

지중변위 계측자동화 및 3차원 유한요소해석에 관한 연구

정용복¹⁾ · 정현기²⁾ · 정소걸²⁾ · 김동현³⁾ · 이희근⁴⁾

A Study on the Automation of Field Instrumentation and the Analysis of MPBX Displacement

Yong-Bok Jung, Hyun-Key Jung, So-Keul Chung, Dong-Hyun Kim and Hi-Keun Lee

ABSTRACT Input data play an important role in numerical analyses. However, it is difficult to obtain appropriate data for many reasons. In order to overcome those difficulties, an automatic MPBX(Multi-Position Borehole Extensometer) monitoring system is developed. This system can be applied to the analyses of measured data which include evaluation of the stability, efficiency of construction and the validity of numerical analyses. At first, the MPBX among field measurement tools is considered in this study. Also, 3-dimensional finite element analyses are carried out to verify the influence of geological conditions and excavation sequence on the MPBX displacement. The effect of geological conditions on the displacement can be estimated qualitatively from the measured data by plotting displacement vs. depth.

1. 서 론

지하구조물 건설의 대상이 되는 지하암반은 단층, 절리, 균열등이 발달되어 있고 이들 불연속면의 역학적 특성과 분포형태는 구조물의 거동에 큰 영향을 준다. 이런 불연속면들의 분포 및 역학적 특성은 시공이전에 완벽히 알 수가 없다. 따라서 계측을 통해 설계와 시공의 타당성을 확인하게 된다.^{1,4)} 또한 지하구조물 설계에 있어서 컴퓨터를 이용한 수치해석 기법을 최근에 상당히 많이 사용한다. 그러나 수치해석에 있어서 입력자료의 정확성 및 정밀도는 수치해석기법 자체보다 이제 더 중요한 요소로 부각되고 있다. 따라서 입력자료를 어떻게 얻을 것이며 어떤 자료를 사용할 것인가를 결정하는 것은 아주 중요하다. 또한 해석결과와 실제 계측결과와 비교, 검토하여 설계 및 시공의 타당성을 분석하는데 사용되어야 가치가 있다.

현재 국내에서는 계측이 아직까지 체계화되어 있지 못한 상태이다. 이는 계측에 대한 철저한 사전 준비가 부족하고 계측의 목적이 정확히 수립되지 않은 상태에서 관행을 따라 수행하기 때문이다. 실제로 노력과 수고를 들이지만 얻는 자료는 활용하기에 부적절한 경우가 대부분이다. 이런 점들을 보완하고 계측자료가 수치

해석 및 시공의 안정성, 경제성 등을 평가할 수 있는 자료로 사용될 수 있도록 하기 위해 계측자동화를 추진하고 있다.⁵⁾

본 연구에서는 계측 항목중 지중변위에 대한 자동화를 다루었다. 또한 계측자료의 해석은 계측만큼이나 중요하므로 복잡한 형태로 나타나는 지중변위에 대해서 지반조건 및 굴착순서에 따른 거동을 조사하기 위해서 3차원 유한요소해석을 단순한 형태의 지반조건을 가정하여 실시하였다.

2. 계측자동화

2.1 개요

지하구조물 시공시 가장 손쉽게 계측할 수 있고 많이 이용되는 계측항목은 변위이다.^{2,3,6)} 터널의 경우에는 내공변위와 지중변위가 있으나 내공변위는 특성상 자동화가 아직까지는 어려운 상태이다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 자동화가 비교적 용이한 지중변위 계측자동화에

1) 학생회원, 서울대학교 박사과정

2) 정회원, 한국자원연구소

3) 정회원, 삼성중공업 건설기술연구소 소장

4) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

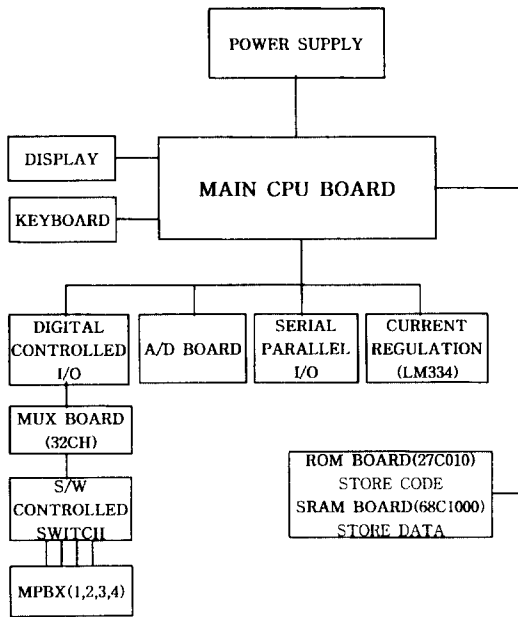


Fig. 1. Block diagram of developed MPBX monitoring system.

대해 다루었다. 본 연구에서 개발된 시스템은 서로 다른 회사에서 제작된 지중변위계라도 사용할 수가 있으며 전기신호로 변환을 시켜주는 변환기가 부착된 다른 종류의 계측기(stress meter, piezometer 등)에도 사용될 수 있다.

2.2 개발 시스템 사양

Fig. 1은 개발된 시스템의 개략도이다. 개발 시스템은 정밀안정전원, 저전력 5V 단일전원동작 주기관, 출력표시 및 입력장치, 계측프로그램 저장용 롬(ROM), 측정자료저장용 배터리백업 초저전력 램(RAM), 20bit 고분해능 아날로그/디지털 변환 보드, 디지털 입출력, 32채널 멀티플렉스 보드, 소프트웨어 자동배전반, 온도보상 정밀 정전류원, 직병렬 접속부등으로 구성된다.

본 시스템의 주요 하드웨어 규격을 정리하면 다음과 같다.

- 현장용 저전력(CMOS) 시스템
- 각조 8채널 MPBX 4조 연결 가능(32채널 동시 모

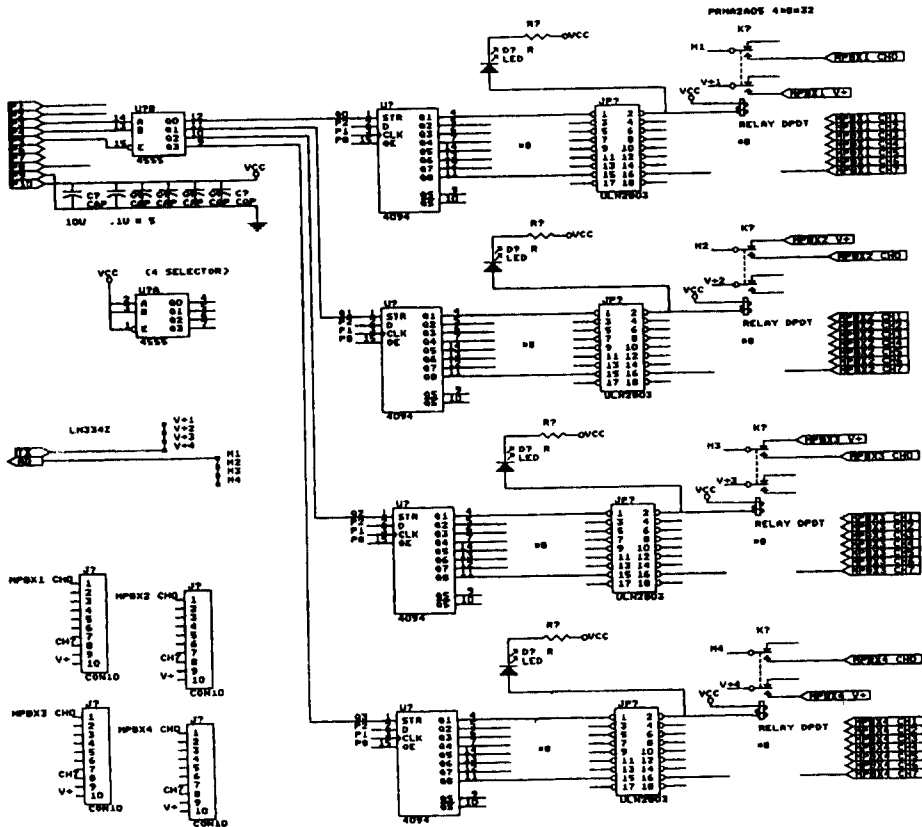


Fig. 2. Schematic diagram of 32 channel multiplex board.

Table 1. Comparison of measurements results in Lab

		Digital read out	Developed system
MPBX 1	Channel 1	157.3	158.42
	Channel 2	147.1	148.42
	Channel 3	-	159.98
	Channel 4	159.5	160.49
MPBX 2	Channel 1	168.5	168.30
	Channel 2	-	156.65
	Channel 3	164.3	164.28
	Channel 4	156.8	156.70
XMBX 3	Channel 1	161.7	161.77
	Channel 2	164.5	164.43
	Channel 3	-	-
	Channel 4	164.0	162.66

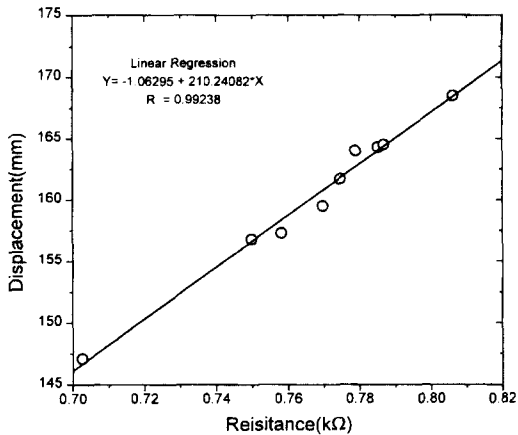


Fig. 3. Correlation chart between resistance(kΩ) and displacement.

니터링)

- 10분 간격 측정(S/W Programmable) 및 저장
- 3.5" PC 플로피 디스크 이용 현장 자료처리 가능
- CMOS SRAM IC에 이중저장(전원이 끊어져도 1개월 이상 유지가능)
- MPBX 이외에 온도, 압력등의 동시모니터링으로의 확장 가능

Fig. 2는 개발된 32채널 멀티플렉스 보드의 회로도이다. 하드웨어적 채널 선택에 있어서 누설전류등을 제거하는 확실한 채널간 전기적 절연을 위해 신뢰도 높은 릴레이를 사용하였다. 또한 이 시스템은 소프트웨어적인 제어와 하드웨어적 확장을 고려해 설계된 것이다.

2.3 MPBX 인터페이스 및 실내비교



Fig. 4. Prototype of MPBX monitoring system.

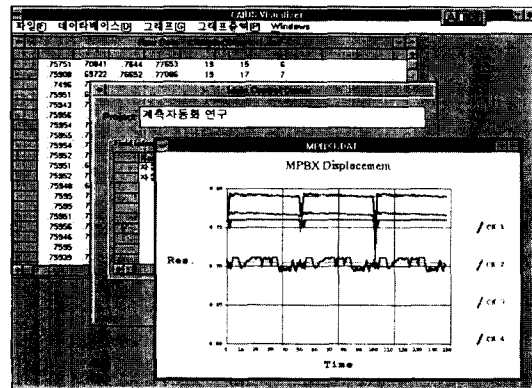


Fig. 5. Developed visualization program.

본 시스템에서 사용한 MPBX는 호주산(Geotechnical systems Australia PTY. LTD.)으로서 4채널짜리 3조이고 길이는 6m이다. 개발시스템과 부가된 readout 장치를 사용한 결과 100mV=1mm의 범위에 해당하는 분해능을 가짐을 확인하였다. Table 1은 실험실내 측정치의 비교결과표이며 일부 채널에 문제가 있었으나 전반적으로 잘 일치했다. Fig. 3은 readout장치와 개발시스템이 획득한 값사이의 상관관계를 나타낸 그래프이며 R=0.99238로서 매우 높은 상관도를 나타내었다.

2.4 현장 시험적용

진주고속도로터널에서 개발된 장비를 24시간동안 시험동작시켰으며 현장사정으로 MPBX 1개만이 정상연결되어 작동되었으나 범위가 이미 수렴한 현장이었다. Fig. 4는 개발 시스템의 사진이다.

본래 2조의 MPBX를 터널 좌우측벽에 설치했으나 막장과의 거리가 10 m정도의 가까운 위치에 설치되어

서 발파작업에 의해 계측기 헤드부분이 파손되어 입구에서의 최측 MPBX에서만 자료가 정상적으로 기록되었다. Fig. 5는 개발된 자료해석프로그램이며 표시된 그래프는 진주고속도로터널현장에서 계측한 자료이다. 프로그램의 기능은 아직까지는 제한적이며 추후 보완할 예정이다.

본 시스템의 현장 설치를 통한 자료 획득 및 Digital read out장치에 의해 계측된 결과와 비교 분석한 결과 기본적인 MPBX변위량의 계측오차가 없음이 확인됨으로써 현장적용성을 입증하였다.

3. 지중변위 분석을 위한 3차원 유한요소해석 및 검토

3.1 개요

지반조건과 막장진행에 따른 지중변위의 거동을 고찰하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

물성이 동일한 경우, 심도에 따라 물성이 다른 경우, 수직방향 연약대가 존재하는 경우에 대해서 전단면과 벤치굴착을 할 경우에 대해 해석하였다. 해석에 사용한 프로그램은 범용 유한요소해석 S/W인 ABAQUS 5.4-1⁷⁾이며 해석모델은 Fig. 6과 같다. 터널단면의 형상은 말발굽형이고 폭은 8 m, 높이는 7 m이다. 모델의 총요소수는 1742개, 총절점수는 2268개이다. 모델의 크기는 x방향(1방향)으로 40 m이며 y방향(2방향)으로 104 m이고 높이는 70 m로 터널높이의 10배이다. 내공변위 계측 위치는 Fig. 7에 나타나 있으며 지중변위 계측 위치는 Fig. 8과 같다. 각 계측점의 위치 및 거리는

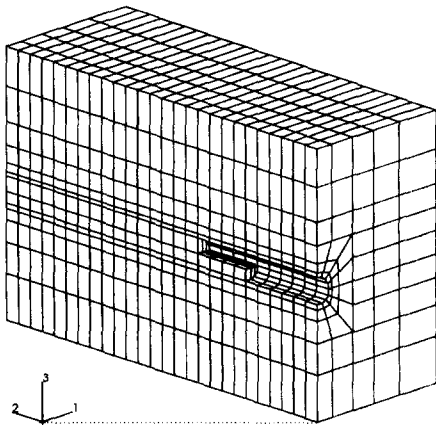


Fig. 6. Model for numerical analyses.

Table 2에 정리되어 있다. 수압은 고려하지 않았으며 절리도 고려하지 않았다. 해석의 단순화 및 일반성을 위해 모델은 선형탄성이라 가정했다. 전단면 굴착의 경우 막장전면이 0.5D(4 m)씩 진행해 가며, 벤치굴착의 경우 상단과 하단이 2.0D 차이로 0.5D씩 진행해가는 것으로 하였다.

터널굴착전 암반내에는 식(1)에 의해 계산되는 초기 응력이 작용하고 있는 것으로 가정하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \gamma z \\ \sigma_1 &= K \cdot \sigma_3, \sigma_2 = K \cdot \sigma_3 \\ \tau_{12} &= 0, \tau_{23} = 0, \tau_{31} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

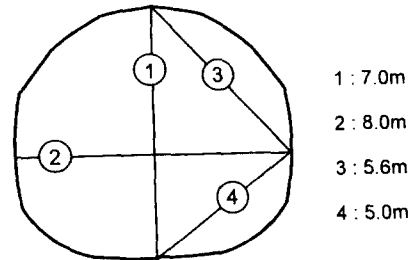


Fig. 7. Configuration of convergence measurements.

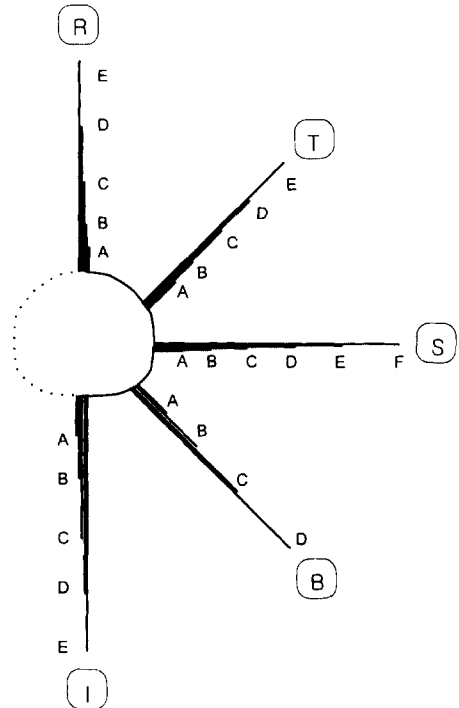


Fig. 8. Configuration of MPBX measurements.

Table 2. Depth of each measuring position (unit:m)

	A	B	C	D	E	F
Roof (R)	1.1	3.4	8.0	14.0	23.0	-
Top-right (T)	1.8	5.6	13.0	22.2	34.6	-
Side (S)	1.1	3.4	8.0	15.0	23.6	36.0
Bottom-right (B)	2.0	5.9	13.8	24.5	-	-
Invert (I)	1.4	4.3	10.0	18.0	30.0	-

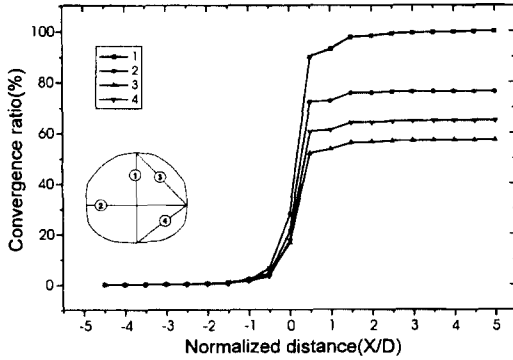


Fig. 9. Convergence ratio (full face excavation).

γ 는 암반의 단위중량을 나타내며 z 는 지표로부터의 깊이를 나타낸다. K 는 초기 수직응력에 대한 수평응력의 크기를 나타내는 측압계수이다. 본 연구에서는 K 가 1.0인 경우에 대해서만 해석을 실시하였다.

3.2 물성이 동일한 경우

모델의 전 요소를 선형탄성으로 가정하며 굴착과정은 터널부분의 요소를 순차적으로 제거함으로써 모사하였다.⁸⁾ 모델의 모든 요소에 대해 탄성계수는 $1.08 \times 10^9 \text{ Pa}$, 포아송비는 0.25, 단위중량은 2.6 g/cm^3 으로 설정했다.

3.2.1 전단면 굴착

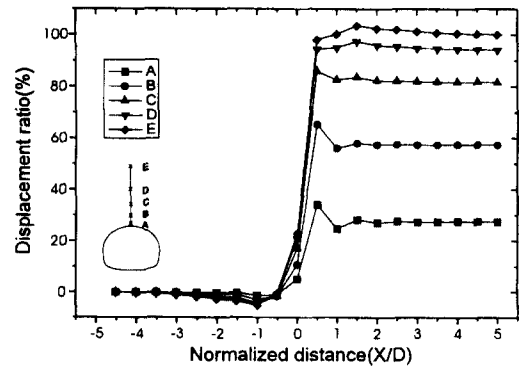
막장이 진행함에 따라 터널종방향으로의 막장지보효과 감소가 발생한다. 이로 인한 굴착력의 일부분은 변형으로 개방되고 나머지는 횡방향 아치로 전가된다.^{8,9)}

Fig. 9는 측압계수 $K=1.0$ 일 경우의 굴착단계에 따른 내공변위 곡선이다. 각 계측지점은 3.1에서 기술한 바와 같다. 그래프의 수평축은 터널단면폭에 대한 계측단면과 막장과의 거리비이다. (+)부호는 막장면이 계측점을 통과한 후를 의미하며 (-)부호는 통과하기 전의 상태를 의미한다. 수직축은 최종 수렴값에 대해서 정규화된 값이다.

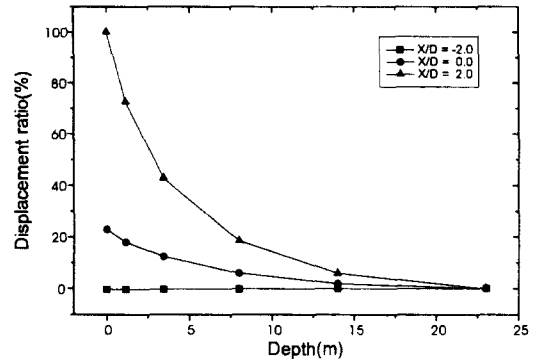
선행변위비⁸⁻¹⁰⁾(PDR=Preceding Displacement Ratio, CDR=Characteristic Displacement Ratio)는

Table 3. Preceding displacement ratio (full face excavation)

Measuring points	1	2	3	4
Preceding displacement ratio(%)	27.9	27.7	29.0	26.9



(a) Displacement vs. step



(b) Displacement vs. depth

Fig. 10. MPBX displacement ratio at roof(full face excavation).

Table 3에 요약되어 있다. 변위곡선의 형태나 선행변위비는 기존의 연구에 의한 결과와 거의 같음을 알 수 있다.⁸⁾

-2D부터 변위가 발생하기 시작해서 약 2D정도면 2차원 평면변형을 상태가 되어 변위가 수렴하는 것을 볼 수 있다. Fig. 9에서 3번의 변위가 4번보다 작게 나온 것은 터널단면형상이 상부는 원형에 가깝고 바닥면은 직선에 가깝기 때문의 3번의 경우 아치효과에 의해 4번보다 변위가 작게 나온 것으로 볼 수 있다.

Fig. 10은 지중변위중 천정(R)부분으로서 각각 해석 단계(a)와 심도(b)에 따라 도시한 것이다. 내공변위와는

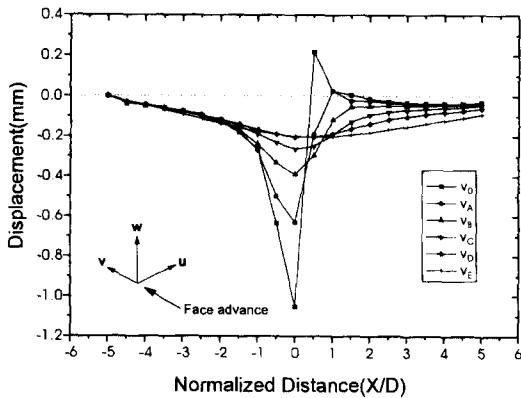


Fig. 11. Displacement of face advance direction (full face excavation and each position is labeled in Fig. 8).

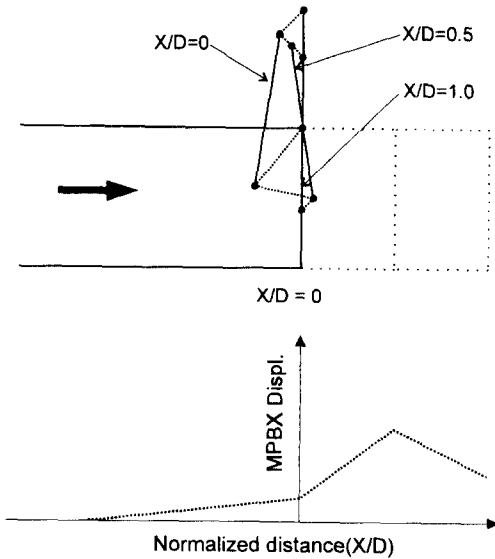


Fig. 12. Behavior of two points with respect to the face advance.

약간 다른 형태를 보임을 알 수 있다.

Fig. 10(a)에서 막장과의 거리가 1D일 경우 변위가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 두 축점간의 거리가 기준길이에 비해 줄어들음을 의미한다. 이는 터널반경방향의 변위는 실제로 계속해서 터널 안쪽으로 발생하지만 터널진행방향 변위의 영향으로 나타난 것이다. 터널진행방향의 변위를 심도별로 표시한 그래프가 Fig. 11에 있다. Fig. 12은 반경방향변위와 막장진행방향변위를 모식적으로 도시해 지중변위의 감소가 일어나는 것을 설명하는 그림이다. 이후의 모든 지중변위 그래프에서 감소하는 부분은 이와 같이 막장진행방향의 변위

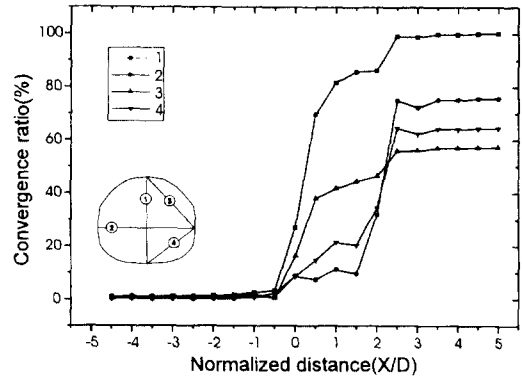


Fig. 13. Convergence ratio (bench cut).

에 의한 영향임을 확인했다. 이러한 현상은 터널단면이 원형이 아니기 때문에 일반화할 수는 없지만 각 계측점을 종합해 볼 때 터널벽면에서 최대 15 m이상 멀어지면 이러한 현상은 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다.

이차원 해석을 실시할 경우 터널진행방향의 변위는 평면변형률상태를 가정하므로 고려대상이 되지 않는다. 그러나 본 3차원유한요소해석 결과 터널진행방향의 변위가 지중변위에 영향을 미침을 확인했다.

Fig. 10(b)는 앵커의 심도에 따른 변위를 나타낸 것이다. 기준점을 심도가 제일 깊은 곳의 앵커위치로 삼았고 이로부터 각 앵커점까지의 거리에 대해 각 해석단계별로 도시했다. 이를 통해 변위의 변화율이 급격한 부분이 영향권이라고 추정할 수 있다. 15 m(약 2D)범위를 벗어나면 거의 영향이 없다고 판단해도 옳다고 볼 수 있다.

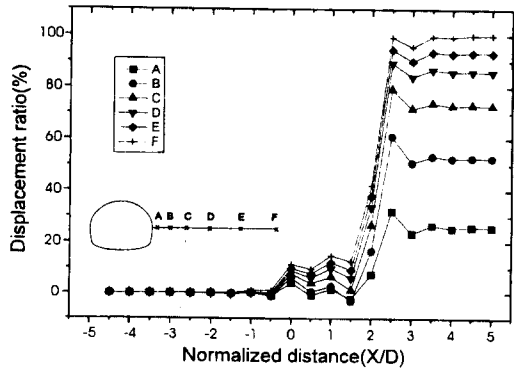
위의 결과를 종합해 볼 때 현장에서 계측을 할 경우 막장 통과 전후에 계측빈도를 늘려야 함을 알 수 있다. 1일 1회 시행하는 계측으로는 위의 사항들을 검사할 수 없을 것이다. 적어도 막장이 계측점을 통과하기 전 후에는 수동계측이라 하더라도 5회 이상 실시하는 것이 바람직하다고 본다. 자동계측으로 막장 도달전부터 계측을 한다면 가능한 한 많은 계측을 막장통과전후에 시행하여야 할 것이다. 계측단면 설정도 일회굴진량과 맞추어서 가능한 한 막장면이 계측단면과 일치해서 통과되도록 하는 것이 바람직하며 수치해석자료등과 비교할 경우 더 유용한 자료가 될 것이라 추정된다.

3.2.2 벤치굴착

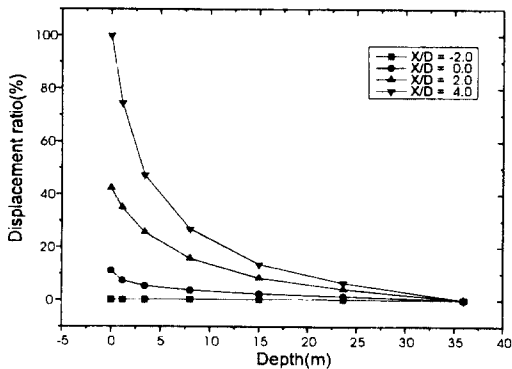
벤치굴착의 경우 하단이 상단을 2D차이로 따라간다. 이 경우 하단이 지보재 역할을 수행하기 때문에 암반이 전단면 굴착과는 다른 거동을 보인다.

Table 4. Preceding displacement ratio (bench cut)

Measuring points	1	2	3	4
PDR(%) Upper bench	26.9	11.4	28.3	13.2
Lower bench	86.1	42.1	81.2	53.7



(a) Displacement vs. step



(b) Displacement vs. depth

Fig. 14. MPBX displacement ratio at side (bench cut).

Fig. 13은 벤치굴착을 했을 경우의 내공변위이다. 2D에서 하단이 제거되므로 이 때 다시 변위가 증가함을 볼 수 있다. 계측지점 1과 3보다 2와 4가 하단에 의해 변위가 더 구속되기 때문에 하단이 굴착된 후에 급격히 변위가 증가함을 볼 수 있다. 반면 1,3 계측점은 하단에 의한 영향이 비교적 적으므로 상단굴착시 대부분의 변위가 발생함을 알 수 있다. 상단과 하단 통과시의 총변위에 대한 선행변위비가 Table 4에 정리되어 있다.

지중변위의 경우 천정(R)부분은 전단면 굴착의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 천정우측(T)부분의 경우 하단에 의한 지보효과를 약간 보여주며 측면(S), 하단우측(B), 인버트(I)는 하단에 의한 지보효과를 명확하게 보여준다.

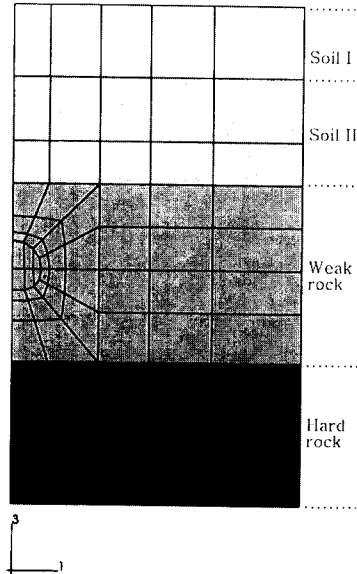


Fig. 15. Profile of the model II.

하단벤치에 의한 지보효과를 보여주는 측면, 하단우측, 인버트 부분중에서 측면의 경우가 Fig. 14에 표시되어 있다. 각 계측점 모두 하단벤치에 의한 영향을 쉽게 파악할 수 있다. 또한 심도별 변위 곡선의 경우 단계적 변화양상을 파악할 수 있다. 전단면굴착의 경우 1D이후에는 거의 수렴하는 것에 비해 벤치굴착의 경우 상단과 계측점사이의 거리가 2D일 경우 하단도 굴착되므로 이 때 다시 한 번 변위가 증가함을 볼 수 있다. 하단 역시 막장면이 계측점에서 1D이상 멀어지면 변위는 수렴하는 것이 확인되었다.

3.3 심도별로 물성이 다른 경우

천부터널 등을 굴착할 경우 심도에 따라 물성이 다른 경우가 대부분이다. Fig. 15와 같이 심도에 따라 각기 다른 물성을 부여해서 해석을 시행하였다. 각 영역의 물성치는 Table 5와 같다.⁸⁾

3.3.1 전단면 굴착

내공변위는 물성이 동일한 경우와 비교해서 변위량이 증가했을 뿐 전체 거동형태는 유사하게 나타났다. 선행변위비는 Table 6에 정리되어 있다. 내개 측점의 평균치는 28.1로서 기존의 수치해석결과와 같음을 알 수 있다.^{8,9)} 물성이 동일한 경우에 비해 1%미만으로 선행변위비가 증가했다.

지중변위의 경우 측면은 물성을 다르게 부여한 영향을 받지 않는다. 천정과 천정우측, 하단우측, 인버트는

Table 5. Properties of the model II

	Soil I	Soil II	Weak rock	Hard rock
Elastic modulus (Pa)	9.8×10^6	6.86×10^7	7.84×10^8	1.08×10^9
Poisson's ratio	0.35	0.3	0.27	0.25
Unit weight (g/cm^3)	1.7	2.1	2.3	2.6

Table 6. Preceding displacement ratio (full face excavation)

Measuring points	1	2	3	4
PDR(%)	28.2	27.9	29.3	27.1

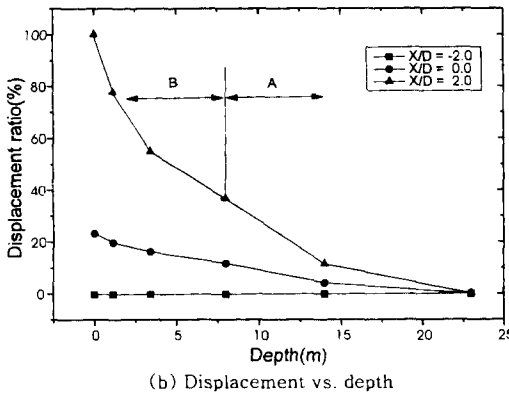
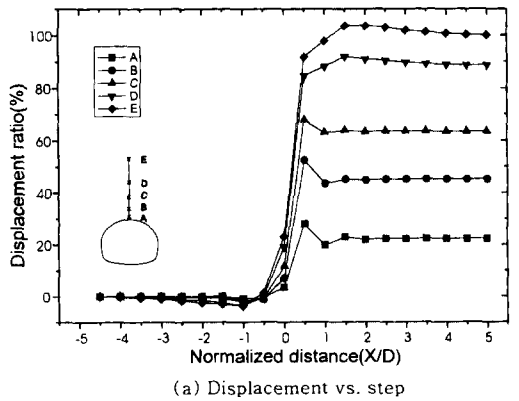


Fig. 16. MPBX displacement ratio at roof (full face excavation).

물성이 다른 영역에 걸쳐서 존재하기 때문에 다른 형태를 보인다. 이를 통해 탄성 암반의 경우 역으로 계층자료로부터 물성치가 다른 영역을 추정할 수 있다.

Fig. 16은 천정에서의 지중변위곡선이다. (a)와 (b)는 각각 해석단계와 심도에 따른 변위곡선이다. Fig. 16(a)를 보면 C와 D계측점이 상대적으로 분리가 일어

Table 7. Preceding displacement ratio (bench cut)

Measuring points	1	2	3	4
Upper bench	26.1	11.3	27.5	13.1
Lower bench	87.6	42.0	83.3	54.4

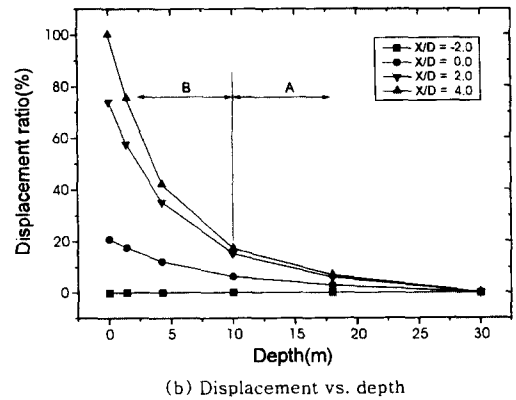
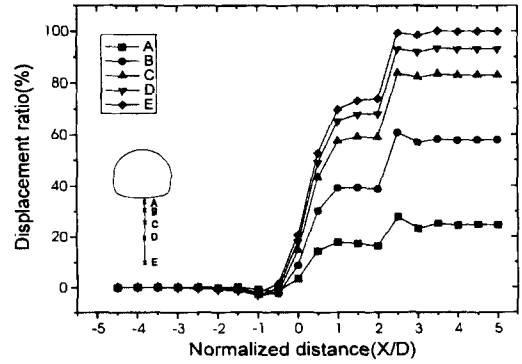


Fig. 17. MPBX displacement ratio at invert (bench cut).

난 것을 볼 수 있다. 따라서 C와 D사이에 경계면이 존재한다고 추정할 수 있다. 실제로는 C점을 기준으로 물성을 다르게 했으며 이를 유사하게 추정한 것이다. Fig. 16(b)를 살펴보면 더 명확히 추정할 수 있다. 물성이 전지역에 걸쳐 동일한 지역에 대한 해석에서는 심도별 변위곡선이 요형(凹形, concave)으로 나타났다. 이를 근거로 심도별 변위곡선을 해석하면, C점에서 D점으로 볼 때 물성이 동일하다면 우측의 화살표방향으로 이동해야 한다. 그러나 B지역보다 A지역의 물성이 취약하므로 예상보다 하향으로 나타난 것이다. 반대로 C에서 D점으로 살펴볼 때도 물성이 동일하다면 좌측 화살표방향으로 이동했어야 한다. 그러나 B지역이 A지역보다 더 양호하기 때문에 예상보다 변위가 작게 나온 것이다. 따라서 Fig. 16(a)와 (b)로부터 경계면이 C라

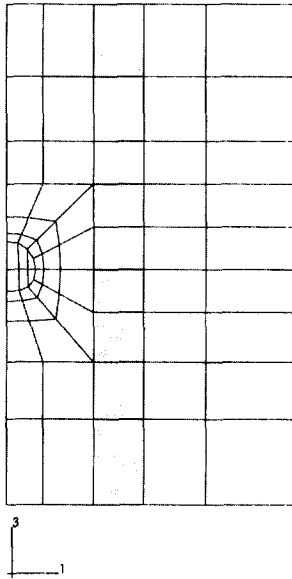


Fig. 18. Profile of the model III.

고 정확히 추정을 할 수 있다. 타 계측점에서도 동일한 결과를 보임을 알 수 있다.

그러나 위의 해석은 주관적일 수 있고 물성의 차이가 적다면 구분하기도 쉽지 않다. 따라서 변위-심도곡선의 각 측정사이의 기울기로부터 경계를 추정하였다. 3.2에서 행한 수치해석결과를 종합할 때 각 측정에서 심도가 깊어짐에 따른 기울기의 변화는 최소 31%, 최대 66.7%, 평균 43.4%, 표준편차 9.8%로 나타났다. 이 자료를 근거로 할 때 Fig. 16(b)에서 기울기의 변화율이 경계점을 기준으로 해서 105.9%로 오히려 기울기가 증가함을 알 수 있다. 따라서 이점은 경계가 된다.

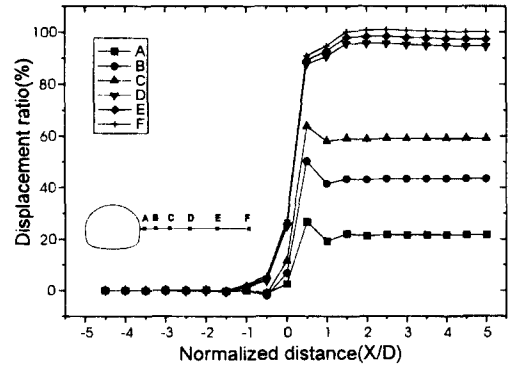
3.3.2 벤치굴착

벤치굴착의 경우 내공변위는 전단면굴착과 비교해 상당 및 하단이 계측점을 통과할 때의 선행변위비가 달라졌을 뿐 물성이 동일한 경우와 특별한 차이가 없었다. Table. 7은 벤치굴착을 수행했을 경우의 선행변위비이다.

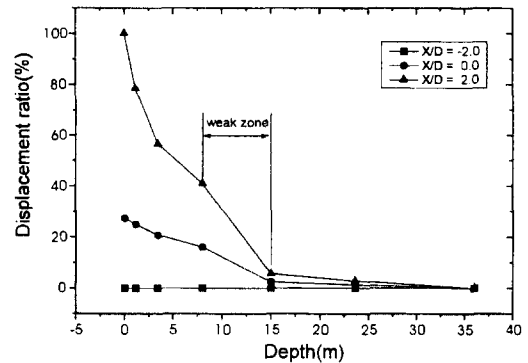
지중변위는 3.2에서 살펴본 내용과 크게 다르지 않았다. 경계추정은 3.3.1의 내용과 같았으며 천정의 경우는 명확하게 추정을 할 수 있었으나 인버트는 Fig. 17과 같이 경계가 명확하지는 않았다. 이는 연암(weak rock)과 경암(hard rock)사이의 물성차이가 soil I과 soil II 사이의 차이보다 작기 때문으로 추정된다. 그러나 기울기 변화율로 살펴보면 해당경계지점에서 29.4%로 최소값 31%보다 작음을 알 수 있다. 따라

Table 8. Properties of the model III

	Elastic modulus(Pa)	Poisson's ratio	Unit weight(g/cm ³)
Weak zone	6.86×10^7	0.3	2.1
The other	7.84×10^8	0.25	2.4



(a) Displacement vs. step



(b) Displacement vs. depth

Fig. 19. MPBX displacement ratio at side (full face excavation).

서 경계를 이 경우에도 추정할 수 있다.

3.4 연약대가 존재하는 경우

연약대가 존재할 경우의 변위거동을 파악하기 위해 Fig. 18과 같은 모델을 구성하였다. 터널 우측의 일부분을 물성이 취약한 것으로 하여 연약대를 모사 하였다. 각 영역의 물성은 Table 8에 있다.

3.4.1 전단면 굴착

천정과 우측하단, 인버트의 경우 계측점이 연약대를 통과하지 않으므로 수직연약대에 의한 영향이 거의 없었다. 반면 측면과 천정우측은 연약대를 통과하여 계측점이 존재하기 때문에 연약대에 의한 영향을 분명하게 보여주고 있다. Fig. 19는 측면의 결과로서 (a)를 보면

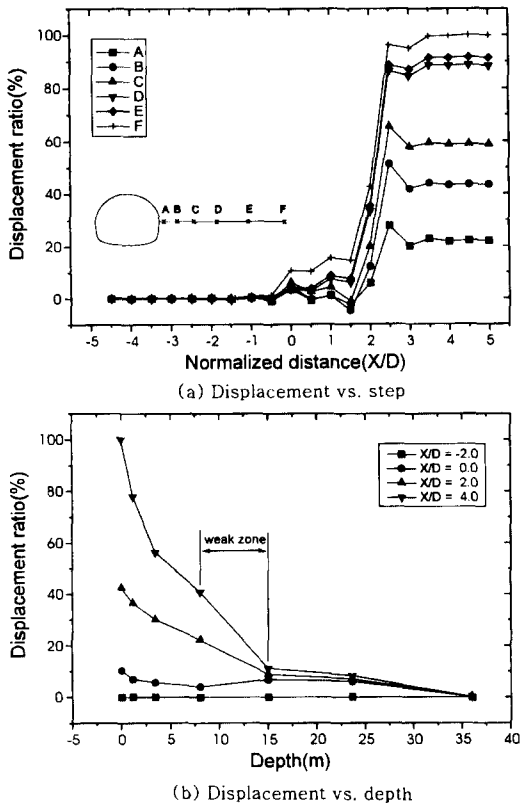


Fig. 20. MPBX displacement ratio at side (bench cut).

C와 D,E,F가 분리된 것을 볼 수 있다. 또한 막장이 계측점을 지나는 순간에서 변위가 약간 복잡한 형태로 변화함을 알 수 있다.

심도-변위곡선의 기울기변화율을 살펴보면 천정우측의 경우 경계영역에서 각각 기울기 변화가 172.9%, 4.0%로 두지점에서 물성이 동일한 경우와 다르게 나타난다. 측면의 경우에는 149.4%, 6.2%로 평균기울기 변화율에서 크게 벗어난다. 따라서 Fig. 19(b)에서 표시한 지역을 경계영역이라고 추정할 수 있다.

3.4.2 벤치 굴착

각지점에서 전단면 굴착의 경우와 유사하게 나타났다. 해석단계에 따른 변위형태는 3.2와 3.3의 벤치굴착과 유사했다.

Fig. 20은 측면에서의 변위곡선이다. Fig. 20(a)의 경우 상단굴착시 하단에 의한 지보역할의 영향으로 변위가 구속됨을 알 수 있다. 그러나 상단과 계측점과의 거리가 2D가 될 경우 하단도 제거되므로 이 때 큰 변위가 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 20(b)를 보면 3.4.1에서 다른 내용으로 연약대지

역을 추정할 수 가 있다. 변위-심도곡선의 기울기 변화율을 통해서 물성이 다른 영역을 추정하는 방법은 이상의 결과를 살펴볼 때 아주 적절한 도구가 될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

자동화를 통해 좀더 신속하고 정확하게 계측자료를 설계 및 시공에 반영하기 위하여 1차적으로 지중변위 계측자동화시스템의 제작 및 적용이 이루어졌다.

또한 지중변위의 현장지질조건과 관련한 거동을 파악하기 위해 3차원 유한요소해석을 실시하였다.

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. MPBX monitoring system의 시제품이 제작되었으며 현장적용을 통해 그 성능을 검증했으나 앞으로 많은 현장적용을 통하여 유용성 및 적용성이 확보되어야 할 것으로 사료된다.

2. 물성이 동일한 경우에 대하여, 전단면 굴착을 했을 경우, 막장이 계측점을 통과하기 전후에 터널진행방향 변위의 거동에 의한 변위감소현상이 발생했다. 이는 터널진행방향변위의 영향임을 확인하였다. 변위-심도곡선을 도시한 결과 물성이 동일한 경우 지중변위는 부드러운 요형(凹形)으로 나타났다. 각 심도에 따른 변위 변화율은 최소 31%, 최대 66.7%, 평균 43.4%, 표준편차 9.8%로 나타났다. 벤치굴착을 했을 경우, 천정지점은 전단면굴착과 유사했으나 측면과 인버트는 하단에 의한 지보역할로 상단통과시 변위가 구속되었다가 하단 통과시 급격히 변위가 증가했다.

3. 심도에 따라 물성이 다른 경우에 대하여, 전단면 굴착을 했을 경우, 물성이 동일한 경우와 유사했으나 변위가 더 크게 발생하였고 경계지역을 전후로 하여 변위의 크기가 급격히 변화였으며 변위심도곡선에서 기울기변화율을 통해 경계면을 추정할 수 있었다. 벤치굴착의 경우, 물성이 동일한 경우와 유사하게 나타났으나 인버트의 경우 두 지역의 물성차이가 Soil I과 Soil II의 차이보다 작기 때문에 경계구분은 명확하지 않았으나 기울기변화율로 비교할 경우 추정이 가능하였다.

4. 수직연약대가 있을 경우에 대하여, 연약대를 통과하는 계측점(측면)의 경우 연약대를 경계로 하여 변위가 서로 분리하는 것이 심도에 따라 물성이 다른 경우보다 더 명확하게 나타났다. 변위-심도곡선에서 기울기 변화율의 변화를 통해 경계지역을 추정할 수 있었다.

5. 본 연구에서는 탄성해석만을 실시하였으므로 앞으로 탄소성, 시간의존성 거동, 불연속체 해석, 보강의 유무 등에 따른 지중변위에 대한 연구, 이완대 추정에 대한 연구 및 현장자료와의 비교연구가 더 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김치환, 1990, 현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위 암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문
2. Dunicliff J., 1993, Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley & Sons, Inc.
3. Hanna T. H., 1985, Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, Trans Tech Publications
4. Kaiser P., 1993, Deformation Monitoring for Stability Assessment of Underground Openings, Comprehensive Rock Engineering, vol.4-II, pp. 607-629
5. 한국자원연구소, 1995, 지하공간의 암반거동 예측 Monitoring 시스템 개발 연구
6. Brown E. T., 1981, Rock Characterization Testing & Monitoring - ISRM Suggested Methods, Pergamon Press
7. ABAQUS User's Manual, Version 5.2, 1992, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.
8. 문선경, 1995, 3차원 유한요소해석을 이용한 터널 막장 주위에서의 응력재분배에 관한 연구, 서울대학교 공학석사 학위논문
9. 선경건설(주) 부설연구소, 1993, 내공변위의 분석기법 개발 연구
10. Barlow J. P. & Kaiser P. K., 1987, Interpretation of tunnel convergence measurements, 6th ISRM International Congress, pp. 787-792