

절리에서의 주입재 유동특성에 관한 연구

김 문상^{*1}, 문 현구^{*2}

*1 : 선경건설(주) 지하비축팀

*2 : 한양대학교 공과대학 자원공학과 부교수

1. 서론

주입공법은 지하공간을 개발할 때 굴착면의 붕괴와 지하수의 유입으로 인한 지하 공동의 불안정성을 방지하고 지반 침하를 최소화하여 지상 구조물에 미치는 피해를 줄이는 목적에 사용되고 있다. 또한 주입공법은 설비가 간단하고 소규모이기 때문에 협소한 장소나 공간에서도 시공할 수 있고 진동 및 소음에 대한 영향이 적기 때문에 공사현장에서 요긴하게 사용되는 공법이다.⁽¹⁾ 이러한 중요성에 비하여 지반굴착시 사용되는 보강공법중에서 이론적 배경과 체계적인 경험의 축적이 가장 부족한 것이 바로 주입공법이다. 그러나 근래에 들어 주입공법에 대한 관심이 높아지면서 지금까지 경험에 의존하여 이루어져 왔던 주입공법을 이론적으로 이해하고 주입효과를 예측하려는 연구가 활발해 졌다.

주입공법의 과학화를 위한 노력중의 하나가 주입재의 유동을 수학적으로 표현하고 전산실험을 통하여 주입효과를 예측하는 것이다. 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.⁽²⁾ 또한 주입재의 물성변화에 대한 실험실 시험결과를 수식화하여 주입재 유동 이론식과 함께 사용하였다. 이를 통하여 보이지 않는 곳에서 이루어지고 있는 주입재의 유동을 가시화시키고 주입재의 물성 변화특성이 주입재의 유동에 미치는 영향을 분석하여 주입설계작업에 도움이 되고자 하였다. 또한 지하수의 유동이 주입재 유동에 미치는 영향을 주입압을 변화시키면서 관찰, 분석하여 지하수와 주입재 유동간의 정량적인 관계를 도출하였다.

2. 본론

2.1 주입재 유동해석 모델의 구성

본 연구에서 사용된 주입재 유동이론식은 1992년 Hässler가 제안한 식으로 그림 1과 같이 여러개의 사각관(채널, channel)이 연결되어 있는 network 모델에서의

유동을 다루고 있다.⁽³⁾ 각 채널이 연결되는 부분을 절점(node)으로 정의하고 절점과 절점사이를 요소(element)라고 정의한다.

주입재는 주입압과 간극수압과의 차이에 의해서 유동하게 되므로 주입압(Pa) 을 수두(m)로 치환하여 주입수두와 각 절점에서 계산된 수두와의 차이로 주입재가 유동하도록 하였다. 주입재와 절리면과의 마찰에 의한 수두손실을 고려하기 위하여 층류에서의 마찰손실에 관한 공식을 사용하였다.⁽⁴⁾ 이 식을 사각관에서의 유동에 적용하기 위해서 원관의 지름대신 수력지름(hydraulic diameter)을 사용하였으며 수력 지름은 간극값의 두배가 된다.

전산실험을 통하여 주입재의 유동을 분석할 때 반드시 고려해야할 사항은 수두 차이가 존재해도 주입재의 유동특성상 더이상의 유동이 이루어지지 않는 현상이 발생한다는 것이다. 주입재의 유동을 멈추는 기준을 세우기 위해서 식 (2.1)과 같은 최대유동거리개념을 도입하였다.^(5,6)

$$L = \frac{\Delta P \cdot b}{2 \tau} \quad (2.1)$$

여기서 L 은 주입재의 최대유동거리(m), ΔP 는 주입압과 간극수압과의 차이 (Pa), b 는 사각관의 간극(m), τ 는 주입재의 전단강도(Pa) 이다. 전산실험시 단위 시간마다 각 절점간의 주입재 유동거리를 계산한 후 유동거리값과 식 (3.2) 의 우변 값을 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(m³/s) 을 계산한다. (ii) 유량을 사각관의 면적(m²)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 절점으로의 유동을 시작하게 된다.

2.2 주입재의 물성변화와 유동특성

전산실험에 필요한 주입재의 물성은 전단강도와 점성도이며 시간에 따른 물성변화를 수식으로 나타내기 위하여 실험실 시험결과 그래프를 함수화하여 사용하였다. 그림 2는 마이크로시멘트의 전단강도와 점성도 변화곡선을⁽⁷⁾ 식 (2.2)의 함수를 사용하여 근사화시킨 것이다.

$$\tau(t) = e^{at} + A \quad \mu(t) = Be^{\beta t} \quad (2.2)$$

여기서 τ 는 주입재의 전단강도(Pa), μ 는 주입재의 점성도(Pa s), α , β , A, B 는 상수이다. 이와 같은 전단강도와 점성도의 변화에 대한 반영방안을 가지고 각각의 영향에 대한 전산실험을 수행하였다.

Lombardi(1985) 는 주입재의 전단강도가 주입재의 최대 유동거리를 결정하므로 주입재의 침투성을 증가시키기 위해서는 전단강도를 낮추는 것이 바람직하다는 실험결과를 발표한 바 있다.⁽⁸⁾ 이와 같은 전단강도와 유동거리와의 관계로부터 주입시간경과에 따른 주입량의 변화를 살펴보고자 주입압을 일정하게 유지하면서 주입재의 전단강도를 증가시켰다. 사용된 주입재는 마이크로시멘트이고 전단강도와 점성도 변화곡선은 그림 2와 같다. 전단강도의 증가는 그림 2의 전단강도값을 전체적으로 2배, 4배, 6배, 8배, 10배로 증가시키는 방법을 사용하였다. 사용된 주입압은 0.5 MPa 이고 주입재의 밀도는 1600 kg/m^3 , 물의 밀도는 1000 kg/m^3 , 절리의 간극은 $200 \mu\text{m}$ 로 하였다. 전단강도가 증가할 수록 주입량이 급격하게 감소하고 있음이 그림 3에 나타나 있다. 여기서 y 축은 각 주입량을 최대 주입량($1.01 \times 10^{-4} \text{ m}^3$)으로 나누어준 값이다. 주입량이 줄어든다는 것은 주입재의 침투거리가 짧아진다는 것을 의미한다. 따라서 계획된 범위내에 주입재를 효과적으로 침투시키기 위해서는 주입시공시 배합시간(mixing time)과 물 또는 다른 첨가제의 양을 신중하게 선택하여 주입재의 전단강도가 변화하지 않도록 해야할 것이다.

점성도의 변화가 주입재의 유동에 미치는 영향을 살펴보고자 각각 3개의 Newtonian grout 와 Binghamian grout 를 사용하였다.⁽⁹⁾ 6개의 주입재에서 얻어진 점성도 변화곡선에서 비선형 증가부분을 두개의 선형 증가부분으로 근사화시켜 점성도변화를 시간에 따른 함수로 표현하였다. 최대유동거리에 도달하기 위한 소요시간을 비교하는 전산실험결과 Binghamian grout 가 Newtonian grout 보다 최소 3.6 배에서 최대 15.3 배까지 소요시간이 큰 것으로 나타났다. 따라서 계획된 침투범위내에 신속히 주입재를 침투시킬 필요가 있을 경우에는 Newtonian grout 를 사용하는 것이 바람직하다는 사실을 확인할 수 있었다.

2.3 단일 절리에서의 주입재 유동

단일절리면에서의 주입재유동을 분석하기 위해서는 간극분포 발생과정이 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 50 cm × 세로 50 cm 의 영역을 가로 1 cm × 세로 1 cm 의 크기를 갖는 2500 개의 정방영역으로 나누어 좌측경계에 10 cm 의 수두를 주고 우측경계에 0 cm 의 수두를 주며 상부경계와 하부경계는 흐름을 차단하여 수두분포를 계산하였다. 간극분포 발생을 위하여 사용된 변이함수는 구형상관함수이며 상관길이는 5 cm 로 하였고 간극의 평균과 표준편차는 각각 $120 \mu\text{m}$ 와 $20 \mu\text{m}$ 로 하였다. 각 정방영역에서 간극값과 수두값이 계산된다. 다양한 간극과 굴곡을 가진 절리면을 따라 주입재가 유동할 때 주입재의 통과여부를

결정하기 위하여 식 (2.3)과 같은 Mitchel 의 기준을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{D_f}{D'_{95}} > 5 : \text{완전침투}, \quad \frac{D_f}{D'_{95}} < 2 : \text{침투불능}, \quad 2 < \frac{D_f}{D'_{95}} < 5 : \text{부분침투} \quad (2.3)$$

여기서 D_f 는 불연속면의 간극, D'_{95} 는 주입재의 입경누적곡선에서 95% 에 해당되는 입경이다.

발생된 간극분포 및 수두를 사용하여 주입재 유동해석을 실시하기 위해서 다음과 같은 network 모델을 사용하였다. 사각관의 폭은 500 μm , 주입재의 밀도는 1600 kg/m^3 , 물의 밀도는 1000 kg/m^3 , 주입재는 시멘트현탁액(마이크로시멘트), 주입압은 50 kPa, D'_{95} 는 34 μm 로 하였다. 주입은 모델의 중앙부에서 이루어지는 것으로 하였으며 전체 절점수는 2597 개이고 요소수는 4900 개이다. 각 절점과 요소에 FDM 모델에서 계산된 수두값과 간극값이 할당된다.

주입이 완료된 후의 주입상태는 그림 4와 같으며 주입시간은 7.45 분이다. 그림에서 볼 수 있듯이 주입재가 지역적으로 편중되어 있고 각각의 주입지역이 3 - 4 개의 채널에 의하여 연결되어 있다. 이것은 단일절리면에서 지하수가 채널을 이루며 유동한다는 내용과 일치되는 결과이다.⁽¹¹⁾ 만약에 절리면에 충전물이 존재하거나 주입재 입자간의 뭉침현상이 발생하게 된다면 전체적으로 주입지역이 차지하는 면적이 감소하게 될 것이다. 따라서 주입효과가 떨어지게 되고 지하수의 유동에 의한 영향이 커지게 되므로 장기적으로 내구성의 약화를 초래할 수 있다.

2.4 지하수 유동과 주입재 유동과의 상호관계

일반적으로 주입재는 지반내 여러 환경으로부터 영향을 받게 되는데 그중 하나가 지하수의 유동에 의한 주입재의 고결형상변화이다. 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 변화시키면서 실험하여 수리구배와 주입압과의 관계를 정량적으로 도출해 보고자 하였다.

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

주입압의 상승에 따른 주입량의 변화를 나타내는 것이 그림 5이고 수리구배가 1.2 인 경우이다. 분석에 앞서 먼저 Q_t 는 전체 주입량(m^3), Q_r 은 주입공을 중심으로 오른쪽으로 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 는 $(Q_l / Q_t) \times 100$ (%) 으로 용어를 정의하고자 한다. 그래프를 보면 주입압이 커지면서 Q_r 은 감소하고 Q_l 은 증가하여 일정한 값으로 수렴하고 있는 것을 알 수가 있는데 이것은 주입압이 커지면서 주입재의 유동이 수리구배를 극복하고 있는 상황을 나타내고 있는 것이다. 주입재의 유동이 수리구배를 극복하는 주입압은 Q_r 이 감소하여 이 후의 모든 값이 50.5% 보다 작게 되는 주입압으로 결정하였다. 그 이유는 Q_r 이 주입압의 증가에 따라 급격한 감소를 보이다가 50.5% 에 도달하게 되면 주입압이 계속해서 증가하여도 그 변화폭이 크지 않고 안정되기 때문이다. 각각의 수리구배단계에서 Q_r 이 50.5% 보다 작게 되는 주입압을 정리하여 선형적합(linear fitting) 을 실시한 결과는 다음의 관계를 얻을 수 있었다.

$$\begin{aligned} \text{주입압(MPa)} &= 2.52 \times \text{수리구배} + 0.037 \\ \text{주입수두(m)} &= 256.14 \times \text{수리구배} + 3.77 \\ \text{상관계수} &: 0.9833 \end{aligned}$$

3. 결론

(1) 전단강도의 증가에 따라 주입재의 침투성이 급격히 줄어들고 있음을 확인하였다. 따라서 주입작업계획시 물의 배합비, 배합시간, 첨가제의 양 등은 신중하게 계획되어야 하며 현장작업시 주입재의 전단강도가 계획된 수치에서 벗어나지 않도록 관리해야 할 것이다.

(2) 점성도 변화특성의 차이에 의하여 Binghamian grout 와 Newtonian grout 의 최대거리 유동시간이 달라지고 있었다. 따라서 현장조건과 시공목적에 부합되는 유동특성을 가진 주입재를 선정하여 주입효과의 극대화를 추구해야할 것이다.

(3) 통계적 간극분포 발생장치를 사용하여 단일절리면에서의 주입재 유동을 분석한 결과 평판모델에서는 관찰할 수 없는 주입재의 채널유동을 확인하였다. 주입재의 유동이 지역적으로 편중되어 있어 압반을 대상으로 주입작업을 수행할 경우 요구되는 만큼의 차수성과 강도증가효과가 있는지에 대해 신중히 검토해 보아야할 것으로 판단된다. 또한 이러한 상황을 극복하기 위해서는 미세간극에도 침투할 수 있는 침투성과 오랜 기간동안 지반내 환경에서 견딜 수 있는 내구성 및 외력에 대한 충분한 강도를 지닌 주입재를 사용해야할 것이다.

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

참 고 문 헌

1. 천 병식(1987), 기초지반 개량공법, 건설 연구사, pp. 86 - 111.
2. 송 명규(1993), 불연속 암반의 수리전도특성과 암석절리에서의 유체유동에 관한 수치해석적 연구, 석사학위 논문, 한양대학교, 66p.
3. 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.
4. 손 병진 (1991) 유체역학, 회중당, p. 919.
5. 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.
6. Xiadong Yang, Huaiyou Zhang & Jinjie Zhang(1993), "A new grouting technique using stiff cement pastes in macroporous formation", EUROCK '93, Vol. 1, A. A. Balkema, Netherlands, pp. 219 - 223.
7. Widmann, R.(1993), "Grouting From Experience To Theory", News Journal, Vol. 1, No. 2, ISRM, pp. 73 - 79.
8. 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.
9. Arvind V. Shroff, Dhananjay L. Shah(1993), Grouting Technology in Tunnelling and Dam Construction, A. A. Balkema, Brookfield, p. 604.
10. Welsh, J. P.(1991), Underground Structure Design and Construction, ed. R. S. Sinha, Elsevier, Netherlands, pp. 328 - 350.
11. Tsang, Y. W., Tsang, C. F.(1987), "Channel Model of Flow Through Fractured Media", Water Resources Research, Vol. 23, No. 3, pp. 467 - 479.

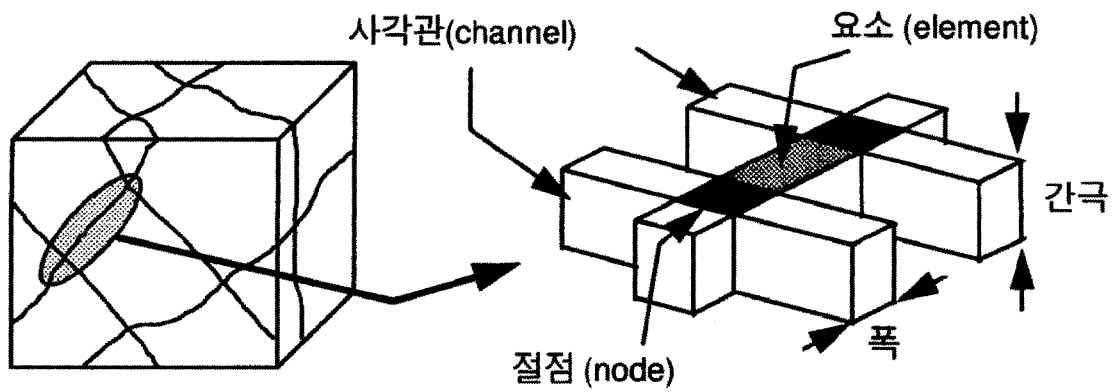


그림 1. 주입재 유동해석을 위한 network 모델

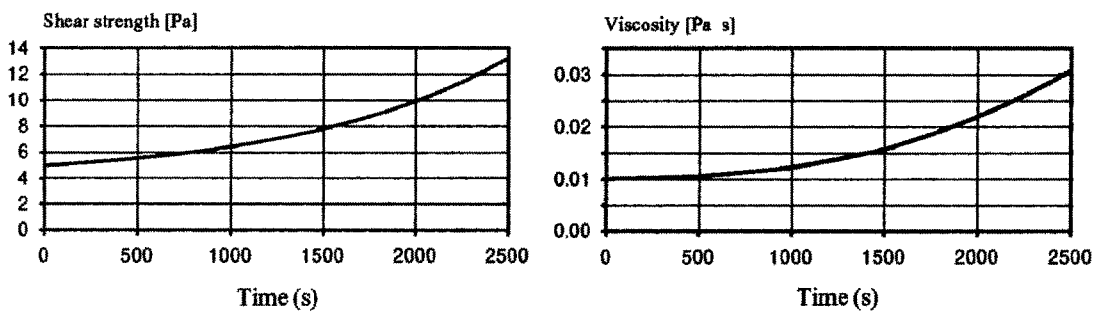


그림 2. 마이크로 시멘트의 전단강도와 점성도 변화곡선

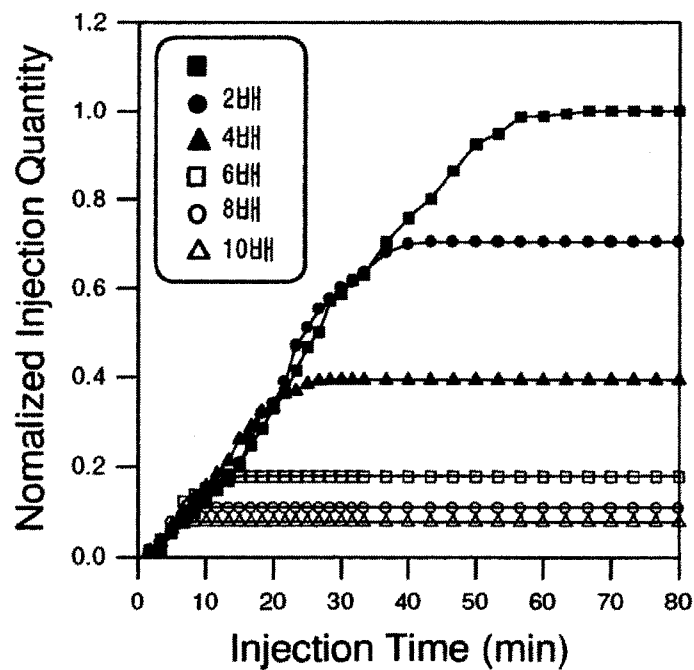


그림 3. 전단강도증가에 따른 주입량의 변화

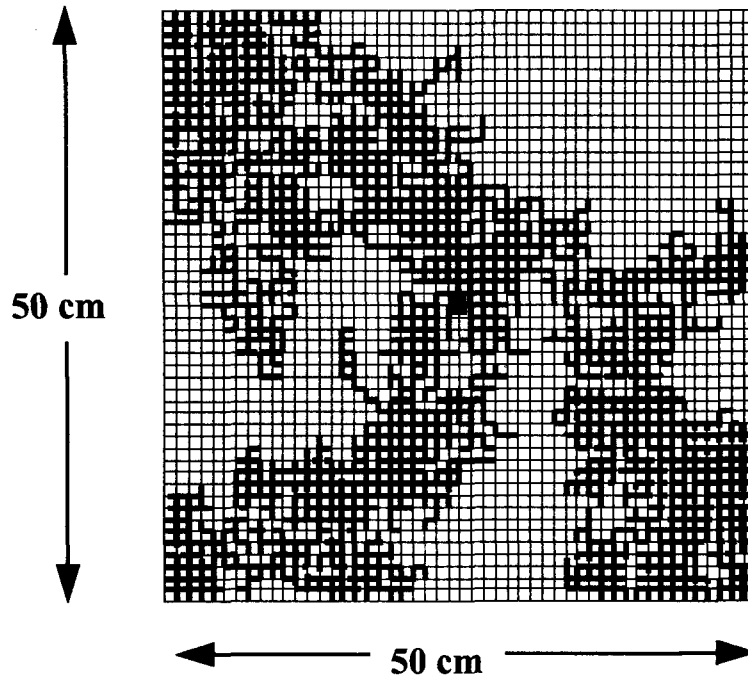


그림 4. 단일절리면에서의 주입재 유동형태

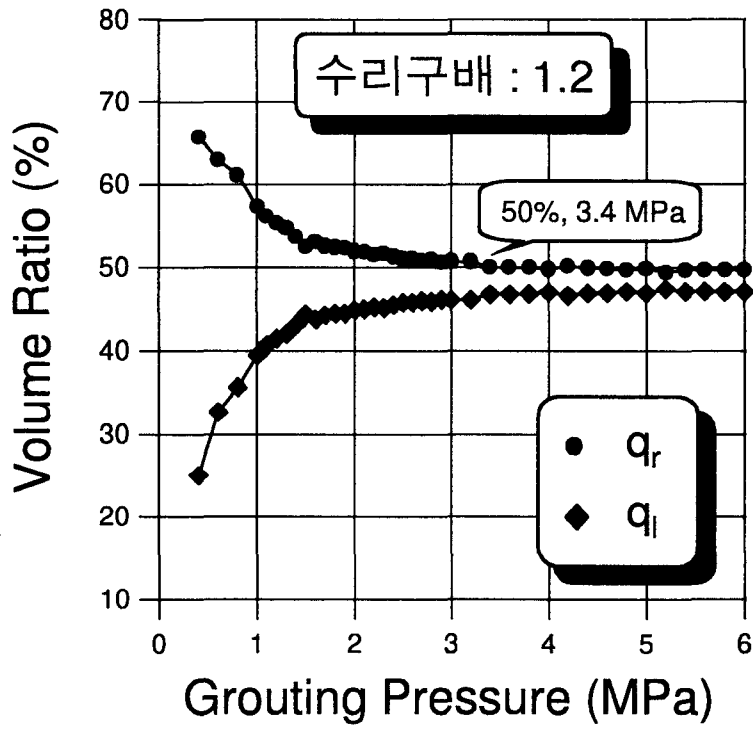


그림 5. 주입압의 증가에 따른 주입량의 상대적 변화