

절리암반에서의 주입재 유동특성에 관한 수치해석적 연구

A Numerical Study on the Flow Characteristics of Grouts in Jointed Rock

김 문 상*¹

Kim, Moon-Sang

문 현 구*²

Moon, Hyun-Koo

Abstract

To study the grout flow in jointed rock, various numerical simulations on the flow characteristics of grout in a single joint plane and two-dimensional joint network are performed. The joint plane is described as a channel network, and the time dependent properties of grout are considered. To deal with various problems, the statistical aperture generator and joint network generator are used.

A loss of head due to friction in laminar flow is adopted to take into account the friction between the grout and joint wall. The grout flow is stopped, when the time is reached the setting time. To consider this phenomenon, the idea of maximum flow length is used.

From the results of numerical simulation on the single joint plane, the channelized penetration of grout is confirmed. The basic principles for the controlling of grouting operation and the selection of the grout are presented. Correlation between the hydraulic gradient and grouting pressure is defined by analyzing the effects of ground water flow on the grout flow. Finally, the grout flow around a tunnel is simulated to increase the understanding grouting operation for jointed rock mass.

요 지

절리암반내에서 이루어지는 주입재의 유동을 분석하기 위하여 단일 절리면과 2차원 절리망에서의 주입재 유동에 대한 전산실험을 수행하였다. 암반내 유체유로를 사각관으로 표현하였으며 주입재의 전단강도와 점성도변화 특성을 반영하였다. 다양한 문제에 접근하기 위하여 통계적 간극분포 발생장치 및 절리망 형성장치와의 연계성을 확보하였다.

주입재와 절리면과의 마찰에 의한 수두손실을 계산하기 위하여 층류에서의 마찰손실을 적용하였으며 주입재의 고화에 따른 유동멈춤현상을 반영하기 위하여 최대유동거리개념을 도입하였

*1 선경건설주식회사 지하비축팀

*2 정희원, 한양대학교 공과대학 자원공학과 부교수

다. Binghamian grout(이후 Bingham 주입재)와 Newtonian grout(이후 Newton 주입재)의 유동특성에 관한 자료를 구하기 위하여 실험실 시험결과를 수식화하였다.

단일절리면에서의 주입재 유동특성에 대한 전산실험을 수행한 결과 평판모델에서는 발견할 수 없는 주입재의 채널유동을 확인할 수 있었다. 전단강도 및 점성도의 변화가 주입재 유동에 미치는 영향을 파악하여 주입관리와 주입재 선정을 위한 기본방안을 제시할 수 있었다. 또한 지하수의 유동이 주입재 유동에 미치는 영향을 분석하여 주입지역에 작용하는 수리구배와 주입압과의 관계를 도출하였다. 마지막으로 터널주변에서의 주입재 유동을 관찰하여 주입작업에 대한 이해를 증진시키고자 하였다.

1. 서 론

방사성 폐기물 처분장, 대도시 지하공간, 액화가스 및 원유 비축 공동, 지하양수발전소 공동, 해저 또는 하저터널과 같은 5가지 지하공동은 그 개발목적과 이용방식에서 차이를 보이고 있지만 본질적으로는 암반 특히 다수의 균열망을 내포하는 불연속 암반을 굴착하고 굴착된 지하 환경속에서 반영구적으로 유지되어야 한다는 공통점을 가진다. 따라서 공사지역과 인접한 지상구조물, 지하매설물에 미치는 영향 및 환경문제와 더불어 현재 개발되고 있는 공간자체에 대한 안정성 확보는 반드시 해결해야만 하는 과제이고 이러한 어려움을 극복하기 위하여 많은 보강공법들이 개발되어 사용되고 있다.

그 중에서도 주입공법은 지하공간을 개발할 때 굴착면의 붕괴와 지하수의 유입으로 인한 지하 공동의 불안정성을 방지하고 지반 침하를 최소화하여 지상 구조물에 미치는 피해를 줄이는 목적에 사용되고 있다. 특히 핵폐기물 저장소 주변에 굴착에 의하여 형성된 교란대가 존재하거나 자연절리가 교차하게 되면 그것들이 방사성 물질의 주 이동경로가 되어 이러한 지질조건을 극복여부는 공사의 성패를 좌우하게 된다.^[10] 이 경우 주입공법을 통하여 공사를 성공적으로 수행할 수 있다. 또한 주입공법은 설비가 간단하고 소규모이기 때문에 협소한 장소나 공간에서도 시공할 수 있고 진동 및 소음에 대한 영향이 적기 때문에 공사현

장에서 요긴하게 사용되는 공법이다.^[5]

그러나 이러한 중요성에 비하여 지반굴착시 사용되는 보강공법중에서 이론적 배경과 체계적인 경험의 축적이 가장 부족한 것이 바로 주입공법이다. 그 이유는 크게 다음의 두가지로 설명되어질 수 있다.^[2] 첫째, 현장에서 사용되는 각 주입재간의 상호반응과 복잡한 지반내 환경변화에 대한 주입재의 복합적 반응을 실험 또는 예측하는 것이 용이치 않으며 둘째, 주입재의 유동경로를 정확히 파악하여 최종고결범위를 예측하는 것이 어렵기 때문이다. 특히 토질내 주입작업시 활렬주입이 발생하거나 암반내에 다수의 절리가 존재할 경우에는 주입재의 물성변화예측과 더불어 대상매질의 기하학적 특성까지 고려해야 하므로 문제가 더욱 복잡하게 된다. 이러한 이유들로 인하여 주입공법에서는 이론보다 경험이 중시되어왔다.

하지만 근래에 들어 주입공법에 대한 관심이 높아지면서 새로운 주입방식이 개발되고 있고, 주입재의 성능이 향상되고 있으며, 주입장비와 계측장비가 발전함에 따라,^[11] 지금까지 경험에 의존하여 이루어져 왔던 주입공법을 이론적으로 이해하고 주입효과를 예측하려는 연구가 활발해졌다. 이러한 작업의 하나로써 1988년 Austria에서 주입공법을 연구하는 그룹이 결성되었고, 1989년 ISRM에서도 주입공법에 대한 위원회가 발족되었다.^[21]

주입공법의 과학화를 위한 노력중의 하나가 주입재의 유동을 수학적으로 표현하고 전산실험을 통하여 주입효과를 예측하는 것이다. 지

급까지 암반내에 존재하는 불연속면에서 이루어지는 주입재의 유동을 이론적으로 연구하고 주입효과를 판단하려는 노력은 주입대상지반이 토질인 경우에 비하여 상대적으로 적었다. 그 이유는 주입재와 유동경로의 복잡성에 의한 문제자체의 어려움과 이해부족 때문이다. 따라서 암반내 주입작업에 있어서 결과의 예측은 토질내 주입작업에 비하여 상대적으로 어렵고 주입설계에 대한 신뢰성 또한 저하될 수밖에 없다. 결국 주입작업에 대한 예측과 실제 결과와의 차이는 주입공법의 과학화를 어렵게 하므로 이러한 여건을 극복하기 위한 노력이 필요한 상황이다.

전산실험을 통하여 주입작업을 해석하기 위해서는 유체의 유동경로를 구현해야 하고, 주입재의 물성변화를 반영할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 통계적 기법을 사용한 간극분포 발생장치와 절리도 발생장치를 이용하여 단일절리면과 불연속암반에서의 유체 유로를 거칠기(roughness)와 절리도(joint map)를 통하여 표현하였다. 또한 주입재의 물성변화에 대한 실험실 시험결과를 수식화하여 주입재 유동 이론식과 함께 사용하였다. 이를 통하여 보이지 않는 곳에서 이루어지고 있는 주입재의 유동을 가시화시키고 주입재의 물성변화 특성이 주입재 유동에 미치는 영향을 분석하여 주입설계작업에 도움이 될 수 있도록 하고자 하였다. 또한 지하수의 유동이 주입재 유동에 미치는 영향을 주입압을 변화시키면서 관찰, 분석하여 지하수와 주입재 유동간의 정량적인 관계를 도출하였다. 그리고 터널주변에서 이루어지는 주입재의 유동을 분석하여 실제 주입작업에 대한 이해를 돕고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 주입재의 분류

주입재란 지반내 간극에 침투, 고결되어 지반의 강도를 높이고 투수성을 낮추는 여러 형

태의 재료를 말한다. 본 공사에 앞서 현장시험 주입을 실시함으로써 지반의 특성과 주입 목적에 부합되어 가장 큰 효과를 발휘할 주입재를 선정하는 것이 바람직하다.

주입재의 유동특성을 표현하기 위하여 사용되는 모델에는 Newton 모델과 Bingham 모델이 있으며 각 모델로 표현되는 주입재를 Newton 주입재, Bingham 주입재라 한다.^(7, 9, 15)

Newton 주입재는 속도구배(velocity gradient) 또는 각변형속도(shear rate)와 전단응력과의 관계가 원점에서 시작되는 직선형태로 나타나는 주입재이다. 전단응력과 속도구배와의 관계는 식 (1)로 표현된다.⁽¹³⁾

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (1)$$

여기서 τ 는 전단응력, μ 는 점성도, dv/dz 는 속도구배이다.

Newton 주입재에 속하는 주입재에는 sodium silicate, urea formaldehyde, polyurethane, epoxy resin 등이 있다.*

Bingham 주입재의 경우에는 초기전단항복응력(initial yield stress) τ_0 가 존재하게 되어 일정의력이하에서는 $dv/dz = 0$, 즉 유동이 일어나지 않는다. 여기서 τ_0 는 학자에 따라서 rigidity, cohesion, flow limit라고 불려지기도 한다. Bingham 주입재의 전단응력과 속도구배와의 관계는 식 (2)로 표현된다.

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv}{dz} \quad (2)$$

Bingham 주입재에 속하는 주입재에는 neat cement, cement with admixtures, cement bentonite, cement fly ash 등이 있다.⁽⁸⁾

2.2 주입가능성 평가

주입설계과정에서 주입재를 선택하기 위한 기준에는 지반내 간극과 균열의 크기, 주입재 입자의 크기, 그리고 대상지반의 투수계수 등이 포함된다. 주입재의 침투가능여부는 주입재의 점성과 점착력보다 입자의 크기에 더 많은

영향을 받는다는 실험결과도 보고된 바 있다.⁽¹⁰⁾ 대상지반이 토질인 경우 먼저 다음과 같이 주입재 입자크기와 토질 입자크기의 비를 정의한다.

$$GR_{15} = D_{15}/D'_{85} \quad GR_{10} = D_{10}/D'_{90} \quad (3)$$

여기서 D_{15} 와 D_{10} 은 각각 입경누적곡선에서 15%와 10%에 해당되는 토립자의 직경이며 D'_{85} 와 D'_{90} 은 각각 입경누적곡선에서 85%와 90%에 해당되는 주입재 입자의 직경이다.

Kravetz는 GR_{15} 가 15이상이거나 GR_{10} 이 8 이상이면 주입재의 침투가 가능하다고 하였다.⁽¹⁵⁾ Mitchel은 GR_{15} 가 24이상이거나 GR_{10} 이 11 이상이면 주입재의 침투가 가능하고 GR_{15} 가 11보다 작거나 GR_{10} 이 6보다 작으면 침투가 불가능하다고 하였다.⁽²⁰⁾ Karol은 먼저 흙의 투수성이 세립토의 함유율에 상당히 민감하기 때문에 #200체 통과입자인 silt의 비율이 20%를 상회하면 주입이 어렵고 30%를 초과하면 주입이 불가능하다고 하였다. 그리고 지반의 투수계수가 10^{-6} cm/sec보다 작으면 주입이 불가능하고, 투수계수가 10^{-3} cm/sec보다 작은 경우 주입재의 점성이 10cp 이상이면 주입이 어렵고, 투수계수가 10^{-1} cm/sec보다 크면 현탁액 주입재를 사용해도 주입이 가능하다고 하였다.⁽¹⁷⁾

암반을 대상으로하는 경우에 사용하도록 제시된 기준으로써 먼저 Mitchel에 의한 기준은 다음과 같다.⁽²⁰⁾

$$\frac{D_{fissure}}{D'_{95}} > 5 : \text{완전침투}, \frac{D_{fissure}}{D'_{95}} < 2 : \\ \text{침투불능}, 2 < \frac{D_{fissure}}{D'_{95}} < 5 : \text{부분침투} \quad (4)$$

여기서 $D_{fissure}$ 는 불연속면의 개구 크기(aperture), D'_{95} 는 주입재의 입경누적곡선에서 95%에 해당되는 입경이다. Shroff와 Shah는 불연속면의 개구 크기가 주입재의 최대입경 보다 3배 이상 크면 침투가 가능하다고 하였다.⁽⁸⁾

Nonveiller는 시멘트 입자가 절리를 따라 침투되기 위해서는 절리는 투수계수가 1.5×10^{-5} cm/s 이상이어야 한다고 하였다.⁽¹⁵⁾

2.3 주입압 결정 및 주입관리 방법

주입압력의 결정은 효과적인 주입작업을 위한 중요한 요소중의 하나이며 과도한 주입압은 지반을 교란시켜 안정성을 떨어뜨리게 되고 반대로 주입압이 너무 낮으면 대상 범위를 충분히 개량시킬 수가 없어서 소기의 목적을 이룰 수가 없다. 주입압은 현장의 지질조건과 지하수의 상태 등과 같은 제반사항을 고려하여 결정되어야 한다. 미국개척국(U.S. Bureau of Reclamation)에서는 주입심도(m)에 0.23을 곱한 값을 허용주입압(allowable pressure, kg/cm²)으로 사용하고 있고, 이탈리아에서는 주입심도(m)를 허용주입압(kg/cm²)으로 사용하고 있다.⁽²⁾

주입관리방법에는 정압주입과 정량주입 및 자기기록계에 의한 자료해석 등이 있다. 그러나 정압주입방법과 정량주입방법처럼 주입압과 주입량의 절대치를 기준으로 하여 주입작업을 관리하는 방법보다는 각각의 시간적 변화를 관찰하여 지반내 주입재의 거동을 탐지하는 것이 보다 유력한 판단 자료가 된다. 이를 위해 자기기록 압력유량계가 사용되고 있으며 시간(T)에 따른 주입압(P)과 주입량(Q)의 변화를 나타내는 곡선을 T-P-Q 곡선이라 한다. T-P-Q 곡선의 형태는 지반조건에 따라 다른 결과를 나타내기 때문에 지반내 주입상황을 보다 가시적으로 나타내 준다. 또한 T-P-Q 곡선을 사용하여 지반내 주입재의 고결형상을 예측하려고 하는 연구가 이루어지기도 하였다.⁽¹⁶⁾

2.4 불연속 암반에서의 유체유동모델

유체가 유동하기 위해서는 첫째, 압력(수두)의 차이가 있어야 하고 둘째, 유동할 수 있는 공간이 필요하게 된다. 따라서 압력의 차이를 예측할 수 있고 유체가 유동하는 공간을 정확

하게 파악할 수 있다면 주입재를 포함한 유체의 지반내 거동을 알 수 있게 된다. 그러나 결정질 암반에서의 유체유동은 절리, 단층과 같이 한정된 공간에서 방향성을 가지고 형성된 불연속면들의 연결에 의하여 일어나게 되고 단일 절리에서의 유동 또한 절리면의 거칠기와 충전물질에 의해서 영향을 받기 때문에 유동문제를 더욱 어렵게 하고 있다. 따라서 불연속 암반에서의 유체유동을 분석하기 위해서는 먼저 단일절리에서의 유동을 파악하고 절리간의 교차에 의한 유체유동을 정의하는 것이 필요하다.

단일절리에서의 유체유동을 연구하기 위하여 초기에는 평행평판모델을 사용하였으나 적용의 한계성에 의하여 근래에 들어 이루어진 연구들은 절리면상에서의 다양한 간극(aperture)과 굴곡(tortuosity)을 고려하고 있다.

^(14, 16) 채널모델(channel model)로 불리는 이러한 방법은 단일균열내에서 유체의 유동이 한정된 몇개의 유동채널을 통해 이루어진다는 현장 실험결과를 바탕으로 하고 있다. 본 연구에서는 채널발생장치를 사용하여 단일절리에서의 주입재 유동을 살펴보고자 하였다. 이 때 사용되는 자료에는 변이함수, 상관길이, 평균간극, 간극의 표준편차 등이 있다.⁽¹⁴⁾

지반내 주입작업은 주입재의 높은 점성과 전단강도와 결부되어 대상지역내에서 한정된 부분에만 영향을 주기 때문에 주입작업을 전산실험하기 위해서는 암반을 불연속 매체로 간주해

야만 한다.⁽¹²⁾ 따라서 암반내에서의 유체유동은 절리들이 복잡하게 연결된 절리망을 통해서 분석되어야 한다. 절리망을 구현하기 위해서는 먼저 통계적 분포를 갖는 절리도가 발생되어야 하고 개별적으로 발생된 절리들간의 연결성을 파악해야 한다. 이것을 위하여 절리도 발생장치와 절리망 형성장치를 사용하였다. 절리도 발생을 위해서 절리의 평균길이, 경사, 경사방향, 절리길이의 표준편차 등과 같은 자료가 사용된다.⁽⁴⁾

3. 주입재 유동해석 모델의 구성

본 연구에서 사용된 주입재 유동이론식은 1992년 Hässler가 제안한 식으로 그림 1과 같이 사각관(채널, channel)에서의 유동을 다루고 있으며 여러 개의 채널이 연결되어 있는 network 모델을 사용하였다.⁽¹²⁾ 각 채널이 연결되는 부분을 절점(node)으로 정의하고 절점과 절점사이를 요소(element)라고 정의한다.

3.1 주입재의 유동 메커니즘

주입재는 주입압과 간극수압과의 차이에 의해서 유동하게 되므로 본 연구에서는 주입압(Pa)을 수두(m)로 치환하여 주입수두와 각 절점에서 미리 계산된 수두와의 차이로 주입재가 유동하도록 하였다. 주입재와 절리면과의 마찰에 의한 수두손실을 고려하기 위하여 층류에서

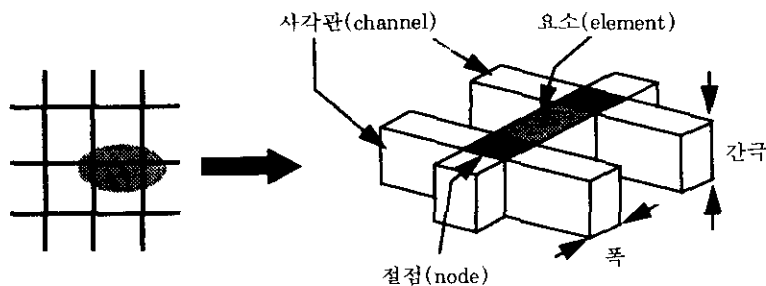


그림 1 주입재 유동해석을 위한 network 모델

의 마찰손실에 관한 공식을 사용하였다.⁽³⁾

$$h_f = \frac{64}{N_R} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

여기서 h_f 는 수두 손실(m), N_R 은 Reynold number, L 은 유동거리(m), D 는 원관의 직경(m), V 는 유동속도(m/s), g 는 중력가속도(m/s^2)이다. 이 식을 사각관에서 유동에 적용하기 위해서 원관의 지름 D 대신 수력지름(hydraulic diameter)을 사용하였다. 수력지름은 간극값의 두배가 된다.

전산실험을 통하여 주입재의 유동을 분석할 때 반드시 고려해야 할 사항은 수두차이가 존재해도 주입재의 유동특성상 더이상의 유동이 이루어지지 않는 현상이 발생한다는 것이다. 주입재의 유동을 멈추는 기준을 세우기 위해서 다음과 같은 최대유동거리개념을 도입하였다.

[19, 22]

$$L = \frac{\Delta P b}{2\tau} \quad (6)$$

여기서 L 은 주입재의 최대유동거리(m), ΔP 는 주입압과 간극수압과의 차이(Pa), b 는 사각관의 간극(m), τ 는 주입재의 전단강도(Pa)이다. 전산실험시 단위시간마다 각 절점간의 주입재 유동거리를 계산한 후 유동거리값과 식(6)의 우변값을 비교하여 유동거리가 우변값보다 작으면 계속 유동할 수 있도록 하고 유동거리값이 우변값보다 크게 되면 주입재의 유동을 멈추도록 하였다.

절점사이에서 이루어지는 주입재의 유동거리계산과 절점간 유동완료판단은 다음의 순서를 따른다. (i) 수두차를 비롯한 여러 자료를 통하여 단위시간당 유량(m^3/s)을 계산한다. (ii) 유량을 사각관의 면적(m^2)으로 나누어 속도(m/s)를 구한다. (iii) 각 단위시간에서 전체 절점을 검색하여 유동이 일어나고 있는 요소를 파악한 후 각 요소에서의 유동거리를 계산한다. (iv) 유동거리가 요소의 길이보다 크게 되는 순간 절점간의 유동이 완료된 것으로 판단한다. 도착절점의 수두를 수두손실에 의해 저하된 주입수두로 바꾸어준 후 다음 절

점으로의 유동을 시작하게 된다.

3.2 주입재의 물성변화

전산실험에 필요한 주입재의 물성은 전단강도와 점성도이며 각각의 시간에 따른 변화는 주입재의 유동에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 의미를 가진다. 하지만 이러한 주입재의 시간에 따른 물성변화를 수식으로 나타낸 실험결과를 구한다는 것은 어려운 일이기 때문에 실험실 시험결과 그래프를 함수화하여 전산실험에 사용하였다.

그림 2는 문헌 (21)에 실려있는 마이크로시멘트의 전단강도와 점성도 변화곡선을 다음의 함수를 사용하여 근사화시킨 것이다.

$$\tau(t) = e^{\alpha t} + A \quad \mu(t) = B e^{\beta t} \quad (7)$$

여기서 τ 는 주입재의 전단강도(Pa), μ 는 주입재의 점성도(Pa s), α , β , A , B 는 상수이다. 약액계열 주입재의 경우에는 각각의 점성도 변화곡선에서 비선형 증가부분을 두개의 선형 증

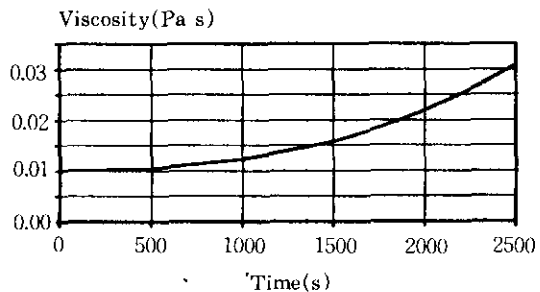
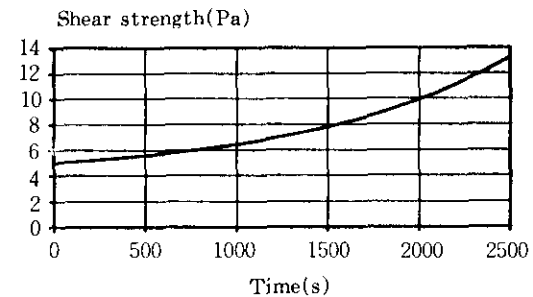


그림 2 마이크로시멘트의 전단강도와 점성도 변화곡선

가부분으로 근사화시켜 점성도변화를 시간에 따른 함수로 표현하였다.

4. 주입재 유동해석 모델의 적용

주입작업시 주입재의 물성변화가 주입재의 유동에 미치는 영향과 암반내 불연속면에서 이루어지는 주입재의 유동형태는 현장주입관제자 및 연구자들의 관심의 대상이다. 본 연구에서는 주입재 유동해석 모델을 사용한 일련의 전산실험을 통하여 개발된 모델의 적용성을 검증해 보고 절리 암반에서 이루어지는 주입재의 유동에 대한 이해를 높이고자 하였다.

4.1 전단강도가 주입재의 유동에 미치는 영향

Lombardi(1985)는 주입재의 전단강도가 주입재의 최대 유동거리를 결정하므로 주입재의 침투성을 증가시키기 위해서는 전단강도를 낮추는 것이 바람직하다는 실험결과를 발표한 바 있다.⁹⁾ 이와 같은 전단강도와 유동거리와의 관계를 이용하여 주입재 유동해석 모델을 현장에서 이루어지고 있는 T-P-Q 곡선을 이용한 주입관리방법에 적용하여 보았다. 전산실험을 통하여 주입압의 변화를 고려하기에는 현재로서 어렵기 때문에 주입압을 일정하게 유지하면서 주입재의 전단강도를 증가시켜 주입시간경과에 따른 주입량의 변화를 살펴보고자 하였다.

그림 3은 관찰면에 절리망을 형성한 후 주입공을 천공한 모습이다. 절리도 발생시 사용된 자료는 표 1과 같다. 절리의 간극은 200 μ m로 하였다. 주입공을 중심으로 우측경계에는 30m의 수

두가 작용하고 있고 좌측경계에는 20m의 수두가 작용하고 있어 지하수의 흐름은 우측에서 좌측으로 일어나고 있는 상황이다. 사용된 주입재는 시멘트현탁액(마이크로시멘트)이고 전단강도와 점성도 변화곡선은 그림 2와 같다. 전단강도의 증가는 그림 2의 전단강도값을 전체적으로 2배, 4배, 6배, 8배, 10배로 증가시키는 방법을 사용하였다. 사용된 주입압은 0.5MPa이고 주입재의 밀도는 1600kg/m³, 물의 밀도는 1000kg/m³으로 하였다.

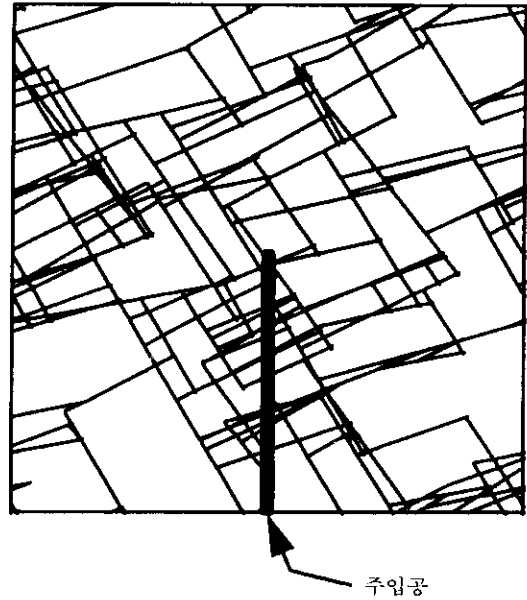


그림 3 절리망에 주입공을 설치한 모습

그림 4는 전단강도를 증가시키지 않은 경우에 주입재가 침투된 모습이고 그림 5는 전단강도를 4배 증가시킨 경우에 주입재가 침투된 모

표 1 절리도 발생을 위한 입력자료

절리군 번호	절리갯수	평균절리길이	절리길이 표준편차	평균경사각	평균경사방향
1	40	3.5m	1.28m	34°	303°
2	40	3.5m	1.77m	76°	107°
3	40	3.5m	1.38m	65°	157°

습이다. 전단강도 증가에 따라 침투범위가 상당히 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그림 5를 보면 지하수 유동에 의한 영향을 받아 주입재가 좌측으로 상대적으로 많이 유동하고 있는 모습을 관찰할 수 있다. 그림 6은 각각의 전단강도 증가단계에서 주입시간경과에 따른 주입량과 전단강도와의 관계를 나타내고 있으며 y축은 각 주입량을 최대 주입량($1.01 \times$

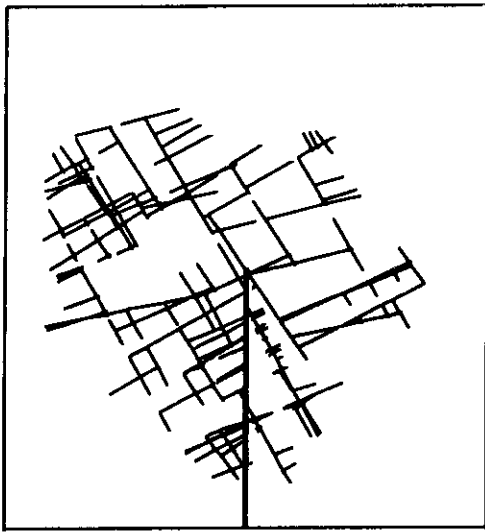


그림 4 주입재의 유동형태

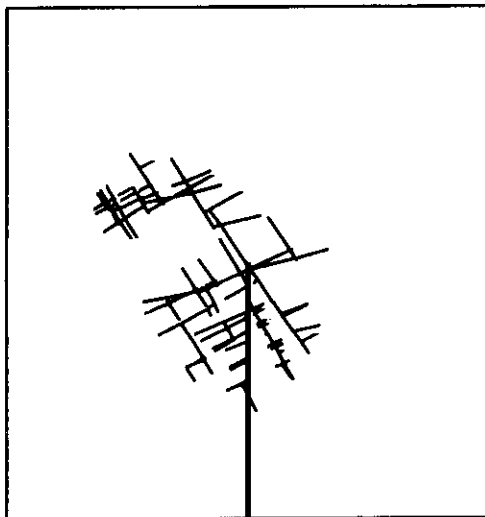


그림 5 전단강도가 4배 증가된 경우 주입재의 유동형태

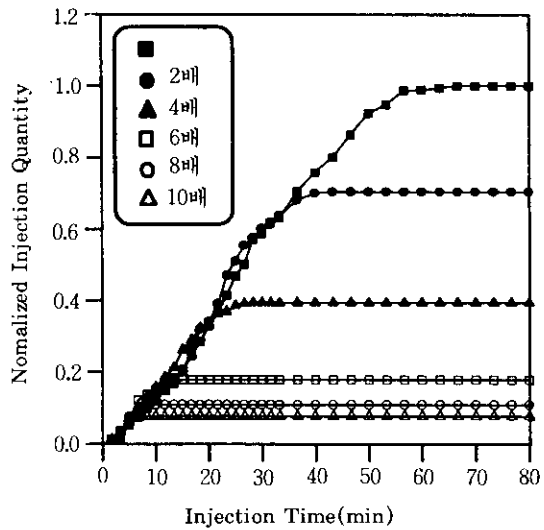


그림 6 전단강도 증가와 주입량의 변화

10^{-4}m^3)으로 나누어준 값이다. 그림 6을 보면 전단강도가 증가할 수록 주입량이 급격하게 감소함을 알 수가 있다. 따라서 주입작업의 효율성을 위해서 주입시공시 배합시간(mixing time)과 물 또는 다른 첨가제의 양을 신중하게 선택하여 주입재의 전단강도가 변화하지 않도록 해야 할 것이다.

4.2 점성도가 주입재의 유동에 미치는 영향

본 실험에서는 점성도의 변화가 Newton 주입재와 Bingham 주입재의 유동에 미치는 영향을 보고자 하였다. 그림 7과 같이 가로 200m, 세로 200m의 크기를 갖는 모델을 사용하였으며 모델의 중앙부에서 주입이 이루어지도록 하였다. 주입공과 절점사이의 수두차를 50m로 고정시키고 주입재의 밀도는 1600kg/m^3 , 물의 밀도는 1000kg/m^3 으로 하였다. 주입재의 전단강도는 5Pa을 유지하도록 하였으며 사각관의 간극은 $320 \mu\text{m}$, 사각관의 폭은 4mm로 정하였다.

주입재의 최대유동거리는 15.68m이고 각 주입재에 있어서 소요된 시간은 표 2와 같다. 전산실험결과에 의하면 Bingham 주입재가 new-

ton 주입재보다 최소 3.6배에서 최대 15.3배까지 소요시간이 큰 것으로 나타났다. 따라서 계획된 침투범위내에 신속히 주입재를 침투시킬

필요가 있을 경우에는 Newton 주입재를 사용하는 것이 바람직하다는 사실이 전산실험을 통해서도 확인되었다.

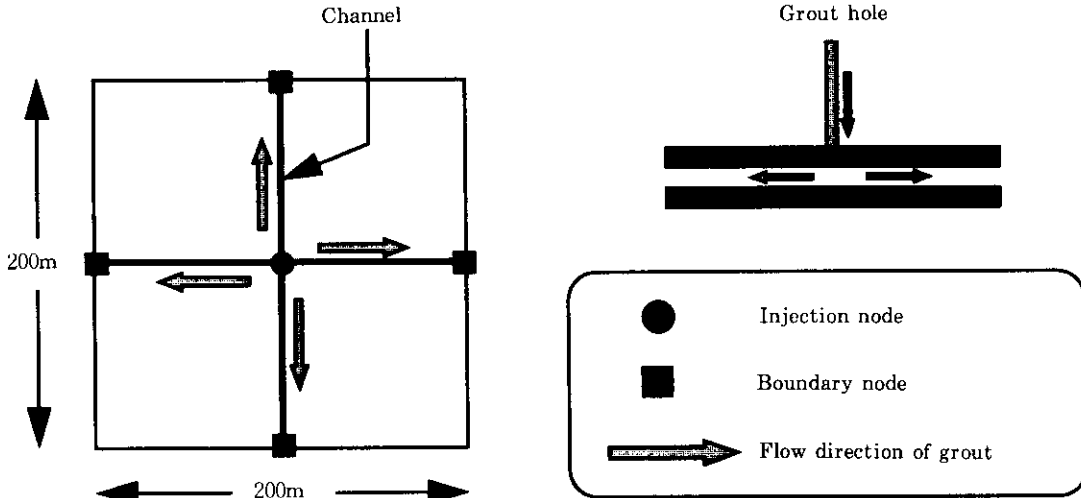


그림 7 주입재 유동해석을 위한 채널모델

표 2 Bingham 주입재와 Newton 주입재와의 최대거리 유동시간비교

	주입재의 종류	최대거리 유동시간(min)
Binghamian grout	Neat cement	1037.3
	Cement - Bentonite	939.9
	Cement - Sodium silicate	1017.5
Newtonian grout	Epoxy	67.7
	Polyurethane	179.9
	Sodium silicate	289.1

4.3 단일절리면에서의 주입재 채널유동

다양한 간극과 굴곡을 가진 절리면을 따라 주입재가 유동할 때 간극의 크기가 작아서 주입재 입자가 통과하지 못하고 막히게 되어 더 이상의 침투가 이루어지지 않는 현상이 발생하게 되는데 이러한 현상을 blockage라고 한다. 본 실험에서는 식(4)를 사용하여 주입재의 통과여부를 결정하였다.⁽¹⁾ 단일절리면에서의 주입재유동을 분석하기 위해서는 간극분포 발생

과정이 필요하며 간극분포 발생장치와 주입재 유동해석 모델과의 연관성을 찾는 작업이 필요하다. 본 연구에서 사용한 간극분포 발생장치는 유한차분법(FDM)으로 간극과 수두를 계산하므로 다음과 같이 모델을 설정하였다. 가로 50cm, 세로 50cm의 영역을 가로 1cm, 세로 1cm의 크기를 갖는 2500개의 정방영역으로 나누어 좌측경계에 10cm의 수두를 주고 우측경계에 0cm의 수두를 주며 상부경계와 하부경계

는 흐름을 차단하여 수두분포를 계산한다. 간극분포 발생을 위하여 사용된 변이함수는 구형상관함수이며 상관길이는 5cm로 하였고 간극의 평균과 표준편차는 각각 $120\mu\text{m}$ 와 $20\mu\text{m}$ 로 하였다. 발생한 간극값과 수두값은 각 정방영역에 할당된다.

앞서 설정된 주입가능성기준과 발생한 간극분포 및 수두를 사용하여 주입재 유동해석을 실시하기 위해서 다음과 같은 network 모델을 사용하였다. 사각관의 폭은 $500\mu\text{m}$, 주입재의 밀도는 $1600\text{kg}/\text{m}^3$, 물의 밀도는 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 주입압은 50kPa , D_{95} 는 $34\mu\text{m}$ 로 하였다. 주입은 모델의 중앙부에서 이루어지는 것으로 하였다. 전체 절점수는 2597개이고 요소수는 4900개이다. 각 절점에 수두값이 할당되며 각 요소에 간극값이 할당된다.

이와 같이 FDM 모델에서 수두값을 갖는 절점의 위치와 숫자가 network 모델에서 수두값을 갖는 절점의 위치, 숫자와 틀리며, FDM 모델에서는 정방영역 전체가 같은 간극을 갖게 되지만 network 모델에서는 절점과 절점 사이에 위치한 요소에서만 간극이 할당된다. 따라서 FDM 모델에서 얻어진 결과를 network 모

델에 곧바로 사용할 수 없기 때문에 2500개의 수두값을 2597개의 절점에 할당해야하고 2500개의 간극값을 4900개의 요소에 할당해야 한다.¹¹⁾ 할당과정중에 발생하는 간극값의 변화를 보기 위하여 할당전과 후의 최대값과 최소값 및 평균값을 계산한 결과 최대오차 5.9%에서 일치하였다.

그림 8.(a)는 주입재가 외곽경계에 최초로 도착하는 시점까지의 유동형태를 나타낸 것으로 주입시간은 7.45 분이다. 그림 8.(a)와 (b)에서 얇은 선은 network 모델의 채널을 나타내는 것이고 굵고 진한 선이 주입재의 유동이 이루어진 부분을 나타내는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 주입재가 지역적으로 편중되어 있고 각각의 주입지역이 3~4개의 채널에 의하여 연결되어 있다. 실제로 절리면에 충전물이 존재하거나 주입재 입자간의 뭉침현상이 발생하게 된다면 전체적으로 주입지역이 차지하는 면적이 감소하게 될 것이다. 따라서 주입 효과가 떨어지게 되고 지하수의 유동에 의한 영향이 커지게 되므로 장기적으로 내구성의 약화를 초래할 수 있다.

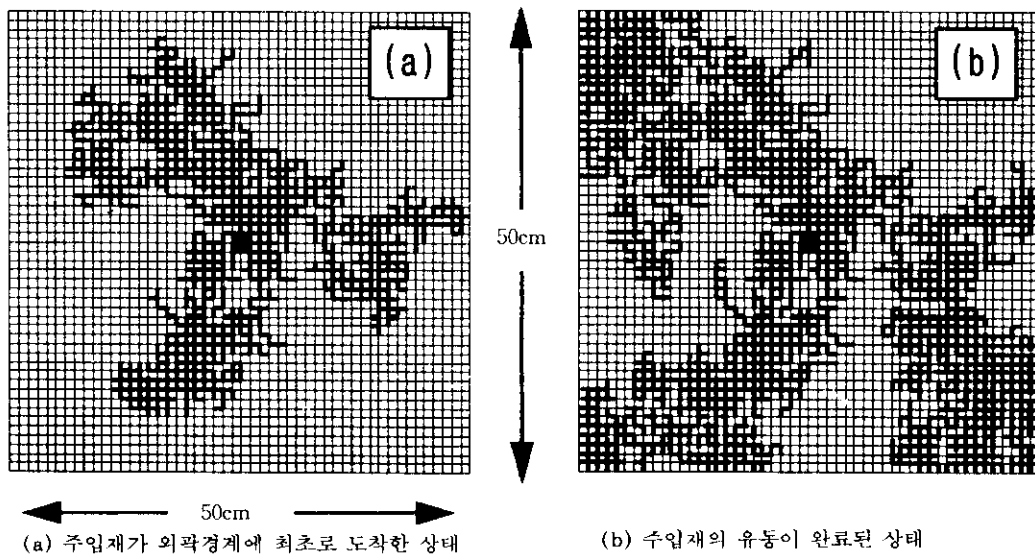


그림 8 단일절리면에서의 주입재 유동형태

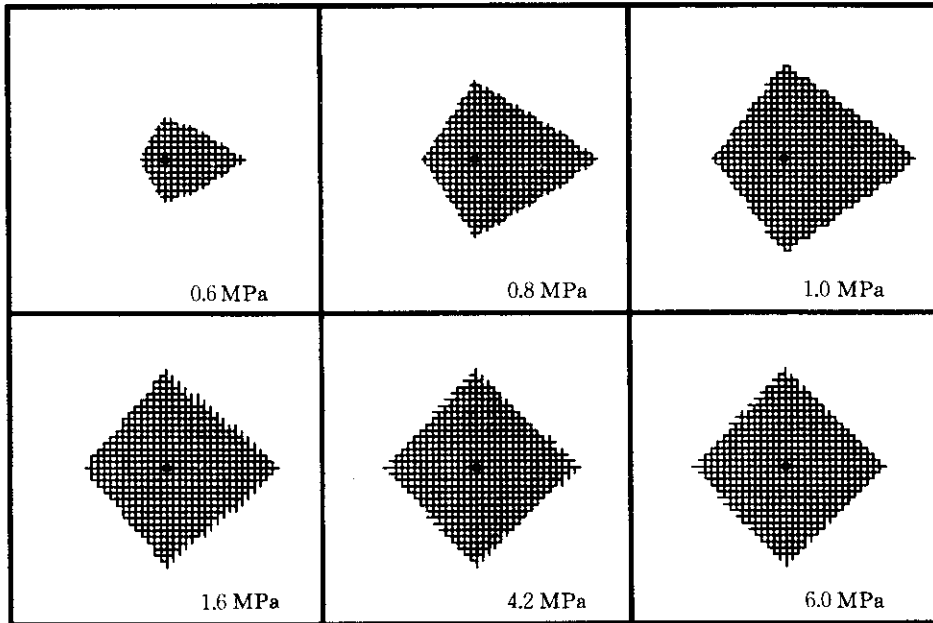


그림 9 주입압 증가에 따른 주입재 유동형태의 변화

4.4 지하수 유동과 주입재 유동과의 상호관계

현장에서 이루어지는 주입작업이 성공적으로 수행되기 위해서는 문제를 올바르게 분석하여 가장 효과적인 주입재와 주입공법을 선정해야 하며 침투된 주입재가 계획된 위치에 설계된 범위로 자리잡아야 한다. 일반적으로 주입재는 급결성 주입재를 제외하고 주입작업 완료후 겔 타입에 이르는 시간동안 지반내 여러 환경으로부터 영향을 받게 된다. 주입재가 받는 영향중의 하나가 지하수의 유동에 의한 주입재의 고결형상변화이다. 주입지역에서의 유속이 상당히 큰 경우에는 주입재가 전체적으로 한쪽 방향으로 이동하게 된다. 이러한 현상은 지하수의 유속이 커질수록 또한 주입완료시간과 주입재 고결시간과의 차이가 클수록 심하게 나타나게 되어 결국에는 주입재가 주입효과를 발휘할 수 없게 되는 상황이 벌어지게 된다. 본 연구에서는 주입지역에 작용하는 수리구배를 변화시켜 지하수의 영향을 간접적으로 나타내었으며 각각의 수리구배 단계에서 주입압을 변화시키

면서 실험하여 주입재가 수리구배와 상관없이 주입되는 상황을 관찰하여 수리구배와 주입압과의 관계를 정량적으로 도출해 보고자 하였다.

전산실험에 사용된 모델은 가로 50m, 세로 50m의 영역에 가로 1m, 세로 1m의 간격을 갖는 격자모델이다. 주입은 모델의 중앙절점에서 이루어지는 것으로 하였다. 모델의 좌측경계수두가 우측경계수두보다 크며, 두 경계간의 수두차를 20m에서 90m까지 10m씩 증가시켰다. 이것은 수리구배를 0.4에서 1.8까지 0.2씩 증가시킨 것을 의미한다. 각 수리구배 단계에서 주입압을 200kPa에서 6MPa까지 40단계로 변화시키면서 실험하였다. 사각관의 간극은 $320\mu\text{m}$, 사각관의 폭은 4mm, 주입재의 밀도는 $1600\text{kg}/\text{m}^3$, 물의 밀도는 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 로 하였다. 사용된 주입재는 시멘트현탁액(마이크로시멘트)이다.

그림 9는 수리구배가 1.8인 경우에 주입재의 유동양상을 나타낸 것이다. 그림과 같이 주입압이 커질 경우에는 수리구배의 영향을 적게 받아 주입재가 주입공을 중심으로 대칭을 이루

게 되는 것을 알 수가 있다. 그러나 주입재의 최종유동형태를 관찰하는 것만으로는 정확한 기준을 세우기가 어렵기 때문에 주입압의 상승에 따른 주입량의 변화를 그래프로 나타내어 분석하고자 하였다. 분석에 앞서 먼저 Q_t 는 전체 주입량(m^3), Q_c 은 주입공을 중심으로 오른 쪽으로 주입된 주입량(m^3), Q_l 은 주입공을 중심으로 왼쪽으로 주입된 주입량(m^3), q_r 은 $(Q_r/Q_t) \times 100(\%)$, q_l 은 $(Q_l/Q_t) \times 100(\%)$ 으로 용어를 정의하고자 한다.

그림 10은 수리구배가 1.2인 경우이다. 그래프를 보면 주입압이 커지면서 q_r 은 감소하고 q_l 은 증가하여 일정한 값으로 수렴하고 있는 것을 알 수가 있다. 이것은 주입압이 커지면서 주입재의 유동이 수리구배를 극복하고 있는 상황을 나타내고 있는 것이다. 주입재의 유동이 수리구배를 극복하는 주입압은 q_r 이 감소하여 이후의 모든 값이 50.5% 보다 작게 되는 주입압으로 결정하였다. 그 이유는 q_r 이 주입압의 증가에 따라 급격한 감소를 보이다가 50.5%에

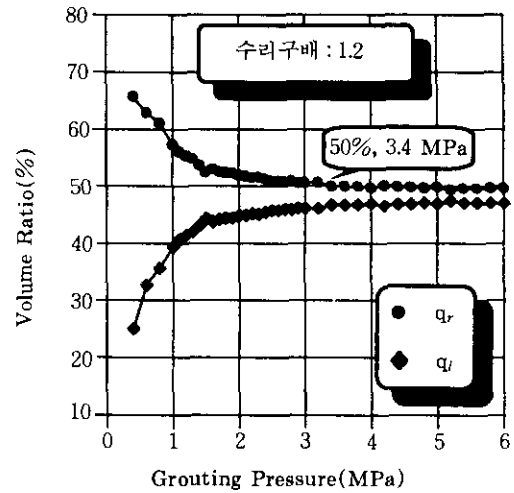


그림 10 주입압 증가에 따른 주입량의 상대적 변화

도달하게 되면 주입압이 계속해서 증가하여도 그 변화폭이 크지 않고 안정되기 때문이다. 각각의 경우에서 q_r 이 50.5% 보다 작게 되는 주입압을 정리하면 표 3과 같다.

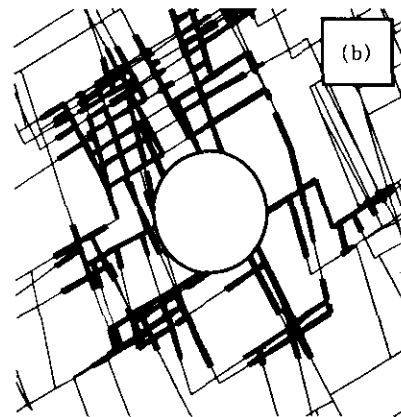
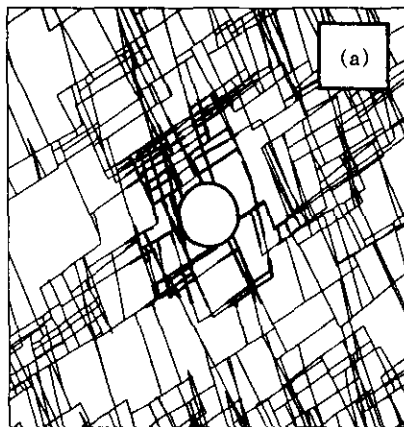


그림 11 터널주변에서의 주입재침투형태

(a) 절리암반내에서의 주입재침투형태

(b) 터널을 중심으로 확대한 모습

표 3 수리구배와 주입압, 주입수두와의 관계

수리구배	주입압(MPa)	주입수두(m)	수리구배	주입압(MPa)	주입수두(m)
0.4	1.0	101.97	1.2	3.4	346.70
0.6	1.4	142.76	1.4	3.6	367.09
0.8	2.1	214.14	1.6	4.0	407.88
1.0	2.5	254.93	1.8	4.4	448.67

각각의 관계에서 선형적합을 실시한 결과는 다음과 같다.

$$\text{주입압(MPa)} = 2.52 \times \text{수리구배} + 0.037$$

$$\text{주입수두(m)} = 256.14 \times \text{수리구배} + 3.77$$

상관계수 : 0.9833

4.5 터널주변에서의 주입재 유동

지반안정처리공법으로 사용되는 주입공법은 지수와 지반강도증가를 통하여 터널붕괴를 방지하고 굴착을 용이하게 하며 용수량을 줄이고 경비를 절감하는데 그 목적을 두고 있다. 이와 같은 중요성을 갖는 터널주변에서의 주입시공에 대한 이해를 돕고자 가로 500m, 세로 500m

크기의 단면에 포함되는 가로 200m, 세로 200m 크기의 단면에 대해 주입재 유동분석을 실시하였다. 터널의 직경은 30m, 터널의 심도는 250m, 절리의 간극은 100 μ m, 주입압은 15MPa, 사용된 주입재는 시멘트현탁액(마이크로시멘트)이며 주입재의 전단강도와 점성도는 시간에 의존한다. 절리도 발생시 사용된 자료는 표 1과 같고 절리군당 절리의 수를 600개로 늘렸다. 절리망에서 절점수는 1367개이고 요소수는 2204개이며 주입이 시작되는 지점은 터널과 절리가 만나는 절점으로 하였다.

그림 11은 주입이 완료된 후의 주입상태를 나타내고 있으며 주입시간은 2.1시간이다. 그림 11의 (b)는 그림 11의 (a)를 터널을 중심으

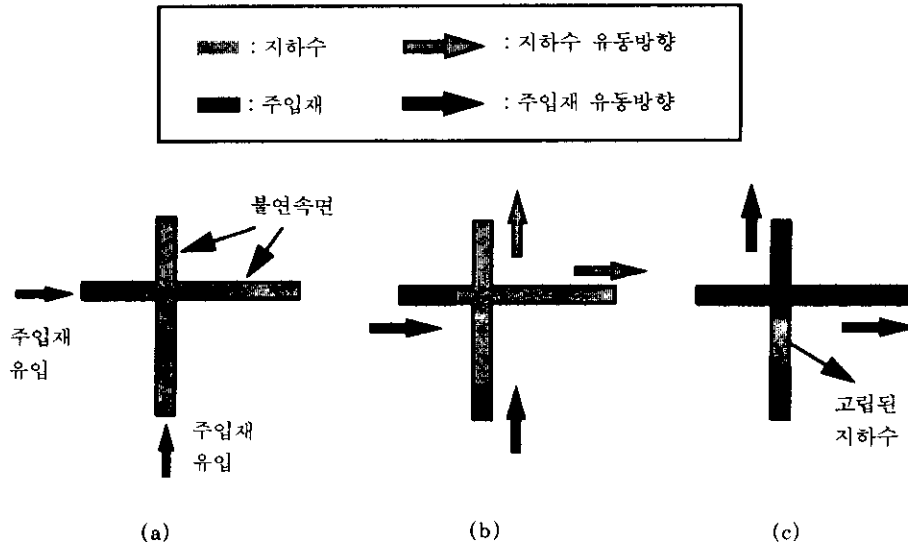


그림 12 절리암반에서의 지하수 고립에 대한 모식도

(a) 주입재 유입 (b) 주입재 유입에 따른 지하수의 유동 (c) 유로차단에 의한 지하수의 고립

로 확대한 것으로 좌측상단과 좌측하단에 주입재가 침투한 부분사이에 형성된 미침투 부분이 존재하고 있음을 알 수가 있다. 이론적으로 대상매질이 균질·등방체인 경우에는 주입재가 주입공을 중심으로 대칭을 이루면서 유동하게 되고 동시에 지하수를 밖으로 밀어내기 때문에 최종 주입범위내에 미 침투부분이 생기지 않게 된다. 하지만 비균질·이방성 매질을 대상으로 주입할 경우 그림 12의 (a)와 같이 불연속면을 따라 주입재가 유입되면 각 절리면간의 간극이나 충전정도의 차이에 의하여 (b)와 같이 불연속면내에서의 주입재 유속이 다르게 되고 결국 (c)와 같이 먼저 교차점을 지나간 주입재에 의하여 지하수가 고립되어 더이상의 주입이 이루어지지 않는 미 침투부분의 형성가능성이 존재하게 된다. 이것은 주입지역내 지하수를 주입재로 100% 치환한다는 주입공법의 기본개념에 위배되는 것으로 주입효과감소를 가져오게 된다. 앞으로 많은 연구가 필요한 부분이라고 판단된다.

5. 결 론

(1) 2차원 절리망에서 수행된 전산실험결과 주입량이 전단강도의 증가에 따라 급격히 줄어들고 있었다. 따라서 주입작업계획시 물의 배합비, 배합시간, 첨가제의 양 등은 신중하게 계획되어야 하며 현장주입작업시 주입재의 전단강도가 계획된 수치에서 벗어나지 않도록 관리해야 할 것이다.

(2) 점성도 변화특성의 차이에 의하여 Bingham 주입재와 Newton 주입재의 최대거리 유동시간이 달라지게됨을 확인하였다. 따라서 주입효과의 극대화를 위해서는 현장조건과 시공목적에 부합되는 유동특성을 가진 주입재를 선정해야 할 것이다.

(3) 통계적 간극분포 발생장치를 사용하여 단일절리면에서의 주입재 유동을 분석하였다. 전산실험결과 평판모델에서는 관찰할 수 없는 주입재의 채널유동을 확인하였으며 이것은 단

일절리면에서 지하수가 채널을 이루며 유동한다는 내용과 일치되는 결과이다. 또한 암반을 대상으로 주입작업을 수행할 경우 단일절리면에서의 주입재 유동이 지역적으로 편중되어 있어 안정성확보를 위해 요구되는 만큼의 차수성과 강도증가효과를 가져오기가 어렵다는 것을 알 수 있었다. 이러한 상황을 해결하기 위해서 미세간극에도 침투할 수 있는 침투성과 오랜 기간동안 지반내 환경에서 견딜 수 있는 내구성 및 외력에 대한 충분한 강도를 지닌 주입재를 사용해야 할 것이다.

(4) 주입지역에 작용하는 수리구배와 효과적인 주입작업을 위한 주입압과의 관계를 살펴보고자 수리구배와 주입압을 증가시키면서 실험하여 수리구배를 극복하는 주입압을 관찰하였다. 실험결과 안정된 주입형태를 이루는 수리구배와 주입압과의 정량적인 관계를 도출할 수 있었다.

(5) 절리암반을 대상으로 주입작업을 수행할 경우 주입재 침투범위내에 미 침투부분이 형성되어 주입효과를 감소시킬 수도 있음을 알게 되었다. 이러한 결과는 단일절리면에서의 주입재 채널유동과 함께 암반에 대한 주입공법의 신뢰성이 제고되어야 사실을 나타내고 있다.

본 연구에서 사용된 주입재 유동해석 모델이 주입재의 유동자체에 한정되어 있어 현장조건을 올바르게 반영한다고 보기에는 부족함이 있다. 그러나 지하수와 주입재간의 역학적 관계 및 현장응력과 주입압에 의한 절리간극의 변화도 함께 고려할 수 있는 해석수단이 개발되어 진다면 현장작업을 위한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 개발된 해석수단은 과학적 주입시공을 위해 많은 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 김문상(1994), 절리암반에서의 주입재 유동특성에 관한 수치해석적 연구, 한양대학교, 석사학위 논문, p.84.
2. 대우건설기술연구소(1988), 지반개량을 위한 그

- 라우팅공법에 관한 연구, p.500.
3. 손병진(1991), 유체역학, 회중당, p.919.
 4. 송명규(1993), 불연속 압반의 수리전도특성과 암석절리에서의 유체유동에 관한 수치해석적 연구, 한양대학교, 석사학위 논문, p. 66.
 5. 천병식(1987), 기초지반 개량공법, 건설 연구사, pp. 86-111.
 6. 최항길(1994), "P-T chart에 근거한 고결형상의 예측에 관한 연구", 한국지반공학회 봄 학술 발표회 논문집, pp.109~132.
 7. Arvind V. Shroff, Dhananjay L. Shah(1992), "Time-Viscosity Relationship of Newtonian and Binghamian Grouts", Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol. 1, ASCE, pp. 663-675.
 8. Arvind V. Shroff, Dhananjay L. Shah(1993), Grouting Technology in Tunnelling and Dam Construction, A. A. Balkema, Brookfield, p. 604.
 9. De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R., & Bruce, D. A.(1992), "Fundamental Observation on Cement Based Grouts (1): Traditional Materials", Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol. 1, ASCE, pp. 474-485.
 10. De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R., & Bruce, D. A.(1992), "Fundamental Observation on Cement Based Grouts (2): Microfine Cements and The Cemill Process", Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol. 1, ASCE, pp. 486-499.
 11. Joseph P. Welsh(1992), "Grouting Techniques for Excavation Support", Excavation and Support for the Urban Infrastructure, ASCE, pp. 240-261.
 12. Lars Hässler, Ulf Håkansson, & Håkan Stille(1992), "Computer simulated Flow of Grouts in Jointed Rock", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 441-446.
 13. Manfred R. Hausmann(1990), Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, Singapore, pp. 346-381.
 14. Moreno, L., Tsang, Y. W., Tsang, C. F., Hale, F. V. & Neretnieks, I.(1988), "Flow and Tracer Transport in a Single Fracture: A Stochastic Model and Its Relation to Some Field Observation", Water Resources Research, Vol. 24, No. 12, pp. 2033-2048.
 15. Nonveiller, E.(1989), Grouting Theory and Practice, Elsevier, Netherlands, pp. 35-68.
 16. Push, R.(1994), Waste Disposal in rock, Elsevier, Netherlands, p. 490.
 17. Reuben H. Karol(1990), Chemical Grouting, Marcel Dekker INC., USA, pp. 23-40.
 18. Tsang, Y. W.(1984), "The Effect of Tortuosity on Fluid Flow Through a Single Fracture", Water Resources Research, Vol. 20, No. 9, pp. 1209-1215.
 19. Ulf Håkansson, Lars Hässler & Håkan Stille (1992), "Rheological Properties of Microfine Cement Grouts", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 453-458.
 20. Welsh, J. P.(1991), "Grouting", Underground Structure Design and Construction, ed. R. S. Sinha, Elsevier, Netherlands, pp. 328-350.
 21. Widmann, R.(1993), "Grouting From Experience To Theory", News Journal, Vol 1, No. 2, ISRM, pp. 73-79.
 22. Xiadong Yang, Huaiyou Zhang & Jinjie Zhang(1993), "A New Grouting Technique using Stiff Cement Pastes in Macroporous Formation", Grouting in Rock and Concrete, A. A. Balkema, Netherlands, pp. 219-223.

(접수일자 1995. 5. 19)