

## 불연속 암반 내 해저터널의 수치해석 방법에 따른 비교 연구

이동훈((주)태조엔지니어링)

유광호(수원대학교)

### 1. 서론

현재 대부분의 지하수에 관한 해석은 해석 대상을 투수성 연속체로 가정하여 유동 및 응력 해석이 실시되어 왔다. 실제 지하철 터널과 같이 지하 천부의 풍화토 및 풍화된 연약 암반에 지하 공동이 설계되는 경우는 해석대상 지역을 투수성 연속체로 보아도 무방하다. 그러나 해저터널과 같이 지하 심부 암반에 건설되는 지하공동의 경우는 주위 환경이 주로 견고한 암반으로 이루어져 있고 암반 자체의 투수성 보다는 현지 암반에 존재하는 불연속면들의 상호 연결성에 영향을 받게 된다. 따라서 절리 암반에 굴착되는 터널의 안정성을 현실적으로 검토하기 위해서는 절리에 의한 영향을 고려한 해석을 수행해야 한다.

김치환(2000)은 개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어서 설계정수를 결정하는 방법에 대해 기술한 바 있으며, 이성규 등(2001)에 의하면 개별요소법을 이용한 터널의 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리 모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 해석 결과를 비교·분석하였다. Barton-Bandis 모델을 이용한 방법에서는 연속체 해석과 불연속체 해석결과의 차이가 없었으며 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 방법에서는 해석의 결과가 차이를 보인다는 것을 연구한 바 있다. 그러나 이들의 연구는 수리적인 특성을 고려하지 않고 역학적인 측면에서 수행된 연구들이었다.

김택곤(1994)에 의하여 불연속 암반내의 지하수 흐름이 공동에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구가 수행된 바 있다. 이 연구에 따르면 동일한 지하수위 조건에서 연계해석과 비연계해석을 수행하여 응력조건과 절리의 방향성에 따른 절리 거동을 비교하였으며 지하수위가 높은 심부 암반의 경우 절리거동에 의한 지하수 상태가 달라지므로 연계해석이 필요하다고 하였다.

본 논문에서는 지하 심부에 위치한 해저터널을 대상으로 해석방법에 따라 지하수를 고려하지 않는 역학해석, 지하수와 불연속면을 고려한 수리적(hydraulic) - 역학적(mechanical) 연계해석과 지하수를 고려한 정수압해석 방법으로 안정성 검토를 하기 위해 수치해석을 실시하였다. 1등급 암반조건, 슛크리트 두께 30cm, 축압계수 1.0과 불연속면의 특성에 따라 해저터널의 안정성 영향을 검토하기 위해 절리간격 1m, 2m, 3m, 절리경사 A(0°와 90°), B(45°와 135°)에 대해 실제 불연속 절리 모델을 주어 각각의 해석방법에 따라 총  $3 \times 1 \times 1 \times 3 \times 2 = 18$ 가지의 해석을 수행하였다. 이를 위해 절리사이로 유동 및 암반응력 해석을 할 수 있는 개별요소 해석 프로그램인 UDEC(Universal Distinct Element Code) ver. 4.0을 사용하였다.

## 2. 수치해석 모델

### 2.1 해석방법에 따른 모델

지하 심부에 위치한 해저터널을 대상으로 해석방법에 따른 안정성 검토를 비교하기 위해 해석방법에 따라 수치해석을 실시하였다. 그림 2.1의 (a)는 지하수를 고려하지 않는 해석으로써 불연속면이 발달한 해저 심부에 터널을 굴착하되 지하수를 배제하고 역학해석만을 수행한 경우이다. 그림 2.1의 (b)는 지하수를 고려한다는 점은 동일하지만 수리-역학적 해석을 고려한 연계해석과 지하수를 고려하되 지하수의 흐름해석은 수행하지 않는 정수압해석을 수행하였다.

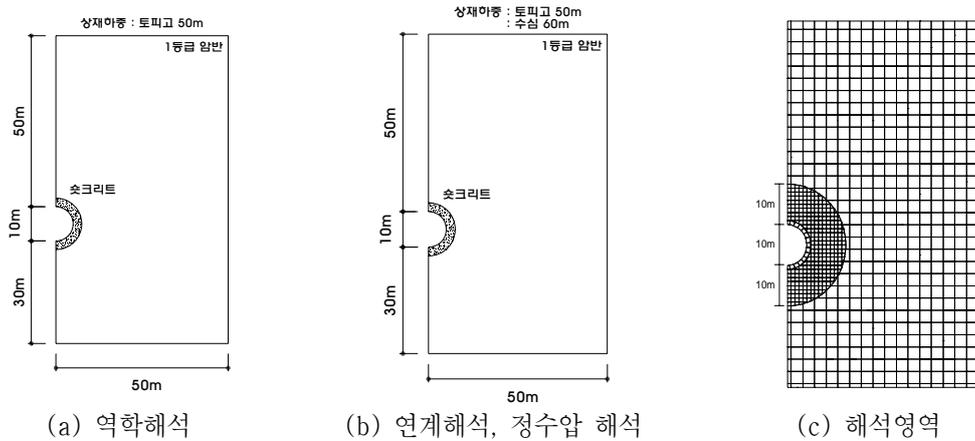


그림 2.1 해석단면 및 해석영역

해저터널을 대상으로 그림 2.1과 같이 동일한 단면조건으로 수심이 60m, 토피가 100m인 직경 10m의 원형터널을 사용하였으며 터널 중심으로부터 수평방향 해석경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50m로 하였다. 즉, 해수면(지하수위)은 터널 천단으로부터 160m 상부에 위치하는 것으로 가정하였다. 해석속도를 높이기 위해 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였으며 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링 하였다. 즉, 지하수면과 토피고 50m는 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 해석 상부 경계면에 작용하는 수압과 토압을 상재하중으로 처리하였다. UDEC 해석 시 해석속도를 높이기 위해 그림 2.1의 (c)와 같이 터널 굴착 시 영향을 미칠 수 있는 영역을 터널 직경의 1D로 하여 이 영역내에서는 불연속면의 절리 간격을 1m, 2m, 3m로 모델링하고 이 영역 밖은 3m로 절리를 생성하여 수치해석을 실시하였다.

### 2.2 암반 및 절리의 강도 정수

수치해석 시 1등급 암반의 암반블록 강도정수는 한국도로공사 도로교통기술원(2002)에서 사용한 값을 사용하였으며 표 2.1과 같이 정리하였다. 특히, 암반블록의 투수계수( $k$ )는 “0”으로 가정하여 불투수성으로 처리하였다.

$$k_j = \frac{1}{12\mu} = 83.3 Pa^{-1} sec^{-1} \quad (2.1)$$

또한, 불연속체 해석 시 사용된 절리의 강도정수는 표 2.2와 같이 정리하였는데 절리의 마찰각, 점착력, 인장강도는 암반블록의 강도정수와 동일한 값을 적용하였다. 한편, 수직응력이 0인 상태에서의 절리틈새인 초기절리틈새( $a_{zero}$ )와 수직응력이 가장 클 경우 더 이상 줄어들지 않는 절리 틈새인 잔류절리틈새( $a_{res}$ )는 가정하여 사용하였다. 절리의 투수율( $k_j$ )은 물의 동점성계수( $\mu$ )를  $10^{-3} Pa \cdot sec$ 로 가정하고 식 (2.1)과 같이 산정하여  $83.3 Pa^{-1} sec^{-1}$ 을 적용하여 절리를 통해 지하수의 흐름을 유도하였다. 표 2.3은 터널의 지지보재인 슛크리트의 강도정수로서 시공순서에 따라 연성 슛크리트와 경성 슛크리트의 탄성계수를 달리하였다. 또한 슛크리트의 파괴 여부를 알 수 있도록 슛크리트의 허용인장응력과 허용압축응력을 설정하여 지지보의 파괴 여부를 판단하였다.

표 2.1 수치해석에 사용된 1등급 암반의 암반블록 강도정수

구분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	마찰각 (°)	점착력 (MPa)	인장강도 (MPa)	간극률	포아송비	투수계수 ( $k$ )	탄성계수 (GPa)
암반	26	45	1.0	0.5	0.20	0.2	0	34.12

표 2.2 불연속체 해석 시의 절리강도정수

구분	마찰각 ( $\phi_j$ ) (°)	점착력 ( $c_j$ ) (MPa)	인장강도 ( $t_j$ ) (MPa)	투수율 ( $k_j$ ) ( $Pa^{-1} sec^{-1}$ )	$a_{zero}$ (mm)	$a_{res}$ (mm)	수직강성 ( $K_n$ ) (GPa/m)	전단강성 ( $K_s$ ) (GPa/m)
절리	45	1.0	0.5	83.3	0.1	0.001	34.12	3.4

표 2.3 지보재(슛크리트)의 강도정수

슛크리트 두께 (cm)	탄성계수(GPa)		포아송비	투수율 ( $k_j$ ) ( $Pa^{-1} sec^{-1}$ )	허용인장응력 (MPa)	허용압축응력 (MPa)
	연성	경성				
30	3	30	0.25	83.3	0.89	12.36

### 3. 수치해석 결과 및 분석

#### 3.1 해석방법에 따른 결과 분석

측압계수 1.0의 경우에서 해석방법에 따른 안전율의 결과를 그림 3.1과 같이 나타내었다. 그림 3.1의 (a)와 (b)는 각각 절리경사가 A(0°와 90°), B(45°와 135°)의 결과로써 그림에서 알 수 있듯이 역학해석 방법의 경우에서 안전율이 가장 크게 나타났으며 연계해석을 수행한 방법이 역학해석 방법과 정수압해석 방법 사이에 존재하였다. 이는 지하수를 고려하여 해석을 함으로써 지하수가 해저터널에 커다란 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 절리간격이 증가할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났으며 절리경사가 B(45°와 135°)의 경우가 안전율이 더 높게 나타났다.

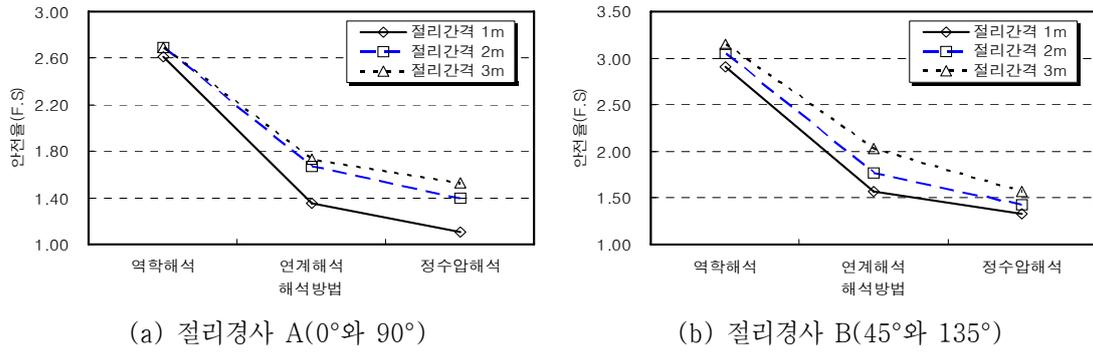


그림 3.1 해석방법에 따른 안전율 관계(측압계수 1.0)

측압계수 1.0일 때 천단변위와 해석방법에 따른 관계를 그림 3.2와 같이 절리간격으로 구분하여 나타내었다. 그림 3.2의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 절리경사가 A(0°와 90°)인 경우가 절리경사 B(45°와 135°)인 경우 보다 천단부의 변위가 크게 나타났으며, 그 범위는 약 0.5mm 내외로 나타났다. 또한, 절리간격이 증가할수록 천단부의 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 동일한 면적내에 생성된 절리의 수가 적기 때문인 것으로 판단된다. 안전율이 가장 낮았던 정수압 해석방법에서 천단변위가 가장 높은 것으로 나타났으며 절리간격이 1m의 경우 절리경사 A와 B일 때 연계해석 방법과 정수압 해석 방법의 천단변위 차이는 거의 없었으며 절리간격이 증가할수록 해석방법에 의한 천단변위 차이는 뚜렷하게 나타났다.

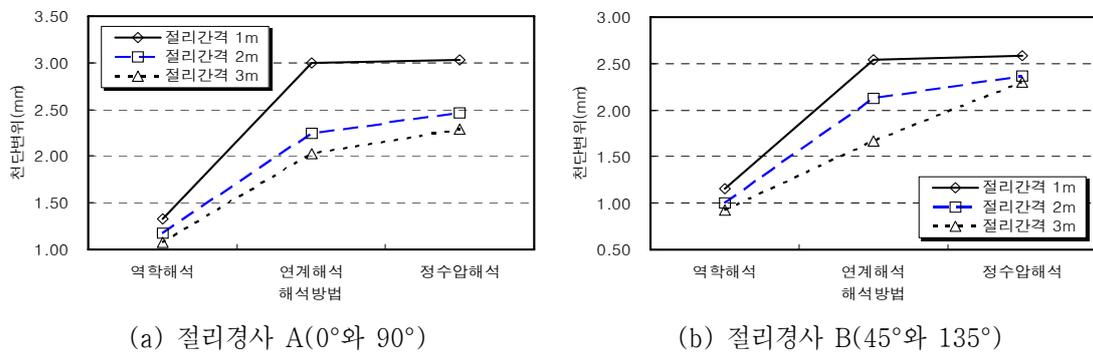
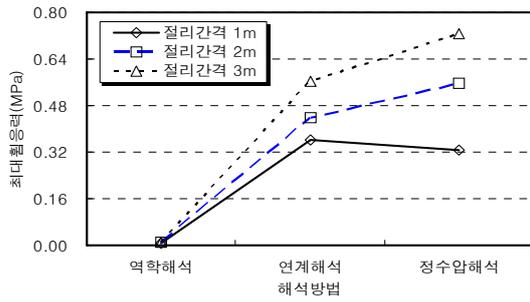
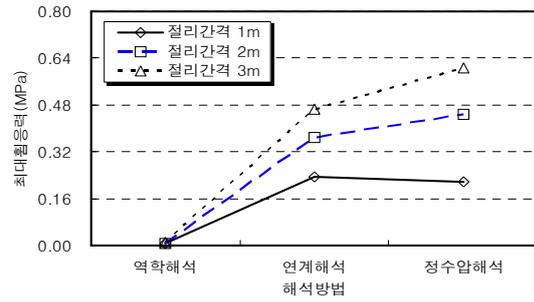


그림 3.2 해석방법에 따른 천단변위 관계(측압계수 1.0)

그림 3.3은 측압계수가 1.0인 경우에서 해석방법에 따라 최대휨응력의 관계를 절리간격으로 구분하여 나타내었다. 그림 3.3의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 절리경사가 A(0°와 90°)인 경우 보다 절리경사 B(45°와 135°)인 경우에서 최대휨응력이 작게 나타났다. 세 가지 해석 방법 중 정수압 해석 방법에서 최대휨응력이 가장 크게 나타났다. 이는 지하수와 불연속면 모두를 고려하여 해석하기 때문에 응력이 크게 걸리는 것으로 판단된다. 안전율이 가장 높게 나타났던 역학해석 방법에서 최대휨응력이 가장 작게 나타났으며, 해석방법과 절리간격이 변하여도 최대휨응력이 슛크리트의 파괴기준인 허용압축응력(12.36MPa)을 넘지 않아 지보재가 안정한 것으로 나타났다. 이는 암반이 1등급 암반으로써 높은 수압과 토압을 충분히 견딜 수 있기 때문에 지보재에 작용하는 응력이 작은 것으로 판단된다.



(a) 절리경사 A(0°와 90°)

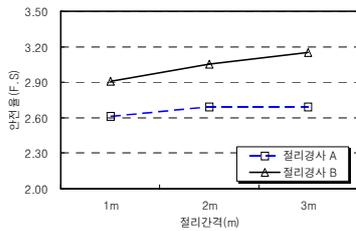


(b) 절리경사 B(45°와 135°)

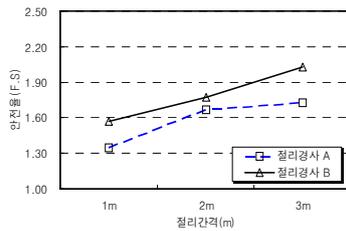
그림 3.3 해석방법에 따른 최대응력 관계(측압계수 1.0)

### 3.2 절리간격에 따른 결과 분석

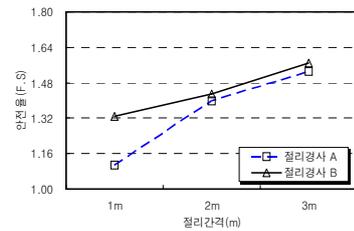
그림 3.4는 측압계수가 1.0일 때 절리간격에 따른 안전율 관계를 해석방법에 따라 나타내었다. 절리 간격이 증가할수록 세 가지 해석방법 모두에서 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 그림 3.5와 같이 절리 간격이 증가하면서 동일한 면적내에 생성된 절리의 수가 적기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 세 가지 해석 방법 모두 절리경사 A보다 절리경사 B인 경우 안전율이 높은 것으로 나타났다.



(a) 역학해석



(b) 연계해석



(c) 정수압 해석

그림 3.4 절리간격에 따른 안전율 관계(측압계수 1.0)



(a) 1m



(b) 2m



(c) 3m

그림 3.5 절리간격 별 블록크기(절리경사 B(45°와 135°))

그림 3.6은 축압계수 1.0인 경우에서 절리간격에 따른 최대변위 관계를 해석방법에 따라 나타내었다. 절리 간격이 증가할수록 최대변위가 감소하였으며 그림에서 알 수 있듯이 역학 해석에서 최대변위가 가장 작게 발생하였다. 이는 지하수를 고려하지 않고 역학해석만을 수행한 조건으로써 터널에 작용하는 응력이 토압만 작용하기 때문이다. 연계해석의 경우 지하수와 토압을 모두 고려함으로써 세 가지 해석방법 중 최대변위가 중간의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 절리경사 B(45°와 135°)의 경우에서의 최대변위가 작게 발생하는 것으로 나타났다.

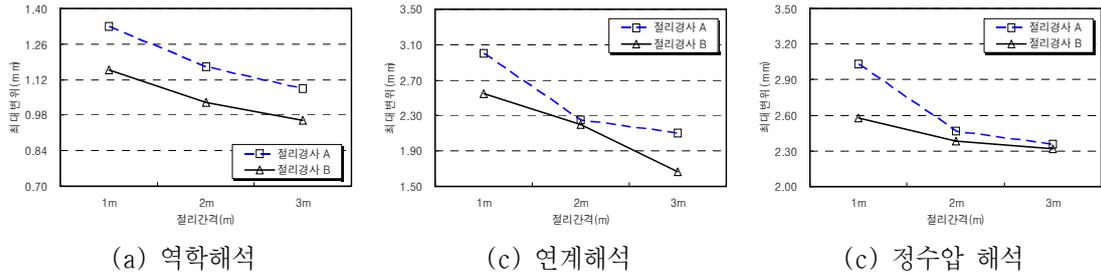
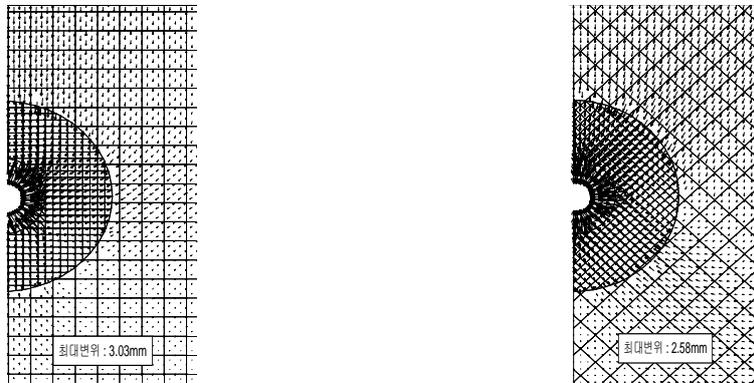


그림 3.6 절리간격에 따른 최대변위 관계(축압계수 1.0)

변위가 가장 높게 나타난 정수압 해석방법에서 축압계수 1.0, 절리간격이 1m 일 때의 변위 벡터도를 그림 3.7과 같이 절리경사에 따라 나타내었다. 그림 3.7의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 절리경사 A의 경우 최대변위는 3.03mm로 발생하였고 절리경사 B의 경우 최대변위는 2.58mm로 발생하여 절리경사 B의 조건에서 최대변위가 작게 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 절리경사 A(0°와 90°) (b) 절리경사 B(45°와 135°)

그림 3.7 절리경사에 따른 변위벡터도(정수압 해석, 절리간격 1m, 축압계수 1.0)

그림 3.8은 축압계수 1.0의 경우에서 절리간격에 따른 최대휨응력 관계를 해석방법에 따라 나타내었다. 절리 간격이 증가할수록 최대휨응력이 증가하였으며 그림에서 알 수 있듯이 역학해석 방법에서 최대휨응력 가장 작게 발생하여 안전율이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 지하수를 고려하지 않고 역학해석만을 수행한 방법으로써 해저터널에 작용하는 응력이 토압만 작용하기 때문이다. 지하수와 토압을 모두 고려한 연계해석 방법의 경우 세 가지 해석방법 중 최대휨응력이 역학해석 방법과 정수압 해석 방법 사이에 존재하며 지하수가 해석방법에 미치는 영향이 크음을 알 수 있다.

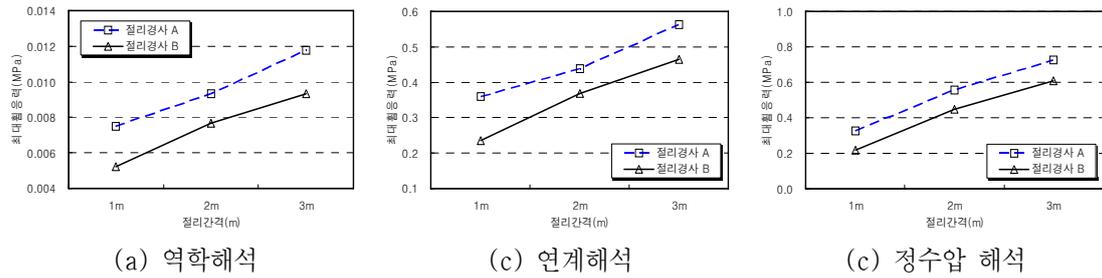


그림 3.8 절리간격에 따른 최대휨응력 관계(축압계수 1.0)

축압계수 1.0, 절리경사 A( $0^\circ$ 와  $90^\circ$ )의 경우에서 터널주변의 휨응력 분포를 그림 3.9와 같이 절리간격으로 구분하여 나타내었다. 그림 3.9의 (a)는 지하수를 고려하지 않은 역학해석 방법으로써 터널주변에 걸리는 휨응력이 절리간격이 1m일 경우 천단부에서 높게 발생하고 절리간격이 2m와 3m의 경우는 인버트부에서 높게 발생하였다.

그림 3.9의 (b)는 연계해석 방법으로써 절리간격이 3m일 때 휨응력이 가장 높게 나타나며 절리간격 1m와 2m의 휨응력은 절리간격이 2m일 때 약간 높게 나타나지만 같은 경향을 보였다. 또한, 절리간격에 구분 없이 측벽부에서 휨응력이 가장 작게 작용하였다.

그림 3.9의 (c)는 지하수를 고려한 정수압 해석 방법으로써 연계해석 방법과 비슷한 경향을 나타내지만 절리간격이 2m와 3m에서의 휨응력이 같은 경향을 나타내었다. 그러나 그림과 같이 세 가지 해석방법에 따른 휨응력을 분석한 결과 터널의 주지보재로 사용되는 숏크리트의 허용압축응력인 12.36MPa는 초과하지 않아 숏크리트가 파괴되지 않는 것을 알 수 있다.

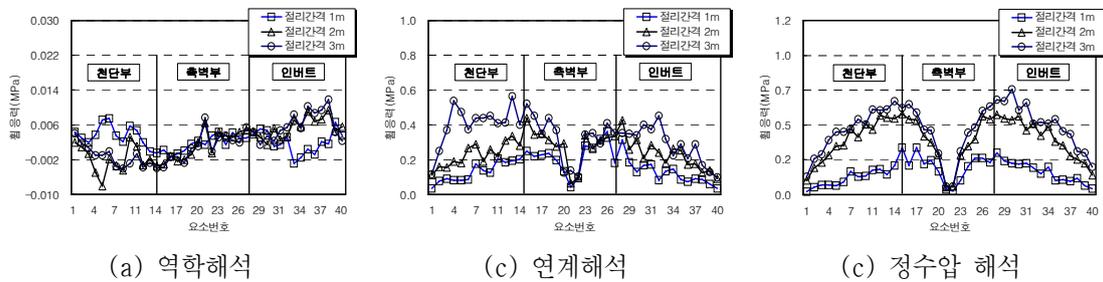


그림 3.9 터널 주변의 휨응력 분포(축압계수 1.0, 절리경사 A( $0^\circ$ 와  $90^\circ$ ))

#### 4. 결론

지하 심부에 위치한 해저터널을 대상으로 안정성 검토를 하기 위해 해석방법에 따라 역학해석, 연계해석, 정수압 해석으로 구분하여 해석을 실시하였다. 1등급 암반조건, 숏크리트 두께 30cm, 불연속면의 특성에 따라 해저터널의 안정성 영향을 검토하기 위해 절리간격 1m, 2m, 3m, 절리경사 A( $0^\circ$ 와  $90^\circ$ ), B( $45^\circ$ 와  $135^\circ$ )에 대해 실제 불연속 절리 모델을 주어 각각의 해석방법에 따라 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

각각의 해석방법에 따라 안전율을 산정한 결과 역학해석 방법이 가장 크게 나타났으며 연계해석 방법, 정수압 해석 방법의 순으로 나타났다. 이는 지하수를 고려한 방법과 그렇지

않은 방법을 비교함으로써 해저터널의 안정성 평가 시 지하수가 중요한 인자임을 알 수 있었다.

절리간격에 따른 안전율 검토 결과 절리간격이 증가할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 지하수를 고려하지 않은 역학해석 방법의 경우 다른 해석방법 보다 절리간격에 의한 안전율의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이는 해저터널의 안전성에 미치는 영향이 절리간격 보다는 절리내에 존재하는 지하수의 흐름이 더 큰 것으로 판단된다.

세 가지 해석방법 중 정수압 해석방법에서 최대휨응력이 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 정수압 조건은 지하수를 고려하여 해석을 하지만 지하수의 흐름해석을 하지 않기 때문에 터널에 작용하는 응력이 크게 걸리는 것으로 분석된다. 그러나 세 가지 해석방법 모두에서 슛크리트의 파괴기준인 허용압축응력을 초과하지 않아 터널이 안정한 것으로 나타났다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때 역학해석 방법보다는 지하수를 고려한 연계해석 방법, 정수압해석 방법에서 안전율이 낮게 나타남으로써 지하수를 고려하는 것이 중요한 인자임을 알 수 있었다. 따라서 지하수위가 높고 높은 지압이 발생하는 해저터널의 경우 지하수를 고려한 연계해석 방법 또는 정수압해석 방법이 적절한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김치환 (2000), “개별요소법에 의한 터널 안정성 해석에 있어 설계정수의 결정”, 터널과 지하공간, Vol. 10, pp. 278~290.
2. 김택곤 (1994), 불연속면 암반내 지하수유동과 공동거동의 상호작용에 관한 수치해석적 연구, 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 97p.
3. 이성규, 김치환 (2001), “개별요소법을 이용한 터널 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 비교”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 167~173.
4. 한국도로공사 도로연구소, (2001), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구”, 268p.
5. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), Universal Distinct Element Code 2D, Ver. 4.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.