

남북 기후변화 및 건강영향 모니터링 기능  
강화를 위한 스마트 보건지소 모델 개발

- 3차년도 사업 결과보고서 -

2026. 2.

서울대학교 의과대학 통일의학센터

## < 목 차 >

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>1. 서론</b>                                  | <b>4</b>  |
| 가. 연구개발의 필요성                                  | 4         |
| 나. 연구개발의 목표 및 내용                              | 9         |
| <b>2. WHO EWARS 기술 분석 및 한반도 적용을 위한 최적화</b>    | <b>13</b> |
| 가. WHO EWARS의 기술적 구조 및 알고리즘 분석                | 13        |
| 나. 한반도 환경을 고려한 데이터 연계 및 최적화                   | 14        |
| 다. 한국형 조기경보 임계값(Threshold) 정립                 | 16        |
| <b>3. 한반도형 EWARS 실무 매뉴얼 개발 및 적용 시나리오</b>      | <b>18</b> |
| 가. 매뉴얼 개발의 성과                                 | 18        |
| 나. 스마트 보건지소 모델 연계 및 실무 적용 방안                  | 19        |
| <b>4. 스마트 보건지소 기반 기후·재생에너지 통합 모니터링 시스템 모델</b> | <b>23</b> |
| 가. 스마트 보건지소 기반 통합 모니터링 시스템 개요                 | 23        |
| 나. 시스템 운용 테스트 및 결과 분석                         | 24        |
| 다. 한반도 적용을 위한 모델 구조 및 운영 시나리오                 | 29        |
| <b>5. 주요 사업 성과</b>                            | <b>32</b> |
| 가. ICAT 2025 특별세션                             | 32        |
| 나. KCI등재지(적정기술학회지) 논문 수록                      | 33        |
| 다. 정기적 온라인 미팅 수행                              | 36        |
| 라. 매뉴얼·모델 활용 성과                               | 37        |
| <b>6. 결론 및 향후 사업 계획</b>                       | <b>41</b> |
| 가. 결론                                         | 41        |
| 나. 정책 제언 및 실무적 활용 방안                          | 42        |
| 다. 향후 사업 계획                                   | 43        |
| <b>참고문헌</b>                                   | <b>45</b> |

## < 그림 목차 >

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| [그림 4-1] 운용 테스트 실증 지역 선정 .....                                                                                                | 23 |
| [그림 4-2] 스마트 모니터링 시스템 운용 실증 테스트 모습 .....                                                                                      | 24 |
| [그림 4-3] 스마트 모니터링 시스템을 통해 측정한 온도와 습도 현황 .....                                                                                 | 25 |
| [그림 4-4] 스마트 모니터링 시스템을 통해 측정한 기압과 풍속/풍향 현황 ..                                                                                 | 26 |
| [그림 4-5] 기상요소 상관관계 분석 .....                                                                                                   | 27 |
| [그림 4-6] 태양광 일사량을 기반으로한 전력 발전 예측 .....                                                                                        | 28 |
| [그림 4-7] 스마트 보건지소용 스마트 모니터링 시스템 모델(안) .....                                                                                   | 31 |
| [그림 5-1] 적정기술학회 10주년 기념 2025 과학기술 ODA 국제 컨퍼런스 포스터 ·                                                                           | 32 |
| [그림 5-2] 서울대학교 의과대학 소식지 함춘인사이드 2026년 1월호 관련 기사 ..                                                                             | 33 |
| [그림 5-3] JAT 학술지에 게재된 「Development of a Smart Monitoring System<br>for Isolated Health Centers Considering Climate Change」 논문 | 34 |
| [그림 5-4] 사업 추진을 위한 온라인 미팅 수행 .....                                                                                            | 36 |
| [그림 5-5] 한반도 맞춤형 감염병 EWARS 구축 및 운영 실무 매뉴얼 .....                                                                               | 38 |

## 1. 서론

### 가. 연구개발의 필요성

#### □ 한반도 기후변화 가속화에 따른 감염병 발생 양상의 변화

##### ○ 한반도 기온 상승의 가속화와 아열대화 현상

- 지구 온난화를 상회하는 기온 상승: 최근 100년간 한반도의 평균 기온 상승은 약 1.8도에 달하며, 이는 전 지구 평균 상승폭을 크게 상회하는 수치임. 특히 겨울철 기온 상승과 여름철 폭염 일수의 증가는 한반도 생태계를 아열대 기후 환경으로 급격히 변화시키고 있음.
- 생태적 서식 환경의 재편: 이러한 온난화는 감염병 매개체인 모기, 진드기 등의 월동을 가능하게 하고, 이들의 활동 기간을 연중으로 확대하는 결과를 초래함. 과거 특정 시기에만 제한적으로 발생하던 매개체 전파 질환이 연중 상시 발생할 수 있는 환경적 토대가 마련되었음.

##### ○ 기후민감성 질환의 확산 범위 확대 및 불확실성 증대

- 발생 지역의 북상 현상: 과거 휴전선 인근 및 경기 북부 지역에 국한되었던 말라리아 발생 지역이 최근 남하하여 수도권 전역과 강원도 내륙으로 확산되고 있음. 또한 아열대성 질환인 Dengue열을 매개하는 흰줄숲모기의 서식지가 전국적으로 발견되는 등 감염병의 지리적 경계가 무너지고 있음.
- 유행 패턴의 불규칙성: 집중호우, 가뭄, 태풍 등 이상기후의 빈도가 잦아짐에 따라 매개체의 번식 주기가 불규칙해지고 있으며, 이는 감염병 유행의 정점(Peak)을 예측하기 어렵게 만들. 기존의 통계적 추정치만으로는 대응할 수 없는 대규모 아웃브레이크(Outbreak)의 위험성이 상존함.

##### ○ 남북 접경 지역의 특수성과 보건 안보 위기

- 단일 생태권으로서의 한반도: 남북한은 지리적·생태적으로 연결된 하나의 공동체임. 기후 변화에 따른 감염병의 이동은 정치적 국경에 의해 제한되지 않으며, 특히 말라리아와 같은 비행 매개체 질환은 접경 지역을 통해 양측을 끊임없이 교차 감염시키고 있음.
- 공동 대응 체계의 부재: 북한 지역의 기상 변동과 그에 따른 감염병

발생 정보는 남한 지역의 방역 전략 수립에 있어 핵심적인 변수임에도 불구하고, 실시간 데이터 공유 체계의 부재로 인해 접경 지역 보건 안보에 큰 공백이 발생하고 있음. 기후 위기 시대에 대응하기 위해서는 남북이 공통으로 사용할 수 있는 표준화된 감시 기술 도입이 절실함.

#### ○ 과학적 예측 기반의 방역 행정으로의 전환 필요성

- 사후적 대응의 경제적·사회적 한계: 환자 발생 후 방역을 강화하는 현재의 '사후적 감시(Reactive Surveillance)' 체계는 대규모 유행 차단에 한계가 명확함. 감염병 확산으로 인한 의료비용 증가, 노동력 손실, 사회적 불안감을 고려할 때 선제적 방역으로의 전환은 국가적 과제임.
- 데이터 기반 의사결정 체계 구축: 기상청의 고해상도 기후 데이터와 감염병 빅데이터를 결합하여 유행 가능성을 수 주 전에 예보하는 시스템은 행정 자원을 적소에 배치하고 방역 효율성을 극대화할 수 있는 유일한 대안임. 이를 통해 기후 위기에 강인한 지능형 보건 의료 체계를 구축해야 함.

### □ 기존 사후적 감시체계의 한계와 선제적 대응의 요구

#### ○ 환자 신고 기반 감시체계의 구조적 타임랙(Time-lag)과 한계

- 발생 후 인지의 시간적 지체: 현재의 법정 감염병 감시체계는 병의원을 통한 '환자 발생 신고'에 의존함. 잠복기, 의료기관 내원 시간, 진단 및 신고 과정을 고려할 때, 실제 지역사회에 유행이 시작된 시점과 방역 당국이 이를 인지하는 시점 사이에는 최소 수일에서 수주의 시간적 격차가 발생함.
- 확산 차단의 골든타임 상실: 환자가 보고된 시점은 이미 감염원이 지역사회 내에 상당 부분 확산된 이후인 경우가 많음. 이러한 '사후적 인지(Reactive Recognition)' 구조는 대규모 유행으로의 발전을 조기에 차단해야 하는 방역의 핵심 목표인 '골든타임' 확보를 어렵게 함.
- 기후 변동성에 대한 대응력 부재: 기존 체계는 과거 발생 데이터에 기반한 정적인 감시를 수행함. 그러나 기온 급등이나 집중호우와 같은 갑작스러운 기상 이변에 따른 감염병 폭발적 유행(Outbreak) 가능성을 사전에 감지하고 대비하는 기능은 결여되어 있음.

#### ○ 방역 행정 자원 배분의 비효율성

- 경험적 판단에 의존한 자원 투입: 과학적 예측 지표가 부재한 상황에

서 방역 자원(방역 인력, 살충제, 예방 백신 등)의 배분은 주로 전년도 발생 통계나 담당자의 경험적 판단에 의존함. 이는 특정 지역의 위험도가 급증하는 상황을 사전에 반영하지 못해 자원의 낭비 혹은 부족 현상을 초래함.

- 정밀 방역(Precision Quarantine)의 부재: 전국적으로 일률적인 방역 지침을 적용함에 따라, 실제 위험 지역에 대한 집중적인 조치가 이루어지지 못해 방역 행정의 가성비와 효율성이 저하되는 결과를 낳고 있음.

#### ○ 선제적 대응(Proactive Response) 체계로의 패러다임 전환 요구

- 예측 기반의 조기경보(Early Warning) 필요성: 기상 인자와 감염병 발생 사이의 상관관계를 분석하여 유행 가능성을 수 주 전에 예보하는 체계가 도입되어야 함. 이를 통해 환자가 발생하기 전, 매개체 방제나 예방 활동을 선제적으로 실시함으로써 유행 자체를 미연에 방지하거나 최소화할 수 있음.
- 데이터 중심의 지능형 방역 거버넌스: 빅데이터와 통계 모델링을 활용한 객관적 위험도 지표는 방역 행정의 근거가 됨. 이는 예산 편성, 인력 배치, 대국민 홍보 등에 있어 과학적인 의사결정 체계를 구축하는 토대가 됨.
- 남북 접경 지역의 보건 안보 강화: 특히 지형적·기상적 변동이 심한 접경 지역에서는 선제적 대응 체계가 보건 안보의 핵심임. 북한 지역의 기상 데이터와 발생 트렌드를 결합한 조기경보 모델은 국경을 초월한 감염병 유입에 대비하는 강력한 방어선 역할을 수행하게 됨.

### □ WHO EWARS 도입의 효율성 및 한글 매뉴얼 개발의 시급성

#### ○ 검증된 글로벌 표준(WHO EWARS) 채택을 통한 사업의 신뢰성 및 효율성 확보

- 중복 투자 방지 및 개발 비용 절감: 독자적인 감염병 조기경보 알고리즘과 시스템을 바닥부터 구축하는 방식은 막대한 시간과 예산, 그리고 임상적 검증이 요구됨. WHO(세계보건기구)가 개발하고 전 세계 보건 현장에서 이미 그 유효성이 검증된 EWARS 패키지를 활용함으로써, 시스템 개발에 소요되는 불필요한 행정적·재정적 자원 낭비를 방지하고 사업의 가성비를 극대화함.

- 국제 표준과의 호환성 및 신뢰도 제고: WHO EWARS는 이동유행기준법(MEM) 등 공신력 있는 통계 기법을 기반으로 설계되어 있음. 국제적으로 통용되는 표준 시스템을 채택함으로써 분석 결과에 대한 학술적·정책적 신뢰도를 확보할 수 있으며, 이는 향후 국제 기구와의 보건 협력 시 기술적 일관성을 유지하는 핵심 자산이 됨.

#### ○ 기술적 진입장벽 해소를 위한 국문화 및 최적화의 필연성

- R 기반 오픈소스 운영의 난이도 극복: WHO EWARS는 R 프로그래밍 언어와 RStudio 환경에서 구동되는 전문가용 도구임. 높은 성능에도 불구하고, 코딩 지식이 부족한 국내 보건 실무자나 보건지소 담당자가 이를 직접 운용하기에는 기술적 장벽이 매우 높음. 따라서 시스템의 복잡한 로직을 알기 쉽게 풀이하고, 클릭 몇 번으로 결과 도출이 가능하도록 안내하는 한글 매뉴얼은 시스템 도입의 성패를 결정짓는 핵심 요소임.
- 한국형 데이터 환경에 최적화된 가이드: WHO의 원형 시스템은 범용적인 변수를 사용하므로, 국내 질병청의 감염병 발생 데이터와 기상청의 관측 자료(기온, 습도, 강수량 등) 규격을 그대로 입력할 경우 오류가 발생할 수 있음. 국내 공공 데이터 규격에 맞춘 데이터 전처리(Pre-processing) 과정과 한국 특유의 보안망 환경(내부망/외부망 분리)에서의 설치법을 담은 한국형 지침서 개발이 시급함.

#### ○ 스마트 보건지소 모델 안착을 위한 실무 지침서의 역할

- 현장 중심의 보건 의료 지능화: 본 사업의 목적지인 스마트 보건지소가 실무적으로 작동하기 위해서는 단순한 하드웨어 보급을 넘어, 담당자가 스스로 지역의 질병 위험도를 산출할 수 있는 '소프트웨어적 역량'이 수반되어야 함. 한글 매뉴얼은 현장 실무자에게 데이터 입력부터 '안전-주의-경계-심각'의 4단계 신호등 정보 해석까지 일관된 기준을 제공하여, 지역 단위의 과학적 방역 행정을 가능케 함.
- 교육 및 확산의 표준 도구화: 본 프로젝트를 통해 개발된 매뉴얼은 특정 지역에 국한되지 않고, 전국 접경 지역 및 취약 지역 보건지소로 확산될 수 있는 '표준 운영 절차(SOP)'가 됨. 이는 소규모 프로젝트임에도 불구하고, 결과물의 범용적인 확산을 통해 국가 전체의 기후 변화 대응력을 상향 평준화하는 전략적 교두보 역할을 수행함.

#### ○ 남북 보건 협력 시 기술적 매개체로서의 가치

- 남북 공동 활용 가능성: WHO라는 공신력 있는 기구의 자산을 매개로

한 한글 매뉴얼은 향후 남북 보건 협력 시 정치적 민감도를 최소화하면서 기술을 전수할 수 있는 유용한 도구가 됨. 북한의 보건 인력 또한 국제기구 표준 시스템에 대한 거부감이 적으므로, 본 매뉴얼은 향후 한반도 전체의 감염병 공동 감시망을 구축하는 데 있어 가장 현실적이고 즉각적인 기술적 지침서가 될 것임.

#### □ 지역 단위 기후-건강 대응을 위한 스마트 보건지소 모델 연구개발의 필연성

##### ○ 국가 단위 조기경보체계의 한계를 보완하는 지역 기반 관측 거점 필요성

- 기후변화 대응을 위한 조기경보체계는 통상 국가 단위에서 운영되나, 기후 위험은 지역별로 상이하게 나타남. 특히 강수, 기온, 습도 등 미시적 기후 변수는 지역 보건지소 단위에서 직접 측정·수집될 때 보다 신속하고 정밀한 위험 예측과 대응이 가능함. 스마트 보건지소는 이러한 지역 맞춤형 기후-건강 관측의 최전선 거점으로 기능할 수 있음.

##### ○ 북한 농촌·산간 지역의 취약성을 고려한 지역 맞춤형 보건 대응 모델 필요

- 북한의 의료 인프라는 농촌 및 산간 지역을 중심으로 특히 열악하며, 기후변화로 인한 건강 영향(감염병, 환경성 질환 등)에 대한 지역 차원의 대응 역량이 매우 제한적임. 중앙 병원 중심의 대응이 아닌, 보건지소 기반의 분산형 기후-건강 모니터링 모델은 북한의 현실적 제약 조건을 고려할 때 가장 실현 가능성이 높은 접근임.

#### □ 전력 접근성이 낮은 지역을 고려한 재생에너지 기반 스마트 보건지소 모델의 필요성

##### ○ 전력 인프라 취약 지역에서도 지속 가능한 보건서비스 제공 가능성

- 농촌 및 도서·산간 지역은 상시적 전력 공급이 어려운 경우가 많으며, 이는 보건의료 서비스의 질을 저해하는 핵심 요인임. 재생에너지를 활용한 독립형 전력 공급 시스템을 보건지소에 적용할 경우, 의료 장비 운영과 데이터 수집의 안정성을 확보함과 동시에 지역 주민의 건강 점

근성을 실질적으로 개선할 수 있음.

○ 검증된 해외 사례를 기반으로 한 기술적·정책적 확장 가능성

- 서울대학교는 넬슨 만델라 아프리카 과학기술원과 협력하여 탄자니아 교외 지역에 스마트 독립전력망 기반 태양광 발전소를 구축하고, 원격 모니터링을 통해 지속 가능한 운영 모델을 검증한 바 있음. 해당 사례는 북한과 유사한 전력 취약 환경에서도 스마트 보건지소 모델이 기술적으로 구현 가능함을 시사하며, 북한 적용을 위한 중요한 선행 근거가 됨.

□ 단계적 연구개발을 통한 스마트 보건지소 모델의 실증 및 확산 필요성

○ 기초 연구-실험(pilot)-실용 모델 제시로 이어지는 단계적 접근의 필요

- 북한 적용을 전제로 한 스마트 보건지소 모델은 단기간에 완성될 수 있는 사업이 아니며, 기초 연구를 통한 타당성 검토, 남한 내 실험적 적용(pilot test), 실용적 모델 정립을 거치는 다년도 연구가 필수적임.

○ 다기관 협력을 통한 적정기술 기반 맞춤형 모델 개발

- 본 연구는 서울의대 통일의학센터를 중심으로 미네소타대학 및 적정기술학회와의 협력을 통해 개발도상국 사례를 분석하고, 이를 남한에서 실증한 후 북한에 적용 가능한 모델로 전환하는 것을 목표로 함. 이는 남북한의 환경적·정책적 차이를 반영한 적정기술 기반 접근으로, 실효성과 지속가능성을 동시에 확보하기 위한 전략임.

나. 연구개발의 목표 및 내용

□ WHO EWARS 기반의 한반도 맞춤형 실무 기술 매뉴얼 확립

○ 기술의 현지화 및 표준화

- WHO EWARS의 핵심 분석 엔진을 분석하여 국내 기상청 및 질병관리청의 데이터 규격과 연동하고, 한반도 특유의 감염병 발생 패턴을 반영한 임계값 설정 가이드를 표준화함.

○ 실무 중심의 운용 체계 구축

- 복잡한 R 통계 패키지 구동 방식을 비전문가 관점에서 재구성하여, 데이터 입력부터 경보 해석까지의 전 과정을 시각화된 매뉴얼로 제공함으로써 스마트 보건지소의 분석 역량을 실질적으로 상향 평준화함.

○ 남북 공동 활용 기반 마련

- 국제기구의 표준 시스템을 채택함으로써 향후 남북 보건 의료 협력 시 발생할 수 있는 기술적 이질성을 사전에 차단하고, 한반도 전역을 아우르는 감염병 조기경보 체계의 기술적 마스터플랜을 제시함.

□ 한반도 맥락을 반영한 WHO EWARS 현지화 적용 체계 정립

○ 한반도 기후·질병 특성을 반영한 EWARS 활용 구조 설정

- 한반도의 기후 특성과 말라리아, 일본뇌염 등 기후 민감성 질환의 발생 특성을 분석하여, WHO EWARS의 역할을 기존 국가 감염병 감시 체계를 대체하는 시스템이 아닌 보완적 조기경보 도구로 정의함.
- 주간(Weekly) 단위의 시간 축과 시·군·구 및 권역(Zoning) 단위의 공간 축을 기준으로 분석 단위를 설정하여, 지역 단위 감염병 위험 변화를 보다 정밀하게 포착할 수 있는 분석 체계를 마련함.

○ WHO EWARS 시스템 설치·구동을 위한 한글 실무 가이드 구축

- R 및 RStudio 기반 운영 환경 구축을 표준화하고, 분석에 필수적인 패키지 구성 및 환경 관리 절차를 매뉴얼에 체계적으로 수록함.
- 공공기관의 보안 환경을 고려하여 Docker 컨테이너를 활용한 설치 방식과 데이터·코드·결과물(Output) 관리 폴더 구조를 표준화함으로써, 실무자가 현장에서 즉시 적용 가능한 인프라 가이드를 제시함.

□ 데이터 처리-예측-의사결정을 연결하는 EWARS 실무 운영 프로토콜 확립

○ 데이터 전처리 및 예측 알고리즘 적용 지침 구체화

- 질병 발생 데이터와 기상 데이터(기온, 강수량 등)를 EWARS 시스템 규격에 맞게 변환하는 데이터 정제(Cleaning) 및 변수 매핑(Mapping) 지침을 개발함.
- 이동유행기준법(MEM)과 토착화 채널(Endemic Channel) 기법을 적용

하여 평년 수준을 상회하는 이상 징후를 탐지하는 예측 모델 운용 절차를 명확히 제시함.

○ 결과 해석, 행정 대응, 확산을 고려한 단계별 운영 로드맵 제시

- 4단계 신호등 체계(안전-주의-경계-심각)에 따른 경보 결과 시각화 및 해석 가이드를 마련하고, 자동화된 방역 조치가 아닌 전문가 판단을 거치는 Human-in-the-loop 기반 의사결정 구조를 실무 지침으로 정립함.
- 도입기(정착·안정화)-확장기(다부처 데이터 통합)-지능화기(AI 기반 고도화)로 이어지는 3단계 발전 로드맵을 제시하여, EWARS 기반 조기경보체계의 지속 가능성과 확산 가능성을 확보함.

□ 스마트 보건지소 기반 기후·재생에너지 통합 모니터링 시스템 구축을 통한 현장 적용 가능성 검증

○ 격오지역 보건지소에서의 기후 변화 대응 및 보건안보 역량 강화

- 기후 민감 질병 발생에 영향을 미치는 기온, 습도, 기압, 풍향·풍속 등 핵심 기상 요소를 보건지소 단위에서 상시 측정·수집함으로써, 지역 단위의 기후 위험을 조기에 인지하고 대응할 수 있는 기반을 마련함.
- 중앙 단위 조기경보체계(EWARS 등)의 한계를 보완하여, 지역 보건지소에서 실질적으로 활용 가능한 기후-건강 연계 모니터링 모델을 제시함.

□ 스마트 보건지소용 기후 민감 질병 대응을 위한 기상 데이터 수집·분석 체계 구축

○ 기후 민감 질병 예측을 위한 현장 기반 기상 데이터 실증

- 평창군 대화보건지소를 실증 지역으로 선정하여, 산악 격오지역 특성을 반영한 기온, 습도, 기압, 풍향·풍속 등의 기상 데이터를 장기간 수집·분석함.
- 수집된 기상 데이터와 기존 연구에서 도출된 기후 민감 질병 발병 특성과의 연계 가능성을 검토하여, 향후 지역 진료 데이터와 결합 가능한 예측 시스템의 기초 자료를 확보함.

○ 실증 운용을 통한 시스템 적용 한계 및 개선 요소 도출

- 센서 설치 구조, 전원 공급 방식, 보건지소 운영 특성(야간 전원 차단 등)으로 인한 데이터 수집 제약을 분석하고, 향후 실운용을 위한 기술적 보완 사항을 도출함.

#### □ 재생에너지 기반 오지 보건지소 전력 확보 가능성 분석 및 스마트 모니터링 시스템 모델 제안

##### ○ 태양광 기반 재생에너지 생산 가능성 실증 및 예측

- 스마트 모니터링 시스템을 통해 일사량 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 태양광 패널 적용 시 확보 가능한 발전량을 산출함으로써, 오지 보건지소의 자립적 전력 운용 가능성을 검증함.
- 동계 후반기 기준 분석 결과를 통해, 계절별 발전량 차이를 고려한 재생에너지 시스템 설계 필요성을 제시함.

##### ○ 스마트 보건지소용 통합 모니터링 시스템 모델 제시

- 기상 예측 시스템, 재생에너지 발전·저장(예측) 시스템, 전력 사용량 예측 및 관리 체계를 통합한 스마트 보건지소용 모니터링 시스템 모델을 제안함.
- 해당 모델은 북한을 포함한 개발도상국 오지 지역 보건지소에 적용 가능한 적정기술 기반 모델로서, 기후 변화 대응과 보건의료 서비스 지속 가능성을 동시에 확보할 수 있는 구조적 대안을 제시함.

## 2. WHO EWARS 기술 분석 및 한반도 적용을 위한 최적화

### 가. WHO EWARS의 기술적 구조 및 알고리즘 분석

#### □ 시스템 아키텍처 및 구동 프레임워크 분석

##### ○ R 기반 오픈소스 프레임워크의 범용성

- WHO EWARS는 전 세계 보건 전문 가들이 공동으로 개선하고 검증한 R 프로그래밍 언어 기반의 패키지임. 통계 분석의 투명성이 보장되며, 특정 벤더에 종속되지 않는 오픈소스 특성상 한국의 공공 보건 의료 데이터 체계와 유연한 결합이 가능함.

##### ○ Docker 기반의 컨테이너화 운영

- 시스템의 복잡한 라이브러리 의존성 문제를 해결하기 위해 Docker 기술을 채택함. 이는 보안이 엄격한 국내 보건소 내부망 환경에서도 환경 설정의 오류 없이 동일한 분석 성능을 재현할 수 있게 하며, 하드웨어 자원의 효율적 배분을 가능케 함.

##### ○ 모듈형 데이터 처리 구조

- 데이터 입력(Input), 통계 엔진(Analysis), 시각화 대시보드(Output)가 독립된 모듈로 구성되어 있어, 한국의 기상 데이터나 질병 신고 서식 변화에 맞춰 특정 모듈만 개보수하여 운용할 수 있는 기술적 유연성을 갖춘.

#### □ 핵심 분석 알고리즘의 통계적 매커니즘

##### ○ 이동유행기준법(Moving Epidemic Method, MEM)

- 감염병의 계절적 변동성을 정밀하게 파악하기 위한 핵심 알고리즘임. 과거 수년간의 질병 발생 데이터를 기반으로 유행이 시작되는 시점(Pre-epidemic)과 종료되는 시점(Post-epidemic)을 통계적으로 정의함.
- 이를 통해 단순 누적 수치 비교가 아닌, 해당 주차(Week)에 기대되는 발생 수준을 산출하여 현재의 유행 여부를 객관적으로 판정함.

### ○ 토착화 채널(Endemic Channel) 기법

- 지역별로 고착화된 질병 발생의 '기저 수준(Baseline)'을 설정하는 기법임. 보통 과거 5~10년치 데이터를 사용하여 평균 발생량과 신뢰구간(Confidence Interval)을 산출함.
- 현재 발생량이 이 채널의 상한선을 이탈할 경우 즉각적인 이상 징후(Aberration)로 간주하며, 이는 한국의 말라리아와 같이 특정 지역에 토착화된 질병의 변동을 감시하는 데 최적화된 방식임.

## □ 확률 모델 기반의 예측 및 경보 논리

### ○ 시계열 분석과 기상 상관성 결합

- WHO EWARS는 단순 발생 통계를 넘어 기온, 습도, 강수량 등 외부 환경 변수와 질병 발생 사이의 상관관계를 확률 모델로 분석함. 특히 매개체(모기 등)의 생애 주기에 따른 '기상 요인과 질병 발생 간의 시차(Time-lag)'를 모델에 반영하여 2~4주 후의 위험도를 선제적으로 계산함.

### ○ 통계적 임계값(Threshold)에 의한 자동 경보

- 분석된 확률 수치는 사전에 설정된 통계적 임계값에 대입됨. 이 임계값은 한국의 질병 발생 밀도와 행정적 대응 역량을 고려하여 미세 조정(Fine-tuning)되며, 최종적으로 실무자가 직관적으로 인지할 수 있는 '4단계 신호등 시스템'으로 전환되어 출력됨.

## 나. 한반도 환경을 고려한 데이터 연계 및 최적화

## □ 한국형 공공데이터 변수 매핑 및 표준화

### ○ 이종 데이터 간의 정합성 확보

- WHO EWARS의 글로벌 표준 입력 규격과 국내 보건·기상 행정 데이터 간의 간극을 해소하기 위한 변수 매핑 작업을 수행함. 질병관리청의 '감염병 신고 데이터'와 기상청의 '지상기상관측(ASOS/AWS) 데이터'를 추출하여 시스템이 인식 가능한 데이터셋으로 표준화함.

### ○ 데이터 변수 정제

- 매뉴얼 Chapter 6~7의 지침에 따라, 국내 데이터의 특수성(예: 신고

시점과 발병 시점의 차이, 기상 관측소별 좌표 정보 등)을 반영함. 특히 R 기반 분석 엔진에서 오류 없이 처리될 수 있도록 날짜 형식, 결측치 처리, 데이터 유형(Numeric/Factor) 변환 로직을 매뉴얼에 명시함.

## □ 한반도 방역 체계를 고려한 분석 단위의 현지화

### ○ 주간(Weekly) 단위의 시간 축 최적화

- 매뉴얼 Chapter 1.5에서 강조하듯, 감염병 신고의 일별 편차(주말 효과 등)를 상쇄하고 기상 인자와의 유의미한 상관성을 도출하기 위해 분석 단위를 '역학 주차(Epidemiological Week)'로 고정함. 이는 국내 감염병 감시 연보 및 WHO의 주간 보고 체계와 일치시켜 결과의 상호 비교 가능성을 높임.

### ○ 공간 단위의 다각화(Zoning)

- 시·군·구 중심의 미시적 분석과 더불어, 감염병의 광역적 확산 패턴을 파악하기 위해 인접 지자체를 묶는 '권역(Zoning)' 단위 분석 기능을 추가함. 이는 통계적 모수(환자 수)가 적은 희귀 기후민감 질환의 분석 안정성을 확보하기 위한 최적화 전략임.

## □ 기상 지표와 감염병 발생 간의 상관성 및 시차(Lag) 분석

### ○ 한반도 특화 기상 변수 설정

- 한반도 내 매개체(모기 등) 증식에 직접적인 영향을 미치는 평균 기온, 최고 기온, 누적 강수량, 상대 습도를 주요 분석 변수로 채택함. 매뉴얼 Chapter 8.2의 기술적 근거를 바탕으로 기상 요인이 질병 발생으로 이어지는 생물학적 메커니즘을 모델에 반영함.

### ○ 시차(Time-lag) 효과의 산출

- 기상 이변 발생 후 실제 환자 신고까지 발생하는 시차(보통 2~4주)를 통계적으로 계산함. R 분석 코드를 통해 지역별·질환별로 가장 높은 상관관계를 보이는 시차를 찾아내어, 조기경보의 예측력을 극대화함.

## □ 국내 IT 및 보안 인프라 대응 최적화

### ○ 공공망 내 설치 및 구동 인프라 표준화

- 매뉴얼 Chapter 4~5의 내용을 바탕으로, 외부 클라우드 사용이 제한적인 국내 보건소 내부망 환경에서 시스템을 독립적으로 구동하기 위한 '로컬 호스트(Local Host)' 환경 설정 지침을 마련함.
- 오프라인 패키지 관리 체계
  - 시스템 운영에 필수적인 R 패키지들을 인터넷 연결 없이도 설치하고 관리할 수 있도록 renv 패키지 등을 활용한 오프라인 라이브러리 구축 방안을 기술하여 현장 보급 가능성을 높임.

## 다. 한국형 조기경보 임계값(Thrsehold) 정립

### □ 통계적 확률 모델에 기반한 경보 기준 산출

- 과거 데이터 기반의 상한선 설정
  - 매뉴얼 Chapter 8~9의 기술적 근거를 바탕으로, 과거 5~10년간의 감염병 발생 데이터를 활용하여 각 주차(Week)별 '기대 발생치'를 산출함. 단순한 평균값을 넘어 통계적 신뢰구간(Confidence Interval)을 설정함으로써, 우연한 변동과 실제 유행 징후를 구분하는 과학적 임계값을 정립함.
- 질병 특이적 임계값 적용
  - 말라리아와 같이 발생 건수가 적으나 위해도가 큰 질병과, 매년 일정 수준 발생이 지속되는 토착성 질환의 특성을 구분하여 임계값을 다각화함. 특히 한국의 낮은 감염병 발생 밀도를 고려하여, 단 1건의 이상 신고에도 민감하게 반응할 수 있도록 모델의 민감도(Sensitivity)를 조정함.

### □ 4단계 신호등(Traffic Light) 경보 체계 및 가시화

- 단계별 위험 수준 정의
  - 시스템 분석 결과를 실무자가 직관적으로 이해할 수 있도록 '안전-주의-경계-심각'의 4단계 시각화 체계를 구축함. 이는 매뉴얼 Chapter 10의 결과 도출 프로세스를 반영한 것으로, 각 단계는 다음과 같은 통계적 의미를 가짐.
  - 안전(Safe/Green): 발생 수준이 평년 신뢰구간 내에 머무는 상태.

- 주의(Alert/Yellow): 발생 추세가 상승 곡선을 그리며 임계값에 근접하는 상태.
- 경계(Warning/Orange): 발생량이 통계적 상한선을 초과하여 유행 확산이 우려되는 상태.
- 심각(Emergency/Red): 폭발적인 아웃브레이크(Outbreak)가 발생하여 즉각적인 행정 조치가 필요한 상태.

○ 현장 중심의 대시보드 구현

- 복잡한 통계 수치 대신 색상과 지수를 활용한 대시보드 인터페이스를 통해, 스마트 보건지소 실무자가 별도의 분석 과정 없이도 지역의 위험도를 즉각 인지할 수 있도록 최적화함.

□ 오경보(False Alarm) 최소화 및 행정 효율화 전략

○ 임계값 미세 조정(Fine-tuning)

- 시스템의 과도한 민감도로 인한 행정력 낭비를 막기 위해, 실제 과거 유행 사례를 대입하여 경보의 정확성을 검증함. 매뉴얼 Chapter 11.2의 1단계(정착 및 안정화) 전략에 따라 한국 실정에 맞는 최적의 임계값 도출 과정을 명시함.

○ 전문가 개입형(Human-in-the-loop) 판단 구조

- 시스템이 산출한 경보가 즉각적인 방역 강제로 이어지는 것이 아니라, 역학조사관 등 전문가의 현장 확인과 맥락적 해석을 거쳐 최종 방역 수위를 결정하도록 하는 '면책 조항' 및 '운영 가이드라인'을 매뉴얼에 포함함. 이는 데이터의 과학적 수치와 현장의 실무적 판단을 조화시키기 위한 핵심적인 장치임.

### 3. 한반도형 EWARS 실무 매뉴얼 개발 및 적용 시나리오

#### 가. 매뉴얼 개발의 성과

##### □ 매뉴얼 개발의 배경 및 목적

###### ○ 기술적 장벽의 해소

- WHO EWARS는 강력한 분석 기능을 보유하고 있으나, 영문 인터페이스와 R 통계 패키지 기반의 구동 방식으로 인해 국내 보건 실무자가 접근하기에 기술적 난이도가 높음. 본 매뉴얼은 이러한 진입 장벽을 낮추어 보건지소 인력이 독립적으로 시스템을 운용할 수 있도록 돕는데 목적이 있음.

###### ○ 실무 중심의 지식 전수

- 단순한 이론 전달이 아닌, 데이터 확보부터 결과 해석까지의 전 과정을 '따라하기' 식(Step-by-Step)으로 구성하여, 정보화 역량에 관계없이 표준화된 분석 결과를 도출할 수 있도록 지원함.

##### □ 매뉴얼의 전체 구성 체계

###### ○ 본 매뉴얼은 총 5개의 파트와 11개의 장으로 구성되어 있으며, 도입부터 사후 관리까지 논리적 흐름에 따라 설계됨.

- Part I. 도입 및 배경 (Chapter 1~2): 조기경보시스템의 개념, 한반도 기후변화와 감염병의 상관성, EWARS의 역할 정의.
- Part II. 시스템 환경 설정 (Chapter 3~5): R 및 RStudio 설치, Docker를 활용한 보안 환경 대응, 필수 라이브러리 구성 방법.
- Part III. 데이터 준비 및 분석 (Chapter 6~9): 국내 기상/질병 데이터 전처리, 데이터 매핑 기술, MEM 및 토착화 채널 알고리즘 적용 가이드.
- Part IV. 결과 도출 및 대응 (Chapter 10): 4단계 신호등 경보 대시보드 해석 방법 및 경보 단계별 보건지소 실무 대응 프로토콜(SOP).
- Part V. 향후 과제 (Chapter 11): 시스템 고도화 로드맵 및 운영 안정화 전략.

## □ 사용자 친화적 가이드 설계 원칙

### ○ 시각적 직관성 확보

- 모든 조작 과정에 실제 구동 화면 스크린샷을 첨부하고, 클릭해야 할 버튼이나 입력해야 할 코드를 별도의 색상과 상자(Box)로 강조하여 가독성을 높임.

### ○ 실무자용 특화 요소 배치

- [Check Point]: 데이터 입력 시 자주 발생하는 오류나 주의사항을 별도로 안내.
- [Technical Note]: 통계적 개념(신뢰구간, p-value 등)에 대한 보충 설명 제공.
- [Q&A]: 현장에서 발생할 수 있는 주요 기술적 문제에 대한 해결책 수록.
- 표준화된 서식 제공: 보건지소에서 즉시 사용할 수 있는 데이터 입력용 엑셀 템플릿 서식과 결과 보고용 양식을 부록으로 제공하여 실무 활용도를 극대화함.

## □ 매뉴얼의 활용 범위 및 기대 효과

### ○ 현장 중심의 거버넌스 강화

- 본 매뉴얼은 스마트 보건지소의 핵심 운영 지침서로 활용되며, 이를 통해 중앙 집중식 방역에서 지역 맞춤형 선제 방역 체계로의 전환을 가속화함.

### ○ 남북 보건 협력의 기술 표준

- 국제 표준(WHO)을 기반으로 한글화된 본 지침서는 향후 남북 접경 지역의 공동 방역 사업 시 기술적 이질성을 극대화하는 표준 교재로 활용될 수 있음.

## 나. 스마트 보건지소 모델 연계 및 실무 적용 방안

## □ 스마트 보건지소 기반의 현장 맞춤형 감시 모델

### ○ 표준화된 데이터 입력 가이드라인 및 템플릿 확립

- 데이터 호환성 확보를 위한 구조 설계: 매뉴얼 Part III(Chapter 6~7)에 근거하여, 국내 보건 행정 데이터와 기상 데이터를 시스템이 인식할 수 있는 표준 템플릿(CSV/Excel) 형태로 정의함. 이는 실제 데이터 분석 수행 전, 데이터 규격을 단일화하여 어떤 지역의 보건지소에서도 즉시 적용 가능한 데이터 처리 프로토콜을 마련한 것임.
  - 변수 매핑 및 전처리 지침 수립: 기상청의 관측 데이터와 질병 신고 자료를 시스템 입력 변수에 맞게 변환하는 전처리(Cleaning) 로직을 매뉴얼화함. 이를 통해 실무자가 향후 확보될 지역 데이터를 시스템에 오류 없이 매칭할 수 있는 기술적 준비를 완료함.
- 시스템 독립 구동을 위한 기술적 인프라 표준화
- Docker 컨테이너 기반의 설치 자동화: 매뉴얼 Part II(Chapter 4~5)의 핵심 성과로, 복잡한 통계 환경과 R 패키지 라이브러리를 하나로 패키징한 Docker 기반 운영 환경을 구축함. 이는 전문가가 부재한 보건지소 현장에서도 매뉴얼의 설치 단계만 따라가면 동일한 분석 성능을 보장받을 수 있는 인프라 표준 모델임.
  - 오프라인 라이브러리 관리체계 구축: 보안상 인터넷 연결이 제한되는 공공기관(보건지소) 내부망의 특수성을 고려하여, 분석에 필요한 패키지들을 사전에 로컬로 구축하는 방안(renv 활용 등)을 수록함. 이는 인프라가 취약한 지역에서도 시스템이 안정적으로 구동될 수 있도록 최적화된 결과물임.
- 스마트 보건 행정의 과학적 의사결정 모델 제시
- 알고리즘(MEM 등)의 운용 설정 최적화: 매뉴얼 Part III(Chapter 8~9)에서 다루는 이동유행기준법(MEM)과 토착화 채널 기법을 한반도 기상 상황에 맞게 설정하는 논리를 정립함. 실제 유행 징후를 어떤 통계적 임계값(Threshold)으로 판단할 것인지에 대한 운영 기준을 매뉴얼에 명시함.
  - 결과 시각화 및 지표 해석 지침: 분석 결과 도출되는 '4단계 신호등 정보' 체계를 스마트 보건지소의 모니터링 대시보드에서 어떻게 해석하고 행정적으로 활용해야 하는지에 대한 가이드라인을 수립함(매뉴얼 Part IV). 이는 보건지소 실무자가 과학적 수치를 근거로 방역 수위를 판단할 수 있는 표준 운영 모델을 제시한 것임.

## □ 경보 단계별 표준 운영 절차(SOP) 수립

### ○ 매뉴얼 기반의 단계별 경보 수준 정의 (Alert Levels)

- 신호등 체계의 통계적 기준 정립: 매뉴얼 Chapter 10.1에 기술된 바와 같이, 분석 알고리즘을 통해 도출된 수치를 4단계(Green, Yellow, Orange, Red)로 시각화함. 이는 복잡한 통계량(p-value, 신뢰구간 등)을 비전문가인 보건지소 실무자가 직관적으로 파악할 수 있도록 변환한 핵심 가이드라인임.
- 안전(Green): 발생 수준이 기대치 이내이며, 상시 모니터링을 유지하는 단계.
- 주의(Yellow): 임계값에 근접하거나 경미하게 상회하여 예의주시가 필요한 단계.
- 경계(Orange): 통계적 상한선을 명백히 초과하여 유행 확산 가능성이 높은 단계.
- 심각(Emergency/Red): 아웃브레이크가 확인되어 비상 대응이 필요한 단계.

### ○ 분석 결과에 따른 보건지소 실무 대응 프로토콜

- 데이터 재검증 및 이상치 확인: 매뉴얼 Chapter 10.2의 지침에 따라, 경보(주의 단계 이상) 발생 시 가장 먼저 입력된 데이터의 오류나 기상 이변 등에 의한 '기술적 오경보' 여부를 재확인하는 절차를 수립함. 이는 방역 자원의 낭비를 막기 위한 필수 검증 단계임.
- 정보 공유 및 보고 체계: 시스템에서 자동 생성된 HTML/PDF 리포트를 활용하여 상급 보건소 및 유관 부서에 상황을 신속히 공유하는 보고 경로를 표준화함. 매뉴얼은 실무자가 별도의 보고서를 작성하지 않고 시스템 출력물을 즉각 활용할 수 있도록 설계됨.

### ○ 전문가 보완형 의사결정 구조 (Human-in-the-loop)

- 시스템 지표와 현장 판단의 결합: 매뉴얼의 '결과 활용' 원칙에 명시된 대로, EWARS의 산출물은 최종 결정이 아닌 '과학적 보조 지표'로 활용함. 보건지소 실무자는 시스템이 제시하는 객관적 수치를 바탕으로 지역의 특수성(행사, 기후 변화 등)을 고려하여 역학 전문가와 함께 최종 대응 수위를 결정함.
- 운영 환류를 통한 임계값 최적화: 매뉴얼 Chapter 11에서 강조하듯, 운영 과정에서 발생하는 경보 사례를 기록하여 향후 지역별 맞춤형 임

계값(Threshold)을 재설정하는 기초 자료로 활용하는 선순환 구조를 제시함.

## □ 남북 접경 지역 및 미래 확산 전략

### ○ 남북 접경 지역의 보건 안보 표준 모델 제시

- 국제 표준 기반의 기술 공유: 매뉴얼 Chapter 11.1에 명시된 바와 같이, WHO EWARS는 글로벌 표준 시스템이므로 향후 남북 접경 지역 내 감염병 공동 대응 시 기술적 이질감을 최소화할 수 있는 자산임. 한글화된 매뉴얼은 접경 지역 보건소와 북측 보건 인력 간의 동일한 분석 언어를 제공하는 가이드라인이 됨.
- 기후 변화 공동 대응 기반: 남북이 공유하는 기후 환경(기온, 강수량 등) 데이터를 동일한 알고리즘에 대입함으로써, 국경을 초월하여 발생하는 기후민감 감염병(말라리아 등)에 대한 선제적 감시 체계의 표준을 수립함.

### ○ 단계별 시스템 정착 및 고도화 로드맵

- 1단계(정착 및 안정화): 본 매뉴얼을 활용하여 지역 보건지소 단위에서 분석 환경을 구축하고, 운영 과정에서 발생하는 기술적 문제와 피드백을 수집하여 가이드를 지속적으로 보완함.
- 2단계(데이터 연계 확장): 현재의 수동 입력 방식에서 나아가, 유관 기관(기상청, 질병청 등)의 공공 데이터 API와 시스템을 직접 연계하여 데이터 입력의 편의성과 실시간성을 높이는 기술적 확장을 도모함.
- 3단계(지능형 감시망 완성): 축적된 운영 데이터를 바탕으로 지역별 맞춤형 임계값(Threshold)을 정교화하고, 매뉴얼에 기술된 통계 모델을 고도화하여 더욱 정밀한 예측력을 갖춘 지능형 방역망으로 전환함.

### ○ 스마트 보건지소 확산 및 실무 교육 자원화

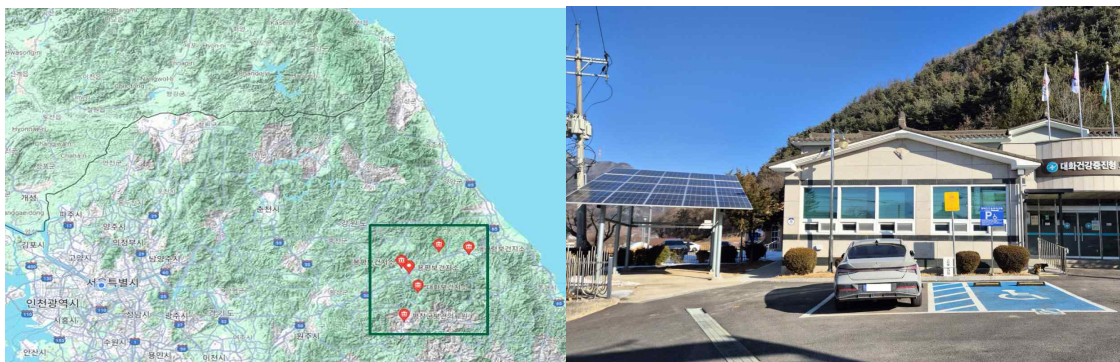
- 표준 교육 교재로의 활용: 본 매뉴얼은 새롭게 구축되는 전국 스마트 보건지소의 감염병 관리 분야 표준 교육 자료로 활용될 수 있음. 매뉴얼 Part II~IV의 '따라하기' 식 구성을 통해 신규 인력의 전문성을 조기에 확보함.
- 지역 방역 거버넌스 강화: 매뉴얼에 명시된 결과 해석 및 대응 로직을 지역 방역 계획 수립의 근거로 채택하여, 데이터에 기반한 지역 맞춤형 보건 행정 모델을 전국적으로 확산시키는 기반으로 삼음.

## 4. 스마트 보건지소 기반 기후·재생에너지 통합 모니터링 시스템 모델

### 가. 스마트 보건지소 기반 통합 모니터링 시스템 개요

#### □ 운용 테스트 실증 지역 선정

- 2차년도 연구를 통해 선정한 북한환경과 유사한 모니터링 지역인 평창군내 10개 보건진료소 및 보건지소 중, 평창군보건의료원의 협조하에 대화보건지소를 실증 지역으로 선정함[그림 4-1].
- 대화보건지소는 산 능선의 끝자락에 위치하여 도심 주거지와 다소 이격되어 있어 타 보건지소에 비해 산악 격오지역의 특성을 잘 보여줄 수 있을 것으로 판단하였음.



(a) 평창군 보건지소 현황

(b) 대화보건지소

[그림 4-1] 운용 테스트 실증 지역 선정

#### □ 스마트 모니터링 시스템 운용 실증 테스트

- 2차년도 연구를 통해 개발된 스마트 모니터링 시스템은 실증 지역으로 선정된 대화보건지소의 태양광 패널 옆에 설치되어 24시간 온도, 습도, 풍향 및 풍속, 기압 등의 기상 데이터와 일사량을 측정하여 서버로 전송하였음.
- 연구의 한계로 태양광 패널을 직접 운용하기 제한되어, 스마트 모

니터링 시스템을 구동하는 전원은 대화보건지소의 협조를 받아 상전을 연결하여 운용하였으며, 보건지소 운영 특성으로 인해 모니터링 시스템의 전원이 차단되는 상황이 간헐적으로 발생하였음.

- 한편, 기상 및 일사량 데이터 수집 조건은 외부의 영향이 최소화되도록 설치하였음.
- [그림 4-2]는 대화보건지소에 설치된 기후변화를 고려한 재생에너지 스마트 모니터링 시스템의 모습으로, 설치된 시스템은 2025년 2월부터 현재까지 데이터를 수집하여 전송하고 있음.



[그림 4-2] 스마트 모니터링 시스템 운용 실증 테스트 모습

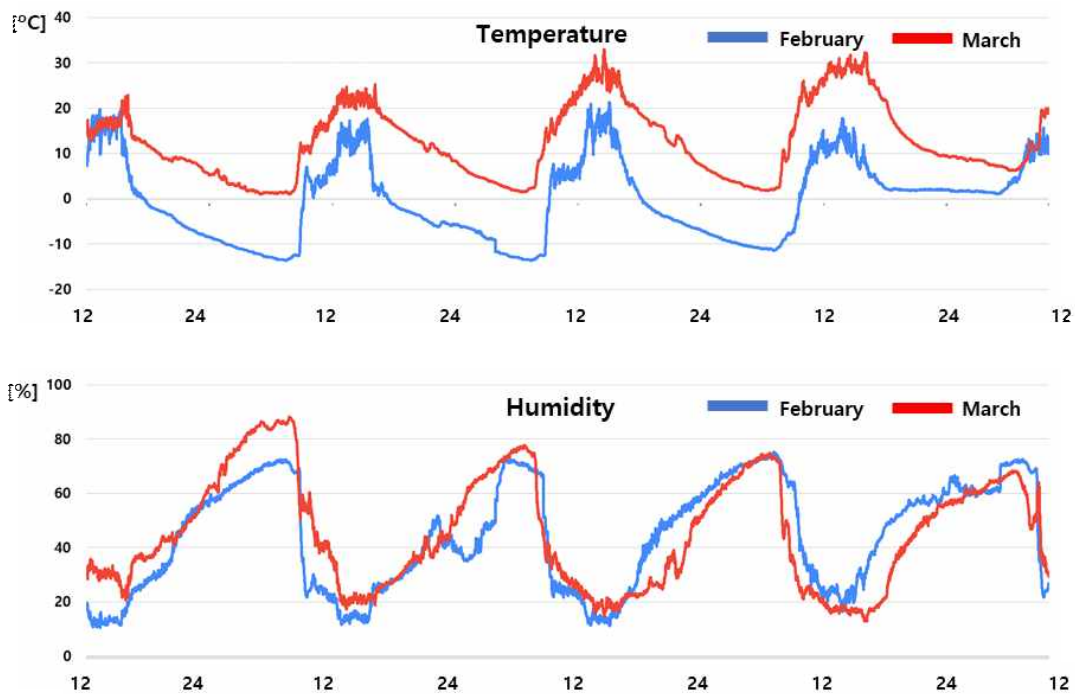
## 나. 시스템 운용 테스트 및 결과 분석

### □ 기후 민감 질병 예측 기상 데이터 모니터링

- 2차년도 연구를 통해 2013년부터 2023년까지의 서울대학교 관악캠퍼스 보건진료소 데이터와 동일 기간의 서울시 기상 데이터를 비교 분석하여 기상 요소의 변화와 호흡기 질환 및 정신건강에 대한 상관관계를 분석하였음.
- 분석결과, 호흡기 질환은 온도의 변화와 선형적 연관성을 가짐이 확인되었으며, 정신건강의 경우에도 온도와 일부 관계됨을 검증하였는데, 보건의료시설이 잘 구축되어 있고 기상의 변화가 극단적이지 않은 대도시 지역에서보다 산악지역과 같은 오지 환경에서는

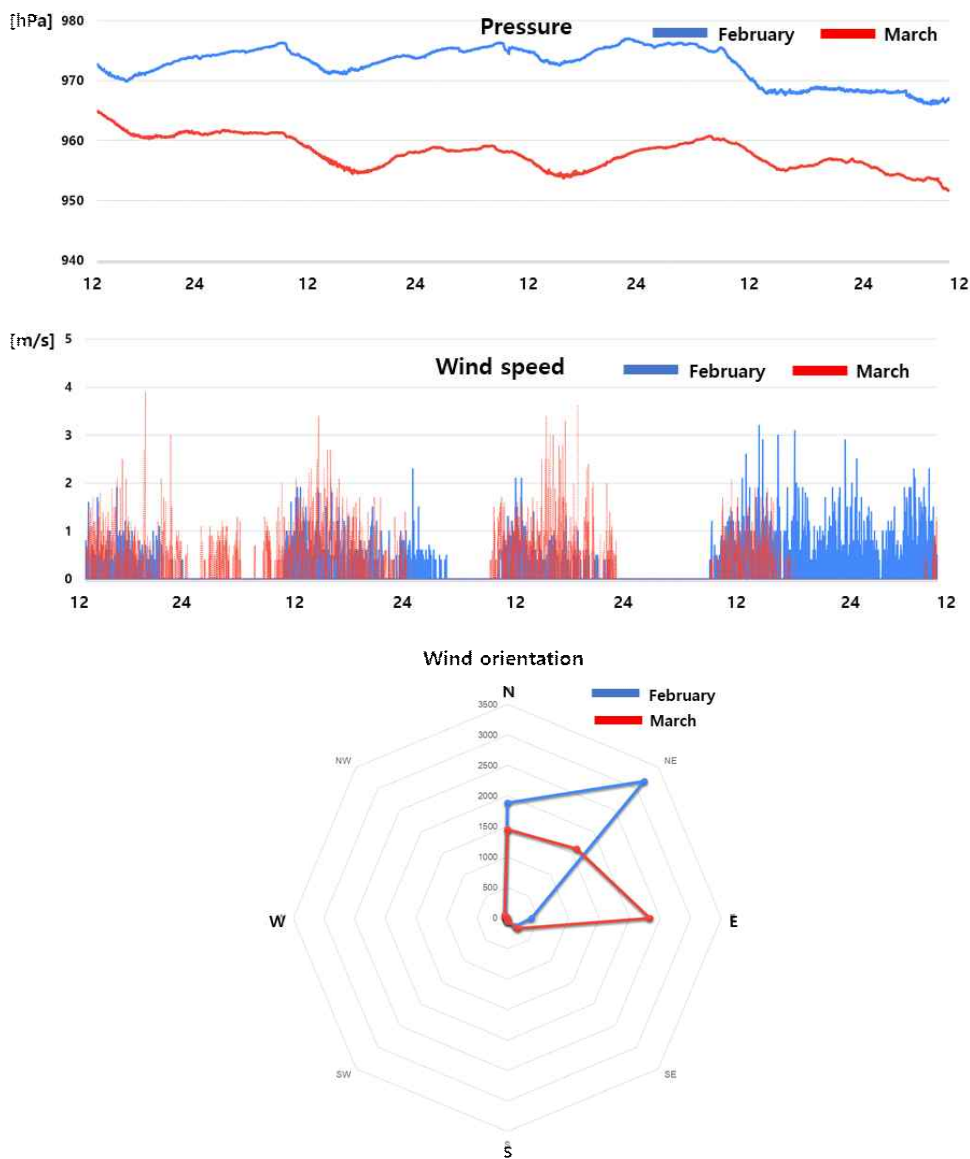
보다 많은 종류의 질환이 기상 요인의 영향을 받을 것으로 추정됨.

- 스마트 모니터링 시스템을 통해 기온과 습도, 기압, 풍속 및 풍향 등 기후 민감 질병에 영향을 주는 기상 요인들을 모니터링 하였는데, 2025년 2월과 3월의 동일자 일부 데이터를 분석하여 시스템 운용 가능성을 검증하였음.
- [그림 4-3]은 기온과 습도를 모니터링한 결과로서, 기온은 최저 -14°C에서 최고 33°C의 분포를 보이고, 2월보다 3월에 높아진 것으로 측정되었는데, 최고 기온이 높게 측정된 이유는 웨더 스테이션 센서의 구조상 온도센서에 태양광이 직접 조사되어 주간 기온이 과다하게 상승하는 현상이 발생하였기 때문임. 이는 차후 실 운용 모니터링 시스템 설계시 보완이 필요할 것으로 판단됨.
- 습도는 2월과 3월이 동일하게 주간에 20% 수준의 낮은 분포를 보이다가 야간에 70% 수준으로 높아지는 경향을 나타내었음.



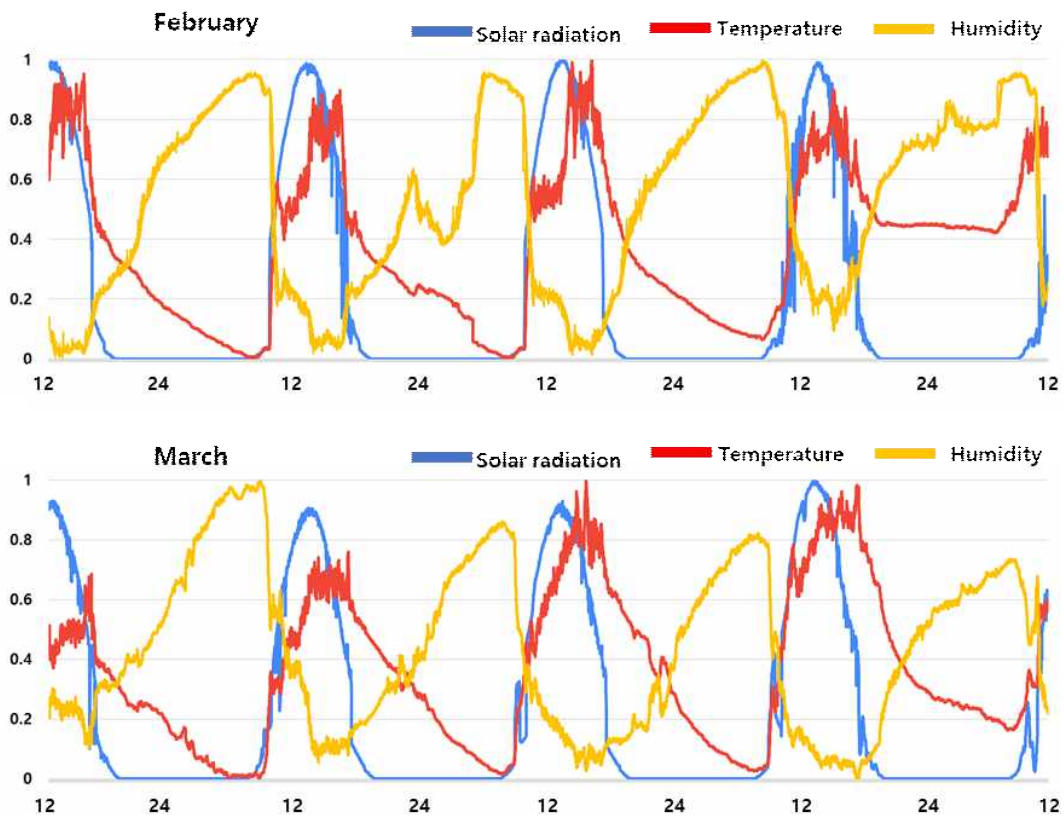
[그림 4-3] 스마트 모니터링 시스템을 통해 측정한 온도와 습도 현황

- [그림 4-4]는 기압과 풍향, 풍속의 모니터링 결과로서, 기압은 전반적으로 953~987hPa의 분포를 보이는 가운데 2월에 비해 3월이 약 15hPa 정도 낮은 분포를 보였음.
- 풍속은 2월 대비 3월에 높게 나타났고 주간에는 바람이 불고 야간에는 바람이 잦아지는 경향을 보였으며, 풍향은 2월에는 주로 북풍과 북동풍이 불고 3월에는 동풍과 북동풍으로 바뀔 수 있었음.



[그림 4-4] 스마트 모니터링 시스템을 통해 측정한 기압과 풍속/풍향 현황

- [그림 4-5]는 분석 기간의 일사량-온도-습도의 상관관계를 분석한 것으로, 2월과 3월 모두 일조가 시작되며 온도는 상승하고 습도는 하락하는 모습을 보였는데, 일조 시작 후 온도는 일부 시간적 지연을 두고 서서히 상승하는 모습을 보임. 이를 통해, 온도와 습도의 상승 및 하강은 반비례하는 성향을 확인할 수 있었음.

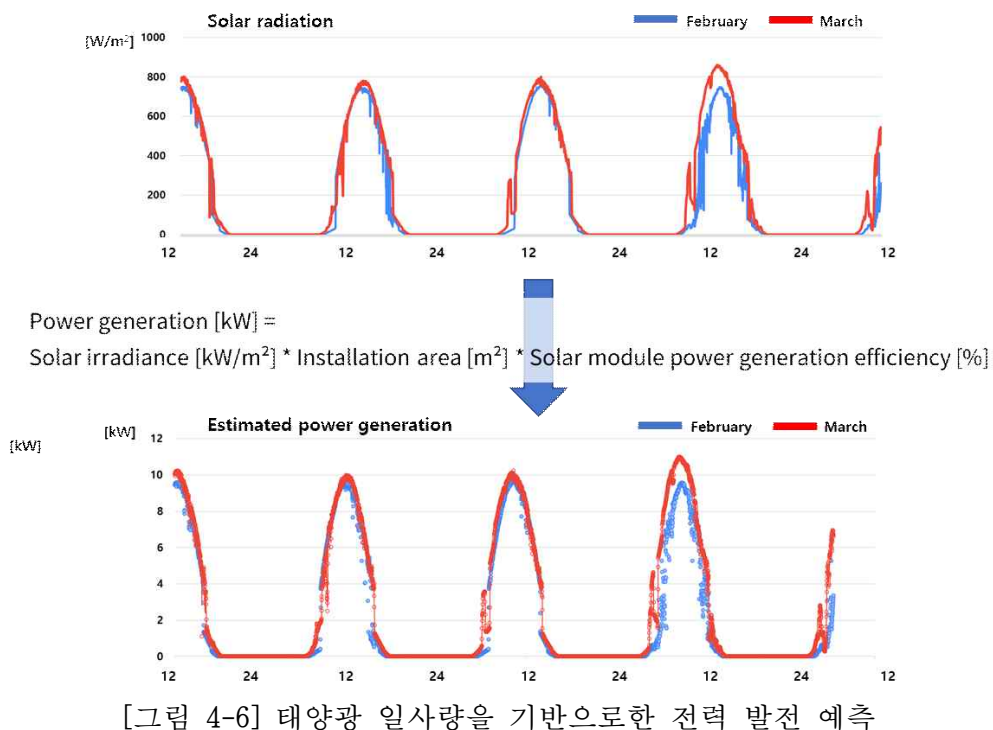


[그림 4-5] 기상요소 상관관계 분석

- 수집된 기상 데이터의 분석 결과, 본 연구팀의 2차년도 연구에서 확인된 기후 민감 질병의 발병 추세와 기상 변화의 상관관계에서 확인된 기상 변화 결과가 상당히 유사한 것으로 판단되어, 향후 해당 지역의 진료 데이터와 연계하여 기후 민감 질환 예측 시스템에 적용 가능할 것으로 판단됨.

## □ 격오지역 보건지소 운용 재생에너지 생산 예측

- [그림 4-6]은 스마트 모니터링 시스템을 통해 태양광 일사량을 측정하고, 이를 통해 해당 지역에서 발전 가능한 전력량을 산출한 결과임.
- 측정된 일사량은 최대 약  $830\text{W/m}^2$ 로 2월 대비 3월에 다소 증가한 모습을 보였으며 일조시간은 약 11시간으로 역시 2월 대비 3월에 일부 길어진 것으로 확인됨.
- 수집된 일사량 데이터를 기반으로 9.6kW급 태양광 패널 기준 발전량을 산출한 결과, 일일 약 2.9~4.0kWh 수준의 전력을 확보할 수 있을 것으로 판단되었음.
- 본 분석 결과는 일사량과 일조시간이 비교적 낮은 동계 후반의 산출 결과로, 하계의 경우에는 보다 많은 전력의 생산이 가능할 것으로 추정됨.



## □ 연구의 한계

- 본 연구는 기후 변화를 고려한 스마트 모니터링 시스템의 적용 가능성을 검증하기 위한 선행 연구로, 향후 본 연구 결과의 실제적 적용을 위해서는 일부 보완이 필요함.
- 첫째로, 스마트 모니터링 시스템의 실증 지역인 강원도 평창군 대회 지역의 의료 데이터와 연계한 기상 상태 변화와 기후 민감 질병의 발병에 대한 상관관계 분석을 의료 정보 공개 제한으로 수행하지 못하였는데, 향후 지역 보건의료원과의 협의를 통해 이에 대한 추가 연구가 필요함.
- 둘째로, 스마트 모니터링 시스템의 제작 및 운용과 관련하여, 하드웨어적으로는 평창지역의 평균 기온 및 일반적 풍속에 대해서는 센서 모듈의 측정 범위에서 충분히 수용이 가능할 것이나, 북한 지역의 최적 기온과 특수한 기상 상황을 고려하면 측정 범위가 보다 확장된 센서를 사용할 필요가 있을것으로 판단됨.
- 셋째로는 보건지소의 운영상 야간 안전을 위해 외부로의 상전 공급을 차단하는 상황이 있어 지속적인 데이터 수집 및 분석이 제한되었는데, 향후 태양광 발전과 연계하여 주간에 발전되어 축적된 전력을 활용하여 야간에 모니터링 시스템을 가동하면 충분히 해결 가능할 것으로 판단됨.
- 끝으로, 보건지소 운용에 소요되는 전력의 실제 발전과 관련해서는 연구의 예산 및 한국전력에서 태양광 발전 전력을 관리하는 현재 우리나라의 전력관리 특성상 태양광 패널과 연계한 실험의 진행이 제한되는 제약이 있었는데, 이 또한 향후 본 연구를 기반으로 실제 상용화로의 발전을 통해 극복이 필요할 것임.

## 다. 한반도 적용을 위한 모델 구조 및 운영 시나리오

### □ 스마트 모니터링 시스템 요구 기능 및 설계시 고려사항

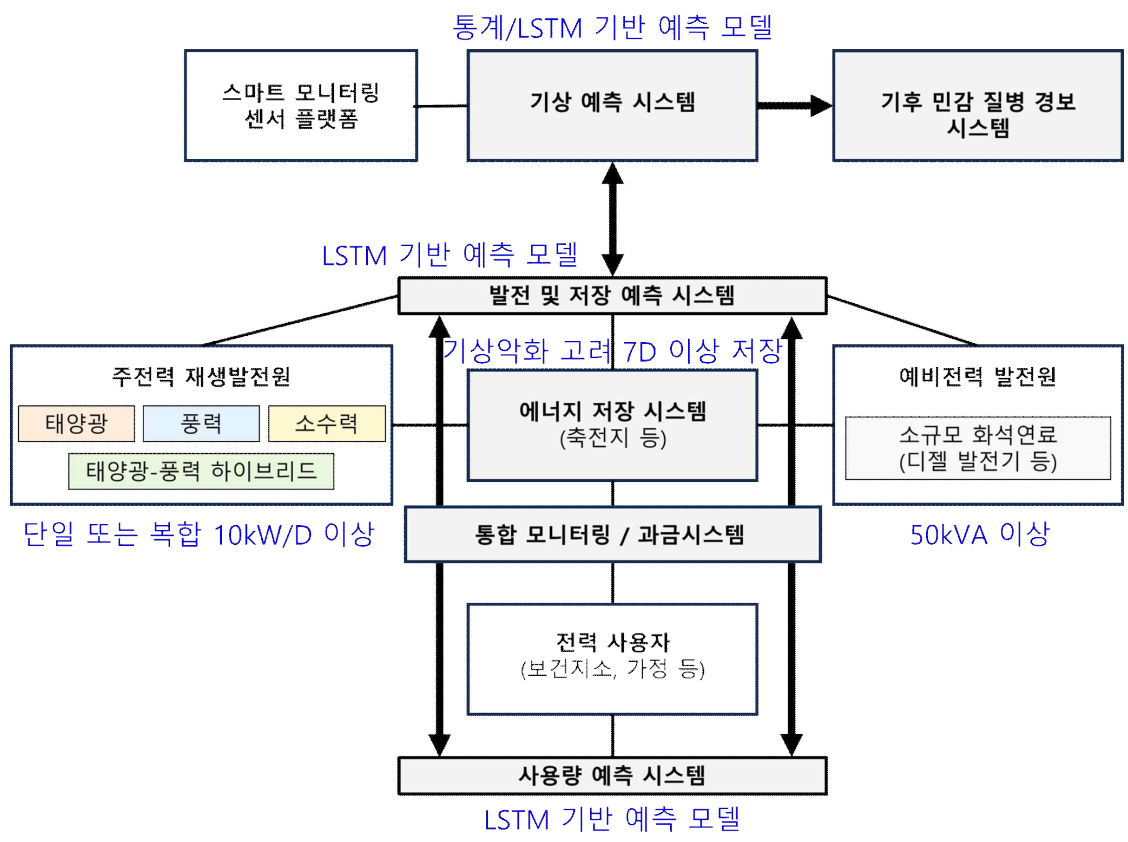
- 본 연구를 통해 도출한 스마트 모니터링 시스템의 요구 기능은 기

후 민감 질병 경보 데이터로 활용 가능한 기온, 풍향 및 풍속, 기압 등 기상 요소 정보를 수집 및 분석할 수 있어야 하며, 오지 보건지소 운용 요구 전력을 확보하기 위해 태양광 일사량 모니터링을 통한 태양광 발전 가능 전력량을 예측 가능하여야 함.

- 또한, 북한을 포함한 탄자니아와 피지 등의 개발도상국 마을 및 보건지소 운용 사례를 분석한 결과 일일 평균 약 10kW 수준의 전력을 단일 또는 하이브리 재생에너지 시스템을 통해 생산 가능하여야 함.
- 부가하여, 태양광 기반 재생에너지 시스템 용량 설계시에는 일조시간의 변화와 기상개황상 발전 가능일 등을 고려하여 충분한 요구 전력을 생산할 수 있도록 설계되어야 함.

#### □ 스마트 모니터링 시스템 모델 제안

- [그림 4-7]은 상기 요구기능 및 고려사항을 반영한 스마트 보건지소용 스마트 모니터링 시스템 모델로서, 기상 예측 시스템, 발전 및 저장(예측) 시스템, 사용량 예측/과금 시스템으로 구성됨.
- 기상 예측 시스템은 웨더 스테이션을 기반으로 기후 민감 질병 경보 시스템 및 발전 예측 시스템과 연동하여 기후 징후가 민감 질병을 유발하는 경향을 보이면 경보를 발동하는 한편, 기후 기반 데이터를 활용하여 스마트 보건지소의 운용에 필요한 전력 발전 예상량을 추정함.
- 발전 및 저장(예측) 시스템은 태양광, 풍력, 하이브리드 등 주전력 재생발전원과 예비전력 발전원 등에 연동되어 전력 발전량과 저장량을 예측하고 발전 및 저장함으로써 스마트 보건지소의 운용에 직접 활용함.
- 사용량 예측 및 과금 시스템은 보건지소와 마을 공동체 등 사용자의 전력사용 패턴을 분석하여 향후 사용량을 예측하고, 저장 시스템의 추세와 연동되어 전력 부족을 경고하는 한편, 유지보수를 위한 통합 과금시스템을 운영하여 지속가능성을 확보함.

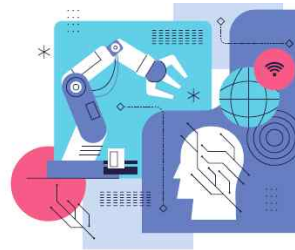


[그림 4-7] 스마트 보건지소용 스마트 모니터링 시스템 모델(안)

## 5. 주요 사업 성과

### 가. ICAT(International Conference on Appropriate Technology) 2025 특별 세션

- **적정기술학회 10주년 기념 2025 과학기술 ODA 국제 컨퍼런스 참석**
  - Appropriate Technology in the Era of Artificial Intelligence의 주제로 열린 제16회 적정기술학회 국제 컨퍼런스에 3년 연속 참석 및 세션 운영을 수행함.



16<sup>th</sup> International Conference on Appropriate Technology  
International Conference on Science & Technology ODA 2025

**적정기술학회 10주년 기념  
2025 과학기술 ODA 국제 컨퍼런스**

**Appropriate Technology in the  
Era of Artificial Intelligence**

**4 December 2025**

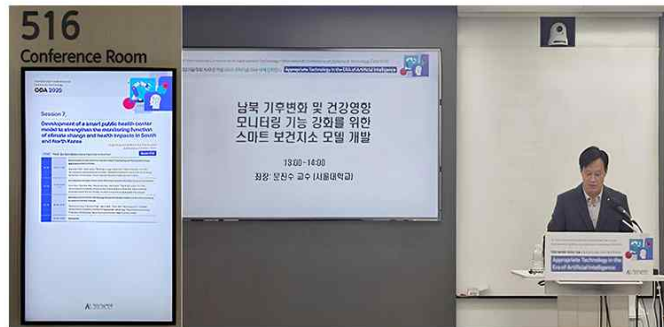
서울대학교 글로벌공학교육센터 컨벤션 5층

[그림 5-1] 적정기술학회 10주년 기념 2025 과학기술 ODA 국제 컨퍼런스 포스터

- 본 연구팀은 남북 보건의료 협력과 기후변화 대응을 주제로 한 연구 성과를 발표하고 이를 토대로 기후변화에 취약한 지역에서 활용 가능한 스마트 보건지소 모델 제시를 목표로 함.

- 향후 본 모델은 북한 오지 지역을 포함한 취약 환경에서 기후 민감 질환에 대한 예방적 대응 역량을 강화하는 데 기여할 것으로 예측됨.

#### 통일의학센터, ‘2025 과학기술 ODA 국제 컨퍼런스’서 기후·보건 연계 연구 성과 발표



< 국제 컨퍼런스 특별 세션 운영 사진 >

서울대학교 의과대학 통일의학센터(소장 문진수 소아과학교실 교수, 부소장 박성민 가정의학교실 교수)는 2025년 12월 4일(목) 서울대학교 글로벌공학교육센터에서 개최된 ‘2025 과학기술 ODA 국제 컨퍼런스’에 참석해, 남북 보건 의료 협력과 기후변화 대응을 주제로 한 연구 성과를 발표했다. 본 컨퍼런스는 적정기술학회 주관하는 국제 학술 행사로, 지속가능한 과학기술 ODA와 적정기술의 확산을 주요 의제로 다루고 있다.

이날 특별 세션에서 통일의학센터는 적정기술학회, 미네소타대학 보건대학원과 함께 서울대학교 통일평화연구원의 통일·평화 기반구축사업의 일환으로 수행 중인 ‘남북 기후변화 및 건강영향 모니터링 기능 강화를 위한 스마트 보건지소 모델 개발’ 연구의 주요 성과를 공유했다.

본 연구는 현재 3차년도를 맞아 시스템의 시험·검증 단계를 진행 중이며, 이를 토대로 기후변화에 취약한 지역에서 활용 가능한 ‘스마트 보건지소 모델’을 제시하는 것을 목표로 하고 있다. 향후 본 모델은 북한 오지 지역을 포함한 취약 환경에서 기후 민감 질환에 대한 예방적 대응 역량을 강화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 통일의학센터는 2015년부터 서울대학교 통일·평화 기반구축사업에 지속적으로 참여하며 한반도 보건 의료 협력과 건강 이슈를 주제로 연구를 수행해오고 있다. 관련 사업 및 연구 활동에 대한 자세한 내용은 통일의학센터 홈페이지(<http://www.reunimedcenter.org/>)와 유튜브 채널(<https://www.youtube.com/@snunification>)에서 확인할 수 있다.

[그림 5-2] 서울대학교 의과대학 소식지 함춘인사이드 2026년 1월호 관련 기사

- 연구 결과 및 성과 공유를 위해 서울대학교 의과대학 소식지인 ‘함춘인사이드’ 2026년 1월호에 컨퍼런스 내 세션 운영 관련 기사를 홍보함.

#### 나. KCI 등재지(적정기술학회지) 논문 수록

- 본 사업 결과를 바탕으로 Journal of Appropriate Technology(KCI 등재지)에 「Development of a Smart Monitoring System for Isolated Health Centers Considering Climate Change」 논문을 게재

- 본 연구는 기후변화로 인한 건강위험이 증대되는 상황에서, 전력·통신 인프라가 취약한 개발도상국 격오지역(북한 포함)의 보건지소 운영 현실을 고려하여, 기후 민감 질병 예측을 위한 기상 데이터 수집과 재생에너지 기반 보건지소 전력 운용 가능성을 동시에 지원하는 스마트 모니터링 시스템을 개발하고 그 적용 가능성을 실증적으로 검증한 연구임.

Journal of Appropriate Technology  
Vol. 11, No. 3, 1-10 (2025)  
pISSN 2465-9169 • eISSN 2765-6551  
<https://doi.org/10.37675/jat.2025.00738>

Article

### Development of a Smart Monitoring System for Isolated Health Centers Considering Climate Change

Woo-Kyun Jung<sup>1,\*</sup>, Sang Min Park<sup>2</sup>, Jieun Jeon<sup>2</sup>, Hyun Kim<sup>3</sup>, Hee Kyung Joh<sup>4</sup>,  
Chan Yu<sup>2</sup>, Jin Soo Moon<sup>2</sup>, Sung-Hoon Ahn<sup>5</sup>, Ki-Bok Min<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering Practice, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute for Health and Unification Studies, College of Medicine, Seoul National University, 71 Ewhajang-gil, Jongno-gu, Seoul 03087, Republic of Korea

<sup>3</sup>Division of Environmental Health Sciences, School of Public Health, University of Minnesota, USA

<sup>4</sup>Department of Family Medicine, Seoul National University Health Service Center, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>5</sup>Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>6</sup>Department of Energy Resources Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

### 기후변화를 고려한 격오지 보건지소용 스마트 모니터링 시스템 개발

정우균<sup>1,\*</sup>, 박상민<sup>2</sup>, 전지은<sup>2</sup>, 김현<sup>3</sup>, 조희경<sup>4</sup>, 유찬<sup>2</sup>, 문진수<sup>2</sup>, 안성훈<sup>5</sup>, 민기복<sup>6</sup>

<sup>1</sup>공학전문대학원, 서울대학교, 서울 관악구 관악로1(08826), 대한민국

<sup>2</sup>통일의학센터, 서울대학교 의과대학, 서울 종로구 이화장길71(03087), 대한민국

<sup>3</sup>환경건강과학부, 미네소타대학교 공공의학대학, 미네소타주, 미국

<sup>4</sup>보건진료센터, 서울대학교, 서울 관악구 관악로1(08826), 대한민국

<sup>5</sup>기계공학부, 서울대학교, 서울 관악구 관악로1(08826), 대한민국

<sup>6</sup>에너지자원공학과, 서울대학교, 서울 관악구 관악로1(08826), 대한민국

변세제적 기후변화는 다양한 재난과 함께 건강 위협의 심화를 초래하고 있다. 특히, 기후 민감 질병의 발병률이 높아지고 있는데, 이러한 현상은 기상 요소의 관측과 질병 발생의 추세를 통합적으로 분석하여 조기에 경보가 가능할 것으로 판단되고 있다. 한편, 의료 인프라가 부족하고 국가 전력망의 접근이 어려운 개발도상국의 격오지 지역은 이러한 기후 민감 질병의 예측과 대응이 상당히 어려운 실정이다. 특히, 북한지역은 산악지형의 점유율이 높고 국가 전력망이 원활하게 형성되지 못했을 뿐만 아니라, 주민 건강과 밀접한 보건지소의 여건 또한 열악한 것으로 알려져 있다. 본 연구는 북한 지역과 같은 개발도상국 격오지에서 보건지소를 운영할 수 있는 전력 인프라의 확보와 기후 민감 질병의 예측에 활용 가능한 기상 데이터를 수집할 수 있는 스마트 모니터링 시스템을 제안한다. 격오지역의 통신 특성 등을 고려하여 설계된 스마트 모니터링 시스템을 북한 지역과 유사한 환경의 강원도 평창군 보건지소에 설치하여 활용 가능성을 실증하였다. 본 연구를 통해 개발된 스마트 모니터링 시스템은 기후 민감 질병 예측 데이터를 확보하고, 격오지역 보건지소 운용에 필요한 태양광 발전 수요를 예측하는데 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단되었다. 본 연구의 결과는 향후 다양한 격오지역에서 기후 민감 질병의 예측과 의료 활동에 필요한 전력 인프라 확보에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

Global climate change is causing various disasters and exacerbating health threats. In particular, the incidence of climate-sensitive diseases is increasing, and early warning of these phenomena is expected through integrated analysis of meteorological observations and disease outbreak trends. Meanwhile, isolated areas in developing countries, where

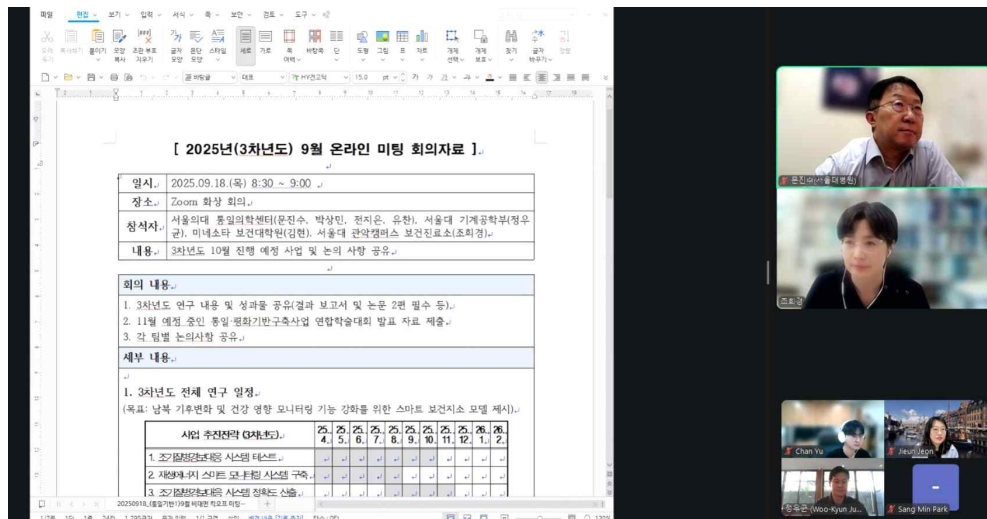
[그림 5-3] JAT 학술지에 게재된 「Development of a Smart Monitoring System for Isolated Health Centers Considering Climate Change」 논문

- 특히, 북한과 유사한 지리·기후·전력 여건을 가진 강원도 평창군 보건지소를 실증 대상지로 선정하여, 산악 격오지역 환경에서도 기상 데이터(기온, 습도, 기압, 풍향·풍속, 일사량 등)를 안정적으로 수집·전송할 수 있는 시스템 구조를 설계·구현하였으며, 실제 현장 설치 및 운용을 통해 시스템의 기술적 타당성과 활용 가능성을 확인함.
  - 본 연구에서 개발된 시스템은 라즈베리파이 기반 엣지 컴퓨팅 모듈, 기상·일사량 센서, 저전력 통신 모듈(2G 기반 SMS 및 MQTT 방식), 방수 패키징 구조로 구성되어, 국가 전력망 접근이 어려운 환경에서도 최소한의 통신·전력 조건 하에서 지속적인 데이터 수집이 가능하도록 설계됨.
  - 실증 결과, 수집된 기상 데이터는 기상청 관측 자료와 유사한 경향을 보였으며, 선행연구에서 확인된 기후 민감 질병과 기상 요인 간의 상관관계 분석 결과와도 정합성을 보여, 향후 보건지소 진료 데이터와 연계 시 기후 민감 질병 조기 경보 체계로의 확장 가능성을 시사함.
  - 또한, 일사량 데이터 분석을 통해 격오지역 보건지소의 태양광 발전 잠재량을 추정함으로써, 보건지소 운영에 필요한 전력 확보 가능성을 검토하였고, 이는 향후 재생에너지 기반 보건의료 인프라 지원 사업 설계에 참고 가능한 실증 근거를 제공함.
  - 본 논문은 기후변화-보건-에너지 문제를 통합적으로 접근하여, 북한을 포함한 개발도상국 격오지역 보건지소를 대상으로 한 기후 민감 질병 대응 및 보건의료 인프라 강화 전략에 기술적·정책적 시사점을 제시했다는 점에서 의의가 있음.
- 본 사업 과정에서 개발한 한반도형 EWARS 실무 매뉴얼을 기반으로 한 후속 논문 발행 준비 중

## 다. 정기적 온라인 미팅 수행

### □ 사업 추진을 위한 정기적 온라인 미팅 운영

- 3차년도 사업 초기 단계에서 4월 비대면 킥오프 미팅을 개최하여, 참여 기관 간 역할 분담, 연구 추진 일정, 연차별 연구 목표를 공유하고 사업 전반의 운영 방향을 체계적으로 정립함.
- 기후변화와 건강영향 모니터링을 위한 스마트 보건지소 모델을 핵심 연구 목표로 설정하고, 조기질병경보(EWARS) 시스템과 재생에너지 기반 모니터링 기술을 연계하는 연구 전략을 중심으로 논의를 지속함.



[그림 5-4] 사업 추진을 위한 온라인 미팅 수행

- 9월 정기 온라인 미팅을 통해 중간 연구 진행 상황을 점검하고, 센서 데이터 수집 현황, 시스템 안정성 이슈, 데이터 분석 방향 등에 대해 기술적·실무적 관점에서 심층 논의를 진행함.
- 이 과정에서 참여 기관 간 데이터 활용 범위와 분석 역할을 재조정하고, 학술논문 작성 및 연구 성과 도출을 위한 일정 관리의 필요성을 공유함.

- 10월 정기 온라인 미팅에서는 3차년도 연구 성과물 요건(결과보고서 및 학술논문 2편 이상)을 재확인하고, 11~12월 예정된 주요 학술행사(통일·평화기반구축사업 연합학술대회, 적정기술학회 국제 컨퍼런스 세션 운영) 준비 사항을 집중적으로 논의함.
- 아울러 기후모니터링 센서 재설치 및 보수 계획, 조기질병경보 대응 시스템의 정확도 산출 방안, 북한 특성을 고려한 한글 매뉴얼 개발 및 배포 일정 등을 구체화함.
- 통일의학센터를 중심으로 각 참여 기관의 연구 성과를 종합·조율하고, 발표자료 취합, 행정 지원, 연구 일정 관리 등 사업 운영 전반을 총괄함.
- 특히 1월 후반부 미팅을 통해 연구 결과의 정책적 활용 가능성, 국제협력 및 ODA 연계의 현실적 제약 요인, 향후 신규 연구과제 및 확장 가능 주제(감염병, 보건의료 인프라, 보건안보 등)를 종합적으로 검토함.
- 최종 미팅에서는 연구 수행 과정과 주요 성과를 종합 정리하고, 제한된 예산 여건 속에서도 도출된 연구 성과의 의의를 공유하며 향후 후속 연구 및 협력 가능성에 대한 의견을 교환함.

## 라. 매뉴얼·모델 활용 성과

### □ WHO EWARS 매뉴얼 개발 및 활용 성과

- 기술적 성과: WHO 표준 알고리즘의 국문화 및 한국형 최적화
  - 영문 기반으로 구성된 WHO EWARS의 구동 원리, 분석 로직, 예측 알고리즘을 국내 보건 실무 환경에 맞게 전면 국문화하고 체계적으로 재구성함으로써, 글로벌 표준 시스템의 국내 보건 체계 이식을 실현함.
  - 한반도 기후 특성과 말라리아·일본뇌염 등 기후 민감 질환의 발생 양상을 반영하여, EWARS를 기존 감염병 감시체계를 보완하는 조기경보 도구로 재정의하고 한국형 활용 체계를 정립함.

## 한반도 맞춤형 감염병 조기경보대응시스템(EWARS) 구축 및 운영 실무 매뉴얼

부제: 데이터 기반 선제적 방역을 위한 기술 표준 및 가이드라인



[그림 5-5] 한반도 맞춤형 감염병 EWARS 구축 및 운영 실무 매뉴얼

### ○ 비전문가를 고려한 분석 환경 자동화 및 표준화

- Docker 컨테이너 기반의 원클릭 설치 환경을 구축하여, 복잡한 통계 라이브러리 및 개발 환경 설정 없이도 EWARS 분석 시스템을 즉시 구동할 수 있는 기술적 기반을 확보함.
- 보안이 엄격한 공공 보건기관 내부망 환경을 고려하여 renv 패키지 등

을 활용한 오프라인 라이브러리 관리 체계를 매뉴얼에 수록함으로써, 인프라 제약 하에서도 시스템 운용이 가능함을 실증함.

## □ 현장 중심의 실무 매뉴얼 및 운영 SOP 확보 성과

### ○ 단계별(Step-by-Step) 실무 지침서 구축

- 모든 분석 단계에 실제 구동 화면 스크린샷과 주요 주의사항(Check Point)을 포함한 시각적 가이드 중심의 매뉴얼을 제작하여, R 코딩 지식이 없는 보건지소 실무자도 독립적으로 시스템을 운용할 수 있는 실무 교육 자료를 완성함.
- 질병 발생 데이터 및 기상 데이터를 즉시 적용할 수 있는 표준 데이터 템플릿(Excel/CSV)을 개발하여, 데이터 전처리 과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소화함.

### ○ 조기경보 해석 및 행정 대응 프로토콜(SOP) 정립

- 통계 분석 결과를 ‘안전-주의-경계-심각’의 4단계 신호등 체계로 시각화하는 경보 해석 로직을 정립하여, 실무자의 이해도와 활용도를 제고함.
- 감염병 유행 판단을 실무자의 경험적 판단에 의존하지 않고, 통계적 임계값(Threshold)에 기반한 과학적 의사결정 구조로 전환할 수 있는 보건 행정의 기틀을 마련함.

## □ 스마트 보건지소용 기후·재생에너지 통합 모니터링 시스템 모델 제안 성과

### ○ 스마트 모니터링 시스템 요구 기능 도출 및 설계 기준 제시

- 기후 민감 질병 경보에 활용 가능한 기온, 습도, 기압, 풍향·풍속 등 핵심 기상 요소 정보를 상시 수집·분석할 수 있는 시스템 요구 기능을 도출함.
- 오지 보건지소의 안정적 운영을 위해 태양광 일사량 모니터링을 통한 재생에너지 발전 가능 전력량 예측 기능을 필수 요소로 설정함.
- 북한을 포함한 개발도상국 보건지소 사례 분석을 통해, 일일 평균 약 10kW 수준의 전력을 단일 또는 하이브리드 재생에너지 시스템으로 생산할 수 있는 설계 기준을 제시함.

○ 스마트 보건지소용 통합 모니터링 시스템 모델 제시

- 기상 예측 시스템, 재생에너지 발전 및 저장(예측) 시스템, 전력 사용량 예측 및 관리(과금) 시스템을 통합한 스마트 보건지소용 모니터링 시스템 모델을 제안함.
- 기상 예측 시스템은 웨더 스테이션을 기반으로 기후 민감 질병 경보 시스템과 연동되어 이상 기후 징후 발생 시 조기경보를 발동함과 동시에, 보건지소 운영에 필요한 전력 발전량을 예측함.
- 재생에너지 발전·저장 시스템과 사용량 예측 체계를 연계하여 전력 부족 상황을 사전에 경고하고, 유지·관리 비용을 고려한 지속 가능한 운영 구조를 제시함.

## 6. 결론 및 향후 사업 계획

### 가. 종합 결론

#### □ 한반도형 조기경보시스템(EWARS) 운영 기반의 실질적 완성

- 본 사업은 기후 변화에 민감한 한반도의 감염병 발생 양상을 선제적으로 감시·대응하기 위해, WHO가 검증한 EWARS 알고리즘을 국내 보건 환경에 맞게 이식하고, 이를 현장에서 실제로 운용 가능한 실무 중심의 기술 표준으로 정립하였음.
- 특히, 단순한 개념 검토나 이론적 적용을 넘어, 실제 데이터 분석의 수행 가능성을 담보하기 위해 표준 데이터 템플릿을 개발하고 Docker 기반의 분석 환경을 구축함으로써, 통계·프로그래밍 전문 인력이 부족한 보건지소 환경에서도 메뉴얼만으로 시스템을 구동할 수 있는 기술적 자립 기반을 마련하였음.
- 이를 통해 EWARS는 중앙 단위의 분석 도구에 머무르지 않고, 지역 현장에서 활용 가능한 조기경보 시스템으로 기능 확장이 가능함을 실증적으로 확인하였다는 점에서 중요한 의의를 가짐.

#### □ 보건지소 중심의 상향식(Bottom-up) 방역 체계로의 전환 가능성 제시

- 본 연구는 기존 중앙 집중식 감염병 감시체계가 갖는 시간적·공간적 한계를 보완하고자, 지역 보건지소가 기상 데이터와 질병 데이터를 직접 결합·분석하여 위험도를 산출하는 ‘지역 밀착형 조기경보 모델’을 제시하였음.
- 이는 감염병 감시와 대응의 출발점을 중앙이 아닌 지역 현장으로 이동시키는 상향식(Bottom-up) 방역 체계로의 전환 가능성을 보여주는 것으로, 스마트 보건지소가 단순한 진료 제공 공간을 넘어 지역 보건 안보의 핵심 거점이자 조기경보의 최전선으로 기능할 수 있음을 시사함.

- 아울러 이러한 접근은 북한을 포함한 의료 인프라 취약 지역에서도 적용 가능한 현실적 대안으로서, 향후 남북 보건의료 협력 및 보건 안보 전략 논의에 중요한 시사점을 제공함.

## 나. 정책 제언 및 실무적 활용 방안

### □ 전국 스마트 보건지소의 표준 감시 모델로의 제도적 확산

- 실무 교육 자원으로서의 제도화 필요성
  - 본 연구를 통해 개발된 EWARS 매뉴얼은 전문 통계 인력이 상주하지 않는 보건지소 환경을 전제로 설계된 실무 중심 지침서로서, 담당 인력의 교체 여부와 관계없이 지속 가능한 감염병 감시 업무 수행을 가능하게 함. 이에 본 매뉴얼을 전국 스마트 보건지소 배포용 표준 교재로 채택하여, 정기 교육 및 현장 훈련에 활용할 것을 제언함.
- 지표 기반 방역 자원 배분 체계 구축
  - 매뉴얼에서 정의한 4단계 신호등 경보 체계를 지역 방역 계획 수립의 공식 지표로 활용함으로써, 감염병 위험 수준에 따라 예산·인력·장비를 과학적 근거에 기반하여 배분하는 효율적이고 합리적인 방역 행정 체계로 발전시킬 필요가 있음. 이는 기존 경험 중심·사후 대응 중심의 행정에서 탈피하여, 데이터 기반 선제 대응 체계로의 전환을 가능하게 함.

### □ 남북 보건 안보 협력을 위한 기술 자산으로의 활용

- 접경 지역 공동 방역을 위한 기술 표준화 자산 확보
  - 본 연구에서 개발된 EWARS 기반 조기경보 시스템은 WHO 표준 알고리즘을 토대로 구축된 만큼, 향후 남북 접경 지역에서의 감염병 공동 감시 및 대응 체계 구축 시 기술적 이질감을 최소화할 수 있는 최적의 도구임.
- 기술 교류 및 단계적 협력의 실무 가이드라인 제공
  - 한글화된 실무 매뉴얼은 향후 북측 보건 인력과의 기술 교류, 공동 교육, 시범사업 추진 시 활용 가능한 실질적 가이드라인으로 기능할 수

있으며, 이를 통해 남북 보건 협력이 선언적 수준을 넘어 실질적·기술적 협력 단계로 진입하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

#### □ 주요 추진결과 요약

- 1차년도 연구를 통해 북한지역 및 개발도상국의 기후 특성과 적용 가능한 재생에너지 시스템을 분석하고, 북한지역 기후 및 지형 특성을 고려한 적정 재생에너지 생산 시스템의 기초 모델을 제시하였음.
- 2차년도 연구에서는 국내 보건지소의 태양광 발전 시스템 적용 사례를 분석하고 실증 테스트 운용 지역을 선정하여, 태양광 기반 기후 및 재생에너지 스마트 모니터링 시스템을 개발하고 시험평가를 수행하였음.
- 3차년도 연구에서는 기후 민감 질병 경보에 활용 가능한 기상 요소 모니터링 시스템을 구축하여 시험 운용하는 한편, 재생에너지 스마트 모니터링 시스템을 실제 운용함으로써 북한지역 오지 보건지소에의 적용 가능성을 실증적으로 검증하였음.
- 최종적으로 3개년에 걸친 연구를 통해 기온, 풍향 및 풍속, 기압 등 주요 기상 요소 정보를 수집·분석하여 기후 민감 질병 경보 데이터로 활용 가능함을 확인하였으며, 태양광 일사량 모니터링을 통해 태양광 발전 가능 전력량을 예측함으로써 오지 보건지소의 운용 요구 전력 확보 가능성을 분석할 수 있는 기후 및 재생에너지 스마트 모니터링 시스템 모델을 제안하였음.

#### 다. 향후 사업 계획

##### □ 한반도형 EWARS 및 스마트 보건지소 모델의 단계적 고도화 및 확산

- 본 연구는 매뉴얼 Chapter 11.2에서 제시한 시스템의 지속적 발전 방향을 토대로, 조기경보시스템(EWARS)과 재생에너지 기반 스

마트 모니터링 시스템을 상용화 수준으로 고도화하고, 다수 지역에서 실 운용을 통해 검증 및 활용성을 확보하는 것을 중장기 목표로 함.

- 이를 통해 궁극적으로 북한지역을 포함한 개발도상국 오지 지역에서 실제 활용 가능한 스마트 보건지소용 모니터링 시스템의 확산을 도모하고, 한반도 보건안보 및 기후변화 대응 역량 강화를 달성하고자 함.

○ 데이터 기반 조기경보체계의 실시간성 및 정밀도 강화

- 데이터 연계 자동화(Near Real-time Data Integration): 현재의 수동 입력 방식에서 나아가, 질병관리청의 감염병 신고 시스템과 기상청 기상 자료 개방 포털(API)과의 다이렉트 연동 모듈을 개발함으로써 실무자의 업무 부담을 최소화하고, 조기경보 체계의 실시간성을 확보하고자 함.
- 지역 맞춤형 임계값(Threshold)의 정밀 고도화: 향후 축적되는 지역별 감염병 발생 데이터를 바탕으로, 매뉴얼에 명시된 이동유행기준법(MEM) 알고리즘의 파라미터를 미세 조정(Fine-tuning)하여 지역별 기후 특성이 반영된 ‘우리 동네 맞춤형 경보 기준’을 완성하고자 함.

○ 지능형 감시망으로의 진화 및 장기적 확산 기반 구축

- 머신러닝 기반 예측 모델의 단계적 도입: 기존의 통계적 분석 모델을 넘어 인공지능(AI) 기반 예측 알고리즘을 추가 도입함으로써, 현재의 발생 현황 해석에 그치지 않고 2~4주 이후의 감염병 유행 가능성을 사전에 경고하는 지능형 감시 체계로의 진화를 추진함.
- 상용화 및 다지역 실증을 통한 확산 전략: 기후 민감 질병 경보 및 재생에너지 스마트 모니터링 시스템을 고도화하여 상용화 수준의 운용 모델로 발전시키고, 다수 지역에서의 실 운용을 통해 시스템의 안정성·확장성·현장 적용성을 검증함으로써 향후 북한지역 및 개발도상국 오지 지역으로의 단계적 확산을 가능하게 하고자 함.

## VII. 참고문헌

### [논문 및 학위논문]

- Kim, Y. S., Yoon, S. K., & Lee, S. H. (2018). Power and policy challenges for inter-Korean renewable energy cooperation. *Environmental Law and Policy*, 21, 132-165.
- Kim, M. S., Moon, J. U., Ryu, J. H., Kim, M. S., Binayak, B., & Ahn, S. H. (2020). The effect of renewable energy on vaccine cold chain extension: A case study in Nepal. *Journal of Appropriate Technology*, 6(2), 94-102.
- Jang, H. S., & Gu, I. S. (2022). Estimating the value of North Korea's renewable energy power market considering its development and the safety of its residents. *Journal of the Korean Society of Safety Management and Science*, 24(3), 75-84.
- Bang, H. J., & Lee, S. K. (2017). Current status and implications of renewable energy in North Korea. *KIET Policy Data*, 2017-295.
- Ahn, S. H., Lee, K. T., Binayak, B., Lee, K. Y., Lee, S. Y., & Song, C. K. (2012). A strategy for configuring renewable energy sources for independent power grid systems in mountainous areas considering sustainability. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 29(9), 958-963.
- Kim, J. S., Jung, W. K., Ha, B. R., Moon, J. H., Lee, H. S., & Ahn, S. H. (2019). Construction and operation of small-scale solar power plants using smart off-grid systems: A case study of the Korea-Tanzania Appropriate Technology Hub. *Journal of Appropriate Technology*, 5(2), 62-69.

### [보고서 및 도서]

- Institute for Health and Unification Studies. (2025). *Development of a smart health center model to strengthen monitoring of climate change and health impacts in South and North Korea: 2024 unification and peace foundation establishment project report*. Seoul National University.
- Kim, S. J., Han, H. J., & Park, B. R. (2021). *Research on inter-Korean climate development cooperation for carbon neutrality on the Korean Peninsula*. Korea Environmental Policy and Evaluation Institute.

### [인터넷 문헌, 언론보도]

- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2020). *The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000-2019)*. <https://www.undrr.org>
- 영남일보. (2024, July 30). *안동 청정에너지에 한발짝 다가서다*.  
<https://www.yeongnam.com/web/view.php?key=20131205.010100720040001>
- 경남신문. (2024, July 30). *밀양시 보건지소, 태양광 설치로 전기요금 절감*.  
<https://www.knnews.co.kr/news/articleView.php?idxno=1293324>
- 한국방송뉴스. (2024, July 30). *예산군, 2021년 신재생에너지 융복합지원사업 '순항'*. <https://www.ikbn.news/news/article.html?no=118380>

평창군. (2024, July 29). *평창군 통계연보*.

<https://www.pc.go.kr/portal/part/info-statistics>

기상청. (2024, July 30). *기상기후 빅데이터 분석 플랫폼*.

<https://bd.kma.go.kr/kma2020/fs/energySelect2.do>