

# 2차원 수치해석을 통한 초저심도 박스형 터널 편측확폭시 지반침하거동 특성 분석

차요한<sup>1</sup> · 조계춘<sup>2</sup> · 홍은수<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수

<sup>3</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 연구부교수

## The numerical study on the ground settlement behavior of box type tunnel enlargement

Yohan Cha<sup>1</sup>, Gye-Chun Cho<sup>2</sup>, Eun-soo Hong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ph. D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Korea

<sup>2</sup>Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Korea

<sup>3</sup>Member, Research Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Korea

**ABSTRACT:** Utility tunnels have been employed in Korea since the 1970s and start to make trouble with structural safety and serviceability. Recently, tunnel enlargement has consequently been proposed due to the impending problems. However there are little study on box type utility tunnels except traffic tunnels. A 2D finite element analysis was conducted to evaluate ground behavior which depends on enlargement size and stiffness by one-side enlargement of the utility tunnel. Settlement scale increased with larger enlargement size and less stiff ground conditions. The observed settlement characteristics due to enlargement are similar to that suggested by Clough & Schmidt (1981). The settlement width is more affected by enlargement size than ground condition.

**Keywords:** Box-type tunnel, Tunnel enlargement, Ground settlement behavior, Numerical analysis

**초 록:** 1970년대 후반부터 설치된 공동구는 노후화에 따른 구조적 안정성과 수용시설의 변화에 따른 사용성이 문제가 될 수 있다. 노후 공동구의 확폭 재시공은 이에 대한 대안이 될 수 있지만 터널확폭에 대한 연구는 대부분 일정 심도 이상의 교통터널에 대하여 수행되었으며 저심도의 박스형 공동구에 대하여는 거의 연구가 이루어지지 않았다. 이 연구에서는 2차원 유한요소해석을 이용하여 공동구 터널을 편측확폭하는 경우 지반의 강성조건과 확폭 규모에 따라 확폭이 지반 침하에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 연구결과 최대 지표침하는 확폭 규모가 크거나 지반 강성이 작을수록 크게 발생하였다. 박스형 터널의 편측확폭시 침하 양상은 Clough & Schmidt (1981)의 제안과 유사하게 나타났으며, 침하 영향범위는 지반특성보다 확폭의 크기에 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

**주요어:** 박스형 터널, 터널 확폭, 지반 침하, 수치해석

## 1. 서론

공동구는 유통·공급 기반시설의 하나로 각종 지하 매설물을 공동 수용함으로써 도시의 미관을 개선하고

도로구조를 보전하며 교통 소통을 원활히 하는 지하 구조물이다. 국내에서는 1978년 여의도 공동구를 시 초로 하여 신도시 개발과 병행하여 설치되었고 전국적으로 75%에 이르는 256km의 공동구가 설치 20년 이상 경과되었다. 특히 수도권에서는 설치 경과 20년 이상의 공동구가 전체의 90%에 이르러 시설물의 안전 문제와 좁은 수용공간으로 인한 공급량 제한, 화재/방

\*Corresponding author: Eun-soo Hong  
E-mail: neshong@kaist.ac.kr

Received January 8, 2016; Revised January 22, 2016;  
Accepted January 26, 2016

재시설 및 소방시설 부재 등의 문제가 발생하고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 터널 내공의 확장이 고려될 수 있다. 터널 확폭에 의해 공급시설의 공간 부족 문제를 해결하는 동시에 성능 개선이 가능하며, 확폭 공법에 따라 벽체 재설치 및 교체를 통해 구조물 안전과 수명연장을 도모할 수 있다. 대상이 되는 지하 구조물을 개착식으로 내공확장할 경우, 지상 부지 장기점유로 인한 교통정체 및 사유지 침입, 민원, 반복굴착으로 발생하는 지반침하 등 여러 가지 문제가 발생하므로 지중에서의 터널링을 통한 확장기술이 요구된다.

확폭 기술은 도로터널, 철도터널을 대상으로 연구된 바 있다. 최근 일본의 확폭 사례를 바탕으로 도로터널의 운용중 확폭 시공시 주요 고려사항이 제안되고 (Kim et al., 2007), 확폭 공법의 종류에 따른 굴착 방식이 소개되었다(Seo et al., 2008a, 2008b). 또한 철도터널 단면확대를 가정하여 터널 확대 비용산출, 현실적 공사전략 제안, 공법 분류 및 국외 사례가 조사되었다(Ahn et al., 2013). 그러나 현재까지 전 세계적으로 터널 확폭의 시공사례가 매우 적고, 기존 연구들은 도로 및 철도터널에 한정된다. 특히 공동구와 같은 박스형 터널에 관한 연구는 거의 이루어지지 않아 실제 공동구에 확폭을 적용하기 위해서는 낮은 토피고의 박스형 터널을 대상으로 확폭에 관한 선행 연구가 수행되어야 한다.

이 연구에서는 낮은 토피고의 박스형 터널 확폭시 지반침하 특성분석을 수행하기 위하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 1) 확폭 모델 및 시공단계 구성을 위하여 박스형 터널 적용을 위한 확폭공법을 비교 분석하였으며, 2) 유한요소해석 프로그램인 MIDAS GTS/NX를 이용하여 다양한 강성의 지반에서 터널 확폭에 따른 지반 침하특성과 3) 확폭 규모에 따른 지반침하를 분석하였다. 특히 지상구조물에 영향을 미칠 수 있는 지표침하량, 최대 침하점의 위치 및 침하형상을 분석하여 박스형 터널의 편측확폭이 일반 신설 또는 병설 터널 굴착과 달리 지반침하에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 터널 굴착시의 지반 침하

Peck (1969)은 굴착에 의한 지표침하가 가우스의 정규분포의 형태와 유사함을 밝혔다. 이를 지표침하  $S_x$ 와 침하곡선의 변곡점  $i$ 에 의하여 정규분포식 (1)로 표현하였고(Fig. 1(a)) 여기서 변곡점  $i$ 는 식 (2)로 제안하였다. 이후 많은 연구자들이 이 가정으로 부터 수치 해석, 원심모형 실험 및 실제 현장의 측정결과를 바탕으로 지표침하곡선이 가우스 정규분포를 따르는 것을 입증하였다. 대표적으로, Cording & Hansmire (1972), Attewell & Farmer (1974), Atkinson & Potts (1977), O'reilly & New (1982) 등은 변곡점  $i$ 와 심도

Table 1. Advanced research of relationship between depth and inflection

Material	Point of inflection	Remarks
Cording & hansmire (1972)	$\frac{i}{R} = 0.8 \tan \beta \times \frac{Z_0}{D} + 0.4$	$\beta =$ draw angle
Attewell & Farmer (1974)	$\frac{i}{R} = K_a \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^n$	$K_a$ & $n =$ ground coefficient
Atkinson & Potts (1977)	$i = 0.25(H + D)$	$H =$ tunnel depth
Clough & Schmidt (1981)	$i = R \left(\frac{Z_0}{D}\right)^{0.8}$	
Mair et al. (1981)	$i = 0.5Z_0$	
O'Reilly & New (1982)	$i = 0.28Z_0 - 0.1$	
Loganathan & Poulos (1998)	$\frac{i}{R} = 1.15 \left(\frac{Z_0}{2R}\right)^{0.9}$	$K_0 = 1.15, n = 0.9$

$Z_0$ 의 관계를 Table 1과 같이 정립하였다.

$$S_x = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

$$\frac{i}{R} = K_a \left( \frac{Z_0}{2R} \right)^n \quad (2)$$

이후 O'Reilly & New (1982)는 병설터널 굴착시 정규분포 곡선의 형태를 띠는 지표침하가 중첩되며 (Fig. 1(b)) 이때의 침하를 식 (3)과 같이 제안하였다. 이 제안에서 두 터널의 직경, 심도와 침하폭은 같다고 가정되었으며 지표침하  $S_x$ 는 터널 중심간의 간격  $d$ 과 기존터널로 부터의 거리  $x_A$ 로 나타난다.

$$S_x = S_{\max} \left[ e^{-\frac{x_A^2}{2i^2}} + e^{-\frac{(x_A-d)^2}{2i^2}} \right] \quad (3)$$

기존 터널이 설치된 이후 새로운 터널이 건설되는 경우 침하의 중첩에 대하여 Hunt (2005), Addenbrooke & Potts (2001) 와 Chehade & Shahrou (2008) 등이 유한요소 해석을 통해 연구하였다. 이러한 기존연구들은 기존터널에 의한 선행 지표 침하를 고려하고 인접한 터널 굴착에 의한 추가 침하의 중첩을 검토한 것이다. 그러나 기존 터널의 확폭시 지표침하의 특성에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않았다.

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 박스형 터널 확폭 조건의 선정

터널 확폭은 확장 방향에 따라 크게 상부, 하부, 편측, 양측확폭로 구분된다. 상부, 하부확폭은 폭원변경 없이 내공의 높낮이만 확대하는 공법이고 편측확폭은 터널의 중심선을 이동하여 한쪽 방향 내공 확대를, 양측확폭은 중심선을 고정하고 양쪽 방향으로 확대하는 공법이다(Kim et al., 2007). 폭원을 변경하지 않는 상부 및 하부 확폭시 작업공간이 협소하여 건설 기기의 반입이 어려워 효율적인 시공이 어렵다. 기존 시설을 유지하고 내부에서 구조물을 보강할 경우 내공축소를 감안해야 한다. 기존터널을 양측으로 확대하는 양측확폭은 내공확보가 뛰어나지만 천단부의 구조적 안정성이 불리하며 보강이 많이 요구되어 안정성, 경제성에서 불리하다.

편측확폭은 인접 지하구조물의 위치에 따라 터널의 중심선 이동이 자유롭고 작업공간의 확보에 상대적인 장점을 보인다. 교통터널의 확폭에서는 굴착기를 사용한 기계식 굴착 방식이 가장 많이 사용되었으며 이러한 장비들이 위치하고 작업할 수 있는 공간의 유무는 시공효율에 큰 영향을 미친다. 확폭에 있어 건설 장비의 배치를 통한 시공성, 경제성을 고려했을 때 편측확폭은 경쟁력을 가진다. 또한 편측확폭의 장점으로 기 시공터널이 최대한 활용될 수 있으며(Choi, et al., 2011) 박스형 터널 편측확폭시 기존 구조물을 지지구조물 및 확폭 터널의 벽체 등으로 활용 가능하

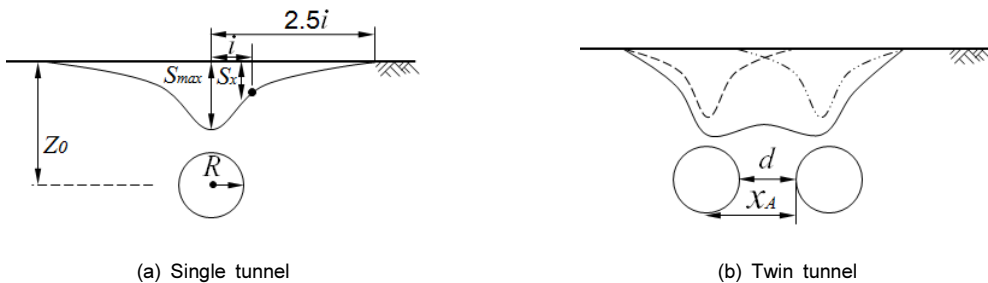

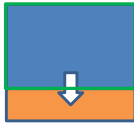




Fig. 1. Distribution of surface settlement

**Table 2.** Review of enlargement method for box tunnel

	Upper portion enlargement	Lower portion enlargement	One-side enlargement	Both-side enlargement
Conceptual diagram				
Space expansion	×	×		
Safety				×
Construction cost				×
Constructability	×			×

good, fair, × poor

다. 한편 도로터널, 철도터널의 경우 도로선형의 문제로 인하여 편측확폭의 적용이 어려울 수 있으나, 공동구, 전력구와 같은 박스형 터널은 선형 제약이 없어 편측확폭의 적용성이 더욱 높다.

확폭 공법을 박스형 터널에 적용할 경우에 대하여 검토한 결과, 편측확폭이 내공확보와 시공성 면에서 우수한 경쟁력을 가질 것으로 평가된다. 그러나 박스형 터널은 공간이 상대적으로 협소하여 확폭시 별도의 굴착공법을 개발하여야 할 것으로 생각된다. 여기에서는 확폭 조건만을 검토하여 개념도와 함께 나타내었다(Table 2).

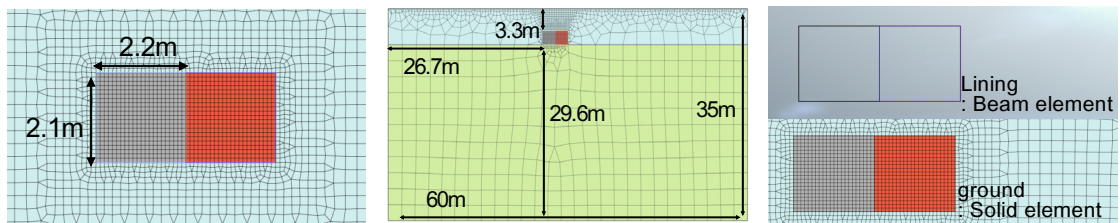
### 3.2 박스형 터널 확폭의 2차원 모델링

박스형 터널 확폭 2차원 모델링에 사용된 터널의 제원 및 세그먼트 단면은 공동구 설계기준(2010)을 참조하였다. 내부규격 및 제시된 표준 도면과 제원을

공유하여, 박스형 터널은 높이 2.1 m, 폭 2.2 m, 벽체와 슬래브 두께 0.3 m이며(Fig. 2(a)) 지표면으로부터 3.3 m 아래 위치해 있다. 환경부의 ‘도심지역 도심도 지하공간 개발의 지반환경영향 및 정책제언(2013)’에 의하면 서울시 공동구의 평균심도는 3.1 m이며 최저심도는 13.9 m로 표층에 위치한다. 유사범위에서 터널폭의 1.5D인 3.3 m로 터널 심도를 설정하였으며 지하구조물의 심도가 낮고 대부분 지하수위보다 높게 위치하여 해석조건에서 지하수위에 의한 영향은 배제하였다.

경계조건이 주요 관심영역의 해석결과에 영향을 미치지 않을 만큼 설정하고자 터널로부터 경계면의 거리를 확폭이 완료된 터널직경의 4배로 설정하였다(Fig. 2(b)). 모델의 좌우 경계는 X축 방향 변위를 구속하였고 하부는 Y축 방향 변위를 구속하였다.

지반은 Mohr-Coulomb 모델을 사용한 Solid 요소로 구성하고 구조물은 탄성 구조체로 가정하여 Elastic



(a) Sectional view of 2D enlargement tunnel

(b) View of model

(c) Element type

**Fig. 2.** Simulation of tunnel enlargement with 2D FEM

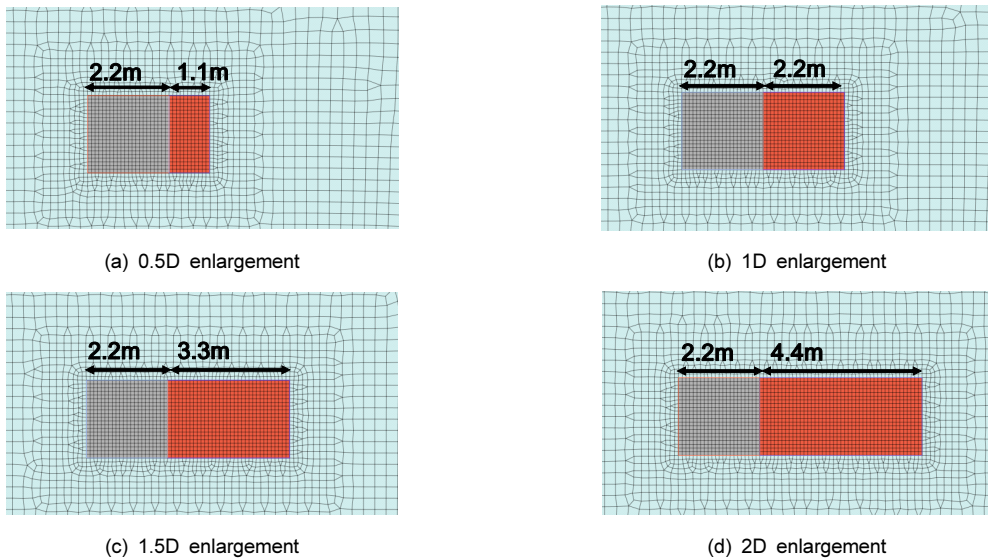
**Table 3.** Properties of ground and structure

Material	Model Type	Elastic modulus	Unit Weight	Poisson's ratio	Cohesion	Friction Angle	Relative stiffness
		$E$ ( $kN/m^2$ )	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$\nu$	$C$ ( $kN/m^2$ )	$\phi$	$E/E_{sandy\ soil}$
Sedimentary soil	Mohr-Coulomb	12.5	17	0.35	20	25	0.2
Sandy soil	Mohr-Coulomb	60	18.5	0.33	1	30	1
Weathered rock	Mohr-Coulomb	100	21	0.3	100	33	1.7
Soft rock	Mohr-Coulomb	200	24	0.25	130	35	3.3
Concrete	Elastic	25,000	24	0.18	-	-	-

모델을 사용한 Beam 요소로 구성하였다(Fig. 2(c)). 지반 조건은 개착박스의 경우 대부분 양질의 사질토로 되메움 하는 것을 고려하여 사질토 지반을 기본으로 하였다. 그러나, 일부 비개착조건 및 상대적 변위 양상 비교를 위해 풍화암과 연암을 추가하였다. 지반의 모델 형식과 요소, 물성치는 Table 3에 나타내었으며  $K_0=0.5$ 를 가정하였다. 지반 강성별 지반거동을 비교, 분석하고자 지반의 탄성계수를 사질토 지반의 탄성계수로 정규화한 상대강성비를 산출하였다.

터널 확폭의 규모에 따른 지반거동을 분석하기 위하여 Fig. 3에 나타난 것과 같이 기존터널 폭(D)의 0.5배(0.5D), 1배(1D), 1.5배(1.5D), 2배(2D) 크기만 큰 내공 확장을 가정하였다. 2배(2D) 초과 확폭은 추가 격벽설치 등 구조적 안정성이 검토되어야 하므로 내부 격벽이 설치되지 않는 조건으로 확폭을 모델링 하였다.

원지반 모델의 초기응력 해석 후 기존터널을 굴착하고 변위를 초기화 하였다. 확폭부 벽체 설치 및



**Fig. 3.** Various enlargement model

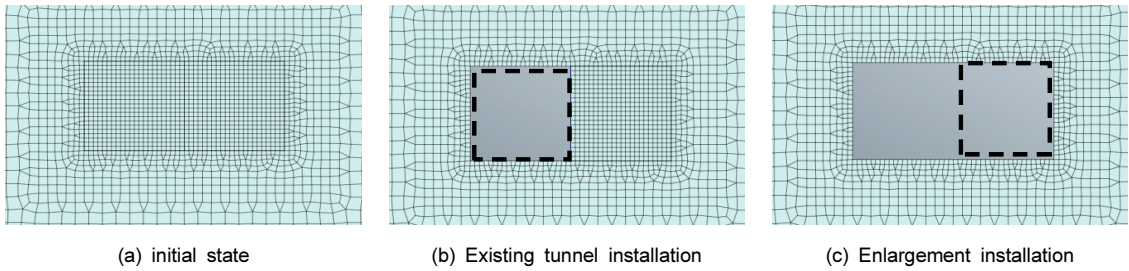


Fig. 4. Enlargement construction process

굴착과 동시에 편측 벽체를 제거하는 단순화된 시공 단계로 구성하였으며 각 단계는 Fig. 4와 같다. 확폭부가 굴착되는 시공단계에서 막장의 붕괴 및 토사유입에 의한 지반침하는 고려하지 않았다.

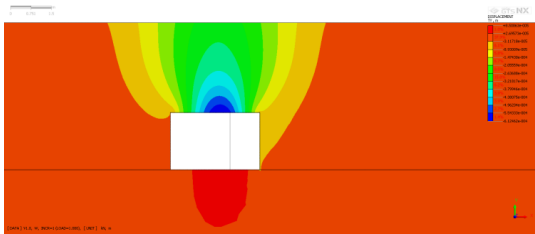
#### 4. 박스형 터널 확폭에 따른 2차원 수치해석 결과 분석

##### 4.1 지반 강성조건과 확폭 규모에 따른 침하 거동 분석

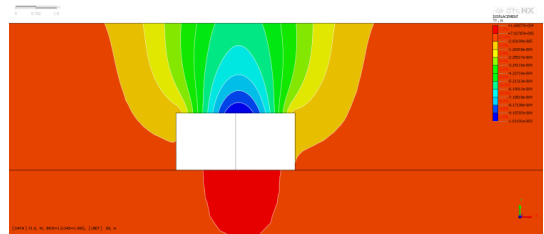
지표침하는 인근 구조물에 영향을 가하므로 확폭시 고려되어야 할 중요한 요소이다. 박스형 터널의 확폭

시 지반 강성도와 터널 확폭 규모에 따라 산출한 지반 변위 결과는 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 중점 검토대상인 사질토 지반에서 지반변위의 확폭의 규모별 유한요소 해석 결과로 편측 확폭시 지반의 연직변위 킨투어 결과에서는 지표면의 수직변위가 터널 중심부에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다(Fig. 5). 또한, 지반변위는 확폭부의 규모가 기존 구조물의 규모보다 작은 경우 확폭부에 변위가 발달하며, 확폭부의 규모가 기존구조물의 규모를 초과하는 경우 이러한 경향이 사라지는 것으로 나타났다.

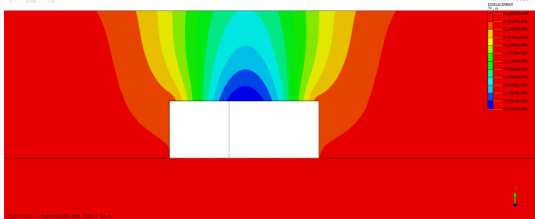
확폭 규모별 지표면 변위  $S$  를 최대변위  $S_{max}$  의 비로 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 최대변위  $S_{max}$  는



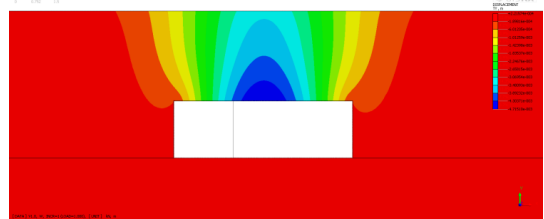
(a) 0.5D enlargement



(b) 1D enlargement



(c) 1.5D enlargement



(d) 2D enlargement

Fig. 5. Vertical displacement contour of sandy soil ground

모든 해석 사례 중 가장 큰 변위이며 원점은 최대 침하가 발생위치이다. 박스형 터널의 편측확폭에 의한 지표침하양상은 원형터널 신설시의 경우와 매우

유사한 것으로 나타났다. 또한 0.5D이하 확폭굴착의 경우 지반조건과 무관하게 터널굴착으로 인한 변위가 매우 작은 것으로 나타나 안정적인 확폭시공이 가능

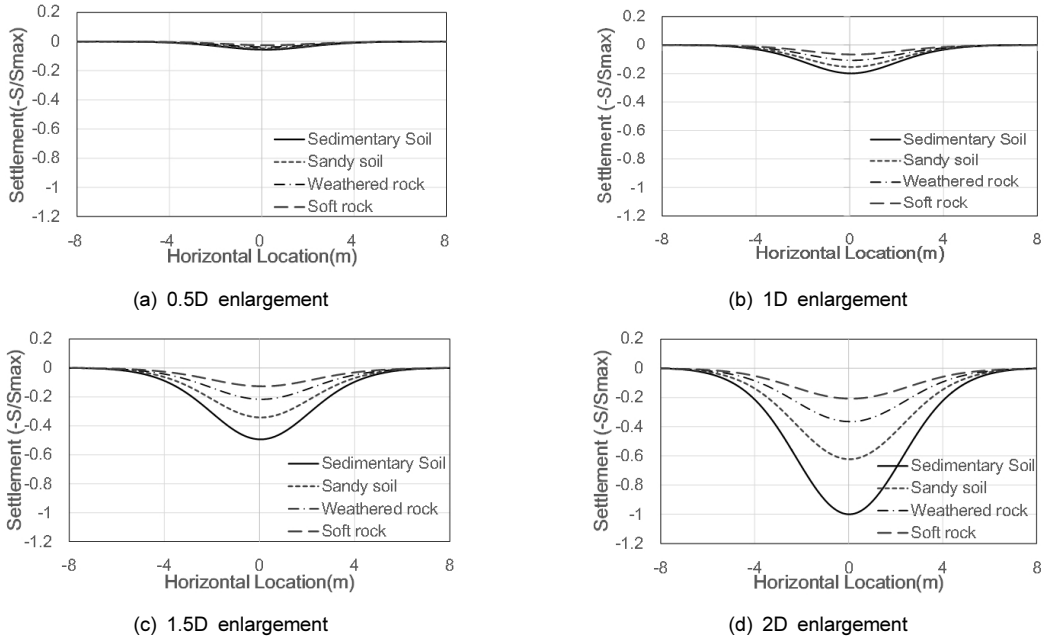
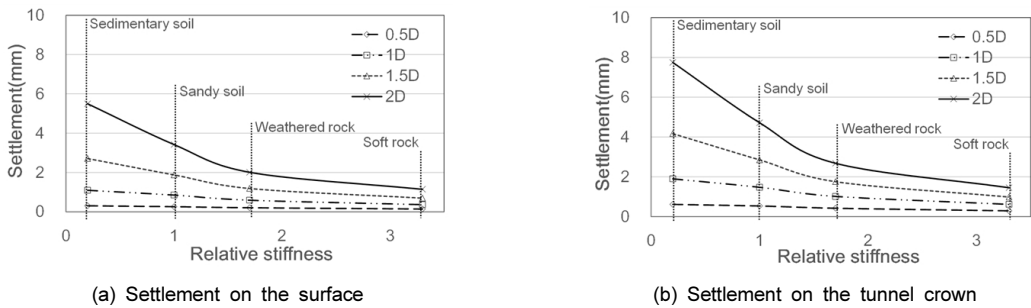
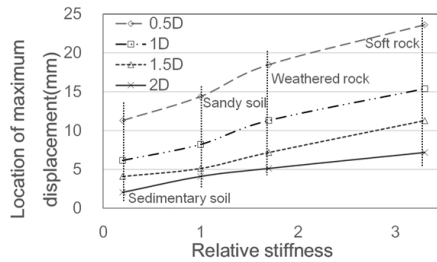


Fig. 6. Settlement versus horizontal location



(a) Settlement on the surface

(b) Settlement on the tunnel crown



(C) Location of maximum displacement

Fig. 7. Settlement versus relative stiffness

할 것으로 추정된다. 지반의 강성이 클수록 확폭 규모 증가에 따른 지반변위량의 증가폭이 감소하였으며 최대침하량의 증가는 확폭규모 증가율 0.5D 보다 크게 발달하는 것을 알 수 있었다.

지반 강성별 침하량과 최대 침하의 발생 양상을 Fig. 7에 나타내었다. 사질토 지반과 상대 강성비가 1보다 작은 경우 확폭 규모별 침하양상이 뚜렷한 차이를 보이니, 지반의 강성이 클수록 확폭의 규모에 따른 영향을 적게 받음을 알 수 있다. 연암 이상에서는 확폭 규모나 지반 강성에 의한 영향이 적고 서로 유사한 값으로 수렴함을 보였다. 터널 확폭시 최대 지표침하는 터널 중심이 아닌 확폭부에서 발생하며 확폭 규모가 클수록 최대 지표침하가 터널 중심으로부터 멀리서 발생함을 알 수 있었다(Fig. 7(c)).

#### 4.2 터널 굴착에 의한 지반 거동특성

확폭 터널 굴착시 거동분석에 앞서, 해당 심도의 박스형 터널 굴착시 지반거동을 원형터널 굴착으로 인한 이론적 지반거동과 비교하였다. 원형 터널과 박스형 터널 중심으로부터 거리에 따른 침하량을 최대 침하로 나눈 결과( $S/S_{max}$ )는 Fig. 8과 같다. 박스터널 굴착으로 인한 지표침하 형상은 원형터널 굴착으로 인한 침하형상과 유사하나 중심부 침하량이 작은 반

면 영향범위는 넓게 나타났다. 침하곡선의 변곡점  $i$ 의 위치를 선행연구의 침하모델을 통해 검토해본 결과, 원형터널과 박스형 터널 굴착으로 인한 침하형상 모두 Clough & Schmidt (1981)의 제안과 가장 유사하게 나타났다. 그러나 박스형 터널은 터널 중심부 침하량이 작게 나타나고 영향범위가 넓어 원형터널 굴착시 침하 이론과 다른 양상을 보였다. 이때 변곡점  $i$ 는 원형 터널의 반경  $R$  과 직경  $D$  그리고 심도  $Z_0$  에 관한 식으로 박스형 터널에 반영하기 위하여 같은 굴착면적의 원형터널로 환산하여 계산하였다.

#### 4.3 확폭 굴착에 의한 지표침하 형상 분석

중점 검토대상인 사질토 지반에서, 확폭량이 작은 경우의 침하형상은 Clough & Schmidt (1981)의 제안과 유사하다. 확폭량이 클 경우 변곡점  $i$ 가 증가하여 Mair (1979)의 제안과 유사한 형상을 보이며 변곡점  $i$ 의 증가는 확폭 터널 상부 지표면에서 더 크게 나타난다(Fig. 9). 조사된 모든 지반에서 발생하는 지표 침하폭을 기존터널 상부 지반에서 발생한 침하폭(Fig. 10(a))과 확폭터널 상부 지반에서 발생한 침하폭(Fig. 10(b))으로 구분하여 나타내었다. 이때, 침하폭을 영향범위( $2.5i$ )로 가정한 결과(Cording & Hansmire, 1972)와  $S_x$ 가  $0.61S_{max}$  일 때의  $x$ 값을 변곡점  $i$ 로 가정

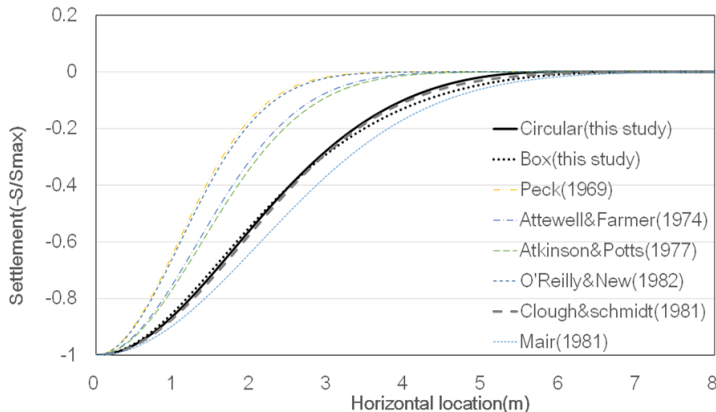


Fig. 8. Settlement characteristics



한 결과(Schmidt, 1969)를 바탕으로, 해석사례별 변곡점  $i$ 를 추정하였다. 기존터널 상부지반에서 추정된 변곡점  $i$ 는 Table 4에 정리하였으며 확폭터널 상부지반에 대한 변곡점  $i$ 는 Table 5에 정리하였다. 추정된 변곡점의 경향은 침하폭의 경향과 동일하게 확폭터널

상부에서 더 크게 나타나 비대칭 침하를 나타냈으며, 영향범위를 나타내는 변곡점  $i$ 는 터널 확폭량이 클수록, 지반강성이 클수록 증가함을 알 수 있었고, 지반 물성보다 확폭 크기에 의한 영향이 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 암반지반에서 지반침하가 발

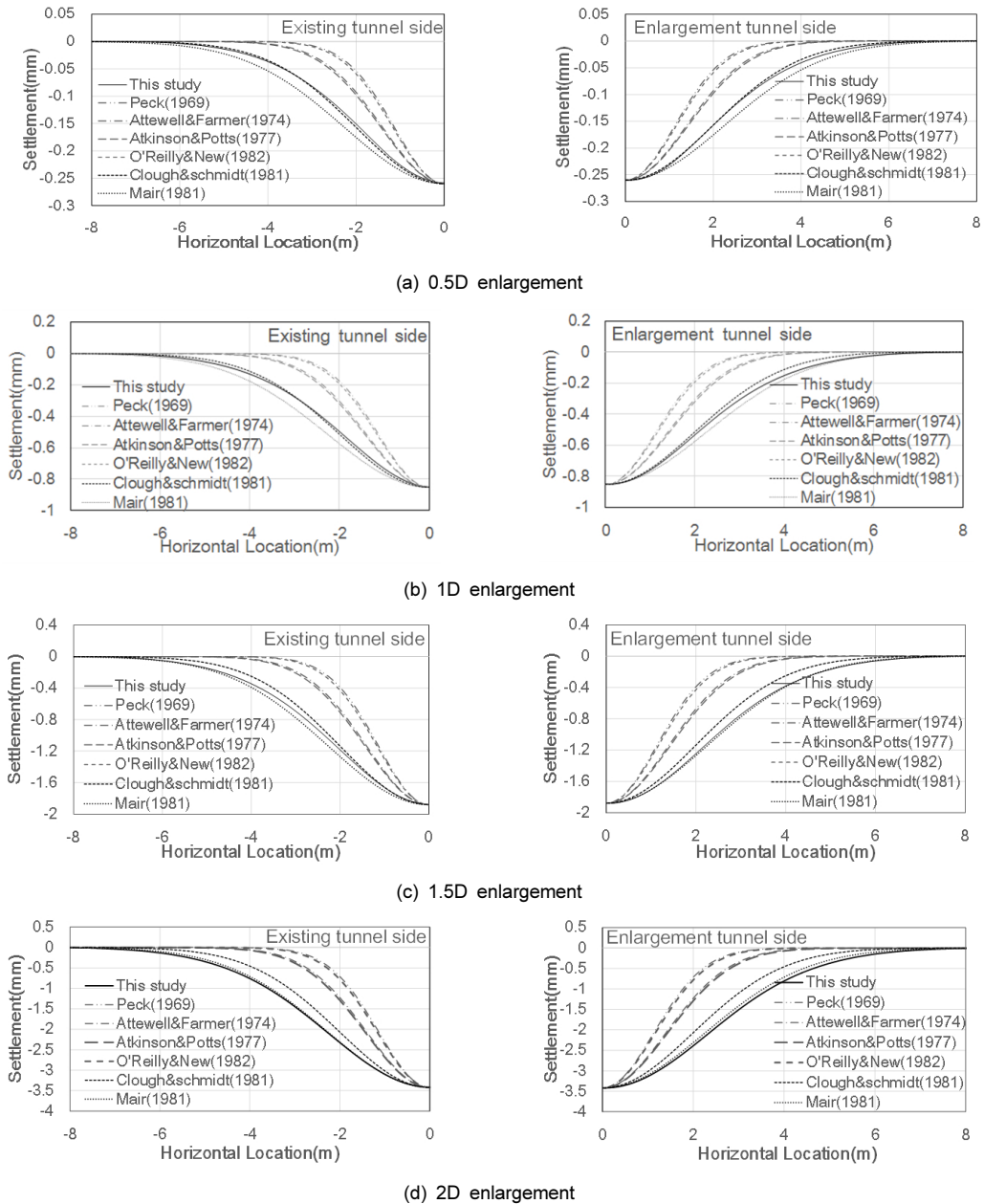


Fig. 9. Settlement in sandy soil

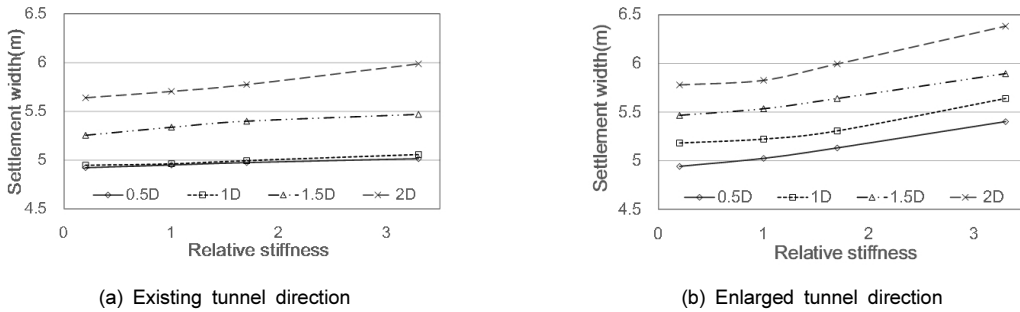


Fig. 10. Settlement width on the surface

생활 경우 내부마찰각  $\phi$ 으로 인하여 영향범위가 축소되고 변곡점  $i$ 가 감소되어야 하나, 분석결과 변곡점  $i$ 가 증가하였다. 지반강성 증가에 따른 영향범위 증가로부터, 내부마찰각  $\phi$ 보다 점착력  $C$ 이 확폭시 영향범위 증가에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 체적손실(Volume Loss)은 변곡점  $i$ 와 최대침하량  $S_{max}$ 에 비례하기 때문에(Schmidt, 1969), 확폭크기에 따른 변곡점  $i$ 의 증가는 터널 크기 증가에 따른 체적손실량 증가에 의한 결과인 점을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

이 연구에서는 터널 확폭에 따른 지반거동을 분석하기 위하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 먼저 터널 확폭 공법 분류 후, 박스형 터널에 적용성을 분석하였으며 그 결과, 편측 확폭의 경우 중심선 이동이 자유롭고 작업 공간 확보의 강점을 갖추어 시공성이 높게 판단되었다. 이를 바탕으로 박스형 터널 편측 확폭을 대상으로 2차원 유한요소 해석을 수행하였다. 확폭 규모에 따른 지반 강성별 지표 침하와 침하 영향범위, 최대 침하위치를 분석하였으며, 특히, 지표 침하 형상을 나타내는 침하곡선의 변곡점  $i$ 를 검토하였다. 이 연구는 박스형 터널의 구조적인 안정성 확보와 구조물의 거동에 대한 추가 연구가 필요하다. 또한 시공상황을 고려하지 않고 순간굴착을 가정한 2차원 해석이라는 한계를 가지고 있으나 시공단계를 고려한 3차원 해석과 그 경향에서 유사한 결과를 보일 것으로 생각된다. 연구결과는 다음과 같다.

Table 4. Inflection of the trough above the existing tunnel

Enlargement size	Relative stiffness			
	0.2	1	1.7	3.3
0.5D	1.969	1.98	1.99	2.006
1D	1.979	1.985	1.998	2.023
1.5D	2.102	2.135	2.16	2.188
2D	2.256	2.282	2.31	2.395

Table 5. Inflection of the trough above the enlarged tunnel

Enlargement size	Relative stiffness			
	0.2	1	1.7	3.3
0.5D	1.977	2.01	2.053	2.161
1D	2.073	2.089	2.123	2.256
1.5D	2.187	2.214	2.256	2.358
2D	2.312	2.331	2.398	2.553

1. 박스형 터널 굴착으로 인한 지표침하 형상은 원형 터널 굴착으로 인한 침하형상과 유사하나 침하 중심부 침하량이 작고 영향범위는 넓게 나타나는 것을 알 수 있었다.
2. 최대 지표침하는 터널 확폭의 규모가 클수록, 지반의 강성이 작을수록 크게 발생하였다. 지반 강성이 작은 지반에서는 확폭규모별 침하양상이 뚜렷한 차이를 보이거나 지반의 강성이 클수록 확폭 규모에

다른 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.

3. 최대 침하의 위치는 확폭 굴착이 완료된 터널의 중심선을 기준으로 할 때, 확폭측으로 이동한 지점에서 발생하였으며 지반 강성이 클수록 이동이 크게 나타났다. 침하폭은 확폭터널 상부지반에서 더 크게 나타나 비대칭 침하를 보였다.
4. 단선터널 굴착 후 지반이 안정된 상태에서의 확폭 굴착에 의한 지반 거동의 메커니즘 분석 결과, 박스형 터널로 인한 침하는 대표적 이론식인 정규분포 형상과 침하 중심부와 폭에서 약간의 상이함을 보였으나 Clough & Schmidt (1981)의 제안과 유사했다. 확폭시 확폭 규모가 크거나 지반 강성이 클수록 변곡점  $i$ 가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 지반 물성보다 확폭 크기에 의한 영향이 더 크게 나타났다. 특히, 변곡점  $i$ 에는 내부마찰각  $\phi$ 보다 점착력  $C$ 의 영향이 큰 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

This research was supported by the grant (15SCIP-B105155-01-000000) funded by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) and the “U-City Master and Doctor Course Grant (Education) Program” under the Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT).

## References

1. Ahn, S.K., Sagong, M. (2013), “Strategy for enlargement of railway tunnels cross section for double stack train”, Railway Journal, Vol. 16, No. 6, pp. 18-24 (In Korean).
2. Atkinson, J.H., Potts, D.M., Schofield, A.N. (1977), “Centrifugal model tests on shallow tunnels in sand”, Tunnels and Tunnelling, Jan, pp. 59-64.
3. Attewell, P.B., Farmer, I.W. (1974), “Ground deformations resulting from shield tunnelling in London Clay”, Canadian Geotech. J. Vol. 11, No. 3, pp. 380-395.
4. Chehade, F.H., Shahrour, I. (2008), “Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure”, Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 23, pp. 201-214.
5. Choi, H.J., Kim, D.K. (2011), “A study on the enlargement of 2-lane road tunnel under construction” Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 13, No. 1, pp. 33-50 (In Korean).
6. Clough, G.W., Schmidt, B. (1981), “Excavations and tunneling in soft clay engineering(ed. E W Brand and R P Brenner)”, Chap 8. Amsterdam, Elsevier.
7. Cording, E.J., Hansmire, W.H. (1975), “Displacement around soft ground tunnels”, Proc. 5th Pan-Am Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Buenos Aires, Vol. 4, pp. 571-633.
8. Hunt, D.V.L. (2005), “Predicting the ground movements above twin tunnels constructed in London Clay”, Ph.D. Thesis, University of Birmingham.
9. Kim, D.K., Jung, H.S. (2007), “Functional improvement by enlargement of existing tunnel”, Magazine of Korean Geotechnical Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 14-20 (In Korean).
10. Mair, R.J. (1979), “Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay”, Ph. D. Thesis, Cambridge University.
11. Ministry of Land, Infrastructure and transport (2010), Design Criteria for Utility Tunnels (In Korean).
12. Ministry of Land, Infrastructure and transport (2010), Standard Specification for Utility Tunnels (In Korean).
13. O'Reilly, M.P., Mair, R.J., Alderman, G.H. (1991), “Long-term settlements over tunnels; an eleven year study at grimsby”, Tunnelling '91, Mining and Metallurgy, London, pp. 55-64.
14. O'Reilly, M.P., New, B.M. (1982), “Settlements above tunnels in the united kingdom-their magnitude and prediction”, Tunnelling '82, Papers Presented

- at the 3rd International Symposium, Inst of Mining and Metallurgy, London, England, pp. 173-181.
15. Peck, R.B. (1969), "Deep excavation and tunnelling in soft ground", Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Vol. 3, pp. 225-290.
  16. Schmidt, B. (1969), "Settlements and ground movement associated with tunnelling in soils", Ph.D Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign.
  17. Seo, K.W., Paek, K.H., Noh, J.R. (2008a), "A case study for enlargement of existing tunnel through comparison with foreign countries' Cases I", Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 1, pp. 40-50 (In Korean).
  18. Seo, K.W., Paek, K.H., Noh, J.R. (2008b), "A case study for enlargement of existing tunnel through comparison with foreign countries' Cases II", Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 1, pp. 71-79 (In Korean).
  19. Zlatanovic, E., Lukic, D. (2014), "Ground surface settlement induced by twin tunnelling", International conference contemporary achievements in civil engineering, Subotica, pp. 921-927.