

도시침수방지법 제정에 따른 도시침수예경보 체계 구축 방안

Establishment of Urban Inundation Forecasting/Warning System Following the
Enactment of the Urban Inundation Prevention Act

이승수 | 양일주 | 김수빈 | 강태운 | 이문환 | 노성진

K O R E A
E N V I R O N M E N T
I N S T I T U T E

■ 저 자 이승수, 양일주, 김수빈, 강태운, 이문환, 노성진

■ 연구진

연구책임자 이승수 (한국환경연구원 연구위원)
참여연구원 양일주 (한국환경연구원 책임연구원)
김수빈 (한국환경연구원 전문연구원)
강태운 (한국환경연구원 초빙연구원)
이문환 (한국환경연구원 연구위원)
노성진 (금오공과대학교 교수)

■ 연구자문위원 (가나다순)

강형식 (한국환경연구원 선임연구위원)
류재나 (한국환경연구원 연구위원)
안상혁 (환경부 물관리정책실 수자원정책관)
오재일 (중앙대학교 건설환경공학과 교수)
윤선권 (서울연구원 연구위원)
이승오 (홍익대학교 건설환경공학과 교수)
정휘철 (한국환경연구원 선임연구위원)

© 2024 한국환경연구원

발행인 이 창 훈
발행처 한국환경연구원
(30147) 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 과학·인프라동
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
<http://www.kei.re.kr>
인 쇄 2024년 4월 25일
발 행 2024년 4월 30일
등 록 제 2015-000009호(1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-941-5 93530
인쇄처 세일포커스(주) 02-2275-6894

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
이승수 외(2024), 「도시침수방지법 제정에 따른 도시침수예경보 체계 구축
방안」, 한국환경연구원.

값 7,000원

서 언

지난 2020년 8월, 관측 사상 최장기(54일) 장마가 있었고 그동안 전국적으로 많은 침수 피해가 발생하였습니다. 또한 2022년 8월에는 서울지역에 내린 집중호우로 인해 많은 인명과 재산상의 피해가 발생했습니다. 도시에서 발생하는 침수는 많은 인구와 인프라가 밀집된 특성으로 인해 다수의 인명피해를 유발한다는 특징을 가지고 있습니다.

도시침수의 발생이 빈번해지고 이로 인한 피해가 지속적으로 발생함과 동시에 피해의 규모가 커짐에 따라 「도시하천유역 침수피해방지 대책법」이 2024년 3월 15일부터 시행되었습니다. 「도시하천유역 침수피해방지 대책법」을 통해 도시침수예보를 위한 물재해 종합상황실 및 도시침수예보센터의 설치 근거가 마련되었습니다. 도시침수예보를 통해 도시침수 발생 규모와 범위에 대한 정보가 적시에 제공된다면 도시침수로 인한 인적·물적 피해를 상당 부분 막을 수 있을 것이라는 기대에 대해서는 큰 이견이 없을 것입니다. 그러나 아직은 도시침수예보의 적절한 시공간적 범위, 발령기준, 체계 및 절차 등 실제적인 도시침수예보 시행 방안이 부재한 실정입니다. 본 연구가 효과적인 도시침수예보제도 운영방안을 마련하고 피해를 줄이는 데 도움이 되기를 바랍니다.

끝으로 본 연구를 수행한 한국환경연구원 통합물관리연구실의 이승수 박사, 이문환 박사, 양일주 책임연구원, 김수빈 전문연구원, 강태운 초빙연구원께 감사를 포함합니다. 바쁘신 와중에도 자문을 통해 연구에 많은 도움을 주신 환경부 안상혁 서기관, 중앙대학교 오재일 교수, 서울연구원 윤선권 박사, 홍익대학교 이승오 교수께 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 강형식 박사, 류재나 박사, 정휘철 박사의 자문에도 감사를 포함합니다.

2024년 4월

한국환경연구원

원장 이창훈

I 요약

I. 연구의 필요성 및 목적

1. 연구 배경

- 「도시침수방지법」 제정에 따라 도시침수예보의 시행이 필요하나 예보 시행을 위한 방안 부재
 - 도시침수예보를 위한 기준, 시공간적 범위, 절차 및 체계 마련 필요

2. 연구의 목적 및 범위

- 도시침수로 인한 인적·물적 피해 예방을 목적으로 도시침수예보 방안 마련을 연구의 목적으로 하고 연구의 범위는 다음과 같음
 - 도시침수예보의 시공간적 범위(안) 제시
 - 도시침수예보를 위한 정량적 기준(안) 제시
 - 도시침수예보체계 및 절차(안) 제시

II. 국내외 도시침수예경보 사례조사 및 요구사항 도출

1. 해외사례

- 미국의 국가 단위 홍수 예경보는 국립기상청이 담당하며, 하천예보센터와 기상예보실이 각각 하천홍수와 돌발홍수를 나누어 관할
 - 예경보는 홍수의 발생확률, 심각성, 임박성에 따라 Watch, Advisory, Warning으로 구분

- 현재 상황과 전망, 공간적·시간적 정보와 함께 홍수로 인한 영향(impact)과 행동 요령(instructions)을 제공
- 일본의 홍수예보는 강우 예측자료를 이용해 표면우량지수를 기반으로 행정구역 단위의 침수위험 정보 제공
 - 도시지역의 복잡한 수리수문학적 현상 표현에는 제한이 있으나 침수 발생 유무를 빠르게 제공할 수 있는 장점
 - 또한 지하공간의 대피를 목적으로 공공하수도의 특별경계수위를 정하고 수위가 이에 도달했을 때 수방관리자 및 일반 시민들에게 정보 전파
- 스코틀랜드는 비상대응기관을 대상으로 사전 준비 및 의사결정을 지원하기 위한 홍수 예보와 일반 대중을 포함하여 정보를 제공하는 홍수정보를 함께 운영
 - 홍수예보는 홍수의 영향(impact)과 발생가능성(likelihood)에 기반하여 위험도를 평가하고, 향후 5일간의 홍수위험 정보를 담은 Flood Guidance Statement를 비상 대응기관을 대상으로 매일 발행
 - 홍수정보는 Alert와 Warning으로 구분되며, 공간적으로는 행정구역 단위로, 시간적으로는 홍수 영향이 예상되는 기간으로 제시
 - 또한 홍수로 인해 발생할 수 있는 영향을 고지함으로써 대응 행동을 유도하고 홍수 발생의 불확실성을 명시하여 주의를 환기

2. 국내사례

- 산불예보, 하천홍수예보, 기상예보 등 타 분야의 예경보 체계를 검토하였음
 - 산림청은 지형, 임상, 기상 자료를 이용해 산불위험등급을 4단계로 산정해 예보하며, 산불감시, 산불 발생 시 대응, 진화에 중점을 두어 운영
 - 홍수통제소는 홍수로 인명과 재산에 대한 피해가 예상될 때 홍수예보를 실시하며, 인명과 재산에 대한 중대한 피해가 예상될 때에는 홍수특보를 발령. 홍수특보는 홍수

특보지점의 기준수위를 기준으로 홍수주의보와 홍수경보로 구분

- 기상청은 기상현상에 대한 일상적인 예보와 중대한 재해가 발생할 것이 예상될 때 경고의 목적으로 발령하는 특보를 발령
- 국내 도시침수예경보시스템 현황에 대하여 문헌조사, 면접조사 등을 통해 조사함
 - 국내 다수의 지자체에서 도시침수예경보시스템 또는 통합정보시스템을 구축·운영 중임
 - 현행 도시침수예경보시스템을 구축·운영 중인 지자체 담당자 대상 예경보시스템 운영·관리 현황, 실효성, 기대효과, 구축·운영 과정에서의 한계점 등에 대해 조사함
 - 도시침수예경보시스템 목적은 예측이 가능한 침수 정보를 사전에 파악하여 피해를 예방하고 대비하고자 함으로, 예측 정보는 정확성과 신속성이 중요함
 - 지역별 여건과 상황은 다르지만, 예측 정보 생성을 위한 장비 구축, 데이터 활용성을 위한 분석 방법 개발·발전, 분석 프로그램의 정교성 확보, 시스템 구축을 위한 법·제도적 근거 마련 등이 필요함
 - 지자체 담당자들의 실무적인 측면에서 단시간 내 급격하게 피해가 확산되는 도시침수 특성과 지역 특성을 고려한 예측 정보제공이 중요함
 - 정보의 활용성과 실효성을 고려하여 도시침수예경보를 위한 시공간적 범위 기준 설정이 필요함

III. 도시침수예경보 기준 및 절차 검토

1. 도시침수예경보 기준 검토

- 국내 도시침수예경보 기준 검토
 - 서울시 침수예경보제, 도립천 홍수경보 기준과 KISTI, 행정안전부, 재난안전연구원의 침수판단 기준 및 침수예보 기준을 검토한 결과, 목적에 따른 기준이 상이하고 명확한 근거가 부재하여 전국단위 예경보 기준으로의 사용은 한계가 있는 것으로 판단

□ 국내 도시침수예경보 기준 검토

- 도시침수예보의 목적을 ‘침수발생에 따른 인적·물적 피해 최소화’로 상정하고 침수 발생시 위험지역에서의 회피(피난)가 가장 곤란한 아동과 자동차 피해 단계를 기준으로 정량적 기준 검토

2. 도시침수예경보의 시·공간적 범위 기준 검토

- 도시침수예보의 목적에 부합하기 위해서는 도시침수가 예상되는 경우 현장 대응에 활용될 수 있어야 함
- 이를 위해 담당 공무원 면담을 통해 요구사항을 조사한 후 지자체 재난대응 체계를 파악하고 ‘위기관리 매뉴얼’과 재난관리 체계 및 ‘재난 대비 30분 대피시스템’을 검토함

3. 도시침수예경보 체계 및 절차 검토

- 하천홍수예보 체계 및 절차를 검토해 도시침수예보에 필요한 기초적인 사항을 검토한 후 도시침수의 특성이 반영된 추가 요소를 검토함
- 내수배제 불량에 의한 침수 및 도시하천 범람에 의한 침수 현상을 관측하고 예측자료로 활용하기 위한 요소를 도출

IV. 도시침수예보를 위한 시공간적 예보범위 검토

1. 관측자료 기반 시공간적 예보범위 검토

- 맨홀 및 하천수위 관측자료를 이용한 시공간적 범위 검토
- 2022.8.8~9. 사이 침수피해가 발생한 도림천 유역에서 관측된 맨홀 및 하천수위 자료를 이용해 도시침수예보에 활용 가능 여부를 파악하고자 관측자료 기반의 선행 시간 확보 수준을 검토하였음

2. 예측 강수량 기반 선행시간 확보 수준 검토

□ 레이더 예측강수 자료의 예측성 검토

- 도시침수예보를 위한 예측자료의 선행시간 확보와 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 초단기강우예측자료(MAPLE)의 10분 단위 예측자료를 이용해 상관성 계수를 산출한 후 예측성을 검토하였음

V. 결과 및 시사점

1. 해외사례 결과 및 시사점

- 해외 국가에서는 도시침수예보를 위한 공간적 범위는 행정구역, 시간적 범위는 수분에서 2일까지로 다양
 - 이는 도시침수 예측자료의 정확도를 고려해 도시침수예보의 목적에 부합하는 정보를 제공하는 것을 시사
 - 도시침수예보를 위한 기준 역시 예보자료의 활용 대상과 목적에 따라 구분하고 있다는 점은 우리나라 도시침수예보 제도의 목적성과 활용성의 명확화가 필요함을 시사

2. 국내사례 결과 및 시사점

- 타 예경보 시스템은 예보하고자 하는 현상의 발생 원인과 그 기작에 따라 활용 목적성이 달라지며, 예경보를 위한 정량적 기준을 가지고 있음
 - 이는 해외 사례 결과와 동일하게 도시침수예보의 목적에 부합하는, 시공간적 범위, 정량적 기준, 예보절차 마련의 필요성을 시사함
- 국내 도시침수예경보시스템 사례조사 결과 관측자료를 이용한 실시간 위험정도에 대한 정보제공(nowcasting)과 침수 발생 위험성에 대한 정보(forecasting) 제공으로 구분 가능

- 그러나 현재 국내 도시침수예경보시스템은 도시침수예경보의 목적, 시공간적 범위, 예측기법, 예경보 기준 등이 혼재되어 있으므로 예경보 체계의 구조화 방안 마련이 필요함을 시사함

- 도시침수 예측시스템을 운영하고 있는 담당자 면담조사 결과 대량의 관측정보가 축적되고 있으나 이를 분석·활용할 수 있는 체계가 미비
- 대량으로 축적된 관측자료의 분석·활용 체계를 마련함과 동시에 다양하게 관측되고 있는 정보를 실제 상황 발생시 활용할 수 있는 AI 시스템이 필요함을 시사함

3. 도시침수예경보 기준 및 시공간적 범위 검토 결과 및 시사점

- 도시침수예보의 목적을 ‘도시침수로 인한 인적·물적 피해 최소화’로 상정하고 도시침수예경보의 기준을 검토
- 아동이 공포심을 느낌과 동시에 자력으로 피난에 어려움이 생기는 침수심이 0.3m, 자동차로 빗물이 유입되는 최소 침수심은 0.1m, 자동차의 엔진에 빗물이 유입되어 운행에 차질이 생기는 침수심은 0.5m로 도출
- 현장 대응을 위한 매뉴얼 검토 결과 재난관리 단계에서 상황관리 단계로 넘어가는 단계에서 도시침수예보의 정보가 필요함
- 상황관리를 위한 선행시간 확보가 필요함과 동시에 행정 체계 단위의 공간적 범위에 기반한 예보 필요성을 시사함

4. 관측수위 기반 시공간적 예보범위 검토 결과 및 시사점

- 5개의 맨홀에 대해 수위 상승 검토 결과 큰 편차가 나타났으나 매우 빠른 수위 상승 속도 확인
- 1m 상승에 최대 62분, 최소 10분 가량 소요되는 것으로 분석되었으나 검토 대상인 5개 지점 중 19-0001 지점을 제외한 나머지 4개 지점의 1m 상승 평균 소요 시간은

약 18분으로 나타남

- 이는 맨홀 관측수위를 이용해 예보자료로 활용하기에는 충분한 선행시간 확보가 곤란함을 시사함
- 하천수위 변화는 맨홀 수위 대비 상대적으로 긴 선행시간 확보 가능
 - 양산교는 16분, 도림교는 36분 후부터 수위가 상승하였으며, 강우 발생 이후 최고 수위 도달까지 case 1에서 양산교는 1시간 6분, 도림교는 1시간 46분이 소요되었으며, case 2에서는 양산교가 3시간 7분, 도림교는 1시간 17분¹⁾ 소요
 - 하천수위 예측을 위한 계산의 신속성이 확보된다면 지점 단위 수준의 예경보가 가능함을 시사함

VI. 정책제언

1. 도시침수예보를 위한 시공간적 범위

- 지자체의 도시침수 대응 절차 및 효율성 확보를 위해 선행 1시간이 확보된 행정동 단위의 도시침수예보자료 생산 필요
 - 도시침수예보의 목적 달성을 위해 예보(forecasting)와 실시간 현황 정보 공유(nowcasting)를 병행하는 방안 제안

2. 도시침수예보를 위한 정량적 기준

- 도시침수로 인한 인적·물적 피해 최소화를 위해 정량적 도시침수예보 기준을 다음과 같이 제안함

1) case 2에서 도림교에서의 최고 수위 도달이 양산교보다 빠른 이유는 당시 도림교의 관측 최고 수위에 도달해 실제 피크치보다 빠르게 최고 수위에 도달한 것이 원인으로 판단된다.

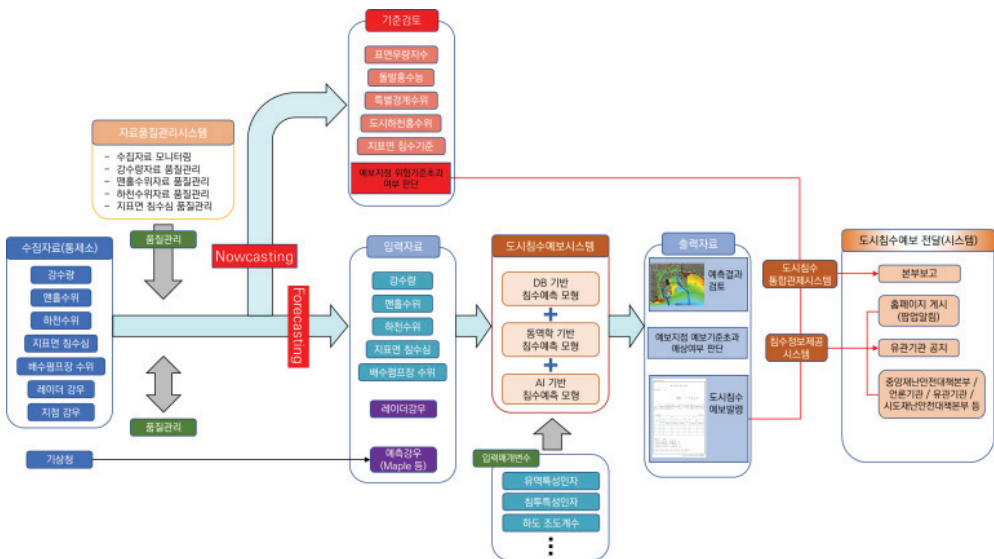
〈표 1〉 도시침수예보를 위한 정량적 기준(안)

단계		기준	비고
주의보	주의	0.1m 초과 예상	자동차 최저지상고
	경계	0.3m 초과 예상	어린이 피난 가능 범위
경보	심각	0.5m 초과 예상	자동차 엔진 정지

자료: 저자 작성.

3. 도시침수예보 체계 및 절차(안)

- 하천홍수예보 체계를 기본으로 도시침수 특성이 반영된 ‘도시침수예보 체계(안)’을 다음과 같이 제시
 - 선행시간 확보가 어려운 도시침수 특성을 고려해 실시간 현황자료를 공유하는 nowcasting과 선행시간이 확보된 예보(forecasting)을 병행
 - 관측자료는 내수침수와 하천범람을 모두 고려할 수 있도록 설정



자료: 저자 작성.

〈그림 1〉 도시침수예보 체계(안)

4. 도시침수예보(특보) 발령문(안) 및 시행령 개정안 제시

- 도시침수예보시 예측자료의 불확실성을 고려해 예측지점과 시간을 특정하기보다는 침수 발생 범위와 시기에 대한 정보를 제공함과 동시에 침수 발생으로 인한 영향 범위에 대한 정보를 제공하는 발령문(안) 제시

도시침수 특보(주의보)(예시)

세종특별자치시 반곡동에 도시침수 **주의보**가 발령되었습니다.
화요일 밤 10시부터 수요일 오전 6시 사이에 저지대를 중심으로 **어린이나 노약자**의 통행에 **어려움**을 겪을 수 있으며, **자동차의 운행**이 어려울 수 있습니다. 특히, **지하차도**를 포함한 **지하공간**이 침수될 수 있습니다.
 현재 인근 **하천 수위는 3.2m**로, **상승중**에 있으며, 시청대로 **맨홀수위는 2.0m**로 **위험수위**에 인접했습니다.

자료: 저자 작성.

〈그림 2〉 도시침수 특보(주의보)(안)

도시침수 특보(경보)(예시)

세종특별자치시 반곡동에 도시침수 **특보**가 발령되었습니다.
수요일 아침 7시부터 8시 사이에 저지대를 중심으로 **성인과 자동차**의 통행이 **불가능**할 수 있습니다. 또한, **지하차도**를 포함한 **지하공간의 침수 위험성**이 매우 높습니다. **하천변 인근이나 저지대**에 접근하지 마시기 바랍니다. 특히 **위험한 지역**은 시청대로 **370번지** 인근입니다. 해당지역에 접근하시려는 분들은 **침수 특보**가 해제된 후에 접근하시기 바랍니다.
 현재 **인근 하천 수위는 4.2m**로, **상승중**에 있으며, 시청대로 **맨홀수위는 2.5m**로 **위험수위를 초과**하여 **월류 위험**이 있습니다.

자료: 저자 작성.

〈그림 3〉 도시침수 특보(경보)(안)

5. 시행령 개정(안)

- 하천과 하수도 수위 자료의 변화 속도를 검토해 본 결과 하수도 수위의 변화속도가 매우 빠름에 따라 예측자료의 생산뿐만 아니라 정보의 활용성이 매우 낮을 것으로 판단됨에 따라 다음과 같이 시행령 개정(안) 제시

〈표 2〉 「도시침수방지법 시행령」 개정(안)

개정 전
<p>제11조(도시침수예보의실시 등) ① 환경부장관은 법 제15조제1항에 따른 도시침수예보(이하 “도시침수예보”라 한다)를 실시하려는 경우에는 사전에 도시침수예보를 위한 측정지점 및 기준수위 등을 고시해야 한다. 고시한 사항을 변경하는 경우에도 또한 같다.</p> <p>② 도시침수예보를 통해 제공하는 정보는 다음 각 호와 같다.</p> <p>1. 하천·하수도의 실측 및 예측수위에 관한 정보</p> <p>2. 하천·하수도의 범람 등으로 인한 침수위험 및 침수범위에 관한 정보</p>
↓
개정 후
<p>제11조(도시침수예보의실시 등) ① 환경부장관은 법 제15조제1항에 따른 도시침수예보(이하 “도시침수예보”라 한다)를 실시하려는 경우에는 사전에 도시침수예보를 위한 측정지점 및 기준수위 등을 고시해야 한다. 고시한 사항을 변경하는 경우에도 또한 같다.</p> <p>② 도시침수예보를 통해 제공하는 정보는 다음 각 호와 같다.</p> <p>1. 하수의 실측수위에 관한 정보</p> <p>2. 하천의 실측 및 예측수위에 관한 정보</p> <p>3. 하천·하수도의 범람 등으로 인한 침수위험 및 침수범위에 관한 정보</p>

자료: 국가법령정보센터, “도시침수방지법 시행령”을 기반으로 저자 작성.

6. 향후 연구과제 제안

- 본 연구를 통해 조사·검토된 사항을 바탕으로 실효성 있는 도시침수예보 제도의 정착을 위해 다음과 같은 4개의 향후 연구과제를 제안함
 - 도시침수를 사전에 효과적으로 모니터링하고 이를 예측에 활용할 수 있는 ‘도시침수 대표지점 선정 기법 개발’을 위한 연구
 - 충분한 선행시간 확보를 위해 Tank model과 같이 비교적 간단한 기법을 적용한 ‘한국형 도시침수 예측모델 개발’을 위한 연구

- 실시간으로 수집되는 관측자료 중 침수 피해 저감을 위해 활용 가능한 데이터를 선별해 정제된 정보를 제공해 줄 수 있는 ‘AI 기반 도시침수 대응·관리 시스템 개발’을 위한 연구
- 도시침수예보의 정확도와 선행시간 확보에 가장 큰 영향을 미치는 고정확도의 예측강우 자료 생산을 위해 ‘초단기 레이더 강우예측정보의 예측성능 향상을 위한 연구’

주제어: 도시침수예보, 예경보 기준, 시공간적 범위, 체계 및 절차

| 차례 |

요 약	i
제1장 서 론	1
1. 연구의 배경	1
2. 연구의 목적 및 범위	4
3. 도시침수예보의 개념 및 예보 형태	4
4. 연구 추진체계	6
제2장 국내외 도시침수예경보 사례조사 및 요구사항 도출	8
1. 해외사례	8
2. 국내사례	22
제3장 도시침수예경보 기준 및 절차 검토	42
1. 도시침수예경보 기준 검토	42
2. 도시침수예경보의 시·공간적 범위 기준 검토	48
3. 도시침수예경보 체계 및 절차 검토	54
제4장 도시침수예보를 위한 시공간적 예보범위 검토	62
1. 관측자료 기반 시공간적 예보범위 검토	62
2. 예측 강수량 기반 선행시간 확보 수준 검토	71
제5장 결과 및 시사점	78
1. 해외사례 결과 및 시사점	78

2. 국내사례 결과 및 시사점	80
3. 도시침수예경보 기준 및 시공간적 범위 검토 결과 및 시사점	85
4. 관측수위 기반 시공간적 예보범위 검토 결과 및 시사점	87
5. 예측 강수량 기반 선행시간 확보 수준 검토 결과 및 시사점	90
제6장 정책제언	91
1. 도시침수예보를 위한 시공간적 범위	91
2. 도시침수예보를 위한 정량적 기준	92
3. 도시침수예보 체계 및 절차(안)	92
4. 도시침수예보(특보) 발령문(안)	95
5. 시행령 개정(안)	97
6. 향후 연구과제 제안	98
참고문헌	101
Executive Summary	107

| 표차례 |

〈표 1-1〉 「도시침수방지법」상 도시침수예보 관련 조항	3
〈표 1-2〉 본 연구에서 정의한 도시침수예보 형태	6
〈표 2-1〉 국립기상청(NWS)의 홍수 예경보 종류 및 발령기준	11
〈표 2-2〉 미국 국립기상청(NWS)의 Flood Warning(예)	12
〈표 2-3〉 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS)의 홍수 영향(impact) 구분	17
〈표 2-4〉 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS)의 홍수 발생가능성(likelihood) 구분	18
〈표 2-5〉 스코틀랜드 홍수경보의 종류와 의미	19
〈표 2-6〉 「산림보호법 시행령」의 산불경보 단계 및 조치	23
〈표 2-7〉 「수자원법 시행규칙」의 홍수특보 발령 기준	25
〈표 2-8〉 「기상법 시행령」의 호우 특보 발령 기준	26
〈표 2-9〉 기상예보의 종류	27
〈표 3-1〉 국내 도시침수예보기준	43
〈표 3-2〉 적정 피난 침수심에 관한 연구 사례	45
〈표 3-3〉 연령별, 성별에 따른 평균 무릎 높이 비율	46
〈표 3-4〉 위기관리 매뉴얼 현황	49
〈표 3-5〉 홍수특보 발령 기준	57
〈표 4-1〉 서울시 하수관로 수위계 설치 현황	63
〈표 4-2〉 도림천 인근 맨홀 수위 관측지점 현황	63
〈표 5-1〉 해외사례 요약	78
〈표 5-2〉 도시침수예보의 목적성과 실효성 조사 결과	83
〈표 5-3〉 도시침수 예측시스템 개선사항 조사 결과	84
〈표 5-4〉 아동 피난 기준 및 자동차 운행 가능여부 검토 결과	85
〈표 5-5〉 관측 맨홀 수위 상승-하강 속도 분석 결과	87
〈표 5-6〉 도림천 수위 상승-하강 속도 분석 결과	88

〈표 5-7〉 도림천 유역의 초단기 강우예측자료 상관성 분석 결과	90
〈표 6-1〉 도시침수예보를 위한 정량적 기준(안)	92
〈표 6-2〉 「도시침수방지법 시행령」 개정(안)	97

| 그림차례 |

〈그림 1-1〉 5일 최대강수량(mm)과 상위 5% 극한강수 일수(일)의 변화 전망	1
〈그림 1-2〉 2020년 여름 장마기간 주요 홍수피해 현황	2
〈그림 1-3〉 도시침수예보 종류와 제공정보 형태	5
〈그림 1-4〉 연구추진체계	7
〈그림 2-1〉 미국 국립기상청(NWS)의 홍수지도 및 예경보시스템(AHPS)	8
〈그림 2-2〉 국립기상청 하천예보센터(River Forecast Center)의 관할 구역	10
〈그림 2-3〉 FIMAN 시스템의 대시보드(시나리오 옵션)	13
〈그림 2-4〉 일본의 재해 예경보 5단계	14
〈그림 2-5〉 표면우량지수 산정 개념도	15
〈그림 2-6〉 호우특별경보(침수해)에 이용되는 표면우량지수 기준치	15
〈그림 2-7〉 특별경계수위 설정 개념도	16
〈그림 2-8〉 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS)의 홍수위험도 매트릭스	18
〈그림 2-9〉 2020년 8월 11일자 Flood Guidance Statement의 Area of Concern 지도	20
〈그림 2-10〉 산림청 국가산불위험예보시스템 제공 정보	24
〈그림 2-11〉 하천홍수예보 업무 흐름도	25
〈그림 2-12〉 기상예보 업무 흐름도	27
〈그림 2-13〉 국내 도시침수예경보시스템 현황조사 개요	28
〈그림 2-14〉 서울특별시, 내외수 연계 통합 침수예측 시스템	30
〈그림 2-15〉 서울특별시, 침수 예경보 체계	31
〈그림 2-16〉 광주광역시 광산구, 디지털 트윈기반 도시침수 스마트 대응시스템	34
〈그림 2-17〉 부산광역시, 도시침수 통합정보시스템	37
〈그림 2-18〉 청주시, 도시침수 시뮬레이션 시스템 개요도	39
〈그림 2-19〉 청주시(90mm/hr) 강우 침수예측도(좌), 침수예측 경보 발령 내용 예시(우)	40
〈그림 2-20〉 2023년 8월 15일 충북대 정문에 대한 실시간 침수예측 경보(맨홀)	40

〈그림 2-21〉 국립재난안전연구원, 도시침수 모니터링 시스템	41
〈그림 3-1〉 국산/외제차 엔진 흡입구 높이 측정 결과	47
〈그림 3-2〉 우리나라 재난관리 체계	50
〈그림 3-3〉 지방자치단체 자연재난 대응 절차(제주시)	51
〈그림 3-4〉 재난 대비 30분 대피시스템 개념	52
〈그림 3-5〉 재해정보지도 경기도 의정부시(좌), 부산시 중구(우)	53
〈그림 3-6〉 하천홍수 예보 절차	55
〈그림 3-7〉 하천홍수 예보 체계	56
〈그림 3-8〉 홍수특보 발령(좌), 변경(중), 해제발령서(우)	58
〈그림 3-9〉 도시침수 발생 모식도	60
〈그림 3-10〉 도시침수 발생 주요 원인 및 모니터링을 위한 주요항목	61
〈그림 4-1〉 도림천 수위관측지점(붉은점) 및 맨홀 관측수위 지점(황색) 위치도	64
〈그림 4-2〉 맨홀 수위 변화 속도 이벤트 선정 예시	65
〈그림 4-3〉 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산 예시	66
〈그림 4-4〉 19-0001 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점	67
〈그림 4-5〉 19-0004 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점	67
〈그림 4-6〉 21-0002 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점	68
〈그림 4-7〉 21-0003 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점	68
〈그림 4-8〉 21-0007 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점	69
〈그림 4-9〉 양산교 수위 변화 속도 계산을 위한 변곡점	70
〈그림 4-10〉 도림교 수위 변화 속도 계산을 위한 변곡점	70
〈그림 4-11〉 도림천 소유역 구성	71
〈그림 4-12〉 초단기 레이더 강우예측자료(MAPLE)	72
〈그림 4-13〉 구로 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	73
〈그림 4-14〉 대림 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	74
〈그림 4-15〉 도림 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	74
〈그림 4-16〉 문래 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	75
〈그림 4-17〉 봉천천 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	75

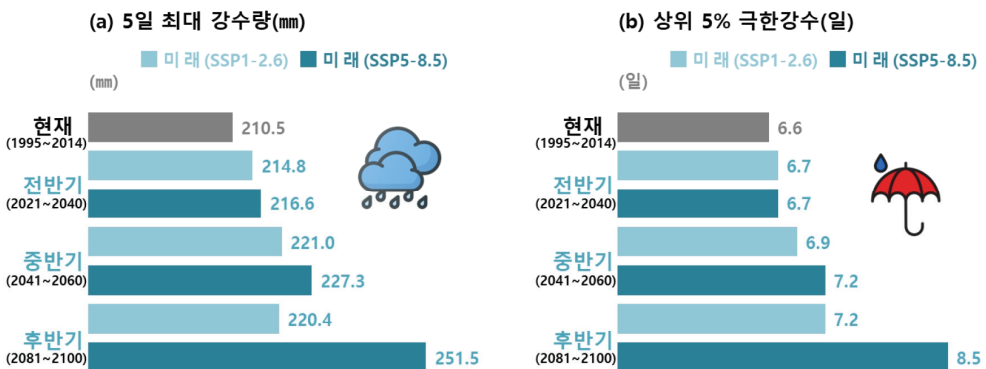
〈그림 4-18〉 서울대 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	76
〈그림 4-19〉 신림 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수	76
〈그림 6-1〉 도시침수예보 절차(안)	93
〈그림 6-2〉 도시침수예보 체계(안)	94
〈그림 6-3〉 도시침수예보(안)	95
〈그림 6-4〉 도시침수 특보(주의보)(안)	96
〈그림 6-5〉 도시침수 특보(경보)(안)	96

제1장

서론

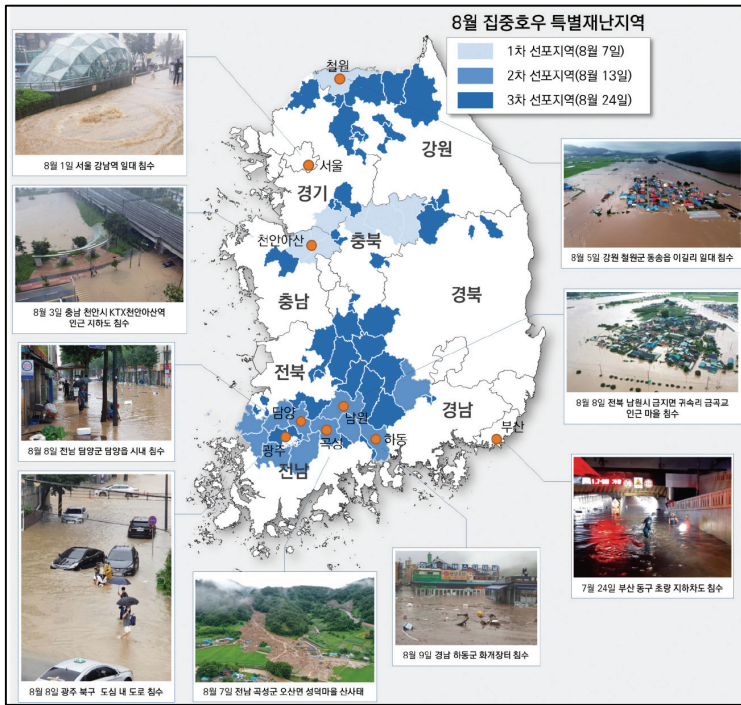
1. 연구의 배경

기후변화로 인해 강수량이 증가할 것이라는 전망이 꾸준히 제기되고 있다. 국립기상과학원(2020)에 따르면 SSP-8.5 시나리오가 적용된 미래의 5일 최대강수량은 현재 210mm에 비해 최대 약 19.5% 증가한 251.5mm로 전망되고 있으며, 상위 5%의 극한강수 일수 역시 현재 6.6일 대비 약 28.8% 증가한 8.5일로 전망된다. 5일 최대강수량의 증가와 상위 5%의 극한강수 일수의 증가는 미래에 집중호우로 인한 피해가 현재보다 더욱 증가할 것이라는 점을 의미하므로 향후 집중호우에 따른 홍수·침수 피해를 예방하기 위한 노력이 시급한 상황이다.



자료: 국립기상과학원(2020), p.20.

〈그림 1-1〉 5일 최대강수량(mm)과 상위 5% 극한강수 일수(일)의 변화 전망



자료: 이승수, 이문환, 강형식(2020), p.2.

〈그림 1-2〉 2020년 여름 장마기간 주요 홍수피해 현황

우리나라는 2020년 8월 관측 사상 최장기 장마기간(54일) 동안 전국적으로 많은 침수 피해가 발생하였다. 2020년 당시 집중호우는 특히 전남과 충청권 그리고 강원도 지역을 중심으로 큰 피해를 발생시켰으며, 제방 월류 및 붕괴로 인한 피해뿐만 아니라 도시지역의 침수로 인해 많은 인명과 재산상의 피해가 발생했다. 또한 2022년 8월 8~9일 이틀 동안 서울지역에 내린 집중호우로 인해 서울지역에서 많은 인명과 재산상의 피해가 발생했다. 당시 주요 피해 상황을 살펴보면 다음과 같다.

2022년 8월 8일 오후 9시 7분경 반지하에 3명이 갇혀있다는 신고가 접수되었으며 지하로 빗물이 유입되어 3명의 인명사고가 발생하였다. 동작구에서는 8일 오후 6시 50분경 폭우로 쓰러진 가로수 정리 작업 중 감전으로 인해 60대 구청 직원 1명이 사망하는 사고가 있었으며, 같은 날 오후 8시 29분에는 지하 주택이 침수되어 1명이 사망하였다. 8일 밤에는 급류에

휩쓸려 서초동 빌딩 지하주차장에서 실종됐던 남성이 사흘 만에 숨진 채 발견되었다. 8일 밤 서초구 서초동 맨홀에 빠져 실종됐던 40대 남성이 10일 오후 직선거리로 약 1.5km 떨어진 다른 맨홀에서 숨진 채 발견되었으며 함께 실종된 여성도 전날(9일) 오후 11시 20분경 사고 현장에서 4km 떨어진 지점에서 시신으로 발견되는 안타까운 사고가 있었다.²⁾

이처럼 도시침수는 많은 인구와 인프라가 밀집되어 있는 도시의 특성으로 인해 다수의 인명피해를 유발한다는 특징을 가지고 있다. 그러나 도시침수로 인해 발생하는 인명피해는 사전 대응과 위험지역으로부터의 회피 또는 대피를 통해 충분히 예방할 수 있다는 특징도 함께 가지고 있다.

도시침수의 발생이 빈번해지고 이로 인한 피해가 지속적으로 발생함과 동시에 피해의 규모가 커짐에 따라 수해방지를 위한 「도시하천유역 침수피해방지 대책법」(이하, 도시침수방지법) 제정안이 2023년 8월 24일 국회 본회의를 통과하였으며 2023년 9월 12일 국무회의에서 의결되어 2024년 3월 15일부터 시행되었다.

〈표 1-1〉 「도시침수방지법」상 도시침수예보 관련 조항

구분	내용
제13조 (침수피해 방지 자료의 정보화)	· 침수피해 방지에 필요한 자료의 효율적인 활용을 위한 정보체계 구축·운영
제14조 (물재해종합상황실의 설치·운영 등)	· 도시침수 등 물재해 정보의 수집·전파, 상황관리 등의 업무를 수행하기 위한 물재해 종합상황실 설치·운영
제15조 (도시침수예보의 실시 등)	· 도시침수예보센터의 설치·운영

자료: 국가법령정보센터, “도시하천유역 침수피해방지대책법”.

「도시침수방지법」은 도시하천유역의 침수피해 방지를 위한 기본계획과 시행계획 수립의 법적근거를 제공함과 동시에 도시침수예보를 위한 물재해 종합상황실 및 도시침수예보센터의 설치근거가 마련되었다는 점에서 큰 의미가 있다고 할 수 있다. 도시침수예보를 통해

2) 동아일보(2022.8.9), “폭우로 8명 사망·7명 실종…이재민 391명 발생”, 검색일: 2023.8.12.

적시에 정확도 높은 도시침수 발생 규모와 범위에 대한 정보가 제공된다면 도시침수로 인한 인적·물적 피해를 상당 부분 막을 수 있을 것이라는 기대에 대해서는 이견이 없을 것이다. 그러나 현재로서는 도시침수예보를 위한 시공간적 범위, 예보를 위한 기준, 예보를 위한 자료 생산 및 예보의 실행을 위한 체계 등 실제적인 도시침수예보 시행 방안이 부재한 실정이다.

2. 연구의 목적 및 범위

도시침수예보를 위해서는 예보를 위해 필요한 정보의 관측, 자료처리, DB 구축, 효과적이고 정확도 높은 기법을 활용한 예측자료의 생산, 적정수준의 예보기준 그리고 예보자료의 전파가 필요하나, 현재로서는 도시침수예보를 위해 필요한 적절한 시공간적 범위, 예보 기준, 도시침수예보를 위한 체계 및 절차가 마련되어 있지 못한 실정이다.

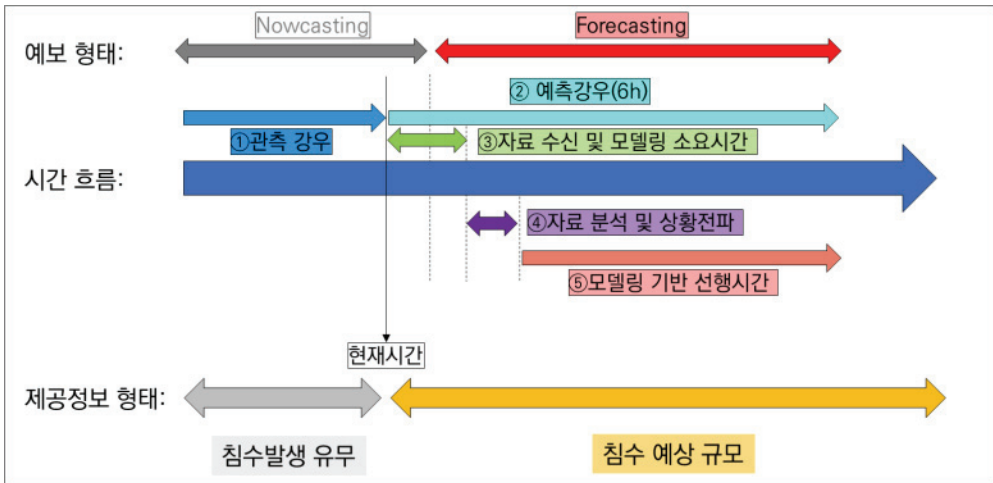
따라서 본 연구에서는 1) 도시침수예보의 시공간적 범위 제안, 2) 도시침수예보를 위한 정량적 기준 제시, 3) 도시침수예보체계 및 절차 제시를 통해 도시침수 피해저감을 위한 효과적인 도시침수예보제도 운영방안을 마련하고 향후 정책방향에 대한 제언을 연구의 목적으로 한다.

3. 도시침수예보의 개념 및 예보 형태

본 연구의 목적인 도시침수예보를 위한 시공간적 범위, 예보기준, 체계 및 절차(안)을 마련하기 위해서는 도시침수예보의 목적을 명확히 하고 이를 달성할 수 있는 도시침수예보의 개념을 설정할 필요가 있다.

도시침수예보의 목적을 명확히 하기 위해 우선적으로 법적 개념을 살펴보면 다음과 같다. 「도시침수방지법」 제1조에서는 제정목적으로 기후변화와 도시화에 따른 대규모 홍수에 적절하게 대응함으로써 도시하천 유역의 침수피해를 방지하기 위함을 제시하고 있으며, 제5조(기본원칙) 제3호에서는 도시침수에 대비하여 예보체계 구축과 대응방안 마련을 규정하고 있다. 또한 제15조(도시침수예보의 실시 등) 제1항에서는 환경부장관은 도시침수로 인한

침수피해를 예방하거나 경감하기 위해 필요한 경우 구역별로 도시침수예보를 실시할 수 있도록 하고 있다. 즉, 도시하천 구역의 침수피해를 예방하기 위한 목적으로 제정된 「도시침수 방지법」에서는 도시침수예보를 법 제정의 목적달성을 위한 수단 중 하나로 제시하고 있으며, 도시침수예보는 도시침수로 인한 침수피해를 예방하거나 경감하기 위한 수단이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 바탕으로 도시침수예보의 목적을 “도시침수의 발생유무와 예상 규모에 대한 정보를 생산하고 이를 관계 대응기관 및 일반 시민들에게 전파함으로써 도시침수로 인한 피해를 예방하거나 피해 규모를 줄이기 위함”으로 정의하고자 한다.



자료: 저자 작성.

〈그림 1-3〉 도시침수예보 종류와 제공정보 형태

도시침수예보를 통해 그 목적을 달성하기 위해서는 도시지역에서 발생할 수 있는 침수의 규모와 정도를 빠른 시간 안에 예측해 충분한 선행시간³⁾을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 침수의 발생 유무를 예측하기 위해서는 예측정보 생산에 필요한 자료를 관측하고, 관측된 자료를 빠르게 한 곳으로 모아 예측자료 생산을 위한 모델링을 수행해 결과를 도출해야

3) 도시침수의 발생 규모에 대한 예측이 끝난 시점으로부터 실제 도시침수가 발생할 것으로 예상된 시간까지를 선행시간이라는 용어로 표현함. 예를 들어 15시에 침수가 발생할 것이라는 정보의 생산이 14시에 이루어졌다면 선행시간은 1시간임.

한다. 도시침수예보를 위한 정보 생산의 절차는 <그림 1-3>과 같이 시간의 흐름에 따라서 현재 시간까지 ① 관측된 강우자료와 ② 예측강우를 이용해 모델링을 수행하고 도출된 자료를 분석한 후 예보기준에 부합하는 경우 정보를 ③ 전파하는 체계를 기본으로 한다. 이때 예보기준 부합여부와 상황전파 단계 이전에 관측 및 예측강우 ④ 자료를 수집하고 모델링을 하기 위한 시간이 필요하다. 결과적으로 현재시간을 기준으로 자료 분석 및 상황전파가 이루어진 이후부터가 실제 도시침수예보의 목적을 달성하기 위해 확보된 ⑤ 선행시간으로 볼 수 있다.

그러나 도시침수예보를 통해 침수로 인한 피해를 예방하거나 저감시키기 위해서 반드시 예측정보만 필요한 것은 아니다. 이미 침수가 발생해 접근이 위험한 지역이나 현재 침수가 발생하고 있는 지역의 위치와 위험 수준에 대한 정보를 제공해 일반 시민들로 하여금 해당 지역을 회피할 수 있도록 하는 것 역시 도시침수예보의 목적에 부합한다. 이미 침수가 발생했거나 침수가 진행 중인 지역에 대한 관측자료(data)는 그 자체가 정보(information)로서 의미를 가진다. 따라서 본 연구에서는 도시침수예보 형태를 예보에 활용되는 자료의 형태와 제공되는 정보의 형태를 다음과 같이 구분한 후 연구를 수행하고자 한다.

<표 1-2> 본 연구에서 정의한 도시침수예보 형태

예보형태	의미	활용자료
Nowcasting	- 관측자료를 기반으로 과거 또는 현재 도시침수 발생 유무에 대한 정보를 제공	관측자료
Forecasting	- 예측자료를 이용해 도시침수 예상 규모에 대한 정보를 제공	예측자료

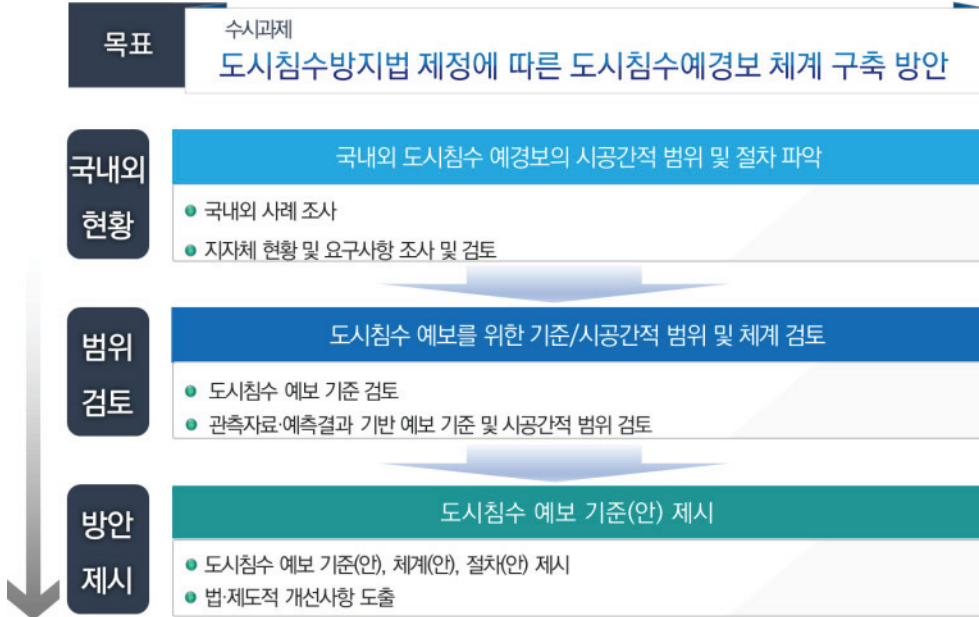
자료: 저자 작성.

4. 연구 추진체계

본 연구에서는 앞서 기술한 연구의 목적을 달성하기 위해 국내외 도시침수 사례조사를 기반으로 도시침수의 시공간적 범위, 예보기준과 절차를 파악하고, 도시침수예측시스템을 운영하고 있는 지자체 담당자와 면담을 통해 도시침수예보의 목적에 부합하는 시공간적

범위를 상정한 후 현재 활용되고 있는 기술의 적용 가능성을 검토하여 도시침수예보 체계 및 절차를 제시하고 향후 정책방향에 대한 제언을 수행한다.

연구추진 체계는 <그림 1-4>와 같다.



자료: 저자 작성.

<그림 1-4> 연구추진체계

제2장

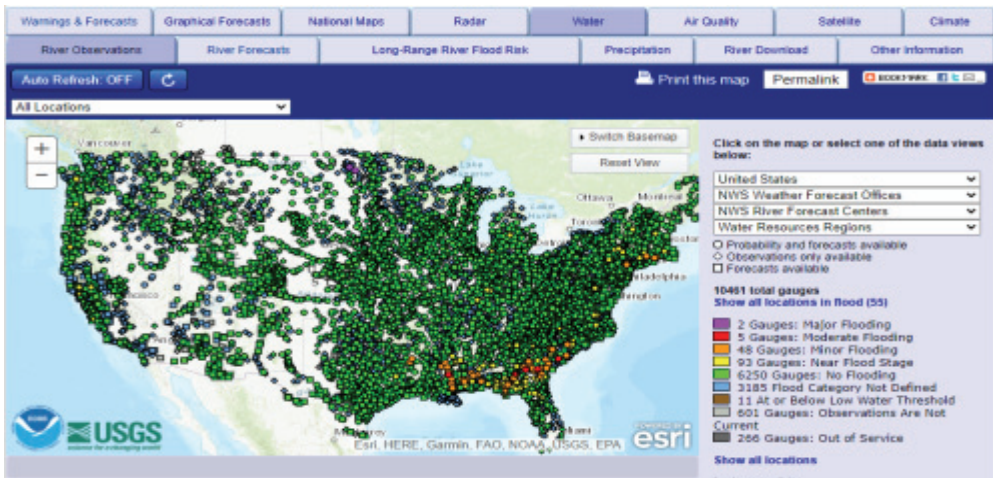
국내외 도시침수예경보 사례조사 및 요구사항 도출

1. 해외사례

가. 미국

1) 국가 홍수 예경보 체계

미국의 국가 단위 홍수 지도 및 예경보 체계 구축 주체는 국립해양대기국(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하 국립기상청(NWS: National Weather Service)이다.



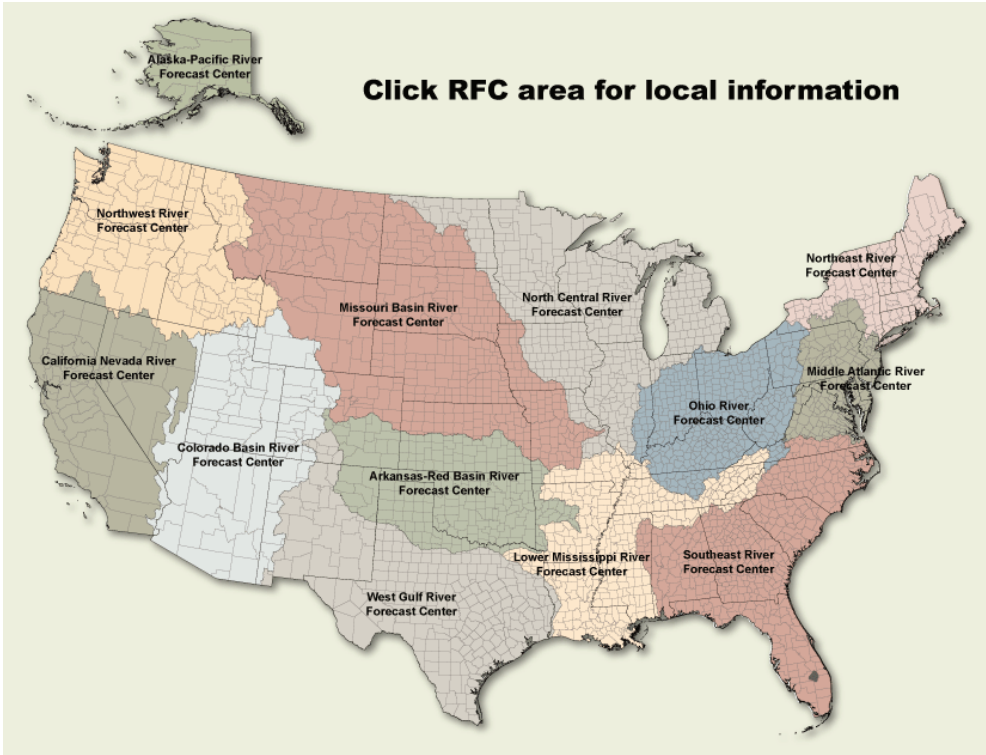
자료: National Weather Service, “Advanced Hydrologic Prediction Service”, 검색일: 2024.3.14.

〈그림 2-1〉 미국 국립기상청(NWS)의 홍수지도 및 예경보시스템(AHPS)

NWS는 미국 전역에 설치된 약 10,460개 계측기의 데이터를 기반으로 홍수지도 및 예경보 서비스(AHPS; Advanced Hydrologic Prediction Service) 시스템을 운영하고 있다(그림 2-1 참조). AHPS는 계측기별로 수위에 따라 Major Flooding, Moderate Flooding, Minor Flooding, Near Flooding Stage, No Flooding으로 구분하여 현재 상태를 표시한다.

홍수 예경보는 NWS의 하천예보센터(River Forecast Center)와 기상예보실(Water Forecast Offices)이 담당한다. NWS는 자연하천 유역 경계를 기준으로 전국에 13개의 하천예보센터를 두고 있으며, 각 센터는 돌발홍수능(Flash Flood Guidance) 등 다양한 기간별 홍수능(flood guidance) 및 예측정보를 제공하고 하천 예경보를 실시한다. 기상예보실의 업무는 돌발홍수(flash flood) 예경보 및 홍수대응으로, 행정구역 경계를 기반으로 122개가 존재하며 각각 20-50개 카운티(County)를 담당한다. 기상예보실은 하천예보센터에서 생성한 돌발홍수능(Flash Flood Guidance)을 기반으로 돌발홍수예보시스템(Flash Flood Monitoring and Prediction)을 이용하여 돌발홍수 주의보 및 경보를 발령하며, 해당 카운티 및 주의 비상재난담당관과 협력하여 홍수관리 및 대응책을 마련한다.⁴⁾

4) 서봉철, 이동률, 노희성(2020), p.58.



자료: National Oceanic and Atmospheric Administration, "River Forecast Centers", 검색일: 2024.3.11.

〈그림 2-2〉 국립기상청 하천예보센터(River Forecast Center)의 관할 구역

NWS의 홍수 예경보는 일반적인 홍수와 돌발홍수를 구분하며, 발생가능성, 심각성, 임박성에 따라 <표 2-1>과 같이 예경보의 종류가 구분된다. 예경보는 발령기준에 따라 크게 Watch, Advisory, Warning으로 나뉘는데, NWS는 발령기준을 발생확률이라는 정량적인 기준과 각 예경보의 의미에 해당하는 정성적인 기준으로 설명하고 있다. 발생확률이 50-80%인 경우는 Watch에 해당하며, 80% 이상일 때 Advisory나 Warning이 발령된다. Advisory와 Warning은 예상되는 홍수의 심각성과 임박성에 의해 구분된다. 대부분의 예경보는 홍수 발생 예상 수시간에서 수일 전에 발령되며, Flash Flood Warning은 그 특성상 수분에서 수시간 전에 발령된다.

〈표 2-1〉 국립기상청(NWS)의 홍수 예경보 종류 및 발령기준

종류	발령기준		발령시기
	발생확률	의미	
Flash Flood Warning	80% 이상	· 생명과 재산에 심각한 위협이 되는 돌발 홍수가 진행 중이거나 임박한 경우	수분~수시간 전
Flood Warning	80% 이상	· 생명과 재산에 심각한 위협이 되는 홍수가 진행 중이거나 임박한 경우	수시간~수일 전
Flood Advisory	80% 이상	· 홍수로 인해 심각한 불편을 초래할 수 있는 경우 · 발생 알림이 필요하나 Warning 수준으로 시급하지 않은 경우	-
Flash Flood Watch	50-80%	· 돌발홍수로 이어질 수 있는 현재 상황 알림 · 돌발홍수 발생이 확실하거나 임박하지는 않음	수시간~수일 전
Flood Watch	50-80%	· 홍수로 이어질 수 있는 현재 상황 알림 · 홍수 발생이 확실하거나 임박하지는 않음	수시간~수일 전

자료: National Weather Service, "Flood Related Products", 검색일: 2024.3.14를 활용하여 저자 작성.

NWS의 홍수 예경보는 어떤 정보를 제공하는지 살펴보기 위해 실제 발령된 Flood Warning을 검토해 보았다. 〈표 2-2〉는 NWS가 2024년 3월 10일에 발령한 Flood Warning이다. 우선 가장 기본적이며 중요한 정보가 WHAT, WHERE, WHEN으로 표시되어 있다. 현재 홍수의 정도("Minor flooding is occurring")와 향후 전망("Minor flooding is forecast"), 공간적인 정보("Presumpscot River at West Falmouth"), 시간적인 정보("Until tomorrow morning")가 제공되었다. 또한 현재 계측기의 수위, 지난 24시간 동안 최고 수위, 단기 전망 등 추가적인 정보도 담겨있다. 이에 더해 홍수로 인한 영향(impact)에 대한 정보와 행동 요령(Instructions)을 제공하고 있다는 점이 눈에 띈다. 현재 발생한 홍수가 영향을 줄 수 있는 도로, 공원 등에 대한 좀 더 구체적인 정보와 주의할 점이나 행동 요령을 제공함으로써 정보의 활용성을 높일 수 있을 것으로 보인다.

〈표 2-2〉 미국 국립기상청(NWS)의 Flood Warning(예)

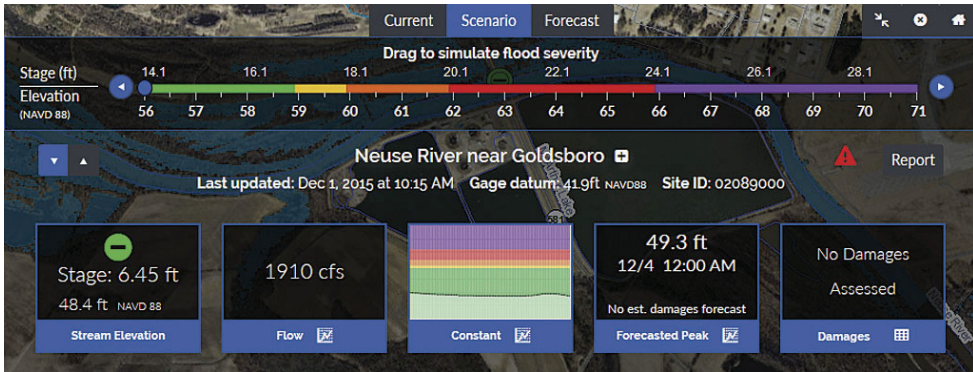
Flood Warning
Flood Warning issued March 10 at 10:49PM EDT until March 11 at 8:34AM EDT by NWS Gray ME ...The Flood Warning continues for the following rivers in New Hampshire...Maine...
Suncook River At North Chichester affecting Merrimack and Belknap Counties. Presumpscot River At West Falmouth affecting Cumberland County.
* WHAT...Minor flooding is occurring and minor flooding is forecast. * WHERE...Presumpscot River at West Falmouth. * WHEN...Until tomorrow morning.
* IMPACTS...At 16.0 feet, Minor flooding with water encroaching upon East Bridge Street in Westbrook and Route 302. Riverbank Park in Westbrook floods. Sappi Wastewater Drive access cut off by floodwaters.
* ADDITIONAL DETAILS... - At 10:30 PM EDT Sunday the stage was 15.8 feet. - Recent Activity...The maximum river stage in the 24 hours ending at 10:30 PM EDT Sunday was 16.2 feet. - Forecast...The river is expected to fall below flood stage just after midnight tonight and continue falling to 5.8 feet early Wednesday afternoon. - Flood stage is 14.0 feet.
Instructions Be especially cautious at night when it is harder to recognize the dangers of flooding. Turn around, don't drown when encountering flooded roads. Most flood deaths occur in vehicles. Caution is urged when walking near riverbanks.

자료: National Weather Service, "Alerts", 검색일: 2024.3.14.

2) 노스캐롤라이나주(North Carolina) 홍수 예경보 체계

노스캐롤라이나주는 허리케인 피해가 많은 지역 중 하나로 피해 예방 및 복구에 큰 노력을 기울이는 주이다. 1999년 허리케인 플로이드(Hurricane Floyd)로 심각한 피해를 입은 이후 침수지도프로그램(NCFMP: North Carolina Floodplain Mapping Program)이 수립되

있고, 이후 실시간 정보 제공을 위해 침수지도 및 경보네트워크(FIMAN: Flood Inundation Mapping and Alert Network)가 도입되었다. 주 전역에 걸쳐 미국 지질조사국(USGS: US Geological Survey)과 주정부에 의해 약 550개의 계측기(gauge)가 설치되었고, 15~30분 간격으로 데이터가 생산된다.⁵⁾ 이러한 관측 데이터를 기반으로 실시간 매핑, 예측, 위험도 분석, 경보 발령 등이 이루어지고 있다. FIMAN의 침수지도는 현재 상태(Current), 시나리오별(Scenario), NWS 예측 데이터를 기반으로 한 침수예측지도(Forecast)를 생산한다(그림 2-3 참조). 경보는 계측기 수위가 일정 수준을 넘어서면 이메일 및 문자로 발송되며, 내용은 해당 지역, 현재 홍수의 정도, 수위, 추세 정도로 비교적 간략하다.



자료: Dorman and Banerjee(2016), p.18.

〈그림 2-3〉 FIMAN 시스템의 대시보드(시나리오 옵션)

노스캐롤라이나는 FIMAN을 기반으로 도로, 교량 등 노스캐롤라이나교통부(NCDOT: NC Department of Transportation)의 자산에 관한 실시간 침수 영향 정보 제공을 위해 FIMAN-T(Flood Inundation Mapping and Alert Network for Transportation)도 구축하였다. FIMAN-T는 FIMAN이 제공하는 Current/Scenario/Forecast 기능에 더해 허리케인 등 기존 대규모 침수 정보 제공 기능(Historic)을 추가하였으며, 계측기가 설치된 지역의 도로와 교량에 대한 홍수 영향을 생산한다.

5) Dorman and Banerjee(2016), p.16.

나. 일본

일본의 도시침수예경보는 기상청이 법령에 의한 주관기관이며, 실질적으로는 기상청과 물관리국토보전국의 하천관리소가 공동으로 주관한다. 예경보는 재해의 종류와 관계없이 <그림 2-4>와 같은 5단계 기준이 적용된다.

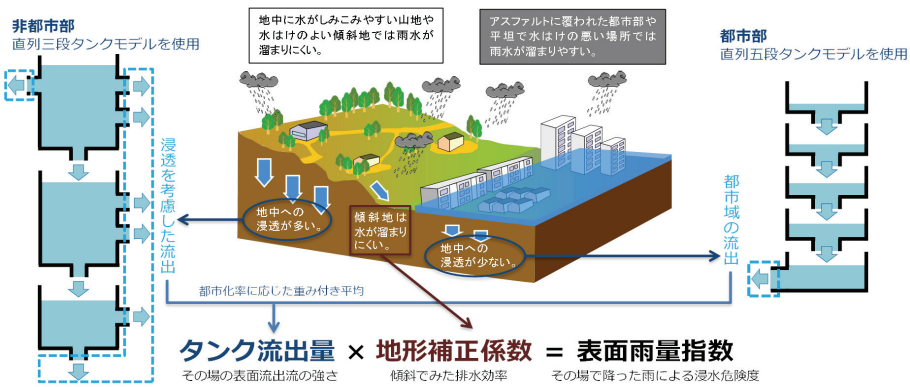
5-Level Warning System			
Warning Level	Action to take	Information provided by local government	Weather alerts issued by JMA
5	Must take measures to protect lives	Disaster information	Emergency warning
4	Must evacuate	Evacuation order / advisory	Landslide alert info. etc.
3	Elderly people must evacuate	Evacuation preparation information	Rain / flood / storm surge warnings etc.
2	Should check evacuation procedures	—	Rain / flood / storm surge advisories etc.
1	Should be on alert for disasters	—	—

자료: NHK World, “5-Level Warning System”, 검색일: 2024.1.13.

<그림 2-4> 일본의 재해 예경보 5단계

도시지역 집중 호우 관측을 위한 39기의 X-band 편파레이더를 설치하여 관측정보를 고도화하고 있으며 우량지수(토양, 표면, 유역)를 통한 예경보 체계를 가지고 있다. 침수 재해는 1시간 전 예측 강우량을 이용하여 산정하고 있으며, 침수예측정보를 생산하기 위한 기법 개발뿐만 아니라 침수예측정보의 정확도에 가장 큰 영향을 주는 강수 예측자료의 정확도 향상을 위한 노력도 병행하고 있다.

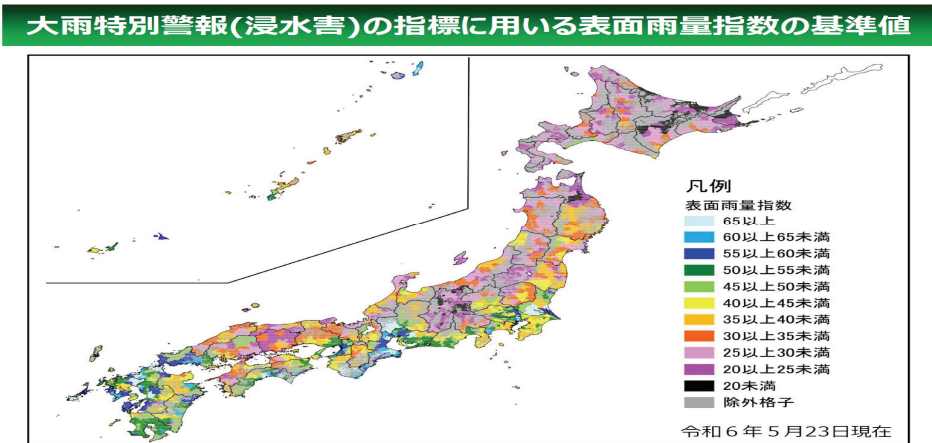
예보의 방식은 강우 예측자료를 이용해 표면우량지수를 기반으로 전 국토 행정구역 단위의 침수위험 정보를 제공하는 것이다.



자료: Japan Meteorological Agency, “표면우량지수”, 검색일: 2024.1.13.

〈그림 2-5〉 표면우량지수 산정 개념도

250m 격자를 이용해 도시지역은 5단 직렬탱크모형, 비도시지역은 지질에 따른 5종류의 3단 탱크모형으로 계산한다. 지형 기울기를 반영하기 위해 지형보정계수를 적용하며, 최종 표출은 250m 격자의 최대값을 이용해 1km 격자로 표현한다. 표면우량지수를 이용하는 이러한 방식은 도시지역의 복잡한 수리수문학적 현상 표현에는 제한이 있으나 침수발생 유무를 빠르게 제공할 수 있는 장점이 있다.

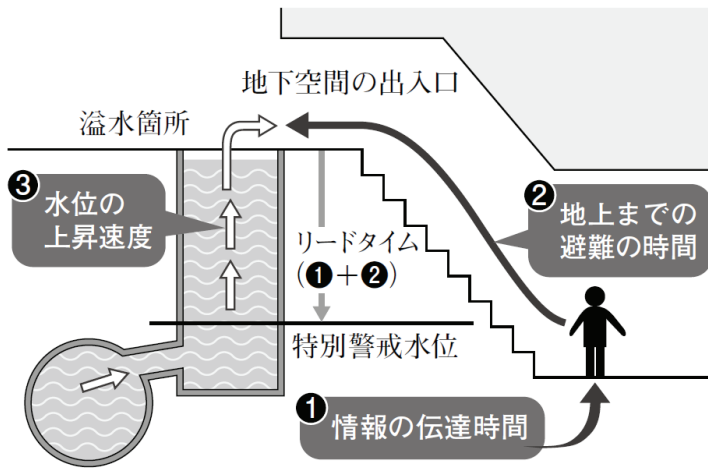


자료: Japan Meteorological Agency, “표면우량지수 기준치”, 검색일: 2024.1.15.

〈그림 2-6〉 호우특별경보(침수해)에 이용되는 표면우량지수 기준치

이와는 별도로 특정 목적 달성을 위한 별도의 예보체계도 존재한다. 「수방법(제13조)」에서는 도도부현지사와 시정촌장으로 하여금 공공하수도의 특별경계수위를 정하고 수위에 도달했을 때 수방관리자 및 일반 시민들에게 정보를 전파해야 한다고 규정하고 있다. 특별경계수위는 맨홀 수위가 급상승하는 경향을 고려해 짧은 리드타임을 인정하고 침수가 임박했을 때 발표하며, 주로 지하공간의 대피를 목적으로 활용한다.

図 3 特別警戒水位設定の概念図



(注) 国土交通省「雨水出水特別警戒水位の設定要領」より作成
 자료: NHK, “고조·내수범람위험정보의 신설”, 검색일: 2024.2.15.

〈그림 2-7〉 특별경계수위 설정 개념도

다. 스코틀랜드

1) 홍수 예경보 체계

스코틀랜드 환경청(SEPA)은 영국 기상청(Met Office)과 함께 홍수위험 평가를 실시하고 그 결과를 바탕으로 홍수예보를 시행하는 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS; Scottish Flood Forecasting Service)를 운영하고 있다. 홍수위험은 홍수의 영향(impact)과 발생 가능성(likelihood)에 기반하여 평가한다.

〈표 2-3〉 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS)의 홍수 영향(impact) 구분

단계	영향	대중(public)에 대한 의미
Minimal disruption	<ul style="list-style-type: none"> · 일반적으로 영향 없으나 · 저지대나 도로에 독립적이고 사소한 침수 가능 · 해안 도로나 산책로에 물보라나 파도 발생 가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 일반적으로 영향 없으나 일부 독립적이고 사소한 홍수가 발생할 수 있음 · 젖은 노면으로 인해 운전이 어려울 수 있지만 이동에 거의 지장을 주지 않음
Minor disruption	<ul style="list-style-type: none"> · 토지와 도로의 국지적 침수 · 개별 자산에 영향을 미치는 국지적 홍수 · 해안 지역의 개별 자산은 물보라 또는 파도의 범람으로 영향을 받음 · 국지적인 이동 중단 	<ul style="list-style-type: none"> · 국지적인 홍수가 발생할 수 있음 · 노면이 젖어 물이 고일 가능성이 있으며, 특히 문제가 있는 것으로 알려진 곳에 서는 더욱 그러함 · 국지적인 이동 중단 및 이동 시간 증대
Significant disruption	<ul style="list-style-type: none"> · 지역사회 일부에 영향 · 건물·구조물 손상 가능 · 빠른 유속, 깊은 물, 파도 범람, 파도 침수로 인해 생명에 위협 발생 가능 · 기반시설 중단 · 자산의 소규모 대피가 필요할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 토지, 도로, 재산이 침수될 가능성이 있음 · 이동 및 기반시설 중단
Severe disruption	<ul style="list-style-type: none"> · 지역사회 전체에 영향을 미치는 광범위한 홍수 · 건물·구조물 붕괴 가능 · 빠른 유속, 깊은 물, 파도 범람, 파도 침수로 인해 생명에 위협 있음 · 기반시설의 광범위한 중단 또는 손실 · 자산의 대규모 대피가 필요할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 광범위한 자산 침수 · 이동에 심각한 지장 · 가스, 전기, 물 공급 중단 · 지역사회에 심각한 혼란

자료: Met Office(2014), p.6의 내용을 바탕으로 저자 작성.

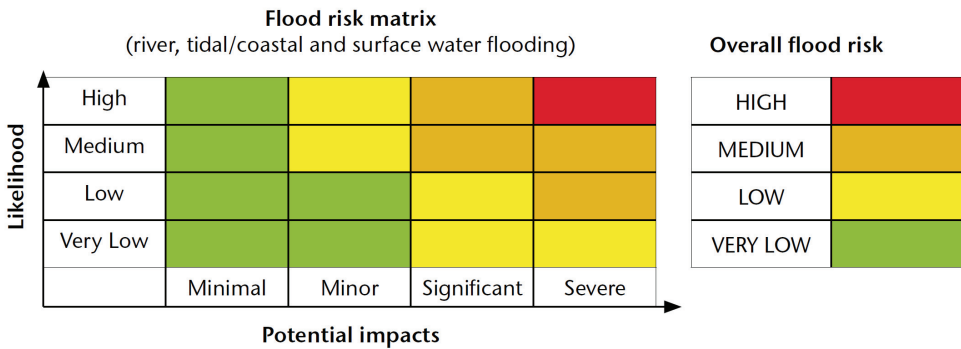
홍수의 영향은 그 정도에 따라 〈표 2-3〉과 같이 Minimal disruption, Minor disruption, Significant disruption, Severe disruption의 4가지로 구분된다. 각 단계는 홍수로 인한 영향이 어느 정도인지와 이러한 상황이 시민들에게 실제로 어떤 형태로 영향을 미칠 수 있는지를 설명한다. 발생가능성 역시 〈표 2-4〉와 같이 홍수 발생 가능성 20%, 40%, 60%를 기준으로 4단계로 구분된다.

〈표 2-4〉 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS)의 홍수 발생가능성(likelihood) 구분

단계	의미	기준
Very low	홍수 발생 가능하나 가능성이 높지는 않음	홍수 발생 가능성 20% 미만
Low	홍수 발생 가능	홍수 발생 가능성 20~40%
Medium	홍수 발생 가능성 높음	홍수 발생 가능성 40~60%
High	홍수 발생 예정 혹은 발생 중	홍수 발생 가능성 60% 초과

자료: Met Office(2014), p.6의 내용을 바탕으로 저자 작성.

SFFS는 위 두 가지가 결합된 홍수위험도 매트릭스(그림 2-8 참조)에 따라 전체적인 홍수 위험도를 평가하고 이와 같은 정보를 담은 Flood Guidance Statement를 매일 발행한다. Flood Guidance Statement는 비상대응기관을 대상으로 제공되며, 스코틀랜드 전역에 대해 향후 5일간의 홍수위험 정보를 담아 홍수 대응을 위한 전술적 계획 및 의사결정을 지원한다.






자료: Met Office(2014), p.3.

〈그림 2-8〉 스코틀랜드 홍수예보서비스(SFFS)의 홍수위험도 매트릭스

홍수 경보는 SEPA가 일반 대중을 포함하여 발령하며 Alert와 Warning으로 구분한다(표 2-5 참조). Alert는 넓은 지역을 대상으로 홍수 발생 가능성에 대한 일반적인 정보를 제공하고, Warning은 특정 지역에 임박한 홍수에 대한 정보를 제공하며 즉각적인 대응 행동을 요구한다.

〈표 2-5〉 스코틀랜드 홍수경보의 종류와 의미

종류	의미	공간범위	발령시기
Flood Alert 	홍수 발생 가능(possible) 대비 필요	regional areas	2시간~2일 전
Flood Warning 	홍수 발생 예정(expected) 즉시 행동 필요	local community areas	3~6시간 전
Severe Flood Warning 	심각한 홍수 발생 예정(expected) 생명 위험	local community areas	3~6시간 전

자료: SEPA, “Floodline - What are Flood Messages?”, 검색일: 2024.1.16의 내용을 바탕으로 저자 작성.

2) 홍수 예경보 발령 사례

스코틀랜드에서는 지난 2020년 8월 11~12일에 지역별로 시간당 50mm 이상, 일 106mm의 강우가 있었고 이로 인해 중부 및 동부지역에 대규모 돌발홍수가 발생했다.⁶⁾ 이와 관련하여 SEPA는 침수, 탈선, 대피 등을 포함하여 582건의 홍수피해를 수집한 바 있다.⁷⁾ SEPA는 홍수 이후에 당시 발생한 홍수 상황, 대응조치 등을 담은 보고서를 발간하였으며, 이를 토대로 당시 발령되었던 홍수 예경보 사례를 살펴보고자 한다.

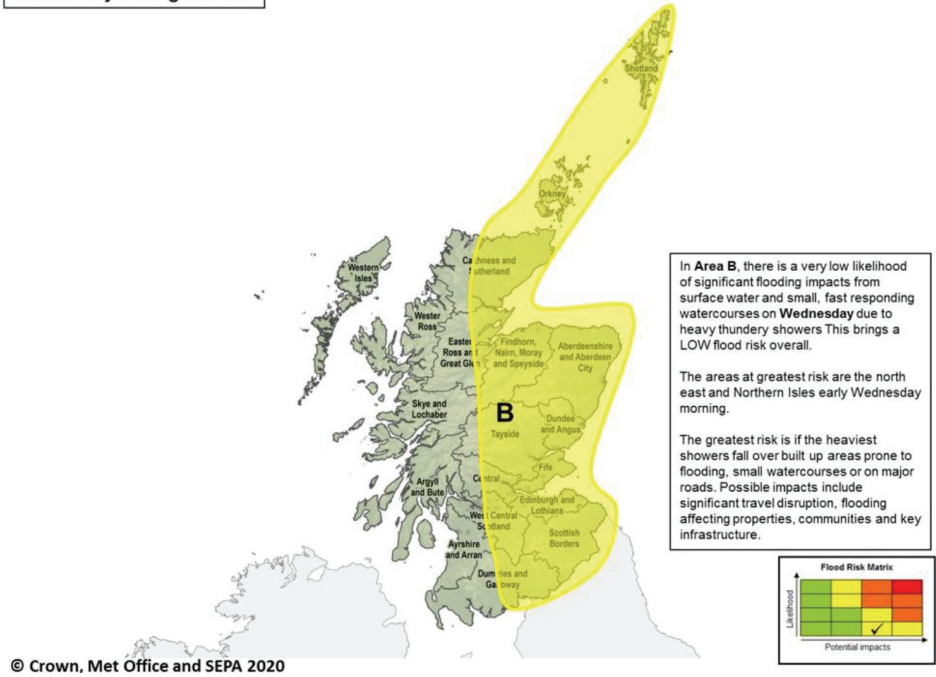
홍수 발생 3일 전이었던 8월 8일에 발간된 Flood Guidance Statement에서는 8월 10~12일에 “재산 침수 및 손상, 이동 및 기반시설의 중단이 발생할 수 있음”이라는 홍수 발생 예보 내용이 포함되었다. 이어 8월 9~11일에 발간된 Flood Guidance Statement에도 유사한 내용이 업데이트되었으며, 특히 8월 11일자에는 심각한 영향을 받을 것으로 예상되는 우려지역(Area of Concern)이 명시되었다(그림 2-9 참조).⁸⁾

6) SEPA(2020), p.3.

7) SEPA(2020), p.10.

8) SEPA(2020), p.12.

Wednesday 12 August 2020



© Crown, Met Office and SEPA 2020

자료: SEPA(2020), p.13.

〈그림 2-9〉 2020년 8월 11일자 Flood Guidance Statement의 Area of Concern 지도

SEPA는 8월 10일에 아래와 유사한 Flood Alert를 많은 지역에 발령하였다. 오후 2시 45분에 애버딘셔(Aberdeenshire) 및 애버딘시(Aberdeen City)에 발령된 Flood Alert의 내용은 아래와 같다.9)

애버딘셔와 애버딘시에 Flood Alert이 발령되었습니다. 화요일 아침부터 수요일까지 천둥이 많이 치는 소나기가 예상되고, 지표수와 작고 빠르게 반응하는 수로에서 홍수 영향을 일으킬 수 있습니다. 특히 위험한 곳은 도시지역과 교통망입니다. 운전에서 어려움이 있을 수 있습니다. 폭우의 국지적인 특성 때문에 모든 위치가 영향을 받지 않을 수 있습니다. 갑작스러운 홍수 영향은 하루 중 언제든지 발생할 수 있습니다.

9) SEPA(2020), p.12.

다음 날인 8월 11일 오후 12시 35분에 발령된 Flood Alert 역시 유사한 내용을 담고 있으며, 진행 상황에 대해 업데이트된 정보를 담고 있다.¹⁰⁾

화요일과 수요일에 천둥이 많이 치는 소나기가 예상되고, 지표수와 강으로부터 홍수 영향을 일으킬 수 있습니다. 특히 위험한 곳은 도시 지역과 교통망입니다. 운전 전에 어려움이 있을 수 있습니다. 폭우의 국지적인 특성 때문에 모든 위치가 영향을 받지는 않을 수 있습니다. 갑작스러운 홍수 영향은 하루 중 언제든지 발생할 수 있습니다. 가장 큰 위험은 화요일 저녁부터 수요일 새벽까지입니다. 부동산, 지역사회 일부, 이동 및 기반시설이 원활하게 작동하지 않을 수 있습니다

홍수 예보에 해당하는 Flood Guidance Statement는 매일 발행되며 향후 5일간의 전망을 담고 있어 비상대응기관이 사전 준비 및 대응을 할 수 있도록 지원하는 역할을 한다. 이는 특정 지역에 발령하는 특보의 개념이 아니며, 따라서 정량적인 침수심이나 침수 면적을 언급하지 않는다. 홍수로 인해 심각한 영향이 발생할 것으로 예상되는 경우 우려지역을 지도상에 표시하여 제공하지만, 이 역시 특정 지점이 아닌 영향을 받을 수 있는 지역을 전반적으로 표현하는 형태이다.

Flood Alert는 Flood Guidance Statement와 비교해 좀 더 구체적인 정보를 전달한다. 우선 발령되는 특보의 수준이 Alert인지 Warning인지와 함께 공간적 범위, 시간적 범위를 명시한다. 공간적 범위는 Flood Guidance Statement보다는 구체적이지만 역시 특정 지점이 아닌 행정구역 단위로 제공하며, 시간적 범위는 홍수 영향이 예상되는 기간으로 제시한다. 또한 이러한 홍수로 인해 발생할 수 있는 영향(도시 지역과 교통망, 운전 어려움, 이동 및 기반시설 중단)을 고지함으로써 대응 행동을 유도한다. 마지막으로 불확실성(국지적인 특성, 홍수 영향은 언제든지 발생 가능)을 명시하여 주의를 환기한다.

10) SEPA(2020), p.12.

2. 국내사례

가. 국내 타 분야 예경보시스템 현황

본 절에서는 국내도시침수예경보시스템 사례 조사 및 지자체 담당자 면담을 통해 도시침수 예경보 제도의 실효성 있는 제도 안착을 위한 시공간적 범위 도출에 앞서 도시침수예보 체계에서 고려해야 할 시사점을 도출하기 위해 타 분야 예경보시스템에 대한 사례조사를 수행한다.

1) 산불예보

산불예보는 아래와 같이 「산림보호법」 제32조에 근거하여 산림청장에 의해 발령된다.¹¹⁾

제32조(산불경보의 발령 및 조치) ① 산림청장은 「재난 및 안전관리 기본법」 제38조 제1항 본문에 따라 산불재난 국가위기경보(이하 “산불경보”라 한다)를 발령할 수 있다. 이 경우 산불경보의 발령기준은 대통령령으로 정한다. ② 산림청장, 지방자치 단체의 장, 산림청 소속 기관의 장 또는 국립공원공단 소속 공원사무소의 장은 산불 경보가 발령되면 대통령령으로 정하는 산불경보별 조치기준에 따라 입산 통제 등 필요한 조치를 하여야 한다.

산불경보는 관심, 주의, 경계, 심각한 4단계로 구성되며 산불위험지수와 해당 지역의 확산에 따라 발령된다. 또한 각 단계별로 대응 인력 배치 및 조치기준을 상세히 규정하고 있다.

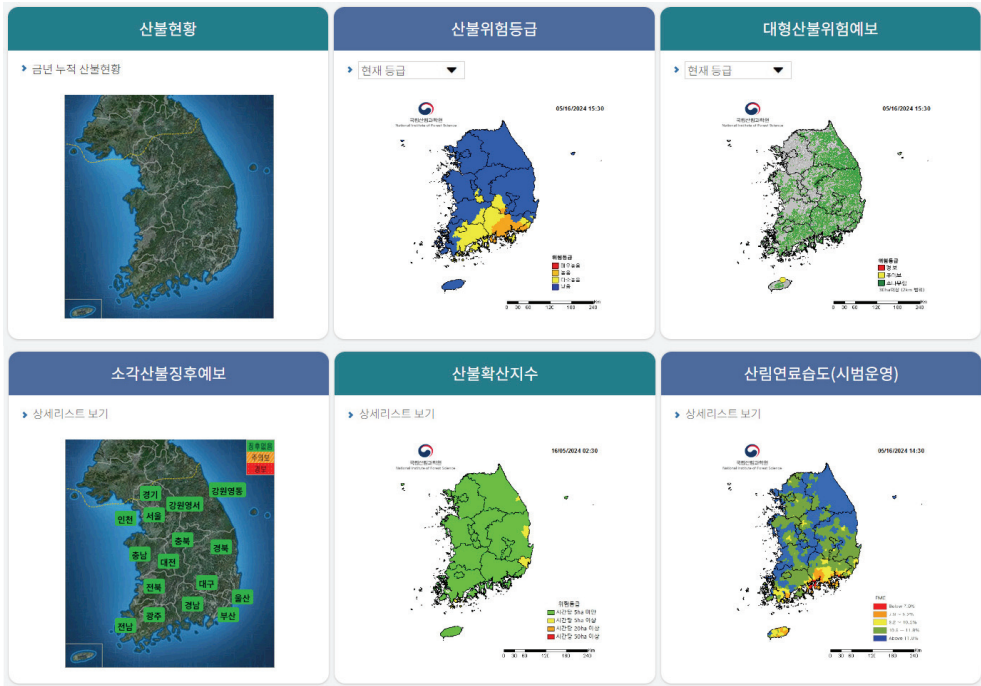
11) 국가법령정보센터, “산림보호법”.

〈표 2-6〉 「산림보호법 시행령」의 산불경보 단계 및 조치

산불 경보 구분	발령기준	소속 공무원·직원의 산불 발생 취약지 배치 또는 비상대기 인원 기준	조치기준
관심	· 산불 발생시기 등을 고려하여 산불 예방에 관한 관심이 필요한 경우로, 주의 경보 발령 기준에 미달되는 경우	· 산불방지대책본부에 속한 상황근무요원을 배치·대기	· 입산통제구역 등 산불 발생 취약지에 감시인력 배치
주의	· 전국의 산림 중 법 제31조의제 1항에 따른 산불위험지수가 51 이상인 지역이 70% 이상이거나 산불 발생의 위험이 높아질 것으로 예상되어 특별한 주의가 필요하다고 인정되는 경우		· 산불 발생 취약지에 산불 전문예방진화대 고정 배치 · 공무원 담당 지역 지정
경계	· 전국의 산림 중 산불위험지수가 66 이상인 지역이 70% 이상이거나 발생한 산불이 대형 산불로 확산될 우려가 있어 특별한 경계가 필요하다고 인정되는 경우	· 소속 공무원 또는 직원의 6분의 1 이상을 배치·대기 · 소속 사회복지요원의 3분의 1 이상을 배치·대기	· 입산통제구역 등 산불 발생 취약지에 감시인력 증원 · 공무원의 담당 지역 주 2회 이상 순찰 또는 단속 활동 · 산림 및 산림인접지역에서의 불 놓기 허가 중지
심각	· 전국의 산림 중 산불위험지수가 86 이상인 지역이 70% 이상이거나 산불이 동시다발적으로 발생하고 대형 산불로 확산될 개연성이 높다고 인정되는 경우	· 소속 공무원 또는 직원의 4분의 1 이상을 배치·대기 · 소속 사회복지요원의 2분의 1 이상을 배치·대기	· 민간·사회단체 및 산불유관 기관의 산불 예방활동 참여 · 공무원의 담당지역 주 4회 이상 순찰 또는 단속활동 · 군부대 사격훈련 자제 · 입산통제구역 입산허가 중지

자료: 국가법령정보센터, “산림보호법 시행령”, [별표1의9], [별표2].

산림청은 지형, 임상, 기상 자료를 이용해 산불위험등급을 4단계(위험낮음, 보통, 높음, 매우 높음)로 산정해 예보한다. 국가산불위험예보시스템은 산불현황, 산불위험등급, 대형산불 위험예보, 소각산불징후예보, 산불확산지수, 산림연료습도 등에 대한 정보를 지역별 격자 단위로 제공하고 있다. 산림청의 예보제도는 산불감시, 산불발생시 대응, 진화에 중점을 두어 운영되고 있으며, 이는 산불의 발생 기작에 근거한 예방 및 대응 목적으로 볼 수 있다.



자료: 국가산불위험예보시스템, “홈페이지 캡처화면”, 검색일: 2024.2.16.

〈그림 2-10〉 산림청 국가산불위험예보시스템 제공 정보

2) 하천홍수예보

환경부장관은 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」(이하, 수자원법)에 의거하여 홍수통제소장에 위임하여 홍수예보를 실시한다. 홍수통제소장은 홍수로 인명과 재산에 대한 피해가 예상될 때 하천변 도로, 철도 및 주요시설의 침수위험 정보, 하천구역 및 그 배후 지역의 예측수위 정보, 친수지구의 홍수위험 정보, 그 밖에 홍수피해를 예방하거나 줄이기 위하여 필요한 정보 등을 제공하는 홍수예보를 실시한다. 또한 홍수로 인명과 재산에 대한 중대한 피해가 예상될 때에는 특별한 주의를 요구하거나 경보를 하는 홍수특보를 발령한다.¹²⁾ 홍수특보는 <표 2-7>과 같이 홍수특보지점의 수위를 기준으로 홍수주의보와 홍수경보로 구분된다.

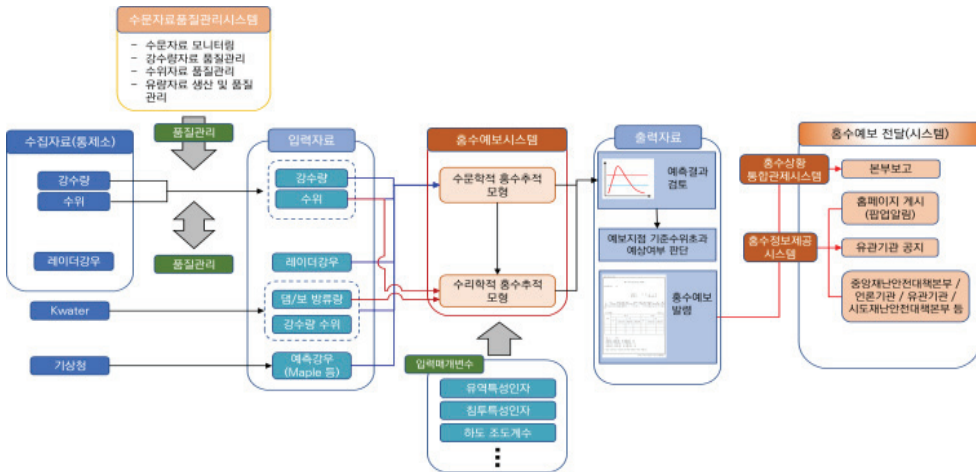
12) 국가법령정보센터, “수자원법 시행규칙”.

〈표 2-7〉 「수자원법 시행규칙」의 홍수특보 발령 기준

구분	발령 기준
홍수주의보	하천의 수위가 계속 상승하여 다음 각 사항에 따른 수위를 고려하여 정한 홍수특보지점의 기준수위(이하 “주의보수위”라 한다)에 가까워지거나 이를 초과할 것이 예상되는 경우 1) 계획홍수량의 100분의 50에 해당하는 유량이 흐를 때의 수위 2) 최근 5년의 평균 저수위로부터 계획홍수위까지 100분의 60에 해당하는 수위 3) 1) 및 2)에 따른 기준을 적용하기 곤란한 경우에는 주변상황 및 제방 정비상태를 고려한 수위
홍수경보	하천의 수위가 계속 상승하여 다음 각 사항에 따른 수위를 고려하여 정한 홍수특보지점의 기준수위(이하 “경보수위”라 한다)에 가까워지거나 이를 초과할 것이 예상되는 경우 1) 계획홍수량의 100분의 70에 해당하는 유량이 흐를 때의 수위 2) 최근 5년의 평균 저수위로부터 계획홍수위까지 100분의 80에 해당하는 수위 3) 1) 및 2)에 따른 기준을 적용하기 곤란한 경우에는 주변상황 및 제방 정비상태를 고려한 수위

자료: 국가법령정보센터, “수자원법 시행규칙”, [별표1].

1974년 건설부 소속 한강홍수통제소 신설(대통령령 제1787호) 이후 수십 년간의 강수량, 하천수위 등의 수문자료 계측 및 품질관리 기술 축적에 기반한 하천 홍수예보시스템이 구축 운영되고 있다. 하천홍수예보는 〈그림 2-11〉과 같이 자료수집, 품질관리, 자료 입력, 수치 모의, 결과 검토, 예보발령의 절차를 통해 이루어진다.



자료: 환경부 도시침수대응기획단(2023.11)을 이용하여 저자 작성.

〈그림 2-11〉 하천홍수예보 업무 흐름도

3) 기상예보

기상청장은 「기상법」에 의거하여 기상현상에 대한 예보 및 특보를 실시한다. 「기상법」은 예보를 “기상관측 결과, 수치예측 결과, 기후정보 등을 기초로 한 예상을 발표하는 것”으로 정의하고 있으며, 특보는 “기상현상으로 인하여 중대한 재해가 발생할 것이 예상될 때 이에 대하여 주의를 환기하거나 경고를 하는 예보”로 정의하고 있다.¹³⁾

일상적인 예보와 중대한 재해가 발생할 것이 예상될 경우 경고의 목적으로 발령하는 특보로 구분하고 있으며, 특보는 각 기상현상에 의한 영향의 정도에 따라 주의보와 경보로 구분한다. 「기상법 시행령」은 이러한 주의보 및 경보 발령을 위한 정량적 기준을 명시하고 있으며, 일기예보를 위한 항목, 시간, 선행시간 등도 규정하고 있다. 호우에 대한 주의보 및 경보 발령 기준은 <표 2-8>과 같다.

<표 2-8> 「기상법 시행령」의 호우 특보 발령 기준

종류	주의보	경보
호우	3시간 누적강우량이 60mm 이상 예상되거나 12시간 누적강우량이 110mm 이상 예상될 때	3시간 누적강우량이 90mm 이상 예상되거나 12시간 누적강우량이 180mm 이상 예상될 때

자료: 국가법령정보센터, “기상법 시행령”, [별표1].

기상예보는 예측 시간에 따라 초단기예보, 단기예보, 중기예보, 장기예보, 기상전망으로 구분된다. 초단기예보는 기온, 강수량, 강수형태 등 기상실황과 강수형태, 강수량 등 예보 요소에 대하여 6시간 이내의 기상상황을 발표하는 것이며, 이 중 강수량은 실황에서부터 12시간까지 10분 단위로 발표한다. 단기예보는 최장 3일까지 예보하며, 중기예보는 단기예보 이후 향후 10일까지를 예보한다. 또한 장기예보는 기압계, 기온, 강수량에 대해 1개월 전망과 3개월 전망을 예보하며, 기후전망은 계절기후전망과 연기후전망으로 구분된다(표 2-9 참조).

13) 국가법령정보센터, “기상법”.

〈표 2-9〉 기상예보의 종류

구분	예보기간	
초단기예보	현재 상황에서부터 6시간 이내의 기상상황을 1시간 간격으로 발표(갱신주기: 10분) 기온, 강수량, 강수형태, 상대습도, 풍향, 풍속 등 6개의 기상실황과 강수형태, 강수량, 하늘 상태, 낙뢰, 기온, 습도, 풍향, 풍속 등 8개의 예보요소를 발표 ※ 강수량은 실황에서부터 12시간까지 10분 단위로 발표(갱신주기: 10분)	
단기예보 (동네예보)	정시기온, 최고·최저기온, 강수형태, 강수확률, 강수량, 적설, 하늘상태, 풍향, 풍속, 습도, 파고 등 12개 요소를 1시간 단위로 최장 3일까지 예보 (일 8회 발표: 02, 05, 08, 11, 14, 17, 20, 23시)	
중기예보	단기예보 이후 향후 10일까지의 기상전망, 육상·해상 날씨, 최고·최저기온, 파고를 오전/오후로 나누어(8~10일은 하루 단위) 예보(일 2회 발표: 06, 18시)	
장기예보	1개월 전망	4주간의 주별 기압계 전망, 기온 및 강수량 예보(매주 목요일 발표)
	3개월 전망	3개월간의 월별 기압계 전망, 기온 및 강수량 예보(월 23일 발표)
기후전망	계절기후전망	발표일 다음 계절의 평균기온과 강수량, 엘니뇨/라니냐 전망(연 4회 발표)
	연기후전망	발표일 다음 해의 평균기온과 강수량, 엘니뇨/라니냐 전망(연 1회 발표)

자료: 기상청, “기상예보”, 검색일: 2024.1.15.

기상예보를 위해서는 기상상황에 대한 관측, 생산된 기상자료를 수집·처리·분배하는 기상 정보통신, 관측 자료를 분석하는 수치예측, 예보의 생산 및 전파 등의 절차를 거친다. 기상예보를 위한 자료 수집 및 분석 절차를 도식화하면 〈그림 2-12〉와 같다. 기상예측 모델은 선행시간이 길어질수록 해상도와 정확도는 낮아진다. 따라서 이러한 수치모의 결과의 한계성을 인정하고 수치예보 결과에 예보관의 전문적인 지식과 경험을 기반으로 예보를 생산한다.



자료: 기상청(2020), pp.12-13.

〈그림 2-12〉 기상예보 업무 흐름도

나. 국내 도시침수예경보시스템 현황조사

국내 도시침수예경보시스템 현황은 문헌조사, 면담(방문/화상)조사, 서면조사 방법을 통해 진행하였으며, 현행 도시침수예경보시스템을 구축·운영 중인 광주광역시, 부산광역시는 문헌·면담조사를, 서울특별시는 문헌·서면조사를 활용하였다. 이 외에 청주시의 침수예경보 시스템, 국립재난안전연구원의 도시침수 모니터링 시스템 사례에 대해서는 관련 문헌자료(연구보고서, 논문), 언론자료 등을 통해 살펴보았다.



자료: 저자 작성.

〈그림 2-13〉 국내 도시침수예경보시스템 현황조사 개요

조사 과정에서 진행한 도시침수 예측시스템 업무를 수행하는 지자체 담당자와 면담조사는 실제 현장에서의 현황 파악(도시침수 예측시스템 필요성 여부, 구축·운영 과정에서 제도적·기술적 한계점 등)을 가능하게 하여 개선 방안의 실효성 제고를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 이러한 조사 목적을 고려하여 연구진 논의를 통해 구조화된 조사지를 작성하였고, 사전에 관련 담당자에게 해당 조사지를 배포한 후 진행하였다.

1) 서울특별시, 내외수 연계 통합 침수예측 시스템

가) 도시침수 예측시스템 운영·관리 현황

서울시는 2010년, 2011년 집중호우로 인한 침수 피해를 바탕으로 34개소의 상습 침수 취약 지역을 선정하고, 해당 지역 대상으로 하수관거 정비, 펌프장 신·증설, 저류조 신설 등의 배수 개선 사업을 2011년 3월부터 진행하였다.¹⁴⁾ 그러나 2018년 기습폭우로 인해 중랑천 월릉교 부근 차량이 침수되는 사건으로 인명피해가 발생하였다.

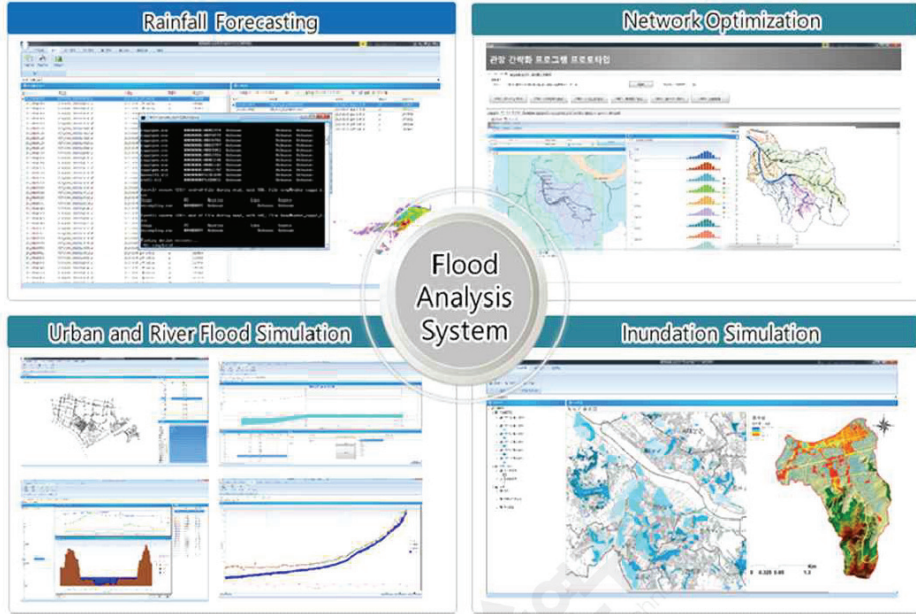
이러한 피해 경험을 바탕으로 서울시는 방재시설물 확충 등의 구조적 대책과 함께 침수지역에 대한 예측 등의 비구조적 대책 수립의 중요성을 인지하였고, ‘서울시 강한 비구름 유입 경로 및 침수위험도 예측 용역(2018~2019년)’ 사업 수행을 통해 레이더를 이용한 실시간 초단기 강우 예측, 강우시나리오 기반 침수위험지역 추정 기술이 적용된 서울시 도시침수 예측시스템을 개발하였다(심재범 외, 2020, p.341). 연이어 ‘서울시 내수침수 위험지역 실시간 예측기술 개발(2019~2020년)’ 사업을 통해 침수피해에 선제적 대응을 하고자 예측시스템을 개선하였다(심재범 외, 2021, p.481).

해당 시스템은 서울시 전역의 강우 정보와 침수 정보를 제공하며, 관로 113,286개(전체 385,768개), 맨홀 106,097개(전체 272,133개), 빗물펌프장 117개소(전체 121개소)가 반영되어 있다(심재범 외, 2021, p.481). 또한 서울시 25개 자치구를 대상으로 실황-예측 강우 정보, 강한 비구름에 대한 이동경로정보, 시나리오 및 실시간 침수정보를 제공하고 있다. 강우정보는 10분 및 1시간 단위 AWS 실황정보와 10분 단위 이류모델 기반 예측정보, 1시간 단위 LDAPS 기반 예측정보를 제공한다. 또한, 레이더 실황정보를 통해 판별된 강한 비구름에 대해 10분 단위 1시간 예측경로를 제공한다. 침수정보는 총 강우량, 강우지속기간, 빗물받이 효율 조건을 반영한 강우시나리오 기반의 6m 고해상도 격자단위 침수시나리오 정보와 자치구별 침수위험정보를 제공하며, 레이더 예측정보를 이용하여 실시간 침수 예측정보를 제공한다(심재범 외, 2021, p.481).

서울시 침수예측 시스템은 2023년 10월 준공되었고, 그해 수방기간 시범운영으로 실제 예측정보의 정확성을 검토하고 있는 중이다. 계속해서 올해에도 시범운영 중으로, 자치구

14) 서울정보소통광장(2022.3.31), “34개 침수취약지역 해소사업 추진현황”, 검색일: 2024.1.15.

확산 운영 목적으로 관리되고 있다.¹⁵⁾



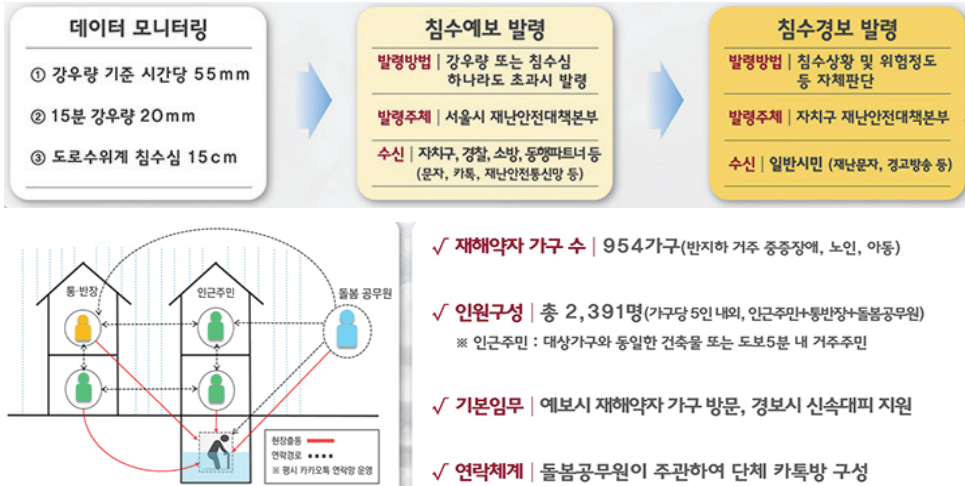
자료: 윤선권, 최현석(2019), p.33.

〈그림 2-14〉 서울특별시, 내외수 연계 통합 침수예측 시스템

나) 도시침수 예측시스템 실효성 및 활용 기대효과

서울시는 침수예측 시스템을 기반으로 ‘2023년 풍수해 안전대책’을 수립하였으며, ‘침수 예경보제’를 시행 중이다. 서울 전역에 설치된 강우량계와 도로수위계에서 일정 기준 이상 강우와 수심이 측정되면 침수 예경보가 발령된다. 발령 수신을 받은 자치구, 경찰, 소방, 동행파트너들은 비상연락체계를 통해 동행파트너 주민들과 재해약자에게 발령상황 등을 전파하고, 동행파트너 주민들은 연락을 받는 즉시 재해약자 가구에 출동하여 대피를 돕는다. 즉, 서울시 재해대책본부에서는 ‘데이터 모니터링’과 ‘침수예보발령’을, 자치구 재해대책 본부에서는 ‘침수경보발령’을 담당한다(그림 2-15 참조).

15) 서울특별시 서면조사(2024.3.18).



자료: 내 손안에 서울(2023.6.26), “전국 최초 침수 예경보제 도입…서울시 풍수해 안전대책”, 검색일: 2024.4.3.

〈그림 2-15〉 서울특별시, 침수 예경보 체계

이와 같은 서울시 도시침수예경보 체계 구축은 도시침수 예측시스템의 실효성을 보여준다. 현행 서울시 데이터 모니터링을 보면 강우량, 도로 침수심, 맨홀 수위, 레이더 영상 등 관측 자료를 주로 활용하고 있으며, 예보를 위한 선행시간에 대한 기준이 불확실하다. 그러나 서울 전역의 침수 발생 가능성을 실시간 예측하기 위한 ‘침수예측 정보시스템’이 실제 운영된다면 침수발생 가능성이 있는 지역 예측으로 선제적 대응이 가능하기 때문이다. 이처럼 선제적 대응을 통한 피해 최소화라는 도시침수 예측시스템의 실효성은 서울특별시 담당자의 서면조사에서도 확인할 수 있다.

“예측시스템은 정확한 정보를 전달하는 것이 아니라 향후 예측 가능한 최악의 침수 정보를 사전에 제공함으로써 더 큰 피해를 막고자 하는 데 그 목적이 있으므로, 실효성은 충분히 있다고 판단된다. 지자체에서 우리 동네의 침수 위험을 사전에 알고 미리 대비해 줄 수 있다는 믿음만으로도 시민들에게는 안도감을 줄 수 있다. 다만, 그 예측의 신뢰도가 너무 낮다면 시민들이 느끼는 체감도가 낮을 수 있으므로 어느 정도의 정확성은 담보가 되어야 할 것이다.”

서울특별시 도시침수 예측시스템 업무 담당자(2024.3.8), 서면조사

다) 도시침수 예측시스템 구축·운영 과정에서의 한계점

서울시의 경우 도시침수 예측시스템을 구축하고 운영하는 과정에서 가장 어려웠던 점은 ‘침수예측을 위한 대용량 데이터 분석’이다. 무엇보다 도시침수는 순식간에 피해 범위와 규모가 확대되기 때문에 데이터 분석 과정에서 신속함이 무엇보다 중요하게 작용한다. 그리고 어느 정도 ‘예측결과의 정확도’도 중요한 요인이다.

“강우 시 실시간으로 침수를 예측하기 위해서는 **대용량의 데이터를 순식간에 분석해야 가능하다**. 이러한 **데이터 분석 로딩 시간을 줄이는 것이 원활한 시스템 운영 및 업무 활용에 중요한 점**이며, 또한 실제 침수 현상을 어느 정도 정확히 예측해 줄 수 있는지 **예측 결과의 정확도**가 무엇보다 중요하다.”

서울특별시 도시침수 예측시스템 업무 담당자(2024.3.8), 서면조사

현행 구축되어 있는 서울시 도시침수 예측시스템은 작년부터 올해까지 시범사업으로 운영 중인데 이는 ‘침수예측 정보의 신뢰성 확보’를 위함이다. 정보의 신뢰성 확보는 현실을 반영할 수 있는 기초 데이터의 품질, 분석 프로그램의 정교성이 중요하다. 그 중에서도 기상청에서 제공하는 강우 예측 정보의 정확성이 침수예측 정보의 핵심이다. 이는 시스템을 운영하는 과정에서 인력의 전문성과 연계되는 문제로, 담당자는 ‘매년 반복되는 여름철 기상 상황을 반영한 시스템 고도화’와 ‘실시간 강우사상 학습을 통한 예측 정보의 검증과 보정을 스스로 수행하는 AI 예측시스템 개발·발전’이 필요함을 강조한다.¹⁶⁾

2) 광주광역시, 디지털 트윈기반 도시침수 스마트 대응 시스템

가) 도시침수 예측시스템 운영·관리 현황

광주광역시는 2020년 8월, 송정역 일대 폭우로 인한 침수, 붕괴 피해가 발생하였다. 당시 광주광역시는 도로, 주택 침수 등의 시설피해로 인해 8개 마을 412명의 이재민 발생, 도로, 주택 침수 등 시설피해 793건이 발생하였다.¹⁷⁾ 특히 피해가 많았던 광산구와 북구에서는

16) 서울특별시 서면조사(2024.3.18).

17) 무등일보(2020.8.8), “500mm 물폭탄 전남 사망 8명… 광주 송정역 일대 침수 등”, 검색일: 2024.4.3.

사망 2명, 실종 1명이라는 인명피해와 함께 약 1,400억 원이라는 시설피해가 발생하였다. 사건발생 이후 도시침수예경보 필요성이 지역 내에서 인지되기 시작하였고, 2022년 ‘도시 침수 스마트 대응시스템 실증사업’에 선정되어 과학기술정보통신부, 환경부, 광주광역시, 경상북도, 경상남도가 ‘디지털 기술 활용 도시침수 공동대응 협약’ 체결을 진행하였다. 이에 광주광역시 광산구에 도시침수 스마트 대응 시스템이 구축되었고, 2024년 기준 디지털 트윈 결괏값 일치 정도에 대한 실증 사업(2년 예정)이 진행 중이다.¹⁸⁾

해당 시스템은 상습 침수지역 대상으로 침수피해를 최소화하기 위한 디지털 트윈 기반 스마트 예측과 긴급대응시스템으로, 클라우드 기반 공통플랫폼을 구축하여 각 지자체 시스템과 연계·구축하는 방식으로 추진되었다.¹⁹⁾ 도시침수 공통플랫폼에는 디지털 트윈 기반 AI 도시침수 예측과 통합분석 시뮬레이션, 도시침수 관련 지자체 데이터 수집이 이루어지며, 예측·분석 결과는 해당 지자체로 연계된다. 지자체 시스템에는 해당 지역 공간정보, 실시간 IoT 데이터 수집·관리, 실시간 지역침수상황 모니터링, 주민 알림서비스(IaaS)가 구축된다.²⁰⁾ 즉, 공통플랫폼을 운영·관리하는 홍수통제소의 지속적인 운영과 표준적인 도시침수 대응 기반 확산의 용이성, 공통 기능 구축으로 인한 예산절감이 가능하다.²¹⁾

〈그림 2-16〉과 같이 광산구는 해당 시스템을 구축하여 실증사업을 진행 중이며, 현재 시스템을 통해 모니터링이 가능한 공간적 범위는 광산구 면적의 약 1/3 수준으로 구축되어 있다. 시스템 운영·관리 업무 담당 인력은 1인이며, 특보 발생 시에 재난관리 시민안전과와 재난안전대책본부가 모두 시스템을 운영·관리하는 인력으로 투입된다.²²⁾

18) 광주광역시 대면조사(2024.3.13).

19) 환경부 보도자료(2023.4.12), p.5.

20) 환경부 보도자료(2023.4.12), p.5.

21) 환경부 보도자료(2023.4.12), p.5.

22) 광주광역시 대면조사(2024.3.13).



자료: 저자 촬영.

〈그림 2-16〉 광주광역시 광산구, 디지털 트윈기반 도시침수 스마트 대응시스템

나) 도시침수 예측시스템 실효성 및 활용 기대효과

현재 예측시스템을 구축·실증 중에 있어 담당자가 시스템의 실효성에 대해 구체적으로 응답하기에는 한계가 있었다. 다만 광주시에서 시스템 활용을 통한 기대효과는 크게 3가지로, 상습 침수지 대상 사전대비, 도시침수 발생으로 인한 대피 근거자료 확보, 시스템 활용을 통한 업무 효율성 증대이다. 특히 도시침수 발생으로 주민 대피과정에서 실제 현장업무 담당인 기초 지자체의 경우 모니터링 기반 침수 위험이 인지되어 재난안전대책본부 구성·운영 과정에서 대피계획 사전수립이 신속한 재난대응을 가능하게 하기 때문이다. 이러한 시스템 기대효과는 다음의 면담조사 과정에서 확인된다.

“... (중략) ... 이 시뮬레이션을 돌렸을 때 사람이 여기 좀 피해가 있을 것 같다 할 경우에 저희 대책본부 회의를 통해서 그럼 **미리 이렇게 대피 계획을 세운다든지** 저희가 대피를 했을 때 그 사람들이 임시대피소 ... 사실 이제 그 대피소도 좀 문제가 있거든요 저희가 **갑자기 연락을 하면은 거기 안에서 준비가 필요한데 준비 안 되니까** 미리 이런 경우 조금 상황이 일어날 수 있으니까 준비를 해라. 그래서 저희가 이제 좀 **근거 자료로 활용할 계획**입니다.”

광주광역시 도시침수 예측시스템 업무 담당자(2024.3.13), 대면조사

이러한 기대효과 중 ‘도시침수 발생으로 인한 대피 근거자료 확보’는 현행 도시침수 발생 시 대응체계의 한계점과 연계된다. 광산구를 포함한 지자체들은 「재난 및 안전관리기본법」(제34조의5) 근거로 총 41개 재난유형별 위기관리 매뉴얼을 작성해야 하며, 이때 시·군·구에서는 실제 임무를 수행하는 기관의 행동조치 절차를 구체적으로 제시하는 ‘현장조치 행동 매뉴얼’을 작성한다. 그리고 실제 재난 발생 시 피해 규모, 범위 등을 고려하여 지역 재난안전대책본부가 시·도, 시·군·구에 설치·운영되며, 시(市) 재난안전대책본부가 설치되면 구(區) 재난안전대책본부는 무조건 설치·운영되어야 한다.²³⁾ 재난안전대책본부는 관할 구역 재난을 수습하고 총괄·조정, 필요조치(예경보 발령, 동원명령, 대피명령 등)를 이행하게 되는데, 도시침수예경보 필요 상황 판단 후 해당 지역 주민들의 대피를 위한 준비시간으로 최소 1시간이 필요하다. 그러나 현재 침수예측 정보들이 1시간 전에 제공되지 못하기에 현장에서 신속한 대응을 위한 근거자료 활용목적으로 도시침수 예측시스템의 실효성 확보를 가능하게 한다. 다음은 침수예측 시스템의 정확도가 70~80%로 개선되어 예측정보를 제공할 경우 어떻게 활용할 지의 질문에 대한 담당자의 응답 내용이다.

“... (중략) ... 대피보다는 사전 준비를 미리 할 것 같아요. **사전 준비** 아까 말씀 드렸드시피 대피소에도 미리 준비를 하고 대피소 문만 딱 열어놓으면 저희가 되는 게 아니고 어떤 물품도 준비를 해야 되거든요. ... (중략) ... 필요한 거 있으면 그때 이제 동원 체계를 동원해가지고 조금 장비라든지 이런 걸 미리 받거나 이런 준비 단계로 하는 **준비 단계로 많이 쓸 것 같아요.**”

광주광역시 도시침수 예측시스템 업무 담당자(2024.3.13), 대면조사

다) 현행 도시침수 대응체계 한계점

현행 도시침수 대응체계의 한계점으로는 ‘부적절한 정보 제공 시기’였다. 위에서 언급한 바와 같이 실제 도시침수가 발생할 경우 현장 대응 과정에서 담당자들은 계측자료와 CCTV 모니터링 자료를 기반으로 침수 발생 예상지역에 투입·배치된 공무원들의 현장 상황 전달 자료를 통해 의사결정을 하고 있다.²⁴⁾ 이는 정보의 활용성 측면을 고려하여 ‘도시침수예경

23) 국가법령정보센터, “재난 및 안전관리기본법”.

보를 위한 시간적 범위 기준 설정'이 필요함을 나타낸다.

또한 '과도한 정보 제공으로 인한 판단 근거 활용 불가'도 문제점으로 나타났다. 관련 유관기관들이 각각 제공하는 정보는 지자체에서 상황을 판단하기 위한 근거로 활용하기에는 예측 결과가 상이하며, 특정 기관의 예측 결과 정보를 활용하는 근거가 마련되어 있지 않아 책임성 소재의 문제로 연계될 가능성이 높기 때문이다. 이는 타 재난 대비 침수상황이 시작 되면 단 몇 분 내로 피해범위가 확대될 수 있는 도시침수의 특성을 고려하였을 때 '통합정보 제공'이 필요함을 보여준다.

“ ... (중략) ... 사실 거의 그냥 저희는 그거 보지는 못해요. 볼 시간이 없어요. 사실 이제 지금 잘 안 보시니까 여기 사실 CCTV가 저희 안에 여기 120대가 넘거든요. 저희는 특보가 떨어지면 타 기관에서 보내주는 정보를 보기 전에 **저희 내부에 있는 데이터로 개체 상태로 먼저 확인**을 하기 때문에 ... (중략) ... **15분 전, 20분 전에 주는 정보는 이미 상황이 종료**되고 제가 봐요. 저희가 가장 크게 보는 게 **댐 개방한 거, 기상정보** 이런 걸 많이 보고요. **그 외에 데이터는 사실 조금 너무 늦어**요. 저희가 이제 현장 근무자들에게 연락을 해야 하고 시설 관리하는 근무자들에게도 연락을 해야하기 때문에 거기 중간에 오고가는 문자를 보고 있을 시간이 없어요.”

광주광역시 도시침수 예측시스템 업무 담당자(2024.3.13), 대면조사

3) 부산광역시, 도시침수 통합정보시스템

가) 도시침수 예측시스템 운영·관리 현황

부산광역시는 시스템별로 분산되어 있는 침수 관련 데이터를 통합정보로 재생성함으로써 침수 대응 과정에서 신속한 의사결정을 위해 구축하였다. 또한 내부적으로 활용되던 침수 관련 정보를 시민들에게 상시 제공함으로써 침수 대응 체계 변경의 전환점을 마련하고자 구축하였다.

〈그림 2-17〉에서 보는 바와 같이 해당 시스템에서는 침수 대응을 위한 다양한 정보를 제공하고 있다. 먼저 기상관측정보로 하천수위, 풍향풍속, 조위, 기상청 강우정보를 확인할

24) 광주광역시 대면조사(2024.3.13).

수 있으며, 지점별 침수센서 수치와 실시간 재해 대피경로, 도로통제상황을 지도에서 확인할 수 있다. 또한 현재 위치 또는 지도상 위치의 행정동 단위로 도시침수 위험상태를 안내하고 있다. 그 외에 도심, 하천, 해안의 집중호우에 따른 침수 위험 지도 제공 및 침수 위험 지역 3D자료 등의 정보를 제공하고 있다. 이는 부산시가 구축·운영 중인 도시침수 통합정보 시스템은 예측을 위한 시스템이 아닌 정보제공을 위한 시스템이기 때문이다.



자료: 부산시 도시침수 통합정보시스템 홈페이지, “메인화면”, 검색일: 2024.4.3.

〈그림 2-17〉 부산광역시, 도시침수 통합정보시스템

나) 도시침수 예측시스템 구축·운영 과정에서의 한계점

현재 부산시가 운영하고 있는 통합정보시스템에서 예측정보를 생성하기 어려운 이유는 강우량에 따른 침수시점, 침수범위, 침수정도에 대한 예측이 실질적으로 불가능하기 때문이다. 불가능한 이유에 대해 도시침수 통합정보시스템 담당자는 3가지를 제시하였다. 첫째, 침수 확인 관측장비 침수감지기 수량의 절대적 부족이다. 현재 침수감지기 수량은 48개로 법정동 정보제공을 위해 필요한 최소 187개 대비 약 1/4 수준이다. 둘째, 침수예측 알고리즘이 적용가능한 고도화된 환경이 미구축되어 있다는 점이다. 셋째, 부산시 지역의 특성상 조위 영향과 경사지형이 많아 침수 예측에 어려움이 있다는 점이다²⁵⁾. 이에 해당 시스템은 현재

데이터를 수집하여 서버에 저장만 하고 있으며, 저장된 데이터를 활용할 수 있는 방법이 미흡한 상황에서 정보제공에 중점을 두고 운영되고 있다. 이는 기상 관측 데이터, 강우량, 도시침수 센서 등 빅데이터 활용 분석이 가능한 인공지능 분석 알고리즘 등 시스템 구축의 필요성을 보여준다.

또한 도시침수예경보에 대한 법적 기반의 미흡함을 예측시스템 구축에 있어 한계점으로 제시하였다. 현재 도시침수 부분과 관련하여 조례 등에 시스템의 의무적인 설치가 제시되어 있지 않아, 소화전 설치 등과 같은 의무조항이 담긴 법률적 정비가 필요하다. 예를 들어 100mm 이상 폭우가 내리는 경우에 예방하기 위해 도시침수 예측 시스템 설치·운영 의무화를 법률적으로 정비할 수 있다.

4) 그 외 도시침수 예측시스템 구축 사례

가) 청주시, 도시침수 시뮬레이션 시스템

청주시는 2017년 7월 16일 집중호우로 인해 인명피해 24명, 이재민 875가구 2,158명이 발생하는 피해²⁶⁾를 경험한 후 ‘하수도정비 중점관리지역’으로 지정되었다. 이에 하수관로 정비, 빗물펌프장 설치 등의 사업추진이 이루어졌고, 자연재해 저감 종합계획 내수 재해 지역에 도시침수 시뮬레이션 시스템을 구축하였다(서용원 외, 2022, p.72).

서용원 외(2022) 문헌을 통해 조사한 청주시 도시침수 시뮬레이션 시스템은 관내 ‘하수도 정비 중점관리지역’과 ‘자연재해저감 종합계획 내수 재해 지역’ 대상으로 구축되었다. 이 시스템은 반복적으로 침수되는 지역 대상으로 배수 능력을 개선하기 위한 것으로, 도시환경과 하천 홍수터 내 흐름을 분석하기 위한 1차원 모델(1D), 지표면 침수를 예측하기 위한 2차원 모델(2D)을 결합한 동적 통합 모델이다. 이는 수위계 수위, 배수문 운영정보, 기상청 강우 데이터를 연계하여 실시간 시뮬레이션 분석을 통해 침수가 예상되는 범위를 예측하여 대상 지역을 관리하는 데 활용된다(서용원 외, 2022, p.72).

구체적으로 살펴보면, 청주시에서 구축한 시스템은 기상청 6시간 초단기 예보와 계측

25) 부산광역시 면담(화상)조사(2024.2.15).

26) 청주시(2018), pp.595-596.

강우에 따른 실시간 시뮬레이션 분석 기반 실시간 내수 침수예측 정보를 제공한다. 특히 기상청 초단기 예보 데이터를 포함하여 각종 DB, 통신 시스템, 결과 저장장치 등을 실시간으로 연결하기 위해 ICM Live 프로그램을 활용하여 침수분석 목적의 ImfoWorks ICM과 연결하고, ICM Live로부터 나오는 침수 결과 파일을 통합 플랫폼과 연결한다는 점에서 타 모니터링 시스템과 차별화를 확보하고 있다(김진형, 목지윤, 2023, p.78).



자료: 서용원 외(2022), p.72.

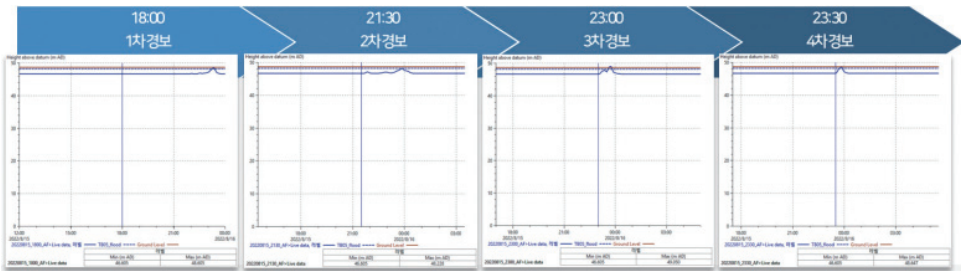
〈그림 2-18〉 청주시, 도시침수 시뮬레이션 시스템 개요도

또한 도시침수 시뮬레이션 시스템을 재난안전 통합 플랫폼과 연계하여 활용하고자 하는데, 재난안전 통합 플랫폼은 청주시가 국지성 집중호우, 폭설 등이 증가함에 따라 선제적이고 근본적인 대응을 위해 2018년부터 2021년까지 구축하였다. 이에 도시침수 시뮬레이션 분석 결과 기반 월류(越流)가 발생할 경우 재난안전 통합플랫폼과 시스템 경보설정을 통해 운영자 경보 알림으로 활용이 가능하다(서용원 외, 2022, p.72).



자료: 김진형, 목지윤(2023), p.78.

〈그림 2-19〉 청주시(90mm/hr) 강우 침수예측도(좌), 침수예측 경보 발령 내용 예시(우)



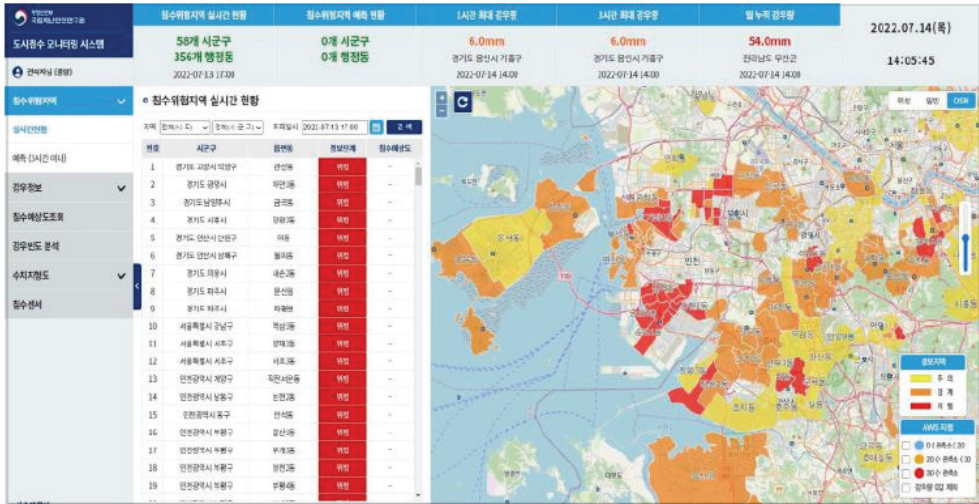
자료: 김진형, 목지윤(2023), p.79.

〈그림 2-20〉 2023년 8월 15일 충북대 정문에 대한 실시간 침수예측 경보(맨홀)

나) 국립재난안전연구원, 도시침수 모니터링 시스템

국립재난안전연구원에서는 침수상황 관리를 위해 침수위험 기준을 설정하고, 상황 발생 시 의사결정을 지원하고자 GIS 기반 OSM 위에 실시간 관측·예측 강우 현황을 표출하는 ‘도시침수 모니터링 시스템’을 개발하였다. 해당 시스템의 주요 기능은 크게 3가지로

① 행정동별 침수위험 기준을 설정하여 3단계 침수 경보 제공, ② 강우 현황 모니터링, 실시간 강우빈도 분석 기능 제공, ③ 침수발생 위험성이 높은 시범지역 대상 시나리오별 침수예상도 제공이다(강호선 외, 2022, pp.36-37).



자료: 조재용 외(2022), p.39.

〈그림 2-21〉 국립재난안전연구원, 도시침수 모니터링 시스템

해당 시스템은 전국 약 630여 개의 기상관측소(ASOS, AWS)에서 측정되는 1분 단위 강우데이터를 수집하여 15분, 30분, 1시간, 3시간, 1일 최대 누적 강우량을 실시간으로 제공한다. 또한 행정동별 설정된 단계별(주의, 경계, 위험) 침수 위험 기준을 통해 위험 알람 발령을 가능하게 하는데(강호선 외, 2023, p.462) 이때 침수 위험 기준은 위험단계별로 한계강우량 대비 일정 비율을 적용하여 설정한다.

제3장

도시침수예경보 기준 및 절차 검토

1. 도시침수예경보 기준 검토

가. 국내 도시침수예경보 기준 검토

본 연구에서는 국내 도시침수예경보 기준을 검토하기 위해 서울시 도시침수예경보제도, 도림천 홍수경보 기준, 한국과학기술정보연구원(KISTI), 행정안전부, 재난안전연구원에서 활용되고 있는 예경보 기준과 침수 판단 기준에 대한 사례조사를 수행하였으며 그 결과는 <표 3-1>과 같다.

사례조사 결과 서울시에서 운영하고 있는 침수예경보 체계에서는 도시침수 위험 단계를 예보와 경보로 구분하였으며, 예보단계에서는 시간당 강우량이 55mm를 초과하는 경우, 15분당 강우량이 20mm를 초과하는 경우 그리고 도로 수위계 침수심 측정값이 15cm를 초과하는 경우에 대해서 예보를 발령하고 있으며, 현장 확인 후 위험여부에 따라서 경보 단계를 발령하고 있는 것으로 파악되었다²⁷⁾.

도림천 홍수경보 기준은 둔치경보와 홍수경보로 구분되어 있다. 둔치경보는 주의, 대피 등 2단계로 구분되어 있으며, 홍수경보의 경우 주의, 경보, 범람 등 3단계로 구성되어 총 5단계 기준을 가지고 있는 것으로 파악되었다. 둔치경보의 경우 하천둔치 내에 있는 시민들을 하천 밖으로 이동시키기 위한 기준이며 홍수경보는 하천범람에 따른 위험정도에 대한 단계별 경보로서 위험정보를 제공하고 있는 것으로 파악된다. KISTI에서 제시한 침수위험 기준은

27) 서울특별시(2023.3.10), “전국 최초 ‘침수 예·경보제’ 시행… ‘동행파트너’가 약자대피 지원”, 검색일: 2024.3.5.

10cm 이상 침수가 예상되는 경우 관리자에게 관련 정보를 통보하고, 30cm를 기준으로 침수 유무를 판단하는 것으로 파악되었다. 그러나 제시된 수치에 대한 기준이 어떤 방식으로 산정되었는지에 대한 근거는 제시하지 않았다. 행정안전부에서는 도심 및 농어촌의 주거·상업·산업단지의 침수유무 판단 기준으로 30cm를 제시하고 있으나 역시 관련 근거는 명확히 제시하고 있지 않다. 재난안전연구원에서 제시한 기준은 침수발생 위험과 침수 판단 유무로 구분할 수 있다. 먼저 침수발생 위험에 대한 정보를 제공하는 한계강우량 적용시 침수 발생 위험에 대해 주의, 경계, 위험 등 3단계로 구분해 알림을 제공하고 있으며, 침수유무 판단의 경우 도로 연석 높이를 활용해 20cm를 적용하고 있다.

〈표 3-1〉 국내 도시침수예보기준

구분	기준		비고
서울시	예보	· 시간당 강우량 55mm 초과 · 15분당 강우량 20mm 초과 · 도로수위계 기준 침수심 15cm 초과	· 침수 예경보제(2023.3.10) · 정량적 기준 선정에 대한 근거 미제시
	경보	· 현장 확인 후 위험여부에 따라 발령	
도립천	둔치 경보	· 1단계(주의): 하천 밖 이동 · 2단계(대피): 하천 밖 대피	· 특정 수심을 기준으로 설정 · 둔치경보는 하천 공간 이용 주민을 대상으로, 홍수경보는 하천 범람에 따른 위험도를 기준으로 설정
	홍수 경보	· 3단계(주의): 경계수위 도달 · 4단계(경보): 위험수위 도달 · 5단계(범람): 주민 대피	
KISTI	· 10cm 이상 관리자 통보 · 30cm 침수 판단		· 정량적 기준 선정에 대한 근거 미제시
행정 안전부	· 30cm		· 도심 및 농어촌의 주거·상업·산업단지 · 침수 여부만 판단
재난안전 연구원	· 주의 · 경계 · 위험		· 지속시간별 한계강우량 적용 · 침수발생 가능성에 대한 등급 기준
	· 침수유무 판단		

자료: 최우정 외(2014); 윤선권, 김민석, 최현석(2021), p.17; 김광영, 양명석(2023), p.19; 국가법령정보센터, “재해지도 작성 기준 등에 관한 지침”을 활용하여 저자 작성.

본 연구에서 조사된 도시침수예보기준을 종합적으로 검토한 결과 여러 기관에서 개별 상황에 따른 별도의 기준을 적용하고 있는 것으로 파악되었다. 그러나 기준 선정 및 적용에 대한 명확한 근거가 제시되어 있지 않으며 침수발생 유무 및 침수위험 정도에 대한 기준이 혼재되어 있는 것으로 파악되었다. 이러한 경우 개별상황에 따라 적합한 기준이 적용되어 상황에 따른 목적을 달성할 수 있을 것으로 판단되나 전국적인 예보 기준으로는 적합하지 않다. 따라서 도시침수예경보 목적에 부합하고 타당한 근거를 가진 기준을 제시할 필요가 있다.

나. 정량적 기준 검토

본 절에서는 도시침수예보기준의 목적을 ‘도시침수로 인한 인적·물적 피해 최소화’로 상정하고 도시침수예보를 위한 정량적 기준을 검토하고자 한다. 이를 위해 도시지역에 활동하는 일반 시민과 도시지역의 일반적인 운행 수단인 자동차를 기준으로 각각 기준을 검토하고자 한다. 일반 시민들의 경우 침수발생시 피난에 가장 취약할 것으로 판단되는 ‘외부 활동이 자유로운 아동’을 기준으로 검토하였으며, 자동차의 경우 운행시 차량내부 빗물 유입 및 엔진 정지 상황을 기준으로 검토하였다.

1) 아동 피난 기준

외부 활동이 자유로운 아동의 피난 기준을 검토하기에 앞서 침수 발생시 피난이 가능한 수준을 파악하기 위해 선행연구를 조사하였으며 그 결과는 <표 3-2>와 같다.

Suga et al.(1994)은 아동과 성인을 대상으로 평지에서 침수심과 유속에 따른 보행대피 한계를 파악하기 위해 침수심에 따른 심리적 영향과 그에 따른 피난 속도를 파악하는 연구를 수행한 바 있다. 연구 결과 성인과 어린이 모두 수심이 무릎까지 오는 경우 대피가 가능했으나 수심이 무릎을 초과하는 경우 공포심을 느낌에 따라 피난 속도가 저하되는 결과를 보고하였다. 강상혁(2003)은 평균신장 174cm, 평균체중 65kg, 20대 후반 및 30대 초반의 성인을 대상으로 침수심과 유속 그리고 보행속도를 파악하는 연구를 수행하였다(강상혁, 2003, p.564). 그 결과 침수심이 무릎 위(0.55m)일 때 독자적인 움직임에 제약을 받아 개수로의

고정상에 의지가 필요함을 파악하였으며 유속이 0.9m/s인 경우 보행이 불가능함을 보고한 바 있다(강상혁, 2003, p.564). Ishigaki et al.(2005)은 여성 16명, 남성 33명을 대상으로 지하공간 침수 대피 실험을 수행하였으며, 그 결과 계단 대피가 가능한 한계수심은 0.3m, 출입문 개방 시 외부 한계 수심은 0.4m임을 보고하였다(Ishigaki et al., 2005, pp.1118-1122). 주재승, 김태훈(2015)은 성인의 평균 신장기준을 기준으로 침수심이 발목(0.17m), 정강이(0.35m) 그리고 무릎(0.45m) 높이 일 때의 상황을 가정하여 지하공간 대피 실험을 수행한 바 있다(주재승, 김태훈, 2015, p.192). 그 결과 난간이 없는 경우 대피 한계수심은 0.35m, 출입문 개방 시 외부 한계수심은 남성 0.5m, 여성 0.4m임을 보고하였다(주재승, 김태훈, 2015, p.195).

〈표 3-2〉 적정 피난 침수심에 관한 연구 사례

연구자	기준	비고
Suga et al. (1994)	· 아동과 성인을 대상으로 평지에서 침수심과 유속에 따른 보행대피 한계 파악	· 성인과 어린이 모두 수심이 무릎까지 오는 경우 대피 가능 · 수심이 무릎을 초과하는 경우 공포감으로 피난 속도 저하
강상혁 (2003)	· 평균신장 174cm, 평균체중 65kg, 20대 후반 및 30대 초반	· 보행속도와 침수시, 유속 사이의 관계 도출 · 침수심 0.55m(무릎 위)일 때 개수로 고정상 의지 필요 · 유속 0.9m/s인 경우 보행 불가능
Ishigaki et al. (2005)	· 여성 16명, 남성 33명을 대상으로 지하공간 침수 대피 실험 수행	· 계단 대피시 한계수심: 0.3m · 출입문 개방 시 외부 한계수심: 0.4m
주재승, 김태훈 (2015)	· 성인의 평균 신장기준 발목(0.17m), 정강이(0.35m) 그리고 무릎(0.45m) 높이 일때 상황을 가정하여 지하공간 대피 실험 수행	· 난간이 없는 경우 계단 대피 한계수심: 0.35m · 출입문 개방 시 외부 한계수심: 0.5m(남성), 0.4m(여성)

자료: Suga et al.(1994); 강상혁(2003); Ishigaki et al.(2005); 주재승, 김태훈(2015)을 활용하여 저자 작성.

선행연구 사례조사에서 확인할 수 있듯이 침수가 발생하면 단순히 침수심과 유속 뿐만 아니라 침수상황에서 심리적 상태 역시 위험상황에서 벗어나기 위해 매우 중요하게 고려되어야 하는 요소임을 알 수 있다. 이에 따라 침수 발생시 정량적인 침수심 수치가 아닌 사람의 무릎 높이부터 공포감에 의해 대피 능력이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는

외부활동이 자유로운 어린이의 무릎높이를 기준으로 침수예경보 기준을 제시하기 위해 국가 기술표준원(2015)에서 제시한 한국인 인체치수조사 사업의 연령별, 성별 신체지수를 이용해 초등학생의 무릎높이로 환산하고 그 결과를 제시하고자 한다.

〈표 3-3〉 연령별, 성별에 따른 평균 무릎 높이 비율

구분	연령(만)	① 평균 무릎높이(cm)	② 평균신장(cm)	③ 비율(①/②)
남자	16	45.1	173.68	0.259673
	17	45.2	161.39	0.280067
여자	16	41.7	174	0.239655
	17	41.5	161.5	0.256966

자료: 국가기술표준원(2015), p.141; 통계청, “시·도별 학생표본 신체(키) 검사 현황”, 검색일: 2024.2.15를 활용하여 저자 작성.

2) 자동차 운행가능 기준 검토

도시침수가 발생하면 도로 위를 운행하고 있는 자동차의 운행에 심각한 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 그 중 가장 먼저 영향을 받는 것으로 차량 하부 높이 이상으로 도로가 침수되어 차량 안으로 빗물이 유입되는 상황과 이후 침수심이 더 높아져 자동차 엔진룸으로 빗물이 유입되어 자동차의 시동이 꺼지는 상황을 상정하였다. 이를 바탕으로 침수발생시 빗물의 차량 유입 가능 높이와 자동차 엔진룸으로의 빗물 유입에 따른 자동차 엔진 정지 유무를 판단할 수 있는 기준을 검토하고자 한다.









「자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙」 제5조에서는 공차상태의 자동차에서 접지부분 외의 부분은 지면과의 사이에 10cm 이상의 간격이 있어야 함을 규정하고 있다.²⁸⁾

또한 삼성교통안전문화연구소에서는 국산 및 수입차량의 자동차 엔진 흡입구 높이를 조사한 결과 그 범위가 0.55~0.8m임을 제시한 바 있다²⁹⁾. 도시침수 발생시 0.1m 이상인 경우 차량내 빗물 유입이 시작될 수 있고 0.5m 이상인 경우 자동차 엔진룸으로 빗물이 유입되어

28) 국가법령정보센터, “자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙”.

29) 한국일보(2019.7.14), “자동차 엔진 흡입구 낮을수록 침수사고 위험 커진다”, 검색일: 2024.2.15.

차량이 정지해 위험 상황에 직면할 수 있을 것으로 판단된다. 아동 피난 기준과 자동차 운행 가능 기준 검토 결과와 시사점은 제5장에 정리하였다.

국산차	측정값	No	측정값	외제차
	80.0 (그랜저)	1	55.0 (BMW5)	
	79.0 (소나타)	2	61.0 (BMW7)	
	74.5 (N5)	3	72.0 (C200)	
	57.0 (말리부)	4	68.0 (A4)	
Max:80.0 / Min:57.0	72.6	평균	65.8	Max:72.0 / Min:55.0

자료: 머니투데이(2019.7.14), “BMW보다 그랜저? 엔진 흡입구 낮은 車, 침수사고 위험 높다”, 검색일: 2024.2.15.

〈그림 3-1〉 국산/외제차 엔진 흡입구 높이 측정 결과

2. 도시침수예경보의 시·공간적 범위 기준 검토

현행 「도시침수방지법」을 기반으로 도시침수 발생 시 발표되는 예경보를 통해 대응을 하는 실질적인 주체는 침수가 발생한 지자체이다. 이에 도시침수예경보를 위한 시·공간적 범위 기준(안)을 제시하기에 앞서 지자체의 대응적인 측면에서 재난 발생 시 절차, 역할 등에 대하여 살펴보고자 한다. 이는 해당 과제에서 제안하고자 하는 도시침수예경보 시·공간적 범위 기준(안)의 실효성과 합리성을 확보하고, 우리나라 재난관리 체계와 연계성을 고려한 도시침수예경보 체계 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

가. 도시침수예경보 위한 시간적 범위 기준 검토

우리나라는 「재난 및 안전관리기본법」 제34조의5를 근거로 총 41개 재난 유형별 위기관리 매뉴얼을 작성하여 운영하고 있으며, 위기관리 매뉴얼은 작성 내용과 주체 등에 따라 3가지로 구분된다.³⁰⁾

먼저 ‘위기관리 표준매뉴얼’은 재난관리 주관기관의 장이 작성하고 행정안전부장관이 승인하는 것으로, 국가차원의 관리가 필요한 재난에 대해서 관계기관의 임무와 역할을 규정하는 내용을 담고 있다. 이때 재난관리 주관기관은 재난 유형별로 예방, 대비, 대응, 복구 등의 업무를 주관하여 수행하도록 하는 관계 중앙행정기관을 의미한다. 다음으로 ‘위기대응 실무 매뉴얼’은 재난관리 주관기관의 장 또는 관계기관의 장이 작성하고 재난관리 주관기관의 장이 승인하는 것으로, 관계기관의 기능과 역할을 근거로 재난 대응 조치 사항과 절차 등의 규정을 포함한다. 마지막으로 ‘현장조치 행동매뉴얼’은 실제 임무를 수행하는 기관의 행동 조치 절차를 구체적으로 제시하는 내용을 담고 있으며, 실무매뉴얼을 작성한 기관의 장이 지정한 기관의 장이 작성하고 재난관리 주관기관의 장이 승인한다. 이때 현장조치 행동매뉴얼은 주로 시장·군수·구청장이 작성하여 시·도지사가 승인하는데, 2022년 12월 기준 풍수해 재난 위기관리 매뉴얼 중 표준 매뉴얼 1개, 실무 매뉴얼 22개, 행동 매뉴얼 642개가 작성된 것으로 파악되었다.³¹⁾

30) 국가법령정보센터, “재난 및 안전관리기본법”.

31) 행정안전부, “위기관리 매뉴얼”, 검색일: 2024.3.28.

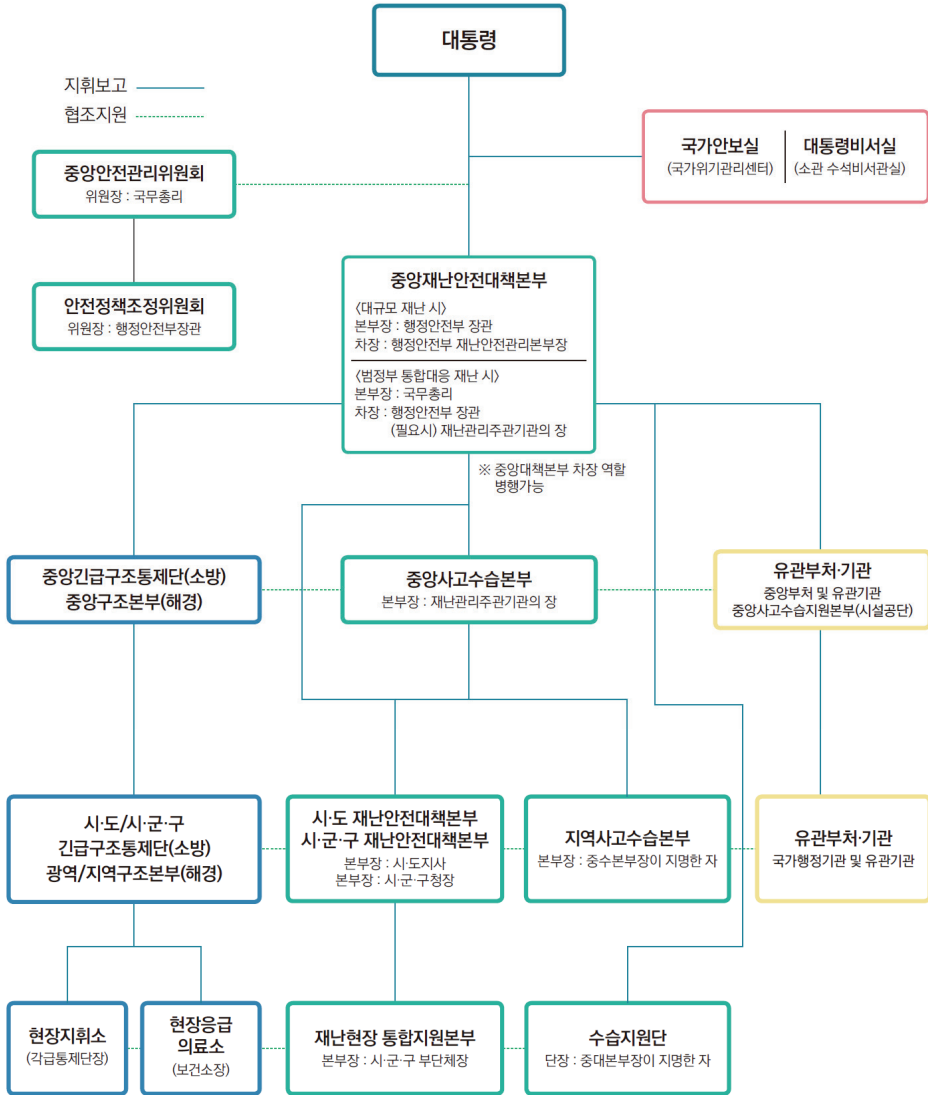
〈표 3-4〉 위기관리 매뉴얼 현황

구분	내용	작성기관	승인기관
위기관리 표준매뉴얼	국가차원 관리 필요 재난 → 관계기관 임무와 역할 규정	재난관리 주관기관의 장	행정안전부장관
위기대응 실무매뉴얼	관계기관 기능, 역할 근거 → 재난대응 조치사항, 절차 규정	재난관리 주관기관의 장 관계기관의 장	재난관리 주관기관의 장
현장조치 행동매뉴얼	실제 임무를 수행하는 기관의 행동조치 절차를 구체적으로 제시	실무매뉴얼 작성기관의 장이 지정한 기관의 장	재난관리 주관기관의 장

자료: 행정안전부, “위기관리 매뉴얼”, 검색일: 2024.3.28.

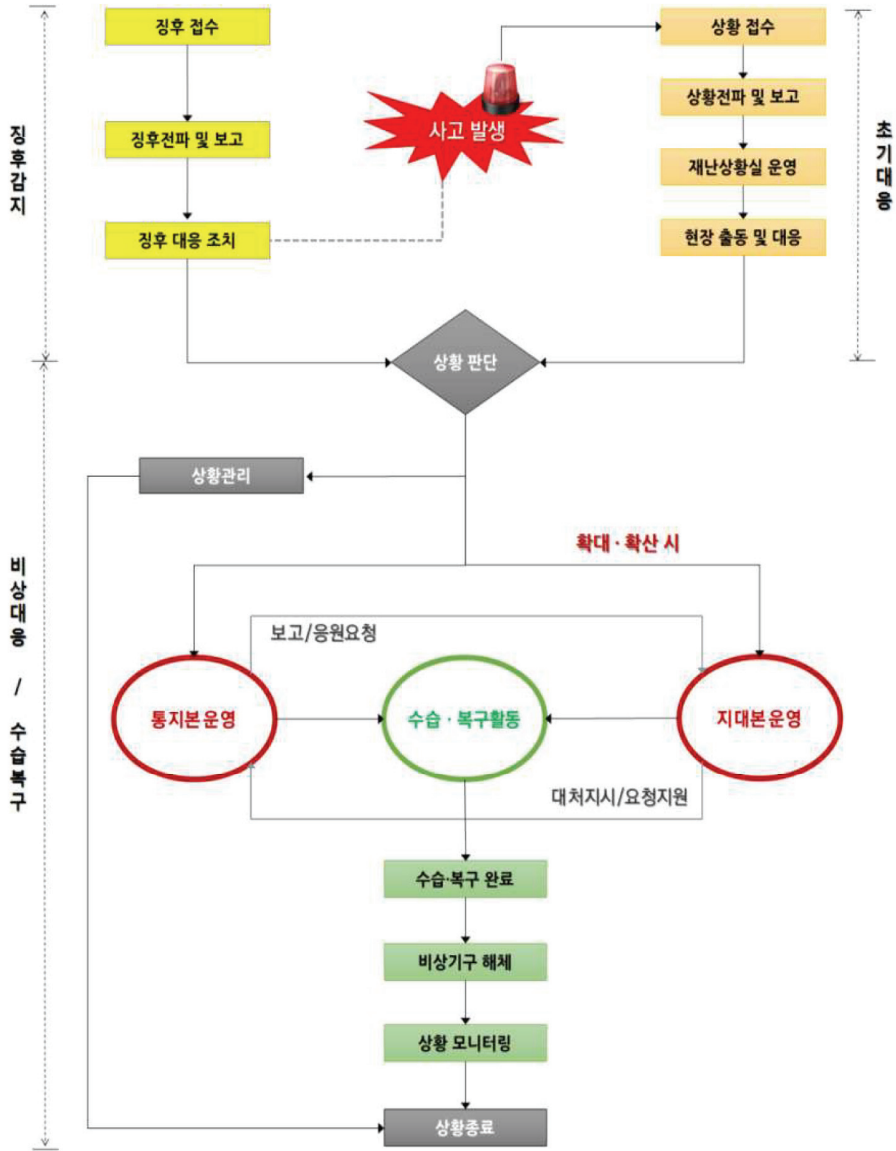
위와 같은 매뉴얼을 근거로, 지자체는 재난 발생 시 피해 규모, 피해 범위 등을 고려하여 지역재난안전대책본부를 설치하여 운영한다. 이때 재난안전대책본부에서는 관할 구역의 재난을 수습하기 위한 총괄·조정 역할과 함께 필요한 조치를 이행하는데 예경보 발령, 동원 명령, 대피 명령 등이 포함된다(그림 3-2 참조). 재난별, 지역별 대응 절차는 일부 차이가 있으나, 일반적인 자연재난 대응 절차의 경우 〈그림 3-3〉과 같다. 지역에서는 재난 발생 징후를 감지하면 초기대응을 위해 재난상황실을 운영하고 현장에 출동하여 대응하는 과정에서 주어지는 정보를 기반으로 상황 판단을 하게 된다. 이후 재난 피해가 확대·확산되는 경우 상황관리를 위해 비상 대응과 수습 복구 단계 과정에서 통합지원본부, 지역재난안전대책 본부를 운영한다.

도시침수예경보의 시간적 범위 설정에 있어 중요하게 고려해야 하는 단계는 상황 판단을 통해 상황관리로 넘어가는 단계이다. 이는 단시간 내에 피해가 급격하게 확산되는 도시침수의 특성으로 인해 상황 판단 후에는 신속한 대응이 이루어져야 피해를 최소화할 수 있기 때문이다. 이에 도시침수예경보 시간적 범위 기준안을 제안하는 과정에서 실제 침수 발생 시 지자체에서 상황을 판단하고, 지역재난안전대책본부를 구성·운영하여 예경보 발령과 대피 명령 등의 의사결정을 하는 절차가 필요하다.



자료: 행정안전부(2021), “대한민국 재난안전관리”, p.10.

〈그림 3-2〉 우리나라 재난관리 체계



자료: 제주시(2020), p.33.

〈그림 3-3〉 지방자치단체 자연재난 대응 절차(제주시)

나. 도시침수에경보 위한 공간적 범위 기준 검토

우리나라는 지역별로 인구사회학적, 지리적 측면에서 공간 다양성을 가지고 있기 때문에 재난발생 지역마다 영향이 다르게 나타난다. 이에 지자체의 대응적인 측면에서 도시침수에 경보를 위한 공간적 범위 기준을 제안하기에 앞서 관련 현황을 살펴보고자 한다.

앞서 언급한 바와 같이 도시침수는 단시간 내에 급격하게 피해가 확대되기 때문에 예경보의 궁극적인 목표는 ‘인명피해 최소화’라고 볼 수 있다. 이와 관련하여 2005년 소방방재청은 침수, 붕괴, 지진해일 발생 가능 지역 등을 대피지구로 지정하고, 인명피해 감소를 위한 ‘재난 대비 30분 대피시스템’을 구축하였다. 재난 대비 30분 대피시스템(e-30, Evacuation-30minutes)은 대피의 신속성과 대피시설의 접근성을 고려한 시스템으로, 특보발령 후 위험 지역에 있는 주민들이 30분 이내에 안전지역으로 대피할 수 있도록 한다.³²⁾

구체적인 절차를 보면, <그림 3-4>와 같이 기상청은 태풍, 집중호우 등으로 인한 침수 발생 시 15분 이내에 기상특보를 발령하고 동시에 경보를 발령한다. 경보 발령 이후 도시침수 시작 시간을 해당 지역 시·군·구에 직접 전달하며, 중앙과 해당 지역재난안전대책본부는 5분 이내 경보사이렌, 대피안내 방송, 재난문자발송 등을 통해 해당 지역 주민들에게 알린다. 그리고 25분 이내 안전한 지역에 대피할 수 있도록 안내한다.



자료: 대한민국 정책브리핑(2005.2.15), “소방청, 재난대비 30분 대피시스템 구축”, 검색일: 2024.3.28.

<그림 3-4> 재난 대비 30분 대피시스템 개념

32) 대한민국 정책브리핑(2005.2.15), “소방청, 재난대비 30분 대피시스템 구축”, 검색일: 2024.3.28.

이와 같은 재난 대비 30분 대피시스템은 인명피해의 최소화라는 측면에서 효과적인 시스템이라고 볼 수 있다. 다만 도시침수예경보를 위한 공간적 범위 기준을 고려하였을 때 인명피해 최소화를 위해서는 ‘재난 약자의 접근성’과 ‘관리 운영의 효율성’도 함께 논의되어야 한다. 이러한 측면을 고려해 민방위 대피를 살펴본 결과, 지방정부의 읍·면·동 주민등록 인구 기준으로 1인당 0.825m³ 공간³³⁾을 667m 이내(대피 시간 기준 5분)³⁴⁾에 대피가 가능한 장소에 지정하는 것으로 제시하고 있다. 또한 지자체별 침수 예상 지역의 신속한 대피와 피해 경감 목적으로 작성되는 재해정보지도의 경우 읍·면·동 수준에서 침수 흔적, 대피처 대피경로, 행동 요령 등의 정보가 제공된다(그림 3-5 참조).



자료: 경기도 의정부시(2014), p.50; 부산광역시(2024.1.9), “도시침수 재해정보지도”, 검색일: 2024.3.28.

〈그림 3-5〉 재해정보지도 경기도 의정부시(좌), 부산시 중구(우)

한편 도시침수예경보시스템 사례조사를 통해 살펴본 바와 같이, 국립재난안전연구원에서는 도시침수 경보체계 실용화를 위해 읍면동 기준 행정구역별 과거 침수 피해 이력과 배수 특성에 기반하여 한계강우량과 경보 기준을 개발하였다(최창원 외, 2018, p.5). 특히 도시 침수예경보를 통해 충분한 대피시간 확보와 인명·재산 피해 저감을 위하여 읍면동 단위의

33) 행정안전부(2020), p.235.

34) 행정안전부(2020), p.237.

경보 기준을 설정하여(최창원 외, 2018, p.108) 시스템에서 3단계(주의, 경계, 위험)의 경보 알람을 통해 도시침수예경보를 하고 있다.

실제 서울시의 경우 동행파트너라는 주민 협업체 제도를 통해 침수 발생 시 통·반장 등 인근 주민과 돌봄 공무원들이 재난약자들의 신속한 대피를 위해 협업하는 제도를 도입하였으며,³⁵⁾ 포항시는 도시침수 상황을 제시하고 읍면동별로 지역별 특성에 맞는 조치와 통제, 주민 대피 훈련을 시행하였다.³⁶⁾

위와 같이 도시침수가 하천홍수 피해와는 다르게 상당히 짧은 시간에 피해가 발생하며, 주택, 상가, 차량 침수 등으로 인해 재산과 인명 피해가 높은 비율을 차지한다는 점 등을 고려하였을 때 도시침수예경보를 위한 공간적 단위로 법정동에 대한 검토가 필요함을 보여 준다. 다만 도시침수예경보를 위한 분석 과정에서 활용되는 기존 정보와 분석 방법의 특성, 지자체별 공간적인 다양성이 있다는 점을 고려하여 공간적 범위 기준(안)에 대해 제안하고자 한다.

3. 도시침수예경보 체계 및 절차 검토

가. 하천홍수 예보 체계 및 절차 검토

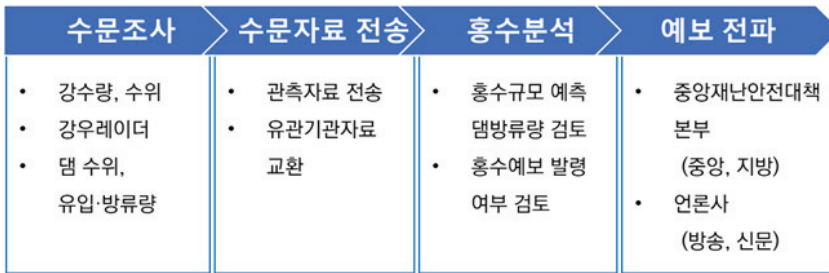
국내에서는 1974년 건설부 소속 한강홍수통제소 신설(대통령령 제1787호) 이후 수십년 간의 강수량, 하천수위 등의 수문자료 계측 및 품질관리 기술 축적에 기반한 하천 홍수예보 시스템을 구축하여 운영 중이다. 따라서 본 연구에서는 도시침수예경보 체계 및 절차를 검토하기 위해 우선적으로 하천홍수 예경보 체계를 검토하여 도시침수예경보 체계와 절차 마련에 활용하고자 한다.

하천홍수는 <그림 3-6>과 같이 수문조사 → 수문자료 전송 → 홍수분석 → 예보전파 절차를 가진다. 수문조사 단계에서는 홍수분석에 필요한 지점강수량, 하천수위, 격자 단위의 강우 레이더 자료, 댐 수위 및 댐 유입·방류량 자료를 수집한다. 수집된 자료는 수문자료 전송 시스템을 통해 홍수통제소와 유관기관으로 전송된다. 이후 홍수분석 단계에서는 수집된

35) 내 손안에 서울(2023.6.26), “전국 최초 ‘침수 예·경보제’ 도입…서울시 풍수해 안전대책”, 검색일: 2024.4.3.

36) 뉴시스(2024.3.14), “포항시, 시민 안전 최우선… 하천 붕괴·도시 침수 대응 훈련”, 검색일: 2024.4.3.

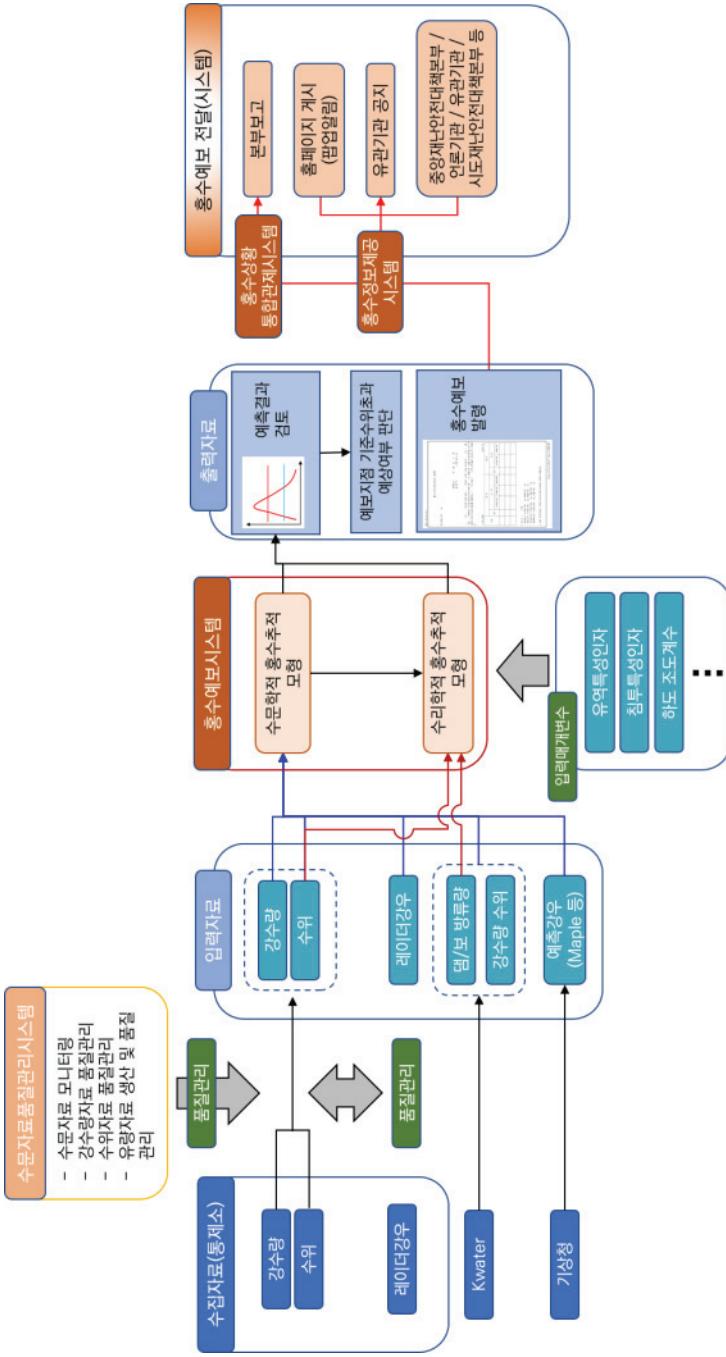
자료를 이용해 홍수의 규모를 예측하고 이를 기반으로 홍수조절을 위한 댐 방류량을 검토한다. 이때 예측된 홍수규모에 따라서 홍수예보 지점을 대상으로 홍수예보 발령 여부를 검토한다. 홍수예보 지점에 대해서 기준 홍수량이 초과되었거나 초과가 예상되는 경우 중앙재난안전대책본부(중앙, 지방)와 방송·신문을 통해 예보를 전파한다.



자료: 낙동강홍수통제소 예보통제과(2024.1)를 이용하여 저자 작성.

〈그림 3-6〉 하천홍수 예보 절차

하천홍수 예보 절차를 보다 세분화한 하천홍수 예보 체계는 〈그림 3-7〉과 같다.



자료: 환경부 도시침수대응기획단(2023.11) 자료를 이용하여 저자 작성.

〈그림 3-7〉 하천홍수 예보 체계

하천홍수 예보체계는 홍수예보 자료인 하천 홍수량과 홍수위 자료 생산을 중심으로 구성되어 있다. 하천 홍수예보 체계에서는 홍수량을 예측하기 위해 수문학적 홍수추적 모형을, 홍수위를 예측하기 위해 수리학적 홍수추적 모형을 사용한다. 수문학적 홍수추적을 수행하기 위해서는 강수량, (하천)수위, 레이더 강우, 댐/보 방류량, 강수량 수위 등의 관측자료와 함께 기상청에서 제공하는 예측강우량 자료가 필요하다. 홍수위 예측을 위한 수리학적 홍수추적을 위해서는 (하천)수위, 댐/보 방류량과 함께 수문학적 홍수추적 모형 결과인 예측홍수량 자료가 필요하다. 관측된 자료들은 모형의 입력자료로 활용되기 전에 품질관리시스템을 통해 오측·결측·이상치 검정을 수행한 후 모형의 입력자료로 사용된다. 또한 수문학적 홍수추적 모형과 수리학적 홍수추적 모형을 통한 예측 홍수량과 예측 홍수위 결괏값을 도출하기 위해서는 유역특성인자, 침투특성인자, 하도 조도계수 등과 같은 모형의 입력 매개변수 값이 필요하다. 이후 수문학적 홍수추적 모형과 수리학적 홍수추적 모형을 통해 예측된 홍수량과 홍수위 값을 이용해 예보지점 단위로 기준홍수량 또는 기준 홍수위 초과 여부에 대한 검토를 수행한 후 기준 초과가 예상되는 경우 홍수상황 통합관제시스템을 통해 본부(환경부)로 보고됨과 동시에 홍수정보제공시스템을 통해 홈페이지 알림, 유관기관 공지, 중앙재난안전대책본부·언론기관·시도재난안전대책본부 등에 해당 정보가 제공된다. 예보지점의 기준 수위에 대한 기준은 <표 3-5>의 「수자원법 시행규칙」 [별표1]에서와 같이 주의보와 경보로 구분되어 특보 형태로 발령되며 수위가 기준수위 이하로 낮아지면 이에 맞게 해제 특보를 발령한다.

<표 3-5> 홍수특보 발령 기준

구분	발령 기준
1. 홍수 주의보	가. 홍수주의보 발령: 하천의 수위가 계속 상승하여 다음 각 사항에 따른 수위를 고려하여 정한 홍수특보지점의 기준수위(이하 “주의보수위”라 한다)에 가까워지거나 이를 초과할 것이 예상되는 경우 1) 계획홍수량의 100분의 50에 해당하는 유량이 흐를 때의 수위 2) 최근 5년의 평균 저수위로부터 계획홍수위까지 100분의 60에 해당하는 수위 3) 1),2)에 따른 기준을 적용하기 곤란한 경우에는 주변상황 및 제방 정비상태를 고려한 수위 나. 홍수주의보 변경발령: 홍수경보가 발령된 지점의 수위가 계속 하강하여 경보수위 이하로 내려갈 것이 예상되는 경우

〈표 3-5〉의 계속

구분	발령 기준
2. 홍수 경보	<p>가. 홍수경보 발령: 하천의 수위가 계속 상승하여 다음 각 사항에 따른 수위를 고려하여 정한 홍수특보지점의 기준수위(이하 “경보수위”라 한다)에 가까워지거나 이를 초과할 것이 예상되는 경우</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 계획홍수량의 100분의 70에 해당하는 유량이 흐를 때의 수위 2) 최근 5년의 평균 저수위로부터 계획홍수위까지 100분의 80에 해당하는 수위 3) 1),2)에 따른 기준을 적용하기 곤란한 경우에는 주변상황 및 제방 정비상태를 고려한 수위 <p>나. 홍수경보 변경발령: 홍수주의보가 발령된 지점의 수위가 주의보수위를 넘어 계속 상승하여 경보수위에 가까워지거나 이를 초과할 것이 예상되는 경우</p>
3. 해제	<p>가. 홍수주의보 해제: 홍수주의보가 발령된 지점의 수위가 계속 하강하여 주의보수위 이하로 내려갈 것이 예상되는 경우</p> <p>나. 홍수경보 해제: 홍수경보가 발령된 지점의 수위가 계속 하강하여 주의보수위 이하로 내려갈 것이 예상되는 경우</p>

자료: 국가법령정보센터, “수자원법 시행규칙”, [별표1].

홍수특보는 주의보와 경보로 구분되며 개별상황에 따라 홍수특보 발령서, 변경발령서, 해제발령서 등 총 3가지로 구분한다.

<p style="text-align: center;">홍수특보(홍수주의보, 홍수경보) 발령서</p> <p>홍수특보 제 ()호</p> <p style="text-align: right;">발령일시: 년 월 일 시 분 발령자: (직명 또는 직)</p> <p>()강()지점의 수위가 계속 상승하여 ()분()시()시에 해당되는 주의보(경보)수위(해발기준 m, 수위표기준 m)를 초과(도달)할 것이 예상되어 홍수특보(경보)를 발령한다()강()지점()지역 수인 물은 유의하시기 바랍니다.</p> <p><수위현황> (단위: m)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">지점</th> <th colspan="2">현 재</th> <th colspan="2">예 상</th> </tr> <tr> <th>일시</th> <th>수 위</th> <th>일시</th> <th>수 위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>해발기준</td> <td>수위표기준</td> <td>변동상황</td> <td>해발기준</td> <td>수위표기준</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>※참고 ()지점</p> <ul style="list-style-type: none"> - 제방높이: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 규모수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 주의보수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 계획홍수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m <p>* 같은 하천이라도 지역과 장소에 따라 예상되는 피해가 다릅니다.</p>	지점	현 재		예 상		일시	수 위	일시	수 위		해발기준	수위표기준	변동상황	해발기준	수위표기준							<p style="text-align: center;">홍수특보(홍수주의보, 홍수경보) 변경발령서</p> <p>홍수특보 제 ()호</p> <p style="text-align: right;">발령일시: 년 월 일 시 분 발령자: (직명 또는 직)</p> <p>()강()지점의 수위가 계속 상승(하강)하여 ()분()시()시에 예전 해당기준 m, 수위표기준 m 내외가 될 것이 예상되므로 ()년()월()일()시()분에 발령한 ()지역 홍수주의보(경보)를 홍수경보(주의보)로 바꾸어 발령한다()강()지점()지역 주민들은 유의하시기 바랍니다.</p> <p><수위현황> (단위: m)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">지점</th> <th colspan="2">현 재</th> <th colspan="2">예 상</th> </tr> <tr> <th>일시</th> <th>수 위</th> <th>일시</th> <th>수 위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>해발기준</td> <td>수위표기준</td> <td>변동상황</td> <td>해발기준</td> <td>수위표기준</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>※참고 ()지점</p> <ul style="list-style-type: none"> - 제방높이: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 규모수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 주의보수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 계획홍수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m <p>* 같은 하천이라도 지역과 장소에 따라 예상되는 피해가 다릅니다.</p>	지점	현 재		예 상		일시	수 위	일시	수 위		해발기준	수위표기준	변동상황	해발기준	수위표기준							<p style="text-align: center;">홍수특보(홍수주의보, 홍수경보) 해제발령서</p> <p>홍수특보 제 ()호</p> <p style="text-align: right;">해제일시: 년 월 일 시 분 해제자: (직명 또는 직)</p> <p>()강()지점의 수위가 계속 하강하고 있으므로 ()년()월()일()시()분에 발령한 ()강()지점()지역의 홍수특보(경보)를 해제한다.</p> <p><수위현황> (단위: m)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">지점</th> <th colspan="2">현 재</th> <th colspan="2">예 상</th> </tr> <tr> <th>일시</th> <th>수 위</th> <th>일시</th> <th>수 위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>해발기준</td> <td>수위표기준</td> <td>변동상황</td> <td>해발기준</td> <td>수위표기준</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table> <p>※참고 ()지점</p> <ul style="list-style-type: none"> - 제방높이: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 규모수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 주의보수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m - 계획홍수위: 해발기준 ()m, 수위표기준 ()m <p>* 같은 하천이라도 지역과 장소에 따라 예상되는 피해가 다릅니다.</p>	지점	현 재		예 상		일시	수 위	일시	수 위		해발기준	수위표기준	변동상황	해발기준	수위표기준						
지점		현 재		예 상																																																													
	일시	수 위	일시	수 위																																																													
	해발기준	수위표기준	변동상황	해발기준	수위표기준																																																												
지점	현 재		예 상																																																														
	일시	수 위	일시	수 위																																																													
	해발기준	수위표기준	변동상황	해발기준	수위표기준																																																												
지점	현 재		예 상																																																														
	일시	수 위	일시	수 위																																																													
	해발기준	수위표기준	변동상황	해발기준	수위표기준																																																												

자료: 국가법령정보센터, “수자원법 시행규칙”, 별지 제1~3호 서식.

〈그림 3-8〉 홍수특보 발령(좌), 변경(중), 해제발령서(우)

나. 도시침수 특성 검토

도시침수예경보 체계 및 절차를 마련하기에 앞서 하천홍수 예경보 체계 절차에 대해 살펴 보았으며 본 절에서는 하천홍수 예보 체계에 도시침수의 특성을 반영해 새로운 도시침수예경보 체계(안) 마련에 활용하고자 한다. 이를 위해 도시침수의 발생 특성에 대해 살펴보면 다음의 <그림 3-9>와 같다.

도시침수 발생 주요 원인은 다양하나 크게 내수배제 불량에 의한 침수와 도시하천으로부터의 월류로 구분할 수 있다. 내수배제 불량으로 인한 침수는 빗물받이, 하수관로의 통수능 부족, 배수펌프장 용량 부족 등에서 기인하며 그 결과 지표면의 침수를 발생시킨다. 도시하천으로부터의 범람은 상류지역에서 유출된 빗물이 집중되어 높아진 하천의 수위가 제방고를 초과하는 경우 발생한다. 이때 우수관로 또는 하수관로(우수관로 + 우수관로)가 하천으로 직접 배수되는 경우 하천의 수위가 우수관로 또는 하수관로의 통수능에 영향을 미치므로 하수관로를 통한 배수능력과 하천수위 사이에는 매우 밀접한 상호작용이 발생한다.

또한 빗물이 자연유하를 통해 하천으로 배수되기 어려운 지역에는 빗물펌프장을 설치해 강제로 제내지³⁷⁾의 빗물을 하천으로 배수시키기도 한다. 따라서 도시침수를 예측하기 위해서는 앞서 설명한 요소들이 종합적으로 고려되어야 한다.

37) 제외지의 반대되는 개념으로 제방을 통해 보호되는 구역을 의미한다. 하천을 기준으로 하천 안쪽은 제외지, 제방을 통해 하천범람으로부터 보호되는 제방 바깥쪽을 제내지라고 한다.

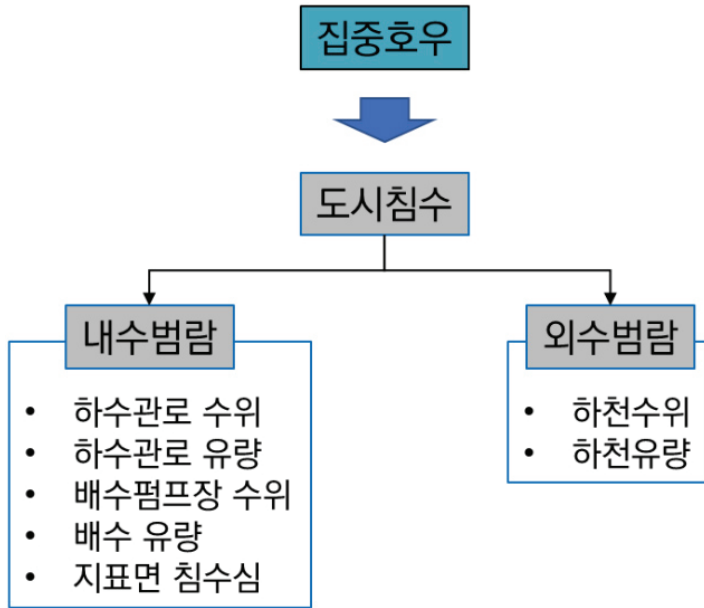


자료: 이승수 외(2022), p.708.

〈그림 3-9〉 도시침수 발생 모식도

본 연구에서는 도시침수의 발생을 유발하는 주요 현상을 내수배제 불량으로 인한 내수 범람과 도시하천의 외수범람으로 구분하였으며, 하수관로와 배수펌프장을 포함하는 하수관망의 통수능 부족으로 인한 침수현상과 도시하천 수위 상승으로 인한 외수범람 현상을 예측하기 위한 관측자료 항목을 〈그림 3-10〉과 같이 제시한다.

하천홍수 예보체계를 기반으로 도시침수의 특성이 반영된 도시침수예보체계(안)과 시사점은 제5장에 정리하였다.



자료: 저자 작성.

〈그림 3-10〉 도시침수 발생 주요 원인 및 모니터링을 위한 주요항목

제4장

도시침수예보를 위한 시공간적 예보범위 검토

본 장에서는 앞서 도출된 도시침수예경보를 위한 시공간적 범위에 대한 적용 가능성을 판단하고자 현재 도시침수예경보에 활용 가능한 자료로 판단되는 서울시 도림천 유역의 맨홀 수위 및 하천수위 자료에 대해 수위 상승·하강 속도를 검토해 그 적용성을 검토하고자 한다. 검토 대상 사례는 1시간 최대 강우량 141.5mm이 발생해 서울시에 대규모 침수를 일으킨 2022년 8월 8~9일 사례를 선정하였으며, 공간적으로는 도림천 유역을 선정하였다. 또한 도시침수 예측 자료의 선행시간 확보에 가장 큰 영향을 미치는 예측강수량 자료의 예측성을 확인하고자 상관성 분석을 통해 도시침수 예측자료의 선행시간 확보 여부를 검토한다.

1. 관측자료 기반 시공간적 예보범위 검토

가. 맨홀 및 하천수위 관측자료 현황

서울시에서는 1분 단위로 하수관로의 수위를 관측하고 있으며 인터넷을 통해³⁸⁾ 자료를 공개하고 있다. 현재 25개 자치구에 245개의 하수관로 수위계가 설치되어 있으며 그 현황은 <표 4-1>과 같다. 서울시 하수관로 수위계 설치 현황은 서울시 열린데이터 광장에서 제공하고 있는 하수관로 수위 현황 자료를 분석해 작성하였다.

38) 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22.

〈표 4-1〉 서울시 하수관로 수위계 설치 현황

고유번호	자치구	지점(개)	고유번호	자치구	지점(개)
01	종로	4	14	마포**	19
02	중	5	15	양천	12
03	용산	9	16	강서	14
04	성동	11	17	구로	13
05	광진	12	18	금천	8
06	동대문	14	19	영등포	12
07	중랑	8	20	동작***	21
08	성북	5	21	관악	7
09	강북	2	22	서초	14
10	도봉*	3	23	강남****	14
11	노원	11	24	송파	2
12	은평	8	25	강동	6
13	서대문	11	합		245

주: 1) *구분코드 8번까지 있으나 3개만 자료 수집.

2) **구분코드 20번까지 있으나 3개만 자료 수집.

3) ***구분코드 27번까지 있으나 21개만 자료 수집.

4) ****구분코드 21번까지 있으나 14개만 자료 수집.

자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22. 활용하여 저자 작성.

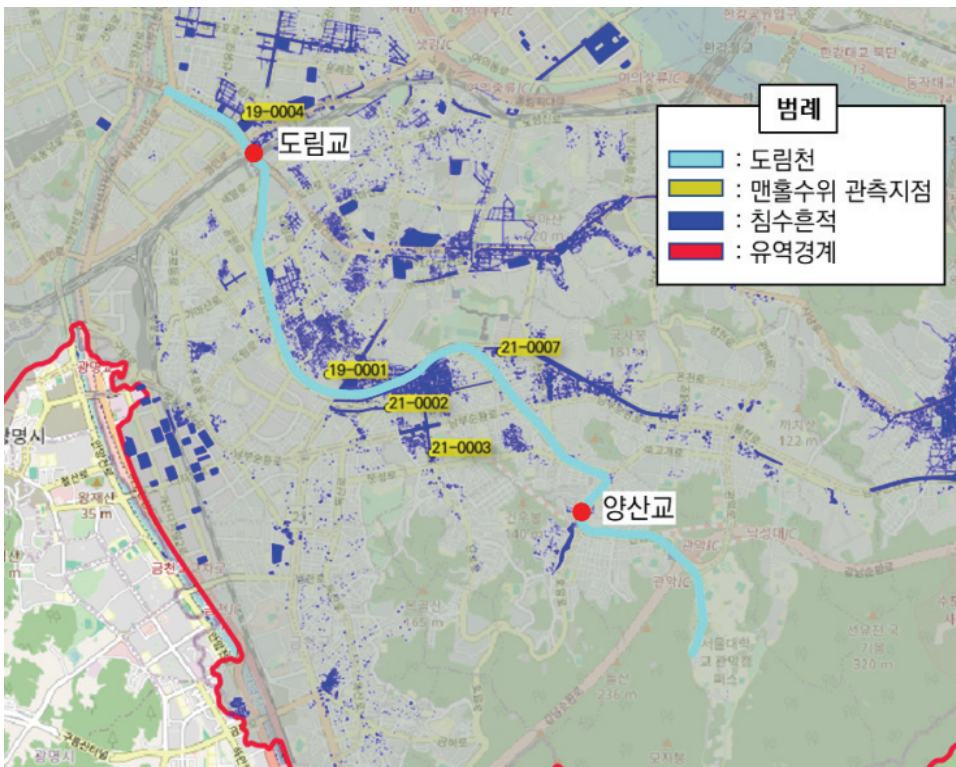
도림천은 관악구, 동작구, 구로구, 영등포구 등 4개의 구에 걸쳐 위치하고 있으며 해당 자치구에 설치되어 있는 하수관로 수위계 자료 중 최하류인 도림교 인근에 위치하고 있는 지점과 도림교와 양산교 사이에 위치하고 지점 4개 등 총 5개의 하수관로 수위계 지점을 선정하였으며 세부 내용은 〈표 4-2〉와 같다.

〈표 4-2〉 도림천 인근 맨홀 수위 관측지점 현황

지점번호	박스 높이(m)	위험 높이(m)	맑은 날 수위비율(%) (23/11/25 기준)
19-0004	1.7	0.85	5.9
19-0001	1.5	0.75	18.0
21-0002	2.4	1.2	6.7
21-0007	1.9	0.95	5.8
21-0003	2.5	1.25	4.4

자료: 서울특별시(2023.4.18), “하수수위현황”, 검색일: 2023.4.22를 활용하여 저자 작성.

도림천 수위 상승·하강 속도 검토를 위한 지점으로는 현재 서울시에서 수위를 관측하고 있는 최상류의 양산교와 최하류 도림교 지점을 선정하였으며, 관측자료는 맨홀 수위와 동일하게 서울 열린데이터 광장에서 제공하고 있는 ‘서울시 하천수위현황’ 자료를 Open API를 이용해 직접 다운로드 받아 활용하였다. <그림 4-1>은 본 연구에서 활용한 맨홀수위 관측지점과 하천수위 관측지점을 나타내고 있다.



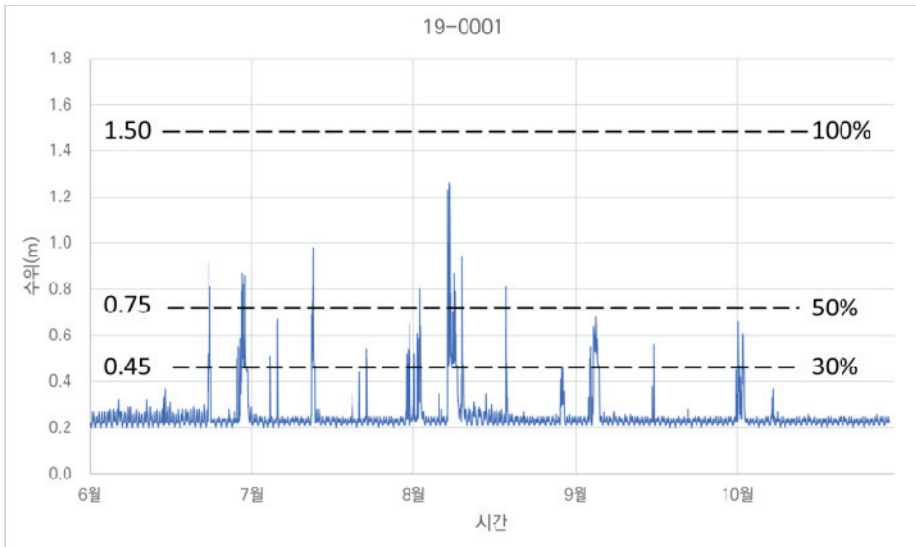
자료: 서울연구원 재난안전연구센터(2023); 서울특별시(2023.4.18), “하수수위현황”, 검색일: 2023.4.22; 디지털트윈(2024.2.13), “행정경계(시군구)”, 검색일: 2024.3.24를 활용하여 저자 작성.

<그림 4-1> 도림천 수위관측지점(붉은점) 및 맨홀 관측수위 지점(황색) 위치도

나. 맨홀 수위 상승·하강 속도 검토

1) 기초 자료 검토

맨홀 수위의 상승·하강 속도를 계산하기 위해 자료를 다운로드³⁹⁾ 받은 후 일정 높이 이상으로 수위가 상승한 경우에 대해서만 분석을 수행하기 위해 박스 높이를 기준으로 30% 이상 수위가 상승한 뒤 하강한 경우만을 선택적으로 분석하였으며, 그 예시는 <그림 4-2>와 같다. <그림 4-2>에서는 맨홀 박스 높이가 1.5m(100%)인 경우 최대 높이의 30%인 0.45m와 50%인 0.75m를 표시하였으며, 이 중 0.45m 이상 수위가 상승했다 하강한 경우에 대해서만 맨홀 수위 변화 속도를 검토한 사례에 대해 도시하고 있다. 여기서 한 가지 흥미로운 사실은 맨홀의 수위가 100% 상승하지 않았음에도 즉, 맨홀이 월류하지 않았음에도 해당 지역에 침수가 발생했다는 사실이다.



자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22.를 활용하여 저자 분석·작성.

<그림 4-2> 맨홀 수위 변화 속도 이벤트 선정 예시

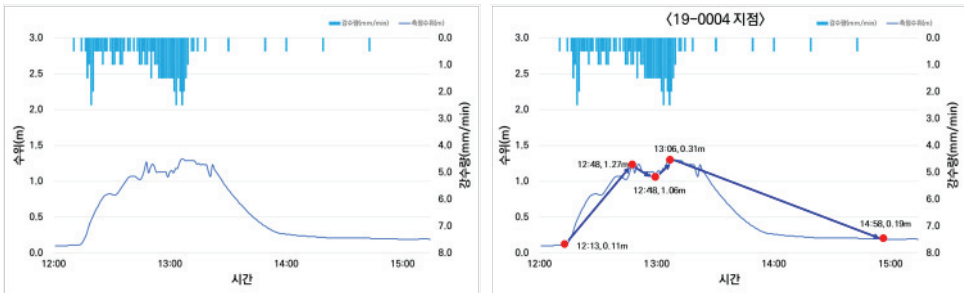
39) 하천수위 자료는 서울특별시 담당 주무관(물순환안전국 치수안전과 치수정보기술팀)을 통해 자료 확보함. 이에 관련 출처는 서울특별시 치수정보기술팀 내부자료로 표기함. 맨홀 수위 자료는 서울시 열린데이터광장 (<https://data.seoul.go.kr/dataList/443/S/2/datasetView.do>)에서 1분단위 자료를 활용함.

2) 맨홀 수위 변화 속도 계산 방법

〈그림 4-3〉에서는 맨홀 수위의 상승·하강 속도를 계산하는 방식에 대해 도시하였다.

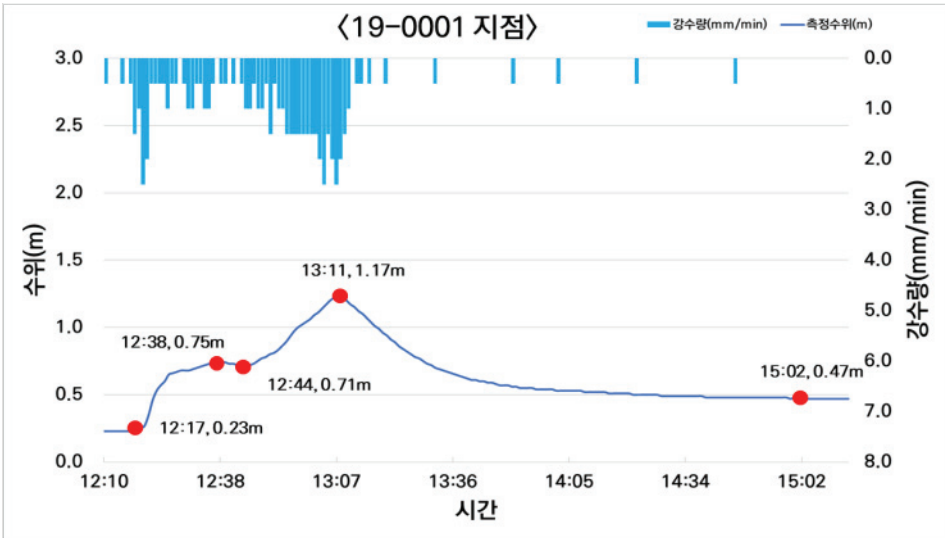
맨홀 수위의 상승·하강 속도를 측정하기 위해 우선적으로 강우관측 자료와 맨홀수위 변화 그래프를 함께 도시한 후 강우 발생 이후 수위가 상승하기 시작하는 점을 표시하였다. 이후 강우강도가 상대적으로 약해진 후 맨홀의 수위가 하강하기 직전에 대해 표시한다. 이후 강우 강도의 변화에 따라서 맨홀수위 변화 그래프의 변곡점마다 표시를 한 후 기울기에 따라 상승과 하강으로 분류하여 속도를 계산하였다(그림 4-3의 우측 참조).

앞서 선택된 도림천 인근 맨홀 수위 관측지점 5곳에 대해 동일하게 적용하였으며 그 계산 과정은 〈그림 4-4〉 ~ 〈그림 4-8〉과 같다. 맨홀 수위 상승·하강 속도의 검토 결과와 시사점은 제5장에 정리하였다.



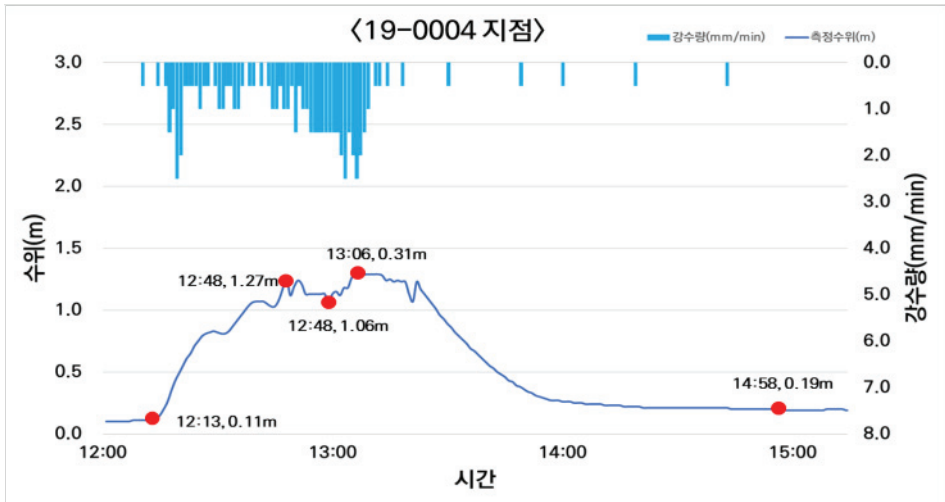
자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-3〉 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산 예시



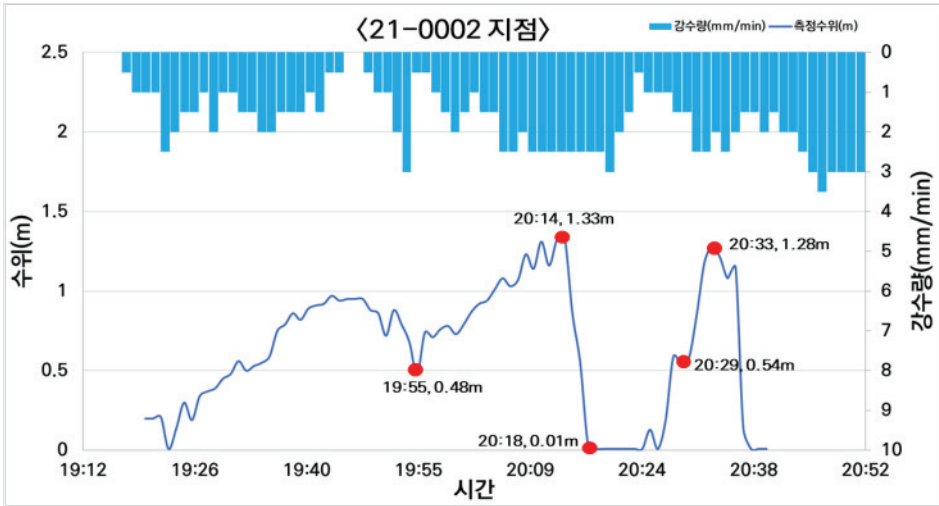
자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-4〉 19-0001 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점



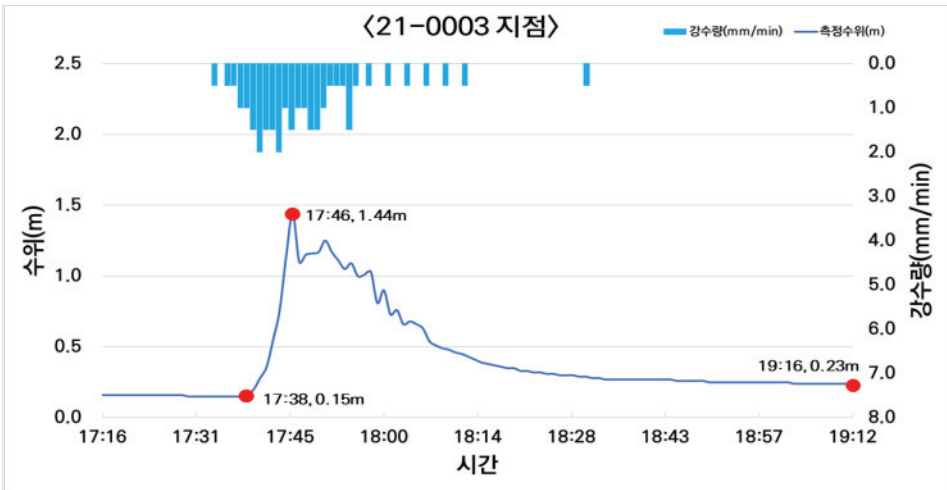
자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-5〉 19-0004 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점



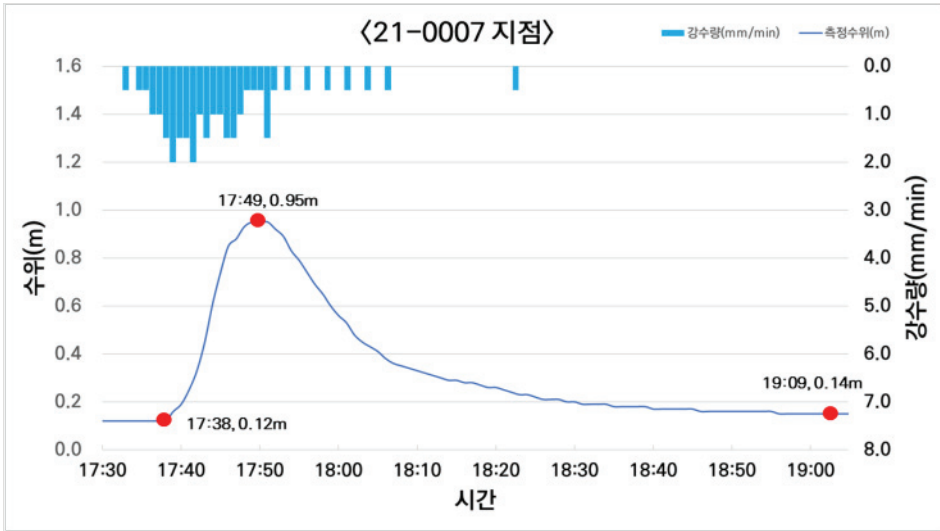
자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-6〉 21-0002 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점



자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-7〉 21-0003 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점

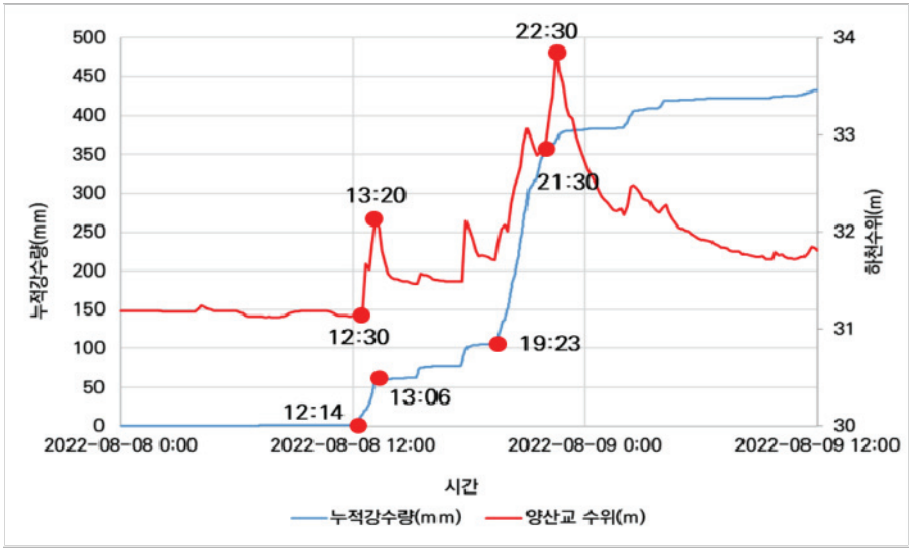


자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-8〉 21-0007 지점 맨홀 수위 상승·하강 속도 계산을 위한 변곡점

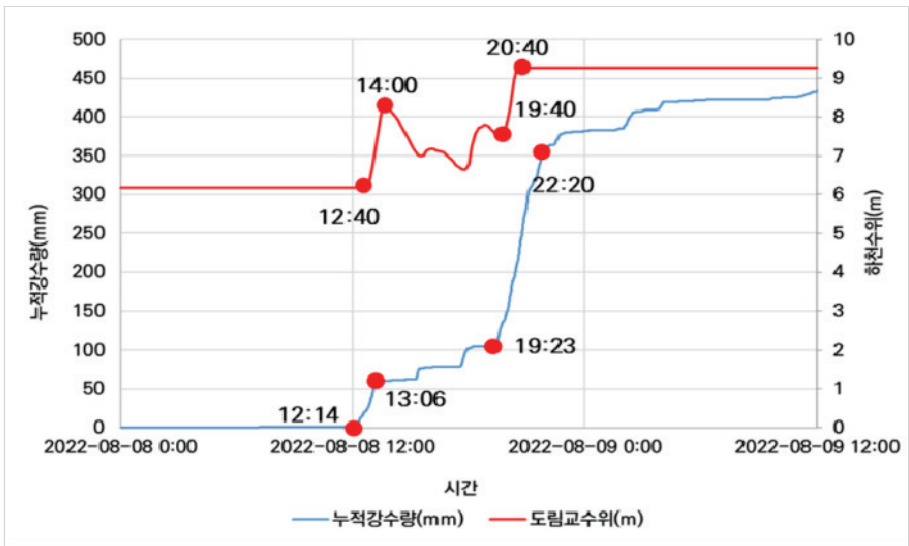
다. 도시하천 수위 상승·하강 속도 검토

도립천 상류에 위치한 양산교와 하류에 위치한 도림교에서 측정된 하천수위의 상승·하강 속도를 검토하기 위해 맨홀 수위 상승·하강 속도 검토방식과 유사하게 하천수위에 적용하여 상승·하강 속도를 검토하였다. 이를 위해 서울시에서 관측하고 있는 도립천 수위 관측자료를 Open API 방식을 이용해 다운로드 받은 후 오차 결측치를 검토하였으며 특이사항이 없는 것을 확인하고 수위변화 속도를 계산하였다. 다만, 강우량 변화에 따른 수위변화 양상을 보다 쉽게 육안으로 파악할 수 있도록 하기 위해 맨홀 수위변화 속도 검토방식과 다르게 누적강수량 변화와 하천의 수위 변화를 동일한 그래프로 표시하였으며, 결과는 〈그림 4-9〉 및 〈그림 4-10〉과 같다. 하천수위 상승·하강 속도의 검토 결과와 시사점은 제5장에 정리하였다.



자료: 서울특별시 치수정보기술팀(2024), 하천수위 관측자료 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-9〉 양산교 수위 변화 속도 계산을 위한 변곡점



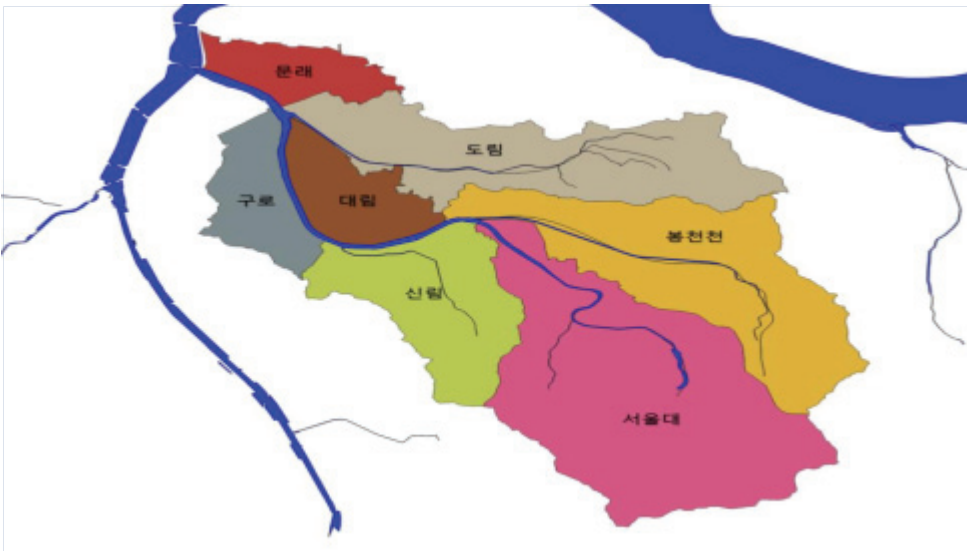
자료: 서울특별시 치수정보기술팀(2024), 하천수위 관측자료 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-10〉 도림교 수위 변화 속도 계산을 위한 변곡점

2. 예측 강수량 기반 선행시간 확보 수준 검토

가. 레이더 예측강수 자료의 예측성 검토

한강홍수통제소에서는 도시침수예보를 위해 도림천 유역을 대상으로 도시침수예보를 위한 도시침수 예측기법의 적용성과 실제 업무 현장에서의 활용 가능성을 검토하기 위한 시범 사업을 2023년에 수행하였다. 시범사업에서는 도림천 유역을 7개의 소유역으로 분할(그림 4-11 참조)하고 개별 소유역에 대한 도시침수 예측 수행을 위해 6시간 선행시간을 가지는 초단기 레이더 예측자료(MAPLE)⁴⁰를 이용하였다. 본 연구에서는 개별 소유역에 대한 초단기 레이더 자료의 예측성 평가를 수행하였다. 레이더 예측자료의 예측성을 평가하기 위해서 선행시간 0분일 때의 자료를 참값인 관측자료로 가정하였으며 선행시간이 증가함에 따라 관측치와 상관성 분석을 통해 예측성 평가를 수행하였다.



자료: 육지문(2024), p.24.

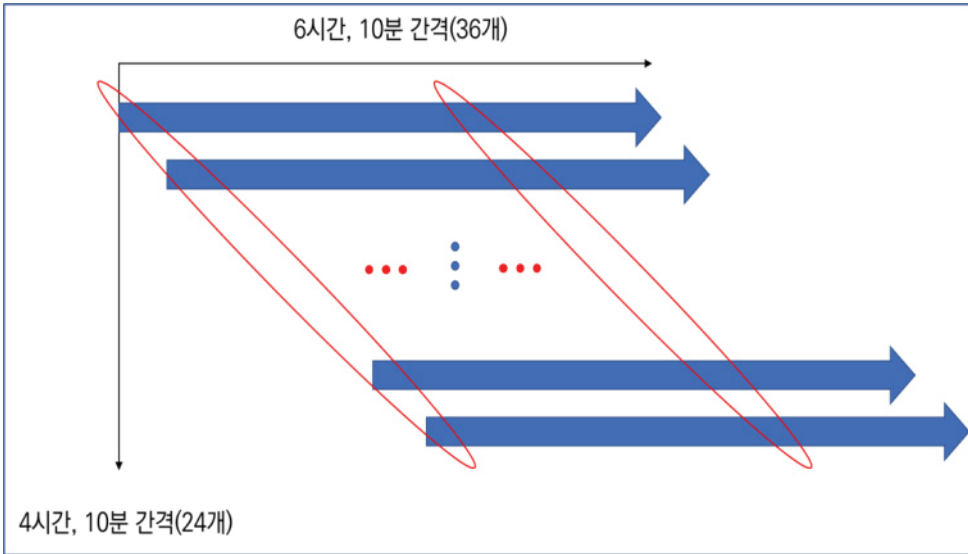
〈그림 4-11〉 도림천 소유역 구성

40) 한강홍수통제소 예보통제과로 전달되는 자료를 이용해 분석하였음.

1) 초단기 레이더 예측자료 분석방법

기상청에서 제공하고 있는 MAPLE 자료는 1km 격자 해상도를 가지며, 매 10분마다 선행 시간 6시간에 대해 10분 간격의 자료가 제공된다. 즉, <그림 4-12>와 같이 가로축 선행시간 세로축을 실제시간이라고 했을 때 화살표의 방향과 같이 10분 간격으로 6시간에 대한 예측 자료 36개가 생성된다.

앞서 설명한 바와 같이 첫 번째 자료는 선행시간이 0분으로 관측자료에 해당하며 이후 자료부터 선행시간이 10분씩 증가한다. 본 연구에서는 선행시간에 따른 초단기 레이더 예측 자료의 예측성을 검토하기 위해 동일 선행시간을 가지는 자료를 소유역별로 하나의 묶음자료 형태로 변환해 관측자료와 예측자료 사이의 상관성을 분석하였다. 상관성 분석⁴¹⁾을 위해 사용된 식은 식(4-1)과 같다.



자료: 저자 작성.

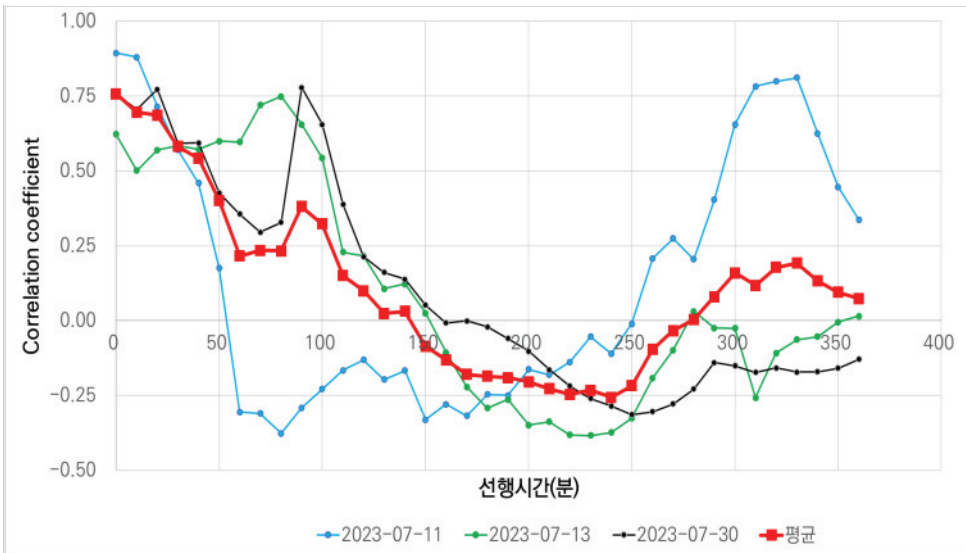
<그림 4-12> 초단기 레이더 강우예측자료(MAPLE)

41) 상관성 분석의 경우 일반적으로 0.5 이상인 경우 두 자료 사이에 상관성이 있다고 판단하며 0.7 이상인 경우 상관성이 높다고 평가한다. 그러나 상관성이 높음이 두 자료 사이에 절대값이 유사함을 의미하는 것은 아니며 두 자료 사이의 연관성이 있음을 의미한다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{식(4-1)}$$

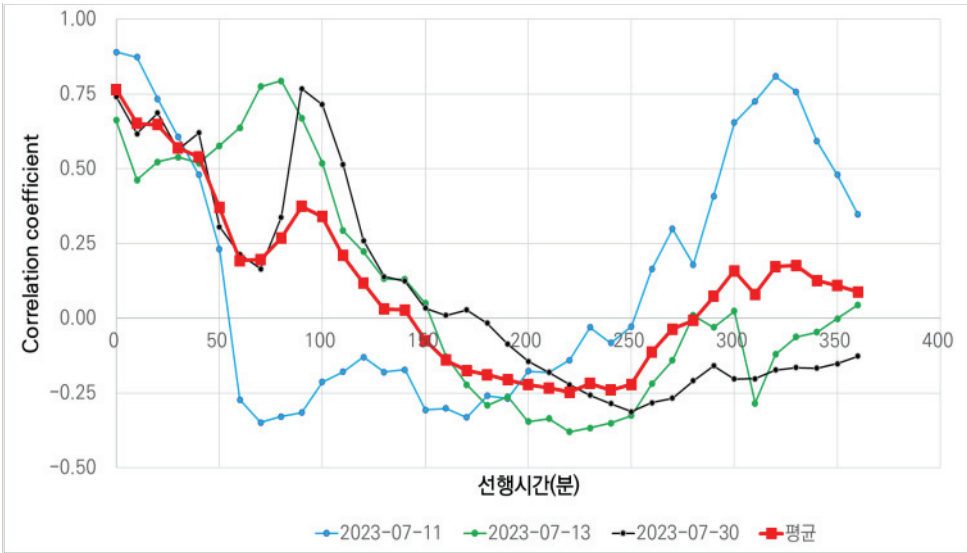
여기서, r 은 상관계수(correlation coefficient), i 는 자료의 개수, x_i 는 자료 x 의 i 번째 값, \bar{x} 는 자료 x 의 평균, y_i 는 자료 y 의 i 번째 값, \bar{y} 는 y 의 평균, n 은 자료의 개수이다.

상관성 분석 결과를 도시한 그래프는 다음과 같다.



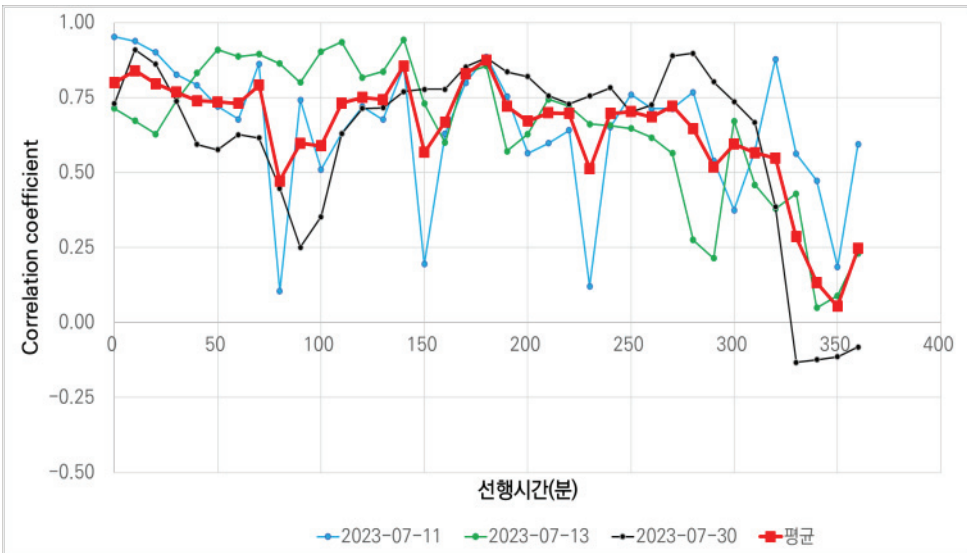
자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-13〉 구로 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수



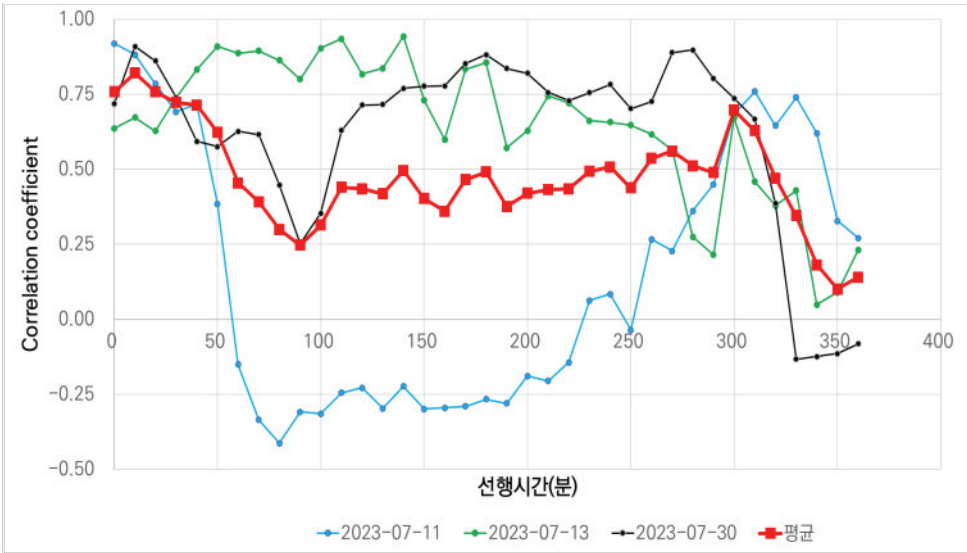
자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-14〉 대림 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수



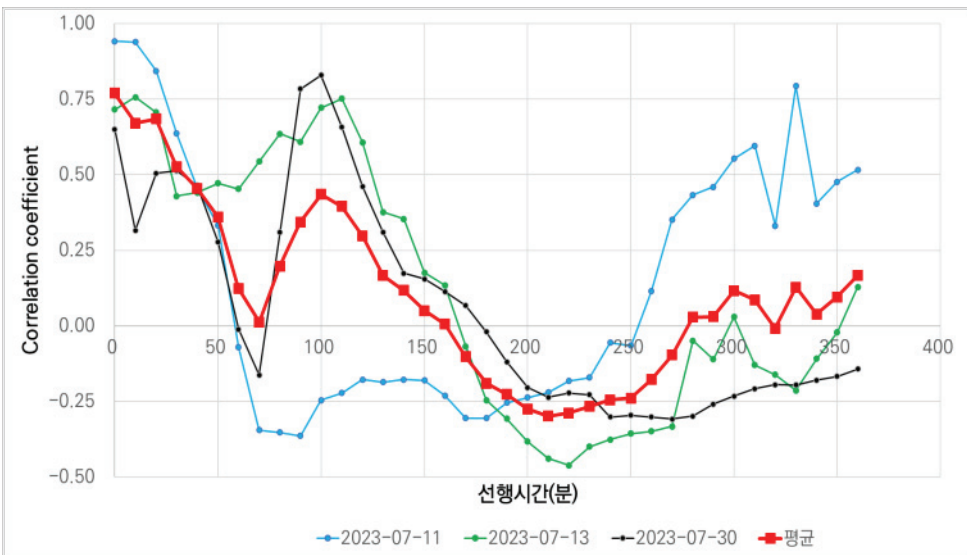
자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-15〉 도림 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수



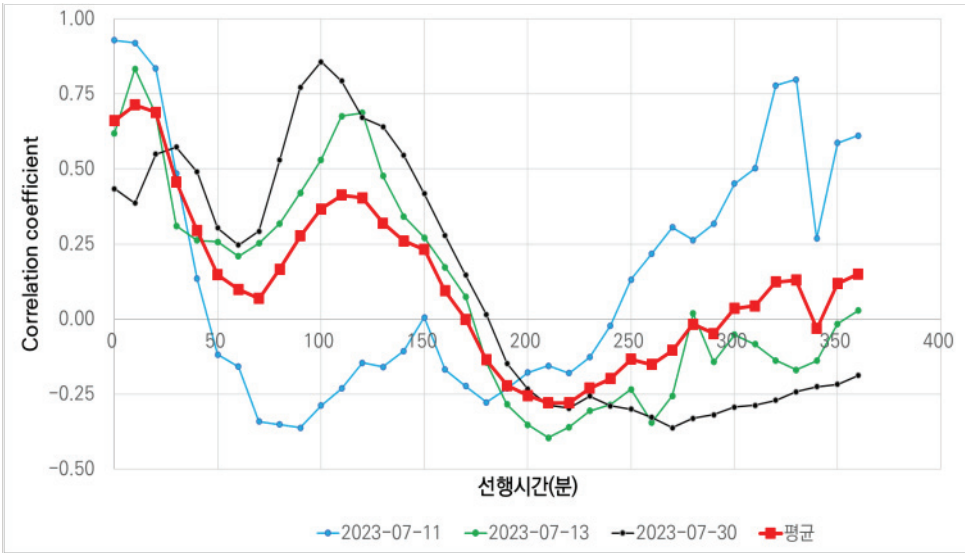
자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-16〉 문래 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수



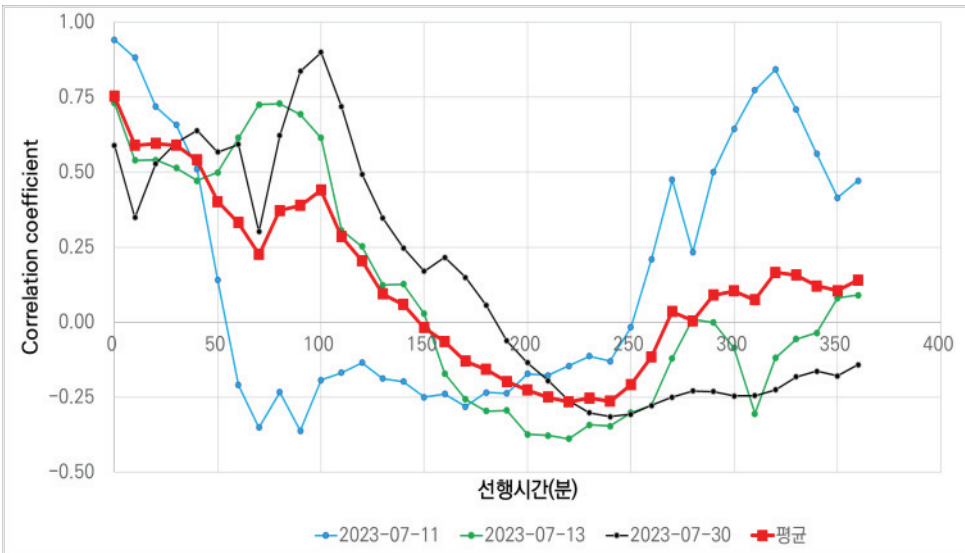
자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-17〉 봉천천 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수



자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-18〉 서울대 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수



자료: 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2)를 활용하여 저자 분석·작성.

〈그림 4-19〉 신림 소유역에서의 초단기 강우예측자료의 상관계수

상관계수 분석 결과 40분(4단계) 이후 0.5에 인접 또는 이하로 떨어지는 소유역이 5개(구로, 대림, 봉천천, 서울대, 신림)로 나타났으며, 도림 소유역은 상관계수 값이 70분 이후까지 0.75 이상을 유지하며 가장 좋은 상관성을 보여주었다. 보다 자세한 결과분석과 시사점은 제5장에 정리하였다.

제5장

결과 및 시사점

1. 해외사례 결과 및 시사점

본 연구에서는 도시침수예경보 업무를 수행하고 있는 미국, 일본, 스코틀랜드를 대상으로 사례조사를 수행하였으며, 도시침수예보를 위한 시공간적 범위, 기준 그리고 체계 및 절차에 대한 결과는 <표 5-1>과 같다.

<표 5-1> 해외사례 요약

구분	공간적 범위	시간적 범위	기준	체계 및 절차
미국	- 행정구역	수분~수시간	- 주의보/경보	· 하천예보센터에서 생성한 돌발홍수능 기반 돌발홍수예보시스템
일본	- 행정구역 (1km 격자) - 특정 지역	수분~1시간	- 5단계	· 표면우량지수를 이용한 예측정보 생산(기상청) · 특별경계수위(지자체장)
스코틀랜드	- 행정구역	3시간~2일	- 비상대응기관 (Flood risk matrix 정보) - 일반시민(3단계)	· 환경청과 기상청에서 합동으로 홍수예보 서비스 운영

자료: Met Office(2014); 서봉철, 이동률, 노희성(2020); National Weather Service, “Advanced Hydrologic Prediction Service”, “Alerts”, “Flood Related Products”, 검색일: 2024.3.14; Japan Meteorological Agency, “表面雨量指数”, 검색일: 2024.1.13; SEPA, “Floodline - What are Flood Messages?”, 검색일: 2024.1.16. 자료를 기반으로 저자 작성.

미국에서는 계측자료에 기반해 현재 도로의 위험상황(nowcasting)에 대한 정보를 제공함으로써 도로 운전자로 하여금 해당 지역을 회피할 수 있도록 함과 동시에 홍수발생이 예상

되는 지역에 대한 예경보(forecasting)를 병행함으로써 도시침수로 인한 피해를 예방할 수 있도록 하고 있다.

일본은 전 국토 단위의 도시침수 발생 위험성에 대한 정보를 제공하고 있으며 하수관로의 '특별경계수위'를 정해 지하공간에 있는 시민들의 대피 시간을 확보할 수 있도록 하고 있다. 이는 특정 목적 달성을 위한 경보체계를 별도로 운영하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

스코틀랜드에서는 도시침수예보시 특정지점이나 정량적 침수심 또는 면적에 대한 언급 대신 침수발생으로 인한 영향에 대한 정보를 제공함으로써 시민들로 하여금 해당 지역의 회피 또는 사전 준비를 통해 도시침수로 인한 위험에서 벗어날 수 있도록 하고 있다. 또한 일반시민과 대응기관에 제공하는 정보를 구분해 예측·예보자료의 활용목적에 명확히 구분하고 있다.

해외사례 조사 결과 행정구역 단위 또는 특정 목적(일반적 침수피해 예방, 지하공간 대피 등)에 맞는 공간적 범위를 가지는 것으로 조사되었다. 예보형태는 관측자료기반의 위험 정보(nowcasting)와 예측자료 기반의 예보자료(forecasting)로 구분하여 제시하고 있으며, 시간적 범위는 수분 ~ 2일까지 다양하나 예보자료의 활용목적에 부합하는 시간적 범위를 가지는 것으로 조사되었다. 도시침수예보를 위한 기준은 2단계(주의보, 경보)에서 5단계까지 다양한 단계를 가지나 예측정보에 대한 정량적 수치는 대부분 제공하지 않고 있는 것으로 파악되었다.

해외국가에서 도시침수예보를 위한 공간적 범위를 행정구역으로 하고 시간적 범위에 대해서는 수분(nowcasting)에서 2일까지로 하는 것은 예측자료의 정확도와 목적에 부합하는 정보를 제공하기 위한 것으로서 우리나라 예경보체계 구성에 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 또한 예보를 위한 기준 역시 예보자료의 활용 대상과 활용목적에 따라 구분하고 있다는 점은 우리나라 도시침수예경보 제도의 목적과 활용성의 명확화가 우선시 되어야 함을 시사한다.

2. 국내사례 결과 및 시사점

가. 타 예경보 시스템

본 연구에서는 도시침수예경보 체계 수립을 위해 현재 운영되고 있는 국내 타 예경보시스템에 대한 사례조사를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

기상청 예보(특보)는 현재시간 이전에 강우강도의 규모를 기준으로 관련 정보를 제공하고 있다. 기상예보는 생활편의 증진을, 기상특보는 재해 발생에 따른 주의 환기 및 경고를 목적으로 하고 있다. 특보를 위한 정량적 기준이 법령에 규정되어 있으며 예보(특보 포함)를 위한 항목, 주기, 선행시간에 대한 법적 근거가 마련되어 있다.

산불예경보 시스템은 미래 발생할 산불의 발생 가능성 측면에서 관심, 주의, 경계, 심각 등 4단계의 정보를 제공하고 있다. 이는 산불 발생의 위험도를 낮추기 위한 정보로서(산불 감시의 규모 조정) 활용되고 있음을 의미한다. 즉, 사전 대응을 통해 산불의 발생 가능성을 낮추기 위함으로 볼 수 있다. 이는 산불 발생 위험성이 증가함에 따라 사전 대응을 통해 산불의 발생 위험을 낮추고, 산불이 발생하는 경우 위험정도에 따라 대응함으로써 산불로 인한 피해를 최소화하기 위한 목적으로 활용되고 있음을 시사한다.

하천 홍수예보는 특보(주의보, 경보) 개념으로 일정 규모의 홍수량 또는 수위에 대한 정보를 제공하고 있다. 홍수 발생 위험성에 대한 정보를 사전에 제공함으로써 홍수의 발생 자체의 억제력은 없으나 피해의 규모를 줄이는데 활용되고 있다.

이를 종합해 보면 타 예경보 시스템의 경우 예보하고자 하는 현상의 발생 원인과 그 기작에 따라 활용 목적성이 달라지는 것을 알 수 있다. 즉, 기상예보, 산불예경보, 하천 홍수예보 3가지 모두 재해를 예방하기 위한 측면에서 정보를 제공하고 있으나 기상예보와 하천 홍수예보의 경우 예보의 대상 현상이 자연현상으로 인위적인 대응을 통해 예보 대상 현상의 발생 자체를 저감시킬 수 있는 가능성이 매우 낮음을 알 수 있다. 따라서 기상예보와 하천 홍수예보의 경우 예보 대상 항목의 발생 가능성에 대한 예측정보를 빠르게 생산해 정보를 제공함으로써 피해를 줄이기 위한 목적을 가진다고 할 수 있다. 이와는 다르게 산불의 경우 자연적인 현상(강수 유무, 토양 수분량, 계절적 요인 등)에 따라 산불의 발생 가능성이 높아질 수 있으나 산불 자체는 인위적인 요소(방화, 개인 부주의 등)에 의해 발생할 가능성이 높다.

따라서 산불의 발생 위험성에 대한 정보를 사전에 생산하고 전파하되 해당 정보를 이용해 산불 발생 위험성을 낮추는 대응 행위의 수준을 결정하는 목적으로도 활용될 수 있다. 이러한 국내 타 예경보시스템 사례조사 결과는 도시침수예보의 목적에 부합하는 시공간적 범위, 정량적 기준, 예보절차 마련의 필요성을 시사하고 있다.

나. 도시침수예경보 시스템

국내 도시침수예경보 시스템에 대한 조사를 위해 서울시 내외수 연계 예측시스템과 서울시 침수예경보 체계, 청주시 도시침수 예측시스템 그리고 재난안전연구원의 한계강우량을 이용한 도시침수예경보 시스템을 대상으로 도시침수예경보를 위한 시공간적 범위, 기준, 체계 및 절차에 대한 조사를 수행한 결과는 다음과 같다.

서울시 내외수 연계 예측시스템의 경우 도림천 유역을 대상으로 Flood Nomo Graph와 SWMM 모형을 이용해 도시침수를 예측하고 있다. 현재 시범사업 수준으로 예경보를 위한 시간적 범위와 예보기준은 수립되어 있지 않은 것으로 파악되고 있으나 도시침수예경보 제도 시행을 위한 다양한 테스트가 진행되고 있다.

서울시 침수예경보 제도는 자치구와 유관기관을 대상으로 예보와 경보로 구분하여 정보를 제공하고 있다. 기상레이더와 지역별 지점강우량 및 도로침수심 자료를 이용해 관측된 정보를 기반으로 단독방과 문자를 통해 자치구와 유관기관에 정보를 제공하고 있다. 경보 상황인 경우 재난문자 및 경고방송을 통해 일반시민들에게 전파를 하고 있으나 별도의 예측정보를 생산해 예보에 활용하고 있지는 않은 것으로 파악되었다.

청주시의 경우 Inforworks ICM 모델링 결과를 기반으로 침수 발생 유무와 지속시간에 대한 정보를 제공하고 있는 것으로 파악되었다. 공간적 범위는 맨홀지점 및 도로 단위 수준의 정보를 생산해 침수발생 유무에 대한 예보를 수행하고 있는 것으로 파악되었다. 청주시에서는 Inforworks ICM 모델을 30분 간격으로 자동실행하여 생산된 정보를 이용해 침수발생 예상 지역에 조기경보 및 재난 대응을 위한 의사결정 지원 목적으로 활용하고자 하고 있으나 실제 활용사례는 확인할 수 없었다.

재난안전연구원에서는 한계강우량을 이용해 침수발생 위험성에 대한 정보를 생산하고

이를 침수 대응 기관에 제공하고 있다. 생산된 정보는 중앙정부와 지자체 공공기관에 제공되고 있다. 예경보를 위한 기준은 주의·경계·심각 3단계 기준을 활용하고 있으며 공간적 범위는 행정동이며, 시간적 범위는 수분~수십분 수준인 것으로 파악되었다.

국내 도시침수예경보시스템 사례조사 결과를 종합해 봤을 때 관측자료를 이용한 실시간 위험정도에 대한 정보제공(nowcasting)과 침수 발생 위험성에 대한 정보(forecasting)제공으로 구분이 가능하다. 그러나 현재 국내 도시침수예경보시스템은 도시침수예경보의 목적, 시공간적 범위, 예측기법, 예경보 기준 등이 혼재되어 있음에 따라 예경보 체계의 구조화 방안 마련이 필요함을 시사한다.

다. 지자체 면담 조사 결과

1) 도시침수예경보시스템 요구사항

국내의 사례 조사를 기반으로 도시침수예경보 체계 및 절차 마련을 위해서는 도시침수예보의 활용 목적에 부합하는 시공간적 범위에 대한 결정이 우선적으로 수행되어야 함을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 현재 도시침수예보업무를 시행하고 있는 서울시, 부산시, 광주광역시의 담당 공무원과 면담을 통해 도시침수 예측시스템의 목적성과 실효성 그리고 개선점에 대한 조사를 수행하였다. 조사결과 도시침수 예측시스템을 통한 정확한 정보 제공 자체보다는 위험성에 대한 정보를 사전에 제공함으로써 상습 침수지에 대한 사전 대비와 침수 대응을 위한 신속한 의사결정을 목적성으로 인식하고 있었다.

또한 도시침수 예측시스템의 실효성 측면에서는 지자체가 침수위험에 대한 정보를 사전에 인지하고 있다는 안도감을 시민들에게 제공할 수 있다는 의견과 정확한 침수 발생 시점 및 범위에 대한 사전 예측은 불가능하므로 사전 위험성에 대한 정보제공을 통해 시민들의 자발적인 위험 회피 측면에서 실효성이 있다는 의견 그리고 시스템 활용을 통한 업무의 효율성 증대와 침수 발생이 예상되는 경우 해당 지역의 시민들을 대피시키기 위한 근거자료로 활용할 수 있다는 측면에서 실효성이 있다는 의견으로 정리되었다.

이러한 의견을 기반으로 도시침수예보제도 시행시 현장 활용을 위해 필요한 적정 규모의 시공간적 범위에 대한 의견으로는 대응 체계의 효율성을 위해 법정동 단위를 선호하는 것으로

나타났으며, 불확실성이 높은 고정확도의 예측정보보다는 현장 대응을 위해 최소 1시간의 선행시간이 확보된 위험성에 대한 정보제공을 선호하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 불확실성이 높은 지점 단위의 예측정보보다는 현장 대응을 위한 필요한 공간적 범위에 대해서 실제 현장 대응을 위한 선행시간을 확보한 예측정보의 생산이 필요함을 시사한다고 할 수 있다.

도시침수예보의 목적성과 실효성에 대한 면담 조사 결과와 함께 현행 도시침수 예측시스템의 개선점에 대한 면담 조사 결과는 다음의 <표 5-2>, <표 5-3>과 같다.

<표 5-2> 도시침수예보의 목적성과 실효성 조사 결과

구분	목적성	실효성
서울특별시	<ul style="list-style-type: none"> · 정확한 정보전달보다는 위험성에 대한 정보의 사전 제공을 통한 피해 예방 	<ul style="list-style-type: none"> · 지자체가 침수위험에 대한 정보를 사전에 인지하고 있는 안도감 측면에서 실효성이 있음
부산광역시	<ul style="list-style-type: none"> · 침수 대응을 위한 신속한 의사결정 · 내부적으로 활용되던 정보를 시민들에게 제공해 대응체계 변경의 전환점 마련 	<ul style="list-style-type: none"> · 정확한 침수 발생 시점 및 범위에 대한 예측은 불가능하다고 판단 · 사전에 위험성에 대한 정보 제공을 통해 시민들의 자발적 위험 회피 측면에서 실효성 있음
광주광역시	<ul style="list-style-type: none"> · 상습 침수지 대상 사전 대비 	<ul style="list-style-type: none"> · 침수 발생으로 인한 대피 근거자료 확보 · 시스템 활용을 통한 업무 효율성

자료: 부산광역시(2024.2.15), 면담(화상)조사; 광주광역시(2024.3.13), 면담(대면)조사; 서울특별시(2024.3.18), 서면조사 자료 기반으로 저자 작성.

〈표 5-3〉 도시침수 예측시스템 개선사항 조사 결과

구분	개선점
서울특별시	<ul style="list-style-type: none"> · 대용량 데이터 신속 분석 · 예측결과에 대한 신뢰성 향상 · 강우예측의 정확도 향상을 통한 침수예측정보의 신뢰성 향상 · 지속적인 시스템 고도화 · 향후 AI 기반으로 발전 필요
부산광역시	<ul style="list-style-type: none"> · 축적되는 관측데이터 활용방안 마련 필요 · 기상, 조위, 강우, 침수심 등 방대한 자료를 활용한 빅데이터 분석을 통한 정보 생산 필요 · 시스템의 정확도 향상을 위한 기초데이터 구축과 운영을 위한 예산 지원 · 침수센서 설치 및 유지관리 기준 규정 정비
광주광역시	<ul style="list-style-type: none"> · 상황 대응시 과도한 정보 제공으로 인해 낮은 활용성을 개선하기 위한 통합정보 필요 · 대응을 위한 최소한의 선행시간(1시간) 확보 필요

자료: 부산광역시(2024.2.15), 면담(화상)조사; 광주광역시(2024.3.13), 면담(대면)조사; 서울특별시(2024.3.18), 서면조사 자료 기반으로 저자 작성.

서울시에서는 현재 대량으로 축적되고 있는 대용량 데이터 신속 분석, 예측 결과에 대한 신뢰성 향상, 강우 예측의 정확도 향상을 통한 침수예측정보의 신뢰성 향상, 지속적인 시스템 고도화, 향후 AI 기반으로 발전 등을 개선점으로 제시하였다. 부산시에서는 축적되는 관측 데이터 활용방안 마련과 기상, 조위, 강우, 침수심 등 방대한 자료를 활용한 빅데이터 분석을 통한 정보 생산, 시스템의 정확도 향상을 위한 기초데이터 구축과 운영을 위한 예산 지원, 침수센서 설치 및 유지관리 기준 규정 정비 등을 개선점으로 제시하였으며, 광주시에서는 상황 대응시 과도한 정보제공으로 인해 낮은 활용성을 개선하기 위한 통합정보 제공, 상황 대응을 위한 최소한의 선행시간(1시간) 확보 등을 개선점으로 제시하였다.

조사된 결과를 종합했을 때 현행 도시침수 예측시스템을 통해 대량의 관측정보가 축적되고 있으나 이를 분석·활용할 수 있는 체계가 미비한 것으로 추정되며, 현재 시스템에서 생산되고 있는 예측정보의 정확성 또한 낮은 것을 알 수 있다. 또한 현재 도시침수 예측시스템의 유지·운영을 위한 예산상의 어려움을 겪고 있는 것을 알 수 있으며, 지자체에서 자체적으로 설치·운영하고 있는 각종 관측 시설에 대한 유지관리 기준 또는 규정 역시 미비한 것을 알 수 있다. 이는 향후 대량으로 축적된 관측자료의 분석·활용 체계를 마련함과 동시에 다양하게 관측되고 있는 정보를 실제 상황 발생시 활용할 수 있는 AI 시스템이 필요함을 시사한다고 할 수 있다.

3. 도시침수예경보 기준 및 시공간적 범위 검토 결과 및 시사점

가. 도시침수예경보 기준

국내 도시침수예경보 기준을 검토하기 위해 서울시 도시침수예경보제도, 도립천 홍수경보 기준과 한국과학기술정보연구원, 행정안전부, 재난안전연구원에서 활용되고 있는 침수 판단 기준에 대한 사례조사 수행 결과 다양한 기준과 범위를 적용하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 예경보의 범위와 목적에 부합하는 정량적 기준을 제시하고 있음에도 불구하고 예경보의 목적이 상이할 뿐만 아니라 제시된 기준에 대한 합리적 근거가 미흡하여 「도시침수 방지법」 시행에 따라 이행되어야 할 국가차원의 도시침수예보의 기준으로 준용하기에는 한계가 있음을 시사한다. 따라서 본 연구에서는 도시침수예보의 목적을 ‘도시침수로 인한 인적·물적 피해 최소화’로 상정하고 도시침수예경보의 기준을 검토하였다. 이를 위해 인적 피해 예방을 위해서는 도시지역에서 활동이 자유로운 아동의 피난 가능 여부를 중심으로 침수심에 대해 검토하였으며, 물적 피해 최소화를 위해서는 도시지역의 자동차의 운행 가능 수준에 대해 검토하였다.

아동의 피난 가능여부를 검토하기 위해 침수발생시 느끼는 공포감과 자력으로 피난이 가능한 침수심에 대해 검토하였으며, 자동차의 경우 차량으로 빗물이 유입되는 수심과 빗물이 자동차 엔진으로 유입되어 자동차의 운행이 불가능해지는 침수심에 대해 검토하였다. 본 연구에서 검토한 아동 피난 가능 수준의 침수심과 자동차 운행 가능 수준의 침수심은 다음 <표 5-4>와 같다.

<표 5-4> 아동 피난 기준 및 자동차 운행 가능여부 검토 결과

구분	침수심(m)	비교
아동	0.3	· 초등학교 1~2학년 어린이의 무릎 높이 수준 · 침수에 따른 공포감을 느끼며 자력으로 피난이 어려울 수 있음
자동차	0.1	· 차량 내부로 빗물 유입 가능
	0.5	· 자동차 엔진 정지 가능

자료: 저자 작성.

나. 시공간적 범위

도시침수예보를 위한 시공간적 범위 검토를 위해 다양한 선행 문헌과 기준 그리고 도시침수 예측시스템을 구축해 운영하고 있는 지자체 담당자와 면담을 수행한 결과 도시침수예보가 실제 도시침수로 인한 피해 예방을 위해 활용되기 위해서는 충분한 대응 시간 확보가 필요한 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 도시침수 대응을 위해 필요한 대응 시간과 공간적 범위에 대한 알아보고자 재난 발생시 지자체에서 준용해야 하는 위기관리 표준매뉴얼, 위기대응 실무매뉴얼, 현장조치 행동매뉴얼을 중심으로 검토한 결과 시간적 범위 설정을 위해서는 재난 관리 체계 중 상황관리 단계로 넘어가는 단계 이전에 도시침수예보 정보가 필요한 것을 확인할 수 있었다. 이는 시간적 범위에 대한 기준을 제시하기 위해서는 실제 침수 발생 시 지자체에서 상황을 판단하고, 지역재난안전대책본부를 구성·운영하여 예경보를 발령하고 대피 명령 등의 의사결정 절차에 대한 고려가 필요함을 시사한다.

도시침수예보의 공간적 범위에 대해 검토한 결과 상황 대응 체계에 대한 고려가 필요한 것을 확인하였다. 이를 파악하기 위해 국가 재난대응 관리 체계와 단계 그리고 '재난 대비 30분 대피시스템'의 대응 체계 및 절차를 검토한 결과 재난 대응을 위한 체계와 절차는 행정구역 단위로 이루어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 이는 도시침수예보에 대한 정보 역시 최소 행정구역 단위로 전파되어야 함을 시사한다고 할 수 있다.

4. 관측수위 기반 시공간적 예보범위 검토 결과 및 시사점

가. 맨홀 수위

2022년 8월 도시침수가 발생한 도림천 인근 5개의 맨홀 수위 관측 결과를 이용해 도시지역 맨홀의 수위 상승-하강 속도를 분석한 결과는 <표 5-5>와 같다.

<표 5-5> 관측 맨홀 수위 상승-하강 속도 분석 결과

지점번호	평균 상승속도 (cm/min)	상승속도 표준편차 (cm/min)	1m 상승 평균시간 (min)	평균 하강속도 (cm/min)	하강속도 표준편차 (cm/min)	1m 하강 평균시간 (min)
19-0004	4.892	2.008	20.4	1.532	0.655	65.3
19-0001	1.614	0.953	62.0	0.476	0.388	210.1
21-0002	9.973	6.104	10.0	25.5	24.772	3.9
21-0007	3.527	2.137	28.4	1.864	1.192	53.6
21-0003	7.625	5.449	13.1	2.804	2.710	35.7
평균	5.526	3.330	26.78	6.435	5.943	35.9

자료: 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, 검색일: 2024.3.22를 활용하여 저자 분석·작성.

분석 결과 맨홀별로 편차가 매우 크나 1m 상승에 최대 62분, 최소 10분 가량 소요되는 것으로 분석되었으며, 하강하는 경우 최대 210분에서 3.9분으로 나타났다. 이는 맨홀 평균 높이가 2m, 위험수위가 평균 1m임을 고려했을 때 위험수위 도달 후 월류까지 확보 가능 시간이 최대 62분에서 최소 10분 가량 필요함을 의미한다. 그러나 검토 대상인 5개 지점 중 19-0001 지점을 제외한 나머지 4개 지점의 1m 상승 평균 소요 시간은 약 18분으로 나타났다.

분석을 위해 선정된 맨홀의 개수 및 위치가 임의로 선정되었다는 점은 분석 결과를 일반화하기에 다소 약점으로 지적될 가능성이 있으나 선정된 5개의 맨홀 중 80%를 차지하는 4개의 맨홀에서 1m 수위 상승에 소요되는 시간이 약 18분이 소요되었다는 점은 강우 발생시 도시 지역의 맨홀 수위 상승이 매우 빠르게 이루어진다는 점을 뒷받침하는 근거로 활용될 수

있다. 따라서 이는 강우 발생 이후 맨홀의 수위 상승 속도를 고려했을 때 상황 발생시 현장 대응을 위한 선행시간 확보가 상당히 어렵다는 것을 시사한다.

또한 향후 도시침수예보를 위해 맨홀 수위를 관측하고 이를 예보자료 생산의 근거자료로 활용하기 위해서는 맨홀 월류 또는 하수관로의 통수능 부족으로 인한 침수의 유발과 맨홀 수위의 인과관계를 분석하기 위한 기법 개발과 예보지점의 침수를 대표할 수 있는 맨홀 지점 선정에 관한 기법 개발이 필요함을 시사한다.

나. 하천 수위

2022년 8월 도시침수가 발생한 도림천의 양산교와 도림교 지점에서 관측된 수위 결과를 이용해 도시하천의 수위 상승-하강 속도를 분석한 결과는 <표5-6>과 같다.

<표 5-6> 도림천 수위 상승-하강 속도 분석 결과

구분	시간	누적강수량 (mm)	양산교			도림교		
			시간	수위 (m)	1m 상승 평균시간 (min)	시간	수위 (m)	1m 상승 평균시간 (min)
case 1	12:14	2.5	12:30	31.15	56.2	12:40	6.17	40.6
	13:06	55.5	13:20	32.04		14:00	8.14	
case 2	19:23	105	21:30	32.79	56.1	19:40	7.47	33.3
	22:20	364	22:30	33.86		20:40	9.27	

자료: 서울특별시 치수정보기술팀(2024), 하천수위 관측자료 활용하여 저자 분석·작성.

당시 관측된 자료는 12:14~13:06분까지 관측된 강우사상(case 1)과 19:23~22:20분까지 관측된 강우사상(case 2) 2개로 구분이 가능하다.

먼저, case 1은 12:14~13:06분까지 52분간 내린 53mm의 강수량에 대해서 양산교는 50분간 0.89m의 수위가 상승했으며, 도림교는 80분간 1.97m 상승해 각각 1m 수위 상승 하는데 56.2분, 40.6분이 소요된 것으로 분석되었다.

case 2는 19:23~22:20분까지 57분간 내린 259mm의 강수량에 대해서 양산교는 60분간

1.07m의 수위가 상승하였으며, 도림교는 60분간 1.8m의 수위가 상승해 각각 1m 수위 상승에 56.1분, 33.3분이 소요되는 것으로 분석되었다. 수위가 상승하는 반응 시간을 검토한 결과 양산교는 16분, 도림교는 36분 후부터 수위가 상승하는 것으로 나타났다. 강우 발생 이후 수위 상승까지 도림교가 양산교보다 20분 가량 늦은 것은 도림교가 유역의 하단에 위치하고 있기 때문인 것으로 수리수문학적으로 매우 타당한 결과가 도출된 것으로 판단된다. 따라서 강우 발생 이후 최고 수위 도달까지 case 1에서 양산교는 1시간 6분, 도림교는 1시간 46분이 소요되었으며, case 2에서는 양산교가 3시간 7분, 도림교는 1시간 17분⁴²⁾으로 나타났다. 이는 하천수위 예측을 위한 계산의 신속성이 확보된다면 지점 단위 수준의 예경보가 가능함을 시사한다.

42) case 2에서 도림교에서의 최고 수위 도달이 양산교보다 빠른 이유는 당시 도림교의 관측 최고 수위에 도달해 실제 피크치보다 빠르게 최고 수위에 도달한 것이 원인으로 판단된다.

5. 예측 강수량 기반 선행시간 확보 수준 검토 결과 및 시사점

도시침수예보를 위한 예측자료 생산시 가장 중요한 요소는 도시지역의 침수를 유발하는 강우자료이다. 따라서 충분한 예측성을 담보하는 강우예측자료는 도시침수예보를 위해 중요한 요소 중 하나라고 할 수 있다. 본 연구에서는 도시침수예보를 위해 필요한 선행시간 확보와 예측강우자료의 예측성 검토를 위해 2023년 강우사상에 대한 초단기 강우예측자료의 상관계수(CC) 분석을 수행하였으며 그 결과는 <표 5-7>과 같다.

<표 5-7> 도립천 유역의 초단기 강우예측자료 상관성 분석 결과

구분	선행시간(분)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
구로	0.7578	0.6959	0.6860	0.5823	0.5416	0.4009	0.2159	0.2351
대림	0.7649	0.6513	0.6480	0.5705	0.5396	0.3719	0.1931	0.1971
도림	0.7989	0.8400	0.7967	0.7680	0.7390	0.7353	0.7309	0.7911
문래	0.7583	0.8212	0.7581	0.7227	0.7143	0.6232	0.4544	0.3920
봉천천	0.7697	0.6705	0.6849	0.5265	0.4537	0.3601	0.1238	0.0121
서울대	0.6612	0.7137	0.6893	0.4561	0.2959	0.1477	0.0996	0.0684
신림	0.7541	0.5904	0.5960	0.5902	0.5404	0.4024	0.3326	0.2257

자료: 저자 작성.

도립천 유역의 7개 소유역에 대한 초단기 강우예측자료의 상관성 분석을 수행한 결과 도림 소유역을 제외하고 구로, 대림, 신림 소유역은 선행시간 40분까지, 문래 소유역은 선행시간 50분까지, 봉천천 소유역은 선행시간 30분까지, 서울대 소유역은 선행시간 20분까지 관측자료와 예측자료 사이의 상관성이 있다고 판단할 수 있는 0.5 이상을 나타내는 것으로 분석 결과가 도출되었다. 도림 소유역은 상관계수가 선행 70분까지 0.75 이상을 유지하며 가장 좋은 상관성을 나타냈으나 나머지 소유역은 평균 선행시간 확보 가능한 시간이 40여 분 정도로 분석되었다. 이는 향후 도시침수 예측정보의 신뢰성과 충분한 선행시간 확보를 위해서는 초단기 강우예측자료의 예측성 확보 방안 마련이 필요함을 시사한다.

제6장

정책제언

1. 도시침수예보를 위한 시공간적 범위

가. 시공간적 범위 제안

본 연구에서는 도시침수예보를 위한 시공간적 범위에 대해서 기초지자체의 침수위험 지구를 대상으로 최소 1시간 이상의 선행시간이 확보된 행정동 단위를 제안한다. 이는 지자체 도시침수 관리 및 대응 담당자 면담을 통해 시공간적 범위에 대한 의견 수렴결과에 부합할 뿐만 아니라 지자체 도시침수 대응 절차 및 체계 조사한 결과 실제 예보 정보가 활용되어 도시침수로 인한 피해 예방에 활용하기 위한 필요한 최소 조건으로 판단된다.

나. 적정 선행시간 확보를 위한 정책제언

현재 도시침수 관리 및 예보를 위해 관측되고 있는 서울시 도립천 구역의 맨홀 관측자료를 이용해 1시간의 선행시간 확보 여부를 검토해 본 결과 맨홀의 수위 변화 속도가 매우 빠름에 따라 예보자료로 직접 활용하는 것은 곤란할 것으로 판단된다. 따라서 예보(forecasting)가 아닌 nowcasting 자료로 활용하는 것을 제안한다. 도시하천 수위의 경우 맨홀 대비 느린 수위변화 속도를 보여줌에 따라 적절한 예측기법을 적용하는 경우 예보에 활용 가능할 것으로 판단된다. 따라서 하천수위 예측자료를 이용해 행정동 단위의 예보와 인근 맨홀수위 관측 자료를 이용한 nowcasting을 병행하는 방안을 제안한다.

2. 도시침수예보를 위한 정량적 기준

도시침수예보를 위한 정량적 기준에 대한 사례조사 결과 과학적 근거에 기반한 정량적 기준이 부재함에 따라 본 연구에서는 과학적이고 정량적인 도시침수예보 기준 마련을 위해 개별적인 외부활동이 자유로운 초등학교 저학년의 피난 가능한 수준의 침수심과 도시지역 자동차 내 빗물 유입과 엔진정지가 유발될 수 있는 침수심을 검토한 결과 각각 0.3m, 0.1m, 0.5m가 도출되었다. 따라서 국내외 도시침수예보 기준을 고려했을 때 예보단계와 위험기준을 <표 6-8>과 같이 제안한다.

<표 6-1> 도시침수예보를 위한 정량적 기준(안)

단계		기준	비고
주의보	주의	0.1m 초과 예상	자동차 최저지상고
	경계	0.3m 초과 예상	어린이 피난 가능 범위
경보	심각	0.5m 초과 예상	자동차 엔진 정지

자료: 저자 작성.

3. 도시침수예보 체계 및 절차(안)

본 연구에서는 다년간 안정적으로 하천홍수 예보를 수행하고 홍수예보 절차를 참고하여 도시구역의 특성을 반영한 도시침수예보 체계 및 절차(안)를 다음과 같이 제안한다.

가. 도시침수예보 절차(안)

도시침수예보 절차는 자료수집, 자료전송, 침수분석, 예보전파 등 4단계로 구성하였다. 자료수집 단계에서는 도시침수예보에 필요한 강수량, 맨홀수위, 배수펌프장 수위, 인접 도시하천 수위, 지표면 침수심 등과 같은 자료를 수집하는 체계를 구성하였으며, 자료 전송 단계에서는 안정적인 관측자료의 전송과 유관기관의 자료 전송 교환 절차를 포함하였다. 침수분석 단계에서는 침수위험기준 도달 여부와 침수발생 예상시 침수의 공간적·시간적

범위를 예측한다. 이후 침수발생이 예상되는 경우 침수위험기준 만족 여부에 따라 침수예보의 발령 여부를 검토하는 체계를 제안한다. 마지막으로 예보의 전파 단계에서는 도시침수 관리·대응 책임을 가지는 중앙재난안전대책본부(중앙, 지방)와 언론사(방송, 신문) 및 SNS를 통한 일반 시민을 대상으로 한 예보를 구분하여 전파하는 방식을 제안하며 그 절차는 <그림 6-1>과 같다.

자료수집	자료 전송	침수분석	예보 전파
<ul style="list-style-type: none"> 강수량 맨홀수위 배수펌프장 수위 하천수위 지표면 침수심 	<ul style="list-style-type: none"> 관측자료 전송 유관기관자료 교환 	<ul style="list-style-type: none"> 침수위험기준 분석 침수규모 예측 침수예보 발령 여부 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 중앙재난안전대책본부(중앙, 지방) 언론사(방송, 신문) 일반 시민(SNS)

자료: 저자 작성

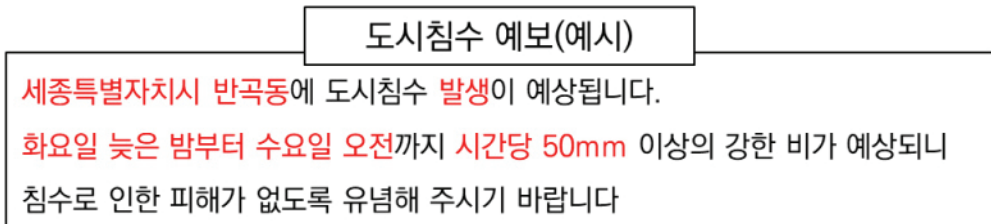
<그림 6-1> 도시침수예보 절차(안)

나. 도시침수예보 체계(안)

본 연구에서는 도시침수 관리·대응을 담당하고 있는 지자체 공무원과 면담을 통해 실제 현장 업무에 활용가능한 예보자료의 시공간적 범위에 대한 조사를 수행하였으며, 이를 기반으로 현재 관측·예측 자료의 적용 가능성 여부를 검토하였다. 검토 결과 현재 도시침수예보에 활용 가능한 맨홀 수위의 경우 그 변화 속도가 매우 빨라 예보에 활용하기보다는 현재 침수 위험수준에 대한 정보를 제공하는 Nowcasting에 활용하는 방안을 제안하였다. 따라서 도시 침수예보 체계(안) 역시 도시침수예보를 위해 수집된 관측자료를 Nowcasting과 예측(forecasting) 등 두 가지로 구분하여 활용하는 체계를 <그림 6-2>와 같이 제안한다.

4. 도시침수예보(특보) 발령문(안)

해외사례 조사 결과 대부분의 국가에서는 도시침수예보시 공간적 범위에 대해서는 특정 지점 대신 행정구역 단위 또는 도로명 수준에 대해서 정량적인 침수심과 침수범위에 대한 예보는 수행하고 있지 않으며, 시간적 범위 역시 정확한 시간 대신 오전, 오후 또는 오늘 밤, 내일 새벽 등 상대적으로 넓은 범위의 시간적 범위에 대해서 침수로 인한 영향 범위에 무게 중심을 두고 예보를 수행하고 있는 것으로 파악되었다. 이는 다양한 원인을 추정할 수 있으나 현재 기술 수준에서는 도시침수 발생의 정확한 지점과 범위 그리고 발생 시기를 예측할 수 없기 때문인 것으로 파악되었다. 따라서 예측정확도가 떨어지는 세밀한 예보시 발생할 수 있는 리크스를 회피함과 동시에 다소 넓은 범위에 대해서 침수 발생으로 인한 영향에 대해서 시민들 스스로 위험을 회피할 수 있도록 하는 것으로 파악된다. 따라서 국내 도시침수예보시에도 무리하게 예측지점과 시간을 특정하기보다는 침수 발생 범위와 시기에 대한 정보를 제공함과 동시에 침수 발생으로 인한 영향 범위에 대한 정보를 제공하는 방식을 다음과 같이 제안한다.



자료: 저자 작성.

〈그림 6-3〉 도시침수예보(안)

도시침수 특보(주의보)(예시)

세종특별자치시 반곡동에 도시침수 주의보가 발령되었습니다.
화요일 밤 10시부터 수요일 오전 6시 사이에 저지대를 중심으로 어린이나 노약자의 통행에 어려움을 겪을 수 있으며, 자동차의 운행이 어려울 수 있습니다. 특히, 지하차도를 포함한 지하공간이 침수될 수 있습니다.
현재 인근 하천 수위는 3.2m로, 상승중에 있으며, 시청대로 맨홀수위는 2.0m로 위험수위에 인접했습니다.

자료: 저자 작성.

〈그림 6-4〉 도시침수 특보(주의보)(안)

도시침수 특보(경보)(예시)

세종특별자치시 반곡동에 도시침수 특보가 발령되었습니다.
수요일 아침 7시부터 8시 사이에 저지대를 중심으로 성인과 자동차의 통행이 불가능할 수 있습니다. 또한, 지하차도를 포함한 지하공간의 침수 위험성이 매우 높습니다. 하천변 인근이나 저지대에 접근하지 마시기 바랍니다. 특히 위험한 지역은 시청대로 370번지 인근입니다. 해당지역에 접근하시려는 분들은 침수 특보가 해제된 후에 접근하시기 바랍니다.
현재 인근 하천 수위는 4.2m로, 상승중에 있으며, 시청대로 맨홀수위는 2.5m로 위험수위를 초과하여 월류 위험이 있습니다.


자료: 저자 작성.

〈그림 6-5〉 도시침수 특보(경보)(안)

5. 시행령 개정(안)

현재 「도시침수방지법 시행령」 제11조 제2항 제1호에서는 도시침수예보 시 하천·하수도의 실측 및 예측수위에 관한 정보를 제공하도록 하고 있다. 그러나 본 연구에서 하천과 하수도 수위 자료의 변화 속도를 검토해 본 결과 하수도 수위의 변화속도가 매우 빠름에 따라 예측 자료의 생산뿐만 아니라 정보의 활용성이 매우 낮을 것으로 판단된다. 따라서 도시침수예보의 신뢰성을 확보하기 위해 현재 구현 가능한 기술수준에서 제공 가능한 정보를 제공할 수 있도록 시행령 개정안을 다음과 같이 제안한다.

〈표 6-2〉 「도시침수방지법 시행령」 개정(안)

개정 전
<p>제11조(도시침수예보의실시 등) ① 환경부장관은 법 제15조제1항에 따른 도시침수예보(이하 “도시침수예보”라 한다)를 실시하려는 경우에는 사전에 도시침수예보를 위한 측정지점 및 기준수위 등을 고시해야 한다. 고시한 사항을 변경하는 경우에도 또한 같다.</p> <p>② 도시침수예보를 통해 제공하는 정보는 다음 각 호와 같다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 하천·하수도의 실측 및 예측수위에 관한 정보 2. 하천·하수도의 범람 등으로 인한 침수위험 및 침수범위에 관한 정보

개정 후
<p>제11조(도시침수예보의실시 등) ① 환경부장관은 법 제15조제1항에 따른 도시침수예보(이하 “도시침수예보”라 한다)를 실시하려는 경우에는 사전에 도시침수예보를 위한 측정지점 및 기준수위 등을 고시해야 한다. 고시한 사항을 변경하는 경우에도 또한 같다.</p> <p>② 도시침수예보를 통해 제공하는 정보는 다음 각 호와 같다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 하수의 실측수위에 관한 정보 2. 하천의 실측 및 예측수위에 관한 정보 3. 하천·하수도의 범람 등으로 인한 침수위험 및 침수범위에 관한 정보

자료: 국가법령정보센터, “도시침수방지법 시행령” 기반으로 저자 작성.

6. 향후 연구과제 제안

본 연구에서 제안된 도시침수예보를 위한 시공간적 범위(행정동 기반의 선행 1시간 확보)에 기반해 적정 선행시간 확보 가능 여부를 검토해 본 결과 맨홀수위 자료는 nowcasting에, 하천수위 자료는 관측기반의 nowcasting과 예측정보 기반의 forecasting을 병행하는 방안이 제안되었다. 그러나 현재 서울시에 설치되어 있는 245개의 맨홀 수위 관측자료는 불명수⁴³⁾를 파악하기 위한 목적으로 설치됨에 따라 도시침수예보자료로 활용 가능한지에 대한 사전 검토가 이루어지지 못하였으며, 본 연구에서 검토를 위해 선정된 5개 지점의 맨홀 역시 도시침수예보를 위한 대표성, 하수관로의 수위 상승과 지표면 침수심과의 인과성 등에 대한 검토는 수행되지 못한 한계점을 가지고 있다. 향후 도시침수예보를 위해 맨홀과 도시하천의 수위 관측을 위한 계측기 설치가 필요할 것으로 판단되나 현재 해당지역의 도시침수 발생 유무를 효과적으로 판단할 수 있는 대표지점(하천, 맨홀 등)을 선정하는 방안 또는 기법이 부재한 것으로 파악된다. 따라서 도시침수를 사전에 효과적으로 모니터링하고 이를 예측에 활용할 수 있는 ‘도시침수 대표지점 선정 기법 개발’을 위한 연구를 제안한다.

현재 시범사업으로 진행 중인 동역학 모델링 기반의 예측정보 생산은 개별 맨홀, 관로 수준의 예측정보를 생산할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 모형 구축과 보정 그리고 해석에 많은 노력과 시간이 소요된다. 이러한 노력에도 불구하고 현재로서는 실효성 있는 예측정보 생산에 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 충분한 선행시간 확보를 위해 일본사례와 같이 Tank model과 같이 비교적 간단한 기법이 적용된 ‘한국형 도시침수 예측모델 개발’사업을 제안한다.

지자체 설문·면담 조사 결과 현재 도시침수 예측시스템을 구축·운영하고 있는 지자체에서는 실시간으로 다양한 관측데이터(맨홀 수심, 지표면 침수심, 예측강우, 관측 강우, CCTV 등)가 대용량으로 축적되고 있다. 그러나 이러한 데이터가 도시침수로 인한 피해를 줄이기 위해서는 대용량 데이터를 분석해 향후 침수 발생 가능성이나 위험지역을 선별해 피해 저감을 위해 활용될 수 있는 정보로의 가공이 필요하다. 따라서 현재 축적된 자료를

43) 하수관로에 유입되는 오수와 우수 이외에 원인불명의 유입수를 의미하며 주로 하수관로의 파손 부위로 유입되는 지하수를 의미함.

이용해 침수를 예측하거나 실시간으로 수집되는 관측자료 중 침수 피해 저감을 위해 활용 가능한 데이터를 선별해 정제된 정보를 제공해 줄 수 있는 'AI 기반 도시침수 대응·관리 시스템 개발을 위한 연구'를 제안한다.

도시침수 예측정보의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 초단기 레이더 강우예측정보의 예측성이 4~50분밖에 담보되지 않는 것으로 분석되었다. 비록 서울시 도림천 유역에 한정된 분석이었으나 도시침수로 인한 피해 예방이라는 도시침수예보의 목적성을 달성하기 위해서는 충분한 선행시간이 확보된 정확도 높은 예측강우정보의 생산이 무엇보다 중요하다. 따라서 도시침수예보의 정확도와 선행시간 확보에 가장 큰 영향을 미치는 고정확도의 예측강우 자료 생산을 위해 '초단기 레이더 강우예측정보의 예측성능 향상을 위한 연구'를 제안한다.

| 참고문헌 |

[국내문헌]

- 강상혁(2003), “저지대 침수지역 주민의 피난행동과 적정 피난수심에 관한 연구”, 「대한토목학회논문집」, 23(6), 대한토목학회, pp.561-565.
- 강호선 외(2022), “도시침수 대응을 위한 모니터링 시스템 개발 및 시범운영”, 「한국산학기술학회 춘계 학술발표논문집」, 한국산학기술학회, pp.36-37.
- 강호선 외(2023), “도시침수 상황관리 지원을 위한 RAINSYS 개발”, 「한국산학기술학회논문지」, 24(11), 한국산학기술학회, pp.461-469.
- 경기도 의정부시(2014), 「재해정보지도」.
- 국가기술표준원(2015), 「제7차 한국인 인체치수조사사업」.
- 국립기상과학원(2020), 「한반도 기후변화 전망보고서 2020: SSP1-2.6/SSP5-8.5에 따른 기후변화 전망」.
- 기상청(2020), 「국민의 내일을 위한 동반자 기상청」, pp.12-13.
- 김광영, 양명석(2023), “도시 침수 예측에서 대응까지: 솔루션 핵심기술 및 활용 사례 중심”, 「KISTI ISSUE BRIEF」, 제61호, 한국과학기술정보연구원.
- 김진형, 목지윤(2023), “국내 사례로 본, 실시간 침수예측의 현주소”, 「물과미래」, 56(4), 한국수자원학회, pp.77-81.
- 낙동강홍수통제소 예보통제과(2024.1), 내부자료.
- 서봉철, 이동률, 노희성(2020), “미국의 홍수 예·경보 체계 및 기술 현황”, 「대한토목학회지」, 68(9), 대한토목학회, p.58.
- 서용원 외(2022), 「지자체 도시홍수 기초조사 및 통합관리모델 수립연구」, 한국수자원공사.
- 서울연구원 재난안전연구센터(2023), 내부자료.
- 서울특별시 치수정보기술팀(2024), 내부자료.
- 심재범 외(2020), “서울시 도시침수 예측시스템 개발”, 「한국수자원학회 학술발표회논문집」,

- 한국수자원학회, p.341.
- 심재범 외(2021), “서울시 도시침수 예측시스템의 개선 및 운영”, 「한국수자원학회 학술발표회 논문집」, 한국수자원학회, p.481,
- 육지문(2024), “도림천유역 내외수연계 침수예측 실용화 연구”, 「KEI 전문가세미나」, 3월 6일, 세종: 한국환경연구원, p.24.
- 윤선권, 김민석, 최현석(2021), 「도림천 고립사고 예방을 위한 예경보시설 운영기준 및 매뉴얼 개선」, 서울기술연구원, pp.17-24.
- 윤선권, 최현석(2019), 「증량천 유역 유량측정 및 홍수 예·경보 방안」, 서울기술연구원.
- 이승수 외(2022), “도시침수 모의 기술 국내 연구동향 리뷰: 2001-2022”, 「Journal of Korea Water Resources Association」, 55(10), pp.707-721.
- 이승수, 이문환, 강형식(2020), “2020년 홍수 현황과 항구적 대책 방향”, 「KEI 포커스」, 8(14), 한국환경정책·평가연구원.
- 제주시(2020), 「2020년 자연재난 대응 행동요령」.
- 조재웅 외(2022), 「도시침수 예측 기술 운영 전략 수립」, 국립재난안전연구원.
- 주재승, 김태훈(2015), “지하공간 침수시 대피능력에 관한 실험적 연구”, 「한국방재학회논문집」, 15(2), 한국방재학회, pp.189-196.
- 청주시(2018), 「2018 시정백서」, pp.595-596.
- 최우정 외(2014), 「지역별 주요 재난 대응 시나리오 및 기준개발(Ⅰ)」, 국립재난안전연구원.
- 최창원 외(2018), 「자연재난 위험도평가 적용 및 도시침수 경보체계 실용화」, 국립재난안전연구원.
- 한강홍수통제소 예보통제과(2024.2), 내부자료.
- 행정안전부(2020), 「2020년도 민방위 업무 지침: 편성, 교육, 훈련, 시설장비」.
- 행정안전부(2021), 「대한민국 재난안전관리」.
- 환경부 도시침수대응기획단(2023.11), 내부자료.

[국외문헌]

- Suga, K. et al.(1994), “避難時の水中歩行に関する実験”, 『水工学論文集』, 38, pp.829-832.
- Dorman, J. and N. Banerjee(2016), “A Real-Time Flood Warning System”, *ArcUser*, 19(1), p.16, p.18.
- Ishigaki, T. et al.(2005), *Experimental Study on Evacuation from Underground Space in Urban Flood*, IAHR World Congress, Seoul.
- Met Office(2014), *Your Guide to Using the Flood Guidance Statement*, p.3, p.6.
- SEPA(2020), *The Flash Floods of 11 and 12 August 2020 in Central and Eastern Scotland*, p.3, p.10, pp.12-13.

[온라인 자료]

- 국가법령정보센터, “기상법”, [https://www.law.go.kr/법령/기상법/\(19225,20230214\)](https://www.law.go.kr/법령/기상법/(19225,20230214)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “기상법 시행령”, [https://www.law.go.kr/법령/기상법 시행령/\(34194,20240206\)](https://www.law.go.kr/법령/기상법 시행령/(34194,20240206)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “도시하천유역 침수피해방지대책법”, [https://www.law.go.kr/법령/도시하천유역 침수피해방지대책법/\(19719,20230914\)](https://www.law.go.kr/법령/도시하천유역 침수피해방지대책법/(19719,20230914)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “산림보호법”, [https://www.law.go.kr/법령/산림보호법/\(19115,20221227\)](https://www.law.go.kr/법령/산림보호법/(19115,20221227)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “산림보호법 시행령”, [https://www.law.go.kr/법령/산림보호법 시행령/\(33582,20230627\)](https://www.law.go.kr/법령/산림보호법 시행령/(33582,20230627)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “수자원법 시행규칙”, [https://www.law.go.kr/법령/수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률 시행규칙/\(00764,20180608\)](https://www.law.go.kr/법령/수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률 시행규칙/(00764,20180608)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “수자원법 시행령”, [https://www.law.go.kr/법령/수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률 시행령/\(33592,20230627\)](https://www.law.go.kr/법령/수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률 시행령/(33592,20230627)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙”, <https://www.law.go>.

- kr/법령/자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙/(01155,20221026), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “재난 및 안전관리기본법”, [https://www.law.go.kr/법령/재난 및 안전관리 기본법/\(19838,20231226\)](https://www.law.go.kr/법령/재난 및 안전관리 기본법/(19838,20231226)), 검색일: 2024.1.15.
- 국가법령정보센터, “재해지도 작성 기준 등에 관한 지침”, [https://www.law.go.kr/행정규칙 /재해지도 작성 기준 등에 관한 지침/\(2021-89,20211228\)](https://www.law.go.kr/행정규칙 /재해지도 작성 기준 등에 관한 지침/(2021-89,20211228)), 검색일: 2024.4.2.
- 국가산불위험예보시스템, “홈페이지 캡처화면”, <http://forestfire.nifos.go.kr/main.action>, 검색일: 2024.2.16.
- 기상청, “기상예보”, <https://www.kma.go.kr/kma/biz/forecast02.jsp>, 검색일: 2024.1.15.
- 내 손안에 서울(2023.6.26), “전국 최초 침수 예·경보제 도입 …서울시 풍수해 안전대책”, <https://mediahub.seoul.go.kr/archives/2008333>, 검색일: 2024.4.3.
- 뉴시스(2024.3.14), “포항시, 시민 안전 최우선… 하천 붕괴·도시 침수 대응 훈련”, https://mobile.newsis.com/view.html?ar_id=NISX20240314_0002661073, 검색일: 2024.4.3.
- 대한민국 정책브리핑(2005.2.15), “소방청, 재난대비 30분 대피시스템 구축”, <https://www.korea.kr/briefing/policyBriefingView.do?newsId=70082806&tongYeog=Y&pageIndex=&startDate=2022-06-12&endDate=2023-06-12&srchWord=>, 검색일: 2024.3.28.
- 동아일보(2022.8.9), “폭우로 8명 사망·7명 실종…이재민 391명 발생”, <https://n.news.naver.com/mnews/article/020/0003444552?sid=102>, 검색일: 2023.8.12.
- 디지털트윈(2024.2.13), “행정경계(시군구)”, https://www.vworld.kr/dtmk/dtmk_ntads_s002.do?searchKeyword=%EC%8B%9C%EA%B5%B0%EA%B5%AC&searchOrganization=&searchBrmCode=&searchTagList=&searchFrm=&pageIndex=1&gidmCd=&gidsCd=&sortType=00&svcCde=MK&dsId=30252&listPageIndex=1, 검색일: 2024.3.24.
- 머니투데이(2019.7.14), “BMW보다 그랜저? 엔진 흡입구 낮은 車, 침수사고 위험 높다”, https://m.mt.co.kr/renew/view.html?no=2019071413432183617&VNC_T#_enliple, 검색일: 2024.2.15.

- 무등일보(2020.8.8), “500mm 물폭탄 전남 사망 8명… 광주 송정역 일대 침수 등”, <http://m.mdilbo.com/detail/Dil0FN/610463>, 검색일: 2024.4.3.
- 부산광역시(2024.1.9), “도시침수 재해정보지도”, <https://www.busan.go.kr/depart/disastermap>, 검색일: 2024.3.28.
- 부산시 도시침수 통합정보시스템, “메인화면”, <https://safecity.busan.go.kr/#/>, 검색일: 2024.4.3.
- 서울 열린데이터 광장(2024.1.15), “서울시 하수관로 수위 현황”, <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-2527/S/1/datasetView.do>, 검색일: 2024.3.22.
- 서울정보소통광장(2022.3.31), “34개소 침수취약지역 해소 사업 추진 현황”, <https://open.gov.seoul.go.kr/public/25670227>, 검색일: 2024.1.15.
- 서울특별시(2023.3.10), “전국 최초 ‘침수 예·경보제’ 시행… ‘동행파트너’가 약자대피 지원”, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/522983>, 검색일: 2024.3.5.
- 서울특별시(2023.4.18), “하수수위현황”, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/519293>, 검색일: 2023.4.22.
- 통계청, “시·도별 학생표본 신체(키) 검사 현황”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=112&tblId=TX_11202_A001&conn_path=I2, 검색일: 2024.2.15.
- 한국일보(2019.7.14), “자동차 엔진 흡입구 낮을수록 침수사고 위험 커진다”, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/201907141449749859>, 검색일: 2024.2.15.
- 행정안전부, “위기관리 매뉴얼”, <https://www.mois.go.kr/frt/sub/a06/b11/crisisManual/screen.do>, 검색일: 2024.3.28.
- 환경부 보도자료(2023.4.12), “가상모형(디지털 트윈)·인공지능(AI) 기반 도시침수예보 및 신속 대응체계 구축한다”, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1594150&menuId=10525>, 검색일: 2024.4.3.
- Japan Meteorological Agency, “표면우량지수 기준치”, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kijun/tk_fpi_map.pdf, 검색일: 2024.1.15.
- Japan Meteorological Agency, “表面雨量指数(표면우량지수)”, <https://www.jma.go.jp>

/jma/kishou/known/bosai/hyomenshisu.html, 검색일: 2024.1.13.

National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA, “River Forecast Centers”,
<https://www.noaa.gov/jetstream/rfcs>, 검색일: 2024.3.11.

National Weather Service: NWS, “Advanced Hydrologic Prediction Service”, <https://water.weather.gov/ahps/>, 검색일: 2024.3.14.

National Weather Service: NWS, “Alerts”, https://alerts.weather.gov/search?region_type=land, 검색일: 2024.3.14.

National Weather Service: NWS, “Flood Related Products”, <https://www.weather.gov/safety/flood-products>, 검색일: 2024.3.14.

NHK World, “5-Level Warning System”, <https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/news/backstories/587/>, 검색일: 2024.1.13.

NHK, “고조·내수범람위험정보의 신설”, https://www.nhk.or.jp/bunken/research/domestic/pdf/20180101_6.pdf, 검색일: 2024.2.15.

SEPA “Floodline - What are Flood Messages?”, <https://www.sepa.org.uk/environment/water/flooding/floodline/>, 검색일: 2024.1.16.

[개인 기록]

광주광역시(2024.3.13), 면담(대면)조사.

부산광역시(2024.2.15), 면담(화상)조사.

서울특별시(2024.3.18), 서면조사.

Executive Summary

I. Necessity and Purpose of Research

1. Research background

- With the enactment of the Urban Inundation Prevention Act, implementing urban inundation forecasts has become necessary. However, there is currently no plan in place to implement these forecasts.
- There is a need to establish standards, spatial and temporal scopes, procedures and systems for urban inundation forecasting.

2. Purpose and scope of research

- The purpose of this study is to develop an urban inundation forecast plan to prevent human and material damage caused by urban inundation. The scope of the research is as follows:
 - Proposal of the spatial and temporal scope for urban inundation forecast
 - Proposal of quantitative standards for urban inundation forecasting
 - Proposal of the urban inundation forecast system and procedures

II. Case Study on the Forecasting and Warning of Urban Flooding

1. Overseas cases

- The National Weather Service oversees national flood forecasting in the

United States, with the River Forecasting Centers responsible for river floods and the Weather Forecast Offices handling flash floods.

- Flood forecasts are classified into Watch, Advisory, and Warning based on the probability, severity, and urgency of flooding.
 - Forecasts include impacts and instructions related to flooding, along with updates on the current situation and outlook, and spatial and temporal information.
- Japan's flood forecasting system provides risk information at the administrative level, using the Surface Rainfall Index based on forecasted rainfall data.
- Although it has limitations in fully capturing complex hydraulic and hydrological phenomena in urban areas, it offers the advantage of quickly indicating the presence or absence of flooding.
 - Additionally, a special alert water level for the public sewer system is set to facilitate the evacuation of underground spaces, and when this level is reached, information is disseminated to flood control organizations and the general public.
- Scotland operates both flood forecasts to support the preparations and decision-making of emergency responders and flood warnings to provide information to emergency responders and the general public.
- The flood forecast assesses the risk based on the impact and likelihood of occurrence of a flood, and issues a Flood Guidance Statement containing flood risk information for the next five days to emergency responders daily.
 - Flood warnings are divided into alerts and warnings, spatially presented

by administrative districts, and temporally defined by the periods during which flood impacts are expected.

- Additionally, it prompts response actions by notifying the possible effects of flooding and draws attention by emphasizing the uncertainty of flooding.

2. Domestic cases

- Forecasting and warning system in other fields such as forest fire forecasting, river flood forecasting, and weather forecasting are reviewed.
 - The Korea Forest Service calculates and predicts the risk level of forest fires in four stages using topographic, climatic, and weather data. It places an emphasis on monitoring, responding to, and extinguishing forest fires.
 - The Flood Control Office conducts a flood forecast when damage to human and property is expected due to flooding, and issues a special flood report when serious damage is expected. Flood warnings are classified into a flood watch and a flood warning, based on the level at the flood warning point.
 - The Korea Meteorological Administration issues daily forecasts of weather phenomena and a special report for the purpose of warning when serious disasters are expected to occur.

- The status of the domestic urban inundation forecasting and warning system has been investigated through literature reviews and interviews.
 - Many local governments in the country are currently developing and operating urban inundation forecasting and warning systems, as well as integrated information systems.

- The purpose of urban inundation forecasting and warning systems is to identify potential flooding information in advance to prevent and prepare for damages. Therefore, the accuracy and promptness of prediction data are crucial.
 - Although conditions and situations vary by region, it is necessary to establish equipment for generating predictive information, develop and advance analytical methods to enhance data usability, ensure the sophistication of analysis programs, and establish legal and institutional foundations for system construction.
- From the practical perspective of local government officials, it is important to provide predictive information that considers the rapid spread of damage by urban inundation and regional characteristics.
 - Considering the utility and efficacy of this information, it becomes imperative to establish both temporal and spatial criteria for urban inundation forecasting and warning systems.

III. Review of Urban Flooding Forecast and Warning Standards and Procedures

1. Review of urban inundation forecast and warning standards

- Review of domestic urban inundation forecast and warning standards
 - The review of Seoul City's flood forecast and warning system, the Dorimcheon inundation warning standards, and the inundation determination and forecast standards of the Korea Institute of Science and Technology Information (KISTI), the Ministry of Public Administration and Security, and the Disaster and Safety Research Institute revealed that not only do the standards vary depending on the purpose, but there is

also a lack of clear basis. Consequently, there is a need for a nationwide forecast and warning standard, as the current standards are judged to be difficult to use.

- The assumed purpose of the urban inundation forecast is the ‘minimization of human and material damage due to inundation.’ Quantitative standards are reviewed based on the damage levels to children and vehicles, which are the most difficult to evacuate from risky areas in the event of inundation.

2. Review of spatial and temporal scope standards for urban inundation forecasts and warnings

- To meet its purpose, the urban inundation forecasting and warning system must be usable for on-site response when urban inundation is expected.
 - To this end, we investigated the requirements through interviews with public officials in charge, identified local governments’ disaster response systems, and reviewed the ‘Crisis Management Manual,’ the disaster management system, and ‘30-minute disaster evacuation system.’

3. Review of urban inundation forecasting and warning systems and procedures

- This study reviewed the river flood forecasting system and procedures to examine the basic requirements for urban inundation forecasting. It also examined additional factors that reflect the characteristics of urban inundation.

- We observed inundation caused by the inadequate conveyance capacity of the sewerage system and flooding by urban rivers and identified factors that could be used as forecast data.

IV. Review of the Spatial and Temporal Forecast Scope for Urban Inundation Forecasting

1. Review of the spatial and temporal forecast range based on observation data
 - Review of the spatiotemporal scope using manhole and river water level observation data
 - To determine whether manhole and river water level data observed in the Dorimcheon basin, where urban inundation damage occurred on August 8-9, 2022, can be used for urban inundation forecasting, this study reviewed the level of advance time secured from the observation data.
2. Review of secured advance time based on predicted precipitation
 - Review of the predictability of radar forecasted precipitation data
 - Predictability was assessed by calculating the correlation coefficient using the 10-minute forecast data from the very short-term rainfall forecast system (MAPLE), which has the greatest impact on securing the advance time and accuracy of the forecast data for urban inundation forecasting.

V. Results and Implications

1. Overseas case results and implications

- In overseas countries, the spatial scope for urban inundation forecasts covers administrative districts, and the temporal scope varies from several minutes to two days.
 - This suggests that information meeting the purpose of urban inundation forecasting is provided, taking into consideration the accuracy of the forecasting data.
 - The fact that the standards for urban inundation forecasting are also classified according to the target and purpose of forecast data usage suggests that the purpose and usability of Korea's urban inundation forecasting system need to be clarified.

2. Domestic case results and implications

- Other forecasting and warning systems have different purposes depending on the cause and mechanism of the phenomena being forecasted, and they have quantitative standards for forecasting and warning.
 - This suggests the need to establish spatiotemporal scope, quantitative standards, and forecasting procedures that meet the purposes of urban inundation forecasting, similar to the findings in overseas case studies.
- According to the case study on domestic urban inundation forecasting and warning systems, the approach can be divided into providing information on real-time risk levels using observation data (nowcasting), and providing information on potential inundation risks (forecasting).

- However, the current domestic urban inundation forecast and warning system mixes purposes, spatiotemporal scopes, forecasting techniques, and forecast and warning standards, suggesting a need for a more structured method for the forecast and warning system.
- An interview with the person in charge of operating the urban inundation prediction system revealed that although a large amount of observational information has been accumulated, the system to analyze and utilize it is inadequate.
- This suggests the need for an AI system that can utilize a variety of observed information in real-time situations, along with the development of a system for analyzing and utilizing the accumulated data.

3. Results and implications of reviewing urban inundation forecasting and warning standards, and spatiotemporal scope

- The purpose of urban inundation forecasting is assumed to be the minimization of human and material damage due to urban inundation. This study reviewed the standards for urban inundation forecasting and warning.
- It was found that at a minimum flood depth of 0.3 m, children experience fear and encounter difficulties evacuating on their own. Rainwater flows into a car at a minimum depth of 0.1 m, while at 0.5 m, it penetrates the car engine, causing disruptions to driving.
- The review of the on-site response manual indicated that urban inundation forecast information is needed during the transition from disaster

management stage to situation management.

- It suggests the necessity of securing advance time for situation management, while also emphasizing the need for forecasts tailored to the spatial scope of administrative system units.

4. Results and implications of reviewing the spatiotemporal forecast range based on observation water levels

- The review of water level rising velocity for five manholes revealed a large deviation, but it confirmed that the water level rising velocity was very fast.
 - Analysis revealed that it takes a maximum of 62 minutes and a minimum of 10 minutes to rise 1 m, but the average time required to rise 1 m at the remaining 4 points under review (excluding point 19-0001) was approximately 18 minutes.
 - This suggests that it is difficult to secure sufficient advance warning time to use manhole observed water levels as forecast data.
- Changes in river water level can secure a relatively long advance warning time compared to the manhole water level.
 - The water level rose after 16 minutes at Yangsan Bridge and 36 minutes at Dorim Bridge. In Case 1, it took 1 hour and 6 minutes at Yangsan Bridge and 1 hour and 46 minutes at Dorim Bridge to reach the highest water level after rainfall. In Case 2, Yangsan Bridge Gyo-ga took 3 hours and 7 minutes, and Dorim-gyo took 1 hour and 17 minutes.
 - This suggests that spot-based forecasts and warnings are possible if the speed of calculation for river water level prediction is secured.

5. Results and implications of reviewing advance warning time security levels based on predicted precipitation

- The Dorim sub-basin showed a correlation coefficient of more than 0.75 up to 70 minutes in advance, but in five other sub-basins, the correlation coefficient decreased to below 0.5 after 40 minutes in advance.
- In the Bongcheoncheon sub-basin, the correlation coefficient was below 0.5 after 30 minutes, and in the Seoul National University sub-basin, it decreased to below 0.5 after 20 minutes.
- This suggests that the prediction performance of ultra-short-term rainfall forecast data needs to be improved to secure the accuracy of urban inundation forecasts and to provide sufficient advance warning time.

VI. Policy Suggestions

1. Spatiotemporal scope for urban inundation forecast

- To establish local governments' urban inundation response procedures and ensure their efficiency, it is necessary to produce urban inundation forecast data at the administrative unit level with at least one hour of advance warning secured.
- This study proposes a plan to combine forecasting and real-time status information sharing (nowcasting) to achieve the goal of urban inundation forecasting.

2. Quantitative criteria for urban inundation forecasting

- To minimize human and material damage caused by urban inundation, the following quantitative urban flooding forecast standards are proposed.

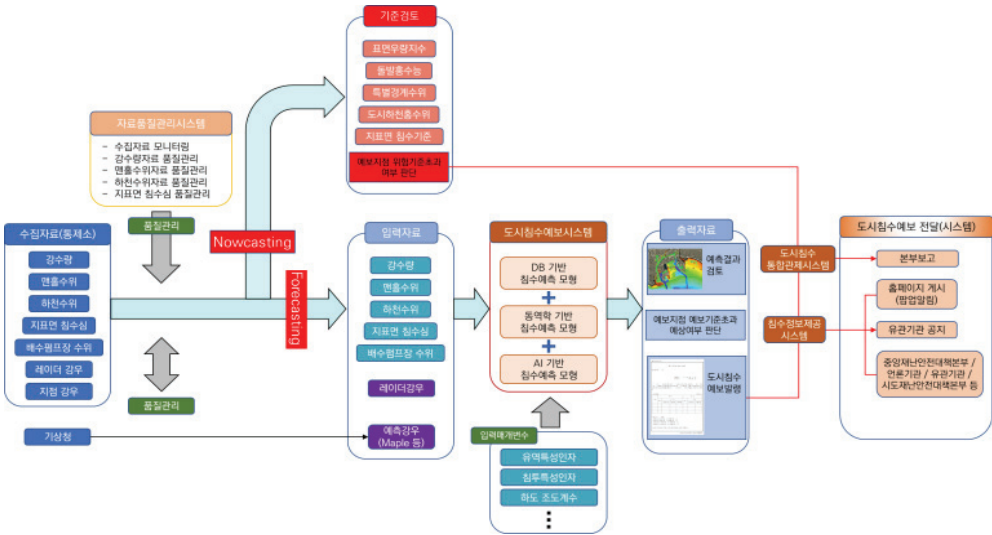
〈Table 1〉 Quantitative standards for urban inundation forecast (draft)

Level		Standard	Note
Advisory	Caution	Expected to exceed 0.1 m	Minimum ground clearance of a car
	Alert	Expected to exceed 0.3 m	Children's evacuation range
Warning	Severe	Expected to exceed 0.5 m	Car engine stop

Source: The authors.

3. Urban inundation forecasting system and procedures (draft)

- Based on the river flood forecast system, the 'Urban Inundation Forecast System (draft)' that reflects the characteristics of urban inundation is presented as follows:
 - Considering the characteristics of urban inundation, where it is difficult to secure advance warning time, nowcasting, which shares real-time status data, and forecasting with advance warning time secured are combined.
 - Observation data is set to take into account both inland water inundation and river flooding.



Source: The authors.

〈Figure 1〉 Proposed procedure of urban inundation forecasting (draft)


4. Presentation of urban inundation forecast (special warning) issuance statement (draft) and enforcement ordinance amendments

- Considering the uncertainty of forecast data, we propose that the order provide information on the scope and timing of inundation, as well as information on the scope of impact due to inundation, rather than specifying the exact forecast point and time.

5. Enforcement decree amendment (draft)

- The review of the velocity of change in river and manhole water level data revealed that the velocity of change in manhole water levels was very fast, resulting in not only the production of forecast data but also the usability of the information being judged as very low. Therefore, an amendment to the enforcement ordinance was proposed as follows.

<Table 2> Amendment to the Enforcement Decree of the Urban Inundation Prevention Act (draft)

Before Revision
<p>Article 11 (Implementation of Urban Flood Forecast, etc) ① If the Minister of Environment intends to conduct an urban flood forecast (hereinafter referred to as “urban inundation forecast”) pursuant to Article 15 (1) of the Act, the measurement points for the urban inundation forecast and the standard water levels, etc. must be determined and announced in advance. The same applies when changes are made to the announced matters.</p> <p>② The information provided through urban inundation forecasts is as follows:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Information on actual measurement and predicted water levels of rivers and sewers 2. Information on the risk of flooding and the extent of flooding due to flooding of rivers and sewers, etc.

After Revision
<p>Article 11 (Implementation of Urban Flood Forecast, etc) ① If the Minister of Environment intends to conduct an urban flood forecast (hereinafter referred to as “urban inundation forecast”) pursuant to Article 15 (1) of the Act, the measurement points for the urban inundation forecast and the standard water levels, etc. must be determined and announced in advance. The same applies when changes are made to the announced matters.</p> <p>② The information provided through urban inundation forecasts is as follows:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Information on actual measured water level of sewage 2. Information on actual measured and predicted water levels of rivers 3. Information on the risk of flooding and the extent of flooding due to flooding of rivers and sewers, etc.

6. Proposal for future research projects

- Based on the matters investigated and reviewed through this study, the following four future research tasks are proposed to establish an effective urban flood inundation system.
 - Research on ‘**developing a technique for selecting representative urban inundation points**’ that can effectively monitor urban flooding in advance and use it for prediction
 - Research on ‘**developing a Korean version of urban inundation prediction model**’ by applying relatively simple techniques such as the tank model

- to secure sufficient advance warning time
- Research on **‘developing an AI-based urban inundation response and management system’** that can provide refined information by selecting data that can be used to reduce inundation damage among observational data collected in real time
 - Research on **‘improving the prediction performance of ultra-short-term radar rainfall forecast information’** to produce high-accuracy forecast rainfall data, which has the greatest impact on securing the accuracy and advance warning time of urban inundation forecasts

Keywords: Urban Flooding Forecast, Forecast and Warning Standards, Spatiotemporal Scope, System and Procedure

■ 저자약력

이승수 (연구책임)

일본 교토대학교 사회기반공학 박사

한국환경연구원 연구위원(현)

seungsoo@kei.re.kr

주요 연구실적

- 합류식 하수관로 퇴적물 관리 방안 마련을 위한 기초연구 (2023)
- 기후위기 대응을 위한 도시침수 관리 정책 개선방안 연구 (2022)

양일주

한국환경연구원 책임연구원(현)

ijyang@kei.re.kr

김수빈

한국환경연구원 전문연구원(현)

sbkim@kei.re.kr

강태운

한국환경연구원 초빙연구원(현)

tukang@kei.re.kr

이문환

한국환경연구원 연구위원(현)

mhlee@kei.re.kr

노성진

금오공과대학교 교수(현)

seongjin.noh@kumoh.ac.kr