

# 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발 최종보고서

2022. 05.

주관연구기관 / 부산대학교 산학협력단  
공동연구기관 / 에스비비(주)

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발'(연구개발 기간 : 2019. 04. 19 ~ 2021. 12. 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2022. 05.

주관연구기관명 : 부산대학교 산학협력단 (대표자) 최 경 민 (인)  
공동연구기관명 : 에스비비(주) (대표자) 이 태 형 (인)



주관연구기관책임자: 안재훈  
공동연구기관책임자: 이태형

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

| 최종보고서(일반과제용)       |               |                                                                                    |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   | 보안등급<br>일반[✓], 보안[ ] |   |  |
|--------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---|--|
| 중앙행정기관명            | 국토교통부         |                                                                                    |                       | 사업명                          | 사업명           |                   | 국토교통기술촉진 연구사업          |                   |                   |                      |   |  |
| 전문기관명              | 국토교통과학기술진흥원   |                                                                                    |                       |                              | 내역사업명         |                   | 국토교통기술혁신연구 (사회이슈해결 유형) |                   |                   |                      |   |  |
| 공고번호               | 공고-제00호       |                                                                                    |                       | 총괄연구개발 식별번호                  |               | 연구개발과제번호          |                        | 21CTAP-C152124-03 |                   |                      |   |  |
| 국가과학기술 표준분류        | EI0599        | 70%                                                                                | EI0408                | 15%                          | EH0102        |                   | 15%                    |                   |                   |                      |   |  |
| 총괄연구개발명            | 국문            | 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발                                             |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
|                    | 영문            | Development of Fine Dust Reducing Permeable Pavement and AI Based Assessment Model |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
| 연구개발과제명            | 국문            | 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발                                             |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
|                    | 영문            | Development of Fine Dust Reducing Permeable Pavement and AI Based Assessment Model |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
| 주관연구기관             | 기관명           | 부산대학교 산학협력단                                                                        |                       |                              |               | 사업자등록번호           |                        | 621-82-06530      |                   |                      |   |  |
|                    | 주소            | 부산 금정구 부산대학로63번길 2                                                                 |                       |                              |               | 법인등록번호            |                        | 184771-0000478    |                   |                      |   |  |
| 주관연구책임자            | 성명            | 안재훈                                                                                |                       |                              |               | 직위                |                        | 교수                |                   |                      |   |  |
|                    | 연락처           | 직장전화                                                                               | 051-510-7627          |                              |               |                   | 휴대전화                   |                   | 010-9978-5449     |                      |   |  |
|                    |               | 전자우편                                                                               | jahn@pusan.ac.kr      |                              |               |                   | 국가연구자번호                |                   | 1013 2097         |                      |   |  |
| 연구개발기간             | 전체            | 2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 (2년 9개월)                                               |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
|                    | 1년차           | 2019. 04. 19 - 2019. 12. 31 (9개월)                                                  |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
|                    | 2년차           | 2020. 01. 01 - 2020. 12. 31 (1년)                                                   |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
|                    | 3년차           | 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년)                                                   |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
| 연구개발비<br>(단위 : 천원) | 정부지원<br>연구개발비 | 기관부담<br>연구개발비                                                                      |                       | 그 외 기관 등의 지원금<br>지방자치체 기타( ) |               | 합계                |                        |                   | 연구개발비<br>외<br>지원금 |                      |   |  |
|                    | 현금            | 현금                                                                                 | 현물                    | 현금                           | 현물            | 현금                | 현물                     | 합계                |                   |                      |   |  |
| 총계                 | 600,000       | 20,500                                                                             | 180,500               | -                            | -             | -                 | -                      | 620,500           | 180,500           | 801,000              | - |  |
| 1년차                | 134,000       | 4,500                                                                              | 40,500                | -                            | -             | -                 | -                      | 138,500           | 40,500            | 179,000              | - |  |
| 2년차                | 135,000       | 4,500                                                                              | 40,500                | -                            | -             | -                 | -                      | 139,500           | 40,500            | 180,000              | - |  |
| 3년차                | 331,000       | 11,500                                                                             | 99,500                | -                            | -             | -                 | -                      | 342,500           | 99,500            | 442,000              | - |  |
| 공동연구기관 등           | 기관명           | 책임자                                                                                | 직위                    | 휴대전화                         | 전자우편          | 비고<br>역할          |                        | 기관유형              |                   |                      |   |  |
|                    | 공동연구기관        | 에스비비(주)                                                                            | 이태형                   | 이사<br>(대표)                   | 010-5510-7948 | satum68@naver.com |                        |                   | 중소기업              |                      |   |  |
| 위탁연구기관             |               |                                                                                    |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
| 연구기관 외 기관          |               |                                                                                    |                       |                              |               |                   |                        |                   |                   |                      |   |  |
| 연구개발담당자<br>실무담당자   | 성명            | 이윤제                                                                                |                       |                              |               | 직위                |                        | 박사과정              |                   |                      |   |  |
|                    | 연락처           | 직장전화                                                                               | 051-510-7650          |                              |               |                   | 휴대전화                   |                   | 010-6766-7094     |                      |   |  |
|                    |               | 전자우편                                                                               | lee_yunje@pusan.ac.kr |                              |               |                   | 국가연구자번호                |                   | 1181 2714         |                      |   |  |

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

2022년 03월 30일

주관연구책임자 : 안 재 훈

주관연구기관의 장 : 부산대학교 산학협력단장

공동연구기관의 장 : 에스비비(주) 이 태 형

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행( '21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

## < 요약 문 >

|                           |       |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
|---------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 사업명                       |       | 국토교통기술촉진연구사업                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             | 총괄연구개발 식별번호 |                                                                | -                                    |  |
| 내역사업명                     |       | 국토교통기술혁신연구<br>(사회이슈해결 유형)                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             | 연구개발과제번호    |                                                                | 21CTAP-C152124-03                    |  |
| 국가과학기술<br>표준분류            |       | EI0599                                                                                         | 70%                                                                                                                                                                                                                                                                                                | EI0408                                                                                      | 15%         | EH0102                                                         | 15%                                  |  |
| 총괄연구개발명                   |       | 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
| 연구개발과제명                   |       | 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
| 전체 연구개발기간                 |       | 2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 (2년 9개월)                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
| 총 연구개발비                   |       | 총 801,000 천원<br>(정부지원연구개발비 : 620,500 천원, 기관부담연구개발비 : 180,500 천원,<br>지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
| 연구개발단계                    |       | 기초[ ] 응용[ ] 개발[ <input checked="" type="checkbox"/> ]<br>기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             | 기술성숙도       |                                                                | 착수시점 기준( TRL 4 )<br>종료시점 목표( TRL 7 ) |  |
| 연구개발과제 유형                 |       | 지정공모 [ <input checked="" type="checkbox"/> ] 자유공모 [ ]                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
| 연구개발과제 특성                 |       | 사회이슈해결                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
| 연구<br>개발<br>목표<br>및<br>내용 | 최종 목표 |                                                                                                | 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
|                           | 전체 내용 |                                                                                                | ○ 미세먼지 저감성능 실험실증 평가기법 개발<br>• 표준 미세먼지 교반 및 분사 장치 및 기법 개발<br>• 실증시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법 개발<br>○ AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개발<br>• 데이터 수집을 위한 IoT 디바이스 제작 및 플랫폼 구축<br>• AI 기반 미세먼지 저감 효율 예측 알고리즘 개발 및 고도화<br>○ 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발<br>• 미세먼지 저감형 여과 필터(여재) 개발 및 제품화<br>• 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발 및 제품화 |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
|                           |       |                                                                                                | 1년차                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                             | 목표          | - 미세먼지 저감성능 평가기법 개발 및 검증<br>- AI 기반 포장체 주변 미세먼지 저감효율 예측 평가모형개발 |                                      |  |
|                           | 내용    | - 표준 미세먼지 및 유해물질 설정<br>- 도로포장 환경미세먼지 현황 자료 구축                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                             |             |                                                                |                                      |  |
|                           | 2년차   |                                                                                                | 목표                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | - 미세먼지 저감 성능 평가기법 개발 및 검증<br>- AI 기반 포장체 주변 미세먼지 저감효율 예측 평가모형개발<br>- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발 |             |                                                                |                                      |  |
|                           |       |                                                                                                | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | - 미세먼지 저감효율 실증기반 평가기법<br>- 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼<br>- 투수성 포장 내 미세먼지 저감 최적 필터             |             |                                                                |                                      |  |
|                           | 3년차   |                                                                                                | 목표                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | - 미세먼지 저감 성능 평가기법 개발 및 검증<br>- AI 기반 포장체 주변 미세먼지 저감효율 예측 평가모형개발<br>- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발 |             |                                                                |                                      |  |
|                           |       |                                                                                                | 내용                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | - 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품<br>- 미세먼지 저감효율 예측 AI 알고리즘<br>- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 제품                  |             |                                                                |                                      |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    |                              |                  |              |                         |          |              |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------------|------------------------------|------------------|--------------|-------------------------|----------|--------------|---------------------|----|----|----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|------|--|-----|--|----------|----------|----|----|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 연구개발성과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 성과 분류                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |              |           |                    | 연구 개발 성과                     |                  |              |                         |          | 성과 유형        |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 미세먼지 저감성능 실험실증<br>평가기법, 장치                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |           |                    | 표준 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품        |                  |              |                         |          | 장비 · 장치      |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    | 미세먼지 저감효율 실증기반평가기법           |                  |              |                         |          | 시스템          |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 미세먼지 예측 IoT 플랫폼,<br>AI 알고리즘                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |           |                    | 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼     |                  |              |                         |          | 시스템          |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    | 미세먼지 저감효율 예측 AI(RNN) 기반 알고리즘 |                  |              |                         |          | 소프트웨어        |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 미세먼지 저감형 투수성<br>포장 시스템                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |              |           |                    | 투수성 포장 내 미세먼지 저감 최적 필터       |                  |              |                         |          | 재료 · 자재      |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    | 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 제품       |                  |              |                         |          | 재료 · 자재      |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| <예상되는 연구개발성과 유형>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    |                              |                  |              |                         |          |              |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| <table><tr><td rowspan="2">구분</td><td rowspan="2">논문</td><td rowspan="2">특허</td><td rowspan="2">보고서<br/>원문</td><td rowspan="2">연구시설<br/>· 장비</td><td rowspan="2">기술요약<br/>정보</td><td rowspan="2">소프트웨<br/>어</td><td rowspan="2">화합물</td><td colspan="2">생명자원</td><td colspan="2">신품종</td></tr><tr><td>생명<br/>정보</td><td>생물<br/>자원</td><td>정보</td><td>실물</td></tr><tr><td>예상성과<br/>(N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr></table> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    |                              |                  |              |                         |          |              |                     |    | 구분 | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트웨<br>어 | 화합물 | 생명자원 |  | 신품종 |  | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보 | 실물 | 예상성과<br>(N/Y) | Y | Y | Y | Y | Y | Y | N | N | N | N | N |
| 구분                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 특허           | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비       | 기술요약<br>정보                   | 소프트웨<br>어        | 화합물          | 생명자원                    |          | 신품종          |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    |                              |                  |              | 생명<br>정보                | 생물<br>자원 | 정보           | 실물                  |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 예상성과<br>(N/Y)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Y            | Y         | Y                  | Y                            | Y                | N            | N                       | N        | N            | N                   |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 연구개발성과<br>활용방안 및<br>기대효과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <div>○ 정부 및 지자체 정책 추진 기반 활용</div> <div><ul style="list-style-type: none"><li>미세먼지 관리 종합대책(현재 시행 중), 미세먼지 서울형 공해차량 운행제한 정책(2018), 건전한 물순환과 수해방지를 위한 법률(2012), 등 관련 법률의 시행을 위한 비용 효율적 기술 확보</li></ul></div> <div>○ 신산업 성장동력 기대(산업과의 연계성 및 사업 확장성)</div> <div><ul style="list-style-type: none"><li>건설 산업성장 기반<ul style="list-style-type: none"><li>미세먼지 저감형 투수성 포장기술을 통한 친환경적인 도로시공으로 기존의 인프라에 새로운 성장동력 제공</li><li>관련 법률 실행으로 실현되는 미세먼지 저감형 포장으로 재비산먼지의 발생을 감소시켜 Green Road 실현</li></ul></li><li>미세먼지 연관 산업/물환경 산업<ul style="list-style-type: none"><li>미세먼지 저감의 원천기술을 확보함으로써 선진국이나 중국 대비 미세먼지 저감형 투수성 도로포장 기술은 미세먼지 연관 산업 및 물환경 산업의 고도화 및 선진화에 기여</li><li>차후 신성장동력 녹색산업의 일환으로서의 미세먼지 저감형 투수성 도로포장 기술은 미세먼지 저감원천 기술으로써 직접적으로 활용되어 미세먼지 연관 산업 및 물환경 산업의 고도화 및 선진화에 기여</li></ul></li></ul></div> <div>○ 쾌적한 도시환경 조성</div> <div><ul style="list-style-type: none"><li>인구 밀집 지역 및 도심 교통시설에 투수성 도로포장 구축 시 대기오염물질 감소와 방재성능 향상으로 쾌적하고 안전한 도시환경 조성</li><li>미세먼지 저감효과 시스템을 통해 도로 위에 미세먼지의 침적을 방지하여 자동차 배기가스, 타이어 마모, 브레이크 패드 마모 등에 의해 재 비산되는 도로 재비산먼지의 발생 감소</li></ul></div> |              |           |                    |                              |                  |              |                         |          |              |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 해당없음                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |              |           |                    |                              |                  |              |                         |          |              |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 연구개발성과의<br>비공개여부 및 사유                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    |                              |                  |              |                         |          |              |                     |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 연구개발성과의<br>등록·기탁 건수                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 특허           | 보고서<br>원문 | 연구<br>시설·<br>장비    | 기술<br>요약<br>정보               | 소프트<br>웨어        | 표준           | 생명자원                    |          | 화합물          | 신품종                 |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |           |                    |                              |                  |              | 생명<br>정보                | 생물<br>자원 |              | 정보                  | 실물 |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 3            | 3         | -                  | -                            | 2                | -            | -                       | -        | -            | -                   | -  |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 연구시설·장비<br>종합정보시스템<br>등록 현황                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 구입기관                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 연구시설·<br>장비명 |           | 규격<br>(모델명)        | 수량                           | 구입<br>연월일        | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화)             |          | 비고<br>(설치장소) | ZEUS<br>등록번호        |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | -            |           | -                  | -                            | -                | -            | -                       |          | -            | -                   |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 미세먼지                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |              |           | 투수성 포장             |                              | 스마트 계측           |              | 인공지능                    |          |              | 실험 실증               |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Fine Dust                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |              |           | Permeable Pavement |                              | Smart Monitoring |              | Artificial Intelligence |          |              | Test and Validation |    |    |    |    |           |              |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

## < 목 차 >

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....                        | 1  |
| 1) 연구개발과제의 최종 목표 .....                     | 1  |
| 1-1. 최종 목표 .....                           | 1  |
| 1-2. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거 .....               | 2  |
| 2) 연구개발과제의 년차별 목표 .....                    | 3  |
| 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 .....              | 5  |
| 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 .....          | 7  |
| 1) 연구수행 결과 .....                           | 7  |
| (1) 정성적 연구개발성과 .....                       | 7  |
| (2) 정량적 연구개발성과 .....                       | 8  |
| (3) 세부 정량적 연구개발성과 .....                    | 9  |
| (4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성) ..... | 16 |
| 2) 목표 달성 수준 .....                          | 17 |
| 4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) .....             | 19 |
| 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용 .....              | 19 |
| 2) 자체 보완활동 .....                           | 19 |
| 3) 연구개발 과정의 성실성 .....                      | 19 |
| 5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 .....          | 20 |
| 6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 .....                | 21 |
| 참고문헌 .....                                 | 22 |
| 별첨자료 .....                                 | 25 |

# 1. 연구개발과제의 개요

## 1) 연구개발과제의 최종 목표

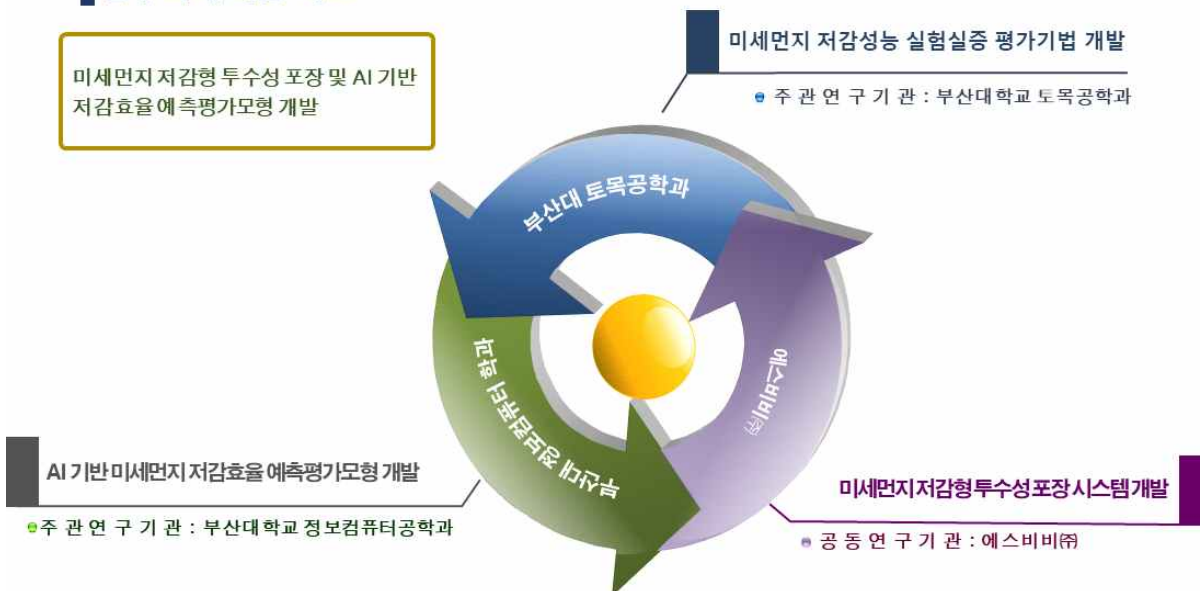
### 1-1. 최종 목표

본 연구는 미세먼지 저감형 투수성 포장의 실증 평가기법을 개발하고, 이를 실내실험과 현장 테스트베드를 통해 분석하며, 또한 AI 예측 알고리즘을 통해 구현하도록 연구목표 체계를 설정하였음.

| 구분    | 내용                                                                                                                                                |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 최종 목표 | 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발                                                                                                            |
| 세부 목표 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 미세먼지 저감성능 실험실증 평가기법 개발</li> <li>○ AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개발</li> <li>○ 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발</li> </ul> |

- **미세먼지 저감성능 실험실증 평가기법 개발**
  - 실내시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법 개발
  - 현장실증시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법
- **AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개발**
  - 데이터 수집을 위한 IoT 디바이스 제작 및 플랫폼 구축
  - AI 기반 미세먼지 저감 효율 예측 알고리즘 개발 및 고도화
- **미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발**
  - 미세먼지 저감형 여과 필터(여재) 개발 및 제품화
  - 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발 및 제품화

### ■ 연구과제 최종 목표



<미세먼지 저감형 투수성 포장과 AI 기반 저감효율 예측평가기법 개발 체계>

## 1-2. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

| 구분      |       | 연구착수                                | 연구종료                                | 단계별 설명 |                  |
|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|
| 기초연구 단계 | TRL 1 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 1  | 이론적 연구단계         |
|         | TRL 2 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 2  | 기술적 개념정립 단계      |
| 실험 단계   | TRL 3 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 3  | 실험적 증명 단계        |
|         | TRL 4 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | TRL 4  | 실험실 성능평가 단계      |
| 시작품 단계  | TRL 5 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 5  | 유사환경 시험 단계       |
|         | TRL 6 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 6  | 유사환경 기술시험 단계     |
| 실용화 단계  | TRL 7 | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | TRL 7  | 실제환경 시작품 데모 단계   |
|         | TRL 8 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 8  | 시제품 설치 및 성능시험 단계 |
| 사업화 단계  | TRL 9 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 9  | 현장적용/사업화 단계      |

| 최종성과물                                          | 기술성숙도(TRL) |        | 설정근거                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------|------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                | 연구 시작시     | 연구 종료시 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 미 세 먼 지<br>저감형 투수성 포장과 AI<br>기반 저감효율<br>예측평가모형 | TRL 4      | TRL 7  | <p>-(연구시작 시)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>국내 미세먼지 저감형 투수성 포장과 저감효율 평가에 대한 연구는 본 기술의 실현을 위한 연구가 산발적으로 수행되어, 본 기술의 개발을 위한 개별 요소들의 연구에 대한 결과를 참조할 수는 있으나, 기술의 제품화와 실증에 대한 연구 성숙도는 낮은 수준임.</li> <li>본 연구는 기술 실현을 위한 개별적 요소 연구를 종합, 정리하여, 이를 실험실 성능평가로부터 시작하여 수행하도록 제안되었기 때문에 연구시작 시 기술성숙도는 실험실 성능평가 단계(TRL 4)에 해당함.</li> </ul> <p>-(연구종료 시)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>본 연구는 실험실 성능평가 단계에서 시작하여, 미세먼지 저감형 투수성 포장의 시제품을 실증 테스트베드를 통해 저감성능을 평가하고, 이를 AI 기반 모형화 하는 것에 있기 때문에, 연구종료 시 기술성숙도는 실제환경 시작품 데모 단계(TRL 7)에 해당함.</li> </ul> |

## 2) 연구개발과제의 년차별 목표

---

### <1차년도>

#### - 주관연구기관(부산대학교)

- 미세먼지 저감성능 실험적 평가기법 설정
  - 미세먼지 유해물질 성상 분석 및 표준 미세먼지 교반기법 설정
  - 실내시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가 기법 설정 및 평가 인자 도출
- IoT 디바이스 플랫폼 구축 및 데이터 수집
  - 환경요소 데이터 및 미세먼지 오염물질 데이터 수집

#### - 공동연구기관(에스비비(주))

- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 설정
  - 기존 미세먼지 저감기술 분석 및 개발 방향 설정

### <2차년도>

#### - 주관연구기관(부산대학교):

- 미세먼지 저감성능 실험적 평가기법 개발
  - 표준 미세먼지 강우모사 분사기법 개발
  - 실내시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가 기법 설정 및 평가 인자 결정
- 환경요소별 미세먼지 저감효율 예측 AI 알고리즘 개발
  - 투수성 포장 상부 미세먼지 저감효율 예측을 위한 RNN 기반 알고리즘 개발

#### - 공동연구기관(에스비비(주)):

- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발
  - 미세먼지 저감형 필터(여재) 선정 및 개발

### <3차년도>

#### - 주관연구기관(부산대학교)

- 미세먼지 저감성능 실험적 평가기법 적용 및 현장실증
  - 실내시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법 개발 및 적용
  - 현장실증시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법 개발 및 적용
- 예측도 고도화 및 자가 학습 모니터링 시스템 개발
  - 학습 데이터 축적을 통한 AI 알고리즘의 정확도 개선

#### - 공동연구기관(에스비비(주))

- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 실증
    - 미세먼지 저감형 투수성 포장재 및 시스템 성능 실증
-

| 구분            | 연구개발목표                                    | 핵심 연구개발성과<br>(연구개발성과물)         | 현재 국내·외<br>기술수준                                     | 연구개발<br>목표치                           | 목표치<br>설정 근거                                                | 가중치<br>(%) |
|---------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------|
| 1년차<br>(2019) | 미세먼지 저감성능<br>평가기법 개발 및<br>검증              | 표준 미세먼지 및<br>유해물질 설정           | 도로포장 주변에서<br>배출원을 고려한<br>표준 미세먼지 및<br>유해물질 기준<br>없음 | 표준 미세먼지<br>설정 인자 수<br>- 4개            | 도로포장 주변에서<br>발생되는 주요<br>미세먼지 유해<br>인자 제시                    | 50         |
|               | AI 기반 포장체<br>주변 미세먼지<br>저감효율<br>예측평가모형 개발 | 도로포장 환경<br>미세먼지 현황 자료<br>구축    | 도로포장 환경에<br>따른 미세먼지<br>현황 자료<br>산발적으로<br>분포되어 있음    | 현황 데이터<br>구축 - 5건                     | 미세먼지 예측에<br>필요한 데이터<br>수집을 위해<br>도로포장 및<br>기간별 현황<br>데이터 구축 | 50         |
| 2년차<br>(2020) | 미세먼지 저감성능<br>평가기법 개발 및<br>검증              | 미세먼지 저감효율<br>실증기반평가기법          | 미세먼지 여과<br>성능 평가 사례<br>없음                           | 시험메뉴얼 -<br>1건                         | 미세먼지 여과<br>성능 평가를<br>위한 체계 설정                               | 37         |
|               | AI 기반 포장체<br>주변 미세먼지<br>저감효율<br>예측평가모형 개발 | 미세먼지 모니터링<br>IoT 디바이스 및<br>플랫폼 | 투수성 포장<br>상부 대기<br>미세먼지 예측<br>데이터 적음                | 시스템 예측<br>인자 수 - 4개                   | 미세먼지 농도에<br>영향을 줄 수<br>있는 데이터들을<br>주요 예측<br>인자로 제시          | 38         |
|               | 미세먼지 저감형<br>투수성 포장<br>시스템 개발              | 투수성 포장 내<br>미세먼지 저감최적<br>필터    | 투수성 포장 내<br>미세먼지<br>저감최적 필터<br>기준 없음                | 기존 모래필터<br>대비 미세먼지<br>포집률 개선 -<br>20% | 기존 모래필터<br>대비 제거<br>포집률 개선<br>기대                            | 25         |
| 3년차<br>(2021) | 미세먼지 저감성능<br>평가기법 개발 및<br>검증              | 미세먼지 교반 및<br>분사장치 제작품          | 미세먼지 여과<br>성능 평가 사례<br>없음                           | 교반수 농도<br>오차 - $\pm 25\%$             | 미세입자 교반<br>및 분사에 따른<br>농도 오차<br>최소화                         | 37         |
|               | AI 기반 포장체<br>주변 미세먼지<br>저감효율<br>예측평가모형 개발 | 미세먼지 저감효율<br>예측 AI 알고리즘        | 도로포장 조건을<br>고려한 미세먼지<br>저감효율 예측<br>연구 사례 없음         | 예측 정확도 -<br>90%                       | 미세먼지 예측을<br>위한 충분한<br>정확도 설정                                | 38         |
|               | 미세먼지 저감형<br>투수성 포장<br>시스템 개발              | 미세먼지 저감형<br>투수성 포장 시스템<br>제품   | 실증 및 실험실<br>수준에서 검증된<br>제품 사례 없음                    | 기존 포장재<br>대비 미세먼지<br>포집률 개선 -<br>20%  | 기존 포장재<br>대비 미세먼지<br>제거 포집률<br>개선 기대                        | 25         |

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

---

### ○ 미세먼지 저감성능 실험실증 평가기법 개발

- 실내시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법 개발
  - 미세먼지 저감효율 실증기반평가기법  
여재 내 미세먼지를 포함한 입자상 물질 여과 성능을 평가하기 위한 시스템 개발  
미세먼지(미세 입자상 물질)의 여과 성능을 평가하기 위한 시험매뉴얼 작성
  - 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품  
소용량 미세먼지 교반 및 분산주입장치 개발 및 적용  
제작한 교반장치 교반 성능 검증  
여재의 미세먼지를 포함한 입자상 물질 저감 효율 평가
- 현장실증시험을 통한 미세먼지 저감성능 평가기법
  - 표준 미세먼지 및 유해물질 설정  
도로(도로이동오염원, 도로포장)에서의 미세먼지 생성원인 및 성상 도출  
재비산되는 미세먼지 생성원인 및 영향을 미치는 주요 인자 분석  
도로에서 발생하는 주요 미세먼지 인자를 통해 표준 미세먼지 설정 인자 제시
  - 미세먼지 저감형 투수성 포장 현장 실증  
투수성 포장 2종류(아스팔트, 폴리우레탄)와 대조군(기존 아스팔트) 운영 중인 도로 설치  
현장 테스트베드 미세먼지 계측 및 실시간 정보 취득 시스템 설치  
기존 아스팔트 포장 대비 투수성 포장의 미세먼지 저감 효과 분석

### ○ AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개발

- 데이터 수집을 위한 IoT 디바이스 제작 및 플랫폼 구축
  - 도로포장 환경 미세먼지 현황 자료 구축  
미세먼지 측정장비를 통한 실제 도로에서의 미세먼지 데이터 수집  
수집된 데이터들의 상관관계 분석을 통한 결과 도출  
미세먼지 모니터링 시스템을 통한 도로 포장재별 미세먼지 데이터 수집 및 비교 결과 제시  
월별, 구간별 현황 데이터 구축
  - 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼  
이동장비를 활용한 미세먼지, 기온, 습도 측정 시스템 구축  
교통정보 수집을 위한 교통량 모니터링 IoT 디바이스 개발  
투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지 개발  
미세먼지, 기온, 습도, 교통량 등 시스템 계측 인자 설정
- AI 기반 미세먼지 저감 효율 예측 알고리즘 개발 및 고도화
  - 미세먼지 저감효율예측 AI 알고리즘  
미세먼지 저감형 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 하이브리드 딥러닝 알고리즘 개발  
미세먼지 정보와 기상정보, 교통정보 데이터간의 상관관계 분석을 통한 예측 모델 학습  
딥러닝 모델에 Attention layer를 추가하여 예측 정확도 개선

---

○ 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발

- 미세먼지 저감형 여과 필터(여재) 개발 및 제품화
    - 투수성 포장 내 미세먼지 저감 최적 필터
      - 실험적 분석을 통한 입자상 물질 저감 필터 선정
      - 미세먼지, 초미세먼지에 대한 필터의 성능 검증
      - 기존 모래필터 대비 미세먼지 포집, 제거 성능 평가
  - 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발 및 제품화
    - 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 제품
      - 도로에 침투한 입자상 물질의 여과와 재비산 방지를 통해 미세먼지를 저감
      - 기존 아스팔트 포장, 투수성 포장에 각각 적용 가능한 2가지 시스템 개발
      - 테스트베드 실증을 통해 기존 포장재 대비 미세먼지 포집, 제거 효과 확인
-

### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 1) 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

---

- 표준 미세먼지 및 유해물질 설정 [별첨 성과 1]
    - 도로(도로이동오염원, 도로포장)에서의 미세먼지 생성원인 및 성상 도출
    - 재비산되는 미세먼지 생성원인 및 영향을 미치는 주요 인자 분석
    - 도로에서 발생하는 주요 미세먼지 인자를 통해 표준 미세먼지 설정 인자 수(4개) 제시, 연구 목표치 달성
  - 도로포장 환경 미세먼지 현황 자료 구축 [별첨 성과 2]
    - 미세먼지 측정장비를 통한 실제 도로에서의 미세먼지 데이터 수집
    - 수집된 데이터들의 상관관계 분석을 통한 결과 도출
    - 미세먼지 모니터링 시스템을 통한 도로 포장재별 미세먼지 데이터 수집 및 비교 결과 제시, 연구 목표치 달성
  - 미세먼지 저감효율 실증기반평가방법 [별첨 성과 3]
    - 여재 내 미세먼지를 포함한 입자상 물질 여과 성능을 평가하기 위한 시스템 개발
    - 미세먼지(미세 입자상 물질)의 여과 성능을 평가하기 위한 시험매뉴얼 1건, 연구 목표치 달성
  - 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼 [별첨 성과 4]
    - 이동장비를 활용한 미세먼지, 기온, 습도 측정 시스템 구축
    - 교통정보 수집을 위한 교통량 모니터링 IoT 디바이스 개발
    - 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지 개발
    - 미세먼지, 기온, 습도, 교통량 등 시스템 계측 인자 수 4개 이상 제시, 연구 목표치 달성
  - 투수성 포장 내 미세먼지 저감 최적 필터 [별첨 성과 5]
    - 실험적 분석을 통한 입자상 물질 저감 필터 선정
    - 미세먼지, 초미세먼지에 대한 필터의 성능 검증
    - 기존 모래필터 대비 미세먼지 포집률 20% 이상 달성, 연구 목표치 달성
  - 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품 [별첨 성과 6]
    - 소용량 미세먼지 교반 및 분산주입장치 개발 및 적용
    - 제작한 교반장치에 대한 교반수 농도 오차  $\pm 25\%$  달성, 연구 목표치 달성
  - 미세먼지 저감효율예측 AI 알고리즘 [별첨 성과 7]
    - 미세먼지 저감형 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 하이브리드 딥러닝 알고리즘 개발
    - 미세먼지 정보와 기상정보, 교통정보 데이터간의 상관관계 분석을 통한 예측 모델 학습
    - 딥러닝 모델에 Attention layer를 추가하여 예측 정확도 개선
    - 딥러닝 모델 예측 정확도 90% 이상 달성, 연구 목표치 달성
  - 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 제품 [별첨 성과 8]
    - 도로에 침투한 입자상 물질의 여과와 재비산 방지를 통해 미세먼지를 저감
    - 기존 아스팔트 포장, 투수성 포장에 각각 적용 가능한 2가지 시스템 개발
    - 테스트베드 실증을 통해 기존 포장재 대비 미세먼지 제거, 포집률 20% 이상 개선 확인, 연구 목표치 달성
-

## (2) 정량적 연구개발성과

---

- 학술논문 성과
    - SCIE 논문 8편과 한국연구재단등재 논문 3편을 게재하여 총 11편의 학술논문 성과 달성
    - 연구 목표치(SCIE 논문 5편, 한국연구재단등재 논문 5편) 초과 달성
  - 학술대회 성과
    - 국제학술대회 2건의 학술대회 발표 성과 달성
    - 국내학술대회 2건의 학술대회 발표 성과 달성
  - S/W 성과
    - 소프트웨어 2건 등록으로 연구 목표치 성과 달성
    - 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지 개발
  - 지식재산권 성과
    - 특허출원 5건, 특허등록 3건의 연구성과 달성
    - 연구 목표치인 특허출원 4건, 특허등록 1건 초과 달성
-

### (3) 세부 정량적 연구개발성과

#### [과학적 성과]

#### □ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

| 번호 | 논문명                                                                                                                                        | 학술지명           | 주저자명                        | 호      | 국명   | 발행기관       | SCIE 여부<br>(SCIE/비SCIE) | 게재일      | 등록번호<br>(ISSN) | 기여율  |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|--------|------|------------|-------------------------|----------|----------------|------|
| 1  | 수분 처리에 따른 다공성 아스팔트의 동탄성계수 변화                                                                                                               | 한국방재학회 논문집     | 유재원                         | 18(7)  | 대한민국 | 한국방재학회     | 비SCIE                   | 20191231 | 1738-2424      | 100  |
| 2  | 활성탄 함유량에 따른 광촉매 시멘트 시편의 전기비저항 특성                                                                                                           | 한국터널지하공간학회 논문집 | 공태현                         | 22(5)  | 대한민국 | 한국터널지하공간학회 | 비SCIE                   | 20200930 | 2233-8292      | 100  |
| 3  | 동결응해에 따른 투수성 폴리머 콘크리트의 인장강도와 동탄성계수                                                                                                         | 한국방재학회 논문집     | 이윤제                         | 21(6)  | 대한민국 | 한국방재학회     | 비SCIE                   | 20211228 | 1738-2424      | 100  |
| 4  | Compaction Quality Monitoring of Open-Graded Aggregates by Light Weight Deflectometer and Soil Stiness Gauge                               | Sustainability | Yongjin Choi                | 12(6)  | 스위스  | MDPI       | SCI                     | 20200323 | 2071-1050      | 100  |
| 5  | Measurement of Permeability in Horizontal Direction of Open-Graded Friction Course with Rutting                                            | Sustainability | Jaewon Yoo                  | 12(16) | 스위스  | MDPI       | SCI                     | 20200810 | 2071-1050      | 100  |
| 6  | Distributed Deep Features Extraction Model for Air Quality Forecasting                                                                     | Sustainability | Axel Gedeon Mnegara Mengara | 12(19) | 스위스  | MDPI       | SCI                     | 20200928 | 2071-1050      | 100  |
| 7  | Numerical Study on the Hydrologic Characteristic of Permeable Friction Course Pavement                                                     | water          | Tan Hung Nguyen             | 13(6)  | 스위스  | MDPI       | SCIE                    | 20210319 | 2073-4441      | 100  |
| 8  | Three-Dimensional Microstructure Reconstruction Framework for Permeable Pavement Analysis Based on 3D-IWGAN with Enhanced Gradient Penalty | sensors        | Ludia Eka Feri              | 21(11) | 스위스  | MDPI       | SCIE                    | 20210521 | 1424-8220      | 33.3 |
| 9  | Investigation of Mechanical and Hydrologic Characteristics of Porous Asphalt Pavement with a Geocell Composite                             | materials      | Jaehun Ahn                  | 14(12) | 스위스  | MDPI       | SCIE                    | 20210609 | 1996-1944      | 100  |

|    |                                                                                                                  |                |                             |       |     |      |      |          |           |     |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|-------|-----|------|------|----------|-----------|-----|
| 10 | Hyperspectral remote sensing of TiO2 concentration in cementitious material based on machine learning approaches | remote sensing | Tae-Min Oh                  | 14(1) | 스위스 | MDPI | SCIE | 20220101 | 2072-4292 | 100 |
| 11 | Attention Based Distributed Deep Learning Model for Air Quality Forecasting                                      | Sustainability | Axel Gedeon Mengara Mengara | -     | 스위스 | MDPI | SCI  | 투고완료     | 2071-1050 | 100 |

#### □ 국내 및 국제 학술회의 발표

| 번호 | 회의 명칭             | 발표 내용                                                                             | 발표자             | 발표 일시    | 장소  | 국명   |
|----|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|-----|------|
| 1  | GEOTEC HANOI 2019 | Experimental analysis of resilient modulus of open-graded aggregate material      | Tan Hung Nguyen | 20191129 | 하노이 | 베트남  |
| 2  | 대한토목학회 2020 컨벤션   | 규사-석탄저회 여재의 TSS 제거 효율에 관한 실험적 연구                                                  | 이홍경             | 20201022 | 제주도 | 대한민국 |
| 3  | 대한토목학회 2020 컨벤션   | Experimental evaluation of hydrologic characteristic of permeable friction course | 이윤제             | 20201022 | 제주도 | 대한민국 |
| 4  | ART 2021          | Stiffness and Dry Unit Weight of D40 Open-Graded Aggregates                       | 이윤제             | 20211110 | 제주도 | 대한민국 |

#### □ 기술 요약 정보

| 번호 | 연도 | 기술명 | 요약 내용 | 기술 완성도 | 등록 번호 | 활용 여부 | 미활용사유 | 연구개발기관 외 활용 여부 | 허용방식 |
|----|----|-----|-------|--------|-------|-------|-------|----------------|------|
| 1  | -  | -   | -     | -      | -     | -     | -     | -              | -    |

#### □ 보고서 원문

| 번호 | 연도   | 보고서 명    | 발간일        | 등록 번호 |
|----|------|----------|------------|-------|
| 1  | 2019 | 연차실적·계획서 | 2019.12.18 | -     |
| 2  | 2020 | 연차실적·계획서 | 2020.12.09 | -     |
| 3  | 2022 | 최종보고서    | 2022.02    | -     |

#### □ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

| 번호 | 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명 | 등록/기탁 번호 | 등록/기탁 기관 | 발생 연도 |
|----|------------------------|----------|----------|-------|
| 1  | -                      | -        | -        | -     |

## [기술적 성과]

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

| 번호 | 구분 | 지식재산권 등 명칭<br>(건별 각각 기재)                    | 국명   | 출원          |          |                 | 등록          |          |            | 기여율 | 활용<br>여부 |
|----|----|---------------------------------------------|------|-------------|----------|-----------------|-------------|----------|------------|-----|----------|
|    |    |                                             |      | 출원인         | 출원일      | 출원번호            | 등록인         | 등록일      | 등록번호       |     |          |
| 1  | 특허 | 비점오염 저감을 위한 다공성 배수 포장 모듈 및 이의 시공 방법         | 대한민국 | 에스비비 주식회사   | 20201020 | 10-2020-0136085 | -           | -        | -          | 100 |          |
| 2  | 특허 | 투수성 포장시스템의 미세입자 여과성능 및 투수계수 평가를 위한 모듈형 시험장치 | 대한민국 | 부산대학교 산학협력단 | 20201112 | 10-2020-0150608 | 부산대학교 산학협력단 | 20211207 | 10-2338143 | 100 |          |
| 3  | 특허 | 미세먼지 예측 정확도 향상을 위한 하이브리드 딥러닝 모델 생성 장치 및 방법  | 대한민국 | 부산대학교 산학협력단 | 20210111 | 10-2021-0003596 | 부산대학교 산학협력단 | 20211105 | 10-2325137 | 100 |          |
| 4  | 특허 | 초분광센서를 이용한 도로구조물의 표면 광촉매 잔량 평가 장치 및 방법      | 대한민국 | 부산대학교 산학협력단 | 20210614 | 10-2021-0076946 | 부산대학교 산학협력단 | 20211006 | 10-2312366 | 100 |          |
| 5  | 특허 | 포장도로의 비점오염물질 여과장치 및 그 시공방법                  | 대한민국 | 에스비비 주식회사   | 20210722 | 10-2021-0096589 | -           | -        | -          | 100 |          |

#### ○ 지식재산권 활용 유형

| 번호 | 제품화 | 방어 | 전용실시 | 통상실시 | 무상실시 | 매매/양도 | 상호실시 | 담보대출 | 투자 | 활용 예정 | 기타 |
|----|-----|----|------|------|------|-------|------|------|----|-------|----|
| 1  | -   | -  | -    | -    | -    | -     | -    | -    | -  | -     | -  |

### □ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

| 번호 | 저작권명                 | 창작일      | 저작자명        | 등록일      | 등록번호          | 저작권자명 | 기여율 |
|----|----------------------|----------|-------------|----------|---------------|-------|-----|
| 1  | AI 기반 미세먼지 수치 예측평가모형 | 20200712 | 부산대학교 산학협력단 | 20201013 | C-2020-034949 | 김영학   | 100 |
| 2  | 미세먼지 저감도 예측 웹사이트     | 20211105 | 부산대학교 산학협력단 | 20211203 | C-2021-052754 | 엄효은   | 100 |

### □ 신기술 지정

| 번호 | 명칭 | 고시일 | 보호기간 | 지정번호 |
|----|----|-----|------|------|
| 1  | -  | -   | -    | -    |

### □ 기술 및 제품 인증

| 번호 | 인증 분야 | 인증기관 | 인증 내용 |      | 인증 획득일 | 국가명 |
|----|-------|------|-------|------|--------|-----|
|    |       |      | 인증명   | 인증번호 |        |     |
| 1  | -     | -    | -     | -    | -      | -   |

□ 표준화

○ 국내표준

| 번호 | 인증구분 | 인증여부 | 표준명 | 표준인증기구명 | 제안주체 | 표준종류 | 제안/인증일자 |
|----|------|------|-----|---------|------|------|---------|
| 1  | -    | -    | -   | -       | -    | -    | -       |

○ 국제표준

| 번호 | 표준화단계 구분 | 표준명 | 표준기구명 | 표준분과명 | 의장단<br>활동여부 | 표준특허<br>추진여부 | 표준개발<br>방식 | 제안자 | 표준화<br>번호 | 제안일자 |
|----|----------|-----|-------|-------|-------------|--------------|------------|-----|-----------|------|
| 1  | -        | -   | -     | -     | -           | -            | -          | -   | -         | -    |

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

| 번호 | 시제품명                               | 출시/제작일 | 제작업체명   | 설치장소               | 이용분야                  | 사업화<br>소요 기간 | 인증기관<br>(해당 시) | 인증일<br>(해당 시) |
|----|------------------------------------|--------|---------|--------------------|-----------------------|--------------|----------------|---------------|
| 1  | 미세먼지 저감을 위한<br>투수성 포장<br>측구여과장치 모듈 | 21.04  | 에스비비(주) | 부산시 금정구<br>중앙대로 일대 | 토목·환경<br>(미세먼지<br>저감) | -            | -              | -             |

□ 현장적용

| 번호 | 적용기술명                        | 적용일        | 발주기관명          | 적용 연구개발기관명     | 적용현장명(장소)                                                   |
|----|------------------------------|------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 1  | 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템<br>현장 실증 | 2021.03.28 | 부산대학교<br>산학협력단 | 부산대학교<br>산학협력단 | 부산시 금정구 남산역<br>일대 중앙대로 배수성<br>아스콘 및 미세먼지<br>저감형 투수성<br>포장공사 |

□ 기술 실시(이전)

| 번호 | 기술 이전 유형 | 기술 실시 계약명 | 기술 실시<br>대상 기관 | 기술 실시<br>발생일 | 기술료   |         |
|----|----------|-----------|----------------|--------------|-------|---------|
|    |          |           |                |              | 발생 연도 | 발생액(천원) |
| 1  | -        | -         | -              | -            | -     | -       |

□ 사업화 투자실적

| 번호 | 연도 | 투자 자금 성격* | 추가 연구개발 투자(천원) | 설비 투자(천원) | 기타 투자(천원) | 합계(천원) |
|----|----|-----------|----------------|-----------|-----------|--------|
| 1  | -  | -         | -              | -         | -         | -      |

□ 사업화 현황

| 번호 | 사업화 방식 | 사업화 형태 | 지역 | 사업화명 | 내용 | 업체명 | 매출액        |            | 매출<br>발생 연도 | 기술<br>수명 |
|----|--------|--------|----|------|----|-----|------------|------------|-------------|----------|
|    |        |        |    |      |    |     | 국내<br>(천원) | 국외<br>(달러) |             |          |
| 1  | -      | -      | -  | -    | -  | -   | -          | -          | -           | -        |

□ 매출 실적(누적)

| 번호 | 사업화명 | 발생 연도 | 매출액    |        | 합계 | 산정 방법 |
|----|------|-------|--------|--------|----|-------|
|    |      |       | 국내(천원) | 국외(달러) |    |       |
| 1  | -    | -     | -      | -      | -  | -     |
| 합계 |      |       |        |        | -  |       |

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

| 성과                             |             |       | -    |      |      |
|--------------------------------|-------------|-------|------|------|------|
| 사업화 계획                         | 사업화 소요기간(년) |       | -    |      |      |
|                                | 소요예산(천원)    |       | -    |      |      |
|                                | 예상 매출규모(천원) |       | 현재까지 | 3년 후 | 5년 후 |
|                                |             |       | -    | -    | -    |
|                                | 시장 점유율      | 단위(%) | 현재까지 | 3년 후 | 5년 후 |
|                                |             | 국내    | -    | -    | -    |
|                                |             | 국외    | -    | -    | -    |
| 향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획 |             | -     |      |      |      |
| 무역 수지 개선 효과(천원)                | 수입대체(내수)    | 현재    | 3년 후 | 5년 후 |      |
|                                |             | -     | -    | -    |      |
|                                | 수 출         | -     | -    | -    |      |

□ 고용 창출

| 번호 | 사업화명 | 사업화 업체명 | 고용창출 인원(명) |       | 합계(명) |
|----|------|---------|------------|-------|-------|
|    |      |         | yyyy년      | yyyy년 |       |
| 1  | -    | -       | -          | -     | -     |
| 합계 |      |         | -          | -     | -     |

□ 고용 효과

| 구분    |      |      | 고용 효과(명) |
|-------|------|------|----------|
| 고용 효과 | 개발 전 | 연구인력 | -        |
|       |      | 생산인력 | -        |
|       | 개발 후 | 연구인력 | -        |
|       |      | 생산인력 | -        |

□ 비용 절감(누적)

| 번호 | 사업화명 | 발생 연도 | 산정방법 | 비용 절감액(천원) |
|----|------|-------|------|------------|
| 1  | -    | -     | -    | -          |
| 합계 |      |       |      | -          |

□ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

| 구분    | 사업화명 | 수입 대체 | 수출 증대 | 매출 증대 | 생산성 향상 | 고용 창출<br>(인력 양성 수, 명) | 기타 |
|-------|------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|----|
| 해당 연도 | -    | -     | -     | -     | -      | -                     | -  |
| 기대 목표 | -    | -     | -     | -     | -      | -                     | -  |

□ 산업 지원(기술지도)

| 번호 | 내용 | 기간 | 참석 대상 | 장소 | 인원(명) |
|----|----|----|-------|----|-------|
| 1  | -  | -  | -     | -  | -     |

## □ 기술 무역

(단위 : 천원)

| 번호 | 계약 연월 | 계약 기술명 | 계약 업체명 | 계약업체 국가 | 총 계약액 | 기 징수액 | 해당 연도 | 징수액 | 향후 예정액 | 수출/수입 |
|----|-------|--------|--------|---------|-------|-------|-------|-----|--------|-------|
| 1  | -     | -      | -      | -       | -     | -     | -     | -   | -      | -     |

## [사회적 성과]

## □ 법령 반영

| 번호 | 구분<br>(법률/시행령) | 활용 구분<br>(제정/개정) | 명 칭 | 해당 조항 | 시행일 | 관리 부처 | 제정/개정 내용 |
|----|----------------|------------------|-----|-------|-----|-------|----------|
| 1  | -              | -                | -   | -     | -   | -     | -        |

## □ 정책활용 내용

| 번호 | 구분<br>(제안/채택) | 정책명 | 관련 기관<br>(담당 부서) | 활용 연도 | 채택 내용 |
|----|---------------|-----|------------------|-------|-------|
| 1  | -             | -   | -                | -     | -     |

## □ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

| 번호 | 구 분<br>(설계 기준/설명서/지침/안내서) | 활용 구분<br>(신규/개선) | 설계 기준/설명서/<br>지침/안내서 명칭 | 반영일 | 반영 내용 |
|----|---------------------------|------------------|-------------------------|-----|-------|
| 1  | -                         | -                | -                       | -   | -     |

## □ 신진연구자 채용

| 번호 | 채용 연구개발기관명 | 채용일 | 근로기간 | 채용인원(명) | 채용인원 중 청년인력(명) |
|----|------------|-----|------|---------|----------------|
| 1  | -          | -   | -    | -       | -              |

## □ 전문 연구 인력 양성

| 번호 | 분류 | 연도   | 현황(명) |    |    |    |    |   |     |     |     |     |    |
|----|----|------|-------|----|----|----|----|---|-----|-----|-----|-----|----|
|    |    |      | 학위별   |    |    |    | 성별 |   | 지역별 |     |     |     |    |
| 1  |    | 2019 | 박사    | 석사 | 학사 | 기타 | 남  | 여 | 수도권 | 충청권 | 영남권 | 호남권 | 기타 |
|    |    |      | -     | 2  | -  | -  | 2  | - | -   | -   | 2   | -   | -  |
| 2  |    | 2020 | 박사    | 석사 | 학사 | 기타 | 남  | 여 | 수도권 | 충청권 | 영남권 | 호남권 | 기타 |
|    |    |      | 2     | 3  | 6  | -  | 11 | - | -   | -   | 5   | 3   | 3  |
| 3  |    | 2021 | 박사    | 석사 | 학사 | 기타 | 남  | 여 | 수도권 | 충청권 | 영남권 | 호남권 | 기타 |
|    |    |      | -     | 2  | 4  | -  | 4  | 2 | -   | -   | 4   | 2   | -  |

## □ 산업 기술 인력 양성

| 번호 | 연도 | 프로그램명 | 프로그램 내용 | 교육 기관 | 교육 개최 횟수 | 총 교육 시간 | 총 교육 인원 |
|----|----|-------|---------|-------|----------|---------|---------|
| 1  | -  | -     | -       | -     | -        | -       | -       |

## □ 다른 국가연구개발사업에의 활용

| 번호 | 연도 | 중앙행정기관명 | 사업명 | 연구개발과제명 | 연구책임자 | 연구개발비(천원) |
|----|----|---------|-----|---------|-------|-----------|
| 1  | -  | -       | -   | -       | -     | -         |

☐ 국제화 협력성과

| 번호 | 구분<br>(유치/파견) | 기간 | 국가 | 학위 | 전공 | 내용 |
|----|---------------|----|----|----|----|----|
| 1  | -             | -  | -  | -  | -  | -  |

☐ 홍보 실적

| 번호 | 홍보 유형 | 매체명 | 제목 | 홍보일 |
|----|-------|-----|----|-----|
| 1  | -     | -   | -  | -   |

☐ 포상 및 수상 실적

| 번호 | 종류 | 포상명 | 포상 내용 | 포상 대상 | 포상일 | 포상 기관 |
|----|----|-----|-------|-------|-----|-------|
| 1  | -  | -   | -     | -     | -   | -     |

[인프라 성과]

☐ 연구시설 · 장비

| 번호 | 구축<br>기관 | 연구시설/<br>연구장비명 | 규격<br>(모델명) | 개발여부<br>(○/×) | 연구시설 · 장비<br>종합정보시스템*<br>등록여부 | 연구시설 · 장비<br>종합정보시스템*<br>등록번호 | 구축일자<br>(YY.MM.DD) | 구축비용<br>(천원) | 비고<br>(설치 장소) |
|----|----------|----------------|-------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|---------------|
| 1  | -        | -              | -           | -             | -                             | -                             | -                  | -            | -             |

## [그 밖의 성과](해당 시 작성)

---

- 이동형 장비를 통한 일반포장도로 및 투수(배수)성 포장도로의 재비산먼지 현장계측
    - 이동형 장비로 재비산먼지 측정센서(Dusttrack 8530)를 사용하였으며, 차량 앞바퀴 뒤쪽에 차량 주행에 따른 재비산먼지를 흡입할 수 있는 호수를 부착하고 재비산먼지 측정 센서와 연결하며, 차량 주행으로 발생하는 재비산먼지를 측정 센서를 통해 측정(PM 10).
    - 차량 속도는 60 km/h로 유지하며, 재비산먼지 측정 센서를 통해 일반포장도로 및 투수(배수)성 포장도로의 재비산먼지 농도를 1초 간격으로 실시간 측정 및 비교.
    - 도로 재비산먼지 농도를 비교한 결과, 투수(배수)성 포장도로가 일반포장도로보다 재비산먼지가 낮게 비산되는 것으로 나타남.
    - 도로 재비산먼지 농도는 전체적으로 차량 통행이 적은 야간보다, 차량 통행이 많은 주간에 높게 나타남.
- 

## (4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

---

- 미세먼지 저감도 예측 웹사이트 개발
    - 지역별 투수성 포장 설치 효용성을 시각화하고 정보 접근성을 높이기 위해 미세먼지 및 기상정보를 바탕으로 미세먼지 저감도를 예측하는 웹사이트를 개발함.
    - 구글 맵 API를 통해 지도를 호출하여 지도상의 위치를 클릭하거나 주소를 입력했을 때, 해당 위치 정보를 서버에 넘겨줌.
    - 서버는 넘겨받은 위치 정보를 바탕으로 Air Korea와 기상청 API로부터 미세먼지 및 기상정보를 불러와 AI 모델에 입력하고, 예측된 미세먼지 저감효율을 웹페이지에 그래프로 보여줌.
    - 개발된 웹사이트는 검증된 API와 측정 장비를 통해 다양하게 수집된 데이터와 AI 모델의 예측 정확도를 바탕으로 사용자들에게 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있음.
    - 미세먼지 저감효율을 수치가 아닌 그래프로 시각화함으로써 지역별 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감도를 직관적으로 보여주어 미세먼지 저감형 투수성 포장의 구현 가능성을 더욱 증대시킴.
-

## 2) 목표 달성 수준

| 연구 개발 목표                                                                                                      | 달 성 내 용                                                                                                                                                                                                          | 달성도(%) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| ○ 미세먼지 저감성능 실험실증 평가기법<br>· 미세먼지 저감성능 평가기법 개발 및 검증<br>- 표준 미세먼지 및 유해물질 설정<br>(표준 미세먼지 설정 인자 수 - 4개)            | ○ 미세먼지 저감성능 실험실증 평가기법<br>· 미세먼지 저감성능 평가기법 개발 및 검증<br>- 표준 미세먼지 및 유해물질 설정<br>(표준 미세먼지 설정 인자 수 - 5개)<br>· 도로에서 발생하는 주요 미세먼지 인자를 통해<br>표준 미세먼지 설정 인자 수(5개) 달성                                                       | 100    |
| - 미세먼지 저감효율 실증기반평가기법<br>(시험매뉴얼 - 1건)                                                                          | - 미세먼지 저감효율 실증기반평가기법<br>(시험매뉴얼 - 1건)<br>· 여재의 입자상 물질(미세먼지) 여과 성능 평가를 위한 시험장비 개발 및 시험매뉴얼 1건 달성                                                                                                                    | 100    |
| - 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품<br>(교반수 농도 오차 - $\pm 25\%$ )                                                             | - 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품<br>(교반수 농도 오차 - $\pm 25\%$ )<br>· 소용량 미세먼지 교반장치 제작<br>· 제작한 교반장치에 대한 교반수 농도 오차 25% 이내 달성                                                                                                    | 100    |
| ○ AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형<br>· AI 기반 포장체 주변 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개발<br>- 도로포장 환경 미세먼지 현황 자료 구축<br>(현황 데이터 구축 - 5건) | ○ AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형<br>· AI 기반 포장체 주변 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개발<br>- 도로포장 환경 미세먼지 현황 자료 구축<br>(현황 데이터 구축 - 6건)<br>· 교통정보 수집을 위한 실시간 교통량 모니터링 IoT 디바이스 개발을 통한 효과적 데이터 수집 및 구간별 미세먼지와 환경변수 데이터 수집<br>(현황 데이터 6건 달성) | 100    |
| - 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼(시스템 계측 인자 수 - 4개)                                                                  | - 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼(시스템 계측 인자 수 - 4개 이상)<br>· 교통정보 수집을 위한 실시간 교통량 모니터링 IoT 디바이스 개발을 통한 효과적 데이터 수집 및 구간별 미세먼지와 환경변수 데이터 수집<br>(계측 인자 수 4개 이상 달성)                                                           | 100    |
| - 미세먼지 저감효율 예측 AI 알고리즘<br>(예측 정확도 - 90%)                                                                      | - 미세먼지 저감효율 예측 AI 알고리즘<br>(예측 정확도 - 90% 이상)<br>· 미세먼지 저감형 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 하이브리드 딥러닝 모델 예측 정확도 90% 이상 달성                                                                                                  | 100    |

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <p>○ 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발</li> <li>- 투수성 포장 내 미세먼지 저감최적 필터 (기존 모래필터 대비 미세먼지 포집률 개선 - 20%)</li> </ul> | <p>○ 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발</li> <li>- 투수성 포장 내 미세먼지 저감최적 필터 (기존 모래필터 대비 미세먼지 포집률 개선 - 20% 이상)</li> <li>· 미세먼지에 대한 필터의 성능을 검증하여 필터 여재 선정 및 기존 모래필터 대비 미세먼지 포집률 20% 이상 달성</li> </ul>                                                                    | 100 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 제품 (기존 포장재 대비 미세먼지 포집률 개선 - 20%)</li> </ul>                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 제품 (기존 포장재 대비 미세먼지 포집률 개선 - 20% 이상)</li> <li>· 측구여과시스템을 개발하여 여재를 충전하여 도로 위의 미세먼지(비점오염원)를 여과하여 운용가능</li> <li>· 기존 아스팔트포장 도로와 투수성 포장 도로 각각 적용이 가능한 미세먼지 저감형 포장 시스템을 개발하고 특허 출원을 통한 제품화</li> <li>· 테스트베드에 설치된 측정기 데이터를 통한 기존 포장재 대비 미세먼지 20% 이상 개선</li> </ul> | 100 |

#### 4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

##### 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

---

- 해당없음

---

##### 2) 자체 보완활동

---

- 해당없음

---

##### 3) 연구개발 과정의 성실성

---

- 해당없음

---

## 5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

### ○ 기술적 측면

- 미세먼지 저감형 투수성 포장 기술의 보급으로 도시 수자원 확보와 도시 하천 건천화 저감 및 수질·대기환경 개선 기대.
- AI기반 저감효율 예측평가모형 기법 개발을 통해 현 시행되고 있는 미세먼지의 저감을 위한 기술에 대한 평가를 할 수 있는 계기를 마련하여 궁극적으로 효율적인 미세먼지 저감형 투수성 포장 설계 및 유지보수를 가능하게 함.

### ○ 사회·경제 산업적 측면

- 전 세계적인 대기환경문제의 심화로 인해 해결방안의 필요성이 부각되고 있음. 미세먼지 저감형 투수성 포장시스템 기술 개발은 친환경적기술개발으로 세계적인 흐름에 적극적으로 대응.
- 녹색공간 확보 및 지역환경개선을 통한 지역주민의 삶의 질 향상. 수자원 확보 및 도시 하천과 생태계 보전. 유관산업과의 연계 성장을 통한 신성장 동력 확보.
- 실험연구를 통한 기술적용의 검증결과를 현장적용에 대한 구체적인 설치기준 수립과 각종시설의 제품화시 반영함으로써 기술확산에 기여.

#### 1. 기술적 측면

- 미세먼지 저감형 투수성 포장 기술의 보급으로 도시 수자원 확보와 도시 수질·대기환경 개선 기대
- 효율적인 미세먼지 저감형 투수성 포장 설계 및 유지보수를 가능하게 함

#### 2. 사회·경제 산업적 측면

- 전 세계적인 대기환경문제의 심화로 인해 향후 세계적으로 각광 받을 것으로 기대
- 지역주민의 삶의 질 향상, 수자원 확보 및 도시 하천과 생태계 보전, 경제 활성화
- 실험연구를 통하여 기술 확산에 기여



<미세먼지 저감형 투수성 포장의 기대효과>

## 6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

### ○ 정부 및 지자체 정책 추진 기반 활용

- 미세먼지 관리 종합대책(현재 시행 중), 미세먼지 서울형 공해차량 운행제한 정책(2018), 건전한 물 순환과 수해방지를 위한 법률(2012), 등 관련 법률의 시행을 위한 비용 효율적 기술 확보.
- 선진국의 앞서 시행한 미세먼지 관련 법률제정과 같은 정책들이 시행될 것으로 예상.

### ○ 산업화 방안(산업과의 연계성 및 사업 확장성)

- 건설 산업성장 기반
  - 미세먼지 저감형 투수성 포장기술을 통한 친환경적인 도로시공으로 기존의 인프라에 새로운 성장동력 제공.
  - 관련 법률 실행으로 실현되는 미세먼지 저감형 포장으로 재비산먼지의 발생을 감소시켜 Green Road 실현가능.
- 미세먼지 연관 산업/물환경 산업
  - 미세먼지 저감의 원천기술을 확보함으로써 선진국이나 중국 대비 미세먼지 저감형 투수성 도로포장 기술은 미세먼지 연관 산업 및 물환경 산업의 고도화 및 선진화에 기여.



### ○ 쾌적한 도시환경 조성

- 인구 밀집 지역 및 도심 교통시설에 투수성 도로포장 구축 시 대기오염물질 감소와 방재 성능 향상으로 쾌적하고 안전한 도시환경 조성.
- 미세먼지 저감효과 시스템을 통해 도로 위에 미세먼지의 침적을 방지하여 자동차 배기가스, 타이어 마모, 브레이크 패드 마모 등에 의해 재 비산되는 도로 재비산먼지의 발생 감소.

## <참고 문헌>

- 
- A. S. Sayegh, S. Munir, and T. M. Habeebullah, "Comparing the performance of statistical models for predicting PM10 concentrations," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 14, no. 3, pp. 653-665, 2014, doi: 10.4209/aaqr.2013.07.0259.
  - B. Liu, Y. Jin, D. Xu, Y. Wang, and C. Li, "A data calibration method for micro air quality detectors based on a LASSO regression and NARX neural network combined model," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-00804-7.
  - Brattebo, B. O., and Booth, D. B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems." *Water Research*, 37(18), 4369-4376.
  - BALL, James E., et al. An investigation of particle size distribution during storm events from an urban catchment. *In: Proceedings of the Second International Symposium on Urban Stormwater Management*. 1995. p. 531-535.
  - DRAPPER, D. Road Runoff Water Quality in South-east Queensland. *Progress Report*, July, 1998.
  - Dahl, A., A. Gharibi, E. Swietlicki, A. Gudmundsson, M. Bohgard, A. Ljungman, G. Blomqvist, and M. Gustafsson (2006) Traffic-generated emissions of ultrafine particles from pavement-tire interface, *Atmospheric Environment*, 40, 1314-1323.
  - Flask, <https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>
  - Harrison, R., J. Yin, D. Mark, J. Stedman, R. Appleby, S.J. Booker, and S. Moorcroft (2001) Studies of the coarse particle (2.5~10  $\mu\text{m}$ ) component in UK urban atmospheres, *Atmospheric Environment*, 35, 3667- 3679.
  - Harrison, R., A. Jones, J. Gietl, J. Yin, and D. Green (2012) Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements, *Environmental Science and Technology*, 46, 6523-6529.
  - Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., Zhang, H., and Granato, T. (2016). "In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four-year study." *Journal of Environmental Management*, 167, 8-14.
  - Lenschow, P., H. Abraham, K. Kutzner, M. Lutz, J. Preu, and W. Reichenbacher (2001) Some ideas about the sources of PM10, *Atmospheric Environment*, 35, 23-33.
  - M. Dong, D. Yang, Y. Kuang, D. He, S. Erdal, and D. Kenski, "PM2.5 concentration prediction using hidden semi-Markov model-based times series data mining," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 5, pp. 9046-9055, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.12.017.
  - Node.js, <https://nodejs.org/ko/docs/guides/>
  - Querol, X., A. Alastuey, C. Ruiz, B. Artinano, C. Hansson, M. Harrison, E. Buringh, H. ten Brink, M. Lutz, and P. Bruckmann (2004) Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities, *Atmospheric Environment*, 38, 6547-6555.
  - R. Nimesh, S. Arora, K. K. Mahajan, A. N. Gill, "Predicting air quality using ARIMA, ARFIMA and HW smoothing," *Model Assist. Stat. Appl.*, vol. 9, no. 2, pp. 137-149, 2014, doi: 10.3233/MAS-130285.
  - R. Martínez-España, A. Bueno-Crespo, I. Timón, J. Soto, A. Muñoz, and J. M. Cecilia, "Air-pollution prediction in smart cities through machine learning methods: A case of study in Murcia, Spain," *J. Univers. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 261-276, 2018.
-

- 
- Smith, D. R. (2011). *Permeable interlocking concrete pavements*, 4th Ed., Interlocking Concrete Pavement Institute, Herndon, VA, USA
  - W. Wang, C. Men, and W. Lu, "Online prediction model based on support vector machine," *Neurocomputing*, vol. 71, no. 4-6, pp. 550-558, 2008, doi: 10.1016/j.neucom.2007.07.020.
  - YOLOv5, <https://github.com/ultralytics/yolov5>
  - 강연구, 조창희, 이병호 (2015) "규사와 액상형 고화제를 혼입한 황토모르타르의 특성에 관한 연구." 대한 건축학회지회연합회 논문집, Vol.17 No.01 (통권 65호) 2015-02.
  - 김영란 (2012). "도시화가 물순환에 미치는 영향과 서울시 현황 : 인구·불투수면 증가로 물순환계 변화." *유택저널*, 97, 27-91.
  - 김혜란 (2012). "틈새형성블록포장의 줄눈재 선정을 위한 실험방법." 학위논문(석사), 중앙대학교 대학원.
  - 기상청자료개방포털, <https://www.kma.go.kr/kma/>
  - 강현, 박기학, 김은수, 황윤빈, 임승빈, 조상범, 최성봉 (2012), "타이어 및 브레이크 패드 마모에 의한 비산 먼지 배출량 및 위해성 조사", 수도권대기환경청 최종 보고서, pp. 38-42, 46.
  - 강혜진, 김철환, 강희만, 이주광 (2018) "고속도로 대기환경 현황 조사 및 관리 방안연구", 한국도로공사 도로교통연구원 2018년도 연구보고서, pp. 136-144.
  - 박지현, 이선엽, 이석환 (2013) "차량 주행 시 타이어와 도로의 경계면에서 발생하는 조대입자, 미세입자 및 초미세입자의 특성 연구", 한국대기환경학회지, Vol. 29, No. 5, pp. 660-665.
  - 강창희, 김기주, 이승훈, 현동림, 고희정, 김원형 (2014) "황사와 연무시 PM10 및 PM2.5 미세먼지 조성 비교: 2010-2011년 고산지역 측정", *Analytical Science & Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 4-9.
  - 강창희, 부준오, 송정민, 신수현, 김원형 (2016) "2009-2014년 제주지역 강수의 이온조성 및 오염특성", *Analytical Science & Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 23-24.
  - 김건 (2012). "부산대 LID 실증단지내 투수포장재의 현장투수성능 분석 및 평가 연구." 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
  - 김형원 (2016). "투수성 포장-지반 시스템을 위한 침투계의 개발과 적용." 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
  - 송태협, 김하석 (2019). "건식공정으로 생산된 석탄저회의 성토재 및 노상재 활용을 위한 물리·화학적 특성 평가." *콘크리트학회논문집*, 31(3), 241-249.
  - 이동규, 김용래, 김종현 (2017), "자동차 배출 미세먼지 영향에 대한 기초연구", 한국조세재정연구원 보고서, pp. 20.
  - 에어코리아, <https://www.airkorea.or.kr/web>
  - 양수진, 정인화, 강동화, 백형부 (2021), "SORT와 DeepSORT의 혼합을 이용한 실시간 다중객체 추적", *Journal of KIIT*, Vol. 19, No. 10, pp. 1-9
  - 이용환, 김영섭 (2020), "객체 검출을 위한 CNN과 YOLO 성능 비교 실험", *반도체디스플레이기술학회지*, Vol. 19, No. 1
  - 안재훈, Maricris Jalmasco, 신현석, 정종원 (2017). "투수성 포장재의 투수특성을 평가하기 위한 시험장비 및 시험절차의 개발." *한국방재학회논문집*, 17(6), 359~365.
  - 안재훈과 신현석 (2018). "폐색을 고려한 투수성 포장재 및 기층재료의 비선형 투수특성 시험장비." *특허청*, 특허 제 10-1900706 호.
  - 이윤제 (2020). "공극 폐색을 고려한 투수블록포장 시스템의 투수계수 실험적 평가." 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
-

- 
- 이재응, 여운광, 심재현, 강태호 (2001). “투수성 포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석.” 대한토목학회 논문집, 21(6A), 645~654.
  - 정용원 (2014) “비산먼지 배출자료 개선기술 개발”, 환경정책기반공공기술개발사업 최종보고서, pp. 72.
  - 전상미 (2016). “투수성 포장의 수문학적 침투특성에 관한 연구.” 학위논문(석사), 인제대학교 대학원.
  - 정덕호 (2019). “정수위 고형물 부하시험을 이용한 투수성 포장의 투수성과 TSS 저감 효율에 관한 연구.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
  - 정향선 (2017). “투수성 포장-지반 시스템의 투수성능평가 장비개발 및 검증.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
  - 한국토지주택연구원, 한국남동발전(주) (2018). “석탄저회의 성토 및 도로용 골재 활용 방안에 관한 연구.”
  - 한국조세재정연구원 (2017), "자동차 배출 미세먼지 영향에 대한 기초연구", pp. 20.
  - 환경부 (2016), "미세먼지 도대체 뭘까?", pp. 9.
  - 환경부 전기차 충전소 , [https://www.ev.or.kr/portal/ecoeffect?pMENUST\\_ID=21541](https://www.ev.or.kr/portal/ecoeffect?pMENUST_ID=21541)
  - 환경부 국립환경과학원 (2006), 대도시 대기질 관리방안 조사연구-미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립
  - 환경부 국립환경과학원 (2010), 자동차에 의한 도로재비산먼지의 성분 및 환경성 평가를 위한 기초연구
-

## 표준 미세먼지 및 유해물질 설정

## 1. 서론

- 미세먼지는 크기에 따라서 2.5  $\mu\text{m}$  이하를 초미세먼지, 10  $\mu\text{m}$  이하를 미세먼지, 20  $\mu\text{m}$  이하를 황사로 정의됨.
- 도로이동오염원으로 인해서 CO(일산화탄소), NO<sub>x</sub>(질소산화물), SO<sub>x</sub>(황산화물), TSP(50  $\mu\text{m}$  이하인 총 먼지), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, VOC(휘발성유기화합물), NH<sub>3</sub>(질산), BC(black carbon)가 배출됨(표 1-1 참조). 도로포장과 관련된 오염원은 도로이동오염원과 비산먼지로 나눌 수 있음. 도로이동오염원과 비산먼지의 총량은 전체의 27%를 차지함. 도로이동오염원으로 인해 배출되는 물질 중 NO<sub>x</sub>(질소산화물)의 배출량이 369,585 ton/yr로 가장 많음. NO<sub>x</sub>은 주요 제거 대상으로 고려할 수 있음.
- 비산먼지로 인해서 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, BC가 배출되고 그 중 TSP의 배출량이 408,242 ton/yr로 가장 많음. BC는 발생하는 양이 미미함. 따라서 비산먼지의 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>가 제거 대상으로 고려됨.

표 1-1. 2015년 기준 배출원별 오염물질별 배출량 통계(CAPSS) (강혜진 등, 2018)

[ Unit : ton/yr ]

| 대분류        | CO      | NO <sub>x</sub> | SO <sub>x</sub> | TSP     | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | VOC       | NH <sub>3</sub> | BC     |
|------------|---------|-----------------|-----------------|---------|------------------|-------------------|-----------|-----------------|--------|
| 합 계        | 792,776 | 1,157,728       | 352,292         | 604,243 | 233,177          | 98,806            | 1,010,771 | 297,167         | 15,934 |
| 에너지산업 연소   | 55,138  | 150,818         | 91,243          | 4,692   | 4,394            | 3,607             | 7,464     | 1,379           | 307    |
| 비산업 연소     | 72,299  | 82,948          | 28,736          | 1,841   | 1,582            | 1,025             | 2,622     | 1,351           | 155    |
| 제조업 연소     | 16,854  | 169,139         | 85,098          | 121,668 | 70,893           | 36,317            | 3,101     | 627             | 741    |
| 생산과정       | 26,069  | 59,830          | 105,385         | 11,876  | 6,658            | 5,132             | 182,899   | 39,432          | 16     |
| 에너지수송 및 저장 | 0       | 0               | 0               | 0       | 0                | 0                 | 29,137    | 0               | 0      |
| 유기용제 사용    | 0       | 0               | 0               | 0       | 0                | 0                 | 555,359   | 0               | 0      |
| 도로이동오염원    | 245,516 | 369,585         | 209             | 9,583   | 9,583            | 8,817             | 46,145    | 10,078          | 5,456  |
| 비도로이동오염원   | 135,700 | 304,376         | 39,424          | 15,320  | 15,317           | 14,106            | 40,311    | 117             | 6,879  |
| 폐기물처리      | 1,548   | 11,977          | 2,119           | 340     | 246              | 209               | 57,074    | 22              | 3      |
| 농업         | 0       | 0               | 0               | 0       | 0                | 0                 | 0         | 231,263         | 0      |
| 기타 면오염원    | 7,197   | 172             | 0               | 498     | 317              | 285               | 648       | 12,882          | 15     |
| 비산먼지       | 0       | 0               | 0               | 408,242 | 109,633          | 17,248            | 0         | 0               | 108    |
| 생물성 연소     | 232,455 | 8,883           | 79              | 30,183  | 14,552           | 12,060            | 86,012    | 15              | 2,255  |

표 1-2. 고속도로에서의 오염물질 배출량 (강혜진 등, 2018)

(단위 : ton/yr)

| 노선명                  | 연장길이    | 구간수 | CO     | VOC   | NOx     | PM <sub>10</sub> <sup>5)</sup> | PM <sub>2.5</sub> <sup>5)</sup> | NH <sub>3</sub> | SOx |
|----------------------|---------|-----|--------|-------|---------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|-----|
| 합계                   | 4,149.0 | 516 | 34,757 | 6,047 | 104,718 | 5,636                          | 3,909                           | 1,724           | 61  |
| 경부고속도로               | 416.5   | 48  | 6,865  | 1,235 | 21,548  | 1,127                          | 783                             | 325             | 12  |
| 남해고속도로               | 271.6   | 39  | 2,050  | 375   | 6,717   | 342                            | 239                             | 89              | 4   |
| 광주대구고속도로             | 212.9   | 23  | 590    | 111   | 1,826   | 95                             | 69                              | 28              | 1   |
| 서해안고속도로              | 336.3   | 37  | 2,475  | 424   | 7,415   | 402                            | 279                             | 125             | 4   |
| 울산고속도로               | 14.3    | 2   | 130    | 24    | 410     | 22                             | 15                              | 6               | 0   |
| 평택화성고속도로             | 26.7    | 6   | 171    | 24    | 416     | 26                             | 18                              | 11              | 0   |
| 익산포항고속도로             | 130.1   | 11  | 539    | 91    | 1,592   | 86                             | 59                              | 28              | 1   |
| 호남고속도로 <sup>1)</sup> | 275.1   | 39  | 1,986  | 343   | 6,105   | 325                            | 226                             | 100             | 4   |
| 순천완주고속도로             | 117.8   | 11  | 427    | 81    | 1,511   | 74                             | 52                              | 17              | 1   |
| 당진영덕고속도로             | 171     | 19  | 927    | 173   | 3,248   | 159                            | 113                             | 37              | 2   |
| 중부고속도로               | 332.5   | 36  | 2,236  | 390   | 6,813   | 362                            | 251                             | 108             | 4   |
| 제2중부고속도로             | 31.1    | 1   | 304    | 47    | 777     | 46                             | 31                              | 17              | 1   |
| 평택제천고속도로             | 126.9   | 15  | 895    | 171   | 3,059   | 152                            | 107                             | 36              | 2   |
| 중부내륙고속도로             | 301.7   | 28  | 2,404  | 464   | 8,481   | 421                            | 297                             | 96              | 4   |
| 영동고속도로               | 234.4   | 30  | 2,997  | 516   | 8,673   | 479                            | 332                             | 155             | 5   |
| 중앙고속도로 <sup>2)</sup> | 369.7   | 33  | 1,934  | 332   | 5,925   | 313                            | 218                             | 92              | 3   |
| 서울양양고속도로             | 78.5    | 11  | 444    | 67    | 1,141   | 68                             | 40                              | 29              | 1   |
| 동해고속도로               | 132.3   | 16  | 352    | 47    | 814     | 51                             | 34                              | 24              | 1   |

- 표 1-2는 고속도로의 길이와 구간 수, 오염물질 배출량에 대한 자료임. 고속도로에서의 오염물질 배출량으로 도시 내부의 도로나 일반 국도의 배출량과 같다고 할 수는 없으나, 표 1-1과 비교해서 NOx(질소산화물), CO(일산화탄소), VOC 등 배출되는 비율이 유사함. 도로이동 오염원의 배출량과 비슷하게 NOx(질소산화물)의 배출량이 104,718ton/yr로 가장 많고 PM10, PM2.5의 배출량은 각각 5,636 ton/yr, 3,909 ton/yr로 확인됨.

- 표 1-3은 2013년도와 2014년도에 도로이동 오염원 중 차종별(휘발유, LPG, CNG, 경류)로 초미세먼지 배출량을 보여주는 자료임. 국내 배출 총량 중 도로이동 오염원이 차지하는 비중은 2013년도에 비해 2014년도에 4.1% 감소했지만 여전히 10% 가 넘는 수치를 보여주고 있으므로 도로이동 오염원에 의한 초미세먼지 배출량은 심각한 수준임.
- 도로이동 오염원의 초미세먼지 총 배출량 중 경유차의 비중이 99% 이상 차지 하고 있음. 휘발유, LPG, CNG 차량의 초미세먼지 배출량은 경유차의 초미세먼지 배출량에 비해 극히 작음. 따라서 경유차에서의 초미세먼지 발생원인 및 성상을 주요 발생 인자로 고려하여서 분석하였음.

표 1-3. 초미세먼지 배출량 (after 이동규 등, 2017)

(단위 : kg,%)

|          | CAPSS 2014 |       | CAPSS 2013 |       |
|----------|------------|-------|------------|-------|
|          | 배출량        | 비중    | 배출량        | 비중    |
| 국내 배출 총량 | 63,285,569 | 100.0 | 76,802,221 | 100.0 |
| 도로이동 오염원 | 9,217,724  | 10.6  | 11,134,558 | 14.5  |
| 휘발유차     | 27,288     | 0.3   | N.A.       | -     |
| LPG차     | N.A.       | -     | N.A.       | -     |
| CNG차     | N.A.       | -     | N.A.       | -     |
| 경유차      | 9,190,436  | 99.7  | 11,134,558 | 100.0 |
| 경유(RV)   | 2,177,145  | 23.6  | 2,461,387  | 22.1  |
| 경유(승용)   | 48,294     | 0.5   | 56,763     | 0.5   |
| 경유(승합)   | 400,084    | 4.3   | 551,218    | 5.0   |
| 경유(화물)   | 6,292,030  | 68.3  | 7,736,480  | 69.5  |
| 경유(특수)   | 67,821     | 0.7   | 76,966     | 0.7   |
| 경유(버스)   | 205,061    | 2.2   | 251,744    | 2.3   |

- 차량에서 발생하는 미세먼지의 생성원인이 다양함. 차량 및 도로포장 주변의 생성원인에 따라 발생하는 미세먼지 성상이 다르므로 본 연구에서는 다음과 같이 미세먼지의 생성원인에 따라 4가지로 분류하였음(그림 1-1 참조).
- 미세먼지 생성원인 4가지
  - ① 차량 배출구에서 발생하는 미세먼지
  - ② 타이어 및 브레이크 패드 마모에 의해 발생하는 미세먼지
  - ③ 도로노면 마모에 의해 발생하는 미세먼지
  - ④ 상기 3가지 미세먼지들이 쌓였다가 다른 도로 이동원들에 의해 재비산되는 미세먼지

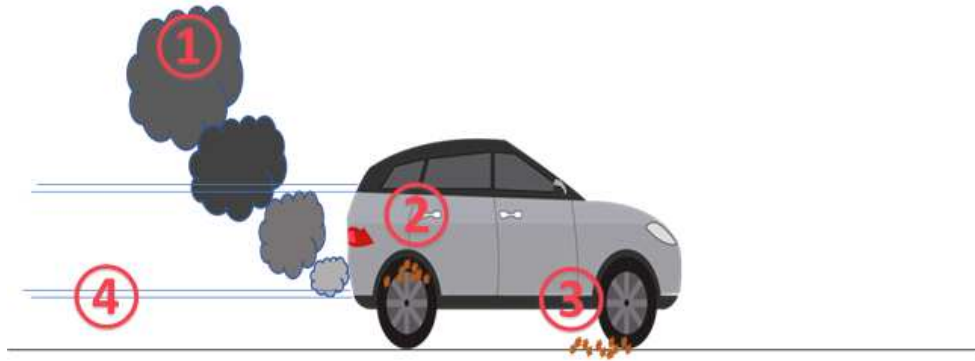


그림 1-1. 미세먼지 생성원인

## 2.1 차량 배출구에서 발생하는 미세먼지

- 차량 배출구에서 발생하는 미세먼지는 1차와 2차적 발생원이 있음. 1차원 생성은 발생원으로부터 배출되는 고체 상태의 입자임. 2차원 생성은 발생원으로부터 가스 상태로 나와 공기 중의 다른 물질과 화학적 반응을 일으켜 미세먼지가 생성됨. 2차적 발생에 의한 미세먼지는 수도권에서 전체 미세먼지( $PM_{2.5}$ )발생량의 약 2/3를 차지할 정도로 매우 높음.
- 그림 2-1 의 디젤차량 배기가스 평균조성에서 유해물질은 가스 상태인 CO(일산화탄소) 1.73%, HC(탄화수소) 0.02%, NOx(질소산화물) 0.04%으로 이루어져 있음. 그 중에서 미세먼지의 2차적 발생을 일으키는 가스는 NOx(질소산화물)임. NOx의 화학적 결합에 의한 2차적 미세먼지를 자동차 배출구에서 발생하는 미세먼지의 주요 요인으로 결정함.

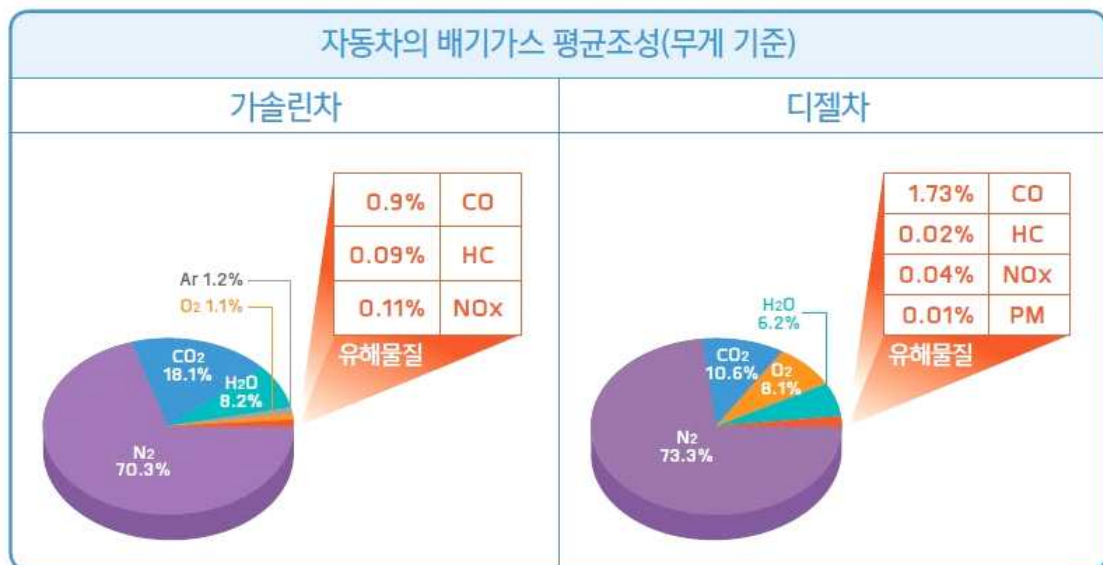


그림 2-1. 자동차의 배기가스 평균조성  
(환경부[https://www.ev.or.kr/portal/ecoeffect?pMENUST\\_ID=21541](https://www.ev.or.kr/portal/ecoeffect?pMENUST_ID=21541))

- 자동차에서 미세먼지의 2차적 발생의 원인이 되는 가스 물질은 NOx(질소산화물) 임. 질소산화물이 대기 중의 수증기, 오존 암모니아 등과 화학반응으로 결합하여서 미세먼지가 생성되는 과정은 그림 2-2와 같음.
- 그림 2-2에서 NOx(질소산화물)이 대기 중 O3(오존)또는 H2O(수증기)와 결합하여서 HNO3(질

산)으로 변환됨을 알 수 있음. 이는 대기 중에 있는 알칼리성 물질  $\text{NH}_3$ (암모니아)와 결합하여서  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (질산 암모늄)이 됨. 이와 같은 과정을 거쳐 생성된  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (질산 암모늄)이 입자상 물질로서 2차적 미세먼지가 생성됨.

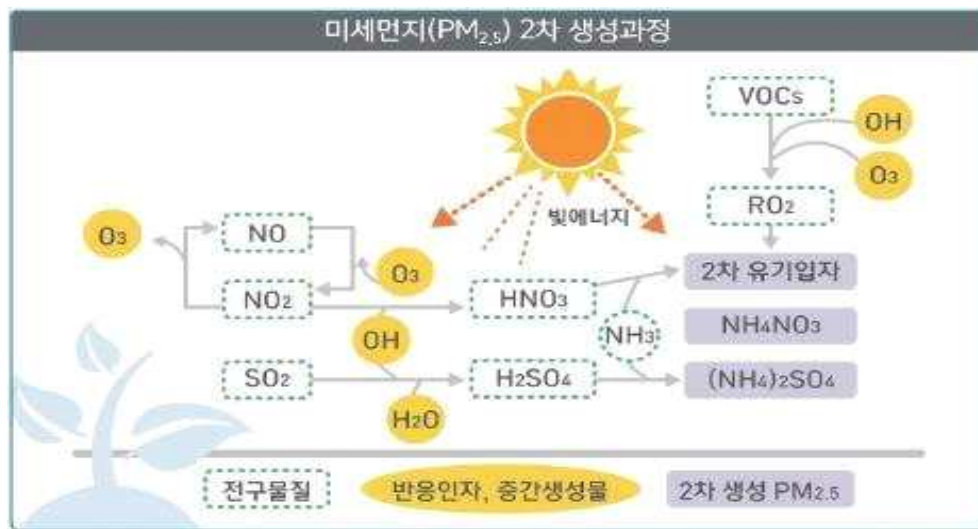


그림 2-2. 미세먼지 2차 생성과정 (환경부, 2016)

## 2.2 차량 배출구 이외에서 발생하는 미세먼지

- 표 2-1은 차량 배출구 이외에서 발생하는 미세먼지를 배출 원인(도로재비산, 건설공사, 나대지, 하역 및 야적, 타이어 마모, 브레이크 패드 마모, 도로표면 마모)에 따라 분류한 자료임.

표 2-1. 수도권 비산먼지 배출량 (강현 등, 2012)

| 발생원        | PM10        | PM2.5       |
|------------|-------------|-------------|
|            | 배출량(ton/yr) | 배출량(ton/yr) |
| 도로재비산      | 35,314      | 8,075       |
| 건설공사       | 5,755       | 576         |
| 나대지        | 5,151       | 773         |
| 하역 및 야적    | 2           | 0.3         |
| 타이어 마모     | 1,399       | 979         |
| 브레이크 패드 마모 | 2,191       | 872         |
| 도로표면 마모    | 1,333       | 720         |

- 도로에서 재비산되는 미세먼지의 양이 43,389 ton/yr 로 가장 많은 것을 알 수 있음. 도로와 관련된 미세먼지 배출 요인인 타이어, 브레이크 패드와 도로표면의 마모로 인해 7,494 ton/yr 가 배출됨. 이는 배출량의 약 12%정도를 차지함.
- 브레이크와 타이어 마모, 도로 표면 마모에 의한 TSP, PM10, PM2.5의 배출량은 도로포장 주변의 미세먼지를 고려할 때 중요한 인자로 분석됨. 마모에 의한 배출량은 다음 식으로 산정함(강현 등, 2012).

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{i,j}$$

TE : 특정 기간과 공간에 대한 TSP, PM10 또는 PM2.5 의 총 배출량(g)

Nj : 특정 공간에 대한 카테고리 j의 차량 수

Mj : 특정 공간에 대한 카테고리 j의 차량 당 평균 주행 거리(km)

EFij : 오염물질 i와 차량 종류 j에 대한 물질 배출 계수(g/km)

i : TSP, PM10 또는 PM2.5

j : 차량종류(이륜차, 승용차, 소형 트럭, 대형 차량)

TSP(Total Suspended Particles): 총 입자상 물질, 50μm 이하 크기의 먼지

- 국내에서는 타이어에 의한 미세먼지 발생량을 추정하는 배출계수가 부정확하여 유럽의 계수를 적용하여 배출량을 산정하고 있음. 유럽 기준이지만 타이어의 기본 재료가 유사하여 국내에도 적용이 될 수 있는 자료라고 판단됨. TSP, PM10, PM2.5의 배출량을 산정할 때 차량 수와 평균 주행거리를 입력변수로 고려함.
- 배출계수는 오염물질의 종류와 차량 종류에 따라 결정됨. 표 2-2는 타이어, 브레이크 패드 마모

배출계수를 2륜차, 승용차, 소형트럭, 대형트럭으로 분류해서 나타냄. 배출계수는 2륜차, 승용차, 소형트럭, 대형트럭 순으로 증가함. TSP, PM2.5와 PM10 모두 대형트럭의 배출계수가 가장 높음. 배출계수를 산정할 때 차량의 크기 및 중량이 고려되어야 함.

표 2-2. 타이어, 브레이크 패드 마모 배출계수(강헌 등, 2012)

| 차종  |    | 타이어 · 브레이크 패드 마모 배출계수(g/km) |        |        |
|-----|----|-----------------------------|--------|--------|
|     |    | TSP                         | PM10   | PM2.5  |
| 2륜차 |    | 0.0083                      | 0.0064 | 0.0034 |
| 승용차 |    | 0.0182                      | 0.0138 | 0.0074 |
| 트럭  | 소형 | 0.0286                      | 0.0216 | 0.0177 |
|     | 대형 | 0.0777                      | 0.0590 | 0.0316 |

- 그림 2-3은 타이어와 브레이크 패드 마모의 속도에 따른 보정값을 나타낸 자료임. 타이어 마모에 대한 속도 보정 값 그래프의 기울기보다 브레이크 패드 마모에 대한 속도 보정 값 그래프의 기울기가 더 큼.
- 자동차의 주행 속도가 올라갈수록 속도 보정값이 감소하여 1.0보다 작아짐. 고속도로보다 도심지 등 저속으로 주행하는 곳에서 속도 보정값이 더 큰 이유는 브레이크의 사용이 더 많아 타이어와 브레이크 패드의 마모가 심해지기 때문인 것으로 분석됨.

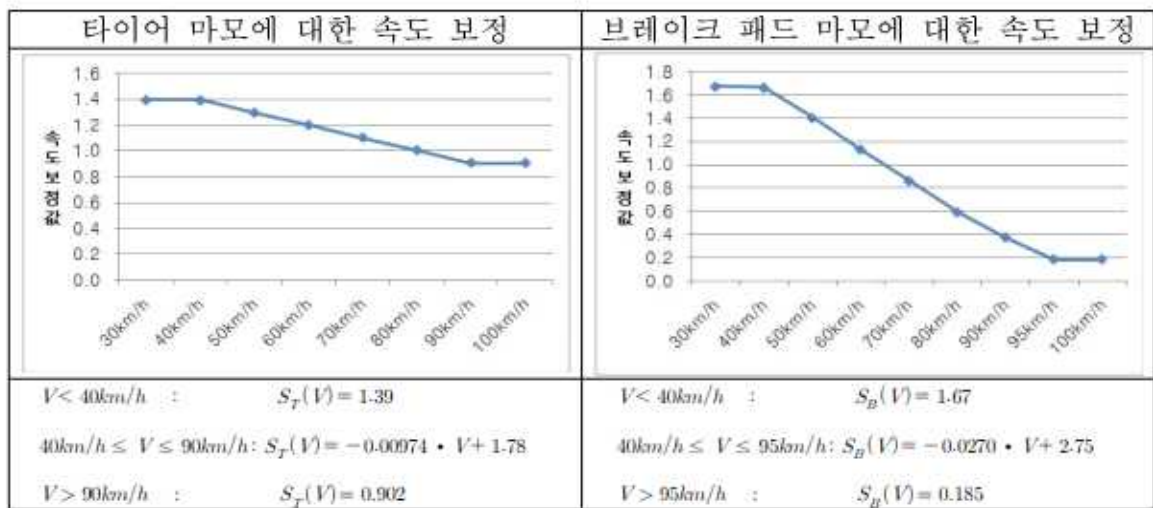


그림 2-3. 타이어와 브레이크 패드 마모의 속도 보정값(강현 등, 2012)

- 5가지 차종 PCs(승용차), LDVs(5톤이하 트럭), HDVs(5톤이상 트럭), Buses(버스), MCs(오토바이)의 타이어와 브레이크 패드 마모에 의한 중금속 배출량은 표 2-3과 같음.
- 5가지 차종의 타이어 마모로 발생하는 PM2.5 총량은 51.32 mg/km, PM10 총량은 70.6 mg/km, TSP 총량은 122.2 mg/km 임. 5가지 차종의 브레이크 마모로 발생하는 PM2.5 총량은 44.22 mg/km, PM10 총량은 107.9 mg/km, TSP 총량은 113.35 mg/km 임.

표 2-3. 차종별 배출계수와 중금속 배출량 (강현 등, 2012)

| material                   | Tyre Wear |       |        |       |       | Brake Wear |        |        |        |        |
|----------------------------|-----------|-------|--------|-------|-------|------------|--------|--------|--------|--------|
| vehicle type               | PCs       | LDVs  | HDVs   | Buses | MCs   | PCs        | LDVs   | HDVs   | Buses  | MCs    |
| Pollutant(Unit)            |           |       |        |       |       |            |        |        |        |        |
| Particulate Matter (mg/km) |           |       |        |       |       |            |        |        |        |        |
| PM <sub>2.5</sub>          | 4.49      | 7.10  | 18.90  | 18.90 | 1.93  | 4.56       | 12.74  | 12.74  | 12.74  | 1.44   |
| PM <sub>10</sub>           | 6.40      | 10.10 | 27.00  | 24.30 | 2.80  | 11.47      | 32.00  | 32.00  | 28.80  | 3.63   |
| TSP                        | 10.70     | 16.90 | 45.00  | 45.00 | 4.60  | 11.70      | 32.65  | 32.65  | 32.65  | 3.70   |
| Heavy Metals (µg/km)       |           |       |        |       |       |            |        |        |        |        |
| Pb                         | 1.31      | 2.18  | 8.70   | 7.25  | 0.58  | 120.00     | 249.00 | 12.00  | 12.00  | 53.00  |
| Hg                         | 0.002     | 0.003 | 0.012  | 0.010 | 0.001 | 0.00       | 0.00   | 1.68   | 1.68   | 0.00   |
| Cd                         | 0.18      | 0.30  | 1.2    | 1.00  | 0.08  | 0.15       | 0.32   | 0.00   | 0.00   | 0.07   |
| As                         | 0.14      | 0.24  | 0.96   | 0.80  | 0.06  | 0.13       | 0.26   | 2.81   | 2.81   | 0.06   |
| Cr                         | 0.16      | 0.27  | 1.08   | 0.90  | 0.07  | 1.82       | 3.77   | 361.80 | 361.80 | 0.80   |
| Cu                         | 0.25      | 0.42  | 1.68   | 1.40  | 0.11  | 1,588      | 3,289  | 15,477 | 15,477 | 4,213  |
| Ni                         | 0.15      | 0.27  | 1.08   | 0.90  | 0.07  | 3.36       | 6.96   | 22.45  | 22.45  | 1.49   |
| Se                         | 1.80      | 3.00  | 12.00  | 10.00 | 0.80  | 0.28       | 0.58   | 1.34   | 1.34   | 0.12   |
| Zn                         | 1,035     | 1,725 | 11,700 | 9,750 | 459   | 512.00     | 1,061  | 620.00 | 620.00 | 226.00 |

PCs : Passenger Cars

LDVs : Light Duty Vehicles

HDVs : Heavy Duty Vehicles

MCs : Motorcycles

- 중금속은 크게 두 가지로 분류되는데, 정상적인 생리기능을 유지하는데 필요한 중금속(아연, 구리가 이에 해당함)과 체내에 들어올시 분해가 잘 되지 않고 신체에 축적되어 독성작용을 하는 유해중금속(납, 크롬이 이에 해당함)으로 분류하고 있음. 중금속은 인체에 들어오더라도 소변 또는 담즙을 통해 대변으로 배설되지만 유해 중금속은 체내에 한번 들어오면 분해가 잘 되지 않고 신체에 축적되어 건강에 악영향을 미침. Pb(납), Hg(수은), Cd(카드뮴), As(비소), Cr(크롬)은 인체에 위험한 중금속으로 분류됨.
- 브레이크 패드와 타이어의 마모로 인해서 발생하는 총량은 Cu(구리)가 40047.86 ( $\mu\text{g}/\text{km}$ )으로 가장 많고 다음으로 Zn(아연)이 27708 ( $\mu\text{g}/\text{km}$ ), Cr(크롬)이 729.99 ( $\mu\text{g}/\text{km}$ ), Pb(납)이 466 ( $\mu\text{g}/\text{km}$ )임.
- 위험한 중금속 입자인 Pb(납), Hg(수은), Cd(카드뮴), As(비소), Cr(크롬) 중 Pb(납)이 5가지 차종에서 브레이크 마모로 발생하는 총량이 446 ( $\mu\text{g}/\text{km}$ )이며, Cr(크롬)이 5가지 차종에서 브레이크 마모로 발생하는 총량이 729.99 ( $\mu\text{g}/\text{km}$ )으로 다른 위험한 중금속 입자의 배출량보다 압도적으로 많으므로 제거에 노력이 필요함.
- 유해 중금속으로 분류되는 납과 크롬에 비해서 구리와 아연은 상대적으로 신체에 미치는 위험성이 낮음(표 2-4 참조). 따라서 검출되는 양이 가장 많았던 구리와 아연 보다는 신체에 치명적인 악영향을 끼칠 수 있는 납과 크롬의 배출량을 감소시키는 데에 집중할 필요가 있음.

표 2-4. 구리, 아연, 납, 크롬이 신체에 미치는 영향

| 구리                                                                                                                                                                                                               | 아연                                                                                                                                                                                                                                                   | 납                                                                                                                                                                                                      | 크롬                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- 철분의 흡수와 이용을 돕는 효소의 구성 성분</li> <li>- 호르몬의 생성 및 결합 조직의 정상화에 기여하고, 신경전달물질과 에너지 생성을 비롯하여 황산화 과정에도 관여함</li> <li>- 체내에서 여러 가지 생리작용을 하고 뼈를 형성에 관여하고 콜라겐을 만들 때도 필요함.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 면역력 향상에 도움, 성장과 골격 형성 등 신체 발육을 도와줌</li> <li>- 성기능과 피부, 노화에 영향을 주는 중요한 성분</li> <li>- 장기간 노출 시 신장, 비장, 췌장 등에 축적</li> <li>- 중독 시 빈혈과 불임 초래</li> <li>- 칼슘과 인의 대사를 방해하여 골격의 석회화, 동맥경화, 간, 장, 신장 손상 초래</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중추신경손상, 관절 약화</li> <li>- 신장, 두뇌, 뼈에서 단백질 결합 합성을 자극</li> <li>- 신경 장애, 행동 장애 유발</li> <li>- 어린이 성장 감소 및 인지 장애 유발</li> <li>- 국제암연구소(IARC)가 지정한 2B 발암물질</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 호흡기, 소화 및 피부를 통해 체내 흡수되어 신장을 통해 배설되지만 근육, 폐, 위장 및 피부에 병변 유발</li> <li>- 섭취 시 구토, 위통, 현기증 유발</li> <li>- 6가 크롬산 염 또는 중 크롬산 화합물의 섭취 시 위경련, 궤양, 장, 심장, 간 및 신장에 치명적인 손상 유발</li> <li>- 단기간 흡입 시 호흡기관 및 폐에 손상 유발</li> <li>- 국제암연구소(IARC)가 지정한 1급 발암물질</li> </ul> |

## 2.3 재비산되는 미세먼지

### 2.3.1 재비산먼지의 정의

- 도로 재비산먼지는 도로위에 쌓여있던 먼지들이 자동차나 기타 도로를 사용하는 이동원들의 주행에 의해 재비산되는 것으로 정의됨. 도로이동원 이외에 바람이나 건설공사와 같은 원인에 의해 재비산되는 경우도 있음. 재비산되는 미세먼지의 양이 새롭게 생성되는 먼지 양의 합보다도 많음(표 1-2 참조). 포장도로에서 차량의 주행에 의해 발생하는 재비산먼지 배출량은 다음식에 의해 산정됨(정용원, 2014).

$$E = Activity(VKT) \times EF(dry\ basis) \times \left(1 - \frac{P}{4N}\right)$$

$E$  : 해당년도 포장도로 재비산먼지 배출량

$VKT$  : vehicle kilometers traveled로 연간 통행차량의 주행거리

$EF$  : 건조조건에서의 포장도로 비산먼지 배출계수

$P$  : 연간 0.254mm 이상의 강수일수

$N$  : 평균화 기간의 일수 (1년은 365일, 계절은 91일, 월은 30일 기준)

## 2.3.2 재비산먼지에 영향을 미치는 주요 인자

### ○ 측정 높이

표 2-5. 타이어 후면의 40 mm높이에서 측정한 속도에 따른 미세먼지의 농도(곽지현 등, 2013)

| Vehicle speed (km/h) | PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> | Particle number (#/cm <sup>3</sup> )  |
|----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                      | Mean ± Standard deviation              | Mean ± Standard deviation             |                                     | Mean ± Standard deviation             |
| 50                   | 261 ± 164                              | 332 ± 208                             | 0.79                                | $2.3 \times 10^4 \pm 1.7 \times 10^3$ |
| 80                   | 264 ± 115                              | 341 ± 149                             | 0.77                                | $2.4 \times 10^4 \pm 4.2 \times 10^2$ |
| 110                  | 303 ± 120                              | 387 ± 154                             | 0.78                                | $2.5 \times 10^4 \pm 2.8 \times 10^3$ |
| 140                  | 476 ± 123                              | 656 ± 166                             | 0.73                                | $2.5 \times 10^4 \pm 4.8 \times 10^2$ |

- 표 2-5는 자동차 주행 시 타이어 후면의 40 mm높이에서 측정한 속도(50 ~ 140 km/h)에 따른 미세먼지의 농도를 나타낸 자료임. 속도가 50 ~ 140 km/h로 증가함에 따라 PM<sub>2.5</sub>의 농도는 261 ~ 476 μg/m<sup>3</sup>로 증가하고 PM<sub>10</sub>의 농도는 332 ~ 656 μg/m<sup>3</sup>로 증가함. PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 농도 비율은 0.79에서 0.73으로 속도가 증가함에 따라 감소하는 추세임. 속도가 50 ~ 140 km/h로 증가함에 따라 평균 구성 입자 수는  $2.3 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$  개수(#/cm<sup>3</sup>)로 증가함.

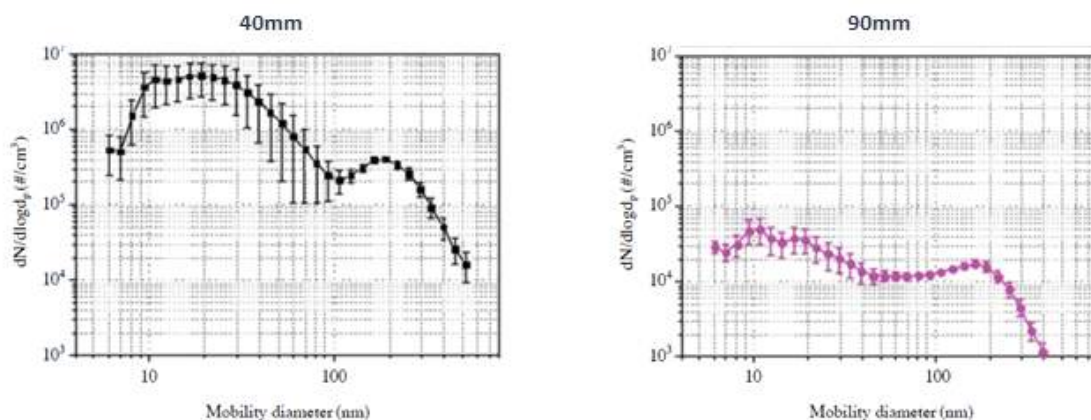


그림 2-4. 40 mm와 90 mm높이에서의 농도 비교 (곽지현 등, 2013)

- 그림 2-4는 자동차 주행 시 타이어 후면의 40 mm 높이와 90 mm 높이에서의 미세먼지 농도를 비교한 자료임. 40 mm 높이에서의 농도가 90 mm 높이에서 농도보다 약 100배 정도 많은 것으로 확인됨. 따라서 측정 높이에 의한 미세먼지 농도의 차이가 매우 크기 때문에 미세먼지 측정 시 센서의 설치 높이 고려가 매우 중요함.

## ○ 차량 주행 속도

표 2-6. 차량 주행속도에 따른 재비산 먼지 입경 별 농도 측정결과(국립환경과학원(2010))

| Measurement condition       | Measured vehicle speed(km/h) | Concentration( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )               |                   |                   |                                     |                                     |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                             |                              | PM <sub>10</sub>                                        | PM <sub>2.5</sub> | PM <sub>1.0</sub> | PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> | PM <sub>1.0</sub> /PM <sub>10</sub> |
| 0 km/h                      | 0.0                          | 86.6                                                    | 68.0              | 57.4              | 0.78                                | 0.66                                |
| 30 km/h                     | 28.2                         | 149.8                                                   | 80.6              | 59.9              | 0.54                                | 0.40                                |
| 40 km/h                     | 41.7                         | 179.7                                                   | 85.3              | 60.7              | 0.47                                | 0.34                                |
| 50 km/h                     | 49.1                         | 206.2                                                   | 93.9              | 62.1              | 0.46                                | 0.30                                |
| 60 km/h                     | 59.4                         | 242.2                                                   | 98.9              | 64.0              | 0.41                                | 0.26                                |
| 70 km/h                     | 71.9                         | 280.6                                                   | 112.1             | 69.9              | 0.40                                | 0.25                                |
| $\Delta C(V)$<br>=C(V)-C(0) | Measured vehicle speed(km/h) | Resuspended road dust conc.( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |                   |                   |                                     |                                     |
|                             |                              | PM <sub>10</sub>                                        | PM <sub>2.5</sub> | PM <sub>1.0</sub> | PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> | PM <sub>1.0</sub> /PM <sub>10</sub> |
| $\Delta C(30\text{km/h})$   | 28.2                         | 63.2                                                    | 12.6              | 2.5               | 0.20                                | 0.04                                |
| $\Delta C(40\text{km/h})$   | 41.7                         | 93.1                                                    | 17.4              | 3.3               | 0.19                                | 0.04                                |
| $\Delta C(50\text{km/h})$   | 49.1                         | 119.6                                                   | 25.9              | 4.7               | 0.22                                | 0.04                                |
| $\Delta C(60\text{km/h})$   | 59.4                         | 155.6                                                   | 30.9              | 6.6               | 0.20                                | 0.04                                |
| $\Delta C(70\text{km/h})$   | 71.9                         | 194.0                                                   | 44.1              | 12.5              | 0.23                                | 0.06                                |
|                             |                              | Average                                                 |                   |                   | 0.21                                | 0.04                                |

- 각각의 차량 주행속도에서 PM에 따른 재비산먼지 농도는 표 2-6과 같음.
- 각각 차량주행속도에서 PM 10, PM 2.5, PM 1.0의 농도와 PM 2.5/PM 10, PM 1.0/PM 10의 비율에 대해서 알 수 있음. 재비산먼지 입경별 농도는 0~70 km/h의 속도에서 측정되었으며 차량의 주행 속도가 증가할수록 PM 10, PM 2.5, PM 1.0의 농도도 증가함(그림 2-5).
- 모든 차량 주행 속도에서 PM 10의 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 가장 큰 결과를 보임.
- PM 2.5/PM 10, PM 1.0/PM 10의 비율은 차량주행 속도가 증가할수록 감소하는 비율을 보였으며 특히 상대적으로 입경이 큰 PM 10의 농도가 급격하게 증가하는 결과를 보임.
- 각각의 차량 주행속도에서 PM 2.5/PM 10, PM 1.0/PM 10의 재비산농도의 비율은 비슷하게 측정됨.

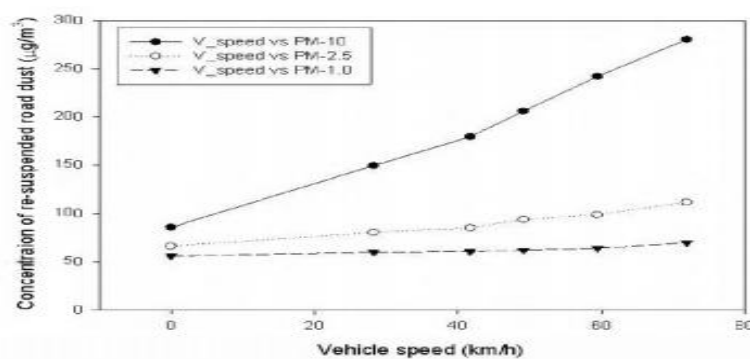


그림 2-5. 차량 주행속도에 따른 재비산먼지 입경 별 농도(국립환경과학원(2010))

## ○ 교통량

- 국립환경과학원에서는 교통량이 재비산먼지에 미치는 영향을 비교 분석하고자 교통량과 재비산먼지 간의 관계를 수치를 통해 비교 및 분석하고자 silt loading이라는 개념을 도입함.
- silt loading이란, 도로에서 채취한 시료 중에 도로단위 면적당 기하학적 직경이  $75\ \mu\text{m}$  이하인 먼지의 무게로, 차량 운행으로 인한 도로먼지의 재비산 가능성을 의미함.
- silt loading은 다른 차량의 영향을 최소화하기 위해 차량통행이 거의 없는 야간(21:10 - 22:10)에 측정되었으며 주행속도는 신호구간 이외에는 40~50 km/h를 유지하였음.
- 측정을 위해 차량을 이용한 먼지 측정 시스템(그림 2-6)을 구축하였으며 2개의 sampling inlet을 이용하여 차량전면의 먼지와 타이어 후면에서 재비산되는 먼지를 동시에 샘플링 하였음.



그림 2-6. 실시간 silt loading 측정을 위한 이동먼지측정시스템(국립환경과학원(2010))

표 2-7. 도로에 따른 평균 silt loading(국립환경과학원(2006))

| 차로수       | 평균 silt loading(g/m <sup>2</sup> ) | 표준편차    | 도로구간 수 |
|-----------|------------------------------------|---------|--------|
| 왕복 2차로    | 0.243                              | 0.184   | 13     |
| 왕복 4차로    | 0.131                              | 0.108   | 73     |
| 왕복 6차로    | 0.115                              | 0.081   | 87     |
| 왕복 8차로 이상 | 0.086                              | 0.047   | 63     |
| 노상주차 유무   | 평균 silt loading(g/m <sup>2</sup> ) | 표준편차    | 도로구간 수 |
| 노상주차      | 0.122                              | 0.096   | 157    |
| (노상주차장)   | (0.177)                            | (0.146) | (23)   |
| 없음        | 0.115                              | 0.101   | 79     |
| 공사 유무     | 평균 silt loading(g/m <sup>2</sup> ) | 표준편차    | 도로구간 수 |
| 공사        | 0.281                              | 0.468   | 34     |
| 없음        | 0.115                              | 0.087   | 205    |
| 커브길 유무    | 평균 silt loading(g/m <sup>2</sup> ) | 표준편차    | 도로구간 수 |
| 커브길       | 0.129                              | 0.106   | 37     |
| 없음(직선구간)  | 0.117                              | 0.096   | 199    |

자료 : 국립환경과학원(2006) (서울시·인천시·안산시 봄 측정결과)

- 왕복 차로수, 노상주차 유무, 공사 유무, 커브길 유무 등을 변수로 설정하였으며 측정결과는 표 2-7에 제시함.
- 표 2-7에 제시된 평균 silt loading 값은 2회 측정한 후 평균한 값을 사용함.
- 왕복 차로수가 적은 경우와 노상주차장이 있는 경우 평균 silt loading이 증가함.
- 공사가 진행되고 있는 경우와 커브구간이 있는 경우에 평균 silt loading이 증가함.

○ 습도

표 2-8. 습도에 따른 silt loading 비교

| 위치   | 습도     |        |       |
|------|--------|--------|-------|
|      | 40%    | 80%    | 감소율   |
| 서부공단 | 0.3016 | 0.2096 | 30.5% |
| 남동공단 | 0.1609 | 0.0649 | 59.7% |
| 서해로  | 0.0537 | 0.0297 | 44.7% |
| 중봉로  | 0.0713 | 0.0273 | 61.7% |
| 경원로  | 0.0924 | 0.0604 | 34.6% |
| 남동로  | 0.0313 | 0.0153 | 51.1% |

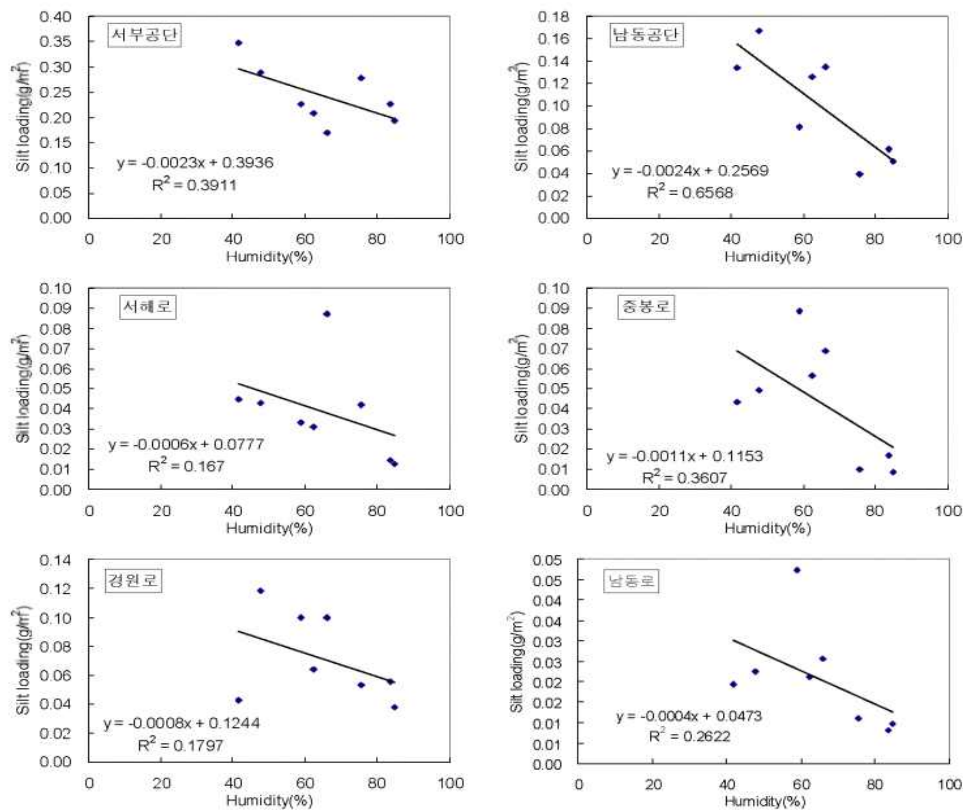


그림 2-7 습도에 따른 silt loading (국립환경과학원(2010))

- 표 2-8과 그림 2-7은 서부공단, 남동공단, 서해로, 중봉로, 경원로, 남동로에서 습도가 40%일 때와 80%일 때의 silt loading을 나타낸 자료임.
- 모든 도로에서 습도가 증가하면 silt loading이 감소함(평균 감소율 47%). 이는 습도가 증가할수록 도로 표면에 존재하는 도로먼지의 재비산 가능성이 감소한다는 사실을 의미함.

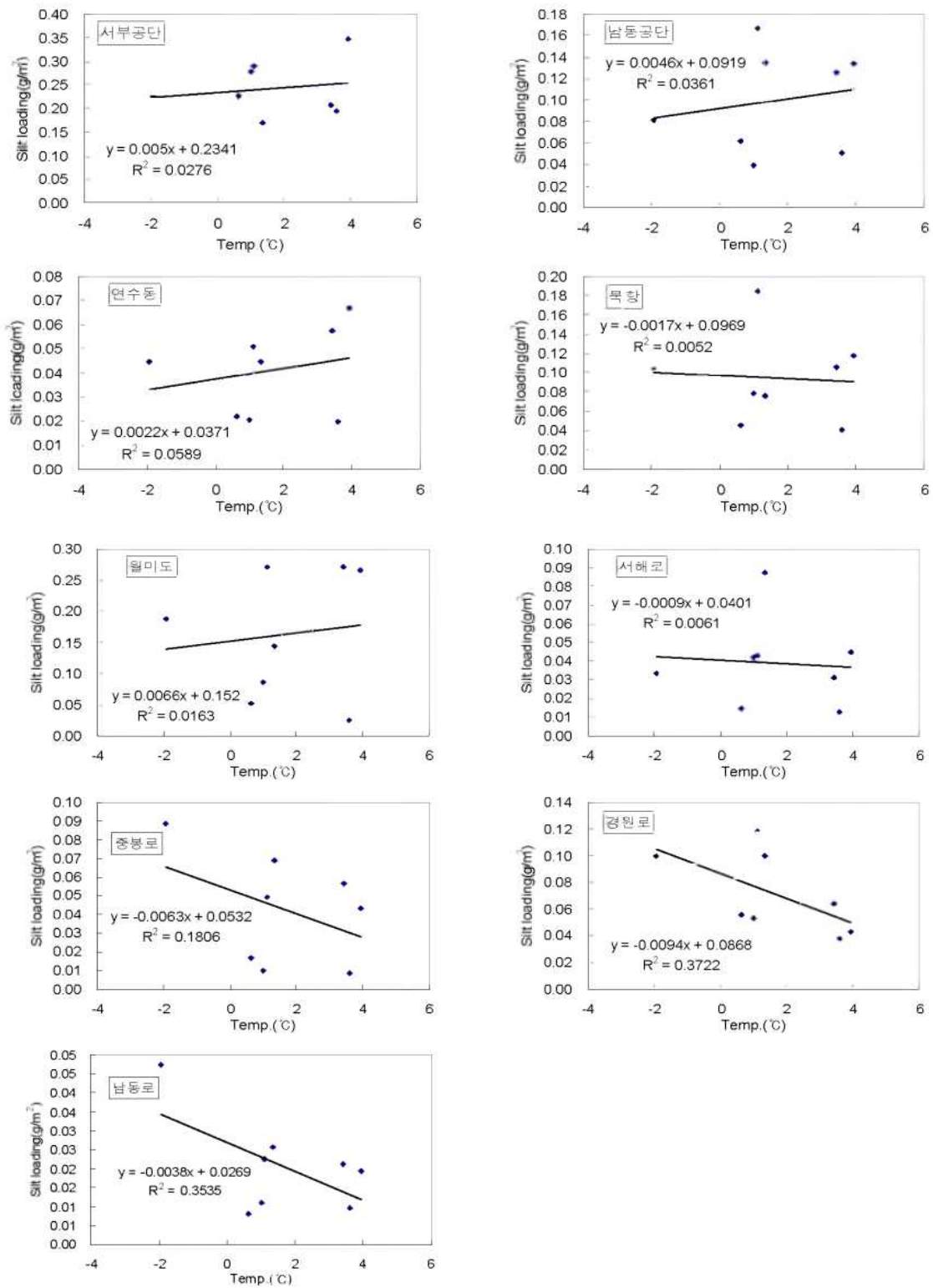


그림 2-8. 온도에 따른 silt loading(국립환경과학원(2010))

- 그림 2-8은 서부공단, 남동공단, 연수동, 북항, 월미도, 서해로, 중봉로, 경원로, 남동로에서 온도와 silt loading값의 상관관계를 나타냄.
- 서부공단, 남동공단, 연수동, 월미도는 온도가 증가할수록 silt loading 값도 증가하지만 북항, 서해로, 중봉로, 경원로, 남동로의 경우 온도가 증가할수록 silt loading 값이 감소함.
- 그러나 위의 결과는  $-2 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 인 경우의 결과에 해당하기 때문에 온도에 따른 영향을 평가하기에 한계가 있음.

## 2.4 강우 속 포함되는 미세먼지(오염된 강우)

### ○ 성분표

- 표 2-9는 제주도의 강수 분석 결과를 국내에서 비교적 청정도가 높은 안면도와 울진 지역 그리고 국외의 일본 Okinawa와 산업화로 인해 오염도가 높은 중국의 Shenzhen, Shanghai와 Guangzhou 지역과 비교한 결과임. 데이터를 비교해보면 산업화로 인해 대기의 오염이 많이 된 중국의 3곳 산업지역에서의 강우 속 NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>의 함량이 청정지역에 비해서 높은 것으로 분석됨(노란색 표시).

표 2-9. 제주도 및 기타 지역의 강수량 평균 이온 농도(μeq/L) (강창희 등, 2016)

| Site                                         | This study       | Anmyendo <sup>18</sup> | Uljin <sup>17</sup> | Okinawa <sup>18</sup> | Shenzhen <sup>19</sup> | Shanghai <sup>20</sup> | Guangzhou <sup>21</sup> |
|----------------------------------------------|------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Na <sup>+</sup>                              | 71.8             | 57.9                   | 99.7                | 308.0                 | 11.2                   | 50.1                   | 55.0                    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                 | 18.3             | 45.6                   | 23.0                | 9.5                   | 33.5                   | 80.7                   | 70.6                    |
| K <sup>+</sup>                               | 2.9              | 3.0                    | 4.2                 | 9.4                   | 1.8                    | 14.9                   | 32.9                    |
| Ca <sup>2+</sup>                             | 12.3             | 21.8                   | 24.6                | 25.2                  | 35.4                   | 204.0                  | 103.6                   |
| Mg <sup>2+</sup>                             | 15.9             | 15.5                   | 24.9                | 63.9                  | 3.3                    | 29.6                   | 17.0                    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>                | 37.2             | 58.0                   | 44.7                | 53.9                  | 64.7                   | 199.6                  | 163.3                   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 | 19.1             | 35.2                   | 21.3                | 7.0                   | 21.9                   | 49.8                   | 53.4                    |
| Cl <sup>-</sup>                              | 68.8             | 68.7                   | 116.5               | 351.0                 | 20.6                   | 58.3                   | 86.8                    |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>                | 3.2              | -                      | -                   | -                     | -                      | 0.3                    | -                       |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>                 | 1.3              | -                      | -                   | -                     | -                      | 0.2                    | -                       |
| HCOO <sup>-</sup>                            | 2.5              | -                      | -                   | -                     | 0.1                    | 0.0 <sub>6</sub>       | -                       |
| CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>             | 2.2              | -                      | -                   | -                     | 0.0 <sub>3</sub>       | 0.4                    | -                       |
| F <sup>-</sup>                               | 0.8              | 1.8                    | 1.4                 | -                     | 1.7                    | 11.0                   | -                       |
| CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 0.0 <sub>4</sub> | -                      | -                   | -                     | -                      | 0.0 <sub>3</sub>       | -                       |

표 2-10. 황사와 연무 시 PM10 및 PM2.5 미세먼지 조성비교(강창희 등, 2014)

| Species                                      | Concentrations (μg/m <sup>3</sup> ) |                  |                  |                  |                  |                  | Ratio  |       |       |       |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-------|-------|-------|
|                                              | Coarse                              |                  |                  | Fine             |                  |                  | Coarse |       | Fine  |       |
|                                              | AD <sup>1)</sup>                    | HZ <sup>2)</sup> | NE <sup>3)</sup> | AD <sup>1)</sup> | HZ <sup>2)</sup> | NE <sup>3)</sup> | AD/NE  | HZ/NE | AD/NE | HZ/NE |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>                 | 1.4                                 | 0.8              | 0.6              | 1.5              | 4.1              | 2.2              | 2.3    | 1.3   | 0.7   | 1.9   |
| Na <sup>+</sup>                              | 7.9                                 | 3.6              | 1.7              | 0.9              | 1.0              | 0.3              | 4.6    | 2.1   | 3.0   | 3.3   |
| K <sup>+</sup>                               | 0.6                                 | 0.3              | 0.2              | 0.4              | 0.8              | 0.2              | 3.0    | 1.5   | 2.0   | 4.0   |
| nss-Ca <sup>2+</sup>                         | 11.0                                | 0.9              | 0.3              | 1.5              | 0.2              | 0.1              | 36.7   | 3.0   | 15.0  | 2.0   |
| Mg <sup>2+</sup>                             | 1.1                                 | 0.4              | 0.2              | 0.3              | 0.1              | 0.1              | 5.5    | 2.0   | 3.0   | 1.0   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                 | 8.2                                 | 6.7              | 2.6              | 5.3              | 7.1              | 1.7              | 3.2    | 2.6   | 3.1   | 4.2   |
| Cl <sup>-</sup>                              | 6.3                                 | 4.3              | 1.9              | 1.0              | 0.8              | 0.2              | 3.3    | 2.3   | 5.0   | 4.0   |
| nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>            | 6.7                                 | 2.5              | 1.5              | 6.3              | 9.3              | 6.2              | 4.5    | 1.7   | 1.0   | 1.5   |
| F <sup>-</sup>                               | 0.1                                 | 0.0 <sub>2</sub> | 0.0 <sub>2</sub> | 0.0 <sub>2</sub> | 0.0 <sub>3</sub> | 0.0 <sub>1</sub> | 5.0    | 1.0   | 2.0   | 3.0   |
| HCOO <sup>-</sup>                            | 0.1                                 | 0.1              | 0.1              | 0.0 <sub>3</sub> | 0.1              | 0.0 <sub>4</sub> | 1.0    | 1.0   | 0.8   | 2.5   |
| CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>             | 0.3                                 | 0.4              | 0.2              | 0.1              | 0.2              | 0.2              | 1.5    | 2.0   | 0.5   | 1.0   |
| CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 0.1                                 | 0.0 <sub>5</sub> | 0.0 <sub>3</sub> | 0.1              | 0.0 <sub>2</sub> | 0.1              | 3.3    | 1.7   | 1.0   | 0.2   |

<sup>1)</sup>AD: Asian Dust, <sup>2)</sup>HZ: Haze, <sup>3)</sup>NE: Non-event

- 표 2-10은 제주도 고산지역의 대기 중에서의 미세먼지 조성을 나타냄. 대기 중에서의 미세먼지 조성이 강우 속에서의 조성 과 유사함. Coarse는 2.5  $\mu\text{m}$  이상의 조대입자를 의미하고, Fine은 2.5  $\mu\text{m}$ 이하의 미세입자를 의미함. AD는 황사가 있는 날, HZ는 미세먼지가 있는 날 그리고 NE는 아무 현상이 없는 날로 정의됨
- $\text{NO}_3$ 는 황사가 있는 날에 조대입자에서 3.2배, 미세입자에서 3.1배 상승함. 반면에  $\text{SO}_4$ 의 농도는 조대입자에서 4.5배로 큰 차이를 보이나 미세입자에서는 1.0배로 황사의 영향을 거의 받지 않은 것으로 나타남.

### 3. 결론

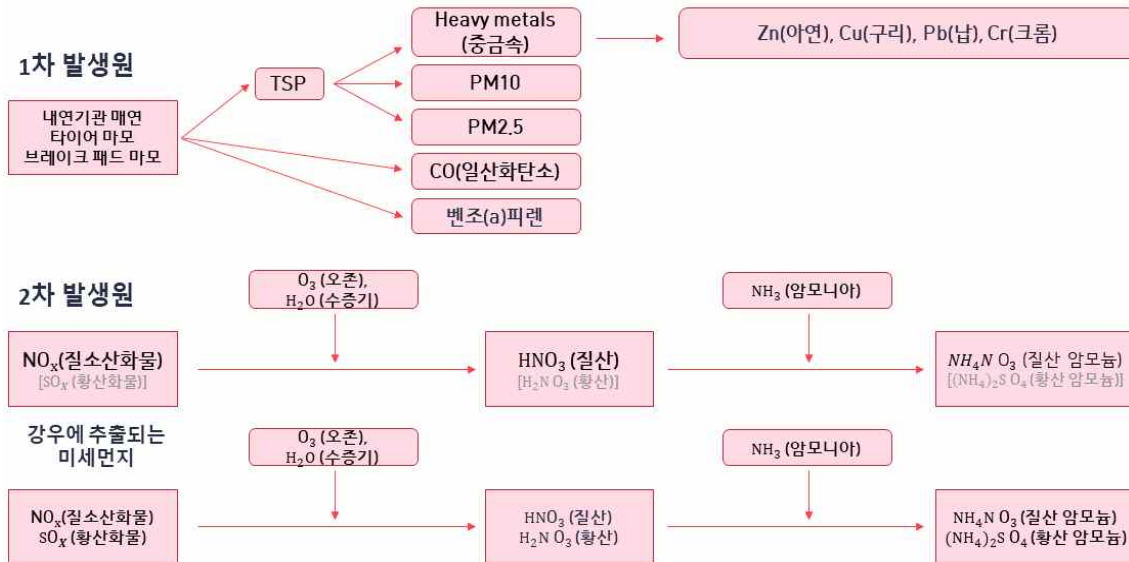


그림 3-1. 도로포장에서의 미세먼지 생성원인 및 성상

- 차량에서 발생하는 미세먼지를 1차 발생원과 2차 발생원으로 나누어 분석하였음. 타이어 및 브레이크 마모로 인해 발생하는 1차적 미세먼지와 배기가스의 질소산화물이 화학적 반응을 일으켜 생성된 2차적 미세먼지의 주요성상을 분석하였음. 도로포장 주변 미세먼지 성상에서 중요하게 고려해야하는 인자를 다음과 같이 설정하였음(그림 3-1). 표 3-1은 본 연구에서 고려한 주요 미세먼지 설정 인자를 보여줌.
- 도로이동오염원에서 나오는  $\text{NO}_x$ (질소산화물)에 의해 생성된 질산염을 포함한  $\text{PM}_{2.5}$  그리고  $\text{PM}_{10}$ 을 주요 제거 인자로 함.  $\text{PM}_{2.5}$  중에서도 내연기관 매연에 의해  $\text{NO}_x$ (질소산화물)의 배출량이 많고 주된 인자로 고려되어야 함.
- 타이어와 브레이크 패드 마모로 인해 발생하는 중금속 중 Zn(아연), Cu(구리), Pb(납), Cr(크롬)의 배출량이 많았음. 그 중에서도 인체에 유해한 Pb(납)과 Cr(크롬)을 주요 인자로 고려함.

## 도로포장 환경 미세먼지 현황 자료 구축

### 1. 개요

- 투수성 재료를 이용한 도로포장 환경에 따른 미세먼지 저감 효과를 평가하는 AI 모델을 만들기 위해 도로에서 발생할 수 있는 여러 미세먼지 데이터를 조사하고 미세먼지량에 영향을 미치는 기상정보와 교통정보를 수집함.
- 미세먼지 및 기상정보 수집을 위해 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)과 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 수집한 데이터를 사용하여 분석하고, 정제된 데이터를 AI 모델에 적용함으로써 모델이 정확한 미세먼지 수치를 예측하도록 함.
- 투수성 포장 환경에서의 미세먼지 데이터 구축을 위해 실시간 모니터링 장비를 통해 데이터를 수집함으로써 미세먼지 저감형 투수성 포장의 효용성을 나타낼 수 있도록 학습함.

### 2. 실험 시스템

#### 2.1. 기상 정보 데이터

##### ○ 기온

- 측정 장소의 1시간 동안의 평균 기온을 미세먼지 예측에 사용함. 기존 연구에 따르면 PM2.5는 복사열을 차단하여 기온을 낮추고, PM10은 복사열을 흡수, 방출하는 역할을 하여 기온을 높임.

##### ○ 습도

- 측정 장소의 1시간 동안의 평균 습도를 미세먼지 예측에 사용함. 습도가 높으면 가스 상태의 물질이 미세먼지로 변화하면서 대기 중 미세먼지 양이 늘어나고, 미세먼지 알갱이가 서로 접촉하여 더 커지게 됨으로써 미세먼지 농도가 증가하게 됨. 이를 통해 습도가 높을수록 미세먼지 수치가 증가하는 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있음.

##### ○ 풍속

- 측정 장소의 1시간 동안의 평균 풍속을 미세먼지 예측에 사용함. 풍속이 낮으면 현재 장소의 미세먼지가 대기 중에 정체되므로 자동차나 공장, 난방 보일러 등에서 배출된 질소산화물 등의 대기오염 물질이 지표면 근처에 축적됨. 축적된 대기오염 물질은 다른 대기오염 물질과 결합하여 미세먼지가 됨. 이를 통해 풍속이 낮으면 미세먼지 수치가 증가하는 상관관계를 확인할 수 있음.

#### 2.2. 미세먼지 데이터

##### ○ PM 2.5, PM10

- 미세먼지는 직경에 따라 PM10과 PM2.5등으로 구분하며, PM10은 1000분의 10mm보다 작은 먼지이며, PM2.5는 1000분의 2.5mm보다 작은 먼지로, 머리카락 직경(약 60 $\mu$ m)의 1/20~1/30 크기보다 작은 입자임. 미세먼지는 공기 중 고체상태와 액체상태의 입자의 혼합물로 배출되며 화학반응 또는 자연적으로 생성되거나 사업장 연소, 자동차 연료 연소, 생물성 연소 과정 등 특정 배출

원으로부터 직접 발생함. PM2.5의 경우 상당량이 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등의 전구물질이 대기 중의 특정 조건에서 반응하여 2차 생성됨. 자연적으로 존재하는 입자로서 광물 입자(예: 황사), 소금 입자, 생물성 입자(예: 꽃가루, 미생물) 등이 있음. 미세먼지 조성은 매우 다양하나, 주로 탄소성분(유기탄소, 원소탄소), 이온성분(황산염, 질산염, 암모늄), 광물성분 등으로 구성되어 있음.

- 미세먼지는 천식과 같은 호흡기계 질병을 악화시키고, 폐 기능의 저하를 초래함. PM2.5는 입자가 미세하여 코 점막을 통해 걸러지지 않고 흡입시 폐포까지 직접 침투하여 천식이나 폐질환의 유병률과 조기사망률을 증가시킴. 또한 미세먼지는 시정을 악화시키고, 식물의 잎 표면에 침적되어 신진대사를 방해하며, 건축물이나 유적물 및 동상 등에 퇴적되어 부식을 일으킴.

#### ○ 일산화탄소(CO)

- 일산화탄소는 무색, 무취의 유독성 가스로서 연료속의 탄소성분이 불완전 연소되었을 때 발생함. 배출원은 주로 수송부문이 차지하며, 산업공정과 비수송부문의 연료연소 그리고 산불과 같은 자연발생원 및 주방, 담배연기, 지역난방과 같은 실내 발생원이 있음.
- 일산화탄소의 인체 영향을 살펴보면, 혈액순환 중에서 산소운반 역할을 하는 헤모글로빈을 카르복시헤모글로빈(COHB)으로 변성시켜 산소의 운반기능을 저하시키며, 고농도의 일산화탄소는 유독성이 있어 건강한 사람에게도 치명적인 해를 입힘.

#### ○ 이산화질소(NO<sub>2</sub>)

- 이산화질소는 적갈색의 반응성이 큰 기체로서, 대기 중에서 일산화질소의 산화에 의해서 발생하며, 대기 중에서 휘발성 유기화합물과 반응하여 오존을 생성하는 전구물질(precursor)의 역할을 함. 주요 배출원은 자동차, 발전소와 같은 고온 연소공정과 화학물질 제조공정 등이 있으며, 토양 중의 세균에 의해 생성되는 자연적 현상 등이 있음.
- 질소산화물의 인체영향을 살펴보면, 일산화질소(NO) 보다는 이산화질소(NO<sub>2</sub>)가 인체에 더욱 큰 피해를 주는 것으로 알려져 있음. 고농도에 노출되면 눈, 코 등의 점막에서 만성 기관지염, 폐렴, 폐출혈, 폐수종의 발병으로까지 발전할 수 있는 것으로 보고되고 있으며, 식물에 대한 피해로는 식물세포를 파괴하여 꽃식물의 잎에 갈색이나 흑갈색의 반점이 생기게 함.

#### ○ 아황산가스(SO<sub>2</sub>)

- 황산화물의 일종으로 물에 잘 녹는 무색의 자극적인 냄새가 나는 불연성 가스임. 천연으로는 화산, 온천 등에 존재하며 황화수소와 반응하여 황을 생성함. 황을 함유하는 석탄, 석유 등의 화석연료가 연소될 때 인위적으로 배출되며, 주요 배출원은 발전소, 난방장치, 금속 제련공장, 정유공장 및 기타 산업공정 등에서 발생함.
- 고농도의 아황산가스는 옥외 활동이 많고 천식에 걸린 어른과 어린이에게 일시적으로 호흡장애를 일으킬 수 있으며, 고농도에 폭로될 경우 호흡기계 질환을 일으키고 심장혈관 질환을 악화시키는 것으로 알려져 있음. 질소산화물과 함께 산성비의 주요원인 물질로 토양 등의 산성화에 영향을 미치고 바람에 의해 장거리 수송되어 다른 지역에 영향을 주며 식물의 잎맥손상 등을 일으키고 시정장애를 일으키며 각종 구조물의 부식을 촉진시킴.

#### ○ 오존(O<sub>3</sub>)

- 오존은 대기 중에 배출된 NOx와 휘발성 유기화합물(VOCs) 등이 자외선과 광화학 반응을 일으켜 생성된 PAN, 알데하이드, Acrolein 등의 광화학 옥시던트의 일종으로 2차 오염물질에 속함. 전구물질인 휘발성 유기화합물은 자동차, 화학공장, 정유공장과 같은 산업시설과 자연적 생성 등 다양

한 배출원에서 발생함.

- 오존에 반복 노출시에는 폐에 피해를 줄 수 있는데, 가슴의 통증, 기침, 메스꺼움, 목 자극, 소화 등에 영향을 미치며, 기관지염, 심장질환, 폐기종 및 천식을 악화시키고, 폐활량을 감소시킬 수 있음. 특히 기관지 천식환자나 호흡기 질환자, 어린이, 노약자 등에게는 많은 영향을 미치므로 주의해야 할 필요가 있음. 또한 농작물과 식물에 직접적으로 영향을 미쳐 수확량이 감소되기도 하며 잎이 말라 죽기도 함.

## 2.3. 데이터 수집

### ○ 데이터 수집 환경

- 부산 시내 20개의 측정소에서 2019년 1월부터 2019년 12월까지 수집한 시간별 데이터를 AI 모델 학습에 사용함. 학습용으로 사용된 데이터는 풍속, 습도, 온도 총 3종의 기상정보와 PM2.5, PM10, 오존, 이산화질소, 일산화탄소, 아황산가스의 총 6종의 미세먼지 데이터를 합하여 총 9종의 특성을 가짐. (그림 1, 표 1)

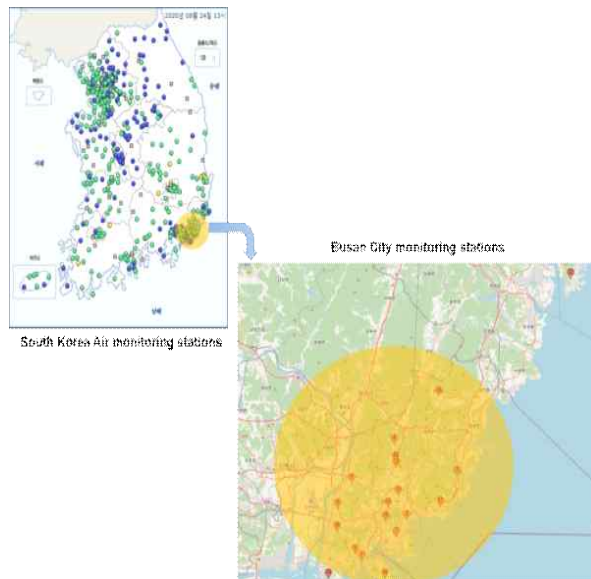


그림 1. 부산 시내 미세먼지 측정소

| ID | Station Name     |
|----|------------------|
| 1  | Gwangbok-dong    |
| 2  | Gwangan-dong     |
| 3  | Gijang-eup       |
| 4  | Noksan-dong      |
| 5  | Daesin-dong      |
| 6  | Daeyeon-dong     |
| 7  | Daejeo-dong      |
| 8  | Deokcheon-dong   |
| 9  | Deokpo-dong      |
| 10 | Myeongjang-dong  |
| 11 | Bugok-dong       |
| 12 | Sujeong-dong     |
| 13 | Yeonsan-dong     |
| 14 | Yongsu-ri        |
| 15 | Jangnim-dong     |
| 16 | Jeonpo-dong      |
| 17 | Jwa-dong         |
| 18 | Cheongnyong-dong |
| 19 | Taejongdae       |
| 20 | Hakjang-dong     |

표 1. 그림1의 측정소 이름

- 투수성 포장 환경에서의 미세먼지 저감 효과 예측 모델 개발을 위해서는 투수성 포장 환경에서의 미세먼지 수치를 직접적으로 측정할 수 있는 장치가 필요함.
- 이를 위해 미세먼지 측정 기구인 Particle plus 8306 모델을 사용함. 그림2는 투수성 포장 환경에서 미세먼지 수치 측정을 위한 장치의 전경 사진이며 장치는 각 크기별 6종의 미세먼지 수치와 온도, 습도의 측정이 가능함. (그림 3)



그림 3. 미세먼지 측정 기구



그림 4. 미세먼지 측정 기구 화면

- 위 측정 장비를 Wi-Fi로 연결하여 외부에서 접속하고 실시간으로 미세먼지 수치를 확인함. (그림 5, 그림 6)

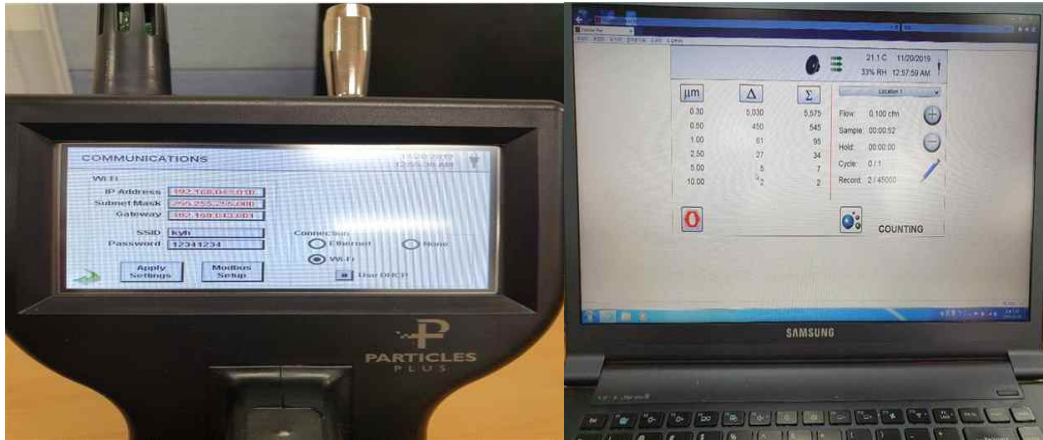


그림 5. Wi-Fi 연결 시 측정 장비 화면

그림 6. 외부에서 접속한 화면

- 미세먼지 실측 데이터 구축을 위해 부산대학교 양산캠퍼스에 설치한 미세먼지 및 기상데이터 실시간 모니터링 장비를 통해 아래와 같은 기간과 위치에 **미세먼지 실측 데이터 6건**을 수집함. 수집 데이터는 온도, 습도, CO2, VOC, PM2.5, light, noise이며, 15분 간격으로 측정됨. (표 2)

| 데이터  | 측정기간                       | 측정위치                                |
|------|----------------------------|-------------------------------------|
| 데이터1 | 2019.07.01~2019.07.3<br>1  | 부산대학교 저영향개발센터 앞<br>주차장형 투수성 아스팔트 포장 |
| 데이터2 | 2019.07.01~2019.07.3<br>1  | 부산대학교 저영향개발센터 앞<br>주차장형 투수성 콘크리트 포장 |
| 데이터3 | 2019.07.01~2019.07.3<br>1  | 부산대학교 저영향개발센터 앞<br>정원               |
| 데이터4 | 2019.10.20.~2019.11.<br>16 | 부산대학교 저영향개발센터 앞<br>주차장형 투수성 아스팔트 포장 |
| 데이터5 | 2019.07.01~2019.07.3<br>1  | 부산대학교 저영향개발센터 옥상                    |
| 데이터6 | 2019.10.20.~2019.11.<br>16 | 부산대학교 저영향개발센터 옥상                    |

표 2. 측정 기간 및 위치별 수집된 미세먼지 데이터

- 3차년도 연구에서는 에스비비(주)에서 설치한 실시간 미세먼지 모니터링 시스템(CMS 시스템)을 통하여 일반 포장(1구간), 투수성 포장(2구간), 배수성 포장도로(3구간)를 구분하여 총 3구간의 미세먼지 데이터 및 기상정보를 수집하고 구간별 특성을 비교함. (그림 7, 그림 8)



그림 7. 실시간 미세먼지 모니터링 시스템 화면

[ 채널 01 ] 센서 장비의 로그 데이터

2022-01-01

| 시간       | 습도   | 온도   | 차도... | 인도... | PM2.5 | PM10 | TSP  | AI | 내용           |
|----------|------|------|-------|-------|-------|------|------|----|--------------|
| 00:00:24 | 22.0 | -0.4 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 8.7  | 12.7 | 3  | [0000000000] |
| 00:01:24 | 21.4 | -0.5 | 0.0   | 0.0   | 2.6   | 4.9  | 8.8  | 4  | [0000000000] |
| 00:02:24 | 21.4 | -0.5 | 0.0   | 0.0   | 2.5   | 4.5  | 10.1 | 4  | [0000000000] |
| 00:03:24 | 21.3 | -0.5 | 0.0   | 0.0   | 2.3   | 4.0  | 8.5  | 4  | [0000000000] |
| 00:04:24 | 21.3 | -0.6 | 0.0   | 0.0   | 2.4   | 4.9  | 9.0  | 3  | [0000000000] |
| 00:05:24 | 21.5 | -0.6 | 0.0   | 0.0   | 2.4   | 3.7  | 7.7  | 4  | [0000000000] |
| 00:06:24 | 21.4 | -0.6 | 0.0   | 0.0   | 2.3   | 4.3  | 8.4  | 3  | [0000000000] |
| 00:07:24 | 21.5 | -0.6 | 0.0   | 0.0   | 2.4   | 5.2  | 9.3  | 4  | [0000000000] |
| 00:08:24 | 21.6 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 5.2  | 8.9  | 4  | [0000000000] |
| 00:09:24 | 21.9 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.7   | 4.4  | 8.4  | 4  | [0000000000] |
| 00:10:24 | 22.7 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 5.9  | 13.6 | 4  | [0000000000] |
| 00:11:24 | 23.0 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 6.5  | 14.0 | 4  | [0000000000] |
| 00:12:24 | 23.8 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.7   | 6.5  | 11.5 | 4  | [0000000000] |
| 00:13:24 | 23.1 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.4   | 5.5  | 9.1  | 4  | [0000000000] |
| 00:14:24 | 23.0 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.5   | 4.6  | 8.7  | 4  | [0000000000] |
| 00:15:24 | 23.2 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.5   | 5.1  | 9.2  | 4  | [0000000000] |
| 00:16:24 | 23.2 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.6   | 4.9  | 10.8 | 3  | [0000000000] |
| 00:17:24 | 23.0 | -0.7 | 0.0   | 0.0   | 2.6   | 4.4  | 8.5  | 4  | [0000000000] |
| 00:18:24 | 23.0 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 5.3  | 9.4  | 4  | [0000000000] |
| 00:19:24 | 23.1 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 5.0  | 9.1  | 4  | [0000000000] |
| 00:20:24 | 23.5 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 2.9   | 5.1  | 12.3 | 4  | [0000000000] |
| 00:21:24 | 23.2 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 3.2   | 6.9  | 15.5 | 4  | [0000000000] |
| 00:22:24 | 25.4 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 5.2  | 11.2 | 4  | [0000000000] |
| 00:23:24 | 23.7 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 5.0  | 18.9 | 3  | [0000000000] |
| 00:24:24 | 23.1 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 3.1   | 5.3  | 18.4 | 4  | [0000000000] |
| 00:25:24 | 23.2 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 2.7   | 3.9  | 25.9 | 4  | [0000000000] |
| 00:26:24 | 23.4 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 2.9   | 5.4  | 9.6  | 4  | [0000000000] |
| 00:27:24 | 23.3 | -0.8 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 5.8  | 9.9  | 4  | [0000000000] |
| 00:28:24 | 23.3 | -0.9 | 0.0   | 0.0   | 2.7   | 5.1  | 8.8  | 4  | [0000000000] |
| 00:29:24 | 23.3 | -0.9 | 0.0   | 0.0   | 2.7   | 4.8  | 8.9  | 4  | [0000000000] |
| 00:30:24 | 23.6 | -0.9 | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 7.0  | 11.3 | 4  | [0000000000] |
| 00:31:24 | 23.4 | -0.9 | 0.0   | 0.0   | 2.9   | 5.6  | 9.6  | 4  | [0000000000] |
| 00:32:24 | 23.4 | -0.9 | 0.0   | 0.0   | 2.9   | 5.9  | 9.9  | 4  | [0000000000] |
| 00:33:24 | 23.6 | -1.0 | 0.0   | 0.0   | 2.8   | 4.4  | 8.1  | 4  | [0000000000] |
| 00:34:24 | 25.2 | -1.0 | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 5.0  | 9.1  | 4  | [0000000000] |
| 00:35:24 | 25.3 | -1.0 | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 5.4  | 8.9  | 4  | [0000000000] |
| 00:36:24 | 24.0 | -1.0 | 0.0   | 0.0   | 3.3   | 6.6  | 7.3  | 4  | [0000000000] |

January 2022

월간로그정보

일일 로그 읽기

일일 로그 삭제

일일 로그 저장

나가기

그림 8. 수집된 미세먼지 데이터 화면

- 미세먼지 모니터링 시스템을 통해 수집된 데이터를 AI모델 입력 형태로 변환하기 위해 구간별 데이터를 정제함. (그림9, 그림10, 그림11)

| A                   | B        | C           | D     | E    |
|---------------------|----------|-------------|-------|------|
| Time                | Humidity | Temperature | Pm2.5 | Pm10 |
| 2021:05:08:23:57:17 | 80.1     | 203.9       | 237   | 59.3 |
| 2021:05:08:23:57:22 | 79.3     | 206.7       | 248   | 59.3 |
| 2021:05:08:23:57:27 | 80.1     | 206.2       | 243   | 59.3 |
| 2021:05:08:23:57:32 | 79.8     | 203.6       | 243.1 | 59.3 |
| 2021:05:08:23:57:37 | 79.2     | 205         | 244.4 | 59.3 |
| 2021:05:08:23:57:42 | 79.9     | 204         | 235.3 | 59.3 |
| 2021:05:08:23:57:47 | 80.2     | 202.7       | 236.7 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:57:52 | 80.2     | 201.8       | 234.3 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:57:57 | 80.4     | 201.1       | 230.9 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:02 | 80.6     | 197.3       | 229.8 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:08 | 80.9     | 204.1       | 227.5 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:12 | 81.3     | 196.7       | 229.2 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:17 | 81.6     | 194.9       | 235.6 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:22 | 82       | 195.2       | 229.2 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:27 | 81.2     | 192.3       | 235.2 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:32 | 81.4     | 193.4       | 236.3 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:37 | 82.3     | 193.7       | 238.9 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:42 | 82.3     | 194         | 244.4 | 59.4 |
| 2021:05:08:23:58:47 | 82.5     | 194.1       | 243.3 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:58:52 | 82.4     | 195.6       | 260   | 59.5 |
| 2021:05:08:23:58:57 | 81.8     | 197.7       | 269.7 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:02 | 81.8     | 199.7       | 269.1 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:08 | 81.7     | 201.5       | 274.2 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:12 | 81.1     | 207.6       | 279.6 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:17 | 80.2     | 204.9       | 268.8 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:22 | 79.5     | 200.9       | 263.2 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:27 | 80.1     | 200.5       | 257.6 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:32 | 80.3     | 203.4       | 260.5 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:37 | 79.8     | 201.9       | 254   | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:42 | 79.2     | 201.3       | 253.1 | 59.5 |
| 2021:05:08:23:59:47 | 78.8     | 200.4       | 249.2 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:59:52 | 79.3     | 198.1       | 227.7 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:59:57 | 79.5     | 199.5       | 221.4 | 59.6 |

그림 9. 1구간 데이터 정제 일부 화면

| A                   | B        | C           | D     | E    |
|---------------------|----------|-------------|-------|------|
| Time                | Humidity | Temperature | Pm2.5 | Pm10 |
| 2021:05:08:23:57:17 | 82.6     | 250         | 343.3 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:22 | 82.8     | 247.8       | 339.6 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:27 | 82.4     | 249.4       | 337.2 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:32 | 82.3     | 251.6       | 327.6 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:37 | 82.3     | 251.4       | 333.3 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:42 | 81.9     | 248.1       | 322.5 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:47 | 81.4     | 248.5       | 321.5 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:52 | 82       | 250.6       | 328.8 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:57:57 | 82.9     | 256.1       | 323.5 | 59.6 |
| 2021:05:08:23:58:02 | 83.1     | 259.7       | 323.8 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:08 | 83.4     | 257.7       | 342.6 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:12 | 84.2     | 254.6       | 344.6 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:17 | 83.9     | 263.8       | 351.6 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:22 | 84.3     | 265.1       | 355.5 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:27 | 84.4     | 264.8       | 360   | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:32 | 85       | 259.6       | 350.7 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:37 | 84.2     | 259.8       | 332.9 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:42 | 84.5     | 260.7       | 345.9 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:47 | 84.4     | 262.5       | 357.2 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:52 | 84.3     | 259         | 363   | 59.7 |
| 2021:05:08:23:58:57 | 83.9     | 252.7       | 348.5 | 59.7 |
| 2021:05:08:23:59:02 | 83.8     | 246.9       | 339.4 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:08 | 83.1     | 243.9       | 322.4 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:12 | 82.4     | 249.5       | 304.7 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:17 | 82.7     | 240         | 306.5 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:22 | 82.8     | 238.2       | 312.5 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:27 | 82.9     | 239.2       | 308.6 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:32 | 83.2     | 241.7       | 317.4 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:37 | 84.3     | 241.3       | 319.4 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:42 | 84.6     | 239.8       | 308.4 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:47 | 84.6     | 234         | 294.6 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:52 | 84.6     | 234         | 294.6 | 59.8 |
| 2021:05:08:23:59:57 | 84.6     | 234         | 294.6 | 59.8 |

그림 10. 2구간 데이터 정제 일부 화면

| A                   | B        | C           | D     | E    |
|---------------------|----------|-------------|-------|------|
| Time                | Humidity | Temperature | Pm2.5 | Pm10 |
| 2021:05:08:23:57:17 | 95.1     | 179.4       | 209.3 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:22 | 94.2     | 180.1       | 207.2 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:27 | 94.6     | 183.6       | 218.9 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:32 | 94.6     | 181.5       | 216.8 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:37 | 94.8     | 182.7       | 216.4 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:42 | 95.5     | 185.5       | 215.9 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:47 | 96.3     | 188.7       | 217.8 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:52 | 96.7     | 189.2       | 215.4 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:57:57 | 98.1     | 184.1       | 214.6 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:58:02 | 98.7     | 187.8       | 211.6 | 58.6 |
| 2021:05:08:23:58:08 | 99       | 188.8       | 212.6 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:12 | 98.1     | 193         | 212.3 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:17 | 97.6     | 193.5       | 211.2 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:22 | 97.9     | 192.6       | 210.2 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:27 | 97.2     | 190.5       | 200.2 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:32 | 96.8     | 194.2       | 211.9 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:37 | 97.4     | 195         | 212.7 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:42 | 97       | 193.3       | 211   | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:47 | 97       | 193.7       | 211.3 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:52 | 96.6     | 192.6       | 210.2 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:58:57 | 96.2     | 186.7       | 210.5 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:02 | 95.3     | 193.8       | 208.5 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:08 | 95       | 191         | 207.4 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:12 | 95.2     | 185.3       | 201.7 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:17 | 95.8     | 186.7       | 203.1 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:22 | 96.1     | 186.1       | 207   | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:27 | 96.2     | 187.5       | 205.5 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:32 | 96.8     | 188.1       | 198.1 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:37 | 95.4     | 184.9       | 195   | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:42 | 95.5     | 186.9       | 196.9 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:47 | 94.8     | 181.9       | 193.5 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:52 | 94.7     | 182.6       | 195.9 | 58.9 |
| 2021:05:08:23:59:57 | 94.8     | 187.5       | 207.9 | 58.9 |

그림 11. 3구간 데이터 정제 일부 화면

## 2.4. 데이터 분석

### ○ 수집한 데이터 활용 및 분석

- 데이터를 학습용 데이터와 테스트 데이터로 분리할 때 특정 달이나 계절에 데이터가 편향되지 않게 하기 위해 각각의 월마다 테스트 데이터를 추출함. 또한 학습 모델을 검증하기 위해서 학습용 데이터에서 학습용 데이터와 검증용 데이터를 70%와 30% 비율로 분할하여 학습을 진행함.
- 또한 PCA 기법을 사용하여 다양한 데이터 특성들이 미세먼지 수치인 PM2.5와 PM10에 얼마나 영향을 끼치는지를 분석함. 그리고 상관관계수가 낮은 즉, 미세먼지 수치에 영향을 크게 주지 않는 특성은 사용하지 않음으로써 예측 모델의 정확도와 학습 속도를 개선함.
- 3차년도 연구에서는 특히 투수성 포장의 효과를 찾아내기 위해 미세먼지 모니터링 시스템으로부터 각 포장재의 종류에 따른 미세먼지 데이터를 수집하여 비교하고 분석하였음. (그림12, 그림13, 그림14)

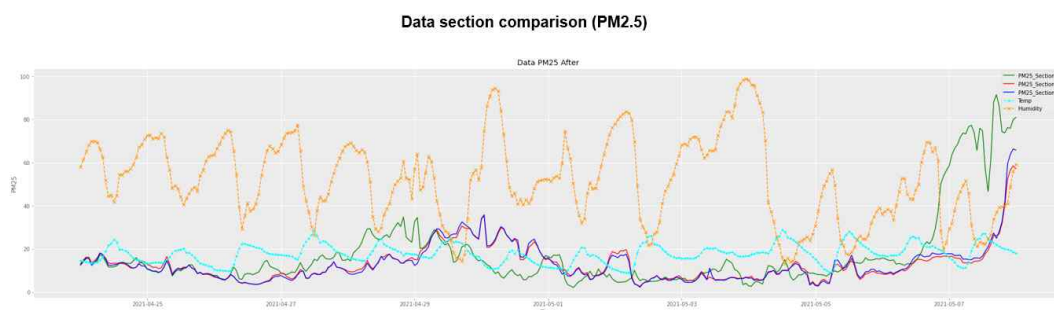


그림 12. PM2.5에 대한 구간별 수치 비교 그래프

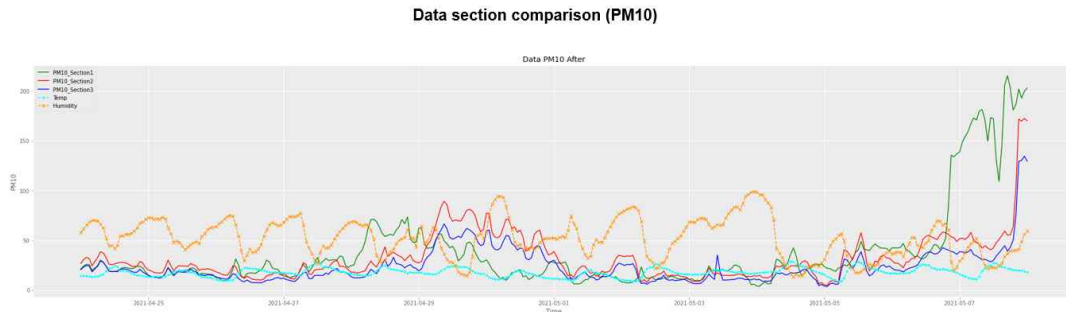


그림 13. PM10에 대한 구간별 수치 비교 그래프

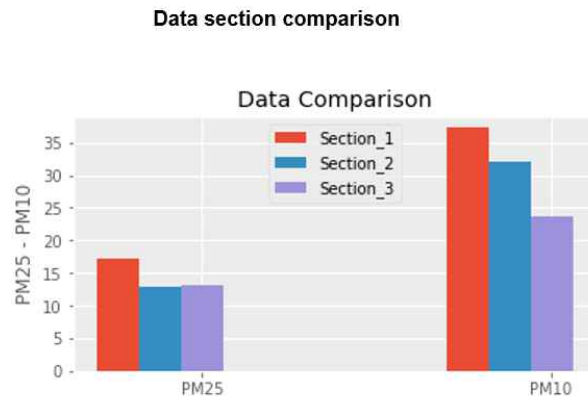


그림 14. 각 구간별 미세먼지 농도 비교 막대그래프

- 단순히 미세먼지 농도의 절대값만을 가지고 비교하였을 때 투수성 포장의 미세먼지 저감효율만을 확인하기 어려움. 따라서 일반 포장도로(1구간) 대비 투수성 포장도로(2구간), 배수성 포장도로(3구간) 비율을 그림 15와 같은 식으로 계산하여 투수성 포장재의 미세먼지 저감효과를 확인함.

$$\text{Ratio[PM25]} = (\text{Section\_2 [PM25]} / \text{Section\_1 [PM25]}) * 100$$

$$\text{Ratio[PM10]} = (\text{Section\_2 [PM10]} / \text{Section\_1 [PM10]}) * 100$$

$$\text{Ratio[PM25]} = (\text{Section\_3 [PM25]} / \text{Section\_1 [PM25]}) * 100$$

$$\text{Ratio[PM10]} = (\text{Section\_3 [PM10]} / \text{Section\_1 [PM10]}) * 100$$

그림 15. 일반 포장 대비 특수 포장 도로 비율 계산식

- 투수성 포장 전인 2월과 포장 후 2달 뒤인 6월, 포장 후 7달 뒤인 11월의 일반 포장(1구간) 대비 투수성 포장 구간(2구간)의 미세먼지 농도 비율이 대폭 감소하는 추이를 보임 (그림 16). 참고로, 그림에서 비율(Ratio)가 100보다 큰 경우는 투수 포장이 설치된 2구간의 미세먼지 양이 일반 포장이 설치된 1구간보다 많다는 뜻이며 100보다 작은 경우는 그 반대임. 단, 'Before'로 표시된 경우는 2구간에 투수 포장이 설치되기 전이므로 포장의 차이는 없으며 위치상의 차이만 존재. 투수 포장 설치 전에는 2구간의 미세먼지 양이 1구간의 2배에 달했으나 포장 후 7개월 후에는 1구간보다 낮아짐을 확인.

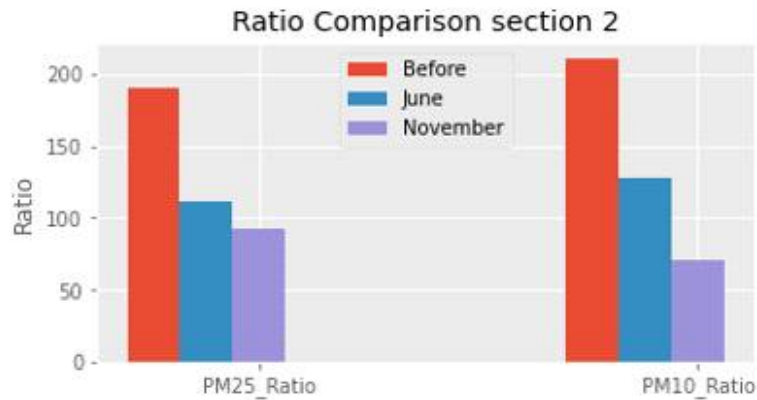


그림 16. 투수성 포장 도로 미세먼지 비율 감소 추이 막대그래프

### 3. 결론

- 미세먼지 데이터 및 기상정보 수집을 위해 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)과 에어코리아(www.airkorea.or.kr)로부터 부산시 측정소에서 측정된 데이터를 수집하고, 미세먼지 농도 측정 장비를 통해 실제 도로에서의 미세먼지 데이터를 수집하여 사용함.
- 또한 영상 AI 분석을 통한 차량 카운팅 및 속도 측정 장비를 개발하여 교통 정보를 수집함.
- 3차년도에는 투수성 포장재의 미세먼지 저감효과를 확인하기 위해 미세먼지 모니터링 시스템으로 부터 수집한 데이터를 달별로 나누어 기상정보를 바탕으로 구간별 미세먼지 수치를 계산하고, 투수성 및 배수성 포장재 구간의 미세먼지 수치를 일반 포장 도로의 수치로 나누어 비율을 계산함.
- 수집하여 정제한 모든 데이터를 미세먼지 저감효율 예측 AI모델에 적용함.

### <참고 문헌>

- 에어코리아, <https://www.airkorea.or.kr/web>
- 기상청자료개방포털, <https://www.kma.go.kr/kma/>

## 미세먼지 저감효율 실증기반평가기법

### 1. 개요

- 강우 시 대기 내 미세먼지, 도로위에 쌓여있던 재비산먼지가 빗물과 함께 투수성 포장재 또는 지표 밑으로 흘러 들어가 다공성 매체 내를 흐르게 된다. 이때, 지하수나 간극수가 함께 흐르거나 미세 입자 또는 투수성 포장재에 의해 걸러졌을 때의 지하수 또는 간극수 농도의 변화를 분석함.
- 실험실 환경에서 평가하기 위하여 미세먼지 입자와 청수를 혼합하여 지속적인 시험수 제조 및 공급을 위한 교반장치, 교반장치로부터 일정한 유량으로 분사되는 펌프를 내부에 마련 포장시료에 통과시켜 농도시험을 수행하는 포장 시료부 그리고 농도분석이 측정되는 측정조를 개발함.
- 미세먼지 저감형 투수성 포장의 구성 요소인 여재 필터의 성능을 알아보기 위해 석탄 저회-규사 여재의 미세입자 제거 효율 평가를 수행하였음.

### 2. 여재의 입자상 물질(미세입자) 제거 효과

#### 2.1. 입자상 물질(미세입자) 제거 효율 평가 시스템

- 미세입자는 지하수나 간극수와 함께 흐르거나 여재와 같은 다공성 재료에 축적되며 간극을 메우게 됨.

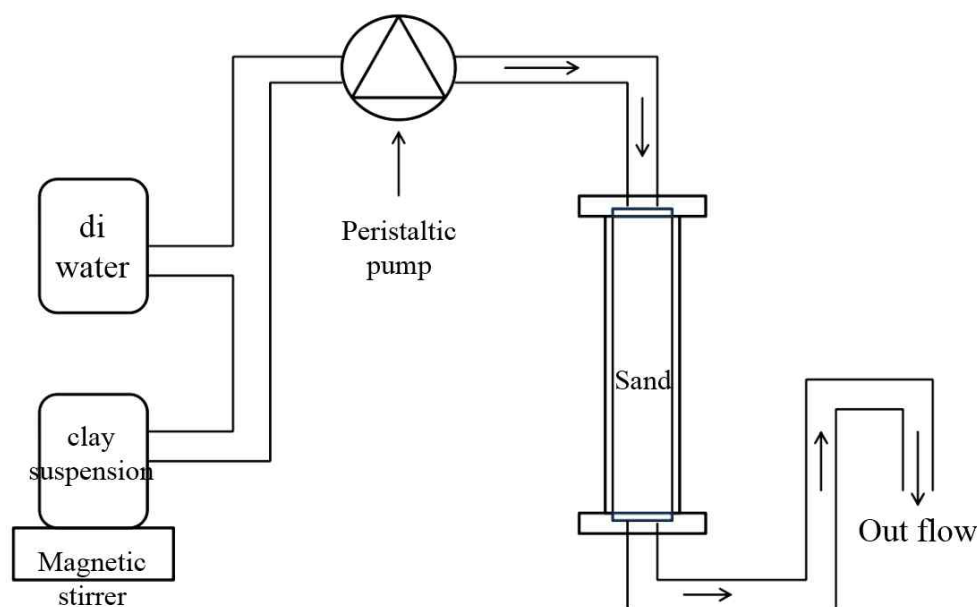


그림 2-1. 입자상 물질(미세입자) 제거 효율 평가 시스템

#### 2.2. 시험장비의 구성

- TSS 제거 효율 시험

- TSS 제거 효율 시험 장치는 교반 장치, 침투 장치 수집 장치로 구분됨. 교반 장치는 교반수조(Agitation tank), 임펠러(Impeller)로 구성되어 있다. 교반탱크의 최대 용량은 1000 L이며, 측면에 설치된 수위기

록계로 탱크 내 오염수의 양을 외부에서 파악할 수 있음. 또한 교반장치의 컨트롤 패널을 통해 교반 속도를 최대 400rpm까지 조절할 수 있음. 위의 장치들이 입자상 물질과 청수를 혼합하여 오염수를 제조하며, 오염수를 교반기 하부에 설치한 침투 장치에 공급함. 침투 장치는 가로 20 cm X 세로 20 cm X 높이 12 cm인 침투셀(Infiltration frame)이 그 역할을 하며, 오염수를 여과시켜 수집 장치로 흘려보냄. 수집 장치는 유출수 수집 수조(Measuring tank)로 구성되어 있음. 침투셀 상부에는 물을 고르게 분사하기 위해 타공 아크릴판을 설치하였음.

### ○ 미세먼지 제거 효율 시험

- 미세먼지 제거 효율 시험 장치는 교반 수조(Agitation tank), 교반기(Stirrer)로 구성되며, 입자상 물질과 청수를 혼합해 오염수를 제조함. 침투 장치는 유량조절기(Flow controller), 드립장치(Driper) 그리고 지름 5 cm X 높이 30 cm 인 침투셀(Filter cell)로 구성되어있음. 유량조절기는 오염수를 설정한 유량으로 분산주입장치에 공급하며, 오염수가 공급된 분산주입장치는 회전하며 침투셀에 오염수를 고르게 분사하는 역할을 함. 수집 장치는 유출수 수집 수조(Measuring tank)로 구성되어 있으며, 침투셀을 통해 여과된 오염수를 수집함. 침투셀의 유출부에는 미세입자 농도 산정을 위해 필터페이퍼를 설치함.

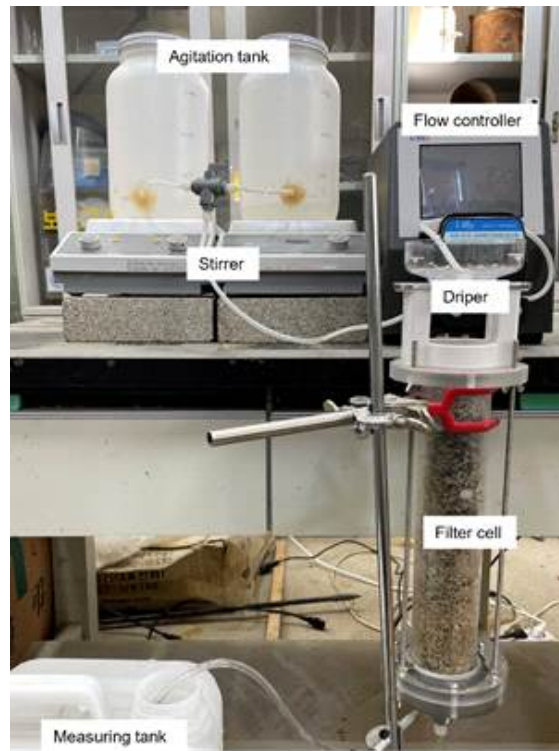


그림 2-3. 미세입자 제거 효율 평가 시험장치

## 3. 시험방법

### 3.1 TSS 제거 효율 시험

- 침투셀에 청수를 흘려보내고 1분 10분 20분 간격으로 유입, 유출수를 수집함.
- 오염수 제조를 위해 입자상 물질을 교반탱크에 투입하여 270rpm으로 30분간 교반시킴.
- 오염수를 침투셀에 흘려보낸 뒤 1분, 10분, 20분, 30분, 40분, 50분 간격으로 유입수와 유출수를 수집함.

### 3.2 미세먼지 제거 효율 시험

- 침투셀에 청수를 150 mL/min의 속도로 침투셀에 20분간 흘려보냄.

- 오염수 제조를 위해 입자상 물질을 교반탱크에 투입하여 500rpm으로 20분간 교반시킴.
- 오염수를 유량조절기를 사용하여 침투셀에 150 mL/min의 속도로 흘려보낸 뒤 1분, 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분 간격으로 유입수와 유출수를 50 mL씩 수집함.

#### 4. 저감효율 분석

- 수집한 유입수와 유출수를 수질오염공정시험기준(환경부 2021)에 따라 부유물질 분석을 시행하며, 아래 식을 활용하여 TSS 혹은 미세입자의 제거 효율을 구함.

$$RE(\%) = \frac{C_{\in} - C_{out}}{C_{\in}} \times 100 \quad \text{식 4.1}$$

여기서,  $C_{\in}$  유입수 (ml)

$C_{out}$  유출수 (ml)

$RE$  제거 효율 (%)

- PM10에 해당하는 크기의 입자에 대해 80%이상의 제거 효율을 보이는 것으로 나타나 일반 TSS 제거 효율에 대한 기존 기준치를 상회하는 것으로 나타남.



그림 4-1. 입자상 물질 농도 측정

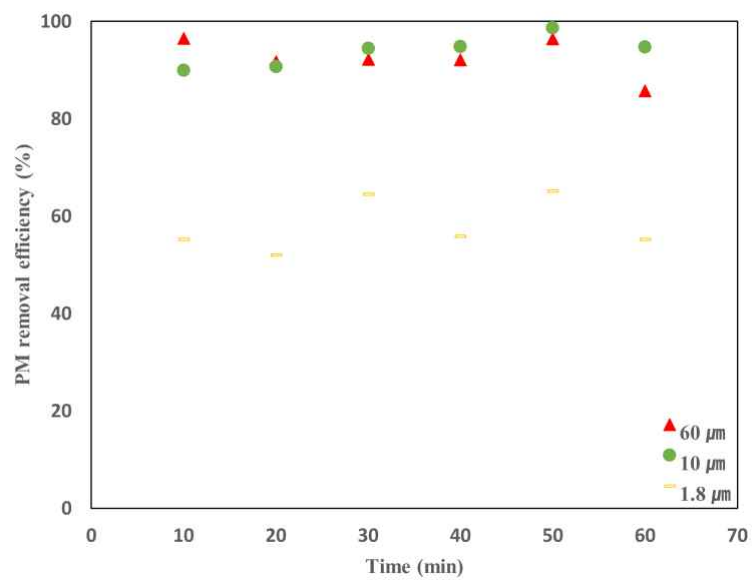
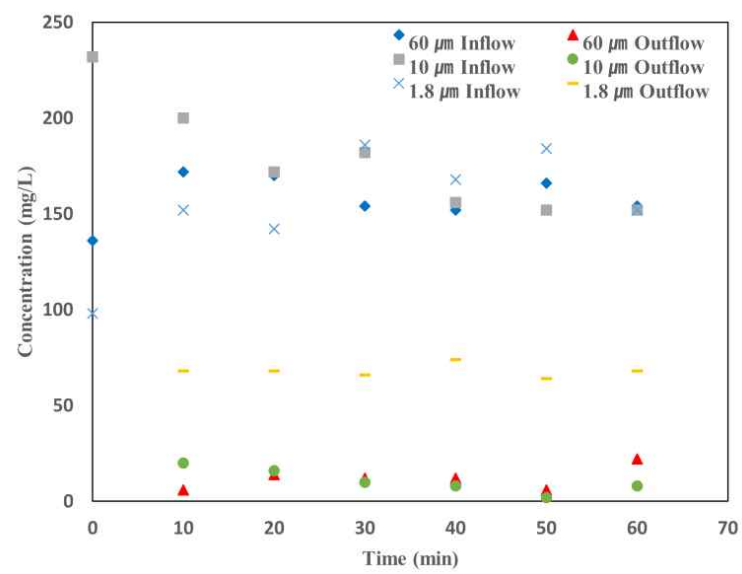


그림 4-2. 미세먼지 제거효율 시험결과 예시

## <참고 문헌>

- Brattebo, B. O., and Booth, D. B. (2003). "Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems." *Water Research*, 37(18), 4369-4376.
- Smith, D. R. (2011). *Permeable interlocking concrete pavements*, 4th Ed., Interlocking Concrete Pavement Institute, Herndon, VA, USA
- Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., Zhang, H., and Granato, T. (2016). "In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot - A four-year study." *Journal of Environmental Management*, 167, 8-14.
- 강연구, 조창희, 이병호 (2015) “규사와 액상형 고화제를 혼입한 황토모르타르의 특성에 관한 연구.” 대한건축학회지회연합회 논문집, Vol.17 No.01 (통권 65호) 2015-02.
- 김영란 (2012). “도시화가 물순환에 미치는 영향과 서울시 현황 : 인구·불투수면 증가로 물순환계 변화.” *위터저널*, 97, 27-91.
- 김혜란 (2012). “틈새형성블럭포장의 줄눈재 선정을 위한 실험방법.” 학위논문(석사), 중앙대학교 대학원.
- 송태협, 김하석 (2019). “건식공정으로 생산된 석탄저회의 성토재 및 노상재 활용을 위한 물리·화학적 특성평가.” *콘크리트학회논문집*, 31(3), 241-249.
- 한국토지주택연구원, 한국남동발전(주) (2018). “석탄저회의 성토 및 도로용 골재 활용 방안에 관한 연구.”
- Dahl, A., A. Gharibi, E. Swietlicki, A. Gudmundsson, M. Bohgard, A. Ljungman, G. Blomqvist, and M. Gustafsson (2006) Traffic-generated emissions of ultrafine particles from pavement-tire interface, *Atmospheric Environment*, 40, 1314-1323.
- Querol, X., A. Alastuey, C. Ruiz, B. Artinano, C. Hansson, M. Harrison, E. Buringh, H. ten Brink, M. Lutz, and P. Bruckmann (2004) Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities, *Atmospheric Environment*, 38, 6547-6555.
- Harrison, R., J. Yin, D. Mark, J. Stedman, R. Appleby, S.J. Booker, and S. Moorcroft (2001) Studies of the coarse particle (2.5~10  $\mu\text{m}$ ) component in UK urban atmospheres, *Atmospheric Environment*, 35, 3667- 3679.
- Lenschow, P., H. Abraham, K. Kutzner, M. Lutz, J. Preu, and W. Reichenbacher (2001) Some ideas about the sources of PM10, *Atmospheric Environment*, 35, 23-33.
- Harrison, R., A. Jones, J. Gietl, J. Yin, and D. Green (2012) Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements, *Environmental Science and Technology*, 46, 6523-6529.
- BALL, James E., et al. An investigation of particle size distribution during storm events from an urban catchment. *In: Proceedings of the Second International Symposium on Urban Stormwater Management*. 1995. p. 531-535.
- DRAPPER, D. Road Runoff Water Quality in South-east Queensland. *Progress Report*, July, 1998.

## 미세먼지 제거효율 평가 매뉴얼

### 1. 개요

- 미세먼지 제거 효율 시험은 여과형 시설에 대한 것으로 다양한 형태의 여과형 시설의 적정 가동, 제거 효율 및 성능유지 가능여부에 대한 객관적 확인을 위한 최소한의 시험방법을 규정한다.

### 2. 시험에 필요한 설계인자

- 적용되는 여재의 물리적 특성
  - 여재의 물리적 특성은 입도(KS F 2302), 단위중량(KS F 2308), 투수계수(KS F 2322)에 대한 시험을 통해 상세히 제시하는 것이 바람직하며, 시험은 KS표준을 따른다.
- 저감시설의 제거 효율
  - 유입수와 유출수를 수질오염공정시험기준(환경부 2021)에 따라 부유물질 분석을 시행하며, 아래 식을 활용하여 입자상 물질 제거 효율을 구한다.

$$RE = \frac{C_{\in} - C_{out}}{C_{\in}} \times 100 \quad \text{식 2.1}$$

여기서,  $RE$  제거효율(%)

$C_{\in}$  : 유입수(mL)

$C_{out}$  유출수(mL)

### 3. 미세먼지 여과시험 장비

- 미세먼지 여과시험 장비는 다음과 같은 장치들로 구성되어 있다.
  - 교반 수조(Agitation tank)      - 교반기(Stirrer)
  - 유량조절기(Flow controller)      - 분산주입장치(Driper)
  - 침투셀(Filter cell)      - 유출수 수집 수조(Measuring tank)

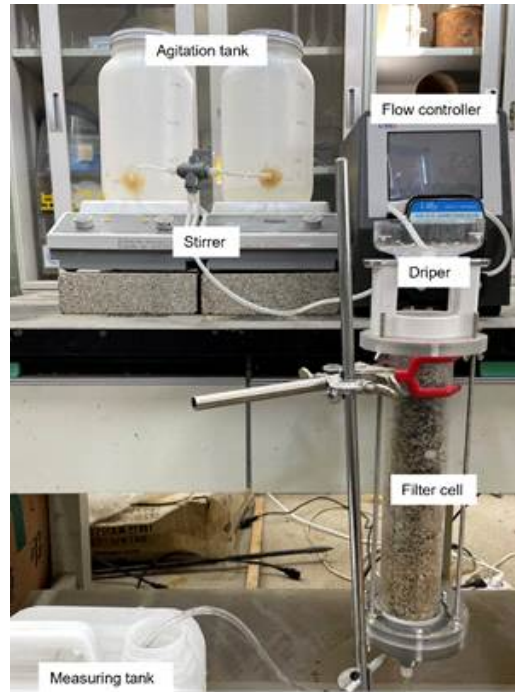


그림 3-1. 미세먼지 여과시험 장비

- ① 교반 수조 : 교반 수조는 청수와 입자상 물질을 혼합해 오염수를 제조하는 역할을 하며, 3 L 수준의 크기로 선정한다.
- ② 교반기 : 교반기는 교반 수조 내에서 청수와 입자상 물질을 교반시켜주는 역할을 한다. 교반 속도는 500 rpm 정도로 하며, 교반 속도가 조절 가능한 장비를 사용하여 교반 수조의 크기에 따라 조절할 수 있도록 한다.
- ③ 유량조절기 : 유량조절기는 시험의 목적에 따라 유량을 임의로 조절할 수 있으며, 임의로 조절된 유량을 일정한 속도로 분산주입장치에 흘려보내는 역할을 한다.
- ④ 분산주입장치 : 분산주입장치는 오염수가 침투셀로 고르게 침투하도록 도와주는 장치이며, 침투셀의 지름에 알맞게 제작한다.
- ⑤ 침투셀 : 침투셀은 여과 시험에 사용 될 여재로 채워진다. 입자상 물질이 여과되도록 충분한 길이를 가져야 하며, 지름 5 cm×높이 30 cm 정도로 한다.
- ⑥ 유출수 수집 수조 : 유출수를 수집하는 수조이며, 시험에 사용되는 오염수의 양에 비례하여 충분한 용량을 가지도록 한다.

## 4. 시험조건 및 시험방법

### 4.1 시험조건

- 유입 농도는 SS 기준으로 200 mg/L 정도로 하여 시험하며, SS 제거 효율이 80% 이상 되는지를 시험을 통해 확인한다. 또한 입자상 물질의 입경은 오염원에 따라 판단하며, 그 예시는 표 4-1와 같다.

표 4-1. 미세먼지 제거효율 시험에 적용하는 입자상 물질의 예시

| 구분 | 입경 (μm) |    |     |
|----|---------|----|-----|
|    | 60      | 10 | 1.8 |

### 4.2 시험방법

- 입자상 물질을 첨가하지 않은 청수를 150 mL/min의 속도로 침투셀에 20분간 흘려보낸다.
- 오염수 제조를 위해 입자상 물질을 교반 수조에 투입하여 500 rpm으로 20분간 교반시킨다.
- 오염수를 유량조절기를 사용하여 침투셀에 150 mL/min의 속도로 흘려보낸 뒤 1분, 10분, 20분, 30분, 40분, 50분, 60분 간격으로 유입수와 유출수를 50mL씩 수집한다.
- 유입수와 유출수에 대한 부유물질 분석을 시행한다.

## 투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 평가 매뉴얼

### 1. 개요

- 투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 시험은 포장체 공극사이에 침투한 물이 기상요인에 의해 동결과 융해를 반복하며 포장체의 강도를 저하시킬 가능성이 있기 때문에 동결융해에 대한 저항성 확보를 위한 시험방법을 규정한다.

### 2. 동결융해 시험기준

- MOLIT (2020)
  - 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침의 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험기준
- KS F 2456 (2018)
  - 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법

### 3. 동결융해 및 강도 시험 장비

- 투수성 폴리머 콘크리트의 동결융해 평가는 다음과 같은 장치들로 구성되어 있다.
  - 공시체 동결융해 시험장비
  - 인장강도 시험장비



그림 3-1. 공시체 동결융해 시험장비



그림 3-2. 인장강도 시험장비

#### 4. 시험조건 및 시험방법

##### ○ MOLIT (2020)

- MOLIT (2020) 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험을 위해 동결융해 전·후에 사용할 공시체를 준비하고, 동결융해에 사용할 공시체는 포화, 수침 과정을 거친 후 수중상태에서  $-18\pm3^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 16시간 이상 냉각한다.

##### ○ KS F 2456 (2018)

- KS F 2456 (2018) 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험을 위해 동결융해 전·후에 사용할 공시체를 준비하고, 동결융해 온도 사이클을 바탕으로 새로운 시험 방법을 설정하였다.
- 동결융해 사이클 온도 범위는  $-18\sim4^{\circ}\text{C}$ 로 동결융해 1사이클당 소요 시간은 총 2시간으로 설정하였다.
- 동결융해 시험 과정에서 항상 공시체의 포화상태를 고려하기 위해 담을 수 있는 용기를 제작하였다.
- 동결융해 온도 사이클은 총 300회를 수행하였으며, 600시간이 소요되었다.

##### ○ 동결융해 전·후 인장강도 시험

- 공시체의 인장강도 시험은 동결융해 전·후에 실시하여 동결융해로 인한 공시체의 인장강도 변화를 측정하였다.
- 인장강도 시험은 KS F 2423 (2016)를 기준으로 진행하였다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi dl} \quad \text{식 2.1}$$

여기서,  $f_{sp}$  인장강도(MPa)

$P$  최대 하중(N)

$d$  공시체 직경(mm)

$l$  공시체 길이(mm)

- 동결융해에 따른 투수성 폴리머 콘크리트의 건전도 변화를 알아보기 위해 동결융해 전·후의 인장강도비(Tensile Strength Ratio, TSR)를 계산하였다.

$$TSR = \frac{f_{sp,treated}}{f_{sp,untreated}} (\times 100)$$

식 2.2

여기서,  $TSR$  인장강도비(%)

$f_{sp,treated}$  동결융해 후 공시체의 평균 인장강도(MPa)

$f_{sp,untreated}$  동결융해 전 공시체의 평균 인장강도(MPa)

## 5. 시험결과

- D100과 D150은 각각 직경 10 cm와 15 cm인 공시체를 나타낸다.
- C는 KS F 2456 (2018) 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법, A는 MOLIT (2020) 배수성 아스팔트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침의 배수성 아스팔트 혼합물의 인장강도 시험기준을 나타낸다.
- 공시체 직경 100 cm, 150 cm에 대해 초기 값의 70% 이상의 수준으로 떨어지는 것으로 나타나 서울시(2010)‘저소음·배수성 아스팔트 콘크리트 포장 품질향상 방안 종합보고서’에 제시된 품질기준을 상회하는 것으로 나타남.

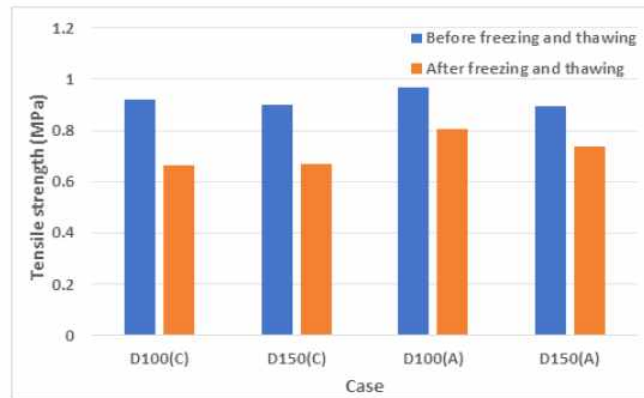


그림 3-3. 인장강도 결과

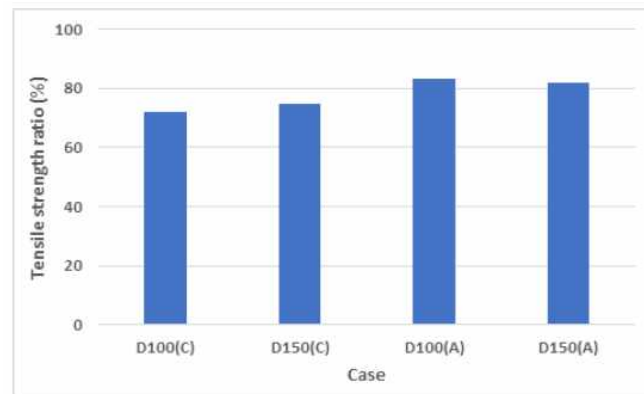


그림 3-4. 인장강도비 결과

## <참고 문헌>

- KS F 2423. (2016). *Standard test method for tensile splitting strength of concrete.*
- KS F 2456. (2018). *Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing.*
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2020). *Guidelines for the production and construction of drainage asphalt concrete pavement.*

## 미세먼지 모니터링 IoT 디바이스 및 플랫폼

### 1. 개요

- 미세먼지 저감형 투수성 포장에 의한 미세먼지 저감효율을 예측하기 위해 실시간 미세먼지량과 미세먼지 발생에 영향을 주는 변수인 기상정보와 교통정보를 수집해야함.
- 실시간 미세먼지량과 기상정보는 이동형 미세먼지 측정 장비를 활용하여 수집함.
- 교통정보를 수집하기 위해 AI보드인 Jetson Xavier 보드를 사용하여 교통량 모니터링 IoT 디바이스를 개발함. 교통정보 측정 시 이동설치에 용이하도록 객체 인식 기술을 활용하여 카메라와 보드만으로 실시간 차량 수와 차량 속도를 파악하고, 해당 정보를 추후 활용 가능하도록 자동으로 저장하는 IoT 디바이스를 개발함.
- IoT 디바이스를 통해 수집된 교통정보와 미세먼지 및 기상정보를 바탕으로 미세먼지 저감형 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지를 개발함으로써 지역별 투수성 포장 설치 효용성을 시각화함.

### 2. 미세먼지량 및 기상정보 측정 시스템

- 실시간 미세먼지량과 기상정보(온도, 습도)는 정확성 향상을 위해 상용 이동형 미세먼지 측정 장비인 Particle plus 8306 모델(그림 1)을 사용. 해당 장비와 이동형 배터리를 활용하여 측정 시스템 구축(그림 2)



그림 1. Particle plus 8306



그림 2. 미세먼지 및 기상정보 측정 시스템

- 해당 장비는 0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0  $\mu m$  등 6종의 미세먼지와 0-60°C 사이의 온도, 0-100% 사이의 습도 측정이 가능함.
- 위 측정 장비를 Wi-Fi로 연결하여 외부에서 접속하고 실시간으로 미세먼지 수치를 확인함. (그림 3, 그림 4)



그림 3. Wi-Fi 연결 시 측정 장비 화면

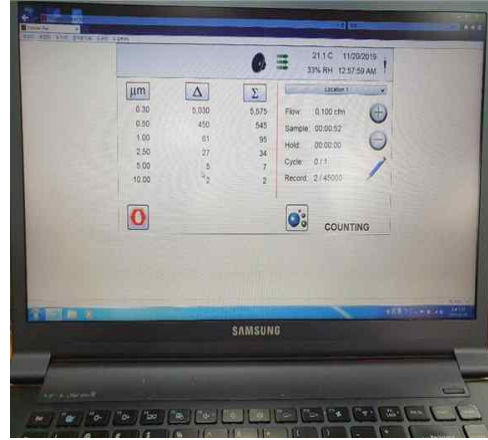


그림 4. 외부에서 접속한 화면

### 3. 교통정보 수집 시스템

#### 3.1 전체 시스템 구조

○ 교통량 모니터링 IoT 디바이스의 전체 시스템 구조(그림 5)

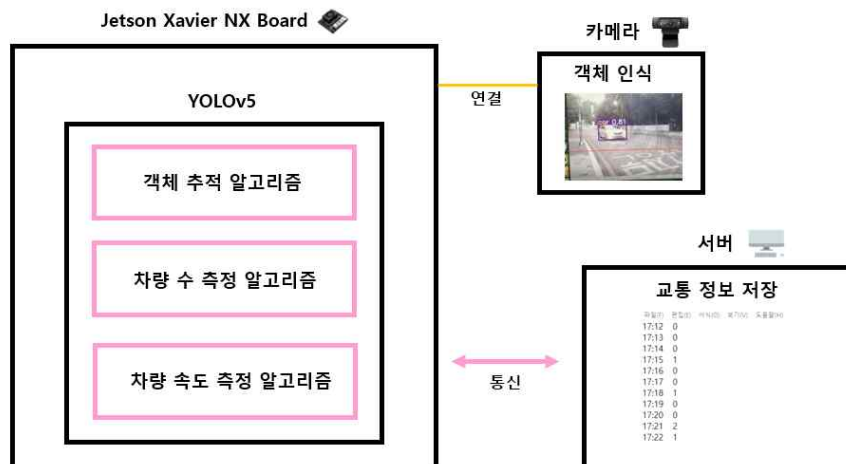


그림 5. 교통량 모니터링 IoT 디바이스 시스템 구조

- 카메라로 촬영한 영상으로부터 객체 인식을 진행하고, 인식된 객체의 이미지에 대해 Jetson 보드의 3가지 알고리즘을 차례로 적용함.
- 측정이 완료되면 서버에 해당하는 PC에 시간과 1분 단위의 차량 수, 차량 속도를 전달하여 서버에서 해당 정보를 txt파일로 저장함.

#### 3.2. 객체 인식 기술

○ YOLOv5

- 카메라와 AI 보드만으로 교통정보를 수집하기 위해 영상 처리 시 객체 인식 기술인 'YOLOv5'를 사용하여 실시간으로 차량을 인식함.
- 'YOLOv5'는 YOLO (You Only Look Once)의 5번째 모델로서 단일 CNN (Convolutional Neural Network) 모델 하나로 특징 추출, Bounding box계산, 클래스 분류를 모두 수행함.

- 하나의 이미지가 입력되면 그리드로 분할 후 Bounding box를 생성하여 box내의 객체에 대해 신뢰 점수 'Confidence Score'와 객체가 해당 class에 속할 확률을 계산함.
- Confidence Score는 수식1과 같이 계산함. 객체가 존재하지 않는다면 0이 되고, 이 때  $Pr(obj)$ 는 객체가 존재할 확률이고 IOU (Intersection Over Union)는 교차 겹침 결합이라는 뜻으로 실제로 객체가 존재하는 box와 객체가 존재할 것이라 예측한 box가 겹치는 부분의 비율을 의미함.

$$Confidence\ Score = Pr(Obj) * IOU$$

수식 32. Confidence Score 계산

- 계산한 값들을 각 그리드에 부여하여 곱하고 그 결과가 설정한 threshold 값 이상이면 해당 객체라고 판단함.

### ○ YOLOv5 버전

- YOLOv5 모델에는 그림 6과 같이 s, s6, m, m6, l, l6, x, x6 버전이 있으며 s버전으로 갈수록 인식 속도는 빠르지만 정확도가 떨어지고, l버전으로 갈수록 인식 속도는 느리지만 정확도가 높다는 특징이 있음.

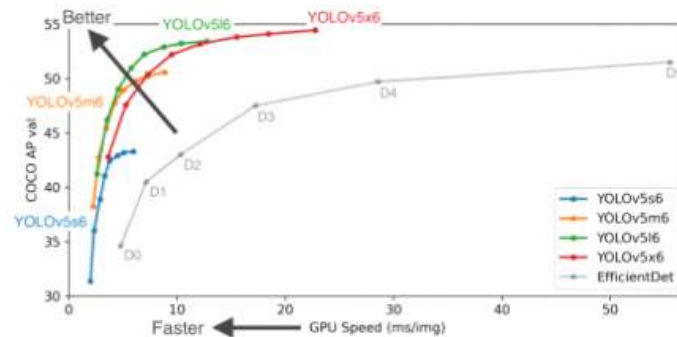


그림 6. YOLOv5 모델 버전 간 비교 그래프

## 3.3. 객체 추적 알고리즘

### ○ DeepSORT 알고리즘(그림 7)

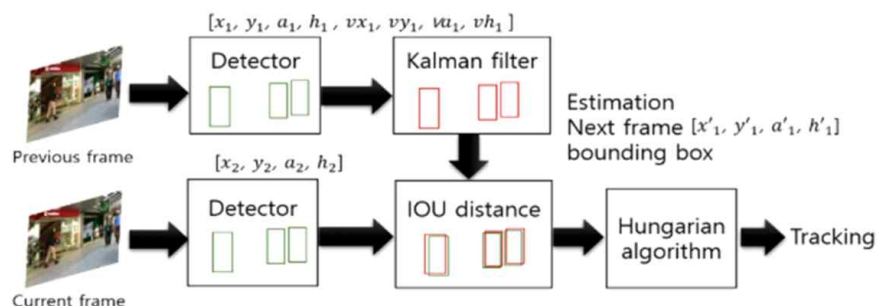


그림 7. DeepSORT 알고리즘 동작 그림

- YOLOv5만을 사용한 객체 인식 시 프레임이 바뀌면 동일 객체를 다른 객체라고 판단하는 문제가 있음. 따라서 프레임간 차량 구분을 위해 객체 추적 알고리즘 중 동일 객체 판단 시 딥러닝 기반 정보를 활용하는 'DeepSORT' 알고리즘을 사용함.
- DeepSORT 알고리즘에서는 이전 프레임에서 탐지된 객체의 위치 정보를 Kalman filter에 적용

하여 해당 객체의 다음 위치를 예측하고, 다음 프레임에서 현재 탐지된 객체와 이전 프레임에서 예측한 객체의 IOU distance를 계산함.

- 계산된 IOU distance를 Hungarian 알고리즘에 적용하여 이전과 동일 객체인지 판단하여 객체 정보를 업데이트함.
- 업데이트된 이미지를 바탕으로 입력 이미지에 대한 전체 특징을 묘사하는 벡터인 Feature Vector를 적용하여 객체가 가려져 추적되지 않는 문제를 해결함.
- DeepSORT 알고리즘을 통해 구분된 객체에 고유 번호인 ID를 할당하고 해당 ID는 저장되어 차량 수 및 차량 속도 측정 시 사용함.

### 3.4. 차량 수 및 차량 속도 측정 알고리즘

#### ○ 차량 수 측정 알고리즘(그림 8)

- 일정 크기 이상의 차량을 인식하기 위해 기준선을 설정하여 Bounding box의 중점이 기준선 아래에 있으면 측정되는 방식으로 동작.
- 이전 프레임에서 측정된 차량 번호를 배열에 저장하여 현재 프레임에서 인식된 번호와 비교하여 한 번 측정된 차량이 중복 측정되지 않도록 함.
- 측정된 차량 수는 1분 단위로 txt파일에 저장하여 추후 정보를 활용 가능하도록 함.

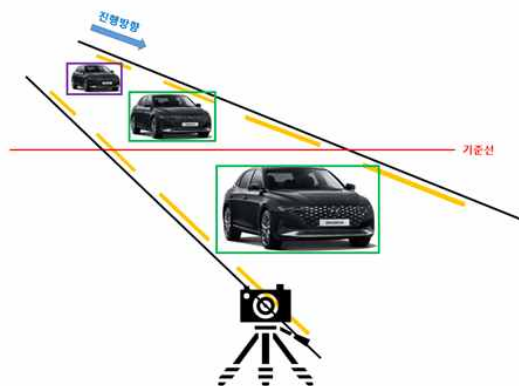


그림 8. 차량 수 측정 알고리즘 동작 방식

#### ○ 차량 속도 측정 알고리즘(그림 9)

- 차량 속도 측정을 위해서는 차량이 이동한 거리와 시간이 필요하므로 두 개의 기준선을 설정함.
- 인식된 Bounding box의 중점이 첫 번째 기준선을 통과하면 객체 추적을 통해 생성된 차량의 ID와 그 때의 시간을 저장함.
- 첫 번째 기준선을 통과한 차량이 두 번째 기준선을 통과했을 때 걸린 시간을 측정하여 수식2를 통해 속도를 계산함.

$$\text{차량속도}(km/h) = \text{두기준선사이의거리}(km) / \text{걸린시간}(h)$$

수식 33. 차량 속도 측정 수식

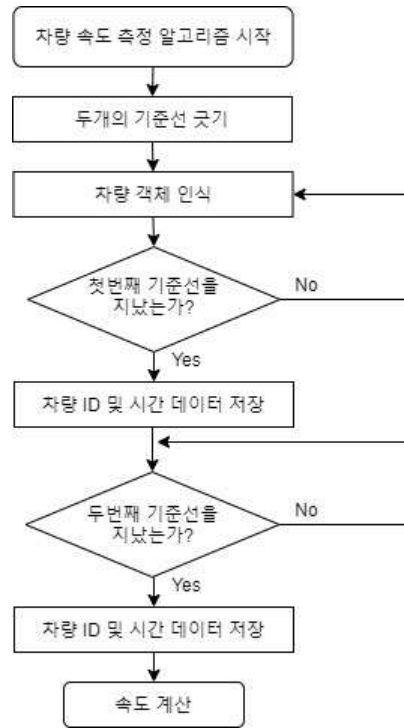


그림 9. 차량 속도 측정 알고리즘 흐름도

### 3.5. 교통정보 시각화

#### ○ 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지

- 웹페이지 전체 동작 구조(그림 10)



그림 10. 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지 전체 동작 구조

- 웹페이지 메인 화면 구성을 위해 React 라이브러리를 사용하며, 구글 맵 API를 통해 지도를 호출해 지도상의 위치를 클릭하거나 주소를 입력했을 때, 해당 위치 정보를 서버에 넘겨줌.
- 서버는 자바스크립트 언어를 사용하는 소프트웨어 플랫폼인 Node.js로 개발되었으며, 웹페이지에서 전달받은 위치 정보를 바탕으로 Air Korea와 기상청 API를 사용해 해당 지역의 미세먼지와 기상 정보를 불러와 AI 모델 서버에 넘겨줌.
- AI 모델 서버는 파이썬 언어를 사용하는 웹 프레임워크인 Flask를 사용하여 서버로부터 미세먼지 정보 및 기상 정보를 받아 미세먼지 저감효율 예측 딥러닝 모델에 적용함.
- AI 모델에서 예측한 미세먼지 저감효율 정보를 서버를 거쳐 웹페이지로 전달하여 해당 지역에 미세먼지 저감형 투수성 포장을 설치했을 때의 예측 미세먼지 예측 미세먼지 저감도를 그래프로 보여줌.

#### 4. 실험결과 및 활용

##### ○ 미세먼지량 및 기상정보 수집

- 그림 2의 미세먼지 및 기상정보 모니터링 시스템 2기를 구축하여 투수성 포장과 일반 포장이 근 거리에 위치하고 있는 부산 광안리(2020.4.20., 2020.5.14.) 경남 합천군청(2020.8.3.)에서 3회에 걸쳐 데이터를 수집함.

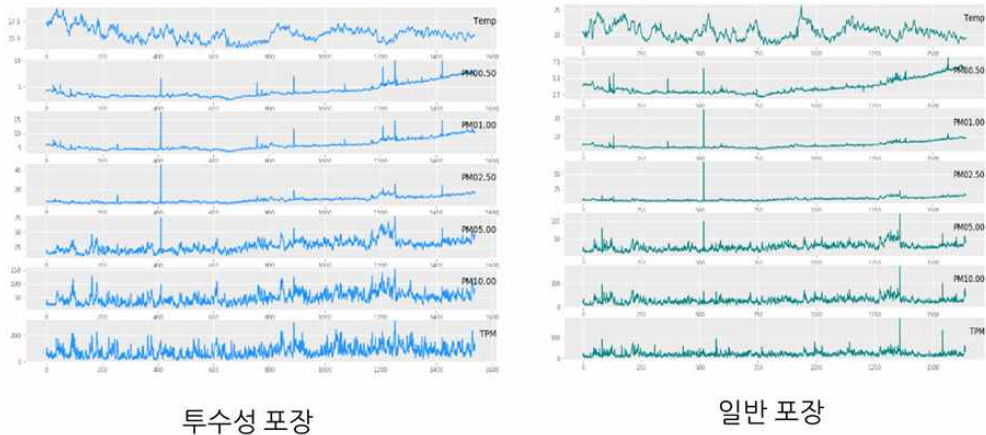


그림 11. 부산 광안리 투수포장 구간



그림 12. 경남 합천군청 투수포장 구간

- 10초 단위로 데이터를 수집하여 일반 포장과 투수성 포장에서의 미세먼지량 변화 추이를 살펴봄.



투수성 포장

일반 포장

그림 13. 미세먼지량의 시간별 변화 추이

일반 포장과 투수성 포장의 미세먼지량과 온도 및 습도 정보를 통계 처리하여 미세먼지 발생량 예측 알고리즘에 활용함.

## Normal pavement data

|       | Temp        | PM00.50     | PM01.00     | PM05.00     | PM10.00     | TempF       | TPM         | PM02.50     |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| count | 7387.000000 | 7387.000000 | 7387.000000 | 7387.000000 | 7387.000000 | 7387.000000 | 7387.000000 | 7387.000000 |
| mean  | 26.610979   | 20.834742   | 48.730412   | 83.298573   | 100.553143  | 79.899762   | 117.881239  | 55.808075   |
| std   | 2.952153    | 2.701074    | 16.183916   | 22.461684   | 26.928699   | 5.313876    | 33.053910   | 17.311750   |
| min   | 22.300000   | 13.530000   | 19.750000   | 36.410000   | 40.800000   | 72.140000   | 42.900000   | 23.980000   |
| 25%   | 24.400000   | 19.640000   | 36.055000   | 66.455000   | 80.480000   | 75.920000   | 95.040000   | 42.570000   |
| 50%   | 25.600000   | 21.240000   | 47.350000   | 84.480000   | 101.130000  | 78.080000   | 114.010000  | 54.470000   |
| 75%   | 29.000000   | 22.925000   | 61.060000   | 97.145000   | 118.160000  | 84.200000   | 139.365000  | 67.675000   |
| max   | 34.300000   | 55.640000   | 99.630000   | 158.050000  | 244.320000  | 93.740000   | 534.800000  | 117.230000  |

## Porous pavement data

|       | Temp        | PM00.50     | PM01.00     | PM05.00     | PM10.00     | TempF       | TPM         | PM02.50     |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| count | 7388.000000 | 7388.000000 | 7388.000000 | 7388.000000 | 7388.000000 | 7388.000000 | 7388.000000 | 7388.000000 |
| mean  | 25.784434   | 20.552393   | 54.156655   | 91.384903   | 109.225305  | 78.411982   | 128.575826  | 61.657895   |
| std   | 3.056358    | 2.563953    | 17.145129   | 23.554501   | 27.590428   | 5.501444    | 33.495250   | 18.614258   |
| min   | 21.200000   | 13.590000   | 22.610000   | 42.000000   | 46.340000   | 70.160000   | 46.340000   | 27.430000   |
| 25%   | 23.500000   | 19.470000   | 40.790000   | 73.580000   | 89.115000   | 74.300000   | 105.947500  | 47.457500   |
| 50%   | 24.700000   | 20.870000   | 54.170000   | 93.520000   | 111.095000  | 76.460000   | 126.425000  | 61.530000   |
| 75%   | 28.200000   | 22.600000   | 67.540000   | 106.112500  | 127.940000  | 82.760000   | 150.380000  | 74.680000   |
| max   | 36.600000   | 32.500000   | 93.330000   | 162.950000  | 195.680000  | 97.880000   | 518.500000  | 122.770000  |

### ○ 교통량 모니터링 IoT 디바이스 측정

#### • 차량 수 측정

그림 14와 같이 인식된 차량이 객체 추적 알고리즘을 거쳐 ID를 부여받아 인식 box 좌측 상단에 표시되고, 기준선을 통과한 차량들의 대수가 화면 좌측 상단에 잘 표시되는 것을 확인함.

또한 측정된 시간과 1분간 지나간 차량 수가 그림 15처럼 txt파일로 잘 저장됨을 확인함.



그림 14. 차량 수 측정 화면

2021-09-22 - Windows 메모장

| 파일(F) | 편집(E) | 서식(O) | 보기(V) | 도움말(H) |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| 17:12 | 0     |       |       |        |
| 17:13 | 0     |       |       |        |
| 17:14 | 0     |       |       |        |
| 17:15 | 1     |       |       |        |
| 17:16 | 0     |       |       |        |
| 17:17 | 0     |       |       |        |
| 17:18 | 1     |       |       |        |
| 17:19 | 0     |       |       |        |
| 17:20 | 0     |       |       |        |
| 17:21 | 2     |       |       |        |
| 17:22 | 1     |       |       |        |
| 17:23 | 0     |       |       |        |

그림 15. 측정된 차량 수 저장 화면

#### • 차량 속도 측정

개발한 IoT 디바이스를 사용하여 속도를 측정한 결과 그림 16과 같이 측정 속도 와 실제 속도 간의 오차가 약 2-7 km/h로 측정되어 허용 오차 범위 내의 정확 도인 것으로 판단됨.

| 차량 번호 | 실제 속도(km/h) | 측정 속도(km/h) | 오차(km/h) |
|-------|-------------|-------------|----------|
| 13    | 21.5722     | 24.6986     | 3.126    |
| 21    | 23.0361     | 26.0172     | 2.986    |
| 39    | 20.3611     | 13.7983     | 6.563    |
| 49    | 21.6359     | 25.638      | 4.002    |
| 87    | 27.6957     | 29.8913     | 2.196    |
| 101   | 19.9794     | 23.0491     | 3.069    |
| 123   | 22.9746     | 15.7365     | 7.238    |

그림 16. 차량 속도 측정 결과표

## ○ 미세먼지 예측 웹페이지

- 구현된 웹페이지의 메인 화면(그림 17)과 지역 선택화면(그림 18)

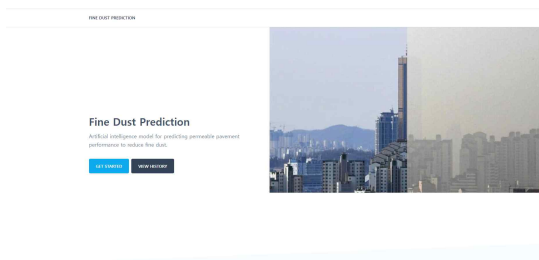


그림 17. 웹사이트 메인 화면

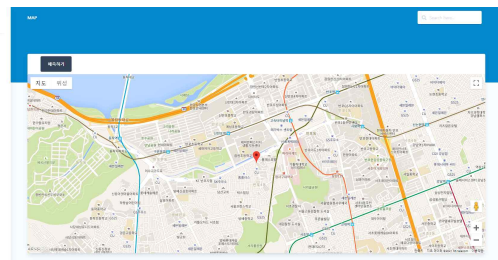


그림 18. 예측할 지역 선택 화면

- 지역 선택 후 딥러닝 모델을 거친 예측 그래프 화면(그림 19)

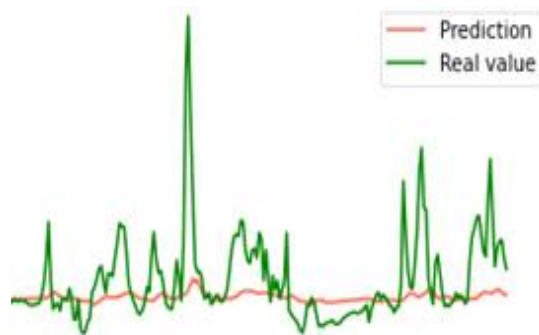


그림 19. 도출된 미세먼지 예측 그래프

## ○ 결론 및 활용방안

- 본 연구에서 목표로 하는 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율 예측을 위해 측정 장비 및 API로부터 미세먼지 농도, 기온, 습도, 풍속, 교통량 정보를 수집했으며, IoT 디바이스를 통해 교통정보를 수집함으로써 총 시스템 계측 인자 수 5개 설정.
  - ✓ 미세먼지 농도: 미세먼지 발생의 분석과 예측을 위해서는 과거 오랜 기간의 미세먼지 발생 추세를 확인할 필요가 있어서 에어코리아([www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr))의 데이터와 미세먼지 측정 장비로 직접 측정한 데이터를 수집
  - ✓ 습도: 공기 중의 물방울은 먼지와 달라붙어 지표면으로 내려앉음으로써 공기 중 미세먼지의 양을 줄일 수 있는 확률이 높아질 수 있다고 생각하여 기상청([www.weather.go.kr](http://www.weather.go.kr)) 사이트로부터 획득한 과거 정보와 습도 센서로 직접 측정한 데이터를 수집
  - ✓ 기온: 기온은 공기의 흐름과 관련이 있고 습도와도 관련성이 높은 지표여서 습도와 마찬가지로 기상청([www.weather.go.kr](http://www.weather.go.kr)) 사이트로부터 획득한 과거 정보와 온도 센서로 직접 측정한 데이터를 수집
  - ✓ 풍속: 바람이 강하면 공기 중 먼지를 멀리 날려버릴 수 있으므로 기상청([www.weather.go.kr](http://www.weather.go.kr)) 사이트로부터 정보를 수집
  - ✓ 교통 정보: 특정 지역의 미세먼지량은 앞서 수집한 여러가지 환경 값도 영향을 미치겠지만 주변에 분포하는 공장이나 교통량이 크게 영향을 미칠 것으로 생각하였고, 특히 본 연구팀이 실험한 지역이 도로 바로 옆이라는 것을 감안했을 때 교통 정보가 필수적이라고 판단하였음. 이에 직접 구현한 영상 처리 기술 기반 차량 수 자동 계수 및 속도 측정 프로그램을 IoT 장치에 탑재하여 데이터를 수집
- 본 연구에서 개발한 교통량 측정 IoT 디바이스는 센서를 이용하는 기존의 교통량 측정 장비와 달리 카메라와 AI 보드만으로 실시간 교통 정보를 얻을 수 있다는 점에서 높은 효율을 발휘함. 특히 경제적 부담감을 덜어줄 뿐만 아니라 설치 시에 전문인력이 필요하지 않고, 어떤 장소에서나 용이하게 설치 및 사용이 가능하므로 향후 활용 가치가 높음.
- 본 연구에서 개발한 미세먼지 저감효율 예측 웹페이지는 검증된 API와 측정 장비를 통해 다양하게 수집된 데이터와 AI 모델의 예측 정확도를 바탕으로 신뢰성 있는 정보를 획득할 수 있음. 또한 수치가 아닌 그래프로 시각화함으로써 지역별 투수성 포장에 대한 미세먼지 저감효율을 직관적으로 보여주어 투수성 포장의 효용성을 더욱 증대시킴.

## <참고 문헌>

- 양수진, 정인화, 강동화, 백형부 (2021), "SORT와 DeepSORT의 혼합을 이용한 실시간 다중객체 추적", Journal of KIIT, Vol. 19, No. 10, pp. 1-9
- 이용환, 김영섭 (2020), "객체 검출을 위한 CNN과 YOLO 성능 비교 실험", 반도체디스플레이기술학회지, Vol. 19, No. 1
- Flask, <https://flask.palletsprojects.com/en/2.0.x/>
- Node.js, <https://nodejs.org/ko/docs/guides/>
- YOLOv5, <https://github.com/ultralytics/yolov5>

## 투수성 포장 내 미세먼지 저감 최적 필터

### 1. 개요

- 투수성포장으로 흘러 들어가는 비점오염물질 중 미세먼지와 같은 입자상 물질은 포장체 내부 공극을 막아 폐색현상이 발생할 수 있기 때문에 투수성 포장시스템은 투수지속성을 검증할 필요가 있음.
- 본 연구에서는 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템을 구성하는 여재 필터의 성능을 알아보기 위해, 석탄 저회-규사 여재에 대한 입자상 물질 제거 효율을 평가하기 위하여 폐색 입자와 청수를 혼합하고 지속적인 시험수 제조 및 공급을 위한 교반장치, 교반장치로부터 분사되는 시험수를 내부에 마련된 투수포장시료에 투수시켜 폐색 성능시험을 수행하는 투수포장 시료부, 그리고 투수성능이 측정되는 측정조를 이용한 미세먼지 저감형 투수성포장의 투수성능, 폐색효과, 농도측정 등의 다양한 성능을 평가하고 시험 방법 및 결과를 설명하였음.

### 2. 표준 미세먼지 교반기법 설정

#### 2.1. 시험재료

- 투수성포장의 투수성능, 폐색효과, 농도측정 등의 실험을 위해 투수계수시험, 다짐시험, 제거 효율 시험을 진행하였으며, 표 2-1의 여재를 사용함.

표 2-1. 시험에 사용한 여재

| 여재   | 배합 비율 (%) |     |
|------|-----------|-----|
|      | 석탄 저회     | 규사  |
| A00  | 0         | 100 |
| A50  | 50        | 50  |
| A100 | 100       | 0   |
| A30  | 30        | 70  |
| A50  | 50        | 50  |
| A70  | 70        | 30  |

#### 2.2 시험장치 및 방법

- TSS 제거 효율 시험
  - 별첨 성과 3의 시험장치 및 절차를 통해 시험을 수행함.
  - 교반장치를 이용하여 60  $\mu\text{m}$ 이하의 입자상물질과 청수를 교반하고, 이 장치로부터 분사되는 시험수를 투수성포장 시료에 투수시켜 투수 성능 및 농도를 측정.
- 미세먼지 제거 효율 시험
  - 별첨 성과 3의 시험장치 및 절차를 통해 시험을 수행함.
  - 교반장치를 이용하여 60  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 1.8  $\mu\text{m}$ 의 입자상물질과 청수를 교반하고, 이 장치로부터 분사되는 시험수를 투수성포장 시료에 투수시켜 투수 성능 및 농도를 측정.

### 3. 시험 결과

- 제거 효율 시험은 여재 비율 구성에 따른 제거 효율과 입자상 물질 크기에 따른 제거 효율로 나누어 진행.
- 진동다짐시험 결과

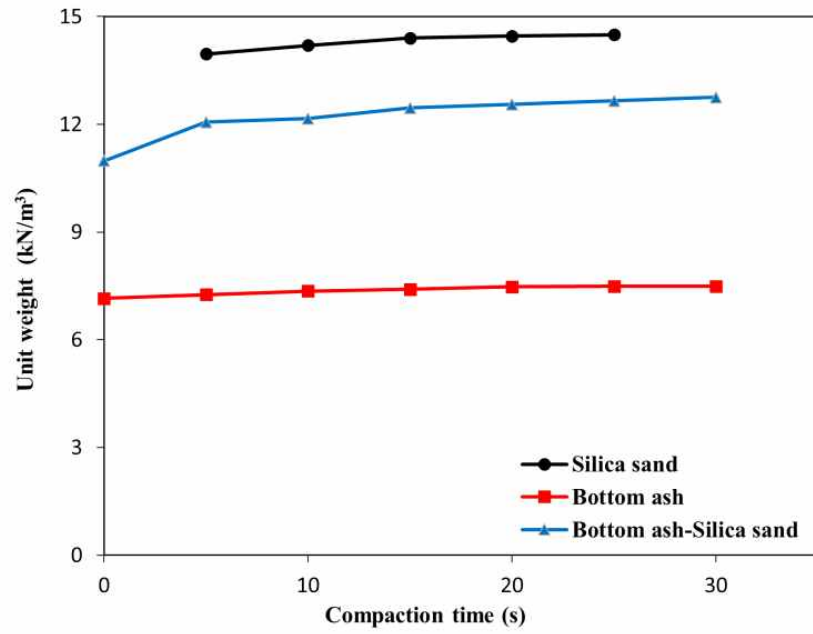


그림 3-1. 진동다짐 시간에 따른 여재의 단위중량 (A00 : Silica sand, A50 : Bottom ash-Silica sand, A100 : Bottom ash)

○ TSS 제거 효율

- A00, A50, A100 시료 결과 비교

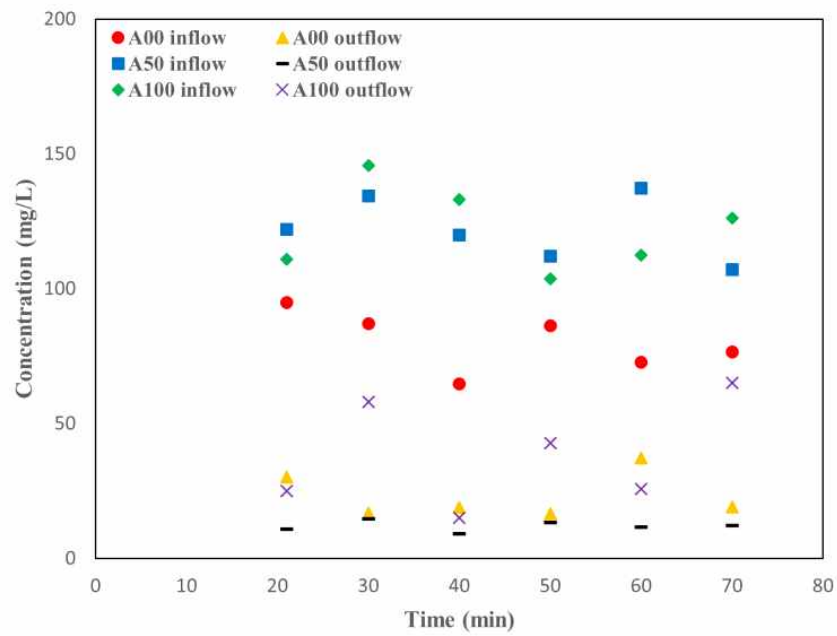


그림 3-2. 유입수 유출수 농도

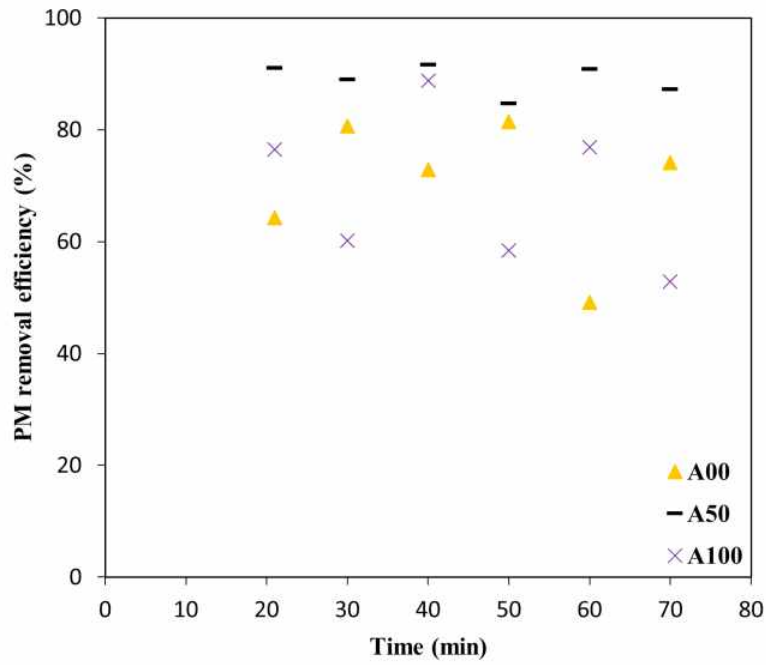


그림 3-3. 제거 효율

- ① A00의 평균 TSS 제거 효율은 71%
- ② A50의 평균 TSS 제거 효율은 92%
- ③ A100의 평균 TSS 제거 효율은 69%

- A30, A50, A70 시료 결과 비교

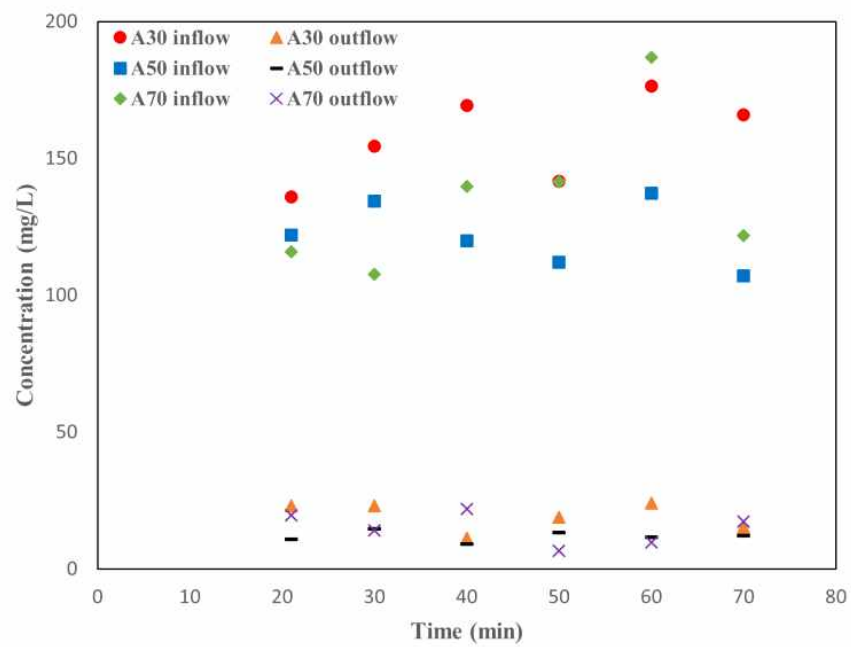


그림 3-4. 유입수 유출수 농도

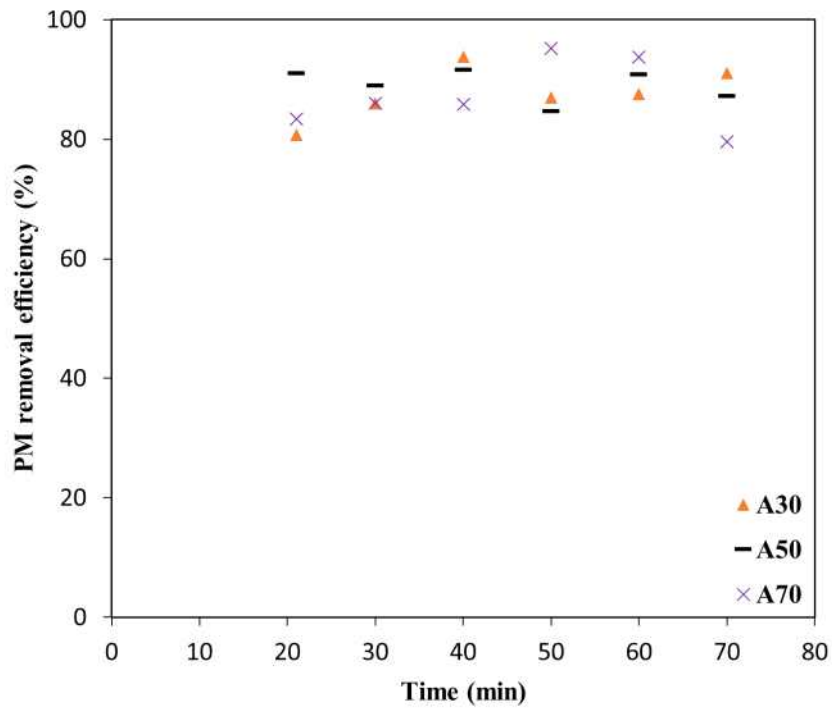


그림 3-5. 제거 효율

- ① A30의 평균 TSS 제거 효율은 88%
- ② A50의 평균 TSS 제거 효율은 92%
- ③ A70의 평균 TSS 제거 효율은 88%

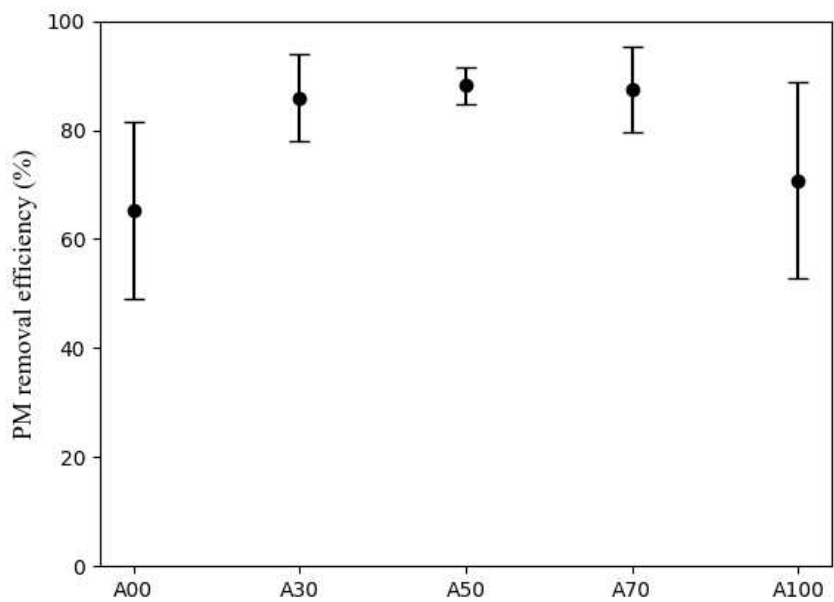


그림 3-6. 제거 효율에 대한 오차막대 그래프

○ 미세먼지 제거 효율

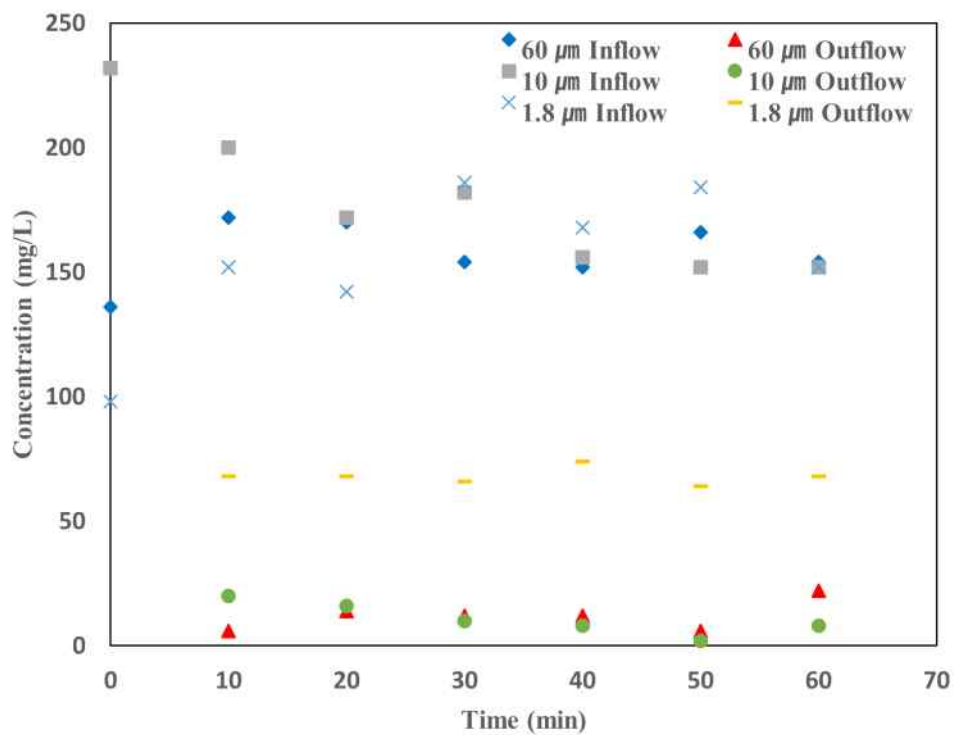


그림 3-7. 유입수 유출수 농도

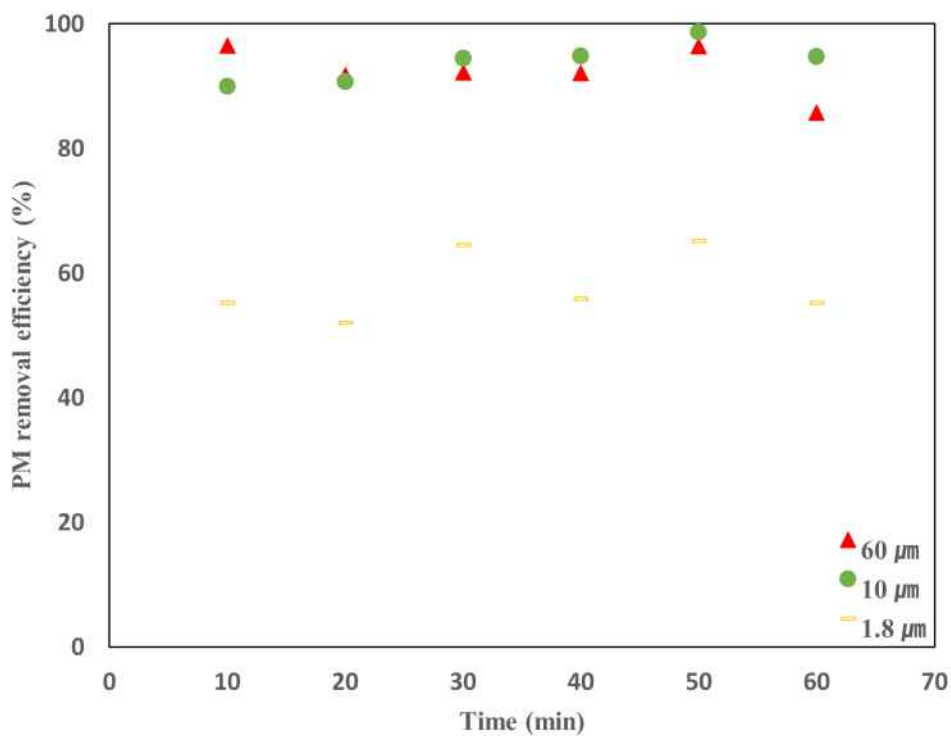


그림 3-8. 제거 효율

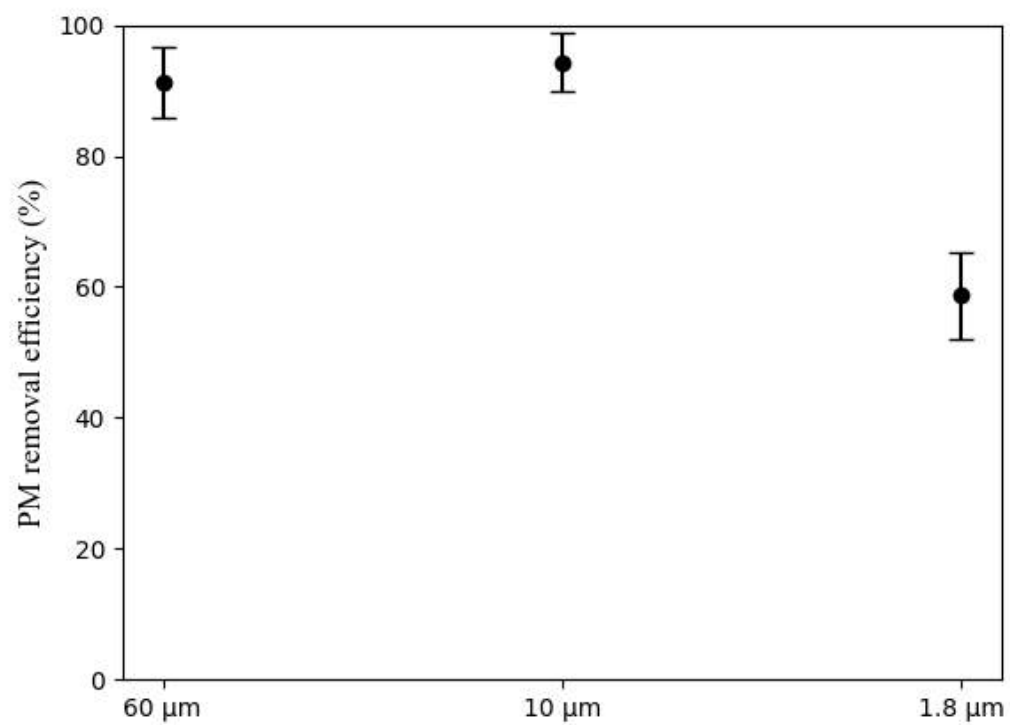


그림 3-9. 제거 효율에 대한 오차막대 그래프

#### 4. 요약 및 결론

여재 필터의 성능을 알아보기 위해 석탄 저회-규사 여재에 대한 입자상 물질 제거 효율을 분석하였음. 제거 효율 시험은 여재 비율 구성에 따른 제거 효율과 입자상 물질 크기에 따른 제거 효율로 나누어 진행하였으며, 여재 비율 구성에 따른 제거 효율의 경우 A00, A30, A50, A70, A100 총 5가지 여재로 시험을 하였음. 입자상 물질 크기에 따른 제거 효율의 경우 A50 혼합 여재에 60  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 1.8  $\mu\text{m}$  크기인 3가지 입자상 물질을 여과시켜 제거 효율을 알아보았고 시험 결과 다음과 같은 결론을 도출하였음.

- ① 석탄 저회-규사 혼합 여재의 미세입자 여과 성능에 따른 TSS 제거 효율을 알아보기 위해 석탄 저회-규사를 동일한 시간으로 다집했을 때의 규사, 석탄 저회, 석탄저회-규사 5:5 혼합여재의 TSS 제거효율을 비교하였고, 그 결과는 다음과 같음.

| 여재 종류   | A00 | A50  | A100 |
|---------|-----|------|------|
| 제거효율(%) | 71  | 92   | 69   |
| 규사대비성능  | 1.0 | 1.30 | 0.96 |

석탄 저회-규사 여재의 비율에 따른 입자상 물질 제거 효율시험 중 A00, A50, A100는 제거효율 평균값이 각각 71%, 92%, 69%로 혼합 여재인 A50의 제거 효율이 가장 좋은 성능을 보여주었다. 혼합 여재의 제거효율은 규사의 제거효율인 보다 약 30% 높은 효율을 보이고, 석탄 저회의 제거효율과 비교하면 약 34% 높은 효율을 보임.

- ② 5:5 혼합여재와 같은 단위중량의 여재 별 TSS 제거효율을 알아보기 위해 석탄 저회-규사의 혼합 비율을 3:7, 5:5, 7:3으로 나누어 TSS 제거 효율을 알아보았으며 그 결과는 다음과 같음.

| 혼합여재 종류 | A30  | A50  | A70  |
|---------|------|------|------|
| 제거효율(%) | 88   | 92   | 88   |
| 규사대비성능  | 1.24 | 1.30 | 1.24 |

혼합여재의 성능을 자세하게 알아보하고자 실시한 A30, A50, A70는 제거효율 평균값이 각각 88%, 92%, 88%로 A50이 상대적으로 더 높은 제거 효율을 보였으나, 제거 효율은 저회와 규사의 비율에 크게 민감하지는 않은 것으로 나타났음.

- ③ 여재의 침투 능력을 분석하기 위해 정수위 시험을 통해 여재별 투수계수를 산정하였으며 결과는 아래와 같음.

| 혼합여재<br>종류       | A00   | A30   | A50   | A70   | A100  |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 투수계수<br>(mm/sec) | 5.762 | 5.498 | 4.841 | 4.258 | 8.670 |

- ④ 저회-규사의 5:5 혼합 여재를 바탕으로, 60  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 1.8  $\mu\text{m}$ 크기의 입자상 물질에 대해, 제거 효율을 분석하였으며 결과는 아래와 같음.

|                             |    |    |     |
|-----------------------------|----|----|-----|
| 입자상 물질<br>( $\mu\text{m}$ ) | 60 | 10 | 1.8 |
| 제거효율(%)                     | 92 | 93 | 58  |

입자상 물질 제거 효율은 60  $\mu\text{m}$ 와 10  $\mu\text{m}$ 는 90% 이상으로 매우 우수한 성능을 보이며, 초미세먼지 수준의 입자인 직경 1.8  $\mu\text{m}$ 의 입자상 물질에 대해서는 60% 수준의 제거 효율을 가지는 것으로 나타남.

## 미세먼지 교반 및 분사장치 제작품

- 본 연구에서는 미세먼지 입자 수준의 입자상 물질 제거 효율 평가를 위한 소용량 교반장치를 구성하고 성능을 평가함. 본 별첨 자료에는 TSS 입자의 교반을 위한 대용량 교반장치와 미세먼지 입자 제거 효율 평가를 위해 구성한 소용량 교반장치의 교반성능을 모두 평가하고 제시함.

### 1. 교반장치의 구성

#### 1.1. 1000 L 대용량 교반장치

- 교반장치는 교반수조(Agitation tank), 임펠러(Impeller)로 구성되어 있다. 교반수조의 최대 용량은 1000 L이며, 측면에 설치된 수위기록계로 수조 내 오염수의 양을 외부에서 파악할 수 있다. 또한 교반장치의 컨트롤 패널을 통해 교반 속도를 최대 400 rpm까지 조절할 수 있다.



그림 1-1. 1000 L 대용량 교반장치

## 1.2. 3 L 소용량 교반장치

- 교반장치는 교반수조(Agitation tank), 교반기(Stirrer)로 구성되어 있다. 교반수조의 최대 용량은 3 L이며, 입자상 물질과 청수를 혼합해 오염수를 제조한다.

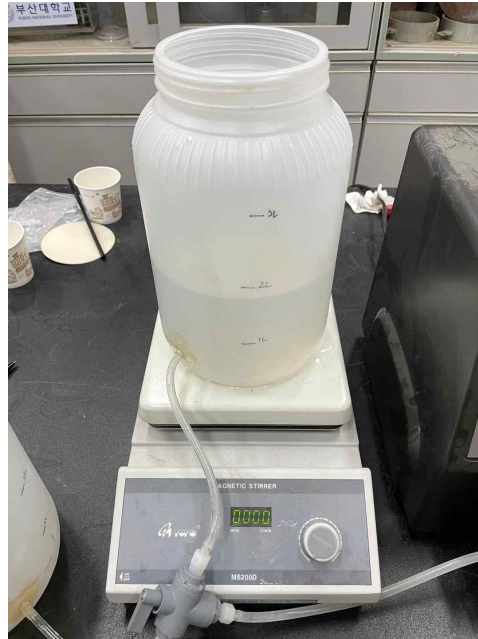


그림 1-3. 3 L 소용량 교반장치

- 소용량 교반장치에 사용되는 입자상 물질은 대용량 교반장치에 사용되는 입자상 물질에 비해 입경이 작다. 따라서 미세한 입자상 물질의 고른 주입을 위해 일정한 속도로 회전하며 셀 전체에 고르게 분사가 가능한 그림 1-4의 분산주입장치를 사용하여 고르게 분사한다.



그림 1-4. 분산주입장치

## 2. 교반 절차

### 2.1. 1000 L 대용량 교반장치

- 교반수조를 깨끗히 세척한 후 물을 채운다.
- 오염수 제조를 위해 입자상 물질을 교반수조에 투입하여 270 rpm으로 30분간 교반시킨다.



그림 2-1. 1000 L 대용량 교반장치의 교반과정

## 2.2. 3 L 소용량 교반장치

- 교반수조를 깨끗이 세척한 후 물을 채운다.
- 오염수 제조를 위해 입자상 물질을 교반수조에 투입하여 500 rpm으로 20분간 교반시킨다.

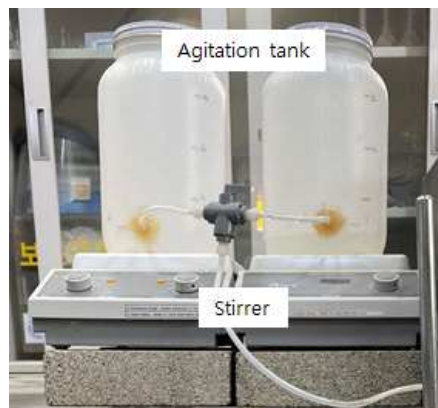


그림 2-2. 3 L 소용량 교반장치의 교반과정

## 3. 교반 결과

### 3.1. 1000 L 대용량 교반장치

- 교반장치를 사용하여 미세입자와 청수를 혼합하였으며, 투입한 미세입자에 대한 교반장치의 교반 효율을 조사하였다.
- 교반 결과, 교반수 농도 오차는 25% 이내를 달성하였으며, 그림 3-1에 나타내었다.

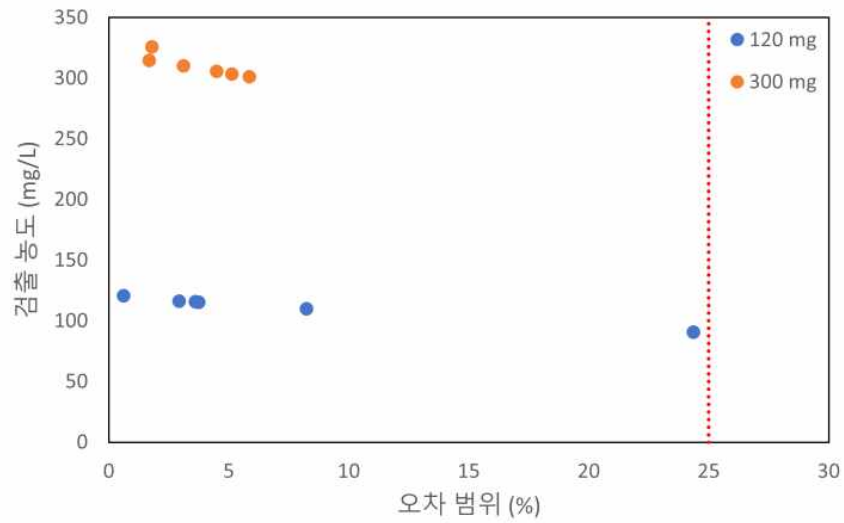


그림 3-1. 교반수 농도오차

### 3.2. 3 L 소용량 교반기

- 교반장치를 사용하여 미세입자와 청수를 혼합하였으며, 투입한 미세입자에 대한 교반장치의 교반 효율을 조사하였다.
- 교반 결과, 교반수 농도 오차는 25% 이내를 달성하였으며, 그림 3-2에 나타내었다.

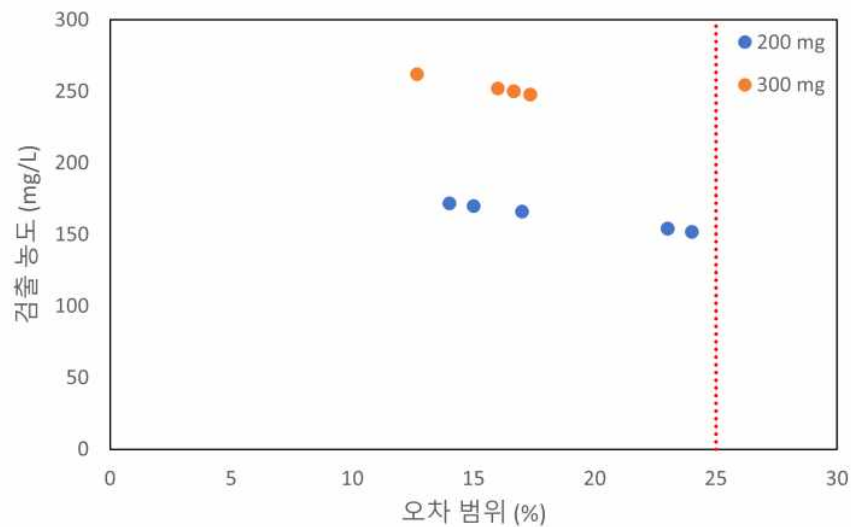


그림 3-2. 교반수 농도오차

## <참고 문헌>

- 안재훈, Maricris Jalmasco, 신현석, 정종원 (2017). “투수성 포장재의 투수특성을 평가하기 위한 시험장비 및 시험절차의 개발.” *한국방재학회논문집*, 17(6), 359~365.
- 안재훈과 신현석 (2018). “폐색을 고려한 투수성 포장재 및 기층재료의 비선형 투수특성 시험장비.” *특허청*, 특허 제 10-1900706 호.
- 이윤제 (2020). “공극 폐색을 고려한 투수블록포장 시스템의 투수계수 실험적 평가.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
- 이재응, 여운광, 심재현, 강태호 (2001). “투수성 포장재를 사용한 호우시 우수유출 저감효과 분석.” *대한토목학회논문집*, 21(6A), 645~654.
- 전상미 (2016). “투수성 포장의 수문학적 침투특성에 관한 연구.” 학위논문(석사), 인제대학교 대학원.
- 정덕호 (2019). “정수위 고형물 부하시험을 이용한 투수성 포장의 투수성과 TSS 저감 효율에 관한 연구.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
- 정향선 (2017). “투수성 포장-지반 시스템의 투수성능평가 장비개발 및 검증.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
- 김건 (2012). “부산대 LID 실증단지내 투수포장재의 현장투수성능 분석 및 평가 연구.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.
- 김형원 (2016). “투수성 포장-지반 시스템을 위한 침투계의 개발과 적용.” 학위논문(석사), 부산대학교 대학원.

## 미세먼지 저감효율예측 AI 알고리즘

### 1. 개요

- 본 연구의 목적은 미세먼지 저감형 투수성 포장에 따른 미세먼지 저감 효율을 평가하는 AI 모델을 만드는 것임. 이를 위해 여러 가지 미세먼지 데이터를 수집하고, 기상정보와 교통정보를 수집하여 이를 토대로 미래의 미세먼지 수치를 예측하는 AI 모델을 개발함.
- 수집된 미세먼지 및 기상정보, 교통정보를 바탕으로 오픈소스 딥러닝 프레임워크인 텐서플로우(TensorFlow)를 사용하여 정확한 미세먼지 수치를 예측하는 AI 모델을 개발함.
- 이와 같은 결과물을 통해 딥러닝 알고리즘이 미래의 미세먼지 수치를 충분히 예측할 수 있음을 보여줌으로써 본 연구의 주 목적인 투수성 재료를 이용한 도로포장 환경에 따른 미세먼지 저감효과를 평가하는 AI 모델을 만드는 문제에 있어서도 딥러닝 알고리즘이 제대로 작동할 것임을 예상할 수 있음.

### 2. 실험 시스템

#### 2.1. 하이브리드 딥러닝 모델

##### ○ 딥러닝 모델 구조

- 3차년도 연구에서는 미세먼지 수치 예측 모델의 정확도 개선을 위해 기존 하이브리드 딥러닝 모델의 구조에 어텐션 계층(Attention layer)을 추가함.
- 하이브리드 딥러닝 모델은 크게 1D-CNN (Convolutional Neural Network) 계층, 중첩 오토인코더 계층 (Stacked autoencoder layer), 중첩 양방향 LSTM 계층 (Stacked Bi-LSTM layer), 어텐션 계층 (Attention layer)으로 구성되어 있음.(그림 1)

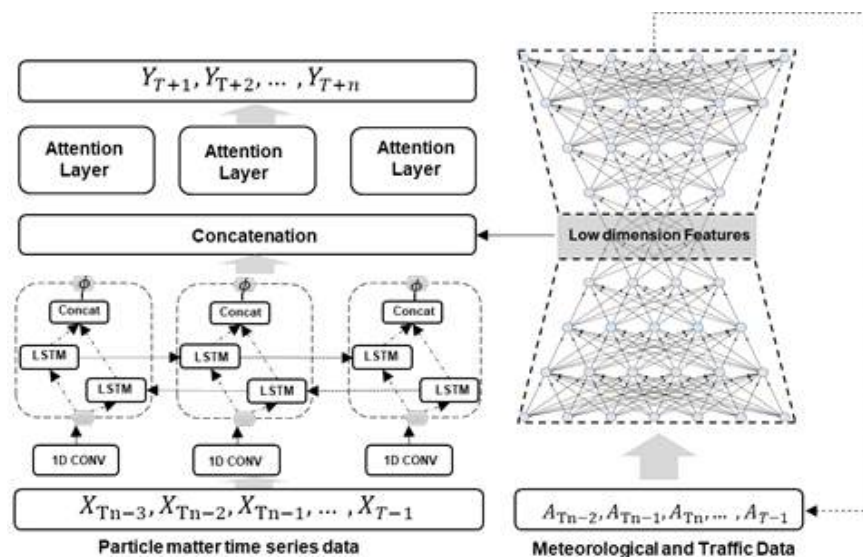


그림 1. 하이브리드 딥러닝 모델 구조

## ○ 1D-CNN 계층

- CNN은 일반적으로 물체 인식이나 이미지 처리 작업에 많이 사용되지만, 1차원을 가지는 특성 때문에 시계열 데이터 예측에도 많이 사용되고 있음. 1D-CNN 계층으로 미세먼지 데이터와 같은 다변량 시계열 데이터를 처리할 경우 지역적 패턴 특성이나 20개소의 모니터링 지역 간의 깊은 공간적 연관 특성을 추출할 수 있다는 장점을 가짐.
- 다양한 장소에서 수집된 미세먼지 시계열 데이터는 여러 개의 1D-CNN 계층을 통해서 처리되고 FC layer의 입력 값이 되는데 그 후 통합 계층에 의한 최종 출력을 통해서 어느 한 지역에서 수집된 시계열 데이터의 지역적 특성을 포착할 수 있을 뿐만 아니라(각 Convolutional 계층에서 1차원 필터를 사용하기 때문에 시간 경과에 따른 지역적 추세 변화 특징을 포착할 수 있음) 여러 지역 간의 공간적 연관성 특징들을 추출해낼 수 있음.(그림 2)

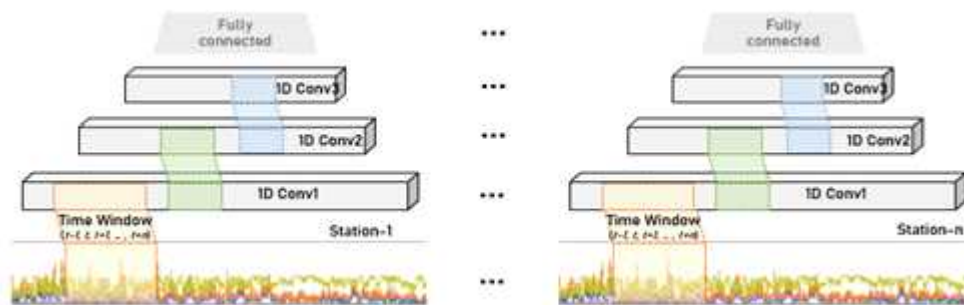


그림 2. 1D-CNN 계층 처리 과정

- 또한 1D-CNN의 local perception과 가중치 공유 특성은 다변량 시계열 데이터 처리에 필요한 파라미터의 수를 줄여 학습 효율을 높일 수 있음. 즉 1D-CNN 계층을 사용함으로써 기존 방법들 보다 미세먼지 관련 데이터의 더 자세한 특징들을 학습에 사용할 수 있고, 더 빠르게 학습을 진행할 수 있음.

## ○ 중첩 오토인코더 계층(Stacked Autoencoder layer)

- 미세먼지 수치의 정확한 측정을 위해서는 과거 미세먼지 데이터뿐만 아니라 기상 데이터(온도, 습도, 풍속 등)나 화학적 가스 데이터(이산화질소, 일산화탄소, 오존, 아황산가스 등) 또한 사용할 필요가 있음. 하지만 대부분의 최신 딥러닝 기반 알고리즘들은 통합된 예측 시스템에서 PM2.5 시계열 데이터와 기상 데이터, 가스 데이터를 동시에 모델링하는데 실패함.
- 본 연구에서는 기상 데이터와 가스 데이터 특성으로부터 정보를 인코딩하기 위해 중첩 오토인코더 계층을 사용함.
- 오토인코더는 입력과 동일한 목표 값을 추출하는 것을 목표로 하는 신경망 알고리즘임. 주어진 데이터가 고차원이어서 변수들끼리의 관계를 한눈에 파악할 수 없을 때 데이터 특징을 잘 표현하는 저차원의 벡터로 변환하는 기법을 사용함.

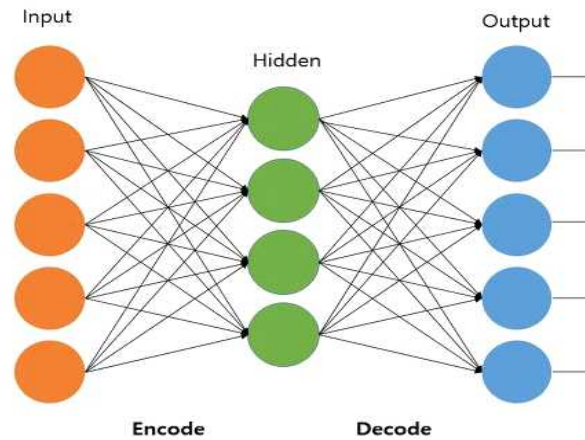


그림 3. 오토인코더 구조

- 오토인코더는 크게 인코딩과 디코딩 2가지 단계로 구분되는데 인코딩 과정에서는 비지도적인 학습을 통해 입력 데이터의 추상적인 특징을 추출하고 디코딩 과정에서는 이 특징들을 통해 원본 데이터를 재구성함.(그림 3)
- 네트워크의 특징 학습 함수는  $h = f_{\alpha}(x)$ 이고,  $f_{\alpha}(x)$ 는 인코더 함수이다. 그리고 디코더 함수는  $\bar{x} = g_{\alpha}(x)$ 로 나타낼 수 있다. 특징 벡터  $h$ 는 원본 입력 데이터의 압축된 표현임.

$$\min \sum_{i=1}^n Loss(X_{meteo+gas,i} - g_{\alpha}(f_{\alpha}(X_{meteo+gas,i}))) + R(\alpha)$$
  
 $X_{meteo+gas,i}$ 는  $i$  번째 모니터링 지역의 가스 데이터와 기상 데이터의 특징임. 따라서 인코딩 함수  $f_{\alpha}(X_{meteo+gas,i})$ 는 입력 데이터의 숨겨진 PM2.5와 PM10의 핵심 정보에 대해 학습하였으므로 미세먼지 학습 모델링을 보조할 수 있음.

- $R(\alpha)$ 는 오토인코더의 가중치 제한 변수로써 PM2.5와 PM10의 예측에 관련이 적은 요소들이나 기상학적 정보를 적게 담고 있는 요소들의 가중치를 제한함으로써 그 특성들을 무시할 수 있음.

#### ○ 중첩 양방향 LSTM 계층(Stacked Bi-LSTM layer)

- 미세먼지 데이터는 시계열 데이터이기 때문에 예측 알고리즘을 구현할 때 시간 의존적인 모델링 방법을 취하게 됨. 이전 PM2.5 수치를 예측하는 데에는 FNN(Feed-forward neural networks) 모델이 많이 사용되었지만 이 모델은 시간 의존성 문제를 고려하지 않아 정확한 예측이 불가능함. 이후 RNN(Recurrent Neural Networks) 알고리즘이 제시되었지만 RNN도 대용량 시계열 데이터를 통한 예측 문제에 있어서 좋지 않은 성능을 보여주는데 이는 시계열 데이터의 크기가 커질수록 학습이 과거 데이터에 크게 의존하게 되어 정확도가 떨어지게 되는 장기 의존성 문제가 발생하기 때문임.
- LSTM 네트워크 (그림 4)은 기존 RNN 구조와 달리 3개의 게이트를 사용한다. 각 게이트는 input, forget, output 게이트로 불리는데 input 게이트는 현재 정보를 저장할 지를 결정하고, forget 게이트는 과거 정보를 버릴지 말지를 결정함. 마지막으로 output 게이트는 어떤 출력값을 출력할지를 결정하는데 LSTM은 이 3개의 게이트와 게이트에 의해 조절되는 Memory cell을 활용하여 과거 데이터 의존도를 조절함으로써 장기 의존성 문제를 해결함.

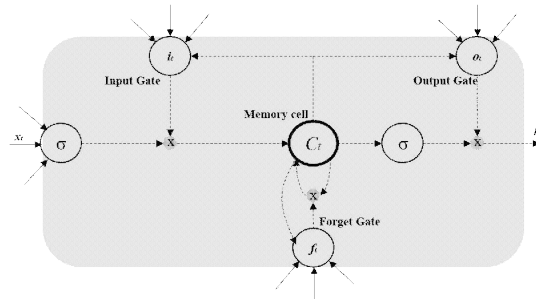


그림 4. 기본 LSTM 구조

- 하지만 기본 LSTM의 단점은 학습 방향이 한 방향으로만 이루어지기 때문에 결과물이 직전 패턴을 기반으로 수렴하는 경향을 보임. 이러한 경향은 데이터가 길어지고 층이 깊어지면 미세먼지 데이터의 특성을 추출할 때 중요한 정보들의 손실이 크다는 단점이 있음.
- 미세먼지 데이터는 한 방향으로 흐르는 시계열 데이터이지만 하루 단위, 일주일 단위, 한 달 단위 등의 단위 시간적 패턴을 가짐. 이러한 특성을 예측에 사용한다면 특정 일의 미세먼지 예측을 위해서 그 전날의 미세먼지 패턴 뿐만 아니라 그 다음 날의 미세먼지 패턴도 사용한다면 더 효과적인 예측이 될 것임. 하지만 기본 LSTM 구조는 한 방향으로만 학습을 진행하기 때문에 미세먼지 데이터의 이러한 특성을 활용할 수 없음. 따라서 보다 정확한 예측을 위해서는 추가적인 방향으로의 학습이 필요함.
- 양방향으로의 학습은 서로에게 영향을 미치지 않고 독립적으로 진행되고 학습이 끝난 후 통합됨. (그림 5) 양방향으로의 학습을 통해서 노드는 과거와 미래의 데이터로부터 정보를 얻을 수 있는데 이를 통해서 직전 패턴에만 기반하지 않고 역방향으로부터의 패턴을 활용할 수 있음. 이를 통해서 기존 LSTM에서 발생하는 문제점을 해결하고 예측의 정확도를 개선할 수 있음.

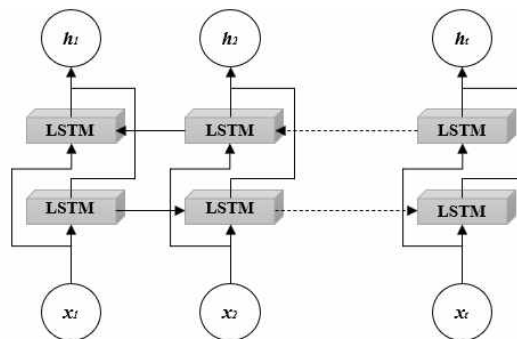


그림 5. 양방향 LSTM 구조

#### ○ 어텐션 계층(Attention layer)

- Attention layer 메커니즘의 주요 목표 중 하나는 모델이 각 샘플 데이터에 서로 다른 가중치를 할당하여 데이터 분석과 예측에 영향을 미치는 필수적인 정보를 도출하는 것임. 이 과정을 통해서 최종 결과에 대해 더 정확한 예측값을 제공할 수 있고, 시스템 리소스의 소비도 줄일 수 있음. 또한 학습 단계에서 입력 데이터에 적절한 가중치를 할당하여 중복되거나 노이즈가 많은 데이터의 영향을 줄일 수 있음.
- Attention layer 메커니즘은 주로 input 데이터의 길이가 긴 경우 처리를 위해 사용되는데, 마지막 hidden state의 context vector가 사용되는 오토인코더 모델과 다른 input state의 가중치를 결합하여 context vector를 생성함. 따라서 context vector는 전체 입력 데이터를 순차적으로 처리할 수 있으므로 데이터 forgetting 문제를 제거할 수 있음. (그림 6)

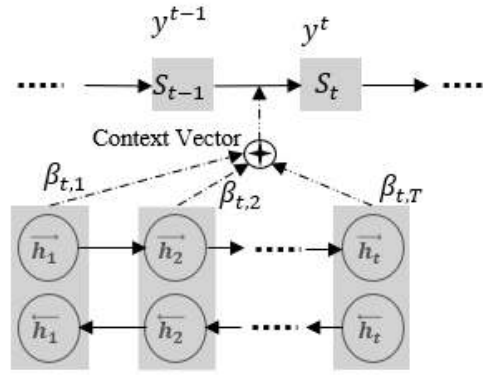


그림 6. Attention layer 구조

- 여기서 context vector  $c_t$ 는 현재 단계에 대한 중요 정보를 나타내는 hidden state  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_{t-1}\}$ 의 가중치 합으로,  $c_t = \sum_{i=1}^{t-1} \beta_i h_i$ 로 나타낼 수 있으며 이 때  $\beta_i$ 는 함수  $f$ 가

$$f: R^m \times R^m \mapsto R \text{라고 정의될 때, } \beta_i = \frac{\exp(f(h_i, h_t))}{\sum_{j=1}^{t-1} \exp(f(h_j, h_t))} \text{이고 } h_i \text{는}$$

$$h_i = \begin{bmatrix} \overrightarrow{h_i^T} \\ \overleftarrow{h_i^T} \end{bmatrix}^T, i = 1, \dots, n \text{ 으로 표현할 수 있음.}$$

- 계산된 context vector는 현재 hidden state  $S_t$ 를 예측하기 위해 이전의 hidden state  $S_{t-1}$ 와 이전 output 값인  $y_{t-1}$ 와 결합되어  $S_t = g(S_{t-1}, y_{t-1}, C_t)$ 과 같이 표현됨.

## 2.2. 데이터간 상관관계 분석

- 본 모델에서는 다음과 같은 식을 활용하여 각 데이터 특성 사이의 상관계수를 계산함.

$$\delta = \frac{n \sum_{i=1}^n a_i b_i - \sum_{i=1}^n a_i \sum_{i=1}^n b_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n a_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n a_i \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n b_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n b_i \right)^2}}$$

그림 7. 데이터 특성 간 상관계수 계산 식

- 다음 식에서 상관계수  $\delta$ 의 절댓값이 1에 가까울수록 두 변수 간의 연관도가 높다는 것을 나타냄.
- 그림 8을 보면 각 특성들끼리의 상관계수를 확인할 수 있음. PM2.5와 PM10은 높은 연관도를 가지는 것을 확인할 수 있음. 이에 따라 본 모델에서는 PM2.5를 예측하는 모델을 학습시킬 때는 PM10 데이터를 사용하지 않고 PM10을 예측하는 모델을 학습시킬 때는 PM2.5 데이터를 사용하지 않음.



그림 8. 변수 간 연관도 히트맵

- PM2.5와 PM10은 온도와 풍속 모두 음의 상관관계를 가지므로 온도가 낮아지면 미세먼지 농도가 증가할 수 있음을 보여줌. 또한 높은 풍속은 바람이 공기 중의 입자를 분산시키기 때문에 양호한 공기의 질을 보장할 수 있음. 교통 데이터는 PM2.5와 PM10 입자와 높은 상관관계가 있어 특정 위치의 차량 통행량이 많을 경우 높은 미세먼지 농도를 가질 것임을 추측할 수 있음.

### 2.3. 분산 학습 구조

- 분산 학습 구조는 데이터 병행화(Data parallelism)라고도 불리는데 이 구조에서는 학습 진행 전에 분산 배치되어 있는 여러 노드에 학습 데이터를 분포시킴. 그 후 각각의 노드는 자신에게 배치된 학습 데이터를 통해 딥러닝 모델을 학습시킴. 자세한 학습 과정은 다음 과정을 따름(알고리즘 1).

#### Algorithm 1: Distributed training process

```

1: Initialization of coordinator node parameters
2: Define the number of training nodes  $N$ 
3: Dataset portioning into  $n$  shards
4: for each monitoring station
5:     datashard  $\leftarrow$  dataset/ $N$ 
6: end for
7: for each node  $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$  do
8:     LocalTrain(Model[parameters], datashard)
9:      $\nabla f_i \leftarrow$  Backpropagation () //send gradient to
    coordinator node
10: end for
11: UpdateMode  $\leftarrow$  Asynchronous () // Model replicas will
    be asynchronously aggregated via peer-to-peer communication with the coordinator
    node
12: Aggregate from all nodes:  $\nabla f \leftarrow 1/N$ 
13: for each node  $i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$  do
14:     CoordinatorNode.Push (ParametersUpdate)
15: end for

```

- 분산 딥러닝 구조를 통해 학습 속도를 개선하고 중앙 노드의 메모리 소비를 감소시킬 수 있음.
- 분산 딥러닝 구조는 먼저  $n$ 개의 노드를 지정하고 데이터를  $n$ 개로 분할하여 각 노드에 할당함. 각 노드는 할당받은 데이터를 통해 스스로 딥러닝 모델을 학습시키고 모델 파라미터를 중앙 서버로 전송함. 중앙 서버에서는 전송받은 모델 파라미터들을 사용하여 최종 모델을 업데이트함. (그림 9)

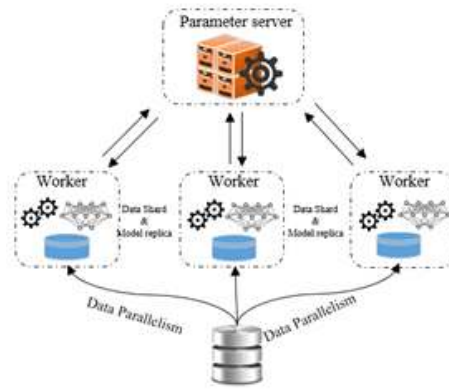


그림 9. 분산 딥러닝 구조

### 3. 실험 결과

○ 기존 알고리즘 대비 미세먼지에 예측에 대한 정확도 개선(그림 10, 그림 11)

| Models                | Metrics | +1h   | +2h   | +4h   | +8h   | +10h  | +12h  | +24h  | +48h  |
|-----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RNN                   | MAE     | 8.33  | 9.49  | 11.61 | 15.87 | 20.67 | 23.50 | 26.41 | 30.08 |
|                       | RMSE    | 12.17 | 13.94 | 16.78 | 21.18 | 25.43 | 30.08 | 34.59 | 37.21 |
|                       | SMAPE   | 25.11 | 28.54 | 29.91 | 36.11 | 39.09 | 41.17 | 44.96 | 45.78 |
| LSTM                  | MAE     | 7.96  | 9.15  | 10.78 | 14.38 | 18.21 | 19.98 | 25.51 | 29.11 |
|                       | RMSE    | 11.31 | 13.90 | 15.18 | 16.87 | 23.14 | 26.71 | 31.18 | 36.92 |
|                       | SMAPE   | 24.87 | 26.47 | 28.39 | 34.17 | 35.29 | 39.49 | 43.42 | 46.03 |
| Autoencoder LSTM      | MAE     | 6.83  | 8.96  | 9.97  | 12.24 | 15.86 | 18.76 | 22.29 | 25.87 |
|                       | RMSE    | 8.94  | 11.87 | 13.83 | 15.79 | 18.48 | 23.44 | 27.53 | 30.21 |
|                       | SMAPE   | 22.39 | 25.57 | 28.09 | 32.93 | 34.28 | 35.96 | 39.49 | 44.27 |
| CNN+LSTM              | MAE     | 6.03  | 8.21  | 10.01 | 12.18 | 14.76 | 17.38 | 20.53 | 24.79 |
|                       | RMSE    | 8.21  | 10.75 | 12.64 | 15.37 | 17.98 | 21.89 | 25.27 | 29.63 |
|                       | SMAPE   | 21.08 | 24.12 | 27.72 | 30.33 | 33.09 | 35.09 | 37.89 | 40.99 |
| ConvBLSTM autoencoder | MAE     | 5.34  | 7.97  | 9.87  | 11.62 | 14.21 | 16.99 | 19.84 | 23.96 |
|                       | RMSE    | 7.92  | 9.90  | 12.18 | 15.11 | 16.89 | 20.34 | 24.12 | 28.17 |
|                       | SMAPE   | 19.27 | 23.37 | 25.33 | 29.74 | 33.14 | 36.15 | 38.90 | 40.17 |
| Proposed Model        | MAE     | 5.02  | 6.96  | 8.59  | 10.97 | 13.87 | 15.87 | 18.75 | 22.59 |
|                       | RMSE    | 7.48  | 9.53  | 11.89 | 14.28 | 16.21 | 19.53 | 23.61 | 28.02 |
|                       | SMAPE   | 17.98 | 20.91 | 24.57 | 27.91 | 30.28 | 34.49 | 37.18 | 39.81 |

그림 10. 각 알고리즘의 PM2.5 예측 평가 수치

| Models                | Metrics | +1h   | +2h   | +4h   | +8h   | +10h  | +12h  | +24h  | +48h  |
|-----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RNN                   | MAE     | 12.20 | 15.75 | 19.63 | 24.73 | 26.21 | 29.87 | 35.59 | 37.19 |
|                       | RMSE    | 15.38 | 19.32 | 22.68 | 25.41 | 29.37 | 34.63 | 39.44 | 43.28 |
|                       | SMAPE   | 29.74 | 33.52 | 36.37 | 40.08 | 42.19 | 45.60 | 46.32 | 48.17 |
| LSTM                  | MAE     | 11.86 | 13.09 | 16.75 | 18.67 | 21.49 | 24.84 | 27.18 | 31.49 |
|                       | RMSE    | 14.56 | 17.56 | 19.36 | 22.49 | 25.68 | 29.09 | 33.18 | 35.85 |
|                       | SMAPE   | 27.41 | 30.25 | 34.34 | 37.58 | 40.18 | 45.02 | 46.82 | 47.32 |
| Autoencoder LSTM      | MAE     | 11.21 | 13.25 | 16.54 | 19.05 | 21.53 | 23.31 | 26.54 | 30.97 |
|                       | RMSE    | 13.67 | 16.53 | 18.11 | 21.25 | 24.57 | 27.33 | 31.85 | 34.37 |
|                       | SMAPE   | 25.89 | 28.09 | 31.52 | 35.47 | 37.69 | 40.08 | 44.16 | 45.99 |
| CNN+LSTM              | MAE     | 9.95  | 12.38 | 15.49 | 18.96 | 21.78 | 23.07 | 25.46 | 29.60 |
|                       | RMSE    | 11.53 | 13.56 | 17.18 | 20.31 | 23.45 | 27.27 | 30.79 | 32.40 |
|                       | SMAPE   | 23.96 | 26.54 | 28.49 | 30.08 | 33.17 | 35.53 | 38.28 | 41.72 |
| ConvBLSTM autoencoder | MAE     | 8.29  | 11.25 | 13.85 | 16.67 | 19.07 | 21.48 | 25.07 | 27.39 |
|                       | RMSE    | 11.27 | 13.96 | 16.34 | 18.75 | 21.49 | 26.07 | 28.96 | 31.09 |
|                       | SMAPE   | 22.79 | 25.38 | 27.75 | 31.96 | 32.51 | 34.09 | 37.69 | 39.83 |
| Proposed Model        | MAE     | 7.38  | 9.57  | 11.19 | 13.96 | 14.37 | 18.56 | 20.74 | 25.89 |
|                       | RMSE    | 9.71  | 12.27 | 14.68 | 16.74 | 17.82 | 20.33 | 23.66 | 25.09 |
|                       | SMAPE   | 19.57 | 23.17 | 24.99 | 27.07 | 29.49 | 30.28 | 32.99 | 34.26 |

그림 11. 각 알고리즘의 PM10 예측 평가 수치

- MAE, RMSE, SMAPE는 예측 모델의 오차를 평가하는 지표로, 모두 수치가 낮을수록 모델이 정확하게 예측하고 있음을 의미함. 그림9, 그림10에서 나타난 평가지표 중 RMSE (Root Mean Square Error) 를 활용하여 수식25와 같이 R2-score를 계산함. R2-score는 분산을 기반으로 예측 성능을 평가하는 지표로, 예측 정확도를 나타내기 적합한 지표임. 특히 수식25의  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  은 RMSE를 제공하여 쉽게 계산할 수 있음.

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2}$$

그림 12. R2-score 계산 식

계산 결과 R2-score가 PM2.5는 약 0.97, PM10은 약 0.92이므로 각 예측에 대해 정확도가 97%, 92%로 모두 90% 이상임을 확인함.

- 본 연구에서 제안하는 하이브리드 딥러닝 모델과 그 외 모델의 PM2.5 및 PM10 예측 그래프 비교 (그림 13, 그림 14, 그림 15, 그림 16)

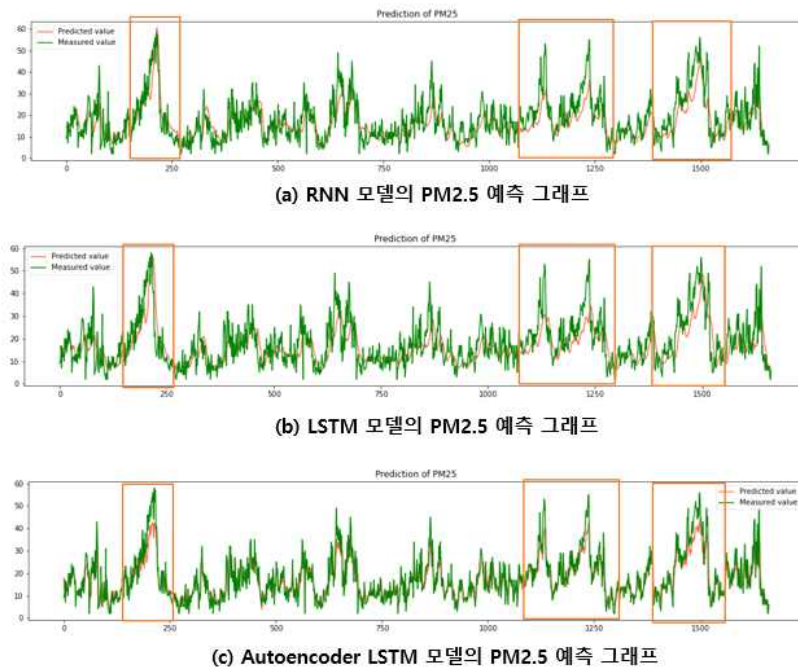
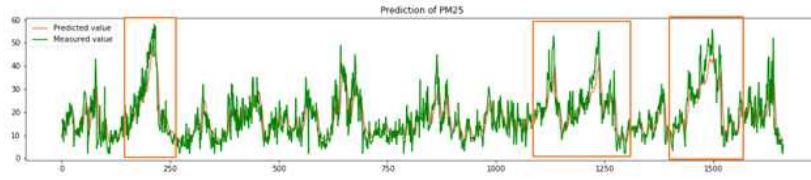
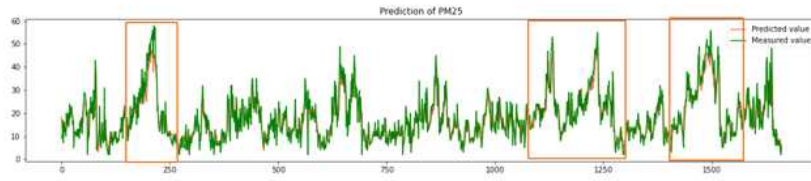


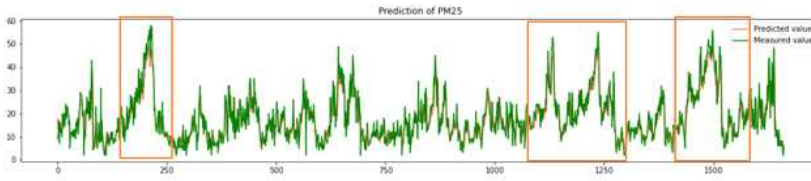
그림 13. 제안 방식과 그 외의 알고리즘에서의 PM2.5 예측 결과 그래프-(1)



(d) ConvLSTM 모델의 PM2.5 예측 그래프

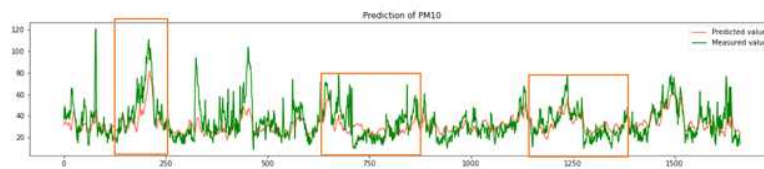


(e) ConvBiLSTM 모델의 PM2.5 예측 그래프

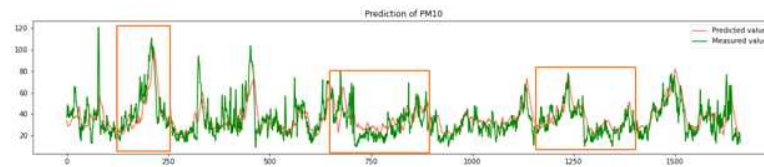


(f) 본 연구 제안 모델의 PM2.5 예측 그래프

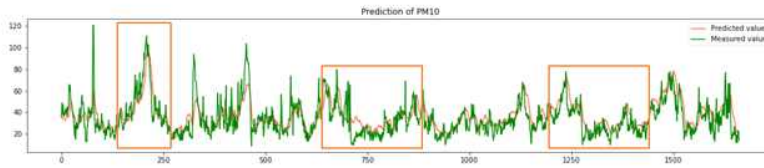
그림 14. 제안 방식과 그 외의 알고리즘에서의 PM2.5 예측 결과  
그래프-(2)



(a) RNN 모델의 PM10 예측 그래프

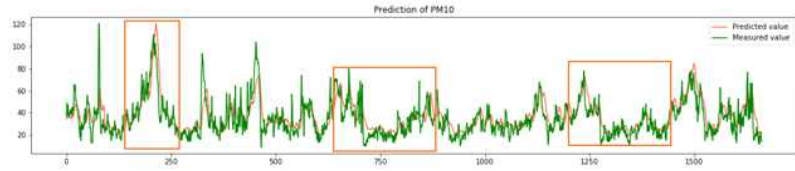


(b) LSTM 모델의 PM10 예측 그래프

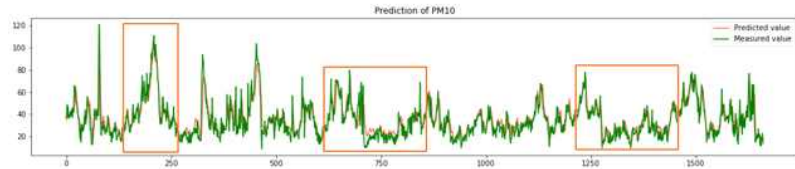


(c) Autoencoder LSTM 모델의 PM10 예측 그래프

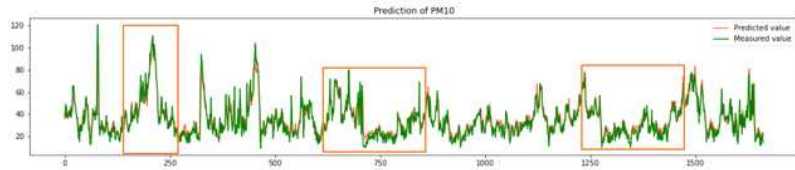
그림 15. 제안 방식과 그 외의 알고리즘에서의 PM10 예측 결과  
그래프-(1)



(d) ConvLSTM 모델의 PM10 예측 그래프



(e) ConvBiLSTM 모델의 PM10 예측 그래프



(f) 본 연구 제안 모델의 PM2.5 예측 그래프

그림 16. 제안 방식과 그 외의 알고리즘에서의 PM10 예측 결과 그래프-(2)

### ○ 기존 알고리즘 대비 딥러닝 학습 소요시간 감소

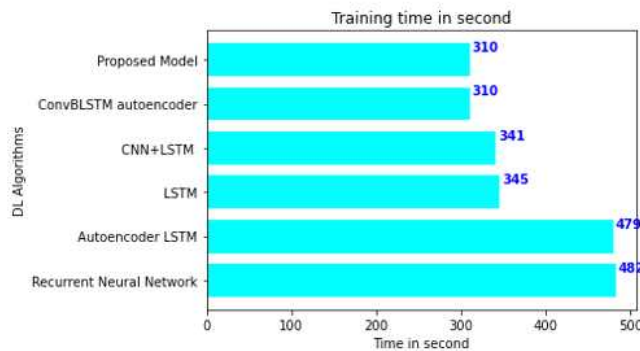
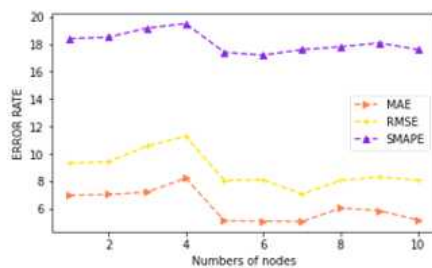
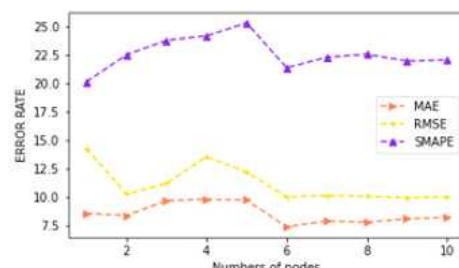


그림 17. 딥러닝 모델 평균 학습시간

- 그림 17는 제안 모델 및 그 외 알고리즘의 미세먼지 예측 평균 학습시간임. 제안된 모델이 다른 알고리즘들보다 최고의 정확도를 가졌을 뿐만 아니라 평균적으로 가장 낮은 학습시간을 가짐.



(a) 노드의 수에 따른 PM2.5 예측 에러율



(b) 노드의 수에 따른 PM10 예측 에러율

그림 18. 노드 개수에 따른 에러율 그래프

- 그림 18은 분산 딥러닝 구조에서 노드의 개수에 따른 에러율을 보여줌. 제안된 분산 딥러닝 구조

는 노드가 5개~8개 사이일때 평균적으로 가장 좋은 성능을 보여줌.

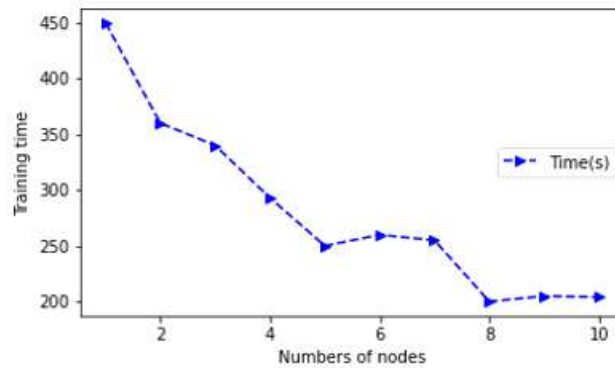


그림 19. 노드 당 학습시간 그래프

- 그림 19는 분산 딥러닝 구조에서 노드의 개수에 따른 학습 시간 변화를 보여줌. 노드가 5개일 때 250초가 소요되었고, 6개일 때 260으로 조금 늘었다가 8개일 때 가장 낮은 시간인 200초를 기록함. 분산 딥러닝 구조에서의 학습시간을 일반 딥러닝 모델의 학습시간과 비교해 보았을 때 약 50%정도의 학습 시간 감소가 있음을 확인할 수 있음.

#### <참고 문헌>

- R. Nimesh, S. Arora, K. K. Mahajan, A. N. Gill, "Predicting air quality using ARIMA, ARFIMA and HW smoothing," Model Assist. Stat. Appl., vol. 9, no. 2, pp. 137-149, 2014, doi: 10.3233/MAS-130285.
- M. Dong, D. Yang, Y. Kuang, D. He, S. Erdal, and D. Kenski, "PM2.5 concentration prediction using hidden semi-Markov model-based times series data mining," Expert Syst. Appl., vol. 36, no. 5, pp. 9046-9055, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.12.017.
- B. Liu, Y. Jin, D. Xu, Y. Wang, and C. Li, "A data calibration method for micro air quality detectors based on a LASSO regression and NARX neural network combined model," Sci. Rep., vol. 11, no. 1, pp. 1-12, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-00804-7.
- A. S. Sayegh, S. Munir, and T. M. Habeebullah, "Comparing the performance of statistical models for predicting PM10 concentrations," Aerosol Air Qual. Res., vol. 14, no. 3, pp. 653-665, 2014, doi: 10.4209/aaqr.2013.07.0259.
- W. Wang, C. Men, and W. Lu, "Online prediction model based on support vector machine," Neurocomputing, vol. 71, no. 4-6, pp. 550-558, 2008, doi: 10.1016/j.neucom.2007.07.020.
- R. Martínez-España, A. Bueno-Crespo, I. Timón, J. Soto, A. Muñoz, and J. M. Cecilia, "Air-pollution prediction in smart cities through machine learning methods: A case of study in Murcia, Spain," J. Univers. Comput. Sci., vol. 24, no. 3, pp. 261-276, 2018.
- 에어코리아, <https://www.airkorea.or.kr/web>
- 기상청자료개방포털, <https://www.kma.go.kr/kma/>

## 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템

### 1. 개요

○ 기존 아스콘을 비교 대상으로 설정하고 배수성 포장인 투수 폴리콘과 투수 아스콘을 각각 1개소에 적용하여 미세먼지 저감 효과를 검증하는 분석 시스템을 구축함.

○ **(미세먼지 저감형 투수성 포장)** 미세먼지 저감형 투수성 포장은 일차적으로 먼지와 노면의 접촉 면적을 줄여 차량 통행시에 재비산 되는 먼지의 농도를 줄이고, 강우 시에는 투수성 포장재와 하부 필터층, 측구 여과장치 등을 통해 먼지를 걸러 수질을 개선하기 위한 새로운 개념으로, 기존의 단순 포장체 기술과는 차별화된 시스템으로서의 기반시설임.

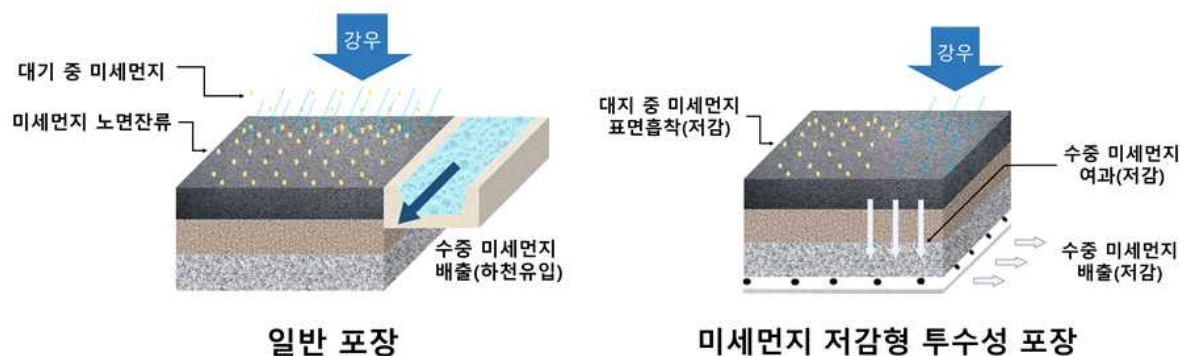


그림 1. 미세먼지 저감형 투수성 포장 개요

○ 일반 포장의 경우 미세먼지가 노면에 잔류하거나 하천으로 배출되어, 대기 중 유해물질 인체 유입, 수중 유해물질의 2차 인체 유입의 위험이 있음.

○ **(AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형)** 미세먼지 저감형 투수성 포장의 성공적인 개발 및 적용을 위해서는 **미세먼지 저감성능의 예측과 평가가 필수적**임. 미세먼지 발생에 영향을 미치는 요소는 온도, 습도, 풍속 등의 환경적 요소와 주변 도로의 교통량, 산업 및 주거 단지 유무 같은 사회적 요소 등 매우 다양. 이들 요소들은 특정 순간의 값이 해당 순간의 미세먼지량을 온전히 결정하는 것이 아니라 이전 일정 기간 동안 축적된 영향력이 쌓여 어느 순간의 미세먼지량을 결정. 이 같은 미세먼지 **영향 인자의 다양성과 기간의 불확정성을 고려할 때 AI 딥러닝 기술의 적용이 필요**.

○ 한 지역에서 일정 기간 동안 각종 환경, 사회 정보와 미세먼지 값을 주기적으로 기록하고, 여기에 투수성 포장을 한 후 역시 일정 기간 동안 같은 정보를 기록하여, 유사한 환경 하에 미세먼지 투수성 포장의 설치로 인한 미세먼지 저감효율을 평가하는 모형을 개발함. 연구기간 내, 그 이후에도 꾸준히 업데이트 될 수 있는 방식의 평가모형을 개발함.

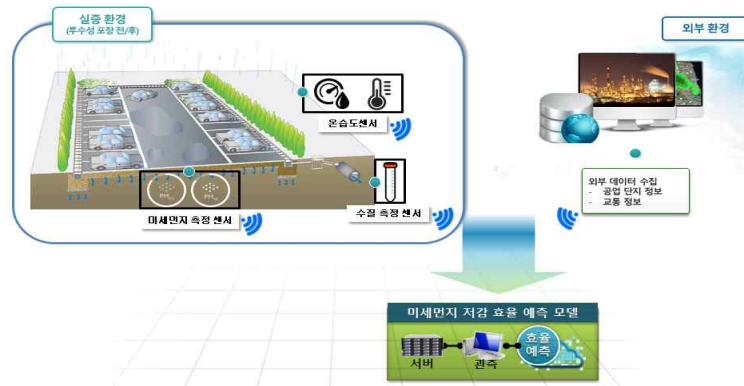


그림 2. AI 기반 미세먼지 저감효율 예측평가모형 개요

○ 본 과업의 연구결과 중 하나는 투수성 포장 시스템을 구성하는 여재 필터가 기존의 실트 수준 크기 입자 뿐 아니라, PM10에 해당하는 미세먼지를 매우 효과적으로 여과할 수 있다는 것을 보이고 있으며, 기존에는 미세먼지 수준의 입자 여과 기능에 대한 연구가 전무하여, 이에 대한 연구 차별성은 매우 구체적임.

○ 또한, 미세먼지 저감효율 예측 AI 알고리즘을 개발하고 학습 데이터 축적을 통한 AI 알고리즘의 정확도를 개선하여 미세먼지 예측 홈페이지 제작하여, 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템의 성능을 대중적, 시각적으로 제시하고 이에 따른 파급을 유도하기 위한 기반을 마련하였음.

## 2. 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 개발 및 시제품화

### 2.1 비점오염 저감을 위한 다공성 배수 포장 모듈 및 이의 시공방법

- 도로에 투수 된 비점오염원을 여과를 통해서 저감하고 도로에 누적 되어 있는 미세먼지의 재비산을 막아 미세먼지를 저감시킴. 총 2가지의 형태로 제작이 되었으며 기존 아스팔트 도로와 투수성 포장 각 경우에 따라 다른 시스템으로 적용됨.
- 그림 3의 경우 기존 아스팔트 포장에 구배를 통해서 측구로 흘러든 비점오염원을 저감시키는 모듈로 기존 아스팔트 도로에 적용한 미세먼지 저감형 포장 시스템임. 장점으로는 이미 기존에 포장 된 아스팔트 도로에 측구 개량을 통해서 모듈을 시공하면 구현이 가능함.
- 그림 4는 그림 3의 모듈이 적용된 기존 아스콘 포장의 미세먼지 저감형 포장 시스템의 모식도임.

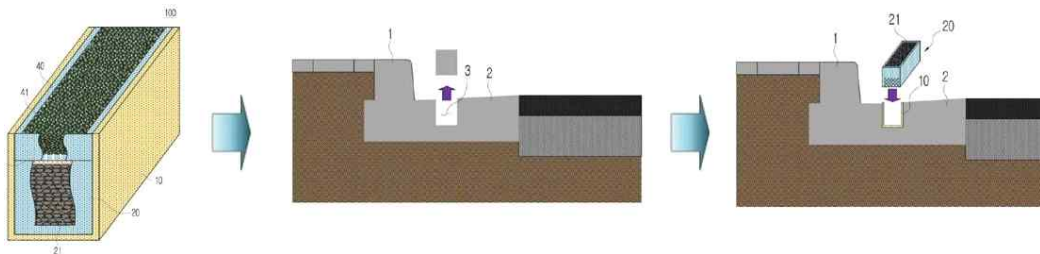


그림 3. 기존 아스팔트 도로에 적용한 미세먼지 저감형 포장 시스템

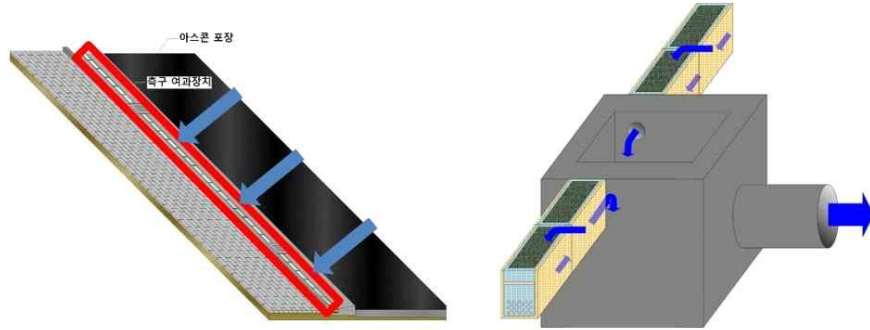


그림 4. 모듈이 적용된 기존 아스콘 포장의 미세먼지 저감형 포장 시스템 모식도

- 그림 5의 경우 투수성 포장에 유공관을 통해서 측구로 흘러든 비점오염원을 저감시키는 여과장치로 투수성 포장도로에 적용한 미세먼지 저감형 포장 시스템임. 장점으로는 유공관을 통해서 여과장치로 집중되기 때문에 여재교체 등 사후 관리가 편리함.
- 그림 6은 그림 5의 여과장치가 적용된 투수성 포장의 미세먼지 저감형 포장 시스템의 모식도임.

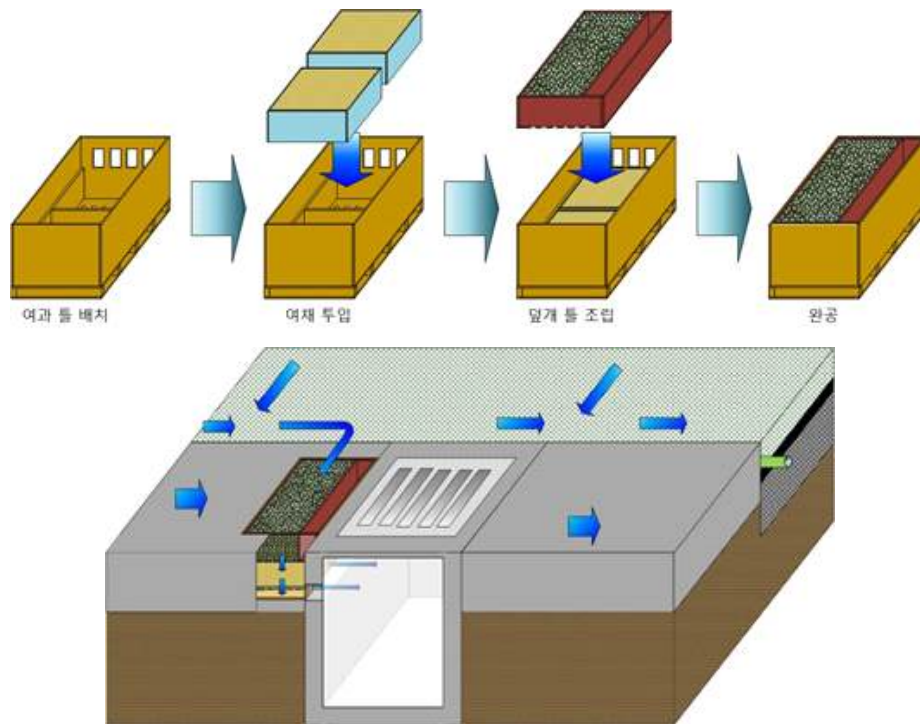


그림 5. 투수성 포장도로에 적용한 미세먼지 저감형 포장 시스템

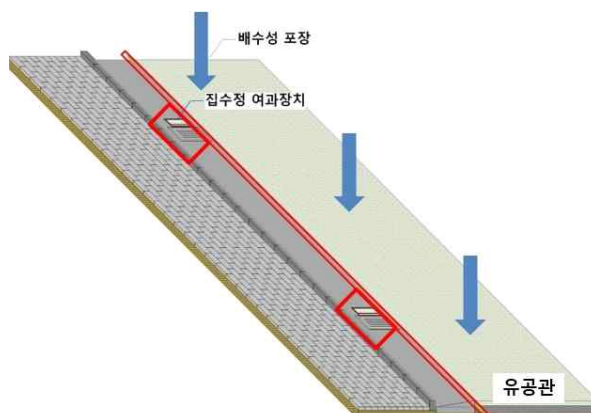


그림 6. 여과장치가 적용된 투수성 포장의 미세먼지 저감형 포장 시스템

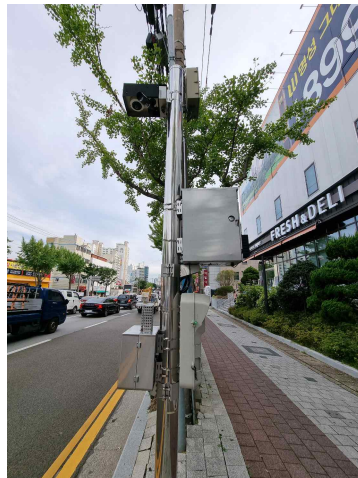
### 3. 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 현장 실증

#### 3.1 테스트 베드 구축의 목적

- 1, 2차년도에 주관연구기관 및 공동 연구기관에서 수행한 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템과 AI 기반 평가기법을 활용하여 미세먼지 저감형 포장의 성능을 실증하고 그 시스템을 제품화.
- 투수성 포장재를 거쳐 측구여과장치로 비점오염원을 여과 후 집수정으로 배출 되는 미세먼지 저감형 포장 시스템을 제품군으로 구성.

#### 3.2 테스트 베드 구성 및 조건

- 기존 아스콘 포장 구간인 1구간, 미세먼지 저감형 투수성 포장 구간인 2구간, 기존의 배수성 아스콘 구간인 3구간으로 총 3개의 구간을 비교하여 테스트 베드를 구축함. 각 구간에는 아래 사진과 같이 1.5m 높이에 현장제어 측정기가 설치되며 실시간으로 미세먼지 농도 데이터가 저장 되어 각 구간의 미세먼지 농도 비교를 통해서 저감 성능을 측정함.



- 테스트베드는 각 구간이 최대한 동일 조건으로 설치가 되어야 하며 최소 각 구간 길이가 70m 이상 조건으로 설치를 함. 그 외에도 경사지지 않고 직선 형태의 편도 3차로 이상으로 선정하며 식생대가 미세먼지 농도에 영향을 미치지 않도록 식생대가 없는 곳으로 함.

### 3.3 테스트 베드 현장 상세 위치도

- 테스트베드 실증을 위한 조건들을 사전에 기획하고 적합한 장소를 찾았으며 해당 행정청의 협조를 통해서 부산시 금정구 남산역 일대 중앙대로를 테스트베드 최적지로 최종확정 하였음. 아래 사진과 같이 남산역 일대에 남측 방향으로 총 3개구간을 설정하였고 직선로 구간에 각 70m씩 테스트 베드를 구축 함.



그림 7. 테스트 베드 현장 위치 및 포장체

- 2구간, 3구간의 경우 기존 아스팔트 도로를 절삭하고 투수 폴리콘 및 배수성 아스콘 포장공사를 실시함. 2구간의 경우 아래 그림과 같이 투수성 포장재를 거쳐 측구여과장치로 비점오염원을 여과 후 집수정으로 배출되도록 측구여과 장치를 설치하였음.



그림 8. 측구여과 장치

### 3.4 구성

- ① 1구간 : 현장제어 측정기 1SET
  - ② 2구간 : 투수 아스콘 포장(T=10 cm, L=100 m) 및 현장제어 측정기 1SET
  - ③ 3구간 : 투수 폴리콘 포장(T=10 cm, L=100 m) 및 현장제어 측정기 1SET
- ※각 구간 현장제어 측정기 설치를 위해서 가로등 점용 허가 필요(1.5 m 높이 설치)

### 3.5 테스트 베드 조건

- ① 내리막경사의 직선이 주로이며, 편도 3차로 일 것
- ② 길이 100 m 이상이면서 중간에 신호등이 없을 것
- ③ 중앙분리대가 식생대가 아닐 것

1) 1구간 - 대조군(기존 아스팔트 비교)



2) 2구간 - 투수 폴리콘 포장



3) 3구간 - 투수 아스콘 포장



### 3.6 시공 사진

#### 사 진 대 장

©공시명 : 남산동 일대 중앙대로 아스콘 포장공사



사진설명 : 확장전 날짜 : 2021.04



사진설명 : 준공 날짜 : 2021.04

#### 사 진 대 장

©공시명 : 남산동 일대 중앙대로 아스콘 포장공사



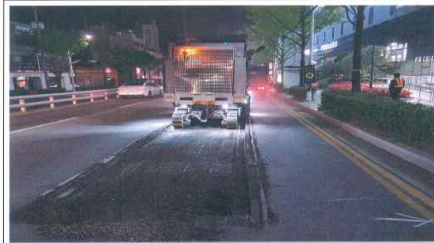
사진설명 : 확장전 날짜 : 2021.04



사진설명 : 준공 날짜 : 2021.04

#### 사 진 대 장

©공시명 : 남산동 일대 중앙대로 아스콘 포장공사



사진설명 : 노면정식 날짜 : 2021.04



사진설명 : 노면정식 날짜 : 2021.04

#### 사 진 대 장

©공시명 : 남산동 일대 중앙대로 아스콘 포장공사



사진설명 : 측구정공 날짜 : 2021.04



사진설명 : 유제살포 날짜 : 2021.04

#### 사 진 대 장

©공시명 : 남산동 일대 중앙대로 아스콘 포장공사



사진설명 : 유공관설치 날짜 : 2021.04



사진설명 : 아스콘포설말다짐 날짜 : 2021.04

#### 사 진 대 장

©공시명 : 남산동 일대 중앙대로 아스콘 포장공사



사진설명 : 포설말다짐 날짜 : 2021.04



사진설명 : 자선도매 날짜 : 2021.04

## 4. 미세먼지 저감형 투수성 포장 시스템 미세먼지 농도 분석 자료

### 4.1 테스트 베드 현장 제어 측정기

- 테스트베드에 설치된 현장 제어 측정기를 통해서 각 구간에 미세먼지 데이터를 수집 하였으며 아래의 사진과 같이 상부에 설치된 제어장치가 현장 영상 및 미세먼지 측정값을 실시간으로 모니터링 가능함.



그림 9. 현장 제어 측정기

- 아래 사진과 같이 사용자는 실시간 영상 및 미세먼지 측정값 이외에 최대15일 이내에 원하는 날짜, 시간을 설정하면 저장된 영상 및 미세먼지 측정값을 확인할 수 있음.



그림 10. 실시간 영상 및 미세먼지 측정값 확인

## 4.2 미세먼지 저감 분석 자료

- 미세먼지 데이터를 분석을 통해 기본적인 대기 중의 미세먼지 농도 외에 차량이 지나가면서 도로 위의 누적 된 미세먼지들이 재비산 되었고 그 값들이 측정기에 데이터 값에 반영이 되었음. 차량의 이동이 많거나 빠르게 지나갈 경우 측정기에 최대값으로 데이터가 저장이 되었고 차량의 이동이 없을 경우 대기 중의 평균 미세먼지 농도의 값으로 최소값으로 나타났음. 데이터 정리와 재비산먼지 농도 산출을 위해서 측정구간의 2분 단위 측정값의 최대값과 최소값의 차를 이용해서 아래 표와 같이 정리하였음.
- 아래 표를 정리하여 분석한 결과 시공 전에 미세먼지가 심각한 겨울 기준으로 대조군인 1구간 대비 2구간은 더 높게 나타났고 3구간은 비슷하거나 낮은 결과 값을 보였음. 이는 각 구간에 교통 혼잡도 및 건물 등 지형지물의 영향이 있을 것으로 판단이 되며 2구간의 경우 신호가 없고 차량이 빠르게 이동하여 상대적으로 높게 측정이 되었음. 그리고 비교적 높은 건물이 측정기 뒤로 위치하여 재비산 시 간헐 구조로 상대적으로 농도가 높게 나오는 것으로 보임.
- 테스트베드 시공 이후(4월 말 ~ 6월) 시공 전 보다 농도 값이 차츰 좋아지는 것을 확인할 수 있었고 습한 날씨로 상대적으로 미세먼지가 가장 적은 여름철(7 ~ 8월)의 경우 2구간은 기존 아스팔트구간과 비슷한 농도 값을 보였음. 그리고 다시 미세먼지가 높아지는 가을, 겨울철(9 ~ 12월) 분석결과 대조군인 1구간보다 2구간의 경우 재비산먼지 농도가 낮아졌음.
- 2구간의 경우 9 ~ 12월 PM2.5, PM10 모두 기존 아스팔트 대비 저감되었음. PM10 기준으로 적게는 14%부터 많게는 47% 까지 저감되는 것을 확인했고 9 ~ 12월 사이 1구간 아스팔트 대비 평균 34.5% 저감되었음.
- 3구간의 경우 PM10이 9월에 기존 아스팔트 보다 저감하는 듯 보였으나 이후 기존 아스팔트보다 약간 높은 결과 값을 보였음.
- 2구간과 3구간 모두 물이 투수가 가능한 포장이지만 상대적으로 공극률이 3구간 대비 2구간이 더 높아 도로 표면에 미세먼지가 누적 되지 않고 포장 속 공극에 누적 되어 재비산이 억제되고 그로인해 재비산먼지 농도가 낮게 측정된 것으로 보임. 이는 공극에 누적된 실트 함량 측정을 통해서 각 구간의 실트량을 비교해보는다면 재비산먼지 저감 효과를 조금 더 객관적으로 설명할 수 있을 것으로 보임.

표 1. 미세먼지 월 평균 농도 계측 결과

|                       | 2 월  |       | 3 월  |       | 4월 시공 전<br>(~4월 18일 16시) |       | 4월 시공 후<br>(4월 18일 16시~) |       |
|-----------------------|------|-------|------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
|                       | PM10 | PM2.5 | PM10 | PM2.5 | PM10                     | PM2.5 | PM10                     | PM2.5 |
| 1구간 재비산 평균 농도 (µg/m³) | 5.43 | 1.71  | 6.42 | 1.79  | 6.74                     | 2.02  | 7.15                     | 1.99  |
| 2구간 재비산 평균 농도 (µg/m³) | 7.88 | 1.45  | 8.43 | 1.41  | 6.93                     | 1.2   | 7.93                     | 1.32  |
| 3구간 재비산 평균 농도 (µg/m³) | 5.11 | 1.66  | 5.63 | 1.61  | 4.43                     | 1.36  | 5.47                     | 1.54  |
| 1구간 대비 2구간 농도(%)      | 145% | 85%   | 131% | 79%   | 103%                     | 59%   | 111%                     | 66%   |
| 1구간 대비 3구간 농도(%)      | 94%  | 97%   | 88%  | 90%   | 66%                      | 67%   | 77%                      | 77%   |
|                       | 5 월  |       | 6 월  |       | 7 월                      |       | 8 월                      |       |
|                       | PM10 | PM2.5 | PM10 | PM2.5 | pm10                     | pm2.5 | pm10                     | pm2.5 |
| 1구간 재비산 평균 농도 (µg/m³) | 5.71 | 1.93  | 4.48 | 1.67  | 3.7                      | 1.58  | 3.66                     | 1     |
| 2구간 재비산 평균 농도 (µg/m³) | 6.22 | 1.16  | 4.7  | 1.03  | 3.78                     | 0.88  | 4.44                     | 0.94  |
| 3구간 재비산 평균 농도 (µg/m³) | 4.43 | 1.29  | 3.11 | 1.08  | 2.49                     | 0.96  | 2.98                     | 1     |
| 1구간 대비 2구간 농도(%)      | 109% | 60%   | 105% | 62%   | 102%                     | 56%   | 121%                     | 94%   |
| 1구간 대비 3구간 농도(%)      | 78%  | 67%   | 69%  | 65%   | 67%                      | 61%   | 81%                      | 100%  |
|                       | 9 월  |       | 10 월 |       | 11 월                     |       | 12 월                     |       |
|                       | PM10 | PM2.5 | PM10 | PM2.5 | PM10                     | PM2.5 | PM10                     | PM2.5 |
| 1구간 평균 농도 (µg/m³)     | 3.99 | 1     | 4    | 1.3   | 5.05                     | 1.49  | 4.25                     | 1.3   |
| 2구간 평균 농도 (µg/m³)     | 3.44 | 0.85  | 2.71 | 0.89  | 2.76                     | 1     | 2.24                     | 0.89  |
| 3구간 평균 농도 (µg/m³)     | 3.42 | 0.96  | 4.45 | 1.01  | 5.51                     | 1.26  | 4.72                     | 1.22  |
| 1구간 대비 2구간 농도(%)      | 86%  | 85%   | 68%  | 68%   | 55%                      | 67%   | 53%                      | 68%   |
| 1구간 대비 3구간 농도(%)      | 86%  | 96%   | 111% | 78%   | 110%                     | 85%   | 111%                     | 94%   |

4.3 수집한 데이터 활용 및 분석

- 데이터를 학습용 데이터와 테스트 데이터로 분리할 때 특정 달이나 계절에 데이터가 편향되지 않게 하기 위해 각각의 월마다 테스트 데이터를 추출함. 또한 학습 모델을 검증하기 위해서 학습용 데이터에서 학습용 데이터와 검증용 데이터를 70%와 30% 비율로 분할하여 학습을 진행함.
- 또한 PCA 기법을 사용하여 다양한 데이터 특성들이 미세먼지 수치인 PM2.5와 PM10에 얼마나 영향을 끼치는지를 분석함. 그리고 상관관계수가 낮은 즉, 미세먼지 수치에 영향을 크게 주지 않는 특성은 사용하지 않음으로써 예측 모델의 정확도와 학습 속도를 개선함.
- 3차년도 연구에서는 특히 투수성 포장의 효과를 찾아내기 위해 미세먼지 모니터링 시스템으로부터 각 포장재의 종류에 따른 미세먼지 데이터를 수집하여 비교하고 분석하였음. (그림1, 그림2, 그림3)

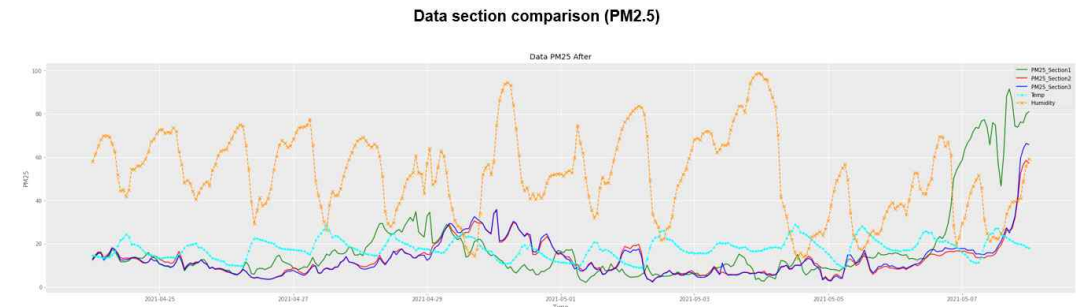


그림 11. PM2.5에 대한 구간별 수치 비교 그래프

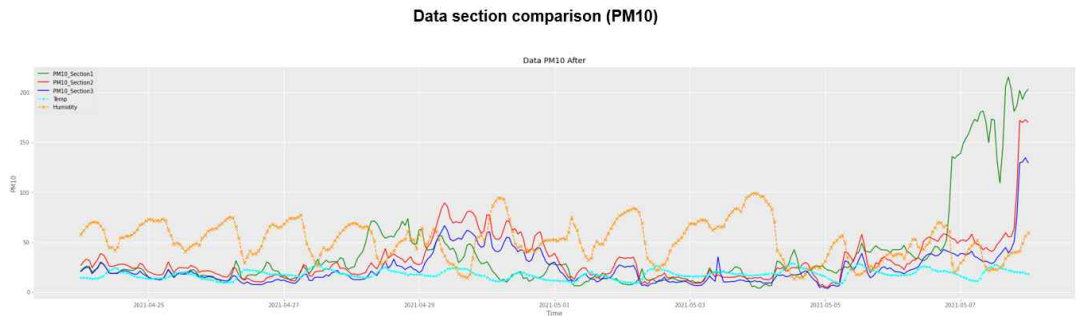


그림 12. PM10에 대한 구간별 수치 비교 그래프

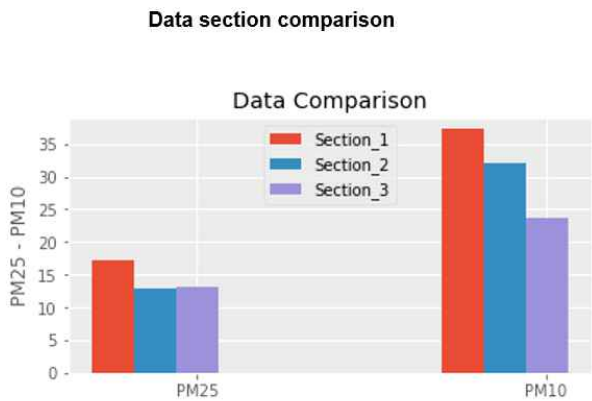


그림 13. 각 구간별 미세먼지 농도 비교 막대그래프

- 단순히 미세먼지 농도의 절대값만을 가지고 비교하였을 때 투수성 포장의 미세먼지 저감효율만을 확인하기 어려움. 따라서 일반 포장도로(1구간) 대비 투수성 포장도로(2구간), 배수성 포장도로(3구간) 비율을 그림 4와 같은 식으로 계산하여 투수성 포장재의 미세먼지 저감효과를 확인함.

$$\text{Ratio[PM25]} = (\text{Section\_2 [PM25]} / \text{Section\_1 [PM25]}) * 100$$

$$\text{Ratio[PM10]} = (\text{Section\_2 [PM10]} / \text{Section\_1 [PM10]}) * 100$$

$$\text{Ratio[PM25]} = (\text{Section\_3 [PM25]} / \text{Section\_1 [PM25]}) * 100$$

$$\text{Ratio[PM10]} = (\text{Section\_3 [PM10]} / \text{Section\_1 [PM10]}) * 100$$

그림 14. 일반 포장 대비 특수 포장 도로 비율 계산식

- 투수성 포장 전인 2월과 포장 후 2달 뒤인 6월, 포장 후 7달 뒤인 11월의 일반 포장(1구간) 대비 투수성 포장 구간(2구간)의 미세먼지 농도 비율이 대폭 감소하는 추이를 보임 (그림 5). 참고로, 그림에서 비율(Ratio)가 100보다 큰 경우는 투수 포장이 설치된 2구간의 미세먼지 양이 일반 포장이 설치된 1구간보다 많다는 뜻이며 100보다 작은 경우는 그 반대임. 단, 'Before'로 표시된 경우는 2구간에 투수 포장이 설치되기 전이므로 포장의 차이는 없으며 위치상의 차이만 존재. 투수 포장 설치 전에는 2구간의 미세먼지 양이 1구간의 2배에 달했으나 포장 후 7개월 후에는 1구간보다 낮아짐을 확인.

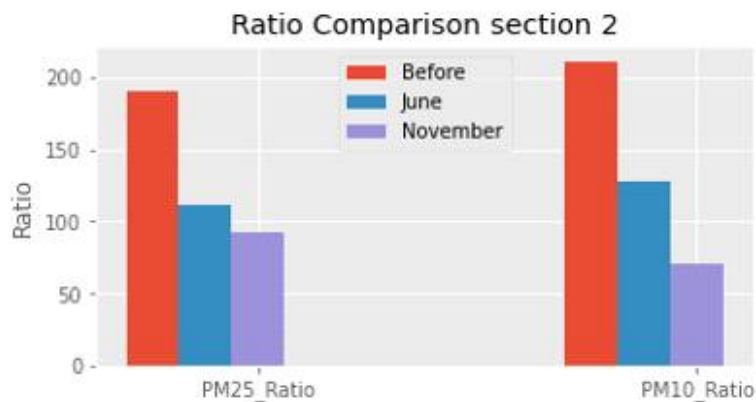


그림 15. 투수성 포장 도로 미세먼지 비율 감소 추이 막대그래프

## 5. 개발기술의 적용 및 실용화를 위한 제한사항 및 최적 조건

- 전국 미세먼지 발생 가장 큰 원인은 비산먼지(46.2%)와 제조업연소(30.8%)이며, 비산먼지 중에서는 건설공사(15.0%)와 도로재비산(12.6%)이 대부분을 차지함.
- 즉, 전국 미세먼지 발생 원인의 12.6%는 도로 재비산 먼지이며, 도로율이 높은 대도시의 경우 도로 재비산먼지가 21%를 차지함.
- 차로변의 미세먼지는 대기의 3배 이상 높음. 2010년부터 2014년까지 5년간 서울의 대기 중 미세먼지 농도는  $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 차로의 미세먼지 농도는  $156 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 대기보다 3.4배 높음.

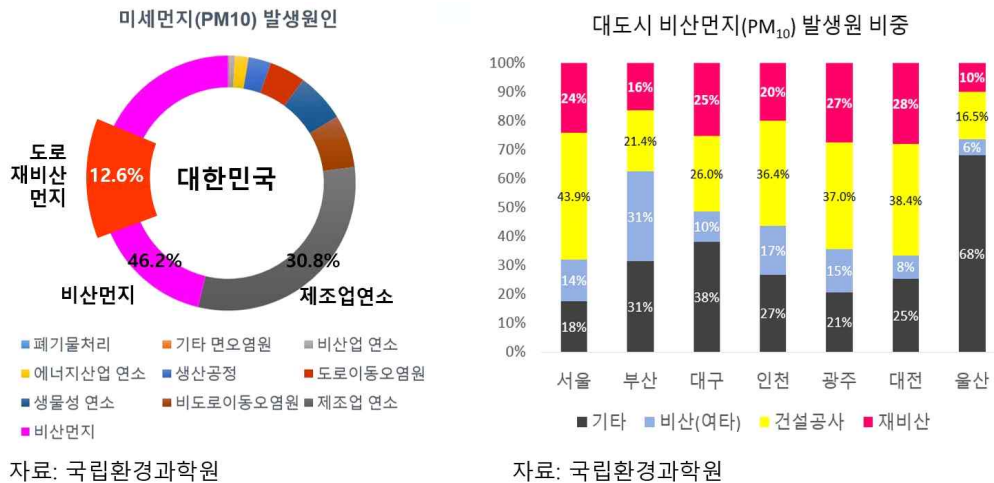


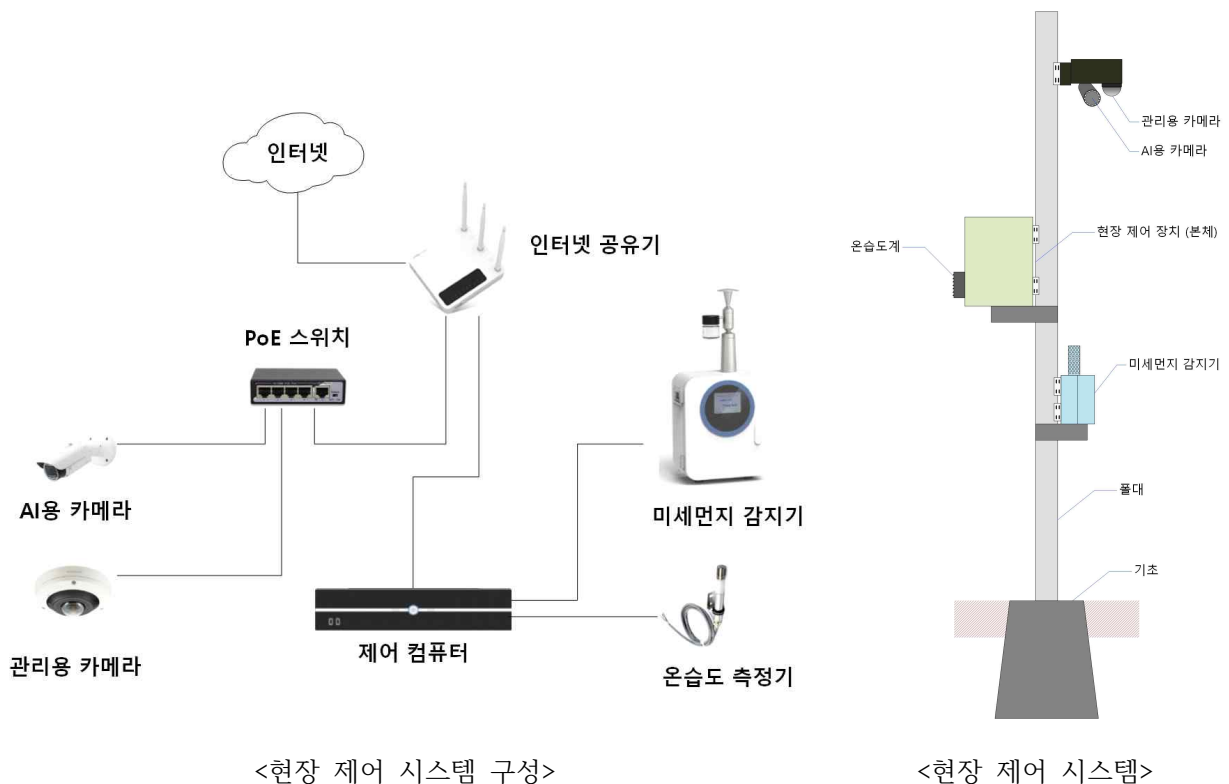
그림 16. 미세먼지 발생 원인

- 차량의 통행량이 많고 속도가 느리지 않은 4차선 이상의 도로에서는 차량에 의한 재비산 먼지를 25% 이상 저감하는 효과를 제공하며, 특히 도로의 바깥 차로에 시공하는 경우 재비산 먼지가 인도를 통행하는 보행자에게 큰 영향을 미치는 미세먼지의 농도를 낮추는 효과를 제공함. 그리고, 승용차와 같은 소형 차량 보다 트럭과 같은 중대형 차량의 통행시 도로 재비산 먼지 발생이 높으므로 이러한 환경에서 재비산 먼지 저감 효과가 더욱 크게 나타날 것임 하지만, 차량 통행이 빈번하지 않거나 또는 통행 속도가 매우 느린 도로에서는 재비산을 억제하는 성능이 떨어짐.
- 차량의 통행량이 많고 속도가 빠른 대로에서는 미세먼지, 특히 재비산 먼지 저감효과가 크지만, 통행량이 적고 속도가 느린 소로에는 재비산 먼지 저감효과가 상대적으로 적음. 이에 통행량이 많고 차량 운행 속도가 큰 대로에 대해 미세먼지 저감형 투수성 포장의 적용성이 높음.
- 건기 겨울철(9월~12월) 동안 계측된 테스트 베드의 계측 결과에 의하면, 폴리카본 포장(2구간)의 경우 9 ~ 12월 PM2.5, PM10 모두 기존 아스팔트(1구간) 대비 저감되었음. PM10 기준으로 최소 14%, 최대 47% 까지 저감되었고, 평균적으로는 약 35% 저감되었음. 이에 우기가 아닌 건기에도 미세먼지 저감형 투수성 포장은 미세먼지 저감에 효과가 있음을 현장 데이터로 검증함.
- 추가적으로 공극에 퇴적되는 오염물질을 주기적으로 흡입 제거함으로써 미세먼지의 발생을 더욱 낮출 수 있음. 포장의 정기적인 먼지흡입과 유지관리는 투수성 포장 뿐 아니라 기존 포장에도 거쳐야 하는 과정임.
- 동절기 제설제 사용에 따른 폴리카본 도로의 강도 저하를 확인하고자 염화칼슘 수용액에 시편을 수침시킨 후 지속적인 강도 시험을 실시한 결과 30일 동안 수침된 시편에서도 강도 저하가 나타나지 않았음. 이에 동절기 제설제에 대해서도 해당 투수성 포장은 매우 우수한 내구성을 보임(BASF, 2016).

## TEST-BED 설치 및 운영 매뉴얼

### 1. 구성

- 현장 제어 시스템은 현장의 영상과 미세먼지 농도, 온습도 정보를 획득하여 중앙 관제 시스템으로 송출하고 물 분사 시스템을 제어하는 기능을 제공한다.
- 메인 함체에는 산업용 컴퓨터와 인터넷 공유기가 내장되어 있고 영상을 획득하는 IP 네트워크 카메라 2대(AI용 카메라 1대 그리고 관리용 카메라 1대), 미세먼지 농도를 획득하는 감지기, 온습도를 획득하는 측정기가 외부에 설치되어 있다.



- 현장 제어 컴퓨터: AI용 카메라 영상, 온도 및 습도 정보를 종합하여 현장의 미세먼지 농도를 산출하며, 사용자 설정에 맞춰 물 분사를 제어한다.
- AI용 카메라: 현장 제어 장치의 AI 모듈이 미세먼지 농도를 산출하도록 차량 통행 영상을 현장 제어 장치의 컴퓨터로 전송한다.
- 관리용 카메라: 현장 제어 장치 주변 영상을 IP 카메라가 직접 전송한다.
- 미세먼지 감지기: PM2.5, PM10, TSP 농도를 감지한다.
- 온습도계: 현장의 온도와 습도 정보를 획득한다.
- 현장 제어 시스템은 카메라 함체, 제어 컴퓨터 함체, 감지가 함체 등 3개의 모듈로 구성되어 있으며 이들은 직경 150mm 지주에 설치된다.

## 2. 규격 및 형상

- 카메라 모듈 합체



- 현장제어장비 합체



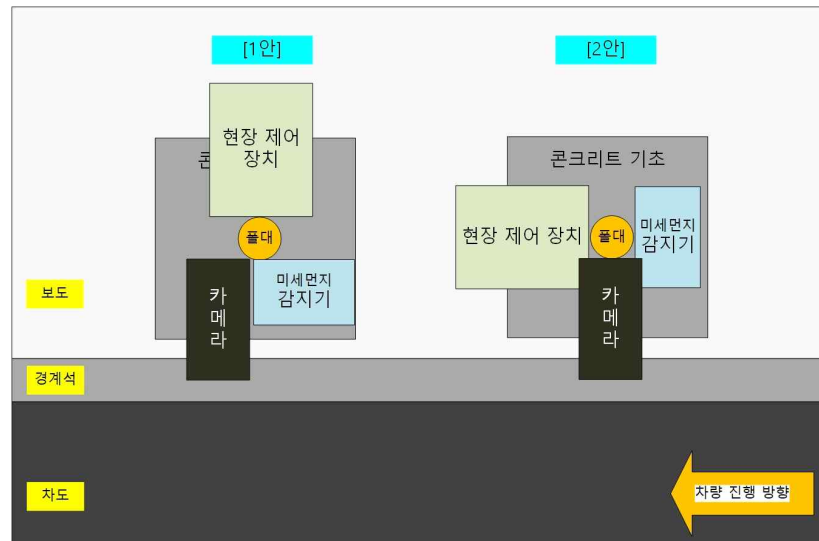
- 미세먼지 감지기 합체



### 3. 설치 사전 준비사항

#### ① 위치 선정

- 미세먼지 감지기와 카메라 상자는 도로 방향으로 설치한다. 이때, 카메라 상자가 보도를 벗어나지 않도록 지주를 설치할 수 있어야 한다. (제 1안)
- 현장제어장치는 이들과 반대 방향에 설치하여 무게를 분산한다.
- 만약 미세먼지 감지기를 도로 방향으로 설치가 어려운 경우 차량이 진입하는 방향으로 설치한다. (제 2안)



<위치 선정>

#### ② 전기 신청

- 전기는 한전에 신청한다.
- 필요 용량: 3Kw

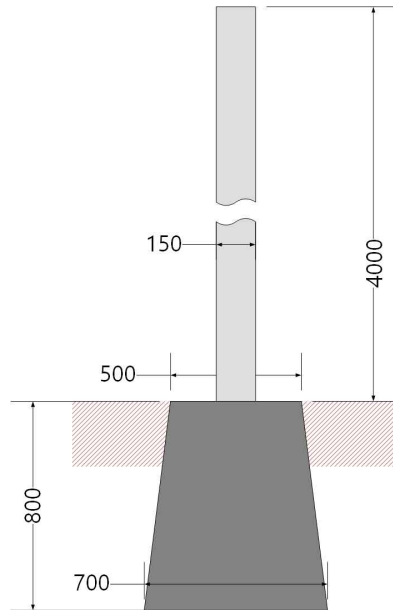
#### ③ 인터넷 신청

- 인터넷은 KT 등 통신업체에 신청한다.
- 권장 서비스: 고정 IP / Giga bit 대역 (최소 500Mbps)

### 4. 설치

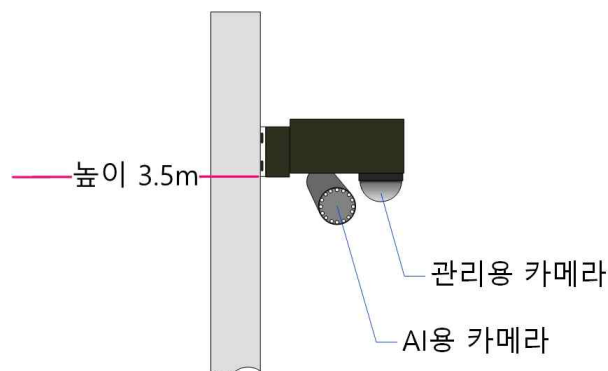
#### ① 콘크리트 기초 매설 및 지주(폴대) 설치

- 콘크리트 기초: 500x700x800mm
- 지주: Ø 150mm / 두께 2mm / 높이 4m



## ② 카메라 모듈 함체 설치

- 설치 높이: 3.5m (카메라 모듈 상자 하단 기준)
- AI용 카메라와 관리용 카메라 결합되어 있는 카메라 모듈 함체를 설치한다.

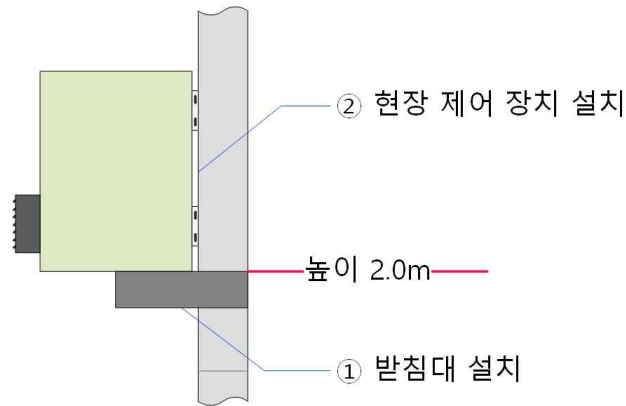


- AI용 카메라와 관리용 카메라(광각) 영상은 각각 별도의 채널로 전시된다.



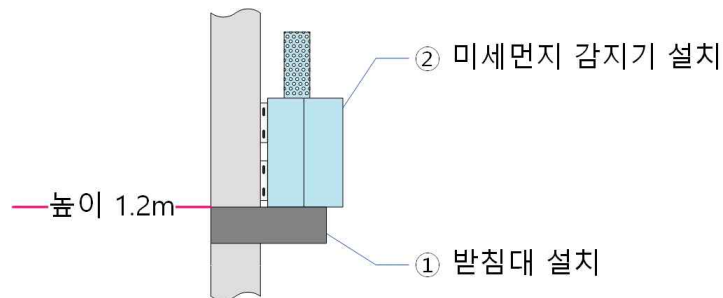
## ③ 현장제어장비 함체 설치

- 설치 높이: 2.0m (현장 제어 장치 하단 기준)



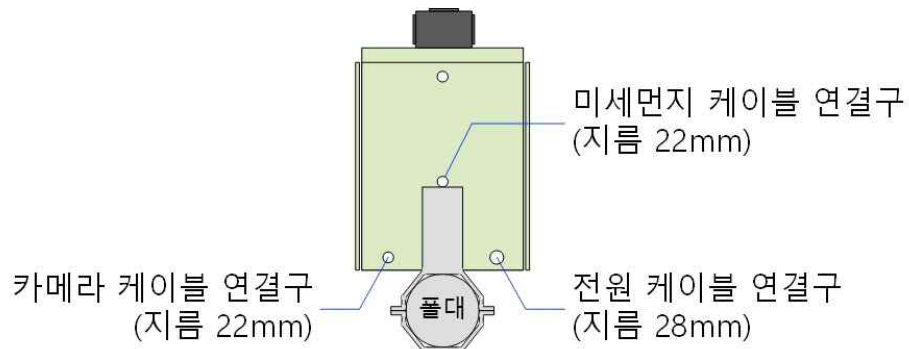
#### ④ 미세먼지 감지기 함체 설치

- 설치 높이: 1.2m (미세먼지 감지기 하단 기준)



#### ⑤ 케이블 연결 및 보호관 설치

- 케이블 보호관을 설치하고 카메라 모듈 함체, 미세먼지 감지기 함체, 전기 계량기에서 UTP 케이블과 전선 케이블을 현장제어장비 함체로 연결한다.
- 현장제어장비 함체 하단에는 지름 22mm 구멍 2개와 지름 28mm 구멍 한 개가 준비되어 있으며, 각각 아래와 같이 사용한다.
  - 28mm 구멍 (폴대 방향): 전원선 인입
  - 22mm 구멍 (상자 중앙): 미세먼지 케이블 인입
  - 22mm 구멍 (폴대 방향): 카메라 케이블 인입

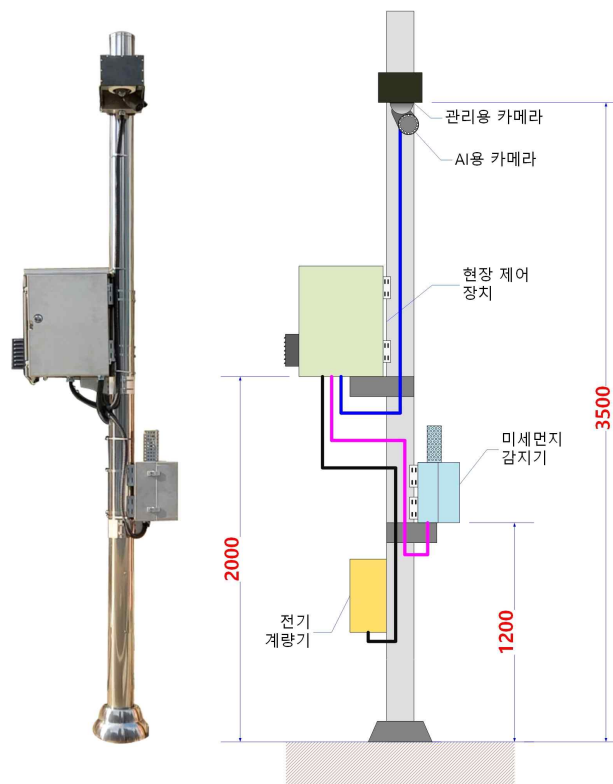


#### ⑥ 전원 연결 및 가동

- 전원선을 차단기에 연결하고 스위치를 올린다.
- 전기는 '한전'의 '사용 전 점검' 후 사용할 수 있다.

## ⑦ 인터넷 케이블 연결 및 네트워크 설정

- 인터넷 모뎀을 현장제어장비 함체 내부 선반에 거치한다.
  - 인터넷 모뎀의 전원을 연결한다. 이때 전원은 위쪽의 6구 전원 멀티탭에 연결하면 안된다. 인터넷 모뎀 전원은 반드시 아래쪽의 4구 전원 멀티탭(붉은색 점선으로 표시)에 연결해야 한다.
  - UTP케이블로 모뎀과 IP공유기와 연결한다. 이때, IP 공유기는 가장 왼쪽에 있는 노란색 단자(푸른색 점선으로 표시)에 네트워크 케이블을 연결한다.
  - IP 공유기에 공인 IP 주소를 포함한 네트워크 정보를 설정한다.
  - 현장의 인터넷에 고정IP가 아닌 변동IP를 신청한 경우 IP공유기의 DDNS 서비스를 활성화시켜서 등록된 URL 정보를 사용하여 현장제어유닛을 중앙관제시스템에 연결한다.
- 버스 정류장에 BIS 시스템이 설치되어 있으면 전기와 인터넷을 공유할 수 있다. 이 경우, 전기와 인터넷을 별도로 신청할 필요가 없다.
- 지장물로 인해 콘크리트 기초 매설이 어려운 경우 현장 타설 할 수 있다.



<설치 완료한 현장 제어 시스템>

# 미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발 최종보고서

초판 인쇄 2022년 5월 13일  
초판 발행 2022년 5월 20일

저 자 안 재 훈

발행인 차 정 인  
발행처 부산대학교 출판문화원  
출판등록 - 제1983-000001호 1983. 11. 10.  
주소 - 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2(장전동)  
전화 - (051) 510 - 1932~3  
전송 - (051) 512 - 7812  
메일 - pnupress@pusan.ac.kr  
홈페이지 - <http://press.pusan.ac.kr>

비매품

ISBN 978-89-7316-747-0 93530

## 주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘미세먼지 저감형 투수성 포장 및 AI 기반 저감효율 예측평가모형 개발’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.