

후면 덧쌓기에 따른 농업용 저수지 제체의 안정성 평가



이 달 원
충남대학교 지역환경토목학과 교수
dwlee@cnu.ac.kr

I. 서론

최근 지구온난화와 이상 기후로 10년간 집중호우 발생빈도가 '70~'80년대에 비해 1.4배 증가하였고, 급격한 기후변화로 강수량의 편차가 심해져 홍수와 가뭄에 대비한 재해 대비능력을 강화할 필요성이 증가되고 있다. 농업기반시설물의 대부분을 차지하고 있는 저수지는 대부분 필댐으로 이루어져 있고, 콘크리트댐에 비하여 재료자체의 공학적 성질이 다양하며 불균질 하여 그 거동을 예측하기가 어렵다.

농림수산식품부와 한국농어촌공사는 2조 7천억원을 들여 전국 4대강 유역 110개(4대강 유역 내 93개, 유역 외 17개) 농업용 저수지를 대상으로 기존제당 덧쌓기 등 뚝 높이기와 여수토 확장, 전동식 수문 및 소수력발전시설 등의 설치사업을 통해 2.8억 m^3 (4대강 유역 내 2.4, 유역 외 0.4)의 추가용수를 확보하여 2016년 10억 m^3 의 물 부족 전망에 대비할 계획이다. 추가 확보된 수자원을

활용하여 우선 부족한 농업용수를 보충 공급하고, 남은 물을 갈수기에 하천으로 흘려보내 농어촌 소하천의 수생태계 보존 및 4대강의 수질개선에 기여 할 것으로 기대하는 등 거시적 차원에서 수자원의 효율적 이용과 관리, 토지이용률 제고 및 환경개선을 통하여 주민들의 삶의 질을 향상시킬 수 있다. 특히, 저수지 뚝 높이기 사업은 기존 저수시설을 보강하는 사업으로 신규 댐 개발로 인한 개발적지 부족과 환경적 영향을 최소화하면서 경제적으로도 유리한 것으로 나타났다(KRC, 2003-2005; MLTM, 2005; MLTM, 2011).

농업기반시설물은 현재 전국에 저수지 17,679개소, 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(KRC, 2005).

뚝 높이기 대상(110개소)중 30년 이상 노후된 저수지가 72개소(64%)이고, 안전진단 결과 보수·보강이 필요

한 C등급이상 저수지 85개소(75%)에 달하고 있어, 축조 후 장기간이 지나 노후화된 저수지의 리모델링을 통한 기능 회복이 필요한 실정하다. 10년 빈도 가뭄에 안전한 논은 전체의 48%로 여전히 영농급수에 한계가 있고, 독 높이기 대상(110지구)중 한발 대응이 미흡한 99개소(88%)에 대해 저수용량 확장을 통해 부족한 농업용수를 공급하여야 한다(KRC, 2005).

지역별로 구분해 보면 경북 22개소, 전남 21개소, 충남 15개소, 전북 15개소, 충북 14개소, 경남 11개소, 강원 7개소, 경기 5개소로 진행되고 있다. 제체유형별로는 제체 덧쌓기 65개소로 가장 많고, 후면 덧쌓기 29개소, 이설 쌓기 16개소이고, 높이별로는 5m 이하가 72개소로 가장 많고, 5-10m 20개소, 10-15m 5개소, 15-20m 6개소, 20m이상 7개소이다(MLTM, 2011).

저수지 독 높이기 사업도 설계 당시에는 양호한 상태로 평가되었더라도, 시공 이후에는 유지관리 상태 및 외적 요인 등에 의해 잔존하는 위험요소가 노출되어 제체의 안전에 영향을 미칠 수 있다. 재해 영향 검토는 사전 재해영향성검토서를 기준으로 기존에 발생했던 재해를 중심으로 개발로 인해 발생 가능한 재해영향요인을 개발사업 시행이전에 예측, 분석하고 적절한 저감방안을 수립·시행하여야 한다.

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 발생할 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 연

구, 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, 붕괴사례 및 상관관계 분석 등의 연구가 진행되어 왔다(Jung, 1989; Kwon 등, 2004; Lee 등, 2011; Fell 등, 2003, 2005; Foster 등, 1999, 2000).

그러나 저수지 독 높이기 사업지역 대부분은 성토에 따른 사면안정문제가 발생되고, 기존 중심코어를 확장하여 축조하기 때문에 코어 설치에 따른 침투류의 해석이 중요하다. 기존 코어의 상층부와 측면으로 코어를 확장 시공할 경우 침윤선의 변화는 안정상에 영향을 미치고, 코어를 수평방향으로 확장하기 때문에 기존 성토재와의 부등 침하의 발생 가능성이 있을 것으로 판단된다. 또한, 신설 및 확장되는 여수토는 구조물로 되어 있기 때문에 이상 홍수시에는 흙과 접속부에 안정성 문제가 발생할 가능성이 높다.

저수지 독 높이기 사업은 제체 덧쌓기, 후면 덧쌓기, 이설 쌓기 등으로 구분하여 시공되고 있다. 그러나 저수지 독 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 독 높이기 전후의 응력-변형 거동을 비교분석하여야 한다.

본 연구에서는 저수지 독 높이기 사업 지구를 대상으로 후면 덧쌓기에 의한 독 높이기 전후의 정상류와 비정상류 조건으로 홍수위시와 수위급강시의 침투류 해석, 사면안정해석 및 유한요소해석에 의한 응력-변형 거동

을 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 m³(중고전: 25만 m³), 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 성토시공 하는 것으로 계획되었다. 후면 덧쌓기 제체 단면은 Fig. 1과 같다.

2. 사용시료

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

3. 분석방법

뚝 높이기 전후의 침투류 해석은 홍수위시 및 수위급강하시로 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 적용 가능하고, 불포화토에 대한 체적함수비-공극수압곡선 SWCC(Soil Water Characteristic Curve)을 이용하여

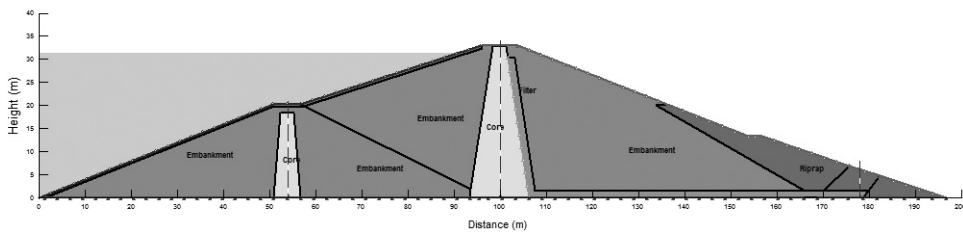


Fig. 1. A cross section of the reservoir.

Table 1. Material properties used soils.

Division	Unit weight (γ_{sols} , KN/m ³)	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

토질에 따른 정(+) 공극수압과 부(-) 공극수압의 변화특성을 나타낼 수 있다(Van Genuchten, 1980; Fredlund 등, 1994).

불포화 투수계수의 추정에는 흡인력 함수를 이용하는 방법을 적용하였고, 체적함수비의 추정에는 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 불포화도에서의 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

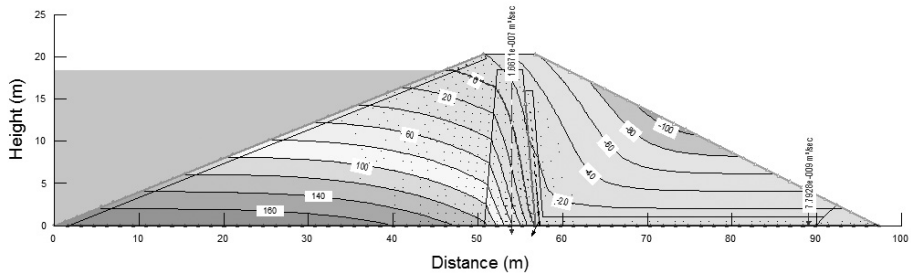
구분하여 적용하였다. 홍수위(31.3 m)로 유지되는 지속시간은 특별한 기준이 없어 고려하지 않았고, 저수지의 총 저수량과 여수토의 방류량을 고려하여 홍수위가 지속시간별로 유지된 후 수위가 사수위(10 m)로 급격히 강하하였을 경우의 시간을 3단계(1일, 5일, 10일)로 나누어 침투류 해석을 실시하였다.

가. 정상류 조건

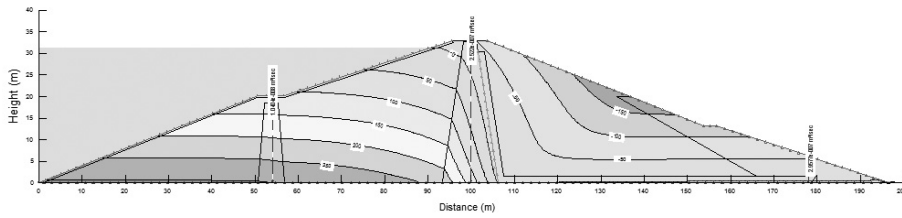
Fig. 2(a)는 정상류 조건하에서 둑 높이기 전의 공극수압 분포는 상류사면에서 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서는 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 홍수위시(18.3 m) 침투수량은 제체중앙에서 $1.68E-07 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고 하류사면은 $7.79E-09 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났다.

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

Fig. 2(b)는 둑 높이기 후의 홍수위 조건하에서 공극수압변화를 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 기초지반의 필터를 통과하고 있다.

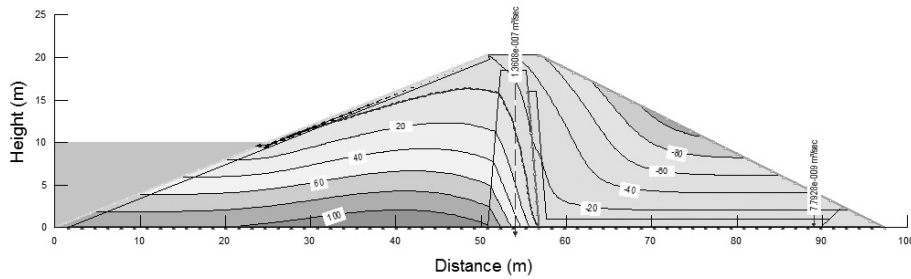


(a) Before

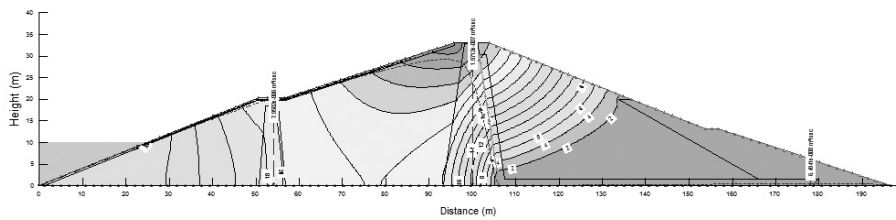


(b) After

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



(a) Before



(b) After

Fig. 3. Comparison of pore water pressure at rapid drawdown (1 days).

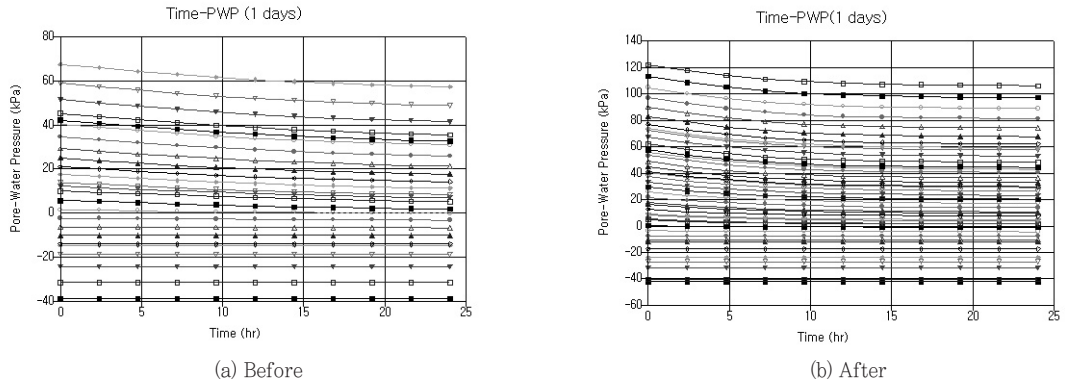


Fig. 4. Comparison of PWP with depth in the core at rapid drawdown (1 days).

홍수위시(31.3 m) 침투수량은 상류사면에서는 1.04E-08, 제체중앙에서 2.52 E-07 m³/s/m, 하류사면은 2.96 E-07 m³/s로 나타났다. Fig. 3(b)는 독 높이기 후의 동수정사를 나타낸 것으로 독 높이기 전과 유사하게 코어하부에서는 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 m³/day로 총저수량(221만 m³)에 대한 허용 누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 1,105 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 2.96 E-02 l/sec로 안전관리기준(100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

나. 비정상류 조건

Fig. 3(a)는 독 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 m³/s/m로 시간에 따라 점차로 감소하였고, 하류사면에서는 7.79 E-09 m³/s로 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이(158.6 m)를 통과하는 1일당 침투수량은 0.11 m³/day로 총저수량(25만 m³)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 125 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 7.79 E-04 l/sec로 안전관리기준(100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다(KRC, 2005).

Fig. 3(b)는 독 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 정(+)의 공극수압을 나타냈는데 이는 부의 공극수압을 나타낸 제체 덧쌓기와 매우 다른 거동을 나타냈다. 특히 기존저수지와 신설저수지의 접속부

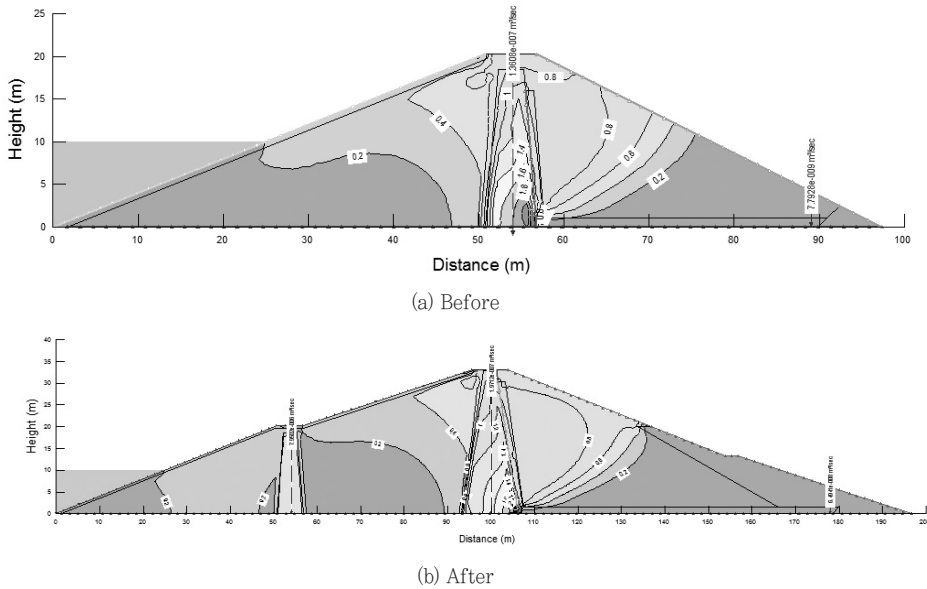


Fig. 5. Comparison of gradients at rapid drawdown(1 days).

에서 공극수압은 수위 급강하시에도 감소하지 않고 크게 잔존하고 있기 때문에 제체 덧쌓기와는 다른 설계방법이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

수위 급강하시 시간에 따른 침윤선은 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 사면안정해석시 신중히 고려되어야 한다.

비정상류 조건하에서 홍수위시(31.3 m)에서 사수위(10.0 m)로 1일 동안 급강하 하였을 경우, 침투수량은 상류사면에서 $7.95 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s/m}$, 제체중양에서 $1.97 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s/m}$ 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 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. 4는 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. 5는 독 높이기 전후의 동수경사를 나타낸 것으로서 수위가 감소함에 따라 상류와 하류사면에서는 분포영역이 점차로 커지고, 독 높이기 후는 기존저수지에서 변화가 나타났다. 독 높이기 전후의 동수경사는 코어 하부에 1.2~2.0 범위로 집중되고 한계동수경사(0.957) 보다 커서 파이핑에 대해서 불안정하였고, 상

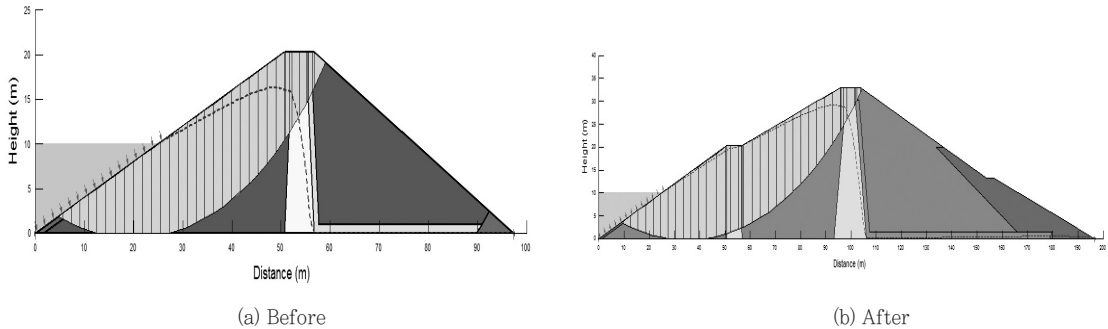


Fig. 6. The stability analysis of upstream slope (1 days).

류와 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 사면안정문제가 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 수위급강하 하였을 경우로 적용하였고, 정상류와 비정상류 조건으로 구분하여 적용하였다. 홍수위로 유지되는 지속시간은 특별한 기준이 없어 고려하지 않았고, 저수지의 총 저수량과 여수토의 방류량

을 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 변동보다는 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.

정상류 조건하에서 간편 Bishop 방법으로 구한 상류사면의 독 높이기전 안전율은 2.473, 독 높이기 후는 2.213으로 매우 크고, 하류사면은 독 높이기전 1.516, 독 높이기 후는 1.668 으로 모든 사면에서 기준안전율 1.2 이내에 포함되어 안정한 것으로 나타났다.

나. 비정상류 조건

Fig. 6은 독 높이기 전후의 수위 급강하시(1일) 상류 사면의 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. 독 높이기 후 홍수위시(31.3 m)에서 사수위(10.0 m)로 급강하 하였을 경우, 상류사면에서는 1.195로 급격히 감소하여 불안정하였고, 하류사면에서 1.676로 기준안전율 이내에 포함되어 안정한 것으로 나타났다.

일반적으로 수위 급강하시는 안전율이 감소하다가 제체내의 공극수압이 소산되면서 안전율이 증가한다. 그러나 이 경우는 짧은 시간에 수위급강하 하였기 때문에

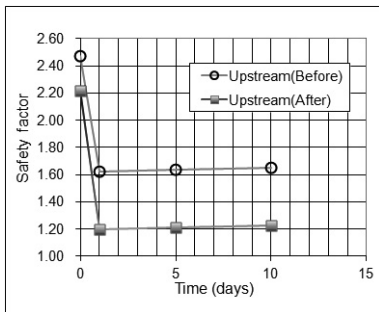
안전율의 증가현상은 나타나지 않았다. 또한, 정상류 조건에서 비정상류 조건으로 변화할 경우에 수위급강하에 따라서 상류사면은 안전율의 감소폭이 크게 나타났지만 하류사면에서는 작게 나타났다.

Table 2와 Fig. 7은 독 높이기 전후의 정상과 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일, 5일, 10일) 안전율의 분포를 나타낸 것이다.

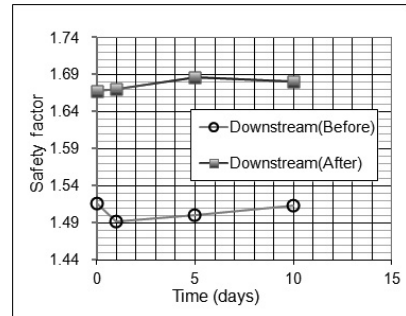
상류사면의 안전율은 정상상태에서 매우 크게 나타났고 수위가 급강하함에 따라 감소하다가 비정상류 상태에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 하류사면의 안전율도 독 높이기전에는 수위 감소에 따라 약간 감소하다가 증가하였고, 독 높이기 후에는 거의 일정하게 나타났다. 독 높이기 전보다 후에서 매우 크고 상류사면과는 반대로 나타났으나 기준안전율 1.2이내에 포함되어 안전한

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	1,491	1,195	1,670
	5	1,634	1,500	1,211	1,686
	10	1,650	1,513	1,225	1,680



(a) Upstream slope



(b) Downstream slope

Fig. 7. Stability analysis at upstream slope and downstream slope

것으로 나타났다. 전체적인 안전율은 독 높이기전은 상류사면의 안전율이 크고, 독 높이기 후는 하류사면이 더 안정한 것으로 나타났다.

3. 유한요소해석에 의한 응력-변형 거동

가. 정상류 조건

Fig. 8은 독 높이기 전후의 정상류 조건에서 홍수위시(18.3 m, 31.3 m) 응력-변형 분포를 나타낸 것이다.

공극수압은 침투류 해석시 정상류조건과 동일하고, 독 높이기 전의 평균유효응력(p')은 코어 하부에서 약 200 kPa로 집중되어 있고, 하류사면 일부에 100~200 kPa으로 분포하고 있다. 독 높이기 후의 평균유효응력(p')은 코어 하부에서 약 400 kPa로 가장 크고, 하류사면 일부에 200 kPa으로 분포하고 있다. 독 높이기 후의

평균유효응력은 독 높이기 전보다 약간 더 큰 분포형태를 나타냈고, 최대전단응력은 독 높이기전에는 약 50 kPa 정도로 분포하였지만 독 높이기 후에는 나타나지 않았다.

나. 비정상류 조건

Fig. 9-10은 독 높이기 전후의 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일) 응력-변형 분포를 나타낸 것이다. 독 높이기 전의 과잉공극수압은 상류사면에서 -5~-80 kPa 범위로 분포하고, 독 높이기 후 상류사면에서는 급격히 감소하여 -20~-200 kPa로 부(-)의 과잉공극수압이 나타났으며, 하류사면에서는 나타나지 않았다. 변위 분포는 독 높이기 전에서는 나타나지 않았고, 독 높이기 후에는 상류사면에 0.02~0.06 m 범위로 점점 더 넓은 분포를 나타냈다. 평균유효응력(p')은 독 높이기 전에는 코어 하부에서 200 kPa 로 가장 크고 상류와

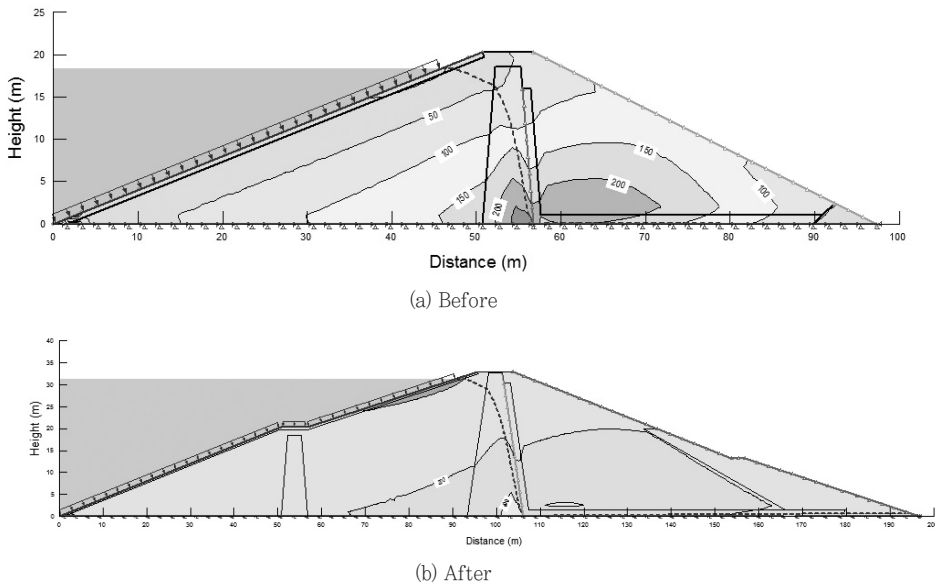
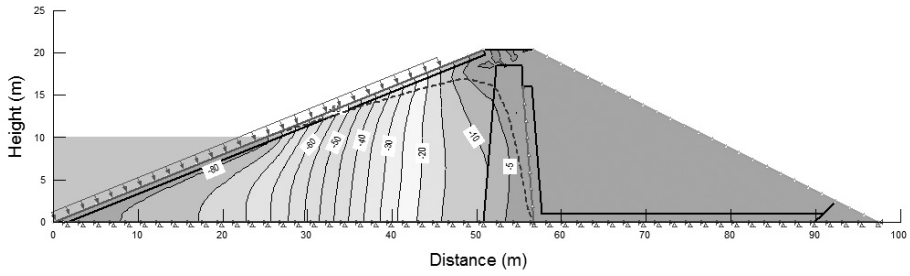
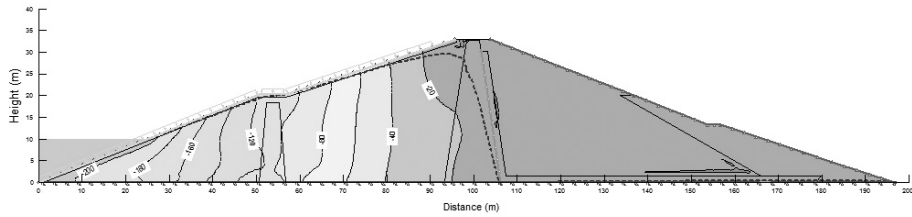


Fig. 8. Comparison of mean effective stress (p').

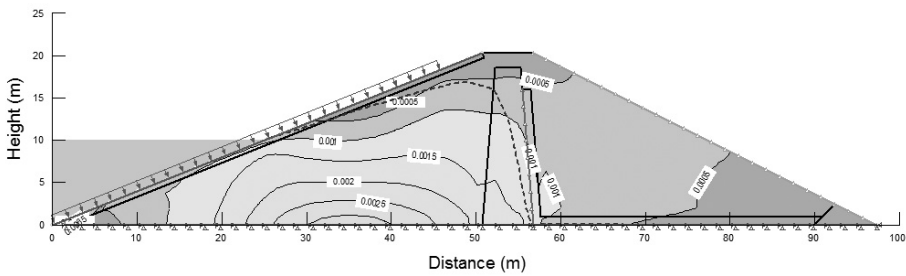


(a) Before

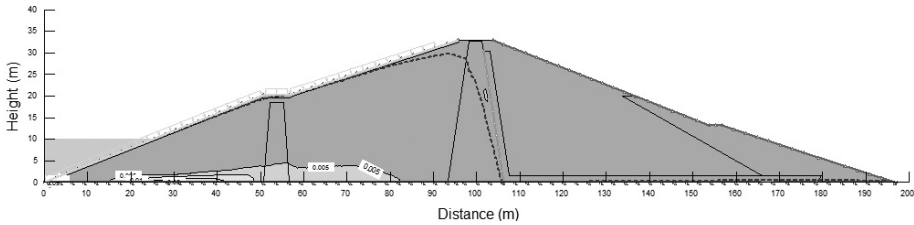


(b) After

Fig. 9. Comparison of excess pore water pressure (1 days).



(a) Before



(b) After

Fig. 10. Comparison of maximum shear strain (1 days).

하류사면으로 진행할수록 감소하였지만, 독 높이기 후는 300 kPa로 전보다 분포영역이 더 크게 나타났다. 독 높이기 전후의 최대전단응력은 코어 부분에서 60~100 kPa 범위로 집중되고 상류사면과 하류사면에서 20 kPa 범위로 폭넓게 분포하였고, 증고 후에는 전단변형이 나타나지 않았다. 최대전단변형은 독 높이기 전에는 사면선단부에서만 0.0025~0.0005 범위로 매우 작게 나타났고, 독 높이기 후에는 하부사면 일부에만 나타났다.

독 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 독 높이기 사업 지구를 대상으로 후면 덧쌓기에 의한 독 높이기 전후에 정상류와 비정상류 조건으로 홍수위시와 수위급강하시의 침투류 해석, 사면안정해석 및 유한요소해석에 의한 응력-변형 거동을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 독 높이기 전·후의 정상류와 비정상류에서 공극수압은 상류사면에서는 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서는 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 또한, 신설 저수지와 접속부에서 넓은 영역으로 분포하고 하류사면에서도 제체 덧쌓기와 매우 다른 정(+)의 공극수압을 나타냈다. 특히 기존저수지와 신설저수지의 접속부에서 공극수압은 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 않았으며, 독 높이기 전후의 동수경사는 코어 하부에서 1.2~2.0 범위로 집중되어 파이핑에 대해서 불안정하게 나타났고, 상류와 하류사면에서는 안정한 것으로 나타났다. 독 높이기 전후의 정상류와 비정상류 조건하에서 총저수량에 대한 1일당 허용누수량과, 제체 100 m당 누수량은 안전관리기준 이내로 나타나서 파이핑에 대해서는 안전하였고, 누수량은 제체 덧쌓기보다 더 작게 나타났다.

3. 독 높이기 전후의 정상과 비정상류 조건에서 상류와 하류사면의 안전율은 정상상태에서 매우 크게 나타났고 수위가 급강하함에 따라 감소하다가 비정상류 상태에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 안전율은 독 높이기 전에는 상류사면이 크고, 독 높이기 후에는 하류사면이 크게 나타났지만 기준안전율 1.2이내에 포함되어 안전한 것으로 나타났다.

4. 독 높이기 전후의 과잉공극수압은 상류사면에서는 급격히 감소하여 부(-)의 과잉공극수압이 나타났고, 하류사면에서는 매우 작게 나타났다. 평균유효응력(p)는 코어 하부에서 가장 크고 집중적인 분포를 나타내고, 독 높이기 후에는 점점 더 큰 분포형태를 나타냈다. 독 높이기 전의 변위는 나타나지 않았고, 독 높이기 후에는 상류사면에서 0.02~0.06 m 범위로 분포범위가 더 넓게 나타났다. 최대전단변형은 독 높이기 전에는 사면선단부에서 넓게 분포하지만, 독 높이기 후에는 분포범위가 매우 작게 나타났다.

앞으로 농업용 저수지 독 높이기 사업의 성공적인 결과를 위해서는 현재 시공되는 있는 사업지구가 적정한 방법으로 시공되고 있는가에 대한 의문을 갖고 문제가 있다면 준공기간을 연기해서라도 재검토되어야 할 것

로 판단된다. 또한 합리적인 안정관리 및 유지관리를 위해서는 공급수압, 토압 및 침하량 등을 정확하게 측정할 수 있는 계측시스템을 구축하고, 해석 결과를 검증하기 위한 대형모형실험 등을 통하여 안정성과 현장 적용성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

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*. A.A. Balkema, 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](http://4rivers.go.kr). [in Korean]
- Van Genuchten MTh. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America J.* 44: 892-898.

기획: 이달원 dwlee@cnu.ac.kr