모니터링에 기반 하여 성능 개선 도모

### ○ Passive 미세먼지 저감기술

- 미세먼지 흡착·흡수 기능 등 미세먼지 저감효과가 우수한 식생을 선별
- 선별된 식생을 모듈화 장치 표면에 입체녹화 방식으로 설치하여 미세먼지 저감 및 심미감 향상
- 관수시스템을 활용하여 식생의 유지관리 능력 향상

### ○ Active 미세먼지 제거기술

- 하이브리드 집진패널 기술을 도입하여 미세먼지 효율적 저감
- 미스트 분사장치를 접목하여 미세먼지를 응축성장 시킨 후 관성충돌 필터를 거쳐 미세먼지 제거
- 정전기 유도를 통해 미세먼지를 이온화 시킨 뒤 입경이 작은 미세먼지 제거
- 태양광 패널 및 원격 제어시스템을 접목하여 에너지 효율성 향상

## 2. 연구수행 내용 및 성과

### 가. 연구개발 내용 및 결과

#### (1) Active 미세먼지 제거 기술 개발

##### (가) 미세먼지 저감장치 시작품을 위한 최적 기술 선정

##### ① 미스트 이용 또는 관성충돌 방식을 고려한 집진장치 개발

##### ㉞ 미세먼지 응집, 성장

- 응축성장 방식의 미세먼지 정화장치는 물을 이용한 초미세먼지의 고속 응축 성장을 통해 초대화된 입자를 제거하는 원리
- 고압 분무 노즐을 통해 100nm 이하의 초미세입자를  $2\mu\text{m}$  이상으로 성장시키고, 초대입자 제거장치를 거쳐 미세먼지를 제거할 수 있는 것이 특징
- 일반적으로 물분자(액적)의 크기는 초미세먼지, 미세먼지와 비슷한 크기여야 물과 먼지가 잘 응집되므로 액적의 크기도 약  $5\mu\text{m}$  전후 크기가 적당한 것으로 판단됨
- 약  $5\mu\text{m}$ 의 액적을 발생시키기 위해 적절한 노즐과 60bar의 압력 필요

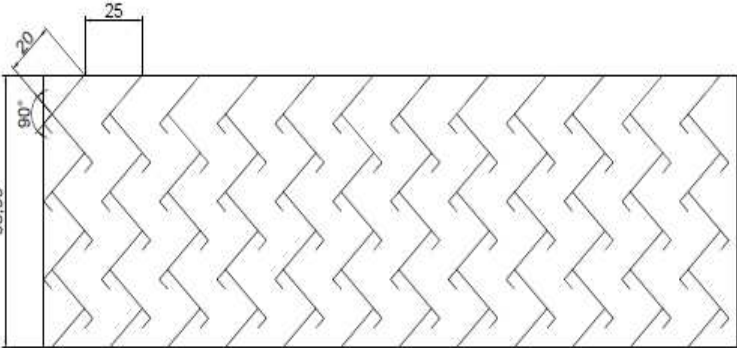
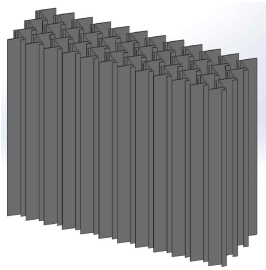
##### ㉟ 관성충돌방식의 집진판

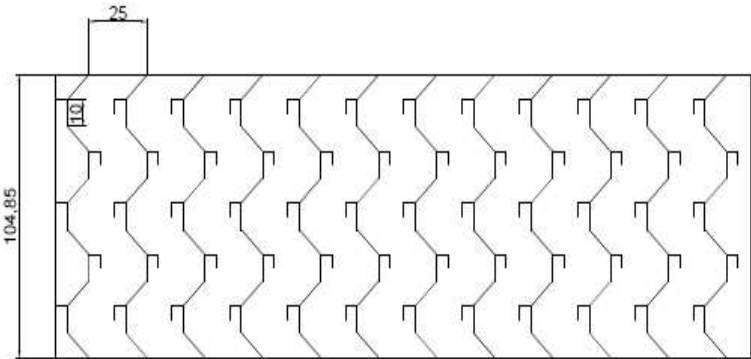
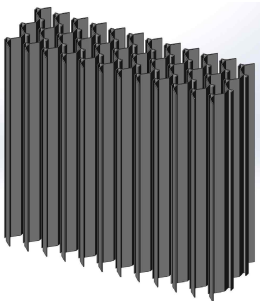
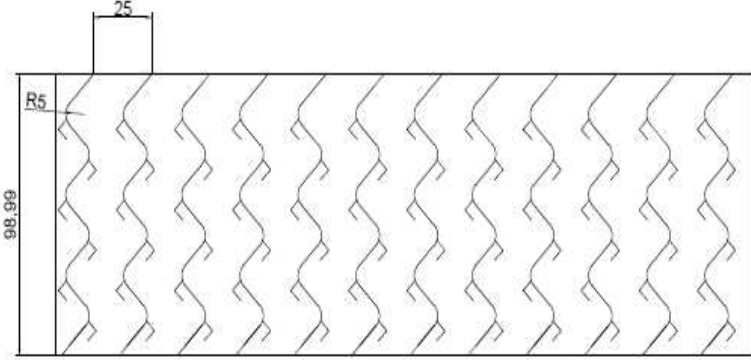
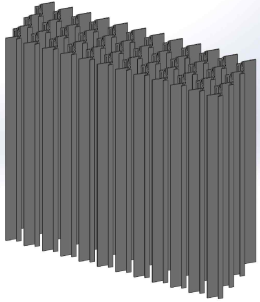
##### ○ Chevron 집진 원리

- 미세먼지의 고체와 공기의 기체가 Chevron층을 통과하면, 기체는 고체보다 쉽게 방해판을 회전하면서 통과하지만 고체는 무거운 밀도 때문에 쉽게 회전하지 못하고 방해판 표면에 충돌하게 됨
- 체류기간 동안 연이은 고체의 충돌로 입자의 사이즈가 커지게 되고 고체는 중력에 의해서 침강하게 되며, 이러한 원리로 미세먼지를 포집하게 됨

##### ○ 관성충돌 집진판 형상 검토

- 공기의 흐름중에서 포집효율을 높이고, 압력손실이 적으며, 최적의 유동이 이루어지는 형상을 선정하기 위해 3가지 형상을 검토함

| Type | 관성충돌 집진판 2D                                                                          | 관성충돌 집진판 3D                                                                           |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    |  |  |

| Type | 관성충돌 집진판 2D                                                                         | 관성충돌 집진판 3D                                                                         |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 2    |   |  |
| 3    |  |  |

[그림 2-1] 관성충돌 집진판 형상 검토

○ 관성충돌 집진판 형상별 유동해석

- 고효율의 미세먼지 포집장치를 개발하기 위하여 유동 전산해석 수행
- 전산해석은 미세먼지 포집장치 내부의 복잡한 유동장과 국부적인 유동 현상을 이해하고, 고효율 미세먼지 포집장치의 설계를 위한 기초자료를 제시하는데 그 목적을 두고 있음

○ 지배방정식과 경계조건

- 미세먼지 포집장치에서 유동을 해석하기 위한 지배방정식은 다음과 같음

(연속 방정식)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(운동량 방정식)

$$U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \overline{u_i u_k} \right) \quad (2)$$

- 난류모델은  $k-\varepsilon$  모델을 사용하였으며 난류 운동에너지  $k$ 와 난류 운동에너지 소멸율  $\varepsilon$ 에 대한 방정식은 다음과 같음

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + G_k + G_b - \varepsilon \quad (3)$$

$$U_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1(G_k + G_b) - C_2) \quad (4)$$

$$G_k = v_t \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad G_b = \beta g_i \frac{v_t}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

- 각각의 미세먼지 포집장치 입출구는 압력이 100 Pa 차로 유지되고 있으며, 10  $\mu\text{m}$  사이즈의 파티클이 유입된다고 가정하고, 각각 형태의 포집률에서 유량과 포집효율 계산

#### ○ 전산해석기법

- 지배방정식과 난류방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같음

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \phi) = \frac{\partial}{\partial x_k} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k}) + S_\phi \quad (5)$$

- 여기서 좌변 항은 대류항이고, 우변의 첫 번째 항은 확산항이며,  $S_\phi$ 는 생성항임.  $\phi=1$ 인 경우는 연속 방정식을 나타내고,  $\phi = U_i$ 인 경우는 운동량 방정식,  $\phi = T$ 인 경우는 에너지 방정식을 나타내며,  $\phi = k$ 와  $\varepsilon$ 인 경우는 난류 방정식을 나타냄. 생성항  $S_\phi$ 는 각각의 지배방정식에 대해서 다른 형태로 표시됨. 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (5)에 대한 차분방정식을 구하면 다음과 같음

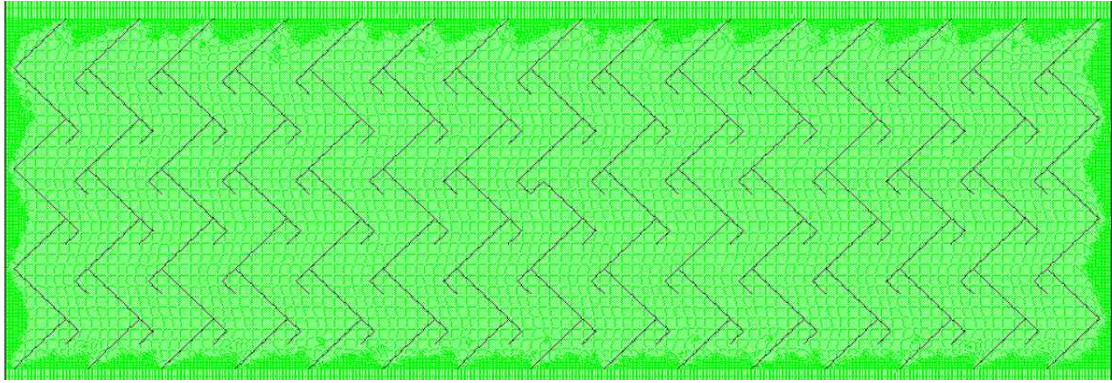
$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (6)$$

- 범용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (6)의 해를 구하였음. FLUENT는 유동, 열전달, 상변화, 연소 등과 관련된 현상의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 GAMBIT, Solver와 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있음
- FLUENT는 완전내연기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 Code로서 속도 등 벡터량과 압력, 온도 등 스칼라 양을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계(non-staggered grid)를 사용하며, 대류항을 계산하기 위한 격자점간의 보간은 power-law법, 2차 상류차분법, 고차 상류차분법인 QUICK법을 선택하여 사용할 수 있음. 난류모델은  $k-\varepsilon$ 모델을 기본으로 사용하고 RSM(Reynolds Stress Model)과 RNG(Renormalization Group) 모델을 선택적으로 사용할 수 있음. 수치해법은 SIMPLE과 SMMPLEC를 채용하고 있음.
- 본 연구에서는 power-law scheme,  $k-\varepsilon$  난류모델, SIMPLE algorithm을 사용하여 전산해석을 수행하였음. 각각의 모델에 대한 수렴판정은 다음의 전영역 잔류항의 총합이  $10^{-6}$  이하가 되는 시점으로 하였음

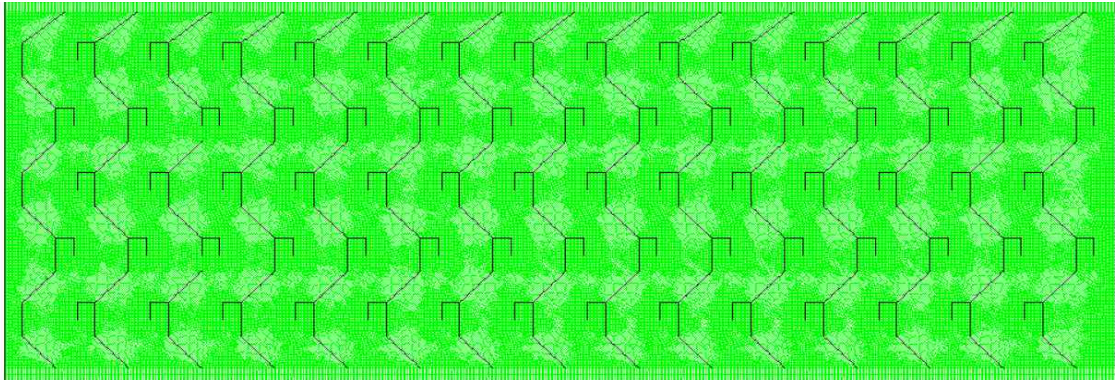
$$\overline{R} = \frac{\sum_{nodesP} | [ A_{E\phi_E} + A_{W\phi_W} + A_{N\phi_N} + A_{S\phi_S} + S_C - A_{P\phi_P} ] |}{\sum_{nodesP} | (A_{P\phi_P}) |} \leq 10^{-6} \quad (7)$$

○ 전산해석 결과

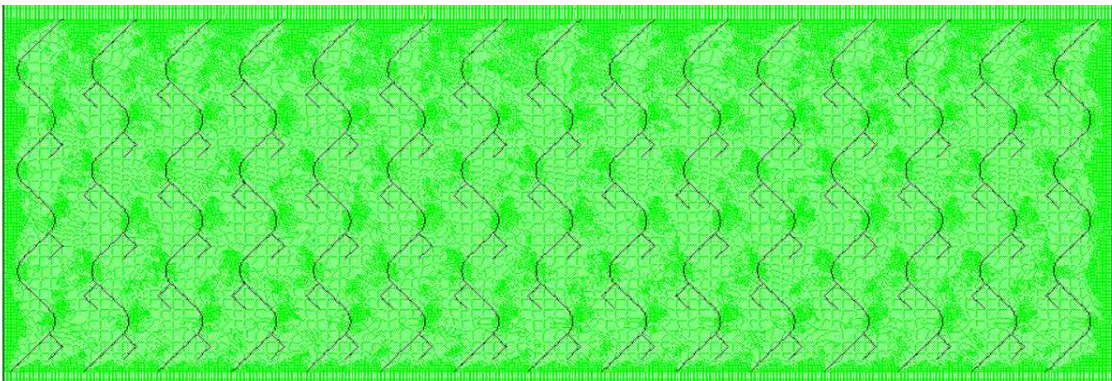
- [그림 2-2]는 각 Type의 미세먼지 포집장치에 대한 계산격자이며, 계산격자는 2D로 만들었으며, 해석의 정확도를 위해 약 21만개의 사각격자를 사용하였음



(a) Type-1 계산격자



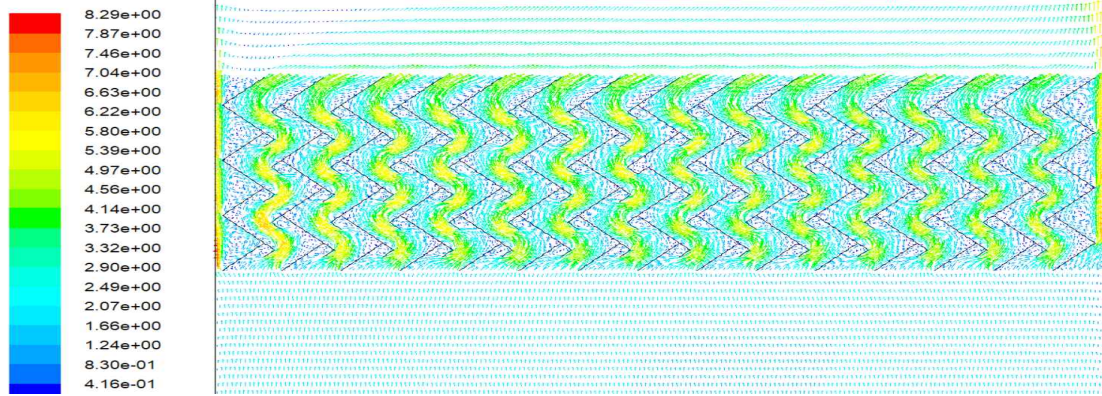
(b) Type-2 계산격자



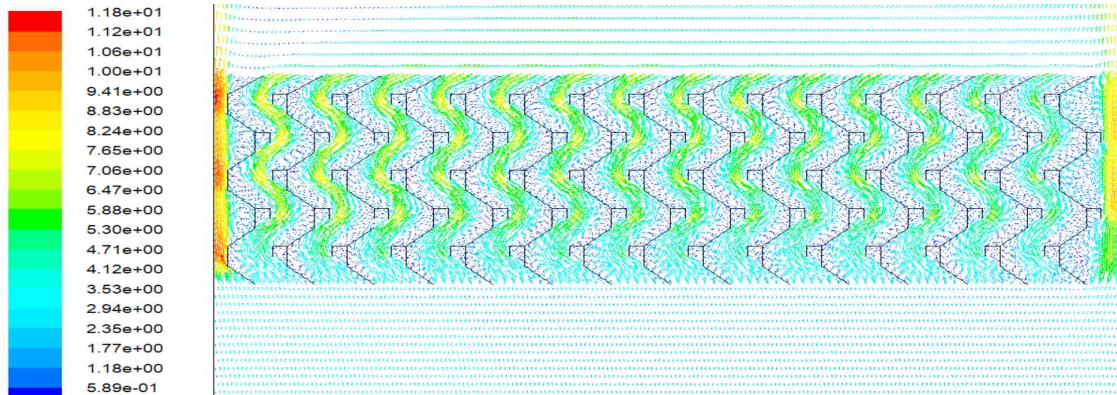
(c) Type-3 계산격자

[그림 2-2] 미세먼지 포집장치 계산격자

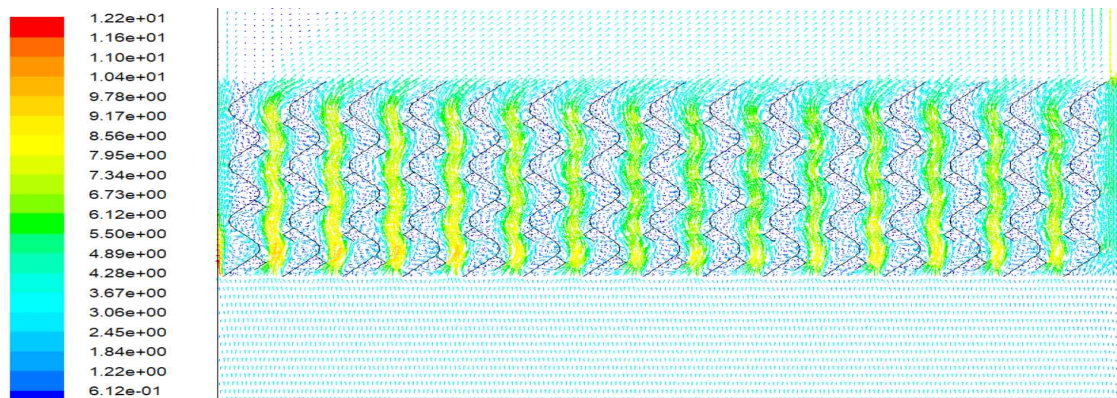
- [그림 2-3]은 미세먼지 포집장치의 속도분포를 나타낸 것으로, 유로를 따라가는 속도분포를 볼 수 있으며, 포집룸에서는 와류가 발생하고 있는 것을 볼 수 있음. Type-3에서는 유동방향으로 라운드처리가 되어 있고, 포집룸의 위치가 유로의 가장자리에 있지 않기 때문에 포집룸과 격인 유로의 영향을 받지 않고 유동방향으로 직선 형태의 속도분포가 나타나고 있음



(a) Type-1 속도분포



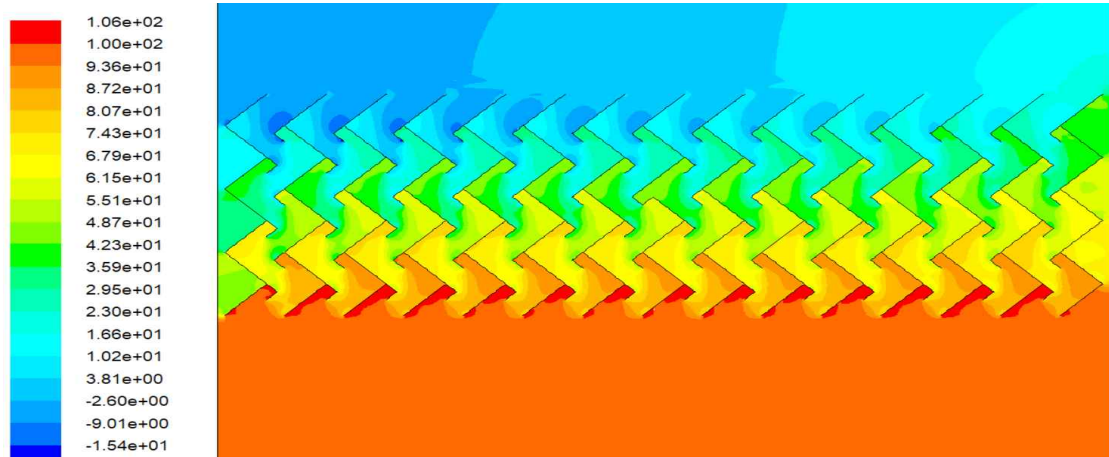
(b) Type-2 속도분포



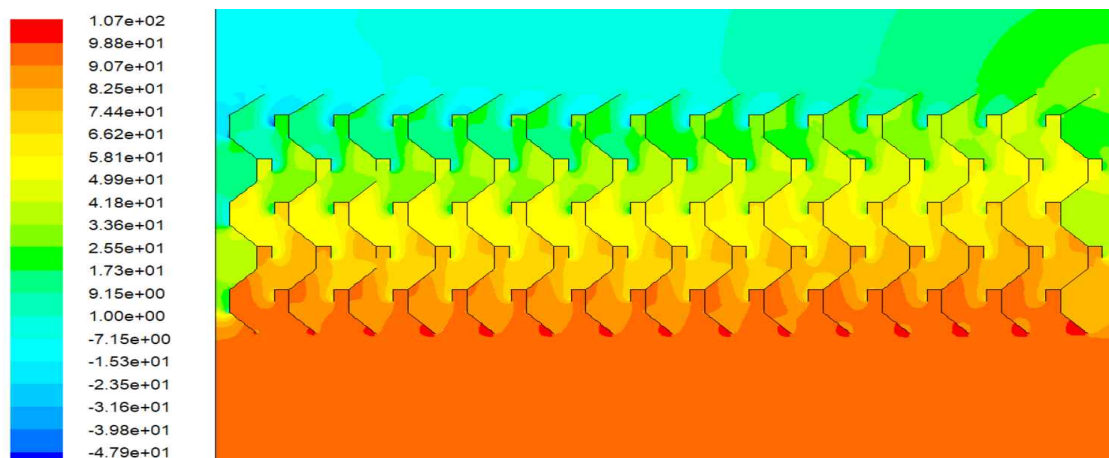
(c) Type-3 속도분포

[그림 2-3] 미세먼지 포집장치 속도분포

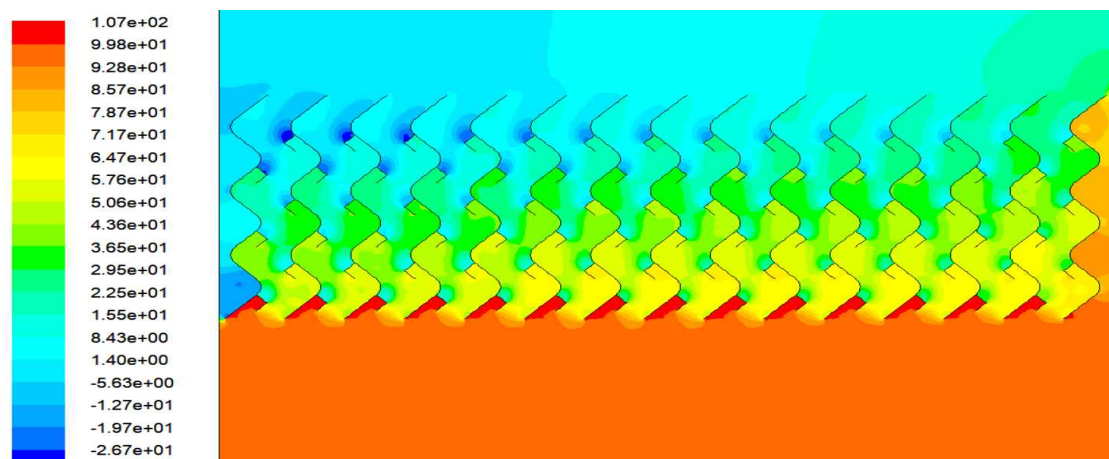
- [그림 2-4]는 미세먼지 포집장치의 압력분포를 나타낸 것으로 가장 앞부분의 포집룸에서 정압이 가장 큰 것을 확인할 수 있음



(a) Type-1 압력분포

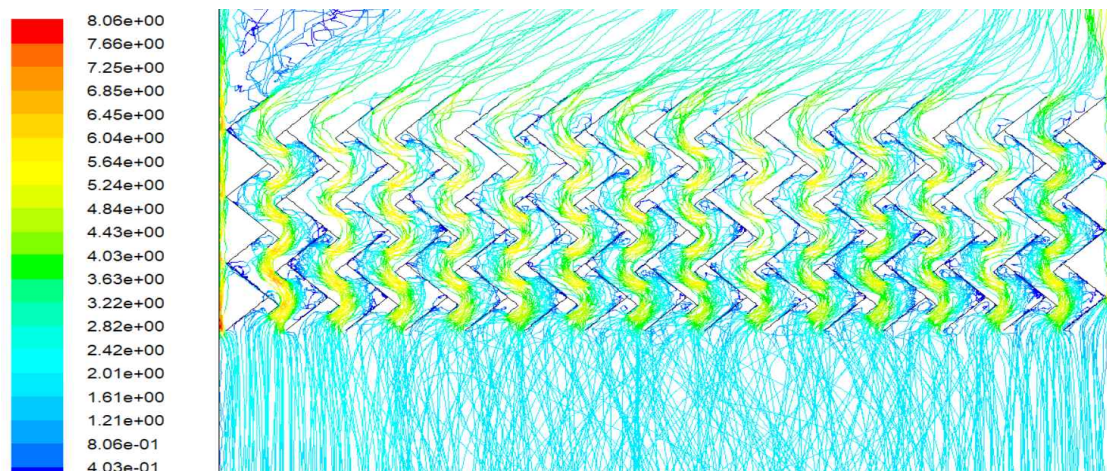


(b) Type-2 압력분포

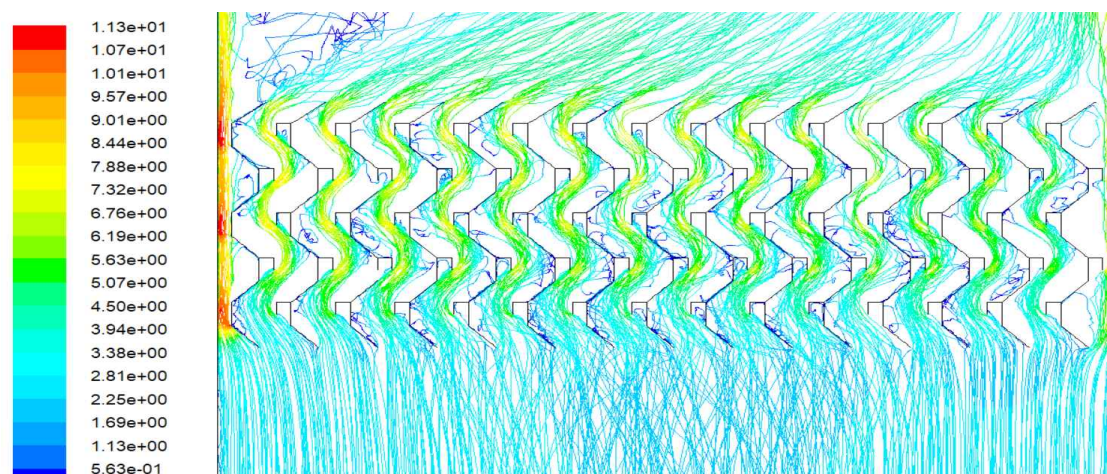


(c) Type-3 압력분포

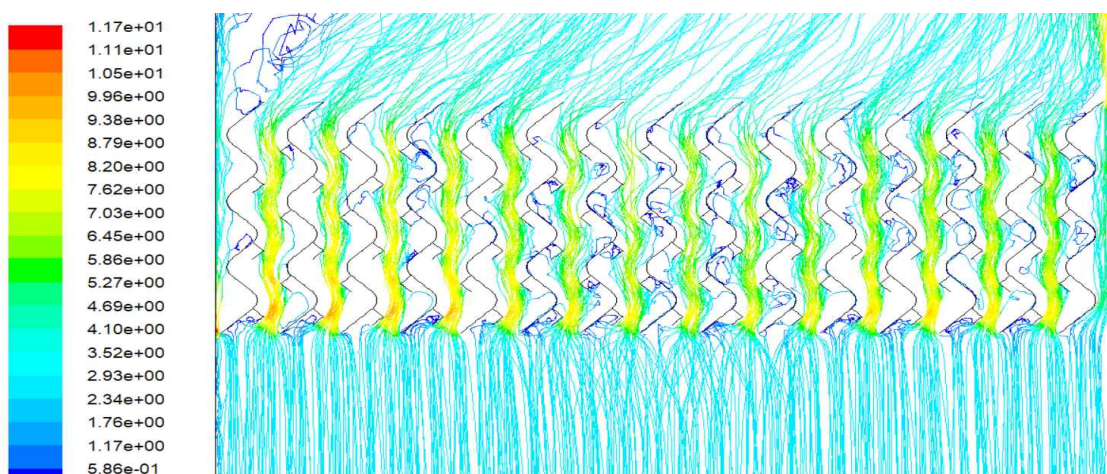
[그림 2-4] 미세먼지 포집장치 압력분포



(a) Type-1 파티클 유동



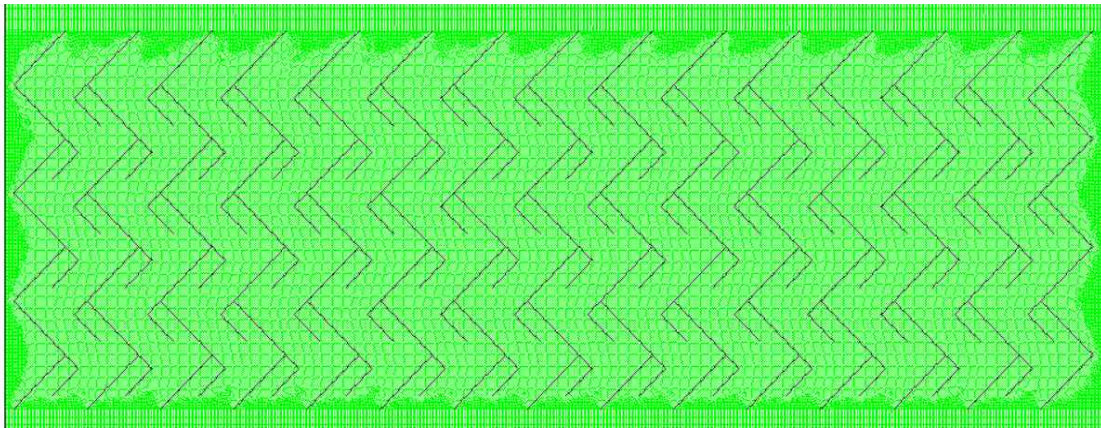
(b) Type-2 파티클 유동



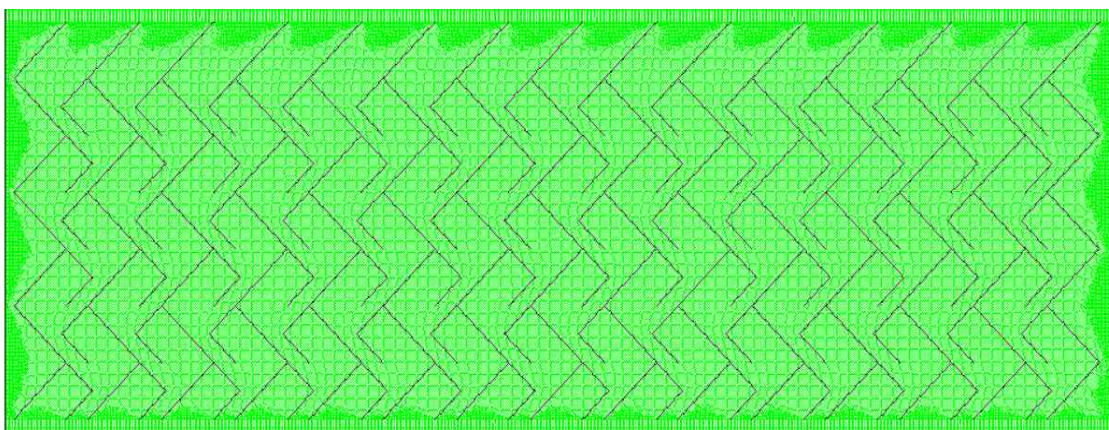
(c) Type-3 파티클 유동

[그림 2-5] 미세먼지 포집장치 파티클 유동

- [그림 2-5]는 미세먼지 포집장치의 파티클 유동을 나타낸 것으로, 사이즈  $10\ \mu\text{m}$ 의 미세먼지를 유동 입구에서 분사하였으며, 미세먼지들은 미세먼지 포집장치 포집룸에서만 제거되는 것으로 경계조건을 설정하였음
- 해석 결과를 보면, 유동입구에서 유인된 미세먼지들이 유동 와류에 의해 포집룸에서 부착되고 있는 것을 볼 수 있으며, 포집룸을 통하지 않고 지나가는 유동에 의해서는 출구쪽으로 빠져나가는 것을 볼 수 있음. 포집장치를 빠져나간 미세먼지는 유동유로가 그림에서 오른쪽으로  $45^\circ$  꺾여있기 때문에 미세먼지의 유동도 오른쪽으로 꺾여 포집장치를 빠져나가고 있는 것을 볼 수 있음
- 세가지 유로형상에 대한 결과에서 Type-1의 경우가 미세먼지 포집 효율이 가장 좋은 것으로 나타났음. 따라서 Type-1 유로 형상에 대해 포집룸의 크기를 바꿔가면서 시뮬레이션 검토를 수행하였음
- 최초에 모델링한 포집룸의 크기는  $5 \times 5\ \text{mm}$ 이었지만 [그림 2-6]과 같이 유동방향의 크기를  $10\ \text{mm}$ 로 설계한 Type-1( $5 \times 10$ ) 모델과 유동방향과 유동방향에 마주하는 면의 크기를  $10\ \text{mm}$ 로 설계한 Type-1( $10 \times 10$ ) 모델에 대해 계산격자를 만들어 시뮬레이션을 수행하였음



(a) Type-1(포집룸  $5 \times 10$ ) 계산격자

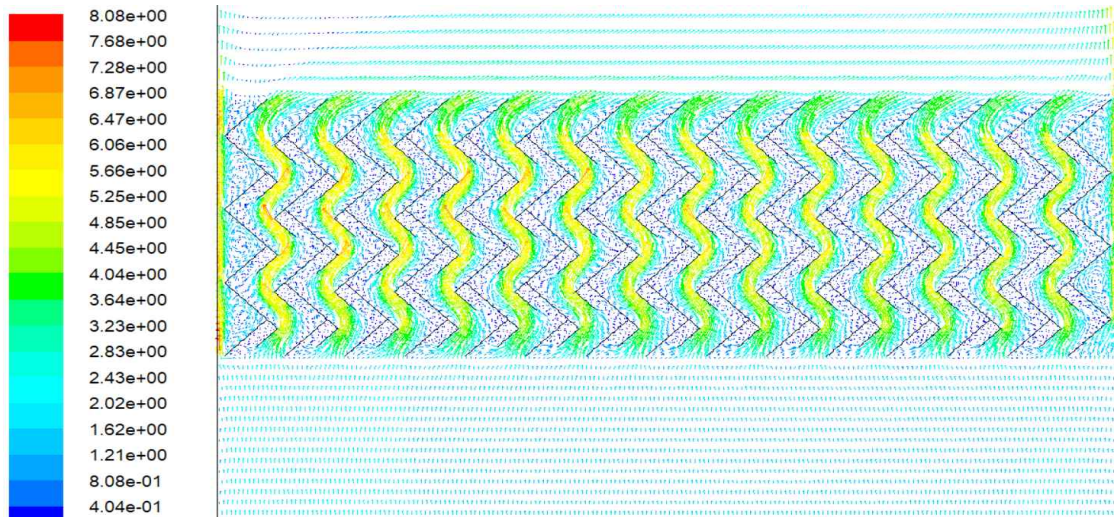


(b) Type-1(포집룸  $10 \times 10$ ) 계산격자

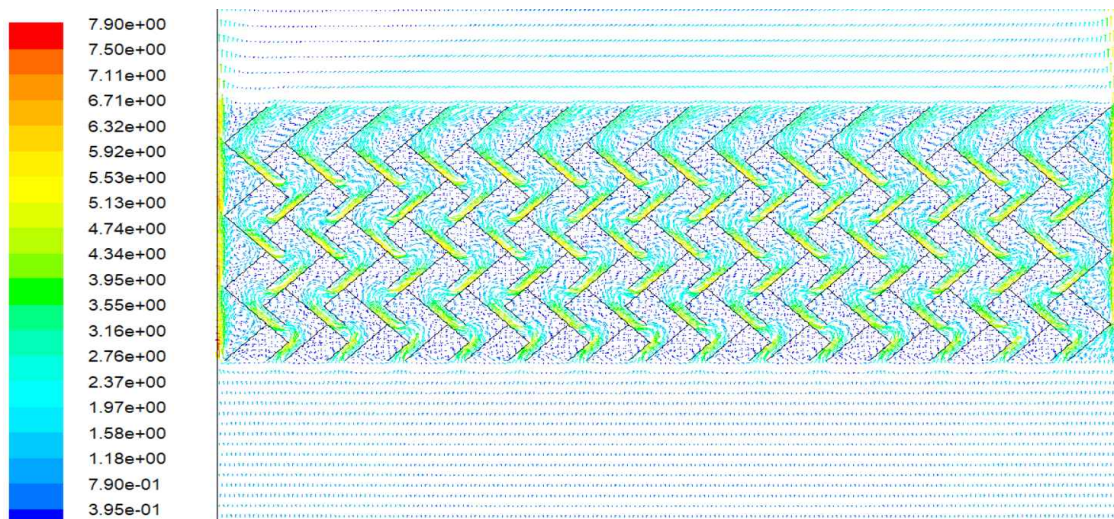
[그림 2-6] Type-1 포집룸 크기 변경 계산격자

- [그림 2-7]은 포집장치의 속도분포를 나타낸 것으로, 유동방향으로 포집룸 크기를 변경한 Type-1( $5 \times 1$

0) 모델의 경우 유로방향을 따라 유동이 발달하고 있으며, 포집룸에서 와류가 발생하는 것을 볼 수 있고, 유동방향과 유동방향에 마주하는 면의 크기를 변경한 Type-1(10×10) 모델의 경우 유로 사이가 좁기 때문에 포집장치를 통과하는 유동이 미미한 것으로 나타나고 있음



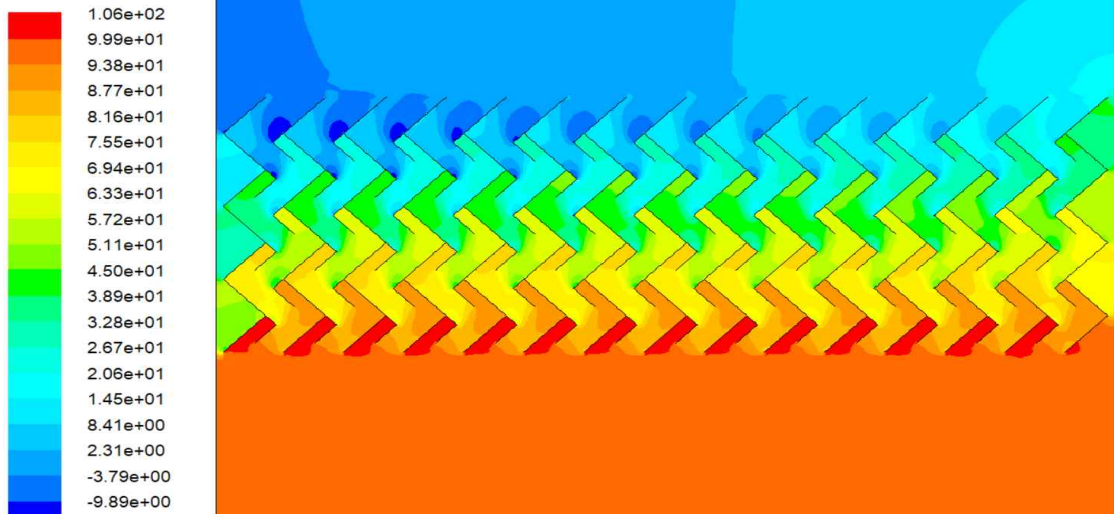
(a) Type-1(포집룸 5×10) 속도분포



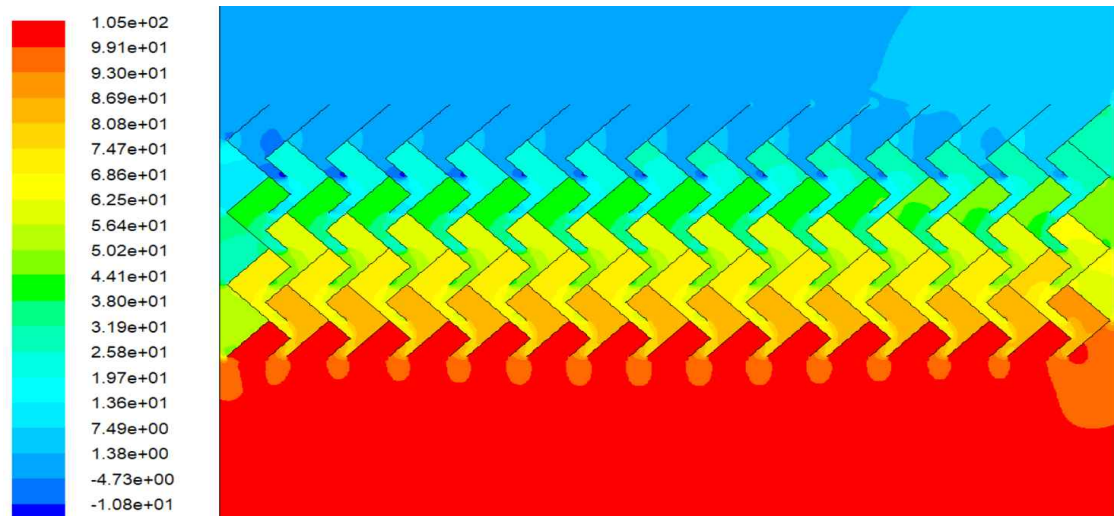
(b) Type-1(포집룸 10×10) 속도분포

[그림 2-7] Type-1 포집룸 크기 변경 속도분포

- [그림 2-8]은 포집장치의 압력분포를 나타낸 것으로 Type-1(5×10) 모델과 Type-1(10×10) 모델 모두 유동방향으로 가장 처음 만나는 포집룸에서 정압이 큰 것으로 나타나고 있으며, Type-1(10×10) 모델은 포집룸의 크기가 크기때문에 정압이 큰 영역이 넓게 분포하고 있음
- [그림 2-9]는 포집장치에서의 파트클 유동을 나타낸 것으로 Type-1(5×10) 모델에서는 포집룸에 부착되는 미세먼지와 유로사이를 통과하는 미세먼지가 고르게 분포하는 것으로 나타나고 있음
- Type-1(10×10) 모델에서는 유로사이의 포집룸에 의한 저항이 매우 커서 유로사이를 통과하는 미세먼지는 거의 보이지 않으며, 포집장치 양쪽 끝의 포집룸이 없는 틈으로 빠져나가는 것을 볼 수 있음



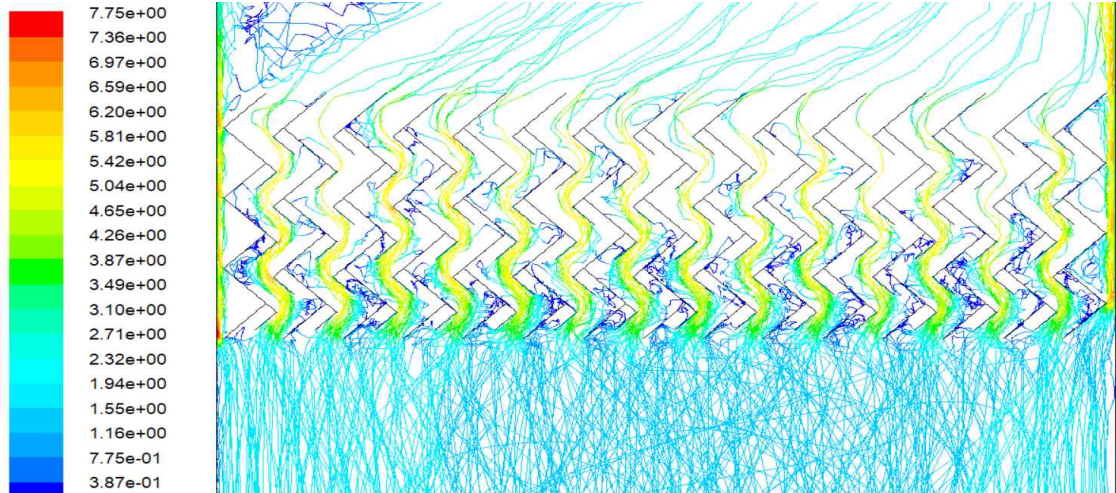
(a) Type-1(포집률 5×10) 압력분포



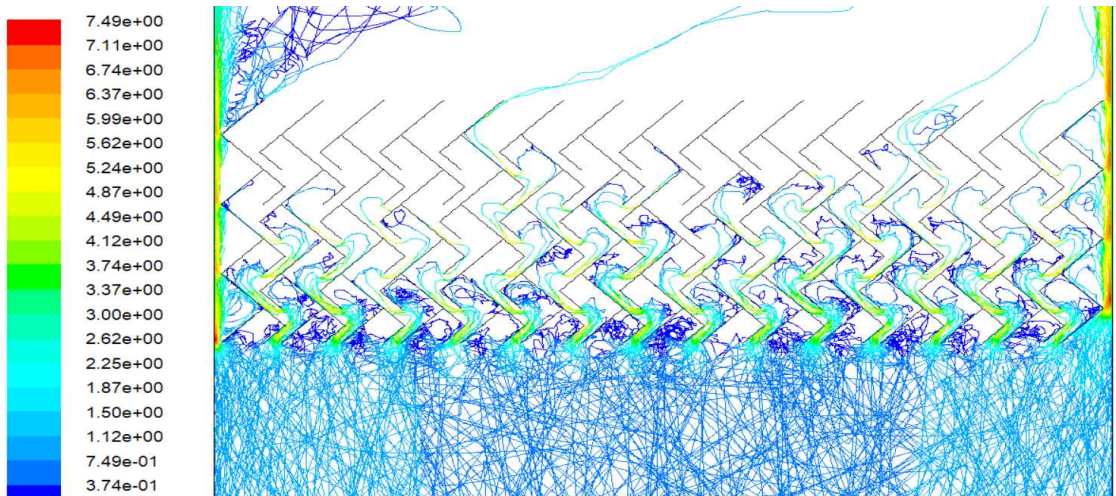
(b) Type-1(포집률 10×10) 압력분포

[그림 2-8] Type-1 포집률 크기 변경 압력분포

- [표 2-1]은 전체 시뮬레이션 결과를 정리한 것으로, 포집률의 크기가 5×5인 경우 Type-1의 포집효율이 0.696으로 가장 좋으며, Type-2와 Type-3은 0.475로 정도로 유사한 결과를 나타냄
- 포집효율이 가장 좋은 Type-1의 포집률의 크기를 변경시킨 경우, 포집률의 크기가 5×10인 포집장치에서 포집효율이 0.818, 10×10인 포집장치에서 0.700으로 포집률이 큰 경우가 오히려 낮게 나왔음
- 이는 포집률이 큰 경우에 저항이 크기 때문에 유동이 포집률이 위치한 유로 사이를 통과하지 못하고 양 옆으로 바이패스 되기 때문으로 판단됨



(a) Type-1(포집률 5×10) 파티클 유동



(b) Type-1(포집률 10×10) 파티클 유동

[그림 2-9] Type-1 포집률 크기 변경 파티클 유동

- 동일 차압일 때 포집장치를 통과하는 풍량 시뮬레이션 결과를 보면 풍량은 Type-1의 경우보다 Type-2와 Type-3이 높게 나타나고 있으며, Type-1에서도 포집률의 크기가 커지면 저항이 커져 유량이 현저히 감소되고 있는 것을 볼 수 있음
- 전체 미세먼지 제거 성능을 동일 팬 압력일 경우 미세먼지 포집장치를 통과하는 유량과 미세먼지를 제거하는 효율의 곱으로 표현할 수 있으며, 이는 Type-1의 포집률 5×5 사이즈의 경우가 가장 큰 것을 확인할 수 있음
- 미세먼지 포집효율을 높이기 위해 단순히 포집률을 크게 만드는 것은 유동저항을 크게 하여 포집장치를 통과하는 공기유량이 감소하기 때문에 전체적인 포집 성능은 감소하는 것으로 판단됨

[표 2-1] 계산결과

| Type | 포집률 크기 | 풍량(m3/s)  | 포집결과    | 포집효율  | 풍량×포집효율 |
|------|--------|-----------|---------|-------|---------|
| 1    | 5×5    | 0.5335247 | 348/500 | 0.696 | 0.3713  |
|      | 5×10   | 0.4502461 | 409/500 | 0.818 | 0.3683  |
|      | 10×10  | 0.2391454 | 350/500 | 0.700 | 0.1674  |
| 2    | 5×5    | 0.7101654 | 242/510 | 0.475 | 0.3373  |
| 3    | 5×5    | 0.7746895 | 237/500 | 0.474 | 0.3672  |

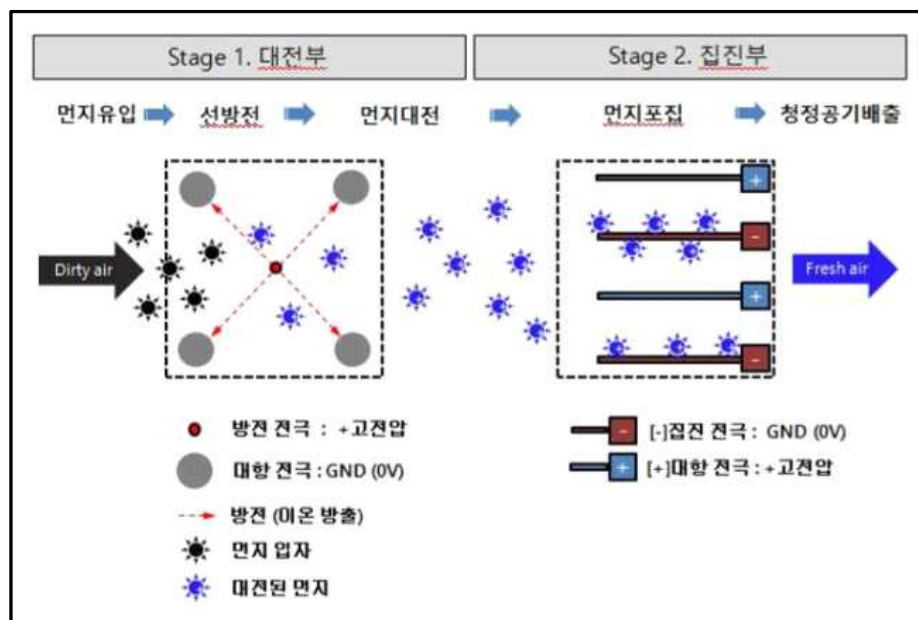
○ 관성충돌방식의 집진판 선정

- 관성충돌 집진판의 3가지 형상 중, 최적의 유동이 이루어지면서 포집효율이 가장 높으며, 생산성, 조립성이 양호한 1번 타입을 선정하였으며, 재질은 외적 영향을 최소화 하기 위해 STS를 적용함

② 하전부와 집진부로 구성된 전기집진 방식을 고려한 집진장치 개발

㉞ 전기집진기의 원리

- 전기집진기라고 하면, 직류고전압에 의한 코로나 방전에 의해 입자를 대전시켜 전계에 의한 정전방식을 이용하여 집진하는 것을 의미하며, 1단형과 2단형으로 구분됨
- 1단형은 방전부와 집진부를 일체화 한 것으로 코트렐 방식이며, 2단형은 방전부의 집진부가 별도로 되어있고, 주로 직류고전압 DC 10~12KV 또는 DV5~6KV를 사용함



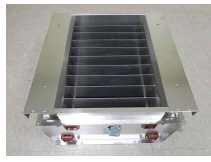
[그림 2-10] 전기집진 원리

㉞ 전기집진기 선정

- 전기집진기 2종류를 비교한 결과, TYPE B 전기집진기의 경우, 전기집진기의 사이즈가 크고 날카롭기 때문에 유지관리에 불편할 뿐만 아니라, 현장 적용이 불가하며, collector부

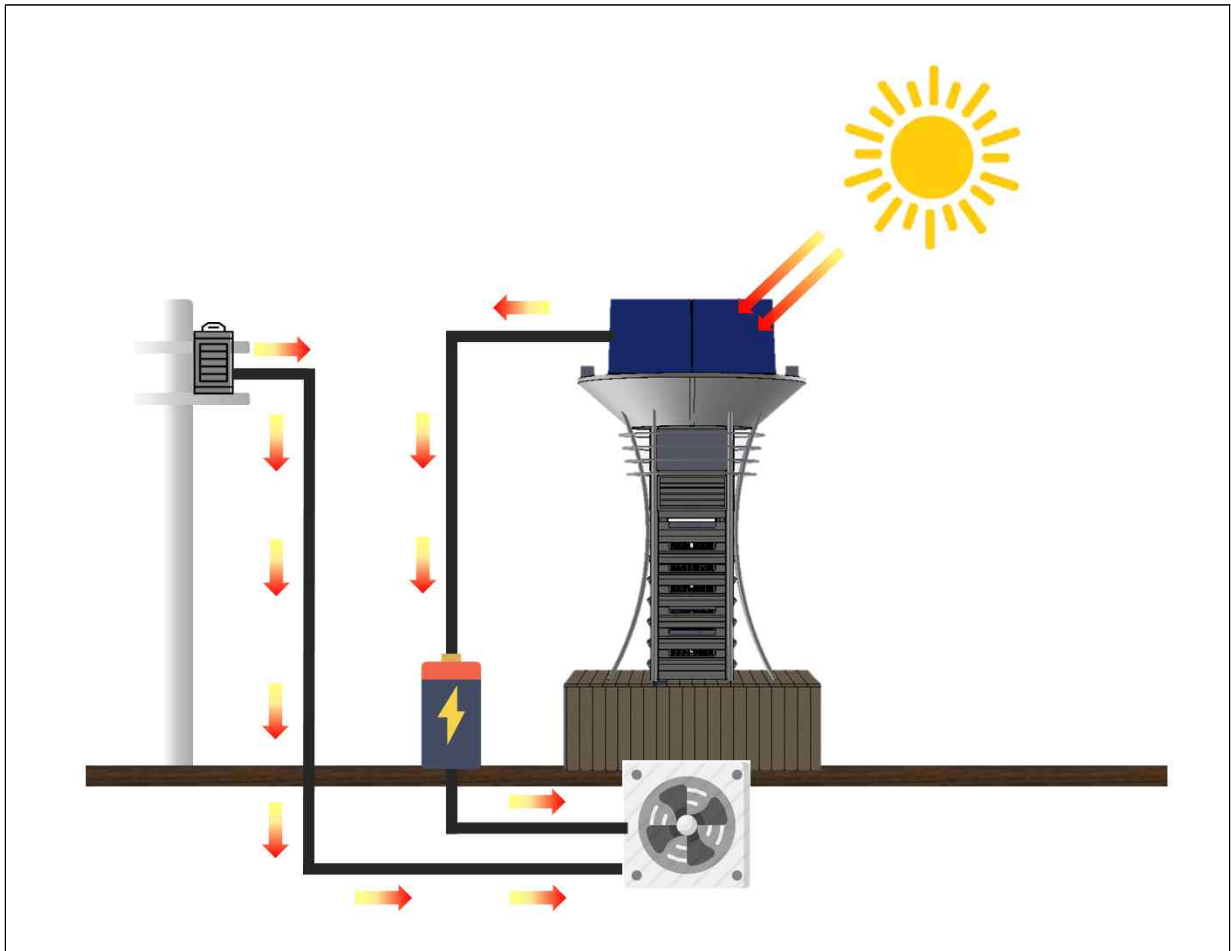
의 노출로 인하여 스파크 발생 가능성이 있고 성능면에서 TYPE는 크기가 크기 때문에 설치 제한이 많으며, 동일풍량 대비 면풍속을 고려하면 TYPE A의 효율이 높아 본 연구에서는 TYPE A의 제품을 적용함

- TYPE A의 전기집진기는 안정성이 있으며, 사이즈가 작기 때문에 본 연구의 시제품에 1개가 아니라, n개를 적용 가능하기 때문에 적용성이 뛰어나
- 전기집진기의 전원공급은 SMPS에 의해 DC 12V로 파워팩에 전원을 공급하면, 파워팩은 전기집진기에 DC 8KV의 고전압을 공급하여 미세먼지를 집진하게 됨

| 구 분                     | TYPE A                                                                              | TYPE B                                                                                |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 크기(W×D×H)(mm)           | 225×225×40                                                                          | 465×465×350                                                                           |
| 전 원                     | DC 12V                                                                              | AC 220V                                                                               |
| 소비전력(W)                 | 3                                                                                   | 33                                                                                    |
| 이온나이저 전압(kV)            | DC 8                                                                                | DC 5~6                                                                                |
| 컬렉터전압(kV)               | DC 8                                                                                | DC 10~12                                                                              |
| 전기집진기                   |   |   |
|                         |  |  |
| 파워팩                     |  |  |
| 케이스 재질                  | 플라스틱                                                                                | STS                                                                                   |
| Ionizer HV/GND 거리(mm)   | 10                                                                                  | 21                                                                                    |
| Collector HV/GND 거리(mm) | 4                                                                                   | 7                                                                                     |
| Collector 노출 여부         | 절연코팅                                                                                | 노출                                                                                    |
| 집진효율(%)                 | >95 @0.3 $\mu$ m                                                                    | >95 @0.3 $\mu$ m                                                                      |
| 무게(kg)                  | 0.3                                                                                 | 10                                                                                    |
| 안 정 성                   | 방전 자동 감지 및 Protection 동작                                                            | 방전 자동 감지 및 Protection 동작                                                              |
| 설치 수량                   | n개 설치                                                                               | 1개 설치                                                                                 |
| 현재 적용처                  | 공기청정기, 크린룸                                                                          | 공기청정기                                                                                 |
| 적 용 성                   | 적 합                                                                                 | 부적합                                                                                   |

[그림 2-11] 전기집진 특성

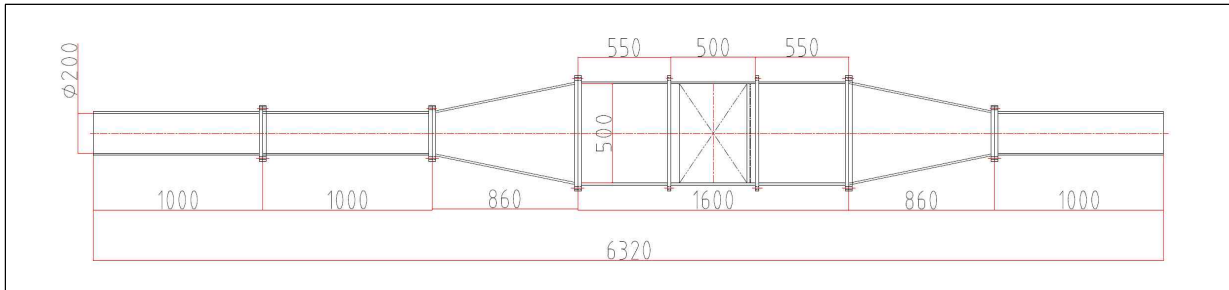
- 미세먼지 저감장치의 운전에 있어서 유지관리비용을 최소화하기 위해 신재생 에너지를 활용함
- 에너지 절감형 저전력 태양광패널을 적용함
- 본 연구에서는 태양광 패널을 적용하여 주간에 필요한 전력을 저장한 후, 야간에 미세먼지 저감장치 조명의 에너지원으로 사용함



(나) Active 처리 요소 기술 개발

### ㉠ 필터유닛 시험 장치 설계 및 제작

- 앞에서 검토한 필터의 성능평가를 위해 필터유닛 시험 장치를 설계함 (아크릴 재질 10t로 제작)
- 필터유닛 시험 장치의 규격은 <KS B 6141, 환기용 공기 필터 유닛>을 준용함



[그림 2-13] 필터유닛 시험 장치 설계 (KS 규격 준용)



[그림 2-14] 필터유닛 시험 장치 제작

○ 필터유닛 시험 장치에서 유동(풍량)을 발생시키기 위한 송풍기 사양은 아래 그림과 같음

|                       |         |                                                                                       |
|-----------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 전 원                   | 3상 380V |  |
| 소비전력(W)               | 1,625   |                                                                                       |
| 소비전류(A)               | 3.55    |                                                                                       |
| 풍량(m <sup>3</sup> /h) | 6,300   |                                                                                       |
| 회전수(rpm)              | 994     |                                                                                       |
| 무 게(kg)               | 30      |                                                                                       |

[그림 2-15] 송풍기 사양

○ 풍량을 측정하기 위한 풍속계는 열선풍속계(HOT-WIRE ANEMOMETER), 13450, TES를 사용함

|           |                       |                                                                                       |
|-----------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 전 원       | 1.5Vx6개, 3A크기         |  |
| 화 면       | 3분리형 LCD, 4자리 디지털     |                                                                                       |
| 측정범위(m/s) | 0~30                  |                                                                                       |
| 분해능(m/s)  | 0.01                  |                                                                                       |
| 정확도       | ±3% of reading ±1% FS |                                                                                       |
| 덕트크기(cm)  | 1~635                 |                                                                                       |

[그림 2-16] 열선풍속계 사양

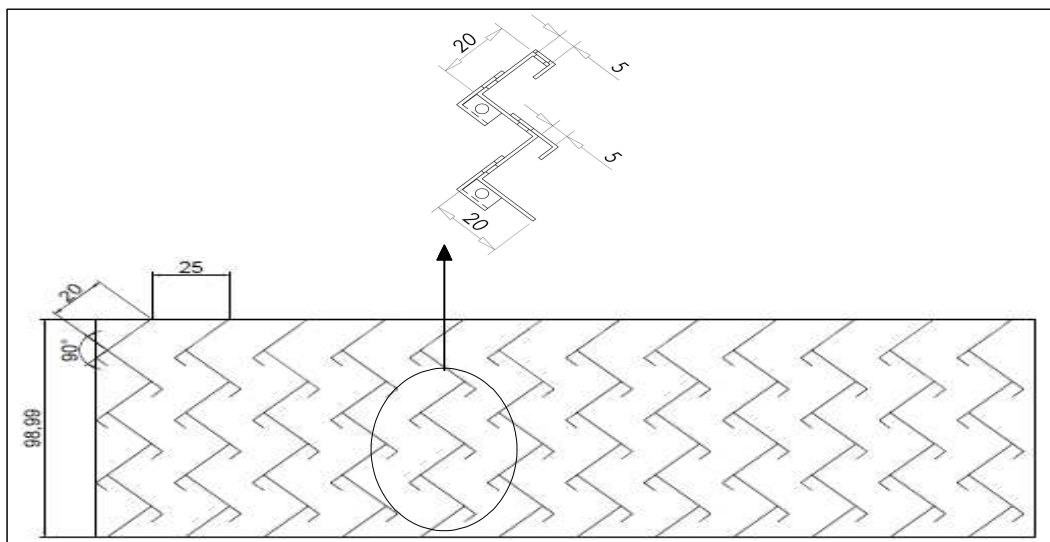
- 미세먼지를 측정하기 위한 측정기는 AirGuardK OAQ Station, 에어가드K OAQ- LTE, 케이웨더(주)를 사용하였으며 사양은 아래와 같음

|          |                                               |                                                                                     |
|----------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 공급전원(V)  | 단상 220V                                       |  |
| 소모전력(W)  | 2.5W                                          |                                                                                     |
| 제품크기(mm) | 260(W) x 270(D) x 330(H)                      |                                                                                     |
| 측정항목     | PM2.5, PM10, 온도, 습도                           |                                                                                     |
| 운영환경     | - 비,눈 보호기능 구비<br>- 필터가 내장되어 심한 먼지로부터<br>센서 보호 |                                                                                     |

[그림 2-17] 미세먼지 측정기 사양

#### ㉔ 관성충돌 집진판 설계 및 제작

- 앞에서 유동해석 결과를 반영시켜 Type-1로 선정된 관성충돌 집진판을 상세 설계하였으며, STS 재질로 제작함



[그림 2-18] 관성충돌 집진판 설계

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| 정 면                                                                                 | 측 면                                                                                 | 윗 면                                                                                  | 등 각                                                                                   |

[그림 2-19] 관성충돌 집진판 제작

㉔ 관성충돌 집진판 시험

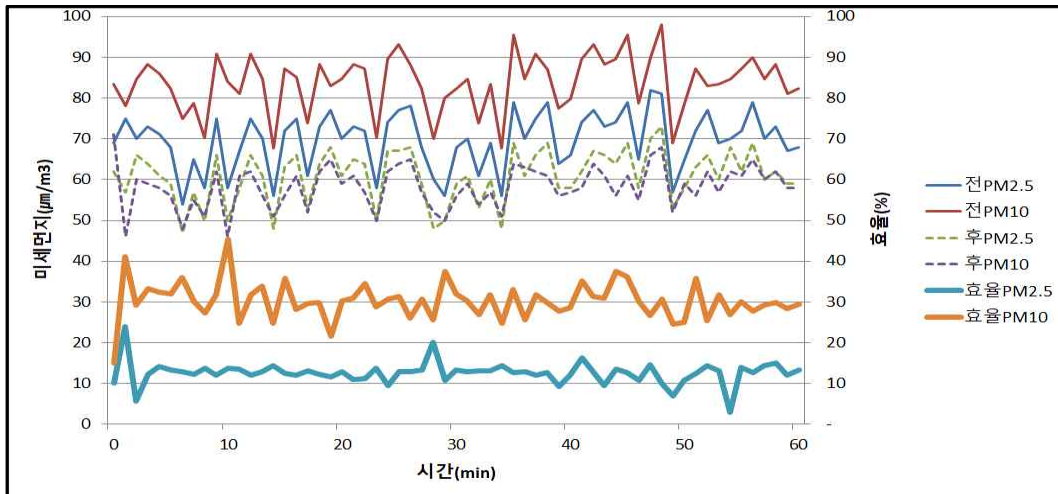
- 필터유닛 시험 장치에 관성충돌 집진판을 설치하고 면풍속을 변화시키면서 집진효율을 측정함
- 송풍기의 리모콘으로 회전수를 조정하여 원하는 풍량(풍속)발생
- 필터의 면풍속은 필터유닛 시험 장치의 흡입쪽 원형부에서 측정함
- 집진필터의 효율시험은 면풍속 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s에서 각각 측정함
- 먼지 발생은 연구 참여기관 사무실의 자연 발생 농도로 측정함
- 시험 결과는 표 2-2에 정리 되어 있으며, 풍속이 빨라짐에 따라 효율은 낮아짐



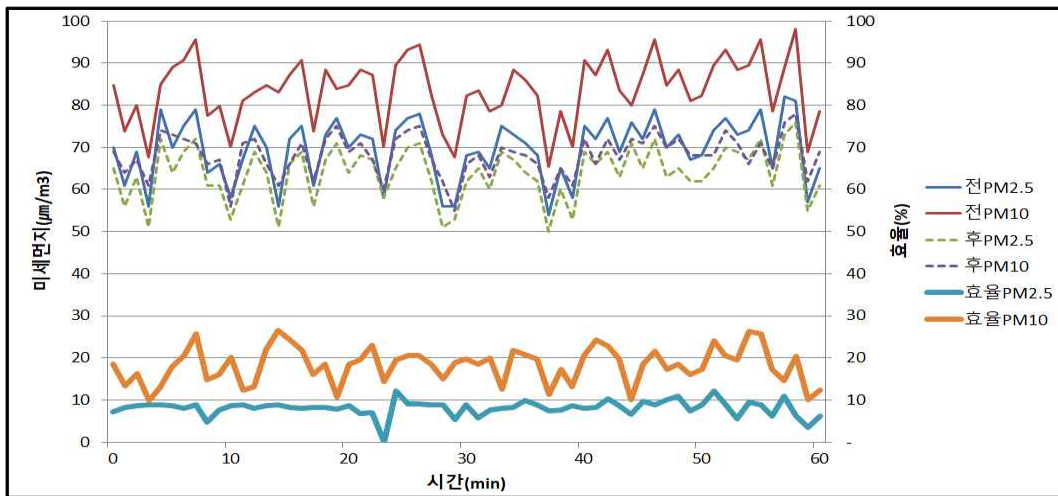
[그림 2-20] 관성충돌 집진판 시험 사진

[표 2-2] 관성충돌 집진판 집진시험 결과

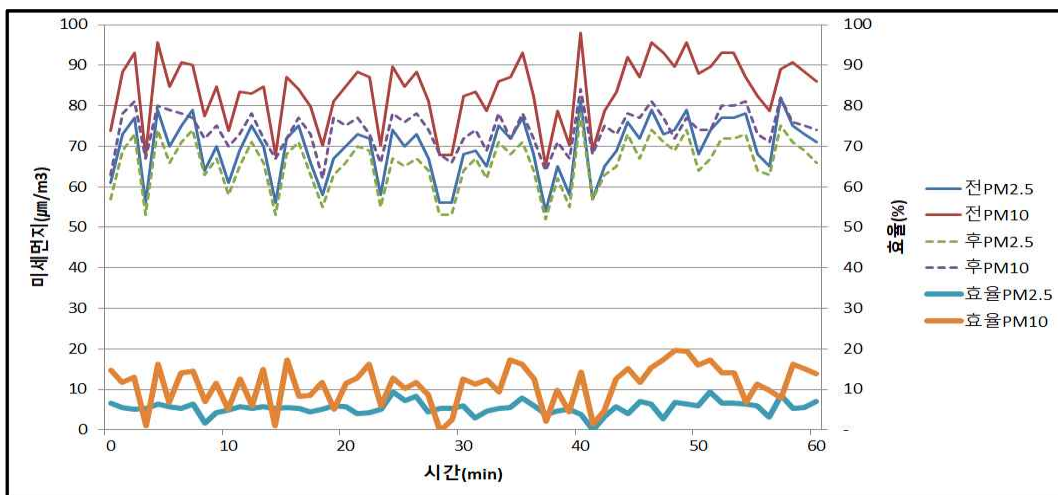
| 면풍속<br>(m/s) | 먼지크기<br>( $\mu\text{m}$ ) | 전단평균농도<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 후단평균농도<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 효율<br>(%) |
|--------------|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|
| 0.5          | 2.5                       | 69.66                                  | 60.90                                  | 12.57     |
|              | 10                        | 83.70                                  | 58.30                                  | 30.24     |
| 1.0          | 2.5                       | 69.61                                  | 63.90                                  | 8.12      |
|              | 10                        | 83.58                                  | 68.11                                  | 18.25     |
| 1.5          | 2.5                       | 69.72                                  | 65.77                                  | 5.56      |
|              | 10                        | 83.84                                  | 74.11                                  | 11.14     |



[그림 2-21] 관성충돌 집진판 집진시험(@ 0.5m/s)



[그림 2-22] 관성충돌 집진판 집진시험(@ 1.0m/s)



[그림 2-23] 관성충돌 집진판 집진시험(@ 1.5m/s)

## ② 전기집진방식 요소기술 개발

### ㉠ 전기집진기 시험

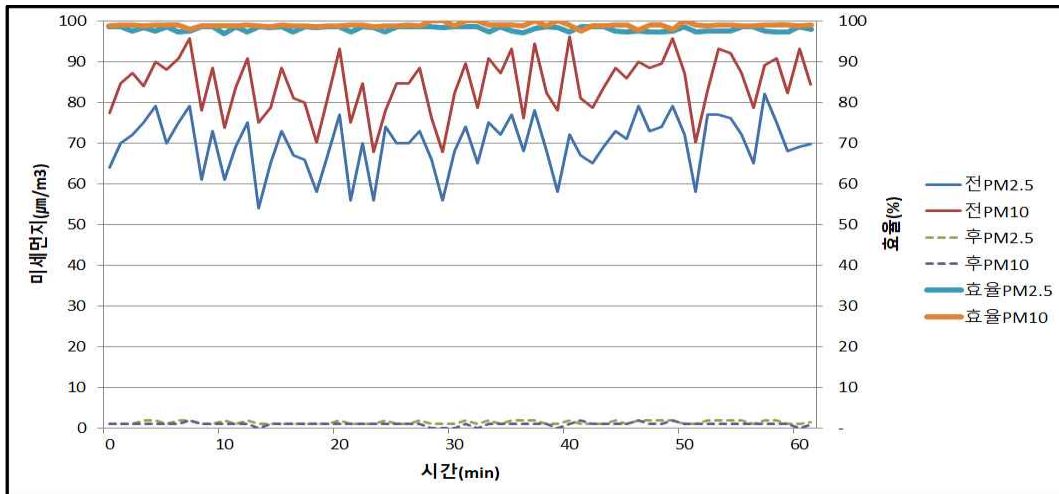
- 필터유닛 시험 장치에 전기집진기를 설치하고 전원을 공급하여 먼풍속을 변화시키면서 집진효율을 측정함
- 송풍기의 리모콘으로 회전수를 조정하여 원하는 풍량(풍속)을 발생시킴
- 필터의 먼풍속은 필터유닛 시험 장치의 흡입쪽 원형부에서 측정함
- 집진필터의 효율시험은 먼풍속 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s에서 각각 측정함
- 먼지 발생은 연구 참여기관 사무실의 자연 발생 농도로 측정함
- 시험 결과는 표 2-3에 나타내었으며, 풍속이 빨라짐에 따라 효율은 낮아짐
- PM2.5와 PM10의 경우, 95% 이상의 제거효율을 나타냄 (이론상 거의 100%의 포집효율이 정상이지만 시험장치 및 측정기의 오차율에 따라 대체적으로 약간 낮은 효율로 측정됨)



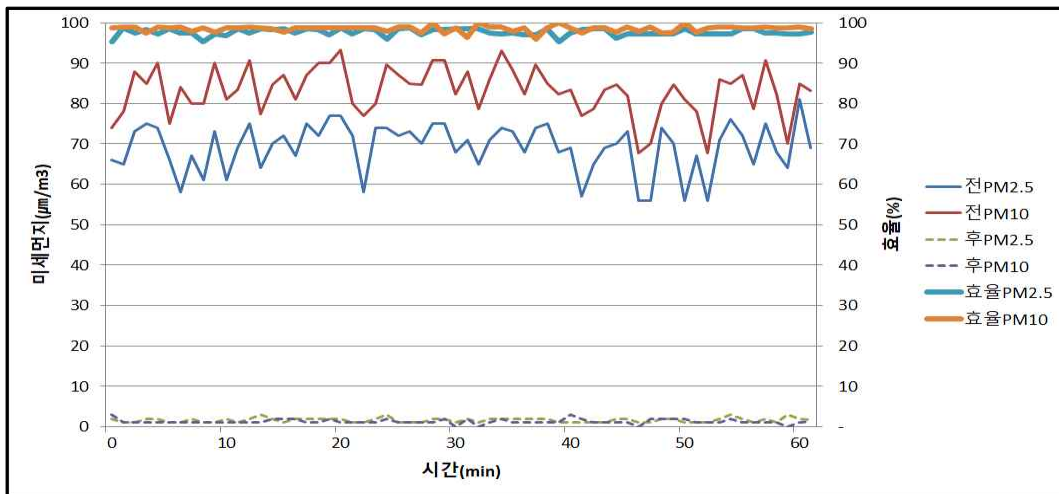
[그림 2-24] 전기집진기 시험 사진

[표 2-3] 전기집진기 집진시험 결과

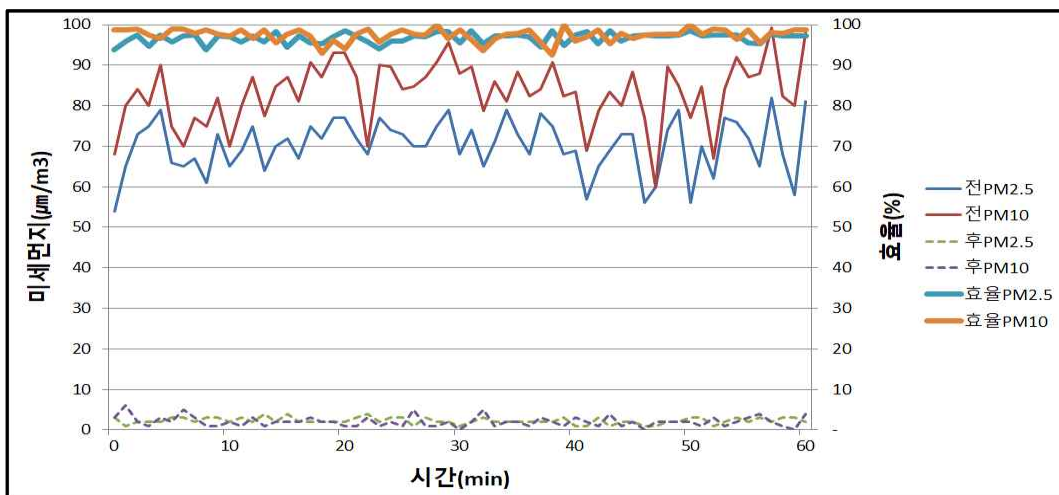
| 먼풍속<br>(m/s) | 먼지크기<br>( $\mu\text{m}$ ) | 전단평균농도<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 후단평균농도<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 효율<br>(%) |
|--------------|---------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|
| 0.5          | 2.5                       | 69.79                                  | 1.43                                   | 97.98     |
|              | 10                        | 84.29                                  | 0.95                                   | 98.88     |
| 1.0          | 2.5                       | 69.13                                  | 1.62                                   | 97.66     |
|              | 10                        | 83.17                                  | 1.23                                   | 98.52     |
| 1.5          | 2.5                       | 70.16                                  | 2.26                                   | 96.77     |
|              | 10                        | 83.21                                  | 2.07                                   | 97.46     |



[그림 2-25] 전기집진기 집진시험(@ 0.5m/s)



[그림 2-26] 전기집진기 집진시험(@ 1.0m/s)



[그림 2-27] 전기집진기 집진시험(@ 1.5m/s)

- [그림 2-28]에 나타난 바와 같이, 본 연구에서 선정된 전기집진기를 공인시험기관인 (재) 부산테크노파크에 의뢰하여 공인인증시험을 진행함
- 시험방법은 KS B 6141 규격의 방법으로 진행하였으며, 입자는 KCl 입자를 사용함
- 면풍속 1.05m/s에서 0.3 $\mu$ m 입자의 집진효율은 98.2%로 H13등급(99.75)의 HEPA 수준은 아니지만, 본 연구의 미세먼지 저감장치에 적용하는데 적합한 것으로 판단

[표 2-4] 전기집진기 효율 시험 결과

| 통과면적<br>(m <sup>2</sup> ) | 풍량<br>(m <sup>3</sup> /min) | 면풍속<br>(m/s) | 집진효율<br>(%, @0.3 $\mu$ m) | 압력손실<br>(Pa) |
|---------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| 0.04                      | 2.5                         | 1.05         | 98.2                      | 11           |

**시 험 성 적 서**

**재단법인 부산테크노파크**  
부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31  
Tel : 051-974-9091  
Fax : 051-974-9099

성적서번호 : BTP-2019-0908  
페이지( 1 )/(총 2 )

1. 의뢰자  
○ 기 관 명 : (주)에코이엔지  
○ 주 소 : 충남 공주시 반포면 송곡로 268-13  
○ 의뢰일자 : 2019. 09. 25.

2. 시험성적서의 용도 : 성능시험

3. 시험대상품목 또는 물질, 시료명 : 전기집진필터

4. 시험기간 : 2019. 09. 25.

5. 시험방법 : 의뢰자 제시 시험조건

6. 시험결과 : 첨부 시험결과 참조

\* 이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.  
\* 본 성적서는 부산테크노파크 KOLAS인증과 관련이 없으며, 시험성적서의 용도 이외의 사용을 금합니다.  
(성적서 진위확인 문의전화 : 051-974-9091)

**확 인**

작성자  
성 명 : 이 병 현 (서 명)

**기술험임자(정)**  
성 명 : 김 동 원 (서 명)

2019. 10. 11.

**재단법인 부산테크노파크 원장 (인)**

BTP-QP-22-02-1/2 (4)      제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2018.06.15)

**시 험 성 적 서**

**재단법인 부산테크노파크**  
부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31  
Tel : 051-974-9091  
Fax : 051-974-9099

성적서번호 : BTP-2019-0908  
페이지( 2 )/(총 2 )

1. 시험결과

| 시험항목 | 단위            | 시험결과 |
|------|---------------|------|
| 집진효율 | 0.3 $\mu$ m % | 98.2 |
| 압력손실 | Pa            | 11   |

○ 풍 량 : 2.5 m<sup>3</sup>/min

2. 시험방법  
○ 인용규격 : KS B 6141 환기용공기필터유닛(2002), 계수법  
○ 의뢰자 요청에 의하여 KCl 입자를 사용 함

3. 제품사진




정면                      후면

끝.

BTP-QP-22-02-1/2 (4)      제정일자(2010.12.01) / 개정일자(2018.06.15)

[그림 2-28] 전기집진기 성적서((재)부산테크노파크)

### ③ 신재생에너지를 활용한 에너지 절감형 저전력 집진방식 개발

- 태양광에서 전력을 생산해서 야간에 고보조명의 전원으로 사용함
- 태양광에서 평균 1,750W의 전력을 생산하여 투광등에서 평균 480W를 소비함

- 25 -

[표 2-5] 솔라판넬 및 고보조명 사양

| 구분   | 항목           | 내용                      |
|------|--------------|-------------------------|
| 솔라판넬 | 판넬용량(W/SET)  | 250                     |
|      | 설치 수량(SET)   | 2                       |
|      | 하루평균발전시간(hr) | 3.5                     |
|      | 하루평균 발전량(W)  | 1,750 (250W×2SET×3.5hr) |
| 투광등  | 소비전력(W/SET)  | 24                      |
|      | 설치 수량(SET)   | 4                       |
|      | 사용시간(hr)     | 5 (평균 19시~24시)          |
|      | 총 소비전력(W)    | 480 (24W×4SET×5hr)      |

#### (다) 집진장치 세부설계 사항 도출 및 핵심부품 시작품 제작

##### ① 집진효율을 고려한 핵심부품 시작품 제작

###### ㉞ 융합형 집진필터

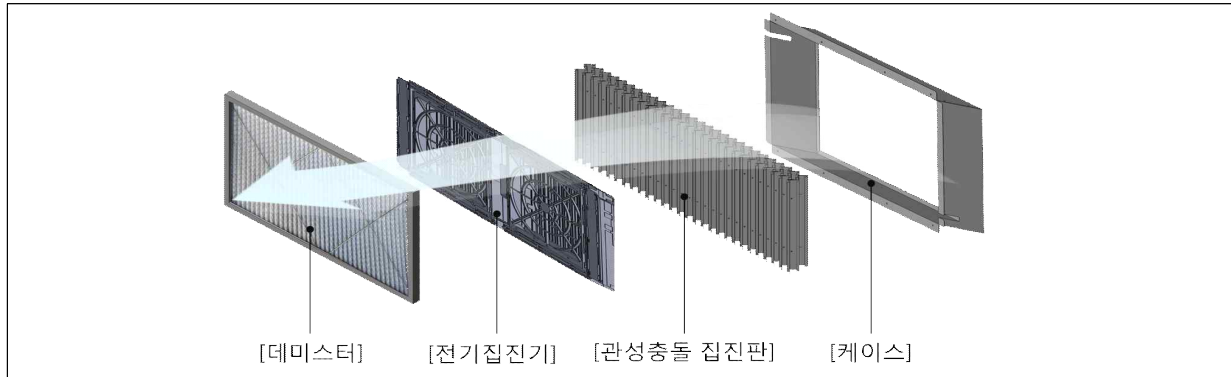
- 대기중의 미세먼지 등의 오염원을 흡입시 빗물 및 이물질의 흡입을 방지하기 위해 루버, 데미스터, 프리필터 등을 설계 및 제작
- 루버와 데미스터는 공기 흡입시 외부 빗물 침투방지, 프리필터는 공기 흡입시 큰 이물질을 제거하는 용도로 기능함

[표 2-6] 흡입부 집진필터

| 구 분  | 규 격              | 사 진                                                                                   |
|------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 루 버  | 805*495*10T, AL  |  |
| 데미스터 | 805*495*10T, STS |  |
| 프리필터 | 798*448*30T, 부직포 |  |

- 미세먼지 등의 오염원을 제거(집진)하고, 외부로부터 빗물 등의 유입을 방지하기 위해 융합형 집진필터(데미스터, 전기집진기, 관성충돌 집진판)를 설계 및 제작함
- 전기집진기를 기준으로 전단에 관성충돌 집진판, 후단에 데미스터가 설치되는 구조이므로, 전기적 안정성을 고려하여 각각 10mm의 간격을 두어 설치함

- 융합형 집진필터에 전기집진기는 2개가 1식으로 설치됨



[그림 2-29] 융합형 집진필터 유동

[표 2-7] 토출부 집진필터

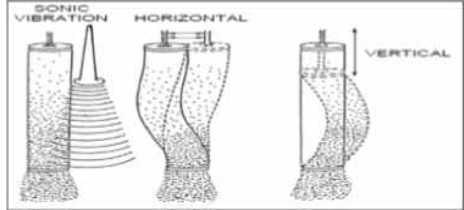
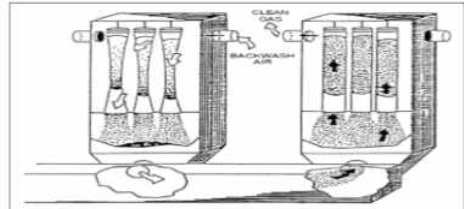
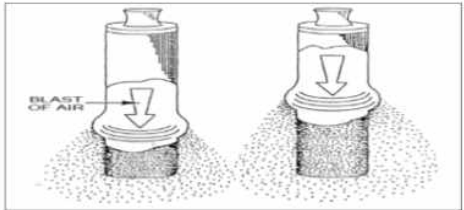
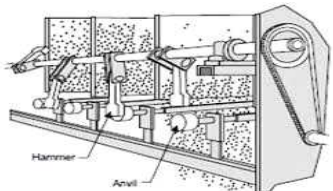
| 구 분      | 규 격              | 사 진                                                                                   |
|----------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 데미스터     | 580×270×10, STS  |   |
| 전기집진기    | 580×270×40, ABS  |  |
| 관성충돌 집진판 | 580×270×100, STS |  |
| 케이스      | 590×280×173, STS |  |
| 융합형 집진필터 | 590×280×173, STS |  |

#### ㉠ 융합형 집진필터 탈착

- 포집된 미세먼지에 대한 탈진 방법
  - 관성충돌 집진판의 경우 rapping 방식을 이용하여 집진판에 포집된 분진을 탈진하는 방식 적용

- 전기집진기의 경우, 포집을 위한 정전기적 성질과 반대의 전하를 적용하여 순간적으로 패널에서 먼지를 탈착시키고 강한 airjet 방식을 적용하여 집진된 먼지 탈진
- 시스템 정지 시 탈진 동작이 이루어지지만, 1~2년에 1회씩 세정공정을 통해 시스템 내부 세척 필요
- 시스템 내부 세척 과정 : 융합형 집진필터에서 3가지 필터 분리 → 중성세제를 희석한 물에 30~60분 동안 세정 → 흐르는 물로 세제가 남지 않도록 충분히 세척 → 배수가 용이하며 그늘진 장소에서 24시간 이상 충분히 건조 → 재조립 및 재사용
- 세척 시 주의사항 : 전기집진기의 필름부 및 와이어가 손상되지 않도록 주의가 필요하며, 필터 케이스 등이 STS의 재질이기 때문에 작업자의 안전에 유의해야 함
- 본 연구의 집진필터 cleaning은 프리필터 - 교체, 데미스터/전기집진기/관성충돌집진관 - 세척 방식이 최적임

[표 2-8] 탈진방법

| 탈진방법            | 설명                                                                                          | 그림                                                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Shaking         | 미세먼지가 포집된 필터를 주기적으로 흔들어 필터에 쌓인 분진을 물리적으로 분리시키는 방식                                           |   |
| Reverse airflow | 필터의 역방향으로 일정 압력 이상의 공기를 통과시켜 필터에 포집된 분진을 탈착시키는 방식                                           |  |
| Pulse-Jet       | 별도의 압축공기가 밸브작동으로 필터의 벤츄리에 가해지면 주변의 2차공기와 함께 유입되어 충격펄스를 발생시키고, 이 때 생성된 압력으로 분진이 필터에서 분리되는 방식 |  |
| Rapping         | 기계적인 충격이나, 진동을 이용하여 포집된 분진을 탈착하는 방식                                                         |  |
| 최적화             | 단일 탈진방식 적용 또는 2개 이상 방식의 복합 적용을 통해 탈진효율 향상                                                   |                                                                                      |

#### ㉔ 태양광 발전기

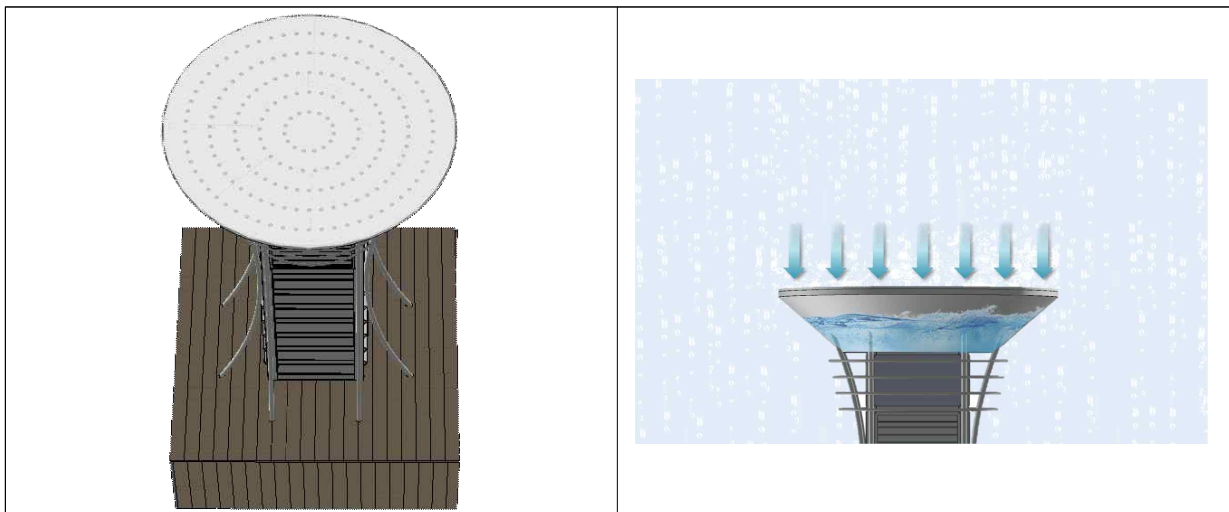
- 주간에 필요한 전력을 저장한 후, 야간에 미세먼지 저감장치의 조명의 에너지원으로 사용하기 위해 아래와 같은 사양의 태양광 발전기를 적용
- 솔라판넬 : 높은 전력 효율과 약한 빛 조건에서 안정적인 성능을 발휘하며, 달팽이 흔적 예방제거, 자외선 노출에 따른 노화방지, 강력한 기계적 부하 저항, 화학적 부식에 강한 양극 산화층 적용
- 인버터 : 순수 싸인파형(정현파), 온도제어쿨링팬, 과부하/쇼트 등의 보호기능 적용
- 배터리 : 고용량, 장수명, 방전시 복구능력이 우수한 무보수 밀폐형의 Lead Acid Gel Battery 적용

[표 2-9] 태양광 발전기 사양

| 구 분        | 항 목                      | 특 성                     | 비 고                                                                                   |
|------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 솔라판넬       | 최고출력(W)                  | 250                     |   |
|            | 최고출력전압(V)                | 18/37.6                 |                                                                                       |
|            | 최고출력전류(A)                | 13.89/7.18              |                                                                                       |
|            | 개방회로전압(V)                | 21.6/46.2               |                                                                                       |
|            | 단락전류(A)                  | 14.94/6.65              |                                                                                       |
|            | 모듈효율(%)                  | 17.03                   |                                                                                       |
|            | 규격(mm)                   | 1480 × 992 × 35         |                                                                                       |
| 인버터        | 출력(W)                    | 600                     |  |
|            | 효율(%)                    | 92 이상                   |                                                                                       |
|            | 입력전압(V)                  | 12/24/48/72/96/110      |                                                                                       |
|            | 출력전압(V)                  | 100/110/120/220/230/240 |                                                                                       |
|            | 무부하소비전력(W)               | 5                       |                                                                                       |
|            | 규격(mm)                   | 260 × 120 × 56          |                                                                                       |
| 충전<br>컨트롤러 | 전압(V)                    | 12/24                   |  |
|            | 무부하전력(W)                 | 12/24                   |                                                                                       |
|            | 배터리전압(V)                 | 9~35                    |                                                                                       |
|            | 최고입력전압(V)                | 100/90                  |                                                                                       |
|            | 최고출력범위(V)                | 2~75                    |                                                                                       |
|            | 정격충전전류(A)                | 30                      |                                                                                       |
|            | 최고출력전류(A)                | 20                      |                                                                                       |
|            | 변환효율(%)                  | 98                      |                                                                                       |
|            | 보호등급                     | IP32                    |                                                                                       |
|            | 규격(mm)                   | 238 × 173 × 72.5        |                                                                                       |
| 배터리        | Capacity(Ah)             | 216                     |  |
|            | Max discharge current(A) | 1800                    |                                                                                       |
|            | Internal resistance(mΩ)  | 3.2±10%                 |                                                                                       |
|            | 규격(mm)                   | 522 × 240 × 225         |                                                                                       |

## ㉔ 빗물저장장치

- 식물의 안정적인 생육을 유지하기 위해, 본 연구에서는 2가지의 방법(빗물을 이용한 관수, 상수도를 이용한 관수)을 고려하였으며 빗물의 저장량이 없을 경우, 상수도를 이용한 관수를 적용함
- 미세먼지 저감장치 시작품의 상부에 빗물을 저장할 수 있는 저장탱크를 설계 및 설치하고 관수펌프와 연동시킴
- 미세먼지 저감장치의 상단에 빗물 저장탱크를 설치하고 상단 가장자리에 돌출부를 설치하여 빗물의 포집을 확대함



[그림 2-30] 빗물저장장치 개요

## ㉕ 송풍기

- 미세먼지 저감장치에서 대기중의 오염원을 흡입하고, 미세먼지 집진을 위해 아래와 같은 사양의 송풍기 2대를 적용함
- 송풍기의 모터는 회전속도 변환이 용이한 BLDC motor를 적용시킴

[표 2-10] 송풍기 사양

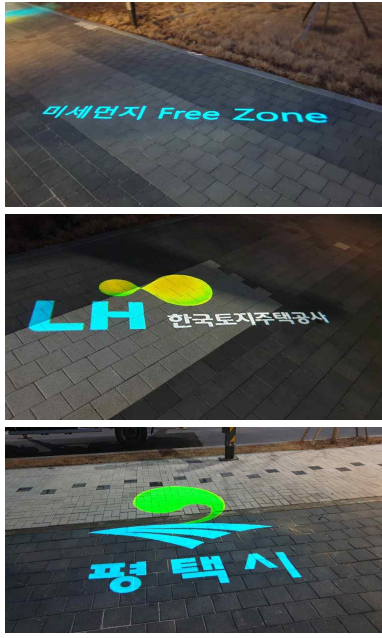
|          |         |  |
|----------|---------|--|
| 전원       | 3상 380V |  |
| 소비전력(W)  | 1,625   |  |
| 소비전류(A)  | 3.55    |  |
| 풍량(m³/h) | 6,300   |  |
| 회전수(rpm) | 994     |  |
| 무게(kg)   | 30      |  |

㉢ 고보조명

- 고보조명은 미세먼지 저감장치의 상부에 설치되어, 특수 필름에 정보를 담아 빛을 통해 바닥면에 표출시키는 방식으로 야간에 시민들에게 인지도를 높이고 흥미를 제공해 주며 시스템에 대한 정보 알림 기능을 담당함
- 투광등은 미세먼지 저감장치의 하부에 설치되어, 야간에 미세먼지 저감장치의 시각 디자인성을 표출함
- 미세먼지 저감장치의 고보조명 및 투광등의 사양과 조명 작동에 대한 현장 운영 현황은 아래와 같음

[표 2-11] 조명 사양

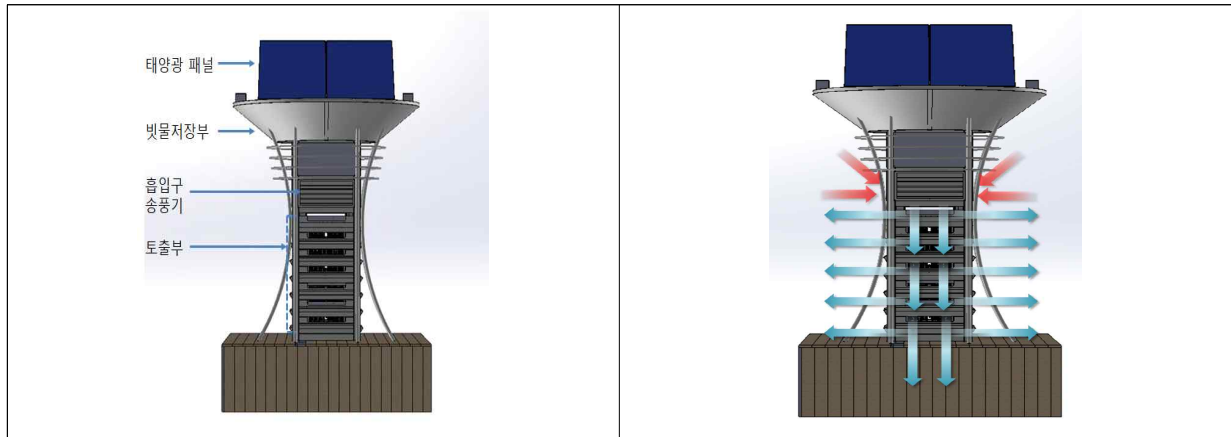
|      |       |              |                                                                                       |
|------|-------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 고보조명 | 설 치   | 외 부          |    |
|      | 크 기   | W:360 H:245  |                                                                                       |
|      | color | 3000K(white) |                                                                                       |
|      | 소비전력  | LED 80W      |                                                                                       |
|      | 방 수   | IP65         |                                                                                       |
| 투광등  | 설 치   | 외 부          |  |
|      | 크 기   | W:180 H:230  |                                                                                       |
|      | color | 3000K(white) |                                                                                       |
|      | 소비전력  | LED 24W      |                                                                                       |
|      | 방 수   | IP67         |                                                                                       |

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
|                                                                                     |                                                                                      |
| 투광등 ON                                                                              | 고보조명 ON                                                                              |

[그림 2-31] 조명에 의한 표출

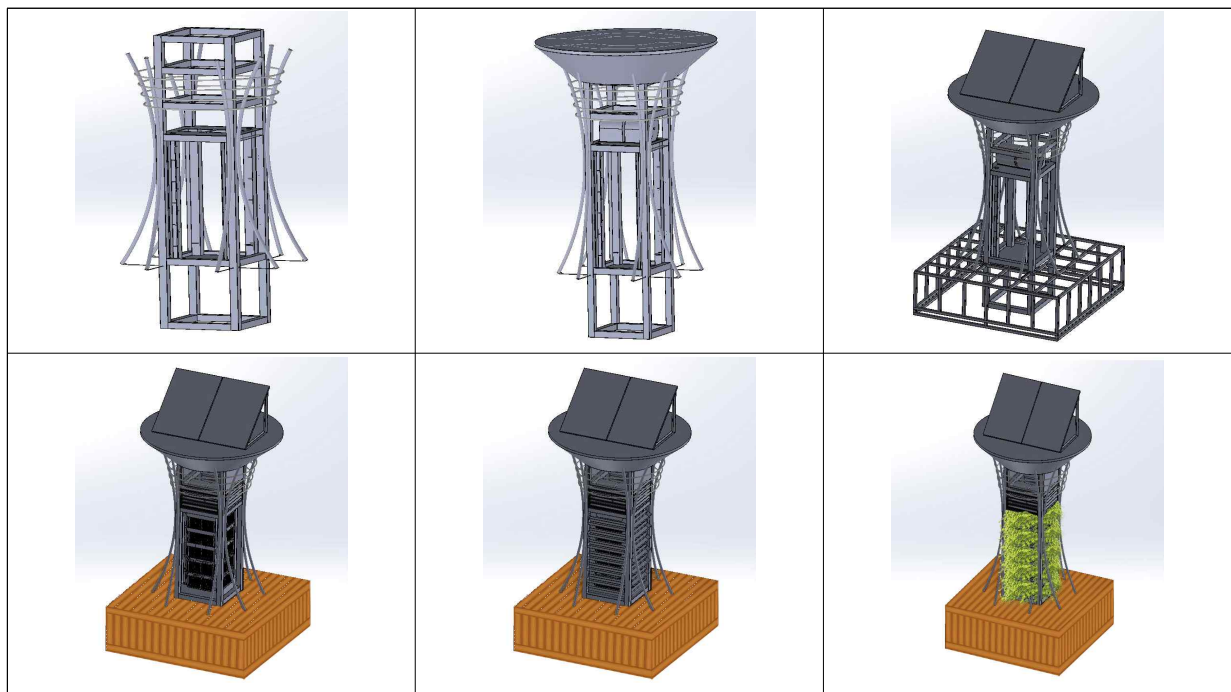
## ② 세부설계도면, 상세기술사양 작성 및 미세먼지 저감효과 분석

### ㉠ 미세먼지 저감장치 설계 및 시뮬레이션



[그림 2-32] 미세먼지 저감장치의 각부 명칭 및 유동

- 반경 3m 내 미세먼지를 저감하기 위한 passive/active 미세먼지 저감장치 설계
- 대기 노출형 시스템으로 색상변형이 없는 STS 재질 적용
- 많은 사람이 이용하는 공간에 설치하기 때문에 실용성과 디자인성을 고려하여 설계
- 외부의 압력에도 견딜 수 있도록 내구성을 고려하여 설계함
- 설치장소가 부천역으로 많은 사람이 오가는 공간이므로 이용자들로 인해 미세먼지 저감 장치가 훼손되지 않고 간섭을 받지 않도록 데크를 접근이 불편한 높이로(0.8m) 설계함



[그림 2-33] 미세먼지 저감장치의 3D 설계

#### ㉔ 미세먼지 저감장치의 제작

- 설계된 미세먼지 저감장치를 용접 및 볼트 조립 방식으로 제작하고 운반 이동하여 현장에 설치함



[그림 2-34] 미세먼지 저감장치의 제작

㉔ 미세먼지 저감장치의 설치

○ 제작된 미세먼지 저감장치를 경기도 부천시 에 있는 부천역 광장에 설치함



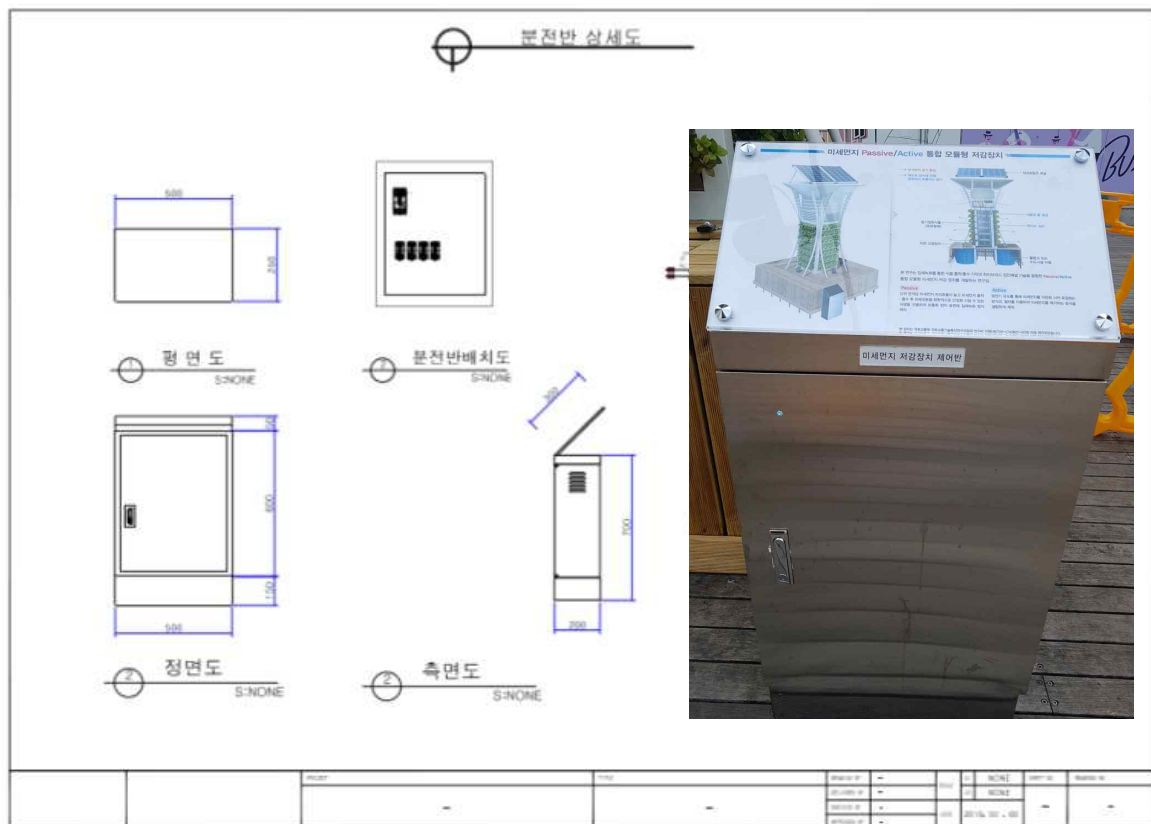
[그림 2-35] 미세먼지 저감장치의 설치 과정

㉔ 미세먼지 저감장치 콘트롤러

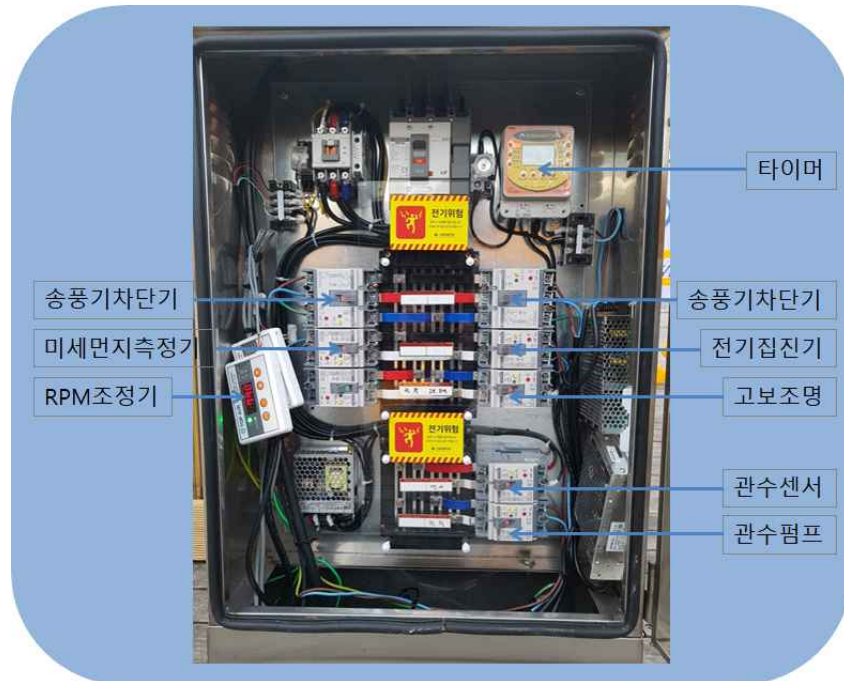
- 미세먼지 저감장치 콘트롤러는 각 구성품별로 별도의 차단기를 설치하여 운전하고 있으며, 각 구성품별 차단기의 사용 설명은 아래의 표와 같음

[표 2-12] 콘트롤러 설명

| 구 분                | 내 용                |
|--------------------|--------------------|
| 메인전원               | 미세먼지 저감장치의 메인전원 공급 |
| 송풍기 차단기            | 송풍기 개별 전원 공급       |
| RPM 조정기            | 송풍기의 회전수(RPM) 설정   |
| 타이머                | 조명의 운전시간 설정(일몰~자정) |
| 전기집진기              | 전기집진기의 개별 전원 공급    |
| 고보조명               | 고보조명 전원 공급         |
| 투광등                | 투광등 전원 공급          |
| 각종센서(미세먼지센서, 관수센서) | 상시 전원 공급           |
| 관수펌프               | 관수펌프 전원 공급         |



[그림 2-36] 미세먼지 저감장치 콘트롤러 상세도



[그림 2-37] 미세먼지 저감장치 컨트롤러 현황사진

#### ㉔ 미세먼지 저감장치의 시운전

- 미세먼지 저감장치 시작품 구조물, 태양광, 필터, 송풍함기, 전기설비, 관수장치 등을 설치한 후, 개별 시운전을 한 후 시제품의 회전수에 따른 풍량을 측정
- 풍량측정에 사용된 계측기는 열선 풍속계로 HOT-WIRE ANEMOMETER), 13450, TES를 사용했으며, 외부 영향을 최소화 하기 위해 외부의 바람이 거의 없는 시간에 측정

[표 2-13] 미세먼지 저감장치의 시운전

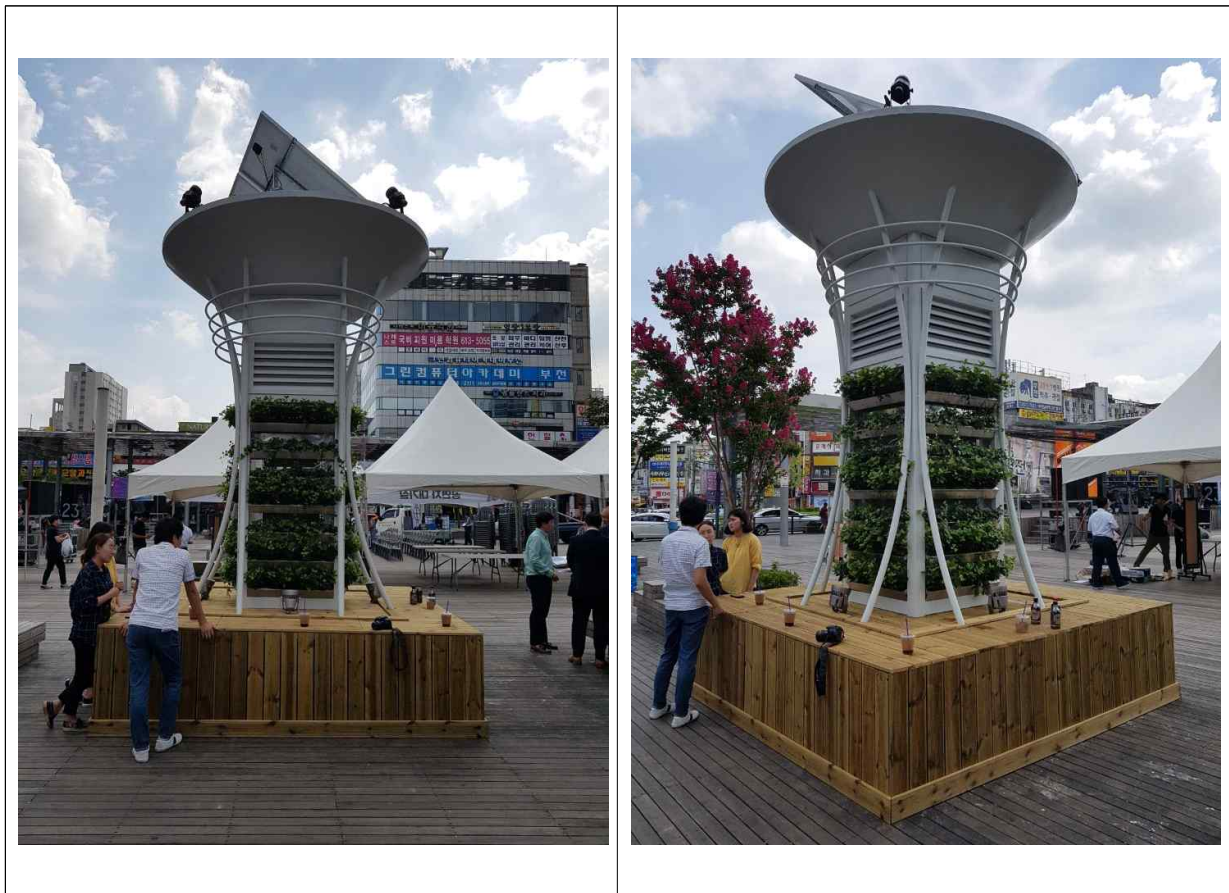
| 구 분   | 시운전 내용                                                                             | 평 가                                                                         | 판 정 |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 구조물   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 구조물의 고정상태</li> <li>- 구조물의 안정성</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고정 완료</li> <li>- 안정성 확보</li> </ul> | 적 합 |
| 태양광발전 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가동상태</li> <li>- 충전 상태</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정상 가동</li> <li>- 정상 충전</li> </ul>  | 적 합 |
| 필 터   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전기집진기 가동상태</li> <li>- 종류별 삽입상태</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정상 가동</li> <li>- 정상 삽입</li> </ul>  | 적 합 |
| 송풍기   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 가동상태</li> <li>- 이상소음</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정상 가동</li> <li>- 이상없음</li> </ul>   | 적 합 |
| 전 기   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 인입/인출 상태</li> <li>- 각 요소별 전원공급</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정상 가동</li> <li>- 정상 가동</li> </ul>  | 적 합 |
| 관 수   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 펌프 가동상태</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 정상 가동</li> </ul>                   | 적 합 |

[표 2-14] 미세먼지 저감장치의 풍량 측정 결과

| 회전수(rpm) | 토출면적(m <sup>2</sup> ) | 평균풍속(m/s) | 풍량(m <sup>3</sup> /h) |
|----------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| 500      | 4.18                  | 0.34      | 5,113                 |
| 800      | 4.18                  | 0.42      | 6,316                 |
| 1100     | 4.18                  | 0.51      | 7,669                 |
| 1400     | 4.18                  | 0.58      | 8,722                 |

#### ㉞ 미세먼지 저감장치 시작품

- 연구개발을 통해 제작한 미세먼지 저감장치를 현장 적용 모니터링을 통해 성능을 평가해 보고 효능 제고를 위한 개선사항을 도출하기 위해서 사람들의 유동이 많은 부천역 광장에 시작품을 설치하고 Test-Bed를 운영함



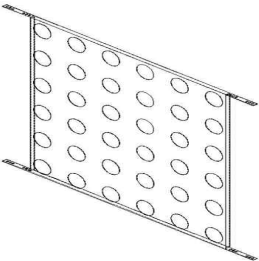
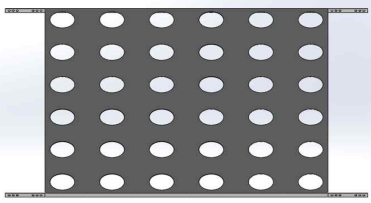
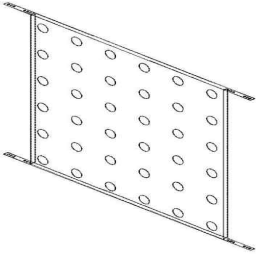
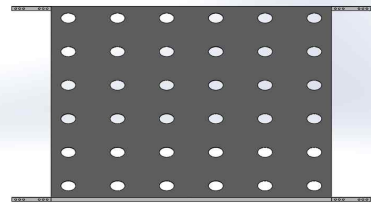
#### (라) 미세먼지 저감장치 시작품 보완

- Test-Bed 운영 과정을 통한 모니터링 결과와 전문가 평가, 그리고 담당 지자체 관계 부서와 협의과정을 거치면서 실제 현장에 운용하기 위해 성능 개선을 필요로 하는 부분을 아래와 같이 보완 하는 과정을 거쳤음

## ① 시작품의 구조 보완

### ㉮ 풍량 조절판 개선

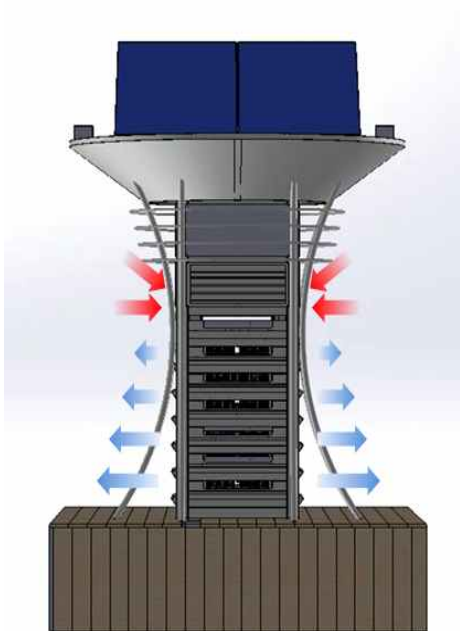
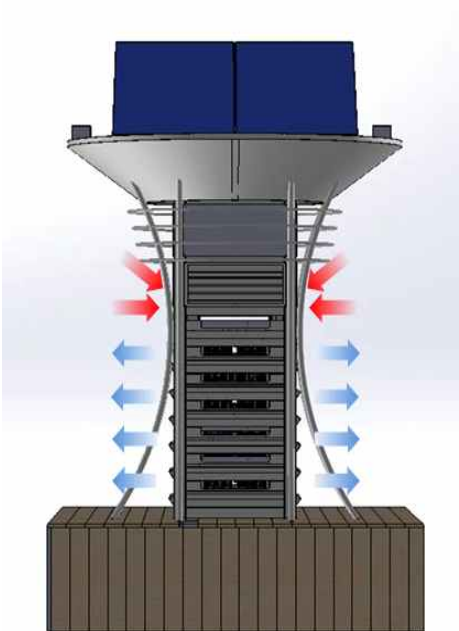
- 미세먼지 저감장치는 장치의 상부에서 오염된 공기를 흡입하여, 하부방향의 측면으로 정화된 공기를 토출하는 방식이며, 하부방향의 측면(4면)에 모듈형 집진필터가 설치되어 있음
- 송풍기 기준으로 장치의 상부/측면에서 흡입하여, 장치의 하부/내부 방향으로 토출하는 구조이므로 공기의 유동특성상 풍량이 장치의 측면 토출면을 기준으로 하부방향으로 쏠리는 현상이 발생
- 상부에 위치한 모듈형 집진필터는 풍속이 느려 집진효율이 좋을 수 있지만, 하부에 위치한 모듈형 집진필터는 풍속이 빠르기 때문에 집진효율이 저하되는 경향 발생
- 최적의 집진효율을 유지하기 위해서는 상부 및 하부의 모듈형 집진필터 풍속이 골고루 분산되어야 할 필요성이 있어 풍량 조절판을 새로 설계, 제작, 설치(그림 2-38)하여 그 결과를 확인함
- 모듈형 집진필터와 식재된 상태에서 풍속을 측정하여 [표 2-15]와 [그림2-41]에 나타내었으며, #1은 최하부, #7은 최상부를 나타냄
- 유동(공기의 흐름)이 발생하는 장치의 내부 공간에 풍량 조절판을 설치한 결과, 모듈형 집진필터 기준으로 평균풍속이  $\pm 5\%$ 의 오차범위로 균일하게 나타남
- 설치 전 풍속 평균이 0.69m/s, 설치후 풍속 평균이 0.64m/s로 0.05m/s의 풍속 감소가 나타났으나, 이것은 풍량 조절판의 압력손실 때문에 발생한 것으로 총 풍량에는 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료됨

| 구분                    | 2D                                                                                  | 3D                                                                                    |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 풍량 조절판<br>Φ50<br>상부설치 |  |  |
| 풍량 조절판<br>Φ30<br>하부설치 |  |  |

[그림 2-38] 풍량 조절판 설계

| 구분       | 상부                                                                                 | 하부                                                                                  |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 풍량조절판    |   |  |
| 풍량조절판 설치 |  |  |

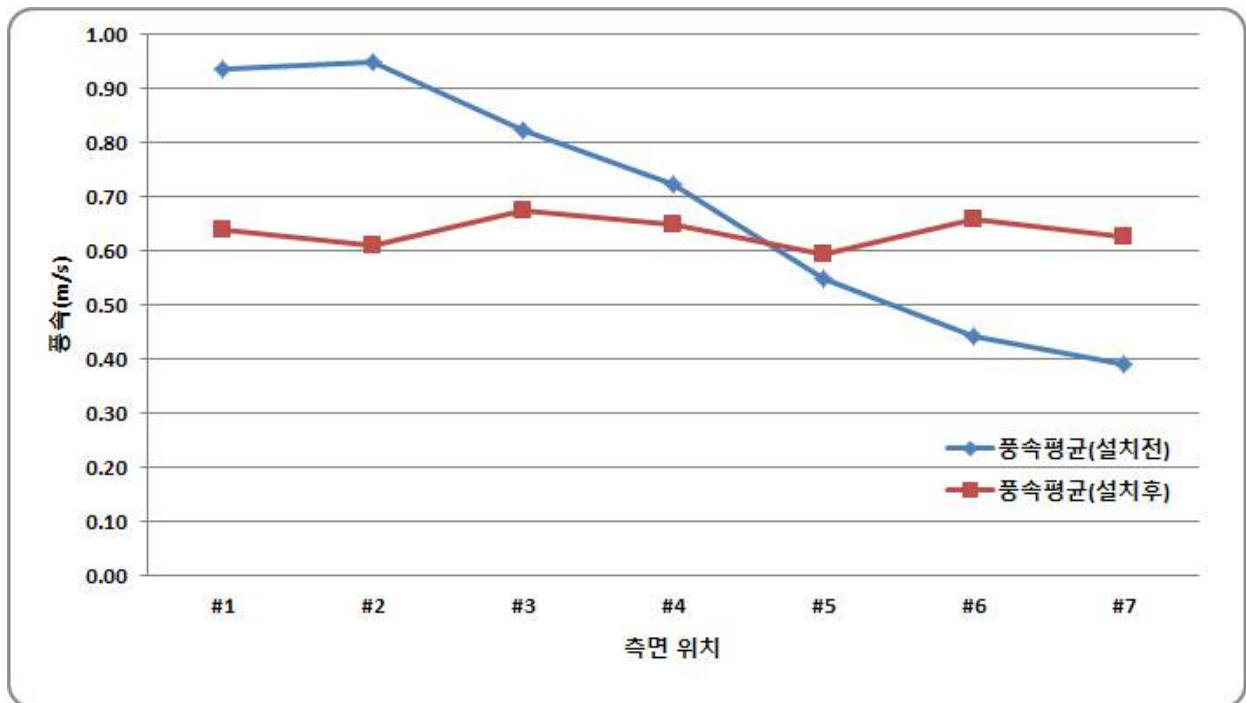
[그림 2-39] 풍량 조절판 구성품 및 설치

| 풍량조절판 설치 전 풍속                                                                       | 풍량조절판 설치 후 풍속                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |

[그림 2-40] 풍량 조절판 설치 전후의 풍속 개요

[표 2-15] 풍량 조절판 설치 전후의 풍속 비교

| 위치 | 풍속(m/s) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 설치전     |      |      |      |      | 설치후  |      |      |      |      |
|    | 1면      | 2면   | 3면   | 4면   | 평균   | 1면   | 2면   | 3면   | 4면   | 평균   |
| #1 | 0.92    | 0.94 | 0.92 | 0.96 | 0.94 | 0.61 | 0.69 | 0.64 | 0.61 | 0.64 |
| #2 | 0.93    | 0.98 | 1.02 | 0.87 | 0.95 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 0.61 |
| #3 | 0.81    | 0.78 | 0.88 | 0.82 | 0.82 | 0.74 | 0.68 | 0.64 | 0.64 | 0.68 |
| #4 | 0.70    | 0.69 | 0.79 | 0.71 | 0.72 | 0.71 | 0.64 | 0.64 | 0.60 | 0.65 |
| #5 | 0.59    | 0.51 | 0.56 | 0.54 | 0.55 | 0.67 | 0.60 | 0.50 | 0.61 | 0.60 |
| #6 | 0.38    | 0.40 | 0.48 | 0.51 | 0.44 | 0.71 | 0.67 | 0.62 | 0.64 | 0.66 |
| #7 | 0.40    | 0.37 | 0.39 | 0.40 | 0.39 | 0.59 | 0.66 | 0.61 | 0.64 | 0.63 |
| 평균 | 0.68    | 0.67 | 0.72 | 0.69 | 0.69 | 0.66 | 0.65 | 0.60 | 0.62 | 0.64 |



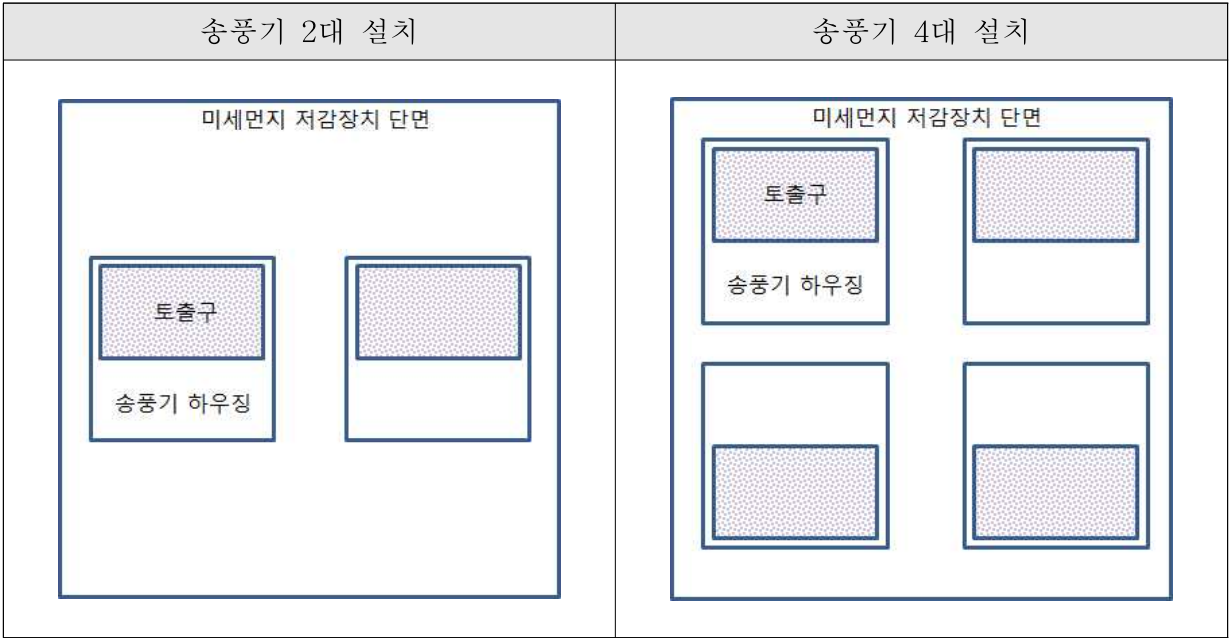
[그림 2-41] 풍량 조절판 설치 전후의 평균풍속 비교

## ② 시작품의 기능 보완

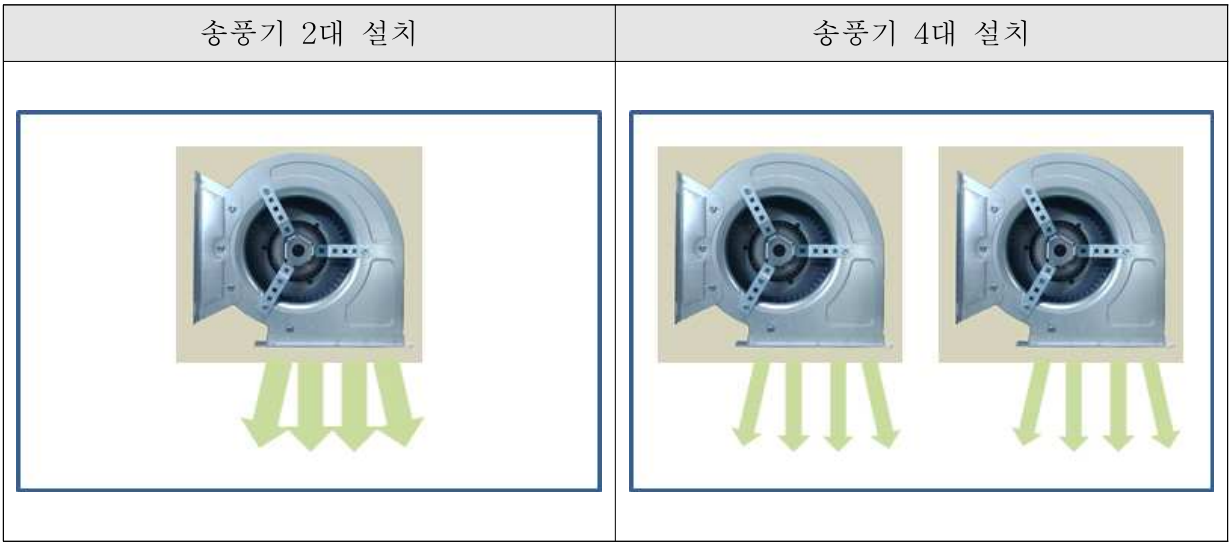
### ㉞ 송풍기 수량 증대

- 오염된 공기를 흡입, 정화, 토출시키는 송풍기를 2대 설치함에 따라, 송풍기 하우징의 형상에 의해 토출 유동이 한쪽으로 치우치는 경향이 있어, 균일한 유동과 소음을 감소시키고자, 기존 용량 보다 작은 송풍기 4대를 설치함
- 변경 전과 대비하여 송풍기 수량을 변경 한 후 사양서상 실제 풍량은 증가하였으며 소비 전력은 감소하였고, 소음의 경우 69dBA에서 62dBA로 떨어지면서 기계적 소음이 감소하

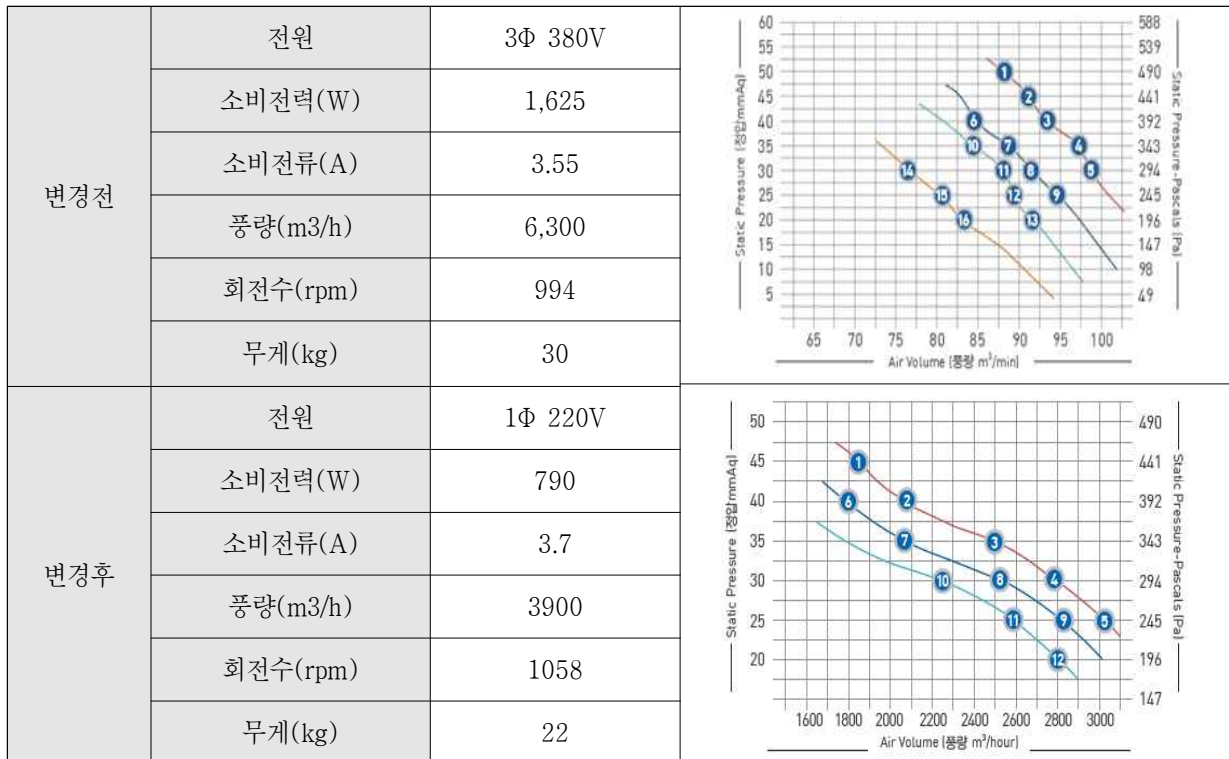
는 것으로 결과됨



[그림 2-42] 송풍기 설치 수량에 따른 단면 형상



[그림 2-43] 송풍기 설치 수량에 따른 유동 형상(측면 VIEW)



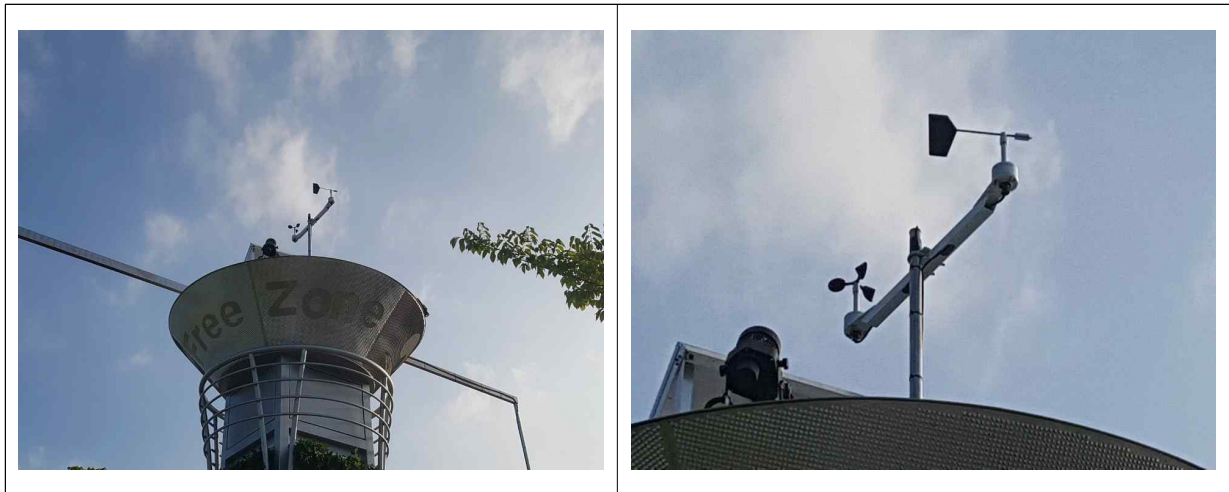
[그림 2-44] 송풍기 사양 변경

#### ㉔ 풍향센서 및 풍속센서 설치

- 외부 풍향과 풍속에 따른 집진 효율을 확인하고 모니터링 하고자 풍향센서 및 풍속센서를 설치함
- 설치된 풍향센서 및 풍속센서의 사양은 아래와 같음

[표 2-16] 풍속계 및 풍향계 사양

| 풍속계       |           |           | 풍향계       |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 측정범위(m/s) |           | 0 ~ 75    | 측정범위(°)   |           | 0 ~ 360   |
| 기동풍속(m/s) |           | 0.5 이하    | 기동풍속(m/s) |           | 0.5 이하    |
| 거리상수(m)   |           | 3.3       | 지연거리(m)   |           | 약 0.6     |
| 정확도       | 16m/s 미만  | ±0.15 이내  | 분해능(°)    |           | 2.8       |
|           | 16m/s 이상만 | ±3 % 이내   | 정확도(°)    |           | ±1.4 이내   |
| 운용환경      | 기온(℃)     | -50 ~ +70 | 운용환경      | 기온(℃)     | -50 ~ +70 |
|           | 순간풍속(m/s) | 75 이상     |           | 순간풍속(m/s) | 75 이상     |



[그림 2-45] 풍향센서 및 풍속센서 설치

#### ㉔ 타이머 및 전력량계 설치

##### ○ 운전타이머 설치

- 기존의 경우 우적센서를 설치하여 우천시에는 미세먼지 저감장치가 운전되지 않도록 제어하고 있었으나, 추가적으로 야간의 경우 집진의 불필요성, 소음발생 등을 고려해 불필요한 운전을 하지 않도록 송풍기 및 전기집진기용 타이머를 설치하여 소음 발생 등에 의한 민원 방지와 운전에 따른 에너지 절감을 실현코자 하였음
- 타이머에 의한 운전시간은 오전 08:00부터 오후 20:00로 설정하였으며, 필요에 따라서 운전시간을 조정할 수 있도록 하였음

##### ○ 전력량계 설치

- 미세먼지 저감장치의 운전에 따른 소비전력량을 확인하기 위해 전력량계를 설치함



[그림 2-46] 운전타이머 및 전력량계

### ③ 시작품의 구조적 안정성 보완

#### ㉞ 기초 및 용접 보완

- 미세먼지 저감장치의 구조적 안정성 보완을 위해 장치 단면적의 2배면적 × 깊이 1m 이상의 콘크리트 타설(철근 포함)과 용접부를 강화시킴



[그림 2-47] 콘크리트 타설 및 용접부 강화

### ④ 시작품의 시각 디자인 보완

#### ㉞ 경사판 오염방지

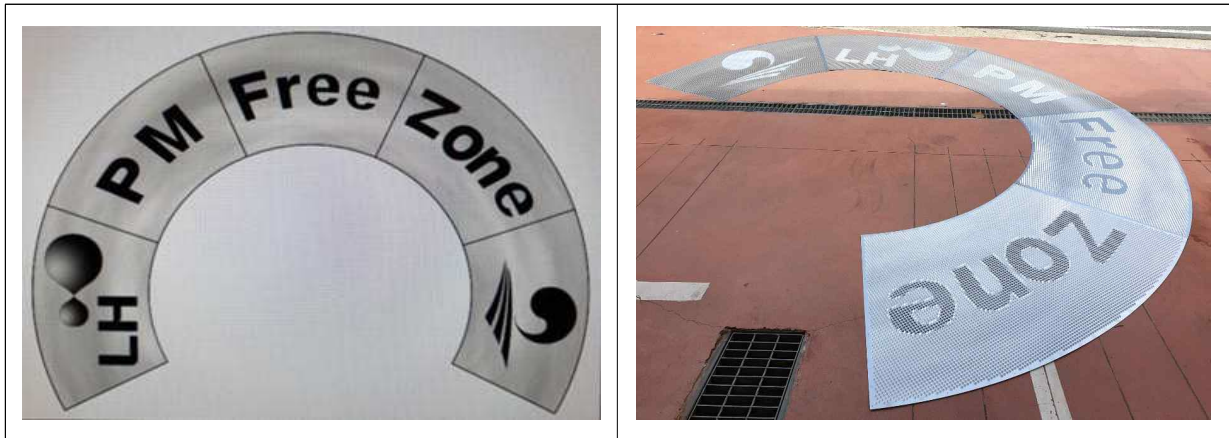
- 오염원이 시작품의 표면에 쌓인 상태에서 우천시 빗물이 경사판을 타고 내려오면서 미세먼지 저감장치의 상부 경사판에 얼룩 등 오염이 발생함
- 경사판 상단에 물끊김막을 설치하여 빗물이 경사판을 타고 본체로 흘러 내려가지 않고, 바로 하강할 수 있도록 하여 얼룩 발생 등 오염 발생을 최소화 시키고자 개선함

| 오염방지 설치 전                                                                           | 오염방지 설치 후                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
|  |  |

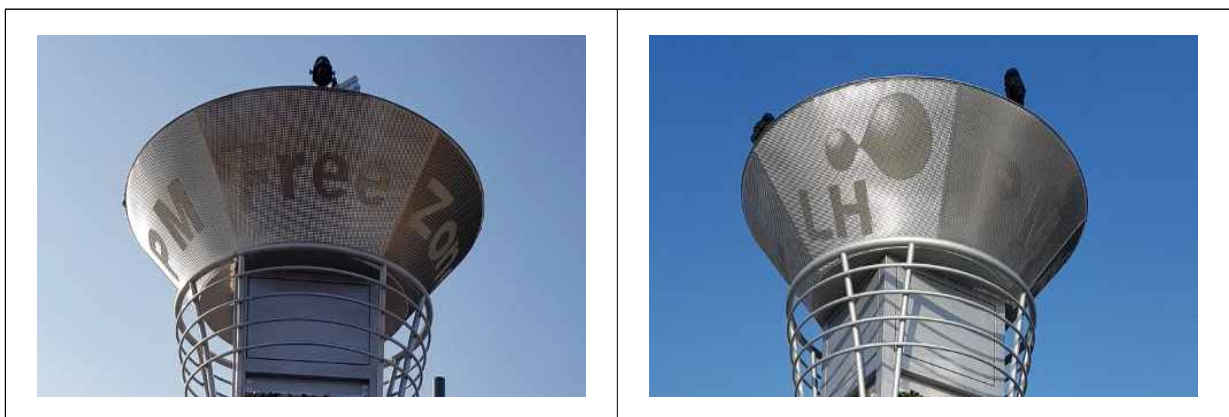
[그림 2-48] 경사판 오염방지 방안

#### ㉠ 경사판 음브레 plate 설치

- 경사판의 오염 방지, 시각적 디자인성, 기능성 등을 종합적으로 고려하여 음브레 plate 설치
- 음브레 plate의 재질은 알루미늄이며, 알루미늄 판에 타공의 각도를 조정함으로써 글자, 그림 등을 새겨 놓고 가독성을 높이도록 하였음



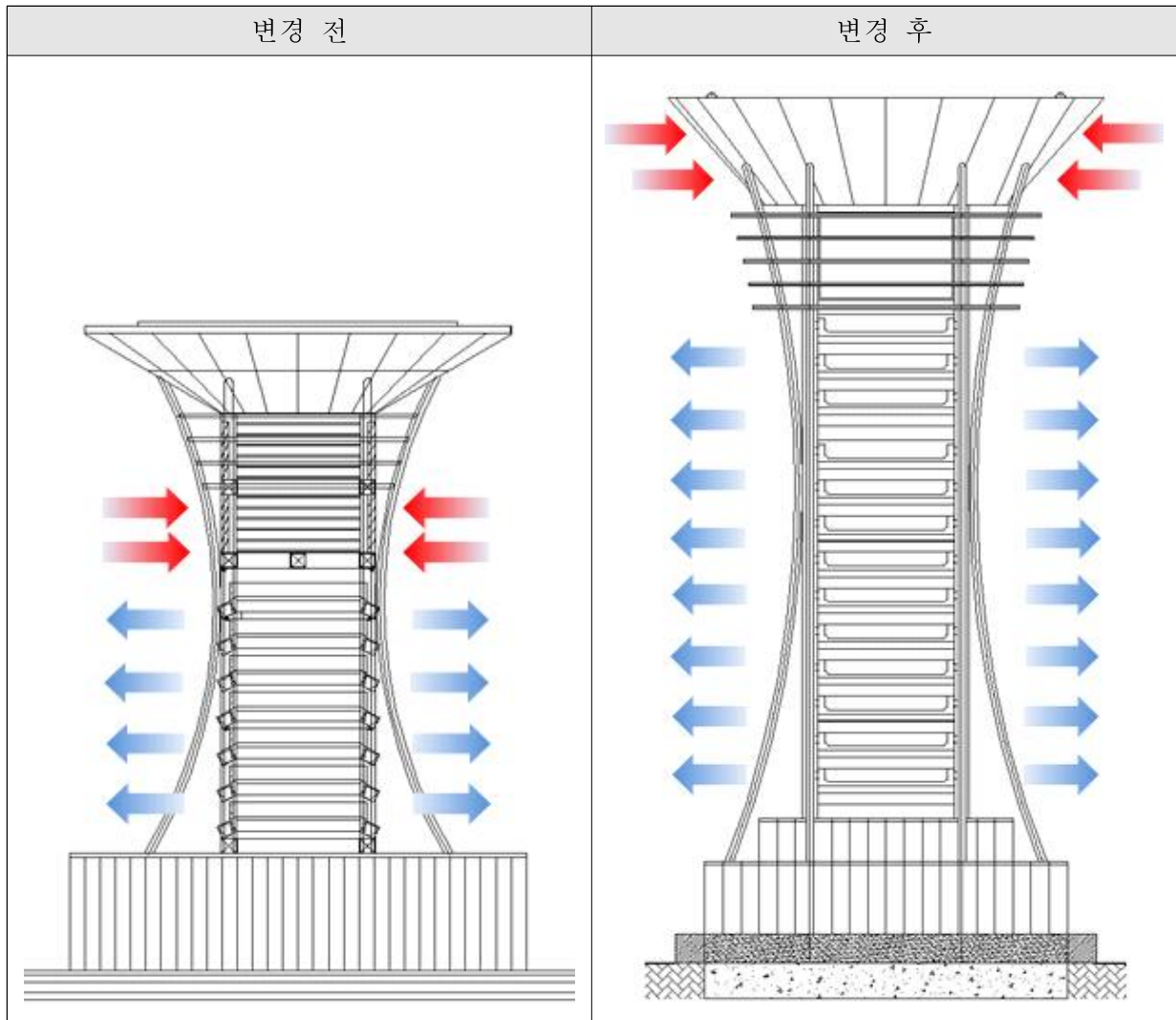
[그림 2-49] 음브레 형식



[그림 2-50] 음브레 설치

#### ㉡ 유로 변경

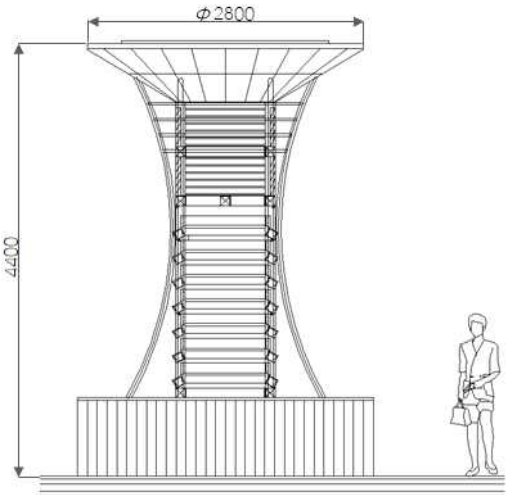
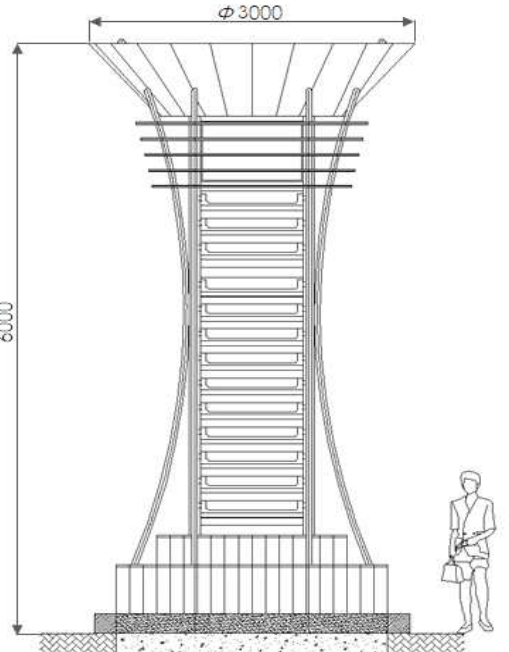
- 경사판 음브레 plate의 타공에 의한 흡입구가 형성됨에 따라 별도의 흡입구 설치가 불필요해, 집진필터의 면적이 증대함에 따라 집진성능 향상과 시각적 디자인성 향상을 위해 흡입구 유로를 아래와 같이 변경하였음



[그림 2-51] 흡입구 유로변경

#### ㉔ 미세먼지 저감장치 크기 확대

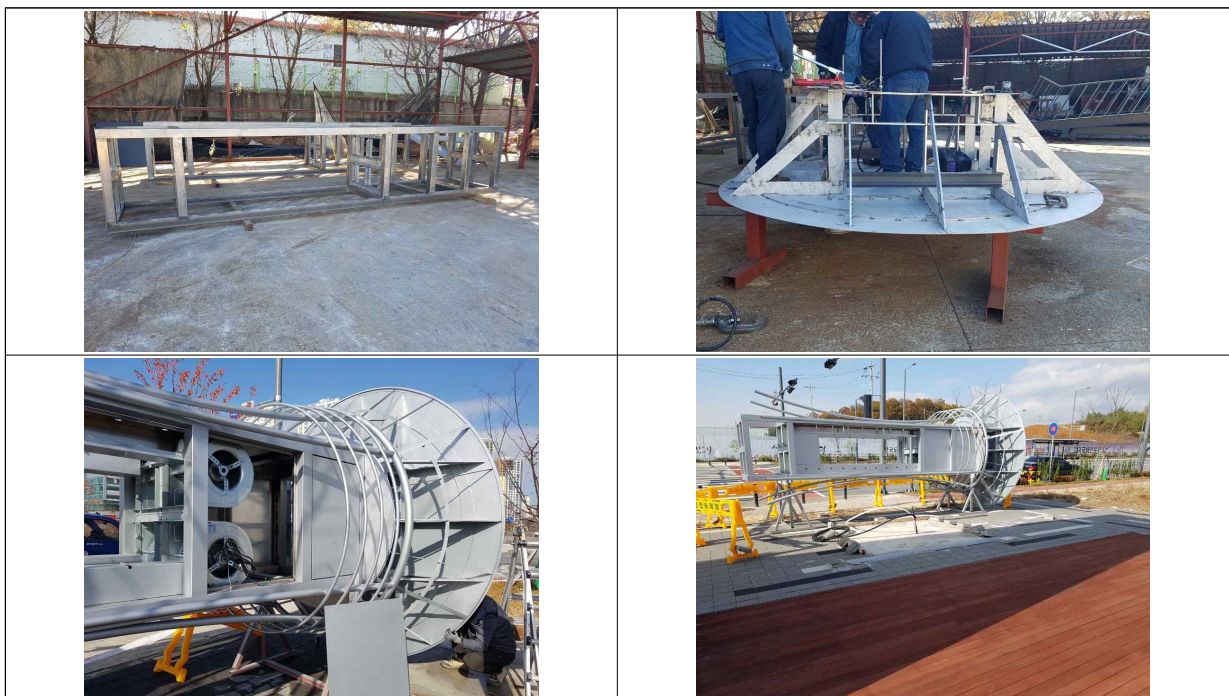
- 미세먼지 저감장치 적용 장소로 실외의 경우는 공원, 녹지, 가로수, 광장, 보도, 도로 방음벽, 버스정류장, 유동인구 밀집지역, 주거단지 쉼터, 놀이터, 교통섬, 건축물의 옥상, 전통시장 등이 있음
- 실내의 경우는 건축물 로비, 지하상가, 역사, 대합실, 터미널, 전시설, 의료시설, 요양시설, 실내주차장, 실내체육시설, 실내공연장 등을 고려해 볼 수 있음
- 실내외 적용 가능 장소에서 미세먼지 저감 성능을 높이고 시각적 디자인 개선 등을 위해서 설치규격을 확대하였으며, 이를 통해 저감장치가 랜드마크로써 역할을 수행할 수 있도록 고려함

| 보완 전(H4400 × Φ2800)                                                               | 보완 후(H6000 × Φ3000)                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |

[그림 2-52] 미세먼지 저감장치의 규격 확대

##### ⑤ 성능 개선 최종 시제품 설치·운영

- 이상과 같이 보완된 미세먼지 저감장치를 설계, 제작하여 경기도 평택시 고덕지구 2개소에 설치·운영 중에 있으며 관수장치 개선과 생화와 조화 모두 식재가 가능토록 설계하였음





[그림 2-53] 성능개선 미세먼지 저감장치 제작 및 설치



[그림 2-54] 보완된 미세먼지 저감장치

## (마) 미세먼지 저감장치 시작품의 운영방안 및 기술 고도화 방안

### ① 시작품 운영방안

- 미세먼지 저감 장치 운영관리방안 참조(별도로 운영관리 가이드라인 발간)

### ② 기술 고도화 방안

#### ㉞ 구조적 기술 고도화 방안

- 적용지역의 환경 여건에 따른 형상의 다각화(원형, 다각형, 터널형, 벽체형 등)
- 강한 흡착을 통한 포집력 향상 및 재비산 방지를 위해서 액상박막이 코팅된 필터를 적용
- 필터오염 및 식생의 생육상태 확인을 위한 감시카메라 설치
- 미세먼지 집진뿐만 아니라, 살균 기능 부가에 대해서 검토 필요
- 집진필터와 송풍기의 모듈화 도모
- 현재 대기 오염상태, 환경알림, 옥외 광고를 위한 LCD monitor 설치
- 측면, 상부, 하부 등 토출방향의 다변화
- 필터의 자동재생 기능을 부가적으로 설치 검토
- 실내의 경우 재실자가 있을 경우에만 운전할 수 있도록 인체감지센서를 설치하고 미세먼지 오염도가 나쁨 이상에서만 운전할 수 있도록 미세먼지센서를 설치하며 조도에 의해 작동하도록 조도센서 설치
- 풍량 및 풍속에 따라 토출방향을 조정할 수 있도록 풍향센서, 풍속센서 및 각종 댐퍼 기능 부가
- 장치의 외부표면 오염도를 저감하기 위한 광촉매 코팅 적용

#### ㉟ S/W적 기술 고도화 방안

- 우적센서 감지장치에 delay time 적용
- 필터의 청소시기를 자동으로 알려 줄 수 있도록 알람 기능 부가
- 미세먼지 오염도, 풍향, 풍속 등에 따라 풍량을 조정함으로써 불필요한 운전 방지에 의한 에너지 절감 실현
- 환경관측망과 연동하여 장비의 운전여부를 판단하고 결정할 수 있는 기능 부가
- 가동상태, 고장정보, 알림정보 등 중앙감시제어 기능과 원격조정 기능을 부가
- PC제어, APP 제어 기능 추가 필요
- 식물 생장을 위한 영양제와 식수 투입(관수량, 관수주기)을 자동 조절할 수 있는 알고리즘 추가
- IoT기술을 접목한 미세먼지 저감장치 전용 PCB 개발

### ③ 성능 유지를 위한 유지관리 체크리스트

- 미세먼지 저감 통합모듈형 장치의 지속적인 성능 유지를 위해서 요구되는 유지관리 항목은 Active 시스템의 경우 전기집진 패널, 송풍기, 조명장치, 콘트롤 판넬 등을 중점 점검하고 불량한 경우 보수 및 교체토록 하며, 특히, 집진패널은 년 3회 수준으로 세척을 해 줄 필요가 있음

[표 2-17] Active 미세먼지 저감장치의 유지관리 체크리스트

| 구 분    | 확인내용              | 적합 | 부적합 | 검토의견 |
|--------|-------------------|----|-----|------|
| 태양광발전  | - 고보조명이 정상적으로 ON  |    |     |      |
| 필터     | - 전기집진기상의 램프 ON   |    |     |      |
| 송풍기    | - 정상가동 확인         |    |     |      |
|        | - 이상소음 발생 확인      |    |     |      |
| 콘트롤 판넬 | - 전원입출력 여부        |    |     |      |
|        | - 누전 차단기 단락 확인    |    |     |      |
| 관수     | - 펌프 가동 및 물 분사 확인 |    |     |      |
| 고보조명   | - 고보조명 ON         |    |     |      |
| 투광등    | - 투광등 ON          |    |     |      |
| 타이머    | - 타이머상의 램프 ON     |    |     |      |
|        | - 설정시간에 따른 운전 확인  |    |     |      |
| 우적센서   | - 정상가동 여부         |    |     |      |
|        | - 우천시 운전 확인       |    |     |      |
| 구조물    | - 구조물의 고정상태 확인    |    |     |      |
|        | - 구조물의 안정성 확인     |    |     |      |
|        | - 구조물의 파손 상태 확인   |    |     |      |
|        | - 점검구의 잠금 상태 확인   |    |     |      |
|        | - 장치주변 청결도 확인     |    |     |      |

※ 체크결과, 부적합시 판매처에 문의

- 미세먼지 저감장치 및 구성부품은 준공일 기준 2년 이내 사용상 문제가 있을 경우 무상으로 처리하며, 하자보증 기간 만료 제품이나 소비자의 과실에 의한 불량은 유상으로 처리하도록 함
- 미세먼지 저감 장치의 유지관리 주기는 아래와 같이 설정해 볼 수 있음

| 구 분               | 수 량           | 관리주기 | 비 고              |
|-------------------|---------------|------|------------------|
| 장치 부문<br>(Active) | 구조물 수리        | 1    | 불량시<br>개별        |
|                   | 태양광배터리 교체     | 1    | 불량시<br>개별        |
|                   | 송풍기 교체        | 1    | 불량시<br>개별        |
|                   | 하이브리드 집진패널 세척 | 1    | 3회/년 권장<br>장치 전체 |
|                   | 고보조명 교체       | 1    | 불량시<br>개별        |
|                   | 고보패턴 교체       | 1    | 불량시<br>개별        |
|                   | 투광기 교체        | 1    | 불량시<br>개별        |
|                   | 콘트롤 판넬 수리     | 1    | 불량시<br>부품별       |

- 보다 구체적인 유지관리 사항은 별도로 작성된 설계시방 및 운영관리 가이드라인을 참조하도록 함

## (바) 설치 및 운영관리 비용 추정

### ① 기본 전제

- 저전력 집진장치 등을 이용한 Active 통합모듈형 장치에 도입된 부품별 재료비와 설치 운영비를 산출하기 위해 구조물 제작 및 설치, 조명 및 콘트롤러, 관수시스템, 필터, 움브레 등으로 구분하여 제시하였음
- 비용산출은 본 시작품에 국한시켜 개략 산출한 것으로 설치규격, 형상, 재료 등에 따라 소요 비용은 달라질 수 있음

### ② 설치 비용

- 요소기술별로 구분하여 설치 비용(재료비 및 공사비 포함)을 산출함
- 원재료의 재료특성, 형상 변경 등에 따라 비용이 달라질 수 있음
- 원재료비 및 인건비 상승 등이 발생하게 되면 소요비용도 달라지게 됨
- 개략 설치 비용은 아래와 같이 추정해 볼 수 있음

| 항목        | 금액(VAT포함)   | 비고          |
|-----------|-------------|-------------|
| 구조물 제작    | 25,960,000  | 재료비 포함      |
| 구조물 설치    | 20,240,000  | 토목공사 포함     |
| 조명 및 콘트롤러 | 18,348,000  | 설치비 포함      |
| 관수시스템     | 9,350,000   | 설치비 포함      |
| 필터시스템     | 26,070,000  | 송풍기, 설치비 포함 |
| Ombrae    | 4,000,000   |             |
| 합계        | 108,768,000 |             |

\* 현장에 적용한 시작품 설치에 국한시켜 개략 산출한 비용으로 현장 여건 및 시설 선정 등에 따라 달라질 수 있음

### ③ 운영관리 비용 추정

- 요소기술별로 구분하여 운영관리 비용을(재료비 및 공사비 포함) 산출함
- 운전(설치)장소, 대기오염 상황에 따라 청소 및 교체 주기는 달라질 수 있음
- 유지관리 비용을 개략적으로 산출한 결과는 아래와 같음

| 구분                 | 항목                   | 주기<br>(청소/교체) | 금액<br>(VAT포함) | 비고        |
|--------------------|----------------------|---------------|---------------|-----------|
| 주기적<br>점검          | 데미스터, 프리필터,<br>관성충돌판 | 3개월           | 2,400,000     |           |
|                    | 전기집진기                | 6개월           | 3,800,000     |           |
|                    | 시스템                  | 3개월           | 800,000       | 예방차원      |
| 간헐적<br>점검<br>(발생시) | 송풍기                  | 발생시           | 1,100,000     | 이상소음, 정지시 |
|                    | 태양광배터리               | 발생시           | 1,700,000     | 전력문제시     |
|                    | 구조물                  | 발생시           | 실행가           | 구조적 결함시   |
|                    | 컨트롤러 판넬              | 발생시           | 실행가           | 시스템 이상시   |
|                    | 조명(고보조명)             | 발생시           | 실행가           | 불량시       |
|                    | 태양광패널                | 발생시           | 실행가           | 전력문제시     |
|                    | 관수시스템                | 발생시           | 실행가           | 불량시       |

#### ④ 비용 절감 방안

- 현재 구조물의 재질을 스테인리스 강판에서 아연도금 강판이나 냉연 강판으로 변경하고, 도장 처리하게 되면 재료비 비용을 절감할 수 있을 것임
- 구조물의 디자인 변경 또는 단순화에 따른 용접량 감소를 통해 제작 비용 절감
- 시작품을 양산화시켜 비용을 낮추고 경제성을 확보할 필요가 있음
- 관계기관과 협의를 통해 관수시설, 토목공사 등을 분담함으로써 설치비용을 절감
- 프리필터의 자동 재생기능을 부여하여 유지관리 비용 절감
- 운전타이머 등을 적용한 운전시간 조정에 따른 운전 비용 절감
- 미세먼지 오염도, 풍속, 조도 등을 감지할 수 있는 각종 센서를 적용한 전용컨트롤러에 의해서 불필요한 운전방지를 통한 운전비용 절감
- 이상과 같이 미세먼지 저감 장치의 설치 및 운영관리시 절감방안과 본 시스템을 양산화시킬 경우, 협력업체와 협의를 통해 약 20% 이상의 설치비용을 절감할 수 있을 것으로 예상

## (2) 식생을 이용한 Passive 미세먼지 저감 기술 개발

### (가) 식물 소재를 활용한 Passive 저감 기법 현황 분석

#### ① 식물의 미세먼지 저감 기작 검토

- 식물을 활용한 미세먼지 저감 Passive 기법을 분석하기 위해 식물 및 수목의 미세먼지 저감기작인 차단, 침강, 흡수, 흡착을 검토함
  - (차단) 대기 중의 미세먼지가 수목의 수관층에 가까워지면, 미세먼지의 확산 면적과 유속이 감소하면서 미세먼지가 유입되지 않고 차단됨
  - (침강) 식물 및 수목이 모인 공간에 들어온 미세먼지가 수관층에서 지면으로 낙하함
  - (흡수) 미세먼지가 나뭇잎의 기공에 의해 흡수됨
  - (흡착) 식물 및 수목의 잎, 줄기, 가지의 표면에서 미세먼지를 잡아두거나 부착함
- 전문가의 자문 및 관련 문헌 검토를 통해 식물의 미세먼지 저감기작은 식물 종의 선정과 식재 기법에 따라 미세먼지 저감효과에 영향을 미치는 것으로 확인됨
- 차단과 침강의 경우, 식물의 배식 유형에 따라 다르게 나타나며 흡수와 흡착의 경우, 식물 종의 선정에 따라 결정됨

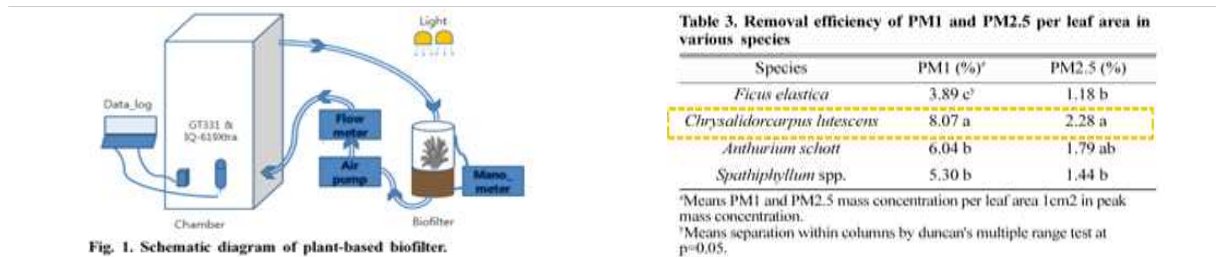


[그림 2-55] 숲과 나무에 의한 미세먼지 저감 메커니즘

\* 출처: 국립산림과학원 도시숲연구센터, 미세먼지 대응하는 도시숲 조성 및 관리방안

- 국내 미세먼지 저감 기작과 관련된 연구는 흡착기능을 중심으로 진행되었으며, 실내공간을 기준으로 식물 활용 미세먼지 챔버를 제작하여 미세먼지 저감효과를 모니터링한 연구가 주로 확인됨
- 국내 선행 연구 중 「4가지 관엽식물을 이용한 바이오필터의 미세먼지 제거 효과, 2014」 문헌에 의하면, 담배연기 내 미세먼지를 오염원으로 하여 관엽식물 4종(인도고무나무, 스파티필름, 아레카야자, 안스리움)에 대한 미세먼지제거 효과를 평가함
- 실내 공간을 모형화한 챔버(60(L)×80(W)×120(H))에 식물 1본 기준의 아크릴 식물 바이오필터를 연결하여 진행하였으며, 주입되는 담배연기 내 미세먼지의 저감량을 측정함

- 측정 결과, 단위 엽면적 당( $\text{cm}^2$ ) 아레카야자의 제거 효과가 가장 높았으며, 안스리움, 스파티필름, 인도고무나무 순으로 효과가 나타남
- 식물의 미세먼지 저감기작은 잎의 흡착과 기공에 의한 흡수 때문이며, 특히 흡착 기작은 식물 잎 표면 큐티클층의 두께와 관련이 있는 것으로 확인됨
- 따라서, 관련 기술 사례 검토 및 흡착 기작에 영향을 주는 식물의 형태적 요인을 고려하여 식물 종을 선정해야 할 것으로 판단됨



[그림 2-56] 식물을 활용한 미세먼지 제거효과 실험 방법 및 결과

\* 출처: 충북대학교 원예학과, 2014, 4가지 관엽식물을 이용한 바이오필터의 미세먼지 제거 효과

## ② 식물을 활용한 미세먼지 저감 기술 사례

### ㉞ 국내 기술

#### ○ Haatz : 버티컬 에어가든

- Haatz의 '버티컬 에어가든'은 식물의 유해물질 저감 작용을 극대화하기 위해 제품 내부에 팬을 설치한 친환경 Airstream 시스템임
- 내부에 설치된 팬을 통해 균등하게 집진된 오염 공기를 토양이 흡수하여 식물의 뿌리에서 미생물 생분해 과정을 거쳐 오염 공기를 정화시킴. 내부에는 자동 관수 시스템을 설치하였으며, 수위 센서를 탑재하여 내부 탱크에 저장된 물이 일정 수위에 도달하면 자동관수할 수 있도록 함
- (적용식물) 실내공기정화 식물 20여종



[그림 2-57] Haatz 버티컬 에어가든 이미지

\* 출처: 하츠 블로그 <https://blog.naver.com/haatz2009/220355920093>

#### ○ 도시와 숲 : 수직정원

- 도시와 숲의 '수직정원'은 서울시 신청사에 설치된 벽면녹화 시스템으로 세계에서 인정받은 최대 규모의 벽면녹화 사례임

- 청사 내부 1층부터 7층까지 높이의 총면적 약 1,516㎡ 규모이며, 14종류의 식물 7만여 본이 식재되어 있음. 포트형 벽면녹화 제품으로 배양토와 자연토를 혼합하여 식재하였으며, 자동 관수 제어시스템을 적용하여 관리함
- (적용식물) 스킨답서스, 푸미라, 아글라오네마, 레몬라임, 스파티필름 등

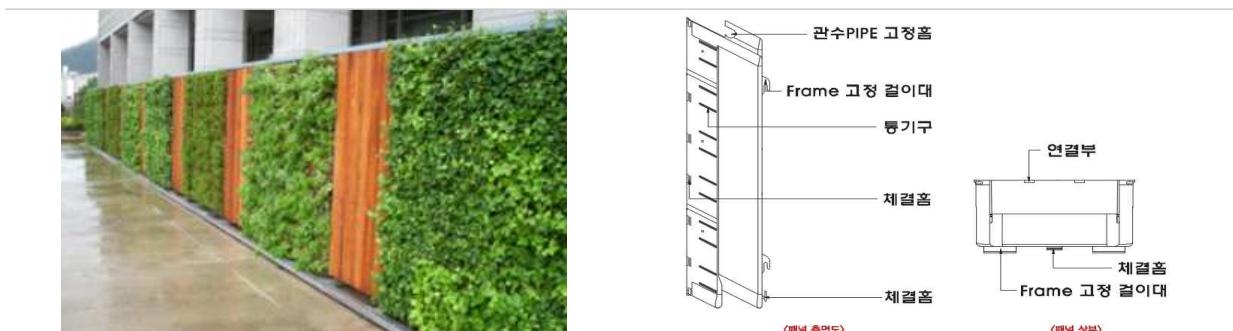


[그림 2-58] 서울 신청사 수직정원 이미지

\* 출처: 환경부 공식블로그(<https://blog.naver.com/mesns/220968815097>), Landscape Times(<http://www.latimes.kr/news/articleView.html?idxno=13896>)

#### ○ 한국도시녹화 : GWS-KP 벽면녹화

- 한국도시녹화의 ‘GWS-KP’는 모듈 형태의 벽면녹화 제품으로 각각의 식재공간에 경사를 주어 식물의 성장을 위한 충분한 토양과 필요 수분을 담수할 수 있게 함
- 제품의 후면 걸이를 통해 가로철물에 고정시키는 방식으로 설치하여, 설치 시간과 비용을 절약하고, 상단부 관수 파이프 고정홈에 관수 파이프를 연결하여 자재의 분식 및 훼손을 방지함
- (적용식물) 초화 및 소관목



[그림 2-59] GWS-KP 시공 이미지와 도면

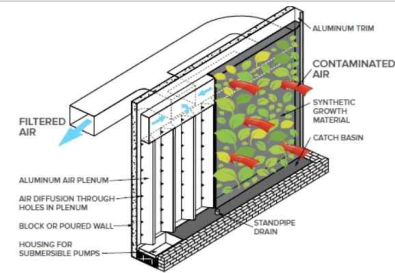
\* 출처: 한국도시녹화(<http://www.biotope.co.kr/>)

#### ④ 국외 기술

##### ○ Nedlaw : Living Wall Biofilter

- 캐나다 Nedlaw의 ‘Living wall biofilter’는 수직형 수경재배 벽면녹화에 건물 공조기를 연계한 식물 바이오필터 시스템임

- 기존 토양 기반 벽면녹화 제품의 토양 침하 및 박리 문제를 해결하기 위해 수경재배형으로 설계되었으며, 건축물의 공조기와 연계하여 다량의 실내공기 흡수를 통해 상대적으로 많은 오염 공기를 흡착할 수 있음
- (적용식물) 드라세나 속, 필로덴드론 속, 인도고무나무 속, 벤자민 고무나무, 홍콩야자, 아이비 등

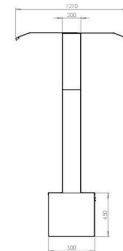
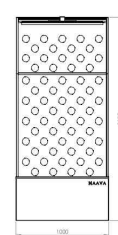
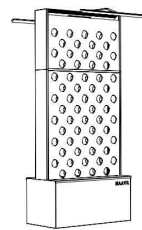


[그림 2-60] Newdlaw Living wall biofilter 이미지와 도면

\* 출처: Nedlaw, Living wall Biofilter: Growing Clean Air and Energy Saving

#### ○ Naturvention : Naava

- 핀란드 Naturvention의 'Living Naava'는 탈·부착 및 교체가 용이한 포트형 단일 벽면녹화 시스템임
- 사물인터넷(IoT) 기반의 시스템을 통해 실시간 관수 및 환경 모니터링이 가능하며, 하단에 설치된 관수 시스템을 통해 식재공간으로 물이 순환됨
- 포트형 식재 방법을 적용하고, 곰팡이 발생율이 낮은 토양기반제를 활용하여 식물 유지관리가 용이하도록 함
- (적용식물) 드라세나 속, 필로덴드론 속, 아이비 속, 쉐플레라 속, 안스리움 속 등



[그림 2-61] Naava 이미지와 도면

\* 출처: Naturvention, Naava Design Guide

#### ○ Green 4 Road : Wall 4 life

- 네덜란드 Green 4 Road의 Wall 4 life는 도로 방음벽에 메쉬 형태의 구조물을 설치하여 녹화를 조성하는 시스템임
- 메쉬 형태의 구조물에 덩굴성 아이비를 식재하였으며, 식재 밀도를 높여 정화 효과를 극대화시킴
- 차량에서 발생되는 오염 공기가 녹화된 방음벽에 의해 외부로 방출되지 않고 흡착되어 공기를 정화시킴

- (적용식물) 아이비

#### ○ Green City Solution : City Tree

- 독일 Green City Solution의 City tree는 이끼를 활용한 벽면녹화 방법을 통해 미세먼지를 포함한 대기 질의 오염원을 정화하는 시스템임
- 사물인터넷(IoT)를 활용하여 실시간으로 공기질 측정이 가능하고 자동관수 시스템을 적용하여 유지 관리가 용이함
- 미세먼지와 이산화질소, 오존가스 등을 제거하는 목적으로 현재 파리, 홍콩 등 20개 도시에 설치되어 있음

- (적용식물) 이끼



[그림 2-62] Naava 이미지와 도면

\* 출처: GREEN4ROADS, Wall4Life Brochure, Green city Solution, The city tree Brochure

#### ㉔ 국내 · 외 기술 분석 시사점

- 식물을 활용한 미세먼지 저감기술은 현재 실내, 실외로 기술 적용 공간이 구분되며, 기술 별 녹화방법 및 적용 식물 등에 따라 유형이 분류됨
- 국내의 경우, 실내 공기정화를 대상으로 제품을 생산하고 있음. 토양 또는 인공토양을 기반재로 하는 포트형으로 구성되며 대부분 실내 생육에 적합한 식물을 적용하고 있음
- 국외의 경우 실내, 실외 공간 모두에 대한 제품을 생산하고 있음. 토양의 비산·하중 등의 문제 해결을 위해 수경재배 및 무토양 방식의 제품을 최근 개발 중이며, 덩굴 식물, 이끼 등 다양한 수종의 도입을 시도하고 있음
- 국내·외 기술 분석 결과, 실내 공기질 정화를 목적으로 하여 미세먼지 저감에 특화된 기술은 제한적임. 또한 대부분의 제품이 실내 환경에 적합한 관엽식물을 적용하고 있음

[표 2-18] 국내·외 식물을 활용한 미세먼지 저감기술 현황

| 공간 | 구분 | 제품명                                   | 녹화 방법           | 규격                                  | 재질              | 적용식물                                                   |
|----|----|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------|
| 국내 | 실내 | 버티컬<br>에어가든<br>(Haatz)                | 벽면녹화<br>(포트형)   | —                                   | —               | 실내공기정화 식물<br>20여종                                      |
|    |    | 수직정원<br>(도시와 숲)                       | 벽면녹화<br>(포트형)   | 1,516m <sup>2</sup>                 | —               | 스킨답서스<br>푸미라<br>스파티필름 등                                |
|    | 실외 | GWS-KP<br>(한국도시녹화)                    | 벽면녹화]<br>(포트형)  | 500×250×120mm<br>(가로×세로×두께)         | H.D.P.E         | 초화 및 소관목                                               |
| 국외 | 실내 | Living wall<br>biofilter<br>(Nedlaw)  | 벽면녹화            | 공간대비 1:100<br>비율                    | (포켓형 다공성<br>매트) | 드라세나 속<br>필로덴드론 속<br>인도고무나무<br>벤자민 고무나무<br>홍콩야자<br>아이비 |
|    |    | Naava<br>(Natur vention)              | 벽면녹화            | W800<br>×H2100<br>×D210~500<br>(mm) | 알루미늄            | 드라세나 속<br>필로덴드론 속<br>아비스 속<br>쉐플레라 속<br>안시리움 속         |
|    | 실외 | Wall 4life<br>(Green 4Road)           | 매쉬형<br>(방음벽 녹화) | —<br>(공간에<br>따라 다르게 적용)             | —               | 아이비                                                    |
|    |    | City Tree<br>(Green city<br>Solution) | 시설물형<br>(이끼 녹화) | 3.5m <sup>2</sup>                   | —               | 이끼                                                     |
|    |    |                                       |                 |                                     |                 |                                                        |

## (나) 미세먼지 저감 수종 선정기준 및 수종 DB 구축

### ① 식물소재 DB 구축 프로세스

○ 도심 내 미세먼지 저감 식물 선정 DB 구축은 다음의 4단계를 거쳐 진행함

- (1단계) 미세먼지 저감 및 도심지 식재에 적합한 식물을 선정함
- (2단계) 국내·외 문헌 검토를 통해 미세먼지 저감 식물 선정기준을 확보함
- (3단계) 우선순위 산정을 위한 영향인자별 배점기준을 마련함
- (4단계) 미세먼지 저감 식물 소재 DB 분류 및 우선순위를 선정함

○ 영향인자별 우선순위 산정을 위해 전문가 설문조사를 통한 퍼지다 기준 의사결정법을 활용함



[그림 2-63] 미세먼지 저감 식물선정 DB 구축 프로세스

## ② 식물소재 DB 구축

### ㉞ 미세먼지 저감에 효율적인 식물 선정

- 미세먼지 저감 식물 리스트를 구축하기 위해 관련 연구 보고서를 중심으로 기능 및 용도에 따른 키워드를 도출함
- 기능에 따른 키워드는 미세먼지 저감, 분진 저감, 음이온 저감 등이며, 용도에 따른 키워드는 옥상녹화, 벽면녹화, 가로식재 등으로 조사됨
- 이에 따라, 1차적으로 127종의 수종이 선정되었으며 이후, 전문가 인터뷰를 통해 국내 도시 도입 가능 수종을 추가하고, BVOCs<sup>1)</sup> 발생 수종과 국내 환경 적용 불가 수종을 검토하여 총 120종의 수종을 도출함(교목 62종, 관목 36종, 덩굴식물류 7종, 초본류 7종, 지피류 5종, 사초류 3종)



[그림 2-64] 미세먼지 저감수종 선정 프로세스

1) BVOCs : 생체내 휘발성 유기화합물

#### ㉔ 미세먼지 저감수종 선정기준 확보

- 국내·외 문헌에서 제시하고 있는 식물의 미세먼지 저감 영향 요인으로는 잎의 거칠기, 털의 유무, 왁스층의 두께 등이 주로 확인되며, 그 외 영향 요인으로는 단위면적 당 기공수, 음이온 발생량 등이 있음

[표 2-19] 국내·외 식물의 미세먼지 저감요인 관련 문헌 현황

| 논문명                                                                                                                       | 설명                                                                                                                 | 저감 영향 요인                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 실내식물의 공기중의 미세먼지 제거 효율 규명                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀폐된 챔버를 활용하여 관엽식물 10종과 킬란드시아 3종에 대한 미세먼지 제거 효과를 확인함</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 식물의 광합성률, 식물의 기공수, 식물 기공의 배치 형태</li> </ul>        |
| 나뭇잎 형상에 따른 매연 제거 특성                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀폐 챔버를 활용하여 도심 가로수에서 주로 볼 수 있는 수목 5종의 잎에 대한 매연 나노입자 제거 특성을 확인함</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 침엽수, 식물 잎 표면의 거칠기</li> </ul>                      |
| 관엽식물이 실내미세분진 제거에 미치는 영향                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 밀폐 챔버를 활용하여 TSP(총 부유입자상 분진)에 대한 관엽식물 5종의 종별 분진 제거량을 확인함</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 식물 잎의 면적, 식물 잎 표면의 형태, 식물의 광합성률</li> </ul>        |
| Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 도로변 식재 수종 16종의 입자상 물질 흡착과 잎의 모양, 잎 표면의 털 유무에 대한 관계를 확인함</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 식물잎의 면적, 잎의 표면 털의 유무</li> </ul>                   |
| Seasonal Variation of Leaf Dust Accumulation and Pigment Content in Plant Species Exposed to Urban Particulates Pollution | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 6종의 식물 잎의 구조, 생리학적 측면에서 먼지입자의 축적에 대한 관계를 확인함</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 식물 잎의 표면 왁스층 두께, 식물잎의 면적, 식물잎의 표면의 거칠기</li> </ul> |

- 식물의 미세먼지 저감 기작은 잎의 기공을 통한 흡수보다 침강, 차단, 흡착 등을 통해 주로 이루어짐
- 침강과 차단의 경우, 군집 단위의 식재에서 주로 나타나는 기작으로 개별식물에 대한 미세먼지 저감 효과는 식물의 형태에 따른 흡착기능에 초점을 맞추어 선정하는 것이 적절하다고 판단됨
- 따라서, 본 연구는 식물의 형태에 따른 흡착기능을 중심으로 식물DB 분류기준을 마련하였으며, 관련 연구인 Nowak(2008)와 Jun Yang(2015)의 연구에 따라 식물의 미세먼지 저감 영향요인에 대한 세부 항목을 다음과 같이 제시함

[표 2-20] 식물의 미세먼지 저감 영향요인 세부항목

| 내용               | 구분        |                                                                                                  |
|------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 미세먼지<br>흡착<br>기능 | 수종의 특징    | 상록침엽수, 상록활엽수, 낙엽수                                                                                |
|                  | 수고        | 20m, 10~20m, 5~10m                                                                               |
|                  | 잎의 복잡성    | 2중~3중 잎, 3출엽, 손바닥 형태의 잎, 손상되지 않은 단일 잎                                                            |
|                  | 잎면적       | 잎의 평균크기가 5cm, 잎의 평균 크기가 5~20, 20cm이상                                                             |
|                  | 잎 가장자리    | 가는 톱니꼴, 이중 톱니, 가는 실처럼 늘어지는 갈라진 틈, 톱날, 치열판, 절개, 잎 모양의 조각, 갈라진 조각, 뾰족한 조각, 돌기, 톱니 모양의 돌기, 가시, 물결모양 |
|                  | 잎 표면의 거칠기 | 털, 끈적한, 비늘 모양, 수지성, 섬모, 광택이 있는, 부드러운 잎표면                                                         |
|                  | 수피의 특징    | 피목, 무늬, 갈라짐, 껍질이탈, 코르크                                                                           |

#### ㉔ 우선순위 산정을 위한 영향인자별 배점 기준 마련

- 미세먼지 저감에 영향을 미치는 영향인자별 배점기준을 마련하여 적용 가능한 수종의 우선순위를 도출함
- 각 세부 요인별 배점기준은 문헌조사와 전문가(수목, 식물, 환경, 원예 분야 전공자 30명)를 대상으로 진행한 설문조사의 결과를 근거로 구분함

[표 2-21] 식물의 미세먼지 저감 영향인자 배점기준

| 기능               | 구분           | 배점기준                          |                                                                 |              |
|------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------|
|                  |              | 3                             | 2                                                               | 1            |
| 미세먼지<br>흡착<br>기능 | 수종의 특징       | 상록침엽수                         | 상록활엽수                                                           | 낙엽수          |
|                  | 수고           | 20m                           | 10~20m                                                          | 5~10m        |
|                  | 잎의 복잡성       | 2중~3중 잎                       | 3출엽,<br>손바닥 형태의 잎                                               | 손상되지 않은 단일 잎 |
|                  | 잎면적          | 잎의 평균크기가 5cm                  | 잎의 평균 크기가 5~20                                                  | 20cm이상       |
|                  | 잎 가장자리       | 가는 톱니꼴, 이중 톱니,<br>가는 실처럼 늘어지는 | 갈라진 틈, 톱날, 치열판, 절개, 잎<br>모양조각, 갈라진 조각, 뾰족한<br>조각, 돌기, 톱니 모양의 돌기 | 가시, 물결모양     |
|                  | 잎 표면의<br>거칠기 | 털, 끈적한, 비늘 모양,<br>수지성         | 섬모, 광택이 있는                                                      | 부드러운 잎표면     |
|                  | 수피의 특징       | 피목, 무늬                        | 갈라짐, 껍질이탈                                                       | 코르크          |

#### ㉔ 도심지 내 미세먼지 저감 식재수종 우선순위 선정 결과

- 구축된 미세먼지 저감 수종 DB를 대상으로 배점기준에 따라 우선순위를 선정하고 목본류(교목류, 관목류)를 중심으로 1~3순위까지의 수종을 제시함
- 교목류
  - 수종 우선순위 산정결과, 상록성 향나무가 1순위로 도출되었으며, 플라타너스, 측백나무, 뽕나무가 2순위로 확인됨
  - 식물의 미세먼지 저감효율에 대한 선행 문헌 검토 결과에 따라 상록침엽수가 높은 순위를 나타낼 것을 예상하였으나 수목의 성상별(상록 침엽, 상록 활엽, 낙엽수) 잎의 형태적 특성이 우선 순위 결과에 영향을 미치는 것으로 확인됨

- 수고의 경우, 초기 식재 형태 및 수목의 생육환경에 따라 변화하는 가변성 지표이므로 본 연구에서는 수목의 생장 최대 수고를 기준으로 배점하였음

[표 2-22] 교목류 1~3순위 우선순위 배점표

| 이름      | 학명                                             | 수목<br>종류 | 수고 | 잎<br>복잡성 | 잎<br>면적 | 잎표면<br>거칠기 | 잎가장<br>자리 | 수피의<br>특징 | 합산 | 순위 |
|---------|------------------------------------------------|----------|----|----------|---------|------------|-----------|-----------|----|----|
| 향나무     | Juniperus chinensis                            | 3        | 3  | 3        | 1       | 3          | 1         | 2         | 16 | 1  |
| 플라타너스   | Platanus                                       | 1        | 3  | 2        | 3       | 1          | 3         | 2         | 15 | 2  |
| 측백나무    | Thuja orientalis L.                            | 3        | 2  | 3        | 1       | 3          | 1         | 2         | 15 | 2  |
| 뽕나무     | Morus alba L.                                  | 1        | 2  | 2        | 2       | 3          | 3         | 2         | 15 | 2  |
| 느티나무    | Zelkova serrata                                | 1        | 3  | 2        | 1       | 3          | 2         | 2         | 14 | 3  |
| 구주물푸레   | Fraxinus excelsior L.                          | 1        | 3  | 2        | 3       | 1          | 2         | 2         | 14 | 3  |
| 미국개오동나무 | Catalpa speciosa (Warder)<br>warder ex Engelm. | 1        | 3  | 3        | 1       | 1          | 3         | 2         | 14 | 3  |
| 양버즘나무   | Platanus occidentalis L.                       | 1        | 3  | 2        | 3       | 1          | 2         | 2         | 14 | 3  |
| 이태리포플러  | Populus × canadensis<br>Moench                 | 1        | 3  | 2        | 3       | 1          | 2         | 2         | 14 | 3  |
| 들메나무    | Fraxinus mandschurica Rupr.                    | 1        | 2  | 2        | 2       | 3          | 2         | 2         | 14 | 3  |

○ 관목류

- 전체 수종 우선순위 산정 결과, 상록성의 사철나무가 우선순위 1순위로 도출되었으며, 풀또기, 팔손이 나무, 산호수, 자금우, 우목사스레피가 2순위로 확인됨
- 본 연구에서는 제시하는 식물의 미세면지저감 영향인자는 대부분 교목류 식물에 해당되는 사항(수고, 수피 등)으로, 향후 관목류 및 초화류 등에 대한 우선순위 선정 기준 마련을 통해 실질적인 Passive 시작품 도입 수종 평가 기준 마련이 필요함

[표 2-23] 관목류 1~3순위 우선순위 배점표

| 이름     | 학명                                                | 수목<br>종류 | 수고 | 잎<br>복잡성 | 잎<br>면적 | 잎표면<br>거칠기 | 잎가장<br>자리 | 수피의<br>특징 | 합산 | 순위 |
|--------|---------------------------------------------------|----------|----|----------|---------|------------|-----------|-----------|----|----|
| 사철나무   | Euonymus japonicus Thunb.                         | 2        | 1  | 3        | 2       | 1          | 3         | 2         | 14 | 1  |
| 풀또기    | Amygdalus triloba (Lindl.)<br>Ricker              | 1        | 1  | 2        | 1       | 3          | 3         | 1         | 12 | 2  |
| 팔손이나무  | Fatsia japonica (Thunb.)<br>Decne. & Planch.      | 2        | 1  | 1        | 3       | 3          | 1         | 1         | 12 | 2  |
| 산호수    | Ardisia pusilla                                   | 2        | 1  | 2        | 1       | 2          | 3         | 1         | 12 | 2  |
| 자금우    | Ardisia japonica                                  | 2        | 1  | 2        | 1       | 2          | 3         | 1         | 12 | 2  |
| 우목사스레피 | Eurya emarginata (Thunb.)<br>Makino               | 2        | 1  | 2        | 2       | 2          | 2         | 1         | 12 | 2  |
| 회양목    | Buxus microphylla var.<br>koreana NAKAI           | 2        | 1  | 2        | 1       | 2          | 1         | 2         | 11 | 3  |
| 고광나무   | Philadelphus pekinensis var.<br>kansuensis Rehder | 1        | 1  | 2        | 2       | 1          | 2         | 2         | 11 | 3  |

| 이름     | 학명                                  | 수목<br>종류 | 수고 | 잎<br>복잡성 | 잎<br>면적 | 잎표면<br>거칠기 | 잎가장<br>자리 | 수피의<br>특징 | 합산 | 순위 |
|--------|-------------------------------------|----------|----|----------|---------|------------|-----------|-----------|----|----|
| 양국수나무  | Physocarpus opulifolius (L.) Maxim. | 1        | 1  | 2        | 2       | 1          | 2         | 2         | 11 | 3  |
| 모란     | Paeonia suffruticosa Andrews        | 1        | 1  | 3        | 2       | 1          | 1         | 2         | 11 | 3  |
| 붉은병꽃나무 | Weigela florida (Bunge) A. DC.      | 1        | 1  | 2        | 1       | 1          | 3         | 2         | 11 | 3  |
| 죽절초    | Sarcandra glabra (Thunb.) Nakai     | 2        | 1  | 2        | 1       | 1          | 3         | 1         | 11 | 3  |
| 다정큼나무  | Raphiolepis indica var. umbellata   | 2        | 1  | 2        | 1       | 2          | 2         | 1         | 11 | 3  |
| 돈나무    | Pittosporum tobira                  | 2        | 1  | 2        | 2       | 2          | 1         | 1         | 11 | 3  |
| 호랑가시나무 | Ilex cornuta                        | 2        | 1  | 2        | 2       | 2          | 1         | 1         | 11 | 3  |
| 납천     | Nandina domestica                   | 2        | 1  | 3        | 1       | 1          | 1         | 2         | 11 | 3  |
| 덜꿩나무   | Viburnum erosum Thunb.              | 1        | 1  | 2        | 2       | 1          | 2         | 2         | 11 | 3  |

## (다) 설계 및 기술 요구사항 도출

### ① 식물활용 Passive 시작품 설계 요구사항 검토

- 국내·외 미세먼지 저감 기술 현황 분석 내용을 바탕으로 도심 주거지 내 적용 가능한 식물 활용 Passive 시작품 설계 요구사항을 검토함
- 외부 공간 적용 가능성, 시공 및 운반 편의성, 식물 교체 가능성, 적용 식물의 다양성, 유지관리 용이성 등으로 설계 요구 사항을 분류하여 다음과 같이 제시함

[표 2-24] Passive 시작품 설계 요구사항

| 항목            | 내용                                             |
|---------------|------------------------------------------------|
| ① 외부공간 적용 가능성 | 시설의 적용 가능성을 말하며, 방수시설 여부, 중요시설의 내부화, 부식성 등을 고려 |
| ② 시공 및 운반 편의성 | 적정규모에 따라 시공 및 운반의 편의성을 고려                      |
| ③ 식물 교체 가능성   | 계절 및 생육정도에 따라 적용가능 식물의 교체가 가능하도록 계획 필요         |
| ④ 적용식물의 다양성   | 식물의 수고와 초장, 환경에 따라 적용 가능한 수종을 선택할 수 있도록 계획 필요  |
| ⑤ 유지관리 용이성    | 저관리형 모듈계획으로 유지 관리비용 최소화 필요                     |

### ② Passive 시작품 기술사양서(안)

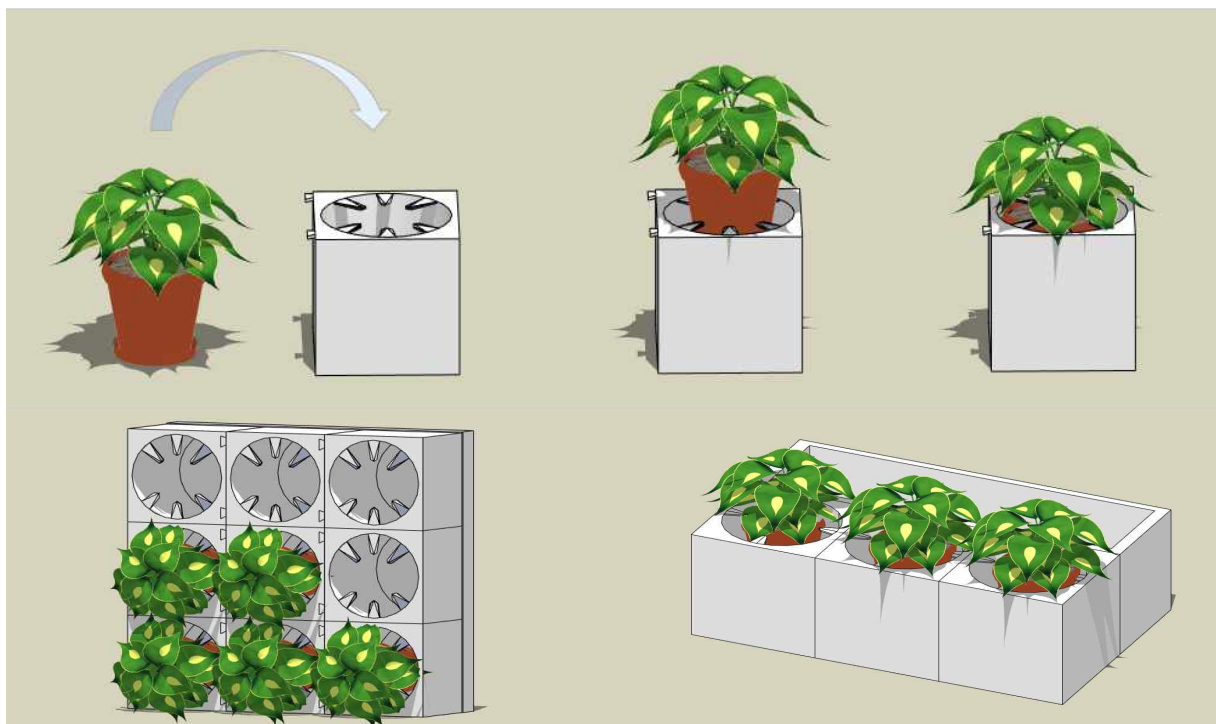
- 식물 활용 Passive 시작품은 화분형과 통합형으로 구분하여 제안하였으며, 각 유형의 세부 기술사항은 다음과 같음

[표 2-25] 미세먼지 Passive 저감 기술사양서(안)

| 항목     | 내용               |     |                                            |  |
|--------|------------------|-----|--------------------------------------------|--|
| 기술명    | 식물활용 Passive 시작품 |     |                                            |  |
| 기술의 종류 | 화분형, 통합형         |     |                                            |  |
| 기술의 규격 | 화분형              | 타입1 | 전체규격 : 270mm × 270mm × 90mm                |  |
|        |                  |     | 1unit: 90mm X 90mm X 90mm(3치 포트형)          |  |
|        |                  |     | 재질 : PVC                                   |  |
|        | 타입2              |     | 전체규격 : 810mm × 810mm × 270mm               |  |
|        |                  |     | 1unit: 270mm × 270mm × 270mm(9치 포트형)       |  |
|        |                  |     | 재질 : PVC                                   |  |
|        | 통합형              | 타입1 | 화분부분 : 90mm × 90mm × 90mm(3치 포트형)          |  |
|        |                  |     | 자바라부분 : 270mm × 90mm × 90mm(최대 길이 1,200)   |  |
|        |                  | 타입2 | 화분부분 : 270mm × 270mm × 270mm(9치 포트형)       |  |
|        |                  |     | 자바라부분 : 810mm × 810mm × 270mm(최대 길이 2,500) |  |

#### ㉮ 화분형 Passive 시작품

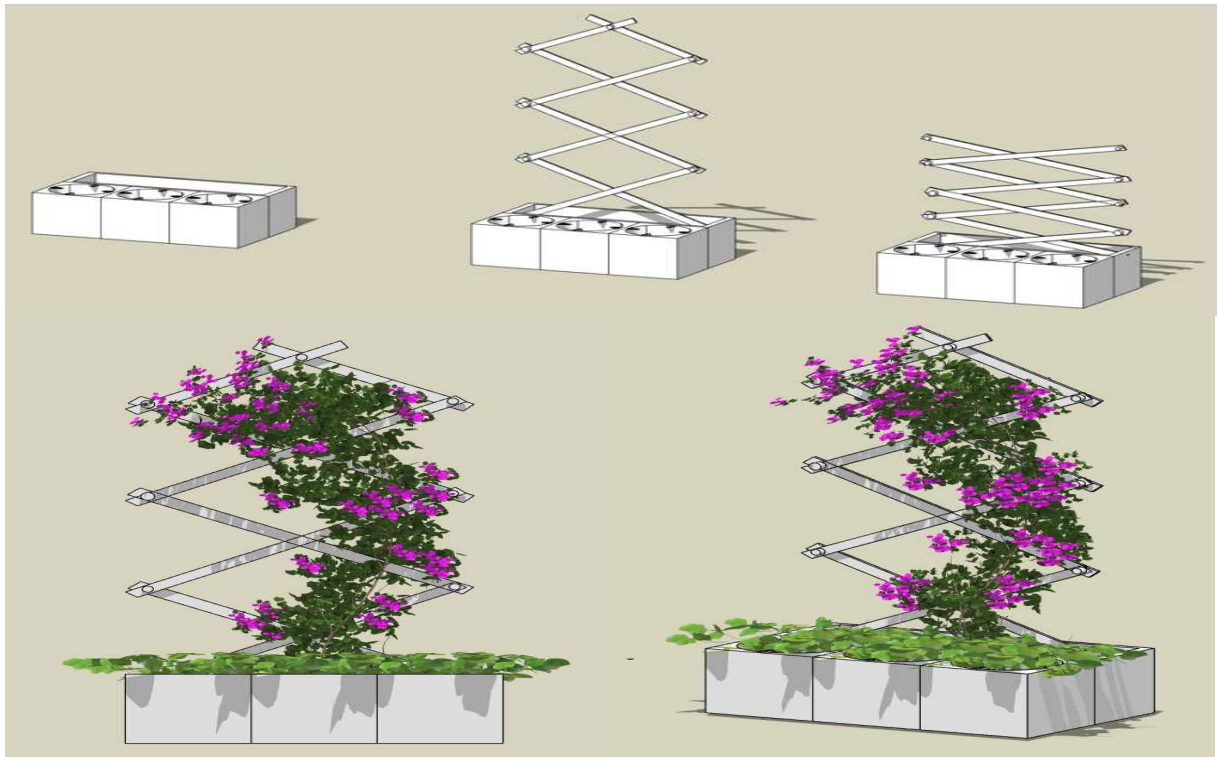
- 화분형 Passive 시작품은 3치 포트(90mm×90mm×90mm)와 9치 포트(270mm×270mm ×270mm) 규격으로 구성되고 각각의 Unit 모듈 9개를 연결하여 하나의 세트로 이루어짐
- 조립성이 우수하여 평면 녹화, 수직녹화가 동시에 가능하고, 시공성이 우수하여 4계절 별로 어울리는 식물을 변경할 수 있음
- 그러나, 관수시설 및 뿌리통풍에 대한 세부적인 디자인은 기술적인 검토와 Active 시스템 연계를 통해 지속적으로 구체화할 필요가 있음



[그림 2-65] 화분형 Passive 시작품 식재 방법 및 녹화 유형

#### ㉔ 통합형 Passive 시작품

- 통합형 Passive 시작품은 3치 포트(90mm×90mm×90mm)와 9치 포트(270mm×270mm ×270mm) 규격으로 구성된 화분 부분과 외부벽면녹화 및 방음벽 식재가 가능한 자바라 부분으로 구성되어 있음
  - (타입 I) 화분부분 : 90mm×90mm×90mm (3치 포트형) + 자바라부분 : 270mm×270mm×270mm (최대 길이 1,200mm)
  - (타입 II) 화분부분 : 270mm×270mm×270mm (9치 포트형) + 자바라부분 : 810mm× 810mm×270mm (최대 길이 2,500mm)
- 조립성이 우수하여 위치 변경이 편리하고, 시공성이 우수하여 4계절별로 어울리는 식물로 변경할 수 있음



[그림 2-66] 통합형 Passive 시작품 식재 방법 및 측면도

#### (라) 식생을 이용한 Passive 시작품 설계

##### ① 기존 제품 유형별 사례 분석

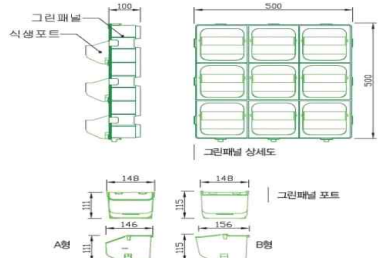
##### ㉕ 국내 제품

##### ○ 유니트형

- 유니트형 벽면녹화란 플라스틱, 철재 틀 안에 경량 토양이나 섬유기반재를 충전하여 녹화 기반으로 만든 후 식물을 식재하는 방법임

- 유니트형의 대표적인 사례로는 한설그린의 'WG3000'이 확인됨. 해당 제품은 유니트본체(그린패널), 커버, 식생 포트로 구성되어 있으며, 벽면부착용 고정 레일을 설치한 후, 레인과 그린 패널을 결합하여 설치함
- 그린패널 각각의 포트에 관수 라인을 연결하여 관수 설비를 구축하고 배수구를 통해 초과 수분을 배출함. 유니트 재질은 합성수지인 고밀도 폴리에틸렌(H.D.F.E)으로 경도, 강도, 내열성 등이 우수하나 가공성은 약함
- 외형상의 유니트 규격은 500 x 500 x T100mm으로 9개의 포트 식재가 가능함

[표 2-26] 한설그린, WG300 사례 분석

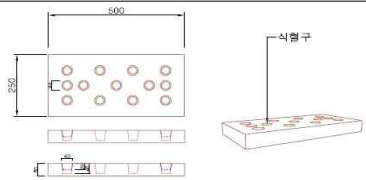
| 제품명 | WG3000                                                                             | 업체 | 한설그린                                                                                 |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 규격  | 500 x 500 x T100mm                                                                 | 재질 | 폴리에틸렌                                                                                |
| 이미지 |  | 도면 |  |

\* 출처: 한설그린([http://www.lafent.com/smt\\_hgreen/index.html](http://www.lafent.com/smt_hgreen/index.html))

#### ○ 매트형

- 매트형 벽면녹화시스템은 우레탄 폼 소재를 이용하여 식재기반을 조성하고 각각의 식재 홈(구멍)에 식물을 식재하는 방법임
- 매트형의 대표적인 사례로는 한설그린의 'G-매트'가 확인됨. 해당 제품은 천연원료를 사용하여 고형화 시킨 형태이며 최대 수분 포화 시 무게가 40kg/m<sup>2</sup> 정도로 가벼운 식재기반재로 구성되어 있음
- 식생기반재가 되는 매트 자체에 배양토 성분이 90% 이상 함유되어 있어 식물의 생장에 유리함
- 규격은 500 x 250 x T50 mm으로 m<sup>2</sup>당 8개의 매트 설치가 가능함

[표 2-27] 한설그린, G-매트 사례 분석

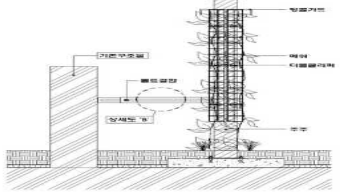
| 제품명 | G-매트                                                                                | 업체 | 한설그린                                                                                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 규격  | 500 x 250 x T50mm                                                                   | 재질 | 특수섬유, 합성수지 외                                                                          |
| 이미지 |  | 도면 |  |

\* 출처: 한설그린([http://www.lafent.com/smt\\_hgreen/index.html](http://www.lafent.com/smt_hgreen/index.html))

○ 메쉬형

- 메쉬형 벽면녹화시스템은 격자형 메쉬를 등반보조재로 사용하여 벽면이나 입면을 덩굴식물로 피복하는 방법임
- 녹화하고자 하는 벽면 하부에 자연지반을 확보한 경우, 벽면에 직접 메쉬를 설치하여 녹화하였고 자연지반이 없는 경우, 녹화용 패널을 별도로 설치함
- 메쉬형의 대표적인 사례로는 한국도시녹화의 'GWS-KM'이 확인됨. 해당 제품은 넓은 면적의 벽면에 시공 및 설치가 간편하며 등반형 식물이 원활하게 성장할 수 있는 지지대 역할을 함
- 외벽의 불규칙한 형태로 인해 발생하는 식물 생육의 피해를 감소시킬 수 있으며, 메쉬를 따라 식물이 자라는 자연스러운 경관을 연출할 수 있음
- 메쉬는 분체도장된 아연으로 제작되며, 표준 메쉬의 크기는 W2000 x H1160mm, Ø3(mm)규격으로 격자(망목)의 간격은 77 x 77mm임

[표 2-28] 한국도시녹화, GWS-KM 사례 분석

| 제품명 | GWS-KM                                                                             | 업체 | 한국도시녹화                                                                                |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 규격  | H600~3600 x W1160, Ø3mm                                                            | 재질 | 스테인레스 메쉬                                                                              |
| 이미지 |  | 도면 |  |

\* 출처: 한국도시녹화([http://www.biotope.co.kr/home/new\\_index.asp](http://www.biotope.co.kr/home/new_index.asp))

㉠ 국외 제품

○ 포켓형

- 포켓형 벽면녹화 시스템은 다양한 소재를 활용하여 주머니 형태의 식재 기반을 제작하고 식물을 식재하는 방법으로 식물의 관리보수가 용이함
- 중국 SUNSHINE사의 제품인 Wall pocket Planter Bag는 부직포와 같은 재료를 이용하여 포켓을 제작한 후 내부에 식물을 식재하여 녹화하는 제품임
- 폴리에스테르 펠트 재질로 보수성을 가지며, 포켓 내부로 식물의 뿌리 성장 및 식생용 토사 수납이 가능함. 포켓 하나의 규격은 19.6 × 19.6 inch임

[표 2-29] 중국 SUNSHINE, Wall pocket Planter Bag 사례분석

|     |                                                                                   |                                                                                    |              |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 제품명 | Wall pocket Planter Bag                                                           | 업체                                                                                 | SUNSHINE(중국) |
| 규격  | 50 x 50cm / 19.6 x 19.6inch                                                       | 재질                                                                                 | 폴리에스테르 펠트    |
| 이미지 |  |  |              |

\* 출처: Sunshine Garden(<http://www.fabricpot.net/>)

- 중국 ABA 사의 Vertical Gardening Wall Hanging Pot Vertical Hook Pots는 포트케이스를 이용하여 화분을 수직 공간에 고정하는 방식의 제품임
- 가벼운 플라스틱 재질로 제작되어 시공에 용이하고 탈부착형 구조로서 교체 시 용이하다는 특징이 있음
- 포트 하나의 규격은 12 × 15 × 18cm로 중형 크기의 식물을 식재하여 초기 피복율을 높일 수 있음

[표 2-30] 중국 SUNSHINE, Wall pocket Planter Bag 사례분석

|     |                                                                                     |                                                                                      |      |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 제품명 | Vertical Gardening Wall Hanging Pot<br>Vertical Hook Pots                           | 업체                                                                                   | ABA  |
| 규격  | 포트사이즈 12 x 15 x 18cm                                                                | 재질                                                                                   | 플라스틱 |
| 이미지 |  |  |      |

\* 출처: <https://www.china-aba.com/product/economical-vertical-gardens-vertical-garden-hook-pots-vertical-garden-modular>

## ② 시제품 디자인(안)에 따른 적용 제품 유형 및 디자인 모델 결정

### ㉠ 식생 모듈 제품 유형별 설계(안) 도출

- 기존 벽면녹화 제품의 사례분석 결과를 활용하여 식생 모듈 제품 유형들의 구조, 재질 등을 고려한 미세먼지 저감 Passive 시작품 설계(안)을 도출함
- 기존 벽면녹화 제품 유형 중 포켓형과 매트형의 경우, 제품 자체가 기반재 역할을 하여 식물을 바로 끼워 넣는 방식으로 다른 유형과는 구성 재질이 상이하여 설계(안) 도출에서 제외하였음

○ 유니트형

- 유니트형은 1차년도 연구 결과를 반영하여 가로 27cm × 세로 27cm × 높이 9cm의 규격으로 설계함
- 소재는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 시공 시 발생하는 하중 문제를 최소화하였으며, 한 번에 9개의 식물 식재가 가능하여 설치에 용이함
- 개별 식재로 4계절 어울리는 수종 교체가 가능하며, 수직녹화와 수평녹화가 동시에 가능한 구조로 다양한 공간에 적용될 수 있음

[표 2-31] 유니트형 설계(안)

| 유형 | 유니트형                                                                                                       |                                      |                                                                                          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 규격                                                                                                         | 270mm x 270mm x 90mm(8cm~10cm 화분 적용) |                                                                                          |
|    | 재질                                                                                                         | HDPE(고밀도 폴리에틸렌)                      |                                                                                          |
| 장점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 소재로 인한 무게 최소화</li> <li>• 개별 식재 가능</li> <li>• 공간 적용 다양성</li> </ul> |                                      | 단점                                                                                       |
|    |                                                                                                            |                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 훼손의 위험</li> <li>• Active 시스템과 연계 어려움</li> </ul> |

○ 포트형 Type 1

- 포트형 Type 1은 기존 가로 10cm × 세로 10cm × 높이 20cm의 규격으로 설계됨
- 소재는 스테인레스 강판(STS)으로, 부식 및 파손의 위험을 최소화하였으며, 개별 포트를 조립을 통해 식재 다양화를 통한 디자인 표현이 가능함
- 포트 뒷면은 고리 형태로 되어있어 벽면과의 부착이 용이하며 식물 잎과 Active 시스템에서 발생하는 정화된 공기의 접촉이 원활함

[표 2-32] 포트형 Type 1 설계(안)

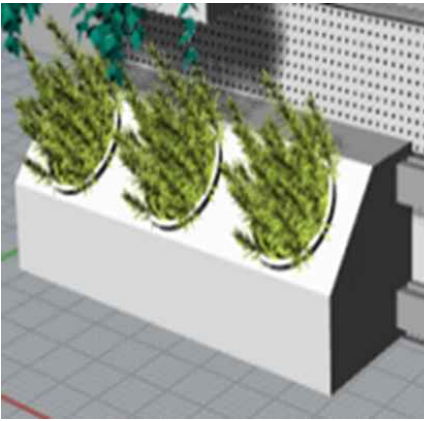
| 유형 | 포트형 Type1                                                                                                            |                                       |                                                                                                                |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 규격                                                                                                                   | 100mm x 100mm x 200mm(8cm~10cm 화분 적용) |                                                                                                                |
|    | 재질                                                                                                                   | STS(스테인레스 강판)                         |                                                                                                                |
| 장점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부식 및 파손의 위험 최소화</li> <li>• 개별 식재 가능</li> <li>• Active 시스템과 연계 가능</li> </ul> |                                       | 단점                                                                                                             |
|    |                                                                                                                      |                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 벽면형으로만 설치 가능</li> <li>• 식물 생장 시, 상-하 식재된 식물에 서로 영향을 줄 수 있음</li> </ul> |

○ 포트형 Type 2

- 포트형 Type 2는 가로 10cm × 세로 10cm × 높이 20cm의 규격으로 설계됨

- 소재는 스테인레스 강판(STS)으로, 부식 및 파손의 위험을 최소화하였으며, 개별 포트의 조립방식에 따라 식재 다양화를 통한 디자인 표현이 가능함
- 레일 형태의 구조물을 벽면에 설치하고 포트 뒷면의 고정홈과 연결하여 부착이 가능함
- 식재된 식물 간에 상호 영향을 주지 않도록 일정 각도를 갖는 구조이며, 식물 잎과 Active 시스템에서 발생하는 정화된 공기의 접촉이 원활함

[표 2-33] 포트형 Type 2 설계(안)

|  | 유형 | 포트형 Type2                                                                                                            |    |                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                    | 규격 | 100mm x 100mm x 200mm(8cm~10cm 화분 적용)                                                                                |    |                                                                                                       |
|                                                                                    | 재질 | STS(스테인레스 강판)                                                                                                        |    |                                                                                                       |
|                                                                                    | 장점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부식 및 파손의 위험 최소화</li> <li>• 개별 식재 가능</li> <li>• Active 시스템과 연계 가능</li> </ul> | 단점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 벽면형으로만 설치 가능</li> <li>• 보조 구조물(레일)이 필수적으로 설치되어야 함</li> </ul> |

#### ○ 매쉬 통합형

- 매쉬 통합형은 가로 27cm × 세로 9cm × 높이 150cm의 규격으로 설계됨
- 소재는 스테인레스 강판(STS)으로, 부식 및 파손의 위험을 최소화하였으며, 포트 부분과 자바라형태의 매쉬가 통합된 구조임
- 포트와 매쉬가 통합되어 있어 지면 식물과 덩굴성 식물을 한번에 식재할 수 있고 계절별로 다양한 수종 변화에 용이함

[표 2-34] 매쉬 통합형 설계(안)

|  | 유형 | 매쉬 통합형                                                                                                  |    |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                     | 규격 | 270mm x 90mm x 1,500mm(최대)                                                                              |    |                                                                         |
|                                                                                     | 재질 | STS(스테인레스 강판), 목재                                                                                       |    |                                                                         |
|                                                                                     | 장점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 동시에 다양한 수종 적용 가능(초화+덩굴)</li> <li>• 부식 및 파손의 위험을 최소화</li> </ul> | 단점 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Active 시스템과 연계가 어려움</li> </ul> |

#### ④ 디자인 모델 결정을 위한 설계(안) 평가

- Passive 시작품 제작 업체와의 논의 과정과 벽면녹화 시스템 개발 관련 문헌자료를 참고하여 미세먼지 저감장치의 Passive 시작품 설계(안) 결정 평가지표를 제시함
- 평가지표는 미세먼지 저감장치의 지속적인 운영을 고려한 장치 설치 및 운영 효율성 평가, 식물 식재 및 공간연출을 고려한 녹화 효율성 평가로 구분됨
- 장치 설치 및 운영 효율성 평가는 외부 공간에서의 지속적인 운영을 위해 진행되는 평가로 경제성, 시공성, 유지관리 용이성 등을 평가지표로 제시함
- 녹화 효율성 평가는 다양한 녹화 경관을 연출하기 위해 진행되는 평가로 식재 용이성, 식물 다양성 등의 평가지표로 제시함

[표 2-35] Passive 시작품 유형 결정 평가 지표 항목

| 평가 유형 분류          | 평가 지표 내용 |                                           |
|-------------------|----------|-------------------------------------------|
| 장치 설치 및 운영 효율성 평가 | 연계성      | Active 시스템과 연계가 용이한지 평가                   |
|                   | 시공성      | 미세먼지 저감장치에 설치할 경우 발생하는 소요 인력 및 비용         |
|                   | 유지관리 용이성 | 지속적인 관리 및 훼손 시 교체가 용이한지 평가                |
| 녹화 효율성 평가         | 식재 용이성   | 식물을 식재하거나 고사한 식물을 교체할 경우 용이한지 평가          |
|                   | 식물 다양성   | 다양한 식물을 식재하여 식물 다양성이 높은 경관을 연출 할 수 있는지 평가 |

- 벽면녹화 유형별 특징에 따른 Passive 시작품 유형 선정 평가를 진행하였으며, 해당 평가 정도에 따라 상, 중, 하로 구분하여 1~3점의 배점을 부여함

[표 2-36] Passive 시작품 유형 선정 평가

| 녹화 유형     | 장치 설치 및 운영 효율성 평가 |   |   |         |   |   |      |   |   | 녹화 효율성 평가 |   |   |     |   |   | 총합 |
|-----------|-------------------|---|---|---------|---|---|------|---|---|-----------|---|---|-----|---|---|----|
|           | 연결성               |   |   | 시공성     |   |   | 유지관리 |   |   | 식재        |   |   | 식재  |   |   |    |
|           | (Active 연계)       |   |   | (설치 과정) |   |   | 용이성  |   |   | 용이성       |   |   | 다양성 |   |   |    |
|           | 3                 | 2 | 1 | 3       | 2 | 1 | 3    | 2 | 1 | 3         | 2 | 1 | 3   | 2 | 1 |    |
| 유니트형      |                   | 0 |   | 0       |   |   |      |   | 0 | 0         |   |   | 0   |   |   | 12 |
| 포트형Type 1 | 0                 |   |   | 0       |   |   | 0    |   |   | 0         |   |   | 0   |   |   | 15 |
| 포트형Type 2 |                   | 0 |   |         | 0 |   | 0    |   |   |           | 0 |   | 0   |   |   | 12 |
| 매쉬 통합형    |                   |   | 0 |         | 0 |   |      | 0 |   | 0         |   |   | 0   |   |   | 11 |

- 유니트형의 경우, 고밀도 폴리에틸렌 소재로 무게가 가벼워 설치 시 용이하고, 개별 화분을 식재할 수 있는 구조로 되어 있어 다양한 수종으로 구성이 가능함
- 그러나, 스테인레스 소재와 비교하여 파손의 위험이 있으며 Active 시스템에서 발생하는 공기와 식물 잎 표면의 접촉이 어려움
- 이에 따라 시공성과 식재용이성, 식물 다양성에서 평균적으로 높은 배점이 부여되었으나 Active 시스템과의 연계성, 유지관리 용이성 항목에서는 평균적으로 낮은 배점이 부여되어 총 12점으로 평가됨

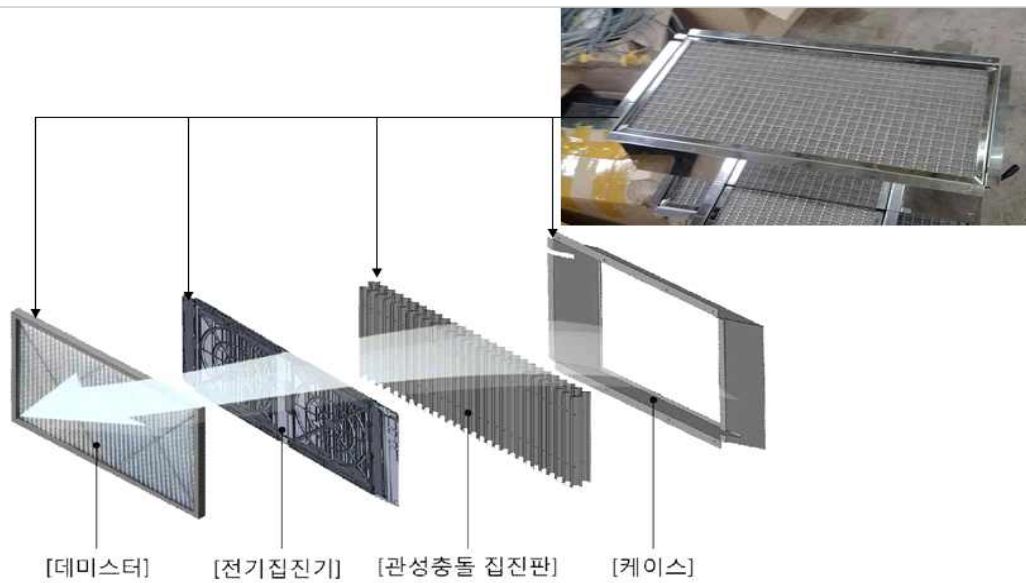
- 포트형 Type 1의 경우, 스테인레스 강판 소재로 파손의 위험이 적으며, 개별 화분 형태로 되어있어 다양한 수종 구성이 가능함. 또한, 포트 뒤쪽으로 고리형 구조가 설치되어 있어 Active 시스템과의 연계가 용이함
- 이에 따라 모든 항목에서 높은 배점이 부여되어 총 15점으로 평가됨
- 포트형 Type 2의 경우, 스테인레스 강판 소재로 파손의 위험이 적으며 개별 화분 형태로 되어있어 다양한 수종 구성이 가능함
- 그러나, 설치 시 보조 구조물인 레일이 필수적으로 설치되어야 하며 Active 시스템과 연계 시 보조구조물, 모듈을 모두 설치한 후 식물을 식재해야하는 번거로움이 있음
- 이에 따라 유지관리 용이성, 식물 다양성에서 평균적으로 높은 배점이 부여되었으나 Active 시스템과의 연계성, 시공성, 식재 용이성 항목에서는 평균적으로 낮은 배점이 부여되어 총 12점으로 평가됨
- 매쉬 통합형의 경우, 초화류와 덩굴식물을 모두 쉽게 적용할 수 있으며 개별 화분 형태로 되어있어 다양한 수종 구성이 가능함
- 그러나, 스테인레스 강판 소재와 목재가 함께 구성되어 있어 목재 소재 부분의 파손 위험이 있으며 Active 시스템에서 1차 정화되어 들어오는 공기가 식물 잎 표면에 접촉하기 어려움
- 이에 따라 식재 용이성, 식물 다양성에서 평균적으로 높은 배점이 부여되었으나 Active 시스템과의 연결성, 유지관리 용이성, 시공성 항목에서 평균적으로 낮은 배점이 부여되어 총 11점으로 평가됨
- 따라서, 가장 높은 점수로 평가된 포트형 Type 1을 Passive 시작품 설계(안)으로 결정함

## (마) Passive 시작품 제작

### ① Passive 시작품 모델링

#### ㉠ Passive 시작품 설계(안) 선정 및 3D 모델링

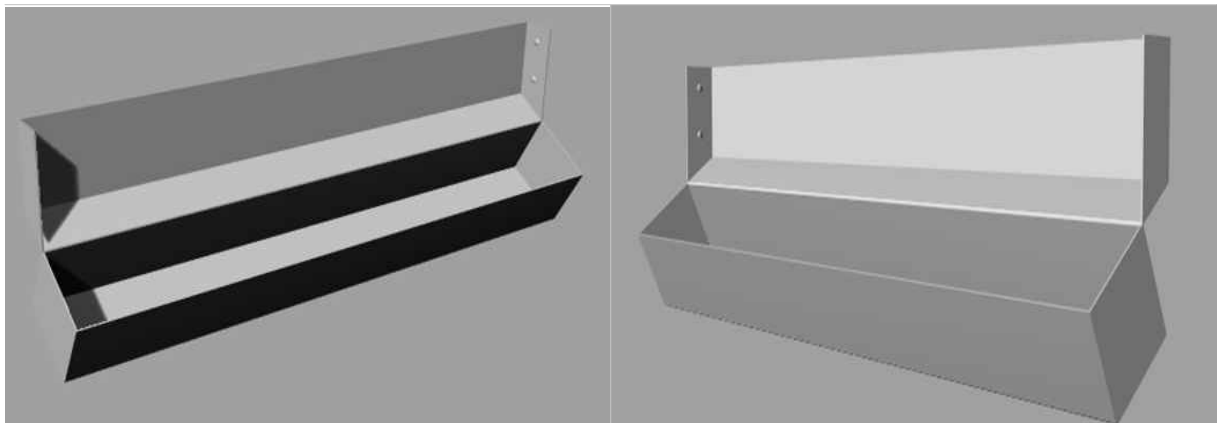
- Passive 시작품의 제작을 위해 Active 시스템과의 구조적 연결과 식물생육 지속성을 위한 세부적인 구조 모델링이 필요함
- Active 시스템은 미세먼지를 집진하여 제거하는 장치로 전기적 안전성과 빗물 유입 방지 등을 위해 판 형태의 융합형 집진필터(데미스터, 전기집진기, 관성충돌 집진판)로 제작됨
  - 데미스터, 전기집진기, 관성충돌 집진판을 10mm의 간격으로 케이스에 결합



[그림 2-67] Passive 시작품 3D 모델링

※ 본 연구에 참여하는 공동기관 1의 2차년도 연구개발 내용 참고(Active 제거 요소기술 개발 및 핵심 부품 제작)

- 이와 같은 판 형태의 Active 시스템에 Passive 시작품을 안정적으로 부착시키기 위해 Passive 시작품이 고정되는 뒷면을 넓게 모델링함
- 미세먼지 저감장치에 부착하여 설치 시, Passive 시작품에 식물 화분 여러 개가 한 번에 식재될 수 있도록 길이를 길게 함
- 또한, 식재 시 안정감을 주어 식물 식재의 효율을 높이고, 관수 시 초과된 물이 내부에 고이지 않도록 30도의 각도를 갖는 구조로 함

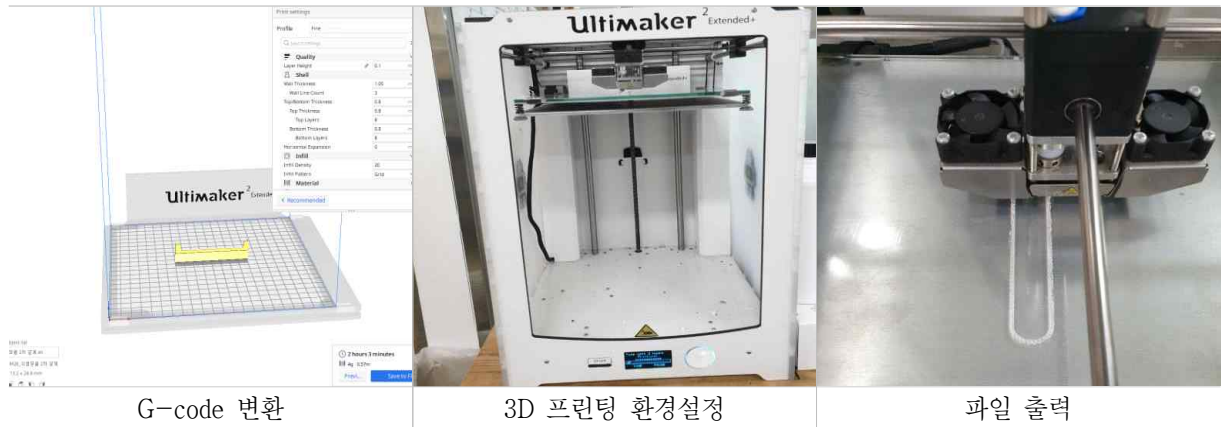


[그림 2-68] Passive 시작품 3D 모델링

#### ㉔ 3D 출력 및 구조 검토

- 3D 프린터 출력을 활용하여 시작품 설계(안)의 구조를 검토함
- 3D 프린터 출력은 저층식으로 필라멘트를 겹겹이 쌓아 입체형상을 만들어내는 것으로 입체적인 구조상의 문제점을 검토할 수 있음

- 3D 프린터로 출력하기 위해서는 출력할 파일(모델링 파일)을 3D 프린터와 연동되는 G-code로 변환 하여 진행해야 함
- 파일 변환 후, 3D 프린터 레벨링(수평)을 조절 후 필라멘트가 안정적으로 부착되도록 적정 출력 환경을 설정해야 함
- 본 연구에서 활용되는 3D 프린터의 출력 가능 사이즈를 고려하여, 실질적으로 제작되는 시작품의 10%에 해당하는 크기로 모델링을 축소함(가로 8cm × 세로 1cm × 높이 2.5cm)



[그림 2-69] 3D 프린팅 출력 과정

## ② 시작품 설계(안) 검토를 통한 시작품 제작

### ㉞ 시작품 설계(안) 구조 검토

- 3D프린팅 출력물에 대한 검토 결과, Active 시스템에서 1차로 정화되어 불어나오는 공기가 식물 앞에 직접적으로 접촉되기 어려운 것으로 나타남
- 식물이 식재되는 부분은 화분을 끼워넣기 편한 구조로 하였으나, 장치 설치 후 식물의 도난 위험성이 있음
- 따라서, 미세먼지 저감장치에 부착되는 부분을 일부 절개하여 식재된 식물의 앞 표면에 Active 시스템에서 불어나오는 공기가 접촉될 수 있게 변경함
- 또한, ‘ㄱ’ 형태의 판을 식재부 앞쪽에 설치하여 식재된 식물의 도난을 방지하도록 함

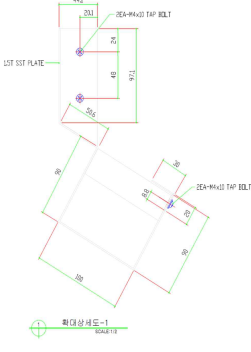


[그림 2-70] 구조적 검토사항을 반영한 3D 프린팅 출력물

#### ㉞ 시작품 제작

- 구조적 검토 사항을 반영하여 다음과 같이 최종 Passive 시작품을 제작함

[표 2-37] 미세먼지 Passive 저감 시작품 세부사항

| 항목       | 내용                                                                                                                                                                     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제품명      | 식물 활용 Passive 시작품                                                                                                                                                      |
| 유형       | 포트형                                                                                                                                                                    |
| 소재       | 1.5 SST PLATE(스테인레스 스틸 판)                                                                                                                                              |
| 제품 규격    | 가로 800 세로 150 높이 250 (mm)                                                                                                                                              |
| 도면 / 이미지 |   |

#### (바) 시작품 Test-bed 적용 및 처리성능 모니터링

##### ① 미세먼지 저감장치 적합 수종 선정 및 Test-bed 적용 식재 계획

##### ㉞ 적합 수종 선정

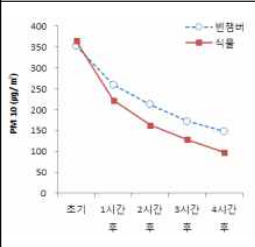
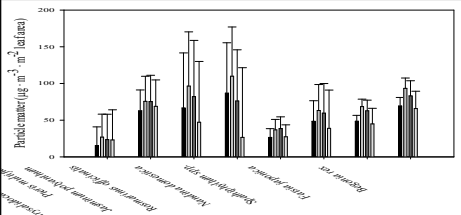
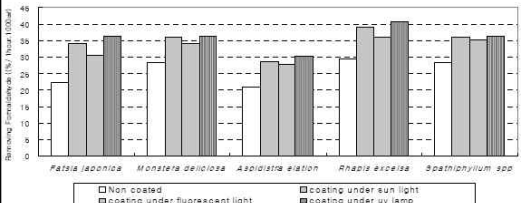
- 문헌 고찰 및 전문가 의견 수렴을 통한 도입 가능 수종 후보 도출
  - 1차년도 연구 결과, 교목류와 관목류를 중심으로 미세먼지저감 수종을 제시하였음. 그러나, Passive 시스템의 규모와 형태를 고려하여, 소형의 초화 및 덩굴류 식재가 적합하다고 판단함
  - 이에 따라 실질적으로 미세먼지 저감장치에 도입 가능한 초화 및 덩굴류 수종 후보를 도출하기 위해 산림청에서 제시하는 ‘미세먼지 저감을 위한 도시숲 조성 수종’과 농촌진흥청에서 제시하는 ‘실내공기 정화 식물’을 참고하여 적용 수종을 검토함
  - 확인되는 수종 중 실질적인 실험을 통해 시간당 공기정화 효과가 규명된 식물을 중심으로 1차 후보를 도출함

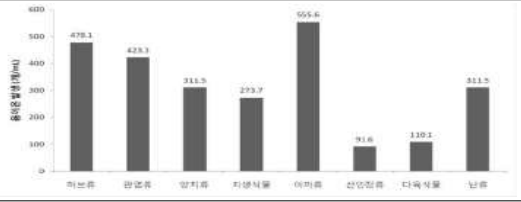
[표 2-38] 산림청, 농촌진흥청의 미세먼지 저감 및 실내 공기정화 효과 수종

| 기관        | 구분 | 수종                                                                                                                                                       |
|-----------|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 산림청       | 초화 | 개미취, 금계국, 기린초, 노란꽃창포, 능소화, 돌나물, 돌단풍, 두메부추, 등굴레, 맥문동, 모람, 물레나물, 비비추, 빈카, 사철나무, 사초류, 속새, 수크령, 옥잠화, 타래붓꽃, 털머위, 톱풀, 패랭이꽃, 양지꽃, 감국, 구절초, 꽃잔디, 노루오줌, 배초향, 수호초, |
|           | 덩굴 | 덩굴장미, 등나무, 마삭줄, 송악, 인동, 으름덩굴, 으아리, 노박덩굴, 담쟁이덩굴, 줄사철, 아이비                                                                                                 |
| 농촌<br>진흥청 | 초화 | 백량금, 산호수, 부처손, 넉줄고사리, 고사리삼, 탈란드시아, 안스리움, 라벤더, 제라늄, 로즈마리, 레몬밤, 산호수, 이끼류, 털머위, 심비디움, 호접란, 애플민트, 파키라, 스킨답서스                                                 |
|           | 덩굴 | 마삭줄, 아이비, 담쟁이덩굴, 으름덩굴, 으아리, 송악, 인동덩굴, 노박덩굴, 줄사철                                                                                                          |

\* 출처: 산림청, 2018, 미세먼지 저감을 위한 도시숲 조성관리 지침(보도자료), 농촌진흥청 국립원예특작과학원, 2014, 에코힐링을 위한 실내공기 정화 식물

[표 2-39] 식물을 활용한 미세먼지 저감 관련 연구 문헌 고찰

| 문헌명                                       | 실험방법                                                                                                                                                      | 실험결과                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 입면녹화용 덩굴식물의<br>미세먼지 저감 능력<br>평가(2018)     | <ul style="list-style-type: none"> <li>입면녹화용 덩굴식물인 담쟁이, 줄사철, 인동, 마삭줄, 송악으로 식물 선정</li> <li>식물이 있는 밀폐된 아크릴 챔버에 미세먼지 입자를 주입시켜 1시간 간격으로 미세먼지 질량 측정</li> </ul> |  <ul style="list-style-type: none"> <li>식물이 있는 챔버의 미세먼지 제거량이 높았으며 시간이 증가할수록 제거량이 높음</li> </ul>                            |
| 실내식물의 공기 중의<br>미세먼지 제거 효율<br>규명<br>(2016) | <ul style="list-style-type: none"> <li>미세먼지 입자를 압축공기로 비산시켜 4시간동안 입자를 낙하시킨 후 식물이 들어있는 챔버에 처리하여 2시간 간격으로 미세먼지 제거량 측정</li> </ul>                             |  <ul style="list-style-type: none"> <li>실내식물은 공기 중의 미세먼지 제거 효과가 있었으며, 단위면적당 미세먼지 제거효율은 아이비와 수염 탈란드시아가 우수</li> </ul>      |
| 실내공기 자연정화를<br>위한 우수정화식물의<br>개발<br>(2004)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>챔버에 실험 대상 식물 (30여가지)을 3-5주 동안 넣고 하루 6시간동안 고농도의 공기오염원 주입 후 농도 변화를 분석</li> </ul>                                     |  <ul style="list-style-type: none"> <li>1차실험결과 우수정화식물로 선정된 수종에 대하여 포름알데히드 제거능 측정 결과, 약 30%의 제거 효율이 높은 것으로 나타남</li> </ul> |

| 문헌명                                       | 실험방법                                                                                     | 실험결과                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 자생 및 화훼식물의<br>환경개선 기능성 효과<br>규명<br>(2014) | <ul style="list-style-type: none"> <li>식물종을 8그룹으로 분류하여 공기 중의 음이온과 상대습도 증가량 분석</li> </ul> |  <ul style="list-style-type: none"> <li>이끼류, 허브류, 관엽류 순으로 음이온 발생과 상대습도 증가량이 높게 나타남</li> </ul> |

- 1차 선정 수종은 성상에 따라 수호초, 털머위, 산호수, 부처손, 만병초, 자금우 등의 초화류와 줄사철, 아이비, 마삭줄, 인동덩굴 등의 덩굴류가 확인됨

[표 2-40] Passive 시작품 도입 가능 수종 1차 선정

| 성상  | 수종명  | 학명                                               | 시간당 공기정화 효과                                                             | 참고문헌                            |
|-----|------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 초화류 | 수호초  | <i>Pachysandra terminalis</i>                    | 포름알데히드 제거량: 2.06mg/<br>음이온 발생량: 473mL                                   | 농촌진흥청<br>공기정화식물<br>보도자료         |
|     | 털머위  | <i>Farfugium japonicum</i>                       | 음이온 발생량: 397mL<br>이산화탄소 감소량: 79.1                                       | 농촌진흥청<br>공기정화식물<br>보도자료         |
|     | 산호수  | <i>Ardisia pusilla</i>                           | 포름알데히드 제거량: 0.86mg<br>음이온 발생량: 407<br>이산화탄소 감소량: 59.2                   | 농촌진흥청<br>공기정화식물<br>보도자료         |
|     | 부처손  | <i>Selaginella tamariscina</i>                   | 포름알데히드 제거량: 9.68mg                                                      | 농촌진흥청<br>공기정화식물<br>보도자료         |
|     | 만병초  | <i>Rhododendron brachycarpum</i>                 | 음이온 발생량: 536.6                                                          | 자생 및 화훼식물의<br>환경개선 기능성 효과<br>구명 |
|     | 자금우  | <i>Ardisia japonica</i>                          | 음이온 발생량: 501.4                                                          | 자생 및 화훼식물의<br>환경개선 기능성 효과<br>구명 |
| 덩굴류 | 줄사철  | <i>Euonymus fortunei</i> var.<br><i>radicans</i> | 미세먼지 제거량: 38μg(4시간)                                                     | 입면녹화용<br>덩굴식물의 미세먼지<br>저감 능력 평가 |
|     | 아이비  | <i>Hedera helix</i>                              | 포름알데히드 제거량: 1.24mg<br>음이온 발생량: 429<br>이산화탄소 감소량: 37.6<br>미세먼지 제거량: 38μg | 농촌진흥청<br>공기정화식물<br>보도자료         |
|     | 마삭줄  | <i>Trachelospermum asiaticum</i>                 | 포름알데히드 제거량: 2.06mg<br>음이온발생량: 473mL                                     | 농촌진흥청<br>공기정화식물<br>보도자료         |
|     | 인동덩굴 | <i>Lonicera japonica</i>                         | 미세먼지 제거량: 45μg(4시간)                                                     | 입면녹화용<br>덩굴식물의 미세먼지<br>저감 능력 평가 |

○ 우선순위 평가 기준에 따른 도입 가능 수종 2차 선정

- 미세먼지 저감에 영향을 미치는 식물의 영향 요인 5가지 항목(식물종류, 잎 면적, 잎 표면의 거칠기, 잎 복잡성, 잎 가장자리 형태)을 기준으로 평가지표를 설정하여 2차 수종 선정을 진행함
- (식물 종류) 미세먼지가 발생되는 겨울철에도 생육이 가능한 상록수를 2점, 낙엽수는 1점으로 평가함
- (잎 면적) 두꺼운 왁스층을 가지며, 피침형의 잎이 입자상 물질 흡착력이 높으므로 침엽수는 2점, 활엽수는 1점으로 평가함
- (잎 표면 거칠기) 거친 잎 표면을 가진 잎이 미세먼지 저감 효과가 높으므로 표면에 털이 있는 경우 5점, 굴곡이 있는 경우 1점으로 평가함
- (잎 복잡성) 잎의 구조 및 형태적 특성이 복잡할수록 미세먼지 저감 능력이 높으므로, 3중엽의 식물은 5점, 단일엽의 식물은 1점으로 평가함
- (잎 가장자리 형태) 잎의 가장자리는 밋밋한 모양보다는 톱니 모양의 잎이 표면에 흡착되는 비율이 높아지므로 톱니모양의 잎은 5점, 밋밋한 모양 잎은 1점으로 평가함

[표 2-41] 미세먼지 저감에 영향을 주는 수종 특성 관련 평가 (도입 가능 수종 2차 선정)

| 구분 | 식물종 | 식물종류 |    | 잎면적 |    | 잎 표면의 거칠기 |    |    |    |    | 잎 복잡성 |     |     |     |     | 잎 가장자리 형태 |      |      |    |    | 총합 |
|----|-----|------|----|-----|----|-----------|----|----|----|----|-------|-----|-----|-----|-----|-----------|------|------|----|----|----|
|    |     | 상록   | 낙엽 | 침엽  | 활엽 | 털         | 광택 | 왁스 | 수지 | 굴곡 | 3중엽   | 2중엽 | 손바닥 | 3출엽 | 단일엽 | 톱니        | 2중톱니 | 둔한톱니 | 물결 | 밋밋 |    |
|    |     | 2    | 1  | 2   | 1  | 5         | 4  | 3  | 2  | 1  | 5     | 4   | 3   | 2   | 1   | 5         | 4    | 3    | 2  | 1  |    |
| 초화 | 수호초 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     | 0   |     |     |           |      | 0    |    |    | 13 |
|    | 털머위 |      | 0  |     | 0  | 0         |    |    |    |    |       |     |     | 0   |     |           |      |      |    | 0  | 10 |
|    | 산호수 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     | 0   |     |     | 0         |      |      |    |    | 15 |
|    | 부처손 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     |     | 0   |     |           |      |      |    | 0  | 10 |
|    | 만병초 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     | 0   |     |     |           |      |      |    | 0  | 11 |
|    | 자금우 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     |     | 0   |     |           |      | 0    |    |    | 12 |
| 덩굴 | 줄사철 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     |     | 0   |     |           |      | 0    |    |    | 12 |
|    | 아이비 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     |     | 0   |     |           |      |      | 0  |    | 11 |
|    | 마삭줄 | 0    |    |     | 0  |           | 0  |    |    |    |       |     |     | 0   |     |           |      |      |    | 0  | 10 |

○ 사계절 외부공간 적용성 및 관리 용이성에 따른 최종 수종 선정

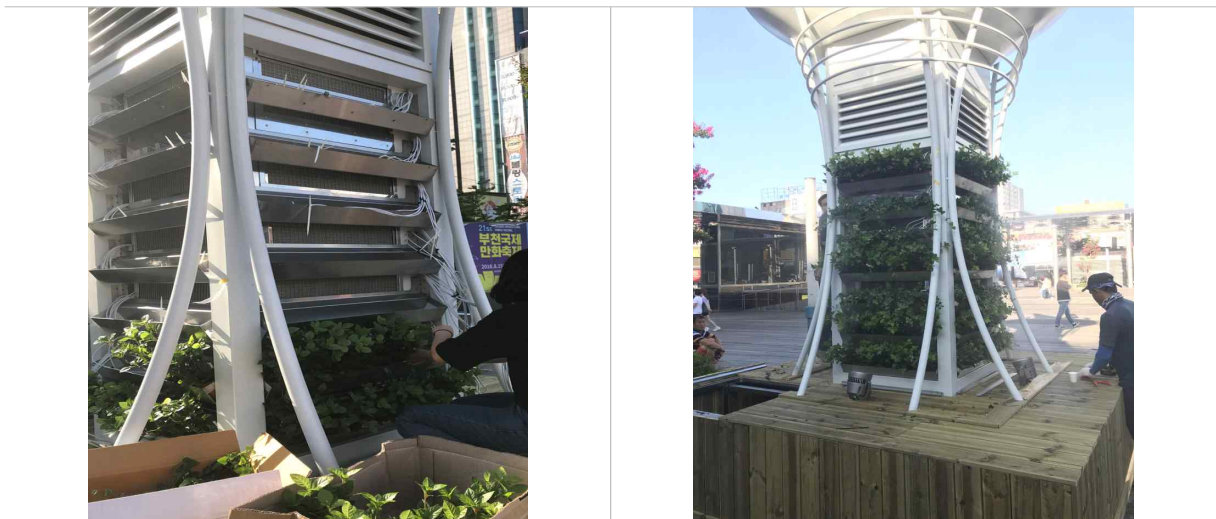
- 2차로 선정된 상위 1, 2위의 초화류와 덩굴류를 중심으로 식물의 생육 특징(내건성, 내한성, 내서성, 사계절성 등)과 유지관리 용이성을 검토하여 최종 도입 가능 수종을 선정함
- 초화류는 산호수와 수호초를 대상으로 검토하였으며 그 결과, 수호초와 비교하여 내공해성과 내건성이 상대적으로 우수한 산호수를 선정하였음
- 덩굴류는 줄사철과 아이비를 대상으로 검토하였으며 줄사철의 경우, 지속적인 전정이 필요한 포복성 관목 수종으로 Passive 시작품 도입에는 한계가 있다고 판단하여 아이비를 선정하였음
- 따라서, 전체 평가 과정을 통해 산호수와 아이비를 미세먼지 저감장치 최종 도입 수종으로 선정하였음

[표 2-42] 식물 생육 특성에 따른 Passive 시작품 최종 도입 가능 수종 선정

| 구분 | 수종  | 생육특성                                             | 관리<br>용이성 | 구분 | 수종  | 생육특성                                       | 관리<br>용이성 |
|----|-----|--------------------------------------------------|-----------|----|-----|--------------------------------------------|-----------|
| 초화 | 산호수 | 내음성에 강함(자외선에 약함)<br>내한성 약함<br>내공해성이 강함<br>건조에 강함 | ○         | 덩굴 | 줄사철 | 반상록성으로 내음성이 강함<br>건조에 강함<br>내한성 강함         | X         |
|    | 수호초 | 내음성이 강함<br>건조에 약함<br>내한성 강함<br>직사광선에 약함          | ○         |    | 아이비 | 내음성 강함<br>건조에 약함<br>중부지방에서 월동 가능<br>내한성 보통 | ○         |

#### ㉔ Test-bed 적용 식재 계획

- 타워형 미세먼지 저감장치의 한쪽 면을 기준으로 Passive 시작품을 설치할 경우, 25cm 간격으로 총 7개가 설치됨
- 미세먼지 저감장치는 4면으로 구성되어 있어 총 28개의 Passive 시작품 설치가 가능하며, 하나의 Passive 시작품에 8개의 식물이 식재되므로 총 식재 식물 수량은 총 224개임
- 총 식재 수량에 따라 미세먼지 저감장치 식재계획(안)을 단일 식재와 복합식재 2가지 유형으로 도출하였으며, 각각의 유형별 특징과 비용을 비교함
- 최종적으로 미세먼지 저감의 기능적 측면과 경관적 측면을 고려하여 초기피복율이 높고 다양한 식재 연출이 가능한 복합식재를 적용함



[그림 2-71] 미세먼지 저감장치 부천역 설치 현황('19. 08)

[표 2-43] 도입 수종의 식재계획(안) 비교(산호수 단가 : 3500원, 아이비 단가 : 3,600원)

| 식재유형 |                                      | 특징                                                                           | 비용(예상)                                |
|------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 단일식재 | 미세먼지 저감장치 전체를 아이비 또는 산호수 1종의 식물로만 식재 | ·단일 수종으로 관리가 용이<br>·통일성 있는 분위기 연출이 가능<br>·하나의 화분에서 병해충 발생 시 전체가 고사 될 가능성이 있음 | 784,000원<br>(산호수 224본 식재 기준)          |
|      |                                      |                                                                              | 806,400원<br>(아이비 224본 식재 기준)          |
| 복합식재 | 미세먼지 저감장치 전체에 아이비와 산호수를 혼합하여 식재      | ·2가지 식물을 활용하여 다양한 식재 연출 가능<br>·수종에 따라 개별 관리방안이 필요<br>·단일 수종 식재 보다 초기 피복율이 높음 | 793,600원<br>(산호수 128본, 아이비 96본 식재 기준) |

## ② 도입 수종 생육을 위한 관수 시설 정비

### ㉠ 관수 용량

○ 미세먼지 저감장치에 도입되는 수종은 벽면에 식재되는 생육 환경 조건과 지속적으로 Active 시스템에서 불어나오는 바람을 견뎌야 하므로 1일 1회 관수가 필수적임

○ 미세먼지 저감장치에 도입되는 3차 포트의 경우, 최대 약 300ml의 관수 용량이 필요함

• 화분 부피 공식

$$V = \frac{1}{3} \times \pi h \times (a^2 + ab + b^2)$$

• 3차 포트 화분 규격 :  $h = 10, a = 5, b = 4$

• 3차 포트 부피 ( $V$ ) =  $\frac{1}{3} \times \pi 10 \times (5^2 + (5 \times 4) + 4^2) = 638.5$

○ 미세먼지 저감장치에 식재된 224개 포트에 필요한 하루 관수 용량은 67,200ml로 한달 동안 필요한 최대 관수 용량은 2,016,000ml로 산정됨

○ 따라서, 미세먼지 저감장치 하부 데크 크기를 고려하여 600L 용량의 각형 물탱크 3개를 설치하고 한달 주기로 관수 용수를 채워야 함



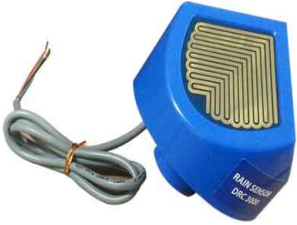
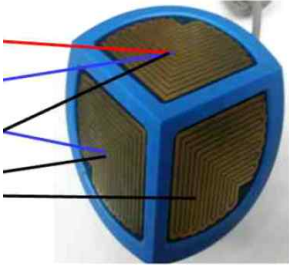
[그림 2-70] 관수시설(600L 물탱크 설치)

### ㉡ 관수 방법

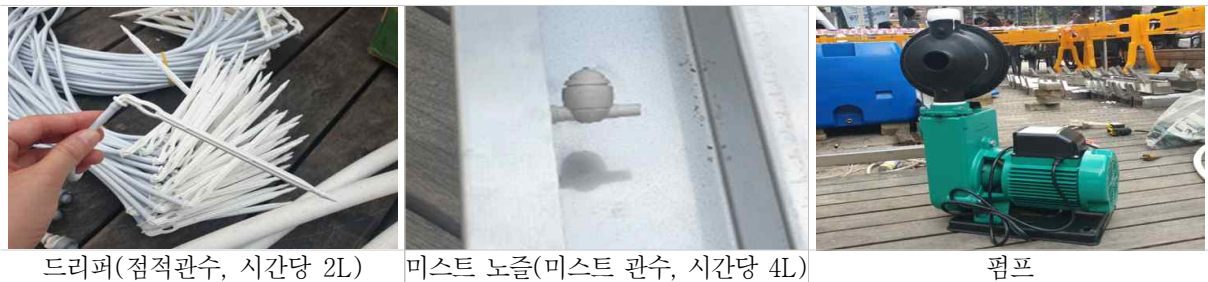
○ 미세먼지 저감장치의 경우 도입 수종의 안정적인 생육을 유지하기 위해 자동 관수 시스

템을 적용하였으며, 강우 시 추가 관수가 진행되지 않게 하기 위해 우적센서를 설치하였음

[표 2-44] 도입 수종의 식재계획(안) 비교

| 이미지                                                                                                                                                                 | 센서 스펙                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p>전원전압 : DC AC 12V ~ 24V<br/>         소비 전류 : 30mA 이하<br/>         타입조정 : 빗물감지 후 지연동작(1초~40초)<br/>         1면 ~ 3면으로 빗물 감지하는 면이 구분<br/>         1면 빗물감지(LED 점등) → 2면 빗물감지(개폐기 작동)<br/>         → 3면 빗물감지(발열 동작)</p> |

- 미세먼지 저감장치의 구조와 기능을 고려하여 점적관수와 미스트 관수를 적용함
- 점적 관수는 파이프나 호스의 물을 일정한 압력으로 조절하여 식물의 뿌리에 한 방울씩 공급하는 관수 방법으로 안정적인 수분 공급이 가능함
- 미스트 관수는 파이프나 호스에 강한 압력을 주어 식물 전체에 고르게 분사되는 관수 방법으로 식물의 수분 공급과 주변 대기 온도 저감, 공기 중 미세먼지 저감에도 효과가 있음
- 따라서, 식물의 지속적인 생육을 위해 주 관수 방법으로는 드리퍼를 이용한 점적관수를 적용하고, 여름철 주변 대기온도 저감과 미세먼지 저감효과 극대화를 위해 일시적으로 미스트 관수를 활용함
- 외부 Test-bed의 관수시설에 적용되는 장비는 드리퍼, 미스트 노즐, 펌프 등이 있음



[그림 2-73] 관수시설 장비

#### ㉔ 관수 주기 설정 및 어플리케이션 연동

- 미세먼지 저감장치에 적용되는 관수 설비는 어플리케이션과 연동하여 실시간으로 관수 시간과 관수 주기를 제어함
- 외부 Test-bed의 관수 환경은 도입된 식물의 생육 안정화를 위해 분당 30ml의 물을 하루 3번, 3분 동안 관수 되도록 설정함
  - 관수 시간 : 오전 9시, 오후 12시, 오후 3시
- 물탱크에 설치된 수위센서와 어플리케이션을 연동하여 물탱크 용량의 3분의 1까지 관수 용수를 사용하였을 경우 저수위 알람이 작동함



[그림 2-74] 관수 시스템 연동 어플리케이션 (반딧불이 T 스마트팜)

### ③ 겨울철 Test-bed 운영 및 유지관리 계획

#### ㉠ 겨울철 Test-bed 식재 계획

- 식물은 대기의 온도가 식물의 적정 생장온도보다 낮아지는 겨울철에 저온에 의한 동해(凍害)를 입을 수 있음
- 저온에서는 식물의 생장과 물질대사 속도가 저하되므로, 저온이 지속되는 경우 세포막이 굳거나 세포 자체가 파괴되기도 함
- 겨울철 식물의 생장 저하로 인해 미세먼지 저감장치의 기능적 효율이 떨어질 뿐 아니라 주변 경관을 저해하는 요인이 될 수 있음
- 따라서, 미세먼지 저감장치의 겨울철 운영을 위해 식재 식물을 조화로 대체하는 방안이 필요함
- 생화로 적용되었던 산호수, 아이비와 형상이 유사한 식물을 중심으로 다음과 같은 조화 식재 후보군을 도출함

[표 2-45] 겨울철 미세먼지 저감장치 적용 조화식물 후보군

| 유사형상 | 이미지 | 품명     | 규격(높이) | 유사형상 | 이미지 | 품명       | 규격(높이) |
|------|-----|--------|--------|------|-----|----------|--------|
| 산호수  |     | 호랑가시   | 30cm   | 아이비  |     | 잎유카가지(1) | 20cm   |
|      |     | 산솔가지   | 30cm   |      |     | 아이비덩굴    | 80cm   |
|      |     | 폴리아이가시 | 40cm   |      |     | 잎유카가지(2) | 30cm   |

#### ㉠ 겨울철 관수 시스템 유지관리 방안

- 외부공간에 설치되는 미세먼지 저감장치의 특성상 겨울철 동파의 위험을 방지하기 위해 별도의 관수 설비 관리 방안이 필요함
- 겨울철 동파가 주로 발생하는 12월~2월까지 관수 시설 관리가 필요하며 동파 방지를 위해 물탱크, 주 관수 파이프, 펌프에 남아있는 관수 용수를 모두 제거해야 함

#### ㉡ Test-bed 식물생육 모니터링

- 관수 상태, 배수 상태, 식물 생육 상태를 항목으로 설정하여 모니터링을 진행함
- 외부 Test-bed에 도입된 식물의 생육 변화 상태를 확인하기 위해 모니터링 주기를 일주일 간격으로 설정하였으며, 모니터링 야장은 다음과 같음

[표 2-46] 외부 Test-bed 식물생육 안정성 모니터링 야장

| 야장 항목                | 내용                                                                                            | 이미지                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|-------|---------|-----|----------|--------|-------|----|---------|----|----|-------------------|---------|------|---------|---------|---------|--------|------|------|------|-------|------------------------------------|------|------|------|-------|----------------------|-----|------|------|------|------|-------|-----|-------|-----|-----|-------|-----------------------------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-----|----|--|--|--|--|--|
| 일반사항                 | <ul style="list-style-type: none"><li>일시, 시간, 모니터링 담당자, 모니터링 횟수, 날씨, 모니터링 항목 등을 표시</li></ul>  | <div>미세먼지 저감장치 외부 test-bed 모니터링</div> <table><tr><td>일시</td><td>2019.09.24(화)</td><td>시간</td><td>13:00 ~</td></tr><tr><td>담당자</td><td>이소담, 손하율</td><td>모니터링횟수</td><td>4회</td></tr><tr><td>날씨</td><td colspan="3">맑음(27℃)</td></tr><tr><td rowspan="3">모니터링 항목<br/>(O 표시)</td><td>드리퍼(관수)</td><td>관수노즐</td><td>물탱크(잔량)</td><td>자동관수 작동</td><td>배수상태</td></tr><tr><td>O</td><td>O</td><td>O</td><td>O</td><td>O</td></tr><tr><td>화분 훼손</td><td>잎 상태</td><td>초장</td><td>초폭</td><td>이름 형태</td></tr><tr><td></td><td>O</td><td>O</td><td>O</td><td>O</td><td>O</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 일시         | 2019.09.24(화) | 시간    | 13:00 ~ | 담당자 | 이소담, 손하율 | 모니터링횟수 | 4회    | 날씨 | 맑음(27℃) |    |    | 모니터링 항목<br>(O 표시) | 드리퍼(관수) | 관수노즐 | 물탱크(잔량) | 자동관수 작동 | 배수상태    | O      | O    | O    | O    | O     | 화분 훼손                              | 잎 상태 | 초장   | 초폭   | 이름 형태 |                      | O   | O    | O    | O    | O    |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 일시                   | 2019.09.24(화)                                                                                 | 시간                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 13:00 ~    |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 담당자                  | 이소담, 손하율                                                                                      | 모니터링횟수                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 4회         |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 날씨                   | 맑음(27℃)                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 모니터링 항목<br>(O 표시)    | 드리퍼(관수)                                                                                       | 관수노즐                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 물탱크(잔량)    | 자동관수 작동       | 배수상태  |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | O                                                                                             | O                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | O          | O             | O     |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 화분 훼손                                                                                         | 잎 상태                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 초장         | 초폭            | 이름 형태 |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | O                                                                                             | O                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | O          | O             | O     |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 전체 식물 상태             | <ul style="list-style-type: none"><li>같은 지점에서 미세먼지 저감장치를 촬영하여 식물 피복율, 전체 생육상태 등을 점검</li></ul> | <table><tr><td>모니터링 일자</td><td>항목</td><td colspan="4">내용</td></tr><tr><td rowspan="3">관수 상태</td><td>자동 관수</td><td colspan="4">작동</td></tr><tr><td>노즐 및 드리퍼</td><td colspan="4">O</td></tr><tr><td>물탱크(잔량)</td><td colspan="4">1/3 정도</td></tr><tr><td>배수 상태</td><td colspan="5">양쪽에 있는 화분은 기둥을 타고 흐르는 물때문에 물이 고여있음</td></tr><tr><td rowspan="3">식물 상태<br/>(O / △ / X)</td><td></td><td>1면</td><td>2면</td><td>3면</td><td>4면</td></tr><tr><td>화분 훼손</td><td>O</td><td>O</td><td>△</td><td>O</td></tr><tr><td>잎 상태</td><td colspan="4">3면 맨윗줄 식물(상호수) 시들음(관수작동 확인)</td></tr><tr><td>주변 이용형태</td><td colspan="5">○</td></tr></table>                                                                                                                                                                                                                                                                 | 모니터링 일자    | 항목            | 내용    |         |     |          | 관수 상태  | 자동 관수 | 작동 |         |    |    | 노즐 및 드리퍼          | O       |      |         |         | 물탱크(잔량) | 1/3 정도 |      |      |      | 배수 상태 | 양쪽에 있는 화분은 기둥을 타고 흐르는 물때문에 물이 고여있음 |      |      |      |       | 식물 상태<br>(O / △ / X) |     | 1면   | 2면   | 3면   | 4면   | 화분 훼손 | O   | O     | △   | O   | 잎 상태  | 3면 맨윗줄 식물(상호수) 시들음(관수작동 확인) |     |     |     | 주변 이용형태 | ○   |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 모니터링 일자              | 항목                                                                                            | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 관수 상태                | 자동 관수                                                                                         | 작동                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 노즐 및 드리퍼                                                                                      | O                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 물탱크(잔량)                                                                                       | 1/3 정도                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 배수 상태                | 양쪽에 있는 화분은 기둥을 타고 흐르는 물때문에 물이 고여있음                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 식물 상태<br>(O / △ / X) |                                                                                               | 1면                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2면         | 3면            | 4면    |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 화분 훼손                                                                                         | O                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | O          | △             | O     |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 잎 상태                                                                                          | 3면 맨윗줄 식물(상호수) 시들음(관수작동 확인)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 주변 이용형태              | ○                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 관수 상태                | <ul style="list-style-type: none"><li>자동 관수 작동여부, 노즐 및 드리퍼 상태, 물탱크 잔량 등을 확인</li></ul>         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 배수 상태                | <ul style="list-style-type: none"><li>도입된 식물 화분에 물 고임 현상 발생 여부 확인</li></ul>                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 식물생육 상태              | <ul style="list-style-type: none"><li>초고, 초폭, 잎 길이 및 잎 폭 등 생육 상태 확인</li></ul>                 | <table><tr><td colspan="6">식물 생육 모니터링</td></tr><tr><td>분류</td><td></td><td>1면</td><td>2면</td><td>3면</td><td>4면</td></tr><tr><td rowspan="2">초고</td><td>상호수</td><td>30cm</td><td>26cm</td><td>35cm</td><td>29cm</td></tr><tr><td>아이비</td><td>28cm</td><td>30cm</td><td>36cm</td><td>32cm</td></tr><tr><td rowspan="2">초폭</td><td>상호수</td><td>24cm</td><td>15cm</td><td>16cm</td><td>18cm</td></tr><tr><td>아이비</td><td>11cm</td><td>13cm</td><td>14cm</td><td>13cm</td></tr><tr><td rowspan="2">잎 길이</td><td>상호수</td><td>4.5cm</td><td>4cm</td><td>5cm</td><td>5.5cm</td></tr><tr><td>아이비</td><td>3cm</td><td>3cm</td><td>4cm</td><td>3cm</td></tr><tr><td rowspan="2">잎 폭</td><td>상호수</td><td>2cm</td><td>3cm</td><td>3cm</td><td>3cm</td></tr><tr><td>아이비</td><td>3.5cm</td><td>3.5cm</td><td>5cm</td><td>4cm</td></tr><tr><td>기타</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> | 식물 생육 모니터링 |               |       |         |     |          | 분류     |       | 1면 | 2면      | 3면 | 4면 | 초고                | 상호수     | 30cm | 26cm    | 35cm    | 29cm    | 아이비    | 28cm | 30cm | 36cm | 32cm  | 초폭                                 | 상호수  | 24cm | 15cm | 16cm  | 18cm                 | 아이비 | 11cm | 13cm | 14cm | 13cm | 잎 길이  | 상호수 | 4.5cm | 4cm | 5cm | 5.5cm | 아이비                         | 3cm | 3cm | 4cm | 3cm     | 잎 폭 | 상호수 | 2cm | 3cm | 3cm | 3cm | 아이비 | 3.5cm | 3.5cm | 5cm | 4cm | 기타 |  |  |  |  |  |
| 식물 생육 모니터링           |                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 분류                   |                                                                                               | 1면                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2면         | 3면            | 4면    |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 초고                   | 상호수                                                                                           | 30cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 26cm       | 35cm          | 29cm  |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 아이비                                                                                           | 28cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 30cm       | 36cm          | 32cm  |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 초폭                   | 상호수                                                                                           | 24cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 15cm       | 16cm          | 18cm  |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 아이비                                                                                           | 11cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 13cm       | 14cm          | 13cm  |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 잎 길이                 | 상호수                                                                                           | 4.5cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 4cm        | 5cm           | 5.5cm |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 아이비                                                                                           | 3cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3cm        | 4cm           | 3cm   |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 잎 폭                  | 상호수                                                                                           | 2cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3cm        | 3cm           | 3cm   |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
|                      | 아이비                                                                                           | 3.5cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3.5cm      | 5cm           | 4cm   |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 기타                   |                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |
| 특이사항                 | <ul style="list-style-type: none"><li>식물화분 훼손 등 기타 장치 상태 확인</li></ul>                         | <div>특이사항</div> <div>* 3면 윗줄 상호수 시들음 현상 진행 → 관수 이상 없음</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |               |       |         |     |          |        |       |    |         |    |    |                   |         |      |         |         |         |        |      |      |      |       |                                    |      |      |      |       |                      |     |      |      |      |      |       |     |       |     |     |       |                             |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |    |  |  |  |  |  |

- 외부 Test-bed 설치 이후부터 일주일 간격으로 모니터링을 진행한 결과, 주변 공사로 인해 모니터링이 불가능한 일을 제외하고 2차년도 연구 종료까지 총 4회 모니터링을 진행하였음
- 모니터링 결과, 식물이 성장하여 육안으로 확인되는 Test-bed의 식생 피복율은 증가하였으나, 단기간 모니터링 진행으로 인해 초폭, 잎의 형태적 크기 등은 상대적으로 변화가 미비함

[표 2-47] 외부 Test-bed 식물생육 안정성 모니터링 야장

| 일자                | 모니터링 내용 |                                                          | 현황사진                                                                                  |
|-------------------|---------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 2019. 08.28<br>진행 | 관수상태    | 훼손된 노즐은 없었으며 드리퍼 빠진 화분 없음<br>물탱크는 약 2분의1정도의 물이 남아있음      |    |
|                   | 배수상태    | 양호                                                       |                                                                                       |
|                   | 식물상태    | 훼손된 화분없이 전반적으로 양호하였으며, 햇빛을 많이 받는 부분의 식물의 잎 끝이 타는 화분이 있었음 |                                                                                       |
| 2019. 09.10<br>진행 | 관수상태    | 물탱크 물 부족으로 관수 작동이 되지 않음                                  |   |
|                   | 배수상태    | 양호                                                       |                                                                                       |
|                   | 식물상태    | 산호수가 전반적으로 붉은색으로 변함<br>아이비 일부(3개)가 고사되어 교체함              |                                                                                       |
| 2019. 09.17<br>진행 | 관수상태    | 물탱크 관수 잔량이 없어 관수가 작동하고 있지 않음                             |  |
|                   | 배수상태    | 양호                                                       |                                                                                       |
|                   | 식물상태    | 식물 마름 현상 진행되어 추가 개별 관수를 진행함<br>전체적으로 시들음 현상이 확인됨         |                                                                                       |
| 2019. 09.24<br>진행 | 관수상태    | 물탱크 관수 용량을 채운 후 자동 관수작동을 확인함                             |  |
|                   | 배수상태    | 양측에 있는 화분은 프레임을 타고 흐르는 물 때문에<br>화분에 물이 고여있음              |                                                                                       |
|                   | 식물상태    | 햇빛을 많이 받는 쪽의 맨윗줄 산호수 시들음 현상(관수<br>이상 없음                  |                                                                                       |

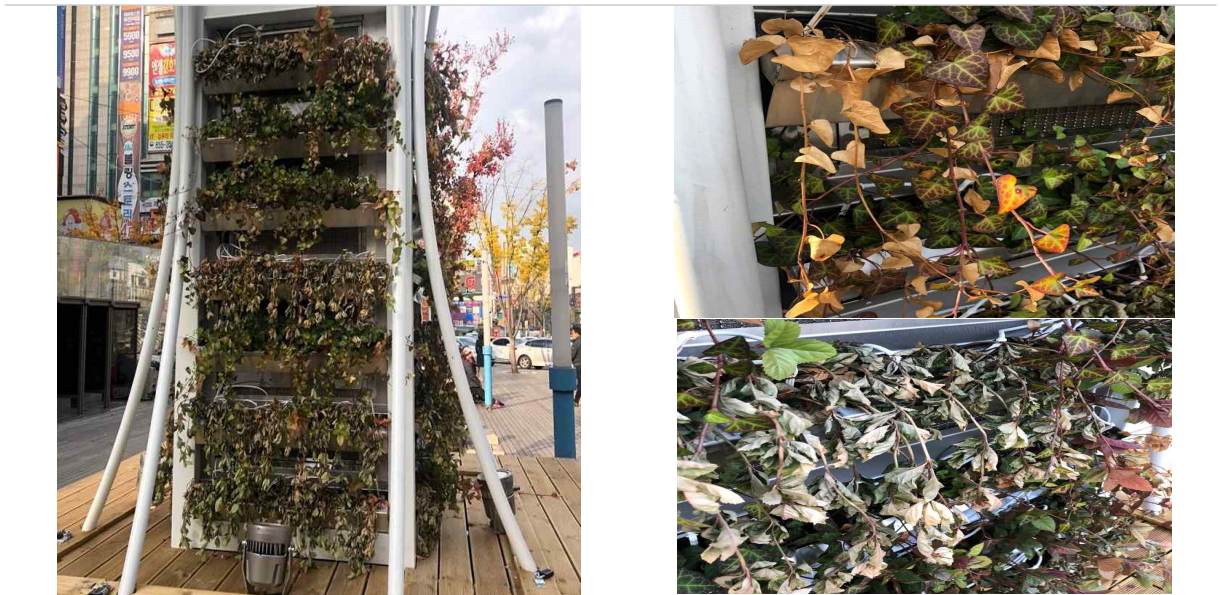
- 외부 Test-bed 도입 식물은 관수시스템의 작동 여부와 생육 상태가 직결되므로 물탱크의 관수잔량, 드리퍼의 막힘 현상, 펌프 및 관수 어플리케이션 작동 오류 발생 등을 지속적으로 확인해주어야 함

- 모니터링 기간동안 확인된 문제점과 3차년도 장기 모니터링 진행 시 발생하는 문제점을 종합하여 Passive 시작품의 성능을 보완함

## (사) Test-bed 모니터링을 통한 시작품 보완

### ① 2차년도 모니터링 결과

- 2019년 8월부터 약 4개월 동안 미세먼지 저감장치의 외부 Test-bed 적용을 모니터링한 결과, 시간이 경과 할수록 산호수의 줄기가 아래로 처지는 현상이 확인됨
- 또한, 1일 3회 총 270ml(1회 90ml) 관수를 진행했음에도 불구하고, 산호수와 아이비 모두에서 건조 현상이 발생하였으며, Active 시스템에서 불어나오는 바람에 의해 식재 기반 토양이 날리는 현상(비산)이 확인됨
- 식물 건조화 현상에 대한 문제점과 토양 날림 현상을 해결하기 위해, Passive 시작품의 적용 환경에 대한 검토가 필요하다고 판단함
- 적용 환경에 대한 검토를 위해 Passive 시작품 내 도입 수종과 식재 환경에 대한 조건을 변경하여 내부 모니터링을 수행한 후, 외부 Test-bed 현장 적용을 통해 보완 사항을 확인하고자 함



[그림 2-75] 산호수, 아이비 건조 현상 발생

### ② 3차년도 Test-bed 모니터링

#### ㉠ 내부 Test-bed 모니터링

- Passive 시작품의 도입 수종과 식재 환경에 대한 조건을 확인하기 위해 내부 Test-bed 모니터링을 시행함

- 미세먼지 저감장치의 사계절 외부환경 적응성 증진을 위해 2차년도 「미세먼지 저감 영향 수종의 특성 관련 평가」에서 산호수 다음으로 높은 점수를 평가받은 줄사철과 유사한 품종인 ‘황금사철’을 변경수종으로 선정함

[표 2-48] 변경 도입 수종(황금사철)

| 이미지                                                                               | 내용                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 학명 : <i>Euonymus japonicus</i> 'Ovatus Aureus'</li> <li>• 노박덩굴과의 상록 관목</li> <li>• 햇별이 잘 드는 양지에 서식</li> <li>• 개화기 : 6~7월(노란색)</li> <li>• 내한성, 내음성이 강함</li> <li>• 결실기 : 9월~10월(붉은색 둥글 열매)</li> </ul> |

- 시작품의 식재 환경 변화를 모니터링하기 위해 포트 식재 방법을 포함하여 상토 식재, 녹화마대 식재, 녹화마대와 바크 식재 총 4가지 유형으로 구분함
- 4가지 식재 유형을 기준으로 도입 수종의 식물생육 안정화를 확인하기 위해 토양상태(토양수분, 토양 pH, 토양온도)와 식물상태(잎 손상, 수형 변화)를 모니터링함
- 토양상태는 센서를 활용하여 모니터링을 진행하였으며 식물상태는 잎과 수형에 대한 육안 모니터링을 통해 식물상태를 판단하였음
- 모니터링은 약 6주간 진행하였으며, 모니터링 조건 및 방법은 다음과 같음

[표 2-49] 내부 Test-bed 모니터링 조건 및 방법

| 항목      | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 모니터링 기간 | • 2020년 5월 13일 ~ 6월 16일(6주)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 모니터링 조건 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조건 1 : 식물 포트 그대로 식재</li> <li>• 조건 2 : 상토를 채운 후 식물 식재</li> <li>• 조건 3 : 상토를 채운 녹화마대에 식물 식재</li> <li>• 조건 4 : 상토를 채운 녹화마대에 식재 후 바크 포설</li> </ul> <div>     </div> <div> <div>조건 1</div> <div>조건 2</div> <div>조건 3</div> <div>조건 4</div> </div> |
| 모니터링 항목 | <div>[토양 상태 모니터링]</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 수분 / 온도 / Ph 측정</li> </ul> <div>[식물 상태 모니터링]</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 잎손상 및 수형 변화</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 모니터링 방법 | <div>[토양수분 모니터링]</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 토양 수분 측정기(JHL9981)</li> </ul> <div>[식물 상태 모니터링]</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 육안 모니터링 및 사진촬영</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

- 그 결과, 식물상태 모니터링의 경우 단기간 모니터링 진행으로 인해 잎 손상 및 수형이 크게 변화하지 않음
- 토양상태 모니터링의 경우 토양 온도는 식재 조건에 상관없이 평균 최소 0.7~1.3℃가 증가하였으며, 토양 pH의 경우 식물 생장에 적절한 토양 산도 범위(5.5~7.0)<sup>2)</sup>를 유지하고 있는 것으로 확인됨

- 토양 수분의 경우 매우 건조함(DRY+), 건조함(DRY), 보통(NOR), 습함(WET), 매우 습함(WET+)으로 구분되며, 식재 조건에 따라 초기 상태와 실험 기간 경과 후 상태에 차이가 확인됨
- 조건 1 포트 식재의 경우, 초기 습함(WET) 상태에서 1주 후 보통(NOR)으로 변화하고 2주 후부터는 건조함(DRY) 상태가 되었으며, 조건 2 상토 식재의 경우, 초기 습함(WET) 상태가 4주까지 유지되다가 5주부터 건조함(DRY) 상태로 변화함
- 반면, 조건 3의 녹화 마대 식재와 조건 4의 녹화 마대+바크 식재의 경우, 초기 매우 습함(WET+) 상태에서 습함(WET)상태로 변화한 후 이를 지속적으로 유지함
- 따라서, 녹화 마대 식재와 녹화마대+바크 식재가 토양 수분 유지에 용이한 식재 방법임을 확인함
- 최종적으로 토양수분 유지와 Active 시스템에서 불어나오는 바람에 의한 토양 날림(비산) 현상을 예방하기 위해 ‘녹화마대+바크 방법’을 Test-bed 적용 식재 방법으로 선정함

[표 2-50] 내부 Test-bed 모니터링 결과

| 유형                         | 일자 |            | 식물상태 모니터링 |      | 토양상태 모니터링 |          |         |
|----------------------------|----|------------|-----------|------|-----------|----------|---------|
|                            |    |            | 잎 손상      | 수형변화 | 토양수분(%)   | 토양산도(pH) | 토양온도(℃) |
| 조건 1<br>(포트 식재)            | 1회 | 2020.05.13 | X         | X    | WET       | 5.5      | 20      |
|                            | 2회 | 2020.05.19 | X         | X    | NOR       | 6.5      | 20      |
|                            | 3회 | 2020.05.22 | X         | X    | DRY       | 6        | 19      |
|                            | 4회 | 2020.05.26 | X         | X    | DRY       | —        | 24      |
|                            | 5회 | 2020.06.09 | X         | X    | DRY       | —        | —       |
|                            | 6회 | 2020.06.12 | X         | X    | DRY       | —        | —       |
| 조건 2<br>(상토 식재)            | 1회 | 2020.05.13 | X         | X    | WET       | 6        | 20      |
|                            | 2회 | 2020.05.19 | X         | X    | WET+      | 6        | 21      |
|                            | 3회 | 2020.05.22 | X         | X    | WET       | 6        | 20      |
|                            | 4회 | 2020.05.26 | X         | X    | WET       | —        | 24      |
|                            | 5회 | 2020.06.09 | X         | X    | DRY       | —        | —       |
|                            | 6회 | 2020.06.12 | X         | X    | DRY       | —        | —       |
| 조건 3<br>(녹화 마대<br>식재)      | 1회 | 2020.05.13 | X         | X    | WET+      | 6        | 22      |
|                            | 2회 | 2020.05.19 | X         | X    | WET       | 6        | 22      |
|                            | 3회 | 2020.05.22 | X         | X    | WET       | 5.5      | 20      |
|                            | 4회 | 2020.05.26 | X         | X    | WET+      | 7        | 24      |
|                            | 5회 | 2020.06.09 | X         | X    | WET       | —        | —       |
|                            | 6회 | 2020.06.12 | X         | X    | WET       | —        | —       |
| 조건 4<br>(녹화 마대<br>+ 바크 식재) | 1회 | 2020.05.13 | X         | X    | WET+      | 5        | 20      |
|                            | 2회 | 2020.05.19 | X         | X    | WET       | 6        | 22      |
|                            | 3회 | 2020.05.22 | X         | X    | WET       | 6        | 19      |
|                            | 4회 | 2020.05.26 | X         | X    | WET+      | 7        | 24      |
|                            | 5회 | 2020.06.09 | X         | X    | WET+      | —        | —       |
|                            | 6회 | 2020.06.12 | X         | X    | WET       | —        | —       |

2) 식물은 약산성(pH5.0~6.0) 또는 중성토양(pH7.0)에서 생장이 원활함(<http://www.nongsaro.go.kr/portal/portalMain.ps>)

#### ㉔ 외부 Test-bed 모니터링

- 내부 모니터링 결과로 도출된 녹화마대 + 바크 식재 방법을 적용하여, 외부 Test-bed를 조성하였으며, 식물생육 변화 모니터링과 미세먼지(PM10) 저감 모니터링으로 구분하여 진행함

##### ○ 식물생육 변화 모니터링

- 식물생육 변화는 토양 수분 상태와 도입 식물의 초장 변화, 미세먼지 저감장치의 녹화(綠化)모습을 모니터링함
- 식물생육 변화 모니터링은 2020년 6월부터 2020년 10월까지 약 5개월 간 진행되었으며, 초기 2개월 동안은 월 4회, 2개월 이후부터는 월 2회로 진행함(기상조건 악화 등의 변수 발생 시 추가 모니터링 시행)

[표 2-51] 외부 Test-bed 식물생육 변화 모니터링 조건 및 방법

| 항 목         |                    | 내 용                                                                                                                                                                       |
|-------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 식물 생육<br>변화 | 모니터링 장소            | • 부천역 북부광장(마루광장)                                                                                                                                                          |
|             | 모니터링 기간            | • 2020년 6월 16일 ~ 10월 16일(5개월)                                                                                                                                             |
|             | 모니터링 조건<br>(식재/관수) | • 식재 : 녹화마대 + 바크 식재(조건 4)<br>• 관수 : 1일 1회 1분 30ml 관수(오전 6시)                                                                                                               |
|             | 모니터링 항목<br>및 방법    | • 토양 수분 변화 → 미세먼지 저감장치 면당 평균 토양수분 측정(센서 활용, 매회 측정)<br>• 식물 초장 변화 → 미세먼지 저감장치 면당 평균 초장 측정(줄자 활용, 2개월에 1회 측정)<br>• 미세먼지 저감장치 녹화(綠化) 변화 → 미세먼지 저감장치 4면 확인(사진 촬영, 1개월에 1회 측정) |

- 그 결과, 토양 수분의 경우 6월부터 10월까지 50% 이상의 토양수분을 유지하였으며, 총 12회 모니터링 결과 평균 71.7%로 확인됨

[표 2-52] 외부 Test-bed 식물생육 변화(토양수분) 모니터링 결과

| 회차  | 일자         | 토양수분(%) |      |      |      | 평균(%) |
|-----|------------|---------|------|------|------|-------|
|     |            | 1면      | 2면   | 3면   | 4면   |       |
| 1회  | 2020.06.23 | 53.8    | 62.3 | 71.2 | 71.6 | 64.7  |
| 2회  | 2020.07.01 | 72.2    | 97.4 | 91.0 | 87.0 | 86.9  |
| 3회  | 2020.07.03 | 78.6    | 88.3 | 85.5 | 67.8 | 80.0  |
| 4회  | 2020.07.08 | 48.4    | 63.2 | 48.0 | 57.3 | 54.2  |
| 5회  | 2020.07.10 | —       | —    | —    | —    | —     |
| 6회  | 2020.07.13 | 65.3    | 63.4 | 53.1 | 72.2 | 63.5  |
| 7회  | 2020.07.15 | 59.4    | 68.5 | 67.6 | 55.4 | 62.7  |
| 8회  | 2020.07.30 | 78.4    | 83.0 | 79.6 | 67.6 | 77.1  |
| 9회  | 2020.08.14 | 84.2    | 85.4 | 85.4 | 84.1 | 84.8  |
| 10회 | 2020.09.02 | 69.6    | 64.7 | 62.4 | 63.2 | 65.0  |
| 11회 | 2020.09.17 | 81.2    | 73.1 | 64.6 | 70.9 | 72.4  |
| 12회 | 2020.10.16 | 74.4    | 86.5 | 62.0 | 86.9 | 77.4  |

- 식물 초장 변화의 경우, 초기 식재일인 6월에는 17.9cm로 측정되었으며, 이후 8월은 21.6cm, 10월은 22.5cm로 식재된 식물이 지속적으로 성장하는 것을 확인할 수 있었음

[표 2-53] 외부 Test-bed 식물생육 변화(식물 초장) 모니터링 결과

| 회차 | 일자         | 식물 초장(cm) |      |      |      | 평균(%) |
|----|------------|-----------|------|------|------|-------|
|    |            | 1면        | 2면   | 3면   | 4면   |       |
| 1회 | 2020.06.23 | 17.9      | 17.8 | 17.6 | 18.3 | 17.9  |
| 2회 | 2020.08.14 | 25.5      | 19.0 | 19.0 | 23.0 | 21.6  |
| 3회 | 2020.10.16 | 26.0      | 20.0 | 20.0 | 24.0 | 22.5  |

- 이러한 식재 식물의 성장에 따라, 미세먼지 저감장치의 녹화(綠化) 모습이 변화하였으며 6월부터 10월 까지 장치 4면을 기준으로 매월 촬영한 결과는 아래와 같음
- 6월과 비교하여 10월에 촬영된 황금사철의 높이는 Passive 시작품의 앞면이 차폐될 수 있을 정도로 성장하였음
- 그러나, Passive 시작품의 크기가 한정되어 있어, 식재 식물 성장을 고려한 생육 토심과 토양 영양분 공급에 한계가 있음

[표 2-54] 외부 Test-bed 식물생육 변화(식물 초장) 모니터링 결과

| 일자         | 미세먼지 저감장치 녹화(綠化) 이미지                                                                |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            | 1면                                                                                  | 2면                                                                                  | 3면                                                                                   | 4면                                                                                    |
| 2020.06.18 |  |  |  |  |

| 일자         | 미세먼지 저감장치 녹화(綠化) 이미지                                                                |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            | 1면                                                                                  | 2면                                                                                  | 3면                                                                                   | 4면                                                                                    |
| 2020.07.10 |    |    |    |    |
| 2020.08.26 |   |   |   |   |
| 2020.09.17 |  |  |  |  |

※ 연구성과 중 하나인 특허 출원을 진행하기 위해 현장에 적용된 4면 하단부 식생모듈을 일정 기간 미세먼지 저감장치에서 떼어내었으며(2020.08.26.), 이후 재설치(2020.09.17.)에 따라 신규 수종으로 교체함

○ Passive 시스템의 미세먼지(PM10) 저감효과 모니터링

- 식재 도입에 의한 Passive 시스템의 미세먼지(PM10) 저감을 확인을 위해 ‘식재 전’ 미세먼지 저감율과 ‘식재 후’ 미세먼지 저감율을 비교하여 모니터링함
- Test-bed의 미세먼지 저감장치는 단일장치로 설치되어 있어 식재 전-후를 동시에 비교하기 어려움
- 이에, 동일한 기간을 기준으로 하여 식재를 적용하기 전과 식재를 적용한 후로 모니터링 순서를 나누어 진행함

[표 2-55] 외부 Test-bed 미세먼지 저감 효과 모니터링 조건 및 방법

| 항목                | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 미세먼지 (PM10) 저감 효과 | <div>모니터링 장소</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부천역 북부광장(마루광장)</li> </ul> <div>모니터링 기간</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (식재 전) 2020년 6월 1일 ~ 6월 15일(15일간)</li> <li>• (식재 후) 2020년 7월 1일 ~ 7월 15일(15일간)</li> </ul> <div>모니터링 조건 (식재 전/후)</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미세먼지 저감장치 상단 미세먼지 측정기 설치(4개)</li> <li>• 미세먼지 저감장치 주변 시설물(시계탑)에 미세먼지 측정기 설치(2개)</li> </ul> <div>모니터링 항목</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 식재 전 미세먼지(PM10) 저감율</li> <li>• 식재 후 미세먼지(PM10) 저감율</li> </ul> <div>모니터링 방법</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미세먼지 저감장치와 장치 주변의 미세먼지 농도를 비교하여 저감율 확인               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미세먼지 저감장치 설치 측정기 농도 ↔ 주변 시설물(시계탑) 설치 측정기 농도</li> </ul> </li> </ul> <div>측정기 설치</div> |

- 미세먼지 측정기는 Air-GuardK OAQ-T1 제품을 활용하였으며, 측정된 데이터는 IAQ 스테이션 통합 관리 시스템을 통해 구축함
- 미세먼지 저감장치가 영향을 미치지 않는 범위 외 공간의 미세먼지 농도와 비교하기 위해 미세먼지 저감장치 상단에 4개(실험구), 미세먼지 저감장치 주변에 위치한 시계탑에 2개(대조구)를 설치하여 미세먼지 농도를 비교함

[표 2-56] 미세먼지 측정기 사양(Air-GuardK OAQ-T1)

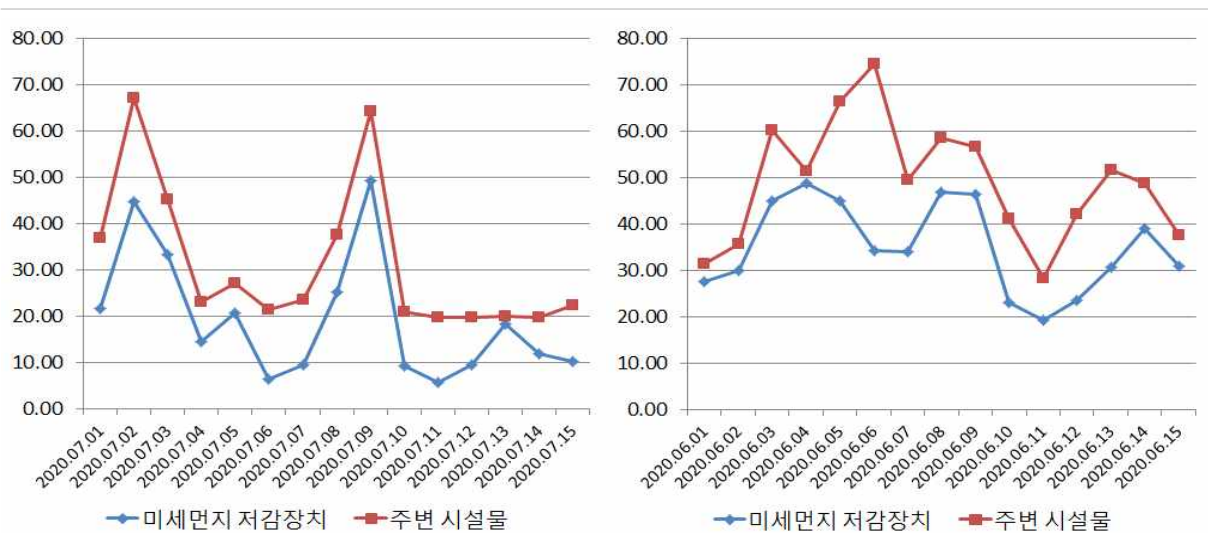
| <div>  </div> | 내용          |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------|
|                                                                                                | 제품명         | Air GuardK OAQ-T1    |
|                                                                                                | 측정방식        | 광산란 방식(적외선)          |
|                                                                                                | 통신방식        | LTE                  |
|                                                                                                | 공급전원 / 소모전력 | 단산 220V / 소모전력 2.5W  |
|                                                                                                | 측정항목        | PM 2.5, PM10, 온도, 습도 |

\* 출처: KWEATHER(<http://www.kweather.co.kr/index.html>)

- 미세먼지 저감장치 상단에 설치된 4개의 측정기 중 반경 1.5m에 설치된 측정기(2)와 시계탑에 설치된 측정기(B)의 농도를 비교하여 저감율을 확인함
- 그 결과, 식재 전의 미세먼지 저감율은 27.5%로 확인되었으며, 식재 후의 미세먼지 저감율은 42.0%로 확인되어 Passive 시스템의 미세먼지 저감율은 14.5%로 확인함

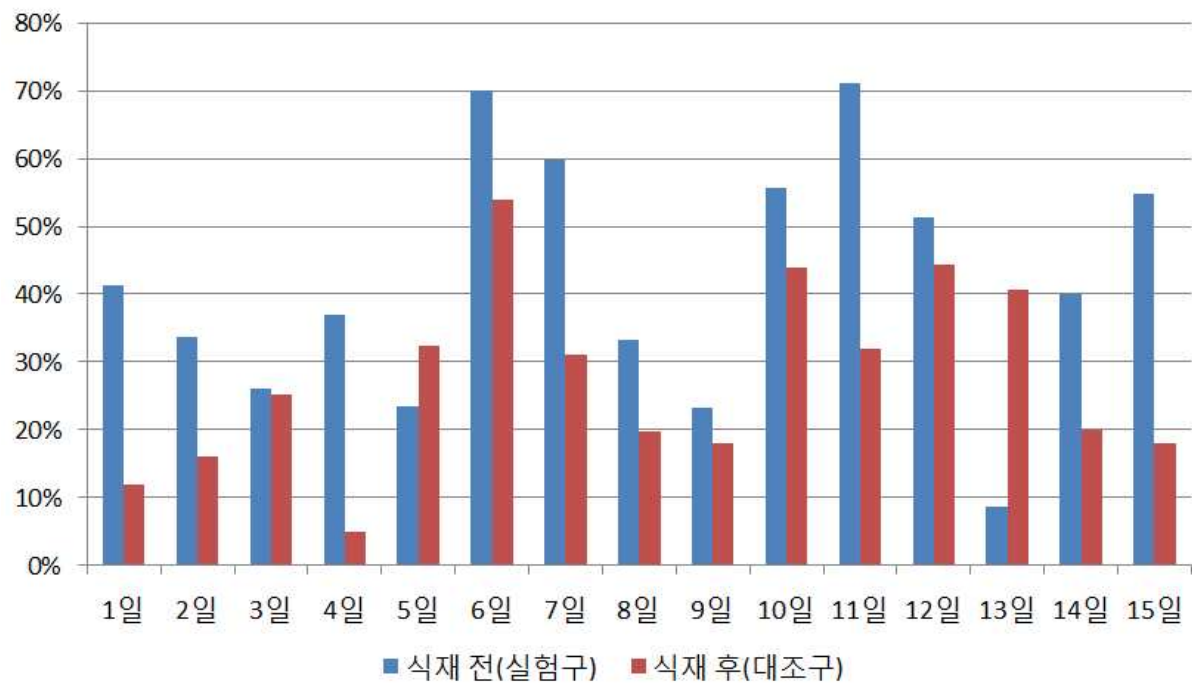
[표 2-57] 미세먼지(PM10) 저감 농도 비교

| 기간         | 실험구           | 기간         | 대조구           |
|------------|---------------|------------|---------------|
|            | 식재 전 미세먼지 저감율 |            | 식재 후 미세먼지 저감율 |
| 2020.06.01 | -12.0%        | 2020.07.01 | 36.75         |
| 2020.06.02 | -16.0%        | 2020.07.02 | 67.17         |
| 2020.06.03 | -25.3%        | 2020.07.03 | 45.20         |
| 2020.06.04 | -5.0%         | 2020.07.04 | 23.06         |
| 2020.06.05 | -32.3%        | 2020.07.05 | 27.14         |
| 2020.06.06 | -54.0%        | 2020.07.06 | 21.43         |
| 2020.06.07 | -31.2%        | 2020.07.07 | 23.43         |
| 2020.06.08 | -19.8%        | 2020.07.08 | 37.67         |
| 2020.06.09 | -18.0%        | 2020.07.09 | 64.24         |
| 2020.06.10 | -43.9%        | 2020.07.10 | 20.82         |
| 2020.06.11 | -31.9%        | 2020.07.11 | 19.74         |
| 2020.06.12 | -44.4%        | 2020.07.12 | 19.64         |
| 2020.06.13 | -40.7%        | 2020.07.13 | 20.02         |
| 2020.06.14 | -19.9%        | 2020.07.14 | 19.67         |
| 2020.06.15 | -18.1%        | 2020.07.15 | 22.41         |
| 평균         | -27.5%        | 평균         | -42.0%        |



식재 전 미세먼지 농도

식재 후 미세먼지 농도



식재 전-후 미세먼지 저감을 비교

[그림 2-76] 식재 전-후 미세먼지 저감을 그래프

- 3차년도에서는 개선된 연구 결과를 토대로 당초 목표 했던 반경 3m 이내의 미세먼지 90% 저감(Active 60%, Passive 30%)을 확인하고자 모니터링을 시행하였으나, 식재 전과 후의 모니터링 시작 시점이 다르며, 통제된 환경이 아닌 외부 영향을 받는 조건에서 모니터링이 진행되어 기존 계획 목표 달성에 한계가 있음
- 2차년도 실내 모니터링을 통해 당초 계획 목표를 기 달성함(보고서 “챔버형 시스템 내 시작품 처리 성능 검증” 부분 참고)
- 향후, 후속 과제로서 환경 영향요인을 통제한 외부 모니터링을 통해 실질적인 미세먼지 저감장치의 미세먼지 저감 효과 검증을 수행할 수 있음

### ③ 모니터링 결과 반영 시작품 보완

#### ㉞ 개선사항 도출

- 외부 Test-bed 모니터링 결과에 따라 총 2가지 개선사항을 도출함
- 첫 번째, 식재 식물의 생장 대비 Passive 시작품의 크기가 작아 토양 내 수분 및 영양분 부족으로 인해 식물 생장에 한계가 발생함
- 1일 1회 지속적으로 관수를 진행하였으나, 잎이 건조하고 윤기가 사라지며 잎끝이 타는 현상이 전체적으로 발생함
  - 식물의 생존 및 지속적인 생장을 위해서는 식물의 생존최소토심 및 생육최소토심 기준에 부합하는 깊이  
의 토양이 필요함
- 두 번째, 외부 공간에 설치되는 미세먼지 저감장치의 입지적 특성상 겨울철 대기 중 기온  
이 낮아질수록 식물의 생육이 어려움
- 10월 모니터링 종료 이후부터 일부 잎이 떨어지는 식물체가 다수 확인됨
  - 미세먼지 저감장치의 지속적인 경관성 유지를 위해 겨울철 식재 식물에 대한 관리 방안 마련이 필요함



2020.10.16. 모니터링

2020.12.09. 모니터링

[그림 2-77] 잎 건조화 및 온도저하로 인한 식물생육 한계 확인

#### ㉔ 시작품 보완

- 모니터링 결과 확인된 첫 번째 문제점인 토양 내 수분 및 영양분 부족을 해결하기 위해 Passive 시작품의 크기를 변경함
- Active 시스템과의 연계, 미세먼지 저감장치의 전체적인 형상 등을 고려하여, Passive 시작품의 화분박스 높이 변경 방향을 도출함
- Passive 시작품의 화분박스 높이 변경 시, 인공지반과 자연지반의 ‘식물 생존/생육 최소 토심’ 기준을 고려하여 높이를 설정함
- Passive 시작품의 식재에 적용되는 토양은 인공토양에 해당되며, 식재되는 황금사철의 경우, 소관목에 해당하므로 이에 부합하는 생존 최소 토심인 20cm를 높이로 적용함
  - (기존) 높이 10cm → (변경) 높이 20cm

[표 2-58] 식물 생존/생육 최소 토심 기준

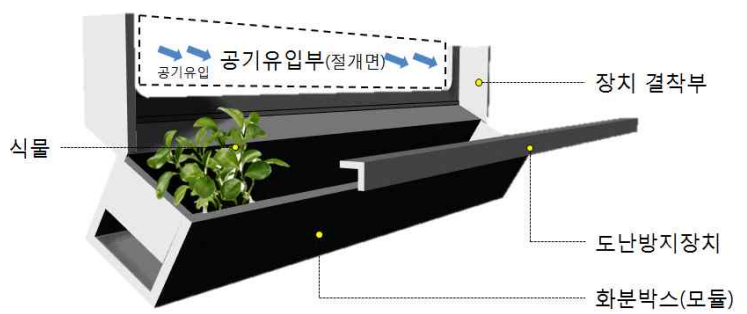
| 식물의 종류  | 생존 최소 토심(cm) |     |     | 생육 최소 토심(cm) |           | 배수층의 두께 |
|---------|--------------|-----|-----|--------------|-----------|---------|
|         | 인공토          | 자연토 | 혼합토 | 토양등급 중급이상    | 토양등급 상급이상 |         |
| 잔디, 초화류 | 10           | 15  | 13  | 30           | 25        | 10      |
| 소관목     | 20           | 30  | 25  | 45           | 40        | 15      |
| 대관목     | 30           | 45  | 38  | 60           | 50        | 20      |
| 천근성 교목  | 40           | 60  | 50  | 90           | 70        | 30      |
| 심근성 교목  | 60           | 90  | 75  | 150          | 100       | 30      |

\* 출처: 국토교통부, 2015, 조정설계기준

- 높이 변경에 따라 보완된 Passive 시작품을 다음과 같이 제작함

[표 2-59] Passive 시작품 보완 제작 세부 사항

| 항목  | 내용                                     | 이미지                                                                                  |
|-----|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 제품명 | Passive 시작품(보완)                        |  |
| 소재  | 2.0 SST PLATE(스테인레스 스틸 판)              |                                                                                      |
| 구성  | 화분박스(모듈)와 식물, 장치 결합부, 도난방지 장치          |                                                                                      |
| 규격  | 화분박스(모듈) 기준 : 가로 800 세로 100 높이 300(mm) |                                                                                      |



## (아) 시작품 운영방안 및 기술 고도화방안 제시

### ① 시작품 운영 방안

#### ㉓ Passive 시작품

##### ○ 구성

- Passive 시작품은 미세먼지 저감과 경관 개선을 위해 미세먼지 저감장치에 연결하여 장치 외벽에 식물을 식재하는 장치임
- 부식 발생 최소화를 위해 스테인레스 스틸판으로 제작하였으며 식재 식물의 크기 및 미세먼지 저감 장치의 형태 및 조화를 고려하여 가로 800mm, 세로 150mm, 높이 250mm의 형태로 제작함
- 식물, 식재공간(화분박스), 결착부 및 도난방지 장치로 구성되어 있음
- 자유로운 공기 유입을 위해 후면부를 절개하였으며, 미세먼지 저감장치 내부에서 정화되어 배출된 공기가 식물의 잎 표면을 거칠 수 있게 함

[표 2-60] Passive 시작품 구성요소

| 항목   |         | 내용                                     |
|------|---------|----------------------------------------|
| 명칭   |         | Passive 시작품                            |
| 소재   |         | 1.5 SST PLATE(스테인레스 스틸판)               |
| 규격   |         | 가로 800mm × 세로 150 mm × 높이 250 mm       |
| 구성요소 | 식물      | 공기정화 기능 및 경관 개선을 위해 식재되는 미세먼지 저감 효과 식물 |
|      | 식재공간    | 식물을 식재하여 식물이 성장하기 위한 기반환경을 제공하는 화분     |
|      | 결착부     | 미세먼지 저감장치에 부착하기 위해 연결되는 고정 부분          |
|      | 도난방지 장치 | 식재된 식물의 분실을 방지하기 위해 설치되는 ‘ㄱ’ 자 형태의 판   |

##### ○ 설치

- 식물 식재가 완료된 Passive 시작품을 미세먼지 저감장치에 장착하는 방식으로 진행됨(Passive 시작품 제작 완료 → 식물 식재 → 미세먼지 저감장치에 장착)
- 식물 식재 시, Passive 시작품의 제작 및 운반 중에 발생한 먼지와 이물질 등을 청소한 후 진행하도록 함
- 식물 식재가 완료된 Passive 시작품의 결착부 양쪽에 ‘십자 나사’를 이용하여 미세먼지 저감장치에 장착·고정 시킴
- 장착 과정에서 식물의 기반재가 되는 토양 및 화분 등의 무게로 인해 작업이 어려우므로 2명 이상의 작업자가 동반하여 진행되어야 함
- 관수 시 물이 고이지 않도록 30°의 각도를 주어 제작하였으며, 식물의 성장을 고려하여 Passive 시작품 간에 25cm의 간격을 줌
- 미세먼지 저감장치에 설치 후 시범 가동을 통해 Passive 시작품의 고정 상태와 식물의 식재 상태를 확인함



[그림 2-78] Passive 시작품 설치 과정

#### ㉞ 식물

##### ○ 식재 수종

- 식재되는 식물은 2차년도 연구 결과에서 도출된 초화류, 소관목류, 덩굴류 중 미세먼지 저감장치가 설치된 지역의 환경, 기상·기후, 장치의 외관적 특성 등을 종합적으로 고려하여 선정함

[표 2-61] 미세먼지 저감식물 DB

| 구분   | 식물종                                                                                                                                                                                                                         |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 초화류  | 개미취, 금계국, 기린초, 노랑꽃창포, 능소화, 돌나물, 돌단풍, 두메부추, 둥굴레, 맥문동, 물레나물, 비비추, 속새, 수크령, 옥잠화, 타래붓꽃, 털머위, 톱풀, 패랭이꽃, 양지꽃, 감국, 구절초, 꽃잔디, 노루오줌, 배초향, 수호초, 부처손, 넉줄고사리, 고사리삼, 툼라드시아, 안수리움, 라벤더, 제라늄, 로즈마리, 레몬밤, 이끼, 털머위, 심비디움, 초접란, 애플민트, 스킨답서스 등 |
| 소관목류 | 사철나무, 자금우, 만병초, 산호수, 백량금 등                                                                                                                                                                                                  |
| 덩굴류  | 모람, 빈카, 덩굴장미, 등나물, 마삭줄, 송악, 인동, 으름덩굴, 으아리, 노박덩굴, 담쟁이덩굴, 줄사철, 아이비 등                                                                                                                                                          |

\* 출처 : 미세먼지 Free Zone 구현을 위한 Passive/Active 통합 모듈형 장치 개발 연구(2차년도) 보고서

- 내공해성, 내한성, 내건성, 내음성 등 외부 환경 조건에서도 잘 견디는 식물 종을 선정하는 것이 바람직함

[표 2-62] 식물 선정 시 고려사항

| 구분   | 내용                                              |
|------|-------------------------------------------------|
| 상록식물 | 봄~겨울 사계절 동안 푸른 잎(녹색 잎)을 지니는 식물                  |
| 내공해성 | 식물이 공해에 견디는 정도로 아황산가스, 오존가스 등 대기 오염물질에 강한 식물    |
| 내한성  | 추위에 견디며 생존하는 능력으로 겨울철 동안 생존하는 식물                |
| 내건성  | 건조한 환경에서 견디는 능력으로 물을 주지않아 건조한 환경에서도 생존하는 식물     |
| 내음성  | • 광도가 낮은 조건에서도 생존하는 능력으로 그늘진 곳에서도 잘 자라고 번식하는 식물 |

##### ○ 식재 방법

- 식물 식재 방법은 ‘포트 식재’와 ‘토양망 식재’로 구분하였으며, 각각 식재 유형의 장·단점과 미세먼지

저감장치 설치 대상지의 환경 조건을 고려하여 식재 방법을 결정함

- 포트 식재는 포트 그대로를 식재하는 방법으로, 연질 플라스틱 포트에 식재된 식물을 Passive 시작품에 꽂아 넣음
- 포트 식물을 그대로 식재하기 때문에 별도의 기술 없이 간단하게 식재가 가능하다는 장점이 있음
- 그러나 뿌리 생장에 한계가 발생하여 식물의 생장 제한과 통기성이 원활하지 못한 단점이 있음
- 포트 식재의 기준 화분 크기는 3치~4치(포트 직경 10cm) 정도이며, Passive 시작품 1개를 기준으로 8개의 포트 적용이 가능함



[그림 2-79] 포트 식재

- 토양망 식재는 토양 주머니에 식물을 식재하는 방법으로 섬유펠트 소재의 마대주머니에 일정량의 토양을 넣고 식물을 식재함
- 토양망 식재는 장치 주변으로 토양 날림이 방지되고, 토양 수분을 유지하여 식물생육에 용이하다는 장점이 있음
- 그러나, 식물 고사 및 병해충 등의 문제 발생 시, 식물과 토양 주머니를 모두 교체해야 하므로 유지관리가 번거로움
- 토양망 식재 시 식생 모듈 1개를 기준으로 2개의 토양주머니가 적용되며, 토양 주머니 1개에는 3~4치 포트 크기의 식물 3본 정도 식재가 가능함



[그림 2-80] 토양망 식재

- 토양망 식재의 방법은 부직포 부착 → 토양 주머니 제작 → 식물 식재 → 표면 바크 포설의 순서로 진행되며 세부 내용은 다음 표와 같음

[표 2-63] 토양망 식재 단계

| 구분         | 내용                                                                      |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ① 부직포 부착   | Passive 시작품의 바닥 면에 원예용 부직포(방수시트 역할)를 잘라 부착함                             |
| ② 토양주머니 제작 | 녹화마대에 토양을 60% 정도 채운 후 토양이 채워지지 않는 부분을 접어 평평하게 만든 후 가로가 긴 사각형 모양을 제작함    |
| ③ 식물 식재    | 마대 주머니의 윗부분을 절개하여 식물을 식재함                                               |
| ④ 바트 포설    | 식재가 완료 되면 토양 흘날림 방지 및 보습효과 증진을 위해 토양주머니의 표면과 Passive 시작품 내부 공간에 바크를 포설함 |

#### ㉔ 관수 시스템(기술 고도화)

##### ○ 관수 유형

- 미세먼지 저감장치에 적용되는 관수 유형은 미세먼지 저감장치 설치 지역의 상수도 연결 여부에 따라 결정이 필요함
- 미세먼지 저감장치 설치지역에 상수도 연결이 가능한 경우 상수 연결 관수 방법을 적용하며, 상수도 연결이 불가능할 경우 물탱크 관수를 적용해야 함

[표 2-64] 관수 유형(상수 연결 관수, 물탱크 관수)

| 구분       | 내용                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 상수 연결 관수 | ·미세먼지 저감장치 설치 시 일반적으로 적용되는 관수 방법<br>·상수도 연결이 가능한 경우, 주변 상수도 라인과 관수 펌프를 연결하여 설치<br>·(장점) 별도의 물 공급 없이 자동으로 관수 용수공급이 용이함<br>·(단점) 초기 투자 비용이 높으며, 관수 용수량 사용에 대한 실시간 확인이 어려움                                                            |
| 물탱크 관수   | ·주변 상수도 연결이 불가능 할 경우에 적용하는 방법<br>·미세먼지 저감장치 하부에 물탱크를 배치하고, 물탱크에 관수 펌프를 연결하여 설치<br>-미세먼지 저감장치의 크기와 Passive 시작품 수량에 따라 물탱크의 크기가 결정됨<br>·(장점) 초기 투자비용이 낮으며, 관수 용수량 사용에 대한 실시간 확인이 가능<br>·(단점) 주기적으로 관수 용수를 공급해야하며, 겨울철에는 관수용수를 제거해야 함 |

※ 상수 연결 관수와 물탱크 관수 모두 겨울철 동파의 위험이 있으므로, 겨울철 관수 장치 관리가 필요함

##### ○ 관수 자재 및 방법

- 주변 환경의 피해 및 식물의 효율적인 관수 방법으로 점적관수를 적용하였으며, 점적관수 시설 운영을 위해 드리퍼, 농업용 호스, 펌프, 수위계 등의 관련 장비를 설치함
- 관수 자재 설치 방법은 미세먼지 저감장치 하부에 펌프를 설치하고 펌프와 농업용 호스를 연결함. 이후, 연결된 농업용 호스를 주 관수 라인으로하여 세부 관수 라인을 연결함
- 세부 관수라인에 최소 4개~8개의 드리퍼를 연결한 후, 식재된 토양에 쫓는 방식으로 설치함
- 물탱크 관수 방법을 적용할 경우, 물탱크에 저장된 관수 용수(물)의 저장용량을 확인하기 위해 수위계 설치가 필요함

- 미세먼지 저감장치가 설치된 지역에 강우가 발생 될 경우, 빗물 이외에 추가적인 관수가 진행되지 않도록 우적 센서를 설치해야 함
- 본 연구에서는 미세먼지 저감장치의 효율적인 유지관리를 위해 기술 고도화 방안으로 어플리케이션 (반딧불이 T 스마트팜)을 활용한 자동관수 시스템을 적용함
- 자동관수 어플리케이션 설치는 총 4단계로 진행되며, 어플리케이션 등록 과정에서 설치 업체의 승인 및 업체 제공 정보 입력이 필요한 부분이 있으므로 확인이 필요함

- ① 자동관수 어플리케이션 설치 : 안드로이드와 IOS에 대하여 선택적으로 설치
- ② 관수시스템 설치 업체의 문의를 통해 승인을 요청하고, 승인번호를 입력
- ③ 해당 장치의 정보와 업체에서 제공하는 IP/도메인을 입력
- ④ 서버 인증 후 장치 등록 완료



[그림 2-80] 자동관수 어플리케이션 설치 및 등록 과정

- 관수 어플리케이션 설치 후 자동제어 설정을 통해 관수 시스템의 작동 시간, 운영 시간 등에 대한 세부 설정이 필요함
- ① 어플리케이션 접속 후 제어 설정 선택
  - ② 등록된 관수 장치 선택
  - ③ 관수 작동 시간 및 운영 시간 설정(시작시간, 종료시간 설정)
  - ④ 자동제어 설정 저장 후 완료



[그림 2-81] 자동관수 어플리케이션 설정 방법

- 관수 시간은 야외 활동 시간을 고려하여 일반적으로 오전에 1회 관수하며, 계절적 시기에 따라 여름철에는 1회 이상 추가 관수를 진행함(기온에 따라 2회~3회 추가 관수)
- 미세먼지 저감장치에 식재된 수종 및 설치 장소의 환경 여건에 따라 관수 주기 및 관수 시간 등이 변동될 수 있음

## ② 유지관리 방안

### ㉠ Passive 시작품

- Passive 시작품의 화분 박스는 식물이 식재되는 부분으로 식재 후 식물의 관리 이외에는 별도의 관리가 요구되지 않음
- 그러나, 미세먼지 저감장치 연결 결착부와 식물도난방지 부품의 경우 탈부착이 가능한 부분으로 지속적인 점검이 필요함
- 결착부의 경우 양쪽 끝에 2개의 나사로 연결되어 있어 정기 점검을 통해 나사의 상태 및 개수를 상시 확인하여 마모와 부식, 분실 등을 방지해야 함
- 식물도난방지 부품의 경우, 식재된 식물의 도난을 방지하기 위해 ‘ㄱ자’ 형태로 제작하였으며, 고정상태 및 나사의 분실 여부 확인이 필요함



[그림 2-83] 도난방지 장치 및 Passive 시작품 결착부

#### ㉔ 식물

##### ○ 전지 및 전정

- 전지·전정이란 식물의 형상을 고르게 하고 웃자람을 막으며, 식물이 자라게 하기 위해 가지를 다듬는 것을 의미함
- 미세먼지 저감장치에 식재한 식물의 경우 식재 경관성 증진, 관리의 용이성, 양호한 수형 유지 등을 고려하여 전지 및 전정이 필요함
- 식물 생장으로 인한 미세먼지 저감장치 운영 문제, 식물의 고사 등으로 인한 경관 저해, 병해충 피해 등의 사항이 확인될 경우 식물의 전정작업 실시가 필요함
- 전지 및 전정을 시행할 경우 미세먼지 저감장치에 식재되는 수종 및 환경 조건 등에 따라 장치 관리자와의 협의 후 실시해야 함
- 일반적으로 수관 전체에 햇볕이 닿을 수 있도록 지나치게 우거진 가지를 우선적으로 솎아내며 도장지(부정아가 자란 것)를 제거해야 함
- 또한, 계절 및 시기에 따라 전지·전정 방법과 횟수가 달라지므로 이를 고려하여 진행해야 함
- (봄) 새눈과 꽃이 개화하는 3~4월에 일조량 및 통풍 등을 고려하여 실시함
- (여름) 장마 전·후인 6~8월에 습기 및 병해충으로 인한 피해를 최소화하기 위해 잎과 가지를 정리함
- (가을·겨울) 11~12월에 추위에 의한 저온 피해를 예방하도록 최소한의 가지만 남기고 정리함

[표 2-65] 전지 및 전정 시기, 방법

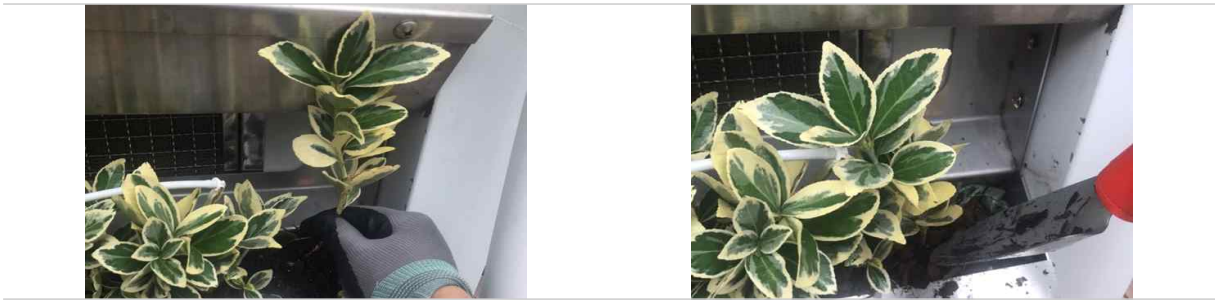
| 구분    | 1월 | 2월 | 3월 | 4월 | 5월 | 6월        | 7월 | 8월 | 9월 | 10월 | 11월   | 12월 |
|-------|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|-----|-------|-----|
| 유지·관리 |    |    | 개화 |    |    | 습기·병해충 방지 |    |    |    |     | 동해 방지 |     |




##### ○ 보식

- 보식이란 식재 대상지의 내·외부적 요인으로 생육 상태가 양호하지 않거나, 고사한 식물을 제거하고 식물을 보충하여 심는 것을 의미함
- 본 연구에서는 미세먼지 저감장치에 식재된 식물이 환경적·물리적 등의 요인에 의해 고사하였거나, 육안으로 식물 생육 상태가 현저히 손상되었을 경우 보식을 실시함
- 기존 식재 위치와 동일한 곳에 식재하였으며, 보식 이후 뿌리 활착과 식물의 환경 적응을 위해 지속적으로 모니터링 함



[그림 2-84] 부천역 Test-bed 보식

#### ○ 병해충 방제

- 병해충 방제란 약제 및 미생물 제제를 살포하여 식물 잎 표면으로 병원균이 침입하는 것을 방지함
- 식재되는 식물에 병해충이 발생되기 전에 예방하는 것이 바람직하나, 병해충이 이미 발생된 경우 초기에 약제를 살포하여 관리해야 함
- 약제 살포는 살충제, 살균제 등 병해충의 종류에 따라 약제의 종류, 살포량, 살포 시기 등을 결정해야 함
- 약제 살포 시 사람, 동물, 구조물, 차량 등에 피해를 주지 않도록 주의하며 바람을 등지고 살포해야 함
- 또한 기온이 너무 높거나 낮은 경우, 약제에 대한 식물체 저항이 발생할 수 있으므로 병해충 방제 효과가 낮아짐
- 이와 같이 기상조건은 약제 살포에 크게 영향을 미치므로 기상 상황 및 병해충의 활동 조건을 충분히 고려하여 적절한 시간대에 살포해야 함

#### ○ 겨울철 식재

- 겨울철에는 식물의 생육 저하로 인해 고사율이 높으므로 미세먼지 저감효과 감소는 물론, 주변 경관 저해의 요인이 될 수 있음
- 이에 겨울철에도 미세먼지 저감장치의 운영 및 심미적 기능을 유지할 수 있는 식재 방안 마련이 필요함
- 본 연구에서는 생화의 생육 한계를 고려하여 겨울철 조화 식재를 통해 미세먼지 저감장치의 지속적인 운영 방안을 제시함
- 기존 생화 식물과 형상이 유사한 폴리아이가지(40cm), 잎유카가지(20cm), 잎유카가지(80cm), 덩굴아이비(80cm) 조화를 선정함



폴리아이가지(40cm)

잎유카가지(20cm)

잎유카가지(80cm)

덩굴아이비(80cm)

[그림 2-85] 식재 조화 종류

- Passive 시작품의 크기만큼 스티로폼을 재단하여 삽입하고, 스티로폼에 조화를 꽂아 넣는 방법으로 식재함
- 조화 식재는 Passive 시작품 1개를 기준으로 6~8개가 적용되며, 식재된 조화는 낚시줄로 묶어 고정시킴

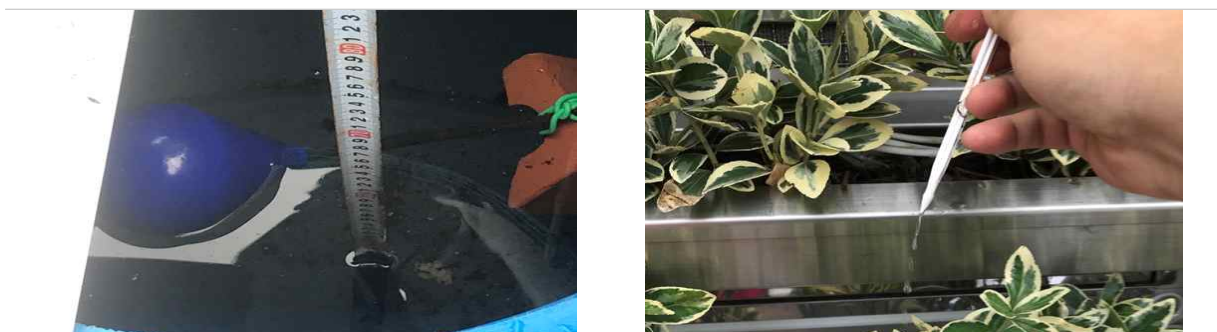


[그림 2-84] 부천역 Test-bed 조화 식재 현황

#### ㉢ 관수시스템

##### ○ 일반 관리

- 상수도 연결 관수의 경우, 물이 지속적으로 공급되는 관수 방법으로 별도의 관리가 필요하지 않음
- 그러나, 미세먼지 저감장치 설치 환경에 의해 상수도 연결이 어려울 경우 물탱크를 설치하여 물탱크에 저장된 수량을 확인하는 과정이 필요함
- 물탱크의 2/3 높이까지 물량이 감소한 경우, 물 공급이 필요함(Test-bed 운영결과, 600L의 물탱크 3개를 연결하여 1일 1회 관수한 결과, 약 45일을 기준으로 물 공급을 진행함)
- 그 외 관수 자재 연결 부분, 드리퍼, 펌프 등에 대하여 분기별 점검이 필요함
- 어플리케이션을 활용하여 드리퍼의 관수 운영상태를 확인하고, 정기적인 청소를 통해 관수 시스템 내부로 이물질이 유입되는 것을 방지함



물탱크 물량 확인

드리퍼 작동 확인

[그림 2-87] 부천역 Test-bed 관수 관리

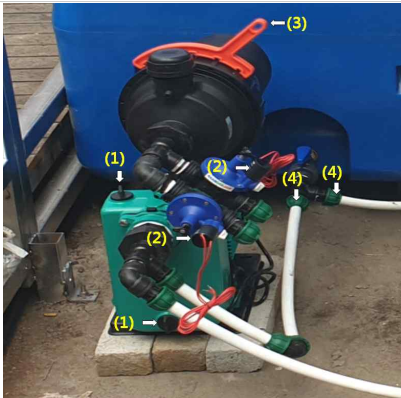
##### ○ 겨울철 관수

- 물탱크를 설치한 미세먼지 저감장치의 경우, 겨울철 동파의 위험을 방지하기 위해 관수 용수(물)의 관리가 필요함

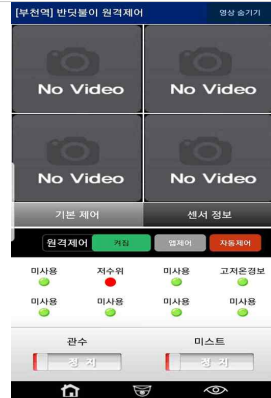
- 다음의 단계에 따라 물탱크에 저장된 용수(물)를 제거해야 함

- ❶ 펌프의 위와 아래쪽 후크 부분(1)을 돌려 펌프 내부 저장된 물빼기
- ❷ 펌프와 연결된 관 부분(2)의 밸브를 돌려 물빼기
- ❸ 펌프와 연결된 물통의 손잡이 부분(3)을 돌려 물통에 저장된 물빼기
- ❹ 물탱크와 펌프가 연결되는 관(4)을 각각 분리하여 물빼기

- 물탱크에 저장된 물을 모두 빼낸 후, 관수 어플리케이션에 저수위 알람이 켜져 있는지 확인해야 함



물탱크 물량 확인



드리퍼 작동 확인

[그림 2-88] 겨울철 관수 관리 방법

### ③ 성능 유지를 위한 유지관리 체크리스트

- Passive 시스템은 식물들의 안정적 생육을 위해서 여름철에는 1회 이상 추가 관수를 시행 하며, 겨울철에는 식물들의 동해 피해로 인한 고사를 방지하기 위해서 조화 식재로 대체해 볼 필요가 있으며, 동파 방지를 위해 관수 용수는 제거해주도록 함

[표 2-66] Passive 미세면지 저감장치의 유지관리 체크리스트(안)

| 구분   | 항목(점검사항)                 | 상태 |    |    | 내용 |
|------|--------------------------|----|----|----|----|
|      |                          | 양호 | 보통 | 불량 |    |
| 식생모듈 | • 식생모듈이 장치에 모두 걸착되어 있는가? |    |    |    |    |
|      | • 파손된 식생모듈이 있는가?         |    |    |    |    |
|      | • 식생모듈의 나사가 부식되었는가?      |    |    |    |    |
|      | • 도난방지 부품이 연결되어 있는가?     |    |    |    |    |
| 관수   | • 관수 어플리케이션이 작동하는지?      |    |    |    |    |
|      | • 드리퍼 연결 상태가 양호한가?       |    |    |    |    |
|      | • 물탱크의 물 잔량              |    |    |    |    |
|      | • 설정한 시간에 관수가 작동하는지      |    |    |    |    |
| 식물   | • 식물 상태는 양호한가?           |    |    |    |    |
|      | • 분실되거나 날아간 식물이 있는가?     |    |    |    |    |
|      | • 배수 상태는 양호한가?           |    |    |    |    |
|      | • 토양수분은 적절한가?            |    |    |    |    |
|      | • 전정 및 시비가 필요한가?         |    |    |    |    |

| 구분 | 항목(점검사항)               | 상태 |    |    | 내용 |
|----|------------------------|----|----|----|----|
|    |                        | 양호 | 보통 | 불량 |    |
|    | • 병해충이 발생하였는가?         |    |    |    |    |
|    | • 상토 및 바크가 유실되지는 않았는가? |    |    |    |    |
|    | • 웃자란 식물이 있는가?(전정 필요)  |    |    |    |    |
| 기타 | • 주변 정리는 잘 되었는지?(청소 등) |    |    |    |    |
|    | • 토양, 바크 등이 남아 있는가?    |    |    |    |    |

- 미세먼지 저감장치의 식물, 관수, 모듈의 운영 관리 공중에 따른 월별 계획은 다음과 같이 적용해 볼 수 있음

| 구분   |        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 비고                                                                                                            |
|------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 모니터링 |        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 상시 모니터링</li> <li>■ 장마철 집중 모니터링</li> </ul>                            |
| 식물   | 식재     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 봄철 생화 식재</li> <li>■ 겨울철 조화 식재</li> </ul>                             |
|      | 전지 전정  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 봄철 개화기 전지 및 전정 실시</li> <li>■ 여름철 장마 이후 전지 및 전정 실시</li> </ul>         |
|      | 보식     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 매월 모니터링 후 식물 상태에 따라 보식</li> <li>■ 여름철 태풍에 의해 피해 입은 식물 보식</li> </ul>  |
|      | 병충해 방제 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 고온건조기에 상시 모니터링 후 방제 (응애, 개각지 등)</li> </ul>                           |
| 관수   | 관수 용수  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 봄철 관수용수 공급</li> <li>■ 겨울철 관수용수 제거</li> <li>※물탱크 관수 유형일 경우</li> </ul> |
| 모듈   | 모듈 장착  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 생화 식재 시 모듈 철거 및 부착</li> <li>■ 조화 식재 시 모듈 철거 및 부착</li> </ul>          |

## (자) 설치 및 운영관리 비용 추정

### ① 기본전제

○ 식생을 이용한 Passive 시작품에 도입되는 부품은 크게 식생모듈과 식물, 식재 자재로 분류해 볼 수 있음

- (식생모듈) : 미세먼지 저감장치 외벽에 식물을 식재하는 화분형태의 부품
- (식물) : 공기정화 및 경관 개선을 위해 식재되는 미세먼지 저감 효과 식물
- (식재 자재) : 식생모듈에 식물을 식재하기 위해 필요한 자재(토양, 바크 모래 마대)

※ 식생모듈의 구성 및 식재 방법은 최종보고서 '시작품 운영 방안 및 기술고도화 방안 제시 부문 참고

### ② 설치 비용 추정

- 식생모듈의 경우, 통합형 미세먼지 저감장치의 높이에 따라 수량이 산출되며, 식생모듈의 수량이 결정됨에 따라 식물과 식재 자재의 수량이 결정됨
- 제시하는 설치 추정 비용은 본 연구의 Test-bed로 설치된 부천역 마루광장의 미세먼지 저감장치 규격에 따라 식생모듈과 식물 수량을 적용하였음

#### ㉠ 식생모듈

- 부천역 마루광장의 통합형 미세먼지 저감장치의 경우, 장치 한쪽 면을 기준으로 4개의 식생모듈이 적용됨
- 미세먼지 저감장치에 적용되는 총 식생모듈은 16개이며, 식생모듈 1개의 단가를 250,000원으로 하였을 때, 총 4,000,000원의 금액이 산출됨

#### ㉡ 식물

- 식물의 경우, 미세먼지 저감 장치 적합 수종 선정 기준에 따라 아이비로 선정하였으며, 식생모듈 1개를 기준으로 식물 6본이 식재됨
- 식생모듈에 적용되는 식물의 총 수량은 96본이며, 중형 크기의 아이비 1개의 단가를 8,000원으로 추정하였을 때, 총 768,000원의 금액이 산출됨

#### ㉢ 식재 자재

- 식재 자재의 경우, 식물 100본을 기준으로 상토 40L 2포대, 바크 40L 1포대가 필요하며, 식물의 비산을 방지하기 위해 적용되는 식생마대의 경우, 식생모듈 1개를 기준으로 2개가 필요하여 총 32포대가 필요함
- 식재 자재의 비용은 구매처에 따라 비용의 차이가 발생 될 수 있으며, 제시하는 비용은 부천역 마루광장의 미세먼지 저감장치 Test-bed 설치 시 확인된 업체를 기준으로 적용 하였음

[표 2-67] 설치비용 종합표

| 구분   | 규격             | 수량 | 단위 | 단가      | 금액        | 비고                    |
|------|----------------|----|----|---------|-----------|-----------------------|
| 식생모듈 | H300×W800×D100 | 16 | Ea | 250,000 | 4,000,000 | 미세먼지 저감장치 1면 기준 5개 적용 |

|      |               |    |    |        |           |                     |
|------|---------------|----|----|--------|-----------|---------------------|
| 식물   | 아이비(중형)       | 96 | 본  | 8,000  | 768,000   | 식생모듈 1개 기준<br>6본 식재 |
| 토양   | 상토 40L        | 2  | 포대 | 9,000  | 18,000    | 식물 50본 기준<br>1포대    |
| 바크   | 6~9mm 크기, 40L | 1  | 포대 | 8,000  | 8,000     | 식물 100본 기준<br>1포대   |
| 모래마대 | 마대주머니 (50장)   | 1  | 묶음 | 15,000 | 15,000    | 식생모듈 1개 기준<br>2장 적용 |
| 총합   |               |    |    |        | 4,809,000 |                     |

\* 현장에 적용한 시작품 설치에 국한시켜 개략 산출한 비용으로 현장 여건 및 시설 선정 등에 따라 달라질 수 있음

- 표에 적용된 제품별 이미지는 아래 그림을 참조하도록 함

[Passive 시작품 설치 예시 및 개별 부품 이미지]



| 식물 및 식재 자재                                                                          |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| 식물(아이비 중형)                                                                          | 토영(상토)                                                                              | 바크(6~9mm)                                                                            | 모래마대                                                                                  |

| 조화식재                                                                              |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| 조화1(아이비)                                                                          | 조화2(호랑가시)                                                                         | 조화3(잎유카가지)                                                                        | 스티로폼                                                                                |

- 이에 식생모듈, 식물, 식재자재를 포함한 Passive 시작품의 설치 비용은 총 4,809,000원으로 추정할 수 있음
- 본 연구의 Test-bed인 부천역 마루광장 미세먼지 저감장치의 경우, 상수도 연결이 불가하여 미세먼지 저감장치 하부에 물탱크를 설치하는 특수 조건이 적용됨
- 다른 대상지에 시작품을 추가 설치할 경우, 물탱크를 설치하지 않고 하단부까지 식생모듈을 설치 할 수 있어 식생모듈과 식물의 적용 수량 증가에 따라 설치 비용 총액이 증가할 수 있음

### ③ 운영관리 비용 추정

- Passive 시작품의 경우, 살아있는 식물을 식재하고 운영하는 장치로서 식물의 생육 상태에 따라 식물과 식재 기반재에 대한 교체 등의 유지관리가 필요함
- 모니터링 결과, 겨울철을 제외한 봄~가을까지는 식물의 생육상태가 양호한 것으로 확인되었으나, 식물 생육 상태와 경관적 측면을 고려할 경우 연 1회 정도 전반적으로 추가 교체가 필요할 것으로 판단됨
- 또한, 겨울철에는 식물이 원활하게 생육하는데 한계가 있어 미세먼지 저감효과의 감소는 물론, 주변 경관을 저해하는 요인이 될 수 있음
- 이에 겨울철 식물의 생육 한계를 고려하여 조화 식재를 통해 미세먼지 저감장치의 경관미를 향상시키는 방향으로 유지관리 하는 것으로 적용해 볼 수 있음
- 적용 조화는 원식물과 형상이 유사한 아이비, 호랑가시, 잎유카가지 조화를 선정하였으며, 식생모듈과의 결합성을 위해 스티로폼을 재단하여 조화를 꽂아 넣는 방법으로 식재함
- 조화 식재 수량은 식생모듈 1개를 기준으로 조화의 크기에 따라 6개~8개 적용이 가능함(아이비 6개, 호랑가시 6개, 잎유카 가지 8개)

[표 2-68] 연 1회 추가 교체(필요시) 및 겨울철 조화식재 관리비용 산출

|              | 구분   | 규격               | 수량 | 단위 | 단가     | 금액      | 비고                  |
|--------------|------|------------------|----|----|--------|---------|---------------------|
| 추가<br>교<br>체 | 식물   | 아이비(중형)          | 96 | 본  | 8,000  | 768,000 | 식생모듈 1개 기준<br>6본 식재 |
|              | 토양   | 상토 40L           | 2  | 포대 | 9,000  | 18,000  | 식물 50본 기준<br>1포대    |
|              | 바크   | 6~9mm 크기,<br>40L | 1  | 포대 | 8,000  | 8,000   | 식물 100본 기준<br>1포대   |
|              | 모래마대 | 마대주머니<br>(50장)   | 1  | 묶음 | 15,000 | 15,000  | 식생모듈 1개 기준<br>2장 적용 |

|                  |           |   |    |   |           |           |                     |
|------------------|-----------|---|----|---|-----------|-----------|---------------------|
|                  | 소계        |   |    |   |           | 809,000   |                     |
| 조<br>화<br>식<br>재 | 아이비       | — | 24 | 개 | 26,000    | 624,000   | 식생모듈 1개 기준<br>6개 적용 |
|                  | 호랑가시      | — | 24 | 개 | 14,000    | 336,000   | 식생모듈 1개 기준<br>6개 적용 |
|                  | 잎유카<br>가지 | — | 64 | 개 | 6,500     | 416,000   | 식생모듈 1개 기준<br>8개 적용 |
|                  | 스티로폼      | — | 16 | 장 | 9,000     | 144,000   | —                   |
|                  | 소계        |   |    |   |           | 1,520,000 |                     |
| 총합               |           |   |    |   | 2,329,000 |           |                     |

※추가 교체의 경우, 필요시에 따라 선택적으로 진행될 수 있음

- 이에, Passive 시작품의 추가 교체 등에 따른 관리비용은 식물과 식재 자재 비용을 합산하여 809,000원으로 산출되며, 겨울철 조화 식재 비용은 1,520,000원으로 산출되어 총 운영관리 비용은 2,329,000원으로 추정됨

#### ④ 비용 절감 방안

- 본 연구에서는 Passive 시작품에 도입되는 수종으로 미세먼지 저감에 효과적이며, 식재 시 미세먼지 저감장치의 녹화율이 높은 중형 아이비를 선정하였음
- 중형 아이비의 경우, 미세먼지 저감에 효과적인 다른 수종(산호수, 사철나무 등) 보다 1.5배~2.0배 단가가 높은 것으로 확인됨
- 이에 추가적인 시작품 설치 시, 비용 절감을 위해 Passive 시작품 도입 수종을 변경하는 방안을 고려해 볼 수 있음
  - 사철나무 1본 단가를 3,500원으로 적용 할 경우, 식물과 식재 자재의 총 비용은 377,000원으로 중형 아이비 식재 시의 비용(809,000원)과 비교하여 약 53.4% 절감이 가능함
- 또한, 식생모듈의 경우 현재 Test-bed 조성을 위해 소량의 맞춤형대로 제작하여 제작비용이 높게 책정되었음. 향후 미세먼지 저감장치가 기성품화 또는 양산될 경우, 비용이 감소될 것으로 생각됨

### (3) 통합모듈형 저감장치 설치운영에 따른 미세먼지 저감효과

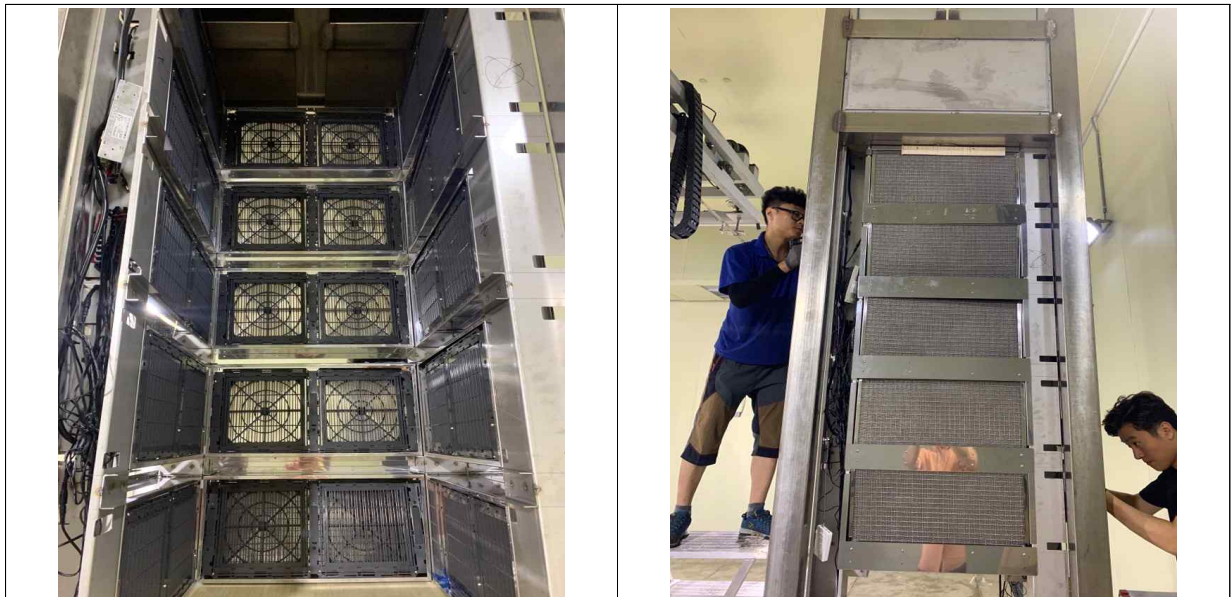
#### (가) 챔버형 시스템 내 시작품 처리성능 검증

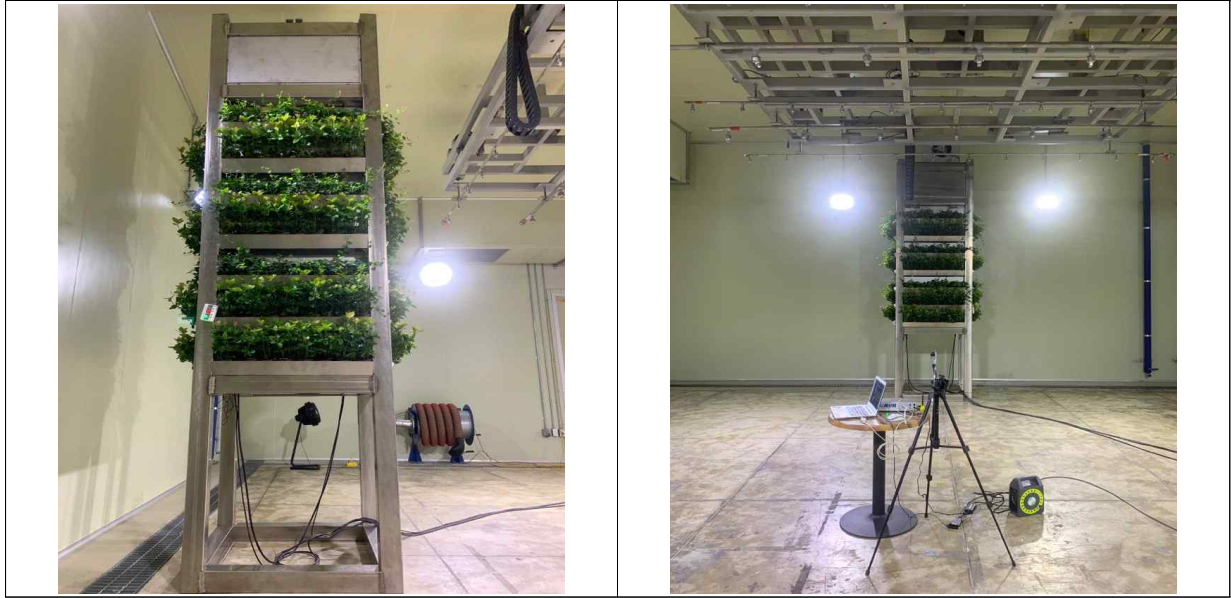
##### ① 시험목적

- Test-Bed 설치, 운영 이전에 외부 영향 요소를 통제된 상황에서 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치의 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5) 제거성능 시험을 목적으로 챔버형 시스템 실험을 수행함

##### ② 시험챔버 및 측정장비 구성

- 시험 챔버의 구성은 한국공기청정협회 규격(SPS-KACA 002-132:2018, 실내용 공기청정기)을 변형하여 한국건설생활환경시험연구원에서 보유한 중형챔버(10m x 10m x 4.5m)에서 시험을 진행함
- 시험 장비 구성은 입자발생장치(SIX JET ATOMIZER 9306, TSI), 입자계수기(11-D, GRIMM)를 사용하였으며, 써큘레이터를 이용한 챔버 내부 공기순환을 통해 미세먼지 농도를 균일하게 함
- KCl(염화칼륨) 10% 수용액을 사용하여 시험입자를 발생시킴





[그림 2-89] 미세먼지 저감장치 시작품 성능평가 (챔버실험)

### ③ 시험방법 및 절차

- 한국공기청정협회 규격 부속서 A의 A.3항의 절차를 준용하여 시험 챔버 내 미세먼지 및 초미세먼지의 배경 농도를 측정함
- 시험 챔버 내 입자를 발생시키고, 교반기를 작동시키면서 일정농도 이상 시험 챔버 내로 입자 공급
- 처리유량, 장치와의 거리, 식생 설치 유무에 따른 미세먼지 저감장치 처리성능을 측정함

### ④ 시험결과 산출

- 시간에 따른 분진감소율 : 시간에 따른 시험입자 감소율은 다음의 식으로 산출함

$$\eta = \left(1 - \frac{C_{nf}}{C_{\epsilon}}\right) \times 100$$

- $\eta$  : 자연감소 시간에 따른 분진 감소율 (%)
- $C_{nf}$  : 자연감소 시 측정 후 t분에서의 입자농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
- $C_{\epsilon}$  : 자연감소 시 측정개시점 t=0에서의 입자농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

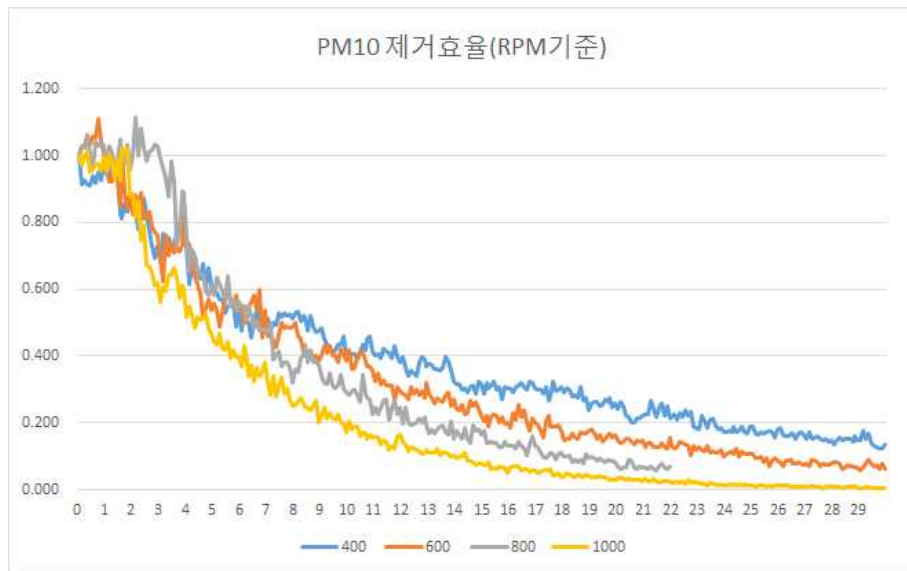
- 자연감소 및 운전감소의 농도 변화율을 모니터링 하였으며, 시험입자 발생 후 안정화된 시점 이후 시험조건별 저감율을 측정함

### ⑤ 시험결과 분석

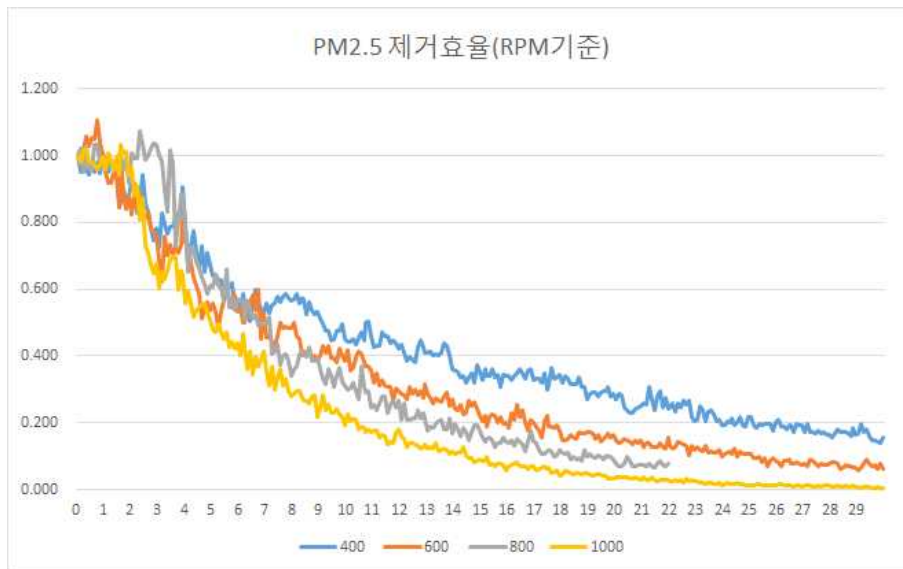
#### ㉠ 처리 유량에 따른 분진감소율((x축 : 샘플링 횟수, y축 : 시간(분))

- 미세먼지 저감장치 내 송풍기의 회전수를 400, 600, 800, 1000 rpm으로 변화시키며 PM10 과 PM2.5의 농도 변화를 측정함
- 미세먼지 저감장치 가동 3분 이내에는 처리 유량 변화에 의한 미세먼지 저감 효과 변화가 크지 않았으나, 이후에는 유량 변화에 의한 영향이 커지는 것을 확인하였음

- 모든 실험 조건에서 미세먼지 저감장치 가동 30분 이내 초기농도 대비 80% 이상 미세먼지와 초미세먼지 농도가 감소하였음
- 송풍기의 회전수를 600 rpm 이상으로 가동시킬 경우 30분 이내 초기농도 대비 90% 이상 미세먼지와 초미세먼지가 제거되었으며, 1000 rpm 조건에서는 97% 수준의 제거효율을 나타냄



[그림 2-90] 처리유량 변화에 따른 PM10 농도 변화



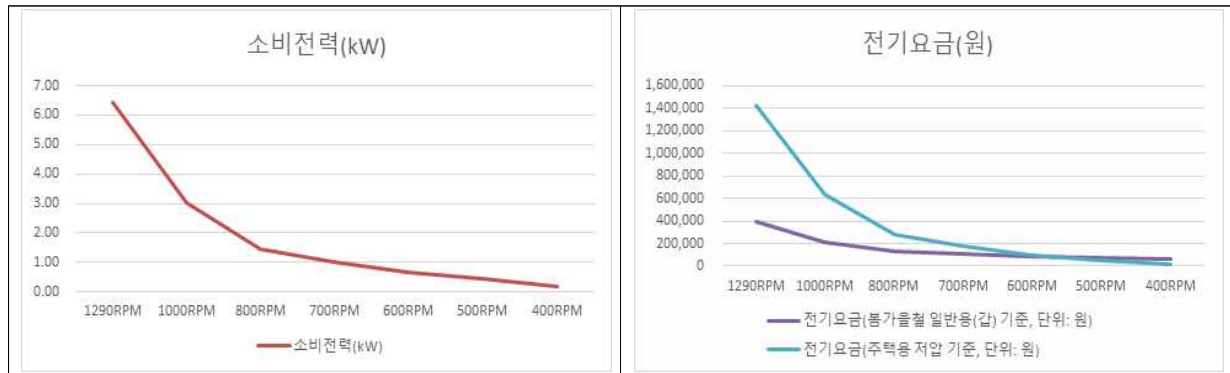
[그림 2-91] 처리유량 변화에 따른 PM2.5 농도 변화

- 처리유량 변화에 따른 소비전력을 분석한 결과 800 rpm을 기준으로 전력량 소모가 급격히 변화하는 것을 확인할 수 있음

- 미세먼지 처리효율과 에너지소모량을 고려하였을 때 800 rpm 조건에서 장치를 운영하는 것이 적합할 것으로 판단됨

[표 2-67] 처리유량 변화에 따른 에너지 사용량 및 전기요금 비교

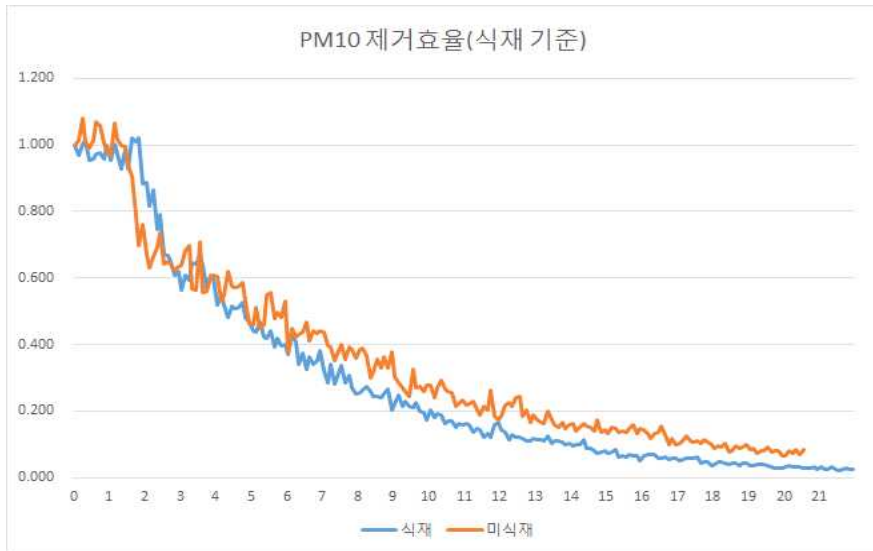
| RPM     | 전류(A) | 월간사용량_24시간 가동<br>(KWh) | 전기요금_일반용<br>(원) | 전기요금_주택용<br>(원) |
|---------|-------|------------------------|-----------------|-----------------|
| 1290RPM | 16.98 | 6.45                   | 4645.728        | 393,370         |
| 1000RPM | 7.92  | 3.01                   | 2166.912        | 209,590         |
| 800RPM  | 3.84  | 1.46                   | 1050.624        | 126,850         |
| 700RPM  | 2.64  | 1.00                   | 722.304         | 102,540         |
| 600RPM  | 1.8   | 0.68                   | 492.48          | 85,490          |
| 500RPM  | 1.2   | 0.46                   | 328.32          | 73,300          |
| 400RPM  | 0.54  | 0.21                   | 147.744         | 59,920          |



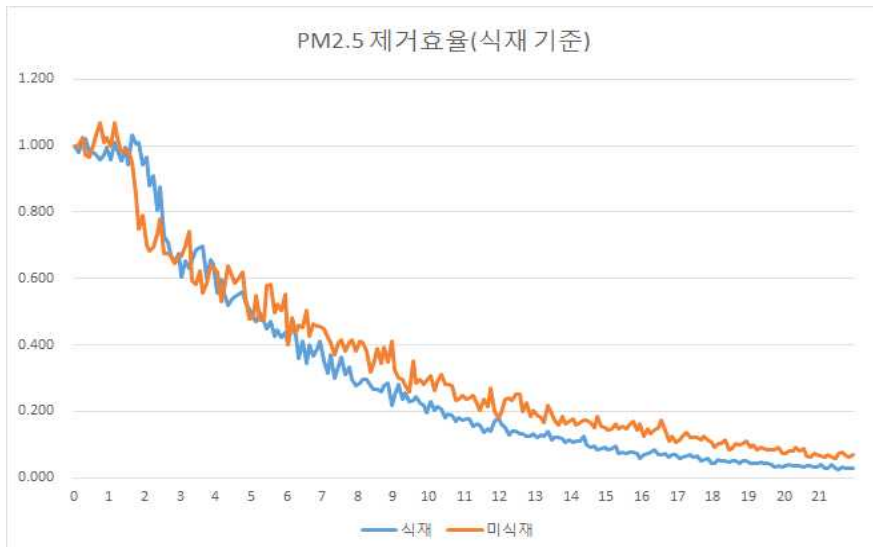
[그림 2-92] 처리유량 변화에 따른 에너지 사용량 및 전기요금 비교

#### ㉠ 식생 유무에 따른 분진감소율 (x축 : 샘플링 횟수, y축 : 시간(분))

- 식생 유무에 따른 미세먼지 저감 효과를 비교하기 위해 하이브리드 집진패널만 장착한 시작품과 식생과 하이브리드 집진패널 모두를 장착한 시작품 간 비교 실험을 진행함
- 하이브리드 집진 패널만 장착한 시작품의 경우에도 장치 가동 30분 내 90% 정도의 미세먼지 저감 효과를 보였으나, 식생패널을 추가적으로 장착한 시작품에 비해 최종적인 저감 효과가 낮았음
- 미세먼지 저감효율과 도시생활 공간에서의 심미감 및 정서적인 효과를 고려할 경우 단순 Active 기술의 적용보다는 식재를 복합적으로 활용하는 Active/Passive 기술의 융합이 보다 효과적일 것으로 판단됨



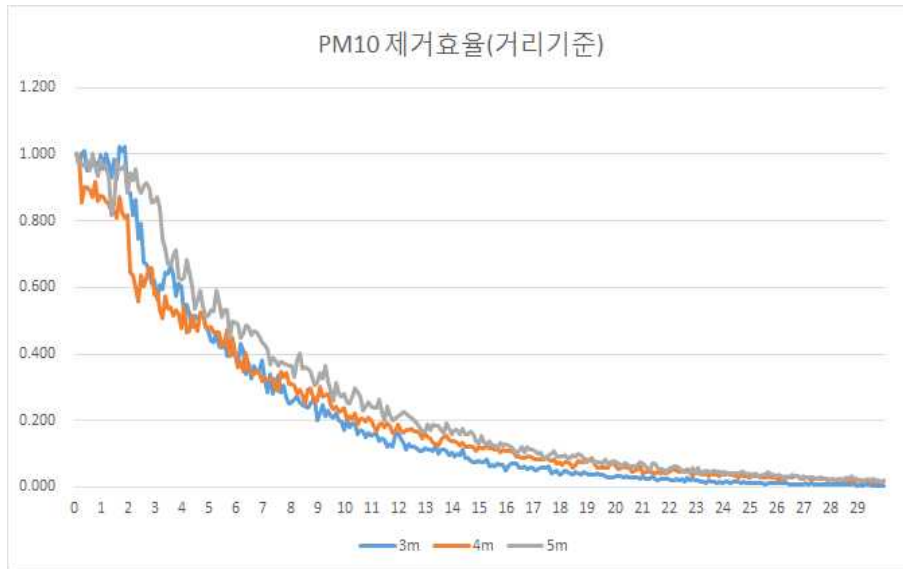
[그림 2-93] 식생 유무에 따른 PM10 농도 변화



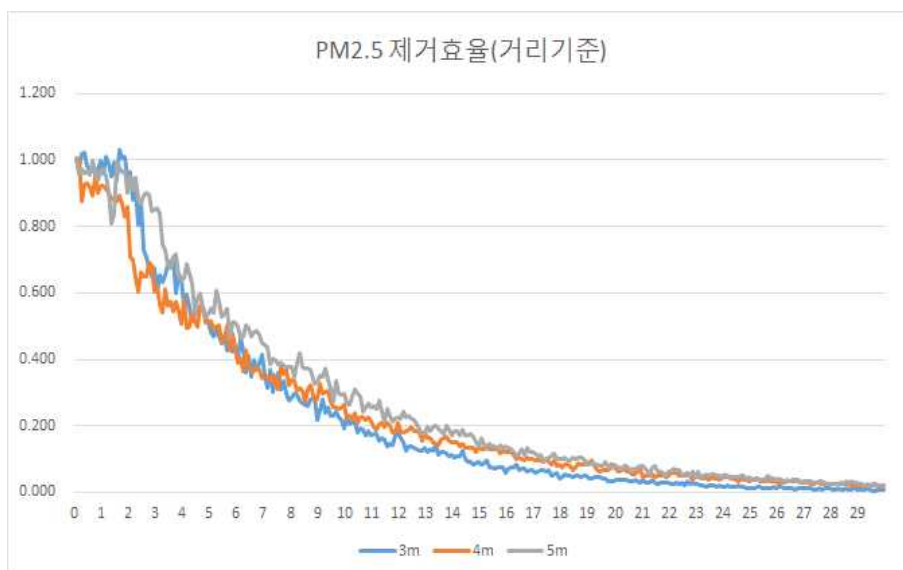
[그림 2-94] 식생 유무에 따른 PM2.5 농도 변화

㉔ 거리 변화에 따른 분진감소율 (x축 : 샘플링 횟수, y축 : 시간(분))

- 미세먼지 처리효율과 에너지사용량을 고려하여 800 rpm, 하이브리드 집진패널/식생패널 동시 장착 조건으로 고정한 후 거리변화에 따른 미세먼지 농도 변화를 측정함
- 미세먼지 저감장치 가동 초기에는 장치로부터 거리가 멀어질수록 미세먼지 농도 저감 기율기가 상대적으로 작았으나, 가동 30분에는 거리와 관계없이 챔버 내 미세먼지가 97% 이상 제거되었음
- 챔버와 같이 밀폐된 실험 조건 내에서는 연구목표로 제시한 반경 3m 이내 미세먼지 농도 90% 이상 저감을 달성할 수 있는 것이 확인되었으며, semi-closed system 또는 실외공간과 같은 open system에서도 효과가 있을 것으로 예상됨



[그림 2-95] 거리 변화에 따른 PM10 농도 변화



[그림 2-96] 거리 변화에 따른 PM2.5 농도 변화

## (나) 미세먼지 저감 영향 범위에 대한 CFD 기반 시뮬레이션 분석

### ① 시뮬레이션 목적

- 미세먼지 농도 실측 분석에 앞서 챔버형 시스템 실험 결과를 기반으로 운전조건을 설정하였을 때, 실외 공간 미세먼지 Free Zone 구현 가능성을 전산유체모사(CFD) 시뮬레이션을 통해 예측함

### ② 시뮬레이션 개요

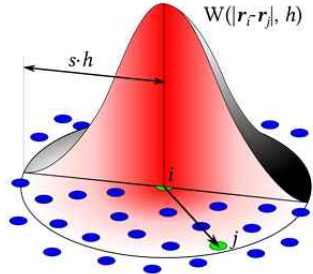
- CFD란 해석적으로는 풀 수 없는 물리적 현상의 지배방정식을 시간적, 공간적으로 이산화하여 근사해를 구하는 방법론을 의미함

- 미세먼지를 포함한 공기와 같은 비압축성 유체의 지배방정식을 해석할 수 있는 방법에는 Eulerian 좌표계 기반의 격자법과 Lagrangian 좌표계 기반의 입자법이 있음
- 본 시뮬레이션에서는 고정된 좌표계 활용에 따라 이류항을 고려하여 계산 격자가 필수적으로 수반되는 격자법이 아닌 흐름에 따른 좌표계를 활용하는 입자법을 활용하는 NFLOW-SPH 소프트웨어를 활용하여 시뮬레이션을 수행함
- NFLOW-SPH는 최대 1억개의 입자를 사용하여 다양한 상황을 해석할 수 있으며, 다상 유동 해석이 가능하여 미세먼지 이동과 같이 복잡한 물리 현상을 해석하는데 적합함

$$\langle f_i \rangle = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\rho_j} W(r_{ij}, h) f_j(x_j, t) \quad \langle \nabla f_i \rangle = \rho_i \sum_{j=1}^n m_j \left( \frac{f_i}{\rho_i^2} + \frac{f_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(r_{ij}, h) \quad \langle \nabla^2 f_i \rangle = \sum_{j=1}^n m_j \frac{\mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla W(r_{ij}, h)}{|\mathbf{r}_{ij}|^2 + (0.01h)^2} (f_i - f_j)$$

Navier-Stokes equation

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}$$

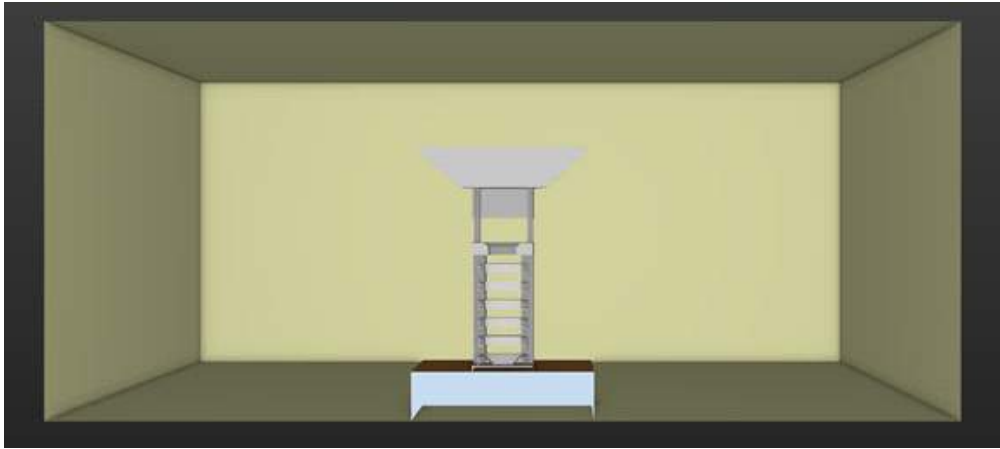
$$\frac{Dv_i}{Dt} = - \sum_{j=1}^n m_j \left( \frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(r_{ij}, h) + \frac{2\nu}{\rho_i} \sum_{j=1}^n m_j \frac{\mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla W(r_{ij}, h)}{|\mathbf{r}_{ij}|^2 + (0.01h)^2} (v_i - v_j) + \mathbf{g}$$


[그림 2-97] 물리량의 SPH식 근사

### ③ 시뮬레이션 조건

- 부천역 마루광장에 설치된 타워형 미세먼지 저감장치의 설계 도면과 운전 조건별 정화 능력을 바탕으로 시뮬레이션 조건을 설정함

| 구분   | 바람이 없는 경우                                                                                                                                                    | 바람이 있는 경우                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 초기입자 | <ul style="list-style-type: none"> <li>입자개수: 약 170만개</li> <li>입자지름: 0.1m</li> </ul>                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>입자개수: 약 185만개</li> <li>입자지름: 0.1m</li> </ul>                                                                          |
| 해석영역 | <ul style="list-style-type: none"> <li>15m(W) x 15m(D) x 6.5m(H)</li> </ul>                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>18m(W) x 12m(D) x 7m(H)</li> </ul>                                                                                    |
| 운전조건 | <ul style="list-style-type: none"> <li>500rpm, 800rpm</li> </ul>                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>800rpm</li> </ul>                                                                                                     |
| 해석조건 | <ul style="list-style-type: none"> <li>시간변화량 : 0.0015초</li> <li>점성 : 0.002 kg/(m·s)</li> <li>밀도 : 1.3 kg/m<sup>3</sup></li> <li>해석시간 : 190초 (5배속)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>시간변화량 : 0.0015초</li> <li>점성 : 0.002 kg/(m·s)</li> <li>밀도 : 1.3 kg/m<sup>3</sup></li> <li>해석시간 : 190초 (5배속)</li> </ul> |



[그림 2-98] 설계도면 기반으로 작성한 해석 모델

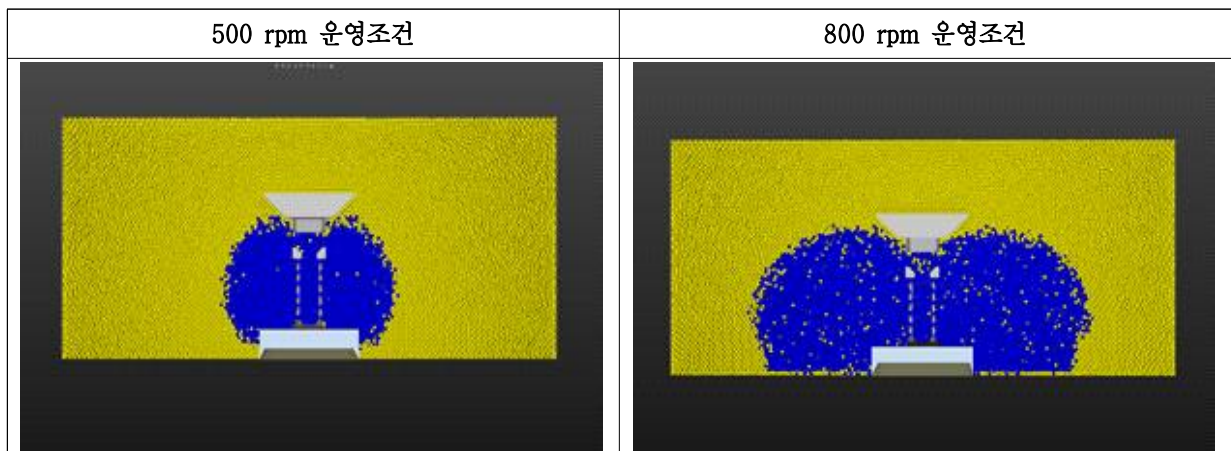
#### ④ 시뮬레이션 결과

##### ㉞ 바람이 없는 경우

- 500 rpm으로 운영할 경우 운전 시작 후 약 30초까지 정화 영역이 점진적으로 확대되며, 반경 약 2m 영역까지 정화가능
- 800 rpm으로 운영할 경우 운전 시작 후 약 40초까지 정화 영역이 점진적으로 확대되며, 반경 약 4m 영역까지 정화가능

##### ㉟ 바람이 부는 경우

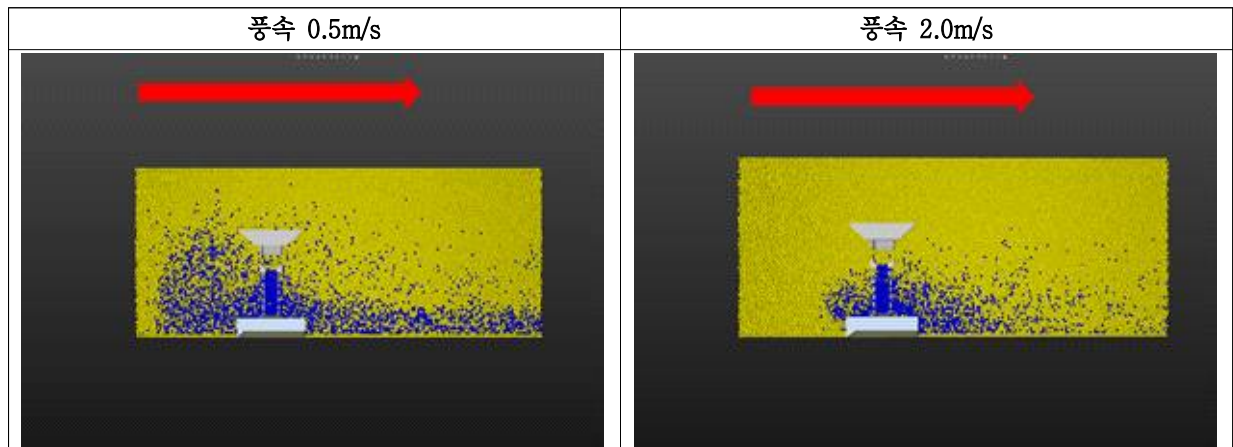
- 풍속 0.5m/s의 경우 바람이 불어오는 방향으로 약 6m 까지 미세먼지 정화능력을 보임
- 운전시작 약 5초까지 정화 영역이 확대되며, 이후 바람이 부는 방향으로만 점차 확대됨
- 풍속 2.0m/s의 경우 바람이 불어오는 방향으로 약 2m 까지 미세먼지 정화능력을 보임
- 운전시작 약 2초 후부터 정화영역이 수렴되며, 풍속이 유출 유속에 비해 높아 정화 영역이 다소 축소됨



[그림 2-99] 미세먼지 Free Zone 구현 시뮬레이션 (바람이 없는 경우)

㉔ 미세먼지 Free Zone 구현가능성 영향 범위

- 바람이 없는 날의 경우 800 rpm 이상의 유량으로 장치를 가동할 경우 반경 3m 이내에서 미세먼지 Free Zone 구현이 가능할 것으로 예상됨
- 적당한 풍속의 바람이 부는 경우 미세먼지 Free Zone 구현에 큰 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 바람과 마주하는 방향은 정화된 공기가 확산되어 더욱 넓은 미세먼지 Free Zone 을 형성할 수 있음
- 장치에서 배출되는 유속에 비해 풍속이 높은 바람이 부는 경우에는 가동효율이 저하되는 것으로 판단되나 송풍기 가동을 가변식으로 전환하여 불어오는 바람을 활용할 수 있는 방법을 강구한다면 에너지사용량 저감은 물론 처리효율 향상에도 기여할 수 있을 것으로 예상됨



[그림 2-100] 미세먼지 Free Zone 구현 시뮬레이션 (바람이 있는 경우)

## (다) 실외 미세먼지 농도변화 모니터링

### ① 실외 미세먼지 농도 모니터링 방법

- IoT 기반의 실외 공기질 실시간 측정 시스템인 에어가드 K 실외공기질(OAQ: Outdoor Air Quality) 모니터링 스테이션을 활용하여 미세먼지 저감장치 활용에 따른 농도변화 분석을 위해 시간별, 일별, 계절별 효과분석 및 성능검증을 진행함
- 미세먼지 저감장치 설치 현장운영 공간(1.5m, 3.0m)과 미설치 공간(10m 이격 구간)에 각각 2대씩 설치하고 비교분석 데이터를 도출하여 미세먼지 저감 효과에 대한 신뢰성을 확보하고자 했음

[표 2-68] 실외공기측정기 신뢰도

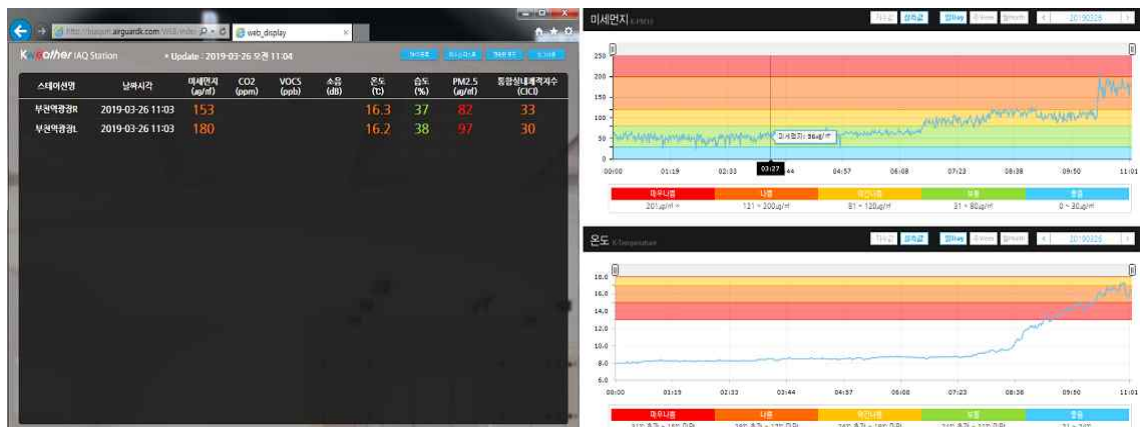
|                          |                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 미세먼지<br>(PM10,<br>PM2.5) | 센서형식 : 광산란(적외선) 검출<br>측정범위 : 0~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>출력신호 : PWM(pulse width modulation)<br>- 기준기와의 비교 및 연구 자료에 근거한 PM10 및 PM2.5 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 변환 값<br>오차범위 : RMSE $\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내 |
| 온도                       | 센서형식 : 반도체(Band gap)<br>측정범위 : $-40 \sim 125^\circ\text{C}$<br>출력신호 : 디지털(I2C)<br>오차범위 : $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ( $20 \sim 40^\circ\text{C}$ ), $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 이하 ( $0 \sim 70^\circ\text{C}$ )                       |
| 습도                       | 센서형식 : 정전용량(capacity polymer)<br>측정범위 : 0~100%, 상대습도<br>출력신호 : 디지털(I2C)<br>오차범위 : $\pm 2.0\%$ ( $20 \sim 80\%$ ), $\pm 4.0\%$ 이하 ( $0 \sim 100\%$ )<br>온도상수 : 최대 $0.13\%/^\circ\text{C}$                                        |
| 전원 및<br>운용환경             | 공급전원 : 220V AC<br>소모전력 : 0.5W<br>작동온도 : $-20 \sim 60^\circ\text{C}$<br>운용환경 : 비, 눈에 대한 보호기능 구비, 필터내장으로 먼지로부터 센서보호                                                                                                               |



[그림 2-101] 실외 미세먼지 농도 모니터링 측정기 설치 현황(미세먼지 처리범위 외 지점)



[그림 2-102] 미세먼지 저감효과 모니터링을 위한 실외공기측정기 설치현황 (저감장치 내)



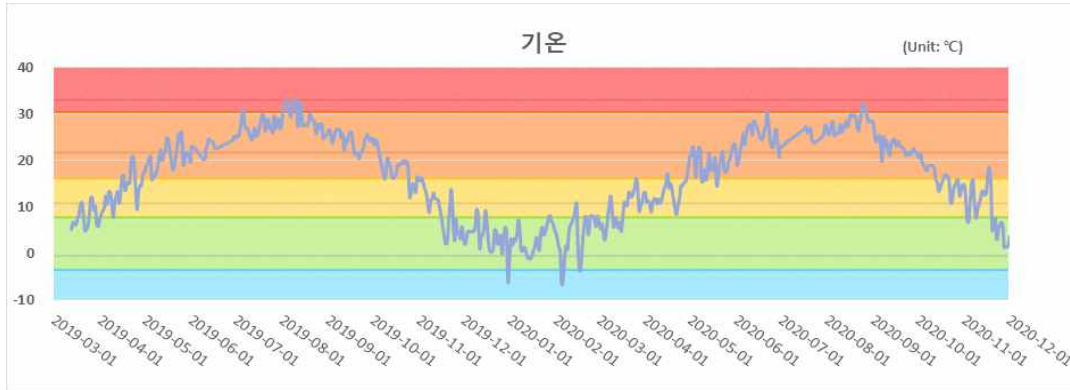
[그림 2-103] 미세먼지 현황 실시간 모니터링

## ② 실외 모니터링 분석 결과

- 부천역 마루광장 실외모니터링은 19년 3월부터 실시간 측정시스템이 적용되었으며, PM10, PM2.5, 온도, 습도가 분당 1회 측정되어 DB에 기록되고 있음
- 장기간 측정된 모니터링 결과와 지역 측정망 자료의 비교를 통해 실제 도시민들이 생활하는 공간과 제공받는 정보의 차이와 공간 특성에 따른 미세먼지 농도 분포를 파악할 수 있음

#### ㉓ 미기후 특성 분석

- 모니터링 기간 동안 대상지역의 여름철 평균기온은 28.2℃로 나타났으며, 겨울철의 평균기온은 3.6℃로 나타남. 그리고 연평균 기온은 16.2℃로 측정되어짐



[그림 2-104] Test-Bed 실시간 온도변화 모니터링

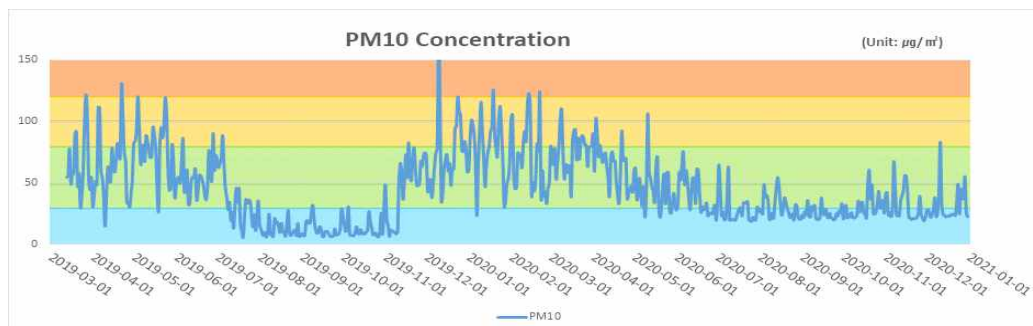
- 상대습도의 경우 년 평균 약 53%~54% 수준으로 나타남. 7~8월달에 상대습도가 가장 높았으며, 시간대별로는 낮에는 기온에 반비례하여 상대습도가 감소하고, 밤에는 반대로 기온이 낮아져 상대습도가 증가하는 것으로 나타남



[2-105] Test-Bed 실시간 습도변화 모니터링

#### ㉔ Test-Bed 설치 구간의 미세먼지 농도 현황

- 모니터링 기간 동안 미세먼지 농도 현황

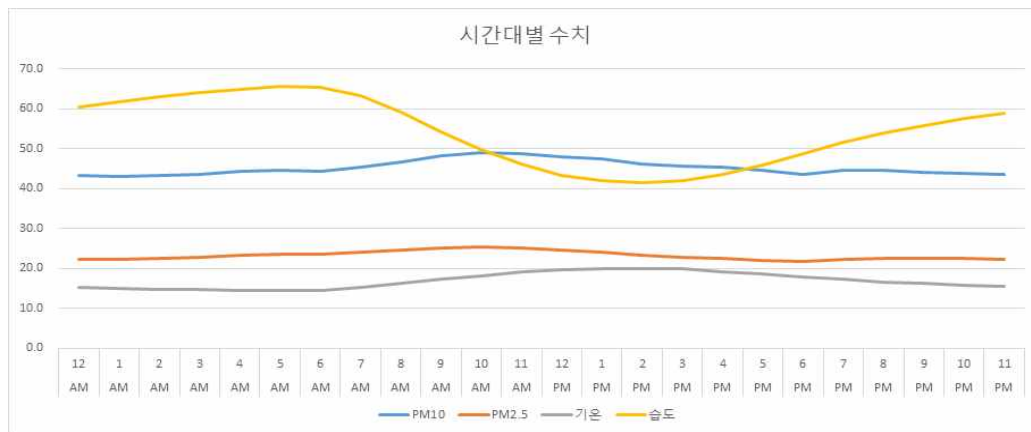


[그림 2-106] Test-Bed 지역의 실시간 PM10 농도변화 모니터링

- 모니터링 측정기간 동안 연평균 미세먼지(PM10) 농도의 경우 2019년에는  $58.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 2020년에는  $45.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 19년 대비 20년에 미세먼지 농도가 낮아진 것으로 나타남
- 2019년도에는 봄철인 4월~5월에 미세먼지 농도가 상대적으로 높았다가 6월 이후부터 농도가 감소하는 것으로 나타났으며, 2020년에 들어서는 1월부터 4월까지 미세먼지 농도가 상대적으로 높다가 5월 이후부터 농도가 감소하는 것으로 나타남. 20년의 경우 이전과는 다른 연평균 농도분포 특성을 보여줌

#### ○ 주요 시간대별 미세먼지 농도 비교

- 시간대별 미세먼지 농도를 살펴본 결과 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았으며, 온도와 기온과의 관계성도 크지 않은 것으로 나타났는데, 테스트 베드 적용 지역이 이전의 일상과는 달라진 외부환경과 활동유형이 영향을 미친 것으로 생각됨

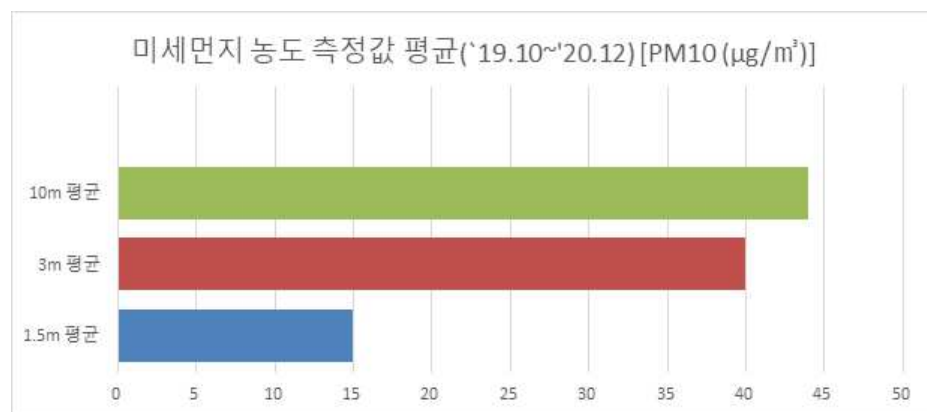


[그림 2-107] 시간대 별 모니터링 인자 변화추이

#### ㉔ 통합모듈형 저감장치 설치구간과 대조구 간 미세먼지 농도 비교

##### ○ 모니터링 기간 동안 미세먼지 농도 비교(월 평균 값 기준)

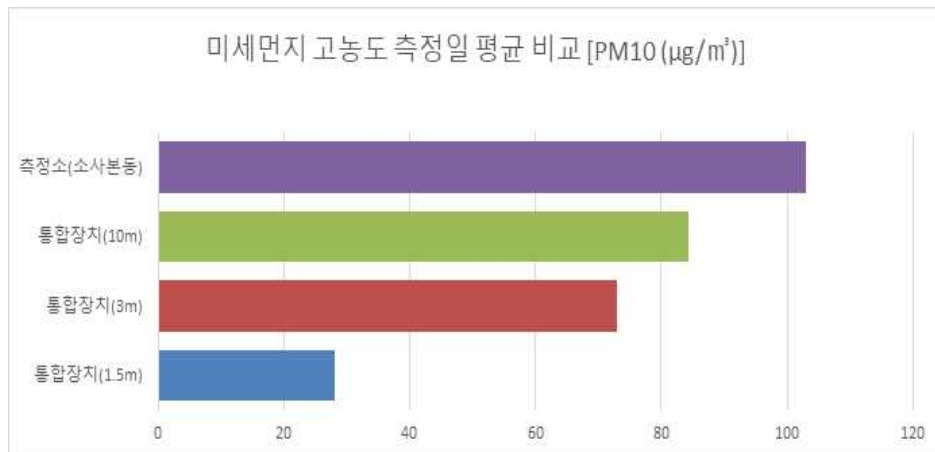
- 통합모듈형 장치가 가동된 19년 10월부터 12월까지, 그리고 2020년 5월부터 12월까지 미세먼지 농도 값을 평균하여 비교한 결과 10m 대조구와 비교시 반경 1.5m는 약 65.9%, 반경 3m는 약 10% 정도 차이가 있는 것으로 나타남(그림 2-108 참조)



[그림 2-108] 미세먼지(PM10) 농도 평균값 비교

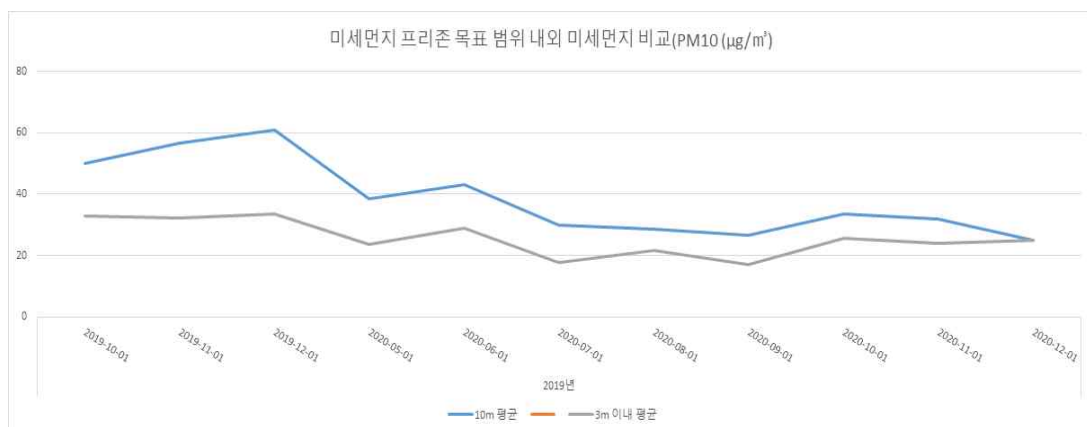
- 인근 측정소(소사본동) 기준으로 미세먼지 농도가  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상으로 나타난 고농도 발생일을 대상으로

로 저감장치와 10m 이격 구간의 미세먼지 농도를 비교·분석한 결과, 반경 1.5m는 약 67%, 반경 3m는 약 13% 정도 농도가 낮은 것으로 나타남(그림 2-109)



[그림 2-109] 미세먼지(PM10) 농도가 높았던 시점의 미세먼지 비교

- 특히, 미세먼지 농도가 상대적으로 낮았던 20년 6월~8월(장마기간)까지의 측정값을 살펴 보면 대조구와 저감장치 간에 농도 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며, 이를 통해 미세먼지 저감 장치는 미세먼지 농도가 나쁨상태 일 때 저감 효과가 보다 높게 작용할 것으로 예측됨
- 연구개발 목표 범위인 반경 3m 이내와 10m 떨어진 거리 간 비교를 위해 측정값을 재정리 하고 미세먼지 농도 측정값을 비교 분석한 결과(그림 2-110), 3m 이내 범위가 상대적으로 미세먼지 농도값이 낮은 것을 확인할 수 있었음
  - 장치로부터 반경 3m 구간은 10m 구간에 비해서 약 33.3% 정도 미세먼지 농도 수치가 낮은 것으로 나타남
  - 모니터링 기간 동안에는 타 년도에 비해 미세먼지 농도가 높지 않았던 점 등을 종합적으로 고려해 볼 때 보다 장기적인 모니터링을 통해 외부공간에서의 먼지저감 효과를 파악해 볼 필요가 있음



[그림 2-110] 미세먼지 프리존 구획 목표 범위 내외 간 미세먼지 농도 비교

## (라) CFD 기반 통합모듈형 저감장치의 미세먼지 프리존 구현가능성 평가

### ① 시뮬레이션 목적

- Test-Bed 적용 장소인 부천역 광장을 미세먼지 free-zone으로 형성하기 위해서 필요한 저감장치 설치 및 배치에 대한 검토를 위해서 타워형 미세먼지 저감장치에 대한 3D 유체 시뮬레이션을 시행함



[그림 2-111] 부천역 광장 지도 및 총면적

### ② 시뮬레이션 개요

- CFD란 해석적으로는 풀 수 없는 물리적 현상의 지배방정식을 시간적, 공간적으로 이산화하여 근사해를 구하는 방법론을 의미함
- 일반적으로 대규모의 공학적 설계를 위해서 상사 모형 실험을 통하여 실제 현상을 모의하는데, 이는 많은 시간, 비용 및 공간이 필요하므로 3D 유체 시뮬레이션을 통해서 비교적 쉽게 다양한 조건에 대한 결과값을 비교할 수 있으므로 경제적이고 합리적인 설계와 평가가 가능
- 입자 방식의 유체 시뮬레이션은 기존 격자 방식에 비해 실시간으로 흐름을 확인할 수 있고 해석 속도가 더 빠르다는 점에서 주목을 받고 있으며, 본 연구에서는 국내 입자기반 3D 유체시뮬레이션 적용 프로그램인 NFLOW를 이용하여 해석을 진행

### ③ 시뮬레이션 조건

- 해석 시나리오 설정
  - 실험으로 도출된 최적의 운전조건 (800 rpm)에 대한 해석 시나리오를 설정
  - 외부유동 (0.5 m/s, 2.0 m/s)을 고려한 해석을 추가
  - 농도에 따른 미세먼지의 확산 효과를 파악하고자 농도 해석 기능을 활용함
  - 미세먼지 저감장치의 유입부와 유출부의 각 지점(0 m, 1.5 m, 3.0 m)에서 속도 계측

- 농도 분포를 통해서 미세먼지 free-zone을 판별하고 부평역 광장에 필요한 저감장치 설치에 관한 정보 파악

[표 2-71] 해석 시나리오

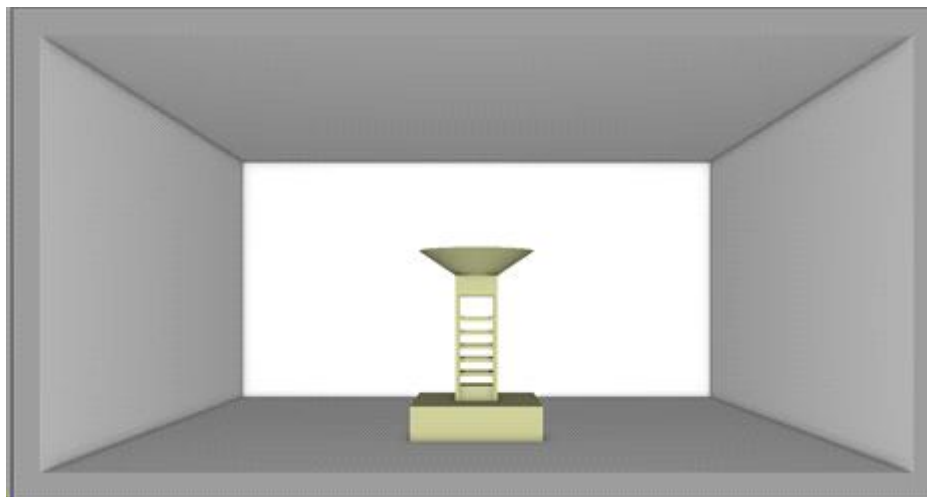
| 시나리오   | 운전 속도 (rpm) | 외부 유동 속도 (m/s) |
|--------|-------------|----------------|
| 시나리오 1 | 800         | 0              |
| 시나리오 2 | 800         | 0.5            |
| 시나리오 3 | 800         | 2              |

[표 2-72] 해석 설정값

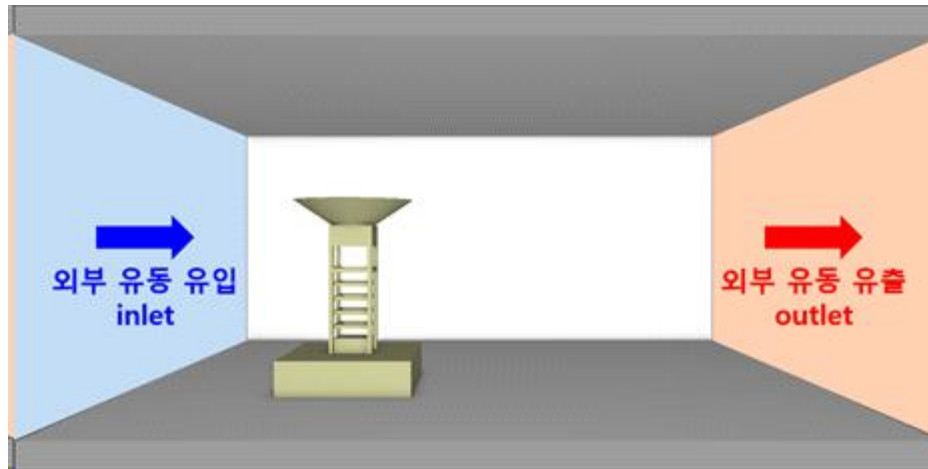
|            |                    |                              |                    |
|------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| 해석 시간 (s)  | 50                 | 해석 간격 (s)                    | 0.001              |
| 입자 반지름 (m) | 0.05               | 입자 수 (개)                     | 200 만              |
| 초기 농도      | $7 \times 10^{-5}$ | 물질 확산 계수 (m <sup>2</sup> /s) | $7 \times 10^{-6}$ |

○ 해석공간 조건

- 해석 공간 : 길이 16 m, 폭 16 m, 높이 7 m 직육면체 공간으로 설정함
- 외부 유동 없는 조건 : 6면에 벽 조건(충분한 해석 공간으로 벽면 효과 무시)으로 설정
- 외부 유동 있는 조건 : 외부 유동 유입 및 유출면을 개방하여 일정 유동 공급
- 실험으로 도출된 최적의 운전조건 (800 rpm)에 대한 해석 시나리오를 설정

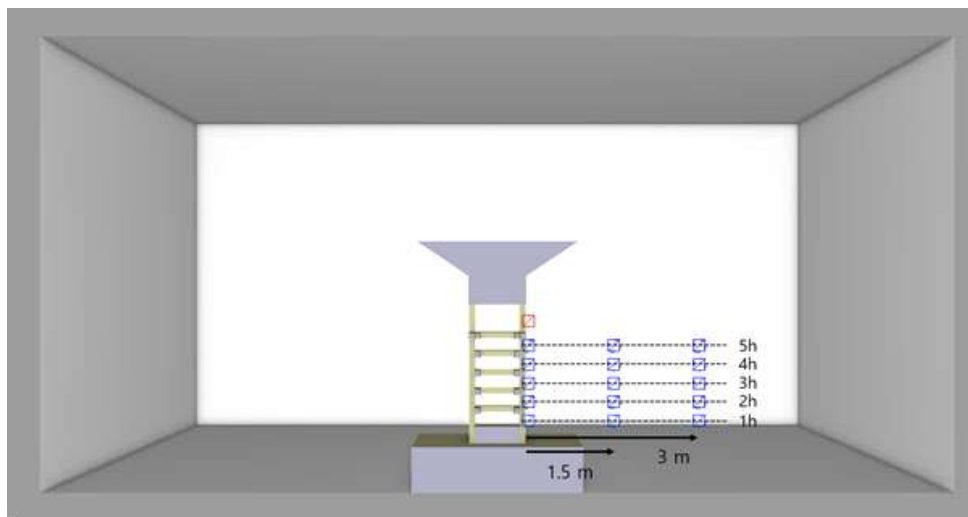


[그림 2-112] 외부 유동 없는 조건에서 해석 공간

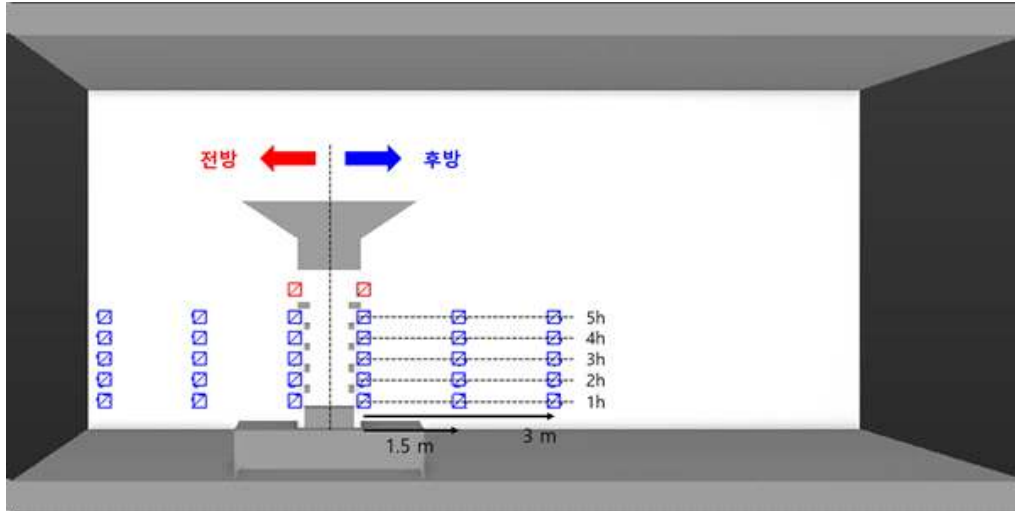


[그림 2-113] 외부 유동 있는 조건에서 해석 공간

- 계측 지점 : 저감장치의 유입부와 각 높이(1h ~ 5h)에 대한 유출부(0 m, 1.5 m, 3.0 m)로 설정함
- 외부 유동 없는 조건 : 좌우 대칭의 유동 특성으로 우측에서만 계측
- 외부 유동 있는 조건 : 좌우 비대칭의 유동 특성을 전제로 전방 및 후방으로 영역을 나눔



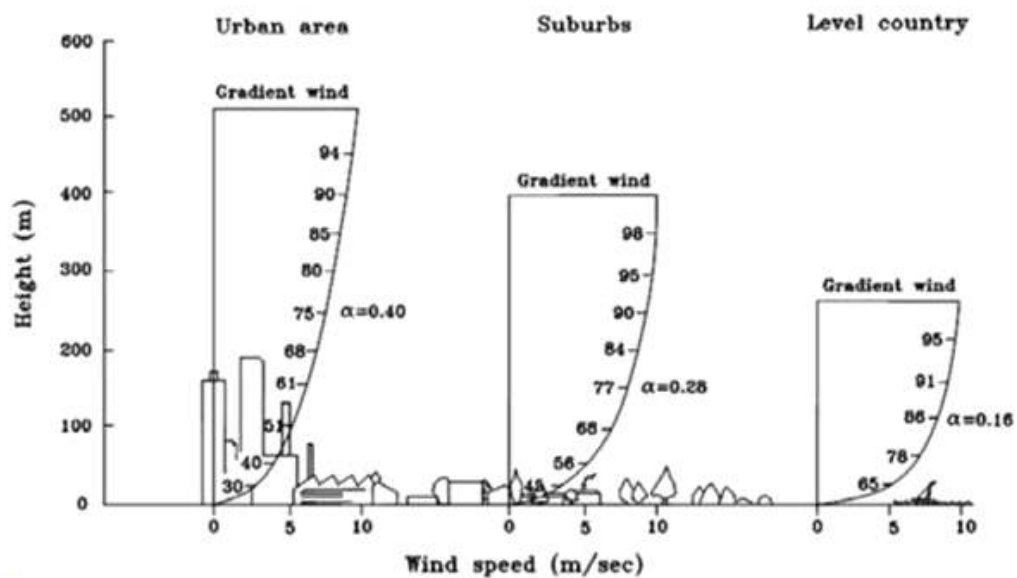
[그림 2-114] 외부 유동 없는 조건에서 계측 지점



[그림 2-115] 외부 유동 있는 조건에서 계측 지점

○ 외부 풍속 선정 기준

- 부천시역의 연평균 풍속은 2.9 m/s로 설정하고 풍속의 경우 지면 높이에 대해서 지수함수 형태의 분포를 보이는 것으로 전제
- 미세먼지 저감장치가 작동하는 높이에서는 1 m/s 이내의 평균 풍속 예상
- 약한 외부 유동 조건 (0.5 m/s)과 강한 외부 유동 조건 (2.0 m/s)으로 설정



[그림 2-116] 지형에 따른 풍속고도분포

- 스칼라 수송 방정식을 적용하여 공기와 초미세먼지의 물질 확산을 고려하여 초미세먼지 농도  $1g/m^3$  을 포화상태로 가정함
- 초미세먼지 기준이 '매우 나쁨'에 해당하는  $76\mu g/m^3$  을 초기값으로 설정하였으며, 해당 농도를 포화상태의 초미세먼지 농도로 나눈 값을 초기 농도 ( $7.6 \times 10^{-5}$ )로 설정

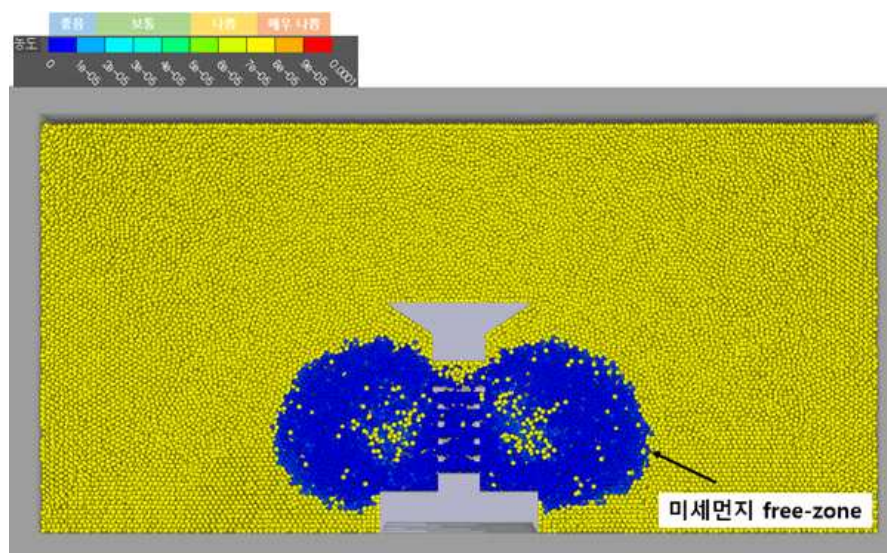
- 우리나라 초미세먼지의 경우, 황산염(황산암모늄)과 질산염(질산암모늄)으로 이루어진 대기오염물질이 58.3%를 차지함
- 해당 물질들의 물질확산계수에 대한 실험값들이 공개되어 있지 않기 때문에, 황산암모늄 및 질산암모늄과 유사한 밀도와 물 질량을 갖는 물질들의 이론값을 적용
- 아닐린, 아세트산에틸, 나프탈렌 그리고 나이트로벤젠의 확산계수를 평균한 값 ( $7 \times 10^{-5} m^2/s$ )을 이용

[표 2-73] 각 물질들의 물 질량, 밀도, 확산 계수

| 구 분                  | 물 질량 ( $g/mol$ ) | 밀도 ( $kg/m^3$ ) | 확산 계수 ( $cm^2/s$ ) |
|----------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| 질산암모늄 $NH_4NO_3$     | 80.043           | 1.72            | —                  |
| 황산암모늄 $(NH_4)_2SO_4$ | 132.14           | 1.77            | —                  |
| 아닐린 $C_6H_5NH_2$     | 93.13            | 1.02            | 0.0726             |
| 아세트산에틸 $C_4H_8O_2$   | 88.11            | 1.9             | 0.0709             |
| 나프탈렌 $C_{10}H_8$     | 128.17           | 1.14            | 0.0602             |
| 나이트로벤젠 $C_6H_5NO$    | 123.11           | 1.2             | 0.0868             |

#### ○ Free-Zone 판별기준

- 저감장치로 흡입되어 유출되는 공기는 미세먼지 농도가 0인 ‘청정공기’로 가정
- 대한민국 초미세먼지 기준에서 ‘좋음’에 해당하는 농도의 분포로 free-zone을 판별



[그림 2-117] 외부 유동 있는 조건에서 해석 공간

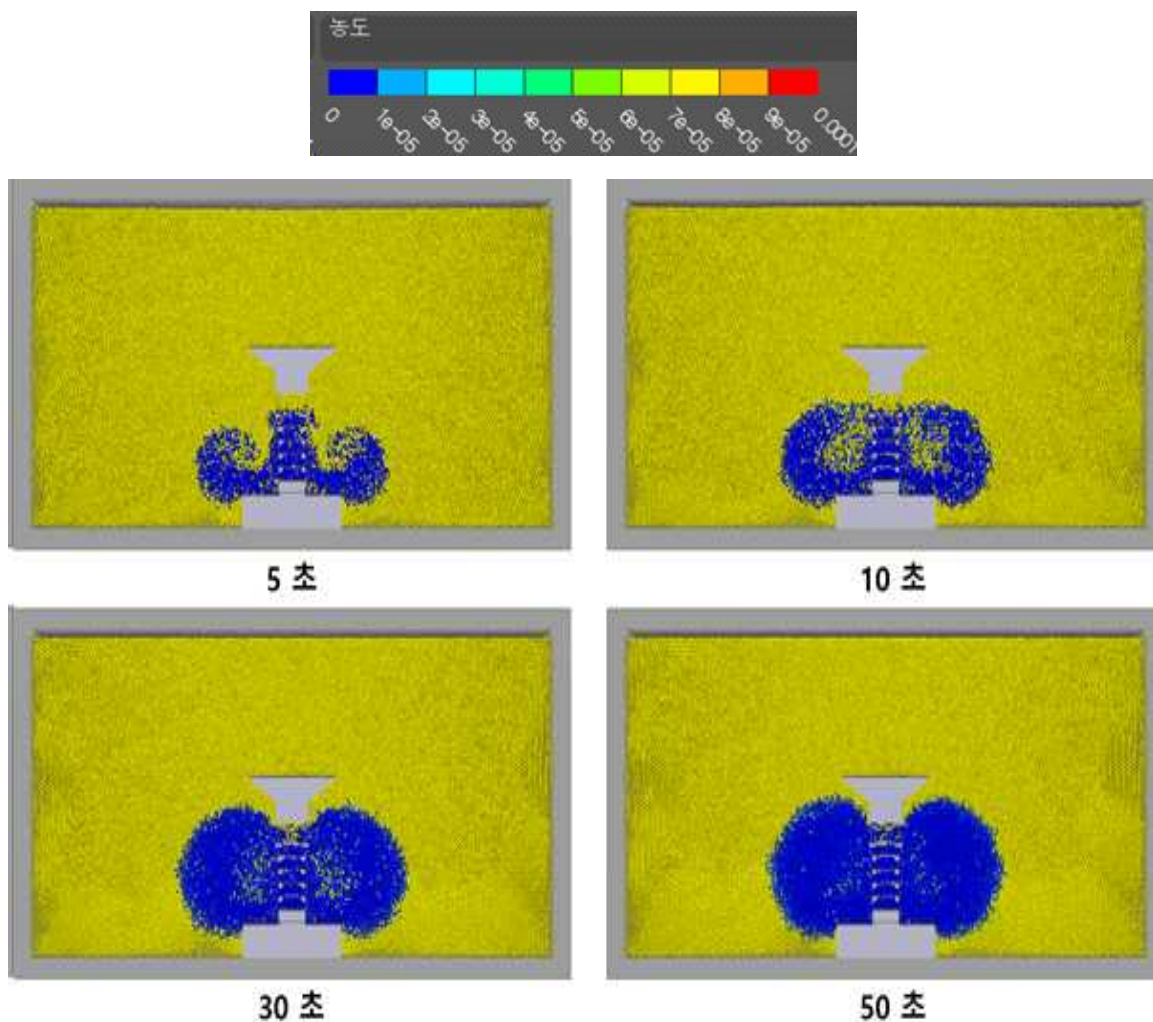
#### ○ 필요 저감장치 대수 산정

- 다양한 지형물이 배치된 상태를 기준으로 ‘광장의 총면적’을 ‘저감장치 효과 영역’으로 나눈 값을 필요 저감장치 개수로 계산
- 향후 보다 정확한 해석을 위해서는 설치 대상 지역의 지형/지물 및 외부조건을 모두 고려하여 해석을 진행해야 함

#### ④ 시뮬레이션 결과

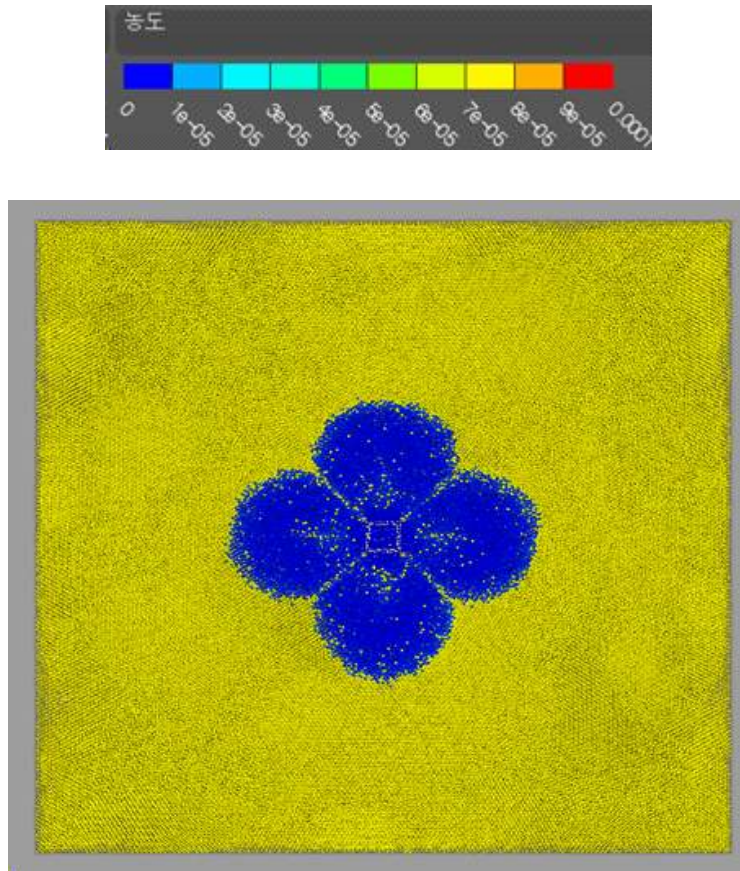
##### ㉞ 시나리오 1(외부 유동이 없는 조건)

- 10 초에 약 3 m 반경의 free-zone을 형성하고 이후에 순환하는 유동형태를 나타냄
- 저감장치의 하단에서 약 5 m/s 속도로 청정공기가 유출되고 주변공기와의 상호작용으로 반경 3 m 지점에서 상승하여 유입부로 흡입
- 반경 3 m 내에서 유동이 순환하며 free-zone 내의 미세먼지 농도를 감소하는 것으로 해석되어짐
- 농도차에 의한 확산 효과는 상대적으로 미미하게 나타남



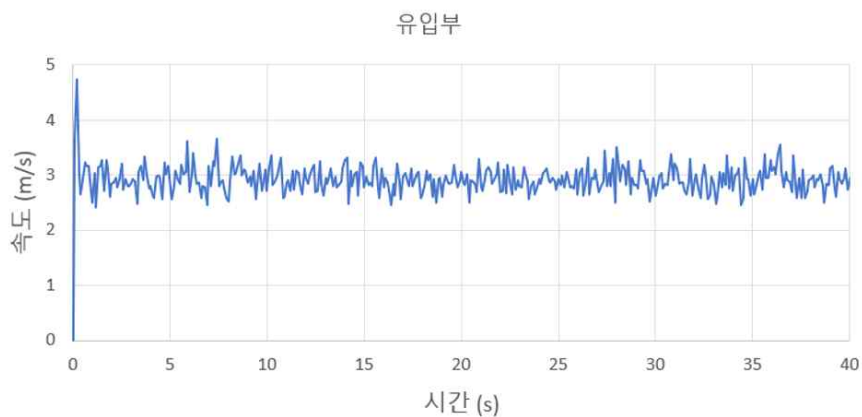
[그림 2-118] 시간에 따른 농도 분포 (외부 유동 x)

- 아래의 그림과 같이 높이 1.5m 지점에서 농도분포를 나타낸 평면도를 살펴보면 툴립 형태로 free-zone을 형성하고 있으며, 프리존 영역의 넓이는 약  $35m^2$ 로 나타남

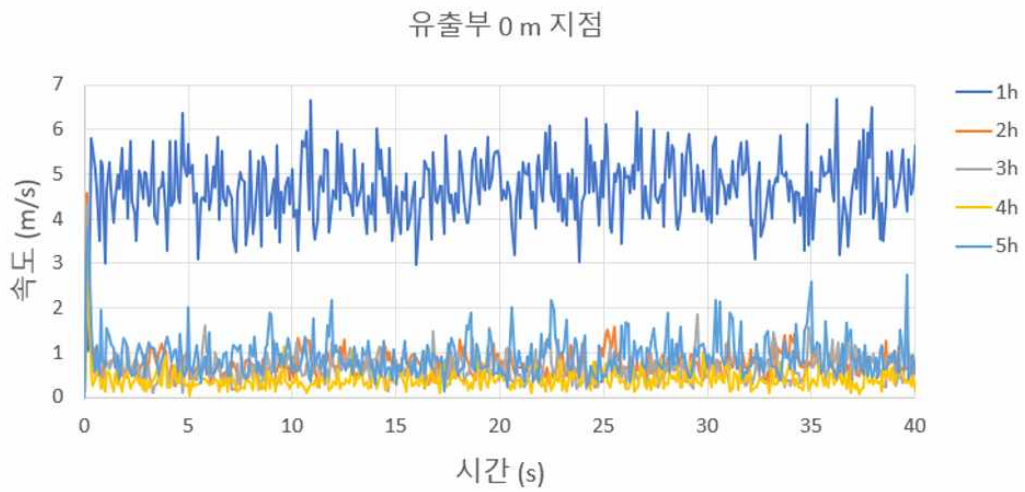


[그림 2-119] 지면 높이 1.5 m 지점에서 평면도 (외부 유동 x)

- 외부 유동이 없는 상태로 유입부 속도가 약 2.9 m/s를 유지하는 조건에서 유출부 속도를 시뮬레이션 한 결과는 아래와 같음
- 0 m 지점에서는 최하단에서 4.7 m/s 로 가장 높으며, 상부로 갈수록 속도가 감소
- 1.5m 지점에서도 동일하게 상부로 갈수록 속도가 낮아지는 경향을 보이며, 1 m/s와 0.25 m/s에서 각각 최대/최소값을 나타냄
- 3m 지점에서는 약 0.04 m/s의 속도를 보이며, 저감장치에 의한 영향이 미미한 것으로 나타남



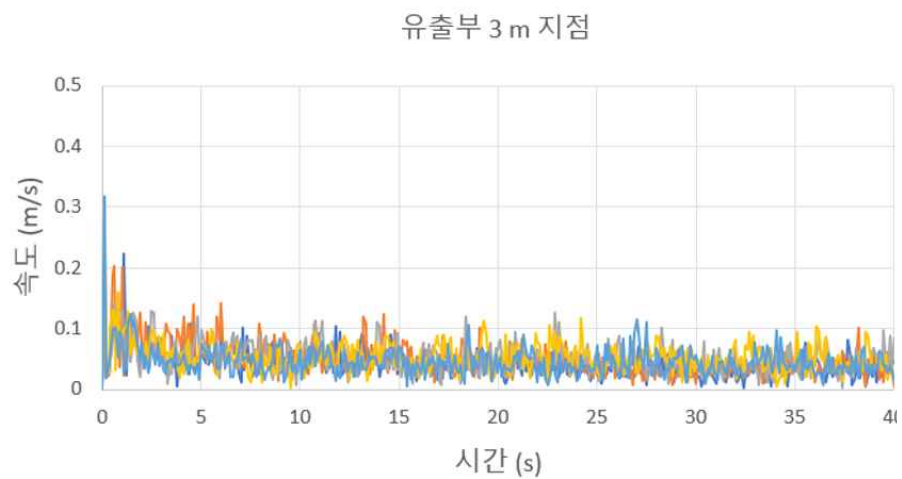
[그림 2-120] 유입부 속도 (외부 유동 x)



[그림 2-121] 유출부 0m 지점 속도 (외부 유동 x)



[그림 2-122] 유출부 1.5m 지점 속도 (외부 유동 x)



[그림 2-122] 유출부 3m 지점 속도 (외부 유동 x)

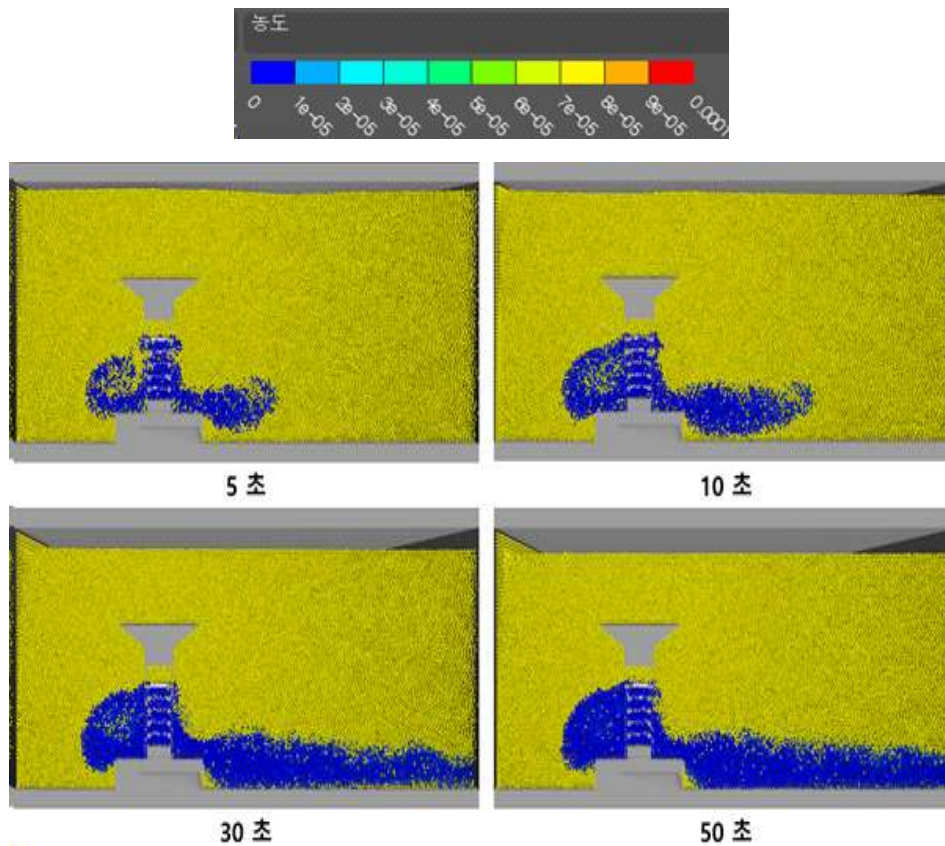
[표 2-74] 외부 유동 없는 조건에서 유입부 및 유출부의 평균 속도

(속도 : m/s)

| 구 분       | 1h   | 2h   | 3h   | 4h   | 5h   |
|-----------|------|------|------|------|------|
| 유출부 0 m   | 4.70 | 0.74 | 0.65 | 0.39 | 0.9  |
| 유출부 1.5 m | 1.01 | 0.56 | 0.37 | 0.31 | 0.25 |
| 유출부 3 m   | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.04 |
| 유입부       | 2.9  |      |      |      |      |

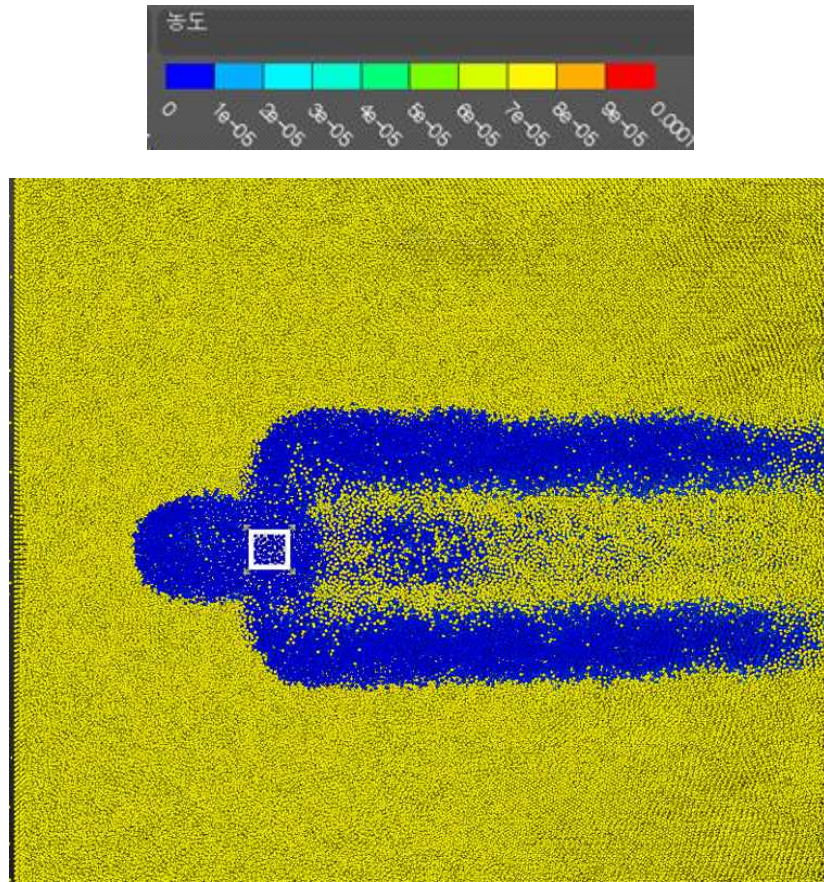
㉔ 시나리오 2(약한 외부 유동 조건 (0.5 m/s))

- 비대칭의 유동 구조와 전방으로 2 m 지점까지 저감효과를 보였으며, 후방으로는 미세먼지 free-zone의 높이가 점점 감소하는 형태가 나타남



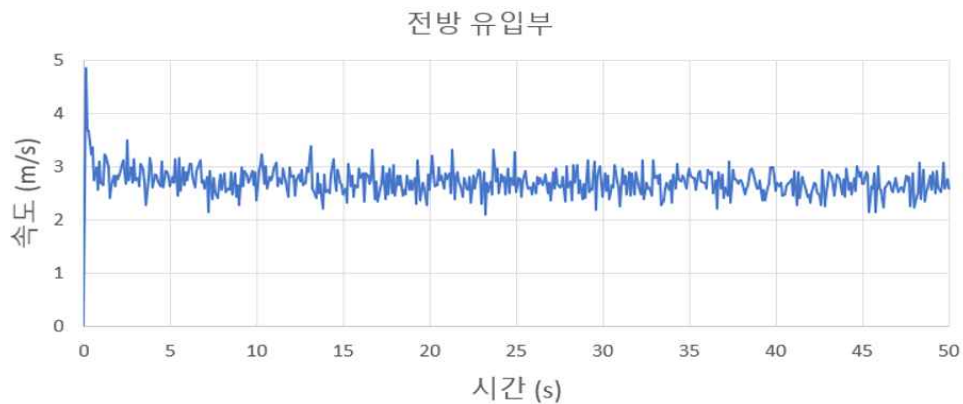
[그림 2-123] 시간에 따른 농도 분포 (외부 유동 0.5 m/s)

- 높이 1.5m 지점에서의 농도분포에 대한 평면도를 보면 후방으로 길게 퍼지는 분포를 보이고 있으며, 미세먼지 프리존 형성 영역의 넓이는 약  $56.7m^2$ 로 나타남
- 부천역 광장 전역에 free-zone 형성을 위해서는 약 82 대의 미세먼지 저감장치 설치가 필요한 것으로 추정됨

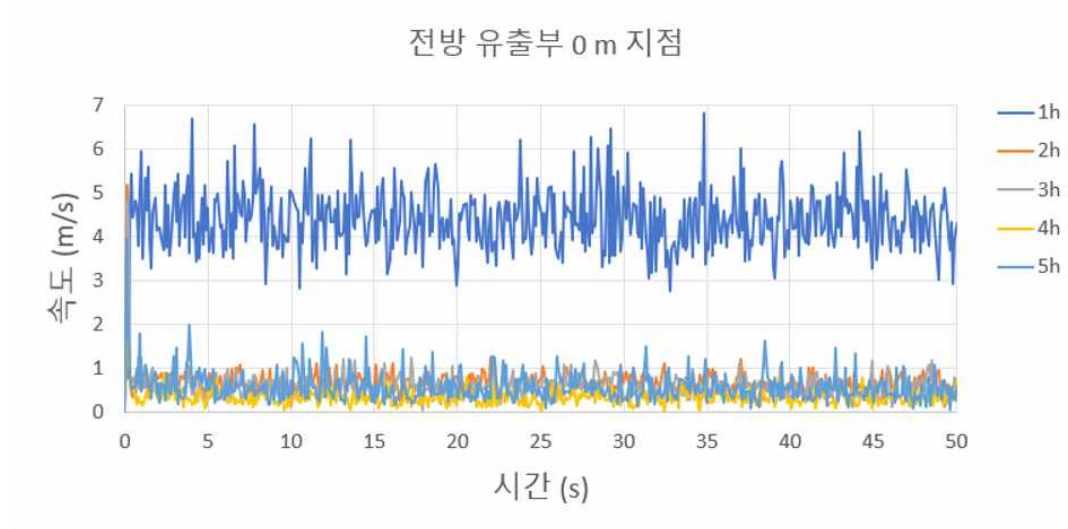


[그림 2-124] 지면 높이 1.5 m 지점에서 평면도 (외부 유동 0.5 m/s)

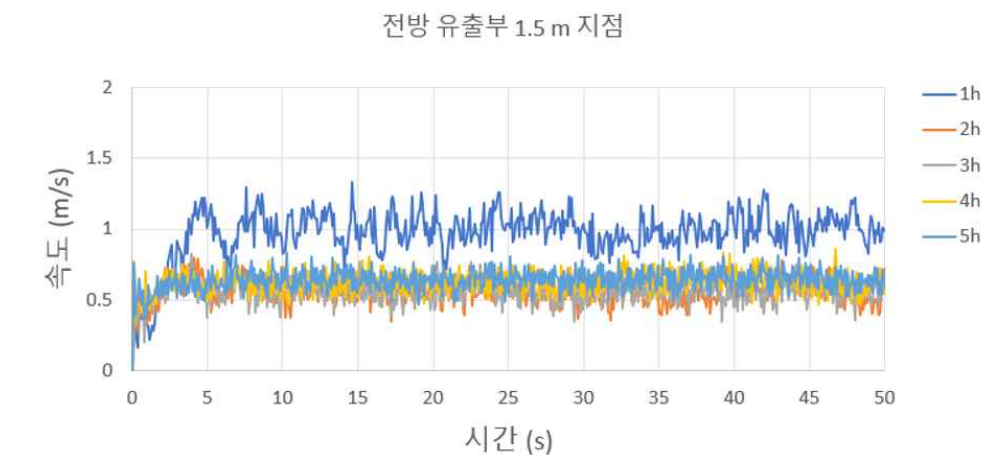
- 유입 속도가 약 2.9 m/s를 유지하는 조건에서 유출부 속도를 산출한 결과는 아래와 같음
  - 0 m 지점에서는 최하단에서 4.7 m/s 로 가장 높으며, 상부로 갈수록 속도가 감소함
  - 1.5 m 지점에서는 최대 1 m/s의 속도를, 나머지 높이에서 0.6 m/s의 속도를 나타냄
  - 3 m 지점에서는 외부유동에 해당하는 0.5 m/s의 속도를 보이며, 저감장치에 의한 효과는 미미한 것으로 확인됨



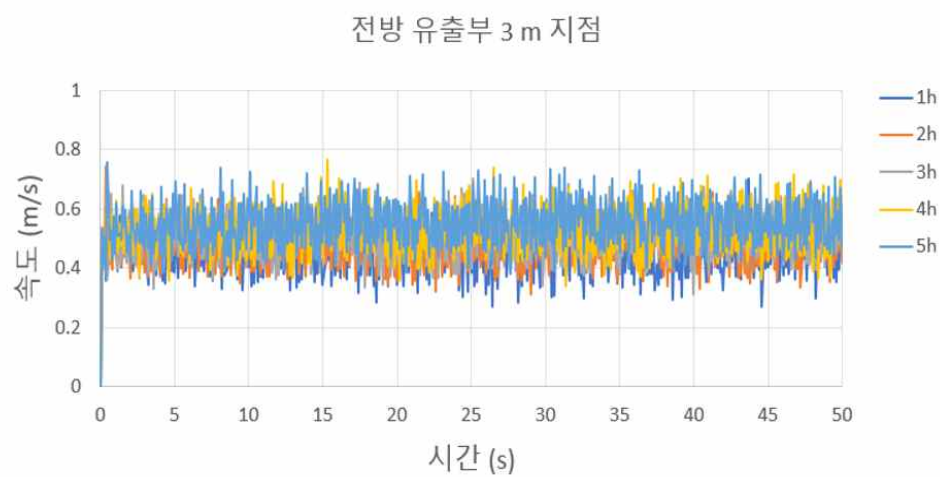
[그림 2-125] 전방 유입부 속도 (외부 유동 0.5 m/s)



[그림 2-126] 전방 유출부 0m 지점 속도 (외부 유동 0.5 m/s)



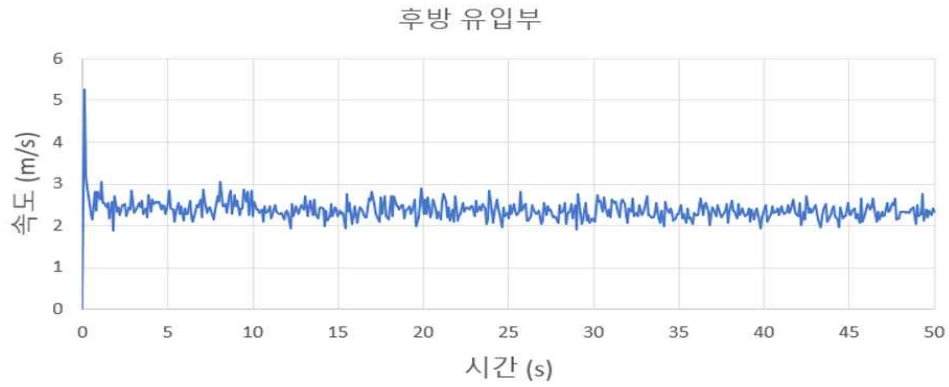
[그림 2-127] 전방 유출부 1.5 m 지점 속도 (외부 유동 0.5 m/s)



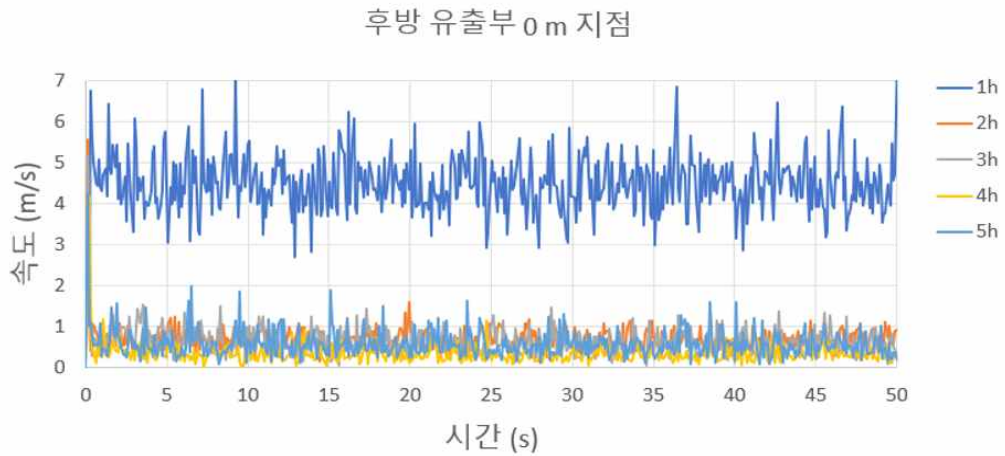
[그림 2-128] 전방 유출부 3 m 지점 속도 (외부 유동 0.5 m/s)

○ 다음으로 후방 영역에 대해서 시뮬레이션 분석한 결과 0m 지점에서는 최하단에서 4.2

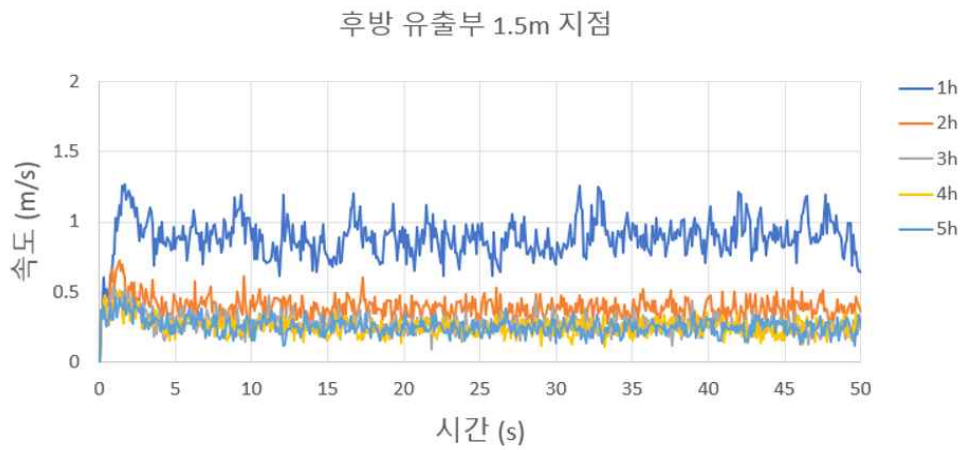
m/s 로 가장 높으며, 상부로 갈수록 속도가 감소하였으며, 1.5 m 지점과 3 m 지점에서의 속도는 전방과 유사한 것으로 나타남



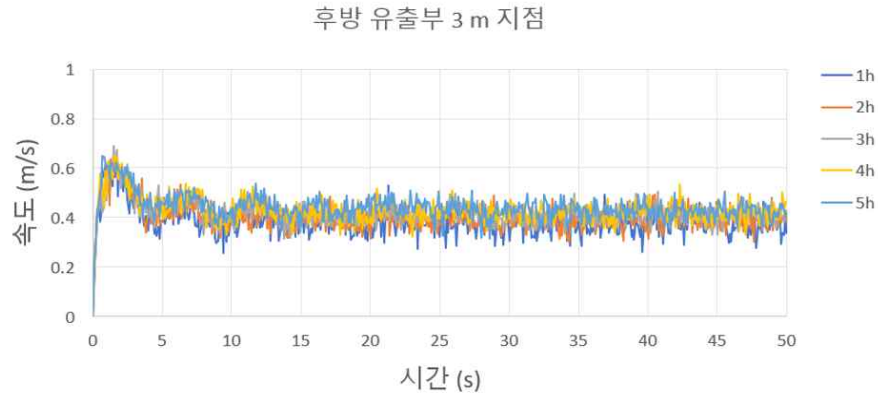
[그림 2-129] 후방 유입부 속도 (외부 유동 0.5 m/s)



[그림 2-130] 후방 유출부 0 m 지점 속도 (외부 유동 0.5 m/s)



[그림 2-131] 후방 유출부 1.5 m 지점 속도 (외부 유동 0.5 m/s)



[그림 2-132] 후방 유출부 3 m 지점 속도 (외부 유동 0.5 m/s)

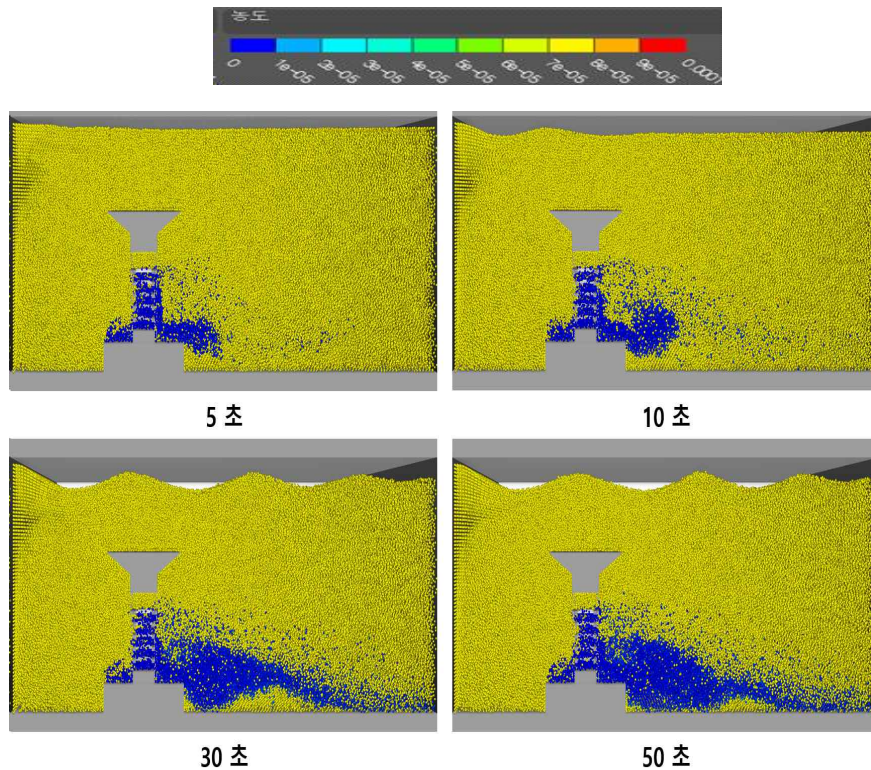
[표 2-75] 약한 외부 유동 조건 (0.5 m/s)에서 유입부 및 유출부의 평균 속도

(속도 : m/s)

| 구 분       | 1h          | 2h          | 3h          | 4h          | 5h          |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 유출부 0 m   | 4.38 / 4.45 | 0.66 / 0.68 | 0.56 / 0.59 | 0.33 / 0.41 | 0.56 / 0.57 |
| 유출부 1.5 m | 1.00 / 0.88 | 0.56 / 0.38 | 0.56 / 0.26 | 0.63 / 0.24 | 0.65 / 0.25 |
| 유출부 3 m   | 0.44 / 0.37 | 0.48 / 0.39 | 0.51 / 0.40 | 0.53 / 0.42 | 0.55 / 0.43 |
| 유입부       | 2.69 / 2.35 |             |             |             |             |

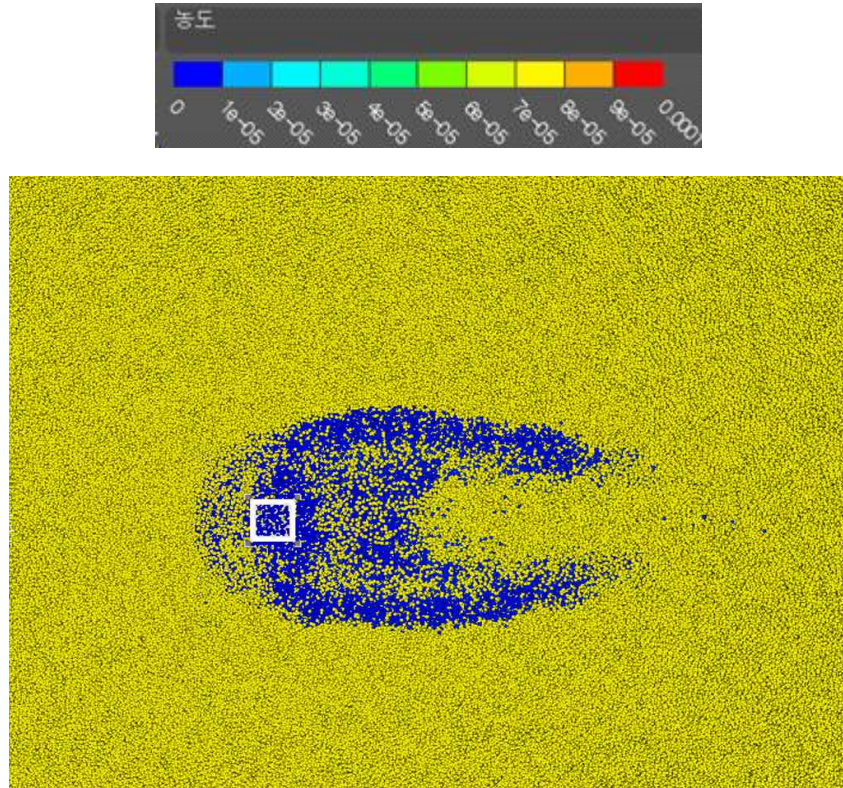
㉔ 시나리오 3(강한 외부 유동 조건 (2.0 m/s))

- 비대칭의 유동 구조와 전방으로 저감효과가 상당히 감소하였으며, 후방으로는 미세먼지 free-zone의 높이가 점점 감소하는 형태를 나타냄



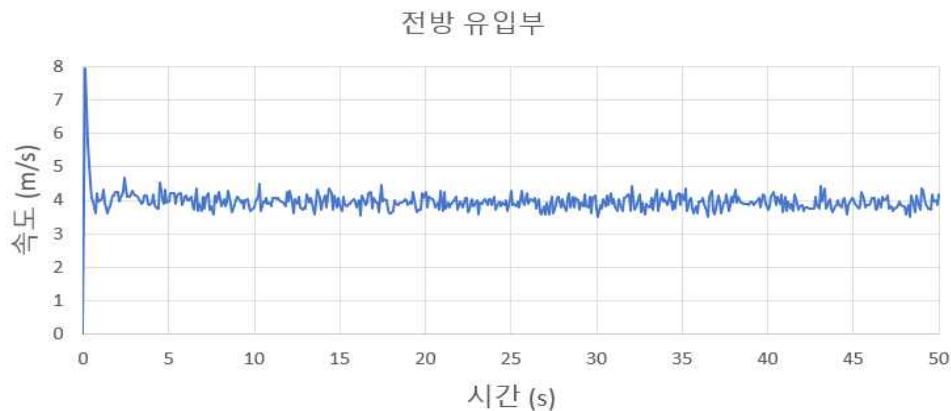
[그림 2-133] 시간에 따른 농도 분포 (외부 유동 2 m/s)

- 아래 시뮬레이션 결과는 높이 1.5m 지점에서의 평면도이며 후방으로 4 m 지점까지 퍼지는 분포를 보이고 있으며, 미세먼지 프리존 해당 영역의 넓이는 약  $21.2m^2$ 로 미세먼지 저감장치의 성능이 상당히 감소하는 것으로 결과됨

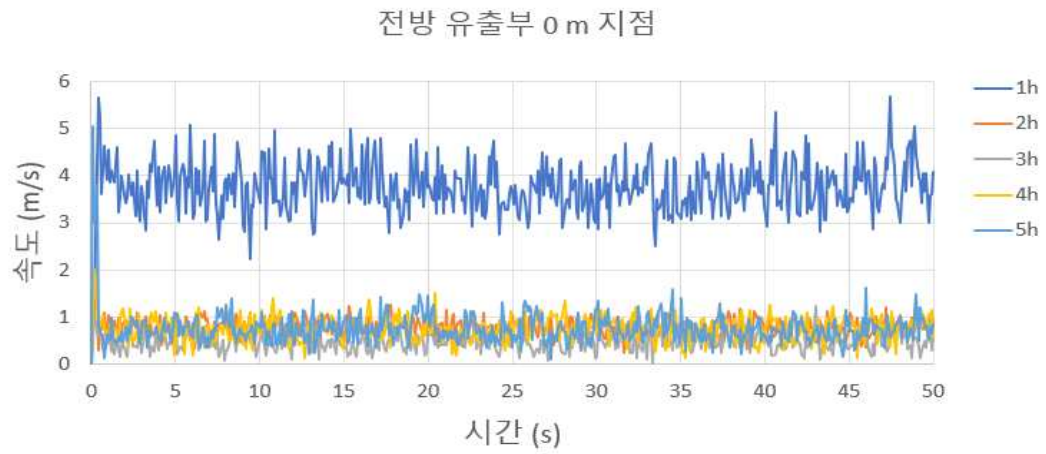


[그림 2-134] 지면 높이 1.5 m 지점에서 평면도 (외부 유동 2 m/s)

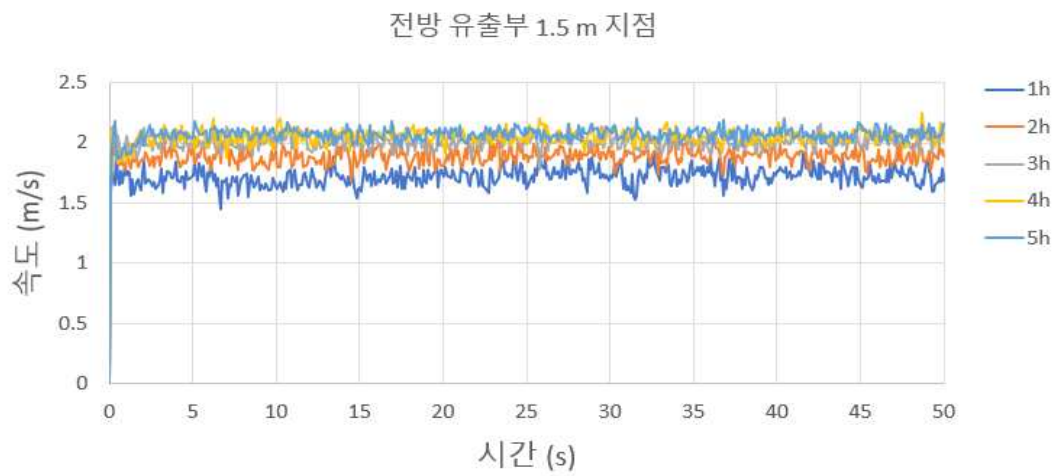
- 전방 유입부 및 유출부 속도 분포를 시뮬레이션 분석한 결과는 다음과 같음
- 0 m 지점에서는 최하단에서 3.7 m/s 로 가장 높으며, 상부로 갈수록 속도가 감소하는 것으로 나타남
  - 1.5 m 지점과 3 m 지점에서는 외부유동에 해당하는 2.5 m/s의 속도를 보이며, 저감장치에 의한 효과는 매우 적을 것으로 보여짐



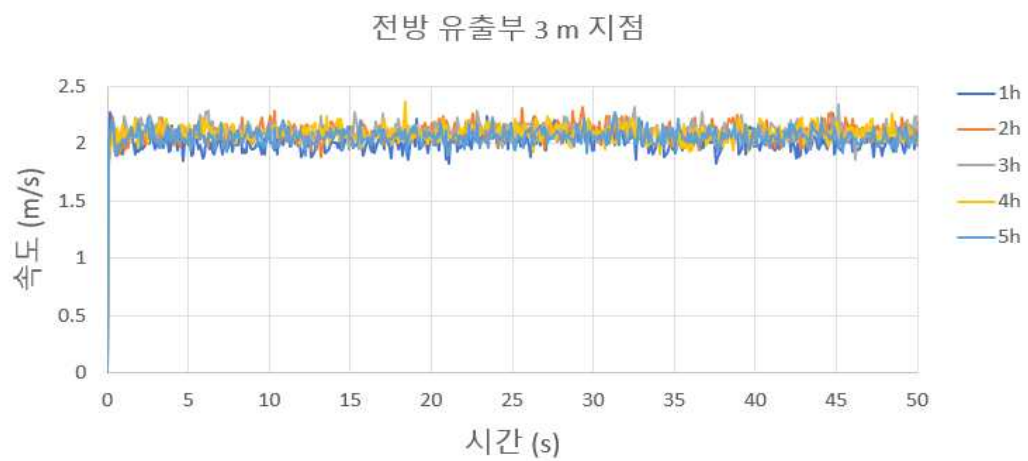
[그림 2-135] 전방 유입부 속도 (외부 유동 2 m/s)



[그림 2-136] 전방 유출부 0 m 지점 속도 (외부 유동 2 m/s)



[그림 2-137] 전방 유출부 1.5 m 지점 속도 (외부 유동 2 m/s)

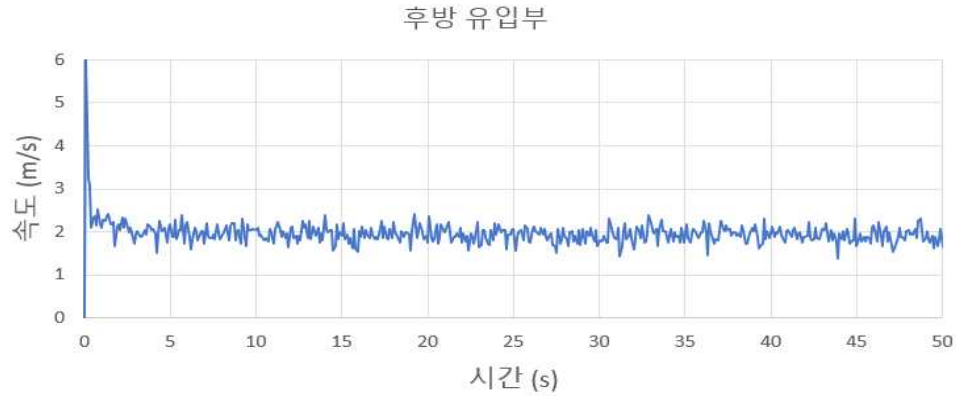


[그림 2-138] 전방 유출부 3 m 지점 속도 (외부 유동 2 m/s)

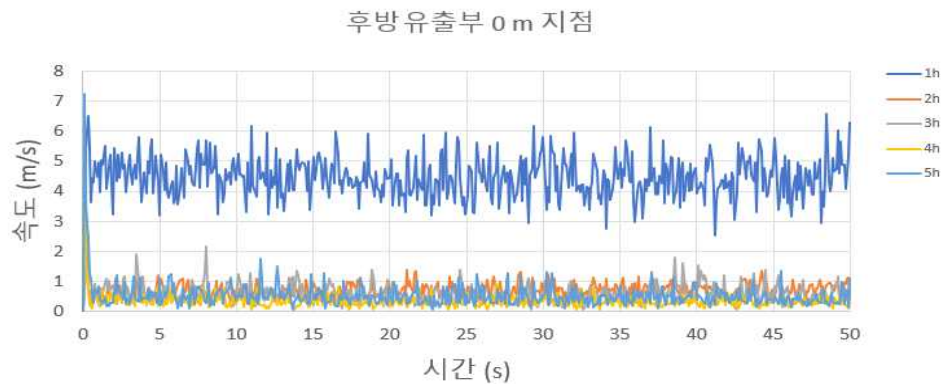
○ 다음으로 후방 영역의 유입부 및 유출부 속도 분포를 보면, 유입 속도는 약 2.0 m/s를 유

지하고 있으며, 0m 지점에서는 최하단에서  $4.4\text{m/s}$  로 가장 높으며, 상부로 갈수록 속도가 감소하는 것으로 나타남

- 1.5 m 지점과 3 m 지점의 경우 초기에는 속도가 높았으나 점차 감소하는 것으로 분석됨



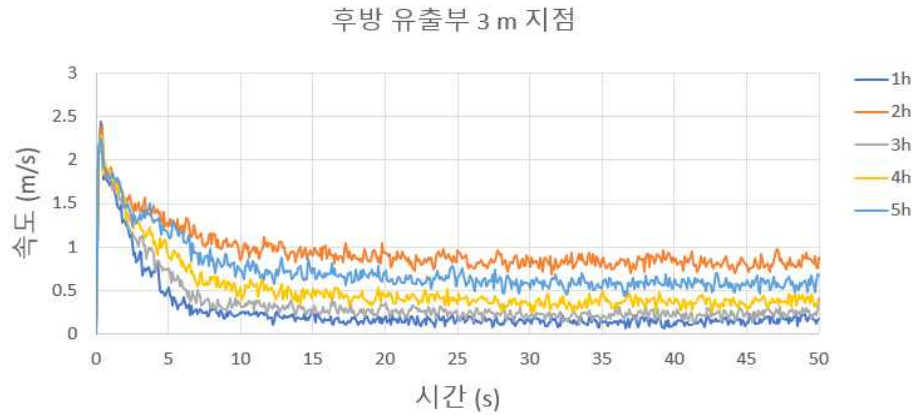
[그림 2-139] 후방 유입부 속도 (외부 유동 2 m/s)



[그림 2-140] 후방 유출부 0 m 지점 속도 (외부 유동 2 m/s)



[그림 2-141] 후방 유출부 1.5 m 지점 속도 (외부 유동 2 m/s)



[그림 2-142] 후방 유출부 3 m 지점 속도 (외부 유동 2 m/s)

[표 2-76] 강한 외부 유동 조건 (2.0 m/s)에서 유입부 및 유출부의 평균 속도

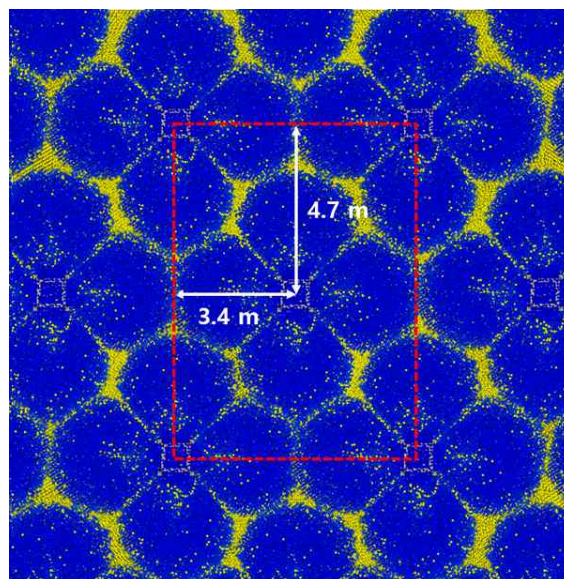
(속도 : m/s)

| 구 분       | 1h          | 2h          | 3h          | 4h          | 5h          |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 유출부 0 m   | 3.76 / 4.42 | 0.79 / 0.7  | 0.49 / 0.58 | 0.75 / 0.32 | 0.75 / 0.48 |
| 유출부 1.5 m | 1.73 / 0.78 | 1.89 / 0.29 | 2.01 / 0.17 | 2.05 / 0.18 | 2.07 / 0.24 |
| 유출부 3 m   | 2.02 / 0.16 | 2.1 / 0.25  | 2.1 / 0.4   | 2.09 / 0.62 | 2 / 0.86    |
| 유입부       | 3.92 / 1.93 |             |             |             |             |

#### ㉠ 미세먼지 프리존 구현을 위한 통합모듈형 장치 배치안

##### ○ 외부 유동 없는 조건의 배치(안)

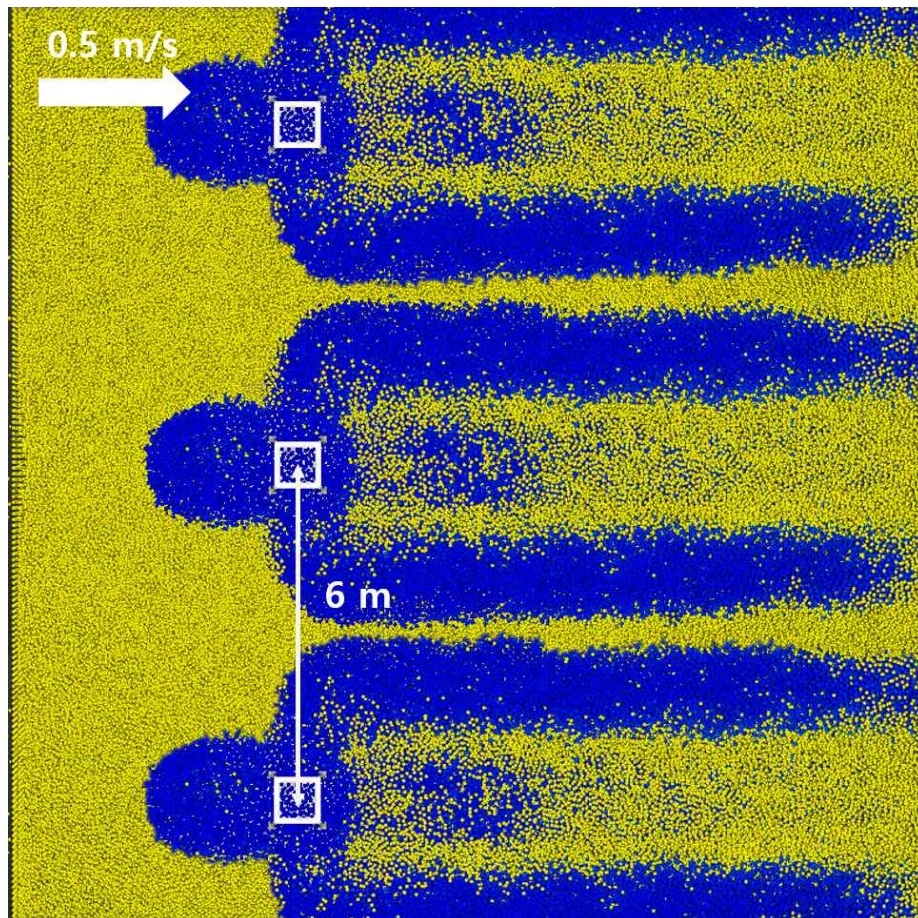
- 현장 모니터링 결과를 활용하여 외부환경 영향 요소를 통제한 상황에서 시뮬레이션 분석한 결과 외부 유동이 없는 조건에서 미세먼지 저감장치의 프리존 형성 범위는 약 35m<sup>2</sup> 정도로 나타나, 연구개발 목표인 반경 3m 구간의 미세먼지 90% 저감 조건을 충족해 주는 것으로 나타남



[그림 2-143] 외부 유동 없는 조건의 배치(안)

○ 약한 외부 유동 조건(0.5 m/s)의 배치(안)

- 외부에서 바람이 유입되는 경우를 전제로 시뮬레이션 분석한 결과, 미세먼지 프리존 형성 영역이 후방으로 길게 퍼지는 분포를 나타냄
- 미세먼지 저감장치의 프리존 형성 범위는 약  $56\text{m}^2$  정도로 나타나 미세먼지 저감장치를 설치하고자 하는 경우는 이를 고려해 배치해 볼 수 있을 것임



[그림 2-144] 약한 외부 유동 조건(0.5 m/s)의 배치(안)

#### (4) 미세먼지 저감 프리존 구현을 위한 통합모듈형 장치 적용 방안

- 생활공간에서 발생하는 미세먼지로 인한 피해를 줄이기 위해서는 통합모듈형 장치 등 기계적 장치들을 적극 활용하는 것이 요구됨. 통합모듈형 저감 장치를 생활 공간내에 적극 반영함으로써 미세먼지로부터 피해를 줄이고 안전하게 활동할 수 있는 미세먼지 프리존을 구현하는데 기여할 수 있을 것임
- 미세먼지 농도가 높은 도시 내 생활공간에서 외부 활동으로 인한 미세먼지 피해를 줄이기 위해서는 저감 장치를 주요 장소에 설치하여 미세먼지를 저감하는 접근이 요구됨
- 지금까지 미세먼지를 흡착하여 저감시키는 기법으로는 Passive적 방법과 Active적 방법이 주로 활용되어짐
  - Passive 미세먼지 저감 기술은 주로 옥상녹화, 벽면녹화 등 인공녹화기술을 활용한 연구가 주로 수행되어짐
  - Active 미세먼지 제거 기술은 미세먼지 집진시스템(전기집진 및 여과집진) 및 다공성 흡착소재 개발, 지능형 환기시스템 도입 등을 주로 다루어 왔음
- 그러나 아직까지 도시민의 주요 외부 생활공간과 관련하여 미세먼지에 대응할 수 있는 기술개발 및 적용은 다소 미흡함
- 식물을 기반으로 한 Passive 기술과 저전력 집진패널을 활용한 Active 미세먼지 제거 기술을 융합하게 되면 상호보완적 기술 요소의 접목을 통해 도시 주요 생활공간에서 미세먼지 저감 효과를 높일 수 있는 기술이라 할 수 있음
  - 녹화만으로 해결하기 어려웠던 고농도 미세먼지 정체 구역에서 먼지 노출에 따른 저감 효과를 높이면서도 기계적 청정시스템이 지니지 못한 심미성과 정서적 안정감을 높이기 위해서 이들 Passive 기법과 Active 기술을 통합한 저감장치의 적용을 통해 미세먼지 문제를 효과적으로 해결할 수 있을 것임
- 특히, 통합모듈형 미세먼지 저감 장치는 탈부착이 자유로운 모듈형 장치로 개발하여 다양한 도시 생활공간에 유연하게 적용시켜 나갈 수 있음
- 미세먼지 통합모듈형 장치는 타 기술요소에 비해서 먼지 저감효능이 높을 것으로 기대되어 공기흐름이 정체되거나 먼지 농도가 높은 지점을 중심으로 적용시켜 볼 수 있음
- 도시 내에서 미세먼지를 발생시키는 도로변에 먼해 공공이용을 위한 시설 및 공간이 설치된 곳에 중점적으로 적용해 볼 수 있음
  - 도로변에서 유입되는 미세먼지 농도가 높은 지역으로 녹지대 확보가 충분치 않거나 식재만으로는 저감에 한계가 있는 경우에 통합모듈형 장치를 설치해 주도록 함
  - 단지 내에서 공기흐름이 정체되거나 농도가 높은 공간에 통합모듈형 장치를 설치해 주도록 함
  - 단지 내 미세먼지로부터 취약한 지역인 어린이놀이터, 학교 통학로 등에 통합모듈형 장치를 설치해 볼 수 있음
  - 또한, 주거지로부터 목적지까지 이동하는데 가장 많은 이용활동이 발생하는 구간을 파악해서 적절한 장소에 저감장치를 설치하여 운영해 볼 수 있음



[그림 2-145] 도심 내 미세먼지 저감형 기술의 적용 예시

- 도시 생활공간에서 미세먼지로부터 취약하거나 피해가 클 수 있는 집중관리구역을 파악하고 이 공간을 중심으로 통합모듈형 장치 설치를 통한 저감 대책을 모색 하도록 함

[표 2-77] 도시 내 통합녹화모듈형 저감 장치 적용 가능 구역 예시

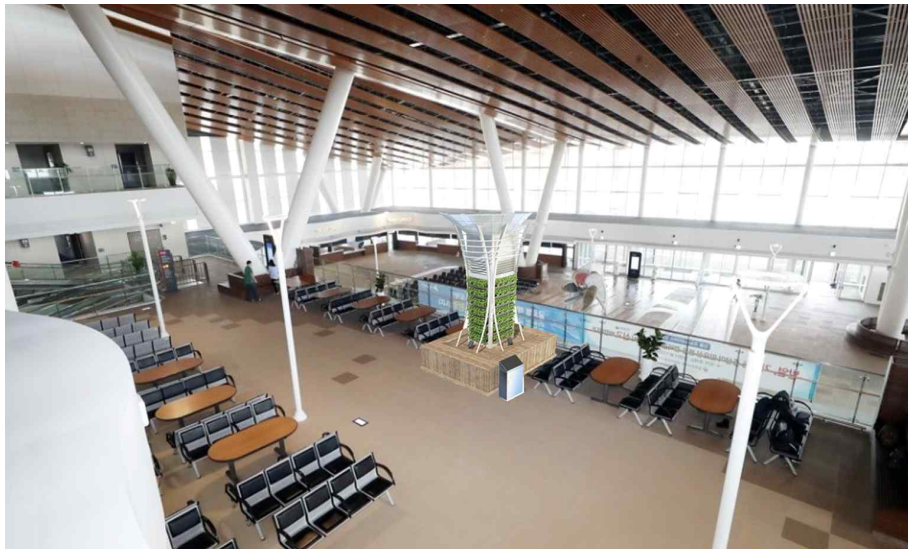
| 검토기준               | 구역 유형                             | 공간특성                                                 | 대상공간 예시                                      |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 취약계층<br>주요<br>이용시설 | 도로 인접 취약계층<br>이용시설                | 미세먼지에 취약한 고령자 및<br>아동들의 이용빈도가 높은<br>시설               | - 어린이놀이터, 학교 통학로,<br>학원주변 공간<br>- 복지시설, 공원 등 |
| 미세먼지<br>정체지점       | 도로에 인접한<br>버스정류장                  | 출퇴근 시간에 이용자가<br>집중되며 버스를 대기하는<br>동안에 미세먼지에 노출        | - 버스 정류장                                     |
|                    | 도로변에 인접된<br>보행로                   | 생활구역 내에서 미세먼지<br>발생 및 유입원이 되고 있는<br>도로변 보행로 및 자전거 도로 | - 보행로 및 자전거 도로                               |
|                    | 주거단지내<br>건물구조 및 형상에<br>의한 먼지 정체구간 | 풍향 특성상 미세먼지가<br>정체되는 건물 형상과 배치가<br>이루어진 주거단지         | - 단지내 ㄷ자형, ㄱ자형 등<br>통풍방향으로부터 닫힌 구조의<br>건물동   |
| 외부활동<br>집중구역       | 유동 인구가 많은<br>지역의 공원 및<br>광장과 상업공간 | 이용밀도가 높은 구간으로<br>상시 이용이 발생하는 구간                      | - 근린생활시설 밀집지역.<br>- 근린공원, 광장 등               |
|                    | 버스정류장에서<br>근린생활까지<br>연결된 가로공간     | 버스정류장 주변에서<br>근린생활시설 또는 주거지와<br>연결된 가로               | - 버스정류장~근린생활시설<br>- 공동주택~버스정류장<br>연결구간 등     |

- 또한, 통합모듈형 장치에 대한 실·내외 모니터링 측정과 시뮬레이션 분석결과 실내에서 보다 먼지 저감 효과가 높았던 점을 고려해 볼 때 실외 공간뿐만 아니라 공기질을 개선할 필요가 있는 실내 다중 이용 시설 등에도 적극 활용해 볼 수 있음

- 대표적으로 실내 공공 건축물 로비, 지하상가, 역사, 대합실, 터미널, 전시시설, 의료시설, 요양시설, 실내주차장, 실내체육시설, 실내공연장 등에 적용시켜 볼 수 있을 것임



(a) 미세먼지 저감장치의 실외 적용 예시



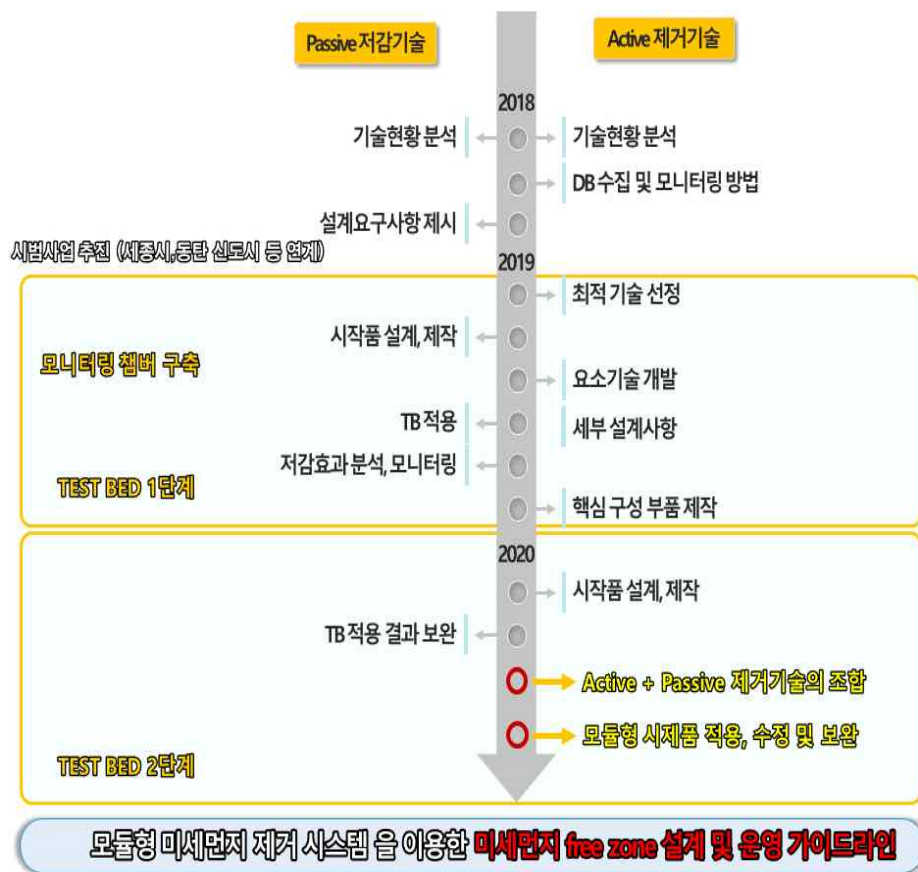
(b) 미세먼지 저감장치의 실내 적용 예시

[그림 2-146] 미세먼지 저감 장치 적용 예시

## 나. 연구개발 추진전략·방법 및 추진체계

### (1) 연구개발 추진전략 및 방법

- 과업의 효율적인 추진을 위해 과업 세부 분야를 Passive 저감기술 개발, Active 제거기술 개발, Passive/Active 통합 모듈형 장치 개발 및 실증 등으로 구분하여 각 분야별 연구책임자의 감독 및 계획하에 체계적이고 효율적으로 연구를 진행함
- 환경공학, 환경화학, 조정 및 생태학, 도시공학, 건축설계 등 미세먼지 저감 관련 분야 전문 연구진의 협업체제로 연구 수행



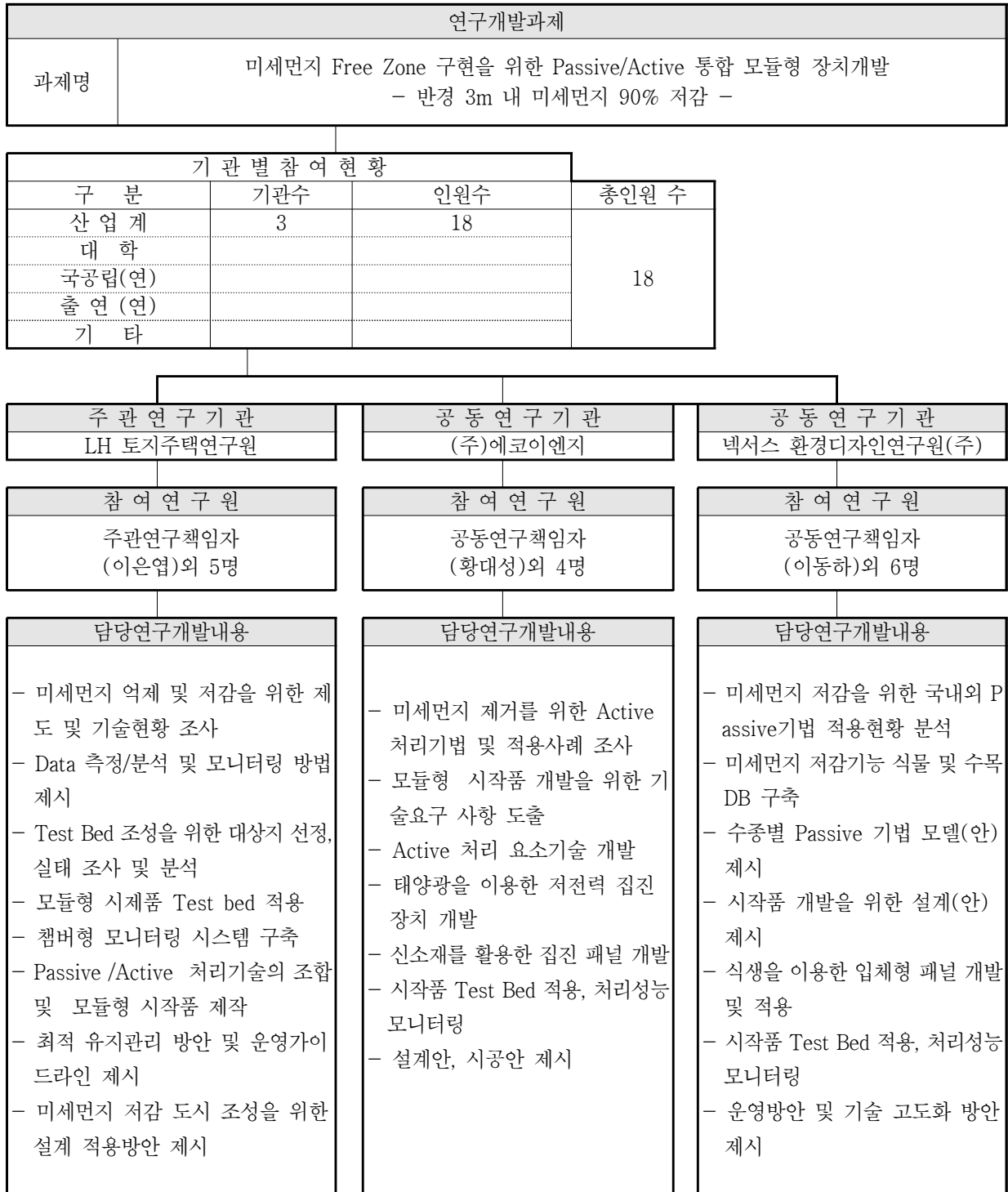
[그림 2-147] 연차별 연구개발 추진 체계

- Passive 저감 기술의 경우 선행 연구와 연계하여 기술현황분석, 미세먼지 저감 우수 식생 DB 구축, 입체녹화 디자인 기법 수립, 환경영향인자 분석 등을 수행할 예정이며 이를 바탕으로 설계요구사항을 제시하고 우선적으로 시작품을 설계·제작한 뒤 저감효과 분석, 모니터링을 수행
- Active 제거 기술의 경우 기술현황 분석, DB 수집 및 모니터링 방법 등 기초연구 수행을 통해 passive 기술과 융합하여 미세먼지 저감 효과에 시너지를 일으킬 수 있는 기술 후보

군을 선별한 후 미세먼지 저감 효율을 극대화 시킬 수 있는 최적기술을 선정

- Active 최적제거 기술 선정 후 요소기술 개발, 세부설계사항 도출, 핵심 구성 부품 제작을 거쳐 시작품을 설계·제작한 뒤 저감효과 분석, 모니터링을 수행하였음
- Passive, Active 개별 기술 개발 후 융합을 통해 모듈형 장치를 개발하며 Test Bed 적용을 통해 미세먼지 저감 효과를 분석, 모니터링 하고 현장운영 결과를 바탕으로 제품의 성능을 수정·보완하였으며 이를 도시 생활공간 내에 확대 설치, 운용할 수 있도록 미세먼지 free zone 구현을 위한 통합모듈형 장치 설계 및 운영 가이드라인을 마련함
- 특히, 연구개발 성과의 실용화 추진을 위해 Test-Bed 적용 지자체인 부천시 담당부서와 지속적인 협업 및 협의를 통해 부천시에 시설을 이관하여 설치, 운영할 경우에 수반될 수 있는 문제점들을 점검하고 이를 고려해 성능을 개선한 미세먼지 저감장치를 LH-부천시 간 MOU에 따른 후속사업으로 추진할 계획에 있음
- 또한, 국내 최대의 도시주택 건설 및 관리를 시행하고 있는 LH 공사의 사업지구인 평택 고덕신도시에 추가적으로 Test-Bed 적용 및 운영 결과를 토대로 하여 3시 신도시 등에 미세먼지 저감 장치를 확대 적용하는 방안에 대해 검토

## (2) 연구개발 추진체계



### (3) 연구개발 추진일정

| 구분 | 연구과제명<br>(연구<br>수행기관) | 관련 성과목표/지표                 |      |            | 세부추진내용<br>(연구수행 Activity) | Activity별<br>산출물 | 소요 연구비<br>(백만원) | 1차년도 |     |     |     | 2차년도 |     |     |     | 3차년도 |     |     |     |  |
|----|-----------------------|----------------------------|------|------------|---------------------------|------------------|-----------------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|--|
|    |                       | 핵심성과                       | 단위성과 | 질적<br>성과지표 |                           |                  |                 | 1/4  | 2/4 | 3/4 | 4/4 | 1/4  | 2/4 | 3/4 | 4/4 | 1/4  | 2/4 | 3/4 | 4/4 |  |
|    |                       |                            |      |            |                           |                  |                 |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
| 주관 | LH<br>토지주택<br>연구원     | A                          | A-1  | A-1-①      | 관련자료 수집                   | 결과보고서            | 15              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | A-1-②      | 현장실태 분석                   | 결과보고서            | 30              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            | A-2  | A-2-①      | Test Bed 선정               | 관련 공문            | 15              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | A-2-②      | Test Bed 운영               | 현장운영<br>자료       | 20              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | A-2-③      | 시스템 성능 검증                 | 분석데이터            | 10              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            | A-3  | A-3-①      | 설계안 제시                    | 설계안              | 20              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | A-3-②      | 가이드라인 작성                  | ISBN 등록          | 15              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       | B                          | B-1  | B-1-①      | DB 구축                     | 결과보고서            | 15              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | B-1-②      | Active/Passive<br>시작품 제작  | 시작품 등록           | 50              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | B-1-③      | 특허출원                      | 특허등록             | 10              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            | B-2  | B-2-①      | Lab Scale<br>챔버실험 수행      | 시험성적서            | 30              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | B-2-②      | 운영 매뉴얼 제작                 | ISBN 등록          | 10              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      |            |                           |                  |                 |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
| 공동 | (주)에코이<br>엔지          | C                          | C-1  | C-1-①      | 관련자료 수집                   | 결과보고서            | 25              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | C-1-②      | 요구성능 설정                   | 기술사양서            | 25              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            | C-2  | C-2-①      | 장치 설계안 도출                 | 설계도서             | 75              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | C-2-②      | 핵심부품<br>시작품 제작            | 시작품<br>등록        | 40              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | C-2-③      | 제거장치<br>시작품 제작            | 시작품<br>등록        | 20              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | C-2-④      | 처리성능 검증                   | 공인인증서            | 15              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       | 넥서스환<br>경디자인<br>연구원<br>(주) | D    | D-1        | D-1-①                     | DB 구축            | 결과보고서           | 20   |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    | D-1-②                 |                            |      |            | 기술 사양 도출                  | 기술사양서            | 20              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    | D-2                   |                            |      | D-2-①      | 장치 설계안 도출                 | 설계도서             | 30              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | D-2-②      | 시작품 제작                    | 시작품<br>등록        | 30              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | D-2-③      | 처리성능 검증                   | 실측데이터            | 40              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |
|    |                       |                            |      | D-2-④      | 설계 및 시작품 보완               | 시작품<br>등록        | 20              |      |     |     |     |      |     |     |     |      |     |     |     |  |

## 다. 연구개발 성과

### (1) 평가착안점 및 기준

- 당해 연도 정량적 연구성과 목표 및 달성도
  - 국내외 논문 목표 5건 대비 4건 달성
  - 특허출원 목표 3건 대비 8건 초과 달성, 특허등록 목표 0건 대비 7건 초과달성
  - 시제품 목표 6건 대비 6건 달성
  - 기타성과(학술발표, 설계도서, 성과홍보 등) 목표 8건 대비 96건 초과달성
  - 인력양성 목표 0건 대비 1건 초과달성

| 구 분         |       | 목표 | 실적 | 달성도(%) | 비 고 |
|-------------|-------|----|----|--------|-----|
| 국내 논문<br>게재 | SCI   | 0  | 0  | 80     |     |
|             | 비SCI  | 5  | 4  |        |     |
|             | 계     | 5  | 4  |        |     |
| 특허 출원       | 국내    | 3  | 8  | 초과달성   |     |
|             | 국외    | —  | —  |        |     |
|             | 계     | 3  | 8  |        |     |
| 특허 등록       | 국내    | 0  | 7  | 초과달성   |     |
|             | 국외    | —  |    |        |     |
|             | 계     | 0  | 7  |        |     |
| 인력 양성       | 석사    | —  | —  | 초과달성   |     |
|             | 박사    | —  | 1  |        |     |
|             | 계     | —  |    |        |     |
| 시제품         | 시제품   | 6  | 6  | 100    |     |
| 기타          | 설계도서  | 3  | 3  | 초과달성   |     |
|             | 성과 홍보 | 1  | 92 |        |     |
|             | 학술 발표 | 2  | 10 |        |     |
|             | 계     | 6  | 95 |        |     |

## (2) 연구성과

### ① 국내·외 논문 게재

| 번호 | 논문명                                                                       | 학술지명          | 주저자명 | 호        | 국명       | 발행기관               | SCI 여부<br>(SCI/비SCI) | 게재일      | 등록번호* |
|----|---------------------------------------------------------------------------|---------------|------|----------|----------|--------------------|----------------------|----------|-------|
| 1  | 미세먼지 저감<br>도시조성 전략 및<br>기법 프레임워크에<br>관한 연구                                | 한국도시설계학<br>회지 | 이성희  | -        | 대한민국     | 한국도시설<br>계학회       | -                    | -        | -     |
| 2  | 미세먼지 포집장치<br>개발을 위한<br>관성충돌 프리필터<br>유동 전산해석                               | LHI Journal   | 경대승  | 12       | 대한<br>민국 | LH<br>토지주택<br>연구원  | 비SCI                 | 19.07.30 |       |
| 3  | 도시 미세먼지 저감<br>식재를 위한 수종<br>선정 기준의<br>우선순위 도출                              | 한국환경<br>생태학회지 | 조동길  | 55       | 대한<br>민국 | 한국환경<br>생태학회       | 비SCI                 | 19.08.14 |       |
| 4  | Characteristics<br>and Reducing<br>Methods of Urban<br>Particulate Matter | KIEAE Journal | 이성희  | 게재<br>승인 | 대한<br>민국 | 한국생태<br>환경<br>건축학회 | 비SCI)                | 19.10.31 |       |
| 5  | EICP에 의한<br>미세먼지 억제: 실내<br>실험 및 현장적용                                      | 한국지반<br>공학회지  | 송준영  | 게재<br>승인 | 대한<br>민국 | 한국지반<br>공학회        | 비SCI                 | 19.10.31 |       |

### ② 국내 및 국제 학술회의 발표

| 번호 | 회의 명칭                                                                        | 발표자 | 발표 일시      | 장소            | 국명   |
|----|------------------------------------------------------------------------------|-----|------------|---------------|------|
| 1  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회<br>전문가 세미나                                               | 경대승 | 2018/05/02 | 국회의사당         | 대한민국 |
| 2  | International Conference on<br>Biotechnology and Environmental<br>Management | 경대승 | 2018/10/02 | Kudam Berlin  | 독일   |
| 3  | 대한토목학회 학술대회                                                                  | 경대승 | 2018/10/19 | 경주화백컨벤션센<br>터 | 대한민국 |
| 4  | 미세먼지 저감 도시조성 전략 및 기법<br>프레임워크에 관한 연구                                         | 이성희 | 2018/10/27 | 한국교통대학교       | 대한민국 |
| 5  | 한국에너지기후변화학회                                                                  | 이경희 | 2018/11/28 | 제주대학교         | 대한민국 |
| 6  | 도시 내 생활공간 미세먼지 저감을 위한<br>정책토론회(2019)                                         | 김정곤 | 19.02.14   | 서울            | 대한민국 |
| 7  | 도시 미세먼지 저감 방안에 관한 정책<br>토론회(2019)                                            | 경대승 | 19.02.14   | 서울            | 대한민국 |
| 8  | 대한환경공학회 전문가그룹<br>학술대회(2019)                                                  | 경대승 | 19.06.14   | 수원            | 대한민국 |
| 9  | 대한환경공학회 전문가그룹<br>학술대회(2019)                                                  | 이은엽 | 19.06.14   | 수원            | 대한민국 |
| 10 | International Conference On Environ<br>mental Science & Green Energy(2019)   | 경대승 | 19.06.03   | 런던            | 영국   |
| 11 | International Conference On Environ<br>mental Science & Green Energy(2019)   | 김영민 | 19.06.03   | 런던            | 영국   |

③ 지식재산권(특허, 실용신안, 디자인, 상표, 신제품 등)

| 번호 | 지식재산권 등 명칭<br>(건별 각각 기재) | 국명       | 출원                         |          |                 | 등록                         |          |            | 기여<br>율 |
|----|--------------------------|----------|----------------------------|----------|-----------------|----------------------------|----------|------------|---------|
|    |                          |          | 출원인                        | 출원일      | 출원번호            | 등록인                        | 등록일      | 등록번호       |         |
| 1  | 미세먼지 포집장치                | 대한<br>민국 | 경대승<br>외 6인                | 18.10.26 | 10-2018-0129329 | 경대승<br>외 6인                | 19.09.10 | 10-2022381 | 100     |
| 2  | 먼지제거장치                   | 대한<br>민국 | 경대승<br>외 1인                | 19.09.27 | 10-2019-0119484 | 경대승<br>외 1인                | 20.05.11 | 10-2111475 | 100     |
| 3  | 먼지집진체                    | 대한<br>민국 | 황대성                        | 19.10.16 | 10-2019-0128623 | 황대성                        | 20.04.17 | 10-2103835 | 100     |
| 4  | 먼지조형물 1                  | 대한<br>민국 | 경대승<br>외 1인                | 19.09.27 | 30-2019-0046627 | 경대승<br>외 1인                | 20.08.11 | 30-1070824 | 100     |
| 5  | 먼지조형물 2                  | 대한<br>민국 | 경대승<br>외 1인                | 19.09.27 | 30-2019-0046651 | 경대승<br>외 1인                | 20.08.11 | 30-1070825 | 100     |
| 6  | 식생 및 식생장치                | 대한<br>민국 | 경대승<br>외 6인                | 18.11.07 | 10-2018-0136094 | 경대승<br>외 6인                | 20.10.14 | 10-2167992 | 100     |
| 7  | 미세먼지 저감장치                | 대한<br>민국 | 황대성<br>외 1인                | 20.05.20 | 10-2020-0060171 | 황대성<br>외 1인                | 20.10.07 | 10-2165557 | 100     |
| 8  | 먼지 제거장치 결합형<br>식생 거치대    | 대한<br>민국 | 넥서스환<br>경디자인<br>연구원(<br>주) | 20.09.03 | 30-2020-0041677 | 넥서스<br>환경디<br>자인연<br>구원(주) |          |            |         |

④ 전문 연구 인력 양성

| 번호 | 분류 | 기준<br>연도 | 현황  |    |    |    |    |   |     |     |     |     |    |
|----|----|----------|-----|----|----|----|----|---|-----|-----|-----|-----|----|
|    |    |          | 학위별 |    |    |    | 성별 |   | 지역별 |     |     |     |    |
|    |    |          | 박사  | 석사 | 학사 | 기타 | 남  | 여 | 수도권 | 충청권 | 영남권 | 호남권 | 기타 |
| 1  | 박사 | 2019     | 1   | -  | -  | -  | -  | 1 | -   | 1   | -   | -   | -  |

⑤ 보고서

| 연도   | 보고서 구분                       | 발간일     | 등록 번호* |
|------|------------------------------|---------|--------|
| 2019 | 모듈형 집진장치 설계도서                | 2019.10 |        |
| 2019 | 하이브리드 집진필터 설계도서              | 2019.10 |        |
| 2019 | 식물을 활용한 모듈형 Passive 시작용 설계도서 | 2019.10 | -      |
| 2020 | 설계시방 및 운영관리매뉴얼               | 2020.12 | ISBN   |

⑥ 기타 (성과홍보)

| 번호 | 행사명 / 보도명(언론사)                                                                                 | 기관명        |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>권철승 김병욱 의원, 2일 '도시내 미세먼지 저감을 위한 전문가 세미나'(건설경제신문)               | LH 토지주택연구원 |
| 2  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>권철승·김병욱 의원, '도시내 미세먼지 저감을 위한 전문가 세미나' 공동 주최(경인일보)              | LH 토지주택연구원 |
| 3  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>권철승·김병욱 의원 '도시내 미세먼지 저감' 전문가 세미나(뉴스웍스)                         | LH 토지주택연구원 |
| 4  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>'도시 내 미세먼지 저감 위한 근본적 정책은?'(메디컬투데이)                             | LH 토지주택연구원 |
| 5  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>김병욱·권철승 의원, 미세먼지 저감 위한 전문가 세미나 개최 (더리더)                        | LH 토지주택연구원 |
| 6  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>김병욱·권철승 의원, 미세먼지 저감 위한 전문가 세미나 개최 (NSP통신)                      | LH 토지주택연구원 |
| 7  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>김병욱·권철승 의원, 미세먼지 저감 위한 전문가 세미나 개최 (로이슈)                        | LH 토지주택연구원 |
| 8  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>경기 의원들, 지역현안 토론회 잇따라 개최 (경기일보)                                 | LH 토지주택연구원 |
| 9  | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>김병욱·권철승 의원, 미세먼지 저감 위한 전문가 세미나 개최 (일간투데이)                      | LH 토지주택연구원 |
| 10 | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>여야가 '같은 날' 내놓은 미세먼지 저감 전략은 (머니투데이/네이버뉴스)                       | LH 토지주택연구원 |
| 11 | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>미세먼지 사회재난 규정될까... 전문가 세미나 개최 (환경미디어)                           | LH 토지주택연구원 |
| 12 | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>여야, 깨끗한 공기 만들기 위한 해법 위해 머리 맞대야 (중부일보)                          | LH 토지주택연구원 |
| 13 | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>도시 미세먼지 줄이려면 공간 구성 요소 감안해야 (건설경제신문)                            | LH 토지주택연구원 |
| 14 | 도시 내 미세먼지 저감을 위한 국회 전문가 세미나/<br>도심 식물 벽·숲, 미세먼지 감소에 탁월<br>국회 세미나서 전문가 제안 "오염물질 흡수해 분해"(경남도민일보) | LH 토지주택연구원 |
| 15 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>도시 미세먼지 저감에 관한 정책토론회 개최(뉴스워커)                                       | LH 토지주택연구원 |
| 16 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>권철승·김병욱 의원, 김병욱 의원, 도시 미세먼지 저감에 관한 정책토론회 3일 성남서 개최 (전자신문)           | LH 토지주택연구원 |
| 17 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원, 도시 미세먼지 저감에 관한 정책토론회 개최(업코리아)                               | LH 토지주택연구원 |
| 18 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원, '도시 미세먼지 저감에 관한 정책토론회' 개최(더리더)                              | LH 토지주택연구원 |
| 19 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원 주최 토론회, "지역 맞춤형 미세먼지 저감 대책 마련 필요" (뉴스프리존)                    | LH 토지주택연구원 |
| 20 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원, "지역 맞춤형 미세먼지 저감 대책 마련 필요" (내외뉴스통신)                          | LH 토지주택연구원 |
| 21 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"잿빛 미세먼지 청화시킬 그린도시 구축"(경인일보)                                        | LH 토지주택연구원 |
| 22 | 도시 내 생활공간 미세먼지 저감을 위한 정책토론회/ 김병욱의원,<br>김병욱 의원, 미세먼지 저감 정책토론회 열어(NSP통신)                         | LH 토지주택연구원 |
| 23 | 도시 내 생활공간 미세먼지 저감을 위한 정책토론회/<br>미세먼지 저감 정책토론회, 14일 국회서 개최(쿠키뉴스)                                | LH 토지주택연구원 |
| 24 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>[오늘의 국회토론회-14일]미세먼지 저감 정책토론회, 14일 국회서 개최(머니투데이)                     | LH 토지주택연구원 |

| 번호 | 행사명 / 보도명(언론사)                                                                              | 기관명        |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 25 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>[2월 14일 국회 토론회] AI 글로벌 리더가 말하는 AI와 미래도시(뉴스핌)                     | LH 토지주택연구원 |
| 26 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>'미세먼지 감소를 위하여'(뉴스1)                                              | LH 토지주택연구원 |
| 27 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>미세먼지 저감 토론회(연합뉴스)                                                | LH 토지주택연구원 |
| 28 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>도시 생활공간 미세먼지 저감 토론회(뉴시스)                                         | LH 토지주택연구원 |
| 29 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 권칠승 박정 "도시 생활공간 미세먼지 저감대책 세워야"(비즈니스포스트)                      | LH 토지주택연구원 |
| 30 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원, "녹지 조성, 미세먼지 36% 줄일 수 있다"... '기능중심' 도로 녹화 강화돼야<br>(국토일보) | LH 토지주택연구원 |
| 31 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"도시 미세먼지 줄이기 위해 녹지 적극 조성해야"(이데일리)                                | LH 토지주택연구원 |
| 32 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>도시 내 생활공간 미세먼지 저감 위한 정책 토론회(천지일보)                                | LH 토지주택연구원 |
| 33 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>미세먼지 설문조사 결과 발표하는 이미옥 대표(천지일보)                                   | LH 토지주택연구원 |
| 34 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>녹지 조성으로 미세먼지 최대 36% 줄일 수 있어(환경일보)                                | LH 토지주택연구원 |
| 35 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"미세먼지 사회재난으로 규정해야"(비즈니스워치)                                       | LH 토지주택연구원 |
| 36 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"미세먼지, 중국도 문제지만 우리 생활 속 문제도 심각"(비즈니스워치)                          | LH 토지주택연구원 |
| 37 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>미세먼지 특별법, 고농도 미세먼지 비상 발령 시 학교 '휴업' 권고(월요신문)                      | LH 토지주택연구원 |
| 38 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 더민주 의원 "녹지 조성으로 미세먼지 최대 36% 줄일 수 있어"(아주경제)                   | LH 토지주택연구원 |
| 39 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"도시 내 생활공간 녹지 조성으로 미세먼지 최대 36% 줄일 수 있어"(부산일보)                    | LH 토지주택연구원 |
| 40 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>미세먼지 "도시 내 생활공간 녹지조성, 최대 36% 줄일 수 있어"(NSP통신)                     | LH 토지주택연구원 |
| 41 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원, 도시 내 미세먼지 저감 위한 토론회 개최(NSP통신)                            | LH 토지주택연구원 |
| 42 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원, 생활공간 곳곳에 녹지 조성해야 미세먼지 줄일 수 있어(데일리시큐)                     | LH 토지주택연구원 |
| 43 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>도심 미세먼지 줄일 방안은?(인천일보)                                            | LH 토지주택연구원 |
| 44 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>디젤자동차가 주범인 도시 공간 내 미세먼지, 이끼 등 자연식생으로 일정부분 저감 가능<br>(산업일보)        | LH 토지주택연구원 |
| 45 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"도로변 '이끼벽', 미세먼지 30%까지 줄인다"(베이비뉴스)                               | LH 토지주택연구원 |
| 46 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱 의원 주최 토론회, 도시 내 생활공간 녹지 조성으로 미세먼지 최대 36% 줄일 수 있어<br>(더리더)    | LH 토지주택연구원 |
| 47 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>"도시 '녹지 조성'으로 미세먼지 최대 36% 줄일 수 있어"(뉴스웍스)                         | LH 토지주택연구원 |

| 번호 | 행사명 / 보도명(언론사)                                                                  | 기관명        |
|----|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 48 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>[주목e토론]"아파트 외벽·출입구·기둥 녹지 조성, 미세먼지 36%↓"(이데일리)        | LH 토지주택연구원 |
| 49 | 도시 미세먼지 저감방안에 관한 정책토론회/<br>김병욱의원 주최 도시내미세먼지 저감 위한 토론회(환경일보)                     | LH 토지주택연구원 |
| 50 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 맞손(NSP통신)               | LH 토지주택연구원 |
| 51 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 '맞손'(경기방송)              | LH 토지주택연구원 |
| 52 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>'미세먼지 저감' 부천시-LH 토지주택연구원 시범사업 추진(파이낸셜뉴스)        | LH 토지주택연구원 |
| 53 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 손 잡고 도시모델 시범사업 추진(매일일보) | LH 토지주택연구원 |
| 54 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 사업 MOU(뉴스1)             | LH 토지주택연구원 |
| 55 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH연구원, '미세먼지 저감사업' 추진(뉴스시스)                 | LH 토지주택연구원 |
| 56 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 '맞손'(위키트리)              | LH 토지주택연구원 |
| 57 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 업무협약 체결(신아일보)           | LH 토지주택연구원 |
| 58 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 도시모델 시범사업 추진 (아시아경제)    | LH 토지주택연구원 |
| 59 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 도시모델 시범사업 손잡았다(서울신문)    | LH 토지주택연구원 |
| 60 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천, LH 토지주택연구원과 미세먼지 저감 도시모델 시범사업 업무협약(기호일보)    | LH 토지주택연구원 |
| 61 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 미세먼지 저감 '맞손'(경기일보)              | LH 토지주택연구원 |
| 62 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시-LH 토지주택연구원, 업무협약 체결(내외뉴스통신)                 | LH 토지주택연구원 |
| 63 | 미세먼지 저감 도시모델 시범사업을 위한 업무협약식/<br>부천시, LH 토지주택연구원과 미세먼지 저감 업무협약(중도일보)             | LH 토지주택연구원 |
| 64 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, 전국 첫 미세먼지 저감장치 시범운영(시사저널)     | LH 토지주택연구원 |
| 65 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, 마루광장에 미세먼지 집진시설 설치(뉴스프리존)     | LH 토지주택연구원 |

| 번호 | 행사명 / 보도명(언론사)                                                                                  | 기관명        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 66 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, '통합모듈형 미세먼지 집진시설' 설치...미세먼지 90% 저감 효과(브레이크뉴스) | LH 토지주택연구원 |
| 67 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, 부천역 마루광장에 통합모듈형 미세먼지 집진시설 설치(NSP통신)           | LH 토지주택연구원 |
| 68 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, 부천역 마루광장에 미세먼지 집진시설 설치(중도일보)                  | LH 토지주택연구원 |
| 69 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, 부천역 마루광장에 '통합모듈형 미세먼지 집진시설' 설치(내외뉴스통신)        | LH 토지주택연구원 |
| 70 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천시, 타워형 미세먼지 통합모듈형 집진시설 설치(시민일보)                  | LH 토지주택연구원 |
| 71 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>'미세먼지 걱정 끝'...부천역에 미세먼지 집진시설 설치(OBS뉴스)             | LH 토지주택연구원 |
| 72 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>[부천소식] '미세먼지 걱정 끝'...부천역에 미세먼지 집진시설 설치(연합뉴스)       | LH 토지주택연구원 |
| 73 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장에 '미세먼지 집진시설' 설치(뉴스1)                      | LH 토지주택연구원 |
| 74 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장에 '통합모듈형 미세먼지 집진 시설' 설치(기호일보)              | LH 토지주택연구원 |
| 75 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장은 미세먼지 Free Zone(업코리아)                     | LH 토지주택연구원 |
| 76 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장에 '통합모듈형 미세먼지 집진시설' 설치(서울신문)               | LH 토지주택연구원 |
| 77 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장에 '미세먼지 집진시설' 설치...미세먼지 90% 저감 (아시아경제)     | LH 토지주택연구원 |
| 78 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장에 '통합모듈형 미세먼지 집진시설' 설치(중부일보)               | LH 토지주택연구원 |
| 79 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>부천역 마루광장은 미세먼지 Free Zone(경기일보)                     | LH 토지주택연구원 |
| 80 | 부천시 미세먼지 Passive/Active 통합 모듈형 저감장치 시험가동/<br>쾌적한 '부천역 마루광장'... 市, 미세먼지 집진시설 설치(경인일보)            | LH 토지주택연구원 |
| 81 | [인터뷰] LH 토지주택연구원 경대승 책임연구원/<br>LH, 지자체와 손잡고 미세먼지 저감장치 시범운영(시사저널)                                | LH 토지주택연구원 |
| 82 | [헤럴드포럼-김효진 LH 토지주택연구원 선임연구위원] 미세먼지 없는 세상에서 살아보기!<br>(헤럴드경제)                                     | LH 토지주택연구원 |

## 라. 연구결과

### (1) 기술적 성과

#### (가) 기술개발 성과

##### ① 기술수준

- 집진기술의 경우 산업, 주거, 차량용 배기가스 분야에 집중도가 높게 기술개발이 이루어져 왔으며, 생활권인 도로 주변 등 외부 공간에 적용하기 위한 기술 개발은 상대적으로 미비
- 연구개발 시작 단계에서는 실험적·해석적 연구를 통해 입체녹화 기법을 이용한 미세먼지 Passive 저감기술, 집진필터를 이용한 Active 기술 등 개별 요소기술의 기능과 특성을 정립하는 단계로서 TRL3에 해당
- 본 연구개발이 종료됨에 따라, 최종성과물 개발을 통해 실증 평가를 입증함에 따라, 장비/장치 완제품의 실제현장 적용 가능성 증명 단계인 TRL8에 해당

##### ② 기술성과

- 본 연구개발을 통해 특허 7건을 등록 달성함으로써 기술 성과에 대해 인증을 받았음

| 구분 | 특허명       | 출원연도      | 등록연도     | 등록인      | 등록번호       |
|----|-----------|-----------|----------|----------|------------|
| 1  | 미세먼지 포집장치 | 18..10.26 | 19.09.10 | 한국토지주택공사 | 10-2022381 |
| 2  | 먼지제거장치    | 19.09.27  | 20.05.11 | 한국토지주택공사 | 10-2111475 |
| 3  | 먼지집진체     | 19.10.16  | 20.04.17 | 한국토지주택공사 | 10-2103835 |
| 4  | 먼지조형물 1   | 19.09.27  | 20.08.11 | 에코이엔지    | 30-1070824 |
| 5  | 먼지조형물 2   | 19.09.27  | 20.08.11 | 한국토지주택공사 | 30-1070825 |
| 6  | 식생 및 식생장치 | 18.11.07  | 20.10.14 | 한국토지주택공사 | 10-2167992 |
| 7  | 미세먼지 저감장치 | 20.05.20  | 20.10.07 | 에코이엔지    | 10-2165557 |

- 시작품을 현장에 설치하고 성능시험을 거침으로써 사업화 단계로 진입이 가능할 것으로 생각됨
- 실내외 미세먼지 저감을 요구하는 다양한 현장적용의 가능성을 확보하였으며 이에 따라 수요처 증대를 예상해 볼 수 있음
- 예상 적용처 : 실외의 공원, 녹지, 가로수, 광장, 방음벽, 버스정류장, 유동인구 밀집지역, 주거단지 쉼터, 놀이터, 교통섬, 실내의 건축물 로비, 지하상가, 역사, 대합실, 터미널, 전시 시설, 의료시설, 요양시설, 실내주차장, 실내체육시설, 실내공연장 등
- 미세먼지에 대한 Active 저감기술과 Passive 저감기술의 융합 기술 확보

- 대기중 미세먼지 관련 분야 산업의 기술 경쟁력 향상에 일조
- 국내외 대기환경시장 진출을 통한 수익창출에 기여 기대
- 국내외 환경시장 확대, 신규시장 형성 및 새로운 녹색 일자리 창출효과 기대
- 사회적 이슈인 도시 미세먼지 문제에 효과적으로 대응하고 실질적인 노출을 저감함으로써 사회적비용 절감에 크게 기여

## (나) 기술우월성

- 본 연구개발 기술은 기존에 제한적으로 실내 공간을 대상으로 적용한 Active 기술에 식생 배치시스템 연동 Passive 기술을 통합한 기술이며, 다양한 형태로 도시 생활공간(도로변, 버스정류장 등)에 적용이 가능함
- Passive/Active 통합 모듈형 장치개발 연구는 기존의 국내외 기술과 비교해 볼 때 적용시스템의 기술적 측면과 적용 식물의 선정 및 DB구축 측면에서 차별성을 지님
- 미세먼지 저감장치 상단에 설치하는 태양광 패널을 통해 공급되는 신재생에너지(태양광)를 통해 미세먼지 흡입장치와 집진 패널 구동이 가능한 친환경 에너지 활용 기술로서 차별성을 지님
- 대기환경의 미세먼지 저감 기술을 실증함에 따라 미세먼지 저감기술의 상용화를 위해 전 인차 역할을 할 것으로 기대
- 기존 미세먼지 저감 기술은 필터형, 전기집진기형 등으로 단순화 되어있는 반면 본 연구는 미세먼지 정화 우수 식물기반 입체녹화, 미스트 분사, 태양광을 활용한 신소재 집진 패널 등의 기술이 접목되어 있어 기술 수준을 향상시킬 수 있음
- Test-Bed 적용을 통한 모니터링으로 단위 면적당 미세먼지 처리 효율이 높은 식물을 선정하여 DB구축이 가능하며, 최종적으로 실외 공간의 미세먼지 Free Zone 설계 및 운영 가이드라인을 제시할 수 있음
- 국내 미세먼지 대응 기술 수준은 최고기술 보유국 대비 평균 약 70% 수준으로 7.5년 정도 기술 격차가 발생하고 있으나, 본 연구개발을 통해 기계기반의 Active 저감 기술과 식생기반의 Passive 저감 기술을 융복합한 통합모듈형 장치 개발을 통해 기술 격차를 줄여가는데 기여할 수 있을 것으로 기대됨

## (2) 경제적 성과

- 공기청정기와 관련한 국내 시장은 세계시장보다 높은 성장 추세이나 기술의 국산률이 낮다는 점에서 본 연구개발을 통해 국내에서의 기술 활용성을 높일 수 있을 것으로 기대됨
- 미세먼지 저감·관리 방법과 관련된 소재기술 뿐만 아니라 감지·측정 시스템으로 구성되어

- 기계, 전자, 화학분야를 아우르는 종합적인 사업으로 기술집약적이고 고부가가치 산업임
- 관련 사업군은 환경 가전 등 제조업, 미세먼지 저감 및 제거 서비스 업, 빅데이터 수집, 분석, 모니터링 등 서비스 업 등이 있음
- 후방산업은 미세먼지 처리 소재 제조업, 검출을 위한 센서 산업이며, 전방산업은 저감 공정 설계를 포함한 시설 건설 산업 등이 있음
- 전 세계적으로 큰 관심을 받고 있는 환경 이슈인 미세먼지 문제에 대한 기술 선도 기대
- 국내외 대기환경시장 진출을 통한 수익창출 기대
- 국내외 환경시장 확대, 신규시장 형성 및 새로운 녹색 일자리 창출효과 기대
- 도시 환경에서의 효율적이고 경제적인 미세먼지 저감 기술 개발을 통해 선진국 수준의 미세먼지 저감 분야 경쟁력 확보 가능
- 세계 환경시장 규모가 2013년 약 988조에서 2020년 이후 약 1249조 9290억원으로 성장할 것으로 전망
- 이 중 대기관리 시장은 전체 환경시장의 약 6% 규모로 추정되며, 2005년 1조 5000억원 규모였던 국내 대기관리 시장은 2020년 이후 3조 7000억원에 이를 것으로 예상됨
- 미세먼지 저감 기술의 수출로, 향후 국제환경 사업에 있어 유리한 위치를 선점하고, 청정 도시개발 분야에서 한국이 선도적인 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대
- 미세먼지 저감도시 모델을 통한 유관기술분야 시장 선점
- 차별화된 모델구축을 통한 신뢰성 및 전략적 다양성 확보로 신산업 시장 개척
- 내수시장 확보를 통한 시장경제 활성화
- 건축/조경부문 산업과 신기술 산업 등 산업간 융합화로 시너지 효과 창출, 산업 경쟁력 향상
- 신산업 창출을 통한 고용효과(일자리 창출)
- 건축/건설/토목/조경 분야의 계획/시공/구조/설비 등 관련 산업체에 신산업 시장을 제공
- 도시재생 등 도시조성사업 추진 시 미세먼지 저감 디자인 적용을 통한 유관분야 고용 창출 기대
- 미세먼지 저감도시 인증 및 평가 시스템 개발 사업화
- 미세먼지 저감기술을 해외 벤치마킹 도시에 제공하여 국내 기술수준 홍보 가능
- 향후 미세먼지 저감도시에 대한 인증/평가 시스템을 구축하여 국내외 시장 확대에 기여

### (3) 사회적 기대성과

- 사회적 이슈인 도시 미세먼지 문제에 효과적으로 대응하고 실질적인 노출을 저감함으로써 사회적비용 절감에 크게 기여
- 세계적인 미세먼지 저감 계획에 능동적으로 참여함으로써 대한민국 환경정책의 위상을 확립하고 장기적인 국가 경쟁력 향상에 기여
- 미세먼지 저감도시 조성 디자인 전략을 통한 도시환경의 질적 수준 제고

- 디자인 전략 도출을 통해 국내 각 도시에 적용될 수 있는 미세먼지 저감도시 구현의 초석 마련
- 주거 및 생활권 환경의 질적 제고 등 시너지 효과 창출 기대
- 미세먼지 저감을 통해 쾌적한 도시 삶의 질에 대한 도시민 욕구 충족 및 녹색생활 기틀 마련
- 도시환경의 질적 수준을 높여 거주자 및 지역 방문자들의 쾌적성 증진
- 공공뿐만 아니라 주민, 상인 등 지역 이해관계자들의 적극적인 참여유도
- 관련 법·제도 개선 및 마련을 통한 보편적 패러다임으로의 전환
- 미세먼지 저감 관련 정책 발굴 및 법·제도 개선으로 효율적인 도시환경관리에 기여
- 효과적인 미세먼지 저감 도시 조성모델을 전국적으로 확산하기 위한 제도적 초석 마련 기대

### 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 3-1. 목표

| 구 분     | 내 용                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |                                             |                                                                             |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 최종 목표   | <ul style="list-style-type: none"> <li>본 연구의 최종목표는 Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감 장치를 개발하고 이를 도시 주요생활 공간에 설치하여 반경 3m 이내의 미세먼지 농도(PM10 기준)를 초기농도 대비 90% 저감하여 미세먼지 농도 ‘ 좋음 ’ 수준 이상으로 유지하고자 함</li> <li>본 연구의 최종 성과물의 유형은 시작품이며, 연구종료 시 최종성과물 활용을 통해 도로변 방음벽, 버스정류장, 주거단지 쉼터 및 놀이터 등 실제 환경에 적용하여 반경 3m 이내에 서 미세먼지 Free Zone을 구현 가능성을 검토</li> </ul> |      |                                             |                                                                             |
| 차년도별 목표 | 주관                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1차년도 | 미세먼지 관련 현황 및 기술동향 조사 및 Test-Bed 구축·운영 방향 제시 | ·미세먼지 정책, 제도 조사, 저감 기술 적용 및 활용사례 조사<br>·Test-Bed 대상지 실태조사 및 운영 계획 마련        |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2차년도 | Test-Bed 선정 및 모듈형 시작품 시범적용                  | ·Test-Bed 선정 및 적용방안 도출<br>·챔버형 시스템 내 시작품 처리성능 검증<br>·모듈형 시작품 Test-Bed 시범적용  |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3차년도 | 통합 모듈형 미세먼지 제거장치 운영가이드라인 및 설계적용 방안 제시       | ·Test-Bed 적용 및 모니터링<br>·운영 가이드라인 및 설계 적용 방안 제시                              |
|         | 공동 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1차년도 | 모듈형 시작품 개발을 위한 기술요구 사항 제시                   | ·기술목표 및 시제품 성능사항 검토<br>·융합방식을 통한 미세먼지 저감 효과 극대화를 위한 Active 기술 설계 요구사항 도출    |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2차년도 | Active 제거 요소기술 개발, 핵심 부품 제작                 | ·모듈형 시작품 개발을 위한 최적 기술 선정<br>·Active 처리요소 기술 개발<br>·세부 설계사항 도출 및 핵심부품 시작품 제작 |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3차년도 | Active 처리장치 시작품 제작, 설계 및 운영관리방안 제시          | ·Test-Bed 기술 적용 모니터링<br>·모니터링 기반 시작품 보완<br>·시작품 최적운영 관리 방안 제시               |
|         | 공동 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1차년도 | Passive 적용 기법 현황 분석 및 설계 요구사항 도출            | ·Passive 적용 기법 현황분석<br>·식물소재 DB 구축<br>·설계 및 기술 요구사항 도출                      |
|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2차년도 | 식생을 이용한 Passive 시작품 설계, 제작                  | ·식생을 이용한 모듈형 시작품 설계<br>·모듈형 Passive 시작품 제작<br>·시작품 Test-bed 적용, 처리성능 모니터링   |

|  |  |      |                                        |                                                       |
|--|--|------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|  |  | 3차년도 | Passive 기술 시제품 설계 보완 및 최적운영·유지관리 방안 제시 | ·Test-Bed 모니터링<br>·시제품 설계보완<br>·시제품 최적운영 및 유지관리 방안 제시 |
|--|--|------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------|

## 3-2 목표 달성여부

### ① 질적 목표 달성

| 년도       | 구분      | 핵심연구성과<br>(level1)                                           | 단위성과물<br>(level2)                    | 최종 성과점검기준                |                        |     |             |            |
|----------|---------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|-----|-------------|------------|
|          |         |                                                              |                                      | 성과검증 기준                  |                        |     |             |            |
|          |         |                                                              |                                      | 질적성과지표                   | 목표수준                   |     | 측정<br>방법    | 달성도<br>(%) |
| 1차<br>년도 | 주관      | Passive/Active<br>통합 모듈형<br>미세먼지 제거<br>시스템 Test-Bed<br>구축·운영 | 조성사례 및<br>기술동향 조사                    | 정책, 제도, 기술 적용<br>현황 분석   | 국내외<br>현황              | 1   | 결과보고서       | 100        |
|          |         |                                                              |                                      | 국내 대상지 실태 조사             | 실증<br>대상지              | 1   | 결과보고서       | 100        |
|          |         | 모듈형 미세먼지<br>제거 시스템 운영<br>가이드라인                               | 모듈형<br>제거시스템<br>개발                   | DB 수집 및 측정방안             | 측정장치,<br>빈도 등          | 1   | 보고서         | 100        |
|          | 공동<br>1 | 태양광을 이용한<br>저전력 신소재<br>집진 패널 개발                              | Active<br>처리기법 및<br>적용 사례 조사         | 물리/화학적 처리장치<br>조사        | 1                      | 1   | 기술사양서       | 100        |
|          |         |                                                              |                                      | 기술요구사항 도출                | 처리용량,<br>규격, 에너지<br>효율 | 1   | 기술사양서       | 100        |
|          | 공동<br>2 | 식생을 이용한<br>입체형 미세먼지<br>저감 패널 개발                              | passive<br>저감기법 및<br>적용 사례 조사        | 흡수/흡착/여과 장치<br>현황조사      | DB구축                   | 1   | 결과보고서       | 100        |
|          |         |                                                              |                                      | 기술요구사항 도출                | 적합수종,<br>처리효과,<br>규격제시 | 1   | 기술사양서       | 100        |
| 2차<br>년도 | 주관      | Passive/Active<br>통합 모듈형<br>미세먼지 시스템<br>Test-Bed<br>구축·운영    | Test-Bed<br>적용                       | Test-Bed 구축              | 1개소                    | 2개소 | 관련공문        | 100        |
|          |         |                                                              |                                      | Test-Bed 운영              | 3회                     | 3회  | 현장운영<br>자료  | 100        |
|          |         | 모듈형 미세먼지<br>제거 시스템 운영<br>가이드라인                               | 모듈형 제거<br>시스템 개발<br>최적 운영관리<br>방안 도출 | Active/Passive 시스템<br>개발 | 시작품<br>1개 이상           | 2개  | 현장확인        | 100        |
|          |         |                                                              |                                      | 실내 대형 챔버실험               | 시작품<br>성능검증            | 1건  | 시험성적서<br>발급 | 100        |

|          |         |                                                             |                                       |              |                     |   |       |     |
|----------|---------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|---|-------|-----|
| 3차<br>년도 | 공동<br>1 | 태양광을 이용한<br>저전력 신소재<br>집진 패널 개발                             | 집진형<br>미세먼지<br>제거시스템<br>요소기술 개발       | 세부설계 사항      | 장치 설계               | 1 | 설계도서  | 100 |
|          |         |                                                             |                                       | 핵심부품 제작      | 시작품<br>제작           | 1 | 현장확인  | 100 |
|          | 공동<br>2 | 식생을 이용한<br>입체형 미세먼지<br>저감 패널 개발                             | 식생을 활용한<br>미세먼지 제거<br>시스템 요소<br>기술 개발 | 세부설계사항       | 장치설계                | 1 | 설계도서  | 100 |
|          |         |                                                             |                                       | 저감장치 개발      | 시작품<br>제작           | 1 | 현장확인  | 100 |
|          | 주관      | Passive/Active<br>통합 모듈형<br>미세먼지 제거<br>시스템 Test-Bed<br>구축운영 | Test-Bed<br>적용                        | 시스템 수정 및 보완  | PM10<br>제거율<br>>60% | 1 | 분석데이터 | 100 |
|          |         | 모듈형 미세먼지<br>제거 시스템 운영<br>가이드라인                              | 모듈형<br>제거시스템<br>개발                    | 현장 적용성 검토    | 현장적용<br>1개소         | 1 | 설계안   | 100 |
|          |         |                                                             | 최적<br>운영관리방안<br>도출                    | 유지관리 방안 제시   | 최적운영<br>조건          | 1 | 운영매뉴얼 | 100 |
|          | 공동<br>1 | 하이브리드 집진<br>패널 개발                                           | 집진형<br>미세먼지<br>제거시스템<br>요소기술 개발       | 제거장치 개발      | 시작품<br>1개이상         | 1 | 현장확인  | 100 |
|          |         |                                                             |                                       | 처리성능 모니터링    | PM10<br>제거율<br>>60% | 1 | 실측데이터 | 100 |
|          |         |                                                             |                                       | 장치 보완        | 시작품                 | 1 | 현장확인  | 100 |
|          | 공동<br>2 | 식생을 이용한<br>입체형 미세먼지<br>저감 패널 개발                             | 식생을 활용한<br>미세먼지 제거<br>시스템<br>요소기술 개발  | 처리성능 모니터링    | PM10<br>제거율<br>>30% | 1 | 실측데이터 | 100 |
|          |         |                                                             |                                       | 저감 시스템 모델 보완 | 시작품<br>제작           | 1 | 현장확인  | 100 |

## ② 양적 목표 달성

| 양적<br>달성<br>정도 | 목표     |   |       | 목표건수  | 달성건수 | 증빙              |
|----------------|--------|---|-------|-------|------|-----------------|
|                | 사업연계지표 | 1 | 국내외논문 | 5     | 4    | 논문 등            |
|                |        | 2 | 특허    | 출원 3건 | 8    | 특허등록증 등         |
|                |        |   |       | 등록 0건 | 7    |                 |
|                |        | 3 | 시제품   | 6     | 6    | 보고서 및 현장설치 사진 등 |
|                |        | 4 | 인력양성  | 0     | 1    | 학위증명서           |
|                |        | 5 | 기타    | 6     | 95   | 기술 사양서, 설계도서 등  |

## 3-2. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속 연구의 필요성 등)

### ① 목표 미달성 원인(사유)

- 해당사항 없음

### ② 후속 연구의 필요성

- 미세먼지 저감장치의 적용처가 다양함(공원, 방음벽, 유동인구밀집지역, 놀이터, 역사, 대합실, 지하상가 등)에 따라, 형상을 다변화(원형, 다각형, 터널형, 벽체형 등)시킨 모델 개발 필요
  - 또한, 생활공간에 설치되므로 주변 경관과의 조화 등을 고려하여 저감장치의 디자인 개선 방안에도 대해서도 후속 연구가 요구됨
- 미세먼지 저감장치 설치시 최적의 성능을 발휘할 수 있도록 적용 대상 공간에 적용하기 위한 저감장치의 적정 크기 및 성능, 가동 시간 등에 대한 최적화 기술에 대한 후속 연구 수행 필요
- 집진필터의 자동재생, 포집된 먼지의 재비산 방지에 관한 후속 연구 수행 필요
- 미세먼지센서, 인체감지센서, 조도센서, 풍향센서, 풍속센서 등을 이용한 자동운전 연구개발 필요
  - 환경관측망 연동과 IoT기술을 접목한 미세먼지 저감장치 전용 컨트롤러 및 PC제어, APP 제어 기능의 기술연구 필요
  - 가동상태, 고장정보, 알람정보 등 중앙감시제어 기능, 원격조정 기능을 부가한 제어장치 기술연구 필요
- 미세먼지 오염도, 풍향, 풍속 등에 따라 풍량을 조절함으로써 불필요한 운전 방지를 통한 에너지 절감 실현
- 그 외에 바이러스 및 세균 등을 잡는 기능도 포함하여 외부 공간에 설치하고 운영할 수 있는 다기능 공기청정 장치에 대해서도 후속 연구 검토 필요

## 4. 연구개발 성과의 활용계획

- 본 연구의 최종성과물인 Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감 장치는 탈부착이 용이하고 설계에 유동성이 있으며, 실질적인 미세먼지 노출 저감 효과가 높아 다양한 현장 적용과 기술수요처 확보가 가능할 것으로 예상됨
  - 도로변 방음벽, 버스정류장, 유동인구 밀집지역, 주거단지 내 쉼터 및 놀이터 등 실외 주요 생활공간에 다양한 형태로 적용될 수 있을 것으로 예상됨
  - 이에 따라 지자체, 공공기관, 기업체 등 다양한 기술수요처를 확보할 수 있을 것으로 판단됨
- 미세먼지 Free Zone 구현을 위한 Passive/Active 통합 모듈형 장치의 설계기술 확보, 요소기술(입체녹화기술, 미스트 분사기술, 저전력 집진패널 기술 등) 개선, 신재생에너지 및 IoT 기술 접목을 통해 미래원천기술을 확보할 수 있을 것으로 예상됨
  - 도시경관 및 공간환경을 고려한 미세먼지 저감장치 최적설계 및 관련 세부기술 지식재산권 등록 확대
  - 태양광, 풍력, 지열 등 신재생에너지 등과 연계한 에너지 저장장치(ESS) 개선을 통해 미세먼지 저감 장치의 활용성을 극대화 시킬 수 있을 것으로 기대됨
  - 우수 활용 미세먼지 집진 패널 세척, IoT 기반 실시간 대기질 모니터링 서비스 등 연계 가능
- 미세먼지 저감 수종 DB는 식물의 미세먼지 저감 영향요인, 유지관리 용이성, 외부 환경 적응성 등을 고려하여 구축되었으므로, 향후 도심 내 미세먼지 저감을 위한 식재 계획 시 수종 선정을 위한 기초 자료로서 활용성이 높다고 판단됨
  - 미세먼지 저감 식물개발 및 미세먼지 저감을 위한 녹화공간 조성 사업에 확대, 적용
- Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 저감장치 개발을 통해 도시, 국가 단위의 미세먼지 저감 대책 마련 및 가이드라인 수립에 이용 가능
  - 미세먼지 저감 장치를 개발함으로써 도시지역 및 소구역 단위에서 미세먼지 저감율 90% 확보 및 미세먼지 저감 도시 조성을 위한 요소기술 확보
  - 미세먼지 저감 도시 확대를 위한 정책 수립 및 지원 기반을 마련하고 이를 통해 미세먼지 저감 및 제어 기술 적용확대와 기술 향상 기회 제공
- 미세먼지 저감 Passive/Active 통합 모듈형 장치의 현장실험을 거쳐 성능과 효율을 개선할 수 있을 것으로 기대되며, 추후 미세먼지 저감 시범단지 및 도시에 실증한 뒤 참여 기업을 통해 장치를 보급·확산 할 수 있을 것으로 기대됨
  - Test-Bed 활용을 통한 Passive/Active 통합 모듈형 장치 성능 검증 및 개선방안 도출
  - 참여기업을 통한 통합 모듈형 장치 제품화, 기술홍보, 국내 보급·확산 방안 수립
  - 중국, 중남미, 중동 등 해외신규 시장 판로 개척을 통한 미세먼지 저감 기술 해외수출구조 고도화
- 특히, 연구성과의 상용화 기반 마련을 위해 Test-Bed 현장 운용을 위해 부천시와 MOU를 체결하고 테스트베드 적용 결과를 토대로 성능을 개선한 저감장치를 LH와 부천시간 후속 사업으로 현장 운용 계획
- 또한, 부천시에 시범 운영한 실증 연구결과를 활용하여 성능 및 디자인을 개선한 통합모

돌형 장치를 LH 사업 지구인 평택 고덕지구 Test-Bed를 추가 운영한 결과를 토대로 가이드라인을 마련하고 LH 관련 업무 담당자에 배포함으로써 신도시 및 도시재생사업 추진시 저감장치를 확대, 적용할 수 있도록 정보를 제공함

- 이에 기반 해 추후 3기 신도시 및 도시재생 사업지구 등에 미세먼지 프리존 구현 사업을 확대, 적용시켜 나갈 계획에 있음



- 운영 관리 매뉴얼은 장기적인 현장 모니터링을 통해 최적의 운영 및 관리 방안을 제시하였으므로, Passive/Active 통합 모듈형 장치의 기능 유지를 위해 활용성이 높다고 판단됨
- 핵심 연구성과에 따른 구체적 활용계획(안)은 아래와 같이 정리해 볼 수 있음

| 구분             | 핵심 연구성과                                                | 활용계획                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 주관연구기관<br>[LH] | Passive/Active 통합 모듈형<br>미세먼지 제거 시스템 Test<br>Bed 구축·운영 | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 현장적용 실증시스템 현장성능의 장기간 실측 및 모니터링 분석자료로 활용</li> <li>· 미세먼지 저감시스템 최적 적용방안 제시 및 모니터링 DB 구축에 활용</li> <li>· Passive/Active 통합 모듈형 미세먼지 제거 시스템의 설계안 제시에 활용</li> <li>· 적정 모니터링 및 운영관리를 통한 효과적인 실증 시스템 운전 및 이를 통한 안정적인 미세먼지 저감효과 확보</li> <li>· 지속적인 모니터링을 통한 업데이트를 통해 본 미세먼지 저감기술 확산을 위한 기반 마련</li> </ul>                             |
|                | 모듈형 미세먼지 제거<br>시스템 운영 가이드라인                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 미세먼지 저감을 위한 시스템이 권장사항이 아닌 의무 사항으로 제도화 될 경우, 관련 기술의 활성화 기대</li> <li>· 지자체, 입주인, 건설업체, 기기·설비 제작업체 등 수요자에 따른 맞춤형 정보로 활용</li> <li>· 기술 시나리오 및 옵션 선택에 따른 시뮬레이션 결과 제공, 사업추진 의사결정 지원에 활용</li> <li>· 미세먼지 저감장치 적용을 위한 계획단계에서 운영단계에 이르는 전반적인 가이드라인을 도출하여 각각의 단계에 따른 지침 마련에 활용</li> <li>· 국토부 '친환경 주택 건설기준 및 성능평가 지침' 과 연계</li> </ul> |

|                                   |                              |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                   |                              | 하여 활용 가능                                                                                                                                                                                                                                            |
| 공동연구기관(1)<br>[㈜에코이엔지]             | 태양광을 이용한 저전력<br>신소재 집진 패널 개발 | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 신재생에너지 사용에 따른 운영관리비 절감효과를 활용한 미세먼지 저감장치 최적화에 활용</li> <li>· 모듈형 방식으로 설치위치 및 규모에 따른 맞춤형 미세먼지 저감장치 적용에 활용</li> <li>· 신재생에너지 생산 및 활용을 통한 에너지 비용 감소</li> <li>· 집진형 미세먼지 제거시스템 요소기술 개발에 활용</li> </ul>            |
| 공동연구기관(2)<br>[넥서스환경디자인<br>연구원(주)] | 식생을 이용한 입체형<br>미세먼지저감 패널 개발  | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 식생의 미세먼지 저감 효과에 대한 DB를 바탕으로 지자체, 단지별 맞춤형 수종선정에 활용</li> <li>· 수종별 설계 및 조성 방안 제시에 활용</li> <li>· Active 처리기법과의 조합 제시에 활용</li> <li>· 도시 환경 개선을 위한 녹지 조성 방안 자료로 활용</li> <li>· 기후변화 대응 녹화기술 개발 자료로 활용</li> </ul> |

## 붙임. 참고문헌

### ○ 보고서 및 문헌 자료

- 국립산림과학원 도시숲연구센터, 2018, 미세먼지 대응하는 도시숲 조성 및 관리방안.
- 국립환경과학원. 2019c, 배출량 통계, <https://airemiss.nier.go.kr>, 검색일: 2020.7.15.
- 국토교통부, 2015, 조경설계기준.
- 김정곤·경대승·이성희, 2018, 미세먼지 저감 도시 조성기법 및 사례 연구, 한국토지주택공사 토지주택연구원.
- 농촌진흥청 국립원예특작과학원, 2014, 에코힐링을 위한 실내공기 정화 식물.
- 박종순·박태선·김종학·성선용·윤은주·남성우·윤세진·김혜란·이건원, 2020, 미세먼지 저감형 행복도시 조성 가이드라인 수립 연구용역. 한국토지주택공사.
- 산림청, 2018, 미세먼지 저감을 위한 도시숲 조성관리 지침.
- 주현수·신동원·최기철·김오석·최지원·김채윤·공성용·김유미·이현철·박선환·김수향·김운수·김정민, 2018, 미세먼지 통합관리 전략 수립 연구, 한국환경정책·평가연구원.
- 충북대학교 원예학과, 2014, 4가지 관엽식물을 이용한 바이오필터의 미세먼지 제거 효과.
- GREEN4ROADS, Wall4Life Brochure.
- Green city Solution, The city tree Brochure.
- Naturvention, Naava Design Guide.
- Nedlaw, Living wall Biofilte : Growing Clean Air and Energy Saving.

### ○ 홈페이지

- 도시와 숲(<http://www.forestcity.co.kr/>)
- 한국도시녹화(<http://www.biotope.co.kr/>)
- 하츠 블로그(<https://blog.naver.com/haatz2009/220355920093>)
- 한설그린([http://www.lafent.com/smt\\_hgreen/index.html](http://www.lafent.com/smt_hgreen/index.html))
- 환경부 공식블로그(<https://blog.naver.com/mesns/220958815097>)
- K-Weather(<http://www.kweather.co.kr/index.html>)
- Landscape Times(<http://www.latimes.kr/news/articleView.html?idxno=13896>)
- Sunshine Garden(<http://www.fabricpot.net/>)
- Xiamen Aba Eco-Technology(<https://www.china-aba.com/product>)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 최종보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.