

## 터널 3차원 내공변위의 해석을 통한 막장전방 지반상태변화 예측

김기선<sup>3)</sup>, 김영섭<sup>1)\*</sup>, 유광호<sup>2)</sup>, 박연준<sup>2)</sup>, 이대혁<sup>4)</sup>

### Prediction of Change in Ground Condition Ahead of Tunnel Face Using Three-dimensional Convergence Analysis

Ki-Sun Kim, Young-Sub Kim, Kwang-Ho You, Yoen-Jun Park and Dae-Hyuck Lee

**Abstract** The purpose of this study is to present an analysis method for the prediction of the change of ground conditions. To this end, three-dimensional convergence displacements is analyzed in several ways to estimate the trend of displacement change. Three-dimensional arching effect is occurred around the unsupported excavation surface including tunnel face when a tunnel is excavated in a stable rock mass. If the ground condition ahead of tunnel face changes or a weak fracture zone exists a specific trend of displacement change is known to be occurred from the results of the existing researches. The existence of a discontinuity, whose change in front of the tunnel face, can be predicted from the ratio of L/C (longitudinal displacement at crown divided by settlement at crown) etc. Therefore, the change of ground condition and the existence of a fracture zone ahead of tunnel face can be predicted by monitoring three-dimensional absolute displacements during excavation, and applying the methodology presented in this study.

**KeyWords** Convergence analysis, Three-dimensional arching effect, Influence line, Trend line

**초 록** 본 연구의 목적은 막장전방에 파쇄대가 존재할 때 터널 3차원 내공변위를 여러 가지 방법으로 해석하여 변위의 변화 경향을 밝히고 지질변화를 예측하는 계속해석기법을 제시하는 것이다. 안정된 지하 암반에 터널을 굴착하게 되면, 터널 막장면을 포함한 무지보 굴착면 주위에 3차원적인 하중전이 현상이 나타나는데 막장 전방의 지반 상태가 변화하거나 연약 파쇄대층이 존재하면 특정한 변위 경향을 보이는 것으로 기존 연구결과 알려져 있다. 터널 천단부 축방향 변위/수직변위 비 등으로 부터 터널 막장 전방에서 지반의 강성이 변화하는 불연속면의 존재를 예측할 수 있다. 그러므로, 시공중인 터널 내에서 3차원 절대 내공 변위를 측정하여 본 연구에서 제시된 계속해석 기법을 적용하면 터널 막장 전방의 지층변화나 파쇄대층의 존재를 사전에 예측할 수 있을 것으로 판단 된다.

**핵심어** 내공변위 해석, 3차원 하중전이 효과, 영향선, 경향선

## 1. 서 론

본 연구에서는 NATM 터널에서 일상적으로 수행되는 계측으로부터 얻어지는 자료를 적극적으로 활용하여 지질의 변화를 예측하는 방법을 다루었다.

연구 목적은 현장에서 수행한 터널의 절대 내공변위의 측정 결과를 분석하여 막장전방의 지반변화에 따른 터널의 거동 양상을 사전에 예측하고, 이에 대한 대책

을 조기에 강구할 수 있도록 하는 방법을 제안하는데 있다.

본 연구에서는 계측 간격을 10 m로 하였고, 계속용 광파기를 이용하여 3차원 절대 내공변위를 계측하였으며, 터널 축방향 변위 L값을 이용한 데이터 분석을 수행하였다. 또한, 현장 조사결과와 비교하였고, 물리 탐사 중 탄성과 탐사를 이용하는 대표적인 탐사 기법인 TSP 탐사를 이용하여 타당성에 대한 검증을 실시하였다.

<sup>1)</sup> 수원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 수원대학교 공과대학 토목공학과 조교수

<sup>3)</sup> 수원대학교 대학원 토목공학과 박사수료

<sup>4)</sup> SK건설(주) Geotask팀 과장

\*교신저자(Corresponding Author): kys04222@hotmail.com

접수일: 2003년 11월 21일

심사 완료일: 2003년 12월 19일

## 2. 막장 주위의 증방향 아칭 효과

터널을 굴착하면 굴착부 주위를 자유 표면으로 유지하기 위하여 굴착부를 따라 변형력이 발생한다. 이러

한 힘을 굴착 상당력 또는 해방력이라 하며, 이것은 굴착부에 존재했던 지반 초기 응력에 의하여 발생한다.

터널이 완성되었을 때 굴착 상당력은 지반과 지보재로 이루어지는 복합 구조계의 횡방향 아칭에 의해서만 전적으로 지지된다. 그러나 시공중에 있는 터널의 막장 주위에서는, 막장 전면이 막혀 있으므로 횡방향 아칭 뿐 아니라 종방향 아칭도 형성된다. 이러한 종방향 아칭은 횡방향 아칭과 합세하여 굴착 상당력을 지지한다.

막장이 전진함에 따라 이전 막장 위치에서의 종방향 아칭에 의해 지지되었던 굴착 상당력 분은 지반과 슛크리트로 이루어진 복합 구조계에 전달된다. 막장 후면으로 갈수록 종방향 아칭 효과가 감소하므로 막장 후면으로 갈수록 변형이 증가하며, 막장에서 충분히 떨어진 거리에서는 이러한 효과가 완전히 사라지게 되어 변형이 수렴하게 된다(정대열, 1993).

Fig. 1은 터널 굴착에 있어서 막장면에 발생하는 종방향, 횡방향 아칭효과를 나타낸다.

### 3. 터널의 3차원 변위 해석방법

#### 3.1 현장의 3차원 계측과정

광학 기술과 전자 기술의 발달에 따라 터널 내 계측 기술도 레이저를 이용하여 얻은 계측자료를 컴퓨터에 의해 처리함으로써 정확하고 신속하게 계측 결과를 얻을 수 있게 되었다(Rabensteiner, 1996).

터널의 3차원 계측은 레이저나 근적외선을 이용하여 거리를 측정하게 되는데, 먼저 터널의 변위가 종식되었다고 생각되는 지점 예를 들어, 터널 갭문 근처를 선택하여 광파기를 세우고 측정하고자 하는 지점에 반사표적을 설치한다. 터널 막장에 근접한 지점의 계측 시에는 볼트로 구성된 반사 표적을 사용하여 계측을 하지 않을 때는 떼어놓았다가 필요시에만 설치하도록 구성할 수도 있다.

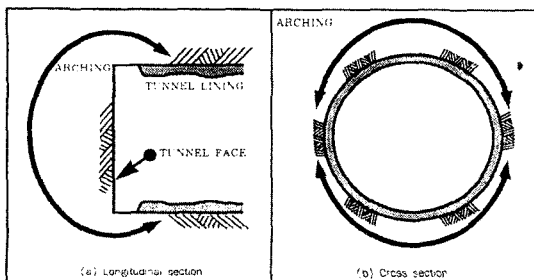


Fig. 1. Longitudinal and transverse arching effects according to the excavation of a tunnel (장석부, 문현구, 1998)

두 지점 사이에 계측기를 설치하여 근적외선 광파를 조사(照射)한 후 반사 표적의 반사광을 받아서 조사광과 반사광의 위상 차이로 거리를 측정된 후, 계측기 내에서 측정된 수평각, 연직각을 이용하여 각 측정점의 3차원 절대좌표를 계산할 수 있다.

#### 3.2 영향선과 경향선에 의한 막장 전방 지반 변화 예측

터널의 내공변위량을 각기 다른 측정지점에서 측정된 변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선(influence line)이라 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(trend line)이라고 정의할 수 있다.

이때, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 파쇄대층에 막장이 접근해 감에 따라 천단의 축방향 변위나 수직 변위가 증가하여 영향선과 경향선의 모양에 변화가 생김을 볼 수 있다. 그러므로 영향선과 경향선을 이용하면 터널의 막장면 전방에 파쇄대층이 접근하고 있음을 파악할 수 있다.

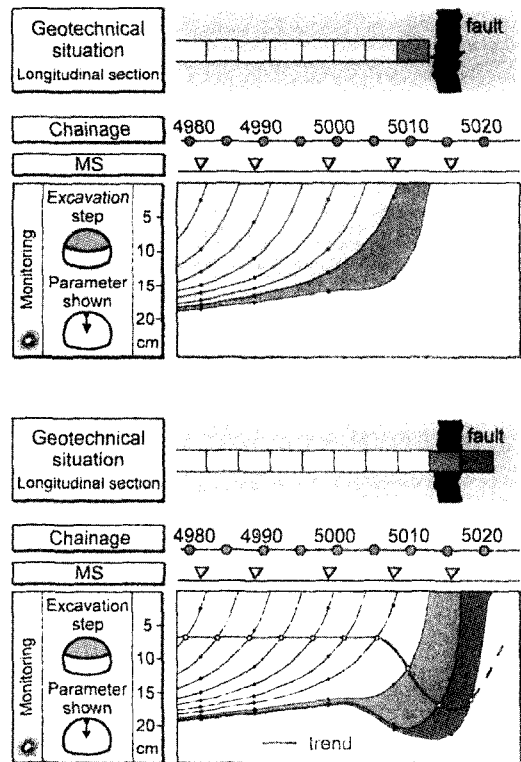


Fig. 2. The change of influence and trend line when a tunnel face accesses a fracture zone (이인모 등, 2001)

**3.3 터널 천단부 축방향 변위/수직변위비에 의한 막장 전방 지반 변화 예측**

Schubert 와 Steindorfer(1996)는 터널 천단부의 절대 변위 측정결과로부터 새로운 계측 결과의 활용 기법을 제시하였다. 막장 전방에 파쇄대나 공동이 존재하면 제대로 아칭현상이 발생되지 않아 막장면의 응력 집중이 심화되어 천단부의 축방향 변위가 크게 증가하게 된다.

L값을 천단부(crown)에서의 터널 축방향 변위라 하고, C값을 터널 내부로의 수직 변위라 할 때, Fig. 3과 같이 L과 C의 비를 이용하면 막장면과 이루는 각도, 내공경사각( $\alpha$ )을 정의할 수 있는데, 파쇄대나 공동이 존재하면 C값에 비해 L값이 크게 증가하므로 내공경사각의 크기가 커지게 된다.

즉 L/C 비가 증가하게 된다. 그러므로 계측된 3차원 변위 데이터로부터 L/C 비의 변화를 구하면 막장 전방에 상대적으로 약한 지반의 존재 여부를 예측할 수 있을 것이다. Fig. 4는 경암층에서 연암층으로 굴착이 진행될 때의 L/C 값의 변화이다.

**3.4 천단수직 변위의 분석  $C/C_0$  해석에 의한 막장 전방 지반 변화 예측**

터널 막장 근처 천단 변위는 파쇄대와 같은 연약대에 접근할수록 증가하여 경향선의 변화를 초래한다. 그러나 실제 현장에 적용되는 각종 3차원 광파계측기는 측정 시마다 발생하는 기계오차 및 조작자의 오차에 의해, 요동치는 측정 결과를 나타내기 쉽다. 따라서 이러한 특성의 현장자료로부터 의미 있는 결론을 도출하기 위해서는 간편한 확률적 개념의 도입이 필요하다(이주공 등 2002).

이주공 등(2002)은 현장계측에서 발생할 수 있는 모든 오차를 정규분포로 가정하여, 계측 결과의 평균과 분산도를 구함으로써 결과분석에 활용할 수 있는  $C/C_0$  평가 기법을 도입하였다. 여기서 C는 해당 계측지점의 천단 수직변위이며  $C_0$ 은 계측 지점 이전까지의 5지점의 변위평균이다. 그 결과 진동범위  $\text{평균} \pm 2\sigma$ ( $\sigma$ =표준편차)를 기준으로 데이터의 경향선을 평가시 파쇄대 존재

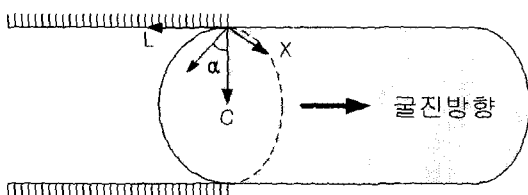


Fig. 3. Schematic diagram showing components of displacement vector defined by  $\alpha$

유무를 사전에 잘 예측할 수 있었다. 따라서 본 연구에서도 이러한 평가기법을 도입하여 막장전방의 지반변화 예측을 시도하였다.

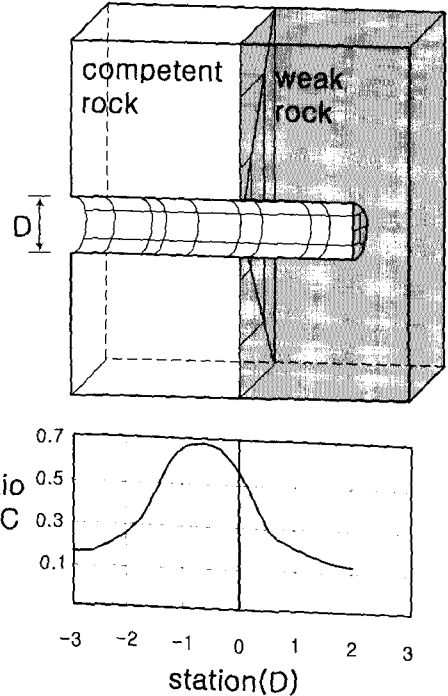


Fig. 4. The change of the ratio, L/C, when face accesses to weak rock from competent rock

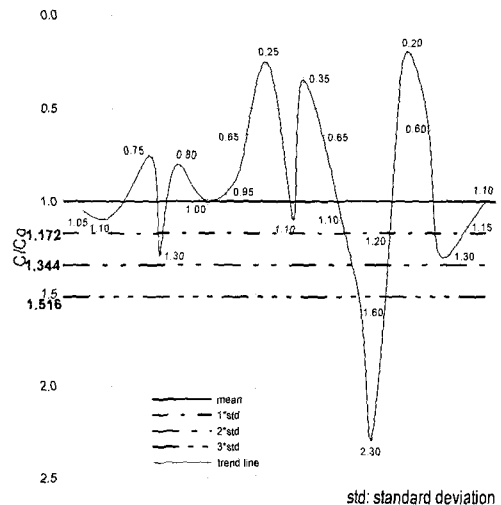


Fig. 5. An analysis of trend line,  $C/C_0$  in a tunnel site (이주공, 2002)

#### 4. 현장 터널 TSP 탐사결과

3차원 광파계측시스템에 의한 터널 변위의 3차원 계측을 위해 SK건설이 시공중인 원평-금구간 도로 확장 공사 터널구간을 선정하였다. 솟튼 터널은 전라북도 정읍에 위치하고 있고 상행선 780 m, 하행선 700 m로 이루어져 있다. 본 탐사에서는 회절중합법을 이용하여 자료처리를 실시하였으며, 하행선 및 상행선 좌측부와 상행선 우측부로 나누어서 회절단면도를 작성하였다. 회절단면도는 단순히 각 영역별(좌측 상·하단, 우측 상·하단) 기하학적인 면만을 고려하여 나타낸 것으로, 그 연장성과 지질학적 변화에 따라 터널축과 교차하지 않을 수 있으므로, 반드시 지질학적·지구조적인 해석을 추가하여야 한다. Fig. 6과 Fig. 7은 회절단면도를 이용하여 탐사결과를 도시한 그림이다.

##### 4.1 하행선 및 상행선 좌측부 탐사 결과

Table 1은 하행선 막장 굴착시 예상되는 불연속면에 대한 특성을 표로 나타내었다. 탐사결과, 상행선 및 하행선 모두 대규모 단층대나 파쇄대는 관찰되지 않으며, 소규모 파쇄대 및 암맥이 군데군데 협재되어 관찰된다.

##### 4.2 상행선 우측부 탐사 결과

Table 2는 상행선 결과를 나타낸 표이다. 탐사 결과, 상행선 터널 우측 구간은 매우 균질한 암질로 구성된 것으로 판단되며, 특이한 단층파쇄대는 관찰되지 않는다. 다만 소규모 파쇄대가 2조 정도 관찰된다.

#### 5. 현장 3차원 계측 결과 분석

실제로 계측이 이루어진 솟튼터널의 현장 계측 데이터에 대해 3차원 내공 변위 분석을 실시하였다.

계측된 터널 변위 벡터를 분석하는 기법에는 천단 축 방향 변위/천단 수직 방향 변위 비(L/C 비)에 의한 분석, C/C, 해석에 의한 분석등이 있고, 또한 천단변위에 의한 분석, 좌측벽 X 방향변위에 의한 분석, 좌측벽 Z 방향변위에 의한 분석, 우측벽 X 방향변위에 의한 분석, 우측벽 Z 방향에 의한 분석이 있다.

본 절에서는 상행선 계측결과와 영향선 및 경향선을 이용하여 전방의 파쇄대를 예측할 수 있는지 여부를 파악하고, 하행선 계측결과도 같은 방법으로 분석하였으나 지면상 생략하고 6절에 결과분석만을 수록하였다.

영향선은 같은 시간에 다른 측정지점에서 측정한 변위를 하나의 선으로 연결한 것으로서 막장 전방의 지반이 굴착되기 이전부터 굴착된 후까지 여러 시간에서 측정한 선들이므로 영향선 자료만으로는 실제 막장 전방 지반이 굴착되기 전에 계측지점(막장 근처 후방)에서 파쇄대 유무를 예측할 수 있었는지를 판단하기는 어렵다. 따라서 막장 전방의 지반이 굴착되기 전 영향선 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값을 연결한 선인 경향선이 보다 명확히 막장 전방 파쇄대 유무를 예측하는 척도로서 활용될 수 있다는 사실에 주의해야 한다.

##### 상행선 계측 결과

###### ○ 천단침하 영향선 및 경향선

Fig. 8은 상행선의 현장 데이터에 의한 영향선 및 경향선과 현장조사 및 TSP 탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이며, 세로축은 천단변위(mm)이고 가로

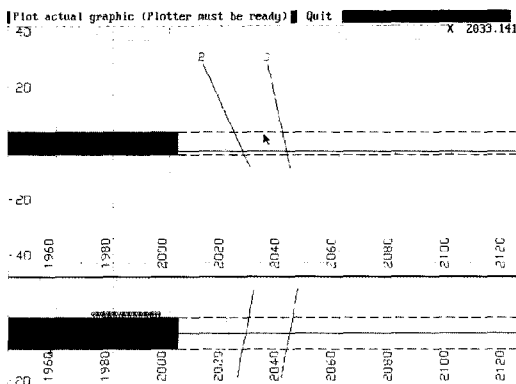


Fig. 6. The exploratory result at the up line on the right side

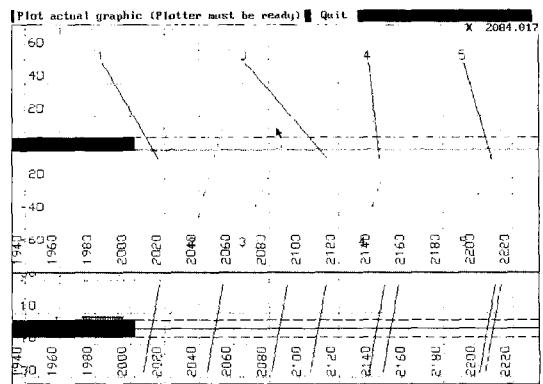


Fig. 7. The exploratory result at the up and down line on the left side

**Table 1.** Discontinuity characteristics expected when a tunnel face is excavated

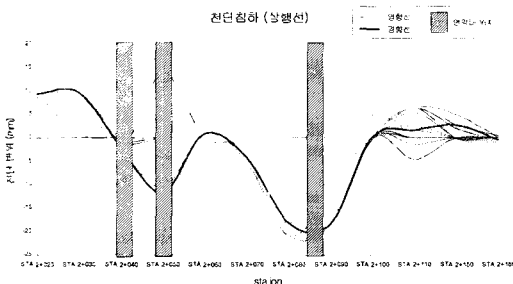
Up line STA.	Down line STA.	Discontinuity characteristics	Observation location with reference to the up line
2K+022	2K+014	small fracture zone	left, up
2K+030	2K+022	small dike	left
2K+058	2K+050	small fracture zone	left, down
2K+095	2K+087	small fracture zone	left, down
2K+117	2K+109	small fracture zone	left, up
-	2K+143	small fracture zone	left, up
	2K+210	small fracture zone	left, down

**Table 2.** The exploratory result about discontinuity at the up line on the right side

Up line STA.	Discontinuity characteristics	Observation location with reference to the down line
2K+018	small dike	right
2K+026	small fracture zone	right, up
2K+041	small fracture zone	right, up

측은 굴착지점이다. 굵은 선으로 표시된 것이 경향선이며 Fig. 8에서 보는 바와 같이 영향선 및 경향선의 변화 양상은 천단침하의 경우 비교적 일치하였다.

TSP 탐사결과, 첫 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+030 지점부터 변화하여 STA. 2K+040 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+040~STA. 2K+045 지점에 파쇄대가 존재함을 예측할 수 있고 TSP 탐사결과와 일치하였고 현장조사와는 일치하지 않았다. 또한 경향선에서 예측하기 불가능하였고 영향선도 변화가 미흡하였다.



**Fig. 8.** Influence and trend line inferred from displacement at crown on the up line

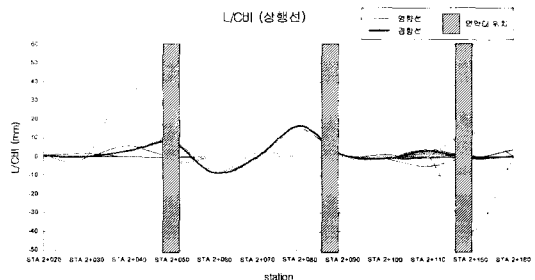
TSP 탐사결과, 두 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+030 지점부터 변화하여 STA. 2K+050 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+050~055 정도에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있고 TSP 탐사결과와 일치하였다. 파쇄대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+030~050 구간의 20 m 정도이다.

현장조사 결과, 세 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+070 지점부터 변화하여 STA. 2K+085 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+085~090 정도에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있고 현장조사 결과와 일치하였다. 파쇄대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+070~085 구간의 15 m 정도이다.

○ L/C비 영향선 및 경향선

Fig. 9는 상행선의 현장 데이터에 의한 경향선 및 영향선과 현장조사 및 TSP 탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이며, 세로축은 L/C비로서, 여기서 L은 천단부(crown)에서의 터널 축방향(종방향) 변위이고, C는 천단의 연직방향 변위이다. 가로축은 굴착 지점이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 영향선과 경향선의 양상은 STA. 2K+060까지는 다르나, 그 이후 굴착 지점에서는 일치하였다.

TSP 탐사결과, 첫 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 L/C비의 변화는 영향선이 STA. 2K+030 지점부터 급격히 상승하여 파쇄대 이전 STA. 2K+040지점에서 하강함으로써, 전형적인 경향을 보여주고 있다. 따라서 하강이후의 구간인 STA. 2K+050지점에 파쇄대가 존재한다는 사실을 예측할 수 있고 TSP 탐사결과와 일치하였고 현장조사와는 일치하지 않았다. 그러나 L/C



**Fig. 9.** Influence and trend line inferred from L/C on the up line

비의 영향선에서 예측 가능하나, 경향선 자료에서는 불가능하였다.

현장조사 결과, 두 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 L/C비의 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+070 지점부터 급격히 변화하여 STA. 2K+080 지점 이후 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+085~090 정도에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있고, 현장조사와 결과와 일치하였다. L/C비의 영향선 및 경향선 결과 모두로부터 예측 가능하였다.

현장조사 결과, 세 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+100 지점부터 변화하여 STA. 2K+150 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+150 바로 이전에 파쇄대가 존재할 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 그러나 경향선에서 예측하기에는 변화가 미흡하였다. 파쇄대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+110~150 구간의 40 m 정도이다. 이렇게 변화구간이 예외적으로 긴 이유는 STA 2K+110 지점과 STA 2K+150 지점의 사이에 현장 사정상 계측 데이터가 없기 때문이다.

○ C/C<sub>0</sub>비 영향선 및 경향선

Fig. 10은 상행선의 현장 데이터에 의한 C/C<sub>0</sub>와 현장조사 및 TSP 탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이며, 세로축은 C/C<sub>0</sub>로서, 여기서 C값은 천단의 연직방향 변위이고, C<sub>0</sub>값은 경향선의 굴착 초기 부분의 5 지점 변위값들의 평균이다. 가로축은 굴착 지점이다. 진동범위 평가 기준 평균±1σ, 평균±2σ, 평균±3σ(σ=표준편차)와 비교를 위해 기준선들을 그림에 표시하였다.

TSP 탐사결과, 첫 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 C/C<sub>0</sub> 선은 약 STA. 2K+040 지점부터 변화하여 STA. 2K+050 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이지만, 평균±2σ 선과 비교할 때 너무 미흡하여

C/C<sub>0</sub> 선으로부터 파쇄대 유무를 예측하는 것은 불가능하였다.

현장조사 결과, 두 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 C/C<sub>0</sub> 선은 약 STA. 2K+070 지점부터 변화하여 STA. 2K+080 지점 이후 하강하여 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+085~090 정도에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있다. 또한 진동기준선인 평균±2σ를 초과함으로써 파쇄대의 존재를 예측할 수 있다.

파쇄대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+080~090 구간의 10 m 정도이다.

○ 좌측 x 방향 변위 영향선 및 경향선

Fig. 11은 상행선의 현장 데이터에 의한 경향선 및 영향선과 현장조사 및 TSP 탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이며, 세로축은 좌측 x 변위 (mm)이고 가로축은 굴착 지점이다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 영향선과 경향선의 양상은 비교적 일치하나 STA. 2K+100 이후에는 상이하였다.

현장조사 결과, 첫 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 STA. 2K+060지점에서 변화하기 시작하여 STA 2K+070에서 피크치를 이루며 이후 상승하였다. 현장조사 및 TSP 탐사는 STA. 2K+087 좌측부에 소규모 파쇄대를 예측하였으므로, 좌측 횡방향 변위인 x변위는 파쇄대 2.0D부터 변화가 발생한다는 사실을 알 수 있다.

현장조사 결과, 두 번째 및 세번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+100 지점부터 변화하여 STA. 2K+110 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+110 이후 파쇄대가 존재함을 예측할 수 있다.

현장조사 결과, STA. 2K+109 및 2K+143에 파쇄대를 예측하였는데, 비교적 계측결과와 부합되나 확연한 양상을 관찰하기는 불가능하였다.

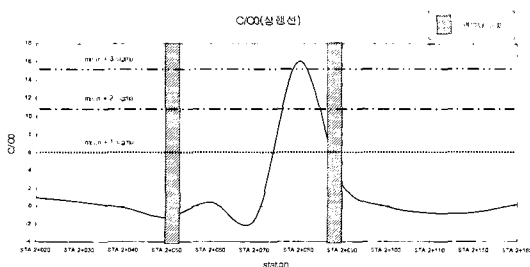


Fig. 10. Influence and trend line inferred from C/C<sub>0</sub> on the up line

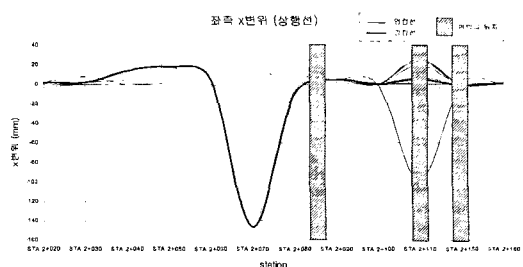


Fig. 11. Influence and trend line inferred from x-displacement at the up line on the right side

○ 좌측 z 방향 변위 영향선 및 경향선

Fig. 12는 상행선의 현장 데이터에 의한 경향선 및 영향선과 현장조사 및 TSP 탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이며, 세로축은 z변위 (mm)이고 가로축은 굴착한 거리이다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 영향선과 경향선의 양상은 비교적 일치하였다.

TSP 탐사결과, 첫 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선은 약 STA. 2K+030 지점부터 변화하여 STA. 2K+040 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+040~050 정도에 파

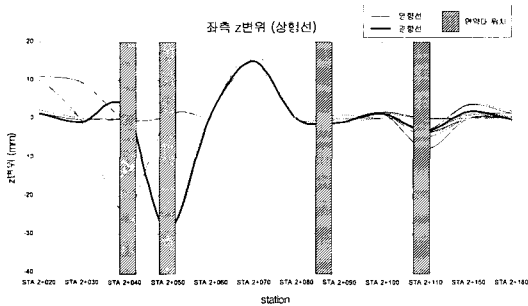


Fig. 12. Influence and trend line inferred from x-displacement at the up line on the right side

쇄대가 존재함을 유추할 수 있다. 그러나 경향선에서 명확한 양상을 얻기가 곤란하였다.

TSP 탐사결과, 두 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+040 지점부터 변화하여 STA. 2K+050 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+050~055 정도에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있다. 파쇄대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+040~050 구간의 10 m 정도이다. 영향선 및 경향선 결과 모두 일치하였다.

현장조사 결과, 세 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+070 지점부터 변화하여 STA. 2K+080 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+080~090 정도에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있다. 파쇄대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+070~080 구간의 10 m 정도이다.

현장조사 결과, 네 번째 연약대 위치의 계측데이터에 의한 영향선 및 경향선은 약 STA. 2K+100 지점부터 변화하여 STA. 2K+110 지점까지 하강한 후 점점 회복되는 모양을 보이는데 이로부터 STA. 2K+110 지점 이후에 파쇄대가 존재함을 유추할 수 있다. 그러나 명확한 양상을 보이지 않으므로 예측하기는 곤란하다. 파쇄

Table 3. Comparison between TSP exploration and tunnel site investigation (The up line)

Location of the weak zone expected from TSP	Discontinuity characteristics expected from TSP	Location of the weak zone expected from 3-dimensional monitoring	Graph analyzed in 3-dimensional monitoring	Site investigation during excavation	Remark
STA 2K+041	small fracture zone	STA 2K+041	displacement at crown left- Z displacement right- Z displacement	none	TSP and 3-dimensional monitoring give the same result, but disagree with a tunnel site
STA. 2K+050	small fracture zone	STA. 2K+050	displacement at crown L/C left- Z displacement right- Z displacement	none	TSP and 3-dimensional monitoring give the same result, but disagree with a tunnel site
STA. 2K+087	small fracture zone	STA. 2K+070 ~ STA. 2K+085	displacement at crown L/C left- X displacement left- Z displacement right- X displacement C/C <sub>o</sub>	fracture zone	3 approaches give the same result
STA. 2K+109	small fracture zone	STA. 2K+110	left- Z displacement right- X displacement	fracture zone at center of tunnel face	3 approaches give the same result
STA. 2K+143	small fracture zone	STA. 2K+150	L/C left- X displacement right- X displacement	some weak zone and transition zone of rock class	3 approaches give the same result
failure to prediction	failure to prediction	STA. 2K+170 ~ STA. 2K+180	displacement at crown L/C right- Z displacement	STA. 2K+170~180 poor rock class at the top half section	3-dimensional monitoring and tunnel site give the same result

대 전방에서 영향선 및 경향선의 모양이 변화하는 범위는 약 STA. 2K+100~110 구간의 10 m 정도이다.

**6. TSP 탐사 및 현장 조사결과와의 비교분석**

TSP 탐사에 의해 파쇄대와 같은 연약대가 막장 전방에 출현하는 예측을 수행한 결과와 3차원 광파기 계측에 의해 각종 변위 자료를 획득 분석한 결과 및 현장 막장 및 벽면조사에 의해 조사를 수행한 결과를 비교함으로써 3차원 변위 분석에 의한 예측 결과를 검증하고자 상호 비교하였다.

단, 다양한 3차원 변위 그래프들 중에서도 막장 전방 지반이 굴착되기 이전에 획득한 계측자료로부터 막장 전방 지반 조건을 명확히 예측한 경우에만 해당 그래프를 나타내었다.

**6.1 상행선**

Table 3에서 보는 바와 같이 3차원 광파기 계측자료 분석에 의해 상행선 터널 막장 전방 지반을 예측한 확률은 매우 높고 대부분 TSP 결과 및 현장 조사 결과와 일치하였다.

- 현장조사, TSP 탐사, 3차원 변위에 의한 예측 일치: 3개소

- TSP 탐사와 3차원 변위에 의한 예측이 일치하지만 현장과는 불일치: 2개소
- TSP 탐사가 예측 못했지만 3차원 변위에 의한 예측과 현장조사 일치: 1개소

STA. 2K+170~180의 경우 TSP 탐사로 상부 반단면의 전체적인 암질 불량 구간을 예측하지 못했으나 3차원 변위 계측 자료 분석에 의해 예측 가능하였다.

결국, 3차원 변위계측에 의해 실제 막장 전방 지반의 파쇄대 유무를 예측한 확률은 위의 6개소 중 4개소로 약 67%였다.

**6.2 하행선**

Table 4에서 보는 바와 같이 3차원 광파기 계측자료 분석에 의해 하행선 터널 막장 전방 지반을 예측한 확률은 매우 높고 대부분 TSP 탐사결과 및 현장 조사 결과와 일치하였다.

- 현장조사, TSP 탐사, 3차원 변위에 의한 예측일치: 1개소
- TSP 탐사와 3차원 변위에 의한 예측이 일치하지만 현장과는 불일치: 1개소
- TSP 탐사가 예측 못했지만 3차원 변위에 의한 예측과 현장조사 일치: 1개소

**Table 4.** Comparison between TSP exploration and tunnel site investigation (down line)

Location of the weak zone expected from TSP	Discontinuity characteristics expected from TSP	Location of the weak zone expected from 3-dimensional monitoring	Graph analyzed in 3-dimensional monitoring	Site investigation during excavation	Remark
-	-	STA 2K+000	displacement at crown L/C C/C. left- X displacement right- X displacement right- Z displacement	appearance of a very poor weak zone (fracture zone at center of tunnel face)	3-dimensional monitoring and site investigation give the same result  TSP didn't investigate
STA 2K+022	small fracture zone	-	-	none	the mistake of prediction using a TSP
STA 2K+030	small dike	STA 2K+030	left - X displacement left - Z displacement right - X displacement right - Z displacement	N/A	TSP and 3-dimensional monitoring give the same result
STA 2K+058	small fracture zone	STA 2K+060 ~ STA 2K+070	left - X displacement left - Z displacement right - X displacement	N/A	TSP and 3-dimensional monitoring give the same result, but disagree with 3-dimensional monitoring
STA 2K+095	small fracture zone	STA 2K+090 ~ STA 2K+100	left - X displacement right - X displacement	a fracture zone at half section on the left side	3 approaches give the same result



- TSP 탐사가 파쇄대를 예측했지만, 3차원 변위 예측과 현장조사 동일하게 비예측: 1개소
  - TSP 탐사와 3차원 변위에 의한 예측이 일치하지만 현장조사 미실시: 1개소
- 결국, 3차원 변위계측에 의해 실제 막장 전방 지반의 파쇄대 유무를 예측한 확률은 위의 4개소 중 3개소로 약 75%였다.

## 7. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 현장 계측 자료에 대한 3차원 변위 분석결과, TSP 탐사와 같은 지반조사를 통해 예측된 연약대의 위치와 거의 합치한다는 사실을 확인하였다.
- 2) 3차원 변위 분석결과에 의해 막장 전방 지반의 파쇄대 유무를 판별하는 정확도는 상행선 하행선 평균 70% 이상으로서 매우 좋은 결과를 나타내었다. 심지어 TSP 탐사가 예측을 못했거나 잘못 예측한 개소에서, 현장 조사 결과와 3차원 변위 분석에 의한 예측이 일치하였다.
- 3) 3차원 변위 분석 그래프 중에서도, 터널 천단 종방향 변위와 수직변위비를 나타내는 L/C비 그래프가 대부분의 경우에 막장 전방 파쇄대 예측에 효과적인 예측자였으며, 천단침하 영향선/경향선 그래프 및 천단 수직변위의 분석 C/C<sub>0</sub>비 그래프 또한 효과적이었다. 그러나 C/C<sub>0</sub>비 그래프 기법은 지속적으로 양호한 암질 구간에서 갑자기 출현하는 파쇄대 예측에는 효과적이었으나, 파쇄대 구간 간격이 좁은 경우 효과가 없었다.
- 4) 영향선 및 경향선의 비교분석 결과, 파쇄대 전방에서 경향선 모양의 변화가 일어나는 범위는 터널 폭의 1~2배 정도인 10~20 m로 일정하게 나타남을 밝혔다. 그러므로, 터널 막장 전방 10~20 m이전에 파쇄대의 존재를 미리 예측할 수 있다.
- 5) 기존의 3차원 수치해석에 의하여 막장전방의 지반상태변화를 파악하는 계측해석기법과 더불어 좌·우측 X, Z 방향 절대 변위의 영향선 및 경향선의 분석을 수행하여 더 많은 파쇄대의 존재를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 데이터 분석을 수행한 슷터터널의 계측 데이터는 0.1 mm의 분해능을 가진 광파기를 이용하여 터널 10 m 간격으로 3차원 절대 변위를 계측하였으며 파쇄대 등 지반변화에 민감한 터널 축방향 변위 L값을 계측하여 종래 천단의 수직변위 C값만을 이용하여 데이터분석을 수행한 연구보다 전방 예측에 훨씬 유리하였다. 따라서 광파기를 사용하면서도 L값을 측정하지 않는 일반적인 광파기 계측에서 L값은 반드시 측정 및 기록해야 할 것이며 숙련된 작업자 및 0.1 mm의 분해능을 가진 3차원 광파기가 준비된다면 적은 경비로도 수행이 가능 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
2. 장석부, 문현구, 1998, 터널 설계조건을 고려한 하중분배율의 정량적 산정에 관한 연구 -ring cut 굴착공법을 중심으로-, 한국지반공학회논문집, 14.5, 5-15.
3. 이인모, 이주공, 이승주, 이형원, 한일영, 이대혁, 2001, 터널 내공변위의 해석을 통한 막장전방 지반조건변화 예측, 한국지반공학회 터널기술위원회 2001 학술세미나, 41-55.
4. 이주공, 이인모, 이승주, 이대혁, 2002, 파쇄대에 접근하는 터널의 내공변위 변화, 터널기술, 4.3, 한국터널공학회, 235-245.
5. Rabensteiner, K., 1996, Advanced Tunnel Surveying and Monitoring, Felsbau, Vol. 14. No. 2.
6. Schubert, W., and Steindorfer, A., 1996, Selective Displacement Monitoring Tunnel Excavation, Felsbau, Vol. 14, No. 2.

**김기선**



1971년 한양대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1990년 울산대학교 대학원 토목공학과  
석사  
2003년 수원대학교 대학원 토목공학과  
박사수료  
Tel: 02-576-9081 ~3  
E-mail: civil0224@hanmail.net  
현재 동흥개발(주) 대표이사

**김영섭**



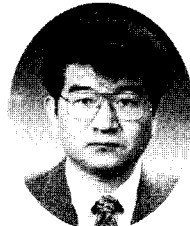
2001년 수원대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
Tel: 031-220-2522  
E-mail: kys04222@hotmail.com  
현재 수원대학교 대학원 토목공학과  
석사과정

**유광호**



1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과  
공학석사  
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원  
토목공학과 공학박사  
Tel: 031-220-2566  
E-mail: khyou@mail.suwon.ac.kr  
현재 수원대학교 공과대학 토목공학과  
조교수

**박연준**



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원  
토목공학과 공학박사  
Tel: 031-220-2580  
E-mail: yjpark@mail.suwon.ac.kr  
현재 수원대학교 공과대학 토목공학과  
조교수

**이대혁**



1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학박사  
Tel: 02-3700-8644  
E-mail: dhlee-d@skec.co.kr  
현재 SK건설(주)연구소 선임연구원