



Application of Flood Vulnerability Index for analyzing safety change of levee according to climate change

Lee, Hoo Sang^a · Lee, Jae Joon^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

Paper number: 17-101

Received: 16 November 2017; Revised: 11 December 2017 / 11 January 2018; Accepted: 11 January 2018

Abstract

In this study, a new technique for evaluating the flood vulnerability of river banks is proposed. For this purpose, flood quantities of the basin were estimated based on the future climate change scenarios and the infiltration stability was evaluated by analyzing the infiltration behavior using SEEP/W which is a 2D groundwater infiltration model of the levee. The size of the river levee was investigated. The size of river levee was investigated by selecting the target area. The safety factor of the levee was analyzed considering the current flood level of the levee and the flood level considering the climate change. The factor needed to analyze the levee vulnerability was derived. We analyzed the vulnerability of the levee considering the change of the levee level according to the climate change scenarios. Levee Flood Vulnerability Index (LFVI) were used to evaluate the vulnerability of the levee.

Keywords: SEEP/W, Safety factor, Flood Vulnerability Index, Levee river

기후변화에 따른 제방의 안전성 영향 분석을 위한 제방홍수취약성지수의 적용

이후상^a · 이재준^{a*}

^a금오공과대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 하천 제방에 대한 홍수취약성을 평가하는 새로운 기법을 기후변화에 따라 달라지는 하천의 수위변화를 고려하여 제방의 취약성 변화 정도를 파악해보고자 한다. 이를 위해 미래 기후변화 시나리오를 기반으로 대상유역의 홍수량을 산정하여 홍수위를 구하고 제방의 2차원 지하수침투 모형인 SEEP/W를 이용하여 침투거동을 분석함으로써 침투안정성을 평가하였다. 대상지역은 한강 분류 서울 구간으로 선정하여 대표 제방을 선정 한 후, 대표 제방의 현재 계획홍수위와 기후변화를 고려한 홍수위를 고려하여 제방의 안전율을 분석하였다. 제방의 취약성 분석에 필요한 인자를 도출하고 이를 활용하여 기후변화 시나리오에 따른 제방의 수위변화를 고려한 제방의 취약성 분석을 실시하였으며 분석결과를 본 연구자가 기 개발한 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 이용하여 제방의 취약성에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어: SEEP/W, 안전율, 제방홍수취약성지수, 하천제방

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 세계 곳곳에서 자연재해가 보다 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 자연재해로 인하여 인명과 재산 피해가 급증하고 있는 실정이다. 우리나라도 마찬가지로

로 국지성 태풍과 집중호우, 한파 등의 영향으로 인명과 재산의 피해가 해마다 증가하고 있는 추세이다.

우리나라의 기후는 대부분 지역의 강수량이 약 1,350 mm 이상의 습윤 지역이다. 하계 집중형 강수형태로, 우리나라는 연강수량의 50% 이상이 여름철(6~9월)에 집중된다. 또한 제방이 제 기능을 발휘할 수 있는 시기도 6~9월이 되기 때문에 이전에 제방의 적절한 점검과 보강이 이루어져야 홍수와 태풍

*Corresponding Author. Tel: +82-54-478-7616
E-mail: jhb365@kumoh.ac.kr (J. J. Lee)

과 같은 자연재해를 막을 수 있다(Cha *et al.*, 2010).

제방이 제 기능을 발휘하기 위해서는 홍수나 범람 등에 얼마나 견딜 수 있는지를 알아야 한다. 그러기 위해서는 무엇보다도 제방이 자연재해로부터 손상을 입게 되는 원인과 과정, 하천수의 침투로 인한 제체내부의 역학적 거동 등에 대한 충분한 이해와 지식을 함양해야 한다.

연구동향을 살펴보면, 제방에 대해서는 Ojha *et al.* (2001)은 제방파괴를 일으키는 파이핑 현상에 영향을 미치는 간극의 영향에 대해 입도분포와 투수성의 변화에 의한 연구를 수행하였으며, Fell *et al.* (2003)은 하천제방에서 침식과 파이핑 현상의 진행시간과 파괴로 이어지는 현상을 추정하고 이를 예방하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 파이핑 현상이 진행되는 시간이 짧다는 것이 분석되었고 지속적인 모니터링을 수행하여 예방 및 경고를 위한 분석도 포함되었다. 다음으로 기후변화에 대한 지표를 이용한 취약성평가 기법에 대한 국외 연구로는 Watson *et al.* (1996)에 의하여 취약성은 기후변화가 시스템에 피해를 주는 정도라고 정의한 바 있으며, Connor and Hiroki (2005)는 기상 및 수문학 지표, 사회경제지표, 대응책 관련 지표로 구분하여 취약성을 평가하였으며, Rygel *et al.* (2006)은 취약성 평가에서 가장 중요한 것은 적합한 지표들을 선정하는 것에 있다고 하였다. 또한 취약성을 노출 지표와 사회학 지표로 구분하였고 Pareto ranking process를 이용하여 사회학 취약성 지표를 통합한 취약성 평가기법을 제시하였다. Balica *et al.* (2009)은 홍수취약성을 3가지 해상도(river basin, sub-catchment, urban area) 별로 산정하여 평가하였다. 또한 기후변화에 따른 취약성평가의 국내 연구로는 Jung and Lee (2007)는 유역상태를 평가하기 위한 홍수피해잠재능(potential flood damage, PFD), 건천화잠재능(potential streamflow index, PSD), 수질오염잠재능(potential water quality deterioration, PWQD)을 개발하여 유역의 종합 수문학 취약도를 산정하기 위한 유역평가지수(watershed evaluation index, WEI)를 개발한 바 있다. Lee *et al.* (2009)은 압력(pressure), 현상(state), 대책(response) 구성체계를 기반으로 홍수위험지수(flood risk index, FRI)를 개발하여 유역간 홍수의 취약성을 비교·분석하였다. 또한 Jung *et al.* (2009)은 기후변화영향을 반영하여 홍수취약성을 민감도(sensitivity), 노출(exposure), 적응능력(adaptation)의 함수로 정의하고 각 유역별 지표들을 이용하여 상대적인 취약도를 평가하였다. 최근 Son *et al.* (2011)은 기후변화 요소를 반영한 홍수취약성 지표(flood vulnerability index, FVI)를 개발하여 북한강 유역의 6개 중권역에 적용하여 이용한 바 있으며, Lee *et al.* (2011)은 국내 5대강유역을 대상으로 Multi-Model Ensemble

시나리오를 이용하여 기후변화에 따른 홍수취약성 평가기법을 제안한 바 있다.

최근 기후변화로 인한 하천의 수위변화가 일어나고 있는 상황에서 제방과 같은 수공구조물에 대한 취약성 분석의 실제적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 실제 규모의 제방 데이터를 통해 제방의 침투 안정성을 분석하고 제방의 취약성에 영향을 주는 인자를 도출하여 개발된 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI)를 적용하여 기후변화에 따른 홍수위 변화시 제방의 취약성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 기후변화 시나리오

기후변화로 인한 물 순환의 변화로 인해 시·공간적 수문 및 생태시스템은 지역단위의 변화를 야기시킨다. 이러한 변동성을 파악하기 위해 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)는 세계 28개 기관의 61개 기후모형으로부터 Representative Concentration Pathway (RCP) 2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5와 같이 4가지 대표경로에 대한 기후변화 시나리오를 제공하고 있다. 불행하게도 지역단위 기후변화 영향 평가를 위한 공간해상도와 CMIP5 기후모형에서 제공되는 공간해상도에는 불일치가 발생하고 있다. 이를 해소하기 위해 수자원 영향평가와 같은 지역단위 연구에 적용가능한 공간해상도로 수정해 줄 수 있는 상세화모형이 요구된다(Kwon *et al.*, 2016).

최근 NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP)와 Downscaled CMIP3 and CMIP5 climate and Hydrology Projections (DCHP)에서는 기후모형 결과를 모형수립과 예측에 모두 사용하는 Model Output Statistics (MOS) 모형 중 Bias-Correction/Spatial Disaggregation (BCSD)모형을 활용하여 상세화된 자료를 제공하고 있다. 그러나 기존 방식은 기후변수 내 장기추세가 뚜렷하게 나타나는 경우, 빈번한 외삽으로 인해 기후모형에서 모의된 장기추세를 왜곡하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 기후모형에서 모의된 장기추세를 유지할 수 있는 기법이 개발되어 CMIP5 기후변화 시나리오에 적용되고 있다(Kwon *et al.*, 2016).

전 세계적으로 널리 활용되고 있는 BCSD와 평균뿐만 아니라 극한기후사상에 대한 장기추세를 직접적으로 고려할 수 있는 Quantile Delta Mapping을 결합하여 BCSD/QDM이 개

발되었다. 이를 CMIP5 기후변화 시나리오에 적용하여 국내 60개 관측소에 대한 상세화된 시나리오가 생산되었다.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)에서는 인류활동으로 인해 야기되는 지구온난화 영향에 대한 인류에 가져올 사회·과학적 영향평가를 실시하여왔다. 이러한 기후변화 영향평가에 대한 요구가 높아짐에 따라 기상, 대기, 대륙, 빙하 등을 결합시킨 다양한 기후모형이 개발되어 왔다. 그러나 이러한 다양한 모형을 통해 생성된 기후변화 시나리오의 변동성이 매우 커 어떤 시나리오를 선택하느냐에 따라 적응전략이 매우 상이하여 시나리오 내 불확실성을 고려해야 함이 제기되었다. 이에 따라, 다양한 기후 모형을 상호·비교하기 위해 1995년에 CMIP가 시작되었다. 또한 전지구모형이 개선될 때마다 CMIP를 수행하여 전반적인 전지구모형의 개선을 유도해 왔다. 최근 CMIP Phase 5 (CMIP5)에서는 경제성장률, 산업화, 복원기술력 등을 고려하여 네 가지 RCP를 설정하여 2100년의 대기농도에 따라 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5와 같이 4가지 대표경로를 제시하였다. 이 중 미래 대기농도의 목표 값에 가까운 RCP4.5 (Thomson *et al.*, 2011)와 as-usual business에 기인한 대기농도를 설정한 RCP8.5, 두 가지 RCP에 대한 미래 기후변화 시나리오를 대상으로 상세화가 실시되었다(Kwon *et al.*, 2016).

본 연구에서는 RCP8.5 기반의 기후변화 시나리오를 바탕으로 홍수량 산출한 것을 사용하였다.

2.2 대상구역의 안전성 평가

본 연구에서는 한강 분류 서울시 구간의 대표 제방에 대해 안전을 분석을 실시하였다.

일본에서는, 크게 3가지 부분에 대한 제방의 저항력 검토를 주요 안전성 평가 방법이라고 판단하였는데, 그 첫 번째는 침투에 대한 저항으로서 제방 사면의 슬라이딩 파괴와 제체의 파이핑 파괴에 대한 안전성 확보이며, 두 번째는 침식에 대한 저항으로서 직접 침식(direct erosion)과 횡방향 침식(lateral erosion)에 대한 안전성 확보가 필요하다고 언급되어 있다. 여기서, 직접 침식이라 함은 하천방향의 경사면에 대한 침식과 제체 끝단 기슭부분의 침식을 의미하고, 횡방향 침식이라 함은 홍수터(flood plain)의 침식 및 세굴을 의미한다. 제방설계 가이드에서 안전성 평가 방법 중 마지막 항목은 지진에 대한 저항력 평가인데, 지진 발생 시 제방 형상의 변형을 수반하는 하천 범람의 방지를 통한 2차적 피해에 대한 안전성 확보가 필요하다고 제시하고 있다(KWRC, 2013).

미국에서는 침투류에 대한 제방 안전성 검토는 미공병단의 제방설계 지침을 따르도록 하고 있다. 원칙적으로 정상상

태를 가정한 정상 침윤면을 설계 수면 표고, 제방 최고수위 및 제방 최저수위 등을 기준으로 설정하여 제방의 안정성을 해석한다. 제방 비탈면의 슬라이딩 파괴에 대한 안전성 평가법에서는 수위에 따라 6개의 경우로 나누어 안전율을 제시하고 있다 (USACE, 2009).

본 연구에서의 하천제방 침투해석은 설정된 설계외력 및 제방을 대상으로 SEEP/W모형을 이용하여 수행하였으며, 해석 결과로부터 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 산출에 필요한 인자를 산출하여 안전성을 평가하는데 사용하였다. 인자 중 안전율의 파이핑을 일으키는 한계동수경사는 자연상태의 사질토에 대해 검토하면 한계동수경사(i_{cr}) = 1.0이 얻어지는 것으로 알려져 있지만 현행 하천설계기준에서는 한계동수경사(i_{cr}) = 0.5~0.8을 고려하여 침투류해석에 의해 얻어진 이탈동수경사(i_{exit})가 한계동수경사의 1/2 이하가 되도록 규정하고 있다. 안전율 분석을 위해 선정된 하천경계조건은 제방의 현재 계획홍수위와 기후변화에 따른 수위상승을 고려한 홍수위를 설정하여 안전율 결과 값의 변화양상을 분석하였다.

2.3 하천제방에 대한 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI)

본 논문의 선행연구에서는 제방의 취약성분석 기술에 필요한 인자로 우리나라 제방 설계에 제시된 계획홍수량에 따라 달라지는 여유고(0.6~2.0 m), 계획홍수량에 따라 달라지는 독마루폭(3~7 m), 제체의 폭(B)과 제방고(H)의 비를 나타내는 제방단면의 비(H/B), 침윤 활동에 대한 안전율, 턱(소단)의 길이, 제체 끝 지점부터 침윤선단까지의 거리와 제체의 폭에 대한 비를 나타내는 침윤선 변화정도, 한계유속을 도출하여 산정식을 재구성하였다. 각각의 인자들은 필리핀에 적용된 식의 형태를 참조하여 안전성에 긍정적인 인자들을 분자에 안전성에 부정적인 인자를 분모에 놓아 지수화하여 취약성을 쉽게 판단할 수 있도록 하였고 인자들의 가중치에 대하여 각각의 인자들에 대한 값의 범위가 다르기 때문에 제방홍수취약성지수 값을 바로 등급화 하는데 쉽게 표현하기 위하여 그 범위를 비슷한 값들로 만들어주고 거기에 인자들의 중요도에 따라 민감도 분석을 통하여 여유고(a)의 가중치는 1, 독마루폭(b)의 가중치를 0.1, 제방단면의 비(H/B)(c)는 2, 안전율(d)은 3, 턱(소단)의 길이(e)는 0.1, 침윤선 변화정도(f)는 1, 한계유속(g)은 1의 가중치를 주었다. 이와 같이 제방의 취약성분석 기술에 적용하고자 필요한 인자를 도출하여 다음 Eq. (1)과 같은 하천 제방홍수취약성지수 산정식을 개발하였다.

	Class	LFVI	Decision
	1	0.0~3.5	Very vulnerable
	2	3.5~4.0	Vulnerable
	3	4.0~4.5	Moderately vulnerable
	4	4.5~5.0	Medium
	5	5.0~5.5	Moderately stable
	6	5.5~6.0	Stable
	7	6.0~7.0	Very stable

Fig. 1. Classification of Levee Flood Vulnerability Index (LFVI)

$$LFVI = \frac{w_1a + w_2b + w_3c + w_4d + w_5e + w_6f}{w_7g} = \frac{a + \frac{b}{10} + 2c + 3d + \frac{e}{10} + f}{g} \quad (1)$$

여기서, *a*는 여유고, *b*는 둑마루폭, *c*는 제방 단면의 비율, *d*는 안전율, *e*는 턱(소단), *f*는 침윤선변화정도, *g*는 한계유속이다.

제방홍수취약성지수 값은 Fig. 1과 같이 1~7등급으로 구분할 수 있으며, 1등급으로 갈수록 취약성 정도가 낮아지고 7등급으로 갈수록 홍수에 대한 안정성이 높아지는 것을 의미한다.

3. 대상유역 제방의 기후변화에 따른 취약성 변화 분석

3.1 대상유역과 대표 제방

대상유역으로는 한강 본류 서울시 구간을 대상으로 하였고, 한강 제방의 제원에 대한 전수조사를 바탕으로 하폭을 기준하여 총 20개로 분류하였다. 그 중에서 대표단면을 상류부, 중류부, 하류부로 나누어 3개의 구간을 정하였다. Fig. 2는 대표 제방단면의 위치를 나타낸 그림이고, 한강의 대표 단면의 계획홍수위시 수심과 제방고는 Table 1과 같다.

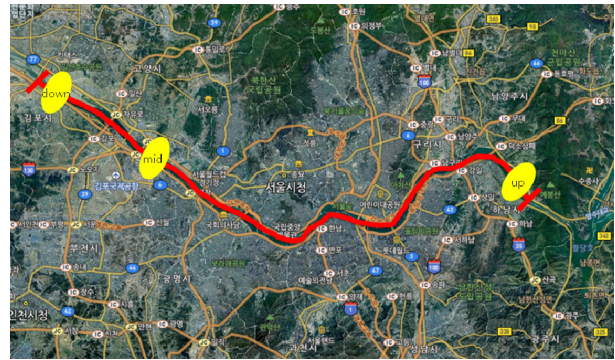


Fig. 2. Site of levee considered in this study

Table 1. Flood water depth and levee height

Division		Flood water depth (m)	Levee height left (m)	Levee height right (m)
Han river	Upstream part	16	19	23
	Midstream part	12	15	15
	Downstream part	15	21	21

3.2 대상유역 제방의 안전율 분석

3.2.1 기후변화에 따른 홍수량 및 홍수위 산정

본 연구에서는 대상유역인 한강 본류 서울시구간의 대표 제방의 홍수량은 다음 기후변화 시나리오 RCP8.5를 기반으로 2016년, 2025년, 2055년의 홍수량을 산정하여 Hec-ras모형을 이용하여 제방의 홍수위시 수심을 구하였고 그것을 Table 2에 나타내었다.

3.2.2 제방의 안전율 분석

본 연구에서는 대상유역인 한강 본류 서울시구간 대표 제방의 하천경계조건은 현재 계획홍수위와 기후변화를 고려한 홍수위를 고려하여 수위를 설정하였고, SEEP/W를 이용하여 수위변화 Case 4가지(2016년, 2025년, 2055년, 제방 만수위시)에 따른 제방의 좌안, 우안의 전수두, 압력수두, 동수경사를 이용하여 분석한 안전율을 다음 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Flood discharge and height according to climate change

Han river									
RCP 8.5	Flood discharge (m ³ /s)	Water depth (m)							
		Left levee				Right levee			
		Upstream part	Midstream part	Downstream part	Levee section ratio	Upstream part	Midstream part	Downstream part	Levee section ratio
2016 year	37,541.73	16.0	12.0	15.0	0.23	16.0	12.0	15.0	0.23
2025 year	39,043.40	16.8	12.6	16.4	0.21	16.8	12.6	16.4	0.14
2055 year	41,149.67	18.1	13.6	19.3	0.23	18.1	13.6	19.3	0.23

Table 3. Safety factor analysis result

Division		Levee					
		Left			Right		
		Height (m)	Water depth (m)	Safety factor	Height (m)	Water depth (m)	Safety factor
Han river	Up-stream part	19	16.0	1.25	23	16.0	1.67
			16.8	1.11		16.8	1.25
			18.1	1.00		18.1	1.00
			19.0	0.91		23.0	0.83
	Mid-stream part	15	12.0	2.50	15	12.0	3.33
			12.6	1.40		12.6	2.50
			13.6	1.25		13.6	2.50
			15.0	1.25		15.0	2.00
	Down-stream part	21	15.0	1.67	21	15.0	1.43
			16.4	1.25		16.4	1.25
			19.3	1.00		19.3	1.00
			21.0	0.83		21.0	0.83

침윤 활동에 대한 안정성이 확보되려면 한강 본류 서울시 구간 좌안과 우안의 상류부와 하류부의 대표 제방 안전율이 침투류 해석에 의하여 산출한 동수경사가 한계동수경사의

1/2 이하가 되도록 해야 한다. 본 연구에서는 대상유역인 한강 본류 서울시 구간 내 안전을 분석 결과, 한강 좌안의 한강상류 홍수심 16~19 m에 대한 제방의 안전을 값은 1.25, 1.11, 1, 0.91로 모두 불안정한 것으로 판명되었으며, 한강중류 홍수심 12~15 m에 대한 제방의 안전을 값은 2.5, 1.4, 1.25, 1.25로 12 m의 홍수심에서만 안정적이었다. 한강하류 홍수심 15~21 m에 대한 제방의 안전을 값은 1.67, 1.25, 1, 0.84로 모두 불안정하였다. 다음으로 한강 우안의 한강상류 홍수심 16~23 m에 대한 제방의 안전을 값은 1.67, 1.25, 1, 0.83으로 모두 불안정한 것으로 판명되었으며, 한강중류 홍수심 12~15 m에 대한 제방의 안전을 값은 3.33, 2.5, 2.5, 2로 모두 안정적인 것으로 판명되었고, 한강하류 홍수심 15~21 m에 대한 제방의 안전을 값은 1.48, 1.25, 1, 0.83으로 모두 불안정한 것으로 판명되었다.

3.3 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 인자 도출

본 연구에서는 SEEP/W를 이용하여 한강 본류 서울시구간의 대표 제방을 상류부, 중류부, 하류로 구분 짓고 취약성 분석에 필요한 현재의 제방의 인자와 기후변화에 따른 제방의 각종 인자들의 변화들의 값을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Vulnerability index factor

Factor		Left levee			Right levee			
		Upstream part	Midstream part	Downstream part	Upstream part	Midstream part	Downstream part	
a	Freeboard (m)	2016 year	3.000	3.000	3.000	7.00	3.000	6.000
		2055 year	2.200	2.400	4.600	6.200	2.400	4.600
		2100 year	0.900	1.440	1.700	4.900	1.440	1.700
		High water height	0	0	0	0	0	0
b	Levee crown width (m)	8	13	8	8	12	7	
c	Levee section ratio	0.230	0.210	0.230	0.230	0.140	0.230	
d	Safety factor	2016 year	1.250	2.500	1.670	1.670	3.200	1.430
		2055 year	1.110	1.400	1.250	1.250	2.500	1.250
		2100 year	1.000	1.250	1.000	1.000	2.500	1.000
		High water height	0.910	1.250	0.830	0.830	2.000	0.830
e	Raised spot length (m)	0	0	0	0	0	0	
f	Seepage line change degree	2016 year	1.150	1.100	1.110	1.108	1.040	0.110
		2055 year	1.190	1.140	1.160	1.136	1.053	1.156
		2100 year	1.220	1.160	1.210	1.180	1.060	1.204
		High water height	1.260	1.190	1.220	1.272	1.067	1.273
g	Critical velocity	2016 year	2.090	2.160	2.190	2.090	2.160	2.190
		2055 year	2.091	2.160	2.191	2.091	2.160	2.191
		2100 year	2.091	2.161	2.191	2.091	2.161	2.191
		High water height	2.093	2.162	2.193	2.093	2.162	2.193

3.4 취약성 분석 기술 적용 검토

제방의 취약성 분석 기술을 대상유역 제방의 인자(여유고, 둑마루폭, 제방단면의 비율, 안전율, 턱(소단), 침윤선 변화정도)들을 도출하여 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 산정하여 제방의 취약성에 정도를 분석을 하였으며, 분석한 결과는 다음 Table 5와 같다.

본 연구에서 분석한 결과 대표 제방의 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 이용한 등급별로 좌안의 상류의 등급이 1~3등급으로 나왔고 중류에서는 1~7급, 그리고 하류에서는 1~7등급으로 분석되었고, 우안의 상류등급이 1~7등급, 중류의 등급이 2~7등급, 그리고 하류의 등급이 1~6등급으로 대상유역인 한강 본류 서울시구간의 대표 제방 중류 구간보다 상류와 하류의 제방취약성지수 등급이 높은 것으로 분석되었다. 기후변화에 따라 수위가 상승함으로써 제방의 취약성 등급 정도가 낮아지는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 대상유역인 한강 본류 서울시구간의 실제 제방의 데이터를 통해 제방의 침투안정성을 분석하고 제방의 취약성에 영향을 주는 인자를 도출하여 개발된 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI)를 적용하여 기후변화에 따른 홍수위 변화 시 제방의 취약성을 분석하고자 한다.

- 1) 대상유역인 한강 본류 서울시구간의 안전율 분석 결과 한강 좌안의 한강상류 홍수심 16~19 m에 대한 제방의 안전율 값은 1.25, 1.11, 1, 0.9로 모두 불안정한 것으로 판명되었으며, 한강중류 홍수심 12~15 m에 대한 제방의 안전율 값은 2.5, 1.4, 1.25, 1.25로 12 m의 홍수심에서만 안정적이었다. 한강하류 홍수위 15~21 m에 대한 제방의 안전율 값은 1.67, 1.25, 1, 0.84로 모두 불안정 하였다.

Table 5. Levee Flood Vulnerability Index analysis

Han river		Flood water depth (m)	LFVI	Class	Decision
Left	Upstream	16	4.3802	3	Moderately vulnerable
		16.8	3.8174	2	Vulnerable
		18.1	3.0496	1	Very vulnerable
		19	2.5079	1	Very vulnerable
	Midstream	12	6.1631	7	Very stable
		12.6	4.4150	4	Medium
		13.56	3.7326	2	Vulnerable
		15	3.0812	1	Very vulnerable
	Downstream	15	6.1112	7	Very stable
		16.4	4.9167	4	Medium
		19.3	3.2741	1	Very vulnerable
		21	2.3006	1	Very vulnerable
Right	Upstream	16	6.8794	7	Very stable
		16.8	5.9071	6	Stable
		18.1	4.9473	4	Medium
		23	2.4076	1	Very vulnerable
	Midstream	12	6.9974	7	Very stable
		12.6	5.7525	6	Stable
		13.56	5.3114	6	Stable
		15	3.9537	2	Vulnerable
	Downstream	15	5.7368	6	Stable
		16.4	4.8710	4	Medium
		19.3	3.2264	1	Very vulnerable
		21	2.2529	1	Very vulnerable

- 2) 대상구역의 제방 좌안의 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값은 상류에서 홍수심 16~19 m에서 2.5079~4.3802로 1~3등급으로 나왔고, 중류의 홍수심 12~15 m에서는 3.0812~6.1631로 1~7등급으로 나왔으며 하류에서의 홍수심 15~21 m에서는 2.3006~6.112로 1~7등급으로 상류에 비해 중류와 하류구간에서 제방취약성등급이 높은 것으로 나왔다.
- 3) 대상구역의 제방 우안의 한강상류 홍수심 16~23 m에 대한 제방의 안전을 값은 1.67, 1.25, 1, 0.83으로 모두 불안정한 것으로 판명되었으며, 한강중류 홍수심 12~15 m에 대한 제방의 안전을 값은 3.33, 2.5, 2.5, 2로 모두 안정적인 것으로 판명되었다. 한강하류 홍수심 15~21 m에 대한 제방의 안전을 값은 1.48, 1.25, 1, 0.83으로 모두 불안정한 것으로 판명되었다.
- 4) 대상구역의 제방 우안의 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값은 상류에서 홍수심 16~23 m에서 2.4076~6.8794로 1~7등급으로 나왔고, 중류의 홍수심 12~15 m에서는 3.9537~6.9974로 2~7등급으로 나왔으며 하류에서의 홍수심 15~21 m에서는 2.2529~5.7368로 1~6등급으로 상류와 하류에 비해 중류구간에서 제방취약성지수 등급이 높은 것으로 나왔다.
- 5) 하천제방설계 시 우리나라에서는 계획홍수위 위주의 활동, 누수, 침하에 대한 안정성을 평가하는데 그치고 있으나, 월류나 침식, 구조물 접합부 등에 대한 안정성 평가 방법을 보다 좀 더 세부적으로 개발할 필요가 있다. 특히 제방홍수취약성지수를 산정하는데 필요한 인자들에 대한 다양한 검증을 통해 실무적으로 활용할 수 있도록 할 필요가 있으나, 미래 상황에 대처하기 위하여 기후변화의 영향을 고려한 제방의 설계기준강화에 필요한 정보를 현지점에서는 충분히 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 17AWMP-B083066-04).

References

- Balica, S. F., Douben, N., and Wright, N. G. (2009). "Flood vulnerability indices at varying spatial scales." *Water Science and Technology*, Vol. 60, No. 10, pp. 2571-2580.
- Cha, E. J., Kwon, H. J., and Kim, S. J. (2010). "2009 Typhoon Feature." *Journal of Korea Meteorological Society*, Vol. 2010, No. 4, pp. 9-10.
- Connor, R. F., and Hiroki, K. (2005). "Development of a method for assessing flood vulnerability." *Water Science and Technology*, Vol. 51, No. 5, pp. 61-68.
- Fell, R., Wan, C., Cyganiewicz, J., and Foster, M. (2003). "Time for development of internal erosion and piping in embankment dams." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 4, pp. 307-314.
- Geo-Slope International Ltd (2004). *Seepage modeling with SEEP/W 2004*. Calgary, Alberta, Canada.
- Jung, E. S., and Lee, K. S. (2007). "Identifying spatial hazard ranking using multicriteria decision making techniques." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 12, pp. 969-983.
- Jung, L. L., Lee, B. J., and Bea, D. H. (2009). "Parameter regionalization of semi-distributed runoff model using multivariate statistical analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 149-160.
- Kwon, H. H., Lima, C. H., and Kim, J. Y. (2016). "A Bayesian beta distribution model for estimating rainfall IDF curves in a changing climate." *Journal of Hydrology*, Vol. 540, pp. 744-756.
- KWRC (2013). *Analysis of runoff characteristics due to climate change*.
- Lee, M. H., Jung, L. L., and Bea, D. H. (2011). "Korean flood vulnerability assessment on climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 653-666.
- Ojha, C. S. P., Adrian, D. D., Ozkan, S., Sills, G. E., and Singh, V. P. (2001). "Role of sand boil formation in levee failure." *Proceedings Congress - International Association of Hydraulic Engineering and Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 226-231.
- Rygel, L., O'sullivan, D., and Yarnal, B. (2006). "A method for constructing a social vulnerability index: an application to hurricane storm surges in a developed country." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 11, No. 3, pp. 741-764.
- Son, M. W., Sung, J. Y., Jung, E. S., and Jeon, G. S. (2011). "Development of flood vulnerability index considering climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., and Clarke, L. E. (2011). "RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100." *Climatic Change*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 77-94.
- USACE (2009). *Guidelines for landscape planting and vegetation management at levees, floodwalls, embankment dams, and appurtenant structures*.
- USACE (2010). *USACE process for the National Flood Insurance Program (NFIP) levee system evaluation*.
- Watson, J. (1996). "Integrated climate management." *Proceedings Washington State Horticultural Association*, Vol. 91, pp. 307-310.