Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 18, No. 12 pp. 768-777, 2017

https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.768
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

# 하천제방 유지관리 기술의 고도화를 위한 하천제방 안전도맵 평가체계 제안

김진만, 문인종*
한국건설기술연구원

# Evaluation System of River Levee Safety Map for Improving River Levee Maintenance Technology

**Jin-Man Kim, In-Jong Moon***
**Geotechnical Engineering Research Institute, KICT**

**요 약** 세계 각국은 기후 및 홍수사상의 변화와 이에 따른 각종 수재해 시나리오에 대응하기 위하여 하천제방 유지관리 기술을 고도화하고 있는 추세이다. 이러한 세계적 동향에 따라 본 연구에서는 하천제방을 효율적으로 유지관리할 수 있도록 하천제방 안전도맵 평가체계를 제안하고자 한다. 하천제방 안전도맵의 개념은 현행 하천제방의 활동, 파이핑, 육안점검 등의 안전도 지표를 GIS맵 상에 지도형태로 표출함으로써 하천관리자의 유지관리효율을 극대화하는 것이다. 이러한 평가체계를 구축하기 위해서 관련 문헌 및 자료 조사를 통해 활동, 파이핑, 육안점검 등 주요 안전도 지표를 선정하였으며, 각각의 안전도 지표를 A, B, C 등 3등급으로 평가할 수 있는 합리적인 기준을 제시하였다. 제시된 기준을 바탕으로 수치해석을 활용하여 시범구간(남강)에 대한 홍수위지속시간 변화에 따른 활동 및 파이핑 안전도 특성을 평가하였다. 시범평가 결과, 활동의 경우 제내외지 구분 없이 모두 A등급을 만족하였으며, 파이핑의 경우 R2에서 홍수위지속시간이 증가함에 따라 파이핑 등급 C등급으로 감소하는 경향을 확인하였다. 본 연구는 하천제방 안전도맵 평가체계를 제안하는 기획연구로서 하천제방 안전도맵 평가체계를 구축하기 위해서는 추후 개선된 추가 연구, 하천제방 자료의 표준화, 제도 및 관련 법 개선 등이 필요할 것으로 판단된다.

**Abstract** The efforts to improve river levee maintenance technologies have accelerated globally in a bid to deal with the flood damage resulting from the changes to the climate and flood events. This paper, in line with such tendency, proposes an evaluation system of a river levee safety map to maintain the river levee in an efficient manner. The concept of a river levee safety map is aimed at maximizing the maintenance efficiency for a manager to indicate the safety index, including the current river levee sliding, piping, and visual inspection on a GIS map. To develop such an evaluation system, a safety index covering the sliding, piping, and visual inspection are designated through the data and document examination and the rational guideline to classify each index into three grades, A, B, and C, is proposed. Based on the guideline proposed, the sliding and piping characteristics in terms of safety depending on the change to the flood water level duration time at the test section (Nam river) were evaluated by numerical analysis. As a result, both the protected landside and riverside satisfied the requirements for Grade A in terms of sliding, and when it comes to piping, the grade declined to C because the flood water level duration time increased at R2. As a planning study to propose a river levee safety map evaluation system, a further advanced study, standardization of the river levee data, and improvement of the existing system and laws are required.

**Keywords :** Flood damage, Numerical analysis, Piping, River levee safety map, Sliding, Visual inspection

본 연구는 국토교통부/국토교통과학진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(17SCIP-B065985-05)에 의해 수행되었음.
*Corresponding Author : In-Jong Moon (KICT)
Tel: +82-31-910-0761 email: mooninjong@kict.re.kr
Received October 26, 2017 Revised November 23, 2017
Accepted December 8, 2017 Published December 31, 2017

## 1. 서론

Lee(2013)은 기후변화 전망 결과, 2100년 지구가 최대 4.7℃, 한반도 최대 6.0℃의 기온 상승이 예상되고, 우리나라는 가까운 시일인 2020년까지 1.1℃~1.5℃의 기온상승이 전망된다고 한다. 최악의 경우 지난 100년간 일어난 기후변화인 1.8℃ 상승이 2020년 내에 발생할 가능성이 있는 것으로 보고하고 있으며, IPCC (Intergovernmental Panel Climate Change, 2007)의 기후변화 시나리오(RCP8.5)에 따라 우리나라는 아열대 기후구로 바뀔 것으로 전망하고 있기 때문에 홍수유발 잠재력이 증가할 것으로 판단된다[1, 2]. 머지않은 미래에 우리나라의 기후 및 홍수사상 변화는 하천제방 붕괴 및 하천 범람으로 인한 하천유역의 인명 및 재산피해를 증가시킬 가능성이 크기 때문에 이를 막기 위한 적절한 하천제방의 취약도 평가체계 및 관련 구축 시스템이 필요하다고 판단된다.

지형 및 환경 요인으로 인하여 제방 기술력이 뛰어난 네덜란드에서는 하천관리자의 하천제방과 관련된 유지 및 보수, 안전 및 정보관리 등 관련 업무효율을 높이고자 DAM(Dike strength Analysis Module) 시스템을 개발하였다. DAM 시스템은 기후 시나리오 및 관련 입력정보(토질, 단면, 재료 등)를 입력할 경우 자동화된 모듈형 소프트웨어에 의해 하천제방의 취약도를 계산할 수 있도록 되어 있다. 미국은 위험에 노출된 인명, 재산, 시설물 등 재해 위해성과 취약성을 평가하기 위해 RVAT(Risk and Vulnerability Assessment Tool) 시스템을 개발하였다. RVAT 시스템은 재해유형별 위험예측 및 가중치에 따른 위험분석을 실시함으로서 유역별 지역특성을 고려한 수재해 대응 기술 구축이 가능하다. 한편, 일본의 경우에는 유하능력, 파이핑, 세굴 등과 관련하여 취약구간 1,200km 도출 및 2020년 까지 정비사업 추진 등 실제적인 하천정책을 수립하고 있다[3]. 이와 같이 국외의 경우 기후 변화 및 재해 대응성 향상을 목적으로 하천제방 유지관리 기술을 고도화하고 있지만, 국내에서는 아직 관련 시스템 및 연구가 진행된 바 없다.

본 연구에서는 수재해 해저드맵(hazard map)과 유사한 개념인 하천제방 안전도맵 평가체계를 제안하고자 한다. 따라서 하천제방 안전도맵 평가체계 구축을 위하여 1)관련 문헌 및 자료 조사, 2)관련 안전도 지표의 정량화된 평가지수 제시, 3)시범구간 평가 등을 수행하였으며, 마지막으로 하천제방 안전도맵 평가체계 구축 방향을 제시하였다.

## 2. 하천제방 안전도맵 평가체계

### 2.1 관련 자료 조사

본 연구에서 제안하는 하천제방 안전도맵은 Fig. 1과 같이 현행 하천제방의 활동, 파이핑, 육안점검 등 안전도 지표를 GIS맵 상에 지도형태로 표출함으로써 하천관리자의 하천 유지관리효율을 극대화시키는 개념이다. 따라서 본 절에서는 활동, 파이핑, 육안점검 등에 대한 안전도 평가를 기초로 하는 하천제방 안전도맵 평가체계를 구축하기 위하여 관련 자료를 조사 및 정리하였다.

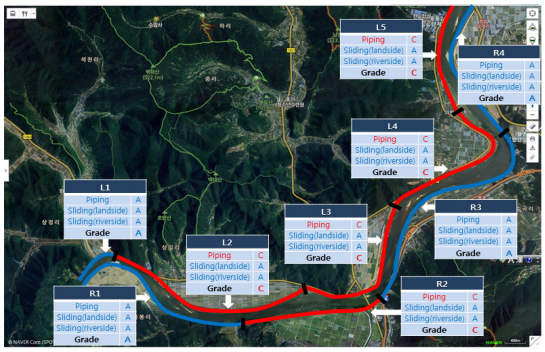

Fig. 1. Concept of river levee safety map

#### 2.1.1 하천제방의 설계

하천제방은 설계 시 하천설계기준·해설[4], 하천공사 설계실무요령[5], 구조물기초설계기준 해설[6] 등 관련 기준을 참조하며, 활동 및 파이핑 등의 안정해석 시 활동의 경우 Bishop의 원호활동법에 의한 제내지(수위급강하) 및 제외지(최대침윤) 활동 등으로, 파이핑의 경우 한계동수경사법, 한계유속법 등을 적용하여 각각 수행한다.

이때 수위파형은 침투해석 시 하천외력에 대한 입력변수로서 평수위구간, 수위상승구간, 홍수위지속구간, 수위하강구간 등으로 구분되어 하천제방 안정해석에 주요설계입력변수로 작용한다. KICT(2015)는 홍수위지속시간에 따른 하천제방의 활동 및 파이핑 안전율 변화 효과를 평가하였으며, 특히 파이핑 안전율의 경우 홍수위지속시간이 길어질수록 급격히 작아지는 것으로 보고하고 있다[3].

### 2.1.2 하천설계기준 변천

하천설계기준(2009)은 1990년대에 개정된 1980년, 1991년, 1993년에 걸쳐 개정된 하천시설기준(1993)을 2009년에 개정 및 보완하여 완성된 기준으로서, 하천설계를 위한 조사, 계획 및 설계에 관한 사항들이 종합적으로 포함되어 있다. 따라서 하천제방의 안전도와 관련된 활동, 파이핑, 제체재료특성 등에 대한 정보는 하천설계기준(2009) 제23장 제방편을 통해 확인할 수 있으며, 본 절에서는 관련 내용을 정리 및 분석하였다[4].

하천설계기준 변천에 따른 하천제방의 구조적 안전율과 제체재료 기준 변천 과정은 Table 1 및 Table 2와 같다. 활동 안전율은 1980년 이래 2009년 까지 동일한 규정(인장균열 고려 여부)을 사용하였으며, 파이핑 안전율은 1993년 이전(하천시설기준)에 파이핑 평가 없이 제체 누수만을 검토하였으나 2000년 이후 파이핑 평가를 반영하였다. 따라서 1993년 이전에 설계된 하천제방은 하천설계기준에 파이핑 안전율 기준이 없는 관계로 차수벽이 설치되지 않았을 것으로 판단된다.

**Table 1.** The change of structural safety factors according to river design standard

| Year | Structural safety | |
|---|---|---|
| | Sliding | Piping |
| 1980 | ·when considering tension crack : 1.3 or more<br>·without considering tension crack : 1.4 or more | ·only check for body leakage according to Casagrande formula |
| 1991 | | |
| 1993 | | ·show only methods without safety factor such as critical hydraulic gradient, critical velocity, creep ratio, etc. |
| 2000 | | |
| 2005 | | ·critical hydraulic gradient : 2.0 or more<br>·critical velocity : 1/100 or less |
| 2009 | | |

**Table 2.** The change of levee fill material according to river design standard

| Year | Levee fill material | | | |
|---|---|---|---|---|
| | USCS | Max size | Permeability (cm/sec) | Compaction |
| 1980 | - | | | |
| 1991 | - | | | |
| 1993 | - | | | |
| 2000 | GM, GC, SM, SC, ML, CL | within 150mm | - | ·KS F 2312 : 90% or more |
| 2005 | | within 100mm | $10^{-3}$ or less | ·KS F 2312 : 90% or more |
| 2009 | | within 100mm | $10^{-3}$ or less | ·KS F 2312 : 90%(levee)/ 85%(super levee) or more |

또한 하천제방의 제체재료 종류, 다짐 관련 기준(상대다짐도 90% 이상) 등은 2000년 이후에 도입되었기 때문에, 그 이전에 축조된 하천제방은 다짐장비 미사용에 따른 구조적 취약 구간이 존재하는 것으로 판단된다. 실제로 국토교통부는 1970~1980년대에 집중적으로 건설된 하천제방이 노후화되어 관공작용으로 붕괴되는 현상이 많이 나타나는 것으로 보고하고 있다[7].

### 2.1.3 하천제방 설계자료 현황

국내 하천제방 안전도맵 구축을 위한 주요자료는 1) 홍수량곡선/계획홍수위, 2)GIS Layer 및 관련 사진, 3) 하천제방단면도, 4)시추 및 토질시험데이터, 5)활동 및 파이핑 안정해석 자료 등 최소 5가지이며, 국내의 기관별 주요자료 분포 현황은 Table 3과 같다.

**Table 3.** The current status of distributed information by organization

| Classification | Curve & Flood level | GIS layer | Levee cross -section | Boring & Soil test data | Sliding & Piping data |
|---|---|---|---|---|---|
| WAMIS | ○ | - | ○ | - | - |
| RIMGIS | - | ○ | - | - | - |
| River general plan report | ○ | ○ | ○ | - | - |
| River management register | ○ | - | ○ | - | - |
| Geotechnical information DB system | - | ○ | - | ○ | - |
| Working design report | ○ | - | ○ | ○ | ○ |

국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS), 하천관리지리정보시스템(RIMGIS), 하천기본계획보고서 및 하천시설관리대장 등은 홍수량곡선/계획홍수위, GIS Layer, 하천제방단면도 등을 보유하고 있으며, 하천시설관리대장의 경우 하천제방 표준단면에 대한 정확한 제원을 제시하고 있어 매우 유용한 자료이다. 하지만 시추 및 토질시험데이터, 활동 및 파이핑 설계자료 등이 없어 직접적인 설계자료로 활용하는데 큰 어려움이 있다.

반면 한국건설기술연구원(KICT)은 국토지반정보 통합DB시스템을 운용하면서 도로, 하천 등 국가사업에서 취득하는 지반조사정보를 GIS Layer, 시추 및 토질시험데이터 등의 자료를 제공하고 있으며, 하천제방 관련 실시설계보고서의 경우 홍수량곡선/계획홍수위, 하천제방단면도, 시추 및 토질시험 데이터, 활동 및 파이핑 안정해석 자료 등을 제시하고 있다.

이와 같이 국내에서는 하천제방 안전도맵 구축을 위한 각각의 자료가 관할하고 있는 기관별로 분산되어 있기 때문에 각각의 자료를 하천제방의 유지관리 목적으로 활용 시 국외 시스템과 달리 효율성이 크게 떨어지는 문제점이 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 국내 하천제방 안전도맵 평가체계 구축을 위한 1)홍수량곡선/계획홍수위, 2)GIS Layer 및 관련 사진, 3)하천제방단면도, 4)시추 및 토질시험데이터, 5)활동 및 파이핑 안정해석 자료 등을 활용하여 하천제방 활동/파이핑/육안점검 등 안전도맵 평가방법을 체계적으로 제시하고자 한다. 그러기 위해서 먼저 기관별로 분산된 하천제방 설계자료를 통합 정리하는 체계 개선이 필요하다고 판단된다.

## 2.2 하천제방 안전도맵 평가방법

### 2.2.1 개요

하천제방 안전도맵 평가방법은 앞서 언급한 하천제방 안전도 연구 사례를 고려하여 홍수위지속시간에 따른 활동 및 파이핑 평가방법과 하천유지·보수매뉴얼(2012)[8] 등에 기재된 육안점검 결과를 포함하는 안전도맵 평가방법을 제안한다.

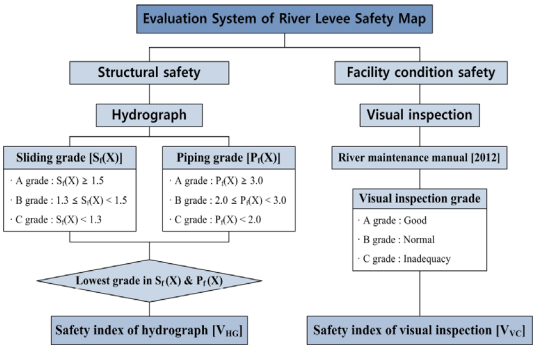


Fig. 2. Evaluation system of river levee safety map

Fig. 2는 하천제방 활동/파이핑/육안점검 등을 고려한 안전도맵 평가체계 개념도를 나타낸다. 하천제방 활동/파이핑/육안점검 안전도맵 평가체계는 설계수위파형의 경우 매년 홍수 시 발생된 수위파형을 토대로 최고수위 지속시간을 변화시켜가면서 평가 대상 하천제방의 활동 및 파이핑 해석을 수행하여 등급을 결정하게 되는데, 활동/파이핑/육안점검 등 각각의 안전도 지표의 등급 기준은 다음 절에서 설명하였다.

### 2.2.2 안전도 평가 지수 도출

안전도 지표는 Fig. 1에서 보듯이 수위파형특성을 고려한 활동 및 파이핑 지표, 육안점검지표 등이 해당되며 모두 A, B, C등급으로 표시된다. 이 때, 등급 구분 기준은 국내 적용 안전율 기준을 B등급 기준으로 하여 A등급의 경우 국내외 최대 안전율, C등급의 경우 최소 안전율 기준을 만족하지 못하는 것으로 정하였다.

본 절에서는 활동 및 파이핑 안전도 지표의 경우 국내외 활동 및 파이핑 안전율 기준을 비교하여 A, B, C 등급의 합리적 경계 값을, 육안점검 안전도 지표의 경우 하천유지·보수매뉴얼(2012)[8]을 참고하여 A, B, C등급을 제시하였다.

(1) 활동 안전율

Table 4 및 Table 5는 각각 국내외 성토 및 절토사면에 대한 활동 안전율 기준을 정리한 표이다. 성토사면의 경우 국내는 1.2~1.5, 일본은 1.1~1.5 등을 적용하고 있으며, 절토사면의 경우 국내는 1.1~2.0, 일본은 1.1~1.5, 미국은 1.0~2.0, 영국은 1.1~1.5 등을 적용하고 있다. 따라서 하천제방 안전도맵 구축을 위한 3단계 활동 등급 기준은 하천설계기준 사면안전율 1.3 기준의 만족여부에 따라 B-C등급으로 나누고, 일본 및 영국의 최대 활동 안전율 1.5 기준을 적용하여 A-B등급으로 나누는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

-A등급 : $F_s \geq 1.5$

-B등급 : $1.3 \leq F_s < 1.5$

-C등급 : $F_s < 1.3$

(2) 파이핑 안전율

Table 6은 국내외 파이핑 안전율 기준을 정리한 표이다. 파이핑 안전율 기준은 국내의 경우 하천제방, 댐, 저수지 등 구조물에 상관없이 2.0, 일본의 경우 1.2~2.0, 미국의 경우 3.0 등을 적용하고 있다. 따라서 3단계 파이핑 등급 기준은 하천설계기준 파이핑 안전율 2.0 기준의 만족여부에 따라 B-C등급으로 나누고, 미국의 최대 파이핑 안전율 3.0 기준을 적용하여 A-B등급으로 나누는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

-A등급 : $F_s \geq 3.0$

-B등급 : $2.0 \leq F_s < 3.0$

-C등급 : $F_s < 2.0$

**Table 4.** The standard for sliding safety factor (fill slope)

| Classification | | Min safety factor | References |
|---|---|---|---|
| Kor | River facility standard | Fs≥1.3 | Normal and flood water level |
| | River design standard | Fs≥2.0 | Vertical collapse (w/o pore pressure) |
| | | Fs≥1.4 | Vertical collapse (with pore pressure) |
| | | Fs≥1.8 | W/O vertical collapse (w/o pore pressure) |
| | | Fs≥1.3 | W/O vertical collapse (with pore pressure) |
| | Road design manual | Fs≥1.2 | Normal (dry season, cut slope) |
| | | Fs≥1.2 | Rainy (rainy season, cut slope) |
| | Road design guideline | Fs≥1.3 | |
| | Geotechnics series | Fs≥1.2 | when water level is falling |
| Jap | Ports&harbors association | Fs≥1.5 | Port facility standard &explanation |
| | Construction Dept | Fs≥1.1~1.3 | Standard planned safety factor |
| | Construction Dept | Fs≥1.3 | Structure foundation design standard |
| | Road lecture | Fs≥1.2~1.3 | Road earthwork, soft ground reinforcement |
| | Soil Engineering Society | Fs≥1.0~1.2 | During temporary load and construction |
| | | Fs≥1.3 | General structure |
| | | Fs≥1.5 | Important structure |
| | Highway design guideline | Fs≥1.25 | Application when joint load starts |
| | | Fs≥1.1 | Temporary stability during construction |

**Table 5.** The standard for sliding safety factor (cut slope)

| Classification | | Min safety factor | References |
|---|---|---|---|
| Kor | Korea Rail Network Authority | Fs≥1.5 | Permanent slope |
| | | Fs≥1.3 | Temporary slope |
| | | Fs≥1.1 | During earthquake |
| | | Fs≥1.3 | During rain |
| | | Fs≥2.0 | Potential damage to people&property |
| | Road design guideline (1976) | Fs≥1.7 | In-situ test Shear strength |
| | | Fs≥1.5 | Uniaxial&triaxial test shear strength |
| | Structure design manual | Fs≥1.3 | |
| USA | FEDERAL REQISTER (1977) | Fs≥1.3 | Upon starting construction (UU Test) |
| | | Fs≥1.5 | When considering seepage (CD Test) |
| | | Fs≥1.0 | When considering earthquake |
| | NAVFAC-DM 7.1 | Fs≥1.5 | For a long-term load |
| | | Fs≥2.0 | Structure foundation |
| | | Fs≥1.25~1.3 | Temporary stability and construction |
| | | Fs≥1.15~1.2 | For seismic load |
| UK | NATIONAL COAL BOARD(1970) | 1.25≤Fs≤1.5 | Peak Shear Stress(UU Test) |
| | | 1.15≤Fs≤1.35 | Residual Shear stress(CD Test) |
| | | 1.15≤Fs≤1.35 | Saturated sandy sil (C=0) |
| | | 1.1≤Fs≤1.2 | CD Test, C=0 |
| Jap | Ports&harbors association | Fs≥1.3 | Port facility standard &explanation |
| | Road authority | Fs≥1.5 | Road design manual |
| | Constriction Dept | Fs≥1.1~1.3 | Standard planned safety factor |

(3) 육안점검

하천제방 육안점검은 하천시설이 본래의 기능과 상태를 유지할 수 있도록 하기 위하여 수행하는 순찰 및 점검 등이 포함된다. 하천제방 안전도맵 평가체계에서 육안점검 안전도 지표의 등급 기준은 하천점검자가 수행해야할 점검 요령을 서술하고 있는 하천유지·보수매뉴얼(2012)[8] 상의 안전점검등급(A등급 양호, B등급 보통, C등급 미흡)을 기준으로 하였다. 자세한 등급 기준은 하천유지·보수매뉴얼(2012)[8]을 참고하기 바란다.

**Table 6.** The standard for piping safety factor

| Classification | | Safety factor |
|---|---|---|
| Kor | River design standard | Fs = 2.0 |
| | Dam design standard | Fs = 2.0 |
| | Structure foundation design standard | Fs = 2.0 |
| Jap | Subway Technology Council | Fs = 1.2~2.0 |
| | Metropolitan highway authority | Fs = 1.5 |
| | River bank design guideline | i < 0.5 (i is the maximum value for hydraulic gradient of foundation at the end of the slope in protected low land) |
| | | G > W<br>G : Weight of covering soil layer<br>W : Uplift pressure at the bottom of covering soil layer (Not applicable when covering soil layer is 3m or more or cohesive soil layer) |
| USA | NAVFAC. "Design Manual 7.1" | Fs = 3.0 |

## 3. 하천제방 안전도맵 시범평가

### 3.1 시범구간 선정

#### 3.1.1 시범구간 선정 기준

하천제방 안전도맵 시범평가를 위한 시범구간은 하천제방 관련 설계자료 및 도면 확보여부, 활동 및 파이핑 안정해석에 필요한 수위파형 제시를 위한 수위관측소 존재 유무, 댐과 같이 홍수 중 방류유량 조절 등의 유량 정보 등이 필요하다. 따라서 1)국토관리지방청 보유 설계자료 유무, 2)최소 5~10개소 연속 제방 유무, 3)수치해석 시 필요한 홍수유량의 정확성, 4)수위파형 산정을 위한 수위관측소 부근, 5)제방고 3단계 구분(3~4m, 5~9m, 9m 이상), 6)3개 이상 지층(SP, GP/SM, GM/CL/ML) 등과 같이 시범구간 선정기준을 정하였다.

시범구간 선정기준 1), 2), 3), 4)는 안정성 해석을 위한 기초자료의 확보 및 홍수유량의 정확성 등을 고려하였으며, 5)은 안정해석 시 제방고에 따른 활동 및 파이핑 변화특성을, 6)은 파이핑 발생 유무 등을 고려하였다.

#### 3.1.2 선정된 시범구간 현황

하천제방 안전도맵 시범평가를 위한 시범구간을 선정하기 위해 ○○국토관리청과 협의하였으며, 설계자료가 잘 정리 및 보관되어 있는 남강, 황강, 감천 등 3개 하천을 추천받았다.

이 중 남강은 1)안정해석을 위한 설계자료 유무, 2)5개 이상 연속된 제방 존재, 3)남강댐에 의한 홍수유량의 정확성 확보, 4)정암 수위관측소에 의한 정확한 수위파형 확보 등에서 황강 및 감천에 비해 상대적으로 우수하여 시범구간으로 최종 선정하였다.

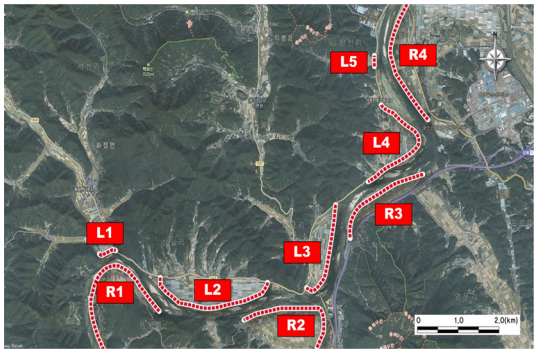


Fig. 3. Test bed section - Nam river

하천제방 안전도맵 시범평가를 위해 선정된 시범구간의 대상 제방은 Fig. 3 및 Table 7에서 보듯이 L1, L2, L3, L4, L5(이상 좌안 5개소), R1, R2, R3, R4(이상 우안 4개소) 등 9개소 제방이다. 본 논문에서는 제방고가 상대적으로 높은 우안에 해당하는 4개소 제방(R1, R2, R3, R4)에 대해서 우선적으로 시범평가를 수행하였다.

Table 7. Test bed section - Nam river

| Left levee | | Right levee | |
|---|---|---|---|
| Levee name | Levee height | Levee name | Levee height |
| L1 | 3~4m | R1 | 4~6m |
| L2 | 4~5m | R2 | 4~5m |
| L3 | 4~5m | R3 | 7~8m |
| L4 | 6~7m | R4 | 7~8m |
| L5 | 5~6m | - | - |

### 3.2 시범구간 평가

#### 3.2.1 개요

본 절에서는 제안된 하천제방 안전도맵 평가체계 도출 및 적합성을 평가하고자 수치해석을 활용하여 홍수위 지속시간 변화(12, 24, 36, 48, 120시간)에 따른 시범구간의 제방별(제방고 3~8m) 활동 및 파이핑 안전도 특성을 평가하였다. 하천제방의 안전도 평가는 설정된 제방 모델 및 설계 외력을 고려한 침투해석을 토대로 활동 및 파이핑에 대한 수치를 산출하는 방식으로 수행하였다. 활동의 경우 Bishop 방법에 의한 1)최대침윤특성을 고려한 제내지 활동, 2)수위급강하에 의한 제외지 활동 등을, 파이핑의 경우 한계동수경사법 및 한계유속법에 의한 파이핑 안전율을 평가하였다.

#### 3.2.2 수치해석 방법

(1) 사용 프로그램

수치해석은 유한 요소법을 이용한 침투 해석용(Finite Element Seepage Analysis)으로 가장 널리 사용되고 있는 캐나다 GEO-SLOPE(2007) 사에서 개발한 SEEP/W 및 SLOPE/W 프로그램을 사용하였다. 본 프로그램은 정상류 상태와 비정상류 상태의 해석뿐만 아니라 포화토 및 불포화토의 침투해석, 2차원 및 축대칭 문제, 피압대수층에서의 흐름, 그리고 비등방성 투수층에 대한 침투해석이 가능한 특징이 있다.

(2) 하천제방 지반 특성

침투해석을 위한 시범구간의 9개소 제방제원 및 지반의 물성은 1)하천시설관리대장, 2)하천정비기본계획, 3)제방별 실시설계보고서의 설계자료, 4)현장시료조사에 의한 채취시료의 공학적 특성, 5)수위파형특성 등을 참고하여 적용하였다.

이때 함수특성곡선(SWRC, Soil Water Retention Curve)의 경우 Van Genuchten(1980)[9]의 방법을 사용하였으며, 각 제방의 함수특성곡선에 적용되는 Van Genuchten(1980)[9] 모델의 곡선맞춤계수들은 하천관리대장과 지반조사 자료에 명시된 흙의 종류에 따라 Carsel&Parrich(1988)[10]의 침투해석 시 불포화토 특성을 참고하여 결정하였다.

(3) 수위파형 선정

하천제방의 침투해석을 수행하기 위해서는 적절한 설계수위파형을 결정해야 하는데, 국내 설계실무에서 주로 사용하는 설계수위파형은 최고 홍수위지속시간이 짧아 설계 시 안전율이 과다 산정되는 문제점이 있다.

본 연구에서는 설계수위파형 작성 시 일본의 하천제방설계지침(Ministry of Construction, 2000)[11]에서 제시하고 있는 방법을 보완하여 국내 여건에 맞는 설계 수위파형을 제시한 Seo&Yoon(2012)[12]의 산정개념을 이용하였다.

감수부 경사, 홍수위지속시간, 합성홍수파 면적 등을 고려하여 제시된 곡선 결정방법에 따라 평수위지속 20시간, 수위상승 128.38시간, 수위급강하 119.4시간, 평수위지속 10시간 등으로 산정하였다. 또한 홍수위지속시간에 따른 활동 및 파이핑에 대한 안전성 변화를 판단하기 위해 홍수위지속시간(12, 24, 36, 48, 120시간-각각 case 1~5)을 변수로 하였다. Fig. 4는 시범구간 우안에 해당하는 4개소 제방(R1, R2, R3, R4)의 case별 설계수위파형을 나타낸다.

(5) 제방 단면 및 요소망 크기

Fig. 5는 시범구간 우안에 해당하는 4개소 제방의 제방단면(해석모델)이다. 이때 제방단면은 하천시설관리대장과 실측량 자료를 이용하였다.

한편, 비정상류해석과 같이 시간에 따라 침투수의 흐름현상이 달라지는 경우에는 요소망의 분할크기가 수치해석 결과에 큰 영향을 미친다. 하천설계기준(2009)[4]

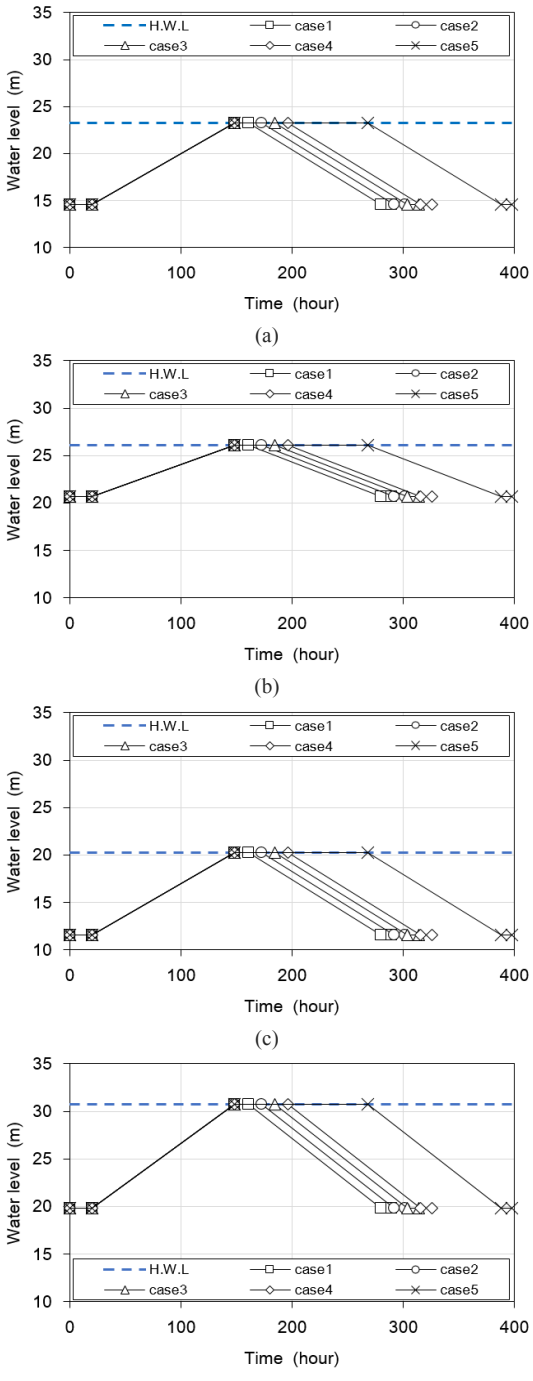


Fig. 4. Design hydrograph used in numerical analysis (a)R1 (b)R2 (c)R3 (d)R4

에서는 제체에 대한 분할요소(요소망)의 최대 크기를 제방 높이의 1/10 이하로 제한 적용하도록 하고 있으며, 이

에 따라 모든 제방의 요소망 크기를 0.5m로 생성하였다.

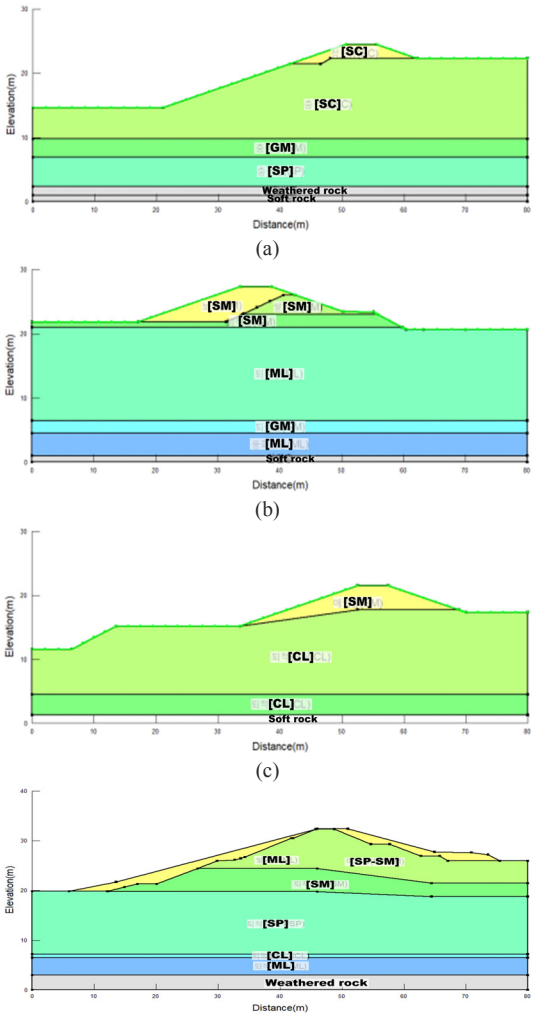


Fig. 5. Levee cross-section used in numerical analysis (a)R1 (b)R2 (c)R3 (d)R4

### 3.3 시범구간 평가 결과

#### 3.3.1 활동 해석

Table 8 및 Table 9는 시범구간 우안에 해당하는 4개소 제방의 제내외지 활동 해석 결과를 정리한 표이며, Fig. 6은 홍수위지속시간에 따른 제내외지 활동 안전율 변화를 도시한 그림이다.

각 제방의 제체재료특성 및 제내외지 비탈면 경사 등에 의해 활동 안전율은 다르게 산정되었으나, 모든 제방이 제내외지 구분 없이 활동 안전율 A등급을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 제외지의 경우 홍수위지속시간이 증가할수록 활동 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 한편, R3의 경우 제외지에서 활동 안전율이 증가하는 부분(case1)을 보이는데 이는 제체의 불포화 특성으로 인해 생긴 것으로 판단된다.

Table 8. Result of numerical analysis - Sliding(landside)

| Levee name | Safety factor (Grade) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | case 1 | case 2 | case 3 | case 4 | case 5 |
| R1 | 3.94 (A) | 3.94 (A) | 3.94 (A) | 3.94 (A) | 3.94 (A) |
| R2 | 2.76 (A) | 2.76 (A) | 2.76 (A) | 2.76 (A) | 2.76 (A) |
| R3 | 2.70 (A) | 2.70 (A) | 2.70 (A) | 2.70 (A) | 2.70 (A) |
| R4 | 3.08 (A) | 3.08 (A) | 3.08 (A) | 3.08 (A) | 3.08 (A) |

Table 9. Result of numerical analysis - Sliding(riverside)

| Levee name | Safety factor (Grade) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | case 1 | case 2 | case 3 | case 4 | case 5 |
| R1 | 2.01 (A) | 2.00 (A) | 1.99 (A) | 1.98 (A) | 1.95 (A) |
| R2 | 2.40 (A) | 2.39 (A) | 2.38 (A) | 2.38 (A) | 2.35 (A) |
| R3 | 1.99 (A) | 2.28 (A) | 2.27 (A) | 2.27 (A) | 2.22 (A) |
| R4 | 1.60 (A) | 1.58 (A) | 1.57 (A) | 1.56 (A) | 1.51 (A) |

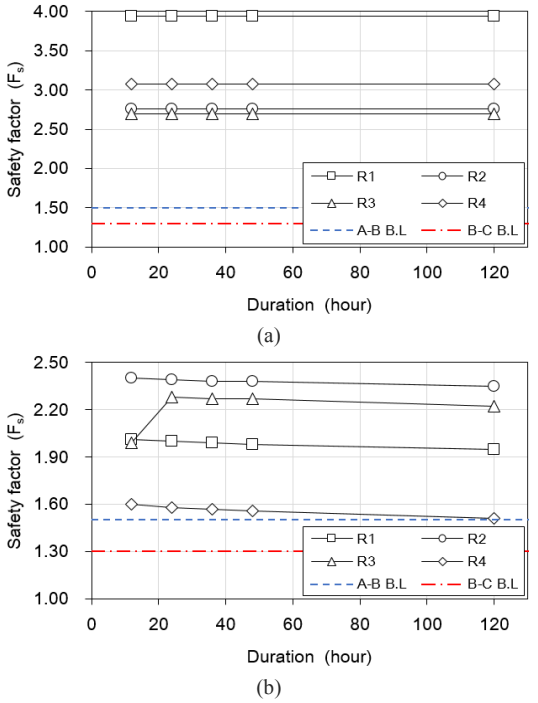


Fig. 6. Result of numerical analysis - Sliding (a) Landside (b) Riverside

### 3.3.2 파이핑 해석 결과

Table 10은 시범구간 하천제방의 파이핑 해석 결과를 정리한 표이며, Fig. 7은 홍수위지속시간에 따른 파이핑 안전율 변화를 도시한 그림이다.

R1, R3, R4 등은 각 case에서 파이핑 안전율이 A등급 기준안전율 보다 현격히 크게 산정되어 홍수위지속시간에 관계없이 A등급을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 R2의 경우 홍수위지속시간이 증가할수록 파이핑 안전율 및 등급이 감소하는 경향을 보이며, case5에서 파이핑 등급이 C등급으로 산정되었다.

본 연구의 활동 및 파이핑 해석 결과는 홍수위지속시간이 하천제방의 안정성 평가에 영향을 미치는 인자임을 발표한 KICT(2015)[3], Kwon(2007)[13] 등의 연구결과에 부합하는 것으로 나타났다.

Table 10. Result of numerical analysis - Piping

| Levee name | Safety factor (Grade) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | case 1 | case 2 | case 3 | case 4 | case 5 |
| R1 | 11,446 (A) | 11,446 (A) | 11,446 (A) | 11,446 (A) | 11,446 (A) |
| R2 | 16.91 (A) | 13.36 (A) | 10.65 (A) | 7.61 (A) | 0.56 (C) |
| R3 | 11,830 (A) | 11,830 (A) | 11,830 (A) | 11,830 (A) | 11,830 (A) |
| R4 | 11,830 (A) | 11,830 (A) | 11,830 (A) | 11,830 (A) | 11,830 (A) |

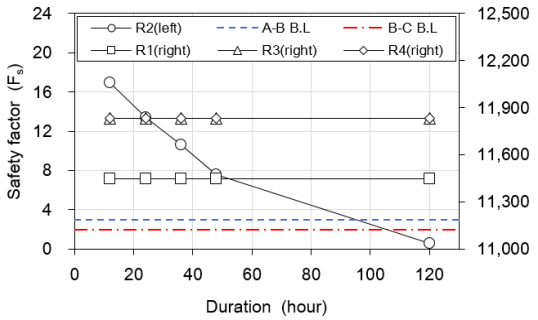


Fig. 7. Result of numerical analysis - Piping

## 4. 결론

본 연구는 하천제방 안전도맵 평가체계 구축을 위한 기획연구로서 국내외 문헌 및 자료 조사, 관련 안전도 지표의 정량화된 평가지수 제시, 시범구간에 대한 평가 등을 수행하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 국내의 경우 기후/홍수사상 변화 및 하천제방의 노후화에 따른 관공작용(파이핑 관련)으로 붕괴되는 현상이 발생되는 것으로 파악되고 있기 때문에 노후된 하천제방의 설계 재보강이 요구되며, 현 하천제방의 효율적인 유지관리가 필요하다.

(2) 본 연구에서는 활동, 파이핑, 육안점검 등 하천제방 안전도맵 평가체계를 제안하였으며, 국내외 문헌연구를 통해 각각의 안전도지표 기준(A, B, C 등 3등급 기준) 및 합리적인 경계값을 제시하였다.

(3) 4개 대표단면에 대한 하천제방 안전도맵 평가체계 시범평가를 수행하였다. 활동의 경우 제외지에서 홍수위지속시간이 증가할수록 활동 안전율이 감소하는 경향을, 파이핑의 경우 R2에서 홍수위지속시간이 증가할수록 파이핑 안전율이 급격히 감소하는 경향을 확인하였다.

(4) 하천제방 안전도맵 평가체계의 수재해 대응성과 유지관리효율을 극대화하기 위해서 추후 세굴, 제체재료 등 안전도 지표의 추가, 취약구간 파악에 따른 보수·보강공법 도출, 수재해 방지 장비 구축 방안 정립 등의 개선된 추가 연구를 수행할 필요성이 있다.

(5) 하천제방 안전도맵 평가체계 구축을 위해서는 분산되어 제공되는 하천제방 자료의 표준화 및 통합관리가 선행되어야 하며, 각 지방청과의 지속적인 의견수렴을 통해 하천관리자의 실질적인 운영환경이나 여건을 파악할 필요가 있다고 판단된다.

## References

[1] S. S. Lee, “Application Method of Local Government Adaptation Policy for Climate Change according to IPCC 5th Assessment Report”, *Korea Research Institute on Climate Change*, Korea, 2013.

[2] IPCC 4th Assessment Report, “Climate Change 2007: Synthesis Report”, *Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva*, Switzerland, pp. 1-104, 2007.

[3] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, “Development of Disaster Risk Management Support System based on Multiple Scenarios: 2nd Extra Report”, *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology*, Korea, pp. 217-263, 2015.

[4] Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, “River Design Criteria”, Ministry of Land,

Transportation and Maritime Affairs, Korea, 2009.

[5] Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, “River Construction Design Practice Tips”, *Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs*, Korea, 2009.

[6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Structure Foundation Design Criteria”, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, Korea, 2015.

[7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Development of advanced Technologies for Levees”, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, Korea, 2004.

[8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “River Maintenance Manual”, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, Korea, 2012.

[9] M. Th. Van Genuchten, “A Closed-Form Equation for Predicting The Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”, *Soil science society of America journal*, vol. 44, no. 5, pp. 892-898, 1980.
DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

[10] R. F. Carsel, and R. S. Parrish, “Developing Joint Probability Distribution of Soil Water Retention Characteristics”, *Water Resource Research*, vol. 24, no. 5, pp. 755-769, 1988.
DOI: https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755

[11] Ministry of Construction, “Design Guidlines for River Levees”, Ministry of Construction, 2000.

[12] L. Seo, and K. S. Yoon, “Estimation of Design Flood-Hydrograph for Unsteady Seepage Analysis Through River Levees”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 12, no. 6, pp. 275-286, 2012.
DOI: https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.6.275

[13] K. K. Kwon, “An Improved Design Method of Levee Culvert Using 3D Seepage Analysis”, Ph D. Dissertation, Kyunghee Univ., Korea, 2007.

**김 진 만**(Jin-Man Kim) **[정회원]**

- 1989년 2월 : 경희대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1990년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구위원

<관심분야>
토질 및 기초, 하천제방, 보강토 옹벽

**문 인 종**(In-Jong Moon) **[정회원]**

- 2012년 2월 : 명지대학교 공과대학 토목환경공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 명지대학교 공과대학 토목환경공학화 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원

<관심분야>
토질 및 기초, 하천제방, 옹벽