

## 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력 증가 원인에 관한 연구

### A Study on Pullout-Resistance Increase in Soil Nailing due to Pressurized Grouting

정 경 한<sup>1</sup> Jeong, Kyeong-Han

박 성 원<sup>2</sup> Park, Sung-Won

최 항 석<sup>3</sup> Choi, Hang-Seok

이 충 원<sup>4</sup> Lee, Chung-Won

이 인 모<sup>5</sup> Lee, In-Mo

#### Abstract

Pressurized grouting is a common technique in geotechnical engineering applications to increase the stiffness and strength of the ground mass and to fill boreholes or void space in a tunnel lining and so on. Recently, the pressurized grouting has been applied to a soil-nailing system which is widely used to improve slope stability. Because interaction between pressurized grouting paste and adjacent ground mass is complicated and difficult to analyze, the soil-nailing design has been empirically performed in most geotechnical applications. The purpose of this study is to analyze the ground behavior induced by pressurized grouting paste with the aid of laboratory model tests. The laboratory tests are carried out for four kinds of granitic residual soils. When injecting pressure is applied to grout, the pressure measured in the adjacent ground initially increases for a while, which behaves in the way of the membrane model. With the lapse of time, the pressure in the adjacent ground decreases down to a value of residual stress because a portion of water in the grouting paste seeps into the adjacent ground. The seepage can be indicated by the fact that the ratio of water/cement in the grouting paste has decreased from a initial value of 50% to around 30% during the test. The reduction of the W/C ratio should cause to harden the grouting paste and increase the stiffness of it, which restricts the rebound of out-moved ground into the original position, and thus increase the in-situ stress by approximately 20% of the injecting pressures. The measured radial deformation of the ground under pressure is in good agreement with the expansion of a cylindrical cavity estimated by the cavity expansion theory. In-situ test revealed that the pullout resistance of a soil nailing with pressurized grouting is about 36% larger than that with regular grouting, caused by grout radius increase, residual stress effect, and/or roughness increase.

#### 요 지

압력식 그라우팅은 지반 보강의 대표적인 공법 중 하나이며, 최근에는 사면 안정 공법으로 널리 사용되는 쏘일네일링에도 적용되고 있다. 그러나 가압 그라우팅 쏘일네일링 공법은 가압에 따른 그라우트와 지반 사이의 메커니즘이 매우 복잡하여 대부분 경험적인 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구는 가압 그라우팅 쏘일네일링의 실내 모형 실험, 현장시험 및 수치모델의 분석을 통해 그라우트와 주변 지반의 상호 거동을 평가하고, 이를 통해 인발저항력을 발휘하는 원인을 고찰하는데 그 목적이 있다. 실내 모형실험은 화강풍화토에 대해 수행하였으며, 그라우트 가압에 따라 초기에는 membrane 모델과 같이 공벽에 큰 압력이 작용하였으나, 점차 그라우트 내의 물이 주변지반으로 침투하

1 정회원, (주)도담이앤씨 기술연구소 상무 (Member, Director, Technical Research Center, Dodam Eng & Construction)

2 (주)도담이앤씨 기술연구소 사원 (Researcher, Technical Research Center, Dodam Eng & Construction)

3 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)

4 (주)도담이앤씨 기술연구소 대리 (Assistant Manager, Technical Research Center, Dodam Eng & Construction)

5 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

면서 잔류응력까지 감소하는 것을 확인하였다. 이 때, 주입초기에 50%였던 물-시멘트비는 약 30%까지 감소하였으며, 이를 통한 그라우트의 강성 증가로 변위회복의 감소 및 주입압의 약 20%에 해당하는 잔류응력이 확인되었다. 또한 가압시 발생 변위를 측정하여, 그 값을 공팽창이론에 의한 값과 비교하였으며 그 결과는 대체적으로 일치하였다. 현장 시험 역시 풍화토에서 수행되었으며, 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력이 중력식보다 약 36% 더 큰 것으로 나타났다. 이는 유효경 증가효과 약 24%, 기타, 잔류응력 및 구근 거칠기 증가 효과 약 10%에 기인함을 알 수 있었다.

**Keywords** : Dilatancy, Expanded radius of grout, Pressurized grouting, Pullout resistance, Residual stress, Soil nailing

## 1. 서론

쏘일네일링 공법은 지반에 네일을 삽입한 후 그라우팅을 수행하여 지반과 일체화함으로써 원지반의 전단 저항력 및 네일의 인발저항력을 활용한 보강공법으로, 그 이용성이 증대되고 있다. 본 공법의 성립을 위해서는 시멘트 밀크에 의한 그라우팅이 필요하며, 기존에는 천공의 충진을 위해 그라우트를 무압으로 채우는 중력식을 이용하였으나, 최근에는 압력식 그라우팅을 적용한 시공 사례가 증가되고 있다. 중력식 쏘일네일링은 그라우팅의 3-6회 반복 주입에 따른 공동 발생 및 충진 불량 등의 단점을 가지고 있으나, 압력식은 1회의 압력 그라우팅만으로 이와 같은 문제들을 해소하여 보강 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 토사지반에서 압력에 의한 유효경 증가에 따른 부착력 증가 등의 보강 효과도 얻을 수 있으므로, 중력식 쏘일네일링에 비하여 전체적인 안전율이 증가된다. 하지만, 기존의 연구에서는 그라우팅에 의해 지반에 작용하는 압력 거동 특성, 그라우팅의 주입압 및 주입시간에 대한 기준 등에 관한 고찰이 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는, 국내에 가장 널리 존재하며 사면 보강 실적이 가장 많은 화강풍화토 지반에 대한 가압 그라우팅 쏘일네일링의 거동 특성을 고찰하였다. 이를 위해 현장 조건에 근거한 실내실험을 실시하여 그라우트와 주변 지반 상호간의 메커니즘 규명, 지반의 팽창 정도 파악 및 공팽창 이론(Cavity Expansion Theory)과의 부합성을 평가하였으며, 현장 인발시험을 통해 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발저항력 증대 원인을 분석하였다.

## 2. 공팽창 이론의 적용

가압에 따른 주변 지반의 변위 및 압력 변화 양상을 예측하기 위해 공팽창이론(Cavity Expansion Theory)을 적용하였다. 공팽창 이론은 Bishop 등(1945), Hill(1950)이 금속 재료에 대해 연구하던 내용을 Gibson과 Anderson(1961)이 지반공학 분야에 도입하면서 지반 문제에 적용되기 시작하였다. Vesic(1972)는 공팽창시 한계압력 산정에 대한 개략적인 해법을 제시하였으며, 이를 깊은 기초의 지지력 문제에 적용하였다. 최근에는 Yu와 Houlsby(1991)에 의해 원형 및 구형의 공팽창 문제에서 소성 거동시 비연합 유동법칙을 적용한 Mohr-Coulomb 파괴 기준에 근거한 분석적 해법이 제시되었다.

### 2.1 문제의 정의

지반내에 반경이  $a$ 인 공이 존재하며 공벽에 압력  $P$ 를 가했을 때, 공은 압력에 의해 팽창을 하게 되고 주변 지반이 받는 응력 또한 증가할 것이다. 압력  $P$ 가 증가하면 주변지반은 탄성거동을 보이다가 탄성의 한계를 넘어서는 순간부터는 천공 주변에 소성영역이 발생하고, 주변지반은 반경방향 및 접선방향으로 응력이 증가할 것이다. 여기서, 공벽에 압력  $P$ 가 작용할 때 평형 방정식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $r$ 은 공의 중심에서부터 반경방향의 거리,  $\sigma_r$ 는 반경방향응력,  $\sigma_\theta$ 는 접선방향응력을 의미한다. 또한, 경계조건은 다음의 식 (2)와 같으며, 여기서  $P$ 는 공벽에

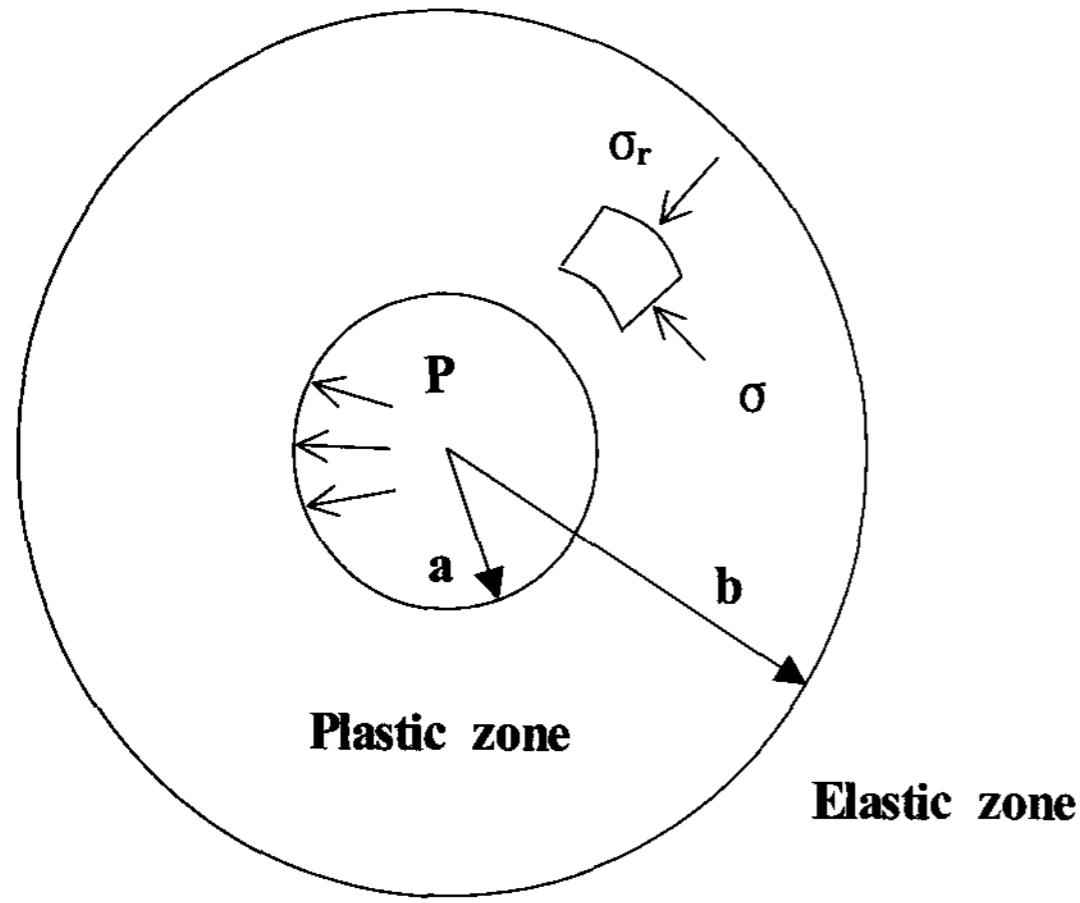


그림 1. 공동팽창 이론

주어진 압력,  $P_0$ 는 지반의 초기 지중응력을 의미한다.

$$\sigma_{r(r=a)} = P, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r = P_0 \quad (2)$$

## 2.2 탄소성 응력 해석

공벽에서 탄성의 한계를 넘어 선 이후에는 공벽 주변으로 반경  $r=b$ 의 영역에 걸쳐 소성영역이 발생되며, 탄성 영역과 소성 영역으로 나누어 응력 해석을 수행하는 과정은 다음과 같다(Yu and Houlsby, 1991).

### (a) 소성 영역( $a < r < b$ )

공벽에 압력이 가해짐에 따라 지반이 탄성의 한계를 넘으면서 소성영역이 발생하며, 공의 중심에서 소성영역까지의 반경을  $b$ 라고 할 때,  $r=b$ 인 소성영역 내에서의 반경 및 접선 방향 응력상태는 다음의 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$\sigma_r = \frac{Y}{\alpha-1} + Ar^{\frac{(1-\alpha)}{\alpha}}, \quad \sigma_\theta = \frac{Y}{\alpha-1} + \frac{A}{\alpha} r^{\frac{(1-\alpha)}{\alpha}} \quad (3)$$

여기서,  $Y = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi}$ ,  $\alpha = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ ,  $\phi$ 는 지반의 내부 마찰각,  $c$ 는 점착력을 의미한다.

### (b) 탄성 영역( $r > b$ )

공벽에 가해지는 압력이 증가함에 따라  $r=b$ 인 지점까지 소성영역이 발생하나,  $r > b$ 인 영역에서는 탄성구간이 여전히 존재한다. 소성영역 밖의 탄성구간에서 반경 및 접선 방향 응력은 다음의 식 (4)와 같이 산정할 수 있다.

$$\sigma_r = P_0 + \frac{B}{r^2}, \quad \sigma_\theta = P_0 - \frac{B}{r^2} \quad (4)$$

여기서, 탄성 및 소성영역 경계면에서의 연속성을 이용하여  $A, B$ 를 소성영역의 반경  $b$ 로서 산정할 수 있다. 즉, 아래의 식 (5)의 경계 조건을 이용하여  $A$ 와  $B$ 를 산정하면 다음의 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{r(r=b)}(elastic) &= \sigma_{r(r=b)}(plastic), \\ \sigma_{\theta(r=b)}(elastic) &= \sigma_{\theta(r=b)}(plastic) \end{aligned} \quad (5)$$

$$A = 2 \left[ \frac{P_0(\alpha-1) + Y}{\alpha-1} \right] \frac{\alpha}{\alpha+1} b^{\frac{\alpha-1}{\alpha}}, \quad B = \left[ \frac{P_0(\alpha-1) + Y}{1+\alpha} \right] b^2 \quad (6)$$

## 2.3 탄소성 변위 해석

Yu와 Houlsby(1991)의 공동팽창 이론에 따르면, 식 (2)에서 제시된 지반의 경계조건과 소성영역내에서의 반경방향 응력 양상을 이용하면, 공벽에 압력이 가해짐에 따른  $b/a$ (소성영역 반경과 천공경 반경의 비)를 다음의 식 (7)과 같이 산정할 수 있다.

$$\frac{b}{a} = R^{\alpha/(\alpha-1)} \quad (7)$$

여기서,  $R = \frac{(1+\alpha)[Y+(\alpha-1)P]}{2\alpha[Y+(\alpha-1)P_0]}$ 으로서 Cavity pressure ratio 로 정의되는 상수이다.

또한,  $a/a_0$ (증가된 천공반경과 초기 천공반경의 비)는 공동팽창 이론의 전개시 수학적 편의를 위해 정의되는 여러 상수들에 의해 다음의 식 (8)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{a}{a_0} = \left\{ \frac{R^{-\gamma}}{(1-\delta)^{(\beta+1)/\beta} - (\gamma/\eta)C(R,\zeta)} \right\}^{\beta/(\beta+1)} \quad (8)$$

여기서,  $C(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n$ 이며,  $C_n$ 은

$$\begin{cases} n = \gamma \text{ 일 때 } \frac{y^n}{n!} \ln x, \\ n \neq \gamma \text{ 일 때 } \frac{y^n}{n!(n-\gamma)} [x^{n-\gamma} - 1] \end{cases}$$

$$\beta = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}, \quad \gamma = \frac{\alpha(\beta+1)}{(\alpha-1)\beta},$$

$$\eta = \exp \left\{ \frac{(\beta+1)(1-2\nu) \times [Y+(\alpha-1)P_0](1+\nu)}{E(\alpha-1)\beta} \right\}$$

$$\delta = \frac{Y+(\alpha-1)P_0}{2(1+\alpha)G},$$

$$\zeta = \frac{2(1-\nu^2)\delta}{(1+\nu)(\alpha-1)\beta} \times \left[ \alpha\beta + (1-2\nu) + 2\nu - \frac{\nu(\alpha+\beta)}{1-\nu} \right]$$

여기서,  $\psi$ 는 다일레이턴시각도로 하중이 가해질 때 축방향 변형에 따른 체적변형의 비를 나타낸다. 즉, 다일레이턴시각도의 증가는 체적변형의 증가를 뜻한다. 따라서 이 논문에서 다일레이턴시각도의 증가는 공벽의 반경변위의 증가에 직접적인 영향을 준다.  $\nu$ 는 포아슨비,  $G$ 는 전단탄성계수를 의미한다.

### 3. 실내 그라우팅 주입 실험

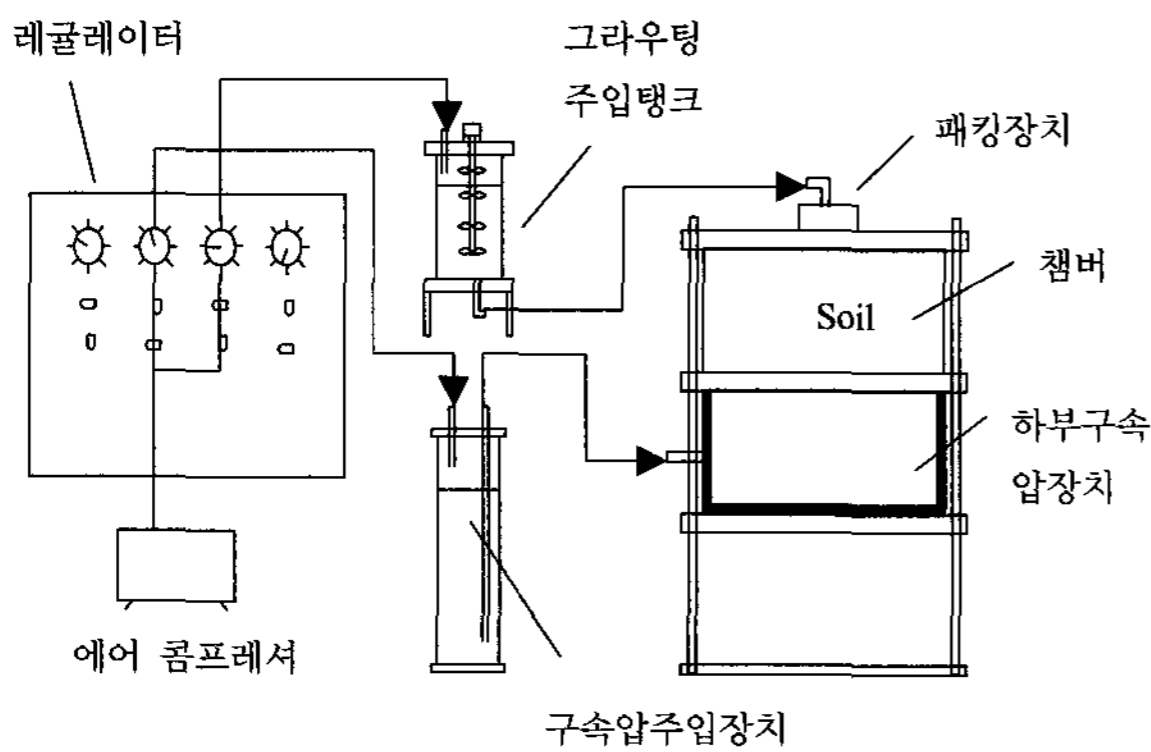
#### 3.1 모형 실험 장치의 구성

본 연구에서는 실내 모형 실험 장치를 제작하여 그라우팅 주입 실험을 실시하였으며, 장치의 개략적인 구성을 그림 2에 나타내었다. 챔버는 직경 60cm, 높이 18cm의 규격으로 실린더형 지반을 모사할 수 있도록 제작되었으며, 실린더의 측면에는 토압계 및 지반변위 측정용 LVDT의 설치를 위해 총 8개의 구멍을 뚫었다. 챔버의 하부 판넬은 상하이동이 가능하게 제작되어 에어 콤프레서를 이용한 수직압 적용이 가능하도록 제작되었다. 그라우팅 주입장치는 주입 탱크와 챔버의 상부 덮개에 설치되는 패키징장치로 구성되어 있다. 그라우트 주입 탱

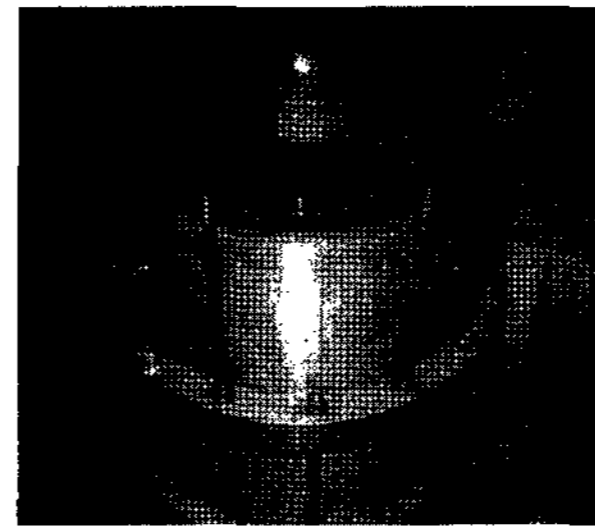
크는 투명 아크릴제로, 공기압을 공급받아 내부의 그라우트재를 밖으로 밀어내도록 설계되었으며 탱크 내부에는 그라우트재의 재료분리 방지를 위한 전동 프로펠러를 설치하였다. 또한, 패키징장치에는 그라우트 주입탱크와의 호스 연결을 위한 밸브, 그라우트 주입시 공기 배출을 위한 밸브 및 주입시 압력변화 확인을 위한 압력계가 설치되어 있다.

#### 3.2 시료 특성

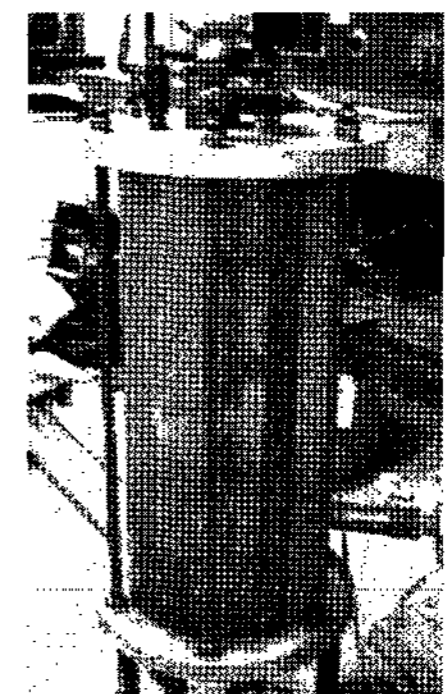
챔버 모형 실험에는 용산 시료, 압구정 시료, 혼합 시료(용산시료+압구정시료) 및 부산 과학단지 시료를 사용하였으며, 각 시료는 No.4체를 모두 통과하고 No.200체의 통과율이 각각 18.8%, 35%, 27%, 48%인 화강풍화토이다. 통일분류법에 의해 4종의 시료는 모두 SM으로 분류되었다. 시료의 내부마찰각과 점착력은 직접전단시험을 통하여 산정하였으며, 탄성계수와 포아슨비는 삼축압축시험을 통해 산정하였다. 또한, 그라우팅시 지반의 투수특성을 파악하기 위해 그림 3과 같이 다짐몰드와 동일한 크기의 투수 시험기를 제작, 투수시험을 수행하였다. 이때, 시험기 벽면이 유연성이 적은 경우 벽을



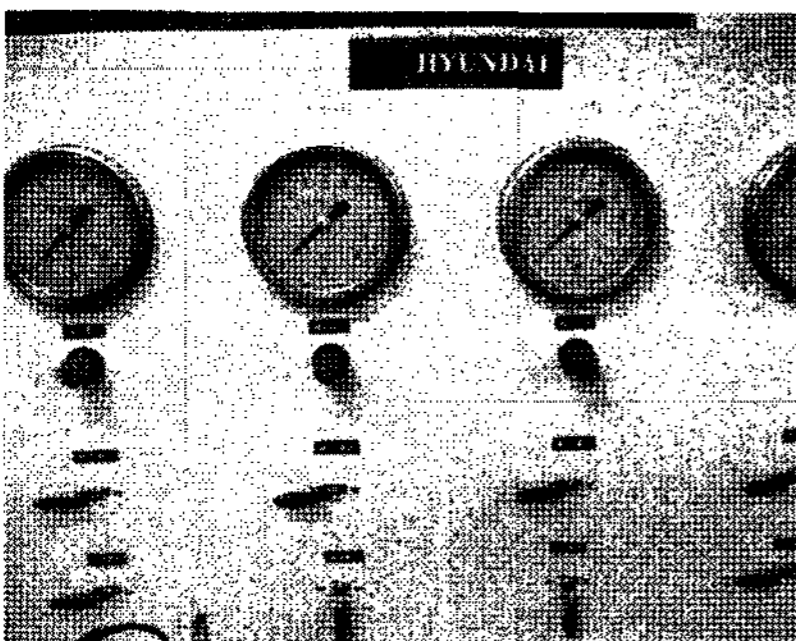
(a) 실험 장치 개략도



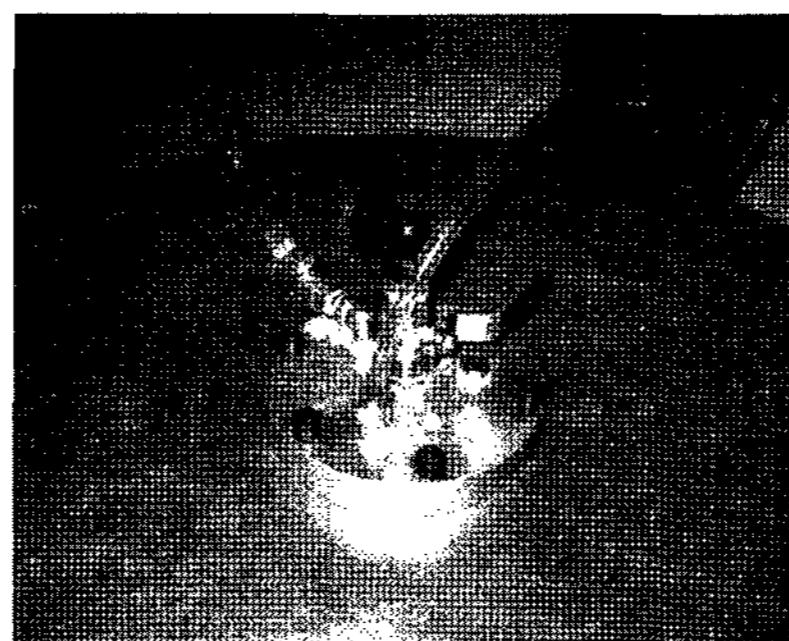
(b) 챔버



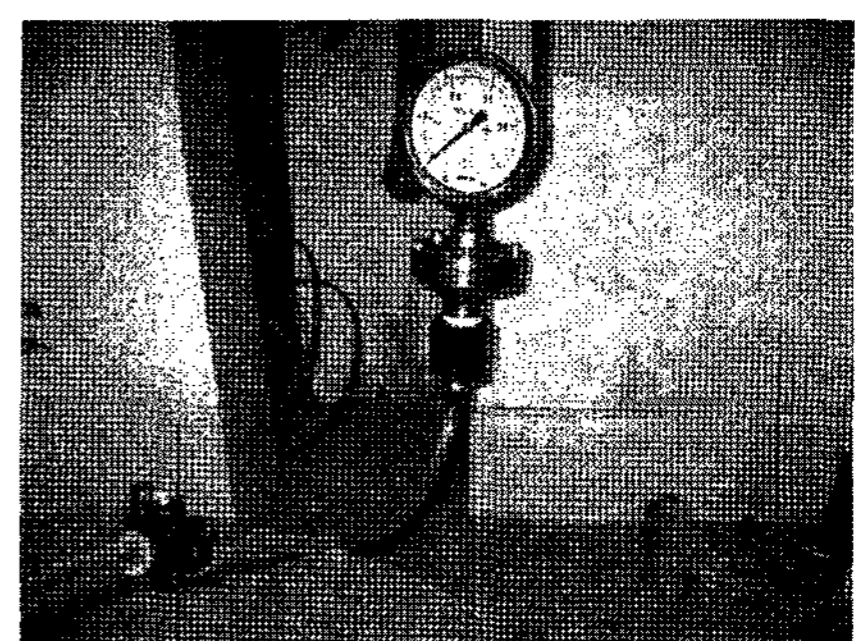
(c) 그라우팅 주입탱크



(d) 레귤레이터

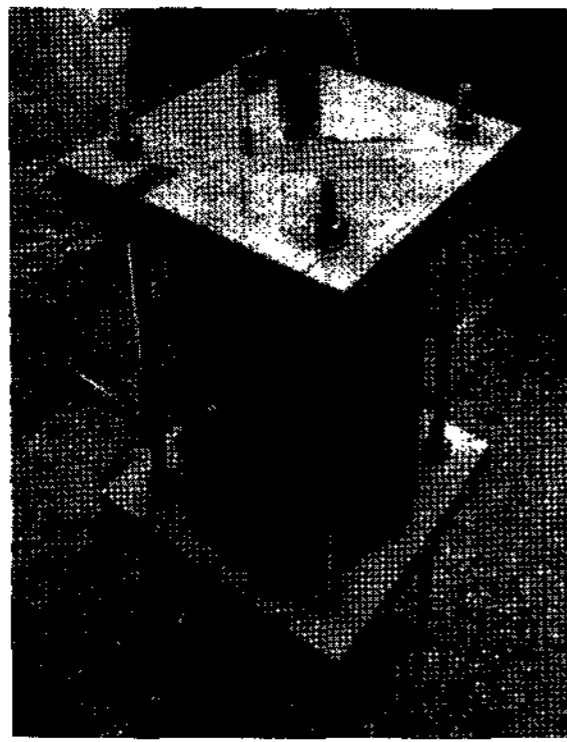


(e) 패키징장치

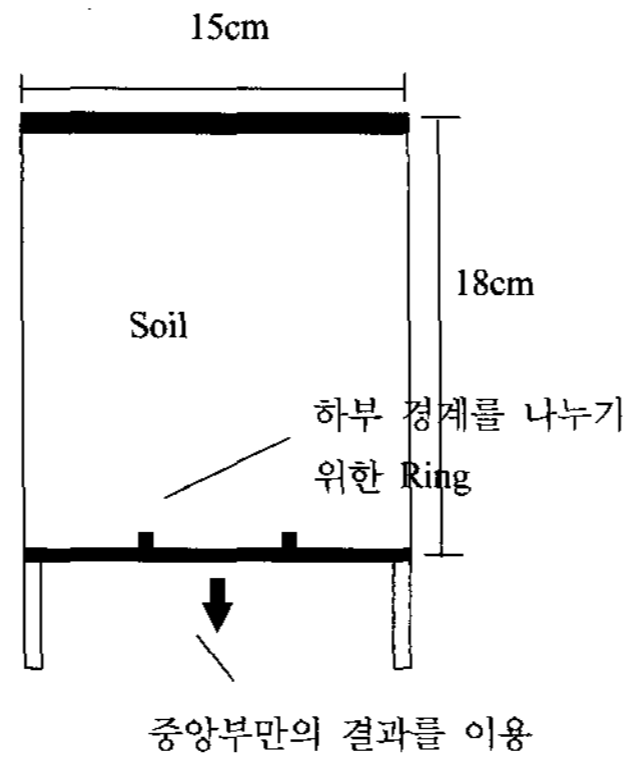


(f) 압력 게이지

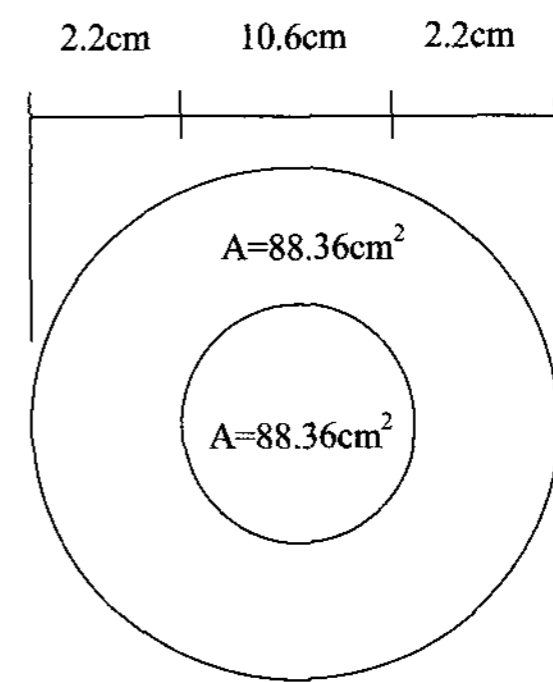
그림 2. 실내 모형 실험 장치의 구성



(a) 투수시험기 전경



(b) 투수시험기의 개략도



(c) 투수시험기의 단면

그림 3. 투수 시험 장치

표 1. 시료의 특성치

시료종류	비중	200번체 통과량(%)	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	탄성계수 (MPa)	포아슨비	간극비	투수계수 (cm/sec)
용 산	2.70	18.8	35	18.62	40.18	0.30	0.78	$2.8 \times 10^{-5}$
압구정	2.68	35.0	34	15.68	34.30	0.33	0.77	$1.2 \times 10^{-5}$
혼 합	2.70	27.0	35	17.64	37.24	0.30	0.78	$2.1 \times 10^{-5}$
부 산	2.68	48.0	33	15.88	33.32	0.34	0.77	$7.5 \times 10^{-5}$

따라서 누수가 발생할 것으로 판단되어, 투수시험기의 하부를 그림 3의 (c)와 같이 면적이 같은 두 부분으로 나누어 투수시험을 수행하고 중앙부를 통해 흐른 물의 양만을 이용해 투수계수를 측정하였다. 투수시험시 수두차는 그라우팅 주입압력 범위 내에 있도록 44kPa의 압력을 적용하였으며, 시험기 내의 시료는 챔버 모형 실험과 동일한 단위중량으로 조성하였다. 실내 실험을 통해 산정한 각 시료의 특성치를 다음의 표 1에 나타내었다.

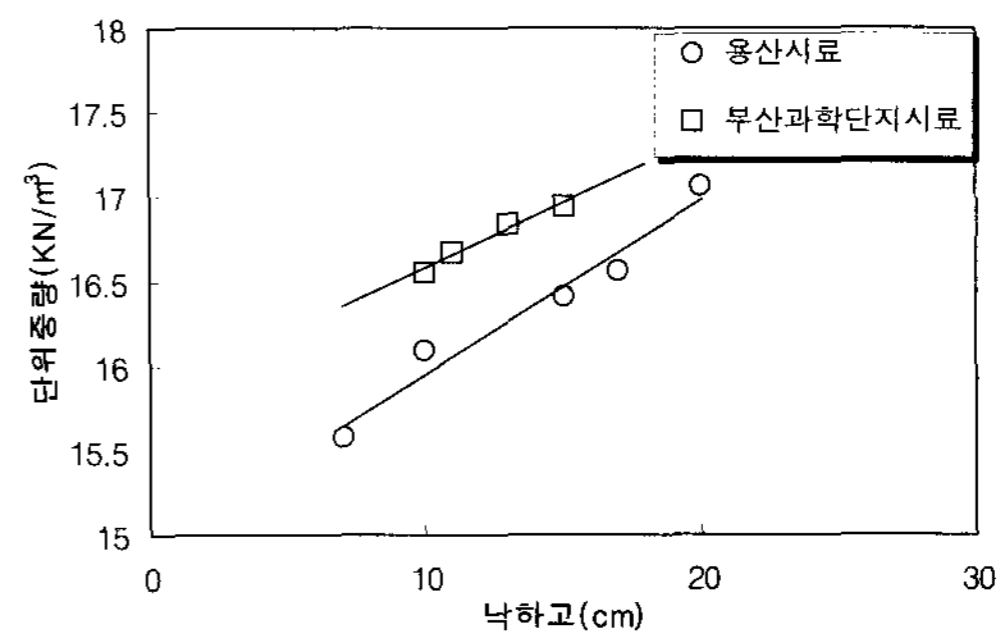


그림 4. 낙하고에 따른 단위중량(용산시료)

### 3.3 지반 조성 및 계측기 설치

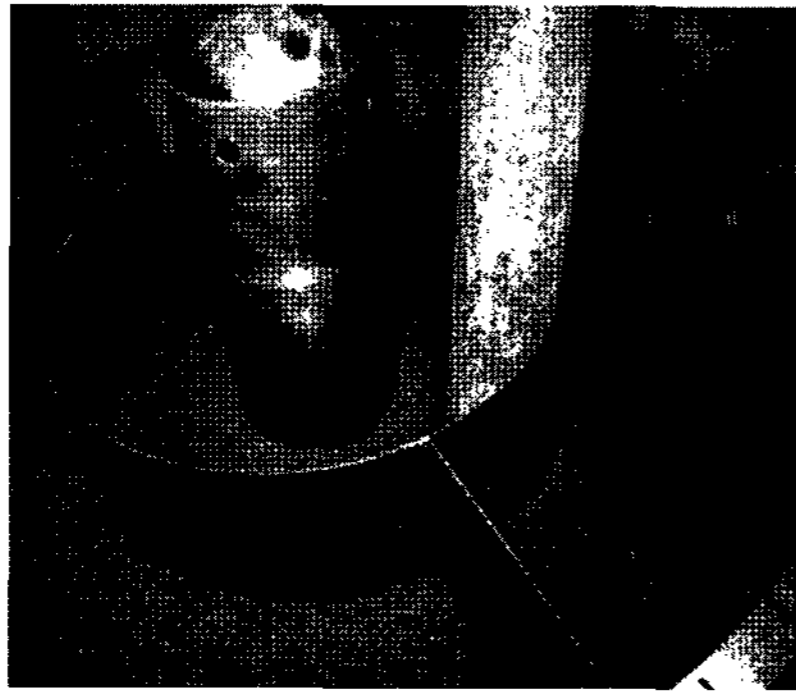
챔버내 목표 단위중량의 지반 조성을 위하여, 별도의 다짐시험을 실시하고 이 결과를 토대로 모형지반을 조성하였다. 다짐시험용 몰드는 지름이 15cm이고 챔버와 동일한 높이의 것이 이용되었으며 램머는 직경 5cm, 무게 4.5kg의 것이 사용되었다. 실험은 시료의 함수비 12%, 층당 다짐횟수 12회, 다짐층수 4층의 조건에서 낙하고를 변수로 수행하였으며, 이를 통해 낙하고 및 단위중량의 관계를 구하여 시료별 다짐 낙하고를 산정하였다. 낙하고와 단위중량의 관계를 그림 4에, 시료별 다짐 낙하고를 표 2에 제시하였다. 이 결과를 단면적이 몰드의 16배인 챔버에 적용함으로써, 층당 다짐횟수는 총 195회가 되며 앞서 결정된 시료별 다짐 낙하고를 이용하여 단위중량 16.66kN/m<sup>3</sup>의 모형지반

표 2. 시료별 다짐 낙하고

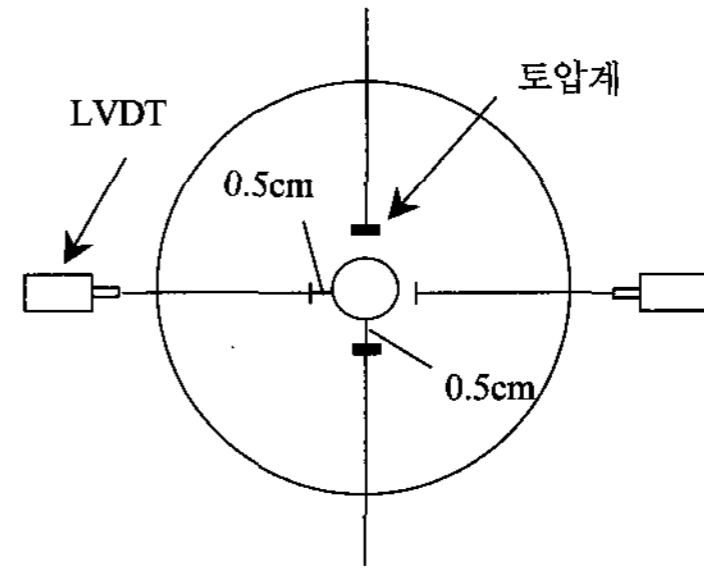
시료종류	낙하고(cm)
용 산	17
압구정	10
혼 합	15
부산과학단지	11

을 조성하였다. 또한 직경 5cm의 램머로 챔버의 전체 면적을 다지기 위해, 챔버의 단면적을 방사 방향으로 5개 구간으로 분할하여 다짐을 실시하였으며 이를 그림 5(a)에 나타내었다. 그리고 천공 과정의 지반 교란 방지를 위해 다짐시 천공경 10cm에 해당하는 관을 삽입한 후에 다짐 완료 후 빼내는 방식을 사용하였다.

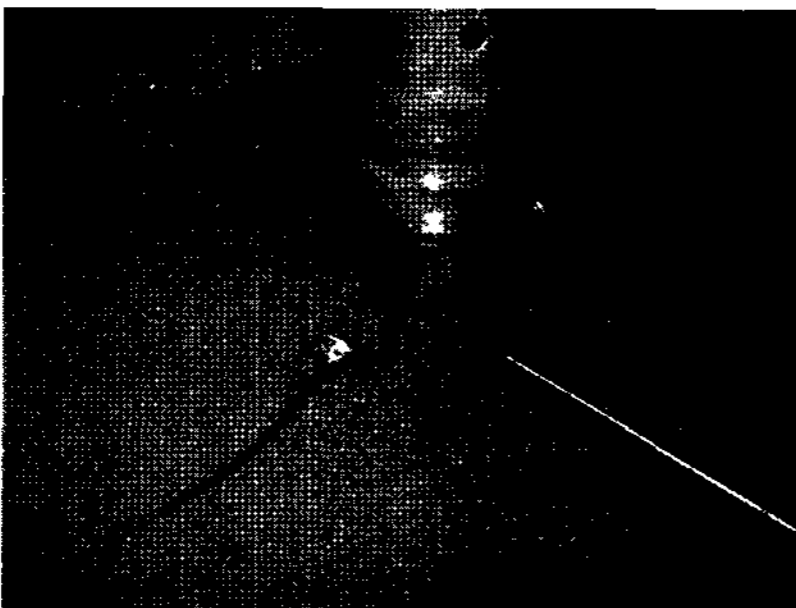
주입에 따른 주변지반의 압력 변화 양상 및 천공된 구멍의 확공량을 확인하기 위하여, 그림 5(b) 및 5(c)에 나



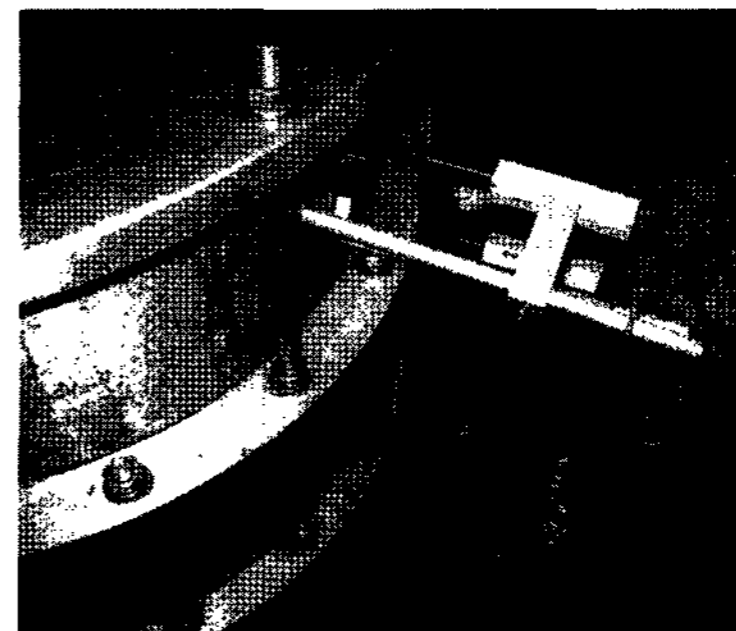
(a) 지반의 다짐



(b) 계측기 설치 개략도



(c) 토압계 설치



(d) LVDT 설치

그림 5. 지반의 다짐과 계측기의 설치

타낸 바와 같이 토압계 및 지반변위 측정을 위한 LVDT를 설치하였다. 토압계는 지반의 다짐시 두 번째 층 다짐을 완료한 후에 지반 속에 매설하였으며, LVDT는 매설이 불가능하므로 얇은 봉 및 지반내 봉과 흙의 마찰 방지를 위한 쉬스관을 함께 설치하였으며 이를 실린더 벽에 미리 천공한 구멍을 통하여 LVDT에 접촉시켜 변위를 측정하였다. 토압계와 변위 측정을 위한 관은 공벽에서 약 0.5cm 떨어진 위치에 설치하였으며, 그 개략도는 그림 5(d)와 같다.

그라우팅의 주입압은 4종의 시료에 대해 각각 294kPa, 441kPa, 588kPa의 3가지 경우로 변화시켜 실시하였다. 이 때, 단위중량  $16.66\text{kN/m}^3$  지반의 4.0m 심도에서의 응력 상태를 모사하기 위하여 66.64kPa의 구속압을 가하였다. 모형지반의 함수비는 다짐시험과 동일하게 12%

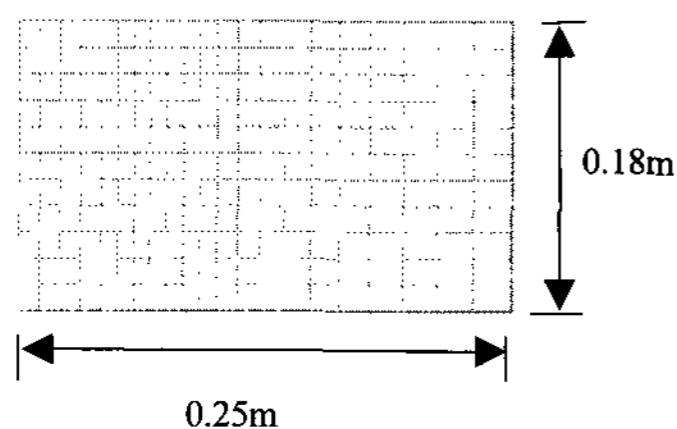
로 조정하였으며, 주입재는 보통 포틀랜드 시멘트를 물/시멘트비 50%로 배합하여 사용하였다.

#### 4. 챔버 모형 실험 결과

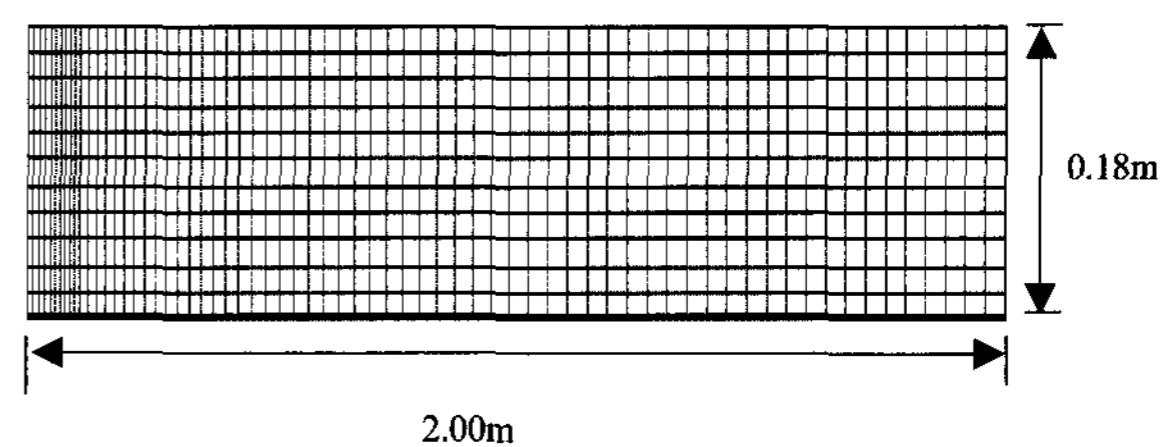
##### 4.1 압력 그라우팅 시 공벽 및 지반에 작용하는 압력

###### 4.1.1 챔버 구속 효과 평가

실내 모형실험을 위한 챔버의 지름은 60cm로, 현장조건과 달리 구속에 의한 영향이 있을 것으로 판단되며 이로 인해 변위는 더 작게, 압력은 더 크게 측정될 것으로 예상되었다. 이러한 챔버의 구속효과를 파악하기 위해 Pentagon-2D를 이용한 축대칭 조건의 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 Mesh를 그림 6에 나타내었다. 해



(a) 구속효과 발생(챔버크기와 동일)



(b) 구속효과 제거(반경방향 영역 충분)

그림 6. 챔버의 구속효과 평가를 위한 수치해석 Mesh

표 3. 주입압별 비구속 조건 대비 구속조건시의 변위 비율

시료종류	294kPa	441kPa	588kPa
용 산	92%	87%	73%
압구정	92%	76%	63%
혼 합	93%	92%	78%
부산과학단지	93%	76%	64%

석은 챔버와 동일 크기의 모델 및 반경방향을 충분히 크게 하여 구속효과가 제거된 모델에 대해 각각 공벽에 압력을 가하여 변위를 측정하는 방식으로 이루어졌으며, 그 결과 공벽에 발생하는 압력은 구속효과가 거의 없었으나 변위는 표 3에 제시한 대로 구속효과에 의한 변위 감소가 나타났다. 그러므로, 본 연구에서 얻어진 변위 결과를 현장에 적용할 경우에는 표 3의 결과를 이용하여 챔버 구속효과가 없는 지반조건으로 환산하여야 할 것으로 사료된다.

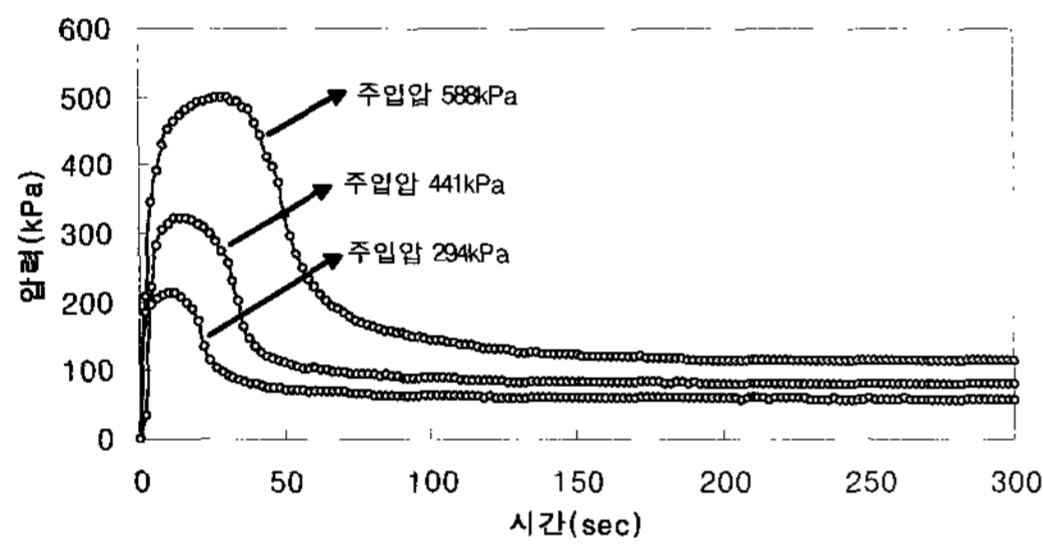
#### 4.1.2 공벽에 작용하는 압력

모형지반 내에 매설한 토압계를 통해 그라우팅 주입

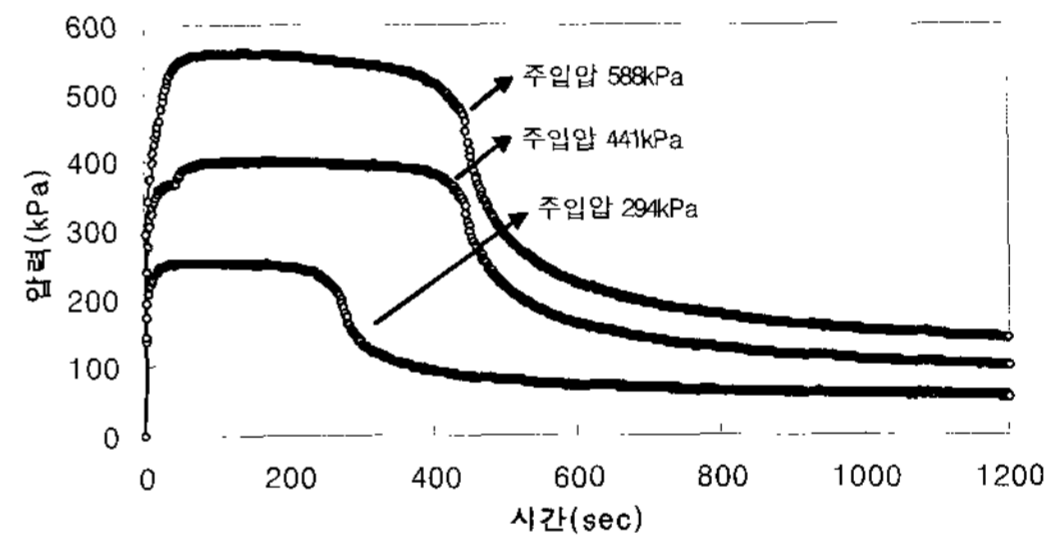
시간 경과에 따른 압력변화 양상을 확인하였으며 결과를 그림 7에 나타내었다. 이로부터, 시간 경과에 따라 지반에 작용하는 압력은 최대 압력까지 증가하였다가 (membrane condition) 그라우트 내의 물이 지반으로 빠져나가면서 압력이 감소하는 것이 확인되었으나, 장시간 경과 후에도 일정량의 응력이 잔류응력으로서 남아 있는 것이 확인되었다. 이러한 양상은 세립분의 함유량 및 투수계수에 따라 다르게 나타나며, 최대 압력의 지속 시간에서 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 또한, 주입압에 비해 최대 압력이 다소 작게 측정되었는데, 이는 그라우트재의 주입시 발생하는 에너지 손실 등의 요인으로 판단된다.

#### 4.1.3 지반별 최대 압력 및 잔류응력

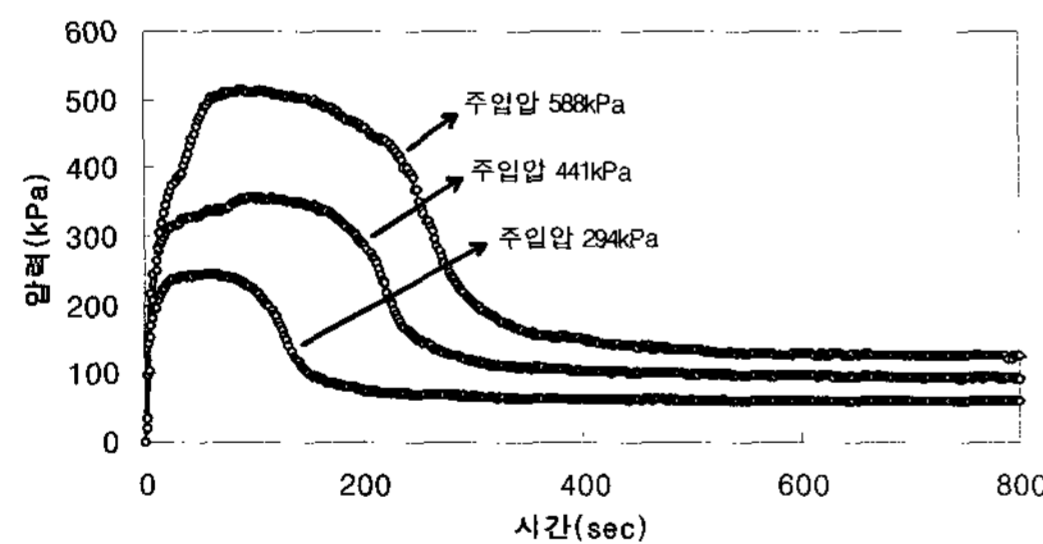
공벽에 작용하는 시간별 압력 변화 양상을 통해 각 시료별로 최대 압력과 잔류응력을 산정하였으며, 그 결과는 다음의 표 4와 같다. 상기 실험결과에서도 알 수 있듯이, 그라우트 주입시 공벽에 작용하는 압력은 그라



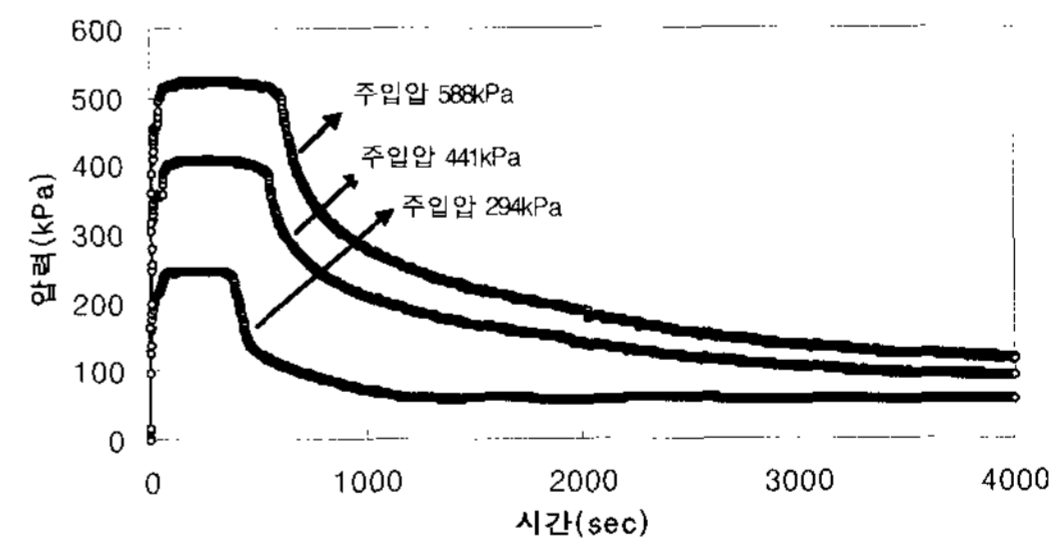
(a) 용산시료(200번체 통과량 18.8%)



(b) 압구정시료(200번체 통과량 35%)



(c) 혼합시료(200번체 통과량 27%)



(d) 부산과학단지 시료(200번체 통과량 48%)

그림 7. 주입압에 따른 지반에 작용하는 압력변화 양상

표 4. 시료별 최대 응력 및 잔류응력과 잔류응력 비율

시료종류	294kPa			441kPa			588kPa		
	최대응력	잔류응력	잔류응력/주입압	최대응력	잔류응력	잔류응력/주입압	최대응력	잔류응력	잔류응력/주입압
용 산	213.64	57.82	19.67	324.38	79.38	18.00	497.84	114.66	19.50
압구정	251.86	55.86	19.00	400.82	100.94	22.89	559.58	142.10	24.17
혼 합	246.96	59.78	20.33	357.70	94.08	21.30	512.54	121.52	20.67
부 산	245.99	58.82	20.00	408.60	90.98	20.63	523.01	116.46	19.81

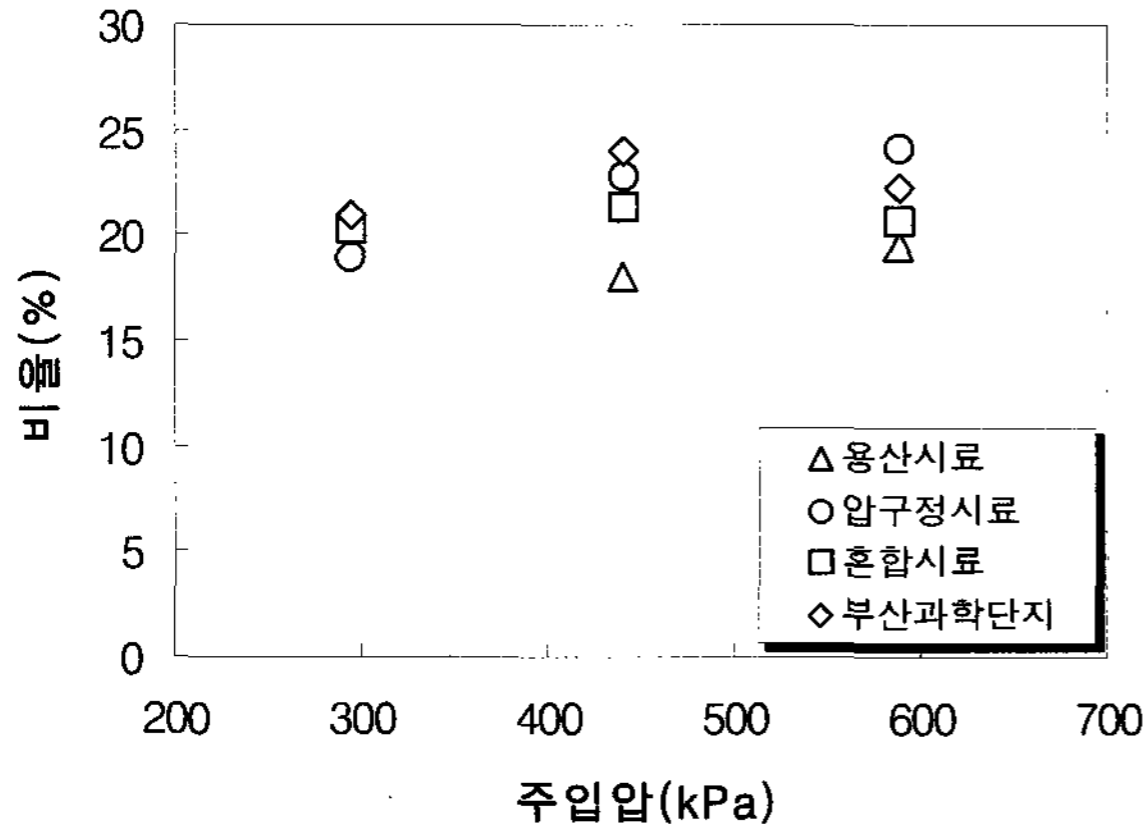


그림 8. 주입압 대비 잔류응력 비율

우트재 내의 물이 지반으로 빠져나가면서 감소하나 최종적으로는 잔류응력으로 수렴하게 된다. 따라서, 이 잔류응력은 가압 그라우팅 쏘일네일링 설치시 지반의 초기 지중응력의 증가에 기여할 것으로 판단된다. 이러한 잔류응력은 시료별, 주입압별로 다소 차이가 있으나 대략 주입압의 20%정도인 것으로 평가된다. 주입압 대비 잔류응력의 비율을 그림 8에 나타내었다.

#### 4.2 지반과 그라우트체의 함수비 변화

그라우트의 초기 함수비는 50%이나, 주입시간 경과에 따라 그라우트내의 물이 지반으로 빠져나가면서 함수비는 감소한다. 실험 결과, 4종의 시료 모두 종료시의 그라우트 함수비는 30% 전후로 나타났다. 이러한 함수

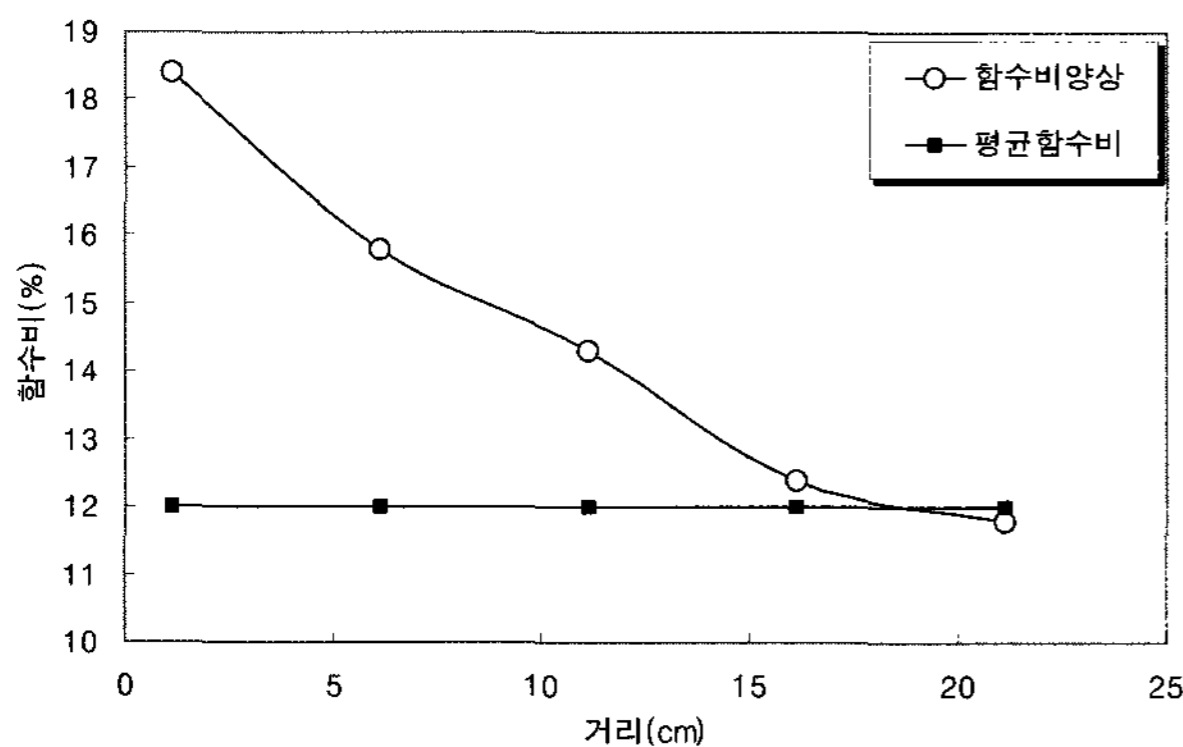
비의 감소는 그라우트재의 강성을 증가시킴으로써 발생된 지반변위의 회복을 억제하며, 이를 통해 잔류응력을 발생시키는 효과를 갖는다. 궁극적으로 잔류응력은 지반내 방사방향 응력으로 작용하여, 지반보강의 효과를 증진시킨다.

지반의 함수비는 다짐 한 후 즉시 초기 함수비를 측정하였다. 실험 종료 후 그라우트에서 지반으로 침투한 물에 의해 지반의 함수비가 증가하였다. 따라서 공벽으로부터 5cm간격으로 시료를 채취한 후 건조기를 이용하여 함수비를 측정하였다. 그라우트의 초기 함수비는 물시멘트비에 의해 50%로 측정이 되었다. 실험 종료 직후 물시멘트비는 시료를 채취한 후 그라우트의 수화반응을 막기 위해 적외선 함수비 측정기로 즉시 건조하여 구하였다. 물시멘트비 변화 및 지반 내 함수비 변화에 의한 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 441kPa로 주입시 용산 시료 및 압구정 시료에 대한 결과를 그림 9 및 표 5에 제시하였다.

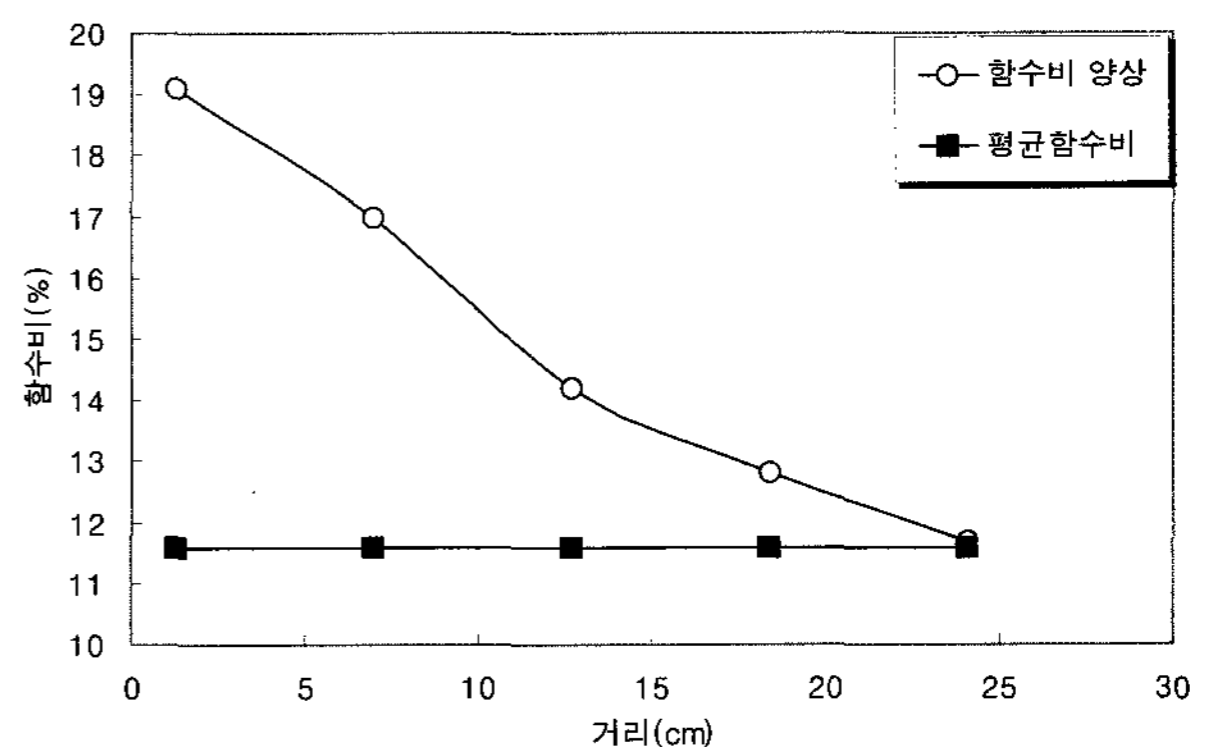
#### 4.3 주입에 따른 그라우트 구근의 변위

##### 4.3.1 반경 변위 증가량의 실험값 및 이론값 비교

그라우팅 주입 시험을 통해 그림 10과 같이 시간별 변위 양상을 측정하고 공팽창 이론을 통한 이론값과 실험값을 비교하였으며, 그 결과를 표 6 및 그림 11에 나타내었다. 여기서 실험값은 앞의 표 3에서 산정한 챔버의 구속효과를 고려하여 비구속 조건으로 환산한 값을



(a) 용산시료



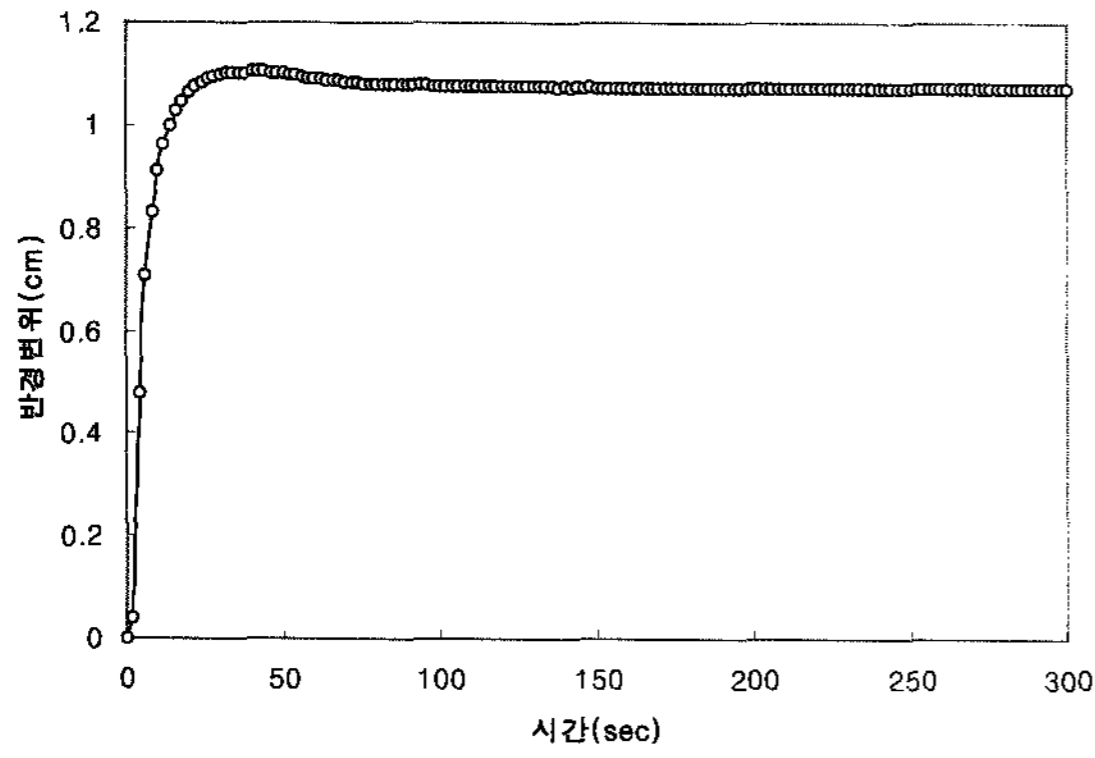
(b) 압구정시료

그림 9. 지반내 함수비 변화 양상

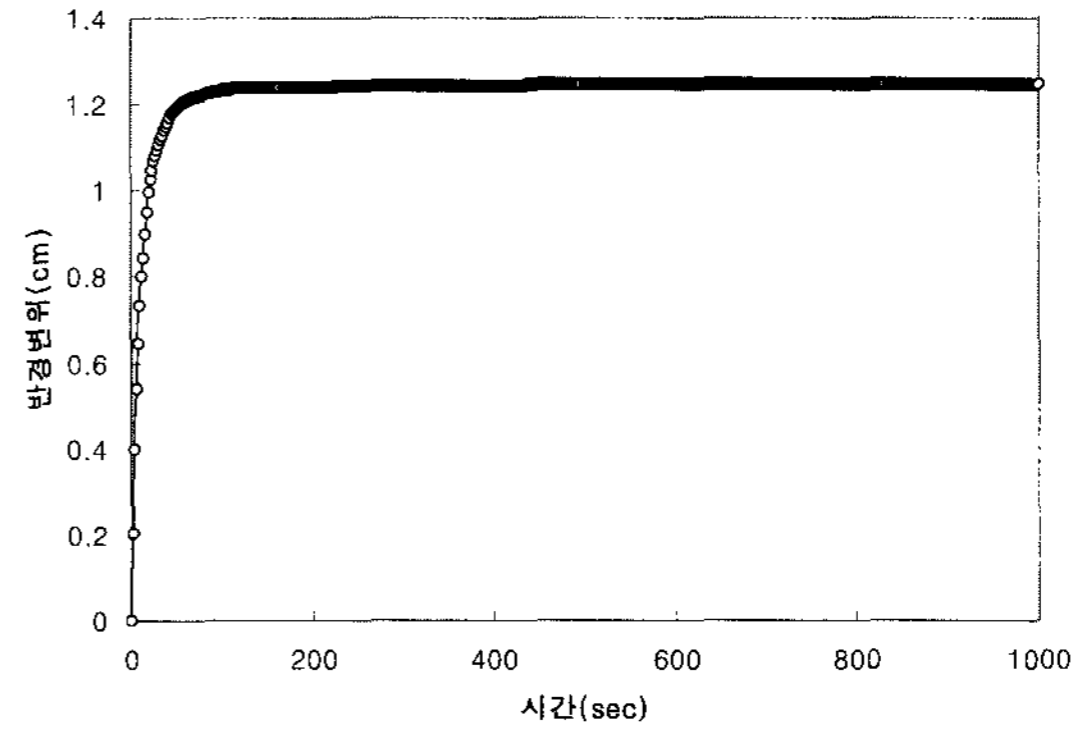
표 5. 지반으로 빠져나간 물의 양

시료 종류	물시멘트비 변화 이용(g)	지반내 함수비 변화 양상 이용(g)
용산 시료	0.66	0.78
압구정 시료	0.70	0.88





(a) 용산시료

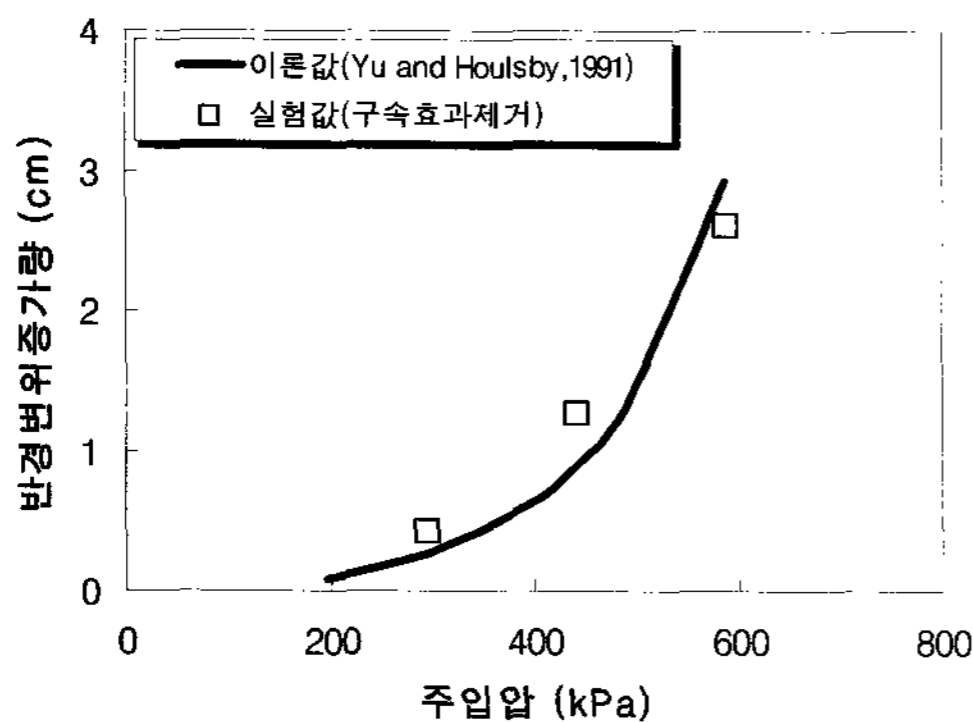


(b) 압구정시료

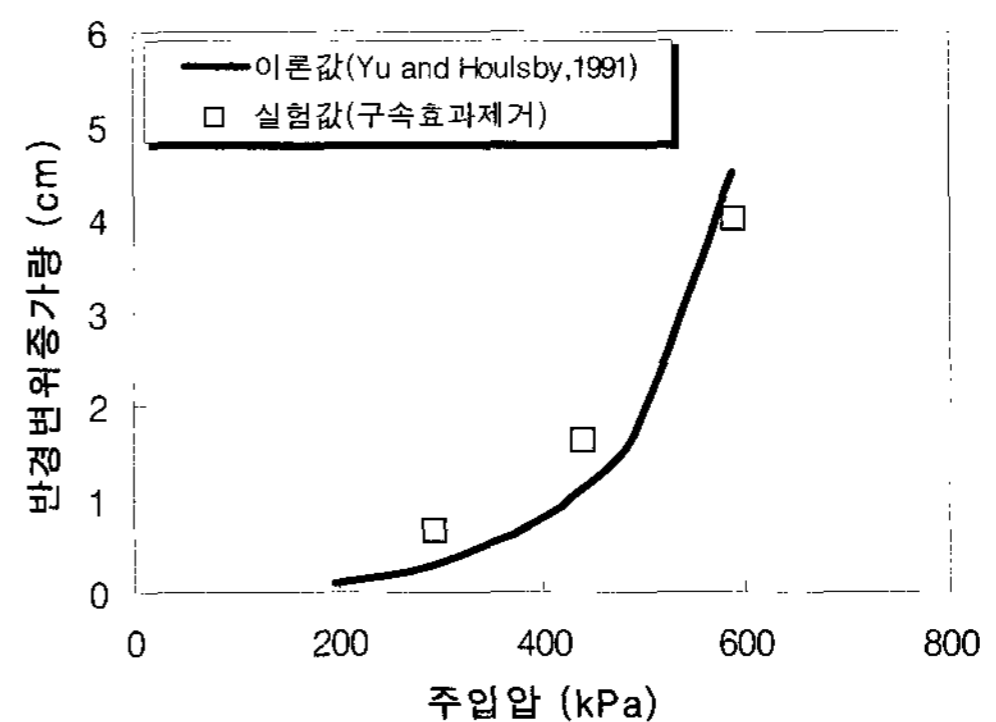
그림 10. 주입압 441kPa에 대한 시간별 반경변위

표 6. 반경 변위 증가량의 실험값 및 이론값

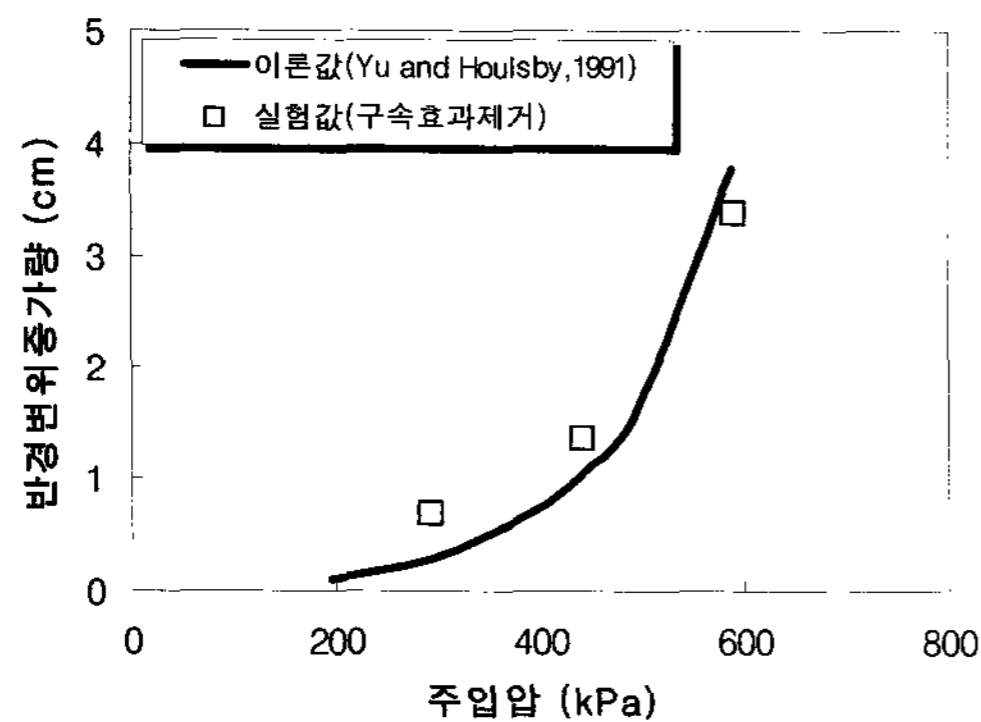
시료종류	주입압(kPa)	챔버 모형실험 결과(cm)	실험값(비구속)(cm)	이론값(비구속)(cm)
용 산	294	0.39	0.42	0.26
	441	1.10	1.27	0.89
	588	1.90	2.61	2.92
압구정	294	0.61	0.66	0.31
	441	1.25	1.63	1.15
	588	2.51	3.99	4.72
혼 합	294	0.64	0.69	0.29
	441	1.26	1.37	1.04
	588	2.64	3.38	3.77
부산과학단지	294	0.65	0.70	0.31
	441	1.50	1.97	1.15
	588	2.70	4.22	4.97



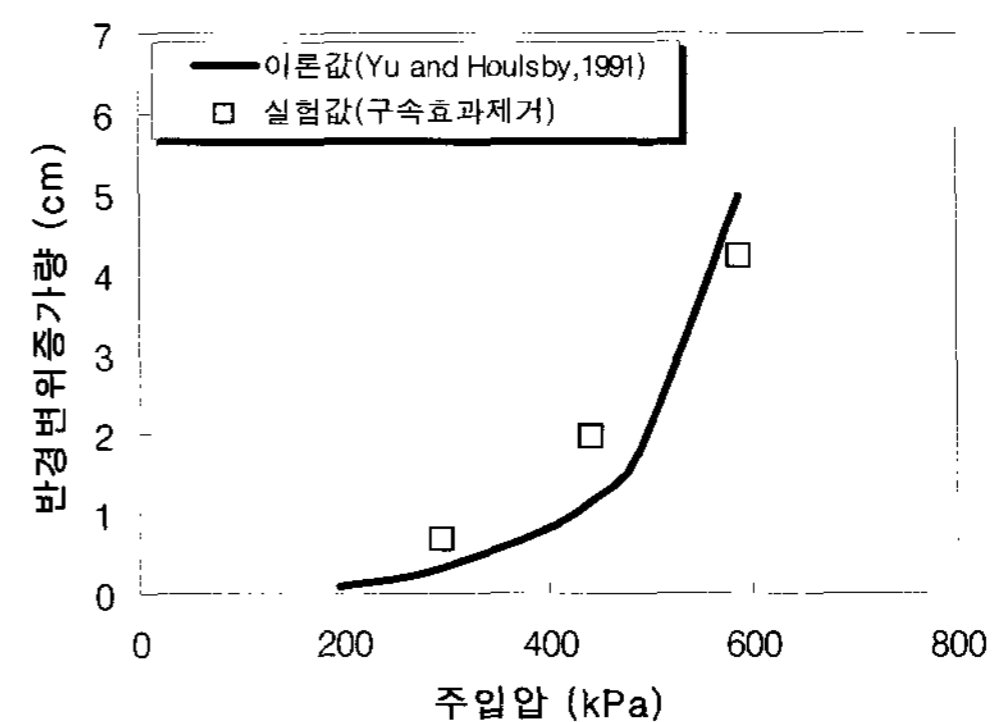
(a) 용산 시료



(b) 압구정 시료



(c) 혼합 시료



(d) 부산 과학단지 시료

그림 11. 반경변위 증가량의 이론값 및 실험값

비구속 조건인 이론값과 비교하였다. 공팽창 이론치의 경우 주입압 증가에 따라 세 시료 모두 약 500kPa 전후의 주입압에서 소성영역이 크게 발생하여 변위가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 챔버 구속효과를 제거한 실험값과 비교시에 그 경향이 대체적으로 유사한 것으로 판단된다. 그러므로, 그라우팅 주입에 따른 반경변위 예측시, 공팽창 이론의 이용은 타당하다고 판단된다.

### 4.3.2 반경 변위 증가량의 일반화

각 시료에 대한 주입압에 따른 반경 변위 증가량을 무차원화시켜 일반화된 값을 산정하였다. 실내 모형실험은 지중 4.0m 깊이의 응력조건을 모사하여 수행한 것이므로 지중 4.0m에서의 반경방향 초기 지중응력을 산정하여 주입압과의 비로써 정규화한 압력비와, 초기 천공 반경(5cm) 대비 증가된 천공반경으로 정규화한 변위 증가비의 관계를 정립하여 주입압에 따른 변위 증가 양상의 일반화된 값을 구하였으며, 그 결과를 표 7 및 그

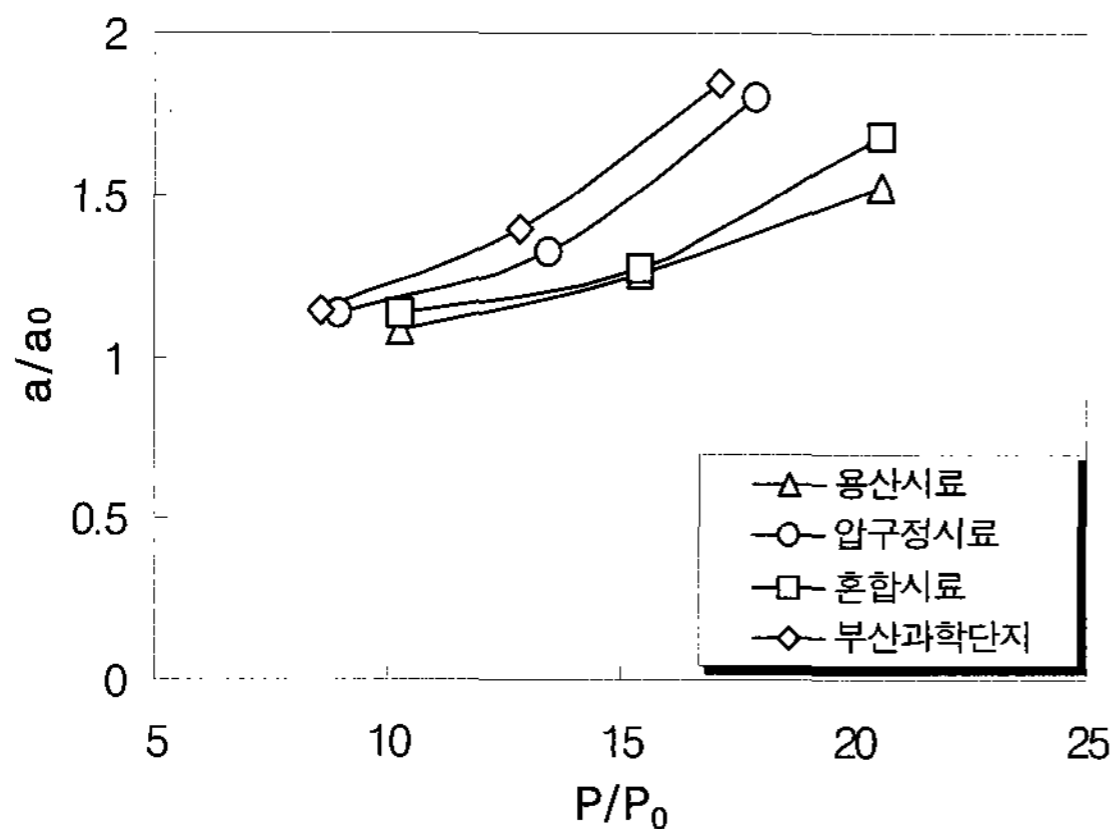
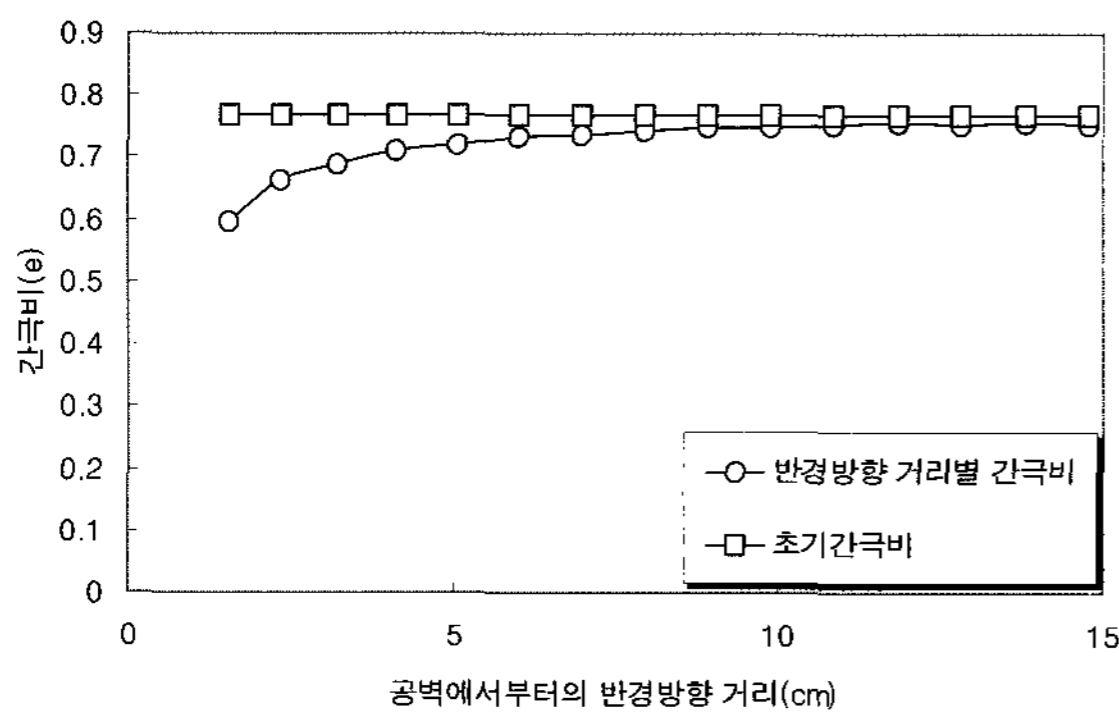


그림 12. 반경변위 증가량의 일반화



(a) 간극비 양상

림 12에 제시하였다. 여기서  $P_0$ 는 반경 방향 초기 지중 응력( $K_0\sigma_v = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_v$ ),  $P$ 는 주입압,  $a_0$ 는 초기 천공반경,  $a$ 는 공경확장 후 천공반경을 의미한다.

### 4.3.3 공벽에서 떨어진 거리별 변위 양상

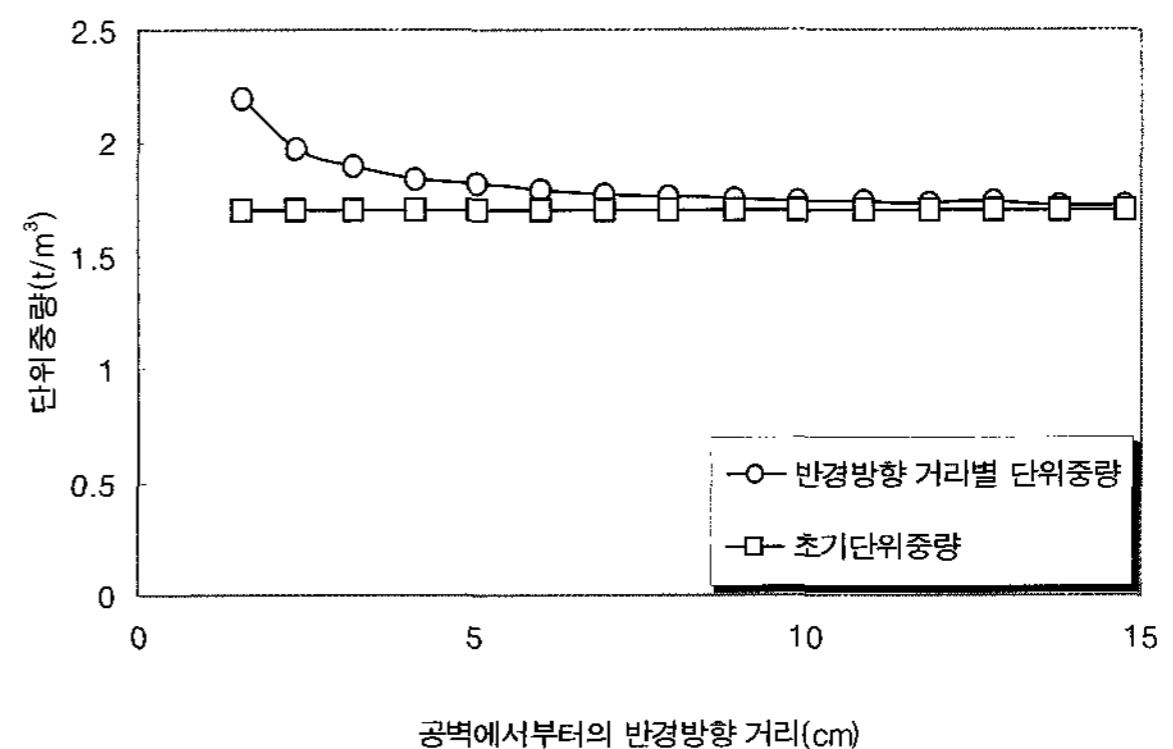
공팽창 이론으로부터 지반변위 발생 종료후 지반의 간극비와 단위중량의 변화 양상을 산정하였다. 즉, 공팽창 이론으로부터 공벽에서 떨어진 거리별로 발생 변위의 값을 산정하였으며 이를 이용해 지반의 간극비, 단위중량을 도출하였고 그 결과는 그림 13과 같다. 공벽에서 반경방향 거리별 간극비 및 단위중량의 산정 결과를 통해 압력 그라우팅시 지반은 압축되어 초기의 간극비 및 단위중량에 비해 그 값이 증가하였음을 알 수 있다.

### 4.4 주입시간 control

지반의 변위 회복 억제와 잔류응력의 증가 효과는 그

표 7. 반경 변위 증가량의 일반화

시료 종류	$K_0$	$P_0$ (kPa)	$P$ (kPa)	$P/P_0$	$a/a_0$
용산	0.43	28.56	294	10.29	1.084
			441	15.44	1.254
			588	20.59	1.522
압구정	0.49	32.82	294	8.96	1.132
			441	13.44	1.326
			588	17.92	1.798
혼합	0.43	28.56	294	10.29	1.138
			441	15.44	1.274
			588	20.59	1.676
부산 과학단지	0.52	34.33	294	8.56	1.14
			441	12.85	1.39
			588	17.13	1.84



(b) 단위중량 양상

그림 13. 구근 주변 지반의 간극비 및 단위중량 양상(부산과학단지 시료)

라우트 내에서 빠져나간 물로 인하여 그라우트의 강성이 증가됨으로써 얻어진다. 그라우트 주입 시험의 결과를 살펴보면, 최대 압력이 지속되는 시간은 물의 침투가 발생되기 이전이므로 membrane 조건과 같다. 따라서, 물시멘트비는 실험전 배합한 함수비(50%)와 거의 같을 것이다. 만약 최대 압력이 지속되는 시점에서 그라우트의 주입을 중단한다면, 물이 그라우트 내에서 지반으로 빠져나가면서 발생하는 물시멘트비 감소현상은 둔화되며, 따라서 지반에 작용하던 압력은 서서히 소산되어 지반의 변위 회복이 발생하고, 이에 따라 그라우팅의 강성 증가효과 또한 없을 것으로 판단된다.

이에 따라, 압구정 시료(200번체 통과량 35%)를 이용하여 주입압 441kPa에 대해 최대 압력이 유지되는 시점(약 2분 경과후)에 그라우팅 주입을 차단하여 그 결과를 기존의 실험결과와 비교하였으며, 이를 그림 14에 나타내었다. 그 결과, 그라우팅 주입 차단 시점부터 최대 압력은 유지되지 못하고 서서히 감소하였으며, 잔류응력 또한 기존 실험 결과보다 50% 이상 적은 것으로 확인되었다. 이 경우 측정된 물시멘트비는 약 45%로서, 그라우트 주입을 차단하지 않고 최대 압력을 유지한 경우의 종료시 함수비인 약 30%보다 함수비의 감소가 둔화된

것을 알 수 있다. 따라서, 물시멘트비 감소에 의한 강성 증가 효과를 발휘하려면 세립자의 함유량에 따른 적정 최소 주입시간이 필요하며 궁극적으로는 잔류응력 발생 시점까지는 그라우팅 주입압을 유지하여야 할 것으로 판단된다. 이에 따라, No.200체 통과량이 각각 다른 3개 시료에 대하여 적정 최소 주입시간을 산정한 결과는 그림 15와 같다. 이를 통하여, 세립자의 함유량과 주입압 증가에 따라 요구되는 적정 최소 주입시간이 증가함을 알 수 있다.

#### 4.5 공벽에 작용하는 압력 거동 메커니즘

압력 그라우팅시 공벽에 작용하는 시간별 압력 변화 양상을 통해 거동 메커니즘을 분석하였으며, 그 결과를 그림 16에 나타내었다. 그라우팅의 주입압은 그림 16(a)와 같이 control 장치의 레귤레이터를 통해 일정하게 유지되나, 지반에 작용하는 압력은 그림 16(b)와 같이 시간에 따라 최대 압력 작용 후 지속적으로 감소하여 일정한 압력으로 수렴함을 알 수 있다. 이는 주입 초기에는 Membrane 조건으로 공벽에 압력이 작용하나(0~ $t_1$ ), 시간경과에 따라 그라우트내의 물이 지반으로 빠져 나가면

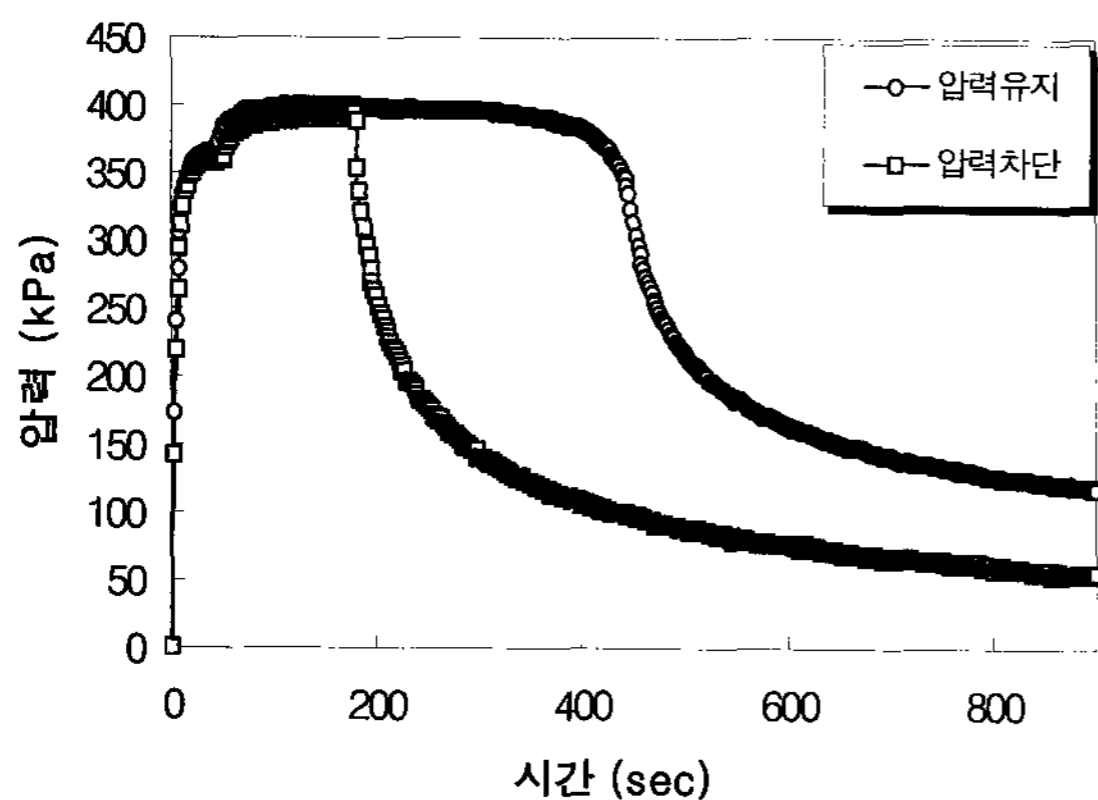


그림 14. 압력을 유지한 경우와 차단한 경우의 압력 양상 비교(압구정 시료, 주입압 441kPa)

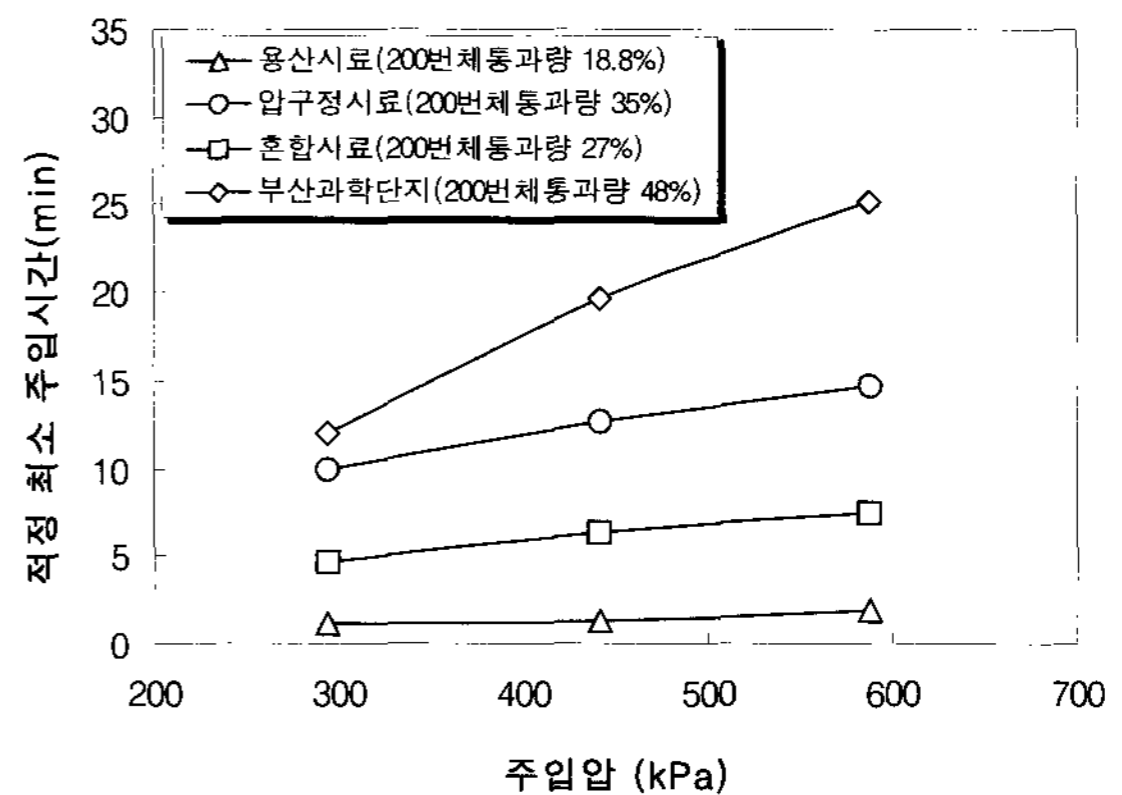


그림 15. 200번체 통과량에 따른 적정 최소 주입시간

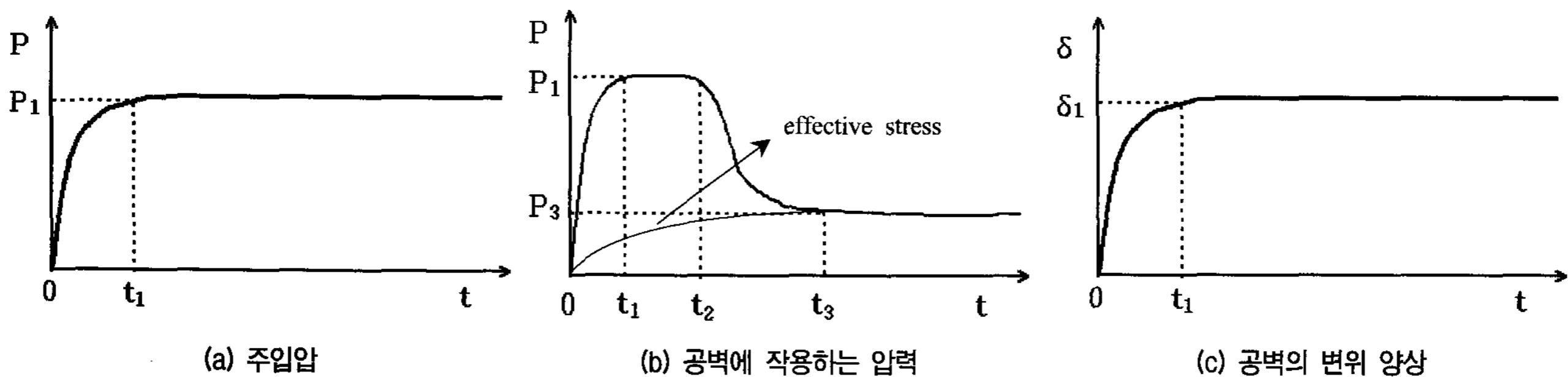


그림 16. 공벽에 작용하는 압력 및 변위 양상

서 그라우트는 반고체 상태로 변하게 된다. 이로 인해 그라우트에 의한 작용 압력은 감소하며, 이 시점부터는 물의 흐름으로 인한 침투압이 지반에 작용하게 된다( $t_1 \sim t_2$ ). 따라서, 시간 경과에 따라 지반으로의 물의 흐름 감소로 침투압이 감소하게 되며, 지반에 작용하는 압력 역시 감소한다. 이 때, 물의 흐름이 종료되면 지반에 작용하는 침투압은 0이 되나, 반고체 상태로 강성이 증가된 그라우트로 인해 지반의 변위 회복은 억제되고 지반에 작용하는 압력은 잔류응력으로 수렴하게 된다( $t_3$  이후). 잔류응력은 앞서 언급한 대로 지반의 초기 지중응력을 증가시켜, 가압 그라우팅 쏘일네일링의 인발력 증가에 기여한다.

공벽에 발생하는 변위의 양상은 그림 16(c)에 나타난 바와 같다. 즉, Membrane 조건 하에서 공벽에 작용하는 압력이 증가하여 최대 압력이 발생할 때까지 변위가 발생한다. 최대 압력 발생 이후 공벽에 작용하는 압력은 감소하지만 반고체화된 그라우트로 인해 변위의 회복은 발생하지 않으며, 이에 따라 시간이 경과되어도 발생 변위는 일정하게 유지된다.

## 5. 현장시험 및 이론적 검증

### 5.1 현장시험 개요

본 시험은 가압 그라우팅 쏘일네일링의 거동 특성을 파악하기 위해 현장에서 직접 시공 후 인발시험을 실시



그림 17. 시험 네일 시공중 전경

한 것으로, 압력식 및 중력식 쏘일네일링의 인발저항력을 산정하고 인발저항력 발생기구에 대한 검증을 실시하기 위해 수행되었다. 또한 풍화토 지반의 경우 인발 시험 시 일정 변위가 발생할 때까지는 하중을 가함에 따라 전면판이 지반 안쪽으로 밀려간다. 따라서 변위는 발생하되 하중의 증가는 미비한 현상이 발생하게 된다. 그러므로 시험 초기에 하중을 가하여 전면판이 어느 정도 지반에 정착하여 자리를 잡은 뒤, 변위 및 하중값을 초기화하여 인발 시험을 시작하게 된다. 즉, 이 실험에서 초기 전면판 정착시까지의 데이터는 사용하지 않는다. 시험은 부산과학지방산업단지 현장에서 풍화토에 대하여 실시하였으며, 쏘일네일링의 길이는 중력식의 경우 자유장 1.0m, 정착장 2.0m로, 압력식의 경우 자유장 0.5m, 패커 0.5m, 정착장 2.0m의 조건으로 설치하여 정착장의 일관성을 유지하였다. 쏘일네일링의 인발 시험은 변형을 제어방식(일정변형을 조건)으로 수행하였으며, 시험 네일 시공중 및 시공 완료후의 전경을 각각 그림 17과 18에 나타내었다.

### 5.2 대상지반의 조건

대상지반의 물성 평가는 실내시험을 위한 시료채취 시 수행되었으며 이를 요약하면 표 8과 같다.

또한 쏘일네일로 사용된 철근의 제원은 표 9와 같다.

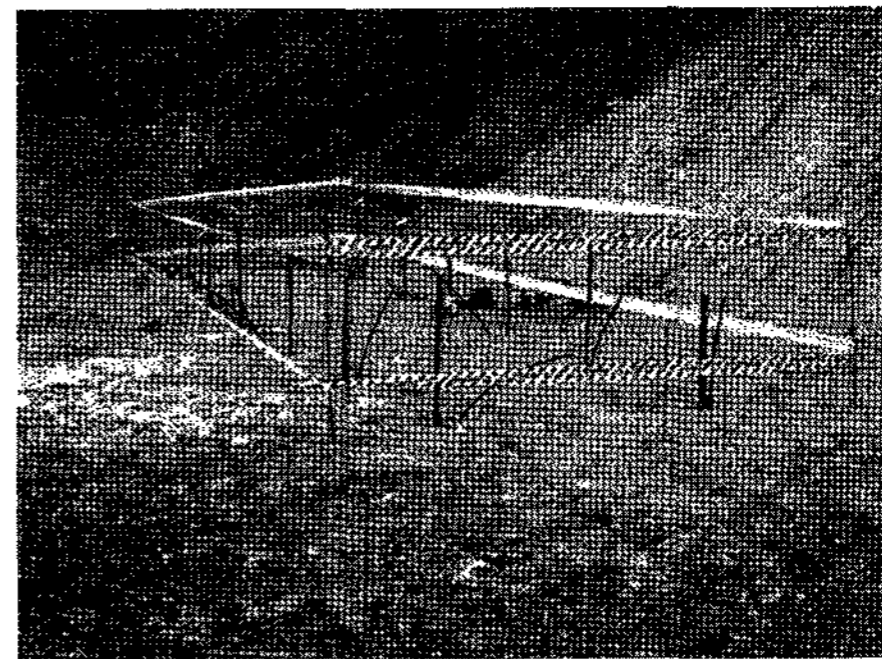


그림 18. 시공 완료후의 네일 전경

표 8. 대상지반의 물성

구분	비중	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	200번체 통과량(%)	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	탄성계수 (MPa)	포아슨비	간극비	투수계수 (cm/sec)	통일분류
물성	2.68	16.66	48	33	15.88	33.32	0.34	0.77	$7.5 \times 10^{-5}$	SM

표 9. 철근의 제원

호칭명	공칭직경(mm)	공칭단면적(cm <sup>2</sup> )	단위무게(kg/m)	항복응력(MPa)	인장강도(MPa)
D29	28.6	6.424	5.04	400	560

### 5.3 현장 인발시험 및 유효경 확인

가압 그라우팅 쏘일네일링 4공, 중력식 쏘일네일링 3공에 대한 시험결과를 표 10 및 그림 19에 나타내었다. 현장 인발시험 결과, 가압 그라우팅 쏘일네일링이 중력식에 비해 인발저항력이 약 36% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

또한 그라우팅 구근의 유효경 확인 및 거칠기 분석을 위해 시공된 네일을 인발하여 그 형상을 조사한 결과,

표 10. 압력식·중력식 쏘일네일링 인발시험 결과

구분	압력식	중력식
항복하중 (kN)	1	112.23
	2	120.76
	3	119.78
	4	-
	평균	117.59
직경(cm)	16.05	12.95
주면적(cm <sup>2</sup> )	10,079.4	8,132.6
인발저항력 $\tau_r$ (kPa)	158.56	144.11

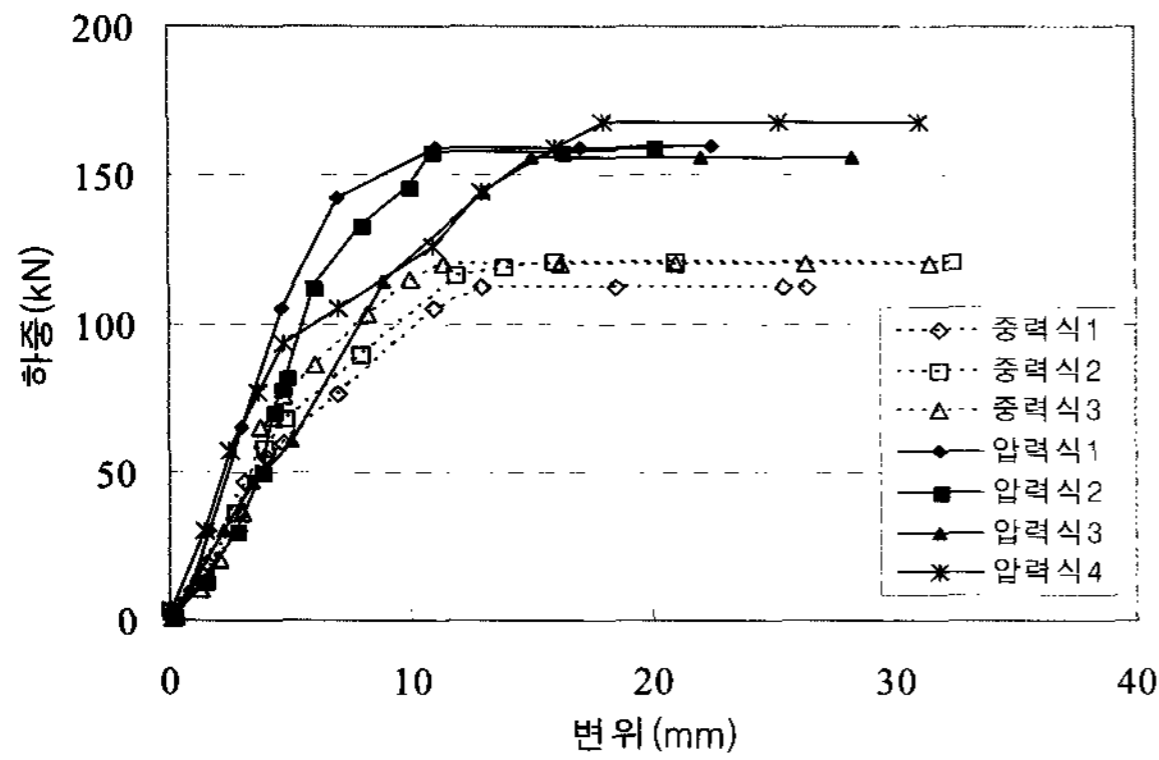


그림 19. 하중-변위곡선

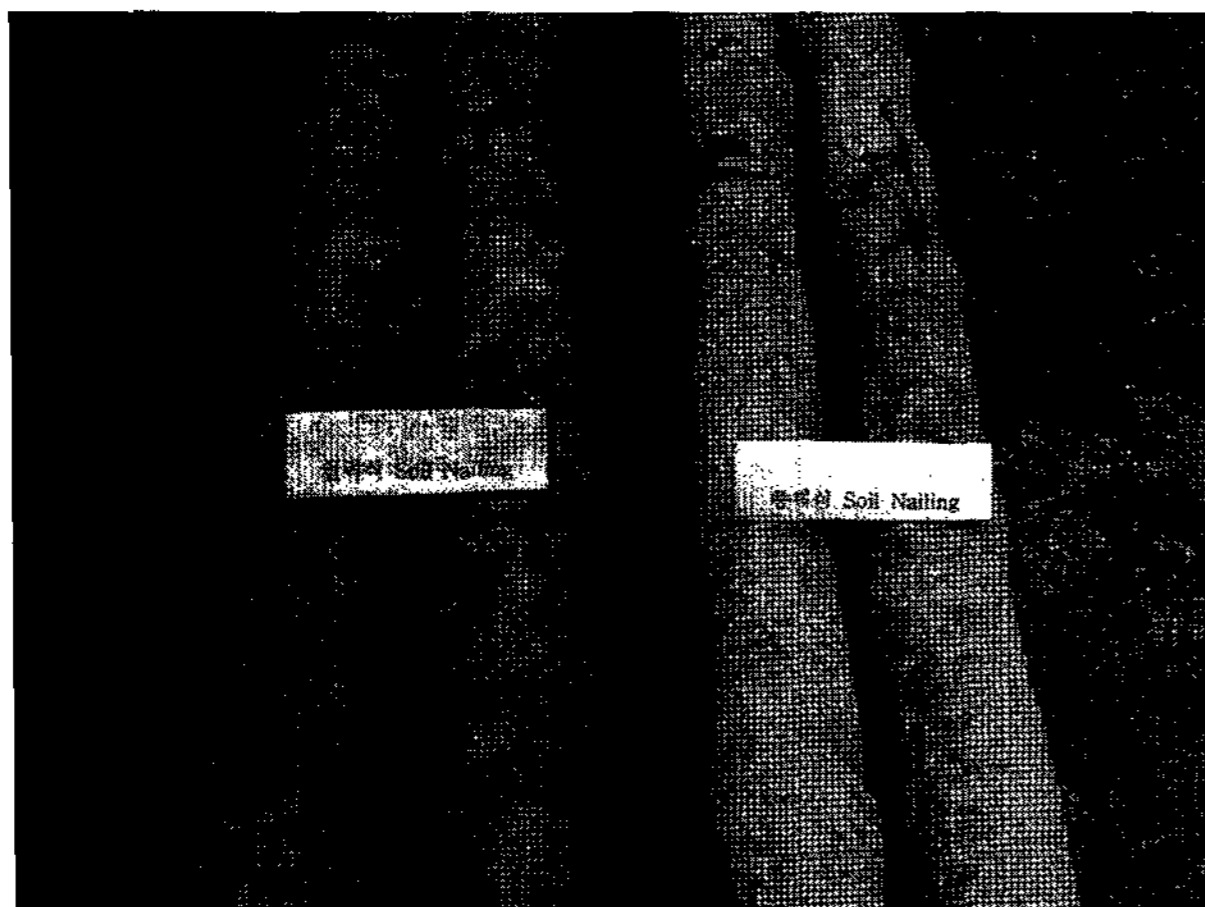


그림 20. 그라우팅 구근의 유효경 및 거칠기 확인

가압 그라우팅 쏘일네일링의 유효경이 평균 16.05cm로 중력식의 평균 12.95cm에 비해 약 24% 증가하는 것으로 나타났으며, 중력식 쏘일네일링이 전반적으로 매끈한 형상임에 비해 압력식의 경우 주변 토사입자 사이로 그라우트재가 침투하여 그 표면이 매우 거칠게 나타남을 알 수 있다. 인발한 압력식 및 중력식 쏘일네일링의 구근을 그림 20에 나타내었다. 따라서, 인발 저항력 증가의 가장 큰 효과는 유효경 증가로 약 24%이며 나머지 10%는 잔류응력 효과 및 구근의 거칠기 효과에 기인한다.

### 6. 결론

본 연구에서는 이론 분석, 그라우팅 모형 실험, 현장 시험, 수치모형을 통한 분석을 통해 가압 그라우팅 쏘일네일링의 실험적, 이론적 거동특성 규명 및 지반보강 측면에서의 효과를 제시하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 그라우팅 주입 초기에는 지반에 작용하는 압력이 membrane 조건과 같이 작용하나, 최대 압력이 발생 이후에는 감소되는 양상을 나타내었다. 이는 그라우트 내의 물이 지반으로 빠져 나가면서 그라우트는 반고체상태로 변하여 더 이상 압력이 전달되지 못하며, 지반에는 침투압이 작용하다가 침투의 종료로 인해 압력이 점차 감소하기 때문인 것으로 판단되며, 이 압력은 잔류응력으로 수렴한다.
- (2) 주입 시간의 경과에 따라 그라우트 내의 물이 지반으로 빠지면서 초기에 50%의 함수비였던 물시멘트비가 약 30%까지 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 그라우트의 강성을 증가시키게 되며, 이에 따라 지반의 변위 회복이 억제되고 궁극적으로 지반에 잔류응력을 발생시키게 된다.
- (3) 그라우팅의 최대 압력이 발생 및 유지되는 시점에서 그라우팅의 주입을 차단함으로써 나타난 결과를 기존의 실험결과와 비교하여 No.200체 통과량에 따른 적정 최소 주입시간을 제시하였으며, 이를 통해 세립분이 많을수록, 주입압이 클수록 본 시간이 더 길어야 함을 확인하였다.
- (4) 실내 모형실험을 통해 산정한 천공의 반경방향 변위를 공팽창 이론을 통해 산정한 이론값과 비교하였으며, 그 결과가 대체적으로 일치하는 것으로 나

타났다. 따라서, 그라우트 주입에 따른 변위 예측을 위해 공팽창 이론을 적용함은 타당할 것으로 판단된다.

- (5) 실내 실험 결과, 그라우트 주입압 대비 잔류응력의 비율은 4종의 시료에 대해 모두 약 20% 정도인 것으로 나타났으며, 이러한 잔류응력은 궁극적으로 지반내 방사방향 응력으로 작용하여, 지반보강의 효과를 증진시킬 것으로 판단된다.
- (6) 현장 인발시험 결과, 가압 그라우팅 쏘일네일링이 중력식에 비해 인발저항력이 약 36% 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 유효경 증가효과 약 24%, 기타, 잔류응력 및 구근 거칠기 증가 효과 약 10%에 기인함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 연구는 (주)도담이엔씨의 연구비 지원(고려대학교 BK21 건설산업 글로벌 리더 양성 사업단 대응)으로 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. Bishop, R.F., Hill, R., and Mott, N.F. (1945), "Theory of indentation and hardness tests", *Proc. Phys. Soc.* 57, pp.147-159.
2. Gibson, R.E., and Anderson, W.F. (1961), "In-situ measurement of soil properties with pressuremeter", *Civ. Engng Pub. Wks Rev* 56, pp.615-618.
3. Hill, R. (1950), "The mathematical theory of plasticity", *Oxford University press*.
4. Vesic, A.S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.98, No.SM3, pp.265-288.
5. Yu, H.S., and Houlby, G.T. (1991), "Finite cavity expansion in dilatant soils : loading analysis", *Geotechnique*, Vol.41, No.2, pp. 173-183.

(접수일자 2008. 2. 20, 심사완료일 2008. 4. 25)