

# 대형제방실험을 통한 Hydraulic well의 효용성 검증

박민철<sup>1</sup>, 김진만<sup>2\*</sup>, 문인종<sup>2</sup>, 진윤화<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>금오공과대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원

## Verification of the Effectiveness of Hydraulic well through Large-scale Embankment Test

Min-Cheol Park<sup>1</sup>, Jin-Man Kim<sup>2\*</sup>, In-Jong Moon<sup>2</sup>, Yoon-hwa Jin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>2</sup>Geotechnical Engineering Research Institute, KICT

**요약** 본 논문은 하천 제방의 침투방지공법으로 일본 미쓰야마 하천 국도 사무소에서 제시한 월륜 공법에 대한 효용성을 연구한 것으로, Hydraulic well의 현장 적용성과 시공성 개선, 침투압 분포 특성을 파악하기 위하여 대형 제방실험과 침투 해석을 수행하였다. 대형제방실험의 방법은 제외지 수위를 재현하여 제방을 포화시킨 후 제방의 간극수압계 변화를 감지, hydraulic well의 내부 수위를 0.1 m ~ 0.7m 로 변화하고 이때 간극수압계를 통해 측정된 간극수압을 비교하여 침투압의 변화를 확인하였다. 대형 제방실험은 hydraulic well의 설치 지점에 따라 두 가지 방법으로 수행하였다. 대형 제방실험결과, hydraulic well의 내부 수위 변화에 따라 최대 37%의 침투압 저감 현상이 발생하는 것으로 평가되었다. 대형 제방실험과 침투 해석의 간극수압을 비교한 결과 거의 유사한 경향이 나타났다. hydraulic well의 내부 수위 변화와 산정된 간극수압의 변화도 비슷한 양상을 보였으나, 심도가 깊어짐에 따라 대형 제방실험결과보다 침투 해석의 간극수압이 더 크게 산정되었다.

**Abstract** This paper reports the results of a field appliance study of the hydraulic well method to prevent embankment seepage, the large-scale embankment experiment and seepage analysis to examine the traits of the seepage pressure. The experimental procedure was focused on the pore pressure after examining the detected value of the pore pressure gage. The inner water levels of hydraulic well were compared with the pore pressure data, which were used to inspect the seepage variations. Two different large-scale experiments were conducted according to the installation points of the hydraulic wells. The decrease in seepage pressure reached a maximum of 37% from the experimental results. The experimental pore pressure results were similar to those of the analyses. In addition, the pore pressure oriented from the water level variations of the hydraulic well showed similar patterns between the experiment and analysis, but if the hydraulic well was deeper, the analyzed water levels were larger than the experimental values.

**Keywords** : Embankment, Hydraulic well, Infiltration Analysis, Large-Scale Test, Piping, River Levee

### 1. 서론

하천제방은 하천 구조물 중 중요한 구조물로서 유수가 하도 밖으로 넘치는 것을 방지하기 위하여 하천을 따라 토사 등으로 축조한 수리구조물이다[1]. KICT, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(2004)[2]에 따르면 홍수에 의한 제방붕괴유형은 1987년부터 2003년까지의 총 붕괴사례 758건 중 월류로 인한 파괴 300건(약39.6%), 침식 295건(약38.9%), 제체불안정 87건(약11.5%) 등의 피해가 발생한 것으로 보고되었다. 하천제방은 수위 상승시 침윤면에 의해 포화대가 발달하면 제체 비탈면의 활동파괴가 발생할 수 있고 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(17SCIP-B065985-05)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

\*Corresponding Author : Jin-Man Kim (Senior researcher)

Tel: +82-31-9100-221 email: jmkin@kict.re.kr

Received September 4, 2017

Revised October 12, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

초지반에서는 누수로 인한 파이핑(progressive backward erosion)이 발생할 수 있으며[3], Im et al.(2006)[4]은 국내의 돌밭 호우와 같은 이상기후에 따라 하천의 유출량과 홍수 지속기간이 급격히 증가하여 하천제방의 안정성을 저하시키는 요인으로 분석되었다. 하천제방의 누수는 제외지 수위가 상승하여 제체 또는 기초지반을 통하여 제내지층으로 침투수가 유출하는 현상을 말한다. 이때, 제체의 누수는 침윤선이 제내지 비탈면에 도달하여 침투수가 유출하는 것으로 심각할 경우 제방 붕괴의 원인이 된다.

하천제방의 누수안정성에 대해서는 수치해석적 방법과 실험을 통한 연구가 진행되었으며 Kim & Moon (2017)[5]은 축소 모형시험과 대형 모형시험을 통하여 파이핑에 의한 제방 붕괴 형상과 붕괴 메커니즘을 분석하고, 파이핑 대책공법으로 제안된 월륜공법의 침투압 분포 특성을 평가하였고, Kim & Jo(1999)[1]는 전기 비저항 탐사를 이용하여 제방의 누수를 탐사하고 weighted residual method를 이용하여 제방 누수량을 평가하였다. Jung et al.(2010)[6]은 하천제방의 침투해석 시 투수계수 변화에 따른 영향 검토를 위하여 매개변수 해석을 수행하였다. 침투류에 대한 수치해석의 연구로는 Taylor and Brown(1967)[7], Neuman and Witherspoon (1970)[8]의 제방의 침투수에 대한 유한요소법 적용, Uno et al.(1988)[9]는 하천제방의 안정성을 평가하기 위해서 제방의 붕괴사례를 조사하고 분석하여 안정성 검토에 대한 기초 연구를 수행하였다.

하천제방의 누수원인은 제방의 폭이 작아 침투수의 침투거리가 짧은 경우와 제방의 재료가 투수계수가 큰 사질토 또는 조립토를 다량으로 함유한 경우, 제체 내에 매설되어 있는 구조물과의 접합부에 흐름이 생기는 경우 등이 있다. 한편, 기초지반으로의 누수는 파이핑 현상으로 불리며, 치수 상 문제가 되기 때문에 유선망, 침투압, 누수량 등을 검토하여 충분한 대책을 강구하여야 한다.

Matsuyama River National Highway Office(2011) [10]는 홍수 시 제방 뒷소단이나 뒷비탈기슭 부근에 제체누수 및 파이핑이 발생될 경우 파이핑 방지대책으로서 월륜공법을 제안하고 있다. 본 공법은 현장 누수상태에 따라 반경 1.2m ~ 2.0m의 Hydraulic well을 흙포대, 배수파이프, 시트 등을 이용하여 구축하고 Hydraulic well 내부의 수압으로 침투압을 저감시켜 파이핑을 방지하는 기법이다. Hydraulic well의 수위는 파이핑 분출수에 의

한 용출 물결이 보이지 않도록 수위를 유도한다. 본 연구에서는 일본에서 제안된 월륜공법의 시공성 개선 및 침투압분포 특성을 규명하고자 Hydraulic well을 개발·제작하여 수두차에 따른 지반 침투압 분포특성을 제방실험을 통해 평가하고자 하였다.

본 연구에서는 제방의 파이핑 현상을 방지하기 위한 Hydraulic well의 효용성을 검증하기 위하여 제방고 1.0m, 뚝마루의 폭 2.5m, 비탈면의 경사도 1:3으로 River Design Standard(2009)[11]을 만족하는 실험제방을 축조하여, 계획된 위치에 간극수압계를 설치하여 실험을 수행하였다. 또한, SEEP/W를 통한 침투해석을 통하여 Hydraulic well의 적합성을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 침투에 의한 제방 파괴

제방의 침투는 제체누수라고도 표현되며, 제방의 제외지층 수위가 상승하여 제체 또는 지반을 통해서 제내지의 제방 비탈 끝 부근에서 침투수가 유출하는 것을 말한다. 침투에는 제체를 통해 침투하는 제체침투와 지반을 침투하는 지반침투가 있으며, 침투위치에 따라 파괴양상도 다르다[2].

지반침투에 의한 파괴는 제체하부의 투수성이 높은 경우에 제외지 수위가 상승함으로써 침투압이 증가하여 제내지 층에 침투수가 용출하는 파이핑 현상이 발생하고 토사의 유출로 인해 제방의 붕괴가 발생한다[12]. 하천제방의 안정은 지하수 수리학 관점에서 누수가 일부 진행되더라도 파이핑 현상이 발생하지 않으면 제체의 안정성에는 문제가 없다고 판단하기 때문에 파이핑 현상의 검토만을 요구한다. 제방 누수에 대한 안정성 평가 방법은 한계동수경사를 통한 방법과 한계 유속을 통한 방법이 있다. 한계동수경사에 의한 안정성 검토 기준은 침투해석에 의하여 산정된 동수경사가 한계동수경사의 1/2 이하일 경우이며, 한계유속에 의한 방법은 소류력에 의하여 입자가 유실되는 한계의 침투 유속을 흙입자의 입경에 따라 산정하여 평가하는 방법이다. 한계동수경사에 의한 KWRA, Korea Water Resources Association (2009)[11]에 따른 제방 누수에 대한 안정성 평가 방법은 Table 1과 같으며, Table 2는 침투류의 입경별 한계 유속을 나타낸 것이다.

**Table 1.** Stability evaluation method for leaking embankment

Division	Equation
A Critical hydraulic gradient method (by Terzaghi)	$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e}$
A Critical velocity method (by Justin)	$V = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}}$

**Table 2.** Critical velocity per particle size of penetrant

Number	Particle size (mm)	Critical Velocity (cm/sec)
1	4.0 ~ 4.8	20.0
2	2.8 ~ 3.4	17.0
3	1.0 ~ 1.2	10.0
4	0.7 ~ 0.85	8.5
5	0.4 ~ 0.7	7.0
6	0.25 ~ 0.5	4.2
7	0.11 ~ 0.25	3.5
8	0.075 ~ 0.11	2.5
9	0.044 ~ 0.075	2.0

## 2.2 누수 방지 대책

KICT(2006)[13]에서 제시하고 있는 대표적인 제방 침투 방지대책은 크게 제체에 적용하는 것과 기초지반에 적용하는 것으로 구분된다. 제체에 적용하는 방지대책은 동수경사를 감소시키고, 활동 안정성을 확보하기 위한 단면 확대 기법과 제체 내 침투 방지 및 억제 효과를 위한 피복기법, 제체 내부의 침투수를 신속히 배수하기 위한 배수공 설치 기법 등이 있으며, 기초지반에 적용하는 대책으로는 제내외지나 제체에 강널말뚝 등을 적용하는 차수기법과 기초지반 표면에 피복 재료를 적용하는 피복 기법 등이 있다.

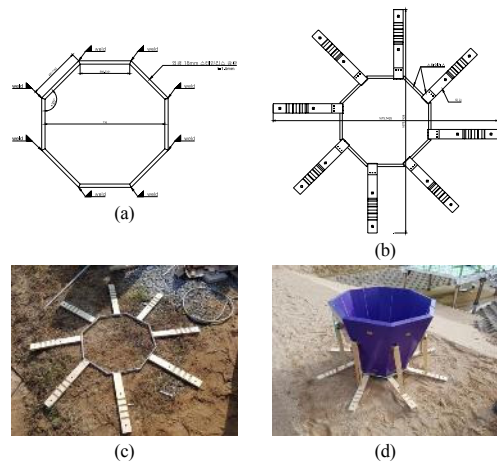
기존의 제방 침투 방지대책은 공용 중인 제방에 적용할 수 없는 기법들이 많으며, 적용하고자 할 경우 제방의 재공사 등으로 인하여 많은 문제점 들을 내포하고 있다.

## 3. Hydraulic well의 대형제방실험

### 3.1 Hydraulic well의 설치

Hydraulic well은 Fig 1과 같이 0.8 m(높이) × 0.77 m(내경)의 8각 원뿔구조로 스테인리스 스틸을 이용하여 제작하였다. 8각 프레임은 총 8개를 조립하게 되며, 누수를 막기 위해 연결부분에는 고무패킹이 설치되어 있

다. 그리고 8각 프레임을 지지하는 하부 받침대가 설치 된다.



**Fig. 1.** Drawing of hydraulic well  
(a)18mm Octagon stainless steel (b)Lower bracket  
(c)Lower bracket installation view (d)Finished goods

## 3.2 실험방법

### 3.2.1 제방의 토사

본 실험은 안동지역의 낙동강 하상토를 사용하였으며, 공학적 특성은 Table 3와 같고, Fig. 2는 제방실험에 사용된 흙의 입도분포곡선과 A 다짐에 의한 다짐곡선이다.

KWRA(2009)[11]은 원칙적으로 통일분류법에 근거하여 최대입경이 100mm 이하인 입도가 균등한 하상모래(SP) 사용을 금지하며, 예외로 사용할 경우 안정성이 확보되는 것을 확인하도록 권장하고 있다.

Casagrande(1950)[14]의 제언을 기초로 Sherard(1953)[15]는 심각한 균열이 발생한 6개의 흙 댐과 지형 조건이나 시공조건이 매우 취약하였음에도 불구하고 균열피해를 입지 않은 제방 12개를 포함하여 균열영향인자를 평가하였다. 균열 영향인자 평가에서는 균열의 정도, 시공법, 지형조건 등이 고려되었으며, 현지 채취 시료에 대해 기본적인 물성시험을 실시하여 입도와 소성도를 분석하고 균열저항등급을 제안하였다(KGS, Korea Geotechnical Society, 2012)[3]. 실험에 사용된 시료는 NAVFAC Manual(1986)[16]의 DM 7.02에 제시된 제체 재료별 누수에 대한 저항성을 평가하면, 통일분류법에서 SP로 균열에 취약한 흙으로 판정된다.

Table 3. Engineering properties of experimental specimens

Classification		Silty Sand
Characteristics		
$G_s$		2.674
$PI$		N.P
Particle size	#200 (%)	2.4
	$C_u$	0.9
	$C_u$	3.6
	USCS	SP
Compaction	$\gamma_{d,max}$ ( $kN/m^3$ )	17.24
	$\omega_{opt}$ (%)	13.9
Shear Strength	$c$ ( $kPa$ )	16.0
	$\phi$ ( $^\circ$ )	38.2

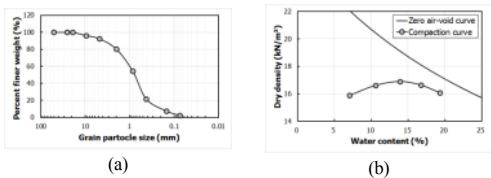


Fig. 2. Particle size distribution and compaction curve of experimental specimens  
(a) Particle size distribution (b) Compaction curve

3.2.2 실험제방의 축조

대형모형 실험수로는 안동하천실험센터 내 제형수로 형상으로 3.0m(하단폭) × 4.0 m(수로폭) × 2.0 m(수로 높이) × 600 m(수로길이)인 직선수로에서의 일부구간에서 수행하였다.

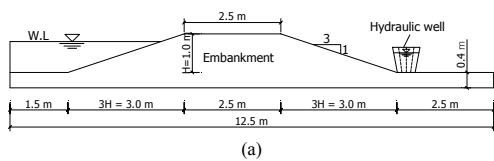


Fig. 3. Section and panorama of experimental embankment  
(a) Section (b) Panorama

Fig. 3은 실험제방의 단면도를 나타낸 것이다. 제방의 높이는 1.0m이고, 뚝마루의 폭은 2.5m이다. 제내지와 제외지 비탈면의 경사도는 1 : 3으로 River Design Standard(2009)[11]을 만족하도록 축조하였으며, 제내지

뒷비탈기슭에서 파이핑 현상이 발생되므로 이 지점에 Hydraulic well을 배치하였다.

3.2.3 간극수압계 배치

Fig. 4는 간극수압계의 매설 위치도를 나타낸 것이다. 실험 케이스는 2개이며 case 1은 Hydraulic well을 실험 제방의 뒷비탈기슭에서 35cm 이격시켜 설치하였다. 이에 따라 Fig. 4. (a)와 같이 간극수압계를 배치하였으며, 지중 10cm 간격으로 설치하였다. 실험 case 2는 실험 case 1과 달리 뒷비탈기슭에서 100cm를 이격시켜 Hydraulic well을 설치하였으며, 간극수압계의 배치는 실험 case 1과 동일하다(Fig. 4. (b) 참고).

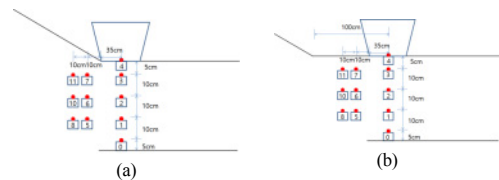


Fig. 4. Buried position map of pore pressure gauge  
(a) Case1 (b) Case2

3.2.4 실험방법

River Design Standard(KWRA,2009)[11]에서는 수위파형은 홍수에 의한 설계지점의 수위변화특성을 시간 경과에 따라 1) 평수위 상승구간, 2) 홍수위 지속구간, 3) 수위하강구간 등으로 구분하여 해석에 필요한 수위특성을 제시하도록 하였다.

본 실험에서는 적용된 제외지의 수위파형은 Fig. 5와 같다. 제방 축조를 완료하고 제외지에 2시간동안 만수위를 재현하였고, 제외지 수위가 만수위에 도달하면 제체를 포화시키기 위하여 18시간이 경과한 후에 Hydraulic well 실험을 수행하였다.

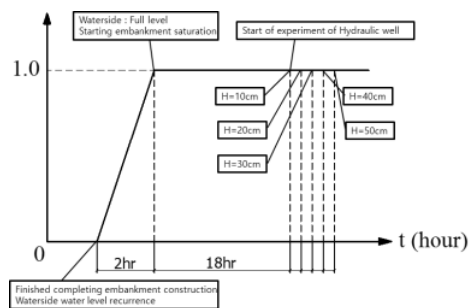


Fig. 5. Hydrograph of waterside

제외지에 수위를 재현한 후 설치된 간극수압계의 변화를 감지하고 Hydraulic well의 수위를 Fig. 6과 같이 재현하여 실험을 수행하였다. 약 10분 간격으로 Hydraulic well의 수위를 10cm 씩 상승시켰다.

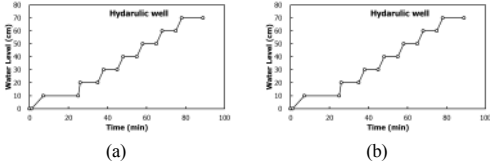


Fig. 6. Hydrograph of hydraulic well  
(a) Case1 (b) Case2

### 3.3 실험결과

#### 3.3.1 Case 1

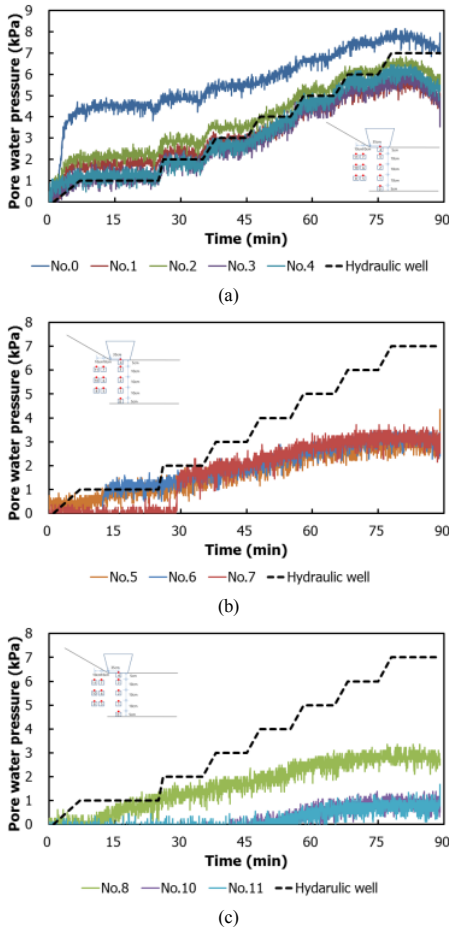


Fig. 7. Result of seepage pressure test (case 1)  
(a) Hydraulic well Installation point (b) 45cm separation site (c) 55cm separation site

Fig. 7은 Case1의 실험결과를 나타낸 것이다. 전체 간극수압계를 Hydraulic well과 수평방향으로 이격된 거리 별로 정리하였다.

Fig. 7 (a)는 Hydraulic well이 설치된 지점에서 지중 깊이별 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 지중 35cm에 설치된 no. 0 센서는 Hydraulic well의 수위보다 약 3 kPa 정도 높게 산정되었으며, 이는 제체가 포화되어 침윤선이 발생되었기 때문이다. 따라서 지표면에 가까워질수록 Hydraulic well과의 간극수압 차이가 감소되었다.

Fig. 7 (b)는 Hydraulic well로부터 45cm 이격된 지점에서 지중 깊이별 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 지중 25cm에 설치된 no. 5 센서와 지중 15cm에 설치된 no. 6 센서, 지중 5cm에 설치된 no. 7 센서는 Hydraulic well의 수위변화에 의하여 간극수압이 증가되었다. 하지만 Fig. 7 (a)의 Hydraulic well이 설치된 지점보다 Hydraulic well의 수위변화에 의한 영향이 감소되었고, Hydraulic well의 수위보다 간극수압이 작게 발생되었다. Fig. 7. (c)는 Hydraulic well으로부터 55cm 이격된 지점에서 지중 깊이별 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7. (b)에 제시된 45cm 이격된 지점의 간극수압 분포와 동일한 양상을 보였다.

#### 3.3.2 Case 2

Fig. 8은 Case2의 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 8 (a)는 Hydraulic well이 설치된 지점에서 지중 깊이별 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 지중 35cm에 설치된 no. 0 센서는 Hydraulic well의 수위보다 약 2 ~ 4 kPa 정도 높게 산정되었으며, 이는 Case 1과 동일하게 제체가 포화되어 침윤선이 발생되었기 때문이다. 따라서 지표면에 가까워질수록 Hydraulic well과의 간극수압 차이가 감소되었다.

Fig. 8 (b)는 Hydraulic well로부터 45cm 이격된 지점에서 지중 깊이별 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 지중 25cm에 설치된 no. 5 센서와 지중 15cm 설치된 no. 6 센서, 지중 5cm에 설치된 no. 7 센서는 Hydraulic well의 수위변화에 의해 간극수압이 증가되었다. 또한, 침윤선의 영향으로 지표면에 가까워질수록 간극수압이 작게 나타났다. Fig. 8 (a)의 Hydraulic well이 설치된 지점보다는 Hydraulic well의 수위변화에 의한 영향은 감소되었다. 그리고 Hydraulic well의 수위보다도 간극수압이 작게 발생되었다. Fig. 8 (c)는 Hydraulic well로부터 55cm 이격된 지점에서 지중 깊이별 간극수압의 변화를

나타낸 것이다. Fig. 8 (b)에 제시된 45cm 이격된 지점의 간극수압 분포와 동일한 양상을 보였다.

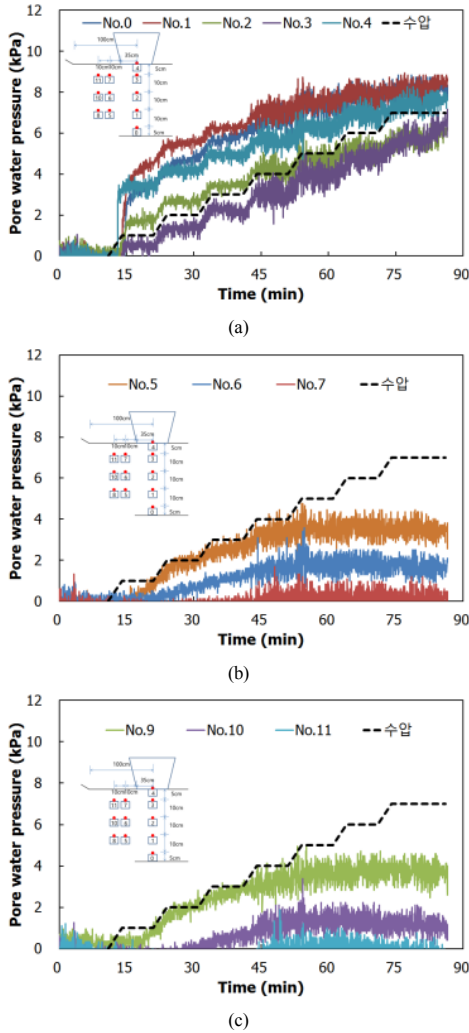


Fig. 8. Result of seepage pressure test (case 2)  
 (a) Hydraulic well Installation point (b) 45cm separation site (c) 55cm separation site

#### 4. 침투해석

##### 4.1 해석조건

##### 4.1.1 제방단면과 요소망의 크기

침투해석의 단면은 Fig. 3 (a)에 제시된 바와 같이 실험 제방과 동일하게 생성하였다. 또한 부정류해석과

같이 시간에 따른 침투수의 흐름현상이 달라지는 경우에 요소망의 분할크기가 해석결과에 큰 영향을 미치며, River Design Standard(KWRA, 2009)[11]에서는 제체에 대한 분할요소의 최대 크기를 제방 높이의 1/10 이하로 제한하여 침투해석을 수행하도록 제시하였으며, Kwon(2007)[17]은 분할요소의 크기에 따라 해석결과로 산정된 동수경사가 달라지며, 경사도가 1 : 3 인 높이 10.0m의 표준제방은 분할요소의 크기가 1/10에서 해석결과가 수렴됨을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 분할요소의 크기를 제방높이의 1/20으로 Fig. 9와 같이 0.05 m (5 cm), 2차원으로 생성하였다.

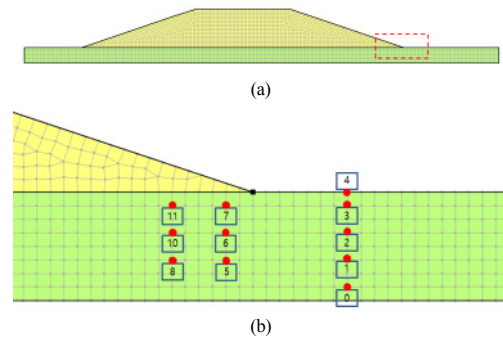


Fig. 9. Location of pore pressure gauge and mesh of experimental levee  
 (a) Geometry and mesh (b) pore pressure gauge location

##### 4.1.2 지반특성

River Design Standard(KWRA, 2009)[11]에서는 제방의 재료는 일반적으로 흙을 사용하며, 재료의 취특성과 경제성 등을 고려하여 선정하도록 하였으며, 제체의 재료는 통일분류법상 GM, GC, SM, SC, ML, CL 등과 같은 일정 정도의 점토(C) 및 실트(M)와 같은 세립분을 함유하도록 제시하였다. 또한, 제체 재료의 최대치수는 100mm 이내이며, 투수계수가  $10^{-3} \text{ cm/sec}$  이하인 것이 적당하다고 제시하였다.

누수에 대한 저항성은 빈입도일수록, 저소성(nonplastic or low plastic)의 재료일수록 취약하다. 저소성의 재료는 누수에 대한 저항능력이 근본적으로 작을 뿐만 아니라 다짐이 불량할 경우 제방의 하류 기슭에서 대규모의 누수영역을 형성할 수 있으며, 빈입도의 재료일수록 포화대를 크게 형성하는 경향이 우세하다[3][16].



Table 4는 침투해석에 적용된 흙의 불포화 물성치와 강도정수를 나타낸 것이다. Table 3에 제시된 빈입도의 모래인 SP를 대상으로 하였다. 불포화 물성은 Carsel and Parrish(1988)[18]에 의해 제시된 데이터베이스를 인용하였다.

Table 4. Unsaturated character of soil

Textural Class	Sand
USCS	SP
$\theta_r$ ( $m^3/m^3$ )	0.045
$\theta_s$ ( $m^3/m^3$ )	0.43
$\alpha$ (1/m)	14.5
$n$	2.68
$m$	0.627
$k_s$ (m/sec)	0.0009

함수특성곡선(SWRC, soil water retention curve)은 van Genuchten(1980)[19]이 제시한 식 1을 이용하였다.

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + \{\alpha(u_a - u_w)\}^n} \right]^m \quad (1)$$

여기서,  $\theta_s$ 는 포화 체적함수비( $m^3/m^3$ ),  $\theta_r$ 는 잔류 체적함수비( $m^3/m^3$ ),  $\alpha$ 는 공기함입치(air-entry value)의 역수(1/m),  $n$ 은 함수특성곡선의 기울기와 관련된 계수,  $m$ 은 모관흡수력이 높은 수준에서 기울기와 관련된 계수로 통상  $m = 1 - \frac{1}{n}$ 을 적용한다.

불포화 투수계수는 함수특성곡선과 동일하게 Van Genuchten(1980)[19]이 제시한 식 2를 적용하였다. 불포화 투수계수는 모관흡수력에 대한 함수가 된다.

$$k_r = \frac{[1 - ((\alpha h)^{n-1})((1 + (\alpha h)^n)^{-m})]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \quad (2)$$

여기서,  $h$ 는 음의 간극수압(모관흡수력)의 수두( $m$ )를 나타낸 것이며,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ 은 곡선맞춤계수를 나타낸다.

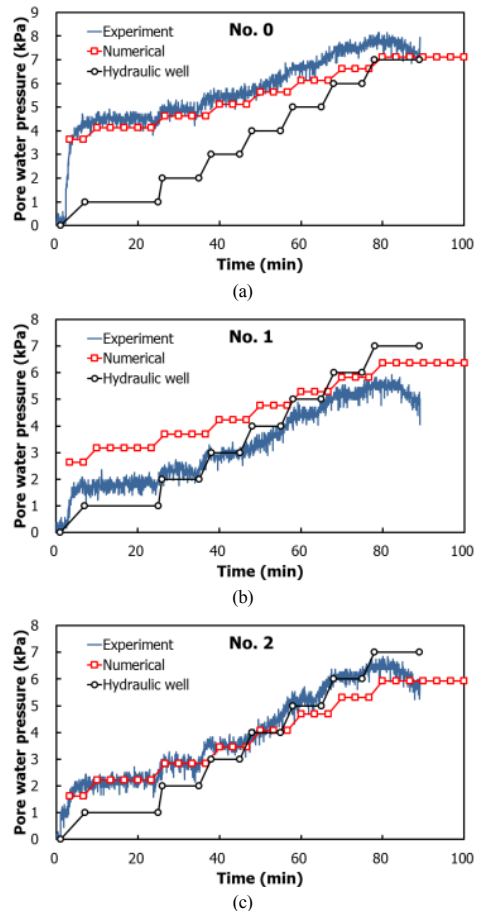
### 4.1.3 수위조건

침투해석에 적용된 수위는 실험의 제외지 수위과형(Fig. 5 참고)과 동일하게 적용하였으며, Hydraulic well의 수위 역시 실험과 동일하게 적용하였다(Fig. 6 참고).

## 4.2 해석결과

### 4.2.1 Case 1의 실물제방 실험과 수치해석 결과 비교

Fig. 10은 Hydraulic well이 설치된 지점의 실물제방 실험과 수치해석을 통해 산정된 간극수압을 비교한 것이다. 수치해석을 통한 간극수압의 산정은 Fig. 5에서 20시간이 경과 후를 기준으로 작성하였다. Fig. 10 (a)의 지중 35cm지점에 설치된 no. 0 센서는 실험과 해석상에서 거의 유사한 거동을 나타내었다. Fig. 10 (b)의 지중 25cm지점에 설치된 no. 1 센서는 해석결과가 실험보다 약 1 kPa 정도 높게 산정되었으며, Fig. 10 (c)의 지중 15cm지점에 설치된 no. 2 센서와 Fig. 10 (d)의 지중 5cm지점에 설치된 no. 3 센서, Fig. 10 (e)의 지표에 설치된 no. 4 센서는 실험과 해석결과가 거의 동일하게 나타났다. 특히 지표에 설치된 no. 4 센서는 동일한 간극수압 분포를 나타내었으며, 이는 수치해석 모델이 실물제방해석에 적합함을 의미한다.



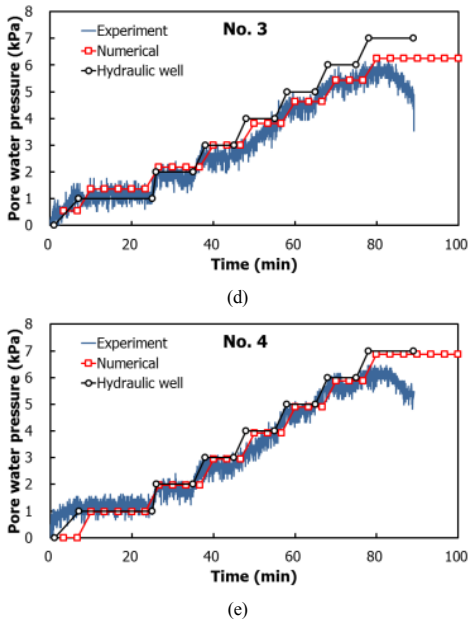


Fig. 10. Comparison of pore pressure of experiments and numerical analysis of case 1 (Hydraulic well Installation point)  
 (a) no. 0 (b) no. 1 (c) no. 2 (d) no. 3 (e) no. 4

Fig. 11은 Hydraulic well로부터 45cm 이격지점 하부의 실물제방 실험과 수치해석을 통해 산정된 간극수압을 비교한 것이다. Fig. 11 (a)의 지중 25cm 지점에 설치된 no. 5 센서는 해석결과가 실험보다 약 2 kPa 정도 높게 산정되었다. Fig. 11 (b)의 지중 15cm 지점에 설치된 no. 6 센서와 Fig. 11 (c)의 지중 5cm 지점에 설치된 no. 7 센서에서는 no. 5 센서에 비하여 수치해석과 실험의 간극수압 차이가 감소되었다.

Fig. 12는 Hydraulic well로부터 55cm 이격지점 하부의 실물제방 실험과 수치해석을 통해 산정된 간극수압을 비교한 것이다. Fig. 12 (a)의 지중 25cm 지점에 설치된 no. 8 센서는 초기에는 수치해석 결과가 실험보다 약 3 kPa 정도 높게 산정되었으나, Hydraulic well의 수위가 높아질수록 그 차이는 감소되었다. Fig. 12 (b)의 지중 15cm 지점에 설치된 no. 10 센서와 Fig. 12 (c)의 지중 5cm 지점에 설치된 no. 11 센서 모두 no. 8 센서와 동일한 경향을 나타내었으며, 그 격차는 감소되었다.

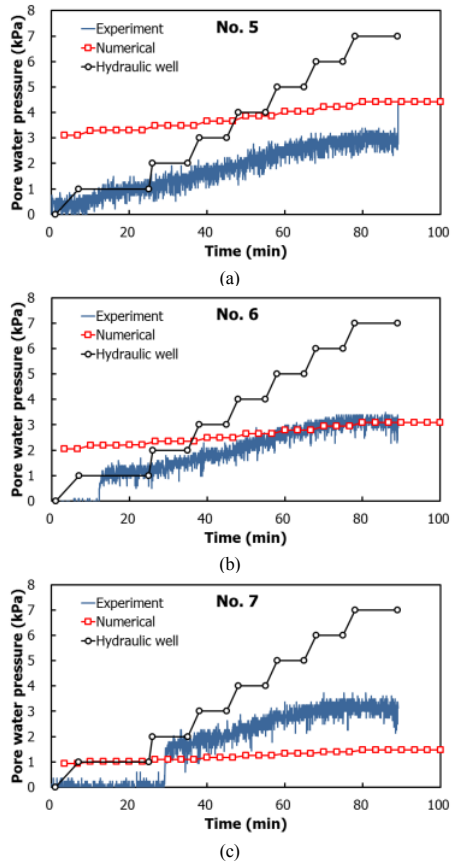
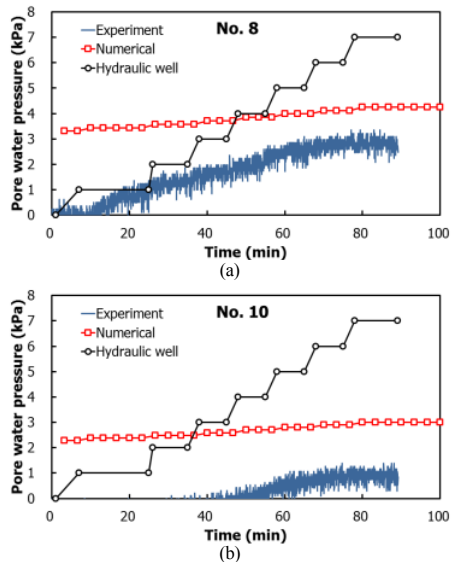


Fig. 11. Comparison of pore pressure of experiments and numerical analysis of case 1 (45cm separation site)  
 (a) no. 5 (b) no. 6 (c) no. 7





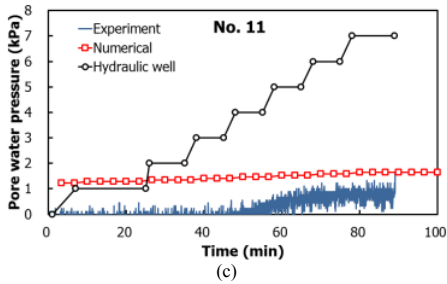


Fig. 12. Comparison of pore pressure of experiments and numerical analysis of case 1 (55cm separation site)  
(a) no. 8 (b) no. 10 (c) no. 11

#### 4.2.2 Case 2의 실물제방 실험과 수치해석 결과 비교

Fig. 13은 Hydraulic well이 설치된 지점의 실물제방 실험과 수치해석을 통해 산정된 간극수압을 비교한 것이다. 해석결과 비교는 4.2.1절과 동일한 기준으로 하였다. Fig. 13 (a)의 지중 35cm지점에 설치된 no. 0 센서와 Fig. 13 (b)의 지중 25cm지점에 설치된 no. 1 센서는 실험의 간극수압이 해석보다 약 3 kPa 정도 높게 산정되었다. Fig. 13 (c)의 지중 15cm지점에 설치된 no. 2 센서와 Fig. 13 (d)의 지중 5cm지점에 설치된 no. 3 센서는 실험과 해석결과가 거의 동일하게 나타났다.

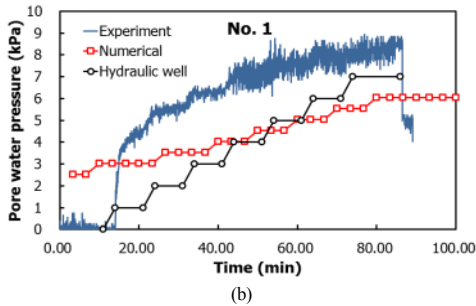
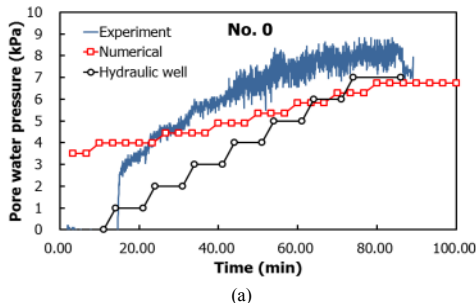
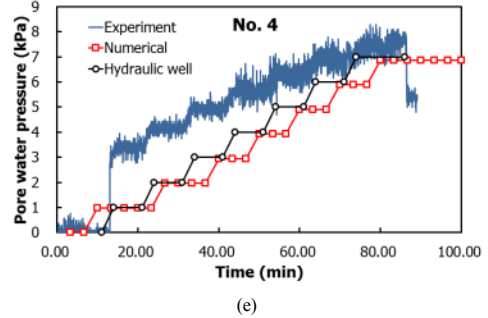
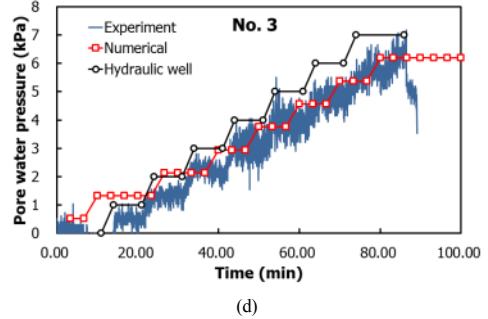
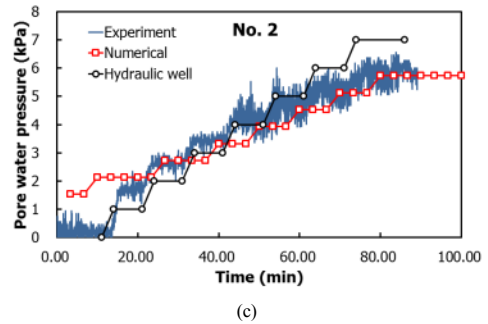
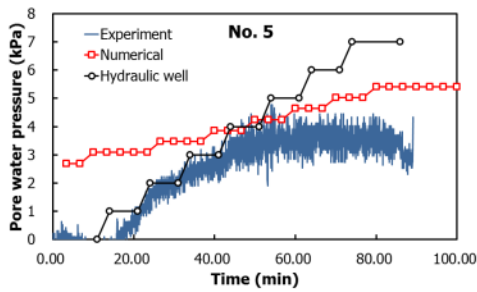
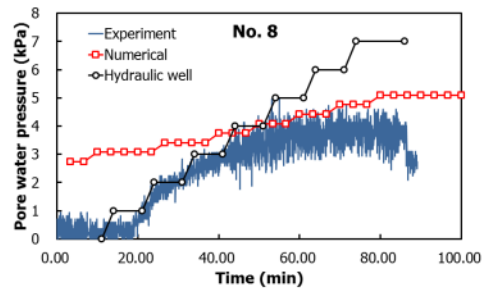


Fig. 13. Comparison of pore pressure of experiments and numerical analysis of case 2 (Hydraulic well Installation point)  
(a) no. 0 (b) no. 1 (c) no. 2 (d) no. 3 (e) no. 4

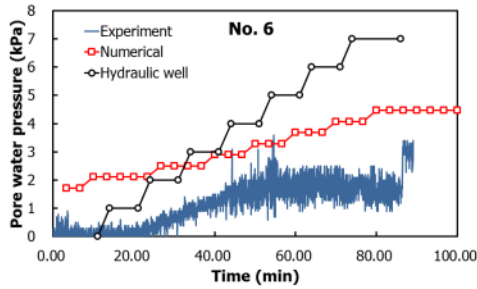
Fig. 14는 Hydraulic well로부터 45cm 이격지점 하부의 실물제방 실험과 수치해석을 통해 산정된 간극수압을 비교한 것이다. Fig. 14 (a)의 지중 25cm지점에 설치된 no. 5 센서는 해석결과가 실험의 간극수압보다 약 3 kPa 정도 높게 산정되었다. Fig. 14 (b)의 지중 15cm지점에 설치된 no. 6 센서와 Fig 14 (c)의 지중 5cm지점에 설치된 no. 7 센서에서는 해석과 실험의 간극수압 차이가 증가되는 양상을 보였다.



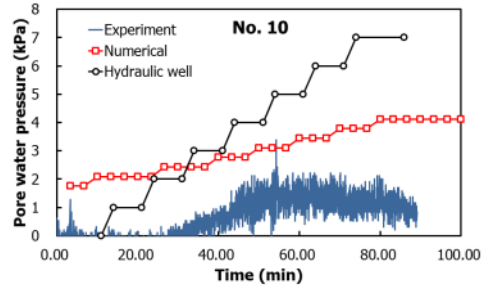
(a)



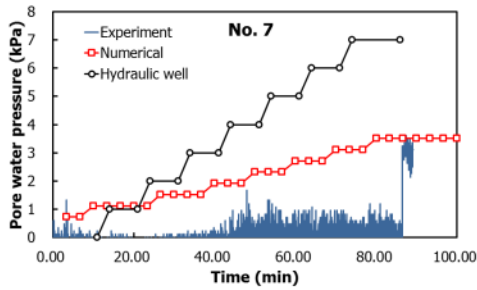
(a)



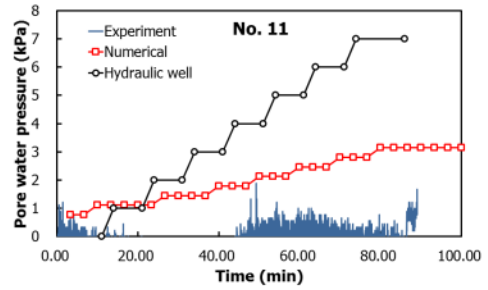
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 14. Comparison of pore pressure of experiments and numerical analysis of case 2 (45cm separation site)  
(a) no. 5 (b) no. 6 (c) no. 7

Fig. 15. Comparison of pore pressure of experiments and numerical analysis of case 2 (55cm separation site)  
(a) no. 8 (b) no. 10 (c) no. 11

Fig. 15는 Hydraulic well로부터 55cm 이격지점 하부의 실물제방 실험과 수치해석을 통해 산정된 간극수압을 비교한 것이다. Fig. 15 (a)의 지중 25cm지점에 설치된 no. 8 센서는 초기에는 수치해석 결과가 실험보다 약 3 kPa 정도 높게 산정되었으나, Hydraulic well의 수위가 높아질수록 그 차이는 감소되었다. Fig. 15 (b)의 지중 15cm지점에 설치된 no. 10 센서와 Fig. 15 (c)의 지중 5cm지점에 설치된 no. 11 센서 모두 no. 8 센서와 동일한 경향을 나타내었으며, 그 격차는 감소되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Matsuyama River National Highway Office(2011)[10]가 홍수 시 제방 뒤통수단이나 뒷비탈기슭 부근에 제체누수 및 파이핑이 발생될 경우 누수방지 대책으로 제안한 월류공법의 단점을 개선한 Hydraulic well을 개발·제작하여 수두 차에 따른 지반 침투압 분포특성을 제방실험을 통해 평가하고 침투해석을 통하여 검증하였다.

- 1) 파이핑방지공법인 Hydraulic well은 지중 내 침투 압분포특성의 경우 상하류 수두차(H)가 0.1m ~ 0.7m로 변화함으로써 Hydraulic well 직하의 경우 지표 밑 5cm 89%, 지표 밑 15cm 63%, 지표 밑 25cm 63% 측벽부의 경우 이격거리 35cm 지표 밑 5cm 25%, 지표 밑 15cm 28%, 이격거리 45cm 지표 밑 25cm 28% 등으로 침투압 저감이 발생하는 것으로 평가 되었다.
- 2) Hydraulic well 하부의 실물제방 실험과 수치해석의 간극수압을 비교한 결과, 제외지 수위과형에서 20시간 경과 후를 기준으로 지표에서는 실험과 해석결과에서 거의 동일하게 나타났으며(no. 4), 심도가 깊어질수록 수치해석이 실험보다 크게 산정되었다.
- 3) Hydraulic well로 부터 45cm 이격지점 하부의 실물제방 실험과 수치해석의 간극수압을 비교한 결과, 지중 25cm 지점에 설치된 센서는 수치해석이 실험보다 약 2 ~ 3 kPa 정도 높게 산정되었다. 지중 15cm지점과 5cm지점에서는 수치해석과 실험의 차이가 감소되었다. Hydraulic well로 부터 55cm 이격지점에서도 45cm 이격지점 결과와 동일한 양상을 나타내었다.

## References

- [1] K. S. Kim, and K. T. Jo, "A Study on the Estimation of Leakage and the probing Leakage in the River Bank", Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, vol. 6, no. 4, pp. 213-217, 1999.
- [2] KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology), The final report of the river embankment related advanced technology development, Korea, pp. 23-31, pp. 68-78, 2004.
- [3] KGS(Korea Geotechnical Society), Dam and embankment design and construction safety management technology, Goomibook, pp. 391-573, 2012.
- [4] D. K. Im, H. K. Yeo, K. H. Kim, J. G. Kang, "Suitability Analysis of Numerical Models Related to Seepage through a Levee", Journal of Korea Water Resources Association, vol. 39, no. 3, pp. 241-252, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2006.39.3.241>
- [5] J. M. Kim, and I. J. Moon, "Analysis of River Levee Failure Mechanism by Piping and Remediation Method Evaluation", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 18, no. 3, pp. 600-608, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.3.600>
- [6] H. S. Jung, Y. S. Byun, B. S. Chun, B. H. Choi, J. M. Kim, "Numerical Analysis for Integrity Evaluation of River Bank", Journal of Korean geo-environmental Society, vol. 11, no. 11, pp. 19-26, 2010.
- [7] R. L. Taylor, and C. B. Brown, "Darcy flow with a free surface", Hydraulic Division, ASCE, vol. 93, pp. 25-33, 1976.
- [8] S. P. Neuman, and P. A. Witherspoon, "Finiter element method of analyzing steady seepage with a free surface", Water Resources Research, America, vol. 6, pp. 889-897, 1970.  
DOI: <https://doi.org/10.1029/WR006i003p00889>
- [9] T. Uno, H. Morisugi, T. Sugii, Y. Nakano, "Stability Evaluation of River Levees on the Basis of Actual Levee Breachings", Japan Society of Civil Engineers, vol. 400, no. 3-10, pp. 55-76, 1987.
- [10] Matsuyama River National Highway Office. "Flood Prevention Handbook", Shikoku Regional Development Bureau, Japan, 2011.
- [11] KWRA(Korea Water Resources Association), River Design Standard, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea, 2009.
- [12] J. H. Kim, "Experimental and Numerical Analyses of Seepage Flows in Levees with Permeable Foundations", Department of Civil Engineering Graduate School Kyungsung University, 2013.
- [13] KICT(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology), An Analysis of embankment, Analysis of reinforcement techniques of Levee infiltration, Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, Korea, 2006.
- [14] A. Casagrande, "Notes on the design of earth dams", Proc. Of Boston Society of Civil Engineers, 1950.
- [15] H. L. Sherard, "Influence of soil properties and construction methods on the performance of homogeneous earth dams", Technical Memorandum 645, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, pp. 1-71, 1953.
- [16] NAVFAC Manual, Foundation & Earth Structures, 1986
- [17] K. K. Kwon, "An improved design method of Levee culvert using 3D seepage analysis", Ph.D dissertation, Kyunghee University, pp. 5-228, 2007.
- [18] 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>
- [19] M. T. 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>

**박민철**(Min-Cheol Park)

[정회원]



- 2010년 2월 : 금오공과대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 응용지반연구실 박사후연구원

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토 옹벽

**진윤화**(Yoon-hwa Jin)

[정회원]



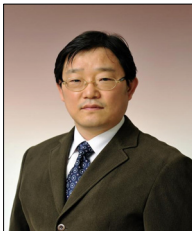
- 2016년 2월 : 금오공과대학교 토목공학과 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 석사과정

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토 옹벽

**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 수석연구원

<관심분야>

토질 및 기초, 하천제방, 옹벽