

## 중심코어형 사력댐의 코어존 침투량 예측기법

### Estimation of Seepage Rate through Core Zone of Rockfill Dam

이 중 옥<sup>1</sup> Lee, Jong-Wook

임 희 대<sup>2</sup> Lim, Heui-Dae

#### Abstract

Seepage rate through the core zone of rockfill dam, estimated from graphical technique and the equation by Sakamoto (1998), is different from the real condition because of neglecting unsaturated flow. With existing method to estimate total seepage rate, it is difficult to understand the tendency of total seepage rate changes by reservoir water level change. Steady state seepage rate and the factors affecting the time needed to attain to changes of reservoir water level and saturated hydraulic conductivity and unsaturated hydraulic properties of core material are analysed thorough the 2-D steady and unsteady state seepage analyses of Soyanggang dam. Numerical results revealed that the seepage rate can be expressed by the linear equation form and the value of unsaturated soil parameter  $n$  is the most important factor affecting the seepage rate and the time needed to attain steady state. The estimation method presented in this study can be used by the designer and the personnel of dam safety for convenient estimation of seepage rate and quantitative analysis of measured seepage rate without 2-D and 3-D numerical analyses.

#### 요 지

불포화 흐름을 고려하지 않는 도해법(Casagrande, 1961; Cedergren, 1997)과 근사식(Sakamoto, 1998)에 의한 중심코어형 사력댐 코어존의 침투량은 실제 침투거동과는 차이가 있고, 저수위 변화에 대한 침투량 변화경향의 파악도 곤란하다. 본 연구에서는 소양강댐에 대한 2차원 정상상태 및 비정상상태 침투류해석으로 저수위, 포화투수계수, 불포화수리특성 변화에 대한 정상상태 침투량과 정상상태 도달시간에 미치는 영향요인을 분석하였다. 분석결과 침투량은 정규화된 선형 관계식으로 예측이 가능하고, 불포화 예측변수  $n$ 이 정상상태 침투량과 정상상태 도달시간에 가장 큰 영향을 주었다. 본 연구에서 제시한 예측기법은 복잡한 3차원 해석 및 여러 단면에 대한 2차원 해석을 수행하지 않고도 댐 설계자 및 안전관리 실무자가 중심코어형 사력댐의 침투량을 산정하여 실측치와의 정량적 분석에 손쉽게 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

**Keywords** : Core zone, Numerical modelling, Rockfill dam, Seepage rate, Unsaturated soil

#### 1. 서 론

필댐의 제체 및 기초지반을 통한 침투량은 외부변형과 함께 댐의 안전관리를 위한 가장 중요한 계측항목이

다. 필댐의 설계단계에서는 도해법에 의한 근사해법과 유한요소법 등의 수치해석에 기초한 침투류해석으로 허용침투량과 침투과피에 대한 안전성을 검토한다. 필댐의 운영 중 발생하는 침투량의 실측치에 대해서는 저

1 정회원, 한국수자원공사 K-WATER연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KIWE, KWater, geoljw@kwater.or.kr, 교신저자)

2 정회원, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept., Civil Engrg., Chungnam National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

수위의 변화 없이 침투량이 급격히 증가하는 경향을 비정상적인 상태로 평가하는 정상적인 평가방법이 주로 이용되고 있지만, 실측치로 얻은 침투량은 저수위에 대한 필댐의 수리특성에 대한 응답이므로 필댐의 안전관리를 위해서는 실측 침투량을 정량적으로 분석하는 방법이 필요하다.

필댐의 대표적인 형식인 중심코어형 사력댐 코어존의 횡단면 형상은 일반적으로 댐축에 대해 대칭이고 폭은 하부로 갈수록 일정비율로 증가하는 사다리꼴 형상이다. 실제의 사력댐에서는 코어존의 상류측과 하류측에 각각 필터존 및 록존이 배치되어 있지만, 코어존의 투수계수보다는 매우 크기 때문에 침투량의 해석에 대해서는 그 존재를 무시할 수 있다(Sakamoto, 1998). 코어존을 통한 침투량 해석은 하류측 침윤면의 위치를 해석적으로 결정할 수 없고, 코어의 형상도 해석적으로 나타내기가 곤란하기 때문에 Casagrande(1961)의 방법을 이용하여 침윤면을 가정하고, 유선망을 작도하는 도해법(Cedergren, 1997)과 불포화 이론을 적용한 수치해석법이 이용되어왔다. Sakamoto(1998)는 Darcy의 법칙과 코어존의 형상을 고려한 근사식을 제안하였다. Chapuis와 Aubertin(2001)은 제한된 단면형상과 수리특성에 대한 불포화 침투류 해석결과를 이용하여 높이 50m 이하의 균일형 및 중심코어형 제방에만 적용할 수 있는 근사식을 제안하였다. 불포화 수리특성에 대한 침투량과 간극수압에 따라 코어존을 통한 침투거동이 변화하지만 도해법과 Sakamoto(1998)의 근사식은 불포화 흐름을 무시하기 때문에 실제 코어존의 침투거동과는 차이가 있다. 코어존 전체의 총침투수량을 산정하기 위해서는 코어존을 댐축방향으로 여러 개의 구간으로 분할하고, 각 구간에 대해 단위폭당 침투량을 산정하여 합산하는 방법이 주로 이용되어 왔다. 하지만 저수위 변화에 대한 총침투량을 산정하기 위해서는 수치해석을 반복적으로 수행해야 할 필요가 있다. 또한, 산정된 총침투량은 정상상태 조건에 대한 것으로 댐이 최초 담수된 후 정상상태에 도달하기 위해 필요한 시간은 코어존의 형상, 포화 투수계수 및 불포화 수리특성에 따라 변화한다.

본 연구에서는 중심코어형 사력댐의 침투량 예측기법을 제시하기 위해 국내의 대표적인 중심코어형 사력댐인 소양강댐을 대상으로 2차원 정상상태 및 비정상상태 침투류해석을 실시하여 저수위, 포화투수계수, 불포화수리특성 변화에 대한 정상상태 침투량과 정상상태 도달시간에 미치는 영향요인을 분석하였다. 기초부를

통한 침투량은 본 연구에서 고려하지 않았다.

## 2 불포화 침투해석 이론

### 2.1 지배방정식

임의 시간에 흐름영역 내 임의 위치에 있는 요소에서 유입 및 유출 유량의 차이는 체적함수비의 차이와 같다. 즉, 외부에서 유입되는 유량과 요소 내 유량의 변화량의 합은 체적함수비의 시간에 따른 변화율과 같으며 2차원의 경우 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서, H는 총수두,  $k_x$ 와  $k_y$ 는 각각 x와 y 방향으로의 투수계수, Q는 작용하는 유량,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량이며  $m_w$ 는 저류용량이다.

정상상태의 경우에는 모든 시간에서 유입된 유량과 유출된 유량이 같으므로 우변은 0이 된다. 본 연구에서는 식 (1)의 해를 얻기 위해 유한요소 해석프로그램인 Seep/W를 사용하였다.

Seep/W는 Wong & Duncan(1984)이 개발하여 Krahn 등(1987)에 의해 계승 발전되었으며 유한요소법을 적용한 본 프로그램은 정상류 상태와 비정상류의 해석뿐만 아니라 포화도 및 불포화도의 침투류 해석, 2차원 및 축대칭 문제, 피압 대수층에서의 흐름 문제, 그리고 비등방성 투수층에 대한 침투류 해석이 가능하다.

Seep/W는 포화영역과 불포화영역 사이를 연속적으로 해석할 수 있다. 각 영역의 재료특성은 함수특성곡선과 불포화투수계수의 2개의 특성함수에 의해 정의되며, 함수특성곡선의 예측에는 입도분포 곡선을 이용한 예측방법(Aubertin 등, 2003), Fredlund와 Xing(1994)과 van Genuchten(1980)의 예측기법을 이용할 수 있고, 불포화투수계수의 예측에는 Fredlund 등(1994), Green과 Corey(1971), van Genuchten(1980)의 예측기법을 이용할 수 있다.

### 2.2 함수특성곡선의 구성식

함수특성곡선은 흙이 함유하는 물과 흙의 모관흡수력(matric suction)의 관계로 정의되며 물의 양은 일반적으로 체적함수비로 표현된다. 함수특성곡선을 나타내기 위해 많은 수학적 수식이 제안되었으며 이들 모델식

에 대한 장·단점에 대해서는 많은 문헌에서 논의되었다 (Leong and Rahardjo, 1997). Fredlund 등(1994)은 전체 모관흡수력 범위에 적용할 수 있는 3개의 변수로 구성된 함수특성곡선식을 van Genuchten(1980)의 제안식과 같이 간극크기 분포로부터 식 (2)와 같이 제안하였다. 이 모델은 다양한 종류의 지반에 대해 적용성이 좋다.

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

여기서,  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 은 곡선맞춤 변수,  $\theta_s$ 는 포화 체적함수비,  $\psi$ 는 모관흡수력이다. 변수  $a$ 는 공기합입치와 관련된 값으로 함수특성곡선의 변곡점에서의 모관흡수력으로 정의되며 변수  $n$ 은 흙의 간극크기 분포와 관련이 있으며, 간극크기 분포가 균등할수록 더 큰 값을 갖는다. 그리고 변수  $m$ 은 함수특성곡선의 변곡점에 대한 곡선의 대칭성과 관련이 있으며  $m=1$ 인 경우를 제외하고는 변곡점에 대하여 비대칭이다. 변수  $m$ 은 높은 모관흡수력 영역에서의 잔류 체적함수비(residual water content)와 관련이 있다. 잔류 체적함수비는 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 유출되지 않는 함수비를 의미하며 이 함수비에 남이 있는 물은 열에 의해서만 제거될 수 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 Fredlund 등(1994)의 모델의 경우 다음과 같다.

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

여기서,  $a$ ,  $n$ ,  $m$ 은 곡선맞춤 변수,  $\theta_w$ 는 체적함수비,  $\theta_s$ 는 포화 체적함수비,  $\psi$ 는 모관흡수력이다.

### 2.3 불포화 투수계수의 구성식

모관흡수력에 따른 불포화 투수계수의 변화를 보여주는 불포화 투수계수곡선 또한 침투류 해석에 있어 중요한 불포화 지반설계 정수이다. 불포화 투수계수 곡선

은 함수비와 밀접한 관련이 있으므로 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.

본 연구에서는 김윤기(2003)와 조성은(2005)에 의해 국내 화강풍화토 및 중심코어형 사력댐 코어존의 불포화 투수계수의 변화를 가장 잘 표현하는 것으로 분석된 식 (4)와 같은 Fredlund 등(1994)의 불포화 투수계수 곡선식을 적용하여 코어존의 불포화 투수계수 변화를 유추하였다.

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

여기서,  $k_w$ 는 모관흡수력에 따른 불포화 투수계수,  $k_s$ 는 포화 투수계수,  $y$ 는 log 적분을 나타내기 위한 적분 더미변수,  $\theta'$ 는 Fredlund 등(1994)의 함수특성곡선의 미분이다.

## 3. 정상 및 비정상상태 침투류 해석

### 3.1 해석대상

본 연구의 해석대상으로 중심코어형 사력댐인 소양강댐의 최대횡단면을 선정하였다. 코어존의 외측에 배치되는 필터존과 록존의 투수계수는 코어존보다 매우 크기 때문에 침투량의 해석에 대해서는 그 존재를 무시할 수 있고(Sakamoto, 1998), 불포화영역에서 흐름에도 기여하는 바가 거의 없어서(조성은, 2005) 필터존과 록존은 침투류해석에서 제외하였다. 코어존의 형상은 그림 1과 같이 높이는 121m, 저폭은 65.5m이며 댐마루에서의 폭은 4m인 댐축에 대칭인 사다리꼴 형상이며 상·하류면의 경사는 1:0.25 이다. 코어존을 통한 침투량은 포화투수계수( $k_{sat}$ ), 등가단면적 및 등가 평균 동수구배의 곱에 비례한다(Chapuis와 Aubertin, 2001). 침투류 해석에 의한 단위폭당 침투량을 정규화하기 위해 그림 2와 같이 3개의 변수를 정의하였다.  $h$ 는 댐의 상·하류면에서의 수두차,  $L_{max}$ 는 코어의 저면 최대폭,  $L_{min}$ 은

저수위 위치에서의 코어의 최소폭, 보조적인 변수로서  $L' = 0.5(L_{max} + L_{min})$ 를 정의하였다. 소양강댐은 1970년 4월 본댐 축조공사를 착수하여 1972년 본댐 축조를 완료하였고 1973년 10월에 준공되었다. 소양강댐은 1973년 11월부터 발전을 개시하여 2009년 6월까지 약 34.6년간 운영되었으며, 그동안의 저수위 변동은 그림 3과 같다. 준

공이후 저수위는 1984년과 1990년에 각각 EL.197.79m, EL.197.99m로서 계획 홍수위인 EL.198.00m에 근접하게 나타났다. 최저수위는 1978년도에 EL.151.93m를 나타내었지만 이는 저수지가 만수되기 이전이고, 1981년 만수위에 도달한 이후의 최저수위는 2008년 6월 15일에 EL.154.99m를 기록하였다.

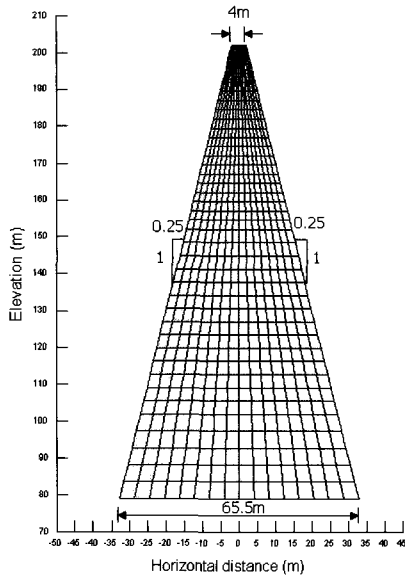


그림 1. 소양강댐 코어존의 해석단면

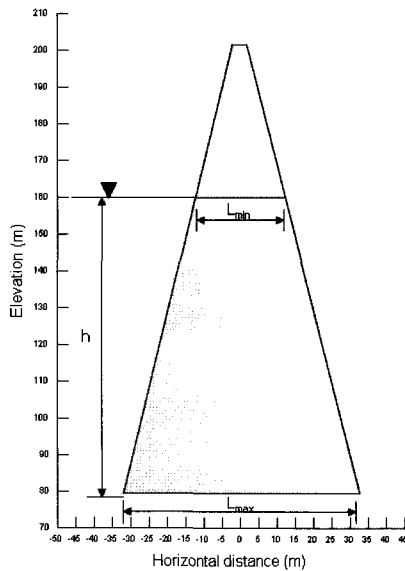


그림 2. 해석결과의 정규화를 위한 변수 정의

### 3.2 코어존 재료의 수리특성

코어존의 성토재료는 SC, SC-SM, SM이 가장 적당한 코어재로 결정되었으나, 매장량이 부족하여 부족분은 화강풍화토(SW 70~50%)와 점토(CH, CL 30~35%)를

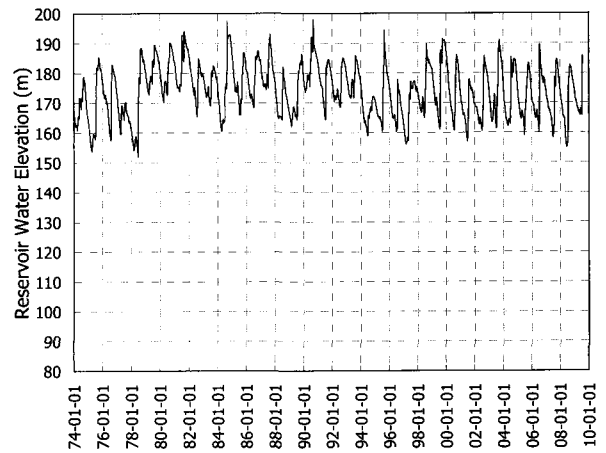


그림 3. 소양강댐 저수위 운영기록

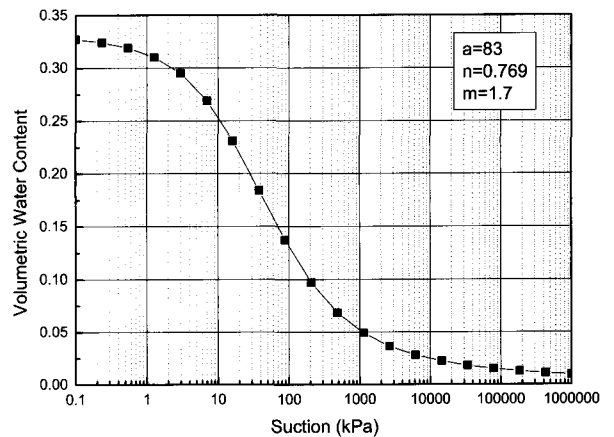


그림 4. 소양강댐 코어존의 합수특성곡선

표 1. 소양강댐 코어재료의 포화 및 불포화 수리특성

| 토질분류       | 함수비 ( $\omega$ ) | 간극율 ( $n$ ) | 포화 투수계수 ( $k_{sat}$ )    | 불포화 수리특성 |       |     | 비고                                     |
|------------|------------------|-------------|--------------------------|----------|-------|-----|----------------------------------------|
|            |                  |             |                          | a(kPa)   | n     | m   |                                        |
| SW, CH, CL | 17%              | 0.38        | $4.6 \times 10^{-9}$ m/s | 83       | 0.769 | 1.7 | · 소양강댐 정밀안전진단 보고서(1999)<br>· 조성은(2005) |

혼합하여 시공되었고, 품질관리 시험결과 투수계수는  $4 \times 10^{-9} \text{m/s}$  이었다(소양강댐 정밀안전진단보고서, 1999).

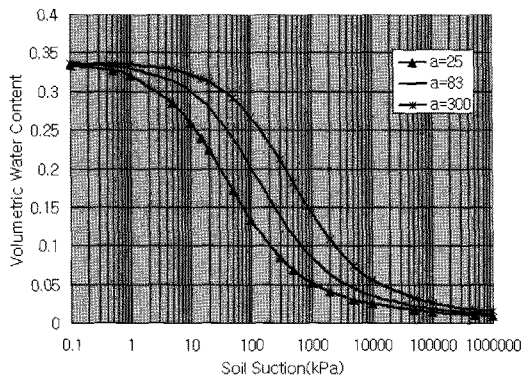
소양강댐 코어존에 대한 불포화 수리특성 실험은 수행되지 않았으므로 표 1과 같이 조성은(2005)이 소양강댐 코어존에 대해 추정된 함수특성곡선 예측변수를 적용하였다. 그림 5는 예측된 함수특성곡선을 기준으로 Fredlund 등(1994)의 모델의 변수들을 각각 변화시켰을 때의 함수특성곡선의 모양과 이로부터 식 (4)를 이용하여 예측한 투수계수 곡선을 나타낸다. 함수특성과 투수계수의 변화는 불포화 영역을 통한 수분의 이동에 중요

한 영향을 미치므로 이들 특성의 변화에 따른 정상상태 침투수량과 정상상태 침투수량에 도달하는 시간에 대한 영향을 분석하였다.

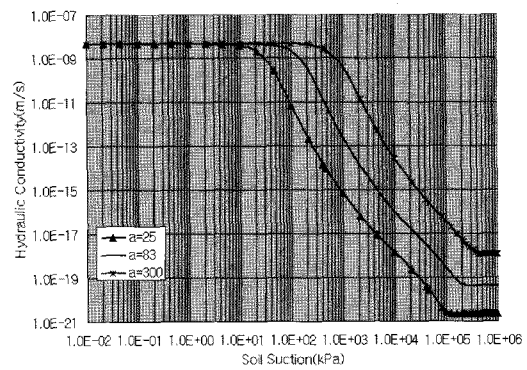
### 3.3 해석조건

#### 3.3.1 정상상태 해석

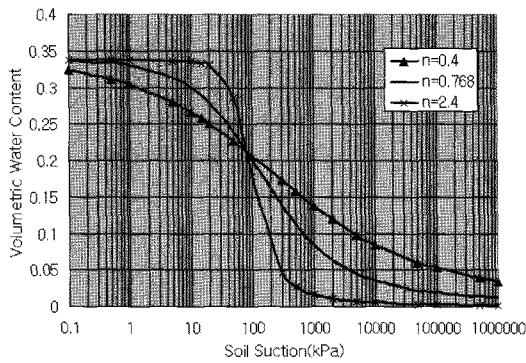
저수위와 불포화 수리특성의 변화에 따른 소양강댐 코어존을 통한 정상상태 침투수량을 산정하기 위해 그림 1의 해석단면에 대해 표 2와 같이 2가지 해석조건으로



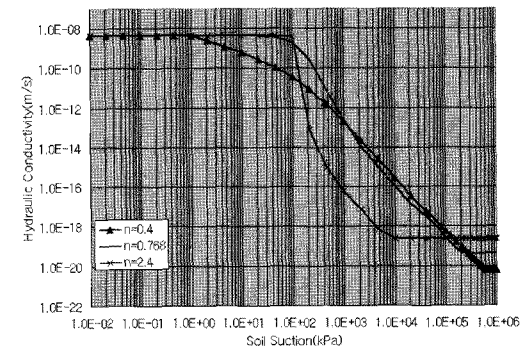
(a)  $a$ 에 따른 함수특성 변화



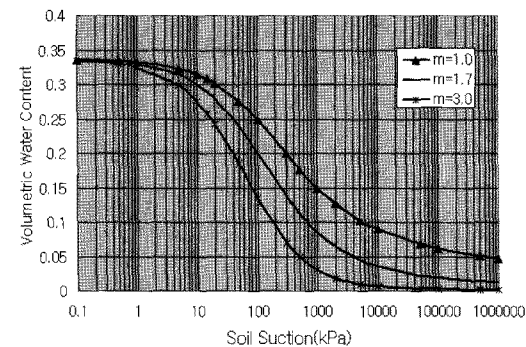
(b)  $a$ 에 따른 투수계수 변화



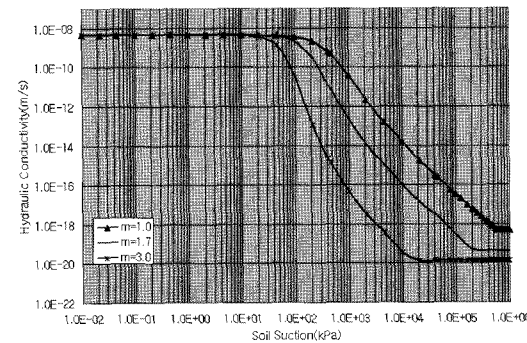
(c)  $n$ 에 따른 함수특성 변화



(d)  $n$ 에 따른 투수계수 변화



(e)  $m$ 에 따른 함수특성 변화



(f)  $m$ 에 따른 투수계수 변화

그림 5. 함수특성 및 투수계수의 변화( $k_{sat} = 4.6 \times 10^{-9} \text{m/s}$ ; 조성은, 2005)

표 2. 정상상태 해석조건

| 구 분 | 포화투수계수<br>( $k_{sat}$ , m/s) | 불포화 수리특성 |       |     | 저수위<br>(EL.m) | 상·하류<br>수두차<br>(h, m) | 비고                            |
|-----|------------------------------|----------|-------|-----|---------------|-----------------------|-------------------------------|
|     |                              | a (kPa)  | n     | m   |               |                       |                               |
| S-1 | $4.6 \times 10^{-9}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 198.0         | 119.0                 | a=83, n=0.768,<br>m=1.7<br>기준 |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         |          |       |     | 193.5         | 114.5                 |                               |
|     | $4.6 \times 10^{-7}$         |          |       |     | 190.0         | 111.0                 |                               |
| S-2 | $4.6 \times 10^{-9}$         | 25       | 0.768 | 1.7 | 180.0         | 101.0                 |                               |
|     |                              | 83       | 0.768 | 1.7 | 170.0         | 91.0                  |                               |
|     |                              | 300      | 0.768 | 1.7 |               |                       |                               |
|     |                              | 83       | 0.400 | 1.7 | 160.0         | 81.0                  |                               |
|     |                              | 83       | 0.768 | 1.7 | 150.0         | 71.0                  |                               |
|     |                              | 83       | 2.400 | 1.7 | 130.0         | 51.0                  |                               |
|     |                              | 83       | 0.768 | 1.0 | 110.0         | 31.0                  |                               |
|     |                              | 83       | 0.768 | 1.7 | 90.0          | 11.0                  |                               |
|     |                              | 83       | 0.768 | 3.0 |               |                       |                               |

정상상태 침투류 해석을 실시하였다. 정상상태에서는 유입량과 유출량이 같기 때문에 함수특성곡선은 필요하지 않지만, 해석의 일관성을 위해 그림 5와 같이 Fredlund 등(1994)의 함수특성곡선으로부터 예측된 투수계수 곡선을 적용하여 함수특성의 영향을 고려하였다.

해석조건 S-1에서는 코어존의 포화투수계수( $k_{sat}$ )를 표 1의 품질시험결과인  $4.6 \times 10^{-9}$  m/s를 기준으로  $4.6 \times 10^{-8}$ ,  $4.6 \times 10^{-7}$  m/s로 변화시켜 해석하였다. 이때 불포화 수리특성의 변화는 고려하지 않았다. 해석조건 S-2에서는 불포화 수리특성의 변화가 침투수량의 변화에 미치는 영향을 검토하기 위해 코어존의 포화투수계수를  $4.6 \times 10^{-9}$  m/s 하고, 표 1의 불포화 수리특성을 기준으로 하여 각각의 예측변수의 변화에 따른 함수특성곡선과 투수계수곡선의 변화를 고려하여 해석하였다. 저수위는 해석조건 S-1과 S-2에서 EL.90m부터 EL.198m(홍수위)까지 10회 변화시켜 해석하였으며, 이때 상·하류 수두차(h)는 11m부터 119m에 해당된다.

Seep/W에서는 침투면의 위치를 직접적으로 결정하지 않고 반복 계산과정을 수행한다(Chenaf와 Chapuis, 1999). 침투면을 지정하지 않고 1차 수치계산을 수행하면 계산된 수두가 표고보다 높은( $u_w > 0$ ) 노드들이 하류 사면 표면부에 나타난다. 2차 수치계산 과정에서 이 노드들은 임의 높이의 침투면을 나타내기 위해  $h=0$ (또는  $u_w=0$ )의 경계조건이 지정된다. 2차 수치계산을 통해 하류사면 표면의 노드에서 표고보다 높은 수두가 계산되면 이 수두는 3차 수치계산 과정에서 표고와 같게 경계

조건이 지정된다. 침투면 상부에서 물은 모관흡수력에 의해 저류되므로 물은 사면을 따라 흐를 수 없는 흐름 정지조건이 된다. 반복 계산과정은 사면 표면부의 모든 노드의 간극수압이 0 또는 음의 값이 되면 종료된다.

### 3.3.2 비정상상태 해석

저수위와 코어존의 포화투수계수( $k_{sat}$ ) 및 불포화 수리특성(a, n, m)이 정상 침투조건에 도달하는데 걸리는 시간에 미치는 영향을 분석하기 위해 표 3과 같이 5가지 조건으로 비정상 침투류해석을 실시하였다. 비정상상태 해석에서는 유입량과 유출량의 차이만큼 물이 흙에 저장되므로 물이 흙을 통해 얼마나 빨리 흐를 수 있는지를 나타내는 투수계수와 함께 얼마만큼의 물을 저장할 수 있는지를 나타내는 함수특성곡선이 입력자료로서 필요하다. 불포화 흐름을 고려하기 위해 정상상태 해석 조건에서와 같이 Fredlund 등(1994)의 함수특성곡선식으로부터 예측된 투수계수 곡선(그림 5)을 이용하여 함수특성의 영향을 고려하였다.

해석조건 T-1에서는 포화투수계수( $k_{sat}$ )를  $4.6 \times 10^{-9}$ ,  $4.6 \times 10^{-8}$ ,  $4.6 \times 10^{-7}$ , T-2에서는 저수위를 EL.198.0m(계획홍수위), EL.193.5(상시만수위), EL.170.0m, EL.150.0m(저수위), T-3에서는 예측변수 a를 25, 83, 100, T-4에서는 예측변수 n을 0.4, 0.768, 2.4, T-5에서는 예측변수 m을 1.0, 1.7, 3.0로 변화시켜 해석하였고, 해석에 적용한 시간간격(Time step)은 목표 저수위에 도달한 후부터 91.25일 간격으로 해석을 수행하였다. 또한, 전체 해석

표 3. 비정상상태 해석조건

| 구분  | 포화투수계수<br>( $k_{sat}$ , m/s) | 불포화 수리특성 |       |     | 저수위<br>(EL.m) | 상·하류<br>수두차<br>(h, m) | 해석 시간간격<br>(day) | 비고           |
|-----|------------------------------|----------|-------|-----|---------------|-----------------------|------------------|--------------|
|     |                              | a (kPa)  | n     | m   |               |                       |                  |              |
| T-1 | $4.6 \times 10^{-9}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            | $k_{sat}$ 변동 |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
|     | $4.6 \times 10^{-7}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
| T-2 | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 198.0         | 119.0                 | 91.25            | 담수위 변동       |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 170.0         | 91.0                  | 91.25            |              |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 150.0         | 71.0                  | 91.25            |              |
| T-3 | $4.6 \times 10^{-8}$         | 25       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            | a 변동         |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 300      | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
| T-4 | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.400 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            | n 변동         |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 2.400 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
| T-5 | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.0 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            | m 변동         |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 1.7 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |
|     | $4.6 \times 10^{-8}$         | 83       | 0.768 | 3.0 | 193.5         | 114.5                 | 91.25            |              |

조건에서 저수위는 담수에 의해 목표수위에 도달한 후 일정하게 유지되는 것으로 가정하여 해석하였다.

#### 4. 결과 및 분석

##### 4.1 정상상태 침투량

표 2의 해석조건으로 정상상태 침투류해석에 의해 저수위 변화와 불포화 수리특성 변화에 따른 단위폭당 침

투량의 변화를 분석하였다. 그림 6은 해석조건 S-1의 정상상태 침투량 해석결과이다. 포화투수계수( $k_{sat}$ )와 저수위가 증가하면 침투량은 포물선 형태로 급격히 증가한다. S-1의 해석결과를 그림 2에서 정의한 변수들을 이용하여 그림 7과 같이 저수위 및 코어존의 기하형상과 포화투수계수로 정규화한 결과, 침투량( $q_s/k_{sat}$ )과 기하형상( $h^2/L'$ )의 관계식은 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있었다. 식 (5)에서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 관계식의 경사와 절편이며 해석결과는 그림 7과 표 4에 나타내었다.

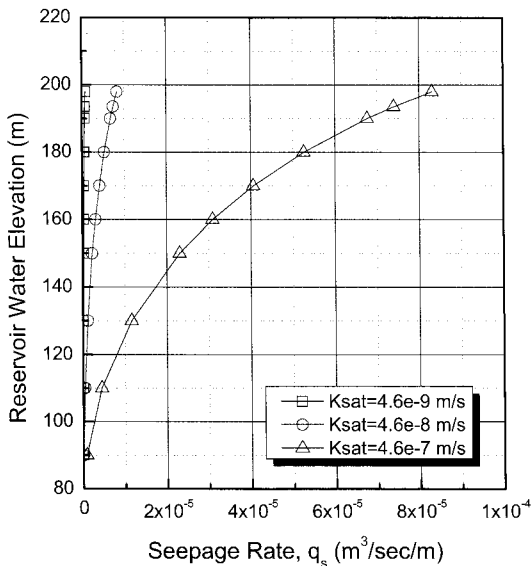


그림 6. 해석조건 S-1의 정상상태 침투량 해석결과

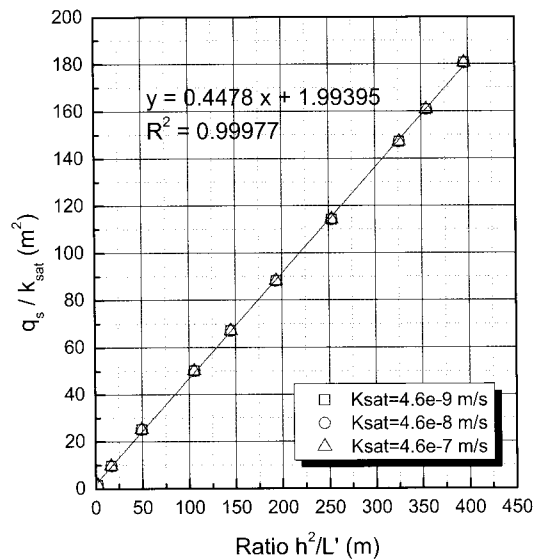


그림 7. 해석결과(S-1)에 의한 정상상태 침투량 예측

표 4. 정상상태 해석결과에 따른 침투량 관계식

| 해석구분 | 해석변수            | 변수의 값                | 침투수량 관계식 |         |         | 비 고 |
|------|-----------------|----------------------|----------|---------|---------|-----|
|      |                 |                      | $\alpha$ | $\beta$ | $R^2$   |     |
| S-1  | $k_{sat}$ (m/s) | $4.6 \times 10^{-9}$ | 0.4478   | 1.9940  | 0.99977 |     |
|      |                 | $4.6 \times 10^{-8}$ |          |         |         |     |
|      |                 | $4.6 \times 10^{-7}$ |          |         |         |     |
| S-2  | a (kPa)         | 25                   | 0.4114   | 0.4260  | 0.99979 |     |
|      |                 | 83                   | 0.4474   | 1.9940  | 0.99977 |     |
|      |                 | 300                  | 0.4434   | 3.7334  | 0.99943 |     |
|      | n               | 0.400                | 0.2020   | 0.0902  | 0.99978 |     |
|      |                 | 0.768                | 0.4474   | 0.1994  | 0.99977 |     |
|      |                 | 2.400                | 0.4452   | 3.1006  | 0.99965 |     |
|      | m               | 1.0                  | 0.4449   | 2.9237  | 0.99966 |     |
|      |                 | 1.7                  | 0.4474   | 1.9940  | 0.99977 |     |
|      |                 | 3.0                  | 0.4398   | 0.8696  | 0.99981 |     |

$$\frac{q_s}{k_{sat}} = \alpha \frac{h^2}{L'} + \beta \quad (5)$$

그림 8~그림 10은 해석조건 S-2의 불포화 수리특성 예측변수(a, n, m)의 변화에 따른 정상상태 침투량 해석 결과이다. 예측변수 a의 값이 25에서 83으로 변화할 때 침투량은 어느 정도의 변동폭을 나타내었지만 a값이 300으로 변화했을 때에는 a가 83일 때와는 큰 차이는 없었다(그림 8). 이것은 a 값이 작을 경우 공기함입치가 작아서 같은 모관흡수력에 대해 더 작은 수분을 함유하므로 물이 흐를 수 있는 공간이 작아지기 때문이며 반대로 a값이 커지면 간극수압은 음의 값을 갖지만 모관흡수력에 의해 포화상태가 유지되는 모관포화영역이

넓으므로 상당한 양의 수분이 불포화 영역에 존재하여 침투수량이 증가하기 때문이다. 공기함입치는 최대 크기의 간극이 자유롭게 배수되기 시작하는 모관흡수력을 나타낸다. 예측변수 n의 값이 0.4에서 0.768로 변화할 때 침투수량은 급격히 증가하지만 2.4에서는 0.768과는 큰 차이를 보이지 않았다(그림 9). 이것은 n의 값이 증가하면 a 값은 고정되어 곡선의 변곡점 위치는 변화지 않은 상태에서 모관흡수력에 따른 함수비의 변화 경사가 커지므로 일정한 높이까지는 함수비가 증가하지만 그 이상의 높이에서는 함수비가 오히려 감소하며 투수계수도 같은 경향을 나타내기 때문이다. 예측변수 m의 값이 1.0에서 1.7로 변화할 때 변화는 거의 없었고

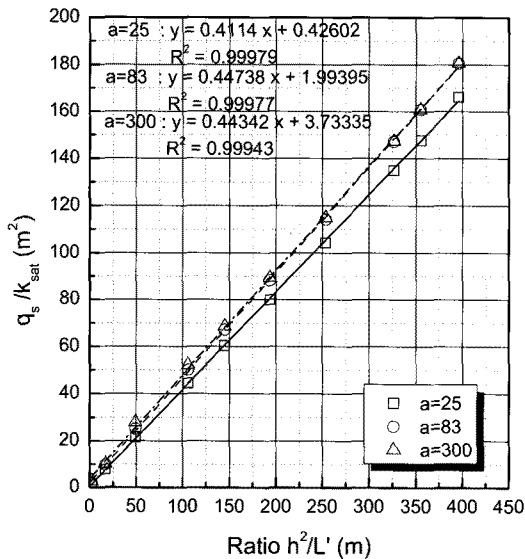


그림 8. 불포화 수리특성 예측변수 a의 변화에 따른 정상상태 침투량 변화(S-2)

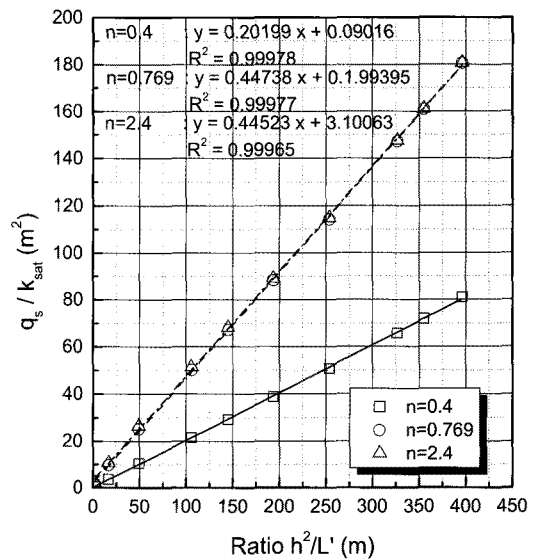


그림 9. 불포화 수리특성 예측변수 n의 변화에 따른 정상상태 침투량 변화(S-2)



m이 3.0일 때 약간 감소하였다. 이것은 m의 값이 작을 수록 함수비가 큰 값을 나타내고 불포화 영역에 존재하는 물의 양도 많기 때문에 투수계수도 큰 값을 가지기 때문이다.

해석조건 S-2에 의한 식 (5)의 침투수량 관계식의  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값은 그림 8~그림 10과 같이 분석하여 표 4에 정리하였다. 이상의 결과로부터 불포화 예측변수 a, n, m중에서 n값이 침투량의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났지만, n=0.4인 경우를 제외하면 변동의

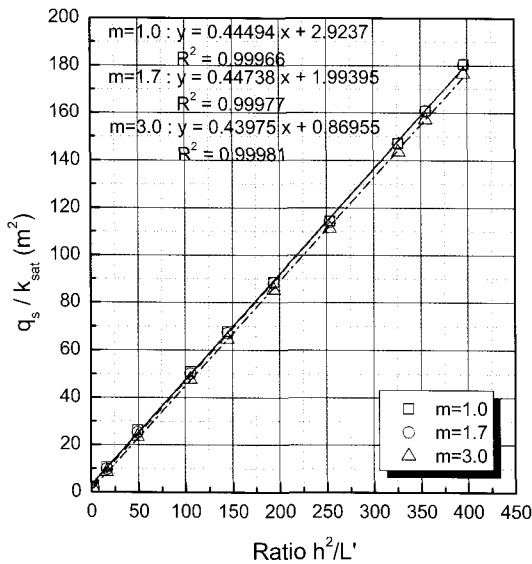


그림 10. 불포화 수리특성 예측변수 m의 변화에 따른 정상상태 침투량 변화(S-2)

폭은 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

#### 4.2 정상상태 침투조건에 도달하는 시간

도해법(Cedergren, 1997)과 근사식(Sakamoto, 1998) 및 수치해석법에 의한 중심코어형 록필댐의 침투량은 정상상태 조건에 대한 것으로 댐이 최초 담수된 후 정상상태에 도달하기위해 필요한 시간은 코어존의 형상, 포화투수계수 및 불포화 수리특성 등에 따라 영향을 받는다.

표 3의 해석조건으로 기본 입력값을 기준으로 비정상 침투류해석으로 얻은 포화투수계수( $k_{sat}$ ), 불포화 예측변수 a, n, m 및 저수위의 변화에 대한 해석결과는 표

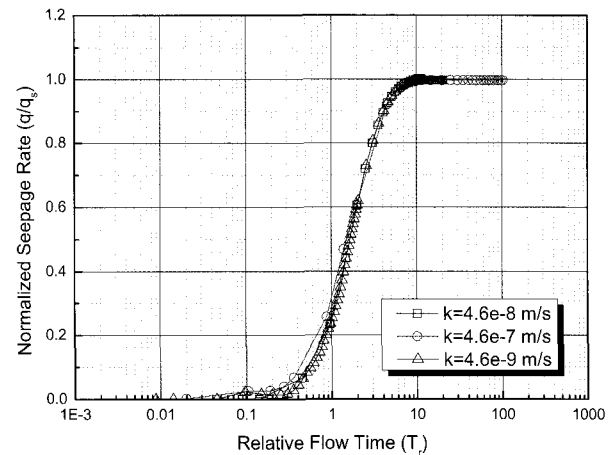


그림 11. 포화투수계수( $k_{sat}$ )에 대한 침투량의 시간변화

표 5. 비정상상태 침투류해석에 의한 정규화 정상상태 도달시간( $T_{rj}$ ) 분석결과

| 해석구분 | 해석변수            | 변수의 변화               | 상·하류 수두차 (h, m) | 정상상태 도달시간 ( $T_f$ , Year) | 코어 저면 침투시간 ( $T_{u,1}$ , Year) | 정규화 정상상태 도달시간 ( $T_{rj}$ ) | 비 고          |
|------|-----------------|----------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------|
| T-1  | $k_{sat}$ (m/s) | $4.6 \times 10^{-9}$ | 114.5           | 1150.00                   | 96.87                          | 11.87                      | $k_{sat}$ 변화 |
|      |                 | $4.6 \times 10^{-8}$ | 114.5           | 174.35                    | 9.69                           | 17.99                      |              |
|      |                 | $4.6 \times 10^{-7}$ | 114.5           | 19.35                     | 0.97                           | 19.95                      |              |
| T-2  | 댐수위 (EL.m)      | 198.0                | 119.0           | 184.35                    | 9.32                           | 19.97                      | 댐수위 변화       |
|      |                 | 193.5                | 114.5           | 174.35                    | 9.69                           | 17.99                      |              |
|      |                 | 170.0                | 91.0            | 189.35                    | 12.19                          | 15.53                      |              |
|      |                 | 150.0                | 71.0            | 184.35                    | 15.62                          | 11.80                      |              |
| T-3  | a               | 25                   | 114.5           | 409.35                    | 9.69                           | 42.24                      | a 변화         |
|      |                 | 83                   | 114.5           | 174.35                    | 9.69                           | 17.99                      |              |
|      |                 | 300                  | 114.5           | 159.35                    | 9.69                           | 16.44                      |              |
| T-4  | n               | 0.4                  | 114.5           | 999.35                    | 9.69                           | 103.24                     | n 변화         |
|      |                 | 0.768                | 114.5           | 174.35                    | 9.69                           | 17.99                      |              |
|      |                 | 2.4                  | 114.5           | 54.35                     | 9.69                           | 5.61                       |              |
| T-5  | m               | 1.0                  | 114.5           | 114.35                    | 9.69                           | 11.80                      | m 변화         |
|      |                 | 1.7                  | 114.5           | 174.35                    | 9.69                           | 17.99                      |              |
|      |                 | 3.0                  | 114.5           | 319.35                    | 9.69                           | 32.96                      |              |

5와 같다. 코어존의 형상, 포화투수계수 및 불포화 수리 특성이 정상상태 도달에 필요한 시간에 미치는 영향을 분석하기 위해 그림 11, 그림 13, 그림 15, 그림 17, 그림

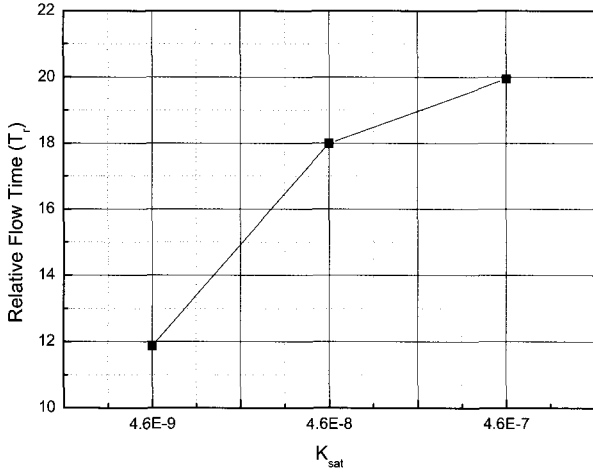


그림 12. 포화투수계수( $k_{sat}$ )에 대한 정규화 정상상태 도달시간( $T_r$ )의 변화

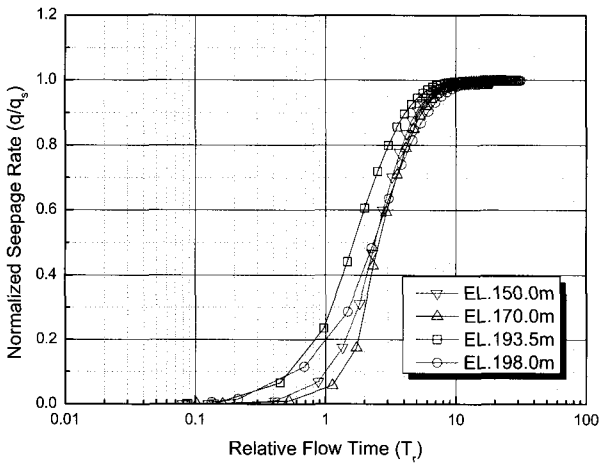


그림 13. 저수위에 대한 침투량의 시간변화

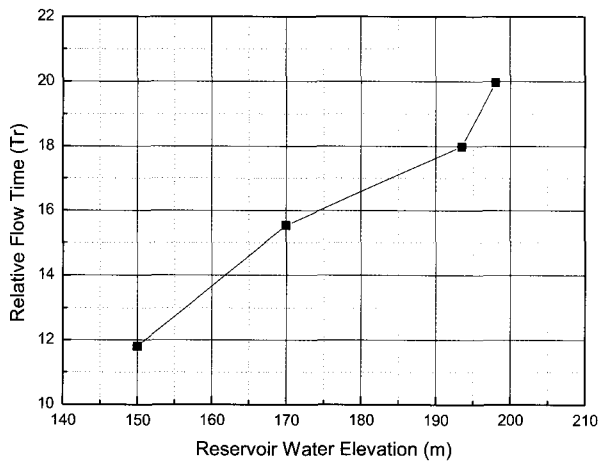


그림 14. 저수위에 대한 정규화 정상상태 도달시간( $T_r$ )의 변화

19와 같이 비정상상태 침투량( $q$ )을 정상상태 침투량( $q_s$ )으로 정규화하고, 식 (6)~(8)과 같이 시간( $T$ )는 침투수가 코어존의 저면폭을 따라서 완전 포화상태로 상류측

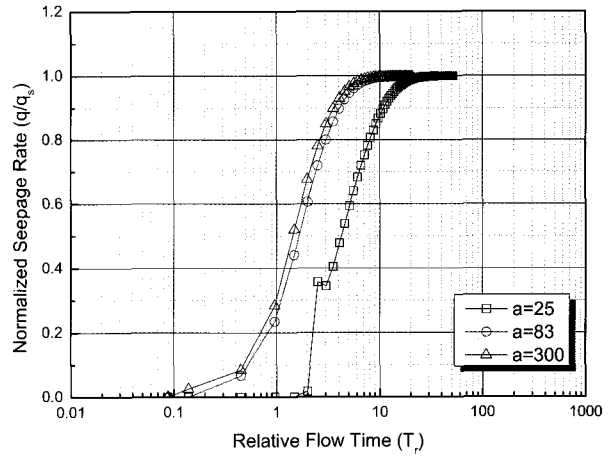


그림 15. 불포화 예측변수 a에 대한 침투량의 시간변화

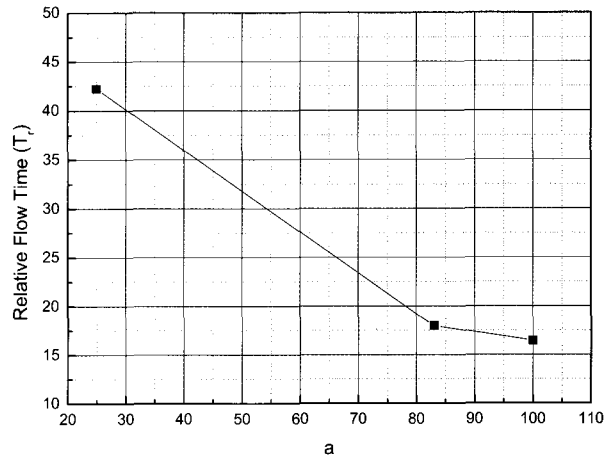


그림 16. 불포화 예측변수 a에 대한 정규화 정상상태 도달시간( $T_r$ )의 변화

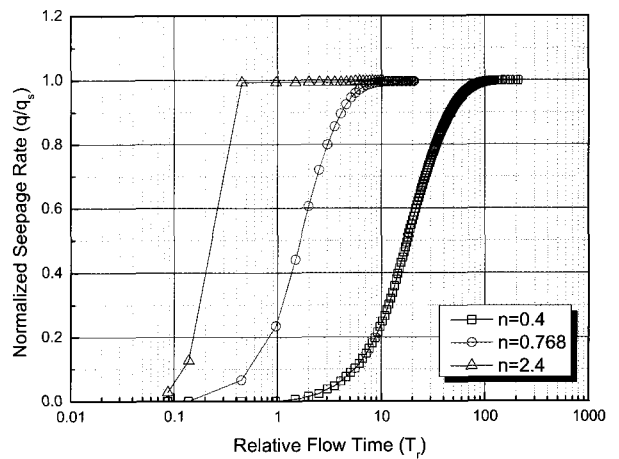


그림 17. 불포화 예측변수 n에 대한 침투량의 시간변화

에서 하류측까지 도달하는데 필요한 시간( $T_w$ )으로 정규화한 정규화 흐름시간( $T_r$ )으로 나타내었다. 모든 해석에서 정규화 정상상태 침투수량( $q/q_s$ )이 1.0이 되는 시간을 정규화된 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )으로 분석하였다.

$$T_r = \frac{T}{T_w} \quad (6)$$

$$T_w = \frac{nL_{max}}{V_s} \quad (7)$$

$$V_s = k_{sat} \cdot i = k_{sat} \cdot \frac{h}{L_{max}} \quad (8)$$

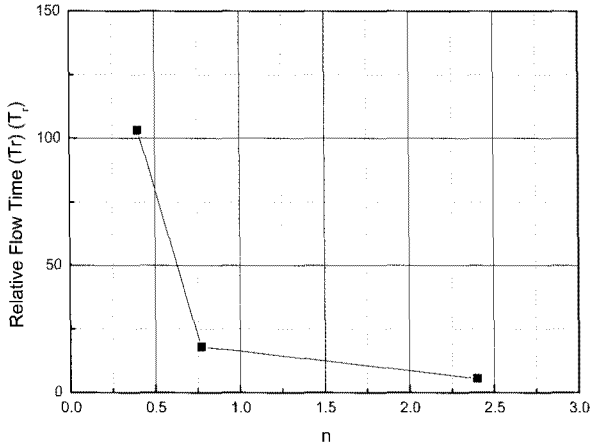


그림 18. 불포화 예측변수 n에 대한 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )의 변화

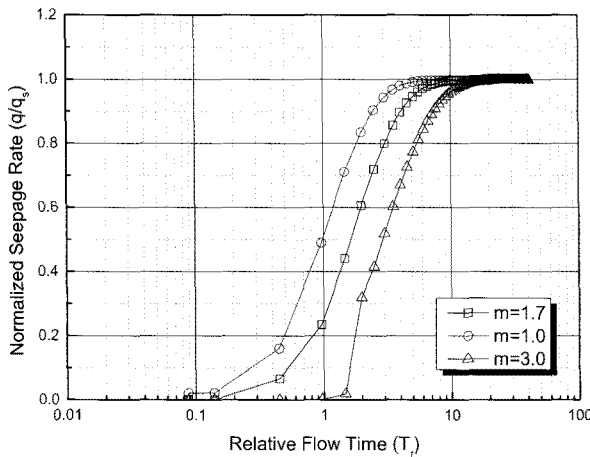


그림 19. 불포화 예측변수 m에 대한 침투량의 시간변화

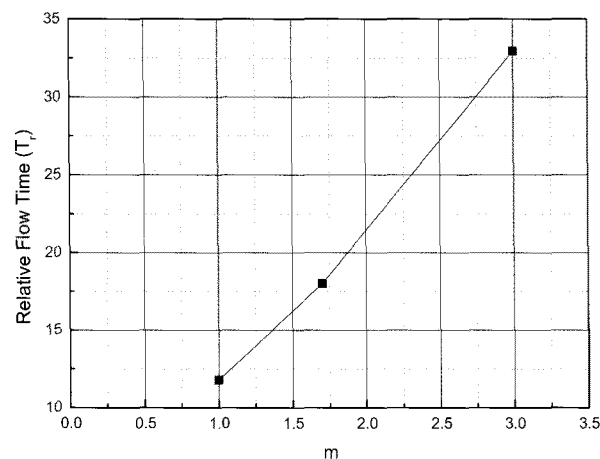


그림 20. 불포화 예측변수 m에 대한 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )의 변화

여기서,  $n$ 은 간극율,  $L_{max}$ 는 코어존 저면의 최대수평거리,  $V_s$ 는 평균 침투속도이다.

포화투수계수 변화에 대한 정규화된 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )의 변화는 그림 11과 그림 13과 같이 투수성이 커지면서 코어저면을 통한 침투시간( $T_w$ )은 감소되기 때문에  $T_{rf}$ 는 11.87~19.95로 증가하고, 댐수위에 대해서는 그림 13과 그림 14와 같이 저수위가 증가하면서 코어저면을 통한 침투시간( $T_w$ )도 감소되기 때문에  $T_{rf}$ 는 11.8~19.97로 증가하지만 변화의 폭은 상대적으로 작아 포화투수계수와 투수계수에 의한 영향은 상대적으로 적은 것을 알 수 있다.

불포화 수리특성 예측변수  $a$ 와  $n$ 의 값이 증가하면서 정규화 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )은 그림 15와 그림 16, 그림 17과 그림 18과 같이 각각 42.24~16.44, 103.24~5.61로 감소되었으며, 예측변수  $m$ 은 값이 증가하면서 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )은 그림 19와 그림 20과 같이 5.61~32.96으로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 예측변수  $a$ 는 값이 클수록 모관포화영역이 증가하여 침투량이 많아지기 때문이며, 예측변수  $n$ 은 흙의 간극크기 분포와 관련이 있고  $n$ 의 값이 증가하면  $a$  값은 고정되어 곡선의 변곡점 위치는 변화하지 않은 상태에서 모관흡수력에 따른 함수비의 변화율이 커지므로 일정한 높이까지는 함수비가 증가하지만 그 이상의 높이에서는 함수비가 오히려 감소하며 투수계수도 같은 경향을 나타내기 때문이다. 예측변수  $m$ 은 값이 작을수록 함수비가 큰 값을 나타내고 불포화 영역에 존재하는 물의 양도 많기 때문에 투수계수도 큰 값을 가지기 때문이다.

포화투수계수, 저수위 및 불포화 수리특성 예측변수 ( $a, n, m$ )중에서 정규화된 정상상태 도달시간( $T_{rf}$ )에 미치는 영향이 가장 큰 것은 예측변수  $n$ 인 것으로 확인되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내의 대표적인 중심코어형 사력댐

인 소양강댐을 대상으로 저수위, 코어존의 포화투수계수 및 불포화 수리특성의 변화에 따른 정상상태 침투류 해석을 실시하여 중심코어형 사력댐 코어존의 침투량 예측기법을 제시하였다. 그리고 비정상 침투류해석으로 저수위와 코어존의 포화투수계수 및 불포화 수리특성이 정상상태 침투수량에 도달하는 시간에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 정상상태 침투량을 저수위 및 코어존의 기하형상과 포화투수계수에 대해 정규화한 결과, 선형 관계식으로 표현할 수 있었으며, 이 관계식의 변수는 Fredlund 등(1994)의 예측변수에 따라 변화하며, 불포화 예측변수  $n$ 이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- (2) 정규화 정상상태 도달시간은 포화투수계수와 저수위에 의한 변동폭은 상대적으로 작은 것으로 분석되었고, 불포화 예측변수  $a$ 와  $n$ 이 증가하면서 정상상태 도달시간은 감소하고, 예측변수  $m$ 이 증가하면서 정규화 정상상태 도달시간도 같이 증가하는 경향을 나타내었다.
- (3) 정상상태 침투수량 관계식과 마찬가지로 포화투수계수, 저수위 및 불포화 예측변수 중에서  $n$ 값이 정규화 정상상태 도달시간에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타나  $n$  값에 대한 중요도가 높은 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시한 침투수량 관계식은 복잡한 3차원 해석 및 여러 단면에 대한 2차원 해석을 수행하지 않고도 손쉽게 침투량을 산정할 수 있으므로 댐 설계 및 안전관리 실무자가 침투량의 예측 및 실측치와의 정량적 분석에 손쉽게 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 침투수량 관계식의 변수들은 코어존의 불포화 투수계수곡선과 함수비특성곡선에 영향을 받으므로 대상댐 코어존의 불포화 수리특성에 대한 합리적인 평가가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 김윤기 (2003), 투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.
2. 댐배설계기설치운영관리지침 (2004), 한국수자원공사, pp.1-10.
3. 댐설계기준 (2003), 한국수자원학회, pp.169-213.

4. 댐시설물유지관리기준 (1994), 건설교통부, pp.52-153, 360-366.
5. 소양강다목적댐 정밀안전진단보고서 (1999), 한국수자원공사, pp.179-322.
6. 소양강다목적댐 제2차 정밀안전진단보고서 (2004), 한국수자원공사, pp.9-324.
7. 조성은 (2005), 불포화 수리특성에 대한 댐체 침투거동의 민감도 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제3호, pp.119-131.
8. Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B. and Chapuis, R.P. (2003), "A Model to Predict the Water Retention Curve from Basic Geotechnical Properties", *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6): 1104-1122.
9. Casagrande, A. (1961), "Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams", *Geotechnique*, Vol.11, pp.161-181
10. Cedergren, H.R. (1997), "Seepage, Drainage and Flow Nets", 3rd ed., *John Wiley & Sons*, New York.
11. Chapuis, R.P. and Aubertin M. (2001), "A Simplified Method to Estimate Saturated and Unsaturated Seepage through Dikes under Steady-state Conditions", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.1321-1328.
12. Chenaf, D., and Chapuis, R.P. (1999), "Analyse Numerique de la Hauteur de Suintements Dams un Puits Pompant un Aquifere a Nappe Libre", *In Proc. of the 52nd Canadian Geotechnical Conference*, Regina, pp.245-251.
13. 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
14. 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*, 35, pp.3-8.
15. Krahn, J., Fredlund, D.G., Lam, L., and Barbur, S.L. (1987), "PC-SEEP: A Finite Element Program for Modelling Seepage", *The first Can. Symp. on Microcomput. Applications to Geotechniq., Regina, Saskatwan*, pp.599-613.
16. 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.
17. Leong, E.C. and Rahardjo, H. (1997), "Review of Soil-water Characteristic Curve Equations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.123, No.12, pp.1106-1117.
18. R.P. Chapuis and M. Aubertin (2001), "A Simplified Method to Estimate Saturated and Unsaturated Seepage through Dikes Under Steady-state Conditions", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, pp.1321-1328
19. Sakamoto, T. (1998), "A Study on Evaluation of Behaviour and Safety of Rockfill Dam", *Public Works and Research Institute*, Tokyo, Japan
20. SEEP/W(Version 5) Manual (2003), Geo-slope International, Canada.
21. 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.
22. Wong, K.S. and Duncan, J.M. (1985), "SEEP: A Computer Program for Seepage Analysis of Saturated Free Surface or Confined Steady Flow. User's Manual", *Charle's Via Jr. Department of Civil Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University*.

(접수일자 2009. 10. 16, 심사완료일 2010. 4. 20)