

# 3차원 절대내공변위를 이용한 터널 막장전방의 지반변화 예측기법

Prediction of Ground-Condition Ahead of the Tunnel Face by Using  
3-Dimensional Absolute Displacements

이 인 모\*<sup>1</sup>

Lee, In - Mo

강 기 돈\*<sup>2</sup>

Kang, Gi - Don

박 광 준\*<sup>3</sup>

Park, Kwang - Joon

---

## Abstract

The increasing population, its high density in the metropolitan area and the accelerated economic development have caused the lack of available surface grounds, and thus design and construction of underground structures have been actively carried out. Owing to this need, there has been much progress in theories and construction techniques to secure the stability of the underground structures. Recently, several studies have shown that it is possible to predict the existence of discontinuities ahead of a tunnel face by analyzing 3-dimensional absolute displacements measured during tunnel excavation. This paper concentrated on the development of a methodology to predict the existence and location of the discontinuities, or the void space(abandoned mine), by performing 3-dimensional FEM analysis and considering the stress relocation caused by arching effect during excavation. Also, this study tried to verify deformation tendencies of the fracture zone, the weak zone, and the void space and thus to build up a basis for choosing the most suitable support system. The results of this study might provide a way of safer and economical tunnel construction by utilizing the in-situ monitoring data.

## 요 지

최근 수도권의 인구집중 및 경제발전의 가속화에 따른 지상공간의 부족으로 인해 지하공간에 대한 설계와 시공이 활발히 진행되고 있으며 그에 따라 지하공동 형성시 안정성을 확보하기 위한 시

---

\*1 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

\*2 정희원, 다산 컨설턴트 (주)

\*3 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 수료

공기술 및 연구가 많은 발전을 이루어 왔다. 최근의 연구결과에 의하면 터널의 시공시 굴진에 따라 지반의 강도차이로 인해 발생된 3차원 절대내공변위의 변화양상을 파악하여 막장 전방의 불연속면을 미리 예측할 수 있다고 연구되었다. 따라서 3차원 계측으로 얻어진 절대내공변위의 분석을 통해 지반변화를 예측, 설계수정 및 변경을 함으로써 보다 안전하고 경제적인 터널시공이 가능하게 되었다. 본 연구는 지하공간 시공시 하중전이 효과(Archiving effect)로 인한 응력의 재배치를 고려하여, 3차원 연속체에 대한 유한요소해석을 수행함으로써 지하 공동이 존재할 경우에 대한 3차원 절대내공 변위의 양상을 파악하여 그 존재 및 위치를 예측하는 데 중점을 두었다. 또한 파쇄대 및 연약대가 존재하는 경우의 해석을 통하여 공동으로 인한 3차원 절대내공 변위 경향과의 차이를 규명하여 공동 및 파쇄대, 연약대를 가려냄으로써 각 경우의 적절한 지보선정에 도움이 되도록 하여 지하공간 개발시 보다 진보적인 정보화 시공을 위한 시스템을 구축하는데 있어 근간을 마련하고자 한다.

Keywords : Prediction, 3-Dimensional absolute displacement, 3-Dimensional FEM analysis, Archiving effect, Ground-condition, Tunnel

## 1. 서 론

지하의 암반은 지진이나 발파등의 외부의 큰 충격하중을 받지 않는 한 대부분 역학적 안정성을 이루고 있다. 그러나 과거의 석탄채굴로 인해 광산터널이 널리 분포하는 폐광지역의 경우, 터널 시공시, 채굴시에 발생한 응력상태의 변화 및 기존폐광과 신설터널과의 상호간섭 효과에 의해 매우 불안정한 상태에 놓일 수 있다. 따라서 이러한 지하공동을 미리 예측하지 못하고 굴진을 하게 되면 적절한 지보선정이 어렵고 암반의 과도한 변형을 방지하기 위해 많은 비용과 시간을 투자하게 될 뿐만 아니라 터널의 붕괴 및 붕락과 같은 큰 사고에 까지 이룰 수 있다. 또한 막장전방에 파쇄대등의 불연속면이 존재할 경우, 이를 미리 예측하지 못하고 굴진을 하게 되면 파쇄대로 인해 터널 굴진에 따라 발생된 종방향 아칭이 영향을 받아 막장면에 응력이 집중하게 된다. 결국, 막장면의 과도한 변위를 유발해 막장이 붕괴되는 상황에 이르게 된다. 따라서 NATM의 핵심요소라고 할 수 있는 계측을 통한 설계수정 및 보완이 필수적이며 본 연구에서 수행하는 3차원 수치해석을 통해 지반변화에 따른 3차원 절대내공변위의 경향을 파악함으로써 현장에서 산

출되는 3차원 계측결과를 분석하여 막장 전방을 예측하는 기술이 시급히 요망된다. 본 연구는 L/C (천단부의 종방향 변위, L과 천단부의 침하량, C의 비)와 S/C (측벽의 수평방향 변위, S와 천단부의 침하량, C의 비), 평사투영법을 중심으로 공동의 존재여부 및 그 위치를 예측할 수 있는 기법을 제시하며, 파쇄대 및 연약대와 지하공동 존재시의 각각의 지반거동의 차이를 정량적, 정성적으로 파악하는 데 초점을 두었다. 본 연구는 막장 전방에 지하공동 및 파쇄대, 연약대 존재시 3차원 절대변위의 경향을 찾아냄으로써 실제 터널 시공시 계측되는 자료의 해석근거를 마련해주며, 나아가 현장계측결과와 수치해석을 통한 역해석 방법을 제공하는 역할을 하여 NATM에 의한 터널시공을 더욱 안전하고 경제적으로 수행되는데 도움을 주고자 하였다.

## 2. 이론적 배경 및 변위해석방법

### 2.1 이론적 배경

#### 2.1.1 아칭효과

지반은 초기에 깊이에 따라 균등하게 증가하는 응력을 내재하고 있다. 이러한 초기 지중

응력을 갖는 지반에 공동등을 시공하여 교란시키게 되면 공동주위의 응력이 매우 증가하게 되며 공동주위로의 응력의 협재(channeling)가 발생하게 된다. 이러한 현상을 아칭(하중전이 효과, 응력재분배)이라 한다. 이러한 현상은 굴착으로 인한 응력의 불균형을 재배치를 통해 평형상태를 찾으려는 '자연'의 노력이라 할 수 있으며 아칭현상 없이는 지하구조물 형성시 지반보강 및 굴착·지보공법 선정에 있어서 기술적·경제적 어려움을 감수해야 하는 어려움이 따르게 된다. 아칭현상은 지반의 강도 및 변형거동의 특성에 따라 발생유무가 결정되며 그림 1과 같은 형태로 발생된다 (Lunardi, 1995).

### 2.1.2 쌍굴의 상호간섭효과

도심지에서는 지하공간을 경제적으로 이용하기 위해 주로 쌍굴 터널을 굴진하게 된다. 이때 두 터널 사이에 발생하는 상호간섭 효과는 응력 및 변위의 관점에서 고찰해 보면, 전

자의 경우 지반에 터널을 시공함에 따라 굴착면의 접선응력( $\sigma_b$ )은 서로 중첩이 되어 그림 2와 같이 이격거리가 감소할수록 그 크기가 증가하는 분포를 보인다. 따라서 선시공터널 완료후 후속시공터널이 굴진해 감에 따라 두 터널사이의 응력이 증가하게 되며 (Obert 등,1993), 이는 지보재(Shotcrete)의 파괴를 유발하게 되는 등 터널 시공에 불안정한 요소로 작용하게 된다. 후자의 경우, Soliman 등 (1993)의 3차원 유한요소해석 결과에 의하면 그림 3과 같이 선시공터널로 인한 지반의 주응력상태의 변화 및 양 터널사이 지반의 이완영역 확대로 인해 후속시공터널이 선시공터널에 가까이 감에 따라 선시공터널의 좌측측벽부의 경우 차츰 터널내로의 변위가 발생하게 되며, 우측 측벽부의 경우 터널 밖으로의 변위경향이 커지는 것으로 나타났다. 막장전방에 지하공동이 존재하는 경우의 신설터널의 거동은 위에서 서술한 아칭효과와 쌍굴터널과 같은 두 지하구조의 간섭효과와의 조합으로 볼 수 있다. 이는

Mainfestations of instability

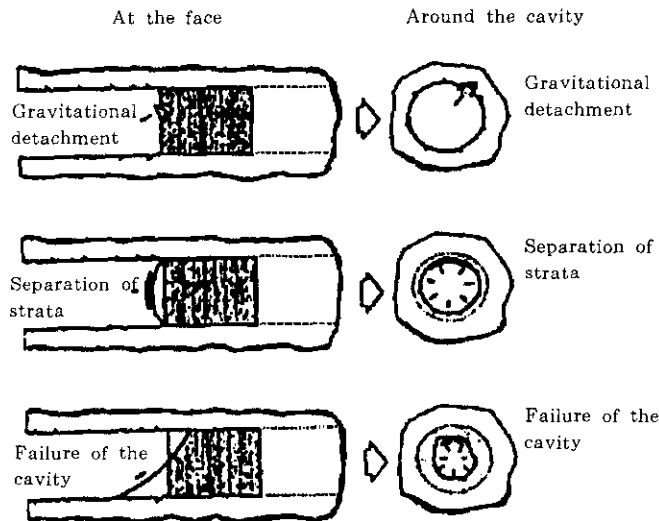


그림 1. 아칭의 분포에 따른 막장의 안정성(Lunardi, 1995)

막장전방의 지반변화에 따라 아칭현상이 달라질 뿐 아니라, 또한 기존의 지하공동과 신설터널 사이에 필연적으로 존재하는 상호간섭 효과가 어우러져 터널거동이 달라지게 되기 때문이다.

## 2.2 3차원 계측을 고려한 수치해석 모델링

신설터널과 기존폐광과의 상대위치를 고려하여 그림 4와 같이 3차원 계측과정을 설정하였다. 또한 그림 5에 나타낸 3차원 절대내공변

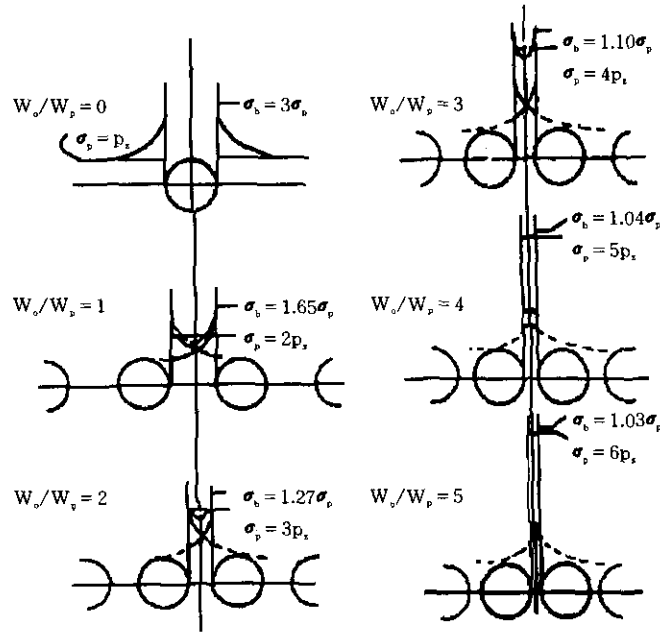


그림 2. 두 원형공동 사이의 접선응력( $\sigma_b$ ) 분포(Obert 등, 1967)

Unit : mm

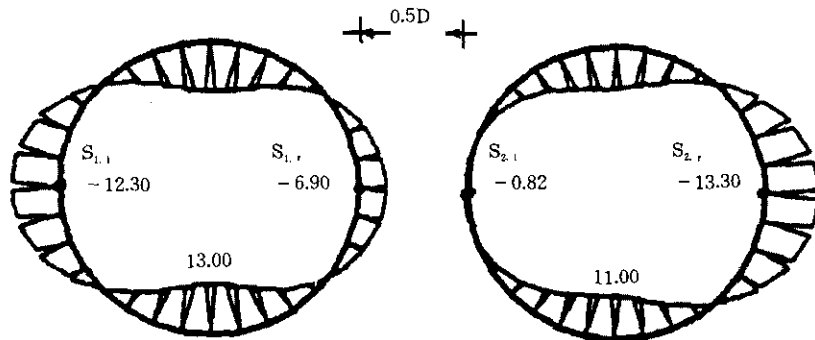


그림 3. 터널간 이격거리가 0.5D인 경우 변위의 양상(Sollman 등, 1993)

위의 각 성분 및 내공경사각을 이용하여 수치 해석결과를 분석하였다. L은 천단부에서의 종방향변위이며 반굴진방향을 양(+)으로 하였고, C는 천단부의 침하량이며 하방향을 양(+)으로 하였다. S는 양측벽에서의 수평방향 내공 변위이며 터널내측으로의 변위를 양(+)으로 하였다. 또한 L과 C의 비를 이용하여 천단부의 종방향 변위가 막장면과 이루는 각도를 내

공경사각( $\alpha$ )이라 정의하였으며 강도가 변하지 않는 균질한 지반에서는  $7^\circ \sim 12^\circ$  정도를 갖는 것으로 알려져 있다(Schubert 등, 1996). 본 연구에서는 현장에서의 실질적인 계측기 설치 및 초기치 측정시기를 수치해석에 반영하기 위해 원지반에 슛크리트가 타설된 후의 결과를 분석하였다.

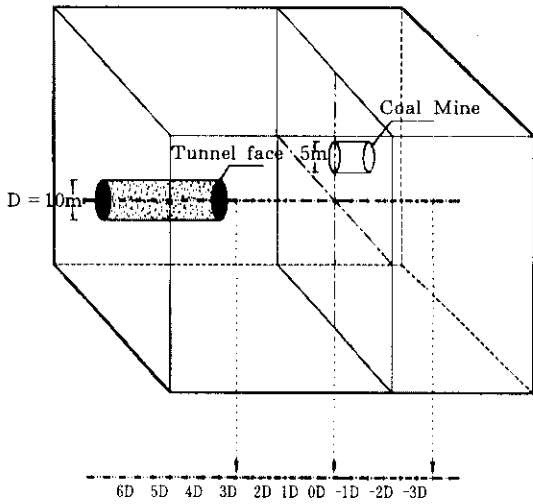


그림 4. 공동과의 상대적 위치를 고려한 계측 진행도

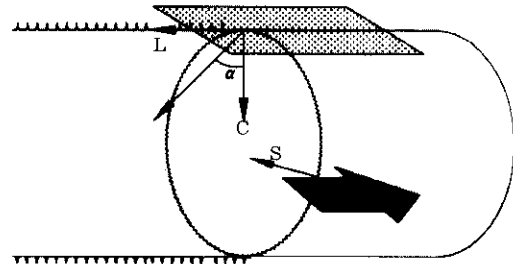


그림 5. 3차원 절대내공변위의 각 성분 및 내공 경사각

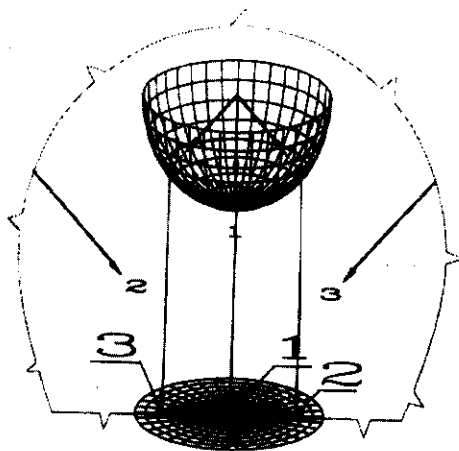


그림 6. 3차원 내공변위의 평사투영 과정

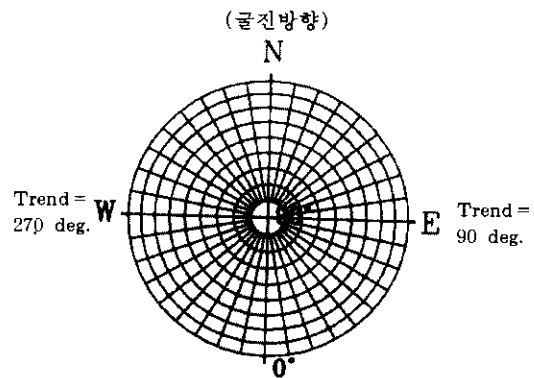


그림 6은 천단부와 양측벽부의 변위벡터를 평사투영법을 이용하여 평면상의 점으로 나타낸 것으로 그림에서 1은 천단부의 변위벡터를 2는 좌측 측벽부의 변위벡터를 그리고 3은 우측측벽부의 변위벡터를 표시하며 이 변위벡터들을 반구의 중심으로 이동후 아래방향으로 투영하여 평사투영도를 작성하게 된다. 본 연구에서는 굴진방향을 북쪽(N)으로 가정하여 3차원 절대변위의 방향과 경사를 산출하였다. 물론 현장에서의 터널시공은 반드시 북쪽으로 굴진하지는 않으며 굴진방향에 따른 고유의 주향이 존재하나, 그 주향을 축으로한 세 축점의 변위벡터 경향은 본 논문에서 가정된 북쪽(N)을 축으로한 결과와 동일하게 나타난다.

### 3. 막장전방의 지하공동(폐광) 및 파쇄대, 연약대 예측을 위한 3차원 수치해석

#### 3.1 해석 프로그램 및 경계조건

본 연구에서는 막장전방에 존재하는 지하공동 및 파쇄대, 연약대로 인한 신설터널의 굴진에 따른 변위양상을 고려하기 위해 유한요소법을 이용한 수치해석 프로그램인 3D- $\sigma$ (Soft Brain Co., Ltd.)를 이용하였다. 지반은 15,000여개의 절점과 2,300개의 요소로 이루어진 3차원 연속체로 모델링하였으며 응력-변위 특성은 탄소성(Mohr-Coulomb)모델을 사용하여 실제 지반에서 발생하는 3차원 아칭효과 및 쌍굴의 상호간섭효과를 고려하였다. 본 연구에서 적용된 터널 심도는 40m이며 형상은 일반적인 변위의 경향을 파악하기 위해 원형단면을 채택하였고 직경(D)은 10m로 하였다. 또한 현장의 시공과정을 반영하기 위해 슛크리트를 셀요소로써 모델링하였으며 이로써 지보로 인한 강성이 큰 곳으로의 하중전이효과를 고려하였다. 또한 지하공동등의 효과를 파악하기 위해 연암 정도의 균질한 지반에서 해석을 수행하였다. 해석 경계면에서 발생하는 구속효과를 최대한 배제하기 위하여 터널의 천단 및 하반에서 상하 4D, 좌우 측벽부에서 3D 떨어진 곳에 경계

를 두었으며, 막장전방에 변화가 생기는 곳을 기점으로 그 전은 5D, 후로 2D의 종방향 경계를 정하였다. 1회 굴진장은 2.5m (0.25D)로써 전단면 굴착을 수행하였으며 공동의 경우 크기는 직경 5m, 길이 10m로 가정하였다. 해석에 사용된 3차원 유한 요소망은 그림 7과 같다.

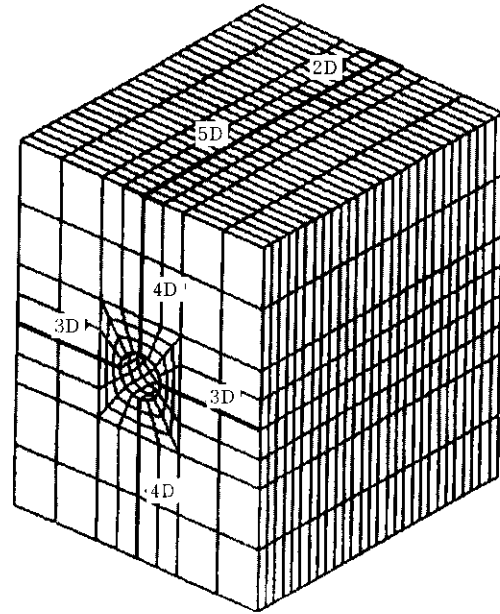


그림 7. 해석에 사용된 3차원 유한요소망

### 3.2 지하공동 및 파쇄대 예측을 위한 지반 모델링

#### 3.2.1 대조군의 설정 및 지반특성치

기존의 지하공동과 신설터널과의 상호 간섭효과를 파악하기 위해 지반은 굴진에 따라 강도가 변하지 않도록 하였으며, 공동의 영향을 고려하기 위하여 지하공동이 없는 지반을 대조군으로 설정하였다. 수치해석에 사용된 지반 및 지보재의 특성치는 아래의 표 1과 같다.

표 1. 수치해석에 사용된 지반특성치

	연암	Shotcrete
탄성계수, $E(t/m^2)$	100,000	1,000,000
포아송비, $\nu$	0.2	0.35
단위중량, $\gamma(t/m^3)$	2.4	2.3
접착력, $C(t/m^2)$	10	-
내부마찰각, $\phi(^{\circ})$	40	-
초기지지중용력비, $K_0$	1.0	-

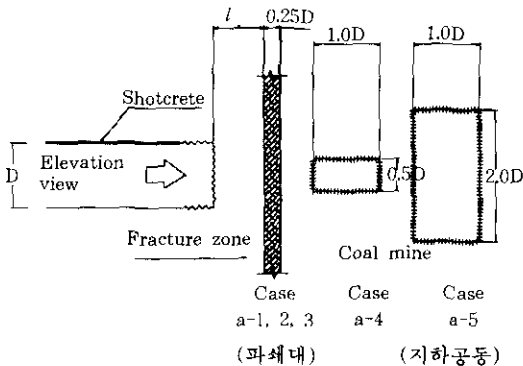
\* Shotcrete 두께 = 0.4m

### 3.2.2 지하공동의 위치 및 파쇄대에 대한 검토

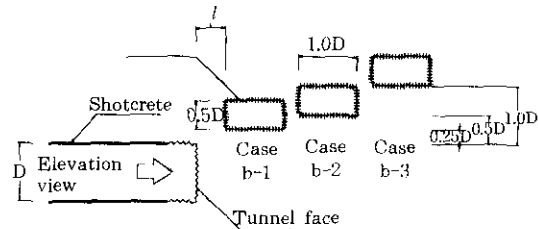
지하공동의 위치에 따라 신설터널의 변위에

미치는 영향을 파악하기 위해 다음 그림 8의 세 경우를 제안하였다. 공동의 모양은 폐광뿐 아니라 다양한 형태로 존재하는 공동의 영향도 고려하기 위해 일반적인 원형단면으로 가정하였으며 그 직경은 0.5D (5m)로 하였다.(Case a-5의 경우는 2.0D로서 공동의 크기가 갖는 효과를 고려하였다.) 또한 공동과 파쇄대의 차이를 규명하기 위해 그림 8의 Case a, 즉 막장면 전방에 지반변화가 존재할 경우에 대해 파쇄대의 해석을 포함시켰으며, 탄성계수를 각각 원지반의 1/2 (Case a-1), 1/5 (Case a-2), 1/10 (Case a-3)로 줄여 파쇄대를 모델링하였다.

Case a. 공동 및 파쇄대가 터널의 막장 전방에 존재할 경우



Case b. 공동이 터널의 천단 상부에 존재할 경우



Case c. 공동이 터널의 좌(우)측에 존재할 경우

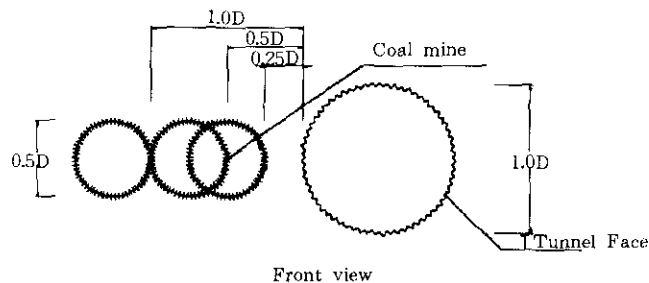


그림 8. 해석조건

#### 4. 3차원 수치해석결과와 고찰

##### 4.1 대조군의 수치해석결과

그림 4의 계측과정에 따라 굴착후 바로 전 막장에 설치한 계측점의 결과를 시공진행에 따라 정리하여 그림 9, 그림 10에서와 같이 L/C 및 S/C의 값을 산출하였으며 균질한 지반에 터널을 시공시 이론적으로 각 막장마다 동일한 변위가 발생하므로 L/C 및 S/C의 경향이 일정하게 발생함을 알 수 있다. 종방향 변위를 나타내는 L의 값은 막장면에서 반굴진방향으로 약 $11^\circ$ 를 유지하며 천단부 침하량의 1/5 정도의 변위를 갖는 것으로 나타났다. 이는 균질

한 지반에서  $7^\circ \sim 12^\circ$  정도로 실측된 내공경사각과 유사함을 알 수 있다. 그림 9 및 10에서  $l/D < 4.0$  구간의 경향이 다소 일정치 않으나 이는 수치해석시 종방향 해석경계에서의 변위 구속효과에 기인한 것으로 판단된다. 3차원 절대변위를 평사투영하면 그림 11과 같이 일정한 범위안에 각각의 점들이 모여서 각각의 점들을 상하로 연결한 선(이하 V-line으로 명명)은 Trend가  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 를 연결한 선(이하 EW-line으로 명명)에 평행하며 직선을 유지함을 알 수 있다. 이는 곧 막장 전방에 아무런 변화가 없을 경우에 대한 지표(Normal state)가 된다.

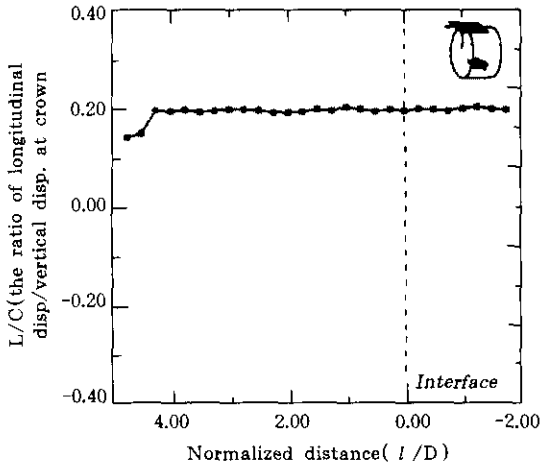


그림 9. 균질한 지반에서의 L/C의 경향선

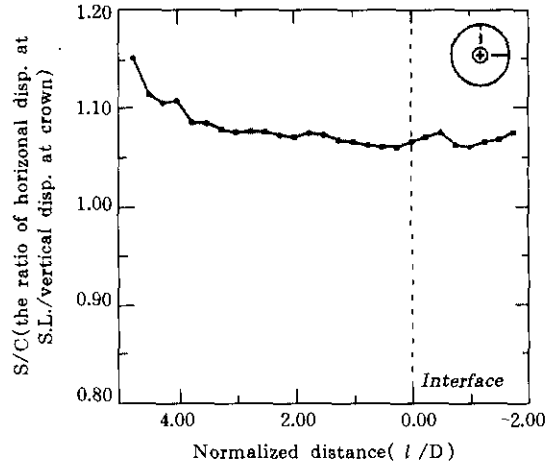


그림 10. 균질한 지반에서의 S/C의 경향선

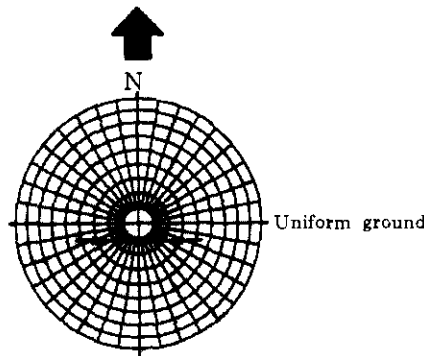


그림 11. 균질한 지반에서의 평사투영도



## 4.2 파쇄대의 존재 및 지하공동의 위치에 따른 영향

채탄지역에서의 폐광 및 그의 석회암지역 등 지반의 특성상 발생하는 지하공동의 존재여부와 그 위치의 막장전방 예측 및 파쇄대와의 차이점 규명을 위해 다음의 해석을 수행하였다.

### 4.2.1 공동 및 파쇄대가 막장면 전방에 존재하는 경우

그림 12는 L/C의 경향선을 작성한 것으로 막장전방에 파쇄대나 공동이 존재할 경우 일정 거리 전부터 뚜렷한 증가추세를 나타내 그들의 존재를 예측하는 것으로 나타났다. 이는 터널 굴착으로 발생한 종방향 아칭이 공동 및 파쇄대로 인해 영향을 받아 굴착면에 응력이 남게 되어 천단부에서 반굴진방향으로의 종방향변위가 증가했기 때문이다. 공동의 경우 약 3.5D 정도에서, 파쇄대의 경우 약 2.0D 정도 전방에서부터 종방향변위가 영향을 받기 시작하는 것을 알 수 있다. 또한 파쇄대는 그 강도가 원지반 강도보다 작을수록, 그리고 지하공동의 경우에는 직경이 클수록 뚜렷한 증가추세를 나타내었다. 반면에 측벽부에서의 내공변위와 천단부 침하량의 비인 S/C의 경우는 그림 13과 같

이 공동에 가까이 감에 따라 천단부의 응력집중으로 S/C의 값이 다소 감소하게 되나 큰 영향없이 균질한 지반의 경우와 같이 유사하게 나타나 전방에 존재하는 공동이나 파쇄대에 의해서는 터널 굴진에 따른 횡방향 아칭에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 반면 1/D가 -2.0에 근접함에 따라 S/C의 값이 감소하는 경향을 보이는 데, 이는 파쇄대 및 공동의 존재로 인해 균질한 지반에서와는 다른 경향을 보이는 것으로 판단되며 1/D=0(interface) 이후의 구간으로 막장 전방의 지반변화 예측수행시 큰 의미가 없다고 할 수 있다. 그림 14, 그림 15는 평사투영법을 이용하여 나타낸 것으로, 먼저 Case a-1~a-3을 보면 그림 14에서와 같이 파쇄대의 존재로 인해 전반적인 영향을 받아 천단 및 양측벽 모두 반굴진방향으로 밀려 V-line은 EW-line과 평행한 직선을 나타내며, Case a-4~a-5의 경우 그림 15에서와 같이 막장면 전방에 존재하는 공동으로 인해 천단부 변위벡터의 방향이 가장 큰 영향을 받아 밀변의 폭이 큰 삼각형의 V-line이 형성되며 양측벽의 변위가 파쇄대가 존재할 경우와는 달리 다소 안쪽으로 모여 있음을 알 수 있다.

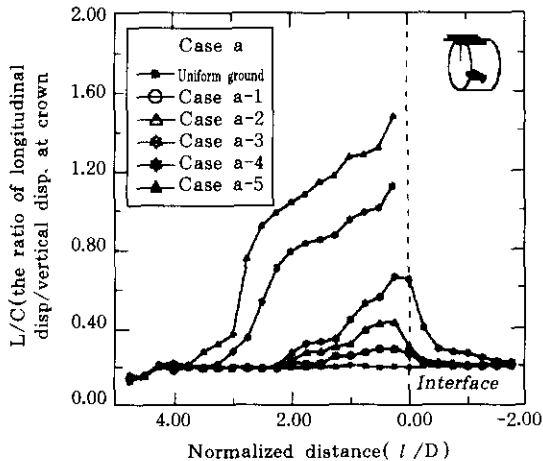


그림 12. 해석 Case a-1~3의 L/C 경향선

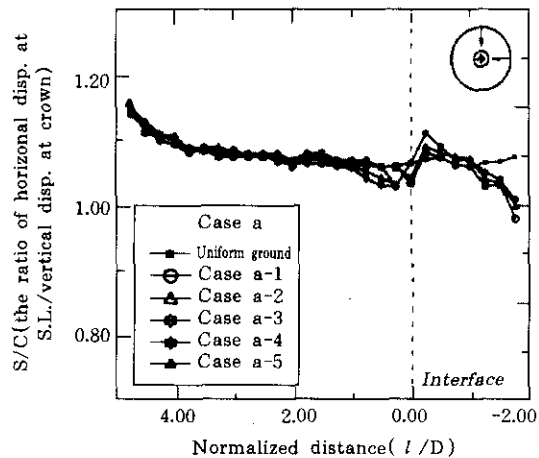


그림 13. 해석 Case a-1~3의 S/C 경향선

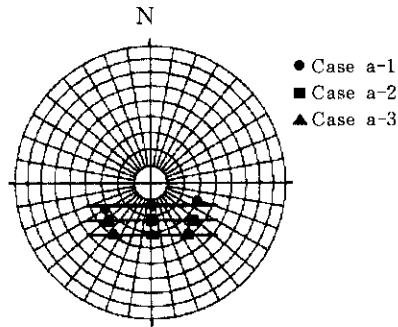


그림 14. 파쇄대 전방 0.25D에서의 평사투영도

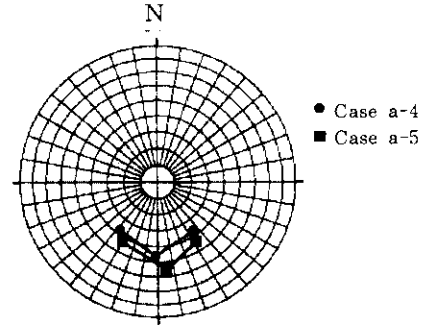


그림 15. 공동 전방 0.25D에서의 평사투영도

#### 4.2.2 공동이 터널의 천단 상부에 존재하는 경우

본 경우에서도 L/C의 경향이 터널막장면의 전방예측에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 먼저 그림 16의 b-1과 b-1\*의 경우를 보면 L/C 값의 크기는 유사하게 나타났으나 공동이 길이의 제한없이 해석영역 끝까지 기존터널과 평행하게 존재할 경우(Case b-1\*) 굴진중 공동으로 인한 영향을 계속받아 다른 경우와 달리 공동이 존재하는 영역에서는 L/C의 값이

급격히 감소하지 않고 일정상태를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 터널 상부에 존재하는 공동이 갖고 있는 종방향 아칭과 터널 굴진에 따른 종방향 아칭이 서로 간섭을 주어 상부에 공동이 제한된 길이로 존재할 경우 그 길이가 갖는 영향으로 인해 침투값을 갖는 경향을 띠게 된 것으로 나타났다. 이는 공동이 해석영역 끝까지 존재하는 b-1\*의 경우와 비교되어 이해될 수 있다. S/C의 경우는 그림 17에서처럼 Case a의 경우와 같이 거의 변화가 없고 공동

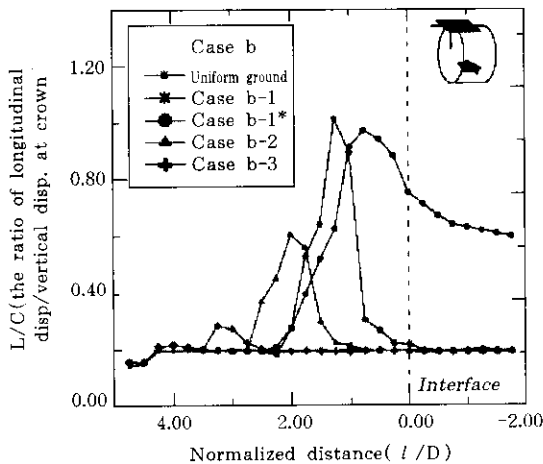


그림 16. Case b-1~3의 L/C 경향선

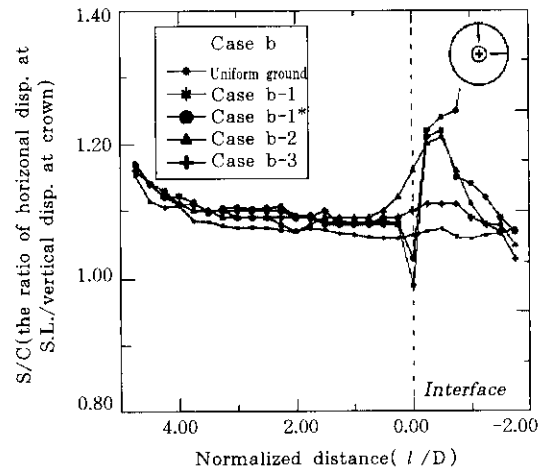


그림 17. Case b-1~3의 S/C 경향선

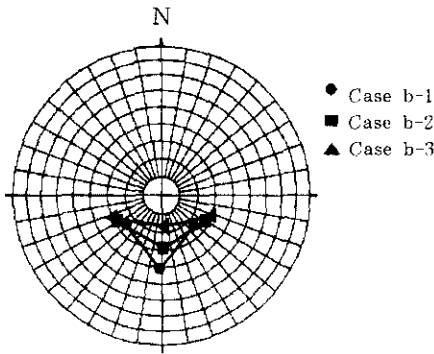


그림 18. 상부에 존재하는 공동 전방 0.25D에서의 평사투영도

과 조우한 뒤에야 공동으로 인해 변화가 발생하므로 전방에측에 있어 큰 역할을 하지 못한다고 할 수 있다. 또한 그림 18의 평사투영도로 공동이 천단과 멀리 떨어져 있을수록 V-line이 일직선에 가까워져 Normal state로 진행되는 것을 알 수 있다.

#### 4.2.3 공동이 터널의 좌(우)측에 존재하는 경우

그림 19에서와 같이 공동이 좌(우)측에 존재할 경우에는 L/C의 경향이 거의 변화가 없

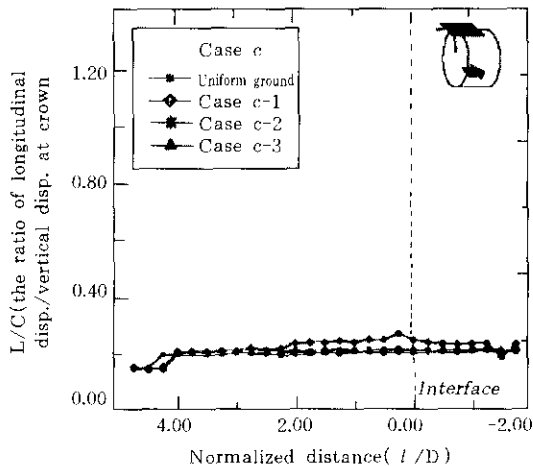


그림 19. Case c-1~3의 L/C 경향선

어 전방에측에 중요한 역할을 못함을 알 수 있다. 이 경우는 쌍굴의 간섭효과에 의해 양 터널사이의 필러두께가 적은 경우(이격거리가 1.0D 이내)에는 터널의 양 측벽에서 기존의 공동방향으로도 변위가 발생하여 신설터널의 내공변위가 줄게되므로 그림 20에서 처럼 S/C의 값이 공동에 다가감에 따라 감소한 것으로 나타났다. 따라서 측벽에 공동이 존재하는 경우 측벽의 내공변위(S)가 전방에측에 중요한 역할을 함을 알 수 있다. 그림 21에서와 같이 평사투영법을 이용하여 3차원 절대내공변위의 경향을 추적해보면 좌측측벽부의 변위벡터가 공동에 근접함에 따라 방향이 공동쪽으로 변화하는 것으로써 좌측에 존재하는 공동의 위치를 파악할 수 있으며 공동과 측벽의 이격거리가 작을수록 좌측측벽부의 영향이 더 커져 V-line이 L의 형태로 굴곡되는 양상을 나타내었다.

#### 4.3 초기 지중응력비에 따른 영향

초기 지중응력비에 따른 영향을 검토하기 위해 막장면 전방에 공동 및 파쇄대가 존재하는 경우, 즉 Case a에 대하여  $K_0=1.0, 1.5, 2.0$ 으로 변화시켜 3차원 절대변위에서의 영향을 고려하였다. 그림 22와 그림 23과 같이 초기

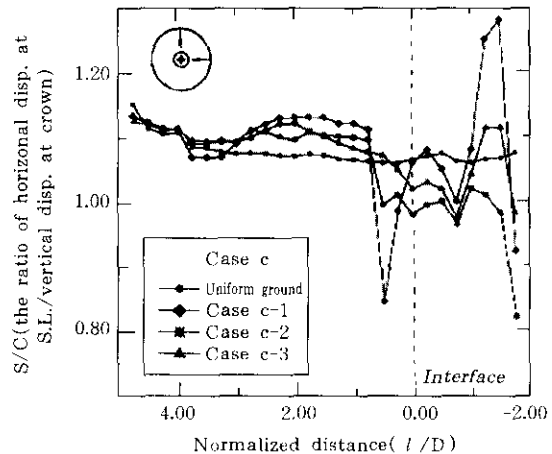


그림 20. Case c-1~3의 S/C 경향선

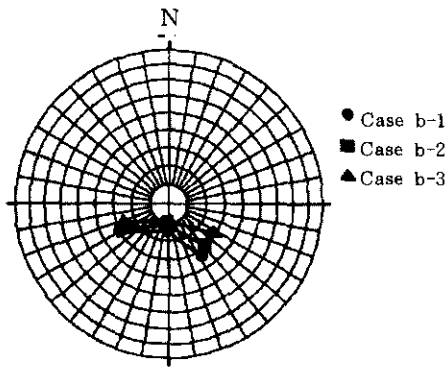


그림 21. 좌측에 존재하는 공동 전방 0.25D에서의  
평사투영도

지중응력비가 커질수록 전방예측을 위한 변위의 경향이 더욱 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다.

### 5. 현장에의 적용사례

현장 적용을 위해 그림 24와 같이 갑작스런 지반변화(즉, 막장전방이 연암에서 자갈층으로 갑자기 변화)로 인하여 막장의 붕괴를 가져왔던 현장을 예로 분석하여 보았다. 단면은 그림 25와 같으며 지반특성치는 표 2와 같다.

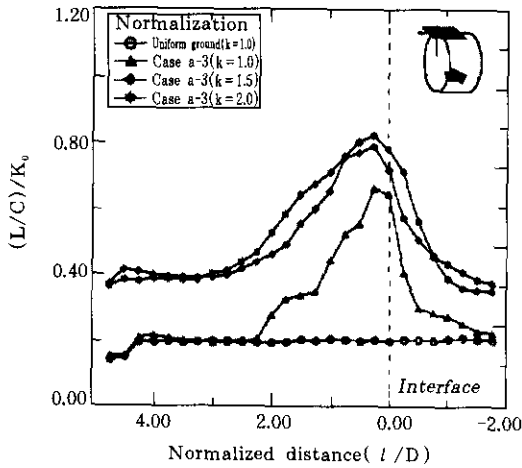


그림 22. 초기 지중응력비에 따라 정규화된 L/C의  
경향선(파쇄대)

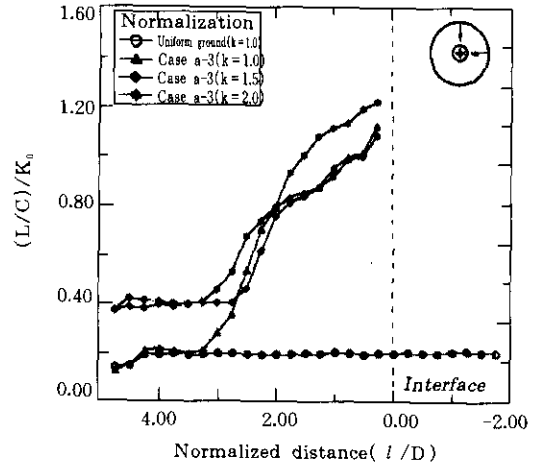


그림 23. 초기 지중응력비에 따라 정규화된 L/C의  
경향선(공동)

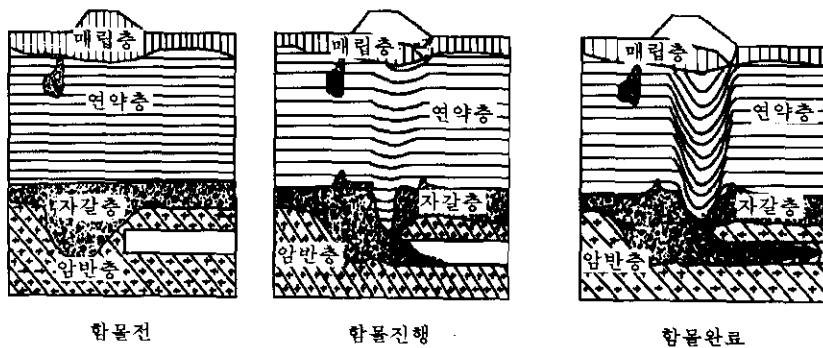


그림 24. ○○전력구 터널의 합물과정 추정도(○○ 원인조사 분석 감정보고서, 1993)

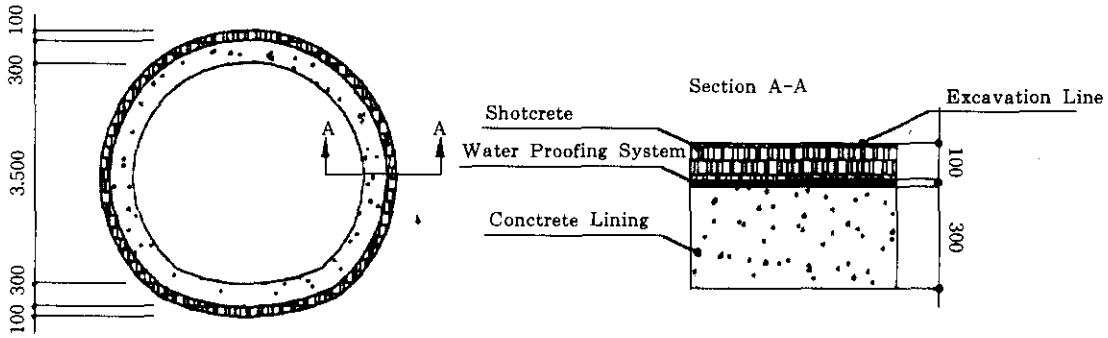


그림 25. 전력구 터널 단면도

표 2. 수치해석에 사용된 지반특성치

	퇴적토층-A	퇴적토층-B	암반층	Shotcrete
심도, Depth(m)	0~21	21~35	35~	-
탄성계수, E(t/m <sup>2</sup> )	300	2,000	500,000	1,000,000
포아송비, $\nu$	0.33	0.41	0.2	0.35
단위중량, $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	1.8	1.9	2.6	2.3
점착력, C(t/m <sup>2</sup> )	3.73	8.8	20	-
내부마찰각, $\phi$ (°)	30	17	40	-
초기지지응력비, K <sub>0</sub>	0.5	0.7	1.0	-

\* Shotcrete의 두께는 0.1m로 하였다.

그림 26에서와 같이 터널 굴착에 따라 발현 되던 종방향 아칭효과가 막장 전방에 존재하는 연약대로 인해 영향을 받아 굴착면에 응력이 남게 되므로 천단의 종방향의 변위(L)가 증가하여 L/C의 값이 증가하였다. 반면 그림 27과 같이 S/C에는 큰 영향이 없으므로 본 경우 역시 천단부의 종방향 변위가 막장전방에측에 큰 역할을 함을 알 수 있다. 평사투영을 이용하여 그림 28과 같이 3차원 절대변위의 변화과정을 나타낸 결과, 연약대가 터널의 좌·우측벽부에서 1.0D 정도의 폭을 갖고 존재하므로 전반적으로 존재하는 파쇄대와는 달리 3차원 절대변위 벡터가 점차로 모이는 양상을 보였다. 그러나 V-line의 경우 EW-line에 평행한 직선으로서 파쇄대의 경우와 유사하다.

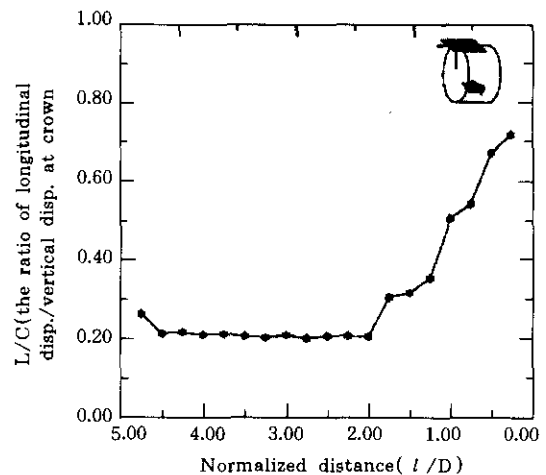


그림 26. 연약대가 존재할 경우의 L/C 경향선

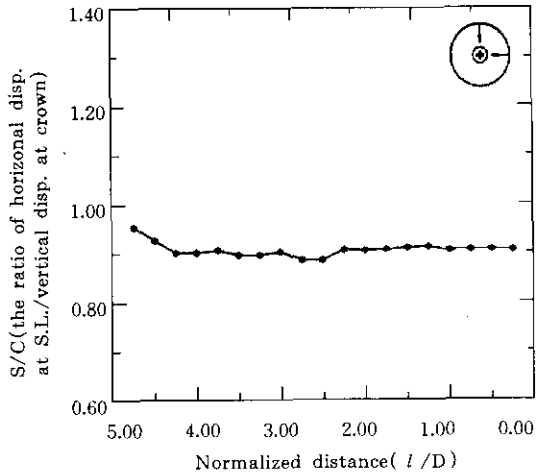


그림 27. 연약대가 존재할 경우의 S/C 경향선

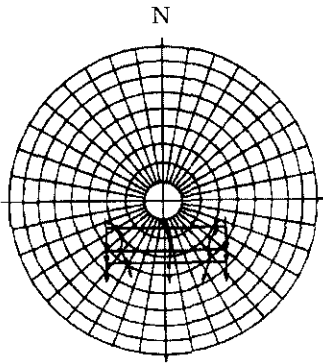


그림 28. 연약대가 존재할 경우의 3차원 절대변위 변화양상

## 6. 결 론

- (1) 균질한 지반에서의 내공경사각은  $7^{\circ} \sim 12^{\circ}$  정도로 알려져 있으며, 본 수치해석 결과 균질한 지반에서  $11^{\circ}$  정도로 산출되었다. 이에 반하여 내공경사각이 파쇄대는 최대 2배, 지하공동은 최대 6배 정도로 산출되어 현장에서 내공경사각의

계속적인 관측으로 막장전방 예측이 가능함을 알 수 있었으며, 파쇄대 및 연약대보다 지하공동(폐광)이 가장 큰 내공경사각을 발생시키는 것으로 나타났다.

- (2) 3차원 절대내공 변위의 평사투영결과 파쇄대의 경우 세 축점이 모두 영향을 받아 내공 경사각( $\alpha$ )이 모두 증가하므로 세 축점을 연결한 선은 EW-line에 평행한 직선의 양상을 나타냈다. 또한 공동의 경우, 천단부의 영향이 가장 크고 양측벽의 영향은 다소 적으며 측벽에서의 변위벡터가 안으로 모이는 경향을 보였다.
- (3) 터널 천단 상부에 존재하는 공동의 경우, L/C의 경향선에 의해서 예측이 가능하며, 평사 투영결과, 천단부의 영향이 크고 측벽부는 영향을 적게 받는 것으로 나타났다.
- (4) 터널 좌(우)측에 존재하는 공동의 경우, S/C의 경향선에 의해서 예측이 가능하며, 그 위치는 평사투영법을 이용하여 알아낼 수 있다.
- (5) 초기 지중응력비를 변화시켜 해석한 결과, 초기 지중응력비가 클 수록 내공경사각의 증가량이 더욱 커져 전방 예측이 더 수월한 것으로 나타났다.
- (6) 현장 적용을 위한 사례연구 결과, 막장전방에 존재하는 연약대의 경우 내공경사각은 균질한 지반의 3배 정도로 산출되어 본 예측기법을 적용하였다면 막장전방의 지반변화 예측을 충분히 할 수 있었던 것으로 분석되었다.

## 감사의 글

본 연구는 코오롱건설(주)와 (주)대우 Engineering의 연구지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드리며, 3D- $\sigma$ 의 사용에 도움을 준 Geodeveloper사에도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김상환, 문일 (1997), "연약지반에서의 근접터널 사이의 상호거동에 대한 연구", 한국지반공학회지, '97 봄 학술발표회 논문집, pp.125~132.
2. 이인모, 강기돈, 박광준 (1997), "터널 막장전방의 지하공동(폐광) 예측기법 개발", 한국지반공학회지, '97 가을 학술발표회 논문집, pp.161~170.
3. 이종욱, 조만섭, 김일중, 김영석 (1993), "단양 지역의 운반경도 굴착시 경도 지보의 필요성 판정에 관한 연구", 터널과 지하공간, 한국암반역학회, Vol. 3, pp. 54~62.
4. 강기돈 (1997), "3차원 절대내공변위를 이용한 막장전방의 지반변화 예측기법", 석사학위논문, 고려대학교
5. ○○원인조사 분석 감정보고서 (1993)
6. Monsees, J. E. (1996), "Soft Ground Tunnelling", *Tunnel Engineering Handbook*, 2nd edition, Chapman and Hall, pp. 97-121.
7. Soft Brain Co. (1997), *3D-σ for Windows*, Ver. 97. 1, User's manual
8. Schubert, W. and Budil, A. (1996), "The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation", 8th International Congress on Rock Mechanics, Vol. 3.
9. Fred, H. K. (1974), "Finite Element Modeling Criteria for Underground Openings in Rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* Vol. 11, pp. 465~472.
10. John, F. A. and Fitzhugh, T. L. (1973), "Stress Changes Ahead of an Advancing Tunnel", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* Vol. 10, pp. 673~697.
11. Lunardi, P. (1995), "Preconfinement of An Excavation in Relation to New Orientations Towards the Design and Construction of Tunnels", *Periodico della Societ Italiana Gallerie*, Anno XVIII-N. 45, pp. 17~37.
12. Pelli, F., Kaiser, P. K. and Morgenstern, N. R. (1991), "The Influence of Near Face Behaviour on Monitoring of Deep Tunnels", *Canadian Geotech. J.* Vol. 28, pp. 226~238.
13. Schweiger, H., and Beer, G. (1996), "Numerical Simulation in Tunnelling", *Felsbau*, vol. 14, Nr. 2, pp. 87~92.
14. Singh, B., Viladkar, M. N. and Samadhiya, N. K. (1995), "A Semi-empirical Method for the Design of Support Systems in Underground Openings", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 375~383.
15. Soliman, E., Duddeck, H., and Ahrens, H. (1993), "Two-and Three-dimensional Analysis of Closely Spaced Double-tube Tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 13~18.

(접수일자 1998. 2. 10)