

불포화 수리특성에 대한 댐체 침투 거동의 민감도 분석

Sensitivity of Seepage Behavior of Dam to Unsaturated Soil Properties

조 성 은¹ Cho, Sung-Eun

Abstract

Seepage analysis through unsaturated zone based on the theory of unsaturated flow is commonly performed to evaluate dam safety. However, the concepts of unsaturated soil behavior have not been transferred into the hands of practicing geotechnical engineers since the problems involving unsaturated soils often have the appearances of being extremely complex. The behavior of dam such as seepage rate and the pore water pressure distribution is different according to the unsaturated hydraulic properties, but nevertheless simply assumed properties have been used due to insufficient data from domestic soils. In this paper, the effect of unsaturated hydraulic properties on the behavior of dam was studied through a series of numerical analyses, and then the results were discussed. It is observed that water table moves at a faster rate, as the values of unsaturated soil parameter a and n increase. The value of m showed opposite trend. The sensitivity calculated using the approximation form showed maximum values near the water table. And the value of n that is related to the slope of soil water characteristic curve gives greatest influence on the change of sensitivity with time.

요 지

댐 안정성 평가를 위하여 불포화 이론을 이용한 침투해석 기법이 널리 사용되고 있으나 지반의 불포화 거동에 대한 인식 부족과 실험절차의 번거로움으로 인하여 입력 물성치에 대한 체계적인 실험과 평가가 일반화되지 못하고 있는 실정이다. 불포화 수리특성에 따라 침투수량 및 간극수압 분포 등 댐체 및 제방의 침투거동이 달라지나 국내 지반에 대한 실험자료 부족으로 대부분 단순 추정치에 의한 값을 사용하고 있다. 본 연구에서는 불포화 수리특성이 댐체의 침투 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 함수특성곡선과 투수계수곡선에 대하여 고찰하고 수치해석을 수행하였다. 해석결과 변수 a 와 n 은 값이 클수록, m 은 값이 작을수록 중력에 의한 침윤선의 하강이 빨리 발생하였다. 유한차분 형식에 의해 개략적으로 계산한 민감도는 침윤선 부근에서 가장 크게 나타났고 시간에 따른 민감도의 변화에는 함수특성곡선의 기울기와 관련된 n 값이 가장 큰 영향을 주었다.

Keywords : Hydraulic conductivity function, Seepage of dam, Sensitivity analysis, Soil water characteristic curve

1. 서 론

필댐은 토질재료, 사력재료, 암재료 등을 잘 조합하여 충분한 저수능력을 갖도록 축조된 구조물이다. 불투수성 토질재료는 차수의 역할을 하며, 단단하게 다져진

상태에서 필요한 투수계수와 전단강도를 가지고 유기물 등의 유해재료를 포함하지 말아야 한다. 사력재료는 불투수성 지역에서의 침투수를 안전하게 하류쪽으로 유하시키기 위해, 견고하게 다져진 상태에서 필요한 전단강도와 배수성을 가져야한다. 필댐 중 코어형

¹ 정회원, 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dam Safety Research Center, Korea Institute of Water and Environment, drsecho@hanmail.net)

필댐의 특징은 최소단면으로서 소요의 차수성을 확보 하려는 데 있다. 그러므로 코어재료에 가장 요구되는 성질은 수밀성이며, 전단강도나 압축성 면에서 다소 불리 하더라도 부득이한 경우가 있다. 코어 재료로서 이상적 인 재료는 0.05mm 이하의 입자를 15~20% 함유하는 입도배분이 좋은 점토, 실트, 모래, 자갈의 혼합물이다. 통일분류법으로 말하면 GC, SC, CL, SM, CH 정도가 적당하고 ML이 그 다음 가며, OL, MH, OH는 부적당하다(댐설계기준, 2003).

필댐에서는 제체 및 기초압반에 저수지에서의 침투가 있다. 침투수의 작용에 의해 제체 내에 간극수압이나 양압력이 발생하고, 침투파괴 혹은 전단저항력의 저하 등의 안정을 손상하려는 현상이 일어나 제체 파괴의 큰 인자가 될 우려가 있다. 또 양수 발전용의 필댐에서는 저수지 수위를 수시간에 30~50m 급강하시키지 않으면 안되는 경우가 있다. 저수지가 급강하하면 제체 내의 침투수에 의한 힘이 경사 아래쪽의 상류측 사면을 향해 작용하기 때문에 활동력이 증가하여 제체의 안정상 바 람직하지 않은 상태가 생긴다. 따라서 필댐의 설계 및 시공에 있어서 침투류에 대한 안정성을 검토할 필요가 있다.

침투류에 대한 안정성 평가 시 불포화 이론을 이용한 침투해석 기법은 자유수면의 취급이 간단하고 복잡한 해석 모델에 대하여 적용성이 뛰어나기 때문에 널리 사용되고 있으나 지반의 불포화 거동에 대한 인식 부족과 실험절차의 번거로움으로 인하여 입력 물성치에 대한 체계적인 실험과 평가가 일반화되지 못하고 있는 실정이다. 불포화 수리특성에 따라 댐체 및 제방의 침투거동이 달라지나 국내 지반에 대한 실험자료 부족으로 대부분 단순 추정에 의한 값을 사용하고 있다. 본 연구에서는 불포화 수리특성이 댐체의 침투 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 함수특성곡선과 투수계수곡선에 대하여 고찰하고 수치해석 기법을 활용하여 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과에 대하여 논하였다.

2. 불포화 침투해석 이론

불포화토를 통한 물의 흐름은 기본적으로 포화토와 같은 물리법칙에 의해 표현될 수 있지만 포화토의 경우와 다른 점은 투수계수가 일정한 값이 아닌, 포화도 또는 모관흡수력의 함수로 주어진다라는 것이다. 포화토 영역의 경우 간극수압이 양의 값을 나타내지만 불포화토

영역의 경우 음의 값을 가진다.

유한요소법을 이용하여 침투를 해석하는 방법은 복잡한 해석영역의 초기조건 및 경계조건 적용이 비교적 용이하여 널리 이용되고 있으며 Taylor와 Brown(1967)에 의해 소개되었다. 이들이 사용한 방법은 자유수면을 결정하기 위하여 상부 경계에 위치한 유한요소들을 압력수두가 0이 될 때까지 조정하는 방법으로 많은 계산이 요구되고 수렴상의 문제를 야기한다. Papagianakis와 Fredlund(1984)는 Taylor와 Brown 방법의 많은 불편한 점들은 자유수면의 위치를 고려하지 않고 포화와 불포화 흐름을 동시에 고려함으로써 극복할 수 있고, 압력수두가 0이 되는 부분이 지하수면임을 보여주었다. 또한 Lam과 Fredlund(1987)는 종래의 정상류 뿐만 아니라, 비정상류 상태를 해석에 포함시켜 해석의 폭을 넓혔다.

2.1 지배방정식

임의 시간에 흐름영역 내의 임의 위치에 있는 요소에서 들어오고 나가는 유량의 차는 체적함수비의 차와 동일하다. 즉, 외부에서 유입되는 유량과 요소 내 유량의 변화량의 합은 체적함수비의 시간에 따른 변화율과 같으며 2차원의 경우 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, H 는 총수두, k_x 와 k_y 는 투수계수, Q 는 작용하는 유량, γ_w 는 물의 단위중량이며 m_w 는 저류용량(specific moisture capacity)이다. 정상상태의 경우에는 모든 시간에서 유입된 유량과 유출된 유량이 같으므로 우변이 0이 된다. 본 연구에서는 식 (1)을 풀기 위하여 유한요소 해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하였다.

2.2 함수특성 곡선(Soil-Water Characteristic Curve)

함수특성곡선은 흙이 함유하는 물과 흙의 모관흡수력(matric suction)의 관계로 정의되며 물의 양은 일반적으로 체적함수비로 표현된다. 함수특성곡선은 임의의 모관흡수력에서의 간극에 함유되는 물의 양, 간극 크기 분포 등에 대한 중요한 정보를 포함하고 있으므로 투수계수, 전단강도 및 부피변화와 같은 불포화 지반의 물성을 나타내는 함수를 유도하기 위하여 사용된다(Siller et al. 2001).

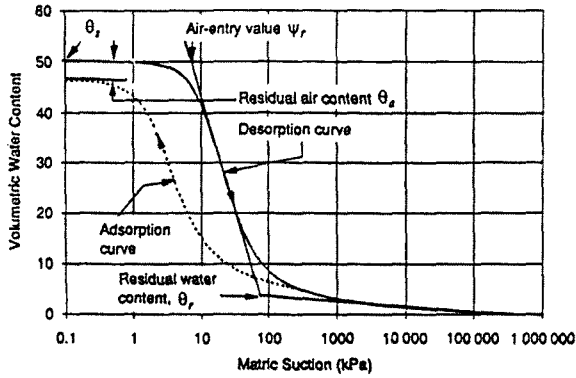


그림 1. 함수특성곡선

전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 1과 같이 S자 형태를 보인다. 포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치(air-entry value)를 초과할 때까지 간극으로부터 물이 유출되지 않는다. 일반적으로 세립분이 많을수록 공기함입치는 커지고 곡선의 기울기는 완만해지는 경향을 보인다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 함수비를 잔류함수비 θ_r (residual water content)라 한다. 그림 1에 표시된 포화함수비 θ_s 는 흙의 최대체적함수비를 의미한다.

2.2.1 Fredlund와 Xing(1994)의 모델

함수특성곡선을 나타내기 위해 많은 수학적 표현이 제안되었으며 이들 모델식에 대한 장점과 단점들에 대하여 많은 문헌에서 논의되었다(Leong and Rahardjo, 1997). Fredlund와 Xing은 전체 흡수력 범위에 적용할 수 있는 3개의 변수를 포함하는 함수특성곡선식을 van Genuchten의 식과 유사한 간극크기 분포로부터 식 (2)와 같이 제안하였다. 이 모델은 다양한 종류의 지반에 대한 적용성이 좋으며, 모델변수가 다른 두 변수의 효과와 구분되는 뚜렷한 물리적인 의미를 가진다.

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2)$$

여기서, a , n , m 은 곡선맞춤 변수이고 ψ 는 모관흡수력이다.

변수 a 는 공기함입치와 관련된 값으로 함수특성곡선의 변곡점에서의 모관흡수력으로 정의된다. 이 값은 함수특성곡선의 모양에는 영향을 미치지 않지만 값이 커질수록 곡선을 모관흡수력이 큰 쪽으로 이동시키는

역할을 한다. 일반적으로 a 는 공기함입치보다는 큰 값을 가지지만 변수 m 이 작은 경우 공기함입치로 정의되기도 한다. 또한 변수 n 은 흙의 간극크기 분포(pore size distribution)와 관련이 있으며, 간극크기 분포가 균등할수록 더 큰 값을 나타낸다. 그리고 변수 m 은 변곡점에 대한 곡선의 대칭성과 관련이 있으며, $m=1$ 인 경우를 제외하고는 변곡점에 대하여 비대칭이다. 또한, m 은 높은 모관흡수력 범위에서 함수특성곡선의 변화와 관련이 있다.

함수특성곡선의 모관흡수력에 대한 일차 미분값은 불포화 지반을 통한 비정상류 투수해석에 사용되는 저류용량 m_w 를 나타내며 간극크기 분포에 대한 정보를 제공한다. 이 기울기는 모관흡수력의 변화에 따른 함수비의 변화율을 나타내며 Fredlund와 Xing의 모델의 경우 다음과 같다.

$$m_w = \frac{\partial \theta_w}{\partial \psi} = \theta_s \frac{nm}{a \left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^{m+1} \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \left(\frac{\psi}{a} \right)^{n-1} \quad (3)$$

2.2.2 ANN을 이용한 함수특성곡선 예측

함수특성곡선은 실험을 통하여 구하는 것이 바람직하지만 실험 시간이 많이 소모되고 복잡하기 때문에 현실적으로 많은 제약이 따른다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 보다 간단한 실험을 통하여 얻어지는 지반물성으로부터 함수특성곡선을 추정하기 위한 연구들이 최근 활발히 진행되고 있다(Rawls and Brakensiek 1985; Vereecken 1989; Arya and Paris 1981; Fredlund and Wilson 1997). 이와 같이 기본물성으로부터 불포화 지반 정수를 추정하기 위한 함수들을 Pedo-Transfer Function (PTF)으로 정의한다. 또한 이러한 PTF를 이용한 추정기법 외에 입도분포곡선에서 얻어지는 조립토와 세립토의 통과백분율, 간극비, 현장함수비 등으로부터 함수특성곡선의 맞춤변수들을 추정하기 위해, 인공신경망이론(artificial neural network theory)을 적용하는 연구도 수행되고 있다(이성진, 2004). 본 연구에서는 이성진(2004)이 제안한 인공신경망 이론을 적용하여 국내에 널리 분포하는 화강풍화토의 함수특성곡선을 추정하는 기법을 활용하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 4-2-1구조를 갖는(인공신경망 이론)을 이용하여 조립질 함유량과 실트 및 점토 함유량, 간극비, 다짐함수비 등 4개의 기본지반 물성으로부터 이론적인 포화함수비와 실험으로부터 얻

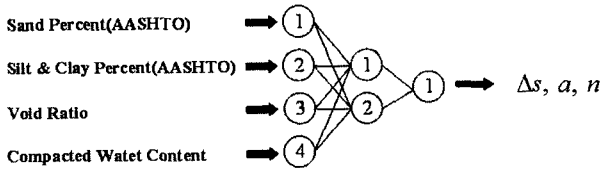


그림 2. 인공신경망을 이용한 함수특성곡선 정수 추정기법

어지는 포화함수비의 차이값(Δs =초기간극률과 포화 체적함수비와의 차)과 Fredlund와 Xing의 함수특성곡선식의 변수 a 와 n 값을 추정하였다. 변수 m 은 국내 풍화토의 경우 1.7로 수렴되는 경향을 보여 상수로 규정되었다.

2.3 불포화 투수계수곡선

모관흡수력에 따른 불포화 투수계수의 변화를 보여주는 불포화 투수계수곡선 또한 침투해석에 있어 중요한 불포화 지반설계 정수이다. 불포화 투수계수곡선은 함수비와 밀접한 관련이 있으며 따라서 유사한 형태를 갖는 함수특성곡선으로부터 추정할 수 있다. Kunze(1968)는 함수특성곡선을 세분화하여 각 구간에 따른 모관흡수력을 이용하여 투수계수값을 유추하였고, van Genuchten (1980)은 자신의 함수특성곡선 이론식의 변수들을 이용하는 투수계수곡선을 제안하였다. 한편 Fredlund 등 (1994)은 다음 식과 같은 적분형식을 통하여 불포화 투수계수곡선을 추정하였다.

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (4)$$

여기서, k_s 는 포화투수계수, y 는 log 적분을 나타내기 위한 적분더미변수, ψ 는 j 번째 간격에 해당하는 모관흡수력, θ' 는 Fredlund와 Xing 함수특성곡선의 미분이다.

김윤기(2003)의 연구결과에 따르면, 국내 화강풍화토에 대한 불포화 투수실험자료를 분석한 결과, Fredlund 등(1994)의 투수곡선식이 실험으로부터 구해진 실제 화강풍화토의 투수계수 변화를 가장 잘 표현하고 있으므로 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 불포화 투수계수를 유추하였다.

3. 댐체의 민감도 분석

민감도 분석은 모델변수에 대한 모델의 반응을 평가하여 모델에 대한 이해를 도모하거나 입력변수, 경계조건 등과 연관된 불확실성으로 인한 모델의 신뢰도 분석을 위하여 실시한다. 민감도는 하나의 변수의 변화에 따른 결과의 변화이므로 민감도계수는 식 (5)와 같이 정규화 된 편미분 형태의 식으로 나타낼 수 있으며 민감도계수를 해석적으로 구하지 못하는 경우에는 미소한 입력변수의 증분으로부터 유한차분식을 이용하여 개략적인 값을 구할 수 있다.

$$S_{i,y} = \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \left| \frac{x_j}{y_i} \right| \approx \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \left| \frac{x_j}{y_i} \right| \quad (5)$$

여기서, i 는 종속변수, j 는 입력변수를 나타내는 첨자이다.

민감도 분석을 위해서는 기준이 되는 기본 입력값(base set)을 정하고 변수의 값을 각각 변화시키면서 모델의 반응을 평가하게 되며 민감도 해석의 결과는 입력값들에 대한 결과값을 도시하거나 입력값들에 대한 민감도계수를 도시함으로써 나타낸다(Williams 등, 1998).

불포화 지반의 흐름에 영향을 미치는 변수로는 포화상태의 체적함수비 θ_s , 잔류체적함수비 θ_r , 공기함입치, 간극 크기 분포, 포화투수계수 k_s 등을 들 수 있다. 이 중 포화투수계수의 경우 그 중요성이 널리 인식되어 있고, 그 값을 구하기 위한 실내실험 및 현장실험이 이미 일반화되어 있다. 또한, 포화상태의 체적함수비 θ_s 는 간극률 n 과 같다고 볼 수 있으므로 기존의 자료로부터 비교적 쉽게 그 값을 구할 수 있다. 그러나 간극 크기 분포, 공기함입치 및 잔류체적함수비는 함수특성곡선의 모양과 직접 관련이 있고 이에 대한 추정이 쉽지 않으므로 이와 관련된 변수들을 대상으로 연구를 수행하였다.

3.1 해석대상

해석대상으로 대표적인 중심코어형 필댐인 소양강댐의 단면을 선정하였다. 댐 단면은 그림 3과 같이 중앙에 코어가 존재하고 코어에 인접한 필터, 사력(sand & gravel), 석괴(rock)로 구성되어 있다. 코어는 SC, SC-SM, SM 재료가 가장 적당한 코어재로 결정되었으나 매장량이 부족하여 부족분은 화강풍화토(SW 70~50%)와 점토(CH,

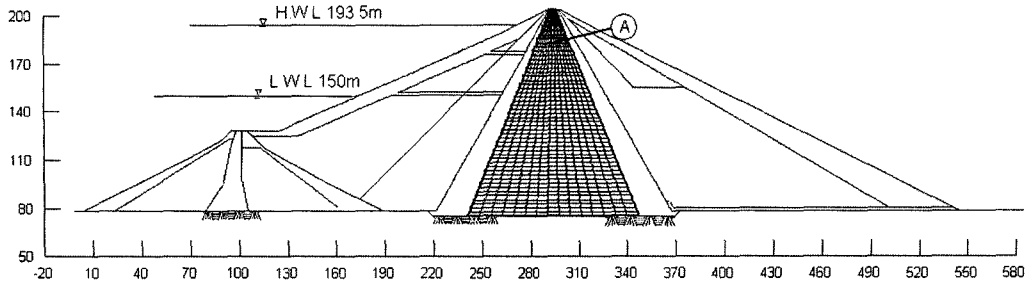


그림 3. 해석단면

CL 30~50%)를 혼합하여 시공되었으며 투수계수는 품질관리시험 결과 $4.6 \times 10^{-9} m/s$ 였다(소양강다목적댐 정밀안전진단보고서, 1999). 소양강댐 코어재의 대표적인 입도분포는 그림 12에 나타내었다.

대상 댐의 코어에 대한 불포화 수리특성 실험이 수행되지 않았으므로 이성진(2004)이 제안한 방법을 이용하여 함수특성곡선을 추정하고 추정된 함수특성곡선과 포화투수계수를 활용하여 불포화 투수곡선을 예측하였다. 표 1은 정밀안전진단 시 시추에 의해 채취된 코어재의 입도분포곡선과 물리적 특성으로부터 얻은 것으로 함수특성곡선을 예측하기 위하여 사용하였으며 이로부터 표 2와 같은 변수들을 예측할 수 있었다. 그림 4에 나타낸 예측된 코어재의 함수특성곡선은 공기함입치는

작은 편이지만 세립분을 상당히 많이 함유하고, 입도분포가 양호한 지반의 특성을 나타내고 있다.

그림 5는 예측된 함수특성곡선을 기준으로 Fredlund와 Xing 모델의 변수들을 각각 변화시켰을 때의 함수특성곡선의 모양과 이로부터 식 (4)를 이용하여 예측한 투수계수곡선을 나타낸다. 함수특성과 투수계수의 변화는 불포화 영역을 통한 수분의 이동에 중요한 영향을 미치므로 이들 특성의 변화에 따른 해석을 수행하여 댐체에 미치는 영향을 평가하였다.

해석대상의 코어재는 균질한 재료로 이루어졌다고 가정하였다. 필터 및 사력 같은 조립재료는 투수계수곡선의 경사가 매우 급해서 물이 빠져나가기 시작하면 쉽게 배수가 되어 투수계수가 급격하게 떨어지므로 불포화영역에서 흐름에 기여하는 바가 거의 없다. 따라서 필터 및 사력영역은 침투해석에서 제외시켰다.

표 1. 예측에 사용된 물성

sand percent	silt & clay percent	void ratio	water content
50%	28.8%	0.6	17%

표 2. ANN에 의해 예측된 변수

Δs	a	n	m
-0.0380	83.084	0.769	1.7

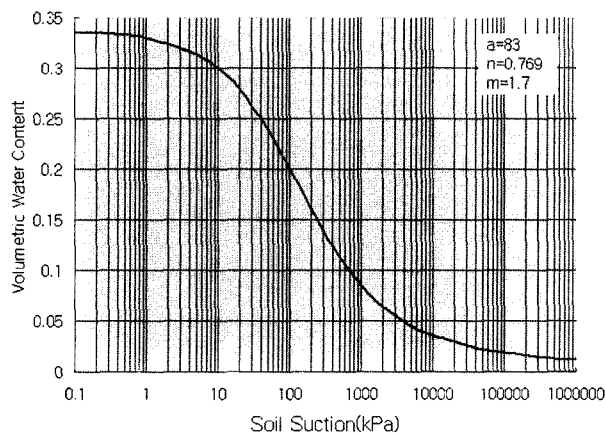
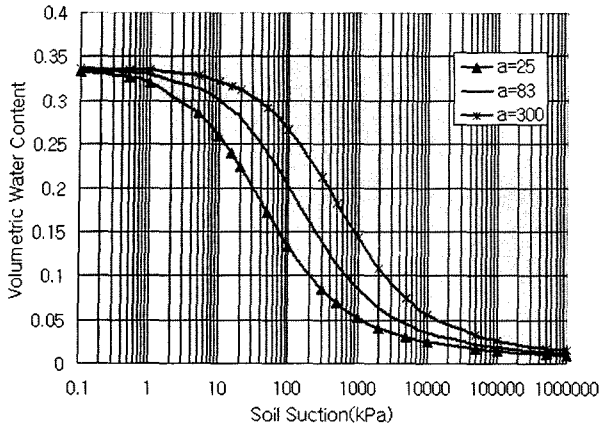


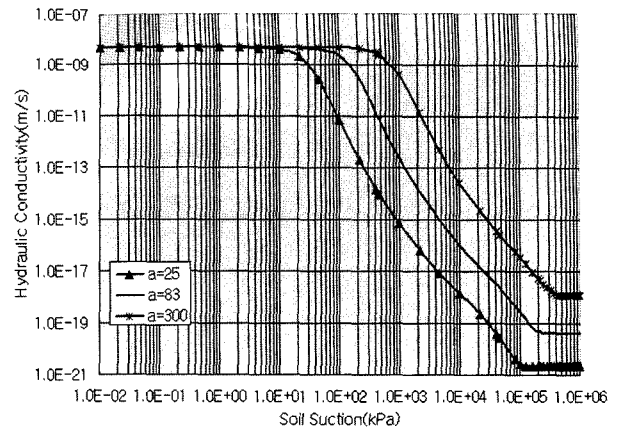
그림 4. 예측된 코어의 함수특성곡선

3.2 정상상태 해석

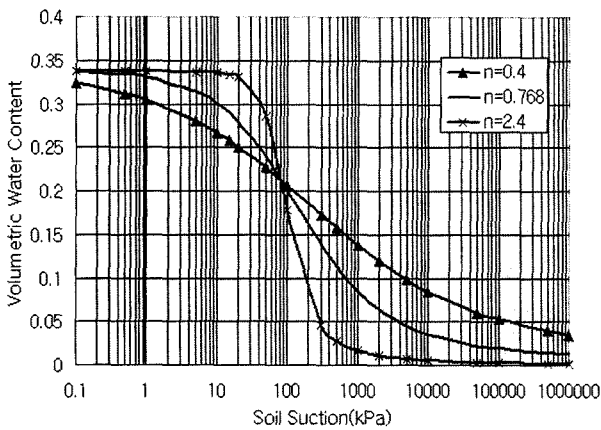
정상상태 흐름에 대한 수리특성의 영향을 해석하기 위해서는 불포화 투수계수곡선이 필요하다. 정상상태에서는 들어오고 나가는 유량이 같기 때문에 함수특성곡선은 필요하지 않지만 이론의 일관성을 유지하기 위하여 그림 5와 같이 변화된 함수특성곡선으로부터 예측된 투수계수 곡선을 이용하여 함수특성의 영향을 고려하였다. 경계조건으로 상류측 수위가 EL. 170m에 위치하고 하류측 사면표면과 침윤선이 교차하지 않도록 경계조건을 조정하였다. 그림 6은 해석결과, 간극수압 수두분포와 흐름벡터를 나타낸 것으로 자유수면 윗부분의 불포화 영역에도 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다. 댐체의 거동을 해석하는 경우 지표면부분에서의 거동을 실제와 같이 얻으려면 현장의 기상조건에 따른 증발량이나 강우량 등 표면에서의 유량경계조건을 지정해야 한다. 그러나 이러한 경계조건을 정확하게 파악하는



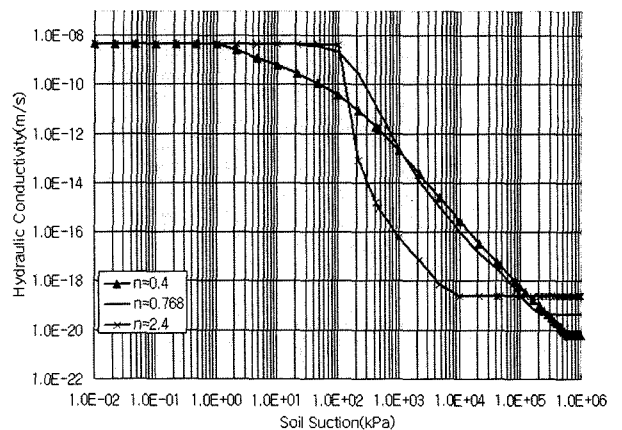
(a) a 에 따른 함수특성 변화



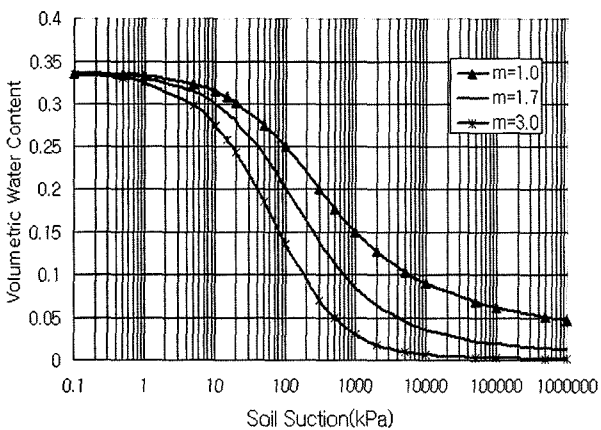
(b) a 에 따른 투수계수 변화



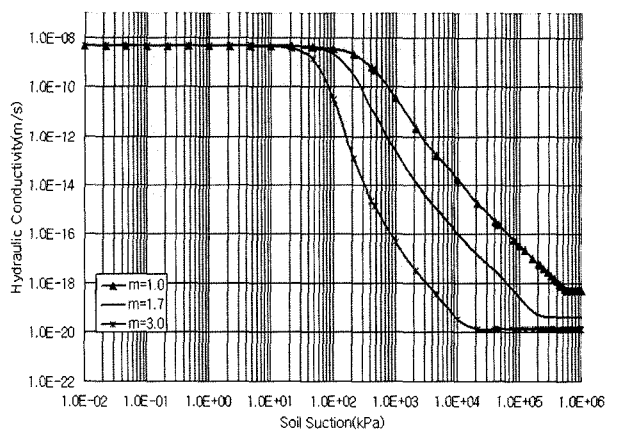
(c) n 에 따른 함수특성 변화



(d) n 에 따른 투수계수 변화



(e) m 에 따른 함수특성 변화



(f) m 에 따른 투수계수 변화

그림 5. 함수특성 및 투수계수의 변화

것은 쉽지 않으며, 표면에 유량 경계조건이 가해지는 경우 흐름을 유발하는 요인이 수두차와 유량의 두 가지이므로 민감도분석으로부터 얻어진 결과의 경향을 파악하기가 상당히 곤란해진다. 따라서 본 연구에서는 연구의 목적을 달성하기 위하여 시스템을 단순화하여 표면에 유량 경계조건을 지정하지 않아 정수압 상태의 간극

수압 분포가 얻어졌다.

불포화 수리특성의 변화에 따른 영향을 파악하기 위해 함수특성곡선의 a , n 및 m 의 값을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 그림 7은 해석결과로부터 دم체 코어 중앙부의 높이에 따른 함수비 분포와 투수계수의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 주어진 경계

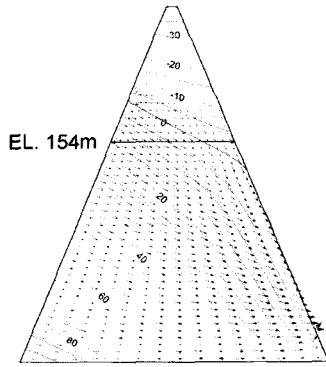
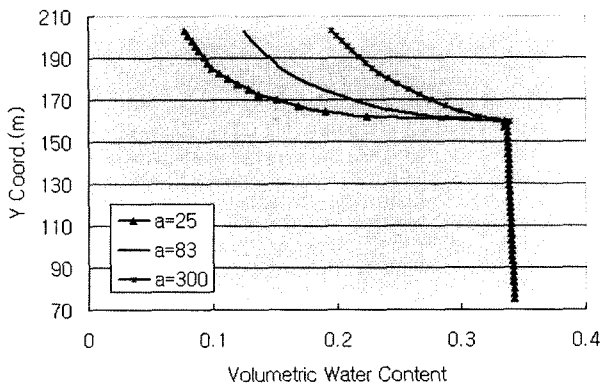


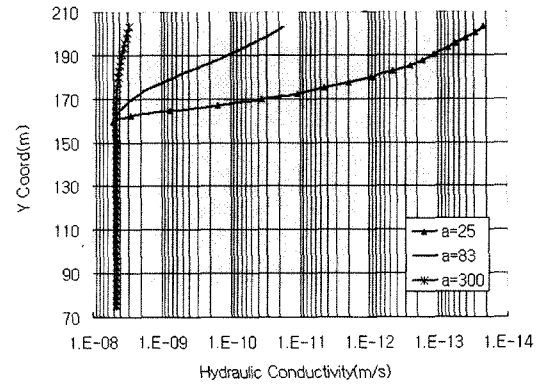
그림 6. 정상상태의 간극수압 수두(m) 분포와 흐름벡터

조건에서는 모관흡수력의 크기가 높이에 비례하므로 체적함수비와 투수계수의 분포는 입력된 함수비와 투수계수의 모양과 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

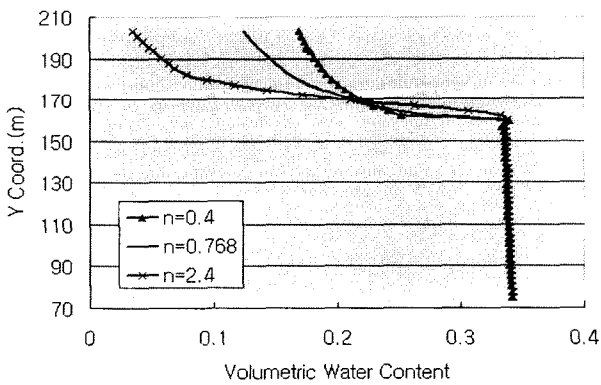
그림 7(a) 및 그림 7(b)에서 a 값이 작을수록 불포화 영역에서 함수비와 투수계수의 값이 작다. 이는 a 값이 작을 경우 공기함입치가 작아서 같은 모관흡수력에 대하여 더 작은 수분을 함유하게 되고, 따라서 물이 흐를 수 있는 공간이 작아지기 때문이다. a 값이 큰 경우 간극수압이 음의 값을 갖지만 모세관현상에 의해 포화상태가 유지되는 모관포화영역이 넓으므로 상당한 양의 수



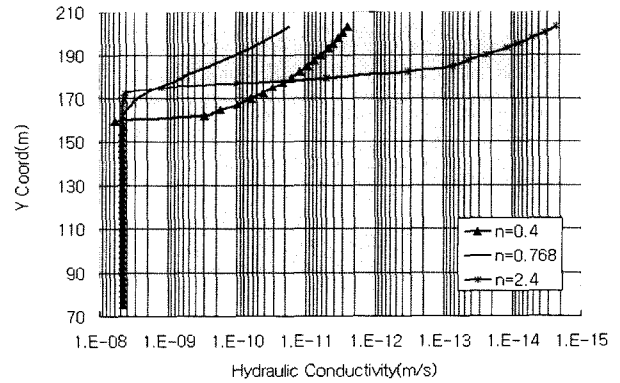
(a) a 에 따른 함수비 분포



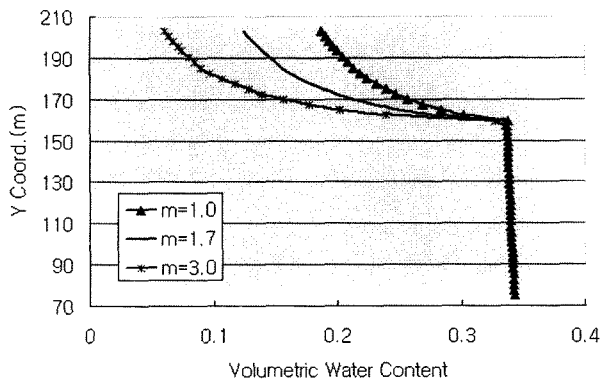
(b) a 에 따른 투수계수 분포



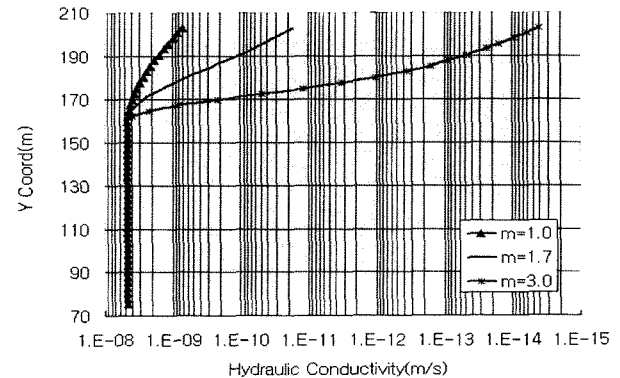
(c) n 에 따른 함수비 분포



(d) n 에 따른 투수계수 분포

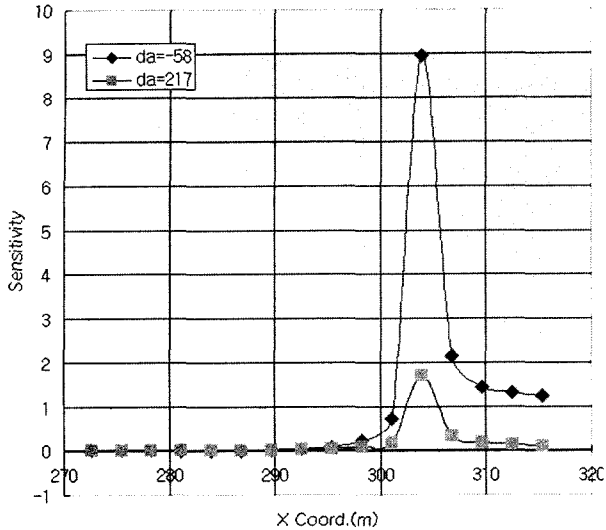


(e) m 에 따른 함수비 분포

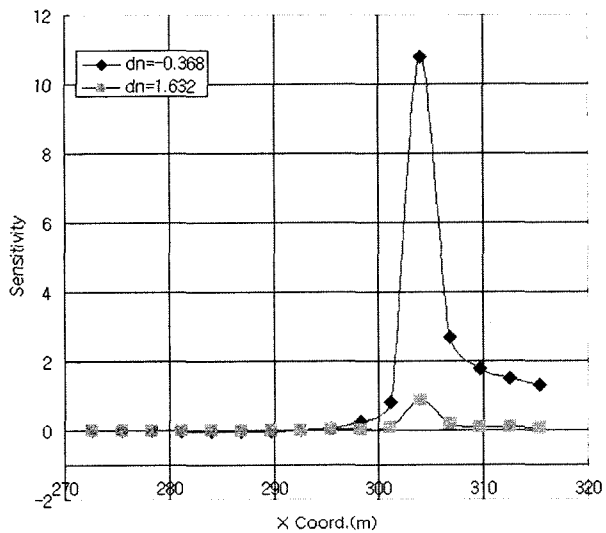


(f) m 에 따른 투수계수 분포

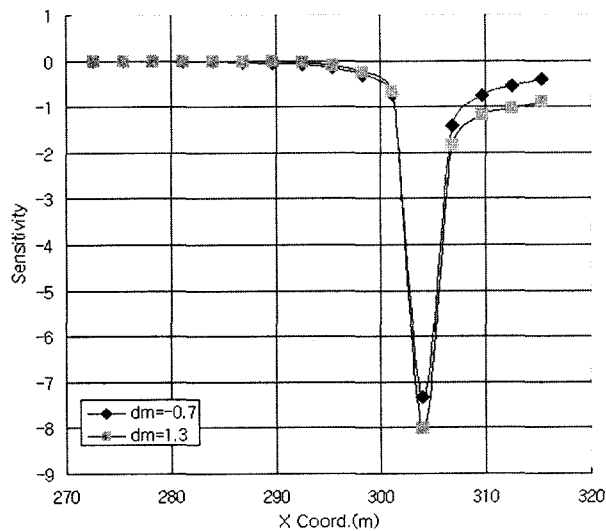
그림 7. 정상상태 해석 결과



(a) a 에 따른 민감도



(b) n 에 따른 민감도



(c) m 에 따른 민감도

그림 8. EL. 154m에서의 간극수압 수두의 민감도

분이 모세관 현상에 의해 불포화 영역에 존재하게 된다. 즉, 모관포화영역에서는 투수계수가 포화투수계수와 같으므로 간극수압이 0인 자유수면 위에도 포화흐름이 존재하게 되어 더 많은 물이 흐르게 된다.

그림 7(c) 및 그림 7(d)에서 n 값이 커지면, a 값이 고정되어 곡선의 변곡점의 위치는 변하지 않은 상태에서 모관흡수력에 따른 함수비 변화의 경사가 커지게 되므로 일정한 높이까지는 함수비가 커지지만 그보다 높은 위치에서는 함수비가 오히려 작아진다. 마찬가지로 투수계수도 같은 경향을 나타낸다.

그림 7(e) 및 그림 7(f)는 m 값의 변화에 따른 함수비와 투수계수의 변화를 나타낸 것이다. m 값이 작을수록 함수비가 큰 값을 나타내고 불포화 영역에 존재하는 물의 양도 많아서 투수계수도 큰 값을 갖게 된다.

그림 8은 그림 6에 표시된 EL. 154m의 수평면을 따라 기본 입력값들을 기준으로 식 (5)로 계산한 간극수압 수두의 민감도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 수면 아래 포화 영역에서는 민감도가 거의 0에 가깝고 침윤선과 교차하는 점에서의 민감도가 크게 나타났다. 즉, 침윤선 주변의 민감도가 가장 큰 것으로 나타났다.

3.3 비정상류 해석

그림 9는 수위 하강시의 수위 변화에 따른 거동을 알아보기 위하여 120일 동안 수위가 EL.193.5m에서 EL.150m로 하강하는 조건을 해석한 결과이다. 비정상류 해석에서는 유입되는 물의 양과 유출되는 물의 양의 차이만큼 흠에 저장되므로 물이 흠을 통해 얼마나 빨리 흐를 수 있는지를 나타내는 투수계수와 함께 얼마만큼의 물을 저장할 수 있는지를 나타내는 함수특성곡선이 입력자료로 필요하다. 비정상류 해석을 위해서는 초기 조건이 필요하므로 수위가 EL.193.5m일 때의 정상상태 해석을 통하여 초기조건을 구하였다.

해석결과 그림 9와 같이 초기에는 수위하강속도 보다 코어부의 배수 능력이 작아서 코어 중앙부의 간극수압이 높게 유지되지만 시간이 지나 배수가 진행되고 정상상태로 이동함에 따라 코어 중앙부의 간극수압이 작아지게 된다.

그림 10은 각각의 변수를 변화시키면서 일정시간이 지난 후 침윤선의 분포를 나타낸 것이고, 그림 11은 각각의 변수의 변화에 따른 댐 코어 상부(그림 3의 ㉠)에서의 간극수압 수두와 기본 입력값을 기준으로 계산한

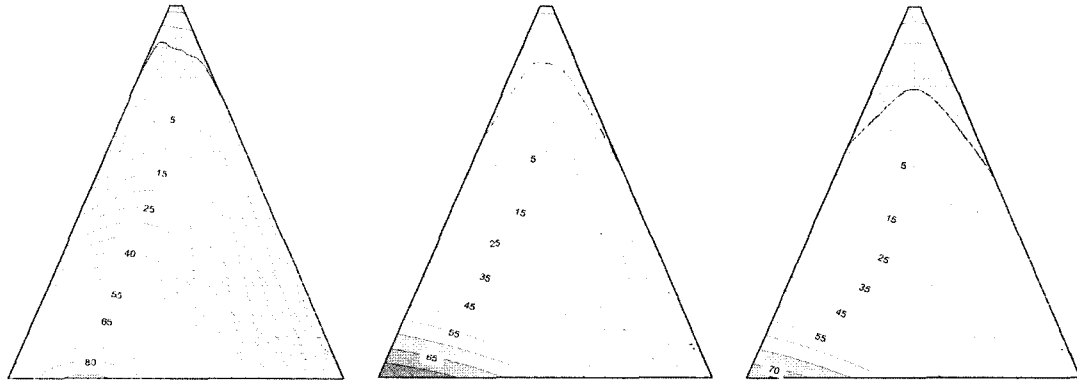


그림 9. 수위하강 시 시간에 따른 간극수압 수두(m) 분포

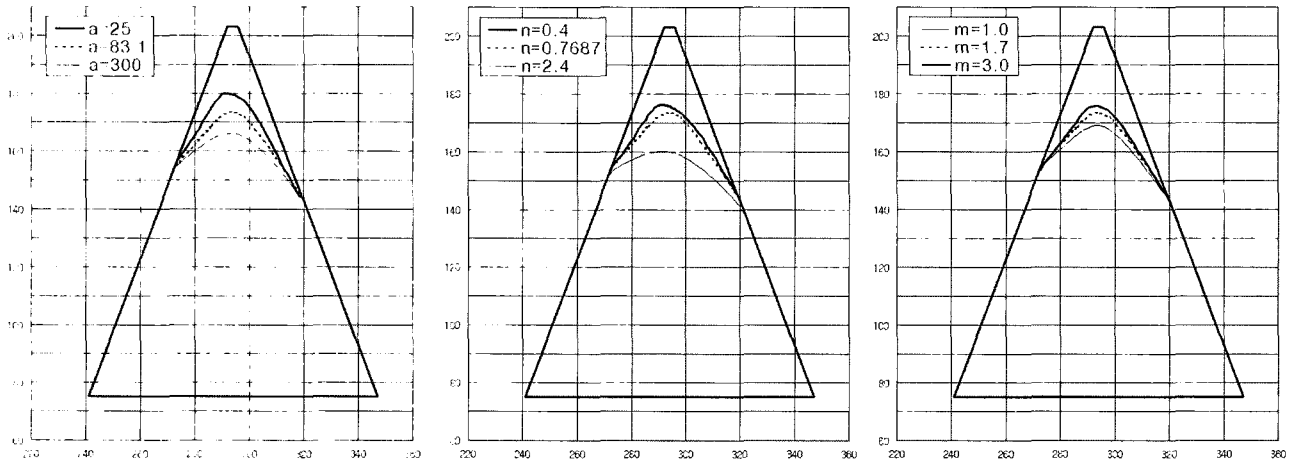


그림 10. 수위하강 시(5.4년 경과 후) 침윤선의 분포

간극수압 수두의 민감도 변화를 나타낸 것이다. 그림 10과 그림 11에서, a 값이 클수록 불포화 영역에서 모세관 현상에 의해 더 많은 양의 물을 함유하게 되므로, 투수계수는 커지고 빠져나가는 물의 양은 적어져 코어의 수위가 빨리 떨어지게 된다.

n 값의 변화에 따른 함수특성곡선의 모양은 간극 크기의 분포와 유사한 모양을 나타낸다. 즉, n 값은 간극 크기의 분포와 관련이 있다. n 값이 작을수록 간극 크기의 분포 폭이 증가하고 n 값이 크면 간극 크기 분포 폭이 감소한다. n 값의 영향은 곡선의 변곡점을 중심으로 함수비와 투수계수가 커지고 작아지는 경향이 있으므로, 초기조건의 함수비에 따라 거동이 달라지는 복잡한 경향을 나타낼 수 있다. 본 해석에서는 관련되는 모관흡수력의 범위가 변곡점 이전의 영역이므로 n 값이 크면 함수비가 커져 빠져나가는 물의 양이 적고 투수계수는 커지므로 침윤선이 빨리 낮아지게 된다(그림 10 및 그림 11(b)).

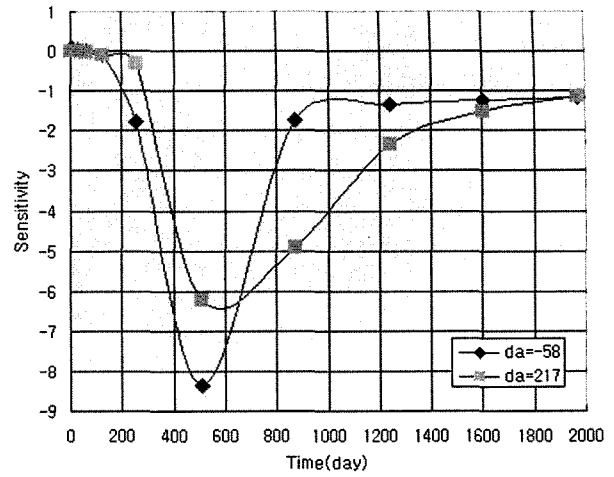
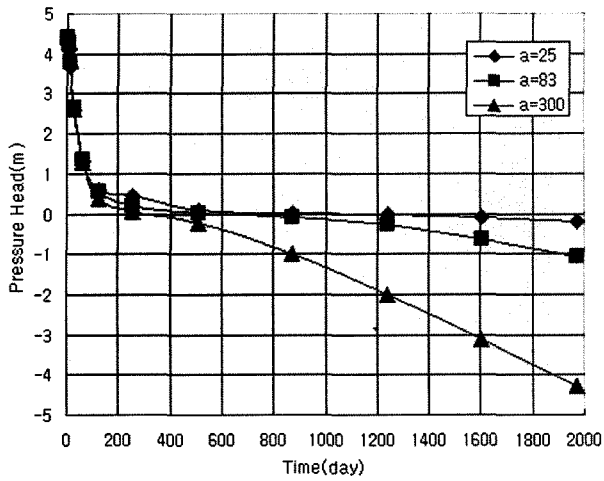
배수가 일어날 때, m 의 값이 클수록 간극수압이 0인

자유수면 윗부분에서 보유할 수 있는 물의 양이 적으므로 빠져나가는 물의 양이 많고, 투수계수는 작아져 그림 10과 그림 11에 나타난 것처럼 침윤선이 늦게 하강하게 된다.

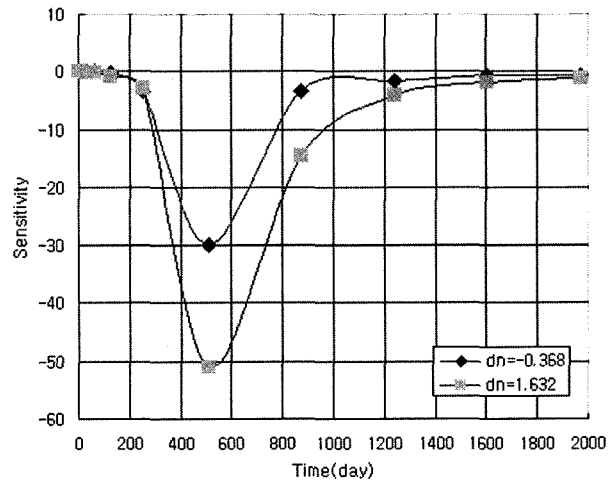
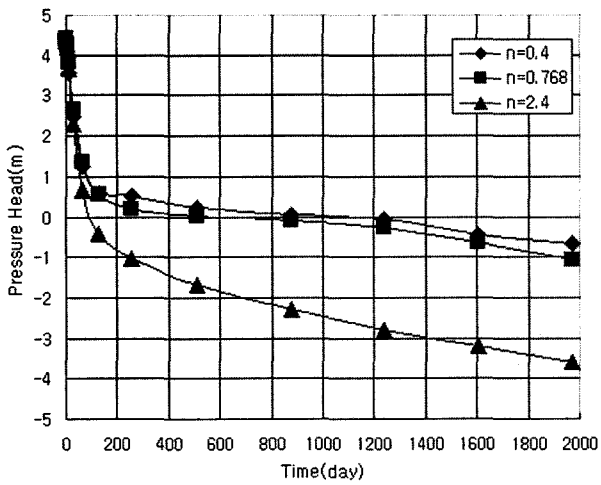
④ 점에서의 간극수압의 민감도는 침윤선이 통과하면서 간극수압이 0이 되는 시간에서 커짐을 알 수 있고 n 값이 시간에 따른 민감도의 변화에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이는 식 (1)에서 함수특성곡선의 기울기인 m_w 에 n 이 가장 큰 영향을 미치기 때문이다.

4. 고찰

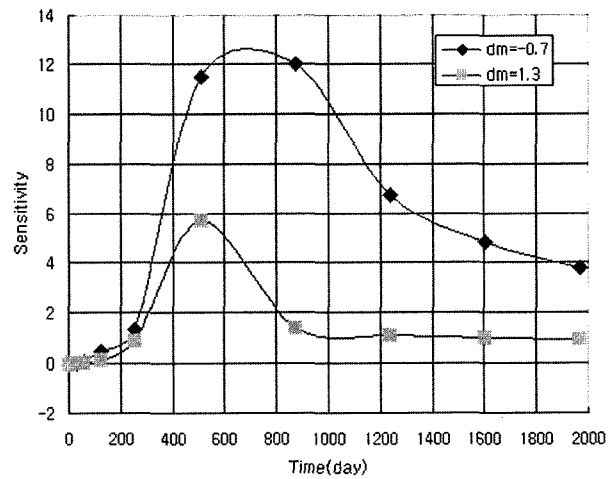
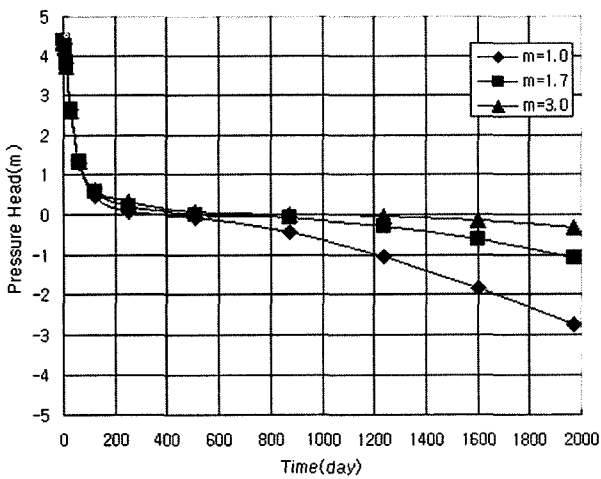
불포화 수리특성을 얻는 방법은 실험에 의한 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 크게 나눌 수 있다. 불포화 지반에 대한 실험이 국내에는 아직 일반화되어 있지 않고 많은 노력이 드는 단점이 있으나 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 예측에 의한 방법에는 입도분포와 같은 기본적인 물리적 지표로부터 함수특성곡선을 예측하고



(a) a 에 따른 변화



(b) n 에 따른 변화



(c) m 에 따른 변화

그림 11. 수위하강 시 ㉠에서의 간극수압 수두와 민감도의 시간에 따른 변화

예측한 함수특성곡선과 포화 투수계수로부터 불포화 투수계수곡선을 예측하는 방법과, 기존에 수행된 실험 데이터베이스로부터 물리적 특성이 유사한 곡선을 골

라 사용하는 방법이 있다. 간접적인 방법은 쉽게 불포화 수리특성을 구할 수 있는 장점이 있지만 국내의 지반에 대한 실험결과의 부족으로 적용성에 대한 검토가 충분

하지 않은 단점이 있다. 어느 방법을 사용할 것인지는 구조물의 중요도에 따라 판단할 문제이나 근래 들어 불포화 지반에 대한 실험장치가 점차 보급되고 있으므로 중요한 구조물의 경우 실험을 수행하는 것이 바람직하며 간접적인 방법을 사용하는 경우에도 지반의 특성을 고려하여 적용하여야 한다.

표 3은 우리나라에 건설된 중심코어형 필댐 중 대표적인 댐의 코어재료를 요약한 것이며 그림 12는 국내 화강풍화토와 함께 기존 댐의 코어재의 입도분포를 나

타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 일반적으로 생각되는 것처럼 코어재료로 점토질 재료가 많이 사용되지 않고 사질토 계열의 풍화토가 많이 사용된 것을 알 수 있다. 이는 양질의 점토를 충분히 얻을 수 없기 때문에 쉽게 구할 수 있는 화강풍화토를 다져서 사용하거나 점토와 섞어 사용한 결과이다. 그러나 침투해석을 수행하는 해석자들은 필댐의 코어가 점토로 이루어졌을 것으로 생각하는 오류를 범하기 쉽다. 그림 13은 기존의 댐체에 대한 정밀안전진단에서 사용된 여러 함수특성곡선과

표 3. 기존 댐의 코어재료

댐 명	소양강댐	안동댐	주암댐	대청댐	수어댐	운문댐	안계댐
코어재료	SC, SM	화강풍화토 (SW-SM)	잔적토(SP-SM), 풍화토(SW-SM)	CL, ML	SC, SM, CL, ML	SC	SW-SM, SM

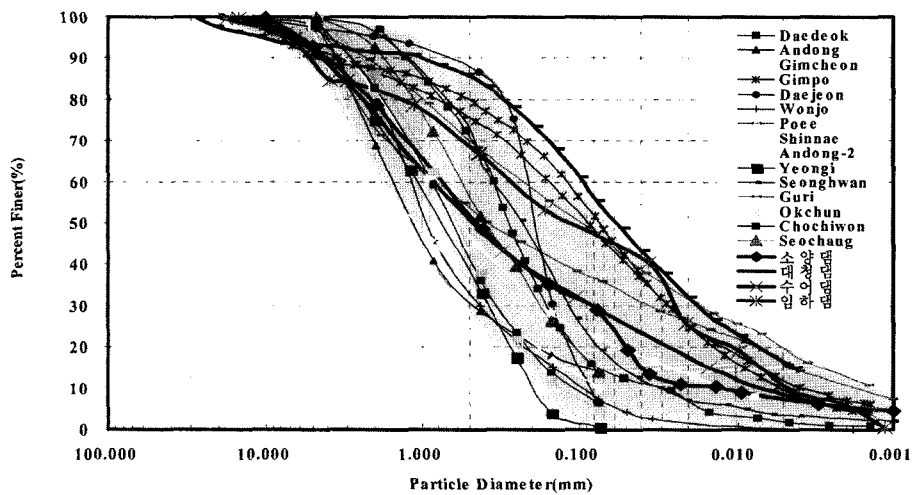
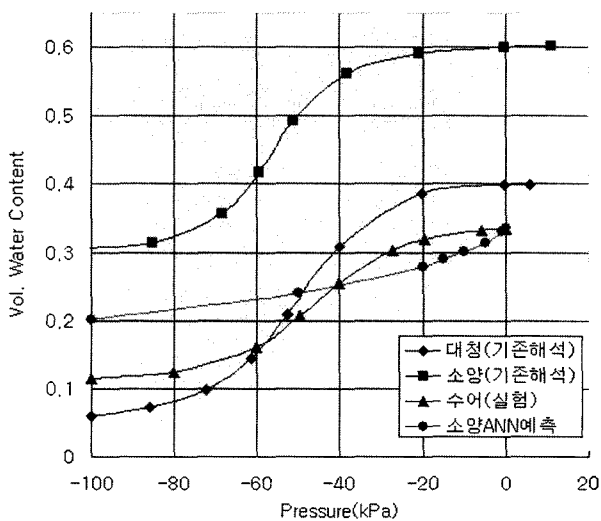
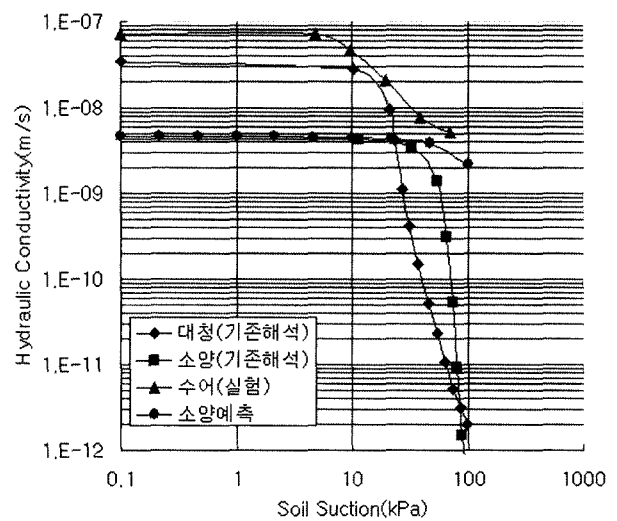


그림 12. 국내 풍화토 및 기존 댐의 입도분포(이성진, 2004)



(a) 함수특성곡선



(b) 투수계수 곡선

그림 13. 기존 댐 코어의 함수특성곡선

투수계수곡선을 나타낸 것이다. 대부분의 경우 실험을 실시하지 않아 문헌으로부터 지반의 종류에 따른 대표적인 곡선을 가정하여 사용하거나 기존의 보고서를 참고하여 지반의 특성을 고려하지 않고 같은 곡선을 사용하는 경우가 대부분이었으며, 심지어는 물성치 제시 없이 결과만을 제시한 경우도 있었다. 그림 13에서 유일하게 실험이 수행된 수어댐의 경우 표 3에서 코어 재료로 다양한 재료가 함께 사용된 것을 알 수 있으나 함수특성곡선의 모양을 고려해 볼 때 코어로 사용된 여러 재료들 중 점성토 부분에 대하여 실험이 수행된 것으로 판단된다. 소양강댐의 경우를 살펴보면 기존의 정밀안전진단의 경우 점성토의 함수특성곡선이 사용되었으나, ANN을 이용한 예측에서는 공기함입치가 작지만 입도분포가 좋은 재료의 전형적인 특성을 보여줌을 알 수 있다. 이와 같이 코어가 점성토가 아님에도 불구하고 문헌에서 얻은 전형적인 점성토의 함수특성곡선을 사용하는 경우 공기함입치가 과대평가 되고 포화상태에서의 체적함수비인 θ_s 도 과대평가 되며, 입도분포가 좁게 평가되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 불포화 수리특성이 댐체의 수리학적 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 함수특성곡선과 투수계수 곡선에 대하여 고찰하고 수치해석 기법을 활용하여 불포화 수리특성의 변화에 의한 댐체의 침투 거동에 대하여 연구하였다. 또한 기존에 수행된 댐체의 침투해석에 사용된 코어재의 불포화 수리특성에 대하여 고찰하고 침투거동에 미치는 영향에 대하여 논하였다.

연구 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 간극 내부로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의되는 공기함입치에 따라 간극수압이 음의 값을 갖지만 모세관현상에 의해 포화상태가 유지되는 모관포화영역의 크기가 결정되고 이 영역이 넓을수록 상당한 양의 수분이 모세관 현상에 의해 불포화 영역에 존재하게 된다.
- (2) 흙의 침투거동에 큰 영향을 미치는 불포화 수리특성은 흙의 입도분포에 의존한다. 흙이 세립분을 많이 함유하면 흙입자들 사이의 간극공간이 작아지므로 공기함입치가 커지게 된다. 또한 함수특성곡선

의 기울기는 흙이 세립자를 많이 함유할수록 평평해지는 경향이 있다.

- (3) 기본 입력값(base set)을 기준으로 변화를 주어 유한 차분 형식으로 개략적으로 계산한 민감도는 침윤선 부근에서 가장 크게 나타났고 시간에 따른 민감도의 변화에는 함수특성곡선의 기울기와 관련된 n 값이 가장 큰 영향을 주었다.
- (4) 우리나라에 건설된 중심코어형 댐을 고찰한 결과에 의하면 일반적으로 생각되는 것처럼 코어재료로 순수 점토질 재료가 많이 사용되지 않고 풍화토가 많이 사용된 것을 알 수 있었다. 이는 양질의 점토를 충분히 얻을 수 없기 때문에 쉽게 구할 수 있는 화강 풍화토를 다져서 사용하거나 점토와 섞어 사용한 결과이다. 입도분포가 좋은 풍화토를 재료로 사용하는 코어에 전형적인 점성토의 함수특성곡선을 사용하는 경우 공기함입치가 과대평가 되고 포화상태에서의 체적함수비인 θ_s 도 과대평가 되며 입도분포가 좁게 평가되는 경향이 있다.
- (5) 댐의 침투거동은 물이 흙을 통해 얼마나 빨리 흐를 수 있는지를 나타내는 투수계수와 함께 얼마만큼의 물을 저장할 수 있는지를 나타내는 함수특성곡선에 따라 달라지므로 댐체 거동 파악을 통하여 안정성 평가의 신뢰도 향상을 위해서는 불포화 수리특성에 대한 합리적인 평가가 반드시 선행되어야 한다.

참고 문헌

1. 김윤기 (2003), 투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.
2. 대청다목적댐 정밀안전진단보고서 (2000), 한국수자원공사, pp. 276-277.
3. 댐설계기준 (2003), 한국수자원학회, p.195.
4. 소양강다목적댐 정밀안전진단보고서 (1999), 한국수자원공사, pp. 318-319.
5. 안계댐 정밀안전진단 보고서 (2003), 한국건설품질연구원.
6. 안동다목적댐 제1차 정밀안전진단보고서 (2001), 한국수자원공사, p.130.
7. 이성진 (2004), 화강풍화토의 불포화 전단강도 및 함수특성곡선 산정에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원.
8. 임하다목적댐 정밀안전진단보고서 (1997), 한국수자원공사.
9. 전남 광양시 수어댐 정밀안전진단보고서 (1998), 한국수자원공사, p.218.
10. Burdine, N. T. (1953), "Relative Permeability Calculations from Pore Size Distribution Data", *Journal of Petroleum Technology*, Vol.5, No.3, pp.71-78.
11. Fredlund, D. G., Xing, A., and Huang, S. (1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water

- Characteristic Curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.533-546.
12. Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., and Wilson, G. W. (1997), “Prediction of the Soil-water Characteristic Curve from Grain-size Distribution and Volume-mass Properties”, *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, April, pp.22-25.
 13. Kunze, R. J., Uehara, G., and Graham, K. (1968), “Factors Important in the Calculation of Hydraulic Conductivity”, *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, Vol.32, pp.760-765.
 14. Arya, L. M. and Paris, J. F. (1981), “A Physico-empirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle Size Distribution and Bulk Density Data”, *Soil Science American Journal*, Vol.45, pp.1023-1030.
 15. Lam, L. and Fredlund, D. G. (1987), “Transient Seepage Model for Saturated-unsaturated Soil Systems : a Geotechnical Engineering Approach”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.565-580.
 16. Leong, E. C. and Rahardjo, H. (1997), “Review of Soil-water Characteristic Curve Equations”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.12, pp.1106-1117.
 17. Papagiannakis, A. T. and Fredlund, D. G. (1984), “A Steady State Model for Flow in Saturated-unsaturated Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, pp.419-430.
 18. Rawls, W. J. and Brakensiek, D. L. (1985), “Prediction of Soil Water Properties for Hydrologic Modeling”, In E. B. Jones and T. J. Ward (Eds), *Watershed Management in the Eighties*, Proc. of Symp. Sponsored by Comm. on Watershed Management, I&D Division, ASCE Convention, Denver, Co, April 30-May 1, pp. 293-299.
 19. SEEP/W (Version 5) Manual (2003), Geo-slope International, Canada.
 20. Sillers, W. S., Fredlund, D. G., and Zakerzadeh, N. (2001), “Mathematical Attributes of Some Soil Water Characteristic Curve Models”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, pp.243-283.
 21. Taylor, R. L. and Brown, C. B. (1967), “Darcy Flow Solutions with a Free Surface”, *Proc. ASCE J. Hydraulics Div.* Vol.93, pp.25-33.
 22. van Genuchten, M. T. (1980), “A Closed Form Equation for Prediction the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”, *Soil Science Society America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
 23. Vereecken, H., Maes, J. Feyen, J., and Darius, P. (1989), “Estimating the Soil Moisture Retention Characteristic from Texture, Bulk Density, and Carbon Content”, *Soil Science*, Vol.148, No.6, pp. 389-403.
 24. Williams, J. R., Ouyang, Y., Chen, J.-S., and Ravi, V. (1998), “Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: compilation of simple mathematical models”, Volume II, National Risk Management Research Laboratory, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268, EPA/600/R-97/128b, pp.C2-C6.

(접수일자 2004. 11. 29, 심사완료일 2005. 4. 7)