

제방형상과 홍수파형에 의한 제방의 파이핑 안정성 평가 Levee Stability Assessment Depending on Levee Shape and Flood Wave

강 태 윤* / 안 현 욱** / 이 광 만*** / 정 관 수****
Kang, Taeun / An, Hyunuk / Lee, Gwangman / Jung, Kwansue

Abstract

Because of the rapid rising of water related disasters due to the global warming, the extreme design criteria of levee construction for severe flood has been applied in several developed countries such as USA and Netheland. In Korea, the national river restoration projects were carried out on 4 major rivers in recent several years. The projects consisted of riverbed dredge and levee reinforcement, and new construction have caused wide change of river environment. However, concrete countermeasures for levee safety and river management have not been suggested until now. Therefore, this study assesses the levee safety of Yulji levee located in Hoechon, Nakdong Basin, where the Levee Seepage Monitoring System installed. The stability of levee is assessed based on the simulation performed by SEEP/W (2D unsaturated seepage model) and the simulated results are compared with the observed data. The effects of the flood wave and levee shape on the levee safety are investigated through several simulations.

Keywords : SEEP/W, analysis on piping of levee, monitoring of real scale levee, gauge data of levee

요 지

최근 지구온난화 및 기후변화에 의한 재난이 빈발하고 있어 미국이나 네덜란드 같은 제방 선진국에서는 특수한 경우 적게는 500년, 크게는 10,000년 빈도의 홍수위까지도 고려하는 극단적인 수준의 제방설계기준을 적용하고 있다. 우리나라도 지난 몇 년간 국가하천을 중심으로 대하천 정비사업이 추진되었다. 주로 하천준설과 제방증축 및 신축 등으로 진행된 사업에 의해 하천환경이 광범위하게 변화되었으나 제방의 안전과 관련된 하천환경 변화에 대응하는 구체적인 대응방안을 제시하지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제방침투감지시스템 Testbed가 구축되어 있는 낙동강 회천의 율지제를 대상으로 제방 안전성을 평가하였다. 평가방법은 간극수압 측정자료를 이용하여 2차원 지하수 침투모형인 SEEP/W를 이용하여 제방의 파이핑 현상을 분석하였으며, 제방의 형상과 홍수파형에 따른 침투현상을 모의하여 제방안정성을 평가하였다.

핵심용어 : 제방침투, 파이핑 현상, SEEP/W, 실제제방계측, 대하천 정비사업

* 충남대학교 국제수자원연구소 연구원 (e-mail: kangxodns@nate.com)
Researcher, International Water Resource Institute, Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea
** 교신저자, 수원대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: hanlight20@hotmail.com)
Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Suwon 445-743, Korea
*** 한국수자원공사 연구원 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr)
Principal Researcher, K-Water Research Institute, Daejeon 305-730, Korea
**** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)
Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

1. 서 론

최근 지구 온난화에 따른 기상이변으로 홍수, 가뭄, 태풍과 한파 등 과거의 경향분석만으로는 예측이 어려운 자연재해가 세계 곳곳에서 발생하고 있다. 우리나라도 마찬가지로 국지성 집중호우와 태풍, 그리고 한파 등의 영향으로 인명과 재산의 피해가 근래에 들어 해마다 증가하고 있는 추세이다. 우리나라의 기후는 대부분 지역의 강수량이 약 1,300 mm 이상의 습윤 지역이며, 연강수량의 50% 이상이 여름철(6~9월)에 집중된다. 이때의 강우유출은 하천으로 집중되며 하천수위의 상대적인 급상승과 급강하를 일으키는 원인이 된다. 하천수위의 급변동은 제방의 내구성에 손상을 주어 국부적인 제방파괴의 주요한 원인이 된다. 또한 급상승한 하천수의 제방침투는 제체내 침윤선과 침투유속, 동수경사를 변화시켜 강우가 끝난 후에도 제방에 지속적으로 영향을 주게 된다. 그러므로 제방 파괴로 인한 피해를 저감하기 위해서는 하천수 변동 및 침투-제체내 지하수위 변동-제방의 안정성 변화로 이어지는 매커니즘을 이해하고 분석하는 과정이 필수적이다. 제체의 침투안정성 평가는 제체와 제체지반의 토양특성과 침투거동을 이해하여야 하며 특히 하천의 수위변동과 제방의 형상에 따른 침투거동에 주목해야 한다.

제방의 침투거동을 연구한 외국의 연구사례들을 살펴보면 Pradel and Radd (1993)는 제방의 안정성을 평가하면서 침투효과에 대해 연구하였는데, 이 때 강우강도, 지속시간 그리고 재현기간을 고려할 수 있는 방법을 제안하였다. Meer et al. (2009)은 네덜란드와 미국의 제방안정성 및 활동사면에 대한 안정성 산정방법을 비교 분석하였고 네덜란드는 1,250~10,000년 빈도의 홍수위를, 미국은 200~500년 빈도의 홍수위에 대한 월류 및 침투 제방안정성을 고려하였다. 일반적인 국내 국가하천 제방설계기준인 100~200년 빈도에 비하면 매우 극단적인 하천 상황까지도 대비하고 있는 것을 알 수 있다. Artières et al. (2012)은 실제 제방에 광섬유 계측센서를 설치하여 제방변형시 발생하는 인장력과 수분포화에 의한 온도 변화를 감지하여 제방의 침식, 누수, 파이핑 등의 침투 거동을 주로 축소모형에서 연구되었던 실험들을 실제 제방에서 재현 및 분석하였으며, 계측 정확도는 온도부분에서 0.1°C, 인장력부분에서 0.02%의 변형을 감지할 수 있었다.

국내의 관련 연구들을 살펴보면 Kang (2003)은 낙동강의 기존 제방들을 대상으로 홍수위 지속시간을 부정류 해석과 실측수위기록을 통하여 확인하고 침투 및 사면안정

등 제방안정성을 수치모형으로 검토하여 제방의 침투 거동을 수치해석적으로 연구하는 발판을 만들었다. Kim et al. (2004)은 하천제방의 안정성 평가는 침투해석으로 결정된 제체 침윤면에 의한 비탈면 활동, 기초지반의 침투 압 상승에 따른 파이핑과 관련된 것으로 적절한 해석기법이 필요하다고 하였다. Kim (2006)은 침투로 인한 제방 파괴의 역학적 거동을 이해하여 낙동강 유역 제방들이 홍수위와 홍수과형변화로 인한 하천수의 제체침투 영향을 분석하고 제방 파괴에 영향을 미치는 하천수 침투를 차수벽의 적정심도를 분석하여 안정성을 평가하였다. Choi (2007)은 하천제방 보강 시 낙동강유역 하천제방의 파이핑현상 발생에 따른 적절한 보강방법을 제시하기 위하여 현장시료 채취 및 실내실험을 수행하였고 유한 요소 프로그램을 이용하여 차수벽 위치에 따른 가장 불안정한 수두 경사값을 통해 합리적인 차수벽 위치를 검토하였다. Kim (2011)은 제방 설계시 적용될 수 있는 제방 단면의 주요 특성인 둑마루 폭, 경사도, 기초지반의 투수계수 및 제방의 높이에 따른 유출부 동수경사를 수치해석을 통해 분석하여 제방에 대한 안정성 검토방법을 제시하였다.

전술한 동향들을 종합해보면, 국외에서는 기후변화에 따른 극단적인 하천상황을 고려한 침투안정성에 관한 연구들의 기반이 구축되었고 또한 실제 제방을 계측하여 침투 거동을 분석하고 있다. 한편 국내에서는 실험과 문헌자료를 통한 수치해석을 실시하여 제방의 침투안정성을 판단하는 사례가 많았으며 실제 제방을 계측하여 침투 거동을 분석한 예는 없는 것으로 보인다. 또한 현재 국가하천은 4대강 사업으로 대규모 하천준설이 이루어져 하천수위와 홍수과형 등이 변화되었으며 제방의 경우는 보강 및 신축이 부분적으로 수행되면서 제방고와 제내지반고, 사면경사 등의 제방형상이 달라졌다. 따라서 이러한 변화요인들이 침투 거동과 안정성에 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석이 요구되고 있다. 본 연구에서는 2차원 비정상-불포화 침투모형인 SEEP/W를 사용하여 낙동강 유역의 실제 제방을 대상으로 침투모의를 수행하였고 제방에 설치된 센서를 통한 관측자료와 비교하여 모형의 적용성을 검토하였다. 또한 대하천 정비사업으로 달라질 수 있는 홍수과형과 제방형상에 따른 지하수 침투거동을 Case별로 모의하여 제방의 안정성을 분석하고 평가하였다.

2. 연구수행 방법

2.1 대상지역

경상남도 합천군 덕곡면 울지리에 위치한 본 연구대상

제방은 낙동강 연안 개발사업 하천개수공사로 1991년도에 축조되었으며, 회천(지방하천) 우안측 경상남도과 경상북도의 경계지점 야산에서 시작하여 낙동강 본류 우안측으로 연결되어 울지교를 지나 낙동강 본류 우안측으로 유입되는 덕곡천(지방하천)의 좌안측을 따라 덕곡천 상류측에 위치한 병배리에 위치한 지방도 1034호선에 접하게 된다(MLTM, 2003). 울지제는 지류가 본류에 합류되면서 퇴적된 지역으로 투수성이 높은 기초지반의 특성을 가지고 있다. 대상지역은 2003년 태풍 매미피해기록이 보고된 바 있는 지역이다. 울지제의 위치는 Fig. 1과 같다.

최근 한국수자원공사에서는 제방누수감지기술 현장 적

용 및 분석을 위해 울지제를 Testbed로 선정하여 계측센서(간극수압계, 수위계, 온도계)들을 설치한 바 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 울지제에 설치된 센서들의 계측자료를 이용하여 2차원 지하수모의를 통해 검증을 수행하였다.

센서들은 4개의 횡단면에 집중형으로 각각 온도계, 간극수압계, 수위계가 설치되어 있으며 온도계는 집중형과 분포형 및 선형(분포형 종단면)으로도 설치되어 있다. 각 횡단면은 약 250m 간격으로 구분되며 제방의 제내지 방향으로 집중형 센서들이 설치되어 있다.

Fig. 2는 울지제 Testbed 센서배치 현황을 보여주고 있다. 횡단면에 따라 각각 센서들이 배치되어 있다. 집중형

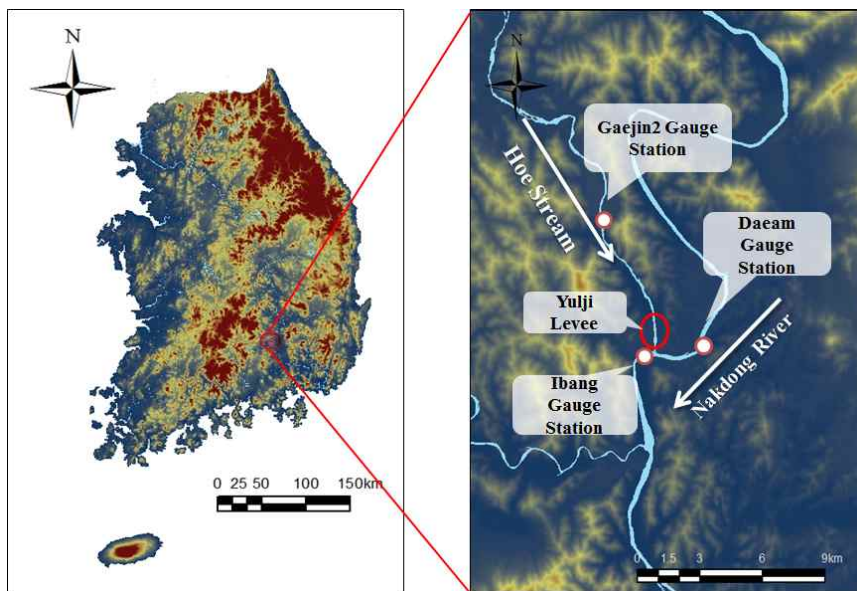


Fig. 1. Study Area

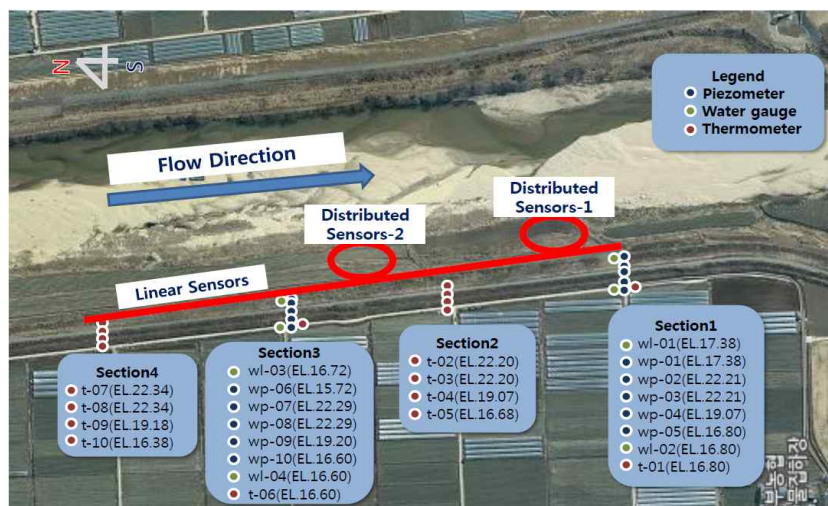


Fig. 2. Locations of Installed Sensors

센서들 중에 wl-01~04는 지하수위, wp-01~10은 간극수압계, t-01~10은 온도계를 나타내며 모든 집중형센서 명칭 옆에는 센서위치의 제방의 표고를 표시하였다. 또한 적색선은 선형, 분포형 온도센서의 위치를 나타내고 있다.

2.2 수치모형 및 파이핑 안정성

토양내 불포화흐름에 관한 지배방정식은 Richards식으로 연속방정식과 Darcy의 법칙에 의해 유도되며 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, t 는 시간, x 는 수평방향, y 는 연직방향, $\phi = h + y$ 는 전수두, h 는 압력수두, Q 는 요소로 유입되는 유량, θ 는 체적함수비 그리고 K 는 투수계수이다. θ 와 K 는 h 에 관한 비선형함수로 표현되며 대표적으로 Brooks-Corey 모형(Brooks and Corey, 1964), Van Genuchten모형(Van Genuchten, 1980) 등이 있다. 따라서 Eq. (1)은 압력수두 h 에 관한 비선형 편미분 방정식이 되며 이 식의 해는 아주 제한적인 조건에서만 구할 수 있으므로 수치모형을 사용하여 불포화흐름을 계산하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 불포화침투를 해석하는 상용 소프트웨어인 SEEP/W를 사용하여 해석을 수행하였다. Lim et al. (2006)은 SEEP/W는 비정상 제방 침투해석에 적용되어 실험결과 및 타 모형과의 결과와 비교를 통하여 모형의 적합성을 검증한 바 있다.

KWRA (2009)에서는 파이핑의 안정성은 한계동수경사에 의한 판정과 한계침투유속에 의한 판정으로 구분하

고 있다. 한계동수경사에 의한 방법은 Eq. (2)와 같은 Terzaghi식으로 산정한다.

$$i_c = \frac{\phi}{D} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

여기서, i_c 는 한계동수경사, D 는 분서지점의 수두, G_s 는 토립자의 비중, e 는 흙의 간극비이다. 일반적으로 한계동수경사가 침투류 해석에 의해 산정된 값보다 2배 이상이 되어야 안전한 것으로 판단한다.

한계유속은 제체 및 기초지반의 흙 입자가 소류력에 의하여 입자가 밀려나가는 유속의 임계치를 말하며, 그 임계치 이상이 되면 파이핑 현상이 발생한다. KWRA (2009)에서는 실제 흙 입자는 여러 크기가 혼재되어 있어 입경기준을 정하기가 어려우므로 침투해석에서 얻어지는 실유속의 한계유속 값에 대한 1/100 이하가 되도록 하고 있다. 또한 MLTM (2003)에서 실내실험을 통해 연구 대상제방의 한계유속을 3.978 cm/s로 산정하였고 모든 Case의 모의결과에서 침투유속이 한계유속의 1/100 이하로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 동수경사에 의한 파이핑의 안정성만을 고려하고 한계유속에 의한 파이핑의 안정성 분석은 생략하기로 한다.

2.3 모의조건

본 연구에서 활용된 제방단면은 간극수압계가 설치된 Testbed Section-3의 횡단면이다. Section-3은 간극수압센서가 설치된 Section-1보다 낙동강 본류에서 더 멀리 떨어진 구간이므로 본류로부터의 배수영향이 적으며 계측상태가 양호한 것으로 판단된다. 입력된 Section-3 횡단면의 모습은 Fig. 3과 같다. 입력된 단면의 제방고는 EL.22.5

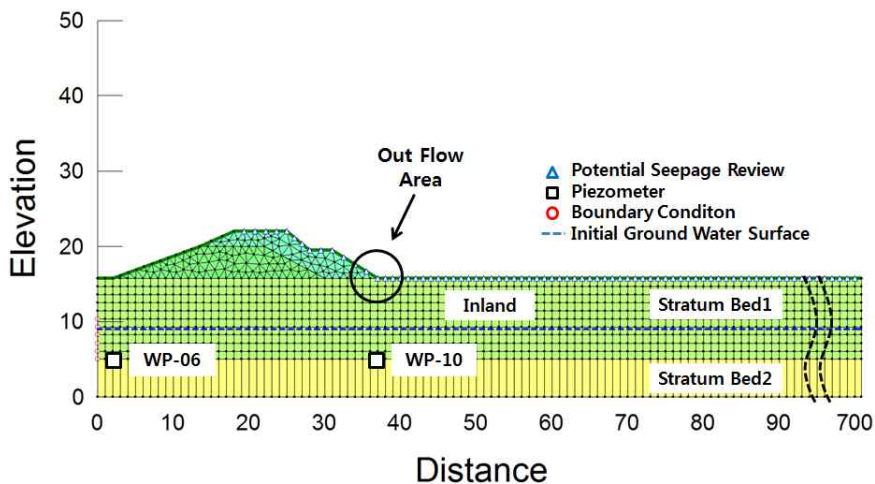


Fig. 3. Computation Domain and Grid on SEEP/W

m이고, 제내지와 제외지 끝단의 사이 폭은 37m이며 제내지와 제외지 사면경사는 1:2이다. 모의영역의 전체 길이는 700m로 하천수위의 경계조건이 영향을 미치지 않는 범위까지 적용하였다. 실제로 제방으로부터 700m 지점까지는 모두 경작지로 이용되고 있으며, 700m 끝단에는 지방도 1034호선(오광대로)이 있다. 유한요소망의 요소수는 2,441개로 Fig. 3과 같이 경계조건으로부터 100m까지는 1m²에 1개의 격자로 구축하였으며 100m 이후는 분석대상이 아니기 때문에 5m²에 1개의 유한요소망으로 구축하여 계산시간과 저장용량을 단축하였다.

지하수 침투유동은 하천수위(경계조건) 위치와 멀어질수록 하천수위 유동보다 훨씬 둔해지게 된다. 그러므로 본 연구에서는 제내지 기슭부근까지 지하수 침투유동이 잘 재현될 수 있도록 경계조건을 제외지 끝단 기슭에 배치하였다. 또한, Potential Seepage Face를 제내지 사면에 설정하였다. 지하수위 초기값은 2012년도 하천의 평수위가 EL.10m인 것과 이 지역의 평균지하수위가 EL.9~10m인 것을 고려하여 EL.9m로 설정하였다. 투수계수와 체적함수비는 모형실험을 활용한 제방의 누수 메커니즘 규명 연구 최종보고서(KWRC, 2012)와 낙동강 수계 정곡제의 1개지구 하천개수공사 실시계획 보고서(MLTM, 2003)에 수록된 투수계수와 체적함수비를 토대로 선정하였으며 대상현장의 지층 구성도는 Table 1과 같다. Table 1에서 SP는 입도분포 불량한 모래 또는 자갈섞인 모래, SM은 실트질 모래 또는 실트섞인 모래, CL은 모래 섞인 점토 또는 실트 섞인 점토 또는 점성이 낮은 점토이다. 부정류 모의시 모형의 안정화를 위해 하천수위 EL.10m을 경계조건으로 적용하여 400시간동안 워밍업을 하고 그 후에는 울지제 홍수과형에 따른 수위변화를 적용하였다. θ 에 관한 비선형 함수는 Van Genuchten모형을 적용하였다.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{1 + \left(\frac{h}{\alpha}\right)^n\right\}^{\frac{n}{n-1}}} \quad (3)$$

여기서, θ_r 은 잔류함수비(Residual Value), θ_s 는 포화함수비(Saturated Value)이며 α , n 은 추정곡선의 매개변수

(Curve Fitting Parameters)이다. 본 연구에서는 Seepage Modeling with SEEP/W (Geo-Slope International Ltd., 2004)에 수록된 각종 토양 물성치 샘플 중에 본 연구대상의 토양과 가장 유사한 샘플을 비교하여 추정곡선의 매개변수($\alpha = 100\text{cm}^{-1}$, $n = 2.0$)를 산정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 모형검증

SEEP/W의 실제 제방에의 적용성을 검증하기 위하여 울지제의 수위 계측 자료가 존재하는 기간(2012년 8월 21일~2013년 2월 28일)을 대상으로 모의를 수행하여 계측 지하수위와 비교하였다. 앞에서 서술한 바와 같이 하천수위는 SEEP/W에서 경계조건으로 처리되며 본 연구에서는 경계조건 수위를 산정하기 위해 HEC-RAS를 이용하여 회천수위를 산정하였다. Fig. 1에서와 같이 HEC-RAS의 상류단 경계조건은 회천상류에 위치한 개진2 및 낙동강 상류의 대암관측소의 수위를, 하류단은 회천과 낙동강의 합류 후에 위치한 이방관측소의 수위 및 유량자료를 입력하여 회천수위를 모의하였고 이를 SEEP/W의 경계조건에 입력하였다.

모의 결과는 Fig. 4와 같으며 모의결과와 계측치는 매우 비슷한 경향을 나타내지만 일정한 수위오차가 존재하는 것을 알 수 있다. 오차의 원인 분석하기 위해 민감도 분석을 실시하였으며 민감도 분석의 시간을 줄이기 위해 Fig. 4 그래프와 동일한 시점인 2012년 8월 22일 00:00부터 수위변동이 가장 심했던 2012년 9월 5일 23:00을 분석기간으로 선정하였다. 분석대상은 wp-10계측 데이터이며 SEEP/W에서 가장 민감한 변수인 투수계수와 체적함수비를 각각 변화시켜가며 모의하였고 Fig. 5에 모의 결과를 도시하였으며 그 결과 매개변수의 변화에 따라 최대 지하수위는 변할 수 있으나 평균적인 수위는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 4를 보면 wp-06과 wp-10에서의 관측지하수위가 1.5m 정도의 일정한 간격을 가지고 동조하고 있는 것을 알 수 있다. 즉 일정한 동수경사를 유지하며 지속적으로 낙동강 본류에서 제내지로 지하수가

Table 1. Characteristics of Soil Layer (MLTM, 2003)

Layer	Soil type	Depth (m)	Hydraulic conductivity (cm/s)	Water contents (%)
Levee	SP	7	5.7e-3	18.5
Reinforcement of Levee	SM	-	2.27e-4	18.5
Stratum Bed1	SM	8.6	4.18e-3	18.8
Stratum Bed2	CL	15.8	2.18e-6	29.6

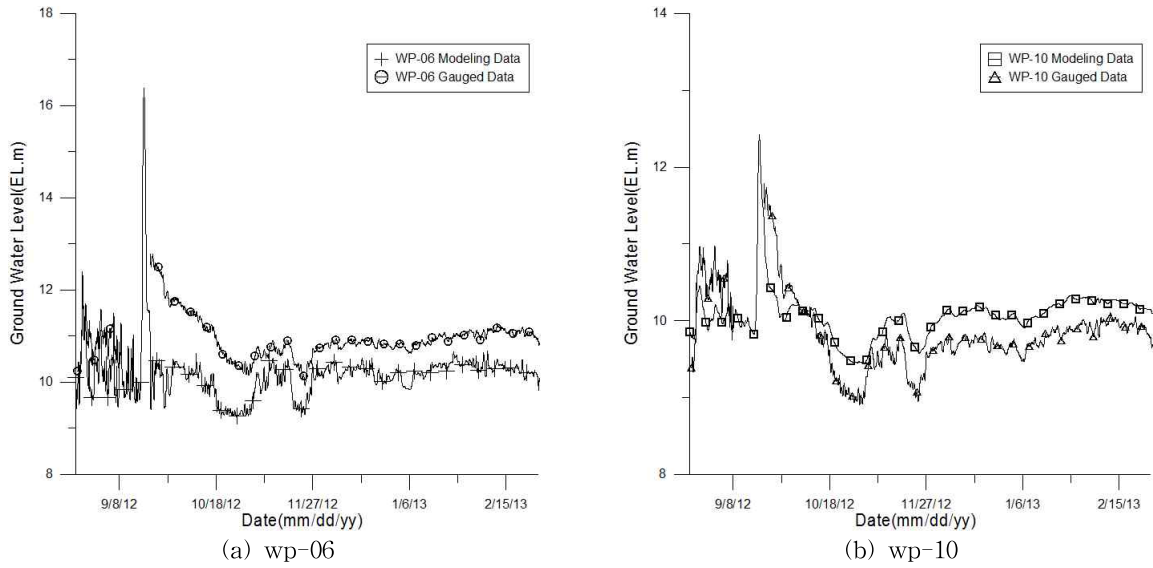


Fig. 4. Observed and Simulated Ground Water Levels at wp-06 and wp-10

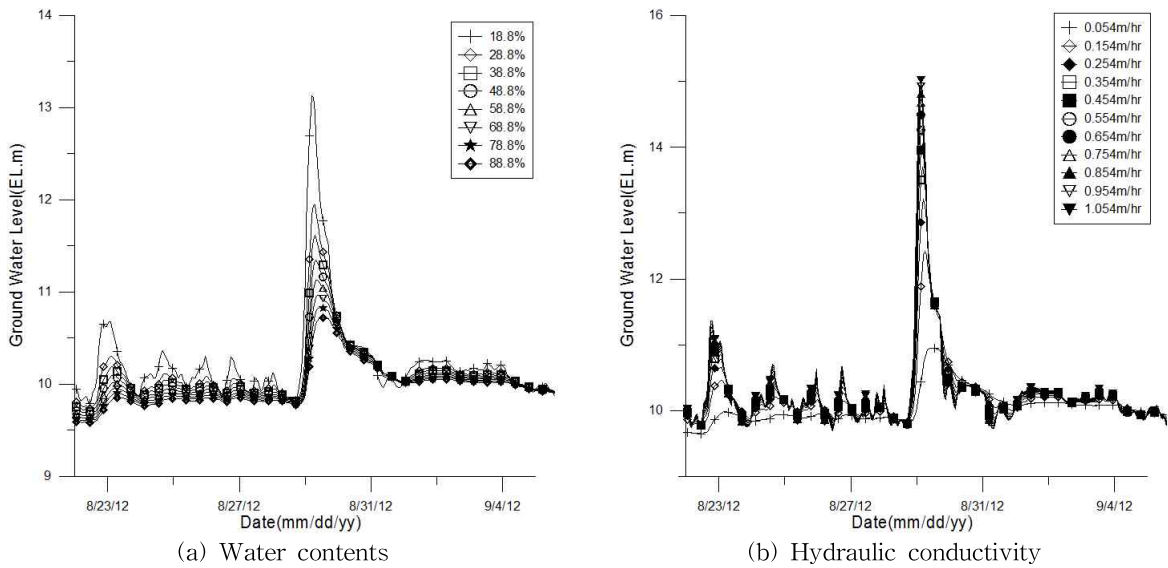


Fig. 5. Sensitive Analysis on Parameters at wp-10

유입되고 있는 상황으로 보이며, 유입된 지하수는 회천으로 유출되는 것으로 추정된다. 하지만 wp-06과 wp-10 사이의 거리는 약 40m로 지하수의 유동이 지표수의 유동에 비해 느린 점을 감안하더라도 비교적 짧은 거리이며 1.5m의 수위 차는 그에 비해 과도한 것으로 판단된다.

지하수위 관측에 사용된 간극수압 센서는 광섬유격자 센서(Fiber Bragg Grating)로 기준과형에 대한 온도와 수압의 변화에 따른 변동과형의 위상차를 매개변수로 사용하며 각 센서의 위치마다 산정된 보정계수를 합산하여 최종적으로 간극수압이 계산된다. 가공되지 않은 데이터

(Raw Data)로부터 간극수압을 계산하기 위하여 사용된 매개변수는 센서가 매설되기 전 실내실험과의 비교를 통하여 추정되었다. 하지만 실험모형과 실제 제방과의 스케일 차이 또는 매설 위치의 불확실성을 고려하면 데이터로부터 간극수압 산출 과정에서 오차가 발생할 가능성이 있으며, 결과를 고찰해 보면 긴 기간 동안의 제방에서의 높은 동수경사는 오차의 영향을 받은 것으로 판단된다. 다수의 지점에 수위센서를 매설하여 제방의 지하수위를 관측하려는 시도는 국내에서 처음 진행되는 것으로 보다 정확한 관측값을 얻기 위해서는 추가적인 검증 및 보정 과정

이 필요한 것으로 보인다. 망실 및 설치점검기간(2012년 8월 22일~9월 30일)을 기준으로 2012년 8월 22일 00:00부터 2013년 2월 28일 까지의 wp-10(제내지측에 위치한 모형 보정에 이용한 센서)과 모형결과의 결정계수는 0.54이었으나 설치점검기간 이후인 2012년 10월 1일부터 2013년 2월 28일 까지는 0.77로서 추산된 관측수위의 변동경향은 하천수위의 변동과 유의미한 상관성을 가지고 있으며 또한 모의된 지하수위의 변동경향과 매우 흡사하다.

본 연구의 목적은 2차원 침투모형을 사용하여 제방의 안정성을 분석하는 것으로 낙동강분류의 영향을 고려하기 힘들다는 모형의 한계를 고려하면 이러한 지하수위 변동경향의 유사성은 모형의 기본적인 검증자료로 사용되어 질 수 있으며 구축된 모형을 통한 안정성 분석의 신뢰도를 높여줄 것으로 판단된다.

3.2 하천 홍수파형과 빈도별 홍수위 변화에 따른 안정성 평가

현재 제방과 하천은 4대강 살리기 마스터 플랜(MLTM, 2009)에 따라, 제내지사면 성토, 측단확대, 단면확대 등의 제방보강이 이루어진 상태이며 대규모 준설로 인해 하천의 유속, 수위, 유량 등이 달라진 상태이다. 하천변화에 따른 지하수 침투거동을 모의하고자 하였고, 이를 위해 우선 확률빈도별(20~150년) 홍수위에 따른 지하수 침투거동을 모의 및 분석하였다. 그리고 그 중 파이핑 안정성이 가장 낮은 150년 빈도 홍수위를 기준으로 홍수파형을 변화시켜 이에 따른 지하수 침투거동을 모의하였다. 본 연

구에서는 낙동강 수계 정곡제의 1개지구 하천개수공사 실시설계 보고서(MLTM, 2003)에 수록된 울지제의 홍수파형을 참고로 하여 홍수위 도달시간, 지속시간, 수위하강시간을 변화시킨 변형 홍수파형을 SPPE/W의 수위조건으로 입력하여 이에 따른 제방의 동수경사를 추정하였다. 울지제의 홍수파형은 Fig. 6, Table 2와 같으며 기존 울지제 홍수파형의 수위도달시간은 7시간, 수위지속시간은 86시간, 수위하강시간은 20시간으로 구성된다.

확률빈도별 홍수위에 따른 모의결과는 Fig. 7(a)와 같다. 모든 확률빈도에서 홍수 발생 20시간 부근에서 최대 동수경사가 나타나고 그 후 동수경사는 감소하다가 확률빈도에 따라 40~80시간을 전후로 하여 두 번째 상승현상이 나타나며 100시간 부근에서 급격하게 감소한다. 두 번째 상승의 경우 동수경사의 상승폭은 확률빈도에 따라 큰 차이를 보이거나 최대동수경사는 첫 번째 상승에서 보이며

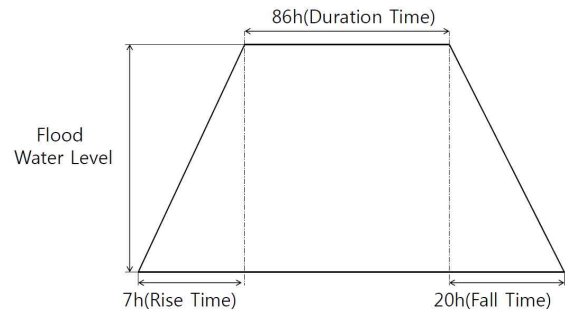


Fig. 6. Designed Flood Wave on Yulji-li Levee (MLTM, 2003)

Table 2. Case of Flood Wave

(a)Flood Frequency

Return Period (yrs)	Flood Frequency (EL.m)
20	18.51
30	18.90
50	19.42
80	19.90
100	20.13
150	20.55

(b)Flood Wave Factor

Rise time (hr)
1
4
7
10
13
Duration time (hr)
62
74
86
98
110
Fall time (hr)
8
14
20
26
32

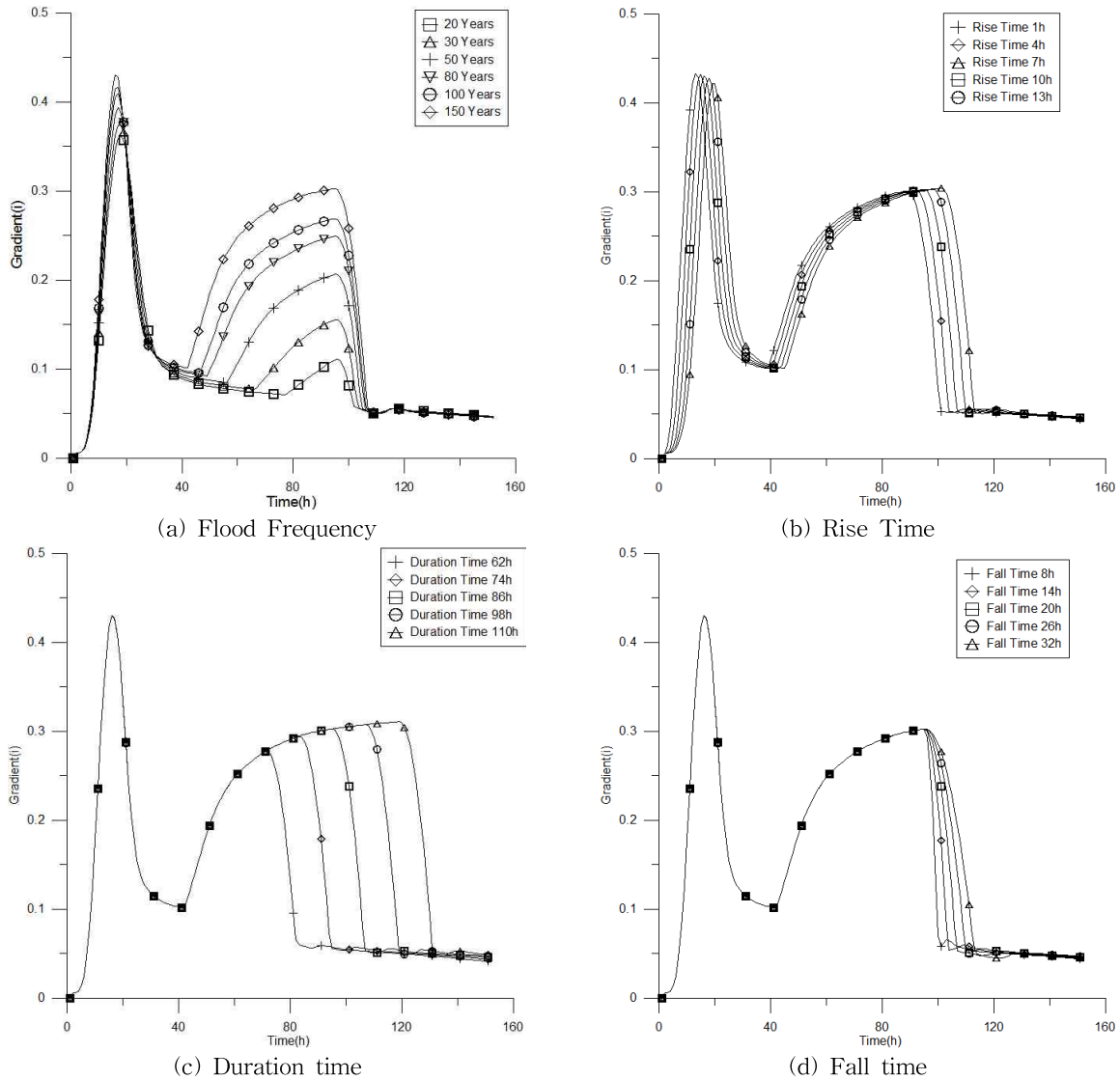


Fig. 7. Change of Hydraulic Gradients Depending on (a) Flood Frequency, (b) Rise Time, (c) Duration Time, and (d) Fall Time with 150 Years Return Period

두 번째 상승에 비해 확률빈도에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

홍수위 도달시간, 지속시간, 수위하강시간을 변화시켜 모의한 결과는 Figs. 7(b), (c), (d)와 같다. Fig. 7(a)에서와 같이 공통적으로 동수경사가 홍수위 지속시간 초반까지 급격하게 증가하여 최대동수경사를 나타내다가 급격한 감소를 나타내었고 홍수위 지속시간 중반에 접어들면서 서서히 상승하는 경향을 보였으며 홍수위 하강시간에 이르러 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. Table 3과 같이 홍수위 도달시간이 증가하는 경우에는 최대동수경사가 미세하게 증가하였으나 홍수위 지속시간과 홍수위 하강시간은 최대동수경사에 영향을 주지 않는 것으로 나타

났다. 결론적으로 율지체의 경우 홍수파형은 제방의 최대 동수경사에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

파이핑 안전율은 Eq. (4)과 같이 산정하여 안정성을 살펴보았다.

$$F_s = \frac{i_c}{i_{max}} \quad (4)$$

여기서 F_s 는 파이핑 안전율, i_c 는 한계동수경사, i_{max} 는 최대동수경사이다. 율지체의 한계동수경사는 MLTM(2003)에서 현장시료 채취 및 실내실험을 수행한 결과 0.51로 나타났다. 최대동수경사는 침투해석시 산정된 동수경사의 최대값이다. 이를 통해 각 빈도별 Case를 SEEP/W로 해석

Table 3. Simulated Maximum Hydraulic Gradient and Piping Safety Factor with Flood Wave

	Type	Max. Hydraulic Gradient (i_{max})	Piping Safety Factor (F_s)
Flood frequency (EL.m)	18.51 (20 y)	0.36251	1.406
	18.90 (30 y)	0.37502	1.359
	19.42 (50 y)	0.39349	1.296
	19.90 (80 y)	0.40933	1.245
	20.13 (100 y)	0.41618	1.225
	20.55 (150 y)	0.43017	1.185
Rise Time (hr)	1	0.43317	1.177
	4	0.43241	1.179
	7	0.43017	1.185
	10	0.42805	1.191
	13	0.42200	1.208
Duration time (hr)	62	0.43013	1.185
	74	0.43012	1.185
	86	0.43017	1.185
	98	0.43011	1.185
	110	0.43010	1.185
Fall time (hr)	8	0.43012	1.185
	14	0.43012	1.185
	20	0.43017	1.185
	26	0.43011	1.185
	32	0.43011	1.185

하고 안전율을 산정한 결과 1.177~1.406을 나타내었고 나머지 홍수파형 Case에 대해서도 산정한 결과 모든 Case의 안전율이 국내기준인 2.0에 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 울지체는 파이프링 현상의 발생 가능성이 있는 것으로 사료된다.

3.3 제방형상의 변화에 따른 안정성 평가

제방형상의 변화에 따른 제방 안정성의 변화를 검토하기 위하여 제방고와 제방폭을 변화시켜 이에 따른 침투구동을 모의하고 안정성을 평가하였다. 대하천 정비사업에서 보축재료의 성토를 통해 제방을 보강한 것을 참고로 하여 본 연구에서는 Table 4, Fig. 8과 같이 제방의 폭과 높이를 변화시켜 침투구동을 모의하였다.

제방고에 따른 침투구동 모의결과는 Fig. 9(a), Table 5와 같다. 전반적으로 제방고의 상승 시 최대동수경사가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 제방의 폭과 높이가 증가할수록 제내지 끝단의 지하수 지표누출이 지연되며 침투유량은 증가하여 그만큼 첫 번째 최대동수경사가 상승

Table 4. List of Transformation of Yulji Levee

Levee height (m)	Levee width (m)
22.5	35
23.5	36
24.5	37
-	38
-	39

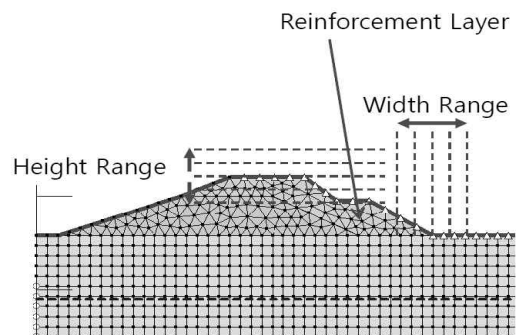


Fig. 8. Transformation of Yulji Levee

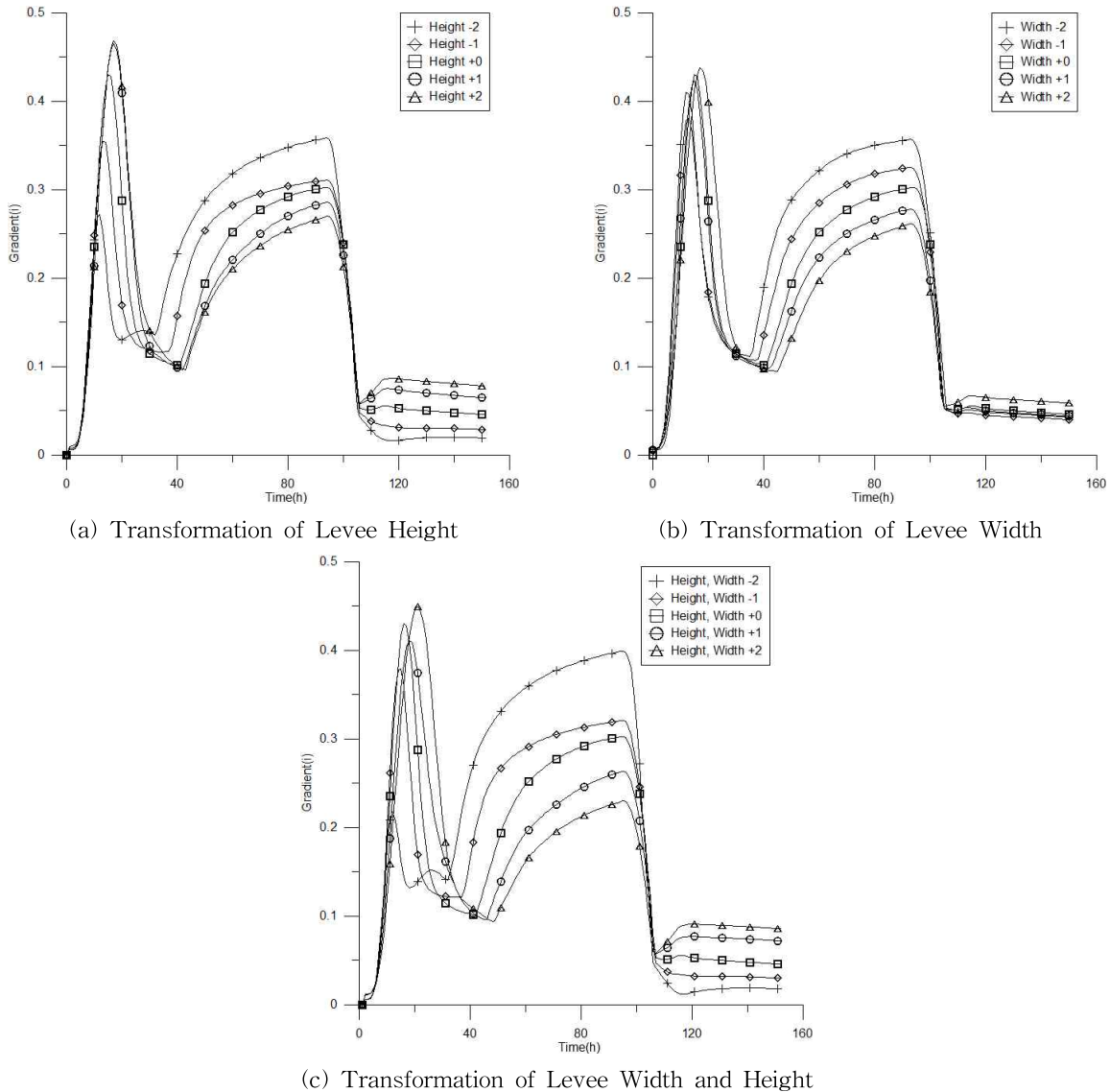


Fig. 9. Change of Hydraulic Gradients Depending on (a) Transformation of Levee Height, (b) Transformation of Levee Width, and (c) Transformation of Levee Width and Height

하지만, 지하수 지표누출이 시작되면서부터 동수경사가 하락하고 두 번째 최대동수경사도 감소하는 것으로 판단된다. 하지만 제방고가 상승할수록 홍수초반 동수경사의 상승폭은 커졌으나 홍수후반의 두 번째 상승폭은 줄어들었다. 특히 제방폭의 상승이나 제방고와 폭을 상승시킨 경우에는 모두 최대동수경사가 홍수초반에 나타난 것보다 달리 제방고를 2m 낮추었을 경우 홍수후반의 두 번째 상승에서 최대동수경사가 나타났다. 이로 미루어 제방고와 최대동수경사와의 관계는 제방의 형상과 홍수곡선의 특성에 따라 달라지며 일률적으로 비례-반비례 관계와 같이 정의되지 않는 것으로 판단된다. 율지제의 경우 150년 빈도 홍수위를 기준으로 하면 제방을 높이는 것은 오히려

파이핑 현상의 위험성을 높이는 것으로 나타났다. 제방폭에 따른 침투유동을 모의한 결과는 Fig. 9(b)와 같다. 전반적으로 제방폭을 늘리는 효과는 제방고를 늘리는 효과와 비슷한 결과를 가져오는 것으로 보인다. 제방폭이 늘어날수록 홍수초반 동수경사의 상승폭은 커지나 홍수후반의 두 번째 상승폭은 줄어든다. 하지만 제방고를 늘리는 것에 비해 제방폭을 늘릴 경우 홍수초반의 동수경사 상승폭은 크지 않다. 침윤면이 제체내부에 형성되지 않은 불포화 상태에서는 요소간에 부(-)의 간극수압이 발생하는데, 이때 제방형상이 커질수록 부(-)의 간극수압도 증가하며 상대적으로 투수계수가 작아지므로 제체내부로 물이 침투하기 어렵게 되어 유출부의 최대동수경사가 상승하는

Table 5. Simulated Maximum Hydraulic Gradient and Piping Safety Factor with Levee Transformations

Type	Displacement (m)	Max. Hydraulic Gradient (i_{max})	Piping Safety Factor (F_p)
Height	-2	0.35882	1.421
	-1	0.35483	1.437
	0	0.43017	1.185
	1	0.46516	1.096
	2	0.46832	1.088
Width	-2	0.41062	1.242
	-1	0.38074	1.339
	0	0.43017	1.185
	1	0.42299	1.205
	2	0.43796	1.164
Height and Width	-2	0.39934	1.277
	-1	0.37915	1.345
	0	0.43017	1.185
	1	0.41109	1.240
	2	0.44964	1.134

것으로 추측된다.

제방고와 폭을 동시에 변화시킨 모의결과를 Fig. 9(c), Table 5에 나타내었다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(c)를 비교해 보면 제방고와 폭을 동시에 변화시킨 경우 제방고만을 변화시킨 경우와 유사한 결과를 나타내었으며 변동폭이 더욱 큰 것을 알 수 있다. 제방고와 폭이 상승할수록 최대동수경사가 증가하는 경향이 있으나 이 관계는 일관적이지 않다. 예를 들어 Table 5에서 제방고와 폭을 1m 증가시킨 경우보다 제방고와 폭을 변화시키지 않은 경우가 최대동수경사가 더 높게 나타났다. 안전율은 Table 5와 같이 1.088~1.437로 나타났으며 홍수과형부분에서 기술한 바와 같이 파이프링 현상으로부터 위험 가능성이 있는 것으로 나타났다. 안전율을 기준으로 판단하면 율지제의 경우 150년 빈도 홍수위에 대하여 오히려 제방고와 폭을 1m씩 줄이는 것이 늘리는 것보다 안전한 것으로 나타났다.

앞에서 모의된 결과를 종합해보면, 홍수과형과 제방형상에 따른 공통적인 동수경사 변는 홍수위 지속시간 초반에는 전체적으로 기초지반의 지하수위가 급격히 상승하게 되어 수류방향이 지표면과 수직에 가까워지기 때문에 최대가 된다. 또한 홍수위 지속시간에 접어들면 지하수위 상승율이 감소하므로 지표면을 향해 흐르던 수류방향은 지표면과 평행한 방향으로 변하게 되고 그때부터 동수경사는 하강하기 시작한다. 그리고 홍수위 지속시간 중에 지하수위가 제방의 보축부분 하부까지 상승하는 시점부

터 동수경사는 다시 증가하기 시작하며, 홍수위 하강시간이 되면 급격하게 하강한다. 안정성에 대해 살펴보면 동수경사의 파이프링 안정성은 본 연구에서 수행한 모든 예측 모의에서 안전하지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 실제제방에서 관측한 자료와 침투모의결과를 분석하여 제방의 안정성을 평가하고자 하였다. 낙동강 율지제를 대상으로 2차원 침투유동을 분석 하였고 한국수자원공사에서 설치한 센서에서 관측한 데이터를 통해 침투모의의 타당성을 검증하였다. 실제 제방에 센서를 설치하여 간극수압을 관측하고 이를 수위로 환산하여 침투유동모의와 비교하는 연구는 국내에서 처음 시도되는 것이다. 현 시점에서 관측 데이터를 그대로 모형의 검증 및 매개변수의 동정에 사용하는 것은 어려운 것으로 보이며 센서의 Raw 데이터를 수위값으로 산정시 추가적인 검토정이 필요한 것을 본 논문에서의 고찰을 통해 알 수 있었다. 또한 연구대상지역이 낙동강 합류부에 위치한다는 3차원적인 특성을 2차원 모형에서 반영하기 어렵다는 한계도 확인할 수 있었다. 하지만 시간에 따른 상대적인 변동값은 하천수위의 변화 및 모의된 변동값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

대하천 정비사업으로 달라질 수 있는 제방의 안정성을

평가하기 위하여 홍수파형과 제방형상에 따른 침투거동을 모의하고 그에 따른 제방의 안정성을 평가하였다. 예측모의의 결과는 다음과 같다.

- 1) 빈도별 홍수위를 통한 울지제의 침투안전성을 분석해본 결과 동수경사에 의한 안전율은 1.185~1.406로 분석되었으며 국내에서 규정하고 있는 안전율 기준인 2.0보다 작으므로 파이핑 현상으로부터 안전하지 않은 것으로 나타났다. 홍수파형 예측 모의에서는 각 인자(홍수위도달시간, 홍수위지속시간, 홍수위하강시간)들의 변화에도 불구하고 유출부의 침투 유동에 미미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러므로 유출부의 침투유동에 가장 큰 영향을 미치는 하천인자는 수위인 것으로 판단되었다.
- 2) 제방고에 따른 변화에서는 제방고가 상승할수록 최대동수경사는 상승하지만 홍수위 지속시간 초반부터는 전반적으로 동수경사가 감소하는 것을 알 수 있었다. 제방폭의 상승에 따른 결과와 제방폭과 제방고를 함께 변화시킨 모의결과도 제방고의 상승에 따른 모의 결과와 거의 동일한 경향을 나타내었다. 또한 최대동수경사는 제방의 형상변화에 대해 비선형적인 관계를 나타내었다. 이는 홍수초기 불포화투수계수가 시간에 따라 크게 변하는 것이 주요 원인이며 제방의 안정성이 제방의 형상과 홍수파형에 따라 복합적인 영향을 받는다는 것을 뜻한다. 따라서 단순히 제방고를 올리거나 제방의 폭을 늘리는 방법이 제방의 파이핑 안정성을 증가시킨다고 볼 수 없으며 오히려 울지제의 경우 안정성을 저하시킬 수도 있는 것으로 나타났다.
- 3) 실제제방에 센서를 설치하여 지하수위를 계측하고자 하는 시도는 국내에서는 처음 시도되는 만큼 아직 관측자료 자체에 대한 검증 및 보정이 부족한 점이 있다. 하지만 앞으로 이와 같은 관측 자료는 꾸준히 늘어날 것으로 보이며 많은 양의 자료를 바탕으로 관측자료가 충분히 검증이 된다면, 본 논문에서 제시한 홍수위 및 제방형상에 따른 제방안정성 분석 방법이 앞으로의 제방보강 및 연구에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Artières, O., Beck, Y.L., Fry, J.J., Guidoux, C., and Pinetese, P. (2012). *Monitoring of Earthdams Leaks and Stability with Fibre-Optics based Monitoring System*, 8th ICOLD european Club Symposium, pp. 432-437.
- Brunch, P.G. (1993). *A Laboratory Study of Evaporative Fluxes in Homogeneous and Layered Soils*, Master thesis, Saskatchewan University.
- Choi, J.J. (2006). *Reasonable Seepage measure of Levee*, Mater Thesis, Kyungpook National University.
- Geo-Slope International Ltd. (2004). *Seepage Modeling with SEEP/W 2004*. Calgary, Alta., Canada.
- Im, D.K., Yeo, H.K., Kim, K.H., and Kang., J.G. (2006). "Suitability Analysis of Numerical Models Related to Seepage through a Levee." *J. of Korea Water Resource Association*, Vol. 39 No. 3 pp. 241-252.
- Jeon, S.J. (2009). *A Study on the solution for the Dimensionless Flood Waves for the Unsteady Seepage Analysis of Levees*, Doctoral Thesis, Suwon University.
- Kang, M.S. (2003). *A Study on The Stability of Levees in Nakdong River Considering Basin Characteristics*, Master Thesis, Yonsei University.
- Kang, T.U. (2014). *Study on the Stability of Seepages by River Level Fluctuation and Transform of Levee Shape*, Master Thesis, Chungnam National University.
- Kim, J.I. (2011). *A analytical study on influence of gradients on section characteristics of river banks*, Mater Thesis, Hanyang University.
- Kim, K.H. (2004). *A Analysis of current Urban Levee Design*, Urban Flood Disaster Management Research Center. (in Korean)
- Kim, K.H. (2005). *Design Technology for Levee -Seepage-*, Urban Flood Disaster Management Research Center. (in Korean)
- Kim, K.H. (2008). *Guide Line for Levee Design*, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Urban Flood Disaster Management Research Center. (in Korean)
- Kim, Y.D. (2006). *Analysis of Infiltration Characteristics of Levee and Determination of Depth of Cut-off Wall according to Water Level and Flow Time*, Master

- Thesis, Pukyung National University.
- Kim, J.M., Choi, B.H., and Cho, S.D. (2004). *Evaluation of Affecting Factors for Seepage Analysis on Levee*. 30th Korean Society of Civil Engineers Conference, pp. 3381-3386.
- Kwak, H.S. (2007). *Influence of Embankment Shape on Exit Gradients in Levee*, Master Thesis, Kyunghee University.
- KWRA. (Korea Water Resources Association). (2005, 2009). *River Design Standard*. (in Korean)
- KWRC. (Korea Water Resources Corporation). (2013). *Field Application and Analysis to Levee Leakage Monitoring Method*. (in Korean)
- Meer, M.T., Woldringh, R.F., and Knuuti, K. (2009). *Comparison of the Dutch and American Levee Safety Approach*, 2009 ASFPM Conference Orlando USA. pp. 59-68.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2013). Nakdong River Flood Control Office, Internet Homepage, <http://www.nakdongriver.go.kr>
- MLTM. (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2003). *Planning Report for Jeonggok Levee Et al. in Nakdong River Improvement*, Busan Regional Construction Management Administration. (in Korean)
- MLTM. (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2004). *Development of Advanced Technology Report for Levee*, Korea Institute of Construction Technology. (in Korean)
- MLTM. (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2009). *4 Major River Master Plan* (in Korean)
- Pradel, D., and Raad, G. (1993). "Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes" *J. Geotech. Eng.*, Vol. 119, No. 2, pp. 315-332.
- USACE. (2009). *Guidelines for Landscape Planting and Vegetation Management at Levees, Floodwalls, Embankment Dams, and Appurtenant Structures*, USACE, USA.
- USACE. (2010). *USACE Process for the National Flood Insurance Program (NFIP) Levee System Evaluation*, USACE, USA.
- Van Genuchten, M.Th. (1980). "A Closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated of Soils." *Soil Science Society of America J.*, Vol. 44, pp. 892-898.
- Wang, H.F., and Anderson, M.P. (1995). *Introduction to Groundwater Modeling*, SaeronBooks.
- Water Management Information System. (2013). <http://www.wamis.go.kr>

논문번호: 14-012	접수: 2014.01.29
수정일자: 2014.02.19/02.25	심사완료: 2014.02.25