

카르스트 지형에서 수행한 지반조사와 터널 설계 Geotechnical Aspects of Tunnel Design in Karst Topology

김달선, 주광수, 이희철, 서영호

현대건설주식회사 토목사업본부 턴키팀

1. 서론

최근 유럽과 미국 지역에서는 카르스트 (Karst) 지형의 변화에 의한 철도, 도로, 교량 및 댐 구조물 손상에 대한 연구와 사례 보고가 점차 체계적으로 진행되고 있다 [1,2,3,4]. 국내에서도 중부 내륙 고속도로 공사 과정에서 교량의 기초 지반에 석회암 공동이 발견되어 공동에 대한 보강 대책을 수립하여 시공을 완료한 실적이 있다 [5]. 또한 석회암 천연 동굴이 분포해 있는 지점에 계획하였던 영월댐 건설이 중지된 이유 중에 하나가 석회암 동굴이 산재되어 있는 지역을 통한 댐 건설후에 야기될 수 있는 누수에 대한 대책에 대한 공학적인 분석이 뒷받침되지 않았기 때문이기도 하였다. 이러한 석회암 공동은 교량 하부기초 뿐만 아니라 터널 굴착 과정에서 특정 암반지역에 나타나고 있으므로 터널 기술자들이 구조물의 장기적인 안정성을 확보할 수 있는 대책을 사전에 수립해야 하는 단계에 이르렀다 [6].

카르스트는 지표 층에 형성된 함몰 지역 또는 지하에 공동이 형성되어 있는 석회암 지역을 의미한다 [7]. 카르스트 지형을 형성하는 석회석 등에서 지하수가 지질을 구성하고 있는 광물을 용해시켜 지하에 함몰 형태의 공동을 형성하게 된다. 즉, 지표를 흐르던 물이 투수성이 비교적 큰 절리나 층리를 만나면 선택적인 용해 작용에 의해 주로 그 곳을 따라 물이 지하로 침투하면서 공동을 형성하면서 광역적인 지질작용에 의해 지표면에서 발생하는 침하 (혹은 함몰) 현상과 지하에 공동이 형성된다. 석회암 공동의 생성 원리는 지하수에 용해되는 화학적 성분으로 이루어진 암반과 지하수 면의 상대적인 위치에 따라서 구분된다.

석회암 지하 공동이 발달하는 방향과 지질 구조선과는 밀접한 관계가 있으며, 용해를 일으키는 지하수는 지질 구조선을 통하여 흘러가게 되므로 지하 공동이 지질 구조선을 따라서 배열될 수도 있고, 서로 연결되어 거대한 공동으로 나타날 수도 있다. 따라서 석회암 공동을 찾기 위해서는 지질 구조와 조사 지역에서 우세한 절리나 층리 방향, 그리고 현장 지압 (in-situ stress) 방향을 파악하는 것이 터널 설계에 있어서 중요한 요소가 된다는 결론을 얻었다.

본 논문은 중앙선 제천-도담역 사이에 분포하고 있는 카르스트 지형을 통과하는 복선 전철 개량 사업에 대한 기본설계 턴키 (turnkey) 설계 과정에서 수립한 지반조사와 이에 대한 체계적인 터널설계 과정을 소개하였다. 중앙선은 복선 개량사업은 2급선 선로 등급으로 설계 속도가 150 km/h, 전체 연장이 16 km 이며, 주요 구조물로서는 정거장 4개소 (제천, 고명, 삼곡, 도담), 터널 11개소 (L = 4,480 m)와 교량 12개소 (L = 1,220 m) 로 구성되어 있다.

본 논문의 목적은 과업 노선 주변에 분포하고 있는 돌리네 (doline)가 분포하는 대량 터널 구간에 대한 석회 공동의 분포 특성을 조사하여 보강 대책을 수립한 결과를 제시하는데 일차적인 목적이 있다.

2. 지질구조와 카르스트 암반특성

2.1 지질구조

대상지역에 대한 지질 구조와 카르스트 공동과의 연계성을 도출하기 위하여 제천, 영춘 지질도 폭 (1:50,000)을 활용하였다. 이 지역은 오도비스 (ordovician)기 퇴적 암류와 백악기 화성암류가 기저를 이루고 소규모 암맥이 이를 관입하여 나타난다. 조사부지 내에 발달 분포하는 주요 암종은 계획노선 시점부의 화성암류인 흑운모 화강암과 소규모 염기성 및 산성 암맥으로 구성되어 있고, 시점부를 제외한 모든 지역에는 노선 구간의 대부분을 차지하는 고생대 오도비스기의 퇴적암류 (석회암, 백운암)와 중생대 백악기의 흑운모 화강암이 기반암으로 형성되어 있으며, 최 상부 층에 제4기 충적층이 부정합으로 피복되어 있다.

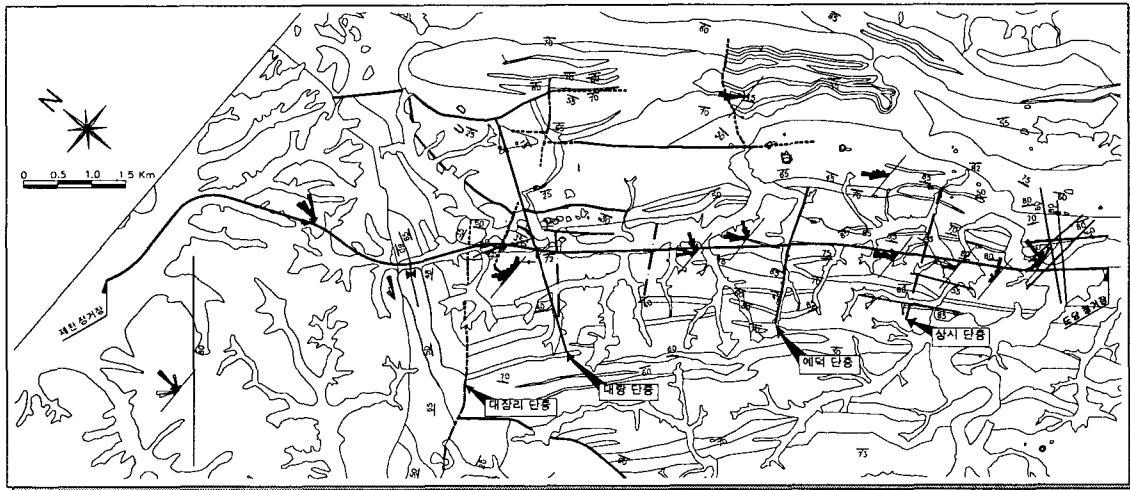


Fig. 1. Structural geological map over the project area

시점부인 제천시 인근은 화강암 지역으로 풍화대가 두껍게 발달하고 있는 반면에 석회암 지역에는 돌리네 등 카르스트 지형의 특징을 나타내고 있어, 석회 공동 분포가 예상되었다. 카르스트 노선 통과 구간에서는 주로 백운암으로 이루어진 홍월리층이 분포하고 있으며, 노선과 평행한 습곡 축을 갖는 습곡 작용의 결과에 의해서 석회암으로 이루어진 삼태산층이 소규모의 띠 형상으로 발달되어 있다. 지질도에 표기된 대장리 단층은 지표 지질조사에서는 확인되지 않았고, 3개의 소규모 단층대 (대량, 예덕 및 상시 단층)를 추가 확인하였다. 세부적인 선구조를 확인할 수 있는 항공사진을 이용하여 과업 구간에 대한 광역적인 선구조 분포와 석회암 지역에 존재하는 돌리네의 분포 현황을 조사하였다 (Fig. 1).

2.2 암반 특성

계획노선 시점부 제천역부터 강서 제2터널까지 구간은 흑운모 화강암이 노선과 거의 직교하는 N40E 방향으로 경계를 이루며, 흑운모 화강암 경계부터 대량터널 입구부에 N60E 방향의 기존 도폭상 확인된 단층까지는 시대 및 지층이 확인되지 않은 석회암 및 백운암이 분포하고 있다. 그외

대부분의 과업 종점까지의 지역은 영월형 구분에 따라 하부로 부터 오오도비스기 퇴적암류의 석회암, 백운암질로 구성된 홍월리층, 삼태산층이 분포하고 있다.

화강암과 석회암의 접촉부에는 부분적으로 열수 변질작용의 부산물인 스카른 (skarn) 광물인 Epidot, Chlorite 등이 산출되기도 한다. 석회암 지역의 불연속면 발달은 N20~40W/50~90SW, 80NE~수직 및 NS~N60~90E/70SE~수직, 70NW~수직 계열의 방향이 현저하게 나타나고 있다. 각종 암석에 대한 현미경 분석과 실험실 결과는 Table 1, 2, 3 에 요약 정리하였다.

2.3 돌리네 분포 특성

항공사진 판독은 석회암 분포 지역의 돌리네 식별이 가능하며, 일부 구간에서는 지형도 분석 및 현지답사에서 확인이 어려운 규모 까지도 용이하게 식별할 수 있다. 식별된 노선주변의 돌리네 분포 지역은 6개소로 분포 양상은 지역별로 구분하였다 (Table 4).

Table 1. Composition of typical rock materials

Rock Type	Grain Size (mm)	Mineral Composition
Granite	< 1.0 mm	plagioclase (43%), quartz (51%), muscovite (5%), others (1%)
Limestone	< 0.1 mm	partially replaced with dolomite, thin bands of quartz and calcite, mostly calcite composition
Dolomite	< 0.5 mm	calcite replaced with dolomite, quartz, calcite vein, mostly dolomite (100%)

Table 2. Mineralogical analyses of the representative rock types

Rock Type	CaO (%)	MgO (%)	CO ₂ (%)
Limestone	47.35	2.45	50.20
Dolomite	30.16	20.50	49.34

Table 3. Summary of the engineering properties of intact specimens

Rock Type	Bulk Density (g/cm ³)	Compressive Strength (kg/cm ²)	Youngs Modulus (x10 ⁵ kg/cm ²)	Poisson's Ratio	P-wave Velocity (m/s)	S-wave Velocity (m/s)
Granite (14)	2.65 {0.10}	970 {714}	2.56 {2.07}	0.24 {0.09}	3,550 {2,137}	1,950 {968}
Limestone (24)	2.74 {0.02}	1320 {558}	4.98 {0.94}	0.18 {0.04}	5,960 {685}	2,890 {226}
Dolomite (67)	2.73 {0.11}	950 {478}	3.99 {1.45}	0.24 {0.05}	4,300 {791}	2,400 {464}

() number of specimens, { } standard deviation

Table 4. Doline population over the entire alignment

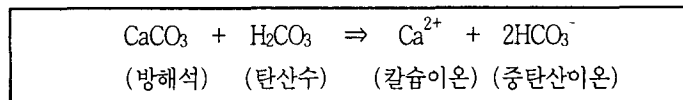
위 치	돌리네 밀도 (%)	노선과 상관 관계	분석면적 (km ²)
대랑터널 주변	3.00	<ul style="list-style-type: none"> • 터널노선에 돌리네군 분포 • 터널에 직접적 영향 예상 	2.9
예덕터널 주변	1.97	<ul style="list-style-type: none"> • 터널노선과 750 m 이상 원거리에 분포 • 터널과 연관관계 없음 	3.2
상시터널 주변	0.99	<ul style="list-style-type: none"> • 터널노선과 인접부에 간헐적 분포 • 터널에 간접적 영향 예상 	0.5
한일시멘트 주변	1.40	<ul style="list-style-type: none"> • 계획노선과 1 km 이상 원거리에 분포 • 계획노선과 연관관계 없음 	2.8
상곡천교 주변	10.50	<ul style="list-style-type: none"> • 계획노선 인접부에 위치 • 구조물 기초지반 확인 필요 	0.2
매포읍 주변	2.01	<ul style="list-style-type: none"> • 계획노선과 1.3 km 이상 원거리에 분포 • 계획노선과 연관 관계 없음 	2.9

3. 카르스트 공동 조사

3.1 카르스트 공동 형성 과정

카르스트 공동 형성과정은 대기중의 이산화탄소 (CO₂)가 우수와 반응하던지 또는 토양내 이산화탄소가 토양 하부로 삼투되는 지하수와의 반응으로 탄산수 공급이 지속되며, 이러한 탄산수로 인하여 석회암 지대의 탄산염 광물인 방해석 (CaCO₃)과 고회석 (CaMg(CO₃)₂)을 용식시키는 화학적 풍화가 일어나게 된다. 따라서 석회암 지대에는 많은 석회동굴이 생성된 것을 흔히 볼 수 있는데 이는 석회암의 틈으로 흘러 들어간 지하수가 화학적 풍화를 일으켜 서서히 제거 시켜서 크고 작은 동굴을 만든 것이며 석회석을 용해한 물이 통풍의 영향으로 수분이 증발하면서 그 속에 용해되었던 석회암 성분이 다시 침전하여 중유석과 석순을 만드는 과정을 반복하게 된다.

방해석이 탄산수와 반응해서 화학적 풍화를 일으키는 반응식은 다음과 같다.



카르스트 지형의 성장기에는 정상적인 지표면을 유지하는데 비해 성숙기 초기 단계에서는 암석중에 발달된 수직 절리 (vertical joint) 들이 용해 작용으로 확대되면서 첨단석 (pinnacle) 들과 수직 공동을 형성한다. 지하 천부에 형성된 수직 공동이나 지하 심부의 공동 천반이 붕락되면서 둘러쌓인 용식 함몰구조를 생성시키게 되는데 지표부의 이러한 함몰 구조를 돌리네 (doline) 또는 싱크홀 (sinkhole) 이라고 정의한다.

카르스트 지형에서의 지하수 이동 경로는 주로 수직 절리나 층리면을 따라 발달된 공동이나 용식된 단층대와 연결되며 층리면 공동이나 단층대 공동을 포화시켜 지하수면과 만나는 계곡 하부나 강가 등에 솟아 천연샘을 만들게 되어 주요한 지하수원이 된다. 이러한 층리면 공동과 단층면 공동이 건조시에 공동으로 나타나거나 지역이 상승할 경우 천연 동굴로 남게된다.

용식 함몰구조의 형태와 형성은 지질 여건에 따라 다르게 나타나나, 일반적으로 돌리네 하부에


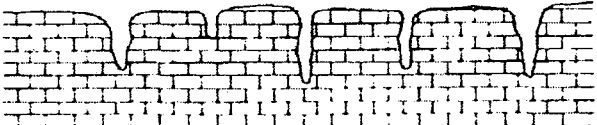
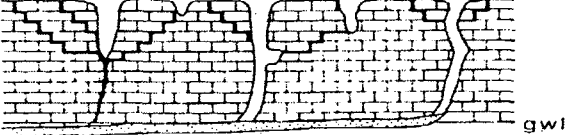
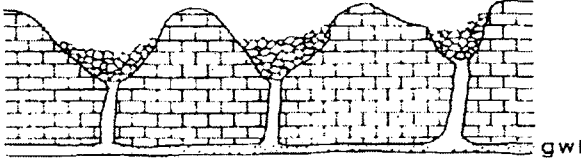
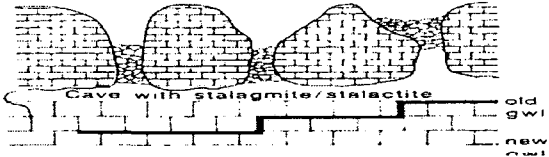
독립된 공동을 수반하거나 지하 심부에서 서로 연결되어 나타나기도 한다. 하부에 지하수 수직통로와 이에 연결된 수평의 공동이 발달된다.

3.2 카르스트 공동 유형

Fookes and Hawkins (1988)는 결정질 석회암 지역에서의 카르스트 특성을 공동 형성의 단계와 형태에 따라 Class I (limestone surface) ~ Class V (major doline karst)의 5개 등급으로 구분하였다 (Table 5). 흡과 공동 시스템 (Class I, II)은 절리 주변의 용해로 생성된 흡과 이의 확장 또는 흡과 연결된 소규모의 공동은 주로 층상의 석회암에서 잘 나타나는 형태로 공동 발달 시기는 비교적 초기 단계에 해당된다. 지표면에서 소규모의 고립된 공동 분포와 불규칙한 석회암의 노출 표면 (pinnacle) 관찰이 가능하다.

싱크홀과 동굴시스템 (Class III, IV, V)은 흡과 소규모의 고립된 공동이 상호 연결되고 보다 확장되어 지하 수위까지 용해가 진행됨에 따라서 동굴과 싱크홀을 형성하고 결국 침하 또는 붕괴 돌리네 (subsidence or collapse doline)가 발달되어 지상 구조물에 대한 재해를 유발할 수 있는 주의 대상의 지반 형태로서 지표에서는 함몰된 돌리네 이외는 관찰이 거의 불가능하다.

Table 5. Doline classification (cited from Fookes and Hawkins, 1988)

구분		주요 형태
slot & cavity system	Class I (limestone surface)	 <p>절리 등 불연속면 주변의 용해</p>
	Class II (minor karst)	 <p>절리 주변 용해로 인한 pinnacle의 발달과 소규모 고립된 석회 공동의 형성</p>
sinkhole & cave system	Class III (karst)	 <p>지하수위 상부의 다수 절리 주변의 용해 확장과 고립된 석회 공동의 연결</p>
	Class IV (doline karst)	 <p>돌리네 및 싱크홀의 형성과 지하수위 주위의 석회 동굴의 발달</p>
	Class V (major doline karst)	 <p>돌리네/석회동굴의 붕괴 및 지하수위의 하강에 따른 새로운 공동시스템의 진전</p>

3.3 카르스트 공동 분포 영향인자

석회 공동의 분포는 암석종류, 지질구조, 지하수 특성에 의해 영향을 받으므로 용해성 암석과 비용해성 암석의 분포 조건에 따라 석회 공동 분포 지역의 규모를 정성적으로 결정할 수 있다. 단양 지역의 경우 비용해성 암석인 혈암 (shale) 및 사암층에 의해 상·하부가 둘러 쌓인 석회암 층에서 석회 공동이 주로 분포하고 있고, 이 중 석회암 내에 호층을 이루는 혈암 또는 이질 석회암 층 사이의 괴상 석회암 층에서 집중적으로 공동이 분포하며, 규모 역시 괴상 석회암의 두께에 직접적인 연관성을 보이고 있다.

지질구조에 의한 영향은 주로 층리의 방향과 단층 등 불연속면의 발달상태에 의해 결정되며 층리 방향은 석회 공동의 진행 방향과 연계되어 수직으로 발달된 단층 혹은 불연속면은 공동이 시작되는 순간부터 대규모 싱크홀을 형성하게 된다. 지하수 수위 역시 공동 분포의 심도를 결정하는 가장 중요한 요소중에 하나가 된다. 특히, 이번 조사에서 확인한 결과에 의하면, 석회 공동의 수평적 확장에 의한 동굴형성은 지하수위 부근에서 현저하게 나타났다. 이러한 현상은 단양 지역에 있어서도 석회 공동은 주로 지하수위의 상부에 집중적으로 분포하며, 지하수 수위 이하에서는 지하수에 인접한 부분에 많이 분포하고 있으므로, 현장 조사과정에서 지하수 수위의 변동 상태와 최저 지하수위를 확인할 수 있는 지하수위 관측공을 설치·관측하였다.

3.4 지질 선구조대 분석

앞에서 설명한 바와 같이, 지하 공동이 발달하는 방향과 지질 구조선과는 밀접한 관계가 있으므로, 지하공동을 찾기 위해서는 지질구조와 조사 지역에서 우세한 절리나 층리의 방향을 파악하는 것이 중요하다. 석회암과 같이 용해성이 큰 암반에서는 지하수가 흐르는 지중 유로가 서로 연결되어 있고 돌리네와 같이 지표와 지하가 수직으로 연결된 유로를 형성하게 된다. 이에 비하여 용해성이 상대적으로 작은 백운석과 같은 암반에서는 확산 흐름이 주로 발생하고 지하 공동은 불규칙하게 산재되어 서로 연결성도 없으며, 공동 규모도 작은 것이 특징이다.

항공사진 판독 결과 13개 광구에서 약 309개의 돌리네 구조를 파악하였고, 현지 답사를 통하여 7개를 추가로 조사하여 총 316개의 돌리네 구조 분포를 확인하였다 (Fig. 2). 돌리네 분포는 N30~N50W 방향으로 석회암 지대에 분포하고 있으며, 이는 지질구조 (석회암 bedding plane) 방향과 관련이 있는 것으로 분석되었다. 특히, 대량터널 주변의 돌리네가 N30~N50W, N30~60E 방향을 따라 분포하여 선구조 (층리방향)와 관련이 있는 것으로 확인되었다. 용식 함몰 구조 형태는 역원추 (inverted cone) 모양으로 밑면의 규모는 장단경이 최소 15 m 내외, 함몰 깊이 1 m 내외에서 최대 장경 230 m, 단경 100 m, 함몰 깊이 20 m 인 것까지 그 규모가 다양하며, 대부분의 장·단축 비도 1.2 미만으로 분포되어 있다 [6].

3.5 지표지질 조사에 의한 공동분포 분석

지표 지질조사에 의해 발견된 대표적인 공동 분류는 (Fig. 3) 석회암 구간에는 Class II, III, IV 로 분류되었고, 백운암 구간은 주로 Class I, II, III, IV 로 구분되었다 [6]. 지표지질 조사결과에 의하면, 노선 구간 중에 안동터널 출구부를 제외하고는 싱크홀과 동굴 시스템의 석회 공동은 관찰하지 못하여 대규모 공동 발달의 가능성은 희박할 것으로 판단되었다. 그러나 화학분석 및 물리탐사 결과, 백운암 구간에서 상시터널 이후에 소규모 석회 공동의 부존 가능성이 있을 것으로 추정되었다.

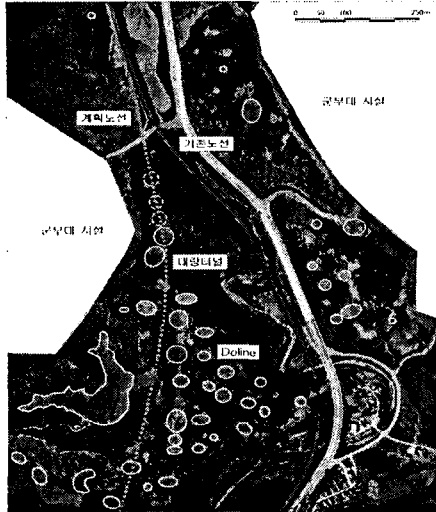


Fig. 2. Aerophoto view of heavily populated doline along "Daerang" tunnel alignment



Fig. 3. Limestone cavern developed at the Daerang tunnel entrance station 163K+150

3.6 광역 물리탐사에 의한 공동조사

항공사진을 판독한 결과는 돌리네가 가장 많이 발달하고 있는 대랑터널 구간에서 수행할 물리탐사 방법을 선정하는데 기초자료로 활용하였다. 물리탐사 (전기비저항, 탄성과 굴절법, GPR) 측정 범위는 광역조사에서 나타난 추정 단층대 범주를 정하였으며, 광역조사와 물리탐사에서 추정된 단층대 분포 위치에 연직시추 및 경사시추를 실시하여 단층대 유무, 단층 파쇄대 발달 심도, 폭 등을 파악하였다.

대랑터널 시점부에는 돌리네가 발견되었으며, 이는 thrust 단층과 관련이 있는 것으로 판단되었다. 조사 당시의 지하수위가 낮은 상태이므로, GPR 에 의한 빈공동과 점토 충전 공동을 구분할 수 있었다 (Fig. 4, 5)

앞에서 기술한바와 같이, 지질 구조대는 지하수 흐름의 주 경로가 되므로 공동 성장 방향에 영향을 주기 때문에 대랑터널의 돌리네도 이러한 영향의 결과라고 분석되었다. 따라서 노두에서 발견된 공동은 석회암 지대인 대랑터널과 백운암 지역에 위치한 터널 노두에서 공동이 발견될 것으로 추정되었으며, 특히 터널 통과 구간에도 공동 존재의 가능성이 높을 것으로 추정되었다.

본 터널 구간에 대해서는 돌리네와 연관된 연약대와 석회공동 등이 터널에 미칠 수 있는 영향을 심도별로 알아보기 위해 쌍극자 간격 (10 m, 20 m)을 달리하여 탐사를 수행하였다. 종방향 측선 결과 영상결과, 등고선도 및 터널이 관통하는 구간 전기비저항 값의 수직 평균값으로 표현하였다.

석회암 구간의 상부에 형성되는 저비저항 구간은 노선 상부에 있는 돌리네나 노선 주변의 돌리네의 영향이며, 백운암 구간의 저비저항대는 파쇄대의 영향으로 상대적으로 풍화를 받은 구간으로 분석되었다. 돌리네들 중에서 163K+050~163K100 구간의 추정 돌리네는 지표상에서는 관찰하기 힘들으나 전기 비저항탐사에서는 돌리네로 평가되었다. 또한, 출구부 164K+220 이후 구간의 저비저항 이상대는 지표에 침하흔적이 있으며, 백운암 구간이지만 소규모 공동의 협재 가능성을 배제할 수 없었다.

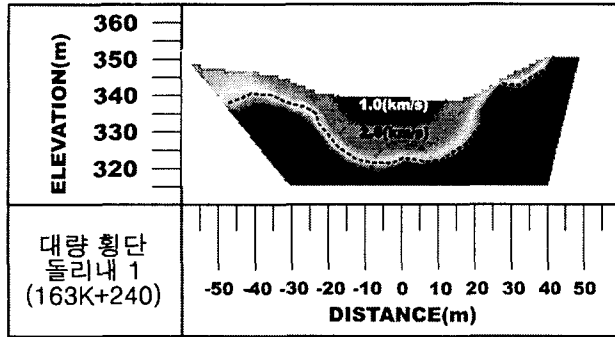


Fig. 4. Doline identified with an electrical resistivity survey at Darang tunnel (163K+240)

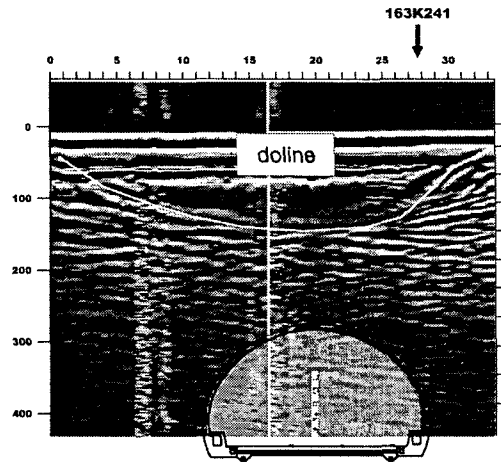


Fig. 5. Radar image of doline at Darang tunnel (163K+240)

터널 통과 구간에 대한 전기비저항값에 의한 암반 분류 결과 수직평균 전기비저항 값에서 변화가 매우 심하며 돌리네나, 단층 영향권에서는 IV, V 등급 구간도 존재한다. 또한, I, II 등급 구간에도 빈 공동의 가능성이 있다고 분석되었다.

GPR 탐사에서 확인되는 돌리네는 먼저 163K+255 이전의 아래 돌리네의 경우는 163K+225~163K+254 구간에서 침하 흔적 최대 심도는 약 7 m (EL.333m)로 터널 상부와 약 8 m의 간격을 가지고 있으며, 위 돌리네의 경우는 163K+275~163K+295 구간으로 침하 흔적이 나타나는 최대 심도는 약 6 m (EL.339m)로 확인되었다.

3.7 시추조사에 의한 공동조사

시추위치는 지표지질조사 및 광역 물리탐사 결과를 기준으로 터널 통과 구간에 걸쳐있는 파쇄대 및 단층대 위치를 선정하였다. 대량터널의 표층을 구성하고 있는 봉적토-풍화암은 GL -1.6 m 이내의 낮은 심도에서 분포하고 있고, 기반암은 석회암 (TTB-11 ~ 16)과 백운암 (TTB-17 ~ 21)으로 구성되어 있으며, 표층 부근에 분포하는 연암을 제외하고 대체적으로 RQD = 70 ~ 100%의 빈도가 우세한 암반으로 확인되었다. 경사시추 (TAB-2) 결과에 의하면, 지표 지질조사 및 물리탐사로부터 추정된 정단층 분포 영역에서 파쇄대가 관찰되었으며, 그 분포 범주 및 영향에 대한 분석을 실시하였다 (Fig. 6). 특히, 소규모 카르스트 공동이 일부 구간에서 발견되었고, 이 결과는 물리탐사의 신뢰도를 재 확인하는 결과가 되었다.

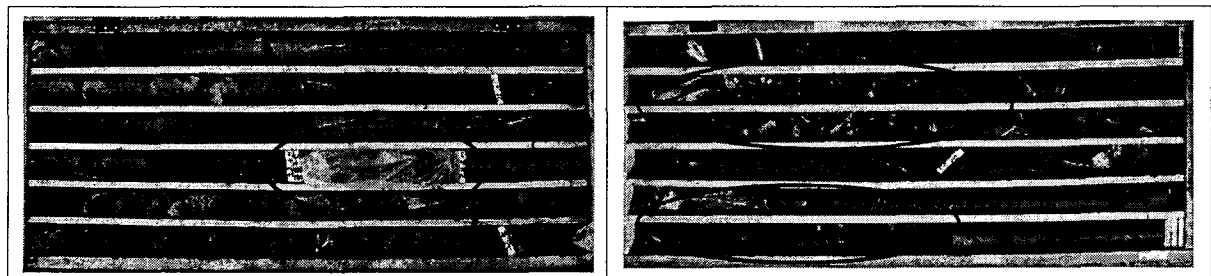


Fig. 6. Karst location identified at TTB-16, 22.6~24.4m (left photo) and fractured zone (right photo) obtained from an inclined boring (TAB-2, 52~54.5, 56.5~57m) at Daerang tunnel

4. 공동형상 시나리오 작성

4.1 카르스트 공동 구분

체계적인 카르스트 공동존재의 가능성은 암종, 지하수 화학성분, 지질구조, 광역 물리탐사 및 현장 시추조사 결과를 이용하여 결정하였다 (Table 6). 암종으로는 화강암, 석회암과 백운암으로서 용식된 지하수에는 양이온과 음이온이 존재하였다. 화강암 지역에서는 Na, K 성분이, 카르스트 지역에서는 Ca, Mg 성분이 많이 분포하였다. 표에서 알 수 있는 바와 같이, 대랑터널 지역에서 Ca 함량이 가장 높게 나타났다 [6].

Table 6. Quantitative classification of a potential karst cave

터널 이름	암종	지하수질 (ppm)		지질구조대	정밀조사	공동존재 가능성
		양이온	음이온(HCO ₃)			
소재1,2터널	화강암	Ca 5.9~25.7 Mg 0.5~5.3	10~51	F1~F4	n/a	×
대랑터널	석회암	Ca 65 Mg 12	113~148	Thrust 단층 대랑단층 F5~F10	시추결과 9개공에서 43군데 발견	★
삼곡터널	백운암	n/a	n/a	소규모 단층 교차 F11	n/a	★
가평터널	백운암	Ca 19.3~53.1 Mg 21.9~26.7	120~157	n/a	n/a	△
예덕터널	백운암 (일부 석회암 band)	Ca 50.8 Mg 37.6	132	석회암 band F12~F14	n/a	○
상시1터널	백운암	n/a	n/a			△
상시2터널	백운암	Ca 47.7~53.4 Mg 22.6~44.2	118~162	종점부 단층구조 인접	시추결과 2개 공에서 발견	★
상시3터널	백운암	Ca 62.7 Mg 27~34	125	상시단층 F15~F16	시추결과 1개 공에서 발견	★
하시터널	백운암	Ca 58.5 Mg 33.8	139	구조선 인접	n/a	○
안동터널	백운암	Ca 64.5 Mg 29.0~41.9	127~161	구조선 인접	n/a	○

Legends: ★ 가능성이 매우 높음 / ○ 가능성 있음 / △ 가능성 있으나 낮음 / × 존재하지 않음

4.2 공동 구분 형태에 따른 카르스트 형식 구분

터널 단면을 중심으로 카르스트 지역에서 나타날 수 있는 다양한 형태의 Karst Type 에 대처할 수 있도록 공동을 6가지로 구분하였다 (Fig. 7). 이에 따른 발파 및 보강방법을 국내에서는 최초로 체계적으로 제시하였다. 보강 방법과 굴착 방법에 대한 상세한 내용은 참고 문헌에 수록되어 있으며 [8], 상세한 내용은 다음 호에 발표할 예정이다.

공동이 분포하는 형태에 따른 카르스트 형식은 비슷한 거동을 하는 암반을 그룹화 분류하여, 설계를 위한 정량적 데이터를 제공하도록 계획하였다. 터널 설계는 석회암 공동 분포 지역임을 고려

하여 터널 상부 2D, 하부 2D 구간에 대한 암반분류를 수행하고, 석회암 공동의 존재 가능성을 판단하여 지반등급/지보패턴 선정시 반영하였다. 또한, 계획 단계에서부터 조사, 설계, 시공에 이르는 모든 과정에서 일관성 있게 적용될 수 있는 객관적인 지표결정을 위하여 3차에 걸친 암반분류를 시행하였다.

암반분류 대상 구간에 대한 선정기준은 화강암 구간에서는 터널 상부 2D, 하부 1D 구간에 대한 시추조사수행 후에 암반분류를 하였으며, 석회암 구간에서는 석회암 공동 등의 영향을 최대한 반영하기 위하여 터널상부 2D, 하부 2D 구간에 대한 시추조사 수행 후에 암반분류를 수행하였다. 터널 구간에 대한 지반등급 선정은 3차로 분류하여 실시하였다. 1차 분류는 시추조사 구간에서의 RQD, 일축압축강도에 의한 분류, RMR분류, Q-System에 의한 분류 방식이며, 2차 분류는 시추구간의 물리탐사 결과 (비저항값, 탄성파속도)와 암반분류간의 상관관계분석을 통한 상관식을 도출한 후, 미시추구간에 대한 RMR 및 Q값을 상관식으로부터 계산/보완하여 구간별 등급을 선정하였다. 마지막으로 3차 분류는 석회암 공동 가능성, 카르스트 지형 (돌리네) 분포, 토피고, 단층-파쇄대 등 지질·지반 공학적 성질을 고려한 등급 조정 실시하였다 [6].

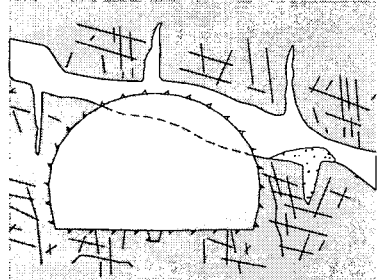
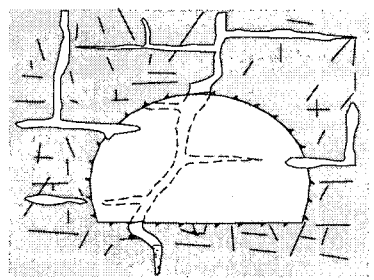
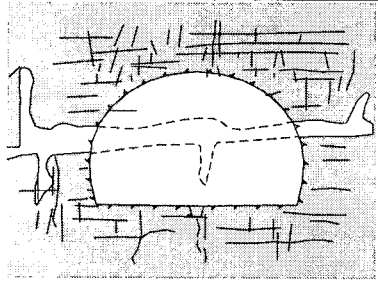
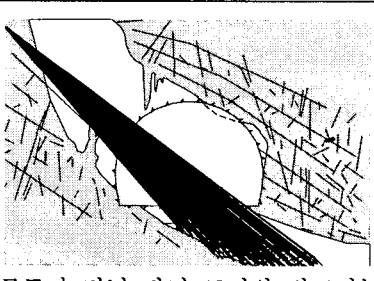
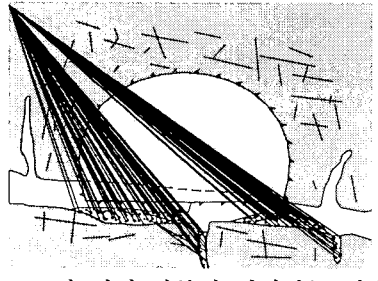
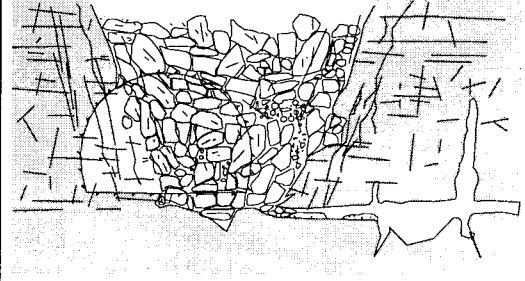
Karst Type	Schematic Configuration	Karst Type	Schematic Configuration
KT-1	 Cave 가 터널 상부에 위치하는 경우	KT-4	 절리면을 따라서 용식이 진전되는 경우
KT-2	 Cave 가 터널 측벽에 위치하는 경우	KT-5	 Cave 규모가 터널 단면 크기와 비교되는 경우
KT-3	 Cave 가 터널 하부에 위치하는 경우	KT-6	 돌리네 하부 통과 경우

Fig. 7. Classification of karst type with cave, joint, and sinkhole locations relative to the tunnel axis

5. 요약

지반조사 결과에 의거하여 돌리네와 공동이 존재하는 지역을 구분하여 지역에 적합한 카르스트 형식을 적용, 예측하였다. 특히, 터널이 돌리네 발달 가능성이 적은 백운암 지역을 통과하는 경우에 소규모의 KT-1 ~ KT-5 가 존재하는 것으로 예측되었다. 그러나 설계시 지반조사의 한계성을 인식하고 시공 중에 필요하다고 판단되는 구간에는 막장 전방의 지질상태를 파악할 수 있는 조사를 선 시행하여, 그 결과를 토대로 최종 등급을 결정하여 안전한 시공에 대처할 수 있도록 해야 한다.

참고문헌

1. Tolmachev, V.V., 1999, Karst and engineering practice, Balkema, Rotterdam.
2. Reuter, F. and V.V. Tolmacev, 1990, Bauen und Bergbau in Senkungs- und Erdfallgebieten, Akademie Verlag, Berlin.
3. Marinos, P.G., 2001, Tunnelling and mining in karstic terrane - an engineering challenge.
4. Redwine, J.C., 1993, Logan Martin dam deep grouting program Hydrogeologic framework in folded and faulted Appalachian karst. Proc. of the fourth Multidisciplinary Conference on sinkholes and the engineering and environmental impact of karst (Applied Karst Geology), (Editor: Barry F. Beck), Panama City, Florida, 25-27 January, 243-254.
5. 한국도로공사, 2000, 지반조사 보고서 - 중부내륙 고속도로 수안보 ~ 구미간 건설공사 (제7공구).
6. 현대건설주식회사, 2001, 지반조사 보고서 - 중앙선 제천 ~ 도담간 복선 전철 건설공사.
7. Webster's Third New International Dictionary, 1976, P.B. Gove (Editor in Chief).
8. 현대건설주식회사, 2001, 설계도면 - 중앙선 제천 ~ 도담간 복선 전철 건설공사.