

Korea Water Resources Association



학술/기술 기 사

54 다원 수문기상 자료와 인공지능 융합을 통한 격자형 강수 정보의 고도화
변종윤·전창현

64 NASA 수문과학연구소의 Noah-MP 지표수문모형과 GRACE 위성 자료를 활용한 연구 소개
조은샘·조은상

74 연안침수의 경제적 영향: 직접피해에서 지역 간 파급효과까지
양정현·정기철

Water
for future

다원 수문기상 자료와 인공지능 융합을 통한 격자형 강수 정보 고도화

Water
for future
학술/기술 기사
01



변종운

Visiting Researcher,
Department of Water
Management, Faculty of Civil
Engineering & Geosciences,
Delft University of Technology
jbyun41@naver.com



전창현

고려대학교 공과대학
건축사회환경공학부 부교수
cjun@korea.ac.kr

1. 들어가며

강수는 물순환의 가장 기본적인 구성 요소이며, 이에 대한 정확한 추정·예측·해석은 수문 모델링, 재해 저감, 홍수 예·경보, 그리고 기후 회복력을 갖춘 수자원 관리의 출발점이다. 정량적 강수 추정(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)과 정량적 강수 예측(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)은 저수지 운영, 용수 배분, 홍수 예·경보 등을 위한 직접적 입력자료로서, 돌발홍수나 도시 침수처럼 국지적이고 급격하게 전개되는 현상을 다루는데 필수적이다. 한편 대기의 수분 보유 능력이 기온 상승에 비례해 증가함에 따라, 짧은 시간에 집중되는 극한 강수의 강도가 커지는 경향이 전 지구적으로 보고되고 있다(IPCC, 2021). 기후변화로 인해 집중호우의 발생 빈도가 증가하고(Trenberth et al., 2014) 강수 현상의 시공간적 양상이 과거와 다르게 변화하면서, 높은 시·공간 해상도의 강수 관측 및 예측 자료에 대한 요구는 그 어느 때보다 커지고 있다.

문제는 강수가 본질적으로 관측 난이도가 높은 변수라는 점이다. 강수는 미세물리 규모에서 종관 규모에 이르는 다양한 시·공간 규모에서 큰 변동성을 보이며, 단일 체계만으로 충분히 포착하기는 어렵다. 이는 각 자료원의 고유한 강점을 활용하고 통합하여 개별 자료원이 지닌 한계를 상호보완할 수 있음을 시

사한다. 강우량계는 지점 단위의 신뢰할 수 있는 직접 관측을 제공하지만, 설치·유지 비용과 공간 밀도의 한계로 도시·산악 지역에서 관측 공백 지역이 발생할 수 있다. 기상레이더는 넓은 영역의 강수를 높은 시·공간 해상도로 관측하지만, 반사도와 강우강도 관계에 기반한 간접적 추정 방식과 다양한 요소에 의한 차폐로 인하여 정량 오차를 동반한다. 이러한 레이더 자료를 입력자료로 강수 예측의 이동을 투영하는 레이더 기반 외삽 예측은 짧은 예측 선행시간에서는 높은 정확도를 보이지만, 단순 이류만을 가정한다는 점에서 예측 선행시간이 길어질수록 강수 생성·소멸에 대한 모의 정확도가 급격하게 저하된다. 수치예보모델은 대기 물리·동역학을 명시적으로 모의해 긴 예측 선행시간에서 상대적으로 우수한 예측 성능을 보이나, 초기·경계조건의 불확실성과 제한된 공간 해상도로 인해 국지성 및 극한 강수의 강도와 위치를 정확히 재현하기 어렵다는 한계가 있다. 인공위성은 지상 관측이 닿지 않는 지역까지 아우르는 전지구 관측을 제공하지만, 구름 상부의 적외선 온도나 마이크로파 신호로부터 지표 강수를 간접 추정한다는 점에서 불확실성이 크며, 시간 해상도, 정확도 및 재방문 주기 간의 상충관계에 대한 상충이 발생한다 (Huffman et al., 2007; Kidd & Levizzani, 2011). 최근에는 기존 관측 장비의 한계를 보완하기 위해, microwave link, CCTV 영상, acoustic sensing 등 기존에는 강수 관측에 활용되지 않았던 다양한 IoT 기반 센서를 활용한 연구도 다양하게 이루어지고 있다 (Byun et al., 2025b; Hwang et al., 2024; Hwang et al., 2025; Lee et al., 2023).

결국 단일 자료원만으로는 강수 과정의 모든 특성을 충분히 포착하기 어렵다 (Berne & Krajewski, 2013). 그렇다면 서로 다른 자료가 지닌 상보적 정

보를 어떻게 결합할 것인가라는 물음이 자연스럽게 제기된다. 최근 인공지능의 발전은 이 물음에 새로운 해법을 제시하며, 다양한 자료를 융합하여 강수 추정의 불확실성을 보완하고 정확도를 향상시키는 접근이 주요 연구 방향으로 주목받고 있다 (Assiri & Qureshi, 2022). 비선형적이고 고차원적인 자료의 특징을 추출하고 이에 대한 관계를 학습할 수 있는 방식은, 이질적 자료를 물리적으로 일관된 하나의 강수 정보로 통합하는 유력한 도구가 될 수 있다. 저자의 박사학위 논문은 바로 이 지점에서 출발한다. 논문 전체를 관통하는 핵심 질문은 다음과 같다. “서로 다른 강점과 한계를 지닌 다원 수문기상 자료를, 인공지능을 매개로 통합함으로써 격자형 강수 정보의 정확성·해석가능성·운영 활용성을 동시에 높일 수 있는가” 본 논문은 이 질문을 강수 정보의 세 가지 요소인, 추정 (estimation), 예측 융합 (forecast fusion), 기여도 해석 (attribution)으로 나누어 다루며, 각 요소에 대응하는 세 개의 연구축으로 구성된다. 센서 기반 관측 자료를 정량적 정보로 변환하고, 예측을 구조적으로 일관되게 융합하며, 예측의 근거를 물리적으로 해석하는 이 세 단계는 분절된 과제가 아니라 하나의 흐름, 곧 차세대 수문정보학 (hydroinformatics)의 기반으로 이어질 수 있다. 이어지는 2~4장에서는 각 연구축의 연구질문과 방법, 핵심 결과, 의의를 소개하고, 5장에서는 세 연구를 관통하는 종합적 함의로서 수문기상 분야에서의 인공지능 모델 선택 지침을 제시한다.

2. 관측 공백 해소를 위한 CCTV영상 기반 강수량 추정

지상 관측망은 신뢰도가 높지만, 설치·유지 비

용과 공간 밀도의 한계로 도시와 산악 지역에 관측 공백을 남긴다. 반면 도시에는 방법·교통 목적으로 이미 설치되어 24시간 운영되는 CCTV 장비가 다수 존재한다. 본 연구는 도시 내의 영상 인프라를 강수 관측 자원으로 재활용하여, 별도의 대규모 투자 없이 관측 밀도를 높이는 방법론을 개발한다는 관점에서 출발하였다. 본 연구의 핵심 연구질문은 “기존 관측 목적으로 설치된 CCTV 장비로 부터 얻은 영상을 정량적 강수강도 값으로 변환하여 지상 관측망을 보완하는 저비용·고밀도 관측 자원으로 활용할 수 있는가, 특히 상대적으로 연구가 부족했던 강설 현상을 포함하여 강수 현상을 하나의 틀에서 다룰 수 있는가”이다.

영상 속 강수의 시각적 정보는 입자의 크기·낙하 속도·밀도와 같은 미세물리적 특성을 반영하며 이는 강수강도와 직접 연결되므로, 영상은 강수 정량 추정의 프록시(proxy)가 될 수 있다고 판단하였다. 이를 구현하기 위해 원자료 영상에서 정량 강수강도로 이어지는 2단계 파이프라인을 구축하였다. 먼저 kNN 기반 배경 분리 기법으로 복잡한 실외 장면에서 움직이는 강수 입자만을 전경

으로 안정적으로 분리하였고(Bouwman et al., 2010), 모폴로지 연산과 관심영역 선정 등을 통하여 강수 입자의 물리적 특성만을 남길 수 있도록 정제하였다. 이후 합성곱 신경망 기반 회귀 모델을 구축하여 처리된 영상을 강수강도로 변환하도록 하였으며(Byun et al., 2023), 학습의 참값으로는 입자 크기 분포와 낙하 속도로부터 강도를 직접 추정하는 PARSIVEL 광학우적계 관측자료를 영상 프레임과 시간적으로 동기화하여 사용하였다(그림 1 참고).

CNN 기반 모델은 강우와 강설 모두에서 안정적 성능을 보였고, 대부분 사례가 “Good”에서 “Very Good” 등급으로 분류되었으며 MAE의 중앙값은 1 mm h^{-1} 이하를 유지하였다. 주목할 점은 강설 입자는 강우 입자보다 낙하 속도가 느리고 유효 입경이 크다는 점에서, 강우 입자에 비해 상대적으로 연속된 프레임에 걸쳐 관측이 이루어졌다는 점이다. 이는 CCTV영상에서 입자의 특성을 더욱 명확하게 추출하는 데 기여하였으며, 지상 관측에서 강설의 정량화가 더 어렵다는 통념과 대비되는 결과이다. 본 연구는 CCTV가 공간적으로 조밀하고 비용 효율적

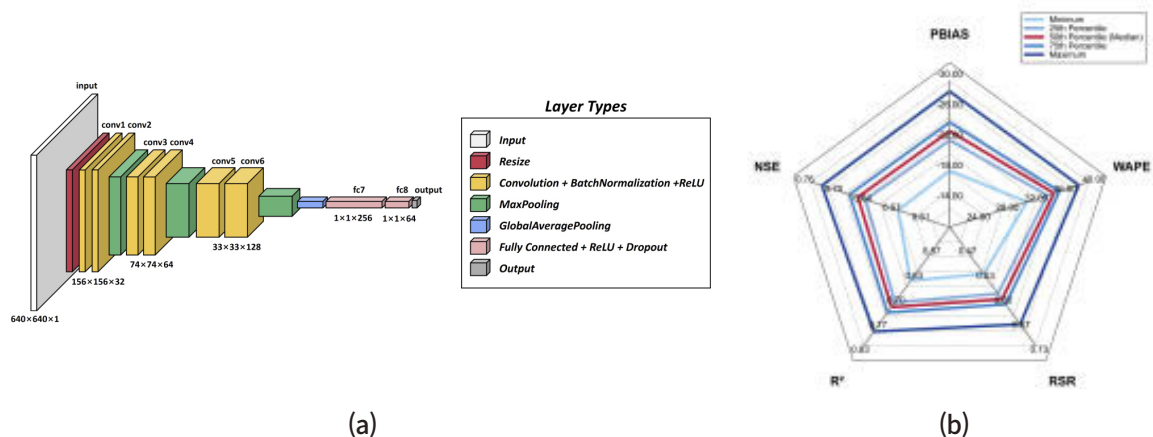


그림 1. CNN-based snowfall intensity estimation framework and performance evaluation. (a) Model configuration of the CNN-based image-value model. (b) Estimated versus observed snowfall intensities for four randomly sampled test subsets (n = 500).

인 보완적 관측 플랫폼으로 기능할 수 있음을 정량적으로 입증함으로써, 이미 설치된 영상 인프라를 강수 관측에 재활용하는 기회적 관측(opportunistic sensing)의 실현 가능성과 고해상도 강수 모니터링으로의 확장 가능성을 제시하였다.

3. 딥러닝 기반 영상 융합 기법을 활용한 강수 예측 자료 상보 보완

레이더 외삽 예측은 강수 에코의 이동을 투영해 높은 공간 해상도의 초단기 예측을 제공하지만 선행시간이 길어질수록 성능이 급격히 저하되고, 수치예보모델(NWP)은 대기 동역학을 반영해 더 긴 예측 시간을 제공하지만 공간 해상도와 국지 규모 정확도가 낮다. 따라서 두 자료는 상보적 관계에 있으며, 본 연구는 두 자료의 상보적 특성을 데이터 기반으로 결합하기 위해 원격탐사·의료 영상 분야에서 발전해 온 영상 융합(image fusion) 기

법(Castanedo, 2013)을 강수 예측에 도입하는 방법론을 개발하였다. 본 연구의 핵심 연구질문은 “딥러닝 기반 영상 융합으로 레이더 외삽 예측과 NWP 자료를 통합하여, 어느 한 자료원만으로는 재현할 수 없는 미세 공간구조를 보존하면서 구조적으로 일관된 고해상도 강수 예측 자료를 생성할 수 있는가”이다.

한반도 수도권권을 대상으로, 기상청이 운영하는 레이더 외삽 예측(MAPLE, 1 km)과 수치예보모델(KLFS, 5 km)을 입력으로, 레이더 합성자료(HSR, 0.5 km)를 목표 자료로 설정하고 모델을 학습시켰다. 강수 예측을 서로 다른 두 정보원의 융합 문제로 정의하고, 모델의 기본 구조를 인코더-디코더 형태로 구축하였다(Byun et al., 2025a). 이 과정에서 세 가지 대표 구조인 Convolutional Autoencoder, U-Net, ResNet을 선정하여 비교하였으며, 나아가 상대적으로 우수한 성능을 보인 ResNet의 잔차 블록 수를 1개에서 10개까지 총 6

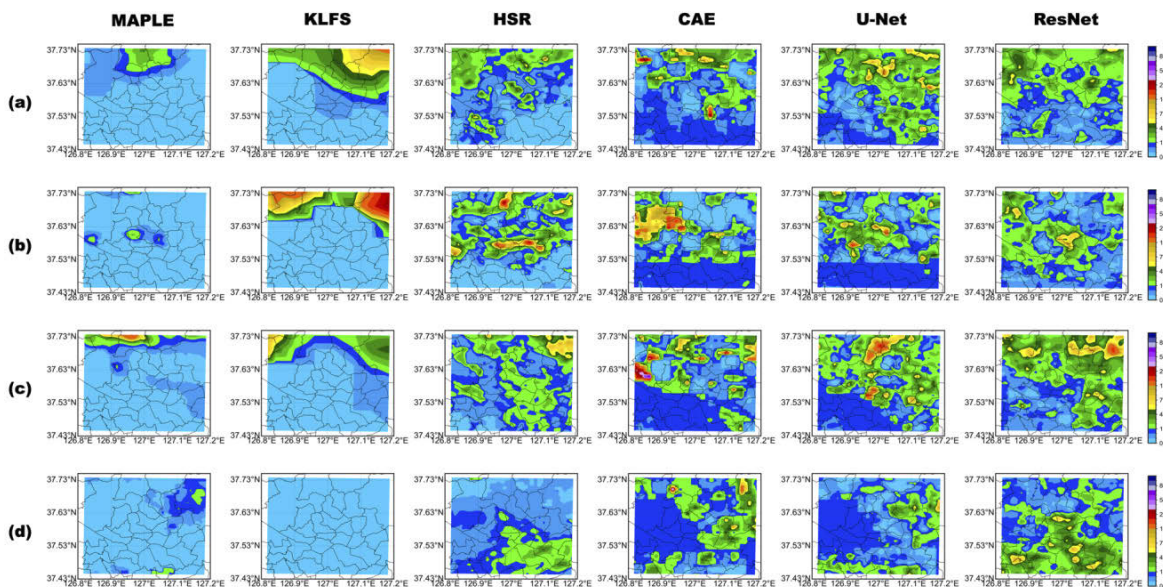


그림 2. Comparison of rainfall fields produced by different model topologies for four selected events: (a) July 10, 2020, 12:00 LST; (b) July 29, 2020, 03:00 LST; (c) August 1, 2020, 07:00 LST; and (d) August 23, 2021, 15:00 LST

단계로 변화시켜 모델 깊이가 융합 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 이처럼 모델 구조(topology)와 크기(size)의 영향을 두 단계로 분리하여 분석함으로써, 각 요소가 영상 융합 성능에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다.

모델 구조 분석에서는, 세 구조 가운데 ResNet이 모든 평가지표에서 일관되게 우수하고 과적합에 대한 상대적으로 높은 강건성을 보였다(그림 2 참고). 이러한 성능 차이는 skip-connection의 구조적 특성과 관련된 것으로 해석된다. ResNet의 identity 기반 연결은 블록의 입력을 출력에 그대로 더해 학습을 residual mapping으로 진행하여, 기울기 전파의 안정성을 확보하고 저수준 특징의 재사용성을 높일 수 있다. 반면 U-Net의 대칭적 skip connection은 인코더와 디코더의 특징을 concatenation 방식으로 결합하므로, 서로 다른 기상 입력자료로부터 추출된 이질적 특징의 통합 과정에서 정보 불일치가 발생했을 가능성이 있다. 모델 크기 분석에서는, 잔차 블록 8개 구성이 상대적으로 가장 좋은 성능을 보였다. 잔차 블록이 10개인 경우, 강수 구조가 파편화되는 등 오히려 모델이 과적합되는 양상을 보였다. 이는 딥러닝 기반 영상 융합 성능이 알고리즘의 종류가 아니라 정보를 결합하는 방식과 적정 용량에 의해 결정되어야 함을 보여준다. 본 연구는 수문·기상 분야에서 영상 융합 기법을 강수 예측에 최초로 적용하여 특징 수준의 자료 융합이 자료원별 고유 구조를 보존하면서 자료 간 불일치를 완화할 수 있음을 입증하였다.

4. 기후대별 강수 지배 인자 규명 및 인자 조합 실험을 통한 강수 예측 성능 개선

인공지능을 기반으로 한 강수 예측은 높은 예측

성능에도 불구하고 예측 근거를 명시적으로 제공할 수 없다는 블랙박스 문제를 가지고 있다. 운영 예보·재해 평가·정책 결정 등의 실무적 관점에서 활용성을 확보하기 위해서는, 예측 정확도만이 아니라 물리적 타당성이 함께 요구된다. 본 연구는 강수를 지배하는 수문기상 인자를 규명하고, 이를 바탕으로 인자 조합 실험을 수행하여 인자 선택이 강수 예측 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것을 목표로 하였다. 본 연구의 핵심 연구질문은 “주요 수문기상 인자의 기여도를 정량화하고 서로 다른 수문기후 지역에서의 지배적 인자들을 규명하며, 예측 정확도를 유지하면서 모델의 복잡도를 줄이고 물리적 해석가능성을 확보할 수 있는가”이다.

분석 대상 지역은 대륙성 호우가 잦은 대륙성 기후(미국 대평원), 상시 대륙성 강우의 열대 습윤 기후(아마존 분지), 장마·태풍이 지배하는 온대 계절풍 기후(한반도 중심 동북아), 그리고 강수가 희소한 극건조 기후(호주 중부)로, 뚜렷이 구분되는 네 기후대이다. ERA5 재분석 자료로부터 대기 불안정도와 관련된 열역학 지표(Colby, 1984; Chen et al., 2020), 연직 운동·수렴을 나타내는 운동학 지표, 연직 적분 수분 지표 등을 활용하여 입력자료로 선정하였다. 예측 대상 변수로는 총 강수량을 설정하였으며, 트리 기반 앙상블 모델 XGBoost를 기반으로 SHAP (SHapley Additive exPlanations) 방식을 활용하여 각 인자의 기여도를 정량화하였다(Chen & Guestrin, 2016; Lundberg & Lee, 2017; Aryal, 2025). 나아가 SHAP 중요도 순위에 따라 인자 조합을 재구성한 9개 실험 사례(Case 1~9)를 설계하여, 상위·하위 인자의 선택이 모델의 예측 효율과 정확도 사이의 상충관계(trade-off)에 미치는 영향을 분석하였다.

SHAP 분석은 대상 지역에 따라서 서로 다른 인자 중요도 순서를 보였다(그림 3 참고). 대륙성 기후의 미국 대평원에서는 열역학 불안정 지표인 kx (K-index, 1위)·CIN (convective inhibition, 3위)·CAPE (convective available potential energy, 5위)가 상위를 점해 깊은 습윤 대류가 강수를 주도함을 보였고, 850 hPa 풍속 ws_850(11위)은 멕시코만 수분을 내륙으로 수송하는 대평원 하층 제트(GPLLJ, Great Plains low-level jet)의 대리 지표로서 연직 적분 수분 발산(VIMD, vertically integrated moisture divergence, 2위)를 강화한다. 열대 습윤 기후의 아마존 분지에서는 VIMD(1위)·CAPE(3위)와 500 hPa 비습 q_500(4위)이 상위에 올라, 상시 습하고 불안정한 대기에서는 불안정도의 유무보다 심층 수분의 지속적 수렴과 연직 상승 w_500(9위)이 강수를 좌우함을 나

타냈다. 온대 계절풍 기후의 한반도 중심 동북아에서는 700·850 hPa 상대습도 r_700(1위)·r_850(2위)가 지배적이라는 점에서 하층-중층 대기의 포화에 강수가 의존하는 장마 전선형 강수의 특징을 드러냈고(Choi et al., 2020), 수증기 플럭스 크기 viwv_mag(8위)는 동아시아 여름 몬순의 수분 수송을 반영한다. 극건조 기후의 호주 중부에서는 kx(1위)·CAPE(3위) 등 불안정 지표가 높은 순위를 보였음에도 실제 강수는 수분 가용성(r_850·viwv_mag 등)의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 특히 다른 세 지역에서 최상위권을 차지한 CIN이 이곳에서는 중요도가 최하위(33위)에 가까운 순위를 보였는데, 이는 강한 지표 가열로 경계층이 깊게 혼합되어 대류 억제층의 효과가 상대적으로 약화되었을 가능성을 시사한다. 즉 해당 지역에서의 강수는 건조·불안정한 대기로의 드문

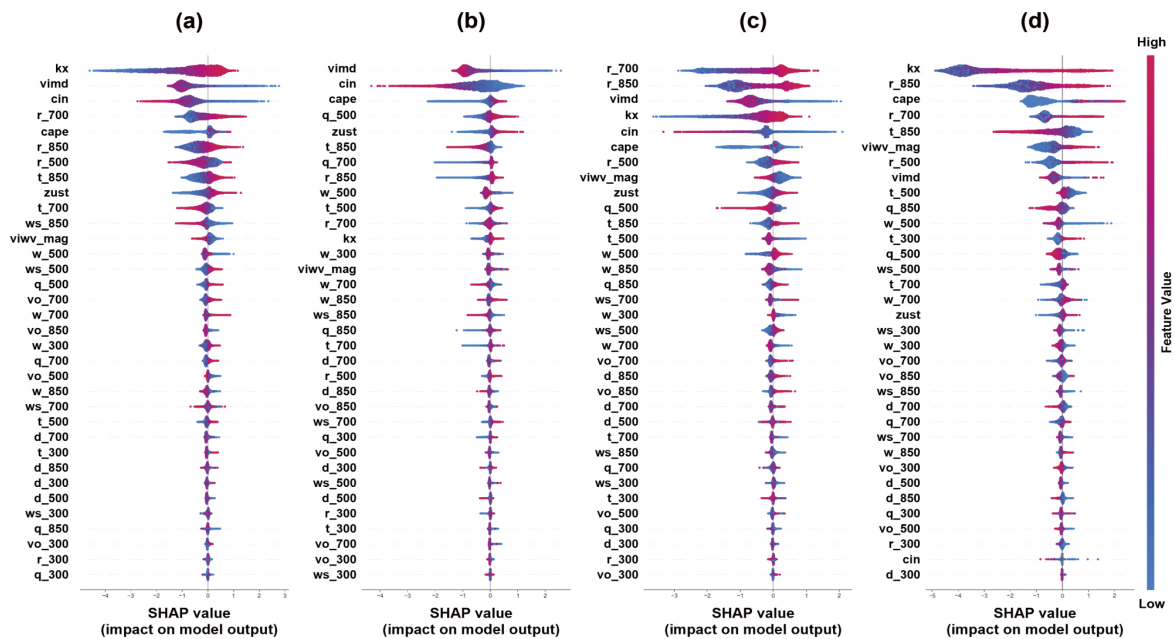


그림 3. SHAP summary plots of feature contributions to predicted rainfall for four regions: (a) Great Plains, (b) Amazon, (c) Northeast Asia (centered on the Korean Peninsula), and (d) Central Australia. Dots denote individual samples, where color represents feature intensity (red: high, blue: low) and horizontal displacement indicates the direction and magnitude of the impact on the model output

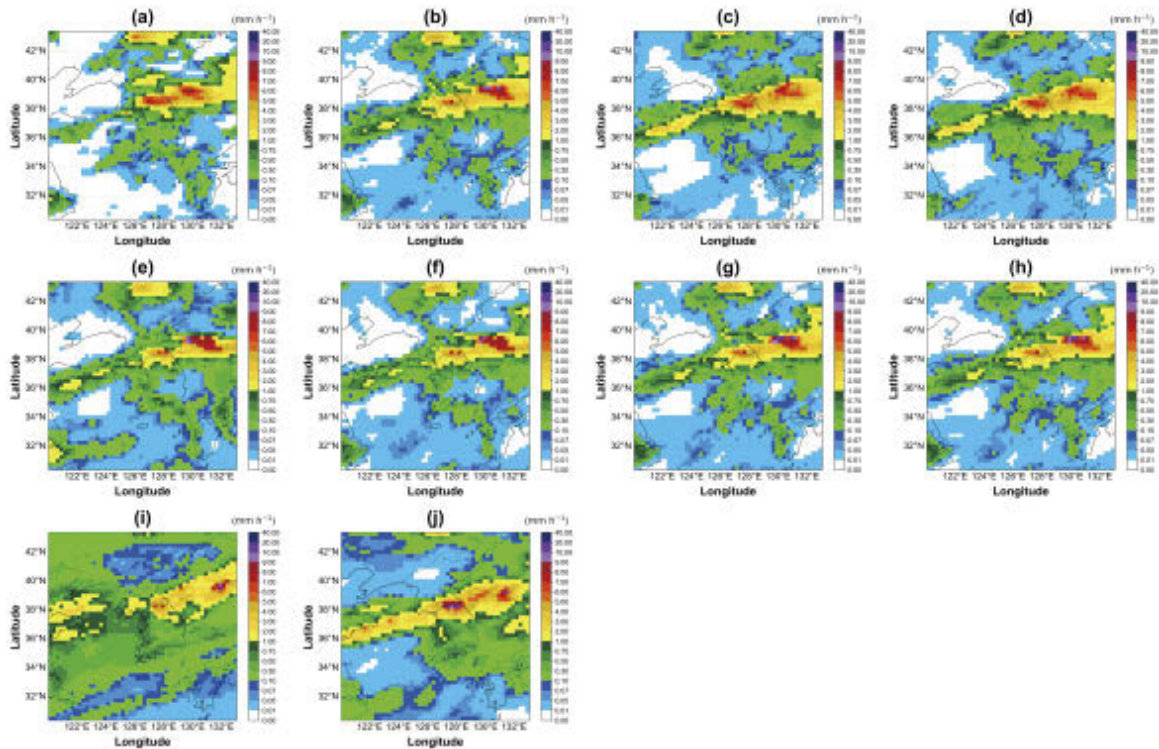


그림 4. Spatial distribution of total precipitation over Northeast Asia centered on the Korean Peninsula at 00:00 UTC on 6 August 2025: (a) reference total precipitation (TP) from ERA5; (b) Case 1, using all features; (c) Case 2, excluding the top 10 features; (d) Case 3, excluding the top 5 features; (e) Case 4, using only the top 5 features; (f) Case 5, using only the top 10 features; (g) Case 6, excluding the bottom 10 features; (h) Case 7, excluding the bottom 5 features; (i) Case 8, using only the bottom 5 features; and (j) Case 9, using only the bottom 10 features.

수분 유입으로 결정되며, 이처럼 지배 인자의 위계가 각 지역의 기후 특성과 정합적으로 재편된다는 사실은 본 연구에서 제시한 모델이 지역별 강수 과정을 정합적으로 학습했음을 시사한다.

인자 조합 실험에서는 상위 인자 각각 5개와 10개만으로 입력자료를 구성한 사례(Case 4·5)가 전체 변수를 사용한 기준 사례와 비슷한 예측 성능을 보인 반면, 하위 인자 각각 5개와 10개로 입력자료를 구성한 사례(Case 8·9)에서는 영상 품질·회귀 오차·범주형 탐지 지표 전반에서 성능이 저하됨을 확인하였다(그림 4 참고). 즉 본 연구에서 구축한 모델을 통해 선정된 소수의 물리적 핵심 인자만으로도 높은 강수 예측 성능을 확보할 수

있었으며, 이는 attribution 결과가 모델 성능과 밀접하게 연계될 수 있음을 보여준다. 이로써 본 연구는 예측 정확도를 유지하면서 모델 복잡도를 낮추는 간결한(parsimonious) 인자 선택 전략을 제시하는 동시에, SHAP 기반 해석을 통하여 모델의 예측 값과 물리적으로 의미 있는 대기 과정을 연결함으로써 인공지능 기반 강수 예측에 과학적 해석 가능성을 높이는 방식을 제시하였다.

5. 종합 논의: 수문·기상 분야 인공지능 모델 선택 전략 제시

세 연구축을 관통하는 핵심 시사점은, 수문기상

분야에서 인공지능의 효용이 특정 알고리즘의 선택보다 과학적 목적·자료 특성·모델 구조의 정합성에 달려 있다는 점이다. 보편적으로 우수한 성능을 보이는 모델 구조를 찾는 행위를 넘어서, 주어진 문제에 가장 적합한 학습 패러다임을 식별하는 문제가 중요하다는 것이다. 본 연구에서는 이러한 원리를 세 가지 유형으로 제시하였다. 강수 추정(2장)은 영상에서 공간 특징을 학습하는 시각 패턴 인식 문제였고, 이는 CNN·U-Net·비전 트랜스포머(ViT) 등 계층적 공간 표현에 특화된 구조에 자연스럽게 부합한다. 예측 융합(3장)은 이질적 정보원의 통합 문제였으며, 본 연구에서는 인코더-디코더 및 잔차 학습 구조의 적용 가능성을 확인하였다. 향후에는 어텐션 기반 구조와 diffusion 기반 생성모델을 활용하여 초해상화 및 불확실성 정량화로 확장할 수 있다. 인자 해석(4장)은 예측 성능과 함께 결과에 대한 해석가능성이 요구되는 문제였으며, 트리 기반 모델과 설명 가능 인공지능(XAI)의 결합을 통해 높은 예측 성능을 유지하면서 주요 인자의 영향과 기여도를 체계적으로 해석할 수 있었다.

이러한 내용을 바탕으로 수문·기상 분야의 연구를 진행함에 있어서 인공지능 모델 선택의 네 가지 기준을 다음과 같이 제시하고자 한다. ① 가용 자료의 구조(영상·격자·시계열·그래프), ② 대상 과정의 지배적 시·공간 특성(공간 패턴 대 시간 해상도), ③ 분석의 과학적 목적(추정·예측·통합·해석), ④ 요구되는 해석 수준(예측 정확도 대 물리적 근거). 이 기준에 따라, 시계열 예측(하천 유량·가뭄·홍수 예보)에는 LSTM·GRU·ConvLSTM·트랜스포머를 하천망·유역과 같은 공간 연결성이 중요한 문제에는 그래프 신경망을 고려할 수 있다. 나아가 극한·비정상(non-stationary) 조건에 대한

강건성을 확보하기 위해서는 지배 방정식과 보존 법칙을 학습에 통합하는 물리 정보 신경망(PINN, Physics-Informed Neural Networks)과 같은 접근을 고려할 수 있으며, 나아가 멀티모달 학습과 파운데이션 모델은 위성, 레이더, NWP, 현장 관측 및 IoT 센서를 포괄하는 차세대 인공지능 기반 수문기상 시스템의 개발을 위한 유망한 연구 방향일 것으로 사료된다.

6. 마치며

본 학위논문에서는 다양한 강수 현상을 대상으로 강수 정보를 고도화하기 위한 인공지능 기반 프레임워크를 제시하였다. 이를 위해 기회적 관측 기반 정량화(추정), 딥러닝 기반 영상 융합(예측), 설명 가능 인공지능 기반 영향 인자 분석(해석)의 세 연구 축을 연계하여 다원 수문기상 자료의 통합적 활용 가능성을 제시하였다. CCTV영상을 정량 강수값으로 전환하고, 서로 다른 예측 자료를 구조적으로 일관된 강수장으로 융합하며, 강수 예측을 물리적으로 해석하는 데 인공지능이 효과적으로 활용될 수 있음을 제시하였다. 이러한 결과는 디지털 트윈을 활용한 수자원 시스템 구축, 통합홍수예보 시스템 개발, 의사결정 지원 체계 구축 등에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 강수 정보의 정확성을 넘어 해석가능성과 운영 활용성을 함께 고려하였다는 점에서, 본 논문은 강수 정보의 생산·이해·활용을 아우르는 통합적 수문정보학의 방향을 제시하였다. 향후 극한 강수 사상에 대한 학습 표본의 보강, 물리 법칙과 제약조건의 도입, 그리고 멀티모달 학습으로의 확장 등을 통해 본 연구에서 제시한 프레임워크의 강건성과 적응성을 한층 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Aryal, Y. (2025). Assessing climate and watershed controls on rain-on-snow runoff using XGBoost-SHAP explainable AI (XAI). *Geosciences*, 15(12), 467.
- Assiri, M. E., & Qureshi, S. (2022). A multi-source data fusion method to improve the accuracy of precipitation products: A machine learning algorithm. *Remote Sensing*, 14(24), 6389.
- Berne, A., & Krajewski, W. F. (2013). Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential? *Advances in Water Resources*, 51, 357–366.
- Bouwman, T., El Baf, F., & Vachon, B. (2010). Statistical background modeling for foreground detection: A survey. In *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision* (pp. 181–199). World Scientific.
- Byun, J., Cha, J., Thiyaalingam, J., Kim, H. J., & Jun, C. (2025a). Enhancing rainfall prediction accuracy through image fusion of radar and numerical weather prediction models. *Expert Systems With Applications*, 130516.
- Byun, J., Kim, H. J., Hwang, S., Baik, J., & Jun, C. (2025b). Snowfall intensity estimation based on convolutional neural networks using CCTV data. *Journal of Korea Water Resources Association*, 58(4), 313–327.
- Byun, J., Jun, C., Kim, J., Cha, J., & Narimani, R. (2023). Deep learning-based rainfall prediction using cloud image analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1–11.
- Castanedo, F. (2013). A review of data fusion techniques. *The Scientific World Journal*, 2013, 704504.
- Chen, J., Dai, A., Zhang, Y., & Rasmussen, K. L. (2020). Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming. *Journal of Climate*, 33(6), 2025–2050.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785–794).
- Choi, J., Kim, H., & Wang, B. (2020). Interdecadal variation of Changma (Korean summer monsoon rainy season) retreat date in Korea. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1348–1360.
- Hwang, S., Jun, C., De Michele, C., Kim, H. J., & Lee, J. (2024). Rainfall observation leveraging raindrop sounds acquired using waterproof enclosure: Exploring optimal length of sounds for frequency analysis. *Sensors*, 24(13), 4281.
- Hwang, S., Lee, J., De Michele, C., Byun, J., Jung, D., & Jun, C. (2025). Rainfall intensity estimation via raindrop sounds leveraging convolutional neural networks and low-cost IoT sensors. *Steel and Composite Structures*, 56(6), 539–550.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... & Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of*

-
- hydrometeorology, 8(1), 38-55.
- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press.
- Kidd, C., & Levizzani, V. (2011). Status of satellite precipitation retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1109-1116.
- Lee, J., Byun, J., Baik, J., Jun, C., & Kim, H. J. (2023). Estimation of raindrop size distribution and rain rate with infrared surveillance camera in dark conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(3), 707-725.
- Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. In *Advances in Neural Information Processing Systems 30* (pp. 4765-4774).
- Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22.
-

NASA 수문과학연구소의 Noah-MP 지표 수문모형과 GRACE 위성 자료를 활용한 연구 소개

Water
for future
학술/기술 기사
02



조은샘

NASA Goddard Space Flight Center /
University of Maryland
Hydrological Sciences Laboratory
Postdoctoral Associate
eunsaem.cho@nasa.gov



조은상

Texas State University
Ingram School of Engineering
Assistant Professor
eunsang.cho@txstate.edu

1. 서론

강수의 지표 도달 이후 증발산·침투·유출로 이어지는 물의 흐름은 수 자원 관리의 근간이 되는 정보이다. 그러나 이를 모든 지점에서 연속적으로 직접 관측하는 것은 현실적으로 불가능하다. 특히 기후변화로 인해 강수의 시공간적 변동성과 극한 강수, 가뭄 및 증발산의 변화가 심화되면서, 관측이 제한된 지역에서도 수문순환을 정량적으로 이해하고 미래의 변화를 전망할 수 있는 모델링 기술의 중요성이 더욱 커지고 있다. 지표수문모형(land surface model)은 이러한 관측의 공백을 물리 법칙으로 메우는 도구다(Wood, 1991). 구체적으로는 물수지와 에너지수지 방정식을 격자마다 풀어 강수·복사·기온 등의 기상 입력강제 자료로부터 증발산, 토양수분, 지하수위, 유출을 연속적인 시공간 장으로 산출한다. 또한 각 성분이 하나의 물수지 방정식 안에서 서로 연결되어 계산되기 때문에, 강수가 어느 경로를 따라 어디에 저장되고 언제 빠져나가는지를 성분별로 추적하는 것도 가능하다. 초기의 지표수문모형은 주로 대기모형의 하부 경계조건으로서 지표면과 대기 사이의 물·에너지 교환을 표현하는 데 초점을 두었으나, 이후 대기·기상모델과의 결합 및 상호작용을 고려하는 방향으로 발전해 왔다. 이에 따라 최근의 지

표수문모형은 관측된 기상자료를 이용해 현재의 수문상태를 재현하는 것을 넘어, 가뭄 감시와 홍수 예보, 농업 용수 관리, 나아가 기후변화에 따른 장기 수자원 전망에 이르기까지 폭넓게 활용되고 있다(Rodell et al., 2004; Haddeland et al., 2014; Emerton et al., 2016).

다만 모형이 물리 법칙에 기반한다고 해서, 그 결과가 곧 실제와 같아지는 것은 아니다. 기상 입력강제자료에 포함된 오차, 토양·식생 매개변수의 불확실성, 그리고 복잡한 물리 과정을 수식으로 단순화하는 과정에서 생기는 구조적 한계가 모의 결과에 누적되기 때문이다(Clark et al., 2015). 자료동화(Data Assimilation, DA)는 이 간극을 관측 자료로 보정하는 절차다(Evensen, 1994; Reichle, 2008). 모형이 예측한 상태와 관측된 값을 각각의 불확실성에 따라 가중하여 결합함으로써, 물리적 일관성은 유지하면서도 관측 자료와 부합하는 새로운 상태 변수를 만들어 낸다. 실제로 오늘날 운영되는 여러 자료동화 시스템이 위성 관측자료를

상시 동화하여 산출물의 정확도를 유지하고 있다(Reichle et al., 2017).

NASA 고다드우주비행센터(Goddard Space Flight Center) 수문과학연구소(Hydrological Sciences Laboratory)에서는 전지구 규모, 대륙 규모의 수문 변수들의 변동을 파악하기 위해 LIS(Land Information System, 그림 1)를 구축하여 이용하고 있다(Kumar et al., 2006; Peters-Lidard et al., 2007). LIS는 다양한 기상 입력강제자료와 지표수문모형을 동일한 시스템 안에서 선택하여 구동할 수 있도록 설계된 프레임워크다. LIS에는 Noah-MP(Noah with Multi-Parameterization Options; Niu et al., 2011), CLM(Community Land Model; Bonan et al., 2002), VIC(Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994), CLSM(Catchment Land Surface Model; Koster et al., 2000), SAC-SMA(Sacramento Soil Moisture Accounting)/SNOW17(Burnash et al., 1973; Anderson, 1973)

Land Information System (LIS) modes of operation

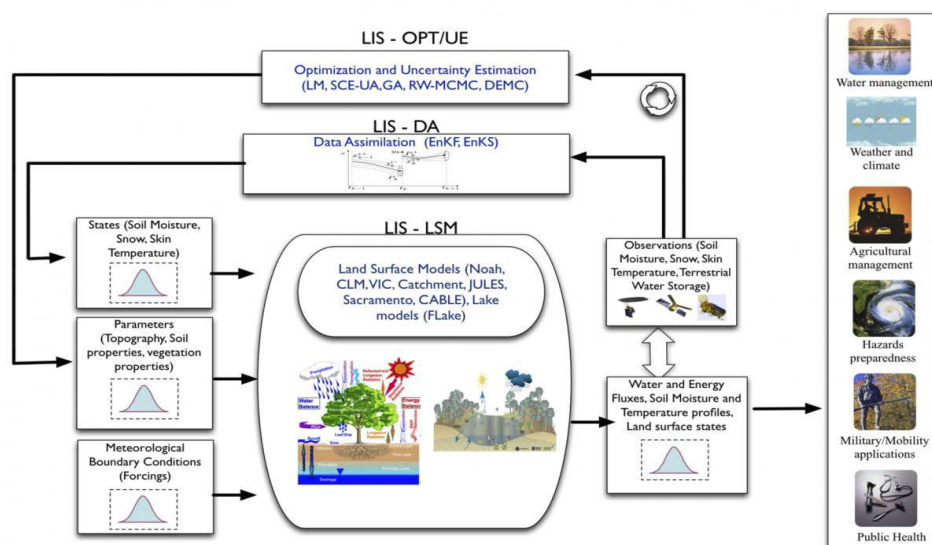


그림 1. NASA 지표정보시스템(Land Information System, LIS)의 구성: 지표수문모형(LIS-LSM)과 자료동화(LIS-DA)의 순환 구조 (출처: NASA 고다드우주비행센터, <https://lis.gsfc.nasa.gov/software/lis>)

등 여러 지표수문모형이 탑재되어 있고, 다양한 재분석 기상자료를 입력자료로 쓸 수 있어서, 연구 목적에 따라 특정 모형을 선택하거나 여러 모형의 결과를 비교 분석할 수 있다.

본 기사에서는 NASA LIS의 주요 지표수문모형인 Noah-MP와 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성 관측 자료를 차례로 살펴본다. 이어서 위성 관측자료를 지표수문모형과 결합하기 위한 자료동화 기법인 앙상블 칼만 스무더(Ensemble Kalman Smoother, EnKS)의 기본 개념과 적용방법을 간단히 소개한다. 마지막으로 미국 미주리강 유역의 한 소유역을 대상으로 GRACE 관측자료와 Noah-MP를 결합한 자료동화 실험 결과를 제시하여, 이를 통해 실제 유역에서 유량 모의 성능을 어떻게 개선할 수 있는지 살펴본다.

2. Noah-MP 지표수문모형

Noah-MP는 Noah 모형을 확장하여 식생, 토양, 눈, 지하수 등 육상 수문·에너지 순환 과정을 정교하게 모의하도록 설계된 지표수문모형이다(Niu et al., 2011; Yang et al., 2011). 이 모형은 각 격자에서 물수지와 에너지수지를 동시에 만족하는 해를 일정한 시간 간격으로 구한다. 물수지에서는 강수가 증발산과 유출로 빠져나가고 나머지가 적설, 토양수분, 지하수의 변화로 남는 관계를 추적하며, 토양층 내부의 연직 수분 이동은 리차드 방정식(Richards equation; Richards, 1931)을 풀어 계산한다. 에너지수지에서는 순복사가 현열, 잠열, 지중열로 분배되는 과정을 식생과 지면으로 나누어 각각 해석한다. 이러한 계산을 통해 격자 단위로 지표유출(surface runoff), 지표하유

출(subsurface runoff), 토양수분, 지하수위, 적설상당수량(Snow Water Equivalent, SWE) 등 주요 수문 성분이 시공간적으로 산출된다.

Noah-MP의 가장 큰 특징은 이름 그대로 '다중 매개변수화(multi-parameterization)' 구조에 있다. 유출 생성, 증발산 산정, 지하수 흐름 등 주요 물리 과정마다 여러 개의 대안적 매개변수화 방식(parameterization scheme)을 제공하여, 연구 지역의 기후·토지피복 특성에 맞게 물리 과정의 산정 방식을 선택할 수 있다. 구체적으로는 동적 식생 활성화 여부, 기공저항 산정 방식(Ball-Berry 또는 Jarvis), 적설 알베도 방식(BATS 또는 CLASS), 동결토양 투수 방식, 과냉각 액상수(supercooled liquid water) 처리 방식 등 12개 물리 과정 각각에 2~4개의 방식을 선택할 수 있다(표 1; Noah-MP Users' Site, <https://www.jsg.utexas.edu/noah-mp/scheme-options/>). 표 1에 정리된 12개 물리 과정의 방식을 모두 조합하면 이론적으로 27,648가지의 서로 다른 모형 구성이 가능하다. 이러한 특성은 앙상블 구성과 구조적 불확실성 분석에서 큰 강점이다. 실제로 미주리강 유역을 대상으로 이러한 매개변수화 조합이 유출 및 적설 모의 성능에 미치는 영향을 평가한 연구도 수행된 바 있다(Cho et al., 2025)

3. GRACE 위성 중력관측

GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)는 NASA와 독일항공우주센터(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)가 공동으로 추진한 위성 중력관측 임무다. 2002년 발사된 GRACE는 2018년 후속 위성 GRACE-FO(GRACE Follow-On)로 이어졌

표 1. Noah-MP의 물리 과정별 매개변수화(parameterization) 선택 방식 (출처: Noah-MP Users' Site, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, <https://www.jsg.utexas.edu/noah-mp/scheme-options/>; Niu et al., 2011)

No.	Physical process	Available parameterization options
1	Dynamic vegetation	① Off ② On (default)
2	Canopy stomatal resistance	① Ball-Berry (default) ② Jarvis
3	Soil moisture factor for stomatal resistance	① Noah, soil moisture (default) ② CLM, matric potential ③ SSiB, matric potential
4	Runoff and groundwater	① TOPMODEL with groundwater (default; Niu et al., 2007) ② TOPMODEL with equilibrium water table (Niu et al., 2005) ③ Original Noah surface and subsurface runoff, free drainage ④ BATS surface and subsurface runoff, free drainage
5	Surface layer drag coefficient	① Monin-Obukhov similarity (default) ② Original Noah (Chen et al., 1997)
6	Supercooled liquid water	① No iteration (default; Niu & Yang, 2006) ② Koren's iteration
7	Frozen soil permeability	① Linear effects, more permeable (default; Niu & Yang, 2006) ② Nonlinear effects, less permeable
8	Radiation transfer	① Modified two-stream (default) ② Two-stream applied to grid cell ③ Two-stream applied to vegetated fraction
9	Ground snow surface albedo	① BATS ② CLASS (default)
10	Partitioning of precipitation into rainfall and snowfall	① Jordan (1991) (default) ② BATS, SFCTMP < TFRZ + 2.2 K ③ SFCTMP < TFRZ
11	Lower boundary condition of soil temperature	① Zero heat flux from bottom ② TBOT at 8 m depth read from file (default)
12	Snow/soil temperature time scheme	① Semi-implicit (default) ② Full implicit

BATS: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, CLASS: Canadian Land Surface Scheme, CLM: Community Land Model, SSiB: Simplified Simple Biosphere Model, TOPMODEL: Topography-based Hydrological Model, SFCTMP: surface air temperature, TFRZ: freezing point, TBOT: soil temperature at the lower boundary

고, 2028년 발사를 목표로 3세대 임무인 GRACE-C(GRACE-Continuity)가 준비 중이다(Tapley et al., 2004; Landerer et al., 2020; NASA JPL, <https://science.nasa.gov/mission/grace-c/>). 관측 원리는 두 대의 쌍둥이 위성이 약 220 km 간격을 두고 동일한 궤도를 비행하면서, 지표 아래 질량 분포 변화에 따라 미세하게 달라지는 위성 간 거리를 마이크로파 간섭계(GRACE-FO부터는 레

이저 간섭계도 병행)로 정밀 측정하는 데 있다(그림 2). 이 거리 변화로부터 지구 중력장의 시간적 변화를 역산하며, 그 변화의 상당 부분은 지하수, 토양수분, 지표수, 적설을 모두 합한 총 저류량(Total Water Storage, TWS)의 변동에서 비롯된다(Rodell & Famiglietti, 1999). 관측치는 통상 구면조화함수(spherical harmonics) 형태로 처리되거나, 격자 단위 질량 변화를 직접 산출하

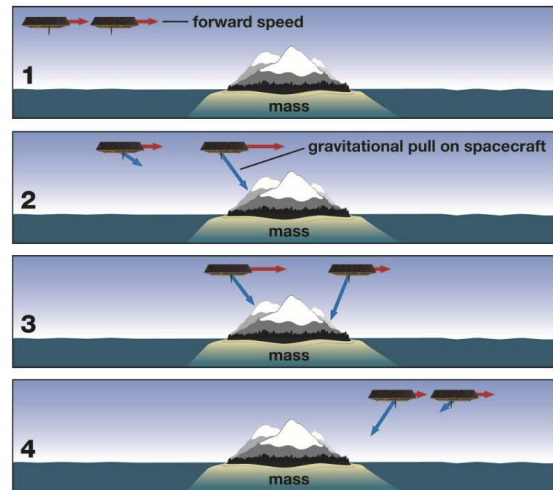
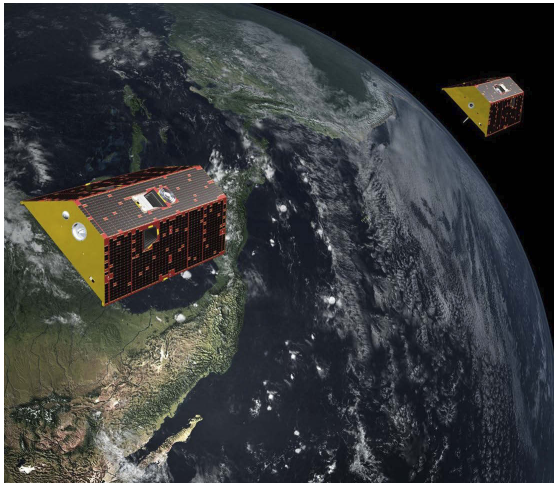


그림 2. GRACE 쌍둥이 위성의 상상도(좌)와 지표 질량 분포에 따라 두 위성 간 거리가 변화하는 중력관측 원리(우)
(출처: NASA/JPL-Caltech, <https://grace.jpl.nasa.gov/>)

는 매스콘(mascon) 방식으로 가공되어 배포된다 (Watkins et al., 2015; Save et al., 2016; Loomis et al., 2019).

GRACE 관측의 가장 큰 강점은 지상 관측망에 의존하지 않고도 대륙 및 유역 규모에서 TWS의 변화를 직접 감시할 수 있다는 점이다. 실제로 GRACE 자료는 미국 캘리포니아, 인도 북부, 중동 등 세계 여러 지역의 지하수 고갈 문제를 정량적으로 밝히는 데 기여해 왔다(Famiglietti et al., 2011; Rodell et al., 2018).

4. GRACE 자료동화를 통한 Noah-MP 모의 성능 개선 연구

4.1 앙상블 칼만 스무더(Ensemble Kalman Smoother)

Noah-MP는 토양수분, 지하수, 적설상당수량 등 개별 수문 성분을 물리 기반으로 계산하지만, 이들 성분의 합이 실제와 얼마나 부합하는지 검증할 독립적인 대규모 관측 수단이 부족하다. 반면 GRACE는 개별 성분을 모두 합한 총 저류량 변화

를 광역적으로 관측하지만, 이를 다시 토양수분·지하수 등으로 분리하지는 못한다. 이에 앙상블 칼만 스무더(Ensemble Kalman Smoother, EnKS; Evensen & van Leeuwen, 2000)라는 자료동화 기법으로 이 두 체계를 연결함으로써 서로의 한계를 보완할 수 있다.

GRACE 자료동화는 다음과 같은 방식으로 이루어진다. 먼저 Noah-MP가 모의한 토양수분, 지하수 등 개별 저류 성분을 격자별로 합산하여 GRACE 관측치와 비교할 수 있는 총 저류량으로 변환하고, 이 변환된 모형값과 GRACE 관측치 사이의 편차를 계산한다. 이때 이 편차를 얼마나 모형에 반영할지는 모형과 관측 각각의 불확실성에 따라 결정되는데, 모형의 불확실성은 입력자료나 모형 상태변수에 확률적 섭동(perturbation)을 가하여 생성한 앙상블의 분산으로 표현되며, 이를 GRACE 관측오차와 함께 고려하여 관측 정보와 모형 정보 사이의 상대적인 가중치, 즉 칼만 이득(Kalman gain)을 산출한다. 이렇게 결정된 가중치에 따라 앞서 계산한 편차를 EnKS를 통해 개별 상태 변수(토양수분, 지하수위 등)에 배분함으로써,

모형의 성분별 값을 관측에 부합하도록 갱신한다. 즉 GRACE는 모형 전체의 물수지가 관측과 어긋나지 않도록 하는 역할을 하고, Noah-MP는 이 제약을 지하수·토양수분 등 개별 성분으로 나누어주는 역할을 맡는다(Zaitchik et al., 2008; Giroto et al., 2016; Kumar et al., 2016; Li et al., 2019).

4.2 예비 적용 결과: Encampment River 유역

GRACE 자료동화가 실제로 지표수문모의를 개선하는지 확인하기 위해, 미국 와이오밍주 남부의 Encampment River 유역(USGS 유량관측소 06623800)을 대상으로 예비(preliminary) 분석을 수행하였다. 이 유역은 록키산맥 동사면의 산악 유역으로, 겨울 동안 축적된 적설과 토양수분·지하수가 봄철 유량을 좌우한다는 점에서 저류 상태의 모의 정확도가 유량 모의 정확도로 직결되는 곳이다. 분석 기간은 유역에서 대규모 홍수가 발

생한 2011년으로 설정하였다.

분석은 자료동화를 적용하지 않은 기존 모의 결과(Open Loop, OL)와, 앞 절에서 설명한 EnKS로 GRACE 총 저류량을 동화한 모의 결과(DA)를 비교하는 방식으로 수행하였다. 한편 Noah-MP는 격자 단위의 지표유출과 지표하유출을 산출할 뿐 하천 유량을 직접 계산하지는 않는다. 따라서 두 실험에서 산출된 유출량을 HyMAP3(Hydrological Modeling and Analysis Platform, version 3; Getirana et al., 2025) 하도추적 모형에 입력하여 관측소 지점의 하천 유량으로 환산한 뒤, USGS 관측 유량과 비교하였다. 지하수의 경우 절댓값이 아닌 기간 평균에 대한 편차, 즉 지하수 아노말리(groundwater anomaly)를 비교 대상으로 삼았다.

분석 결과는 그림 3과 같다. 이 그림을 통해 GRACE 자료동화가 지하수 아노말리와 유량 모의에 어떤 영향을 미치는지 확인할 수 있다. 홍수 발

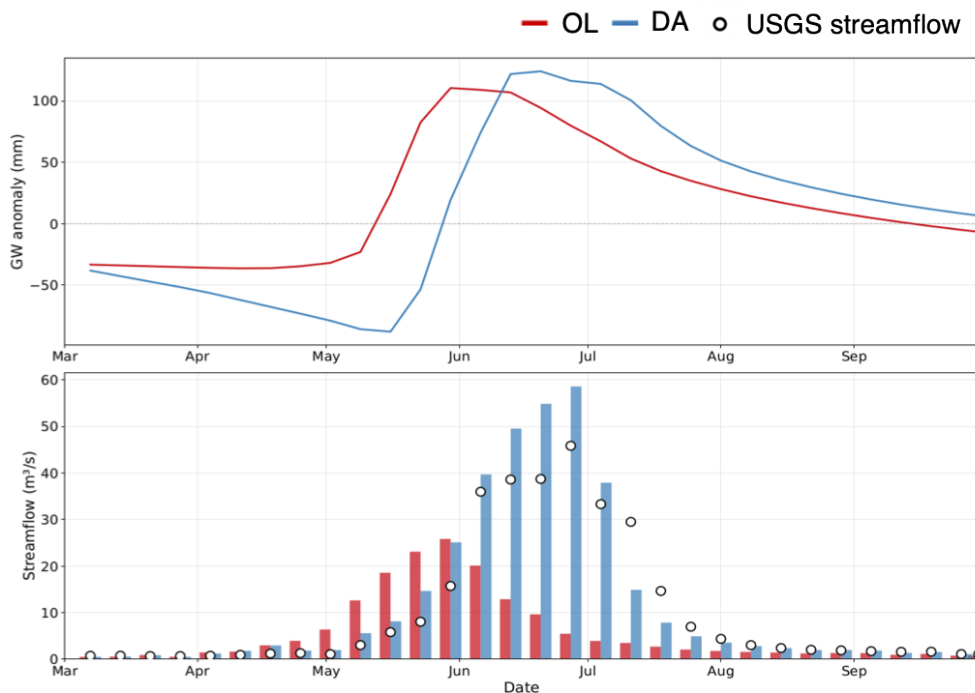


그림 3. Encampment River 유역(USGS 06623800)의 2011년 지하수 아노말리(위)와 하천 유량(아래) 모의 결과. 기존 모의 결과(OL), GRACE 자료동화(DA), USGS 관측값의 비교

생 이전의 기간(4월-5월)에 기존 모의 결과는 관측보다 지속적으로 큰 유량을 모의하였는데, 자료동화를 적용한 결과에서는 지하수 저류가 낮아지면서 기저유출이 함께 줄어 모의 유량이 관측값에 가까워졌다. 반면 홍수기(6월-8월)에는 자료동화가 지하수 저류를 더 큰 값으로 보정함으로써, 기존 모의 결과에서 나타났던 과소추정 문제를 보완한 것으로 확인된다.

5. 맺음말

Noah-MP와 GRACE는 각각 물리 기반 수문모형과 위성 원격탐사라는 서로 다른 접근법을 대표한다. 그러나 양상을 칼만 스무더 방법을 통해 이 둘을 결합하면, 직접 관측이 어려운 지하수 저류의 변동을 연속적으로 추정할 수 있다. 앞서 살펴본 Encampment River 유역의 예비 결과는 이렇게 보정된 지하수가 하천 유량의 모의 정확도를

개선한다는 점을 보여준다.

이 연구의 중요한 확장 가능성 중 하나는 중단기 수문예측으로의 적용이다. 중단기 예측 시간 규모에서는 대기 초기조건뿐만 아니라 토양수분과 지하수와 같이 상대적으로 천천히 변화하는 지표면의 수문 상태가 예측 가능성을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 특히 토양수분의 초기 상태는 수주에서 수개월에 걸쳐 침투와 유출 과정에 영향을 미치기 때문에 수문예측 성능에 중요한 역할을 한다(Koster et al., 2010). 따라서 GRACE 관측자료를 통해 보정된 총 저류량과 이를 바탕으로 추정된 지하수·토양수분 상태를 수문예측 모형의 초기 조건으로 활용한다면, 보다 현실적인 초기 수문상태에서 예측을 시작할 수 있다. 이는 특히 초기 토양수분 및 지하수 상태가 중요한 홍수·가뭄 등 중단기 수문현상의 예측 성능을 향상시키는 방향으로 확장될 수 있다.

참고문헌

- Anderson, E. A. (1973). National Weather Service River Forecast System - Snow Accumulation and Ablation Model (NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-17). U.S. Department of Commerce.
- Bonan, G. B., Oleson, K. W., Vertenstein, M., Levis, S., Zeng, X., Dai, Y., et al. (2002). The land surface climatology of the Community Land Model coupled to the NCAR Community Climate Model. *Journal of Climate*, 15(22), 3123-3149.
- Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system: Conceptual modeling for digital computers. Joint Federal-State River Forecast Center, U.S. National Weather Service and California Department of Water Resources, Sacramento, CA.
- Chen, F., Janjić, Z., & Mitchell, K. (1997). Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP Mesoscale Eta Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 85(3), 391-421.
- Cho, E., Cho, E., Vuyovich, C. M., Li, B., & Jacobs, J. M. (2025). Basin-scale evaluation of the Noah-MP land surface model for runoff and snow generation in the Missouri River Basin: Insights and recommendations for parameterization

- scheme selection. *EGUsphere*, 2025, 1–30.
- Clark, M. P., Nijssen, B., Lundquist, J. D., Kavetski, D., Rupp, D. E., Woods, R. A., et al. (2015). A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. *Water Resources Research*, 51(4), 2498–2514.
- Emerton, R. E., Stephens, E. M., Pappenberger, F., Pagano, T. C., Weerts, A. H., Wood, A. W., et al. (2016). Continental and global scale flood forecasting systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), 391–418.
- Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C5), 10143–10162.
- Evensen, G., & van Leeuwen, P. J. (2000). An ensemble Kalman smoother for nonlinear dynamics. *Monthly Weather Review*, 128(6), 1852–1867.
- Famiglietti, J. S., Lo, M., Ho, S. L., Bethune, J., Anderson, K. J., Syed, T. H., et al. (2011). Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*, 38(3), L03403.
- Getirana, A. C. V., Kumar, S. V., Yoon, Y., Arsenault, K. R., & Geiger, J. V. (2025). The HyMAP-3 hydrodynamic model (NASA/TM-20250009546). NASA Goddard Space Flight Center.
- Giroto, M., De Lannoy, G. J. M., Reichle, R. H., & Rodell, M. (2016). Assimilation of gridded terrestrial water storage observations from GRACE into a land surface model. *Water Resources Research*, 52(5), 4164–4183.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., et al. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251–3256.
- Jordan, R. (1991). A one-dimensional temperature model for a snow cover: Technical documentation for SNTHERM.89 (Special Report 91-16). U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Koster, R. D., Mahanama, S. P. P., Yamada, T. J., Balsamo, G., Berg, A. A., Boisserie, M., et al. (2010). Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment. *Geophysical Research Letters*, 37(2), L02402.
- Koster, R. D., Suarez, M. J., Ducharne, A., Stieglitz, M., & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model: 1. Model structure. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D20), 24809–24822.
- Kumar, S. V., Peters-Lidard, C. D., Tian, Y., Houser, P. R., Geiger, J., Olden, S., et al. (2006). Land Information System: An interoperable framework for high resolution land surface modeling. *Environmental Modelling & Software*, 21(10), 1402–1415.
- Kumar, S. V., Zaitchik, B. F., Peters-Lidard, C. D., Rodell, M., Reichle, R., Li, B., et al.

- (2016). Assimilation of gridded GRACE terrestrial water storage estimates in the North American Land Data Assimilation System. *Journal of Hydrometeorology*, 17(7), 1951–1972.
- Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., et al. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL088306.
- Li, B., Rodell, M., Kumar, S., Beaudoing, H. K., Getirana, A., Zaitchik, B. F., et al. (2019). Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges. *Water Resources Research*, 55(9), 7564–7586.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415–14428.
- Loomis, B. D., Luthcke, S. B., & Sabaka, T. J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1381–1398.
- NASA Goddard Space Flight Center. Land Information System (LIS). <https://lis.gsfc.nasa.gov/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. GRACE / GRACE-FO Mission. <https://grace.jpl.nasa.gov/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. GRACE-C (Gravity Recovery and Climate Experiment – Continuity). <https://science.nasa.gov/mission/grace-c/>
- Niu, G.-Y., & Yang, Z.-L. (2006). Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5), 937–952.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R. E., & Gulden, L. E. (2005). A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, D21106.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Dickinson, R. E., Gulden, L. E., & Su, H. (2007). Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, D07103.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., et al. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D12109.
- Noah-MP Users' Site, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin. Scheme options. <https://www.jsg.utexas.edu/noah-mp/scheme-options/>
- Peters-Lidard, C. D., Houser, P. R., Tian, Y., Kumar, S. V., Geiger, J., Olden, S., et al. (2007). High-performance Earth system modeling with NASA/GSFC's Land

- Information System. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 3(3), 157-165.
- Reichle, R. H. (2008). Data assimilation methods in the Earth sciences. *Advances in Water Resources*, 31(11), 1411-1418.
- Reichle, R. H., De Lannoy, G. J. M., Liu, Q., Ardizzone, J. V., Colliander, A., Conaty, A., et al. (2017). Assessment of the SMAP Level-4 surface and root-zone soil moisture product using in situ measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 18(10), 2621-2645.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.
- Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (1999). Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time-dependent gravity field. *Water Resources Research*, 35(9), 2705-2723.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M.-H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557, 651-659.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., et al. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394.
- Save, H., Bettadpur, S., & Tapley, B. D. (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7547-7569.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9), L09607.
- Watkins, M. M., Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., & Landerer, F. W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2648-2671.
- Wood, E. F. (1991). Global scale hydrology: Advances in land surface modeling. *Reviews of Geophysics*, 29(S1), 193-201.
- Yang, Z.-L., Niu, G.-Y., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., et al. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, D12110.
- Zaitchik, B. F., Rodell, M., & Reichle, R. H. (2008). Assimilation of GRACE terrestrial water storage data into a land surface model: Results for the Mississippi River basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9(3), 535-548.

연안침수의 경제적 영향: 직접피해에서 지역 간 파급효과까지

Water
for future
학술/기술 기사
03



양정현

한국환경연구원
물관리연구실 위촉연구원
myyds111@naver.com



정기철

한국환경연구원
물관리연구실 연구위원
kcjung@kei.re.kr

1. 서론

기후변화에 따른 평균해수면 상승과 극한 해수위의 증가는 국내의 저지대 연안지역의 침수위험을 지속적으로 높이고 있다. 연안침수는 집중호우에 따른 도시침수나 하천 범람과 달리 천문조, 폭풍해일, 파랑 및 월파 등 다양한 해양과정이 복합적으로 작용하여 발생한다. 특히 태풍이나 강한 저기압이 만조와 중첩될 경우 높은 해수위와 강한 파랑이 동시에 발생하면서 연안 저지대의 침수범위와 침수심이 크게 증가할 수 있다(Vousdoukas et al., 2018; Hinkel et al., 2021). 우리나라 연안에는 주거지역뿐 아니라 국가산업단지, 항만, 조선소, 발전시설, 물류거점 및 농경지가 밀집해 있다. 이러한 시설은 해안과 인접한 평탄한 저지대에 입지한 경우가 많아 연안침수에 상대적으로 취약하다. 침수가 발생하면 건물과 설비, 농경지, 차량 및 인명 등에 물리적 피해가 발생할 뿐 아니라 항만과 산업시설의 기능 저하, 주민의 대피와 복구활동, 교통 및 물류 차질 등 다양한 사회·경제적 영향이 뒤따를 수 있다.

연안침수의 피해규모는 침수면적만으로 판단하기 어렵다. 동일한 침수면적이라도 고가의 생산설비가 밀집한 산업지역에서는 피해액이 크게 나타날 수 있으며, 경제적 자산가치가 상대적으로 낮더라도 많은 인

구가 거주하는 지역에서는 대피와 인명안전 측면의 위험이 클 수 있다. 따라서 연안침수 위험을 구체적으로 파악하기 위해서는 침수범위와 침수심을 건물, 농경지, 인구 및 차량과 같은 개별 자산 자료와 결합하여 분석할 필요가 있다(Merz et al., 2010). 연안침수의 영향은 직접 침수된 지역 내부에만 한정되지 않는다. 주거지 침수는 주민의 대피, 주택 정리와 복구 및 통근 차질을 발생시켜 정상적인 노동활동을 일시적으로 제약한다. 또한 산업시설과 농업자산 및 차량의 피해는 생산과 운송 활동에 충격을 주고, 지역 간 산업거래를 통해 다른 지역의 생산활동에도 영향을 미칠 수 있다.

이에 본 연구에서는 국내 연안지역을 대상으로 해안침수예상도와 자산별 공간자료를 결합하여 연안침수의 직접피해를 산정하였다. 또한 직접피해가 경제활동으로 전달되는 경로에 따라 주거지 침수에 따른 노동활동 차질과 산업별 피해충격이 타 지역으로 전달되는 지역 간 경제적 파급효과를 구분하여 분석하였다.

2. 연안침수의 직·간접 피해 분석

2.1 객체기반 직접피해 산정

본 연구에서는 해양수산부 국립해양조사원이 구축한 해안침수예상도를 연안침수 위험자료로 활용하였다. 해안침수예상도는 천문조, 폭풍해일 및 파랑에 의한 월파 등 복합적인 연안침수 요인을 고려하여 구축된 자료이다. 분석에는 50년, 100년, 150년 및 200년 빈도별 침수범위와 침수심을 활용하였다.

직접피해는 개별 자산의 위치에 해당하는 침수심을 적용하는 객체기반법으로 산정하였다. 행정구역별 침수면적에 평균적인 자산가치와 손상률을

적용하는 방식과 달리, 객체기반법은 개별 건물과 농경지가 실제 침수범위에 포함되는지를 확인하고 해당 위치의 침수심을 직접 적용할 수 있다는 장점이 있다. 분석대상은 주거자산, 산업자산, 농업자산, 차량 및 인명으로 구분하였다. 주거자산과 산업자산은 건물의 위치와 용도정보를 이용하여 분류하였으며, 건물의 구조물과 내용물 피해를 함께 고려하였다. 농업자산은 침수범위에 포함되는 농경지와 농작물을 대상으로 하였고, 차량은 침수심에 따른 차량 손상률을 적용하였다. 인구와 차량은 행정구역 단위의 통계자료를 건물의 용도와 규모를 기준으로 개별 건물에 공간적으로 배분하였다. 이후 각 건물의 침수 여부와 침수심을 적용하여 침수 영향 인구와 차량 피해를 산정하였다.

각 빈도별 피해액은 특정 규모의 연안침수가 발생했을 때 예상되는 잠재적 피해를 의미한다. 그러나 발생확률이 서로 다른 빈도별 피해액만으로는 장기적인 연안침수 위험을 하나의 기준으로 비교하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 빈도별 피해액과 발생확률을 결합하여 기대연평균피해액을 산정하였다. 기대연평균피해액은 실제로 매년 동일한 피해가 발생한다는 의미가 아니라, 발생확률이 높은 소규모 침수와 발생확률이 낮은 대규모 침수의 피해를 장기 평균으로 환산한 위험지표이다. 따라서 지역별 침수위험 비교와 방재사업의 우선순위 설정에 활용할 수 있다.

2.2 간접피해 산정

연안침수의 간접피해는 직접피해가 경제활동에 영향을 미치는 경로에 따라 주거지 침수로 인한 노동활동 차질과 산업별 피해충격에 따른 지역 간 경제적 파급효과로 구분하였다.

주거지 침수는 주민의 대피, 주택 정리와 복구

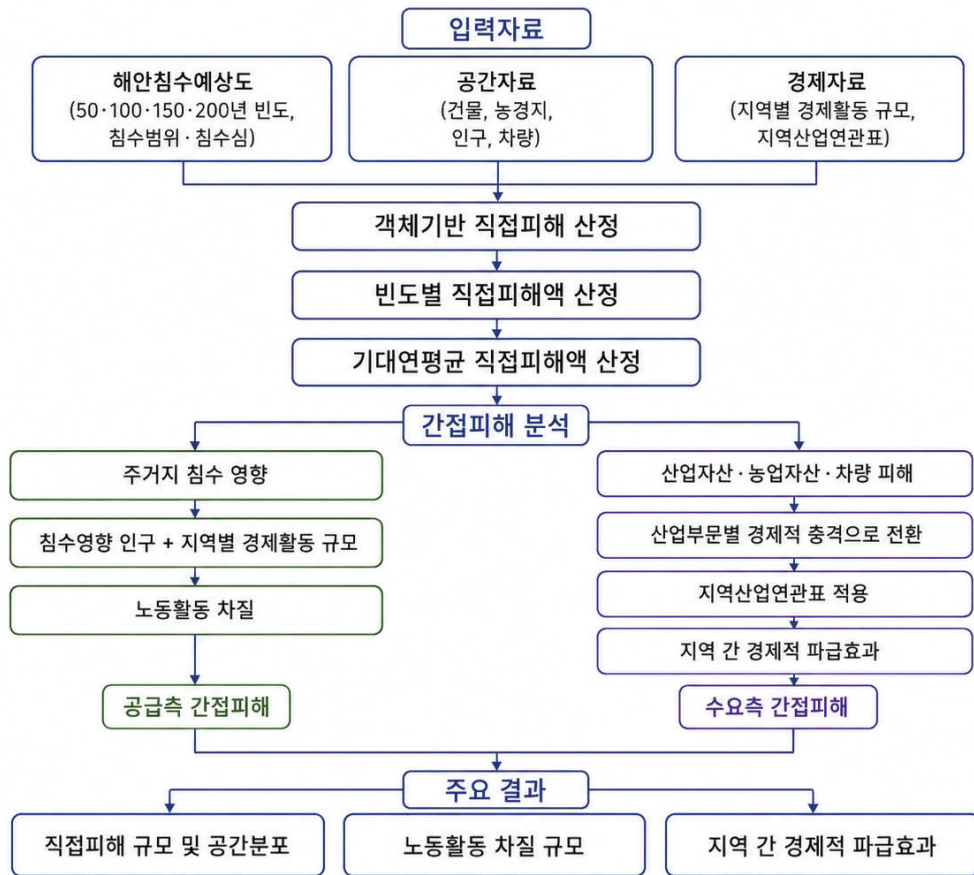


그림 1. 연안침수 직·간접피해 분석절차

및 통근 차질을 발생시켜 정상적인 경제활동을 일시적으로 제약할 수 있다. 본 연구에서는 침수영향 인구와 지역별 경제활동 규모를 이용하여 주거지 침수에 따른 노동활동 차질을 산정하였다. 이는 주거건물의 구조물 및 내용물 피해와 구분되는 간접적인 경제영향으로 평가하였다. 산업자산, 농업자산 및 차량 피해는 관련 산업부문의 경제적 충격으로 전환하고, 한국은행 지역산업연관표를 이용하여 타 지역과 산업으로 전달되는 영향을 분석하였다. 산업자산 피해는 건물용도에 따라 관련 산업에 배분하였으며, 농업자산 피해는 농림어업 부문에 적용하였다. 차량 피해도 차량유형과 경제적 기능을 고려하여 관련 산업에 배분하였다.

주거자산은 노동활동 차질로 별도 산정하였으

며, 인명 피해는 특정 산업의 생산활동과 직접 연결하기 어려워 지역 간 경제적 파급효과 분석에서 제외하였다. 또한 본 연구에서는 피해 발생지역 내부의 산업연관효과를 제외하고, 피해지역의 산업별 충격이 지역 간 거래를 통해 타 지역으로 전달되는 영향만을 지역 간 경제적 파급효과로 제시하였다. 지역산업연관분석 결과는 실제 재난에서 확정적으로 발생하는 손실액이라기보다 현재의 지역·산업 간 거래구조를 전제로 한 잠재적 경제영향을 의미한다. 실제 영향은 재고 활용, 대체공급, 우회수송 및 복구속도 등에 따라 달라질 수 있으므로 지역별·산업별 상대적인 파급 가능성을 파악하는 지표로 활용하였다.

3. 연안침수 직·간접 피해 분석 결과

3.1 빈도·자산별 직접피해

해안침수예상도를 이용하여 국내 연안지역의 직접피해를 산정한 결과, 50년, 100년, 150년 및 200년 빈도로 갈수록 침수범위와 침수심이 증가하면서 피해액도 커지는 것으로 분석되었다. 총 직접피해액은 50년 빈도에서 약 2조 262억 원, 100년 빈도에서 약 2조 6,812억 원, 150년 빈도에서 약 3조 2,553억 원, 200년 빈도에서 약 3조 7,496억 원으로 산정되었다. 200년 빈도의 피해액은 50년 빈도의 약 1.85배에 해당한다.

50년 빈도에서 100년 빈도로 증가할 때 직접피해액은 약 6,550억 원 증가하였다. 100년 빈도에서 150년 빈도로 증가할 때에는 약 5,741억 원, 150년 빈도에서 200년 빈도로 증가할 때에는 약 4,943억 원 증가하였다. 빈도가 커질수록 피해액은 지속적으로 증가하였으나, 각 빈도 구간에서 증가한 피해액은 동일하지 않았다.

이러한 차이는 빈도별로 새롭게 침수범위에 포함되는 지역과 자산의 규모가 다르고, 기존 침수 지역에서도 침수심의 증가 정도가 서로 다르기 때문이다. 낮은 빈도에서 이미 침수된 자산은 더 큰 빈도의 침수 상황에서 침수심과 손상률이 증가할 수 있다. 이와 함께 침수범위가 내륙으로 확대되면서 기존에는 침수되지 않았던 건물, 농경지 및 차량 등이 추가로 피해 대상에 포함될 수 있다. 따라서 빈도 증가에 따른 피해액 변화는 단순히 침수면적이 확대된 결과라기보다 침수심의 변화와 새롭게 노출되는 자산의 종류 및 가치가 복합적으로 작용한 결과로 해석할 수 있다. 다만 네 개 빈도의 결과만으로 피해 증가가 일정한 선형 또는 비선형 관계를 보인다고 단정하기는 어렵다.

전체 기대연평균 직접피해액은 약 1,795.3억 원/년으로 산정되었다. 기대연평균피해액은 실제로 매년 동일한 규모의 피해가 발생한다는 의미가 아니다. 발생 가능성이 상대적으로 높은 소규모 침수와 발생 가능성은 낮지만 피해규모가 큰 침수를 함께 고려하여 장기적인 연평균 위험으로 환산한 값이다. 자산별 기대연평균피해액은 산업자산이 약 1,004.7억 원/년으로 가장 크게 나타났으며, 전체 직접피해의 56.0%를 차지하였다. 이어 주거자산이 약 326.8억 원/년으로 18.2%, 차량이 약 324.5억 원/년으로 18.1%, 농업자산이 약 136.0억 원/년으로 7.6%를 차지하였다. 인명 피해의 화폐환산액은 약 3.2억 원/년으로 전체의 0.2%였다.

산업자산 피해가 전체의 절반 이상을 차지한 것은 국내 연안지역에 산업단지, 항만, 조선소, 제조시설 및 물류시설이 집중되어 있기 때문이다. 산업시설은 건축물 자체뿐 아니라 생산설비, 기계, 원재료 및 재고자산의 가치가 높기 때문에 비교적 제한된 면적이 침수되더라도 큰 경제적 피해가 발생할 수 있다. 주거자산과 차량 피해는 각각 전체 기대연평균 직접피해의 약 18%를 차지하여 유사한 수준을 보였다. 주거자산 피해에는 건물 구조물과 가재도구 등 내용물 피해가 포함된다. 차량은 연안도시의 주거지역, 상업지역 및 산업지역에 넓게 분포하고 있으며, 일정 수준 이상의 침수가 발생하면 엔진과 전기·전자 장치가 손상될 가능성이 높다. 이는 연안침수 대책에서 산업시설뿐 아니라 주거지역과 주차공간에 대한 관리도 중요하다라는 점을 보여준다. 농업자산 피해의 비중은 산업자산, 주거자산 및 차량보다 낮았으나, 일부 연안 저지대에서는 중요한 피해항목으로 나타날 수 있다. 농경지는 단위면적당 자산가치가 산업시설보다 낮지만 넓은 면적에 분포한다. 특히 해수

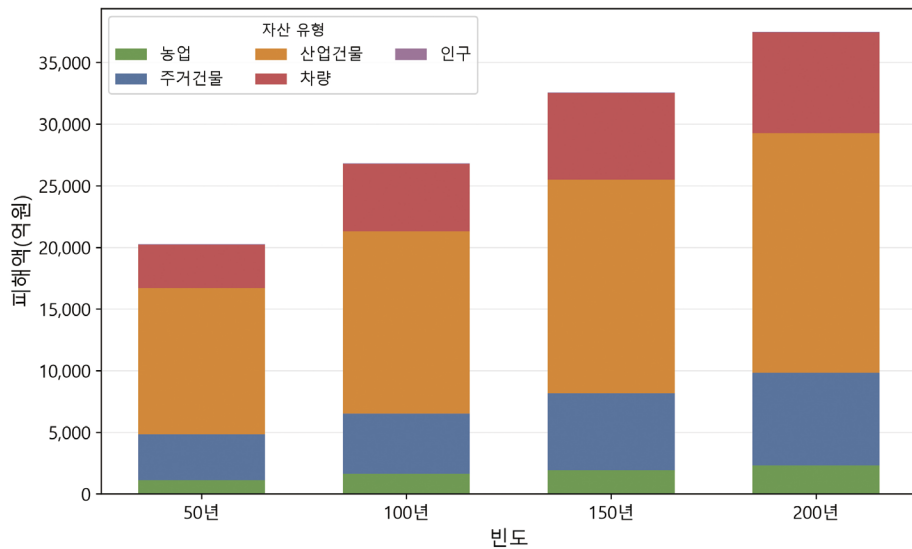


그림 2. 빈도별 연안침수 직접피해액

가 유입되면 농작물의 직접적인 손실뿐 아니라 토양 염류화로 인해 다음 영농기간까지 영향이 지속될 가능성이 있다. 인명 피해는 다른 자산피해보다 작은 비중을 차지하였다. 그러나 이는 인명 피해의 재난안전상 중요성이 낮다는 의미가 아니다. 인명 피해는 경제적 피해와 별도로 우선적으로 관리해야 하며, 침수영향 인구와 잠재적 피해인원 등의 지표를 함께 제시할 필요가 있다.

3.2 지역별 직접피해와 피해 집중지역

지역별 기대연평균 직접피해는 경상남도에서 약 644.3억 원/년으로 가장 크게 산정되었으며, 전체 피해의 35.9%를 차지하였다. 이어 충청남도 약 437.9억 원/년, 전남·광주 통합지역 약 304.6억 원/년, 부산광역시 약 129.9억 원/년, 울산광역시 약 83.3억 원/년 순으로 나타났다.

경상남도, 충청남도 및 전남·광주 통합지역의 피해를 합하면 전체 기대연평균 직접피해의 약 77.2%에 해당한다. 이는 국내 연안침수의 경제적 위험이 전국 연안에 고르게 분포하기보다 산업시

설, 항만 및 농경지가 집중된 일부 지역에 편중되어 있음을 보여준다. 경상남도는 연안에 조선·기계산업과 항만 관련 시설이 집중되어 있고, 연안 도시의 주거지역도 함께 침수에 노출되어 있다. 이에 따라 산업자산과 주거자산 피해가 복합적으로 발생한 것으로 볼 수 있다. 충청남도에는 서해안 산업단지와 항만시설뿐 아니라 넓은 연안 농경지가 분포하고 있어 산업자산과 농업자산 피해가 함께 나타났다. 전남·광주 통합지역에서도 산업시설과 농경지가 위치한 일부 지역을 중심으로 피해가 집중되었다. 지역별 피해규모는 해안선의 길이나 전체 침수면적만으로 설명하기 어렵다. 침수면적이 넓더라도 농경지나 상대적으로 자산가치가 낮은 토지가 주로 분포한다면 경제적 피해액은 제한적일 수 있다. 반대로 침수면적이 상대적으로 작더라도 고가의 생산설비와 산업시설이 집중된 지역에서는 피해액이 크게 산정될 수 있다.

시군구별로는 경상남도 통영시의 기대연평균 직접피해가 약 219.4억 원/년으로 가장 크게 나타났다. 이어 전남·광주 통합지역의 영암군 약 212.8

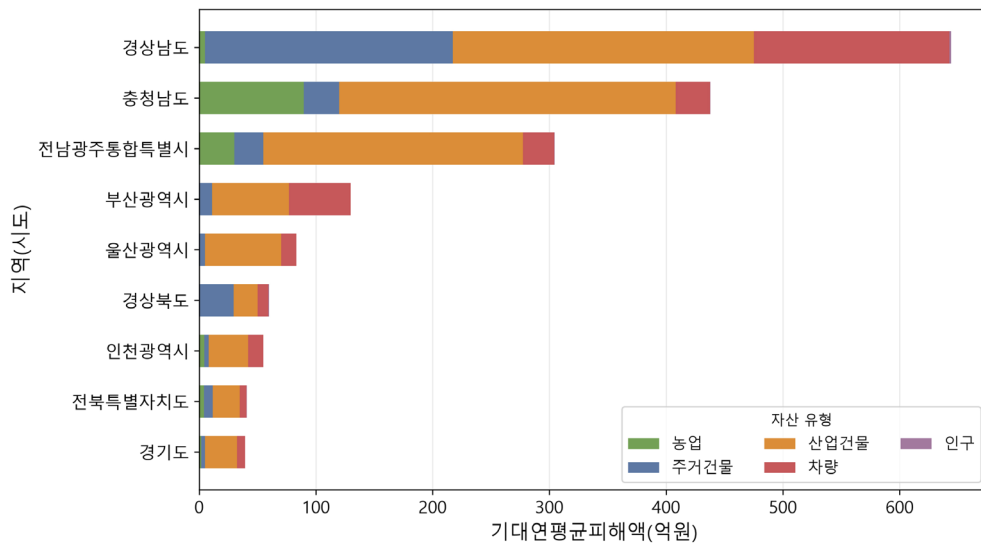


그림 3. 지역별 기대연평균 직접피해액

억 원/년, 경상남도 거제시 약 196.2억 원/년, 충청남도 당진시 약 188.5억 원/년, 충청남도 서산시 약 125.6억 원/년 순으로 분석되었다. 통영시와 거제시는 연안에 조선·제조시설과 주거지역이 함께 분포하고 있어 산업자산과 주거자산이 동시에 침수위험에 노출된 것으로 판단된다. 영암군은 특정 대규모 산업시설의 피해가 지역 전체 피해액에서 큰 비중을 차지하였다. 당진시와 서산시는 산업단지, 항만시설 및 농경지가 함께 분포하여 여러 자산유형에서 피해가 발생한 것으로 분석되었다.

읍면동별로는 영암군 삼호읍의 기대연평균 직접피해가 약 212.8억 원/년으로 가장 크게 나타났다. 이어 당진시 송산면 약 90.2억 원/년, 당진시 송악읍 약 83.2억 원/년, 서산시 대산읍 약 79.4억 원/년, 통영시 광도면 약 74.4억 원/년 순으로 나타났다. 삼호읍, 송산면, 송악읍 및 대산읍은 대규모 산업시설이나 항만·물류시설이 집중된 지역으로, 산업자산 피해가 전체 피해액을 크게 좌우하였다. 이러한 결과는 광역지자체나 시군구 단위의 결과만으로는 확인하기 어려운 세부 피해 집중

지역을 보여준다. 다만 읍면동별 피해순위는 특정 대규모 산업시설의 자산가치에 따라 크게 달라질 수 있다. 따라서 피해액이 큰 지역을 선정할 때에는 총피해액뿐 아니라 피해를 구성하는 자산유형을 함께 살펴볼 필요가 있다. 산업자산 중심 지역과 주거자산 또는 농업자산 중심 지역은 피해양상과 필요한 대응방안이 서로 다르기 때문이다.

이상의 결과를 종합하면 국내 연안침수 피해는 일부 산업·항만지역과 연안 농업지역에 집중되는 특성을 보였다. 따라서 전국 연안에 동일한 기준의 대책을 적용하기보다 각 지역의 주요 자산과 피해구조를 고려하여 방재사업과 시설보강의 우선순위를 설정할 필요가 있다.

3.3 연안침수에 따른 간접피해

3.3.1 주거지 침수에 따른 노동활동 차질

주거지 침수는 건물과 가재도구에 대한 물리적 피해뿐 아니라 주민의 대피, 주택 정리와 복구 및 통근 차질을 유발한다. 이에 따라 침수지역 주민이 정상적인 경제활동에 참여하기 어려워지면서

일정 기간 노동활동에 차질이 발생할 수 있다.

전체 분석지역의 기대연평균 노동활동 차질은 약 67.55억 원/년으로 산정되었다. 지역별로는 경상남도가 약 27.68억 원/년으로 가장 크게 나타났으며, 이어 경상북도 약 17.35억 원/년, 충청남도 약 7.19억 원/년, 전라남도 약 5.27억 원/년, 전북특별자치도 약 4.24억 원/년 순으로 분석되었다. 경상남도과 경상북도의 노동활동 차질을 합하면 약 45.04억 원/년으로 전체의 약 66.7%를 차지하였다. 이는 두 지역에서 주거지 침수의 영향을 받는 인구와 지역경제 규모가 상대적으로 크게 나타난 결과로 볼 수 있다. 노동활동 차질의 지역별 분포는 주거자산 직접피해의 분포와 반드시 일치하지 않았다. 주거자산 직접피해는 건물의 규모와 자산가치, 침수심 및 가재도구의 가치에 영향을 받는 반면, 노동활동 차질은 침수영향 인구와 지역별 경제활동 규모에 따라 달라진다. 따라서 주거건물의 물리적 피해가 상대적으로 크지 않더라도 침수영향 인구가 많고 경제활동 규모가 큰 지역에서는 노동활동 차질이 크게 나타날 수 있다.

특히 경상남도는 지역별 기대연평균 직접피해와 노동활동 차질이 모두 가장 크게 나타났다. 이는 연안에 주거지역과 산업시설이 함께 분포하면서 자산의 물리적 피해와 주민의 경제활동 차질이 동시에 발생할 가능성이 크다는 점을 보여준다. 반면 경상북도는 직접피해 상위지역에는 포함되지 않았으나 노동활동 차질에서는 두 번째로 크게 나타났다. 이는 건물피해만을 기준으로 평가할 경우 주민의 경제활동 제약이 충분히 드러나지 않을 수 있음을 의미한다. 따라서 주거지역의 연안침수 위험을 평가할 때에는 건물 구조물과 내용물 피해뿐 아니라 주민의 대피, 복구 및 통근 차질에 따른 경제활동 영향을 별도로 고려할 필요가 있다.

다만 본 연구에서 산정한 노동활동 차질은 실제 생산감소액을 직접 관측한 결과가 아니라 침수영향 인구와 지역별 경제활동 규모를 이용하여 잠재적 영향을 추정된 값이다. 실제 영향은 침수 지속 기간, 사업장의 운영 여부, 재택근무 가능성, 유급 휴가 및 복구기간 등에 따라 달라질 수 있다.

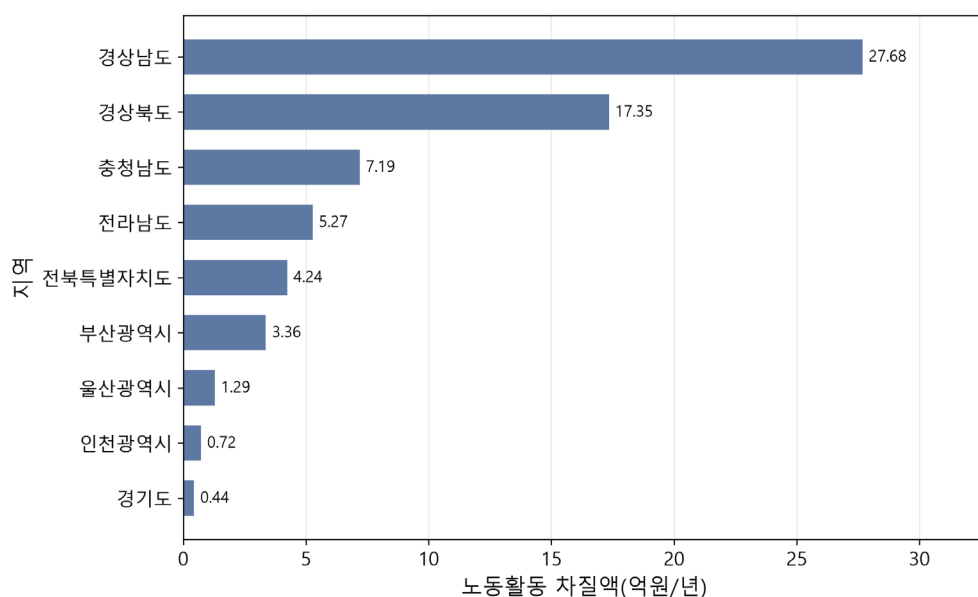


그림 4. 지역별 주거지 침수에 따른 노동활동 차질

3.3.2 지역 간 경제적 파급효과

산업자산, 농업자산 및 차량 피해를 산업별 경제적 충격으로 적용하여 피해가 발생한 연안지역에서 다른 지역으로 전달되는 경제적 영향을 분석하였다. 피해 발생지역 내부에서 나타나는 산업연관 효과는 분석범위에서 제외하였다.

피해지역에서 다른 지역으로 전달되는 기대연평균 경제적 파급효과는 약 427.36억 원/년으로 산정되었다. 이 값은 직접 침수된 지역의 산업피해가 지역 간 원료, 부품 및 서비스 거래를 통해 다른 지역의 생산활동에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 의미한다. 피해 발생지역을 기준으로 충청남도에서 발생한 피해가 다른 지역에 미치는 경제적 파급효과가 약 145.01억 원/년으로 가장 크게 나타났다. 이어 전라남도 약 114.48억 원/년, 경상남도 약 86.94억 원/년, 울산광역시 약 30.27억 원/년, 부산광역시 약 17.07억 원/년 순으로 분석되었다. 충청남도, 전라남도 및 경상남도에서 발생한 경제적 파급효과를 합하면 약 346.42억 원/년으로 전체의 약 81.1%를 차지하였다. 이들 지역은 직접피해 규모가 큰 동시에 산업단지, 항만, 제조시설 및 물류시설이 집중되어 있어 피해가 지역 간 산업거래를 통해 다른 지역으로 전달될 가능성도 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다. 다만 직접 피해 규모와 다른 지역에 미치는 경제적 파급효과의 순위는 반드시 일치하지 않았다. 경상남도의 기대연평균 직접피해가 가장 크게 나타났지만 지역 간 경제적 파급효과는 충청남도와 전라남도에 더 크게 나타났다. 이는 직접피해의 규모뿐 아니라 피해를 입은 산업이 다른 지역과 맺고 있는 중간재 및 서비스 거래관계가 경제적 파급효과를 결정하는 중요한 요인임을 보여준다. 영향을 받는 지역을 기준으로 경기도가 약 99.98억 원/년

으로 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이어 서울특별시 약 79.39억 원/년, 경상북도 약 29.06억 원/년, 부산광역시 약 26.28억 원/년, 울산광역시 약 25.81억 원/년 순으로 분석되었다. 경기도와 서울특별시가 받는 경제적 영향은 합계 약 179.38억 원/년으로 전체 지역 간 경제적 파급효과의 약 42.0%를 차지하였다. 두 지역은 분석대상 연안지역에서 생산되는 원료와 중간재를 공급받거나 해당 지역에 다양한 서비스와 제품을 공급하는 과정에서 상대적으로 큰 영향을 받은 것으로 볼 수 있다. 이는 연안침수의 경제적 영향이 실제 침수구역이나 행정구역의 경계를 넘어 비침수지역으로 전달될 수 있음을 보여준다.

산업별로는 원소재 제조업의 지역 간 경제적 파급효과가 약 118.10억 원/년으로 가장 크게 나타났으며, 전체의 약 27.6%를 차지하였다. 이어 가공·조립 제조업 약 51.05억 원/년, 생활관련 제조업 약 37.47억 원/년, 도소매업 약 37.34억 원/년, 과학연구 및 전문기술 서비스업 약 32.95억 원/년 순으로 나타났다. 원소재 제조업에는 석탄 및 석유제품, 화학제품, 비금속광물제품 및 1차 금속제품이 포함된다. 이들 산업은 여러 제조업에서 원료와 중간재로 활용되고 지역 간 거래비중도 높기 때문에 연안지역의 산업피해가 다른 지역으로 전달되는 주요 경로로 작용한 것으로 판단된다. 가공·조립 제조업은 기계 및 장비, 운송장비, 전기장비, 컴퓨터·전자 및 광학기기를 포함하며, 원소재 제조업과 함께 지역 간 생산연계에서 중요한 비중을 차지하였다. 도소매업과 과학연구 및 전문기술 서비스업도 재화의 유통과 기업 활동 지원을 통해 지역 간 경제적 영향을 전달하는 주요 산업으로 나타났다. 주요 지역·산업 간 파급경로를 살펴보면 충청남도에서 발생한 피해가 경기도의 원소

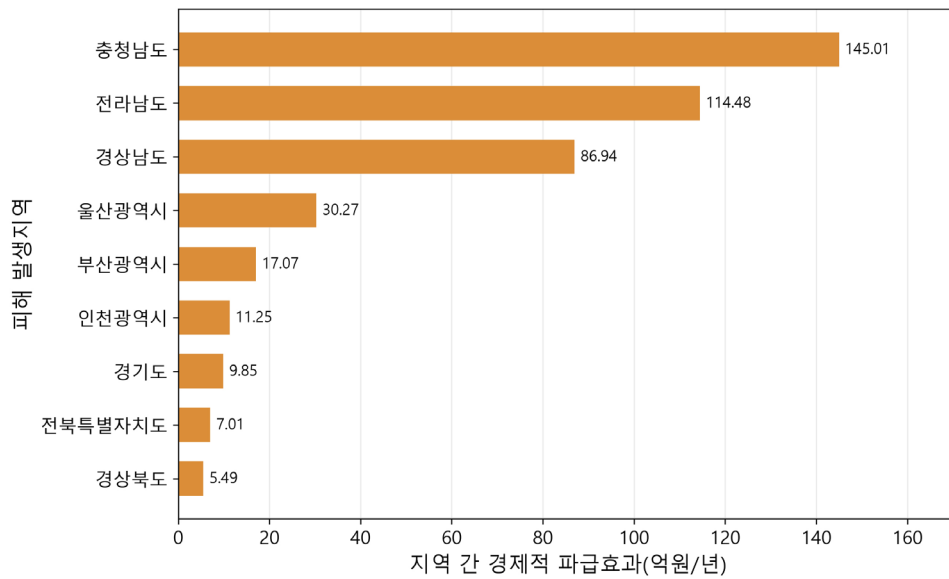


그림 5. 피해 발생지역별 지역 간 경제적 파급효과

재 제조업에 미치는 영향이 약 10.67억 원/년으로 가장 크게 나타났다. 이어 충청남도에서 경기도의 가공·조립 제조업으로 전달되는 영향이 약 8.48억 원/년, 충청남도에서 서울특별시의 과학연구 및 전문기술 서비스업으로 전달되는 영향이 약 7.00억 원/년으로 분석되었다. 이 밖에도 충청남도에서 울산광역시의 원소재 제조업으로 전달되는 영향은 약 6.32억 원/년, 전라남도에서 경기도의 원소재 제조업으로 전달되는 영향은 약 5.86억 원/년, 충청남도에서 서울특별시의 도소매업으로 전달되는 영향은 약 5.80억 원/년으로 나타났다.

이러한 결과는 충청남도와 전라남도의 산업피해가 수도권과 주요 산업지역의 제조업 및 서비스업으로 전달되는 구조를 보여준다. 따라서 연안 산업단지와 항만에 대한 침수대책은 해당 지역의 직접피해를 줄이는 데 그치지 않고, 이들 지역과 연결된 다른 지역과 산업의 잠재적 경제적 영향을 완화하는 데에도 기여할 수 있다. 다만 지역 산업연관분석은 분석기준연도의 산업구조와 지역 간 거래관계가 유지된다는 가정에 기초한다. 실제

재난 이후에는 기업의 재고 활용, 대체공급자 확보, 우회수송, 생산이전 및 복구속도에 따라 영향의 크기가 달라질 수 있다.

따라서 본 연구의 지역 간 경제적 파급효과는 실제로 확정된 경제손실액이라기보다 연안침수 피해가 지역 간 산업연계를 통해 전달될 수 있는 잠재적 영향과 지역·산업별 상대적 중요성을 나타내는 지표로 해석하는 것이 적절하다. 또한 피해 발생지역 내부의 산업연관효과는 포함하지 않았으므로 직접피해 및 노동활동 차질과 단순히 합산하여 전체 경제손실로 제시해서는 안 된다.

4. 연안침수 대응을 위한 정책적 시사점

4.1 지역별 자산과 피해특성을 고려한 대응

연안침수 피해규모는 침수면적뿐 아니라 침수 지역에 분포한 자산의 종류와 가치에 따라 크게 달라진다. 특히 산업자산 피해가 전체 기대연평균 직접피해의 절반 이상을 차지하였으며, 조선·제조 시설, 산업단지 및 항만·물류시설이 밀집한 일부

지역에서 피해가 집중되었다. 따라서 전국 연안에 동일한 방재기준을 적용하기보다 지역별 주요 자산과 피해구조를 고려하여 대응대책을 차별화할 필요가 있다. 산업·항만지역에서는 생산설비와 전기·통신 및 제어시설의 침수방지를 강화하고, 핵심설비를 침수위보다 높은 위치에 배치하는 등 시설의 기능 유지에 중점을 두어야 한다.

주거지역에서는 저층주택과 지하공간의 침수방지뿐 아니라 주민의 대피와 임시거주, 교통복구 및 일상생활 회복을 함께 고려해야 한다. 주거지 침수는 건물과 가재도구에 대한 물리적 피해에 그치지 않고 주민의 노동활동에도 차질을 줄 수 있기 때문이다. 농업피해가 큰 연안 저지대에서는 방조제와 배수시설의 기능을 점검하고, 외수위 상승으로 인한 배수제약과 해수 유입 가능성을 함께 고려할 필요가 있다. 특히 염수침수는 농작물 피해뿐 아니라 토양의 염류화를 유발할 수 있으므로 침수 이후 토양회복과 영농재개를 지원하는 대책도 마련해야 한다.

이와 같이 지역별 주요 피해자산과 피해원인을 구분하면 방재사업의 우선순위를 보다 구체적으로 설정할 수 있다. 광역지자체 단위의 평균적인 피해규모뿐 아니라 시군구와 읍면동 단위의 피해 집중지역을 활용하여 시설보강과 주민보호 대책의 우선지역을 선정할 필요가 있다.

4.2 지역 간 산업연계를 고려한 대응

산업시설과 항만 및 물류시설의 침수피해는 해당 지역의 생산시설과 자산에만 영향을 미치는 것이 아니다. 연안지역에서 생산되는 원료와 중간재 및 서비스가 지역 간 거래를 통해 공급되는 경우, 특정 지역의 침수피해는 다른 지역의 생산과 유통에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 주요 산업단지와

항만에서는 개별 시설의 침수방지와 복구대책뿐 아니라 공급망과 물류기능의 연속성을 확보하기 위한 대응이 필요하다. 기업과 시설운영자는 주요 원료와 부품의 공급경로를 사전에 점검하고, 대체 공급자와 우회수송경로 및 비상재고 확보방안을 포함한 업무연속성계획을 마련할 필요가 있다.

정부와 지방자치단체도 연안지역 주요 시설의 직접적인 침수위험뿐 아니라 해당 시설의 기능 저하가 다른 지역과 산업에 미칠 수 있는 영향을 함께 검토해야 한다. 특히 국가산업단지, 항만, 에너지시설 및 주요 물류거점과 같이 광역적인 기능을 담당하는 시설은 개별 지방자치단체의 대응만으로 관리하기 어렵기 때문에 중앙정부와 지방자치단체 및 시설운영자 간의 협력이 중요하다. 연안방재사업의 효과를 평가할 때에도 사업지역에서 감소하는 직접 피해만을 고려하기보다, 해당 시설과 연결된 다른 지역과 산업에서 줄어든 수 있는 경제적 영향도 함께 살펴볼 필요가 있다. 다만 지역 간 경제적 파급효과는 실제 확정손실액이 아니라 현재의 산업구조와 거래관계를 전제로 산정된 잠재적 영향이므로, 방재사업의 부가적인 편익과 지역 간 연계성을 검토하는 자료로 활용하는 것이 적절하다.

4.3 복합침수를 고려한 통합관리

연안침수는 단독으로 발생하기도 하지만 태풍이나 집중호우가 발생할 경우 하천 범람과 도시 내수침수와 동시에 나타날 수 있다. 특히 만조와 폭풍해일로 연안의 수위가 높아지면 하천과 도시 배수체계의 방류가 어려워져 침수범위가 확대되거나 침수시간이 길어질 수 있다. 그러나 현재의 침수관리는 연안침수, 하천홍수 및 도시침수를 서로 다른 자료와 관리체계에 따라 개별적으로 평가하는 경우가 많다. 이러한 방식은 여러 침수유

형이 동시에 발생할 때 나타나는 복합적인 위험을 충분히 반영하기 어렵다. 따라서 강우, 하천수위, 조위, 파랑 및 도시배수능력을 함께 고려하는 복합침수 분석체계를 구축할 필요가 있다. 연안의 해수위와 하천수위 및 도시배수 정보를 연계하면 침수위험이 급격히 증가하는 지역과 시간을 보다 구체적으로 파악할 수 있다.

예측과 경보체계도 개별 재난유형별 정보를 제공하는 방식에서 벗어나 주민과 시설관리자가 실제로 필요한 통합위험정보를 제공하는 방향으로 개선해야 한다. 이를 바탕으로 지역별 대피시점, 도로와 지하공간의 통제기준, 배수시설과 수문의 운영 및 주요 산업시설의 비상대응 절차를 연계할 필요가 있다. 장기적으로는 해수면 상승과 기후변화로 인한 연안침수 위험의 변화를 하천과 도시침수 위험과 함께 평가해야 한다. 이러한 통합적인

접근은 방재시설의 우선순위 설정, 토지이용계획, 산업시설의 입지관리 및 주민대피계획을 수립하는 데 활용될 수 있다.

종합하면, 국내 연안침수 대응은 지역별 피해특성에 따른 시설보강과 주민보호, 산업연계에 따른 공급망 관리 및 연안·하천·도시침수를 아우르는 통합 물재해 관리의 세 방향으로 추진할 필요가 있다. 이를 통해 침수지역의 직접피해를 줄이는 동시에 주민의 일상회복과 지역 간 경제적 영향까지 고려한 보다 실효성 있는 연안침수 관리체계를 구축할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 중견연구(RS-2023-00272933)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 해양수산부 국립해양조사원(2024), 2024년 해안침수예상도 제작 결과보고서.
한국은행(2025), 2020년 지역산업연관표.
Hallegatte, S.(2008), An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina, Risk Analysis, Vol. 28, No. 3, pp. 779-799.
Hinkel, J., Feyen, L., Hemer, M., Le Cozannet, G., Lincke, D., Marcos, M., Mentaschi, L., Merkens, J. L., de Moel, H., Muis, S., Nicholls, R. J., Vafeidis, A. T., van de Wal, R. S. W., Voudoukas, M. I., Wahl, T., Ward, P. J. and Wolff, C.(2021), Uncertainty and bias in global to regional scale assessments of current and future coastal flood risk, Earth's Future, Vol. 9, No. 7, e2020EF001882.
Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R. and Thieken, A. H.(2010), Assessment of economic flood damage, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 10, No. 8, pp. 1697-1724.
Miller, R. E. and Blair, P. D.(2009), Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
Okuyama, Y. and Santos, J. R.(2014), Disaster impact and input-output analysis, Economic Systems Research, Vol. 26, No. 1, pp. 1-12.
Voudoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P. and Feyen, L.(2018), Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard, Nature Communications, Vol. 9, 2360.