



Sensitivity analysis of flood vulnerability index 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: 18-081

Received: 15 October 2018; Revised: 31 October 2018; Accepted: 31 October 2018

Abstract

In this study, a new methodology was proposed to evaluate the flood vulnerability of river levee and to investigate the effect on the levee where the water level changes according to climate change. The stability of levee against seepage was evaluated using SEEP/W model which is two-dimensional groundwater infiltration model. In addition to the infiltration behavior, it is necessary to analyze the vulnerability of the embankment considering the environmental conditions of the river due to climate change. In this study, the levee flood vulnerability index (LFVI) was newly developed by deriving the factors necessary for the analysis of the levee vulnerability. The size of river levee was investigated by selecting the target area. The selected levees were classified into upstream part, midstream part and downstream part at the nearside of Seoul in the Han river, and the safety factor of the levee was analyzed by applying the design flood level of the levee. The safety ratio of the levee was analyzed by applying the design flood level considering the current flood level and the scenario of climate change RCP8.5. The degree of change resulting from climate change was identified for each factor that forms the levee flood vulnerability index. By using the levee flood vulnerability index value utilizing these factors comprehensively, it was finally possible to estimate the vulnerability of levee due to climate change.

Keywords: Climate change, River levee, Vulnerability, Flood vulnerability index,

기후변화에 따른 제방의 홍수취약성지수 민감도 분석

이후상^a · 이재준^{a*}

^a금오공과대학교 토목공학과

요 지

본 연구에서는 하천 제방에 대한 홍수취약성을 평가하는 새로운 기법을 제시하고 기후변화에 따라 변화하는 수위에 대하여 제방에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 먼저 2차원 지하수침투 모형인 SEEP/W를 이용하여 제방의 침투거동을 분석하여 침투안전성을 평가하였다. 침투거동뿐만 아니라 기후변화에 따른 하천환경여건을 고려하는 제방의 취약성 분석 기술이 필요함으로써 본 연구에서는 추가적으로 제방의 취약성 분석에 필요한 인자를 도출하여 제방의 홍수취약성지수(levee flood vulnerability index ; LFVI)에 의한 취약성 평가기법을 새로이 개발 하였다. 대상지역을 한강 본류 서울 구간으로 선정하여 하도별 제방의 크기를 조사하였고 조사한 제방을 상류부, 중류부, 하류부로 구분하여 3개의 대표 제방을 선정하였다. 이들 대표 제방지점에서 현재의 계획홍수위와 기후변화 시나리오 RCP8.5를 고려한 계획홍수위를 적용하여 제방의 활동 안전율과 제방 홍수취약성지수를 분석하였다. 그리고 제방홍수취약성지수를 구성하는 각각 인자들에 대하여 기후변화에 따른 변화 정도를 파악하였다. 이들 인자들을 종합적으로 활용한 제방홍수취약성지수 값을 이용하여 최종적으로 기후변화에 따른 제방의 취약성을 추정할 수 있도록 하였다.

핵심용어: 기후변화, 하천제방, 취약성, 제방홍수취약성지수

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

1. 서론

최근 기후변화로 인해 세계 곳곳에서 자연재해가 발생하고 있다. 이러한 자연재해로 인하여 인명과 재산 피해 급증하고 있는 실정이다. 우리나라도 마찬가지로 국지성 태풍과 집중호우, 한파 등의 영향으로 인명과 재산의 피해가 해마다 증가하고 있는 추세이다.

특히 우리나라의 경우 강우는 대부분 여름철에 장마와 태풍으로 인해 집중현상을 보이고 있다. 이때의 강우 유출은 하천으로 집중되며 하천수위의 급상승과 급강하를 일으키는 원인이 된다. 하천수위의 변동은 제방파괴를 가져올 수도 있으며 제방에 손상을 주기도 한다. 또한 하천수위의 급상승으로 인하여 제체내의 침윤선과 침투유속, 동수경사를 변화시켜 제방에 지속적인 영향을 주게 된다. 그러므로 제방에 영향을 주는 인자를 파악하고 기후변화에 따른 유동적인 대체 방안이 있어야 제방파괴로 인하여 발생한 피해를 저감할 수 있다.

연구동향을 살펴보면, Darby *et al.* (1996)은 하천제방 안전화에 대한 실험적 연구를 수행하여 제방파괴면의 응집력과 경사에 의한 안정성과 퇴적과 침식으로 인한 제방파괴를 분석하였다. Gui *et al.* (1998)은 하천제방의 바람의 세기에 따른 풍수해 피해 정도를 분석하여 월류에 의한 홍수범람 모델을 개발하여 피해 정도를 예측하고 개선하는 연구를 수행하였다. Marc Vuillet *et al.* (2013)은 제방의 확률론적 안정성 평가에 대한 연구를 수행하여 제방의 침투에 대한 파괴가능성을 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 분석하였다. Han *et al.* (1997)은 댐 및 하천제방의 수문학적 위험도 평가를 하기 위해 Monte Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의한 위험도 모형을 개발하였다. Kim *et al.* (2004)은 하천제방 안정성 평가는 침투 해석으로 결정되어진 제체 침윤면에 의한 비탈면 활동의 기초 지반 침투압 상승에 따른 파이핑과 관련된 것으로서 적절한 모델의 해석기법이 필요하다고 하였다. Lee *et al.* (2006)은 GUI 형태의 HEC 모형과 ARC/VIEW 등을 이용한 하천범람 해석에 대한 연구를 진행 하였으며, Han *et al.* (2007)은 하천에서의 EAP구축을 위한 범람위험도 평가기법을 적용하여 홍수위험도지도를 분석한 바 있다. 기후변화에 따른 취약성평가의 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) 구

성체계를 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. 이들의 연구를 살펴보면 하천시설물인 제방에 대한 취약성을 분석할 수 있는 기술에 대하여는 연구가 미비한 실정이다.

최근 하천개수계획 수립에 따라 제방의 신설 또는 증축이 대대적으로 이루어지고 있고 기후변화에 따른 수문기상현상 변화로 인해 하천의 수위와 제방 내 침투현상 등의 인자들이 변하게 되어 제방에 대한 취약성 분석의 실제적인 연구가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 상황의 제방의 데이터를 통해 제방의 침투안전성을 분석하고 제방의 취약성에 영향을 주는 인자를 도출하여 각각 인자들을 이용한 제방홍수취약성을 분석하기로 한다. 그리고 기후변화 시나리오에 따른 수위변화를 고려하여 제방홍수취약성지수의 구성인자에 대한 민감도 분석을 실시하기로 한다. 또한 본 연구에서 개발한 제방홍수취약성지수의 변동성을 분석하여 기후변화에 따라 변화되는 하천 수위변화를 고려한 제방의 취약성을 분석하고자 한다.

2. 홍수와 제방의 취약성 평가를 위한 기법

2.1 홍수취약성지수(Flood Vulnerability Index, FVI)

일본 국토성 국토기술정책종합연구소(National Institute for Land & Infrastructure Management, NILIM)에서는 홍수취약성지수(flood vulnerability index, FVI)를 개발하였고 Fig. 1과 같은 기본 산정식을 제시하였다.

필리핀에 적용한 사례를 보면 수문, 기후, 경제·사회적 인자는 취약성을 증가시키는 요인이므로 이것을 분자로, 취약성을 감소시키는 인자인 보호조치 인자는 분모로 하여 구성하였다. 이 식을 이용하여 필리핀의 주요 하천유역 18개에 대한 홍수취약성지수를 분석한 결과 2~35의 홍수취약성지수 값이 얻어졌으며, 이를 5개의 등급으로 분류하여 나타내었다. 다음 Fig. 2는 필리핀에서 홍수취약성지수의 산정식으로 활용한 것이다.

$$FVI = C + H + S - M$$

$$= (3 \times I_1) + (3 \times I_2 + I_3) + (-I_4 - I_5 + I_6 - I_7 + I_8 + I_9) - (I_{10} + I_{11})$$

Fig. 1. Flood Vulnerability Index(FVI) developed by NILIM, Japan

$$FVI = \frac{w_c C + w_h H + w_s S}{w_m M} = \frac{3 \times I_1 + 2 \times \sum_{l=2}^3 I_l + \sum_{m=4}^9 I_m}{\sum_{n=10}^{11} I_n}$$

Fig. 2. Flood Vulnerability Index(FVI) developed in case of Philippines

홍수취약성지수는 홍수에 대한 경각심을 고취하여 일반인들도 쉽게 홍수 위험을 쉽게 이해할 수 있고 정부의 치수정책 우선순위를 결정하기 위하여 개발하였다. 홍수취약성지수의 기상과 관련된 인자는 미국 해양대기관리처(NOAA)의 자료를 이용하여 유역단위의 선형 회귀분석을 통해 기후변화에 따른 홍수 피해와 취약성을 지수화하여 각 유역별 홍수 취약 정도를 제시하였다. 이 지수는 NOAA 기상자료를 사용함으로써 일본 지역에만 국한되는 것이 아니라 전 세계에 확대 적용이 가능하다. 그러나 이 홍수취약성지수는 유역이나 제내지 지역의 홍수에 대한 취약성(위험도)을 평가하는 것으로서 제방과 같은 하천시설물(수공구조물)에 대해 직접 적용하기에는 적절하지 않다.

이를 토대로 본 연구에서는 홍수취약성지수를 기반으로 재구성하여 하천시설물인 제방에 영향을 주는 인자를 도출하여 제방홍수취약성지수(levee flood vulnerability index ; LFVI)를 개발하기로 한다.

2.2 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI)의 개발

본 연구에서는 일본 국토기술정책종합연구소에서 개발한

홍수취약성지수의 형식을 차용하여 하천제방에 대한 홍수취약성을 분석하는 새로운 기법을 개발하고, 이를 이용하여 제방의 안전성을 판단하기로 한다.

먼저 제방의 취약성분석 기술에 필요한 인자로 다음과 같은 7개의 인자를 채택하였다. i) 하천설계기준의 제방 설계에 제시된 계획홍수량에 따라 달라지는 여유고(0.6m~2.0 m), ii) 계획홍수량에 따라 달라지는 독마루폭(3 m~7 m), iii) 제체의 폭(B)과 제방고(H)의 비를 나타내는 제방단면의 비(H/B), iv) 침윤 활동에 대한 안전율, v) 턱(소단)의 길이, vi) 제체 끝 지점부터 침윤선단까지의 거리와 제체의 폭에 대한 비를 나타내는 침윤선 길이 비, vii) 한계유속. 이상의 7가지 인자를 사용하여 제방홍수취약성지수를 산정하는 식을 제안하였다. 각각의 인자들은 필리핀에 적용된 식의 형태를 참조하여 안전성에 긍정적인 인자들을 분자에, 안전성에 부정적인 인자를 분모에 놓아 지수화하여 취약성을 쉽게 판단할 수 있도록 하였다. 인자들의 가중치에 대하여는 각각의 인자들에 대한 값의 범위가 다르기 때문에 제방홍수취약성지수 값을 등급화하기 쉽도록 그 범위를 비슷한 값들로 만들어주고 거기에 인자들의 중요도에 따라 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과 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 길이 비(f)는 1, 한계유속(g)은 1의 가중치를 부여하였다. 이와 같이 제방의 취약성분석 기술에 적용하고자 필요한 인자를 도출하여 다음 Eq. (1)과 같은 하천 제방홍수취약성지수 산정식을 개발하였다.

$$LFVI = \frac{w_1 a + w_2 b + w_3 c + w_4 d + w_5 e + w_6 f}{w_7 g}$$

$$= \frac{a + \frac{b}{10} + 2c + 3d + \frac{e}{10} + f}{g} \tag{1}$$

여기서, w_1, \dots, w_7 : 가중치

- a = 여유고(m)
- b = 독마루폭(m)
- c = 제방 단면의 비(H/B)
- d = 활동 안전율
- e = 턱(소단)의 길이(m)
- f = 침윤선 길이 비
- g = 한계유속(cm/s)

본 연구에서 개발된 제방홍수취약성지수 값은 Table 1과 같이 1~7등급으로 구분할 수 있으며, 1등급으로 갈수록 취약

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

| Class | LFVI | Decision |
|-------|---------|-----------------------|
| 1 | < 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 < | Very stable |

성 정도가 낮아지고 7등급으로 갈수록 홍수에 대한 안전성이 높아지는 것을 의미한다.

3. 기후변화에 따른 제방의 취약성 분석

3.1 대상유역과 대표 제방의 선정

대상유역으로 한강 본류 서울시 구간을 대상으로 하였으며 한강 제방의 제원에 대한 전수조사를 통하여 하폭을 기준하여 총 20개 단면으로 분류하였다. 그 중에서 대표단면을 상류부, 중류부, 하류부로 나누어 3개의 구간을 정하였다. Fig. 3은

대표 제방단면의 위치와 제방단면모식도를 나타낸 그림이다.

3.2 기후변화에 따른 홍수량 및 홍수위 산정

본 연구에서는 대상유역인 한강 본류 서울시구간의 대표 제방의 홍수량은 기후변화 시나리오 RCP8.5를 기반으로 2016년, 2025년, 2055년의 홍수량을 산정하여 HEC-RAS모형을 이용하여 제방의 홍수위 시 수심을 구하였고 2016년도 홍수량과 홍수위를 100%로 하여 기후변화에 따른 수위가 얼마나 상승하는지를 알아보았고 그것을 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 보면 기후변화 시나리오 RCP8.5에 의거 한강 본류 서울시 구간의 계획 홍수량은 2025년도에는 4%정도 증가하고 2055년도에는 10%정도 증가하는 것으로 추정된다. 이러한 계획홍수량 증가에 따라 계획홍수위는 2025년도에는 5~9%정도 증가하고, 2055년도에는 13~29%정도 증가하는 것으로 추정된다. 하류부 구간이 상류부, 중류부 구간보다 증가량이 컸으며, 홍수량 증가비율보다 홍수위 증가비율이 높아서 기후변화에 대비하기 위해서는 월류 영향 저감을 위주로 한 제방의 안전대책이 중요할 것으로 생각된다.

3.3 제방의 활동 안전율 분석

본 연구에서는 대상유역인 한강 본류 서울시구간 대표 제방의 활동 안전율을 분석하기 위하여 SEEP/W모형을 이용하였다. 제방 지점의 하천수위는 현재 계획홍수위와 기후변화를 고려한 홍수위를 고려하여 수위를 설정하였다. 기후변화 시나리오 RCP8.5에 의거한 수위변화는 2025년, 2055년, 제방 만수위시를 대상으로 제방의 좌안, 우안의 동수경사를 이용하여 활동 안전율을 추정하였다. 2016년도의 계획홍수위를 100%로 하여 활동 안전율의 변화 정도를 알아보았고 이를 다음 Table 3에 나타내었다.

Table 3을 보면, 기후변화 시나리오 RCP8.5에 의거 좌안의 활동 안전율은 제방좌안 상류부에서는 11.2~27.2% 감소하였고, 중류부에서는 44~50% 감소하였으며, 하류부에서는 25.1~50.3% 감소하였다. 제방우안 상류부에서는 25.1~50.3%

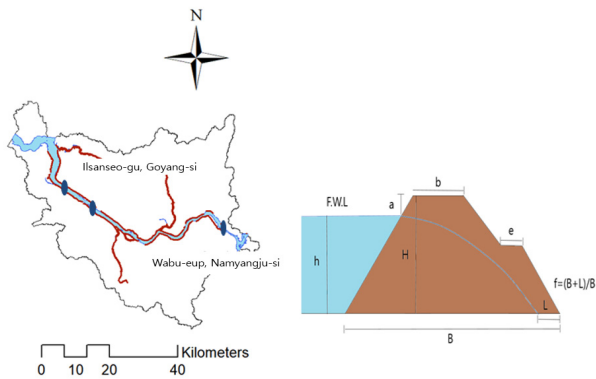


Fig. 3. Site of levee considered in this study and schematic diagram of levee

Table 2. Flood discharge and water depth according to climate change

| | RCP 8.5 | Flood discharge (m ³ /s) | | Water depth(m) | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------------------------------|------|----------------|------|----------------|------|-----------------|------|---------------|------|----------------|------|-----------------|------|
| | | | | Left levee | | | | | | Right levee | | | | | |
| | | | | Upstream part | | Midstream part | | Downstream part | | Upstream part | | Midstream part | | Downstream part | |
| Han river | 2016 year | 37,541 | 100% | 16.0 | 100% | 12.0 | 100% | 15.0 | 100% | 16.0 | 100% | 12.0 | 100% | 15.0 | 100% |
| | 2025 year | 39,043 | 104% | 16.8 | 105% | 12.6 | 105% | 16.4 | 109% | 16.8 | 105% | 12.6 | 105% | 16.4 | 109% |
| | 2055year | 41,149 | 110% | 18.1 | 113% | 13.6 | 113% | 19.3 | 129% | 18.1 | 113% | 13.6 | 113% | 19.3 | 129% |

Table 3. Safety factor analysis of levee according to climate change

| Division | | Left Levee | | | | | Right Levee | | | | |
|-----------------|----------|------------|-------------|------|---------------|-------|-------------|-------------|------|---------------|-------|
| | | Height (m) | Water depth | | Safety factor | | Height (m) | Water depth | | Safety factor | |
| Upstream part | 2016year | 19 | 16.0 | 100% | 1.25 | 100% | 23 | 16.0 | 100% | 1.67 | 100% |
| | 2025year | | 16.8 | 105% | 1.11 | 88.8% | | 16.8 | 105% | 1.25 | 74.9% |
| | 2055year | | 18.1 | 113% | 1.00 | 80% | | 18.1 | 113% | 1.00 | 59.9% |
| | bankfull | | 19.0 | 119% | 0.91 | 72.8% | | 23.0 | 144% | 0.83 | 49.7% |
| Midstream part | 2016year | 15 | 12.0 | 100% | 2.50 | 100% | 15 | 12.0 | 100% | 3.33 | 100% |
| | 2025year | | 12.6 | 105% | 1.40 | 56% | | 12.6 | 105% | 2.50 | 75.1% |
| | 2055year | | 13.6 | 113% | 1.25 | 50% | | 13.6 | 113% | 2.50 | 75.1% |
| | bankfull | | 15.0 | 125% | 1.25 | 50% | | 15.0 | 125% | 2.00 | 60.1% |
| Downstream part | 2016year | 21 | 15.0 | 100% | 1.67 | 100% | 21 | 15.0 | 100% | 1.43 | 100% |
| | 2025year | | 16.4 | 109% | 1.25 | 74.9% | | 16.4 | 109% | 1.25 | 87.4% |
| | 2055year | | 19.3 | 129% | 1.00 | 59.9% | | 19.3 | 129% | 1.00 | 69.9% |
| | bankfull | | 21.0 | 140% | 0.83 | 49.7% | | 21.0 | 140% | 0.83 | 58.0% |

cf) Stable ≥ SF 2.0

감소하였고, 중류부에서는 24.9~39.9% 감소하였으며, 하류부에서는 12.6~42% 감소하였다. 이러한 결과로 미루어볼 때 우안 중류부를 제외하고는 대부분 기후변화로 인해 제방의 활동 안전율이 불안정한 상황에 달할 것으로 추정된다.

3.4 기후변화에 따른 제방홍수취약성지수 분석

3.4.1 제방홍수취약성지수의 구성 인자 변화 정도

본 연구에서는 한강 본류 서울시구간의 대표 제방을 상류

부, 중류부, 하류부로 구분 짓고 취약성 분석에 필요한 현재의 제방의 인자와 기후변화에 따른 제방의 각종 인자들의 변화하는 정도를 Table 4에 나타내었다. 제방홍수취약성지수를 구성하는 인자 중 침윤선 길이 비, 한계유속, 활동 안전율은 SEEP/W모형의 침투거동해석 결과로부터 얻을 수 있다.

Table 4의 기후변화에 따른 수위상승으로 인한 제방홍수취약성지수의 인자의 변화율을 살펴보면, 여유고는 2016년도 계획홍수위시 100%에서 2025년도에는 좌안 상류부에서

Table 4. Vulnerability index factor according to climate change

| Factor | | | Left levee | | | | | | Right levee | | | | | |
|--------|----------------------------|----------|---------------|------|----------------|-------|-----------------|-------|---------------|-------|----------------|-------|-----------------|-------|
| | | | Upstream part | | Midstream part | | Downstream part | | Upstream part | | Midstream part | | Downstream part | |
| | | | value | % | value | % | value | % | value | % | value | % | value | % |
| a | Free board (m) | 2016year | 3.00 | 100 | 3 | 100 | 3 | 100 | 7 | 100 | 3 | 100 | 6 | 100 |
| | | 2025year | 2.20 | 73.3 | 2.4 | 80 | 2.6 | 86.7 | 6.2 | 88.6 | 2.4 | 80 | 4.6 | 76.7 |
| | | 2055year | 0.90 | 30 | 1.44 | 48 | 1.7 | 56.7 | 4.9 | 70 | 1.44 | 48 | 1.7 | 28.3 |
| | | bankfull | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| b | Levee crown width(m) | 8 | 100 | 13 | 100 | 8 | 100 | 8 | 100 | 12 | 100 | 7 | 100 | |
| c | Levee section ratio | 0.23 | 100 | 0.21 | 100 | 0.23 | 100 | 0.23 | 100 | 0.14 | 100 | 0.23 | 100 | |
| d | Safety factor | 2016year | 1.25 | 100 | 2.50 | 100 | 1.67 | 100 | 1.67 | 100 | 3.20 | 100 | 1.43 | 100 |
| | | 2025year | 1.11 | 88.8 | 1.40 | 56 | 1.25 | 74.9 | 1.25 | 74.9 | 2.50 | 75.1 | 1.25 | 87.4 |
| | | 2055year | 1.00 | 80 | 1.25 | 50 | 1.00 | 59.9 | 1.00 | 59.9 | 2.50 | 75.1 | 1.00 | 69.9 |
| | | bankfull | 0.91 | 72.8 | 1.25 | 50 | 0.83 | 49.7 | 0.83 | 49.7 | 2.00 | 60.1 | 0.83 | 58.0 |
| e | Raised spot length(m) | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | 0 | 100 | |
| f | Seepage line change degree | 2016year | 0.85 | 100 | 0.90 | 100 | 0.89 | 100 | 0.89 | 100 | 0.96 | 100 | 0.89 | 100 |
| | | 2025year | 0.81 | 95 | 0.86 | 96 | 0.84 | 94 | 0.86 | 97 | 0.95 | 99 | 0.84 | 94 |
| | | 2055year | 0.78 | 92 | 0.84 | 93 | 0.79 | 89 | 0.82 | 92 | 0.94 | 98 | 0.80 | 90 |
| | | bankfull | 0.74 | 87 | 0.81 | 90 | 0.72 | 81 | 0.73 | 82 | 0.93 | 97 | 0.73 | 82 |
| g | Critical velocity (cm/s) | 2016year | 2.09 | 100 | 2.2 | 100 | 2.2 | 100 | 2.1 | 100 | 2.2 | 100 | 2.2 | 100 |
| | | 2025year | 2.09 | 100 | 2.2 | 100 | 2.2 | 100 | 2.1 | 100 | 2.2 | 100 | 2.2 | 100 |
| | | 2055year | 2.09 | 100 | 2.2 | 100 | 2.2 | 100 | 2.1 | 100 | 2.2 | 100 | 2.2 | 100 |
| | | bankfull | 2.09 | 100 | 2.2 | 100.1 | 2.2 | 100.1 | 2.1 | 100.1 | 2.2 | 100.1 | 2.2 | 100.1 |

최대 73.3%까지 감소하였고 2055년도에는 우안 하류부에서 최대 28.3%까지 감소하였다. 활동 안전율은 2016년도 계획 홍수위시 100%에서 2025년도에는 좌안 중류부에서 최대 56%까지 감소하였고 2055년에는 좌안 하류부에서 최대 49.7%까지 감소하였다. 침윤선 길이 비는 2016년도 계획홍수위시 100%에서 2025년도에는 좌안 하류부와 우안 하류부에서 최대 94%까지 감소하였고 2055년도에는 좌안 하류부에서 최대 89%까지 감소하는 변화율을 보였다.

3.4.2 제방홍수취약성지수의 민감도 분석

대상유역 제방의 인자인 여유고, 독마루폭, 제방단면의 비율, 활동 안전율, 턱(소단)의 길이, 침윤선 길이 비를 현재와 기후변화에 따라 변화하는 정도를 도출하여 제방홍수취약성 지수 값을 산정하였고, 기후변화로 인하여 수위가 상승함에 따라 변화하는 인자인 여유고, 활동 안전율, 침윤선 길이 비에 대하여 민감도 분석을 하였으며, 제방홍수취약성지수와 인자들을 비교하였다. 이와같이 비교 분석한 결과는 다음 Table 5와 Figs. 4~8에 나타내었다.

기후변화 시나리오에 따른 제방홍수취약성지수 값을 이용한 제방의 취약성 등급을 살펴보면, 좌안제방의 상류부 등급은 2~1등급으로 추정되었고 중류부 등급은 4~1등급으로 추정되었으며 하류부에서는 5~1등급으로 추정되었다. 우안제방의 상류부와 중류부에서 등급은 6~1등급, 그리고 하류부의 등급은 4~1등급으로 추정되어 기후변화가 진행될수록 제방홍수취약성지수의 등급이 낮아져서 제방의 안전성이 악화되는 것으로 나타났다. 대상유역인 한강 본류 서물시구간의 대표 제방 중류부 구간이 상류부보다 하류부보다 제방홍수취약성 지수 등급이 높은 것으로 분석되어 상대적으로 안전성이 높게 나타났다. Figs. 4~7은 제방홍수취약성지수 값에 대한 구성 인자의 관계를 분석하기 위한 것으로서, Fig. 4는 기후변화 시나리오에 따른 홍수심 변화율과 LFVI 값을 도시한 것으로서 상관계수 0.846의 높은 반비례관계를 보이고 있고, Fig. 5는 기후변화 시나리오에 따른 여유고 변화율과 LFVI 값을 도시한 것으로서 상관계수 0.906의 높은 정비례 관계를 보이고 있다. 또한 Fig. 6은 기후변화 시나리오에 따른 침윤선 길이 비 변화율과 LFVI 변화율을 도시한 것으로서 상관계수 0.866의

Table 5. Levee Flood Vulnerability Index analysis according to climate change

| Han river | | | Variation to 2016(%) | | | | LFVI | Class | Vulnerability decision |
|-------------|------------|----------|----------------------|------------|---------------|----------------------------|--------|-------|------------------------|
| | | | Flood water depth | Free board | Safety factor | Seepage line change degree | | | |
| Left levee | upstream | 2016year | 100% | 100% | 100% | 100% | 3.7822 | 2 | Vulnerable |
| | | 2025year | 105% | 73.3% | 88.8% | 95.29% | 3.1013 | 1 | Very vulnerable |
| | | 2055year | 113% | 30% | 80% | 91.76% | 2.3593 | 1 | Very vulnerable |
| | | bankfull | 119% | 0% | 72.8% | 87.06% | 1.8223 | 1 | Very vulnerable |
| | midstream | 2016year | 100% | 100% | 100% | 100% | 4.9118 | 4 | Medium |
| | | 2025year | 105% | 80% | 56% | 95.56% | 3.6242 | 2 | Vulnerable |
| | | 2055year | 113% | 48% | 50% | 93.33% | 3.0043 | 1 | Very vulnerable |
| | | bankfull | 125% | 0% | 50% | 90.00% | 2.3224 | 1 | Very vulnerable |
| | downstream | 2016year | 100% | 100% | 100% | 100% | 5.2463 | 5 | Moderately stable |
| | | 2025year | 109% | 86.7% | 74.9% | 94.38% | 4.2034 | 3 | Mod. vulnerable |
| | | 2055year | 129% | 56.7% | 59.9% | 88.76% | 2.6268 | 1 | Very vulnerable |
| | | bankfull | 140% | 0% | 49.7% | 80.90% | 1.6673 | 1 | Very vulnerable |
| Right levee | upstream | 2016year | 100% | 100% | 100% | 100% | 5.9770 | 6 | Stable |
| | | 2025year | 105% | 88.6% | 74.9% | 96.63% | 5.1789 | 5 | Moderately stable |
| | | 2055year | 113% | 70% | 59.9% | 92.13% | 4.2967 | 3 | Mod. vulnerable |
| | | bankfull | 144% | 0% | 49.7% | 82.02% | 1.7486 | 1 | Very vulnerable |
| | midstream | 2016year | 100% | 100% | 100% | 100% | 5.5976 | 6 | Stable |
| | | 2025year | 105% | 80% | 75.1% | 98.96% | 4.5463 | 4 | Medium |
| | | 2055year | 113% | 48% | 75.1% | 97.92% | 4.0985 | 3 | Mod. vulnerable |
| | | bankfull | 125% | 0% | 60.1% | 96.88% | 2.9655 | 1 | Very vulnerable |
| | downstream | 2016year | 100% | 100% | 100% | 100% | 4.9815 | 4 | Medium |
| | | 2025year | 109% | 76.7% | 87.4% | 94.38% | 4.1578 | 3 | Mod. vulnerable |
| | | 2055year | 129% | 28.3% | 69.9% | 89.89% | 2.5832 | 1 | Very vulnerable |
| | | bankfull | 140% | 0% | 58.0% | 82.02% | 1.6236 | 1 | Very vulnerable |

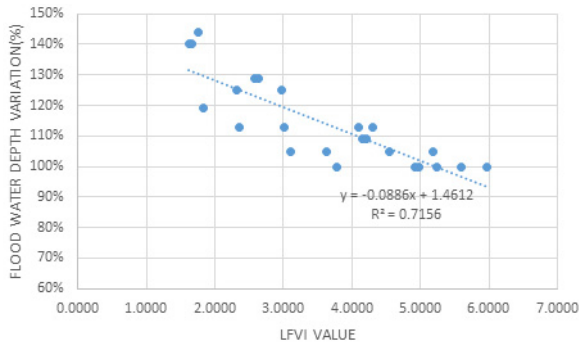


Fig. 4. The relationship between LFVI and flood water depth (variation)

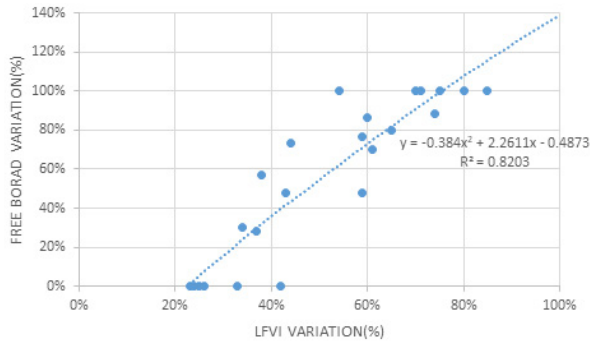


Fig. 5. The relationship between LFVI and free borad(variation)

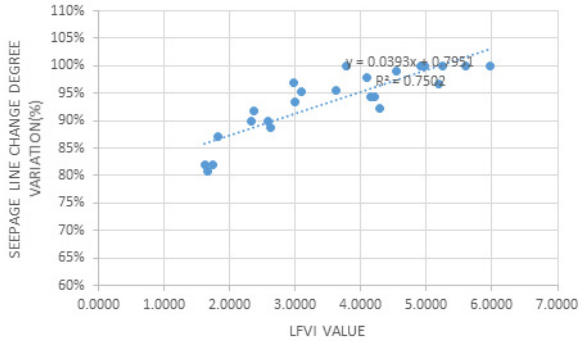


Fig. 6. The relationship between LFVI and seepage line change degree (variation)

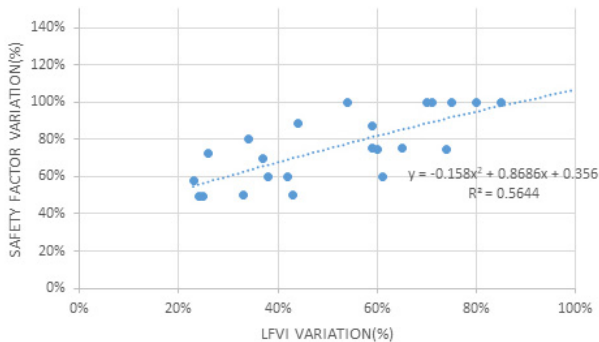


Fig. 7. The relationship between LFVI and safety factor (variation)

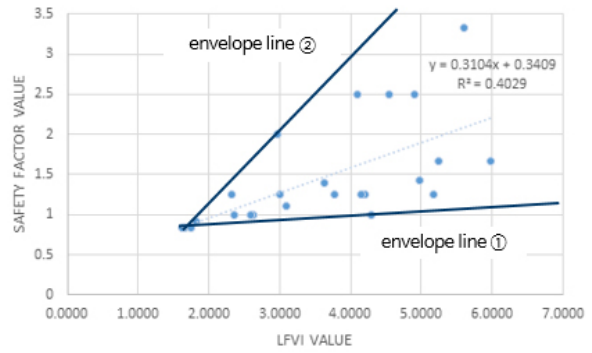


Fig. 8. The relationship between LFVI and safety factor(value)

높은 정비례 관계를 보이고 있고, Fig. 7은 기후변화 시나리오에 따른 활동 안전율 변화율과 LFVI 변화율을 도시한 것으로 상관관계수 0.751의 비교적 양호한 정비례 관계를 보이고 있다. 이상의 그림에서 볼 수 있듯이 제방의 안전성을 높이기 위해서는 제방홍수취약성지수 값이 증가되어야하므로 홍수심을 낮추거나 여유고를 증대시키는 방안(제방고 증대)과 침윤선 길이 비를 단축시키는 방안(제체 확폭)이 기후변화에 대응하는 대안이 될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8은 기후변화 시나리오에 따른 활동 안전율 값과 LFVI 값을 도시한 것으로서 활동 안전율보다 LFVI 값의 범위가 넓어서 제방 취약성을 보다 쉽게 판단할 수 있는 근거로 제시하였다. 본 연구대상으로 선정한 대표 제방의 제한성 때문에 기후변화에 따른 활동 안전율과 LFVI의 관계가 명확히 나타나는 않았으나, 기후변화가 진행됨에 따라 포락선①에서부터 포락선②로 변화하는 추세를 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 8로부터 기후변화 정도에 따른 활동 안전율이 산정되면 그때의 LFVI를 추정할 수 있고 Table 1을 통하여 제방의 취약성(안전성)등급을 판단할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 한강유역의 대표 제방에 대하여 제방홍수취약성지수를 이용하여 취약성 평가를 실시하였다. 기후변화에 따른 제방홍수취약성지수의 각각의 인자들을 통하여 변화하는 정도를 파악하고 기후변화 시나리오에 따라 인자들이 취약성 평가에 어떠한 영향을 미치는지를 수치화하여 분석하였다.

- 1) 한강 본류 서울시구간 대표 제방의 하천수위는 현재 계획홍수위와 기후변화 시나리오 RCP8.5를 고려한 홍수위를 고

려하여 수위를 설정하였다. 수위변화는 2016년, 2025년, 2055년, 제방 만수위시를 대상으로 SEEP/W를 이용하여 활동 안전율을 구하였고 해석결과로부터 제방홍수취약성 지수 산출에 필요한 인자를 산출하여 안전성을 평가하는데 사용하였다.

- 2) 제방의 취약성분석 기술에 필요한 인자로 다음과 같은 7개의 인자를 채택하였다. i) 우리나라 제방 설계에 제시된 계획홍수량에 따라 달라지는 여유고(0.6 m~2.0 m), ii) 계획홍수량에 따라 달라지는 독마루폭(3 m~7 m), iii) 제체의 폭(B)과 제방고(H)의 비를 나타내는 제방단면의 비(H/B), iv) 침윤 활동에 대한 안전율, v) 턱(소단)의 길이, vi) 제체 끝 지점부터 침윤선단까지의 거리와 제체의 폭에 대한 비를 나타내는 침윤선 길이 비, vii) 한계유속 이상의 7가지 인자를 사용하여 제방홍수취약성지수를 구하는 식을 제안하였다.
- 3) 본 연구에서 분석한 결과 기후변화에 따른 수위상승으로 인한 제방홍수취약성지수의 인자의 변화율을 살펴보면, 여유고는 2016년도 계획홍수위시 100%에서 2025년도에는 좌안 상류부에서 최대 73.3%까지 감소하였고 2055년도에는 우안 하류부에서 최대 28.3%까지 감소하였다. 활동 안전율은 2016년도 계획홍수위시 100%에서 2025년도에는 좌안 중류부에서 최대 56%까지 감소하였고 2055년에는 좌안 하류부에서 최대 49.7%까지 감소하였다. 침윤선 길이 비는 2016년도 계획홍수위시 100%에서 2025년도에는 좌안 하류부와 우안 하류부에서 최대 94%까지 감소하였고 2055년도에는 좌안 하류부에서 최대 89%까지 감소하는 변화율을 보였다.
- 4) 기후변화 시나리오에 따른 제방홍수취약성지수(Llevee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 이용한 제방의 취약성 등급을 살펴보면, 좌안제방의 상류부 등급은 2~1등급으로 추정되었고 중류부 등급은 4~1등급으로 추정되었으며 하류부에서는 5~1등급으로 추정되었다. 우안제방의 상류부와 중류부에서 등급은 6~1등급, 그리고 하류부의 등급은 4~1등급으로 추정되어 기후변화가 진행될수록 제방홍수취약성지수의 등급이 낮아져서 제방의 안전성이 악화되는 것으로 나타났다.
- 5) 기후변화에 따른 하천의 수위상승으로 인하여 제방홍수취약성지수에 미치는 영향으로는 여유고와 활동 안전율이 감소하였고 침윤선 길이 비가 감소하는 것으로 분석되었다. 이 결과 제방홍수취약성지수를 이용하여 기후변화에 따른 하천의 수위상승으로 인해 제방이 취약해지는 것을 알 수 있었고 제방홍수취약성지수를 이용한 대책으로 수위상승에 따른 여유고 증대, 침윤선 길이 비를 증가시키기 위한 제

방 단면 확대를 통하여 제방홍수취약성지수의 등급을 높여 제방의 안전성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

- Darby, S., and Thorne, C. (1996), "Development and Testing of Riverbank-Stability Analysis." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 8, pp. 443-454.
- 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, Alta., Canada.
- Gui, S., Zgang, R., and Xue, X. (1998), "Overtopping Reliability Models for River Levee." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 12, pp. 1227-1234.
- Han, K. Y., Lee, J. S., and Kim, S. H. (1997), "Risk Model for the Safety Evaluation of Dam and Levee : I. Theory and Model." *Journal of Korea Water Resources Association*. Vol. 30, No. 6, pp. 679-690
- Han, K. Y., Kim, K. S., Ahn, K. H., and Lee, Y. S. (2007), "Inundation Impact Assessment for Establishing EAP in a River." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. Vol. 2007, No. 10, pp. 1140-1143
- 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 summary for policy makers. Cambridge University Press, Cambridge.
- 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.
- Kim, J. M., Choi, B. H., and Cho, S. D. (2004), "Evaluation of Affecting Factors for Seepage Analysis on Levee," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5
- Kim, K. H. (2008), "The levee design guide line." Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

- KWRA (2009). River design standard, KWRA.
- Lee, H. S., and Lee, J. J.(2018). "Application of Flood Vulnerability Index for Analyzing Safety Change of Levee according to Climate Change." *Journal of Korea Water Resources Association*. Vol. 51, No. 4, pp. 293-299
- Lee, J. T., Heo, S. C., Kim, J. H., and Han, J. Y.. (2006), "Characteristics of the Inundation and Process of Making a Flood Map According to the Levee Break Conditions in Urban Stream - Jungrang Experimental Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*. Vol. 39, No. 5, pp. 383-394
- 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.
- Liang, R. Y. (1999), "A Reliability Based Approach for Evaluating the Slope Stability of Embankment Dams," *Engineering Geology*, Vol. 54, pp. 271-285
- Marc vuillet., Peyras, L., and Carvajal, C.(2013). "Levee Performance Evaluation Based on Subjective Probabilities." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 329-349
- 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.
- USACE (2009). Guidelines for Landscape Planting and Vegetation Management at Levees, Floodwalls, Embankment Dams, and Appurtenant Structures, USACE.
- USACE (2010). USACE Process for the National Flood Insurance Program (NFIP) Levee System Evaluation, USACE.
- Zhang, Q. (2012), "Steady and Nonsteady Seepage Flow Analysis for the Yangtze Embankment due to Bridge Construction." *Procedia Earth and Planetary Science*5, pp. 124-129.