02

주암댐 도수터널

최원석 부장 /
현대건설㈜ 인프라환경사업본부

김용규 이사 /
에스코컨설턴트 도시기반시설본부

「주암댐 도수터널 시설안정화 건설공사」 실시설계 소개

1. 사업 개요

본 사업은 전라남도 순천시에 위치한 보성강 수계인 주암본댐과 이사천 수계인 주암조절지댐을 연결하는 신규 도수터널 건설공사로 기존 주암 도수터널의 구조적 불안정으로 인한 여수국가산업단지 및 전남동부권(순천, 여수, 고흥 등)의 용수공급 중단이라는 국가적 · 사회적 재난방지를 위해 계획된 국가기반시설사업이다.

주암댐 도수터널 시설안정화 사업의 주요현황은 다음과 같다.

■ 주요현황

– 도수터널 : L=11.23km, D=3.3m(외경 4.0m), 연직갱 2개소

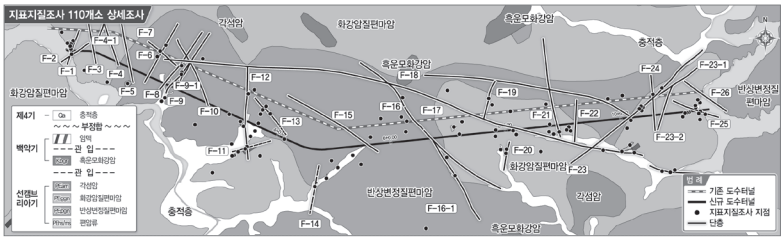
– 원형 취수탑 : 고압 롤러게이트, 2개소

– 가물막이 : 매립식 가물막이, 2개소

본 고에서는 주암댐 도수터널 건설공사 중 도수터널의 터널 설계에 중점을 두어 소개하고자 한다.

2. 지형 및 지질 특성

〈그림 1〉 사업 위치도



〈그림 2〉 지반조사 결과

이 지역은 문유산, 조계산, 고동산을 잇는 남북방향 산능을 중심으로 주암호와 상사호의 유역이 분기된다. 터널구간은

최대 약 750m의 고도분포를 보이며 깊고 험준한 산능을 형성하고 있다. 기반암은 선캠브리아기의 화강암질편마암, 반상변정질편마암, 흑운모편마암이 주로 분포하며 연성전단대인 순창전단대의 동쪽부와 인접하여 위치하고 있어 지질구조 및 암상의 변화가 복잡하다. 편마암과 편암으로 구성되어 있는 기반암은 연성전단대의 영향을 받아 물과 접촉할 경우 급격히 강도가 저하되는 열화현상의 특성을 보인다.

3. 도수터널 설계

3.1 기존 도수터널 분석을 통한 신규 도수터널 선형계획

기존 도수터널은 1990년 12월 공사 준공 및 통수를 개시하였고, 이후 1991년 7월~1992년 12월 사이 붕락사고가 발생됨에 따라 3회의 걸친 보수 · 보강작업이 수행되었다. 총 연장 11.488km인 기존 도수터널은 전체연장의 약 96%가 무라이닝 상태로 준공되었고 붕락사고의 개연성으로 전구간 콘크리트라이닝 설치가 검토되었으나, 용수공급 시기를 감안하여 일부구간에 대한 보수만 시행된 채 1994년 5월에 재통수 되었다.

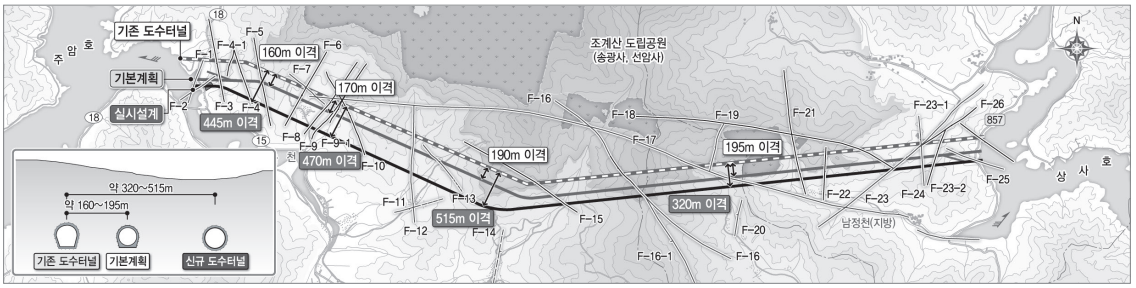
기존 도수터널은 대부분이 무라이닝 구간으로 도수터널 내 수압변동이 불연속면의 점진적 이완 · 수축작용을 반복하였고, 수압으로 인한 침투수가 불연속면의 열화현상을 가속화시켜 연약한 단층대 구간에서 붕락이 발생한 것으로 추정된다.

기존 설계자료를 분석하여 기존 도수터널의 상태평가와 구간별 위험도를 평가하였으며 신규 도수터널 설계시 참고자료로 활용했다. 이에, 신규 도수터널은 전구간 콘크리트라이닝을 설치하여 내수압에 의한 암반손상을 배제하였고, 터널굴착 중 기존 도수터널에 미치는 진동의 영향을 고려하여 320m 이상 이격한 노선을 계획하였다.

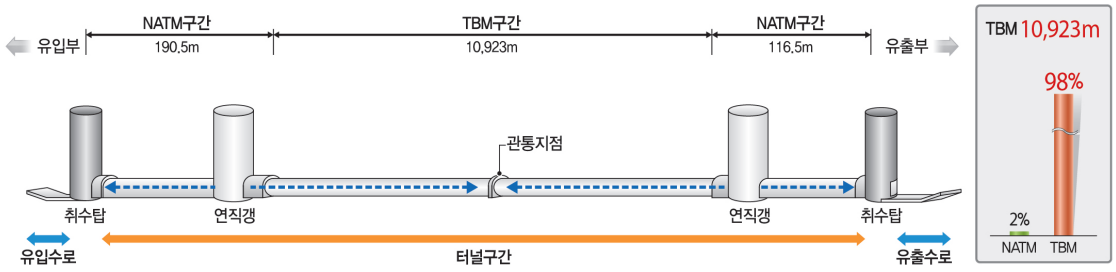
3.2 터널 굴착방법 선정

신규 도수터널 굴착시 기존 도수터널과 적정 이격거리를 확보하였음에도 불구하고 발파공법으로 인한 영향을 완전히 배제하기는 어려우며, 터널노선 주변 일부 민가에도 그 영향이 미칠 것으로 예상된다. 따라서, 기존 도수터널의 안전성과 인접민가의 민원예방을 위해 연직갱 및 유입 · 유출부 일부구간에만 NATM공법을 적용하여 발파영향을 최소화하고 이를 제외한 전구간에 TBM공법을 적용하여 터널굴착에 따른 진동의 영향을 배제하였다.

또한, 본 도수터널은 소단면 장대터널이며 터널 노선구간의 80%가 암반등급 Ⅰ~Ⅲ등급으로 암질이 양호한 산악터널임을 감안하여 Open TBM 방식을 선택하였으며, 11km에 달하는 터널공사의 공기단축을 위해 양방향 TBM 굴착으로 계획하였다.



〈그림 3〉 지반특성 및 현황을 고려한 신규 도수터널 노선 선정



〈그림 4〉 도수터널 굴착 계획

3.3 TBM 시공계획

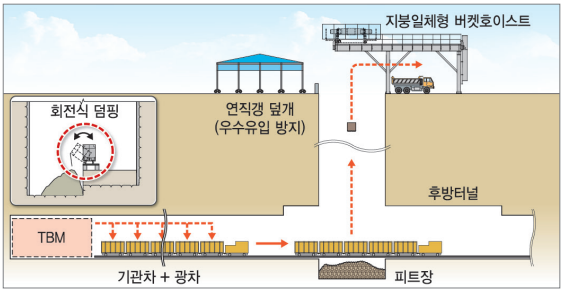
TBM공법 적용 연장은 총 10.923km로 2기의 TBM 장비가 유입 · 유출부의 연직갱으로 투입되고 양방향 굴진을 통해 중앙부에서 관통하도록 굴착계획을 수립하였다.

TBM 굴진중 갱내 버력처리는 연속적 굴착이 가능하고 국내 시공사례가 많은 전기기관차와 광차를 이용한 방식을 적용하였으며, 갱내 버력처리는 연직갱 하부에 피트장을 설치하고 버켓 호이스트를 이용한 방식을 적용함으로써 시공성을 향상시켰다. 또한, 연직갱을 이용한 작업구 계획으로 작업부지 조성시 환경훼손을 최소화하고, 본선터널공사의 조기착공이 가능하도록 하였으며 도수터널 완공 후에는 연직갱을 활용하여 유지관리를 할 수 있도록 계획하였다.

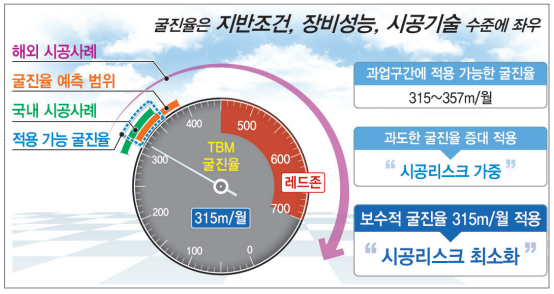
연직갱 공사와 연직갱으로부터 굴착되는 유입 · 유출부의 NATM구간은 F/T분(Fast Track, 설계 · 시공병행방식)으로 우선대상공종에 포함되어 현재 공사가 진행 중에 있다.

TBM공법은 지반조건의 변화에 대한 대응이 NATM공법에 비해 상대적으로 어렵기 때문에 정확한 공사기간 산정을 위해서는 굴진율(Advance Rate) 예측이 매우 중요하다.

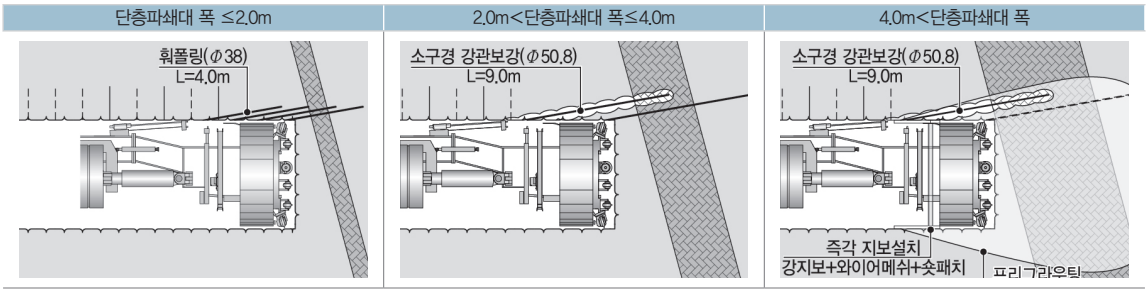
TBM 굴진속도는 국내 · 외 TBM 가동률 및 굴진율 사례를 검토하고 경험적 방법, NTNU 시험, RMR을 이용한 TBM 굴진율 분석을 통해 결정하였다. 검토결과 사업구간 지반조건에서는 월 315~391m의 굴진이 가능할 것으로 예상되나, 국내 시공사례(월 291~357m)와 미예측 단층파쇄대 조우 및 장비의 고장 · 수리 등을 감안하여 예상 굴진율의 범위 중 최저값에 해당하는 월 315m로 선정하여 시공 리스크를 최소화하였다.



〈그림 5〉연직갱을 이용한 연속적 버력 반출 시스템



〈그림 6〉 설계적용 굴진율



〈그림 7〉 TBM 터널구간 단층파쇄대 규모에 따른 보강계획

3.4 주요구간 통과방안

1) 단층대 및 지질이상대 통과방안

터널 시공중에는 지반조사의 불확실성 등으로 인해 예상치 못한 지반이 출현할 수 있기 때문에 막장 전방지반에 대한 시공중 조사가 필요하다. 본 사업에서는 단층파쇄대의 폭에 따라 2.0m를 초과구간에서는 100m 전방에서 원거리탐사법인 TSP(The Tunnel Seismic Prediction method)탐사, 단층파쇄대 폭 2.0m 미만구간에서는 10m 전방에서 근거리 탐사법인 TEPS(Tunnel Electrical resistivity Prospecting System)탐사를 수행하여 전방지반을 조사하도록 계획하였다.

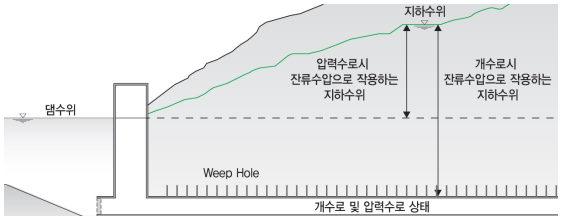
막장 전방지반조사 등을 통해 단층파쇄대의 존재가 확인될 경우 프로브드릴을 이용한 선진수평보링으로 단층파쇄대 및 공동 등 연약대의 지질상태와 용출수 발생여부를 판단할 수 있도록 하였다.

또한, 단층파쇄대의 규모에 따라 훠폴링 또는 강관보강 등 추가 보강계획을 수립하여 지질 이상대 통과구간에 대한 안정성을 확보하였다.

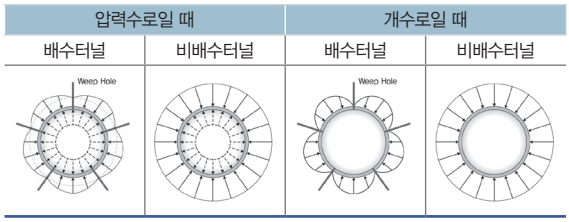
2) 터널굴착 중 지하수 모니터링 계획

지하수 유동을 모사할 수 있는 3차원 유한차분모형인 Visual MODFLOW를 이용한 유동해석결과 도수터널 굴착시 터널 주변에 국부적인 지하수위 강하가 발생하며, 인근 마을 내 대표관정에서의 지하수위 저하량은 0.2~1.2m 정도로 지하수 고갈 가능성은 낮은 것으로 예측되었다. 하지만, 터널굴착 중 예상치 못한 지하수위 강하로 인한 인근 마을의 민원에 적극적으로 대처하기 위해 노선인근 10개 마을을 지하수 중점 관리구간으로 선정하고, 총 20공의 관측공(자동계측 8공, 반자동계측 12공)을 배치하여 지하수 모니터링을 계획하였다. 굴착중 용출수가 발생할 경우 차수그라우팅 보강을 실시하고, 일시적인 지하수위 저하시 급수차 등을 활용하여 긴급용수를 공급할 수 있도록 하였다. 지하수위의 변동폭이 크고(3~5m

〈그림 8〉 지하수 중점관리구간



〈그림 9〉 도수터널에서의 외수압 발생조건



〈그림 10〉 도수터널에서 배수 · 비배수 조건에 따른 수압분포

이상) 지속적인 저하시에는 대체관정을 개발하여 지하수 저하에 따른 민원발생에 적극적으로 대처할 수 있도록 계획하였다.

3.5 도수터널 특성을 고려한 콘크리트라이닝 설계

1) 도수터널 배수형식 선정

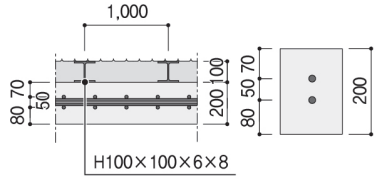
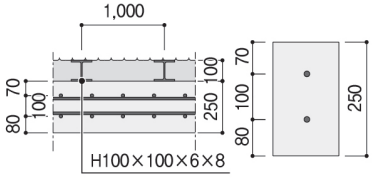
일반적으로 배수형 터널은 터널주변의 지하수를 유도배수시킴으로써 수두차에 의한 수압이 작용하지 않으며, 비배수형 터널은 지하수 배출이 차단됨으로써 터널 외부수압을 모두 콘크리트라이닝이 부담하므로 이때 수압은 정수압으로 고려한다.

하지만, 도수터널에서의 작용수압은 터널 내부로 흐르는 유수의 작용으로 인해 일반터널과 상이한 분포를 보인다. 도수 초기 물이 터널 바닥면을 흐르는 개수로 상태에서 터널 단면을 만류하는 압력수로 형태로 변화한다. 압력수로 조건일 경우 내수압은 최대가 되며 내 · 외수압이 균형을 이루고 댐수위 이상의 지하수위는 잔류수압으로 작용하게 된다. 반면, 개수로 조건일 경우 배수터널은 잔류수압만 작용하며, 비배수터널은 정수압이 작용한다.

사업구간의 실제 지하수위를 반영하여 배수 · 비배수형 터널의 콘크리트라이닝 구조검토를 수행한 결과 비배수형일 경우 배수형에 비해 약 7배 이상의 큰 단면이 요구되어 경제성이 매우 불리한 것으로 판단되었다. 따라서, 신규 도수터널은 수로터널 설계 및 시공관리 지침서(한국수자원공사, 2007)상의 '외수압이 내수압의 2배 이상으로 높을 경우 Weep Hole을 설치한다.'라는 규정을 근거로 구조검토와 기존 사례를 종합적으로 분석하여 외수압을 해소할 수 있는 배수형 터널로 설계하였다. 배수형식은 국내 도수터널에 적용사례가 많은 Weep Hole을 이용한 배수시스템을 적용하였다.

2) 콘크리트라이닝 내구성 확보 방안

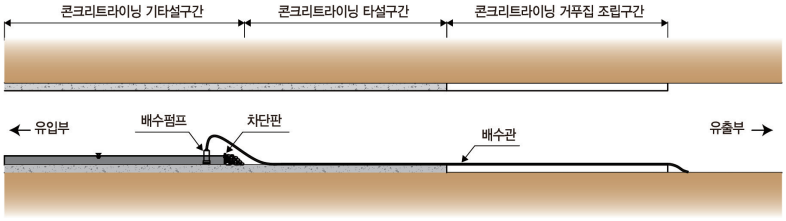
터널 구조물은 열화, 손상 등에 따른 보수시 경제적 손실이 큰 구조물에 해당하며, 도수터널은 상시 물이 흐르고 있기 때문에 일반 터널시설물에 비해 운영중 내부상태 점검이나 진단 · 보수 등의 유지관리에 어려움이 많다.

구분	단면두께 200㎜	단면두께 250㎜
철근배치 개념도		

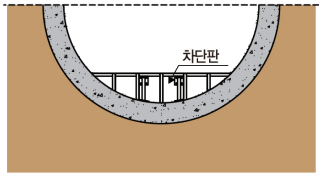
콘크리트라이닝의 장기적인 내구성 확보를 위해 콘크리트 설계강도를 27MPa로 상향하였고, 터널내 흐르는 유수에 의한 철근부식을 방지하기 위해 설계기준에 따른 피복두께 이상을 확보하였다. 콘크리트라이닝의 내측 피복두께는 유수에 의한 영향을 고려하여 80㎜, 외측 피복두께는 흙에 접하는 면을 고려하여 70㎜를 반영하여 단면검토를 수행하였다. 검토결과, 단면두께가 200㎜일 경우는 철근의 배치가 중립축에 가까워져 인장에 저항하는 철근의 역할이 감소되고 철근간격이 좁아 콘크리트라이닝의 시공 품질저하가 우려된다. 따라서, 단면두께를 최소 250㎜ 이상을 확보하여 철근조립 및 콘크리트 타설이 가능하고, 구조적 안정성 및 장기적인 내구성을 확보할 수 있도록 하였다.

3) 콘크리트라이닝 품질관리 방안

도수터널 관통 후 터널 내 공사중 유입수는 배수경사를 따라 유출부로 집수된다. 이로 인해 유출부 콘크리트라이닝 타설구간은 유입수가 흐르게 되어 콘크리트라이닝 타설시 시공성 저하 및 품질확보가 어려울 수 있다.
따라서, 콘크리트라이닝 기타설구간에 터널 유입수 차단판을 설치하여 콘크리트 타설구간에 유입수 흐름을 차단하고 이동식 배수펌프와 배수관을 이용하여 유입수를 유도배수함으로써 콘크리트라이닝 타설시 유입수에 의한 품질저하가 발생하지 않도록 하였다.
콘크리트라이닝 타설 후에는 GPR(Ground Penetration Radar)를 통해 배면 공동조사를 실시한다. 이는 균열조사방안으로 육안조사 대비 약 150배 빠르고 정확도가 우수한 3차원 레이저 스캐닝으로 터널 천단부의 공동을 조사하고, 공동 발견시 뒷채움 재시공을 통해 콘크리트라이닝의 구조적 안정성 및 시공품질을 확보할 수 있도록 하였다.



〈그림 11〉 터널 유입수 배수 개념도



〈그림 12〉 차단판 설치 개념도

4. 맺음말

현재 주암댐 도수터널 공사는 유입부 및 유출부의 연직갱 굴착이 진행중으로 조만간 본 터널공사인 TBM 굴착이 진행될 예정이다. TBM 공법은 과거의 국내 시공사례 등을 참고할 때 양호한 암반조건에서는 효율적이며 성공적인 시공사례를 보여 왔으나 불량한 암반구간의 통과시에 장비고장 또는 굴진중지 등의 문제점이 발생하는 경우가 있어 시공상 각별한 주의가 필요한 것으로 알려져 있다. 본 설계에서는 전방지반에 대한 탐사 및 사전보강을 통해 불량한 암반에서의 공기지연요소를 최소화하도록 하였다. 시공시 앞서 소개한 대책이 적절하게 반영될 수 있도록 하였으며, 현장 여건 등에 따라 설계 및 시공계획 등을 보완하여 과거의 사례보다 진일보한 TBM 터널공사가 이루지기를 기대한다.