

# 3차원 수치해석을 이용한 Shield TBM 굴진시 지표침하 주요 영향요소 분석

전기찬<sup>1</sup> · 김동현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 대한건설ENG 기술연구소, 상무

<sup>2</sup>정회원, 대한건설ENG 기술연구소, 부사장

## A study on key factors of ground surface settlement due to shield TBM excavation using 3-dimension numerical analysis

Gy-Chan Jun<sup>1</sup>, Dong-Hyun Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>KOREA Engineering & Construction Co., Ltd. Managing Director

<sup>2</sup>KOREA Engineering & Construction Co., Ltd. Vice President

**ABSTRACT:** This paper is to perform 3-dimensional numerical analysis considering face pressure, backfill pressure, excavation length, soil model and element size for selecting key factors of ground surface settlement due to shield TBM advancement. According to the numerical analysis results, backfill pressure and soil model are governing factors inducing ground surface settlement. To complement this study, the ground conditions and characteristics of the boring machine will be considered using numerical analysis.

**Keywords:** Shield tunneling, 3-D numerical analysis, Backfill pressure, Soil model

**초 록:** 본 연구는 Shield TBM 굴착시 지표침하에 대한 주요 요소를 선정하기 위하여 3차원 지반해석 프로그램을 이용하여 막장압, 뒤채움압, 굴진장, 지반모델 및 요소망에 대한 다양한 조건을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 의한 지표침하 산정결과 뒤채움압과 지반모델조건이 가장 큰 영향을 미치는 요소로 판단되었으며 향후 지반조건 및 장비특성에 따른 사례를 추가하여 연구를 보완하고자 한다.

**주요어:** Shield TBM 터널, 3차원 수치해석, 뒤채움압, 지반모델

## 1. 서론

최근 급속한 도시화에 따라 지하공간 개발 요구가 증가하고 있고 급격히 팽창한 도심지 인구를 분산시키기 위하여 인접 도심지와의 접근성을 높이는 방법으로 교통 지하화 계획들이 진행되고 있다. 또한 도심지 외곽에 위치하는 공항, 철도 및 버스터미널과 같은 주요 시설물에 대한 접근성을 높이기 위하여 도심지

터널계획 및 시공사례가 증가하고 있다. 특히 도심지에 인접하여 대형 하천 또는 해협 등에 의한 지형적 단절이 발생하는 경우 불량한 시공조건 및 지반조건에 유리한 Shield TBM 공법이 주목받고 있다.

Shield TBM 공법은 굴착과 함께 막장면을 토압 또는 슬러리압을 이용하여 안정성을 확보하고 동시에 세그먼트를 조립하여 안전성은 물론 시공성에 장점을 갖고 있는 공법이다. 그러나 국내에서는 아직까지도 Shield TBM 공법에 대한 경험이 부족하여 시공에 많은 어려움을 겪고 있으며 설계분야에서도 명확한 설계방법이 정립되지 않고 있다. 특히 도심지 설계에서 중요한 지표침하 예측방안이 국내에서는 정립되지

\*Corresponding author: Dong-Hyun Kim  
E-mail: k7419@chol.com

Received April 15, 2015; Revised May 1, 2015;  
Accepted May 6, 2015

못하고 있으며 대부분 기존 수치해석 방법 및 문헌 자료를 이용하여 지표침하를 예측하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 3D 수치해석을 이용하여 쉴드터널 굴착시 지표침하에 영향을 주는 요소를 선정하고 다양한 조건에 대하여 수치해석을 수행하여 요소별 지표침하에 미치는 영향정도를 평가하였다. 수치해석 수행은 네덜란드 Second heinenoord tunnel 시공 및 계측 사례를 이용하여 지층조건과 지반물성을 적용하였고 막장압, 뒤채움압, 굴진장, 지반모델, 요소망 적용에 따른 지표침하 영향 정도를 분석하였다.

## 2. 사례선정

### 2.1 Second heinenoord tunnel 개요

본 연구의 기본 배경으로 선정된 Second heinenoord tunnel은 네덜란드의 최초로 계획된 하저터널

로 Oude Maas강 하부의 굴착을 위한 2개소 pilot tunnel을 시험시공하고 실험 및 계측을 수행하여 쉴드터널 연구에 많은 정보를 제공한 사업이다. 터널의 외경은 8.3m로 Slurry Shield TBM 장비를 사용하여 굴착을 수행하였고 라이닝은 RC segment type으로 시공되었다. 완성 후 기존 Heineoord 터널의 교통효율 저하 및 안전상의 문제를 해결하기 위하여 저속교통(보행자, 자전거, 오토바이 및 농기구 등)을 위한 터널로 사용되고 있다.

### 2.2 지층현황 및 물성

Second heinenoord 터널 통과구간인 Oude Maas 강 하부 지질현황은 Fig. 1과 같이 층적층과 홍적층 지반으로 조사되었으며, 각 층은 사질토, 점성토 및 이탄층의 연약지반으로 구성되어 있으며 해석 적용 물성은 Table 1과 같다(Sven Möller, 2006).

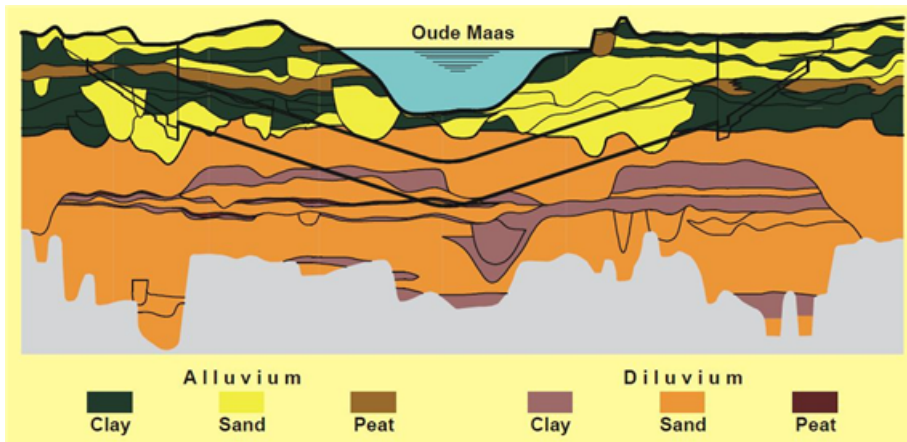


Fig. 1. Second Heinenoord Tunnel Geologic Strata

Table 1. Heinenoord soil properties

layer	depth	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (degree)	$K_0$	$E_{ocd}$ (MPa)	$\nu$
1 (fill)	GL(-) 4.0 m	17.2	3	27	0.58	8	0.34
2 (sand)	GL(-) 19.75 m	20	0.01	35	0.47	40	0.30
3 (sand)	GL(-) 23.25 m	20	0.01	35	0.47	120	0.30
4 (clay)	GL(-) 27.5 m	20	7	31	0.55	48	0.32

### 3. 영향인자 비교 및 분석

#### 3.1 해석개요

본 연구에서는 터널해석에서 일반적으로 쓰이는 탄소성 변형을 표현하는 모델로 Mohr-Coulomb 파괴 기준 외에도 Hardening-Soil, Hardening-Soil-small 모델을 적용하여 해석결과를 분석하였다. 막장압과 뒤채움압은 압력하중을 이용하여 모사하고 다양한 압력 하중을 적용하여 수치해석을 수행하였다.

#### 3.2 모델링

해석영역은 터널굴진방향 120 m, 폭 40 m, 높이 27.5 m, 터널 직경 8.3 m, 토피고 15 m, 굴진장 1.5 m의 제원으로 Fig. 2와 같이 모델링 하였고 지반물성은 Table 1과 같이 4개 층에 대한 지반 물성을 적용하였다. 해석프로그램은 지반분야에 널리 사용되는 2종류의 수치해석 프로그램을 이용하여 동일한 조건에서 해석을 수행하였으며 실무적인 관점에서 요소망 크기에 따른 영향성도 검토하였다.

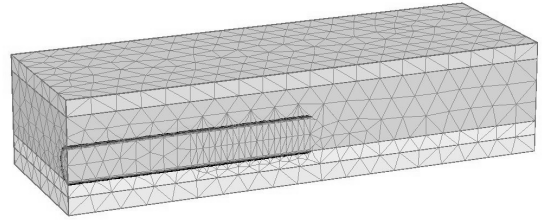


Fig. 2. Tunnel modeling

#### 3.3 시공단계 해석

시공단계의 구성은 뒤채움 적용방법과 적용단계의 선정을 위해 Fig. 3의 5가지 Case에 대한 수치해석을 수행하여 실제 지반거동과 유사한 결과를 나타내는 Case5를 선정하여 이후 수치해석에 적용하였으며, 경계조건 영향을 고려하여 초기굴진 20 m이후 부터의 결과를 정리하였다(Fig. 3).

#### 3.4 해석조건

총 터널굴진 연장은 120 m를 모델링하고 이 중 75 m까지 굴착 진행 시공단계를 구성하여 해석을 수행하였다. Shield TBM 본체 연장과 뒤채움 구간을

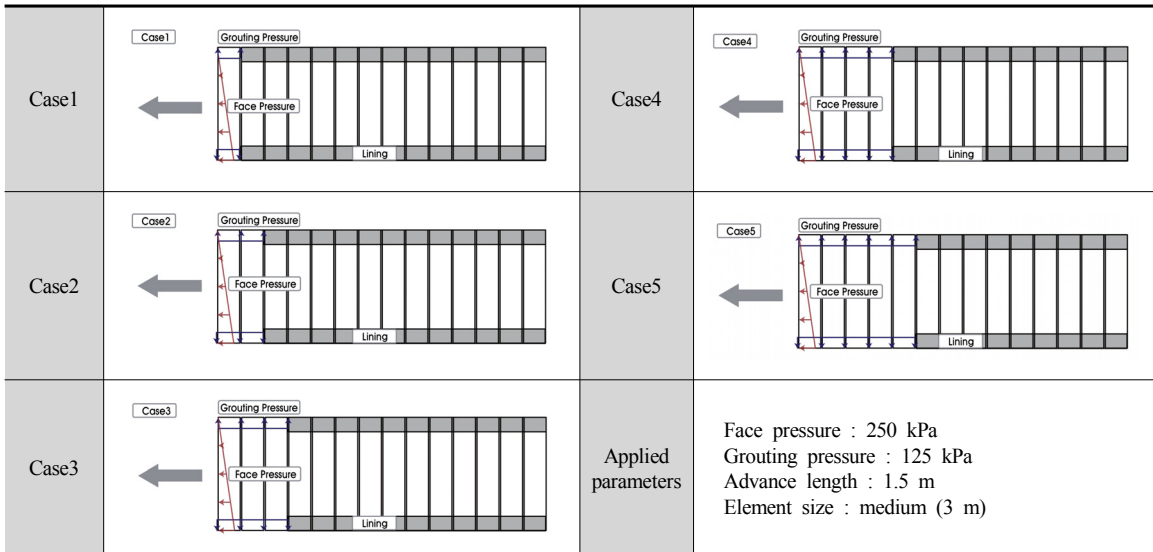


Fig. 3. Backfill grouting pressure cases

**Table 2.** Analysis cases

Face pressure	Backfill pressure	Advance length	soil model	Element size
160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	1.5 m (very coarse)
230 kPa	180 kPa	3 m	Hardening-Soil	3 m (medium)
300 kPa	250 kPa	4.5 m	Hardening-Soil-small	4.5 m (very fine)

고려하여 굴착 5단계 이후부터 세그먼트를 적용하였으며 뒤채움 그라우팅 경화과정은 생략하였다.

해석조건 선정을 위해 주요 영향 인자를 선정하고 (LIM, 2003) 실제 현장조건 외에 Table 2와 같이 해석 조건을 추가하여 수치해석을 수행하였다. 시공현장에서는 막장압 230 kPa, 뒤채움압 125 kPa로 계획되었으며, 굴진장은 1.5 m로 시공되었다.

## 4. 해석결과

### 4.1 막장압에 대한 영향

셴드터널 막장면에는 토압과 수압이 작용하므로 이에 대한 대응압을 적용하여 안정성을 확보한다. 대응 막장압은 Rankine 토압이론, Terzaghi 토압이론, Murayama 토압이론 등을 이용하여 산정함이 일반적

**Table 3.** Face pressure cases

Case	Face pressure	Backfill pressure	Advance length	Soil model	Element size	
Program A	HS-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	6 m (medium)
	HS-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	6 m (medium)
	HS-3	300 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	6 m (medium)
	HSS-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	6 m (medium)
	HSS-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	6 m (medium)
	HSS-3	300 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	6 m (medium)
	MC-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m (very fine)
	MC-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m (very fine)
	MC-3	300 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m (very fine)
Program B	BP1-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	BP1-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	BP1-3	300 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	BP2-1	230 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	BP2-2	160 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	BP2-3	300 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	AL-1	230 kPa	125 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	AL-2	160 kPa	125 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	AL-3	300 kPa	125 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	3 m

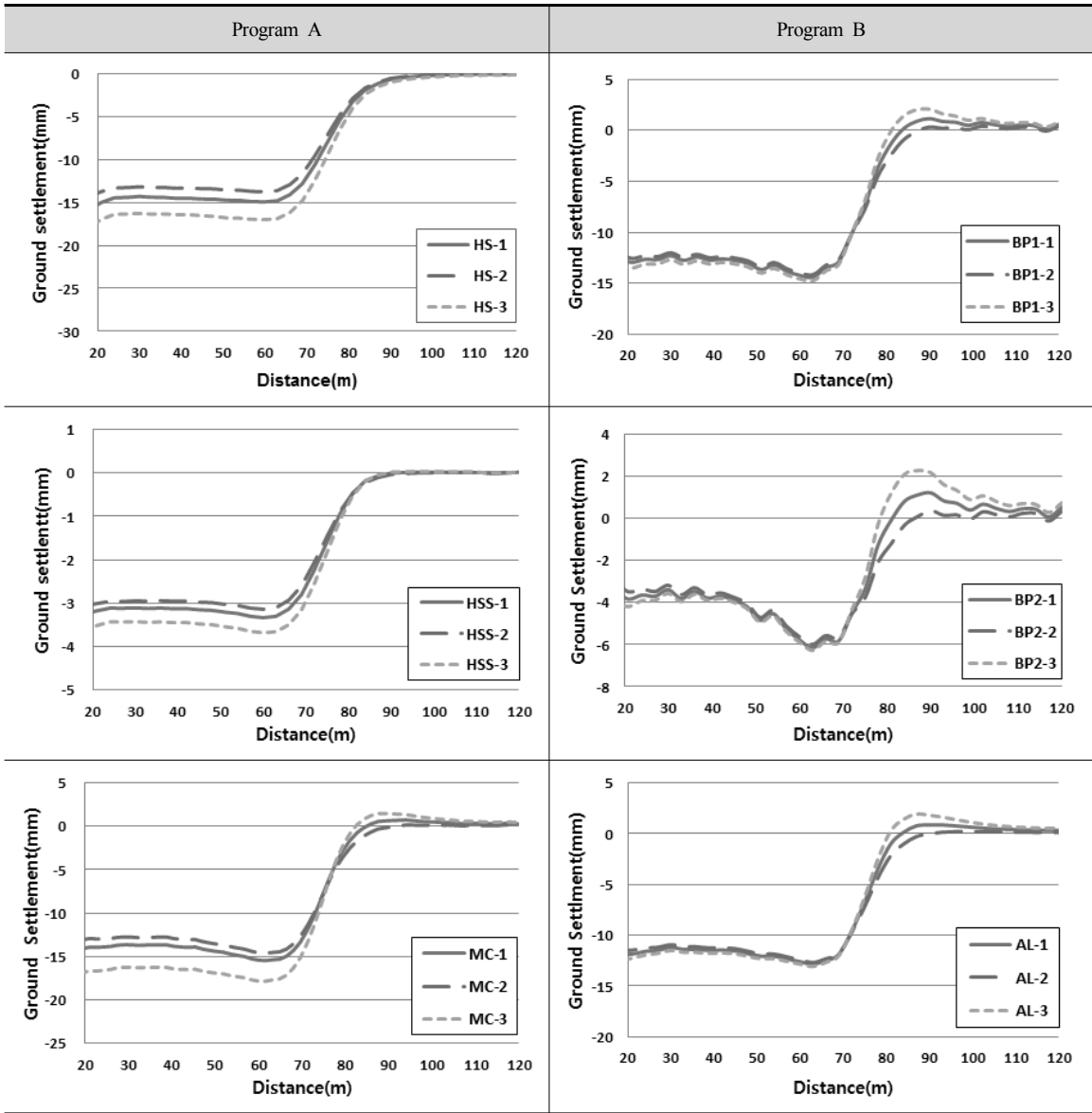


Fig. 4. Face pressure and ground surface settlements

이나(Cho, 2008) 본 연구에서는 Second heinenoord 터널 사례에서 측정된 막장압 230 kPa을 적용하였으며 막장압 영향검토를 위해 30%감소된 막장압과 30% 증가된 막장압을 적용하여 수치해석을 수행하고 해석 결과를 비교 분석하였다(Table 3, Fig. 4).

막장압에 의한 case별 해석결과 지표침하는 막장압이 증가할수록 막장 전방에 용기가 발생하고 막장면

후방에서는 지표침하가 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다.

이러한 경향은 막장압이 증가함에 따라 전방에 발생한 용기가 막장면 후방의 지표침하에 영향을 미치는 것으로 예상되며 과도한 막장압 적용시 지반파괴로 인한 지표면 용기현상을 예상할 수 있다.

### 4.2 뒤채움압에 대한 영향

뒤채움압의 작용방식에 대한 다양한 해석 기법들이 있으나 본 연구에서는 뒤채움압을 압력하중으로 모사하는 방법을 적용하고 세그먼트 구간에서는 콘크리트 라이닝 물성 요소를 적용하는 방법을 선정하였다. 해석결과는 Fig. 5와 같으며 Case 5를 선정하여 이후 해석에 적용하였다(3.3 시공단계 해석 참고).

뒤채움압의 지표침하에 대한 영향 정도를 분석하기 위하여 Second heinenoord 터널 사례에서 측정된 뒤채움압 125 kPa 외에도 추가로 180 kPa, 250 kPa 뒤채움압에 대한 해석을 수행하고 해석결과를 비교분석하였다(Table 4, Fig. 6).

해석결과 뒤채움압에 의한 영향은 막장압에 비해 상당히 큰 것으로 나타났다. 수행한 두 프로그램에서

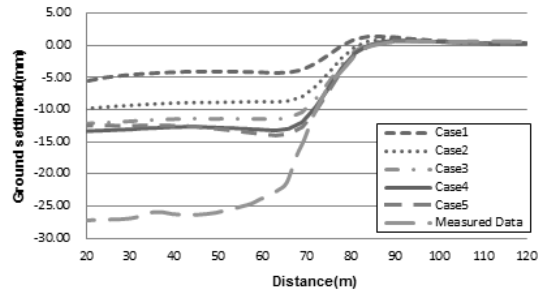


Fig. 5. Backfill pressure and ground surface settlements

모두 뒤채움압 125 kPa, 180 kPa, 250 kPa에 대한 지표침하에서 큰 차이를 보였다.

Program A에서는 125 kPa와 180 kPa를 적용한 해석결과에서 지표침하는 약 5배의 차이를 보였으며 250 kPa를 적용한 해석결과에서 가장 작은 지표침하량을 보이거나 매우 분산된 해석결과를 확인하였다.

Table 4. Backfill grouting pressure cases

Case	Face pressure	Backfill pressure	Advance length	Soil model	Element size	
Program A	FP1-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP1-2	230 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP1-3	230 kPa	250 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP2-1	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP2-2	160 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP2-3	160 kPa	250 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	HSS-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)
	HSS-2	230 kPa	180 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)
	HSS-3	230 kPa	250 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)
Program B	FP1-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP1-2	230 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP1-3	230 kPa	250 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP2-1	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP2-2	160 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP2-3	160 kPa	250 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP3-1	300 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP3-2	300 kPa	180 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP3-3	300 kPa	250 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m

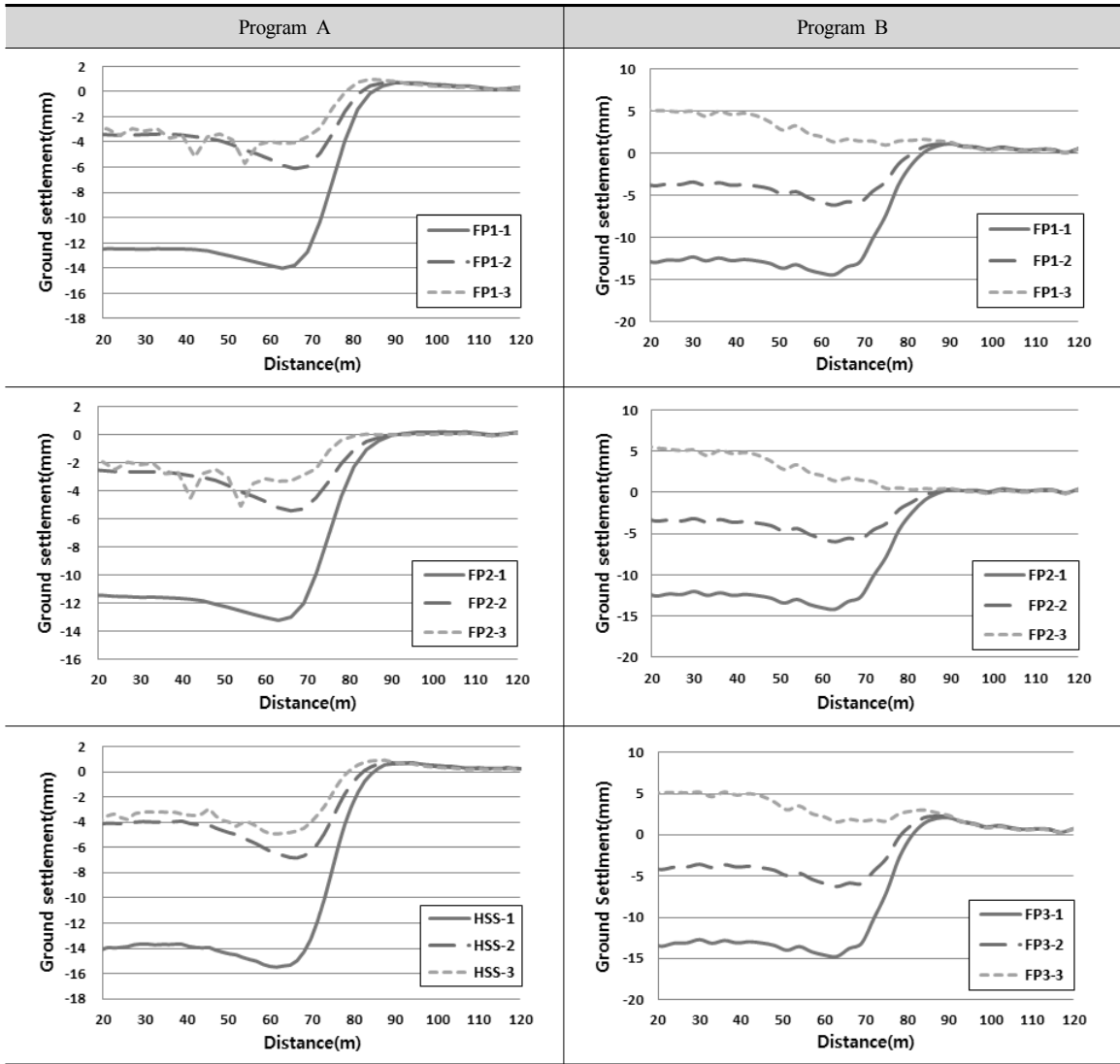


Fig. 6. Backfill grouting pressure and ground surface settlements

Program B에서는 3가지 경우에 대한 결과가 뚜렷한 차이를 나타내고 뒤채움압 250 kPa의 경우 막장압과는 상관없이 막장면 후방 지반에서 크게 융기하는 결과를 나타내고 있다.

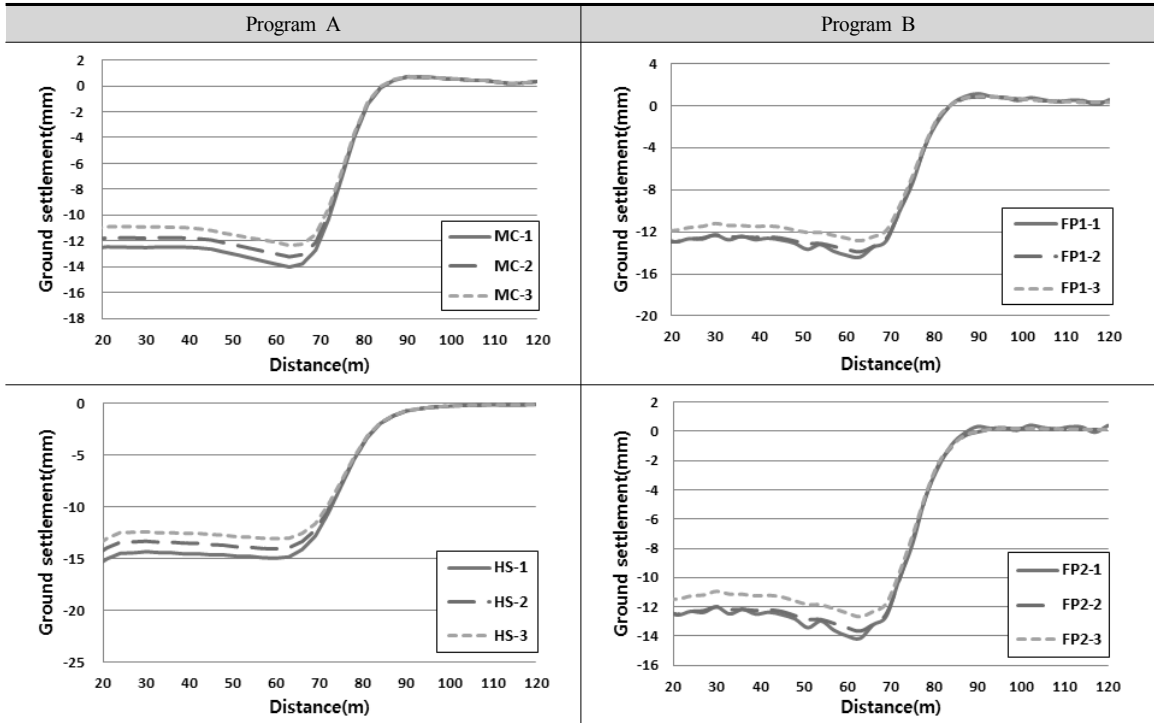
### 4.3 굴진장에 대한 영향

굴진장은 일반적으로 세그먼트 연장과 관련이 있으며 해석상에서는 요소망 최소 크기가 굴진장에 따라

결정되므로 해석시간과도 관련이 있다. Second heinenoord 터널에서 굴진장은 1.5 m이다. 해석조건에서 굴진장은 1.5 m 이외에도 추가로 3 m, 4.5 m를 적용하여 수치해석을 수행하고 해석결과를 비교 분석하였다. 해석결과 굴진장에 의한 지표침하 결과에서는 다소 미미한 차이를 나타내었다. 75 m굴착 단계에서 막장면의 전방에서는 동일한 지표침하를 나타내며 막장면 후방에서의 지표침하는 1~3 mm정도의 차이를 확인하였다(Table 5, Fig. 7).

**Table 5.** Advance length cases

Case	Face pressure	Backfill pressure	Advance length	Soil model	Element size	
Program A	MC-1	230 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)	
	MC-2	230 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)	
	MC-3	230 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)	
	HS-1	230 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	medium (6 m)	
	HS-2	230 kPa	3 m	Hardening-Soil	medium (6 m)	
	HS-3	230 kPa	4.5 m	Hardening-Soil	medium (6 m)	
	HSS-1	230 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)	
	HSS-2	230 kPa	3 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)	
	HSS-3	230 kPa	4.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)	
Program B	FP1-1	230 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP1-2	230 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP1-3	230 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP2-1	160 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP2-2	160 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP2-3	160 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP3-1	300 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m	
	FP3-2	300 kPa	125 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP3-3	300 kPa	125 kPa	4.5 m	Mohr-Coulomb	3 m



**Fig. 7.** Advance length and ground surface settlements



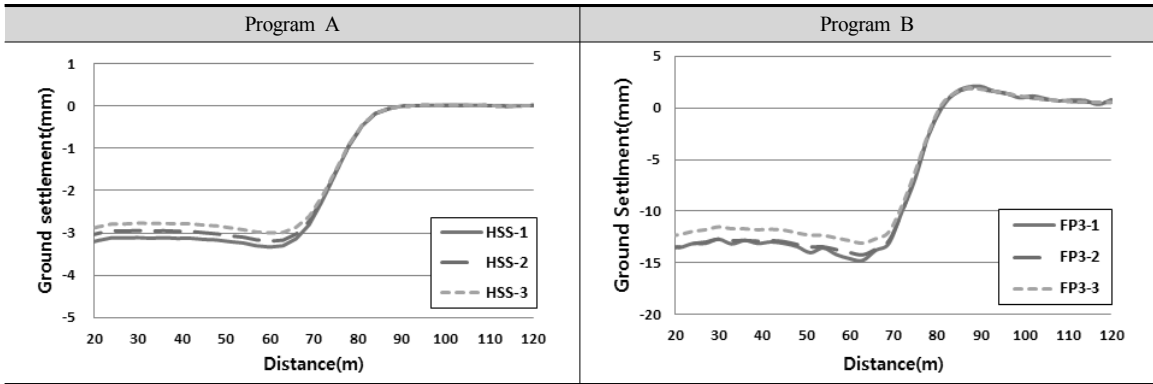


Fig. 7. Advance length and ground surface settlements

#### 4.4 지반모델

실무에서는 지반관련 수치해석에서 적용사례가 많고 간편한 Mohr-Coulomb 지반모델이 대부분 이용되고 있다. 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 지반모델 외에도 Hardening-Soil, Hardening-Soil-small 등 다양한 지반모델을 적용하여 수치해석을 수행하고 결과를

비교분석 하였다. 프로그램 A에서는 Hardening-Soil, Hardening-Soil-small를 추가로 적용하여 수치해석을 수행하였고 Program B에서는 Mohr-Coulomb 지반모델 외에 HardeningSoil 지반모델을 적용하여 수치해석을 수행하고 해석결과를 비교 분석하였다(Table 6, Fig. 8).

수치해석 결과 Program A에서는 Mohr-Coulomb

Table 6. Soil model cases

Case	Face pressure	Backfill pressure	Advance length	Soil model	Element size	
Program A	FP1-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP1-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	medium (6 m)
	FP1-3	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	medium (6 m)
	FP2-1	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	FP2-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	medium (6 m)
	FP2-3	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	medium (6 m)
	FP3-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	very fine (3 m)
	FP3-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	very fine (3 m)
	FP3-3	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)
Program B	FP1-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP1-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	3 m
	FP2-1	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP2-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	3 m
	AL-1	160 kPa	125 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	3 m
	AL-2	160 kPa	125 kPa	3 m	Hardening-Soil	3 m

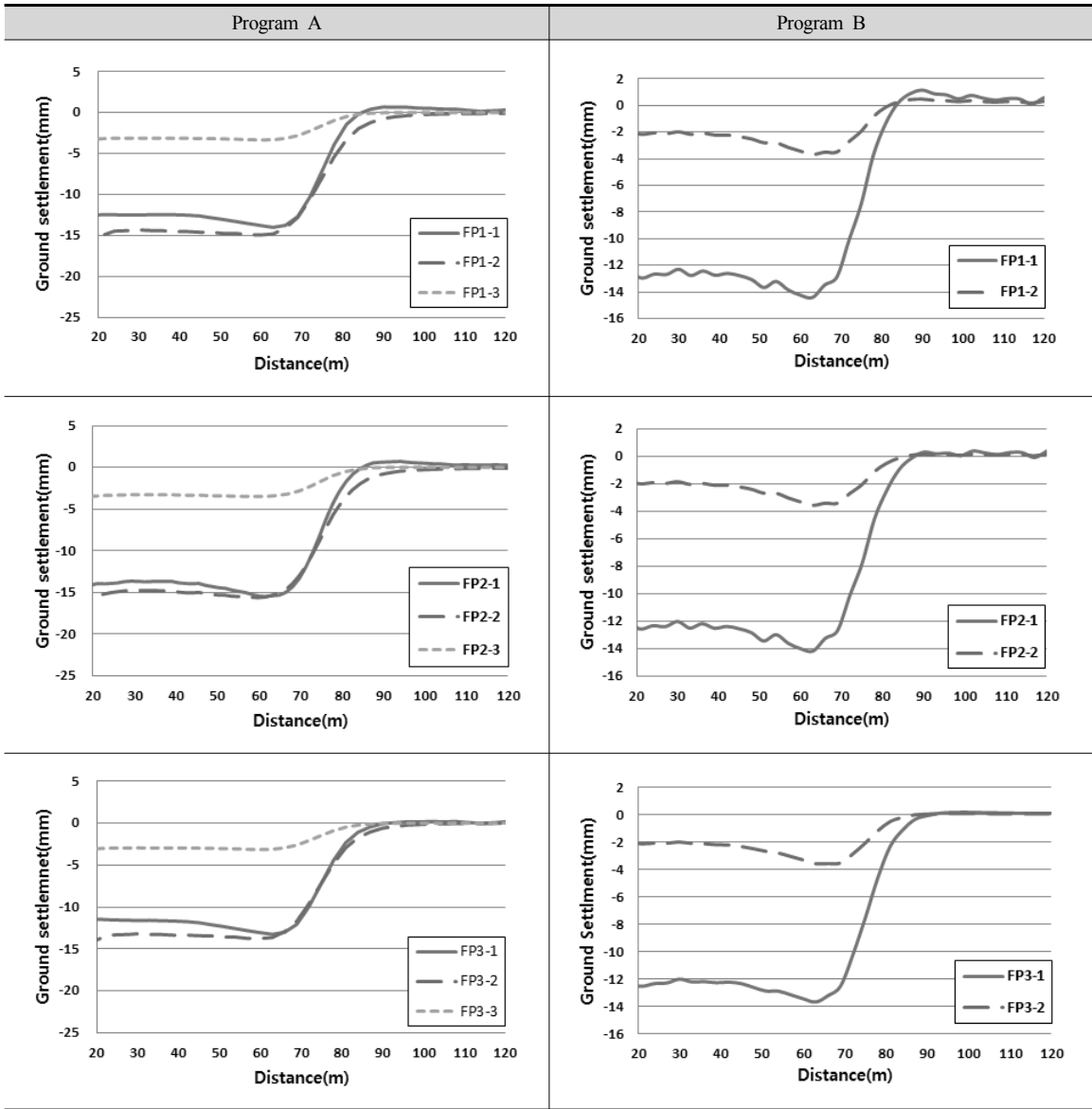


Fig. 8. Soil model and ground surface settlements

지반모델 적용시 12~15 mm 지표침하가 발생하였고 Hardening-Soil 모델 적용시에는 14~16 mm 지표침하가 발생하여 유사한 지표침하 결과를 확인하였으며, Hardening-Soil-small 모델에서는 3~4 mm로 침하량이 작게 발생하였다.

Program B에서 Mohr-Coulomb 모델의 침하량은 12~14 mm로 Program A와 유사한 결과를 나타내었

으나 Hardening-Soil 모델 적용조건에서는 지표침하가 2~4 mm로 상당히 작은 침하량이 발생되어 프로그램 간 해석결과 차이가 발생하였다. 상이한 해석결과는 프로그램 특성에 의한 차이로 예상되며 지반해석 프로그램 종류를 추가하여 해석결과의 신뢰성을 확인할 필요성을 확인하였다.

### 4.5 요소망에 대한 영향

정확한 수치해석을 수행하기 위해서는 물성과 시공 단계 그리고 정교한 요소망이 필요하다. 그러나 요소망이 정교해 질수록 상당한 해석시간이 소요되어 실

무적인 관점에서 적절한 요소망 크기 산정이 필요하다. 따라서 해석결과의 정확성을 유지하는 적정 크기의 요소망을 판단하기 위하여 요소망 크기별 지표침하량과 해석시간에 대한 연구를 수행하였다(Table 7, Fig. 9).

Table 7. Element size cases

Case	Face pressure	Backfill pressure	Advance length	Soil model	Element size	
Program A	MC-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	medium (6 m)
	MC-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	very fine (3 m)
	MC-3	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	very coarse (12 m)
	HS-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	medium (6 m)
	HS-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	very fine (3 m)
	HS-3	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil	very coarse (12 m)
	HSS-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	medium (6 m)
	HSS-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very fine (3 m)
	HSS-3	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Hardening-Soil-small	very coarse (12 m)
Program B	FP1-1	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP1-2	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	1.5 m
	FP1-3	230 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	4.5 m
	FP2-1	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP2-2	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	1.5 m
	FP2-3	160 kPa	125 kPa	1.5 m	Mohr-Coulomb	4.5 m
	FP3-1	160 kPa	125 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	3 m
	FP3-2	160 kPa	125 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	1.5 m
	FP3-3	160 kPa	125 kPa	3 m	Mohr-Coulomb	4.5 m

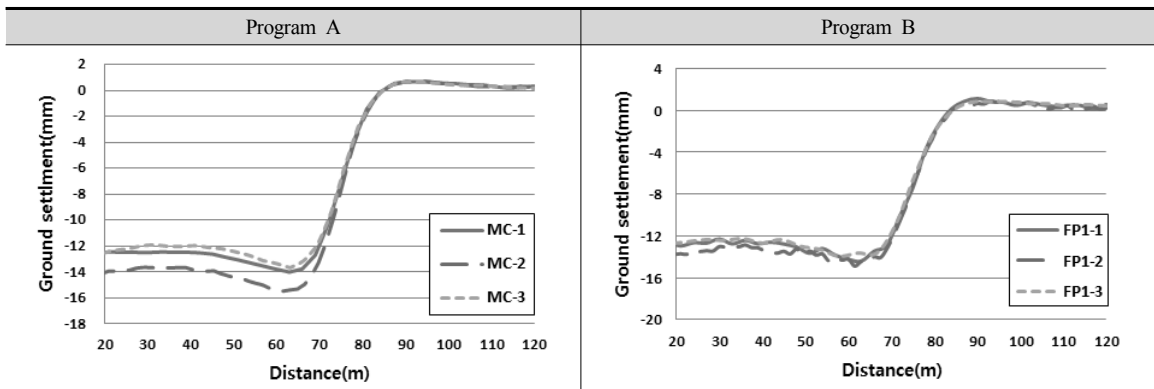


Fig. 9. Element size and ground surface settlements

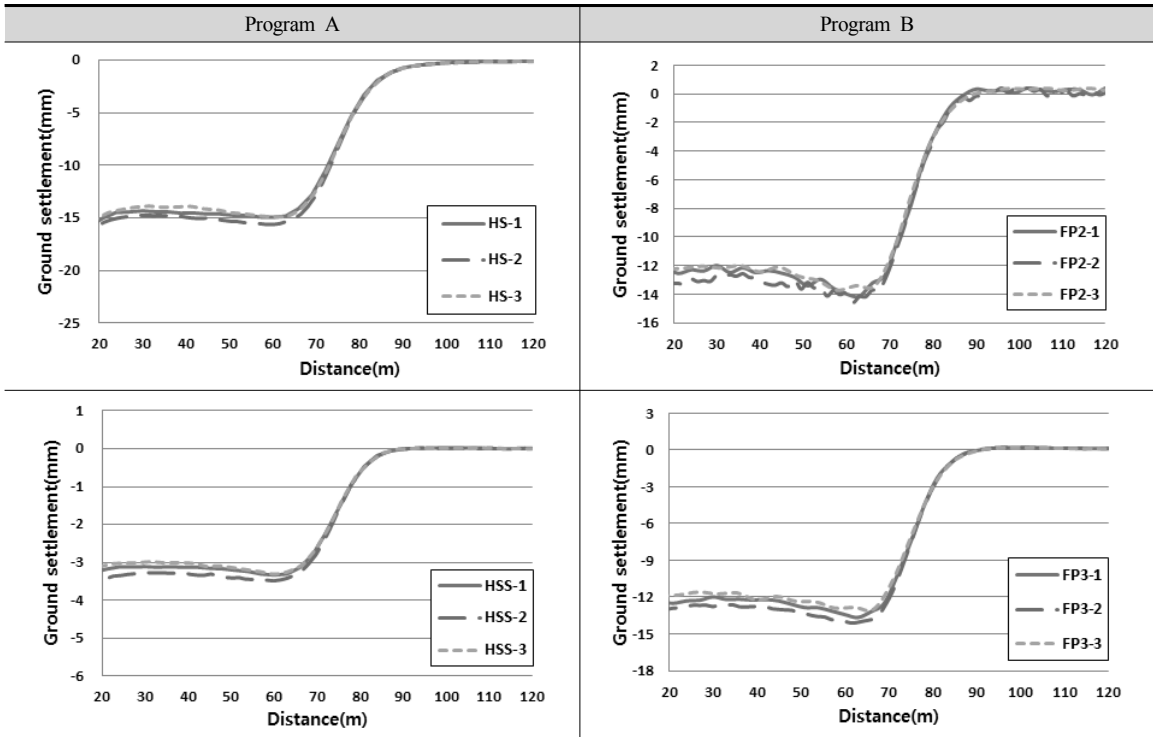


Fig. 9. Element size and ground surface settlements

요소망에 대한 비교를 위해 굴진장이 1.5 m인 것을 고려하여 Program B에서는 1.5 m, 3 m, 4.5 m에 대해 비교하였으며 Program A에서는 very fine (3 m), medium (6 m), very coarse (12 m)의 경우에 대해 해석을 수행하였다.

해석결과 요소망에 따라 해석결과의 영향은 미미한 것으로 나타났고 요소망형성이 정밀해 질수록 해석결과 지반침하량이 다소 증가하는 양상을 보였다. 또한 요소망이 정밀해 짐에 따라 해석시간은 상당한 시간의 차이가 발생하였다. 따라서 요소망 선정시 해석목적, 기하형상, 물성을 고려해야 하고 추가로 실무에서는 해석시간을 고려한 적절한 요소망 크기를 선정함이 타당한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Shield TBM 3차원 수치해석에서

다양한 영향요소에 대한 지표침하의 영향성을 분석하기 위해 Second Heineoord tunnel 사례를 이용하여 심도 약 16.5 m에 사질토구간을 통과하는 터널로 선정하고 막장압, 뒤택음압, 굴진장, 요소망 등의 조건에 대해 100여 가지의 설계조건을 고려하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 막장압에 의한 지표침하 영향을 비교하기 위하여 160 kPa, 230 kPa, 300 kPa 3가지 막장압을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 지표침하는 75m굴착단계에서 막장 전방으로 막장압의 크기가 증가할수록 지표용기가 확인되었으며 막장 후방에서는 침하량이 증가되는 현상을 확인하였다.
2. 뒤택음압의 경우 125 kPa, 180 kPa, 250 kPa 3가지 조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 뒤택음압 조건에 따라 지표침하의 변화가 뚜렷하게 확인되었다.

3. 굴진장의 경우 1.5 m, 3 m, 4.5 m 3가지 조건을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 굴진장에 의한 지표침하 변화는 미미한 것으로 확인하였다.
4. 수치해석 적용시 일반적인 Mohr-Coulomb 지반모델 이외에 Hardening-Soil, Hardening-Soil-small 지반모델을 추가로 적용하고 해석결과를 검토하였다. 지반모델별 지표침하에 차이를 나타내고 있으며 적용 해석프로그램 종류에 따라라도 상당한 해석결과 차이가 발생하여 프로그램 종류를 추가하여 해석결과의 신뢰성을 검토할 필요성을 확인하였다.
5. 다양한 요소망 크기에 따른 해석결과와 소요시간에 대해 비교검토 하였다. 해석결과 요소망 크기가 지표침하에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타난 반면 해석시간은 크게 증가하였다.

수치해석결과 뒤택음압, 지반모델, 막장압, 굴진장, 요소크기 순으로 지표침하에 영향을 미치는 것으로 확인되어 뒤택음압과 지반모델이 지표침하에 영향을 미치는 주요 요소로 판단하였다. 따라서 막장압보다 뒤택음압 관리가 중요 사항임이 예상되고 시공시 뒤택음 시공에 대한 관리가 더욱 중요시 되어야 할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 뒤택음압을 주요 영향요소로 선정하고 추가로 지반조건 및 장비특성을 반영한 검토를 수행할 예정이나 지반모델의 경우 실무여건을 고려하여 Mohr-Coulomb 모델을 중심으로 연구를 수행하는

것이 타당하다고 판단하였다.

본 연구는 Shield TBM에 대한 수치해석을 이용하여 설계정수에 따른 지표침하 영향성을 평가하고 설계사례와의 비교분석을 통하여 최적의 해석기법을 제안하기 위하여 진행되었다. 본 검토 내용을 포함한 다양한 설계조건 및 해석기법에 대한 추가 연구를 수행 중에 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. Cho, J.S. (2008), "Analysis of ground movements and lining segment in shield TBM based on three dimensional finite element method", Pukyong National University, pp. 15-25.
2. LIM KEN CHAI (2003), "Three-dimensional finite element analysis of earth pressure balance tunnelling", national university of singapore, pp. 121-198.
3. SVEN CHRISTIAN MÖLLER. (2006), "Tunnel induced settlements and structural forces in linings", Eigenverlag des Instituts für Geotechnik, pp. 108-111.