

기후변화에 따른 홍수피해 취약성 평가

Vulnerability Assessments of Climate Change on Flood Damage

정일원* , 이병주** , 김광천***배덕효***

Il-Won Jung, Byong-Ju Lee, Kwang-Cheon Kim, Deg-Hyo Bae

요 지

현재 기후변화는 점점 가속화되고 있으며, 이로 인해 향후 홍수피해는 더욱 증가될 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 장기적이 측면에서 이러한 홍수피해에 대비하기 위해서는 유역별 홍수에 대한 취약성을 평가하고, 기후변화의 영향을 고려하여 유연한 적응 정책을 마련하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 국내유역의 홍수 취약성을 평가하는 방법으로 지표틀 이용한 방법을 제안하였다. 이 방법은 기후변화에 따른 홍수 취약성을 민감도(sensitivity), 노출(exposure), 적응능력(adaptation)의 함수로 정의하고, 각 유역별 지표틀을 이용하여 상대적인 취약성 정도를 평가하는 것이다. 본 연구에서는 유역의 민감도와 노출정도가 클수록 기후변화에 대한 홍수피해에 취약하고, 적응능력이 클수록 취약성이 낮다고 판단하였다. 본 연구에서 제안한 방법으로 국내 139개 유역에 대해 상대적인 홍수피해 취약성을 평가한 결과 과거 유역별 홍수 피해액의 분포와 유사한 것으로 나타났다. 또한, A2 시나리오를 이용하여 미래 기후변화 상황에서의 홍수피해 취약성에 대해 평가한 결과 국내 유역의 홍수피해는 증가될 가능성이 있는 것으로 전망되었으나 유역별 공간적인 취약성은 크게 변화지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 기후변화, 취약성 평가, 홍수, 수자원

1. 서 론

기후변화의 원인인 지구 온난화는 대기 중의 수증기량을 증가시켜 대기상태를 불안정하게 함으로써 호우의 발생 빈도를 증가시킬 것으로 전망되고 있다(IPCC, 2007). 이에 따라 세계적으로 기후변화와 최근 빈번하게 발생하는 홍수와 상관계수를 규명하기 위한 연구들이 진행되고 있다(e.g. Cunderlik et al., 2005). 그러나 기후변화가 점차 가속화될 것으로 전망됨에 따라 상관계수의 규명뿐 아니라 발생 가능한 홍수피해를 예방하기 위한 연구도 병행되어야 한다. 이를 위해서는 유역별 홍수에 대한 취약성을 정량적으로 평가하고, 기후변화의 영향을 고려한 적절한 적응방안을 마련하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 미래 기후변화 상황에서 홍수피해의 변동성을 전망하고, 이를 통해 국내 유역의 홍수피해 취약성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 먼저 국내 실정에 적합한 취약성 평가기법을 제안하였으며, 5대강 권역을 대상으로 현재 기후시스템과 미래 A2 시나리오 상황에서의 취약성을 평가하고 비교하였다. 먼저 현 기후시스템에서의 취약성을 평가하기 위해 민감도, 노출 정도, 적응 능력에 관련된 지표틀을 조사하였다. 유역별로 조사된 지표틀을 이용하여 취약성을 평가하고, 홍수와 가뭄에 대한 취약지역을 도출하였다. 그 다음 A2 시나리오 상황에서는 유역별 취약성을 평가하였다. 이때 유역의 노출 정도와 적응 능력은 현재와 동일하다고 가정하였으며, 단지 민감도 지표의 변동성만을 고려하여 취약성을 평가하였다. 한국은 1990년대 이후 태풍 및 집중호우로 인한 홍수(1996년, 1998년, 1999년, 2002년, 2003년, 2006년, 2007년) 피해가 빈번히 발생

* 정회원.세종대학교 토목환경공학과 Post-doctor-E-mail : bobilwon@paran.com
** 정회원.세종대학교 토목환경공학과 박사과정-E-mail : bjlee0704@paran.com
*** 정회원.한국수자원공사 소양강댐관리단 : E-mail : kckim@kwater.or.kr
**** 정회원.세종대학교 토목환경공학과 교수.수운연구소-E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

하고 있으며, 피해액도 증가하는 추세에 있다. 현재 기후변화는 점점 가속화되고 있으므로, 이로 인한 홍수피해는 더욱 증가될 가능성이 높다. 본 연구는 이러한 피해에 대비한 유연한 수자원계획을 수립하는데 있어 활용성이 높을 것으로 판단된다.

2. 방법론

2.1 취약성의 정의

UNDP(2005)에서는 취약성을 식 (1)과 같이 민감도(sensitivity)와 적응능력(adaptation capacity)의 함수로 정의하였으며, IPCC(2001)에서는 식 (2)와 같이 취약성을 노출(exposure), 민감도, 적응능력의 함수로 표현하였다.

민감도는 적응을 고려하지 않는 상황에서 시스템이 기후변화에 얼마나 영향을 받는가를 나타내는 것으로 기온의 변화에 대해 용설의 영향이 큰 지역이 적은 지역에 비해 봄철 유출량의 변화에 더 민감하다고 할 수 있다(배덕효와 정일원, 2005). 노출은 기후에 민감한 시스템의 요소가 기후와 접촉되어 있는 정도를 의미한다. 적응능력은 시스템이 예상되는 환경의 변화에 얼마나 잘 적응할 수 있는가를 나타내는 정도라고 할 수 있다.

$$Vulnerability = f(sensitivity, adaptation\ capacity) \quad (1)$$

$$Vulnerability = f(exposure, sensitivity, adaptation\ capacity) \quad (2)$$

본 연구에서는 식 (2)를 이용하여 취약성을 식 (3)과 같이 정의하였다. 이 식은 노출과 민감도의 곱을 적응능력으로 나눈 값을 취약성으로 정의한 것이다. 이것은 동일한 적응능력에 대해 기후에 대한 민감도가 높을수록, 노출정도가 심할수록 취약성이 증가되는 것을 표현하고 있다. 본 연구에서는 유역별 상대적인 취약성을 평가하기 위해 지표를 정규화(normalized)하여 이용하였다.

$$Vulnerability = \frac{exposure \times sensitivity}{adaptation\ capacity} \quad (3)$$

2.2 취약성 지표 선정

기후에 대한 시스템의 노출, 민감도, 적응능력을 평가하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 대체 변수(proxy variable)를 이용하여 간접적으로 평가하는 방법이 적용되고 있다. 취약성 지표들은 노출, 민감도, 적응능력으로 구분하여 표 1과 같이 지표들을 선정하였다. 민감도 지표로서 일강수량이 80mm 이상인 날의 일수(PN80), 일최대강수량(PX1D), 일최대유출량(MDF), 전체 상위 90%를 초과하는 일유출량의 평균(FN90) 등을 선정하였다. 기상과 수문학적 지표들은 미래 기후변화 시나리오를 통해 변동성을 평가할 수 있으므로, 이러한 지표들의 변화에 따라 유역의 취약성이 어떻게 영향을 받을 것인가를 분석할 수 있다. 노출 정도를 나타내는 지표로서 유역평균표고(ELEV), 인구밀도(POP), 자산가치밀도(ASA)를 선정하였다. 적응능력을 나타내는 지표로서 하천개수율(CI), 내수배제시설의 양수량(PUMP), 다목적댐의 홍수조절용량(DFC)을 선정하였다.

표 1. 홍수취약성 지표

| Index | Indicator | Description |
|-------------|-----------|---|
| Sensitivity | PN80 | 일강수량이 80mm 이상인 날의 일수 |
| | PX1D | 1일 동안의 최대강수량(mm) |
| | MDF | 연 최대일유출량(m ³ /sec) |
| | FN90 | 전체 상위 90%의 유출량을 초과하는 일유량값의 평균 |
| Exposure | ELEV | 유역평균고도(m) |
| | POP | 유역별 단위면적당 인구(인/km ²) |
| | ASA | 유역별 단위면적당 자산밀도(원/m ²) |
| Adaptation | CI | 하천개수율(%) |
| | PUMP | 배수펌프의 배수능력(m ³ /min.) |
| | DFC | 홍수조절용댐의 홍수조절능력(10 ⁶ m ³) |

2.3 A2 시나리오

본 연구에서 이용한 A2 시나리오는 기상연구소 기후연구실에서 “기후변화협약 대응 지역기후 시나리오 산출 기술개발” (2002-2004)의 일환으로 생산한 것이다. 자료 기간은 100년(2001-2100년)이며, 자료 형태는 과거 30년(1971-2000년) 평균 월별값에 대한 편차자료로서 기온과 강수 변화량을 제공하고 있다. 자료 영역은 32.9684°N-43.426°N, 122.9348°E- 131.4468°E이며, 격자 간격은 약 0.2432°(약 27 km)이다. 본 연구에서는 미래 취약성 평가기간으로 2025s(2011-2040년)과 2065s(2051-2080년) 두 기간에 대해 분석하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 기준기간에 대한 분석

본 연구에서는 기후변화에 따른 극한사상의 취약성을 평가하기 위해 5대강 권역을 139개 유역으로 구분하여 연구를 수행하였다. 유역별 홍수사상관련 수문기상지표들의 대표값을 도출하기 위해 1971-2000년 동안의 유역평균강수량과 유출량 자료를 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 수집하였다. 유역별 홍수관련 취약성지표를 민감도(sensitivity), 노출(exposure), 적응능력(adaptation capacity)로 구분하여 자료를 수집하였다(그림 1). 각 유역별 강수량과 유출량에 대해 지표들을 연도별로 추정하고 이를 평균하여 유역 대표값으로 활용하였다. 자산밀도(ASA)는 공시지가에 대한 건설교통부 연차보고서 평균공시지가현황을 기준으로 산정하였다. 지가는 토지의 자산가치 변화를 대표할 수 있는 지표로서 공시지가가 높은 지역이 침수될 경우 홍수피해가 더 클 것으로 판단하였다. 유역별 인구밀도(POP)는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 2000년도 자료를 이용하였다. 이 자료는 인구주택총조사(2000), 통계청(<http://www.nso.go.kr>) 등의 자료를 이용하여 구축한 것이다. 유역의 평균표고(ELEV)는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 하천개수율(CI)은 외수방어시설로서 일반적으로 전국 행정구역별 통계연보에 수록된 지방2급하천 이상의 하천을 기준으로 요개수연장 대비 기개수연장을 백분율로 환산하여 산정한다. 본 연구에서는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 내수배제시설의 총양수량(PUMP)는 유역내 내수배제시설의 총양수량을 합하여 산정하였다. 댐홍수조절용량(DFC)은 홍수조절 능력이 있는 댐을 대상으로 이 용량이 하류에도 홍수관리에 영향을 미친다고 가정하였다. 댐 하류부의 유역들은 하류로 갈수록 댐에 의한 영향이 감소하고 합류로 인하여 댐의 영향을 받는 점을 고려하여 유역의 누가면적을 이용하여 하류부의 홍수조절효과를 평가하였다.

그림 2는 본 연구에서 적용한 방법을 통해 산정한 현재 기후상황에서의 취약성과 과거 단위면적당 홍수피해액 현황을 비교하여 제시한 것이다. 지역별로 홍수피해에 취약한 지역은 한강의 중하류유역과 낙동강, 섬진강, 영산강유역의 남쪽 유역들로 분석되었다. 이에 비해 낙동강 중상류유역은 상대적으로 취약성이 낮은 지역으로 나타났다. 한강 중하류 유역은 적응능력이 매우 높게 나타난 지역이나 기후인자에 대한 민감도와

노출정도도 매우 커 결과적으로 취약한 지역으로 산정되었다. 섬진강과 영산강유역의 남쪽 유역들은 높은 기 후민감도에 비해 적응능력이 낮아 취약성이 높게 산정되었다. 향후 이러한 지역들에 대해서는 치수능력증대 사업 등의 우선순위를 두는 방안들이 검토되어야 할 것으로 사료된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 본 연구에서 추정된 홍수 취약성은 과거의 실제 홍수피해액과 유사한 결과를 보여, 본 연구 결과가 취약성 평가방법이 신뢰성 있는 결과를 제시할 수 있는 것으로 판단되었다. 이 결과는 상대적으로 홍수피해에 취약하다는 것을 나타내는 것으로, 취약성이 크다고 해서 반드시 홍수피해가 많이 발생한다는 것을 의미하는 것은 아니다.

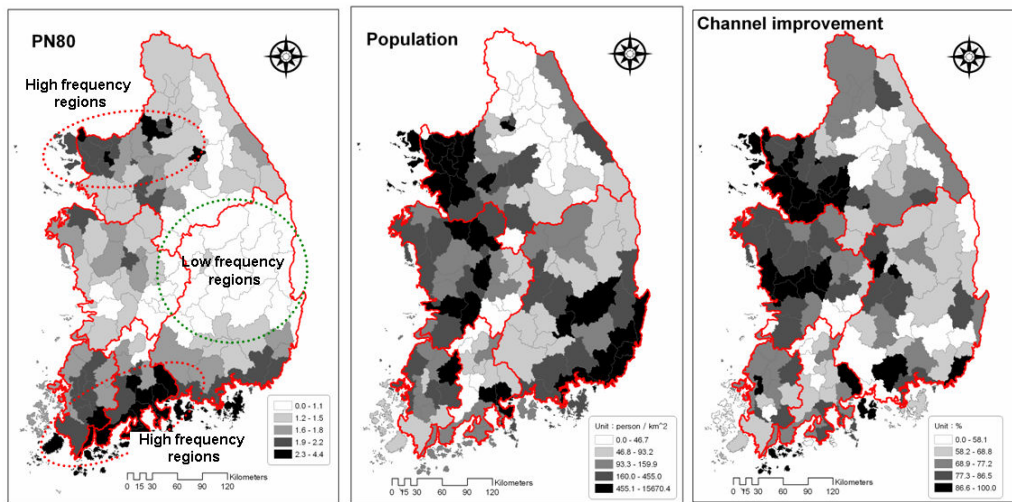


그림 1. 기준기간에 대한 유역별 취약성 지표

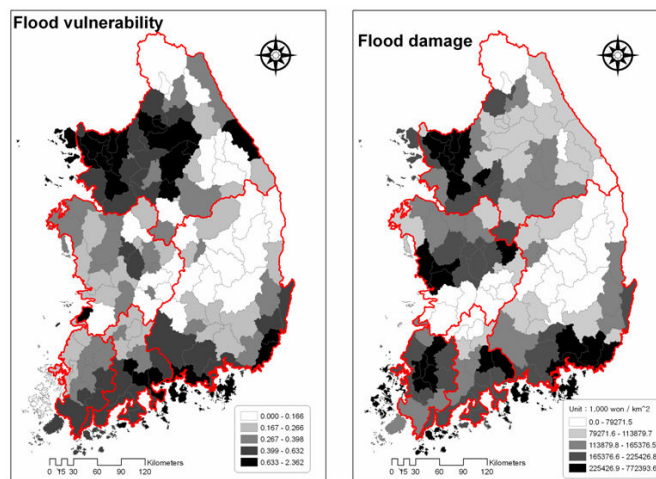


그림 2. 유역별 홍수취약성 및 실제 홍수피해액 비교

3.2 미래기간에 대한 분석

A2 시나리오 상황에서 홍수와 가뭄에 대한 유역별 취약성의 변동성을 평가하였다. 민감도 지표의 변화만을 고려하고 노출 및 적응능력에 대해서는 고정하여 취약성을 산정하였다. 결과적으로 공간적으로는 현재 기 후상황에서의 취약성과 유사한 패턴을 나타내었다. 각 소유역들 자체적으로 취약성이 증감하였지만 취약지역의 공간적인 패턴에는 크게 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 2025s 기간에서의 홍수에 대한 상대적인 취약성에서는 여전히 한강 중하류유역, 안성천유역, 낙동강 하류유역, 섬진강 하류유역이 가장 취약한 것으로

나타났으며, 남한강 상류유역과 낙동강 중상류유역이 상대적으로 홍수에 덜 취약한 것으로 나타났다. 특히 영산강과 섬진강 권역은 현 기후시스템에서 홍수에 대한 적응능력이 상대적으로 낮다고 평가된 지역들이므로 지속적인 개선이 필요할 것으로 분석되었다. 이러한 유역에서는 사업우선순위를 두는 등의 방안이 필요할 것으로 판단된다. 2065s 기간에서의 홍수에 대한 상대적인 취약성에서는 2025s 기간에서와 유사하게 나타났다. 특히 2065s 기간에서는 낙동강 중류유역과 금강 하류유역에서 현재에 비해 홍수 취약성이 증가될 것으로 전망되었다. 이것은 이 유역들에서 PN80, PX1D, MDF 등의 지표가 크게 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 2065s 기간에서는 기존의 홍수에 취약했던 지역들은 여전히 취약하고, 이와 더불어 금강과 낙동강권역에서는 취약지역의 범위가 커질 것으로 전망되었다. 그러나 취약성이 감소한다고 홍수피해가 감소하는 것은 아니며, 단 한번의 홍수로도 엄청난 재산 및 인명피해가 발생할 수 있으므로 홍수에 대한 적응능력은 꾸준히 향상시켜야 할 것으로 사료된다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기후변화에 따른 국내유역의 홍수 취약성을 평가하는 방법으로 지표를 이용한 방법을 제안하고, 5대강수계 139개 유역에 대해 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 방법으로 유역별 상대적인 홍수피해 취약성을 평가한 결과 유역의 과거 홍수 피해액의 분포와 유사한 것으로 나타났다. 또한, A2 시나리오를 이용하여 미래 기후변화 상황에서의 홍수피해 취약성에 대해 평가한 결과 국내 유역의 홍수피해는 증가될 가능성이 있는 것으로 전망되었다. 그러나 유역별 공간적인 취약성은 크게 변화되지 않을 것으로 나타났다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소 (2002). **기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (I)**.
- 기상연구소 (2003). **기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (II)**.
- 기상연구소 (2004). **기후변화협약대응 지역기후시나리오 산출기술개발 (III)**.
- 배덕효, 정일원 (2005). 기후변화에 따른 수자원 영향평가, **방재정보**, pp. 16-22.
- Chunderlik J.M. and Simonovic S.P. (2005). "Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions", *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 631-654.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- UNDP (2005). *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures*, Cambridge University Press, USA.