

NATM 시공 산악터널에서의 암반평가시스템 적용 연구

김영근¹⁾ · 장정범²⁾ · 정한중³⁾

Application of the Evaluation System of Rock Mass in a Mountain Tunnel Constructed by NATM

Y. G. KIM, J. B. JANG and H. J. JEONG

ABSTRACT For tunneling safely and reasonably in underground, it is essential to design the support suitable to the geological conditions that could be different from the results of pre-investigation. Therefore, it is very important to evaluate the characteristics of rock mass around tunnel in excavating. But, it is very difficult to assess the quality of rock mass and an irregularity of evaluation is given rise to by difference of experience, geological knowledge and so on. Thus, it is required to establish the quantitative evaluation method for rock mass around tunnel under construction. In this study, the evaluation system of rock mass was developed using image processing technique and rock mass classification in the tunnel face, the modeling of geological structures by GeoCAD and back analysis of measurement results. The characteristics of rock mass including the mechanical parameters and rock mass quality can be evaluated using this system, and it is showed the usefulness that this system is applicable to the tunnel site constructed by NATM in a mountain.

요 약 터널은 긴 선상구조물로서 사전조사결과와 다른 지질조건이 나타날 수 있으므로, 안전하고 합리적인 터널공사를 위해서는 시공중 지질조건에 적합한 지보설계를 실시하는 것이 필수적이다. 이를 위해서는 시공중 터널주변지반에 대한 정량적이고 공학적인 평가가 매우 중요하다. 그러나 시공중 암반을 평가하는 것은 매우 어렵고 조사자의 경험과 지식의 차이에 의해 평가정도가 크게 달라져 그 불합리성이 심화되고 있는 실정으로서 터널주변암반에 대한 합리적인 평가방법이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 터널 화상처리, GeoCAD, 역해석으로 구성된 평가시스템을 개발하였다. 본 시스템은 터널막장에서 조사·시험 및 화상처리기법을 통하여 암반분류·평가를 실시하고, 터널주변 지반구조 및 굴착/지보과정의 3차원 모델링을 통하여 전방지질을 예측가능하게 하며, 터널계측자료의 역해석을 통하여 터널주변 지반의 물성을 정량적으로 평가할 수 있는 체계적이고 종합적인 평가시스템이다. 또한 이를 NATM공법으로 시공되는 터널현장에 적용함으로써 본 시스템의 현장적용성을 검증하였으며, 이를 통해 적절한 지보공을 시공하여 터널의 안정성을 확보하고 합리적인 시공관리를 달성할 수 있었다.

1. 서 론

터널은 지하에 건설되는 긴 선상구조물이란 특수성으로 인하여 사전조사에 의해 설계에 필요한 정보를 터널 전체길이에 걸쳐 정밀도 높게 구하는 것이 매우 어렵다. 그러므로 터널시공중에 막장의 지질상황을 관찰하고 그때까지의 계측결과를 포함하는 시공상황을 고려하여 적절한 실시설계를 하는 것이 중요하게 된다.

따라서 터널 시공중 주변암반에 대한 정확한 공학적 인 평가가 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 이를 위해서는 보다 객관적으로 막장지질의 상태를 조사·평가하고, 터널의 실제거동을 계측하여 그 결과로부터 터널 주변 지반의 특성을 파악할 수 있어야 한다. 즉 이러한 평

- 1) (주)대우 건설기술연구소, 선임 연구원
- 2) (주)대우 건설기술연구소, 주임 연구원
- 3) (주)대우 건설기술연구소, 토목연구실장

가결과를 바탕으로 설계의 타당성을 검증하고, 만일 문제가 있으면 설계변경하여 암반상태에 적절한 지보공을 시공함으로써 터널의 안정성을 충분히 확보하여야 한다. 또한 터널 시공에서는 급변하는 지질조건에 능동적으로 대처하여 보다 합리적인 시공을 달성하기 위해서는 종합적인 암반평가방법 및 그 결과를 feedback 할 수 있는 시스템화가 필수적이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 터널막장에서 화상처리 및 조사·시험을 통하여 체계적인 암반분류·평가를 실시하고, 터널주변 지반구조의 3차원 모델링을 통하여 전방지질을 예측가능하게 하며, 터널계측자료의 역해석(Back analysis)을 통하여 지반의 물성을 평가할 수 있는 체계적이고 종합적인 평가시스템을 개발하여 이를 터널현장에 적용함으로써 본 시스템의 현장적용성을 검증하고자 하였다.

2. 암반평가 시스템

암반평가 시스템은 터널 시공중 터널의 안정성 및 주변 암반의 공학적 특성을 보다 정확하고 종합적으로 평가하기 위한 것으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 터널화상처리, GeoCAD, 역해석으로 구성되어 있다

그림에서 보는 바와 같이 터널화상처리는 터널시공중 정량적인 암반분류기법과 터널막장의 화상처리에 의한 암반 불연속면 및 암종을 분석하여 객관적인 막장 관찰도를 작성하는 분류시스템이다. Geo-CAD는 지질구조, 지반의 횡 종단면 구조, 터널굴착과정, 지보 패턴 등을 모델링할 수 있으며, 또한 설계와 시공시 나타나는 모든 지질정보 및 시공정보를 입력하여 터널공사에 필요한 정보를 제공하고 보여주는 정보시스템이다. 역해석은 초기 설계시와는 달리 시공현장에서 발생할 수 있는 지반의 물성변화에 대해 지보재의 신속하고 합리

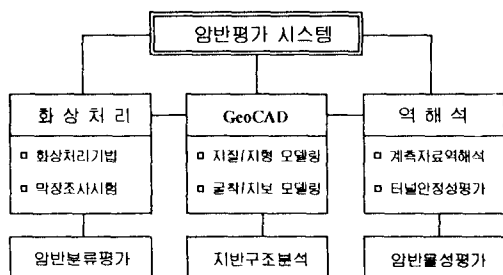


Fig. 1. 암반평가 시스템 구성도.

적인 재설계 및 터널의 안정성을 판단하기 위하여 시공중 실측한 변위와 응력으로 부터 주변 구조계를 파악할 수 있는 해석 시스템이다.

이와 같이 터널화상처리, GeoCAD, 역해석으로 구성된 암반평가시스템은 터널 시공중 막장에서의 조사·시험 결과와 계측결과를 정량적으로 평가하고, 그 결과를 시공에 적절하게 반영하여 터널의 안정성을 확보하고, 보다 합리적인 시공관리를 달성하고자 하였다.

3. 터널 화상처리

본 연구에서는 불연속면 및 암종분석을 위한 화상처리기법을 개발하고, 시공중 정량적인 암반분류기법을 적용하여 이를 시스템화 하였다.

Fig. 2는 터널화상처리의 구성을 나타낸 것으로 화상처리기법과 암반분류를 통하여 터널 막장에서 보다 객관화되고 정량적인 암반평가를 실시하여 설계암반구분과 비교하고 이를 시공에 반영하기 위한 것이다.

3.1 터널막장 조사·시험

막장관찰은 지질성상의 파악, 지보효과의 확인 및 지보재결정의 자료로 하기 위해 실시하는 것이며 터널의 설계·시공 및 계측의 기본이 되는 것으로 막장관찰을 실시할 경우 중요한 것은 터널에 있어서 어떠한 암반 거동이 예상되고 그것이 어떤 인자에 의해 지배되는가를 미리 또는 빠른 시기에 파악하는 것이며, 관찰데이터는 정확하고 객관성이 있으며 재현성을 가져야 한다.

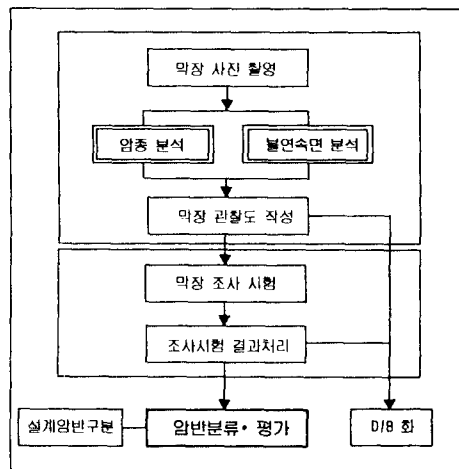


Fig. 2. 터널 화상처리 흐름 및 구성도.

터널에서의 암반분류·평가를 위한 불연속면 조사 방법은 Table 1과 같다.

표에서 보는 바와 같이 암석강도를 구하기 위해서 간 이 시험법인 슈미트 해머시험 및 접하중시험을 실시하고, 절리의 평균간격을 구하기 위해서는 조사선법(Scanline sampling method)을 이용하였으며, 절리방향은 주향/경사를 측정하여 평사투영해석을 통해 주절리방향을 구하였다. 또한 불연속면의 상태 및 지하수상태를 조사하였다.

3.2 화상처리기법

화상처리기법(Image processing technique)은 터널

Table 1. 터널막장 조사항목 및 평가

조사항목	측정방법	평가
암석강도	슈미트 해머 시험, 접하중 시험	평균값 → 등급표
불연속면 방향	Compass & Clinometer	평사투영 해석
불연속면 간격	조사선법(調査線法)	평균값 → 등급표
RQD	절리간격, 식, 도표	평균값 → 등급표
불연속면 상태	거칠기, 풍화정도, 충전물, 간극	등급표
용수상태	육안, 수압, 수량	등급표

막장을 사진기로 촬영하고 이를 스캐너로 컴퓨터에 입력하며, 이의 화상처리를 통하여 불연속면 및 암종을 구분하여 막장관찰도를 작성하는 것이다.

(1) 화상데이터 입력

터널은 지하구조물이므로 사진촬영에 필요한 빛이 상대적으로 부족하다. 따라서 적절한 광원을 인위적으로 제공해야 한다. 특히 대단면 터널에서는 여러개의 광원이 필요하므로 점보드릴의 불빛을 이용하는 것이 좋으며 가능한 많은 광원을 확보해 광량을 높여야만 한다. 그리고 터널막장을 한장의 사진에 찍는 것이 좋으나 거리가 멀어지게 되면, 사진의 선명도가 떨어지므로 대단면 터널의 경우 여러개로 분할 촬영해야한다. 이 때 촬영각도 및 거리에 의한 오차를 최소화하도록 주의를 해야한다. 촬영후 사진을 현상하여 스캐너로 컴퓨터에 입력한다.

(2) 화상처리 및 분석

스캐너를 통해 입력된 터널막장사진(Fig. 3(a))으로부터 화상처리용 S/W를 사용하여 뚜렷하게 보이는 불연속면을 추출하게 된다. 이는 Edge의 벡터화기법을 응용한 것으로 입력된 사진은 먼저 Contrast(對照)를 주고 Edge를 검출한다. 검출된 Edge는 주변 노이즈를

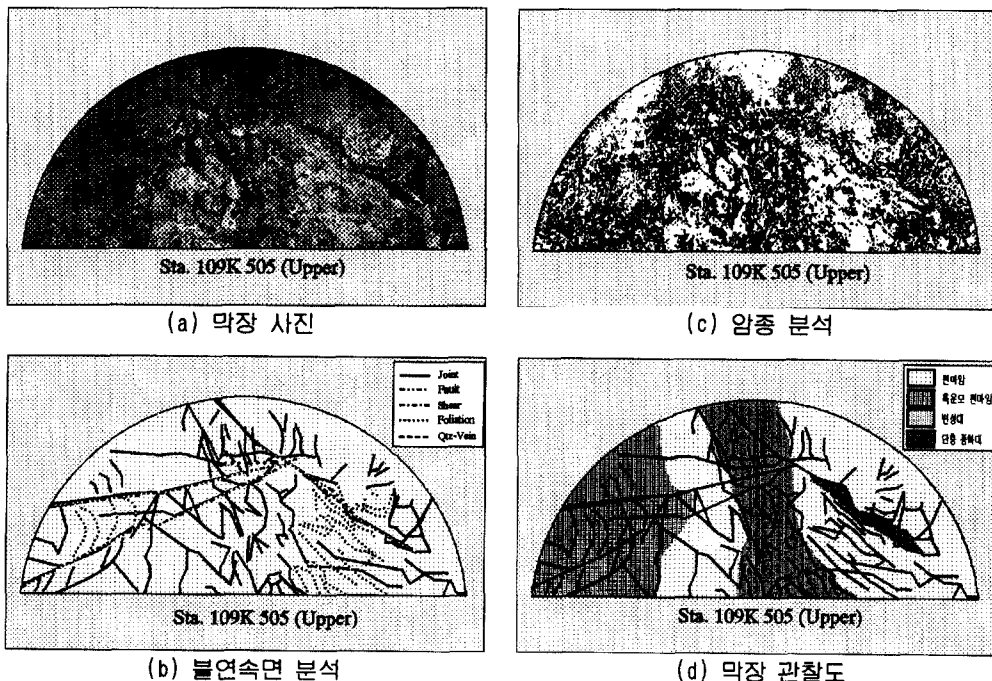


Fig. 3. 터널 막장 화상처리 결과.

제거하여 최종적으로 불연속으로 표현된다(Fig. 3(b)). 암종분석은 불연속면에 비해 농도차가 비교적 뚜렷하게 나타나기 때문에 사진에 나타난 RGB원색 신호를 색차신호로 변화시켜 0에서 360까지의 색도로 구분한다. 구분된 색도로부터 암층 및 풍화정도를 구분하게 된다(Fig. 3(c)). 불연속면과 암층 및 풍화정도 분석을 통하여 막장관찰도를 작성한다(Fig. 3(d)).

이와 같이 막장의 화상처리기법은 불연속면을 분석하고 암층과 풍화정도를 구별하는데 유효한 수단으로 사용될 수 있지만 기본적으로 공학적 판단을 소홀히 해석하는 안되며 암반분류 및 평가의 객관적인 자료로 활용

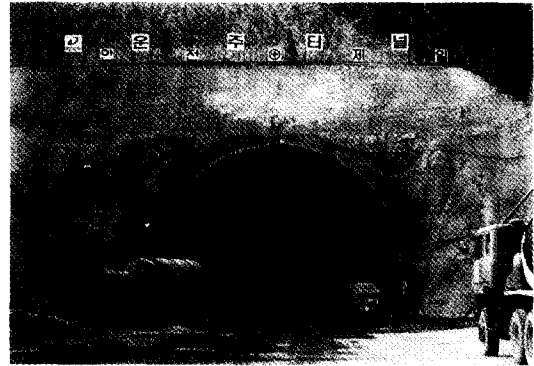
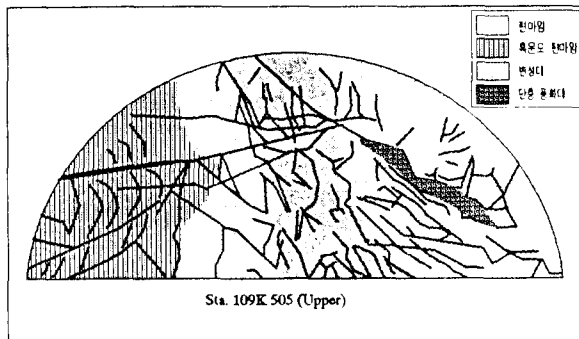


Fig. 4. 경부고속철도 운주터널.

Table 2. 터널막장에서의 암반분류 및 평가 결과

분류요소	측정값		평균값	등급	RMR	암반분류	
암석강도	반발계수	44, 48, 50, 40, 64, 45, 55, 49 34, 42, 47, 55, 38, 45	53.8	S5 (1232)	10.91		III FAIR ROCK
절리간격	수평방향 (cm)	135, 42, 99, 104, 47, 16, 26, 109 26, 78, 114, 47, 52, 73, 78, 16, 156, 161	48	Medium	7.85		
	연직방향 (cm)	54, 60, 36, 48, 90, 48, 48, 78, 18, 30, 54, 36					
RQD	절리빈도		60.9	Medium	12.07		
	Joint Set 1	6.7				19.4 Small	
	Joint Set 2	6.9					
	Joint Set 3	5.8					
절리상태	Persistence	3-10 m	Roughness 거침		17		
	Aperture	1-5 mm					
	Infilling	없음	Weathering 적당히 풍화				
지하수상태	습윤(Damp)				10	52.83	
절리방향	S50E/30, S80E/43, S50W/60, S58W/63, S40W/72 N14W/60, N30W/45, N10W/80, N22W/73, N18W/65			유리	-5		



막장 관찰도

- 불연속면
 - 우측에 Fault
 - 중앙에 Random Joint
 - 일부 Foliation
- 암 종
 - 안구상 편마암과 호상 편마암 혼재
 - 우측상부에 단층풍화대
 - 중앙에 변성대 발달

될 수 있다.

3.3 암반분류 및 평가

암반을 평가할 때는 관찰요소마다 점수를 주고 (Rating), 이의 합이나 계산에 의해 암반을 정량적으로 분류하는(Grouping) 방법을 이용한다. 본 연구에서는 RMR분류법을 적용하였는데, 이 방법은 암반을 6가지 요소, 즉 암석의 압축강도, RQD, 불연속면의 상태와 간격, 지하수 상태, 불연속면의 방향에 의해 암반을 분류하는 것이다.

본 연구에서는 RMR분류법을 적용하기 위하여 슈미트 해머 시험에 의한 암석강도 평균값과 절리간격의 평균값, 체적절리계수로부터 RQD계산, 절리상태 및 지하수 상태 그리고 절리방향에 대한 고려로부터 RMR 값을 계산하여 암반을 정량적으로 평가하였다.

3.4 현장적용

정량적인 암반분류·평가를 위한 터널 화상처리는 경부고속철도 운주터널 구간에 적용하였다. 본 터널은 NATM 공법에 의해 시공된 총 길이 4.2 km, 단면적 107 m²의 장대 산악터널이다(Fig. 4).

Table 2는 화상처리에 의한 터널 막장에서의 암반분류 및 평가 결과의 한 예이다. 이 구간은 운주터널 109K 505 지점으로 RMR 값은 52.8로 암반등급 III (Fair Rock)으로 조사되었으며, 불연속면의 분포상황은 우측에 Fault, 중앙에 Random Joint가 보이며 일부 Foliation이 나타났다. 암종은 호상편마암이 주로 분포하며, 우측상부에 단층풍화대와 중앙에 변성대가 발달되어 있음을 알 수 있다.

4. GeoCAD

지반구조 3차원 모델링 프로그램인 GeoCAD는 소형 컴퓨터 환경에서 지질구조 및 각시공 단계를 3차원적으로 구현함으로써, 시공중 지질구조를 평가하고 각 시공단계에 따른 지반의 안전성을 검토하여 적절한 굴착 및 지보형태를 신속·정확히 결정하기 위한 판단근거를 제시하고자 하는 목적으로 개발하였다.

GeoCAD는 AutoCAD 환경에서 Auto Lisp 언어를 사용하여 개발된 그래픽 프로그램으로서 Fig. 5에서 보는 바와 같이 지질구조, 터널굴착 과정, 지반의 횡단면 및 종단면 구조, Shotcrete타설 과정, Rockbolt 시공과

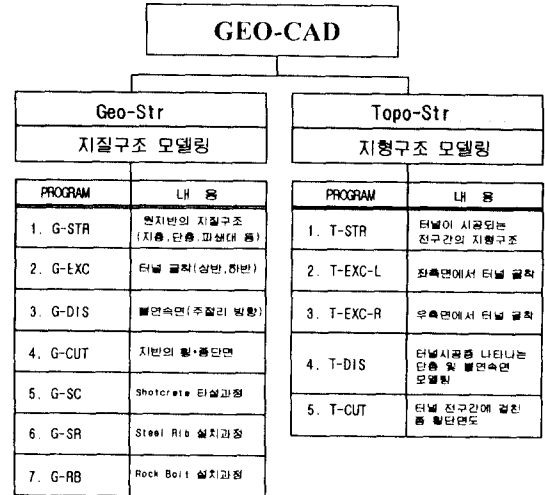


Fig. 5. GeoCAD 구성도.

정, Steel rib 설치과정 등을 보여주는 지질구조 모델링 프로그램과 터널굴착 전 구간에 걸친 지형구조, 터널시공 진척상황, 전구간 지형구조의 횡단면 및 종단면 구조 등을 보여주는 지형구조 모델링 프로그램으로 구성되어 있다.

4.1 지질구조 모델링

(1) G-STR

G-Str은 화면에 나타내고자 하는 지반의 3차원적인 범위를 지정하도록 한다. 즉, 수평방향, 수직방향, 종방향의 도시범위를 터널의 내공지름(D)의 배수로 지정하게 하므로써 간단히 터널 굴착에 따른 분석범위를 정할 수 있도록 되어있다.

G-Str은 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 네가지 지층을 나타낼 수 있도록 프로그램 되어 있다. 즉, Boring 자료를 토대로 시점과 종점의 각 지층의 깊이를 각각 입력하면, 지층구조를 3차원적으로 나타낼 수 있다.

(2) G-EXC

G-Exc는 실제 터널 굴착상황을 정확하게 나타낼 수 있도록 상·하반 분할 굴착을 표현할 수 있도록 개발되었다. 이때, 터널의 중심은 앞의 G-Str에서 구성한 지반중의 수평범위의 1/2지점, 수직범위의 상단에서 2/3지점에 위치한다.

또한, 상반과 하반의 분할지점인 Spring line은 터널의 중심점에서 터널 내공의 지름의 1/2씩 좌우로 수평선을 그었을때, 이 수평선을 터널 중심점을 기준으로 터널

상부로 8.1°씩 회전시킨 점을 연결한 선으로 정하였다.

(3) G-DIS

G-Dis는 불연속면을 모델링하기 위해 개발된 것으로서, 터널굴착에 따라 터널 막장에서 발견되는 여러가지 불연속면(절리 및 단층)을 나타낼 수 있다.

G-Dis는 터널을 굴착하면서 막장에서 발견되는 불연속면의 갯수, 각각의 두께, 횡방향 경사, 종방향 경사, 횡방향 이동거리, 종방향 이동거리 등을 조사하여 이것을 앞의 지층 모델링에 표현하였다.

(4) G-CUT

G-Cut은 어떤 특정 지점에서의 횡단면 및 종단면구조를 표현하여 그 지질 상태를 파악하기 위한 것으로, 기본 원리는 횡방향 및 종방향으로 여러개의 단면 절단이 가능하므로 연속적인 단면구조 파악이 가능하도록 프로그램되어 있다.

(5) G-SC

G-SC는 터널 내부에 Shotcrete타설을 수행한 결과를 나타내기 위한 것으로, 기본원리는 Shotcrete의 타설 시작 각도와 종결각도를 입력 받고, Shotcrete 타설 두께와 종방향 타설거리를 입력받아 타설 범위를 정한다. 또한 마찬가지로 방법으로 Tunnel lining을 표시하는 것이 가능하다.

(6) G-SR

G-SR은 터널 내부에 강지보를 설치하는 공정을 화면에 나타내기 위한 것으로, 기본원리는 강지보의 폭과 높이를 입력받아 강지보의 단면 크기를 결정하고, G-SC에서와 같이 강지보의 시작각도와 종결각도를 입력받아 강지보의 화면 표시범위를 정한다.

또한 강지보의 시작거리를 입력받아 강지보 설치의 출발점을 정한 후 강지보의 갯수 및 강지보 사이의 거리를 입력 받아, 일정한 간격으로 정해진 수 만큼 강지보를 차례대로 터널 내부에 설치해 나간다.

(7) G-RB

G-RB는 터널내부에서 지반중으로 Rockbolt를 설치하는 공정을 화면에 나타내기 위한 목적으로 개발되었으며, 기본원리로 Rockbolt의 직경과 길이를 입력받아 Cylinder형태의 Solid요소를 생성하고 Rockbolt를 지반중에 설제 도면상의 시공각도 및 위치에 설치한다.

또한, G-RB에서는 횡방향으로는 Rockbolt타입 시작 각도 및 증가각도에 따라 터널 표면으로 부터 지중에 설치되는 공정이 추가되어 있다. 즉, 횡방향 설치 Loop및 종방향 설치 Loop가 중복되어 계속적으로 지

반중에 Rockbolt를 설치해 나가게 된다.

4.2 지형구조 모델링

(1) T-STR

T-Str은 터널이 굴진되는 전지역에 걸친 종합적인 지형구조를 측량결과, 지반 보링, 물리탐사등의 자료를 기초로 사전에 개략적으로 구성하기 위한 것으로, 화면에 표시할 지형의 3차원적인 범위를 지정하고 지형 및 지질을 대표할 지점을 10점을 선정한다. 그 다음에 각각의 지점에서의 수평거리, 고도, 풍화도의 두께, 풍화암의 두께, 연암의 두께 등을 순차적으로 입력하면, 지형 및 지층구조가 3차원적으로 나타나도록 구성되어 있다.

(2) T-EXC-L & T-EXC-R

T-Exc-L과 T-Exc-R은 T-Str에서 구성한 지형 및 지질구조속으로 시점방향 및 종점방향에서 터널을 굴착하는 것을 모델링하기 위한 목적으로 개발하였으며, 실제 터널 굴착공사의 진척상황을 정확하게 표현할 수 있도록 상하반 분할굴착이 가능하다.

(3) T-DIS

T-Dis는 터널 전구간에 걸친 지형 모델에 불연속면을 표시하여, 터널 시공시 보다 안전한 공사수행을 위한 자료로 이용하기 위한 것으로, 지반조사 결과 나타난 불연속면의 수, 불연속면의 폭, 지표면에서 관찰된 불연속면의 횡방향 경사, 종방향 위치 및 경사를 입력한다.

(4) T-CUT

T-Cut는 어떤 특정 지점에서의 횡단면 및 종단면 구조를 표현하여 그 지질 상태를 파악하기 위한 것으로, 또한 횡방향 및 종방향으로 여러개의 단면 절단이 가능하므로 연속적인 단면 구조 파악이 가능하도록 프로그램되어 있다.

4.3 지반구조 3차원 모델링 예

Fig. 6에서는 GeoCAD에 의한 지반구조의 3차원 모델링 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)은 지층 및 지질 구조 모델링의 예로서 지층은 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 4가지로 표현되어 있으며, 1개의 단층이 나타나 있다. Fig. 6(b)에는 터널굴착과정의 모델링 결과로서 아치형 터널의 상하반 분할 굴착과정이 나타나 있다. Fig. 6(c)에는 터널 주변지반의 모델링 결과로서 시공중 입력된 절리 1개가 추가로 나타나 있고 시공 중인 터널 주변 지반의 전체적인 특징이 표현되어 있다. Fig. 6(d)에는 터널지보과정의 모델링 결과로서 Shotcrete, Rockbolt, Steel rib가 나타나 있다.

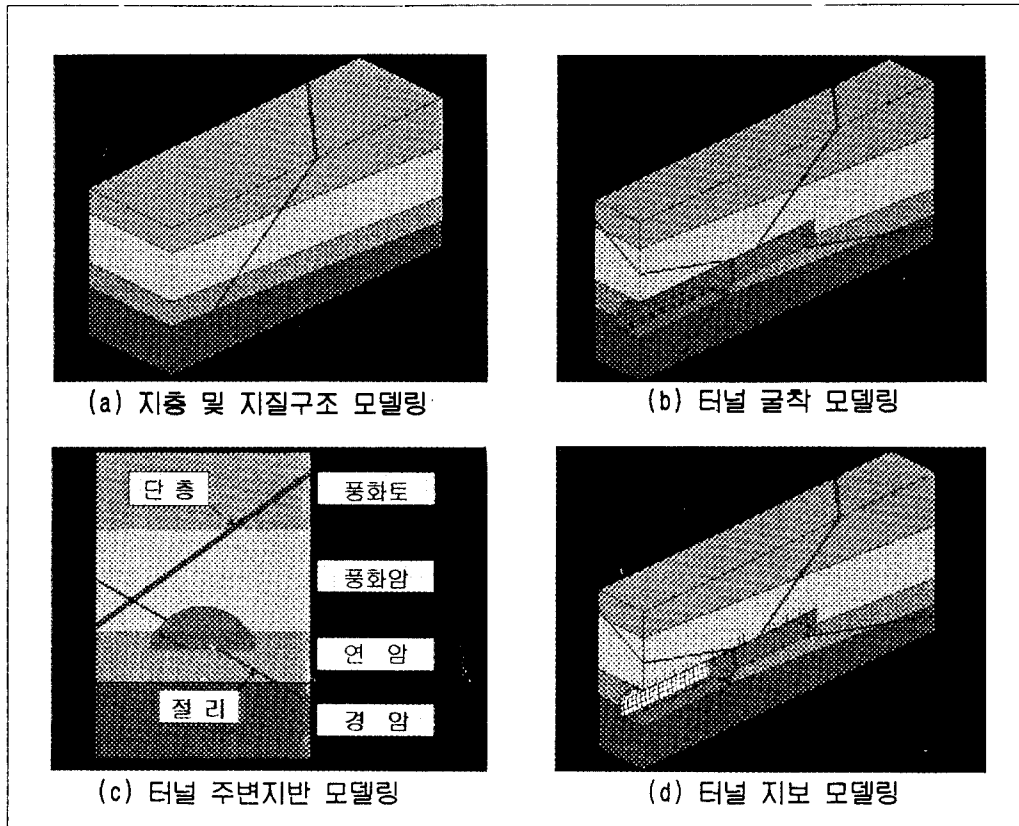


Fig. 6. GeoCAD에 의한 3차원 모델링 결과.

4.4 현장 적용

GeoCAD는 경부고속철도 운주터널에 적용하였다. Fig. 7(a)는 운주터널의 지질종단면도이며, Fig. 7(b)는 모델링 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 도심지 터널과는 달리 풍화도, 풍화암, 연암 등의 깊이가 전체 높이에 비해 매우 작게 나타났으며, 터널의 대부분이 경암지반을 통과하고 있으며, 터널 시점부와 종점부에서는 풍화도와 풍화암 지반이므로 이에 대한 적절한 보강 대책을 수립해야 할 것으로 판단된다. 또한 터널굴착방법인 상하반 분할 굴착과 NATM 지보공이 실시설계와 동일하게 입력되어 있어 터널 전구간에 걸친 굴착상황 및 지보상황을 쉽게 파악할 수 있었다.

5. 역해석

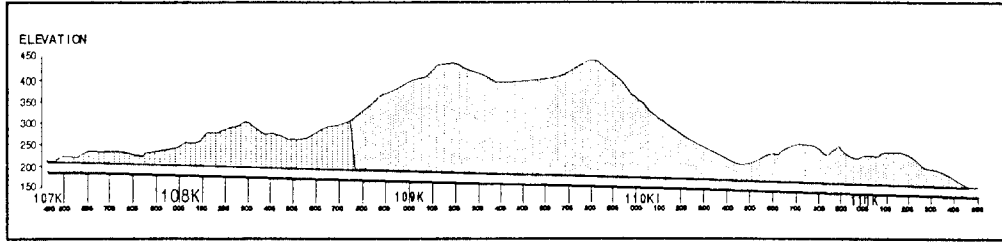
본 연구에서는 시공 중 실측한 변위로 부터 터널 주변 지반의 물성을 정량적으로 파악할 수 있는 역해석프

로그래를 개발하고 이를 터널 현장에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

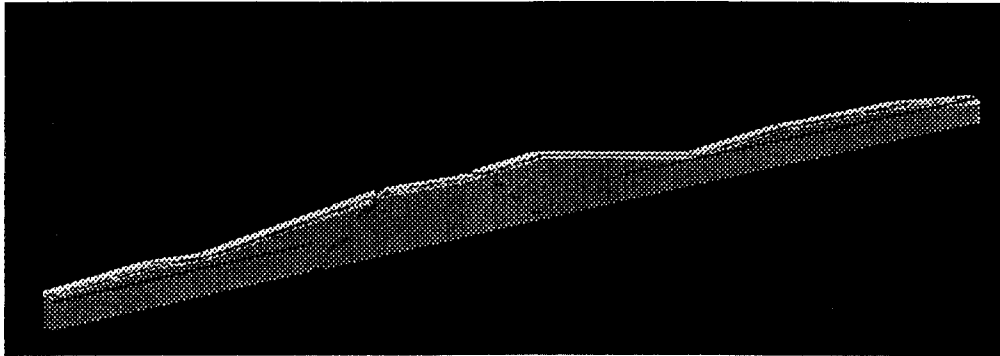
5.1 역해석 프로그램

본 연구에서는 유한차분법을 이용한 FLAC을 기본 도구로 하여, 직접법과 최적화기법을 조합한 역해석 프로그램(DWBACK)을 개발하였다. 역해석 대상으로는 터널의 거동에 큰 영향을 미치는 탄성계수(E), 점착력(c), 내부마찰각(ϕ)을 미지의 매개변수로 하였다.

Fig. 8은 역해석 프로그램의 구성도를 나타낸 것이다. 먼저, 계측변위인 천단침하나 내공변위를 입력하고 최적화 기법 및 목적함수에 대한 정보를 입력한다. 입력된 계측변위에 의하여 초기물성 산정 프로그램에서 E, c, ϕ 에 대한 초기값을 산정하게 된다. 초기값으로 회귀분석식에 의하여 계측지점에 해당하는 지점에서의 해석변위를 계산하고 입력된 최적화 기법과 목적함수의 정보에 따라 최적화 과정을 수행하게 된다. 최적화



(a) 운주터널 지질 종단면도



(b) 3차원 모델링 결과

Fig. 7. GeoCAD에 의한 운주터널 모델링 결과.

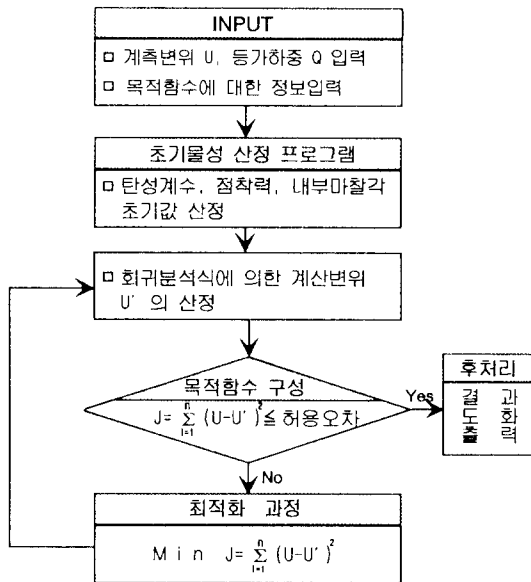


Fig. 8. 역해석 프로그램 구성도.

과정에서는 계속해서 E, c, φ값을 보정하여 목적함수의 값이 허용범위로 수렴할 때까지 반복연산과정을 계속 하게 된다. 목적함수의 값이 허용범위로 수렴하면 프로그램의 수행은 종료되고, 이 결과들을 후처리(Post

Table 3. 회귀분석에 사용된 암반물성.

분류	탄성계수 (tonf/m ²)	점착력 (tonf/m ²)	내부마찰각 (degree)	등가하중 (tonf/m)
1	25,000	12.5	35.0	0.0
2	45,000	24.0	38.0	33.0 (1D)
3	119,000	68.0	43.0	66.0 (2D)
4	324,000	194.0	48.0	-

processing)하여 도시화한다.

(1) 초기물성 산정 프로그램

본 연구에서는 역해석 프로그램에 임의의 초기값을 입력하기 보다는 계산상의 효율성과 정확성을 높이기 위하여 미지의 매개변수에 대하여 정도 높은 초기물성을 산정할 수 있는 초기물성 산정프로그램을 개발하였다.

이 프로그램은 터널 내부에서 수행되는 천단침하와 내공변위의 측정결과로부터 탄성계수, 점착력, 내부마찰각을 구하는 상관성이 높은 관계식으로 구성되어 있다. 따라서, 이러한 상관관계식을 구하기 위하여 회귀분석이 수행되었는데, 회귀분석에 사용된 지반물성 자료는 토질 및 암석물성시험자료, 지질조사보고서 및 터널 수치해석보고서를 대상으로 수집, 정리하였다. 정리

된 자료는 통계처리를 통하여 평균과 표준편차를 구한 후 Table 3과 같이 4개 그룹으로 구분하였다. 초기물성 산정식이 일반성을 가지기 위해서는 단면형태별로 회귀분석에 사용하는 매개변수가 역해석 대상외에 단위 중량, 토피 등이 식에 포함되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 단위중량과 토피의 영향을 등가하중으로 환산하여 표준모델에 적용함으로써 해석경우의 수를 줄이면서 단위중량과 토피의 영향을 효율적으로 반영하였다.

역해석 대상터널에서 수행된 계측결과로 탄성계수, 점착력, 내부마찰각에 대한 초기물성을 산정하기 위하여 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과는 범용 통계처리 프로그램을 사용하여 천단침하, 내공변위, 등가하중으로 탄성계수, 점착력, 내부마찰각을 산정할 수 있는 정도 높은 상관관계식을 구하였다.

(2) 최적화 프로그램

본 연구에서는 최적화기법을 사용하여 역해석 대상의 최적해를 구하도록 하였다. 최적화기법을 사용하는 기본적인 개념은 해석변위 u_i 가 실측변위 u_i^* 와 같아진다면 실제적인 입력자료를 해석에 사용할 수 있게 된다는 것이다. 즉, 식 (1) 과 같은 목적함수를 최소화하는 최적화기법에 의하여 실제적인 입력자료를 근사적으로 얻을 수 있다는 것이다.

$$J = \sum_{i=1}^n (u_i - u_i^*)^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (1)$$

본 연구에서 사용한 최적화 방법으로는 Steepest descent method 를 사용하였다.

본 연구에서는 역해석 과정이 반복계산에 대한 계산 시간을 줄이면서 역해석이 보다 효율적으로 수행되게 하기 위하여 지반물성과 변위의 관계에 대하여 회귀분석을 수행하였다. 즉, 식 (1)과 같은 목적함수를 구성하기 위하여 탄성계수, 점착력, 내부마찰각으로 계산변위를 산정할 수 있는 정도 높은 식을 회귀분석을 통하여 구하였다. 식 (2)는 천단침하에 대하여, 식 (3)은 내공변위에 대한 목적함수를 보여주고 있다.

$$J_1 = w_{\text{E}} \left[\frac{884543}{(1-E)} + \frac{249}{Q} - \frac{29}{C} - \frac{2220}{\text{FRI}^2} - 3.52 \right] \quad (2)$$

$$J_2 = w_{\text{Q}} \left[\frac{62811}{E} - \frac{50}{Q} - \frac{48}{(1-C)} + \frac{5006}{\text{FRI}^2} - 2.82 \right] \quad (3)$$

여기서 w_{E} , w_{Q} 은 계측변위를 나타내는 것으로 천단

침하와 내공변위이며 E 는 탄성계수, Q는 등가하중, C는 점착력, FRI는 내부마찰각을 나타낸다.

식 (2)와 식 (3)은 천단침하와 내공변위에 대한 목적함수를 나타내는 것으로 각각의 식을 하나의 목적함수로 사용할 수도 있으며, 두 식을 하나의 목적함수로 조합하여 사용할 수 있도록 하였다.

5.2 현장적용

개발된 역해석시스템의 현장적용성을 암반평가시스템이 적용된 지점을 대상으로 검토하였다. 검토 대상지점은 내공변위 및 천단침하의 계측자료가 있고, 시추조사 및 실험실 시험, 현장시험이 수행된 지점을 선정하였다. 대상지점은 Fig. 9와 같이 터널 천단부로부터 지표까지의 토피가 약 45 m이며 시추조사자료에 의한 심도별 실내실험 결과는 Table 4와 같다.

또한, 이 지점에서 상부 반단면 굴착시까지 측정된 계측변위는 Fig 10과 같다.

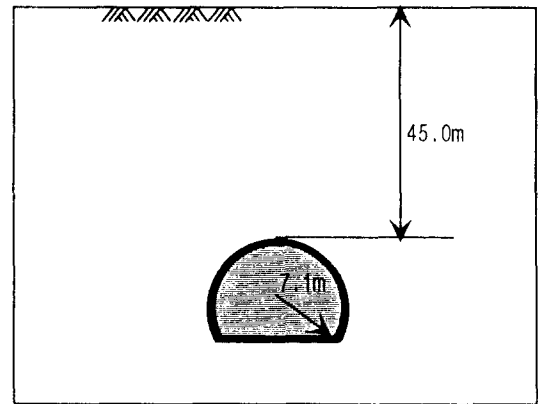


Fig. 9. 역해석 대상지점.

Table 4. 심도별 실내시험 결과

심도	분류	크기
8.5~9.0 m	탄성계수 (tonf/m ²)	2,780,000
	점착력 (tonf/m ²)	1,600
	내부마찰각 (°)	45.5
20.5~21.5 m	탄성계수 (tonf/m ²)	5,450,000
	점착력 (tonf/m ²)	2,200
	내부마찰각 (°)	49.0
29.5~30.5 m	탄성계수 (tonf/m ²)	5,210,000
	점착력 (tonf/m ²)	1,800
	내부마찰각 (°)	44.5

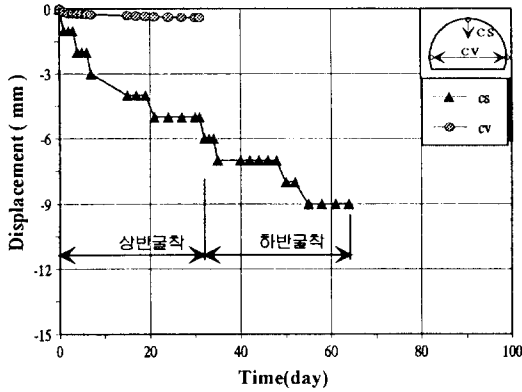


Fig. 10. 측정된 계측변위.

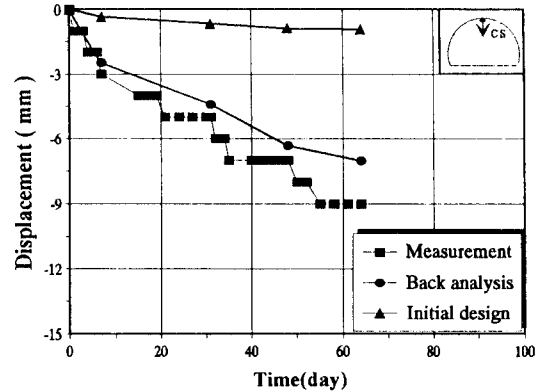


Fig. 11. 역해석지점에 대한 천단침하의 비교.

Table 5. 역해석 결과

분 류	크 기
탄성계수 (tonf/m ²)	226,000
점착력 (tonf/m ²)	89.0
내부마찰각 (°)	45.0

위 그림에서 나타난 내공변위 및 천단침하의 계측결과와 Fig. 9의 기하학적 형상에 대한 역해석 결과는 Table 5와 같다.

역해석 결과는 입력하는 계측변위 구간에 대한 지반물성의 평균적인 크기를 나타내는 것으로 시추조사자료에 의한 실내실험결과와 큰 차이를 보이나 이는 역해석 결과가 현장의 상황을 고려한 역해석 결과를 나타내는 것이기 때문에 시추조사자료에 의한 실내실험결과를 현장실험결과로 변환시켜 비교하여야 한다. 해석대상 구간은 지표에서 심도 10.0 m까지는 풍화대층이 그 하부로는 연암층, 경암층의 순서로 분포하고 있으며 경암층은 코아 회수율이 39~100%, RQD가 0~100% 정도를 나타내고 있다.

탄성계수의 경우, 실내실험치와 현장실험치의 관계는 RQD로 관계지을 수 있는데 RQD가 50% 이하의 경우는 탄성계수 감소비가 0.1 정도이며, 70% 이하의 경우는 0.2를 나타내고 있다. 따라서, 본 구간의 경암층을 현장실험치로 변환시키는 경우, 탄성계수가 최소 270,000~540,000 tonf/m²의 분포를 나타낸다고 할 수 있다. 공내재하시험 결과는 연암층의 경우가 30,000~98,000 tonf/m²의 분포로 나타났으며, 경암층의 경우는 72,000~620,000 tonf/m²의 분포를 나타내 실내실험결과와 비교할 때 작은 값을 보여주고 있는데, 이는 현장 작업시 암반에 형성되어 있는 균열, 절리 등으로 인한

영향인 것 같다.

역해석 결과를 공내재하시험 결과 및 RQD에 의한 실내실험결과와 비교할 때, 역해석 결과는 이들 값의 중간아래에 해당하는 크기이다. 이는 역해석 결과가 계측지점에 대한 지반물성의 평균적인 크기를 나타내는 값인데 반하여, 실험결과는 연암 및 경암에 대한 물성치이므로 이 구간이 풍화암에서 경암이 분포하고 있는 것을 생각할 때 역해석 결과는 타당하다고 분석된다.

점착력과 내부마찰각의 크기도 실험결과와 비교할 때, 내부마찰각의 경우는 거의 정확히 일치하는 결과를 보이고 있다. 점착력의 경우는 역해석 결과가 실내실험치에 비하여 작게 나타나는 것으로 분석되었다. 이 지점은 지질조사보고서에 따르면 RMR 분류 2등급에 해당하는 지점으로 이 등급에 해당하는 점착력은 30~40 tonf/m², 내부마찰각은 35~45° 정도를 나타내고 있다. 이 결과를 볼 때, 내부마찰각은 실내실험결과, RMR 분류에 의한 결과, 역해석 결과가 잘 일치하는 경향을 보이나 점착력의 경우는 역해석 결과가 실내실험결과와 RMR 분류에 의한 결과 사이에 분포하는 결과를 보이고 있다. 그러나, 역해석 결과에 의한 점착력의 크기도 이 구간의 평균값을 나타낸다고 생각할 때, 전반적으로 역해석 결과는 타당한 결과를 보인다.

역해석 결과를 근거로 최종 변위를 예측하기 위하여 정해석을 수행하였다. 즉, 정해석에 사용된 지반물성 중 탄성계수, 점착력, 내부마찰각은 역해석 결과를 사용하였으며 나머지 지반물성은 실내실험 결과를 근거로 하여 입력하였다. 또한 굴착단계는 대상구간의 시공 단계를 그대로 반영하여 해석하였다.

해석결과를 굴착단계에 따라 최종 굴착단계까지 계측이 수행된 터널 내부의 천단침하에 대하여 정리하면 Fig. 11과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 계측결과와 본 연구의 결과는 잘 일치하는 경향을 보이고 있어, 역해석 결과가 현장의 상황을 잘 반영하고 있음을 알 수 있으며, 또한 역해석의 목적인 터널 단면의 안정성 평가가 실질적으로 확보할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 터널시공에 있어서 합리적인 시공관리와 안전하고 경제적인 시공을 달성하기 위하여 화상처리기법, GeoCAD, 역해석프로그램을 개발하고, 이를 종합화한 암반평가시스템의 터널현장 적용을 통하여 그 유용성을 검증하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 터널막장을 사진촬영하여 이를 입력하고, 화상처리기법에 의해 불연속면 및 암층을 분석하여 막장관찰도를 작성하므로써 보다 객관적인 암반분류가 가능하였고, NATM 공법으로 시공중인 운주터널에서 암반분류·평가를 실시하고 설계암반분류와 비교하여 지보패턴 변경에 활용하였다.

2) 지질구조, 터널굴착, 지보공 설치과정 등을 구현할 수 있는 3차원 모델링 프로그램인 GeoCAD를 개발하고 이를 운주터널에 적용하여, 전방지질을 예측가능하게 하므로써 시공의 안전성을 확보하였다. 또한 터널 굴진 및 지보상황을 표시함으로써 공사진행 및 공사계획등에 종합적으로 활용가능하였다.

3) 시공 중 실측한 계측변위를 이용하여 터널주변지반의 물성변화를 파악할 수 있는 역해석 프로그램을 개발하고 이를 운주터널 현장을 대상으로 적용한 결과 탄성계수, 점착력, 내부마찰각에 대하여 합리적인 결과를 얻음으로써 본 연구결과와 현장적용성을 확인하였다.

4) 암반평가 시스템은 터널시공 중 정량적인 암반분류와 계측자료의 역해석 결과를 시공에 즉각적으로 반영하므로써 지보재의 합리적인 재설계 및 터널단면의 안정성을 판단할 수 있었으며, 또한 시공중 지질 및 지반구조를 평가하고 굴착 및 지보 등에 관한 정보를 D/B화 하므로써 터널 시공관리에 효과적으로 활용할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Hisatake, M. and Maeda, Y., 1988, "Back analysis for ground parameters in tunneling", IABSE Proceedings P-128/88, pp. 77-88.
2. Cividini, A., Jurina, L. and Gioda, G., 1981, "Some aspects of characterization problems in geomechanics", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 18, pp. 487-503.
3. Gioda G. and Sakurai, S., 1987, "Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics", Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 11, pp. 555-583.
4. Sakurai, S. and Takeuchi, K., 1983, "Back analysis of measured displacements of tunnels", Rock Mechanics and Rock Engineering, pp. 173-180.
5. Sakurai, S., 1993, "Back analysis in rock engineering", Comprehensive rock engineering - Principles, Practice & Projects, pp. 543-569.
6. Hisatake, M. and Ito, T., 1985, "Back analysis for tunnels by optimization method", 5th Int. Conference of Numerical Methods in Geomech., pp. 1301 - 1307.
7. Rao, S.S., 1977, Optimization Theory and Application, A Halsted Press Book, pp.321~350.
8. Bienawski, Z.T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, pp.51~72.
9. Priest, S.D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall, pp.25~149.
10. 吉中龍之進, 櫻井 春輔, 菊之 宏吉, 1989, 岩盤分類とその適用, 土木工學社, pp.62~89.
11. 村田 均, 岩井孝幸, 川越 健, 御手洗良夫, 1993, 画像解析による岩盤評價 システムの研究", 第25回 岩盤力學に関するシンポジウム 講演論文集, pp.1~ 5.
12. McClay, K.R., The Mapping of Geological Structures, Open University Press, pp.1~44, 1987.
13. (주)대우 건설기술연구소, 1995, 경부고속철도 제4-3공구 노반신설공사 종합계측보고서(운주터널).
14. 한국 고속철도 건설공단, 1992, 서울-부산간 경부고속철도 제4공구 실시설계기타 - 지질 조사보고서(I).
15. (주)대우 건설기술연구소, 1995, 터널 합리화 시공을 위한 암반평가시스템 연구보고서.