

## 터널 편압 대책에 대한 수치해석적 연구

### A Study of Numerical Analysis for Uneven Stress of Tunnel

현기환<sup>1)</sup>, Ki-hwan Hyun, 윤지선<sup>2)</sup>, Ji-son Yoon,

<sup>1)</sup> 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 석사과정, Graduate Student, Div. of Environmental and Geosystem Engineering. Univ. of Inha

<sup>2)</sup> 인하대학교 공과대학 지구환경공학부 교수, Professor, Div. of Environmental and Geosystem Engineering. Univ. of Inha

**SYNOPSIS** : In recent years, as lines are selected in disadvantageous region, unavoidable developments is increased. Owing to such developments, environmental problems have been occurred frequently. In excavation of tunnels especially located in close to slope, uneven stress take place to tunnel due to a topographical factor. it is used assistant methods of construction which are excavation of slope, retaining wall, ground anchor, etc for uneven stress. these assistant methods raise problems of environmental.

In this study, using slit, we could make better stress state by means of inducing stress concentration in boundary of tunnel. considering a variety of slit and rock mass condition, we use numerical analysis.

**Key word** : Uneven stress, Tunnel, Concentration stress, Numerical analysis

## 1. 서론

지하공간의 활용과 도로의 직선화로 인하여 터널의 시공이 증가되고 있으며 앞으로도 그 추세는 증가되리라 생각된다. 특히, 환경 보존 의식의 강화와 건설 공해의 규제 강화 등으로 인해 터널 시공 조건은 날로 열악해 지고 있다. 이러한 여건에서 제반 문제를 해결하기 위한 기술의 발전도 뒤따라야 한다고 하겠다.

지금까지, 경사면에 근접한 터널을 굴착할 경우에 터널 및 사면의 안정을 위하여 다양한 대책이 수립되고 시행되었다. 대표적으로 옹벽의 설치, 사면 절취, 그라운드 앵커등의 공법이 그것이다. 하지만 이러한 방법은 터널 및 사면의 안정을 우선 할뿐 사면의 환경적인 면에서는 바람직하지 않다. 따라서, 환경친화적인 보조공법이 필요하게 된다.

위와 같은 경우에 터널 및 사면이 불안정하게 되는 요인으로서는 많은 요인이 있지만, 편압에 대한 요인이 중요하게 생각된다. 이러한 편압은 터널의 시공중이나 시공 후에도 안정성에 영향을 주게된다. 따라서, 이러한 편압에 대한 대책으로서 슬릿을 설치하여 터널에 국부적으로 발생하는 편압을 이동시키는 방법에 대하여 검토하였다.

본 연구에서는 해석방법으로 다양한 슬릿의 조건을 모델화하고 해석하기 위한 방법으로 수치해석적 방법을 이용하였고, 그 결과로 슬릿을 이용하여 터널의 안정성을 확보할 수 있는 결론을 얻을 수 있었다.

## 2. 연구 배경

경사면에 근접한 터널을 굴착할 때 산사태, 사면붕괴, 지표침하, 막장붕괴, 편압, 지내력 부족, 용수 등의 많은 예상되는 문제점을 갖게된다. 이러한 문제점들 중에서 편압은 산사태와 사면붕괴에 의한 것도 있지만 지형상으로 사면과 터널의 위치관계에 의한 것도 문제로 된다.

한편으로 편압의 발생요인을 살펴보면 다음과 같이 분류할 수 있다. 터널의 갱구 부근이나 경사면에 근접한 지형에서는 지질이 불리하고 지형이 비대칭 구조를 갖게된다. 이러한 지형에서는 토피가 얇기 때문에 면압권이 비대칭이 되어 편압이 발생된다. 또한, 산사태, 애추, 급사면 상에서 표토층의 지반이동으로 인해 터널에 편압이 발생된다. 경사과쇄대나 경사층리면 등의 불연속면이 존재하는 경우 불연속면의 방향에 따라서 측벽에 편압이 발생하는 경우가 있다. 지반의 팽창압은 일반적으로 장소에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 원지반의 부분적 팽창으로 인해 편압이 발생된다. 그리고, 병설 터널, 절취, 발파진동, 지진 등에 의해서도 발생된다. 병설 터널에서는 응력상태의 교란으로 인해 각 터널에 재배분된 압력이 작용되어 변상이 된다.

기존에는 이러한 편압 발생을 개선시키기 위해서 보다 심부로 노선을 선정하여 토압의 균형을 맞추는 방법을 사용하였다. 그러나, 불가피하게 노선이 선정된 경우에는 옹벽, 압성토, 그라운드 앵커, 원지반 주입 등의 방법을 고려하게 된다. 하지만, 이러한 보조공법의 시공은 환경적인 문제를 야기시키게 된다.

터널을 굴착하면 그 전까지 지반내에 존재하던 응력이 교란되어 터널에 가까운 지반에는 새로운 응력상태가 발생된다. 이러한 응력상태를 설명하는 방법의 하나로서 주응력선을 이용하는 방법이 있다. 다양한 단면 형상의 터널 주변의 응력분포를 고찰하기 위해서는 응력장의 개념이 이해되어야 한다. 이러한 경우 응력장의 개념과 유사한 물의 흐름으로 유선을 표현하는 방법을 들 수 있다. 이러한 방법을 지류론이라고 한다. 지류론에서는 유선과 물의 관계로 주응력선과 응력의 관계를 대략적으로 유추할 수 있다. 그림 1은 터널 주변에 발생하는 최대 및 최소 주응력선과 원주형 장애물 주위에 발생하는 유선을 보인다.

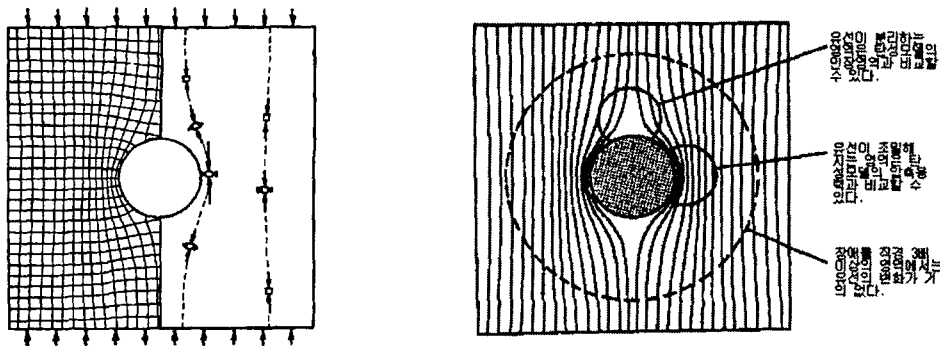


그림 1. 터널 주변에 발생하는 최대 및 최소주응력선과 원주형 장애물 주위에 발생하는 유선

지류론을 이용하여 경사면의 터널에 발생하는 응력 분포를 유추해 보면, 그림 1에서 보이는 유선의 모양이 경사면의 각도에 의한 영향으로 기울게 되고, 사면과 터널이 근거리에 놓여 있기 때문에 그 부근의 응력 분포는 대단히 조밀하게 된다. 따라서, 터널 주변에 큰 압축응력이 발생되리라고 생각할 수 있다. 이러한 압축응력이 작용되는 부분에 유선의 직각 방향으로 얇은 판을 놓는다고 가정한다면 유선의 분포는 얇은 판의 끝 부분을 지나게 되고 그 부근에 유속은 빠르게 됨을 유추할 수 있다. 그리고, 장애물 주변에는 유선의 분포가 느슨하게 된다. 따라서, 얇은 판의 영향으로 장애물의 안정성은 증가되게 된다.

얇은 판과 같은 슬릿을 터널에 설치하면 위의 지류론에 의한 것과 같이 응력의 집중 부분이 슬릿의 끝 부분으로 이동하게 되고 터널의 안정성이 증가됨을 생각할 수 있다. 따라서 이러한 슬릿의 모델을 수치해석적 방법을 통하여 고려하고 적절한 슬릿의 모델을 선정한다.

### 3. 해석 모델과 지반물성

경사면에 근접한 터널을 가상으로 설정하고 그로 인해 발생하는 문제점을 해결하기 위한 방법을 고려하고자 한다. 따라서, 아래와 같은 가상의 모델을 설정하였다. 이 모델은 45°의 경사를 갖고 사면에 1D 정도의 거리에 직경 10m의 터널을 굴착하는 경우에 대하여 모델화 하였다. 해석 프로그램으로는 연속체 해석이 가능한 FLAC을 사용하였다. 그림 2와 3은 선정된 해석 지반 모형과 사용된 요소망이다. 슬릿의 표현은 터널의 굴착 모델과 같은 모델을 사용하였다. 즉, 내부 경계 조건을 갖고 물성치가 없는 모델을 사용하였다. 지반은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 슬릿 폭을 작게 할수록 기하급수적으로 요소망의 수가 증가하게 되고 해석 시간이 증가되게 된다. 따라서, 적절하다고 판단되는 10cm 정도의 슬릿 폭을 묘사하기 위하여 아래의 요소망과 같이 구성하였다.

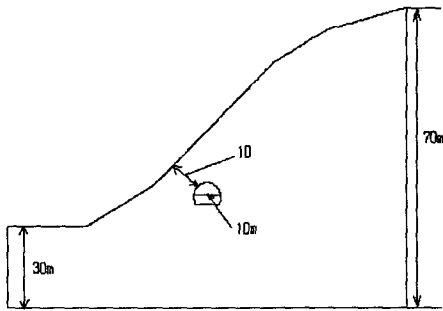


그림 2. 해석 지반 모형

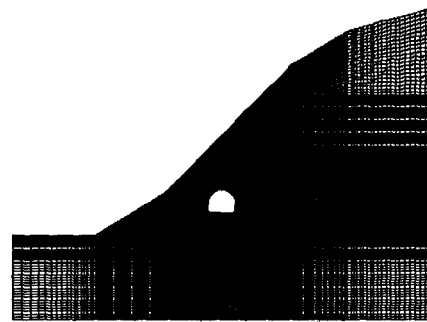


그림 3. 사용된 요소망

일반적인 사면은 다양한 지층과 암질조건을 갖지만 이 연구의 목적은 편압 대책을 위한 방법을 제시하고 검토하는 것에 중점을 두기 때문에 등방 등질로 가정하였다. 표 1에 보인 바와 같이 기존문헌에 의거한 대표적인 지반의 물성치를 바탕으로 하여 문제가 발생하는 모델의 물성치를 선정하였다. 경암, 보통암, 연암에서는 문제가 발생하지 않았으며, 풍화암, 풍화토의 물성치에서 소성영역이 발생되었다. 풍화토의 물성치에서는 전체 사면이 불안정화 되었다. 이는 등질의 낮은 물성치로 인해 사면전체의 파괴가 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서, 국부적으로 터널에 문제가 발생하는 풍화암의 물성치를 선정하였다. 그리고, 해석 결과에 큰 영향을 주는 축압계수는 0.5로 간주하였다.

표 1. 해석지반의 물성치

항 목	경 암	보 통 암	연 암	풍 화 암	풍 화 토
탄성계수 ( $\text{kg/cm}^2$ )	$1.80 \times 10^9$	$7.50 \times 10^4$	$3.00 \times 10^4$	$5.00 \times 10^3$	$2.00 \times 10^2$
단위중량 ( $\text{g/cm}^3$ )	2.65	2.60	2.50	2.25	1.90
점착력 ( $\text{kg/cm}^2$ )	$3.00 \times 10$	$1.50 \times 10$	7.00	2.50	0.30
포아슨비	0.20	0.22	0.26	0.30	0.35
내부마찰각 ( $^\circ$ )	50	45	40	35	30

2차원 해석시에는 3차원의 해석과의 고려를 위하여 하중 분담율을 제시한다. 본 연구에서는 시공 단계별 고려를 하는 것에 중점을 두는 것이 아니기 때문에 대부분의 기존 해석에서 사용되었던 하중분담율 50%를 사용하였다.

선정된 풍화암의 물성치를 갖는 모델의 해석 결과를 그림 4, 5에 도시하였다. 그림 4는 Mohr-Coulomb 강도와 응력 비를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 터널의 왼쪽 측벽과, 오른쪽 하부 측벽의 강도비가 낮게 됨을 알 수 있다. 그리고, 그림 5에서 보듯이 그 부근에 소성영역이 발달하고 있음을 알 수 있다.

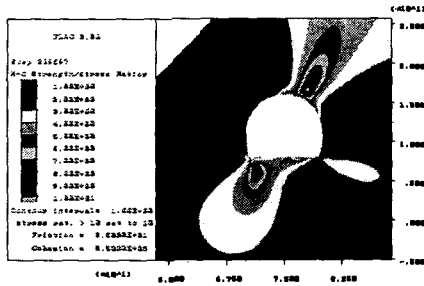


그림 4. M-C 강도와 응력 비

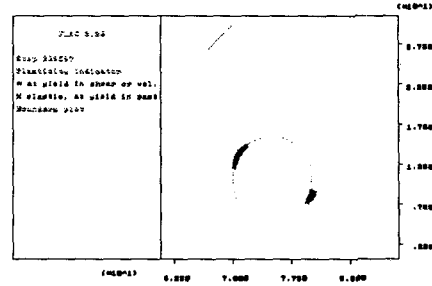


그림 5. 소성영역 분포

위의 해석결과는 하중분담율이 50%인 상태에서의 결과이다. 따라서 지보에 의한 효과를 고려한다고 하더라도 터널 시공 후에도 문제시 될 수 있다. 이 경우 응력집중이 발생하는 부분에 슬릿을 시공하여 응력 재배분을 통해 안정화 할 수 있다고 생각되어, 터널의 오른쪽 하부에 슬릿을 설치하여 해석을 하였다. 그림 6, 7의 결과를 보면 하부에 있던 소성영역과 응력 집중이 슬릿의 첨단 부분으로 이동되고, 터널의 오른쪽 부분에 강도비가 증가된 안정영역이 커지게 됨을 알 수 있다. 그러나, 응력의 전이로 인해 터널의 왼쪽 상부가 약화되는 것을 볼 수 있다. 하지만, 터널에 슬릿을 설치함에 따른 효과를 확인하기에는 충분하다고 생각된다. 따라서, 다양한 슬릿 조건을 변화시키면서 터널의 안정성을 고려한다.

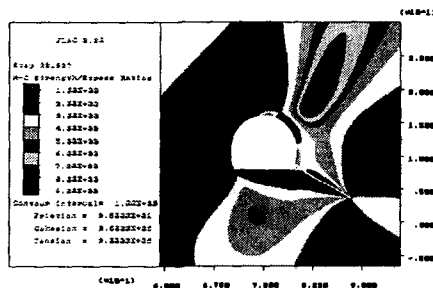


그림 6. M-C 강도와 응력 비

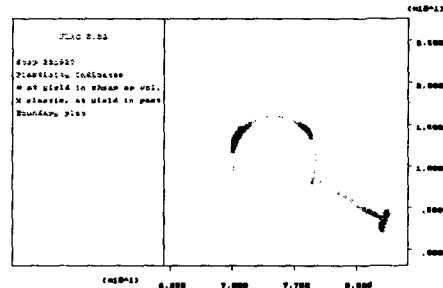


그림 7. 소성영역 분포

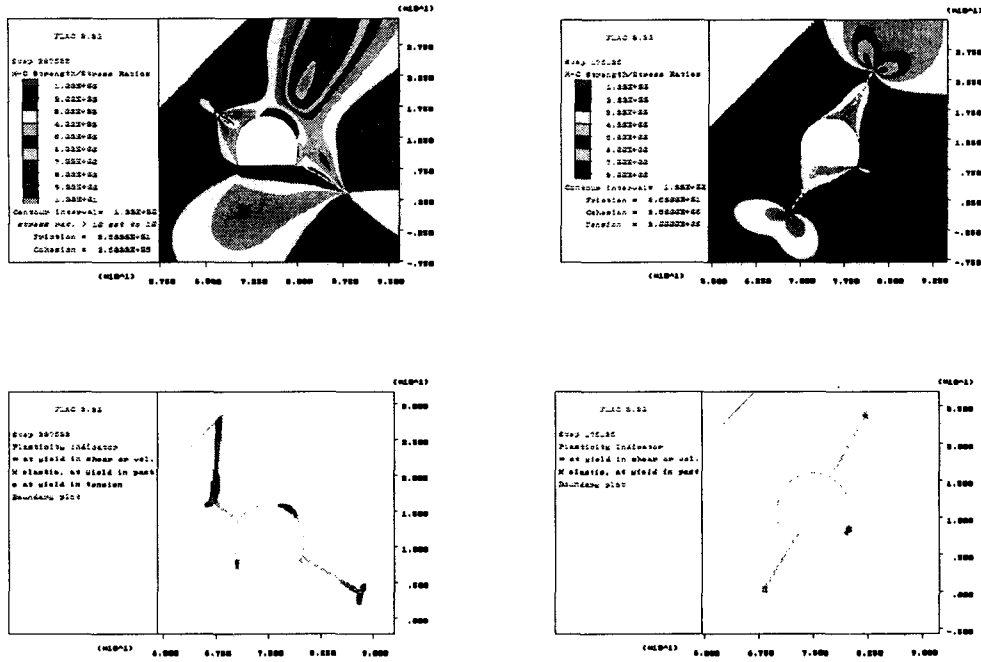
#### 4. 다양한 슬릿 조건을 고려한 수치해석 결과 및 분석

앞 절에서 보인 바와 같이 슬릿의 시공으로 인해 터널의 안정성에 영향이 있음을 보았다. 따라서 최적의 슬릿 조건을 구하기 위하여 슬릿의 방향, 폭, 길이, 개수 등의 조건을 변화 시켜 가면서 터널의 안정성의 영향을 비교 검토하였다.

##### 4.1 슬릿 방향에 의한 영향

슬릿의 시공 방향은 최대 주응력과 최소 주응력의 방향과 밀접한 관련이 있다. 터널의 굴착시 최대주응력 방향에는 인장영역이 발생되고, 최소주응력 방향에는 압축응력이 발생되어 전단영역이 발생된다. 따라서, 이 두 방향에 슬릿을 모델화 하였다. 최소 주응력 방향에는 폭 10cm와 길이 10m, 5m의 슬릿을 모델링 하였다. 여기에서 5m의 슬릿을 선택한 이유는 슬릿이 사면에 직접적인 영향을 주는 것을 줄이기

위해서이다. 그리고 최대 주응력 방향의 슬릿은 각각 폭 10cm와 길이 10m로 선정하였다.



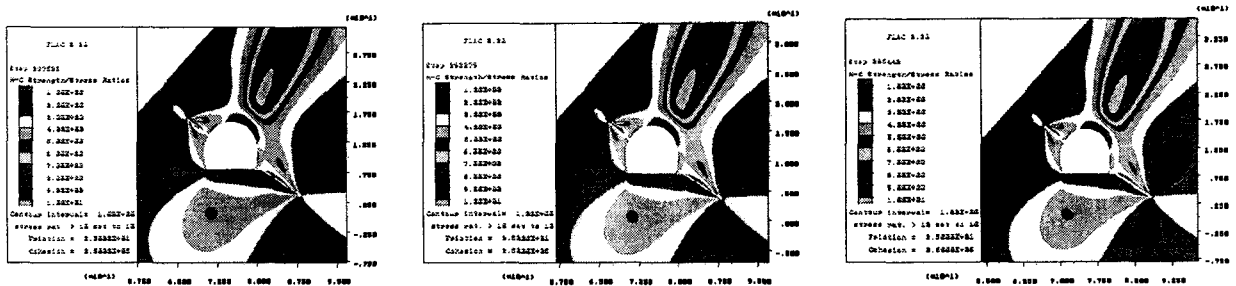
(a) 최소 주응력 방향의 슬릿 (b) 최대 주응력 방향의 슬릿

그림 8. M-C 강도와 응력 비, 소성영역분포

해석 결과에서 최대주응력 방향과 최소주응력 방향의 슬릿 모델간의 소성영역 분포만을 비교해 보면 최대 주응력방향의 슬릿이 효과가 크다고 생각될 수 있다. 그러나, 최소 주응력 방향의 슬릿의 안정영역이 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 최소 주응력 방향의 슬릿이 더 효과적이라고 할 수 있다.

#### 4.2 슬릿 폭에 의한 영향

최소 주응력 방향의 2개의 슬릿 모델의 경우에 슬릿의 폭과 그에 따른 안정성과의 관계를 고려한다. 슬릿의 폭은 10, 20, 30의 세 경우로 설정하여 해석하였다. 세 가지의 해석결과를 그림 9에 나타내었다. 세 가지 경우의 해석 결과에서 슬릿의 폭에 따른 응력 분포에 대한 변화 양상이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 따라서 폭에 의한 영향은 없다고 할 수 있다. 그러나, 슬릿의 폭이 증가할수록 슬릿과 터널의 인접부에 변형량이 커지게 되며, 터널 최대 변형량도 크게 된다.

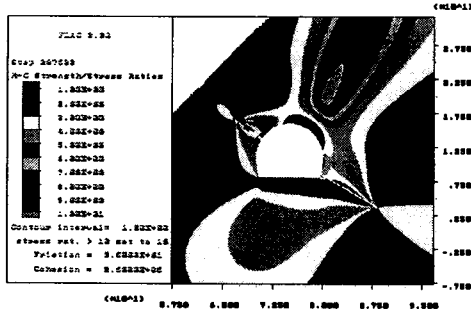


(a) 10cm 슬릿 폭 (b) 20cm 슬릿 폭 (c) 30cm 슬릿 폭

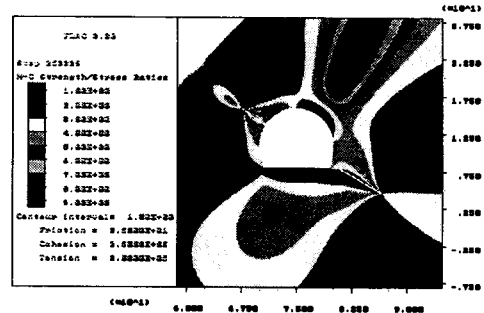
그림 9. 10, 20, 30cm 슬릿 폭의 M-C 강도와 응력 비

### 4.3 슬릿의 길이에 의한 영향

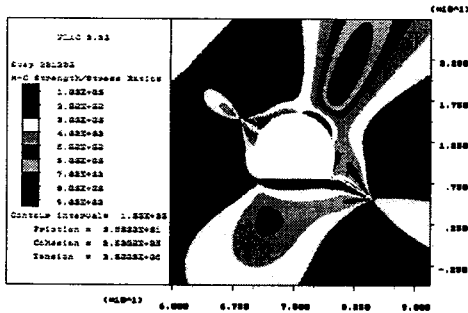
슬릿의 길이 변화에 따른 영향을 연구하기 위하여 슬릿의 길이를 (10m, 5m), (8m, 4m), (6m, 3m) (4m, 2m)의 경우에 대하여 해석하였다.



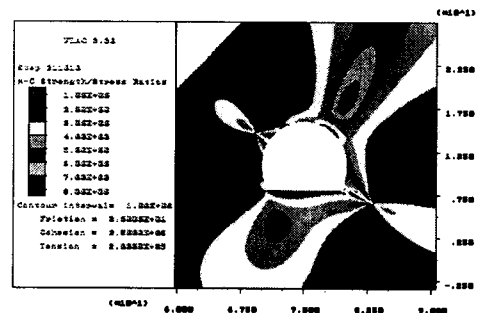
(a) 10m, 5m의 슬릿



(b) 8m, 4m의 슬릿



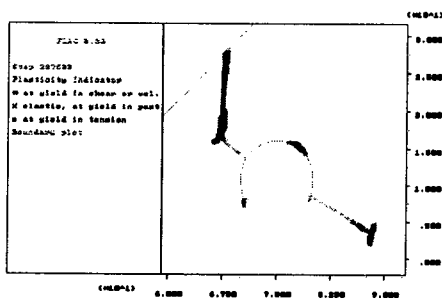
(c) 6m, 3m의 슬릿



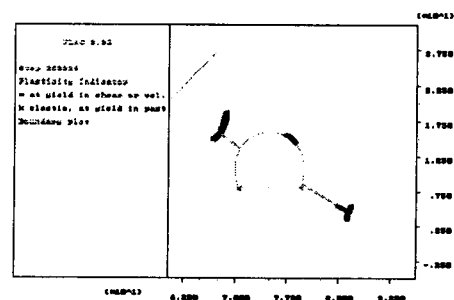
(d) 4m, 2m의 슬릿

그림 10. 각각의 길이에 따른 M-C 강도와 응력 비

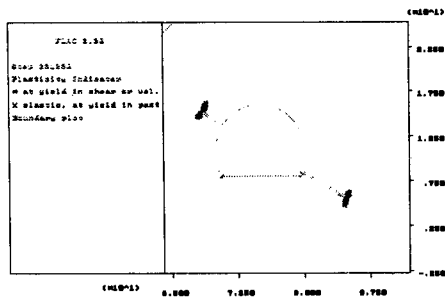
그림 10의 결과에서 보인 바와 같이 슬릿의 길이가 길어질수록 터널 주변 지반의 강도비는 증가하게 된다. 그러나, 터널의 상부와 인버터 부분에 국부적으로 낮은 강도비를 갖는 부분이 발생된다. 이는 슬릿의 영향으로 인해 응력의 전이가 발생된 것으로 생각된다. 그러나, 슬릿의 길이가 짧게 될수록 이러한 부분도 줄어들게 된다. 따라서, 터널 주변의 응력 상태가 최상일 조건은 4m, 2m의 슬릿을 설치할 경우이다.



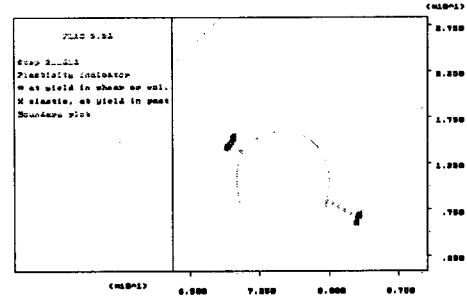
(a) 10m, 5m의 슬릿



(b) 8m, 4m의 슬릿



(c) 6m, 3m의 슬릿



(d) 4m, 2m의 슬릿

그림 11. 소성영역 분포

그림 11의 소성영역의 분포를 보면 슬릿의 길이가 감소함에 따라서 소성영역의 분포도 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 따라서 4m, 2m의 슬릿을 설치하는 것이 적절하다고 판단된다.

#### 4.4 슬릿의 개수에 의한 영향

최대 주응력 방향의 슬릿과 최소 주응력 방향의 슬릿을 병용하였을 경우에 터널의 안정성에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 슬릿을 최소 주응력 방향에 2개, 최대 주응력 방향의 1개와 최대, 최소 주응력 방향에 각 2개씩을 설치할 경우로 해석하였다. 첫 번째의 경우 그림 12에서 보면 터널 상부의 강도비가 증가 된 것을 볼 수 있으며, 소성영역의 분포도 슬릿의 첨단부에 집중됨을 알 수 있다. 두 번째의 경우 그림 13에서 보면 터널의 근접 영역 대부분의 강도비가 증가되었다. 따라서 가장 효과가 크다고 하겠다. 그러나, 슬릿을 네 방향에 설치하는 것은 어려움이 따른다고 생각된다.

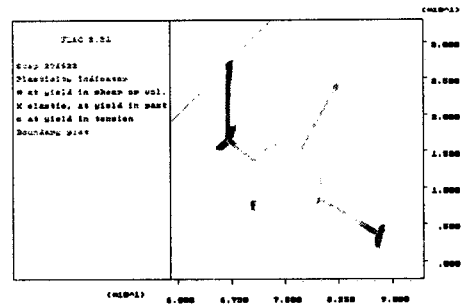
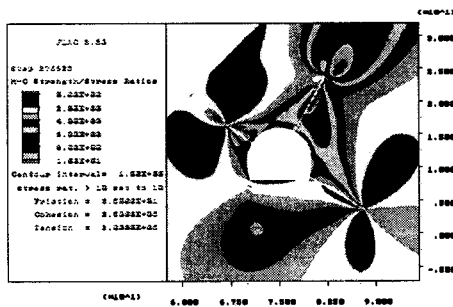


그림 12. 슬릿을 3개 설치한 경우의 M-C 강도와 응력비, 소성영역의 분포

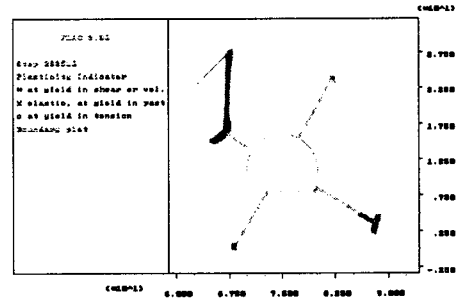
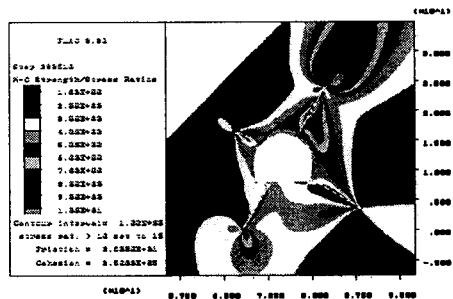


그림 13. 슬릿을 4개 설치한 경우의 M-C 강도와 응력비, 소성영역의 분포

#### 4.5 최적의 슬릿 조건에 따른 해석결과

이상으로 다양한 슬릿의 조건에 따른 영향을 알아보았다. 얻어진 결과를 통해 슬릿의 폭이 10cm, 길이는 4m(사면 방향은 2m), 개수는 4개인 모델이 이론적으로 최적의 슬릿 모델로서 선정되었다. 이 모델의 해석 결과를 그림 14에 나타내었다. 슬릿이 없는 모델(그림 4,5)과 선정된 최적의 슬릿 모델(그림 14)을 비교해 보면 확연히 효과가 있음을 확인할 수 있다. 터널 주변 암반의 강도비 증가와 그에 따라서 터널 벽면에 발생되었던 소성영역의 분포가 슬릿의 침단부로 이동되었음을 확인할 수 있다.

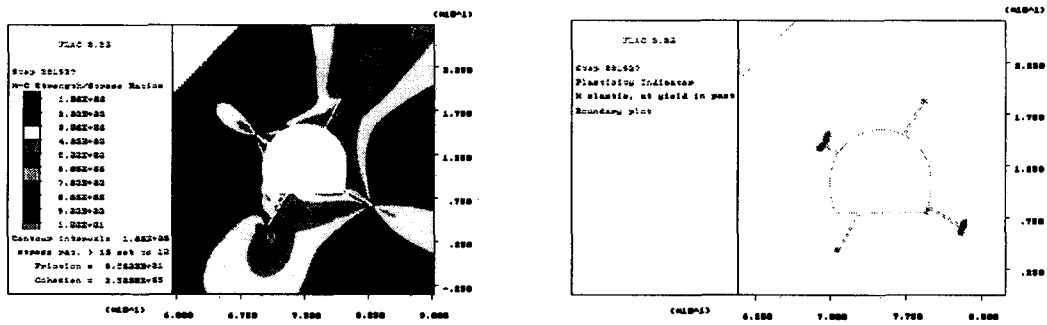


그림 14. 슬릿 설치 모델의 M-C 강도 응력 비(좌)와 소성영역 분포(우)

#### 5. 결 론

경사면에 근접한 터널에 발생하는 편압에 대한 대책으로서 슬릿의 설치가 효과적인 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

슬릿의 설치시에 고려해야 할 요인으로서 슬릿의 방향, 폭, 길이, 개수에 관하여 비교 검토하였다. 그 결과로 선정된 모델의 경우에 4개와 4m, 2m의 길이를 갖는 슬릿 모델이 이론적으로 가장 합리적인 모델로서 선정되었다. 그러나, 시공 상황을 고려할 경우에 최대 및 최소 주응력 방향에 2개의 슬릿을 사용하는 것이 가장 적합하리라고 생각된다. 최소 주응력 방향에 슬릿을 시공할 경우에는 사면과의 안정성 영향이 문제가 되므로 슬릿의 길이에 관하여 고려하여야 한다.

앞으로의 연구에는 다양한 지반에서 슬릿의 적용성과 시공상의 문제에 대해서 더 많은 연구가 필요하리라 생각된다.

#### 참고문헌

1. 윤지선, 1990, 암반역학, 구미서관, 서울, pp 176~318.
2. 윤지선, 1994, 터널공학, 구미서관, 서울, pp 196~231.
3. E. Hoek and E.T. Brown, 1980, Underground Excavation in Rock : Institution of Mining and Metallurgy, London, pp 183~243.
4. B.H.G. Brady and E.T. Brown, 1985, Rock Mechanics For Underground Mining, George Allert & Unwin, London, pp 153~208.
5. 日本道路協會, 1992, 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, 小葉印刷所, pp 127~135.
6. 日本土木学会, 1994, 山岳トンネル補助工法, 日本土木学会, pp 173~180.
7. 山本 尚志, 1978, 山岳トンネル工事実例集 変形編, 土木工学社, pp 107~114.