

# 기존터널의 대규모 공동 처리대책

유광호<sup>1\*</sup>, 박광준<sup>2</sup>, 임철순<sup>3</sup>

## A remedy measure for large cavities of an existing tunnel

Kwang-Ho You, Kwang-Joon Park, Chul-Soon Lim

**Abstract** During enlarging an existing tunnel under operation, unexpected excessive overbreaks and large cavities around the tunnel were found. It was an issue that they might influence the stability of the new tunnel. The overbreaks and cavities are assumed that they were attributed to excessive blasting under the condition of insufficient ground investigation. To enlarge the existing tunnel safely, therefore, a remedy measure for the overbreaks and cavities is suggested.

**Keywords:** Excessive overbreaks, large cavities, remedy measure for the overbreaks

**요 지** 운영 중에 있던 기존터널을 확폭하는 터널공사를 수행하던 중 기존터널 시공 시 생성된 것으로 추정되는 과대여굴 및 대규모 공동이 발견되어 신설터널의 안정성문제가 대두되었다. 이러한 과대여굴 및 공동의 형성 원인은 기존터널 시공 시 불충분한 지반조사 상태에서 과도한 발파시공으로 인해 형성된 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 기존터널을 안전하게 확폭하기 위한 과대여굴과 공동의 처리 대책을 제시하였다.

**주요어:** 과대여굴, 대규모 공동, 여굴 처리 대책

### 1. 서 론

경기도 가평군에 위치한 OO터널은 폭 5.8 m, 높이 4.27 m의 1차로 왕복터널로 1970년대 초 육군 공병대에 의해서 건설되어 30여 년간 운영 중에 있었으나, 안전진단 결과 라이닝 구조물에 손상이 심하고 누수가 많아 붕괴위험이 높은 것으로 평가되어 확공 신설토록 하였다. 신설터널은 폭 11.2 m, 높이 6.46 m의 2차로 왕복터널로 계획하여 확폭공사를 하던 중 터널 라이닝 배면에서 예기치 않았던 대규모의 공동이 다수 발견되어 이에 대한 영향평가와 처리대책이 필요하게 되었다.

이러한 과대여굴 및 공동의 형성 원인을 파악하기 위해 현장 절리면조사와 썸기파괴 가능성 분석 그리고 발파에 의한 암반 손상 영역 분석을 실시하였다. 신설터널 상부까지도 확장된 기존터널의 과대 여굴을 충진재로 뒷채움 할 경우 발생하는 문제점을 분석하기 위해 뒷채움재의 종류에 따른 신설터널 라이닝의 구조해석을 실시하였고, 과대 공동구간에 대해서는 뒷채움재의 2차 탈

락을 방지하기 위한 보강대책도 강구하였다. 그리고 최종적으로는 뒷채움재로 보강된 구간의 전체적인 터널 안정성 분석을 실시하여 뒷채움 보강효과를 검증토록 하였다.

따라서 본 연구는 기존의 노후된 터널을 철거하고 확폭하는 경우 신설터널의 안정성을 확보하기 위한 여굴 처리 방법과 대책을 제시하고 있으므로 유사한 경우에 좋은 참고가 될 것으로 생각된다.

### 2. 현장 상황 및 지반 조건

#### 2.1 여굴 현황조사

기존의 OO터널을 확폭 굴착하던 중 터널라이닝 배면에 뒷채움을 실시하지 않은 대규모의 여굴이 그림 1과 그림 2와 같이 다수 발견되었다. 조사에서 확인된 과대여굴의 발생위치와 규모는 그림 3과 같다. 특히, 시점갱구부로부터 150 m 지점에는 기존터널 라이닝 배면으로부터 높이 7 m에 이르는 최대 규모의 여굴(공동)이 존재하고 있었다. 이는 신설터널을 확공한 이후에도 약 5 m 정도의 여굴로 남아 있는 규모였다.

이러한 대규모 여굴은 주로 파쇄대 구간에서 확인되었는데, 이 구간의 절리 방향이 터널 주향과 10~20°의

<sup>1</sup>수원대학교 토목공학과 교수

<sup>2</sup>(주) 대정건설컨설팅 대표이사

<sup>3</sup>(주) 대정건설컨설팅 터널부 부장

\*교신저자: 유광호 (khyou@suwon.ac.kr)

각을 이루고 있어 천장부에서 썩기형 낙반이 발생하기 쉬웠던 것으로 판단된다. 일반적으로, 단층 파쇄대 구간은 개구된 절리면을 따라 지하수가 유입되고, 이때 지표의 세립점토가 지하수와 함께 스며들어 협재된 점토(gouge)상태로 존재하게 된다. 이와 같이 점토가 충전된 단층 파쇄대에 과도한 발파로 충격이 가해지면 절리는 더욱 벌어져서 암반의 균열이 확장되고 최종적으로는 낙반으로 이어졌을 것으로 추정된다.

터널 전 구간에 대한 여굴 및 낙반 상태에 대한 조사 결과, 8개 구간에서 여굴 또는 낙반이 발생한 것으로 나타났다. 그 위치와 연장은 표 1과 그림 3에 정리하였다(경기도 북부출장소, 1999).

## 2.2 지질상태

본 OO터널 구간의 지질은 대부분 변성암류인 용두리 편마암 복합체중의 마그마타이트질 석류석 편마암으로 이루어져 있으며 서측으로 일부 춘천 화강암인 흑운모 화강암이 관입되어 있다. 용두리 편마암 복합체 중 최하부를 이루는 마그마타이트질 석류석 편마암은 대체로 N30°~50°E의 주향과 50°~60°SE의 경사를 갖는 엽리면을 보인다(경기도 북부출장소, 1999).

이러한 절리의 방향은 터널주향과 10~20°의 각을 이루면서 터널 단면을 절단하고 있는 파쇄대를 형성하게 되었고, 절리면에서 썩기를 형성하고 있던 상부는 모두 낙석으로 떨어져 여굴의 높이가 터널 라이닝 면으로부

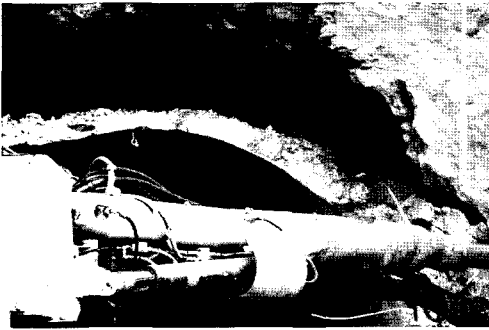


그림 1. OO터널 갱구부 여굴



그림 2. STA. 5+910 지점 여굴현황

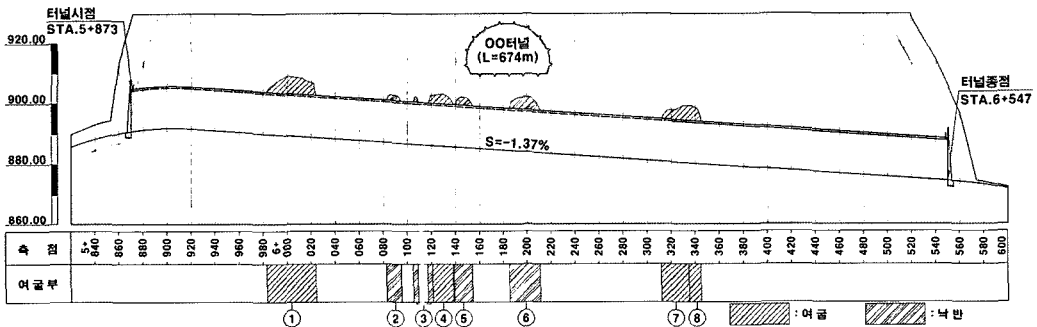


그림 3. 여굴 현황도

표 1. 여굴 발생 위치 및 연장

구 간	위 치	연장(m)	비 고	구 간	위 치	연장(m)	비 고
①	STA. 5+983~6+023	40	여 굴	⑤	STA. 6+139~6+154	15	낙 반
②	STA. 6+083~6+095	12	낙 반	⑥	STA. 6+185~6+211	26	낙 반
③	STA. 6+105~6+121	16	낙 반	⑦	STA. 6+312~6+326	14	여 굴
④	STA. 6+121~6+138	17	여 굴	⑧	STA. 6+326~6+345	19	여 굴



그림 4. OO터널 측벽부 절리면

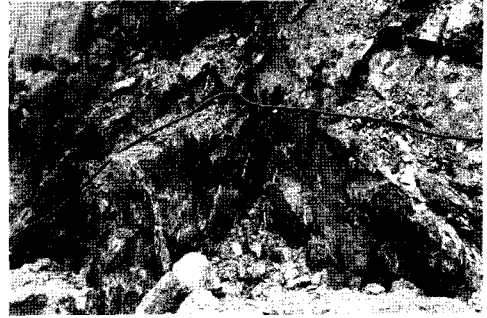


그림 5. OO터널 갱구부 절리면

터 3~7 m, 길이가 약 25 m에 달하는 대규모 여굴이 터널 좌측부분에 치우쳐져 형성되게 되었다.

본 OO터널 현장에서 확인된 그림 4와 그림 5에서 보는 바와 같은 지질상태를 요약하면 다음과 같다.

1) 부정합

의암 규암층과 그에 의해 부정합으로 덮이는 흑운모편암과의 관계로 규암층의 일반적 상태가 N60°E, 45°SE 입에 대하여 흑운모편암은 N86°E, 48°SE이거나, N70°E, 50°SE로서 상이한 방향성을 보이고 있다.

2) 단층

점토구간의 지층은 거의가 고각도 단층면을 가지며 파쇄대나 심한 습곡대를 가지고 있고 단층부근에서는 심한 미습곡축이 만들어졌고 N40°~60°E방향으로 경사진 등사습곡축을 볼 수 있다.

3) 습곡

변성암대에서 현저한 습곡구조가 발달하였다. 그 중 대습곡은 흑운모편암대내의 석회암층의 분포 및 석유석 흑운모편암과 전기석 석유석 우흑질 편마암과의 분포로 보아 배사와 경사구조를 볼 수 있다.

3. 기존터널의 발파영향 분석

3.1 개요

본 OO터널의 라이닝 상부 배면에 분포하는 대규모의 여굴은 주로 터널 굴착 시 과도한 발파에 의해서 형성된 것으로 판단되었다. 따라서, 기존터널 시공으로 발생한

여굴의 현황 및 지반조사 자료를 바탕으로 당시 사용된 장약량을 역추정하여 발파손상영역을 추정하였다. 이렇게 추정된 발파손상 영역을 분석하여, 기존터널의 손상영역이 신규 터널에 미치는 영향을 고려하여 안정성을 분석하였다.

기존터널 시공 시 발파로 인해 발생한 손상영역을 분석하기 위해서는 당시 사용된 화약의 제원, 굴진장, 장약량 및 지반조건과 같은 자료가 필요하나 현재 그 당시의 지반조사 자료나 시공 자료가 전혀 남아 있지 않아 시공시의 장약량 및 손상영역을 파악하는 데는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 현지 암반의 특성치와 유사한 지반 특성치를 갖고 있는 인근 현장의 시험발파 자료를 참고하였다.

3.2 장약량 산정

기존터널의 발파시 사용한 장약량은 누두지수함수를 고려한 식 (1)의 Hauser 공식(기경철과 김일중, 2002, pp. 33~40)을 이용하여 산정하였다. 이 식에서 발파계수 C는 발파 당시의 전색상태, 폭약위력, 암석항력계수에 대한 자료가 없으므로 경질의 화강암 값인 0.47로 가정하였다. 발파당시 과장약 상태였을 것으로 판단하여 n은 1.5의 값을 적용하였고, 누두지수함수는 일반적으로 많이 사용되고 실험적으로도 적합한 식 (2)의 Dambrun식(기경철과 김일중, 2002, pp.33~40)을 적용하였다. 굴진장과 최소저항선(W)은 모두 1.0 m로 가정하였다.

$$L = f(n) CW^3 \tag{1}$$

여기서,

L: 장약량

C: 발파계수  
W: 최소저항선

$$f(n) = (\sqrt{1+n^2} - 0.41)^2 \quad (2)$$

여기서,  
f(n): 누두지수함수  
n: 누두지수

이상과 같은 가정 하에서 기존터널의 발파 시 사용한 장약량을 계산한 결과, Megamite(50 mm×400 mm×1,000 g)화약 2개(2 kg)가 사용된 것으로 산정되었다.

### 3.3 암반손상영역 산정

암반손상영역은 식 (3)의 근거리 진동속도 모델식과 식 (4)의 변형률 손상 모델식에서 임계진동속도가 같아지는  $R_0$ 를 구하여 암반손상 영향 반경을 산정하였다(장수호 등, 2000).

$$V = kl^\alpha \left[ \int_0^H \frac{dx}{\{R_0^2 + (R_0 \tan \theta - x)^2\}^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha \quad (3)$$

여기서,  
k,  $\alpha$ ,  $\beta$ : 암반의 구조적특성 및 발파조건에 따라 달라지는 상수  
 $\theta$ : 장약공의 하부에서 측점을 바라보았을 때의 각도  
x: 장약공 하부에서 미소장약  $W_i$  까지의 거리 ( $W_i = ldx$ )  
l: 선형 장약량  
H: 장약 길이

$$V_d = 0.1 \times UCS \times \frac{V_p}{E} \quad (4)$$

여기서,  
UCS: 일축압축강도  
E: 탄성계수  
 $V_p$ : P파속도

근거리 진동속도 모델식과 변형률 손상 모델식에서 임계진동속도가 같아지는 암반손상 영향반경,  $R_0$ 를 구하기 위해 발파장약량은 2 kg을 적용하고, 발파 진동상

수 등은 유사현장의 측정 자료를 적용하여 추정한 결과, 기존터널의 외곽공에서 발파에 의한 암반손상 영향반경은 3.16 m로 산정되었다.

### 3.4 발파영향 분석 결과

인근지역의 유사현장에서 적용한 지반 및 발파조건을 가정을 통해 기존터널의 발파 시 암반손상영역을 검토한 결과 최대 3.16 m의 값이 산정되었다. 1970년대 우리나라 육군 공병대의 발파기술을 고려할 때 3.16 m 이상의 손상영역이 발생하였을 가능성도 배제할 수 없다.

기존터널의 발파에 의한 암반손상영역이 신설터널의 굴착단면보다 더 크게 산정되었을 뿐만 아니라 신설터널의 확폭 굴착 시에도 추가의 발파에 의해 암반손상영역이 확장되었기 때문에, 발파 이완영역에 대한 보강대책은 필히 이루어져야한다. 한편, 과장약 발파에 의해서 형성된 대규모의 여굴(공동)을 뒷채움하지 않고 그대로 방치할 경우, 이완된 암괴가 낙반하여 신설터널의 라이닝구조물을 손상시키게 되므로 구조물의 손상을 방지하기 위해서는 라이닝과 굴착면 사이의 여굴(공동)을 충전시키기 위한 대책이 필요하다.

따라서, 신설터널의 라이닝에 대한 구조계산 시에는 과장약 발파에 의한 암반손상영역의 이완허중과 대규모 공동의 뒷채움재 허중을 고려한 구조물 안정해석이 필요하다.

## 4. 과대여굴의 안정성 분석

### 4.1 개요

기존터널 라이닝 상부 배면에 분포하는 대규모 여굴에 대해서는 규모별로 안정성을 분석하여 각각에 대한 보강 여부를 결정하였다. 이러한 안정성 검토를 수행하기 위해 갱구부 사면 및 터널 내부에서 주요 불연속면군의 방향성을 조사하여, 터널굴착 시 형성될 수 있는 썩기의 기하학적 특성 및 썩기파괴의 가능성을 Unwedge 프로그램(Rocscience Inc., 1986)을 사용하여 분석하였다.

터널 천장부에서 발생하는 파괴는 대부분 불연속면을 따라 발생하는 썩기파괴가 지배적이다. 특히 천단(roof), 측벽(sidewall) 및 막장(face)에서 형성되는 썩기는 잠재적으로 불안정한 썩기로서, 사전에 썩기블록의 형상 및 안정성을 파악하는 것은 대단히 중요하다.

본 OO터널의 여굴 규모는 기존 터널 라이닝으로부터 최대 7 m 까지 나타났으며, 암반의 상태는 미세한 균열이 발생하였고, 풍화의 흔적이 있으며, 누수가 많은 상태임을 사전에 실시한 안전진단 자료를 통해 확인할 수 있었다.

### 4.2 썩기파괴 가능성 분석

본 연구에서는 터널 굴착 시 얻어진 지질조사자료에 기초하여, 터널굴착 시 형성될 수 있는 잠재적 썩기의 형상 및 안정성, 특히 천단부에 발생한 대규모 여굴의 발생 가능성을 평가하는 데 주목적이다.

분석에 적용된 터널단면은 폭 11.2 m의 변형된 마제형 단면으로 하였고, 터널 내부 및 갱구부 사면으로부터 조사된 3개의 대표 절리군의 방향성을 사용하여 기존터널과 신설 확폭터널의 경우에 대한 썩기파괴 가능성을 분석하였다. 특히 확폭터널의 경우는 무보강 구간과 지보재 보강구간으로 구분하여 각각의 경우에 대하여 안정성을 검토하였다.

### 4.3 분석 결과

기존터널의 무보강시 터널 천단에서의 최대 가능 썩기의 자중은 14.0 tonf이며, 안전율은 1.1, 정점높이는 2.0 m로 계산되어 터널의 안정성이 낮은 것으로 나타났다. 즉, 천단 썩기의 경우 안전율 1.1은 설계안전율 1.5 보다 작은 값이므로 썩기파괴가 발생할 수 있는 가능성을 내포한다. 터널 측벽의 경우는 불안정한 썩기가 형성되지 않았으며, 막장면에서도 파괴는 발생하지 않았다.

한편, 신설터널의 경우에는 폭을 11.2 m로 확폭하고 보강하지 않았을 경우 터널 천장에서 썩기파괴의 가능

성이 있는 것으로 나타났다. 신설터널에서 천단의 최대 가능 썩기의 자중은 68.0 tonf이며, 안전율은 0.8, 정점높이는 3.4 m로서 천단부에서의 썩기파괴가 일어날 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 측벽부나 막장부에서는 소규모 썩기가 형성되지만 터널의 안정성에는 큰 영향을 미치지 않는다. 신설터널을 지보재(숏크리트/록볼트)로 보강 시에는 천단부의 최대가능 썩기의 자중은 68.0 tonf 이며, 안전율이 4.7로 분석되어 썩기파괴에 대한 터널의 안정성이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 분석결과를 정리하면 표 2와 같다.

## 5. 여굴 보강대책

### 5.1 개요

터널 천장부 배면에 위치한 대규모 여굴을 뒷채움하지 않고 그대로 방치하게 되면 신설터널의 라이닝 배면에 낙반이 발생하여 구조물에 손상을 입히거나, 지하수 유입으로 상부지반의 풍화 등 터널주변 지반을 약화시켜 터널의 안정에 위해를 입힐 가능성이 크므로 뒷채움과 보강대책공법의 적용이 필요하다.

과장약 발파에 의해서 발생된 과대여굴은 암질, 암의 갈라진 틈, 굴착방식 등에 따라 규모, 발생위치, 누수상황 등이 다를 수 있으므로 이를 고려하여 그 보강대책을 수립하였다.

### 5.2 여굴 처리대책

#### 5.2.1 소규모 여굴

소규모 여굴(3 m<sup>3</sup> 이하)은 숏크리트만으로 충전토록 계획하였다. 협소한 여굴에서는 굳은 숏크리트가 아치

표 2. 썩기파괴 분석결과

위 치	기존터널 무보강시			신설터널 무보강시			신설터널 지보재 보강시		
	정점높이 (m)	안전율 (FS)	썩기무게 (tonf)	정점높이 (m)	안전율 (FS)	썩기무게 (tonf)	정점높이 (m)	안전율 (FS)	썩기무게 (tonf)
좌측하부 썩기	0.1	582.3	0.1	0.3	285.5	0.3	0.3	4267.3	0.3
천단부 썩기	2.0	1.1	14.0	3.4	0.8	68.0	3.4	4.6	68.0
좌측상부 썩기	0.2	27.5	0.1	0.4	15.7	0.5	0.4	212.0	0.5
우측하부 썩기	0.1	50.7	0.1	0.3	24.3	0.3	0.3	402.0	0.3
바닥부 썩기	3.9	stable	94.0	6.2	stable	367.0	6.2	stable	367.0
우측상부 썩기	0.2	52.6	0.1	0.3	28.9	0.3	0.3	582.7	0.3

작용을 하여 구조물을 안정시키게 되므로 암반의 균열이 적고 슛크리트 중량이 라이닝에 하중으로 작용할 가능성이 적은 경우에 취할 수 있는 방법이다.

### 5.2.2 대규모 여굴

대규모 여굴(3 m<sup>3</sup> 이상)에 대해서는 슛크리트 충전 만으로는 보강에 한계가 있기 때문에 표 3에 제시된 바와 같이 지보재 시공순서, 여굴 위치 등을 고려하여 적절한 대책을 적용하였다(박광준 등, 2001).

### 5.2.3 뒤채움 재료 검토

터널 천장부에 발달한 대규모 여굴에 일반적인 슛크리트로 뒤채움을 실시하였을 경우에는 신설터널 라이닝에 사하중으로 작용하게 되어 구조물의 안정성을 저해하게 된다. 따라서 뒤채움 재료의 적용성을 분석하기 위하여 표 4에 제시한 뒤채움재의 종류별 특성을 비교 검토하였다. 검토결과, 뒷채움재로는 시공성과 경제성에서 탁월하고 라이닝에 하중을 적게 주는 경량기포 콘크리트를 결정하였다.

표 3. 여굴 뒤채움 시공방법

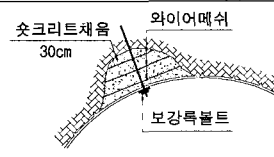
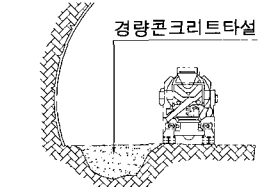
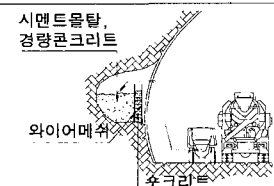
구 분	개 요 도	개 요 및 적 용 성
지보재 시공 전 뒤채움 시공		<ul style="list-style-type: none"> <li>터널의 지보공은 굴착 이후 발포로 인해 약해진 암반의 안정을 위하여 슛크리트와 병행하여 시공</li> <li>연약구간의 여굴규모가 크고, 여굴을 형성하고 있는 지반상태가 불량하여 슛크리트의 부착이 용이치 않으며, 부착강도가 약해지면 자칫 구조물에 하중으로 작용하게 됨</li> </ul>
지보재 상부 레미콘 타설		<ul style="list-style-type: none"> <li>지보재 보강을 위해 지보재 상부에 강봉과 와이어메쉬를 설치하고 레미콘을 타설하는 방법</li> <li>레미콘 타설이 한 번에 이루어질 수 없고, 양생 후 여러 번 시공을 해야 하는 점과, 양생이 이루어지기 전까지는 레미콘의 자중을 지지하기 위한 별도구조물 필요</li> </ul>
지보재 보강 후 뒤채움 시공		<ul style="list-style-type: none"> <li>뒤채움 시공 전 지보재로 사용되는 강지보재 사이에 종방향 철근 배치하고 와이어메쉬로 보강한 후 슛크리트 시공</li> <li>라이닝이 시공 전 지보공의 일시적인 라이닝 역할</li> <li>여굴이 대규모로 발생된 연약구간에서 낙반으로 인한 안전사고 예방</li> </ul>

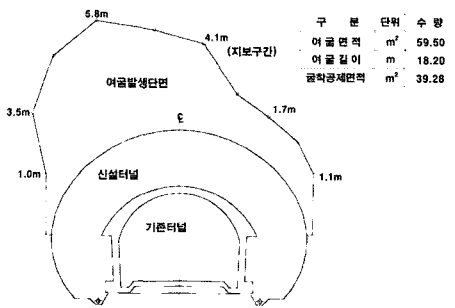
표 4. 뒤채움재의 특성 비교

구 분	스�크리트	경량기포 콘크리트	발포우레탄
개 요	<ul style="list-style-type: none"> <li>강섬유 슛크리트를 공동부에 일정두께로 단계별 타설하는 공법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시멘트모르타르에 기포재(스티로폼볼)를 혼합하여 주입하는 공법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>두가지 약액을 혼합하여 발포 및 고결에 의해 공동을 채우는 공법</li> </ul>
장 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>시공속련도가 높다.</li> <li>기존의 시공장비를 이용 할 수 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>라이닝의 하중부담 적다.</li> <li>부착성과 유동성이 크다.</li> <li>타 공법에 비해 경제적이다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>라이닝의 하중부담 적다.</li> <li>누수구간의 작업이 가능</li> <li>현장상황에 따른 제품 변형이 가능하다.</li> </ul>
단 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>라이닝에 하중부담이 크다.</li> <li>시공두께에 한정이 있다.</li> <li>공사기간이 길다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>배합비 관리에 숙련공이 필요하다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>발포제 전문가가 필요</li> <li>공사비가 비싸다.</li> <li>시공 후 발포제 수축우려</li> <li>흡수로 인한 자중 증가</li> </ul>
주재료	<ul style="list-style-type: none"> <li>시멘트, 모래, 자갈, 혼화재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시멘트, 모래, 기포재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고분자 우레탄</li> </ul>
단위중량	2.4 tonf/m <sup>3</sup>	1.0 tonf/m <sup>3</sup>	0.035 tonf/m <sup>3</sup>

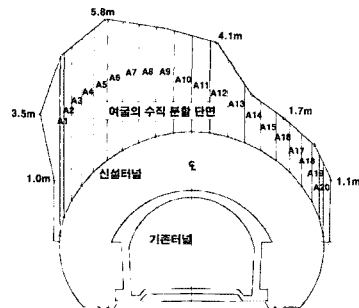
### 5.3 여굴 상세 보강대책

대규모 여굴구간의 뒤편채움재 주입 시에는 굴착면과의 접촉 불량 또는 시공 불량 등으로 인하여 충진된 재료가 이탈할 가능성이 많으므로 안전한 충진을 위해서는 사전에 견고한 터널 지보재의 설치가 필수불가결한 사항이다. 따라서 터널 지보 패턴별로 지보재 보강계획을 달리하였는데, 강지보재가 적용된 구간(Type 4, 5, 6)에는 와이어메쉬 설치 후 슛크리트를 타설하여 보호막을 만들었고, 강지보재가 설치되지 않은 구간(Type 1, 2, 3)에는 철근과 와이어메쉬 설치 후 슛크리트를 타설하여 보호막을 만든 후 경량기포 콘크리트를 주입토록 하였다.

구간별 보강 계획은 표 5와 같이 구분하여 적용하였다.



(a) 해석단면 개요도



(b) 여굴 채움재로의 면적분할

그림 6. 연직하중 작용도

표 5. 보강재 적용종류별 보강대책

구 간	무지보 보강구간	강지보재 보강구간
	여굴(공동)위치: ② ③ ⑥	여굴(공동)위치: ① ④ ⑤ ⑦ ⑧
적 용 개요도		
작 업 순 서	<ol style="list-style-type: none"> <li>지보재 보강                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 보강철근 설치(C.T.C 1.0 m(중)/0.3 m(횡))</li> <li>- 와이어메쉬 및 주입 검사공 설치</li> <li>- 강섬유 슛크리트 타설</li> </ul> </li> <li>여굴부 경량기포 그라우팅</li> <li>방수 및 라이닝철근콘크리트 타설</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>지보재 보강                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 강지보재 설치(C.T.C 1.5 m(중)/0.3 m(횡))</li> <li>- 와이어메쉬 및 주입, 검사공 설치</li> <li>- 강섬유 슛크리트 타설</li> </ul> </li> <li>여굴부 경량기포 그라우팅</li> <li>방수 및 라이닝철근콘크리트 타설</li> </ol>

따라서 본 해석에서는 여굴 채움재료의 연직하중을 고려하기 위해 그림 6과 같이 연직방향으로 여굴 면적을 분할하여 단위 폭 당 작용하는 자중으로 적용하였다.

각 뒤채움 재료별 허용응력을 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL(MIDAS Information Technology Co. Ltd., 1989)로 검토한 결과, 표 6에 보인 바와 같이, 천단부에서 숏크리트를 뒤채움재로 사용한 경우에만 인장응력이 발생하며 허용치를 초과하는 것으로 나타났고, 경량기포콘크리트나 발포우레탄 등의 뒤채움재는 구조적으로 안정한 것으로 검토되었다. 따라서, 뒤채움재의 경제성 및 시공성을 고려하여 경량기포 콘크리트를 적용

하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

## 7. 터널의 안정성 분석

### 7.1 개요

터널 배면의 공동(여굴)을 뒤채움 시공하였을 경우, 터널의 안정성이 확보되는지를 검토하기 위하여 FLAC-2D 프로그램(Itasca Consulting Group, Inc., 2000)을 이용하여 시공단계별 및 시공완료 후 최종단계의 터널 안정성을 검토하였다.

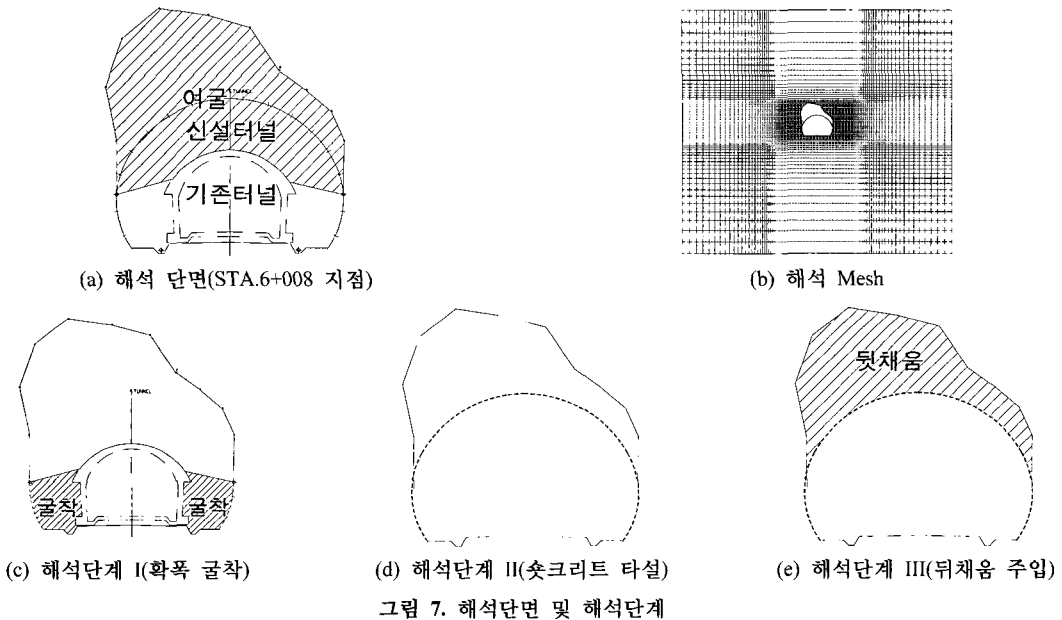


표 6. 뒤채움재의 영향 검토 결과

구 분	$f_{ca} = 8.24(\text{MPa})$		$f_{ta} = -0.60(\text{MPa})$		$V_a = 355(\text{kPa})$		
	$f_{\max}(\text{MPa})$	판단	$f_{\min}(\text{MPa})$	판단	$V(\text{kPa})$	판단	
숏크리트 이용 뒤채움	천단부	4.36	O.K	-1.32	N.G	206.92	O.K
	아치부	2.81	O.K	1.70	O.K	68.65	O.K
	측벽부	2.79	O.K	1.03	O.K	71.59	O.K
경량콘크리트 이용 뒤채움	천단부	1.96	O.K	-0.58	O.K	93.16	O.K
	아치부	1.29	O.K	0.78	O.K	32.36	O.K
	측벽부	1.37	O.K	0.48	O.K	39.23	O.K
발포우레탄 이용 뒤채움	천단부	0.43	O.K	-0.10	O.K	19.61	O.K
	아치부	0.37	O.K	0.20	O.K	9.8	O.K
	측벽부	0.47	O.K	0.13	O.K	18.63	O.K



### 7.2 해석조건

해석위치는 터널 내 여굴이 가장 크게 발생하여 구조적으로 불안정한 것으로 판단되는 구간을 대표단면으로 선정하였다. 해석 영역은 경계조건이 영향을 미치지 않을 만큼 넓게 메쉬를 구성하였으며, 해석단계는 그림 7과 같이, 신설터널을 확폭 굴착하고 슛크리트를 타설한 후 뒤채움재를 충전하는 3단계로 구성하였다.

### 7.3 입력 지반 특성치

터널단면의 안정성 검토에 적용한 연암층의 특성치는 시추조사에 나타난 RQD값 등을 고려하여 변형 및 강도 특성치를 표 7과 같이 결정하였다. 지보재의 입력 특성치는 표 8과 같다.

### 7.4 해석 결과

여굴이 확폭된 해석단계 I에서는 표 9에서 보는 바와 같이 천단부 변위는 거의 발생하지 않았으나, 바닥부 및 좌·우측부는 유사한 크기의 변위가 발생하였다. 여굴이 남아있는 상태에서 슛크리트를 타설한 해석단계 II에서 좌·우측부의 변위가 최대 5.0 mm, 3.7 mm 발생하였으며, 최종적으로 뒤채움재를 충전한 해석단계 III에서의 천단변위는 4.5 mm 발생하여 변위발생 정도가 크지 않으므로 안정하다고 판단된다.

스�크리트의 휨압축응력은 그림 8에서와 같이 좌·우측 자유단 시작부분에서 크게 발생하며 좌측자유단 시작부분에서 최대치가 발생한다. 슛크리트의 휨압축응력은 뒤채움재 주입 후 3.37 MPa로 가장 크게 발생하였으나, 슛크리트의 허용 휨압축응력 8.24 MPa를 넘지 않아 안정한 것으로 판단된다.

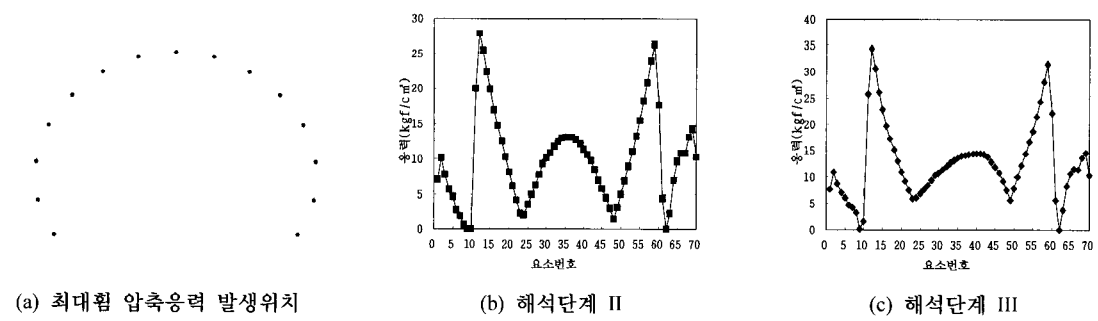


그림 8. 해석단계별 부재응력 분포도

표 7. 적용 지반 특성치

구 분	단위중량(tonf/m <sup>3</sup> )	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	변형계수(GPa)	포아송비
연암	2.60	490.33	35	2.36	0.27

표 8. 지보재 특성치

구 분	단위중량(tonf/m <sup>3</sup> )	변형계수(GPa)	설계기준강도(MPa)
스�크리트	2.40	14.71	f <sub>tk</sub> =20.59

표 9. 해석단계별 최대변위

(단위: mm)

해석단계	I (확폭 시)	II (스�크리트 타설 시)	III (뒤채움 주입 시)
천단부	0.0	0.0	-4.5
바닥부	0.8	0.9	0.8
좌측부	0.6	5.0	4.9
우측부	0.7	3.7	3.6

## 8. 결 론

OO터널 확폭공사 시 발견된 기존 터널의 과대여굴에 대한 처리방안을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존터널의 시공시 발파로 인한 암반 손상영역은 3.16 m 정도로 추정되었다. 이러한 추정치는 본 현장과 유사한 지반특성을 갖는 인근현장의 시험발파 자료와 1970년대 우리나라 육군 공병대의 발파 기술을 감안하여 산정한 것이다. 참고로 기존터널의 여굴조사 확인된 대부분의 과대여굴의 규모는 터널 천장으로부터 3-7 m 높기로 확인되었다.
2. 대규모의 과대여굴은 대부분 파쇄대 구간에서 확인되었는데, 이 절리군의 주향은 터널 축방향과 10~20°의 경사를 보이고 있어 썩기형 파괴의 가능성이 높은 것으로 나타났다. 대규모 여굴 구간에 대한 썩기파괴에 의한 안정성 분석 결과, 무보강시에는 천단부에서 썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 검토되었다. 그러나, 슛크리트나 록볼트에 의한 지보재 보강 시에는 모든 썩기파괴에 대해서 안전한 것으로 검토되었다.
3. 과대 여굴의 뒤채움 주입재의 특성에 따른 터널 라이닝의 안정성을 검토한 결과, 경제성과 시공성 측면에서 경량기포 콘크리트가 양호한 것으로 나타

났다. 슛크리트로 여굴을 뒤채움하는 경우에는 천단부에서 인장응력이 허용치를 초과하는 것으로 검토되어 부적합한 것으로 검토되었다.

4. 터널의 지보패턴에 따라 강지보재가 시공된 구간과 그렇지 않은 구간으로 구분하여 상세한 보강대책 및 뒤채움재 충전방안을 제시하였고, 각각의 경우에 대한 터널 안정성 분석을 실시하여 그 적합성 여부를 검증하였다.

## 참고문헌

1. 경기도 북부출장소 (1999), "OO~OO간(지방도 341호선) 도로확·포장공사 실시설계 토질조사보고서".
2. 기경철, 김일중 (2002), 산·학인을 위한 발파공학, 동화기술, pp. 478.
3. 박광준, 최덕찬, 양문상 (2001), "석회암 공동지역에서의 터널시공", 한국지반공학회 터널기술위원회, 학술세미나, pp. 64-89.
4. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인 (2000), "발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 129-140.
5. Itasca Consulting Group, Inc. (2000), FLAC 2D User's Guide, Version 4.0.
6. MIDAS Information Technology Co. Ltd. (1989), MIDAS CIVIL Structural Engineering System, Version 5.8.
7. Rocscience Inc. (1986), Unwedge Tutorials, Version 2.36.



유 광 호

수원대학교  
토목공학과  
교수

E-mail: khyou@suwon.ac.kr



박 광 준

(주) 대정컨설턴트  
대표이사

E-mail: kjoon@djenc.co.kr



임 철 순

(주) 대정컨설턴트  
터널부  
부장

E-mail: limsoil@djenc.co.kr