

지하굴착지반에서의 3차원 지하수흐름에 관한 신뢰성해석 Reliability approach to three-dimensional groundwater flow analysis in underground excavation

장연수¹⁾, Yeon-Soo Jang, 김홍석²⁾, Hong-Seok Kim, 박준모³⁾, Joon-Mo Park,

¹⁾ 동국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Env. Eng., Dongguk University

²⁾ 동부엔지니어링(주), Dongbu Engineering, Co., Ltd.

³⁾ (주)건일엔지니어링, Kunil Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this paper, a reliability-groundwater flow program is developed by coupling the 3-D finite element numerical groundwater flow program with first and second order reliability program. The numerical groundwater program developed called DGU-FLOW is verified by solving the examples of groundwater flow through the underground excavation and comparing the results with those of commercial MODFLOW 3D programs. Reliability routine of the program is also verified by comparing the probability of failure of the flow model from FORM/SORM with that of Monte-Carlo Simulation. The difference of out-flux and total head calculated near the bottom of the excavation using the deterministic 3D groundwater flow and the commercial programs was negligible. The reliability analysis of the groundwater flow showed that the probability of failure from the first and second order reliability method are quite close that of Monte-Carlo Simulation. Therefore, the developed program is considered effective for analyzing the groundwater flow with uncertainty in hydraulic conductivity of the soils.

Key words : Underground excavation, Reliability analysis, Groundwater drawdown, Deterministic model, Uncertainty

1. 서 론

최근까지 지하굴착 및 터널공사에서 지하수 영향을 고려한 안정성을 평가하는데 고려되는 지반정수들은 항상 일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 입각한 확정론적 방법을 일반적으로 많이 사용하고 있다. 즉, 평균에 중점을 두고 지하수 흐름해석을 실시하여 안정성여부를 판정한다. 그러나 지반정수는 지반의 형성당시 또는 현재의 외부환경적인 요인에 따라서 위치 및 시간에 따라 그 특성이 다르며 또한 시험방법과 표본개수에 의해서도 인위적인 오차를 내포하게 된다. 이러한 불확실성은 우리가 대상지반에 대한 지반조사 자료의 분산특성을 살펴보더라도 쉽게 확인할 수 있는데, 고정된 평균값만을 이용하는 기존의 확정론적 이론에 의한 지하수 흐름해석은 지반정수들의 분산성을 고려할 수 없어 정확도에서 한계가 있다. 따라서 대상구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 확정론적해석 뿐만 아니라 불확실성이 크거나 작은 곳을 구별하기 위한 수단으로서의 신뢰성해석이 필요하다.

신뢰성 해석이란 확률론적 접근방법에 의한 해석으로 지반정수들이 내재하고 있는 불확실성을 고려하기 위하여 각 정수들을 분산특성을 갖는 확률변수로 취급하여 해석하는 방법이다. 신뢰성 해석은 파괴의 가능성을 정량적인 파괴확률로서 산정하게 되며, 확률변수의 변동에 따른 파괴확률의 변화 역시 알 수 있다. 따라서 불확실성을 정량적으로 나타내는 신뢰성 해석은 기존의 정성적인 개념의 안전계수를 이용하는 확정론적인 해석의 문제점을 보완할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

확률론적 해석방법에 대한 필요성은 기존의 해석방법에 대한 필요성과 상반되는 것이 아니라 오히려 그 연장선상에서 분산특성을 고려하여 합리적인 해를 구하려는 관점에서 그 적용성을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 실제로 확률론적 해석을 할 경우 기존의 확정론적 해석에서 구한 해를 기반으로 하여 확률론적 해석을 추가로 수행하는 것이 대부분이다. 신뢰성 해석은 해석해의 단순한 통계적 특성에만 초점을 맞추는 것이 아니라 다양한 분산특성을 갖는 지반정수들로 인해 발생하는 해석결과들의 분산특성들로부터 그 대상구조물이 얼마나 안전한가를 파괴확률을 정량적으로 구하여 평가하고 확정론적 해석의 문제점을 보완하는데 있다.

본 연구는 기존의 지반구조물 설계시 안전계수를 적용한 확정론적 방법의 불합리한 점을 개선하기 위하여 체계적인 신뢰성 이론에 근거를 둔 보다 합리적이고 사용이 간편한 유한요소기법을 적용한 3차원 지하수흐름에 관한 신뢰성 해석프로그램을 제작하고, 실제 적용성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구동향

Warren and Price(1961)은 통계학적 지하수 흐름모델링을 최초로 제안한 연구자들로, 이들은 정상류 및 부정류 흐름의 수치해석에서 균열된 암반의 투수계수를 통계학적 기법을 사용하여 결정하는 연구를 수행하였다. McMilan(1966)은 수두가 확률밀도함수, 평균 동수경사 및 모델이산화(model discretization)에 의해 어떻게 영향을 받는지에 대한 조사 수행을 위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 연구를 수행하였다. 1, 2, 3차원 흐름해석 평가에는 유한차분법을 사용하였고, 유한차분 격자망의 크기, 형상 및 배치는 통계학적 해석에 거의 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었다.

Bibby and Sunada(1971)는 피압 부정류 흐름상태 조건하에서 수리지질학적 상수들의 오차가 수두에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유한차분법에 의한 흐름해석과 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 연구를 수행하였다. 초기수두에서의 오차가 수두의 불확실성에 가장 크게 영향을 미친다는 연구결과를 나타냈다. Sagar and Kiesel(1972)은 Theis 해를 이용한 피압대수층 해석시 수리상수의 측정오차와 시간에 따른 오차누적에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 Theis 해는 Bibby and Sunada (1971)의 결과와 마찬가지로 초기수두에 가장 큰 민감도를 보였으며, 가장 작은 민감도를 보인 파라미터는 저류계수인 것으로 발표하였다. Gelhar(1976)은 대수층의 1, 2차원 정상류 흐름에 대해 투수계수가 로그정규분포를 가진다고 가정하여 연구를 수행하였으며, 수두의 불확실성이 투수계수의 불확실성보다 더 큰 영향을 준다는 연구결과를 얻었다. Sagar(1978)는 처음으로 비균질 다공질매체를 통한 흐름해석에 Taylor 급수 근사법을 적용한 유한요소 방정식을 개발하였으며, 각 확률변수에 대한 확률밀도함수가 평균값 근처에서 최대가 되는 것으로 가정하였고, 간단한 일차원 예제에 대하여 해석적 접근을 시도하였다.

일계이차모멘트라고도 불리는 일계 Taylor 급수 접근법은 Choot(1980)와 Hachich(1981)에 의해 댐, 성토사면 등과 같은 구조물 하부를 통한 추계학적 침투해석을 수행하면서 이용하였다. Choot(1980)는 댐 제체 중앙하부에서 불확실성에 가장 크게 영향을 미치는 요인은 정수두 경계조건의 변동량(scale of fluctuation)인 것으로 분석하였다. 흥미로운 점은 Choot는 일계 2차모멘트 결과는 유한요소모델의 이산화(discretization)에 대하여 아주 민감한 것으로 나타나 일계이차모멘트법의 정확도를 위해서 보다 더 세밀하게 이산화하는 것을 제안하는 과거 연구결과를 한층 발전시켰다.

Dettinger and Wilson(1981)은 불확실한 흐름특성을 가진 다공질 매체에서 정상류와 부정류 조건을 갖는 수치해석모델에 대하여 일계 및 이계 Taylor 급수 해석방법을 개발하였다. 이들은 일계 해석법은 Monte Carlo simulation보다 효율적으로 신뢰성 해석을 할 수 있다고 하였다. Sagar and Clifton(1983)는 Hanford 지역에 대해 지하수 흐름 불확실성에 관한 수치해석적 연구를 수행하였다. 이들은 이계 Taylor 급수 해석법은 수두의 불확실성을 추정하는데 보수적으로 평가한다고 하였으며, 수두상관성이 수리전도도의 상관성 보다 크고, 수두상관성은 수평흐름시보다 수직 흐름에서 더 크게 영향을 받으며, 수두분산은 정수두경계 사이의 중앙의 노드에서 가장 크다고 하였다. Townley and Wilson(1985)은 지하수 흐름해석에서 여러 가지 이유로 민감도에 대한 평가가 필요하며, 민감도는 일계 2차 모멘트 Taylor 근사법과 최적화문제에서 비선형 gradient를 찾는 데에도 필요하다고 주장하였다. Sykes et al.(1985)

는 모델 내 수두와 흐름속도의 민감도를 산정하기 위한 adjoint 기법을 적용하였으며, 모델 내 수두는 경계조건에 대해 가장 민감하였고, 흐름속도는 투수계수 값에 가장 민감하다고 평가하였다. 장연수(1995)는 점토차수재를 통한 오염물질 이동의 해석을 위해 다공질 매체를 통한 일차원 오염이동 수치해석 모델을 이용하여 신뢰성 해석을 실시하였다. 확률해석에 사용된 입력변수중 투수계수의 공간 및 국부(local) 분산도가 가장 민감하다고 하였다.

정일문 등(1998)은 지하공동주변 매질의 불균일성을 고려한 수두의 불확실성에 대해 연구를 수행하였는데 수리전도도의 공간적인 변동을 고려하여 수두의 불확실성을 해석하고 그에 따른 영향을 고찰하였다. Monte Carlo 기법을 이용하여 연구를 수행하였으며 수리전도도의 표준편차가 클수록 수두값의 표준편차가 커지게 되고 동수경사가 큰 지역인 공동의 직상부와 수막주변 그리고 경계조건에서 먼 지역에서 불확실성이 크게 나타나기 때문에 지하 공동의 설계시 수리전도도의 공간적 변동성을 고려하여야 한다고 결론지었다.

본 연구에서는 3차원적 지하수 거동을 분석할 수 있는 3차원 유한요소 해석프로그램을 제작하고 지반정수들의 분산특성을 고려한 3차원 지하수거동에 대한 신뢰성 프로그램을 제작하였다. 또한 기존 문헌 고찰결과, 신뢰성 해석에 관한 연구에서 적용한 지반정수들의 분포특성은 투수계수의 경우에는 로그정규분포를 수두에 대해서는 정규분포를 주로 사용하였으므로 본 연구에서도 이를 적용하였다.

3. 이론적 배경

3.1 3차원 지하수흐름해석 이론

본 연구에서는 3차원 Darcy 법칙과 연속방정식을 이용한 단일 2계 편미분방정식을 식(1)과 같이 3차원 지하수흐름의 지배방정식으로 정의하였다.

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, K_x , K_y , K_z 는 x, y, z방향의 투수계수이며, $\partial^2 h / \partial x^2$, $\partial^2 h / \partial y^2$, $\partial^2 h / \partial z^2$ 는 각 방향으로의 수두변화, S_s 는 저류계수, $\partial h / \partial t$ 는 시간변화에 따른 수두변화이다.

지배방정식을 가중잔차법의 하나인 Galerkin 법으로 접근하여 유도된 식(2)와 같은 유한요소 방정식을 이용하여, 수치해석 프로그램을 구성하였다.

$$\int_v ([B]^T [D] [B]) dv \{H\} + \int_v (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dv \{H\}_{,t} = q \int_v (\langle N \rangle^T) dv \quad (2)$$

여기서, 좌변 1항은 강성행렬(stiffness matrix), 2항은 체적행렬(mass matrix), 우변은 흐름 벡터(flux vector)이다.

3.2 지하수흐름에 관한 신뢰성해석 이론

3.2.1 신뢰성해석의 기본이론

신뢰성 해석을 수행하기 위한 설계기준은 안전(safety)과 파괴(failure)를 판단할 수 있는 기준이 된다. 설계기준은 관심이 되는 구성요소의 거동을 정의하는 함수로 정식화되며, 구성요소는 대상물에 가해지는 하중요소(L)와 그에 저항하는 저항요소(R)로 표현할 수 있다. 식 (3)과 같은 설계기준식은 해석대상의 파괴양식에 따라 유도된 식으로 한계상태함수(limit state function), 안전여유(safety margin) 등의

용어로 사용되고 있다.

$$Z = R - L \tag{3}$$

여기서, 저항요소가 하중요소보다 큰 경우 ($R > L$)이면 구조물이 안전한 경우이고, $R < L$ 이면 구조물의 파괴가 발생한 경우이므로, $Z=0$ 은 구조물의 안전과 파괴의 경계가 되는 한계상태(limit state)가 되고, 그림 1과 같이 확률변수의 확률밀도함수로 표현할 수 있다.

이와 같은 개념을 지하수 흐름문제에 적용하면, 투수계수, 저류계수, 지하수위 등 지하수흐름에 관한 영향인자들은 특정한 확률분포와 통계적특성을 갖는 확률변수로 간주되며, 지반특성에 내재된 불확실성을 합리적으로 해결할 수 있도록 한다. 즉, 지하수흐름에 관한 영향인자가 극단적으로 크거나 작아서 지반굴착시 목표하는 유량을 초과할 수도 있고, 그렇지 않을 수도 있는 확률을 부여하는 것이다.

굴착지반에서 지하수흐름에 의한 파괴(failure)는 수치해석에 의해 산정된 유량(Q_{model})이 목표로 하는 유입수량(Q_{target})을 초과할 경우로 식 (4)와 같이 정의한다. 이에 대한 한계상태함수를 식 (5)와 같이 정식화 할 수 있으며, 목표 유입수량을 초과할 확률은 식 (6)과 같다. 파괴확률(P_f)은 Monte-Carlo 시뮬레이션(M.C.S)과 같은 추출법이나 일계 신뢰성 분석법(FORM, first-order reliability method), 이계 신뢰성 분석법(SORM, second-order reliability method)과 같은 근사법으로 산정할 수 있다.

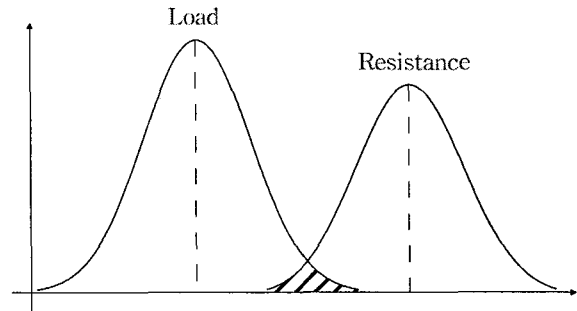


그림 1. 파괴확률 개념도

$$P_f = P(Q_{model} \geq Q_{target}) \tag{4}$$

$$Z = g(X) = Q_{target} - Q_{model} \tag{5}$$

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(X) \leq 0} f_x(x) dx \tag{6}$$

3.2.2 확률변수의 불확실성

초기 확률론적 해석은 투수계수(hydraulic conductivity, K)와 투수량계수(transmissivity, T)와 같은 지반정수를 정의하기 위한 적당한 확률밀도함수(PDF)를 구성하는데 관심을 두었다. Law(1944)는 최초로 원유 저장소의 투수계수를 로그정규분포로 제안하였으며, Bulnes(1946), Warren et al.(1961), Bennion and Griffiths(1966) 등이 이에 대한 연구를 뒷받침하였다. Willardson and Hurst(1965)는 시추공의 토질 표본의 데이터를 검토한 결과 투수계수는 로그정규분포를 나타내는 것으로 연구되었으며, Brust et al.(1969), Nielsen et al.(1973)는 표토에 대한 시험결과에서도 동일한 결과를 얻었다. McMillan(1966)는 캘리포니아의 대수층을 평가한 결과 투수량계수는 로그정규분포인 것으로 연구되었다.

Freeze(1975)는 투수계수와 투수량계수를 로그정규분포로 가정하여 입증한 결과를 보여주었으며, Neuman(1982)은 추가적으로 투수량계수, 비유량, 흙의 입도가 로그정규분포임을 발견하였다. 이들 논문에서 투수계수와 투수량계수가 음의 값으로 표시되기 때문에 확률변수는 항상 0보다 작은 값으로 정의된다. Freeze(1975)는 자연상태에서 일반적인 흙과 암반에 대한 투수계수(log K) 값은 +3~9 정도로 예측하였으며, 실제 흙과 암반의 투수계수를 조사한 결과 투수계수의 평균값은 -2.68~-5.60 log cm/sec, 표준편차는 0.20~1.56 log cm/sec의 값을 갖는 것으로 나타났다. Delhomme(1979)은 13개의 유럽 대수층에서 투수량계수의 평균값과 분산을 조사하였는데, 대부분의 평균값은 -2.0 ~ -3.0 log

m²/sec로 조사되었으며, 분산범위는 0.12 ~ 0.98 m²/sec으로 나타났다.

Mantoglou et al.(1982)은 지구통계학적 기법 중 하나인 Turning Banks Method를 사용하여 공간적으로 상관된 수리전도도와 분배계수의 무작위성 분포재생을 수행하였다. 수문지질학적 주요 매개변수인 투수계수는 그 크기가 공간상에서 불규칙적으로 변동하며, 많은 연구에 의해 투수계수의 변동성 (Variability)이 대수정규분포에 의해 묘사될 수 있다는 사실이 입증되었다(Freeze, 1975; Schwartz, 1977; Woodbury & Sudicky, 1992).

3.2.3 신뢰성 분석법

신뢰성해석에서는 각 확률변수의 평균과 분산, 그리고 분포형태만을 이용하여 파괴확률에 대한 상대적인 지표인 신뢰도지수를 근사적으로 산정하는 일계 및 이계 신뢰성 분석법과 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률, 즉 파괴확률을 상대적으로 정확하게 산정하는 추출법이 있다.

일계 및 이계 신뢰성 분석법은 신뢰도지수의 기하학적 의미에 기초한 모멘트법을 이용하고 있으며, 추출법에 의한 파괴확률의 직접적인 산정보다 계산에 요구되는 노력과 시간이 현저하게 줄어들게 되고 가장 파괴가 발생하기 쉬운 각 설계변수의 값을 설계점(design point)의 좌표로부터 파악할 수 있으므로 현재 가장 많이 이용되는 신뢰성 해석법이다.

추출법은 특별한 경우를 제외하고는 해석적인 방법만으로 파괴확률을 엄밀하게 산정하기가 어려운 경우가 대부분이어서 충분한 횟수의 모의실험(simulation)을 통하여 파괴확률을 근사적으로 산정하는 방법을 주로 이용하는데, 대표적인 방법으로는 Monte-Carlo Simulation이 있다.

본 연구에서는 신뢰성 해석결과의 유효성을 검증하기 위하여 확률변수(투수계수, 지하수위)의 값을 한계상태식에 대입하여 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률을 산정하였는데, Monte-Carlo Simulation로 추정된 파괴확률의 정확성을 보장하기 위하여 Shooman(1968)이 제안한 오차 추정식으로부터 유의수준 5%, 파괴확률이 10⁻³ 일 경우에 대하여 표본추출횟수(N)를 10,000회로 결정하였다.

3.2.4 민감도 분석

확률변수의 평균 및 표준편차의 변화에 대한 파괴확률의 변화를 해석하는 민감도 분석(sensitivity analysis)은 정규화된 무차원계수로 확률변수의 상대적인 중요도를 파악할 수 있는 기준이다. 일계신뢰성 해석법에서 확률변수에 대하여 기대되는 파괴확률과 신뢰도지수에 대한 민감도를 측정함으로써 민감도 분석을 다음 식 (7) ~ 식 (9)와 같이 수행할 수 있다.

$$\beta = \sqrt{u^t u} : minimize, \quad u = (X - \mu) / \sigma, \quad (7)$$

$$u^{k+1} = \frac{G_u^{kT} u^k - g(u^k)}{G_u^{kT} G_u^k} G_u^k, \quad G_u^k = \left\{ \frac{\partial g}{\partial u_1}, \frac{\partial g}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial g}{\partial u_n} \right\}^T \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{u^{*T} u^*} = \frac{G_u^{*T} u^*}{\sqrt{G_u^{*T} G_u^*}}, \quad \alpha = \frac{G_u^{*T}}{\sqrt{G_u^{*T} G_u^*}} \quad (9)$$

여기서, β 는 한계상태함수의 평균(μ)과 표준편차(σ)의 비로 정의되는 신뢰도지수(reliability index), X는 확률변수, g는 한계상태함수, α 는 민감도이다.

4. 신뢰성해석

4.1 3차원 지하수 흐름해석 프로그램 검증

4.1.1 검증 개요

검증에 이용된 흐름영역은 그림 2와 같이 폭이 200m, 길이가 200m이며, 대수층의 두께가 40m인 부지에 폭 40m, 길이 50m의 직사각형 단면으로 심도 15m까지 굴착된 것으로 설정하였다. 굴착단면의 벽면은 흐름이 없는 것으로 가정하였으며, 수치해석 해석영역은 경제성과 대칭성을 고려하여 1/4 단면으로 모델링 하였다.

검증대상 흐름영역의 지반구성은 그림 2에 나타난 바와 같이 매립토층, 퇴적토층, 풍화토층, 풍화암층으로 이루어진 비균질대수층으로 모사하였으며, 각 토층의 투수계수는 표 1과 같이 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/sec} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 로 분포하는 것으로 가정하였다. 지반굴착단면에는 압력수두가 작용하지 않도록 25m의 위치수두만을 부여하고, 흐름영역의 경계면에는 정수두 경계조건으로 35m의 지하수위를 부여하였다.

수치해석프로그램의 검증에 이용된 3차원 지하수 유동 수치해석프로그램은 1983년에 미국지질조사소에서 개발되었으며, 유한차분법을 채택하고 있는 MODFLOW (A Modular Three-Dimensional Ground-Water Flow Model, version 2.6)로 현재 전세계적으로 가장 범용되고 있는 프로그램이다.

4.1.2 유입수량 및 전수두분포 비교

굴착단면에 대한 3차원 지하수 흐름해석을 통하여 계산된 지하수 유입량과 대수층 내의 수두분포를 나타내고, 두 수치해석프로그램간의 정확성을 비교 검토하였다. 굴착단면으로 유입되는 지하수 유입량은 본 해석프로그램(DGU FLOW)과 MODFLOW 3D에서 각각 $94.52 \text{m}^3/\text{day}$, $87.35 \text{m}^3/\text{day}$ 로 약 7.59%의 오차를 보였다.

지반굴착 굴착시 지하수 유동에 의한 전수두를 그림 2와 같이 가로, 세로 방향의 연직단면과(A-A', B-B'선)과 수평단면(C-C')으로 구분하고, 53개 지점에서 전수두를 계산하여 그림 3에 산포도로 나타내었다. DGU FLOW와 MODFLOW에 의해 산정된 전수두의 평균오차는 0.054m로 DGU FLOW의 해석결과가 크게 나타나고 있으나, 오차의 크기가 매우 작아 무시할 수 있는 것으로 평가되었다.

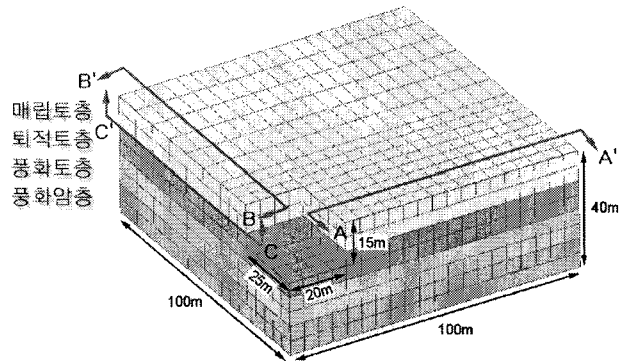


그림 2. 3차원 비균질대수층의 흐름영역

표 1. 검증에 이용된 비균질대수층의 물성치

구 분		입력물성치(m/sec)
투수계수 (K, m/sec)	매립토층	1×10^{-5}
	퇴적토층	5×10^{-6}
	풍화토층	1×10^{-6}
	풍화암층	1×10^{-7}
경계조건 (H, m)	굴착면 지하수위	D.L (+) 25
	지표면 지하수위	D.L (+) 35

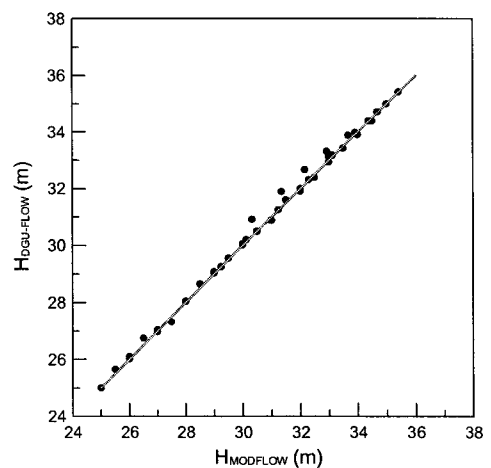


그림 3. 전수두 산포도

4.2 신뢰성해석 적용

4.2.1 검증 개요

3차원 비균질대수층에 대한 신뢰성 해석은 지하수흐름해석 프로그램의 검증에 이용된 흐름영역을 동일하게 사용하였다. 신뢰성해석에 이용된 확률변수의 평균값은 표 1과 같으며, 지표면 지하수위의 분산계수는 0.1, 투수계수의 분산계수는 0.5로 문헌에서 제시하고 있는 일반적인 값으로 가정하였다. 비균질대수층에서 다음과 같은 경우에 대하여 신뢰성 해석을 실시하고 그 결과를 비교, 검증하였다.

- ① 확정론적 해석에 의해 산정된 굴착단면으로의 유입수량(목표유량)을 안전율이 1.0인 경우로 가정하고, 안전율을 증가시키면서 유입수량을 초과할 확률(파괴확률)을 계산하였다. 계산된 파괴확률을 Monte-Carlo Simulation에 의해 산정된 파괴확률과 비교함으로써 신뢰성해석프로그램의 정확도를 검증하고, 민감도 분석을 통하여 유입수량의 영향이 가장 큰 확률변수를 파악하였다.
- ② 민감도가 가장 큰 확률변수(투수계수)의 평균값을 변화시켜 신뢰성 해석을 수행하고 파괴확률의 변화를 파악하였으며, 확률변수의 분산계수가 파괴확률에 미치는 영향 및 파괴확률과의 연관성을 검토하였다.

4.2.2 안전율에 따른 파괴확률과 민감도분석

신뢰성 해석으로부터 수치해석에 의해 산정된 유입수량을 초과할 확률은 안전율이 증가할수록 파괴확률이 감소하는 경향을 보였다. 안전율이 1.0일 경우에 확률변수의 평균값으로 파괴확률은 50.00%로 계산되었으며, 안전율이 2.48 이상인 경우에 토공사의 허용파괴확률(0.1%) 이하로 감소하는 것으로 평가되었다. 일계 및 이계신뢰성 해석법에 의한 파괴확률은 그림 4와 같이 거의 일치하는 것으로 계산되었다. 일계 및 이계신뢰성 해석법에 의한 파괴확률과 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률은 0.03~4.50% 정도의 차이를 보였으며, 파괴확률의 값이 작아질수록 두 분석법의 파괴확률의 차이는 감소하였다.

확률변수의 평균값에 대한 파괴확률의 민감도는 표 2와 같이 심도 10.0~20.0m에 위치한 퇴적토층의 투수계수가 가장 큰 것으로 분석되었으며, 매립토층의 투수계수 > 지표면 지하수위 > 풍화암층의 투수계수 > 풍화토층의 투수계수 순으로 나타났다. 그러나 투수계수와 지표면 지하수위의 분산계수 차이를 고려하면 실제 민감도는 지표면 지하수위가 가장 큰 것으로 판단되며, 이는 Bibby and Sunada(1971), 정일문(1998) 등 여러 연구자들의 연구결과와도 일치하고 있다. 지표면 지하수위와 퇴적토층의 투수계수의 평균값이 증가할수록 파괴확률은 증가하며, 반면에 이외의 토층에서는 투수계수가 감소할수록 퇴적토층의 수평흐름을 발달시키기 때문에 파괴확률은 증가하는 것으로 나타났다. 확률변수의 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도 분석결과, 확률변수에 상관없이 표준편차가 증가할수록 파괴확률은 증가하는 것으로 평가되었다.

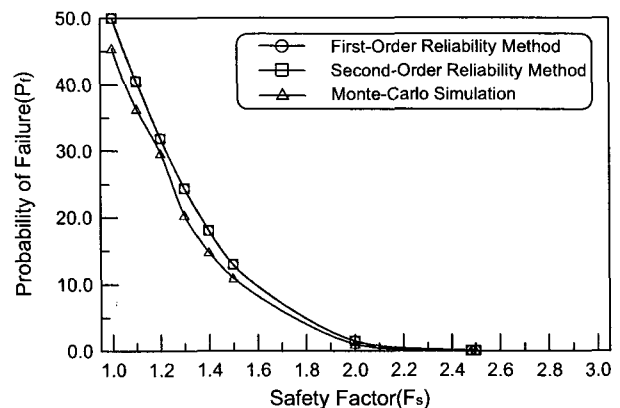


그림 4. 3차원 비균질대수층에서 안전율에 따른 파괴확률

표 2. 파괴확률의 민감도 분석($P_f = 0.1\%$)

확률변수	$\frac{dP_f}{d\mu}$	$\frac{dP_f}{d\sigma}$	$\frac{dP_f}{d\lambda}$	$\frac{dP_f}{d\xi}$
지표면 지하수위	8.31×10^{-4}	2.21×10^{-3}	8.31×10^{-4}	2.21×10^{-3}
매립토층	$-4.12 \times 10^{+2}$	$3.26 \times 10^{+2}$	-2.49×10^{-3}	2.68×10^{-3}
퇴적토층	$3.78 \times 10^{+2}$	$2.93 \times 10^{+2}$	2.62×10^{-3}	2.97×10^{-3}
풍화토층	$-1.19 \times 10^{+2}$	$4.25 \times 10^{+1}$	-9.74×10^{-5}	4.11×10^{-6}
풍화암층	$-4.07 \times 10^{+2}$	$1.39 \times 10^{+2}$	-3.37×10^{-5}	4.92×10^{-7}

4.2.3 평균값에 따른 파괴확률의 변화

퇴적토층의 투수계수는 굴착단면의 유입수량에 가장 영향을 크게 미치는 확률변수이므로 퇴적토층 투수계수의 평균값 변화가 파괴확률에 미치는 경향을 분석하였다. 여기서, 퇴적토층 투수계수의 분산계수는 항상 동일한 것으로 가정하였다.

퇴적토층의 투수계수가 5.00×10^{-6} m/sec 일 경우에는 평균값을 이용한 확정론적 해석 결과와 일치하므로 파괴확률이 50.0%로 계산되었으며, 평균값이 1/5로 감소되었을 경우 파괴확률은 0.54%로 약 1/100이 감소하였다. 평균값이 1/10로 감소되었을 경우에는 파괴확률은 1/2500이 감소된 0.02%로 계산되어 평균값과 파괴확률 사이의 비선형적인 상관관계가 있음을 알 수가 있었다(그림 5 참조).

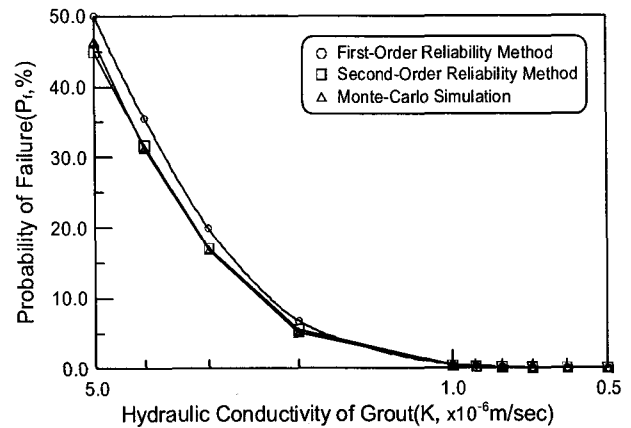


그림 5. 3차원 비균질대수층에서 확률변수의 평균값에 따른 파괴확률

4.2.4 분산계수에 따른 파괴확률의 변화

확률변수의 분산계수에 따른 파괴확률의 경향을 파악하였다. 목표값(target value)은 안전율이 2.48($P_f = 0.1\%$)일 때 목표유량($Q=234.41$ m³/day)을 기준으로 하였으며, 확률변수의 분산계수를 0.1~0.9 범위에서 변화시키면서 신뢰성 해석을 수행하였다.

전반적으로 그림 6과 같이 분산계수가 증가함에 따라 파괴확률도 역시 증가하는 경향을 보였다. 분산계수가 0.1일 때 파괴확률은 약 0.002~0.003%로 계산되었으며, 0.7인 경우 0.50~0.60%로 계산되었다. 분산계수가 비교적 낮은 0.1 이하의 경우에는 Monte-Carlo Simulation에서는 확률변수의 표본추출횟수가 10000번임에도 불구하고 파괴확률이 10^{-5} 이하이기 때문에 파괴확률을 정확히 추정하지 못하였으며, 일계 및 이계신뢰성 해석법에 의한 파괴확률은 거의 동일한 것으로 평가되었다.

분산계수가 0.2~0.5인 경우에는 일계 및 이계신뢰성 해석법과 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률은 약간의 편차를 보였다. 분산계수가 0.3일 경우에 가장 큰 차이를 보였으며, 분산계수가 증가할수록 그 편차는 감소하여 분산계수가 0.6~0.7인 경우에는 신뢰성

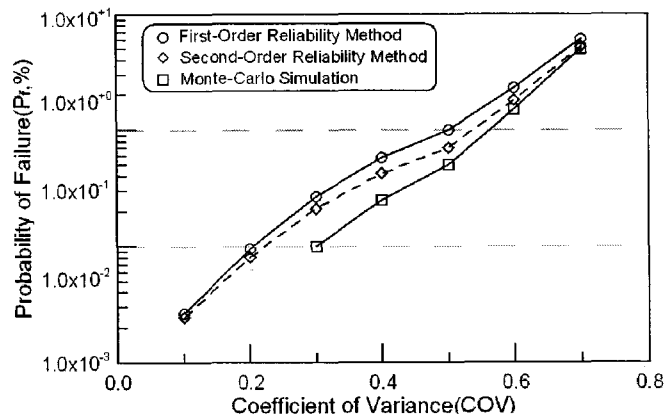


그림 6. 분산계수에 따른 파괴확률

해석법에 따른 파괴확률의 편차는 거의 없는 것으로 평가되었다. 따라서 일계 및 이계신뢰성 해석법은 굴착지반에서 지하수흐름의 신뢰성해석을 수행하는데 효율적인 방법인 것으로 판단된다.

5. 결론

지반굴착시 지하수 흐름에 대한 불확실성을 정량적으로 고려할 수 있는 신뢰성 해석프로그램을 제작하고 신뢰성 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

지반내 지하수의 유동을 평가하기 위해서 3차원 유한요소법을 이용하여 지하수 흐름해석이 가능한 수치해석 프로그램을 제작하였으며, 범용지하수 흐름해석프로그램과 비교 검토하여 프로그램의 적정성을 검증하였다. 비균질 대수층에 대한 3차원 흐름해석에서 유입수량 오차 및 전수두 평균오차가 미소하므로 본 프로그램은 지반굴착에 따른 지하수 해석에 적합한 것으로 판단된다.

지반물성치들의 불확실성을 정량적으로 고려할 수 있도록 지하수 흐름해석 프로그램에 확률통계학적 이론을 이용하여 지하굴착지반의 지하수흐름에 관한 신뢰성 해석을 수행하였고 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률과 비교하여 적정성을 검증하였다. 일계 및 이계신뢰성 분석법을 이용한 파괴확률과 Monte-Carlo Simulation에 의한 파괴확률이 거의 유사하게 평가되었고, 과거 연구결과들과 비교하여 볼 때 본 프로그램은 지하수 유동에 관한 신뢰성 해석에 유효한 것으로 사료된다.

확정론적 해석에서 안전율이 1.5~2.5로 안전하게 평가된 경우에도 신뢰성 해석에서는 파괴확률이 0.72~13.13%로 불안정한 결과를 나타낸 바, 설계시 지반정수의 분산특성을 고려하여야 함을 알 수 있었다.

평균 및 표준편차에 대한 파괴확률의 민감도 분석으로부터 파괴확률에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 매립층의 투수계수이며, 분산계수의 크기를 고려할 경우에는 지표면 지하수위(경계조건)가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

분산계수에 따른 파괴확률의 영향성 평가로부터 COV가 증가할수록 파괴확률도 점차 증가하는 경향을 보이며, 평균값이 파괴확률에 미치는 민감도가 표준편차의 경우보다 큰 것으로 나타나 지하수흐름에 대한 안정성 평가에 있어서 지반정수의 확률분포(평균, 분산)를 정확하게 평가하는 것이 중요하다.

분산계수와 파괴확률은 선형적인 상관관계가 있으며, 지반정수의 평균값과 파괴확률 사이에는 비선형적인 상관관계가 있다. 또한 확률변수 종류에 상관없이 표준편차가 증가할수록 파괴확률은 증가하는 것으로 평가되었다.

그러므로 여러 가지 요인에 의해 불확실성을 내재하고 있는 지반정수를 수치모델의 파라미터로 이용할 경우에는 정수들의 분산특성이 고려되어야 하고 확정론적 해석과 더불어 신뢰성 해석을 병행하는 것이 보다 합리적인 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 사업단의 연구비지원(과제번호 : 3-4-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 장연수 (1995), "점토차수재를 통한 오염물질 이동에 대한 신뢰성 해석", 대한토목학회지, 제 15권, 제 5호, pp. 1405~1416.
2. 정일문, 조원철, 허준행 (1998), "지하공동주변 매질의 불균일성을 고려한 수도의 불확실성 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제 3권, pp. 41-44.
3. Bennion, D. W. and Griffiths, J. C. (1966), "A Stochastic Model for Predicting Variations in Reservoir Rock Properties", *Trans. AIME*, Vol. 237, pp. 9-16.

4. Bibby, R. and Sunada, D. K. (1971), "Statistical Error Analysis of a Numerical Model of Confined Groundwater Flow", *Proceedings of First International Symposium on Stochastic Hydraulics*, C. L. Chiu, pp. 591-612.
5. Brust, K. J., Bavel, C. H. M., and Stirk, G. B. (1968), "Hydraulic Properties of a Clay-loam Soil and the Field Measurement of Water Uptake by Roots", *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 32, pp. 322-326.
6. Bulnes, A. C. (1946), "An Application of Statistical Methods to Core Analysis Data of Dolomitic Limestone", *Trans. AIME*, pp. 223-240.
7. Delhomme, J. P. (1979), "Spatial Variability and Uncertainty in Groundwater Flow Parameters : A Geostatistical Approach", *Water Resource Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 269-280.
8. Dettinger, M. D., and J. L. Wilson, (1981), "First-order Analysis of Uncertainty in Numerical Models of Groundwater Flow", 1, Mathematical development, *Water Resource Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 149-161.
9. Freeze, R. A. (1971), "Three-Dimensional, Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin", *Water Resource Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 347-366.
10. Gelhar, L. (1976), *Stochastic Subsurface Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
11. Mantoglou, A., Wilson, J.L. (1982), "The Tuning Bands Method for Simulation of Random Fields Using Line Generation by a Spectral Method.", *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 1379-1394.
12. McMillan, W. D. (1966), "Theoretical Analysis of Groundwater Basin Operations", *Water Resource Center Contribution*, Vol. 114.
13. Neuman, S. P. (1982), "Statistical Characterization of Aquifer Heterogeneities : an Overview in Recent Trends in Hydrogeology", *Geol. Soc. Am. Spec.*, 184, pp. 81-102.
14. Sagar, B. and Kisiel, C. C. (1972), "Limits of Deterministic Predictability of Saturated Flow Equations", *Proceedings of Second Symposium on Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, International Association Hydraulics Research*, Guelph, Canada, Vol. 1, pp. 194-205.
15. Sagar, B., Galerkin. (1978), "Finite Element Procedure for Analyzing Flow Through Random Media", *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 1035-1044.
16. Schwartz, F.W. (1977), "Macoscopic Dispersion in Porous Media: The Controlling Factors.", *Water Resources Research*, Vol. 13, pp. 743-752.
17. Sykes, J. F., J. L. Wilson and R. W. Andrews. (1985), "Sensitivity Analysis for Steady-state Groundwater Flow using Adjoint Operators", *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 359-371.
18. Townley, L. R., and J. L Wilson. (1985), "Computationally Efficient Algorithm for Parameter Estimation and Uncertainty Propagation in Numerical Models of Groundwater Flow", *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1851-1860.
19. Warren, J. E., Skiba, F. F., and Price, H. S. (1961), "An Evaluation of the Significance of Permeability Measurements", *Journal of Petrol. Tech.*, Vol. 13, pp. 739-744.
20. Willardson, L. S. and Hurst, R. L. (1965), "Sample Size Estimates in Permeability Studies", *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE*, Vol. 91, No. IR1, pp. 1-9.
21. Woodbury, A.D. and Sudicky, E.A. (1992), "Inversion of the Borden Tracer Experiment Data: Investigation of Stochastic Moment Models.", *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 2387-2398.