

발파소음 저감을 위한 터널의 일방향 굴진사례

채희문^{1)*}, 김용준²⁾, 김선기³⁾, 김주화⁴⁾

Tunnel Excavation in One Direction to reduce Blasting Noise

Hee-Moon Chae, Yong-Jun Kim, Sun-Ki Kim and Chu-Hwa Kim

1. 서 론

터널의 굴진계획은 일반적으로 굴진효율의 극대화를 위해 양방향 굴착을 기본개념으로 채택하고 있다. 하지만 지형, 민원, 작업 불가능 등의 사유에 의해 계획과는 달리 양방향 굴착의 어려움이 발생하는 경우가 종종 발생한다. 장대터널에 있어서의 일방향 굴착은 많은 시간과 경비를 요하는 고려하기 힘든 방법일 수 있으나, 그 연장이 짧은 터널의 경우에는 양방향굴진 시 추가되는 중점부의 갱구 가시설, 공사용 가도 설치 등의 작업을 고려할 때 일방향 굴착이 무조건 불리하다고는 말할 수 없다.

2. 일방향 굴진 개요

2.1 지형 및 지질

본 터널의 위치는 경기도와 충청북도의 경계를 이루는 차령산맥 북서쪽 기슭에 위치하고 있고 모암은 호상편마암이 주종을 이루고 있으며 일부 흑운모 편마암이 분포하는 지질을 보이고 있다. 지질구조는 3가지 정도의 대표적인 절리군이 존재하며, 이중 편리면을 따르는 불연속면이 우세하게 발달하여 있다.

2.2 일방향 굴진 배경

본 터널은 안성-음성간 고속도로 건설공사 6공구의 금광1 터널로 안성방향과 음성방향의 연장은 각각 380 m, 369 m인 비교적 그 연장이 짧은 쌍굴 터널이다.

당초계획에서는 지질특성 파악 및 발파로 인한 발파공해 영향권 분석을 통하여 보원물건의 위치 및 종류를 확인하고 민원제기의 가능성을 줄이기 위한 지발당 장약량 조절, 갱구부의 방음시설, 비산방지방안 등의 다각적인 검토를 통해 양방향 굴진을 계획하였다(Fig. 1. 참조).

하지만 선행되어진 시점부 발파 작업 시 약 400 m 이격된 주거지에 대한 민원이 제기 된 바 있었으며, 이를 통해 발파소음을 실측한 결과 소음규제 기준인 75 dB(A)에는 못 미치지만 비교적 높은 수준인 73 dB(A)이 기록되기도 하였다.

중점부의 경우는 Fig. 2.에서 볼 수 있는 바와 같이 갱구부로부터 230 m 정도 떨어진 곳에 축사와 민가가 위치하며, 169 m 이격된 거리에 정온시설(사찰)이 존재하고 있어 시점부에 비해 발파에 대한 민원 부담이 더욱 커진 상황이었다.

실제 민원발생은 수치상으로 표현되는 부분보다는 민원인의 실제피해 사례(실제 법적인 수치에 못 미치는 경우에 발생하는 가축의 유산, 사산)가 빈번한 공사 중단 등의 요인이 될 수 있다.

따라서 본 시공에서는 중점부 토공부분을 그대로 남겨둔 채 일방향으로 NATM 중점부 까지 굴착해 나아가는 방법을 통해 중점부에 미 굴착된 자연지반을 방음벽으로 활용할 수 있는 계획안에 대한 검토를 수행하였다.

3. 발파소음 저감계획

벽에 의한 음의 투과손실은 저주파 영역에서는 벽의 강성(Stiffness)에 의해 투과 손실이 지배되고, 벽의 공진 주파수 부근에서는 벽의 감쇠(Damping)에 의해 결정된다. 공진 주파수 이상의 주파수에서는 벽의 질량(Mass)에 의해서 투과손실이 결정되는데 이 영역을 질량 법칙(Mass Law)이 지배하는 영역(Mass Controlled Region)이라 한다.

¹⁾ 대림산업(주) 기술연구소 토목설계지원팀 사원
²⁾ 정회원, 대림산업(주) 토목사업본부 토목사업부 과장
³⁾ 정회원, 대림산업(주) 토목사업본부 토목사업부 부장
⁴⁾ 정회원, 대림산업(주) 토목사업본부 본부장
* 교신저자 : hmchae@daelim.co.kr
접수일 : 2005년 7월 29일
심사 완료일 : 2005년 9월 22일

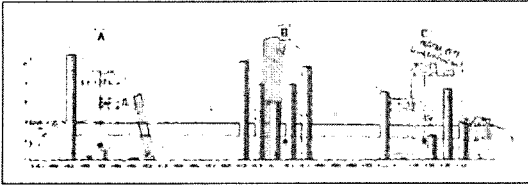


Fig. 1. 터널계획구간의 지질예측

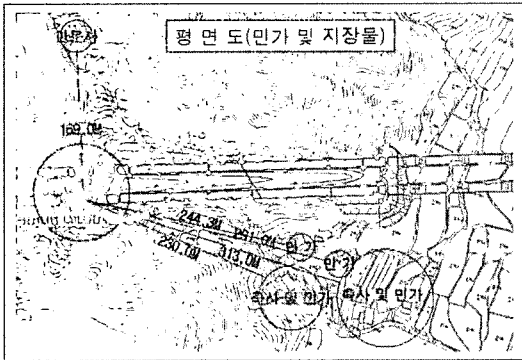


Fig. 2. 터널 종점부에 위치한 발파영향 지역

이러한 질량법칙의 영역에서의 투과손실(TL: Transmission Loss)은 주파수나 벽의 표면 밀도(ρ)가 2배로 증가함에 따라 약 6 dB씩 증가한다.

$$TL = 20 \log(f) + 20 \log(\rho) - c \text{ (dB)}$$

$$TL = 20 \log(f \cdot \rho) - c \text{ (dB)}$$

여기서, TL : 투과손실 (dB)

f : 주파수 (Hz)

ρ : 벽의 표면 밀도 (kg/m^2)

c : 입사파의 형태에 따른 상수 (43)

즉, 음파의 투과손실은 벽체의 면밀도와 주파수의 곱에 비례하므로 발파 시 보편적으로 발생하는 250Hz의 음파가 면밀도 10 kg/m^2 (밀도 2.0 kg/m^3 방벽두께 1 m)에 수직 입사할 경우 약 10 dB의 소음감소 효과가 있을 것으로 예상할 수 있다.

본 터널의 굴착은 터널 갱구부 토공부분의 굴착을 미시행한 상태에서 발파를 수행하도록 계획하였으므로 방벽두께가 100 m 이상 (50 dB 이상의 소음감소 효과)이 되어 지반자체가 훌륭한 방음벽 효과를 나타낼 수 있을 것으로 예상되었다.

4. 일방향 굴진 계획

4.1 관통부의 응력상태

터널을 굴착하게 되면 굴착이전 정역학적인 평형상태로 작용하고 있는 초기응력이 교란되어 2차 응력으로 변화하게 되며, 동시에 굴착부에서는 변형을 일으키게 된다.

일반적으로 굴진면 전방은 굴진면 코아부로 인해 대부분 종방향 아치가 형성되며, 굴진면에서 후방으로 멀어질수록 종방향 아칭작용은 점차 사라지게 되어 결국 횡방향 아치만 남게되는 경향을 보인다.1)

또한 지보재가 설치되고 굴착이 진행됨에 따라, 이전 굴진면 위치에서 종방향 아칭에 의해 지지되었던 응력은 이전 굴진면 위치에 설치된 지보재에 압력으로 다시 작용함에 따라 종방향 아칭현상은 지보재에 가해지는 내압의 작용원리가 되기도 한다.2-3)

따라서 본 터널의 일방향 관통은 위와 같은 종방향 아칭특성을 고려할 때 연성지보 보다는 강성이 큰 지보재의 적용이 중점관통부의 단면안정에 더 효과적일 것이라 판단되었다.

4.2 중점부의 관통계획 및 시공

설계시 터널 관통부의 결정은 일반적으로 터널 연장 구간 중 암질이 가장 양호한 구간으로 계획된다. 하지만 일방향 굴착에 있어서 본 터널의 중점부는 최대 토 피고가 약 4.9 m 밖에 되지 않는 특징을 보이고 있었으며 관통에 따른 응력 해방 시 응력-변형 관계에 있어 매우 불리한 상태가 될 것으로 예상되었다(Fig. 3. 참고).

따라서 중점부 토공을 미시행한 상태에서 NATM 중점부 까지 강관다단 그라우팅 및 Fore poling을 적극적으로 적용하고 강지보재의 간격을 0.6 m로 적용하여 내공변위를 안정시키는 방법을 선택하였다(Fig. 4. 참고).

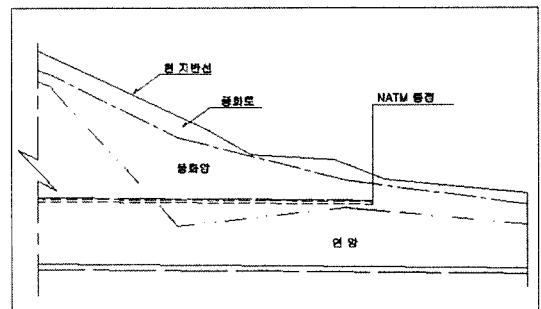


Fig. 3. 터널 관통부의 지질현황

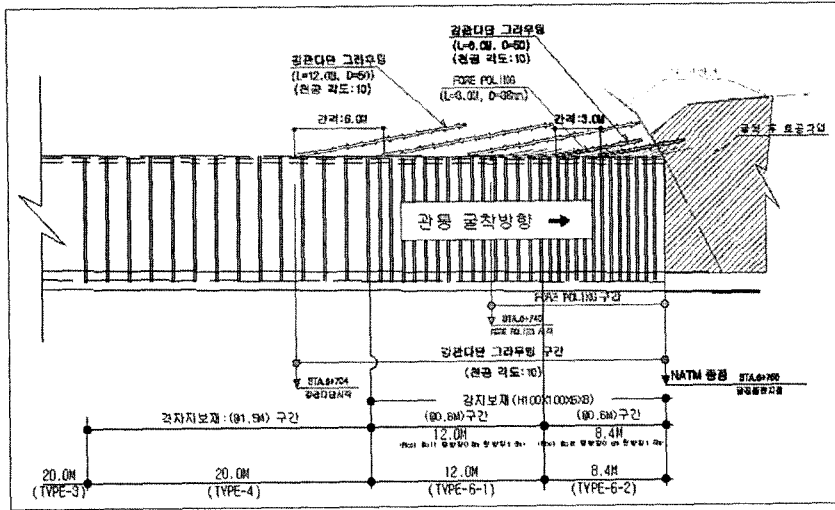


Fig. 4. 터널 종점부의 관통계획

종점부 굴착방법으로는 지층상태가 불량할 것으로 예상되었던 마지막 8.4m 구간에 심베기 개념의 소할발파를 이용하여 자유면을 확보한 후 기계굴착을 통하여 터널 상·하반을 굴착해 나가도록 계획하였다.

상기 계획대로 시공은 진행되었으며 NATM종점까지의 굴착 및 보강을 완료한 후 종점 부에서 사면을 조심스럽게 보강하며 절취하여 터널을 관통 시켰다. 터널의

갱구부에서는 응력개방에 따른 불안의 요인을 제거하기 위해 시점방향으로 강관단면 그라우팅을 실시하였으며, 기계굴착 및 미진동파쇄를 병행하여 진동에 의한 갱구 부 붕괴방지를 위해 노력하였다.

갱구부 관통 및 보강과정은 Table 1.에 정리하였으며 종점부 토공에 의해 발생한 토사는 관통된 터널을 이용하여 운반 및 사토하였다.

Table. 1. 터널의 일방향 관통과정

단계	시공 개요도	시공사진
1 단계	<p>NATM 8층 STA. 6+765.00</p> <p>20.0m (TYPE-3)</p> <p>20.0m (TYPE-4)</p> <p>터널내부 상·하반 분할굴착 및 보강 (터널의 굴착 및 보강 종료 시 까지 종점부 토공 미시행)</p>	
	<p>NATM 8층 STA. 6+760.00</p> <p>20.0m (TYPE-4)</p> <p>20.0m (TYPE-5)</p> <p>터널 상부 절취 및 상부 사면보조공 (갱구사면 S/N, S/C)</p>	
2 단계	<p>NATM 8층 STA. 6+750.00</p> <p>20.0m (TYPE-4)</p> <p>20.0m (TYPE-5)</p> <p>터널 상부 절취 및 상부 사면보조공 (갱구사면 S/N, S/C)</p>	
	<p>NATM 8층 STA. 6+740.00</p> <p>20.0m (TYPE-4)</p> <p>20.0m (TYPE-5)</p> <p>종점부 토공작업 및 사면보강 갱구부 굴착 및 갱구사면 보강 (S/N, R/B, S/C)</p>	
3 단계	<p>NATM 8층 STA. 6+730.00</p> <p>20.0m (TYPE-4)</p> <p>20.0m (TYPE-5)</p> <p>종점부 토공작업 및 사면보강 갱구부 굴착 및 갱구사면 보강 (S/N, R/B, S/C)</p>	
	<p>NATM 8층 STA. 6+720.00</p> <p>20.0m (TYPE-4)</p> <p>20.0m (TYPE-5)</p> <p>종점부 토공작업 및 사면보강 갱구부 굴착 및 갱구사면 보강 (S/N, R/B, S/C)</p>	

4.3 종점부 터널의 내공변위 계측

당 현장의 계측관리기준 및 계측위치는 Table. 2 및 Fig. 5.에 나타난 바와 같이 한국도로공사기준 및 Franklin관리기준을 적용하였으며 5개소의 측점을 대상으로 그 변위를 관리하였다.

터널(STA. 6+483 ~ STA. 6+765)에서 측정된 6개소의 내공변위 및 천단침하 정도를 살펴보면 굴착의 진행에 따른 변위의 증감은 있었으나 모두 안정측으로 수렴하는 결과를 보였으며, 0.6m 간격의 강지보로 보강된 종점부의 최후 막장(STA. 6+765)에서는 Fig. 6.에서 볼 수 있는 것과 같이 누적최대변위가 좌측상반에서 사선 방향으로 -4.16 mm 발생하였으나 이는 관리기준 치(40 mm)로 볼 때 매우 안전측에 속하며 수렴되는 결과를 보였다.4)

5. 결 론

금광1터널 일방향 굴진의 시공사례를 통해 얻게 된 결론은 다음과 같다.

Table. 2. 터널의 내공변위 계측기준

계측기명	Type-1	Type-2	Type-3	Type-4~6	관리방법
내공 변위	5 mm	15 mm	30 mm	40 mm	변위량이 관리기준치에 초과할 때 보고
천단 침하	15 mm				변위량이 관리기준치에 초과할 때 보고
지중 변위	10 mm				변위 Graph가 불규칙할 때 보고
R/B 축력	8.9 ton				변위량이 관리기준치에 근접할 때 보고
S/C 응력	84 kg/cm ²				변위량이 관리기준치에 근접할 때 보고

관리등급	범위	조치사항
레벨1	안정	예상변위×0.8 이하
	주의	예상변위×0.8 이하~1.2
레벨2	위험	예상변위×1.2 이상
		<ul style="list-style-type: none"> * 이상적인 계측수행 * 계측 측정 및 빈도증가 * 이상원인 분석 및 보고 * 추가보강 및 보조공법 적용검토 * 필요시 시공법 수정

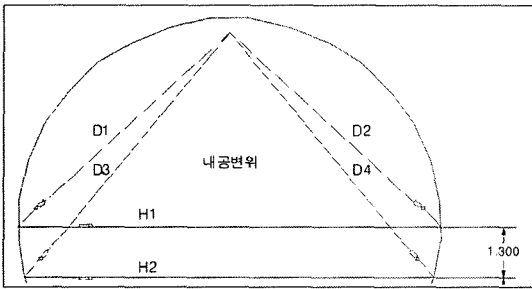


Fig. 5. 터널 단면 내의 계측 위치

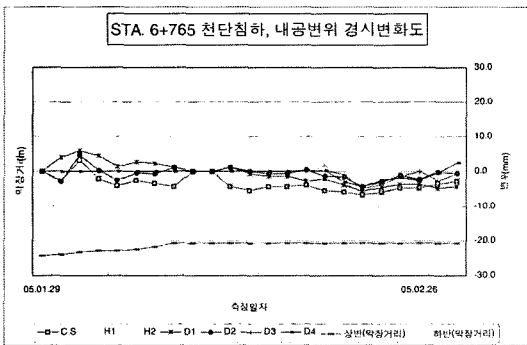


Fig. 6. 터널 종점부의 변위 계측결과

1. 당초 일방향 관통의 계기가 되었던 주변의 물건에 대하여 발파진동 및 소음에 대한 계측을 수행한 결과는 다음과 같다.
 압실이 가장 좋은 종점부(지발당 최대장약량 7.5 kg)에서 풍화암층이 얇게 분포하고 있는 종점부(지발당 최대장약량 1 kg)에 이르기 까지 계측을 수행

한 결과 이격거리가 169 m로 보원물건 중 가장 가까운 곳에 위치하고 있는 한운사에서 최대 진동치는 0.06 kine(문화재 기준 : 0.2 kine), 소음 치는 60 dB(소음규제기준 : 75 dB)로 계측되어 관련 기준을 만족하였을 뿐만 아니라 현장에서 실시한 주민 설문조사 결과 굴착기간 동안 일상생활에서 소음과 진동을 거의 느끼지 못했다는 답변이 대다수였다. 이는 일방향 굴착에 따른 종점부 원지반의 풍화암체가 훌륭한 방음벽의 역할을 수행했던 것으로 사료된다.

2. 일방향 굴진 시 문제가 되는 종점 관통부의 안정성 확보 문제는 변위의 발생이 작은 강지보를 통한 강성보강과 터널외부에서의 미진동 파쇄 및 기계굴착을 통한 조심스러운 토공계획을 수립하여 적용한 결과 안정적인 관통을 이룰 수 있었다.
3. 비교적 연장이 짧은 터널 또는 공사기간에 여유가 있는 터널의 계획에 있어서 민원 및 지형적인 요건을 적극적으로 반영하여 초기부터 일방향 굴착을 검토한다면 시공도중 일방향 굴착으로 공법을 전환함에 따라 발생하는 비용과 손실을 사전에 차단할 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Terzaghi, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley&Sons, Inc. New York, pp. 66-77.
2. 이인모, 2001, 암반역학의 원리, 새론출판, 334p.
3. 이회근, 양형식, 1997, 응용암석역학, 서울대학교출판부, pp. 335-370
4. 월간계측보고서, 안성-음성 간 고속도로 건설공사(제 6공구)

채 희 문

2001년 건국대학교 토목공학과 공학사
2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시
스팀공학부 공학석사

Tel: 02-2011-8286
E-mail: hmchae@daelim.co.kr
현재 대림산업(주) 기술연구소 토목설계
지원팀 사원



김 용 준

1995년 영남대 공학사 (토목공학전공)
1997년 영남대 공학석사(토목공학전공)
2001년 영남대 공학박사(토목공학전공)

Tel: 02-2011-8276
E-mail: 9yjkim9@hanmail.net
현재 대림산업(주) 토목사업본부 토목사
업부 과장



김 선 기

1979년 고려대 이학사 (지질학 전공)
2003년 서울시립대 공학석사 (토목공학
전공)

Tel: 02-2011-8657
E-mail: skkim@dic.co.kr
현재 대림산업(주) 토목사업본부 토목사
업부 부장



김 주 화

1971년 한양대 공학사 (토목공학 전공)
2005년 수원대 석사 (토목공학 전공)

Tel: 02-2011-7022
E-mail: jukim@dic.co.kr
현재 대림산업(주) 토목사업본부 본부장
부사장

