

수직구 및 기존 도수터널 근접구간 굴착공법 개선사례

-소양강댐 선택취수설비 건설공사 현장 중심으로-



김 종 해

한국수자원공사
수자원사업본부장
(jonghae@kwater.or.kr)



박 성 순

한국수자원공사
소양강댐관리단장
(sspark@kwater.or.kr)



홍 성 균

한국수자원공사
소양강댐관리단 차장
(prohong@kwater.or.kr)



이 종 구

한국수자원공사
소양강댐관리단 과장
(209man@kwater.or.kr)

1. 서 론

지하 암반층 굴착방법 중에는 강력한 화약류를 이용한 발파작업이 현재까지는 가장 경제적이고 우수하나, 화약 폭발시 발생하는 지반진동은 인접구조물(보안물건) 및 사람·가축 등에 피해를 줄 수 있어 불가피하게 발파작업이 제한되는 경우가 종종 있다. 한편 발파가 불가능한 경우 기계식 굴착을 사용하게 되는데, 암반강도, 굴착규모 및 작업여건 등을 고려할 경우 공사비가 과다하게 소요되며, 공기지연이 발생하게 된다.

본 고에서는 소양강댐 선택취수설비 건설현장에서 신설 취수탑 및 도수터널 시공을 위해 기존 취수탑 구조물과 도수터널이 인접한 지역에서의 터널 굴착시, 기존공법을 개선하여 경제적이고 안전하게 굴착을 완료한 사례를 소개하고자 한다.

2. 현장 현황분석 및 개선검토

2.1 현장개요

본 현장의 선택취수설비 건설공사는 취수탑과 연결 터널을 신설하여 기존 도수터널에 연결, 대규모 탁수 발생시에도 선택적으로 맑은 물을 취수하여 하류로 방류함으로써 연속발전이 가능토록 하는 공사이다. 굴착공사는 크게 취수탑 구간 수직구 굴착 및 연결터널 굴착으로 구성되어 있다. 기반암은 흑운모 편암으로 일부 석회질 암이 혼재되어 있으며, 신설 터널 일부 구간에 단층대가 형성되어 있다.

2.2 설계상의 연결터널 굴착공법 현황

신설 연결터널은 기존 도수터널과 접해 있고, 반대

수직구 및 기존 도수터널 근접구간 굴착공법 개선사례
-소양강댐 선택취수설비 건설공사 현장 중심으로-

표 1. 선택취수설비 건설공사 개요

- 목 적 : 소양강댐 탁수병류기간 단축으로 댐의 부정적 이미지 불식 및 하류영향 최소화
- 공사기간 : 2009. 11~2014. 7
- 시설개요
 - 취 수 탑 : B16m×L22.2m×H89.2m
 - 연결터널 : D=7.3m, L=70.1m(원형)
 - 조절문비(B10m×H4.8m×3문, 직선단단식 Roller Gate), 취수문비, 안전문비 등
 - 가물막이, 수직터널 굴착 및 보강 등

편으로는 취수탑 축조를 위한 수직구 가시설과 접해있으며, 수직구 가시설 상부에는 원형 가물막이 구조물이 축조되어 있어 수직구 및 기존 도수터널의 접속구간은 연결터널 굴착 작업시 매우 취약한 구간이라 할

수 있다. 연결터널 구간은 구간별로 굴착공법이 발파 및 무진동암파쇄 등으로 구분하여 적용하도록 설계되었다(표 2).

수직구와 연결터널이 교차되는 접속부 구간에서 발파작업을 수행시에는 수직구 흠막이 가시설에 영향을 주며, 연결터널 천단부 임반의 손상범위가 확대되어 수직구 안정성에 문제가 발생할 수 있기 때문에 연결터널 시작점 구간에 기계식 굴착공법을 적용하였다. 또한, 연결터널에 적용되는 발파패턴은 접속부 패턴, P-1, P-2, P-3 등으로 구분하였으며, 터널 외곽공에는 여굴을 최소화할 수 있도록 Smooth Blasting 공법을 적용하였다.

한편, 신설 터널과 기존 도수터널이 연결되는 접속부 구간은 무진동암파쇄공법을 적용하여 굴착중 기존

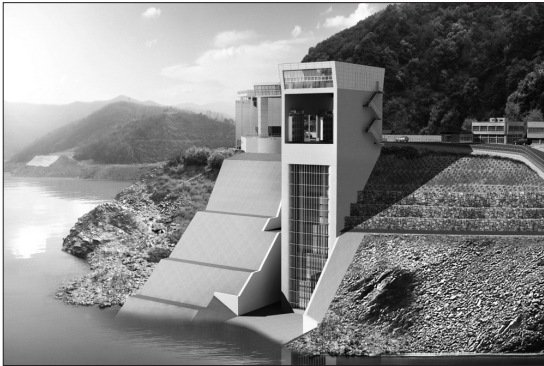


그림 1. 조감도 및 현장 전경

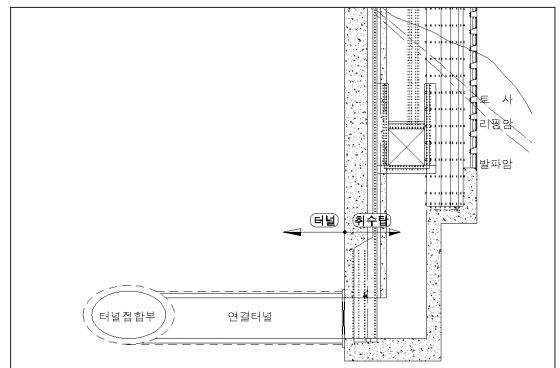
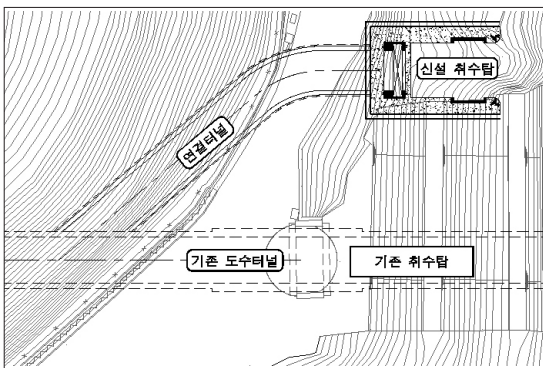


그림 2. 평면도 및 종단면도

표 2. 신설 연결터널 구간별 적용 굴착공법

위치별	적용범위	구간	적용공법
연결터널 시점 ~ 5m 구간	5m	수직구 접속부	기계식 굴착공법
5m ~ 46m 구간	41m	연결터널	발파공법
46m ~ 연결터널 종점	22m	기존 도수터널 접속부	무진동암파쇄공법

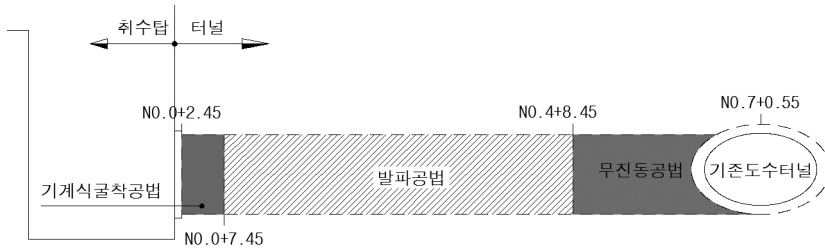


표 3. 굴착공법 개선검토안

구분	당초설계	개선검토	개선사유 및 효과
수직구 접속부	기계식 굴착공법	선균열 조절발파공법	<ul style="list-style-type: none"> • 암반손상 최소화, 진동저감 • 굴착공기 단축
신설터널 본선구간	Smooth Blasting 공법	선균열 조절발파공법	<ul style="list-style-type: none"> • 도수터널 구조물 진동영향 최소화
기존터널 접속부	무진동 암파쇄공법	선균열 조절발파공법 + 무진동 암파쇄공법	<ul style="list-style-type: none"> • 굴착공기 단축
적용 진동추정식	서울시 제안식	현장 시험발파식	<ul style="list-style-type: none"> • 진동 전달특성 신뢰성 확보

터널 라이닝 구조물 손상을 최소화하고 터널 안정성을 확보하도록 하였다.

2.3 신설 연결터널 굴착공법 개선 검토

수직구와 신설 터널 접속부 구간의 굴착은 기계식 굴착공법으로 설계되어 있으나, 기계식 굴착공법은 시공성, 효율성 측면에서 매우 불리하여 공기지연 요소로 작용하기 때문에 수직구 구조물에 미치는 진동 영향을 최소화 하고 연결터널 천단부 암반손상을 최소화 할 수 있는 선균열 조절발파공법의 적용성을 검토 하였다.

신설 연결터널 노선과 기존 터널과의 이격거리는 직선거리로 최대 24m 정도로 평행 내지 예각(40°)으

로 배치되어 종점부에서 관통하도록 되어있는데, 기존 도수터널 관통지점으로부터 굴착직경 0.5D 구간 (22m)은 터널의 안정성을 고려하여 무진동굴착공법을 적용하였다. 기존 도수터널로부터 0.5D 이상의 구간은 조절발파공법으로 설계되었는데, 적용된 Smooth Blasting 공법은 터널 굴착선을 매끄럽게 유지할 수 있다는 장점이 있는 반면, 진동저감 측면에서는 효과가 거의 없기 때문에 기존 도수터널에 인접한 구간에서 본 공법을 적용할 경우, 발파진동으로 인한 기존 터널 라이닝 구조물에 영향을 미칠 수 있다.

이에 기존 터널 구조물의 진동 영향을 최소화하기 위해서 신설 연결터널 측벽부에 선균열 조절발파공법 적용성을 검토하였다.

3. 신설터널 조합형조절발파공법 적용사례

3.1 개 요

신설터널과 수직구의 접속부 구간 일부에 적용된 기계식 굴착공법 대신 적용한 선균열 조절발파공법은 국내에서 개발된 조합형조절발파공법이다. 본 공법은 주 발파공보다 사전에 기폭되어 주 발파공의 진동을 차단할 뿐만 아니라 터널 굴착선의 손상범위를 최소화할 수 있기 때문에 수직구의 가시설 구조물 및 기존터널 라이닝 구조물에 전달되는 진동 영향을 최소화할 수 있고 안전성을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

한편 기존-신설터널 접속부 구간 적용된 기계식 굴착공법 적용 범위의 적정성을 파악하고, 최적의 굴착 방법을 선정하기 위해 연결터널 내(No.2-3.35)에서 조합형조절발파 공법을 이용하여 시험발파를 수행하였다.

조합형조절발파공법(Complex Blasting)은 터널 굴착선에 설치하는 Line Drilling과 pre-splitting공법을 조합한 선균열형 조절발파공법으로, 조절발파공을 주 발파공(심발공, 확대공, 바닥공) 보다 먼저 기폭하게 함으로써 굴착 예정선에 균열층을 형성시켜 주 발파공 발파시 발생하는 진동이 터널 굴착선 밖으로 전달되는 것을 차단시키도록 하는 공법이다. 조합형조절발파공법의 기폭 순서에 따른 암반의 파쇄형태를 나타낸 모식도는 그림 3과 같다.

조합형조절발파공법은 지금까지 국내에서 사용하고 있는 일반적인 조절발파공법에 비해 터널 굴착선을 보다 매끄럽게 유지시켜줄 뿐만 아니라 진동저감 효과가 뛰어나(약 30 ~ 50% 저감) 신설터널에 인접하여 구조물이 존재하는 경우 발파의 진동저감이 요구되는 구간에 주로 적용되는 공법이다.

3.2 조합형조절발파공법의 특성

3.3 수직구-연결터널 접속부 구간 적용 사례

수직구 흙막이 가시설 구조물(H-Pile+G/A, Rockbolt)에 미치는 발파진동 영향과 가스압으로 인

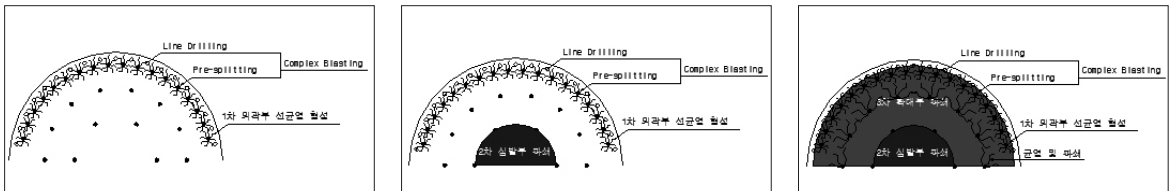


그림 3. 기폭순서에 따른 암반 파쇄형태 모식도(조합형조절발파)



그림 4. 조합형조절발파 공법 발파패턴도와 현장 사진

표 4. 수직구 접속부 구간 연결터널 발파시 수직구 구조물에서 진동 측정결과




구 분	수직구 가시설 구조물	가물막이 구조물	기존 취수탑
진동측정모습			
이격거리(심발부 기준)	22m	47m	92m
허용기준	5.0cm/sec	1.0cm/sec	1.0cm/sec
측정값	0.955cm/sec	0.679cm/sec	0.089cm/sec

표 5. 수직구 가시설에서 측정된 진동 예측값과 실측값 비교

구 분	진동값 산출근거	이격거리	지발당장약량	진동값	진동저감율
예측값	$V = 200 \left(\frac{R}{W^{1/2}} \right)^{-1.6}$ (국토해양부 제안식)	22m	1.0Kg	1.423cm/sec	32.9%
실측값	수직구 구조물에서 측정	22m	1.0Kg	0.955cm/sec	

표 6. 조합형조절발파공법 적용에 따른 굴착공기 단축효과

굴착공법	적용구간	굴착단면적(전단면기준)	굴착능력	굴착공기	공기단축 효과
기계식 굴착공법	5m	71.953m ²	15m ³ /일	24일	19일
발파공법	5m	71.953m ²	2발파/일	5일	

한 손상을 방지하기 위해서 연결터널 접속부 일정구간은 기계식 굴착공법을 적용하여 굴착하도록 설계되어 있다. 그러나 수직구와 연결터널 접속부 구간 천단부의 응력집중 현상과 암반의 부분적 파괴, 변형 및 붕락 현상 등이 발생할 수 있으므로 접속부 구간 안정성 확보를 위해서 일부구간(터널폭의 0.5D)에 진동전달을 감소시키고 손상을 억제하기 위해서 선균열 조절발파 공법인 조합형조절발파공법을 적용하였다(그림 4 참조).

한편, 수직구와 연결터널 접속부 구간에서 본 공법 적용시 거리별 진동 측정결과는 다음 표 4와 같이 나타났다.

표에서와 같이 수직구-연결터널 접속부에 본 공법 적용결과 수직구 상부 각 지점에서 측정된 진동값은 모두 허용치 이내로 제어되었음을 알 수 있다. 또한 국토해양부에서 제시한 발파진동추정식으로 예측한 발파진동값과 실제 조합형조절발파공법으로 발파하여 실측된 진동값을 비교하면 표 5와 같이 나타나는데, 조합형조절발파공법 적용시 실측된 진동값이 추정식에 의한 예측값의 32.9% 수준임을 알 수 있다.

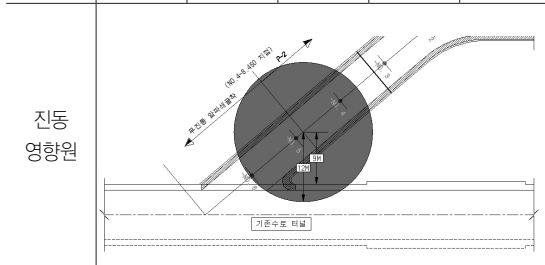
또한, 수직구 접속부 구간 굴착공법을 당초 기계식 굴착공법에서 조합형조절발파공법으로 개선함으로써 발파에 따른 진동영향 저감뿐만 아니라 표 6과 같이 굴착 공기를 약 19일 정도 단축하는 효과를 얻게 되었다.

3.4 기존-신규터널 접속부 구간(No.4-8.45) 발파진동 예측

신설 연결터널은 기존 도수터널과 약 9m ~ 24m 정도(발파공법 적용구간 기준) 이격을 두고 굴착된다. 당초 연결터널 본선구간은 Smooth Blasting공법으로 계획되어 있으나, 동 공법은 진동저감 효과가 전혀 없어 구조물 인근에서 발파시 발파진동으로 인한 피해가 발생할 수 있으며, 특히 기존 도수터널 구조물은 완공 후 약 40여년이 경과되어(1973년 완공) 라이닝 구조물의 안정성이 우려되기 때문에 발파진동에 대한 영향을

표 7. Smooth Blasting공법(원설계공법) 적용시 예측 진동값

구분	이격거리	지발당 장약량	진동 허용치	진동 예측값	적합성
결과내용	9.0m	0.875Kg	2.5cm/sec	3.719cm/sec	부적합



최소화해야 할 필요성이 있었다.

한편, 연결터널 노선중 굴착패턴 P-2 적용구간에서 설계공법으로 발파할 경우 기존 도수터널 최단거리 지점(No.4-8.45)에서 발파진동값이 약 3.719cm/sec 정도 감지되는 것으로 예상(연결터널 시험발파 진동추정식 적용)되어 기존 도수터널 라이닝 구조물의 발파진동 허용치(2.5cm/sec)를 초과하는 것으로 나타났다.

이에 연결터널 본선 구간에 조합형조절발파공을 설치하여 발파 진동을 저감토록 하였으며, 기존 설계와 같은 지발당 장약 조건으로 조합형조절발파공법을 적용하여 발파할 경우 기존 도수터널 구조물에서의 발파진동값은 2.32cm/sec 으로 예상되었으며, 입자유동 해석 프로그램인 P.F.C 2D(Particle Flow Code)를 이용하여 기존 도수터널 구조물에서의 진동값 예측 결과, 약 1.85 cm/sec로 나타나 진동 허용범위 내로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다(표 8 참고).

3.5 연결터널 조합형조절발파공법 적용효과 분석

본 현장은 신설터널의 수직구 접속부 구간은 기계식 굴착공법, 본선구간은 발파공법(Smooth Blasting)으로 굴착토록 설계되어 있다. 수직구 접속부에 적용된

표 8. 조합형조절발파공법 적용시 예측 진동값

구분	진동추정식에 의한 예측	수치해석에 의한 예측
예측근거	$V = 73.85 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.32}$ $V = 72.01 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.33}$	P.F.C 2D 사용 * 굴착패턴 P-2 발파수량 및 현장 암석 물성치 적용
예측결과		
예측값	2.32 cm/sec	1.85 cm/sec

기계식 굴착공법은 인접지반에의 굴착진동차단 효과는 양호하나 굴착속도가 너무 느려 굴착공기가 상당히 지연되는 문제점이 있다. 따라서 수직구 접속부 구간에 발파공법을 적용하되 수직구 구조물에 전달되는 진동을 최소화 할 수 있는 방법으로 선균열 발파공법인 조합형 조절발파공법을 적용하였다.

그 결과 접속부 직상부에 위치해 있는 수직구 가시 설 및 가물막이 구조물에서 발파진동값이 허용치 보다 훨씬 작은 값(8~32% 수준)으로 전달되어 안전하게 수직구 접속부 구간 굴착작업을 완료하였으며, 당초 굴착공기를 약 19일 정도 단축하는 효과를 얻었다.

또한, 연결터널 본선구간에 적용된 Smooth Blasting공법은 진동저감이 어렵기 때문에 일부 굴착 패턴 구간에서 발파할 경우 기존 도수터널 구조물에서 발파진동값이 허용치를 초과하거나 근사치로 감지될 것으로 예상 되었으나, 조합형조절발파공법 적용을 통해 진동을 약 30~40% 정도 저감할 수 있을 것으로 판단되어 기존 도수터널 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 검토되었다.

4. 결론

본 현장 신설 연결터널의 굴착은 수직구 접속구간, 본선구간, 기존 도수터널 접속구간으로 분류하여 적용 굴착공법을 달리하여 설계되어 있다(수직구 접속부 구간 - 기계식 굴착, 연결터널 본선구간 - Smooth Blasting공법).

그러나 기계식 굴착공법을 적용할 경우 굴착 시공성과 굴착공기 측면에서 매우 불리하고 연결터널 본선구간에 Smooth Blasting공법을 적용할 경우 일부 굴착 패턴 구간 발파시 기존 도수터널 구조물 안정성에 문제가 될 수 있다.

따라서 신설 연결터널의 굴착효율을 제고시키고 연결터널 근접 구조물에 대한 안정성을 확보하기 위해서 조합형조절발파공법으로 개선하여 연결터널 굴착

작업을 수행하였다. 그 결과 수직구 접속부 구간 발파작업시 수직구 구조물에서 발파진동이 허용치의 8~32% 수준으로 제어할 수 있었으며, 접속부 구간 굴착공기를 약 19일 정도 단축하는 효과를 얻을 수 있었다.

또한, 신설 연결터널 본선구간에서 조합형조절발파공법을 적용하여 발파작업을 수행하였는데, 본선터널에서 약 9m~24m 정도(발파공법 적용구간 기준) 떨어진 기존 도수터널에서 발파진동이 허용치 이내로 감지되었을 것으로 예상된다(기존 도수터널은 운영중인 시설로서, 접근이 불가하여 진동계측기 설치를 하지 못하였음). 특히, 기존 도수터널과 신설 연결터널 최단거리(9m)에서 Smooth Blasting공법으로 발파할 경우 기존 도수터널에서 발파진동 허용치(2.5cm/sec)를 초과할 것으로 예상되었으나 조합형조절발파공법을 적용하여 도수터널 구조물의 안정성을 확보하였다.

향후, 터널노선에 근접해서 구조물이 존재할 경우 선균열 효과를 얻을 수 있는 조합형조절발파공법을 적용하여 암반의 손상범위를 최소화하고 진동전달을 억제하여 근접 구조물의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 정희상 외, "터널 제어발파 공법 및 화약류의 진동전달 특성에 관한 연구", 한국지반환경공학회 논문집 12(2), 2011.2, pp.5-14
2. GS건설㈜, 『서울지하철17공구현장 본선터널 발파진동이 잠실 학생체육관 구조물에 미치는 영향검토 보고서』, 2010
3. 한국수자원공사, 『수직구 및 연결터널 굴착공사 기술자문 보고서』, 2012
4. 김웅수, 『발파핸드북』, 구미서관, 1994
5. Stig O Olofsson, 『Applied Explosives Technology for Construction & Mining』, 1990, pp.174-185.