

하천제방의 유지관리 효율성 및 재해 대응성 향상을 위한 하천제방 안전도맵 평가체계 연구

김진만, 문인종*, 윤광석, 김수영
한국건설기술연구원

A Study on Evaluation System of River Levee Safety Map to Improve Maintenance Efficiency and Disaster Responsiveness

Jin-Man Kim, In-Jong Moon*, Kwang-Seok Yoon, Soo-Young Kim
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, KICT

요약 최근 기후 및 홍수사상이 변화함에 따라 하천제방 붕괴 및 범람으로 인한 수재해 위험성이 증가하고 있는 추세이기 때문에 각종 수재해 시나리오에 대응 가능한 하천제방 유지관리 기술을 고도화할 필요가 있다. 본 논문에서는 하천제방의 효율적인 유지관리 및 재해 대응성 향상을 위하여 하천제방 안정성에 영향을 주는 주요 요소별 안전도맵 평가체계를 제안하고자 한다. 하천제방 안전도맵은 활동, 파이핑, 육안점검, 세굴, 제체재료 등의 안전도 지표를 GIS맵 상에 지도형태로 표출함으로써 육안으로 신속하게 위험지역을 파악할 수 있고, 피해발생 이후 피해복구를 실시하는 현 국내 제방관리 수준에서 벗어나 선제적인 대응을 통해 하천제방 유지관리의 효율성을 극대화 할 수 있다. 본 논문은 기 제안된 활동, 파이핑, 육안점검 등을 포함한 하천제방 안전도맵 평가체계에 세굴, 제체재료 등을 추가 및 보완한 후속논문으로서, 1) 문헌 및 자료 조사를 통한 세굴 및 제체재료 3등급 기준을 제시하였으며, 시범평가를 통해 2) 남강지역 좌안 5개소의 홍수위지속시간에 따른 활동 및 파이핑 특성, 3) 남강지역 좌/우안 9개소의 세굴 및 제체재료 특성 등을 평가하였다. 본 논문에서 제안하는 하천제방 안전도맵 평가체계는 향후 하천관리자 행동요령, 보수·보강공법 선정, 소요 예산 산정 등을 연계한 연구가 진행된다면 보다 현실적이고, 활용성 높은 연구가 될 것으로 판단된다.

Abstract Owing to the changing climate and recent flood events, flood damage caused by river levee collapse and overflow is on the rise in Korea, making it necessary to enhance river levee maintenance technologies to deal with various flood damage scenarios. This paper proposes the evaluation system of a river-levee safety map to improve maintenance efficiency and disaster responsiveness. A river-levee safety map, indicating sliding, piping, visual inspection, scouring, and safety index of a levee fill material on a GIS map will enable the dangerous zone to be identified visually and the development of proactive measures to deal with it. This will maximize the river-levee maintenance efficiency, which is a break from traditional practice in that restoration measures are taken only after the damage has occurred. This study includes scouring and levee fill material in addition to previously-proposed sliding, piping and visual inspections. The research activities conducted in the study include 1) categorization of scouring and levee fill material based on document and data examination, 2) evaluation of sliding and piping at 5 locations on the left levee in the Nam river according to the duration time of the flood water level, and 3) evaluation of the characteristics of scouring and levee fill material at 9 locations on the left/right levee in the Nam River. The river levee safety map proposed in this study would be more useful and practical but further study on the manual for river management organization, repair and reinforcement methods, and budget is required.

Keywords : Flood damage, River levee safety map, Scouring, Levee fill material, Safety index

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(18SCIP-B065985-06)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : In-Jong Moon(KICT)

Tel: +82-31-9100-761 email: mooninjong@kict.re.kr

Received June 26, 2018

Revised (1st July 30, 2018, 2nd August 8, 2018)

Accepted September 7, 2018

Published September 30, 2018

1. 서론

IPCC(2007)[1]는 기후변화 시나리오(RCP8.5)를 근거로 우리나라의 기후 및 홍수사상은 아열대 기후구로 변화될 것으로 전망하고 있으며, 가까운 미래에 우리나라의 하천유역은 하천제방 붕괴 및 범람으로 인한 인명 및 재산피해가 발생할 가능성이 클 것으로 예상된다. 따라서 미래 기후 및 홍수사상 변화에 대응하기 위해서는 하천제방 유지관리 기술 고도화 및 재해 대응성 향상에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Kim&Moon(2017)[2]은 하천제방 유지관리 기술 고도화 및 재해 대응성 향상을 위하여 활동 및 파이핑, 육안점검 등의 안전도 지표를 포함한 하천제방 안전도맵 평가체계를 제안한 바 있다. 본 논문은 Kim&Moon(2017)이 제안한 하천제방 안전도맵 평가체계를 보완한 후속 논문으로서, 네덜란드 DAM 시스템, 미국 RVAT 시스템, 일본 하천정책 등 하천제방 유지관리 기술 고도화와 관련된 국내외 연구동향은 Kim&Moon(2017)에서 이미 소개하고 있다.

한편, KICT(2004)[3]는 하천제방 붕괴 사례 758건을 분석하였으며, 하천제방 붕괴 원인은 누수에 의한 침식 300건(39.6%), 월류에 의한 세굴 및 침식 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%) 등의 순으로 나타난 것으로 보고하고 있다. 하천제방 붕괴 사례를 참고해 보았을 경우 활동 및 파이핑, 육안점검, 세굴, 제체재료 등이 하천제방 안전도를 판단하는데 중요한 지표라고 할 수 있다. 그러나 Kim&Moon(2017)은 세굴 및 제체재료 등의 안전도 지표를 포함하지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 이미 제안된 활동 및 파이핑, 육안점검 등의 안전도 지표 이외에 세굴 및 제체재료 등의 안전도 지표를 추가한 보완된 하천제방 안전도맵 평가체계를 제시하고자 하였다. 이를 위해 세굴 및 제체재료 안전도 지표에 대하여 1)문헌 및 자료 조사, 2)안전도 지표의 정량화된 평가 등급 기준 제시, 3)좌/우안 9개소에 대한 시범평가 등을 수행하였으며, 또한 시범평가의 경우 Kim&Moon(2017)에서 수행하지 못했던 좌안 5개소에 대한 활동 및 파이핑 평가를 추가 수행하였다.

2. 하천제방 안전도맵 평가체계

2.1 개요

하천제방 안전도맵은 활동, 파이핑, 육안점검 등 하천제방 안전도 지표를 GIS맵 상에 지도형태로 표출하여 하천제방의 안전도를 쉽게 판단하고, 관련 안전도 지표에 문제가 있을 시 보수·보강법 및 소요예산을 결정하는 등 국가 및 지방하천 관리기관 또는 하천관리자의 하천 유지관리 효율을 극대화시키는 개념이다. 따라서 하천제방 안전도 지표를 평가하기 위해서는 관련 자료 및 기준이 명확하고 일관성이 있어야 한다. 하천제방 안전도맵의 개념 및 안전도 지표와 관련된 자료 및 기준에 대한 자세한 설명은 Kim&Moon(2017)을 참고하기 바란다.

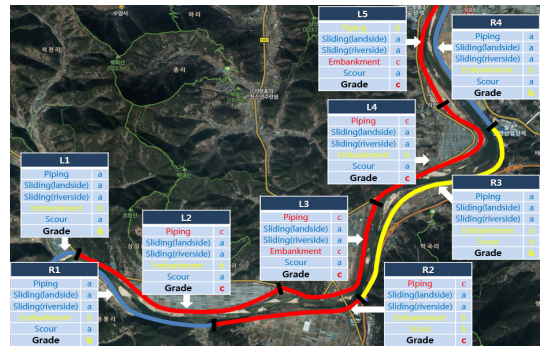


Fig. 1. Concept of river levee safety map

Table 1. Evaluation system of river levee safety map

Index	Grade a	Grade b	Grade c
Sliding	$S_f \geq 1.5$	$1.3 \leq S_f < 1.5$	$S_f < 1.3$
Piping	$P_f \geq 3.0$	$2.0 \leq P_f < 3.0$	$P_f < 2.0$
Visual inspection	Good	Fair	Poor
Scour (m/sec)	$v_s < 1.0$	$1.0 \leq v_s < 3.0$	$v_s \geq 3.0$
Levee fill material	GC, SC, CL, CH	GM, SM, ML, MH	GW, GP, SW, SP

본 논문에서는 Fig. 1 및 Table 1에서 보듯이 Kim&Moon(2017)에서 제시한 활동, 파이핑, 육안점검 외에 제체재료, 세굴 등의 안전도 지표를 추가하여 총 5가지의 안전도 지표를 포함한 하천제방 안전도맵 평가체계를 제안하고자 한다.

2.2 하천제방 안전도 평가 지표

2.2.1 제체재료

2.1절에서 언급하였듯이 활동, 파이프, 육안점검 등의 안전도 지표에 대한 등급 기준은 Kim&Moon (2017)에서 자세하게 설명하였으며, 본 절에서는 제체재료 및 세굴 등의 안전도 지표에 대한 등급 기준을 설명하였다.

하천제방의 안전을 위해서는 양질의 제체재료를 사용하는 것이 중요하며, 국내의 경우 하천설계기준 및 해설(2009)[4]은 제체재료의 투수특성이 투수계수(k) $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이하인 것이 적당하며, 통일분류법 상 GM, GC, SM, SC, ML, CL, CH 등의 흙을 양질의 제체재료로서 권장하고 있다. 이러한 하천설계기준 및 해설(2009)은 일본의 제체재료 품질기준 및 미국의 NAVFAC DM 등을 참조하여 사용하고 있다.

일본의 복해도 불량토 대책 매뉴얼(1985)[5]은 투수계수(k)가 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 미만이며, 불투수성 및 건조시 크랙 방지를 위하여 세립분 함량 15% 이상, 50% 이하 등을 만족하는 흙을 제체재료로서 적합한 흙으로 제시하고 있으며, 미육군공병단(U.S. Army Corps of Engineers) (1986)[6]은 제체 누수(파이핑) 및 균열에 대한 저항성에 따라 Fig. 2 및 Table 2와 같이 흙을 3등급으로 분류하였다. 이에 따라 세립분이 거의 없는 GW, GP, SW, SP 등은 제체재료로서 부적합한 흙으로 분류할 수 있다.

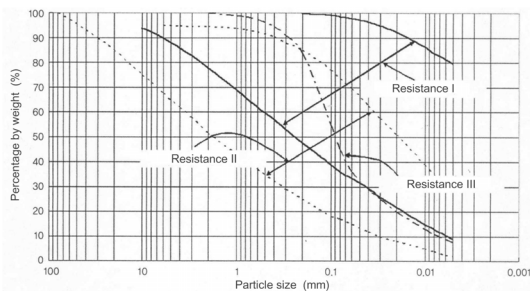


Fig. 2. Particle size distribution curve for piping resistance of levee fill material(USACE, 1986)

Table 2. Classification standard according to piping and cracking resistance(USACE, 1986)

Classification		USCS
I	Piping	◦ CL, CH (PI > 15) ◦ SC (well graded, PI > 15)
	Cracking	◦ CH ($D_{50} < 0.02 \text{mm}$, PI > 20)

II	Piping	◦ CL, ML (PI < 15) ◦ SC, GC (well graded, 7 < PI < 15)
	Cracking	◦ GC, SC, SM, SP ($D_{50} > 0.15 \text{mm}$)
III	Piping	◦ SP, SM, ML (PI < 7)
	Cracking	◦ CL, SM (PI < 20, $0.15 < D_{50} < 0.02 \text{mm}$)

2.2.2 세굴

하천제방은 제방 앞비탈(제외지)에서 유수에 의한 세굴 및 침식이 발생 가능하며, 특히 하천의 수충부에 해당 하는 만곡부에서 세굴 및 침식현상이 많이 발생한다. 이와 같이 세굴에 의한 제방 붕괴 위험은 물의 흐름과 관계가 있기 때문에 하천 유속은 세굴을 일으키는 가장 큰 요인이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 세굴 안전도 지표를 하천 유속을 통해 등급을 분류하고자 하였다.

Table 3. Scour fragility of river levee depending on river velocity and critical tractive velocity of revetment(MLTM, 2016)

Classification		Velocity (m/sec)	
levee	rapid stream	3.0	
	semi-rapid stream	2.0~3.0	
	semi-slow stream	1.0~2.0	
	slow stream	1.0	
Revetment	vegetation	grass	2.0
	sheet	Geotextile	3.0
		block mat	4.0
	wood	wooden grid	4.0
		wooden block	4.0
		pile fence	4.0
	stone	dry riprap	5.0
		wet riprap	7.0
	gabion	vegetation net	5.0
		gabion mat	5.0
	concrete	porous	8.0
		link block	5.0
environment block		8.0	

하천공사설계실무요령(2016)[7]은 Table 3에서 보듯이 하천 평균유속을 기준으로 급류부, 준급류부, 준완류부, 완류부 등 4단계 세굴 취약구간을 제시하였으며, 각각의 호안공법에 따른 한계유속 및 적용 조건을 정리하였다.

일본의 JICE(2007)[8]은 제방 및 호안 설계 시 적용하는 하천의 평균유속, 대표유속 산정식을 제시하고 있

으며, 하천공사설계실무요령(2016)은 이를 준용하고 있다.

따라서 하천제방 안전도맵 구축을 위한 세굴 안전도 지표는 국내 하천공사설계실무요령(2016)과 일본 JICE(2007) 기준을 적용하였으며, Table 1에서 보듯이 하천 유속에 따라 a등급($v < 1.0\text{m/sec}$), b등급($1.0 \leq v < 3.0\text{m/sec}$), c등급($v \geq 3.0\text{m/sec}$)으로 정의하였다. a등급은 완류부 조건, b등급은 준급류부 및 준완류부 조건, c등급은 급류부 조건 등을 각각 적용하였다.

3. 하천제방 안전도맵 시범평가

3.1 시범평가 구간 및 범위

3.1.1 시범평가 구간

본 논문은 활동, 파이핑, 육안점검 등의 안전도 지표를 통한 하천제방 안전도맵 평가체계를 제시했던 Kim&Moon(2017)의 후속논문으로서, 앞서 설명하였듯이 제체재료, 세굴 등의 안전도 지표를 추가하여 총 5가지 안전도 지표를 포함한 하천제방 안전도맵 평가체계를 제시하였다.

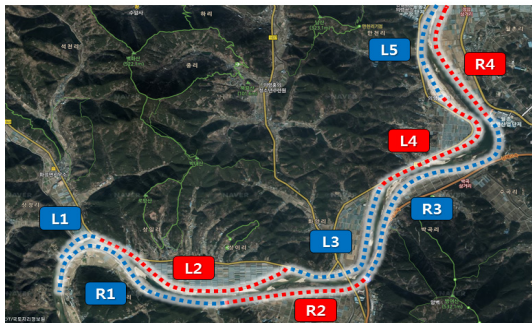


Fig. 3. Test bed section - Nam river

Table 4. 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	-	-

추가 및 보완된 하천제방 안전도맵 시범평가를 위해 시범평가 구간 및 대상제방은 Kim&Moon (2017)와 같이 L1, L2, L3, L4, L5(이상 좌안 5개소), R1, R2, R3, R4(이상 우안 4개소) 등 9개소 제방으로 하였다(Fig. 3 및 Table 4 참고). 자세한 시범평가 구간 선정 기준 및 현황에 대한 설명은 Kim&Moon(2017)을 참고하기 바란다.

3.1.2 시범평가 범위

Kim&Moon(2017)은 시범평가 구간 중 제방고가 상대적으로 높은 우안에 해당하는 4개소 제방(R1, R2, R3, R4)의 활동 및 파이핑 안정해석을 통해 시범평가를 수행한 바 있다.

따라서 본 논문에서는 Table 5를 보듯이 1)수위과형에 따른 좌안 5개소 제방(L1, L2, L3, L4, L5) 활동 및 파이핑 안정해석, 2)실시설계보고서와 현장 시료채취 및 실내시험을 통한 시험평가 구간 제방(좌/우안 9개소)의 제체재료 평가, 3)하천기본계획 및 HECRAS 자료를 이용한 시험평가 구간 제방(좌/우안 9개소)의 세굴 안전도 평가 등을 수행하였다.

Table 5. Scope of test evaluation

Safety Index	Object	Advanced Study	This Study
Sliding	Left Levee (L1, L2, L3, L4, L5)	-	○
	Right Levee (R1, R2, R3, R4)	○	-
Piping	Left Levee	-	○
	Right Levee	○	-
Levee Fill Material	Left Levee	-	○
	Right Levee	-	○
Scour	Left Levee	-	○
	Right Levee	-	○

3.2 활동 및 파이핑 시범구간 평가

3.2.1 개요

본 절에서는 Kim&Moon(2017)와 같이 제안된 하천제방 안전도맵 평가체계 도출 및 적합성을 평가하고자 수치해석을 활용하여 홍수위지속시간 변화(12, 24, 36, 48, 120시간)에 따른 시범구간(좌안)의 제방별 활동 및 파이핑 안전도 특성을 평가하였다. 활동의 경우 Bishop 방법을 이용하여 제내지(최대침윤특성 고려) 및 제외지(수위급강하) 활동 안전율을, 파이핑의 경우 한계동수경

사범 및 한계유속법을 이용하여 파이핑 안전율을 평가하였다.

3.2.2 수치해석 방법

수치해석은 유한 요소법을 이용한 침투 해석용(Finite Element Seepage Analysis)으로 널리 사용되고 있는 SEEP/W 및 SLOP/W 프로그램을 사용하였다. 침투해석을 위한 시범평가 구간의 제방 제원 및 지반 물성은 1) 하천시설관리대장, 2)하천정비기본계획, 3)제방별 실시 설계보고서의 설계자료, 4)현장시료조사에 의한 채취시료의 공학적 특성, 5)수위파형특성 등을 참고하였다.

한편, 함수특성곡선(SWCC, Soil-Water Characteristic 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 불포화도 특성을 참고하여 결정하였다.

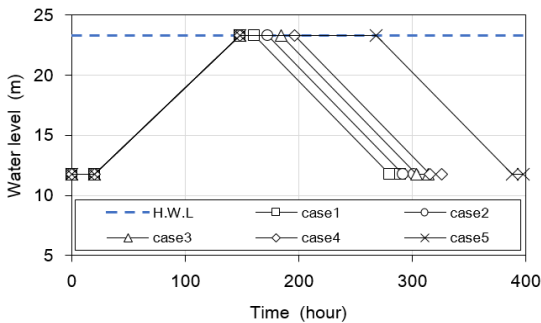


Fig. 4. Design hydrograph used in numerical analysis - L1

침투해석 시 필요한 설계수위파형은 일본의 하천제방 설계지침(2000)[11]에서 제시하고 있는 방법을 보완하여 국내 여건에 맞는 설계 수위파형을 제시한 Seo&Yoon(2012)[12]의 산정개념을 이용하였다. 따라서 시범구간의 평수위 지속 20시간, 수위상승 128.38시간, 수위급강하 119.4시간, 평수위 지속 10시간 등으로 산정되었으며, 홍수위지속시간(12, 24, 36, 48, 120시간-각각 case 1~5)을 변수로 하였다. Fig. 4는 시범평가 구간 중 좌안 L1에 해당하는 case별 설계수위파형을 나타낸다.

3.2.3 시범구간 평가 결과

(1) 활동(Sliding)

Table 6 및 Table 7은 시범평가 구간 하천제방(좌안 5개소)의 제내외지 활동 안전율을 정리한 표이며, Fig. 5는 홍수위지속시간에 따른 제내외지 활동 안전율 변화를 도시한 그림이다.

활동 안전율은 하천제방 체재재료 특성 및 제내외지 비탈면 경사 등에 의해 값이 다르게 산정되었으나, L1의 제외지 case1을 제외한 모든 제방이 제내외지 구분 없이 활동 안전율 a등급을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 제내지의 경우 Kim&Moon(2017)의 연구결과와 같이 홍수위지속시간이 증가할수록 활동 안전율이 감소하는 경향을 보였다.

Table 6. Result of numerical analysis - Sliding(landside)

Levee name	Safety factor (Grade)				
	case1	case2	case3	case4	case5
L1	2.09 (a)	2.09 (a)	2.09 (a)	2.09 (a)	2.09 (a)
L2	2.00 (a)	2.00 (a)	2.00 (a)	2.00 (a)	2.00 (a)
L3	2.22 (a)	2.21 (a)	2.21 (a)	2.21 (a)	2.20 (a)
L4	1.86 (a)	1.84 (a)	1.83 (a)	1.82 (a)	1.81 (a)
L5	2.26 (a)	2.24 (a)	2.22 (a)	2.19 (a)	2.07 (a)

Table 7. Result of numerical analysis - Sliding(riverside)

Levee name	Safety factor (Grade)				
	case1	case2	case3	case4	case5
L1	1.41 (b)	1.52 (a)	1.51 (a)	1.51 (a)	1.52 (a)
L2	2.01 (a)	2.04 (a)	2.04 (a)	2.04 (a)	2.03 (a)
L3	1.78 (a)	1.78 (a)	1.78 (a)	1.78 (a)	1.78 (a)
L4	1.62 (a)	1.62 (a)	1.62 (a)	1.62 (a)	1.62 (a)
L5	1.74 (a)	1.74 (a)	1.74 (a)	1.74 (a)	1.67 (a)

한편, 제외지의 경우 L1과 L2는 홍수위지속 12시간~24시간(case1~case2) 사이에서 활동 안전율이 증가하는 부분이 있는데, 이는 제체의 불포화 특성으로 인해 생긴 것으로 판단된다.

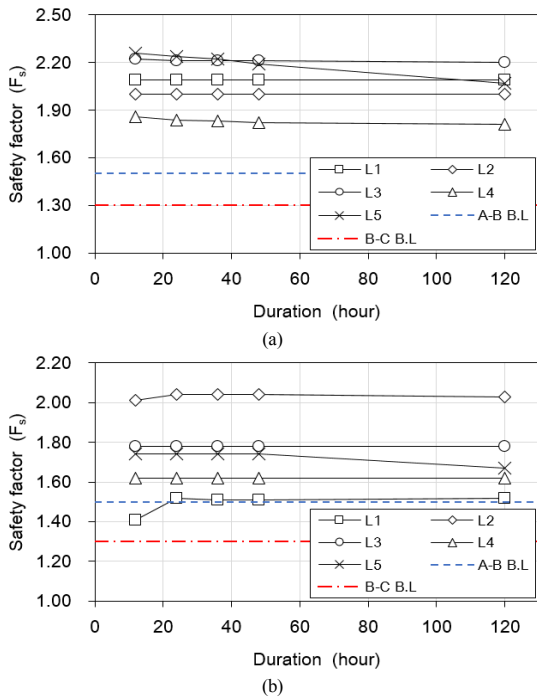


Fig. 5. Result of numerical analysis - Sliding
(a) Landside (b) Riversid

(2) 파이핑(Piping)

Table 8은 시범평가 구간 하천제방(좌안 5개소)의 파이핑 해석 결과를 정리한 표이며, Fig. 6은 홍수위지속시간에 따른 파이핑 안전을 변화를 도시한 그림이다.

L1은 각 case에서 파이핑 안전율이 a등급 기준안전율(3.0 이상) 보다 현격히 크게 산정되어 홍수위지속시간에 관계없이 a등급을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 L1 하상 아래 투수계수가 큰 자갈층이 존재하여 침투수 흐름이 자갈층으로 집중되고, 그로인해 제내지 비탈기슭 또는 지표면에서 상향 침투가 발생되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 L5의 경우 Kim&Moon(2017)의 연구결과와 같이 홍수위지속시간이 증가할수록 파이핑 안전율 및 등급이 감소하는 것으로 나타났다.

한편, L2, L3, L4 등은 파이핑 등급이 c등급으로 나타나 파이핑 안전도가 매우 취약한 것으로 나타났으며, 시범평가 구간의 하천제방 중에서 우안 보다는 좌안이 파이핑에 취약하다는 것을 판단할 수 있다.

본 논문은 KICT(2015)[13], Kwon(2007)[14], Kim&Moon(2017) 등과 같이 활동 및 파이핑의 경우 홍수위지속시간이 하천제방의 안정성 평가에 영향을 미치는 요인임을 확인 시켜주고 있다. 또한 향후 연구에서 활동 및

파이핑 안전도 등급에 따른 하천관리자 행동요령, 보수·보강공법 선정, 소요예산 판단 등을 연계한다면 본 연구의 질적 향상을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8. Result of numerical analysis - Piping

Levee name	Safety factor (Grade)				
	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
L1	9483 (a)	9483 (a)	9483 (a)	9483 (a)	9483 (a)
L2	0.92 (c)	0.75 (c)	0.66 (c)	0.61 (c)	0.52 (c)
L3	1.68 (c)	1.65 (c)	1.63 (c)	1.63 (c)	1.63 (c)
L4	0.59 (c)	0.56 (c)	0.56 (c)	0.55 (c)	0.54 (c)
L5	14.51 (a)	5.46 (a)	2.68 (b)	1.61 (c)	0.49 (c)

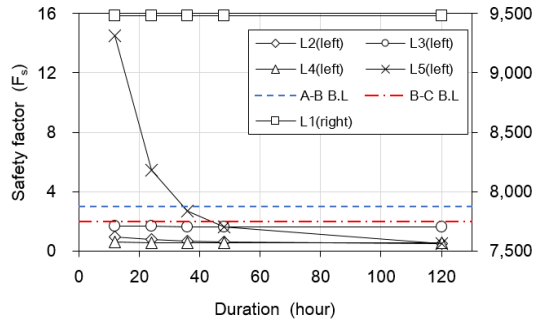


Fig. 6. Result of numerical analysis - Piping

3.3 제체재료 시범구간 평가

3.3.1 개요

본 절에서는 시범구간의 하천제방(좌/우안 9개소)별 실시설계보고서를 검토하여 실시설계에 반영된 하천제방별 제체재료를 정리하였으며, 직접 수행한 현장 시료 채취 및 실내시험 결과와 비교하여 제체재료를 평가하였다.

3.3.2 실시설계 자료 수집 및 현장 시료채취

시범구간의 하천제방에 대한 제체재료를 평가하기 위해 먼저 9개소 제방별 실시설계보고서를 수집하였으며, 제방별 표준단면도 및 대표단면도 상의 지층분포를 분석하여 제체재료로 사용된 흙의 종류를 파악하였다. Fig. 7은 시범구간의 하천제방 중 L1에 대한 대표단면도이다.

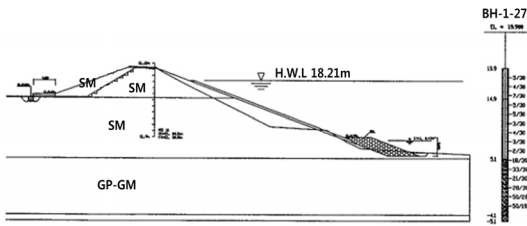


Fig. 7. River levee representative section(L1)(KICT, 2017)

Table 9. Sampling location

Levee name	Cross section	Coordinate	
		Latitude(N)	Longitude(E)
L1	No.16 (BH-1-27)	35-15-54.22	128-12-59.43
L2	No.14 (BH-18)	35-15-20.25	128-14-11.43
L3	No.18 (HYB-3)	35-15-46.88	128-16-26.60
L4	No.33 (DSB-6)	35-17-11.60	128-17-48.11
L5	No.33 (MCB-2)	35-17-55.32	128-17-11.79
R1	No.71 (BH-15)	35-15-45.26	128-13-9.64
R2	No.39 (BH-6)	35-15-15.60	128-15-42.42
R3	No.1 (NB-2)	35-16-33.72	128-17-22.92
R4	No.13 (KB-3)	35-17-44.27	128-17-11.79

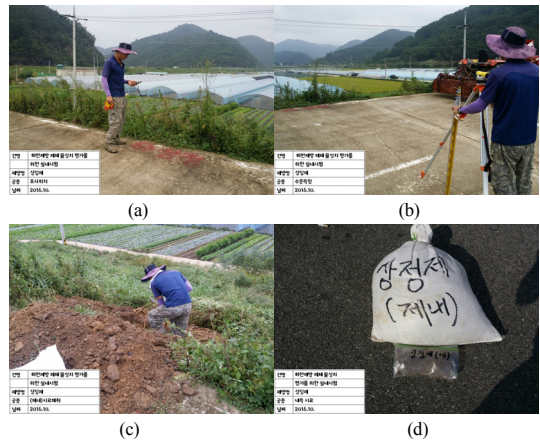


Fig. 9. Sampling
 (a) Check location (b) Survey
 (c) Sampling (d) Samples taken

하천제방별 표준단면도 및 대표단면도를 통해 Table 9와 같이 현장 시료채취 위치를 선정하였으며, Fig. 8은 L1의 시료채취 위치 및 측량을 통한 하천제방 단면도를 나타낸다. 현장 시료채취 전경은 Fig. 9와 같다.

3.3.3 시범구간 평가 결과

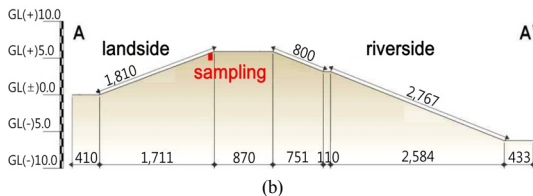
Table 10은 실시설계보고서 상의 실시설계 자료와 현장 시료채취 및 실내시험 등에 따른 시범구간 하천제방별 제체재료의 흙 분류 및 투수계수를 비교한 표이다. 흙 분류(USCS)의 경우 좌안 2개소(L3, L5)와 우안 2개소(R1, R4)를 제외한 나머지 제방(6개소)은 제체재료가 서로 일치하는 것으로 나타났다.

제체재료의 등급은 최근 수행한 현장 시료채취 결과를 반영하였다. 그 결과, 좌안 3개소(L1, L2, L4), 우안 4개소(R1, R2, R3, R4) 등이 b등급으로 양호한 제체재료 특성을 보이는 것으로 평가되었으며, 좌안 2개소(L3, L5)는 c등급인 불량토로 평가되었다. 시범평가 제방들의 제체재료가 a등급이 아닌 b등급이 다수인 이유는 실시설계보고서의 단면도를 검토한 결과, 경계성 및 효율성에 있어서 유리한 하상토를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 양질토를 제체재료로 사용하고 있는 L1, L2, L4 등은 투수계수가 $k = 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이하로서 하천설계기준 및 해설(2009) 및 하천공사설계실무요령(2016)에서 제시하는 기준을 만족하지만, 우안 4개소 및 상대적으로 불량토를 사용하는 L3, L4는 투수계수 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 8. Sampling site and section
 (a) Sampling site (b) Section

Table 10. Comparison of soil classification and coefficient of permeability

Levee name	Working design		Sampling		Grade
	USCS	k (cm/sec)	USCS	k (cm/sec)	
L1	SM	6.80×10^{-4}	SM	8.93×10^{-4}	b
L2	SM	4.22×10^{-4}	SM	7.62×10^{-4}	b
L3	SP	7.35×10^{-3}	SP-SM	4.48×10^{-3}	c
L4	SM	8.46×10^{-3}	SM	9.90×10^{-4}	b
L5	CL	2.71×10^{-5}	SW-SM	4.77×10^{-3}	c
R1	SC	4.75×10^{-4}	SM	1.53×10^{-3}	b
R2	SM	3.22×10^{-3}	SM	1.08×10^{-3}	b
R3	SM	4.00×10^{-5}	SM	1.14×10^{-3}	b
R4	SP-SM	1.75×10^{-4}	SM	2.63×10^{-3}	b

3.4 세굴 시범구간 평가

3.4.1 개요

본 논문에서는 시범구간의 하천제방(좌/우안 9개소)에 대한 세굴 안전도를 평가하기 위하여 하천기본계획에 제시되어 있는 제방 단면별 1차원 수치모의(HEC-RAS) 결과(계획홍수량/홍수위, 지형자료, 평균유속, 평균하상고 등)를 수집 및 정리하였으며, 정리된 결과를 이용하여 대표유속을 도출한 뒤 하천제방 안전도맵 평가체계에 따라 세굴 안전도 지표를 평가하였다.

3.4.2 대표유속 산정 절차 및 방법

일본의 JICE(2007)는 호안 설계 시 만곡부의 세굴 영향을 고려하기 위하여 대표유속 개념을 제시하였다. 대표유속은 하천의 평균유속에 만곡의 영향이나 하상 세굴을 고려할 수 있는 보정계수를 곱하여 산정하도록 함으로써 하천의 중·횡단 특성을 고려할 수 있는 장점이 있다.

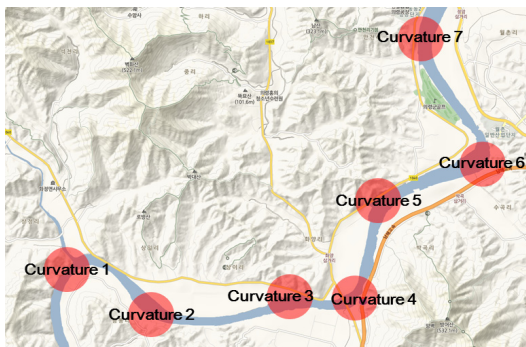


Fig. 10. Curvature location

Table 11. Velocity correction factor of curvature

Curvature	B (m)	r (m)	$B/2r$	α_{curve}
1	238.3	442.0	0.27	1.27
2	321.7	1,543.0	0.10	1.10
3	430.0	447.1	0.48	1.48
4	358.3	392.5	0.46	1.46
5	420.0	957.3	0.22	1.22
6	437.5	346.5	0.63	1.63
7	438.3	966.0	0.23	1.23

시범평가 구간의 하천을 직선부와 만곡부로 구분한 결과, 시범평가 구간에서 만곡부는 Fig. 10에서 보듯이 총 7지점으로 도출되었으며, 하천기본계획에 제시된 횡단측량자료 외에 1:5,000 수치지도와 30m DEM 자료를 함께 활용하여 하천의 만곡형상을 재현하였다. 7지점의 만곡부에 대한 곡률반경(r), 하폭(B) 및 유속보정계수(α_{curve}) 산출 결과는 Table 11과 같다. 이 때 만곡부의 대표유속은 Kim&Yoon (2016)[15]이 수치모의를 통해 사용성을 검증한 하도곡률에 의한 유속보정식 식 (1)을 사용하여 대표유속(V_0)을 산정하였다.

$$V_0 = \alpha_{curve} \cdot V_m \quad (1)$$

여기서, V_m 은 단면의 평균유속(m/sec), α_{curve} 는 곡률에 의한 유속보정계수($=1+B/2r$), B 는 하폭(m), r 은 하도 중심의 곡률반경(m)이다.

3.4.3 시범구간 평가 결과

하천기본계획은 HEC-RAS 모형을 이용하여 측점별 하천단면에 대한 평균유속을 산정하여 제시하고 있다. 따라서 본 논문에서는 시범평가 구간의 측점별 평균유속, 계획홍수량/홍수위 등을 정리하였으며, 각 제방별로 만곡부를 고려하여 대표유속을 Table 12와 같이 산정하였다.

Table 12. Calculation of v_s

Levee name	H_d (m)	v_s (m/sec)	Grade
L1	7.30	3.77	c
L2	7.58	2.44	b
L3	7.10	3.20	c
L4	7.46	3.96	c
L5	8.31	2.22	b

R1	7.44	1.66	b
R2	7.39	3.24	c
R3	6.79	3.96	c
R4	7.96	2.39	b

L1, L3, L4, R2, R3 등과 같이 주로 만곡부 외측에 해당하는 제방은 세굴 안전도 c등급으로 세굴에 취약한 반면에, L2, L5, R1, R4 등과 같이 주로 만곡부 내측에 해당하는 제방은 세굴 안전도 b등급으로 비교적 세굴 안전도가 양호한 것으로 나타났다.

본 논문에서 산정한 제방별 평균 대표유속은 각 제방에 해당하는 측점별 대표유속들의 평균값이기 때문에 앞서 결과 분석한 것과 같이 만곡부 내외측에 따른 세굴 위험성 경향을 일반화하기 어렵기 때문에 향후 만곡부 유출입부 유속 특성을 분석하는 것이 필요하다고 판단된다.

제방은 세굴 및 침식으로부터 보호하기 위해 호안을 설치하기도 한다. 하천설계기준 및 해설(2009)은 1)유속에 의한 방법, 2)소류력에 의한 방법 등으로 호안공법 선정 기준을 분류하고 있기 때문에, 향후 소류력을 고려한 세굴 안전도 지표 등급을 고려할 필요도 있다고 판단된다. 또한 활동 및 파이핑과 같이 안전도 등급에 따른 하천관리자 행동요령, 보수·보강공법 선정, 소요예산 판단 등을 연계한다면 본 연구의 질적 향상을 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 하천제방 안전도맵 평가체계 구축을 위한 Kim&Moon(2017)의 후속논문으로서 1) 남강 좌안 5개소 제방의 시범평가 수행, 2) 국내외 문헌 및 자료 조사, 3) 관련 안전도 지표의 정량화된 등급 기준 제시 등 수행한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문은 1)체재재료 및 세굴 안전도 지표 추가 및 합리적인 안전도 지표 등급(a, b, c 등 3등급) 기준 제시, 2)활동 및 파이핑 시범평가 추가 수행 등 기존 하천제방 안전도맵 평가체계를 보완하여 제시하였다.
- (2) 시범구간의 활동 및 파이핑은 활동의 경우 홍수위 지속시간이 증가할수록 안전율이 감소하는 경향을 보이지만 대부분의 제방(L1 제외)이 a등급으

로, 파이핑의 경우 이와는 달리 L5에서 홍수위 지속시간이 증가할수록 안전율이 c등급으로 감소하는 경향을 나타내어 시범구간의 경우 홍수위 지속시간이 증가함에 따라 파이핑에 취약한 특성을 나타낸다.

- (3) 시범구간 하천제방의 체재재료 안전도는 좌안 3개소(L1, L2, L4), 우안 2개소(R2, R3) 등이 공학적 특성이 일치하며, 대부분의 제방(L3, L5 제외)이 b등급으로 양호한 체재재료 특성을 보이는 것으로 평가되었다.
- (4) HEC-RAS 수치모의 분석 결과, 세굴 안전도는 주로 만곡부 외측에 해당하는 제방이 c등급으로 세굴에 취약한 특성을 보였으며, 향후 세굴 위험도 평가 시 호안특성을 반영한 분석기법 개선이 필요할 것으로 판단된다.
- (5) 하천제방 안전도맵 평가체계의 구축 및 활용을 위해서는 선행연구에서와 같이 1)분산된 하천제방 자료의 표준화 및 통합 관리, 2)지속적·정기적인 현장조사를 통한 데이터 최신화, 3)하천관리자의 실질적인 운영환경 및 여건 등이 필요하다고 판단된다. 또한 향후 안전도에 따른 하천관리자 행동요령, 보수·보강공법 선정, 소요 예산 판단 등을 연계한 연구를 수행한다면 보다 현실적이고, 활용성 높은 연구 성과가 발현될 것으로 기대된다.

References

- [1] IPCC 4th Assessment Report, "Climate Change 2007: Synthesis Report", pp.1-104, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2007.
- [2] J. M. Kim, and I. J. Moon, "Evaluation System of River Levee Safety Map for Improving River Levee Maintenance Technology", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.18, No.12, pp.768-777, 2016.
DOI : <http://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.12.768>
- [3] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, "Development of Disaster Risk Management Support System based on Multiple Scenarios: 3rd Extra Report", pp.313-314, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea, 2016.
- [4] Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, "River Design Criteria", Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea, 2009.
- [5] Civil Engineering Laboratory of Hokkaido Development

Bureau, "Defective Soil Countermeasure Manual in Hokkaido", Japan, 1985.

[6] U.S. Army Corps of Engineers, "Foundation and Earth Structures", NAVFAC Manual, 1986.

[7] Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, "River Construction Design Practice Tips", Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea, 2016.

[8] JICE(Japan Institute of Construction Engineering), Dynamic Design of Revetments, Sankaido, 2007.

[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.

[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.

[11] Ministry of Construction, "Design Guidelines for River Levees", Ministry of Construction, Japan, 2000.

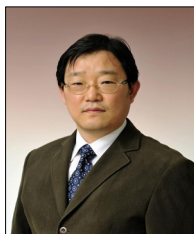
[12] L. Seo, and K. S. Yoon, "Estimation of Design Flood-Hydrograph for Unsteady Seepage Analysis Through River Levees", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.12, No.6, pp.275-286, 2012. DOI : <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.6.275>

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

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

[15] S. Y. Kim and K. S. Yoon, "Study on Applicability of River Revetment Design for Consideration of Velocity Variation due to Meandering and Scour Effect", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.17, No.12, pp.17-25, 2016. DOI : <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.12.17>

김진만(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

문인종(In-Jong Moon) [정회원]



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

<관심분야>

토질 및 기초, 하천제방, 옹벽

윤광석(Kwang Seok Yoon) [정회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험, 환경공학

김수영(Sooyoung Kim) [정회원]



- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구위원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험