

# 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 최신 연구동향



김울안이 ▶▶▶

고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정  
adelaida802@korea.ac.kr



정민철 ▶▶▶

고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정  
hoyo21@korea.ac.kr



공정식 ▶▶▶

고려대학교 건축사회환경공학부 부교수  
jskong@korea.ac.kr

## 1. 서론

2005년 8월, 중심기압은 902 hpa이며 최대풍속 78 m/s, 최대강우량 457 mm를 동반한 허리케인 카트리나가 미국 뉴올리언스에 상륙하면서 지역 제방들이 순차적으로 붕괴되었고 시는 7.5 m 깊이로 수몰되었다. 이로 인해 약 12,000명의 인명피해와 100조 원 이상의 재산피해가 발생했다. 우리나라의 경우 1996년 집중호우로 인한 홍수량의 증가로 연천댐체 일부가 파괴되어 주변지역이 침수되는 일이 있었고 2002년 8월 낙동강 유역 장기홍수, 2002년 태풍 루

사 및 2003년 태풍 매미 등에 의한 홍수로 사회적 경제적으로 큰 피해를 입었다. 급작스런 기후로 인해 발생하는 피해는 현대에 와서 그 빈도가 증가하고 있으며 이런 피해가 발생하는 가장 큰 이유 중 하나는 이전보다 그 발생 빈도와 정도가 증가한 기후변화로 판단된다.

지구온난화에 따른 중요한 영향으로 강우량 및 홍수 수위의 불확실성 증가와 수문 증가 등을 꼽을 수 있으며, 이러한 변화는 기존 수공 구조물의 안정성 및 기능성을 약화시킬 수 있다. 따라서 기후변화에 따른 수위 증가 및 강우량 불확실성 증가 등에 따라 구조물의 안정성 및 기능성이 얼마나 약화되었는지를 평가할 수 있어야 하며, 또한 그 결과를 이용하여 보수·보강 대책이 수립되어야 한다. 본 연구에서 신뢰성 해석에 기반을 둔 구조물의 위험도 조사는 불확실한 기후 변화나 외력 등의 확률적 특성, 재료물성의 변동특성, 시공오차에 의한 치수의 변동특성, 설계기준식의 불확실성 등을 종합적으로 고려하여 시설물이 기후변화에 따른 외력 증감에 의해 발생할 수 있는 각종 파손모드의 발생 확률을 산정하여 그 위험도를 평가하는데 초점을 두고 있다.

## 2. 조사 범위

선진국에서는 1970년대 후반 수자원 분야에서 기후변화로 인한 비정상성을 연구하는 논문이 발표되어 지금까지 30여년의 연구가 진행되어 왔다. 또한 구조

Table 1. Literature Review Scope

Journal	연도	1995년 3월 ~ 2010년 3월
	총 편수	43편
	저널명	저널명대한토목학회(13) 한국구조물진단학회(5) 한국수자원학회(3) 한국지진공학회(4) Journal of engineering mechanics(2) 기타(16)
Research Report	연도	1993년 3월 ~ 2010년 3월
	총 편수	11편
주요 내용		구조물 안정성 평가, 취약도 곡선, 구조물 생애주기 분석 등
키워드		Structure stability analysis, Fragility curve, LCP Analysis등

물의 정량적인 성능 평가와 위험도 평가 기법 등과 관련한 연구는 꾸준히 수행되어왔다. 그러나 기후변화에 따른 구조물의 안전도 및 위험도 영향 평가와 관련한 연구는 국내·외에 많이 이루어지지 않은 실정이며, 기존의 구조물의 정량적 성능 평가 및 위험도 평가 기법 등을 적용하여 기후변화로 인한 구조물의 영향평가와 관련한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 구조물의 지역 특성상 발생한 집중호우 등에 관한 기존 연구와 구조물의 위험도 및 성능평가를 위한 기법과 관련한 연구를 참고하였다. 현재 총 43개의 저널과 11편의 연구 보고서를 검토하였으며, 이를 통해 수공구조물 관련 연구는 주로 댐 위주로 이루어진 것을 확인하였고, 본 연구에서 기후 변화에 의한 구조물의 영향 분석을 위한 기법으로 연구할 구조물 취약도 분석은 주로 지진에 대한 구조물의 성능 평가에 사용되었다. 문헌 검색을 위한 사이트로는 RISS, DBPIA, CSA 등이 있으며 그 외에 수자원공사에서 발간한 설계지침서 등을 참고하였다. 아래 Table 1에 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 관련 국내·외 문헌의 범위를 정리하였다.

### 3. 연구동향

#### 3.1 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 국외 연구동향

선진국에서는 1970년대 후반 수자원 분야에서 기후변화로 인한 비정상성을 연구하는 논문이 발표되어 지금까지 30여년의 연구가 진행되어 왔다. 하지만 기

후변화에 따른 구조물의 안전도 및 위험도 관련 연구는 비교적 부족하며 그 연구 내용 또한 매우 부정확한 것이 현실이다. 본 연구에서 기후 변화에 의한 구조물의 영향 분석을 위한 기법으로 연구할 구조물 취약도 분석은 주로 지진에 대한 구조물의 성능평가에 사용되었다. Dario Roside 등은 “Seismic risk assessment of levees” 연구를 통하여 취약도 분석을 통한 구조물의 지진 영향 평가를 수행하였으며, 그 외에도 Kazi R.Karim 등의 “Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation”, Masanobu Shinozuk 등의 “Nonlinear static procedure for fragility curve development” 등과 같은 연구에서 취약도 분석을 통한 구조물의 성능 평가를 수행하였다. 구조물의 정량적 성능 평가와 관련한 국외 연구동향 문헌조사 내용을 Table 2에 정리하였다.

기후변화에 대비하여 설계기준을 제시한 실질적인 사례는 영국과 일본 등에서 찾아볼 수 있다. 영국은 2115년까지 기후변화의 극한 기상 예측치를 공고하고 지역개발계획 및 방재시설기준을 적용하여 시행중이다. 예를 들어 2025년까지는 최대강우강도 5%, 하천최대유량 10%를 추가하여 적용하고 2055년까지는 최대강우강도 10%, 하천최대유량 20%를 추가하는 방식이다. 영국은 이러한 실질적 가이드라인 작성 뿐 아니라 해수면 상승에 대비하여 템즈강 수문 증고를 계획 중에 있다. 숫자를 통해 설계기준을 제시한 영국과 달리 일본에서는 기후변화 영향평가 방법과 적응계획 절차를 통해 개념적인 적응 가이드라인을 제안하고 있으며, 스미다강과 요도강과 같이 대하천이

Table 2. 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 연구 - 국외 연구동향

번호	제목	저자	주요내용	키워드	특이사항
1	Portfolio Risk Assessment: A Tool for Dam Safety Risk Management	Bowles D.S 등	댐의 안정성 및 위험도 평가의 다양한 방법론적 연구 제안	Dam safety	
2	Seismic risk assessment of levees	Doug Johnson 등	제방의 내진 위험도 평가 수행	Risk analysis	
3	Risk is not a four letter word: Ten years of success using a risk-based dam safety approach in Washington	Doug Johnson	워싱턴의 댐 구조물에 대한 위험도 평가 사례 제시	Risk analysis	
4	Rapid damage assessment of infrastructure components in the central united states	Fikri Acar	미국의 전반적인 토목 구조물에 대한 손상 평가 및 위험도 평가 방법에 관한 연구	Risk analysis	
5	Analysis of stability of earthen dams in kachchh region, Gujarat, India	Sivakumar Babu 등	인도의 kachchh 지역의 댐에 대한 안정성 평가 연구	Stability analysis	
6	Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation	Kazi R. Karim 등	지진에 의한 지반 운동의 영향을 취약도 곡선을 통해 분석하여 고속도로 교량의 위험도 평가를 수행함	fragility curve	
7	Statistical analysis of fragility curves	Masanobu Shinozuka 등	취약도 곡선의 통계학적 분석 수행	fragility curve	
8	Nonlinear static procedure for fragility curve development	Masanobu Shinozuka 등	취약도 곡선의 비선형 분석과 관련한 연구 수행	fragility curve	
9	Application of Correspondence Analysis in the Assessment of Mine Tailings Dam Breakage Risk in the Mediterranean Region	Salgueiro AnaRita 등	지중해 부근의 댐 구조물에 대한 위험도 평가 수행	Stability analysis	
10	Development of fragility curves for bridges in Korea	Seongkwan Mark Lee 등	대한민국 교량 구조물의 취약도 곡선을 이용한 위험도 안정성 평가 수행	fragility curve	

통과하는 도심지역의 치수안전도 확보를 위하여 일반 제방보다 규모가 큰 이른바 슈퍼제방을 설치하여 기후변화로 인한 수량증가에 대비하고 있다.

### 3.2 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 국내 연구동향

국내에서는 1990년대 중반부터 기후변화 연구가 수자원 분야에서 시작되어 15년 정도의 연구 경험을 가지고 있으나, 산발적으로 수행되었고 표준화가 이루어지지 못해 연구결과마다 매우 상이한 결과를 보이고 있으며, 특히 기후변화에 따른 수공구조물의 영향분석과 관련한 연구는 매우 부족한 실정이다. 안상진 등(2003)은 “호우로 인한 수공구조물 홍수피해 영향” 연구를 통해 호우발생 시 수공구조물의 피해 정도를 연구하였고, 임정열 등(2006)은 “피해 결과 분

석에 따른 국내 댐 파괴 경향 예측” 연구를 통해 통계적인 방법을 이용하여 국내 댐의 파괴 원인을 정밀하게 분석하였다. 구조물의 정량적 위험도 평가와 관련한 연구로 공정식 등(2009)은 “영주댐 신뢰성 분석” 연구를 통해 실제 수공 구조물의 위험 영향 인자의 확률론적 신뢰성 분석을 통한 정량적 위험도 평가를 수행하였다. 이종현 등(2009)은 “지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안전성” 연구를 통해 취약도 분석을 통한 구조물의 내진 성능평가 연구를 수행하였으며, 이진학 등(2004)도 “지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가” 연구를 통해 지진 취약도 분석을 통한 교량 구조물의 내진 성능 평가 및 위험도 분석을 수행하였다. 구조물의 위험도 및 성능평가와 관련한 국내 연구는 그 연구 성과의 신뢰도가 높고 관련 연구가 정착한 반면, 기후 변화를 고려한 수위 변화에 따른 수공구조물의 영향 분석과 관

Table 3. 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 연구 - 국내 연구동향

번호	제목	저자	주요내용	키워드	특이사항
1	미래 기후변화에 대한 용담댐 치수안전도 분석	강부식 등	기후 변화를 대비한 용담댐 구조물의 안전도 평가 수행	안전도	
2	하천시설물 유지관리 매뉴얼	건설교통부 하천관리과	제방, 수문, 호우 등의 하천시설물 유지관리 매뉴얼 개발	하천시설물, 유지관리	
3	기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구	과학기술처	기후변화 영향 평가 및 범국제적 환경 문제에 대한 논의 및 연구	기후변화	
4	신뢰성 분석을 통한 기존 댐 재개발의 적정규모 결정의 관한 연구	권현한 등	영향인자의 확률론적 신뢰성 분석을 통한 댐 적정규모 결정	신뢰성	
5	교량의 풍하중 취약도 분석	김두기 등	교량의 풍하중 취약도 곡선 산정을 통한 안정성 평가 수행	취약도	
6	기후변화가 용담댐 유역에 미치는 영향	김병식 등	기후변화에 의한 수문변동이 용담댐 유역에 미치는 영향 분석	기후변화, 댐	
7	지진으로 인한 교통망 피해추정 기법	김상훈 등	교통망 피해추정 기법을 적용한 지진 피해 예측	피해추정 기법	
8	미래기후변화가 댐 유입량 및 수문순환에 미치는 영향평가	김성준	기후변화에 의한 수문 변동의 댐 영향평가 수행	기후변화, 댐	
9	수자원계획의 최적화 연구 :기후변화에 따른 수자원계획의 영향평가	김승 등	기후변화 및 수문변동에 대비한 수자원 계획의 최적화 연구 수행	기후변화, 수공구조물	
10	지반특성을 고려한 FCM 교량의 지진취약도 분석	김재천 등	지반-구조물 상관관계를 고려한 구조물 지진 취약도 분석 수행	취약도	
11	충주댐 수문부 댐체의 지진 안전성 평가	김호승 등	수문부 댐체 절편을 대상으로 3차원 선형동해석을 수행	안정성 평가, 댐	
12	지진 위험도를 고려한 도로 교통망의 내진보강 우선순위 결정	나웅진 등	구조물의 지진취약도를 고려해 내진보강 우선순위결정 방법을 연구	위험도 평가	
13	기후변화에 의한 소수력발전소 설계변수의 영향	박안순 등	기후변화에 따른 강우형태 변화의 소수력 발전소 수문학적 성능특성 영향 분석	기후변화 영향	
14	하천범람상황조사 지침 연구 보고서	박용섭 등	하천범람의 피해상황 조사 및 원인분석	하천범람 영향	
15	확률론적 내진성능평가를 위한 PSC Box 거더교의 지진취약도 해석	송종결 등	지진취약도 해석을 통한 PSC Box 거더교의 내진성능평가법 연구	취약도	
16	기존댐의 수문학적 안전성 평가기준 개선방안	신철식 등	현 평가기준을 재검토하여 개선방안 제시	안정성 평가	
17	기후변화에 따른 방재개념의 변화	심재현 등	기후변화에 따른 방재 개념 확장 및 재정립	기후 변화	
18	추계학적 강우 변동 특성화와 연계한 하천제방의 통합 신뢰도 평가 모형	안기홍	강우 변동 특성화의 확률론적 해석을 통해 하천제방의 신뢰도 모형 추정	신뢰성 평가	
19	호우로 인한 수공구조물의 홍수피해 영향	안상진 등	집중호우로 인한 구조물 피해 원인 분석	구조물 홍수피해	
20	제방 안전도 평가 방법 비교	이성준 등	제방 안전도 평가 방법 비교	안정성 평가	
21	제방 안전도 평가 적용성 검토	이성준 등	제방 안전도 평가의 적용성이 적절한지 비교 및 검토	안정성 평가	
22	위험도 해석기법을 이용한 댐의 안전성 평가	이종석 등	위험도 해석기법 소개 및 댐 안정성에 적용하여 이점 검토	안정성 평가	
23	지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안전성	이종현 등	지진영향의 각 특성을 고려하여 손상도 곡선 도출 및 안정성 평가	위험도 평가	
24	지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가	이진학 등	지진취약도분석 수행 및 현 시방서 타당성 간접적 검토	취약도 분석	
25	소단형 방파제의 안정성에 대한 신뢰성 해석	이철응	신뢰성 해석을 방파제 안정성에 적용 및 적절성 연구	신뢰성 평가	
26	신뢰성 해석에 의한 제방의 월류 위험도 산정	이철응 등	하천제방 설계시 위험도 분석 연구 수행	신뢰성 평가	
27	피해 결과 분석에 따른 국내 댐 파괴 경향 예측	임정열 등	국내 댐 피해 결과를 통한 파괴 경향 예측	수공구조물 파괴경향	

Table 3. 기후변화에 따른 수공구조물 영향분석 연구 - 국내 연구동향 (계속)

번호	제목	저자	주요내용	키워드	특이사항
28	건설공사의 확률적 위험도분석평가 기법 개발	조효남 등	건설프로젝트의 위험도 분석기법 모델링을 위한 다방면 연구	위험도 평가	
29	댐 안전도 평가 및 유지관리 방안 연구	한국건설기술 연구원	다양한 분석을 통해 댐 안전도 평가 및 유지관리 방안 연구	안전도	
30	기후변화에 따른 대청댐 유입량변화 분석	한규하 등	여러 기후변화 자료를 사용해 SWAT모형에 적용, 유입량분석	기후변화, 댐	
31	홍수피해에 따른 지역적 취약성 변화 분석	홍지혜 등	과거 20년 홍수피해액에 근거한 취약성 분석	취약도 분석	

련한 연구는 매우 부족한 실정이다. 기후 변화의 불확실성을 고려한 연구와 구조물의 정량적 성능 평가와 관련한 국내 연구동향 문헌조사 내용을 Table 3에 정리하였다.

#### 4. 맺음말

기후변화로 인해 발생하는 홍수(또는 가뭄)에 의한 인명피해 및 재산피해는 매우 큰 편이며 이를 예측하여 미리 대비하는 것은 매우 어렵고 예측하더라도 그 정확성에 대한 신뢰는 어느 정도인지 불확실하다. 이러한 불확실성에도 불구하고 기후변화에 대한 예측과

대비는 필수적이며 이미 몇몇 국가에서는 기후변화를 고려한 설계를 시작하고 있다. 본문에서 제시한 것처럼 영국과 일본은 다가오는 미래에 기후변화에 의한 수위가 평균보다 높아질 것으로 판단하고 각각 수치적, 이론적으로 대안설계기준을 제시하였다. 국내외적으로 구조물의 일반적인 안전성에 대한 연구나 특수한 경우인 지진에 대한 연구는 많이 이루어져있고 현재 활발하게 진행 중이지만 기후변화에 따른 구조물 안정성 및 신뢰성에 관한 연구는 국내외로 많이 부족한 실정이다. 기후변화에 따른 구조물의 안전성 및 신뢰성 연구는 단편적인 외력에 의한 해석보다는 불확실성을 고려하여야 한다. 🌊

#### 참고문헌

1. 건설교통부 하천관리과 (2005). 하천시설물 유지관리 매뉴얼 결과보고서, 건설교통부
2. 권현한, 문영일, 최병규, 오태석 (2003). “신뢰성 분석을 통한 기존 댐 재개발의 적정규모 결정의 관한 연구” 대한토목학회 학술대회, 제 2003권, 제 10호, pp. 1995-1999.
3. 신철식, 류근준, 조경석, 배봉원 (2007). “기존댐의 수문학적 안전성 평가기준 개선방안” 한국수자원학회지, 제 41권, 제 10호, pp. 44-52.
4. 안상진, 김진국, 전계원, 광현구 (2003). “호우로 인한 수공구조물의 홍수피해 영향” 건설기술논문집, 제22권, 제 1호, pp. 77-86.
5. 이종현, 이수철 (2009). “지진의 변화에 따른 교량의 해석적 손상도 곡선의 안전성” 한국구조물진단학회 학술대회, 제 13권, 제 2호, pp. 145-152.
6. 이진학, 윤진영, 윤정방 (2004). “지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가” 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제 8권, 제 6호, pp. 31-43.
7. 임정열, 이종욱, 신동훈, 전제성 (2006). “피해 결과 분석에 따른 국내 댐 파괴 경향 예측” 대한토목학회 학술대회, 제 2006권, 제 10호, pp. 4112-4115.
8. 한국수자원학회 (2005). (건설교통부 승인)하천설계기준 해설, 사단법인 한국수자원학회.
9. Dario Rosidi (2007). “Seismic risk assessment of levees” *Civil engineering dimension*, Vol. 9, No. 2, pp. 57-63.

10. Fikri Acar (2009). Rapid damage assessment of infrastructure components in the central united states, MAE Center.
11. Kazi R. Karim, Fumio Yamazaki (2001). "Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation" *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol. 30, No. 12, pp. 1839-1856.
12. Masanobu Shinozuka, M. Q. Feng, Jongheon Lee, Toshihiko Naganuma (2000). "Statistical analysis of fragility curves" *Journal of engineering mechanics*, Vol. 126, No. 12, pp. 1224-1231.
13. Masanobu Shinozuka, Maria Q.Feng, Ho-Kyung Kim, Sang-Hoon Kim (2000). "Nonlinear static procedure for fragility curve development" *Journal of engineering mechanics*, Vol. 126, No. 12, pp. 1287-1296.