

균열 암반에서의 HydroDFN 모델 해석을 이용한 등가블록투수계수의 계산

김형목¹⁾, 류동우¹⁾, 박의섭^{1)*}, 신희순¹⁾, 田中達也²⁾

Calculation of Equivalent Block Permeabilities using HydroDFN Model Analysis in Jointed Rocks

Hyung-Mok KIM, Dong-Woo RYU, Eui-Seop PARK, Hee-Soon SHIN and Tatsuya TANAKA

Abstract In this paper, it was aimed to enhance core processes required in establishing hydrogeological models constructed using borehole investigation results. Water Conducting Feature (WCF) information was extracted from borehole investigation, and HydroDFN model was constructed based on the WCF information. The HydroDFN model was sub-divided by cubic blocks, and equivalent permeability of each sub-divided block was calculated and compared with the results of hydraulic test at the borehole. Through these analysis processes, suggestion for identifying and prescribing WCF parameters in the construction of HydroDFN model was made.

Key words Hydrogeological model, Water Conducting Feature (WCF), HydroDFN, Equivalent block permeability

초 록 본 연구에서는 시추공 조사 결과를 바탕으로 수리지질학적 모델 구축과정에 요구되는 해석과정의 체계화 및 고도화의 일환으로 균열 암반에서의 조사 시추공을 통해 얻어진 균열 정보로부터 지하수 유동경로를 제공하는 구조(Water Conducting Feature, WCF)를 선별하고, 선별된 WCF 정보를 이용하여 HydroDFN 모델을 구축하였다. HydroDFN 모델 내부를 세분한 정육면체 블록에서의 등가투수계수를 계산하고, 계산된 등가블록 투수계수는 시추공 투수시험 결과와 비교함으로써 구축된 HydroDFN 모델의 검증에 이용하였다. 이러한 해석과정을 통해 투수량 계수 등으로 대표되는 WCF 파라미터의 설정 및 수리지질학적 모델 구축시의 효과적인 방안을 제안하였다.

핵심어 수리지질학적모델, Water Conducting Feature (WCF), HydroDFN, 등가블록투수계수

1. 개 요

해저 및 하저 터널의 건설, 방사성 폐기물 지중처분 및 환경위해가스 중 하나인 이산화탄소의 지중처분과 같은 사업을 수행하기 위해서는 대상 부지의 수리지질학적 특성을 파악할 필요가 있다. 수리지질학적 특성 조사의 경우, 지표 및 시추공 조사·분석, 조사·분석 결과를 바탕으로 한 모델 구축 및 해석, 해석결과를 이용한 모델 검증 및 수정 등의 과정으로 이루어 진다.

대상 부지의 수리지질학적 특성 조사·분석은 일반적

으로 3단계를 통해 수행되는데, 시추공 조사로 대표되는 지표지질조사, 수갱 및 터널 등의 굴착 과정 중에 이루어 지는 조사, 그리고 마지막으로 대상 구조물의 실제 시공 심도에서의 조사 과정으로 구성된다. 수리지질학적 모델의 경우, Equivalent Porous Medium(EPM) 모델 및 Discrete Fracture Network(DFN) 모델로 양분할 수 있으며, EPM 모델은 광역 해석에, DFN 모델은 상대적으로 작은 영역의 절리가 발달된 암반에 유용하게 사용된다. 또한, 절리 암반에서 DFN 모델로부터 등가투수계수를 추정하는 연구가 보고된 바 있으며(주광수, 2000, 김경수 외, 2002), 등가투수계수에 영향을 미치는 요인들에 대한 수치해석적 검토를 실시한 결과도 보고된 바 있다(방상혁 외, 2003).

본 연구에서는 지표지질조사에 해당하는 시추공 조사·분석 결과를 바탕으로 DFN 모델을 구축하여 모델

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부

²⁾ 일본오바야시건설(주) 토목기술본부

* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 6월 11일

심사 완료일 : 2007년 6월 22일

내부를 세분한 정육면체 블록의 등가투수계수를 계산하는 일련의 해석을 수행하고, 해석결과로 얻어진 등가블록투수계수를 시추공 투수시험 결과와 비교함으로써 구축된 모델을 검증하였다. 이를 통해 DFN 모델을 이용한 수리지질학적 모델 구축에 필요한 핵심과정 및 conditioning과정을 모듈화함과 동시에 정도 향상을 위한 방안으로 HydroDFN 모델 및 guard zone 개념(Jackson et al, 2000)의 도입 등을 시도하였다. 본 연구에서 수행된 해석 과정의 흐름도를 Figure 1에 제시하였다.

2. WCF 및 MWCF의 판정 및 분류

지하수 유동통로를 제공하는 구조(Water Conducting Features, WCF)의 판정을 위해 먼저 연구부지에 굴착된 시추공에서 회수된 코어 관찰 및 BTV를 이용한 시추공 관측을 실시하였다. 시추 코어 및 시추공 관측을 통

해 어느 한쪽에서만 관측되는 균열은 배제하고 동일한 심도에서 양측 모두에서 관측된 균열만을 선별하여 사용하였다. 또한, 광물막, 암종간의 경계, 층리면, 및 폐쇄 균열 등도 제외하였다.

이러한 지질학적 조사 과정을 통해 선별된 균열을 대상으로 WCF의 판정에는 유체전도도(Fluid Electric Conductivity, FEC) 조사 결과를 활용하였다(Tsang and Doughty, 2003). FEC 시험에서의 측정 오차를 고려하여 이상점(anomaly) 심도의 ± 1.0 미터 구간에 해당하는 균열을 본 연구에서는 WCF로 판정하였다.

결정질의 화강암으로 구성된 연구대상 모델 영역은 균열 발달 양상 및 특성에 따라, 상부의 Upper Highly Fractured Domain(UHFD)와 하부의 Lower Scarcely Fracture Domain(LSFD)으로 구분되었다.

조사 시추공을 통해 3개의 함수 파쇄대를 관측하였으며 이들 파쇄대의 경우 MWCF(Major Water Con-

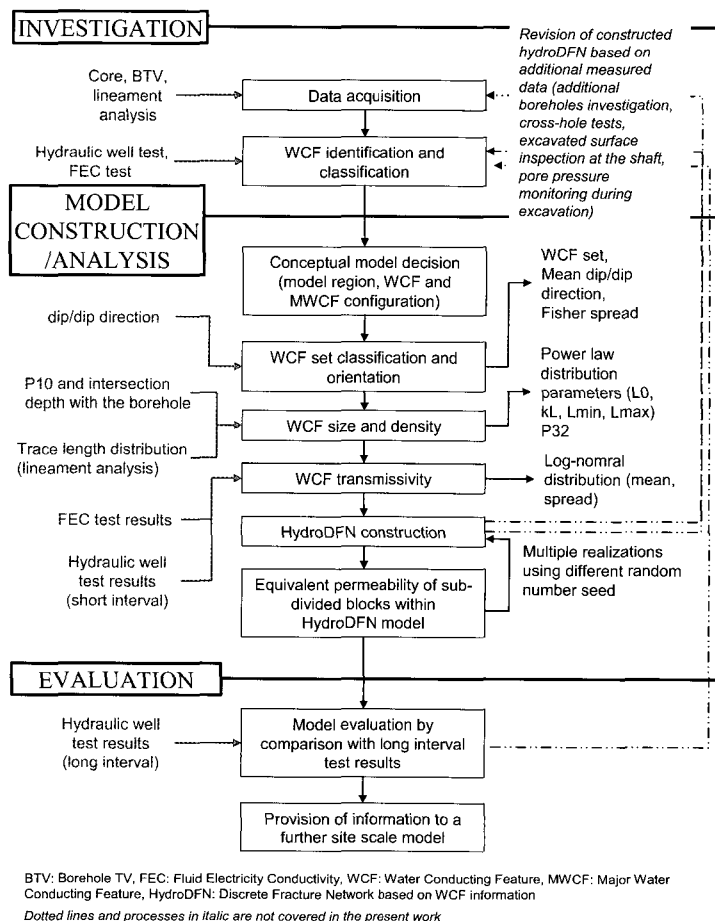


Fig. 1. Flowchart of hydrogeological site characterization work in this study

ducting Feature)로 별도로 분류하였다. MWCF에 종속된 균열들은 상기 WCF와는 별도로 분류하였다. 본 연구에서 2차원 평면구조로서의 MWCF의 표현 및 HydroDFN 모델 구축에는 이들 종속균열은 활용되지 않았으나, MWCF의 표현방식에 따라서는 이들 종속균열들을 만을 대상으로한 통계처리 및 해석이 필요할 수 있다.

3. 수리학적 개별절리네트워크 모델 구축 및 등가블록투수계수의 계산

본 연구에서는 조사 시추공을 통해 관측된 균열 중 WCF로 판정된 균열만을 대상으로 DFN을 구성하고 있고, 지질학적으로 유의한 균열체로 구성된 GeoDFN과 구별하기 위해 HydroDFN으로 표기하였다. HydroDFN 모델에서는 WCF의 경우 확률론적으로, MWCF는 결정론적인 방법을 통해 표현하였다. Table 1에 시추공어 관측 및 시추공벽 검층을 통해 관측된 결정론적 MWCF의 표시에 이용한 파라미터들을 정리하였다.

조사대상부지에 적합한 HydroDFN 모델을 구축하기 위해서는 시추공 조사를 통해 관찰된 WCF를 대상으로 그 방향성, 밀도, 위치, 크기 및 투수량 계수 등에 관한 통계처리 및 conditioning 작업이 필요하다. Figure 2에 본 연구에서의 conditioning 작업을 도시화하였다. 구축된 HydroDFN 모델의 크기는 조사 시추공 주변의 400 m x 400 m x 1500 m이며, 등가블록투수계수의 계산에 이용된 정육면체 블록의 개수는 3x1x12이다. 정육면체 블록의 한변의 길이는 100 m로 하였다. HydroDFN 모델의 구축 및 등가블록투수계수의 계산에는 Connect-Flow 프로그램 내 Napsac 모듈을 이용하였다(Hartley and Honlton, 2003). 또한, 블록경계에 위치한 고투수성 혹은 저투수성 균열들의 영향을 배제하기 위해 guard zone 개념을 적용하였다(Jackson et al., 2000). 본 연구에서는 100 m 블록에 대해 20 m의 guard zone을 설정하고 등가블록투수계수를 계산하였다.

3.1 방향성

WCF의 방향성 조사에는 cluster 해석법을 이용하였

다(Muniel, 2004). 상대적으로 균열이 발달한 상부 UHFD 에서는 4개의 절리군을, 하부의 LSFD에서는 3개의 절리군이 분포하였으며, 수직 및 수평방향에 가까운 경사를 가지는 절리군으로 구성되었다. 수직으로 굴착된 조사 시추공 방향에 기인한 편향성 오차를 고려하기 위해 Terzaghi 보정을 실시하였다(Priest, 1993).

3.2 크기(길이)

WCF 크기의 경우, 직접적인 측정이 곤란하기 때문에 그 설정에 많은 어려움이 따르며, 조사방법에 따라 조사 가능한 WCF의 크기가 크게 제한된다. 동일한 생성 원인을 가지는 균열의 경우, 조사 스케일에 관계없이 동일한 분포를 따른다는 가정에 따라(Muniel, 2004), 본 연구에서는 조사대상지역 부근에서 실시된 10 km x 10 km의 lineament 조사 결과를 이용하여 WCF 크기에 대한 conditioning을 실시하였다. WCF 크기의 함수로는 Power-law 분포를 이용하였으며, 크기와 누적빈도의 log-log 그래프상에서의 직선기울기를 이용한 conditioning을 실시하였다. WCF의 기하학적 형상은 사각형으로 설정하였으며 주향 방향과 경사 방향 길이는 양의 상관관계를 가지는 것으로 설정하였다.

3.3 세기(밀도) 및 심도(위치)

본 조사에서는 조사위치에 따른 영향을 상대적으로 덜 받는 것으로 알려진 P32 밀도(총 균열면적/모델부피)를 P10(총 균열개수/총 조사 시추공 길이) 밀도 대신에 사용하였다. P32 밀도의 경우, 직접적인 측정이 불가능한 이유로 HydroDFN 모델 내에 가상 시추공을 굴착하여 P10 밀도를 구하고, 실제 조사 시추공의 P10 계측치와 비교·수정하는 과정을 반복적으로 수행함으로써 결정하였다. 반복계산에서는 Dershowitz and Herda(1992)에 의해 보고된 관계식 (1)을 이용함으로써 계산시간을 단축할 수 있다.

$$\frac{P_{10_{simulated}}}{P_{10_{observed}}} = \frac{P_{32_{simulated}}}{P_{32_{observed}}} \quad (1)$$

Table 1. Parameters for deterministic MWCF in the HydroDFN model

	Intersection depth (mabh)	Apparent thickness (m)	True thickness (m)	Length (m)*	Strike	Dip
Fault #1	195.27~211.98	16.7	5.7	286	N13W	70E
Fault #2	648.20~725.80	77.6	9.5	473	N5W	83E
Fault #3	918.20~982.70	64.5	16.7	835	N39W	75E

*P=0.01*L (Vermilye & Scholtz, 1988), where P (m) is a distance to a fault edge from center, and L (m) is a fault length.

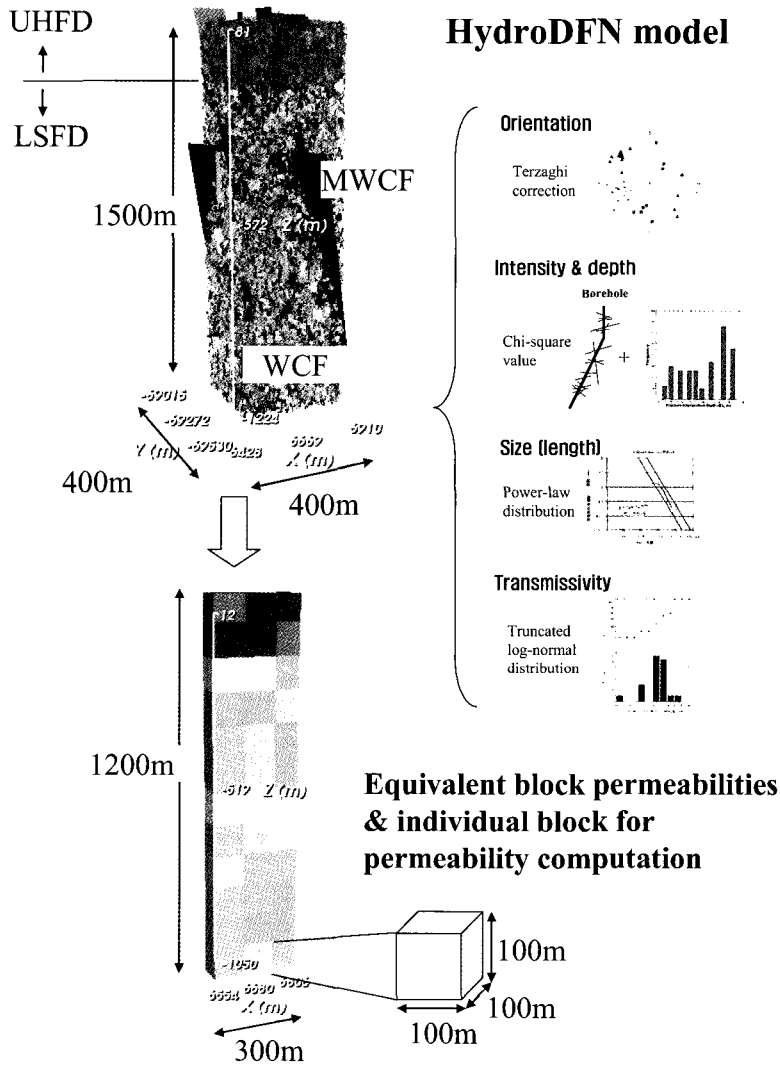


Fig. 2 A HydroDFN model constructed through intensive conditioning, and sub-divided block structure

동시에, 조사 시추공이 WCF를 관통하는 교차심도를 이용한 HydroDFN모델의 conditioning을 실시하였다. 교차심도 관측치와 작성된 HydroDFN 모델 내 가상 조사 시추공과 WCF와의 교차심도 데이터의 정량적인 비교를 위해서는 히스토그램을 통한 Chi-squared 적합성 평가를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 Chi-squared치는 식 (2)와 같다.

$$X^2 = \sum_{i=1}^k (Obs_i - Exp_i)^2 / Exp_i \quad (2)$$

여기서, Obs_i 는 교차심도 관측결과의 i 번째 bin, Exp_i

는 교차심도 해석결과의 i 번째 bin을 나타낸다. 또한, k 는 교차심도 히스토그램에서의 총 bin 개수를 나타낸다.

본 연구에서는 Chi-squared치를 적합성 평가가 아닌 조사결과와 작성모델과의 유사성을 판정하는 상대적인 기준치로서만 이용하고 있기 때문에, chi-squared치가 작을 수록 작성된 HydroDFN모델에서의 교차심도가 실제 조사대상지역과 유사함을 나타낸다. 확률론적으로 증가한 100회의 realization 중 상대적으로 작은 값의 Chi-squared치를 보인 10회의 경우만을 선별하여 등가 블록투수계수를 계산하였다.

HydroDFM모델의 연결성을 결정하는 중요한 요소로서 WCF의 크기와 밀도를 들 수 있다. WCF의 크기와 밀도는 유기적인 관계를 가지고 있어, 주어진 밀도 하에서 작은 스케일의 WCF의 증가는 연결성의 증가를 초래한다. 하지만, 해석에 고려하는 WCF의 하한값이 작을수록 고려 대상 WCF 개수의 증가로 계산에 필요한 시간 및 용량은 기하급수적으로 증가하기 때문에 적절한 값을 설정할 필요가 있다. 고려한 WCF 크기 구간에서의 P32밀도값은 아래의 식 (3)으로부터 재계산된다 (Munial, 2004).

$$P_{32}[L_{min}, L_{max}] = P_{32}[L \geq L_0] \frac{(L_{max}^{2-kl} - L_{min}^{2-kl})}{(L_0^{2-kl})} \quad (3)$$

3.4 투수량 계수

조사 시추공에서는 20개의 시험구간을 통해 pulse, slug,

pumping 시험 등의 투수시험을 실시하였으며, 시추공 투수시험 상세해석을 실시하여 각 시험구간에 해당하는 투수 계수를 구하였다. WCF의 투수량 계수 분포는 시추공 투수시험 결과를 down-scaling함으로써 구하였다. 즉, WCF 투수량 계수는 시험구간 내 투수량 계수를 시험구간 내 WCF 개수로 나눈값에 해당한다. 이는 본 조사대상지역이 결정질암에 해당하고 결정질암 내에서는 대부분의 지하수 유동이 WCF를 통해 발생한다는 가정에 근거하였다. 시험구간의 길이가 짧을수록 본 가정의 타당성이 높다고 판단되어, 짧은 시험구간의 시험결과를 WCF의 투수량 계수 분포 산정에 상대적으로 긴 시험구간의 시험결과를 HydroDFN모델로부터 구한 등가블록투수계수의 비교·검증에 사용하였다. Figure 3에 모든 시험구간에서의 투수량 계수를 나타내었으며 선분은 시험구간 길이에 해당한다.

시추공 투수시험 구간의 개수가 많을수록, WCF 투수

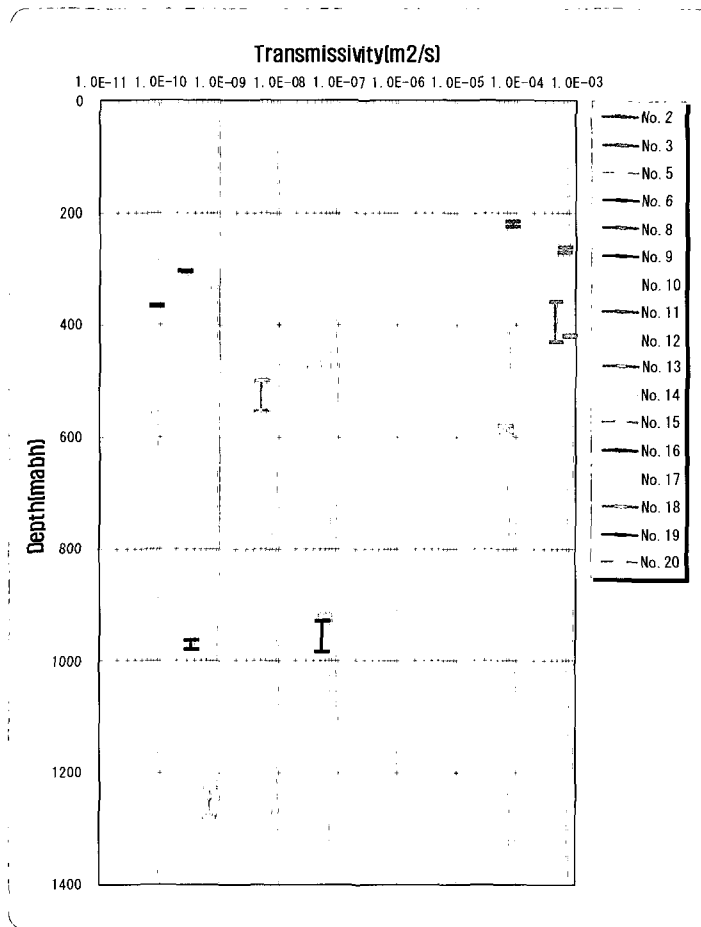


Fig. 3. Results of the hydraulic test at the drilled borehole

량 계수의 불확실성은 감소하고 완만한 분포곡선을 얻을 수 있다. 그러나, HydroDFM 모델 해석을 사전에 염두해 둔 시추공 조사를 제외하고는 이와 같은 조건의 충분한 투수시험 결과를 기대하기는 어렵다. 본 연구에서는 시추공 투수시험에 비해 상대적으로 수월하게 다량의 데이터를 구할 수 있는 유체전도도(Fluid electric conductivity, FEC) 시험결과를 이용한 WCF 투수량 계수 분포 산정을 실시하였다. 한편, FEC 시험 결과로부터 계산된 투수량 계수의 경우 간접적인 투수계수 특성치이고, 본 시추공 투수시험 결과와 비교해 많은 차이를 보였다. 따라서, 선형회귀를 통해 수리시험 결과와 동일한 차원의 투수량 계수로 환산하여 WCF의 투수량 계수 분포 추정에 이용하였다. 이

와 같은 방법으로 구한 투수량 계수 분포의 결과는 Figure 4와 같다.

WCF 투수량 계수의 측정수 한계에 따른 불확실성에 대한 방안으로 depth-dependent 투수량 계수 분포 모델을 대체 모델로서 고려해 보았다. 일반적으로 심도에 따라 균열의 투수계수는 감소하는 것으로 알려져 있으며 Figure 5는 본 연구에서 사용한 2가지의 depth-dependent 분포로서, bilinear 함수와 지수함수적으로 심도에 따라 감소하는 투수량 계수 분포를 나타낸다. 투수량 계수의 불확실성을 고려하여 본 연구에서 적용한 5개의 WCF 투수량 계수 분포 모델은 Table 2와 같다.

HydroDFN 모델의 구축에 사용된 전체 파라미터 값을 Table 3에 요약하였다.

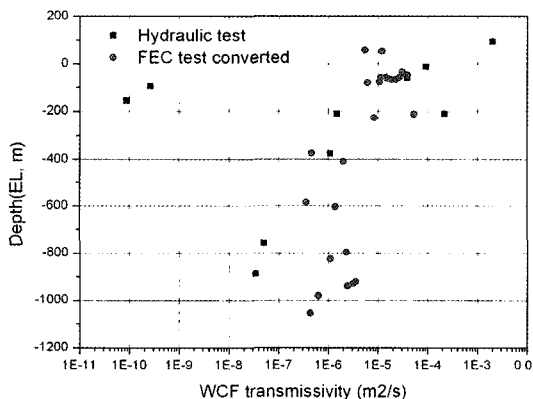


Fig. 4 Results of WCF transmissivity distribution

Table 2. Alternative models considered for the uncertainty in WCF transmissivity distribution

Alternative Model case	WCF transmissivity distribution
AM#1	Log-normal distribution based on borehole hydraulic tests only
AM#2	Log-normal distribution based on borehole hydraulic tests as well as converted FEC test results
AM#3	Log-normal distribution based on FEC tests only
AM#4	Bi-linearly decreasing distribution with depth
AM#5	Exponentially decreasing distribution with depth

Table 3. Parameters of WCFs used for the HydroDFN model construction

Rock domain		UHFD				LSFD			
Fracture set name		NE	NW	Sub-H	EW	NW	NE	Sub-H	
Orientation	dip / dip direction	84/133	67/73	3/201	29/325	89/60	89/127	15/340	
	Spread	34.38	22.36	16.35	1.61	11.05	14.38	1.93	
Size (length) [m]	Truncated power-law model	L0	2.5						
		kL	4.0						
		Lmin	2.5						
		Lmax	3000						
Intensity (density)	P32 [m2/m3]	0.630	0.236	0.088	0.091	0.140	0.130	0.049	
	L0 [m]	2.5							
	Lmax [m]	3000							
Transmissivity [m2/s]	Truncated log-normal distribution	Mean	-10.22	-10.71	-13.90		-14.70	-13.96	-19.02
		STD	3.11	1.88	1.01		2.67	1.70	1.99
		Min	-22.02	-22.02	-16.08		-23.14	-23.14	-21.12
		Max.	-6.13	-6.13	-12.59		-8.37	-8.37	-11.61

4. HydroDFN 모델 해석결과 및 검토

블록투수계수의 계산결과, 투수계수 텐서의 각 성분 (Kxx, Kxy, Kxz, Kyy, Kyz, Kzz)을 얻을 수 있으나 본 연구에서는 스칼라 값인 시추공 투수시험 구간에서의 계측결과와의 비교를 위해 대각성분들의 기하학적 평균값을 이용하였다.

4.1 Guard zone의 영향

블록경계에 위치한 고투수성 혹은 저투수성 균열들의 영향을 살펴보기 위하여 20m의 guard zone 설정 유무에 따른 블록투수계수의 차이를 비교해 보았다(Figure 6). Figure 6는 서로 다른 3가지 경우의 균열망에 대한 결과로, guard zone 을 설정했을 때(with guard zone의 경우) 해석결과가 투수계수 계측치와 상대적으로 근사한 결과를 관측할 수 있었으나, 심도에 따라서는 반대의 양상도 관측되었다.

4.2 MWCF의 영향

MWCF가 등가블록투수계수에 미치는 영향을 살펴볼 목적으로 MWCF의 유무에 따른 결과를 비교해 보았다(Figure 7). 조사공에서의 투수시험 데이터에 근거한 투수량 계수 모델(Table 2에서의 AM #1)에서는 MWCF에 의한 블록투수계수의 변화가 그다지 크지 않았다. 한편, FEC결과에 기초한 WCF 투수량 계수 분포 모델(Table 2에서의 AM #3)에서는 MWCF의 영향으로 블록투수계수 값이 크게 증가하였다. 이는 MWCF가 WCF에 비해 상대적으로 고투수성으로 설정되었기 때문으로, MWCF로 분류되는 함수파쇄대 등을 포함한 DFN 해석에 있어서는 MWCF의 투수 특성 설정에 특히 주의를 요함을 알 수 있다. 본 연구에서는 MWCF를 2차원 평면구조로 표현하고 있으나, 실제로는 MWCF 주변 일정 범위에 WCF가 집중된 어느 정도의 두께를 가지는 3차원 구조가 보다 현실적이라 할 수 있다. 이 경우 MWCF 주변 종속 균열의 증가로 주변 균열망의 연결성이 향상되어 투수성이 증가하는 결과를 초래할 수 있으며, 특히 이동 경로의 복잡화로 인해 이를 통한 용질이동 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

4.3 투수시험결과와의 비교

등가블록투수계수와 투수시험 계측치와의 비교 결과를 Figure 8에 나타내었다. WCF 투수량 계수 분포의 불확실성을 고려한 5개의 투수량 계수 모델 해석 결과, 모든 구간에서 계측치 결과와 상응하는 결과를 찾아보기는 곤란하였으며, 특히, LSFDF 구간에서의 해석결과와

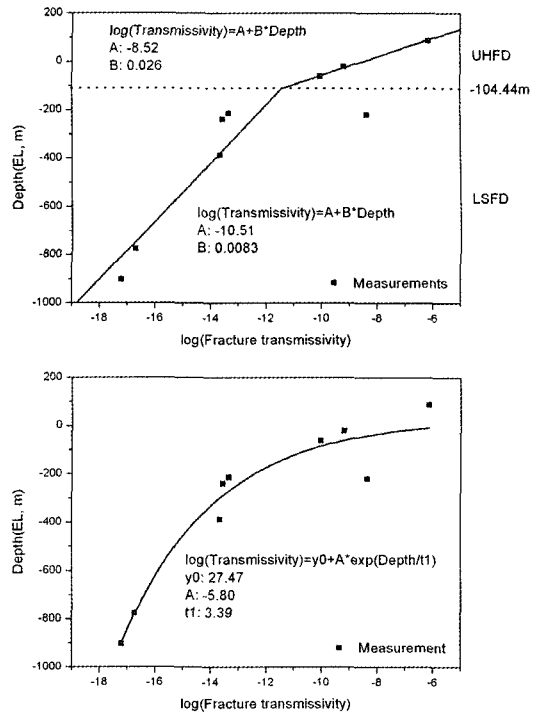


Fig. 5 Depth-dependent WCF transmissivity distributions as alternative models for WCF transmissivity

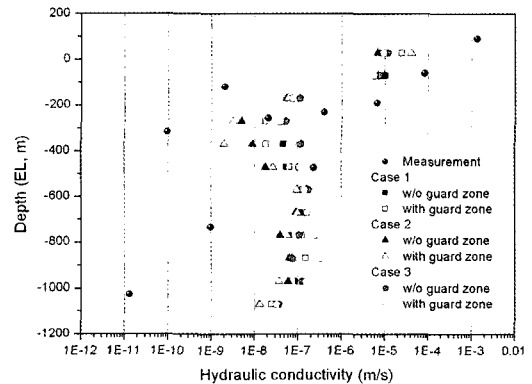


Fig. 6 Effect of guard zone in block permeability calculation

계측치의 불일치가 두드러졌다. 하나의 조사 시추공 결과에 근거한 본 연구 결과로부터 대상지역에 적합한 투수량 계수 모델의 선정 및 구축한 HydroDFN 모델의 검증 을 위해서는 추가적인 조사 시추공의 굴착을 통한 조사결과가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 시추공 투수시험 결과에 추가하여 실제 굴착에 따른 지하수 유입량 자료 및 이에 따른 주변 시추공에서의 수압변동 모니터링 결과 등과 같은 이질적이고 다양한 정보를 적용함으로

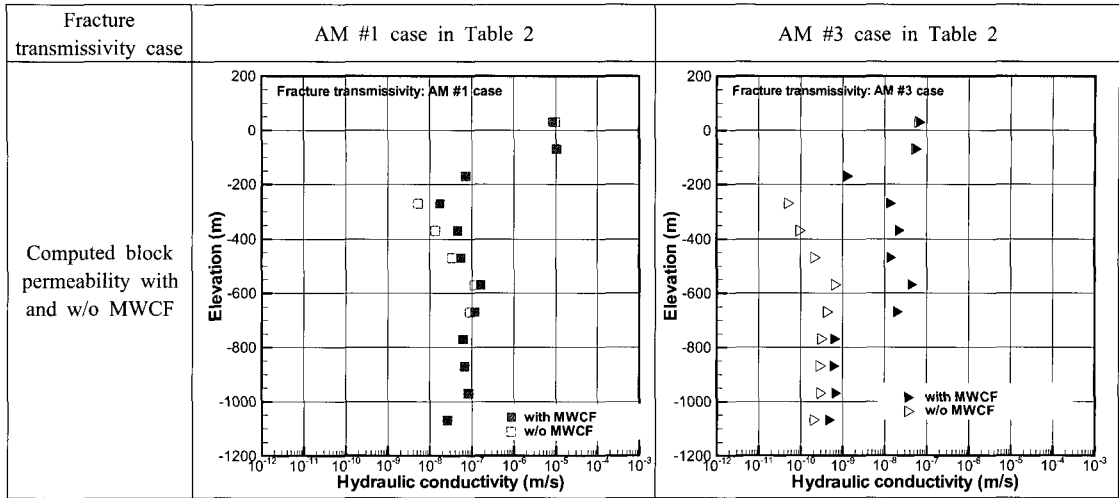


Fig. 7 Effect of MWCF in block permeability calculation

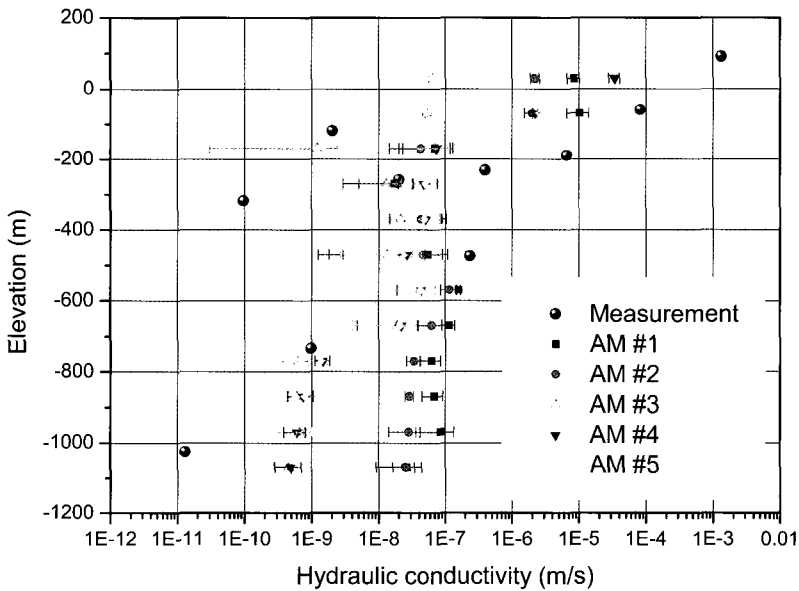


Fig. 8 Comparison between measurements and computed block permeabilities from HydroDFN

써 모델 신뢰성 향상을 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

5. 맺음말

해저 및 하저터널, 방사성 폐기물 처분장 건설 등을 위한 지하 암반의 굴착공사에는 지하수 유입이 필연적으로 발생하게 된다. 절리 암반의 경우, 유입되는 지하수의 대부분은 개별 절리를 통해 발생하므로 균열망(Discrete Fracture Network, DFN) 모델을 이용한 수리지질학적

모델을 구축하고 대상 부지의 특성 및 배수시설 등을 설계하는 것이 개념적으로 타당할 것으로 보인다.

본 연구에서는 시추공 조사 데이터를 바탕으로 HydroDFN 모델을 구축하고 구축된 모델내의 세분된 정육면체 블록의 등가투수계수를 계산하는 일련의 해석과정을 수행하고 시추공 투수시험을 통한 투수계수 계측치와 해석 결과를 비교해 보았다.

시추공 조사를 통해 관측된 균열 중에서 실제 지하수 유동 경로를 제공하는 균열만을 Fluid Electric Conduc-

tivity(FEC) 시험을 통해 선별하고 Water Conducting Feature(WCF)로 정의하였다. 이들 WCF로 구성된 DFN 모델을 HydroDFN 모델로 정의하고 일반적인 GeoDFN 모델과 구별하였다.

HydroDFN 모델 해석과정의 체계화 및 고도화를 목적으로 한 본 연구에서는, 시추공 투수시험 결과 중 상대적으로 짧은 구간의 시험구간결과는 WCF의 투수량 계수 분포 추정에 이용하였고, 비교적 긴 구간의 시험구간 투수량 계수의 경우 HydroDFN모델로부터 계산된 등가블록투수계수와와의 비교·검증에 이용하였다.

시추공 투수시험 개수의 한계 및 WCF 투수량 계수 분포에 내재되는 불확실성을 극복하기 위한 일환으로 FEC시험 결과를 WCF 투수량 계수 분포의 추정에 활용해 보았다. 또한, 블록경계에 위치하는 고투수성 혹은 저투수성의 WCF의 영향을 최소화하기 위한 guard zone 개념을 소개하였다.

본 연구결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 본 연구부지와 같이 수직 방향으로 경사진 균열이 탁월한 경우, 이와 평행하게 굴착된 조사 시추공을 통해 WCF에 관한 신뢰성 높은 정보를 얻기는 곤란한 경우가 많다. 자료 획득 및 신뢰도 향상을 위한 방안으로 경사시추장비 등의 개발을 통해 균열 경사 방향과 수직한 방향으로의 접근이 필요할 것으로 생각된다.
- WCF 투수량 계수 분포에 내재된 불확실성의 저감을 위해서는 많은 수의 사전 계획된 시추공 투수시험이 필요할 것으로 생각되며, 상대적으로 데이터 수에서 유리한 FEC시험 결과를 보조 데이터로서 활용하는 방안도 효과적일 것으로 생각된다. 또한, FEC 시험을 사전에 실시하고 결과로서 얻어진 이상점을 기준으로 시추공 투수시험을 설계함으로써 보다 신뢰성 있는 투수량 계수 분포의 추정이 가능할 것으로 생각된다.
- 또한, WCF 투수량 계수 분포의 불확실성을 평가하는 방안으로는 공간투수시험, 수갱 및 터널 굴착에 따른 지하수 유입량 및 주변 시추공에서의 수압 모니터링 데이터 등의 상호 이질적인 성격의 데이터를 병행한 방법이 필요할 것으로 생각된다.
- MWCF가 블록투수계수의 평가에 미치는 영향이 크므로, MWCF의 기하학적 형상 뿐만 아니라 투수량 계수와 같은 투수특성 등의 조사기법을 고도화할 필요가 있을 것으로 생각된다.
- 시추공 투수시험을 통해서 수직방향으로의 데이터 수에 비해 극히 한정된 수평방향으로의 데이터 값만을 얻을 수 있다. conditioning을 통해 구축된

HydroDFN 모델을 활용할 경우, 가상 시추공 조사 결과를 통해 수평방향 데이터의 증가를 얻을 수 있으며 이를 통해 투수계수의 3차원 공간적인 분포 구조의 파악에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

- 굴착 공동을 포함한 광역지하수유동 해석 등에서 HydroDFN 모델만을 이용한 해석에는 한계가 있으므로 구조물 주위는 DFN모델을 형성하고 원거리에서는 EPM 모델을 결합시킨 복합모델 등을 활용한 해석도 가능할 것으로 기대된다. 이 경우 수리지질학적 경계조건 등을 보다 명확하게 설정할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구의 일부는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

References

1. 주광수, 균열망 해석법을 이용한 불연속 암반의 지하수 유동 및 용질이동 연구: 불연속 암반의 등가투수계수 추정, 터널과 지하공간, 제 10권 3호, pp. 378-386, 2000
2. 김경수, 김천수, 배대석, 등연속체매질로서의 화강암지역의 유효수리전도도 산출, 한국지질공학회지, 제 12권 3호, pp. 319-332, 2002
3. 방상혁, 전석원, 최종근, 삼차원 불연속면 연결망을 이용한 암반의 등가수리전도도 결정에 대한 연구, 터널과 지하공간, 제 13권 1호, pp. 52-63, 2003
4. Jackson, C.P., Hoch, A.R., and Todman, S., Self-consistency of a heterogeneous continuum porous medium representation of a fractured medium, Water Resources Research, Vol. 36 (1), pp. 189-202, 2000
5. Tsang, C. F. and C. Doughty, Multi-rate flowing fluid electric conductivity logging method, Water Resources Research, Vol. 39(2), 2003
6. Vermilye, J. M. and C. H. Scholtz, The process zone; a microstructural view of fault growth, Journal of Geophysical Research, 103(B6), pp. 12223-12237, 1998
7. Hartley, L., and D. Holton, Napsac(release 8.0), Technical Summary Document, Serco Inc., 2003

- 8. Muniel, R., Statistical analysis of fracture data, adapted for modeling Discrete Fracture Networks-Version 2., SKB R-04-66, pp. 24-36, 2004
- 9. Priest, S. D., Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London, pp. 71-76, 1993
- 10. Dershowitz, W. and H. H. Herda, Interpretation of fracture spacing and intensity, Proc. 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, NM, pp. 57, 1992
- 11. Hartley, L. et al., Groundwater flow and radionuclide transport modeling using CONNECTFLOW in support of the SR Can assessment, SKB R-04-61, pp. 14-15, 2004

김형목



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3265
 E-mail: kimh@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

류동우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3099
 E-mail: dwryu@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

박의섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3098
 E-mail: espark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

신희순



1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1978년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3240
 E-mail: shinhs@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

田中達也

E-mail: tanaka.tatsuya@obayashi.co.jp
 현재 오바야시건설회사 토목기술본부 주임