Journal of Wetlands Research
Vol. 21, No. s-1, November 2019, pp. 134-140

ISSN 1229-6031 (Print) / ISSN 2384-0056 (Online)
DOI https://doi.org/10.17663/JWR.2019.21.s-1.134

하천 제방의 취약성 분석 지수 개발 및 적용

이후상·이재준†

금오공과대학교 토목공학과

Development and Application of Vulnerability Analysis Index for River Levee

Hoosang Lee·Jaejoon Lee†

Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

(Received : 11 October 2019, Revised: 20 November 2019, Accepted: 10 December 2019)

요 약

본 연구에서는 하천 제방에 대한 홍수취약성을 평가하는 새로운 기법으로 제방홍수취약성지수를 제안하였고 제방홍수취약성지수를 산정하는데 있어 필요한 인자를 적용하는 방법에 대하여 알아보고자 한다. 이를 위해 먼저 대상 제방의 계획홍수위를 적용하여 제방의 안전율을 분석하였고, 제방의 인자들로는 여유고, 둑마루폭, 제방단면의 비, 활동안전율, 턱(소단)의 길이, 침윤선 길이 비, 한계유속으로 7가지의 인자들을 바탕으로 제방홍수취약성지수를 산출하였다. 이를 활용하여 제방의 취약성 분석을 실시하고 분석결과를 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 이용하여 1 ~ 7등급으로 나누어 제방의 취약성을 평가하였다.

핵심용어 : 안전율, 제방홍수취약성지수, 하천제방, 홍수 취약성

Abstract

In this study, we propose a new method for evaluating the vulnerability to flooding river levee. The purpose of this study is to examine how to apply the factors necessary to calculate the proposed levee flood index. To do this, the safety flood level was analyzed by applying the planned flood level. The levee flood vulnerabilities index was calculated based on seven factors such as freeboard, levee crown section, levee section ratio, safety factor, raised spot length, Seepage line change degree, and critical velocity. The Levee Flood Vulnerability Index(LFVI) of the levee developed in this study was used to levee vulnerability analysis. The results of the analysis were divided into 1 to 7 grades using Levee Flood Vulnerability Index(LFVI).

Key words : Levee flood vulnerabilities index, River levee, Safety factor

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea
E-mail: toyou3045@naver.com

• **Lee, Hoo Sang** Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea / Ph.D. candidate (toyou3045@naver.com)
• **Lee, Jae Joon** Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea / Professor (jhb365@kumoh.ac.kr)

1. 서 론

최근 지구 온난화에 따른 기상이변으로 세계 곳곳에서 홍수, 가뭄, 태풍과 한파 등의 자연재해가 발생하고 있다. 우리나라도 마찬가지로 태풍과 국지성 집중호우, 그리고 한파 등의 영향으로 재산과 인명의 피해가 발생하고 있는 추세이다.

그 대표적인 사례로는 2002년에 태풍 루사와 장기 홍수로 인해 전국적으로 270명이 사망하거나 실종, 7,634동의 주택파손, 17.749ha의 농경지 유실 등 총 6조 1,038억 원의 막대한 피해가 발생하였다. 또한, 2003년에는 태풍 매미로 인하여 140명의 인명 피해와 4조 7,810억 원의 재산피해가 발생하였다(한국건설기술연구원, 2004).

특히 우리나라의 강우는 대부분 여름철에 단기간으로 집중현상을 보이고 있다(국립방재연구소, 2002). 이때의 강우 유출로 인해 하천으로 집중되며 하천수위의 급상승을 일으키는 원인이 된다. 하천수위의 급변동은 제방파괴가 일어날 수 있으며 제방의 손상을 주기도 한다. 최근 기후변화에 따른 기상이변으로 세계 곳곳에서 가뭄, 홍수 등이 빈번히 발생하고 있다. 우리나라도 90년대 이후 태풍과 집중호우로 인한 재산과 인명피해가 증가하고 있는 실정으로 하천제방의 붕괴로 인한 홍수, 침수 및 인명피해 등이 발생할 수 있기 때문에 안정성 높은 제방의 설계가 중요성하게 부각되고 있다.

연구동향을 살펴보면, 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 하천제방의 안정성 평가는 침투해석으로 결정된 제체 침윤면에 의한 비탈면 활동 기초지반의 침투압 상승에 따른 파이핑과 관련된 것으로 적절한 모델의 해석기법이 필요하다고 하였다. Lee et al(2006)은 GUI 형태의 HEC 모형과 ARC/VIEW 등을 이용한 하천범람해석에 대한 연구를 진행하였으며, Han et al.(2007)은 하천에서의 EAP구축을 위한 범람위험도 평가기법을 적용하여 홍수위험도지도를 분석한 바 있다. Kim et al.(2011)은 제방 설계시 적용될 수 있는 제방 단면의 주요 특성인 둑, 마루, 폭, 경사도, 기초지반의 투수계수 및 제방의 높이에 따른 유출부 동수경사를 수치해석을 통해 분석하여 제방에 대한 안정성 검토를 실시하였다. Kim et al.(2004)은 하천제방 안정성 평가는 침투해석으로 결정되어진 제체 침윤면에 의한 비탈면 활동의 기초지반 침투압 상승에 따른 파이핑과 관련된 것으로서 적절한 모델의 해석기법이 필요하다고 하였다. 이들의 연구를 살펴보면 하천시설물에 대한 직접적인 연구를 통하여 제방에 대한 취약성 분석 기술에 대하여 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 제방의 침투안전성을 분석하고 개발된 제방홍수취약성지수를 이용하여 제방의 취약성에 영향을 주는 각각의 인자에 대하여 알아보고 제방의 상태에 따른 인자들을 도출하여 각각 인자들을 이용한 제방홍수취약성을 분석하고 개발 된 제방홍수취약성지수 인자들의 적용성을 알아보고자 한다.

2. 연구방법

2.1 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI)

2.1.1 제방홍수취약성지수 가중치 산정 방법

2.1.1.1 엔트로피 기법

엔트로피 가중치 추정방법은 대안과 속성을 많이 포함하는 현실적인 다기준 의사결정 문제에 대해 의사결정자가 비교적 이해하기 쉬운 정보이론(information theory)방법을 적용하는 것이다. 정보이론이란 각 속성의 빈도수를 기반으로 응집도가 높은 속성을 발견하여 가중치를 높게 부여하는 방법이다(Berry등,1999). 이는 어떠한 체계 내에서 그 신호에 대한 정보를 수치로 나타낸다는 의미이고 엔트로피가 크다는 의미는 불확실성이 감소한다는 의미로 해석된다.

엔트로피를 근거한 4가지 기본 정보측정방법은 최대엔트로피(Maximumentropy), 결합엔트로피(joint-entropy), 조건부엔트로피(conditionalentropy)와 정보전달(transinformation) 등이 있다.

엔트로피 방법을 이용하여 지표별 가중치를 구하기 위한 산정 절차는 다음과 같다.

먼저 각지표의 구축된 값을 case별로 행렬을 구성하고 둘째, 구성된 지표별로 속성정보를 정규화 한다. 정규화된 자료를 이용, 각 속성별 Entropy를 산정한 후 최종적으로 지표간의 가중치를 결정하게 된다.

첫째, case별 평가항목의 속성정보를 이용하여 식 (2.1)과 같이 행렬을 구성한다.

$$D=\begin{bmatrix} x_{11} \cdots x_{1j} \cdots x_{1n} \\ \vdots \quad \cdots \vdots \quad \cdots \vdots \\ x_{i1} \cdots x_{ij} \cdots x_{\in} \\ \vdots \quad \cdots \vdots \quad \cdots \vdots \\ x_{m1} \cdots x_{mj} \cdots x_{mn} \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

둘째, 평가항목별 속성정보를 식 (2.2)와 같이 정규화한다.

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} (i=1,2,\ ...,m;\ j=1,2,\ ...,n) \tag{2.2}$$

셋째, 각 속성별 entropy를 식 (2.3)과 같이 산정한다.

$$E_j=-k\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\log p_{ij} (here, k=\frac{1}{\log m};\ j=1,2,\ ...\ ,n) \tag{2.3}$$

넷째, 다양성 정도를 고려하여 식 (2.4)와같이 산정하고 평가항목간의 가중치를 식(2.5)와 같이 산정한다.

$$d_j=1-E_j \tag{2.4}$$

$$\text{가중치, } w_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} (j=1,2,\ ...\ ,n) \tag{2.5}$$

2.1.1.2 case별 가중치 산정

제방 홍수취약성 평가를 위한 인자에 대하여 32개의 case별에 인자 값은 다음의 Table 1과 같다.

본 연구에서는 제방의 취약성을 평가하기 위하여 선정된 인자들에 대하여 설계기준에 명시되어 있는 인자들의 값들을 기반으로 가중치 설정을 위해서 객관성이 검증된 엔트로피 기법을 사용하여 가중치를 산정하였다.

먼저 가중치를 산정하는데 있어 앞서 제시한 case별 인자 값들에 대한 Table 2와 같이 정규화된 D 행렬을 구성한다.

이후 정규화된 값을 바탕으로 식 (2.3)을 이용하여 각 인자별 엔트로피를 산정한다.

이때 엔트로피 값을 산정시 $\log p_{ij}$는 정규화된 값을 이용하여 산정하고 엔트로피 값을 산정하는데 필요한 $k=\frac{1}{\log m}$에서 m은 case의 개수이므로 32개에 대한 값은 0.6644가 된다. 식 (2.4)에서 $d_j=1-E_j$을 이용하여 다양성의 정도를 고려하고 정규화된 인자들간의 가중치 식 (2.5)를 이용하여 w_{ij}를 산정하게 된다.

분자에서 고려되어진 5개의 인자(여유고, 둑마루폭, 제방단면의 비, 안전율, 침윤선 길이 비)를 고려하여 가중치를 산정하였고 턱(소단)의 길이에 대하여는 예전에 설계된 제방에서는 찾아볼 수 있지만 최근 제방 설계시에는 턱(소단)에 대하여 고려하지 않는 실정이므로 둑마루폭과 같은 가중치를 주었다.

2.1.2 제방홍수취약성지수 산정

본 연구에서는 일본 국토기술정책종합연구소에서 개발한 홍수취약성지수의 형식을 차용하여 하천제방에 인자들로 구성하여 하천제방에 대한 홍수취약성을 분석하는 새로운 기법을 개발하고, 이를 이용하여 제방의 안전성을 판단하기로 한다.

Table 1. Argument value by case

case	Freeboard(m)	Levee crown width(m)	Levee section ratio	Seepage line change degree	Safety factor
1	0.6	4	0.1	0.5	0.8
2	0.6	4	0.1	0.5	3
3	0.6	4	0.1	1.5	0.8
4	0.6	4	0.1	1.5	3
5	0.6	4	0.5	0.5	0.8
6	0.6	4	0.5	0.5	3
7	0.6	4	0.5	1.5	0.8
8	0.6	4	0.5	1.5	3
9	0.6	10	0.1	0.5	0.8
10	0.6	10	0.1	0.5	3
11	0.6	10	0.1	1.5	0.8
12	0.6	10	0.1	1.5	3
13	0.6	10	0.5	0.5	0.8
14	0.6	10	0.5	0.5	3
15	0.6	10	0.5	1.5	0.8
16	0.6	10	0.5	1.5	3
17	2	4	0.1	0.5	0.8
18	2	4	0.1	0.5	3
19	2	4	0.1	1.5	0.8
20	2	4	0.1	1.5	3
21	2	4	0.5	0.5	0.8
22	2	4	0.5	0.5	3
23	2	4	0.5	1.5	0.8
24	2	4	0.5	1.5	3
25	2	10	0.1	0.5	0.8
26	2	10	0.1	0.5	3
27	2	10	0.1	1.5	0.8
28	2	10	0.1	1.5	3
29	2	10	0.5	0.5	0.8
30	2	10	0.5	0.5	3
31	2	10	0.5	1.5	0.8
32	2	10	0.5	1.5	3

Table 2. Normalized D matrix construction

case	Freeboard(m)	Levee crown width(m)	Levee section ratio	Seepage line change degree	Safety factor
1	0.014423	0.017857	0.010417	0.015625	0.013158
2	0.014423	0.017857	0.010417	0.015625	0.049342
3	0.014423	0.017857	0.010417	0.046875	0.013158
4	0.014423	0.017857	0.010417	0.046875	0.049342
5	0.014423	0.017857	0.052083	0.015625	0.013158
6	0.014423	0.017857	0.052083	0.015625	0.049342
7	0.014423	0.017857	0.052083	0.046875	0.013158
8	0.014423	0.017857	0.052083	0.046875	0.049342
9	0.014423	0.044643	0.010417	0.015625	0.013158
10	0.014423	0.044643	0.010417	0.015625	0.049342
11	0.014423	0.044643	0.010417	0.046875	0.013158
12	0.014423	0.044643	0.010417	0.046875	0.049342
13	0.014423	0.044643	0.052083	0.015625	0.013158
14	0.014423	0.044643	0.052083	0.015625	0.049342
15	0.014423	0.044643	0.052083	0.046875	0.013158
16	0.014423	0.044643	0.052083	0.046875	0.049342
17	0.048077	0.017857	0.010417	0.015625	0.013158
18	0.048077	0.017857	0.010417	0.015625	0.049342
19	0.048077	0.017857	0.010417	0.046875	0.013158
20	0.048077	0.017857	0.010417	0.046875	0.049342
21	0.048077	0.017857	0.052083	0.015625	0.013158
22	0.048077	0.017857	0.052083	0.015625	0.049342
23	0.048077	0.017857	0.052083	0.046875	0.013158
24	0.048077	0.017857	0.052083	0.046875	0.049342
25	0.048077	0.044643	0.010417	0.015625	0.013158
26	0.048077	0.044643	0.010417	0.015625	0.049342
27	0.048077	0.044643	0.010417	0.046875	0.013158
28	0.048077	0.044643	0.010417	0.046875	0.049342
29	0.048077	0.044643	0.052083	0.015625	0.013158
30	0.048077	0.044643	0.052083	0.015625	0.049342
31	0.048077	0.044643	0.052083	0.046875	0.013158
32	0.048077	0.044643	0.052083	0.046875	0.049342
합계	1	1	1	1	1

먼저 제방의 취약성분석 기술에 필요한 인자로 다음과 같은 7개의 인자를 채택하였다. ⅰ)하천설계기준의 제방 설계에 제시된 계획홍수량에 따라 달라지는 여유고(0.6m~2.0m), ⅱ)계획홍수량에 따라 달라지는 둑마루 폭(3m~7m), 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.

그 결과 여유고(a)의 가중치는 0.5, 둑마루폭(b)의 가중치를 0.1, 제방단면의 비(H/B)(c)는 0.5, 안전율(d)은 3, 턱(소단)의 길이(e)는 0.1, 침윤선 길이 비(f)는 1.5, 한계유속(g)은 1의 가중치를 부여하였다. 이와 같이 제방의 취약성분석 기술에 적용하고자 필요한 인자를 도출하여 다음 식 (2.6)과 같은 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 산정식을 개발하였다.

$$LFVI = \frac{w_1 a + w_2 b + w_3 c + w_4 d + w_5 e + w_6 f}{w_7 g} = \frac{0.5a + 0.1b + 0.5c + 3d + 0.1e + 1.5f}{g} \quad (2.6)$$

여기서, $w_1, \ldots, w_7$: 가중치

a = 여유고(m)

b = 둑마루폭(m)

c = 제방 단면의 비(H/B)

d = 활동 안전율
e = 턱(소단)의 길이(m)
f = 침윤선 길이 비
g = 한계유속(cm/s)

Table 3. Classification of levee flood vulnerability index

	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

본 연구에서 개발된 제방홍수취약성지수 값은 Table 3과 같이 1~7등급으로 구분할 수 있으며, 등급을 나누는 기준은 제방에 대하여 현재 취약성 평가는 안전율(Stable ≥ SF 2.0)에 기반하여 취약성 정도를 안전과 불안전으로 평가를 하고 있다. 제방홍수취약성지수는 안전율이 2.0이상을 기준으로 4등급에 해당하는 Medium으로 분류하였고 나머지 등급은 1등급으로 갈수록 취약성 정도가 낮아지고 7등급으로 갈수록 홍수에 대한 안전성이 높아지는 것을 의미한다.

3. 제방홍수취약성지수 인자 도출 및 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. 1은 대표 제방단면의 위치와 제방단면모식도를 나타낸 그림이다.

3.2 제방홍수취약성지수 인자 도출

본 연구에서는 한강 본류 서울시구간의 대표 제방을 상류부, 중류부, 하류부로 구분 짓고 취약성 분석에 필요한 현재의 제방의 인자와 기후변화에 따른 제방의 각종 인자들의 변화하는 정도를 Table 4에 나타내었다. 제방홍수취약성지수를 구성하는 인자

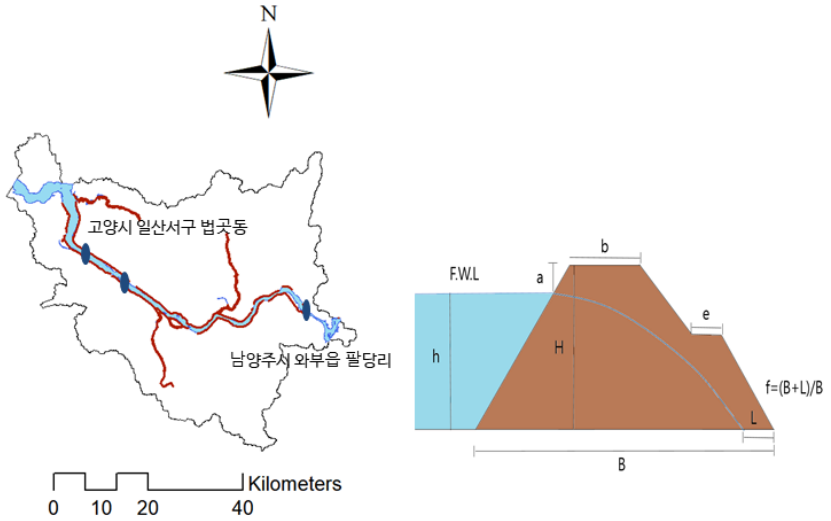

Fig. 1. Site of levee considered in this study and schematic diagram of levee

Table 4. Vulnerability index factor

Factor		Left levee			Right levee		
		Upstream part	Midstream part	Downstream part	Upstream part	Midstream part	Downstream part
		value	value	value	value	value	value
a	Freeboard(m)	3	3	3	7	3	6
b	Levee crown width(m)	8	13	8	8	12	7
c	Levee section ratio	0.23	0.21	0.23	0.23	0.14	0.23
d	Safety factor	1.25	2.50	1.67	1.67	3.33	1.43
e	Raised spot length(m)	0	0	0	0	0	0
f	Seepage line change degree	0.85	0.90	0.89	0.89	0.96	0.89
g	Critical velocity(cm/s)	2.09	2.2	2.2	2.1	2.2	2.2

Table 5. Levee Flood Vulnerability Index analysis

Han river		LFVI	Class	Vulnerability decision
Left levee	upstream	3.782	2	Vulnerable
	midstream	4.911	4	Medium
	downstream	5.246	5	Moderately stable
Right levee	upstream	5.977	6	Stable
	midstream	5.597	6	Stable
	downstream	4.981	4	Medium

중 침윤선 길이 비, 한계유속, 활동 안전율은 SEEP/W모형의 침투거동해석 결과로부터 얻을 수 있다.

대상유역의 홍수량은 37,541m^3/sec이다. 홍수량에 따른 제방의 인자들을 살펴보면 여유고는 좌안 제방에서는 3m, 우안제방에서는 3~7m로 계획홍수량에 따른 여유고 설계 기준보다 크게 되어 있고, 둑마루폭은 좌안과 우안의 제방에서 7~13m로 계획홍수량에 따른 둑마루폭 설계 기준보다 크게 되어있다. 제방단면의 비는 제체의 폭(B)과 제방고(H)의 비를 나태 내는 것으로서 좌안에서는 0.21~0.23, 우안에서는 0.14~0.23의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 활동안전율은 상류 제방에서는 좌안이 1.25 우안이 1.67, 하류제방에서는 좌안이 1.67, 우안이 1.43으로 안전하게 나왔으나 중류 제방에서는 좌안이 2.5, 우안이 3.33으로 제방 활동 안전율이 2.0이상으로 불안전한 상황으로 나타났다. 턱(소단)의 길이는 대상 제방에는 존재하지 않으므로 고려하지 않았고, 침윤선 길이 비는 좌안과 우안에서 0.85~0.96의 값이 산정되었고, 한계유속은 2.09~2.2로 산정되었다.

3.3 취약성 분석 기술 적용 검토

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

본 연구에서 분석한 결과 침윤 활동에 대한 안정성을 확보되려면 한강 본류 서울시 구간의 제방 안전율이 침투류 해석에 의하여 산출한 동수경사가 한계동수의 1/2이하가 되도록 해야 하는데 대상유역의 상류부 제방과 하류부 제방의 안전율 값이 좌안에서 1.25, 1.67 그리고 우안에서는 1.67, 1.43으로 분석되었고 중류부 제방의 안전율 값이 좌안에서 2.5, 우안에서 3.33으로 한강의 상류와 하류에 비해 중류의 안전율 값이 높게 도출되었다. 대표 제방의 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 이용한 등급별로는 좌안의 상류등급이 2등급(Vulnerable)으로 나왔고 좌안 중류와 우안 하류에서는 4등급(Medium)으로 나왔으며 좌안 하류에서는 5등급(Moderately stable), 우안 상류와 중류에서는 6등급(Stable)으로 대상 제방에서는 좌안 상류와 중류 우안 하류부 제방의 취약성이 낮은 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 대표 제방의 취약성 분석을 실시하였다. 하천 제방 침투해석은 설정된 설계외력 및 제방 모델(SEEP/W)을 이용하여 수행하였으며, 제방의 각 인자들을 고려하여 제방홍수취약성지수를 산출하여 안정성을 평가하였다.

1) 제방의 취약성분석 기술에 필요한 인자로 다음과 같은 7개의 인자를 채택하였다. ⅰ)하천설계기준의 제방 설계에 제시된 계획홍수량에 따라 달라지는 여유고(0.6 m~2.0 m), ⅱ)계획홍수량에 따라 달라지는 둑마루폭(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.

2) 홍수량에 따른 제방의 인자들을 살펴보면 여유고는 좌안 제방에서는 3m, 우안제방에서는 3~7m로 계획홍수량에 따른 여유고 설계 기준보다 크게 되어 있고, 둑마루폭은 좌안과 우안의 제방에서 7~13m로 계획홍수량에 따른 둑마루폭 설계 기준보다 크게 되어있다. 제방단면의 비는 제체의 폭(B)과 제방고(H)의 비를 나태 내는 것으로서 좌안에서는 0.21~0.23, 우안에서는 0.14~0.23의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 활동안전율은 상류 제방에서는 좌안이 1.25 우안이 1.67, 하류제방에서는 좌안이 1.67, 우안이 1.43으로 안전하게 나왔으나 중류 제방에서는 좌안이 2.5, 우안이 3.33으로 제방 활동 안전율이 2.0이상으로 불안전한 상황으로 나타났다. 턱(소단)의 길이는 대상 제방에는 존재하지 않으므로 고려하지 않았고, 침윤선 길이 비는 좌안과 우안에서 0.85~0.96의 값이 산정되었고, 한계유속은 2.09~2.2로 산정되었다.

3) 본 연구에서 분석한 결과 침윤 활동에 대한 안정성을 확보되려면 한강 본류 서울시 구간의 제방 안전율이 침투류 해석에 의하여 산출한 동수경사가 한계동수의 1/2이하가 되도록 해야 하는데 대상유역의 상류부 제방과 하류부 제방의 안전율 값이 좌안에서 1.25, 1.67 그리고 우안에서는 1.67, 1.43으로 분석되었고 중류부 제방의 안전율 값이 좌안에서 2.5, 우안에서 3.33으로 한강의 상류와 하류에 비해 중류의 안전율 값이 높게 도출되었다. 대표 제방의 제방홍수취약성지수(Levee Flood Vulnerability Index, LFVI) 값을 이용한 등급별로는 좌안의 상류등급이 2등급(Vulnerable)으로 나왔고 좌안 중류와 우안 하류에서는 4등급(Medium)으로 나왔으며 좌안 하류에서는 5등급(Moderately stable), 우안 상류와 중류에서는 6등급(Stable)으로 대상 제방에서는 좌안 상류와 중류 우안 하류부 제방의 취약성이 낮은 것으로 분석되었다.

우리나라의 경우 제방의 취약성 분석을 할 때 안전율을 이용

하여 제방의 취약성을 분석하고 있다. 그러나 안전율뿐만 아니라 제방의 취약성을 분석하기 위해서는 제방에 작용되는 다른 인자들을 고려하게 된다면 인자들을 이용한 대책이 가능할 것으로 판단된다. 제방홍수취약성지수를 이용한 대책으로 수위 상승에 따른 여유고 증대, 침윤선 길이 비를 증가시키기 위한 제방 단면 확대를 통하여 제방홍수취약성지수의 등급을 높여 제방의 안전성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 83081).

References

Darby, S and Thorne, C. (1996), "Development and Testing of Riverbank-Stability Analysis." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 122, No. 8, pp. 443-454. [DOI:10.1061/(asce)0733-9429(1996)122:8(443)]

Fell, R, Wan, C., Cyganiewicz, J., and Foster, M.(2003), "Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams." *J. Geotech. Eng.*, Vol. 129, NO. 4, PP. 307-314. [DOI:10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:4(307)]

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." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 124, No. 12, pp. 1227-1234. [DOI:10.1061/(asce)0733-9429(1998)124:12(1227)]

Han, KY., Lee, JS., and Kim, SH.(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. [Korean Literature]

Han, KY., Kim, KS., Ahn, KH., and Lee, YS.(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. [Korean Literature]

IPCC (2001) Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group Ⅱ to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Penal on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (2007) Climate change 2007: The Scientific basis summary for policy makers. Cambridge University Press, Cambridge.

Jung, ES. and LeeK. S.(2007). "Identifying Spatial Hazard Ranking Using Multicriteria Decision Making Techniques." *Journal of Korea Water Resources Association,* Vol.40, No.12, pp. 969-983. [Korean Literature]

Jung, LL., Lee, BJ., Bea, DH.(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. [Korean Literature]

Kim, JM., Choi, BH., and Cho, SD.(2004), "Evaluation of Affecting Factors for Seepage Analysis on Levee," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers.* Vol. 26, No. 5. [Korean Literature]

Kim, KH. (2008), "The levee design guide line." Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. [Korean Literature]

KWRA(2009), River design standard, KWRA

Lee, HS., Lee, JJ.(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. [Korean Literature]

Lee, HS., Lee, JJ.(2018). "Sensitivity analysis of flood vulnerability index of levee according to climate change" *Journal of Korea Water Resources Association.* Vol. 51, No. S-1 (2018), pp. 1161-1169. [Korean Literature]

Lee, JT., Heo, SC., Kim, JH. and Han, JY.(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. [Korean Literature]

Lee, MH., Jung, LL., Bea, DH.(2011). "Korean Flood Vulnerability Assessment on Climate Change." *Journal of Korea Water Resources Association,* Vol. 44, No. 8, pp. 653-666. [Korean Literature]

Liang, RY.(1999), "A Reliability Based Approach for Evaluating the Slope Stability of Embankment Dams," *Engineering Geology*, Vol. 54, pp. 271-285 [DOI:10.1016/s0013-7952(99)00017-4]

Marc vuillet,. Peyras, L,. and Carvajal, C.(2013). "Levee Performance Evaluation Based on Subjective Probabilities." *Europeam J. Environmental and Civil Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 329-349 [DOI:10.1080/19648189.2013.785723]

Son, MW., Sung, JY., Jung, ES., Jeon, GS.(2011). "Development of Flood Vulnerability Index Considering Climate Change," *Journal of Korea Water Resources Association,* Vol. 44, No. 3, pp. 231-248. [Korean Literature]

USACE(2009), Guidlines for Landsacpe 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 Science5*, pp. 124-129. [DOI:10.1016/j.proeps.2012.01.021]