

# 유한요소 모델을 이용한 필댐 기초지반 그라우트커튼의 적정심도 연구

김진희<sup>\*1</sup>, 안조범<sup>\*2</sup>, 윤정환<sup>\*3</sup>

## 1. 서론

댐(dam)의 기초지반에 시공되는 그라우트커튼(grout curtain)은 댐 축조 후 기초지반을 통한 침투류를 차단하기 위하여 시행되며, 콘크리트 댐, 흙댐, 사력 댐 등의 공학적 차이에 따라서 그 시공 위치 및 심도, 폭 등이 다르게 적용된다. 흙과 사력 재료로 축조되는 필댐(fill type dam)은 전통적인 댐 축조방식으로 우리나라의 댐 중에서도 가장 많은 부분을 차지하고 있다(Houlsby, 1985; 농림부, 1999).

그라우트커튼(grout curtain)의 설계·시공 요소는 기초지반의 투수성, 댐 내의 수심, 제체 성토재료의 투수성, 그라우트커튼의 투수성 등에 의하여 결정되며, 설계·시공 요소들은 그라우트커튼의 깊이, 폭, 투수도 등이다. 그 중에서도 그라우트커튼의 깊이는 기초지반을 통한 침투량 및 침투압, 그리고 제체 하류부 지반의 유출동수구배(exit gradient)의 변화에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 인식되고 있다(Weaver, 1991; 장의용, 2001).

그러나 제체 및 기초지반의 투수도 이방성 및 댐 내 수압이 고려된 침투류 결과가 수학적으로 완벽하게 구해지기는 대단히 어려운 일이다. 현재까지 기초지반을 통한 침투류 해석 방법은 이론적 방법이나 도해적 방법 및 실험적 방법 등이 이용되어 왔으나 불규칙한 물성 및 자연 조건을 수용하지 못하여 제한적

인 조건 내에서 이용되어 왔으며, 전산 분야의 발달과 함께 수치해석기법의 활용 폭이 커지면서 소규모의 변형 단면의 영역 설정이 가능한 유한요소법이 주로 댐의 침투류 해석에 많이 이용되고 있다(U.S. Army Corps of Engineers, 1993)

국내에서 필댐 제체에 대한 침투류는 진병익(1968), 신방웅(1982), 김일현(1980), 신진환(1996), 한성대(1998) 등에 의해서 다양한 조건에 따라 연구되었으나 필댐 기초지반에 대한 침투류 연구는 미진한 상태이다.

본 연구에서는 복잡한 댐 기초지반 침투류 시험 조건의 구현이 가능하고 신뢰성이 있는 수치해석 기법인 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 그라우트커튼이 설치된 필댐의 기초지반을 통한 침투류 해석을 시도하였으며, 그라우트커튼 심도에 따른 침투량, 침투압 및 수리역학적인 안정성 해석에 연구의 중점을 두었다.

## 2. 필댐 기초지반 침투류의 영향요소

### 2.1 침투류의 기본이론

필댐에서의 이론적인 침투류 해석은 투수성에 영향을 미치는 여러 요소를 현실 조건과 유사하게 가정함으로써 결과를 해석할 수 있으며, 저수위나 경계조건 등의 변화에 따라서 정상침투류와 비정상침투류로 구분할 수 있다.

침투류의 기본식이 되는 연속방정식은 Darcy의

<sup>\*1</sup>정회원, 농업기반공사 전라남도본부

<sup>\*2</sup>정회원, 농업기반공사 환경지질사업처

<sup>\*3</sup>전남대학교 건설지구환경공학부 교수

법칙이 성립하고, 유체는 비압축성이라는 가정하에 다음의 3차원 식으로 표현된다.

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

여기서,

h : Total head

$K_x, K_y, K_z$  : Hydraulic conductivity in the x,y,z-direction, resp.

$S_s$  : Specific storage coefficient

t : Time

댐의 침투류 해석에 이용되는 투수계수는 Darcy 법칙을 만족하여야 한다. 자연상태의 흐름 조건에서는 Darcy 법칙의 적용이 불가능한 경우가 있으나, 일반적으로 지하수는 한계 Reynolds 수가 1~10의 범위인 층류로 분류되기 때문에 댐 기초지반을 흐르는 침투류 해석에 대해서도 Darcy 법칙의 적용은 무리가 없다(Cedergren, 1975; 한정상, 1998).

필댐 제체 및 기초지반의 침투류에 대한 수치해석은 침투류의 수두, 유속분포, 유량, 침투수압분포 등을 구하여 누수량 및 댐의 안정성을 검토하는데 이용되며 유한요소법이 일반적으로 이용된다.

필댐 내 침투류의 유한요소해석은 두 가지 방법이 있다. 하나는 자유수면 취급 방법에 따라 포화 영역만을 계산 대상으로 하여 자유수면이 변화하면 해석 영역도 변화하는 포화 침투류 해석방법이고, 다른 하나는 포화 영역뿐만 아니라 불포화 영역도 계산 대상에 포함시킨 포화·불포화 침투류 해석방법이다.

제체 및 댐 기초지반의 침투류 해석은 제체 침윤선 하부의 포화구간에 대한 영역을 대상으로 해석하므로 포화 침투류 해석 방법을 적용하며 이에 대한 이론은 다음과 같다.

필댐 내의 침윤선은 자유수면을 형성하며, 침투류가 정상 또는 비정상 흐름 상태에서 매체 또는 침투수의 압축성이나 가속도의 영향보다도 자유수면의

변동 영향이 가장 크며, 해석시 자유수면의 변동에 의해서만 비정상성을 고려하면, 침투류 기본식인 식 (1)로부터 다음과 같이 총포텐셜에 관하여 필댐 내 2차원 침투류 방정식을 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) = 0 \quad (2)$$

여기서,

h : Total head

$K_x, K_y$  : Hydraulic conductivity

또한 Fig. 1과 같이 일반적인 경계조건을 고려하면 다음 방정식들로 표현할 수 있다(과학기술, 1998; 건설부, 1993).

① 제체 내의 자유수면상 :  $h=Z(x,y,t)$

② 저수지 수면하의 제체사면상 :  $h=h(t)$

③ 제체 기초 경계면상 :

$$K_x \frac{\partial h}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial h}{\partial y} l_y = q$$

여기서,

q : unit flux across the side of an element

$l_x, l_y$  : vertical line in boundary surface

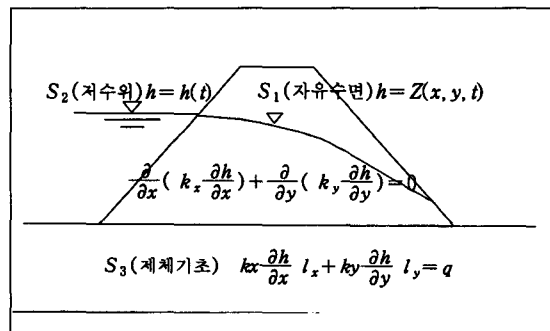


Fig. 1. Seepage equation in fill type dam

이러한 기초식 및 경계 조건식에 대한 연립 방정식은 최종적으로 다음 식으로 행렬 표시할 수 있다.

$$[K] \{H\} + \{Q\} \quad (3)$$

여기서,  $[K]$  = Element characteristic matrix  
 $\{H\}$  = Vector of nodal heads  
 $\{Q\}$  = Applied flux vector

필댐 내의 자유수면은 저수지 수위의 변동에 따라 변화하므로 시간에 따라 변동하는 저수위 수위 및 자유수면의 비정상 흐름은 유한한 미소 시간에 대한 정상 침투류 해석을 실시하여 해석될 수 있다.

## 2.2 침투류의 영향요소

필댐의 기초지반 중앙부나 상류부에 설치되는 그라우트커튼의 효율을 결정하는 요소는 기초지반의 투수성(permeability), 댐 내의 수심, 제체 성토부의 투수성과 그라우트커튼의 심도, 투수성 및 폭 등이며, 이 중 댐 내의 수심, 기초지반의 투수계수와 그라우트커튼 심도는 그라우트커튼의 설계 및 시공에 있어서 가장 중요한 변수들로 인식되며, 주어진 조건에서 인위적으로 결정되어진 최종 요소는 그라우트 커튼 심도가 된다.

그러나 그라우트커튼의 심도는 기초지반의 투수성과 저수지의 수심에 따라 비선형적인 변화를 보이고, 불균질한 지질구조적인 원인 때문에 확립적으로 설정될 수 없다.

필댐을 축조할 경우, 댐 부지의 기초지반의 처리는

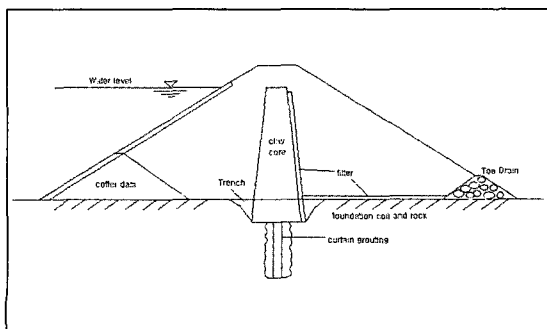


Fig. 2. Typical cross section of fill dam curtain grouting

누수차단, 지반안정성, 변형방지를 목적으로 시행되며 투수성 기초지반의 처리방법은 차수 트렌치(cut-off trench), 차수벽(cutoff wall) 형태로 시공된다. 이들 차수체들은 댐 하부를 통과하는 침투수의 유로를 연장하여 그 흐름을 효과적으로 억제되도록 설계된다(Fig. 2).

커튼 그라우팅은 Soil-bentonite slurry-trench cutoff wall, Concrete cutoff wall, Cement bentonite cutoff wall, Plastic concrete cutoff wall과 같은 차수벽 시공 방법의 일종으로 기초지반에 발달되어 있는 균열, 절리, 공동, 공극 등을 주입재로 채워 수밀성과 지반의 강도를 증진시키기 위해 찬공기로 구멍을 뚫은 후 주입펌프로 주입재를 지반 틈새에 집어넣어 고결되게 하는 일련의 공법을 말한다(US-BR, 1998; 장의웅, 2001).

## 3. 필댐 기초지반 침투류 수치적 Modeling

### 3.1 침투류 유한요소 수치모델 구축

필댐의 전반적인 거동 해석에 있어 유한요소법 등의 수치해석법은 기초지반 및 축조재료의 특성과 복잡한 경계 조건의 모델링 매개변수의 불가피한 가정 및 한계로 인하여 전적으로 신뢰할 수 있는 해석 결과만을 기대하기는 어렵다.

본 연구에서는 필댐의 그라우트커튼이 설치된 기초지반을 통한 침투류에 대한 해석이 목적이므로 제체 및 기초지반의 제반 물성치중 투수계수에 대한 신뢰도 있는 수치만 필요하며, 다양한 매개변수가 필요한 제체의 안정성 검토 해석에 비하여 상대적으로 변수에 대한 신뢰도는 높은 편이다.

기본적으로 필댐의 기초지반을 통한 침투류는 기초지반이 흩이거나 암반이거나 상관없이 투수성 지반이면 발생하게 되며, 이를 처리하는 방법으로 Horizontal drains, Cutoffs, Up-stream

impervious blankets, Down-stream seepage berms, Toe drain, Relief wells, Grout curtain 등이 이용된다(U.S. Army Corps of Engineers, 1993).

현재, 우리나라 농업용 필댐 기초지반의 차수는 대부분 Cutoff trench와 Grout curtain이 결합된 형태로 설계·시공되고 있으며, 이러한 설계 목적은 제체 및 점토코어의 저면과 기초의 접촉부분을 통한 누수량을 감소시켜 저수지의 저류안정성을 높이고 하류측 지반의 간극수압을 감소시켜 수리적 안정성을 높이는 데 있다.

유한요소법에 의한 침투류 해석은 복잡한 해석 영역의 초기조건 및 경계조건에서도 비교적 용이하게 적용이 가능하므로 제체나 기초지반의 침투류 해석에 광범위하게 적용된다.

침투해석의 목적은 문제의 성질에 따라 다소의 차이가 있으나 대상영역 내 자유수면, 수두, 침투유량, 침투수압을 구하여 침투류에 대한 안정성을 검토하는 것이며, 필댐의 침투류 해석을 위해서는 다음과 같은 조건을 필요로 한다.

- A. 댐체의 기하학적 단면설정
- B. 초기 수위조건
- C. 댐 축조재료의 특성(각 영역별 투수계수 등)

이러한 침투류 해석 조건 중 본 연구에서 적용한 댐체의 기하학적 요소를 결정하는 댐 제원과 제체 및 기초지반의 투수계수는 해석 프로그램 자체에서 제공하는 각 토질별 정수값(Table 1)을 이용하였으며, 전산 해석에 이용된 프로그램은 캐나다 GEO-SLOPE International Ltd사의 SEEP/W DEFINE(ver 5.12)으로 정상상태 및 비정상상태의 침투류 해석, 2차원 축대칭 해석 및 평면 해석이 가능한 프로그램이다.

해석 모형은 필댐의 구조물 형태가 실제로는 3차원이지만 단면이 일정하고 길이가 긴 형태를 한 경우가 대부분이므로 경계조건과 초기 수위조건을 단순화하

여 댐축 중간의 대표 횡단면으로 근사적인 2차원 해석을 시도하였다. 2차원 해석 모형의 구성은 댐수심 27m, 기초지반 두께 54m의 규모로 설정하였고, 각 요소 단위는 해석 대상 영역의 기하학적 형태를 고려하여 사각형(quadrilateral region) 또는 삼각형(triangular region)으로 구성하였으며, 요소(element)는 2,095개, 절점(node)은 1,464개로 구성하였다(Fig. 3~4).

경계조건에서 좌측사면은 전수두(total head) 조건, 우측사면 하부는 절점유량 조건과 전수두 조건, 기초지반 하부는 불투수 조건으로 처리하였다.

필댐 커튼그라우팅 설계의 핵심인 그라우트커튼의

Table 1. Hydraulic conductivity of each material adopted in the model(GEO-SLOPE International Ltd, 1998)

Constitution of dam	Material	Hydraulic conductivity(m/s)
Clay core cutoff	Well graded clay	$7.00 \times 10^{-10}$
Embankment	Sandy clayey silt	$1.50 \times 10^{-8}$
	Filter	$4.30 \times 10^{-6}$
Toe drain	Gravel	$4.22 \times 10^{-3}$
Foundation ground	Soil and rock	$8.00 \times 10^{-7} \sim 1.00 \times 10^{-5}$
Underground cutoff	Grout curtain	$1.00 \times 10^{-7}$

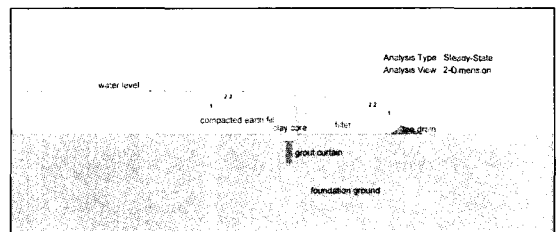


Fig. 3. Typical cross section of seepage analysis in fill dam

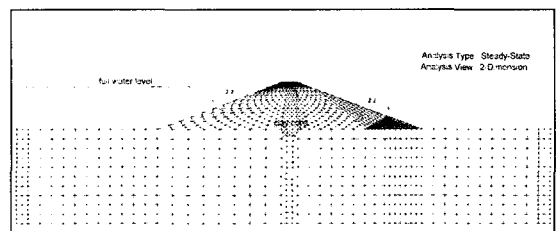


Fig. 4. Finite element mesh net of seepage analysis in fill dam foundation

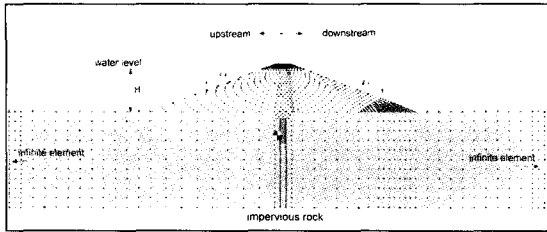


Fig. 5. Boundary conditions of FEM seepage analysis in fill dam

심도는 제체를 통한 누수량 및 침투류에 의한 제체의 안정성 해석에 의하여 결정될 수 있으며, 경험적 기준은 있으나 정량적 세부 기준은 모호한 실정이다.

왜냐하면, 기초지반의 투수성이 큰 경우, 기초지반을 통한 누수량은 많아 지지만 유출지점이 제체 범미 부보다 하류부인 경우에는 제체 안정과 무관하므로 침투류의 흐름을 차단할 필요가 없으며, 다만 저류 기능적인 경제성을 고려한 허용누수량 기준 범위 내에서 차수되는 것이 바람직하기 때문이다.

그리고 기초지반의 허용누수량 기준은 제체를 통한 누수량과는 달리 별도로 정하기 어려운 부분으로 기초지반의 투수성이 큰 경우에는 일반적으로 제체를 통한 누수보다는 훨씬 많은 누수가 기초지반을 통해 발생할 수 있으나 누수량 중 많은 부분이 제체에 침투수로 작용하지 않고 댐 하류부로 흐르는 지하수로 흘러 들기도 하며, 비록 기초지반을 통한 누수량이 허용누수량 이내의 적은 양이더라도 댐 하류부 제체 및 배후 농경지를 습지화시키는 등 악영향이 있을 때는 누수량을 최소화하기 위한 차수심도는 충분히 깊어져야 한다.

### 3.2 수치모델의 검증

유한요소모델 요소망(element mesh net)과 절점(node)의 구조적 안정성이 보장되어 연산 error를 유발하지 않는지를 검증하고 구축된 모델의 모사결과를 도해적 침투류 해석기법인 유선망 해석 결과와 비교하여 적정성을 검토하였다.

유한요소망 및 절점의 구조적 검증은 SEEP/W 프로그램에 자체 내장된 verify/sort 모듈을 이용하였다. 이 검증 과정의 검토내용은 요소망의 모양과 절점의 위치를 분석하는 것이며, 요소망이 사각형 또는 삼각형으로 구성되었을 때 각 요소간 크기의 비와 요소 변의 길이의 비가 만족되어야 하고, 절점은 연산이 이루어지는 단위이므로 주변 절점과 항상 연결성을 갖도록 구성 규칙을 만족해야 한다. 상기한 verify/sort 모듈에 의한 검증 결과 본 연구 모델의 요소 및 절점에 대한 구조적 error는 나타나지 않았다.

또한 연구 모델이 댐 제체 및 기초지반을 통한 침투류 해석을 위하여 구성되었으므로 실제로 적절히 기능을 발휘하는지 모델 적정성을 증명하기 위하여 침투류 해석을 위한 대표 단면을 설정하여 모사를 시행하고, 도해적 침투류 해석방법인 유선망(flow net)해석 결과와 비교함으로써 모델의 경계조건 및 유한요소망 설정 등이 적절히 수행되었는지를 검증하였다.

유선망은 흙 속을 흐르는 침투류의 전수두가 동일한 점을 연결한 등수두선(equipotential line)과 등수두선에 직각 방향으로 흐르는 유선(flow line)의 곡선군을 말한다. 유선망에서 각 유로의 침투량은 같고, 2개의 등수두선의 수압강하량은 다른 2개의 등수두선에 대해서도 같으며, 침투속도 및 등수경사는 유선망의 폭에 역비례한다는 논리로부터 다음 식과 같이 침투유량을 구할 수 있다.

$$q = kH \frac{N_f}{N_d} \quad (4)$$

여기서,

$q$  : Rate of discharge

$K$  : Hydraulic conductivity

$H$  : Total water pressure

$N_f$  : Number of flow lines

$N_d$  : Number of equipotential lines

Table 2. Comparison of flow net and seep/w solution results

Item	Flow Net	SEEP/W
Total seepage rate(m <sup>3</sup> /sec/m)	4.57×10 <sup>-5</sup>	4.41×10 <sup>-5</sup>
- Total head(H)	27	27
- Number of flow line(N <sub>f</sub> )	6.1	-
- Number of equipotential space(N <sub>d</sub> )	18	18
- Interval of equipotential line	1.5	1.5

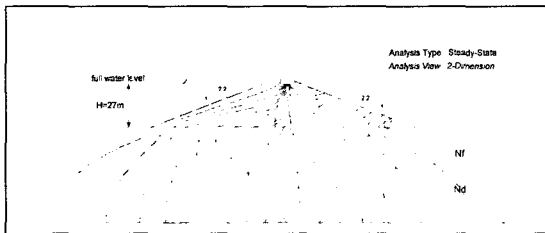


Fig. 6. Flow net solution of fill dam seepage

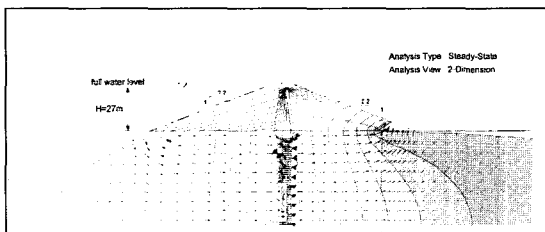


Fig. 7. SEEP/W computed head distribution and flow vectors

균질한 기초지반의 지층조건과 댐수심 27m, 기초지반 투수계수  $5 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ , 그라우트 심도 13.8m 인 흙 댐의 대표 단면을 설정하여 정상류 흐름시 제체 및 기초지반을 통한 침투류를 유선망 해석(Fig. 6)과 유한요소모델 해석(Fig. 7)을 시행한 결과 Table 2와 같은 결과를 확인함으로써 수치모델의 실용성을 검증하였다.

본 수치모델은 주로 기초지반을 통한 침투류 해석에 목적이 있으므로 제체는 설계 기준에 따라 최상의 조건으로 시공되었을 경우를 가정하였으며, 이럴 경우 제체부를 통한 침투량은 기초지반을 통한 침투량에 비하여 0.1~1% 수준에 불과하므로 유선망 해석에서 구한 침투량은 기초지반 침투량만

을 계산한 것이다.

유선망 해석에 의한 침투량은 식(5)에 적용하면,  $q = 5.0 \times 10^{-6} (\text{m/s}) \times 27 (\text{m}) \times 6.1 / 18 = 4.57 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 으로 산정되어 수치모델을 구축하여 모사한 동일 단면에 대한 침투량  $4.41 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 과 거의 유사한 결과를 보인다.

## 4. 매개변수에 대한 수치해석

### 4.1 수치해석 조건

본 연구에서는 필댐 신설저수지나 기설 저수지에 서 시행되는 차수 목적의 커튼 그라우팅 설계의 정량적 기준을 제시코자 침투류 해석을 시도하였다.

침투류 해석 모델은 그라우트커튼이 설치된 필댐의 기초지반을 통한 침투류 해석을 목적으로 구성되었으며, 유한요소해석 방법을 적용하여 커튼 그라우팅의 대표적인 설계 요소인 댐 수심, 배수 형식 및 기초지반의 투수도에 따라 변화되는 침투류를 해석하였다.

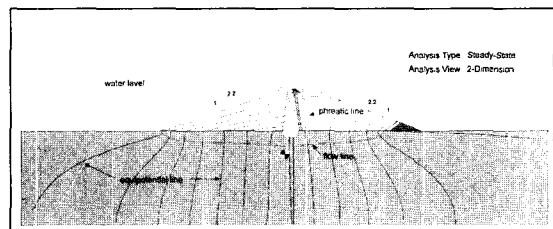


Fig. 8. Typical seepage flow line through dam foundation before curtain grouting

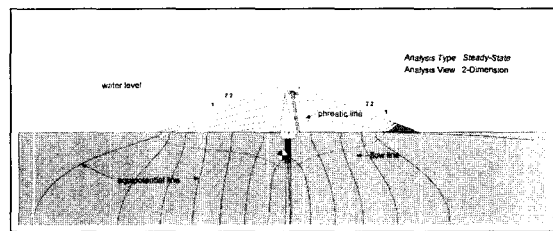


Fig. 9. Typical seepage flow line through dam foundation after curtain grouting

그라우트커튼이 설치될 경우 기본적인 기초지반내의 침투류는 양적인 감소와 간극수압의 변형이 발생하여 유선(flow line)이 변화된다(Fig. 8~9).

댐 수심, 그라우트커튼 심도와 폭, 기초지반의 투수도 및 배수 형식은 기초지반을 통한 침투류의 양과 속도에 미치는 영향이 가장 큰 요소들로서 본 모델 해석에서는 댐하류부에 토우드레인이 설치되어 있고 댐 수심이 27m, 그라우트커튼 폭이 3m인 제체의 외형 조건과 기초지반의 투수성을 7단계로 변화시키고 각 단계별로 그라우트 심도를 0~36.6m까지 10단계로 변화시키면서 그라우트 심도에 따른 침투류의 변화 양상을 해석하였다.

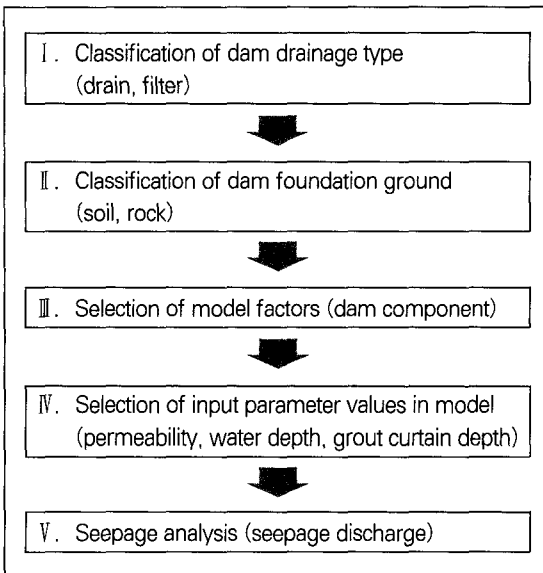


Fig. 10. Process of seepage analysis in fill dam with grout curtain

Table 3. Value range of model input parameters

Design parameters and unit	Symbol	Range of values	Remarks
Hydraulic conductivity of foundation ground	K(m/s)	$8.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	variable
Water depth	H(m)	27	fixed
Width of grout curtain	W(m)	3	fixed
Depth of grout curtain	D(m)	0~36.6	variable

Fig. 10에 제시한 그라우트커튼이 시공된 필댐의 침투류 해석 절차는 미국, 일본, 유럽 등 외국과 우리나라에서 축조되었거나 축조되고있는 수많은 필댐의 전형적인 형식을 고려하여 가장 용이하게 침투류 해석에 접근할 수 있는 핵심적인 요소들을 추론하여 다섯 단계로 구분한 것이다.

먼저, 배수 형식(I)은 드레인(drain)과 필터(filter)가 있는 것과 없는 것을 고려한 것으로 설계기준이 엄격하지 않던 시대에 축조된 댐이나 댐 높이가 높지 않은 경우에 드레인과 필터가 설치되지 않고 댐이 축조되었다.

기초지반 조건(II)은 침투류에 절대적인 영향을 미치는 투수성 요소를 반영하기 위한 것으로 기초지반이 흙이나 암반이냐에 따라 적용하는 투수도의 범위가 달라진다. 이 들 외에 모델의 구성 요소(III)인 댐 높이, 댐 너비, 사면의 기울기 등은 기본적인 댐 제원들이며, 모델의 매개변수값 적용(IV)은 댐 수심 및 그라우트커튼 심도와 폭, 기초지반의 투수계수를 모델에 반영하기 위한 과정으로 본 연구 모델에서 적용되는 매개변수 입력값 범위는 Table 3과 같다. 이 들 매개변수 값은 건설부 및 농업기반공사 댐 설계기준 및 시공현장에서의 적용성 등을 고려하여 반영하였다.

## 4.2 그라우트커튼의 효율 평가

### 4.2.1 매개변수에 따른 침투수량 변화

제체 하류부로 유입되는 침투수량 예측은 Fig. 11 처럼 침투유선을 A, B, C 형식(type)으로 구분하여 필터와 토우 드레인의 영향을 우선 검토하였으며, 각 침투수량은 각 침투유선 상부를 통과하는 침투류의 합을 의미한다. 검토 결과 침투유선이 제체 성토부 끝점과 필터의 경계부를 통과하는 A 형식의 침투수량 예측 방법이 제체 하류부 바닥면으로 상향 침투되는 침투수량을 그라우트커튼 심도에 따라 변화 되는 경향을 가장 잘 반영하는 것으로 해석되었으며, 상대적으로 B와 C 형식은 침투유선이 필터 바닥면의 중

간부 및 필터와 토우드레인의 경계부를 통과하는 유선 형태로서 필터와 토우드레인의 급격한 투수성 증가 때문에 그라우트커튼 심도에 따라 체체 하류부 바닥면에 침투하는 침투수량의 분석은 불가하였다.

Fig. 12~13에 도시된 그래프는 댐 기초지반의 투수계수를 7단계( $K=8.0 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ )로 변화시키고, 각 단계별로 그라우트커튼의 심도(D)를 10단계(0~36.6m)로 변화시켜가면서 체체 하류부 중 토우 드레인 안쪽으로 유입되는 침투수량을 분석한 것으로, 기초지반 투수성의 이방성을 고려하여 K-anisotropy( $K_v/K_h$ )를 1.0과 0.1인 경우로 구분하였다.

먼저, K-anisotropy( $K_v/K_h$ )가 1.0인 경우, A형식에서 기초지반 투수계수가  $1 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이하에서는 그라우트커튼이 설치되더라도 침투수량은 감소되지 않았으며,  $3 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 이상에서는 투수도가 높아질수록 침투수량이 최소로 감소하는 그라우트커튼 심도는 깊어지는 경향을 보인다.

그리고, 특기할 만한 점은 그라우트커튼 설치 심도가 10.2m이하로 짧은 경우에는 오히려 체체로 유입되는 침투수량이 증가하는 결과를 보이며, 이는 기초지반 투수성이 균질 등방인 조건에서 그라우트커튼이 하류부 기초지반 내 압력수두를 감소시켜 침투류의 상승을 유도한 것으로 해석된다. 이 때의 그라우트커튼 심도는 댐 수심 27m의 약 1/3정도에 해당된다.

K-anisotropy( $K_v/K_h$ )가 0.1인 경우 A 형식 침투수량은 그라우트커튼이 없을 경우는 K-anisotropy ( $K_v/K_h$ )가 1.0일 때의 약 67% 수준이었으며, 그라우트커튼 설치 조건에서는 커튼 심도에 상관없이 모두 감소하였고, 그라우트커튼 심도가 5.4~6.6m 일 때 침투수량이 최대로 감소하는 한편, 투수계수가 커질수록 침투수량 감소 폭도 증가하였다.

또한 필댐 기초지반에서 침투류를 최소화하는 그라우트커튼의 심도 결정을 위하여 기초지반이 균질 등방 투수성 조건에서 댐 수심을 6~48m까지 14단계, 기초지반 수리전도도를  $3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 까

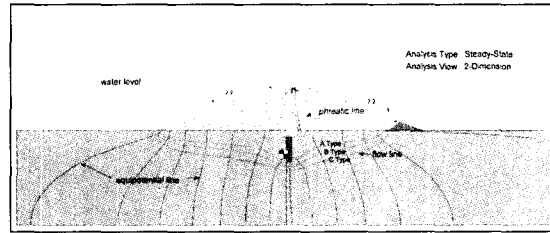


Fig. 11. Type of seepage flow line through dam foundation after curtain grouting

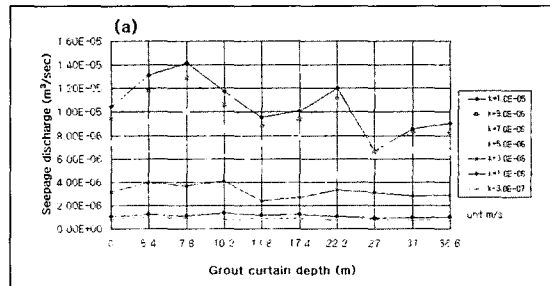


Fig. 12. A-type seepage through dam foundation (foundation K-anisotropy( $K_v/K_h$ )=1.0)

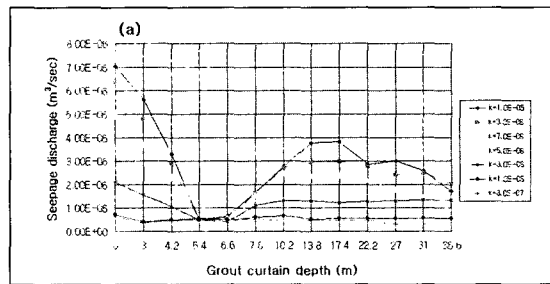


Fig. 13. A-type seepage through dam foundation (foundation K-anisotropy( $K_v/K_h$ )=0.1)

지 19단계로 하여 각 수리전도도 조건별로 체체로 유입되는 침투수량이 가장 최소화되는 그라우트커튼의 적정 심도를 285개 추출하였으며, 추출된 그라우트커튼의 적정 심도(D)는 종속변수로 놓고 기초지반 투수계수(K)와 댐 수심(H)을 독립변수로 취하는 다중회귀식을 유도하였다. 다중회귀식은 식 (5)와 같다.



$$D = 8.02K + 0.82H - 6.8 \quad (R^2 = 0.89) \quad (5)$$

(Parameters unit : D = [m],  
K = [m/day], H = [m])

추출된 식(5)는 기존의 그라우트커튼 심도 산정식이 댐수심(H)만을 고려하여 산정된 것에 비하여 기초지반의 투수성 요소를 추가로 고려함으로써 침투류의 주요 변수에 대한 해석력을 높여 그라우트커튼의 적정심도 산정의 신뢰도 상승이 기대된다.

#### 4.2.2 매개변수에 따른 침투수압 변화

침투수압(seepage pressure)은 수중의 임의의 두 점 사이의 전 수두(total head) 차이로 생긴 침투수로 인하여 발생된 유효응력을 의미하며 수두차(h)와 물의 단위중량( $\gamma_w$ )의 곱으로 표현된다.

양압력(liftup pressure)은 구조물 양단의 수두차에 상당한 간극수압(pore-water pressure)에 의하여 발생하며 전수두에서 위치수두(elevation head)를 뺀 값으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{Total head}(h_t) - \text{Elevation head}(h_e) \\ = \text{Pressure head}(h_p) \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로, 압력수두는 댐과 같이 수두의 변화와 밀접한 관계를 갖는 토목구조물의 안정성 해석에 필수적인 검토 요소라 할 수 있다. Fig. 14는 그라우트커튼(Depth=13.8m)이 설치된 필댐의 제체 및 기초지반을 통하여 흐르는 침투수의 전수두에서 위치수두를 뺀 압력수두만을 등수두선으로 표현한 전형적인 모식도이다.

필댐 바닥면과 기초지반이 만나는 접촉면을 따라 작용하는 침투수압은 제체에 불안정 요소로 작용하며, 특히 토우 드레인(toe drain)과 만나는 제체 하류부(downstream)는 성토하중이 적고 투수도가 높은 필터(filter)와 연결하여 있으므로 적은 침투수압에도 파이프가 발생할 수 있다. 즉, 제체 하류부로 갈수록 침투수압이 작아지는 감소정도가 미미하면

그 만큼 제체 손상이 빠를 수밖에 없다.

본 연구에서는 필댐 기초지반에 그라우트커튼이 설치될 경우, 제체 바닥면에 작용하는 양압력의 크기를 제체 상류부에서 하류부까지 약 140m의 저폭 구간 중 9개 지점에서 검토하였다. 또한, 필댐 기초지반의 투수조건에 따라 가장 효과적인 그라우트 심도 분석을 위하여 필댐 기초지반의 투수계수(7단계)와 그라우트커튼의 심도(10단계)를 변화시켜 가면서 제체 횡단의 바닥면을 상류에서부터 하류방향으로 거리별로 압력수두만을 추출하고 Fig.15~18에 그래프로 도시하였다.

먼저, K-anisotropy( $K_v/K_h$ )가 1.0인 경우 그라우트커튼 설치되기 전에는 제체 횡단면 상류부에서 하류부까지 바닥면에 작용하는 침투수압은 거의 완만한 감소 경향을 보이지만, 그라우트커튼이 설치된 후 그라우트커튼 설치 지점 앞(65.5m)과 뒤(74.5m)에서 급격한 변화를 보인다.

이러한 그라우트커튼 앞·뒤의 침투수압은 기초지반의 투수계수가 클수록, 그라우트커튼 심도가 깊을수록

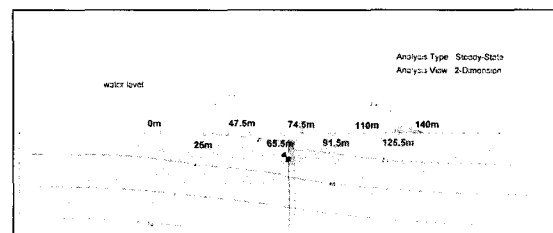


Fig. 14. Pressure head equipotential line in fill dam with grout curtain

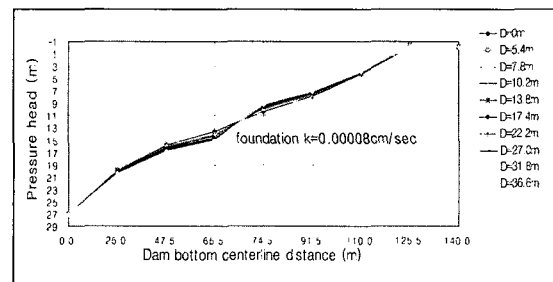


Fig. 15. Uplift at dam bottom for a range of grout depth (foundation  $K = 8 \times 10^{-7}$  m/sec, K-anisotropy = 1.0)

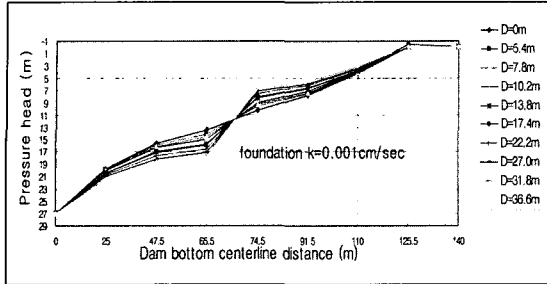


Fig. 16. Uplift at dam bottom for a range of grout depth (foundation  $K=1 \times 10^7$  m/sec,  $K$ -anisotropy=1.0)

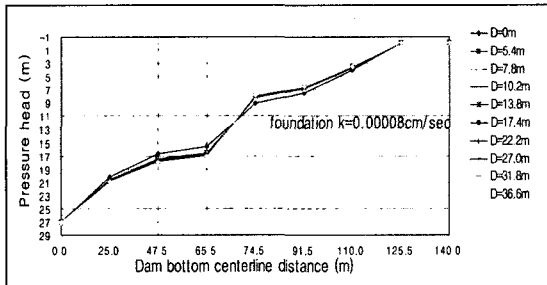


Fig. 17. Uplift at dam bottom for a range of grout depth (foundation  $K=8 \times 10^7$  m/sec,  $K$ -anisotropy=0.1)

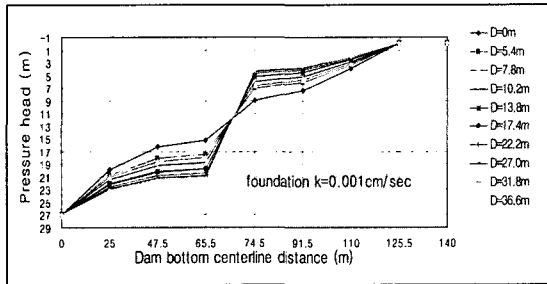


Fig. 18. Uplift at dam bottom for a range of grout depth (foundation  $K=1 \times 10^7$  m/sec,  $K$ -anisotropy=0.1)

특 더 크게 변화하는 것으로 분석되었으며, 제체 어느 지점에서든 댐 수심에 의한 수두압(2.7kgf/cm<sup>2</sup>) 이상은 나타나지 않았다.

#### 4.2.3 매개변수에 따른 파이핑 검토

파이핑은 침투수압이 상향으로 되어 유효응력이 0이 될 경우, 사질의 자연지반에 놓인 수리구조물 뒷굽이나 널말뚝의 하류면에서 이따금 발생할 수 있으

며, 물이 수평방향으로 침투하는 흩댐 또는 방조제의 하류부 경사면에서 필터의 잘못된 설계나 시공, 다짐 불충분, 제체나 기초지반내 누수경로 존재 등의 이유로 발생할 수 있다(김상규, 2001 ; Sherad, et al., 1967).

본 연구의 침투류 해석결과, 제체와 기초지반의 접촉부를 통한 침투수압 발생으로 형성되는 침투수의 유출동수경사는 침투수가 유출되는 제체의 끝 부분에서 가장 크게 분석되었으며, 흩댐 하류부에서 형성되는 최고 유출동수경사 발생 지점이 지중인 점을 고려하여 동일 지점 상부의 제체 토중량 등의 영향을 종합하여 파이핑 안전성을 검토하였다.

분석 방법은 먼저, 상술한 기초지반을 통한 침투수량 및 침투수압 분석 방법과 동일하게 기초지반의 투수조건과 그라우트커튼의 심도 변화에 따라 제체 성토부 끝점에서의 유출동수경사( $i_e$ )를 확인하였다.

다음 식 (7)과 (8)는 한계동수경사와 유출동수경사를 이용하여 파이핑 안전율을 구하는 식이다.

$$F_s = \frac{i_c}{i_e} \quad (7)$$

여기서,

$i_c$  : critical gradient

$i_s$  : exit gradient

$$i_c = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n) \cdot (G_s - 1) \quad (8)$$

여기서,

$i_c$  : Critical gradient

$\gamma_s$  : Unit weight submerged soil

$\gamma_w$  : Unit weight of water

$G_s$  : Specific gravity of soil

$e$  : Void ratio

$n$  : Porosity

$i_c$ 는 한계동수경사로 입자가 모래인 경우 분사현상 발생 유무의 기준치로 대략 1값을 보인다. 일반적인

로 흙 지반의 침투조건에서 유출동수경사( $i_e$ )에 대한 한계동수경사의 비로 표현되는 파이핑의 안전율 (safety factor)은 1.5~15의 범위를 갖은 것으로 알려져 있고 있으며, 조사자에 따라서 4~5 (Harr, 1962), 2.5~3.0 (Cedergren, 1977)의 값을 제안하였다. 김용식(1999)은 유한요소법을 이용한 흙댐 제체의 파이핑에 대한 안전율 해석에서 한계동수경사에 대한 안전율은 1.5를 적용하는 것이 합리적인 것으로 보고하였다.

그러나 제체의 경우 최고 유출동수경사 발생 지점이 지표에 노출되지 않고 일정한 두께의 토체가 하중으로 작용하고 토체의 성분이 점성이 많을 경우 수두 손실이 많아 실질적인 파이핑 해석에는 침투류 유출 지점의 상부 토하중이 고려되어야 한다.

동수경사에 의한 파이핑의 안전율은 전기한 바와 같이 한계동수경사( $i_c$ ) 값을 최대 유출동수경사( $i_e$ ) 값으로 나눈 값이며, 댐체내 한계동수경사는 흙의 통상적인 한계동수경사가 0.85~1.1인 점을 감안하여 1로 가정하였다.

Fig. 19~20은 댐 하류부로 유출되는 침투류의 동수경사를 등치선도로 작성하고 유출동수경사가 가장 크게 나타나 파이핑 우려가 있는 제체 성토부와 토우드레인이 만나는 지점(a and b)에 대한 단면도이다. 해석결과, 기초지반 투수성이 커질수록 유출동수경사가 감소하였는데, 이는 유출동수경사가 최고치로 나타나는 지점은 토우드레인과 접하는 부분으로서 기초지반 투수성이 클수록 토우드레인으로의 배수가 원활해지기 때문으로 판단된다.

본 연구 모델에서 제시된 제체 물성치의 각 투수계수 조건에 따라 해석된 댐 제체 하류부(downstream) 끝 점의 최고 유출동수경사는 투수 등방성 지반에 그라우트커튼이 설치되기 전인 경우, 침윤선 안쪽 a점에서는 0.63, 침윤선 바깥쪽 b점에서는 1.52로 나타났으며, 그라우트커튼이 36.6m로 설치된 후의 최고 유출동수경사는 침윤선 안쪽 a점에서는 0.57, 침윤선 바깥쪽 b점에서는 1.25로 나타나 그라우트커튼 설치에 의한 유출동수경사 감소는 설치전의

82~90%로 해석되었다.

그리고 그라우트커튼 설치 전·후에 침윤선 안쪽 a점에서의 파이핑 안전율은 각각 1.58과 1.75로 안전율이 비교적 낮은 것으로 분석되었으나, 동수경사에 의한 파이핑 해석은 사질토 지반에서 유출지점 상부의 토하중이 없는 경우를 기준으로 하므로 본 연구 모델에서의 직접 적용은 곤란하다.

Fig. 21~24는 침윤선 안쪽 a와 침윤선 바깥쪽 b, 두 지점에서 나타나는 유출동수경사를 투수이방성(K-anisotropy = 1.0 and 0.1)과 투수계수 변화 조건에 따라 그라우트커튼 심도별로 분석하여 도시한 것이다.

제체 성토부 끝부분 a와 b지점에서의 유출동수경사는 각 투수계수별로 a지점에 비하여 b지점에서 약 2배 내외의 높은 값을 보이며, 이중 침윤선 바깥쪽 b점의 유출동수경사는 침윤선이 형성되지 않아 실제 토립자를 유거시킬만한 침투력 발휘가 어려울 것이며, 침윤선 안쪽 a점의 유출동수경사에 의한 파이핑 안전율 해석은 a점이 수중 또는 지표 노출이 되지 않고 일정 두께의 토체의 하중을 받고 있으므로 식(7)에 의한 단순한 파이핑 해석은 합리적이지 못한 것으로 판단된다.

결국, 제체 하류부 최고 유출동수경사 발생 지점의 파이핑 해석은 Terzaghi 방법에 의한 침투압에 대한 상부 토중량의 응력 비교로 검토함이 타당하며 식(9)을 적용하여 구한 침윤선 안쪽 a점의 실질적인 파이핑 안전율은 24.80으로 상당히 안전한 것으로 분석되었다.

$$F_s = \frac{W}{J} \quad (9)$$

여기서,

W : total effective weight of soil

J : seepage forces

Fig. 19~20은 댐 하류부로 유출되는 침투류의 동수경사를 등치선도로 작성하고 유출동수경사가 가장

크게 나타나 파이핑 우려가 있는 제체 성토부와 토우 드레인이 만나는 지점(a and b)에 대한 단면도이다.

Fig. 21~24는 a, b 두 지점에서 나타나는 유출동수경사를 투수 이방성과 투수계수 변화 조건에 따라 그라우트커튼 심도별로 분석하여 도시한 것이다.

파이핑 안전율의 제체 성토부 끝부분 a와 b지점에서의 유출동수경사는 투수계수와 상관없이 a지점에 비하여 b지점에서 약 2배 내외의 높은 값을 보였다.

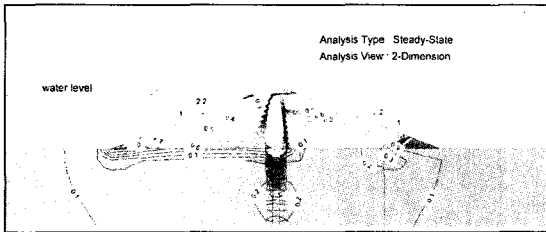


Fig. 19. Typical iso-gradient line in fill dam with grout curtain

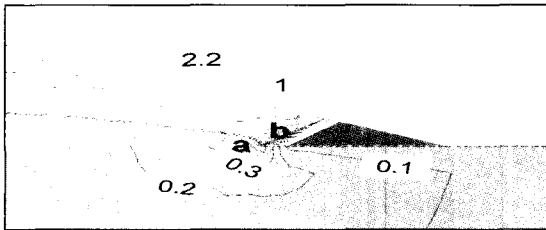


Fig. 20. Typical gradient in embankment downstream with grout curtain

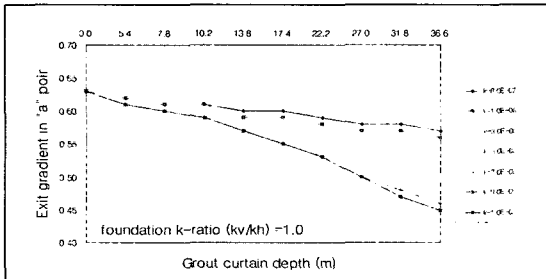


Fig. 21. Exit gradient in embankment end point (a) (foundation K-anisotropy=1.0)

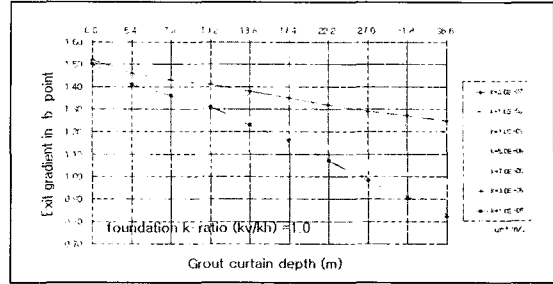


Fig. 22. Exit gradient in embankment end point (b) (foundation K-anisotropy=1.0)

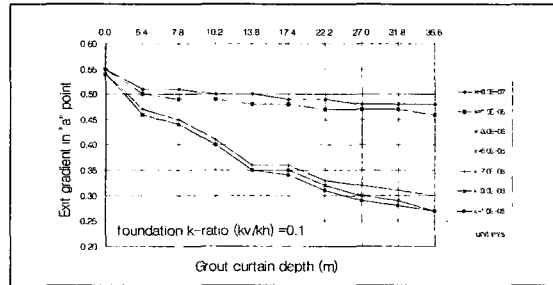


Fig. 23. Exit gradient in embankment end point (a) (foundation K-anisotropy=0.1)

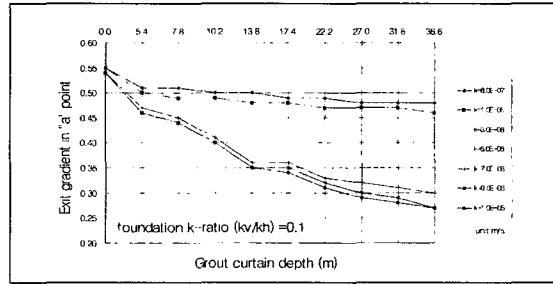


Fig. 24. Exit gradient in embankment end point (b) (foundation K-anisotropy=0.1)

## 5. 결론

본 연구에서는 필댐의 기초지반을 통한 침투류를 차단 또는 감소시키기 위해 설치되는 그라우트커튼의 적정심도 및 효율성 평가를 위하여, 그라우트커튼 자체의 투수성과 설치심도, 댐 수심, 기초지반의 투수성 등을 주 영향요소로 하는 유한요소모델을 구성

하고 침투류에 대한 수치해석을 실시함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균질 등방 투수성 조건을 갖는 기초지반보다는 불균질 또는 수평 투수성이 우세한 이방 투수성 조건의 기초지반에서 그라우트커튼의 침투류 감소 효율이 훨씬 높게 나타났다.

그라우트커튼에 의한 침투수량 감소 효과는 기초지반의 균질·불균질 또는 등방·이방 투수성 조건과 상관없이 기초지반 수리전도도가  $3 \times 10^{-6} \text{m/s}$  이상일 경우 명확히 나타났으며, 기초지반 수리전도도가  $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$  이하일 경우에는 매우 미미한 것으로 분석되어 그라우트커튼의 설치 여부 판단 시 중요한 기준이 될 수 있음을 확인하였다.

(2) 기초지반이 균질 등방 투수성 조건일 때, 기초지반을 흐르면서 제체에 영향을 미치는 침투수량을 최적으로 감소시키는 그라우트커튼의 심도(D)는 기초지반 수리전도도(K)와 댐 수심(H)을 독립변수로 하는 다중회귀식으로 표현 가능할 정도의 상관성을 보이며 추출된 다중회귀식은 다음과 같다.

$$D = 8.03K + 0.82H - 6.8 \quad (R^2 = 0.89)$$

(Parameters unit : D = [m],

K = [m/day], H = [m])

(3) 기초지반이 균질 이방 투수성 조건(K-anisotropy ( $K_v/K_h$ ):0.1)일 때, 그라우트커튼이 설치된 후 기초지반을 흐르면서 제체에 영향을 미치는 침투수량은 그라우트커튼 심도에 관계없이 모두 감소되었으며, 댐 수심이 27m인 연구 모델에서의 침투수량은 그라우트커튼의 심도가 5.4~6.6m로 댐 수심의 20~24% 범위일 때 최대로 감소되어 수평투수성이 큰 퇴적층 등의 기초지반에서 그라우트커튼의 적정 설치심도는 등방 투수성 지반

조건의 그라우트커튼 심도보다 훨씬 낮게 결정될 수 있음을 시사한다.

### 참고문헌

1. 건설부(1993), 댐시설기준 제5편 필댐, pp. 297~489
2. 과학기술(1998), 필댐의 조사(설계에서 시공까지), pp. 13~326
3. 김상규(2001), 토질역학-이론과 응용, 청문각, 434P
4. 김용식(1999), 차수그라우팅에 의한 제체의 파이핑현상 방지효과에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문, pp. 37~45
5. 김일현, 1980, Fill Dam 경사심벽의 침투유량에 관한 실험적 연구, 대전공업전문대학, 논문집 Vol.27, No.2, pp.487~492
6. 농림부(1999), 농업기반시설관리지침(저수지편), 농어촌진흥공사, 292P
7. 농수산부(1982), 농지개량사업계획설계기준(댐편), 809P
8. 신방웅, 1982, 필댐 심벽의 침투에 관한 실험적 연구, 건설기술논문집, Vol.27, No.1, pp.96~97
9. 신진환, 1996, 지반의 투수성에 따른 제체 침투류의 변화, 산업안전학회지, Vol.11, No.2, pp.109~115
10. 양재만(1983), 韓國의 댐 기초지반과 그 處理, 한국지질학회지, Vol.19, No.2, pp.85~100
11. 장의웅(2001), 댐 그라우팅 설계 및 시공 실무지침서, 474P
12. 진병익, 1968, 중앙심벽형 필댐의 침투에 관한 실험적 연구, 대한토목학회지, Vol.16, No.2, pp.19~29
13. 천병식(2000), 지반공학-이론과 실제-, 구미서관, 819P
14. 한성대, 1998, 포화, 불포화지반의 침투류 해석(I), 경남대학교 부설 공업기술연구소 연구논문집, Vol.16, No.16, pp.171~178
15. 한정상(1998), 지하수환경과 오염, 박영사, 1071P
16. Cedergren, H. R.(1975), Foundation Engineering Hnadbook, Van Nostrand Reinhold, New York,

- pp.221~243
17. Cedergren, H. R.(1977), Seepage, Drainage and Flow Nets, 2nd ed., Wiley, New York
  18. GEO-SLOPE International Ltd(1991-1998), SEEP/W Version for users Guide, Printed in Canada
  19. Harr. M. E.(1962), Groundwater and Seepage, McGraw-Hill Book Company, Inc. New York
  20. Houlby A.C(1985), Cement Grouting Design, pp.228~229
  21. Kreuzer H., and Bury K.(1984), A probability based evaluation of the safety and risk of existing dams. Proceeding of the international conference on safety of dams, pp.61~71
  22. Sherard, J. L. et al.(1963), Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley and Sons. pp.114~130
  23. U.S. Army Corps of Engineers(1993), Seepage Analysis and Control for Dams, chapter 4, 9, 11, 12
  24. U.S. Army Corps of Engineers(1995), Geotechnical Analysis by The Finite Element Method, pp.A-26~A-39
  25. USBR(1998), Earth manual 3rd edition, U.S bureau of reclamation, pp.242~247
  26. Weaver, K.(1991), Dam Foundation Grouting, ASCE press

## 골프동호회에서 알려드립니다.

8월의 창립 라운딩에 이어서 9월 모임도 회원여러분의 열화와 같은 참여 가운데 끝났습니다. 이제 는 골프치기 가장 좋은 계절이라는 가을에 10월 모임을 준비 중에 있습니다.

원래는 10월 23일에 개최 예정이었으나 토목학회 모임과 겹치는 관계로 10월 29일(수)로 날짜를 변경하여 대회를 가질 예정입니다.

아직 장소는 미정이지만 10월 29일 오후에 티업하는 것을 계획하고 있습니다.

참가자격은 골프동호회에 가입하신 회원여러분을 대상으로 하고 있습니다. 골프에 관심있으신 분들은 어서어서 가입하시고 회원들과 친목의 유대를 가지시기 바랍니다.

기타 문의 사항은 골프동호회의 간사를 맡고 있는 태조엔지니어링의 김성인 상무에게 문의하시면 됩니다.

(연락처) 전화:02-2140-9200, 휴대폰:011-237-9977, e-mail : saint516@freechal.com