

# 약액주입 시 형성된 고결체의 수치해석 기법 연구

## A Study on Numerical Technique of the Hardened Grout Formed by Grouting

이 중 휘<sup>1</sup> Lee, Jong-Hwi

천 병 식<sup>2</sup> Chun, Byung-Sik

### Abstract

Recently, pressure grouting is widely being used in construction site for strength improvement of ground and water proof, reinforcement and so on. It is necessarily required to estimate an appropriate injection pressure and injection time for economical and reasonable construction in the site through the size and shape of the hardened grout measured according to ground condition. However, sampling for the hardened grout is time-consuming and needs high cost on preliminary test in the site. The system which could predict the size and shape of the hardened grout does not exist until now. Thus, numerical method based on VOF method and porous model was used for the calibration chamber injection test with injection pressure (50 kPa, 100 kPa, 150 kPa) in this study. The results indicate that the numerical technique based on VOF method and porous model among CFD analysis is expected to be a basic study for the prediction of the behavior and solidification of pressure grouting.

### 요 지

최근 가압 그라우팅 형식의 약액주입공법이 지반의 지반개량, 차수, 강도 증대 등의 목적으로 널리 쓰이고 있다. 이에 지반조건에 따른 고결체의 크기 및 형상을 측정하여 적정 주입압 및 주입시간을 정하는 것은 경제적이고 합리적인 시공을 위해 필수적이다. 그러나, 현장에서 시험시공을 통한 고결체 채취는 시간과 비용이 많이 소모되며, 그라우팅 공법을 적용한 지반에 고결체의 크기와 형상을 예측한 시스템은 현재까지 없다. 따라서, 본 연구에서는 물유리계 약액을 사용하여 주입압(50kPa, 100kPa, 150kPa)에 따른 실내모형주입시험을 실시하고 이를 전산유체역학(CFD)의 porous media 모델과 VOF(Volume of Fluid) 기법을 이용한 수치해석을 실시하여 비교 분석하였다. 수치해석 결과, VOF 기법을 이용한 주입모사는 지중 속에 주입된 가압 그라우팅의 거동 및 고결 양상을 예측할 수 있는 기초적인 수치해석적 기법이 될 것으로 판단된다.

**Keywords :** ADINA, CFD analysis, Grout bulb, Grouting, Hardened grout, Injection pressure, Volume-of-fluid

### 1. 서 론

최근 건설현장에서 현재 국내에서 실시되는 가압 그라우팅 형식의 약액주입공법들은 지중에 그라우팅 재

료를 압력 주입함으로써 주입압에 의해 그라우팅 공 주 변이 압축되고 주변지반의 공극, 균열, 절리부분에 그 라우팅 재료가 침투됨으로써 지반고결을 통해 대상지 반의 전단강도를 증가시킬 뿐 아니라 차수효과를 얻기

<sup>1</sup> 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

<sup>2</sup> 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

위해 사용되고 있다(박종호 등, 2003). 하지만 이러한 가압 그라우팅 공법은 지반의 고유한 특성에 따른 맥상주입, 침투주입이 부분별하게 일어나 시공목적에 부합되지 않는 시공이 되는 경우도 허다하다. 이를 위해 현장 적용시, 본 시공에 앞서 시험시공을 통한 주입효과를 확인하게 되는데, 이러한 주입효과 확인은 굴착 후 고결체의 채취를 통해 강도와 형상을 확인하여 적정 주입압, 주입시간, 주입단계, 주입공의 간격, 개수 등 시공계획의 전반적인 산정을 위하여 필수적으로 행하여진다. 그러나, 이러한 시험시공을 통한 고결체 채취와 형상 확인은 확실한 주입효과를 판단내릴 수 있지만 전반적으로 불균질한 지중에서 일일이 시험시공을 실시하는 것은 비경제적이며 비효율적이다.

현재까지는 이러한 고결체의 형상을 통한 주입효과를 모니터링 할 수 있는 시스템은 아직까지 없으나 다만 최항길 등(1994)이 약액주입 시  $P \sim t$  chart로부터 기초적인 자료를 수집하여 고결형상 예측을 연구한 바가 있다. 또한 프랑스의 Soletanchue Enterprize Co.에서는 주입펌프에 센서를 부착하여 주입상태를 데이터 형식으로 받아 주입효과를 분석하는 SINNUS system이 개발되었고 국내에도 도입되어 여러 주입시공 시 적용이 되었다(천병식 등, 2000). 한편, 그라우팅 주입과 관련해서는 국내외에서 그라우팅 재료의 물성을 이용한 주입량을 산정하는 연구가 진행되었는데, 국내에서는 전기환 등(2010)이 Bingham이론을 기초로 한 암반 내 불연속면을 따라 유동하는 주입재의 유동특성을 FLUENT코드에서 Herschel-Bulkely모델과 VOF모델을 적용하여 모사하였으며, 국외에서는 Håkansson 등(1992)이 원형관 내부에 그라우트가 주입될 때 주입압에 따른 최대 주입거리를 산정한 바가 있다. 또한 El-Kelesh 등(2008)은 모형토조시험을 통한 컴팩션그라우팅의 거동과 모델링 설계 기법을 제안하였고 YANG 등(2009)은 구성방정식을 이용한 수치해석 활용 및 연약지반에서의 컴팩션그라우팅 주입압 산정에 관한 연구를 수행한 바가 있다.

따라서 본 연구에서는 물유리계 주입재를 사용하여 침투성 및 고결성시험(천병식, 2002)을 토대로 한 실내 모형토조주입시험을 주입압(50kPa, 100kPa, 150kPa)에 따라 실시하였으며, 주입재의 흐름에 의한 지반 속 거동 및 고결성 형태를 파악하기 위해 실내모형토조를 모델링하고 지반과 주입재의 물성치를 이용하여 전산유체역학(CFD ; Computational Fluid Dynamics)의 porous media모델과 VOF(Volume of Fluid)방법을 응용한 수치

해석을 실시하여 비교·분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 주입재의 지중 속 거동

지중 속에 주입된 주입재를 수치적으로 모사하는 것은 지반주입 시 지반의 종류, 이질 지층, 지하수, 주입량, 주입압, 주입공의 유효경, gel-time 등 여러 요소가 관계하기 때문에 실질적으로 그 거동을 모사하는 것은 쉬운 일이 아니다(천병식, 1998). 하지만 주입재를 하나의 유동성을 가지는 유체로써 간주했을 때, 고결범위를 구하는 방법으로서 Maag(1983), Karol(1960)의 두 식이 많이 쓰이고 있으며 다음과 같은 한정적 조건을 필요로 한다.

- (i) 지반은 완전균질이어야 한다. 따라서 수직, 수평 투수계수가 다를 경우는 적용될 수 없다.
- (ii) 지반의 흐름상태는 층류이어야 한다. 따라서 Darcy의 법칙에 따라야 한다.
- (iii) 주입재의 점성은 gel-time까지 일정하여야 한다.

이들 조건은 점성토에서는 거의 적용이 어려우며, 일정한 조도를 가진 사질토 지반에서 적용이 가능하다. 특히, 三木五三郎(1978)는 균등침투의 경우 주입재가 지중을 흐르는 속도  $v_g$ (cm/sec)는 일반적으로 층류의 경우에 대한 Darcy의 법칙에 따르는 것으로 보고 다음 식(1)과 같이 나타낸 바가 있다.

$$v_g = k \cdot \frac{\gamma_g / \gamma_w}{\mu_g / \mu_w} i \quad (1)$$

- 여기서,  $k$  : 흙의 투수계수(cm/sec)
- $\gamma_g, \gamma_w$  : 주입재 및 물의 단위중량( $g/cm^3$ )
- $\mu_g, \mu_w$  : 주입재 및 물의 점성계수( $g/cm \cdot sec$ )
- $i$  : 주입압력을 동수구배로 표시한 값

또한 Maag(1983)의 식을 응용하여 반경  $\gamma_0$ 의 주입관 선단으로부터 반경 R의 범위까지 약액이 3차원적으로 방사상으로 침투하는 데 걸리는 시간을  $t$ 라하고 평균적인 주입압력수두를  $h$ 로 하면 다음 식(2)를 얻을 수 있다.

$$t = \frac{\mu_g / \mu_w}{\gamma_g / \gamma_w} \cdot \frac{n}{kh} \cdot \frac{R^3 - \gamma_0^3}{3\gamma_0} \quad (2)$$

여기서,  $n$  : 흠의 공극율  
 $\gamma_0$  : 주입관의 반경(cm)  
 $R$  : 주입유효반경(cm)

한편, Karol(1960)은 용액형 약액의 침투거리를 반경  $R$ (cm)로서 다음과 같이 나타내었다.

$$R = 2\pi^3 \sqrt{\frac{Qt}{\mu n}} \quad (3)$$

여기서,  $Q$  : 단위주입량( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
 $t$  : 주입소요시간(sec)  
 $\mu$  : 주입재에 대한 물의 비점도  
 $n$  : 흠의 공극율

특히, 현탁액형 주입재(시멘트계, 점토계)는 비뉴턴 점성(non-Newtonian viscosity)의 성질을 가지며, 다음 식 (4)와 같이 주입재가 유동하기 위해서는 항복치  $f_0$  이상의 응력을 필요로 한다. 이와 달리 물유리계와 같은 용액형 주입재는 뉴턴 점성(Newtonian viscosity)의 특성을 가지며, 식 (5)와 같이 포아즈이유의 법칙을 따른다. 즉, 현탁액형과 달리 항복치가 없기 때문에 침투가 용이하다. 또한 유체를 유동시키기 위하여 어떠한 응력을 가하게 되면 점성이 낮은 것일수록 급속히 유동하게 된다(천병식, 1998).

$$F = f_0 + \mu(dV/dX) \quad (4)$$

$$F = \mu \cdot (dV/dX) \quad (5)$$

여기서,  $\mu$ 는 유체의 점성계수이다.

## 2.2 Porous media model과 VOF method

CFD분석은 압축·비압축 유동, 정상·비정상 상태 유동, 층류·난류 유동을 포함한 전반적인 유체 유동 해석을 위한 유한 요소 해석으로써 유체와 유체 사이의 자유 표면, 유체와 구조물 사이의 동적 경계면 해석을 위해 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) 공식이 사용된다. ALE는 물체의 변형관계를 접근을 쉽게 유도한 Lagrangian 방법과 물체의 변형을 따라 물체의 변형 경로의 접근을 쉽게 유도한 Eulerian 방법, 각각의 장점을 최대화하여 유한 요소해석을 위한 제안된 방법이다(박대효 등, 2003). ALE의 기본적인 이론 접근식은 박대효 등(2003)의 논문에서 참고 가능하므로 본 논문에서는 생략한다.

유체가 다공질 매체(porous media) 공극 사이로 흐르는 지배방정식은 연속방정식, 에너지방정식 및 Darcy의 법칙이 사용된다. ADINA에서는 다공질 매체를 통과하는 흐름을 관장하는 연속 및 에너지방정식의 수치 방법은 비압축성 유체의 흐름분석과 동일하다고 제시하고 있다. 다공질 매체는 그림 1과 같이 유체와 고체 영역으로 나누어지며 다공질 매체를 흐르는 유체를 정의하기 위하여 미세원형홀 모델로 정의하고 있다.

미세원형홀을 통과하는 점성유체는 일정한 압력강하를 받으며, 흐름을 지배하는 방정식은 다음 식 (6)과 같이 모멘텀방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left( y \frac{\partial v_m}{\partial y} \right) \quad (6)$$

여기서,  $v_m$ 은 흠을 흐르는 유체의 속도이다. 이러한 속도는 항복응력을 갖지 않는 뉴턴 점성(Newtonian viscosity)의 특성을 반영함으로서 다음 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$v_m = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y^2 - R^2) \quad (7)$$

이를 이용해 흠의 단면으로부터 적분을 하면 다음 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\hat{v} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R v_m y dy d\varphi = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

또한 이러한 흠들이 다공질 매체에 일부 분포한다면 공극률  $n$ 을 가지며, 다공질 매체의 평균속도는 식 (9)와 같이 정리할 수 있다.

$$v = n\hat{v} = -\frac{nR^2}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (9)$$

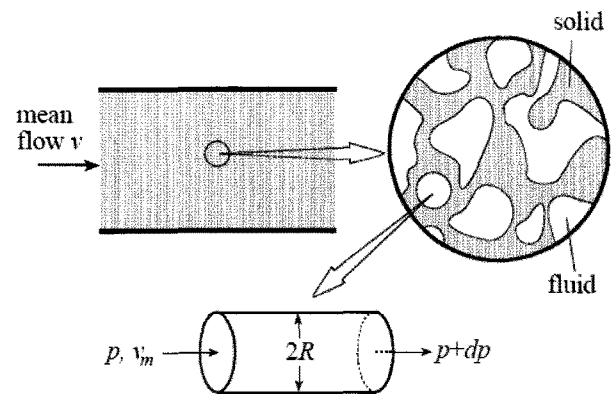


그림 1. Illustration of porous media models(ADINA R&D Inc., 2009)

여기서,  $nR^2/8$ 은 다공질 매체의 투수율이며,  $L^2$ 의 차원을 갖는다.

따라서, 본 논문에서 수행한 바와 같이 이러한 투수성과 흐름속도 방정식을 적용하고 열전달 모델을 제외한다면, 다공질 매체의 흐름을 표현하는 지배방정식은 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_F \rho \|v\| v + \mu K^{-1} \cdot v = -\nabla p + F^B \quad (10)$$

여기서,  $K = k_{ij} E_i E_j$ 는 투수율텐서이고  $\beta_F$ ,  $F^B$ 는 각각 관성인자, 물체력(body force)이다.

한편, 경계면 추적 해석(volume tracking) 방법은 고정 격자계에서 큰 변형을 수반하는 자유 표면을 다룰 수 있는 수치 기법으로 알려져 있으며, MAC(Markus and Cell)방법(Nakayama 등, 1996)과 VOF방법이 널리 쓰이고 있다. 특히, VOF(Volume of Fluid) 방법은 유체의 체적분율을 표시하는 변수에 대한 전달 방정식을 해석함으로써 자유 표면의 위치를 추적하는 방법으로 효율성 때문에 유체역학분야에서 많이 사용되고 있다(김민수 등, 2000).

VOF 방법에서는 고정 격자계 위에서 셀(그림 2 참조) 내부의 유체 체적 분율을 계산하기 위하여 자유 표면을 추적하며(Hirt 등, 1981), 유체 체적 분율(fractional volume-of-fluid,  $f$ )은 유체가 점유하고 있는 지점에서는 1, 그 외에서는 0이 되도록 정의되며, 자유 표면이 이동하면 각 셀의 유체 체적 분율이 갱신되는데, 수치적인 관점에서 모든 셀은  $f$ 값에 따라서 세 가지 범주로 분류된다. VOF 방법에서는 식 (11)를 풀어서 셀이 유체로 완전히 채워져 있으면 그 셀의 유체 체적 분율은 1이 되고( $f=1$ ), 주 유동영역으로 간주된다. 한편 셀이 비어 있으면 ( $f=0$ ) 그 셀은 유동 영역의 밖에 있고,  $f$ 값이 0과 1 사이에 있을 때( $0 < f < 1$ )는 그 셀들은 자유 표면 위에 있다고 간주된다(Larmaei 등, 2010).

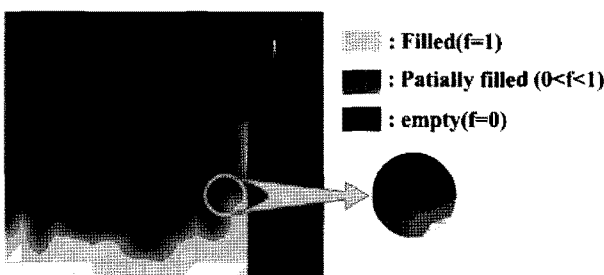


그림 2. VOF method

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \cdot \nabla f = 0 \quad (11)$$

### 3. 실내모형주입시험

실내모형주입시험은 기존의 침투성 및 고결성시험(천병식, 2002)과 동일한 모형토조 및 주입관을 사용하여 수행하였으며, VOF방법을 이용한 주입모사에 앞서 비교를 위하여 수행되었다.

#### 3.1 실내모형토조

본 연구에서는 사진 1과 같이 토사의 제거와 고결체의 채취가 용이하도록 원통의 반단면이 탈부착이 되도록 제작되었으며 주입관 내경은 1cm, 모형토조의 내경은 90cm, 높이는 90cm이다. 그림 3은 실내모형주입시험의 개요도이다. 약액탱크(A액, B액)는 블리딩이 발생하지 않도록 충분히 교반할 수 있는 것으로 제작되어 주입구가 막히는 현상(dry packing)을 방지하도록 하였다. 주입펌프를 이용하여 시험 시 주입압이 일정한 상태로 유지되도록 하였으며, 이를 압력계로 유지가 되는지 육안으로 확인할 수 있도록 고안되었다. 주입관은 주입홀의 크기가 시료보다 크기 때문에 홀 내부로 유입되어 주입 시 지장을 줄 수 있으므로 내부에는 망을 설치하였



사진 1. Calibration chamber

표 1. Mechanical properties of Joomunjin standard sand

Material	Min. dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Max. dry density (g/cm <sup>3</sup> )	water contents (%)	$\phi$	$c$	Cu	Cg	USCS	D <sub>r</sub> (%)
주문진 표준사	1.34	1.56	0	36°	0	1.9	1.11	SP	30.4

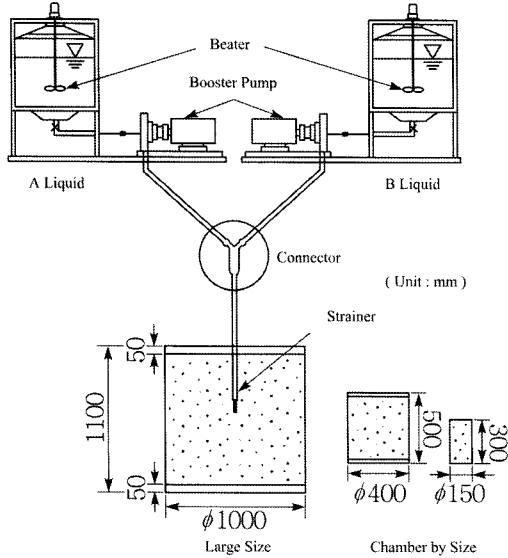


그림 3. Scheme of equipment for experiment(천병식, 2010)

다(천병식 등, 2002).

토조 모형지반은 주문진 표준사를 사용하였으며, 그 공학적 특성은 다음 표 1과 같다. 토조 내 바닥에서부터 50cm만큼 표준사를 채웠으며 수치해석 시 동일한 투수 계수를 가진 지반상태를 조성하기 위하여 정수위 투수 시험에서 공시체 제작과 유사하게 조성하였다(4.2절 참고). 수치해석 시 함수에 의한 영향을 배제하기 때문에 모형지반을 다짐 시에는 건조법으로 실시하였다. 이 때 상대밀도는 약 30.4%로 느슨한 지반으로 조성되었다.

### 3.2 주입시험

표 2는 주입재의 배합비로서 통상 물유리를 주재료 하고 무기계 시멘트를 사용한 강도발현이 목적인 SGR - 7호를 사용하였다. 또한 gel-time이 50~90초 정도 소요되는 완결타입으로서 느슨한 조립질 지반에 침투주입이 되도록 하였다. 또한, 주입관을 인발하는 시간은

표 2. Mix proportion of grout

contents	A liquid (200L)		B liquid (200L)		
	water glass (L)	water (L)	cement (kg)	retarding agent (kg)	water (L)
middle type (gel-time 50"~90")	100	100	60	24	167



사진 2. Experiment of injection at the calibration chamber

각 주입압 별로 30초로 하였으며, 고결체의 형상이 흐트러지지 않도록 수직도를 유지하면서 인발을 하였다(사진 2 참조).

각 주입압(50~150kPa)별로 실시를 하였으며, 이에 대한 산정근거는 주입 시 할렬이 되지 않도록 Kutzner(1996)가 제시한 바와 같이 다음 식 (12)에서 산정하였다.

$$P_0 = \frac{\gamma \cdot h}{m} (1 + \sin \phi) \quad (12)$$

- 여기서,  $P_0$  : 주입압
- $\gamma$  : 지반의 단위중량
- $h$  : 지표면으로부터 수직거리
- $\phi$  : 지반의 마찰각
- $1/m$  : 포아송비

### 4. 수치해석

본 연구에서는 유한요소 범용해석 프로그램인 ADINA Ver. 8.6을 사용하였으며, 모형토조 내 주입을 모사하기 위하여 CFD분석을 실시하였다. 앞서 언급한 바와 마찬

가지로 물유리계 주입재가 완결상태로써 일정한 공극률과 투수계수를 가진 사질토를 대상으로한 porous media 모델을 이용하여 유체의 흐름에 의한 침투주입이 되도록 모델링 하였다(2.2절 참조). 또한 기본적으로 중력가속도  $9.8m/s^2$ 을 적용하여 뉴턴의 점성(Newtonian viscosity)법칙에 따른 유체가 수평방향으로 무분별하게 이동하는 것을 방지하였다.

#### 4.1 모형토조 및 주입관 모델링

모형토조와 주입관은 그림 4와 같이 앞서 실시한 실내모형주입시험과 동일하게 원통형의 실제 모형토조와 같은 크기로 모델링하였다. 또한 모형토조의 유한요소망은 3D-fluid 타입으로서 해석결과값의 정밀도를 높이기 위하여 중심축으로 가까워질수록 메쉬의 간격이 좁아지는 형태를 취하였다. 한편, 해석의 용이성을 위하여 전체를 표준사(porous media)로 채우되, 해석수행은 time function을 이용하여 실제 주입시험과 마찬가지로 바닥에서부터 높이 50cm까지 인발이 되면서 주입이 되도록 하였다. 주입관의 경우, 실제 주입관과 같은 주입개수(16개)와 주입간격을 모사하였으며 메쉬의 형상과 개수

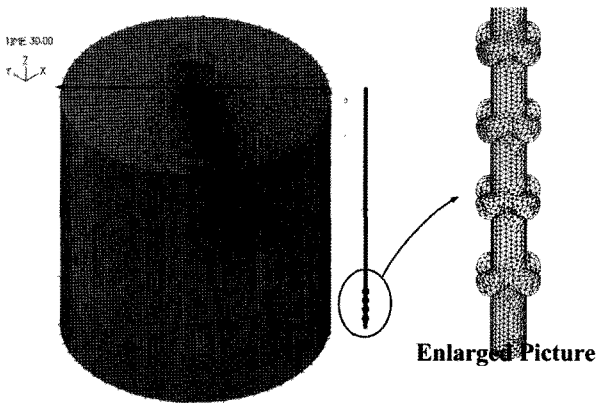


그림 4. Finite element mesh

표 3. Parameters of Joomunjin standard sand used in ADINA

material		condition	density (kg/cm <sup>3</sup> )	permeability (cm/s)	porosity	viscosity (kg/m·s)	fluid bulk
주문진 표준사	porous media	fluid	0.00129	$1.201 \times 10^{-2}$	0.46	300	-
		soild	1340				

표 4. Parameters of SGR used in ADINA

material		vicosity (kg/m·s)	density (kg/cm <sup>3</sup> )	coef. of volume	fluid bulk
SGR(완결)	constant	0.0024	1500	0	-

가 해석수행에 있어서 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 판단되어 3D-Fluid 타입의 3절점 요소를 사용하였다.

#### 4.2 모형지반 및 주입재의 입력 물성치

모형지반에 대한 물성치로 모래를 다공성 매체로 간주, porous media로 설정하였다. 조건에 따라 유체(fluid) 상태일 때와 고체(solid)상태일 때로 나누어 물성치를 입력을 하도록 되어있으며, 그 내용은 다음 표 3과 같다. 공극률은 느슨한 상태의 상대밀도를 구하여 산정을 하였으며, 투수계수는 정수위 투수시험(KS F 2322)을 통하여 산정한 값을 입력하였다. 이 때 정수위 투수시험은 KS F 2312(흙의 다짐 시험 방법)에서 제시하는 바와 같이 A방법(래머중량 2.5kgf, 몰드의 내경 100mm, 다짐층수 3, 층당 다짐횟수 25)으로 공시체를 제작하여 투수계수를 산정하였다. 특히, 유체상태일 때 밀도는 유체가 고체내부에 공극이라 가정하고 일반적인 1기압에서 0°C 일 때 공기의 밀도를 입력하였다. 점성계수는 자연상태의 토사가 아닌 고체상태일 때 점성계수로서 깰화의 진행이 거의 완료되었을 때 상태를 간주하여 가장 유사한 대상의 값을 입력하였다.

한편, 주입재료는 기본적인 유체(constant)로 간주하였으며, 그 물성은 표 4과 같다. 주입재의 밀도와 점성계수는 각각 비커법, 점도계로 산정한 값을 입력하였다.

#### 4.3 경계조건

본 수치해석에서는 뉴턴의 점성법칙을 따르는 주입재가 porous media 모델 공극으로 플로우가 되는 현상을 모사하였으므로 고결화에 대한 판정이 용이하지 않다. 따라서, 수치해석 시 주입량은 무시하고 인발조건에서 모형토조주입시험과 조건을 최대한 동일하게 유지하려 노력하였다. 인발조건(rigid motion ; +Z axis)은 높

이 50cm가 인발될 때, 30초가 소요되도록 적용하였으며 이는 토조 내부 심벽과 주입관 외벽에 wall조건을 부여 함으로써 경계층이 형성되어 인발이 되도록 하였다. 한편 하중조건(주입압)은 모형토조주입시험과 마찬가지로 50kPa, 100kPa, 150kPa으로써 주입관 최상부 단면에 normal traction(-Z axis)으로 적용을 하였다.

## 5. 결과분석 및 고찰

### 5.1 실내모형주입시험 결과

SGR의 경우 재령 3일에서 소정의 강도를 확보할 수 있었으므로 모형토조의 반단면을 해체하여 고결체를 채취하였다. 각 주입압에 따른 결과를 육안으로 확인할 수 있었는데, 사진 3(a), (b), (c)와 같이 주입압을 높일수록 직경이 커짐을 확인할 수 있었다. 특히 50kPa의 경우, 낮은 주입압으로 인해 주입재료가 주입관으로부터 거리에 따라 균등하게 침투되지 못하고 일부 구간에 집중적으로 주입되는 형태를 보였다. 이는 주입압이 낮을 경우 투수계수가 낮은 쪽으로 주입재료가 유입되기에 주입압이 모자라므로 모형토조 내에 형성된 지반 내에

서 주입재의 거동이 주로 투수계수가 높은 쪽에 치우치고 모형지반의 상대밀도가 균등하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 100kPa의 경우에는 원기둥의 형태로서 비교적 균등한 주입이 이루어진 것으로 나타났으며, 150kPa의 경우에는 100kPa보다 상, 하부의 직경이 상대적으로 커졌으나 일부분이 채취 시 부스러져 전체적으로 균등하지 못한 주입이 이루어진 것으로 나타났다.

특히, 지반조성 시 다짐부족 및 상재압의 부재로 인해 박종호 등(2003)에서 제시한 주입압보다 작음에도 불구하고 지반의 할렬파괴가 자주 일어나 주입이 용이하지 않았다. 이에 여러 시도를 거치면서 모형시험과 수치해석 시 동일한 주입시간인 30초 동안 바닥에서부터 흐트러짐 없이 수직도를 유지하여 인발을 하면서 주입을 시도했다.

### 5.2 수치해석 결과

그림 5는 인발시간에 따른 주입모사 전경으로서 판상의 x방향으로 횡단면을 나타내었다. 주입관 상부에 일정한 압이 각 주입구로 전달이 되면서 해당 점성을 갖는 유체가 일정한 공극률과 투수계수를 가지는 porous media

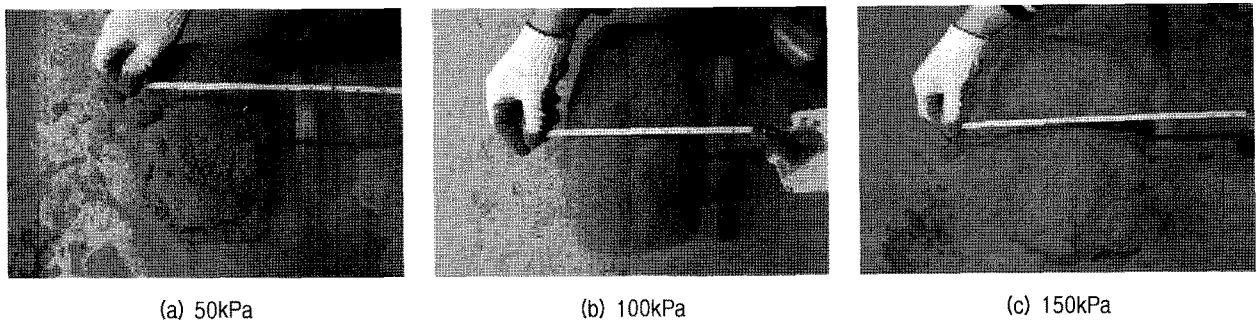


사진 3. The shape of the hardened grout with injection pressure

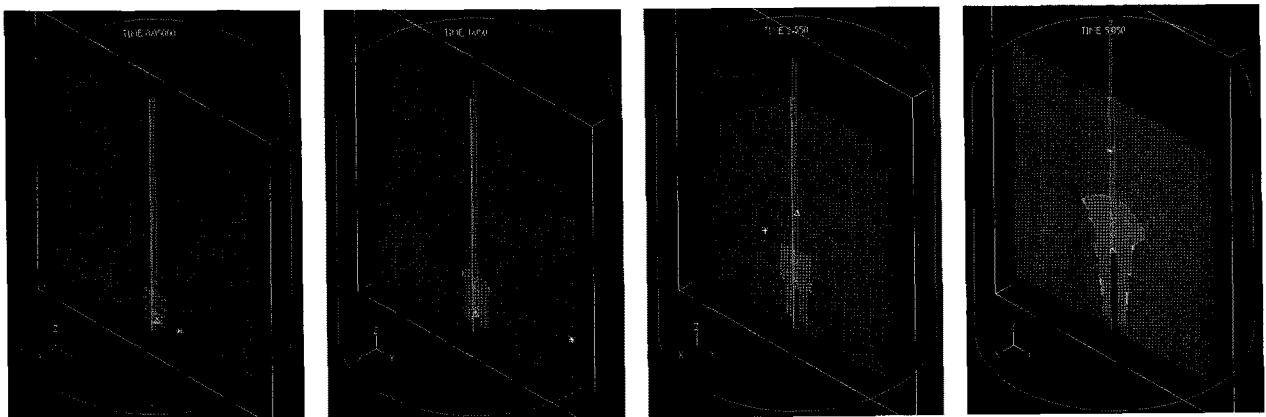
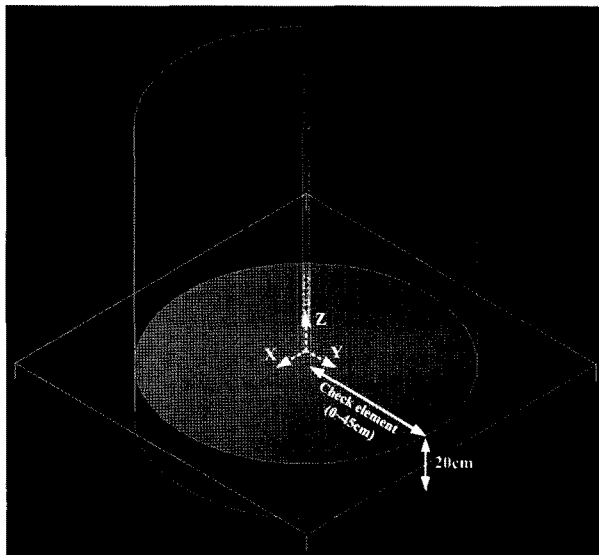


그림 5. The diffusion of material with time step

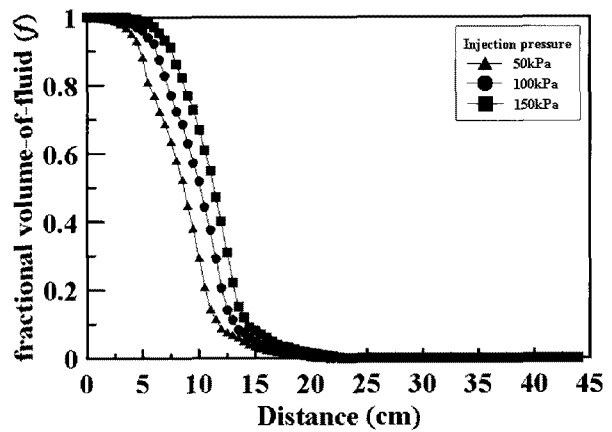
로 확산이 일어나며 인발시간이 경과함에 따라 밀도가 증가하는 것을 볼 수가 있다. 한편, 고결체의 길이변화는 인발시간(time step)에 의존하며 변하는 것을 확인하였으며, 표준사의 물성치 입력시 전방향으로 투수계수를  $1.201 \times 10^{-2}$ 로 동일하게 했음에도 불구하고 상부 방향으로의 주입재의 이동은 하지 않는 것으로 나타났다(4.2절 참고).

CFD분석으로는 고결화 판정이 용이하지 않으므로 모형지반 내 주입재료의 확산을 유체 체적 분율( $f$ )을 통해 침투 유무를 결정하였다. VOF이론에서 언급하였듯이 유체 체적 분율( $f$ )가 증가할 때, 즉  $f$ 가 0보다 클 때를

주입재료가 침투되어 확산된 것으로 판단을 하였다. 특히, 그림 6(a)과 같이 가장 균질할 것으로 판단되는 고결체 하단부에서 20cm 떨어진 종단면 반지름 요소(0~22cm)를 분석하였으며, 이에 주입압별 중심으로부터 거리별  $f$ 의 값은 그림 6(b)과 같다.  $f$ 의 값은 0~1을 나타내고 주입압이 증가 할수록  $f$ 는 증가하는 경향이 나타나며, 중심으로부터 거리별로도  $f$ 가 감소하는 즉, 밀도가 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 양상을 전체적인 주입범위를 산정하였으며, 그 결과는 그림 7(a), (b), (c)과 같다. 그림 6(b)의 결과와 마찬가지로 주입압별 고결체의 대부분은  $f$ 가 약 0.8~1로써 고밀도로 분포를 하고 고결체

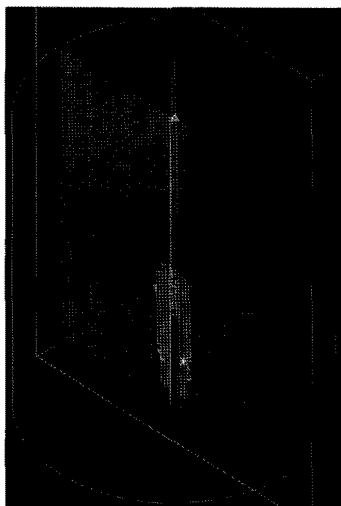


(a) Checking elements

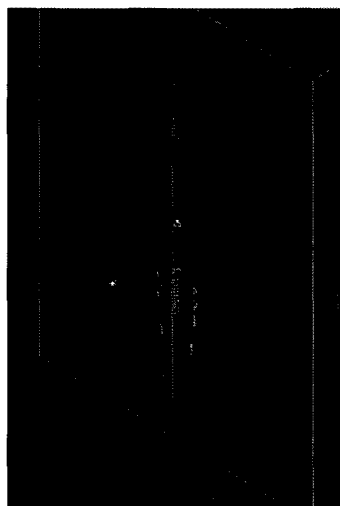


(b) Fractional volume-of-fluid( $f$ ) values

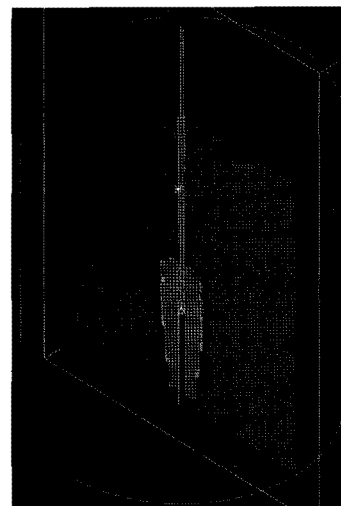
그림 6. Fractional volume-of-fluid values( $f$ ) with distance



(a) 50kPa(time step 29.25)



(b) 100kPa(time step 29.50)



(c) 150kPa(time step 30.75)



그림 7. Value of VOF with injection pressure



의 바깥부분에서 약 0~0.8의 값을 나타내어 저밀도를 나타내는 것을 알 수가 있다. 뉴턴 점성거동을 보이는 유체가 확산이 되면서 관성인자의 작용과 물체력(body force)의 저하로 유체의 속도가 저하되어 침투가 줄어드는 경향을 알 수 있다.

본 연구에서는  $f$ 의 값이 0.8이상일 때 고결체가 소요 강도를 얻을 수 있는 형상으로 간주하였다. 따라서, 이러한 고결체의 형상을 3차원 윤곽 데이터 또는 폴리곤 모델로 불러는 ISOSURFACE 기능을 사용하여  $f$ 의 값이 0.8~1.0일 때를 기준으로 그림 8(a), (b), (c)와 같이 주입압 별로 나타내었다. ISOSURFACE는 유체 체적 분율( $f$ ) 값에 따른 형상을 자유자재로 나타낼 수 있으므로  $f$ 가 0.8~1.0 일 때를 기준으로 산정하여 얻은 형상은

비교적 실내모형주입시험 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

고결체의 형태는 비교적 균등한 원기둥 형태이며, 주입압이 증가할수록 주입범위(직경)가 증가하며 고결체의 크기가 커짐을 알 수 있다. 또한 고결체의 바닥부분과 상부의 주입범위는 약 1.2배 정도의 차이가 나타났는데, 이는 주입이 진행되고 인발이 되면서 상대적으로 투수계수가 커진 시료의 상부 쪽으로 이동한 것으로 보여진다.

### 5.3 ISOSURFACE 보정

본 연구에서는  $f$ 를 0.8~1.0 기준으로 고결체 형상을

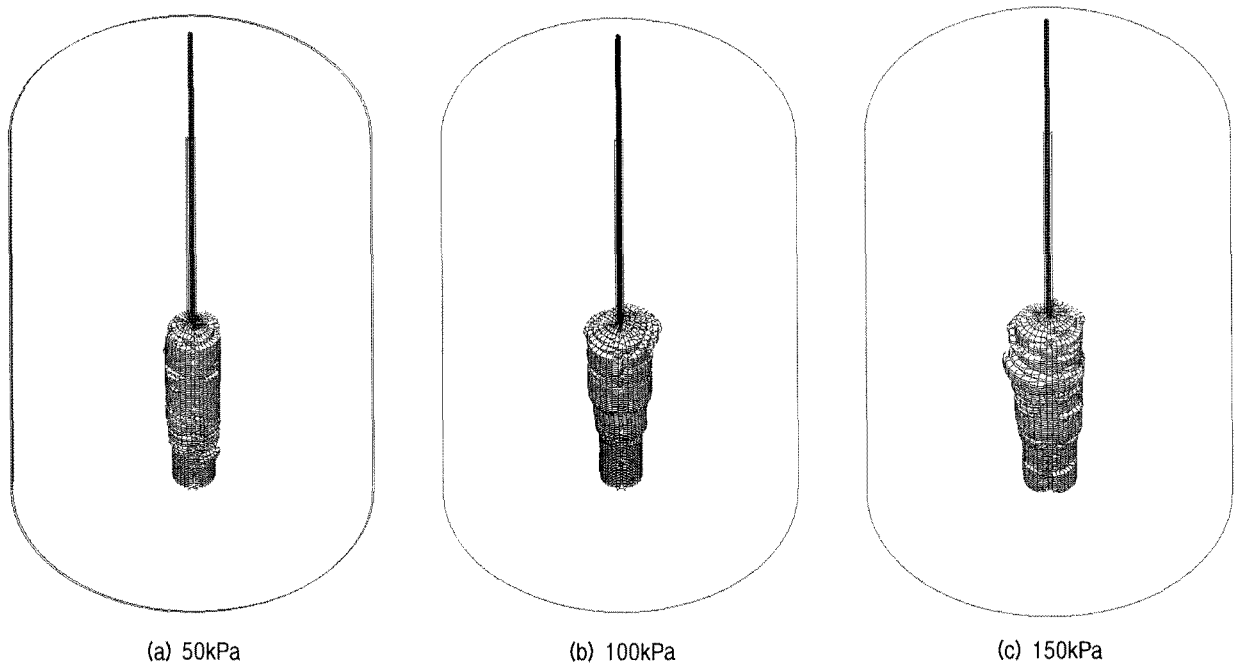


그림 8. The shape of the hardened grout by isosurface function( $f=0.8\sim 1.0$ )

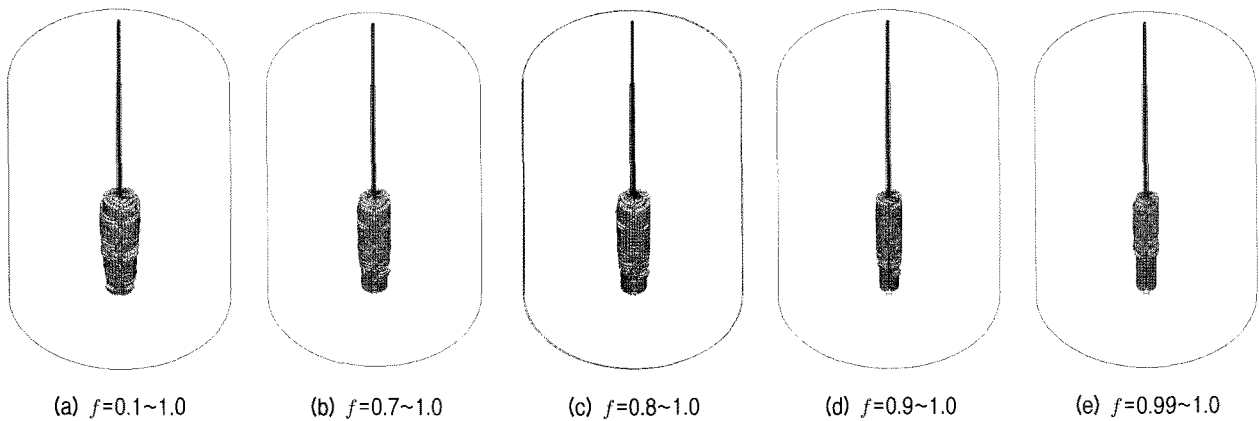


그림 9. The comparison of size with volume-of-fuild( $f$ ) by isosurface(ex. 50kPa)

모사하였다. 하지만 그림 9(a)~(e)에서 보는 바와 같이 기준(c)보다  $f$ 를 하향 조정하여 (a), (b)와 같이 기준보다 더 커지게 되며 (d), (e)와 같이  $f$ 를 상향 조정하여 더 작게 모사할 수 있다. 이를 조절함으로써 고결체 직경을 일부 보정한다면 모형시험결과와 유사성이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는  $f$ 를 0.8~1.0 기준으로 고결체 형상을 모사하였다. 하지만 그림 9(a)~(e)에서 보는 바와 같이 기준(c)보다  $f$ 를 하향 조정하여 (a), (b)와 같이 기준보다 더 커지게 되며 (d), (e)와 같이  $f$ 를 상향 조정하여 더 작게 모사할 수 있다. 이를 조절함으로써 고결체 직경을 일부 보정한다면 모형시험결과와 유사성이 있을 것으로 판단된다.

#### 5.4 고찰

실내모형주입시험과 수치해석으로부터 고결체의 상하부 직경을 측정된 결과를 표 5와 그림 10(a), (b)에서 비교를 하였다. ISOSURFACE로 형성한 고결체의 직경 측정 방법은 메쉬와 메쉬 간격을 MEASURE 기능으로 측정하였다. 전반적으로 실내모형주입시험과 수치해석

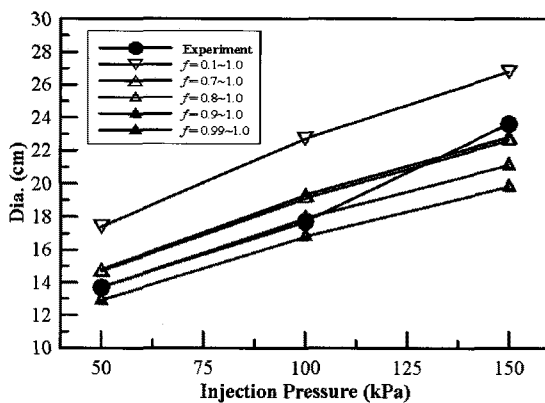
결과는 주입압이 커짐에 따라 고결체의 상하부 직경은 커지는 경향을 나타내고 있다. 고결체 상부직경의 경우, 주입압 50kPa에서는  $f$ 가 0.9~1.0일 때, 주입압 100kPa에서도  $f$ 가 0.9~1.0일 때, 150kPa에서는  $f$ 가 0.7~1.0에서 모형시험결과와 유사성을 보였다. 또한 고결체 하부직경의 경우, 주입압 50kPa에서는  $f$ 가 0.9~1.0일 때, 주입압 100kPa에서는  $f$ 가 0.7~1.0 또는 0.8~1.0일 때, 150kPa에서는  $f$ 가 0.1~1.0에서 모형시험결과와 가장 유사성을 보였다. 한편, 고밀도·저밀도의 분포에서도 모형시험결과와 비교한 고결체의 직경은  $\pm 3\sim 4\text{cm}$  정도로 나타나므로 본 방법에서 제시한 바와 같이  $f$ 의 보정을 통하여 가압그라우팅의 고결체를 어느 정도 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 6. 결론

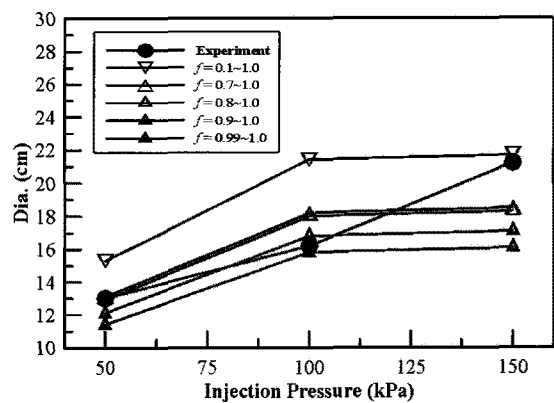
본 연구에서는 물유리계 주입재를 사용한 가압그라우팅 형식의 고결체 형상을 예측하기 위하여 실내모형 토조주입시험을 토대로 주입재 흐름에 의한 지중 속 거동 및 porous media 모델과 VOF 방법을 응용하여 모사하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

표 5. The diameters of the hardened grout on experiment and numerical

Dia. of the bulbs(cm)	Injection pressure	50kPa		100kPa		150kPa	
	Location	top	bottom	top	bottom	top	bottom
Experiment		13.7	13.0	17.7	16.2	23.6	21.2
Numerical analysis( $f=0.1\sim 1.0$ )		17.4	15.3	22.7	21.4	26.8	21.7
Numerical analysis( $f=0.7\sim 1.0$ )		14.8	13.1	19.3	18.2	22.8	18.5
Numerical analysis( $f=0.8\sim 1.0$ )		14.7	12.9	19.1	18.0	22.6	18.3
Numerical analysis( $f=0.9\sim 1.0$ )		13.7	12.1	17.9	16.8	21.1	17.1
Numerical analysis( $f=0.99\sim 1.0$ )		12.9	11.4	16.8	15.8	19.8	16.1



(a) top



(b) bottom

그림 10. The diameters of the hardened grout with injection pressure

- (1) 주입재의 뉴턴의 점성법칙과 porous media 모델의 플로우에 의한 주입을 모사하였으므로 고결화에 대한 판정이 용이하지 않다. 따라서, 수치해석 시 주입량은 무시하고 인발조건에서 모형토주입시험과 조건을 최대한 동일하게 유지하였고 본 수치해석에서 고결화에 의한 고결체의 형상을 모사하기 위하여 VOF 방법의 유체 체적 분율(fractional volume-of-fluid,  $f$ )이 0.8~1.0을 기준으로 나타내었다.
- (2) 실내모형주입시험과 수치해석 결과로부터, 주입압이 커짐에 따라 고결체의 상하부 직경은 커지는 경향을 나타내고 있다. 단, 수치해석의 경우, 유체 체적 분율( $f$ )을 일부 조절하는 방법을 제안하여 주입압별로 실내모형시험과 가장 근접하는  $f$ 의 범위를 제안해보았다. 이는 고밀도·저밀도의 분포에서도 모형시험결과와 비교한 고결체의 직경과 비교시  $\pm 3 \sim 4\text{cm}$  정도로 나타나므로 본 방법에서 제시한 바와 같이  $f$ 의 보정을 통하여 가압그라우팅의 고결체를 어느 정도 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 하지만 유체 체적 분율( $f$ )을 일부 조절하는 방법으로 실제 고결체 형상과 유사도를 높이는 것은 본 연구에서만 한계적으로 적용이 가능한 시점이다, 이에 더 많은 조건하에서 거동을 분석하기 위해서 민감도 분석(sensitivity analysis)이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 수치해석을 이용하여 주입재의 거동과 고결체의 형상을 예측하기에는 아직까지 적용성에 한계가 있다. 지반의 종류, 이질 지층, 지하수, 주입량, 주입압, 주입공의 유효경, Gel-time 등 여러 요소가 관계하여 그 특성을 선행 연구자에 의해 일부 이해할 수 있을 뿐, 이에 대한 수치해석 기법의 적용성의 확립을 위해 다수의 조건에 의한 분석이 필요할 것으로 보인다.
- (5) 이러한 지속적인 연구는 지중 속에 주입된 그라우팅 공법의 거동 및 고결 양상을 예측할 수 있는 기초적인 수치해석적 기법이 될 것으로 판단되며 차후에는 본 수치해석 기법과 아울러 Mohr-Coulomb 모델과 연동해석하여 지반주입에 의한 할렬과파 메커니즘도 모사할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

1. 김민수, 신수호, 이우일 (2000), "자유표면이 존재하는 유체 유동 해석을 위한 VOF 방법 기반의 새로운 수치 기법(I) - 새로운 자유

- 표면 추적 알고리즘 및 검증 -", *대한기계학회논문집 B권*, 제 24권, 제 12호, pp.1555-1569.
2. 박대호, 정소찬, 김원철 (2003), "포화된 다공질 매체의 질량 보존과 운동량 보존에 대한 Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE) 정식화", *한국지반환경공학학회논문집*, Vol.4, No.1, pp.5-10.
3. 박종호, 이상익, 박용원 (2003), "가압 그라우팅 구근의 강도특성에 관한 실험적 연구", *대한토목학회논문집*, 제 23권, 제 4호, pp.221-229.
4. 전기환, 류동우, 김형목, 박의섭, 송재준 (2010), "질리 거칠기와 간극 변화에 따른 그라우트 유동과 주입압에 관한 수치해석적 연구", *터널과 지하공간*, *한국암반공학회지*, Vol.20, No.2, pp.82-91.
5. 천병식 (1998), *최신 지반주입 이론과 실제*, 원기술, pp.87.
6. 천병식 (2000), "ENPASOL과 SINUS에 의한 지반보강 사례연구", *대한토목학회논문집*, 제 20권, 제 6호, pp.507-516.
7. 천병식 (2002), *고성능 주입재에 의한 연약지반처리공법 연구*, 한국과학기술재단, pp.11-14.
8. 천병식 (2010), *지반공학 실험 및 조사*, 구미서관, pp.240.
9. 천병식, 이재영, 하광현 (2002), "지반주입재 종류별 주입특성 및 환경적 유해성에 관한 연구", *한국지반환경공학학회논문집*, 제 3권, 제 4호, pp.37-49.
10. 최항길, 柳澤榮司, 천병식 (1994), "注入中 P-t Chart에 의한 注入形態狀況의 豫測에 관한 研究", *대한토목학회*, 학술발표회 논문집, 제 1권, pp.693-696.
11. 한국표준협회 (2000), 한국산업규격 KS F 2312.
12. 한국표준협회 (2000), 한국산업규격 KS F 2322.
13. ADINA R&D Inc.(2009), "ADINA Theory and Modeling Guide - Volume III : ADINA CFD & FSI", pp.31-34, pp.58-61, pp.141-146.
14. EI-KELESH A M, MATSUI T. (2008), "Calibration chamber modeling of compaction grouting", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.31, No.4, pp.295-370.
15. Håkansson, U., L. Hässler and H. Stille (1992), "Theological properties of micro fine cement grouts", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7.4, pp.453-458.
16. Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981), "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamic of Free Boundaries", *J. Comput. Phys.*, Vol.39, pp.201-225.
17. Karol, R. H. (1960), "Soils & Soil Engineering, Cap. 17", Prentice Hall Eng. Mechanics Series, Englewood Cliffs, N. Y.
18. Kutzner C. (1996), *Grouting of Rock and Soil*, A. A. Balkema, pp.18.
19. Larmaei M. M., Mahdi T. (2010), "Simulation of shallow water waves using VOF method", *Journal of Hydro-environment Research* 3, pp.208-214.
20. Maag, E. (1938), "Ueber die Verfestigung und Dichtung des Baugrundes (Injektionen)", *Erdbaukurs de E.T.H.*, Sammlung der Vorträge herausgegeben vom Institut für Erdbauforschung der eidg. Techn. Hochschule Zürich, Zürich.
21. Nakayama, T. and Mori, M. (1996), An Eulerian Finite Element Method for Time-Dependent Free Surface Problems in Hydrodynamics, *Int. J. Numerical Methods Fluids*, Vol.22, pp.175-194.
22. YANG Xiao-li and Zou Jin-feng, (2009), "Estimation of compaction grouting pressure in strain softening soils", *Journal of Central South University of Technology*, Vol.16, No.4, pp.653-657.
23. 三木五三郎 (1978), "土質と注入施工", *土木學會關東支部講習會講演集*, 日本下水道事業團, pp.31-39.

(접수일자 2011. 2. 28, 심사완료일 2011. 6. 15)