

터널 시공중 굴착면 지질정보 디지털화 및 3D 가시화

권영주¹ · 이 청¹ · 김진웅¹ · 김광염^{2*} · 임성빈² · 최재원³

¹한국도로공사 호천-양양 건설사업단, ²한국건설기술연구원 지반연구실, ³(주)넥스지오 엔지니어링사업부

Digital Mapping and 3D Visualization of Tunnel Face Information under Construction

Young-Ju Kwon¹, Cheong Lee¹, Jin-Woung Kim¹, Kwang-Yeom Kim^{2*}, Sung-Bin Yim² and Jai-Won Choi³

¹Hongcheon-Yangyang Construction Office, Korea Expressway Corporation

²Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Div., Korea Institute of Construction Technology

³Engineering Part., NEXGEO Inc.

In this study, a tunnel information database system was developed to optimize the process of assessing and analyzing geological information from the life cycle of tunnel construction. All data from every stage in tunnel construction can be put into the system and be utilized for the decision making. In the system, tunnel face mapping information can be managed by digital format which can be easily transformed into 3D visualization module and thus help analyzing geological discontinuities. The system was applied to waterway and road tunnel in domestic area to verify its effectiveness.

Key words : face mapping, 3D geomodeling, tunnel geological data, 3D visualization, network system

본 연구에서는 터널의 시공 중 굴착면을 통해 획득되어지는 지질정보의 분석과 평가의 객관화를 위해 디지털 매핑 데이터베이스 시스템을 개발하였다. 지질조사 정보와 설계단계에서의 다양한 정보를 데이터베이스화 하고 이를 시공 중 조회하여 활용할 수 있도록 하였다. 시공 중에 굴착면의 평가를 디지털 이미지 기반으로 관리할 수 있도록 하였다. 또한, 3차원 가시화 모듈을 통해 불연속면 정보 등의 분석 및 평가에 활용 할 수 있도록 하였다. 개발된 시스템은 실제 시공 중인 수로 터널 및 고속도로 터널 현장에 적용함으로써 효율성을 확인하였다.

주요어 : 굴착면 관찰, 3차원 지질모델링, 터널 지질정보, 3D 가시화, 네트워크 시스템

1. 서 론

첨단 탐사장비 및 조사기법을 활용해 지질조사와 탐사의 정확도와 정밀도를 높이려는 최근의 노력에도 불구하고, 지하압반에 대한 직접적인 조사의 한계성으로 인해 구조물 설계단계에서의 지질조사 결과는 여전히 불확실성을 안고 있으며, 따라서 시공 중 지속적으로 취득되는 지질정보를 통해 불확실성을 제거해 나가야 한다. 특히, 터널설계를 위한 지질조사는 터널 구조물의 특성상 폭이 좁고 연장이 긴 영역을 대상으로 실시

되어, 조사 영역내의 지질학적·지반공학적 변화양상을 연속적으로 파악하기가 쉽지 않다. 또한, 조사 영역이 대부분 험준한 산악지형으로 이루어져 있으므로 지형적 제약이 크게 작용하는 조사방법은 배제되면서 원할한 지질조사가 이루어지기 어렵다. 따라서 터널구조물의 경우 터널 내부의 지반상태를 직접적으로 확인할 수 있는 시공단계에서의 지질조사에 대한 중요성이 더욱 강조된다.

우리나라의 도로 및 철도터널에서 주로 시공되는 NATM 터널은 시공과 동시에 수행되는 지질조사 결과

*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

의 활용을 극대화한 공법이며, 취득된 지질정보를 얼마나 체계적으로 관리하고 활용하는가에 따라 공사의 효율성과 안정성이 좌우된다고 할 수 있다. 터널 굴착면 지질조사(face mapping)는 시공 중 이루어지는 지질조사의 핵심이며, 지질 전문가에 의해 정확하고 신속하게 수행되어 시공에 반영되어야 한다.

그러나 국내의 터널현장에서 수행되고 있는 터널 굴착면 관찰은 지질기술자 개인의 능력 및 경험상의 문제, 시간적인 제약 등으로 인하여 여러 가지 지질정보가 누락된 채, 단순히 RMR 등급만으로 지보패턴을 결정하는 등 형식적이고 획일적으로 이루어지고 있으며, 조사결과를 시공에 적절하게 반영하지 못하는 것이 현실이다. 이에 대한 개선방안으로, 객관적이고 정량적인 굴착면 관찰을 위하여 관찰 기록지의 각 항목을 세분화하고 정량적인 표현이 필요한 항목에 대해서는 기준을 구체적으로 제시하여 객관적으로 기재하도록 유도하거나, 디지털영상촬영 및 분석기술과 같은 IT기술을 터널분야에 적용하는 등의 대안이 제시되기도 하였다(Kim *et al.*, 2006).

굴착면 단위로 작성된 지질조사 내용은 선행 조사결과와 연계하여 연속적인 터널 내부 지질도를 작성하여야 한다. 지속적으로 기록된 터널 내부 지질도는 터널 지반 상태의 상호 연관성 분석과 터널 내 지질 재해 위험도의 예측에 중요한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 준공 후 유지관리 단계에서도 귀중한 자산으로 활용될 수 있다(KTA, 2008). 특히 굴착면 평가 정보는 시공 중 터널의 거동 예측에 사용 가능하며(Yim *et al.*, 2007; Seo *et al.*, 2008), 노선을 따른 연속적인 굴착면 지질정보의 통계 관리도 분석을 통해 전방 단층대 예측 등에도 활용 될 수 있다(Yim *et al.*, 2010). 그러나 실제 현장에서 수기로 작성된 굴착면 관찰 기록지는 주로 해당 굴착면의 안전판에만 일회성으로 활용되며, 터널 붕괴 등의 특별한 경우를 제외하면 굴착면 관찰 결과를 체계적으로 활용하여 추가적인 정보를 얻으려는 노력은 거의 이루어지지 않고 있다. 심지어 지질정보에 대한 관리가 허술하여 시공 중 획득한 귀중한 지질정보들이 준공 후 유실되는 경우도 흔히 발생하는 것이 현실이다.

본 연구에서는 터널 굴착면 지질조사 시에 얻어지는 지질정보들을 전산화하여 데이터베이스로 구축함으로써 접근성과 활용성을 높이고, 디지털 굴착면 관찰 모듈을 개발하여 최초 자료 입력 당시부터 전산화된 자료 형태로 수집하고자 하였다. 굴착면 관찰 모듈을 태블릿 PC와 같은 모바일 기기에 탑재하면 조사자가 기

존의 수기방식을 대체하여 현장에서 바로 사용할 수 있으며, 입력해야 하는 정보들을 항목화하여 사용자가 지질정보를 충실히 입력하도록 유도할 수 있다. 모바일 기기의 터치스크린을 활용하여 굴착면 스케치를 빠르고 간편하게 수행할 수 있도록 폴리곤(polygon), 폴리라인(polyline)과 같은 불연속 모델(discrete model)을 사용하였으며, 즉석에서 촬영한 굴착면 사진을 굴착면 스케치의 배경으로 사용하여 보다 정확하고 객관적인 스케치가 가능하도록 하였다. 또한, 굴착면 단위로 입력된 2D 기반의 지질정보를 3D 정보로 변환하여 가시화함으로써, 축적된 지질정보를 직관적이고 종합적으로 파악할 수 있도록 하였으며, 터널 시공의 위핵요소로 작용할 수 있는 암종경계, 단층대, 파쇄대 등과 같은 지질구조를 곡면(surface)으로 모델링하여 그 규모와 방향성을 공간적으로 인지할 수 있도록 개발하였다. 개발된 시스템은 국내의 수로터널과 고속도로 터널 건설현장에 시험 적용하여 그 활용성을 검토하였다.

2. 시스템 개요 및 구성

시공 중 지질조사에 의해서 획득된 지반정보들을 활용하여 지속적으로 터널 지질모델링 작업을 수행하기 위해서는 자료들을 효과적으로 입력, 저장, 분석하기 용이한 자료구조로 설계해야 한다. Table 1은 본 시스템의 주요 입력 자료들을 분류하고 공간/속성구조를 분석한 결과이다.

굴착면에서 획득되는 2D 지반정보는 터널노선과 스테이션 거리정보를 활용하여 3D 지반정보로 변환할 수 있는 공간데이터 특성을 갖는다. 노선이나 설계단면, 암종/암질/불연속면 스케치 정보와 같은 정보공간데이터의 표현을 위해 직선(line)과 호(arc)의 조합으로 정의되는 CAD모델과 폴리곤, 폴리라인과 같은 불연속 모델을(discrete model) 사용하였다.

암종/암질과 같은 폴리곤구조의 GIS데이터를 쉽게 제작하기 위해 전산기하학의 배치 알고리즘(arrangement algorithm) 기반의 폴리곤 매핑 알고리즘(Wein *et al.*, 2007)을 사용하였으며, 이 알고리즘은 사용자가 스케치한 지질경계선에 의해 발생하는 폴리곤을 자동으로 계산한다. 점, 선, 면간의 위상구조를 정의한 배치(arrangement) 자료구조는 폴리곤 정보와 폴리라인 정보로 변환되어 각각 지층의 공간분포회와 지층 곡면(surface) 제작에 활용된다. Fig. 1은 3D 터널지질모델링 작업흐름도로서 터널모델 정의, 굴착면 지반정보 입력, 굴착면 매핑자료 가시화, 지질경계선정

Table 1. Data types and spatial data structures

1st category	2nd category	3rd category	Spatial structure	Description
Design parameters	Line	Plane geometry	Line/arc CAD model	
		Longitudinal altitude	Altitude on each station	
	Standard cross-section		Line/arc CAD model	Side wall/bottom
	Stational cross-section		Station range	Cross-section type
Construction parameters	face information	Location of face	Station	Survey date, investigator
		Rock type	Polygon	Name of rock mass
			Polyline	Boundary of rock mass
		Rock	Polygon	Name or rock
			Polyline	Boundary of rock
		Discontinuity	Polyline	Dip/dip direction
		Ground water condition	Point	Amount of ground water
		Cycle information	Point	Test
		Rating		RMR rating

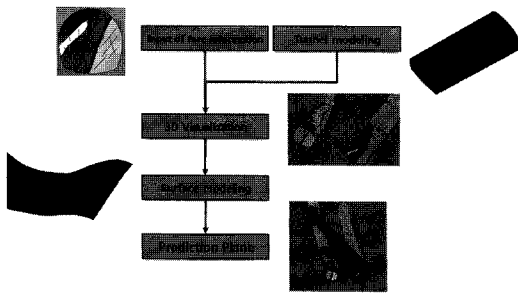


Fig. 1. Geomodeling workflow.

된 자료를 활용하여 RMR 평가, 표준 굴착면 관찰도 출력, 썬기파괴 분석과 같은 안정성 해석, 단층 진행방향 예측 등의 분석기능을 수행할 수 있다.

3. 터널 굴착면 관찰 모듈

일반적으로 터널현장에서 현장 기술자는 특정 조사 양식에 의거하여 종이도면에 RMR 평가나 굴착면 관찰도를 작성한 후 별도의 전산화 작업을 거쳐 전자문서나 CAD 파일 등의 형태로 자료를 저장한다. 그러나 이러한 자료는 자료의 보관이나 리포팅을 주된 목적으로 구축되므로, 비록 전산화된 형태라 하더라도 기존의 설계지반정보나 축적된 시공지반정보를 이용한 굴착면 전방예측과 같은 자료의 분석을 위해서는 별도의 자료변환과정이 필요하며, 데이터베이스 구조로 구축되지 않아 신속한 자료의 조회가 어려운 등 자료의 활용성이 떨어지는 문제점이 있다. 자료의 획득단계부터 활용성을 고려한 자료 포맷으로 전산화되어 저장되면 한번의 입력과정을 통해 자료의 보관, 유사 실시간 분석, 리포팅 등이 가능하게 되어 현장 의사결정에 소요되는 불필요한 다운타임(down time)을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 추후 터널의 유지관리업무에 효과적으로 활용될 수 있다.

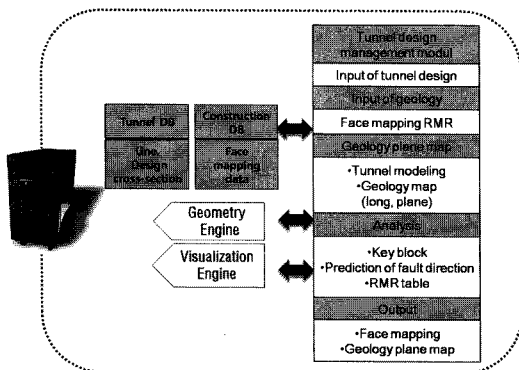


Fig. 2. System outline.

보를 이용한 곡면 모델링, 곡면의 진행방향 예측 등의 과정으로 구성된다.

시스템의 개략적인 구성도는 Fig. 2와 같으며, 굴착면 매핑자료 3D 가시화, 터널 지질도 제작 등의 터널 지질모델링 관련 기능 외에 데이터베이스 구조로 입력

GIS에서 공간객체는 해당 객체의 위치와 관련된 공간정보와 속성정보로 표현된다. 일반적으로 폴리곤구조의 GIS도면을 구축하기 위해서는 해당 주제도 생산 후 전문 DB구축인력에 의한 수치화과정 및 속성정보 입력 작업이 필요하다. 그러나 전산 전문지식이 없는 현

Table 2. Structures of face mapping table

Type	Spatial structure	Description
General face information		General face information
Rock mass type, rock type	Polygon	Name of rock and rock mass
Joint/fault	Polyline	Strike, dip
Ground water condition	Point	Leakage
Sketch of failure potential	Image	
Rock mass rating		Result of rock mass rating
Supporting		Support type

장 기술자가 터널 현장에서 신속하고 쉽게 그리는 것이 가능하며 별도의 추가적인 작업과정 없이 분석에 활용되기 위한 신뢰도 높은 공간도면을 생산하기 위해서는 기존의 GIS틀이나 CAD에서 제공되는 기능은 적합하지 않다.

구축 대상 자료의 특성을 파악하기 위하여 굴착면 조사 정보를 Table 2와 같이 폴리곤, 폴리라인, 포인트, 이미지 포맷의 공간자료구조와 속성정보로 분류하였다. 조사정보는 공간과 속성정보 입력을 위한 그래픽 편집기와 RMR 지수 산정과 같은 순수 속성정보 입력을 위한 입력 시트로 구성된다. 폴리곤, 폴리라인, 포인트, 이미지는 암종, 암질, 절리 및 단층 등의 개별 주제정보(theme)의 표현 구성요소이며, 사용자는 그래픽 편집기의 주제별 전환기능을 통해 공간을 정의하며 해당 공간에 속성을 부여한다.

3.1. 폴리곤 매핑 알고리즘

폴리곤 매핑은 암종이나 암질 영역을 그리고 암종/암질명의 속성정보를 정의하는 작업이며, 폴리곤 매핑 정보는 지질의 분포를 해석하기 위한 중요한 자료가 된다. 이를 위해 오스트리아에서 개발된 터널정보관리

시스템인 2DOC의 터널 폴리곤 에디터(tunnel polygon editor)를 분석하였으며, 전산기하학에서 개발된 배치 알고리즘을 이용하여 폴리곤 매핑 알고리즘을 개발하였다(KICT, 2010).

2DOC의 터널 폴리곤 에디터는 기존에 사용되는 Auto CAD plug-in 형태의 소프트웨어를 대체하기 위해 개발되었다. 기존 Auto CAD는 빠르게 굴착면 정보를 전산화하기 위한 수단을 제공하지 못하므로, 이를 보완하기 위해 방대한 양의 터널 굴착면 자료를 빠르고 간편하게 벡터라이징(vectorizing)할 수 있고, 터널에 대한 일관된 모델을 제작하고 정확한 데이터를 입력하기 위한 소프트웨어로 폴리곤 에디터가 개발되었다. 폴리곤 에디터는 Fig. 3과 같이 수기 굴착면 조사 자료를 폴리곤 정보로 변환하며, 폴리곤 확장(polygon extension), 폴리곤 추가(polygon attachment), 폴리곤 분할(polygon splitting), 노드 삽입, 노드 이동, 고립 폴리곤(island polygon) 삽입, 스냅 기능 등을 제공한다. 폴리곤 에디터는 오류가 발생할 수 있는 다양한 경우를 방지하는 기능이 탑재되어 있으나, 사용자는 현재 그려진 폴리곤의 형상에 맞는 적절한 도구를 선택하여 폴리곤을 수정해야 하는 단점이 있기 때문에,

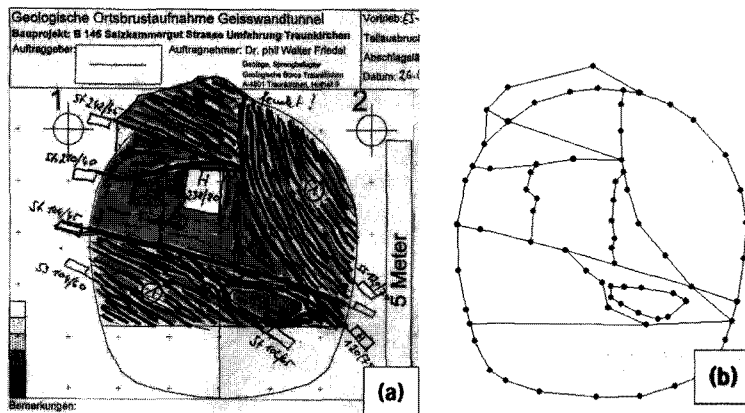


Fig. 3. Polygon editor (a) face mapping data, (b) digitized polygon informations.

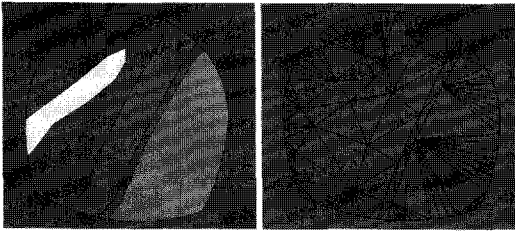


Fig. 4. Triangulation of polygon mapping.

이를 극복하기 위해 배치 기반의 폴리곤 매핑 알고리즘 (CGAL Editorial Board, 2008)을 사용한다. 본 연구에서는 폴리곤 매핑 자료의 가시화를 위해, 폴리곤의 노드 정보만을 활용하는 구속조건 삼각화(constrained triangulation) 방법을 사용하였다(Fig. 4).

3.2. 굴착면 매핑 시스템

본 연구에서 굴착면 매핑 시스템은 Visual C++ 8.0 및 trolltech사의 cross-platform C++ GUI 라이브러리인 Qt를 이용하여 개발하였으며, 해당 라이브러리를 별도의 변환과정 없이 윈도우, Mac, 유닉스계열의 X11, PDA의 임베디드 리눅스 등 다양한 플랫폼에서 활용될 수 있다.

Fig. 5는 암종 및 암질 매핑 화면으로 주어진 터널 설계단면상에서 사용자가 폴리라인 형태로 곡선을 정의한 후 해당 폴리곤에 암종 및 암질종류에 대한 속성 정보를 부여하는 작업 화면이다. 생성된 암종 및 암질

공간객체는 DB형태로 저장되며 추후 굴착면별 암종 및 암질 공간분포를 3D로 조회하거나 지질구조를 곡면(surface)형태로 가시화하여 전방 지반상태 예측에 활용된다.

또한 사용자는 현장에서 촬영한 굴착면 사진을 불러와 매핑화면의 배경으로 삽입할 수 있으며, 이를 통해 굴착면에 나타난 절리구조를 비교적 정확하고 객관적으로 스케치할 수 있다. 절리구조는 사용자가 정의한 절리군 속성이 부여된 선(line)의 형태로 입력된다(Fig. 6). 입력된 절리구조 자료를 이용하여 Fig. 7과 같이 터널 이완영역 내의 썩기 파괴 가능성에 대한 기하학적 해석을 현장에서 간편하게 수행할 수 있으며, 이를 통해 낙반 발생 가능성이 있는 영역을 파악하여 즉각적으로 대응할 수 있다.

절리의 방향, 연장, 틈새, 거칠기, 충전물, 풍화도, 슈미트해머 강도 등의 절리 상세정보는 별도의 테이블로 구성하여 콤박스 형태로 간편하게 기입 또는 선택하도록 구성하였다. 굴착면의 지하수 정보는 dry, damp, wet, dripping, flowing의 5단계로 속성을 구분하여 심볼(symbol)을 가진 점(point) 자료의 형태로 지하수 누출지점을 표시하도록 구현하였으며, 매핑 화면상에서 간략하게 텍스트를 기입할 수도 있다.

3.3. RMR 평가 시트

본 시스템에 적용한 RMR 평가 시트는 Fig. 8과 같이 압축강도, 암질지수, 불연속면의 간격, 불연속면의

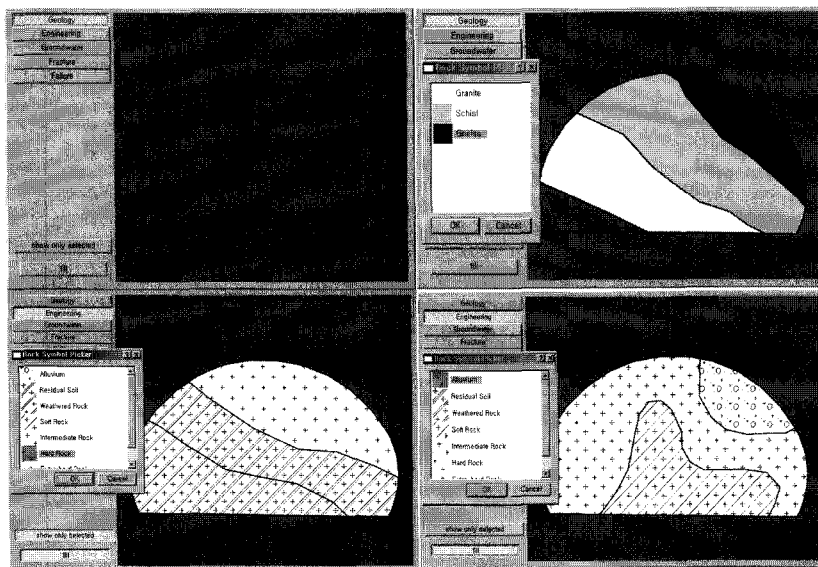


Fig. 5. Face mapping module - designation of rock types and rock mass boundaries.

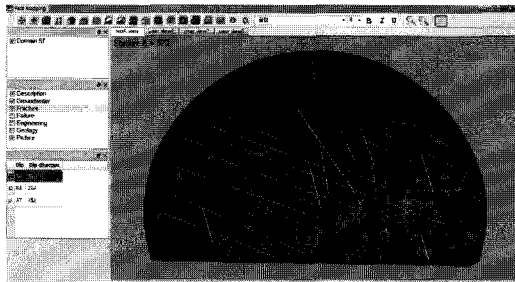


Fig. 6. Mapping of tunnel digital images and geological structures.

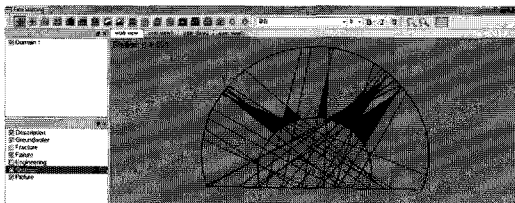


Fig. 7. Key block analysis based on discontinuity informations.

Date	Location	Geologic	Section	Supervisor
		+250	4	
		100 - 250	4	
		50 - 100	2	
		25 - 50	1	
		5 - 25	9	
		1 - 5		
		0		
		19		
		75 - 90%		
		56 - 79%		
		25 - 50%		
		+25%		
		complexity of		
		15		
		10		
		5		
		2		
		73		
		46 / 187		
		75 / 259		
		77 / 319		
		76		
		76		
		2		

Fig. 8. RMR sheet.

상태, 지하수상태 등 5개 주 평가항목과 터널방향에 대한 절리 방향보정 항목으로 구성되어 있다. 현장 기술자가 앞서 입력한 불연속면 정보 등의 굴착면 관찰 자료는 RMR 시트에서 해당 항목에 반영되어 자동으로 RMR 점수 및 해당 암반등급이 계산되도록 구현하였으며, 자동 계산된 값이 굴착면 현황을 정확하게 반영하지 못할 경우 사용자의 판단에 의해 수정될 수 있다. 각 굴착면에서 평가된 RMR 점수, RQD 등의 수치는 Fig. 9와 같이 그래프 형태로 도시하여, 터널굴착에

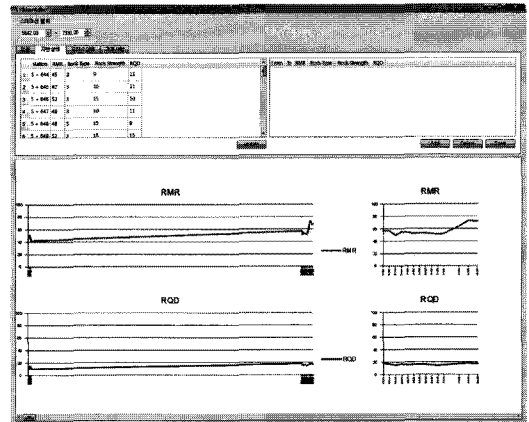


Fig. 9. Chart for RMR trend.

따른 변화추이를 쉽게 파악할 수 있다.

4. 3D 지질모델링 모듈

본 연구에서는 터널 3D 지질 모델을 제작하기 위해 석유탐사분야에서 개발되어 광산 및 지반 등 다양한 분야에서 활용되는 GOCAD 지질모델링 기술을 적용하였다.

4.1. GOCAD를 이용한 지질모델링

지질학적 사물은 불확실성을 내재한 공간자료이며 복잡한 분포특성을 갖기 때문에 솔리드 모델링의 보기 좋은 곡선이나 곡면으로 표현하기 어렵다. 이를 극복하고 자연사물을 불연속적으로 모델링하기 위해 GOCAD가 개발되었다. 불연속적 지질모델링(discrete geomodeling)을 위해서는 지질 사물의 기하구조, 위상관계, 물리적 특성을 일관된 방법으로 모델링하기 위한 수학적 방법들이 필요하며, 특히 물리적 특성과 노드의 좌표를 보간할 수 있는 수학적 도구가 필요하다. 이러한 목적에서 개발된 DSI(Discrete Smooth Interpolation) 방법은 GOCAD의 핵심 알고리즘이다. GOCAD는 기타 지질모델링 소프트웨어와 달리 개발 키트(development kit)를 제공하며, 이를 통해 GOCAD의 핵심모델링 기능을 활용할 수 있다.

GOCAD에서 곡면 객체(object)는 연결되거나 분리된 삼각형들의 조합으로 구성된 삼각형 면(triangulated surface)으로 구현된다(Paradigm Geophysics, 2007). 연결된 삼각형들의 집합을 part라 하며 곡면은 여러 개의 part로 구성될 수 있다. part의 경계선을 border라고 하며 surface 경계선은 여러 개의 논리적인 border

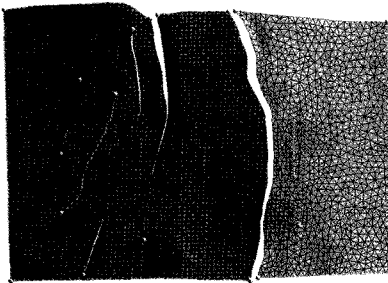
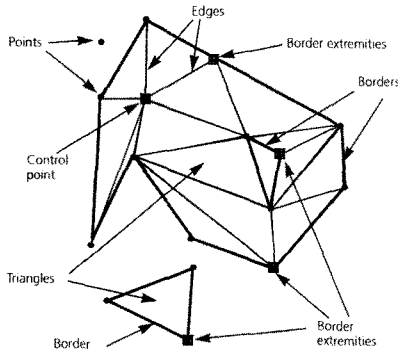


Fig. 10. Components of triangulated surfaces and example.

로 나눌 수 있다. 논리적인 border를 구획하는 node를 border extremity라 한다. 곡면의 내부 border는 빈 공간(hole)을 포함할 수 있으며 단층에 의한 절단면이나 단층영역을 묘사하는 데 사용된다(Fig. 10).

곡면(surface)의 제작방법에는 입력 포인트 자료들이 메쉬 구조에 직접적으로 반영되는 Direct Triangulation 방법과, 입력 자료와 무관하게 메쉬를 구성한 후 DSI를 통해 입력 자료의 영향을 반영하는 Indirect Triangulation 방법이 있다. 제작된 곡면을 특정방향으로 연장시키기 위해서는 외삽(extrapolation) 알고리즘을 이용해야 하는데, 본 연구에서는 곡면의 선형경향성 판단을 목적으로 해당 삼각형(triangular) 메쉬와 유사한 방향성을 갖는 평면을 정의하고 평면의 범위를 조절함으로써 예측정보를 얻고자 하였다.

4.2. 3D 지질모델링 시스템

본 시스템의 지질모델링 기능은 GOCAD 라이브러리를 이용하여 3D view 화면을 통해 이루어지며, 여기서 사용자는 터널 형상 모델, 터널 상부 지형모델, 굴착면 매핑결과, 3차원 절리망, 지질구조(경계)면, 곡면 진행방향 예측 평면 등을 제작하거나 가시화할 수 있다.

굴착면 매핑 시스템을 이용해 입력한 정보는 3차원

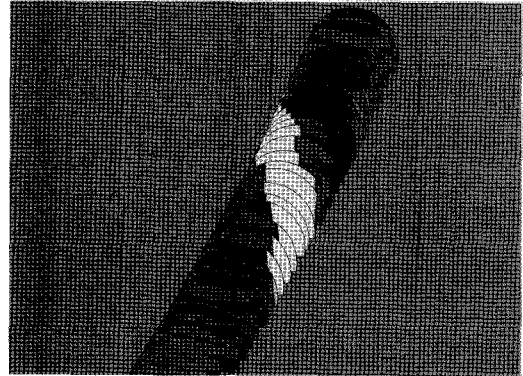


Fig. 11. 3D visualization of face mapping results.

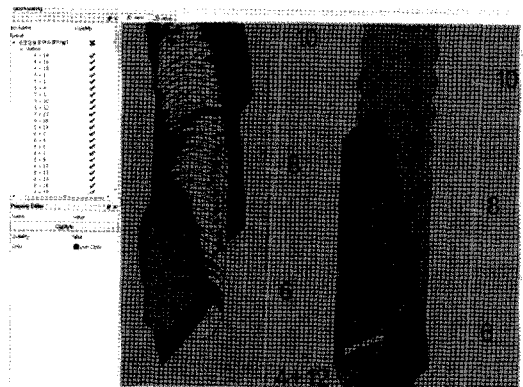


Fig. 12. Geological surface from face mapping results.

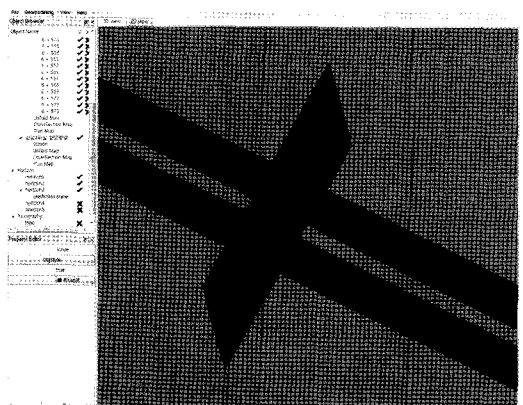


Fig. 13. Prediction of geological structure progress.

공간의 해당 스테이션 위치에 가시화되며, 터널 굴착에 따라 매핑 정보가 축적되면 Fig. 11과 같이 굴착면 지질상태의 변화양상을 한 눈에 파악할 수 있다.

지질구조의 곡면은 굴착면 매핑 시 입력된 폴리라인

(암중 및 암질경계, 단층 및 파쇄대 등의 지질구조 경계)을 이용하여 제작되며, 사용자는 3D 뷰(view)에서 대상 폴리라인을 개별적으로 선택하여 특정 영역에서만 곡면을 제작하거나, 매핑 시 부여된 동일한 속성을 가진 폴리라인을 일괄적으로 선택하여 제작할 수 있다 (Fig. 12). 곡면으로 구현된 지질구조는 지질 전문가가 아니더라도 그 규모와 방향성을 시각적으로 쉽게 인지할 수 있는 장점이 있다.

단층과 같은 지반 위해요소의 노선 교차여부, 굴착면에서의 출현 폭 및 출현 구간, 이후 진행방향 등의 예측은 터널 시공에 있어서 매우 중요한 정보가 된다. 그러나 그 근거가 되는 지질조사 자료는 공간적으로 터널 굴착면에만 한정되어 있으므로, 생성된 지질 곡면의 대표방향성을 추출하여 진행방향을 예측하는 기능을 개발하였다. 이 기능은 지질 곡면과 가장 유사한 방향의 예측 평면을 생성하고 그 평면의 각도와 범위를 설정하는 방법으로 구현되며, 특히 단층이 쌍굴 터널의 한 터널에서 다른 터널 방향으로 발달하는 등의 경우에 유용하다(Fig. 13).

굴착면 매핑 시 그려진 절리구조는 사용자가 입력한 절리군별 방향정보를 이용해 가시화되며, 터널 구간내

의 불연속면 발달 규모, 빈도, 방향성 파악에 이용될 수 있다(Fig. 14).

본 시스템의 지질 모델링 기능은 GOCAD 라이브러리를 기반으로 개발되었으므로, GOCAD의 곡면 오브젝트 파일 포맷인 ts파일을 불러올 수 있다. 따라서 수치지형도의 지형정보를 이용해 GOCAD에서 지형모델을 제작하면 Fig. 15와 같이 터널 상부의 지형모델을 구현할 수 있다. 이를 통해 터널굴착 진행에 따른 토 피고 변화, 계곡부의 발달 위치 등을 3차원 화면으로 확인할 수 있다.

5. 네트워크 시스템 개발

NATM 터널은 그 특성상 발파 후 수행되는 굴착면 관찰 및 결과 보고에서부터 공사 진행에 대한 의사결정까지의 과정이 신속하게 진행되어야 하므로, 터널 지질정보를 전산화하고 데이터베이스를 기반으로 정보관리 및 해석을 수행하는 본 시스템의 특성상 활용도를 극대화하기 위해서는 네트워크 시스템의 적용이 필수적이다.

5.1. 네트워크 시스템 구성

네트워크 시스템의 기본 구성을 간략하게 도시하면 Fig. 16과 같다. 현장에서 굴착면 조사를 수행하는 조사자는 무선통신이 가능한 모바일 기기를 통해 DB 서버로부터 해당 굴착면에 대한 암반등급, 지보패턴, 보강공법 등의 설계정보를 전송받아 조회하게 된다. 설계정보를 충분히 숙지한 조사자는 굴착면에서 모바일 기기에 탑재된 굴착면 관찰 모듈을 통해 지질조사를 수행하고, 터널 밖으로 나온 후 무선통신을 통해 조사결과를 DB 서버로 전송한다. 서버에 접속한 각 사용자 그룹은 전송된 조사결과를 실시간으로 조회하게 된다. 지질 전문가 그룹은 새로운 조사결과를 선행 조사

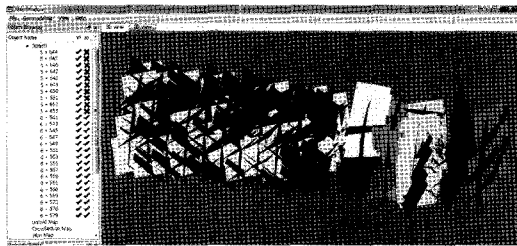


Fig. 14. 3D visualization of joints.

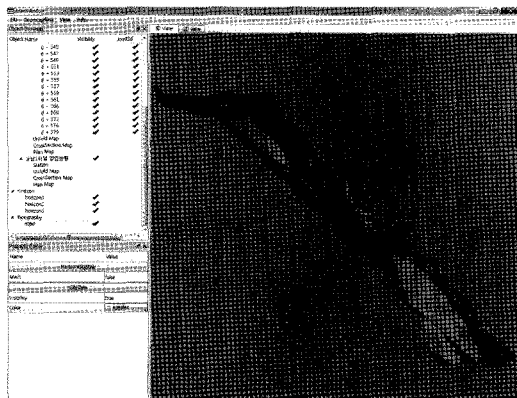


Fig. 15. 3D modeling of ground surface above tunnel line.

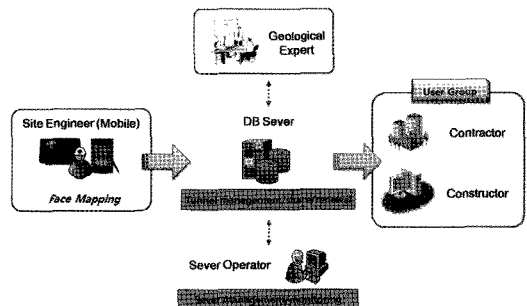


Fig. 16. Network system outline.



Fig. 17. Wireless networking outline.

결과와 연계해 검토하고 3D 지질모델링 모듈을 통해 해석결과를 3차원으로 가시화하여 공사 관리자에게 제공한다.

5.2. 네트워크 운영 및 자료전송 방식

데이터의 전송은 유/무선 인터넷을 통하여 TCP/IP 프로토콜을 사용하여 전송이 되며 공사현장이 산간 지역인 점을 고려하여 3G 통신망을 Wi-Fi로 변경하여 전송한다. 무선전화를 이용하여 데이터를 전송하기 때문에 통화 가능지역 어디에서든 데이터 전송이 가능하다(Fig. 17).

시스템은 서버 및 클라이언트로 구분된다. 서버에서는 로그인 관리 및 결제 데이터베이스를 관리하며, 클라이언트는 원천데이터의 입력과 입력데이터의 분석을 통한 2차 데이터의 생산과정으로 구분된다. 데이터 수집 및 분석 중 생산되는 리포트는 해당 보고자에게 SMS로 전송을 하여 서버의 데이터가 업데이트가 된 것을 통보한다.

데이터의 동기화는 2차에 걸쳐 이루어진다. 로그인이 성공 했을 때 서버의 파일을 다운로드 받아 동기화가 한번 이루어지고 이후 결제를 요청했을 때 작성된 리포트 파일 및 데이터를 업데이트 하여 동기화를 한다. 로그인 및 결제를 위해 개인별 ID를 사용하고 ID 별로 접근권한을 설정한다.

작성한 리포트는 미리 보기를 통해 출력 결과물을 미리 확인 할 수 있고, 서버에 저장된 결제 사인을 다운로드받아 온라인 결제가 가능하며, 출력기능을 추가 하여 편의성을 증대시켰다.

6. 현장 적용 및 활용성 평가

6.1. 수로터널 현장 적용

Fig. 18은 본 현장의 굴착면 매핑자료를 터널노선정보를 활용한 좌표계 변환과정을 통해 3D로 가시화한 화면이다(K-water, 2010). 본 현장의 터널 굴착면 지반 정보는 1~2 m의 스테이션 간격으로 구축되어 단지 가시화만으로도 지질의 공간분포가 쉽게 파악되는 특징이 있다.

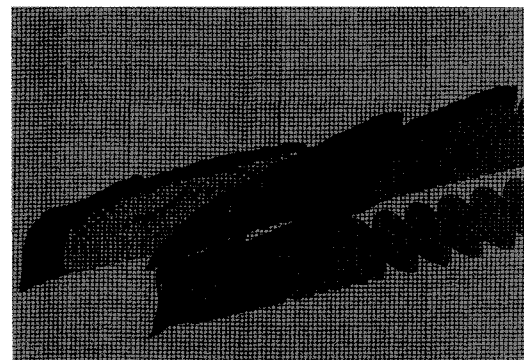
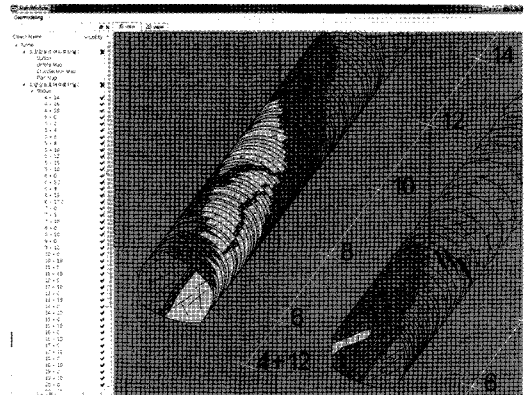


Fig. 18. 3D visualization of OO waterway tunnel face mapping.

6.2. 고속도로터널 현장 적용

대상 현장은 주로 화강암질 편마암이 분포하는 지역으로, 풍화도가 낮고 대부분 경암 수준의 양호한 암반 상태를 보인다. NATM 공법의 발파굴착식 터널로, 터널의 굴진방향은 N20E, 굴진장은 2.5~3.5 m이며, 주 절리의 방향은 N18W/62SE로 나타났다.

본 현장에서는 모바일 기기를 이용하여 5개소의 굴착면을 조사하였으며, 선행 굴착면 조사 결과와 함께 Fig. 19와 같이 가시화하였다. 굴착면에서 화강암질 편마암 이외의 암종은 출현하지 않았으나, 관찰되는 색을 기준으로 암반을 담갈색영역과 암청색영역으로 구분할 수 있으며, 일부구간에서 터널 진행방향에 수직으로 단층점도(T=1 cm)가 발달한 소규모 단층이 확인되었다. 또한 상이한 색을 보이는 암반의 경계와 소규모 단층을 3차원 곡면으로 가시화하여 지질 경계선의 분포를 확인하였다.

6.3. 활용성 평가 및 개선사항 도출

본 시스템을 실제 터널시공현장에 적용한 결과, 모바일 기기를 활용한 굴착면 스케치 기능은 충분한 적

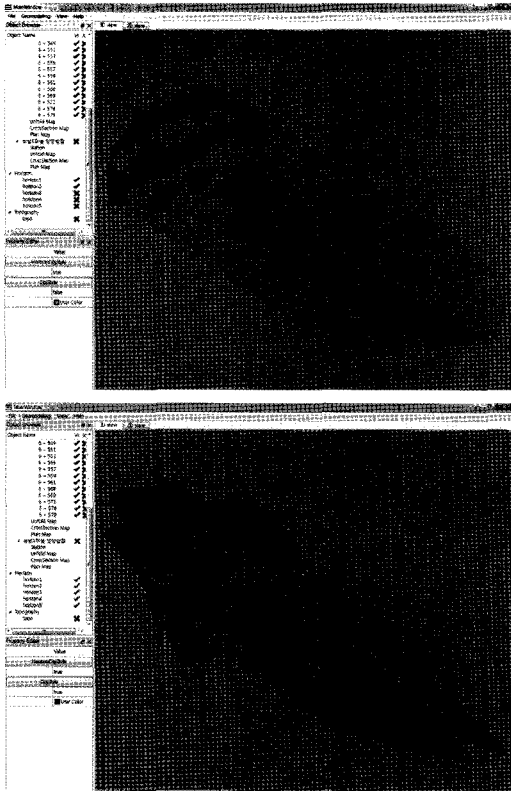


Fig. 19. 3D visualization of OO road tunnel face mapping.

용성을 보였으나, 부가 기재사항과 같은 텍스트 형태의 입력은 보완이 필요한 부분으로 나타났다. 이는 모바일 기기가 가진 입력장치상의 한계로, 상용구를 이용하는 방법, 또는 전자펜으로 기록한 내용을 그림파일 형태로 저장하는 방법 등으로 개선책을 모색해야 할 것으로 판단된다.

3D 지질모델링 모듈은 비 지질전문가, 특히 공사 관리자가 현장의 지질구조를 이해하는데 도움이 되어 긍정적인 효과를 가져다주는 것으로 나타났다.

7. 결 론

국내의 터널 현장에서 수행되고 있는 굴착면 관찰은 지질 기술자 개인의 능력 및 경험상의 문제, 시간적 제약 등으로 인하여 여러 가지 지질정보가 누락된 채, 단순히 RMR 등급만으로 지보패턴을 결정하는 등 형식적이고 획일적으로 이루어지고 있으며, 조사결과를 시공에 적절하게 반영하지 못하는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 터널 굴착면 지질조사 시에 얻어지는 지질 정보들을 전산화하여 데이터베이스로 구축함으로써 접

근성과 활용성을 높이고, 나아가 최초 자료 입력 당시부터 전산화된 자료 형태로 수집하여 지질정보의 분석과 평가를 객관화하기 위한 디지털 매핑 데이터베이스 시스템을 개발하였다.

시스템 개발의 주요 내용 및 활용성 평가 등에 대한 상세 결과는 다음과 같다.

1. 시스템은 크게 터널 설계정보 관리 모듈, 굴착면 지반정보 입력 모듈, 지질 전개도 작성 모듈, 지반정보 분석 모듈, 출력 모듈 등으로 구성된다.

2. 2DOH의 터널 폴리곤 에디터를 이용하여 굴착면 관찰에 의한 지질정보를 가시화 하였다. Arrangement 기반의 폴리곤 매핑 알고리즘을 적용하였으며, 특히 폴리곤의 노드 정보만을 활용하는 constrained triangulation 방법을 사용하였다.

3. 3D 지질모델링을 위해 물리적 특성과 노드의 좌표를 보간할 수 있는 DSI(Discrete Smooth Interpolation) 방법을 핵심 알고리즘으로 하는 GOCAD를 이용하였으며, 이를 통해 터널 형상 모델, 터널 상부 지형 모델, 굴착면 매핑 결과, 3차원 절리망, 지질구조(경계)면, 곡면 진행방향 예측 평면 등을 제작하여 가시화하였다.

4. 시스템의 활용도를 극대화하기 위해 네트워크 시스템을 적용하였다. 조사지는 조사결과를 무선통신을 통해 DB 서버로 전송하게 되며, 지질 전문가 그룹은 새로운 조사결과를 선행 조사결과와 연계해 검토하고 3D 지질모델링 모듈을 통해 해석결과를 3차원으로 가시화하여 관리자에게 제공한다.

5. 본 연구를 통해 개발된 시스템은 수로터널 현장과 고속도로 터널 현장에 적용하여 효율성을 평가하였다. 그 결과 시공현장의 3차원 지질정보를 가시화하여 지질정보의 이해 및 전망 예측 등에 유용하게 활용될 수 있는 것으로 확인되었다. 향후 텍스트 입력 등의 부가적인 기능들이 보완된다면, 현장에서 사용될 수 있는 완성도 높은 시스템이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

CGAL Editorial Board (2008) CGAL User and Reference Manual, 3.4 edition.
 KICT (2010) IT Grafting Ground Characteristics Analysis and Suvey Using System-development for REST, Ministry of Construction & Transportation.
 Kim, K.Y., Kim, C.Y., Yim, S.B., Yun, H.S. and Seo, Y.S. (2006) A Study on Problem and Improvements of Face Mapping during Tunnel Construction, The Journal of Engineering Geology, v.16, p.265-273.
 Korean Tunnelling and Underground Space Association (2008) Tunnel Mechanized Construction Building Book,

- CIR.
K-water (2010) System-development for Tunnel Geological-development.
- Paradigm Geophysics (2007) Gocad Developer's Guide.
- Wein, R., Fogel, F., Zukerman, B. and Halperin, D. (2007) Advanced Programming Techniques applied to CGAL's Arrangement Package, Computational Geometry.
- Seo, Y.S., Yim, S.B., Na, J.H. and Park, S.H. (2008) Suggestion of a Modified RMR based on Effect of RMR Parameters on Tunnel Displacement in Sedimentary Rocks, The Journal of Engineering Geology, v.18, p.187-195.
- Yim, S.B., Kim, K.W., Kim, C.Y. and Seo, Y.S. (2010) New Approach on Prediction of Fault Zone Ahead of Tunnel Face by Using x-Rs Control Chart for RMR Parameters, Tunnelling Technology, Journal of Korea Tunnelling Association, v.12, p.463-475.
- Yim, S.B., Seo, Y.S., Kim, C.Y. and Kim, K.W. (2007) A Study on Geological Factors Affecting Behavior of Sedimentary Rock Tunnel Using Quantification Method Type I, The Journal of Engineering Geology, v.17, p.263-270.

2010년 11월 10일 원고접수, 2010년 12월 14일 게재승인