

## 단층파쇄대를 포함한 화강암지역의 여수로 터널 안정성 분석

한공창<sup>1)\*</sup>, 류동우<sup>1)</sup>, 김선기<sup>2)</sup>, 배기총<sup>2)</sup>

### Stability Analysis of the Spillway Tunnel Located on the Granite Region Including Fault Fractured Zone

Kong-Chang Han, Dong-Woo Ryu, Sun-Ki Kim and Ki-Chung Bae

**Abstract** The construction of an emergency spillway of Imha Dam is being in progress on the granite region including fault fractured zone. Considering that this tunnel is being excavated in three parallel rows, the pillar width between each tunnel and the face distance between each tunnel face were evaluated. The Influence of the fault fractured zone for the tunnel stability was investigated by numerical modelling in 3D. Various geophysical investigations and rock engineering field tests were carried out for these purposes. It was suitable that the second tunnel would be excavated in advance, maintaining the face distance between each tunnel face of minimum 25 m. The results of numerical modelling showed that the roof displacement and the convergence of the second tunnel were insignificant, and the maximum bending compressive stress, the maximum shear stress of shotcrete and the maximum axial force of rockbolt were also insignificant. Therefore, it was estimated that the stability of the spillway tunnel was ensured.

**Key words** Emergency spillway, Excavation, Tunnel, Numerical analysis

**초 록** 임하댐 비상여수로 터널 공사가 단층파쇄대가 포함된 화강암지역에 굴착되고 있는데 본 터널이 3련 터널임을 감안하여 터널이격거리, 터널막장간 이격거리를 검토하였으며 단층파쇄대가 여수로 터널의 안정성에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 여러 가지 지구물리학적 조사와 암반공학적인 현장 실험을 실시하였다. 터널 막장간 이격거리는 최소 25 m 이상을 유지하면서 2터널의 선형 굴착이 적합하리라 판단되며 단층대의 영향을 받는 터널 만곡부의 3차원 수치해석결과 2터널의 천단변위 및 내공변위는 미미하며 슛크리트 최대 휨압축응력, 슛크리트 최대전단응력, 록볼트 최대축력 등을 살펴보면 만곡부 굴착에 따른 응력집중은 미미하여 여수로 터널의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

**핵심어** 비상여수로, 굴착, 터널, 수치해석

#### 1. 서 언

최근 기상이변에 따른 이상 홍수가 빈번하고, 댐 설계 홍수량 설계기준이 가능최대홍수량(PMF)으로 강화되었으며, 최근의 집중 호우를 고려하여 산정한 각 댐의 유역의 가능최대강수량(PMP)이 설계 당시보다 증가됨에 따라 가능최대홍수량(PMF) 유입시 댐 안정성 확보가 필요한 것으로 검토되었다. 따라서 임하댐 역시 이

상호우에 대비하여 댐 및 여수로의 안정성을 확보함으로써 국민의 생명과 재산을 보호할 수 있도록 비상여수로 건설을 추진하게 되었다.

그러나 본 여수로 터널은 단층 파쇄대가 발달한 화강암 지역을 통과하며 3련 터널로 굴착되므로 터널간 이격거리 및 터널막장간 이격거리를 검토하였으며 단층대의 영향을 받는 터널 만곡부에 대한 3차원 수치해석을 실시하여 터널의 천단변위 및 내공변위를 분석하였으며 또한, 슛크리트 최대 휨압축응력, 슛크리트 최대전단응력, 록볼트 최대축력 등을 분석하여 여수로 터널의 안정성 여부를 판단하였다.

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지반안전연구부

<sup>2)</sup> 대림산업

\* 교신저자 : hankc@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 1월 14일

심사 완료일 : 2008년 2월 12일

## 2. 지형 및 지질

본 임하댐 지역은 태백산맥이 남단에서 서남으로 뻗은 산맥의 서부에 해당하는 지역으로 낙동강 상류의 주요지류인 반변천 상류의 16 km 지점에 위치하고, 본 지역에 연한 태백산맥은 동으로 백암산, 무포산 서로는 고산, 구암산 등의 산계와 분수령을 이루고 있어, 지형의 대부분은 산악지형을 이루고 있다.

화강암과 변성암으로 된 유역서부와 중부는 지형 운회상 노년기 지형에 해당하며 표고 300 m 이내의 비교적 낮은 산지로서 일반적으로 완만한 경사를 이루고 있고, 특히, 편마암 분포지형은 구릉지와 소규모 분지를 형성하고 있다. 한편 퇴적암 분포가 우세한 동부는 표고 500 m 이상의 비교적 높은 지형을 이루며 각 주봉을 중심으로 산릉이 불규칙하게 발달되어 있고 계곡을 흐르는 하천은 직선적이며 수지상의 수계발달형태를 형성하고 있다.

그림 1은 임하댐 주변의 지질특성을 나타내고 있는데, 이 지역의 지질은 선 캄브리아기의 결정질석회암이 협재한 편상화강암질이 댐지역의 중앙부 아기산 부근에 분포하고 있으며, 그 상부에 경상계 퇴적암류인 Arkose 사암, 사암, 세일, 니암, 니회암 및 역암이 부정합으로 피복되어 북쪽으로 분포하고 있다. 또한 본 퇴적암은 국부적으로 조립질 흑운모화강암과 각섬석화강암을 부정합으로 피복하기도 하며 하천을 따라 사력 및 점토로 구성된 하상층적층이 퇴적되어 있다. 변성암류의 구조는 N40°~70°E의 지배적인 주향과 선경상계화강암의 관입점속, 퇴적암류에 의한 부정합 피복으로 특징지워지며 경상계의 구조는 북북서 방향에 동편으로 완경사하며 영양분지의 일부분을 이룬다. 부분적으로 Warping이나 소습곡에 의해 배사 또는 향사 구조를 보

여주고 있다. 한편 후경상계 단층작용에 따라 형성된 것으로 사료되는 단층은 본지역 수물지 북동쪽에 발원되어 있는 대단층과 Dam site 부근 시추조사시 확인된 우안측에 1개, 하상에 1개가 확인되었다.

## 3. 지반조사

일반적으로 터널 설계를 위한 지반조사는 지질 특성을 파악하기 위한 광역 지질 조사, 상세 지질 조사, 시추 조사 등으로 이루어지는 지질조사와 지층 분포, 지반 및 암반의 조건을 파악하기 위한 물리탐사, 지반 및 암반의 역학적 및 수리적 특성을 파악하기 위한 현장 시험 및 실내 시험 등으로 구분할 수 있다.

광역지질조사 및 상세 지질 조사를 통해 광역적 암종, 지질구조적 특성 등을 파악하며, 상세 지질 조사에서는 단층대 특성 및 불연속면 특성 등을 추가적으로 파악할 수 있다. 이를 통해 터널 굴착 시 취약 암반 구간을 설정하고, 시추조사 및 여타 지반 조사 계획을 입안할 수 있는 근거를 제시한다. 이어지는 지반 조사를 통해 설계지반정수를 산정하고, 각 지반특성구간별 대표 단면 및 구간에 대한 안정성 검토가 이루어진다. 임하댐 비상여수로 터널의 기본설계 및 실시설계 시 수행되었던 지반조사 항목 및 수량 그리고 조사 위치는 표 1 및 그림 2와 같다.

터널구간에서 이루어진 조사 및 시추공 위치 및 선정 사유는 표 2와 같다.

지반조사를 위한 시추공 위치 선정 및 작업은 지표물리탐사 결과를 토대로 선정하는 것이 바람직할 수 있으나, 일정상 병행되어 이루어지는 경우가 많기 때문에 단층대나 연약대로 판단되는 구간이 물리탐사 결과 영상으로부터 결론지어지는 경우 그 특성 및 규모 확인을

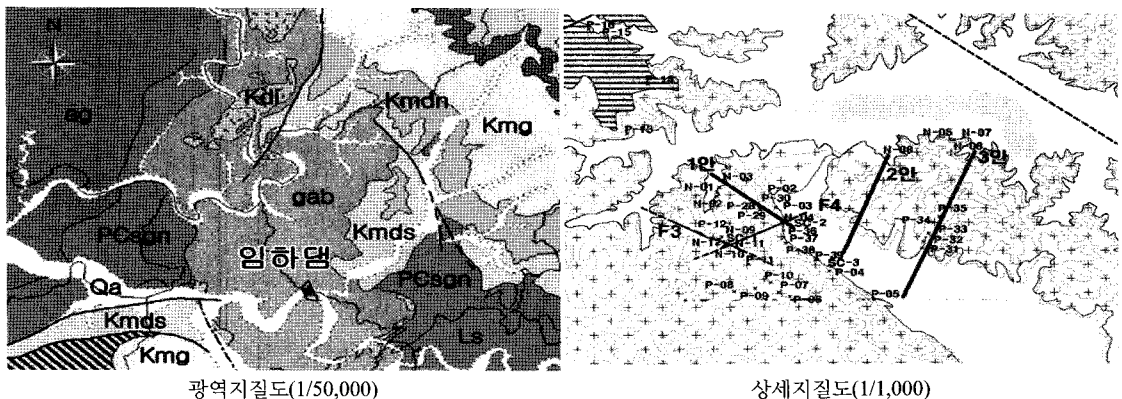


그림 1. 임하댐의 지질특성현황

표 1. 기본설계 및 실시설계를 위한 조사항목 및 수량

(가) 기본 설계

조 사 항 목		수 량	조 사 항 목		수 량
물리 탐사	•MASW 탐사 •대심도탄성파토모그래피탐사	2축선 0.52km	현장 시험	•탄성파 토모그래피 •Suspension PS 검층 •공내밀도 검층 •수압파쇄시험 •지하수 유향·유속시험 •양수시험 •순간충격시험	2단면 1공 2공 1공 2공 1회 2회
현장 조사	•시추조사(수직/경사) •시험굴조사	30/1회 5회		실내 시험	•실내토질시험 •실내암석시험
현장 시험	•표준관입시험 •SPT 효율측정 •공내재하시험(PMT/GMJ) •시추공전단시험 •지표투수시험	240회 3회 14/13회 6회 2회			

(나) 실시 설계

조 사 항 목		수 량	조 사 항 목		수 량
물리 탐사	•전기비저항탐사 •굴절법 탄성파탐사	1축선 0.985km	현장 시험	•표준관입시험 •수압시험 •공내재하시험(PMT/GMJ) •탄성파토모그래피	45회 8회 8/4회 2단면
현장 조사	•시추조사(수직/경사)	17/3회			
실내 시험	•일축압축강도 •AMS 분석	11회 1식			

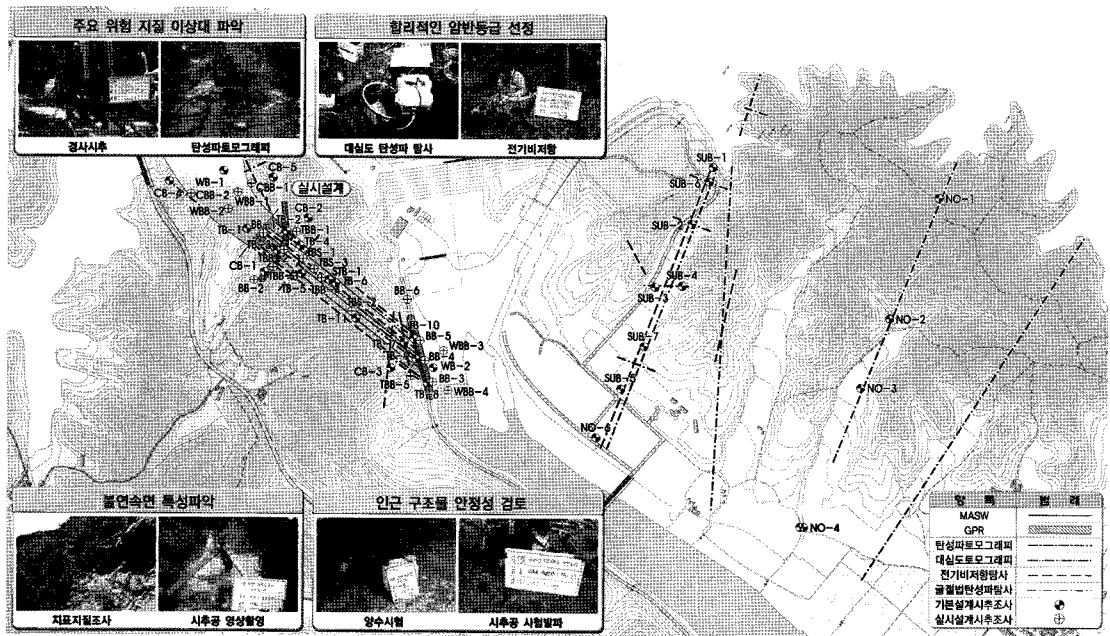
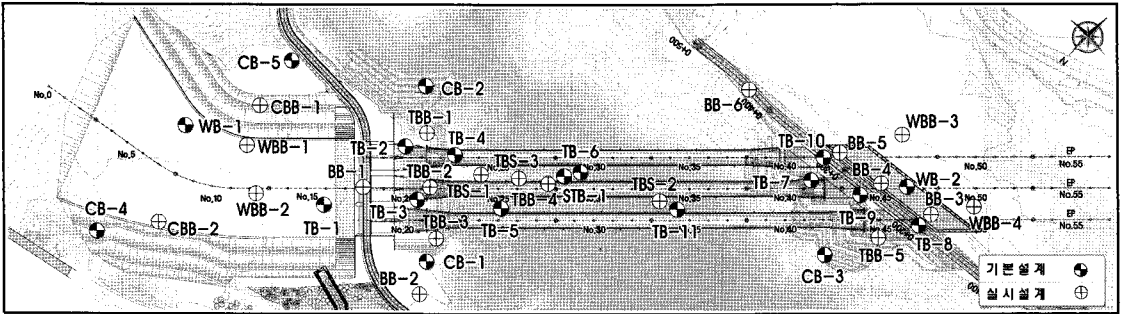


그림 2. 시추공 및 지반 조사 위치

위한 추가 시추가 이루어져야 한다. 단층대 존재 유무 및 분포범위 파악을 위해 사용된 시추공은 기본설계 및

실시설계 시 각 1공(TB-6, TBB-4)을 실시하였다. 경사시추를 통한 단층대 존재 유무 및 분포범위 파악

표 2. 시추공 위치 및 선정 사유



위치 선정 사유	기본설계	실시설계
<ul style="list-style-type: none"> <li>터널시점 갱구부의 암반상태 확인 및 공학적 설계정수 산정을 위한 시험공</li> <li>붕적 및 풍화대층 분포 심도 파악</li> </ul>	TB-1, TB-2, TB-3, TB-4	TBB-1, TBB-2, TBB-3
<ul style="list-style-type: none"> <li>단층대 존재유무 및 분포범위 파악</li> </ul>	TB-6	TBB-4
<ul style="list-style-type: none"> <li>암반상태 확인 및 공학적 설계정수 산정을 위한 시험공</li> </ul>	TB-5, TB-7, TB-11	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>터널종점 갱구부의 암반상태 확인 및 공학적 설계정수 산정을 위한 시험공</li> <li>탄성과 토모그래피 탐사를 통한 터널 출구부 상세 지층 파악</li> </ul>	TB-8, TB-9, TB-10	TBB-5
<ul style="list-style-type: none"> <li>경사시추를 통한 단층대 존재유무 및 분포범위 파악</li> </ul>	STB-1	TBS-1, TBS-2, TBS-3

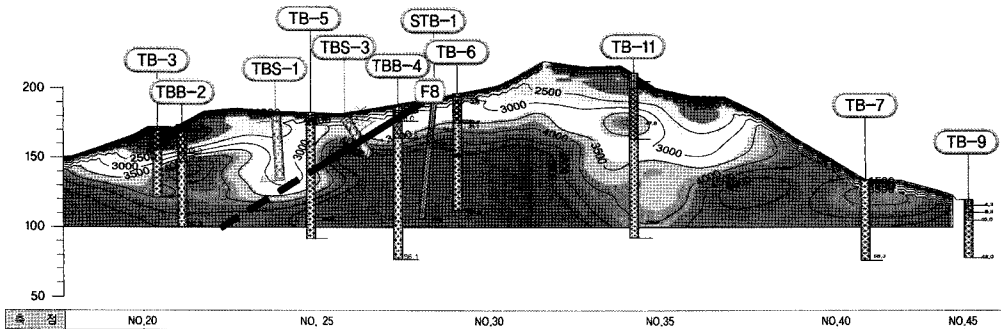


그림 3. 2터널 종축선을 따라 수행된 대심도 탄성과 토모그래피 결과

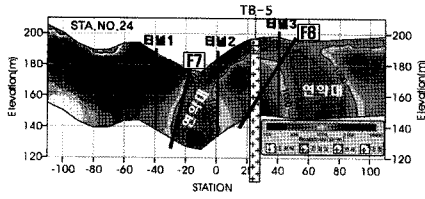
을 위해, STB-1, TBS-1, TBS-2, TBS-3 등의 시추 조사를 병행 실시하였으며 반면 암반 상태 확인 및 공학적 설계 정수 산정은 기본 설계 시의 시추공 TB-5, TB-7, TB-11 등을 활용하였다.

지층 규명 및 지질학적 이상대 파악을 위해 수행된 물리탐사로는 전기비저항 탐사, 탄성과 굴절법, 대심도 탄성과 토모그래피 등이 수행되었다. 비상여수로 터널 구간 심부의 탄성과 속도를 획득하여 지반의 공학적 성질을 분석하고 이상대 및 지층의 분포를 파악하기 위해 대심도 탄성과 토모그래피를 수행하였다. 2터널 종단방향으로 탐사가 수행되었으며, 이로부터 2터널에서 F8 단층의 영향이 미치는 범위가 터널 지반고 기준으로 NO.24-25 구간 정도에 해당됨을 예상할 수 있다(그림

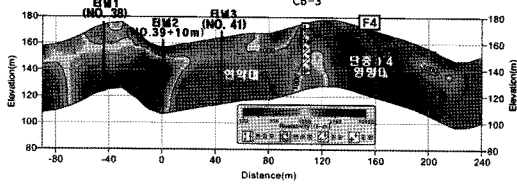
3). TB-5 시추공은 이 부근을 관통한 시추공으로 F8 단층대의 특성을 파악하였다.

전기비저항 탐사는 3개 터널의 종축선 및 유입부 횡축선(NO.24), 유출부 횡축선(NO.39+10, NO.41+12)에 대해 이루어졌으며 전기비저항 및 대심도 탄성과 토모그래피의 종축선 결과를 기초하여 연약대로 예상되어지는 구간에 대해 횡축선 방향의 전기비저항 탐사를 추가로 수행하였다. 이로부터 각 해당 지점에 대한 연약대로 예상되는 지질 이상대 및 단층의 방향 및 범위를 상세하게 예측할 수 있는 자료를 획득할 수 있었다.

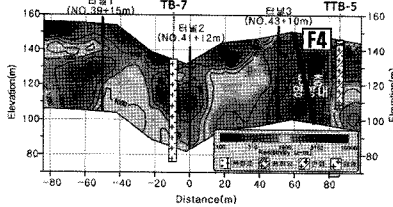
NO.24의 횡축선 상의 전기비저항 탐사 결과로부터 1터널과 2터널의 필라는 단층 F7의 영향을 받을 것으로 추정할 수 있으며, 2터널과 3터널의 필라는 단층 F8



(가) 유입부 횡측선 (NO.24)



(나) 유출부 횡측선 (NO.39+10)



(다) 유출부 횡측선 (NO.41+12)

그림 4. 횡측선 전기비저항 탐사 결과

의 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 유출부 횡측선의 경우, NO.39+10에서 연약대의 존재와 범위를 재확인할 수 있었으며, NO.41+12에서 단층 F4로 인한 연약대의 범위를 파악할 수 있었다(그림 4).

4. 비상여수로 주요제원

비상여수로 터널은 수리특성 및 구조 안정성을 고려한 터널 단면 계획 및 정밀 지반조사, 분석 결과를 토대로 대단면 3련 병설 터널로 터널 안정성과 시공성을 고려한 최적 굴착계획, 지질특성을 고려한 최적 발파 공법을 선정하였는데 이때 여수로의 중·평면과 주요 제원은 표 3과 같으며 여수로 터널의 단면현황 및 제원은 표 4와 같다.

5. 터널 안정성 검토

5.1 터널 이격거리

본 여수로 터널은 3련터널로 계획되어 있는데 병설터널간 이격거리 설정시 이격거리의 변화에 따른 터널의

표 3. 비상여수로 주요 제원

접근수로부	<ul style="list-style-type: none"> <li>설계수두(PMF 최고홍수위) <math>H_d = 14.40\text{m}</math></li> <li>접근유속 <math>V_a = 3.0 \text{ m/s}</math> 내외</li> </ul>	
웨어부	<ul style="list-style-type: none"> <li>웨어상류면 곡선부 <math>\frac{x^2}{12.145} + \frac{(2.045-y)^2}{4.182} = 1</math></li> <li>웨어하류면 곡선부 PMF 대상으로 웨어곡선 적용 (<math>k=2.05, n=1.810</math>) <math>y = -0.0562x^{1.81}</math></li> </ul>	
천이부	<ul style="list-style-type: none"> <li>천이각 <math>5.5^\circ</math></li> <li>천이길이 <math>L=61.85 \text{ m}</math> (중단사거리)</li> <li>단면변화구간 <math>L=46.70 \text{ m}</math> (중단사거리)</li> <li>경사 <math>1:2.0 \rightarrow 1:4.5</math></li> </ul>	
도류부	<ul style="list-style-type: none"> <li>터널직경 <math>D=15.0 \text{ m}</math></li> <li>완경사 <math>1:100</math></li> <li>만곡부 곡률반경 <math>R=100 \text{ m}</math></li> </ul>	
공기혼입장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>형식 Deflector + Groove</li> <li>공기혼입량 : <math>112.49 \text{ m}^3/\text{s}</math></li> <li>위치 : 웨어정부에서 하류로 <math>45.3 \text{ m}</math> 지점</li> <li>규모 : <math>1.0 \text{ m} \times 0.8 \text{ m} \times 1\text{EA}</math></li> <li>공기농도 : <math>40.5\%</math></li> </ul>	
감세공	<ul style="list-style-type: none"> <li>버켓 Tip 각도 <math>20^\circ</math></li> <li>버켓 곡률반경 <math>R=57 \text{ m}</math></li> <li>버켓 Tip 표고 <math>\text{EL.}119.441 \text{ m}</math> (PMF시 하류하천 수위에 대한 여유고 확보)</li> <li>버켓 단위폭당 유량 : <math>136 \text{ m}^3/\text{s}</math> / 감세공폭 : <math>20 \text{ m}</math></li> </ul>	

표 4. 터널의 주요 제원

구 분	입구부 천이구간	일반 구간	출구부 천이구간	
단 면				총 계
터널 #1	28.868 m	312.816m	37.502m	379.186m
터널 #2	28.868 m	354.219m	37.502m	420.589m
터널 #3	28.868 m	395.621m	37.502m	461.991m

터널 총연장 :  $L = 379.186 \text{ m} + 420.589\text{m} + 461.991\text{m} = 1,261.766\text{m}$

구조적 안정성과 터널 보강공사비, 시공성 등의 경제적 상관관계를 검토하여 최소 이격거리의 설정방안을 수립하는 것이 설계에서 필요하다.

병설터널에 대한 이격거리에 대한 설계기준에 대해 건교부 터널설계 기준(1999)을 보면 터널을 2개 이상 병렬로 계획하는 경우에는 터널의 단면 크기와 굴착대상 지반의 공학적 특성을 감안하여 터널굴착공사를 위한 주변 지반거동 및 발파진동이 인접터널에 나쁜 영향을 미치지 않도록 상호 충분히 이격시켜야 한다고 되어 있다.

따라서 본 터널의 평균 필라폭이 1D이므로 모형실험과 수치해석기법에 의해 병설터널에서의 터널이격거리에 따른 간섭효과를 알아 보았으며 모형실험 및 전산해석에서는 안정성을 보였으나 표 5의 ‘병설터널의 근접도 구분’(철도설계 편람(토목편) 터널)에서 언급한 바와 같이 주의시공의 범위에 해당된다. 또한, 백영식 등(1993), 임수빈 등(1994), 김학문 등(1996), 유충식 등(1997)의 연구자가 쌍굴터널에서의 이격거리에 대한 검토 결과 필라의 폭이 1.5D 이상이 되어야 변위에 대하여 비교적 안정한 것으로 평가하고 있는 바, 본 터널은 3련 터널이므로 중앙터널 좌우에 필라가 형성되는 경우이므로 쌍굴 터널보다도 열악한 조건에 해당된다.

실시설계시의 지반조사는 비교적 국지적인 위치에 대하여 실시된 결과이므로 변화가 비교적 심한 산악지대의 경우 터널공사에서 설계시 추정된 지반조건은 시공시에 부분적으로 달라질 가능성이 농후하다.

따라서 설계시 적용된 지보패턴과 지보량은 비교적 적절하다고 평가되나 위와 같은 원인으로 인하여 시공이 이루어지는 경우에는 보완조사를 통하여 지보 설계의 적정성을 검토하고 변화된 현장 지반조건에 대한 적절한 지보패턴을 적용할 필요가 있다.

표 5. 병설터널의 근접도 구분(철도설계 편람(토목편) 터널)

양 터널의 위치관계	터널 이격거리	근접도 구분
신설터널이 기존 터널 수평면보다 위에 위치할 때	1.0D 미만	대책시공 범위
	1.0~2.5D	주의시공 범위
	2.5D 이상	일반시공 범위
신설터널이 기존 터널 수평면보다 아래에 위치할 때	1.5D 미만	대책시공 범위
	1.5~2.5D	주의시공 범위
	2.5D 이상	일반시공 범위

### 5.2 터널 막장간 이격거리

비상여수로의 굴착은 출구 측에서 약 300 m를 굴진하고, 입구 측에서 약 100 m를 굴진하여 관통하도록 되어 있다. 특히 입구 측에 존재하는 천이부의 터널 이격거리(Pillar width, PW)가 0.5D이며 일반부의 PW는 1.0D인 3련 터널인 비상여수로는 PW뿐 아니라 막장간 이격거리(Face distance, FD)에 대한 검토가 필요하다.

2련 이상의 터널의 상호 간섭효과는 터널 사이의 이격거리(PW)뿐 만 아니라 막장 간 이격거리(FD)에 영향을 받을 수 있으므로 실제 시공단계를 고려한 3차원 해석에 의한 터널 주변의 응력-변형률 거동을 모사해야 한다. 2련 터널이상의 터널 시공 시 후행터널은 선행터널의 부분적 시공 혹은 완공 후 시공되므로 후행터널은 선행터널과는 상이한 응력상태에서 굴착하게 된다. 즉, 터널 굴착 시 터널 및 주변지반의 거동은 굴착 전의 응력상태에 좌우되는 데 후행터널은 선행터널의 굴착으로 인해 이미 교란된 상태의 지반에 굴착되므로 후행터널의 거동은 선행터널의 거동과 상이하며, 후행터널의 굴착 또한 선행터널의 상호 간섭효과를 야기하여 기존의 선행터널의 역학적 거동에 상당한 영향을 미친다. 따라서 2련 이상의 터널 시공 시 상호 간섭효과를 피하기 위해서는 터널 중 더 큰 터널의 직경에 해당하는 거

리이상으로 유지하여야 하며, 특히 이완영역이 발생하여 탄소성상태의 응력이 유발되는 경우에는 탄성 상태의 경우보다 현저히 넓은 이격거리를 유지하여야 한다.

입하댐의 선·후행 터널 막장 간 이격거리는 슛크리트의 허용 진동기준을 토대로 발파에 의한 영향을 검토하였다. 그러나 국내의 경우 슛크리트 허용진동기준에 대한 규정이 없어 국외기준인 핀란드의 슛크리트 가이드라인의 재령일별 허용기준치를 적용하여 선·후행 터널 막장 간 이격거리를 검토하였다. 그 결과 지보패턴별 지발당 장약량에 대한 균치 않은 슛크리트 타설면과 인접터널 심발공과의 최소이격거리는 표 6과 같이 산출되었다.

수치해석과 선 시공 발파영향에 의한 인접터널의 영향검토, 그리고 이격거리에 따른 상호 간섭효과 이론과 기존의 설계·시공사례를 검토한 결과 막장 간 이격거리는 최소 25 m 이상의 간격을 유지하면서 굴착해나가야 할 것으로 판단된다. 또한 2터널을 선행터널로 굴착하는 것은 막장 간 이격거리뿐 아니라 터널 이격거리의 증대를 위한 방법이 될 수 있다. 따라서 검토사항을 반영하고 시공성을 고려하여 출구측의 경우 지형상 터널 막장면이 동일선상에 존재하지 않기 때문에 3련의 터널을 동시에 굴착하고, 입구 측의 경우 25 m 이상의 간격을 두고 2터널을 선행 굴진하는 것이 적합하리라 생각된다.

그러나 본 터널은 터널간이격거리가 0.5D에서 1.0D

표 6. 지보패턴별 지발 당 장약량과 균치 않은 슛크리트에 대한 최소이격거리

지보패턴	1	2	3	4	5
지발 당 장약량(kg/delay)	12	9.75	6.75	2.25	1.5
최소이격거리 (m)	68	61	51	30	24

로 터널 이격거리가 짧은 3련 터널이기 때문에 굴착에 따른 지반의 응력교란이나 인접터널의 발파에 따라 지보재나 필라의 안정성을 저하시킬 수 있으므로 시공 시 내공변위와 진동치를 측정하고 슛크리트나 록볼트에 대한 손상정도를 파악하여 터널의 안정성 및 시공 상의 안전에 문제가 없도록 이격거리를 조절하여 시공해야 할 것이다.

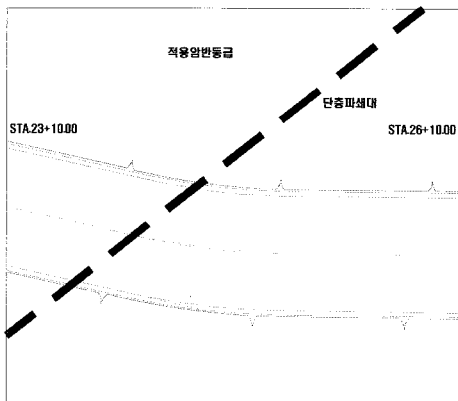
### 5.3 만곡부 안정성 검토를 위한 3차원 수치해석

#### 5.3.1 해석개요 및 해석방법

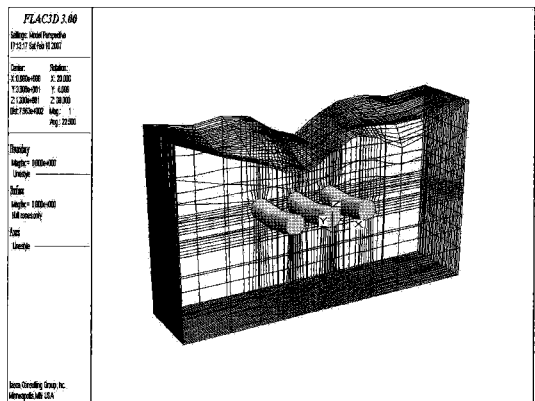
터널 안정성 해석 중 단층의 영향과 응력집중이 예상되는 만곡부에 한해 3차원 수치해석을 수행하였다. 만곡부는 비상여수로 터널에 있어 지형적 여건에 의해 발생하는 경사변화 구간으로 1:4.5 경사구간과 1:100 경사구간이 접속하는 구간이다. 만곡부는 터널이 약 12도의 각도로 접속되어 응력집중이 예상되어 안정성이 취약하다고 판단되어 3차원 해석을 통해 터널 거동 특성을 분석하여 지보패턴의 타당성을 검증할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 해석 구간은 접속부를 중심으로 전·후 각각 30 m, 총 60 m 구간의 전체적인 지형과 지층을 실제와 유사하게 모델링 후 해석을 수행하였다.

지구물리 조사를 통하여 파악한 단층대의 분포상황을 살펴보면 해석구간인 터널의 만곡부는 단층 F8과 교우할 것으로 예상되었기 때문에, 이를 해석조건에 반영시켰으며, 만곡부 NO. 23+10 - NO. 26+10 구간을 해석범위로 하여 모델링을 수행하였다. 그림 5는 해석구간의 종단면도 및 모델링도를 표시하고 있다.

실제 지반지형을 모델링하여 터널 계획심도에서의 초기 응력상태를 모사했으며, 측압계수를 지반조사 결과



종단면도



모델링도

그림 5. 해석구간의 종단면도 및 모델링도

를 토대로 2.0을 적용하였다. 해석을 위한 지반경계범위는 터널 좌·우측 경계는 5D(D는 터널직경), 하부경계까지는 4.0D로 모델링하여 주요 해석 영역이 경계조건에 의하여 영향을 받는 것을 최소화시켰다. 해석에 사용한 지반등급별 지반정수는 표 7과 같다.

사용한 해석프로그램은 3차원 유한 차분해석 코드인 FLAC 3D ver 3.00을 이용하였으며, 해석 모델로 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 해석을 적용하였다.

해석 단계는 2단계로 나누어 실시하였는데 1단계에서는 지형 모델링 및 응력초기화, 2단계에서는 터널 상

표 7. 지반등급별 적용 지반정수

구 분	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수(MPa)	점착력(MPa)	내부마찰각(°)	포아송 비
지반등급 V	23.0	300	0.034	32	0.30
지반등급 IV	24.0	1,000	0.6	35	0.28
지반등급 III	25.0	5,000	0.9	40	0.27
지반등급 II	26.0	10,000	1.5	43	0.25

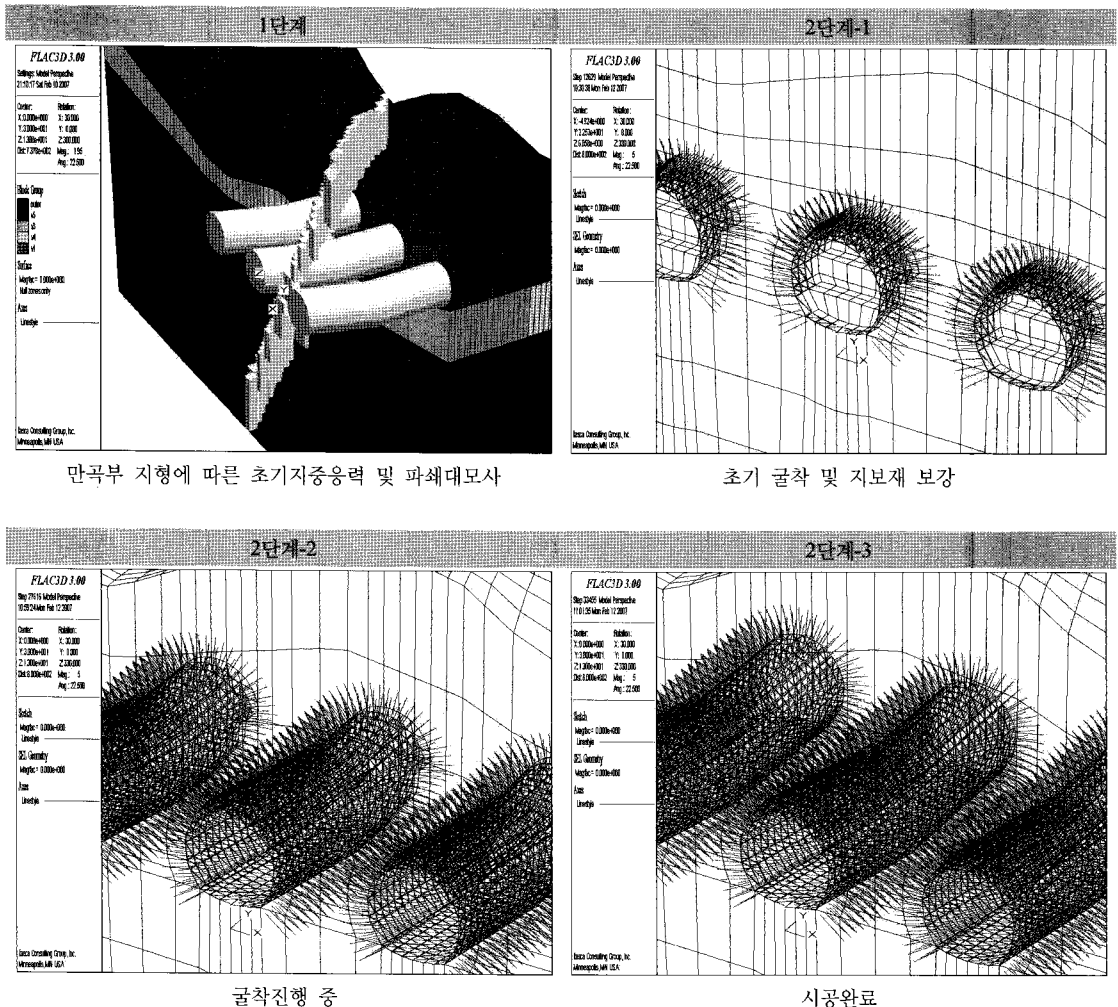


그림 6. 모사 단계별 시공 내용.



· 중·하반 3분할 굴착 및 지보재 설치로 모사 단계별 시공 내용은 그림 6과 같다.

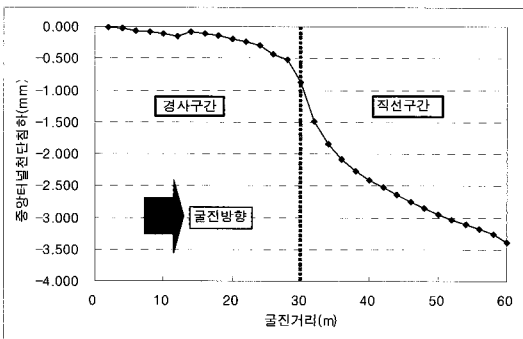
5.3.2 해석결과 분석 및 요약

발생변위 양상을 살펴보면 단층대 영향으로 인해 가장 위험할 것으로 예상되는 중앙 터널(2 터널)에서 해석단계별 변위는 최대 3.386 mm로 미소한 것으로 나타났다(그림 7). 2터널의 내공변위는 3번 터널의 경우 1터널과 3 터널의 방패효과(shield effect)로 1, 2터널에 비해 작게 나올 것으로 예상되었으나 단층대를 고려하

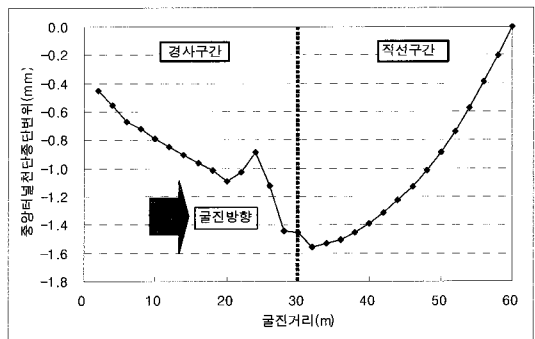
였기 때문에, 단층대에 가장 근접하여 위치하는 2 터널이 상대적으로 큰 변위를 보인 것으로 나타났다.

가장 위험할 것으로 예상되는 중앙 터널(2 터널)에서 슛크리트 최대 휨압축응력은 7.502 MPa, 슛크리트 최대전단응력은 0.0114 MPa, 록볼트 최대축력은 56.54 kN이 각각 발생하였다(그림 8). 따라서 만곡부 굴착에 따른 응력집중은 미미하여 만곡부의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

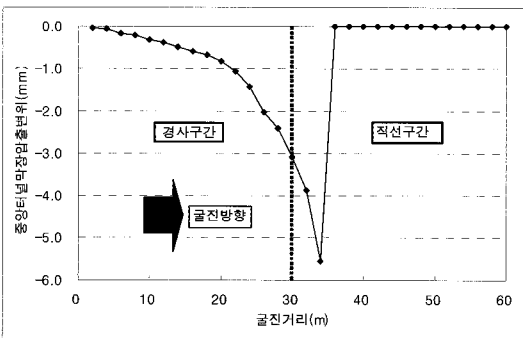
해석결과를 요약하면 표 8과 같은데 주어진 지반조건과 물성 하에서 천단 및 내공 변위는 허용 변위량보다



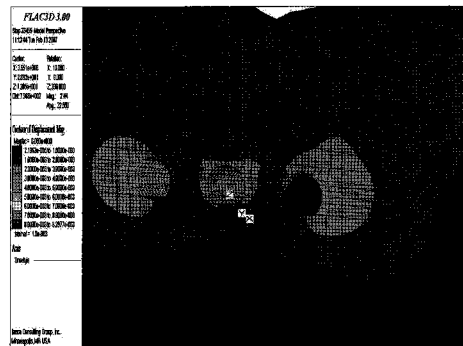
굴착단계별 중앙터널 천단변위 발생경향



굴착단계별 중앙터널 중방향변위 발생경향

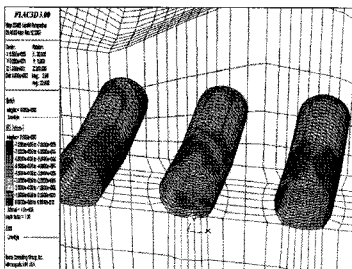


굴착단계별 중앙터널 막장압출변위 발생경향

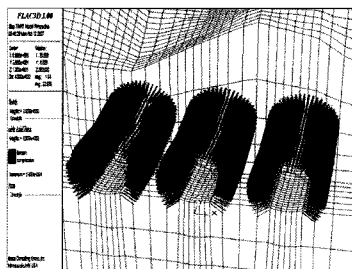


최종단계 합변위도

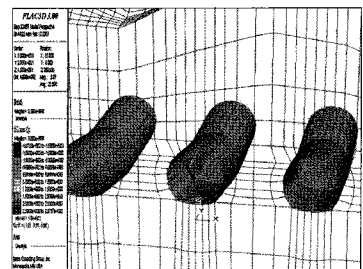
그림 7. 굴착단계별 변위 발생 양상



스�크리트 최대주응력도



록볼트 축력도



스�크리트 전단력도

그림 8. 부재력에 걸리는 하중 분포 양상

표 8. 3차원 터널 안정성 해석 결과.

구분	천단변위(mm)	내공변위(mm)	숏크리트 휨압축응력(MPa)	록볼트 축력(kN)
터널 #1	3.522	5.842	3.681	50.30
터널 #2	3.386	9.616	7.502	56.54
터널 #3	1.972	11.121	4.043	39.02
허용기준	-	-	8.400	88.67
안정성 평가	O.K	O.K	O.K	O.K

작은 변위를 보였으며, 지보재인 숏크리트와 록볼트에 걸리는 하중은 허용응력 내로 안정성 확보에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

## 6. 결론

임하담 비상여수로 터널에 대한 터널 이격거리, 터널 막장간 이격거리 및 단층대가 통과하는 만곡부에 대한 안정성 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

본 터널의 이격거리 1D는 전산해석에서 안정성을 보였으나, 설계기준이나 기타 참고문헌 등을 고려할 때 터널과 터널 사이 필라에 대한 안정성을 고려한 주의 깊은 시공이 필요한 것으로 판단된다. 터널 막장 간 이격거리는 최소 25 m 이상을 유지하면서 2터널의 선행굴착이 적합하리라 판단된다. 그러나 본 터널은 PW가 0.5D에서 1.0D로 터널 이격거리가 짧은 3련 터널이기 때문에 굴착에 따른 지반의 응력교란이나 인접터널의 발파에 따라 지보재나 필라의 안정성을 저하시킬 수 있으므로 시공 시 내공변위와 진동치를 측정하고 숏크리트나 락볼트에 대한 손상정도를 파악하여 터널의 안정성 및 시공 상의 안전에 문제가 없도록 이격거리를 조절하여 시공해야 할 것이다.

본 여수로 터널에서 응력집중이 가장 심할 것으로 예상되는 만곡부 구간의 3차원 수치해석 결과, 발생변위 양상을 살펴보면 단층대 영향으로 인해 가장 위험할 것으로 예상되는 중앙 터널(2 터널)에서 해석단계별 변위는 최대 3.386 mm로 미소한 것으로 나타났으며 또한

가장 위험할 것으로 예상되는 중앙 터널(2 터널)에서 숏크리트 최대 휨압축응력은 7.502 MPa, 숏크리트 최대전단응력은 0.0114 MPa, 록볼트 최대축력은 56.54 kN이 각각 발생하였는데 만곡부 굴착에 따른 응력집중은 미미하여 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단되었기 때문에 본 여수로 터널은 전 구간이 안정할 것으로 판단되었다.

## 사 사

이 연구는 과학기술부 기관고유 연구사업 ‘지하구조물 통합 안전감시시스템 개발 연구’의 지원을 받아 수행되었으며 또한 연구수행에 도움을 주신 대림산업 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김학문, 정재우, 이봉열, 1996, 쌍굴 터널 굴진에 따른 주변 지반거동과 간섭효과, 96 봄 학술발표회 논문집, pp.173-182, 한국지반공학회.
- 백영식, 임홍택, 임수빈, 1993, 산악지 쌍굴수로 터널해석에 대한 고찰, 93년도 봄 학술발표회 논문집, pp.21-26, 한국지반공학회.
- 유충식, 이호, 윤호석, 1997, 쌍굴 터널의 거동에 관한 3차원 유한요소 해석, 97 가을 학술발표회 논문집, pp 151-160, 한국지반공학회.
- 임수빈, 이성민, 이제우, 백영식, 1994, 터널 굴착시 고려해야 할 주변암반의 매개변수와 진행성 파괴, 94 가을학술발표회 논문집, pp.231-234, 한국지반공학회.
- 철도설계편람(토목편) 터널, 2004, 대한토목학회.
- 터널설계 기준, 1999, 건설교통부.

**한 공 창**



1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 Ecole des mines de Paris 지질공  
학과 공학석사  
1993년 Ecole des mines de Paris 지질공  
학과 공학박사  
Tel: 042-868-3241  
E-mail: hanc@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
책임연구원

**류 동 우**



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시  
스템 공학부 공학박사  
Tel: 042-868-3099  
E-mail: dwryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 선임연구원

**김 선 기**



1979년 고려대 이학사 지질학 전공  
2003년 서울시립대 공학석사 토목공학 전공  
  
Tel: 02-2011-8657  
E-mail: skkim@dic.co.kr  
현재 대림산업(주) 토목사업본부 토목사  
업부 부장

**배 기 충**



1979년 건국대학교 공과대학 토목공학  
과 학사  
  
Tel: 054-821-1540 (현장)  
E-mail: kcbae@daelim.co.kr  
현재 대림산업(주) 안동임하댐비상여수  
로 현장 소장