

## 후면 덧쌓기에 따른 농업용 저수지 제체의 안정성 평가

이달원<sup>1\*</sup> · 노재진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지역환경토목학과, <sup>2</sup>충남대학교 대학원

### Safety evaluation of agricultural reservoir embankment according to backside extension

Dal-Won Lee<sup>1\*</sup>, Jae-Jin Noh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Agricultural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Received on 10 February 2012, revised on 22 February 2012, accepted on 23 March 2012

**Abstract :** This study was carried out for safety evaluation, the practical application and improvement of design method of the agricultural reservoir embankment according to backside extension. Seepage analysis, slope stability analysis and finite element analysis were performed for steady state and transient conditions. Also, the pore water pressure, seepage quantity, safety factor and stress-strain behavior according to high water level and rapid drawdown were compared and analyzed. The pore water pressure at contact region between backside extension and old embankment was kept high after rapid drawdown. Therefore, backside extension is recommended that design method is required to be improved and reinforced more than the others raising embankment. The hydraulic gradients before and after backside extension showed high value at the base of the core, but they showed stable state at the upstream slope and downstream slope. The seepage quantity per 1 day and the leakage per 100 m for the steady state and transient conditions appeared to be safe against the piping. The safety factor of slope stability showed high at the steady state, and transient conditions did not show differences depending on the rapid drawdown. The safety factor was appeared high at the upstream slope before backside extension and downstream slope after extension. The excess pore water pressure for steady state and transient conditions showed negative(-) at the upstream slope, it was small at the downstream slope. The mean effective stress ( $p'$ ) showed high at the base of the core and to be wild distribution after the extension. The displacement after extension showed 0.02-0.06 m in the upstream slope, the maximum shear strain after extension was smaller than that before extension.

**Key words :** Agricultural reservoir, Backside extension, Seepage analysis, Slope stability, Finite element analysis

## I. 서론

최근 정부에서는 전국 4대강 유역 110개의 농업용 저수지를 대상으로 기존제당 덧쌓기 등 둑 높이기와 여수로 확장, 전동식 수문 및 소수력발전시설 등의 설치사업을 통해 2.8억 m<sup>3</sup>의 추가용수를 확보하여 가뭄과 홍수피해 방지, 노후화로 인한 재해위험 예방 및 하천 건천화로 인한 수질 악화 방지 등을 위하여 추진하고 있다. 특히, 저수지 둑 높이기 사업은 기존 저수시설을 보강하는 사업으로 신규 댐 개발로 인한 개발지적 부족과 환경적 영향을 최소화하면서

경제적으로도 유리한 것으로 나타났다(MLTM, 2011).

농업기반시설물은 현재 전국에 저수지 17,649개소, 양배수장 7,178개소, 방조제 1,593개소 등이 산재해 있고, 1945년 이전에 9,380개소(53%), '46~'71년은 6,203개소(35.1%)가 설치되어 30년 이상된 저수지가 80% 이상에 달하고 있다. 또한 시군관리 저수지 14,323개소(64%), 농어촌공사 관리 3,326개소(62%)가 설치이후 경과연수가 50년 이상 되었고, 저수지의 5,617개소(89%)가 유효저수량이 10만 m<sup>3</sup>미만의 소규모 저수지로 가뭄으로 인한 불안정한 용수공급과 재해 위험도가 증가하고 있다(KRC, 2005).

둑 높이기 대상(110개소)중 30년 이상 노후된 저수지가

\*Corresponding author: Tel: +82-42-821-5793

E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

72개소(64%)이고, 안전진단 결과 보수·보강이 필요한 C 등급이상 저수지 85개소(75%)에 달하고 있어, 축조 후 장기간이 지나 노후화된 저수지의 리모델링을 통한 기능 회복이 필요한 실정하다. 뚝 높이기 대상저수지들의 수질은 호소 수질환경기준 4등급 이상으로 대부분 농업용수 수질 기준에 만족하고 있으며, 하천유지용수 공급시 하류하천의 수질개선에 큰 기여를 할 수 있다. 10년 빈도 가뭄에 안전한 논은 전체의 48%로 여전히 영농급수에 한계가 있고, 뚝 높이기 대상(110지구)중 한발 대응이 미흡한 99개소(88%)에 대해 저수용량 확장을 통해 부족한 농업용수를 공급하여야 한다(KRC, 2005; MLTM, 2011).

지역별로 구분해 보면 경북 22개소, 전남 21개소, 충남 15개소, 전북 15개소, 충북 14개소, 경남 11개소, 강원 7개소, 경기 5개소로 진행되고 있다. 제체유형별로는 제체 덧쌓기 66개소로 가장 많고, 후면 덧쌓기 28개소, 이설 쌓기 16개소이고, 높이별로는 5 m 이하가 72개소로 가장 많고, 5~10 m 20개소, 10~15 m 5개소, 15~20 m 6개소, 20 m 이상 7개소이다(MLTM, 2011).

저수지 제체의 붕괴원인으로는 홍수시 급격한 수위상승 및 급강하에 의한 비탈면의 활동, 기초지반의 토질조건, 제방 월류 그리고 수위변화에 따른 제체 내 지반누수 등의 여러 가지 요인이 작용한다. 위와 같은 원인으로 제체가 붕괴되면 홍수, 침수 및 인명피해 등이 발생될 수 있기 때문에 제방의 안정성 확보에 대한 기준설정과 평가기법의 필요성이 무엇보다도 중요하다.

그동안 농업용 저수지에 관련된 연구는 제체의 안정성 검토를 위한 실험과 침투류 해석 등의 수치해석 연구, 시설물의 보수보강에 관련된 연구, 계측기를 이용한 안전진단 공법 연구 등이 수행되었다(Foster 등, 2001; Lee 등, 2003; Min 등, 2008; Kim 등, 2009).

저수지 제체의 안정성에 관한 기존의 연구들은 파이핑

현상의 실내모형실험과 침투해석, 제체의 붕괴원인, 붕괴 사례 및 상관관계 분석 등의 연구가 진행되어 왔다(Jung, 1989; Kwon 등, 2004; Lee 등, 2011; Fell 등, 2003, 2005; Foster 등, 1999, 2000).

저수지 뚝 높이기 사업은 제체 덧쌓기, 후면 덧쌓기, 이설 쌓기 등으로 구분하여 시공되고 있다. 그러나 저수지 뚝 높이기 사업지역 대부분은 성토에 따른 상류와 하류사면에서의 사면안정문제가 발생되고, 코어 설치에 따른 침투류의 해석이 중요하다. 또한, 기존 코어와 새롭게 확장 시공되는 성토재와의 부등 침하의 발생 가능성, 코어에서의 침하량, 하류사면에서의 변화 등을 유한요소해석에 의해 뚝 높이기 전후의 응력-변형 거동을 비교분석하여야 한다.

본 연구에서는 저수지 뚝 높이기 사업 지구를 대상으로 후면 덧쌓기에 의한 뚝 높이기 전후의 정상류와 비정상류 조건으로 홍수위시와 수위급강시의 침투류 해석, 사면안정 해석 및 유한요소해석에 의한 응력-변형 거동을 비교분석하여 설계방법 개선 및 현장실용화 방안을 제시하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 분석대상지구

분석에 적용된 저수지 뚝 높이기 현장은 후면 덧쌓기로 시공 중인 전북 무주군 00저수지를 선정하였다. 저수지 제원은 필댐 형식으로 총저수량 221만  $m^3$ (중고전: 25만  $m^3$ ), 유역면적 790 ha, 길이 256.3 m, 높이 20.3 m에서 33.3 m로 13 m 제정고를 높이는 것으로 계획되어 있다. 제당의 중심코어는 점토로 구성되어 있고, 뚝 높이를 시공하면서 기존 저수지의 하류사면 일부를 걷어낸 후 성토 시공 하는 것으로 계획되었다. 후면 덧쌓기 제체 단면은 Fig. 1과 같다.

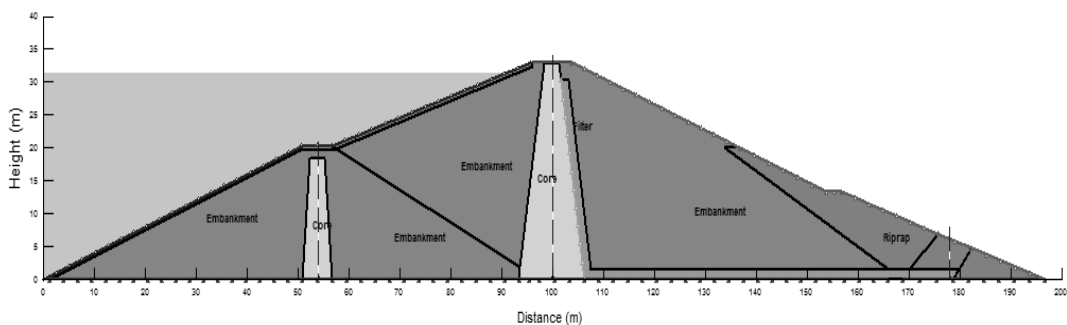


Fig. 1. A cross section of the reservoir.

## 2. 사용시료

사용된 성토재와 점토는 저수지 현장의 토취장에서 채취하였고 물리적 및 역학적 특성을 분석한 결과는 Table 1 과 같다.

## 3. 분석방법

둑 높이기 전후의 침투류 해석은 홍수위시 및 수위급강 하시로 구분하여 포화시와 불포화시에 SEEP/W 프로그램 이용하여 검토하였다(SEEP/W, 2007). SEEP/W 는 Darcy 법칙과 Laplace 방정식을 이용하여 포화 및 비포화 흐름을 해석하는 유한요소 프로그램이다. 이 프로그램은 정상상태 흐름(steady state flow)과 비정상 상태 흐름(transient flow)에 대하여 모두 적용가능하고, 불포화토에 대한 체적함수비-공극수압곡선 SWCC(Soil Water Characteristic Curve)을 이용하여 토질에 따른 정(+) 공극수압과 부(-) 공극수압의 변화특성을 나타낼 수 있다(Van Genuchten, 1980; Fredlund 등, 1994).

불포화 투수계수의 추정은 흡인력 함수를 이용하는 방법을 적용하였고, 체적함수비의 추정은 입도곡선을 기초로 예측된 data point function 방법을 이용하였다. 수위변동에 따른 불포화투수계수와 체적함수비 곡선은 구하기 위해서는 많은 시간이 소비되므로 SEEP/W(2007) 프로그램에서 제시한 토양수분특성곡선(SWCC)에 가장 근접한 곡선을 선택하여 흡인력(matric suction)에 따른 불포화토에서의 변화특성을 적용하였다.

저수지 둑 높이기 사업지역의 사면안정 해석은 SLOPE/W (2007) 프로그램을 이용하여 분석하였다. 수위조건은 둑 높이기 전·후의 홍수위에서 사수위로 수위급강하 하였을 경우로 적용하였고, 포화 및 불포화토에서 정상류와 비정상류 조건으로 구분하여 적용하였다. 유한요소해석에 의한

둑 높이기 전후의 거동은 SIGMA/W(2007) 프로그램을 이용하여 coupled stress/pwp 분석에 의한 응력-변형과 침투류 해석을 동시에 수행하여 분석하였다. 코어와 제방은 시험에서 구한 parameter를 이용하여 탄-소성해석으로 분석하고, 필터와 사석은 선형 탄성해석으로 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 둑 높이기 전·후의 침투류 해석

침투류 해석시 수위조건은 둑 높이기 전·후의 홍수위에서 사수위로 수위급강하 하였을 경우로 적용하였고, 포화 및 불포화토에서 정상류와 비정상류 조건으로 구분하여 적용하였다. 홍수위(31.3 m)로 유지되는 지속시간은 특별한 기준이 없어 고려하지 않았고, 저수지의 총 저수량과 여수토의 방류량을 고려하여 홍수위가 지속시간별로 유지된 후 수위가 사수위(10 m)로 급격히 강하하였을 경우의 시간을 3단계(1일, 5일, 10일)로 나누어 침투류 해석을 실시하였다.

#### 가. 정상류 조건

Fig. 2(a)는 정상류 조건하에서 둑 높이기 전의 공극수압 분포는 상류사면에서 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서는 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 홍수위시(18.3 m) 침투수량은 제체중앙에서  $1.68E-07 \text{ m}^3 / \text{s/m}$ 이고 하류사면은  $7.79E-09 \text{ m}^3 / \text{s}$ 로 나타났다.

동수경사는 코어하부에서 1.8~2.2 범위로 한계동수경사(0.957) 보다 커서 불안정하게 나타났고, 하류사면에서는 0.2~0.8 범위로 한계동수경사(1.013) 보다 작아 파이핑에 대해서는 안전한 것으로 나타났다(Fig. 3(a)). 전체 제체길이(158.6 m)를 통과하는 1일당 침투수량은  $0.11 \text{ m}^3 / \text{day}$ 로 총저수량(25만  $\text{m}^3$ )에 대한 허용누수량 안

Table 1. Material properties used soils.

Division	Unit weight ( $\gamma_{sat}$ , KN/m <sup>3</sup> )	Coefficient of permeability (m/s)	Cohesion (kPa)	Angle of internal friction (degree)	Young's modulus (kPa)	Poisson's ratio	USCS
Core	19.32	5.90E-09	42.14	15.4	20,000	0.424	CL
Embankment	19.72	2.20E-08	38.22	13.5	25,000	0.434	SC
Filter	19.63	5.40E-05	0	33	30,000	0.330	SP
Riprap	22.56	1.00E-04	0	45	100,000	0.230	GP

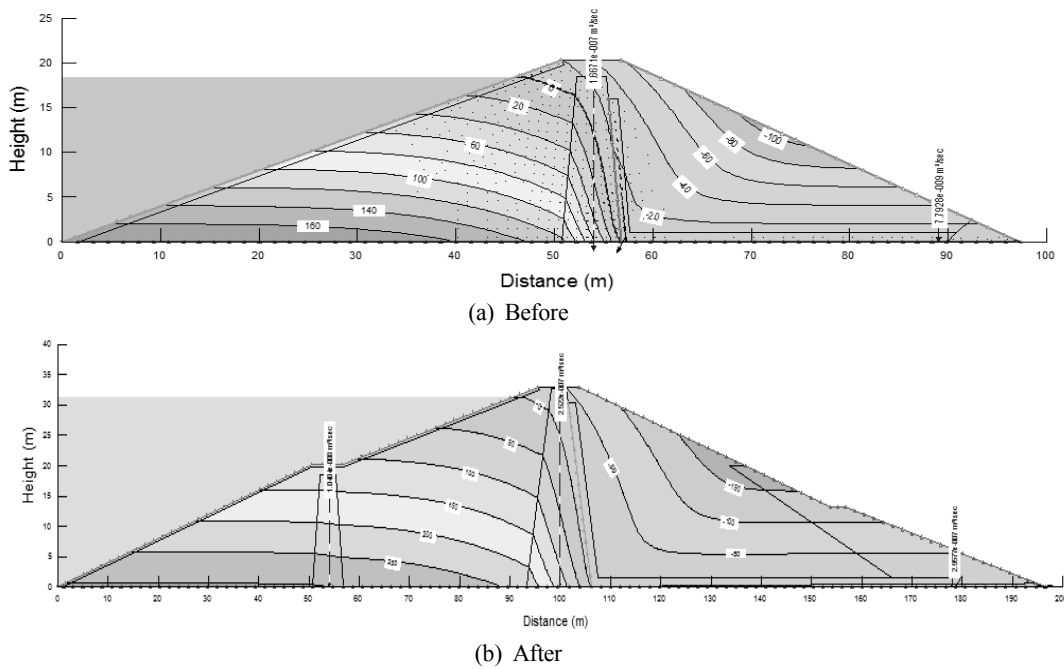


Fig. 2. Comparison of pore water pressure under steady state condition.

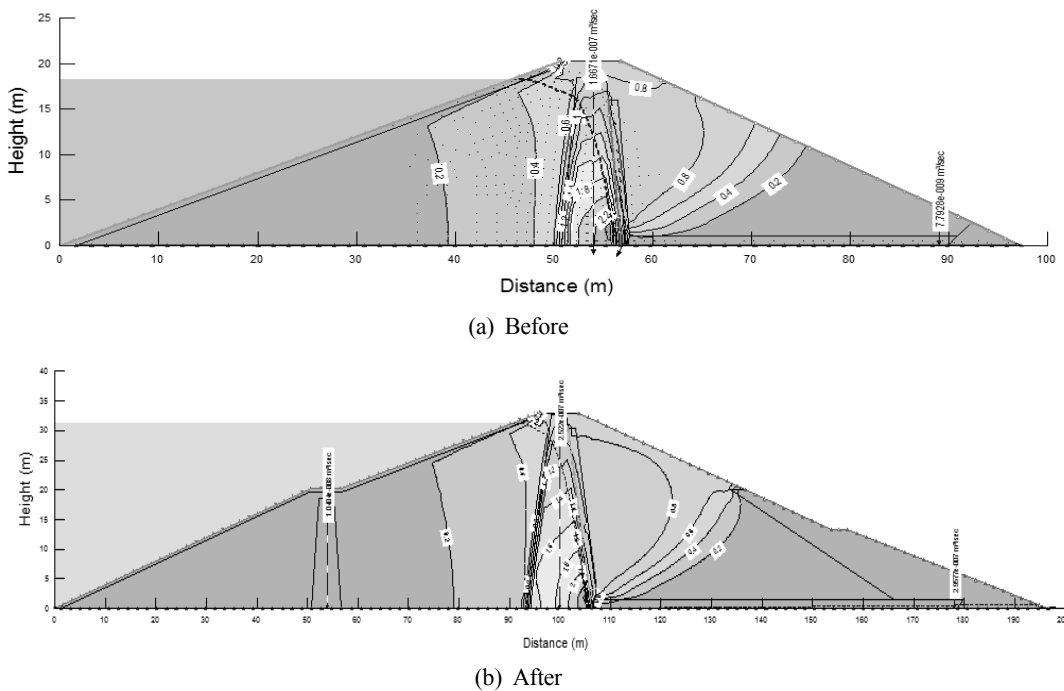


Fig. 3. Comparison of gradient under steady state condition.

전관리기준(총저수량의 0.05%)인  $125 \text{ m}^3 / \text{d}$  이내이며, 제체 100 m당 누수량은  $7.79\text{E}-04 \text{ l}/\text{sec}$  로 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다(KRC, 2005).

Fig. 2(b)는 뚝 높이기 후의 홍수위 조건하에서 공극수압

변화를 나타낸 것이다. 상류사면에서는 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서는 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 코어 중앙에서 심도별 공극수압은 200(하부) ~ -50(상부) kPa로 침윤선은 코어에서 하류부로 급격하게 감소하면서 하부 기

초지반의 필터를 통과하고 있다.

홍수위시(31.3 m) 침투수량은 상류사면에서는  $1.04E-08$ , 제체중앙에서  $2.52 E-07 m^3 /s/m$ , 하류사면은  $2.96 E-07 m^3 /s$ 로 나타났다. Fig. 3(b)는 둑 높이기 후의 동수경사를 나타낸 것으로 둑 높이기 전과 유사하게 코어 하부에서는 1.8~2.2 범위로 불안정하게 나타났고, 하류사면에서는 0.2~0.8 범위로 파이핑에 대해서는 안전한 것으로 나타났다.

전체 제체길이(256.3 m)를 통과하는 1일당 침투수량은  $6.56 m^3 /day$ 로 총저수량(221만  $m^3$ )에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인  $1,105 m^3 /d$  이내이며, 제체 100 m당 누수량은  $2.96 E-02 l/sec$ 로 안전관리기준(100 m당  $1 l/sec$ ) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

**나. 비정상류 조건**

Fig. 4(a)는 둑 높이기 전의 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일) 공극수압 분포를 나타낸 것이다. 공극수압은 상류사면에서는 0~100 kPa 범위로 정(+)의 공극수압을 나타내고 하류사면에서는 부(-)의 공극수압을 나타냈다.

비정상류 조건하에서 홍수위시(18.3 m)에서 사수위(10.0 m)로 1일 동안 급강하 하였을 경우, 침투수량은 제체중앙에서  $1.36 E-07 m^3 /s/m$ 로 시간에 따라 점차로 감소하

였고, 하류사면에서는  $7.79 E-09 m^3/s$ 로 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이(158.6 m)를 통과하는 1일당 침투수량은  $0.11 m^3 /day$ 로 총저수량(25만  $m^3$ )에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인  $125 m^3 /d$  이내이며, 제체 100 m당 누수량은  $7.79 E-04 l/sec$ 로 안전관리기준(100 m당  $1 l/sec$ ) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다(KRC, 2005).

Fig. 4(b)는 둑 높이기 후의 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일) 공극수압 분포를 나타낸 것이다. 공극수압은 기존 저수지에서는 12~20 kPa 범위로 정(+)의 공극수압을 나타내면서 수위가 강하함에 따라 점차로 작아지고, 신설 저수지와 접속부에서는 22~30 kPa 범위로 상부로 갈수록 더 크게 나타났다. 하류사면에서는 2~26 kPa 범위로 정의 공극수압을 나타냈는데 이는 부의 공극수압을 나타낸 제체 덧쌓기와 매우 다른 거동을 나타냈다. 특히 기존 저수지와 신설저수지의 접속부에서 공극수압은 수위 급강하 시에도 감소하지 않고 크게 잔존하고 있기 때문에 제체 덧쌓기와는 다른 설계방법이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 수위 급강하시 시간에 따른 침윤선을 나타낸 것으로 코어부에서 급격하게 감소한 후 필터를 통과하고 있지만, 상류사면에서의 침윤선은 거의 감소하지 않고 사면부근에 남아 있는 것으로 나타났는데, 이는 제체 덧쌓기 보다 더 불안정한 상태에 있다고 판단되므로 사면안정해석

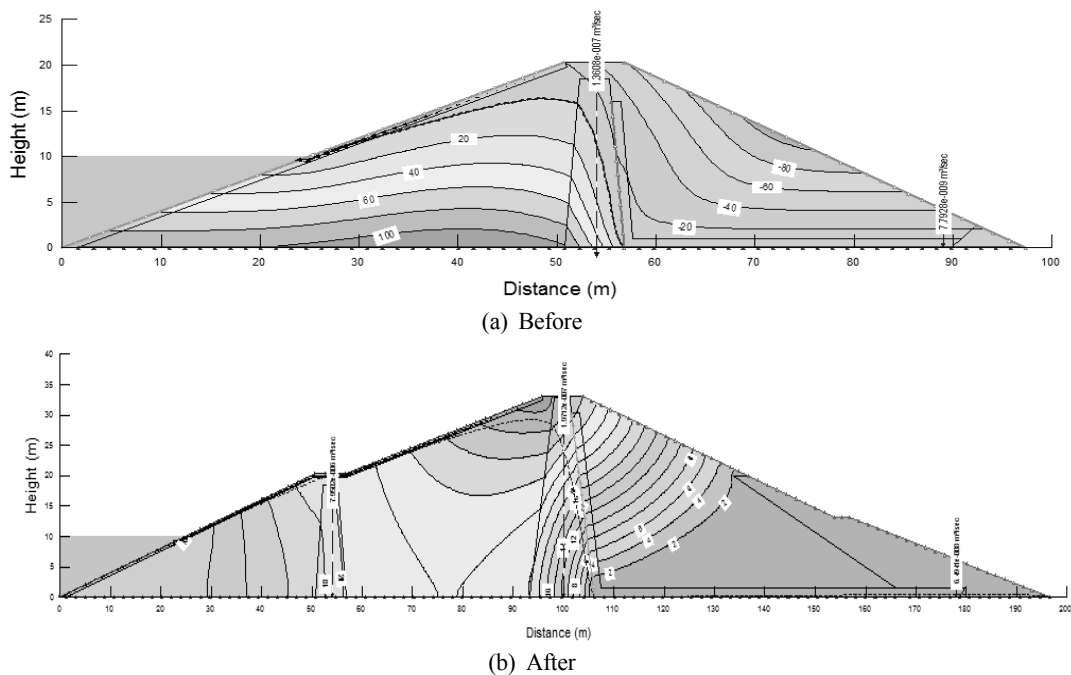


Fig. 4. Comparison of pore water pressure at rapid drawdown (1 days).

시 신중히 고려되어야 한다.

비정상류 조건하에서 홍수위시(31.3 m)에서 사수위(10.0 m)로 1일 동안 급강하 하였을 경우, 침투수량은 상류사면에서  $7.95 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s/m}$ , 제체중앙에서  $1.97 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m}$ 로 시간에 따라 점차로 감소하였고, 하류사면에서는  $6.49 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 시간에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이(256.3 m)를 통과하는 1일당 침투수량은  $1.44 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 총저수량(221만  $\text{m}^3$ )에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인  $1,105 \text{ m}^3/\text{d}$  이내이며, 제체 100 m당 누수량은  $6.49 \times 10^{-3} \text{ l/sec}$ 로 안전관리기준(100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 수위급강하시 코어중앙에서 심도별 시간에 따른 공극수압 변화를 나타낸 것으로 상부에서는 약간씩 감소하고 하부에서는 거의 변화를 나타내지 않았다. 독 높이기 전은 -40(하부)~ 70(상부) kPa이고, 독 높이기 후는 -40(하부)~ 120(상부) kPa 로 나타나 침투수량의 흐름이 원활하게 통과하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 독 높이기 전후의 동수경사를 나타낸 것으로서 수위가 감소함에 따라 상류와 하류사면에서는 분포영역이

점차로 커지고, 독 높이기 후는 기존저수지에서도 변화를 나타냈다. 독 높이기 전후의 동수경사는 코어 하부에 1.2~2.0 범위로 집중되고 한계동수경사(0.957) 보다 커서 파이핑에 대해서 불안정하였고, 상류와 하류사면에서 0.2~0.8 범위로 한계동수경사(1.013) 보다 작아 파이핑에 대해 안정한 것으로 나타났다. 독 높이기 전후의 비정상류 조건에서 5일과 10일 동안 침투류 해석 결과는 1일 동안의 공극수압, 침윤선, 동수경사와 수치만 차이가 있고 분포 거동은 유사하게 나타났다.

## 2. 독 높이기 전·후의 사면안정해석

저수지 독 높이기 사업지역 대부분은 성토에 따른 사면 안정문제가 발생되고, 기존 저수지를 확장하여 후면에 축조하기 때문에 제방 설치에 따른 안정 해석이 중요하다. 독 높임 후에는 저수량의 급증에 따라 침투수압이 몇 배로 증가하고, 제체를 통한 침투수는 제체 하류부를 포화시켜 과잉공극수압의 증가함에 따라 파이핑 현상이 급진전되므로 제체의 사면안정성을 평가하여야 한다. 사면안정 해석시 수위조건은 독 높이기 전·후의 홍수위에서 사수위로 수위

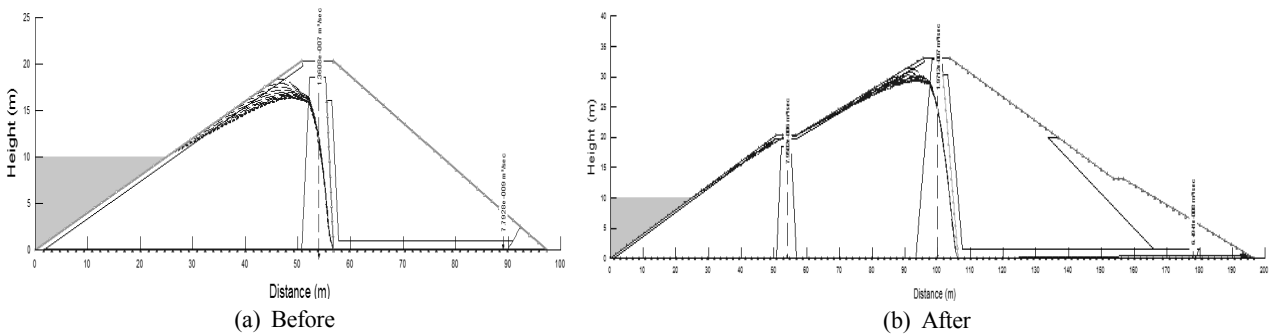


Fig. 5. Comparison of seepage line with time at rapid drawdown (1 days).

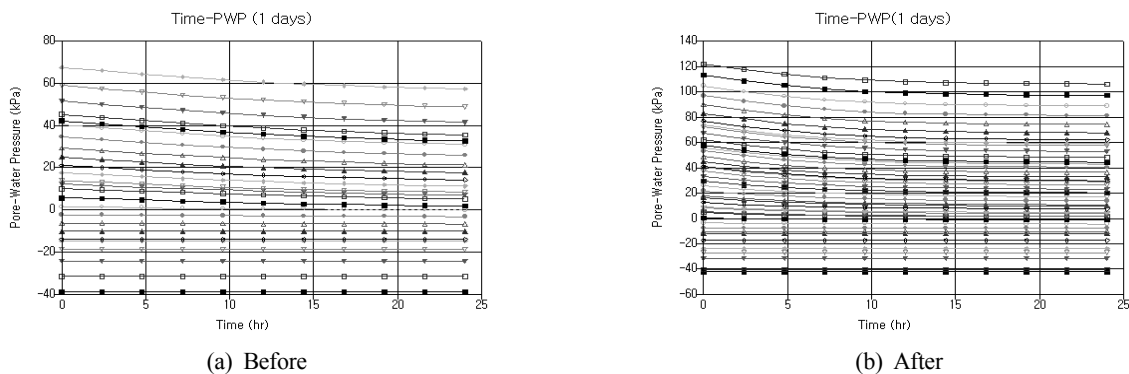


Fig. 6. Comparison of PWP with depth in the core at rapid drawdown (1 days).

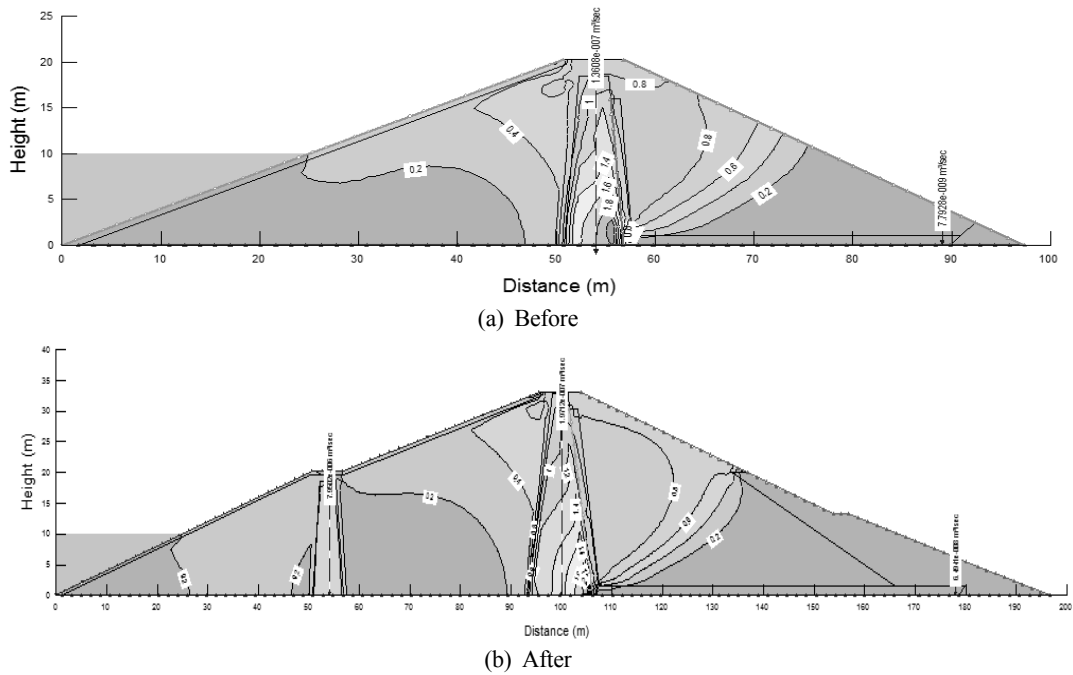


Fig. 7. Comparison of gradients at rapid drawdown(1 days).

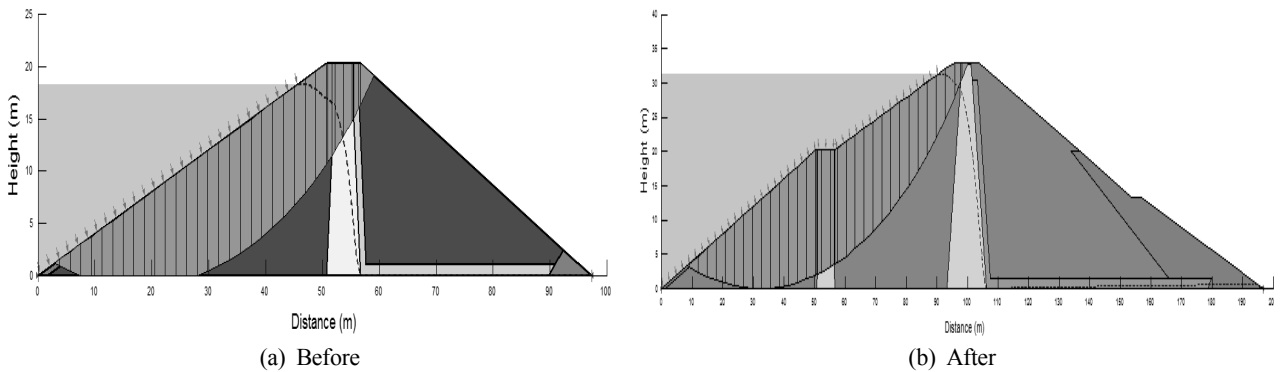


Fig. 8. The stability analysis of upstream slope.

급강하 하였을 경우로 적용하였고, 정상류와 비정상류 조건으로 구분하여 적용하였다. 홍수위로 유지되는 지속시간은 특별한 기준이 없어 고려하지 않았고, 저수지의 총 저수량과 여수토의 방류량을 고려하여 홍수위가 지속시간별로 유지된 후 수위가 사수위로 급격히 강하하였을 경우의 시간을 3단계(1일, 5일, 10일)로 나누어 해석을 실시하였다.

**가. 정상류 조건**

비탈면 사면안정검토는 현장의 시험결과를 기초로 시공성 및 경제성을 고려하여 비탈면의 안정성을 확보하는 최적의 경사와 대책공법을 선정하는데 있다. 일반적으로 수중부 비탈면의 경우는 건기 및 우기에 따른 지하수위 변동

보다는 저수위 변화에 따른 사면안정해석이 적합하므로 국토해양부 댐 설계기준(2005)에서 제시한 제체조건과 저수상태를 고려한 안정해석을 수행하였다(MLTM, 2005). 현장 대상지구의 사면안정 검토는 가장 위험한 조건인 만수시와 수위급강하시에 분석하였고 기준안전율은 상하류사면에 1.2를 적용하였다.

Fig. 8-9는 정상류 조건하에서 간편 Bishop 방법으로 구한 둑 높이기 전후의 사면안정해석 결과이다. 상류사면의 둑 높이기전 안전율은 2.473, 둑 높이기 후는 2.213으로 매우 크고, 하류사면은 둑 높이기전 1.516, 둑 높이기 후는 1.668 으로 모든 사면에서 기준안전율 1.2 이내에 포함되어 안정한 것으로 나타났다.

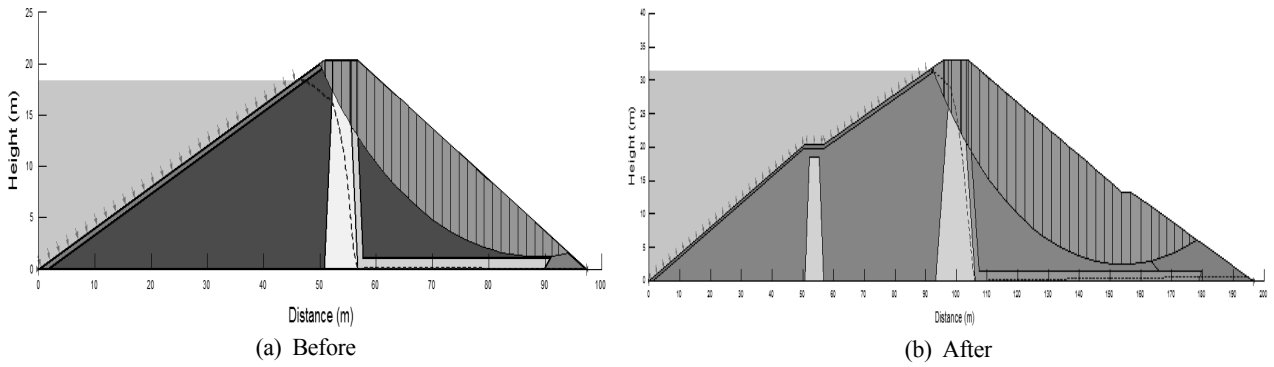


Fig. 9. The stability analysis of downstream slope.

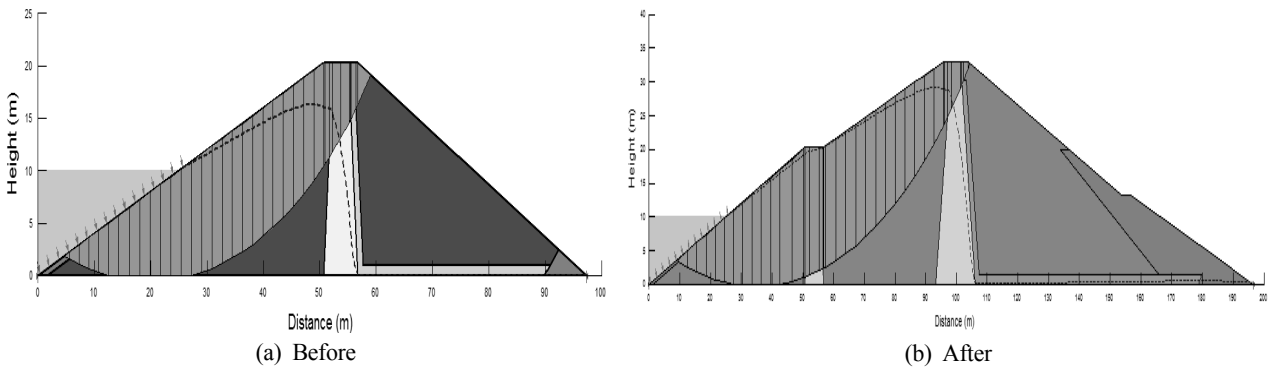


Fig. 10. The stability analysis of upstream slope (1 days).

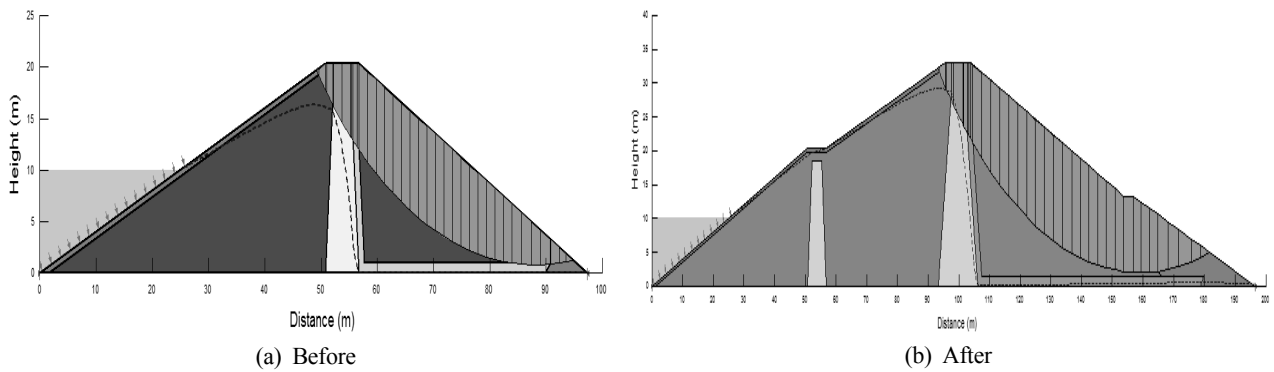


Fig. 11. The stability analysis of downstream slope (1 days).

나. 비정상류 조건

Fig. 10-11은 뚝 높이기 전후의 수위 급강하시(1일) 상류사면과 하류사면의 안전율 분포를 나타낸 것이다. 비정상류 조건하에서 홍수위시(18.3 m)에서 사수위(10.0 m)로 1일 동안 급강하 하였을 경우, 안전율은 상류사면에서 1.624, 하류사면에서 1.491로 기준안전율 이내에 포함되어 안정한 것으로 나타났다. 뚝 높이기 후 홍수위시(31.3 m)에서 사수위(10.0 m)로 급강하 하였을 경우, 상류사면에서는 1.195로 급격히 감소하여 불안정하였고, 하류사면

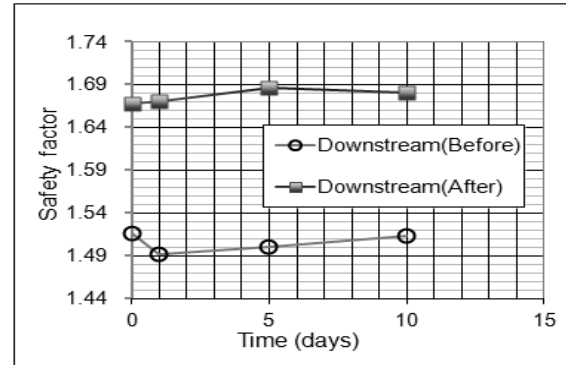
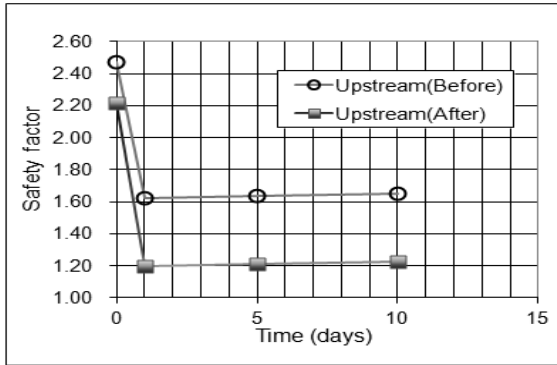
에서 1.676로 기준안전율 이내에 포함되어 안정한 것으로 나타났다.

일반적으로 수위 급강하시는 안전율이 감소하다가 제체 내의 공극수압이 소산되면서 안전율이 증가한다. 그러나 이 경우는 짧은 시간에 수위급강하 하였기 때문에 안전율의 증가현상은 나타나지 않았다. 또한, 정상류 조건에서 비정상류 조건으로 변화할 경우에 수위급강하에 따라서 상류사면은 안전율의 감소폭이 크게 나타났지만 하류사면에서는 작게 나타났다.



**Table 2.** Result of stability analysis under steady state and transient condition.

Division	Before raising an embankment		After raising an embankment	
	Upstream slope	Downstream slope	Upstream slope	Downstream slope
Steady state	2.473	1.516	2.213	1.668
Transient (days)	1	1.624	1.195	1.670
	5	1.634	1.211	1.686
	10	1.650	1.225	1.680



(a) Upstream slope

(b) Downstream slope

**Fig. 12.** Stability analysis at upstream slope and downstream slope

Table 2와 Fig. 12는 둑 높이기 전후의 정상과 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일, 5일, 10일) 안전율의 분포를 나타낸 것이다.

상류사면의 안전율은 정상상태에서 매우 크게 나타났고 수위가 급강하함에 따라 감소하다가 비정상류 상태에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 하류사면의 안전율도 둑 높이기 전에는 수위 감소에 따라 약간 감소하다가 증가하였고, 둑 높이기 후에는 거의 일정하게 나타났다. 둑 높이기 전보다 후에서 매우 크고 상류사면과는 반대로 나타났으나 기준안전율 1.2이내에 포함되어 안전한 것으로 나타났다. 전체적인 안전율은 둑 높이기 전은 상류사면의 안전율이 크고, 둑 높이기 후는 하류사면이 더 안정한 것으로 나타났다.

### 3. 유한요소해석에 의한 응력-변형 거동

#### 가. 정상류 조건

Fig. 13-14는 둑 높이기 전후의 정상류 조건에서 홍수 위시(18.3 m, 31.3 m) 응력-변형 분포를 나타낸 것이다.

공극수압은 침투류 해석시 정상류조건과 동일하고, 둑 높이기 전의 평균유효응력( $p'$ )은 코어 하부에서 약 200 kPa로 집중되어 있고, 하류사면 일부에 100~200 kPa으로 분포하고 있다. 둑 높이기 후의 평균유효응력( $p'$ )은 코어

하부에서 약 400 kPa로 가장 크고, 하류사면 일부에 200 kPa으로 분포하고 있다. 둑 높이기 후의 평균유효응력은 둑 높이기 전보다 약간 더 큰 분포형태를 나타냈고, 최대전단응력은 둑 높이기 전에는 약 50 kPa 정도로 분포하였지만 둑 높이기 후에는 나타나지 않았다.

#### 나. 비정상류 조건

Fig. 15-19는 둑 높이기 전후의 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일) 응력-변형 분포를 나타낸 것이다. 둑 높이기 전의 과잉공극수압은 상류사면에서 -5~-80 kPa 범위로 분포하고, 둑 높이기 후 상류사면에서는 급격히 감소하여 -20~-200 kPa로 부(-)의 과잉공극수압이 나타났으며, 하류사면에서는 나타나지 않았다. 변위 분포는 둑 높이기 전에서는 나타나지 않았고, 둑 높이기 후에는 상류사면에 0.02~0.06 m 범위로 점점 더 넓은 분포를 나타냈다. 평균유효응력( $p'$ )은 둑 높이기 전에는 코어 하부에서 200 kPa 로 가장 크고 상류와 하류사면으로 진행할수록 감소하였지만, 둑 높이기 후는 300 kPa로 전보다 분포영역이 더 크게 나타났다. 둑 높이기 전후의 최대전단응력은 코어 부분에서 60~100 kPa 범위로 집중되고 상류사면과 하류사면에서 20 kPa 범위로 폭넓게 분포하였고, 증고 후에는 전단변형이 나타나지 않았다. 최대전단변형은 둑 높이기 전

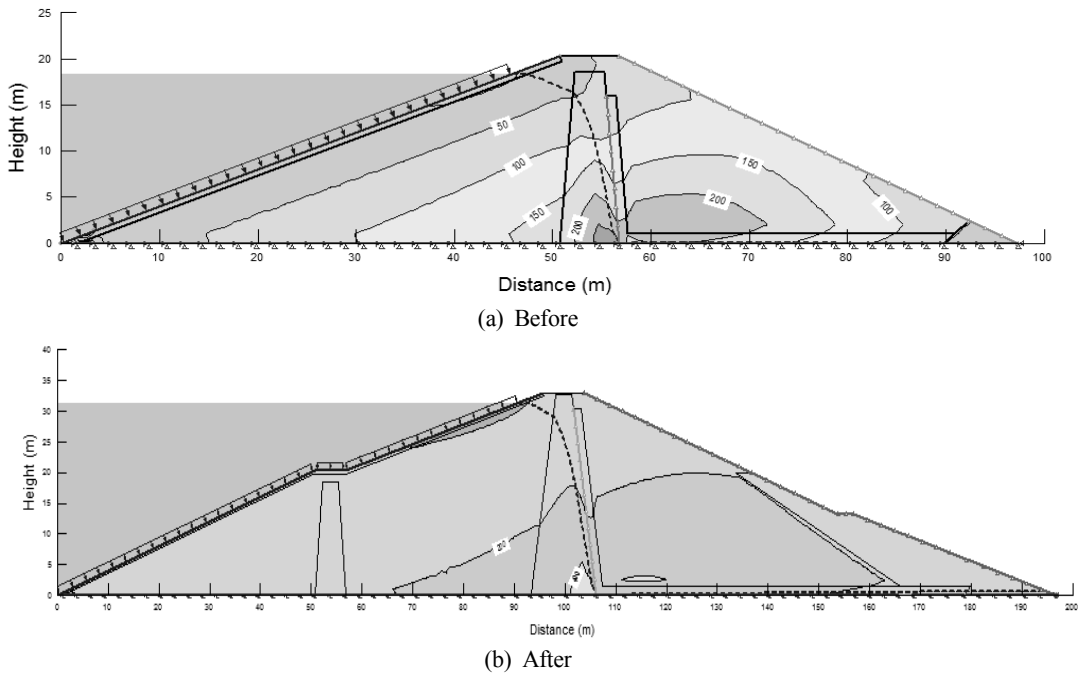


Fig. 13. Comparison of mean effective stress ( $p'$ ).

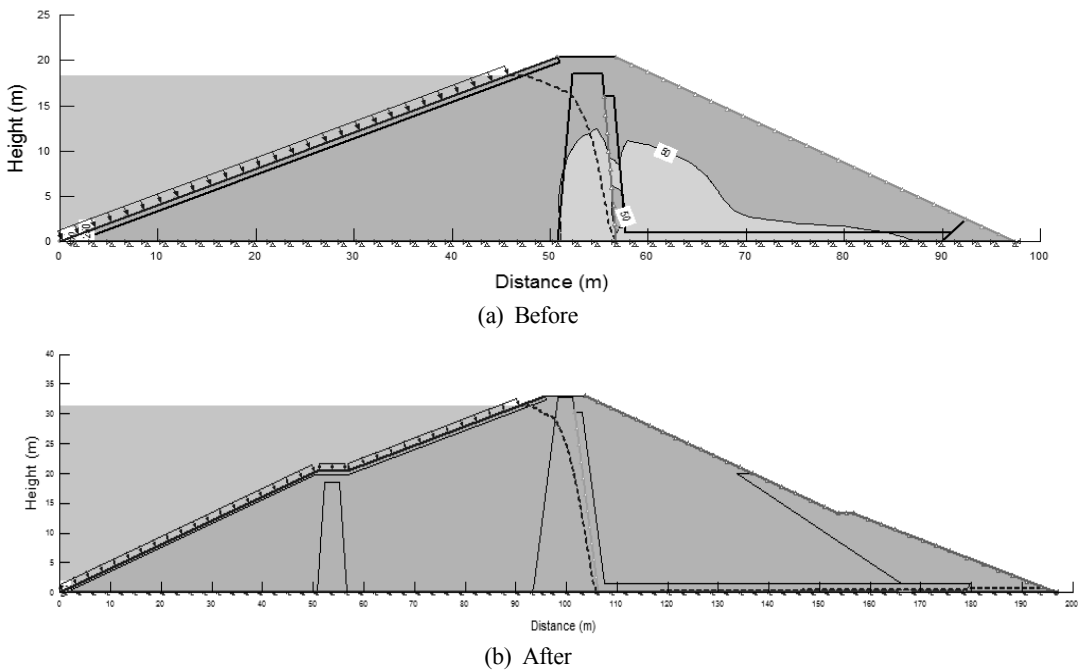


Fig. 14. Comparison of maximum shear stress.

에는 사면선단부에서만 0.0025~0.0005 범위로 매우 작게 나타났고, 뚝 높이기 후에는 하부사면 일부에만 나타났다.

뚝 높이기 전후의 비정상류 조건에서 5일과 10일 동안 수위 급강하시의 응력-변형 분포는 1일 동안의 응력-변형 거동과 수치만 차이가 있고 유사한 경향으로 나타났다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 저수지 뚝 높이기 사업 지구를 대상으로 후면 덧쌓기에 의한 뚝 높이기 전후에 정상류와 비정상류 조건으로 홍수위시와 수위급강하시의 침투류 해석, 사면안정

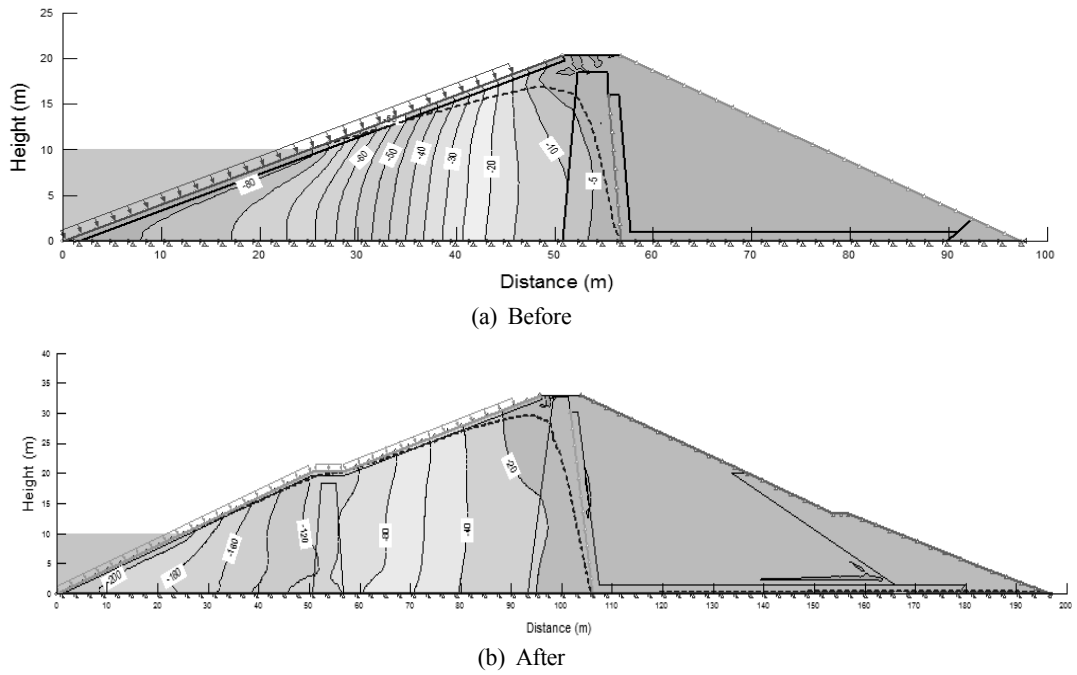


Fig. 15. Comparison of excess pore water pressure (1 days).

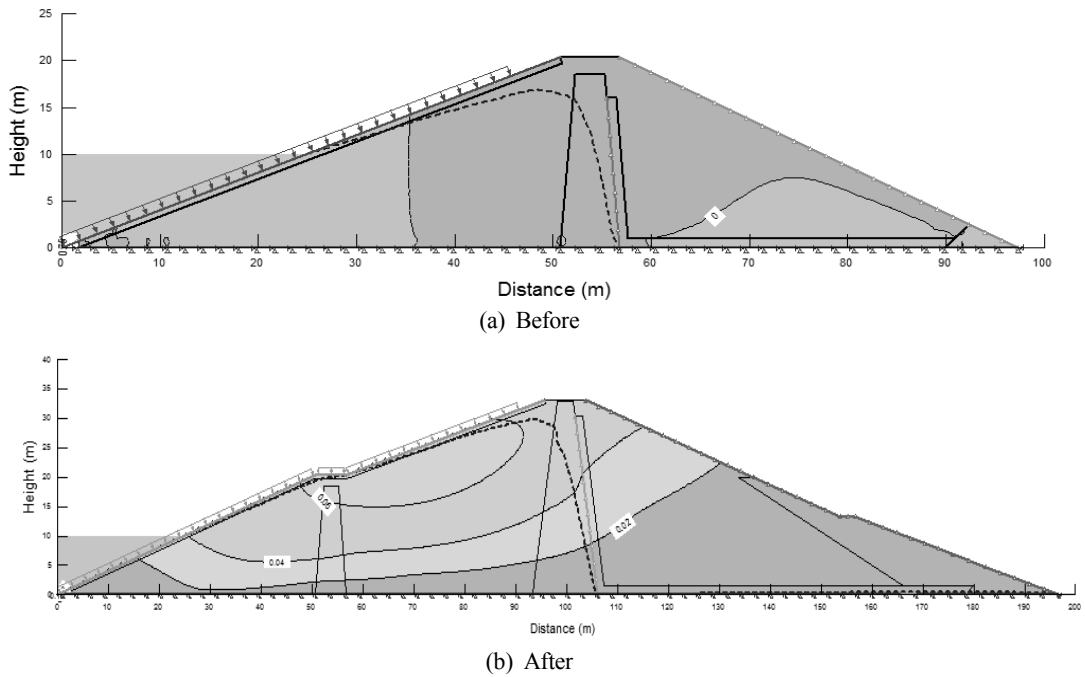


Fig. 16. Comparison of displacement (1 days).

해석 및 유한요소해석에 의한 응력-변형 거동을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 뚝 높이기 전·후의 정상류와 비정상류에서 공극수압은 상류사면에서는 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어

를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서는 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 또한, 신설저수지와 접속부에서 넓은 영역으로 분포하고 하류사면에서도 제체 덧쌓기와 매우 다른 정(+)의 공극수압을 나타냈다. 특히 기존저수지와 신설저수지의 접속부에서 공

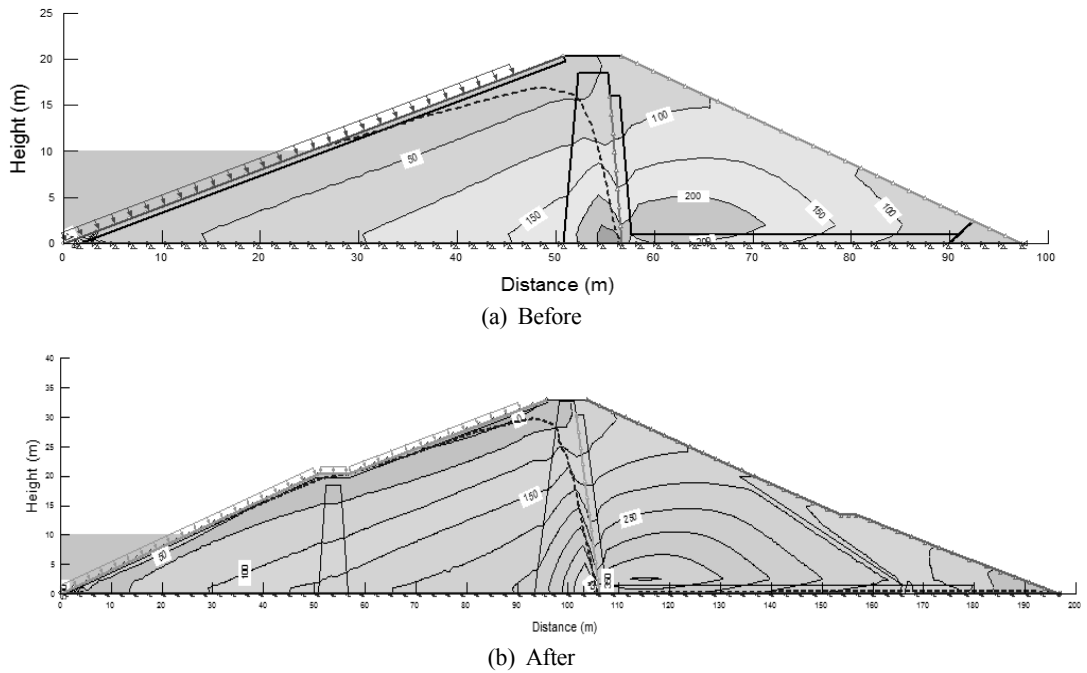


Fig. 17. Comparison of mean effective stress ( $p'$ ) (1 days).

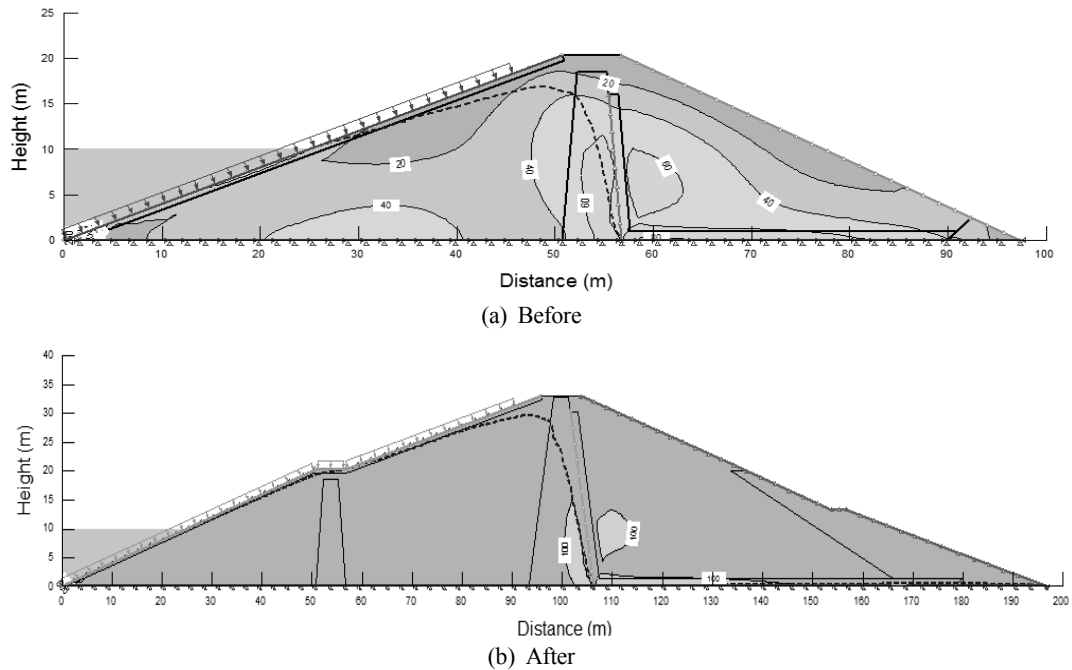


Fig. 18. Comparison of maximum shear stress (1 days).

극수압은 수위 급강하시에도 감소하지 않고 크게 잔존하고 있기 때문에 제체 덧쌓기와는 다른 설계방법이 고려되고 보강되어야 할 것으로 판단된다.

2. 코어중앙에서 심도별 공극수압 변화는 상부에서는 약간씩 감소하고 하부에서는 거의 변화를 나타내지 않았으

며, 뚝 높이기 전후의 동수경사는 코어 하부에서 1.2~2.0 범위로 집중되어 파이핑에 대해서 불안정하게 나타났고, 상류와 하류사면에서는 안정한 것으로 나타났다. 뚝 높이기 전후의 정상류와 비정상류 조건하에서 총저수량에 대한 1일당 허용누수량과, 제체 100 m당 누수량은

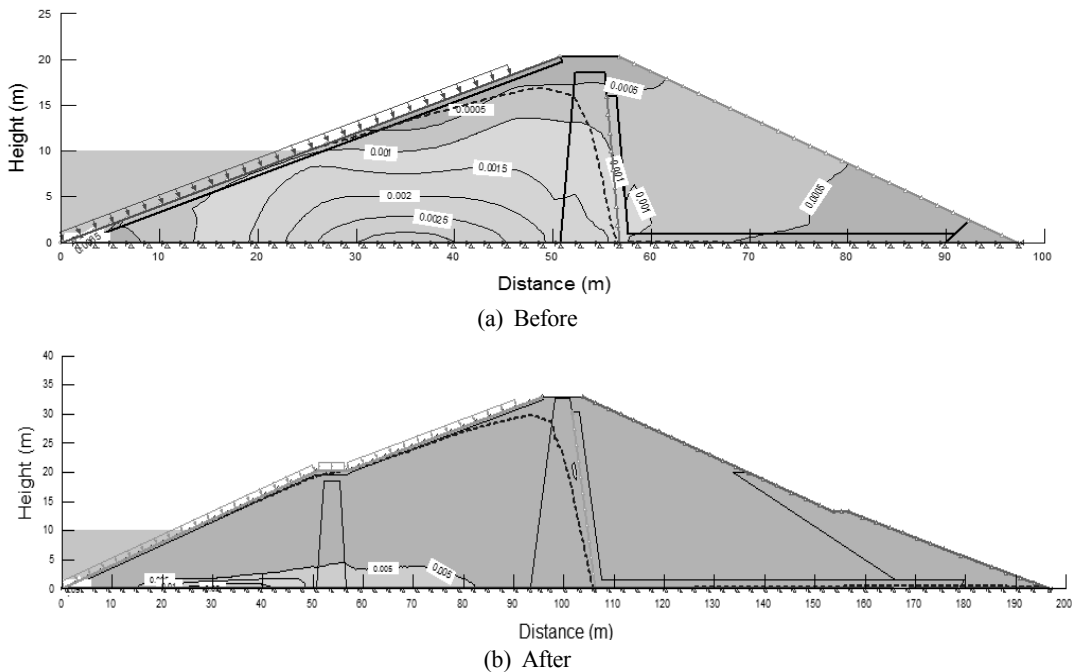


Fig. 19. Comparison of maximum shear strain (1 days).

- 안전관리기준 이내로 나타나서 파이핑에 대해서는 안전하였고, 누수량은 제체 덧쌓기보다 더 작게 나타났다.
3. 둑 높이기 전후의 정상과 비정상류 조건에서 상류와 하류사면의 안전율은 정상상태에서 매우 크게 나타났고 수위가 급강하함에 따라 감소하다가 비정상류 상태에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 안전율은 둑 높이기 전에는 상류사면이 크고, 둑 높이기 후에는 하류사면이 크게 나타났지만 기준안전율 1.2이내에 포함되어 안전한 것으로 나타났다.
  4. 둑 높이기 전후의 과잉공극수압은 상류사면에서는 급격히 감소하여 부(-)의 과잉공극수압이 나타났고, 하류사면에서는 매우 작게 나타났다. 평균유효응력( $p'$ )는 코어하부에서 가장 크고 집중적인 분포를 나타내고, 둑 높이기 후에는 점점 더 큰 분포형태를 나타냈다. 둑 높이기 전의 변위는 나타나지 않았고, 둑 높이기 후에는 상류사면에서 0.02~0.06 m 범위로 분포범위가 더 넓게 나타났다. 최대전단변형은 둑 높이기 전에는 사면선단부에서 넓게 분포하지만, 둑 높이기 후에는 분포범위가 매우 작게 나타났다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 한국연구재단의 지원을 받아

수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

Fell R, Wan CF, Cyganiewicz J, Foster MA. 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.* 129(4): 307-314.

Fell R, Macgregor P, Stapledon D, Bell G. 2005. *Geotechnical engineering of dam*. Balkema AA, pp. 393-439.

Foster MA, Fell R. 1999. A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event three methods, UNICIV Rep. NO. R-377. School of Civil and Environmental Engineering, Univ. of New South Wales, Sydney, Australia.

Foster MA, Fell R, Spannagle M. 2000. The statics of embankment dams failures and accidents. *Canadian Geotech. J.* 37: 1000-1024.

Foster MA, Fell R. 2001. Assessing embankment dam filters that do not safety design criteria. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.* 127(5): 398-407.

Fredlund DG, Xing A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical J.* 31: 521-532.

GEO-SLOPE. 2007. SEEP/W 2007. GEO-SLOPE International Ltd.

GEO-SLOPE.2007. SLOPE/W 2007. GEO-SLOPE International Ltd.

GEO-SLOPE.2007. SIGMA/W 2007.GEO-SLOPE International Ltd.

Jung HS. 1989. An experimental study on piping failure of

- earth embankment. J. of Korean Geotechnical Society 5(4): 17-26. [in Korean]
- Kim MH, Lee DW. 2009. Safety evaluations of reservoir embankment by instrument system. J. of Korean Society of Agricultural Engineers 50(2): 37-44. [in Korean]
- Korea Rural Community Corporation (KRC). 2003-2005. Report of Monitoring System for Disaster Prevention of Agricultural Structure. [in Korean]
- Korea Rural Community Corporation (KRC). 2005. Guidelines for Precision Safety Inspections of Dam. [in Korean]
- Kwon HM, Kim CY, Park YH, Chung CK, Kim MM. 2004. Experimental investigation of seepage properties on weathered residual soils. J. of the Korean Geotechnical Society 20(1): 75-82. [in Korean]
- Lee DW, Oh BH. 2003. Stability evaluation methods of agricultural reservoir by field monitoring. J. of Agri. Sci. Chungnam Nat'l Univ., 30(2): 164-174. [in Korean]
- Lee DW, Lee KS, Lee YH. 2011. Seepage analysis of agricultural reservoir due to raising embankment, J. of Agricultural Science 38(3): 493-504. [in Korean]
- Min HG, Lee DW. 2008. Prediction of excess pore water pressure of reservoir embankment on soft ground. J. of Korean Society of Agricultural Engineers 50(2): 37-44. [in Korean]
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2005. *Guidelines for Dam Design*. [in Korean]
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2011. *The 4 Major Rivers Restoration*. Assessed in <http://4rivers.go.kr>. [in Korean]
- Van Genuchten MT. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America J. 44: 892-898.