

# 여수로 구조물 하부 암반 내 발달한 절리들을 통한 지하수 누수량 분석

김형수\* · 이주현\* · 정의진\*\* · 이종우\*\*\*

\*넥스지오 지하수 환경팀

\*\*넥스지오 지반기술부

\*\*\*삼성물산 건설부문

## Evaluation on the leakage of ground-water through fractured rock under a spillway

Hyoung Soo Kim\* · Ju Hyun Lee\* · Ui Jin Jeong\*\* · Joong Woo Lee\*\*\*

\*Hydrogeological Environment Team, NexGeo Inc.

\*\*Division of Geotech, NexGeo Inc.

\*\*\*Civil Works Division, Samsung Corporation

### ABSTRACT

Recently, spillways are need to control stable water level for supporting main dams because of floods by unusual change of weather such as Typhoon Rusa. This study has been focused on the amount of leakage through the rock mass distributed fractures and joints under the opened emergency spillway. It is very important to evaluate the amount of leakage as these affect stability of spillway by interaction between effective stress and pore pressure. The commercial program MAFIC has been used for analyzing groundwater flow in fractured rock mass. The results showed that the values of range, average and deviation of leakage were  $2.85\sim 3.79\times 10^{-1}$ ,  $3.32\times 10^{-1}$  and  $1.70\times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/day/m<sup>2</sup> respectively. Secondary, we have estimated the effect of grouting after the transmissivity( $T_f$ ) of joint 1 as main pathway of leakage known from above results was changed from  $1.78\times 10^{-7}$  to  $1.59\times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. The results showed that the values of range, average and deviation of leakage were  $7.80\times 10^{-4}\sim 1.53\times 10^{-3}$ ,  $1.18\times 10^{-3}$  and  $1.32\times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/day/m<sup>2</sup> respectively. As the result, the amount of leakage after grouting has been decreased by a ratio of 1 to 277.

### Key words

spillway, leakage, fractured rock mass, grouting, transmissivity

## 1. 서론

댐건설, 절개사면, 터널 굴착 및 여수로 등 공사에 대한 주변 지하수계의 변화 양상을 예측하기 다양한 지하수 모델링을 적용하여 수위강하 및 지하수 환경 시스템 변화 등을 추정한다. 특히 댐 관련 건설에 대해서는 변화된 지표수/지하수계에 따른 누수 발생 여부를 판단하고 이에 대비하는 것이 무엇보다도 중요하다. 일반적으로 연구지역 전체를 하나의 다공질 매질로 가정하고 누수량을 모의하는 MODFOLW(McDonald ; Harbaugh, 1988) 및 Seep/W 등을 많이 적용하고 있다. 그러나 실제

연구 구간 중 누수 여부에 관심있는 하부 암반 내 발달한 불연속면 및 파쇄구간을 다공질 매질로 고려하고 분석하는데는 한계가 있다. 이러한 다공질 매질 관련 프로그램은 입력 수리상수를 통한 불연속면의 구현이 어느 정도 가능하나 암반 균열의 크기, 간격, 방향성 등을 정확히 모사할 수 없기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 여수로 예상 구간 하부 암종의 변화에 따른 대규모 불연속면과 그것을 통한 지하수 유동을 분석하기 위해 절리 암반 내 지하수 유동을 상세히 모사하여 분석하였다. 또한, 차수/그라우팅 효과를 예측하기 위해 ①그라우팅 전 누수량 및 ②그라우팅 후 누수량에 대한 상호 비교 분석

을 실시하였다. 불연속면과 지하수 유동의 정확한 관계를 분석하기 위해서는 적용구간에 지표면에서의 상세지표지질조사뿐만 아니라 가능한 많은 시추공에서 암반심도까지 수직별 암종 상태를 분석 평가하고 구간별 수리 시험 등을 통해 암반균열의 분포와 균열의 수리적 균열 특성 자료 획득이 필요하나 현실적 한계로 인한 적용성의 한계를 내포하고 있다. 그러나 이러한 한계에도 불구하고 특정지역의 수리적 균열(불연속면)특성을 파악하는데 유용하게 적용될 수 있다.

## 2. 현장 분석

### 2.1 지질 개요

본 연구구간 중 모델영역은 흑운모 편암이 주로 분포하고 있다. 분포 특성은 광역적으로 규암층의 좌우측에 남-북 혹은 북북동-남남서 방향으로 4대가 대상 분포하고 있으며, 습곡 및 드리스트 단층에 의해 유사한 주향을 가지는 지층이 반복적인 분포를 보인다. 흑운모 편암층의 서쪽 경계는 중생대 복운모 화강암으로 관입접촉 관계를 보인다. 화강암 관입 경계부를 따라, 복운모 화강암 내 다수의 소규모 포획암으로 산출된다. 흑운모 편암의 암석 특성은 짙은 갈색~짙은 회색을 띠며, 운모류의 정향배열로 정의되는 엽리구조 발달한다. 엽리구조는 NS ~ N40°E 방향이 우세하며, 50°~80°의 고각으로

동경사한다. 소규모 습곡작용으로 배사와 향사구조가 반복되며, 습곡측면과 엽리방향이 평행한 소습곡 구조가 인지된다. 복운모 화강암과의 인접부에서 접촉변성작용에 의해 변형 및 변성 작용의 정도 증대된다. 흑운모 편암을 이루는 구성 광물은 흑운모, 석영 및 K-장석으로 구성되며, 흑운모, 백운모, 녹니석으로 구성된 우흑대와 석영, 장석으로 구성된 우백대로 교호하여 발달하므로 엽리 방향이 매우 뚜렷하다. 부구성 광물은 소량의 백운모와 미량의 사장석, 각섬석, 녹니석, 석류석으로 구성되며, 화강암류 인접부에서 접촉변성작용에 의해 흑운모의 입자크기 및 함량 증가한다. 흑운모 편암의 공학적인 특성은 엽리구조에 의한 박리 현상 및 심한 변형-응력 이방성 발달하며, 다량의 흑운모 함유로 인해 상대적으로 풍화에 취약하다. 화강암류와의 관입 경계부에서 심한 파쇄 및 변질대 발달로 인한 암반 강도가 저하되며 대규모 암반 비탈면 형성 시 연속성이 좋은 엽리구조에 의한 평면파괴 발달 가능하다(그림 1 참조).

### 2.2 절리암반 특성

#### 2.2.1 절리 구조

본 연구 해석 지역의 상세 지표지질 조사, 공내 영상촬영(BIPS) 및 텔레뷰어 분석을 실시하였다. 연구 지역 내 발달한 불연속면을 조사한 결과 접근 수로와 조절부에서는 대표적인 특성의 값을 가지는 3개의 절리군들이

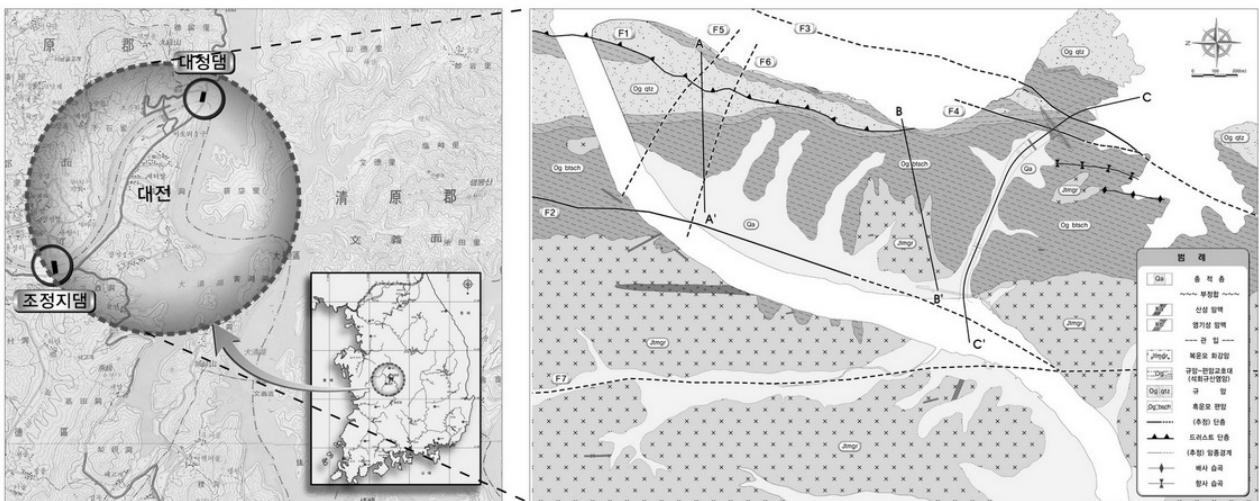


그림 1 연구지역내 지질도.

나타냈다. 각 절리군들의 불연속 특성 값은 표 1 과 같다.

### 2.2.2 수리적 특성

본 연구지역 내 암종별 대표적인 수리상수를 획득하기 위해 현장투수시험, 수압시험, 순간충격시험, 양수 시험 및 양수 유발 유속 시험(Young; Julian; Pearson; Molz; Boman, 1998)을 실시하였다. 대수층 내 전체적인 지하수 유동 특성을 파악하기 위해 일반적으로 장기 양수 및 순간 충격시험을 실시하는데 본 연구지역은 절리 암반의 수리적 특성이 중요하므로 각각의 시추공에서 수압시험 및 양수 유발 유속 시험을 실시하였다(표 2 참조). 유효공극률 및 전체공극률 자료는 문헌값을 이용하였다(Freeze; Cherry, 1979).

## 3. 수치해석 분석

### 3.1 해석 개요

#### 3.1.1 위치 선정

연구구간 내 지표지질조사, 시추주상도, 물리탐사, 선 구조 분석 등 불연속면 특성 결과를 토대로 모델영역을 여수로 구조물 구간 하부로 선정하였다. 여수로 구조물

구간 하부 암반 지역 내 모델 영역은 92(가로)×60(세로)×40(수직)m<sup>3</sup> 이며 북측을 기준으로 N36W 방향을 가지고 있다(그림 2 참조).

#### 3.1.2 해석 프로그램

해석 영역 내 분포하는 불연속면들(절리, 단층 등)의 특성을 고려하여 불연속면을 따라 여수로 하부로 누수되는 양을 예측하기 위해 균열매질(fractured media)내에서의 지하수 유동을 모의할 수 있는 3차원 유한요소 모델인 불연속체 지하수 유동 프로그램(MAFIC)을 적용하였다. MAFIC은 하나의 프로그램이 아닌 몇 가지의 프로그램들이 합쳐진 형태의 프로그램이다. 불연속면을 통계학 상으로 생성하는 FracWorks와 생성된 절리망 자료에 터널 설정과 주변 수리 경계 조건 등 수리적 초기 및 경계조건을 대입하는 SamEdit가 있다. 또한 이렇게 만들어진 두개의 자료 결과를 하나로 묶어주는 MeshMaster가 있다. 그리고 이렇게 합쳐진 자료 내에서 불연속면들의 연결성을 고려하여 최적의 계산 조건 형태로 바꾸어주는 프로그램 EdMesh가 있고 최종적으로 이러한 결과를 바탕으로 수리적 분석 결과를 해주는 MAFIC으로 구성되어져 있다(표 3 참조).

표 1 불연속면의 특성 종합 분석.

구분	절리군1	절리군2	절리군3
방향	52/125	58/335	85/022
Fisher	72.9	61.5	34.7
평균간격	12.5±19.9cm	31.0±57.0cm	77.4±71.5cm
평균연장	456.6±201.4cm	183.0±102.0cm	77.4±71.5cm
평균JRC	5.7±1.7	8.3±2.4	8.2±2.4
평균JCS	39.1±13.8	40.4±11.5	38.5±11.9

표 2 암종별 수리특성.

암종	비저류계수 (S <sub>v</sub> , m <sup>-1</sup> )	비산출률 (S <sub>y</sub> )	유효공극률 (n <sub>e</sub> )	전체공극률 (n <sub>r</sub> )	지층구분	투수계수 (K, cm/sec)
운모편암	1.08×10 <sup>-4</sup>	0.28	0.18	0.21	토사층	3.22×10 <sup>-3</sup>
화강암	5.00×10 <sup>-5</sup>	0.21	0.12	0.15	풍화토	6.64×10 <sup>-4</sup>
규암	8.00×10 <sup>-5</sup>	0.25	0.14	0.18	풍화암	5.65×10 <sup>-4</sup>
교호대	1.00×10 <sup>-4</sup>	0.26	0.15	0.20	연 암	9.79×10 <sup>-5</sup>
충적층	5.00×10 <sup>-3</sup>	0.30	0.20	0.25	경 암	1.86×10 <sup>-5</sup>

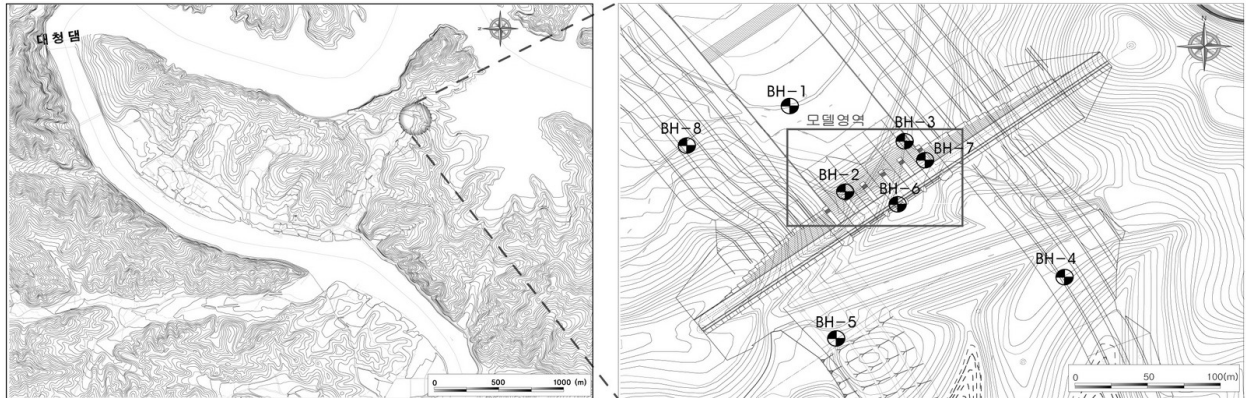


그림 2 해석모델 위치.

### 3.2 해석 과정 및 결과

#### 3.2.1 해석 과정

위에서 얻어진 불연속면 특성 값을 가지고 불연속면을 생성한 후 해당 모델 영역 내 지하수 환경을 파악하

기 위해 프로그램 Visual ModFlow를 통해 얻어진 결과를 토대로 수리적 초기 및 경계조건을 대입하여 해석모델을 생성하였다(표 4 참조). 생성된 불연속면들은 통계에 의해 확률론적으로 발생되었기 때문에 불확실성을 해소하기 위해 통계학적 기법 중 난수적으로 많은 수의

표 3 MAFIC 세부 구성.

순서	프로그램	특징
1	FracWorks	- 통계 확률적인 3차원 불연속면 생성
2	SamEdit	- 구조물, 경계조건 및 초기조건 설정
3	MeshMaster	- 1, 2에서 생성된 두 가지 형태의 파일들을 MAFIC에 사용할 수 있는 형태로 변환
4	EdMesh	- MAFIC 유한요소 코드를 위한 생성된 망의 수정 및 개선에 적용 - 도메인 내 수리적으로 연결되어있지 않은 finite cluster를 삭제하는데 사용
5	MAFIC	- 형성된 단열망에 역학적/수리적 상수값들을 적용하여 지하수 유동을 모의

표 4 각 해석 모델들의 수리적 초기/경계조건 특성.

조건(condition)		그라우팅 전	그라우팅 후	
영역(region)		slab형(직육면체)	slab형(직육면체)	
크기(x×y×z)		92×60×40m <sup>3</sup>	92×60×40m <sup>3</sup>	
모델	경계조건	상부면(T)/값	no flux	no flux
		하부면	no flux	no flux
		동면(E)	no flux	no flux
		서면(W)	no flux	no flux
		남면(S)	constant head	constant head
		북면(N)	constant head	constant head
투수계수(K)		1.78×10 <sup>-5</sup> cm/sec	1.59×10 <sup>-7</sup> cm/sec 이하	

모델 샘플들을 생성하여 그것들을 평균 및 표준편차를 획득하여 불확실성을 줄이고 현실에 근접한 결과를 얻을 수 있는 Monte Carlo Simulation을 적용하였다. 본 분석에서는 그라우팅 전/후를 1000회의 MCS 방법을 적용하여 절리 모델들을 분석하였다.

### 3.2.2 해석 결과

MCS(Monte Carlo simulation)방법을 통해 생성된 절리모델들에 대해 지하수 유동 분석을 고려하기 위해 프로그램(MAFIC)을 이용해서 그라우팅 전/후에 대한 누수량을 분석하였다. 여수로 설치 후 하부 절리 암반 내 최대 누수량은 단위면적( $m^2$ )당  $3.79 \times 10^{-1} m^3/day$ 이고, 평균(표준편차)은  $3.32 \times 10^{-1} (1.70 \times 10^{-2}) m^3/day$ 로 분석되었고 값들이 정규분포곡선을 나타내어 현장의 특성을 잘 반영하였다고 판단할 수 있었다. 이는 그라우팅 효과 적용 시에도 같은 결과를 나타내었다(그림 3참조). 해석 결과를 보았을 때 대표 절리군1(dip/dip direction = 52/125)을 통해 주로 누수가 발생하는 것으로 판단되었다. 이러한 결과를 토대로 발달된 파쇄대의 차수 그라우팅 효과를 적용하여 해석한 결과, 누수량의 범위는  $7.80 \times 10^{-4} \sim 1.53 \times 10^{-3} m^3/day/m^2$  이고, 평균(표준편차)

은  $1.18 \times 10^{-3} (1.32 \times 10^{-4}) m^3/day$ 으로 분석되었다. 차수 전 결과와 비교하였을 때 누수량이 약 1/277로 감소되는 효과가 있는 것으로 분석되었다(표 5 참조).

## 4. 결론

댐 및 여수로 구조 하부에서 발생하는 누수량을 분석하는데 연속체 개념을 토대로 하는 기존의 모델들은 한계를 나타내었다. 보다 더 합리적인 분석을 위해 절리암반 내 분포되어 있는 절리의 구조 및 수리지질학적 특성들을 반영할 수 있는 분석을 실시하였다. 해석 결과 그라우팅 전 최대 유출량은 단위면적( $m^2$ )당  $3.79 \times 10^{-1} m^3/day$ 이고, 그라우팅 처리 후 분석 결과 최대 유출량은 단위면적( $m^2$ )당  $1.53 \times 10^{-3} m^3/day$ 였다. 그라우팅 효과를 판단하기 위해 모델영역 내 두개의 시추공에서 그라우팅 효과 시험을 실시하였으나 주입공 및 관측공에서 나타나는 수리적 변화 현상들이 좁은 범위에도 불구하고 다양한 특성이 나타났다. 따라서, 좀더 정확한 특성 파악을 위해서는 모델 영역 내 추가 시험이 시행된다면 더욱더 정확한 예측을 얻을 것으로 판단된다. 또한, 모델영역 크기와 현재 실시된 지하수 현장 시험 시행 범위의

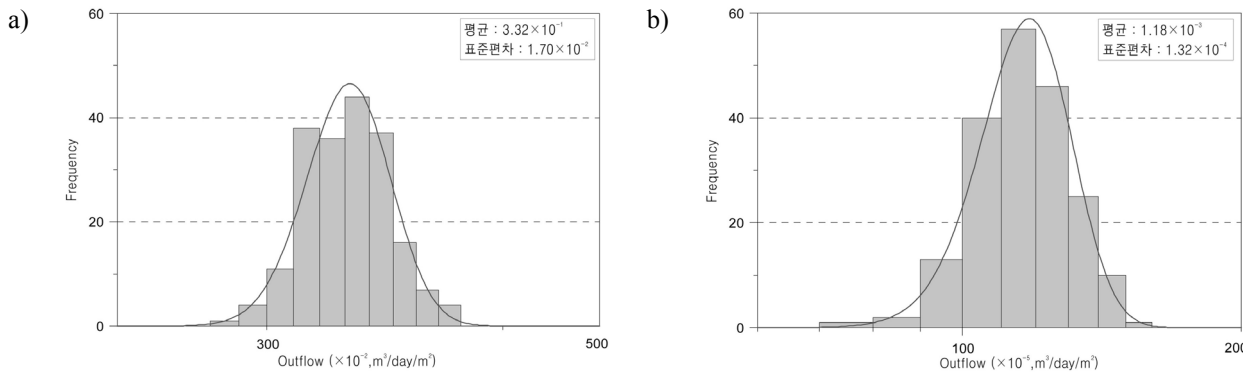


그림 3 MCS 결과 누수량 분포도 a) 그라우팅 효과 전, b) 그라우팅 효과 후.

표 5 여수로 구조물 하부 암반 내 누수량.

(단위 :  $m^3/day/m^2$ )

항 목	그라우팅 전	그라우팅 후
유출량 범위	$2.85 \times 10^{-1} \sim 3.79 \times 10^{-1}$	$7.80 \times 10^{-4} \sim 1.53 \times 10^{-3}$
평균 (표준편차)	$3.32 \times 10^{-1}$ $(1.70 \times 10^{-2})$	$1.18 \times 10^{-3}$ $(1.32 \times 10^{-4})$

차이에서 발생하는 스케일 효과(scale effect) 및 절리의  
저류계수를 고려할 수 있는 수리 간섭 시험(hydraulic  
interference test)들을 추가 시행하여 반영하는 것이 필  
요하다.

### 참고문헌

McDorald, M.G., and A.W. Harbaugh, A modular three-dimen-

sional finite difference ground-water flow model, *Techniques  
of Water-Resources Investigations*, U.S.G.S, 1988  
Young, S.C., H.E. Julian, H.S. Pearson, F.J. Molz, and G.K.  
Boman, *Application of the electromagnetic borehole flow-  
meter*, EPA/600/R-98/058, U.S. Environmental Protection  
Agency, 1998  
Freeze, R.A., and J.A. Cherry, *GROUNDWATER*, Prentice-Hall.  
Inc, 1979.