

## 철도터널 하부 여굴처리 방법에 대한 정적 안정성 검토

### Static stability analysis of remedy measure for the overbreaks in railway tunnel bottom

배상만\*, 이성혁\*\*, 조국환†

Sang-Man Bae\*, Kook Hwan Cho†, Sung-Hyeok Lee\*\*

**Abstract** Overbreak is an inevitable during tunnel excavation. It significantly affects tunnel construction cost and safety. The overbreak occurs due to incorrect expectations to the geologic structures, excessive charge or strength of explosives, etc. In this study, Numerical analyses were performed to evaluate Stability in three overbreak filling material using a model railway tunnel bottom ground around the foundation. Overbreak filling material analysis results showed that the stability is secured. Additional research for the dynamic stability of tunnels train driving is considered necessary.

**Keywords** : Railway Tunnel, Tunnel Blasting, Remedy measure for the overbreaks, Numerical Analysis

**초 록** 터널을 굴착하면서 발생하는 여굴은 터널공사에서 공사비 및 안정성에 지대한 영향을 미치게 된다. 여굴은 지지구조를 정확하게 예측하지 못하거나, 적정 장약량을 산정하지 못하는 등 다양한 원인으로 발생한다. 따라서 본 연구에서는 철도터널 바닥부 기초 및 주변지반을 모사한 후 3가지 유형의 여굴채움 재료를 이용하고 시공단계에 따른 안정성 검토를 수행하였다. 여굴채움 재료별 해석결과 모두 정적안정성이 확보된 것으로 해석되었다.

**주요어** : 철도터널, 터널발파, 여굴처리대책, 수치해석

## 1. 서 론

최근의 국내 터널공사 기술은 급속도로 발전해가고 있다. 대형 천공장비 및 보강장비가 투입되고, 장공 천공이 설계에 반영되면서 굴진 속도가 빨라지고 있다. 또한 굴진 효율을 증대시키고 발파공해를 최소화할 수 있는 새로운 개념의 발파공법이 적용되고 있으며, 막장 암반을 파악하여 천공패턴을 변화시키는 기술이 도입되고 있다. 터널의 1차 숏크리트 라이닝의 설계선 바깥으로 추가로 굴착된 것을 여굴(과굴, Overbreak)이라 한다. 그러나 암반상태와 발파조건이 고려되지 않은 채 일률적으로 동일한 패턴으로 설계되고 사용하고 있기 때문에 좋은 효과를 얻지 못하고 있다. 터널공사에서 여굴 최소화의 목적은 크게 암반의 손상방지와 터널 설계단면의 최적화 유지에 있다.

여굴이 크게 발생하게 되면 암반보강을 위한 Rock bolt 및 Shotcrete 타설비 등의 보강비가 증가하고, 버력량의 증가로 인한 발파암 처리시간이 장시간 소요되어 공기가 지연되는 원인이 되며, 암반의 손상영역이 확대되어 Key Block 및 부석이 발생하여 낙반 등의 안전 사고를 초래할 수 있다. 또한 암반 손상영역의 확대는 암반의 틈새를 통해 지하수 유출 경로가 형성되어 암반을 안정적으로 유지하는데 어려움이 많다. 기 발표된 통계자료에 의하면 터널

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

\* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 글로벌철도시스템학과 석사과정, 한국철도시설공단

\*\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 수석연구원

굴착선 여굴에 의해 추가로 소요되는 비용은 터널공사비의 15~18%를 차지하는 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 이유로 최근에는 터널 굴착시 여굴 감소를 위한 방안에 관하여 국내에서도 연구한 결과가 몇몇 발표된 바 있다[1~3, 4]. 그러나 이들은 여굴을 야기 시키는 몇 가지 문제 중 일부인 천공방법이나 발파 패턴 설계 등을 분리시켜 연구하고 있다.

여굴이란 천공방법은 물론 발파 패턴과도 직접적인 관계가 있기 때문에 종합적으로 검토되어야 한다. 즉 여굴 발생의 주요 요인은 암반내 불연속면의 발달 상태와 같은 자연적 현상과 천공 및 발파와 같은 인위적인 요인에 의해 좌우된다. 또한 발파로 인해 형성되는 터널 주변의 암반 손상·교란영역(disturbed rock zone, DRZ)은 터널 주변 암반인 모암과 다른 특성 즉 미소파괴나 균열이 형성되어 변형계수의 감소, 투수계수의 증가와 같은 현상을 초래하게 된다. 여기서 손상·교란영역이란 파괴영역(failure zone), 손상영역(damage zone) 및 교란영역(disturbed zone)을 총칭하는 의미이다. 본 논문에서는 발파작업과 암척소 과정에 따라 발생하는 바닥부 여굴에 대하여 채움방안을 검토하고, 수치해석을 통하여 그 안정성을 평가하였다.

## 2. 여굴 발생 기준 및 현황

### 2.1 국내 터널 여굴 허용 기준

발파공법을 이용하여 터널을 굴착하게 되면 굴착 선에 여굴이 발생하는 경우가 많이 발생하고 있다. 여굴은 터널의 안정성 문제에 있어 중요고려사항이며, 공사비를 증가시키는 절대적 요인이기도 하다. 여굴이 발생하는 여러 가지 원인 중 불변의 요인이라 할 수 있는 천공오차(Look-out)은 천공장이 길어질수록 증가할 수 밖에 없다. 그래서 국내에서는 허용 여굴량을 설정하여 설계에 반영하고 있으며, 공사비에 포함시켜 발주가 이루어지고 있다. 허용 여굴량은 굴진장이 1.5~2.0m정도일 경우를 고려해서 설정된 것이기 때문에 천공오차 한계를 감안하여 대개 15~20cm로 설정하고 있다. 그러나 오늘날에서는 3.0m이상의 장공으로 천공이 이루어지기 때문에 천공오차의 확대로 여굴량이 증가할 수 밖에 없다. 다음 Table 1은 철도 설계지침 및 편람에서 제시하고 있는 여굴 기준을 나타낸 것이다.

Table 1 여굴두께 산정

구분		천장부	측벽부	바닥부
여굴두께(cm)	발파구간	15	10	10
	기계굴착구간	7	7	

### 2.2 여굴 발생 원인분석과 문제점

터널 발파 시 발생하는 여굴의 원인은 크게 암반의 특성, 화약류 성능, 시공성으로 구분할 수 있다. 이와 같은 3가지 특성은 복합적으로 영향을 미치기 때문에 한 가지 특성만을 고려하여 여굴의 원인으로 한정 짓는 것은 바람직하지 못하다. 국내 터널현장에서 여굴량이 크게 발생하는 원인 및 문제점을 나열하면 다음과 같다.

### 2.2.1 암반의 특성

발파대상 암반층의 생성시기, 지각변동, 풍화 정도에 따라 발파효과 및 여굴 상태가 상당히 다르게 나타난다. 일반적으로 밀도가 낮은 암석은 상대적으로 낮은 에너지에 서도 쉽게 부서지고 여굴이 많이 발생하는 경우가 많고, 입자가 치밀한 암석은 발파 시 더 많은 에너지를 필요로 하지만 여굴이 덜 생기는 특성이 있다. 암석의 강도가 클 수록 화약량이 많아지지만 여굴은 적게 생기며, 강도가 작은 암반에서는 화약량이 적게 소요되지만 여굴이 많이 발생한다. 또한, 불연속면은 천공 rod의 휨을 유도하고 응력이 집중되는 현상을 일으켜 crack이 발전하는 요인이 된다.

터널굴착을 위한 발파패턴은 지보패턴을 결정하기 위한 공학적 암반분류 (RMR, Q-system)를 기초로 하여 결정하고 있다. 그러나 공학적 암반 분류값은 터널의 무지보 자립시간 결정과 지보량을 결정하는 요인으로 활용되기 때문에 발파의 난이도와 여굴 최소화를 위한 발파패턴 설계 기준으로는 부적합하다. 그래서 여굴 최소화를 위한 별도의 발파암 분류기준이 설정되어 반영되어 야 한다.

### 2.2.2 화약류의 성능

국내에서 생산되는 화약류 중 터널 굴착 선의 여굴을 줄이기 위해 사용되는 화약류 는 정밀폭약이다. 그러나 이 폭약은 저폭속 (4,400m/sec)으로 폭발위력이 떨어져 경압이 노출되는 구간에서는 충분한 파괴효과를 발휘하지 못하여 여굴 또는 미굴이 자주 발생한다. 또한 폭발감도 및 가비중(1.0g/cm<sup>2</sup>) 이 다른 화약에 비해 떨어져 현장에서 발파 작업 시 불발되는 경우가 많이 발생하여 암반의 파쇄효과가 상대적으로 저조한 실정이다. 특히 불발된 화약이 파쇄된 암석 덩어리 속에 파묻혀 있기 때문에 버력처리 작업 시 폭발할 위험성이 존재하여 안전관리에 어려움이 많이 발생한다.

터널 굴착선이 미려하게 절단되기 위해서는 천공경과 화약류 직경의 관계가 매우 중요하다. 이러한 관계를 디커플링 지수 (Decoupling Index)라 하며, 조절발파의 최대효과를 내기 위해서는 디커플링 지수가 2.0~2.5 정도, 장약밀도는 250g/m로 유지되어야 하는데(U. Langefors), 국내에서 주로 사용되는 정밀폭약은 디커플링 지수는 2.7 정도이며, 장약밀도는 235g/m로 파괴력이 떨어질 수밖에 없다. 그 영향으로 터널 굴착선의 여굴 또는 미굴이 발생하게 된다.

### 2.2.3 시공성 측면

최근 발파를 위해 사용되는 천공장비는 Jumbo Drill을 사용하고 있으며, Jumbo Drill 장비 피드 부분의 특성상 천공비트를 굴착 예정선에 위치시킬 수 없다. 그래서 천공비트를 굴착예정 선으로부터 10cm 하부지점에 설치하여 천공하게 된다. 이럴 경우 터널단면을 유지시키기 위해서 천공각도를 최소 3~4° 정도를 세워서 천공하게 되며, 이와 같은 경사천공으로 인하여 이루어지는 외향각 (Look-Out) 으로 천공오차가 발생하게 되어, 발파 시 불가피하게 여굴이 발생한다. 또한 천공 작업자의 숙련도에 따라 천공각도와 공간격이 일정하지 않은 경우가 많이 발생하며, 특히, 미굴이 우려되는 경우 굴착선 바깥에서부터 천공을 시작함으로써 과다 여굴의 직접적인 원인이 된다

### 3. 여굴 처리 유형별 안정성 검토

본 검토구간은 00터널 구간의 바닥부 여굴 처리구간으로 여굴 채움 시공 완료 후 바닥부의 균질한 지지력 확보여부를 확인하기 위하여 여굴 처리 유형별로 안정성 검토를 수행하였다. 본 구간은 해발 400~800m, 경사 30도 이상의 산악지대이며 화강암류가 분포하고 있고, 터널 천단에서 지표까지 75m에 이르는 깊은 심도를 가지고 있다. 해석단면은 무근 라이닝 구간 중 처침에 가장 불리한 단면을 선정하였고, 용수발생이 없는 일반 구간이므로 용수로 인한 영향은 배제하였다. 해석영역은 Fig. 1과 같이 경계조건에 대한 영향을 배제하기 위하여 수평 3D, 터널하부에서 수직구간 2D 만큼 간격을 두었고, 상부는 지표까지 모델링 하였다.

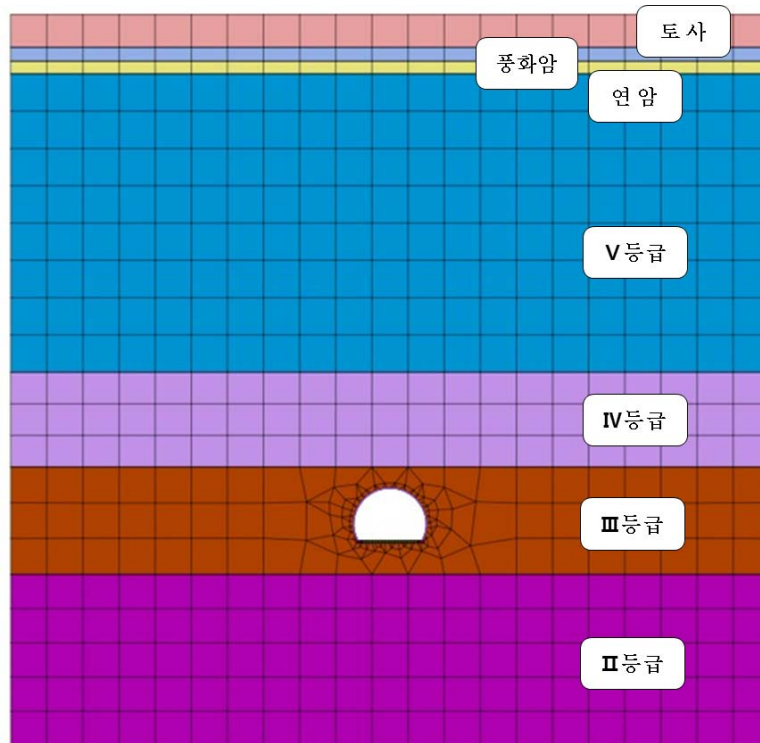


Fig. 1 해석 모델

터널 바닥 여굴부는 발파 직후 공사차량의 주행성등을 위해 버력을 활용한 잡석으로 채워져 있으나 궤도 시공 전 압착소를 수행하고 충분한 지지력을 갖는 재료로 치환하여야 한다. 현재 까지 여굴발생으로 인한 공간은 콘크리트 채움을 실시하였으나, 현재 터널연장이 길고, 여굴량이 많은 경우에 한하여 터널 바닥부에 콘크리트 채움이 아닌 다른 재료로 사용할 수 있는 것에 대한 검토가 실시 중에 있다.

이에 따라 다음과 같이 여굴 채움 재료 안정성 검토는 총 3가지 CASE를 수행하였다. CASE1은 기존에 사용해왔던 방법인 버림 콘크리트(18MPa)를 채운 후 궤도를 부설하는 방식이다. 그러나 현재 철도설계기준에는 터널 내 바닥부에 대한 지지력 및 품질기준이 따로 명시되어있지 않아 CASE2는 최소강도가 풍화암 이상의 일축압축강도를 가지도록 빈배합 콘크리트(5MPa)를 채운 후 궤도 직 하부 10cm는 버림 콘크리트(18MPa)를 채워 궤도를 부설하는 방식을 선정하였다. CASE3은 강화노반 부설방법과 동일하게 혼합골재를 포설하고 궤도 직 하부 10cm는 CASE2와 동일하게 버림 콘크리트(18MPa)로 부설하였다. 혼합골재에 사용된 물성은 강화노반에 사용

하는 재료의 물성을 동일하게 사용하였다.

해석프로그램은 MIDAS NX을 이용하였고, 사용된 지반물성은 Table 2에 정리하였다. 터널 바닥부 지반이 균질하고 연속성 있는 지반으로 가정하였다. 바닥부 시공이 완료된 상태를 모델링 하였으며, 열차 운행 중을 모사하기 위하여 보조도상 바닥부에 Fig. 2와 같이 열차하중 (KRL2012)을 작용시켜 바닥부에 발생하는 침하량을 검토하였다. 허용 침하량은 선로유지관리 지침[6] 고저틀림기준에 따라 3.0mm로 선정하였다.

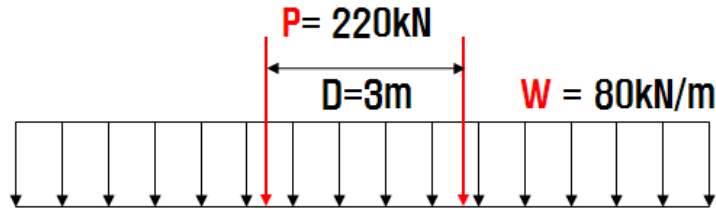


Fig. 2 KRL2012 표준휠하중

Table 2 지반 정수

구분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kPa)	내부마찰각	변형계수 (GPa)	포아송비	
토 사	18.0	5	27.0	0.01	0.35	
풍 화 암	22.0	100	33.0	0.45	0.30	
연 암	23.0	400	35.0	2.00	0.27	
기 반 암	Ⅱ등급	26.0	2500	43.0	14.00	0.22
	Ⅲ등급	25.0	1000	38.0	7.00	0.25
	Ⅳ등급	23.0	400	35.0	2.00	0.27
	Ⅴ등급	21.0	200	30.0	0.40	0.30
도상 콘크리트	24.5	-	-	267	0.18	
버림 콘크리트	24.5	-	-	267	0.3	
빈배합 콘크리트	20.0	-	-	0.564	0.3	
혼합골재	19.0	-	35	160	0.21	

터널의 역학적 안정성은 숏크리트 포설 후 거동이 발생하지 않는다면 구조적으로 안정성이 확보된 것으로 판단한다. 본 검토구간은 추가적인 안정성 확보를 위하여 라이닝을 시공하였고, 여굴을 채운 후 열차하중을 재하하였다.

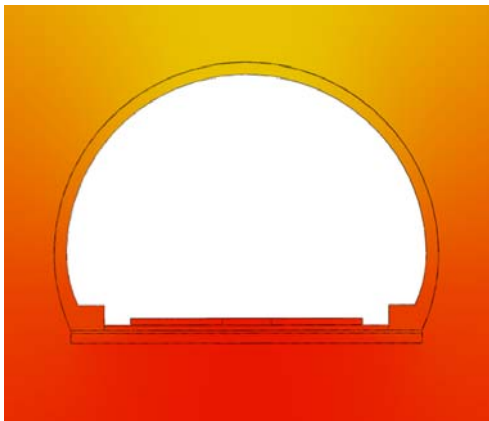
Table 3은 모든 CASE의 바닥부 처짐 해석결과와 응력결과를 나타낸 것이다.

CASE1은 Fig. 3과 같이 바닥부 선로의 처짐량은 2.11mm이고, 버림 콘크리트에서의 휨압축응력은 1.96MPa로 나타났다. 이는 선로유지관리 지침에 따라 3mm이내의 변위량을 보이고, 콘크리트의 허용 휨압축응력은  $5.04\text{MPa}(0.28f_{ck}(18\text{MPa})=f_{ca})$ 이므로 안정한 것으로 나타났다.

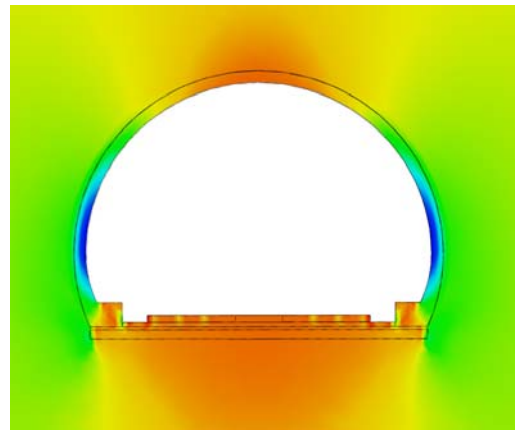
Table 3에서 보듯이 CASE2와 CASE3에서도 CASE 1과 비슷한 바닥부 처짐량과 버림 콘크리트에서의 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 여굴채움재로 사용한 빈배합 콘크리트와 혼합골재의 경우 압축강도 측면에서는 버림 콘크리트와 비교하여 차이가 매우 적으므로 정적 안정성이 확보되는 것으로 판단된다.

Table 3 CASE별 바닥부 응력과 변위

구분	바닥부 처짐량(mm)	버림 콘크리트 응력(MPa)
CASE1 (버림 콘크리트)	2.11	1.96
CASE2 (빈배합 콘크리트)	2.13	1.38
CASE3 (혼합골재)	2.2	1.07



(a) 터널 주변 변위 컨투어



(b) 터널 주변 응력 컨투어

Fig. 3 CASE1의 변위와 응력 컨투어

#### 4. 결 론

발파공법을 이용하여 터널을 굴착하게 되면 굴착 선에 여굴이 발생하게 된다. 여굴은 터널의 안정성 문제에 있어 중요한 고려사항이며, 공사비를 증가시키는 요인이다. 본 연구에서는 터널 굴착 시 발생하는 여굴을 효과적으로 채우기 위하여 여러 가지 채움 공법을 제안하고 수치 해석을 통하여 안정성을 분석하였다.

터널 바닥부 여굴구간은 채움재의 강도변화가 바닥부의 처짐과 콘크리트 응력에는 영향이 매우 적어 미소한 차이만 나타났으며, 혼합골재로 시공하는 경우에도 열차하중 재하시에 안정성이 확보되는 것으로 검토되었다. 이는 혼합골재의 경우 압축강도 측면에서는 콘크리트와 비슷한 강도를 가짐으로 본 구조해석에서는 안정성이 확보되는 것으로 나타났다.

그러나 터널 내부와 같이 닫힌 단면에서는 혼합골재를 통과한 열차진동하중이 터널과의 경계면에서 반사되어 증폭 되어 궤도면에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 추가적인 연구를 통하여 공진에 대한 안정성 검토가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] 이태노, 김동현, 서영화, “터널굴착면 여굴 최소화를 위한 발파암 분류(안) 및 공법 개발 연구”, 화약 • 발파, Vol 20, No3, pp. 25~38, 2002.
- [2] 이상돈, 김낙영, “여굴최소화를 위한 최적발파 패턴 설계방안에 관한 연구”, 제 18회 도로 기술 연구성과 발표회 논문집, 한국도로공사, pp. 71~109, 2001.
- [3] 김양균, 김형철, 유정훈, “터널발파 작업시 여굴 저감을 위한 천공방법 연구”, 화약발파, Vol 21, No2 pp1~13, 2003.
- [4] 김성욱, “터널 천공발파시 여굴원인 및 대책”, 도로공사 실패사례집, 한국도로공사, pp 391~394, 1999.
- [5] 김경훈, 임한욱, “터널 굴착시 천공 및 발파조건이 여굴의 크기에 미치는 영향”, 산업기술연구, Vol 24, B호 2004.
- [6] 한국철도시설공단, 선로유지관리지침, 2015