



## 농업용 저수지 제방에서 3차원 수치해석에 의한 감압정의 효과 분석

### Evaluation on the Effect of Relief Wells by 3D Numerical Analysis on the Embankment of an Agricultural Reservoir

유전용<sup>a</sup> · 허준<sup>b</sup> · 장용채<sup>c,†</sup>

Ryu, Jeon-Yong · Heo, Joon · Chang, Yong-Chai

#### ABSTRACT

Through 3D seepage analysis of pressure relief well installed on the embankment of agricultural reservoir, the effects of reducing pore water pressure and hydraulic gradient, and increasing piping safety, depending on diameter (0.2, 0.4, 0.6 m) and space (10, 25, 50 m) of relief well, were analyzed. The conclusions drawn through this study are as follows. i) At the location of pressure relief well, pore water pressure decreases by 25.3~62.5%, and hydraulic gradient decreases by 22.4~55.7%. ii) Between relief wells, pore water pressure decreases by 2.7~40.3%, and hydraulic gradient decreases by 2.8~47.0%, which are relatively less than at the cross section of installed location of relief well. iii) Piping safety factor by critical hydraulic gradient increases by 28.9~125.6% at the location of relief well and increases by 2.9~88.8% between relief wells. iv) Seepage analysis needs to be performed by the 3D method to make evaluation of seepage at the location of relief well and between relief wells possible. v) Additional evaluation is required for various conditions such as waterhead, engineering characteristics of embankment body and its foundation, location, diameter, spacing and depth of pressure relief well.

**Keywords:** Reservoir embankment; relief well; pore water pressure; hydraulic gradient; 3D analysis

## 1. 서론

전국에 산재하고 있는 약 17,500여 개소의 농업용 저수지는 기상이변 현상과 더불어 노후화로 인해 제체의 월류 및 내부침식 대응방안 등 붕괴방지 기술이 지속적인 관심사가 되고 있다. 최근 기후 변화의 영향으로 과거보다 강우가 집중되어 자연재해가 증가하고 있기 때문에 재해예방에 대한 대책이 필요한 실정이며, 이러한 자연환경의 변화는 비교적 침투에 취약한 농업용 저수지의 구조적 안정에 영향을 미치게 된다. 최근 들어 발생한 국내의 저수지의 붕괴사례를 살펴보면 주변지역 및 하류지역에 대규모 사회적 피해를 발생시키고 있으므로, 제체 붕괴로 인한 피해발생을 방지하기 위한 선

제적 대응이 시급한 실정이다.

필댐의 붕괴는 월류 (37.9%)와 파이핑 (39.7%)이 주된 원인으로 분석되고 있고, 월류는 집중호우 등의 기상조건에 의해 발생, 파이핑은 시간경과에 따라 제체의 내구성이 저하하는 현상으로 발생하는 등 농업용저수지 제체의 노후화와 관련된 문제는 월류와 파이핑에 관한 문제를 중요하게 고려하여야 한다 (MAFRA, KRC, 2019). 한편, 저수지 하부 기초지반이 암반이 아닌 투수성 지반 위에 축조되어 있는 경우, 투수성 토층 내부로 침투수에 의한 제체 하류사면 하단부의 높은 간극수압의 발생으로 인해 제체의 장기적인 안정성 문제를 초래하게 된다. 제체의 안정성 증대 방법으로 침투수를 안전하게 제체의 외부로 배수를 유도하거나, 블랭킷, 지수벽을 설치하는 경우도 있다. 또한, 지표면을 덮고 있는 불투수층이 두꺼운 경우나 층상을 이루고 있는 지반에서는 감압정을 설치하는 방법이 유효한 것으로 알려지고 있다. 감압정은 압력을 해소하기 위해 수직으로 설치하여 스크린이 포함된 관정을 말하며, 기초지반의 토사 유출을 방지하기 위하여 필터재료가 스크린을 둘러싸고 있는 형태로 구성된다 (U.S. Army Corps of Engineers, 1992; Chang et al., 2020). 이란의 Karkheh 댐에서는 제체의 하류사면 끝단부에 40개의 감압정을 설치하여 압력수두를 저감시키기 위한 목적으로 사용하고 있다 (Heidarzadeh et al., 2015).

<sup>a</sup> Doctoral Course, Department of Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University, Director General, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

<sup>b</sup> Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

<sup>c</sup> Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-61-240-7311, Fax: +82-61-240-7341

E-mail: [geo@mmu.ac.kr](mailto:geo@mmu.ac.kr)

Received: August 24, 2020

Revised: September 7, 2020

Accepted: November 2, 2020

일반적으로 감압정은 지표로부터 투수층의 전체 깊이를 관통하도록 직경 15~60 cm의 우물을 8~30 m의 간격으로 설치하고 있으나 (Salmasi et al., 2015), 설계시에는 수두조건과 지반조건, 감압정의 직경, 설치간격 등 다양한 요소를 종합고려해서 그 효과를 평가하고 설치제원을 결정해야 한다. 댐체에서 정상상태의 침투류해석이나 안정해석은 일반적으로 2차원 수치해석으로도 충분하다. 그러나 댐체의 종단방향으로 제체의 정해진 위치에 감압정을 설치하는 경우, 감압정 간격, 감압정 직경 등 요소를 감안하면, 침투류해석이나 안정해석은 3차원 해석이 필요하다. 이는 제체의 종단방향으로 감압정의 설치위치와 감압정과 감압정의 사이에서의 침투압력이나 안정성이 서로 다르게 나타나기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 저수지 제체의 높이와 수두, 기하학적 형상, 축조재료와 기초의 토질특성, 감압정의 설치간격과 직경 등 요소를 가정하여 3차원 침투류 해석을 실시하고 간극수압의 변화 및 한계동수경사 방법에 의한 안정성 평가를 수행함으로써 노후된 저수지 제체의 붕괴방지 수단으로 적용 가능한 감압정의 효과를 분석하였다.

## II. 감압정 효과에 관한 수치해석

### 1. 수치해석 모델

침투류 해석의 유선망 방법으로는 단면의 기하학적 형상 및 복잡한 경계조건을 고려하는데 한계가 있어 현재는 유한요소법이나 유한차분법을 등의 수치해석기법이 활용되고 있다 (Cho, 2012). 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 유한요소해석 침투에 사용되는 지배미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $H$ 는 전수두 (m),  $k_x$ 는  $x$ 방향의 투수계수 (m/sec),  $k_y$ 는  $y$ 방향의 투수계수 (m/sec),  $k_z$ 는  $z$ 방향의 투수계수 (m/sec),  $Q$ 는 흙의 단위 체적당 단위시간당 물의 유출입량 ( $m^3/m^3 \cdot sec$ ),  $\theta$ 는 체적함수비,  $t$ 는 시간 (sec)이다.

흙속에서 물이 상향 침투가 발생하면 유효응력이 감소하고 유효응력이 0인 조건에 도달하면 흙의 안정상태가 파괴되는 파이프링 (Piping) 현상이 발생한다. 유효응력이 0이되는 동수경사 ( $i$ )를 한계동수경사 ( $i_{cr}$ )라 한다. 한계동수경사에 의한 안전율은 다음과 같이 검토된다.

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1) \quad (2)$$

$$F_s = \frac{i_{cr}}{i} \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$ 는 토립자의 수중단위중량 ( $kN/m^3$ ),  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량 ( $kN/m^3$ ),  $G_s$ 는 토립자의 비중,  $e$ 는 흙의 간극비,  $n$ 은 흙의 간극률이다.

### 2. 수치해석 조건

본 논문에서는 감압정의 설치에 따른 양압력 및 동수경사의 감소 효과를 확인하기 위하여 3차원 침투해석을 수행하였다. 저수지 제방의 형식은 균일형으로 가정하였으며 하부지반은 침투류 흐름이 발생하는 풍화토 지층 (10 m)과 침투류 흐름이 발생하지 않는 연암층 (90 m)으로 가정하여 분석하였

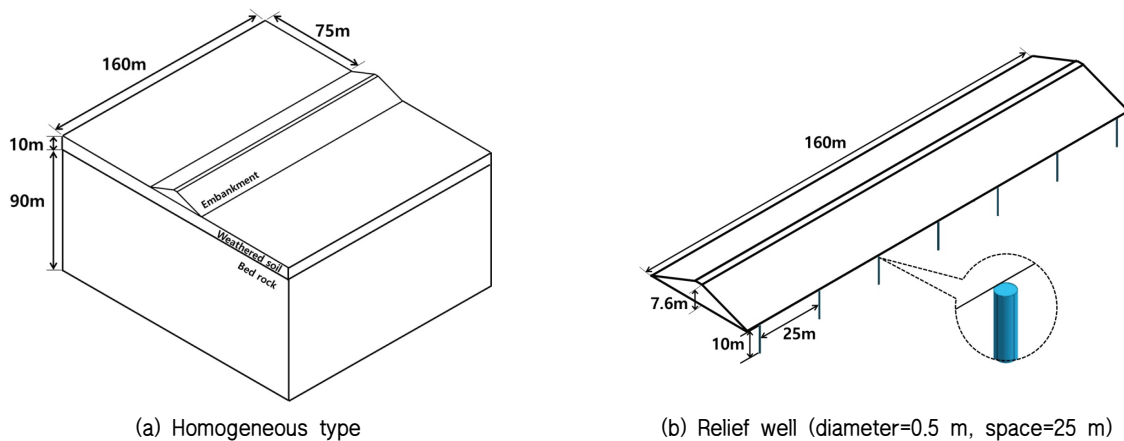


Fig. 1 Numerical analysis model

다. 저수지 제방의 높이는 농업생산기반정비사업 통계연보를 분석하여 농업용 저수지 평균 높이 7.6 m로 결정하였다 (MAFRA, KRC, 2018). 상류사면과 하류사면의 경사도는 1:2.5, 댐마루폭은 2.6 m이고, 제방의 길이는 160 m로 설정하

였다. 감압정의 직경은 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m 등 3가지 조건으로 적용하였으며 설치간격은 10 m, 25 m, 50 m 등 3가지 조건으로 침투해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지반의 물성치는 농업용저수지 30개 지구의 비상대처계획 (EAP) 자료를 참조하여 제방과 하부지반 풍화도의 투수계수를 결정하였다. 침투류 해석을 위한 불포화 함수특성의 체적함수비와 부간극수압의 관계는 농업용저수지 설계 자료를 참조하여 결정하였다. 저수지 제방의 수위조건은 최대홍수위 (5.6 m)와 상시만수위 (4.6 m) 조건으로 가정하여 정상류 수치해석을 수행하였다. 감압정의 직경, 설치 간격, 수위조건 등을 고려하여 20개 Case의 해석을 수행하였다. 감압정 효과분석을 위한 해석모델과 조건은 Fig. 1과 Table 1에, 분석한 20개의 Case는 Table 2에 나타내고 있다.

**Table 1** Numerical analysis condition

Classification		Homogeneous earth fill dam
Fill dam	Height (m)	7.6
	Width (m)	2.6
	Slope (V:H)	1:2.5
	Length (m)	160
Permeability	Embankment (m/sec)	$5.75 \times 10^{-7}$
	Weathered soil (m/sec)	$2.78 \times 10^{-4}$
	Bed rock (m/sec)	$5.00 \times 10^{-11}$
Relief well diameter (m)		0.2, 0.4, 0.6
Relief well depth (m)		10
Space between relief wells (m)		10, 25, 50
Upstream water head (m)		5.6(F.W.L.), 4.6(N.H.W.L.)

### 3. 수치해석 방법

감압정의 직경, 설치간격에 따른 제방의 안정성 향상 효과를 분석하기 위해 3차원 유한요소 침투해석 프로그램 midas GTS NX를 사용하였다. 침투해석 요소망의 크기는 일본 하천 설계기준에서 제안하는 제방 높이의 1/10이하로 설정하였다

**Table 2.** Condition used in numerical analysis of relief well

	Relief well diameter (m)				Relief well space (m)			Upstream water head (m)	
	0	0.2	0.4	0.6	10	25	50	5.6(F.W.L)	4.6(N.H.W.L.)
CASE 1	○	-	-	-	-	-	-	○	-
CASE 2	-	○	-	-	○	-	-	○	-
CASE 3	-	○	-	-	-	○	-	○	-
CASE 4	-	○	-	-	-	-	○	○	-
CASE 5	-	-	○	-	○	-	-	○	-
CASE 6	-	-	○	-	-	○	-	○	-
CASE 7	-	-	○	-	-	-	○	○	-
CASE 8	-	-	-	○	○	-	-	○	-
CASE 9	-	-	-	○	-	○	-	○	-
CASE 10	-	-	-	○	-	-	○	○	-
CASE 11	○	-	-	-	-	-	-	-	○
CASE 12	-	○	-	-	○	-	-	-	○
CASE 13	-	○	-	-	-	○	-	-	○
CASE 14	-	○	-	-	-	-	○	-	○
CASE 15	-	-	○	-	○	-	-	-	○
CASE 16	-	-	○	-	-	○	-	-	○
CASE 17	-	-	○	-	-	-	○	-	○
CASE 18	-	-	-	○	○	-	-	-	○
CASE 19	-	-	-	○	-	○	-	-	○
CASE 20	-	-	-	○	-	-	○	-	○

(Jin et al., 2011; Byun et al., 2012). Fig. 2는 균일형 제방의 요소망과 간극수압 및 동수경사 변화에 대한 분석지점을 나타내고 있다. 제방 횡단면에서 분석지점은 제방 하류사면 (P1), 풍화토층 (P2) 및 제방 중앙 (P3)을 검토하였다. 하류사면과 풍화토층의 분석위치는 사면 끝단부에서 좌방향 0.5 m, 제방과 하부지반과의 경계면으로부터 상부와 하부 0.1 m 지점에서 각각 분석하였으며 제방 중앙부의 분석위치는 제방과 원지반의 경계면으로부터 상부 0.1 m 지점에서 분석하였다. 또한, 제방 횡단면에서 정의한 각 지점에 대한 ① 감압정 미설치 조건으로 제방 종단방향의 전체구간에 대한 간극수압과 동수경사를 분석하고 (Case 1, 11에 해당하며, 감압정 직경을 0 m로 해석), ② 감압정 설치지점 (RW), ③ 감압정과 감압정의 중간지점 (BRW)에서 간극수압과 동수경사를 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 간극수압의 변화

감압정 설치 유무에 따른 침투거동을 분석하기 위하여 감압정의 직경 및 설치 간격을 변화시켜 제방하류사면, 제방중앙부 및 풍화토층의 간극수압을 분석하였다. 감압정 설치조건에 따른 간극수압의 결과 예시는 Fig. 3에 나타내고 있다.

Fig. 4는 홍수위 조건 하류사면 (P1) 분석 지점에서 제방 종단방향으로 감압정의 설치 간격과 직경에 따른 간극수압의 분포를 나타내고 있다. 각 그림에서 맨 위에 위치한 적색선은 감압정이 설치되지 않은 경우 (감압정 직경을 0으로 해석)의 간극수압을 나타낸 것이다. 감압정이 설치된 위치 (RW)에서 제방에 작용하는 간극수압은 급격히 감소되었으며, 감압정과 감압정 사이에서 간극수압감소는 상대적으로 적은 것으로 평가 되었다. 감압정이 설치된 제방의 최대간극수압은 감압정

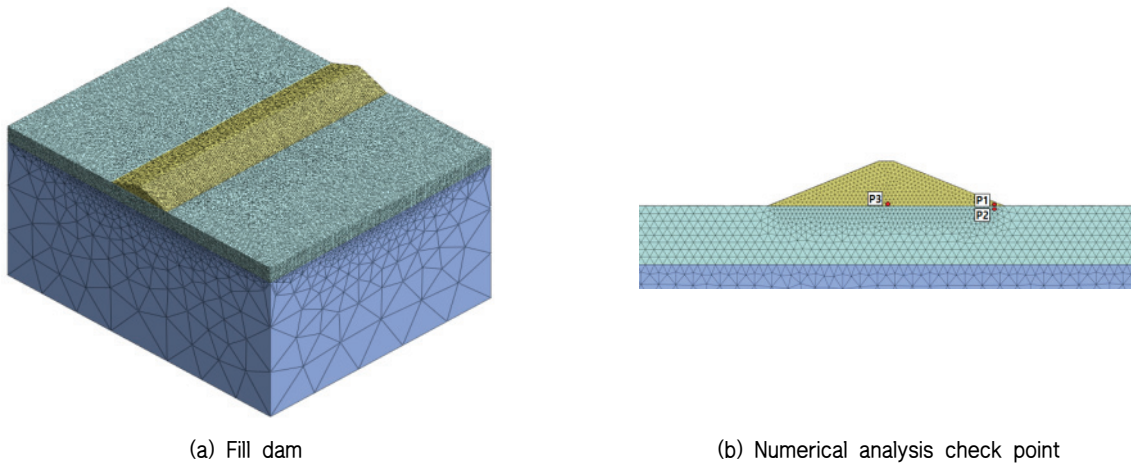


Fig. 2 Numerical analysis modeling

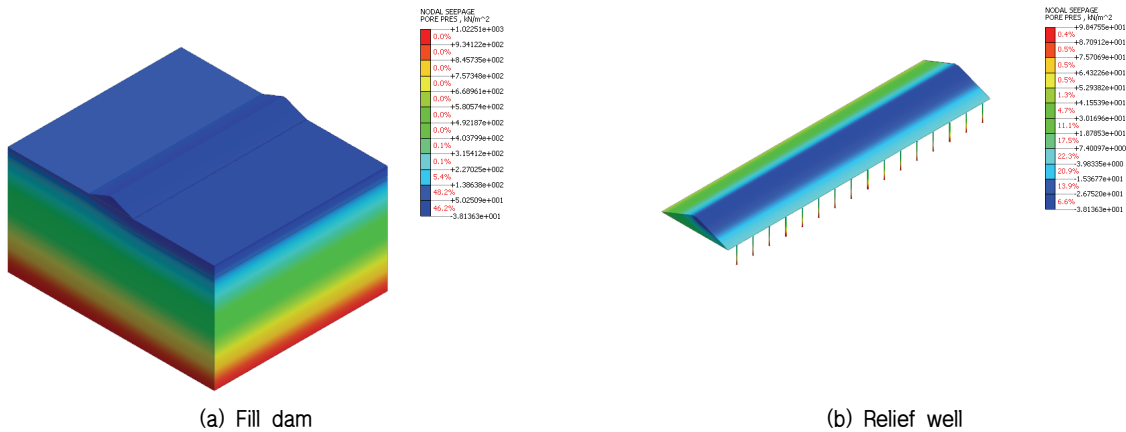


Fig. 3 Numerical analysis result on pore pressure (CASE 8)

과 감압정 사이의 중간지점 (BRW)에서 나타났고, 최소간극수압은 감압정이 설치된 위치에서 나타났다.

Fig. 5는 감압정의 설치간격, 직경변화에 따라 홍수위 및 상시만수위 조건에서 하류사면 (P1)에 작용하는 종단방향 간극수압 (Fig. 5-a,b,d,e)과 감소비 (Fig. 5-c,f)를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 조건에서 홍수위 및 상시만수위 시 제방 하류사면에 작용하는 최대간극수압은 4.03 kPa (Fig. 5-a,b)과 3.21 kPa (Fig. 5-d,e)로 평가되었다. 홍수위 조건에서 감압정이 설치된 위치 (RW)에서는 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 3.01 kPa로 최소 25.3% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 1.51 kPa로 최대 62.5% 감소하는 것으

로 평가되었다. 감압정과 감압정의 중간 위치 (BRW)에서는 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 3.92 kPa로 최소 2.7% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 2.41 kPa로 최대 40.3% 감소하는 것으로 평가되었다. 상시만수위 조건에서 감압정이 설치된 위치 (RW)에서는 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 2.29 kPa로 최소 28.6% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 1.50 kPa로 최대 53.4% 감소하는 것으로 평가되었다. 감압정과 감압정의 중간 위치 (BRW)에서는 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 3.21 kPa로 최소 3.0% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 1.80 kPa로 최대 43.8% 감소하는 것으로 평가되었다.

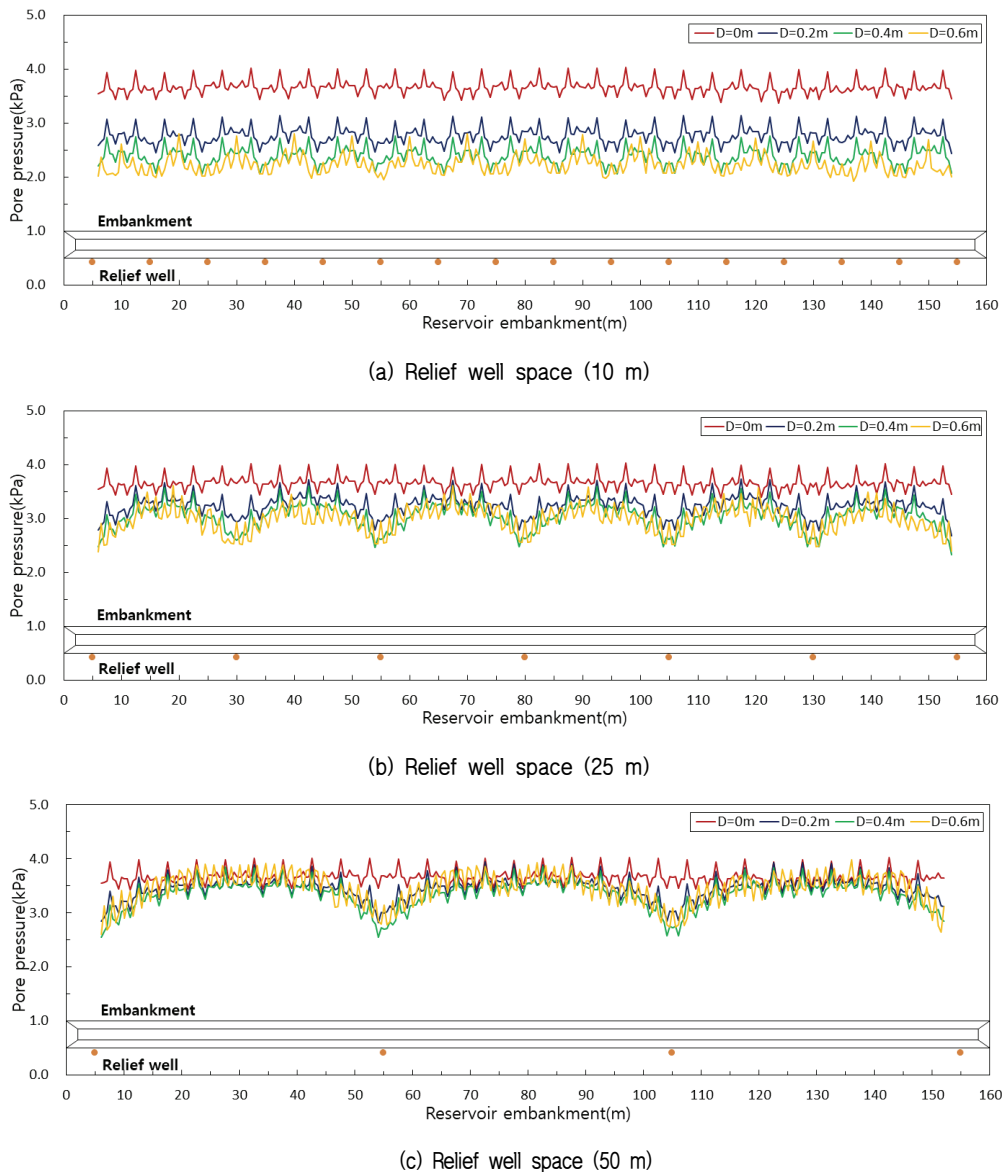
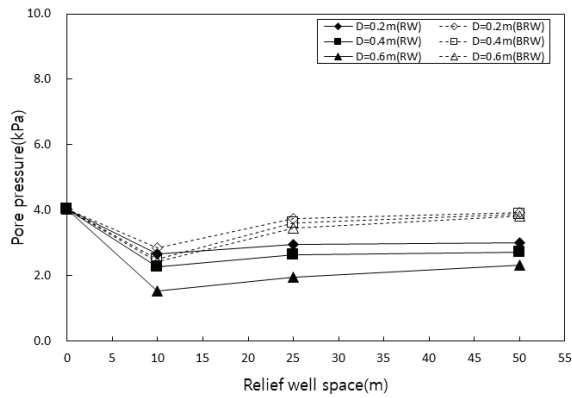


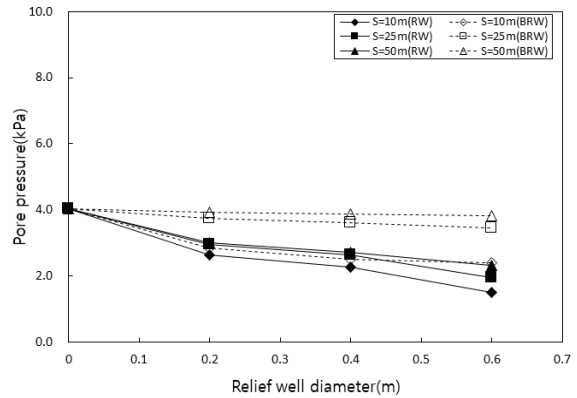
Fig. 4 Pore pressure in longitudinal direction of downstream slope (P1)

Fig. 6은 감압정의 설치간격, 직경변화에 따라 홍수위 및 상시만수위 조건에서 풍화토층 (P2)에 작용하는 종단방향 최대간극수압 (Fig. 6(a))과 이때의 감소비 (Fig. 6(b))를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 조건에서 홍수위 및 상시만수위 시 풍화토층에 작용하는 최대간극수압은 7.31 kPa (Fig.

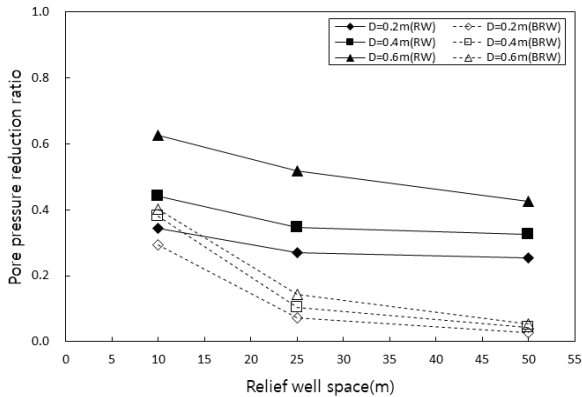
6(a))과 6.85 kPa (Fig. 6(a))로 평가되었다. 홍수위 조건에서 최대간극수압은 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 최소 2.5% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 6.36 kPa로 최대 13.0% 감소하는 것으로 평가되었다. 상시만수위 조건에서 최대간극수압은 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서



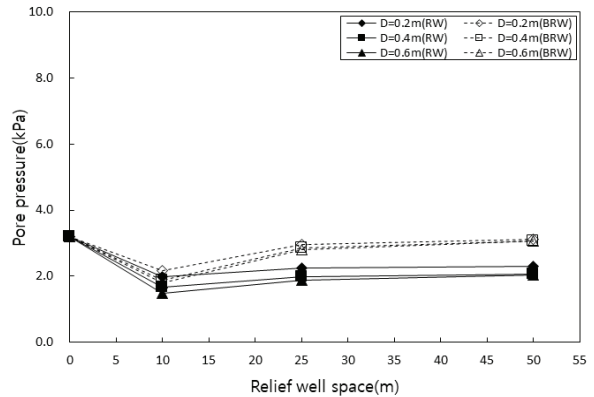
(a) Pore pressure (relief well space, F.W.L.)



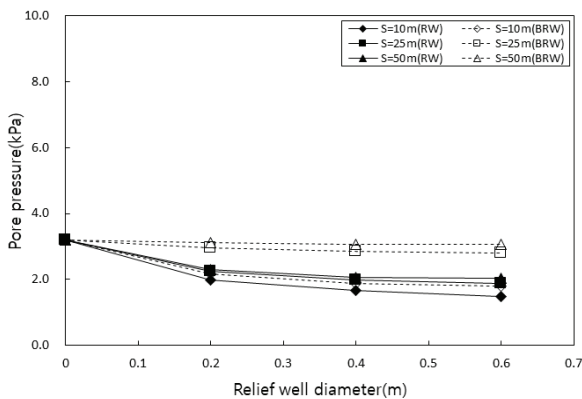
(b) Pore pressure (relief well diameter, F.W.L.)



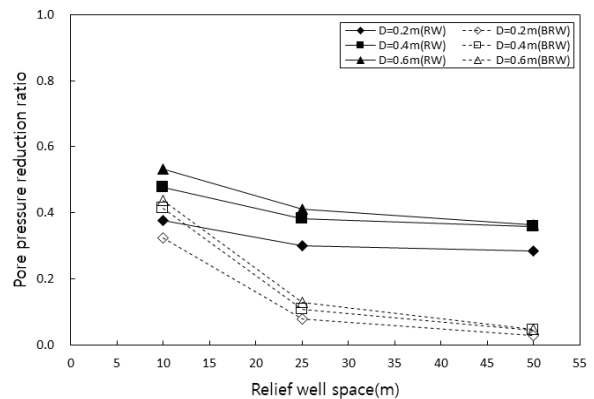
(c) Pore pressure reduction ratio (F.W.L.)



(d) Pore pressure (relief well space, N.H.W.L.)



(e) Pore pressure (relief well diameter, N.H.W.L.)



(f) Pore pressure reduction ratio (N.H.W.L.)

Fig. 5 Pore pressure at downstream slope (P1)

최소 2.3% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 6.11 kPa로 최대 10.9% 감소하는 것으로 평가되었다.

Fig. 7은 감압정의 설치간격, 직경변화에 따라 홍수위 및 상시만수위 조건에서 제방 중앙부 (P3)에 작용하는 종단방향 최대간극수압 (Fig. 7(a))과 이때의 감소비 (Fig. 7(b))를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 조건에서 홍수위 및 상시만수위에서 제방 중앙부에 작용하는 최대간극수압은 27.61 kPa (Fig. 7(a))과 22.67 kPa (Fig. 7(a))로 평가되었다. 홍수위 조건에서 최대간극수압은 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 27.44 kPa로 최소 0.6% 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 26.28 kPa로 최대 4.9% 감소하는 것으로 확인되었다. 상시만수위 조건에서 최대간극수압은 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 22.53 kPa로 최소 감소하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 21.57 kPa로 최대 감소하는 것으로 평가되었다. 상시만수위 조건에서의 최대간극수압의 감소비는 홍수위 조건과 유사하게 나타났다.

한편, 분석된 간극수압이 펄스형태로 나타나는 것은 유한

요소해석의 요소크기 영향에 따른 것으로 판단된다. 이에 대한 규명을 위해서는 추가적인 분석이 필요하다. 감압정의 직경과 설치간격에 따른 간극수압의 감소 효과를 분석한 결과, 직경과 설치간격에 따라 간극수압 감소의 크기는 다르게 나타나고 있다. 또한, 감압정은 제방 하류사면 뿐만 아니라 제방 중앙부, 하부지반에서도 간극수압의 감소효과가 나타나고 있다.

따라서 Fig. 4의 감압정이 설치된 제방의 3차원 침투해석 결과에 나타난바와 같이 침투압력이 제체의 종단방향으로 감압정의 설치위치와 감압정과 감압정의 사이에서 서로 다르게 나타나고 있으므로, 침투분석은 3차원 해석으로 수행하는 것이 타당하다고 판단된다.

## 2. 동수경사의 변화

감압정 설치 유무에 따른 침투거동을 분석하기 위하여 감압정의 직경 및 설치간격을 변화시켜 제방 하류사면의 유출 동수경사를 분석하였다. 동수경사와 파이핑 안전율은 홍수위 조건에서 제방의 침투거동을 분석하였다. 감압정 설치에 따

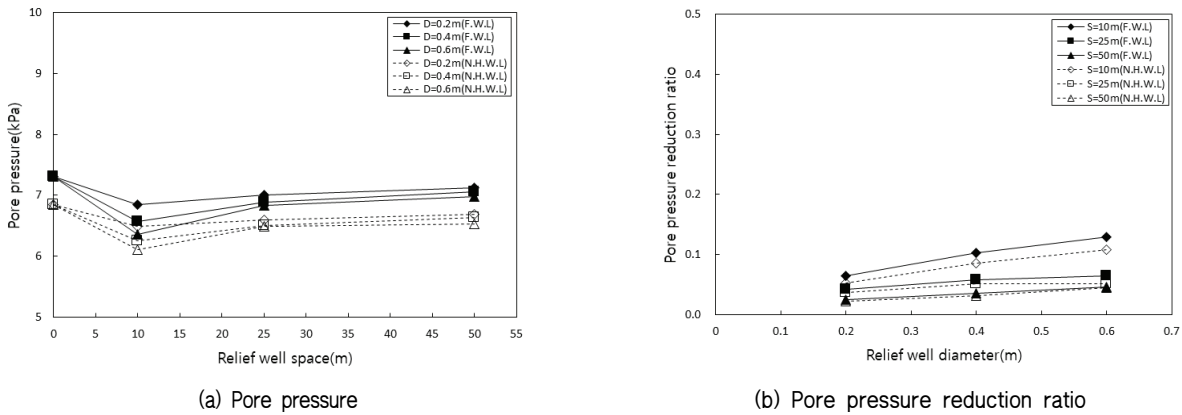


Fig. 6 Pore pressure at weathered soil (P2, BRW)

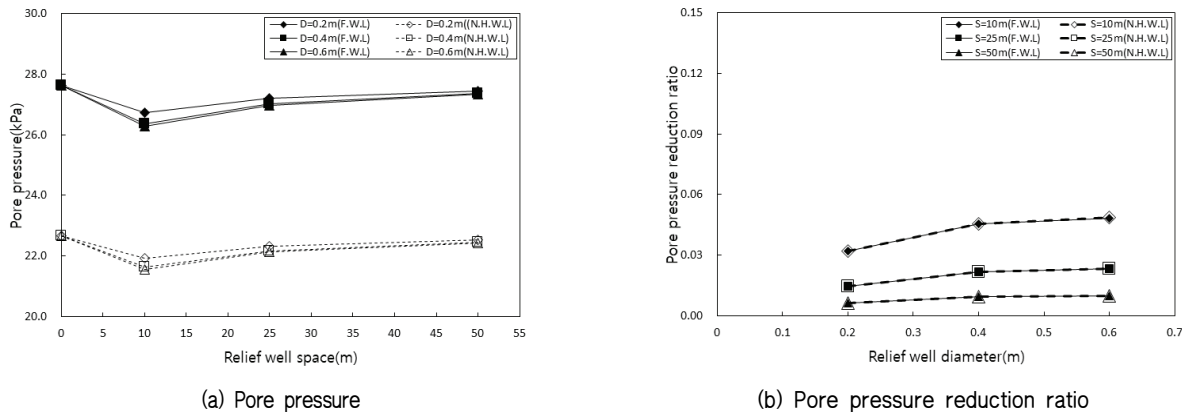


Fig. 7 Pore pressure at embankment middle part (P3, BRW)

른 동수경사의 결과 예시는 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 9는 홍수위 조건의 하루사면 분석 지점 (P1)에서 제방 종단방향으로 감압정의 설치간격과 직경에 따른 동수경사의

전체 분포를 나타냈다. 동수경사의 변화는 감압정이 설치된 위치 (RW)에서 제방에 작용하는 동수경사가 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 감압정과 감압정 사이에서는 상대적

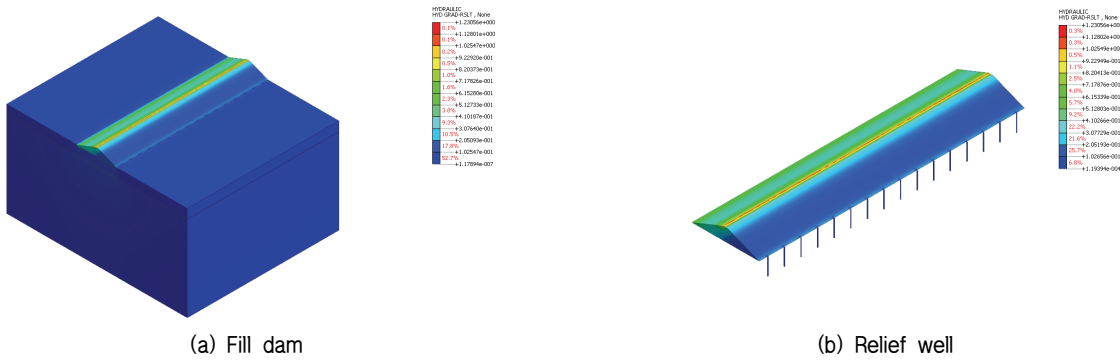


Fig. 8 Numerical analysis (hydraulic gradient) result (CASE 8)

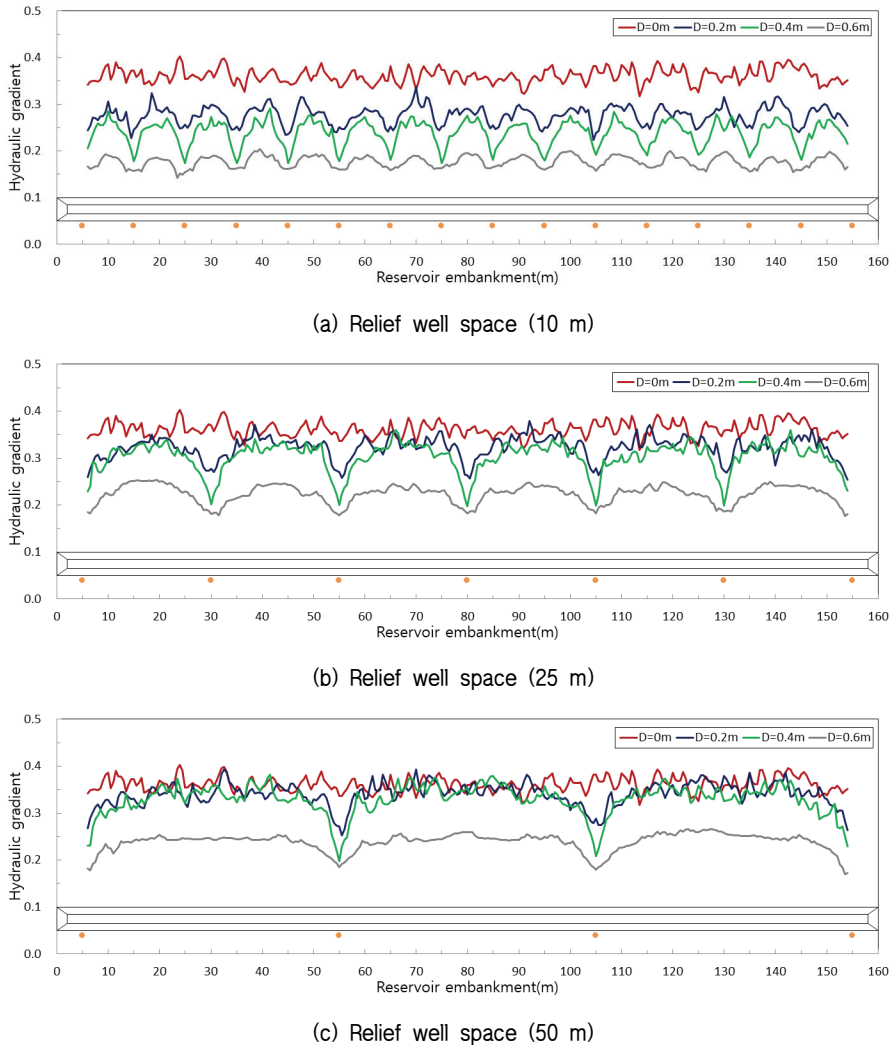
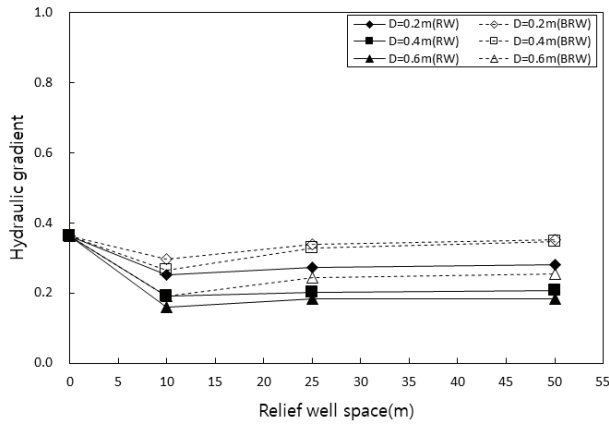
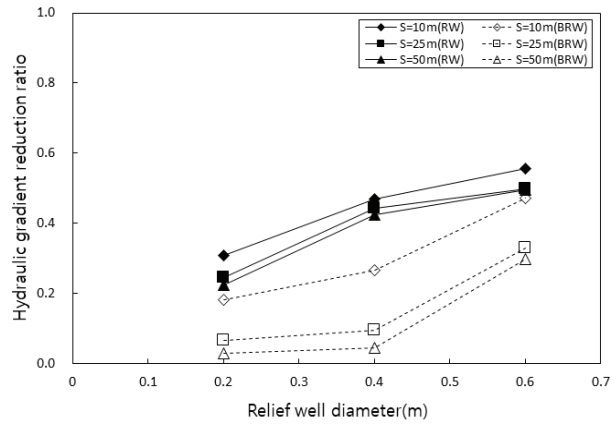


Fig. 9 Hydraulic gradient in longitudinal direction of downstream slope (P1, F.W.L.)





(a) Hydraulic gradient (F.W.L.)



(b) Hydraulic gradient reduction ratio (F.W.L.)

Fig. 10 Hydraulic gradient at downstream slope (P1)

으로 더 적은 것으로 평가되었다. 감압정이 설치된 제방의 최대동수경사는 감압정과 감압정 사이의 중간지점 (BRW)에서 나타났고, 감압정이 설치된 위치 (RW)에서 동수경사가 가장 적은 것으로 나타났다. 감압정의 설치에 따른 상대적인 효과를 분석하기 위하여 감압정이 설치되지 않은 조건 (감압정 직경을 0으로 해석)과 비교하였다. Fig. 9(a)-(c)에서 맨 위에 위치한 적색선은 감압정이 설치되지 않은 경우의 동수경사를 나타낸다.

Fig. 10은 감압정의 설치 간격, 직경의 변화에 따라 홍수위 조건의 하류사면 P1 지점에서 동수경사 (Fig. 10(a))와 동수경사의 감소비 (Fig. 10(b))를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 홍수위 (감압정 직경을 0으로 해석, Case-1에 해당)에서 제방하류사면에 작용하는 최대유출동수경사는 0.361로 평가되었다. 최대유출동수경사를 분석하면 다음과 같다. 홍수위 조건에서 감압정이 설치된 위치 (RW)에서는 감압정의 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 0.280으로 최소 22.4% 감소하는 것으로 평가되었고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 0.160으로 최대 55.7% 감소하는 것으로 평가되었다. 감압정과 감압정의 중간위치 (BRW)에서는 감압정의 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 0.351로 최소 2.8% 감소하는 것으로 평가되었고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 0.191로 최대 47.0% 감소하는 것으로 평가되었다.

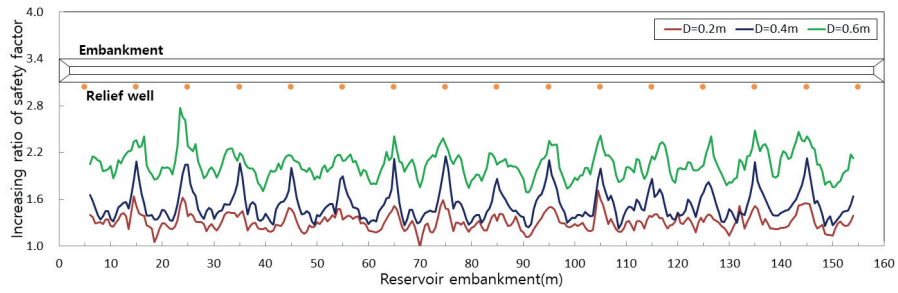
제방 안정성을 평가하기 위해 하류사면에서 발생하는 유출 동수경사와 한계동수경사 ( $i_{cr}$ )의 비교를 통해 하류사면의 파이핑에 대한 안정성을 평가하였다. 한계동수경사는 30개 저수지의 비상대처계획 (EAP) 자료를 참고하여 평균값 1.106을 활용하였다.

Fig. 11은 홍수위 조건의 하류사면 분석 지점 (P1)에서 제방 종단방향으로 감압정이 설치되지 않은 조건 (감압정 직경을

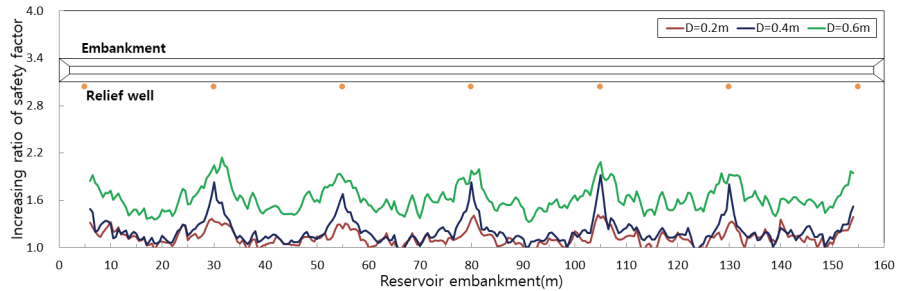
0으로 분석)에서 파이핑 안전율을 기준으로 감압정의 직경, 간격을 조건으로 설치하였을 경우 파이핑 안전율의 증가비를 연속적인 그래프로 표시하였다. 그림에서 나타나듯이 파이핑 안전율은 감압정 설치 위치 (RW)에서 최대로 증가하는 것으로 나타났고, 감압정과 감압정 사이의 제방에서도 감압정이 설치되지 않은 경우에 비해 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 균일형 저수지 제방에서 적정 직경과 간격으로 감압정을 설치하면 제방의 파이핑에 대한 안정성 증가가 가능하다.

Fig. 12는 홍수위 조건에서 감압정 직경과 설치간격에 따른 제방 하류사면 P1에서 파이핑 안전율의 최대값 (Fig. 12(a))과 안전율 증가비 (Fig. 12(b))를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 제방 하류사면 P1에서 파이핑 안전율은 3.06으로 평가되었다. 감압정이 설치된 위치 (RW)에서 파이핑 안전율의 최대는 6.90로 나타났고, 감압정과 감압정 중간 지점 (BRW)에서는 최소 3.15로 나타났다. 감압정이 설치된 위치 (RW)에서 안전율은 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 3.94로 최소 28.9% 증가하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 6.90으로 최대 125.6% 증가하는 것으로 평가되었다. 감압정과 감압정 중간 위치 (BRW)에서 안전율은 감압정 직경 0.2 m, 설치간격 50 m에서 3.15로 최소 2.9% 증가하였고, 직경 0.6 m, 설치간격 10 m에서 5.78로 최대 88.8% 증가하는 것으로 평가되었다.

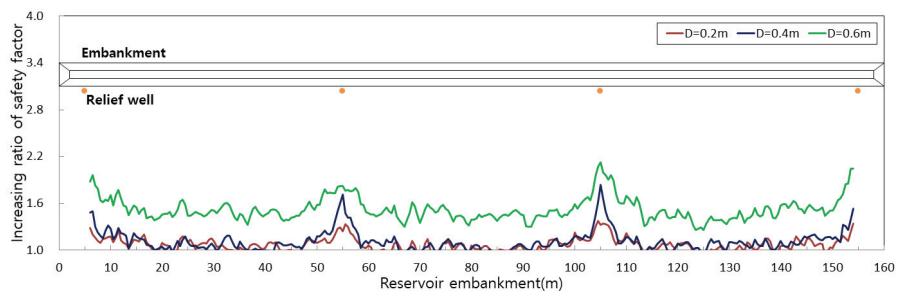
동수경사와 파이핑 안전율을 분석한 결과, 감압정의 직경과 설치간격에 따라 유출동수경사는 감소하고 파이핑 안전율은 증가하는 것으로 평가되었다. Fig. 12(b)에 나타난 바와 같이 동수경사의 감소와 파이핑 안전율의 증가는 감압정 직경 0.2 m 이하와 설치간격 25 m 이상에서는 효과가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 감압정의 설치시 직경과 간격은



(a) Relief well space (10 m)

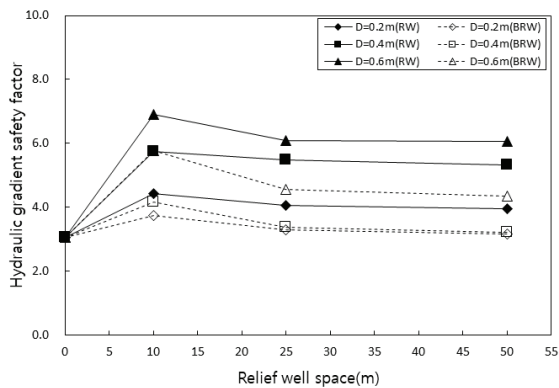


(b) Relief well space (25 m)

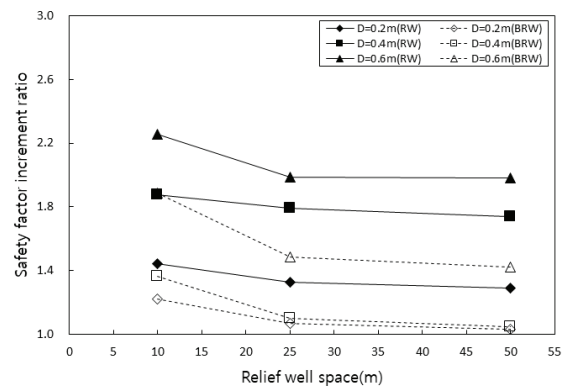


(c) Relief well space (50 m)

Fig. 11 Safety factor increment ratio in P1 along longitudinal direction of downstream (F,W,L.)



(a) Hydraulic gradient safety factor



(b) Safety factor increment ratio

Fig. 12 Hydraulic gradient safety factor at P1 of downstream slope (F,W,L.)

제체와 지반의 토질조건, 침투조건 및 이에 따른 안전을 등보다 다양한 요소를 고려하여 결정하여야 하며, 이에 대한 추가 분석이 필요하다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업용저수지 제방에 설치된 감압정에 대한 3차원 침투해석을 통하여 감압정 설치 유무, 직경 및 설치간격에 따른 간극수압, 유출동수경사의 감소 효과 및 파이핑 안전성을 분석하였다.

- (1) 감압정 위치 (RW)에서 직경 (0.2, 0.4, 0.6 m), 설치간격 (10, 25, 50 m)에 따라 홍수위 조건에서 간극수압은 25.3~62.5%, 동수경사는 22.4~55.7% 감소하고, 상시만수위 조건에서 간극수압은 28.6~53.4% 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 감압정과 감압정 중간 (BRW)에서 직경 (0.2, 0.4, 0.6 m), 설치간격 (10, 25, 50 m)에 따라 홍수위 조건에서 간극수압은 2.7~40.3%, 동수경사는 2.8~47.0% 감소하고, 상시만수위 조건에서 간극수압은 3.0~43.8% 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 감압정 위치 (RW)에서 보다 감압정과 감압정 중간 (BRW)에서 홍수위 조건에서 간극수압은 22.2~22.6%, 동수경사는 8.7~19.6% 적게 나타났고, 상시만수위 조건에서 간극수압은 9.6~25.6 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 한계동수경사에 의한 파이핑 안전율은 직경 (0.2, 0.4, 0.6 m), 설치간격 (10, 25, 50 m)에 따라 홍수위 조건에서 감압정 위치 (RW)에서는 28.9~125.6% 증가하고, 감압정과 감압정 중간 (BRW)에서는 2.9~88.8%로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 감압정을 설치함에 따라 제방의 파이핑에 대한 안전율이 증가하는 것을 알 수 있다.
- (5) 3차원 해석으로 감압정 설치조건에 대한 침투분석 결과, 감압정의 위치 (RW)와 감압정과 감압정 중간 (BRW)에서의 침투거동이 서로 다르게 나타내고 있는 점을 고려할 때, 감압정이 설치된 제방에서 침투해석은 감압정과 감압정의 사이의 침투거동특성의 분석이 가능한 3차원 해석으로 평가하는 것이 타당하다고 사료된다.
- (6) 향후 제체의 단면, 제체와 기초지반의 토질조건, 감압정의 위치, 직경, 간격 및 깊이 등과 같은 다양한 조건에 대한 추가적인 평가가 필요하다.

#### REFERENCES

1. Byun, Y. S., J. I. Kim, S. I. Baek, and B. S. Chun, 2012. A analytical study on influence of gradients on section characteristics of river banks. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 13(3): 13-19 (in Korean).
2. Chang, J. H., C. H. Yoo, and S. C. Baek, 2020. Numerical analysis of relief well effect for seepage control of small fill dam. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 21(2): 5-13 (in Korean). doi:10.14481/jkges.2020.21.2.5.
3. Cho, S. E., 2012. Probabilistic seepage analysis considering the spatial variability of permeability for layered soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 28(12): 65-76 (in Korean). doi:10.7843/kgs.2012.28.12.65.
4. Heidarzadeh, M., A. A. Mirghasemi, and H. Niroomand, 2015. Construction of relief wells under artesian flow conditions at dam toes: Engineering experiences from Karkheh earth dam, Iran. *International Journal of Civil Engineering* 13(1): 73-80. doi:10.22068/IJCE.13.1.73.
5. Jin, S. W., N. R. Kim, and D. S. Kim, 2011. Reproduction of piping failure due to the permeable layer using centrifuge test. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 31(1C): 1-10 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2011.31.1C.001.
6. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), KRC (Korea Rural Community Corporation), 2018. Statistical yearbook of land and water development for agriculture (in Korean).
7. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), KRC (Korea Rural Community Corporation), 2019. Development of collapse prevention technology for agricultural dams (II) (in Korean).
8. Salmasi, F., B. Mansuri, and A. Raoufi, 2015. Use of numerical simulation to measure the effect of relief wells for decreasing uplift in a homogeneous earth dam. *Civil Engineering Infrastructures Journal* 48(1): 35-45. doi:10.7508/CEIJ.2015.01.004.
9. U.S. Army Corps of Engineers, 1992. Design, construction and maintenance of relief wells. EM 1110-2-1914, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington.