

터널형 비상여수로의 설계 사례

A Case Study On The Design of Tunnel Type Spillway

백승규¹⁾, Seung-Kyu Baek, 추석연²⁾, Seok-Yeon Choo, 백운일³⁾, Un-Il Baek, 박형섭⁴⁾, Hyung-Seop Park

¹⁾ 단우기술단 차장, General Manager, DANWOO Engineering. Co., Ltd.

²⁾ 단우기술단 상무이사, Managing Director, DANWOO Engineering. Co., Ltd.

³⁾ 대림산업 상무이사, Vice President, DAELIM Industrial Co., Ltd.

⁴⁾ 대림산업 부장, Manager, DAELIM Industrial Co., Ltd.

SYNOPSIS : Tunnel type spillway is rarely constructed in worldwide, and designed secondary in Korea. In this paper we pronounce a case study of tunnel type spillway design. We firstly considered lining concrete abrasiveness and cavitations for tunnel safety. This paper describes the design of tunnel type spillway section, excavation method, blasting, support and concrete lining.

Keywords : spillway design, tunnel type, cavitation, lining concrete, abrasiveness

1. 서 론

최근 들어 국지적 집중호우와 같은 이상기후 현상이 자주 발생하며 이에 따라 수해 발생 횟수도 증가하고 있다. 2002년 태풍 루사와 매미에 의해 대규모 수해를 겪은 이후 전국 21개 댐의 수문학적 안정성에 대한 재검토가 이루어졌다. 임하댐의 경우 댐 설계 당시 최대 가능 홍수량은 7,550 m³/sec이었으나, 재검토 결과 14,820 m³/sec로 약 두배 증가하였으며, 댐의 안전성 확보를 위하여 7,270 m³/sec의 부족분에 대한 비상 여수로 건설이 필요한 것으로 검토되었다.

수문학적 안정성 검토 및 치수능력 증대를 위한 댐의 안정성 확보 우선순위 검토 결과 전국 21개 댐 중 세 번째로 임하댐의 안정성 확보가 시급한 상태로 검토되어 비상여수로 건설을 추진하게 되었다.

본 연구 대상 과업인 임하댐 비상여수로 건설 사업은 국내에서 두 번째로 시행중인 터널형 여수로로써, 국내에는 시공사례가 없는 터널형 여수로의 설계와 체계적인 자료축적을 위한 기술력 향상을 위하여 설계 사례를 간략히 정리하여 소개하고자 한다.

터널형 여수로의 건설 목적은 댐의 안정성 확보를 위한 재해 방지이고, 사용 빈도가 낮은 중요 구조물로써, 설계시에 중점적으로 고려한 사항은 방류시 고유속으로 인한 라이닝콘크리트의 마모대책과, 공동(cavitation) 발생으로 인한 침식 대책을 설계에 충분히 반영하여 여수로의 내구성 및 안전성을 확보하는 것이다.

전체 터널 설계 세부 내용에 대하여 간략하게 정리하면 비상여수로의 형식 및 위치를 결정하기 위한 지반조사, 여수로 형식 결정 후 원활한 유수의 흐름을 고려한 단면 계획, 대단면 터널의 안정성 확보를 고려한 굴착 계획, 댐과 관련된 기존의 주요구조물들의 안전성을 고려한 발파계획, 대규모 터널의 굴착 안정성을 고려한 지보패턴계획, 고유속으로 인한 마모 및 침식을 고려한 콘크리트 라이닝계획, 방배수 계획과 시공 및 운영중의 안정성을 고려한 계측 및 유지관리 계획의 순서로 정리하였다.

2. 여수로 터널의 특성 및 사례분석

여수로는 저수된 물의 방류 시점마다 최적량의 물을 방류하여 댐의 안정성을 확보하기 위한 재해 방지용

구조물로서, 방류수의 신속하고 원활한 방류를 위하여 여수로내 일체의 시설물을 고려하지 않는다. 이러한 여수로의 형식은 크게 개수로형과 터널형으로 구분할 수 있으며, 본 연구대상인 임하댐 여수로는 터널형으로 설계 되었다.

먼저 설계에 앞서 터널형 여수로의 사례 조사를 하였으나, 국내에는 시공 실적이 없었으며, 해외 여수로의 시공 및 운영 사례들을 조사하여 분석하고 설계에 참고하였다. 표 2.1은 조사된 전 세계 여수로 터널의 주요 제원들을 정리하여 나타낸 것이다.

표 2.1 해외 터널형 여수로 현황 및 제원

No.	국 가	댐 명	설계유량 (m ³ /s)	터널연수	직경 (m)	길이 (m)	최대경사 (degrees)	준공년도
1	미 국	Hoover Dam	5,664	2	15.2	195/225	50	1936
2		Seminole Dam	1,500	1	9.1	170.7	50	1939
3		Kortes Dam	1,416	1	9.1	197	50	1951
4		Hungry Horse Dam	1,416	1	7.4	259.7	50	1953
5		Flaming Gorge Dam	825	1	5.5	300	55	1964
6		Glen Canyon Dam	3,908	2	12.5	570/517	55	1964
7		Yellowtail Dam	2,605	1	9.75	351	55	1966
8		Blue Mesa Dam	963	1	6.4	330	55	1966
9	인도네시아	Cirata Dam	2,600	2	10	570/585	50	1987
10		Batutegi Dam	2,000	1	11.5	557	50	2002
11	대 만	Shimen Dam	3,200	2	7X10	720	57	1964
12		Tachien Dam	3,200	1	12.0	800	50	1974
13	일 본	Misakubo Dam	1,700	1	8.5	162	10	1969
14		Nagawada Dam	1,500	1	8.0	280	50	1971
15		Arima Dam	670	1	7.0	105	47	1986

사례 조사 결과 대부분의 여수로 터널 경사는 50도 이상의 급경사로 건설되었으며, 건설 후 방류 중 콘크리트 라이닝의 침식으로 수차례의 사고가 발생하여 이에 대한 대책으로 1984년 이후 콘트리트 라이닝의 침식을 방지하기 위하여 공기혼입장치(aerator)를 여수로 내에 설치하고 있다. 따라서 본 설계에서는 콘크리트 라이닝의 침식 사고 방지를 위한 중점 고려사항으로 방류시 고유속으로 인한 콘크리트의 마모대책과 공동(cavitation) 발생으로 인한 콘크리트의 침식대책을 수립하여 여수로의 내구성을 확보하고자 하였다.

3. 임하댐 비상여수로 계획 현황

여수로 터널의 형식 및 위치를 선정하기 위하여 대상지역에 대한 지반 조사를 실시하고, 수리 수치해석 및 모형 실험을 실시하여 적정 조건 및 형식을 선정한다. 본 설계에서는 댐 우안의 터널식 여수로와 댐 좌안의 개착식 여수로가 고려되었으며, 두 형식에 대하여 계획성, 시공성 및 안정성, 경제성 및 유지관리성, 환경성에 대하여 그 적합성을 비교하여 아래 표 3.1에 정리하여 나타내었다.

표 3.1 여수로 형식별 특성

터널식 여수로	구 분	개착식 여수로
상류부 기존 여수로와 간섭 없음 하류 하천과 평행하게 방류 임하댐 발전소 침수 없음	계획성	상류부 기존 여수로와 간섭 발생 하류하천과 직각으로 방류 임하댐 발전소 침수 피해
터널구간 경암반 조건, 파쇄대 없음 발생 굴착량 최소(약 1,250,000m ³)	시공성 및 안정성	풍화민감도 높음 노출사면 안정성 저하 기반암 심도 25m 이상 굴착량 과다
공사비 비율 : 1.0 유지보수 장비 운용 유리(완경사)	경제성 및 유지관리성	공사비 비율 : 1.3 (30%과다) 유지보수 장비 운용 불리(급경사)
훼손 면적 49,000m ² 자연훼손 최소화	환경성	훼손면적 157,000m ² 자연훼손 과다

지형 및 지질조건 등의 현장 조건과 모형실험 및 기타 조건들을 비교 분석한 결과 댐 우안에 터널형 여수로를 건설하는 것이 우수한 것으로 분석되어 설계를 추진하였다. 먼저 최대 방류량과 유속 등의 조건들을 고려하여 터널의 규모를 결정하였으며, 아래 표 3.2에 비상여수로 터널의 제원을 정리하였다. 터널은 방류시 상류 댐 저수지로부터 유입되는 입구부 천이구간, 일반 원형구간, 하류 하천으로 방류되는 출구부 천이구간의 3개 구간으로 구분된다.

표 3.2 임하댐 터널식 비상여수로 제원

구 분	입구부 천이구간	일반구간	출구부 천이구간	총 연 장
터널 1	29 m	311 m	38 m	380 m
터널 2	29 m	354 m	38 m	421 m
터널 3	29 m	395 m	38 m	462 m

4. 임하댐 비상여수로 터널 설계 세부 내용

본 사례 대상인 임하댐 터널형 비상 여수로 세부 설계 내용에 대하여 지반조사, 단면 계획, 굴착계획, 발파설계, 표준지보패턴계획, 콘크리트 라이닝 설계, 방배수 설계, 계측 및 유지관리, 버력 활용계획으로 세분하여 간략하게 정리하였다.

4.1 지반조사

임하댐 비상 여수로의 적절한 설치 위치를 결정하기 위하여 지질 및 지반 현황을 조사하였다. 과업구간의 암종은 중생대 주라기의 임하 화강암으로 시추조사 결과 터널 상부 일부구간에서 소규모 전단 파쇄대를 확인할 수 있었으나 터널 구간에서는 파쇄구간이 없는 것으로 조사되었다. 그러나 전기 비저항 탐사 결과 터널 중앙부에 대규모 불연속면의 징후가 나타났기 때문에 대심도 탄성과 토모그래피를 이용하여 확인한 결과 단층 등의 지질 이상대는 없는 것으로 조사되었다. 이처럼 전기비저항 탐사에서 불연속면의 징후가 나타난 원인은 터널 상부 노선을 가로질러 송전탑이 있었기 때문인 것으로 검토 되었으며, 터널 구간에는 특별한 지질 이상대는 없는 것으로 조사되었다.

기존 임하댐 건설당시의 자료들과 임하댐 지역과 관련된 논문 및 보고서 자료들을 분석한 결과 임하댐 지역이 풍화 민감도가 높게 나타나는 특성이 있다고 보고되어있어 풍화 민감도 분석을 실시하였으며, 설계 시 강도 정수를 15% 하향조정하여 설계에 적용하였다. 또한 터널의 규모가 직경 15m 3련으로 건설되는 매우 큰 구조물이므로 각 터널별 지질 조건을 제시하기 위하여 3차원 암반 분류를 실시하여 터널별 구간별 암반등급을 산정하여 설계에 적용하였다. 그림 4.1은 비상여수로 터널 2의 암반 등급도를 나타낸 것이다.

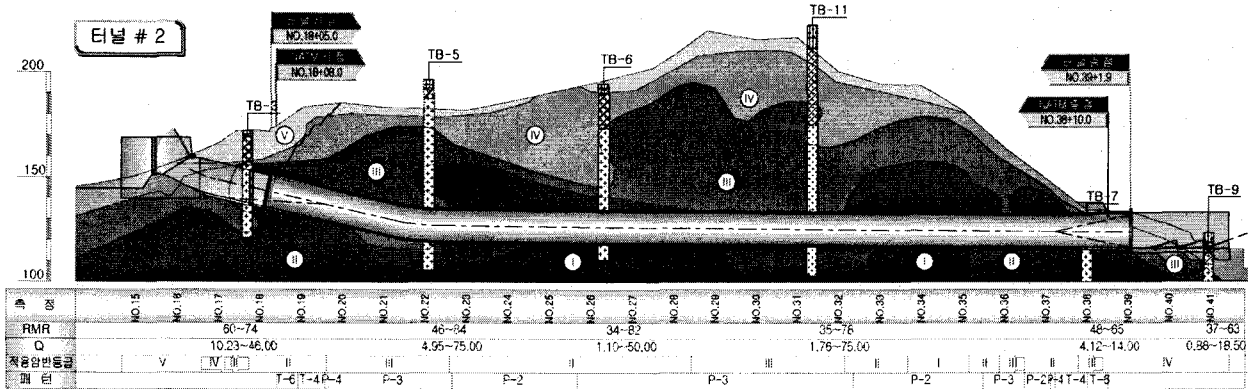


그림 4.1 임하댐 비상여수로 터널구간 암반등급도 (터널 2)

4.2 단면계획

여수로 터널의 적정 단면 형상과 규모를 결정하기 위하여 수리적 특성, 시공성, 안정성을 고려하여 단면을 결정하였다. 단면의 크기는 통수 단면적이 터널 단면적의 75% 이내로 제한되는 한국 수자원 학회의 댐 설계 기준(2005)을 준수하여 결정하였으며, 필요한 내공단면적을 결정하기 위한 과정을 그림 4.2의 흐름도로 정리하여 나타내었다.

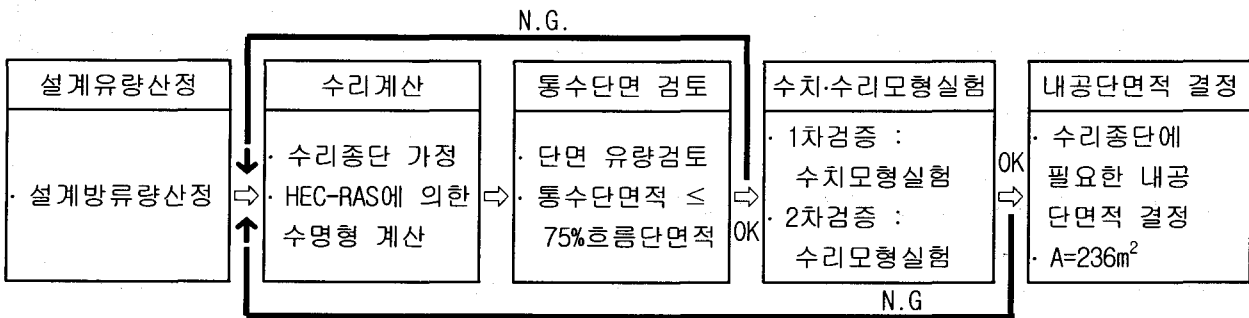


그림. 4.2 필요 내공 단면적 설계 흐름도

유수의 원활한 흐름을 위한 단면적 계산 결과 236m²의 내공 단면적이 필요한 것으로 계산되었다. 터널의 단면은 일반부와 천이부를 구분하여 계획 하였다. 일반부의 내부 형상은 천이부와와의 원활한 단면변화가 가능하고 동일한 통수량 통과시 마찰손실이 가장 적은 원형으로 선정하였으며, 굴착 단면은 외력 작용시 구조적으로 가장 안정한 형태인 수정 마제형으로 채택하였다.

천이부의 단면 계획은 댐의 월류부와 일반부의 원활한 단면 변화와 마찰 손실을 최소화 할 수 있고, 경제적으로는 불리하나 역학적으로 안정한 형상며, 수리 특성이 우수한 인버트 설치마제형 단면을 채택하였다. 그림 4.3은 일반부와 천이부의 선정 단면을 나타낸 것이다.

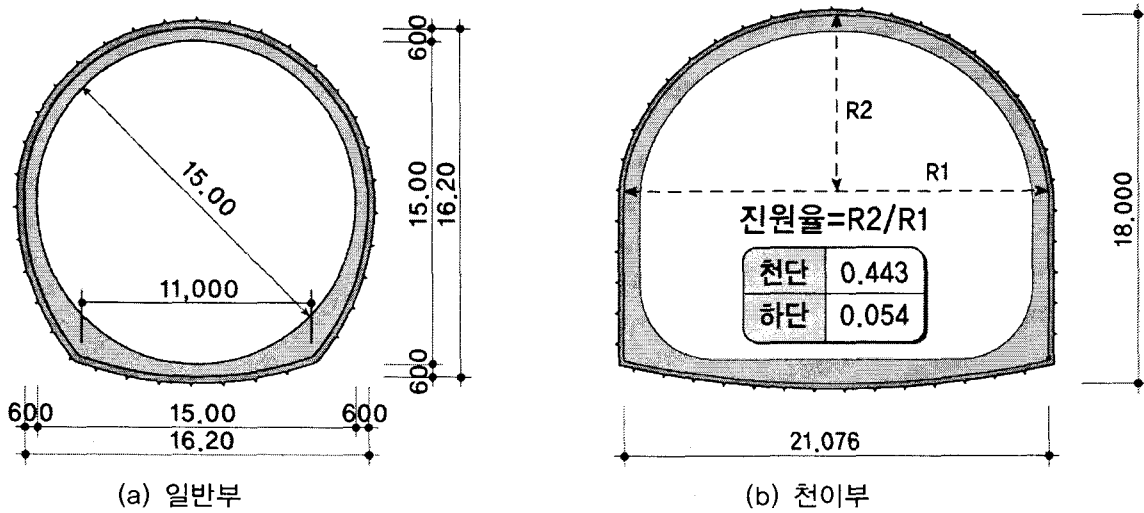


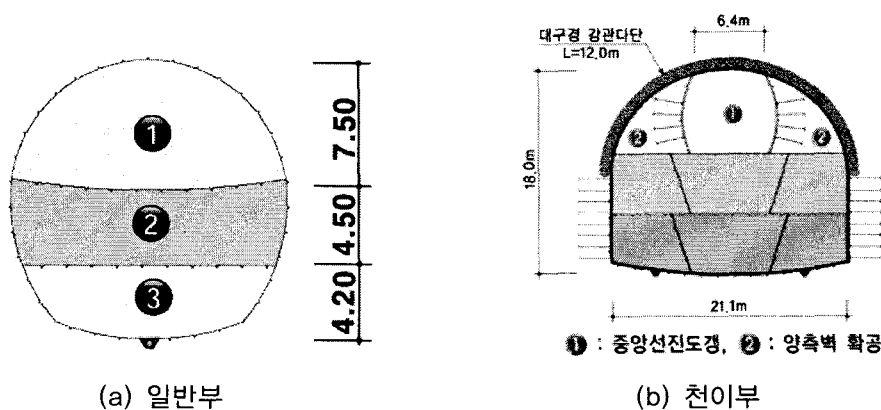
그림 4.3 임하댐 비상 여수로 터널 단면

4.3 굴착계획

굴착 계획을 수립하기 위하여 기존 대단면 터널의 굴착 사례를 검토한 결과 시공성, 안정성, 작업성 등을 고려하여 굴착 단면적을 100m²내외로 선정하고자 계획하였다. 또한 록볼트의 시공과 대형 덤프트럭의 회전 반경을 고려하여 최대 굴착고는 7.5m, 회전폭은 9.6m 확보하도록 계획하였으며, 임하댐 기존 구조물에 미치는 발파 진동 영향을 최소화 하기 위하여 구조물에 근접한 터널을 선굴착하여 방진구의 역할을 하도록 굴착계획을 수립하였다.

천이부는 3단 3분할의 총 9분할로 굴착을 계획하였다. 굴착 방법은 상단 전단면에 대구경 강관다단을 설치하여 안정성을 확보한 뒤 중앙부를 강관다단의 중첩구간까지 선진도갱 굴착하고, 상반의 양 측벽을 확공 굴착하고 상반을 관통한 뒤 중반과 하반을 굴착하도록 계획하였다.

일반부는 록볼트 시공과 대형 장비의 터널내 회전을 고려하여 최대 굴착고를 선정한 결과 3단 분할 굴착으로 계획하였다. 또한 천이부와 작업연계성과 공사중 환기 효율성의 증대를 위하여 상반을 선굴착하였으며, 상반 굴착시 전방 지질 확인 및 지질 불연속면에 대한 보강을 실시하여 굴착 안전성을 개선하였다. 그림 4.4는 일반부와 천이부의 분할 굴착 단면을 나타낸 것이다.



(a) 일반부

(b) 천이부

그림 4.4 임하댐 비상여수로 분할 굴착 계획 단면

4.4 발파설계

터널굴착을 위한 발파에 의한 소음 진동 영향을 최소화하기 위하여 건설교통부의 발파진동 허용 기준과

구조물의 중요도를 고려하여 시공중 발파진동 관리 기준치를 선정하였다. 댐 주변 구조물들과 비상여수로 터널의 안정성을 고려한 발파 설계를 수행하기 위하여 시험발파에 의한 기존의 방법과 3차원 수치해석적 방법으로 발파진동 영향을 검토하고 적정 장약량을 산정하여 발파설계를 수행하였다.

주변 주요 구조물에 대한 3차원 발파진동 영향 검토 수치해석 결과 비상여수로 굴착 발파시 기존 구조물에 진동 영향이 발파 진동 허용 기준을 만족하는 것으로 분석되었으며, 표 4.1에 해석 결과를 정리하여 나타내었다.

표 4.1 임하댐 주변 주요 구조물 3차원 발파진동 영향

모델링 개요도	임하댐	임하댐 발전소	가배수 발전수로 터널
	최대진동 0.182<1.0cm/s	최대진동 0.207<1.0cm/s	최대진동 0.481<1.0cm/s

4.5 표준지보패턴계획

임하댐 시공 당시 발생한 가배수로 터널의 붕괴원인 분석을 실시하였으며, 경험적, 공학적 및 해석적 접근방법에 의한 최적 지보량을 산정하고 적용하여 지보패턴의 신뢰도를 확보하고자 하였다. 가배수로 터널의 붕괴사례 분석 결과를 고려하여 적정 록볼트 길이를 산정하였으며, 절리 특성을 분석하여 주의 시공 구간을 선정하고 터널 전구간에 대한 Key block 안정성 검토를 실시한 뒤 적절한 보조 공법을 계획하였다. 그림 4.5는 Key block 해석 결과를 나타낸 것으로 전 구간 파괴안전율은 2.0 이상이었으나, 유입부, 전단파쇄 예상구간, 편토압 구간, 유출부 주의 시공 구간으로 선정하였다.

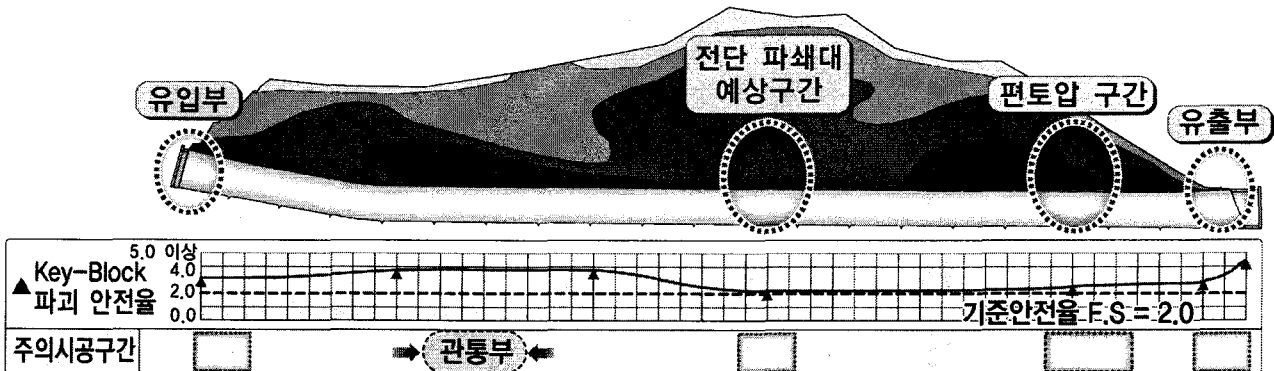


그림 4.5 임하댐 터널구간 Key block 해석 결과

4.6 콘크리트 라이닝 설계

댐 저장수의 방류시 여수로에서 콘크리트 라이닝에 공동현상(cavitation)에 따른 피해가 수차례 발생하였으며, 이에 대한 대책으로 공기공급장치(aerator)를 설치하여 문제를 해결하였다. 본 과업에서는 공동현상 및

고유속에 의한 콘크리트 침식의 최소화와 라이닝 균열 최소화를 통한 콘크리트의 내구성을 개선하기 위하여 고품질 콘크리트 라이닝을 계획하고자 하였다.

먼저 공동현상 발생 유무를 여수로 전구간에 걸쳐 검토한 결과 국내의 기준을 만족하고, 공동현상이 발생하지 않는 것으로 검토되었으므로 공기공급장치를 설치하지 않았다. 고유속에 의한 콘크리트 라이닝의 침식을 방지하기 위하여 USBR monograph No.42의 시공단차 기준을 만족하는 콘크리트 라이닝 시공 관리 기준을 제시하였다. 또한 ACI의 기준을 적용하여 골재 치수를 40mm이상으로 증가시켰으며, 콘크리트 라이닝 표면 강도 증진과 내마모성 향상을 위하여 표면 강화제를 도포하는 것으로 계획하였다. 콘크리트 라이닝 내 균열발생 최소화 방안으로 콘크리트의 밀실 타설이 이루어 질 수 있도록 강제 거푸집의 라이닝 타설구 개수와 위치별 유동 특성에 대한 모형실험을 실시하였으며, 실험결과 타설구의 개수를 증가시켜 밀실 타설을 유도할 수 있었다.

콘크리트 라이닝 품질 향상을 위한 세부 항목으로는 바닥부의 공기 배출을 위한 Air-Hole 설치, 발생 균열의 유도를 위하여 균열유도 줄눈 설치, 탈형강도 확보를 위한 탈형강도 분석, 수화열 및 부등 건조 수축을 최소화하기 위한 습윤 살수 양생, 시공 조인트의 단차를 제어하기 위한 거푸집 처짐 방지 단부 보강, 고주파 진동기를 이용한 다짐방식을 개선하였다.

4.7 방배수 설계

비상여수로 터널은 수로터널로써 운용중에 터널내로 지하수가 유입되어도 무방하므로 라이닝에 미치는 배면 수압을 최소화하기 위하여 배수 터널로 계획하였다. 국내의 기설계 사례 및 해외사례 분석결과 천단부 및 측벽부에는 weep hole을 설치하였으며, 하부에는 맹암거를 적용하여 배수를 유도하였다. 본 과업에서도 터널 상부에 Weep hole을 설치하여 터널 내부로 배수를 유도하고, 측방과 하부에서는 맹암거로 배수를 유도하였으며, 그림 4.6은 본 과업에 선정된 방배수 시스템을 정리하여 나타낸 것이다. 맹암거는 일반구간에서는 1개를 두었으나, 천이부 구간에서는 단면이 증가하기 때문에 용량을 고려하여 맹암거를 2개 설치하는 것으로 계획하였다.

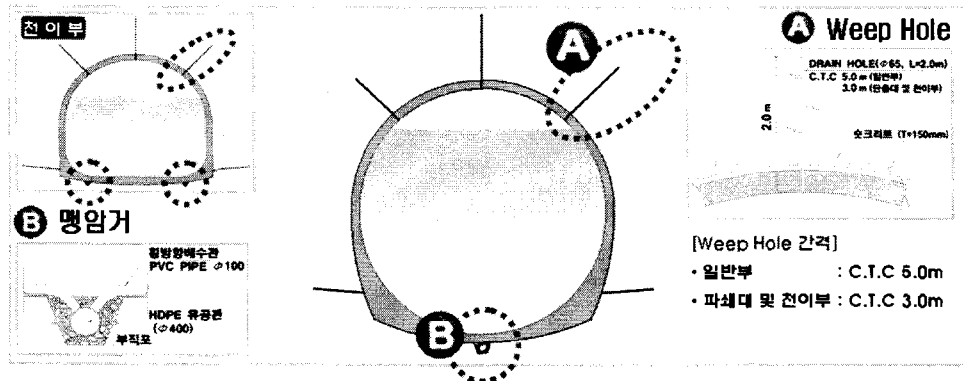


그림 4.6 임하댐 비상여수로 방배수 시스템

4.8 계측 및 유지관리

시공 중 및 운영 중 기존구조물과 비상여수로 터널의 안전을 위하여 기존 임하댐 계측 시스템과 비상여수로 시스템을 하나로 묶어 원활한 계측관리가 이루어 질 수 있도록 통합 운영 계측 시스템을 계획하였다. “시설물 안전관리에 관한 특별법”기준에 따라 정기적 점검 및 안전진단을 계획하였으며, 점검원과 점검 차량의 터널 내 원활한 접근을 위하여 이동식 카리프트와 유지 보수원 출입 사다리를 계획하였다.

또한 여수로 터널 안전성에 영향을 줄 수 있는 4개의 중점유지관리 구간을 선정하여 안전에 만전을 기하였다. 그림 4.7은 통합계측관리 계획을 정리하여 나타낸 것이다. 임하댐 관리사무소에서 통합관리가 이루어 질 수 있도록 계획 하였다.

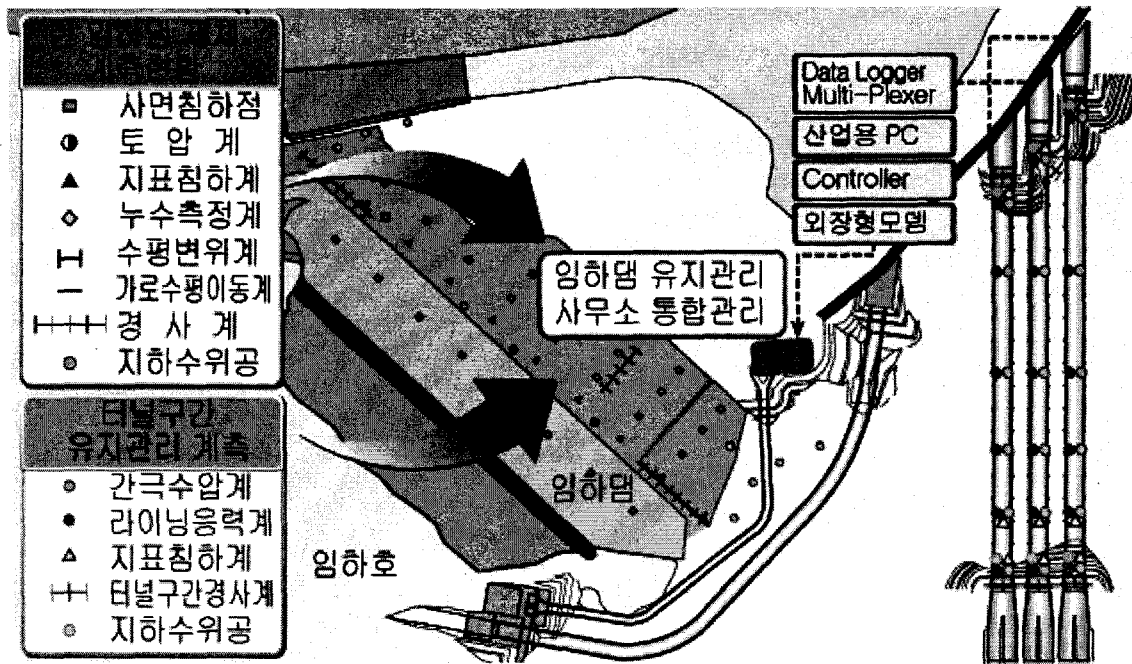


그림 4.7 임하댐 통합 계측관리 시스템 계획도

4.9 버력 활용계획

터널 굴착으로 발생하는 대규모의 버력들은 공사 중 자재로 활용하거나, 공원조성에 활용하여 지역 경제 및 문화예술 활성화에 이바지 할 수 있도록 계획하였다.

5. 결 론

본 사례 보고의 터널형 비상여수로는 기존의 댐 구조물 주변에 추가로 건설되는 구조물이므로 시공시 기존 구조물의 안전성 확보를 고려하여 설계를 수행하였다. 또한 국내에서는 두 번째로 시행된 터널형 여수로 설계이므로 이와 관련된 체계적인 자료 축적과 기술력 향상을 위하여 설계 사례를 간략히 정리하여 소개하였다.

참고문헌

1. 수자원공사(2006), 임하댐 비상여수로 실시설계 보고서.
2. 백승규(2005), 임하댐 비상여수로 설계 및 시공, 대전, 수자원연구원 한국대담회 수자원학회 공동 기술 심포지엄.
3. 추석연, 윤종오, 백승규, 백운일, 박형섭(2005), 터널 굴착 시 주변 구조물에 미치는 영향을 고려한 발파설계 사례, 한국암반공학회 추계학술발표회, 한국암반공학회, 춘천, pp. 303-319.
4. 건설교통부, 2003, 암발파 설계기준 및 시공지침.