

## 지형과 사교하는 갱구부의 비탈면 최소화 방안 연구

### A Study on the Minimization of Cutting Slope around Tunnel Portal

정관식<sup>1)</sup>, Kwan Sik Jeong, 박지훈<sup>2)</sup>, Ji Hoon Park, 김건호<sup>3)</sup>, Gun Ho Kim, 이완재<sup>4)</sup>, Wan Jae Lee

1) 동성엔지니어링, 터널부 차장

2) 동성엔지니어링, 터널부 대리

3) 동성엔지니어링, 터널부 이사

4) 동성엔지니어링, 터널부 전무

**SYNOPSIS** : The Cutting slope is to be minimized when a tunnel meets the contour of slope terrain at a right angle around its portal. However, a tunnel portal has been generally installed at a right angle to the longitudinal axis of a tunnel with no consideration of the intersection angle with the slope terrain. This sometimes tended to cause huge cutting slope that resulted in many disadvantage in terms of safty, economy and environment. Therefore, the minimization of cutting slope is studied by taking the intersection angle into account, and the result is compared with that by the conventional method. In addition a design method for the inclined portal to the tunnel axis is proposed through 3D-FEM analysis, also the applicable ground condition is suggested.

**Key words** : tunnel portal , cutting slope , terrain , inclined portal , 3D-FEM analysis

## 1. 서론

최근 도로 및 철도 터널의 노선계획이 환경보전적 측면과 민원해소 등과 같은 제약조건에 의해 불리한 지형 상에 터널 갱구부가 위치하여 편경사의 대꺾기 갱구비탈면이 다수 발생하는 실정이다.

즉 동일한 비탈면에서 지형과 직교하는 터널갱구부는 지반보강 등의 노력으로 비탈면 높이를 최소화할 수 있으나, 지형과 사교할 경우, 편측 대꺾기 비탈면의 발생은 극복하기 어려운 문제로 사면안정성은 물론 원지반의 과도한 훼손을 초래하게 된다.

본 연구는 노선에 직각으로 계획하던 기존의 NATM갱문을 노선과 사교로 설치하여 기존의 설계방식에 따른 편측 대꺾기 비탈면의 발생을 최소화 할 수 있는 설계기법을 제시하는데 그 목적이 있다. 사교갱문의 설치에 따른 지반공학적 안정성 평가를 위해 3차원 유한요소해석을 실시하여 기존의 설계방식과의 지반거동 및 응력변화를 비교 검토하였다. 아울러 구조적으로 취약한 편측갱구부에 대한 안정성 확보를 위해 갱문 가시설 지보재의 적정성을 검토하였으며, 암질에 따른 case study를 통해 본 연구의 적용이 가능한 지반조건의 한계를 찾고자 하였다.

연구결과, 기존의 설계방식으로 발생하는 비탈면 높이를 절반으로 축소할 수 있었으며, 토공량 또한 60%이하로 감소시킬 수 있었다. 갱구부 막장면 안정성을 위해 응력집중이 발생하는 편측 및 천단부에 대해서는 갱문 가시설의 강지보공량 조정하여 구조적 안정성의 확보가 가능한 것으로 판단되었다.

따라서, 본 설계기법은 시공시 협소한 갱구 비탈면의 토공작업(-비탈면보강공을 포함한-)을 최소화하여 공사비절감 및 공기단축을 통해 친환경적인 설계와 동시에 경제적인 시공이 가능하며, 집중호우 등에 의한 추가적인 갱구비탈면의 붕괴요인을 제거함으로써 운영중 도로의 주행안정성 확보와 유지관리비의 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 갱구부 비탈면 설계사례 분석

### 2.1 갱구부 비탈면 설계기준

최근 터널갱구부 설계에 있어서 자연훼손 최소화를 위해 NATM갱문의 설치위치에 대한 설치기준들이 한국도로공사 등에서 제안되고 있으며, 설계 발주 단계에서 감독관청에 의해 갱구비탈면의 최대높이에 대해 제한을 두는 실정이다.

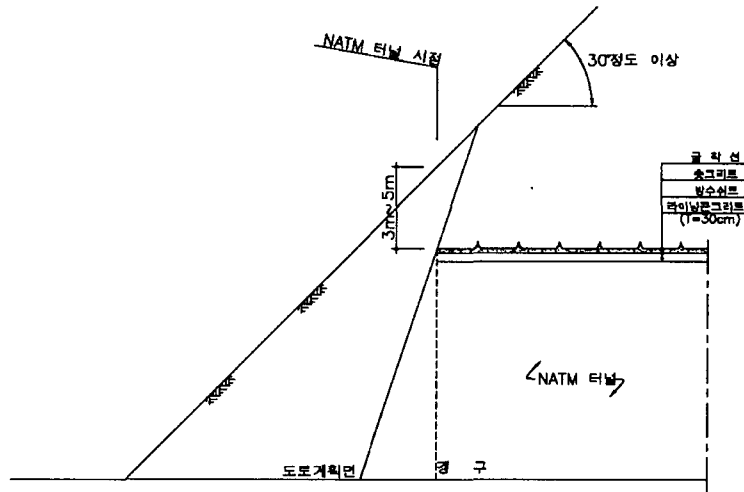


그림 1. 도로공사 갱구부 설치기준

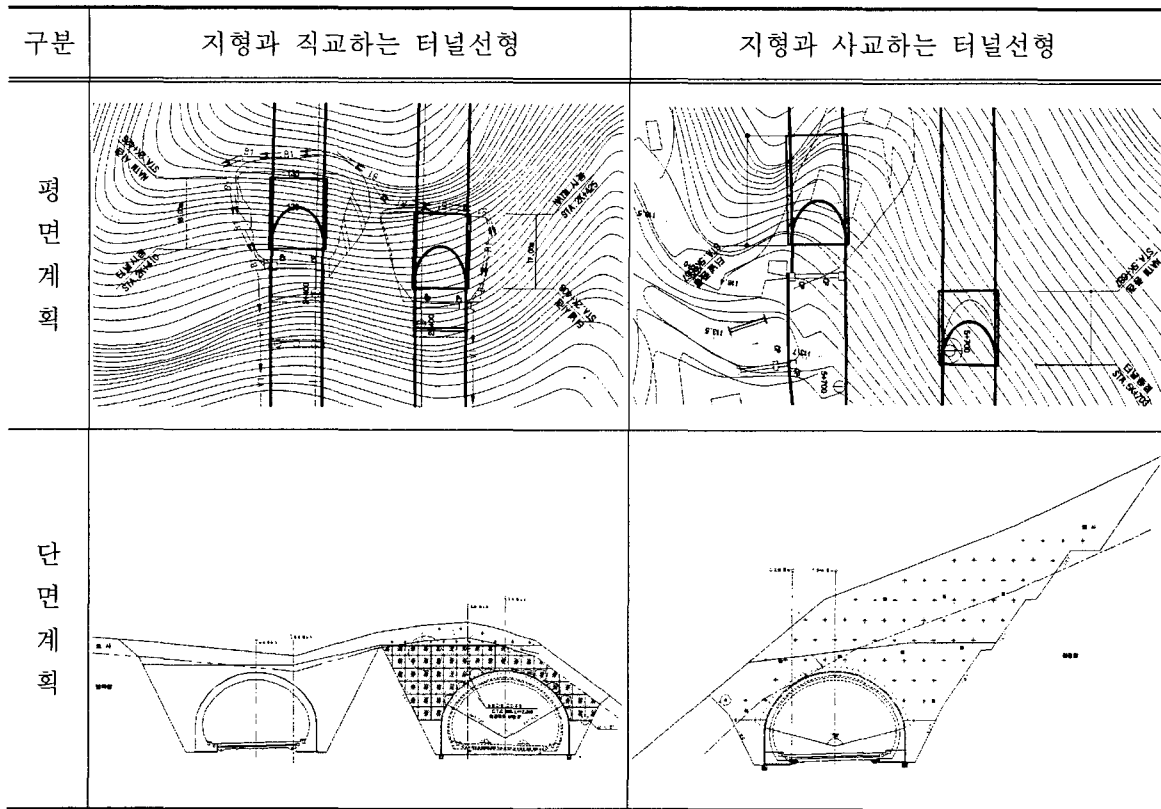
그림 1에서 보는 바와 같이, 한국도로공사의 경우 환경보호정책 방향에 부응하기 위해 적극적인 보강 후 굴착계획의 적용을 통해 갱구 상단부 토피가 3.0m정도 확보되는 시점에서 갱구가 형성되도록 제안하고 있으며, 갱구부 비탈면 높이를 가능한 H=20m 이내로 제한하고 있다.

### 2.2 지형과 터널갱구부와의 관계

급경사지형에서 터널선형이 지형과 사교할 경우, 노선축 방향과 직교하는 기존의 NATM갱구부 설계 방법은 편측에 대절토부가 불가피하게 형성하게 된다. 이러한 갱구부 배면의 편측 대절토구간은 시공 및 유지관리 시 갱구비탈면의 불안전 요인으로 작용한다.

다음의 표 1.은 터널선형이 지형과 직교 또는 사교할 경우의 갱문계획을 나타낸 것이다.

표 1. 지형과 교차방향에 따른 터널 갱문 계획



지형과 직교할 경우, 최소 토피고가 확보되는 지점에 NATM시점을 계획할 경우 횡단면상의 터널 좌, 우측의 비탈면의 높이를 최소화할 수 있다.

그러나, 지형과 사교하는 터널선형의 경우 편측의 최소 토피고를 확보하게 되면 반대측 비탈면구간은 편측 대절토부가 형성되게 된다.

이러한 편경사 대절토 비탈면의 발생은 과도한 자연훼손 뿐만아니라, 토공량의 과다발생 및 비탈면 안정을 위한 추가적인 보강공법의 적용으로 시공성, 경제성, 환경성 측면에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한, 공용중 집중호우에 의한 침투수가 갱구부로 집중되어 비탈면 붕괴의 위험 구간으로 상존하게 된다.

### 2.3 지형과 사교하는 터널의 시공사례 검토

지형과 사교하는 터널갱구부의 문제점을 파악하기 위해 국내 설계 및 시공사례를 분석하였다.

경남지역의 도로설계에서 본 연구과제와 유사한 지형에서 대절토 갱구비탈면이 계획되어 시공시 대규모 비탈면 붕괴가 발생한 사례를 찾을 수 있었다.

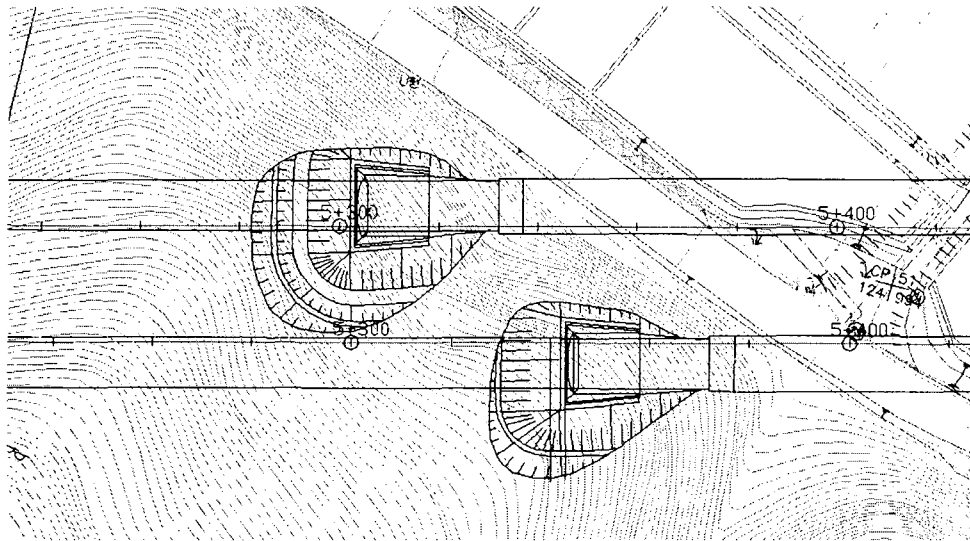


그림 2. 터널 갱구부 설계 현황

당 현장은 1998년 실시설계가 완료되어 2005년 현재 터널갱구부에 대한 토공작업이 시공중인 국도건설공사 현장이다. 당초 설계시 기존도로 및 제방하천, 전답지역등의 현지여건에 의해 터널 진입구간이 급경사 지형에 사교하여 계획되어 갱구비탈면의 높이가 30m이상의 대절토가 계획된 구간으로 2004년 갱구부 굴착시공 중 비탈면 붕괴가 발생되었다.

그림 3은 갱구부 비탈면의 굴착 전경 사진이다.



그림 3. 터널 갱구부 시공현황

당 현장은 2004년 갱구부 토공 작업중 상부 암반에서 인장균열이 0.8~1.2m의 폭으로 1.0m~2.0m의 단차가 발생하였으며, 비탈면 최상부에 원호파괴 및 지반이완이 다수 발생하였다.

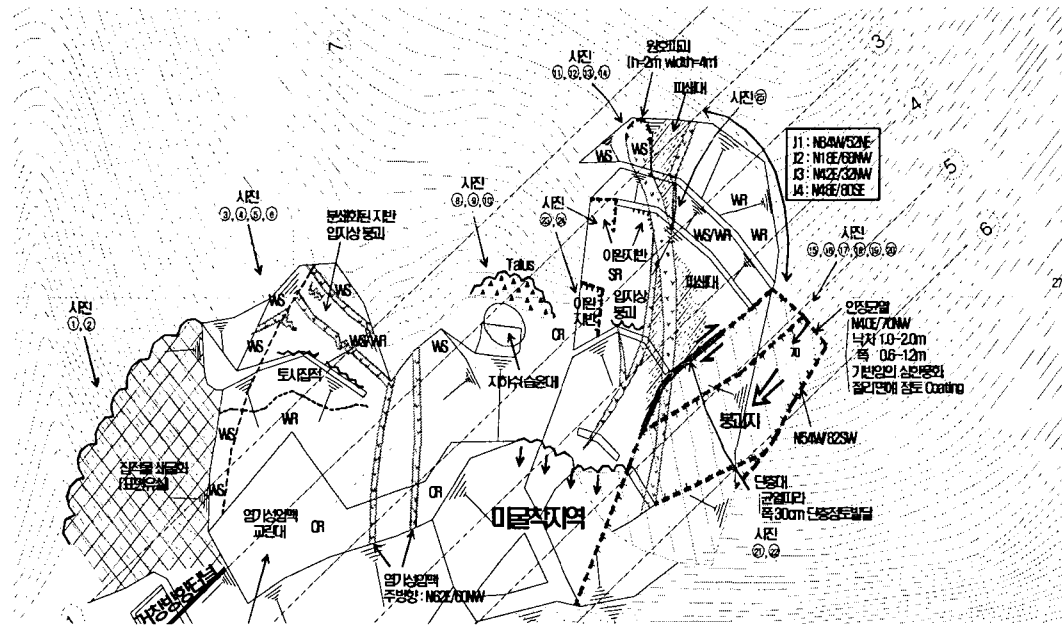


그림 4 터널 갱구부 붕괴 현황도

그림 5는 당 현장의 갱구비탈면 붕괴현황 및 현장사진을 나타낸 것이다.



그림 5. 붕괴구간 현장사진

당 현장은 급경사 지형에서 갱구부가 지형과 사교로 계획된 구간으로 암반굴착에 따른 지반 응력 이완, 지질 취약대의 지표면 노출에 의한 지반 내구성의 급격한 저하와 더불어 발파작업에 의한 불연속면의 이완 등이 복합적 원인으로 작용하여 대규모 비탈면붕괴를 초래한 대표적인 사례이다.

### 3. 지형과 사교하는 지역에서의 갱구 비탈면 최소화 방안

#### 3.1 도로 노선축과 사교하는 갱문계획(-이하 지형순응 갱구부-)

앞서 검토한 바와 같이 지형과 사교하는 터널구간에 있어서 도로 노선축과 직교하는 기존의 갱구부 설계방식은 대규모 편측비탈면의 발생은 불가피하며, 지반안정성 및 시공성, 경제성, 환경성 측면에서 매우 불리하게 된다.

본 연구에서는 갱구비탈면 최소화를 위해 도로 노선축과 사교하는 갱구부 계획으로 지형에 순응하는

갱구비탈면을 계획함으로써 비탈면안정성 확보와 더불어 환경훼손을 최소화하는 경제적인 설계방안을 찾고자 하였다.

아래의 그림은 기존의 설계방식과 본 연구에서 검토한 지형에 순응하는 갱구비탈면(-이하 지형순응 갱구부-)을 나타낸 것이다.

표 2. 지형순응방식의 갱구부 설계기법과 기존 설계방식 비교

| 구 분               | 기존 설계 갱구부           | 지형 순응 갱구부           |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| 평 면<br>계 획        | <p>최대비탈면고 = 34m</p> | <p>최대비탈면고 = 19m</p> |
| 갱구부<br>굴 착<br>모식도 |                     |                     |
|                   |                     |                     |

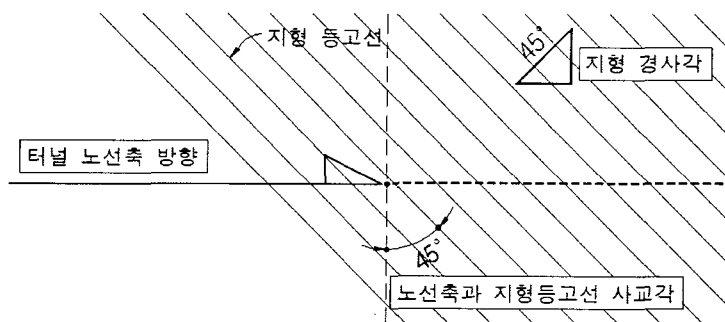
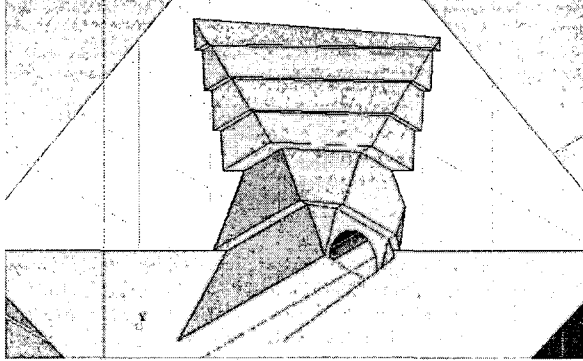
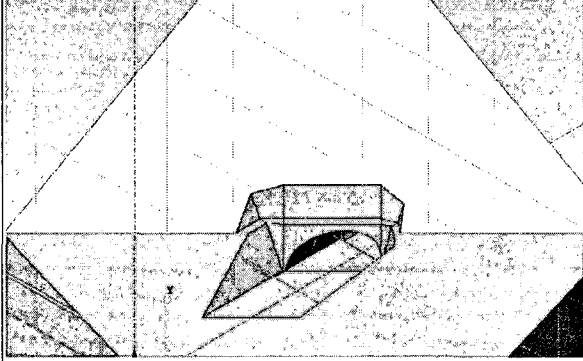
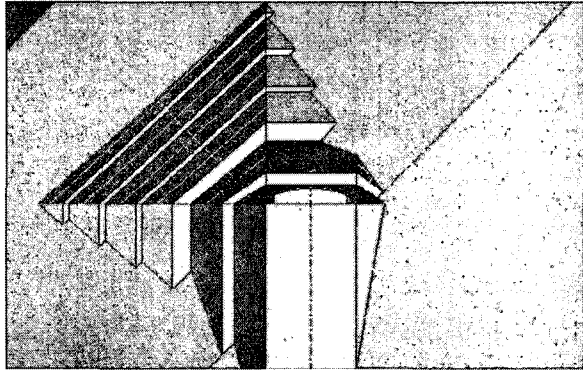
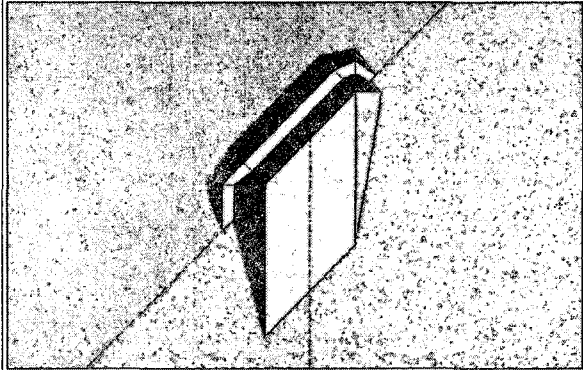


그림 6. 지형조건과 터널계획

본 연구에서 제시한 갱구설계방법과 기존설계방법의 정량적 비교를 위해 그림 6과 같이 갱구부에서 종단상 지형 경사각이 45°이고, 터널 노선축방향과 지형 등고선이 45°사교하는 터널선형을 가정하여 갱구부 비탈면 높이, 훼손면적 및 토공 굴착량을 비교하였다.

표 3. 기존 설계방법과 금번연구 갱구부 굴착량 비교

| 기존설계방법  | 지형순응방식   |
|---|--|
|    |    |
|   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 최대 비탈면 높이 : 35m이상</li> <li>• 훼손면적 : 1,969m<sup>2</sup></li> <li>• 토공량 : 10,160m<sup>3</sup></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 최대 비탈면 높이 : 20m이하</li> <li>• 훼손면적 : 679m<sup>2</sup></li> <li>• 토공량 : 3,263m<sup>3</sup></li> </ul> |

지형순응방식으로 NATM갱문을 계획할 경우, 기존방식보다 비탈면 높이는 35m이상에서 20m이하로 낮아졌으며, 원지반 훼손면적은 1,969m<sup>2</sup>에서 679m<sup>2</sup>으로 65%로 감소되었으며, 굴착토공량의 경우 10,160m<sup>3</sup>에서 3,263m<sup>3</sup>로 70%의 토공량 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 수치해석을 통한 안정성 검증

본 연구방법의 지반공학적인 안정성 검증을 위해 3차원 수치해석을 실시하였다.

수치해석적 안정성 검증은 유한요소법에 의한 3차원 해석 Program인 Visual IFEA를 사용하였으며, 해석결과와 검토는 동일한 지형과 지반조건하에서 기존의 설계방법과 지형순응방식에 의한 NATM갱구 계획을 각각 3차원 모델링하여 지반응력 및 변위값을 비교하였다.

또한, 대상 지반의 암반등급별 강도정수를 산정하여 각 암반등급에 따른 갱구부 가시설의 지보재 안정성을 검토하였다.

본 연구의 해석적 검증을 위해 사용된 Visual FEA는 Intuition Software에서 개발한 3차원 유한요소법(FEM : Finite Element Method)에 의한 지반분야의 범용 해석 프로그램이다.

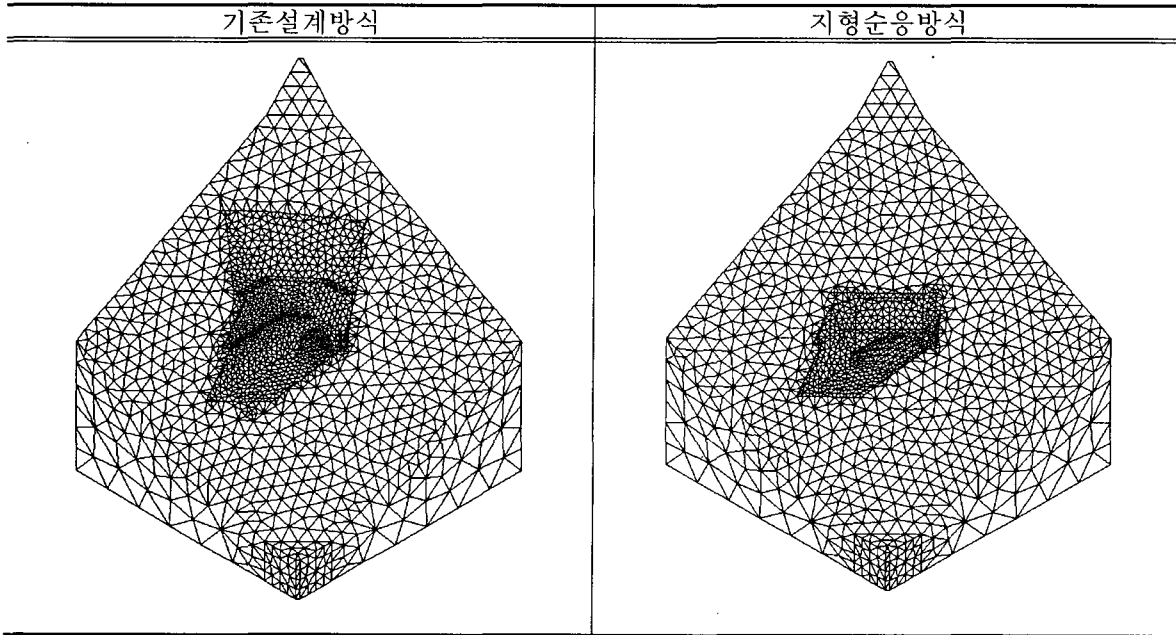
Visual FEA는 Mohr-Coulomb, Drucker-Prager 등의 다양한 탄소성 구성 모델 및 비등방성 모델 제공하며, 본 연구에서는 지반안정 검토에 주로 사용되는 Mohr-Coulomb의 탄소성해석모델을 적용하였다.

#### 4.1 해석모델링

수치해석적 안정성 검증을 위해 동일한 지형, 지반조건 하에서 기존의 설계방식과 지형순응방식으로 2개의 지반모델링을 수행하였다.

해석범위는 터널 중심선을 기준으로 좌·우 50m, 갱구부를 기준으로 전, 후 50m 범위를 포함시켰으며, 터널바닥 하부 40m까지를 모델링 범위로 가정하였다.

표 4. 갱구부 3차원 해석 Mesh



#### 4.2 적용 지반물성치

적용된 지반물성치는 국내 사례 분석을 통해 암질상태에 따른 강도정수를 5등급으로 분류하여 각 암질등급별로 해석을 실시하였으며, 이 때 지반의 축압계수는  $k_0=1.5$ 로 가정하였다.

암질상태에 따른 적용 강도정수는 아래의 표와 같다.

표 5. 암반등급별 적용 강도정수

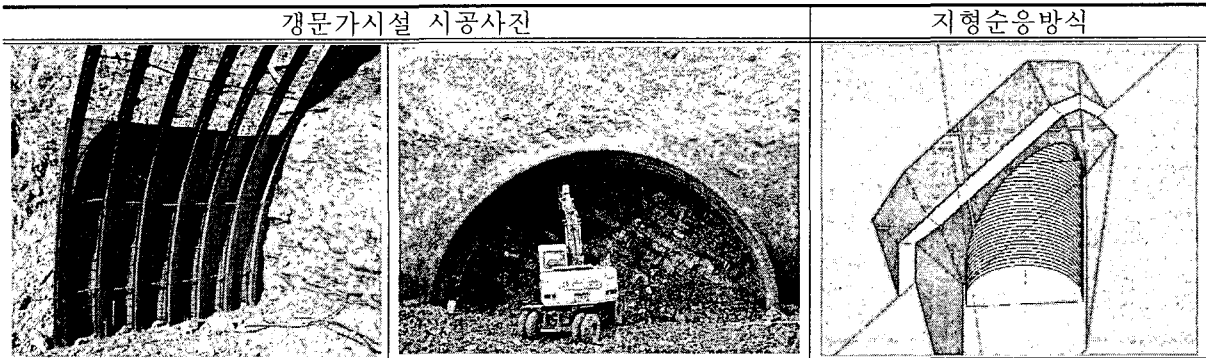
| 암반등급   | 암 질 상 태   | 강도정수                               |                       |                                   |  |                   |
|--------|-----------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|-------------------|
|        |           | 단위중량<br>( $\text{tf}/\text{m}^3$ ) | 내부마찰각<br>( $^\circ$ ) | 점착력<br>( $\text{tf}/\text{m}^2$ ) | 탄성계수<br>( $10^3 \times \text{tf}/\text{m}^2$ ) | 포아송비<br>( $\nu$ ) |
| TYPE-1 | 매우 양호한 암반 | 2.60                               | 41                    | 300                               | 1,200  | 0.20              |
| TYPE-2 | 양 호 한 암 반 | 2.55                               | 40                    | 120                               | 1,000  | 0.22              |
| TYPE-3 | 보 통 암 반   | 2.40                               | 34                    | 70                                | 710  | 0.24              |
| TYPE-4 | 불 량 한 암 반 | 2.30                               | 30                    | 40                                | 260  | 0.27              |
| TYPE-5 | 매우 불량한 암반 | 2.10                               | 30                    | 10                                | 50   | 0.30              |

#### 4.3 지형순응 갱구부 가시설 계획

기존의 설계방식은 NATM시점부가 노선과 직교하여 갯문 가시설이 지표에 노출되나, 지형순응갱구부의 경우 갯문 가시설의 일부가 지중 굴착면과 일체화되고 나머지 면적은 지표에 노출되므로 수치해석적 검증에서 갯문 가시설의 강제지보와 슛크리트의 강성이 갯구부 안정성 검토에 있어서 매우 중요한 구조재가 된다.



표 6. 갱문 가시설 모식도



본 연구에서는 일반적인 갱문 가시설 설치공사에 적용되는 강재지보와 슛크리트 두께를 적용하였다. 표 7.은 일반적인 갱구가시설 표준도에 의한 지보재 설치간격 및 규격을 나타낸 것이다.

표 7. 갱문 가시설 지보재

| 지 보 재   | 규 격   | 상세도면 |
|---------|---|------|
| 강 지 보 재 | C.T.C = 0.5m<br>H-100×100×6×8                 |      |
| 스 트 리 트 | 강섬유보강<br>외측 : 5cm<br>내측 : 3cm<br>강지보재 피복두께 제외 |      |

수치해석시 적용한 갱문가시설의 지보재 특성치는 표 8.과 같으며, 강재는 단면특성을 환산하여 슛크리트와 같이 shell요소로 입력하여 해석을 수행하였다.

표 8. 지보재 특성치

| 구 분     | 단 위 중 량<br>(tf/m <sup>3</sup> ) | 변 형 계 수<br>(10 <sup>3</sup> ×tf/m <sup>2</sup> ) | 규 격           |
|---------|---------------------------------|--|---------------|
| H - 형강  | 7.85                            | 20,000   | H-100×100×6×8 |
| 스 트 리 트 | 2.40                            | 500  | fck = 210     |
|         |                                 | 1,500  |               |

#### 4.4 시공단계별 굴착계획

수치해석을 위한 시공단계별 굴착계획은 아래의 표와 같이 선정하여 각 단계별 안정해석을 실시하였다.

시공단계는 크게 (1)갱구부 굴착 → (2)사교구간 굴착 → (3) 갱문가시설 설치 → (4) NATM굴착의 순으로 해석을 실시하였다.

해석시, 갱구 비탈면 보강 Rockbolt , 천단부 선보강공법( RPUM, 강관다단그라우팅 등 )등의 지반보강효과는 본 검토에서 제외하였으며, 암반등급의 변화에 따른 지반변위 및 지보재 부재력에 대한 검토만 수행하였다.

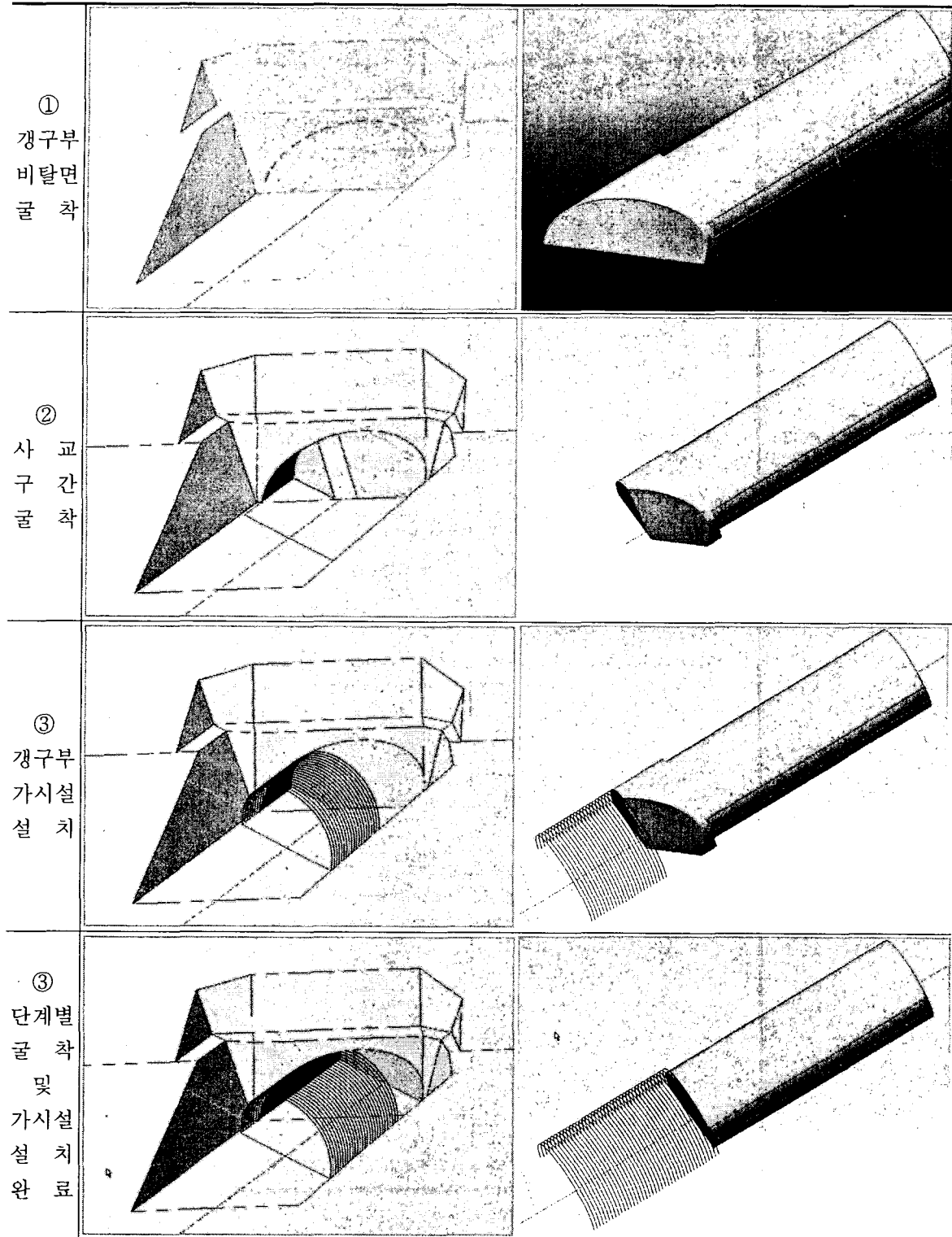
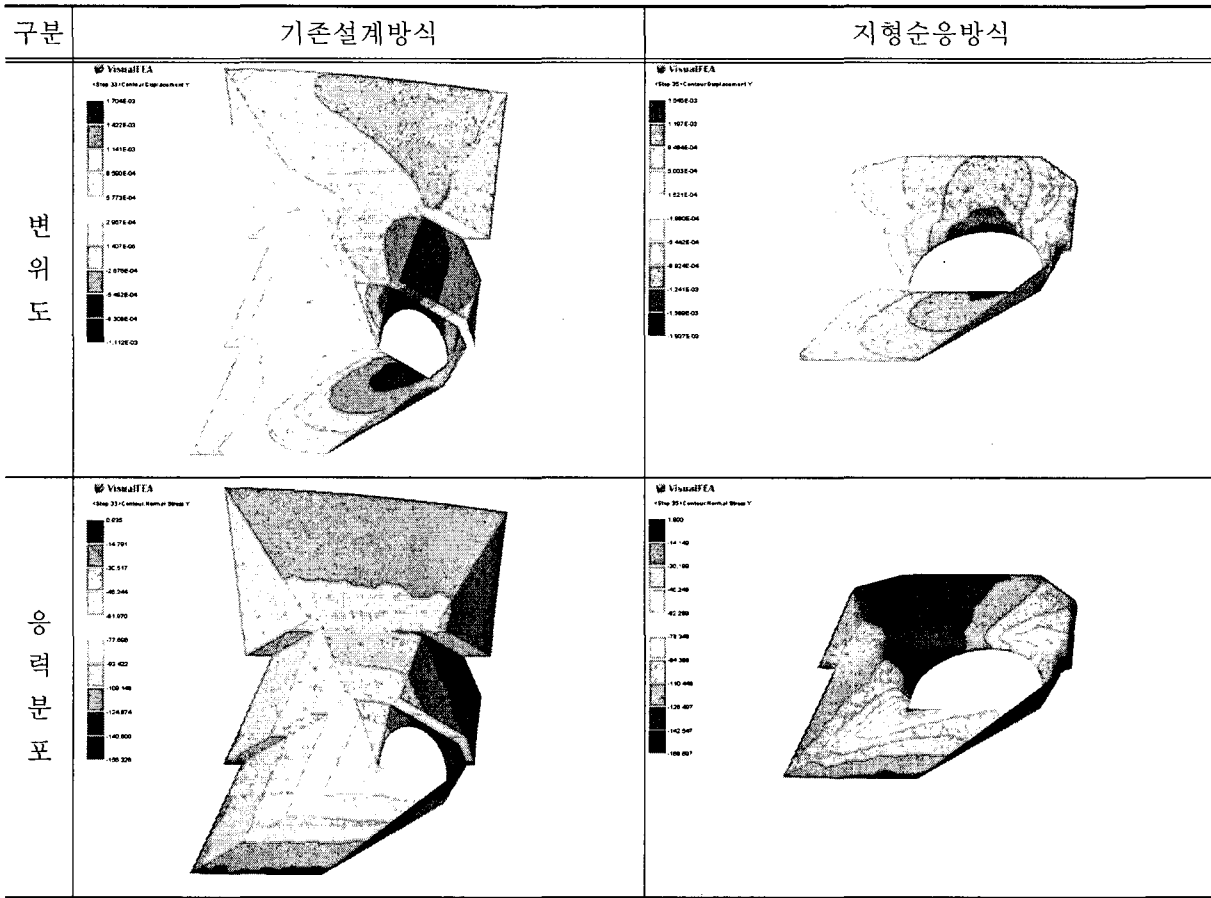


그림 7. 지형순응 갱구부 시공순서

#### 4.5 해석결과 검토

기존설계방식과 지형순응방식의 갱구굴착시 변위분포 및 응력분포는 다음의 그림과 같다.

표 9. 사면굴착에 따른 해석결과



암반등급별 갱구부의 최대 변위값은 갱구부 좌측 측벽부에서 최대변위가 발생하였으며 그 결과는 아래와 같다.

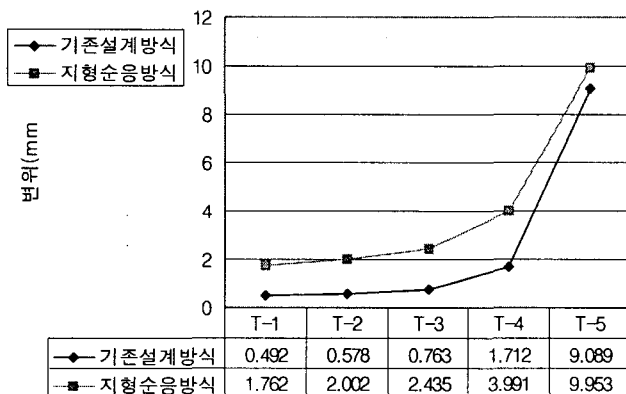
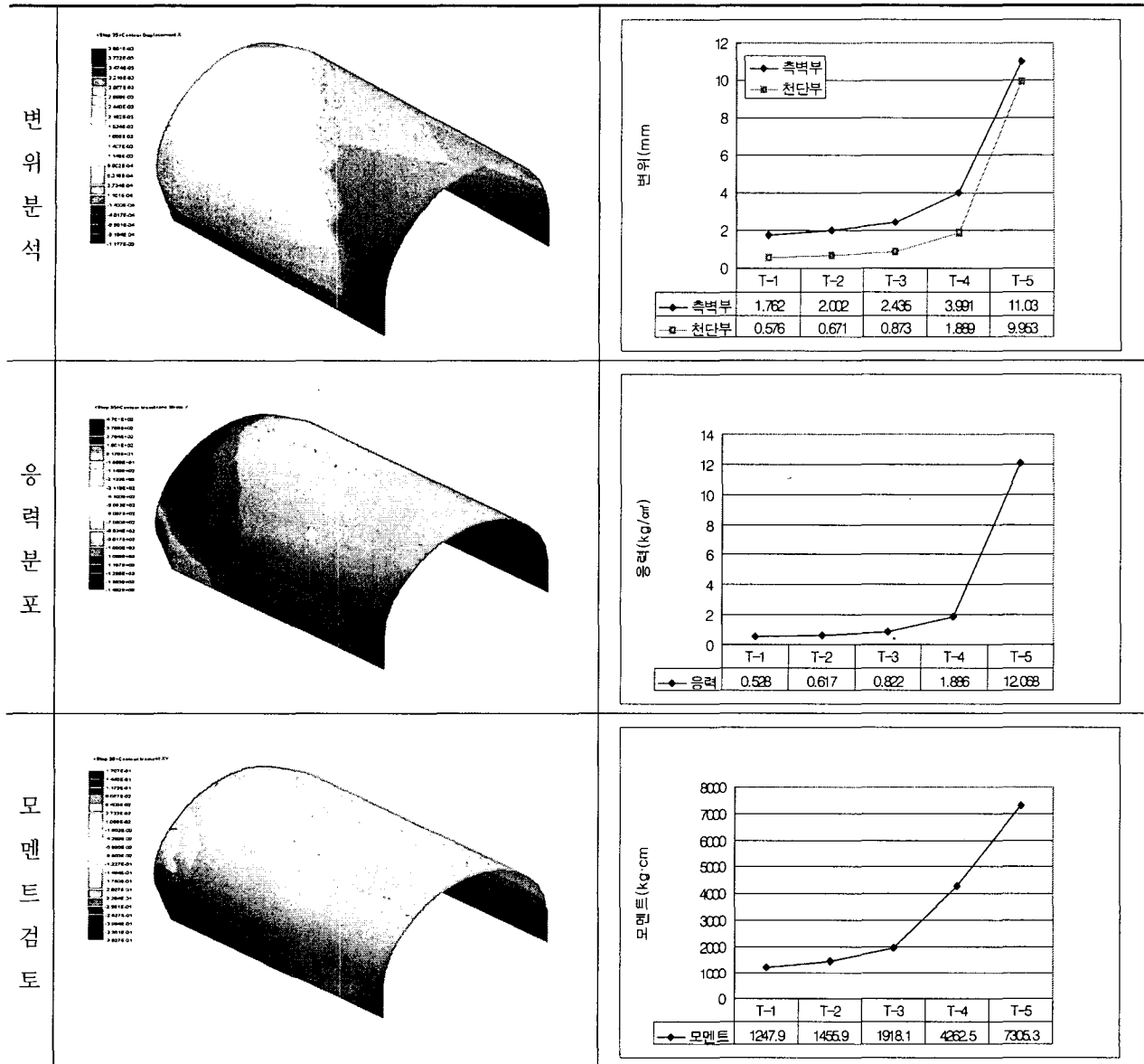


표 10. 암반등급별 최대 내공변위

| 암반등급   | 기존방식 (mm) | 지형순응 (mm) |
|--------|-----------|-----------|
| TYPE-1 | 0.492     | 1.762     |
| TYPE-2 | 0.578     | 2.002     |
| TYPE-3 | 0.763     | 2.435     |
| TYPE-4 | 1.712     | 3.991     |
| TYPE-5 | 9.089     | 11.030    |

불량한 암반상태(TYPE-4)에서의 갱구부 가시실 분석결과는 아래의 그림과 같다.

표 11. 갱구부 가시설 해석결과



| 구분  | 변위(mm) |       | 압축응력(kgf/cm <sup>2</sup> ) |        | 천단응력(kgf/cm <sup>2</sup> ) |        | 비고 |
|-----|--------|-------|----------------------------|--------|----------------------------|--------|----|
|     | 천단     | 내공    | 결과                         | 안정성    | 결과                         | 안정성    |    |
| 최대값 | TYPE-1 | 0.576 | 1.762                      | 32.69  | OK                         | 0.528  | OK |
|     | TYPE-2 | 0.671 | 2.002                      | 36.66  | OK                         | 0.617  | OK |
|     | TYPE-3 | 0.873 | 2.435                      | 44.62  | OK                         | 0.822  | OK |
|     | TYPE-4 | 1.889 | 3.991                      | 80.05  | OK                         | 1.886  | OK |
|     | TYPE-5 | 9.953 | 11.03                      | 114.85 | NG                         | 12.068 | NG |
| 허용값 | -      | -     | 86                         |        | 3.6                        |        |    |

갱구부 가시설에 대한 부재력 안정성을 검토한 결과, 암반등급이 불량한 type-5를 제외한 type-4이상의 암반등급에서는 안정한 것으로 파악되었다.

그러므로, 암질 상태가 매우 불량한 지반조건 하에서는 지형순응 갱문 계획 시 갱구부 가시설 강재의 설치간격 및 규격을 조정할 필요가 있으며, 천단부 선보강공법 및 측벽부 보강 록볼트의 추가적용으로 갱구부의 안정성을 확보하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서 지형과 사교하는 갱구부에서의 갱구 비탈면 설계방식을 기존의 도로축에 직교로 계획하는 방식에서 지형에 순응하는 하는 방향으로 검토한 결과, 갱구부에서 발생하는 편측 대절토사면을 최소화하여 과도한 자연훼손 방지 및 공사기간 단축, 비탈면 보강공사비 절감효과를 얻을 수 있었으며 아래의 항목으로 요약할 수 있다.

1. 급경사지 지형과 교차하는 구간에서의 기존 갱구설계방식은 과도한 비탈면 발생에 따라 시공시 사면붕괴가 다수 발생하였고, 그에 따른 공기지연 및 보강공사비의 과도한 발생을 초래하고 있음을 사례 분석 결과 알 수 있었다.

2. 기존의 설계방식에 비해 본 연구에 의한 설계방식을 적용할 경우, 갱구 비탈면의 높이는 50%, 원지반 훼손면적은 65%, 굴착 토공량은 70% 감소시킬 수 있었다.

3. 안정성 검증을 위해 3차원 수치해석 프로그램을 사용하여 기존 갱문설계방식과 지형순응방식에서의 갱구부 내공변위값을 비교 검토한 결과, 지형순응방식의 경우 측벽부 최대 변위값이 암반등급별로 1.762~11.03mm으로 기존방식의 경우 0.492~9.089mm에 비해 다소 높은 변위분포를 보였다.

4. 지형순응갱문 설계방식은 NATM시점부에 비대칭지반 형상을 발생하며, 그에 따라 갱문가시설의 안정성에 대한 검증이 중요하므로 본 연구에서 암반등급에 따른 갱문가시설의 부재력 검토결과, 암반등급 type-4이상의 지반에서는 통상 갱구가시설로 적용되는 강지보재 및 슛크리트타설로 갱문 안정성을 확보할 수 있었다.

이상의 검토에서 본 연구 방식은 기존의 설계방식에 비해 갱구부의 비탈면 발생을 최소화할 수 있는 설계방식임을 알 수 있었으며, 환경성과 경제성을 동시에 만족하는 설계방식이다. 그러나, 갱구부 비대칭 지반형상에 따른 구조적 안정성을 확보하기 위해 풍화대 및 지질 이상대와 같은 불량한 지반조건에서의 적용성이 향후에 검증되어야 하며, 그에 따른 보강공법의 적용성 검토가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 도로설계편람(Ⅰ) 제6편 터널, 건설교통부(2000), p613-1~17
2. 도로설계요령 제4권 터널, 한국도로공사(2002), p154~173
3. 터널갱문가시설 시공방안 검토(건설관10105-129), 한국도로공사(2003)
4. 터널갱문부 설계기준 검토(설계도10201-70), 한국도로공사(2003)