

## 확률론적 댐 침투거동 해석

### Stochastic Seepage Analysis of Dam

조 성 은<sup>1</sup> 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. There is variability and uncertainty associated with the unsaturated hydraulic properties that in turn will lead to variability in predicting unsaturated soil behavior such as seepage rate and the pore water pressure distribution. In this paper, measurements of the soil-water characteristic curve and saturated hydraulic conductivity for the core material of dam were conducted. Then, finite element stochastic analysis was used to capture the effect of unsaturated hydraulic properties on the seepage behavior of dam. It is observed that the amount of seepage increases, as the values of unsaturated soil parameters  $a$  and  $n$  increase. The values of  $m$  and  $p$  showed opposite trend.

#### 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. 지반의 불포화 수리특성은 변동성과 불확실성을 내포하고 있으며, 이는 침투수량 및 간극수압 분포 등 댐체 및 제방의 침투거동에 영향을 미친다. 본 연구에서는 댐의 심벽재료에 대한 함수특성곡선과 투수계수를 구하는 실내실험을 수행하였다. 그리고, 불포화 수리특성이 댐체의 침투 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 입력물성의 확률론적 분포를 고려한 수치해석을 수행하였다. 해석결과 Fredlund와 Xing 함수특성곡선식과 Campbell의 투수계수식에서 변수  $a$ 와  $n$ 은 값이 클수록,  $m$ 과  $p$ 는 값이 작을수록 정상상태에서의 침투수량이 많았다.

**Keywords :** Hydraulic conductivity curve, Monte Carlo simulation, Seepage, Soil water characteristic curve

#### 1. 서 론

토질재료, 사력재료, 암재료 등을 잘 조합하여 충분한 차수능력을 갖도록 축조된 구조물인 댐에서는 제체 및 기초압반을 통하여 저수지로부터의 침투가 발생한다. 침투수의 작용에 의해 제체 내에 간극수압이나 양압력이 발생하고, 침투파괴 혹은 전단저항력의 저하 등의 안정을 손상하려는 현상이 일어나 제체 파괴의 큰

인자가 될 우려가 있다. 따라서 댐의 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 있는 중요한 도구이다. 그러나 실험절차의 번거로움으로 인하여 입력 물성치에 대한 체계적인 실험과 평가가 일반화되지 못하고 있으며 불포화토질역학 이

<sup>1</sup> 정회원, 한국수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, drsecho@hanmail.net)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

론에 대한 인식 부족으로 물성의 변화에 따른 지반의 침투거동에 대한 이해가 부족한 실정이다.

불포화 수리특성에 따라 담체 및 제방의 침투거동이 달라지나 국내 지반에 대한 실험자료 부족으로 대부분 단순 추정에 의한 불확실한 값을 사용하고 있다. 실험이 수행되는 경우에도 흡수력을 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않기 때문에 함수특성곡선은 변동성(variability)과 불확실성(uncertainty)을 내포하게 되며 이를 사용하여 모델링한 지반의 불포화거동에 영향을 미치게 된다. 투수계수의 경우에 같은 시료에 대한 실험결과에서 차수 2 정도의 변동 폭이 발생할 수 있다는 것은 널리 알려진 사실이다. 그러나 대부분의 해석의 경우 실험의 오차, 재료의 불균질성 등을 고려하지 않는다. 따라서 수치해석을 통하여 얻는 결과를 적절하게 평가하기 위해서는 수치해석을 수행함에 있어 입력물성의 변동 폭을 고려하는 확률론적 접근법이 필요하다.

본 연구에서는 불포화 수리특성이 담체의 침투 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 담의 심벽재료에 대한 함수특성곡선과 투수계수를 구하는 실내실험을 수행하였다. 그리고, 함수특성곡선 및 투수계수함수의 변수의 변동 폭을 고려하는 확률론적 해석을 수행하여 물성의 변화가 담체의 침투량의 변화에 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 지반의 불포화 특성

### 2.1 함수특성 곡선

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).

함수특성곡선을 나타내기 위해 많은 수학적 표현이 제안되었으며 이들 모델식에 대한 장점과 단점들에 대하여 많은 문헌에서 논의되었다(Leong and Rahardjo, 1997). Fredlund와 Xing(1994)은 전체 흡수력 범위에 적용할 수 있는 3개의 변수를 포함하는 함수특성곡선식을 van Genuchten(1980)의 식과 유사한 간극크기 분포로부터 식 (1)과 같이 제안하였다. 이 모델은 다양한 종류의

지반에 대한 적용성이 좋으며, 모델변수가 다른 두 변수의 효과와 구분되는 뚜렷한 물리적인 의미를 가진다.

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (1)$$

여기서,  $C(\psi)$ 는 보정함수,  $\theta_s$ 는 포화 체적함수비,  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 은 곡선맞춤 변수이고  $\psi$ 는 모관흡수력,  $e \approx 2.71828$ 이다.  $C(\psi)$ 는  $\psi = 10^6$  kPa에서 체적함수비의 값을 0이 되게 하기 위해 도입된 값으로 실제 사용되는 작은 모관흡수력 범위에서는 1에 가까운 값을 가지므로 곡선의 모양에 영향을 미치지 않아 생략할 수 있다.

함수특성곡선은 직접측정법이나 입도분포 등을 이용한 간접예측법을 이용하여 구한다. 그러나 어느 경우에도 불확실성은 존재하게 된다. 함수특성 실험과 관련된 변동요인은 실험결과를 곡선맞춤하는 과정에서 사용되는 이론곡선의 종류, 측정에 사용되는 방법의 차이, 실험자의 능력과 경험, 측정점의 개수, 흡수력의 측정범위 등이다(Zapata 등, 2000).

### 2.2 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.

본 연구에서는 불포화 투수계수곡선을 예측하기 위해 개선된 Campbell 방법을 사용하였다. 개선된 Campbell 방법은 식 (2)와 같이 Fredlund와 Xing의 함수특성곡선을 기저로 이용하며 불포화 영역에서의 투수계수곡선의 기울기는 변수  $p$ 에 의하여 조절된다.  $k_{\min}$ 은 투수계수곡선이 잔류함수비 이후에는 평평하게 수렴하는 것을 나타내기 위해 도입되었다(Fredlund, 1996).

$$k(\psi) = (k_s - k_{\min}) \left[ \frac{\ln \left( 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \left[ \frac{1}{\left\{ \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \right]^p + k_{\min} \quad (2)$$

여기서,  $k_s$ 는 포화투수계수,  $k_{\min}$ 은 최소투수계수,  $\psi_r$ 은 잔류함수비에 대응하는 모관흡수력,  $p$ 는 투수계수곡선의 기울기와 관련된 변수이다.

### 3. 심벽재의 불포화 특성 실험

일반적으로 필댐의 내부는 투수성이 매우 낮은 심벽 재료가 사용된다. 필댐의 바깥쪽 부분에는 비교적 투수성이 큰 재료로 이루어진 투수존이 존재하기 때문에 필댐의 상류 측에서는 저수위와 동일한 수위가 나타나지만, 차수존인 심벽을 통과하면서 투수성은 급격히 감소하기 때문에 심벽의 침윤선 상부 및 필댐 하류에 있는 영역에서는 불포화 상태가 존재하게 된다. 저수위는 강우나 홍수 등 자연적인 변화와 홍수조절, 발전 등 인위적인 목적에 의하여 변하게 된다. 이러한 저수위의 변화로 인하여 필댐 심벽 내부의 간극수압도 변하게 된다. 특히 저수위 상승으로 인하여 심벽 내부에서 나타난 음의 간극수압이 작아지거나 소산될 경우 심벽 재료의 강도 또한 줄어들게 되어 필댐 자체의 안정성에도 영향을 미치게 된다. 이러한 특성 때문에 간극수압의 변화에 따른 불포화 거동특성에 대한 연구가 요구된다.

#### 3.1 심벽재료가 갖추어야 할 성질

필댐의 심벽재는 시공이 용이한 재료로 소요의 차수성, 밀도 및 전단강도를 가져야하며 제체의 변형에 순응할 수 있는 소성을 가져야 한다. 또한, 침투수에 대한 저항성이 있어야 하며 대개 다음과 같은 공학적 특성을 갖는다.

입도는 양호하고 축조시 과도한 과잉간극수압이 발생하지 않도록 세립분이 지나치게 많지 않아야 한다. 댐 설계기준(2003)에 의하면, 0.05mm 이하의 입자를 15~20% 정도 함유한 재료가 적합하며 소성지수가 15이상인 점토질 재료가 파이핑에 대한 저항성이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 심벽재료는 조립재료(사력재료)와 달리 함수비에 의해 밀도가 크게 변화하며 일반적으로 최적 함수비(O.M.C) 보다 다소 습윤측일 때 투수계수가 최소가 된다. 투수계수는 대략  $10^{-5}$ cm/sec 이하(현장), 또는  $10^{-6}$ cm/sec 이하(실내)이어야 한다. 다짐특성은 다짐횟수가 많을수록 최적함수비가 낮아지고, 최대건조밀도는 증가되며, 투수계수는 감소하는 경향을 나타낸다.

#### 3.2 실험 재료

본 연구에서 사용된 흙은 건설 중인 ○○댐에서 채취된 시료로 교란상태로 채취되었다. 시료의 입도분포곡

선은 그림 1과 같이 입도가 양호한 분포를 나타내고 있으며, 시료의 물리적 성질은 표 1에 나타나 있다. 또한 이 시료의 입자크기 및 함유량은 표 2에 나타난 값과 같다. 채취된 시료는 USCS에 의하면 SC(점토질 모래)로 분류되는 소성이 있는 세립분을 포함하는 흙으로 소성지수(PI)가 13.6으로 15에 가까워 양호한 파이핑 저항성을 가진 것으로 판단된다. 이 재료는 200번 체 통과율이 45%로 세립분의 함유량이 다소 큰 특성을 보이고 있다.

그림 2는 재료의 다짐곡선을 나타내며 햄머중량 2.5kg,

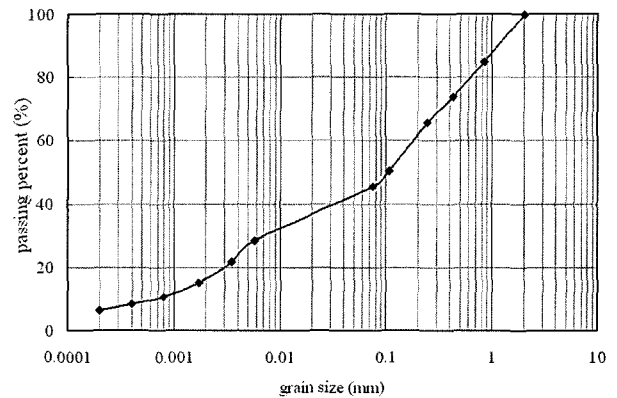


그림 1. 입도분포 곡선

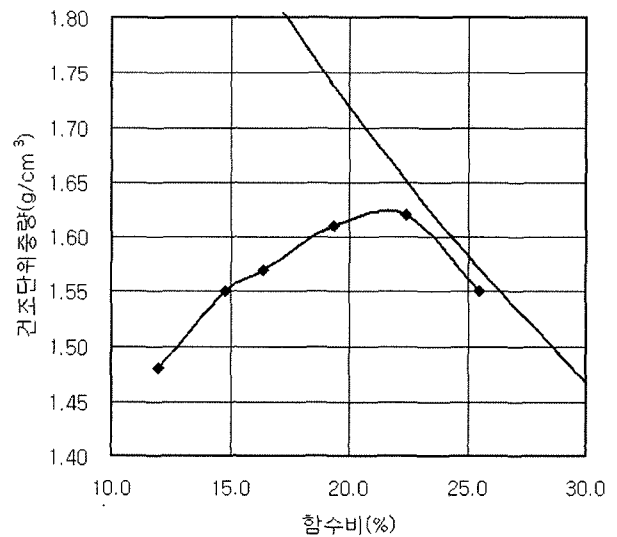


그림 2. 다짐곡선

표 1. 시험 재료의 물리적 성질

$G_s$	LL	PL	PI	O.M.C(%)	$\gamma_{dmax}$ (g/cm³)
2.62	34.93	21.33	13.60	21.6	1.623

표 2. 입자 크기 및 함유량

$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	균등계수	곡률계수
0.0006	0.0063	0.1810	282.9	0.35

낙하고 30cm로 총 3층에 25회 다짐을 수행한 결과이며, 최대건조밀도는  $1.623\text{g/cm}^3$ 이고 최적함수비(OMC)는 21.6%로 나타나고 있다. 다짐곡선이 분명한 침투값을 나타내고 있으나 OMC가 상대적으로 높은 상태를 나타내고 있다.

### 3.3 함수특성곡선 실험

함수특성을 구하기 위해 사용된 장비는 Volumetric Pressure Plate Extrator의 일종인 Fredlund SWCC Device (그림 3)로 압력셀에 공기함입치가 큰 세라믹디스크를 설치한 후 그 위에 시료를 올려놓고 셀 내부에 공기압을 가해주어 압력셀에서 빠져나오는 물의 양을 측정하여 체적함수비의 변화를 측정하는 장비이다. 이 장비는 공기압축기를 사용하여 15bar까지 압력을 가할 수 있고 건조과정과 습윤과정의 이력현상을 측정할 수 있으며 공기압을 이용하는 하중 재하틀을 사용하여 시료에 연속하중을 가할 수 있는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 교란상태에서 채취된 시료를 재성형하여 실험을 수행하였다. 먼저 실험에 사용될 시료를 오븐에서 건조시킨 후, 적당량의 물과 골고루 교반시켜 실험을 하고자 하는 함수비로 만들었다. 이렇게 교반된 흙을 직경 63mm, 높이 30mm의 시료링에서 성형하였다. 시료의 성형시 시료의 초기함수비는 다짐곡선에서의 최

대건조단위중량에 상응하는 습윤측의 함수비인 23%가 되도록 성형하였다. 성형이 완료된 시료는 중량을 측정하고 물에 담가두어 포화시킨다. 이때 시료의 상하면에 거름종이 및 다공판을 사용한다. 포화가 완료된 시료는 셀안의 세라믹디스크 위에 설치하고 셀을 조립한다. 본 연구에서는 세라믹디스크의 공기함입값이 3bar인 것을 사용하였다.

실험은 우선 시료를 포화시킨 후 모관흡수력을 높여 가면서 1차 건조과정(1st Drying)을 시행한다. 그 후 모관흡수력을 단계적으로 낮추어가면서 1차 습윤과정(1st Wetting)곡선에 상응하는 실험값들을 얻었다.

실험을 통해 얻은 곡선은 그림 4와 같다. 이 때 하중의 작용에 의한 함수특성의 변화를 알아보기 위하여 재하장치를 사용하여 하중을 가한 상태에서 같은 방법으로 실험을 수행하였으며 하중의 크기를 바꾸며 같은 과정을 반복하였다. 그림에서 알 수 있듯이 작용하는 하중이 클수록 함수특성곡선의 공기함입값이 커지고 곡선의 기울기가 완만해져 동일한 모관흡수력에 대하여 체적함수비가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 응력상태에 따라 부피가 변화하고 흙의 구조가 달라져 함수특성이 달라지기 때문이며, 이러한 응력상태에 따른 경향은 국내외의 문헌에서도 보고된 바 있다(성상규와 이인모, 2003; Vanapalli 등, 1999; Ng와 Pang, 2000).

이렇게 구해진 함수특성곡선 실험값을 대상으로 최적화기법을 적용한 곡선맞춤기법을 이용하여 각 이론별 함수특성곡선에 사용되는 맞춤변수들을 구하였다. 그림 5에 하중을 재하하지 않은 상태에서의 건조과정에 대하여 각 함수특성곡선 이론식들과 실험 결과값을 비교하여 보여주었다. 이론식을 통해 얻은 함수특성곡선과 실험에서 구한 결과값을 비교하여 보면 곡선맞춤시

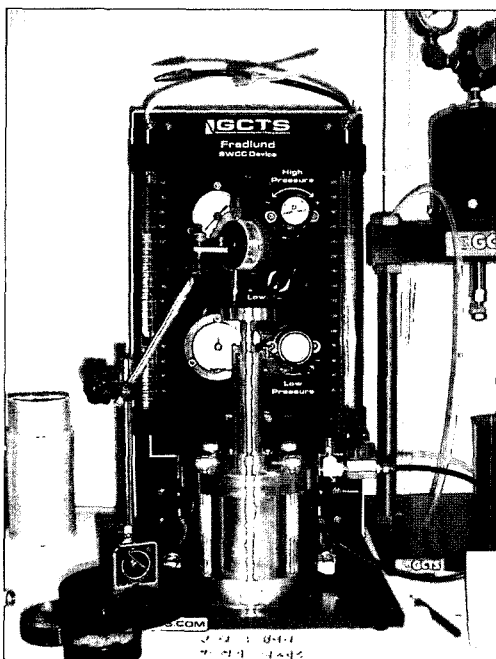


그림 3. 함수특성 측정장치

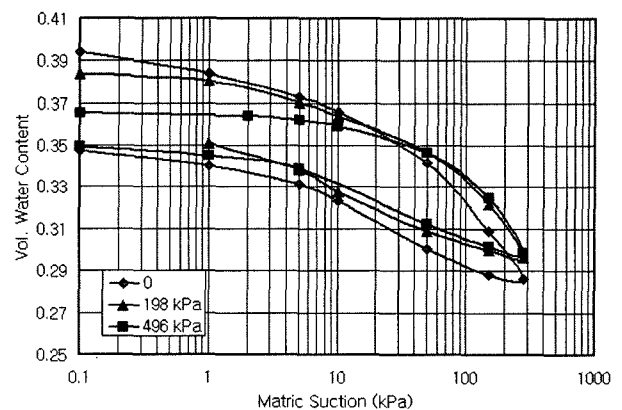
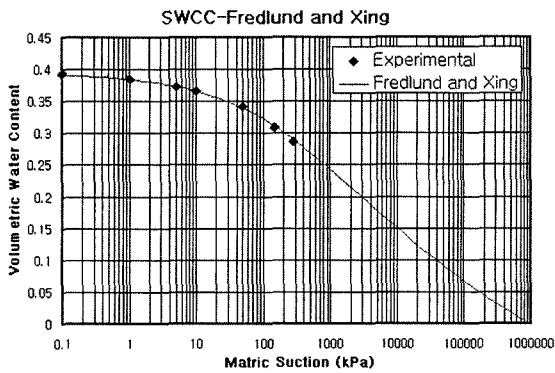


그림 4. 함수특성 실험 결과

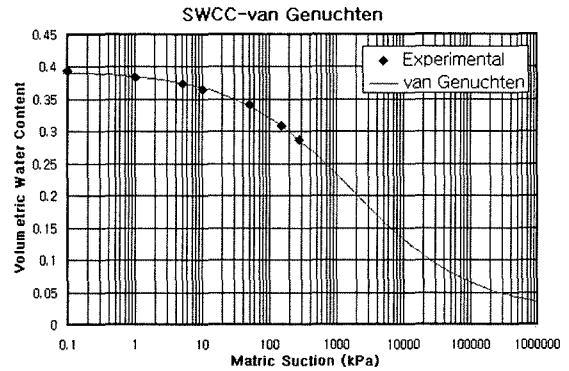
의 변수 개수가 많은 Fredlund와 Xing, van Genuchten 곡선은 실험결과를 잘 나타내고 있지만, van Genuchten 과 Mualem 곡선과 Brooks와 Corey 이론곡선은 이들에 비해 다소 차이가 발생하고 있다. 특히 Fredlund와 Xing 이론곡선에서  $10^6$ kPa에서 함수비가 0이 되도록 곡선맞춤이 수행됨을 알 수 있다. 다른 응력 상태의 실험결과에 대하여도 마찬가지로 경향의 곡선맞춤 결과를 얻었다.

### 3.4 투수 실험

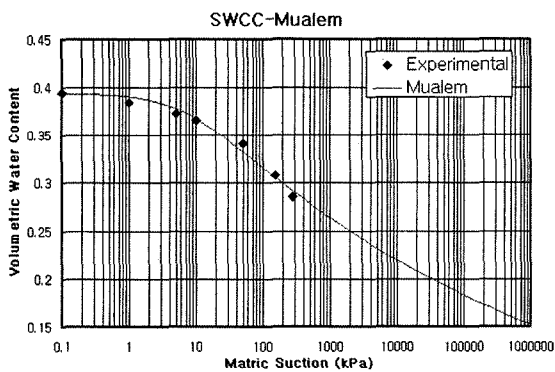
투수성을 결정하는 실내실험에는 변수두시험과 정수 두시험 그리고 압밀실험에 의한 직접 또는 간접 측정방법이 있다. 본 연구에서는 수압을 일정하게 유지시키는 정수두시험을 기본으로 하여 그림 6과 같이 직경 70mm, 높이 30mm 시료에 대하여 삼축셀을 이용한 포화투수실험을 실시하였다. 실험 수행 중 유효구속압은 30kPa이 되도록 일정하게 유지되게 하였다. 이 실험을 통해 얻은 심벽



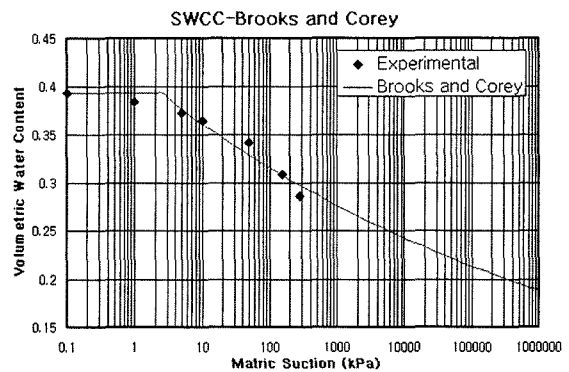
(a) Fredlund와 Xing SWCC



(b) van Genuchten SWCC



(c) van Genuchten과 Mualem SWCC

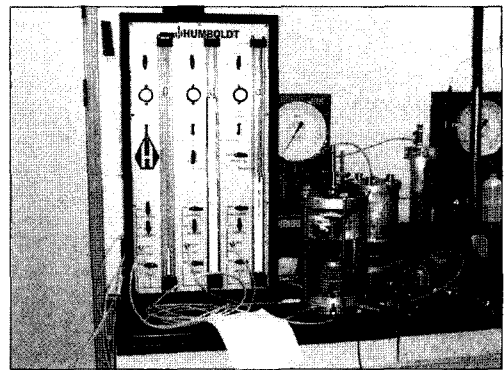


(d) Brooks와 Corey SWCC

그림 5. 이론별 함수특성 곡선(하중 0, 건조과정)



(a) 제작된 시료



(d) 포화투수 실험

그림 6. 투수실험

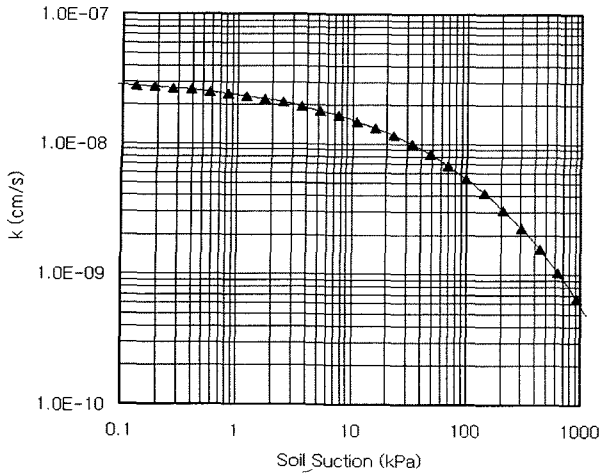


그림 7. 투수계수곡선

재의 다짐시료에 대한 포화투수계수값은  $3.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 로 계산되었다. 그림 7은 식 (2)의 개선된 Campbell 방법을 이용하여 함수특성곡선으로부터 투수계수를 경험적으로 유추한 투수계수곡선을 나타낸다. 이때 투수계수곡선의 기울기에 영향을 미치는 경험변수  $p$ 의 값은 입도분포가 좋고 세립분이 많은 재료의 특성을 고려하여 평균값을 12로 가정하여 해석에 적용하였다.

#### 4. 댐체의 침투해석

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. 포화도 영역의 경우 간극수압이 양의 값을 나타내지만 불포화도 영역의 경우 음의 값을 가진다.

유한요소법을 이용하여 침투를 해석하는 방법은 복잡한 해석영역의 초기조건 및 경계조건의 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.

#### 4.1 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.

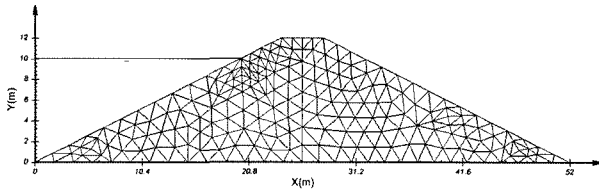
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

여기서,  $H$ 는 총수두,  $k_x$ 와  $k_y$ 는 투수계수,  $Q$ 는 작용하는 유량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량이며  $m_w$ 는 함수특성곡선의 기울기이다. 정상상태의 경우에는 모든 시간에서 유입된 유량과 유출된 유량이 같으므로 우변이 0이 된다. 본 연구에서는 식 (3)을 풀기 위하여 자동 요소세분화 기법 (automatic mesh refinement)과 확률론적 해석(stochastic analysis)이 가능한 Soilvision사의 유한요소 침투해석 프로그램인 SVFLUX(2005)를 사용하였다.

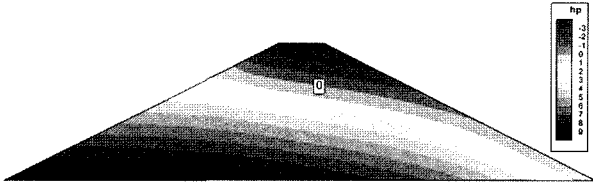
#### 4.2 결정론적 해석

그림 8(a)는 높이 12m이고 10m까지 담수가 되어진 대표적인 흙댐의 단면을 나타낸다. 댐체에 필터가 없으므로 침윤선이 하류측 사면과 교차하게 되어 침윤면(seepage face)이 발생하게 된다. 따라서 이 길이를 결정하기 위한 경계조건을 하류사면에 지정하였다. 댐체에 필터 및 사력 영역이 존재하는 경우에도 심벽에 비해 투수계수가 커서 흐름에 기여하는 바가 거의 없으므로 침투거동은 그림 8(a)의 단면과 유사하게 된다. 댐체 하부는 불투수층으로 가정하여 댐체를 통한 침투만 고려하였다.

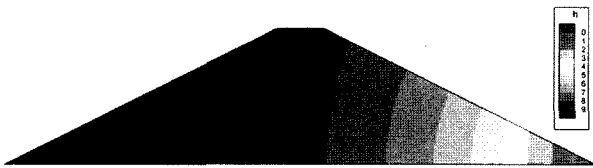
실험에서 얻어진 1차 습윤과정(하중 0)의 함수특성곡선을 이용한 정상상태 해석을 수행하였다. 그림 8(b)는 간극수압수두의 분포를 나타내고 그림 8(c)는 총수두의 분포를 나타내고 있다. 그림 8(d)는 흐름벡터를 나타낸 것으로 침윤선 상부에서도 상당한 양의 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 간극수압은 0보다 작지만 포화상태를 유지하는 모관포화 영역으로 물이 흐르기 때문이다. 댐체의 단면 중량을 통해 통과하는 유량  $Q = 1.505 k_s$ 로 나타났다.



(a) 해석영역



(b) 간극수압수두 분포



(c) 총수두 분포



(d) 흐름벡터 분포

그림 8. 결정론적 해석결과

### 4.3 확률론적 해석

댐체의 간극수압, 총수두 및 침투량 등의 침투거동은 지반의 불포화 수리특성에 의해 좌우되나, 불포화 수리특성이 침투거동에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 수행되지 않은 것이 현실이다. 조성은(2005)은 불포화 수리특성이 댐체의 침투 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 함수특성곡선과 투수계수곡선에 대하여 고찰하고 수치해석 기법을 활용하여 민감도 분석을 수행한 바 있다. 또한, Fredlund(2004)는 중심코어형 필댐에 대한 Monte Carlo 해석을 수행하여 투수계수곡선의 기울기에 따라 심벽 상부의 불포화 영역에서의 흐름이 총 침투량의 18~83% 까지 달할 수 있음을 보였다.

이러한 수리학적 특성을 나타내는 변수들은 확률론적인 불확실성을 포함하므로 물성치의 변동폭을 고려한 확률론적 해석결과가 실제 해석결과와 불확실성에 대한 체계적이고 정량적인 정보를 제공할 수 있다.

확률변수  $X$ 의 변동성에 대한 지표인 변동계수(Coefficient of Variation)는 다음과 같이 평균과 표준편차의

비로 정의된다.

$$COV = \frac{\sigma_X}{\mu_X} = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \quad (4)$$

확률론적 해석방법의 하나인 Monte-Carlo Simulation 은 확률변수들의 확률밀도함수를 이용하여 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 발생시켜 확률변수의 표본집단을 생성하고 생성된 각 확률변수의 값을 입력값으로 하여 해석결과와 확률분포를 구할 수 있는 방법이다.

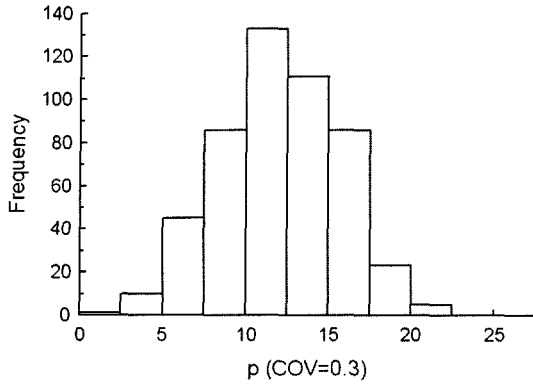
본 연구에서는 Fredlund와 Xing의 함수특성곡선의 변수인  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 과 개선된 Campbell 투수계수식의 변수인  $p$ 값의 변동에 따른 댐체의 정상상태에서의 침투량에 대한 확률론적 해석을 수행하였다. 이를 위해 각 변수에 대하여 각 500회의 해석을 수행하였다. 침투해석에 필요한 물성 중 포화투수계수는 투수계수곡선의 모양은 변화시키지 않고 절대값만 변화시켜 정상상태 해석의 경우에 포화투수계수와 침투량의 비가 일정하게 되므로 Monte-Carlo Simulation의 대상 변수에서 제외하였으며 결과 해석시 침투량을 포화투수계수 값으로 정규화함으로써 그 영향을 배제하였다.

입력 물성값의 평균은 실험값을 기본으로 사용하였으며 변동계수 0.1과 0.3에 대하여 각각 정규분포를 가정한 해석을 수행하였다. 그림 9는 해석에 사용된 각 변수의 분포를 나타내는 히스토그램이다.

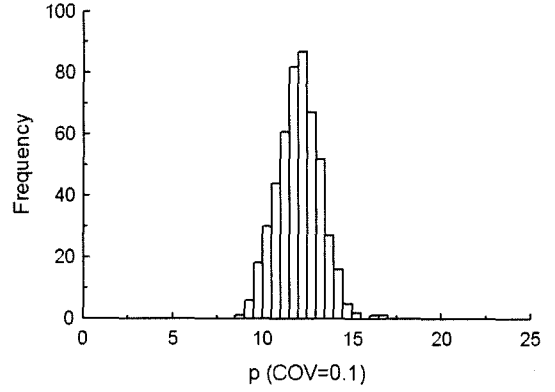
그림 10은 Fredlund와 Xing 함수특성 곡선의 각 변수의 변화에 따른 포화투수계수  $k_s$ 로 정규화된 침투수량의 변화를 나타낸 것이다.  $a$ 와  $n$ 값이 증가하면 침투량이 증가하고,  $p$ 와  $m$ 이 증가하면 침투수량은 감소함을 알 수 있다.

$p$ 값은 투수계수곡선의 기울기와 관련이 있는 경험계수로 식 (2)에서 알 수 있듯이  $p$ 값이 증가하면 불포화 영역에서의 투수계수가 작아지게 되므로 침투량도 감소하게 된다.

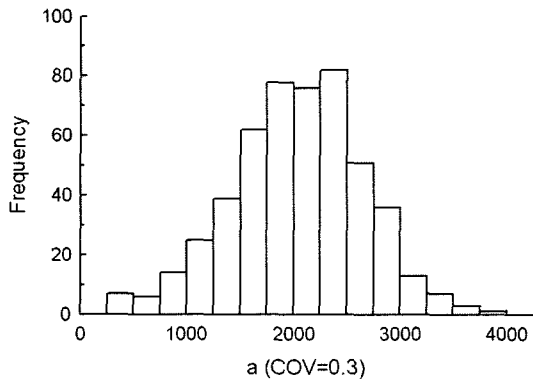
변수  $a$ 는 공기함입치와 관련된 값으로 함수특성곡선의 변곡점에서의 모관흡수력으로 정의된다. 이 값은 함수특성곡선의 모양에는 영향을 미치지 않지만 값이 커질수록 곡선을 모관흡수력이 큰 쪽으로 이동시키는 역할을 한다.  $a$ 값이 클수록 공기함입치가 커서 같은 모관흡수력에 대하여 더 많은 수분을 함유하게 되고, 따라서 물이 흐를 수 있는 공간이 커진다.  $a$ 값이 큰 경우 간극수압이 음의 값을 갖지만 모세관현상에 의해 포화상



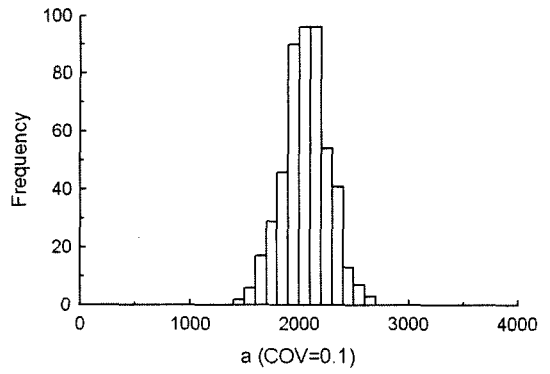
(a) 입력 변수  $p$ 의 분포(COV=0.3)



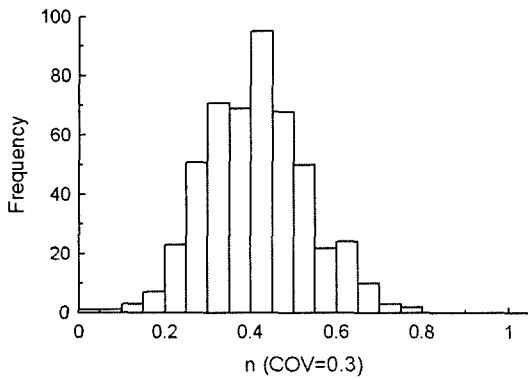
(b) 입력 변수  $p$ 의 분포(COV=0.1)



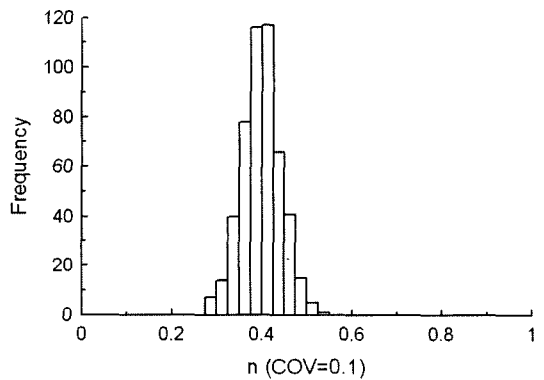
(c) 입력 변수  $a$ 의 분포(COV=0.3)



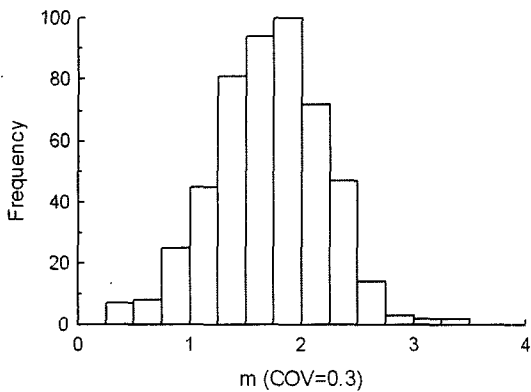
(d) 입력 변수  $a$ 의 분포(COV=0.1)



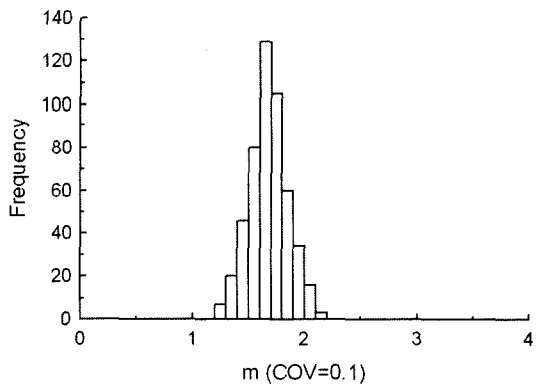
(e) 입력 변수  $n$ 의 분포(COV=0.3)



(f) 입력 변수  $n$ 의 분포(COV=0.1)



(g) 입력 변수  $m$ 의 분포(COV=0.3)



(h) 입력 변수  $m$ 의 분포(COV=0.1)

그림 9. 입력물성의 분포



태가 유지되는 모관포화영역이 넓으므로 상당한 양의 수분이 모세관 현상에 의해 불포화 영역에 존재하게 된다. 즉, 모관포화영역에서는 투수계수가 포화투수계수와 같으므로 간극수압이 0인 자유수면 위에도 포화흐름이 존재하게 되어 더 많은 물이 흐르게 된다.

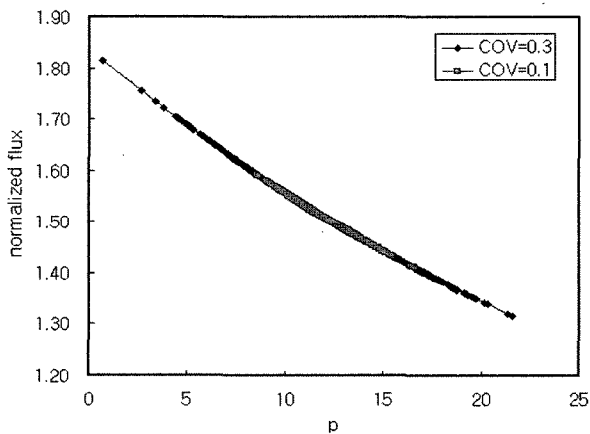
변수  $n$ 은 흙의 간극크기 분포(pore size distribution)와 관련이 있으며, 간극크기 분포가 균등할수록 더 큰 값을 나타낸다.  $n$ 값이 커지면,  $a$ 값이 고정되어 곡선의 변곡점의 위치는 변하지 않은 상태에서 모관흡수력에 따른 함수비 변화의 경사가 커지게 되므로 함수비가 커지게 된다. 마찬가지로 투수계수도 커지게 되므로 더 많은 양의 침투가 발생하게 된다.

변수  $m$ 은 변곡점에 대한 곡선의 대칭성과 관련이 있으며 높은 모관흡수력 범위에서 함수특성곡선의 변화와 관련이 있다.  $m$ 값이 클수록 함수비가 작은 값을 나타내고 불포화 영역에 존재하는 물의 양도 작아서 투수계수가 작은 값을 갖게 되며 더 적은 물이 흐르게 된다.

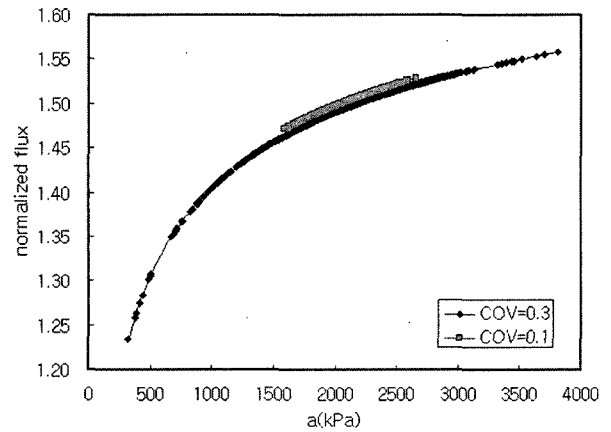
그림 11은 해석결과의 분포를 히스토그램으로 나타낸 것으로 표 3에서 알 수 있듯이 입력변수의 변동계수보다는 침투량의 변동계수가 항상 작게 나타났다. 동일한 변동계수를 나타내는 입력값에 대하여  $n$ 값에 의한 정규화된 침투량의 변동폭이 가장 크게 나타났으며 그 다음으로  $p$ ,  $m$ ,  $a$ 의 순으로 나타났다. 변수  $n$ 은 흙의 간극크기 분포와 관련이 있으므로 입도분포를 고려하여 입력값을 결정하는 것이 정확한 해석값을 얻기 위해 매우 중요함을 알 수 있다.

## 5. 결론

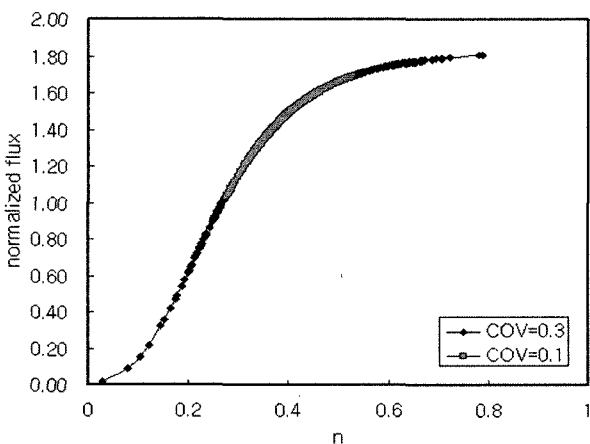
본 연구에서는 댐의 심벽재료에 대한 함수특성곡선과 투수계수를 구하는 실내실험을 수행하였다. 그리고, 불포화 수리특성이 댐체의 침투 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 함수특성곡선 및 투수계수곡선의 변수의 변동 폭을 고려한 확률론적 해석을 수행하여 물성



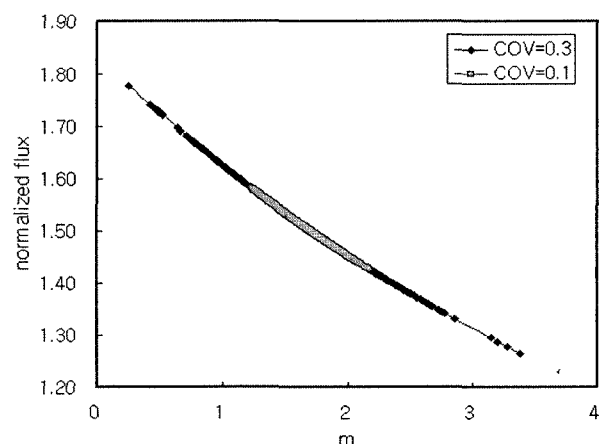
(a)  $p$ 의 변화에 따른 유량변화



(b)  $a$ 의 변화에 따른 유량변화

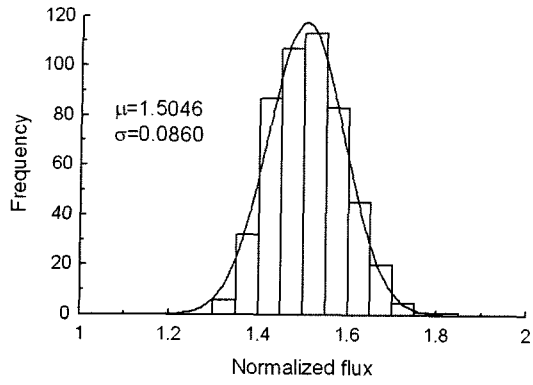


(c)  $n$ 의 변화에 따른 유량변화

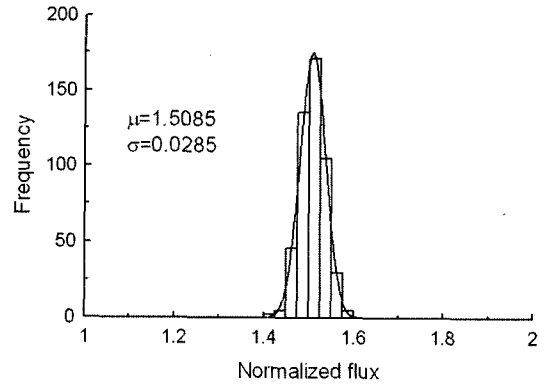


(d)  $m$ 의 변화에 따른 유량변화

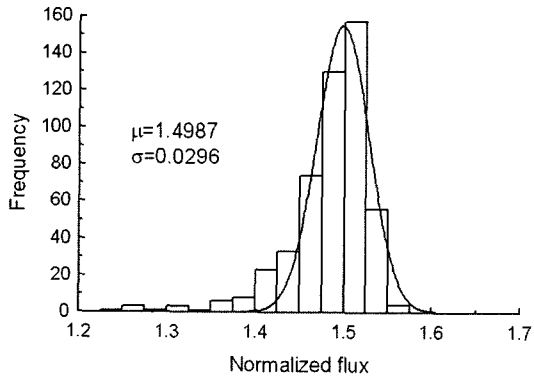
그림 10. 입력값의 변화에 따른 유량의 변화



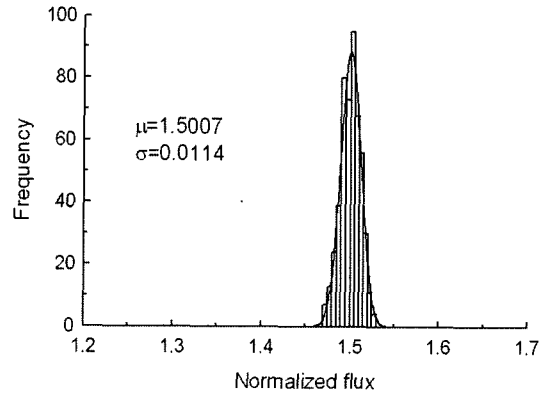
(a)  $p(\text{COV}=0.3)$



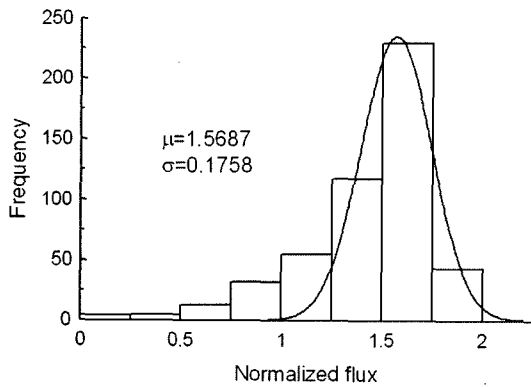
(b)  $p(\text{COV}=0.1)$



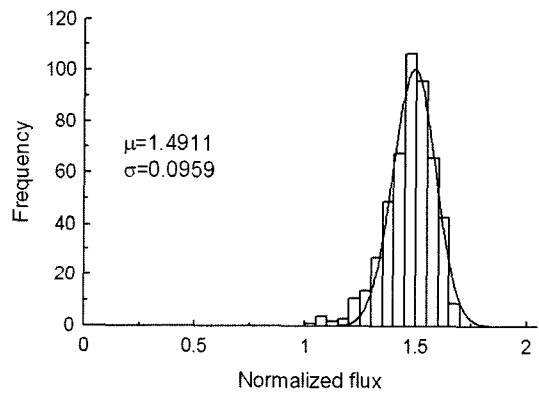
(c)  $a(\text{COV}=0.3)$



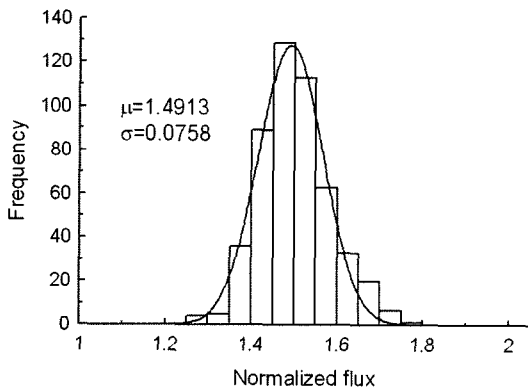
(d)  $a(\text{COV}=0.1)$



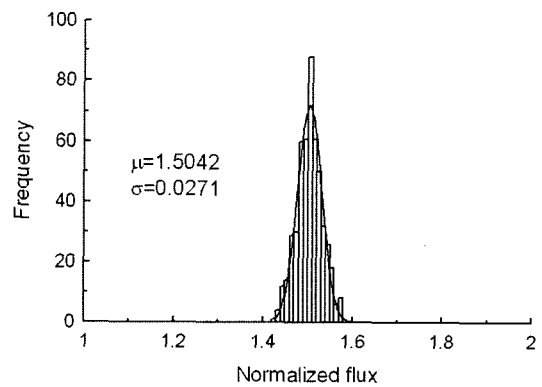
(e)  $n(\text{COV}=0.3)$



(f)  $n(\text{COV}=0.1)$



(g)  $m(\text{COV}=0.3)$



(h)  $m(\text{COV}=0.1)$

그림 11. 해석결과의 분포

표 3. 변수 및 침투수량의 확률분포

	입력변수							
	p		a(kPa)		n		m	
COV	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3
Mean	12	12	2060	2060	0.404	0.404	1.68	1.68
Std. Dev.	1.2	3.6	206	618	0.0404	0.1212	0.168	0.504
정규화 침투수량(해석 결과)								
Mean	1.5085	1.5046	1.5007	1.4987	1.4911	1.5687	1.5042	1.4913
Std. Dev.	0.0285	0.0860	0.0114	0.0296	0.0959	0.1758	0.0271	0.0758
COV	0.019	0.0507	0.008	0.020	0.064	0.112	0.018	0.051

의 변화에 따른 댐체의 침투량의 변화를 연구하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 심벽재료에 대한 함수특성 실험에서 작용하는 연직 하중이 클수록 함수특성곡선의 공기함입값이 커지고 곡선의 기울기가 완만해져 동일한 모관흡수력에 대하여 체적함수비가 증가하였다. 이는 응력상태에 따라 부피가 변화하고 흙의 구조가 달라져 함수특성이 달라지기 때문이다.
- (2) 함수특성곡선 실험값을 대상으로 곡선맞춤기법을 이용하여 각 이론별 함수특성곡선에 사용되는 맞춤 변수들을 구한 결과, 곡선맞춤식의 변수 개수가 많은 Fredlund와 Xing, van Genuchten 곡선은 실험결과를 잘 나타내고 있지만, van Genuchten과 Mualem 곡선과 Brooks와 Corey 이론곡선은 이들에 비해 다소 차이가 발생하고 있다.
- (3) Fredlund와 Xing 함수특성 곡선의 각 변수의 변화를 고려한 해석 결과에 따르면 동일한 변동계수를 나타내는 입력값에 대하여 흙의 간극 크기 분포와 관련이 있는 n값에 의한 침투량의 변동 폭이 가장 크게 나타나므로 입도분포를 고려하여 입력값을 결정하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

댐의 침투거동은 물이 흙을 통해 얼마나 빨리 흐를 수 있는지를 나타내는 투수계수와 얼마만큼의 물을 저장할 수 있는지를 나타내는 함수특성곡선에 따라 달라지므로 댐체 거동 파악을 통하여 안정성 평가의 신뢰도 향상을 위해서는 댐 축조 재료에 대한 실험자료의 축적과 물성 변동 폭에 대한 추후 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

1. 성상규, 이인모 (2003), “화강풍화토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향”, *한국지반공학학회논문집*, 제19권, 2호, pp.27-38.
2. 조성은 (2005), “불포화 수리특성에 대한 댐체 침투 거동의 민감

- 도 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제21권, 3호, pp.119-131.
3. 한국수자원학회 (2003), *댐설계기준*, p.195.
4. 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.
5. Fredlund M. D. (1996), *Design of a Knowledge-Based System for Unsaturated Soil Properties*, M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
6. Fredlund, M. D. (2004), “Finite Element Stochastic Analysis”, *57th Canadian Geotechnical Conference and 5th Joint IAHC-GS Conference*, October 24-27, Quebec, QC, Canada.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Ng, C. W. W., and Pang, Y. W. (2000), “Influence of Stress on Soil-Water Characteristics and Slope Stability”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.126, No.2, pp.157-166.
11. 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.
12. 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.
13. SoilVision System Ltd. (2005), *SVFLUX (Ver. 5) User's manual*, Canada.
14. 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.
15. 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.
16. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., and Pufahl, D. E. (1999), “The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-water Characteristic of a Compacted Till”, *Geotechnique*, Vol.49. No.2, pp.143-159.
17. Zapata, C. E., Houston, W. N., Houston, S. L., and Walsh, K. D. (2000), “Soil-Water Characteristic Curve Variability”, *Advances in Unsaturated Geotechnics*, Denver, Colorado, August 5-8, pp.84-123.

(접수일자 2006. 1. 2, 심사완료일 2006. 4. 4)