

## 배수통문이 설치된 제방의 설계수위파형결정에 관한 수치해석

### Numerical Analysis in Hydrograph Determination for Sluice Gate installed Levee

김진만<sup>1</sup>, 최봉혁<sup>2\*</sup>, 오은호<sup>3</sup>, 조원범<sup>4</sup>

Jin-Man Kim<sup>1</sup>, Bong-Hyuck Choi<sup>2\*</sup>, Eun-Ho Oh<sup>3</sup>, Won-Beom Cho<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Member, Senior Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute KICT, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-7132, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Institute, KICT, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-7132, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Research Fellow, Uno Solution, 70-20, Heiry-maeul-gil, Paju-Si, Gyeonggi-Do, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Researcher, Geotechnical Engineering Research Institute, KICT, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-7132, Republic of Korea

#### ABSTRACT

According to national regulations and its commentary, such as Rivers Design Criteria & Commentary (KWRA, 2009), Foundation Structure Guideline and its Commentary(MLTM, 2014 and KGS, 2009), the integrity evaluation of river levee includes slope stability evaluation of both riverside/protected low-land and piping stability evaluation with respect to foundation and levee body along with water level conditions. In this case the design hydro-graph can be the most important input factor for the integrity evaluation, however it is fact that the national regulations do not provide any proper determination methods regarding hydro-graph. The authors thus executed an integrity evaluation of sluice gate in levee by changing each hydro-graph factor, including rising ordinary water level, lasting flood water level, falling water level, and flood frequency, in order to suggest a determination method of reasonable hydro-graph. As a result, the authors suggested that at least over 57 hours of rising ordinary water level and over 53 hours of lasting flood water level should be considered for the design hydro-graph of sluice gate in levee at Mun-san-jae.

#### 요 지

하천제방 건전도 평가는 하천설계기준·해설(KWRA, 2009) 및 구조물기초 설계기준과 그 해설서(MLTM, 2014와 KGS, 2009) 등 관련 기준 및 기준 해설서에 따라 수위조건 별 기초지반 및 제체를 통한 파이핑 안전성과 제내지 및 제외지 비탈면의 활동안전성 평가를 통해 수행된다. 이때 수위파형은 하천제방 건전도 평가 시 가장 중요한 수위조건 입력자료이나, 국가기준에서 합리적인 결정방법을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 합리적인 수위파형 결정방법 제안을 위하여 평수위 상승, 홍수위 지속, 수위강하, 홍수빈도 등 수위파형 구성인자 변화에 따른 배수통문 설치 제방의 건전도 평가를 수행하였다. 평가결과, 문산배수통문 설치 제방의 설계수위파형은 최대 57 시간 이상의 평수위상승시간 및 53 시간 이상의 홍수위지속시간 등을 반영하여 설정하여야 할 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Levee, Integrity evaluation, Piping, Slope stability, Design Hydro-graph, Flood Event

#### 1. 서 론

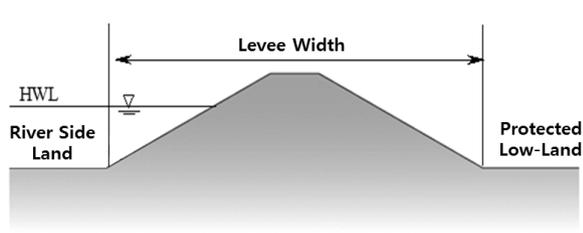
2013년 재해연보(NEMA, 2013)에 따르면 국내 발생재해는 2013년도의 경우 호우 18회, 대설 5회, 강풍·풍랑 4회, 태풍 1회로 총 28회의 재해가 발생하여 호우 및 태풍

Received 23 Mar. 2015, Revised 25 Aug. 2015, Accepted 5 Oct. 2015

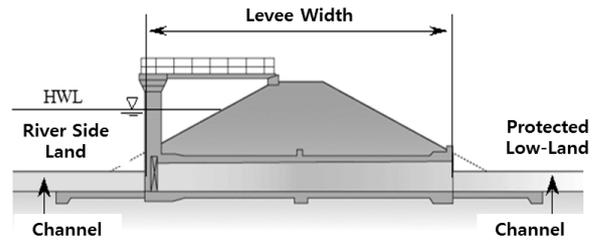
\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0290; Fax: +82-31-910-0235

E-mail address: bhchoi@kict.re.kr (B. Choi)



(a) Typical Levee Section View



(b) Sluice Gate Installed Levee Section View

Fig. 1. Reduced width of the Sluice Gate Installed Levee (Kim et. al., 2004)

등 수재해가 19회로 총 발생재해의 67.8 % 정도로서 주재해인 것으로 보고되었다. 또한, 최근 10년간 재해로 인한 공공시설 피해복구액은 제방·호안·수문 등 하천시설 23.60%, 사면·교량 등 도로시설 14.09%, 사방시설 6.83%, 수리시설 5.70 % 등으로 나타나 하천시설의 피해복구액이 가장 큰 것으로 보고되었다.

이때, 국내 하천시설 중 하천제방의 붕괴원인은 Kim et. al.(2004)에 의해 수행된 연구결과에 따르면, 1987년~2003년까지의 국내 하천제방 붕괴원인 조사결과 침식(39.6%), 월류(38.9%), 제체 불안정(11.5%), 구조물에 의한 파괴(10.0%) 등으로 보고되었다. 이러한 하천제방 붕괴원인은 제체 불안정의 경우 수공학적 원인과 지반공학 적 원인이 직·간접적으로 관련된 1) 제체 및 기초지반의 침하, 2) 침투, 3) 사면안정, 4) 하상토 사용 등에 의한 것으로 알려져 있으며, 구조물에 의한 파괴의 경우 Fig. 1에서 보듯이 하천제방을 관통하여 설치된 배수통문 등에 의한 1) 배수통문 설치에 따른 제방 폭 축소 및 불연속단면 발생, 2) 말뚝기초에 의한 배수통문 하부공동 및 유로 발생 등에 의한 것으로 알려져 있다.

한편, 하천제방 설계 및 건전도평가는 파이핑 및 활동 평가를 수행하게 되어 있으나, 국내 관련 기준인 하천설계 기준·해설(KWRA, 2009)과 구조물 기초 설계기준 및 그 해설서(MLTM, 2014와 KGS, 2009)의 경우 외력인 수위파형의 합리적인 결정방법을 제시하지 못하고 있어 실무 설계 시 계측수위를 고려한 가정 수위파형을 이용하여 부정확한 설계가 이루어지고 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 배수통문이 설치된 제방은 앞서 언급하였듯이 제방 폭의 감소에 따라 파이핑 및 활동에 대한 제방 건전도 평가 시 일반 제방 단면과 다른 결과를 보이기 때문에 합리적인 건전도 평가를 위한 방법의 검토가 필요한 실정이다.

Kim et. al.(2014)은 합리적인 수위파형 제시를 위하여

평수위 상승, 홍수위 지속, 수위강하, 강우빈도 등 개별 수위파형의 변화에 따른 하천제방의 파이핑 및 활동에 대한 제방의 건전도 평가를 통하여 조립토 제방의 합리적인 설계수위파형을 제시한 바 있으나, 배수통문이 설치된 제방 단면을 고려한 연구는 수행된 바 없다.

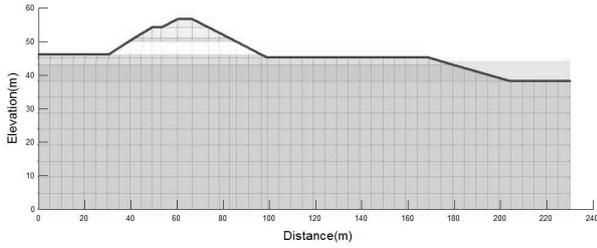
이에, 본 연구에서는 강장고령보 상류 문산제의 배수통문 설치구간을 대상으로 합리적인 수위파형 결정방법 제시를 위하여 평수위 상승, 홍수위 지속, 수위강하, 강우빈도 등 수위파형 영향인자 변화에 따른 안정해석을 수행하여 파이핑 및 활동 등 제방 건전도를 평가하고 이를 이용하여 배수통문 설치 제방의 합리적인 수위파형 결정방안을 제시하고자 한다.

## 2. 하천제방 건전도 평가개요

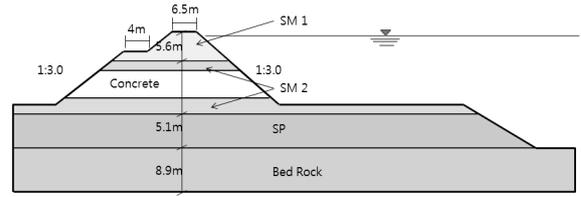
### 2.1 건전도 평가방법

하천제방의 건전도 평가는 수위조건에 따른 침투해석 결과를 이용하여 파이핑 및 활동에 대한 안정성을 평가하는 방식으로 수행된다. 이때, 국내 관련기준은 파이핑에 대한 안정성평가의 경우 한계동수경사법 및 한계유속법 등으로, 활동에 대한 안정성평가의 경우 Bishop의 원호활동법을 적용하여 제내지(최대 침윤 조건) 및 제외지(수위급강하 조건) 활동에 대한 평가를 수행하도록 제시하고 있다.

한편, 침투해석 시 적용 수위조건은 댐과 같이 홍수기간이 긴 미국, 유럽 등의 경우 최고홍수위를 이용한 정상수위조건인 정상침투해석으로 수행하고 있으며, 홍수 지속기간이 짧은 한국 및 일본의 경우 시간에 따라 수위가 변화하는 수위파형을 이용한 비정상수위조건인 비정상침투해석을 적용하여 경제적 설계를 유도하고 있다(Ministry of Construction(Japan), 2000).



(a) The finite element mesh used for the analysis



(b) Geological configuration

Fig. 2. The finite element mesh and geological configuration used for the analysis

Table 1. The Characteristics of Soil for the Analysis (MLTM, 2009)

Material	Unit weight ( $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio ( $\nu$ )	Permeability (cm/sec)	Cohesive (c, kPa)	Internal friction angle ( $\phi$ , °)
Levee materials (SM1)	18	0.33	8.00E-04	10	28
Sedimentary layer (SM2)	17	0.30	2.00E-03	5	25
Sedimentary layer (SP)	19	0.33	8.00E-03	0	30
Culvert (Concrete)	23	0.15	5.00E-03	300	33
Bed rock	24	0.30	5.00E-06	300	33

본 논문에서는 기존 조립토 제방의 설계수위파형결정 검토를 위한 Kim et. al.(2014)의 연구와 동일하게 “한 요소체적에 유입흐름율과 유출흐름율과의 차이가 일정 시간 동안의 체적 함수량의 변화와 같다”고 가정한 식 (1)의 비정상 포화해석 모델을 이용하여 침투해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, H : 전수두,  $K_x$  : x방향 투수계수,  
 $K_y$  : y방향 투수계수, Q : 적용된 경계유량,  
 $\theta$  : 체적함수량, t : 시간

한편, 침투 및 활동해석은 국내 하천제방 설계에 널리 이용되고 있는 캐나다 GEO-SLOPE 사의 SEEP/W 및 SLOPE/W 프로그램을 사용하였다. 이때, 제방 침투해석은 유한요소망의 경우 Fig. 2 (a)에서 보듯이 해석의 정밀도를 위하여 약 9,783개의 치밀한 3절점 및 4절점 평면요소로 구성하였으며, 요소망 크기의 경우 구조물 기초 설계 기준·해설(KGS, 2009)에서 최적 침투해석 요소망 크기로 제안하고 있는 제방 높이의 1/10 또는 0.5m 이하 기준을 적용하였다.

또한, 각 지반의 지층구성 및 물성치는 Fig. 2 (b) 및 Table 1에서 보듯이 낙동강 본류 문산제(낙동강수계 하천

기본계획(변경) 보고서(MLTM, 2009)를 대상으로 대표적인 값을 선정하였으며, 배수통문의 경우 콘크리트로 적용하여 해석을 수행하였다.

## 2.2 해석 범위 및 내용

본 연구에서는 다양한 수위파형변화에 따른 배수통문 설치제방의 건전도 평가를 위하여, Kim et. al.(2014)에 의해 문산제 인근 성주수위관측소 관측결과로부터 제안된 Fig. 3의 성주관측소 설계수위파형(평수위 상승시간 23시간(③), 홍수위지속시간 15시간(⑫), 수위강하시간 29시간(⑧))을 기본수위파형으로 하여 각 변화인자에 따른 영향을 검토하였다. 수위파형 변화인자 및 기호는 Table 2에서 보듯이 1) 평수위상승시간 6(①), 16(②), 23(③), 42(④),

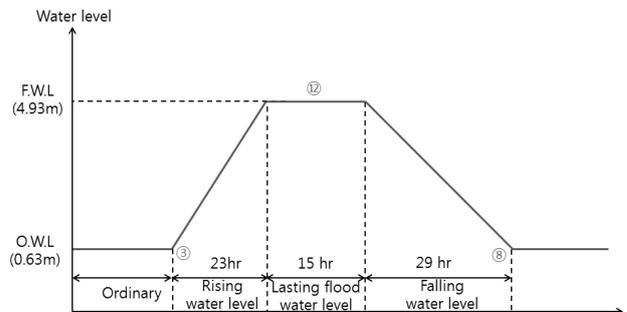


Fig. 3. Design Hydrograph of Sung-Ju Station

Table 2. Using hydrograph seepage/landslide analysis scope and content (Kim et. al., 2014)

Rate item	Main Content		
Rising ordinary water level		Variation factor	time
		Variation value	6, 16, 23, 42, 57 hr
		Legend	①, ②, ③, ④, ⑤
		Combination of Hydrograph	①+⑫+⑧, ②+⑫+⑧, ③+⑫+⑧, ④+⑫+⑧, ⑤+⑫+⑧
Falling water level		Variation factor	time
		Variation value	11, 23, 29, 58, 70 hr
		Legend	⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩
		Combination of Hydrograph	③+⑫+⑥, ③+⑫+⑦, ③+⑫+⑧, ③+⑫+⑨, ③+⑫+⑩
Lasting flood water level		Variation factor	time
		Variation value	8, 15, 27, 40, 53 hr
		Legend	⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮
		Combination of Hydrograph	③+⑪+⑧, ③+⑫+⑧, ③+⑬+⑧, ③+⑭+⑧, ③+⑮+⑧
Flood frequency		Variation factor	frequency
		Variation value	200(24.93m), 100(24.28m), 50(23.56m) year
		Legend	⑫, ⑯, ⑰
		Combination of Hydrograph	③+⑫+⑧, ③+⑯+⑧, ③+⑰+⑧

57(⑤) 시간, 2) 수위급강시간 11(⑥), 23(⑦), 29(⑧), 58(⑨), 70(⑩) 시간, 3) 최대홍수위지속시간 8(⑪), 15(⑫), 27(⑬), 40(⑭), 53(⑮) 시간, 4) 홍수빈도 50년(⑫), 100년(⑯), 200년(⑰) 등으로 변화시켰으며, 수위급강하 효과의 경우 투수성(k, cm/sec)과 t시간 동안 수위강하높이(h)를 고려한 수위강하속도(h/t, cm/sec)를 비교하여 발생잔류수 간극수압에 의한 활동영향을 고려하였다.

이때, 각 변화인자 별 건진도평가는 각 변화인자의 영향만을 평가하기 위하여 기본 수위파형(Fig. 3 참조)과 각 변화인자의 조합을 통하여 수행하였다. 각 변화인자의 조합은 평수위상승의 경우 기본 수위파형을 고려하여 최대홍

수위지속시간을 15시간(⑫)으로, 수위강하시간을 29시간(⑧)으로 고정한 후 평수위상승시간 변화(①, ②, ③, ④, ⑤)만을 고려한 5가지 수위파형조합(①+⑫+⑧, ②+⑫+⑧, ③+⑫+⑧, ④+⑫+⑧, ⑤+⑫+⑧)을 적용하였으며, 수위급강하·홍수지속시간·홍수빈도의 경우 기본수위파형에 각각의 변화인자의 변화를 적용하였다.

한편, 파이핑 및 활동해석은 안전율이 최소가 되는 1) 파이핑 및 제내지 활동안전율의 경우 홍수위지속시간의 최종시점(끝단), 2) 제외지 수위급강하에 의한 활동안전율의 경우 수위급강하시간의 최종시점(끝단)에서 수행하였다.

### 3. 해석결과 및 분석

#### 3.1 평수위상승효과

하천제방은 평수위상승 및 홍수위 지속시간 변화에 따라 제체 포화 및 침윤특성이 달라지며, 제체 침윤특성에 따른 제방 붕괴 메카니즘을 보여주는 Nakajima(2003)의 연구결과에서 보듯이 제방 안정성에 미치는 수위변화의 영향은 매우 큰 것으로 알려져 있다.

Fig. 4 (a) 및 (b)는 평수위상승시간의 단계적 변화(6시간~57시간)를 반영한 수위파형 별 배수통문 설치 제방의 침윤특성을 보여준다. 배수통문 설치 제방의 침윤특성은 Fig. 4 (a) 및 (b)에서 보듯이 평수위상승시간 증가에 따라 소단부근에서 지하수위상승이 1.0m 정도 발생하며 침윤선이 상승하는 것으로 나타났다.

한편, 평수위 상승에 따른 파이핑 안전율 변화특성은

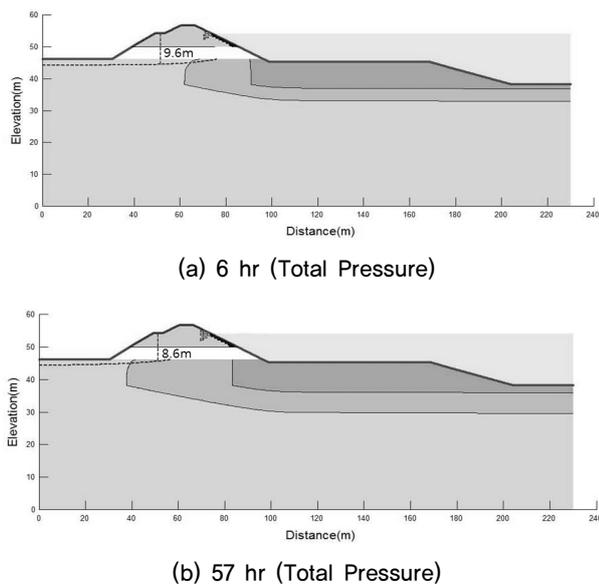


Fig. 4 (c) 및 Table 3에서 보듯이 한계동수경사법의 경우 4.20~40.48, 한계유속법의 경우 4.97E+06~8.26E+07의 범위로서 평수위 상승에 따른 파이핑에 의한 배수통문 설치 제방 건전도의 경우 크게 감소하는 경향을 보이거나 하천 설계기준 파이핑 기준안전율 2.0 및 100 이상을 만족하는 것으로 평가되었다. 이때, 파이핑에 대한 안전율이 기준안전율에 비해 상대적으로 큰 이유는 해석단면이 비탈경사 1:3에 제내지에 소단까지 있는 단면으로 누수에 대한 안정성의 경우 충분히 확보되었기 때문인 것으로 판단된다.

또한 평수위 상승에 따른 활동안전율 변화특성은 평수위상승시간 증가에도 활동 비탈면 포화영역 변화가 발생되지 않아 안전율의 변화없이 제내지의 경우 2.72, 제외지의 경우 2.45로 하천설계기준의 활동 기준안전율 1.3 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

따라서, 평수위 지속시간 증가에 따른 영향은 파이핑의 경우 동수경사가 크게 증가하여 안전율에 영향을 미치나

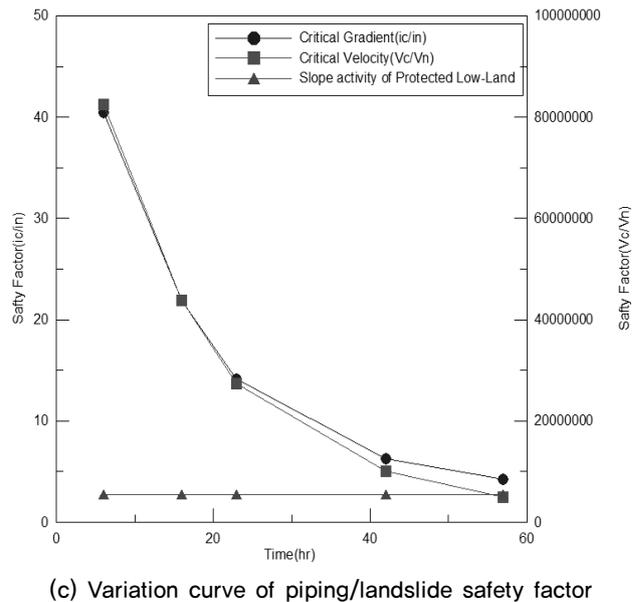


Fig. 4. Result of analysis for the rising ordinary water level

Table 3. Seepage/Landslide analysis (Rising ordinary water level)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide	
		I	II	III	IV
Falling water level	①+⑫+⑧	40.48	8.26E+7	2.72	2.45
	②+⑫+⑧	21.87	4.38E+7		
	③+⑫+⑧	14.13	2.74E+7		
	④+⑫+⑧	6.30	9.99E+6		
	⑤+⑫+⑧	4.20	4.97E+6		

I : Critical Gradient( $FS = i_c/i_n$ ), II : Critical Velocity( $FS = v_c/v_n$ ),

III : Protected low-landslide(FS), IV : Riverside landslide(FS)

기준안전율 이상으로 평가되었으며, 활동의 경우 배수통문 설치 제방의 활동 비탈면 포화영역 변화가 발생되지 않아 안전율의 변화가 없는 것으로 평가되었다.

### 3.2 수위급강하효과

배수통문 설치 제방의 파이핑 및 활동 안전율은 수위급강하 시간의 단계적 변화(70시간~11시간)에 따라 파이핑에 대한 안전율의 경우 한계동수경사법 5.15~8.72, 한계유속법 6.22E+06~1.60E+07으로 각각 41% 및 61% 정도의 차이를 나타내고 있으며, 제외지 제방의 활동 안전율의 경우 2.44~2.45로 0.01% 정도 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 5 및 Table 4 참조).

이때, 제방 건전도 평가 시 수위급강하효과는 제외지 활동 안전율과 관계있는 것으로 알려져 있으나, 해석결과 수위급강하 시간 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로

평가되었다. 이러한, 평가결과는 최대홍수위와 평수위의 수위차 4.3m 대비 수위강하속도가 수위급강하 70시간에서 1.71E-3cm/sec로서 제체 투수계수 8.0E-4cm/sec에 비해 약 2.1배 이상 크기 때문에 이미 수위강하속도와 침투압 및 포화영역의 소산시간 차이에 의한 수위급강하 효과가 발현되었기 때문에 수위급강하 시간 감소에도 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

### 3.3 홍수위지속시간 효과

Fig. 6 (a) 및 (b)는 홍수위지속시간의 단계적 변화(8시간~53시간)를 반영한 수위파형 별 배수통문 설치 제방의 침윤특성을 보여준다. 배수통문 설치 제방의 홍수위지속시간 증가에 따른 침윤특성은 Fig. 6 (a) 및 (b)에서 보듯이 홍수위지속시간 증가에 따라 소단부근에서 지하수위증가가 0.9m 정도 발생되는 것으로 나타났다.

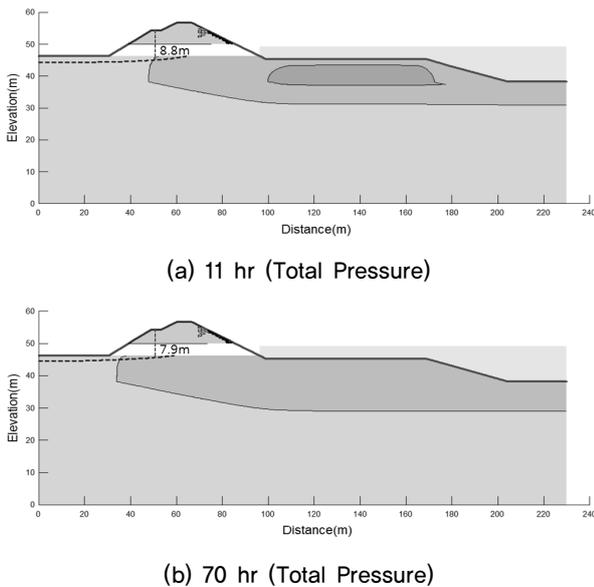
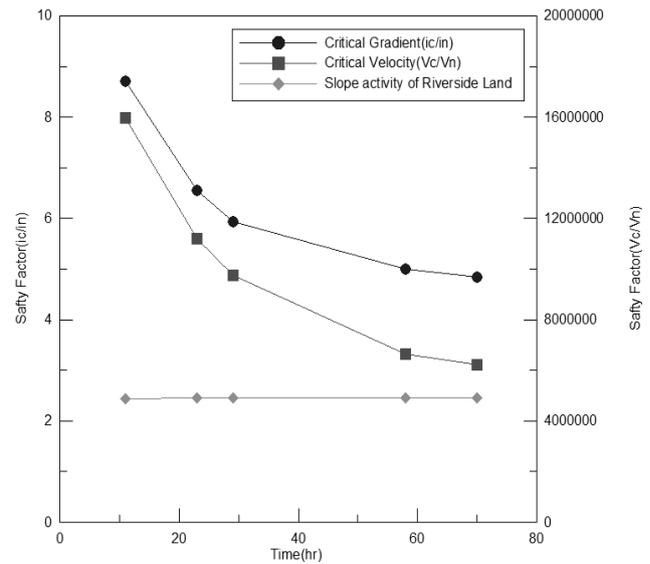


Fig. 5. Result of analysis for the falling water level

Table 4. Seepage/Landslide analysis (Falling water level)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide	
		I	II	III	IV
Falling water level	③+⑫+⑥	8.72	1.60E+7	2.72	2.44
	③+⑫+⑦	6.55	1.12E+7		
	③+⑫+⑧	5.93	9.76E+6		
	③+⑫+⑨	5.00	6.64E+6		
	③+⑫+⑩	4.85	6.22E+6		

I : Critical Gradient( $FS = i_c/i_n$ ), II : Critical Velocity( $FS = v_c/v_n$ ),  
 III : Protected low-landslide(FS), IV : Riverside landslide(FS)



(c) Variation curve of piping/landslide safety factor

한편, 홍수위지속시간에 따른 파이핑 안전율 변화특성은 Fig. 6 (c) 및 Table 5에서 보듯이 파이핑의 경우 한계동수경사법 4.46~20.63, 한계유속법 6.29E+06~4.07E+07 범위로서 두 평가법 모두 약 80 %의 안전율 감소가 발생하였으며, 활동에 대한 안전율의 경우 제내지 2.72, 제외지 2.45로서 변화가 없는 것으로 평가되었다.

따라서 홍수위지속시간 효과는 평수위상승효과와 마찬가지로 파이핑의 경우 홍수위지속시간 변화에 따라 최대 462%의 큰 동수경사 증가가 발생하는 반면에 활동의 경우 침윤선에 의한 포화영역 확대가 발생하지 않아 안전율 변화가 없는 것으로 판단된다.

### 3.4 홍수빈도 효과

본 논문의 평가대상 제방은 Kim et. al.(2014)에 의해 수행된 연구와 동일하게 홍수빈도 200년으로 설계된 낙동

강의 문산제(제방고 7.39m, 여유고 2.0m 이상)를 대상으로 수행하였다. 이때, 배수통문 설치 제방의 건전도 평가를 위한 홍수빈도 변화에 따른 홍수위는 MLTM(2009)에 따라 200년 빈도 4.93m, 100년 빈도 4.28m, 50년 빈도 3.56m 등으로 고려하여 적용하였다(Kim et. al., 2014).

홍수빈도에 따른 파이핑 및 활동에 대한 안전율 변화는 Fig. 7 및 Table 6에서 보듯이 파이핑의 경우 한계동수경사법 14.13~16.42, 한계유속법 2.74E+07~3.21E+07로서 각각 24 % 및 34 % 정도 감소하는 특성을 보여주고 있으며, 제내지 활동에 대한 안전율 변화의 경우 2.72로 변화가 없는 것으로 평가되었다. 이러한 파이핑 및 활동 안전율 변화특성은 기존 조립토 제방에 대한 Kim et. al.(2014)의 연구결과와 동일하게 1) 문산제의 제방여유고 2.46m (200년 빈도 기준)와 2) 홍수빈도변화에 의한 작은 수위차 (1.37m)의 영향으로 판단된다.

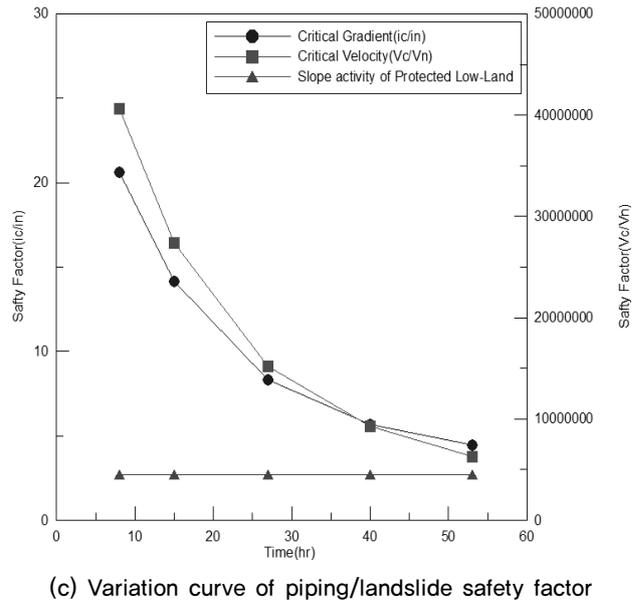
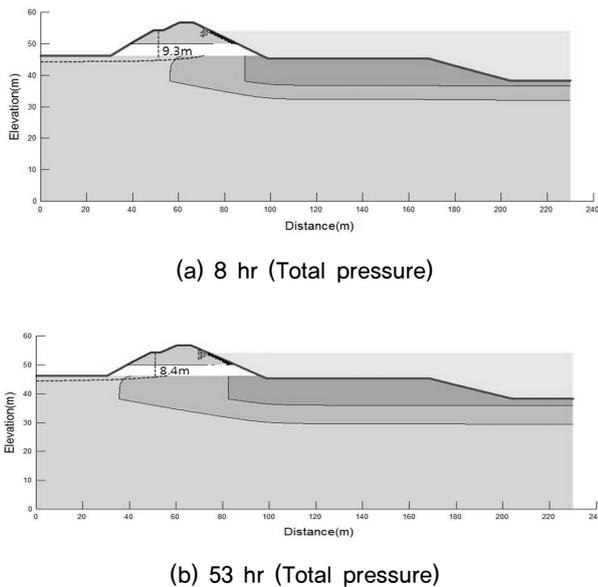


Fig. 5. Result of analysis for the falling water level

Table 5. Seepage/Landslide analysis (Lasting flood water level)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide	
		I	II	III	IV
Lasting flood water level	③+⑪+⑧	20.63	4.07E+7	2.72	2.45
	③+⑫+⑧	14.13	2.74E+7		
	③+⑬+⑧	8.30	1.52E+7		
	③+⑭+⑧	5.66	9.27E+6		
	③+⑮+⑧	4.46	6.29E+6		

I : Critical Gradient( $FS = i_c/i_n$ ), II : Critical Velocity( $FS = v_c/v_n$ ),

III : Protected low-landslide(FS), IV : Riverside landslide(FS)

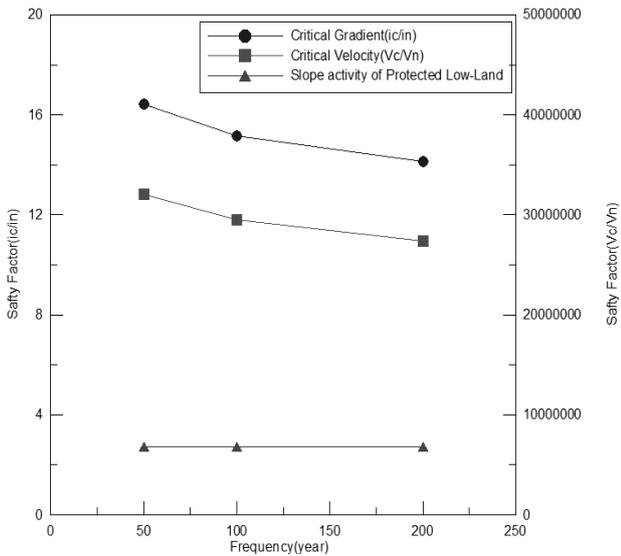


Fig. 7. Variation curve of piping/landslide safety factor for the flood frequency

### 3.5 제안 설계수위파형

수위파형 변화인자에 따른 건전도 평가결과, 배수통문 설치 제방의 건전도는 설계빈도 200년, 평수위상승시간 57시간, 홍수위지속시간 53시간 및 문산제 홍수사상에 의해 결정된 수위급강하시간 70시간 적용 시 각 변화인자 별 안전율의 변화가 작게 발생하는 경향을 보이는 것으로 평가되었다.

따라서, 배수통문 설치 제방의 200년 빈도 설계수위파형은 기존 조립토 제방에 대한 Kim et. al.(2014)의 연구결과와 동일하게 파이핑 안전율의 경우 한계동수경사 2.0 및 한계유속법 100 이상, 활동안전율의 경우 1.3 이상 등 하천설계기준 관련 규정과 해석결과를 고려하여 1) 최대 57시간 이상의 평수위상승시간, 2) 홍수사상으로 구해진 지역별 수위급강하시간, 3) 최대 53시간 이상의 홍수위지속시간 등을 제안한다.

이때, 제안 수위파형을 이용한 배수통문 설치 제방의 건

전도는 파이핑의 경우 한계동수경사법 5.21, 한계유속법 3.69E+06, 제내지 활동에 대한 안전율의 경우 2.72 등으로 하천설계기준 이상의 안전율을 보이는 것으로 평가되었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 낙동강 문산제를 대상으로 배수통문 설치 시 평수위상승, 홍수위지속, 수위강하, 홍수빈도 등 수위파형 변화인자를 고려한 한계동수경사법, 한계유속법에 의한 파이핑 안전성과 제내지 및 제외지 활동안전성에 대한 수치해석적 제방 건전도 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 평수위상승시간 변화에 따른 배수통문 설치 제방의 건전도는 평수위상승시간 변화(6시간~57시간)에 따라 파이핑 안전율의 경우 한계동수경사법의 경우 4.20~40.48, 한계유속법의 경우 4.97E+06~8.26E+07의 범위로 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 활동 안전율의 경우 제내지의 경우 2.72, 제외지의 경우 2.45로 배수통문 상부 활동사면 포화영역의 변화특성에 의해 변화가 거의 없는 것으로 평가되었다.
- (2) 수위급강하 시 배수통문 설치 제방의 건전도는 수위급강하시간 변화(70시간~11시간)에 따라 파이핑 안전율의 경우 한계동수경사법 5.15~8.72, 한계유속법 6.22E+06~1.60E+07으로 각각 41% 및 61% 정도로 평수위상승 및 홍수위지속 효과에 비해 작게 나타났으며, 제외지 활동 안전율의 경우 2.44~2.45로 0.01% 정도 감소하여 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 홍수위지속시간 변화에 따른 배수통문 설치 제방의 건전도는 홍수위지속시간 변화(8시간~53시간)에 따라 파이핑 안전율의 경우 한계동수경사법 4.46~20.63, 한계유속법 6.29E+06~4.07E+07로서 두 평가

Table 6. Seepage/Landslide analysis (Flood frequency)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide	
		I	II	III	IV
Flood frequency	③+⑫+⑧	14.13	2.74E+7	2.72	2.45
	③+⑯+⑧	15.16	2.95E+7		
	③+⑰+⑧	16.42	3.21E+7		

I : Critical Gradient( $FS = i_c/i_n$ ), II : Critical Velocity( $FS = v_c/v_n$ ),

III : Protected low-landslide(FS), IV : Riverside landslide(FS)

법 모두 약 80% 정도로 크게 감소하는 것으로 나타났으며, 활동 안전율의 경우 제내지 2.72, 제외지 2.45로서 홍수위 지속시간에 따라 약 10%의 변화가 발생하는 것으로 평가되었다.

- (4) 홍수빈도별 배수통문 설치 제방의 건전도는 50년, 100년, 200년 홍수빈도 적용 시 제방여유고 대비 최대 1.37m 정도의 작은 수위 차에 기인하여 파이핑의 경우 한계동수경사법 14.13~16.42, 한계유속법 2.74E+07~3.21E+07로서 각각 24% 및 34% 정도 변화하나, 제내지 활동의 경우 안전율 2.72로 변화가 없는 것으로 평가 되었다.
- (5) 배수통문 설치 제방의 건전도는 설계빈도 200년, 평수위상승시간 57시간, 홍수위지속시간 53시간 및 문산제 홍수사상에 의해 결정된 수위급강하시간 70시간 적용 시 각 변화인자 별 안전율의 변화가 작게 발생하는 경향을 보이는 것으로 평가되어 설계수위파형 설정 시 1) 최대 57 시간 이상의 평수위상승시간, 2) 홍수사상으로 구해진 지역별 수위급강하시간, 3) 최대 53 시간 이상의 홍수위지속시간, 4) 홍수빈도 200년 빈도 등을 반영할 것을 제안한다.

### Acknowledgement

This research was supported by a grant (13SCIPS01) from Smart Civil Infrastructure Research Program funded

by Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) of Korea government and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA).

### References

1. Km, K. H., Yoon, K. S., Lee, J. W., Lee, S. J., Yeo, K. D., Cha, J. H., Lee, D. S., Hwangb, J. K., Kim, J. M., Choi, B. H., Oh, S. Y. (2004), *Development of Advanced Technologies for Levees*, Final Report, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, pp.68-74.
2. Kim, J. M., Kim, J. S., Oh, E. H., and Cho, W. B. (2014), "Numerical Analysis in Hydrograph Determination for Cohesive Soil Levee", *Journal of Korea Society of Engineering Geology*, Korea Society of Engineering Geology, Vol.30, No.4, pp.81-92.
3. Korea Geotechnical Society (2009), *Foundation Structure Guideline's commentary*, MLTM, Korea.
4. Korea Water Resources Association (2009), *River Design criteria & Commentary*, MLTM, Korea.
5. Ministry of Construction (2000), *Levee Design Guidelines*, pp.221-245, Japan.
6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009), *Nakdong River Restoration 23 area enforcement design*, MLTM, Korea.
7. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2014), *Foundation Structure Guideline*, MLTM, Korea.
8. Nakajima, H. (2003), *River Levee*, Kibodang Press, japan.
9. National Emergency Management Agency (2013), *Disaster Annual Report (2013)*.