

# 카룬댐 프로젝트

백 운 일 (대림산업 이사)

## 1. 서론

본 댐 공사를 위한 Karun강의 유수전환은 상류 및 하류 Cofferdam을 건설하면서 시작되었으며, 공사 중의 하천유지 수량이나 홍수량은 내경이 9.0m인 두 개의 배수터널(DTR and DTL)을 이용하여 100년 빈도 설계홍수량인 2,900m<sup>3</sup>/sec를 배출할 수 있도록 설계 시공되었다. 또한 DTR은 최종적으로 담수시 수량조절 및 하천유지수량의 배출을 위하여 2개의 Gates(2.0m × 3.2m)를 설치하는 Bottom Outlet으로 변환하여 최대 550m<sup>3</sup>/sec의 유량을 배출할 수 있도록 하였다.

Bottom Outlet은 기본적으로 DTR입구에서 Morning Glory 형태인 Intake Tower와 약 80m높이의 Shaft Tunnel 및 수량조절을 위한 Gate Chamber로 구성된다(그림1 참조). 따라서 담수개시를 위하여 DTL Stoplogs를 닫게 되면 저수지 수위는 약 2일 이내에 EL.300.0m까지 차오르게 된다.

Bottom Outlet 전환공사는 댐공사의 공정 및 카룬강의 수문특성에 의해 좌우되며 단계별로 이루어지게 되는데 이는 댐공사 중 배수터널의 통수능력은 설계홍수량을 배출할 수 있는 조건을 항상 충족해야 하기 때문이다.

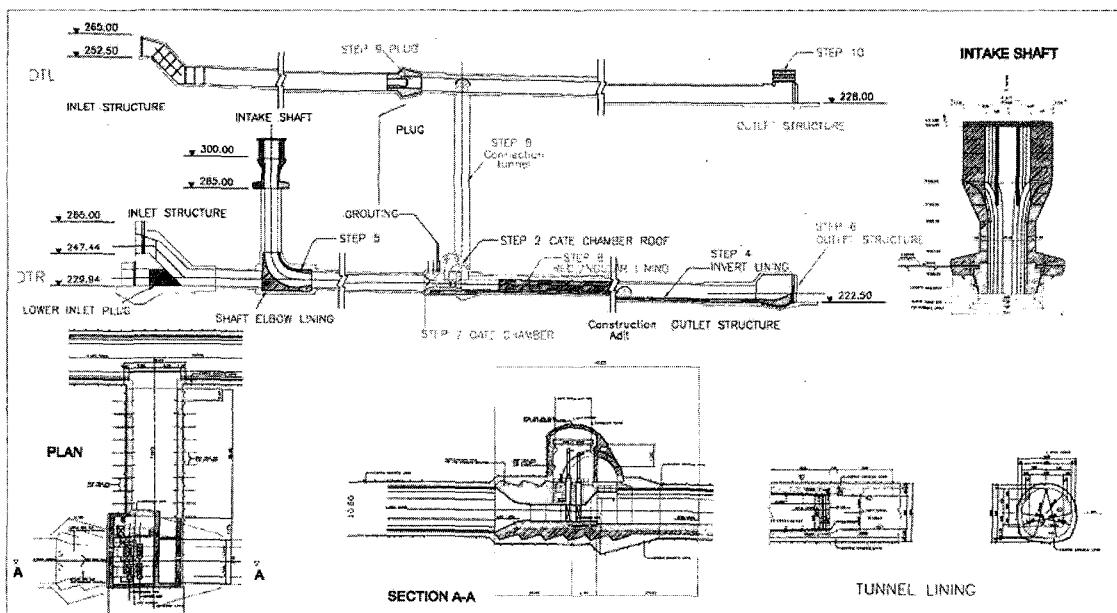


그림 1. Bottom Outlet 구조물

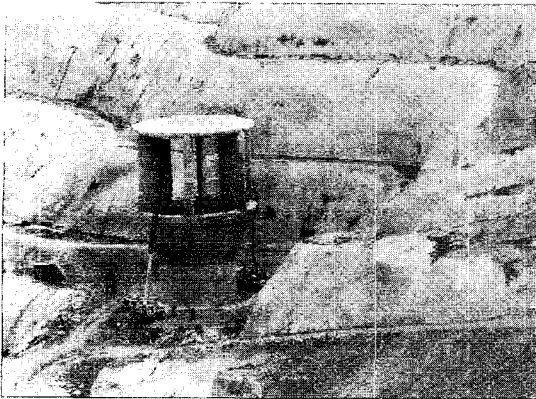


사진 1. Bottom Outlet Intake Tower

따라서, 어느 한쪽의 배수터널을 막기 위한 공사를 위해서는 댐높이와 통수능의 관계가 큰 역할을 하게 되며 특히 카룬강의 수문특성이 댐공사에 미치는 영향은 지대하므로 이 특성에 대하여 알아 보기로 한다.

## 2. 수문학적 특성

General Project Information(GPI 2.03.03)에 따르면 월평균 최대유량은 해발 2,000m 이상인 상류유역에서 눈이 녹기 시작하는 3월에 발생하여, 최대 홍수는 대개 12월에서 3월 사이에 발생된다고 기록되고 있다. 이러한 홍수는 약 26km 상류에 위치한 Karun 1 Dam에서 주로 조절되며, 100년 빈도 홍수에 해당하는 6,100m<sup>3</sup>/sec의 유입량은 K-1 Dam에서 조절되어 첨두부하를 2,200m<sup>3</sup>/sec로 제한하여 방류되며 Intermediate Catchment로부터 유입되는 700m<sup>3</sup>/sec를 합한 2,900m<sup>3</sup>/sec가 당 현장의 100년 빈도 설계홍수량으로 간주되었다. 3월에서 5월까지에 걸쳐 녹은 눈이 카룬강의 주요 방류량이 되긴 하나 11월에도 강우강도가 큰 비로 인해 홍수가 발생한 사례가 있으며 우기는 5월까지도 지속되는 경우가 있었다.

따라서 현장의 잠재적인 홍수기를 크게 분류하면

- Season #1 Rainfall floods : 11월부터 2월까지
- Season #2 Snow melt floods(K-1 Dam Release) : 3월부터 5월까지

와 같다.

Season #1에 겪었던 두 번에 걸친 홍수이력 및 당 현장의 공사기간 중에 K-1 Dam 방류결과는 <그림 2>~<그림 5>와 같다. 한편, 설계홍수량에 대한 현장의 대비는 천단이 EL.301.0m인 Integrated Cofferdam과 두 개의 배수터널을 통한 배수량이 2,900m<sup>3</sup>/sec에 달하게 되므로 가물막이(Upstream Diversion Dyke)설치로 인한 유수전환 직후 위기전에 Integrated Cofferdam의 시공이 완료되었다.

11월부터 5월까지에 걸쳐 배수터널의 통수능에 지장을 초래하는 것은 위기상황을 초래하게 되며, 특히 K-1 Dam에 홍수가 유입되는 3월에서 5월까지 통수능에 영향을 주는 것은 극심한 위기상황을 초래하게 된다.

## 3. Bottom Outlet의 목적

Bottom Outlet의 일차적인 목적은 댐 초기 담수시 1m/day의 수위상승속도를 유지하여 댐체의 안정을 도모하기 위한 방류수량을 조절하기 위한 것이다.

Diversion Tunnels Stoplog를 내린 후 EL.300.0m에서 EL.350.0m까지의 수량조절은 발전용 Pressure Shaft를 통하지 않고는 Bottom Outlet을 통해서만이 가능하며, 특히 Power Intake Weir Sill이 위치한 EL.342.0m에서 EL.300.0m까지의 저류량은 약 7,500만m<sup>3</sup>으로서 당 현장으로 유입이 없는 경우에는 2 내지 3일 이내에 저류량의 완전방류가 가능하다. EL.300.0—dlgkmdl 저류량 2,500만m<sup>3</sup>은 사수(Dead Storage)로 간주되며, DTL에 설치된 Fuse Plug를 제거하지 않는 한 사용이 불가능하다.

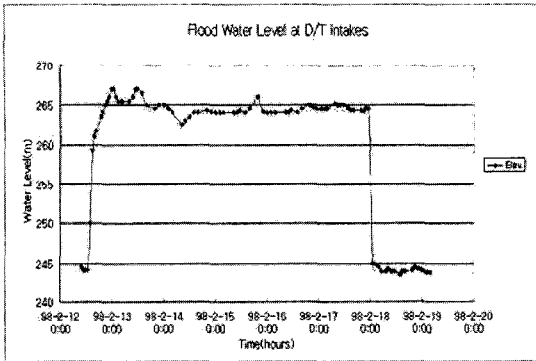


그림 2. 1998년 2월 저수지 수위

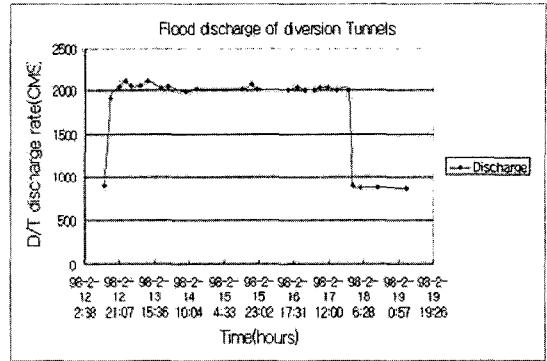


그림 3. 1998년 2월 Bottom Outlet 방류량

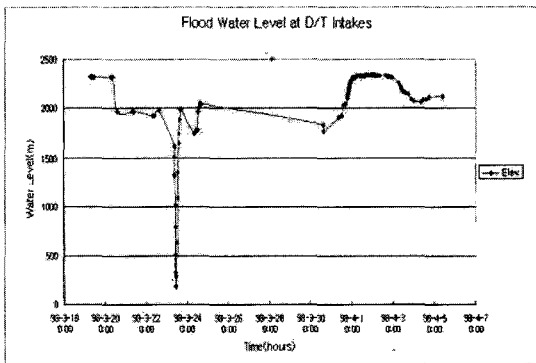


그림 4. 1998년 3월 저수지 수위

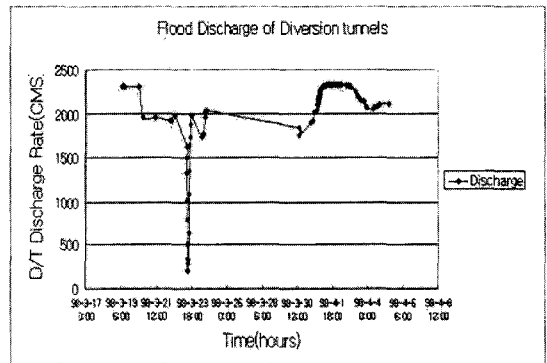


그림 5. 1998년 3월 Bottom Outlet 방류량

Bottom Outlet의 부수적인 목적은 비발전시 하류로 기저유량인 하천유지수량을 방류할 시 간편하게 이용될 수 있다는 데에 있다.

#### 4. DTR의 Bottom Outlet 전환

기본설계의 개념은 <그림 1>에 나타난 바와 같이 댐 시공중에 단계별로 DTR을 Bottom Outlet으로 전환하게 되며, 작업순서는 Intake Shaft and Tower, Lowerplug, Curtain Grouting at the Centerline of gate Chamber, Elbow Plug, Gate Chamber의 순서로 진행된다. DTR Inlet에서 약 400m 하류부에 위치한 Gate Chamber는 DTR Roof위에 위치하며, 이 Chamber는 25m길이의

Connection Tunnel에 의해 DTL에 연결되어 Operation 기간 중에 통로로 이용된다. DTL은 Connection Tunnel의 직상부에 Fuse Plug Concrete를 설치하여 차수를 실시한다.

DTR의 Gate Chamber하류부 중 유속이 가장 빠른 45.0m구간(CH:698.2m - CH: 653.2m)은 Steel로 Lining하였으며, 그 이하 205m구간(CH:653.2m - CH:448.2m)은 콘크리트로 폭이 6.0m, 높이 5.0m인 직사각형 수로를 만들었으며, 7개소에 Aerator를 설치하여 Cavitation 피해를 방지하도록 설계, 시공되었다.

참고로 Steel Lining구간은 원 설계에서는 20.0m로 계획되었으나 수리모형실험 결과에 따라 45.0m로 연장하였다. CH 448.2m에서 CH 0.0m까지는 Invert만을 Concrete Lining하는 것으로 하였다.

DTR 말단부는 원설계시 Flip Bucket Structure로 계획되었으나 수로폭을 9.0m에서 6.0m로 축소함으로 인해 Stoplog활용이 가능해진 고로 홍수시 Backwater를 방지하기 위해 설계를 변경하여 Stoplog Slot로 만드는 구조로 변경되었다.

- Chute complete
- Power Intake structures complete except extension works
- DTR platform ready
- Stoplogs ready

## 5. 기술시방서

Bottom Outlet Works에 대한 특기시방서에 따르면 “River Diversion Scheme”과 “Dewatering and Care of Water”는 시공자가 계획, 시행토록 규정되어있다. 또한 2,900CMS이하인 홍수에 대하여 시공자가 현장보호의 책임을 지도록 되어 있다. 반면에, 발주처는 River Diversion 및 DTR, DTL Stoplog Lowering시 K-1 Dam의 방류를 조절하여 안전한 시공이 되도록 하며, 초기 담수하는 동안에 K-1 Dam 방류량을 조절하는 책임을 규정하고 있다.

현장이 홍수로 인한 피해가 발생하지 않도록 담수 과정과 배수터널의 폐쇄시 일반적인 순서 및 전제조건에 대하여는 특기시방서에 기술되어 있다.

댐의 담수는 DTL Closure와 동시에 시작되며, 기술시방서에 명기된 전제조건은 다음과 같다.

- 본 댐 공사완료
- 여수로 수문 작동완료
- Power Intake 주변기기 작동완료
- Stilling Basin 완료
- 계측기기 작동완료
- Bottom Outlet 작동완료

### 2) 홍수가능성 보험관련

공사기간동안에 100년 빈도홍수량 2,900CMS보다 작거나 같은 홍수에 대하여 현장의 보호 및 Dewatering에 대한 책임을 시공자가 갖는다는 계약 조건에 따르면 그 이상의 홍수량에 대하여는 Force Majeure로 간주되며, 발주처가 책임을 지는 것으로 간주된다.

## 6. 계약적 고려사항

### 1) 배수터널 폐쇄를 위한 전제조건

DTR Closure를 위한 전제조건은 프로젝트의 안전을 위하여 특기시방서에 기술되어 있으나 현장여건에 비해 볼 때 전부를 만족시킬 필요는 없는 것으로 간주된다. 예를 들면

- 본 댐 최소성토높이 132m(EL.337m asl)
- Spillway forebay complete
- Spillway headwork concrete except one pier and bridge

따라서, 시공자는 2,900CMS까지의 홍수에 대하여 보험을 들어야 하며, 당 현장의 Diversion System은 이 홍수에 대하여 설계되어진 것이다. 따라서, 부적절한 때 배수터널의 방류량을 감소시키는 것은 홍수의 가능성을 높이는 결과가 되며, 피해 발생시 보험처리가 어려워지는 근거가 될 수 있으므로 주의를 요한다.

대체적으로 5월말부터 11월초까지는 건기로 분류되는데 우선 유량이 적고 상류에 위치한 K-1 Dam에서 발전을 위해 수량을 조절함으로 인해 홍수에 대한 우려는 없는 것으로 간주해도 좋다.

그러나 우기 중 특히 3월에서 5월 사이의 홍수위험은 상당히 높으며, 본 댐의 건설기간 중에 배수터

널의 충분한 방류량 확보를 위한 노력이 요구되었다. 특히, 1999년도에 DTR Shaft Elvow를 시공함으로 인해 통수능력이 20% 감소되었던 바 이를 보상하기 위하여 2000년 3월 전에 댐 성토고를 EL.360.0m까지 올려 댐으로 홍수가 월류되는 것을 방지시켰다.

계약적인 논쟁이 된 부분은 “Care of water during and after impounding” 이른 글귀의 해석에 있었다. 실제로 시공자는 담수행위에 대한 아무런 권한이 없었다. 예를 들면, K-1 방류, Gate Chamber Operation, Spillway gate Opening 모두가 발주처의 권한에 해당되므로 시공자는 제한된 책임만을 갖게 된다.

## 7. 건설과정

Bottom Outlet작업의 주요 Activity에 대한 작업진행과정을 기술하면 다음과 같다.

### ○ 1998년

- DTR intake shaft(tower)
- Concrete wall in gate chamber
- Curtain and consolidation grouting in DTL
- Demolish DTL - connection tunnel wall
- Close DTR inlet stoplogs(by other contractor)
- Curtain and consolidation grouting in DTR
- DTR lower inlet concrete plug
- Open DTR inlet stoplogs(by other contractor)

### ○ 1999년

- Close DTR inlet stoplogs
- Demolish old concrete lining at DTR

intake shaft bottom

- Construct elbow plug at DTR intake shaft bottom
- Demolish old(stage-1) concrete at Gate area in DTR
- Construct temporary protective concrete lining at gate area
- Invert lining(1st stage) in DTR from (CH:448.2 to CH:0.0)
- Place concrete foundation for gate area steel liners
- Open DTR inlet stoplogs

### ○ 2000년

- Invert lining(2nd stage) in DTR downstream of gates
- Erection of B/O crane, steel liners and gates by other contractor
- Concreting around the steel liners
- Concrete lining of rectangular channel in DTR
- Backfill DTL inlet area to EL.265.0m
- Close DTL inlet stoplogs --- start of impounding
- Open up connection tunnel
- Demolish old concrete at DTL plug

### ○ 2001년

- Construct concrete fuse plug in DTL

### ○ 담수개시후 잔공사:

Bottom Outlet으로 고속류가 흐른 후 48시간 이내에 DTR내에 Steel 및 Concrete Lining에 주요 피해가 생겨 Bottom Outlet 잔여공사에 대한 계류가 발생하였으며, 그 내용은 아래와 같다.

## 기술 기사

- Concrete lining of the connection tunnel
- Construction of gate chamber roof
- DTR outlet structure
- DTL outlet structure

잔공사는 Steel 및 Concrete Lining에 대한 재설계가 확정된 후 시작될 예정이며, DTL Stoplog가 제거되지 않은 상태에서 Fuse Plug의 기능은 매우 모호하나 EL.350.0m까지 아무런 문제없이 담수된 것을 볼 때 더 이상 Fuse Plug의 기능을 유지할 필요는 없을 것으로 판단된다.

### 8. DTL Stoplog Lowering - 담수개시 및 피해상황

2000년 12월 19일 DTL Stoplog Lowering을 위한 6-1에서 언급된 절대적 전제조건이 완료되어, Stoplog를 내리기 시작함과 동시에 담수가 개시되었다.

2000년 12월 21일 소음과 진동을 수반한 Concrete Block이 DTR Outlet 으로 씻겨져 나오는 것을 발견하였으며(〈사진 3〉 참조), 그 즉시 DTR에 Aeration이 가능하도록 Connetion Tunnel을 즉각적으로 Opening하기 시작하였다.

담수개시 후 사건기록은 아래와 같다.

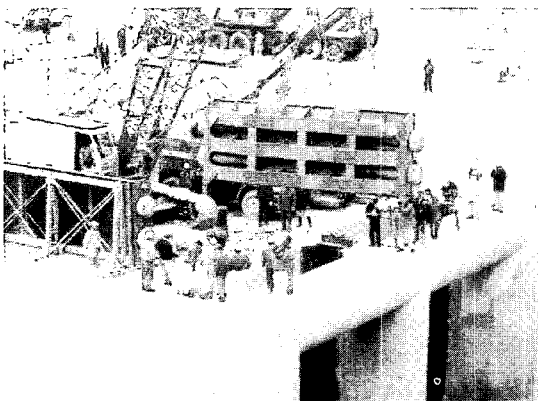


사진 2. DTL Stoplog Lowering

#### ○ 2000년 12월 19일 :

- 01:15 AM K-1 Shut down - no more release for at least 6 hours
- 10:15 AM DTL stoplogs all closed - compounding effectively started

#### ○ 2000년 12월 20일 :

- 04:00 AM K-1 release 550cms (11시간 동안 유지됨)

#### ○ 2000년 12월 21일 :

- 05:30 AM 저수위 EL.300m에 도달하여 DTR로 물이 나오기 시작함

이날과 다음날 까지도 DTR Intake Tower로 분수처럼 물이 뿜어져 나오는 현상이 약 5-10초간격으로 발생함(〈사진 5〉 참조). 이는 DTR에서의 압력변화로 인하여 갇힌 공기가 Shaft를 통하여 뿜어져 나오므로 인해서 발생된 현상임.

#### ○ 2000년 12월 22일

- 야간에 약 530cms로 K-1에서 방류함

#### ○ 2000년 12월 23일

- 12:00 AM DTR 피해상황 발견

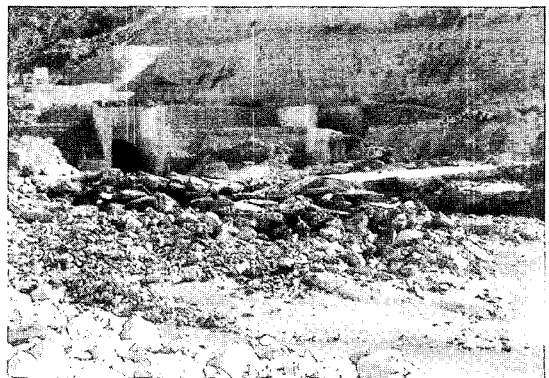


사진 3. Concrete Block이 DTR Outlet으로 씻겨져 나온 모습

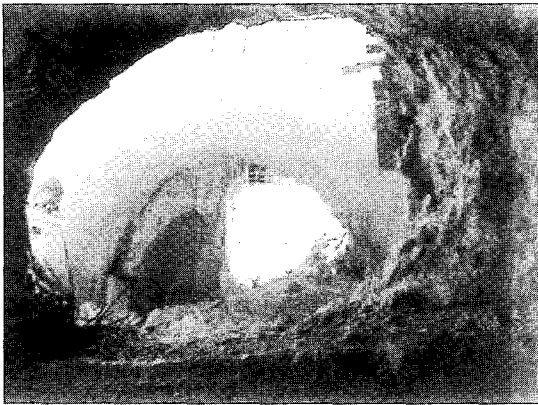


사진 4. Connection Tunnel Opening 모습

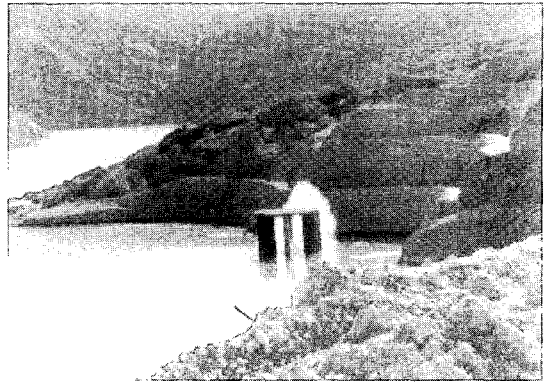


사진 5. 담수시 DTR Intake Tower를 통해 분수처럼 물이 뿜어져 나오는 모습



사진 6. Concrete Lining구간 피해 모습

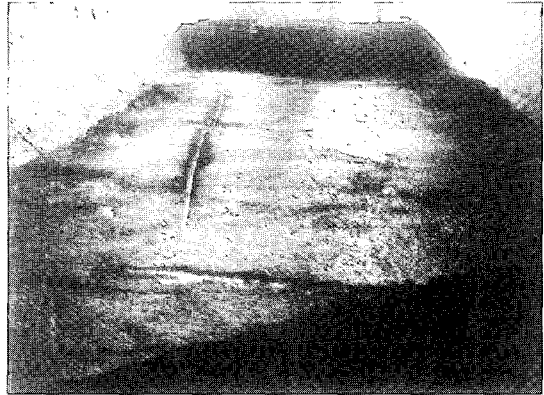


사진 7. Steel Lining구간 피해 모습

- 12:00 AM DTL Connection Tunnel에 첫 번째 개구부(opening)를 만들

첫 번째 Opening을 위해 Drilling하는 동안에 DTR쪽으로 공기가 심하게 흡입되는 상황이 발생하였다. 개구부를 설계단면적에 가깝게 키우자 공기의 속도는 약 15m/sec로 감소되었으나, DTR에 가장 가까운 Aeration Gallery에서의 공기속도는 속도측정기의 한계인 30m/sec를 훨씬 상회하였다. Gates Operation을 좌우하는 Gate Chamber안에 있는 Hydromechanical Equipment, Crane, Cylinder, Control Panel 등은 조사결과 작동이 가능한 상태였다.

DTR 피해를 조사하기 위해 12월 25일 약 1시간에

걸쳐 Gates를 완전히 닫은 후 내부를 관찰한 결과 직사각형 수로를 조성한 Invert와 Wall의 Concrete Lining 전구간(약200m)과 Steel Lining구간 45m 중 36m 구간이 씻겨나간 것으로 조사되었다(〈사진 6〉, 〈사진 7〉, 〈그림 6〉 참조). 그리고 〈그림 7〉은 이 기간 동안 담수시 저수지의 수위변화를 보여주고 있다.

## 9. 피해상황 검토 및 피해조정

신규 Concrete 및 Steel Lining에 대한 피해정도를 평가해 본 결과 이전과 같이 530cms의 유출량이 지속된다면 배수터널의 Old Concrete Lining에 피

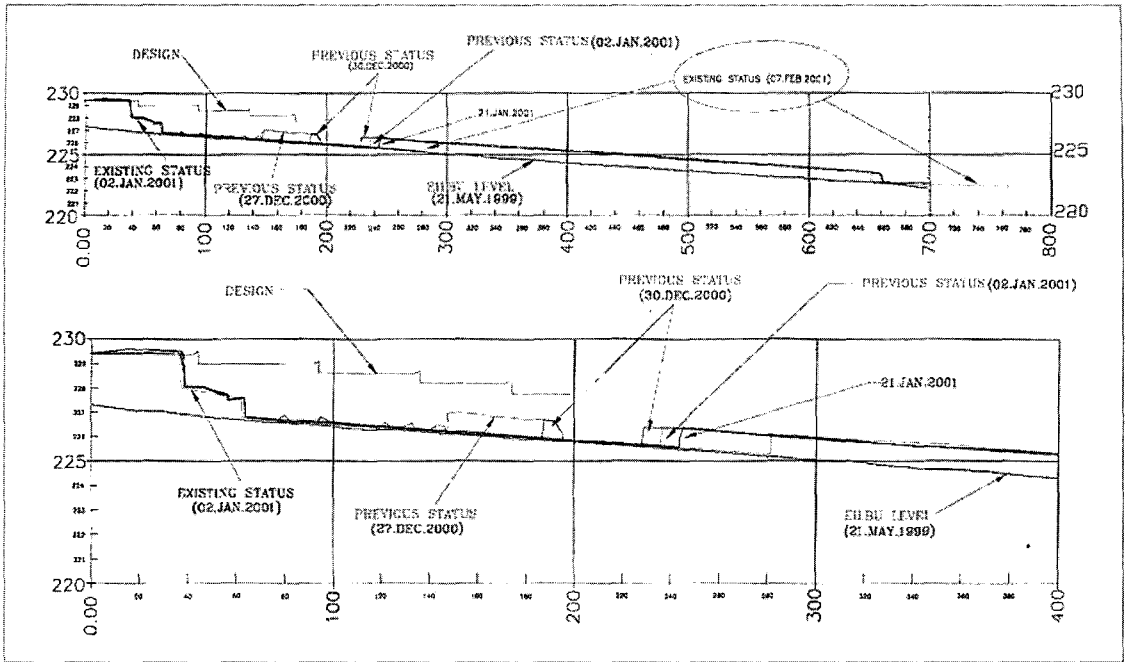


그림 6. DTR 피해상황 현황

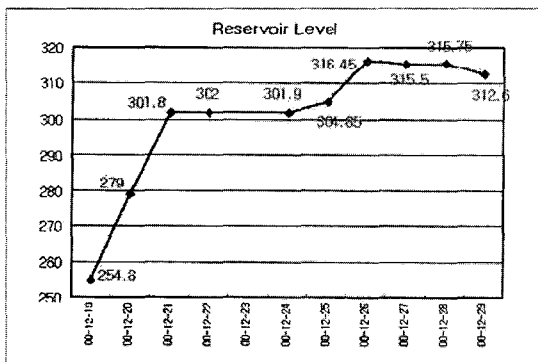


그림 7. 담수시 Reservoir의 수위변화

해가 발생될 가능성도 배제할 수 없다는 결론에 도달하여 피해조정을 위한 유출량의 조정이 불가피하게 되었다. 따라서, 주수위의 급상승을 막고 유출량을 조절하기 위한 K-1 Dam Release의 조절에 돌입하게 되었으며, 단계별로 10cm씩 Gate Opening을 조절해 가면서 Tunnel의 피해진행정도, Gate Vibration 정도 및 혼입되는 공기의 속도를 관찰해 본 결과 가능 최대 Opening은 2.5m로써 300cms가 최대 배출가

능량인 것으로 판명되었다. 결국 담수위는 K-1 Dam 방류량과 Gate Opening을 조절해 가면서 담수위가 EL.350.0m에 달할 때까지 지속하였다.

### 10. 피해발생 원인

피해발생 원인에 대한 전문적인 조사가 진행되어야 하나 사설관찰에 입각한 원인을 간단히 거론해보기로 한다.

#### 1) Aeration 부족

DTR 및 Gates의 Aeration은 담수 후 4.5일이 경과된 후이나 공급이 되었으며 Aerator에 적정한 공기의 공급이 부족하여 Cavitation현상이 크게 발생된 것으로 판단된다. Aerator에 대한 수리모형실험에서는 Aeration Gallery에 공기공급이 안될 때 최



대유량이 Gate를 통과하는 경우에 대해서는 고려되지 않았다. 수리모형실험결과에 따르면 Steel Liner 주변에서의 흐름이 가장 극한상황이며, 터널의 주변을 따라서 난류 Jet가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 적절한 Aeration이 안되는 상황에서는 상상하기 어려운 압력요동이 발생되어 피해상황에 이르게 된다는 것을 쉽게 상정할 수 있다.

Steel Lining 벽체의 설계도 검토되어야 할 부분인데 Anchoring도 없고 Secondary Concrete나 기존의 Tunnel Concrete Lining에 적절한 Bonding이 없이 5m 높이의 Cantilever로 작용하도록 설계되어 있어 매우 불안정한 구조이므로 약간의 인력이 작용되더라도 쉽게 파괴될 상황이었다.

따라서, 적절한 Aeration이 없이는 Concrete Channel Lining에 설치된 Aerator가 작동이 불가능한 상태였으며 이로 인한 Cavitation Damage는 불가피한 상황이었다.

## 2) Air Entrainment

수리모형실험에서 밝혀진 바에 따르면 Intake Tower에서 연행공기에 의한 부정적인 현상의 발생가능성을 언급하고 있다. Intake Tower를 통해 혼입된 공기가 Shaft and Tunnel을 통과하여 Bottom Outlet Gates주변에서 큰 압축과 갑작스런 팽창이 발

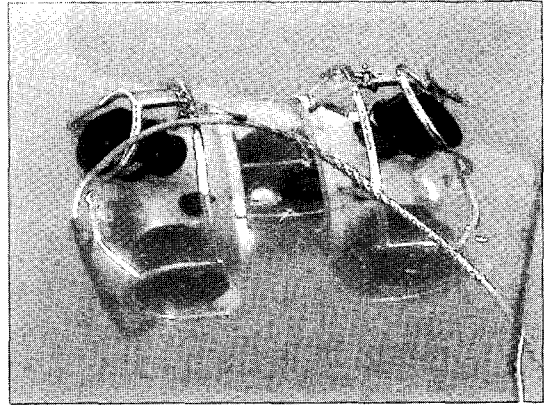


사진 8. Remotely Operating Vehicle

생하여 심각한 압력변화를 일으키고 Gate의 진동과 하류부에 악영향을 미칠 수 있는 것으로 판명되었다.

따라서, 이를 방지하기 위하여 담수위가 EL.303m에 도달하기 까지 Gate Opening을 조절하면서 자유수면의 흐름을 유지하도록 하고 압력수로의 흐름으로 바뀔때는 최소 담수위를 EL.308.0mdp 위치시켜 공기의 혼입을 방지할 것을 제시하였다.

그러나 현장에서는 이를 지킬 수 있는 조건이 구비되지 않았으며, 이러한 보고내용이 사전에 고려되지 않아 피해가 발생된 원인의 하나로 보여진다.

사건 발생 후 Remotely Operation Vehicle로 표면관찰을 행한 결과 이 현상으로 인한 Concrete표면의 피해는 발견되지 않았으며, Gate 주변까지는 R.O.V가 닿질 않아 조사가 불가능 하였다.