

# 비개착공법으로 건설된 지하구조물 주변 지반 응력이완 방지 방안

## The Method to Prevent Releasing of the Stress nearby Sub-structure Constructed by Non-open cut Method

이광재\*, 이성혁\*\*, 조국환†

Kwang-Jae Lee\*, Sung-Hyuk Lee\*\*, Kook-Hwan Cho†

**Abstract** As the development of around railway area, the subsurface construction using non-open cut method under the railway has been recently increased. However, when the structure under railway is constructed, the track support stiffness of the ground is not considered as an important design factor. In this study, soil-nailling method and grouting method were proposed to prevent releasing the stress of the soil nearby structures constructed by non-open cut method in ballast track. Thus, 3D numerical analyses and field test were performed to find out the stability of the track. The results of this study present the applicability of the field.

**Keywords** : Non-open cut method, Stress release, Numerical analyses, Field test

**초 록** 최근 철도주변의 개발이 확산되고 있는 가운데 비개착공법을 이용하여 철도노반하부를 횡단하는 구조물을 시공하는 경우가 불가피하게 증가하고 있다. 그러나, 기존선 하부를 횡단하는 구조물을 시공하는 경우 구조물 주변의 지반응력변화 및 변위 발생으로 인한 열차 주행 안정성 검토는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 자갈도상에서의 구조물 주변지반의 응력이완을 방지하기 위해 쏘일네일링 및 Grouting을 이용한 지반 보강 방안을 제안하였으며, 이동하중을 고려한 3D 수치해석 및 현장시험시공을 통하여 검증하였다. 본 연구를 통하여 제안한 공법의 현장적용 가능성을 제시 하였다.

**주요어** : 비개착공법, 응력이완, 수치해석, 현장시험시공

## 1. 서 론

지하 공간을 활용하는 방법은 크게 개착공법과 비개착공법으로 구분할 수 있다. 개착공법은 굴착을 위한 벽체(C.I.P, H-Pile+토류판, Sheet Pile 등)를 시공한 후 굴착진행과 동시에 지보재(Strut, 어스앵커 등)를 설치하면서 굴착하는 공법으로 일반적인 굴착공사에 가장 많이 이용된다. 하지만 개착공법을 도심지 공사에 적용할 경우 교통체증의 유발, 지장물, 이설비용 발생 등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 최근 들어 도심지 공사에서는 교통 불편으로

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

\* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

\*\* 한국철도기술연구원 첨단인프라TFT 책임연구원

인한 민원 해결과 지장물 이설비용을 최소화하기 위하여 비개착공법의 적용이 늘어나고 있는 추세이다. 도로 또는 철도 등의 기존 구조물 하부에 지하 연결통로를 건설하기 위해 널리 사용되고 있는 비개착공법은 함체견인공법, 강관추진공법, 엘리먼트(element) 견인/추진공법, 패널(panel)추진공법 등으로 구분되며[1], 일반적으로 횡단구간에 대해 강성이 큰 원형 강관이나 사각형 강관을 관입하여 루프(roof)를 형성함으로써 강관 상부의 구조물 자중과 교통하중을 지지하는 개념을 이용한다. 비개착공법은 그 활용이 늘어가는 추세에 비해 개착식 터널공법[2],[3]과 비교할 때 관련 연구가 상대적으로 부족한 상황이다.

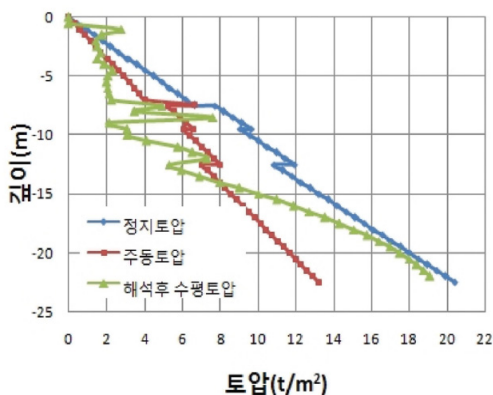
이에 본 연구에서는 자갈도상에서의 구조물 주변지반의 응력이완 방지를 위한 3D 수치해석을 수행하여 보강공법을 제안하였고, 현장시험을 통하여 적용가능성을 제시하였다.

## 2. 구조물 추진에 따른 응력이완

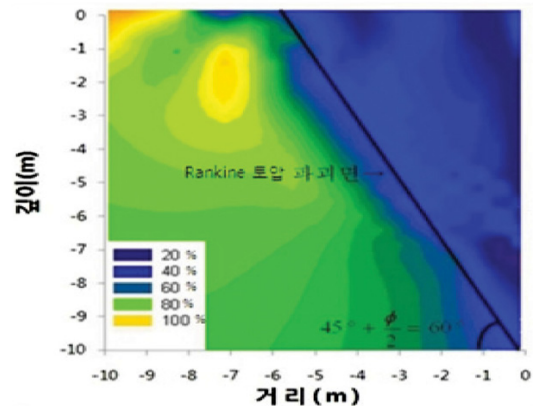
### 2.1 연구동향

Eum et al.[4]은 현장계측을 통해 프론트잭킹 공법과 파이프루트 공법을 적용한 철도지하횡단공사에 따른 지반거동을 분석한 결과, 강관 관입과 굴착공정에서 80% 이상의 침하가 발생한다고 하였다. Roh[5]도 RPS(Roof Panel Shield)공법에 의한 지하횡단구조물의 시공을 3차원 수치해석에 의해 모사한 결과, 최종적으로 발생한 지표 변위량의 1/3이 강관루프의 형성시에 발생한다고 하였다.

Park et al.[6]은 철도노반 하부를 횡단하는 비개착공법 적용에 대하여 연구하였는데, Fig.1 에 나타난 바와 같이 암거 구조물과 접해있는 흙구간 경계면까지 해석한 수평토압이 설계에 적용된 정지토압보다 훨씬 작게 나타나며 주동토압에 가깝게 나타나는 경향을 보인하고 하였다. 또한 Rankine의 주동토압 파괴면에 가까운 응력이완이 발생한다고 하였으며, 상부의 수직응력이 약 40% 감소하여 선로 지지강성이 크게 저하된다고 하였다.



(a) Earthwork pressure nearby structure



(b) Stress relaxation nearby structure

Fig. 1 Earthwork pressure and stress relaxation nearby structure occurred by non-open cut method [6]

## 2.2 지중경사계를 통한 응력이완 분석

본 연구에서는 비개착공법에 따른 지하구조물 시공 시 굴착 및 강관 압입 단계에서 주변지반의 거동특성을 파악하고자 지중경사계를 설치하고 계측을 수행하였다.

### 2.2.1 A지하차도

Fig. 2는 A지하차도의 지중경사계 계측결과를 나타내었다. 최대변위 값은 깊이 0.5m 부근의 상부노반에서 나타났으며 8.22mm의 변위를 보였다. 또한 강관의 압입 작업(2013/01/24) 후 변위가 0.99mm에서 4.9mm로 급하게 변화하였다.

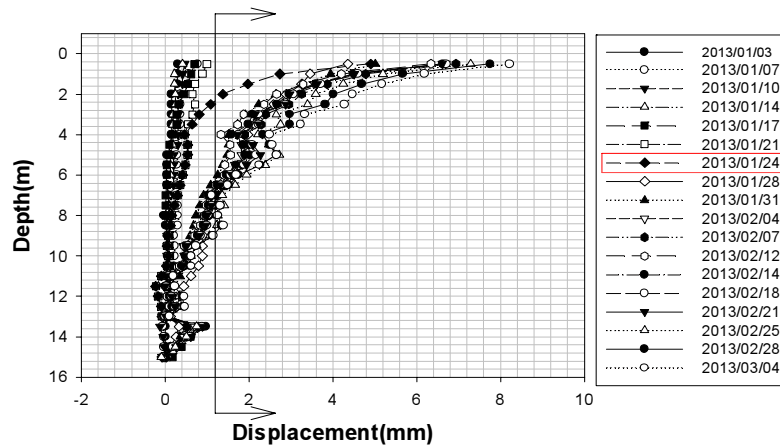


Fig. 2 Measurement results of A substructure

### 2.2.2 B지하차도

Fig. 3에서 보는 바와 같이 B지하차도의 지중경사계 계측결과, 지표 1.5m의 깊이에서 6.7mm의 최대 변위가 발생하였다. 강관의 압입 작업(2013/01/21) 후 0.49mm에서 3.79mm로 급하게 변화한 것을 알 수 있다.

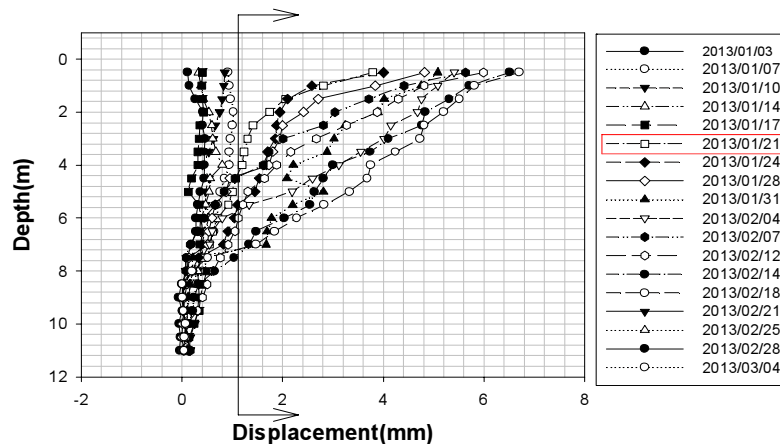


Fig. 3 Measurement results of B substructure

### 2.2.3 계측결과 분석

지중경사계를 이용한 현장계측 DATA를 분석한 결과, 강관의 압입 작업을 기준으로 급격하게 변위가 발생하였다. 이는 강관의 압입 작업에 의한 토사의 유실로 발생한 것으로 판단된다. 이러한 토사의 유실은 응력을 이완시키고 열차주행안정성에 악영향을 야기 할 수 있다.

## 3. 수치해석을 통한 접속부 보강방안

### 3.1 수치해석을 통한 접속부 보강방안 연구

#### 3.2.1 수치해석 모델링

비개착공법을 이용한 구조물의 접속부 구간을 모사하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 Lusas를 이용하여 이동하중을 고려한 3D 수치해석을 수행하였다. 해석모델은 Fig. 4와 같으며 모델링 범위는 구조물을 포함하여 총 길이는 80m, 총 높이는 하부노반 8m, 강화노반을 포함한 상부노반은 3m로 하였고 자갈도상은 0.3m로 하였다. 하중은 KTX 바퀴를 실물로 모델링하여 300km/hr의 속도로 재하하였다. Table 1은 수치해석에 사용된 물성치를 나타내었고 Fig. 5는 해석 모델을 나타내었다.

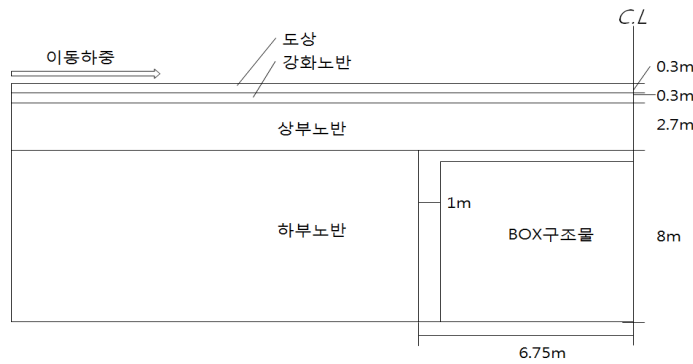


Fig. 4 Analysis model

Table 1 Properties used in numerical analysis

명 칭	하부노반	상부노반	강화노반	도 상	구조물
Type	Mohr/C			Elastic	
E(tonf/m <sup>3</sup> )	10,000	3,000	130,000	2,300,000	
V(포아송비)	0.3	0.35	0.25	0.18	0.21
X(tonf/m <sup>3</sup> )	2.0	1.9	1.9	2.5	2.3
X <sub>22</sub> (tonf/m <sup>3</sup> )	2.0	1.9	1.9	-	-
Cohesion(C)	0	1.5	0	-	
Friction Angle( $\Phi$ )	40	31	35	-	-
Tensile Strength(tonf/m <sup>3</sup> )	200	200	200	-	-

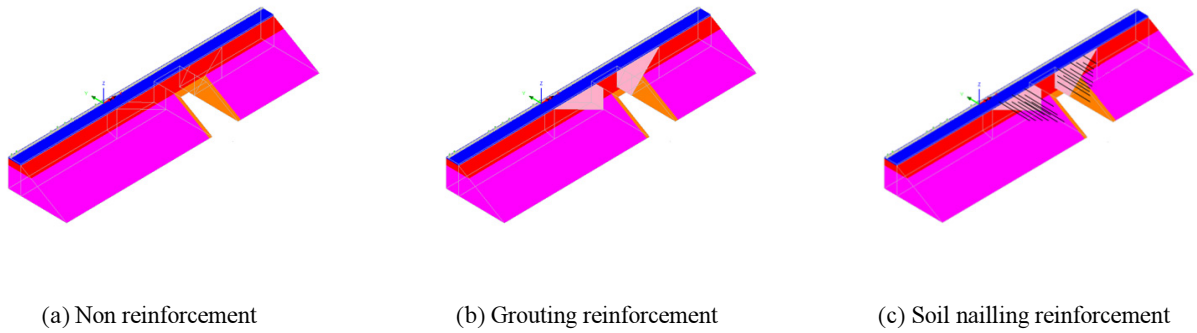


Fig. 5 Analysis models depending on reinforcement method

### 3.2.2 수치해석 결과

Fig. 6는 접속부를 미보강 한 경우 열차 주행에 따른 변위를 나타낸 그림이다. 구조물 좌측 8m에서 최대 변위가 측정되었으며, 그 값은 8.42mm로 나타났다. Fig. 7는 그라우팅 적용에 따른 변위를 나타내는데 구조물 좌측 7m에서 1.78mm의 최대변위가 나타났다. Fig. 8는 소일네일링에 따른 결과이며 구조물 좌측 7m에서 1.96mm의 최대변위가 나타났다. 본 수치해석을 통해 보강 전/후에 따른 변위 특성을 분석한 결과 보강 했을 경우 미보강 시 보다 약 5배 정도 변위가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 접속부 보강이 필수적이라 판단된다.

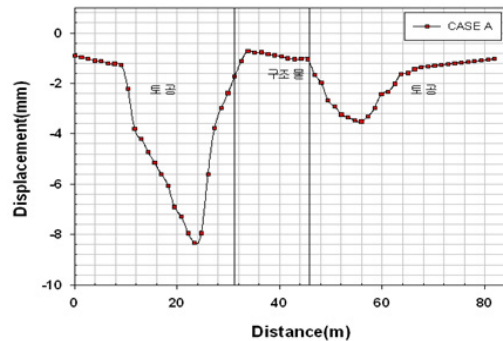


Fig. 6 Displacement result of non reinforcement

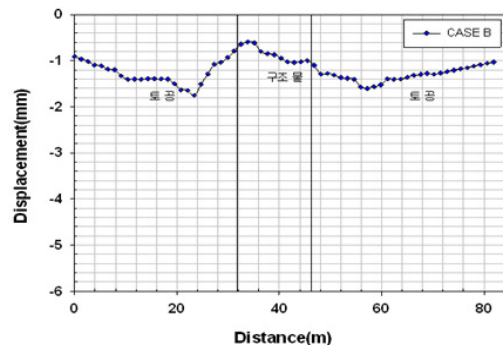


Fig. 7 Displacement result of grouting reinforcement

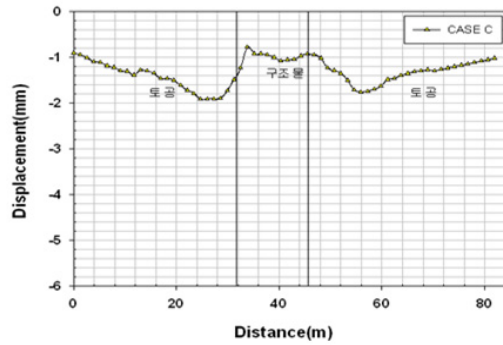


Fig. 8 Displacement result of soil nailing

### 3. 현장시험시공을 통한 보강

#### 3.2 현장시험시공을 통한 보강방안 연구

##### 3.2.1 강관보강그라우팅을 통한 보강 방안

강관보강 그라우팅 공법은 굴착 전에 일정규모의 강관을 지중에 삽입하고 주입재를 다단으로 주입하여 강관의 빔(beam)작용을 유발시키고 주입재의 주입에 의해 지반의 차수 및 점착력, 밀도, 내부마찰각을 증가시켜 주변지반을 지지해 주는 역할을 하기 때문에 하중경감효과 및 차수효과를 동시에 누릴 수 있어 다양한 용도로 이용 될 수 있다.

본 현장시험시공에서 사용한 강관보강 그라우팅 공법은 주입재를 중력식으로 주입하였고, 주입재에 수축저감제를 혼합하여 낮은 w/c비로 시공 중이나 시공 후에 발생할 수 있는 지반의 수축을 최소화 하였다. Table 2 는 본 현장시험시공에서 사용한 주입재의 배합비를 나타내었다.

Table 2 Mixing ratio of grouting

구분	주입량(kg)	시멘트(kg)	작업용수(kg)	수축저감제(%)
A액	133kg	100kg	30kg	3%

##### 3.2.2 보강공법 현장시험시공

작업을 위한 부지 정리를 위하여 Back-Hoe를 이용하여 토공 작업을 수행하였으며, 기존 옹벽부 천공 및 주입을 위하여 천공기를 이용하여 코어천공(150mm)를 수행하였다. 다음 단계는 시멘트 그라우팅을 위한 천공(125mm) 및 강관(75mm)을 삽입 하였다. 삽입된 강관은 그대로 존치하여 보강하도록 하였다. 그 후 약액을 주입하였으며 마지막으로 주입홀을 마감하였다. 또한 향후 지반의 거동을 광파기를 이용하여 분석하기 위해 강관에 타케팅 작업을 하였다. Fig. 9 는 본 보강공법 순서를 나타낸다.



(a) 토공



(b) 옹벽부 Core천공



(c) 천공기(C6)를 이용한 천공



(d) 물보링 작업



(e) 강관파이프 설치 전



(f) 하단 강관파이프 설치 및 그라우팅 작업



(g) 상단 강관파이프 설치 및 그라우팅 작업



(h) 그라우팅 및 미장작업



(i) 광파기 계측을 위한 타겟 작업

**Fig. 9** Procedure of reinforcement method

### 3.2.3 현장계측을 통한 보강방안 검토

현장시험시공 시 열차주행에 따른 안정성을 평가하기 위하여 시공부분내의 6개 지점을 선정하여, 열차주행에 따른 침목의 동적 변위를 계측하였다. 계측은 시공 전, 시공 중, 시공 후에 대하여 수행하였으며 Fig. 10은 계측 결과를 나타낸다. 시공 전의 경우 평균 최대변위는

5.85mm~7.24mm로 계측되었으며, 시공 중에는 6.78mm~7.31mm로 계측되었다. 시공 후 1일차는 5.05mm~5.73mm, 2일차에는 4.71mm~5.38mm로 계측되었다.

지반을 보강한 후에 변위는 지반보강공법 시공 전 보다 약 20% 감소 되었다. 철도노반하부에 비개착공법으로 구조물 시공 시 구조물 주변 지반을 중력식 강관보강 그라우팅 공법을 사용하여 보강하는 것이 선로의 용기나 침하에 영향을 미치지 않고, 지반의 지지강성을 증대시키는 공법으로 적합한 것으로 판단된다.

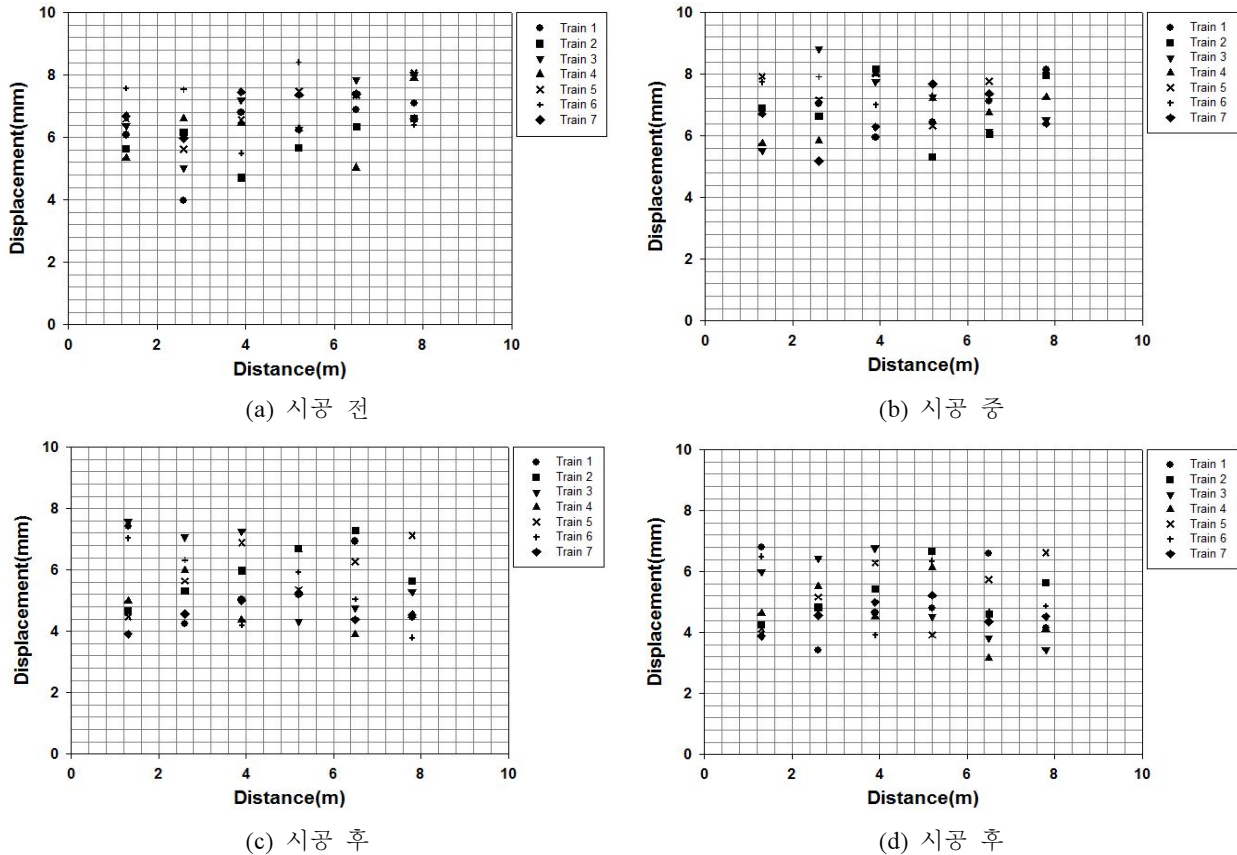


Fig. 10 Results of field measurement

### 3. 결론

본 연구에서는 비개착공법 시 강관의 압입으로 인한 토사의 유실로 인해 발생하는 구조물 주변의 응력이완에 대해 현장계측을 통하여 계측하였고, 수치해석을 통하여 보강방안을 제안하였다. 또한 제한된 방안을 통하여 현장시험시공을 수행하고 계측을 통하여 공법의 적정성을 분석하였다.

- 1) 지중경사계를 이용한 현장계측 결과, 강관의 압입 시기를 기준으로 급격하게 변위가 발생하였는데, 이는 강관의 압입에 의한 토사의 유실로 발생한 것으로 판단된다.
- 2) 수치해석 결과, 구조물 주변의 보강은 열차주행 안정성에 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 3) 강관다단그라우팅을 이용한 현장시험시공 결과 선로의 용기나 침하에 영향을 미치지 않



왔고 침묵의 변위가 감소하였다. 이는 본 공법으로 인해 지반의 지지강성이 증대되어 나타난 효과로 판단된다.

4) 향후 광과기를 이용한 강관의 변위를 계측하여 시공 후 지반의 거동에 대해 분석이 필요할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- [1] Korea Railway Research Institute (2010) Study of increasing Natural Ground Stabilization on Railway Earthwork section, Research Report.
- [2] Bae, G.-J. and Lee, G.-P. (2001) A study on Modelling Methods Used for the Analysis Cut-and Cover Tunnel Lining, *Journal of Korean Tunnelling Association*, Vol.3, No.2.
- [3] Bae, G.-J. (2003) Analysis on the Field Measurements with the Construction of Cut and Cover Tunnel., *Journal of Korean Society for Rock Mesh.*, Tunnel & UNDERGROUND Vol.13, No.2, pp. 13-22.
- [4] Eun, K.-Y., Shin, M.-H., and Kim, J.-H. (2001) The analysis of Ground Behavior on the Crossing Construction Under Railroad Using Field Measurement., *Journal of the Korea Society for railway*, Vol.5, No.2, pp. 83-89.
- [5] Roh, J.-M. (2006) Numerical Analysis of Crossing Tunnel Using Roof Panel Shield Method., Master thesis, Dept, of Civil and Environmental system Engre., University of Incheon, South Korea.
- [6] Park, Y.-S. (2012) A study on the lateral Earth Pressure and Stress Relaxation by Non0excavation Method Under Railroad., Master theses, Dept, of Railway system Engre., Seoul national university of science and technology., Graduate school of railway, South Korea.