

## 하천제방의 누수탐사 및 누수량 평가에 관한 연구

# A Study on the Estimation of Leakage and the probing Leakage in the River Bank

김경수(Kyoung-Soo Kim)\* · 조기태(Ki-Tai Jo)\*\*

**요 약 :** 하천제방은 하천 수리 구조물 중 가장 중요한 구조물 중의 하나이다. 하천제방의 붕괴는 재해발생의 직접적인 원인이 되기 때문에 하천제방의 내구성, 안정성은 중요한 요소이다. 제방붕괴의 원인은 홍수범람과 제방 누수를 들 수 있다. 본 연구는 전기 비저항 탐사를 이용하여 제방누수를 탐사하고, 또 제방의 누수가 발생하였을 경우 weighted residual method를 이용하여 제방 누수량을 평가하였다. 본 연구의 대상구역은 섬진강 상류유역이며, 대상제방의 제원은 길이 300 m, 소단 2.0 m, 제방 폭 4.5 m, 높이 4 m 이다. 본 연구에서는 대상제방에서 전기 비저항 탐사를 이용하여 제방의 누수여부를 평가하였다, 그리고 누수가 발생하는 지점에서 weighted residual method를 이용하여 제방 누수량을 평가하였다. 그 결과 해당제방의 누수는 39-45 m, 80-90 m, 218-222 m, 214-250 m 지점에서 발생하였으며, 누수형상은 직사각형 및 다각형 등의 형상을 보였다. 그리고 이들 누수지점에서 누수량은  $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 평가되었다.

**Abstract :** The river bank is one of the most important structure of fluvial hydraulic structure. Because the breaking of river bank is the cause of calamity, the durability and stability of river bank are very important factors. The breaking of river bank is the cause of the overflow of flood and the leakage of river bank. In this study, we investigated the leakage of river bank using the resistivity probing and estimated the volume of leakage using the weighted residual method. The study basin of this study is the upstream of Sumjin river basin and the factor of river bank is length 300 m and berm 2.0 m and width 4.5 m and height 4 m. We evaluated the leakage of river basin using using the resistivity probing and estimated the leakage volume using the weighted residual method. The result of this study, the leakage of river bank generated at the point of 39-45 m 80-90 m, 218-222 m, 214-250 m and the type of leakage is the rectangle and the polygon. And the leakage volume of this points evaluated  $2.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ .

### 서 론

하천제방은 하천 구조물 중 중요한 구조물 중 하나로서 유수가 하도 밖으로 넘치는 것을 방지하기 위하여 하천을 따라 토사 등으로 축조한 수리구조물이다. 이러한 하천제방은 그 종류에 따라 구체적인 기능은 다르며, 제방의 궁극적인 목적은 홍수에 의한 피해를 경감하고 홍수류가 하도외로 넘치는 것을 방지 혹은 제어하여 홍수류를 하도외로 계획적으로 유도하기 위하여 축조된다. 또한 위락공간으로 사용되는 하천제방이 붕괴되며 홍수피해, 침수피해 및 인명피해 등을 야기할 수 있기 때문에 제방의 내구성 및 안정성은 매우 중요한 요소이다.

하천제방의 붕괴는 홍수의 범람으로 인한 제방붕괴, 제방의 누수로 인한 붕괴 등 여러 가지 원인으로 발생할 수 있다. 하천제방 붕괴의 원인이 되는 제방의 누수는 제외측의 하천수위가 상승하므로 제체 및 기초지반을 통한 침투수가 제내측에 누출하는 현상을 의미하며, 침투수 누출에 의한 관공작용(Piping action)은 제방 붕괴의 원인이 된다. 이러한 제방의 누수는 제

체 누수와 기초지반 누수로 구분할 수 있다. 본 연구는 하천제방 붕괴의 원인이 되는 제방누수를 조사하기 위하여, 본 연구의 대상 하천제방에서 전기 비저항 탐사를 이용하여 제방의 누수여부를 파악하고, 누수가 발생하였을 경우 weighted residual method를 이용하여 제방 누수량을 평가하는데 그 목적이 있다.

### 대상지점

제방누수를 조사하기 위한 대상지점은 제방축조 재료의 파악이 가능한 곳이어야 하며, 제외지와 제내지의 표고차를 확보할 수 있는 곳 그리고 대상지점에서 장기 하천유량자료가 확보되어 있는 지점 그리고 가능하면 제외지는 연중 일정한 수위를 유지하고 있는 지점이어야 한다.

제방의 누수는 제방축조 재료에 따라 크게 좌우된다. 일반적으로 제방축조 재료는 인근 하천에서 굴착한 토사를 이용하여 축조하게 되는데, 제방축조 당시 토사의 투수성시험 등 기초토질실험을 수행하게 된다. 본 연구에서는 별도의 토질시험은 수행하지 않았으며, 제방축조 당시 실시한 시험성적을 사용하였다. 그리고 제방에서 누수의 진행상황을 파악하기 위해서는 제내지와 제외지 사이에 어느 정도의 표고 차를 확보할 수 있어야 하며, 또 제외지 측에서 하천수위를 평가하기 위해서는 인근 하천의 장기 하천 유출량 자료가 확보되어 있어야 한다.

\* 군산대학교(Kusan National University, San 68, Miroung-Dong, Kusan 573-360

\*\* 전북대학교(Chonbuk National University, 664-14, Dukjin-Dong, Dukjin-Gu, Chonju 561-756, Korea)

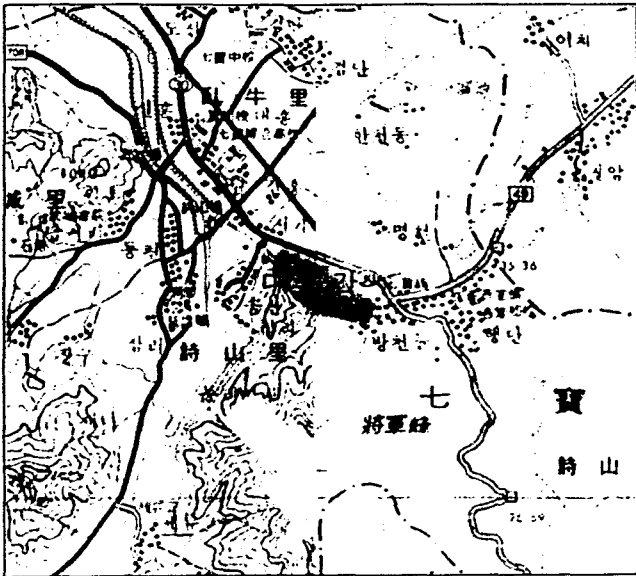


Figure 1. The study Basin.

그리고 제방누수를 보다 정확하게 관측하기 위해서는 대상제방 지점의 하류측에 보나 취수장 같은 수리시설물이 있어 항상 일정한 수위를 유지할 수 있는 지점이어야 한다. 본 연구에서는 이러한 조건을 고려하여 섬진강 댐 하류에 축조되어있는 제방을 대상지점으로 선정하였으며, 본 연구에서 선정한 대상구간의 하천제방 연장은 약 300 m이다. 본 연구의 대상구역은 Figure 1에 도시하였다.

**제방현황**

본 연구에서는 제방 누수량을 평가하기 위하여 섬진강 상류 유역에 축조되어 있는 제방을 대상지점으로 선정하였다. 본 연구에서 선정한 대상제방의 제원은 길이 300 m, 소단 2.0 m, 폭 4.5m, 높이 4m 등이다. 본 제방의 축조재료는 인근 하천에서 하상토를 이용하여 축조되었으며, 인근 하천은 비교적 직선구간이다. 그리고 대상제방의 약 50m 하류지점에 취수보가 설치되어 있어 유속이 매우 느린편이며, 수류가 안정적이기 때문에 하상의 세굴 우려가 매우 적은 구간이다. 또한 이 지점은 취수장이므로 낚시, 수영, 골재채취 등의 행위와 사람의 접근이 금지되어 있어 제방은 매우 안정적인 상태이다. 한편, 본 지점은 섬진강 다목적 댐에서 방류한 물이 흐르는 하천으로서 비교적 연중 고른 하천용수가 흐르는 하천이므로 제방 및 하천의 하상은 안정적인 구간이며, 제방의 상류는 산악지형이고, 유역면적은 비교적 적은 구간으로서 홍수범람의 위험성이 적은 지역이다(건설부, 1988).

**유역현황**

본 연구의 대상하천 제방구간의 지형은 동부지역은 산지지역이며, 서부지역은 평야지역이다. 지질은 실트질 및 점토질 등이며, 흑운모, 화강암 및 편암 그리고 모래 등으로 구성되어 있다. 기후는 여름철에는 고온다습하며, 겨울철에는 한랭 건조한 전형적인 우리 나라의 기후특성을 보이고 있다. 한편 연평균

강우량은 1,310 mm로 우리 나라의 연평균 강우량보다 다소 많은 편이며, 연평균 기온은 13.5°C로 우리 나라 연평균 기온에 비해 다소 높은 편이다.

지질은 모래와 실트가 섞인 GP-GM 군에 속하는 Poorly Graded Gravel with Silt and Sand의 토질이며, 토질의 수직적 분포상태는 표토층, 퇴적층, 풍화대, 기반암의 순으로 형성되어 있다. 지표에 분포하고 있는 표토층은 실트 섞인 모래, 모래 섞인 실트층이 분포하고 있으며, 표토층 하부에 분포하고 있는 퇴적층은 실트 섞인 모래 및 자갈층으로 구성되어 있다. 퇴적층 하부에 발달하고 있는 풍화대층은 상대밀도가 매우 조밀한 암반으로 구성되어 있으며, 풍화암층 하부에 분포하는 기반암층은 중생대 유라기~백악기에 생성된 화성암류인 대보화강암으로 구성되어 있으며, 부분적으로 석영반암이 발달하고 있다. 한편, 토지이용 현황을 보면 전체면적의 45.4%가 농경지로 이용되고 있으며, 이것은 타 지역에 비하여 농경지가 차지하는 비율이 매우 높은 편이다(건설부, 1988).

**제방누수 조사**

제방의 누수여부를 확인하는 물리탐사 방법에는 전기 비저항 탐사, GPR탐사, 자연전위 탐사법, 전자 탐사법 등이 있다. 이들 탐사법 중 전기 비저항 탐사법은 그 이론이 비교적 간단하고 탐사방법이 간편하기 때문에 댐 누수 조사, 제방 누수 조사 등에 가장 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 탐사의 정확도, 탐사심도, 경제성 등을 고려하여 전기 비저항 탐사법을 이용한 제방 누수 여부 및 누수형상 등의 조사를 수행하였다.

**침출수 누수위치 및 영향범위 탐사**

제방의 누수위치 및 영향범위 탐사를 위한 전기 비저항 탐사법은 전류 전극을 통해 대지에 공급된 전류의 크기와 이에 의해 발생된 전위의 크기를 측정함으로써 지하의 전기 비저항치의 변화 양상을 탐지하는 물리 탐사법이다. 전기 비저항 탐사법의 장점은 누수부위 및 영향 탐사에 효과적이며, 대부분의 지질조건에서 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있다. 한편 전기 비저항 탐사법의 단점은 high frequency를 사용하기 때문에 지반의 전기 전도도가 크면 감쇠가 커져 탐사 가능 심도가 커지지 못한다는 점이다.

**전기비저항 탐사의 원리 및 해석방법**

쌍극자배열 전기 비저항 탐사는 한 쌍의 전류전극과 다른 한 쌍의 전위전극 간격이 같은 전극배열로 전류전극과 전위전극의 거리를 연속적으로 쌍극자 길이의 정수배 만큼 증가시킴으로써 2차원 탐사를 수행할 수 있다.

쌍극자 길이, 전류 및 전위전극의 간격을 탐사 목적과 탐사 정밀도 등에 따라 선택하고 a, 2a, 3a, ..., na 간격으로 단계적으로 이동하면서 전위차를 측정하여 겹보기 비저항 값의 수평적 및 수직적 변화를 파악한다. 전기 비저항 쌍극자 탐사는 쌍극자 길이 a를 조절할 수 있어 탐사 목적 및 지질학적인 조건에 따라 조사 깊이를 다르게 할 수 있고, 전극 전개수 n을 조정함으로써 지하의 수직적인 전기 비저항 분포와 변화 양상을

신속하게 탐지할 수 있다.

본 연구에서는 탐사 축선을 300 m, 쌍극자 길이  $a=1$  m, 전극 전개수  $n=8$ 로 하였다. 대상제방에서 전기 비저항 탐사를 통해 얻어진 자료를 이용하여 지표 부근에 존재할 수 있는 수평적인 전기전도도 변화에 대한 보정과 정량적인 해석을 하기 위해서 대상지점의 지하 구조에 대한 반응을 계산하고 보정할 수 있는 모델반응 계산과 역산과정을 수행하여야 한다.

전기 비저항 탐사를 통해서 얻어진 겹보기 비저항값은 두 개의 전위전극 사이의 중심점과 두 개의 전류전극 사이의 중심점을 각각 45° 아래로 그어 만나는 점에 기입하게 된다. 이러한 겹보기 비저항값을 비교, 분석하여 지하의 전기 비저항의 수직적, 수평적 분포 및 변화 상황 등을 해석한다. 이와 같은 겹보기 비저항 값을 이용하여 단면으로 나타낸 그림을 겹보기 비저항 가단면이라고 한다. 겹보기 비저항 가단면에 나타난 값들은 지하에 실제 분포하고 있는 참 전기 비저항값이 아니며, 가단면에 나타난 값이 역시 지하의 실제 깊이를 나타내는 것은 아니다. 따라서 실제 지하의 전기 비저항 분포 및 이의 정량적인 해석을 위해서는 역산 과정을 거치게 된다. 특히 쌍극자 배열을 이용한 전기탐사시 천부에 존재하는 수평적인 전기전도도의 변화에 대단히 민감하므로, 이로 인한 이상대를 정확히 파악할 수 없는 단점을 가지고 있어 정량적인 해석보다는 정성적인 해석에 그치는 경우가 많다. 따라서 정량적인 해석을 위해 반복적 시행착오법에 의한 정모델링과 역산을 거치게 된다.

본 연구에서 얻어진 쌍극자 배열 전기 비저항 탐사 자료를 이용하여 작성된 겹보기 비저항 가단면 그리고 모델반응 계산에 의한 이론적인 전기 비저항 가단면 및 역산에 의한 2차원적 참 전기 비저항 단면 등을 도시하였다.

### 제방침투해석

본 연구에서는 수치해석 기법을 이용한 제방의 침투해석을 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제방침투 해석을 위하여 사용한 수치해석 기법은 weighted residual method를 이용한 유한요소법을 이용하였다. weighted residual method를 이용한 유한요소법은 1차원의 단순한 정상 포화 흐름으로부터 임의적으로 변화하는 2차원의 이방성 지반의 포화 및 비포화 흐름을 해석할 수 있으며, 강우에 의한 침투, 증발, 시간에 따른 경계조건의 변화 등 다양한 외부 조건변화를 고려한 해석이 가능하다.

#### 제방침투 해석 기법

weighted residual method를 이용한 유한요소법은 Darcy의 법칙을 따르는 포화·비포화 흐름에 근거를 둔 해석방법이다. Darcy의 법칙은 본래 포화된 흙에 대하여 적용하는 흐름법칙이지만, Childs and Collins-George(1950) 등에 의하여 비포화 흐름영역까지 확장 적용되었다. 포화 흐름 조건과 비포화 흐름 조건의 근본적인 차이점은 투수계수가 시간에 따라 일정한 것이 아니라 함수비에 따라 변화한다는 것이다. 즉, 함수비와 투수계수는 모든 간극수압의 함수로 되어 있다. 일반적으로, 함수비가

감소하면 불포화도의 투수계수 역시 감소한다. weighted residual method를 이용한 유한요소법의 기본 미분 방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial(x)}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial(y)}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + q = \frac{\partial(V_w/V)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, H는 전수두(total hydraulic head)이며,  $k_x$ 와  $k_y$ 는 x와 y 방향의 수리전도도 그리고 q는 외부로부터 유입되는 유입량,  $V_w$ 는 임의의 한 요소안에 존재하는 물의 체적, V는 요소의 체적,  $V_w/V$ 는 체적 함수비, t는 시간이다.

식 (1)은 임의의 시간에 제방의 한 요소(element)에 들어오는 유입량과 제방의 임의의 한 요소를 빠져나가는 유출량은 체적 함수비의 변화와 같다는 것을 의미한다. 즉, 임의의 시간에 x와 y방향으로 흐른 물의 양과 외부의 유입량을 합한 값은 체적 함수비의 변화량과 같다. 정상류하에서는 제방 한 요소의 유입량과 유출량은 시간의 변화에 관계없이 일정하다. 따라서, 식 (1)의 오른쪽 항은 0이 되기 때문에 식 (2)과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\frac{\partial}{\partial(x)}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial(y)}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + q = 0 \quad (2)$$

체적 함수비의 변화는 응력상태와 구성물질의 특성변화에 의존한다. 불포화도의 응력상태는 두 가지 응력상태로 표현할 수 있으며, 상태변수는  $(\sigma - u_a)$ 와  $(u_a - u_w)$ 이다. 여기서,  $\sigma$ 는 전 응력,  $u_a$ 는 간극 공기압 그리고  $u_w$ 는 간극수압이다.

weighted residual method를 이용한 유한요소법은 비정상 해석시 하중의 증감이 없는 일정한 전응력 조건으로 계산을 하며, 비정상 해석시 간극 공기압은 대기압과 일정한 것으로 가정한다. 이러한 조건하에서 체적 함수비의 변화는 두 번째 응력상태 변수인  $(u_a - u_w)$ 의 변화에만 의존하고, 간극 공기압  $u_a$ 는 일정한 것으로 가정한다. 따라서, 체적 함수비의 변화는 간극수압만의 함수가 된다.

체적 함수비와 간극수압과의 관계는 간극을 구성하는 물질의 특성에 의존한다. 이를 수식으로 표현하면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$\frac{V_w}{V} = m_2^w (u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서,  $m_2^w$ 는 체적 함수비와 간극수압의 관계곡선에서 곡선의 경사이며, 이 값은 간극을 구성하는 물질의 저류능력을 나타낸다.

여기서,  $u_w$ 는 간극수압이며,  $\rho$ 는 물의 밀도, g는 중력 가속도, y는 위치 수두를 나타낸다.

식 (3)을 시간에 대하여 미분하고 전수두를 미분식에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial(x)}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial(y)}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + q = g \rho m_2^w \frac{\partial(V_w/V)}{\partial t} \quad (4)$$

위 식이 weighted residual method를 이용한 유한요소법의 지배 방정식이다.

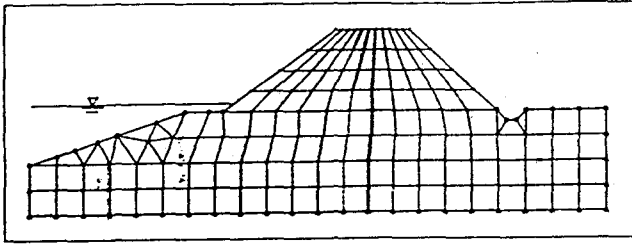


Figure 2. The grid network of river bank.

**침투해석 조건**

본 연구에서 침투해석의 대상이 되는 제방은 인근 하천토사를 준설하여 축조된 제방으로 제방 축조에 이용된 재료는 실트질이 섞여 있는 사질토이다. 본 연구에서는 제방 축조에 이용된 토사의 투수계수를 추정하기 위하여 별도의 시험을 실시하지 않고, 일반적으로 널리 사용되고 있는 투수계수를 사용하였다. 비포화 흐름해석을 위한 부간극수압과 함수비의 관계는 여러 가지의 흙의 종류에 대하여 실험을 통해 구한 경험적인 자료를 참고로 하였다(Mualem, 1978).

한편, 제방의 침투해석은 제외지층의 수위변동에 따라 그 해석조건이 달라지기 때문에 제외지층의 수위변동에 따른 제방의 침투해석을 달리 수행하여야 한다. 그러나 본 연구의 대상 제방은 하류에 하천수 취수를 위한 러버댐이 공기 압축식 자연 율류형으로 축조되어 여름철 홍수기를 제외한 대부분의 기간에 수위가 거의 일정하기 때문에 본 연구에서 제방 침투해석을 위해 사용된 수위는 일정하다는 가정 하에 해석을 실시하였다.

한편, 하천수를 저류하기 위한 러버댐의 형식은 수명 20년

의 공기 압축식 자유 율류형이며, 러버댐의 규격은 W16.8 m x L50.0 m x H2.5 m이며, 댐의 계획 고수위는 EL.30.9 m, 저수위는 EL.27.56 m이다. 그리고 러버댐의 저류량은 85,000 m<sup>3</sup>/day이며, 문비 규격은 W2.58 m x H1.0 m x 2면, 그리고 러버댐의 최대 방류량은 55 m<sup>3</sup>/sec이다.

또한, 해당 제방에서 침투해석을 실시하기 위하여 삼각형과 사각형을 조합한 총 136개의 격자망을 구성하였으며, 또 총 164개 절점을 구축하였다. 본 연구에서 해당 제방을 대상으로 구성한 제방 격자망은 Figure 2에 도시하였다(SEEP/W, 1988).

**적용 및 고찰**

연구에서 하천제방의 누수여부를 조사하기 위한 전기 비저항 탐사를 실시하였으며, 이들 자료를 해석한 결과의 일례를 Figure 3에 도시하였다. 그 결과 본 연구의 대상제방 시작점을 기준으로 하여 상류방향으로 약 39~45 m 지점에서 타 제방 부위보다 많은 양의 누수가 진행되고 있으며, 누수형상은 불규칙한 다각형 모형을 띄고 있다(Figure 3). 그리고 약 80~90 m부근에서는 직각 사각형 형상의 누수가 진행되고 있고, 약 218~222 m 부근에서는 다각형 형상의 누수가 진행중이며, 약 240~250 m 부근에서는 직사각형 형상의 누수가 진행중인 것으로 나타났다

한편 본 연구에서 전기 비저항 탐사를 이용하여 누수위치를 확인 한 후, 누수지점에서 weighted residual method를 이용하여 해당 하천제방의 누수량 평가를 실시하였다. 그리고 본 연구는 제방의 누수 중 제체 누수량만을 평가하는데 그 목적이 있기 때문에 제방 누수량을 평가하기 위한 수치 실험을 실시하기 전에 해당 하천제방 좌안에 설치된 소단을 기준으로 약

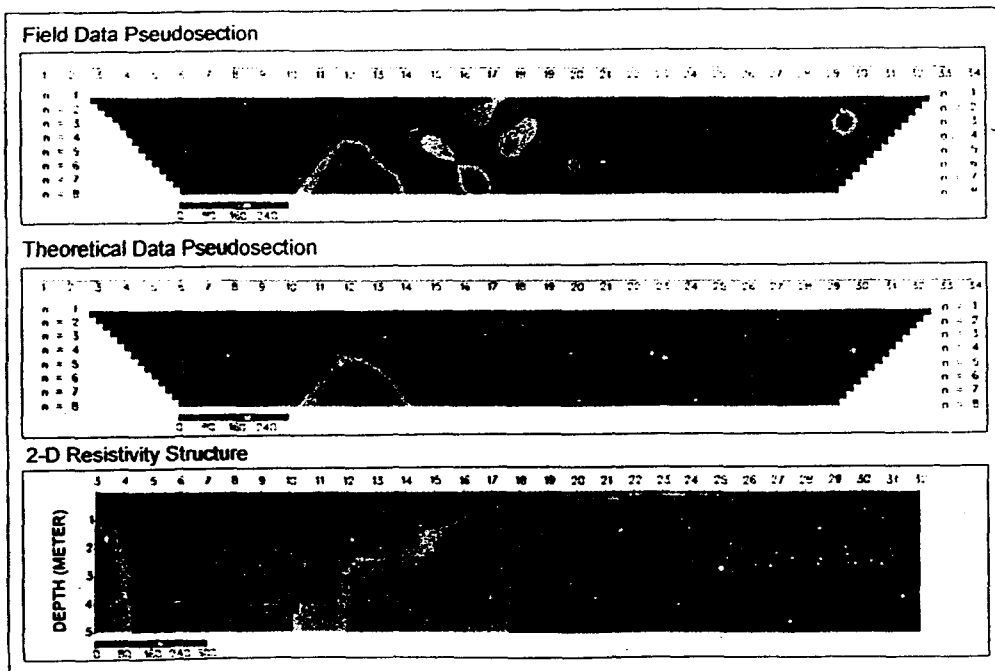


Figure 3. The results of electrical resistivity probing.

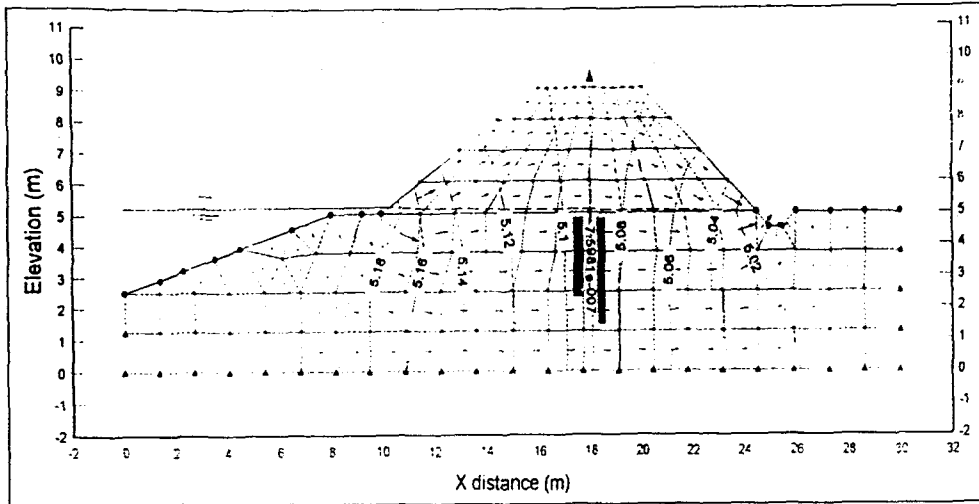


Figure 4. The vector of leakage in the river bank.

5 m 직하지점을 바닥의 영점으로 정하고 이점을 기준으로 해당 하천제방의 누수를 평가하기 위한 수치 실험을 실시하였다. 본 연구의 해당하천 제방의 축조재료는 실트질이 함유된 사질토로서 투수계수는  $1.0 \times 10^{-5}$  m/sec로 가정하였으며, 제방 침투 해석 당시 하천 수위는 소단에서 약 20 cm 정도였으며, 소단 끝 부분에서 약 6 m 정도의 앞부분을 영점으로 하였을 때 X축 방향으로 8 m 떨어진 지점에서 수두는 5.18 m이었다. 그리고 제외지 축으로 진행할수록 수두가 점점 떨어져 제방의 중앙부인 X축 방향으로 18 m 떨어진 지점에서는 수두가 5.09 m로 강하하였으며, X축으로 24 m 떨어진 지점에서는 수두가 5.02 m로 강하하였다(Figure 4).

또한, Figure 4에서 알 수 있듯이 제방을 통해 누수되는 누수량 중 대부분의 침출수는 소단이 설치된 부분에서 침투한 침출수가 제방의 하단부를 통하여 누수되고 있으며, 그 외에 제방의 상단을 통하여 침투되는 누수는 모세관 현상으로 인해 발생하기 때문에 그 양은 매우 적은 양 일 것으로 판단된다.

본 연구에서 weighted residual method를 이용한 유한 요소법을 이용하여 해당제방의 누수량을 평가한 결과 누수량은 단위면적당  $7.60 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/sec로 평가되었으며, 이를 일일 누수량으로 변환하면 단위면적당 누수량은  $2.74 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/day로 평가되었다.

## 결론

본 연구는 해당 하천제방의 누수여부 진단, 누수가 발생할 경우 전기 비저항 탐사를 이용하여 누수의 범위를 진단하고, weighted residual method를 이용하여 대상 하천제방의 누수량을 파악하는데 그 목적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 해당 하천제방의 현지조사 및 하천제방의 수준측량을 실시하였으며, 대상 하천제방에서 전기비저항 탐사를 실시하여 제방의 누수여부를 판단하였다. 그리고 weighted residual method를 이용하여 제방의 누수량을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 전기 비저항 탐사 결과 제방 하단부에 전반적으로 약간의 누수가 발생하고 있으며, 특히, 해당 하천제방의 누수탐사를 위한 시작점에서 약 39-45 m, 80-90 m, 218-222 m, 240-250 m 부근에서 소량의 누수가 발생하고 있으며, 누수형상은 직사각형 및 다각형의 형상을 띄고 있다.

2) 대상 하천제방에서 침투해석을 실시하기 위하여 삼각형 및 사각형을 조합한 총 136개의 격자망을 구성하였으며, 총 164개의 절점을 구축하였다.

3) 제방 누수량을 파악하기 위하여 weighted residual method를 이용한 수치실험 결과 제방 누수량은 단위폭당  $2.74 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/sec로 추정되었으며, 이를 전 제방으로 확대하여 계산한 결과 전체 제방에서 누수량은 0.82 m<sup>3</sup>/day로 평가되었다.

## 참고문헌

- 건설부, 1988, 섬진강 수계 광역상수도 사업 실시 설계 보고서, p.105-165.
- 대한토목학회, 1994, 건설부 제정 하천공사 표준시방서, p.53-135.
- 선우중호, 1983, 수문학, 동명사, p.147-151.
- 안상진, 1995, 하천공학, 구미서관, p.160-169.
- 한국수자원공사, 1996, 광동댐 거동분석 및 효율적 댐 운영방안 연구보고서, p.120-127.
- 한국수자원공사, 1996, 안계댐 안전도 평가보고서, p.73-87.
- 현병구, 1988, 물리탐사의 기본이론, 서울대학교 출판부, p.61-72.
- 정인준, 김명모, 1987, 토질역학, 구미서관, p.94-95.
- Childs, E. C. and Collis-George, N., 1950, The Permeability of Porous Material, Proceeding of the Porous Society, pp.392-405.
- Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. 1977, Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturated Soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 13, pp.261-276.
- Green, R. E. and Corey, J. C., 1971, Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of some Predictive Methods, Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 35, pp.3-8.
- Mualem, 1978, Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media: Generalized Macroscopic Approach, Water Resource Research, 14(2), pp. 325-334.