

흐름상태와 제내지 및 제외지의 표고변화에 따른 제방의 파이핑안정성 평가

Levee Stability Assessment depending on Level of Inland and Riverside land in Flow State

강 태 운* / 안 현 옥** / 김 연 수*** / 정 관 수****

Kang, Taeun / An, Hyunuk / Kim, Yeonsu / Jung, Kwansue

Abstract

Nowadays, the world has suffered by natural disaster of climate change due to global warming. Korea has also faced with similar situation. To prevent these natural disaster, Four Major River Management has conducted. One of conducted content in Four Major River Management is the levee maintenance which classified into fill-up the inland, levee of reinforcement and so on. These maintenances may make the characteristics of groundwater flow change and affect to the levee safety (piping phenomenon). Therefore, analysis on groundwater fluctuation according to level of riverside and inland should be required. This study focus on levee of Hoe stream, which is connected to Nakdong river, and piping safety factor in the levee analyzed by using pore water pressure. Besides, groundwater fluctuation, which is depended on level of riverside and inland, is simulated by using the SEEP/W (2D ground water model). This simulation considered steady flow and unsteady flow. As a result, piping safety factor increased due to rising the inland level. Piping safety factor of riverside was effected by only river water level. Therefore, external levee factor considering inland level raising and suitable control of river water level is need to increase piping safety factor.

Keywords : Yulji levee in Nakdong river, piping phenomenon, SEEP/W, monitoring of real scale levee

요 지

최근 지구온난화로 인한 기상이변으로 전세계가 몸살을 앓고 있다. 우리나라도 같은 실정에 직면해 있으며 이에 대비하는 차원으로 대하천 정비사업을 실시한 바 있다. 제방에 대한 정비항목으로는 하천준설, 제내지와 제외지에 대한 성토 및 보강 등이 있으며 이로 인해 지하수 흐름양상이 변하게 될 것으로 추정된다. 그러므로 이와 같은 환경을 시뮬레이션을 통해 제내지와 제외지의 높이에 따른 제방의 파이핑 안정성을 분석해볼 필요가 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 낙동강의 지류인 회천에 위치한 울지제를 중심으로 본 연구제방에 설치된 간극수압센서를 이용하여 제내지와 제외지의 표고변화에 따른 제방내부의 지하수 침투양상을 SEEP/W를 이용하여 정상류 및 부정류를 고려한 모의를 수행하고 안정성을 검토하였다. 모의결과, 제내지의 표고가 상승할수록 파이핑 안정성이 증가하는 것으로 나타났으며 제외지측은 표고와는 상관없이 하천수위에 따라 파이핑 안정성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러므로 제방의 파이핑 안정성을 증대시키기 위해서는 제내지의 성토와 적정하천수위유지와 같은 제방의 외적 요소들도 함께 고려해야할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 낙동강 울지제, 파이핑 현상, SEEP/W, 실제제방계측

* 충남대학교 국제수자원연구소 연구원 (e-mail: kangxodns@nate.com)

Researcher, International Water Resources Institute, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

** 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목학과 조교수 (e-mail: hyunuk@cnu.ac.kr)

Assistant Professor, Dept. of Agricultural and Rural Eng., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*** 충남대학교 국제수자원연구소 연구원 (e-mail: yeonsu0517@gmail.com)

Researcher, International Water Resources Institute, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**** 교신저자, 충남대학교 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr, Tel: 82-42-821-5675)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

1. 서 론

홍수는 예로부터 주요 재난 중 하나로 인식되어져 왔으며 이를 예방하고 다스리는 제방은 현대에 들어 매우 중요한 수공 구조물중 하나로 자리매김하고 있다. 우리나라에서는 대하천정비사업을 통해 주요 국가하천마다 보와 제방을 신설 및 보축하여 홍수방어 및 재난예방에 힘을 기울이고 있다. 제방에 대한 정비사업의 내용은 보축 및 신설이 주를 이루나, 제내지 성토와 제외지 보강 및 저수로의 준설 등도 함께 수행되었다. 이러한 정비사업의 영향으로 인해 지하수 및 하천의 흐름변화가 발생하고 있는 것으로 판단되며, 이는 제방의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 중요한 문제로 판단된다. 따라서 지하수 및 하천흐름의 변화양상이 제방 안정성에 얼마나 영향을 미칠 수 있는지 정량적으로 분석할 필요가 있을 것으로 보인다.

이를 위해서는 정비사업이 수행되었던 제방에 계측 센서를 설치하고 장기간 모니터링을 한 후, 계측된 자료를 이용해 제방의 안정성을 분석하는 것이 가장 좋은 방법이라고 판단된다. 하지만 광범위한 영역에 계측센서를 설치하여 지속적인 계측과 유지보수를 수행한다는 것은 현실적인 측면에서 많은 어려움이 있을 것으로 보인다. 그렇기 때문에 국내외에서는 제방안정성에 관하여 주로 실내실험과 수치모의를 이용한 연구들이 이루어져 왔다. MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008)의 경우, 제방설계 가이드라인을 편찬한 바 있는데, 그 중 일본 건설성에서 제안한 홍수과형의 산정기법을 소개하면서 침투해석 모형의 적절한 사용기법과 제방보강 모의방법 등에 관한 내용을 언급한 바 있다. 또한 정상류와 부정류의 수치해석 모의를 수행하고 모의결과를 비교하여 정상류 침투해석은 제방 안정성확보에 유리하며 부정류 침투해석은 경제적인 제방설계에 유리하다는 것을 밝혔으며, 수치모의를 통한 제방의 안정성 평가 시에는 부정류와 정상류의 흐름상태를 모두 고려해야 할 것을 제안하였다. Xu (2014)의 경우에도 이와 비슷한 연구를 수행했었고 댐과 같이 일정 수위를 유지하는 경우에는 정상류 침투해석을, 하천제방과 같이 수위변화가 빈번한 경우에는 부정류 침투해석을 수행해야 함을 언급하기도 했다. Kim (2011)의 경우에는 제방자체의 형상(둑 마루폭, 경사도)과 외적인 특성(기초지반의 투수계수 및 제방높이)에 따른 제내지 유출부의 동수경사를 계산하고 제방의 안정성을 평가함으로써, 실내실험이나 계측으로는 한꺼번에 고려하기 힘든 다양한 인자들의 변화에 대한 제방의 건전도를 연구하였다. Chu-Agor et al. (2008)은 제방안정성에

대한 실내실험을 수행한 사례로서 실험데이터와 SEEP/W 및 SLOPE/W의 모의값을 이용하여 제방의 안정성 변화를 비교분석하였다. 이 연구는 토양의 강도에 따라 침투수의 간극수압이 달라질 수는 있지만 이는 제방안정성 변화에 지배적인 영향이 되지 않음을 제시하였으며 그 보다는 파이프링 현상으로 인한 일정규모의 하방침식이 발생할 때 거의 100%의 확률로 제방과파가 일어남을 언급하였다. 이를 통해 제방안정성은 하방침식과 밀접한 관련이 있으며 하방침식 깊이에 따라 기하급수적으로 제방안정성이 변화할 수 있음을 확인하였다.

이러한 수치모형실험과 실내실험을 통한 시도들과는 다르게, 실제크기의 제방모형에 광섬유 계측센서를 설치하여 침투거동을 모니터링 한 사례도 있다. 이 연구에서는 인장력 변화와 체체수위 및 온도 변화를 측정하여 침투거동과 제방 안정성을 세부적으로 분석하였다(Artières et al., 2012). Kim et al. (2014)의 경우에는 화강풍화토로 구성된 대규모 제방모형을 제작하고 침투실험을 수행하였으며 제체내부로 흐르는 침투수의 거동을 TDR센서를 통해 파악하였다. 이를 통해, 불포화영역과 포화영역에 대해 분포형 TDR센서를 이용하면 별도의 데이터 변환을 거치지 않고 계측데이터만으로도 침투거동을 쉽게 파악할 수 있음을 제시하였다.

한편, KWRC (Korea Water Resources Cooperation, 2013)에서도 실제 제방을 Test-bed로 선정하고 광센서를 이용한 간극수압계, 수위계, 온도계를 설치하여 침투거동을 모니터링한 연구를 수행하기도 하였다. 이러한 실제 제방의 모니터링 자료에 대한 침투거동 분석은 국내에서 거의 시도된 바 없으며, 더불어 Kang et al. (2014)은 이 연구에서 획득한 모니터링 데이터를 이용하여 침투해석 모형을 검증하고, 제방의 형상과 홍수과형에 따른 시나리오별 부정류 모의를 통해 제방의 안정성을 평가하였다. 하지만 이 연구에서는 홍수과형과 제방자체의 형상만을 고려한 제방안정성을 평가했지만 제내지와 제외지의 표고변화와 같은 제방외부의 조건들에 대해서는 연구하지 않은 부분이 있기 때문에 좀 더 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다. 실상, 대다수 하천본류의 경우 대하천 정비 사업을 수행하면서 지반누수 방지를 위한 제내지 성토 및 퇴사제거를 위한 하천준설, 수자원 확보를 위한 보의 설치 등으로 제방의 외적환경들이 크게 변한 부분이 있기 때문에 이에 대한 제방침투 안정성을 파악하는 연구의 필요성이 증가되는 추세이다. 특히, KWRC (2013)에서는 일본의 경우, 슈퍼제방(제방의 높이만큼 제내지를 1V:30H의 경사로 성토)을 통한 제방안정성의 개선사례를 소개한

바 있으며, 그만큼 제내지와 제외지의 표고변화에 따른 제방안정성은 국내에서도 충분한 검토가 필요하다. 또한 이미 언급했던 Xu (2014)와 MLTM (2008)의 제안과 같이 제방 안정성 평가를 위해서는 정상류 모의와 부정류 모의를 함께 수행하여 결과를 함께 분석해볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 제내지와 제외지의 표고변화에 따른 침투양상을 정상류와 부정류로 함께 모의하여 제방의 외적요인들이 파이핑 안정성에 얼마나 영향을 미치는지를 분석하였다.

2. 연구수행 방법

2.1 대상지역

본 연구대상인 울지체는 경상남도 합천군 덕곡면 울지리에 위치하였으며 ‘낙동강 연안 개발사업 하천개수공사’로 1991년도에 축조되었으며, 회천(지방하천)을 따라 낙동강과 합류하는 부근에서 울지교를 지나는 부근까지 연장되어 있다(Fig. 1). 제내지에 위치한 덕곡면의 평균표고는 El. 11~16m인 것으로 조사되었으며 이곳 토지는 주로 경작지로 활용되고 있다. 또한, Hydrological Survey Center(2007)에 따르면 회천의 경우 전 구간(합류부로부터 14km)이 낙동강으로부터 배수영향을 받는 것으로 나타났다. 홍수터의 넓이는 20~150m로 형성되어 있으며 특히, 저수로에 사주가 발달되어 있는 것으로 조사되었다. 한편, 울지체는 지류가 본류에 합류되면서 퇴적된 지역으로서 기초지반이 높은 투수성을 가지고 있으며 2003년 태풍 매미피해 기록이 보고된 바 있는 지역이다.

2.2 수치해석 모형

수치해석 모형은 Geoslope의 SEEP/W 2004를 이용하

였다. 토양내부의 포화침투에 관한 지배방정식은 Darcy (1865)에 의해 유도되었으며 Richards (1931)에 의해 수정되어 Eq. (1)과 같이 수정된 Darcy법칙을 불포화토양에 적용할 수 있게 되었다.

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

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.

2.3 파이핑 안정성 검토방법

한계유속은 제체 및 기초지반의 흙 입자가 소류력에 의하여 밀려나가는 유속의 임계치를 말하며, 그 임계치 이상이 되면 파이핑 현상이 발생하는 것으로 판단한다. 한편으로 KWRA (2009)에서는 지반의 흙 입자 구성은 상당히 복잡하기 때문에 임계기준을 정하기가 어려우므로 침투해석에서 얻어지는 실유속의 한계유속 값에 대한 1/100 이하의 값이 되도록 한계유속 판정의 기준을 정하고 있다. 또한 MLTM (2003)의 울지체 실시설계보고서에 따르면 울지체의 한계유속을 투수계수실험을 통해 3.978 cm/s로 산정한 바, 본 논문의 Case별로 모의된 최대유속 값이 한계유속에 비해 매우 작게 산정된 것을 고려하여 한계유속에 의한 파이핑 안정성 판단은 의미가 없을 것으로 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 동수경사에 의한 파이핑의 안정성만을 고려하고 침투유속에 의한 파이핑 안정성 평가는 생략하였다.

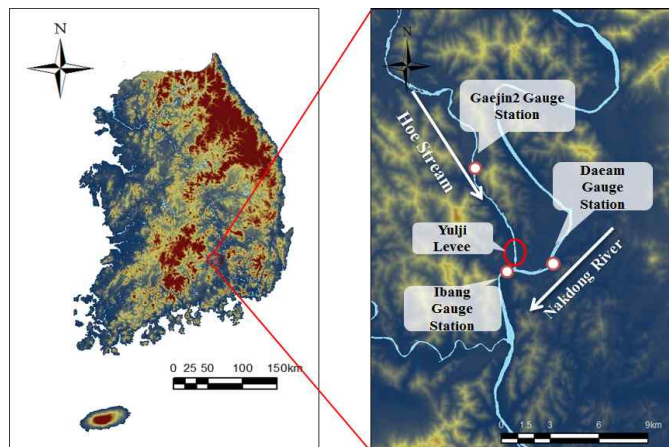


Fig. 1. Study Area (Kang, 2014)

동수경사법은 Eq. (2)와 같으며 본 논문에서는 이를 이용하여 안전율을 산정하고, 파이핑 안정성을 검토하였다.

$$F_s = \frac{i_c}{i_{max}} \quad (2)$$

여기서 F_s 는 파이핑 안전율, i_c 는 한계동수경사, i_{max} 는 최대동수경사이다. 울지체의 한계동수경사(i_c)는 MLTM (2003)에서 현장시료를 채취하고 실내실험을 수행한 결과 0.51로 도출되었다. 하천설계기준(KWRA, 2009)에서는 안전율 F_s 가 2 이상이 되어야 파이핑으로부터 안전하다고 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 하천설계기준에 따른 파이핑 안전율을 이용하여 침투해석결과와 한계동수경사를 비교하여 제방의 파이핑 안전율을 판단하였다. 또한, SEEP/W는 수치해석의 특성상, 불포화된 격자의 동수경사도 계산되기 때문에 실제로 파이핑 현상이 일어날 수 없는 시점임에도 불구하고 안전율이 매우 작아질 수 있는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 수치적인 착오를 고려하기 위해 지하수가 충분히 제내지 끝단까지 상승하는 시점(모의 시작 후 50시간 시점) 이후의 동수경사 값을 더불어 선정하였다.

2.4 모의조건

2.4.1 검증을 위한 모의조건

Kang et al. (2014)에서는 지형자료의 모습이 제내지가 700m 정도로 과대하게 긴 형태로 지형을 구축하였으나, 본 연구에서는 제외지의 표고에 대한 변형을 용이하게 하고 과도한 격자구성으로 인한 계산시간낭비를 저감하기 위하여 Fig. 2와 같이 제내지와 제외지가 대칭된 형태로

개선하였다. 더불어 홍수위의 경계조건을 제방사면이 아닌 제외지 기초지반에 적용했던 부분이 있어서 하천수위가 다소 낮아지는 경향이 있었기 때문에 홍수위 경계조건을 제방사면까지 적용하여 부정류 수치해석상의 과소경향을 최소화하였다.

입력된 단면의 제방고는 El.22.5m이고, 제내지와 제외지 끝단의 사이 폭은 37m이며 제내지와 제외지 사면경사는 1V:3H이다. 모의영역의 전체 길이는 120m로 적용하였다. 또한 제내지 및 제외지 지반고는 울지리의 지반고를 고려하여 El.16m로 설정하였다.

경계조건은 Fig. 2와 같이 제외지측 전체를 설정하였고 Potential Seepage Face를 제내지 사면에 설정하여 침투 모의시, 침윤선이 제내지 표고보다 높아지지 않게 설정하였다. 지하수위 초기값은 2012년도 하천의 평수위가 El.10m인 것과 이 지역의 평균지하수위가 El.9~10m인 것을 고려하여 El. 9m로 설정하였으며 투수계수와 체적함수비는 모형실험을 활용한 제방의 누수 메커니즘 규명 연구 최종보고서(KWRC, 2012)와 낙동강 수계 정곡제외 1개지구 하천개수공사 실시설계 보고서(MLTM, 2003)에 수록된 울지체의 물성치를 고려하여 선정하였다. 기타 세부 사항들은 Kang et al. (2014)를 참고하였다.

2.4.2 모형의 민감도분석 및 검증

본 논문에서는 SEEP/W 내에서 구축한 제방과 실제 제방과의 적용성을 검증하기 위하여 울지체의 간극수압 계측자료가 존재하는 기간(2012년 8월 21일~2013년 6월 15일)을 대상으로 모의를 수행하였다. 또한, 계측된 간극수압 데이터(압력단위: psi)를 압력수두로 환산 후 센서심도(El. 5m)를 합산하여 얻은 지하수위와 모의결과를 비

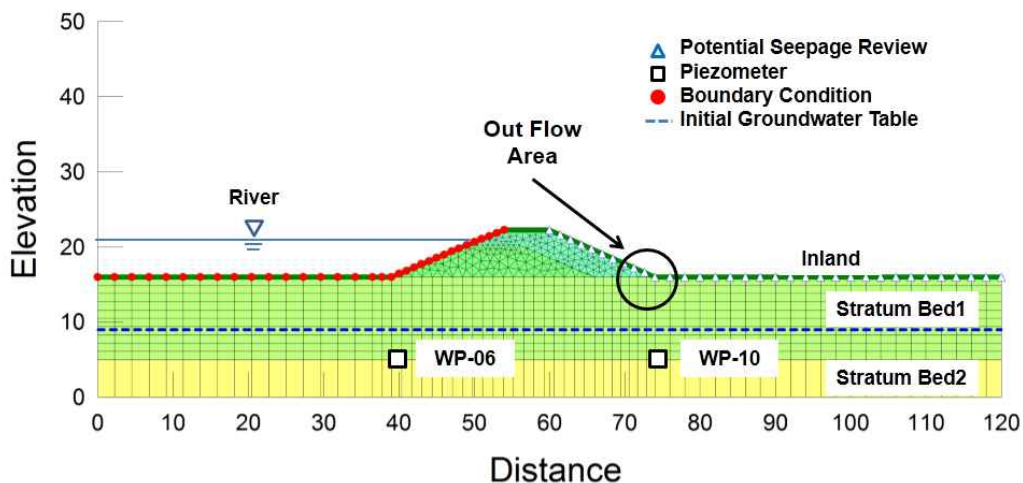


Fig. 2. Computation Domain and Grid on SEEP/W

교하였다. 이는 Kang et al. (2014)에서 이미 선행되었던 과정이지만 더 많은 계측데이터가(Kang et al., 2014)에서는 2013년 2월 28일까지 계측함) 축적됨에 따라 이를 다시 모의하여 본 논문에 구축된 모형의 적합성을 재기술하였다. 모의결과(Fig. 3)를 살펴보면 계측값이 모의값보다 약 1m 정도 상향되어 있고 Fig. 3(b)의 경우에는 반대로 1m 정도 하향되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 오차를 보정하기 위해 본 연구에서는 민감도 분석이 필요하다고 판단하였고 침투해석이 가장 크게 영향을 미치는 변수인 투수계수와 체적함수비를 조정하여 지하수위가 어떻게 변하는지 파악하였다.

민감도 분석에는 고수위가 발생한 2012년 8월 22일~2012년 10월 18일에 계측된 회천수위를 이용하였으며 계산시간을 줄이기 위해 12시간 간격으로 모의하였다. 또한, 체적함수비의 경우에는 10%씩 가감을, 투수계수는 0.1

m/hr씩 가감을 하여 침투모의시에 지하수흐름이 어떻게 달라지는지 살펴보았다(Fig. 4). 그 결과 투수계수와 체적함수비의 변화로는 전반적으로 지하수위가 변하지 않는 것으로 나타났다. 특히, 고수위 부분은 투수계수가 크고 체적함수비가 작을 경우 더욱 가파르고 높게 상승하는 모습을 나타냈지만 최고수위 발생이후에는 실제와는 다르게 그만큼 빠르게 하강하는 모습도 나타났다. 이는 2차원 침투해석의 특성상 제방횡단면의 침투해석만을 하게 되므로 낙동강 분류 하천수의 종방향 유입에 대한 침투는 고려하지 못하여 수위하강시간에서 차이가 나는 것으로 판단된다.

한편, 계측 값과 모의 값의 결정계수는 망실 및 설치점 검기간(2012년 8월 22일~9월 30일)을 기준으로 2012년 8월 22일 00:00부터 2013년 6월 15일 15:00까지의 wp-06, wp-10(제내지측에 위치한 모형보정에 이용한 센서) 계측

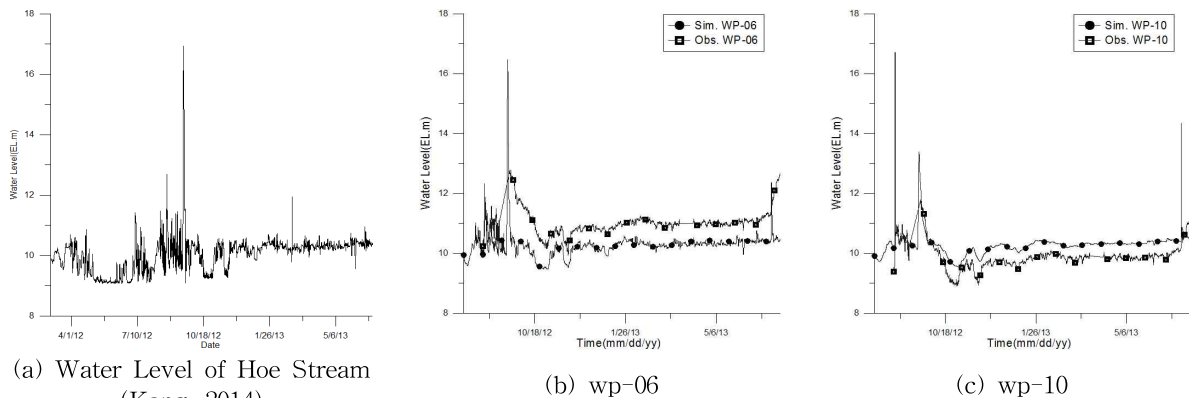


Fig. 3. Comparing with Observed and Simulated Ground Water Levels at wp-06 and wp-10

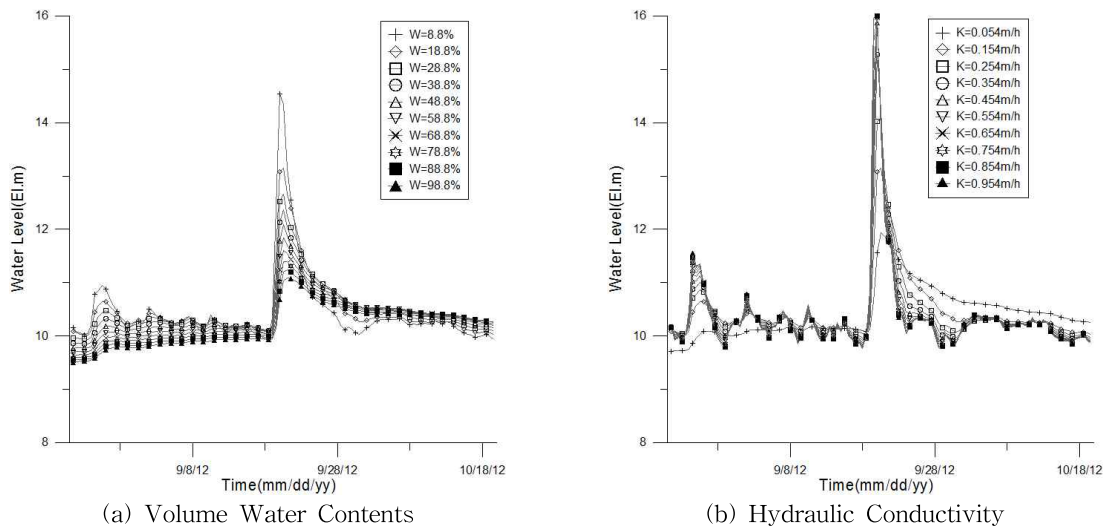


Fig. 4. Sensitive Analysis of Model

값과 그 지점 모의결과의 결정계수는 각각 0.35, 0.58이었으며 설치점점기간 이후인 2012년 10월 1일 00:00부터 2013년 6월 15일 15:00까지는 0.5, 0.70으로 산정되었다. 비록, 제외지측 센서(wp-06)와 그 지점 모의 값의 RMSE (Root Mean Square Error)는 0.84, 제내지측 센서(wp-10)와 그 지점의 모의값의 RMSE는 0.48정도로 실제 계측값과 일정한 수위오차가 발생하고는 있지만 토양시료 채취시, 모든 구간의 시료를 획득할 수 없는 한계성을 생각한다면 구축된 모형으로 모의하는 것에는 무리가 없을 것으로 판단된다(e.g. Hong and Kim, 2007; Jung, 2003; Hong, 2013). 또한, wp-06과 wp-10의 데이터 간에 전반적인 수위차이는 거의 없으며 특히, 전반적인 수위변화는 경계조건으로 입력된 회천수위의 영향을 크게 받기 때문에 실제 하천수위가 아닌 더욱 극단적인 변화를 나타내는 홍수과형을 이용한 모의시에는 좀 더 역동적인 침투변화를 나타낼 것으로 판단된다.

2.4.3 예측을 위한 모의조건

본 연구에서는 지방하천 제방의 경우 80년 빈도 홍수위를 기준으로 설계 및 축조되고 있는 상황을 반영하여 Fig. 5와 같은 율지제의 홍수과형(MLTM, 2003)을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 실제 수문곡선은 일반적으로 포물선 형태이지만 본 연구에서는 MLTM (2003)에서 제시

한 율지제 홍수과형과 동일하게 홍수위 최고값의 75% 이상이 되는 부분을 최고수위의 지속시간(Duration Time)으로 수정한 사다리꼴의 홍수과형을 사용하였다. 계산간격은 1시간 단위로 설정하였으며 홍수위 상승시간은 7시간, 홍수위 지속시간은 86시간, 홍수위 하강시간 20시간을 기준으로 총 113시간을 모의하였다. 평수위는 2012년도 회천 평수위인 El. 10m를 기준으로 하였으며, 80년 빈도 홍수위인 El. 19.9m를 홍수과의 최고수위로 사용하였다. KWRC (2013)의 보고서에 의하면 일본의 경우 1V:30H의 경사로 제내지측 제방을 성토하는 슈퍼제방의 사례를 제시한 바 있는데, 본 연구에서는 슈퍼제방과 같이 큰 규모의 제내지를 구성하지 않는 대신 좀 더 제외지와 제내지의 표고에 따른 침투양상을 고려하기 위해 제외지와 제내지의 표고를 동일한 모양(수평을 유지)으로 상하향하여 침투모의를 수행하였다. 또한, 세부적으로 -2m~+2m 범위에서 각각 1m 단위로 상승 및 하강시켜 모의를 수행하였으며 제방의 경사는 일정하게 1V:3H를 유지하도록 하였다(Fig. 6).

한편으로 제외지 표고가 상승 또는 하강하면 하천수위도 함께 변화될 것으로 예상되었기에 이러한 사항을 고려하여 HEC-RAS를 통해 제외지의 표고에 따른 흐름모의를 진행하였다. 그 결과, 회천 전지역(합류부에서 개진2 수위관측소까지)의 하천수위는 10 cm 이내의 변화를 나

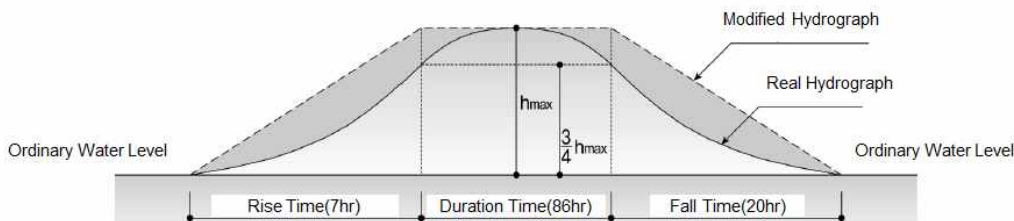


Fig. 5. Designed Flood Wave on Yulji-li Levee(MLTM, 2003)

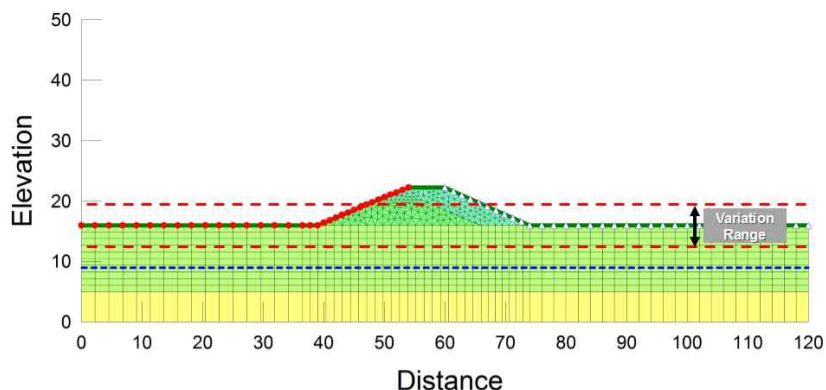


Fig. 6. Variation Range according to Riverside Level and Inland Level

타냈으며 이를 통해 제외지 표고변화는 하천수위변화에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 회천하류의 수위가 회천 상류보다 낙동강 본류수위의 영향을 강하게 받고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 제외지 및 하상고의 표고변화로 인한 수위 변화는 고려하지 않고 Case별 모의를 수행하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 모의결과 및 고찰

수위변화에서는 제외지 변형 Case를 먼저 살펴보면 Fig. 7(a)와 같다. 우선, 모든 부정류 모의 Case에서는 최대지하수위가 El. 16m(제내지반고)으로 같은 값을 나타냈고 제내지 변형 Case의 경우에는 Fig. 7(b)와 같이 제내

지반고를 상승하거나 하강시킨 만큼 침윤선의 높이가 동일하게 변하는 것으로 나타났다. 이는 홍수위가 제내지반고보다 다소 높기 때문에 유출부 표고까지 침윤선이 상승한 것으로 보이며, 지하수위가 일정해지는 시점부터 유출부에서 과잉 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 정상류 모의 Case도 부정류 모의결과와 마찬가지로 제내지층 지반까지 침윤선이 상승하였기 때문에 제내지반고와 지하수위가 같은 것으로 나타났다.

유출부의 동수경사 변화는 Fig. 8과 같다. 부정류로 모의한 제외지 변형 Case의 경우에는 모든 변화 조건에서 거의 동일한 값을 나타내었고 제내지 변형 Case의 경우 제내지를 상승시킬수록 전반적으로 동수경사가 감소하였으며 제내지를 하강할수록 동수경사가 증가하였다. 여기서, 최대동수경사의 경우 Fig. 8과 같이 침윤선이 유출부

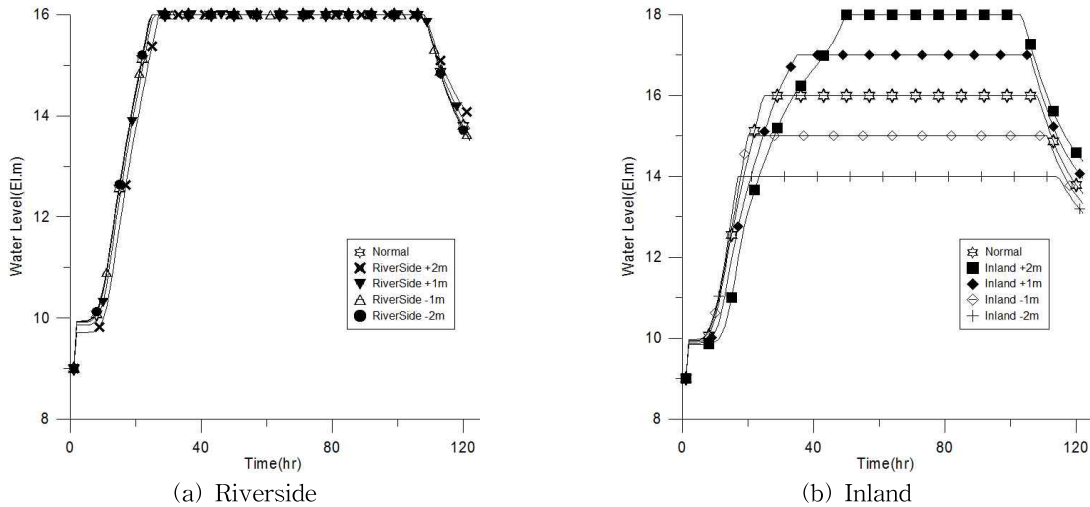


Fig. 7. Water Level Fluctuation depending on Time

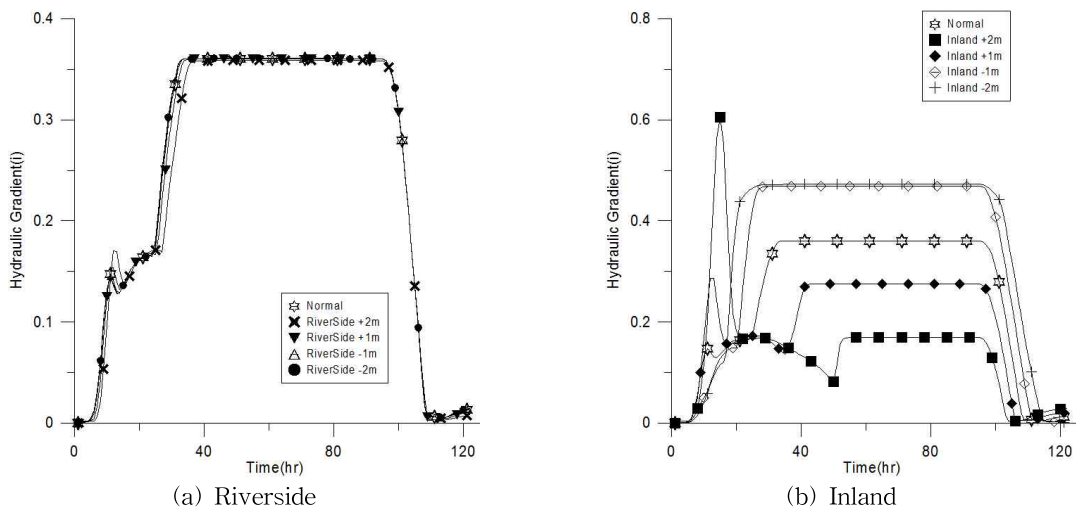


Fig. 8. Hydraulic Gradient Fluctuation depending on Time

까지 상승하지 않았음에도 불구하고 최대값이 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 침윤선이 제내지반고까지 상승하기 전(홍수위가 증가하는 초반)에는 유속벡터 방향이 제내지반과 수직방향에 가까워져 최대동수경사를 이루기 때문으로 판단된다. 이후, 지하수위가 일정수위를 지속하는 시점에는 제내지반의 유속이 증가하여 유속벡터가 수직방향에서 제내지반과 평행한 수평방향으로 변하게 되어 동수경사가 감소하는 것으로 판단된다.

한편, 최대동수경사의 경우, 침윤선이 지반고까지 다다르지 않는 시점에는 파이핑 현상을 일으킬 수 없다는 점을 고려하여, 모의시작 후 50시간 시점의 지하수위도 산정하였다. 이들 Case 별 동수경사들을 비교해보면 제내지가 상승할수록 동수경사가 뚜렷하게 감소하는 양상을 보였고 제내지가 하강할수록 동수경사는 상승하는 것으로 나타났다. 가장 큰 안전율을 보여준 Case는 제내지 표고 +2m 일 때, $F_s=6.174$ 를 나타냈으며 제내지+1m Case(두 번째로 높은 안전율 나타냄)보다 3.33배나 높은 수치를 나

타낸 것이다. 또한 가장 작은 안전율을 보여준 Case는 제내지-2m Case로써 $F_s=1.080$ 을 나타내었다.

정상류 모의결과와 동수경사는 Tables 1~2와 같다. 제외지 표고를 변화시킨 Case에서는 0.360을 기준으로 거의 동일한 값을 나타내었고 제내지 표고변형 Case에서는 +2m에서 -2m 순으로 0.169~0.472를 나타내었다. 또한 제내지 표고를 하강한 Case에서는 정상류와 부정류의 동수경사가 같은 값을 나타내었으며 제내지 표고를 상승한 Case에서는 정상류 모의결과가 부정류 모의결과(최고값)보다 비교적 과대산정된 것을 알 수 있다. 제방설계가이드라인(MLTM, 2008)에 의하면 일반적으로 부정류 침투해석은 정상류 침투해석에 비해 상대적으로 작은 설계외력을 도출하여 경제적인 설계를 가능하게 하는 반면, 안전측면에서는 불리하다고 논한 바 있다. 따라서, 본 연구의 최대 동수경사값에 대한 파이핑 안정성평가결과는 비록 안전율 2.0 미만의 값으로서 80년 빈도 홍수위에 취약한 것으로 나타났으나 부정류 모의결과가 정상류 모의결

Table 1. Cases of River Side Level Simulation Results and Piping Safety Factor

River Side Level (m)	Maximum Water level(El.m)	Hydraulic Gradient (i)				Piping Safety Factor (F_s)			
		Unsteady			Steady	Unsteady			Steady
		Max.	At 50hr	Avr. of Max. and 50hr		Max.	At 50hr	Avr. of Max. and 50hr	
+2	16	0.359	0.359	0.359	0.359	1.421	1.422	1.422	1.420
+1	16	0.360	0.360	0.360	0.360	1.417	1.416	1.417	1.416
Normal	16	0.360	0.360	0.360	0.360	1.417	1.415	1.416	1.416
-1	16	0.361	0.361	0.361	0.360	1.413	1.414	1.414	1.416
-2	16	0.361	0.361	0.361	0.361	1.413	1.414	1.414	1.412

Table 2. Cases of Inland Level Simulation Results and Piping Safety Factor

Inland Level (m)	Maximum Water level(El.m)	Hydraulic Gradient (i)				Piping Safety Factor (F_s)			
		Unsteady			Steady	Unsteady			Steady
		Max.	At 50hr	Avr. of Max. and 50hr		Max.	At 50hr	Avr. of Max. and 50hr	
+2	18	0.606	0.083	0.344	0.169	0.842	6.174	3.508	3.017
+1	17	0.287	0.027	0.157	0.276	1.777	1.850	1.813	1.847
Normal	16	0.360	0.360	0.360	0.360	1.417	1.415	1.416	1.416
-1	15	0.469	0.469	0.469	0.468	1.087	1.088	1.087	1.089
-2	14	0.472	0.472	0.472	0.472	1.081	1.080	1.080	1.080

과보다 다소 작은 값을 나타내는 것으로 볼 때, 본 연구에서 쓰인 율지제 홍수과형이 충분히 극한 상황을 반영하고 있음을 알 수 있다. 또한 과대산정된 부정류모의 결과에 대한 다른 원인으로는 초기지하수위 조건과 모형의 워밍업시간, 홍수과형의 초기수위 등에 따라 정상류값과 차이를 보이는 것으로 판단된다.

유출부의 침투유속의 경우는 Fig. 9와 같이 나타났다. 부정류의 경우, 제외지 변화 Case에서는 제외지 표고가 상승 또는 하강했음에도 불구하고 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 반면에 제내지의 표고변화 Case에서는 제내지 표고가 상승할수록 침투유속이 감소하였으며 제외지 표고가 하강시에는 침투유속이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 침투유속의 안전율은 산정하지 않았기 때문에 이에 대해서는 전체 모의시간 중에 가장 높은 침투유속을 선정하여 안정성을 비교하였다. 그 결과는 Table 3과 같으며, 제내지-2m Case에서 가장 높은 침투유속(0.314 m/hr)이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 제내지+2m Case보다 약 20배나 높은 수치로서 파이핑현상

에 의한 제방안정성을 크게 악화시킬 수 있음을 단적으로 보여준다. 정상류 모의결과에서는 침투유속이 Table 3과 같이 부정류 유속보다 과소산정된 것으로 나타났다. 이는 동수경사 값과 마찬가지로, 율지제 홍수과형이 다소 극한 상황을 반영하고 있음을 침투유속을 통해 확인할 수 있다.

위의 결과들을 종합해 본다면 율지제의 경우, 부정류와 정상류의 최대동수경사값, 모의시작 후 50시간시점의 최대동수경사값을 고려할 때 제내지 표고를 상승시키는 Case에서는 파이핑 안전율도 상승하며 제외지 Case에서는 표고를 변화시키더라도 파이핑 안전율이 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 부정류와 정상류모의 결과에서는 정상류 모의결과가 부정류 모의결과에 비하여 안전율이 비교적 과소산정되는 것을 알 수 있는데, 이는 부정류 모의에 활용된 율지제 홍수과형이 비교적 극한상황을 반영하고 있으며 모형에 적용한 초기 지하수위조건, 홍수과형의 초기수위조건, 모형의 워밍업시간 등에 기인하여 값의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 추후에는 이를 반영한 시나리오를 설정하여 정상류와 부정류 모의에 대

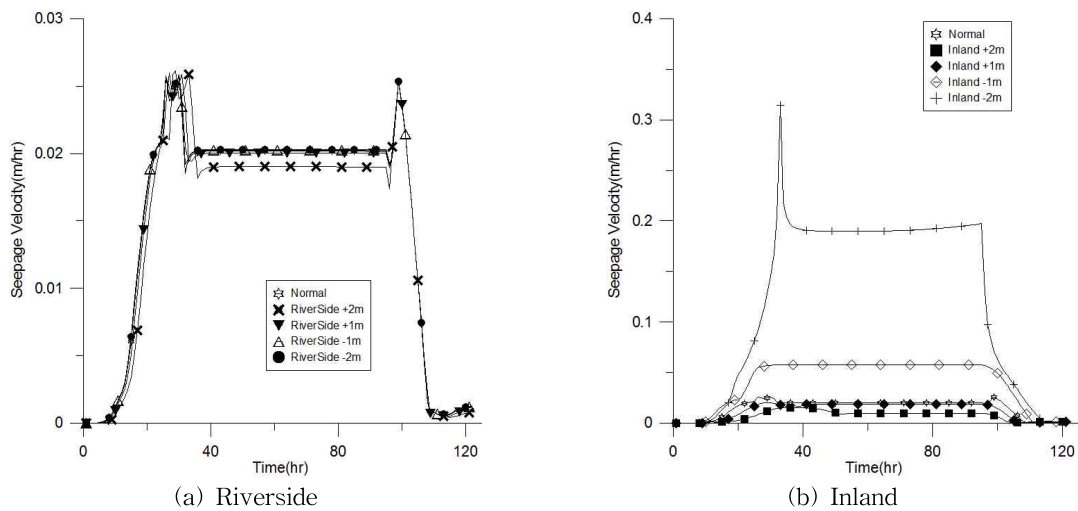


Fig. 9. Seepage Velocity depending on Time

Table 3 Seepage Velocity based on each Case

Level(m)	River Side Case Max. Seepage Velocity (m/hr)		Inland Case Max. Seepage Velocity (m/hr)	
	Unsteady	Steady	Unsteady	Steady
+2	0.026	0.018	0.015	0.009
+1	0.026	0.021	0.020	0.018
Normal	0.259	0.020	0.259	0.020
-1	0.025	0.020	0.057	0.057
-2	0.025	0.020	0.314	0.198

한 결과값의 차이를 세부적으로 분석함으로써 부정류 모의 적절한 조건수립을 도출해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 실제 제방에서 관측한 자료와 침투모의결과를 분석하여 제내지 및 제외지의 표고에 따른 파이핑 안정성을 평가하였다. 우선적으로 관측된 자료를 바탕으로 추정된 매개변수를 활용하여 낙동강 울지제를 대상으로 2차원 침투모의를 실시하고 해당지역에서 계측한 간극수압 데이터와 상호비교하여 타당성 검증을 수행하였다. 그 결과, 계측데이터와 모의결과 간의 일정한 수위오차를 확인하였고 이를 저감하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 하지만 매개변수의 조정으로는 구축된 모형에서 발생하는 수위오차를 줄이기 어려운 부분이 있었다. 일반적으로 지하수유동 분석은 대상지역의 모든 토양에 대한 특성과 지하수유동을 파악하는 것이 가장 이상적이지만, 현실적으로 이를 시행하는 것은 매우 어려운 것으로 판단된다. 본 연구에서도 이러한 한계성을 해결하기 어려운 점이 있었으며 추후, 이에 대해서는 좀 더 면밀한 분석을 통해 오차저감의 방안을 찾아보는 것이 필요하다고 판단된다. 하지만 선행연구인, Kang et al. (2014)에서 이용했던 모형의 경계조건 및 지형자료를 본 연구를 통해 개선하였으며 정상류 및 부정류모의를 병행하여 각각의 안정성을 평가함으로써 연구결과의 신뢰성을 높였다. 더불어, 제방의 형태에 따른 파이핑안정성 연구를 연장하여 제내지와 제외지의 표고변화를 고려한 파이핑 안정성을 평가하였는데, 기대와는 다르게 제외지 표고변화와는 상관없이 하천수위의 영향이 파이핑 안정성에 지배적이라는 것을 알 수 있었다. 이에 대한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 제내지 및 제외지의 표고를 변화시키지 않은 경우를 Normal Case라고 하면, 제내지의 표고에 따른 모의에서는 표고가 낮아질수록 유출부의 수두가 일정해질 때, 동수경사는 Normal Case보다 큰 값이 나타났고 지하수위 지속시점 중반에는 동수경사가 더욱 커지는 것을 알 수 있었다. 제내지의 표고를 상승시킨 Case의 경우, 초반부에는 Normal Case 보다 동수경사가 현저하게 상승하였으며 이후의 지하수위 지속 시간에는 Normal Case보다 동수경사가 적은 것으로 나타났다. 따라서 제내지 표고를 상승시킬수록 파이핑 안정성이 증가하며 제내지 표고를 하강시킬수록 파이핑 안정성이 감소하는 것을 알 수 있었다. 여기서, 모든 Case의 모의결과를 살펴보면 지하수위

가 일정하게 지속되는 시점(지하수 유출이 일어나는 시점)이전에 동수경사가 가장 크게 산정되는 것을 알 수 있는데, 이는 침윤선이 제내지반고보다 아래에 있기 때문에 파이핑 현상이 일어날 수 없는 것으로 판단된다. 따라서, 제방의 파이핑 안정성을 판단할 때에는 단순히 최대동수경사를 고려해야하는 것이 아닌, 침윤선이 제내지반고까지 상승한 시점부터의 동수경사를 고려해야 한다는 점에 유의해야할 것으로 판단된다.

- 2) 하천수위가 일정한 경우, 혹은 큰 변화가 없는 경우, 기대와는 달리 제외지의 표고변화는 유출부의 동수경사에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 제방의 파이핑 안정성을 확보하기 위해서는 제외지의 표고보다는 하천의 수위저감에 주안을 두어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 한계유속에 따른 파이핑 안정성을 평가하지는 않았지만 동수경사와 더불어 보다 세부적인 침투양상을 파악하기 위해 침투유속을 Case별로 분석하였다. 침투유속의 경우, 제내지 표고를 상승시킬수록 유속이 감소하였으며 제내지 표고를 하강시킬수록 유속은 현저하게 증가함을 알 수 있었다. 따라서 제내지 표고상승이 침투유속을 감소시켜 파이핑안정성 확보에 도움이 될 것으로 판단된다. 한편 제외지 변화 Case에서는 제외지 표고변화에 따라 침투유속이 변할 것이라는 예상과는 달리, 모두 같은 양상을 나타내는 것을 볼 때, 제외지 표고변화는 침투유속에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 판단된다.
- 4) 정상류와 부정류 침투해석의 비교에서는 정상류 모의결과가 부정류 모의결과보다 다소 과소산정되었음을 알 수 있었다. 본 연구의 부정류 모의결과는 일반적인 부정류 모의결과(정상류모의결과가 부정류에 비해 과대산정되는 경향)와는 다소 상이한 것으로 나타났다. 이는 울지제 홍수파형의 특성, 모형의 워밍업시간, 홍수파형의 초기수위 및 초기지하수위 조건 등에 기인한 것으로서 추후, 이러한 조건을 세부적으로 분석하여 부정류와 정상류의 침투모의 방법을 개선해야할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Artières O., Beck, Y.L., Fry, J.J., Guidoux, C., and Pinettes, P. (2012). Monitoring of Earthdams Leaks and Stability with Fiber-Optics based Monitoring System, 8th ICOLD european Club Symposium, pp. 432-437.
- Chu Agor, M.L., Wilson, G.V., and Fox, G.A. (2008). "Numerical Modeling of Bank Instability by Seepage Erosion Undercutting of Layered Streambanks." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 1133-1145.
- Geo-Slope International Ltd. (2004). Seepage Modeling with SEEP/W 2004. Calgary, Alta., Canada.
- Hong, S.H., and Kim, J.K. (2007). "Elevation of Groundwater Flow for the Kap-cheon Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 6, pp. 431-446.
- Hong, S.T. (2013). Unsaturated Seepage Analysis of Embankment by Distributed TDR Sensor, Ph. D. Thesis, Sangji University.
- Hydrological Survey Center. (2007). Hydrological Survey Report. (in Korean)
- Jung, S.I. (2003) A Study on the Surfacewater and Groundwater Flow using MODFLOW, Master Thesis, Kyunghee 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.
- Kang, T.U. An, H.U., Lee, G.M., and Jung, K.S. (2014). "Levee Stability Assessment Depending on Levee Shape and Flood Wave." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 307-319.
- Kim, J.I. (2011). A analytical study on influence of gradients on section characteristics of river banks, Mater Thesis, Hanyang University.
- Kim, J.M., Park, M.C., Jo, W.B., and Han, H.S. (2014). "Seepage Analysis of Weathered Granite Model Embankment Using TDR Seosor." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No. 3, pp. 17-28.
- 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)
- 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). (2005). Design Technology for Levee -Seepage-, Urban Flood Disaster Management Research Center. (in Korean)
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2008). Guide Line for Levee Design, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Urban Flood Disaster Management Research Center. (in Korean)
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2009). 4 Major River Master Plan. (in Korean)
- MOLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2013). Nakdong River Flood Control Office, Internet Homepage, <http://www.nakdongriver.go.kr>
- Richards, L.A. (1931). "Capillary Conduction of Liquids through porous Mediums." *Journal of Physics*, Vol. 1, No. 5, pp. 318-333.
- Water Management Information System (2013). <http://www.wamis.go.kr>
- Xu, Xin. (2014). A Study on Influence of Embankment Shape on Gradients in River-Banks under the Steady flow and Transient flow Seepage, Master Thesis, Hanyang University.

paper number : 15-005

Received : 16 January 2015

Revised : 27 February 2015

Accepted : 3 March 2015