

근접굴착 시 기존건물의 영향을 받는 터널의 거동

이종민*

정회원, 공학박사, STeng 대표

Behavior of the tunnel under the influence of a existing building during the adjacent ground excavation

Jong-Min Lee*

Ph.D., STeng CEO

*Corresponding Author : Jong-Min Lee, lee200jm@naver.com

Abstract

If the ground is excavated in a depth which is deeper than the adjacent existing tunnel, the behavior of the braced wall is known to be greatly affected by the presence of the tunnel. By the way it is expected to be also affected by the structure on the ground surface, There are not many examples of studies which are conducted on this subject. As a result, largel scale model tests and analysis were conducted, to measure the behavior of the tunnel under the building whose location on the ground surface was varied during the adjacent ground excavation. For this purpose, the location of a building load was varied in 0 m, 1D, 2D on ground surface. In this paper, the behaviors of braced wall and adjacent tunnel was studied. Model tests in 1 : 10 scale were performed in real construction sequences. The size of test pit was 2.0 m (width) × 6.0 m (height) × 4.0 m (length) in dimension. As a result, it was found that the stability of the existing tunnel under the influence of the building load on the ground surface adjacent to the braced wall.

Keywords: Ground excavation, Braced wall, Large scale model test

초 록

건물하중의 영향을 받는 상태의 기존터널에 근접해서 터널보다 깊은 심도로 지반을 굴착하는 경우에 흙막이벽체의 거동이 기존터널의 존재로 인해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그런데 지상 구조물에 의해 받는 영향에 대한 연구 예가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존터널에 근접하여 지반을 굴착할 때 기존터널이 상부구조의 영향을 받는 상태에서 건물 위치에 따른 터널의 거동을 대형모형실험과 수치해석을 실시하여 측정하였다. 이를 위해 지표면에 건물하중이 없는 경우와 건물하중이 3가지 이격거리에

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(3)609-623(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.3.609>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received February 28, 2018

Revised March 27, 2018

Accepted April 6, 2018



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 © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

위치한 경우(0 m, 1D, 2D)에 대하여 각각 대형모형실험을 수행하였다. 본 논문에서는 흙막이벽체와 기존구조물의 영향을 받고 있는 터널의 거동에 대하여 연구하였다. 1 : 10의 축척으로 2.0 m (폭) × 6 m (높이) × 4.0 m (길이)의 크기를 가진 대형토조에서 실험을 수행하였다. 그 결과 흙막이벽체 배면에 있는 인접터널의 안정성은 근접굴착에 의해 뚜렷하게 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어: 근접굴착, 흙막이벽체, 대형모형실험

1. 서론

현대의 도시는 살아있는 유기체처럼 활력있게 변하고 있다. 즉, 산업과 경제의 발전에 발맞추어 인구의 집중현상이 초래되어 더욱 팽창되고 과밀화되어 거대화해지면서 도심 곳곳에서 고층빌딩이 세워지고 재개발이 진행되면서 기존건물의 인접지역 및 기존건물 하부 깊은 심도에 굴착공사가 빈번해지고 있다. 또한 도심지의 용지 부족 현상이 심화되어 최적 토지활용을 위해 기존건물에 인접한 근접굴착 흙막이공사가 증가하고 있는 현실이다. 이러한 밀집화된 도심지공사로 인해 기존건물의 균열 및 지하매설물의 파괴 그리고 시공 중 흙막이벽체의 붕괴에 따른 피해가 심각해지고 이에 따른 막대한 인적 손실과 경제적 손실이 발생되고 있다.

도심지에서 흙막이공사가 대형화되고 복잡화 되면서 공사장과 근접한 곳에 기존건물과 장애물이 있는 흙막이공사가 빈번하게 진행되고 있다. 건물하중과 흙막이 벽체 간 이격거리와 같은 영향요소들은 전체 흙막이구조물의 안정성 확보에 매우 중요할 뿐 아니라 주변지반 및 인접구조물의 안정성 확보에도 매우 중요하다.

국내에서는 터널에 근접하여 굴착공사를 시행할 경우에 대해 대형모형실험과 수치해석을 통해 벽체변위와 터널거동의 관계에 대한 연구를 발표한 바 있다. 근접굴착 시 굴착단계별 흙막이벽체와 기존터널에 발생하는 흙막이벽체의 변위를 분석하고 배면지반의 변형을 최소화 시키는 방법이 다각도로 연구되어 안정성에 대해서는 현장에 적용되어 왔다(Kim, 2008). 이처럼 흙막이벽체에 대한 연구는 많이 있는 실정이다. 하지만 근접굴착에 따른 기존건물 하부통과 터널에 대한 연구는 아직도 미미한 실정이다.

본 논문에서는 기존건물에 인접한 터파기 공사에서 기존건물과 근접터널(지하철, 건물, 상하수박스, 전력통신구, 각종 지하매설물 등)을 보호 할 목적으로 굴착단계별 흙막이벽체와 기존터널의 거동을 분석하였고, 이를 검증하기 위하여 대형모형실험을 실시하고 수치해석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 개요

본 연구에서는 기존건물에 인접한 터파기 공사에서 기존건물과 근접 터널(흙막이벽체 배면에서의 터널 중심축과의 이격거리 1.5D 가정)을 보호하기 위해 건물하중의 영향 유무 및 위치(흙막이벽체 배면에서의 이격거리 0 m, 1D, 2D, Table 1 및 Fig. 1 참조)에 따라 각각의 굴착단계별 흙막이벽체, 근접터널 및 기존건물의 거동을 대형모

형실험을 통하여 분석하였고, 같은 조건으로 수치해석을 수행하였다(Lee, 2011).

이때 지중응력 및 토압에 관한 일반이론과 건물하중에 따른 지중응력 및 토압을 근거로 하였다.

대형모형실험은 축척 1/10의 모형토조에서 지반을 조성하고 계측기기를 설치하여 측정하였다.

수치해석은 유한요소법(F.E.M)을 적용한 범용해석 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 각 조건별로 4가지 경우에 대해 수치해석을 수행하고 해석 결과에 대해 분석하였다.

대형모형실험과 수치해석 결과를 비교 분석하여 근접굴착에 따른 기존건물과 흙막이벽체, 배면지반의 지표침하 등에 대해 현장에서의 실용화에 적용(Lee, 1999)할 수 있도록 그 효율성을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 건물하중의 위치 등을 Table 1과 같이 다양하게 변화시켜서 보다 폭 넓게 비교 분석하고자 하였다.

Table 1. Building load table

Type	Building load (270 kN)			
	No	0 m	1D	2D
Excavation	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4

*1D; building width (12 m)

2.2 대형모형실험

2.2.1 실험 개요

본 논문에서는 근접시공 시 굴착단계별로 벽체의 변위와 부재력, 벽체배면의 기존건물과 근접터널 및 지표침하 등에 미치는 영향을 파악하기 위해 대형모형실험을 수행하였다.

본 연구에서 적용한 건물은 폭 12 m를 기준으로 적용하였으며, 다음 Fig. 1과 같다.

대형모형실험은 경계조건의 영향을 비교적 적게 받고 실험결과를 일반화할 수 있는 장점이 있다.

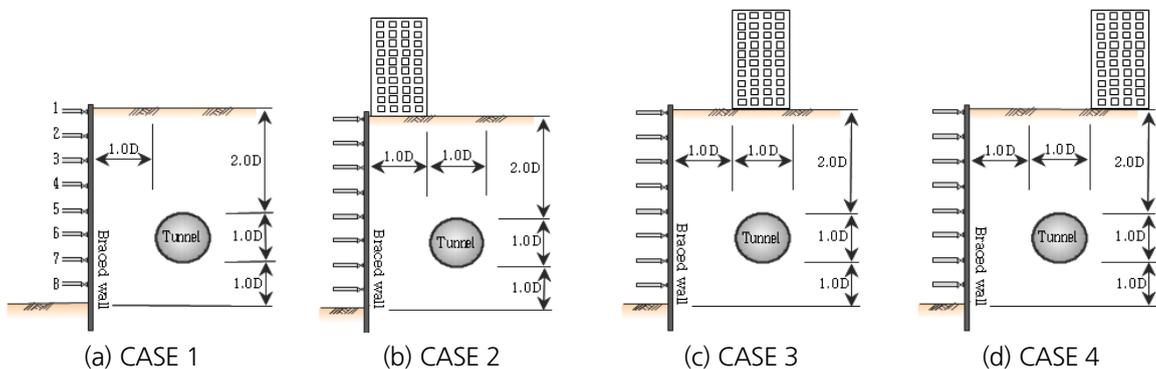


Fig. 1. Loading conditions

2.2.2 실험장치

본 연구에 사용된 대형모형 토조는 Fig. 2와 같이 크기가 폭 2.0 m, 높이 6.0 m, 길이 4.0 m이며, 지반은 8단계로 나누어 굴착을 하였다. 흙막이벽체는 토조의 전면에 설치하였고 굴착은 스크류잭으로 모사하였다.

대형모형 토조의 바닥과 측벽은 콘크리트 벽체로 이루어져 있고, 전면 벽체는 배후 토압에 저항할 수 있도록 I형강을 버팀대로 한 격자형으로 설치하였으며, 모형 흙막이벽체는 철판($t = 16 \text{ mm}$)을 사용하여 만들었다. 또 대형모형 토조의 벽체와 다짐 모래사이에 마찰을 최소화시키기 위해 토조의 벽체에 벤토나이트를 도포하고 구리스 바른 비닐을 씌워 최적의 경계조건을 만들었다.

굴착방법은 8단계 굴착에 맞도록 c-형강을 플렌지(flange)가 맞물리도록 2장씩 용접하여 총 8장으로 제작한 후에 흙막이판(철판) 전면에 설치하고 3개의 반력 강재를 설치하였다.

지반 굴착은 실험모형 전면의 양쪽 반력강재에 고정 설치된 스크류잭을 상단부터 한 단계씩 스크류잭을 푸는 방식으로 모사했다.

대형모형실험에 사용된 건물의 크기는 길이(L)에 대한 대응비를 사용하여 실제건물 하중은 270 kN으로 가정하여 Fig. 3과 같이 유압잭을 사용하여 재하하였으며, 실험모형 흙막이벽체의 두께는 탄성계수, 중력가속도, 상사율로 결정하였다.

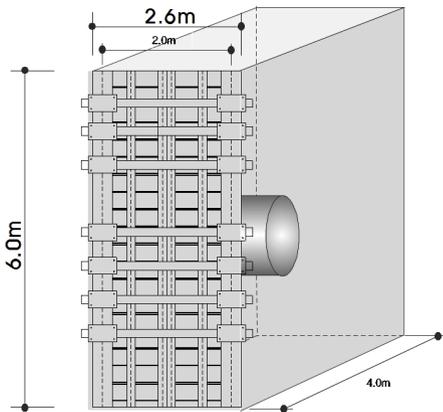


Fig. 2. System for the model test



Fig. 3. Loading system

(1) 대형모형

대형모형실험은 실제 현장을 구현하는 실험으로써 기하학적으로 길이에 대하여 1/10로 축소한 것이다. 축소율에 의한 물리량은 길이(L), 면적(A), 체적(V)이 있으며 실제현장과 대형모형 간에는 다음 관계가 성립된다.

길이 = $\frac{L_m}{L_p}$, 면적 = $(\frac{L_m}{L_p})^2$, 체적 = $(\frac{L_m}{L_p})^3$ 이므로 대형모형실험에 사용된 모형 건물 폭은 $12 \text{ m} \times \frac{1}{10} = 1.2 \text{ m}$ 이다(여기서, L_m = 모형길이, L_p = 실제길이).

본 실험에서는 지반의 강성비(α)를 이용한 방법으로 모형 제원을 Table 2와 같이 결정하였다(Duddeck and Erdmann, 1985).

실제 현장에 있는 노후건물 주변의 흙막이공사 현장의 지반은 연약한 암에 해당되는 지반을 대상으로 하였으며, 대형모형실험에서 가정한 건물이 시공된 지반은 모래를 이용하여 상대밀도가 일정하도록 조성하였다.

Table 2. Data of the model tunnel lining

Elastic modulus of soil	20,000 kN/m ²
Elastic modulus of tunnel	2.0 × 10 ⁸ kN/m ²
Width of tunnel	1.0 m
Radius of tunnel	0.6 m
Thickness of tunnel	6 mm

(2) 대형모형 흙막이벽체

실제 흙막이벽체는 두께 $t = 0.80$ m인 콘크리트 지하연속벽으로 대형모형실험에 사용된 모형 흙막이벽체 두께는 벽체 탄성계수와 중력가속도와 상사율을 적용하여 구하면 다음 식 (1)과 같다(Hobbs, 1966).

$$t_m = \frac{T}{C} \times \left[\frac{G_m}{G_R} \times \frac{1}{C} \times \frac{E_R}{E_m} \times \frac{B_R}{B_m} \right]^{\frac{1}{3}} \times 1000 \tag{1}$$

따라서 모형 흙막이벽체는 두께 $t = 16$ mm 철판을 사용하였다.

축소모형실험은 실제현장의 조건을 축소율로 적용하여 현장의 모든 상태를 거의 유사하게 나타낼 수 있다.

2.2.3 모형지반

대형모형실험의 지반은 균질하고 등방성인 모래로 조성하였으며 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 대형 토조 바닥부터 습윤상태의 모래를 30 cm씩 포설하고 진동기로 다짐하여 조성하였다. 수평 수직 토압계 및 수평 수직 변위계는 수치해석을 한 주응력도에 의거(Lee, 1998)하여 필요한 지점에 위치별로 설치하였다.

2.2.4 계측

본 대형모형실험에서는 흙막이벽체, 기존건물, 지표침하의 거동을 분석하기 위해 각각의 위치에 필요한 Table 3과 같은 계측기를 부착하였으며, 실험이 진행되는 동안 30분 간격으로 자동 계측되어 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

Table 3. Data acquisition system / Measuring sensors

Data acquisition system / Measuring sensors
UPC-601-u lap card
Switch box
TDS-302 data logger
Earth pressure
LVDT
Strain gauge
Ground displacement sensors

(1) 흙막이벽체

건물하중이 작용하는 경우에 대해 굴착단계별 흙막이벽체의 수평변위는 Fig. 4와 같이 8개소에 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였다. 변형율게이지(strain gauge)는 흙막이벽체의 양면에 각각 20개씩 총 40개를 부착 설치하여 굴착단계별, 건물하중의 작용위치에 따라 흙막이벽체의 부재력을 측정하였다.

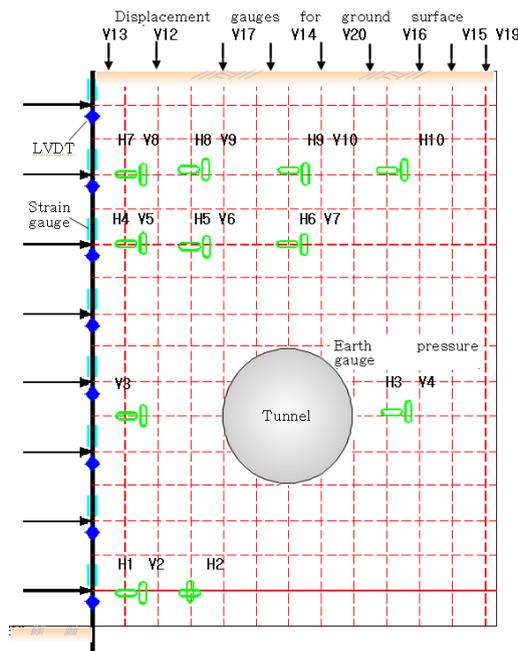


Fig. 4. Installation of measuring sensors

(2) 터널

굴착단계별로 건물하중이 작용했을 경우에 대해 터널의 변위는 변위계(LVDT)를 Fig. 5와 같이 방사형으로 설치하여 측정하였다.

변형율게이지(strain gauge)는 터널라이닝 양면에 각각 16개씩 총32개를 그림처럼 부착 설치하여 터널라이닝의 부재력을 측정하였다.

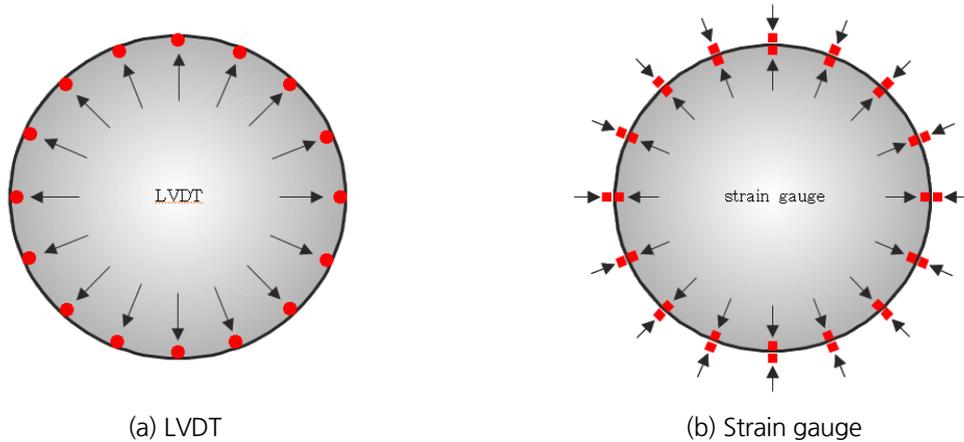


Fig. 5. Installation of measuring sensors for the tunnel

(3) 지표침하 및 지중변위

지표침하는 각각의 경우에 대해 그림 4와 같이 지표 9개소에 변위계를 설치하여 측정하였다.

토압계는 흙막이벽체 배면 지중에 수직 및 수평토압을 측정하기 위해 각각 12개씩을 매설하였고, 또 지중변위계를 매설하여 지중의 수직/수평 변위도 측정하였다.

2.2.5 실험 방법

계측기 등을 토조 내부에 설치하면서 지반조성을 완료 한 후에 대형실험을 수행하였다(Lee, 2003). 이때 건물 하중이 없는 경우와 건물하중이 흙막이벽체로부터 이격거리 0 m, 1D, 2D의 경우에 대해 실험을 수행하였다.

대형 토조에 설치된 모든 계측기의 초기치는 굴착하기 전에 “영(Zero)”으로 초기화 하였다. 1단 굴착 후 흙막이벽체의 변위가 발생된 상태에서 매설된 토압계를 읽어서 배면지반이 안정된 것을 확인한 후, 2단 굴착을 하여 1단에서와 같이 굴착과 안정화를 반복하면서 8단 굴착을 완료하였다. 기존 건물의 이격거리는 1D(터널 지름12 m)를 기준으로 하여 적용하였으며 건물하중을 위치별로 작용시켜 결과를 분석하였다.

2.3 수치해석

2.3.1 해석프로그램 및 경계조건

대형모형실험은 8단계의 굴착과 버팀 작업으로 이루어지고, 터널의 토피는 터널직경(D)의 두배인 2D로 하고 흙막이벽체와 이격거리는 1D로 하였으며, 흙막이벽체 배면 지표에는 위치에 따라 건물하중(흙막이벽체로부터 0

m, 1D, 2D)을 재하하였다. 이에 대해 범용 유한요소법(F.E.M) 프로그램인 PLAXIS Ver. 8.2를 이용하여 2차원으로 모델링하여 건물라이닝과 흙막이벽체 및 배면지반의 거동을 파악하였다(Kirsch, 1898).

터널라이닝과 흙막이벽체는 Frame요소로 하고, 버팀대는 Fixed anchor요소로 하여 탄성모델을 적용하였으며, 지반구성모델은 Mohr-Coulomb을 적용하여 유한요소해석을 하였다. 경계조건은 좌우 측벽의 경계점들은 상하로만 이동되는 로울러 지점으로 하였고 하단부의 경계조건은 고정단으로 하였다. 나머지 절점은 X, Y 방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속을 갖는 경계조건으로 하였다.

본 수치해석에서 흙막이벽체는 2차원으로 수행하였으며, 재료의 성질이 다른 흙막이벽체 및 터널라이닝과 모래로 조성된 실험지반의 사이에는 경계면을 두었다(Soliman et al., 1993).

본 수치해석의 모델링은 Fig. 6과 같다.

2.3.2 해석방법 및 입력물성치

수치해석에서 좌우 측벽의 경계점들은 상하로만 이동되는 로울러 지점으로 하였고 하단부의 경계조건은 고정단으로 하였다. 나머지 절점은 X, Y 방향으로 이동이 가능하고 회전에 대해 구속되도록 하였다. 지반은 탄소성 구성식을 갖는 2차원 평면 변형율 요소로 모사하였다. 수치해석에 사용된 지반 및 재료의 입력 물성치는 Table 4와 같다.

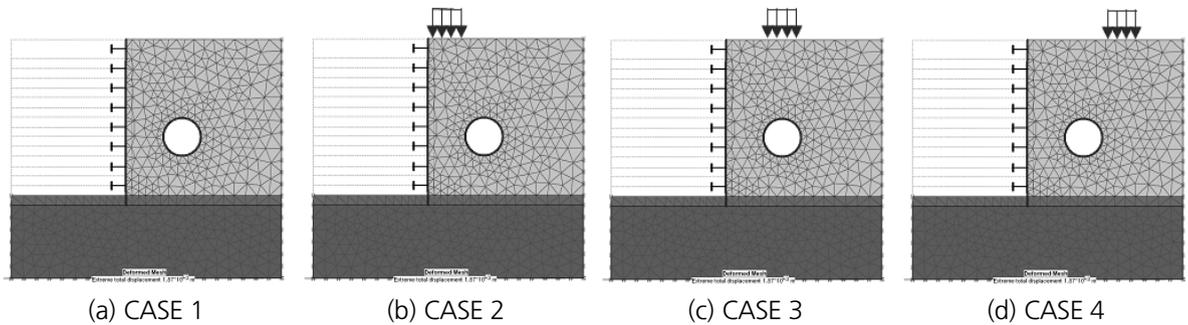


Fig. 6. Boundary conditions for the analysis

Table 4. Analysis data

Soil	E [kN/m ²]	ν	γ [kN/m ³]	ϕ	C [kN/m ²]
		20,000	0.25	16.2	38°
Wall	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]		d [m]	ν
	3,293,000	70.0		0.016	0.3
Lining	1,929,000	5.788		0.006	0.3
Bracing	EA [kN]			L [m]	
	450,700			1.34	

3. 결과 분석

본 연구에서는 굴착단계별 건물하중의 위치에 따른 흙막이벽체의 수평변위와 부재력은 물론 기존 터널의 내공변위와 부재력 및 흙막이벽체의 배면지반의 지표침하에 대하여 대형모형실험과 수치해석의 최종단계에서의 결과를 비교분석하여 흙막이 공사 시 발생하는 흙막이벽체의 수평변위를 굴착단계별로 분석해서 건물하중의 위치에 따른 흙막이벽체 배면에 있는 기존 터널의 안전성을 확보하는 방안을 탐구 하였다.

3.1 흙막이벽체

3.1.1 흙막이벽체의 수평변위

흙막이벽체의 수평변위는 최종굴착 완료 후 최대 값을 취하여 대형모형실험과 수치해석한 결과를 Fig. 7과 같이 비교 분석하였다.

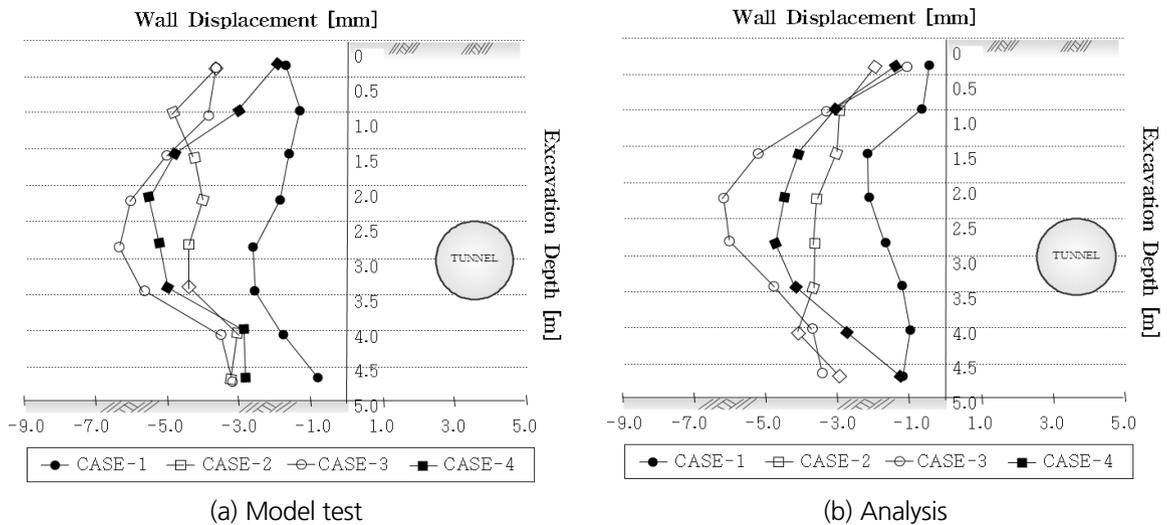


Fig. 7. Wall displacement

대형모형실험 결과 흙막이벽체 최대변위는 각각의 CASE에서 2.29 mm, 4.54 mm, 6.03 mm, 5.11 mm로 나타났고, 수치해석에서도 각각의 CASE에서 2.16 mm, 4.02 mm, 6.01 mm, 4.39 mm로 유사한 결과를 나타냈다. 이는 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에서 가장 크게 나타났다.

3.1.2 흙막이벽체의 부재력

최종 굴착 완료 후에 흙막이벽체에 발생하는 최대부재력 값에 대해 대형모형실험 결과와 수치해석 결과를 Fig. 8, 9와 같이 비교 분석하였다.

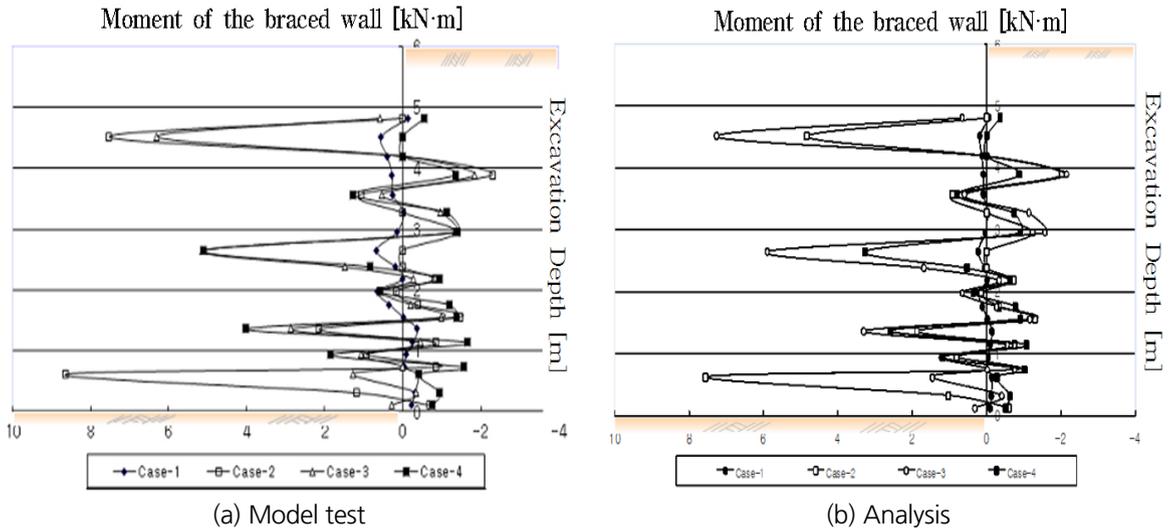


Fig. 8. Moment of the wall

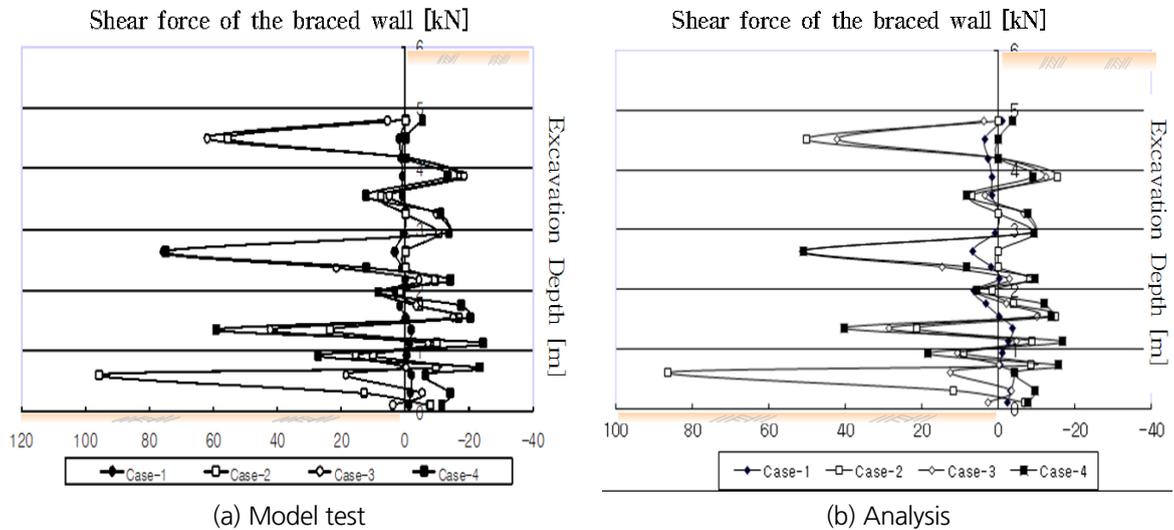


Fig. 9. Shear force of the wall

모멘트는 대형모형실험에서 각각 CASE 에서 0.678 kN·m, 8.641 kN·m, 6.302 kN·m, 5.103 kN·m로 나타났으며, 수치해석에서도 각각 CASE 에서 0.266 kN·m, 7.560 kN·m, 7.281 kN·m, 6.912 kN·m로 나타났다.

전단력은 대형모형실험에서 각각 6.8 kN, 86.4 kN, 51.2 kN, 51.0 kN으로 나타났으며, 수치해석에서도 각각 3.3 kN, 83.3 kN, 76.2 kN, 75.0 kN 으로 유사한 결과로 나타났다.

이는 흙막이벽체의 부재력(모멘트, 전단력) 모두 흙막이벽체 선단부(0 m)에 건물이 있는 경우가 가장 크게 나타났다.

3.2 터널

3.2.1 터널의 내공변위

기존 터널에 근접 굴착 시 지상부 건물의 재하위치에 따라 터널의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대형 모형시험과 수치해석 결과를 토대로 흙막이벽체의 수평변위와 터널의 내공변위의 상관관계를 분석하였다. 각각의 경우에 대해서도 터널의 내공변위를 분석하였다. 또한 건물하중의 재하 위치에 따른 터널의 내공변위 유형을 굴착단계별로 Fig. 10과 같이 비교 분석하였다.

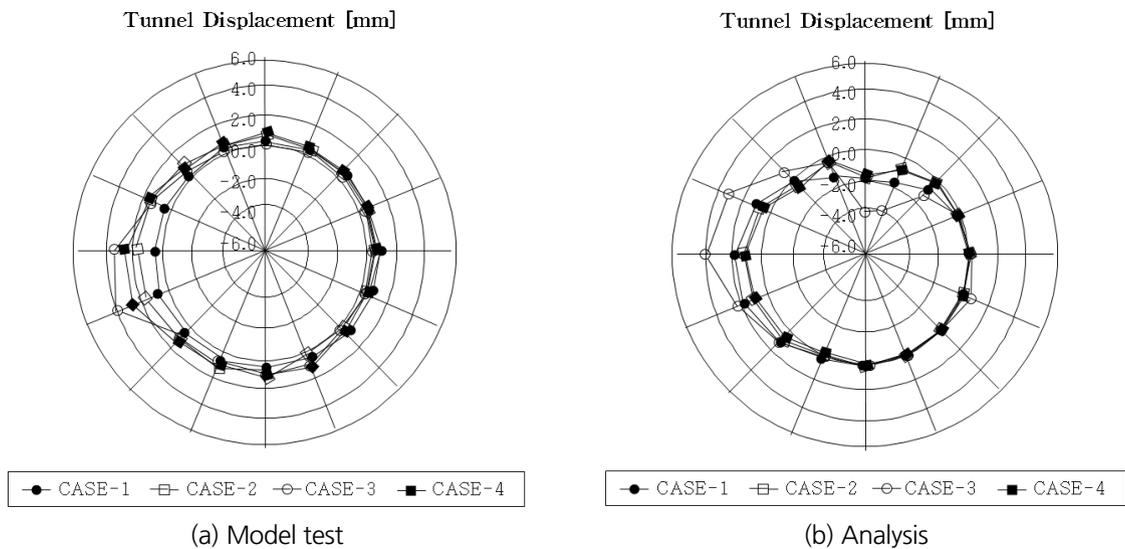


Fig. 10. Displacement of the tunnel lining

대형모형시험 결과 라이닝의 최대변위는 각각 CASE에서 2.22 mm, 1.70 mm, 4.27 mm, 1.70 mm로 나타났으며, 수치해석 결과 최대변위는 1.16 mm, 3.13 mm, 4.32 mm, 4.09 mm 로 나타났다. 이는 터널라이닝의 부재력(모멘트, 전단력) 모두 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에 건물의 영향을 받아서 가장 크게 나타났다.

3.2.2 터널의 부재력

굴착 시 각 CASE 별로 터널부재에 발생하는 응력(모멘트, 전단력, 축력)을 최종 굴착 완료 후의 최대부재력 값을 기준으로 대형모형시험 결과와 수치해석 결과를 Fig. 11, 12, 13과 같이 비교 분석하였다.

모멘트는 대형모형시험에서 각각 CASE에서 0.039 kN·m, 0.048 kN·m, 0.126 kN·m, 0.049 kN·m으로 나타났고, 수치해석에서는 각각 0.048 kN·m, 0.262 kN·m, 0.309 kN·m, 0.362 kN·m으로 나타났다.

전단력은 대형모형시험에서 각각 CASE에서 0.331 kN, 0.407 kN, 1.000 kN, 0.653 kN 수치해석에서는 각각

0.355 kN, 1.852 kN, 2.474 kN, 3.205 kN으로 나타났다.

축력은 대형모형시험에서 각각 CASE에서 34.4 kN, 20.5 kN, 47.4 kN, 209.0 kN 수치해석에서는 각각 22.9 kN, 36.5 kN, 38.5 kN, 35.8 kN으로 나타났다.

이는 터널라이닝의 부재력(모멘트, 전단력) 모두 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에 건물의 영향을 받아서 가장 크게 나타났다.

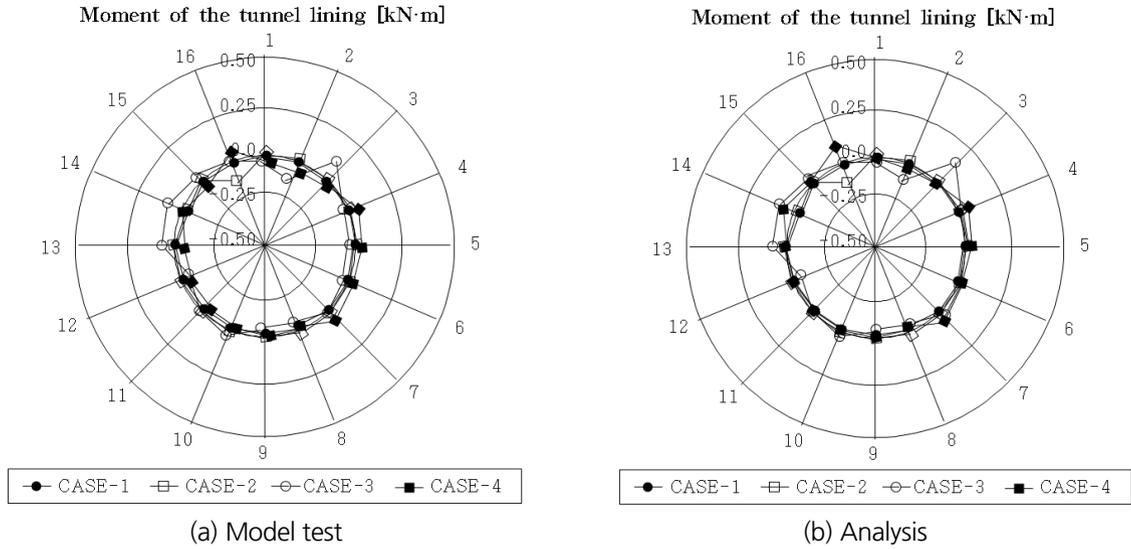


Fig. 11. Moment of the tunnel

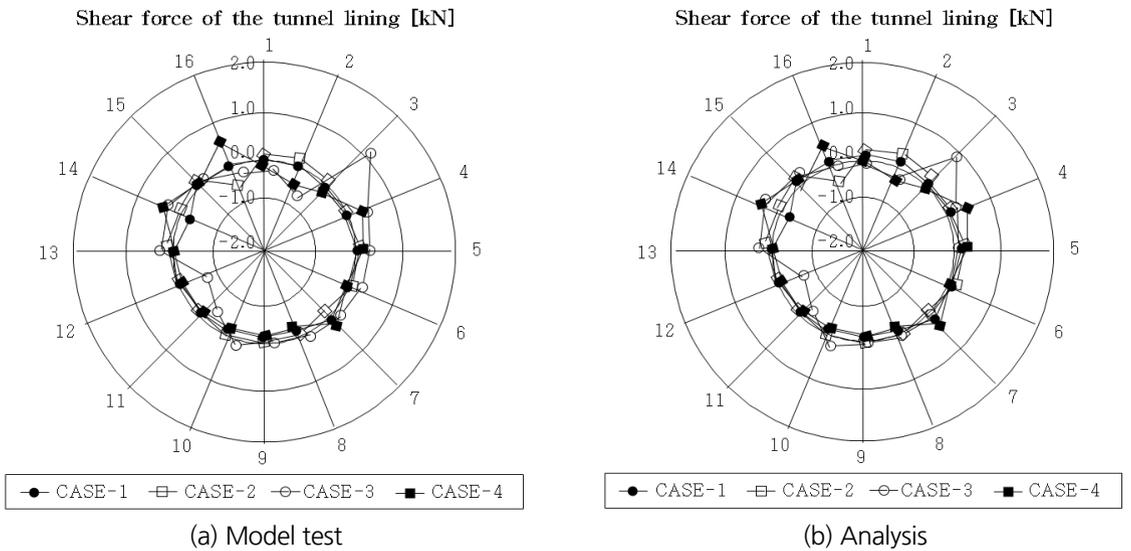


Fig. 12. Shear force of the tunnel

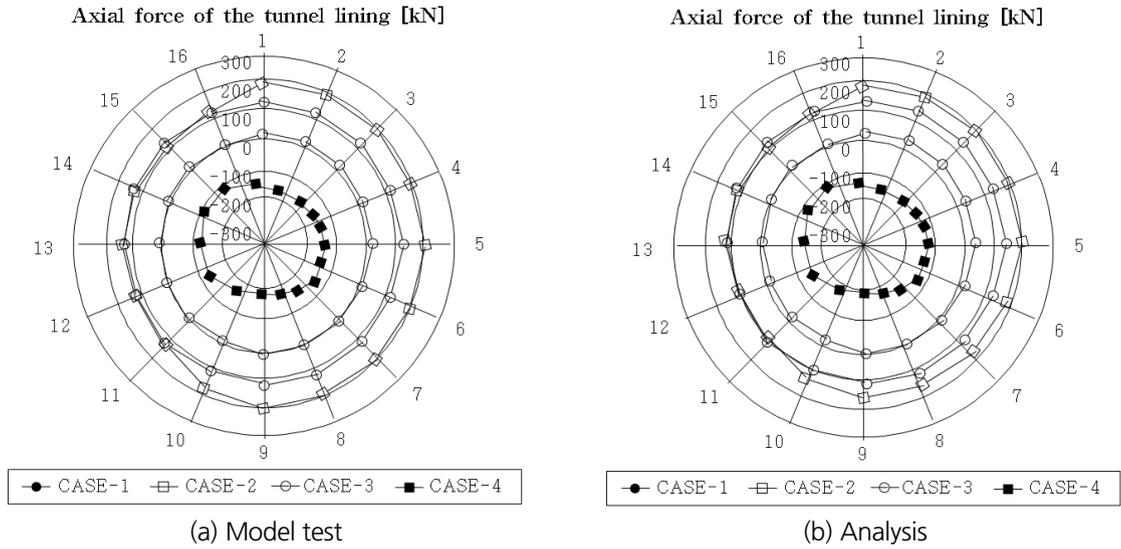


Fig. 13. Axial force of the tunnel

3.3 지표침하

근접굴착 시 흙막이벽체의 수평변위로 인해 흙막이벽체 배후 지반은 이완되고, 굴착이 계속되는 동안 서서히 지표침하를 발생시킨다. 흙막이 벽체의 수평변위와 지표침하의 관계를 대형모형실험 결과와 수치해석 결과를 Fig. 14와 같이 비교 분석하였다.

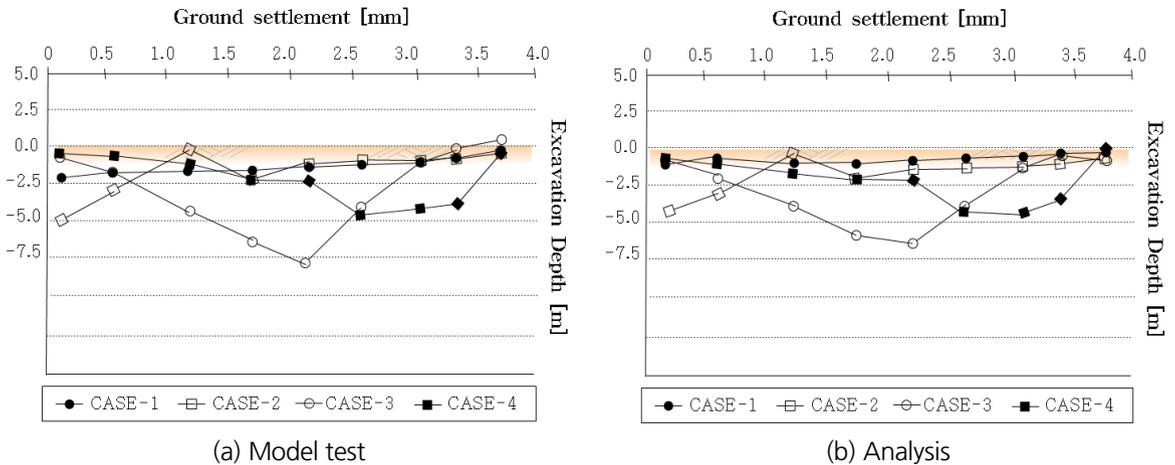


Fig. 14. Ground settlement

대형모형실험 결과 지표침하는 각각 CASE에서 2.1 mm, 4.88 mm, 8.02 mm, 4.27 mm로 나타났고, 수치해석 결과에서도 0.90 mm, 4.36 mm, 6.16 mm, 4.19 mm로 유사하게 나타났다.

흙막이벽체 배면지반의 지표침하는 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에 지표침하가 가장 크게 나타났다.

3.4 지중변위

굴착단계별 흙막이벽체 배면의 지중변위(수직, 수평)는 가상 주동활동면 내에서 최대수직변위 각각 V5-0.45 mm, V8-3.72 mm, V9-3.14 mm, V5-0.47 mm로 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우가 가장 크게 나타났으며, 최대수평변위는 H6-0.02 mm, H6-0.03 mm, H6-0.86 mm, H6-0.52 mm로 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우가 가장 크게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 건물에 인접한 터파기 공사에서 흙막이벽체와 벽체 배면에 있는 기존터널 및 배면 지반의 거동에 대한 영향성을 검토하였다. 이를 위해서 대형모형실험을 수행하였으며, 수치해석을 통하여 실험을 검증하였다. 그리고 흙막이벽체와 배면지반의 거동은 물론 기존터널의 거동과 부재력을 비교 분석하였으며, 근접 건물의 위치에 따른 경우를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 흙막이벽체 근접 공사중 건물하중은 흙막이벽체 배면에 부가하중으로 작용하여 안정성에 영향을 주는 것으로 대형모형실험과 수치해석을 통해 확인되었다.
2. 근접굴착 시 흙막이벽체에 발생하는 수평변위는 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에 건물의 영향으로 최대로 나타났다.
3. 터널라이닝의 최대내공변위와 부재력(모멘트, 전단력) 모두 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에 건물의 영향으로 최대로 나타났다.
4. 최대지표침하는 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우에 건물의 영향을 받아서 최대로 크게 나타났다.
5. 흙막이벽체 배후 지반의 지중 최대수직변위는 건물이 없는 경우 보다 터널 직상부(1D)에서 가장 크게 나타났고, 터널 배후부(2D)에서는 미소한 크기로 나타났다. 지중 최대수평변위는 건물이 없는 경우와 터널 전면부(0 m)에서 미소하게 나타났고, 터널 직상부(1D)에서 가장 크게 나타났다. 분석결과 흙막이벽체 배후 지반의 지중변위는 터널 직상부(1D)에 건물이 있는 경우의 지중변위가 가장 크게 분석되었으며, 이는 기존건물이나 인접구조물에 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.
6. 본 연구에서 대형모형실험과 수치해석의 결과에서 유사한 분석 결과를 보였다. 현재 실무에서는 수치해석만으로 실시설계하여 현장 시공을 하고 있는 실정이지만, 향후에는 보다 더 많이 실험적 연구가 필요할 것으로 보인다.

이상과 같이 대형모형실험과 수치해석 결과를 분석한 결과 터널 직상부(1D)에 건물이 있을 경우가 터널과 기존건물의 안정성에 가장 크게 영향을 주는 것으로 분석되었다. 추후 다양한 연구를 통해 근접공사에 따른 흙막이 벽체와 기존 터널 및 건물의 위치에 따른 안정성을 확보할 수 있을 것이다.

References

1. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), "Structural design models for tunnels in soft soil", *Underground Space*, Vol. 9, No. 5-6, Pergamon Press, pp. 246-259.
2. Hobbs, D.W. (1966), "Scale model studies of strata movement around mine roadways. Apparatus, technique and some preliminary results", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol. 3, No. 2, pp. 101-127.
3. Kim, I. (2008), Behavior of tunnel due to adjacent ground excavation with pre-loading on braced wall behavior of tunnel due to adjacent ground excavation with pre-loading on braced wall, Ph.D. Thesis, Ajou University, pp. 1-19.
4. Kirsch, C. (1898), "Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre", *Vereines deutscher Ingenieure*, Vol. 42, No. 28, pp. 797-807.
5. Lee, J.M. (2011), "Behavior of the tunnel below a building depending on the pre-loading on braced wall during the adjacent ground excavation", Ph. D. Thesis, Ajou University, pp. 1-35.
6. Lee, S.D. (1998), "Soil mechanics second edition", Book Salon, Seoul, pp. 353, 354, 388-396.
7. Lee, S.D. (1999), "Fundamental engineering", Book Salon, Seoul, pp. 252-254.
8. Lee, S.D. (2003), "Understanding of the latest tunnel technology", Ajou University Ground Engineerin Laboratory, pp. 1-22.
9. Soliman, E., Duddeck, H., Ahrens, H. (1993), "Two- and three-dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No.1, pp. 13-18.