

## Application Report Series /

### 도로터널분야 – 비상주차대 및 피난연락갱

- 프로젝트 개요
- 설계조건 및 구조물 현황
- 모델링
- 해석개요
- 해석결과

## 1. 프로젝트 개요

본 사업은 국도 25호선 남천~청도 1구간에서 산악지 통과구간의 열악한 기하구조를 개선하여 안전하고 쾌적한 국도 기능의 확보, 물류비용의 절감 및 이동성과 주행성을 향상시키기 위하여 계획되었다. 본 구간은 국도기능 분류상 국도 III등급으로서 통과 교통량 비율이 낮거나 관광성격의 도로를 위한 적합한 기능이 확보되어야 한다. 그러므로 특수교량, 장대터널 등 대규모 구조물 시공에 따른 내구성, 기능성, 경제성을 고려하여 도로 안전진단을 통한 기능향상이 요구되고 있는 상황이다.

본 과업구간 내에 시공되는 터널은 남성현터널이며 터널 내에 차량 고장 또는 유지관리 시 원활한 교통처리를 유도하기 위하여 비상주차대를 설치하고 비상시 구난차량의 터널간 이동을 원활히 하기 위하여 피난연락갱을 설치하였다. 그러므로 남성현터널 구간 중 비상주차대 확폭구간과 차량용 피난연락갱 접속구간의 해석을 수행하여 안정성을 검토하는 것을 본 과업의 목적으로 한다.

## 2. 설계조건 및 구조물 현황

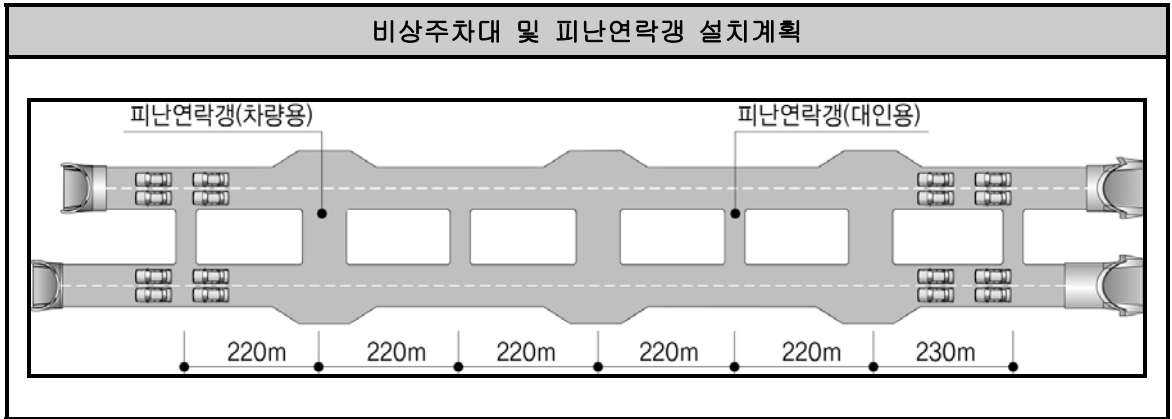
### 2.1 설계조건 검토

- (1) 현장여건 및 지반특성에 적합한 굴착공법은 터널연장이 2km이하인 점을 고려하면 TBM+확대발파공법이나 기계굴착공법이 굴착공기, 경제적 측면에서 발파공법보다 유리하지 않으며 본 구간의 암석의 강도가  $1,500\text{kgf/cm}^2$  내외로 높고 단층대 및 파쇄대 출현 등 지반상태 변화가 클 것으로 예상되어 이에 대한 대처능력이 우수한 발파굴착공법을 적용하였다.
- (2) 표준지보패턴 중 지보재설계는 시험시공을 통하여 슛크리트 급결제를 선정하였고 이와 병행하여 인근현장 시공사례조사를 통하여 기능성을 개선하였다. 지보량은 RMR 및 Q값을 이용하여 적정량을 설계하였으며, RMR로 산출된 지보재량과 비교분석을 실시하였다. 구간별 지보패턴 적용에 있어서는 RMR-Q상관관계를 활용한 지보패턴 설계를 하였으며 단층대 및 갱구 봉적층구간은 세부 지보패턴으로 설계하였다.

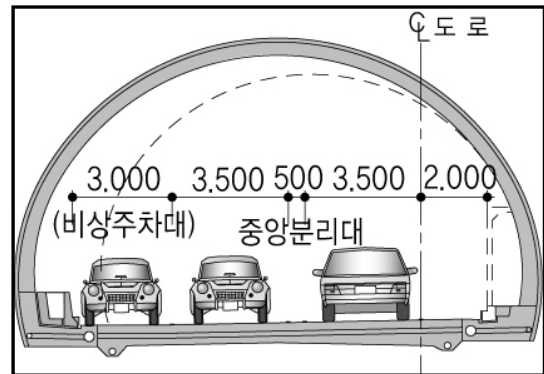


2.2.2 비상주차대 및 차량용 피난연락갱

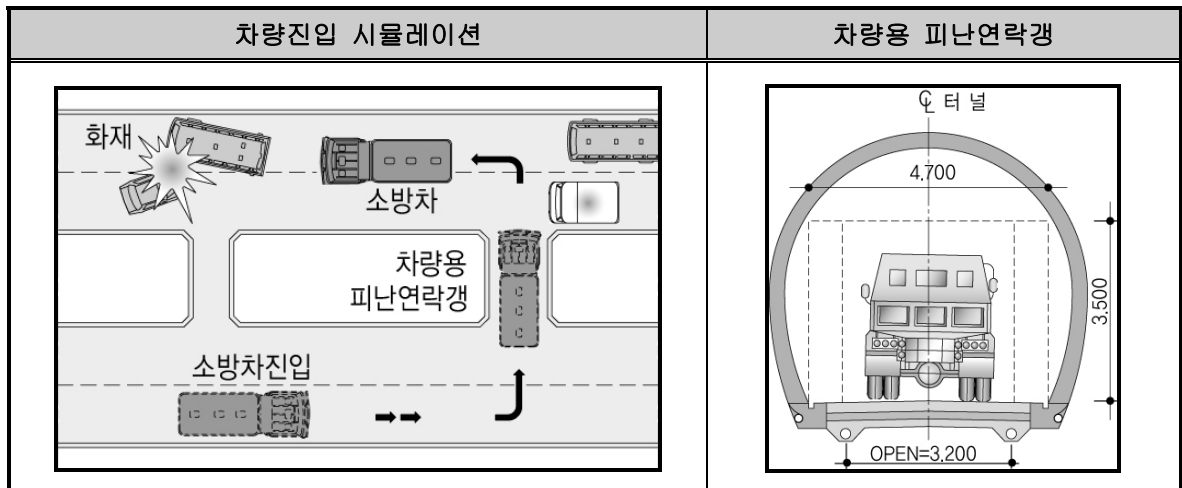
(1) 피난연락갱은 아래 그림과 같이 220m간격으로 설치된다.



(2) 비상주차대의 설치기준은 1,000m이상의 터널에 750m 간격으로 설치하는 것으로 규정하고 있다. 본 남성현 터널내에 설치되는 비상주차대는 그 폭원이 3.0m이며 접속길이 각각 10m에 유효길이 20m의 총 연장 40m로 설치가 된다. 비상주차대의 연장은 시뮬레이션을 통해 주차동선 검토로 접속길이를 선정한다. 우측 그림은 비상주차대의 확폭부와 본선 터널과의 크기를 비교하여 나타낸 것이다.



(3) 차량용 피난연락갱의 설치기준 또한 비상주차대와 마찬가지로 1,000m이상의 터널에 750m간격으로 설치된다. 차량용 피난연락갱은 시설한계 규정이 있는데, W4.7m × H3.5m이며, 방화문 유효개구부도 W3.2m × H3.5m로 설계되었다. 본 과업구간의 터널내 차량용 피난연락갱은 차량 진입 시뮬레이션 수행에 의하여 구난차량 및 소방차의 진입여부에 대하여 검토하였다.

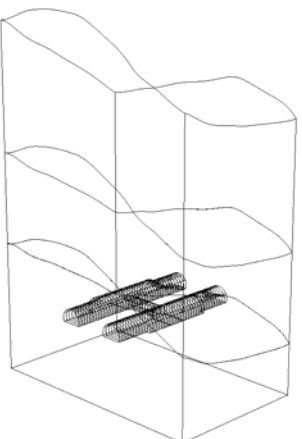
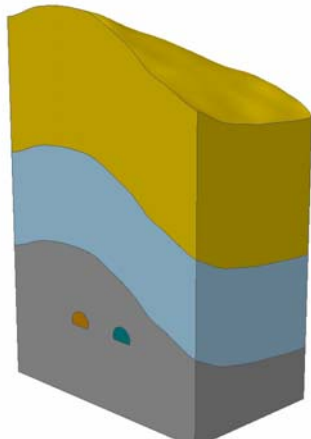
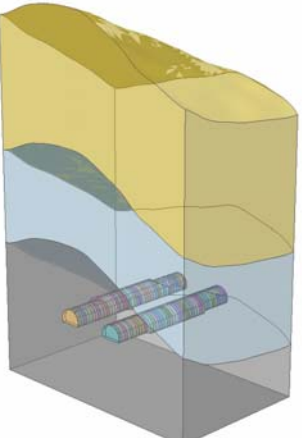
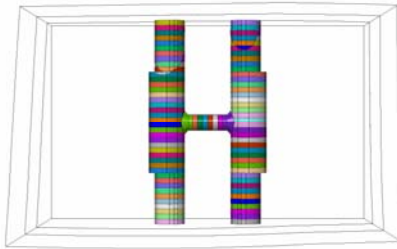


### 3. 모델링

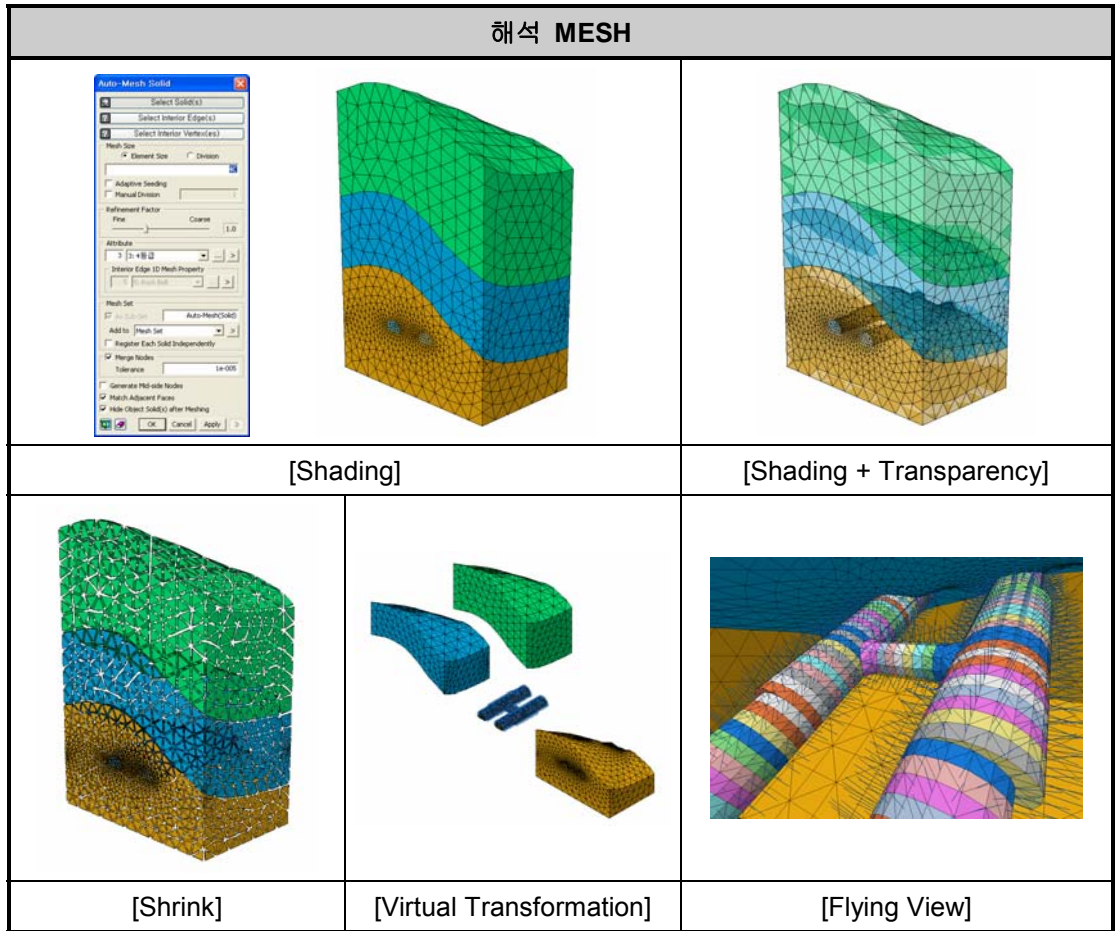
본 프로젝트의 수치해석에 사용된 프로그램은 지반 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/GTS이며, 여기서는 MIDAS/GTS를 이용한 해석모델링, 재료특성, 경계조건 및 하중의 입력 내용을 설명하였다.

#### 3.1 해석모델링

- (1) 해석모델의 지층구성은 풍화토층, 연암층, 경암층으로 구성되어 있고 그 하부로 편도압이 작용하며, 해석 개요도는 다음 그림과 같다. MIDAS/GTS에서는 다양한 Graphic Display Option으로 복잡한 지반 모델의 내부 형상을 편리하게 확인할 수 있다. Geometry 개체의 표현 방식에는 Geometry 개체의 면은 감추고 외곽선으로만 표현하는 Wireframe, 면과 외곽선을 함께 이용하여 Geometry 개체를 표현하는 Shading with Edge 등이 있으며, Geometry 개체의 내부를 볼 수 있는 Transparency 표현을 사용할 수 있다.

해석 개요도	
	
[Wireframe]	[Shading with Edge]
	
[Shading with Edge + Transparency]	[Wireframe + Shading with Edge]

(2) 해석 MESH는 아래 그림과 같으며, MIDAS/GTS 해석에 사용된 Mesh로 지반은 Solid를 선택하여 Mesh생성 작업을 수행하는 Auto Mesh Solid, 슛크리트는 Solid요소의 Free Face로부터 2D 요소들을 추출하는 Extract Element, 록볼트는 Edge를 선택하여 Mesh생성 작업을 수행하는 Auto Mesh Edge를 사용하였다. 요소망에 대해서는 추가적으로 요소를 일정 비율만큼 축소시켜 그려주는 Shrink 표현을 적용할 수 있으며, 선택한 Mesh Set을 임의의 방향으로 이동시켜 모델을 자유롭게 관찰할 수 있는 Virtual Transformation 기능과 간단한 마우스 Dragging으로 모델의 내·외부 형상을 동적으로 확인할 수 있는 Flying View 기능을 제공한다.



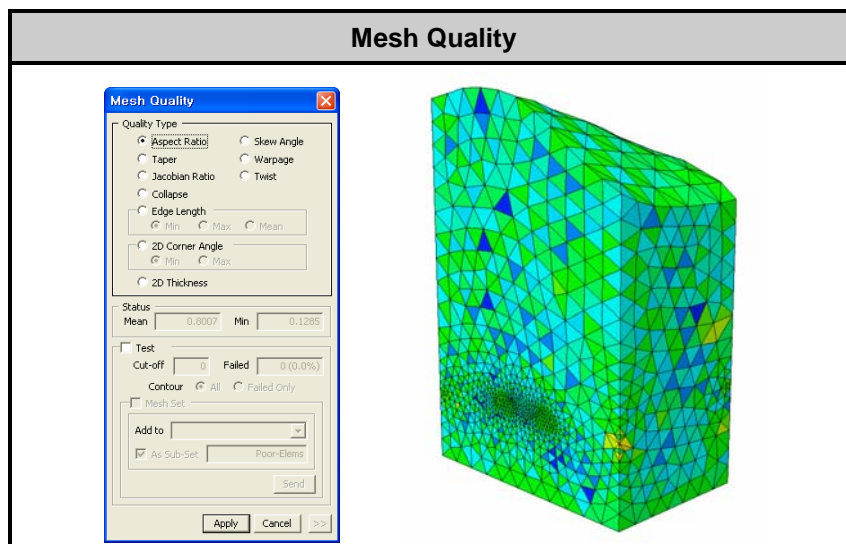
(3) 해석에 사용된 요소종류는 지반에 Solid 요소, 슛크리트에 Plate 요소, 록볼트에 Embedded Truss 요소를 사용하였다.

- ① Solid 요소는 임의 3차원 공간상에 위치한 4개, 5개 또는 6개의 면으로 정의되는 요소로서, Solid Structure 또는 Thick Shell 등의 모델링에 주로 사용된다.
- ② Plate 요소는 동일평면상에 위치한 3, 4, 6 또는 8개의 절점에 의해 정의되는 요소로서, 평면인장/압축거동, 평면전단거동, 두께방향의 휨거동, 두께방향의 전단거동을 고려할 수 있다. 따라서 콘크리트 라이닝, 슛크리트, 토류벽, 기초판 등의 모델링에 사용될 수 있다.

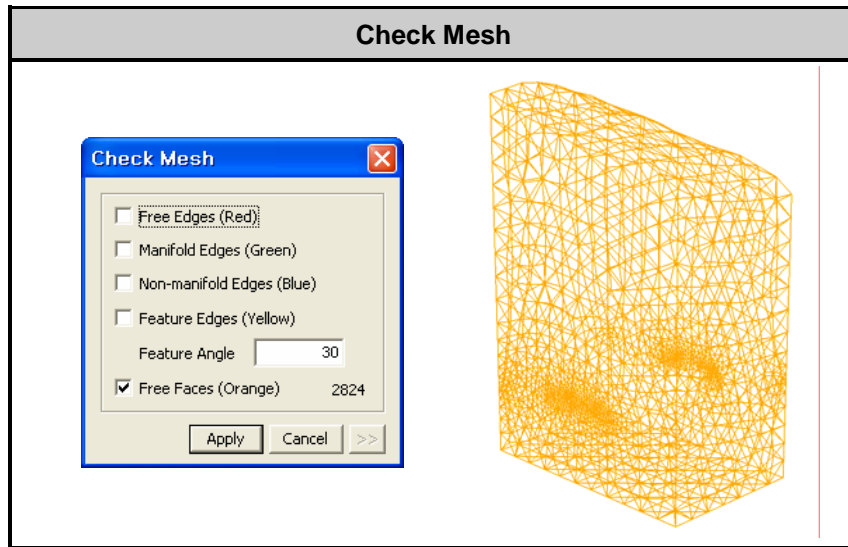
- ③ Embedded Truss 요소는 2개의 절점에 의해 정의되는 'Uniaxial Tension-Compression 3D Line Element'로서, 일반적으로 록볼트, 앵커 및 버팀대(Strut) 등을 모델링 하는데 사용되며 요소 축방향의 힘만 전달할 수 있다.



- (4) 요소의 Quality를 체크하면 아래 그림과 같으며, 요소의 적정 형상비(Aspect Ratio)는 요소의 종류, 기하학적 형상, 구조형태 등에 따라 다르다. 그러나 일반적으로는 요소 형상비를 가능한 한 1.0에 가깝도록 하는 것이 바람직하다. 또한, 요소의 크기는 상대적으로 작을수록 수렴성이 우수하다.



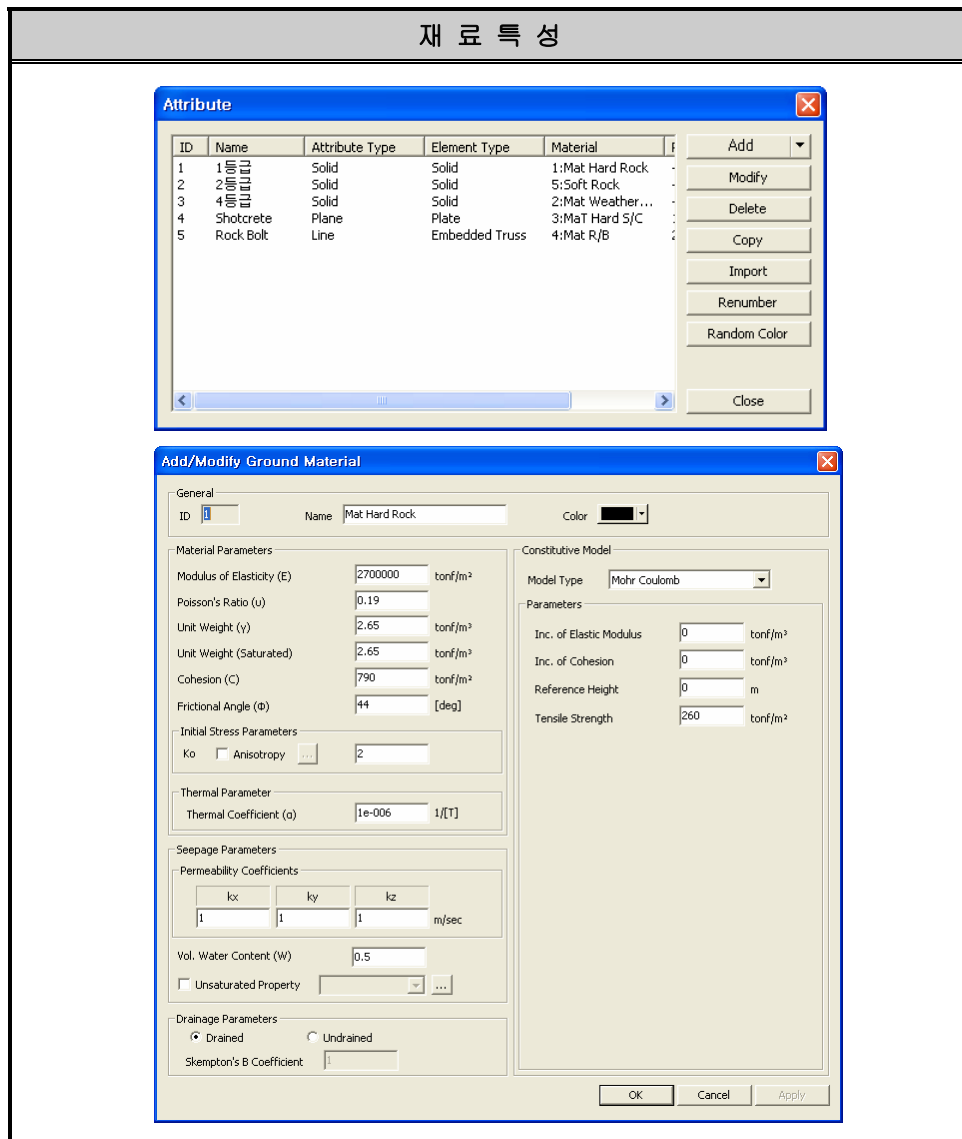
(4) 요소의 정보를 얻기 위하여 요소의 Free Face를 체크하면 아래 그림과 같다.



### 3.2 재료특성

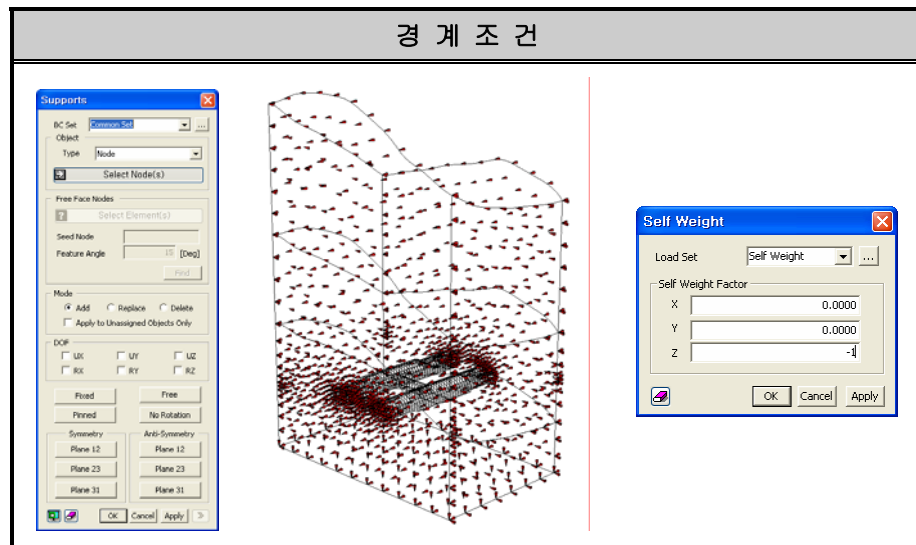
(1) 과업구간의 암반분류를 수행한 결과 지반등급 1, 2, 4로 구분하였으며 지반등급 및 적용지보패턴은 다음 표와 같다.

구 분	E(tonf/m <sup>2</sup> )	$\gamma_t$	$\gamma_{sat}$	c(tonf/m <sup>2</sup> )	$\Phi$	$\nu$	$K_0$
지반등급 1	2,700,000	2.65	2.65	790	44	0.19	2.0
지반등급 2	1,740,000	2.60	2.60	340	38	0.22	2.0
지반등급 4	210,000	2.4	2.4	90	32	0.28	2.0
Shotcrete	1,500,000	2.4	2.4	-	-	0.2	-
Rock Bolt	21,000,000	7.85	7.85	-	-	0.3	-
구 분	쏏크리트두께 (mm)	록볼트 길이 (m)	록볼트 간격(m)		굴착공법		
			종방향	횡방향			
지보패턴 III	80	4.0	2.0	1.5	전단면		



### 3.3 경계조건 및 하중

해석 시 고려된 경계구속조건은 전체영역에 대하여 회전자유도를 고정시켰으며, X축 및 Y축, Z축 면에 대하여 변위 및 회전자유도를 Fix시켰고, 하중조건은 Z축 방향으로 중력하중을 부여하였다.



## 4. 해석개요

### 4.1 해석목적

- (1) 선·후행 터널간 이격거리에 따른 영향범위의 중첩으로 주변지반의 거동이 발생하는 병설터널의 경우 직경이 본선터널과 다른 비상주차대등의 확폭부와 이를 연결하는 피난터널의 설치 시 터널의 안정성 검증이 필요하다.
- (2) 평면변형률(Plain Strain) 조건으로 해석이 불가능한 구간에 속하는 비상주차대 해석모델의 경우 선시공 터널의 양방향 통행으로 인한 비상주차대 설치구간과 추후 대인용 피난터널이 접속된 구간에 대하여 예상되는 응력집중현상에 의한 안정성을 검토하기 위해 3차원 해석이 필요하다.
- (3) 본 해석구간과 같이 본선터널 지보타입이 III등급으로 계획될 경우 수치해석을 통한 지보타입의 적정성을 검증함이 타당하고 또한 안정성 검토 결과와 영향범위 산정에 따른 보강여부를 판단함을 목적으로 한다.

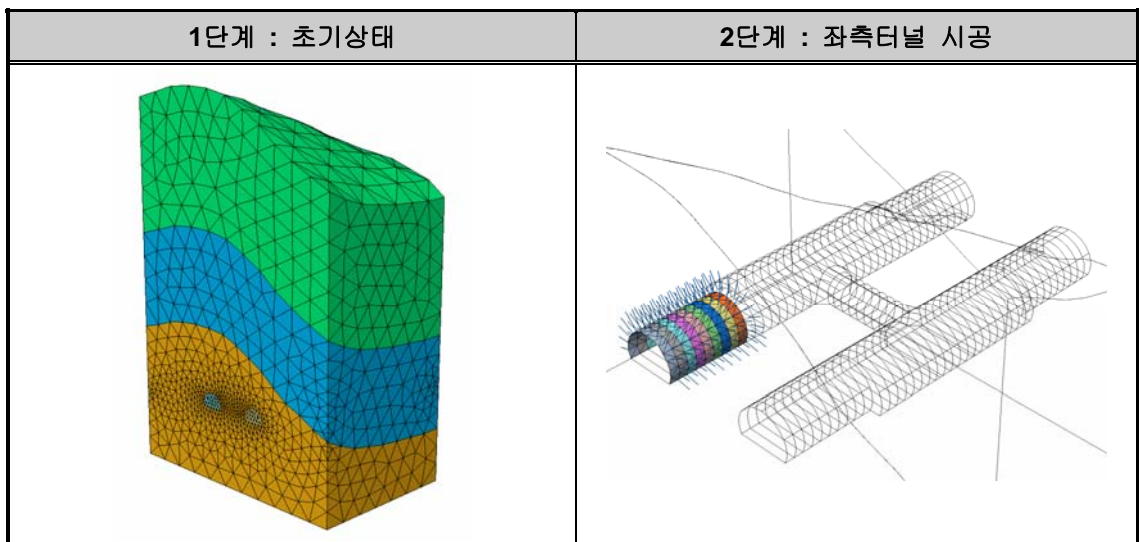
### 4.2 해석조건 및 방법

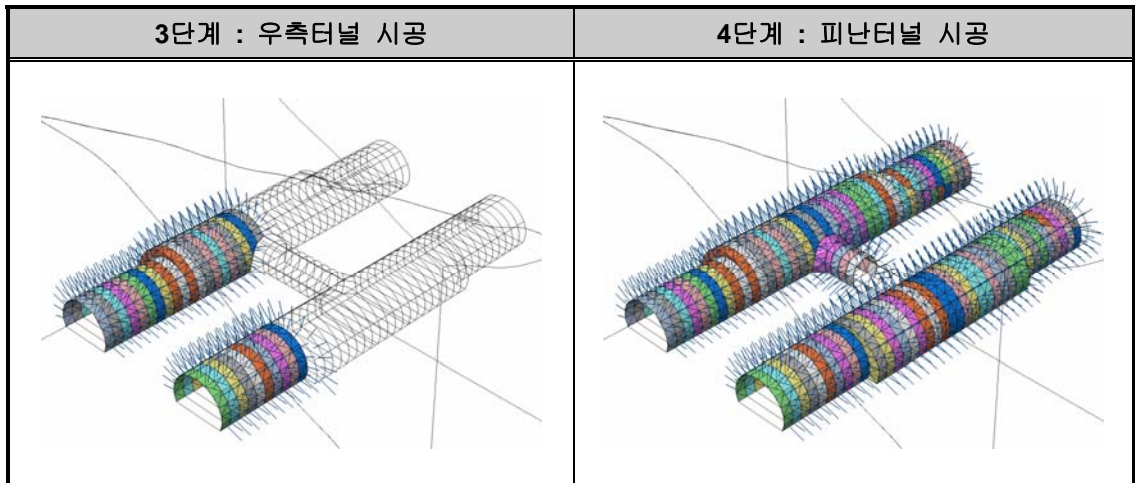
- (1) 본 해석모델의 지보패턴은 3등급으로 전단면 굴착을 적용하였다.
- (2) 해석구간은 병설터널로서 일반본선구간 40m, 비상주차대구간 40m의 본선구간이며, 피난터널은 약 20m이고 선.후행터널의 이격거리는 30m이다.
- (3) 해석모델은 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성해석을 적용하였고 비상주차대-대인용차량용 피난터널의 접속부 안정성 검토와 시공과정중의 실제 지반거동을 분석하기 위하여 실제 과업구간의 지형, 지질조건을 고려하고 굴착 및 지보재 설치등 실제 시공순서 및 접속부 단면형상 등을 고려한 3차원 해석을 수행하였다.
- (4) Mohr Coulomb 파괴기준은 간단하고 정확한 장점 때문에 현재까지 흙 재료에 대해서 가장 널리 사용되고 있으며, 실용적인 구속압의 범위에서 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있고 사용이 간편하기 때문에 지반공학에 관한 많은 수치해석 문제에서 가장 많이 사용되는 파괴모델이다.

### 4.3 시공단계

시공단계별 모델링은 다음과 같다.

시공순서	시공단계	비 고
1	초기상태	원지반상태
2	터널시공	터널굴착(좌측, 우측, 피난터널순) → 락볼트 설치 → 슛크리트 설치





## 5. 해석결과

MIDAS/GTS에서는 해석결과를 Result Component에 따라 Contour, Table, Graph, Vector, Diagram 등 다양한 방법으로 나타낼 수 있으며, 본 프로젝트에서는 수치해석 결과를 이용하여 변위도, 주응력도, 횡압축응력도 및 축력도 등의 Contour를 얻었고 각 결과값에 대한 안정성 여부를 검토하였다.

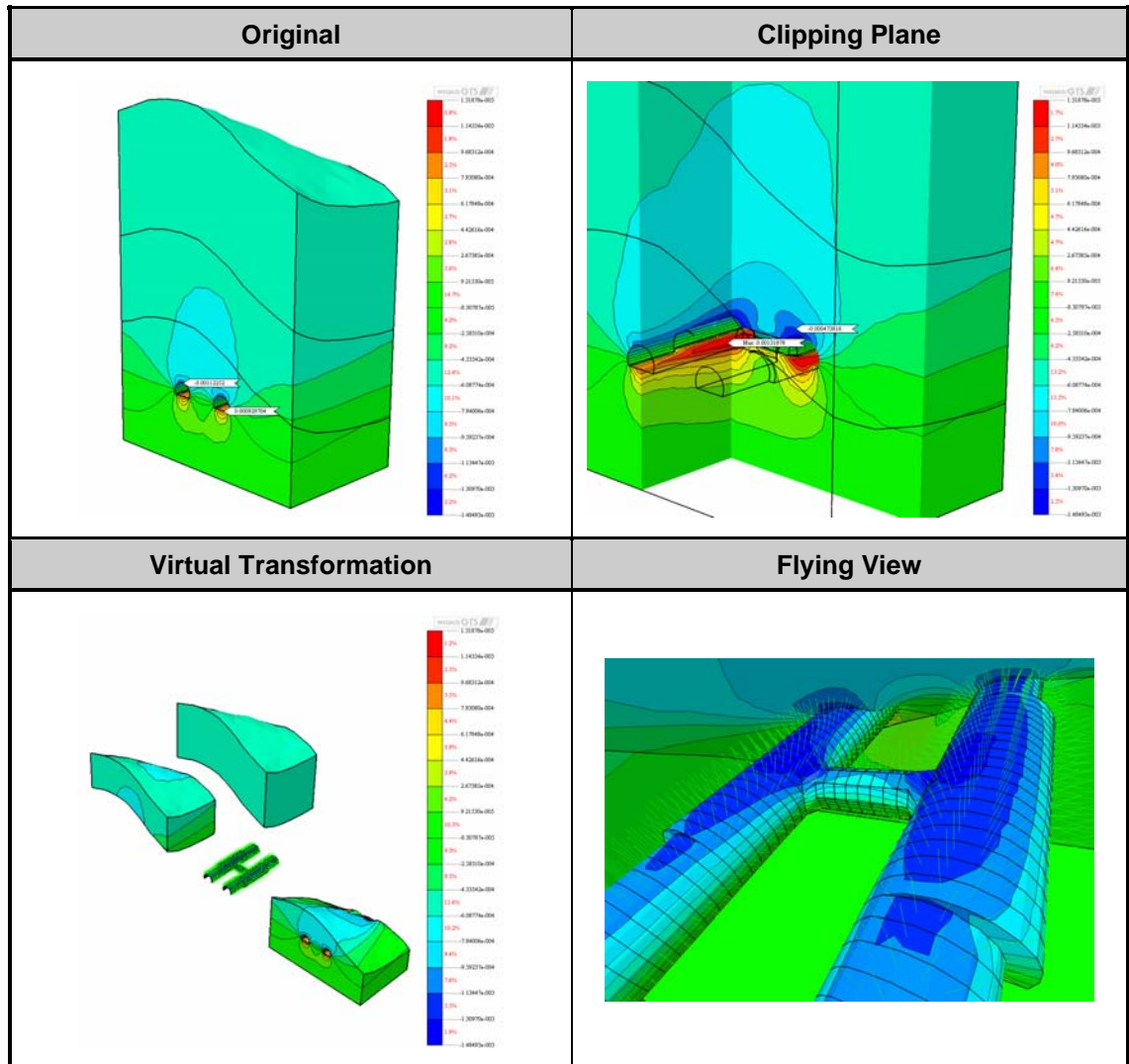
MIDAS/GTS는 Graphic 환경에서 해석 결과를 보다 정확하게 확인할 수 있도록 다양한 Contour Plot 방식을 제공하며, 일반적인 Contour Plot을 그리는 Original, 등위면 또는 등위선을 그리는 Iso Surface, 3D 모델에서는 절단면, 2D 모델에서는 절단선 상에 Contour Plot을 그리는 Slice Plane, 3D 모델에서는 절단면, 2D 모델에서는 절단선을 기준으로 한 쪽에만 Contour Plot을 그리는 Clipping Plane이 있다. 또한 Extract Result 기능을 사용하여 원하는 위치의 일부 결과값들을 손쉽게 얻을 수 있으며, Probe Result 기능을 이용하여 절점이나 요소들의 결과값을 모델의 해당위치에 Result Tag를 붙여서 직접 나타낼 수 있고 On-Curve Diagram과 Settlement Profile 기능을 사용하여 훨씬 직관적으로 해석결과를 확인할 수 있다.

### 5.1 변위도

최종단계의 최대연직변위는 1.32mm, 최대수평변위는 2.27mm이다. 이것은 허용변위로 쓰이고 있는 10~20mm보다 훨씬 안전한 값으로 터널 시공시 천단변위 및 내공변위가 크게 발생하지 않는 것으로 판단된다.

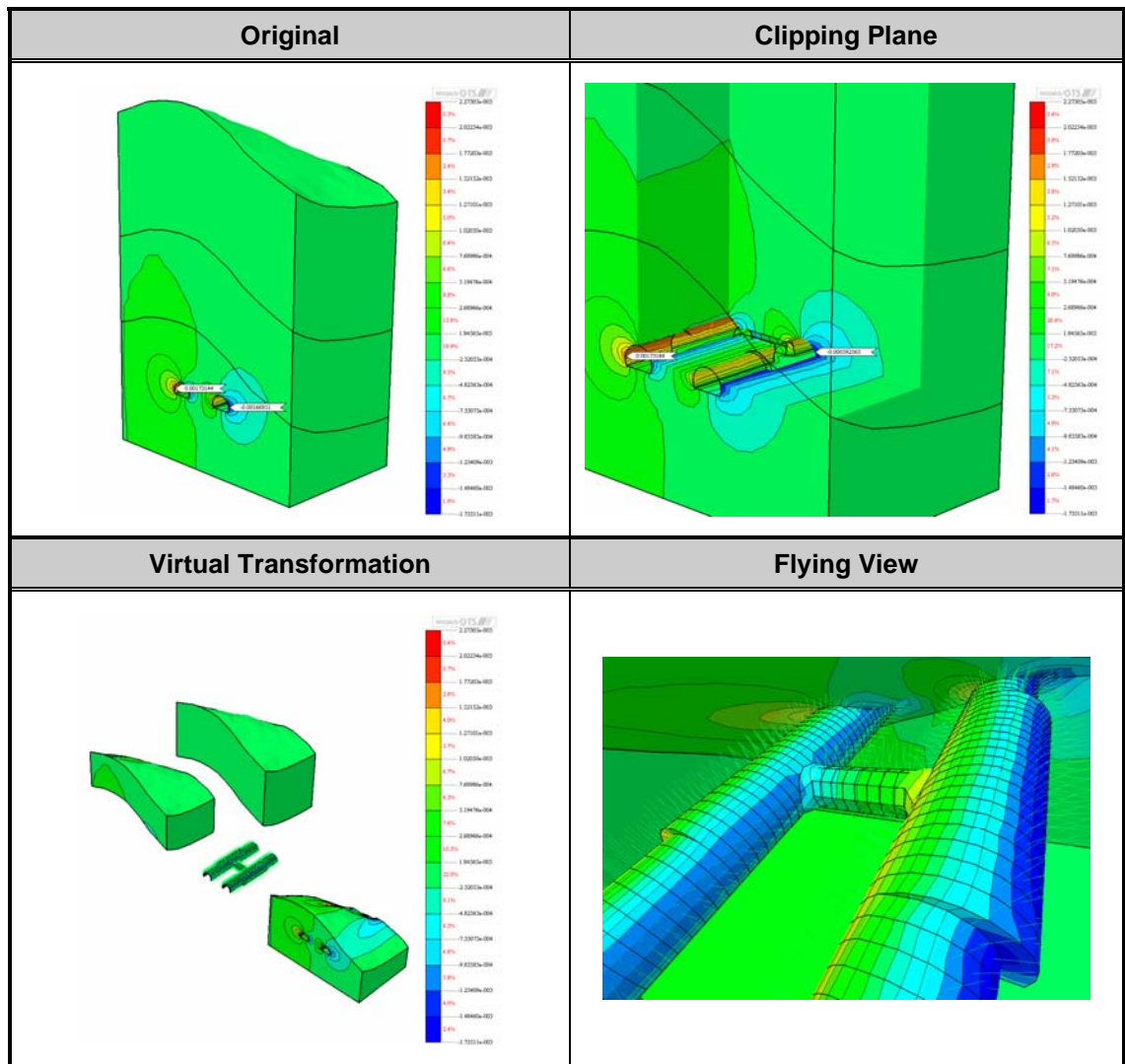
### 5.1.1 연직변위도 (최종단계)

터널 천정부지반 및 지보재의 안정성 판단을 위하여 천단 침하를 측정하고 터널 굴착에 따른 지표침하 영향을 파악하고 주변 구조물의 안전도 분석 침하방지대책 수립 및 효과를 파악하기 위하여 지표 침하를 측정한다.



### 5.1.2 수평변위도 (최종단계)

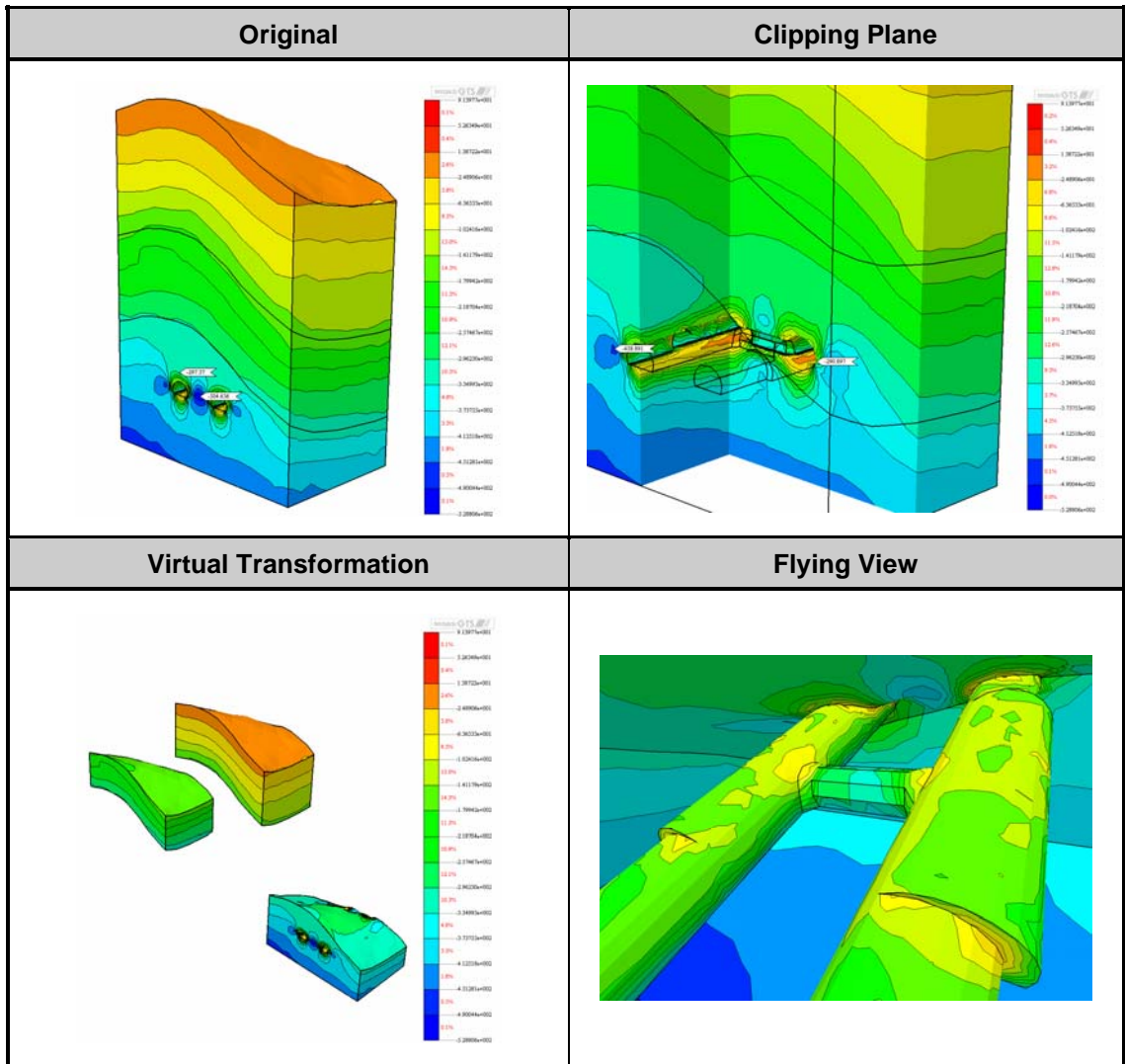
변위량, 변위속도, 변위수렴 상태를 파악하여 주변지반의 안정성을 확인하고 1차 지보에 대한 설계 및 시공의 타당성 평가와 2차 복공의 실시 시기 등을 판단하기 위해서 내공 변위를 측정한다.



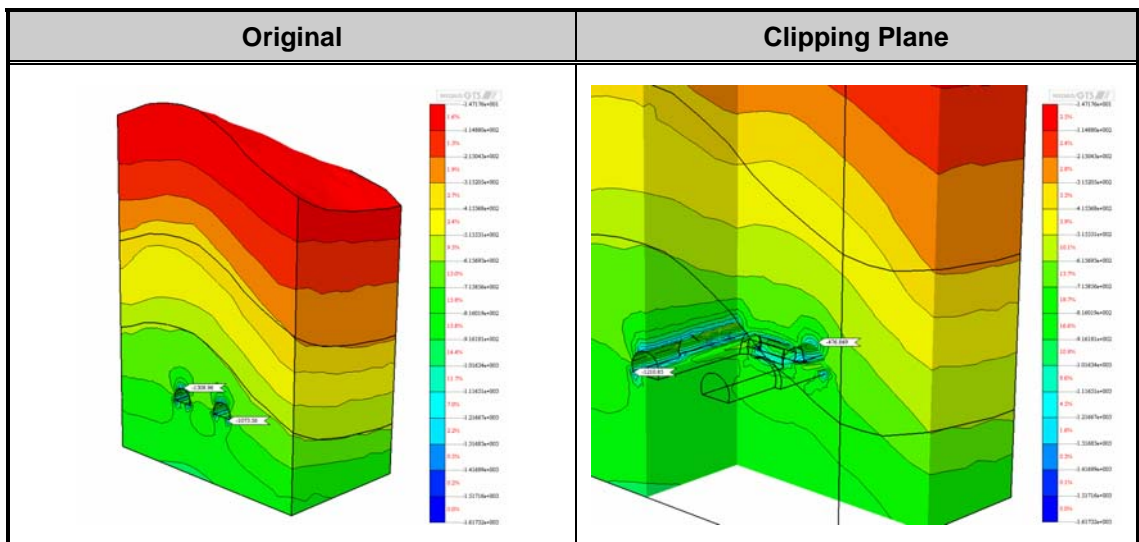
## 5.2 주응력도

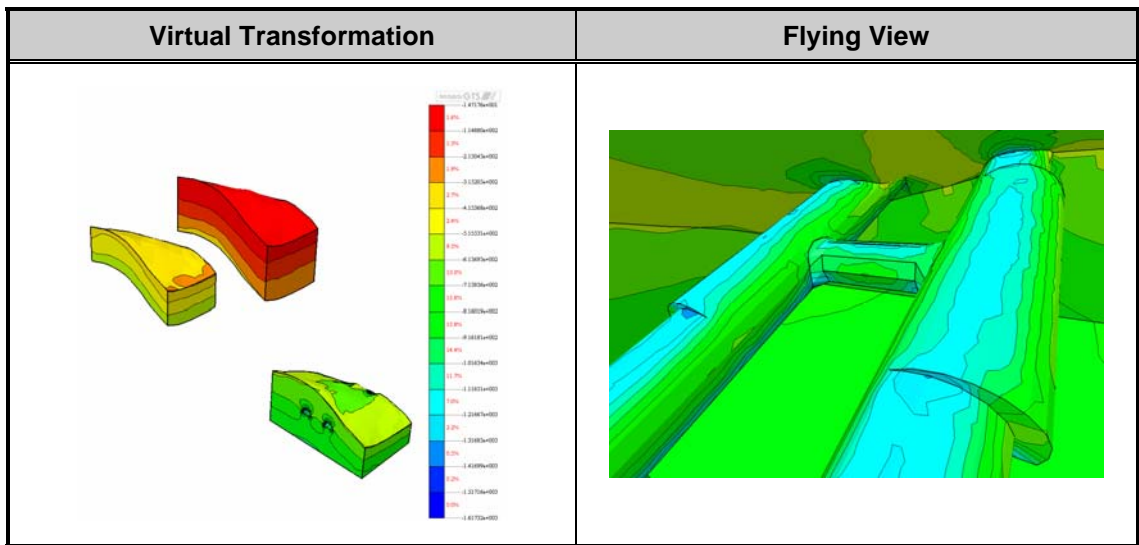
지반의 역학적인 방향성에 의한 주응력 방향의 변화에 따라 터널의 거동을 고찰하기 위하여 최대주응력과 최소주응력의 공간적 위치관계에 따라 터널의 거동특성을 검토하고 주응력 방향각의 변화에 따른 변위 및 응력의 증·감을 분석하여 지보패턴 계획 시 이를 보완하는 설계가 이루어지도록 한다.

5.2.1 최대주응력도 (최종단계)



5.2.2 최소주응력도 (최종단계)



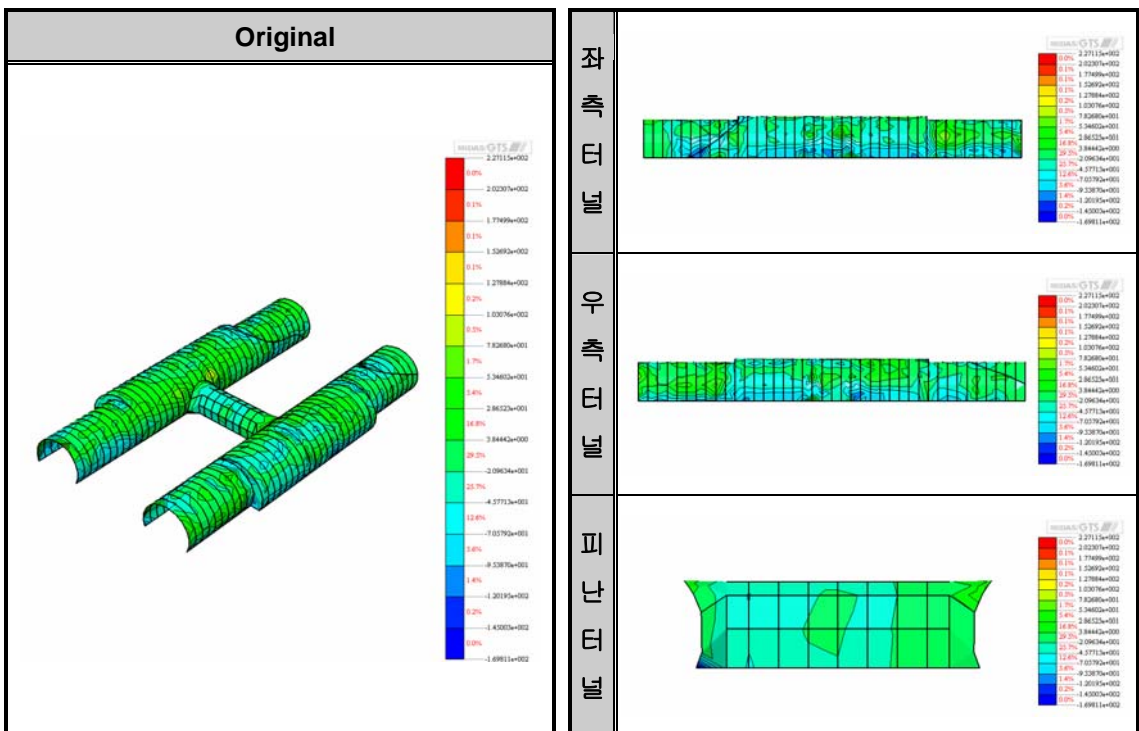


### 5.3 횡압축응력도 및 축력도

숏크리트, 록볼트와 같은 지보 부재의 안정성은 해석에서 얻어진 응력과 각 부재의 허용응력을 비교함으로써 평가한다. 따라서, 각 지보부재의 응력을 적절히 평가할 필요가 있다. 숏크리트의 횡압축응력은  $22.7\text{kgf/cm}^2$ 로 허용압축응력  $84.0\text{kgf/cm}^2$ 내에 위치하며, 록볼트의 축력도 2.29tonf로 그 안정기준을 만족한다.

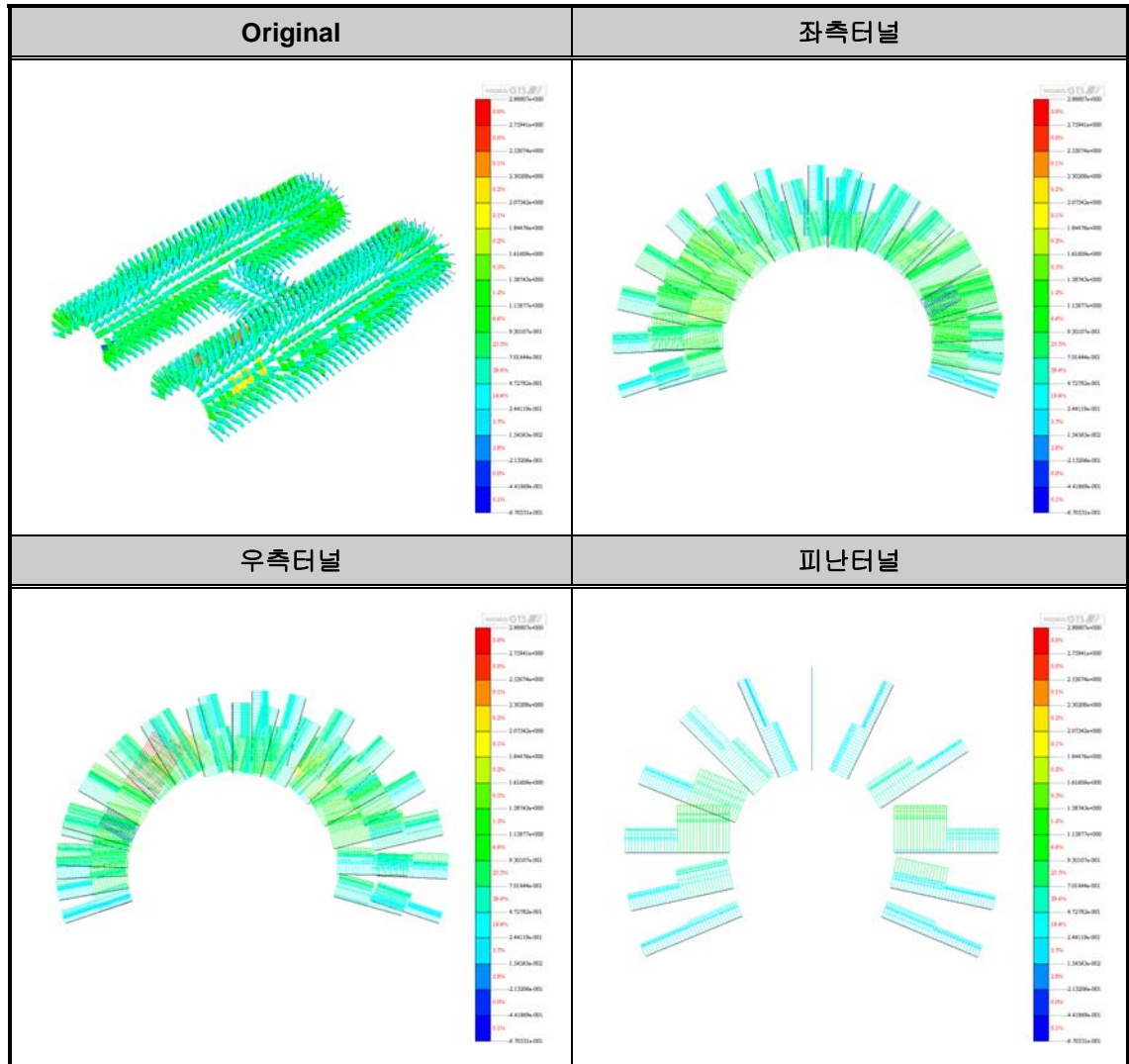
#### 5.3.1 숏크리트 횡압축응력도 (최종단계)

숏크리트의 배면토압 및 축방향응력을 측정하기 위해서 숏크리트의 후미압축응력을 측정한다.



### 5.3.2 록볼트 축력도 (최종단계)

록볼트에 작용되는 축력을 심도별로 측정하고 록볼트의 지보효과와 유효설계길이를 판단하기 위해서 록볼트 축력을 측정한다.



해석결과 본 구간에 설치되는 비상주차대 및 피난연락경의 안정성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

구 분	연직변위(mm)			수평변위(mm)			S/C 휨압축응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )			록볼트축력 (tonf)		
	결과	허용	판정	결과	허용	판정	결과	허용	판정	결과	허용	판정
Abs Max.	1.32	10-20	안정	2.27	10-20	안정	22.7	84.0	안정	2.99	8.87	안정
허용기준	-			-			0.4 f <sub>ck</sub>			0.42 A σ <sub>y</sub>		