

GO₂-Tunnel: 터널 시공 중 디지털 Face Mapping 및 3D 지질 모델링



박정훈
넥스지오
엔지니어링 부문
사장



박성욱
넥스지오
기술연구소 소장



김광염
한국건설기술연구원
수석연구원

1. 서론

터널 시공 중 관찰되는 터널 내 지질 상태에 대한 기록과 도면화는 터널 시공 중 조사의 가장 기본적인 자료이며, 최종적인 지질 모델임에도 불구하고 그동안 국내 터널 시공 중 가장 취약한 부분으로 흔히 지적되어져 왔던 사항이기도 하다. 특히 국내에 주로 적용되고 있는 터널 공법이 굴착 중 직면하는 지반 조건에 대한 능동적 대응을 전제로 한 공법이라고 할 때, 이러한 시공 중 지질도의 중요성은 지속적으로 강조될 필요가 있다. 터널의 경우, 그 설계 내용은 일반적으로 예비 설계로 이해되어, 실제 시공 과정에서 설계 중 예측되었던 정보를 실재하는 지반 조건과 항시 대비하면서 현장에서 적절한 대응을 하는 것을 기본으로 하고 있다(홍성완 외, 2002). 터널 설계 시 예측되었던 지반 상태와 굴착 중에 터널 내 실재하는 지반 상태가 일치하지 않는 조건에서 이에 대한 적절한 조치가 수행되지 못할 경우 터널 낙반 등 지반 재해가 발생

하곤 한다(Yoon et al, 2004).

이러한 문제로 인하여 국내에서 최근 터널 시공 중 지질 조사와 평가에 대한 전산화 및 정보화 구현을 기본 목적으로 하는 연구가 활발히 진행되어 왔으며, GO₂-Tunnel 시스템은 그 연구 성과를 기반으로 개발된 상용 SW이다(유영권 외, 2007; 윤운상 외, 2004; 윤운상 외 2010). GO₂-Tunnel 시스템은 설계 단계에서 예측된 지반 조건과 시공 중 확인된 굴진면 지반 특성을 비교/분석하여 지반의 불확실성을 해소하며, 시공 중 지반정보의 효율적인 입출력과 관리 및 활용을 통하여 신속한 의사결정 뿐 아니라 운용 중 최적의 유지 관리를 위한 정보화 시스템을 구현하는 것을 목적으로 하여 개발되었다.

2. GO₂-Tunnel 시스템의 활용 프로세스

GO₂-Tunnel 시스템은 터널 설계 중 예측된 지반정보

의 효과적 활용, 시공 중 지반정보조사/평가 기술 지원 및 정보 관리를 통해 각종 공정 위해요인에 대해 신속하고 즉각적인 대처방안을 수립을 주요 목적으로 정보화된 의사결정 지원시스템이다. 그림 1과 같이 GO₂-Tunnel 시스템은 중앙 분석 서버(CS), 지오 모델링 모듈(GM), 디지털 맵핑 입출력기(MM)의 3개 모듈을 기본 시스템 구성으로 하여 터널 시공 중 필요에 따라 천공 데이터 분석기(DM), 레이저 스캐닝 굴착단면 측정기(LM) 등 2개의 모듈을 추가할 수 있도록 설계되었다.

현장 터널 기술자는 굴진면에 대한 Face Mapping과 암반 평가를 수행하는 디지털 맵핑 입출력기(MM)을 중심으로 장약 또는 보강용 천공 데이터를 이용하여 근전방의 지반 상태를 평가하는 천공 데이터 분석기(DM), 레이저 스캐닝을 이용한 굴착단면 측정기(LM)를 이용하여 자료를 획득하고 이를 중앙 데이터베이스 및 분석 서버(CS)로 전송하며, 지오모델링 모듈(GM)을 이용한 3차원 지오모델링을 통하여 현재 굴진 지반의 평가 뿐 아니라 전방의 지반 상태에 대한 예측을 수행하게 된다. 이러한 모든 정보는 다시 디지털 맵핑 입출력기(MM) 등을 통하여 현장 기술자에게 다시 제공하게 되어 급속안정화 터널시공의 기반을 구성하게 된다 (윤운상 외, 2010).

기존 터널 시공 중 지반 정보 활용 프로세스의 경우, 설계 도서의 확인과 터널 굴진면 face mapping 및 전산화 과정이 단속적으로 이루어져 그 정보화와 의사결정의 네트워크화가 이루어지기 곤란한 문제를 가지고 있다. 터널지반정보화 활용시스템의 프로세스는 터널 현장 기술자가 이미 정보화 되어 있는 터널 설계 내용을 현장에서 모바일 PC 등을 이용하여 직접 확인하고, 굴진면의 지반 상태와 비교 입출력함으로써 기술자의 정보 활용도를 높이고, 입력과 정보화 및 3차원 분석이 동시에 이루어져 합리적이며 신속한 의사결정을 지원할 수 있다.

그림 2는 현재 상용화된 GO₂-tunnel v1의 터널 지반 정보 활용화 프로세스이다. GO₂-tunnel v1은 기본 시스템 구성인 MM, GM, CS모듈로 구성되어 일반적인 터널 시공 프로세스에 적용할 수 있도록 개발되었다. GO₂-tunnel의 지반 정보 활용 프로세스는 설계 단계에서 이루어지는 모든 지반 조사 정보를 DB화 하고 이를 시추 주상도의 형태로 출력할 수 있도록 하였으며(MM/D), 이를 기초로 터널의 3차원 지반 분석(GM/D)과 각종 지반 정보와 노선 및 단면 등 터널 배치 및 설계 정보를 3차원적으로 가시화하고 임의의 지질단면도 생성(CS/D)으로 지반 조건과 설계 내용을 비교 분석할 수 있다.

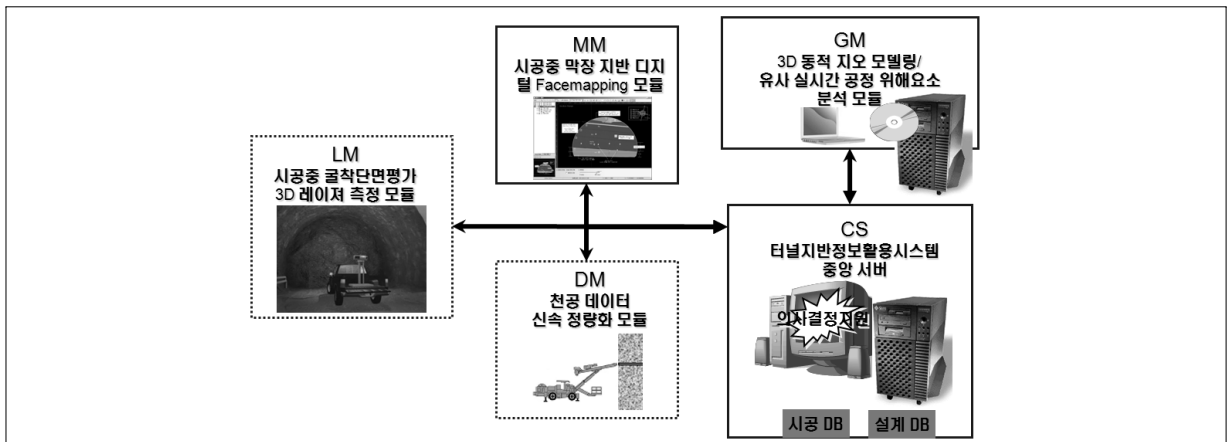
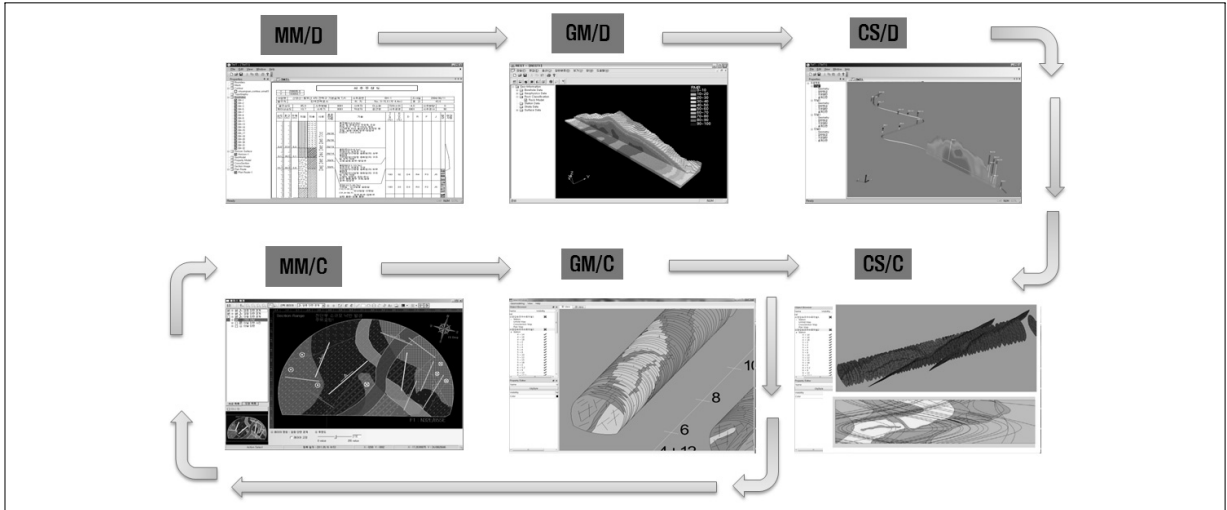


그림 1. GO₂-tunnel 시스템의 구성(실선: 기본 시스템)

그림 2. GO₂-tunnel의 터널 지반 정보 활용 프로세스

설계 단계에서부터 GO₂-tunnel을 이용하여 각종 지반 정보와 각종 설계 정보가 DB화되었다면, 이를 별도의 작업 없이 시공 현장의 기초 DB로 활용할 수 있다. 시공 중 터널 기술자는 설계 단계 구성된 GO₂-tunnel DB를 이용하여 설계 및 설계 시 지반 정보를 조회하고, 주의 구간에 대한 예경보 서비스를 제공받을 수 있으며, 터널 굴진면의 정보를 모바일 PC 등으로 직접 전산 입력 및 현장 분석하고(MM/C), 입력된 정보를 서버로 전송하므로써(CS/C), 3차원 지반 정보 분석과 모델을 구성할(GM/C) 수 있다.

3. GO₂-Tunnel의 주요 기능

3.1 설계 단계 터널 지반 정보화 활용

GO₂-tunnel의 설계 단계 터널 지반 정보화 활용 기능은 지반 정보 및 설계 정보의 입력 및 조회, 지반 및 설계 정보의 3차원 가시화 및 모델 구성으로 요약된다. 지반

및 터널 설계 정보의 입력은 터널 프로젝트정보, 터널정보, 설계지반정보 등의 기본 입출력 기능, 입력된 자료를 이용한 시추주상도 출력, 종단면도 출력 등 리포팅 기능, 지형도 등의 도면, 시추자료를 활용한 지층모델 생성 및 3차원 지반 등급 산정 등 지반정보 3차원 가시화 기능을 구현하였다.

3.1.1 터널 설계 구조물 정보 입출력

사용자는 구조물 정보 입출력 기능을 이용하여 노선의 평면 및 고도정보를 입력, 수정, 삭제할 수 있으며, CAD 파일 불러오기 또는 직접 입력으로 터널 단면을 입력, 수정, 삭제할 수 있다. 입력된 노선정보와 단면 정보는 3D 터널모델로 구성되어 터널 가시화 및 스테이션 계산, 종단면도 생성과 같은 기하학적 연산에 이용된다. 터널 노선정보 입력모듈을 통해 구성된 터널모델로부터 스테이션을 생성할 수 있다. 사용자는 스테이션간격을 설정함으로써 스테이션 기준점을 설정하게 되며 스테이션기준 표현, 시점으로부터의 거리 표현, X,Y,Z 절대좌표 표현법 간의 상호변환을 수행할 수 있다(그림 3).

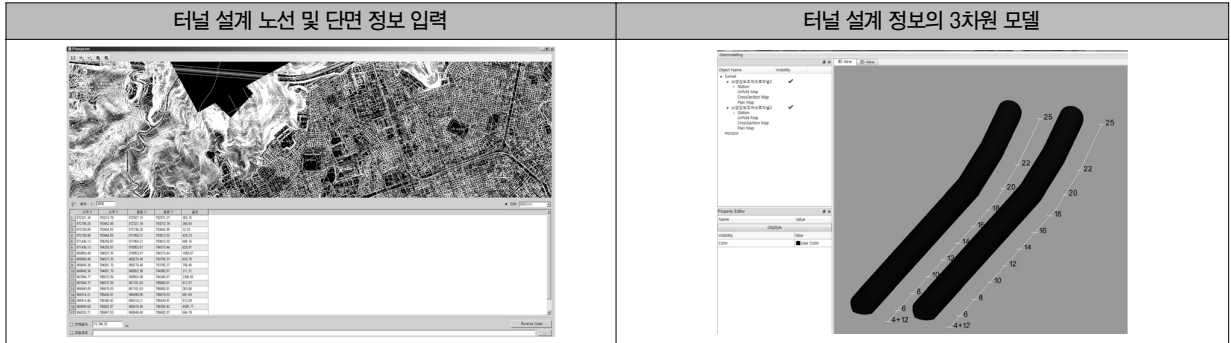
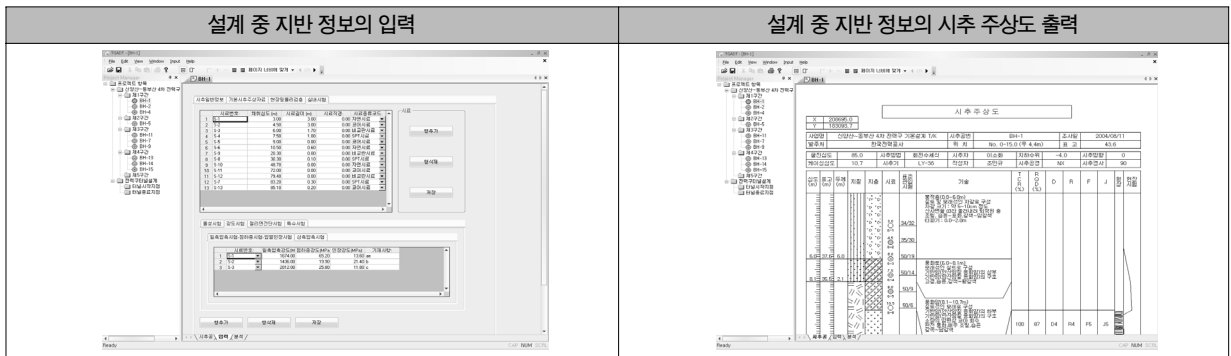
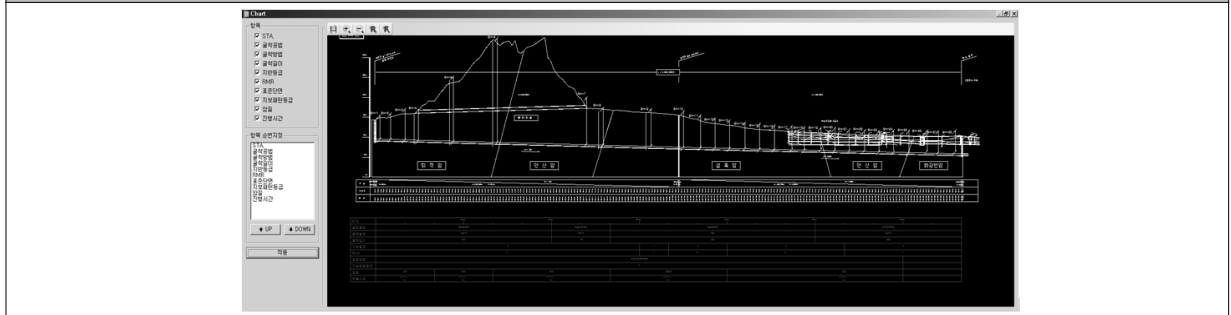


그림 3. GO₂-tunnel: 설계 중 터널 정보 관리 모듈



설계 중 지반 정보관리



설계 중 지반 정보의 종합 분석

높은	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350	2400	2450	2500
암석 종류	화강암		편마암		사암		규암		편마암		역암		석회암																																					
ROD	23			36			55			69			81			91																																		
위성영상	L3N03E			L4N04E			R3			R4.S1			R5.S2			R6.S3																																		
물리탐사	R1		R2		R3		R4.S1		R5.S2		R6.S3		R7		R8																																			
지표지질	F5				F6(폭3m 변질대)								F7				F8																																	
시추코어	D1		D2(폭3m)		D3(폭7m)		D4,D5,D6(폭1~2m)				D7(폭0.5m)																																							
RMR	11		16		29		36		66		57		39		41		53																																	

그림 4. GO₂-tunnel: 설계 중 지반 정보 관리

3.1.2 터널 설계 지반 정보 입출력 및 3차원 정보 관리

사용자는 터널 설계 지반 정보 입출력 기능을 통하여, 설계 중 이루어지는 지표지질조사, 시추 조사, 물리 탐사 및 각종 실내, 현장 시험의 정보를 입력, 수정, 삭제할 수 있다. 입력된 지반 정보는 설계 정보와 연계되어 DB로 구축되며, 필요한 정보는 각종 검색 조건에 의해 추출 분석할 수 있고, 시추 주상도의 형태로 출력할 수 있다(윤운상 외, 2004). 아울러 터널 설계 정보와 연계하여 노선에 해당하는 지반 상태를 별도의 표로 출력할 수 있다(그림 4). 입력된 지반 정보는 각 시추공 단위의 RMR 등 암반 평가와 3차원 암반 평가에 활용되며, DB로 구축된 터널 설계 정보 및 지반 정보는 3차원 모델 구성을 통한 가시화 또는 임의의 지층 단면 구성이 가능하다(그림 5).

3.2 시공 단계 터널 지반 정보화 활용

GO₂-tunnel의 시공 단계 터널 지반 정보화 활용 기능은 설계 지반 정보의 조회 및 예정보, 시공 중 터널 지반 정보의 현장 입력 및 평가, 시공 중 터널 3차원 지질 모델 구성 및 예측으로 요약된다. 지반 및 터널 설계 정보의 조회와 예정보는 현장 기술자가 굴진면에서 또는 수시로 가능토록 하고, 조회된 설계 정보와 굴진면의 지반 상태를 비교하면서 굴진면 지질도와 암반 평가를 현장에서 직접 전산 입력하고, 이를 토대로 터널 지반 정보의 3차원 가시화와 근전방 지반 상태의 예측이 가능토록 구현하였다.

3.2.1 터널 시공 중 지반 정보 입출력

터널 시공 현장의 기술자는 시공현장에서 모바일 PC 등을 사용하여 설계정보를 조회할 수 있다. 프로젝트명,

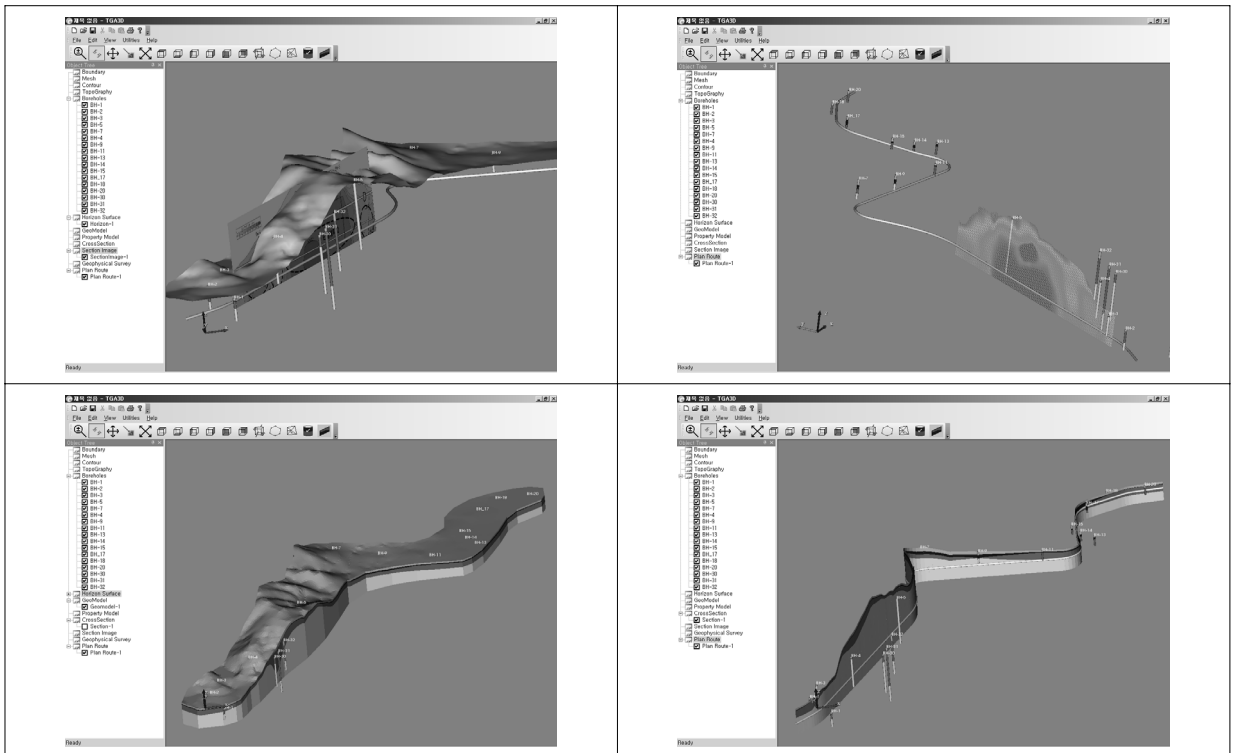


그림 5. GO₂-tunnel: 설계지반정보 3D 가시화, 슬리드 모델 구성, 임의 단면 작성

신기술 신공법

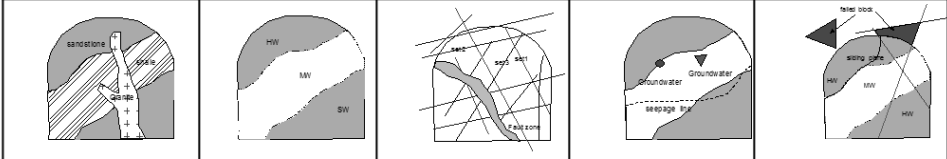
주요 기능	주요 내용
1. 굴진면 정의	- 입력항목: 위치, 굴착방향, 지질, 심도, 조사일시, 조사자, 검수자
2. 굴진면 맵핑 및 조사	- 기 구축 터널단면정보 활용 - Graphic Editor 기능 (Polygon, Polyline, Symbol 등) - 도형정보에 속성 부여 (암종, 절리군의 방향/길이, 기재사향 등) ※ 사용자 편의성, 분석에 직접적으로 활용될 수 있도록 드로잉 시 오류 검출
	
3. 굴진면 암반분류	- 비전문적 현장 기술자들도 쉽게 사용할 수 있는 인터페이스 및 참고자료 제공
4. 지보 설계 정보 입력	- 설계정보와 시공 중 RMR정보를 비교함으로써 지보등급 결정 - 지보패턴 설계변경 시 변경사향을 입력

그림 6. 모바일 터널 굴진면 평가시스템의 주요 기능

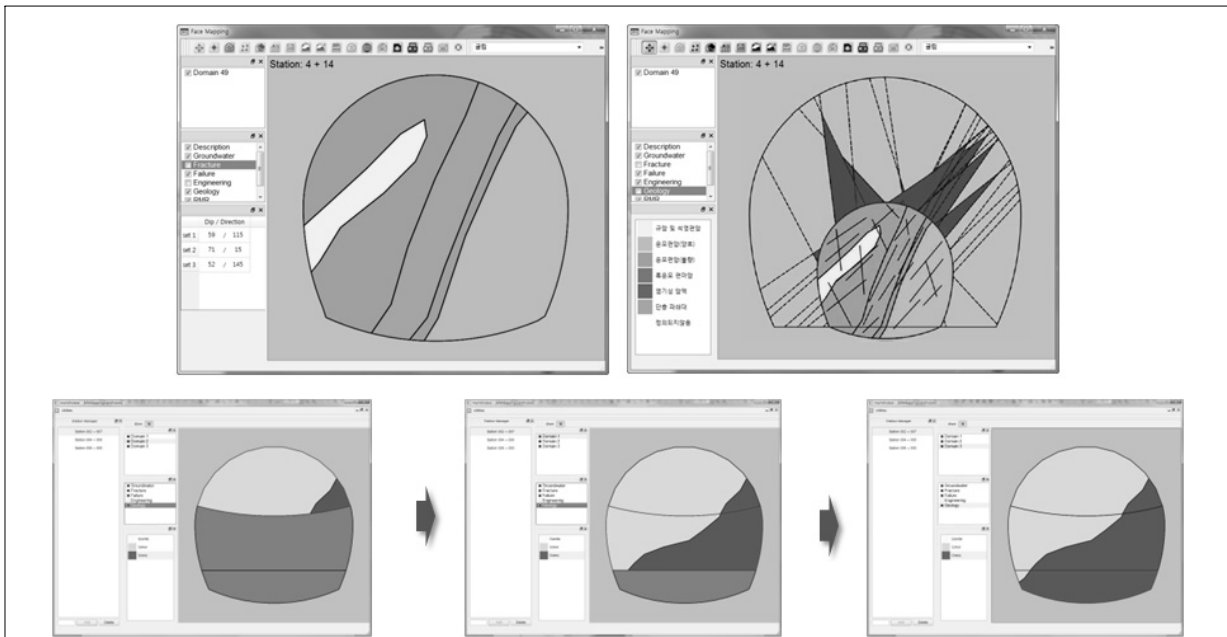


그림 7. GO₂-tunnel: 터널 시공 중 굴진면 지질도 작성 및 평가

터널, station정보를 입력하면 해당 지점의 설계단계에서 수행한 지반조사 자료 정보, 지반등급평가 정보 등의 지질/지반 정보와 표준단면, 지보패턴설계 등 터널 제원 및 지보재 정보가 출력되며, 설계 중 예측된 불량 지반이 근접할 경우, 이에 대한 예 경고 알림 기능이 포함된다. 또한 터널 시공 현장의 기술자는 시공현장에서 모바일 PC

또는 PC등을 사용하여 그림 7과 같이 설계정보의 조회와 굴진면의 지질 및 지반 상태 등을 입출력할 수 있다.

특히 현장기술자는 터널 굴진면 조사에 앞서 기 구축된 설계지반정보 및 터널설계정보를 모바일 시스템을 통해 조회하게 된다. 사전정보 조회 후 현장기술자는 스테이션 정보, 굴착방향, 심도, 조사일시 등 굴진면 일반정보를 입

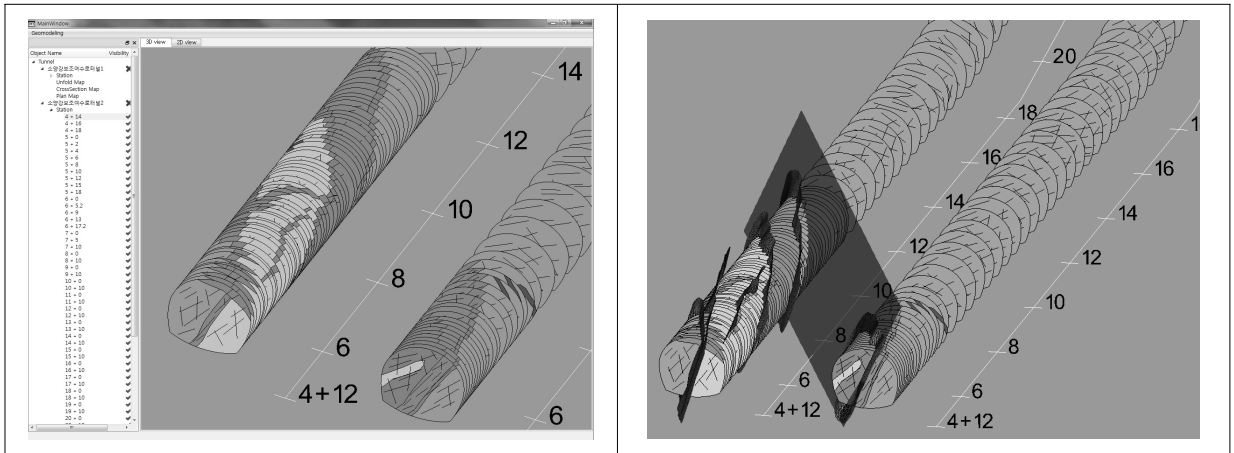


그림 8. GO₂-tunnel: 굴진면 지질 정보의 3차원 가시화 및 분석

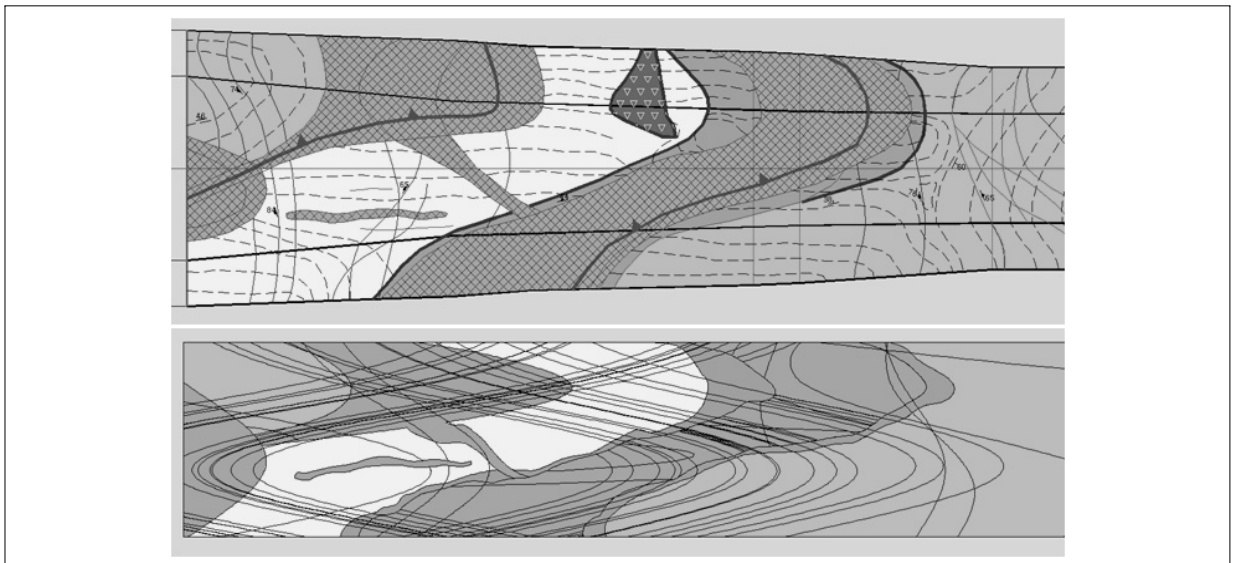


그림 9. 터널 시공 중 지질전개도 작성

력하게 되며 RMR 평가나 암종, 암질, 절리 및 단층과 같은 불연속면, 지하수상태, 파괴징후정보를 입력하게 된다. 아울러 현장 지반 정보를 효과적으로 관리하기 위해 분할 굴착 시 선 굴착 지반 정보와 연계된 분할 굴착면 굴진면 지질도 작성 기능과 암종 또는 암질 등 다양한 지반 분류 조건에 따라 동일 굴진면에서 굴착 단계에 따른 굴진면 지질도 작성이 가능토록 구현하였다(그림 7).

3.2.2 터널 시공 중 3차원 지반 정보 분석

터널 시공 현장의 기술자가 작성한 굴진면 매핑자료와 RMR 등 암반 평가 자료는 서버로 전송되어 즉시 터널노선정보를 활용한 좌표계 변환과정을 통해 3D로 가시화된다(그림 8). 사용자는 객체관리창의 on/off기능을 통해 스테이션별 굴진면 매핑자료의 가시화상태를 제어할 수 있으며, 스테이션별 굴진면 정보는 폴리곤과 폴리라인으

로 구성되며 지질경계선을 연결하여 지층면을 제작할 수 있다. 또한 지층 및 단층면에 대해 평면을 제작할 수 있으며 평면내에 정의 u, v좌표축의 법선벡터에 대해 회전각, u, v 방향별 평면의 크기를 정의하여 평면의 연장정도를 수정할 수 있다. 특히 각 굴진면의 지층을 연결하여 3차원 솔리드 모델을 구성할 수 있으며, 구성된 솔리드 모델은 터널 지질 전개도 등 도면 작성에 활용할 수 있다.

구성된 3차원 터널 지질 모델을 이용하여 터널 기술자는 지질 평면도 및 종단면도 뿐 아니라, 터널 지질전개도를 작성할 수 있다. 특히 곡면으로 이루어진 터널 벽면의 지질 상태를 기록하는 터널 지질 전개도는 그 활용도가 높음에도 불구하고 작도법의 어려움으로 완전지질전개도 제작하기 어려웠던 점을 해소하였다(유영권 외, 2009). 그림 9는 그림 8의 사례에서 수작업을 통하여 작성한 터널 지질전개도(상)과 터널 시공 중 지질도의 정보화 작성

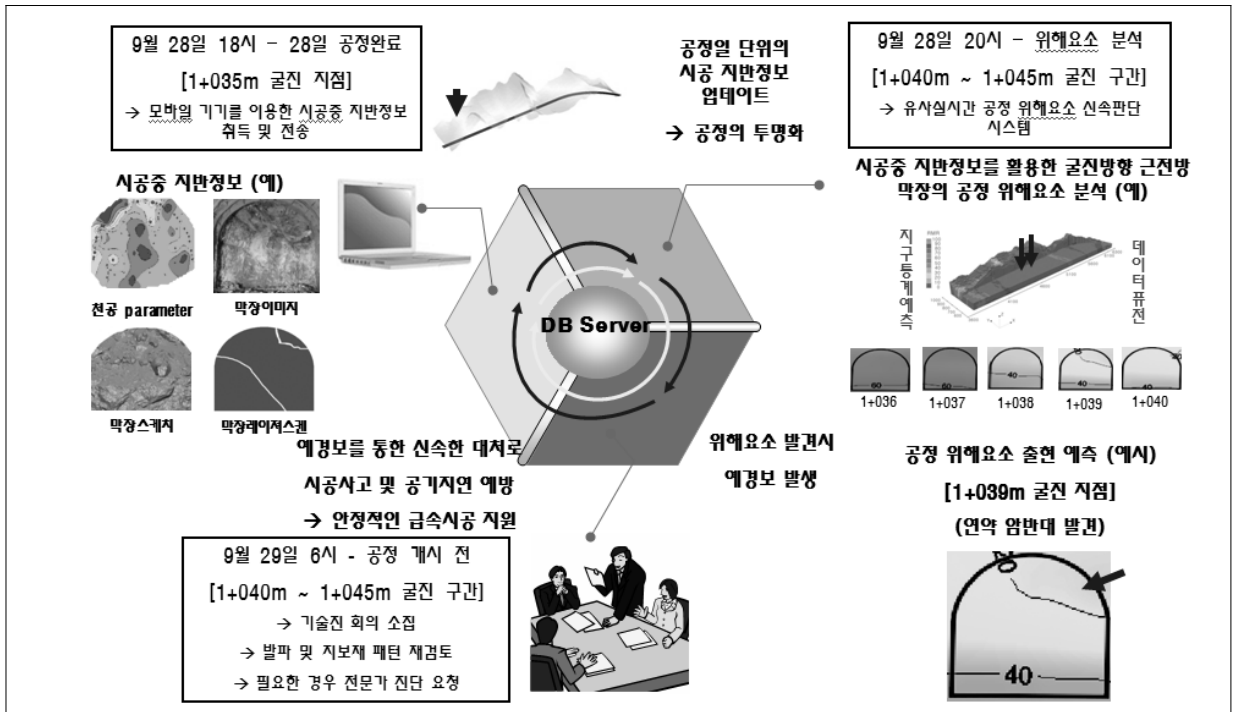


그림 10. 터널 지반정보화 활용시스템을 이용한 공정위험요소 진단 및 의사결정 프로세스

시스템을 이용하여 생성한 터널 지질전개도(하)를 비교한 것이다.

4. 맺음말

터널 시공 중 획득되는 다양한 정보를 모바일 기기를 통해 현장에서 실시간 처리하고, 이를 3차원으로 가시화하여 분석하고 진단하는 모바일-서버 기반 시스템은 터널의 정보화를 위한 발전에 중요한 기여를 할 수 있다. 모든 터널 시공 중 자료를 실시간으로 디지털 정보화하고 3차원으로 가시화하게 되어 자료 관리 및 분석 처리에 있어서 기여할 뿐 아니라, 설계 변경요인이 발생시, 3차원 모델과 네트워크를 통한 효율적인 의사결정 시스템을 통해 신속하고 정확한 의견수렴이 가능할 것으로 기대된다.

모바일 설계자동화 시스템에 의한 효과적인 지반 정보의 관리 및 유통이 실시될 경우, 설계와 시공단계의 정보 교환, 시공 중 정확한 의사 소통과 결정 프로세스가 구현되어 터널 현장에서의 지반 사고의 방지와 전체 공기 단축 및 예산 절감에 큰 역할을 할 수 있을 것이다. 특히 GO₂-tunnel로 정보화 된 터널 굴착 중 지반 정보는 터널 구조물의 준공 후 유지 관리 상의 중요한 자료로 활용될

수 있을 것으로 기대한다. 그림 10은 GO₂-tunnel과 같은 터널 지반 정보화 활용 시스템의 현장 정착 조건에서 터널 공정상 위해요인의 신속한 판단 및 의사 결정 프로세스를 통해 터널의 안전 급속 시공을 이루어 내는 시나리오의 하나로서 앞으로 가까운 시일 내 이와 같은 프로세스가 정착되길 희망한다.

참고문헌

1. 유영권, 윤운상, 김영근, 김창용, 배규진 (2009), 수로 터널의 시공 중 터널지질도 작성 사례 연구, 한국터널공학회 학술발표회 논문집.
2. 윤운상 외 (2004) 터널 최적설계를 위한 지반상태 분석 및 예측 기술 개발 보고서. 한국전력 중소기업 협력과제
3. 윤운상 외 (2010) 급속안정화 터널시공을 위한 IT 접목형 지반 특성조사/분석 기술 개발 최종보고서, p217. 국토해양부 첨단 도시개발 사업 'IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널시공기술 개발 (연구단장: 배규진)' 중 제1세부과제
4. 홍성완, 배규진, 서용석, 김창용, 김광영 (2002) "지반조사정보의 3차원 가시화 시스템 개발," 지질공학, Vol. 12, No. 2, pp. 179-187.
5. Yoon, W.S, Jeong, U., Han, B.H., Shin, K.H., Lee, S.S. & Kim, Y.K., (2007) 3D geo-modeling for spillway tunnel construction in the complex fault region., Proc. 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress, V1, p 279-282.