

# 실드TBM터널에서 뒤채움 주입이 지반의 단기·장기 침하에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

오주영<sup>1</sup> · 박현구<sup>1\*</sup> · 김도형<sup>2</sup> · 장석부<sup>3</sup> · 이승복<sup>3</sup> · 최항석<sup>4</sup>

<sup>1</sup>정회원, 삼성물산 건설부분 Civil사업부 책임

<sup>2</sup>정회원, 삼성물산 건설부분 Civil사업부 책임

<sup>3</sup>정회원, 삼성물산 건설부분 Civil사업부 수석

<sup>4</sup>정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수

## Study on the effect of tail void grouting on the short- and long-term surface settlement in the shield TBM Tunneling using numerical analysis

Ju-Young Oh<sup>1</sup> · Hyunku Park<sup>1\*</sup> · Dohyoung Kim<sup>2</sup> · Seokbue Chang<sup>3</sup> · Seungbok Lee<sup>3</sup> · Hangseok Choi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Member, Samsung C&T Corporation, Civil Business Unit, Manager

<sup>2</sup>Member, Samsung C&T Corporation, Civil Business Unit, Manager

<sup>3</sup>Member, Samsung C&T Corporation, Civil Business Unit, Director

<sup>4</sup>Member, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ. Professor

\*Corresponding Author : Hyunku Park, [hnine.park@samsung.com](mailto:hnine.park@samsung.com)

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
19(2)265-281(2017)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.2.265>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received March 17, 2017

Revised March 27, 2017

Accepted March 29, 2017



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

### Abstract

For shallow tunnel constructions, settlement of the ground surface is a main issue. Recent technical developments in shield TBM tunneling technique have enabled a decrease in such settlements based on tunneling with ground deformation controls. For this objective, the tail void grouting is a common practice. Generally surface settlements in a soil of low permeability occur during a tunnel construction but also during a long period after completion of the tunnel. The long-term settlements occur mainly due to consolidation around the tunnel. The consolidation process is caused and determined by the tail void grouting which leads to an excess pore water pressure in the vicinity of the tunnel. Because of this, the grouting pressure has a strong effect on the long-term settlements in the shield tunneling. In order to investigate this effect, a series of coupled hydro-mechanical 3D finite element simulations have been performed. The results show that an increase in grouting pressure reduces the short-term settlements, but in many cases, it doesn't lead to a reduction of the final settlements after the completion of consolidation. Thereby, the existence of a critical grouting pressure is identified, at which the minimal settlements are expected.

**Keywords:** Shield TBM, Tail void grouting, Settlement, Consolidation, Volume change, Critical grouting pressure

## 초 록

얇은 터널의 시공에 있어 지표 침하는 주요 관리 사항으로 쉴드 TBM 기술을 적용함으로써 굴착 중 지반 변형의 제어를 통하여 침하를 경감시키는 것이 가능하며, 특히 뒤채움 주입은 침하 경감의 목적으로 쉴드 공법에서는 일반적으로 적용되는 기술이다. 투수성이 낮은 지반에서의 TBM 시공에 의한 지표 침하는 터널 시공 중에 발생할 뿐만 아니라, 터널 관통 후에도 장기간에 걸쳐 발생한다. 장기 침하는 주로 터널 주변의 압밀에 의해 발생되고, 이 압밀 과정은 터널 주변에 과잉 간극수압을 유발하는 뒤채움 주입에 의해 영향을 받게 되며 결과적으로 쉴드 TBM 터널에서는 뒤채움 주입이 장기 침하에 큰 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 쉴드 TBM 공법 중 뒤채움 주입이 지표 침하에 미치는 영향을 파악하기 위해 3차원 응력-간극수압 연계해석을 수행하였다. 해석 결과 뒤채움 주입압의 증가는 단기 침하를 경감시키지만, 다수의 경우에서 장기 침하의 감소에 기여를 하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 장기 침하를 최소한으로 제한할 수 있는 한계 주입압의 존재를 확인하였다

**주요어:** 쉴드 TBM, 뒤채움 그라우팅, 침하, 압밀, 체적 변화, 한계 주입압

## 1. 서론

유동 인구와 물류 이동의 지속적인 증가로 인해 사회 기반 시설의 확장 및 신설이 지속적으로 요구되고 있으며, 이와 더불어 수송 수단의 질적 상승에 대한 요구 또한 증가하고 있다. 도심지의 과밀화로 인해 지상 개발은 매우 제한적이며, 공사로 인한 주변 환경에 대한 영향 및 민원을 최소화하기 위해 터널 시공이 크게 증가한 상황이다.

터널 공법의 발전은 세계적으로 NATM (New Australian Tunneling Method) 공법과 같은 종래의 터널 공법의 발전과 더불어 쉴드 TBM 공법의 급속한 발전이 이루어지고 있다. 쉴드 TBM 공법의 터널 지보 개념은 지반의 응력 해방 거동에 억제·대응하는 방식으로써 터널 굴착시 지반의 응력 해방을 허용하는 종래의 NATM 공법의 지보 개념과는 상이한 방식이다. 굴진면에 압력을 가하여 굴진면의 변형을 억제함으로써 굴진면의 안정을 도모하며, 매우 강성이 큰 쉴드가 굴착면의 변형을 억제한다. 또한 쉴드 통과 후 불가피하게 발생하는 쉴드 후미의 빈 공간(테일 보이드)을 그라우팅하여 채움으로써 지반 변형을 억제함과 동시에 강성이 큰 세그먼트 라이닝을 통해 지반을 지지토록 한다. 이러한 공법상의 특징으로 인해 침하가 민감한 지역이나 연약층이 존재하는 등의 시공 난이도가 높은 조건에서 쉴드 TBM 공법이 적용되고 있으며, 과거에 불가능했거나, 난이도가 상당히 높은 구간에서 터널 시공이 가능해지고 있다. 하지만, 이러한 쉴드 TBM 공법의 특징에도 불구하고, 실제 쉴드 TBM 터널 시공시 침하가 발생하는 것으로 계속되고 있으며, 저토피 구간에서 쉴드 TBM 터널 시공시에는 침하 발생이 여전히 주요 쟁점사항이다.

쉴드 TBM 터널 시공시 발생하는 침하는 굴진면 지지를 위해 가하는 챔버 압력, 쉴드의 자세제어, 뒷채움 주입 압력 및 체적 등의 쉴드 TBM 운전조건에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다(Attewell 1978, Mair and Taylor

1997, Suwansawat 2002, Leca and New 2007, Jun and Kim 2015, Park et al. 2016). 사질토 지반과 같이 투수계수가 큰 지반에서는 운전조건이 침하에 미치는 조건이 일정 범위 내에서 제한적으로 일어나는 반면, 점성토 지반과 같이 투수계수가 낮은 지반에서는 TBM 운전조건이 터널 관통 후에도 장기간에 걸쳐 영향을 미쳐 지표침하가 발생한다. 현장 계측 연구에 따르면 이러한 장기침하는 전체 침하의 약 30~90%를 차지하는 것으로 나타나고 있으며(Shirlaw 1995, Hashimoto et al. 1999), 주로 쉴드 TBM 통과 중 터널 주변 지반에 발생하는 과잉간극수압과 지반의 압밀에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 발생하는 과잉간극수압의 크기와 분포 형태는 쉴드 TBM의 운전 조건, 지반의 압축성 및 투수성, 주변 지반에 대한 라이닝의 상대 배수조건, 터널 시공 전 초기 간극수압 분포 등에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다 (Mair and Taylor 1997).

쉴드 TBM 터널에서 뒤채움 주입은 쉴드 TBM 터널에서 불가피하게 발생하는 테일 보이드의 변형을 억제하고, 지반 침하를 감소시키는데 중요한 역할을 하는 조정 요소이다. 또한, 지반의 장기거동에 관련하여 뒤채움 주입이 지반 내 과잉간극수압을 증가시키는 주요 인자인 것으로 확인되었다(Hwang et al., 1996, Hashimoto et al., 1999). 따라서, 본 연구에서는 뒤채움 주입이 단기 및 장기 침하에 미치는 영향을 확인하기 위해 균질한 단순 지반 조건에 대해서 응력-간극수압 해석을 수행하였고, 해석을 통하여 뒤채움 주입압력의 크기, 지반의 강성 및 체적 변화 특성과 지반 침하 간의 연관성을 파악하였다.

## 2. 수치해석 모델링

### 2.1 구성요소별 모델링

본 연구에서는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였고(ABAQUS, 2011), 과잉간극수압에 의한 지반의 장기침하 거동을 확인하기 위하여 응력-간극수압 연계해석 모델을 이용한 3차원 수치해석을 수행하였다. 해석 모델에서는 지반, 쉴드 TBM, 터널 라이닝, 테일 보이드 그라우트를 개별적으로 고려하였다(Fig. 1.)

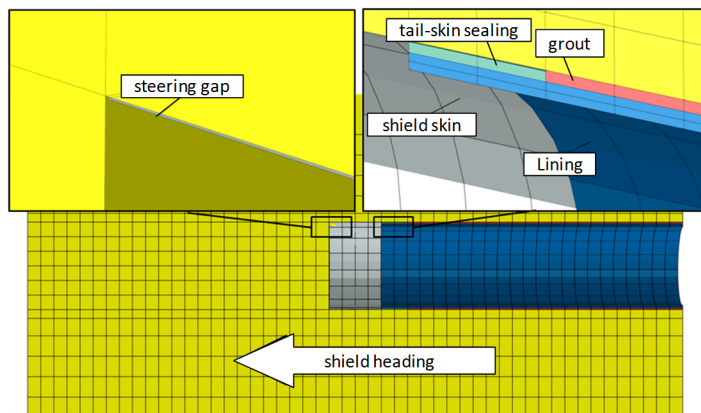


Fig. 1. Three-dimensional finite element model

지반과 테일 보이드 그라우트는 간극수와 입자로 이루어진 2상의 포화된 다공성 매질로 모델링하였다(Lewis and Schrefler, 2000). 이는 Biot (1941)의 압밀이론에 따라 압밀에 의한 지반과 그라우트의 시간 의존적 거동을 고려할 수 있으며, 더불어 그라우트와 지반사이의 수리적 상호작용 및 TBM 후미에서 그라우트 내부 압력의 감소를 고려할 수 있다. 지반과 그라우트의 요소망은 변위는 quadratic approximation, 간극수압은 linear approximation 을 하는 20절점으로 구성된 3차원 응력-간극수압 연계 요소로 형성하였다.

셴드 TBM은 원뿔 형태의 스킨 플레이트를 가진 강체 contact body로 모델링하였고, 지반과 스킨 플레이트 사이에 마찰력을 부여하여 스킨 플레이트에 접촉하는 지반요소 절점의 변위를 제한하였다. 셴드 스킨 플레이트는 셴드 헤드부의 장비 외경이 셴드 테일부의 직경보다 작은 원뿔 형태로 가정하여 요소망을 형성하였으며, 외경차이는 2 cm으로 가정하였다. 이때 굴진면 부근에서의 overcutting은 고려하지 않았다. 또한, 셴드 테일부에 테일썰을 요소망을 형성하고, 내측면에 contact surface를 정의하여 라이닝 요소와의 상호 작용을 고려하였다.

터널의 콘크리트 세그먼트 라이닝의 경우 조인트를 고려하지 않고 단순화된 탄성 연속체 요소로 가정하여 20 절점의 3차원 요소로 요소망을 형성하여 완전 불투수 조건으로 모델링하였다. 또한, 테일썰과의 접촉을 감안하여 활성화되는 라이닝 요소의 외측면에 contact surface를 정의하여 라이닝 요소 활성화와 동시에 테일썰과의 접촉 거동이 활성화되도록 정의하였다.

각 구성요소에 대한 기하학적 파라미터는 Table 1에 정리된 바와 같다.

Table 1. Geometric parameters

Overburden	Diameter of excavation	Length of shield	Steering gap at shield tail	Diameter of lining	Thickness of lining
20 m	10 m	9 m	0.02 m	9.8 m	0.3m

## 2.2 재료 모델링

재료 모델링에 있어 대상 지반의 거동은 von Wolffersdorf (1996)의 모델을 기본 모델로 하고, intergranular strain개념을 도입하여 Niemunis & Herle (1997)에 의해 확장된 hypoplasticity를 적용하였다. 해당 구성 모델은 ABAQUS 프로그램 내에 제공된 user interface인 UMAT를 이용하여 프로그래밍되어 해석에 반영하였다.

Hypoplasticity의 구성방정식은 비선형의 속도(rate) 타입의 텐서 방정식으로, 탄성 변형과 소성 변형을 구분하지 않고, 식 (1)과 같이 Cauchy stress  $\mathbf{T}$ , 간극비  $e$ , strain rate  $\mathbf{D}$ 의 단일 텐서 방정식으로 수학적인 기술이 가능하다. 또한, 지반 거동의 응력 의존성(barotropy) 및 간극비 의존성(pycnotropy)을 고려하고 있다.

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathcal{L}(\mathbf{T}, e) : \mathbf{D} + \mathbf{N}(\mathbf{T}, e) \parallel \mathbf{D} \parallel \quad (1)$$

여기서,  $\overset{\circ}{\mathbf{T}}$  : Objective Jaumann stress rate

$\mathbf{L}$  : 4th order stiffness tensor

$\mathbf{N}$  : 2nd order stiffness Tensor

적용한 hypoplasticity 구성방정식에 대한 자세한 설명은 동일 저자의 Oh (2013), Oh and Ziegler (2014)에서 수록되어 있다. 본 연구에 적용된 입력 물성치는 Table 2에 정리된 것과 같다. 여기서  $\gamma_{sat}$ 는 포화단위중량,  $\phi_c$ 는 한계 내부마찰각,  $h_s$ 는 입자 강성,  $n$ 은 압축지수,  $e_{d0}$ ,  $e_{c0}$ ,  $e_{i0}$ 는 각각 응력 상태의 최대 간극비, 한계 간극비, 최소 간극비,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 Pycnotropy 지수를 나타낸다. 나머지  $R$ ,  $m_R$ ,  $m_T$ ,  $\beta_R$ ,  $\chi$ 는 intergranular strain과 관계되는 재료 물성으로 각각 최대 intergranular strain, 180°방향전환시 강성증가 계수, 90°방향전환시 강성증가 계수, 관계식의 지수를 의미한다. 각 입력 물성치에 대한 물리적 의미 및 산정방법에 대해서는 Niemunis & Herle (1997)과 Herle & Gudehus (1999)에서 상세히 다루어지고 있다.

**Table 2.** Input parameters for soil

$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi_c$ [°]	$h_s$ [kPa]	$n$ [-]	$e_{d0}$ [-]	$e_{c0}$ [-]	$e_{i0}$ [-]	$\alpha$ [-]
21	33	1.5 · 106	0.28	0.55	0.95	1.05	0.25
$\beta$ [-]	$R$ [-]	$m_R$ [-]	$m_T$ [-]	$\beta_R$ [-]	$\chi$ [-]		
1.50	1 · 10 <sup>-4</sup>	5.0	2.0	0.5	6.0		

지반의 강성 및 체적변화 특성과 뒤채움 그라우팅이 지반에 미치는 영향의 관계를 파악하기 위해 3가지의 다른 초기 간극비를 가정하였다. 이 때 초기 간극비는 hypoplasticity의 상대밀도 지표  $r_e$ (식 (1))를 0.3, 0.4, 0.5로 가정하고, 하중-간극비 관계(식 (2))를 이용하여 가정한 상대밀도에 부합되도록 산정하였다.

$$r_e = \frac{e - e_d}{e_c - e_d} = \frac{e_0 - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}} \quad (2)$$

$$\frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \frac{e_i}{e_{i0}} = \exp \left[ - \left( \frac{3p}{h_s} \right)^n \right] \quad (3)$$

상대밀도 지표가 작은 값을 보일수록 조밀한 지반을 의미하며, Fig. 2는 3축 압축 시험을 hypoplasticity를 적용하여 수치해석한 결과이며, 상대밀도에 따라 다른 거동을 보여주고 있다.

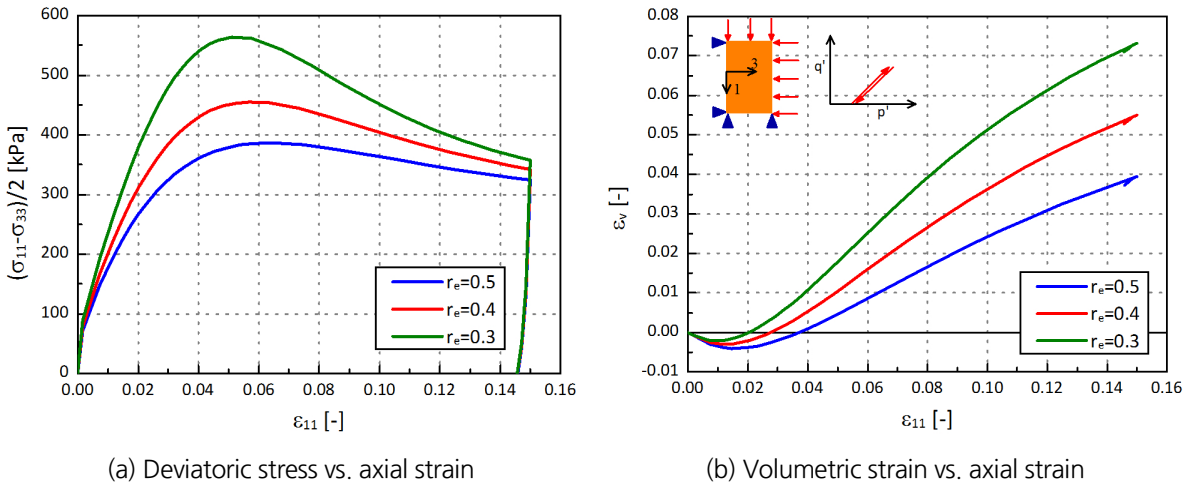


Fig. 2. Computed stress-strain-volume change relationship in triaxial compression test under equal confinement pressure ( $p=200$  kPa)

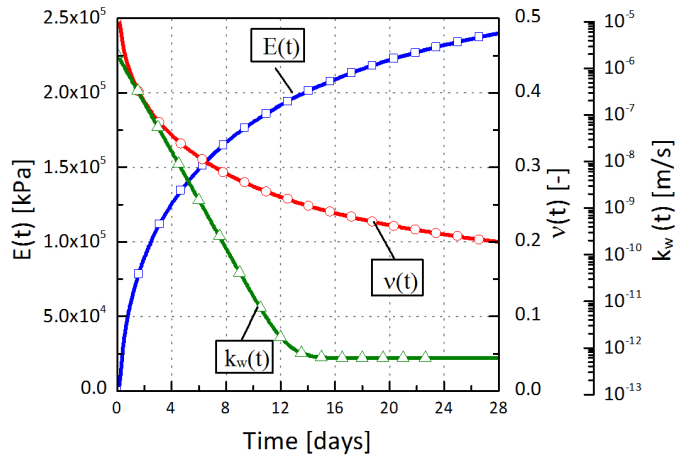


Fig. 3. Time dependent stiffness and permeability of grout

지반의 투수계수  $k_w=1 \times 10^{-8}$  m/s 로 가정하였고, 이는 실트질 지반의 투수계수 범위 내에 있다.

본 논문의 해석결과는 쉘드 TBM 터널에서 뒤채움 주입과 지반 조건사이의 상호작용에서 지반 투수계수의 영향을 파악하기 위한 다수의 매개변수 해석 중 일부이다. 그 이유로 인해 본 논문의 해석 대상 지반 투수계수가 실트질 지반에 속함에도 사질토에 대한 지반 물성치가 적용되었다. 따라서, 느슨한 사질토가 정규압밀점토와 거동이 유사하고, 조밀한 사질토가 과압밀 점토의 거동과 유사하므로 경향 분석이 가능하여 본 논문에서는 발생 경향과 현상의 원인 분석에 주안점을 두어 기술하였다.

테일 보이드를 채운 그라우트는 초기 액체상태와 수화작용에 따른 경화과정을 고려하기 위해 탄성계수와 Poisson 비, 투수계수를 각각 시간 함수  $E(t)$ 와  $\nu(t)$ ,  $k_w(t)$ 로 나타내었고, 시간에 따른 변화는 Fig. 3에서 볼 수 있

는 바와 같다. 시간에 따른 탄성계수의 변화와 Poisson 비의 변화는 각각 Meschke et al. (1996)과 Mayer (2000)이 제시한 시간함수를 적용하였다. 그라우트의 탄성계수는 ETAC의 그라우트 물성을 적용하였다. 그라우트 투수계수의 변화는 Kasper (2004)가 제시한 시멘트 몰탈에 대한 시간에 대한 투수계수 함수를 사용하였다. 이는 그라우트의 배합비에 따라 상이한 값을 보이므로 적용된 배합비에 따른 투수특성을 고려해야만 한다.

### 2.3 변위경계 및 수리 경계

연계해석을 위해 설정한 변위 경계와 수리 경계는 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

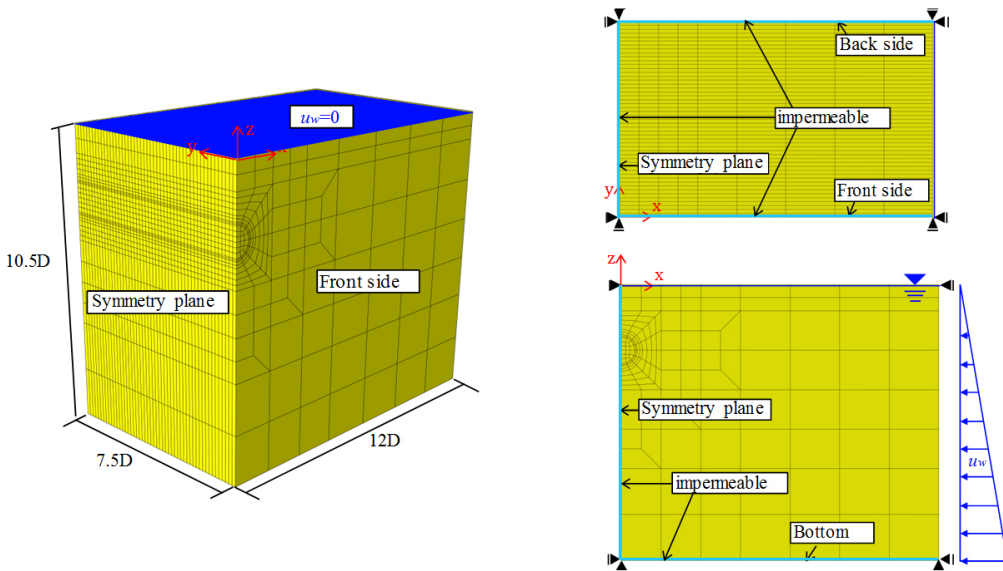


Fig. 4. FE mesh with boundary conditions

실드 TBM터널의 단면은 원형으로 터널 중심축에 대해서 좌우 대칭인 점을 감안하여 우측 반단면에 대한 해석을 수행하였다. 측면 경계면과 하부 경계, 전면과 후면 경계에는 롤러를 설치하여 각각 수평 방향과 연직방향의 변위를 구속하도록 하였다.

수리 경계조건으로 측면경계와 하부경계, 지표면에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였으며, 전면 경계와 후면 경계는 불투수층으로 지하수 유입이 발생하지 않도록 하였다.

### 2.4 시공과정 모델링

굴진면 지지압력은 굴진면에 작용하는 분포 하중으로 해석상에서 고려하였다. 굴진면 지지압력이 침하에 대한 영향을 최소화하기 위해서 초기 지반의 수평응력과 동일한 크기의 분포 하중을 굴진면에 작용하도록 하였다

(Jun and Kim, 2016). 뒤채움 주입은 주입 압력과 그라우트 요소망의 활성화를 통하여 모델링하였다. 주입압력은 굴착면과 라이닝 외측면에 작용하는 분포하중으로 고려하였고, 천단으로부터 터널 바닥으로 그라우트의 단위 중량( $\gamma_{gr}=21 \text{ kN/m}^3$ )에 의해 선형으로 증가하도록 하였다(Fig. 5). 주입 압력에 의한 지반침하 경향을 파악하기 위하여 4가지 압력 수준(천단부에서 초기 토피 압력의 80, 100, 120, 140%)에 대한 수치해석을 수행하였다.

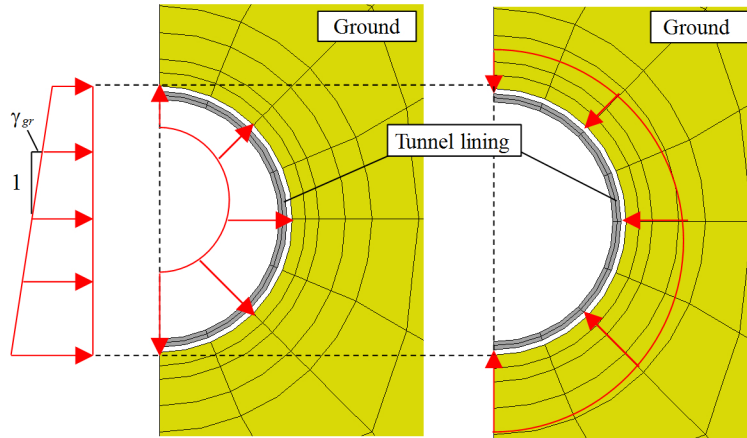


Fig. 5. Distribution of grouting pressure

실제 쉴드 TBM의 굴진은 연속적으로 이루어지나, 본 수치해석에서는 step-by-step으로 이루어진다고 가정하였다. 터널의 굴착은 기존의 지반요소망을 비활성화하여 구현하고, 쉴드의 전진, 그라우팅, 라이닝의 조립은 굴착 과정에 맞추어 요소망을 활성화하는 것으로 모델링하였다. 또한, 장기침하 거동을 파악하기 위하여 터널 관통 후 압밀 침하 계산을 위한 추가적인 해석 단계를 설정하였다.

### 3. 해석 결과

본 연구의 해석결과는 쉴드 TBM 터널에서 뒤채움 주입과 지반 조건사이의 상호작용에서 지반 투수계수의 영향을 파악하기 위한 다수의 파라미터 해석 중 일부이다. 그 이유로 인해 본 논문의 해석 대상 지반 투수계수가 실트질 지반에 속함에도 사질토에 대한 지반 물성치가 적용되었다. 따라서, 느슨한 사질토가 정규압밀점토와 거동이 유사하고, 조밀한 사질토가 과압밀 점토의 거동과 유사하므로 경향 분석이 가능하여 본 논문에서는 발생 경향과 현상의 원인 분석에 주안점을 두어 기술하였다.

#### 3.1 지표 침하

본 연구의 대상 지반은 투수계수가 낮기 때문에 지반침하는 단기 침하와 장기 침하로 구분할 수 있으며, Oh



(2013)의 구분 기준을 참조하여 뒤채움 그라우팅 후 1일 경과 후까지의 침하를 단기 침하, 이후 압밀 완료까지 발생하는 침하를 장기 침하로 하였다.

Fig. 6은 연약한 지반( $r_e=0.5$ )에서 뒤채움 주입압 차이에 따른 지표 침하 분포 곡선 예측 결과를 나타낸다. 뒤채움 주입압의 증가는 단기 침하의 크기를 경감시키며, 높은 주입압은 지표에서의 히빙을 유발하고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 6(b)). 압밀 완료 후 발생한 최종 침하를 비교할 경우, 높은 주입압이 적용된 경우에서 더 큰 지표 침하를 보이고 있다. 이는 주입압의 증가함에 따라 장기 압밀 침하량이 증가하는 것을 의미하며, 투수성이 낮은 지반에서는 높은 주입압이 적용되는 경우 전체 침하량은 장기 침하에 의해 결정된다고 할 수 있다.

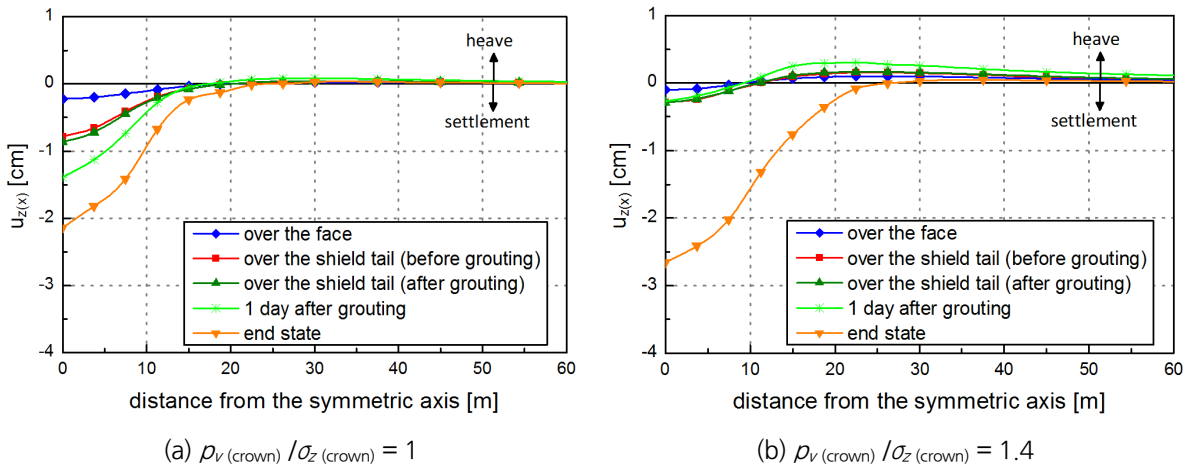


Fig. 6. Settlement troughs for  $r_e = 0.5$

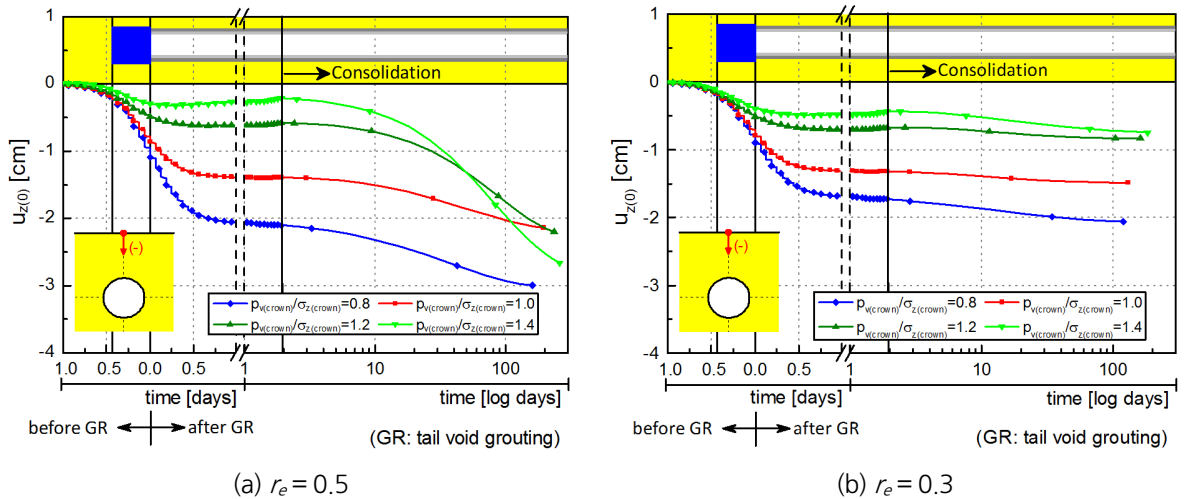


Fig. 7. Settlement over the tunnel axis depending on the grouting pressure

Fig. 7(a)는 연약한 지반( $r_e=0.5$ )에서 시간에 따른 터널 천단 상부 지표침하 변화를 보여주고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 뒤채움 주입압력이 높아짐에 따라 단기 침하의 크기는 감소하며, 이러한 경향은 굴진면 전방 지반의 지표침하에서부터 이미 나타나고 있음을 알 수 있다. 최종 침하에 미치는 주입압의 영향은 토피압력 대비 주입압의 크기에 따라 다르게 나타나고 있으며, 뒤채움 주입압력이 토피 압력의 80%에서 100%로 증가한 경우, 전체 침하량이 감소함과 동시에 압밀에 의한 장기 침하량도 감소하였다. 이 두 경우와는 달리, 뒤채움 주입압력이 토피압력의 120%로 증가된 경우에는 더 큰 최종 침하 및 장기 침하가 발생하고 있으며, 그 이상의 주입압에서는 이러한 경향이 더욱 심화되고 있음을 볼 수 있다. 또한, 뒤채움 주입압의 증가는 압밀로 인한 장기 침하 발생 시간을 증가 시킴을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)와 (b)의 비교 시 주입압이 침하에 미치는 영향이 지반의 과압밀정도( $r_e$ )에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 과압밀된 지반일수록 지반 강성이 크고 압축성이 작기 때문에 터널 굴착에 따른 지표 침하가 작게 나타나며, 주입압 변화에 따른 지표침하의 경향 변화가 작게 나타났다. 또한, 최종 침하 도달까지 걸리는 시간이 상대적으로 짧은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 터널 천단 상부의 지표 침하를 시기별로 도시한 그래프로, 주입압이 증가함에 따라 단기 침하(뒤채움 그라우팅 1일 경과 후 침하)는 감소하며, 이러한 경향은 미세하지만 연약한 지반일수록 분명하게 나타나고 있다. 최종 침하에서는 이와는 대조적으로 Fig. 6과 7에서 볼 수 있었던 것처럼 증가된 주입압은 항상 최종 침하의 감소를 수반하지 않으며, 일정 압력 이상의 주입압에서는 도리어 최종 침하의 증가를 유발하고 있다. 즉, 투수성이 낮은 지반에서는 최종 침하를 최소한으로 제한할 수 있는 한계 주입압의 존재하여 한계 주입압 이하의 주입압에서는 주입압의 증가와 함께 최종 침하가 감소하고, 한계 주입압을 초과한 주입압에서는 주입압의 증가는 최종 침하의 증가를 야기하고 있음을 알 수 있다. 이러한 한계 주입압은 지반 과압밀 정도에 따라 상이한 값을 보이는데, 과압밀된 지반( $r_e=0.3$ )에서 연약한 지반( $r_e=0.5$ ) 보다 높은 한계 주입압을 나타내고 있다.

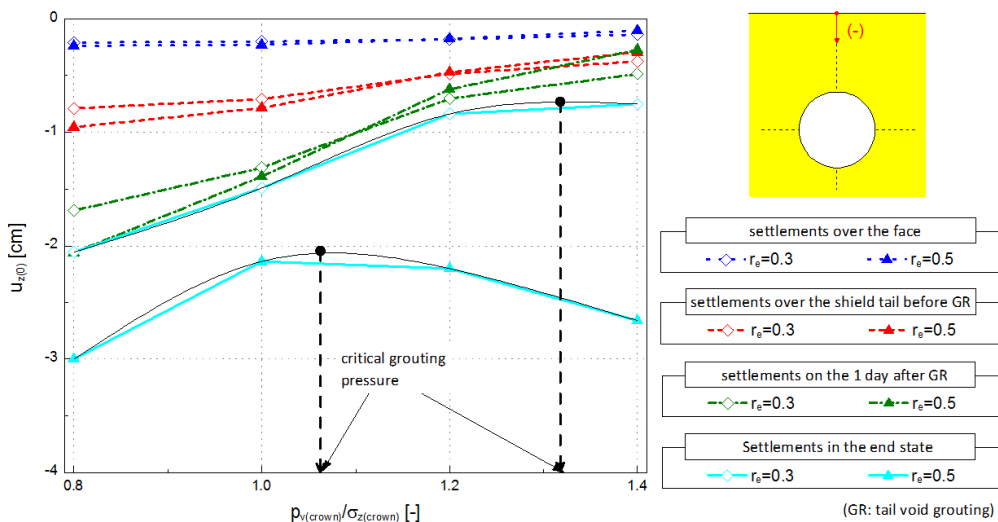


Fig. 8. Surface settlements over the tunnel axis

### 3.2 체적손실과 지표 침하와의 관계

실드 TBM 터널의 굴진에 의한 지중응력 변화로 인하여 굴착면의 변형이 발생하고, 이러한 굴착면의 변형은 지표에서 침하 또는 히빙 형태로 나타나게 된다. 이러한 굴착면의 변형과 지표 침하와의 관계는 일반적으로 원 굴착 단면적과 실제 단면적과의 차이를 의미하는 체적손실을 이용하여 파악한다(Fig. 9). 체적 손실은 단위 길이당 원 굴착량 부피에서 단위 길이당 실제 터널 부피를 뺀 값으로 정의된다. 따라서, 실드 TBM 터널에서는 응력 해방으로 인해 터널 내부로 변형이 발생하여 터널 단면적이 축소하는 경우 체적손실은 (+)의 값을 갖게 되며, 높은 굴진면 지지압력이나 높은 뒤채움 주입압력에 의해 터널 외부로 터널 단면적이 확대되는 경우 체적손실은 (-)의 값을 갖게 된다. 본 절에서는 지반의 단기·장기 거동에 따른 체적손실과 지표 침하에 관계를 살펴보았다.

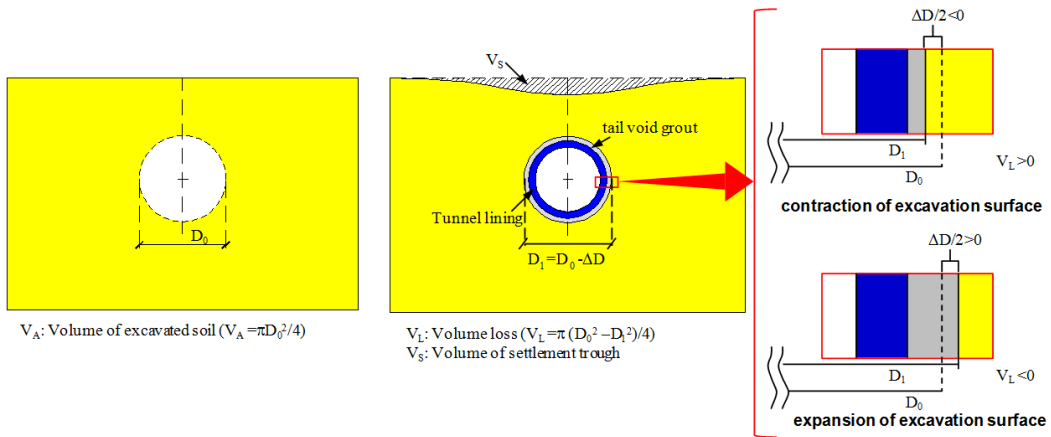


Fig. 9. Definition of  $V_A$ ,  $V_L$ , and  $V_S$

Fig. 10은 연약한 지반( $r_e=0.5$ )에서 TBM 굴진 중 시간경과에 따른 체적 손실과 침하트래프의 체적 변화를 보여준다. 여기서 체적손실과 침하트래프 체적은 굴착량에 대한 백분율로 나타내었다. 체적손실은 굴진면이 침하 측정위치를 통과하고 난 후 실드가 그 위치를 통과하면서 점차 증가하고, 뒤채움 주입에 의해 감소하여 이후 거의 일정한 크기를 유지하고 있다. 또한 뒤채움 주입에 의한 체적손실 감소량은 주입압이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 침하 트래프의 체적은 주입압이 토피 압력의 80%와 100%인 경우 실드 헤드부분이 침하 측정 위치를 통과하기 전부터 증가하기 시작하여 실드가 통과하면서 점차 증가 후 압밀이 진행되면서 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 반면에 주입압이 토피압력의 120%와 140%인 경우에는 실드 헤드부분이 침하 측정 위치를 통과하기 전부터 감소하여 관통 후 압밀이 진행되면서 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이로 볼 때 뒤채움 주입에 의한 굴착면 확장에 대한 영향은 터널 축방향 전후로 크게 나타남을 볼 수 있다. 이 그래프에서 주의깊게 봐야 할 부분은 뒤채움 주입 후 침하트래프의 체적 변화가 체적손실이 발생하지 않음에도 점차 증가하는 것으로서, 이는 실드 TBM 터널에서의 장기침하는 테일보이드의 변형에 의한 것보다는 지반 자체의 체적변화에 의해 발생하는 것을 의미한다.

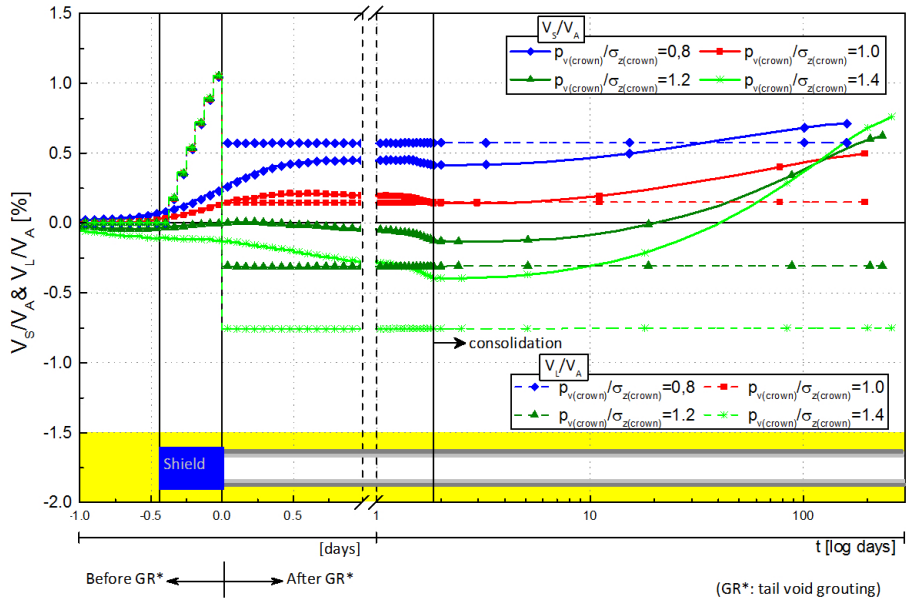


Fig. 10. Developments of normalized volume loss ( $V_L/V_A$ ) and volume of settlement trough ( $V_S/V_A$ )

체적손실과 침하트래프의 체적과의 관계는 지반의 과압밀 정도에 따라 상이함을 보인다(Fig. 11). 단기 침하의 경우(Fig. 11(a)) 주입압의 증가와 함께 체적손실과 침하트래프의 체적은 감소하며 체적손실과 침하트래프의 체적 간 차이는 과압밀된 지반일수록 그 차이가 작음을 볼 수 있다. 최종 침하의 경우(Fig. 11(b)) 단기 침하와 비교했을 때 체적손실은 시간의 경과에도 불구하고 변화가 거의 없으며, 침하트래프의 체적은 증가하였다. 그 증가량은 Fig. 8에서 알 수 있던 것처럼 한계 주입압 이상의 주입압이 작용한 경우에는 크게 증가하고 있다.

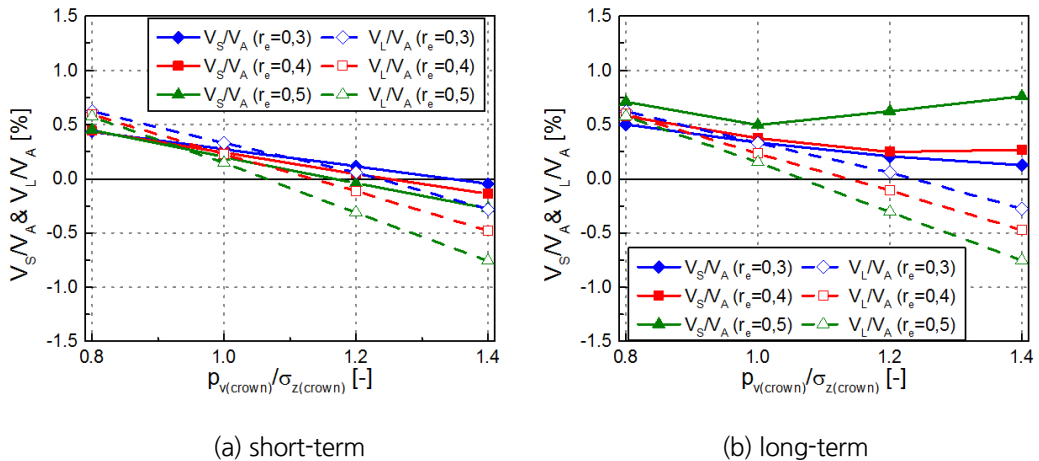


Fig. 11. Comparison of normalized volume loss ( $V_L/V_A$ ) and volume of settlement trough ( $V_S/V_A$ )

### 3.3 주변 지반의 체적변화

3.2절에 기술된 바와 같이 장기 침하하는 대체로 지반의 체적변화로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 본절에서는 지반의 체적변화에 대해 기술하고, 한계 주입압을 경계로 체적 변화의 경향이 어떻게 바뀌는지 살펴보았다.

Oh and Ziegler (2014)는 뒤채움 주입은 굴착면의 단면 크기를 확대시키고, 이와 동시에 주변 지반을 조밀하게 만든다고 하였다. 따라서, 주변 지반의 조밀화는 굴착면의 확대에 의한 체적손실의 감소분을 상쇄하여 (-)의 체적 손실이 발생하더라도 이 효과가 지반까지 도달하지 않는다고 하였다. 또한, Oh (2013)는 터널 주변부의 체적 감소분을 터널 굴착면의 체적손실에 반영하여 수정 체적손실을 제시하였고, 이는 침하트래프의 체적에 상당부분 근접함을 확인하였다.

Fig. 12는 연약한 지반( $r_e=0.5$ )에 대해 뒤채움 주입압에 따른 주변 지반 체적변형률 Contour를 나타낸 것으로, 주입압 크기에 따라 체적변형률 발생 형태가 상이함을 확인할 수 있다. 여기서 변형률의 (+)값은 팽창을, (-)의 값은 압축을 의미한다. 주입압의 크기에 따른 차이는 최종 상태의 체적변형률 분포에서 분명하게 확인된다. 터널 주변부는 주로 압축 변형이 지배적이며, 이러한 지반의 조밀화는 주입압의 증가와 함께 뚜렷하게 나타나고 있다. Fig. 12의 체적 변화 예측 결과와 Fig. 10 및 Fig. 11의 결과는 장기 침하가 뒤채움 압력 가압 이후 발생하는 주변 지반의 체적 변화로 인한 것임을 나타낸다.

앞서 Fig. 8의 예측결과에 따르면, 연약한 지반( $r_e=0.5$ )의 한계 주입압은 토피 압력의 100%와 120%사이에 존재하는 것으로 파악되었다. 뒤채움 주입압력이 한계 주입압보다 낮은 경우(Fig. 12(a), (b)) 터널 천단으로부터 터널 인버트부로 터널 주변에 원형 링 형태의 압축영역을 형성함이 예측되었다. 터널 주변부가 터널 주변을 따라 압축되고, 압축영역 외부의 터널 상부 지반이 침하하는 동안 거의 동일한 체적으로 거동하는 것으로 미뤄 볼 때 원형의 압축영역은 Fig. 13(a)에 나타낸 바와 같이 터널 단면의 확대에도 불구하고 지반의 아칭효과를 유발하는 것으로 판단된다. 뒤채움 주입압력이 한계 주입압보다 높은 경우(Fig. 12(c), (d)) 터널 주변 지반에 형성되는 압축영역 내 압축 변형률의 증가와 함께 지표 방향으로 압축영역이 확장되고 있다. 이러한 경향은 주입압의 크기가 클수록 뚜렷하게 나타나고 있다. 터널 주변 지반에 형성되는 압축영역 내 압축 변형률의 증가로 인해 터널 상부 지반의 침하가 증가하며, 동시에 터널 상부 지반 내부에 압축됨에 따라 지반 내 아칭이 형성되기 어려운 조건이 된다(Fig. 13(b)). 이를 통해 한계 주입압을 초과한 뒤채움 주입압으로 인한 지표 침하의 증가를 설명할 수 있다. 또한, 한계 주입압을 터널 주변에 아칭을 형성할 수 있는 최대 뒤채움 주입압으로 정의할 수 있다.

앞서 설명한 지반의 체적 변화 예측 결과를 통해 3.2절의 체적손실과 침하트래프의 체적관계에 대한 설명이 가능하다. 터널 주변 지반의 체적 감소는 뒤채움 주입으로 인한 굴착면 확대에 의해 감소한 체적손실의 상당부분을 상쇄하기 때문에 대부분의 경우 감소된 체적손실과 침하트래프의 체적과 일치하지 않는 것이며, 연약한 지반일수록 압축성이 더 크므로 이들 상호 간의 차이는 더욱 커지게 된다.

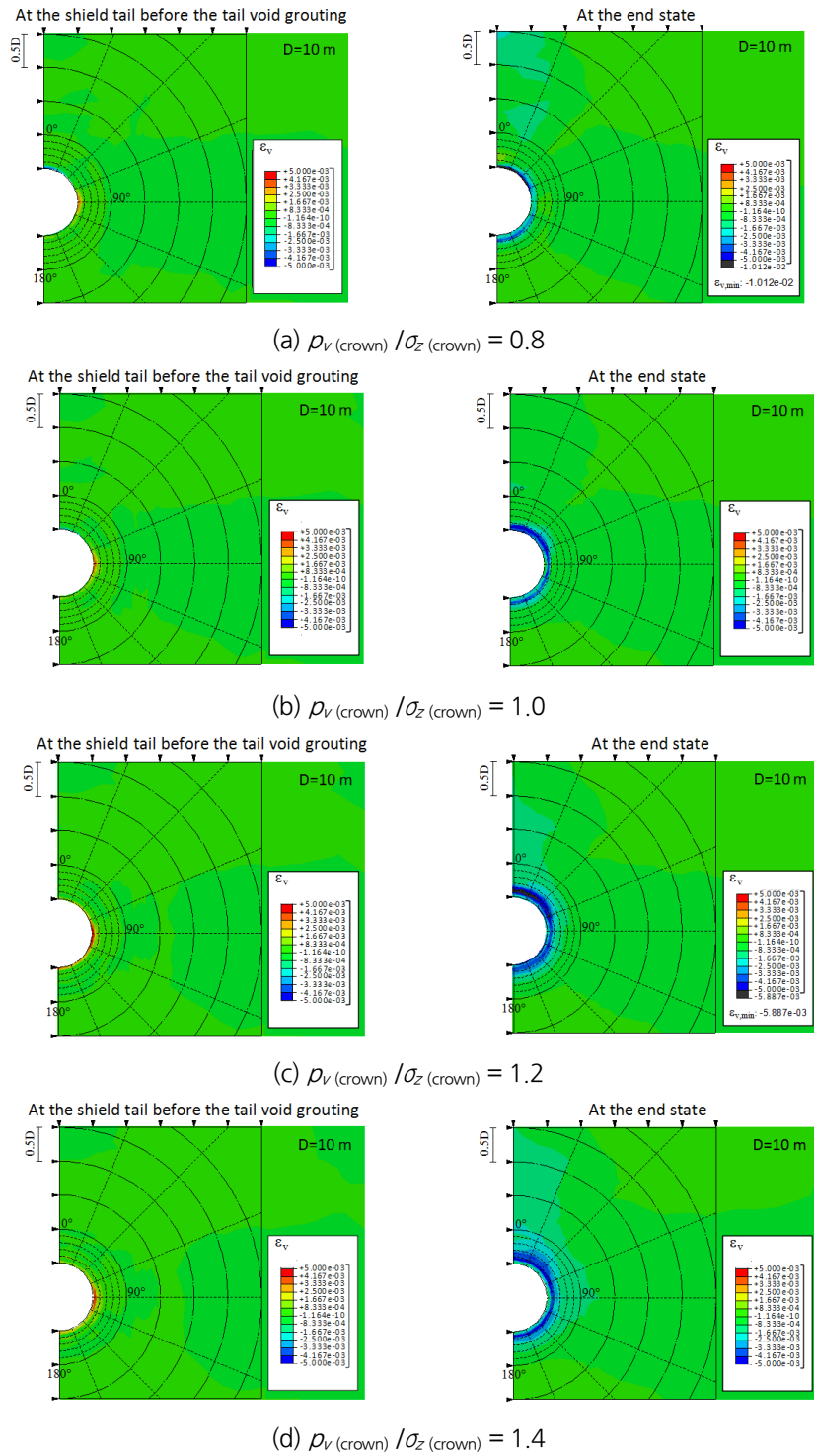
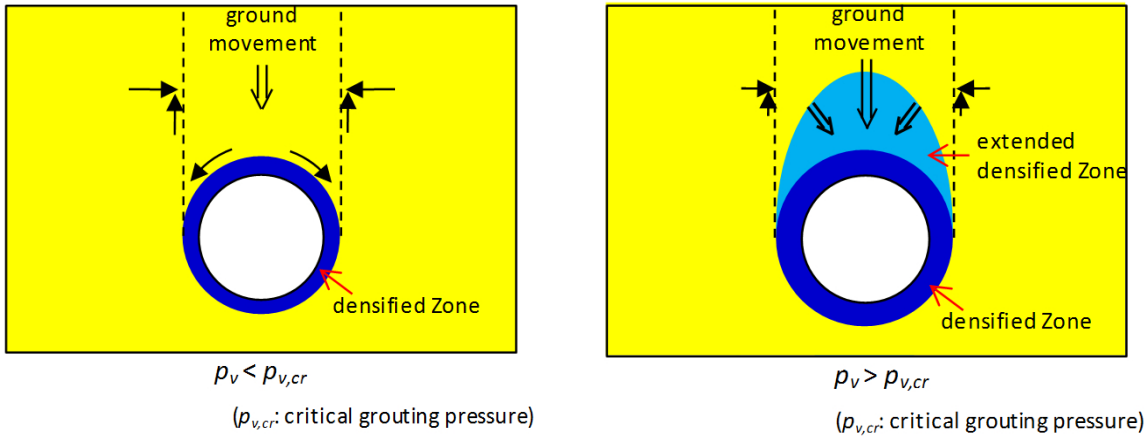


Fig. 12. Volumetric strain in the ground at the shield tail before the tail void grouting (left) at the end state (right) for  $r_e = 0.5$



(a) Case with grouting pressure under the critical value (higharching effect) (b) Case with grouting pressure above the critical value (lowarching effect)

Fig. 13. Schematic description of arching effect in the ground

#### 4. 결론

본 논문에서는 3차원 응력-간극수압 연계해석을 통해 쉴드 TBM 터널 시공시 뒤택음 주입이 지표침하에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 대상 지반은 투수성이 낮은 지반으로 뒤택음 주입은 단기 침하와 장기 침하에 영향을 주는 것으로 나타났고, 그 해석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 주입압의 증가는 단기 침하를 감소하는 효과를 나타냈다. 하지만, 다수의 경우에서 압밀로 인한 장기 침하 발생 후 최종 침하를 경감시키는 효과는 나타나지 않았다. 이로부터 투수성이 낮은 지반에서 최종 침하를 최소한으로 제한할 수 있는 한계 주입압이 존재함을 확인하였으며, 이는 터널 주변 영역에 아칭을 형성할 수 있는 최대 크기의 뒤택음 주입압으로 정의할 수 있다.
2. 한계 주입압은 지반의 초기 과압밀 정도의 영향을 받는다. 즉, 지반이 과압밀된 상태일수록 그 지반에 부합하는 한계 주입압의 크기는 더 큰 것으로 나타났다.
3. 뒤택음 주입 후 굴착면의 체적 손실이 거의 일정하게 유지됨에도 장기 침하가 발생하므로 볼 때 장기 침하는 체적손실의 변화보다 주로 터널 지반 주변의 압축변형에 의해 발생하는 것으로 나타났다.
4. 본 연구에 사용된 해석 결과는 쉴드 TBM 터널에서 뒤택음 주입과 지반 거동의 상호작용에 지반의 투수성의 영향을 파악하기 위한 파라미터 스터디의 일부이다. 그 이유로 인해 본 연구의 대상 지반이 실트질 지반에 속함에도 모래에 대한 역학적인 물성이 해석에 적용되었고, 경향 분석에 주안점을 두었다. 조밀한 모래가 과압밀 점토의 거동과 유사하고, 느슨한 모래가 정규압밀점토와 거동이 유사하여 경향 분석에는 문제가 없을 것으로 판단되나, 차후 투수성이 낮은 지반에서 뒤택음 주입과의 상호작용을 정량화하기 위해서는 그에 부합되는 적절한 물성치가 적용되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 15SCIP-B066321-03)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. ABAQUS (2011), "Abaqus/Standard v.6.11, User Manual", Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
2. Attewell, P.B. (1978), "Large ground movements and structures, Chapter: Ground movements caused by tunnelling in soil", Pentech Press, pp. 812-948.
3. Bauer, E. (1996), "Calibration of a comprehensive hypo-plastic model for granular materials", Soils and Foundations, Vol. 36, No. 1, pp. 13-26.
4. Biot, M.A. (1941), "General theory of three-dimensional consolidation", Journal of Applied Physics, Vol. 12, No. 2, pp. 155-164.
5. Gudehus, G.(1996), "A comprehensive constitutive equation for granular materials" Soils and Foundations, Vol. 36, No. 1, pp. 1-12.
6. Hashimoto, T., Nagaya, J., Konda, T. (1999), "Prediction of ground deformation due to shield excavation in clayey soils", Soils and Foundations, Vol. 39, No. 3, pp. 53-61.
7. Herle, I., Gudehus, G. (1999), "Determinatioin of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies", Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, Vol. 4, pp. 461-486.
8. Hwang, R. N., Moh, Z. -C., Chen, M. (1996), "Pore pressure in induced in soft ground due to tunneling", International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp. 119-124.
9. Jun, G.-C., Kim, D.-H. (2015), "A interaction on the estimating shield TBM tunnel face pressure through analytical and numerical analysis", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 306-317 (in Korean).
10. Jun, G.-C., Kim, D.-H. (2016), "A interaction on the estimating shield TBM tunnel face pressure through analytical and numerical analysis", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 3, pp. 273-282 (in Korean).
11. Kasper, M. (2004), "Finite Elemente Simulation maschineller Tunnelvortriebe in wassergesättigtem Lockergestein", Thesis, Faculty for Civil Engineering, Ruhr Unversity Bochum (in German).
12. Leca, E., New, B. (2007), "ITA/AITES Report 2006 on Settlements induced by tunneling in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 119-149.
13. Lewis, R.W., Schrefler, B.A. (2000), "The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media", John Wiley & Sons.
14. Mair, R.J., Taylor, R.N. (1997), "Theme lecture: Bored Tunnelling in the urban environment", 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 4, pp. 2353-2385.
15. Mayer, P.-M. (2000), "Verformungen und Spannungsänderung im Boden durch Schiltzwandherstellung



- und Baugrubenaushub”, Thesis, Institute for Soil Mechanics and Rock Mechanics, Karlsruhe University (in German).
16. Meschke, G., Gropik, C., Mang, H.A. (1996), “Numerical analyses of tunnel lining by means of a viscoplastic model for shotcrete”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 39, pp. 3145-3162.
  17. Niemunis, A., Herle, I. (1997), “Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range”, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 2, pp. 279-299.
  18. Oh, J.-Y. (2013), “Interaktion der Ringspaltverpressung mit umgebendem Baugrund und Tunnelauskleidung”, Doctoral Thesis, Faculty for Civil Engineering, RWTH Aachen University, Germany (in German).
  19. Oh, J.-Y., Ziegler, M. (2014), “Investigation on influence of tail void grouting on the surface settlements during shield tunneling using a stress-pore pressure coupled analysis”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 148-151.
  20. Park, H., Oh, J.-Y., Chang, S., Lee, S. (2016), “Case study of volume loss estimation during slurry tbm tunnelling in weathered zone of granite rock”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 1, pp. 61-74 (in Korean).
  21. Shirlaw, J. N. (1995), “Observed and calculated pore pressure and deformations induced by an earth pressure balance shield: Discussion”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 181-189.
  22. Suwansawat, S. (2002), “Earth pressure balance (EPB) shield tunneling in bangkok: ground response and prediction of surface settlements using artificial neural networks”, Doctoral Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, United States.
  23. von Wolffersdorff, P.-A. (1996), “Hypoplastic relation for granular material with a predefined limit state surface”, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 1, pp. 251-271.