

국토정책 Brief

국토연구원에서 수행한 주요 연구과제의 핵심 내용과 정책제안 등을 압축해 국민께 알려드리고자 하는 발간물입니다.

2024. 7. 8.
No. 973



발행처 국토연구원
발행인 심교언
www.krihs.re.kr

이 브리프는 나무를 베지
않고 만든 생분해성 펄프
용지를 사용하였습니다.

이종소 부연구위원

이상은 건설·민간투자·자원연구센터장

신진욱 부연구위원

표희진 전문연구원

유현지 전문연구원

환경시리즈 ②

기후위기 시대 하천횡단교량의 취약성 해소방안

주요 내용

- ① 기후변화로 인한 극한기후의 증가가 시설물 안전에 직접적인 영향을 미치는 가운데 최근 감사원은 ‘기후위기 적응 및 대응실태II(사회기반시설 분야)’를 통해 댐·교량 등 시설물에 대한 대비를 지적
- ② 교량 시설물의 유지관리 단계인 안전점검·진단, 성능평가, 성능개선 등의 업무기준을 분석한 결과 교량의 여유고 및 교각과 인근 교각까지의 길이인 경간장 등은 홍수 시 직접적인 붕괴에 영향을 미치고 있음에도 불구하고 유지관리 시 적정성을 고려하고 있지 않은 것으로 분석
- ③ 또한 시설물의 종별로 안전점검·진단, 성능평가, 성능개선 등의 적용대상을 제한하고 있어 홍수 피해 발생 시 주변에 큰 피해가 예상되는 교량 등은 종별과 무관하게 성능평가 등을 확대 적용할 필요가 있을 것으로 분석
- ④ 확대 적용할 필요성이 있는 교량을 합리적으로 선별하기 위해 하천교량의 위험성 분석방법(기능적합성, 노출특성, 공간취약성 고려)을 개발하여 적용하였으며, 이는 각 관리주체가 교량을 유지관리하는 데 활용할 수 있을 것으로 판단
- ⑤ 본고는 하천교량의 유지관리 항목 개선, 대상 확대, 우선순위 도출방법론 등을 제안하였으며, 기후위기 적응을 위한 기반시설 관리방안을 네 가지로 제시

정책방안

- ① (기후위기 적응대책을 위한 하천횡단교량의 선별) 홍수로 인한 붕괴 시 주변 지역에 큰 피해가 예상되는 교량을 위험성 분석으로 선별하여 정밀안전점검·진단·성능평가 대상을 확대
- ② (안전점검·진단·성능평가 등에 있어 홍수 취약성 진단) 설계 및 시공 시 고려하는 여유고, 경간장 등을 안전점검·진단·성능평가 항목에 추가하여 기후위기에 대비
- ③ (성능개선사업 우선순위 도출) 위험성 분석결과를 활용하여 성능개선사업의 우선순위를 객관적이고 합리적으로 도출
- ④ (관련 제도 개선근거 마련) 관련된 법 조항을 검토하여 하천교량 유지관리 및 기후위기 적응 근거를 마련하고 「지속가능한 기반시설 관리 기본법」상 기본계획과 관리계획에 반영하는 방안을 제시

01. 기후변화 영향 및 대응 실태

기후변화가 시설물에 미치는 영향 및 문제점

기후변화 대응 기본계획(관계부처 합동 2019)과 적응대책(관계부처 합동 2020)에서는 집중호우, 태풍, 흑한, 해수면 상승의 기후변화가 시설물 안전에 직접적인 영향을 주는 현상으로 보고 있음

- 이에 대한 피해는 침수, 시설물 파손, 비탈면 붕괴 등으로 이어지고, 발생원인 측면에서는 14개의 리스크 중 집중호우가 9개로 가장 많음
- 국토·연안부문에서는 극한기상으로 발생한 피해액(3,486억 원, '08~'17년) 및 복구액(5,090억 원, '08~'17년)의 70% 이상이 도로, 하천 등과 같은 공공시설에서 발생

이에 따라 기후변화 및 시설물 관리와 관련된 법률을 제·개정하여 관련 피해를 최소화하고 국민의 안전을 확보하고자 노력함

- 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」(이하 시설물안전법), 「지속가능한 기반시설 관리 기본법」(이하 기반시설관리법) 등을 통해 국가적 차원에서 시설물을 유지관리하여 재난 및 재해를 예방하고 국민의 안전을 확보하고자 함
- 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제정을 통해 기후위기 영향에 취약한 시설을 보유·관리하는 공공기관 등에 기후위기 적응대책과 관할 시설의 특성을 고려한 대책 수립을 의무화하고 있음

시설물 유지관리를 위한 관련 법령과 지침에서는 기후위기와 관련된 사항의 반영이 미흡한 것으로 나타남

- 관련 지침을 시설 유형별로 살펴본 결과, 평가 시 기후변화와 관련된 사항은 반영이 미흡한 실정
- 또한 개별 시설물에 대해 평가하고 있을 뿐 주변 환경인 토지이용, 거주인구, 위험지역 여부 등의 사항 역시 고려하지 않고 있음

2024년 감사원 '기후위기 적응 및 대응실태' 조사결과, 댐·교량 등 기후변화 대비 부족

감사원(2024)이 IPCC의 기후변화 시나리오를 분석모형에 적용하여 시뮬레이션 분석한 결과, 도심지 침수, 댐 월류, 교량 붕괴, 항만 침수 등 재해 발생 위험이 정부 예측보다 증가하는 것으로 확인

- 특히 미래 기후변화 시나리오를 적용하여 교량(313개)을 분석한 결과, 강우량 증가에 따라 침식에 의한 손상 발생 위험이 늘어나는 것으로 분석
- 하천설계기준에 따르면 지자체 등이 하천기본계획 수립 시 계획홍수위보다 교량의 여유고가 충분히 높아야 하고, 구조물이 물에 의해 깎이는 현상인 세굴 방지능력을 확보하도록 하고 있으나 기후변화를 고려하지 않아 교량 붕괴 발생위험과 월류 발생위험이 증가할 것으로 예상
- 장기 기후변화 시나리오에서는 월류 교량이 108개에서 최대 172개로 59.3% 증가하고, 여유고 부족 교량도 183개에서 203개로 10.9% 증가할 것으로 전망되는 등 모든 시나리오에서 월류, 여유고 부족 교량이 증가

감사원은 미래 기후위기로 인한 교량의 안전성 확보를 위하여 하천설계기준 등 관련 규정에 미래 기후변화 요인을 반영하는 방안을 마련하도록 환경부에 통보

02. 기후변화 전망 및 유지관리 현황 분석

우리나라 기후변화 전망 및 교량시설물에 미치는 영향

2050년까지 탄소중립을 달성하더라도 기온, 강수량 그리고 관련 극한기후지수는 증가할 것으로 전망

- 시나리오에 따른 우리나라 기후변화를 전망한 결과, 탄소중립 실현이 가능한 SSP1-2.6 시나리오에서도 기온과 강수량은 증가
- 폭염일수, 1일 최대강수량, 상위 1% 극한강수량의 극한기후지수 역시 탄소중립 실현이 가능한 SSP1-2.6 시나리오에서 증가할 것으로 전망

표 1 현재 대비 기후변화 시나리오별 기온 및 강수 변화

전국	현재	단기(2021~2040)		중기(2041~2060)		장기(2081~2100)	
		SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
평균 기온(°C)	11.9	+1.3	+1.5	+1.6	+2.9	+2.3	+6.3
평균 강수량(%)	-	+2.9	-0.7	+4.6	+6.6	+3.4	+18.3
강수일수(일)	110.9	-9.0	-7.4	-7.0	-5.5	-6.0	-5.6

주: SSPx-y 형식에서 SSP1은 친환경적인 성장, SSP2는 완화-적응의 중도성장, SSP3는 기후변화 취약성장, SSP5는 화석연료에 의존한 고속성장을 뜻하며, y는 2100년 기준의 복사 강제력을 의미(IPCC 2021).

자료: 이종소 외 2023, 2의 <표 1>, 국립기상과학원 2021, 20; 23의 자료를 참고하여 저자 작성.

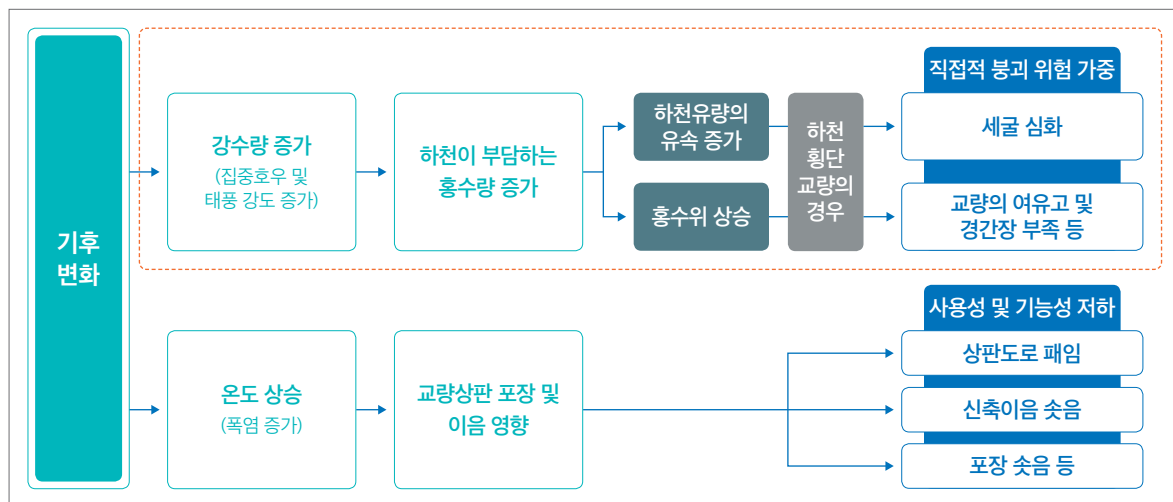
기후변화로 인해 강수량 증가가 예상되는 가운데 교량의 여유고와 경간장¹⁾이 부족하게 되면 교량 붕괴에 직접적인 영향을 미칠 수 있음

- 관련 선행연구, 교량시설의 사고사례 등을 통해 기후변화 리스크 요인을 도출한 결과 집중호우 및 태풍으로 인한 교량의 여유고 부족, 경간장 부족, 세굴 등이 직접적인 교량 붕괴에 영향을 미치는 것으로 나타남

하천교량 붕괴의 주된 원인은 강수량 증가로 하천 유속과 홍수위가 증가하지만 이를 버티지 못하고 붕괴 및 유실

- 강수량이 증가하게 되면 하천이 부담하는 홍수량이 증가하게 되고 이는 하천유량의 유속 증가와 홍수위 상승을 유발
- 유속이 증가하게 되면 세굴이 심화되고 홍수위 상승은 교량의 여유고 및 경간장 부족으로 직접적인 붕괴 위험이 가중된다고 할 수 있음

그림 1 기후변화가 하천교량에 미치는 대표적인 영향



자료: 이종소 외 2023, 4의 <그림 1>.

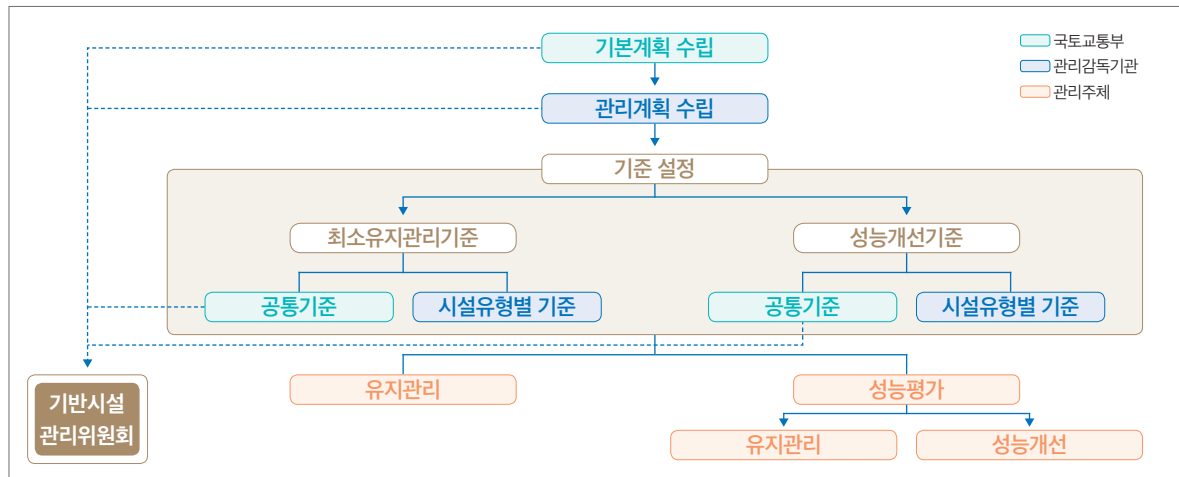
1) 여유고와 경간장은 계획홍수량(Q)에 따라 결정되며(Q=10,000m³/s 이상인 경우 2.0m 이상의 여유고 확보), 경간장의 경우 대체로 20+0.005Q를 기준으로 하고 있음.

기반시설 및 교량시설물 유지관리 현황 분석

(기반시설관리 및 유지관리 체계) 「기반시설관리법」에 의한 기반시설의 관리체계는 관리주체, 관리감독기관, 기반시설관리위원회로 이루어지며, '기반시설관리(기본)계획'과 '최소유지관리기준', '성능개선기준'을 규정하여 체계를 구축

- 관리감독기관의 장은 기반시설별 세부시설의 종류 및 규모에 따라 유지관리에 필요한 기준인 '최소유지관리기준'과 '성능개선기준'의 대상시설을 정하며 관리주체는 그 기준에 따라 기반시설을 관리
- '최소유지관리기준'은 소관 기반시설별 최소한의 유지관리수준에 관한 기준이며, '성능개선기준'은 유지관리보다 성능개선이 더 유리한지 판단할 수 있는 기준임

그림 2 기반시설 관리체계



자료: 이종소 외 2023, 5의 <그림 2>, 이태훈 외 2021, 67의 <그림 2>에서 재인용.

(교량시설물의 성능평가, 성능개선 등의 기준 분석) 기반시설의 '최소유지관리기준'과 '성능개선기준'에서는 관리수준 설정, 성능개선 적합성 검토 등을 위해 「시설물안전법」에 따른 안전점검·진단·성능평가 등을 실시

- 교량시설물의 안전을 위해 관리주체는 정기안전점검(1, 2, 3종), 정밀안전점검(1종, 2종, 3종의 경우 필요시), 정밀안전진단(1종) 그리고 성능평가(1종 일부, 2종 일부)를 실시
- 안전점검·진단·성능평가 대상은 시설물의 종류별로 다르며, 실시 대상은 <표 2>에 정리

표 2 종별 안전점검, 정밀안전진단 및 성능평가

구분	정기안전점검	정밀안전점검	정밀안전진단	성능평가
1종	대상	대상	대상	일부 대상
2종	대상	대상	-	일부 대상
3종	대상	필요시	-	-
기타	미관리대상	-	-	-

주: 1, 2, 3종은 시설물의 규모와 중요성 등을 고려하여 분류.

자료: 이종소 외 2023, 6의 <표 6>.

(소결 및 시사점) 「기반시설관리법」에 따른 전체적인 기반시설의 관리체계 및 현황을 살펴보고 교량시설물의 성능평가, 성능개선, 설계기준을 분석한 결과 다음과 같은 문제점 및 시사점을 도출

- 하천교량의 설계 및 시공 시 고려하고 있는 교량의 여유고, 경간장 등은 교량의 직접적인 붕괴에 영향을 미치고 있음에도 불구하고 유지관리 단계에서 고려하고 있지 않은 것으로 분석
- 성능평가의 경우 일부 시설만을 대상으로 하고 있어 기반시설의 노후화 대책 및 기후위기 적응을 위해서는 정밀안전점검, 정밀안전진단, 성능평가 대상을 위험성이 높은 교량까지 확대할 필요
- 또한 통수단면 부족으로 인한 성능개선이 필요한 교량은 매우 많지만 예산 등의 문제가 있기 때문에 객관적이고 합리적인 방법을 마련하여 성능개선사업 우선순위를 도출할 필요

03. 하천교량의 위험성 분석방법 개발

AHP와 PROMETHEE를 연계한 하천교량의 위험성 분석방법론 설정

교량시설물의 안전점검·진단·성능평가 시 현재는 고려 대상이 아닌 여유고 등을 고려 대상에 포함하여 기후위기 적응을 위한 하천교량의 위험성 분석방법을 개발

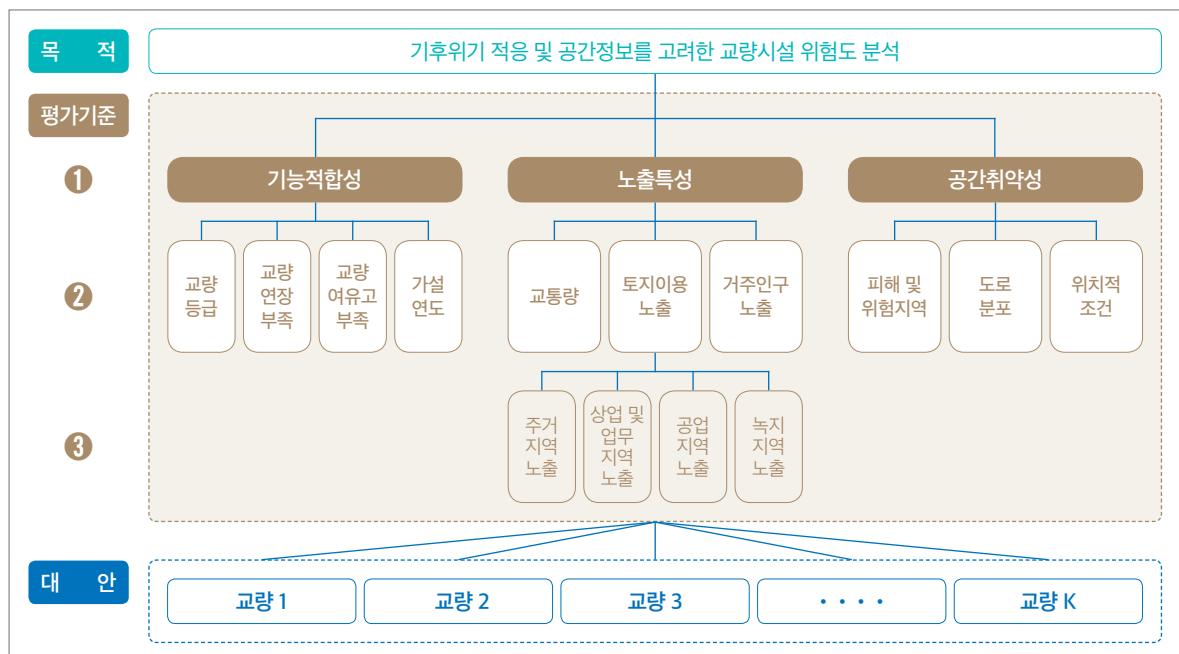
- AHP(Analytic Hierarchy Process)가 가진 유연성을 활용하여 고위험 하천교량 결정 문제를 계층구조화하고 전문가 설문으로 평가기준별 가중치를 도출
- AHP를 통해 도출된 평가기준별 가중치를 PROMETHEE(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)에 적용해 각 하천교량별로 위험성에 대한 비교우위를 검토하고 현장검증을 통해 최종 고위험 교량을 선정

하천교량의 위험성 분석항목 도출 및 가중치 산정

국내외 교량시설물 안전성 평가에 활용되는 주요 항목들의 종합·분류 후 연구와의 적합성, 중요성, 중복성 등을 검토하여 평가항목을 선정 및 구조화하고 전문가 62인을 대상으로 쌍대 비교 설문조사를 실시하여 가중치 산정

- 주요 분석영역의 경우 기능적합성(50.1%) > 공간취약성(25.7%) > 노출특성(24.1%)순으로 가중치 도출
- 세부 지표는 교량등급(17.8%), 피해 및 위험지역(15.0%), 교량의 여유고(13.5%), 교통량(13.0%), 가설연도(10.0%), 교량 연장(8.7%), 위치적 조건(7.3%), 거주인구(6.4%), 도로 분포(3.5%), 주거지역(1.7%), 공업지역(1.4%), 상업지역(1.2%), 녹지지역(0.4%) 순서로 가중치 도출

그림 3 교량시설 위험성 분석을 위한 계층구조화

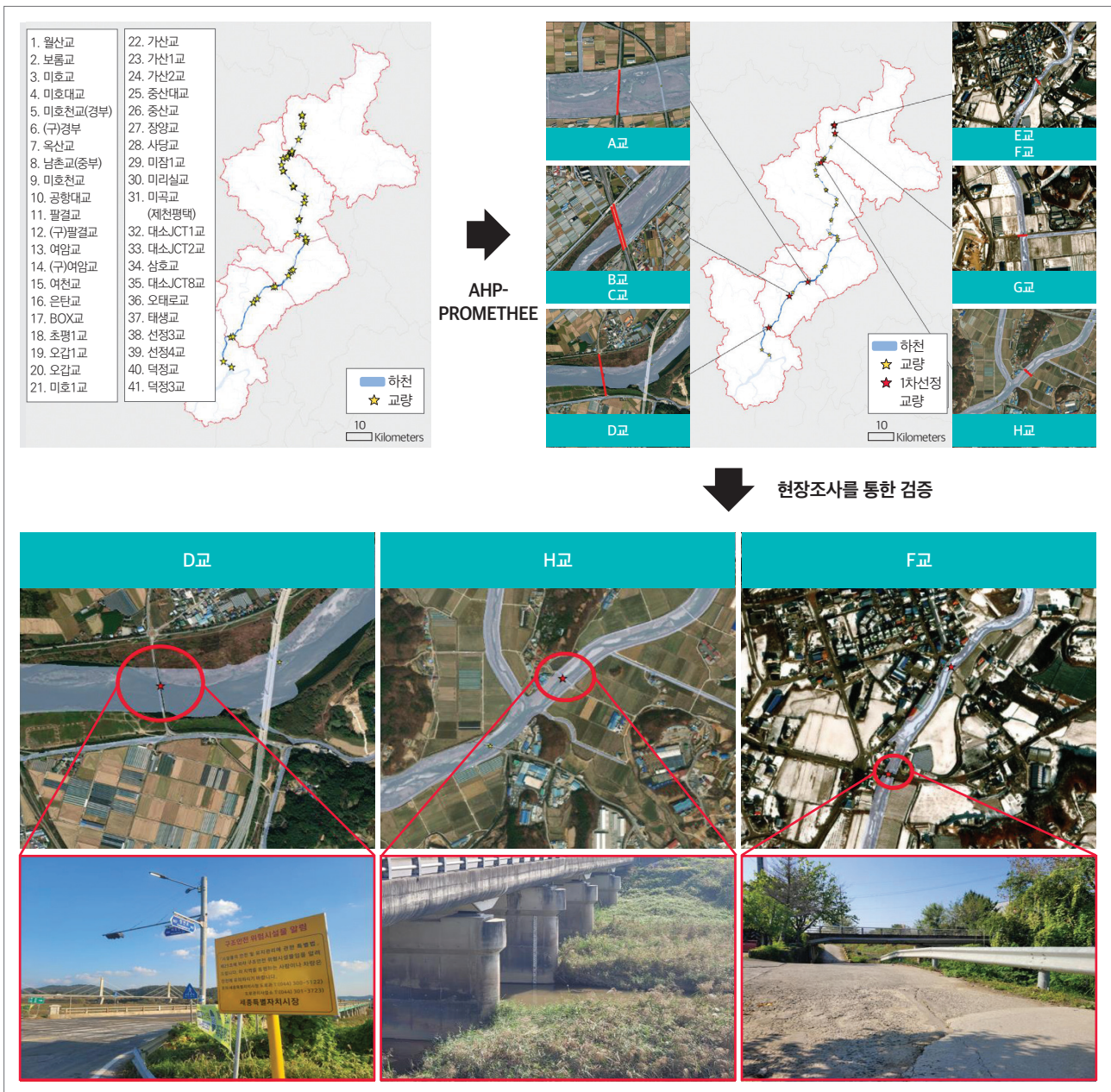


AHP-PROMETHEE 기법을 활용한 하천교량 시설의 위험성 분석

미호강 유역을 대상으로 AHP 결과를 PROMETHEE에 적용하여 전체 교량의 약 20%에 해당하는 8개의 교량을 1차적으로 선정하였으며, 추가적인 현장조사 및 검증을 실시하여 3개 교량을 최종 고위험 하천교량으로 판단

- PROMETHEE 1로 선호도 유입량과 유출량을, PROMETHEE 2로 선호도의 순흐름량을 산정하여 대안 간의 비교우위를 판별
- 분석된 고위험 하천교량을 대상으로 현장조사, 면담 등 검증을 실시하여 교량별 위험요인을 살펴보고 3개 교량을 고위험 하천교량으로 최종 확정
- 인명피해 발생가능성이 적다는 점, 여유고가 충분히 확보되었다는 점, 관리주체가 지속적으로 보수·보강을 실시하고 있었다는 점 등으로 5개 교량은 고위험 하천교량에서 제외

그림 4 고위험 하천교량 선정 절차 및 검증 결과



04. 개선방안 도출 및 정책제안

성능평가 항목 추가 및 개선을 통한 홍수 취약성 진단

여유고, 경간장 등은 집중호우 시 하천교량 피해 발생의 주된 원인으로, 계획홍수위에 따른 교량의 여유고, 경간장 확보 등을 유지관리 단계에서 고려할 필요가 있음

- 하천교량 설치 이후 유지관리 단계에서 실시하는 안전점검·진단·성능평가 등에서는 여유고, 경간장 등은 검토하고 있지 않으며, 세굴만을 구조안전 성능에서 조사·평가하고 있는 것으로 분석
- 현재 제방의 안전점검·진단·성능평가 시 활용되고 있는 제방 안전성능 평가기준을 참고하여 하천교량에 적용하여 안전하게 하천교량을 관리할 필요
- 기존 점검 진단자료, 도면 등 정보 수집 절차에서 하천기본계획을 조사하도록 규정하고 성능평가에 따른 장기 유지관리전략 수립 시 여유고 확보 및 통수단면 개선계획을 반영한 관리전략을 수립할 필요

위험성 분석방법을 활용한 하천횡단교량의 선별 및 성능개선사업 우선순위 도출방법 개선

시설의 종과 무관하게 안전여부를 검토하도록 대상시설을 선별하여 정밀안전점검·진단과 성능평가를 확대 적용

- 하천교량의 경우를 제3종 시설물이라 할지라도 교량의 상태, 등급, 교통량, 주변지역 여건 등을 고려하여 붕괴 시 큰 피해가 예상되는 시설물이 있을 경우 관리주체가 안전점검·진단, 성능평가 등을 실시할 수 있도록 대상시설 확대 필요
- 30년 이상 노후화가 진행된 제3종 교량시설물 가운데 위험성 분석결과 큰 피해가 예상되는 경우, 중대한 결함이 발생한 교량 가운데 위험성 분석결과 큰 피해가 예상되는 경우 등

성능개선을 필요로 하는 하천교량이 많은 상황에서 성능개선사업 우선순위를 도출하기 위한 객관적이고 합리적인 방법론을 제안하고 관련 평가 항목 모색

- 기후변화 등에 의한 홍수량 증가를 극복할 수 있도록 개별 시설물의 구조적·수리적 특성뿐만 아니라 주변의 토지 이용, 거주인구, 위험지역 여부 등을 검토할 수 있는 방법론 마련이 필요
- 성능개선 평가항목 중 정책성의 사업추진여건, 시설의 중요도 내 해당 구조물의 환경조건 항목을 확장하거나 특수평가 항목에 적용하는 방안을 모색

표 3 종별 안전점검, 정밀안전진단 및 성능평가 대상시설 확대(안)

구분	정기안전점검		정밀안전점검		정밀안전진단		성능평가	
	기존	개선(안)	기존	확대(안)	기존	확대(안)	기존	확대(안)
1종	대상	좌동	대상	좌동	대상	좌동	일부 대상	대상(확대)
2종	대상	좌동	대상	좌동	-	일부 확대	일부 대상	대상(확대)
3종	대상	좌동	필요시	필요시 + 일부 확대	-	일부 확대	-	일부 확대

주: 1, 2, 3종은 시설물의 규모와 중요성 등을 고려하여 분류.
자료: 이종소 외 2023, 6의 <표 6>을 일부 수정.

기반시설 관리의 기후위기 적응 근거 마련

기후위기 적응 근거 마련을 위한 제도 개선(안)

- 「기반시설관리법」상의 기본계획과 관리계획에 기후위기 적응 및 대책을 포함
- 「기반시설관리법」 제8조의 기본계획에 포함되어야 하는 사항과 「기반시설관리법 시행령」 제4조의 관리계획에 포함되어야 하는 사항에 “기반시설의 기후위기 적응 및 대책과 관련된 사항”을 포함
- 「시설물안전법」에 따른 안전점검·진단, 성능평가 대상 확대 필요(동법 시행령, 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침 등의 개정)

표 4 「기반시설관리법 시행령」상 관리계획 관련 개정(안)

변경 전	변경 후
제4조(기반시설 관리계획) ① 법 제6조에 따른 관리주체별 관리감독기관의 장(이하 “관리감독기관의 장”이라 한다)은 법 제9조제1항에 따라 수립하는 소관 기반시설에 대한 관리계획(이하 “관리계획”이라 한다)에 다음 각 호의 사항을 포함시켜야 한다. 1. 소관 기반시설의 현황, 여건변화 및 미래 전망에 관한 사항 - 후략 -	제4조(기반시설 관리계획) ① 법 제6조에 따른 관리주체별 관리감독기관의 장(이하 “관리감독기관의 장”이라 한다)은 법 제9조제1항에 따라 수립하는 소관 기반시설에 대한 관리계획(이하 “관리계획”이라 한다)에 다음 각 호의 사항을 포함시켜야 한다. 1. 소관 기반시설의 현황, 여건변화 및 기후위기 적응과 대책을 포함한 미래 전망에 관한 사항 - 후략 -

자료: 지속가능한 기반시설 관리 기본법 시행령 [시행 2022.12.8.] [대통령령 제33034호, 2022.12.6. 일부개정].

참고문헌

감사원. 2024. 감사보고서 -기후위기 적응 및 대응실태(사회기반시설 분야)-. 서울: 감사원.

관계부처 합동. 2019. 기후변화대응 기본계획 2차.

_____. 2020. 국가기후변화 적응대책 3차.

국립기상과학원. 2021. 남한상세 기후변화 전망보고서. 제주: 국립기상과학원.

이종소, 이상은, 신진옥, 유현지, 표희진. 2023. 기후위기 적응을 위한 도로교량의 성능평가 개선 필요성. 국토이슈리포트 No.73. 세종: 국토연구원.

이태훈, 정재훈, 권지혜. 2021. 기반시설 통합정보 관리체계 구축 및 활용방안 소개. 물과미래 55권 10호: 64-70.

지속가능한 기반시설 관리 기본법 시행령 [시행 2022.12.8.] [대통령령 제33034호, 2022.12.6. 일부개정].

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. Summary for Policymakers. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf (2024년 7월 3일 검색).

- **이종소** 국토연구원 주택·부동산연구본부 부연구위원(jslee@krihs.re.kr, 044-960-0648)
- **이상은** 국토연구원 건설·민간투자·자원연구센터장(selee@krihs.re.kr, 044-960-0465)
- **신진옥** 국토연구원 주택·부동산연구본부 부연구위원(kisokujn@krihs.re.kr, 044-960-0387)
- **표희진** 국토연구원 주택·부동산연구본부 전문연구원(pyo0224@krihs.re.kr, 044-960-0193)
- **유현지** 국토연구원 주택·부동산연구본부 전문연구원(hjyoo@krihs.re.kr, 044-960-0393)

※ 이 브리프는 “이종소, 이상은, 유현지, 표희진, 신진옥. 2023. 기후위기 적응을 위한 기반시설 관리 개선방안 연구: 하천교량을 중심으로. 세종: 국토연구원” 보고서를 참고하여 작성한 것임.

※ 이 브리프는 연구자 개인의 의견으로서, 정부나 국토연구원의 공식적인 견해와 다를 수 있음.



KRIHS
국토연구원

세종특별자치시 국책연구원로 5
전화 044-960-0114 팩스 044-211-4760 홈페이지 www.krihs.re.kr

