

## 제방 침투 수치모형의 적정 입력조건 검토

### Investigative Study on Proper Input Conditions of Numerical Model for Seepage Analysis

임동균\*, 김규호\*\*, 여흥구\*\*\*, 강준구\*\*\*\*

Dongkyun Im, Kyu-Ho Kim, Hongkoo Yeo, Jungu Kang

#### 요 지

침투는 지반이 층적으로 구성되어 있는 제방의 파괴를 야기하는 중요한 원인이다. 침투 해석 수치모형은 제방 침투와 관련된 문제 해석과 방지기법 설계에 있어 매우 유용한 방법이나, 각각의 수치모형은 적용상 한계와 문제점을 내포하고 있다. 실제 지하수 흐름은 간극률, 입자형상 및 크기, 포화도 등과 같은 토질특성, 내부침식과 같은 역학적 특성, 점성과 동결융해 같은 열역학적 특성, 그리고 화학적 특성 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 이러한 물리적 인자 이외에도 침투 수치해석은 외력조건, 격자 크기(element size), 그리고 시간 간격(time step interval) 등 입력조건에 영향을 받기 때문에 이들 설정에 대한 검토를 시행하여야 한다. 본 연구에서는 침투 수치모형의 적절한 입력조건 범위를 검토하였으며, 격자크기는 계산시간과 해석결과 등 수치모의의 효율성을 고려하였을 때 홍수위 혹은 제방고의 1/10이하로 결정하면 타당할 것으로 판단된다. 그리고 침투 수치모형의 시간 간격은 외력조건을 고려하여 1시간 이내로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 본 연구결과는 침투해석 수치모의의 유의사항을 검토하여 해석결과에 대한 불확실성과 위험요소를 제거하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 침투, 수치모형, 격자크기, 시간간격

#### 1. 서 론

근래 국지성 및 돌발 호우로 일컬어 졌던 기상현상은 이제 서서히 국내 기후로 인식되어 지고 있다. 이러한 기상여건과 도시화로 인하여 하천내 유출량 및 홍수위 지속시간은 급격히 증가하고 있다. 또한, 양호한 지반조건이 감소하여 비교적 연질 또는 투수층(과거 하천 및 하천부지 등)을 수반하는 지반에 제방을 건설하여야 하는 경우가 발생하고 있다. 이러한 수리 및 지반조건 악화로 인해 매년 상당수의 제방이 붕괴되어 많은 인명과 재산 손실을 가져오고 있다. 과거 하천제방은 월류에 의한 붕괴가 대부분이었으나, 최근에는 하천제방이 정비됨에 따라 월류에 의한 붕괴보다 강우와 하천수의 복합요인에 의한 침투파괴가 중요한 문제로 대두되고 있다. 그러나 국내에서 제방 침투 설계 및 평가기술에 대한 검토는 다른 수공학 분야에 비해 상대적으로 중요하게 검토되지 않았다.

\* 한국건설기술연구원 연구원·031-910-0516(E-mail : himdk@kict.re.kr)

\*\* 한국건설기술연구원 수석연구원·031-910-0257(E-mail : khkim1@kict.re.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원·031-910-0549(E-mail : yeo917@kict.re.kr)

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원·031-910-0569(E-mail : jgkang02@kict.re.kr)

실제 침투현상을 정확히 파악하기 위해서는 실물 및 모형실험에 의한 방법을 적용하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 대상 제방의 토질 및 다짐도 등 현장 조건을 정확히 구현하기 어려울 뿐 아니라, 실험에 필요한 공간 확보 등 다양한 제약조건을 가진다. 따라서 비포화 영역의 침투거동을 포함하여 실제 물리현상을 비교적 손쉽게 유사하게 해석하기 위해서는 수치해석기법을 이용하는 것이 가장 합리적이다. 그러나 각 수치해석기법은 적용상 주의점 및 한계조건을 가지고 있으므로, 정확한 침투해석을 위해서는 이에 대한 평가가 선행되어야 한다. 특히 최근에 실무에서 적용하고 있는 상업적 프로그램은 사용자가 적용하는 문제에 대해 검증은 수행한 프로그램이 아닐 뿐 아니라, 사용자가 침투현상에 대한 정확한 지식이나 교육 없이도 결과를 도출할 수 있게 되어 있어 해석결과에 대한 불확실성 및 위험요소가 내제되어 있다(임동균 등, 2006).

실제 침투현상은 간극률, 입자형상 및 크기, 포화도 등과 같은 토질특성, 내부침식과 같은 역학적 특성, 점성과 동결융해 같은 열역학적 특성, 그리고 화학적 특성 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 이러한 물리적 인자 이외에도 침투 수치해석은 외력조건, 격자 크기(element size), 그리고 시간 간격(time step interval) 등 입력조건에 영향을 받기 때문에 이들 설정에 대한 검토를 시행하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 침투 수치모형의 적절한 격자크기와 시간 간격 범위를 검토하였다.

## 2. 침투 해석

지하수 흐름 지배방정식은 일반적으로 Darcy 법칙(식 (1))과 질량보존의 법칙(식 (2))에 의해 구성된다.

$$V = -k \text{grad}(h) \quad (1)$$

$$\text{div}(k \text{grad}h) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

여기서  $V$ 는 유속,  $k$ 는 투수계수,  $h$ 는 수두,  $Q$ 는 경계내의 유량,  $t$ 는 시간, 그리고  $\theta$ 는 체적함수량(volumetric water content)이다. 식 (2)는 수직 2차원 평면( $x, z$ )에 대하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$k_x \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + k_z \left( \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

지배방정식은 정상조건의 경우 식 (3)의 우변이 제거된 Laplace 방정식 형태를 취하며, 비정상조건의 경우 Fourier 방정식 형태를 취하게 된다. 또한 비포화조건을 고려할 경우 투수계수와 체적함수량은 간극수압의 함수이다.

실제 지하수 흐름은 간극률, 입자형상 및 크기, 포화도 등과 같은 토질특성, 내부침식과 같은 역학적 특성, 점성과 동결융해 같은 열역학적 특성, 그리고 화학적 특성 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 그러나 개발된 상업적 프로그램은 다양한 조건의 문제를 해석하기 위해 필요한 모든 인자를 고려하지는 못하므로, 적용하고자 하는 침투문제에 대한 기본적인 검증(계수검증, 격자간격, 시간간격 등) 과정을 걸쳐 적용하여야 한다.

## 3. 입력조건 검토

### 3.1 격자 크기

침투 수치모형은 격자의 크기 및 형상에 따라 침윤선, 동수경사, 그리고 침투유속 등 침투해석

결과가 변화한다. 따라서 본 연구에서는 다른 조건은 모두 동일하게 적용하고 격자 크기를 변화시켜가며 침투해석을 시행하였다. 적용한 침투 수치모형은 실무에서 가장 사용빈도가 높은 SEEP/W를 적용하였다(Geo-slope International Ltd., 2004). 격자 크기는 제외지 수위로 무차원 시켰으며, 해석에 적용한 무차원 격자크기는 각각 1/5, 1/10, 1/20, 1/40, 1/80이다.

그림 1은 침투유속 등유속선과 벡터를 도시한 것이다. 그림 1(b)~(e)의 해석결과는 거의 동일한 것으로 판단되나, 그림 1(a)는 나머지 해석결과와 다른 양상을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 동수경사 해석결과에서도 동일하게 나타난다. 즉, 대상구간의 침투해석에 있어서 동일한 경계조건이라도 격자 크기 및 형상에 따라 상이한 해석결과를 나타내게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 정확한 침투해석을 위해서는 적절한 격자 크기 및 형태에 대한 범위가 제시되어야 한다.

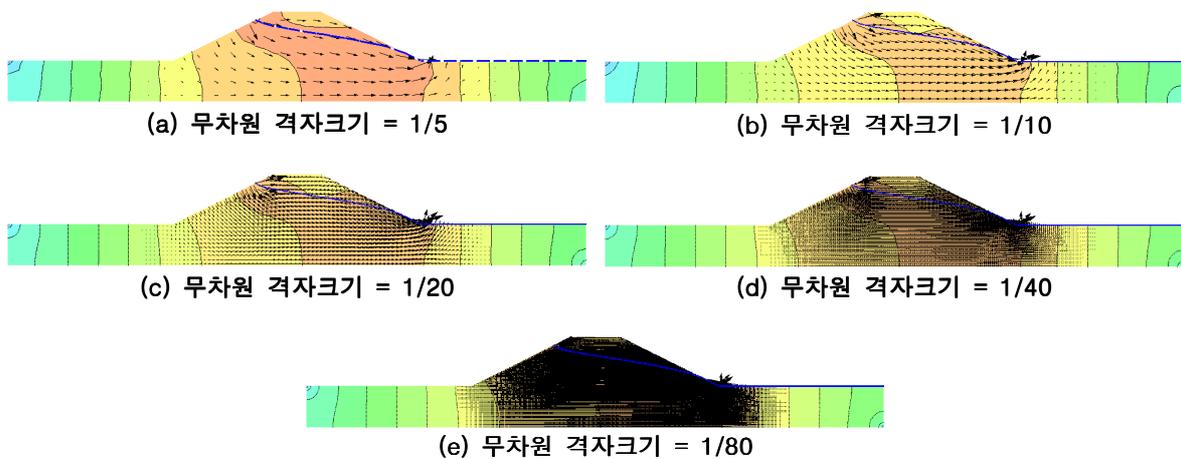


그림 1. 격자 간격에 따른 침투유속 해석결과

그림 2는 격자 크기에 따른 동수경사를 도시한 것이다. 가로축의 격자 크기와 세로축의 동수경사는 각각 제외지 수위와 최대 동수경사로 무차원 하였다. 실선으로 연결된 자료는 본 연구의 해석 결과이며, 점선은 기존의 연구 결과이다(건설성, 2002). 그림으로부터 동수경사 해석결과는 격자크기에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 기존 연구에서는 무차원 격자크기가 1/10 이하가 되면 동수경사는 거의 일정한 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서는 무차원 격자크기가 1/20 이하에서 일정한 값을 나타내고 있다. 이와 같은 경향은 침투유속이나 단위 침투량 등 모든 침투해석결과에서 동일한 형태로 발생된다. 두 연구결과가 다소 차이를 나타내고 있으나, 계산시간과 해석결과 등 수치모의의 효율성을 고려하였을 때 격자크기는 제외지 혹은 제방고의 1/10이하로 결정하면 타당할 것으로 판단된다.

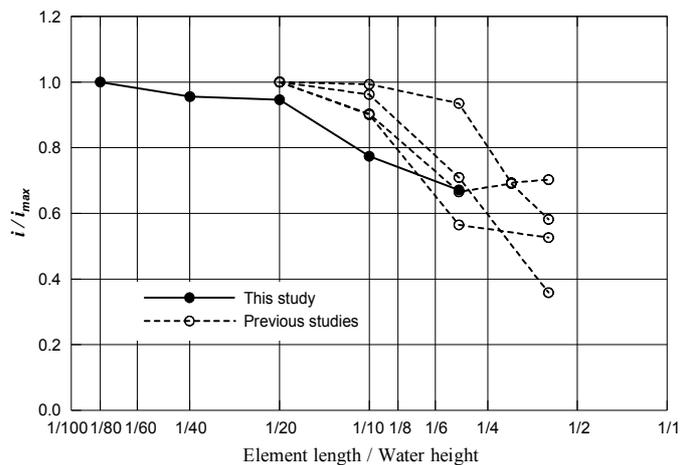


그림 2. 격자크기에 따른 동수경사 해석결과

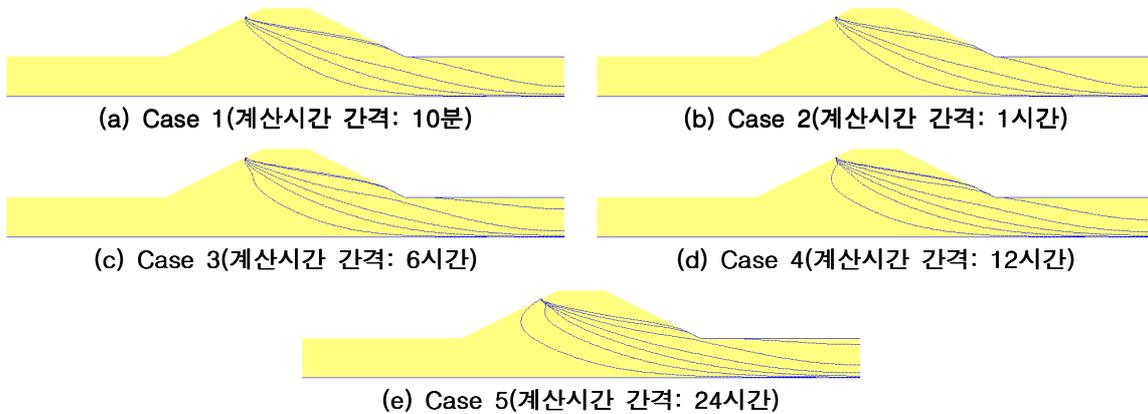
### 3.2 시간 간격

시간 간격이 해석결과에 미치는 영향을 파악하기 위해서 다른 조건은 모두 동일하게 적용하고, 시간 간격을 변화시키며 침투해석을 시행하였다. 격자 크기는 제외지 수위의 1/20로 설정하였으며, 계산시간 간격 및 반복횟수는 표 1에 정리하였다.

**표 1. 시간 간격 및 반복횟수**

항 목	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
계산시간 간격 (초)	600	3600	21600	43200	86400
반복횟수 (번)	1008	168	28	14	7

그림 3은 각 계산시간 간격별 침윤선 분포를 도시한 것이다. 그림 3(a)와 (b)의 침윤선 해석결과는 거의 동일한 것을 알 수 있으며, 4일의 침투 지속시간이 경과되면 시간에 따라 침윤선이 변화하지 않는 정상상태에 도달한 것을 알 수 있다. 그러나 계산시간 간격을 크게 설정한 그림 3(c)~(e)에서는 정상상태까지 걸리는 침투 지속시간이 5~6일정도 소요되고 있다. 또한 침윤선 이외에 침투유속 및 동수경사 등과 같은 침투해석결과도 동일한 양상을 나타낸다. 이러한 결과로부터 계산시간 간격은 침투해석 결과에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 적절한 계산시간 간격을 설정할 필요가 있다.



**그림 3. 계산시간 간격에 따른 침윤선 해석결과**

그림 4는 각 계산시간 간격별로 제내지 비탈면 끝단에서의 동수경사 해석결과를 침투 지속시간에 따라 도시한 것이다. 침윤선 해석결과와 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 계산시간 간격을 1시간 이하로 설정한 결과와 24시간으로 설정한 결과를 살펴보면 동수경사의 크기가 대략 2배 이상 차이가 나고 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 해석결과는 침투 안정성 해석에 있어 중대한 문제를 야기할 수 있다. 즉, 부적절한 계산시간 간격을 이용하여 침투해석을 시행할 경우 실제 혹은 최적화 된 계산시간 간격의 해석결과보다 매우 작은 수치를 도출하게 되어, 제방 안정성이 미 확보된 구간을 검토하지 못할 수 있다.

그림 5는 계산시간 간격에 따라 침투 해석결과를 도시한 것이다. 가로축은 계산시간 간격이며,

세로축은 동수경사이다. 각각의 기호는 동일한 침투지속시간에서의 결과를 도시한 것으로, 계산시간 간격이 1시간 이하가 되면 거의 동일한 해석결과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 유사한 연구로 건설성(2002)의 연구에서는 “계산시간 간격은 입력하는 외력조건 등과 밀접한 관계가 있으며, 통상 외력조건으로 작용하는 홍수과형은 1시간 간격을 기준으로 작성하므로 계산시간 간격은 1시간 이하로 한다”고 제시 되어 있다. 두 연구결과와 접근방식이 다소 상이하기는 하지만, 결과적으로는 거의 유사한 내용을 포함하고 있다. 즉, 침투 수치모형의 계산시간 간격은 외력조건을 고려하여 1시간 이내로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

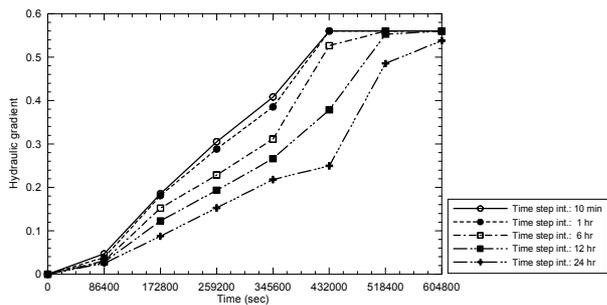


그림 4. 제내지 비탈면 끝단에서의 동수경사 해석결과

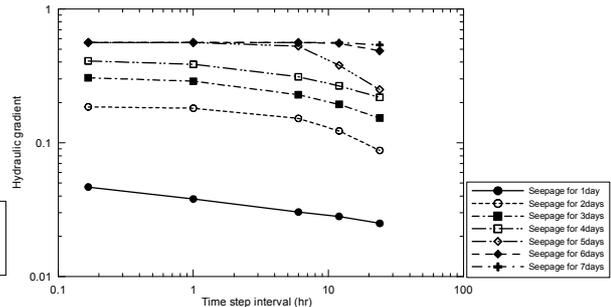


그림 5. 계산시간 간격에 따른 해석결과

#### 4. 결 론

침투 해석 수치모형은 비포화 영역의 제방 침투 현상 해석과 방지기법 설계에 있어 매우 유용한 방법이나, 각각의 수치모형은 적용상 한계와 문제점을 내포하고 있다. 따라서 정확한 침투해석을 위해서는 이에 대한 평가가 선행되어야 한다. 침투 해석 수치모형에 영향을 미치는 인자는 토질 특성, 역학적 특성, 열역학적 특성, 화학적 특성, 그리고 입력 조건 등이 있다.

본 연구에서는 침투 해석 수치모형에 영향을 미치는 인자 중 격자 크기와 시간 간격 같은 입력 조건의 적절한 범위를 검토하였다. 격자 크기의 경우, 계산시간과 해석결과 등 수치모형의 효율성을 고려하여 제외지 혹은 제방고의 1/10이하로 결정하면 타당할 것으로 판단된다. 또한 침투 수치모형의 계산시간 간격은 외력조건을 고려하여 1시간 이내로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

#### 참 고 문 헌

1. 건설성 (2002), 일본의 하천제방설계지침.
2. 임동균, 여홍구, 김규호, 강준구 (2006). “제방 침투 수치해석 모형의 적합성 분석”, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, Vol 39(3), pp.241-251.
3. Geo-Slope International Ltd. (2001), SEEP/W for finite element seepage analysis, Version 5, users manual. Calgary, Alta.