

뒷채움 주입 거리에 따른 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성 분석

조원섭¹ · 송기일^{2*} · 류희환³

¹비회원, 인하대학교 사회인프라공학, 석사과정

²정회원, 인하대학교 사회인프라공학, 조교수

³정회원, 한국전력 전력연구원, 선임연구원

Analysis on the behavior of shield TBM cable tunnel: The effect of the distance of backfill grout injection from the end of skin plate

Won-Sub Cho¹, Ki-Il Song^{2*}, Hee-Hwan Ryu³

¹Department of Civil Engineering, Inha University, Graduate Student

²Department of Civil Engineering, Inha University, Assistant Professor

³Power System Laboratory, KEPCO Research Institute, Senior Researcher

ABSTRACT: Recently, tunnelling with TBM is getting popular for the construction of cable tunnel in urban area. Mechanized tunnelling method using shield TBM has various advantages such as minimization of ground settlement and prevention of vibration induced by blasting that should be accompanied by conventional tunnelling. In Korea, earth pressure balance (EPB) type shield TBM has been mainly used. Despite the popularity of EPB shield TBM for cable tunnel construction, study on the mechanical behavior of cable tunnel driven by shield TBM is insufficient. Especially, the effect of backfill grout injection on the behavior of cable tunnel driven by shield TBM is investigated in this study. Tunnelling with shield TBM is simulated using 3D FEM. The distance of backfill grout injection from the end of shield skin varies. Sectional forces such as axial force, shear force and bending moment are monitored. Vertical displacement at the ground surface is measured. Furthermore, the relation between volume loss and the distance of backfill grout injection from the end of skin plate is derived. Based on the stability analysis with the results obtained from the numerical analysis, the most appropriate injection distance can be obtained.

Keywords: Shield TBM, Cable tunnel, Three dimensional numerical analysis, Volume loss

초 록: 최근, tunnel boring machine (TBM)을 이용한 도심지 지중 전력구 터널 건설이 증가하고 있다. 쉴드 TBM을 이용한 기계화 터널 굴착 공법은 재래식 공법에 비해 지반침하를 최소화 하고 발파에 의한 진동을 줄일 수 있는 장점이 있다. 국내에서는 earth pressure balance(EPB) 쉴드 TBM이 주로 사용되고 있다. 그러나 전력구 터널 굴착을 위한 쉴드 TBM 공법이 증가함에도 불구하고, 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 후방주입 거리에 따른 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성을 분석하고, 굴착면 지반 손실과 후방주입 거리와의 상관관계를 도출하고자 한다. 쉴드 TBM을 이용한 터널 굴착은 3D FEM을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 뒷채움 그라우트가 설치되는 거리의 변화에 따른 축력, 전단력, 휨 모멘트와 같은 단면력을 검토하고 지표면에서의 연직 변위를 분석하였다. 또한, 유한요소해석으로 얻어진 결과와 안정성 분석에 기초하여, 지반과 터널 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 뒷채움재 주입시기를 결정할 수 있다.

주요어: 쉴드 TBM, 전력구 터널, 3차원 유한요소해석, 지반 손실

*Corresponding author: Ki-Il Song

E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received March 10, 2014; Revised March 19, 2014;

Accepted March 21, 2014

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 대한민국에서는 산업의 발전 및 생활수준 향상에 의한 전력 의존도 상승으로 인해 전력 사용량이 급증하고 있다. 이로 인해 대규모 정전 사태가 발생하기도 했으며, 도시의 변전소와 발전소를 연결 하는 초고압 송전선로 등의 기반시설의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 국내 전력 기반 시설인 초고압 송전선로는 주거 생활권 내 소음 유발과 건강상의 문제를 야기하고 농지 및 산림을 훼손한다. 이에 따라 환경 친화적 공법과 안전성 향상 측면에서 송전선로의 지하화가 필수적이다.

그러나 전력구 터널 굴착을 위한 쉴드 TBM 공법이 증가함에도 불구하고, 복합지반에서 즉시주입과 후방주입에 따른 쉴드 TBM 터널의 거동에 관한 연구는 미비한 실정이다. 복합지반에서 전력구 터널의 안정성을 확보하기 위하여 쉴드 TBM을 적용할 시, 뒷채움 그라우트의 설치가 적절하게 이루어지지 않는다면 과도한 내공 변위 혹은 과도한 단면력의 작용으로 터널 구조물이 불안정할 수 있다. 뒷채움 그라우트의 주입시기가 중요함에도 불구하고, 뒷채움 시기에 따른 전력구 터널의 역학적 거동에 대한 분석은 미비한 실정이다. 또한 기계식 터널 공법 중에서 사용 빈도가 가장 높은 쉴드 TBM 공법의 모델링 및 해석 기법에 대한 명확한 모델링 방법이 제시되어 있지 않다(Kang, 2013). 특히, 세그먼트와 지반과의 상호작용을 고려하는 방법은 국가별로 다양함을 알 수 있다(ITA, 2000).

도심지에서의 터널굴착은 지상의 지장물에 손상을 유발하기 때문에 터널굴착으로 인한 침하 및 수평변위를 파악하는 것이 중요하다. 터널 굴착면에서 지반 손실량(Volume loss factor, V_L)은 터널 굴착 방법과 지반의 종류에 영향을 받으며 %로 나타낸다. 대표적으로, 런던에서 EPB 쉴드 TBM 공법으로 시행된 CTRL project (Channel Tunnel Rail Link)의 경우 평균적으로 0.25~0.5% 범위의 값이 측정 됐다(ITA-AITES WG “Research”, 2007).

본 연구에서는 뒷채움 그라우트의 후방주입 거리에 따른 쉴드 TBM 터널과 지반의 거동 분석을 수행하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 해석 프로그램 MIDAS-GTS NX를 이용하여 합리적인 모델과 시공단계를 제시하고 지반의 연직 침하와 세그먼트 라이닝의 안정성을 동시에 파악할 수 있는 분석법을 제시하고자 한다. 또한 유한요소해석으로 얻어진 최대 지반 침하량과 변곡점의 위치로 V_L 의 값을 도출한 뒤 CTRL project의 측정값과 비교 분석을 수행했다. 그리고 단위길이에 대한 총 침하 부피량(V_S)와 V_L 의 관계를 분석하였으며, 후방주입 거리에 따른 V_L 의 상관관계를 도출하였다.

2. 쉴드 TBM 유한요소해석 모델링 기법

2.1 유한요소해석의 배경

쉴드 TBM 굴착과정에서 중점적으로 분석해야 할 사항은 터널 굴착에 따른 지표침하 발생과 세그먼트의 안정성이다. 그러나 현재 세그먼트의 안정성 판단과 지표침하를 예측하기 위한 유한요소해석은 일체화가 되어있지 않다. 즉, 쉴드 추진시 안정성 검토, 지하수 침투 영향 검토, 추진관 구조물의 안정성 검토가 각각 다른 해석 프로그램을 통해 이루어지고 있다.

그러나 현재 3차원 유한요소 또는 유한차분 해석 프로그램을 이용하여 적절한 요소로 구성된 모델 해석을 수행하면 안정성 획득에 필요한 결과 값과 지반의 거동을 동시에 획득 할 수 있다. 즉, 세그먼트의 안정성 분석과 동시에 지표침하의 예측이 가능하다. 실제 시공 또한 복합적인 방법으로 이루어지기 때문에 다양한 방법으로 세그먼트의 안정성을 검토할 수 있는 장점이 있다. 또한 쉴드 TBM 시공에서 중요한 시공 과정 중 하나인 뒷채움 그라우트 후방 설치 거리에 따른 터널 및 세그먼트의 거동을 확인할 수 있다.

2차원 유한요소해석과 3차원 유한요소해석의 가장

큰 차이점은 Gap Parameter의 적용 여부이다. Gap Parameter는 쉴드 TBM 터널 시공 중 발생하는 체적손실에 의한 변위를 정량화 시켜 유한요소해석 모델에 입력할 수 있도록 한 것이다(Lee et al., 1992). Gap Parameter는 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Gap\ Parameter = 2\Delta + \delta + U(U = U_{3D}^* + W) \quad (1)$$

- U_{3D}^* : 굴진면 손실로 인해 발생하는 3차원 움직임
- W : 쉴드장비 과다굴착으로 인한 변위
- Δ : 쉴드 장비 스킨플레이트와 라이닝 사이의 공간
- δ : 라이닝을 설치하는데 필요한 공간

2차원 유한요소해석에는 주로 변위 제어 모델(Displacement Control Model, DCM) 방법을 이용하여 유한요소해석을 수행한다. DCM 방법은 Gap Parameter를 포함한 터널 모델을 만든 뒤 터널의 외경 부분을 터널 내부의 한 점으로 수렴하게 하여 세그먼트 라이닝에 접촉 시키는 방법이다. 하지만 이러한 방법은 실제 쉴드 TBM 거동과는 다르며, 지표의 연직 침하가 과대 예측이 되는 경향이 있다. 또한 굴착면 손실로 발생하는 3차원 움직임을 가정해서 입력해야 하고 하중 분담율을 적용해야 하므로 터널 내부의 변위 수렴 정도를 미리 가정해야 한다.

반면에 3차원 유한요소해석은 굴착면 손실로 인한 3차원 움직임을 고려할 필요가 없으며 굴착면 손실 및 지표침하, 세그먼트에 발생하는 힘과 응력 등 다양한 결과를 얻을 수 있다. 즉, 3차원 해석을 수행하는

경우 가정사항에 근거한 Gap Parameter를 산정할 필요성이 감소하게 된다. 본 연구에서는 뒷채움 그라우트의 주입 거리(후방주입 거리)에 따른 세그먼트 라이닝의 안정성과 지표침하의 거동을 동시에 획득할 수 있는 3차원 쉴드 TBM 모델 구축 기법을 제시하고자 한다.

2.2 3차원 쉴드 TBM 모델링

쉴드 TBM 유한요소해석 모델링 정립에 사용된 TBM 제원 및 세그먼트 단면은 기설 154 kV ○○ 변전소와 ○○ 변전소간 계통 구성을 위해 20○○년 ○월 ○일~20○○년 ○월 ○일 수행된 설계 보고서를 바탕으로 하였다. 전력구 터널의 직경은 외경이 4 m, 내경이 3.8 m이고 지표면으로부터 13 m 아래 위치해 있다. 상부 10 m는 풍화토이고 풍화암이 그 아래 놓여있으며 지하수위는 고려하지 않았다. Skin plate는 쉴드 TBM의 커터헤드 부분과 이를 보호하는 쉴드 부분을 나타내며 Skin plate의 길이는 총 4 m를 적용하였다. 세그먼트 라이닝의 단위길이는 1 m를 적용하였으며 지반의 조건과 물성치 그리고 모델링에 사용된 요소는 Table 1에 정리하였다.

쉴드 스킨과 세그먼트 라이닝은 각각 0.1 m와 0.2 m 두께의 Shell 요소로 모델링 한다. Shell 요소로부터 요소 두께의 상단, 중간, 하단에서 발생하는 힘을 결과 값으로 추출할 수 있다. 본 연구에서는 세그먼트와 쉴드를 Shell 요소로 적용함으로써 단면력을 결과 값으로 얻을 수 있었다. Solid 요소를 사용하고 응력을 획득한 뒤 작용 힘을 각 단면마다 계산하여 단면력을

Table 1. Properties of the ground and TBM

Material	Model	Element	Elastic modulus (kN/m ²)	Poisson's ratio	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (degree)
Skin Plate	Elastic	Shell	2.5e8	0.20	-	-
Segment	Elastic	Shell	2.1e7	0.25	-	-
Backfill grout	Elastic	Solid	1.0e7	0.30	-	-
Weathered rock	Drucker Prager	Solid	1.0e5	0.30	50	35
Weathered soil	Drucker Prager	Solid	5.0e4	0.35	20	30

구할 수 있지만, 빠른 안정성 판단을 위해서는 Shell 요소가 가장 적절하다고 판단하였다. 뒷채움 그라우트와 풍화암 및 풍화토는 Solid 요소로 모델링하는 것이 가장 효과적이라고 판단하였다. 본 연구에서 뒷채움 그라우트는 지반의 이완거동에 따른 하중을 세그먼트에 전달하는 탄성구조체로 가정하여 모델을 구축하였다. Fig. 1(a)는 3차원모델을 나타내고 있으며, (b)는 전력구 터널의 단면 제원을 도시하고 있다. 외경의 크기는 굴착면을 나타내며 내경은 Shell 요소로 세그먼트가 설치되는 직경을 나타낸다. 그리고 외경과 내경 사이 0.1 m는 쉴드 TBM의 기계적 오차로 발생하는 Gap Parameter 이다. Fig. 1(c)는 세그먼트, 뒷채움 그라우트, 풍화토, 그리고 쉴드 스킨의 모델링에 적용된 요소를 나타낸다.

경계조건으로 우선 막장압을 결정해야한다. 관리

토압의 계산 과정은 절대적인 방법이 아니라 현장의 검토 결과를 바탕으로 관리토압을 설정 한 후, 다양한 조건에서의 모니터링 결과를 참고하여 결정해야 한다 (Kim, 2013). 본 연구에서는 $K_0 = 0.5$ 를 가정하여, 관리토압 $P_0 = 177 \text{ kN/m}^2$ 를 획득하여 굴착면에 적용하였다.

세그먼트 라이닝을 Shell 요소로 모델링하는 경우, 뒷채움 그라우트 없이 먼저 세그먼트를 모델링하게 되면 지반을 모델링하고 있는 솔리드 요소와 세그먼트 라이닝을 모델링하는 Shell 요소의 상호작용이 불가능하기 때문에 유한요소해석 프로그램 특성상 해석이 불가능하다. 따라서, 후방주입 모사 시공단계에서는 쉴드 길이 4 m 만큼 지반이 굴착 된 후 세그먼트 라이닝의 자중($P_s (= \gamma_{concrete} \cdot Area) = 54.24 \text{ kN/m}$)이 바닥에 beam load 요소로 작용하도록 모델링 하였다.

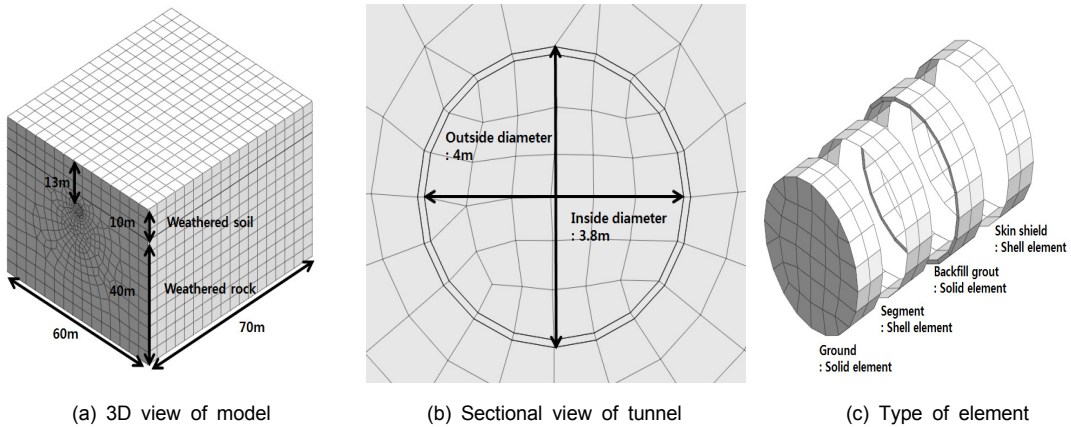


Fig. 1. Simulation of cable tunnel with 3D FEM

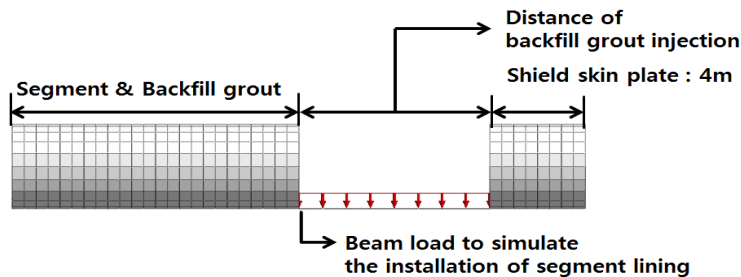


Fig. 2. Construction process

분석하고자 하는 길이의 후방주입이 모사 된 후 세그먼트 라이닝의 자중을 대신해서 세그먼트 라이닝의 Shell 요소와 뒷채움 그라우트의 솔리드 요소가 동시에 설치된다. 뒷채움 그라우트의 주입압은 고려되지 않았으며, 뒷채움 그라우트는 쉴드 TBM의 기계적 오차로 생기는 Gap Parameter인 0.1 m의 두께만큼 세그먼트와 굴착면 사이에 주입된다. 위 과정은 Fig. 2에 나타냈다. 세그먼트 라이닝이 지반과 접촉하지 않고 자립하는 경우 뒷채움 그라우트가 시공되기 이전에는 위와 같은 모델링 방법이 합리적인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 쉴드 스킨 후방 1 m 지점에 세그먼트와 뒷채움 그라우트가 설치되는 즉시주입 공법과, 쉴드 스킨 후방 2 m, 4 m, 6 m, 8 m 지점에 세그먼트와 뒷채움 그라우트가 설치되는 후방주입 거리에 따른 분석을 수행했다. 수행된 Case는 Table 2에 정리하였

으며, Case 1에 대한 시공단계는 Table 3에 정리하였다.

3. 터널 거동 분석

3.1 지표면 연직 변위

Fig. 3(a)는 Case 5의 경우 지표면 연직 변위의 유한 요소해석 결과를 나타낸다.

터널의 굴착 거리에 따른 지표면의 연직 침하 경향을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 변위는 터널이 모두 시공된 후 발생된 최대 침하 지점에서 터널 시공단계에 따라 측정했다. 측정지점은 터널 중심축 상부이다. 대부분의 경우 지표면의 연직 변위는 20 m 굴착 시 수렴되는 특성을 나타낸다. Case 1인 경우에는 Case 5 보다 지표면의 변위가 85%가량 감소했다. 이는 후방주입에 의해 터널 내공 폐합이 늦어짐으로써 터

Table 2. Analysis cases

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
The distance from the end of skin plate to segment (m)	1	2	4	6	8

Table 3. Construction stage of case 1

	Construction stage											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	...
Skin plate	A:1	A:2	A:3	A:4	A:5	A:6	A:7	A:8	A:9	A:10	A:11	...
					R:1	R:2	R:3	R:4	R:5	R:6	R:7	...
Face pressure	A:1	A:2	A:3	A:4	A:5	A:6	A:7	A:8	A:9	A:10	A:11	...
		R:1	R:2	R:3	R:4	R:5	R:6	R:7	R:8	R:9	R:10	...
Ground of outside diameter						A:1	A:2	A:3	A:4	A:5	A:6	...
	R:1	R:2	R:3	R:4	R:5	R:6	R:7	R:8	R:9	R:10	R:11	...
Change property: Ground to backfill grout						A:1	A:2	A:3	A:4	A:5	A:6	...
Ground of inside diameter												
	R:1	R:2	R:3	R:4	R:5	R:6	R:7	R:8	R:9	R:10	R:11	...
Segment						A:1	A:2	A:3	A:4	A:5	A:6	...
Weight of segment					A:1	A:2	A:3	A:4	A:5	A:6	A:7	...
						R:1	R:2	R:3	R:4	R:5	R:6	...

Note; A denotes installation of the element and R denotes removal of the element, respectively.

널 내부 지반이 이완 되는 거동을 의미한다.

Fig. 3(c)는 후방주입 거리의 길이에 따른 지반의 변위를 나타낸다. 후방주입 거리가 증가함에 따라 지표면의 최대 연직 변위는 증가하며 후방주입 거리가 터널 직경 정도 되는 경우 수렴하는 것으로 나타난다. 즉시주입 방법인 Case 1에서는 굴착 후 뒷채움 그라우트를 빠른 시간 내에 설치함으로써 암반의 응력해방 시간을 최소화 하고 터널 내공을 폐합함으로써 내공 변위를 제어할 수 있다. 터널 시공에서 천단 변위의 영향은 지상 구조물들의 안전에 영향을 미치기 때문에 최소화 하는 것이 중요하지만 반대로 세그먼트에 발생하는 단면력이 커질 수 있기 때문에 세그먼트의 안정성 또한 고려해야 한다.

3.2 세그먼트에 발생하는 최대주응력 분석

세그먼트의 안정성을 판단하기 위해 최대주응력, 축력, 휨모멘트, 전단력을 분석했다. 발생하는 응력과 힘은 터널이 80 m 굴착이 되었을 때 세그먼트의 모든 요소에 대하여 검토되었다.

Fig. 4(a)는 Case 5의 경우 세그먼트에 발생하는 최대주응력의 유한요소해석 결과를 나타낸다.

Fig 4(b)는 터널 굴착 거리에 따른 세그먼트에 발생하는 최대주응력 경향을 나타낸다. 세그먼트에 발생하는 최대주응력 경향은 지표면의 연직 침하 경향과는 반비례관계를 나타낸다.

Fig. 4(c)는 후방주입 거리의 길이에 따른 세그먼트

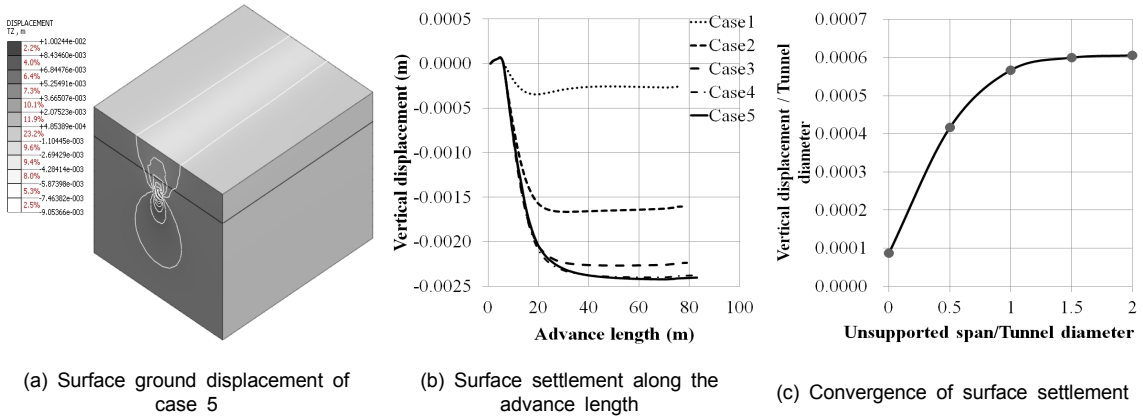


Fig. 3. Surface settlement due to tunnel excavation: Effect of backfill grout injection

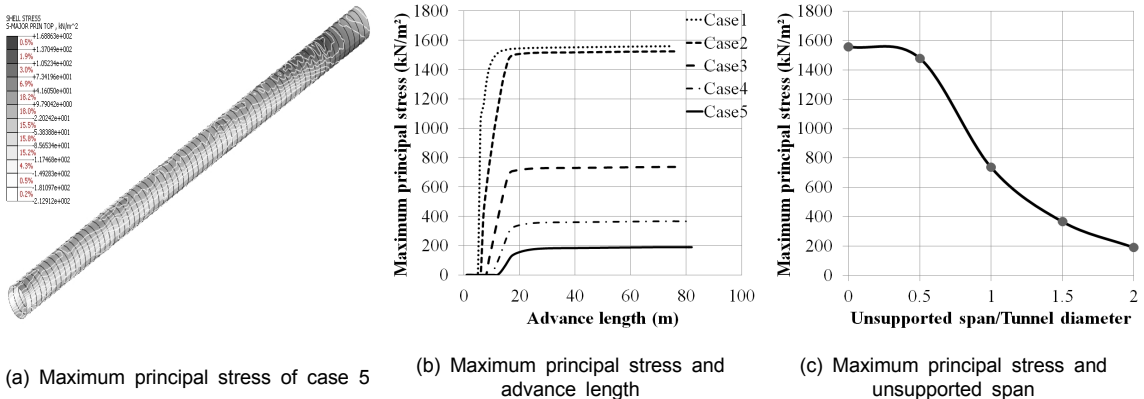


Fig. 4. Maximum principal stress acting on the segments

에 발생하는 최대주응력의 크기를 나타낸다. 후방주입 거리가 증가 할수록 주응력이 감소한다. 세그먼트의 안정성과 지표면의 침하 관계를 고려하여 적절한 주입시기를 찾는 것이 중요하다. 최근에는 인접 구조물에 더 큰 문제가 발생할 수 있는 지표 침하를 억제하는 방향으로 시공을 하고 있다.

3.3 세그먼트에 발생하는 축력 분석

Fig. 5(a)는 Case 5의 경우 세그먼트에 발생하는 축력의 유한요소해석 결과를 나타낸다.

Fig. 5(b)는 터널 굴착 거리에 따라 세그먼트 라이닝에 발생하는 축력의 경향을 나타낸다. Case 1은 가장 먼저 세그먼트와 뒷채움 그라우트가 설치되기 때문에 암반의 내공 변위와 지표면 연직 침하를 최대한 억제할 수 있다. 이때 세그먼트 라이닝 배면에 그라우트가 설치되는 시점에서 최대값을 즉시적으로 나타낸다. 또한 후방주입 길이가 길어짐에 따라 축력의 최대값은 감소하며 수렴도도 증가되는 것으로 나타난다. 즉 Fig. 5(b)의 그래프에서 Case 1의 경우, 급격한 기울기로 최대값에 빨리 수렴하는 반면, 뒷채움재의 후방주입 거리가 증가할수록 최대값에 수렴하기까지 기울기는 완만해진다. 본 연구 결과, 후방 주입인 경우 세그먼트에 발생하는 축력은 다른 단면력에 비해 일정한

값으로 수렴하기 까지 시간이 상대적으로 오래 걸림을 알 수 있다. 세그먼트에 발생하는 축력은 다른 단면력에 비해 크기가 크고 지속적으로 세그먼트의 안정성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Fig. 5(b) 그래프에서 축력의 기울기를 분석한 결과 Case 2~Case 5 모두 일정한 단계에서 현저히 감소된 축력 증가율을 나타내므로 일정한 값으로 수렴하고 있다고 판단된다.

Fig. 5(c)는 후방주입 거리의 길이에 따른 축력의 크기를 나타낸다. 세그먼트의 최대 축력 경향은 지표면의 연직 방향 침하와는 반비례관계를 나타낸다. Case 5의 경우는 Case 1에 비해 40% 감소된 축력의 크기를 나타낸다. 이는 터널 주변 지반의 이완에 따른 결과임을 알 수 있다.

3.4 세그먼트에 발생하는 휨모멘트 분석

Fig. 6(a)는 Case 5의 경우 세그먼트에 발생하는 축력의 유한요소해석 결과를 나타낸다.

Fig. 6(b)는 터널 굴착 거리에 따른 휨모멘트의 경향을 나타낸다. 터널 내공 변위를 억제한 Case 1의 경우 가장 큰 휨모멘트를 나타낸다. 응력 이완의 정도에 따라 Case 5까지 점차 줄어드는 휨모멘트를 확인 할 수 있으며, 최대 휨모멘트가 발현되는 순간 역시 순차

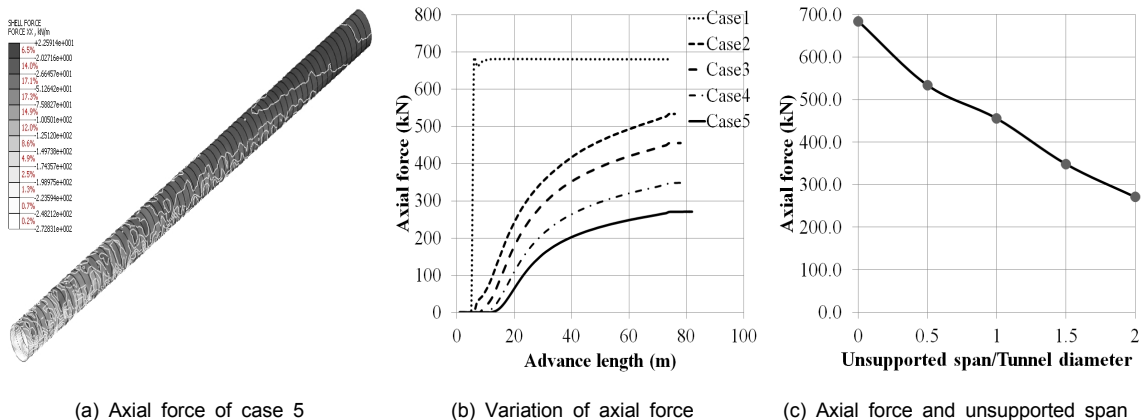


Fig. 5. Axial force acting on the segments

적으로 증가함을 확인 할 수 있다. 이는 그래프 상에서 최대값에 수렴하기까지 기울기로 확인 할 수 있다.

Fig. 6(c)는 후방주입 거리의 길이에 따른 휨모멘트의 경향을 나타낸다. 세그먼트에 발생하는 휨모멘트는 지표면의 연직 침하 경향과 반비례관계를 나타내며, Case 5의 경우는 Case 1에 비하여 88% 감소된 휨모멘트의 크기를 나타낸다. 휨모멘트 크기의 감소 경향은 지표면의 연직 침하 및 세그먼트에 발생하는 최대주응력의 감소 경향과 유사함을 알 수 있다.

3.5 세그먼트에 발생하는 전단력 분석

Fig. 7(a)는 Case 5의 경우 세그먼트에 발생하는

전단력의 유한요소해석 결과를 나타낸다.

Fig 7(b)는 터널 굴착 거리에 따른 전단력의 경향을 나타낸다. 터널의 내공 변위를 최대한 제어하는 Case 1에서 가장 큰 전단력을 나타내며 후방주입 거리가 증가함에 따라 점차 전단력은 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig 7(c)는 후방주입 거리의 길이에 따른 전단력의 경향을 나타낸다. 후방주입 거리에 따른 전단력의 감소폭은 축력과 휨모멘트의 경향에 비해 크게 나타났다. Case 1의 최대 전단력은 Case 5에 비해 99%감소된 전단력 크기를 나타냈다. 이는 후방주입으로 인해 세그먼트에 가해지는 힘의 감소 효과가 다른 단면력에 비해 효과적임을 나타낸다.

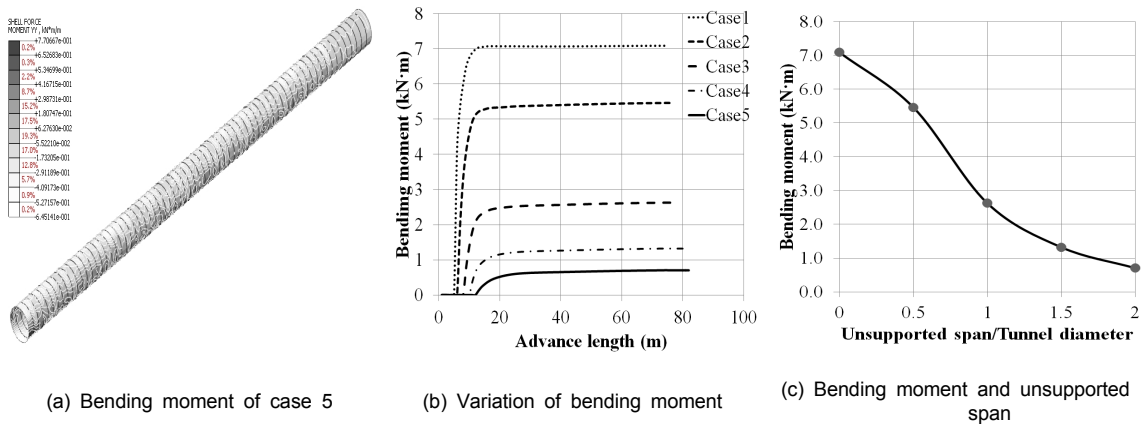


Fig. 6. Bending moment acting on the segments

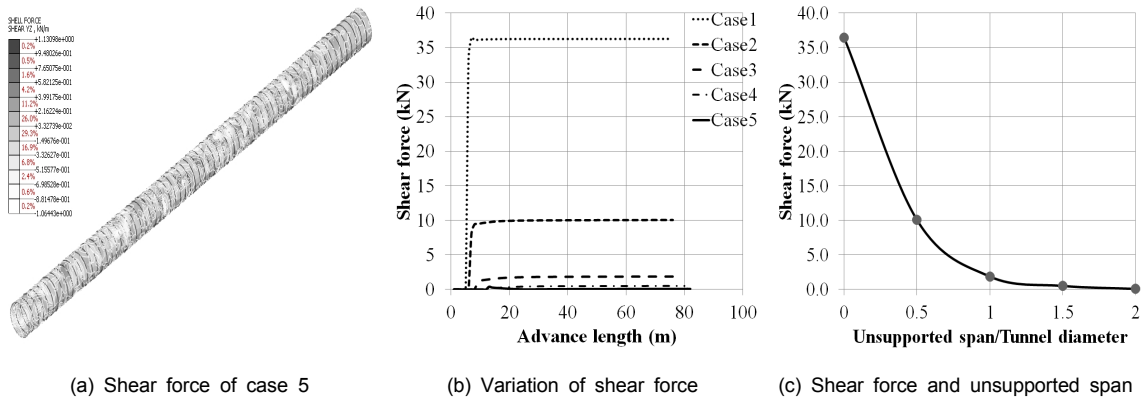


Fig. 7. Shear force acting on the segments

3.6 세그먼트 안정성 판단

기존의 세그먼트 라이닝 설계는 2차원 구조해석 프로그램을 이용하여 적절한 단면을 산출한 뒤 안정성을 검토 하였다. 또한 세그먼트 라이닝 설계와는 별개로 3차원 유한요소해석을 이용하여 지반의 침하를 예측하였다. 하지만 3차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 적절한 요소로 모델링을 수행하면 세그먼트 라이닝에 발생하는 단면력과 응력을 구할 수 있다. 즉 3차원 유한요소해석을 통해 지반의 거동과 세그먼트의 안정성을 동시에 검토할 수 있다. 세그먼트 라이닝과 같은 콘크리트 구조물은 허용응력 검토를 수행하여 허용응력을 초과하는 응력이 발생하는 경우 강도 설계법을 적용하여 철근량을 산정하는 것이 일반적이나, 본 연구 대상 터널에 발생하는 응력은 허용응력 이내이므로 강도 설계법은 생략하였다.

계산된 축력, 휨모멘트, 그리고 전단력으로부터 세그먼트 라이닝의 안정성을 검토할 수 있다. Table 4에 세그먼트의 강도와 물성치를 정리하였다. 세그먼트 라이닝의 설계기준강도는 24 MPa의 세그먼트이며 허용 압축응력, 허용 인장응력, 허용 전단응력 계산

결과는 Table 5에 나타났다. 가장 큰 단면력을 나타내는 Case 1인 경우에 대하여, 시공단계 완료 상태인 세그먼트의 모든 요소에 대하여 발생하는 최대 단면력을 검토했다. 식 (2)은 휨 압축응력, 식 (3)은 휨 인장응력, 식 (4)은 전단응력을 나타내며 결과값은 Table 6에 허용 응력과 비교하여 정리하였다. 최대 작용 응력의 비교 결과, 설계된 세그먼트 라이닝은 허용응력 이내 존재함을 알 수 있다. 본 논문에서 참고한 기설 154 kV ○○ 변전소와 ○○ 변전소간 계통 구성을 위해 수행된 설계 보고서에 따르면, 본 연구에서 획득한 세그먼트에 발생하는 최대 응력 값이 구조해석 프로그램 및 2차원 유한요소해석을 이용하여 획득한 결과와 유사함을 확인했다.

$$F'_c = \frac{P_{\max}}{A} + \frac{M_{\max}}{Z} \quad (2)$$

$$F_c = \frac{P_{\max}}{A} - \frac{M_{\max}}{Z} \quad (3)$$

$$V = \frac{V_{\max}}{A} \quad (4)$$

Table 4. Properties of the segment

f_{ck} (MPa)	T (m)	A (m ²)	I (m ⁴)	y (m)
24	0.2	2.26	1.99059	1.95

Table 5. Allowable stress of the segment

	Standard	Strength design criteria	Allowable stress
Allowable compressive stress	$0.40 f_{ck}$	$f_{ck} = 24 \text{ MPa}$	9.6 MPa
Allowable tensile stress	$0.42 \sqrt{f_{ck}}$		2.058 MPa
Allowable shear stress	$0.25 \sqrt{f_{ck}}$		1.225 MPa

Table 6. Stability of the segment

	Compressive stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Shear stress (MPa)
Maximum	2.858	0.716	0.057
Allowable	9.6	2.058	1.225

여기서, P_{max} 는 1699.53 kN, M_{max} 는 36.31 kN, A 는 2.26 m², Z 는 1.02 m³, V_{max} 는 60.05 kN이다.

$$S_{max} = 0.313 \cdot V_L \cdot \frac{D^2}{i} \quad (5)$$

4. 후방주입 거리에 따른 Volume loss 분석

4.1 3차원 유한요소해석 결과

앞서 구축한 동일한 모델로부터 지반 침하를 획득하여 터널 굴착면의 지반 손실량 V_L 과 지표면 침하곡선에서의 단위길이에 대한 총 침하 부피량 V_S 의 관계를 분석했다. 터널굴착으로 인해 발생하는 지반침하 예측은 현재 Peck (1969)이 제안한 여러 함수가 자주 사용되고 있다(Son et al., 2010). 즉, 터널반경 및 지표면에서부터의 깊이와 지반의 상태를 알면 변곡점의 위치를 결정할 수 있으며 이로부터 침하 폭이 결정될 수 있다. 또한 변곡점의 위치 i 와 터널의 직경 D , 그리고 터널 굴착면에서 지반 손실량(Volume loss factor, V_L)으로부터 지반의 최대 침하량(S_{max})을 식 (5)로부터 획득 할 수 있다(Snezana, 2012).

유한요소해석 결과로 얻게 되는 값은 최대 침하량 S_{max} 와 변곡점 i 값이다. Schmidt (1969)는 지표면의 침하발생 형상은 Gauss 분포곡선을 따르며 터널 변위에 따른 지표면 변위 발생량은 다음과 같은 식 (6)과 같은 관계를 보인다고 제안하였다(Koh et al., 2011).

$$V_S = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{max} \quad (6)$$

또한 터널의 굴착 직경 D 와 Volume loss 지수 V_L (%) 은 다음과 같은 식 (7)과 같이 표현된다(Snezana, 2012).

$$V_L = \frac{V_s}{\pi D^2} \cdot 100\% \quad (7)$$

본 연구의 유한요소해석 결과로 획득한 최대 침하

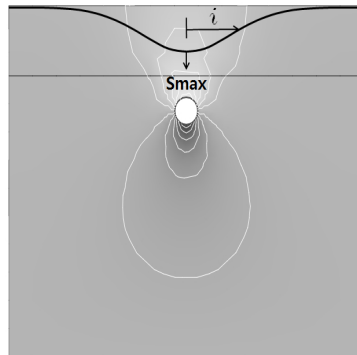


Fig. 8. Inflection point in the curve of subsidence

Table 7. Maximum displacement (S_{max}) at the ground surface

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
S_{max} (mm)	0.02587	0.16051	0.22366	0.23781	0.24027
i (m)	10				
D (m)	4				

량 S_{max} 와 변곡점 i , 굴착직경 D 의 값은 Fig. 8과 Table 7에 도시했다.

4.2 후방주입 거리에 따른 V_S 와 V_L 관계

각각의 Case에 따른 V_S 및 V_L 결과를 Table 8에 나타냈으며, Fig. 9은 후방주입 거리에 따른 경향을 나타낸다. Fig. 9로부터 쉴드 TBM 으로 인해 발생된 V_L 는 0.05~0.5% 내에 분포하는 결과를 얻었다. 이는 쉴드 TBM 공법으로 시행된 CTRL project (Channel Tunnel Rail Link)에서 측정된 범위와 유사함을 확인할 수 있다. CTRL project는 다양한 점토와 흙을 포함하는 복합지반에서 수행되었으며, 외경 8.15 m의 EPB 쉴드 TBM을 이용하여 건설되었다. CTRL project에서 탈수 상태의 모래지반에서는 0.2~0.5%의 V_L 을 나타냈으며 이는 본 연구의 결과와 유사함을 알 수 있다.

내공 변위를 최대한으로 제어한 Case 1의 경우 V_L 의 값이 0.05%를 나타냈으며 이는 Case 5의 경우에 비해 88% 감소된 값을 나타냈다. 또한 즉시주입에

비해 Case 2의 V_L 는 큰 폭으로 증가하였으며 후방주입 거리가 증가함에 따라 V_L 증가폭은 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 즉, 지반 연직 침하 억제를 우선적으로 고려 할 때 즉시주입으로 인한 지반 침하 억제 효과는 후방주입보다 효과적이라고 판단된다. 실제 터널 시공 시 최대한 빨리 뒷채움 그라우트를 시행하는 것이 지반침하의 억제에 중요한 부분이라는 점을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 후방주입 거리에 따른 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성을 분석하기 위하여 3차원 유한요소해석 연구를 수행하였다. 특히, 후방주입 거리에 따라 변하는 지반의 연직 변위와 Volume loss와의 상관관계를 분석하고 세그먼트 라이닝에 발생하는 단면력을 분석하였다. 이를 위해 3차원 유한요소법을 적용하여 쉴드 TBM의 합리적인 모델링 방법을 제시하였다. 또한 이러한 합리적인 모델을 바탕으로 후방주입 거리에 따른 세그먼트의 단면력을 분석하고 허

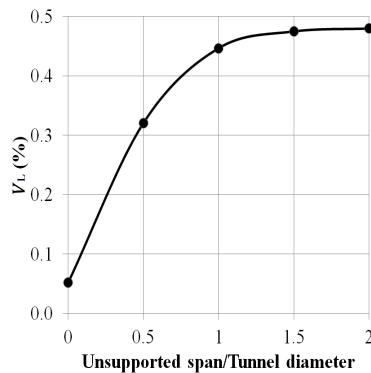


Fig. 9. The case 1~5 in relation V_L and unsupported span

Table 8. Results of the V_S and V_L

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
V_S (m ²)	0.00813	0.05042	0.07027	0.07471	0.07548
V_L (%)	0.05167	0.32052	0.44662	0.04749	0.47978

용응력 설계법을 바탕으로 세그먼트의 안정성을 분석하였다. 종전에 구조해석과 지반 침하 확인을 위한 유한요소해석을 각각 수행하는 불편함을 해소하기 위해 세그먼트의 안정성과 지반 침하를 동시에 분석할 수 있는 기반을 제시했다. 후방주입 거리가 증가할수록 지반의 연직 침하는 증가했다. 반면, 세그먼트에 발생하는 축력, 휨 모멘트 및 전단력은 후방주입 거리가 증가 할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 즉시 주입으로 지반의 내공 변위를 제어함으로써 지반의 이완이 제어되는 경우, 지반 침하를 최대한 감소시킬 수 있지만 세그먼트에 발생하는 단면력이 증가한다. 후방주입 거리에 따른 Volume loss의 분석 결과, 지반 침하 억제 측면에서는 즉시주입이 효과적임을 알 수 있었고, 후방주입 거리가 늘어날수록 Volume loss의 증가 폭은 점차 수렴되는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20131010501790).

References

1. ITA WG Mechanized Tunneling (2000), "Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)", pp. I-22-I-34.
2. ITA-AITES WG "Research" (2007), "ITA/AITES report 2006 on settlements induced by tunneling in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, pp. 119-149.
3. Kang, T.H. (2013), "A study of earth pressure calculating method about shield TBM tunnel segments in the rock", Master Thesis, Hanyang University.
4. Kim, J.Y. (2013), "EPB shield TBM tunnel construction -How to set the face pressure value and management for the stability of face-", Korean Geotechnical Society, Vol. 29, No. 2, pp. 21-27.
5. Koh, S.Y., Kwon, S.J., Hwang, C.H., Kim, S.I., Choo, S.Y. (2011), "A study on gap parameter and influence area of ground settlement using back analysis constructed by shield TBM with shallow depth", 2013 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, Vol. 14, No. 2, pp. 1509-1518.
6. Lee, K.M., Rowe, R.K., Lo, K.Y. (1992), "Subsidence owing to tunnelling, I. estimating the gap parameter", Canada, Geotech. J., Vol. 29, pp. 929-941.
7. Peck, R.B. (1969), "Deep excavations and tunneling in soft ground", Proceedings of the 7th international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225-290.
8. Schmidt, B. (1969), "Settlements and ground movements associated with tunneling in soils", PhD Thesis, University of Illinois.
9. Snezana Maras-Dragojevic (2012), "Analysis of ground settlement caused by tunnel construction", Gradevinar, Vol. 64, No. 7, pp. 573-581.
10. Son, M.R., Min, J.C. (2010), "Comparison of ground movements in a single ground layer and multiple ground layers due to nearby tunnel excavation", Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 3-C, pp. 167-174.