

## 하천제방 직선부 및 만곡부의 침윤선 변화 분석

### Analysis of Changes of Seepage Line on Straight and Curved Levee

이 승 호<sup>1</sup> Lee, Seung-Ho

강 휴 택<sup>2</sup> Kang, Hyoo-Tack

#### Abstract

In this study we analyzed the seepage characteristics of meandering section of rivers commonly seen in domestic terrain. The seepage analysis is designed to be more realistic by considering a tangent and meandering section of levee. The levee was idealized to reflect the relevant characteristics by considering the curved angle of 90 degrees and 130 degrees in the spatial frequencies, water elevation conditions, and hydraulic conductivities. Seepage analysis becomes more detailed and precise with the seepage curve shape which is interpreted to indicate the flow of three-dimensional numerical analysis program using VisualFEA. As a result of the analysis, it is shown that the water level in the straight levee was constant, regardless of hydraulic conductivities, and the total head in the meandering section was increased by the overlapping of seepage. Consequently, it is found that the total head was increased more significantly in the case of 90 degrees curved levees than 130 degrees, and the total head showed similar characteristics in the straight levee.

#### 요 지

본 연구에서는 국내 지형에 따른 하천 특성을 고려하여 하천제방구간 만곡부의 침투특성을 분석하였으며, 하천제방의 직선부 및 만곡부를 구분하여 보다 실제적인 침투해석이 실시 되도록 하였다. 제방만곡부 침투 특성 반영에 적합하도록 평면선형각도를 90°, 130°로 변화시켰고, 평수위 및 홍수위 조건과 투수계수 등의 매개변수를 변화시켜가며 침투 해석을 수행하였다. 침투해석은 보다 상세하고 정밀하게 만곡부 형상의 침투 해석 흐름을 나타낼 수 있는 3차원 수치 해석 프로그램인 VisualFEA로 수행하였다. 평수위 및 홍수위시의 침투 해석결과 직선부에서는 투수계수와 관계없이 동일 수위형태로 나타났으며 만곡부로 근접할수록 침윤선이 중첩되면서 수두가 증가하였다. 만곡부의 평면 선형 90°, 130°의 경우 평면선형각이 90°에서 수두증가 현상이 더 크게 나타났으며, 직선부에서는 모두 비슷한 양상을 보였다.

**Keywords :** Curves levee, High water level condition, Hydraulic conductivity, Seepage

#### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 이상기후 현상에 의한 집중강우의 발생빈도가 증가되고 있으며, 자연하천의 대부분이 천정천으로서 인위적인 제방이 형성되어있는 우리

나라의 경우도 이러한 이상기후 현상에 의해 강우가 집중되는 6~9월에 제방붕괴 등의 자연재해 발생이 점차 증가하면서 제방안정 및 보강대책에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다.

우리나라의 서부와 남부에는 이른바 노년기지형이

1 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Sangji Univ.)

2 정회원, 동부엔지니어링 지반공학부 전문 (Member, Director, Geotechnical, Dongbu Eng. Co., Ltd., htkang@dongbueng.co.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

탁월하게 발달되어 있기 때문에, 서해와 남해로 흐르는 주요 하천들은 사행천(蛇行川) 또는 곡류하천(曲流河川)이 대부분으로서 제방축조 또한 만곡부의 형태가 상당수 분포하고 있다. 이러한 하천들은 산업화의 발달에 따른 토지이용 극대화에 의해 직강공사(直江工事)가 실시되어 유로가 반듯하게 펴졌으나, 기존 농지사용 및 인접구조물 분포 등에 의해 아직도 상당수의 하천이 곡류부로서 만곡부를 형성하고 있으며, 하천개발 패러다임이 생태하천 복원으로 변화하면서 만곡부 형태가 이전보다 많이 잔존하게 됨에 따라 제방안정성 측면에서의 만곡부 중요성 또한 커지게 되었다.

하천제방에 대한 안정성 평가는 침투해석으로서 결정된 제체 침윤선에 의한 비탈면 활동, 기초지반의 침투압 상승에 따른 파이핑과 관련된 것이다. 따라서 침투해석은 하천제방의 안정성 평가에 있어서 가장 중요한 단계로 적절한 모델 및 해석기법의 적용이 요구된다.

일반적으로 침투해석 결과는 지반의 투수성, 제체단면의 형상 및 크기, 홍수위 지속 시간, 불포화도 함수특성 등에 의해 영향을 받는다. 그러나 하천제방의 안정성 평가를 위한 모델링시 제방폭 및 제방고 등 제방규모에 따른 대표단면의 선정으로, 안정성 해석결과의 차이가 발생하는 만곡부 특성을 반영하기 못하고 있는 실정이므로 하천제방구간의 직선부 및 만곡부를 구분하여 보다 실제적인 안정성해석이 실시되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 만곡부를 포함하고 하천설계 기준을 적용한 일반적인 하천제방의 형상으로 모델링하여 만곡부의 침투 특성을 고찰하기 위해 만곡부 평면 형상을 90°, 130°로 구분하여 침투해석을 실시하였다. 침투해석시 투수계수는 10<sup>-4</sup>m/sec, 10<sup>-5</sup>m/sec, 10<sup>-6</sup>m/sec로 단계별로 적용하여 하천제방의 투수계수에 따른 침윤선 변화를 고찰하였으며, 홍수위 및 평수위의 수위 조건으로 구분하여 설정하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 흙속에서의 물의 흐름에 대한 지배방정식

기본적으로 흙속에서 Dary's 법칙이 성립한다고 하면 흙 속에서의 물의 흐름은 전수두의 차이에 의해 발생하며 질량보존의 법칙이 성립하므로 흐름에 대한 지배방정식을 유도할 수 있다. 또한 Darcy's 법칙을 따른다면 흙속에서의 흐름형태는 Laminar flow가 될 것이며(Lambe

등, 1978), 압밀을 생각하지 않고 침투해석만을 고려한다면 체적함수비  $\theta$ (전체 체적에 대한 물의 체적비)를 이용하여 흙속에서의 물 흐름에 대한 3차원 지배방정식을 유도(Freeze 등, 1979)할 수 있으며 식 (1)과 같다.

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

### 2.2 파이핑(Piping) 현상

흙속에서 물이 흐를 때 발생하는 침투력은 유효응력과 같은 일종의 체력(Body force)으로서 흐름방향으로 발생한다(Craig, 1997). 따라서 침투가 중력과 반대방향인 방향으로 발생된다면 침투력은 유효응력과 반대방향으로 작용하여 유효응력을 감소시키게 된다. 점착력이 없는 모래지반에서 수두차이에 의해 발생하는 침투력이 점점 커져 유효응력과 같아지면 침투력과 유효응력의 합력이 0이되어 전단강도를 소실하게 된다. 이러한 조건을 'quick condition'이라 하며 침투력과 유효응력이 서로 같게 되는 동수경사를 한계동수경사( $i_{cr}$ )라고 한다. 이러한 한계동수경사를 구하면 아래와 같다.

$$J = i\gamma_w V = \gamma' V$$

$$\therefore i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2)$$

분사현상이 발생하면 유수에 의해 지표면의 흙이 침식되고, 이로 말미암아 유로가 더 짧아지기 때문에 동수경사가 점점 더 커져서 유로를 따라 마치 파이프처럼 공동이 생기게 되는데, 이와 같은 현상을 파이핑(Piping) 현상이라고 한다. 이러한 파이핑에 대한 안정성을 검토하는 방법은 한계동수경사를 이용하는 방법과 침투유속의 한계치(한계유속)를 구하여 토립자의 이동가능성을 검토하는 방법이 있다. 일반적으로 제방의 파이핑 안정성은 한계동수경사와 제방 동수경사의 비가 2.0 이상이면 파이핑에 대하여 안전한 것으로 판단하게 된다. Kalin(1977)은, 지반은 비균질특성을 가지기 때문에 현장의 한계동수경사는 이론으로 구한 한계동수경사에 대해 20~40% 저감된다고 제안하였으며 Schmetmann(2000)은 실제로 현장의 세립 모래지반으로부터 평균적인 동수경사가 0.3~0.61 수준에서 보일링이 발생함을 확인하였듯이 파이핑 안정검토에서 2이상의 안전율을 고려하는 것은 지반의 이방성 및 비균질 특성에 기인하는 것으로도 생각할 수 있다.

### 3. 제방 만곡부를 고려한 침투해석

#### 3.1 수위조건

제방 침투해석은 하천설계기준에 의거, 계획홍수위의 시간적 변화를 고려한 포화 부정류해석이며, 해석결과로부터 파이핑 안정성 검토, 산정된 간극수압을 적용한 제방 비탈면 안정성 평가를 수행하므로 하천제방의 안정성 평가에 있어서 중요한 부분을 차지한다.

홍수기간이 긴 미국, 유럽 등의 경우에는 고수위를 정상 수위 조건으로 하여, 정상 침투 해석을 수행하고 있으며, 홍수기간이 짧은 일본의 경우(일본하천제방설계지침, 2000) 집중호우와 같은 강우특성을 고려하여 비정상 침투 해석을 적용하여 경제적으로 유도하고 있다. 국내의 경우 일본과 같이 홍수 지속시간이 짧아 수위조건을 정상상태로 다룰 경우 과대한 외력을 줄 수 있으므로(권교근 등, 2006) 비정상 침투 해석을 실시하는 것이 타당할 것으로 판단되며, 세계 각국의 추세(김진만 등, 2004)와 같이 포화·불포화 모델을 사용하여야 하나 하천설계기준과 같이 포화 부정류해석(한국수자원학회, 2005)을 실시하였다. 이와 같이 하천설계기준에서 포화 부정류해석을 채택한 것은 부정류해석은 초기 제방 포화도에 따라 매우 다른 결과를 나타내나 이를 설계시에 정량적으로 산정하여 적용하기는 현실적으로 곤란하다. 또한 불포화시 흙의 투수계수는 포화시보다 더 작은 값을 갖는데, 이는 흙 속의 공기에 의한 흐름저항 때문이며 결과적으로 침투해석에 의한 파이핑 안전율은 포화시에 비하여 훨씬 작은 값을 나타낸다. 이러한 사항을 고려하여 불 때 안전측 설계를 위하여 포화 부정류해석을 채택한 것으로 판단되며 본 연구에서도 하천설계기준을 준용하였다.

부정류해석이므로 시간에 따른 수위조건이 반드시 필요하다. 실제 시간에 따른 수위 변화는 연속적이거나, 해석의 편의를 위하여 수위 곡선을 홍수위 도달기간, 홍수위 지속시간 및 평수위 도달시간의 3구간으로 단순하였다(그림 1). 실제 홍수 수문곡선에서 최고수위의 지속

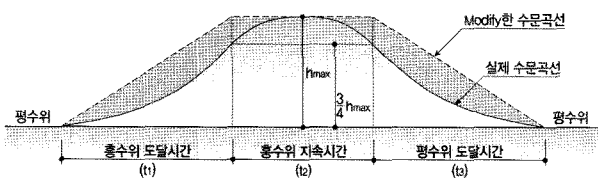


그림 1. 시간-하천수위 조건

시간은 매우 짧으나 충분한 안정성 확보를 위해 제외지수위가 상승하기 시작하여 최고수위( $h_{max}$ )를 지나 최고수위의 3/4정도 내려갔을 때까지의 시간을 홍수위 지체시간(홍수위 도달시간+홍수위 지속시간)으로 정의하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 홍수위 지체시간을 기준으로 침투해석 결과를 분석하였다.

침투해석시 적용한 수위조건은 홍수시 지속시간이 길어 파이핑 현상이 자주 발생하는 낙동강 제방 시간대별 관측수위를 참고하여 선정하였으며, 평수위에서 2일에 걸쳐 최대수위에 도달한 후 3일의 지체시간을 거쳐 1일 동안에 평수위로 돌아오는 비정상 수위조건으로 설정 하였다.

#### 3.2 해석제원

본 연구에서는 침투해석을 위해 유한요소해석을 이용하였으며, 제방단면의 3차원 모델링이 가능한 VisualFEA 프로그램을 사용하였다. 경계조건으로는 기초 지반의 하부 수직방향, 양 측면의 경우 수평 방향 변위를 구속하였으며, 이때 침투해석에 영향을 미치는 제체 및 기초 지반의 유한요소망의 크기는 직선부와 만곡부를 포함하는 제방형태의 포괄적인 흐름형상을 검토하기 위해 크기가 약 2.0m 정도인 삼각형 메쉬를 사용하였다.

해석에 사용된 지반의 지층구조는 파이핑이 발생하기 쉬운 조건인 투수계수가 큰 사질토로 모델링하였다(윤광석, 2004). 사질토는 하천제방의 일반적 조건인 퇴적층에서 흔히 발견된다. 투수계수는 모래의 일반적인 값들을 고려하여 3가지로 선정하였다.

만곡부를 포함하는 하천제방에서의 침투해석을 위하여 그림 2와 같이 제방폭 5m, 제방고 8m, 국내 하천 설계기준에서와 같은 제방사면 1:3.0 기울기로 적용 하였으며, 국내에서의 하천제방 만곡부 형상을 실제에 가깝

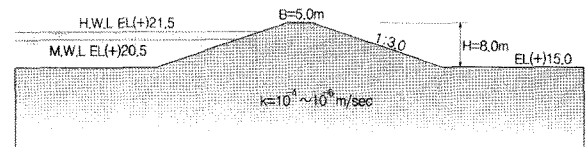


그림 2. 침투해석 단면

표 1. 투수계수의 일반적인 값들

흙 종류	$k (\times 10^{-4} \text{ cm/sec})$
느슨한 모래	3000~5000
중간 모래	1000
가는 모래	50~150

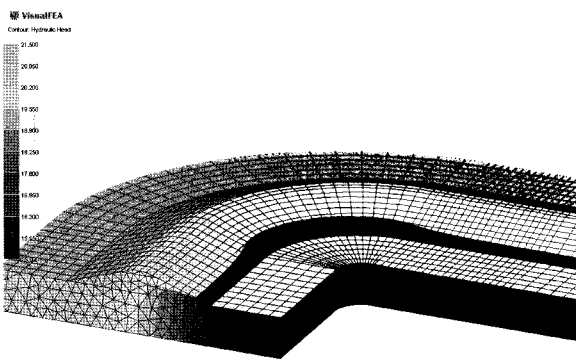
표 2. 해석 조건

변화인자	변화값	비고
제방 평면 선형각	90°	2case
	130°	
수위 조건	평수위(M.W.L)	2case
	홍수위(H.W.L)	
투수 계수	$10^{-4}$ m/sec	3case
	$10^{-5}$ m/sec	
	$10^{-6}$ m/sec	

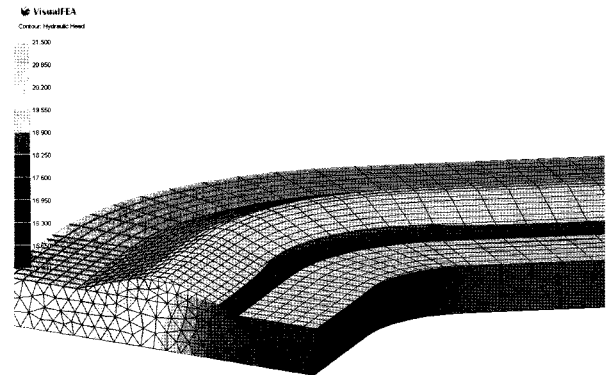
계 반영하기 위해 평면선형각도를 90°, 130°로 변화시켰고, 평수위 및 홍수위 조건, 투수계수를 표 1과 같이 변화시켜가며 해석을 수행 하였다.

### 3.3 침투해석 결과

제방만곡부를 고려한 3차원 포화부정류 침투해석결

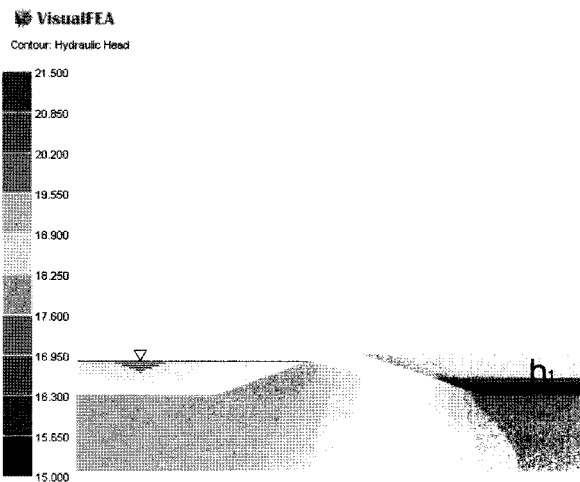


(a) 만곡부 각도 : 90°

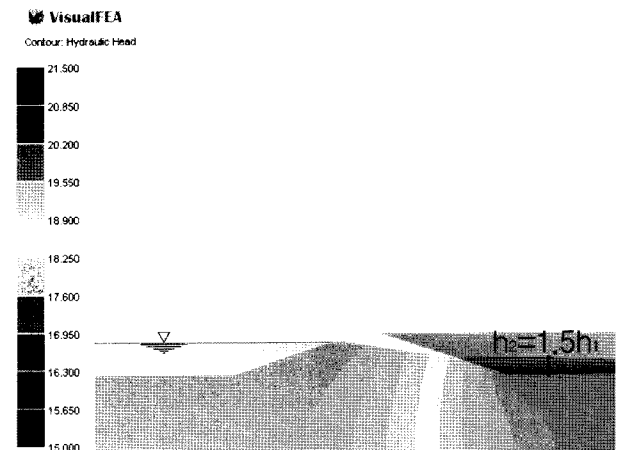


(b) 만곡부 각도 : 130°

그림 3. 만곡부 수두 분포도



(a) 직선부



(b) 만곡부

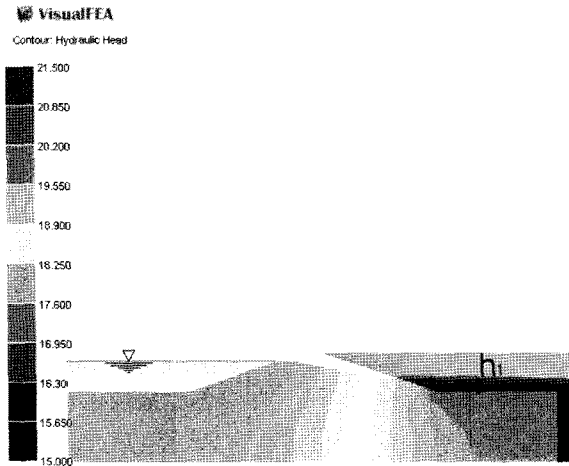
그림 4. 제방 직선부 및 만곡부 침투해석 결과(만곡부 각도 : 90°)

과는 그림 3~8과 같다.

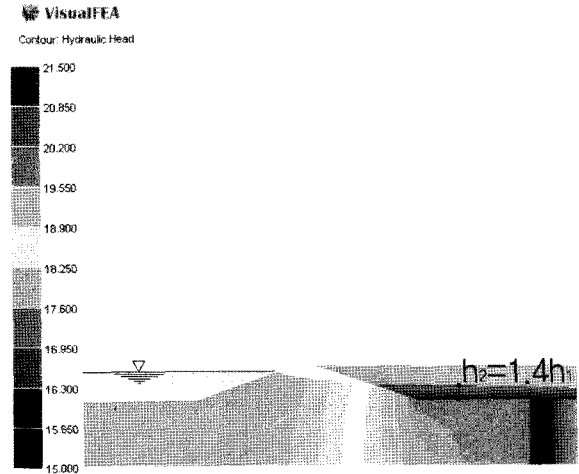
만곡부를 고려한 침투해석 결과 제방선단부가 침윤선과 만나는 부분(진한색으로 표시된 부분)이 직선부보다 크게 상승한 것으로 나타났다. 이는 침투류는 제체 법선에 직각방향으로 유입이 되고, 만곡부에서는 이러한 침투류에 의한 침윤선이 증첩되는 현상이 발생한다. 그러므로 이러한 침윤선 증첩에 의한 침윤선 집중으로 수두가 상승하게 된다.

만곡부 평면선형각도가 90°인 경우 직선부에 비하여 하류측 수위가 약 1.5배 상승하였고, 만곡부 평면선형각도가 130°인 경우 직선부에 비하여 하류측 수위가 약 1.4배 상승하여 제방 만곡부의 각도가 커져 완만한 형태를 가질수록 수두 증가효과가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 제체 법선 직각방향으로 유입하는 제내지층으로의 침윤선 집중효과가 감소하는 현상에 기인한다.

만곡부 각도변화에 따른 파이핑 안전율은 만곡각도



(a) 직선부



(b) 만곡부

그림 5. 제방 직선부 및 만곡부 침투해석 결과(만곡부 각도 : 130°)

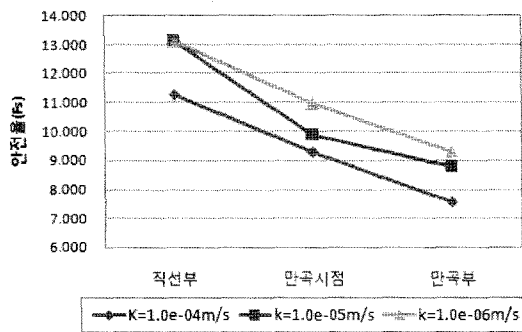


그림 6. 직선부와 만곡부의 파이핑 안전율 변화(만곡부 각도 : 90°)

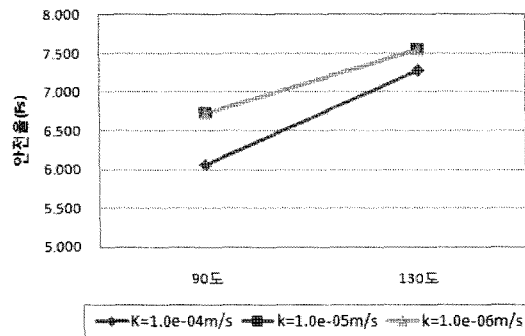


그림 7. 만곡부 각도에 따른 파이핑 안전율 변화(만곡중앙부)

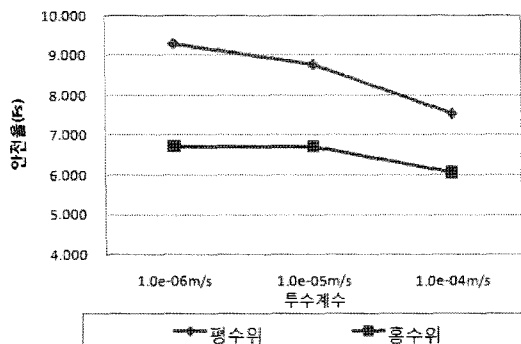


그림 8. 만곡중앙부에서 투수계수에 따른 파이핑 안전율 변화

가 클수록, 즉 만곡도가 완만할수록 크게 나타났다. 만곡부의 평면선형각도가 90°인 경우 만곡중앙부에서 파이핑 안전율은 약 6.1~6.7 이나, 평면선형각도가 130°인 경우에는 안전율이 약 7.2~7.6으로 증가한다. 이는 침윤선이 제내지층으로의 집중효과가 감소하여 수두 증가효과가 작기 때문인 것으로 판단된다.

투수계수에 따른 파이핑 안전율은 투수계수가 클수록 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 투수계수 증가에 비해 침투유량 증가량이 더 커, 결과적으로 동수경사가 커지게 되는 것을 의미하는 것으로 만곡부에서의 침윤선 집중은 투수계수가 커질수록 두드러진다고 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 사행하천과 포행하천이 다수 분포하는 국내 하천 특성을 고려하여 하천제방구간 만곡부의 침투특성을 분석하였으며, 이를 위해 하천제방의 직선부 및 만곡부를 3차원으로 모델링하여 침투해석을 실시하였다. 만곡부 각도 변화에 따른 침윤선 변화를 고찰하기 위해 평면선형각도를 90°, 130°로 변화시켰고, 평수위 및 홍수위 조건과 투수계수를 변화시켜가며 침투 해석을 수행 하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 제방 만곡부에서는 직선부 보다 수두가 증가하였다. 수두증가에 따른 동수경사는 평면선형각도 90°의 경우 만곡부는 직선부에 비해 1.4~1.5배 증가하였다. 이는 침투류가 제체 법선에 직각방향으로 유입이 되면서 만곡부에는 침윤선이 중첩되고, 이러한

침윤선 집중에 의해 수두가 상승하게 된다.

- (2) 제방 만곡부의 각도가 커져 완만한 형태를 가질수록 수두 증가효과가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 제체 법선 직각방향으로 유입하는, 제내지층으로의 침윤선 집중효과가 감소하는 현상에 기인한다.
- (3) 직선부와 만곡부의 파이핑 안전율은 만곡부쪽으로 갈수록 낮은 것으로 나타났다. 평면선형각도 90°의 경우 직선부 파이핑 안전율은 11.2~13.2 이나, 만곡부 파이핑 안전율은 7.5~9.2정도로 감소하였다. 이는 만곡부에 침윤선 집중에 따른 수두상승에 인한 것으로서, 만곡부의 파이핑 안전율 감소영향 및 수두상승에 따른 간극수압 증가로 제방 비탈면 안정 해석시 주의가 필요하다.
- (4) 만곡부 각도변화에 따른 파이핑 안전율은 만곡각도가 클수록, 즉 만곡도가 완만할수록 크게 나타났다. 평면선형각도 90°의 경우 만곡중앙부 파이핑 안전율은 6.1~6.7 이나, 평면선형각도 130°의 경우는 7.2~7.6으로 증가한다. 이는 침윤선이 제내지층으로의 집중효과가 감소하여 수두 증가효과가 작기 때문이다.
- (5) 투수계수에 따른 파이핑 안전율은 투수계수가 클수록 감소한다. 이는 투수계수 증가에 비해 침투유량 증가폭이 더 커 결과적으로 동수경사가 커지게 되는 것을 의미하는 것으로 만곡부에서의 침윤선 집중은 투수계수가 커질수록 두드러진다고 할 수 있다. 따라서 투수계수가 큰 지반의 만곡부 제방안정

성 평가는 각별한 주의가 필요하다고 할 수 있다.

- (6) 만곡부의 경우 제체 법선에 직각방향으로 유입되는 침투류에 의해 침윤선이 증첩되고 수두가 상승함에 따라 동수경사가 증가한다. 평면선형각도 90°의 경우 직선구간에 비해 만곡부는 동수경사가 1.4~1.5 배 증가하므로, 제방안정성 평가시 만곡부 영향을 반드시 고려하여야 하며 향후 관련 제방설계기준의 보완이 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 권교근, 한상현 (2006), 우리나라 하천제방에 대한 내부침식 파괴 연구; 사례연구, *대한토목학회 논문집*, 제 26권 1C호, pp.33-42.
2. 김진만, 최봉혁, 조삼덕 (2004), 하천제방의 침투해석 영향인자 분석, 2004 대한토목학회 정기학술대회.
3. 윤광석 (2004), 하천제방 붕괴 유형분석 및 설계방안, *한국수자원학회지*, 제37권 5호, pp.50-60.
4. 한국수자원학회 (2005), *하천설계기준·해설*.
5. 한국지반공학회 (2003), *구조물 기초설계기준 해설*.
6. 建設省, 2000.6 *河川堤防設計指針*.
7. Kalin, M. (1977), Hydraulic Piping-Theoretical and Experimental Findings, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.14, No.1, pp.107-124.
8. Craig, R. F. (1997), *Soil Mechanics*, E & FN Spon, pp.87-88.
9. Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*, Prentice Hall, Inc, pp.128-130.
10. Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1978), *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons, pp.274-275.
11. Schmertmann, J. H. (2000), "The No-Filter Factor of Safety against Piping through Sands", *ASCE, Geotechnical Special Publication*, No.111, pp.65-133.

(접수일자 2009. 9. 4, 심사완료일 2009. 9. 25)