제방 리스크 분석을 통한 하천재해 위험지구 선정

Selection of River Disaster Hazard Area for Levee Risk Analysis

박준형* · 이재영** · 최현구*** · 한건연****

Park, Jun Hyung*, Lee, Jae Yeong**, Choi, Hyun Gu***, and Han, Kun Yeun****

Abstract

In Korea, flood damage caused by typhoons and heavy rains such as Typhoon Chaba (2016) is greatly increasing, and a new illumination for the river disaster hazard area is needed. Ministry of Land, Infrastructure and Transport has created a flood risk map for national rivers, and each municipality has selected a disaster hazard area through a Comprehensive Plan for Storm and Flood Damage Reduction. However, this is only an approximate hazard area selection using the water level of the river cross section by the design frequency. Therefore, in this study, the high risk levee is selected through the evaluation of the physical hazard (Hazard) of the levee using the hydraulic analysis results and the vulnerability of the levee itself (Vulnerability). In addition, expert survey were conducted to link hazard and vulnerability, and weights were calculated and used to evaluate the risk of levee. For application to the actual basin, the project was applied to the target basin, Anseong stream, and the risk for each levee was calculated and the flood awareness map was made by setting up the overflow and collapse scenarios for the levee which shows the highest risk. This study can be used as a basis for evaluating the safety of the levee and the selection of river disaster hazard area by introducing a comprehensive levee assessment technique.

Key words : Hazard, Vulnerability, Levee Risk Analysis, 2-D Inundation Analysis, Disaster Hazard Area

요 지

우리나라에서는 태풍 차바(2016)와 같은 강력한 태풍과 집중호우로 인한 침수피해가 크게 증가하고 있으며, 이를 대비한 하천재해 위험지구에 대한 새로운 조명이 필요한 실정이다. 국토교통부에서 국가하천에 대하여 홍수위험지도를 작성하였으며, 각 지자체에서는 풍수해저감종합계획 수립을 통해 재해 위험지구를 선정하여 홍수 피해를 대비하고 있다. 하지만 이 경우 제방의 월류 및 붕괴시나리오를 구성함에 있어 대상 제방 선정이 중요하나 정확한 고위험 제방의 선정이 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 수리해석 결과를 이용한 제방의 물리적인 위험도(Hazard)와 제방 자체의 성질에 대한 취약도(Vulnerability) 평가를 통해 고위험 제방을 선정하고 이를 재해 위험지구 선정에 활용하고자 한다. 위험도와 취약도의 연계를 위해 전문가 설문조사를 실시하여 가중치를 산정하고 이를 활용하여 제방 리스크(Risk) 평가를 실시하였다. 실제 유역에 대한 적용을 위해 대상유역인 안성천에 적용하여 각 제방에 대한 리스크를 산정하고, 가장 높은 리스크를 나타내는 제방에 대한 월류 및 붕괴 시나리오를 설정하여 침수예상도를 작성하였다. 본 연구는 종합적인 제방 평가 기법을 제시함으로써 제방 안전도 평가 및 하천재해 위험지구 선정에 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 위험도, 취약도, 제방 리스크 분석, 2차원 침수해석, 재해위험지구

*정회원, 국가민방위재난안전교육원 재난안전교육과 연구사(Email: pjh3615@korea.kr)

Member, Researcher, Disaster and Safety Education Division, National Civil Defence and Disaster Management Training Institute

**교신저자, 정회원, 경북대학교 건설환경에너지공학부 박사과정(Tel: +82-53-950-6624, Fax: +82-53-951-6624, Email: water9933@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University

***K-water 통합 물 관리처 선임연구원

Senior Researcher, Integrated Water Resource Management Dept, Korea Water Resources Corporation

****정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyungpook National University

1. 서 론

침수예상도는 하천의 계획규모를 초과하는 강우사상, 제방의 월류 및 붕괴 등에 대한 다양한 시나리오를 고려하여 수리수문학적 분석을 통해 범람해석을 실시하여 작성되는 지도로 재해정보지도에 침수정보를 제공하는 역할을 한다(National Emergency Management Agency, 2013). 이러한 침수예상도 작성 시 홍수범람구역의 정확한 추정을 위해서는 대상지역의 수문, 지형, 토지이용현황 등이 중요한 요소이나 외수범람의 경우 실제로 피해를 일으키는 원인은 홍수파이기 때문에 제방의 월류 및 붕괴에 따른 홍수파의 흐름을 파악하여야 한다. 하지만 풍수해저감종합계획 수립 시 선정하는 위험지구의 경우 1차원 수리분석 결과를 제내지에 반영하여 범람범위를 산정하다보니 실제로 위험한 제방에서의 월류나 붕괴로 인한 제내지의 정확한 범람범위를 산정할 수가 없다. 하천 인근에 위치한 도시의 경우 제방의 월류나 붕괴로 인해 인명 및 재산의 피해가 막대하기 때문에 정확한 침수해석 결과를 통한 침수예상도의 작성이 필요하다.

현재 국토교통부에서 작성 중인 홍수위험지도는 홍수범람 시나리오를 작성하기 위해 월류 및 파제범람 시나리오를 작성하여 지도를 제작하고 있으며, 계획빈도를 초과하는 홍수량에 대해 수리해석을 실시 후 월류와 가상의 제방 붕괴상황을 고려하고 있다. 하지만 2016년 9월 발생한 태풍 차바에 의해 태화강이 월류하여 침수가 발생한 지역은 2008년 작성된 홍수위험지도(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008)와는 다른 곳으로, 침수예상도의 역할을 제대로 하지 못하였다. 따라서 정확한 침수예상도 작성을 위해서는 제방 월류 및 붕괴지점의 선정이 큰 영향을 미치므로 본 연구에서는 고위험 제방을 선정하기 위해 새로운 제방 리스크 평가 방법을 제안하여 고위험 제방에서 월류 및 붕괴로 인한 침수예상도를 통한 하천재해 위험지구를 선정하였다.

하천 제방의 위험도 평가에 대한 연구는 신뢰성 및 불확실성 분석에 기반을 둔 연구에서 시작되었다. Bogardi et al.(1976)은 수리학적 제방 설계에 대해 신뢰도 이론을 적용하여 통계모형의 적용성을 검토하였고, Tung et al.(1981)은 하천제방의 위험도에 대해 다양한 불확실도 해석기법을 적용하였다. Brizendine(1997)은 현장 실험 및 모형 실험 자료를 토대로 risk tree를 구성하여 사면안정 및 침투, 그리고 월류에 대한 위험도를 종합적으로 분석하였으며, Steenbergen et al.(2004)은 월류, 파이핑, 사면안전 등을 고려한 모형을 개발하여 제방 시스템의 안전도를 평가하였다. van der Meer et al.(2009)은 네덜란드와 미국의 제방 안전성에 대한 산정방법의 비교·분석을 통해 월류 및 침투에 대한 제방 안전성 산정기법을 제시하였다.

국내에서도 하천 제방에 대한 위험도 평가를 위해 다양한 평가기법이 연구되었다. Song et al.(2008)은 AHP(Analytic

Hierarchy Process)분석을 통해 도시하천의 특성을 고려하여 도출된 평가인자를 제방특성, 하천특성, 생태환경특성으로 나누어 평가할 수 있는 도시하천 평가기법을 개발하였다. Ahn et al.(2009)은 다양한 무차원 누가강우량곡선을 생성하고 신뢰도 지수를 이용하여 하천제방의 위험도를 평가하였다. Park et al.(2011)은 기반공학적 설계요소에 대한 제방의 붕괴예민도를 수치해석모형을 이용하여 파악하였으며, 평균입경이 유출량에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 4대강 사업 이후 변화된 하천에 대한 제방 안전성을 평가하는 연구가 진행되고 있다. Kang et al.(2014)은 홍수파형과 제방형상에 따른 침투거동을 모의하여 대하천 정비사업으로 달라질 수 있는 제방의 안정성을 평가하였다. Park et al.(2016)은 하천준설사업 전·후의 지형변화를 고려하여 2차원 수리해석을 실시하고 그 결과를 통해 제방 위험도를 평가하였다.

제방붕괴 및 월류에 따른 외수범람 홍수파 해석과 관련한 주요 연구를 살펴보면, Xantopoulos and Koutitas(1976)는 2차원 범람홍수파 해석을 위하여 Eulerian 좌표상에서 양해법 유한차분모형을 이용하여 그 해를 구하였고, Fread(1985)는 제방범람으로 인한 홍수파를 주수로와 연결된 네트워크로 고려하여 제내지에서의 1차원 홍수파 해석을 실시하였으며, 2차원 범람홍수의 흐름해석에 대한 수치모형들이 많이 연구되어 왔다(Bradford and Sanders, 2002; Brufau and Garcia-Navarro, 2000; Jha et al., 2000). 국내에서는 Lee and Han(1995)이 제내지에서의 범람홍수파 해석을 위한 침수해석 모형을 개발하여 제내지에서의 침수양상을 분석하였으며, Kang et al.(2007)과 Cho et al.(2010)은 FLUMEN 모형을 이용한 홍수해석을 통하여 침수피해 저감방안을 제시하였다.

지금까지의 제방 위험도 및 치수안전도 평가에서는 주로 수리학적 분석을 통한 제방의 위험도 평가를 실시하였으나, 이는 제방의 물리적인 특성 및 제방의 설계기준 등을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 제방이 붕괴되는 원인은 다양하며, 특히 제방의 물리적인 특성들에 의해 붕괴되는 위험도 평가기법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 제방 위험도 평가 시 단점을 보완하여 제방 위험도(Hazard)와 취약도(Vulnerability)를 분석하여 이를 동시에 고려한 제방 리스크 평가 기법을 제안하였다. 이를 통해 다양한 원인을 고려하여 고위험 제방을 찾고, 그 제방에서 월류 및 붕괴로 인해 발생하는 제내지에서의 정확한 범람범위를 산정하고자 한다.

2. 제방 리스크 평가기법

제방 리스크 평가를 위해 수리학적 분석을 통한 위험도 평가와 물리적인 특성을 고려한 취약도 평가기법을 제시하였다. 각각의 기법에서 산정된 결과들을 하나의 리스크 지수

로 산정하기 위해서는 가중치가 중요한 역할을 하므로 전문가 설문문을 통해 가중치를 산정하고 이를 활용한 제방 리스크 평가기법을 제안하고자 한다.

2.1 제방 위험도(Hazard) 평가

홍수 시 수리현상은 매우 복잡하여 다양한 원인으로 제방이 붕괴될 수 있으며, 도로 및 철도 교량 등 중형단구조물로 인해 하천 내에 통수단면 축소 및 홍수 소통장애로 인하여 제방이 붕괴되는 상황이 발생할 수 있다. 본 연구에 앞서 구체적인 지형정보를 반영하여 2차원 수리모형을 이용해 월류, 침투, 침식에 대한 제방 위험도 평가를 실시하는 연구가 진행되었다(Park et al., 2016). Park et al.(2016)이 제안한 제방 위험도 평가기법은 편수위를 포함한 홍수위와 제방고를 비교하는 월류위험도 평가, 제방인근 영역에서의 전단력과 와점성계수 등을 비교·분석하는 침식위험도 평가, 한계동수경사법의 적용을 위해서 홍수위와 제내지 표고를 비교하는 침투위험도 평가이다. 본 연구에서는 선행연구에서 제안한 평가기법을 적용하여 다양한 제방 붕괴 원인들 중 수리학적 분석이 가능한 월류, 침투, 침식에 의한 제방 위험도를 평가하여 이를 하나의 제방 위험도(Hazard)로 평가하였다.

2.2 제방 취약도(Vulnerability) 평가

제방 리스크 평가를 위해 앞서 수리학적 분석을 통해 산정한 위험도뿐만 아니라 제방과 관련된 물리적인 특성을 고려하여 제방 취약도 평가를 실시하였다. 제방의 물리적인 특성인 제방의 유형, 축조년수, 설치위치, 하천설계기준 준수여부, 수공구조물 조건 등을 고려하여 각각에 대해 취약도 지수를 부여하고 이를 하나의 제방 취약도(Vulnerability)로 평가하였다.

2.2.1 제방의 유형

제방의 구성 재료와 양식이 어떤 방식으로 구성되어 있는지에 따라서 제방 취약도 분석 시 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 제방의 재료 및 설치방식에 따라 Table 1과 같이

제방을 구분하고 이에 대한 등급을 나누어 분석하였다. 본 연구에서는 이를 적용하기 위해 RC 구조 등 강벽재료를 사용한 경우, 콘크리트 구조 및 콘크리트 라이닝 등으로 설치된 경우, 서석쌓기 등으로 설치된 경우, 다양한 호안양식을 도입한 경우, 일반 토사 및 식생구조로 되어 있는 경우 등으로 구분하여 취약도가 증가하는 것으로 고려하여 분석하였다.

2.2.2 제방의 축조년수

최근 기후변화 등에 따른 강우량의 증가와 도시화에 따른 유출량의 증가로 인해 노후된 댐 및 제방 등의 구조물이 붕괴되는 사례가 늘어나고 있어, 이와 같은 관점에서 제방의 축조년수가 제방 취약도에 미치는 영향은 클 것으로 판단된다. 이를 위해 제방의 축조년수에 대한 취약도 평가를 다음 Eq. (1)과 같이 적용하였다.

$$P = C \times \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^n \right] \quad (1)$$

여기서, P는 제방축조년수에 대한 점수, C는 변환계수(n=50일 경우, C=1.5727), T는 일반적인 내용년수(통상 50년), n은 제방의 확률년이다.

2.2.3 제방의 설치위치

제방 설치위치의 지형적인 양상은 제방 취약도에 영향을 미치게 된다. 즉, 일반적인 제방의 취약지역은 만곡부, 합류부 등으로 구분할 수 있다. 만곡부의 경우 홍수 시 빠른 유속으로 인한 제방의 침식 등이 발생할 수 있으며, 큰 홍수량을 가지는 지류가 합류하는 곳에 위치한 제방의 경우도 제방의 안전성에 영향을 미치게 된다. 또한, 하천 폭의 변화가 큰 협착부의 경우에도 홍수 발생 시 하천의 유수소통이 원활하지 못해 제방이 붕괴될 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 제방의 협착부 설치위치에 따라 취약도 지수를 부여하기 위해 상하류의 통수단면적의 비를 고려하였다.

Table 1. Levee Vulnerability Analysis - Levee Type

Type	Grading	Description
Flood wall	0.0 ~ 0.2	RC structure and with strongest protection
Concrete-paved levee	0.2 ~ 0.4	paved with concrete
Stone-paved levee, mason-paved levee, brick-paved levee	0.4 ~ 0.6	paved with stone, or mason, or brick
Revetments	0.6 ~ 0.8	concrete-paved, stone-paved, mason-paved, brick-paved revetments, box gabion, and roll gabion
Earth levee	0.8 ~ 1.0	paved with clay and vegetated

2.2.4 하천설계기준 준수여부

국내 하천제방 설계 시 제방단면을 결정하기 위해서는 하천설계기준(2009)에서 제시한 조건들을 반영하여야 한다. 이는 제방이 안전한가를 판단하는 기준으로 본 연구에서도 하천설계기준에서 규정하고 있는 홍수량 규모별 여유고, 둑마루폭, 제방경사 등을 준수하고 있는지의 여부를 중요한 취약도의 판단기준으로 설정하였다(Tables 2 and 3).

Table 2. Free Board According to Design Frequency

Design Frequency (m ³ /s)	Free Board (m)
~ 200	0.6 ≤ H _{fb}
200 ~ 500	0.8 ≤ H _{fb}
500 ~ 2,000	1.0 ≤ H _{fb}
2,000 ~ 5,000	1.2 ≤ H _{fb}
5,000 ~ 10,000	1.5 ≤ H _{fb}
10,000 ~	2.0 ≤ H _{fb}

Table 3. Levee Crown Width According to Design Frequency

Design Frequency (m ³ /s)	Levee Crown Width (m)
~ 200	4.0 ≤ W _{lc}
200 ~ 5,000	5.0 ≤ W _{lc}
5,000 ~ 10,000	6.0 ≤ W _{lc}
10,000 ~	7.0 ≤ W _{lc}

2.2.5 수공구조물 조건

하도에 위치한 교량, 보 등의 주변에서는 소용돌이나 국부적인 고유속이 발생하는 경우가 있다. 이러한 물의 작용에 의해 제방의 표면이 침식되거나 하안이 세굴되고 이것이 서서히 확대되어 제방의 파괴로 이어진다. 따라서 제방 인근 지역에 위치한 교량, 보와 낙차공, 각종 시설물 등은 제방의 취약도에 큰 영향을 미치게 되므로 이들 시설물의 유무를 취약도 분석인자로 고려하였다.

2.3 제방 리스크 평가

본 연구에서는 기존의 제방 위험도 및 치수안전도 평가 시 위험도만을 고려한 것을 보완하고자 위험도와 취약도를 동시에 고려한 제방 리스크 평가 기법을 제안하였다(Park et al., 2015). 즉, 제방 위험도 평가의 경우 수리학적 분석이 가능한 월류, 침투, 침식에 의한 위험도를 분석하여 각 분석 결과를 각 요소별 가중치를 고려하여 하나의 위험도(Hazard)로 산정하며, 취약도 평가의 경우 제방의 물리적인 특성인 제방 유형, 축조년수, 설치위치, 하천설계기준 준수여부, 수공구조물 조건 등을 고려한 취약도 분석 결과를 각 요소별 가중치를 고려하여 하나의 취약도(Vulnerability)로 산정하는 것이다. 이렇게 산정된 위험도와 취약도를 동시에 고려하

여 제방의 붕괴에 영향을 미치는 다양한 요소들이 반영된 제방 리스크 평가를 실시하고자 한다.

$$R = W_h H + W_v V \quad (2)$$

여기서, R 은 리스크, H 는 위험도, V 는 취약도, W_h 와 W_v 는 각각 위험도와 취약도의 가중치를 나타내고 있다. 또한, 이와 같은 분석을 통해서 각각의 평가항목에 대한 결과값을 등급화하고, 그 결과들을 위험도와 취약도의 합으로 표현하여 세분화된 제방 리스크 평가 등급을 선정하고자 한다.

Fig. 1. Method of Levee Risk

Table 4. Grade of Levee Risk Assessment

Grade	Risk	Range
5	Very High	0.81 ~ 1
4	High	0.61 ~ 0.80
3	Medium	0.41 ~ 0.60
2	Low	0.21 ~ 0.40
1	Very Low	0 ~ 0.20

2.3.1 제방 리스크 평가기법의 검토

위험도와 취약도를 산정함에 있어 가중치에 따라 제방 리스크 평가 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 중요도를 가지는 가중치 선정을 위해 국내 수자원분야 전문가를 포함한 다양한 분야의 전문가들을 대상으로 설문 실시하였다. 각 인자별로 최대 5점에서 최소 1점까지의 범위에서 응답자가 생각하는 중요도 점수에 표시하는 방법을 사용하였다.

Fig. 2와 같이 총 설문 참여인원은 55명이며, 설문 응답자 구성 비율은 소속별로 기업이 40.8%로 가장 많았으며, 대학 26.5%, 공공기관 22.5% 순이며, 종사분야와 종사한 기간은 각각 수자원분야(87.2%)와 11~16년(32.7%)이 가장 높은 비율을 차지하고 있었다.

Fig. 2. Questionnaire Participation Status

2.3.2 가중치 산정

설문조사 결과를 바탕으로 통합 위험도 평가와 취약도 평가에 사용할 가중치를 각각 산정하였으며, 제방 리스크 평가를 위한 통합 위험도와 통합 취약도의 가중치를 구함으로써 제방에 대한 통합 리스크 평가가 가능하도록 하였다. 본 연구에서 이용할 각 인자에 대한 가중치는 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Weighted Value of Levee Risk Assessment

Classification	Criteria	Weighted Value
Hazard	Overtopping	0.396
	Infiltration	0.322
	Erosion	0.282
	Total	1.000
Vulnerability	Levee Type	0.204
	Levee Age	0.191
	Levee Location	0.200
	River Design Standard	0.235
	Hydraulic Structures	0.171
	Total	1.000
Risk	Integrated Hazard	0.547
	Integrated Vulnerability	0.453
	Total	1.000

3. 제방 리스크 평가기법의 적용

본 연구에서 제안한 제방 리스크 평가기법의 적용을 위해 안성천 상류권역을 대상유역으로 선정하였다. 대상 유역인 안성천 유역은 북측으로 경기도 안성시 삼죽면과 접하고, 안성시 대덕면에서 금천과 합류하여 안성천 국가하천 구간으로 유하하며, 유역면적 145.42 km², 유로연장 23.04 km로 안성천 전체의 약 8.77%를 차지하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014). 대상유역에 대해 수리해석을 실시하여 그 결과를 통해 위험도를 평가하고, 대상유역 내의 제방들의 물리적인 특성들을 분석하여 취약도를 평가하였다.

3.1 제방 위험도 평가

대상유역의 제방 위험도 평가를 위해 수리해석을 실시하고 각 제방에서의 홍수위와 소류력을 계산하였다. 제방고 및 제내지 지형고 등의 제원을 GIS tool을 이용하여 추출하여 지형자료로 활용하였으며, 발생 가능한 홍수사상의 적용을 위해 계획빈도별 홍수량에 대하여 2차원 수리해석을 실시하였다. 수리해석 결과로 산정된 하천 홍수위와 소류력, 그리고 제방고 및 제내지 표고를 월류, 침식, 침투에 대한 위험도를 평가하기 위한 인자로 활용하였다. 2.1절에 언급된 선행연구에서 제안한 방법론을 적용하여 홍수위와 제방고를 비교하는 월류 위험도 평가, 한계동수경사법의 적용을 위해서 홍수위와 제내지 표고를 비교하는 침투위험도 평가, 제방인근 영역에서의 전단력과 와점성계수 등을 비교·분석하는 침

식위험도 평가를 실시하였다. 각 제방의 월류, 침투 및 침식에 대한 위험도를 산정한 결과를 Z-점수법(Nardo et al., 2005)을 통해 등급화하여 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 제방 취약도 평가

대상구역의 제방들에 대해 본 연구에서 제안한 제방 취약도 평가기법을 적용하여 각 요소별 등급화 된 제방 취약도 평가 결과를 Figs. 4~5에 나타내었다.

3.3 제방 리스크 평가

앞서 산정한 제방에 대한 위험도와 취약도 평가결과를 바탕으로 이를 동시에 고려한 제방 리스크를 산정하여 Fig. 6에 나타내었다. 대상구역의 제방 리스크 평가결과 안성시 안성1,2동 일대에 걸쳐 건설된 K제방이 가장 높은 등급을 가지면서 리스크가 높은 제방으로 나타났다. 제방

리스크 평가결과를 shape파일의 형태로 제작하여 제방 리스크 지도를 Fig. 7에 나타내었다. 작성된 제방 리스크 지도를 통해 대상구역의 제방에 대한 리스크 평가결과 및 위험 제방의 위치를 확인할 수 있으며, 이는 풍수해저감종합계획 수립 시 위험 제방 선정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 월류 및 붕괴로 인한 제내지의 침수해석 시 고위험 제방의 위치를 제공함으로써 정확한 침수범람범 위 산정에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 제방 리스크 평가를 적용한 침수예상도 작성

제방 리스크 평가를 통해 선정된 위험한 제방에 대해 월류 및 붕괴 시나리오를 적용하여 침수예상도를 작성하였다. 이를 위해 1, 2차원 수리해석 모형을 구축하고, 구축된 모형

Fig. 3. Levee Hazard Analysis - Hazard Indices

Fig. 4. Levee Vulnerability Analysis - River Design Standard

Fig. 5. Levee Vulnerability Analysis - Vulnerability Indices

Fig. 6. Integrated Levee Risk Analysis

Fig. 7. Levee Risk Map

의 신뢰성 확보를 위해 대상유역에 발생한 실제 홍수사상에 대해 검증을 실시하였다. 검증된 모형에 발생 가능한 빈도별 홍수량을 적용하여 위험한 제방에서의 월류 및 붕괴 시나리오를 작성하고, 각 시나리오별 침수예상도를 작성하였다.

4.1 실제 홍수사상에 대한 검증

검증을 위한 사상으로서 2006년 7월 26일에서 29일까지 398 mm의 집중호우로 인해 대상유역에서 발생한 침수피해 사상을 적용하였다. 이 호우로 제방이 유실되고 제방침식이 일어나 붕괴되었으며, 수백여 채의 가옥이 침수되어 주민 수천 명이 긴급 대피하는 피해가 발생하였다. 붕괴된 제방지점은 장기간 지속된 강우로 제체 강도가 저하된 상태에서 계획빈도를 상회하는 홍수로 인해 제방이 붕괴된 것으로 추정되었다(KARICO, 2006).

4.1.1 1차원 하천수리해석

제방 붕괴 유출량을 산정하기 위해 1차원 수치해석 프로그

램인 FLDWAV 모형을 활용하였다. 미국 기상청(NWS)에서 개발된 FLDWAV 모형은 1차원 Saint-Venant 방정식을 지배 방정식으로 사용하며, 하천구간에서의 급변류, 단면의 변화, 교량 등의 영향을 내부경계 조건으로 수용할 수 있도록 설계되었다. 제방 붕괴 및 월류 조건에 대한 해석이 가능하여 본 연구에서는 FLDWAV 모형을 활용하여 제방 붕괴 유출량을 산정하였다.

실제 제방이 붕괴된 지점은 당시 집중호우로 인해 대상유역 내에 위치한 금광저수지에서 4개의 수문을 동시에 방류하여 갑자기 증가한 수위로 인해 제방이 붕괴되었다. 따라서 1차원 하천수리해석을 위해 당시 금광저수지의 방류량을 상류단 경계조건으로, 안성 수위관측소에서의 관측수위를 하류단 경계조건으로 적용하였다. 각 경계조건은 강우-유출 해석모형인 HEC-1 모형을 이용하여 산정되었으며, 지류로 유입되는 월동천 및 기타 소유역의 유출량을 계산하여 측방 유입량으로 적용하였다. Figs. 8, 9에 검증을 위해 구축된 모형과 각 경계조건을 제시하였다.

Fig. 8. Model Construction for Verification

(a) Boundary Conditions(w/o DB)

(b) Downstream Boundary

Fig. 9. Boundary Conditions

적용한 홍수사상에서 조령천 우안인 가천2제에서 붕괴가 발생하였으며, 당시 조사된 붕괴폭 100 m, 붕괴 지속시간 1시간을 제방 붕괴 입력조건으로 적용하였다. Fig. 10과 같이 하천수리해석 결과로 산정된 제방 붕괴 유출량을 2차원 침수해석의 경계조건으로 사용하였다.

Fig. 10. Levee Breach Discharge

4.1.2 2차원 제내지 침수해석

홍수파가 지표면에 전달되는 경우 지표면의 저류, 홍수파의 감쇠, 건물 주위에서의 흐름 등에 따라 그 물리적인 양상을 수식으로 표시하기에 큰 어려움이 있다. 그러나 유한차분기

법에 의한 침수해석은 범람예상구역의 물리적인 특성을 정확하게 반영할 수 있는 수리학적 방정식을 기본으로 하여 해석될 수 있다. 본 연구에서 2차원 제내지 침수해석에 적용한 프로그램은 유한차분기법을 기반으로 하는 상용프로그램인 FLO-2D이다. 침수해석에 사용된 기법인 유한차분기법은 미분항을 Taylor 급수 전개를 이용하여 표현하는 근사해법으로, 기법의 기초가 쉽고 입력자료를 비교적 쉽게 구축할 수 있는 장점이 있다. 따라서 간단한 입력자료를 활용하여 실제 홍수사상에 대한 검증을 위한 2차원 침수해석 결과를 도출하였다.

과거 홍수사상에 대한 검증을 위해서 제방에서의 붕괴 유출량, 침수범위, 침수심 등을 사용하는데, 본 연구에서는 풍수해저감종합계획 및 침수흔적도 등의 문헌자료에서 확인할 수 있는 침수범위를 통해 실제 침수범위와 검증을 실시하였다. 1차원 하천수리해석을 통해 산정된 제방 붕괴 유출량을 이용하여 2차원 제내지 침수해석을 실시한 후 실제 범람된 침수범위와 2차원 침수해석 결과를 비교하였다. 2차원 제내지 침수해석을 위해 사용된 지형자료는 국토지리정보원에서 제공하는 1/5,000 축척의 수치지도를 이용하였고, 격자는 5 m×5 m, 조도계수는 대상지역이 농경지임을 고려하여 0.035를 적용하였다. 최대 홍수심도와 실제 침수면적과 비교해 본 결과를 Fig. 11에 나타내었으며, 적합도 산정을 통해 구축된 모형의 신뢰성을 확인하였다(Table 6).

Fig. 11. Comparison of Observed and Simulated Inundation Area

Table 6. Calculation of Inundation Area and Goodness of Fit

Inundation Area (Observed) (m ²)	Inundation Area (Simulated) (m ²)	Goodness of Fit (%)
616,075	684,075	81.8

4.2 고위험 제방에 대한 월류 및 붕괴 시나리오

기존의 풍수해저감종합계획 보고서의 하천재해 위험지구는 하천기본계획 상 횡단면에 홍수위를 입력하여 연장선상에 있는 지역은 동일한 수위를 가지는 것으로 가정하고 선정한다. 하지만 이러한 방법으로 하천재해에 대한 위험도를 나타내는 것은 홍수파의 전달특성을 제대로 반영하기 힘든 한계가 있으므로, 제방 월류 및 붕괴에 대한 2차원 제내지 침수해석 결과로 침수예상도를 작성하여 하천재해 위험지구를 산정하면 정확한 침수심 및 홍수파 전파상황 등의 다양한 정보를 반영하여 의사결정이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 제방 리스크 평가를 통해 선정된 고위험 제방에 대한 월류 및 붕괴 시나리오별 침수예상도를 작성하여 하천재해가 발생할 가능성이 높은 지역의 방재대책 수립에 기여하고자 한다.

4.2.1 1차원 수리해석 모형 구축 및 경계조건

발생 가능한 홍수사상의 적용을 위해 계획빈도별 홍수량에 대한 제방 월류 및 붕괴 유출량을 산정하였다. 이를 위해 Fig. 12와 같이 대상유역에 1차원 수리해석 모형을 구축하였다. 대상유역의 주요지류인 조령천에 대해서도 하도단면을

구축하여 지류모의를 실시하였으며, 나머지 지류들에 대해서는 측방유입량으로 고려하였다. 상류단 경계지점은 대상유역 내 점촌 지점을 선정하였으며, 하류단 경계지점은 안성천 지방하천 구간의 종점을 선정하여 자유단 경계조건을 적용하여 하상경사로 계산되도록 지정하였다.

하천기본계획 보고서에서 제시하는 계획빈도별 홍수량의 경우 지점 홍수량 값만을 나타내므로 과다 산정될 가능성이 크다. 이에 본 연구에서는 극한 사상을 고려하되 과다산정을 방지한 부정류 해석을 위해 Log-Pearson Type III 분포를 이용하여 수문곡선을 산정하였다(Singh, 1998). Fig. 13은 상류단 경계조건 및 각 지류에 대한 측방유입량을 도시하였다.

4.2.2 시나리오 구성

계획빈도별 홍수량에 대한 제방 리스크 평가 결과에서 5등급을 가지며, 인구가 밀집한 지역으로 제방의 월류 및 붕괴 발생 시 피해가 클 것으로 예상되어 L제방을 대상으로 시나리오를 구성하였다. Tables 7, 8에 계획빈도별 산정된 홍수위-제방고 비교 결과와 제방 월류 및 붕괴 시나리오 구성을 나타내었으며, Fig. 14는 각 시나리오별 L제방에서의 유량수문곡선을 나타내었다.

Fig. 12. Stream Network for 1-D Flood Analysis

Fig. 13. Boundary Conditions by Scenario

Table 7. Comparison of Water Surface Elevation and Levee Height

Return Period	No.	Water Surface Elevation (EL.m)	Levee Height (L) (EL.m)	Levee Height (R) (EL.m)
80 Year	8+200	30.20	31.18	30.22
	8+100	30.19	31.03	30.16
	8+000	30.20	30.94	30.10
100 Year	8+200	30.36	31.18	30.22
	8+100	30.35	31.03	30.16
	8+000	30.35	30.94	30.10
200 Year	8+200	30.63	31.18	30.22
	8+100	30.62	31.03	30.16
	8+000	30.62	30.94	30.10

Table 8. Scenario Configuration

Scenario	Return Period	Description	Breach Width (m)	Breach Duration (hr)
Scenario 1	80 Year	Overtopping	-	-
Scenario 2		Breach	25	1
Scenario 3	100 Year	Overtopping	-	-
Scenario 4		Breach	25	1
Scenario 5	200 Year	Overtopping	-	-
Scenario 6		Breach	25	1

Fig. 14. Discharge Hydrograph by Scenario

(a) Scenario 1

(b) Scenario 2

(c) Scenario 3

(d) Scenario 4

(e) Scenario 5

(f) Scenario 6

Fig. 15. Flood Prediction Map by Scenario

4.2.3 시나리오별 침수예상도 작성

2차원 침수해석을 통한 정확한 침수예상도 작성을 위해 1/5,000 축척의 수치지도와 하천기본계획 상 평면도를 사용하였으며, 도심지에서의 홍수와 전달양상을 파악하기 위해 건물의 형상을 반영한 지형자료를 구축하였다. 격자크기 3m×3m의 정형격자를 구성하여 2차원 침수해석을 실시하고 침수예상도를 작성하였다. Fig. 15는 각 시나리오에 대한 침수예상도를 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 수리해석 결과를 이용한 제방 외적의 물리적인 위험도와 제방 자체의 성질에 대한 취약도의 연계를 위해 전문가 설문조사를 실시하여 산정된 가중치로 제방 리스크 분석을 실시하였다. 제방 리스크 분석을 통해 기존의 제방 위험도 평가에서 나아가 취약도를 동시에 고려한 분석

을 통해 종합적인 제방 평가 기법을 제시하였다. 이를 통해 제방 안전도 평가 및 제방 보강에 있어 우선순위를 부여할 수 있으며, 하천의 계획빈도를 상회하는 수위로 인한 제방의 월류 및 붕괴에 대한 시나리오를 통해 하천재해 위험지구를 선정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 고위험 제방의 선정을 위해 월류위험도, 침식위험도, 침투위험도 분석을 통한 제방 위험도 평가기법과 제방 유형, 축조연수, 설계기준 등 제방의 물리적인 특성을 고려한 취약도 분석기법을 제시하였다. 위험도와 취약도를 산정하는 각 인자들의 가중치 선정을 위해 전문가들을 대상으로 설문을 실시하였다. 설문을 통해 위험도(월류: 0.396, 침투: 0.322, 침식: 0.282)와 취약도(제방유형: 0.204, 축조연수: 0.191, 위치: 0.200, 설계기준: 0.235, 수공구조물: 0.171), 리스크(위험도:

0.547, 취약도: 0.453)에 대한 가중치를 산정하였다. 도출된 가중치를 활용하여 위험도와 취약도가 동시에 고려된 통합 리스크 평가를 실시한 결과 안성천 지방하천 구간의 총 19개의 제방 중 절반이 넘는 12개의 제방이 4등급을 넘는 위험한 제방으로 나타났다.

- (2) 선정된 위험 제방에서의 월류 및 붕괴에 대한 하천재해 위험지구 분석을 위해 2006년 실제 붕괴 사례인 안성천 유역 지류의 조령천 제방 붕괴에 대해 2차원 침수해석을 실시하였다. 그 결과 81.8%의 높은 적합도로 구축된 1, 2차원 모형의 신뢰도를 확인할 수 있었다. 검증된 모형을 활용하여 제방 리스크 평가 결과를 기준으로 안성천 지방하천 구간의 계획빈도별 제방 월류 및 붕괴 시나리오를 구성하여 침수해석을 실시하였다. 침수해석 결과를 통해 침수예상도를 작성하였으며, 위험 제방에서의 하천재해 위험지구 선정에 활용될 수 있음을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서 제안하는 제방 리스크 평가기법은 과거 재해로 인한 인명손실이나 붕괴를 방지하기 위한 대책에 대한 고려는 하지 못하였다. 재해위험지구 선정 시 인명손실에 대한 고려를 우선순위 반영에 포함되는 것이 필요하며, 제방의 축조년수로 인해 취약도가 높게 산정되더라도 제방에 대한 보강공사가 이루어졌다면 이를 보완하는 취약도 산정 기법이 필요할 것으로 판단된다. 추후 연구에서 이러한 보완을 통해 다양한 요인을 반영한 정확한 평가기법을 제시하고자 한다.

하천의 준설과 제방의 보강 등으로 재해에 대한 대비가 이루어지고 있음에도 불구하고 하천재해로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 따라서 고위험 제방을 합리적인 분석을 통해 선정함으로써 제한된 재원을 효과적으로 사용하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서 제안된 제방 리스크 평가기법을 통해 고위험 제방 및 하천재해 위험지구의 선정 등은 체계적인 방재대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발 사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MPSS-자연-2014-75].

References

Ahn, K.H., Han, K.Y., and Kim, B.H. (2009) Risk Assessment of Levee Embankment Applying Reliability Index. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 7, pp. 547-558.

Bogadi, I., Duckstein, L., and Castano, E. (1976) Effects

of Stochastic Model Choice Hydraulic Design. *Proceedings of 2nd IAHR Int. Symp. on Stochastic Hydraulics*, Lund, Sweden.

Bradford, S.F., and Sanders, B.F. (2002) Finite-volume Model for Shallow-water Flooding of Arbitrary Topography. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 289-298.

Brizendine, A.L. (1997). *Risk-based Analysis of Levees*. Ph.D. dissertation, Univ. of West Virginia.

Brufau, P., and Garcia-Navarro, P. (2000) Two-dimensional Dam Break Flow Simulation. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 33, pp. 35-57.

Cho, W.H., Han, K.Y., and Ahn, K.H. (2010) Flood Risk Mapping with FLUMEN model Application. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2B, pp. 169-177.

Fread, D.L. (1985) Channel Routing. *Hydrological Forecasting*, Edited by Anderson, M.G., and Burt, T.P., John Wiley & Sons, New York, pp. 437-503.

Jha, A.K., Akiyama, J., and Ura, M. (2000) Flux-difference Splitting Schemes for 2d Flood Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 33-42.

Kang, S.M., Park, M.J., Kim, S.H., and Kim, S.J. (2007) A Study on the Mitigation of Inundation Damage Using Flood Inundation Analysis Model FLUMEN: For the Park of Jinwicheon Reach. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 6B, pp. 583-590.

Kang, T.U., An, H.U., Lee, G.M., and Jung, K.S. (2014) Levee Stability Assessment Depending on Levee Shape and Flood Wave. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 307-319.

Lee, J.T., Han, K.Y., Yoon, S.E., and Park, J.H. (1995) Floodwave Modeling in Inundated Area Resulting from Levee-Break. *Water for Future*, Korea Water Resources Association, Vol. 28, No. 5, pp. 163-174.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2014) *Flood Hazard Map Master Plan Supplement Report*.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008) *A Guide for Producing the Flood Hazard Map*.

Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., and Tarantola, S. (2005) *Tools for Composite Indicators Indicators Building*. EUR 21682 EN, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy, pp. 44-52.

National Emergency Management Agency (2013) *Guidelines for Disaster Mapping*.

- Park, J.H., Kim, B.J., and Han, K.Y. (2015) Integrated Risk Assessment of Levee for Flood Hazard Mapping. *Proceedings of KSCE 2015 Convention*, Gunsan, Korea, pp. 101-102.
- Park, J.H., Kim, S.H., and Lee, C.H. (2011) Investigation about Design Parameter of Levee using Numerical Model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 6, pp. 259-268.
- Park, J.H., Kim, T.H., and Han, K.Y. (2016) Hazard Evaluation of Levee by Two-Dimensional Hydraulic Analysis. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 45-57.
- Singh, V.P. (1998) *Entropy-Based Parameter Estimation in Hydrology*. Springer, Netherlands, pp. 252-274.
- Song, J.I., Lee, J.H., and Yoon, S.E. (2008) Development of Stream Assessment Technique for Restoration and Management of Urban Stream. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 3B, pp. 283-296.
- Steenbergen, H.M.G.M., Lassing, B.L., Vrouwenvelder, A.C. W.M., and Waats, P.H. (2004) Reliability analysis of Flood Defence System. *HERON*, Vol. 49, No. 1, pp. 51-73.
- Tung, Y.K., and Mays, L.W. (1981) Optimal Risk-based Design of Flood Levee Systems. *Water Resources Research*, AGU, Vol. 17, No. 4, pp. 843-852.
- van der Meer, M.T., Woldringh, R.F., and Knuuti, K. (2009) Comparison of the Dutch and American Levee Safety Approach. *2009 ASFPM Conference*, Orlando, USA, pp. 59-68.
- Xanthopoulos, Th., and Koutitas, Ch. (1976) Numerical Simulation of a Two-Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 321-331.

Received	May 10, 2017
Revised	May 16, 2017
Accepted	October 12, 2017