

# 대단면 2-Arch 터널 설계 사례

정두 석\*, 김용 일\*\*, 오 성 진\*\*, 윤상 길\*\*, 송경 현\*\*, 권종 찬\*\*

## 1. 개요

최근에 도심지 지역에서는 터널 계획시 용지 제한과 자연녹지 환경훼손 최소화를 요구하는 사회적 경향을 반영하여 2-Arch 터널을 계획하는 사례가 증가하고 있다. 그러나 현재까지 2-Arch 터널 설계는 경험이 부족한 실정이며, 특히 왕복6차로 이상의 대단면 2-Arch 터널 시공실적이 전무한 상태이다. 따라서 여기서는 대단면 2-Arch 터널의 해외 시공 사례 조사 및 기 시공된 터널에서의 문제점을 분석하여, 효율적인 유지관리를 위한 터널형식, 안전성 확보를 위한 굴착계획, 대단면 갱문 설치에 따른 환경훼손 최소화 및 자연과의 조화 방법 등을 소개하고자 한다.

## 2. 현황

### 2.1 노선 현황

본 계획노선은 용인~서울간 고속도로와 오산시 운암사거리를 연결하여 수도권 이남지역과 서울을 연결할 새로운 남북축 도로로서, 동 도로 개설에 따라 서울~오산간 상습정체를 보이고 있는 경부고속도로, 국도1호선, 국지도23호선, 지방도317호선의 기존 남북축 교통량 분산은 물론 수도권 이남지역의 대규모 택지개발 사업에 따른 서울방향 교통 서비스 수준 향상 및 지역균형 발전을 목적으로 계획되었다. 전체연장은 9.0km에 달하며, 당사가 참여한 제2공구는 교량1개소, 터널2개소를 포함하는 3.3km의 구간이며, 대단면 왕복6차로 2-Arch 터널인 청명터널이 위치하고 있다.

### 2.2 지반 현황

청명터널의 기반암은 선캠브리아기 퇴적암 기원

\*1 (주)대우건설 부장

\*\*2 (주)대우건설 부장

\*\*3 (주)대우건설 과장(senseoh@dwconst.co.kr)

\*\*4 (주)바우컨설턴트 전무

\*\*5 (주)바우컨설턴트 차장

\*\*6 (주)바우컨설턴트 대리

## I 대단면 2-Arch 터널 설계 사례 I

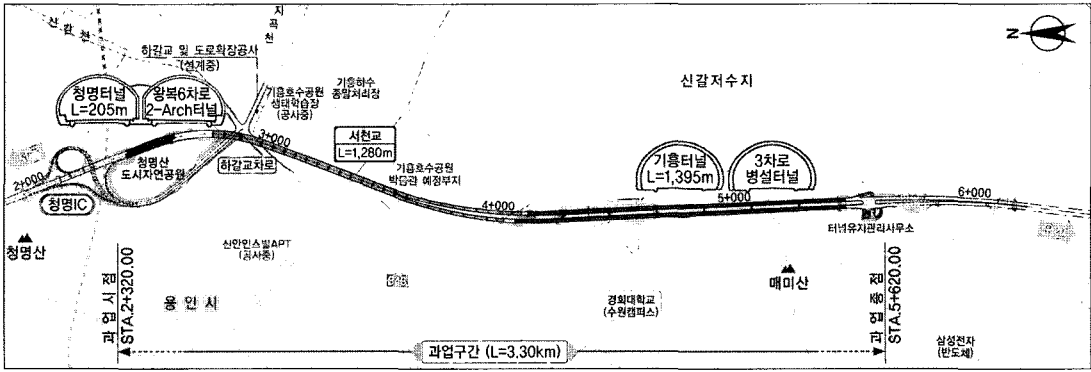


그림 1. 설계구간 터널 현황도

표 1. 청명터널 설계현황

| 구 분  | 터널연장 | 종단경사   | 터널형식       | 환기방식 | 갱문형식         | 단면 크기     |
|------|------|--------|------------|------|--------------|-----------|
| 서울방향 | 205m | -2.56% | 2-Arch 터널  | 자연환기 | 시점 : 돌출형+날개형 | 폭 : 29.5m |
| 오산방향 | 205m | -2.56% | - 방수막 일체시공 | 자연환기 | 종점 : 돌출형+날개형 | 높이 : 9.1m |

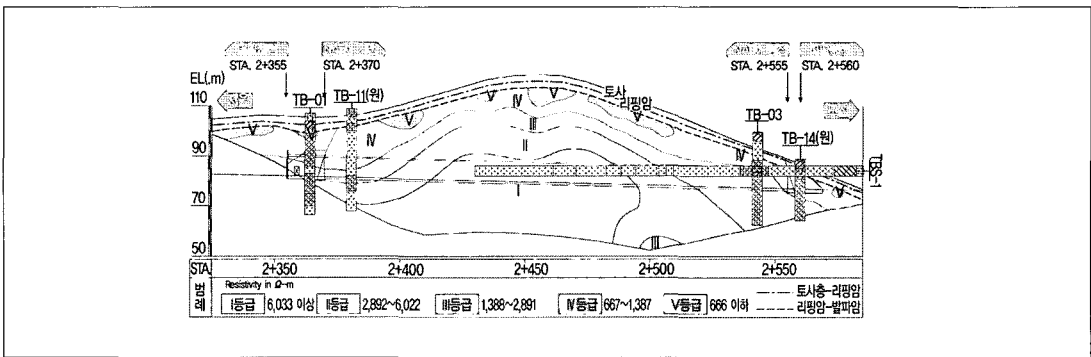


그림 2. 청명터널 암반등급도

의 흑운모 편마암으로 구성되어 있으며, 규장 편마암이 렌즈상으로 분포하고 있다. 지표지질조사, BIPS 및 텔레뷰어를 통하여 불연속면의 분포현상을 파악하고, 암반분류(RQD, RMR, Q)와 물리탐사 분석결과를 상관분석하여 그림 2와 같은 암반등급을 산정하였다. 청명터널은 10~30m의 저토피 구간에 계획되어 있으며, 갱구부는 암반등급 IV~V의 편경사 지형에 위치한다. 또한 하루 3.5m<sup>3</sup>의 지하수 유출이 예상되어 굴착에 따른 안전성 확보대책과 누수에 대한

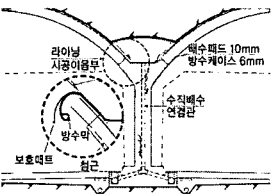
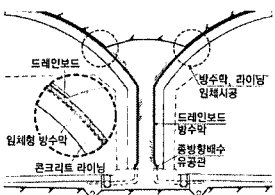
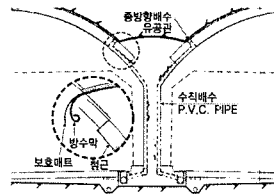
문제점을 해결할 수 있는 시스템이 요구되었다.

### 3. 주요검토사항

#### 3.1 터널형식

기존 2-Arch 터널은 중앙벽체부분의 방수쉬트 손상으로 인하여 누수발생 가능성이 높으며, 겨울철

표 2. 2-Arch 터널형식 비교

| (a) 방수 케이스형   | (b) 방수막 일체형   | (c) 기본형(기존 형식)   |
|---|---|--|
|    |    |    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 라이닝 시공이음부 누수발생 우려</li> <li>• 천단부 케이스 시공 및 구근콘크리트 시공에 따른 소요공기 증가</li> <li>• 운용중 방수케이스 및 수직배수관의 유지관리 불가</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙벽체 상부 암반하중만 지지</li> <li>• 중앙벽체와 라이닝 사이 드레인보드 설치로 통수능력 확보</li> <li>• 10치터널 방배수 형식 구현으로 근본적 누수문제 해결</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙벽체가 라이닝 하중 지지</li> <li>• 천단부 종방향 배수관 시공에 따른 시공성 저하와 소요공기 증가</li> <li>• 운용중 종방향 배수 유공관 및 수직배수관의 유지관리 불가</li> </ul> |

에는 누수된 물의 동결로 상재하중을 집중적으로 받고 있는 중앙벽체의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 설계에서는 표 2에 나타난 것과 같이 방수케이스형, 방수막 일체형, 기본형을 비교 검토하여 최적의 2-Arch 터널 형식을 선정하였다.

방수 케이스형은 중앙벽체 노출철근 및 본선발파로 인한 방수슈트 손상으로 누수발생 가능성이 높으며, 중앙벽체에 과도한 축력작용으로 압축파괴가 우려되어 구조적으로 불안정할 것으로 판단된다. 그리고 기본형은 수직배수관(P.V.C PIPE) 손상시 유지관리가 불가능하며, 노출철근에 의한 방수막 손상과 방수슈트 접합부의 장시간 노출 손상에 의한 누수가 우려된다. 그러나 방수막 일체형은 시공이음부 없이 방수막 일체시공으로 1-Arch 터널 방·배수형식을 구현할 수 있어 누수문제를 해결할 수 있으며, 중앙벽체에 집중되던 상재하중이 상·하행선 측벽라이닝으로 분산되어 다른 형식에 비해 구조적 안정성 확보가 유리하다.

또한 경제성 분석결과, 방수막 일체형 방식이 방수 케이스 방식에 비하여 경제성 측면에서 2.5% 정

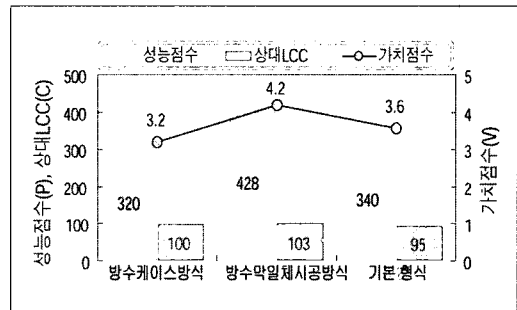


그림 3. VE/LCC 종합평가

도 비용이 증가하지만, 구조적 안정성, 시공성 등과 같은 점에서 유리하게 나타나 그림 3과 같이 다른 형식에 비해 가치향상도가 30.5% 높게 나타났다. 따라서 방수막 일체형 방식으로 선정하였다.

### 3.2 굴착계획

일반적으로 2-Arch 터널은 지반이 불량하고 응지폭이 좁을 때 적용되는 방식으로써 중앙터널 단면을 작게 하여 터널의 안정성을 높이지만, 중앙터널 내 페이로더 회전반경 및 장비 진출입이 어려워 시

## | 대단면 2-Arch 터널 설계 사례 |

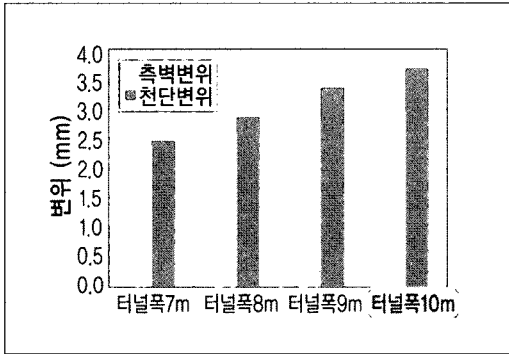


그림 4. 중앙터널 폭 비교

공성이 저하되므로, 시공성 편의를 위해 터널 폭 별로 수치해석을 실시하여 중앙터널 확폭 여부를 검토하였다.

그 결과 그림 4와 같이 중앙터널 폭을 10m 이상 확대하더라도 최대변위는 4mm 이내로 나타나 터널의 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서 시공성을 향상시킬 수 있도록 중앙터널 폭을 10.6m로 확폭 적용하였다.

청명터널은 왕복 6차로 대단면 2-Arch 터널로서 국내 시공사례가 전무한 실정이다. 따라서 굴착방식 선정을 위해 체코의 Valik Tunnel (표 3) 등을 참고하였으며, 표 4와 같은 터널 굴착방식을 비교 검토하여 가장 우수한 방식을 채택하였다. 3도강 굴착방식은 지반이 매우 불량한 경우, 기초 지지력 확보를 위해 적용하는 방식으로써 VE/LOC 분석결과(표 5)가 장 낮은 가치향상도를 나타내었으며, 암반지지층으

표 3. Valik Tunnel 개요

| 갱구부 전경  | 현황  | 특징  |
|---|---|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 위치 : D5 motoway, 체코</li> <li>• 저토피고 : 최대 30m</li> <li>• 지반특성 : soft ground</li> <li>• 총연장 : 380m                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 개착터널 : 시·중점부 50m</li> <li>- NATM : 330m</li> </ul> </li> <li>• 2006년 개통예정</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 용지폭 제한으로 왕복 6차로 2-Arch 터널</li> <li>• 측벽 선진도강 굴착방식 적용</li> <li>• 본선 터널 - (높이 : 8.2m, 폭 : 11.5m)×2 Line</li> <li>• 중앙터널 - 높이 : 약6m, 폭 : 약9m</li> </ul> |

표 4. 터널 굴착 방식 비교

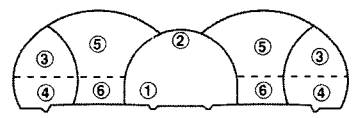
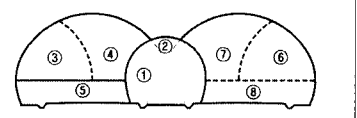
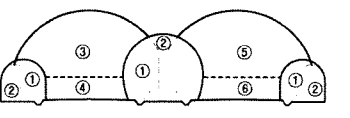
| (a) 측벽 선진도강 굴착  | (b) 중벽분할 굴착   | (c) 3도강 굴착   |
|---|---|--|
|    |    |    |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙터널 및 중앙벽체 시공후, 본선 굴착전 측벽도강 굴착으로 초기 지반이완 최소화</li> <li>• 중앙벽체용 편하중 최소화 가능</li> <li>• 지반 불량시 침하 억제, 막장 안정성 매우 우수</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 중앙터널 및 중앙벽체 시공후 일정 이격 거리로 상반을 중벽분할 시공하여 터널 전체 안정성 확보</li> <li>• 중앙벽체 편하중이 클 수 있음</li> <li>• 상부지반 불량시 침하 억제, 막장 안정성 우수</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3개의 파일럿 터널과 지지벽체를 선시공하여 초기 지반 이완을 최소화하며, 기초 지지력을 확보</li> <li>• 양측 도강 및 Abut부 선시공으로 기초 지반 불량시 안정성 매우 우수</li> </ul> |

표 5. VE/LCC 분석결과

| 측벽 선진도강 굴착      | 중벽분할 굴착 | 3도강 굴착          |
|-----------------|---------|-----------------|
|                 |         |                 |
| 가치향상도 : 33.1% ▲ | 기준      | 가치향상도 : 26.0% ▼ |

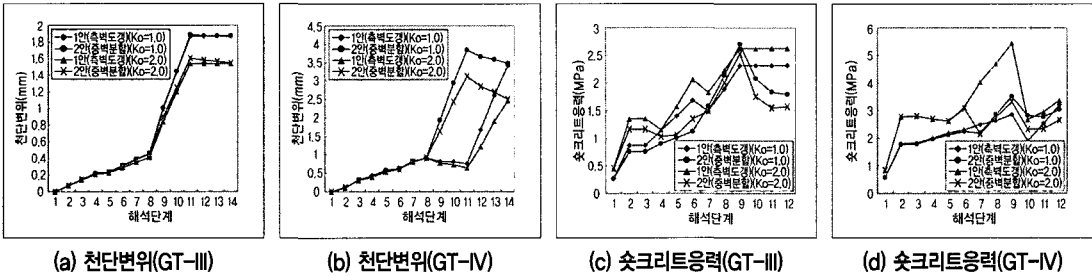


그림 5. 수치해석 결과

로 인하여 지지력이 양호할 것으로 판단되는 청명터널에는 적절치 못한 굴착방식으로 사료되었다. 그래서 측벽 선진도강 굴착 방식과 중벽분할 굴착 방식에 대하여 수치해석적으로 안정성을 비교 검토하여 적용방식을 채택하였다.

해석결과, 그림 5 (b)과 같이 암반등급이 불량하면 최종 천단변위는 비슷하게 발생하지만, 시공 중 천단변위는 측벽 선진도강 방식이 중벽분할 방식보다 유리하게 나타났다. 반면 슛크리트 응력은 측벽선진도강 방식이 중벽분할 방식보다 불리하게 나타났지만, 허용응력(8.4MPa) 이내로서 안정성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

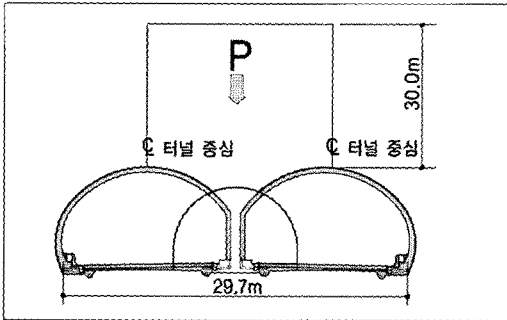
그리고 대부분의 터널 붕괴사고가 막장과 인접하여 발생한다는 것을 보면 시공 중 변위 역제가 터널의 안정성에 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서

청명터널에는 지보재가 보다 적극적으로 변위를 억제할 수 있는 측벽 선진도강 굴착방식을 적용하였다.

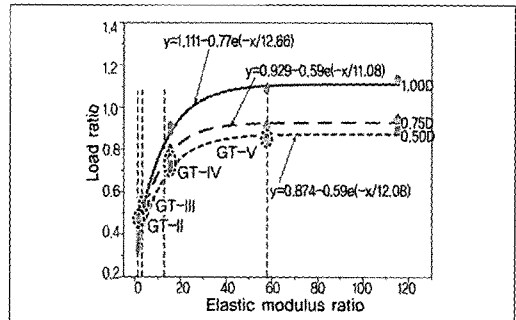
### 3.3 콘크리트 라이닝 안정해석

터널에 작용하는 하중은 일반적으로 1)표준설계, 2)비슷한 조건하에 있는 설계, 3)해석적 방법의 개별적 혹은 조합에 의해 선정된다. 처음 두 방법들은 과거의 경험에 기초를 두고 있지만, 세 번째 접근법은 일반적이지 않은 디자인이나 비슷한 건설 프로젝트의 데이터가 없는 경우에 적용된다. 본 설계는 아직까지 시공사례가 없으므로 해석적 방법 중 Matsuda (1998)가 제안한 방법을 적용하였다. Matsuda는 지반의 탄성계수와 하중비 등과 같은 입력값을 변화시켜가며 수치해석을 한 후, 입력값과 출력값의 상관

## I 대단면 2-Arch 터널 설계 사례 I

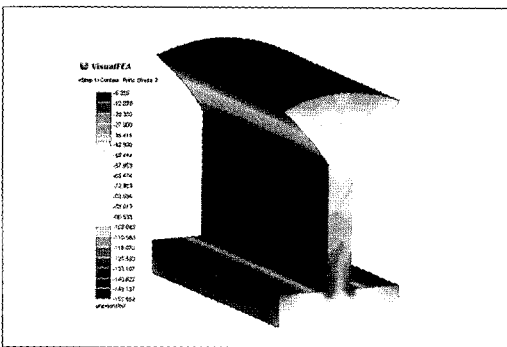


(a) 토피고에 의한 하중

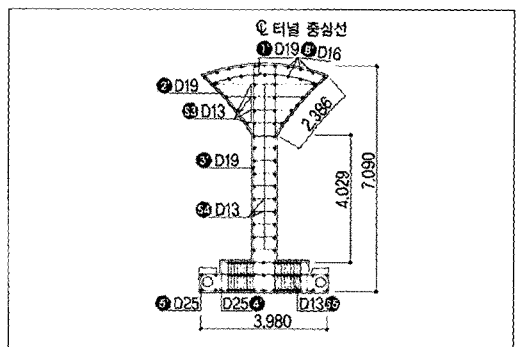


(b) 하중비와 탄성계수비의 상관관계

그림 6. 해석적 방법에 의한 하중 산정



(a) 3차원 해석결과



(b) 구조계산

그림 7. 중앙벽체 안정성 검토

관계를 이용하여 중앙기둥에 작용하는 하중을 계산하였다.

본 설계에서는 P-M 상관도를 이용하여 중앙벽체 두께를 80cm로 산정하였으며, 3차원 Solid 요소를 이용한 수치해석을 통하여 응력집중구간의 파악 및 철근 보강 여부 등을 검토하였다. 이때, 중앙벽체에 작용하는 하중은 보수적인 관점에서 최대 토피고 1.0D에 대하여 "Matsuda"가 제안한 방법을 이용하여 부재에 하중이 전달되는 것으로 설정하였다.

해석 결과, 상부에는 인장력이 작용하고 벽체 및 바닥부에서는 압축력이 발생하였고, 벽체와 기초이음부분에 응력이 집중 발생하였다. 그래서 구조계산

에 의거 철근보강을 하여 안정성을 확보토록 하였다.

콘크리트 라이닝 안정성 해석에 있어서 기존 2-Arch형식은 라이닝의 하중이 중앙벽체에 직접 전달되어 라이닝과 중앙벽체가 일체화되는 모델링되었지만, 방수막 일체형은 방수막 설치로 인하여 중앙벽체와 라이닝이 분리되어 이완하중을 분담하는 구조를 형성하므로 그림 8과 같이 Frame 요소를 사용하여 분리구조 모델로 해석을 수행하였다. 라이닝에 작용하는 하중은 Terzaghi의 수정이완하중을 바탕으로 여러 가지 경험식과 수치해석적 방법을 동원하여 산정하였으며, 특히 중앙벽체는 콘크리트 라이닝과 함께 하중을 분담하고 있기 때문에 환산하여 각

## 지반구조물공 사례

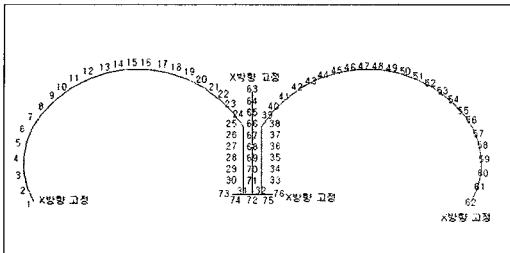


그림 8. 모델 개요도

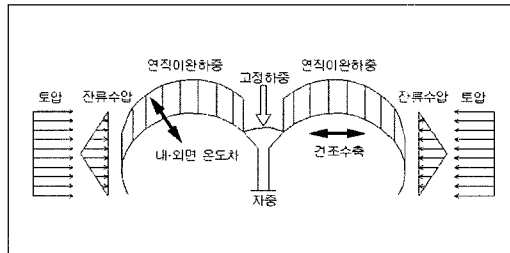


그림 9. 하중조합 개요도

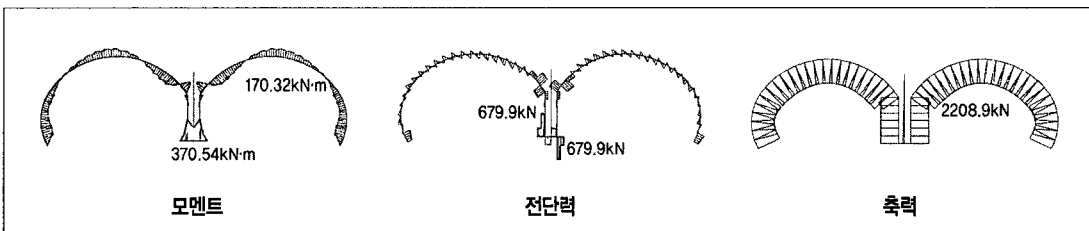
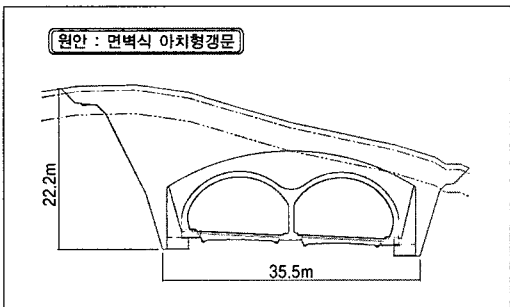
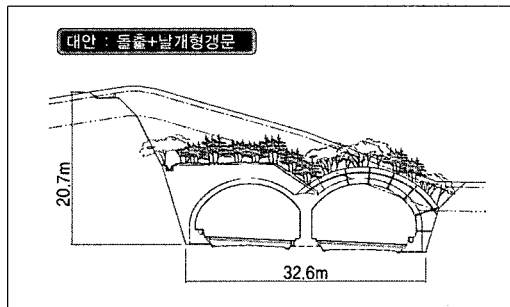


그림 10. 라이닝 구조해석 결과



(a) Arch 면벽형



(b) 날개형+볼출형

그림 11. 갱문형식 비교

부재에 집중하중을 주는 방식으로 그림 9와 같은 하중조합을 통하여 라이닝 구조해석을 수행하였다.

라이닝 구조해석 결과, 본선 라이닝의 천단부와 바닥 기초부에서 최대 모멘트가 발생하였으며 전단력은 바닥 기초부에서 가장 크게 나타났다. 그리고 축력은 라이닝 전체에 걸쳐 비슷한 값으로 나타났으며, 모멘트, 전단력 및 축력의 최대값은 허용치 이내로 나타나 라이닝의 안정성을 확보할 수 있었다.

### 3.4 갱문계획

청명터널은 도시자연 공원인 청명산을 지나므로 환경훼손 최소화가 요구되며, 인근주민의 이용에 방해가 되지 않고 주변경관과 조화를 이루도록 갱문이 계획되었다. 2-Arch 터널의 갱문은 통상 그림 11 (a)와 같이 Arch 면벽형 갱문으로 계획하는데 이것은 옹벽 설치로 인하여 산림훼손 폭이 증가한다. 따라

## | 대단면 2-Arch 터널 설계 사례 |



그림 12. 청명터널 갱구부 전경

서 산림훼손을 최소화하기 위하여 그림 11 (b)와 같은 날개형+돌출형 갱문을 적용하였다.

이 형식은 비교적 완만한 지반에 설치하여 절토를 최소화 할 수 있으며, 절취부분에 개착터널을 설치하고 되메움함으로써 자연복원 기능을 부여할 수 있다. 또한 콘크리트 면벽이 작아 주변환경과 조화를 이루기 쉬우며, 심리적 압박감이 적다.

### 4. 결론

최근 들어 환경의 중요성으로 인하여 2-Arch 터널이 많이 시공되어 운용 중에 있다. 하지만, 기존 2-Arch방식으로 설계된 터널에서는 누수에 대한 유지관리 비용이 증가되고 있으며, 운전자들은 동절기 결빙에 의한 사고 위험성에 노출되어 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 1-Arch터널 방배수 형식을 구현한 방수막 일체 시공방식을 적용하여 누수에 의한 근본적인 문제점을 해결하여 설계에 반영하였다. 국내 시공실적이 전무한 대단면 왕복 6차로

2-Arch터널임을 감안하여 해외시공사례를 조사 및 분석하여 지반이완을 최소화 할 수 있는 측벽 선진 도강 굴착방식을 적용하여 시공중에 안정성을 확보토록 하였다.

2-Arch터널의 일반적인 갱문형식인, Arch 면벽형 갱문을 날개형+돌출형 갱문으로 계획함으로써 산림훼손 면적을 최소화하고 주변 경관과 조화를 이루도록 하여 원활한 주행성을 확보토록 하였다.

앞으로 2-Arch터널이 점차적으로 증가할 것이 예상되므로 이런 설계사례들이 체계적으로 관리되고 공유되어 다음 설계 시에 유용한 자료로 활용되었으면 한다.

### 참고 문헌

1. 대우건설, 영덕~오산간 광역도로 건설공사 대안설계 보고서, 2006
2. Boosting the boom in central Europe, Mining & Construction, 2005, pp.10~15
3. Tetsuo.Matsuda, Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground, 1998, Tunnels & Metropolises, pp.1193~1198
4. 이정인, 암석역학을 이용한 터널설계, 1997, pp.125~128
5. 김도형, 박준경, 김영근 외, 대단면 근접병설터널 설계 및 안정성 평가 기법에 관한 연구, 한국암반공학회 춘계학술발표회, 2003
6. 김상균, 김태혁, 이인모, 2Arch 도로터널 설계 및 시공 개선방안 고찰, 터널기술, 2003, pp.29~38