절리암반내 지하수 및 주입재의 유동특성에 관한 연구

A Study on the Flow Characteristics of Groundwater and Grout in Jointed Rock

문 현 구[*1]
Moon, Hyun-Koo

송 명 규[*2]
Song, Myung-Kyu

Abstract

The groundwater flow and grout flow in individual rock joint and jointed rock mass are studied using various methods of analysis such as (i) the finite difference method, (ii) channel network analysis and (iii) joint network analysis. The flow behaviour is investigated in two distinguishable scales of observation: one for a rough joint of a laboratory scale having variable aperture, and the other for field-scale rock masses having three sets of intermittent joints.

In the former case, the aperture-dependent channel flow is identified for both water and grout flows. The comparison of the flow rate in a rough joint is made between the finite difference analysis and existing analytical solution. In the latter case, the effects of increasing number of joints on the groundwater inflow into a circular opening of various diameters are analyzed using both the joint network method and Goodman's analytic solution. Comparisons are made between the two methods. The boundary effects in the joint network method are discussed. The inhomogeneity of joint network and its impacts on the groundwater inflow are also discussed.

요 지

본 논문에서는 유한차분법, 채널망 해석법 및 절리망 해석법 등 다양한 해석기법을 이용하여 개별 암석절리 및 절리암반에서의 지하수 유동과 주입재의 유동거동을 연구하였다. 유동거동은 두개의 상이한 관찰규

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 시스템응용공학부 교수
*2 (주) 에스코 컨설턴트

모, 즉 변화하는 간극분포를 가진 실험실 규모의 거친 절리면과 3개의 절리군에 속한 단절된 절리들을 포함하고 있는 현장 규모의 절리암반에 대해 수행되었다.

단일절리에서의 유동해석결과 물과 주입재 모두 간극분포에 의존하는 채널흐름의 특성을 확인할 수 있었다. 유한차분법과 기존의 이론해에 의한 유량 계산결과를 비교 분석하였다. 절리암반의 경우 절리의 수와 굴착된 원형공동의 직경을 증가시키면서 공동내부로의 지하수 유입량을 분석하였다. 이 분석에는 절리망 해석법과 Goodman의 이론해를 사용하여 결과를 비교하였다. 또한 절리망 해석법의 경계효과, 절리망의 비균질성이 지하수 유동에 미치는 영향 등을 논의하였다.

Keywords : Groundwater flow, Grout flow, Jointed rock mass, Joint aperture, Channel flow, Channel network analysis, Joint network analysis.

1. 서 론

암반에 분포하는 다양한 불연속면들과 지하공동내의 과도한 지하수 용출은 지하 구조물의 안정성을 저해하는 요인으로서 익히 인식되고 있다. 또한 절리, 균열 등의 불연속면들에 의해 암반의 변형계수, 강도, 열 및 수리적 성질 등이 변화한다는 것도 사실이다. 그러나 어떤 종류의 불연속면이 지하공동 설계에 있어 특히 더 중요할 것인가를 판단하는데는 다음 두가지 사항을 고려하여야 한다. 첫째는 불연속면의 크기(또는 연장성), 방향성 및 밀도(또는 간격) 등으로 구성된 기하학적 분포특성이고 둘째는 분석 및 설계의 대상이 되는 암반구조물의 크기이다. 따라서 공학적 측면에서 미소균열(microcracks, fissures) 등은 연결망을 형성하는 절리와 파쇄면(joints, fractures) 등에 비해 상대적으로 중요성이 낮다고 할 수 있다. 이는 전자의 경우 물성에 미치는 영향이 실험실에서의 시험 측정치에 이미 포함되어 있지만 후자는 그렇지 못하기 때문이다. 물론 현장 시험도 가능하겠지만 비용과 시간의 제약이 따르고 특히, 절리 분포가 균일하지 않을 경우 위치에 따라 달라질 수 있는 암반물성(site-specific rock mass property)의 속성으로 인해 특정 위치나 심도에서의 현장 시험치를 절리암반 전체의 대표값으로 간주하는데는 무리가 있다.

공학역학(engineering mechanics)의 핵심과제는 실험실에서 관찰되는 미시적 거동특성과 현장에서의 공학적(거시적) 거동특성 간의 괴리를 해소하는 일이다. 이와 관련하여 대표체적(REV: representative elementary volume)의 개념이 도입되었고 다수의 균열이 분포하는 고체와 절리가 분포하는 암반의 등가물성이 연구되었다(Hill, 1963; Hashin & Shtrickman, 1963; Singh, 1973; Morland, 1974; Gerrard, 1982). 그러나 엄밀한 의미에서 대표체적 개념은 균열 및 절리가 규칙적, 반복적으로 분포하던가 아니면 완전히 무작위적 분포(random distribution)를 가질 때만 적용 가능하다. 암반의 경우 절리의 기하학적 분포상태가 이렇게 이상적으로 나타나기는 어렵다. 분석 및 설계의 측면에서 볼 때 또 다른 한계성은 대표체적의 치수(크기)가 굴착의 특성치수(characteristic length: 예로, 굴착사면의 높이, 지하공동의 폭 또는 높이) 보다 훨씬 작을 때만 대표체적 개념의 의미가 있다.

이와 같은 재래의 대표체적 개념이 갖고 있는 한계성을 해소하고 절리암반에 대한 등가물성의 적용 범위를 확장하기 위해서는 우선 규칙성이 결

여된 절리들이 분포하는 암반의 물성을 결정할 수 있는 이론이 필요하다. 따라서 다수의 절리 또는 절리군들이 임의의 방향성(arbitrary orientations)을 갖고 분포할 경우 암반의 변형계수, 강도, 열 및 수리전도계수 등 절리암반의 등가물성들을 추정코자 이론적 연구가 수행된 바 있다(Moon & Kim, 1993; Moon & Jue, 1993).

본 논문에서는 지하수와 주입재의 유동거동을 해석함에 있어 두개의 상이한 관찰규모(scale of observation)를 채택하였다. 먼저 소규모 관찰 단계에서는 단일 절리면(50cm×50cm)을 대상으로 절리면의 거칠음 특성 및 간극의 변화가 물과 주입재(grouts)의 유동에 미치는 영향을 분석하였다. 한편 공학적 규모에서는 500m×500m의 암반을 대상으로 3개 절리군에 속한 절리의 수를 600~1800개까지 변화시키면서 원형공동 내부로의 지하수 유동거동을 관찰하였다. 여기에는 채널 유동에 기초한 절리망 해석기법과 등가 수리전도계수를 적용한 Goodman의 이론해(Zhang & Franklin, 1993)가 사용되었으며 각각의 방법에서 계산된 지하수 유입량을 비교 분석하였다. 절리망 해석법 및 이론해의 장단점, 특히 절리망을 이용한 유동해석시 발생하는 경계효과(boundary effects)와 절리분포의 비균질성에 기인한 이론해의 한계성 등이 논의되었다.

2. 절리면의 특성과 간극 시뮬레이션

절리면을 통한 유체 유동에 있어 가장 중요한 요소는 절리간극(joint aperture)이다. 만약 절리를 두개의 평행평판으로 간주할 수 있다면 유량은 평판 간극의 삼승에 비례하게 되므로 다음 표현과 같은 Darcy 법칙(Darcy's cubic law)을 적용할 수 있다.

$$\frac{Q}{\Delta h} = C\,b^3 \tag{1}$$

여기서 Q는 유량(volumetric flow rate), Δh는 수두차, b는 평행평판의 간극, C는 유체의 물성과 유동범위에 의해 결정되는 계수로서 $C=\left(\frac{\gamma}{12\mu}\right)\left(\frac{W}{L}\right)$, γ와 μ는 각각 유체의 단위중량과 점성계수, W와 L은 각각 평판 유로의 폭과 길이를 나타낸다. 그러나 거친 절리면에 의해 절리간극이 변화할 경우 Darcy 법칙은 최소한 다음과 같은 수정을 필요로 한다(Cook, 1992).

(1) 절리벽면의 접촉상태를 고려한 수정:

$$\frac{Q}{\Delta h} = C\frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)}(b_o)^3 \tag{2}$$

여기서 α는 접촉면의 면적비로서 $\alpha=\frac{A_c}{A_t}$, A_t는 절리면의 면적, A_c는 절리면 중 접촉 부분의 면적, b_o는 절리의 초기 평균간극이다.

(2) 절리의 닫침을 고려한 수정:

$$\frac{Q}{\Delta h} = C\frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)}(b^*)^3 \tag{3}$$

여기서 $b^*=b_o\left[1+\ln\left\{\frac{(b_o-v)}{b_o}\right\}\right]$, v는 절리닫침(joint closure)을 나타낸다.

(3) 유로의 곡절(tortuosity)을 고려한 수정:

$$\frac{Q}{\Delta h} = C\frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)}(b^*)^3(\xi)^{-2} \tag{4}$$

여기서 $\xi=\frac{b_o}{(b_o-v)}$ 로서 유로의 곡절 정도를 나타낸다.

이상의 세가지 수정은 모두 절리간극에 의존하는 유동특성을 의미한다. 화강암, 화강반암, 사암,

편암 및 안산암에 분포하는 절리의 간극에 관한 실험연구 자료에 의하면 간극분포는 일반적으로 로그정상분포를 따르며 평균간극은 암석에 따라 43㎛~145㎛의 범위, 표준편차는 10㎛~38㎛의 범위를 가지며 각각의 평균치는 절리간극 88㎛, 표준편차 21㎛이다(Tsang & Tsang, 1987; Iwano & Einstein, 1993). 따라서 본 연구에서는 단일 절리면을 통한 유체 유동의 간극 의존성을 시험하기 위해 한변의 길이 L=50cm인 정방형 절리면에 평균간극 88㎛, 표준편차 21㎛의 로그정상분포를 따르는 간극을 추계학적 방법으로 발생시켰다. 이때 변이함수(variogram function)로는 다음과 같은 지수상관함수 $A(r)$과 구형상관함수 $C(r)$을 사용하였다.

$$A(r) = \sigma^2 \exp\left(\frac{-2|r|}{\lambda}\right), \quad r < \lambda$$
$$= 0, \quad r \geq \lambda \tag{5}$$

$$C(r) = \sigma^2 \left(1 - \frac{3r}{2\lambda} + \frac{r^3}{2\lambda^3}\right), \quad r < \lambda$$
$$= 0, \quad r \geq \lambda \tag{6}$$

여기서 σ^2은 간극분포의 분산, r은 발생영역 내에서의 거리, λ는 공간상관길이(spatial correlation length)이다. 본 시험에서는 정규화한 상관길이 λ/L를 0.1에서 0.6까지 0.1간격으로 증가시켜 보았다. 이 λ/L는 값이 커질수록 절리의 간극 변화가 감소하면서 평행평판에 근접하는 특성을 갖는다.

그림 1은 구형상관함수(λ/L = 0.1)를 이용하여 50cm×50cm 영역에 발생시킨 절리간극 분포도로서 시각효과를 위해 세로축(간극)을 과장하였다. 그림 2는 발생된 간극의 상대빈도를 막대그림으로 표현한 것으로서 원래 의도했던 로그정상분포(평균 88㎛, 표준편차 21㎛)곡선과 잘 일치함을 보여준다.

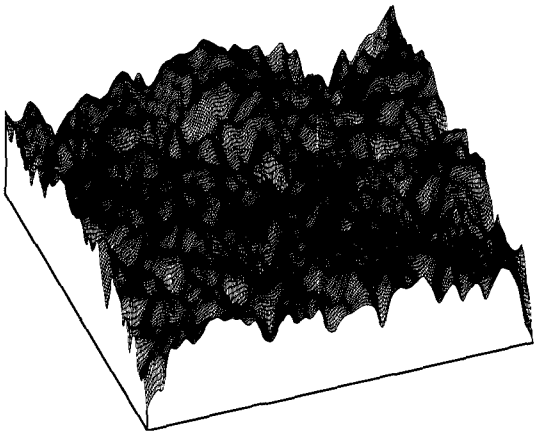


그림 1. 50cm×50cm 절리면에 발생된 간극분포도(낮은 지형의 간극이 큼)

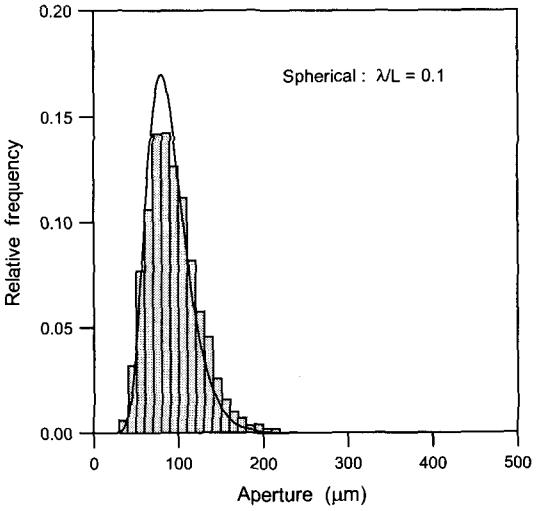
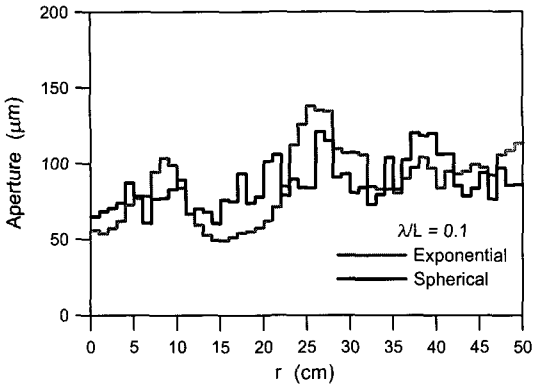
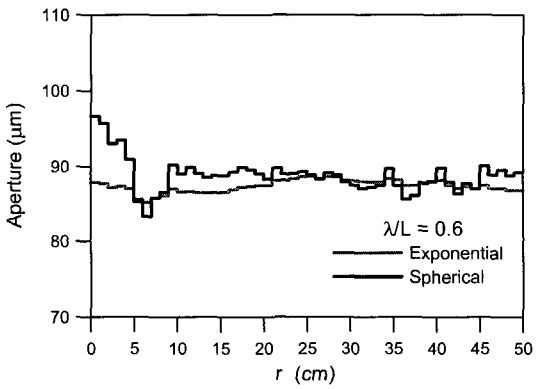


그림 2. 간극값의 상대빈도 비교 (막대그림 : 간극 시뮬레이션 결과, 곡선 : 로그정상분포)

한편 그림 3은 상관길이가 간극분포에 미치는 영향을 보기 위한 그림으로서 발생영역을 양분하였을 때 나타나는 간극의 변화를 도시한 것이다. 사용된 두개의 변이함수 모두 λ/L = 0.1일 경우에 비해 λ/L = 0.6일 경우 간극의 변화가 감소하고 평탄한 절리면에 근접하는 경향을 보였다. 이는



(a)



(b)

그림 3. 지수상관함수와 구형상관함수에 의한 간극분포의 비교(r=절리면 중앙선을 따른 거리) : (a) λ/L=0.1 의 경우 (b) λ/L=0.6 의 경우

상관길이가 증가하면 주위 간극간의 상관성이 증대되고 따라서 인접 지점에서 유사한 간극값을 갖게되기 때문이다. 또한, 지수상관함수와 구형상관함수의 차이 즉, 사용된 변이함수의 종류에 의한 간극분포의 차이는 상관길이가 증가함에 따라 감소하였다.

3. 단일 절리면에서의 물의 유동

절리간극 시뮬레이션을 통해 얻어진 총 12개의 모델(변이함수 두가지×여섯개의 λ/L값)에 대해 유한차분법을 이용한 유동해석을 수행하였다. 격자(grid point)간격 $\Delta x = \Delta y = 1$cm, 좌우 경계면 간의 수두차 10cm, 상하경계면은 흐름을 차단하는 조건(no-flow)을 적용하고 Gauss-Seidel반복법에 의해 다음 평형방정식의 해를 계산하였다.

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j \left[\frac{(P_i - P_j)}{R_{ij}} \right] = 0 \qquad (7)$$

$$R_{ij} = 6\mu \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \right) \left(\frac{1}{(b_i)^3} + \frac{1}{(b_j)^3} \right) \qquad (8)$$

여기서 하부첨자 i와 j는 인접한 두개의 절점, Q_{ij}는 i와 j절점 간의 유량, P_i와 P_j는 각각 i와 j절점에서의 수압, R_{ij}는 i와 j절점 간의 수리저항(hydraulic resistance), b_i와 b_j는 각각 i와 j절점의 간극을 나타낸다. 각 절점에서의 수압분포, 절점 사이의 유량이 계산되면 각 절점의 유로 단면적을 이용하여 유속을 결정할 수 있다.

그림 4는 $\lambda/L = 0.1$인 경우 유한차분법에 의해 계산된 속도벡터의 분포를 도시한 것으로 간극이

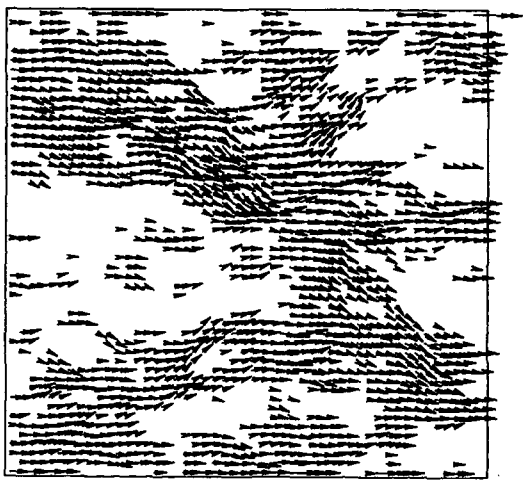


그림 4. 유한차분해석에 의한 절리면에서의 유속벡터 분포

큰 유로를 따라 흐름이 우세하게 나타나는 "채널 유동(channel flow)" 특성을 잘 보여주고 있다(속도벡터는 편의상 3mm/s 이상만 도시하였음). 물론 수두경계조건에 의해 전반적인 흐름은 좌측 경계에서 우측 경계로 향하고 있으나 각 지점에서의 간극의 차이로 인해 유동 방향이 급격히 변화하는 "곡절유동(tortuous flow)" 현상도 관찰되고 있다.

한편 Amadei & Illangasekare (1992)는 거친 절리면에 대한 이론적인 유동해석 방법을 제안한 바 있다. 그들의 이론해는 이방성 비균질 수리특성을 가진 절리면에서의 수두분포에 관해 다음의 선형 미분방정식에 기초하고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = \sum_i Q_i\,\delta(x-x_i)\,\delta(y-y_i) \qquad (9)$$

여기서 T_x와 T_y는 각각 x축과 y축 방향의 투과도(transmissivity), h는 수두, Q_i는 source 또는 sink에 의한 유량, δ는 디락델타함수이다. 그들은 이 미분방정식에 Fourier 변환에 의한 적분변환법을 적용하여 수두분포와 속도분포를 계산하는 이론해를 제시하였다. 본 연구에서는 앞서 유한차분법에 의한 유동해석 결과와 이 이론해의 결과를 비교하였다. 이를 위해 앞서 사용했던 50cm×50cm의 절리면을 대상으로 유한차분해석에서와 동일한 간극분포와 경계조건을 이론해에 적용하여 유량과 속도분포를 계산하였다.

그림 5는 λ/L의 변화에 따른 유량(volumetric flow rate)의 변화양상을 나타낸 것으로 유한차분해석과 이론해의 결과를 비교하였고, 지수상관함수와 구형상관함수의 결과도 함께 비교하여 보았다. 이론해는 낮은 λ/L값(즉, 절리간극의 변화가 매우 심한 경우)에서 유량을 2.3배까지 과대평가하는 경향을 보였으며 반대로 높은 λ/L값(즉, 절리간극의 변화가 미미한 경우)에서는 30% 정도

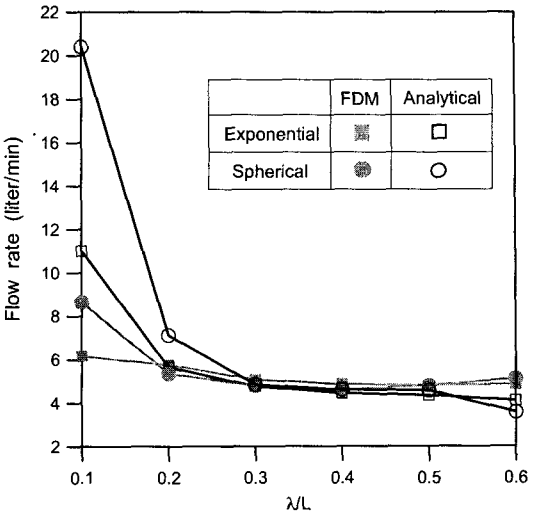


그림 5. 상관거리 λ/L의 변화에 의한 유량의 변화 : 유한차분법(FDM)과 이론해(Analytical)의 비교 및 지수상관함수와 구형상관함수 간의 비교

낮은 유량을 나타내고 있다. 이러한 차이는 Amadei & Illangasekare의 이론해에 내포된 기본 가정 즉, "절리의 거칠기와 간극은 주어진 절리면 내에서 완만하게 변화하며 급격한 간극의 변화로 인한 수두손실은 고려하지 않는다" 는 가정에서 그 원인을 찾을 수 있다. λ/L = 0.1일 경우 절리간극은 매우 급격히 변화하며 따라서 이론해의 오차는 커지게 된다. 한편 λ/L값이 0.3, 0.4, 0.5로 증가할 경우 절리간극의 변화는 완만해지며 이론해와 유한차분해석의 결과는 10% 내외에서 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 단일 절리면에서의 주입재의 유동

거친 절리면을 통한 주입재의 유동을 분석하기 위해 본 연구에서는 채널망 해석법(channel network analysis)을 적용하였다(Hassler et al., 1992; 김문상, 1994). 본 연구에서 적용한 채널망 해석의 각 단계를 요약하면 다음과 같다.

(1) 간극 시뮬레이션을 통해 절리면(50cm×50cm)에 간극분포를 발생시킨다.
(2) 유한차분법에 의해 외곽경계조건에 따른 수두분포를 계산한다.
(3) 폭과 길이가 일정하고 높이는 간극에 해당하는 사각관 형태의 채널요소(channel element)를 발생시킨다.
(4) 주입재의 95% 누적입경 $D_{(95\%)}$와 간극 b를 비교함으로써 각 채널요소에서의 주입재의 관통여부를 판단한다(관통: $b/D_{(95\%)} > 5$).
(5) 다음 식에 의해 각 채널요소에서의 주입재 유동량을 계산한다.

$$Q = K\Delta h \tag{10}$$

$$K = \frac{\rho_w g b^3 W}{12}\left[\frac{1-3Z+4Z^3}{\Delta x\ \mu}\right] \tag{11}$$

$$Z = 2\left[\frac{dx}{dt}\frac{\mu}{b\tau}+\frac{1}{4}\cos\left\{\frac{\pi}{3}+\frac{1}{3}\cos^{-1}\left[\frac{1}{8}\left\{\frac{dx}{dt}\frac{\mu}{b\tau}+\frac{1}{4}\right\}^{1.5}\right]\right\}\right]^{1/2} \tag{12}$$

여기서, Q는 단위시간당 주입재 유동량(volumetric flow rate of grout), Δh는 절점간의 수두차, ρ_w는 물의 밀도, g는 중력가속도, b는 간극, W는 사각관 요소의 폭, Δx는 절점간의 거리, μ는 주입재의 점성도, $\frac{dx}{dt}$는 주입재의 평균 유동속도, τ는 주입재의 전단강도이다.

(6) 주입재 유동시 절리벽면에서의 마찰에 의한 수두손실을 다음 식으로 계산한다.

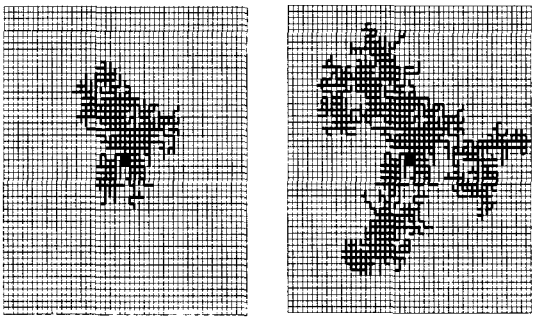
$$h_f = \frac{32 L v^2}{g N_r D_h} \tag{13}$$

여기서 h_f는 주입재와 절리벽면의 마찰저항에 의한 수두손실, L은 주입재 유동거리, v는 유동속도, N_r은 Reynold number, D_h는 수력지름이다. 수력지름 $D_h = \frac{2bW}{b+W}$로서 채널요소의 폭(W)과 높이(간극 b)에 의해 결정된다.
(7) 수두손실을 고려한 유량과 채널요소의 단면적으로부터 유동속도 및 단위시간당 유동거리를 결정하고 다음 식에 의한 최대유동거리를 적용하여 주입재의 유동정지 여부를 결정한다.

$$L_{\max} = \frac{\Delta P b}{2\tau} \tag{14}$$

여기서 $L_{\max}$는 최대유동거리, ΔP는 주입압과 간극수압의 차이이다.
(8) 주입재의 유동거리, 절점간 거리 및 최대유동거리를 비교하여 주입재의 계속적인 유동 가능성을 검색한 후 다음 채널요소에 대해 (4)번 단계부터 다시 반복적인 분석을 수행한다.

그림 6은 50cm×50cm의 절리면 중앙에 위치한 주입공에 50kPa의 주입압을 작용시킨 후 약 10초 및 1분 경과시 주입재 침투상태를 나타낸 것이다. 사용된 절리간극의 평균과 표준편차는 각각 120㎛와 20㎛이고 좌우측 경계면의 수두차는 10cm,



(a) (b)

그림 6. 50cm×50cm 절리면에서의 주입재 침투상태(주입위치=절리면 중앙) : (a) 주입후 10초 경과, (b) 주입후 1분 경과

상하경계면은 no-flow조건을 적용하였으며 주입재는 전단강도 및 점성도가 시간에 따라 증가하는 Bingham형 시멘트($D_{(95\%)}=34\mu m$)를 가정하였다(Widmann, 1993). 주입재 침투는 주입 초기에 비교적 빠른 속도로 진행되었으며 약 1분 경과시 주입재는 최초로 우측 외곽경계에 도달하였다. 절리간극의 변화에 의해 주입재의 유동은 몇개의 침투로에 집중되는 채널현상(channel phenomenon)이 일어났으며 유동이 완전히 정지된 최종 시점(주입후 8분 경과)에서도 주입재의 침투면적은 전체 절리면의 일부(49%)에만 편중됨으로써 주입효과가 저하되는 결과를 초래하였다.

5. 암반내에서 지하수의 유동

단일 절리면을 대상으로 할 경우 간극의 분포특성에 의한 채널흐름이 주요 유동메커니즘이 되는 것과는 대조적으로 대규모 암반을 대상으로 하는 공학적 관점에서는 다수의 절리군에 의해 형성되는 절리망(joint network)이 주된 유로를 형성한다. 따라서 절리의 기하학적 분포특성 중 특히 개별 절리간의 연결성은 유동해석에 결정적인 영향을 미치게 된다. 그러나 현장조사에서 얻어지는 측정자료는 일반적으로 절리군의 개수와 각 절리군의 평균 경사각 및 경사방향(혹은 주향)등으로 구성되며 좀더 정밀한 조사를 수행하면 절리의 평균 길이, 각 절리군에 속한 절리의 수, 절리밀도(혹은 빈도수)등이 얻어진다. 그동안의 연구에 의하면 절리분포에 관한 이러한 기하학적 자료는 일반적으로 통계적 성질을 갖고 있음을 알 수 있다(이근채, 1992).

본 연구에서는 3개의 절리군(평균 경사각은 각각 34°, 76°, 65°; 평균 경사방향은 각각 303°, 107°, 157°; 방향성에 대한 표준편차는 공히 5°)에 속한 절리들이 반구정상분포(Arnold's hemispherical normal distribution)를 따르며 절리의 길이는 로그정상분포(평균값은 3개 절리군 공히 50m, 표준편차는 각각 1.28m, 0.77m, 0.38m)를 따른다고 가정하였다. 관찰방향(view direction)은 N50°E, 관찰면 즉 해석 영역은 한변이 500m인 정방형 수직단면으로 설정하였고 여기에 총 600, 900, 1200, 1500, 1800개의 절리가 분포하는 절리암반 모델 5개를 발생시켰다. 각 절리군에 속한 절리의 수는 균등하게 배분하였다. 일례로 절리의 수가 1200개인 암반모델은 그림 7과 같다.

다음 단계는 이 암반모델에 포함된 절리중 지하수 유동에 기여하는 절리만을 찾아내어 절리망을 형성하는 과정이 필요하다. 절리들의 연결성을 시험하는 방법의 첫 단계는 각 절리의 위치, 방향성 및 길이에 관한 자료로부터 직선의 방정식을 구하고 절리 상호간의 교점을 계산하는 일이다. 절리번호(j)와 교점번호(i)에 의해 결정되는 행렬 $[M_{ij}]$를 구성하고 이 행렬로부터 최소한 두개 이상의 교점을 가진 절리만을 선별해냄으로써 고립된 절리나 막다른 길을 가진 절리를 제외시킬 수 있었다(송명규, 1993). 같은 요령으로 외곽경계나

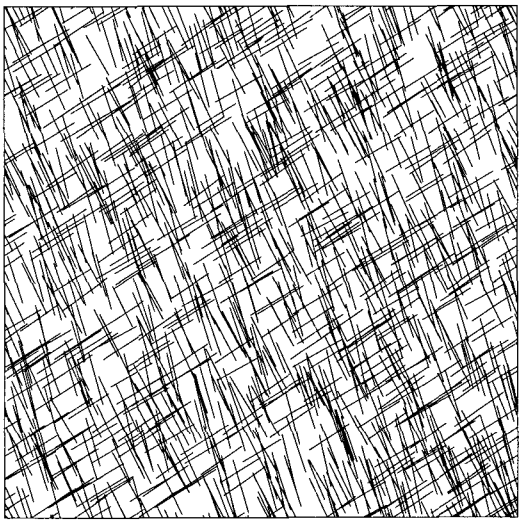


그림 7. 500m×500m 수직단면에 발생된 절리도 : 절리의 수=1200개

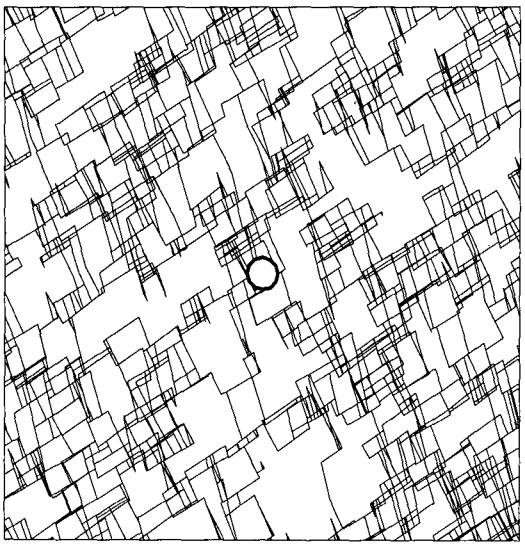


그림 8. 1200개 절리에 의해 형성된 절리망 (공동의 직경=30m)

내부 굴착경계(예로, 직경 30m의 원형공동)와 만나지 않는 절리들도 제거한 결과 그림 8과 같은 절리망이 얻어졌다.

절리망을 통한 지하수 유동해석은 다음 연립방정식을 이용하여 각 교점에서의 수두 h_i를 계산하는 단계부터 시작된다.

$$h_i = \frac{\sum C_{ij} h_j}{\sum C_{ij}} \qquad (15)$$

여기서 하부첨자 i와 j는 교점번호, h_i와 h_j는 각각 i와 j교점의 수두, C_{ij}는 ij교점간의 수리전도도(hydraulic conductance)로서 절리간극과 절리길이 및 유체의 동점성계수에 의해 결정된다. 절리의 수와 절리간의 교점의 수가 매우 커질 경우 상기 연립방정식의 해를 구하는 방법으로는 sparce matrix solving method가 가장 효율적이었다. 본 유동해석에 사용된 경계조건은 상부경계면을 지하수위와 일치시켰으며, 좌우측 및 하부경계면은 수두경계조건을 사용하였고, 굴착경계에는 대기압이 작용한다고 가정하였다. 절리의 평균 수리간극은 100㎛으로 하였다. 계산된 절점 수두로부터 절점간의 수두차 Δh를 결정하고 절점간 수리전도도를 이용하여 유량을 계산하였다.

그림 9는 앞서 설정된 5개 암반모델에 대해 원형공동의 직경을 10m에서 50m까지 변화시켰을 때 공동내부로 유입되는 지하수량의 변화를 도시한 것이다. 지하수 유입량(inflow)은 공동의 축방향으로의 단위길이(1m)당 0.2~2.2 liter/min의 범위내에서 변화하였고 절리의 수와 공동의 직경이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 본 해석에서 연결된 절리들로 형성된 유로를 통해 유동이 발생하므로 공동 직경에 비례하는 굴착경계면(πd)과 절리망이 교차할 확률이 그만큼 증가하기 때문인 것으로 해석된다.

이와 같은 절리망 해석결과의 신빙성과 의미를 검토하기 위해 다음 식으로 표현되는 Goodman의 이론해를 동일한 절리암반 모델에 적용시켜 보았다.

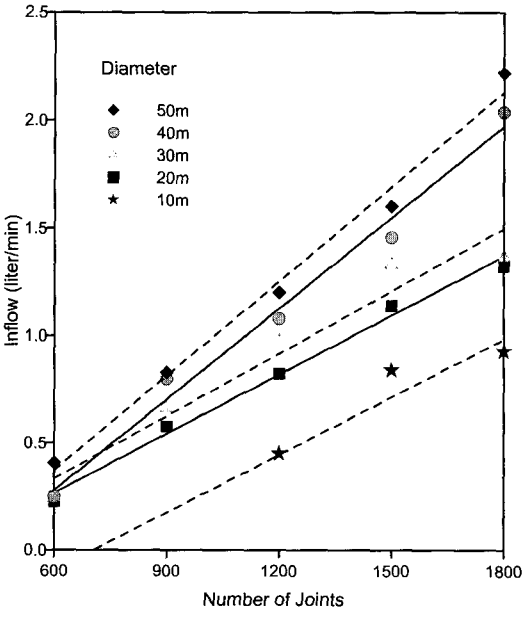


그림 9. 공동의 직경 및 절리의 수 증가에 의한 공동내부로의 지하수 유입량 변화

$$Q = \frac{2\pi K_s H_o}{\ln(\frac{4L}{d})} \quad (16)$$

여기서 Q는 유량, K_s는 매질의 등방성 수리전도계수(hydraulic conductivity), H_o는 공동중심에서의 정수압 수두, L은 지표면에서 공동중심까지 심도, d는 공동의 직경이다. 이 이론해의 특징은 균질 등방성 매질을 대상으로 지하수위의 변화가 없는 정상상태의 유동(steady-state flow)을 가정한 것이다. 따라서 본 연구에서 다루고 있는 절리암반에 이 이론식을 적용하기 위해서는 우선 대상 암반의 수리전도계수를 결정하여야 한다. 절리암반의 등가 수리전도계수(equivalent hydraulic conductivity)를 결정하는 방법에 관한 자세한 내용은 참고문헌(Moon & Jue, 1993; Moon et al., 1995; Moon et al., 1996)에 설명되었기에 여기서는 생략한다. 절리군의 방향성에 의해 등가 수리전도계수는 자연히 이방성을 띄게 되므로 본 유동해석에서는 암반모델의 수평방향 등가 수리전도계수 k_{xx}와 연직방향 등가 수리전도계수 k_{yy}의 평균값을 식(16)의 K_s값으로 사용하였다(표 1).

그림 10은 공동의 직경 10m, 20m, 30m, 40m, 50m 각각의 경우 이론해로부터 계산된 유량과 절리망 해석에서 얻어진 유량을 비교한 결과이다. 3개의 절리군이 뚜렷이 분포하는 암반에서 공동내부로의 지하수 유입량은 등가 수리전도계수 K_s 값 하나만으로 표현되는 균질 등방성 매질을 가정한 지하수 유입량과 적게는 9% 많게는 65%까지 차이가 남을 알 수 있다. 이 차이는 절리의 수가 많아질수록 감소하는 경향을 보이며 이는 절리암반내 유로(flow path)의 분포상태가 균질체에 근접하기 때문인 것으로 해석된다. 그러나 절리의 수가 작을 경우에는 등가물성 K_s값 하나에만 의존하는 해법 즉 서론에서 언급한 대표체적 개념을 적용하는 방법은 상당한 오차를 수반함을 알 수 있다. 따라서 이 경우엔 개별 절리의 영향을 직접 반영하는 절리망 해석기법이 필요하다고 판단된다. 다만 절리군의 수가 증가하거나 무작위 절리가 분포함으로써 암반의 이방성 및 불균질성이 완화될 경우에는 단순한 형태의 상기 이론식이 매우 유용하게 사용될 수 있다.

절리망 해석법은 절리의 기하학적 분포특성이 유체유동에 직접 반영된다는 장점에도 불구하고

표 1. 5개 절리망 모델의 이방성 등가수리전도계수(k_{xx}, k_{yy}) 및 평균수리전도계수(K_s)

	절리망 모델				
	I	II	III	IV	V
절리개수	600	900	1200	1500	1800
k_{xx} (10^{-8}m/s)	0.372	1.113	1.957	3.205e	4.441
k_{yy} (10^{-8}m/s)	0.533	1.659	3.164	3.164	8.177
K_s (10^{-8}m/s)	0.453	1.386	2.561	3.185	6.309

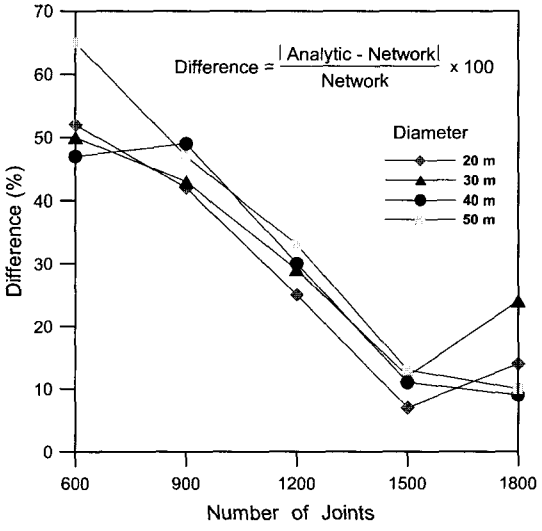


그림 10. 지하수 유입량에 대한 이론해와 절리망 해석결과의 비교

근본적으로 한정된 해석영역을 모델로 삼고 있는 수치해석기법의 일종이기에 유한요소법, 개별요소법 및 유한차분법 등이 갖고 있는 몇 가지 한계성을 공유하게 된다.

그 중 유한요소법을 이용한 응력해석에서 지적되고 있는 경계효과(boundary effects)가 본 절리망 해석에는 어떠한 영향을 미치는지 분석해 보았다. 물론, 해석영역의 외곽경계가 공동으로부터 충분히 멀리 있고 매질이 균질하다면 경계효과는 없다. 그러나 공동 주변 암반에서의 절리망 유로의 분포상태는 그림 8과 같이 비균질 이방성을 보이고 있다. 따라서 직경 30m의 공동을 중심으로 해석영역의 크기를 100m×100m, 200m×200m, 300m×300m, 400m×400m로 변화시키면서 유동해석을 수행하였고 그 결과를 당초의 500m×500m 모델에서 얻어진 결과와 비교하였다.

그림 11은 500m×500m 모델을 기준으로 정규화된 지하수 유입량의 변화를 보여주고 있다. 해석영역이 100m×100m일 경우 계산된 유입량은

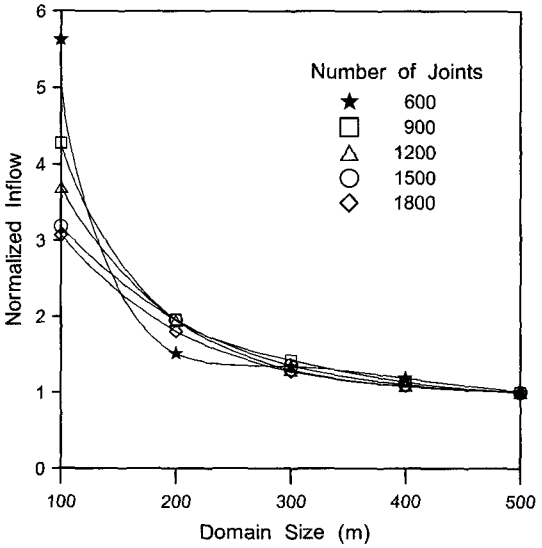


그림 11. 절리망 해석의 경계효과 비교 : 해석영역의 크기 변화에 따른 정규화된 지하수 유입량의 변화

당초 모델에 비해 3.1배에서 5.6배까지 과대 평가되었으나 해석영역이 400m×400m로 커짐에 따라 그 차이는 8%~18%로 감소하였다. 또한 절리망 해석법의 경계효과는 암반에 분포하는 절리의 수(절리의 밀도분포)와도 관련되어 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 다양한 해석기법을 이용하여 불연속 암반내에서의 지하수 및 주입재의 유동 특성을 분석하였다. 관찰의 초점이 개개의 절리면에 국한될 경우 물과 주입재의 유동은 절리간극의 분포상태에 좌우되며 간극의 평균과 표준편차가 결정되면 적절한 확률분포함수와 변이함수를 이용하여 절리면의 간극을 모사할 수 있었다. 유한차분법을 적용한 유동해석 결과 간극의 변화가 심한 절리면에서는 유동이 용이한 유로를 따라 흐름이 집중되는 채널현상과 유동 방향이 급격히 변화하는 곡절현상이 관찰되었다. 절리간극의 변화가 심하지 않을 경우에는 이론해와 유한차분법 모두 유량 예측에 큰 차이를 보이지 않았다. 거친 절리면을 통한 주입재의 유동에서도 절리간극은 주입재의 관통 여부를 판단하는 조건, 유동량 계산, 절리벽면에서의 주입재 마찰손실 계산 및 주입재의 최대유동거리 계산에 필수적인 입력변수 역할을 하였다. 주입재의 시간의존적 전단강도와 점성도가 결정되면 채널망 해석기법에 의해 주입재의 침투과정을 모델링할 수 있었으며 이를 통해 주입재와 절리의 특성이 반영된 주입효과 예측이 가능하였다.

관찰의 대상이 공학적 규모의 절리암반으로 바뀔 경우 지하수 유동의 주된 통로는 연결된 절리망이다. 현장조사로부터 절리군의 기하학적 성질(방향성, 밀도 또는 절리개수, 길이 등)과 그에 대한 확률분포특성이 파악되면 통계적 절리발생기법을 통해 절리암반 모델을 구현할 수 있었으며

발생된 절리들 상호간의 연결성을 분석함으로써 유동해석에 필요한 절리망이 형성된다. 제시된 절리망 해석기법을 이용하여 절리의 수와 굴착공동의 직경을 변화시키면서 공동으로의 지하수 유입량을 분석하였다. 절리의 수와 굴착공동의 직경이 증가함에 따라 유입량도 증가하였으나 균열망의 비균질성으로 인해 증가율은 일정치 않았다. 한편, 균질 등방성 매질을 가정한 이론해와 절리망 해석결과를 비교 분석한 결과 본 연구에서 제시된 절리망 유동해석기법은 개별 절리의 영향을 가장 직접적으로 처리할 수 있다는 장점이 있는 반면 해석결과가 절리의 위치적 분포특성과 해석영역의 크기에 따라 민감하게 변화한다는 단점도 갖고 있다.

참 고 문 헌

1. 김문상(1994), "절리암반에서의 지반주입재 유동특성에 관한 수치해석적 연구", 석사학위논문, 한양대학교, p.84.
2. 송명규(1993), "불연속 암반의 수리전도특성과 암반절리에서의 유체유동에 관한 수치해석적 연구", 석사학위논문, 한양대학교, p.66.
3. 이근채(1992), "통계적 절리구조 모델링과 지하공동 안정성 평가에의 적용", 석사학위논문, 한양대학교, p.125.
4. Amadei, B. & Illangasekare, T.(1992), "Analytical Solution for Steady and Transient Flow in Nonhomogeneous and Anisotropic Rock Joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, pp.561~572.
5. Cook, N.G.W.(1992), "Natural Joints in Rock: Mechanical, Hydraulic and Seismic Behaviour and Properties under Normal Stress", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, pp.198~223.
6. Gerrard, C.M.(1982), "Equivalent Elastic Moduli of Rock Masses Having One, Two and Three Sets of Joints", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.19, pp.15~23.
7. Hashin, Z. & Shtrickman, S.(1963), "A Variational Approach to the Theory of the Elastic Behaviour of Multiphase Materials", J. Mech. Phys. Solids, Vol.11, pp.127~140.
8. Hassler, L., Håkansson, U., and Stille, H.(1992), "Computer-simulated Flow of Grouts in Jointed Rock", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.7, pp.441~446.
9. Hill, R.(1963), "Elastic Properties of Reinforced Solids", J. Mech. Phys. Solids, Vol.11, pp.357~372.
10. Iwano, M. & Einstein, H.(1993), "Stochastic Analysis of Surface Roughness, Aperture and Flow in a Single Fracture", Proc. of EUROCK '93 ISRM Int. Symp., Vol.1, pp.135~141.
11. Zhang, L. & Franklin, J.A.(1993), "Prediction of Water Flow into Rock Tunnels: an Analytic Solution Assuming an Hydraulic Conductivity Gradient", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, pp.37~46.
12. Moon, H. & Jue, K.(1993), "Equivalent Thermal and Hydraulic Properties of Jointed Rock Masses", Proc. of EUROCK '93 ISRM Int. Symp., Vol.1, pp.337~346.
13. Moon, H. & Jue, K. and Song, M.(1995), "Estimation of the Mechanical, Thermal and Hydraulic Properties of Jointed Rock Masses and Their Scale Effects", Proc. of the 8th ISRM Int. Congress on Rock Mech., Vol.2, pp.715~719.
14. Moon, H. & Kim, C.(1993), "Scale Effects in the Elastic Moduli and Strength of Jointed Rock Masses", Proc. of the 2nd Int. Workshop on Scale Effects, pp.39~48.
15. Moon, H. & Kim, C. and Choi, S.(1996), "Approximate Methods of Estimating the T-H-M Properties of Jointed Rock Masses", Proc. of the Korea-Japan Joint Symp. on Rock Engineering, pp.173~180.
16. Morland, L.M.(1974), "Continuum Model of Regularly Jointed Mediums", J. Geophys. Res., Vol.79, pp.357~362.
17. Singh, B.(1973), "Continuum Characterization of Jointed Rock Masses: Part I-the Constitutive Equations", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.10, pp.311~335.
18. Tsang, Y.W. & Tsang, C.F.(1987), "Channels Model of Flow through Fractured Media", Water Resour. Res., Vol.23, pp.467~479.
19. Widmann, R.(1993), "Grouting from Experience to Theory", ISRM News Journal, Vol.1, No.2, pp.73~79.

(접수일자 1999. 5. 19)