

사력댐의 정상상태 침투량 예측식

An Equation to Estimate Steady-State Seepage Rate of Rockfill Dam

이 종 옥¹ Lee, Jong-Wook

임 희 대² Lim, Heui-Dae

Abstract

In this study unsaturated seepage analysis of 8 large rockfill dam managed by Korea Water Resources Corporation, were carried out, and the seepage rate of rockfill dam was analyzed by changing reservoir water level, shape, saturated and unsaturated seepage properties of core zone to present an equation to estimate steady-state seepage rate of rockfill dam. This equation considers unsaturated seepage flow and is applicable to domestic large scale Rockfill dam with the height of more than 50m. Estimated values by the proposed equation are greater than those by the method of Sakamoto (1998), which does not consider unsaturated seepage flow. The difference of estimated values increases with the lower reservoir water level and decreases with the higher reservoir water level. We can be sure that the comparison between the measured seepage rate and the estimated seepage rate by the proposed equation for the existing rockfill dam was well-matched. The proposed equation is close to the actual phenomenon compared with the existing equations (Sakamoto, 1998; Chapuis and Aubertin, 2001) because it is based on the results of unsaturated seepage analysis of dams, has upstream and downstream slopes in the range of 1Vertical: (0.2~0.3)Horizontal.

요 지

본 연구에서는 한국수자원공사가 건설 및 관리하고 있는 8개 대규모 사력댐을 대상으로 불포화 침투류해석을 실시하고 저수위의 변화, 차수존의 형상변화와 포화 및 불포화 수리특성의 변화에 대한 사력댐 제체의 침투량을 분석하여, 불포화 영역을 통한 침투량을 고려할 수 있고 높이 50m 이상의 국내 대규모 사력댐에 적용 가능한 사력댐 제체의 침투량 예측식을 제안하였다. 제안된 예측식에 의한 침투량은 불포화 흐름을 고려하지 않는 기존 이론식(Sakamoto, 1998)에 비하여 전반적으로 큰 값을 나타내었고, 그 차이는 저수위가 낮아지면서 증가하고, 저수위가 높아지면서 감소하였다. 기존 사력댐에서 측정된 실측 침투량을 제안된 예측식에 의한 예측치와 비교한 결과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 제안된 예측식은 차수존의 상하류 사면경사가 1V:(0.2~0.3)H의 범위인 사력댐에 대한 불포화 침투류해석 결과에 기초하며, 불포화 흐름을 고려하므로 기존 예측식(Sakamoto, 1998, Chapuis와 Aubertin, 2001)에 비해 실제 현상에 가까운 예측결과를 얻을 수 있다.

Keywords : Empirical equation, Rockfill Dam, Steady-state seepage rate, Unsaturated seepage analysis

1 정희원, 한국수자원공사 K-WATER연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, K-water Institute, K-water, geoljw@kwater.or.kr, 교신저자)

2 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

사력댐의 제체를 통한 누수는 파이핑 현상을 유발시켜 댐 붕괴를 일으키는 주요한 원인이 되므로, 댐 제체를 통한 침투량과 침투수의 탁도계측은 댐의 안전관리에 있어 대단히 중요하다(PWRI, 1984; 飯田, 2006). 국내에서는 댐설계기준(한국수자원학회, 2005)에 의거 댐 제체 하류측에 집수벽과 삼각웨어를 설치하여 댐 제체를 통한 침투량을 지속적으로 측정하고 분석하여 댐체 안정성을 판단하는 기초자료로 이용토록 규정하고 있으며, 이에 따라 현재 대부분의 국내 주요 다목적댐에는 침투량 측정시설을 설치하여 운영관리하고 있다(조재희 등, 1998; 이규탁과 임희대, 2007; 이종욱 등, 2009)

댐 차수준에서의 파이핑과 같은 비정상적인 누수현상의 발생여부는 저수위와 침투량 사이의 관계를 면밀히 분석하여 판단할 수 있다. 사력댐에서 댐 제체를 통한 정상적인 침투량은 저수위와 상관성을 나타낸다(Wood와 Abernathy, 1996; Gresz와 Nagy, 1997; Lee 등, 2005). 따라서, 저수위 변화에 비해 급격한 침투량의 변화는 차수준의 비정상적인 상태를 나타낸다고 볼 수 있다(PWRI, 1984; 播田 등, 1994; 飯田, 2006).

Schaffernak(1917), Iterson(1917)과 Casagrande(1937)는 침투면의 위치를 가정하고 Darcy의 법칙을 적용하여 제방의 침투량을 예측하는 이론식을 제시하였다. Schneebeli(1966)는 비탈끝 드레인이 설치된 균일형 제방에 대해 침투선을 포물선으로 가정하여 저수위 변화에 대한 침투량 예측식을 제안하였다. Chapuis(1990)는 매립지의 라이닝을 통한 침투량의 예측에 적용할 수 있는 해석해를 제안하였다. Sakamoto(1998)는 Darcy의 법칙을 기초로 하여 차수준의 형상, 투수성 암반의 두께, 지수 커튼의 길이 및 계곡형상 등을 고려한 사력댐의 차수준과 기초암반으로부터의 침투량을 정량적으로 나타낼 수 있는 식을 제안하였다. Chapuis와 Aubertin(2001)은 제한된 단면형상과 수리특성에 대한 불포화 침투류해석 결과를 이용하여 높이 50m 이하의 균일형 및 중앙차수벽형 제방에 적용할 수 있는 수식을 제안하였다. 이종욱과 임희대(2010)는 소양강댐을 대상으로 불포화 침투류 해석을 수행하고 그 결과를 차수준의 기하형상과 포화 투수계수로 정규화하여 저수위 변화에 따른 소양강댐 침투량의 예측식을 제시하였다.

사력댐의 침투거동은 물이 흙을 통해 얼마나 빨리 흐를 수 있는지를 나타내는 투수계수와 얼마만큼의 물을

저장할 수 있는지를 나타내는 함수특성곡선에 따라 달라지므로, 침투류 해석의 신뢰도 향상을 위해서는 댐 축조재료에 대한 불포화 수리특성을 고려하여야 한다(조성은, 2006). 조성은(2005, 2006)의 연구결과에 따르면 침윤선 부근에서 침투량의 변화가 가장 크고, Fredlund 등(1994)의 함수특성곡선식과 투수계수식에서 변수 a 와 n 은 값이 클수록, m 과 p 는 값이 작을수록 정상상태 침투량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 흙의 간극크기 분포와 관련이 있는 n 값에 의한 침투량의 변동이 가장 크게 나타났다.

사력댐 제체의 정상상태 침투량을 예측하는 기존 이론식들(Schaffernak-Iterson, 1917; Casagrande, 1937; Sakamoto, 1998)은 실제 댐에서 발생하는 불포화 영역을 통한 침투량은 고려하지 않고 포화 영역을 통한 침투량만을 대상으로 하고 있다는 문제점을 내포하고 있고, 저수위 변화에 대한 정상상태 침투량을 예측하는 기존 경험식들(Schneebeli, 1966; Chapuis와 Aubertin, 2001)은 대체적으로 단면형상이 일정한 흙댐과 사력댐에 대한 해석결과를 기초로 하여 댐의 높이가 50m 이하인 중·소규모 댐에 대한 해석결과를 제시하고 있어 국내 대규모 사력댐에 대한 기존 이론식과 경험식의 적용 가능성을 확인할 필요가 있다.

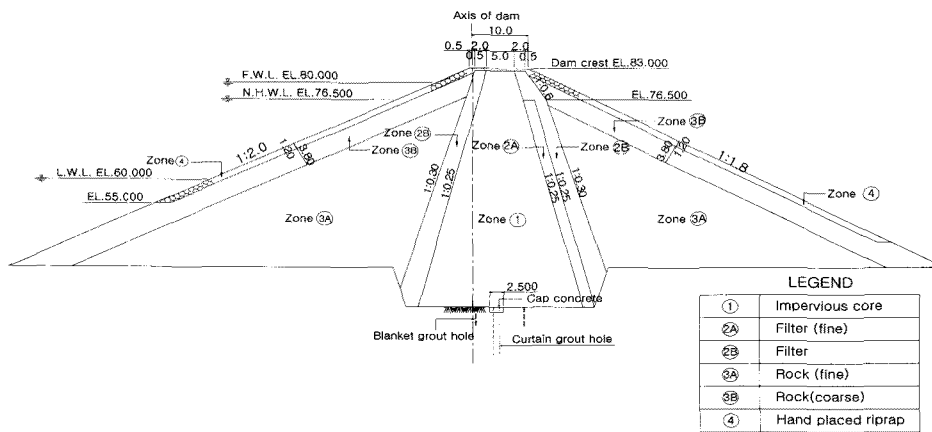
본 연구에서는 불포화 영역을 통한 침투량을 고려할 수 있고, 높이 50m 이상의 국내 대규모 사력댐에 적용 가능한 사력댐 제체의 침투량 예측식을 제안하기 위해 한국수자원공사가 건설 및 관리하고 있는 8개 대규모 사력댐을 대상으로 불포화 침투류해석을 실시하여, 저수위의 변화, 차수준의 형상변화, 포화 및 불포화 수리특성의 변화에 대한 사력댐 제체의 침투량을 분석하였다.

2. 연구대상 사력댐

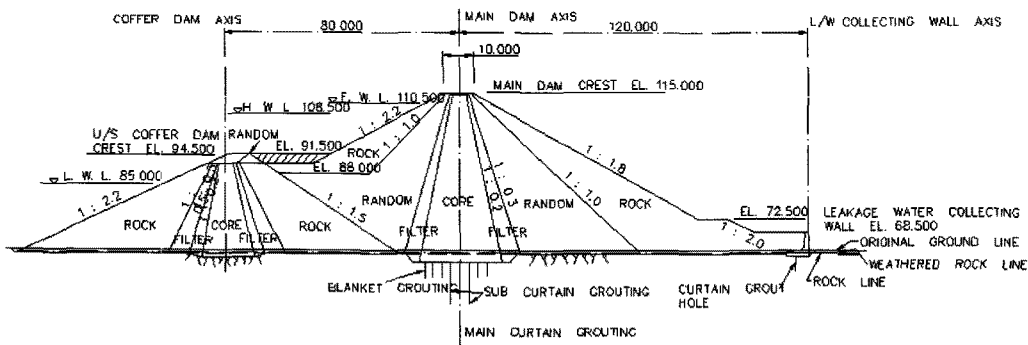
표 1은 해석에 이용된 국내 대규모 사력댐들의 준공년도와 제원을 나타낸 것이다. 대상댐들은 높이가 48.5m~123m 이고, 길이는 136.1m~612m인 댐들이다. 준공 후 경과년수는 1973년 준공된 G댐이 36년으로 가장 오래되었고, 가장 최근인 2002년 준공된 F댐은 7년이 경과하였다. A댐은 콘크리트 중력식과 사력댐의 복합형댐으로 총 길이는 496m 이고, 이중 사력댐의 길이는 131.6m이다. 해석에 이용된 국내 대규모 사력댐들의 표준단면도는 다음의 그림 1과 같다.

표 1. 8개 연구대상 사력댐의 제원

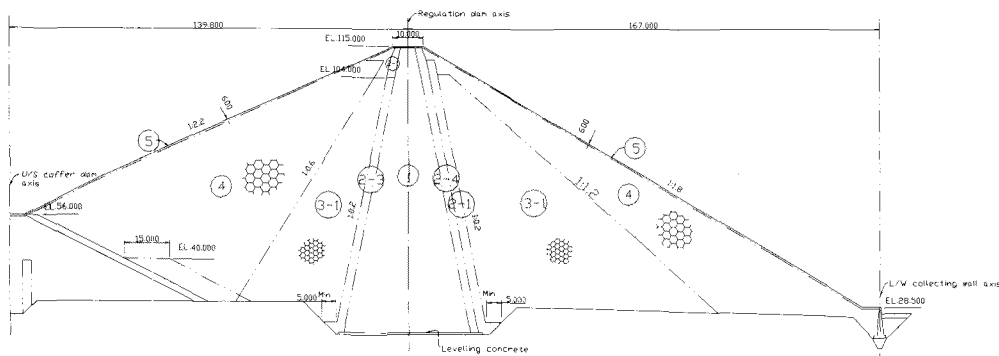
댐	준공년도	높이(m)	길이(m)	댐 체적(104m ³)	댐 정상부 표고(EL.m)
A	1981	52.0	131.6 (496.0)	123.4	83.0
B	1992	58.0	330.0	157.3	115.0
C	1992	99.9	562.6	496.5	115.0
D	1993	73.0	515.0	342.3	168.0
E	2000	50.0	291.0	111.6	79.0
F	2002	48.5	205.0	67.5	184.0
G	1973	123.0	530.0	959.1	203.0
H	1977	83.0	612.0	401.5	166.0



(a) A댐

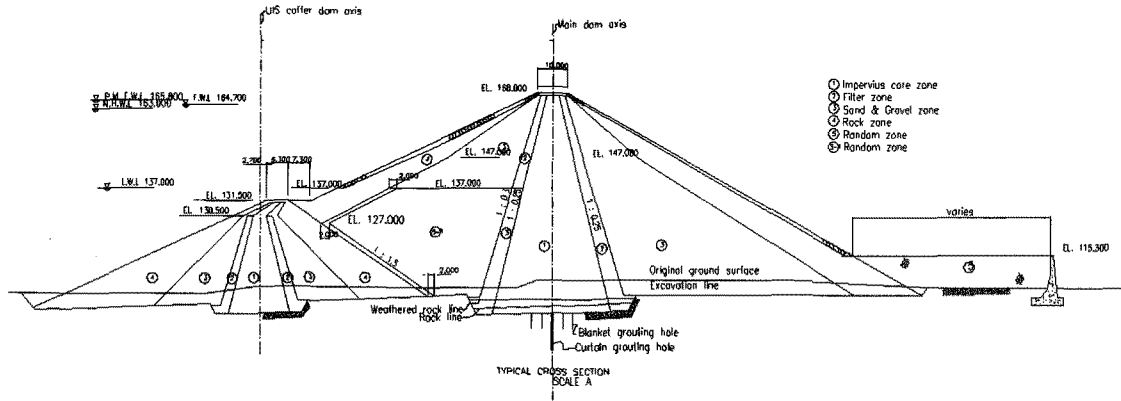


(b) B댐

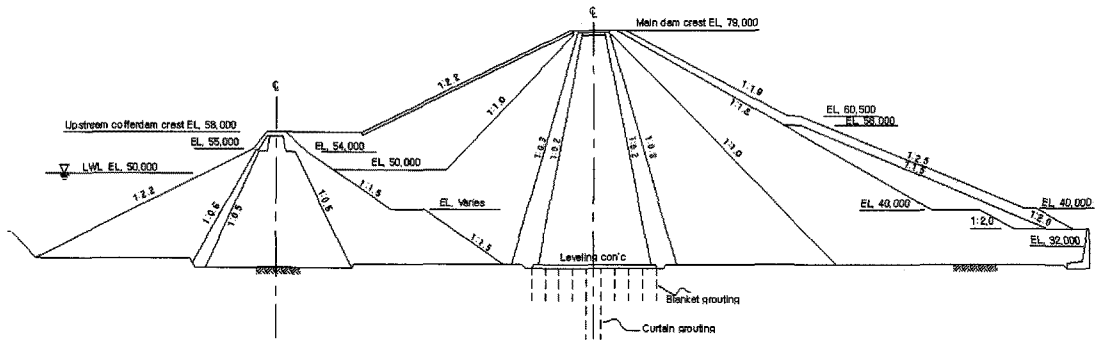


(c) C댐

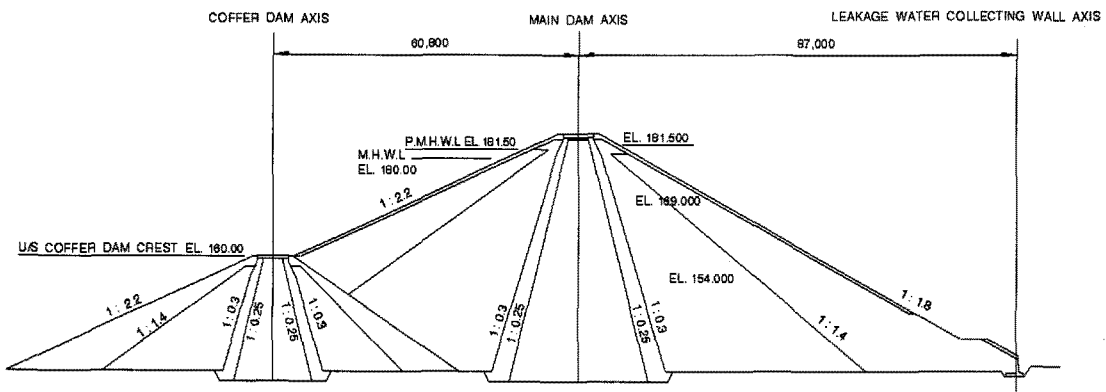
그림 1. 초기포화도에 따른 초기흡수력과 파괴시 흡수력의 변화



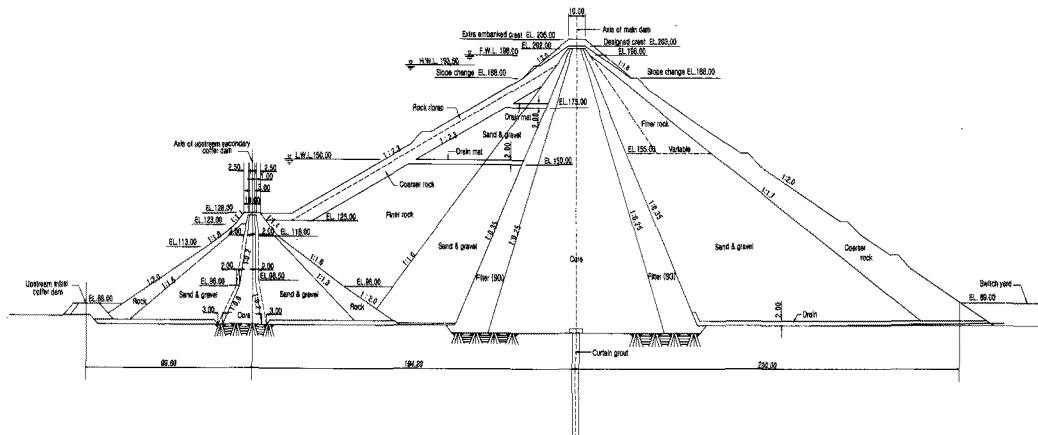
(d) D댐



(e) E댐

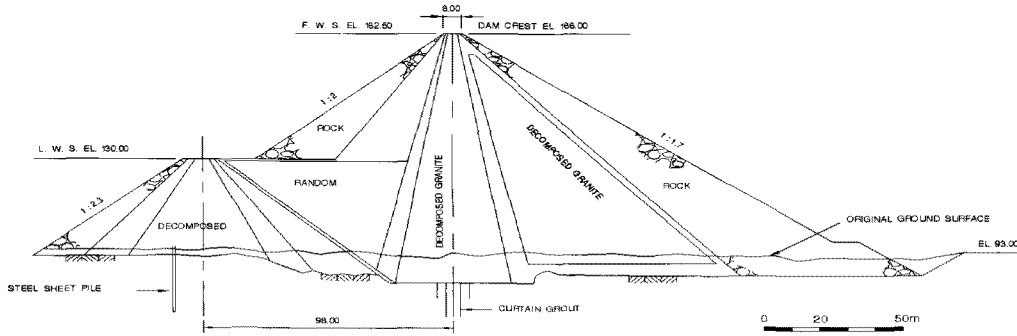


(f) F댐



(g) G댐

그림 1. 초기포화도에 따른 초기흡수력과 파괴시 흡수력의 변화 -계속



(h) H댐

그림 1. 초기포화도에 따른 초기흡수력과 파괴시 흡수력의 변화 -계속

표 2. 8개 연구대상 사력댐 차수준의 제원

댐	차수준 표고(EL.m)		차수준 폭(m)		차수준 사면구배(V:H)	
	정상부	기초부	정상부	기초부	상류	하류
A	83.0	34.0	5	31.0	1:0.25	1:0.25
B	114.5	56.5	5	28.2	1:0.20	1:0.20
C	115.0	15.1	5	64.9	1:0.30	1:0.30
D	168.0	95.0	4	40.5	1:0.25	1:0.25
E	78.5	28.5	5	25.0	1:0.20	1:0.20
F	183.0	134.5	4	29.5	1:0.25	1:0.25
G	202.0	79.0	4	65.5	1:0.25	1:0.25
H	165.0	82.0	4	33.9	1:0.20	1:0.15

3. 불포화 침투류 해석

3.1 해석단면의 선정

사력댐 차수준의 외측에 배치되는 필터존과 록존의 투수계수는 차수준에 비해 상대적으로 과대하기 때문에 침투량 해석의 필요성이 낮으며(Sakamoto, 1998), 불포화영역의 침투량에 미치는 영향도 적기 때문에(조성은, 2005) 침투류해석은 차수준만을 대상으로 수행하였다.

표 2는 해석단면의 모델링을 위한 대규모 사력댐 차수준 상·하부의 표고 및 폭, 상·하류사면의 경사를 나타낸 것이다. 차수준 상부 폭의 경우 G댐, H댐, D댐, F댐의 4개 댐은 4m, A댐, B댐, C댐, E댐의 4개 댐은 5m로 시공되었다. 차수준 상·하류사면의 경사로는 B댐과 E댐에서 상·하류사면은 모두 1V:0.2H, G댐, A댐, D댐, F댐에서는 1V:0.25H, C댐은 1V:0.3H으로 시공되었으며, H댐에서는 상류사면은 1V:0.25H, 하류사면은 1V:0.15H로 시공되었다.

그림 2는 침투류해석을 위해 해석 대상댐들의 차수준을 유한요소로 모델링한 해석단면이다.

3.2 불포화 침투류 해석방법

3.2.1 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, γ_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 캐나다의 GEO-SLOPE사에서 개발한 SEEP/W(Version5.0)를 이용하였다. 유한요소법을 적용한 본 프로그램은 정상상태와 비정상류 해석뿐만 아니라 포화도 및 불포화도의 침투류해석, 2차원 및 축대칭 문제, 피압 대수층에서

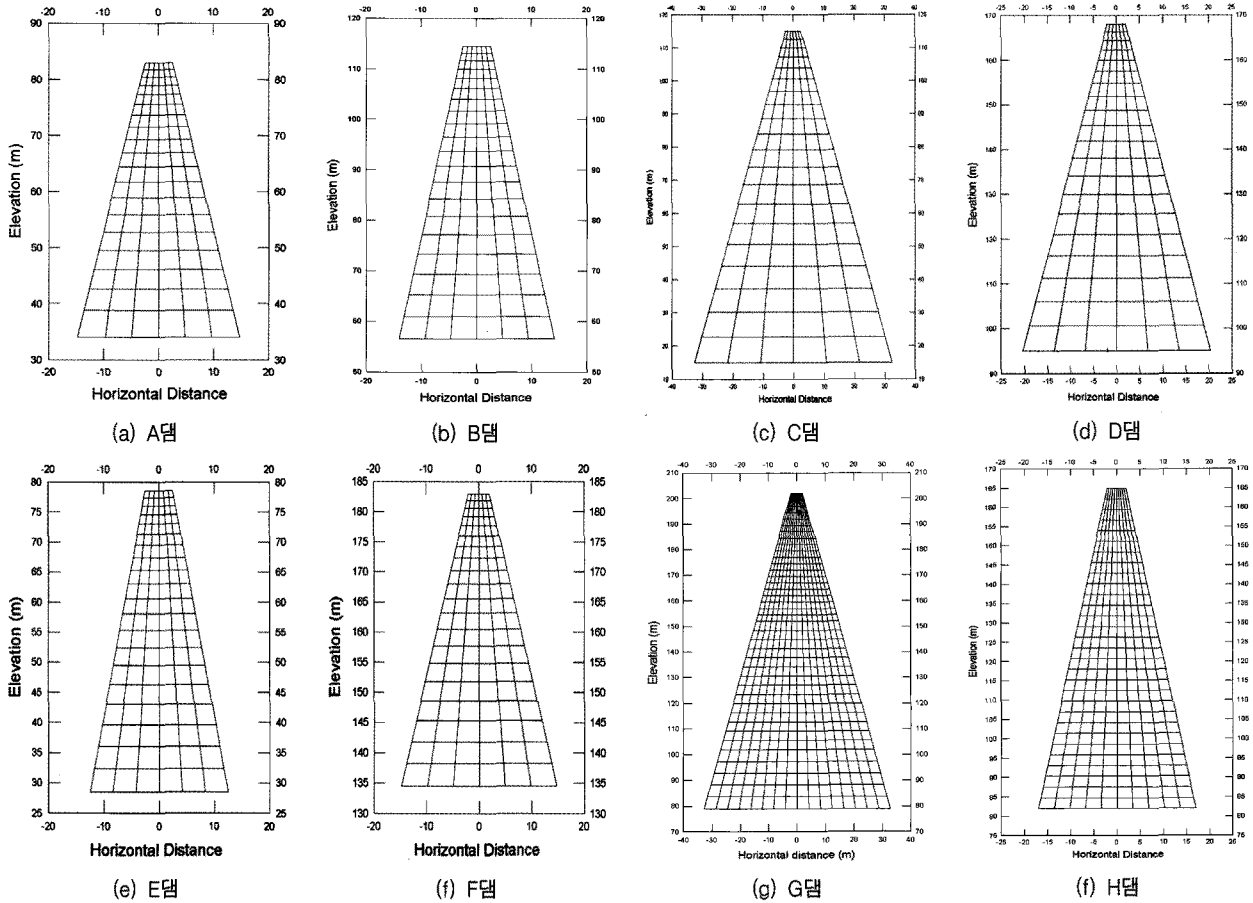


그림 2. 8개 연구대상 사력댐 차수존의 유한요소망

의 흐름 문제와 비등방성 투수층에 대한 침투류해석이 가능하다.

3.2.2 함수특성곡선

침투류해석을 수행하기 위해서는 간극수압과 함수비의 관계를 이해하여야 한다. 물이 흙을 통해 흐를 때 물의 일부는 흙의 간극에 저류된다. 불포화토에서 흙의 간극 내에 저류되는 물의 체적은 포화흡수력에 따라 변화한다. 건조과정에 있는 흙의 전형적인 함수특성곡선은 다음의 그림 3과 같다.

함수특성곡선은 흙이 배수될 때 물로 채워진 간극의 체적을 나타낸다. 함수특성곡선의 3가지 주요 특성치로는 공기함입치(A.E.V.), 간극수압의 변화에 따른 곡선의 기울기(m_w) 및 잔류 함수비(θ_r) 또는 포화 함수비(θ_s)가 있다. 공기함입치는 최대 크기의 간극에서 자유롭게 배수되기 시작하는 부의 간극수압의 값을 나타낸다. 공기함입치는 흙의 최대 간극크기의 함수이며, 흙의 입도분포에 의해서도 영향을 받는다. 크고 균등한 형태의 간극을 갖는 흙일 수록 공기함입치는 상대적으로 작아진다.

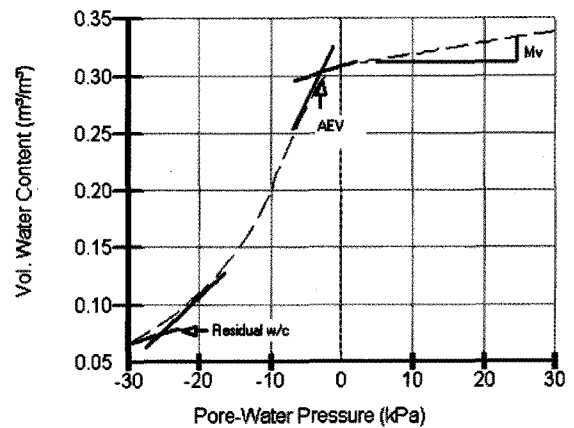


그림 3. 함수비특성곡선의 정의

양(+)의 간극수압과 부(-)의 간극수압의 범위 모두에서 물이 양쪽으로 흘러나갈 수 있으므로, 적합한 함수특성곡선의 기울기를 설정하여야 한다. 물로 채워진 간극의 배수로 인해 물이 흘러나가 중력에 의한 흙의 건조화 또는 간극의 크기가 감소되어 포화된 흙으로부터 물이 배출된다. 양의 간극수압 영역에서 저류계수(m_w)는 1차원 압밀에 대한 압축계수(m_v)와 같아진다. 부(-)의 간극

수압 범위에서 함수특성곡선의 기울기는 공기함입치로부터 잔류함수비까지의 간극수압의 범위에 대해 간극수압 변화에 따라 흡수에 물이 저류되는 체적의 비율 변화를 나타낸다.

함수비특성곡선을 얻기 위해서는 실험이 복잡하고 시간이 많이 걸리기 때문에 곡선맞춤변수를 이용하는 이론식과 입도분포 곡선을 이용하는 예측기법을 함수특성곡선의 예측에 많이 사용한다.

Aubertin 등(2003)은 Kovacs가 제안한 방법을 보완하여 함수특성곡선을 예측하는 방법을 제안하였다. 광산에서 배출되는 부스러기 광물(Tailing)과 같은 재료의 특성을 더욱 잘 표현하기 위해 Kovacs의 방법을 개선하였고, 점성토에 대해서도 적용할 수 있도록 개선되었다. Aubertin 등의 방법은 기본적인 재료특성을 이용하여 함수비특성곡선을 예측한다.

이 예측기법은 초기에는 포화도의 함수로 결정되었고, 이후에 함수비특성곡선으로 변경되었다. 예측기법은 2개의 주요 항목에 대한 포화도를 정의하여 전개한다. 첫 번째 항목은 상대적으로 작은 부의 간극수압에서 존재하는 모관흡수력에 의해 흡에 저류되는 잔류함수비에 대한 것이다. 두 번째 항목은 주로 부착력에 의해 흡수에 물이 저류되는 부의 간극수압이 큰 곳에서의 함수비특성곡선이다. 이들 두 항목은 부의 간극수압과 입경, 입자의 형태와 공극비와 같은 재료특성으로부터 산정된다.

3.2.3 불포화 투수계수

모관흡수력에 따른 불포화 투수계수의 변화를 보여주는 불포화 투수계수곡선 또한 침투류 해석에 있어 중요한 불포화 지반설계 정수이다. 불포화 투수계수 곡선은 함수비와 밀접한 관련이 있으므로 유사한 형태를 갖는 함수특성곡선으로부터 추정할 수 있다.

김윤기(2003)와 조성은(2005)은 식 (2)와 같은 Fredlund 등(1994)의 불포화 투수계수 곡선식을 적용하여 국내 화강풍화토 및 중심코어형 사력댐 코어존의 불포화 투수계수의 변화를 유추하였다.

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (2)$$

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

3.3 경계조건

본 연구에서 불포화 침투류해석에 의한 침투량은 정상상태의 침투량만을 해석대상으로 하며 각 대상댐의 차수존 상류사면에는 식 (3)과 같은 전수두 경계조건으로 두 기초 저면부로부터 정상부까지 저수위를 다양하게 변화시키고, 하류사면에는 경계면 외측으로 침투수가 발생하지 않도록 하는 침윤면(Seepage face, $Q=0$) 경계조건을 지정하여, 반복 계산으로 침윤면의 위치를 결정하도록 하였다. 침윤면을 지정하지 않고 1차 수치계산을 수행하면 계산된 전수두가 위치수두보다 높은 (즉, 압력수두>0) 노드들이 하류사면 표면부에 나타난다. 2차 수치계산 과정에서 이 노드들은 임의 높이의 침윤면을 나타내기 위해 압력수두가 0인 경계조건이 지정된다. 2차 수치계산을 통해 하류사면 표면의 노드에서 위치수두보다 높은 전수두가 계산되면, 전수두의 값은 3차 수치계산 과정에서 위치수두와 같게 경계조건이 지정된다. 침윤면 상부에서 물은 모관흡수력에 의해 저류되므로, 물은 하류사면을 따라 흐를 수 없는 흐름 정지조건이 된다. 반복 계산과정으로 하류사면 표면부의 모든 노드에서의 압력수두가 0 또는 음의 값이 되면 종료된다.

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

여기서, H 는 전수두(Total head, m), u 는 간극수압(kPa), γ_w 는 물의 단위중량(kN/m³), y 는 위치수두(Elevation head, m)이며 u/γ_w 는 압력수두(Pressure head, m)라고 한다.

3.4 재료특성과 입력변수

침투량 해석을 위한 차수존 재료의 입력변수를 결정하기 위해 다음의 표 3과 같이 대규모 사력댐 차수존에 대한 시험성토 및 축조중 품질관리 시험결과를 조사하였다. 입도분포곡선은 그림 4와 같다.

대상댐의 차수존은 SC, SM, CL, ML, SW-SM(화강풍화토)로 분류되며, 비중(G_s)은 2.66~2.74, 액성한계(w_L)는 25~44%, 소성지수(PI)는 비소성(NP)~22, 현장건조밀

표 3. 8개 연구대상 사력댐 차수준 재료의 공학적 특성

댐명	USCS	G_s	w_L (%)	PI	γ_{df} (t/m ³)	w_f (%)	k_s (cm/sec)	
							설계치	품질관리시험
A	CL, ML	2.74	44.0	22.0	1.586	23.6	5.6×10^{-6}	3.40×10^{-6} (현장)
B	SC, SM	2.72	34.1	14.1	1.768	16.4	1.0×10^{-5}	2.78×10^{-6} (실내) 4.33×10^{-6} (현장)
C	SC, SM	2.72	29.6	8.7	1.778	16.5	1.0×10^{-5}	1.61×10^{-6} (실내) 6.53×10^{-6} (현장)
D	SC, SM	2.67	27.3	13.3	1.774	14.9	1.0×10^{-5}	2.71×10^{-6} (실내) 1.36×10^{-5} (현장)
E	CL	2.71	36.8	14.7	1.618	21.3	5.0×10^{-7}	$< 5.00 \times 10^{-7}$ (실내)
F	SC, SM	2.66	33.0	13.5	1.687	21.0	1.0×10^{-5}	$< 1.00 \times 10^{-5}$ (실내)
G	SC, SM	2.70	31.8	17.2	1.811	17.0	1.0×10^{-7}	4.60×10^{-7} (실내) 4.70×10^{-7} (현장)
H	SW-SM	2.68	25.0	NP	1.930	9.7	1.0×10^{-5}	7.40×10^{-6} (실내)

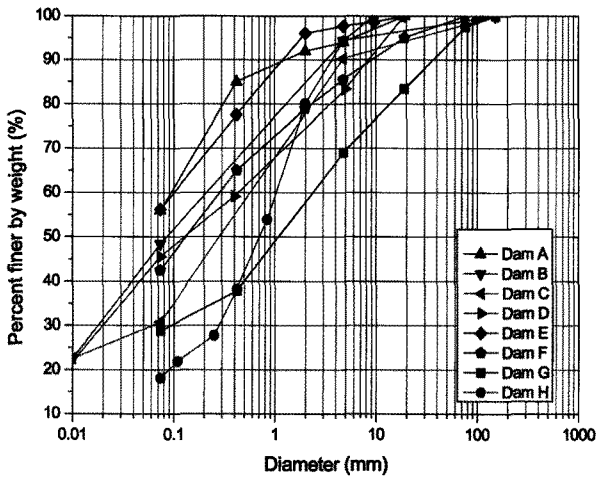


그림 4. 8개 연구대상 사력댐 차수준의 입도분포 곡선

도(γ_{df})는 1.586~1.930t/m³, 현장함수비(w_f)는 9.7~23.6%, 설계 포화투수계수($k_{sDesign}$)는 1.0×10^{-7} ~ 1.0×10^{-5} cm/s, 실내 시험에 의한 투수계수(k_{sLab})는 4.60×10^{-7} ~ 1.00×10^{-5} cm/s, 현장시험에 의한 투수계수(k_{sField})는 4.70×10^{-7} ~ 6.53×10^{-6} cm/s로 조사되었다.

본 연구에서는 침투류해석의 대상으로 차수준의 포화영역과 불포화영역을 모두 고려한 포화 및 불포화 침투류해석을 실시하기 때문에 침투류해석의 입력변수는 포화투수계수(k_s)와 함께 함수특성곡선과 불포화투수계수곡선이 필요하다.

표 4는 선정된 차수준 재료의 입력변수를 나타낸 것이다. 차수준의 포화투수계수(k_s)는 실제 현장조건을 잘 대표하는 축조중 품질관리시험으로 수행된 현장투수시험 결과를 선정하였다.

불포화특성인 함수특성곡선과 불포화투수계수곡선

표 4 불포화 침투류 해석을 위한 차수준의 입력 파라미터

댐명	θ_s	w_L (%)	k_s (cm/sec)
A	0.421	44.0	3.40×10^{-6}
B	0.350	34.1	4.33×10^{-6}
C	0.346	29.6	6.53×10^{-6}
D	0.336	27.3	1.36×10^{-5}
E	0.403	36.8	5.00×10^{-7}
F	0.366	33.0	1.00×10^{-5}
G	0.329	31.8	4.70×10^{-7}
H	0.280	25.0	7.40×10^{-6}

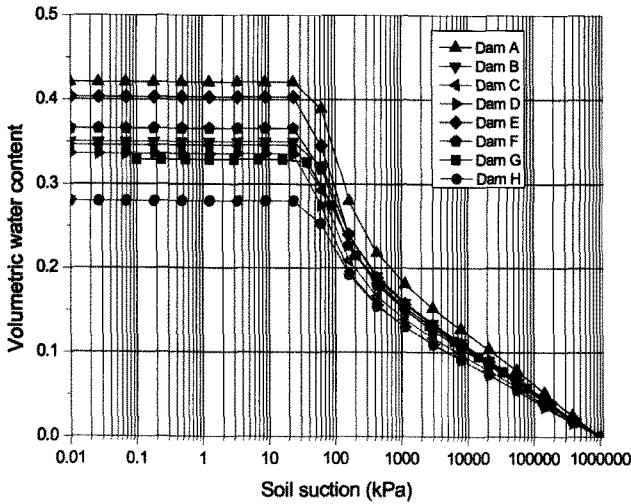
에 대한 실험자료는 입수가 어렵기 때문에, 입도분포곡선을 이용하여 점성토에 대한 함수특성곡선을 추정하는 Aubertin 등(2003)의 예측기법과 김윤기(2003)와 조성은(2005)에 의해 국내 화강풍화토에 대한 불포화투수계수의 변화를 잘 표현하는 것으로 나타난 Fredlund 등(1994)의 불포화투수계수 예측식을 적용하여 추정하였다.

차수준의 함수특성곡선은 그림 5의 입도분포곡선과 표 4의 완전 포화시의 체적함수비(θ_s)와 액성한계(w_L)를 이용하여 추정하였고, 불포화투수계수곡선은 추정된 함수특성곡선으로부터 결정하였다. 완전포화시의 체적함수비(θ_s)는 간극율(n)과 같으므로, 다음의 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 산정하였다.

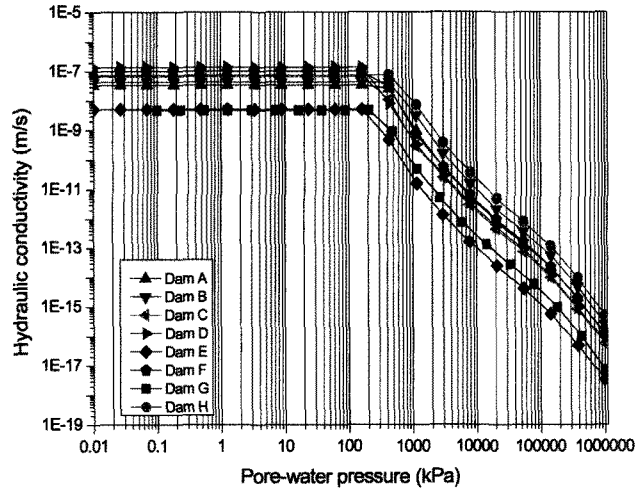
$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_{df}} - 1 \quad (4)$$

$$\theta_s = n = \frac{e}{1+e} \quad (5)$$

여기서, e 는 간극비, θ_s 는 완전포화시의 체적함수비,



(a) 체적함수비 곡선



(b) 불포화 투수계수 곡선

그림 5. 8개 연구대상 사력댐 차수존의 불포화 특성

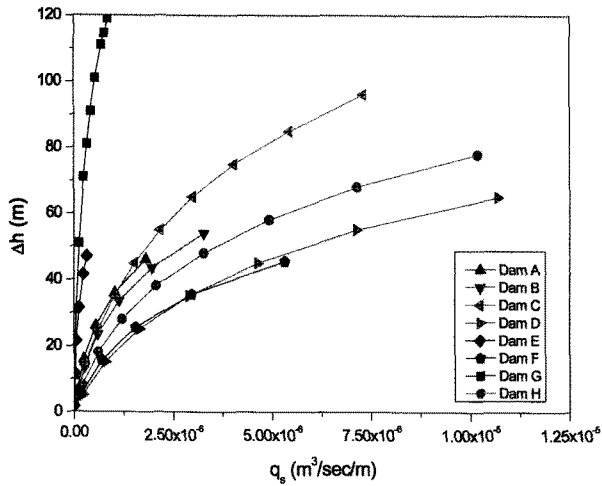


그림 6. 댐 저수위와 불포화 침투류 해석에 의한 정상상태 침투량 예측치의 관계

n 은 간극율, G_s 는 비중, γ_{df} 는 현장건조밀도(t/m^3), γ_w 는 물의 단위중량($=1t/m^3$)이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 불포화 침투류 해석결과

일반적으로 사력댐 제체를 통한 정상상태 침투량은 Darcy의 법칙에 따라 포화투수계수(k_s), 저수지 수심(Δh), 댐의 규모에 의해 영향을 받는다. 그림 6은 불포화 침투류해석에 의한 8개 대규모 사력댐의 침투량(q_s)과 저수지 수심(Δh)과의 관계를 나타낸 것이다. 해석결과, 침투량(q_s)은 포화투수계수(k_s), 저수지 수심(Δh), 댐

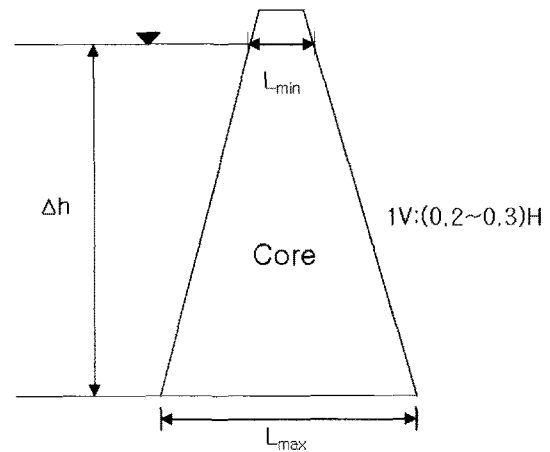


그림 7. 사력댐 제체의 정상상태 침투량 예측식의 변수정의

의 규모에 따라 변화하였다. 특히, 저수위의 수심(Δh)이 증가하면서 침투량(q_s)은 포물선 형태로 증가하였다.

4.2 침투량 예측식 분석

사력댐 침투량 예측식을 도출하기 위해 이종욱과 임희대(2010)가 제안한 예측기법을 적용하여, 그림 7과 같이 차수존을 형상화하고 상류측 저수위의 수심(Δh), 차수존 저면 최대 폭(L_{max})과 저수위 위치에서의 차수존 폭(L_{min})으로 산정된 L' 를 변수로 정의하였다. 차수존의 상·하류사면 경사가 1V:(0.2~0.3)H의 범위인 8개 국내 대규모 사력댐의 침투량 해석결과를 그림 8과 같이 $\Delta h/L'$ 과 포화투수계수(k_s)로 정규화하여 사력댐의 차

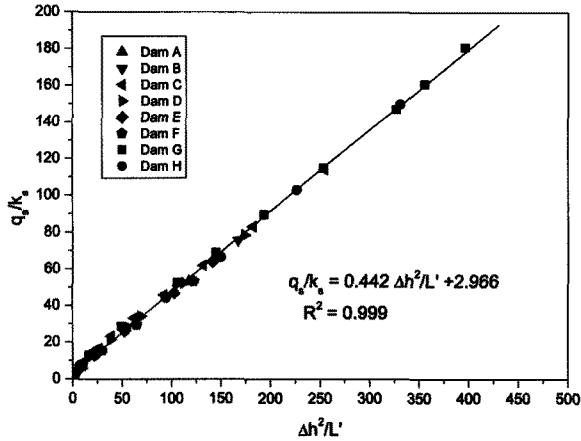


그림 8. 불포화 침투류 해석에 의한 사력댐 제체의 정상상태 침투량 예측식

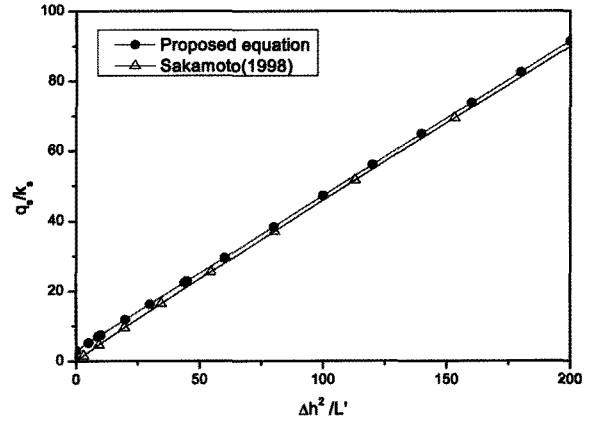


그림 9. 제안된 예측식과 기존 이론식(Sakamoto, 1998)의 비교

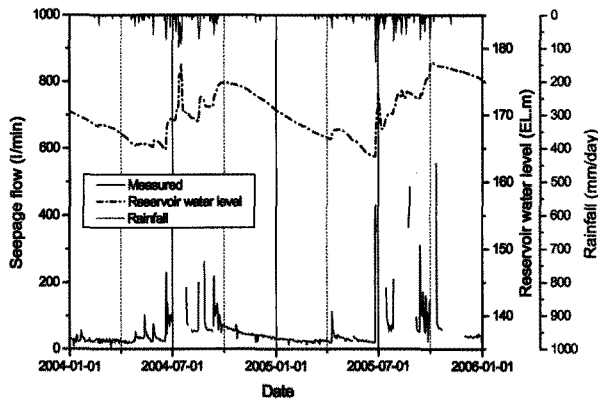


그림 10. 제안된 예측식과 기존 이론식(Sakamoto, 1998)의 비교

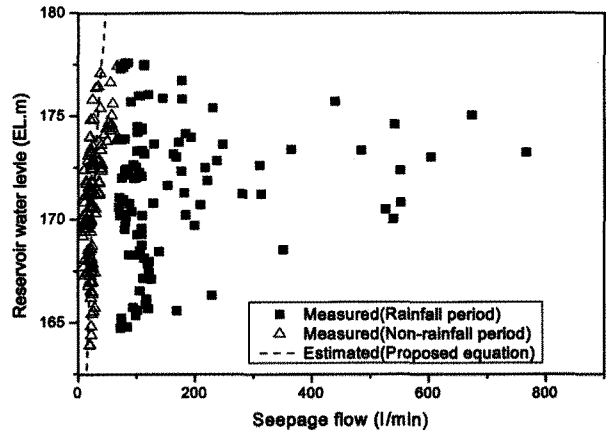


그림 11. 기존 사력댐(F댐)의 제안식에 의한 예측치와 실측 침투량과의 비교

수준 침투량을 다음의 식 (6)과 같은 선형관계식으로 분석 및 제안하였다(단, $\Delta h=0$ 일 때 $q_s/k_s=0$ 임).

본 연구를 통해 제안된 예측식은 불포화 흐름을 고려한 방법으로서 그림 9와 같이 불포화 흐름을 고려하지 않는 기존 이론식인 Sakamoto(1998)의 방법과 비교하여 분석하였다. 분석결과 예측된 침투량은 불포화 흐름을 고려하여 제안된 예측식이 Sakamoto(1998)의 방법보다 크게 나타났으며, 그 차이는 저수위가 낮을수록 증가하고 저수위가 높아지면서 감소하였다. 이와 같은 결과는 사력댐 차수존 내부에 형성된 침윤면 상부의 불포화 영역을 통해 불포화 흐름이 발생하고, 차수존의 형상이 위로 갈수록 폭이 좁아지는 사다리꼴 형상으로 저수위가 높아지면서 불포화 흐름이 발생하는 불포화 영역이 좁아지기 때문이다.

제안된 예측식을 적용하여 한국수자원공사에서 관리하고 있는 F댐의 침투량 예측치와 실측치를 분석하였

다. F댐은 높이 45m, 길이 205m의 사력댐이며 차수존의 투수계수는 1×10^{-5} cm/sec를 적용하였다. 그림 10은 2004년부터 2005년까지 2년간 측정 및 수집된 F댐의 일강수량, 저수위, 실측 침투량의 시간변화 그래프이다. 그림 11과 같이 비강우시에 측정된 실측 침투량을 제안된 예측식에 의한 예측치와 비교한 결과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

제안된 예측식은 차수존의 상·하류 사면경사가 1V:(0.2~0.3)H의 범위인 사력댐에 대한 불포화 침투류해석 결과에 기초하며, 불포화 흐름을 고려하므로 기존 예측식보다 실제 현상에 가까운 예측결과를 얻을 수 있다. 또한, 복잡한 3차원 해석 및 여러 단면에 대한 2차원 해석을 수행하지 않고도 댐 설계자 및 안전관리 실무자가 사력댐 차수존의 침투량을 산정하여, 실측치의 정량적 분석에 손쉽게 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

$$\frac{q_s}{k_s} = 0.442 \frac{\Delta h^2}{L'} + 2.966 \quad (\text{단, } \Delta h=0 \text{ 일 때 } q_s/k_s=0) \quad (6)$$

여기서, q_s = 차수준을 통한 단위폭당 침투량
($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)

k_s = 포화투수계수(m/sec)

Δh = 상류측 저수위의 수심(水深, m)

L_{\max} = 차수준 저면의 최대 폭(m)

L_{\min} = 저수위 위치에서의 차수준의 폭(m)

L' = $0.5(L_{\max} + L_{\min})$

5. 결론

본 연구에서는 불포화 영역을 통한 침투량을 고려할 수 있고, 높이 50m 이상의 국내 대규모 사력댐에 적용 가능한 사력댐 제체의 침투량 예측식을 제안하기 위해 한국수자원공사가 건설 및 관리하고 있는 8개 대규모 사력댐을 대상으로 불포화 침투류해석을 실시하였고, 기존 이론식과 기존 사력댐의 실측 침투량과 비교하여 제안된 예측식을 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 수치해석 결과 침투량은 포화투수계수, 저수지 수심 및 댐의 규모에 따라 변화하며 특히 저수위의 수심이 증가하면서 침투량은 포물선 형태로 증가하였다.
- (2) 예측된 침투량은 불포화 흐름을 고려하여 제안된 예측식이 불포화 흐름을 고려하지 않는 기존 이론식(Sakamoto, 1998)보다 크게 나타났으며, 그 차이는 저수위가 낮을수록 증가하고 저수위가 높아지면 감소하였다.
- (3) 기존 사력댐에서 측정된 실측 침투량을 제안된 예측식에 의한 예측치와 비교한 결과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 제안된 예측식은 차수준의 상·하류 사면경사가 1V:(0.2~0.3)H의 범위인 사력댐에 대한 불포화 침투류해석 결과에 기초하며, 불포화 흐름을 고려하므로 기존 예측식보다 실제 현상에 가까운 예측결과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김윤기 (2003), 투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.

2. 이규탁, 임희대 (2007), “중앙심벽형 필댐의 침투량 및 침투량에 관한 연구-임하댐을 중심으로”, *대한토목학회 논문집*, 제27권 제6C호, pp.383-392.

3. 이종욱, 전제성, 임희대 (2009), “기존 필댐 장기간 안전관리를 위한 제척항목 유지보수 우선순위 선정”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제10권 제7호, pp.67-79.

4. 이종욱, 임희대 (2010), “중심코어형 사력댐의 코어존 침투량 예측기법”, *한국지반공학회 논문집*, 제26권 제4호, pp.47-58.

5. 조성은 (2005), 불포화 수리특성에 대한 댐체 침투거동의 민감도 분석, *한국지반공학회 논문집*, 제21권 제3호, pp.119-131.

6. 조성은 (2006), 확률론적 댐 침투거동 해석, *한국지반공학회 논문집*, 제22권 제4호, pp.73-83.

7. 조재희, 김경호, 윤영호 (1998), “사력댐의 누수특성 및 누수관리 개선방안에 관한 연구”, 충북대학교 산업과학기술연구소, *산업과학기술연구논문집*, Vol.12, No.2, pp.299-309.

8. 한국수자원공사 (1981), 대청다목적댐 공사지.

9. 한국수자원공사 (2005), 대청다목적댐 제2차 정밀안전진단보고서.

10. 한국수자원공사 (2006), 보령댐계통 광역상수도사업 공사지(댐편).

11. 한국수자원공사 (1974), 소양강다목적댐 공사지.

12. 한국수자원공사 (2001), 안동다목적댐 제1차 정밀안전진단보고서.

13. 한국수자원공사 (1977), 안동다목적댐 공사지.

14. 한국수자원공사 (1992), 임하다목적댐 공사지.

15. 한국수자원공사 (2007), 임하다목적댐 제1차 정밀안전진단보고서.

16. 한국수자원공사 (1991), 주암다목적댐 공사지.

17. 한국수자원공사 (2006), 주암다목적댐 정밀안전진단보고서.

18. 한국수자원공사 (2000), 횡성다목적댐 공사지.

19. 한국수자원공사 (2009), 횡성다목적댐 정밀점검보고서.

20. 한국수자원학회 (2005), “댐설계기준”, pp.169-213.

21. 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.

22. Casagrande, A. (1961), “Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams”, *Geotechnique*, Vol.11, pp.161-181.

23. 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.

24. 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.

25. Gresz, I., and Nagy, I. M., “Comparison of Seepage Through Bodies of Earthfill Dams”, Proc. of 19th ICOLD, Vol.2, Italy, pp.1067-1079.

26. Iterseon, F. K. (1917), “Eenige Theoretische Beschouwingen over kwel”, De Ingenieur, Th van.

27. PWRI (Public Work Research Institute, Ministry of Construction Government of Japan, 1984), “Safety Control For Dams”, *Public Work Research Institute Technical Memorandum* No.2115.

28. Lee, J. Y., Choi, Y. K., Kim, H. S., Yun, S. T. (2005), “Hydrologic Characteristics of a Large Rockfill Dam: Implications for Water Leakage”, *Engineering Geology*, Vol.80, pp.43-59.

29. Sakamoto, T. (1998), “A Study on Evaluation of Behaviour and Safety of Rockfill Dam”, *Public Works and Research Institute*, Tokyo, Japan.

30. Schaffernak, F. (1917), “Über die Standicherheit durchlaessiger

Geschurturteter Damme”, Allgem. Bauzeitung.

31. Schneebeil, G. (1966), “Hydraulique Souterraine”, Eyrolles, Paris.
32. SEEP/W (Version 5) Manual (2003), Geo-slope International, Canada.
33. SEEP/W Manual (2007), Geo-slope International, Canada.
34. Wood, H. and Abernathy, A. R. (1996), “Analysis of Transient Seepage Through Earthen Dams Using Cross Correlation Statistical Techniques”, *Hydrological Science and Technology*, Vol.12, No.1-4, American Institute of Hydrology, pp.99-108.
35. 播田, 杉村, 白川, 桑島 (1994), “フィルダムの安全管理のための提体挙動計測手法に関する検討”, *ダム工学*, No.15, pp.55-63.
36. 飯田陸一 (2006), “ダムの安全管理”, 財団法人 ダム技術センター.

(접수일자 2011. 7. 18, 심사완료일 2011. 10. 5)