

청송 양수발전소 시공사례

A Case Study on the Chungsong Pumped-storage power station Construction

홍창수¹⁾, Chang-Soo Hong, 이현구²⁾, Hyun-Koo Lee, 도종열³⁾, Jong-Youl Do

¹⁾ 삼성물산 건설부문 기술연구팀 선임, Senior Researcher, R&D Team, Samsung Corporation

²⁾ 삼성물산 건설부문 토목기술팀 차장, Deputy General Manager, Samsung Corporation

³⁾ 삼성물산 건설부문 청송양수발전소 현장소장, General Manager, Samsung Corporation

SYNOPSIS : The pumped-storage power system is the one of the hydroelectric power systems, generating electricity with hydraulic head difference. In this system, the electricity is produced during the hours of peak demand by using water that has been pumped into an upper reservoir from a lower reservoir during the hours of low demand. Generally, the system consists of an under-ground power house and tunnels such as the headrace, pressure, and tailrace tunnels.

The Chungsong pumped-storage power station is the sixth one in the pumped-storage power station in Korea. Both the regional self-government and the population of chungsong -Goon had made a great effort to draw this power station construction into this area. The proposed Chungsong pumped-power station construction project was accepted by the central government as a part of the national electricity plan for the first time in Korea.

Keywords : Pumped-storage power station, Headrace Tunnel, Tailrace Tunnel

1. 서 론

양수발전이란 전력이 남아도는 심야에 하부 저수지의 물을 상부 저수지로 끌어올려 저장한 뒤, 전력 소비가 많은 낮 시간대에는 물을 낙하시켜 발전기를 돌리는 방식이다. 때문에 상부와 하부에 댐을 만들어 물을 가두고, 이를 터널로 연결해야 한다. 발전소의 수차(水車)가 시계 방향으로 돌면 전기가 생산되고, 반대로 돌리면 물을 위로 밀어 올리는 펌프 역할을 한다.

국내 전력에서 수력이 차지하는 비율은 7.6%로 적은 편이지만 수력 가운데 양수발전의 비율은 68%에 이른다. 일반인의 생각과 달리, 양수가 수력발전의 주력(主力)인 것이다.

한국서부발전이 발주한 청송양수발전소는 국내 최초로 지역주민과 지방자치단체가 유치하여 정부의 전력수급계획에 반영되어 추진되는 사업으로, 최대 낙차고가 345.1m로써 30만kW짜리 발전기 2기(基)를 설치해 총 60만 kw의 생산능력을 갖춘 국내 6번째의 순양수식 발전소이다. 경북 청송군 파천면 신흥리와 안덕면 노래리에 위치한 청송발전소는 동아건설산업과 삼성건설이 공동으로 시공하는 사업으로 2000년 9월 발전소 진입터널 굴착공사를 착공해 올해말을 준공목표로 삼고 있다 (그림 1).

청송양수발전소 건설현장은 그 동안 선형발전소 건설과정의 경험을 토대로 167건이라는 개선사례를 설계, 시공에 반영하여 완벽한 품질을 구현하고 안전사고 없는 현장을 만들기 위해 최신품법을 과감히 채택함으로써 안전을 최우선으로 하는 건설현장을 만들었으며 그 결과, 2000년 6월부터 무재해운동을

전개하여 2005년 3월 무재해 4배 달성했고, 2006년 4월 6배수 달성을 목표로 시스템적 안전경영을 추진하고 있다.

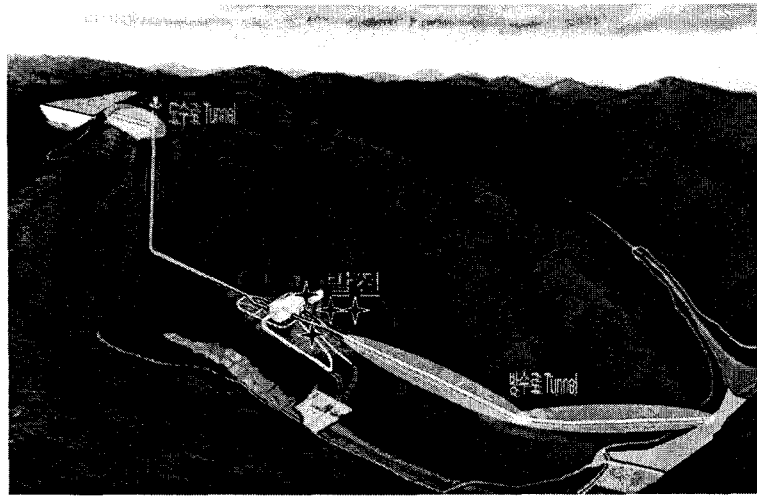


그림 1. 양수발전 개요

2. 공사 개요

2.1 지질개요

하부댐 수몰지에는 국부적으로 선캠브리아기의 각섬석편마암이 분포하고 있으며, 시대미상의 우백질 화강암이 하부댐 우안부에서 3번 작업터널까지 분포하였다. 백악기 퇴적암류는 하부댐 우안부에서 수로터널 및 상부댐 전지역에 걸쳐 분포하며, 특히 역암 및 역질사암이 방수로터널 구간에 분포하였고 세일층이 지하발전소 및 수로터널구간에 분포하였다. 또한 녹색사암이 조압수조 및 상부지댐 전반에 걸쳐 분포하였다.

2.2 시설개요

양수발전소는 그림 2와 같이 상부저수지에서 취수구(Intake)를 통과한 물이 도수터널(Headrace Tunnel)을 지나 수직, 수평 수압터널(Pressure Tunnel)을 통해 지하 약 186m에 위치하고 있는 지하발전소(W25.5m×H55.7m×L114.6m)로 흘러들어 물의 낙차를 이용해 발전을 한 후 흡출터널(Draft Tube Tunnel)을 통해 에너지를 감쇄하고 방수로(Tailrace Tunnel) 및 방수구(Outlet)를 통해 하부저수지로 방류하는 구조를 이루고 있다. 그림 3은 각 수로터널의 표준단면을 보여주고 있다. 또한 발전기 수차의 운전개시나 급정지시 수류의 작용에 의한 압력을 줄이기 위한 조압수조(Surge Tank)가 있으며, 이밖에 그림 4와 같이 지하발전소 접근을 위한 진입터널(Access Tunnel), 작업용터널(Work Adit), 지하발전소와 옥외변전소를 연결하는 고압케이블 설치를 위한 모선터널(Cable Tunnel), 배수터널(Drain Tunnel) 등이 있다.

수압철관의 설치구간은 불량한 지질조건(단층파쇄대)에 의한 누수가 예상되는 구간이나, 터널의 작용수압을 지지하는 암반피복두께가 불충분할 경우, 혹은 터널의 작용수압이 터널 주위암반의 최소주응력보다 큰 경우에 설치한다. 청송양수 발전소의 경우는 발전소 상류측이 고수압을 받는 압력터널이 연결되므로 발전소 주위에 누수가 가능성이 있어서 이를 방지하기 위해 수압철관을 설치하였다.

수로터널은 기본적으로 내압 및 외압에 대해 구조적으로 안정해야 하며 내수압에 대해 충분히 차수기능을 할 수 있는 수밀(Watertight)구조를 형성하여야 한다.

표 1. 시설 개요

구 분	도수터널	수직터널	수평터널	방수로	진입터널	모선터널
연 장 (m)	311.761	249	615	1855	606.852	550.052
중단구배 (%)	7.0	수직	7.0	2.645	10.109	7.13
터널 내경 (m)	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5×6.7	4.2×4.2

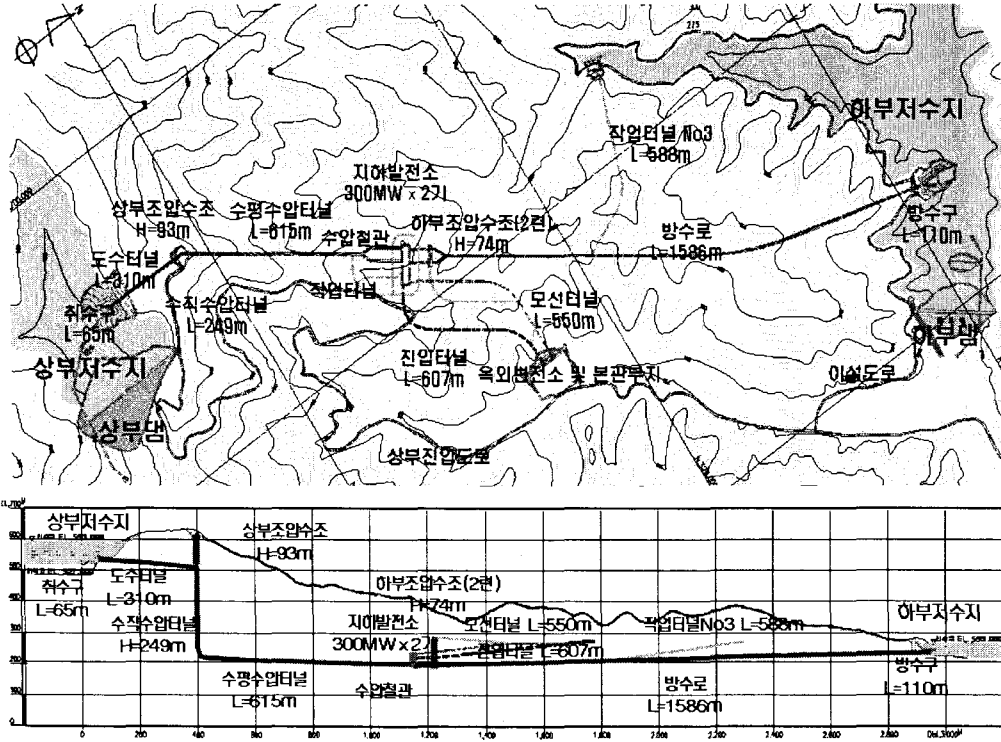


그림 2. 수로터널 증평면도

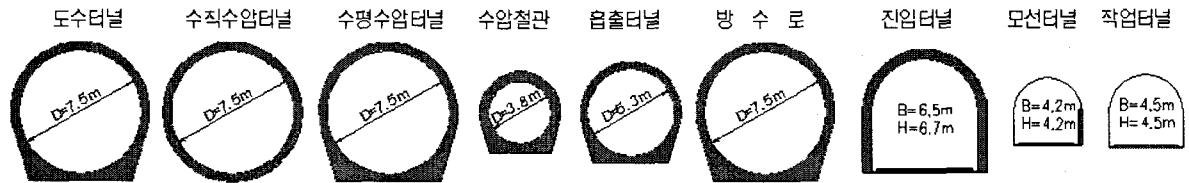


그림 3. 각 수로터널의 표준단면

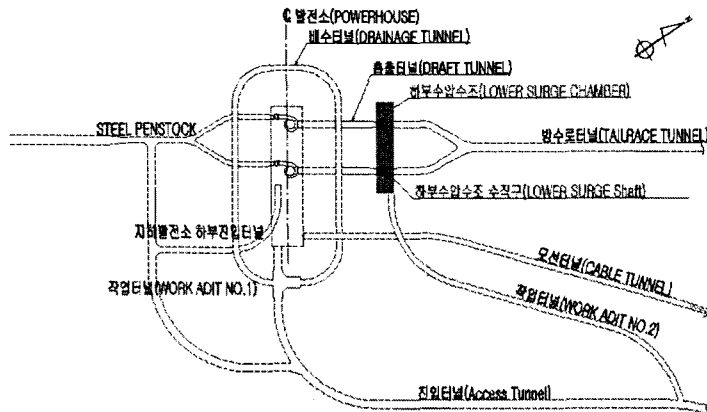


그림 4. 지하발전소 부근 각 수로터널 현황

3. 터널시공

3.1 방수로터널 굴착 및 축조공사

방수로터널(Tailrace Tunnel)은 지하발전소와 방수구를 연결하는 수로터널을 굴착하는 공사로서 총연장은 1,855m이며, 경사는 2.645%이다. 이중 흡출터널은 발전소 가동중에 펌프나 수차에서 토출된 물을 흡출관(Draft Tube)을 통해 에너지를 감쇄시킨 후 방수터널 및 방수구를 통하여 하부저수지로 방출시키는 기능을 담당하며 연장은 270.602m(2연)이고 경사는 14.43%이다.

방수로터널 굴착공사는 01년 5월 7일에 착공하여 02년 8월 6일 준공하였으며, 축조공사는 02년 5월 2일에 착수하여 04년 7월 31일에 완공하였다.

굴착공사시 주요장비는 굴착시 3Boom Jumbo Drill, 버력 상차는 3.5m³용량의 휠로더, 운반은 15ton 덤프 트럭을 통해 수행하였으며, 공사시 사용한 주요자재 및 굴착량은 다음과 같고, 굴착순서는 그림 5와 같다.

- | | | | | | |
|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|----------|-------------|
| ○ 굴 착 량 | : 112,788 m ³ | ○ 버 력 처 리 | : 195,273 m ³ | ○ 강지보공 | : 401 Set |
| ○ Rock Bolt | : 17,307 EA | ○ Shotcrete | : 33,196 m ³ | ○ 철근가공조립 | : 1,380 Ton |
| ○ 콘크리트량 | : 39,689 m ³ | ○ 그라우팅 주입 | : 29,622 대 | | |
| ○ 경 압 천 공 | : 57,242 m ² | | | | |

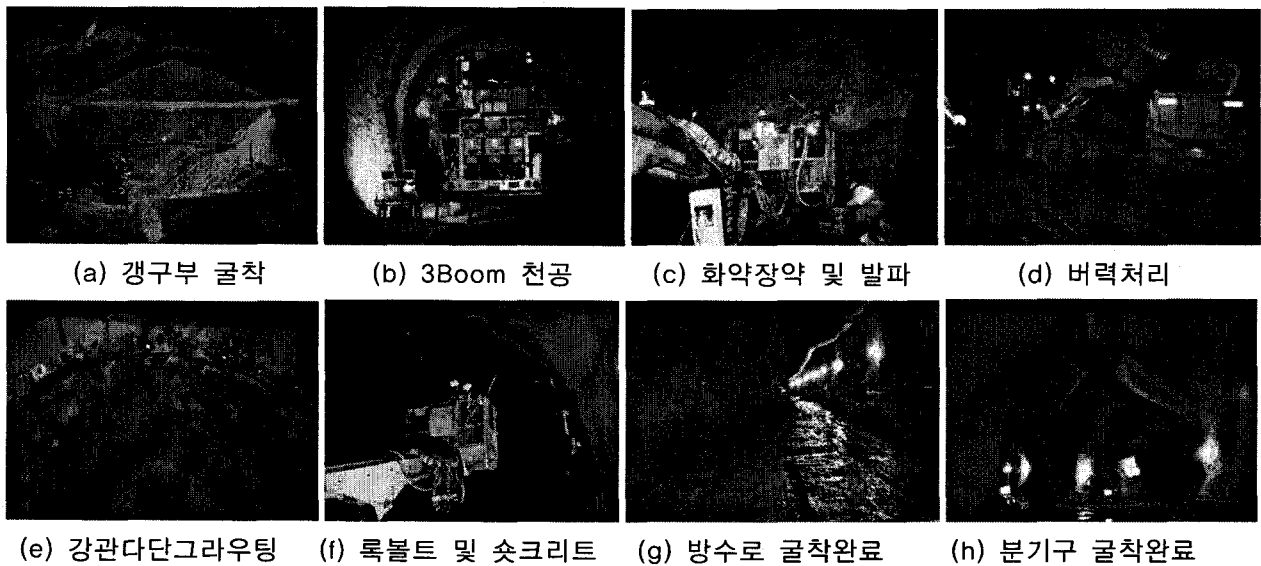


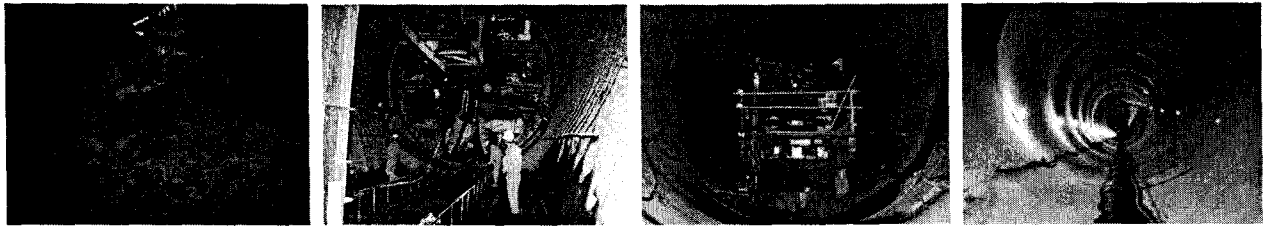
그림 5. 방수로 굴착공사 순서

축조공사시 일반 철근콘크리트라이닝 구간은 설계강도 240kg/cm²에 철근 D22@250을 사용하였으나, 발전소 부근의 터널은 수압에 대한 구조적 안정 및 충분한 차수기능을 할 수 있는 수밀구조를 갖기 위해 라이닝 부재의 설계강도를 300kg/cm²(25-300-10)으로 하였으며, 강섬유보강(SF 40kg/m³) 콘크리트를 사용하였다. 또한 종점부(방수구측) 파쇄대 구간에는 강섬유보강(SF 20kg/m³) 콘크리트를 사용하였으며, 철근 D25@300을 사용하였다.

축조공사의 시공순서는 그림 6과 같으며 굴착이 완료된 바닥부 암반면에 대해서는 공기압축기를 이용한 고압살수 및 인력에 의한 삽, 호미 등을 이용해 부석, 흙 및 먼지를 완전히 제거한 뒤 Dental 콘크리트를 타설하였다.

콘크리트 타설전 그라우팅 작업을 위해 75mm 강관을 그라우팅 위치에 미리 설치하여 후속작업시 콘크리트 천공작업을 용이하게 할 수 있었다. 콘크리트라이닝 축조후 최대 15kg/cm² 압력의 암밀그라우팅

이 실시되었으며 접촉그라우팅(Contact Grouting) 및 뒷채움 그라우팅(Backfill Grouting)도 필요시 실시되었다.



(a) 암반청소/Dental Con'c타설 (b) 철근조립 (c) 압밀그라우팅 (d) 축조 전경
그림 6. 방수로 축조공사 순서

3.2 하부조압수조 굴착 및 축조공사

발전기 수차의 운전개시나 급정지시 수류의 작용에 의해서 압력터널 내부에 급격한 압력변화가 일어나는 현상을 수격작용(Water Hammering)이라 하며, 이러한 압력변화에 대한 설비의 안전을 확보하기 위해 상부와 하부에 조압수조를 설치하였다.

상부 조압수조의 내경은 10m이며 높이는 92.987m이며 하부 조압수조는 그림 7과 같이 수실부와 수직구로 나누어져 있다. 수직구의 내경은 8.5m이며, 높이는 74.157m 이며, 2련으로 설치되어 있다. 수실부는 높이는 약 19m이며, 폭은 14.4m이고 연장은 76.4m 이다. 단면의 형상은 아치부는 달걀형식이며, 측벽부는 버섯형식으로 아치부에는 길이 10m의 록볼트가 설치되었으며, 선단정착과 전면접착식을 혼합한 형식이다.

- 굴 착 량 : 34,592 m³
- Rock Bolt : 3,289 EA
- 콘크리트량 : 11,561 m³
- 버 력 처 리 : 67,311m³
- Shotcrete : 9,212 m³
- 철근가공조립 : 491.56 Ton
- 강지보공 : 21 Set

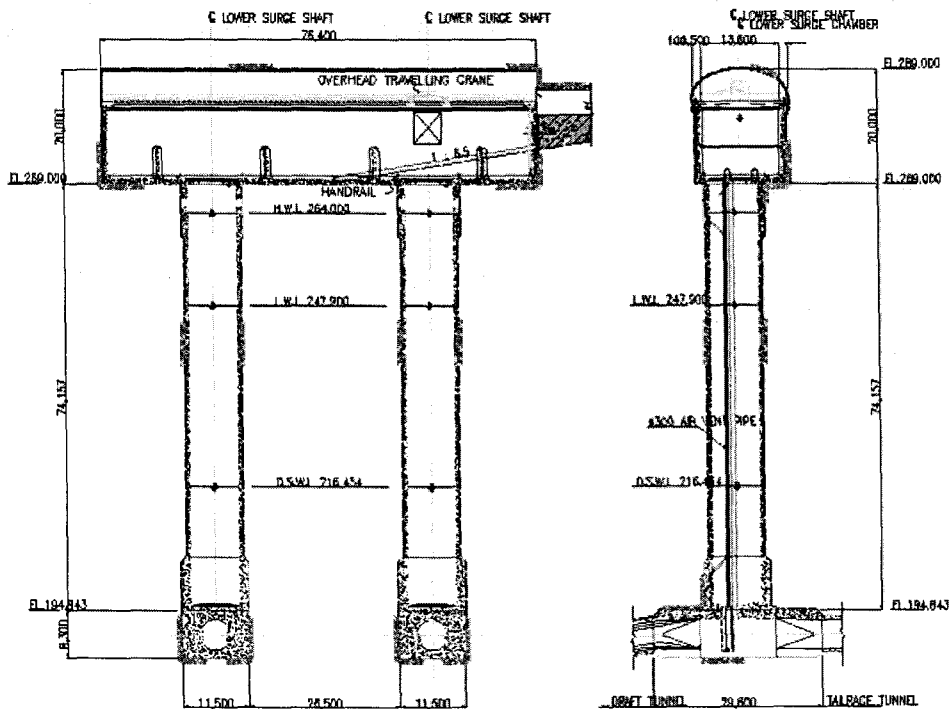


그림 7. 하부조압수조 개요

3.2.1 수실부 굴착 및 축조공사

하부조압수조의 경우 굴착공사는 01년 7월 5일에 착공하여 02년 9월 4일에 준공하였으며, 축조공사는 02년 9월 11일에 착공하여 03년 9월 18일에 준공하였다.

수실부의 굴착공사 및 축조공사의 시공순서는 그림 8과 같다. Main Body 굴착은 Bench cut 발파공법으로 시행하되 벽체면은 여굴 및 이완을 최소화 하기위해 제한발파(Presplitting Blasting)공법으로 굴착하였다.

수실부 공사중 지하발전소와 방수로에서 발생된 분진, 매연이 수직터널을 통하여 수실부로 유입된 후 정체현상이 일어나 열악한 작업환경으로 어려움을 겪었다. 이를 해소하기 위해 수실부 입구에 환기팬을 설치하여 하부조압수조 진입터널로 배출하였으나 환기효과가 높지 않아 작업효율저하 등으로 애로사항이 많았으며 작업공간이 협소하여 장비의 진입과 회전에 많은 시간이 소요되는 어려움을 겪었다.

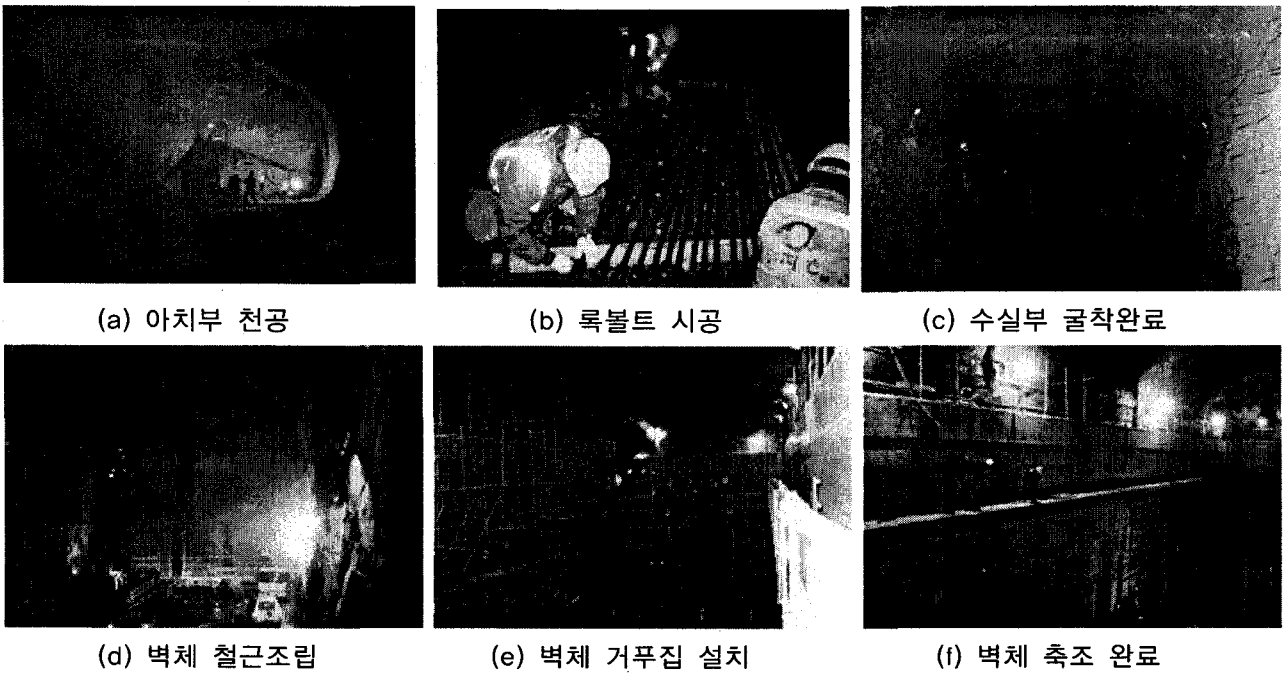


그림 8. 하부조압수조 수실부의 시공순서

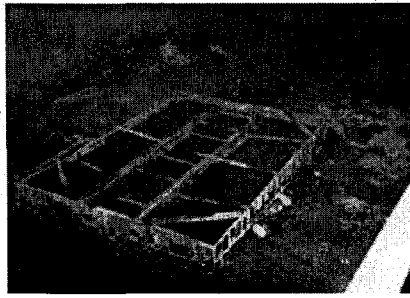
3.2.2 수직터널 굴착 및 축조공사

수직터널 굴착공법은 대별하여 D&B(Drill & Blasting Method)공법과 RBM(Raise Boring Machine Method)공법, RC(Raise Climber Method)로 구분되는데 청송양수발전소에서는 안전하고 시공속도가 빠른 RBM 공법을 채택하여 시공하였다.

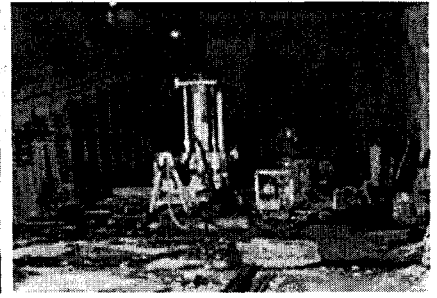
특히, 수압터널의 경우에는 수직편차가 발생하여서는 안된다. RBM공법 유도공 굴착시 초기에 수직도를 확보하지 못하면 굴착이 진행될수록 수직오차가 커질 수 있고 ROD에 걸리는 힘이 커져 휠 수도 있기 때문에 본 현장에서는 초기 1m/일의 굴진속도로 15m를 굴진하였고 이후에는 5m/일의 굴진속도로 굴착하였다. RBM공법은 상부 및 하부에 작업공간을 확보할 수 있는 경우에 사용되는 상향식 굴착방법으로, 굴착하고자 하는 수직구 상부에는 기계실(Machine Room), 하부에는 리밍룸(Reaming Room)을 조성한 후, 상부 기계실에 그림 9의 (a)~(c)와 같이 RBM장비를 안착시켜 소구경(Φ 311mm)의 Tri-con Bit로 상부에서 하부로 굴착하면서 드릴파이프를 교체 연결하여 소구경 유도공을 그림 9의 (d)와 같이 관통시킨 후 그림 9의 (e)와 같이 상부로 리머 헤드(Reamer Head)를 끌어올리면서 회전·압쇄에 의해 수직구를 대구경(Φ 2.4m~3.05m)으로 확공하여 나가는 방법으로 본 현장에서는 직경 2.4m의 리머헤드를 사용하였다.



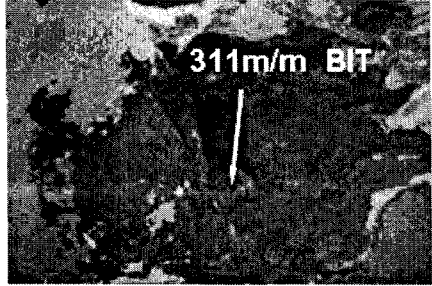
(a) 수실부 진입로 측벽보강



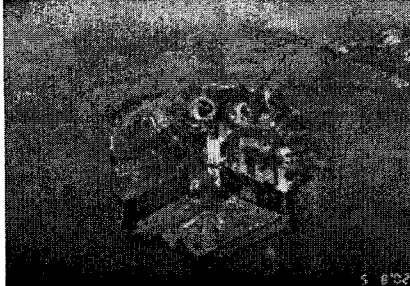
(b) RBM 기계기초 타설



(c) RBM 설치



(d) 유도공 천공완료



(e) 리밍헤드 설치



(f) RBM용 동력

그림 9. RBM공법에 의한 수직구 굴착(소구경)

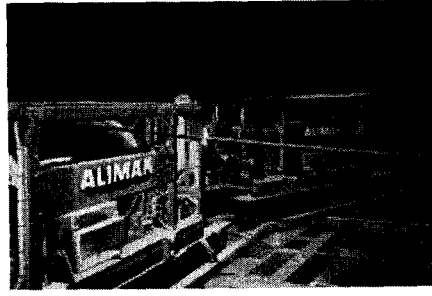
NATM공법에 의한 확개시 (그림 10) Gantry 크레인과 윈치 5ton짜리 4대를 사용하여 작업대를 작동하였으며, 안전성의 제고를 위해 크레인 상단에 리미트 스위치를 2단으로 설치하여 불시의 사고를 방지할 수 있도록 조치하였지만 크레인파 윈치의 잦은 고장으로 다소의 공기지연이 발생되었고 이를 통해 국산 장비를 사용하면 고장발생시 신속한 조치가 가능하다는 교훈을 얻게 되었다. 수직구 시공시 가장 어려운 작업은 천공작업으로 시공초기에 크롤러드릴(Crawler Drill) 2대로 시공하였으나 수평방향 천공시 집진장치가 벽체에 밀착이 되지 않아 분진을 수집하지 못해 환기상태가 극히 불량하게 되어 점보드릴을 통해 분진발생을 최소화 하였다. 발파후 버력은 리밍공을 통해 밀으로 던진 후 하부터널을 통해서 반출 하였다.

수직터널의 축조공사는 (그림 11) Slip Form공법을 이용하였으며, 폼에 연직계를 설치하고 하부에 타겟을 설치하여 연직도를 수시로 검사하였다. 슬립폼은 한번 상승시키면 하강이 불가능하기 때문에 상승시기 판단이 매우 중요하였다. 1회 상승높이는 2.5m로써 당초계획은 일평균 3m정도의 타설높이로 계획하였으나 실제 속도는 일평균 2.4m 정도였다. 이는 시공시 동절기가 포함되어 양생온도가 낮은 것이 주요원인으로 분석되어 하부 찬공기 유입되는 곳을 밀폐하고 난방기를 작동시키는 조치를 한 결과 상승속도를 향상시킬 수 있었다.

하단의 수평터널은 5ton 크레인을 이용하여 Saddle Form을 조립하였으며 25-300-10에 강섬유를 혼입한 콘크리트를 타설하였다. 콘크리트 타설시 타설압력에 의한 거푸집의 변형을 확인하기 위해 변위계 이지를 4개소에 설치하였고 일정높이까지 타설한뒤 1시간 가량 작업을 중지한 뒤 타설하는 방법을 반복 하였다.



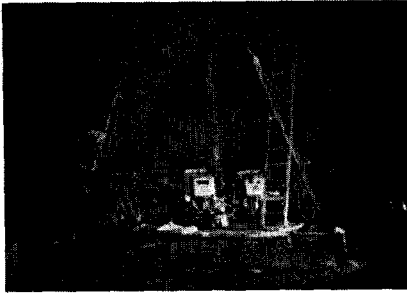
(a) Gantry 크레인 설치



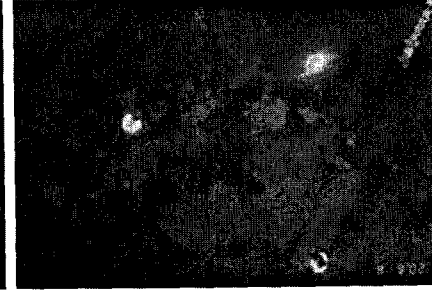
(b) 윈치 설치



(c) 점보드릴



(d) 확갱작업대 설치



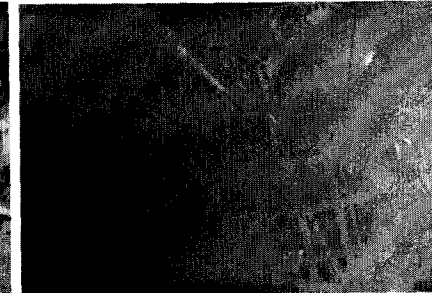
(e) 확갱 장약 및 발파



(f) 강지보 설치



(g) 수직구 하부 버력처리



(h) 슛크리트 타설(건설)

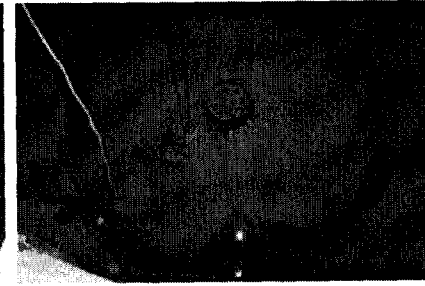


(i) 록볼트 시공

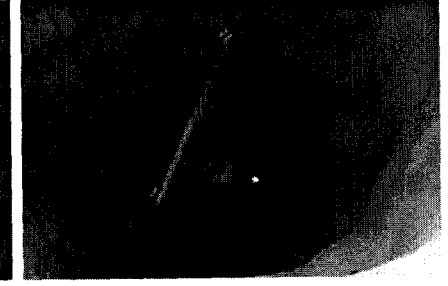
그림 10. NATM공법에 의한 확갱



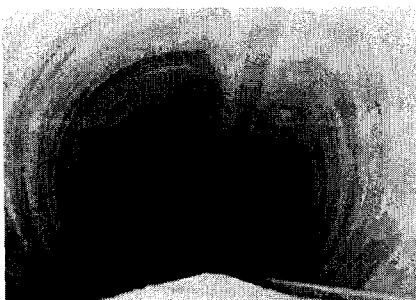
(a) 수직구 슬립폼 조립



(b) 슬립폼 Setting



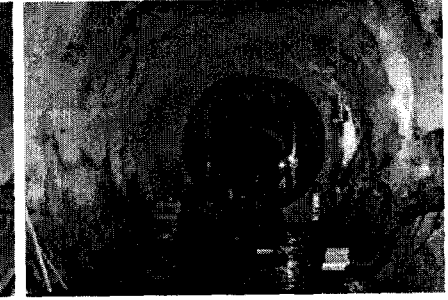
(c) 수직구 콘크리트 타설



(d) 수직구 축조완료



(e) 하단 Saddle Form 조립



(f) 수직구 하단 축조완료

그림 11. 수직구 축조공사

4. 라이닝 타설시 개선사항

4.1 라이닝폼 콘크리트 투입구 위치 표준화

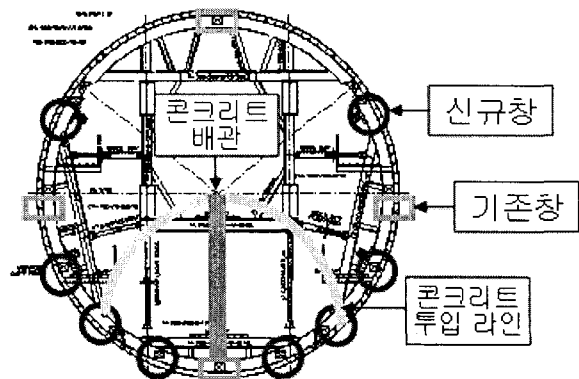
콘크리트 라이닝 타설시 콘크리트 투입구 타설높이가 3.5m 이상으로 낙하과정에서 골재분리에 의한 곰보발생으로 균질의 콘크리트 확보가 어려웠으며 작업창 부족에 따른 타설부위 콘크리트의 상태 파악이 어려웠고, 콘크리트 진동기 사용 부위가 제한적이었다.

이에 그림 12와 같이 콘크리트 투입구 위치를 바닥에서부터 0m, 1.5m, 3.5m, 5.5m 높이에 설치하는 것으로 표준화하였으며, 투입구를 작업창으로 활용하여 타설상태를 파악하고 전구간에 걸쳐 콘크리트 진동기를 사용하여 골재분리 및 곰보 최소화로 양질의 콘크리트를 타설할 수 있게 되었다.

개선비용은 용접 및 자재비를 포함하여 2백만원이 소요되었으나 실패비용 약 2천만원에 대해 체질 개선으로 약 1천 팔백만원의 효과가 있을 것으로 판단되었다.



(a) 개선전 골재분리 발생

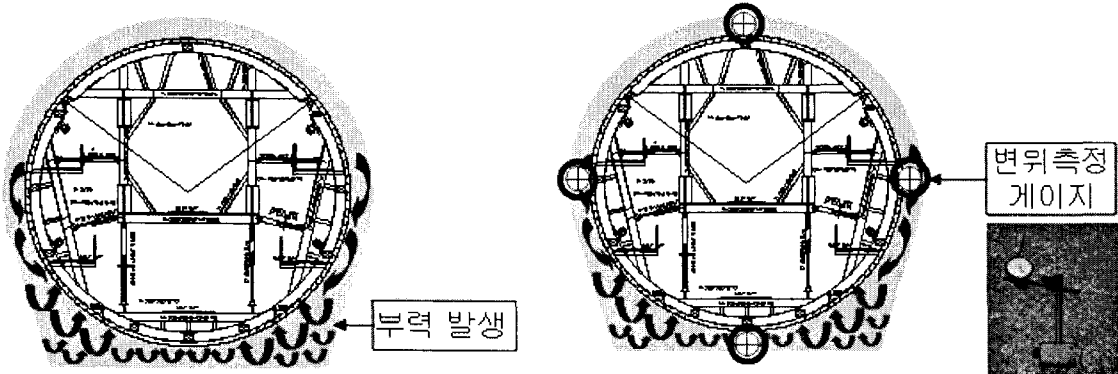


(b) 작업창 추가설치(개선)

그림 12. 라이닝폼 콘크리트 투입구 위치 표준화 개요

4.2 라이닝폼 변위측정 방법 표준화

원형 수로터널 콘크리트 라이닝 타설중 부력에 의해 라이닝폼의 변위가 발생하고 시공조인트 구간에 단차가 발생하는 등의 문제가 발생하였다. 이에 그림 13과 같이 라이닝폼 4곳에 변위측정 게이지를 설치하여 변위발생 여부를 확인하고 변위발생시 타설속도를 평상시 30m³/hr에서 20m³/hr로 감소시킨 결과 시공 Joint구간의 단차발생이 ±0.5cm 이내로 저감되었다.



(a) 개선전 라이닝폼 변위 육안관찰 (b) 변위측정 게이지 설치를 통한 타설속도 조절

그림 13. 라이닝폼 변위측정 방법 표준화

5. 결 론

청송양수발전소는 국내최초로 지자체에서 유치하여 정부계획에 반영된 발전소 건설사업으로 발전소 건설로 인해 지역경제 활성화 및 안동 일대에 안정적인 전력공급을 기대할 수 있을 것으로 판단되며 주왕산과 연계한 청송군 관광자원화에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

수로터널은 내수압에 대해 충분한 차수가 가능한 수밀(Watertight)구조를 갖추어야 하며, 유지관리가 일반의 도로터널보다 어렵기 때문에 초기의 라이닝관리가 중요하다고 할 수 있다. 이를 위해 본 과업에서는 그라우팅 및 콘크리트 라이닝의 품질관리에 최선의 노력을 다하였으며, 다양한 노력을 통해 품질 향상 및 경비절감 효과를 볼 수 있었다.

지하의 복잡한 구조 시공시 작업자는 열악한 환경에 노출되기 쉬우며, 이는 곧 공기지연을 초래할 수 있으므로 공사중 환기, 수직구 공법선정시 작업자의 안전을 최우선시하였고 앞으로는 이러한 환경문제가 커지리라고 판단된다.

참고문헌

1. 이석원, 조만섭, 배규진(2000), “수직구 굴착 공법의 선정 방안”, *KTA 2000 Symposium*
2. 임한욱, 김치환(2002), “국내 양수발전소 지하공동 안정성 해석방법의 비교”, *한국암반공학회지*, Vol.12, No.4, pp.248~258.
3. 장은식, 오인석 (2000), “고속도로 터널의 수직갱, 사갱 설계 및 시공”, *터널기술*, Vol. 2, NO. 1, pp.42~52.
4. 대교물산, *R.B.M. 공법*, 한국.
5. 한국 서부발전(주), *청송양수발전소 건설기록집 제1집~5집*, 한국.
6. Alimak, *Alimak Raise Climber*, Sweden.
7. The Robbins Company (1992), *The Raise Boring Handbook*, Washington, USA.