

석회암공동 분포지역에서의 터널 시공사례

A Case Study on Construction of Tunnel at Limestone Cavity Site

김시격¹⁾, Si-Kyeok Kim, 강인섭²⁾, In-Seop Kang, 김용하³⁾, Yong-Ha Kim, 윤일병³⁾, Il-Byung Yoon, 문훈기³⁾, Hoon-Ki Moon

¹⁾ (주)용마엔지니어링 상무, Managing Director, Yongma Engineering Co., Ltd

²⁾ (주)용마엔지니어링 부사장, Vice President, Yongma Engineering Co., Ltd

³⁾ (주)용마엔지니어링 부장, General Manager, Yongma Engineering Co., Ltd

SYNOPSIS : As construction for road tunnel is increasing, various geotechnical conditions can be faced during the construction stage. Especially, if the tunnel is located in limestone area, many kinds of site investigations such as in-situ boring, electrical resistance survey, TSP(Tunnel Seismic Prediction) and etc., are conducted before and during the construction. By conducting these preliminary tests, location, size, and filling materials in limestone cavities can be approximately estimated. Once some cavities which can be harmful for tunnel safety are predicted, methods for ground reinforcement and tunnel excavation, corresponding those ground conditions, have to be established and verified by measurement data and numerical analysis. If necessary, invert lining should be also considered. In this paper, by studying some cases of tunnels constructed in limestone area, predicted problems during construction and rational countermeasures for those are presented.

Keywords : road tunnel, cavities in limestone area, site investigation, preliminary test, ground reinforcement, measurement, numerical analysis, invert lining

1. 서 론

최근 국내 산업의 발전에 따라 강원도 일대 석회암 지역에 과거 건설된 낮은 운행속도와 좁은 도로폭을 가진 낙후된 도로에 대해서 신규 및 확장 건설공사를 시행하고 있으나 석회암 공동이 분포하고 있어 터널이나 교량등 구조물 안정성에 중요한 영향을 미치고 있다.

용해성 암석인 석회암의 화학적 풍화작용으로 인해 습곡 및 단층 등의 지각변동을 거쳐 발생한 균열면으로 지표수가 흘러들어 지하에서 용식이 진행되어 공동과 점토가 협재된 연약대가 분포하게 된다. 특히 석회암층은 지하수 유입 및 파쇄대를 통한 지표수의 유입으로 불규칙한 공동이 형성되어 이러한 지역에 터널 공사시 막장 붕락이나 균열등의 문제점이 발생할 수 있어 석회암 공동에 대한 각별한 주의가 필요하다.

본 현장은 제 2차 강원도 건설 종합계획에 따라 강릉-동해간의 원활한 교통소통을 도모하기 위해 시공 중인 동해고속도로 4차로 확장공사의 일부 구간으로 터널 시공 중 상부 반단면 굴착공사 진행시 공동으로 인한 붕락발생 구간에 대한 보강대책 및 시공사례에 대하여 고찰하고자 하였다.

2 현장개요

2.1 지형 및 지질

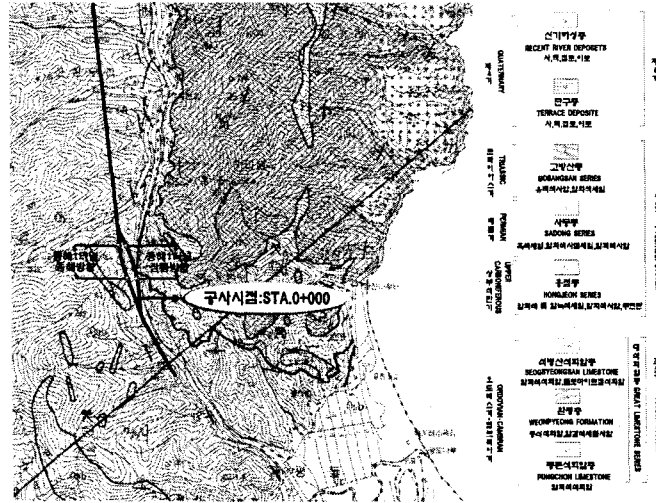


그림 1. 과업지역 지질도

2.1.1 지형특성

본 과업지역은 동해고속도로(동해~주문진간) 확장공사 제4공구 지역 중 동해1터널이 공사중인 지역으로 지형은 50~400m 내외의 고도를 갖는 산릉과 계곡으로 형성되어 있다. 이 산릉은 NS~NS10E 방향의 기존 동해고속도로를 중심으로 평행하게 발달되며 계곡의 방향은 주 계곡방향 NS~NS10E 이며 주 계곡의 방향의 서측부는 N70~80W, N70~80E 방향으로 형성되며 동측부는 N70~80E 방향과 N30~40W 방향이 우세하게 발달한다.

본 과업지역 지형은 능선부 일대를 제외한 다른 지형은 단면상 강릉방향 터널쪽으로 급경사를 이루는 지형이며 터널 상부에는 국도 7호선, 터널 하부로는 영동선 철도 터널이 교차하고 있고 경사면 우측으로 기존 동해고속도로 터널이 위치하고 있다.

2.1.2 지질특성

본 과업지역을 구성하는 지질계통은 상기 지질도에 나와 있는 바와 같이 조선계의 대석회암통, 평안계의 홍점통, 사동통, 고방산통 및 제4계의 신생대 제4기 층적층으로 구성되어 있다.

본 지역의 암질은 대부분 상층부는 홍점통을 이루는 암회색 및 암녹색 셰일로 구성되며, 하층부 및 동해터널 종점부 지역은 대석회암통의 암회색 석회암이 협재하는 것으로 판단된다. 흑색 셰일로 구성된 사동통은 동해1터널 노선 동측과 기존 고속도로변을 따라 평행하게 분포하며 고방산통은 노선 동측의 산릉지역에 대부분 분포하고 있다. 대석회암통의 석회암은 암회색 석회암과 담회색 석회암이 호층을 이루어 분포하며 층리의 주향은 N30E, 경사 20SE를 이루며 소규모 습곡을 보여주기도 한다. 과업지역 상층부에 대부분 분포되어 있는 홍점통의 암석은 암회색~암록색 셰일과 암회색 사암으로 구성되며 소규모 무연탄이 협재한다.

동해1터널 시점부에는 다양한 형태와 규모를 가진 용식공동이 발달하고 있는 석회암이 분포하고 있으며, 종점부에는 파쇄와 균열이 심한 셰일과 사암이 분포하고 있다. 이들 지층간의 경계는 약 STA. 0+360~380 구간에 존재하며, 종점부쪽으로 약 30°정도의 경사를 이루고 있는 것으로 판단되며 이 지질 경계면은 단층점토 및 각력들로 이루어진 단층파쇄대로 예상된다.

2.2 석회암 공동 발생원인 및 분포현황

시공중 추가 시추조사(12공)를 실시하여 일부 시추공에서 공동구간을 확인하였으며 전기비저항탐사를 종단방향 3축선 횡단방향 3축선을 실시하여 공동구간 및 암질 불량구간을 추정하였다. 또한, 동해방향 (STA.0+092~0+230)과 강릉방향(STA.0+121~0+270)으로 TSP탐사를 실시하여 공동출현 예상구간 및 절리 밀집도를 고려해서 집중보강구간, 보강구간, 선택적 보강구간으로 구분하여 보강대책을 수립하였다.

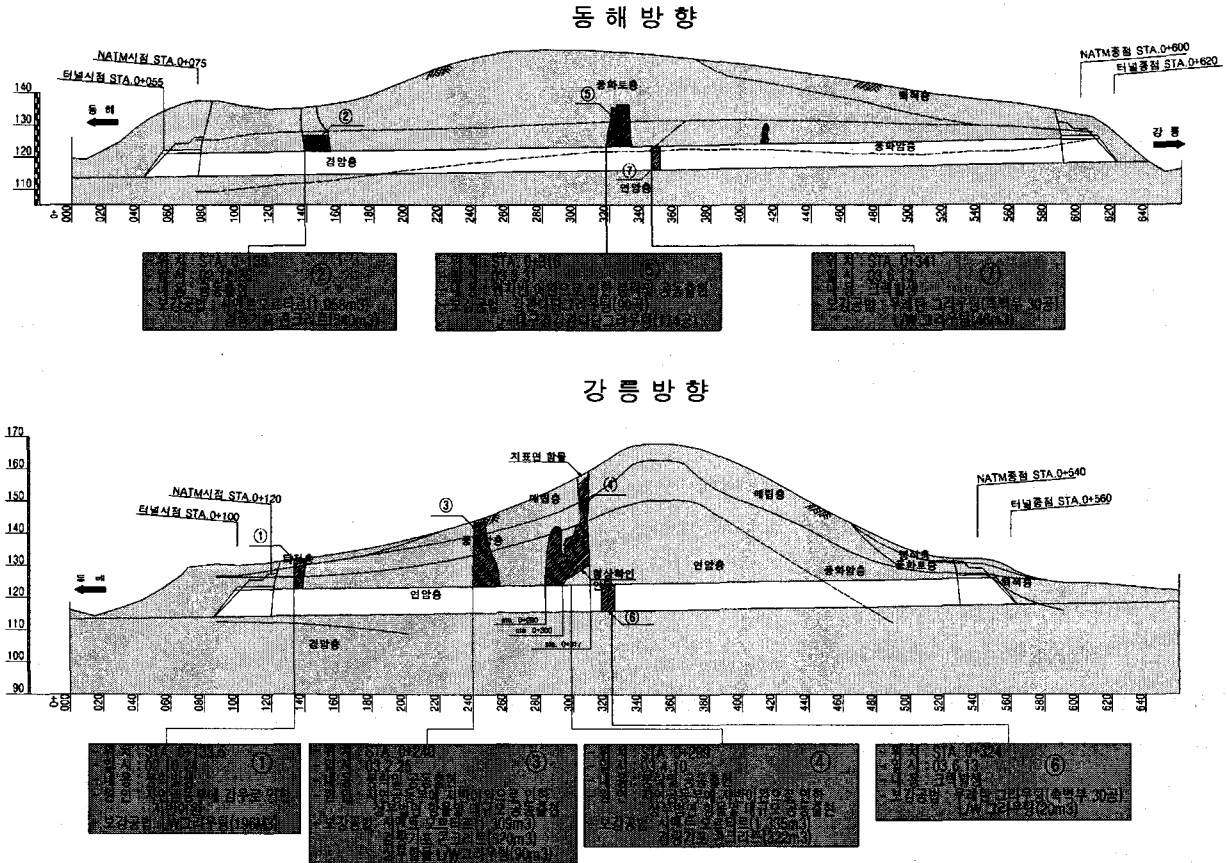


그림 2. 공동 분포 현황

1) 동해방향 STA.0+133~0+140 구간

본 구간은 동해1터널 동해방향 굴진과정에서 연장 약 15m, 폭 3~10.2m, 높이 5~19m 규모의 대규모 공동이 STA.0+139에서 발견되었으며 공동에 인접하여 국도 7호선이 통과하고 있다.

기반암인 석회암에 지질구조(균열 및 단층)가 발달되어 있고 막장에서 용수는 발견되지 않았으나 상당히 오랜 시간 이전에 주변에서 유로가 형성되었던 것으로 추정되며 유로를 따라 흐르는 물의 용식작용으로 인해 공동이 형성된 것으로 추정된다.

2) 강릉방향 STA.0+230~0+257 구간

본 구간은 고생대 초기에 퇴적되어 생성된 조선계 대석회암통에 속하는 암회색의 석병산 석회암층이 터널 시점부에 분포하여 석회암내 발달된 수직절리에 따라 용식석회 공동이 발달되어 있다.

용식작용에 의해 형성된 공동내부에 주변 석회암의 각력 또는 암괴와 점토 등 분급도가 낮은 혼합물로 충전된 붕락형 공동으로 터널굴진에 의해 막장면 내로 충전물의 붕락이 발행하였으며 막장면 내부 붕괴 영향이 지표면까지 전달되어 지표면이 함몰되어 있는 상태이다.

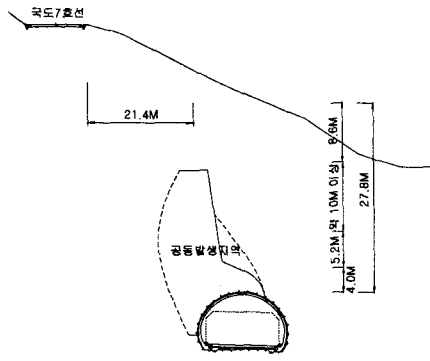


그림 3. 공동현황 (동해방향 STA.0+139)

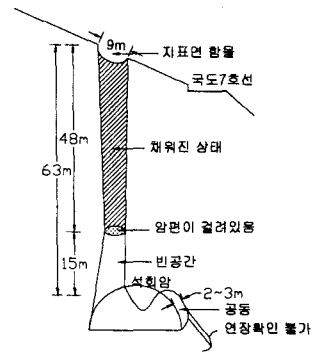


그림 4. 공동현황 (강릉방향 STA.0+240)

3) 강릉방향 STA.0+280~0+305 구간

본 구간은 터널 굴진과정에서 용식 석회암 공동 노출 되었으며 국도 상부까지 경사져서 연결되어 있으며 공동 내에 함수량이 많은 토사 충전물 중 일부는 터널내로 붕락되었고 나머지는 큰 암괴에 걸려 이동이 중단된 상태에서 국도7호선 사면이 함몰(직경 약 13m, 깊이 약 5m)되었다. 석회암 지대의 공동은 불규칙한 형태로 생성되어 노출되지 않은 공동의 위치 및 규모를 파악하기 어려우며, 확인되지 않은 공동으로 인해 하반 굴착이 완료된 후, STA. 0+310~320(강릉) 구간의 좌측상단 아치부에 추가적인 균열(20~30cm)이 발생되었다.

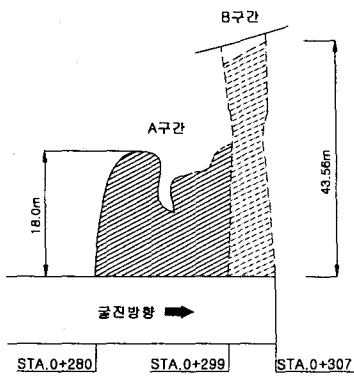


그림 5. 공동현황 (중단면도)

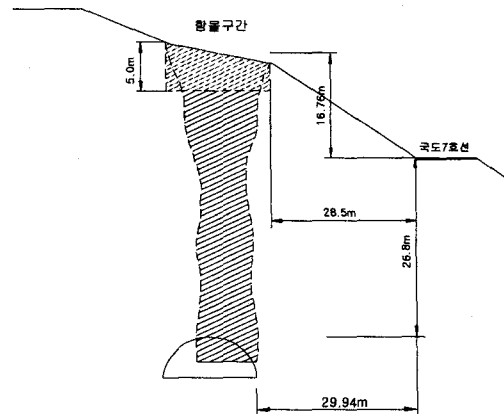


그림 6. 공동현황 (강릉방향 STA.0+299)

3. 석회암 공동의 특성

3.1 석회암 지대의 지형특성

석회암(Limestone)에는 여러 종류가 있는데 주로 방해석(CaCO_3)의 형태로 존재하는 탄산염광물이 최소한 50% 이상인 암석을 가리킨다. 석회암 지대에서 발견되는 독특한 유형의 지형을 총칭하여 "카르스트(Karst)"라고 하며, 주로 탄산칼슘(CaCO_3)이 주성분인 석회암이 탄산가스를 포함한 빗물에 잘 용해되기 때문에 발달한다.

돌리네(Doline)는 석회암이 용식되어 형성되는 오목한 와지로서 가장 흔한 카르스트 지형중의 하나로서 평면형태는 대체로 원형 또는 타원형이며 지름은 수 미터에서 수 백미터까지이며 깊이도 1m미만에서 백미터까지 다양하다. 돌리네는 집단적으로 발달하는 것이 보통이며, 돌리네의 가운데는 빗물이 빠져나가는 배수의 역할을 하는 싱크홀이 존재한다. 일련의 돌리네가 성장하여 인접한 2개 이상의 돌리네가 결합되어 형성된 와지를 우발라(Uvala)라고 하며, 와지 안에는 한 개 이상의 싱크홀(Sink hole)이 존재한다. 우리나라에서는 단양, 영월, 삼척 등의 일부지역에 돌리네가 집중적으로 발달되어 있다.

석회암동굴은 일반적으로 절리와 같은 암석의 틈을 통하여 침투해 들어간 물이 지하수를 이루고, 이러한 지하수가 하천으로 흘러들어갈 때 대량의 석회암이 용해되어 제거됨으로서 형성되어진다. 동굴의 천장에서 떨어지거나 동굴벽을 흘러내리는 물에 용해된 탄산칼슘이 결정을 이루면서 침전, 집적됨으로써 발달하는 지형을 스펠레옴(Speleothem)이라고 하며 종유석과 석순, 석주 등이 여기에 속한다.

3.2 석회암의 암석특성 및 공동의 형성

석회암은 탄산염 광물을 최소 50%이상 함유하고 있으며, 암반 내에는 층리, 절리 및 단층파쇄대 같은 많은 불연속면들이 존재하는데 이들은 지표수 및 지하수 통로의 역할을 할뿐만 아니라 지하수로 인해 화학적 또는 기계적 풍화가 발생하여 지층형성에 큰 영향을 준다.

석회암의 주 구성성분인 방해석은 이산화탄소 및 물과 반응하여 용해되며 대기중의 이산화탄소(CO₂)는 강우의 형태로 지표로 유입되며, 지표 내로 침투하면서 이산화탄소의 농도가 더 높아져 방해석의 용해가 가속화된다. 석회암층의 두께가 클수록 석회암 공동 발달 가능성이 높으며 공동의 형성은 균열부(절리계, 단층 등)와 관련되는데, 일차 지하로 흡수된 강우는 작은 틈새를 느린 속도로 중력 이동하며, 이러한 과정에서 균열은 용해되어 확장되고 지하수의 유동 속도는 빨라지게 된다.



그림 7. 석회암공동 및 2차생성물 형성

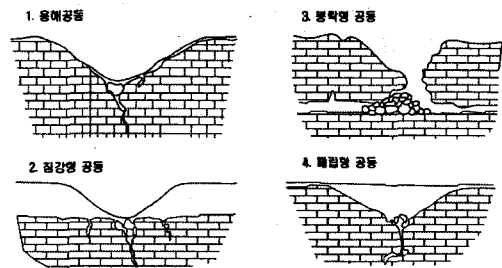


그림 8. 공동의 형태

3.3 석회암공동이 구조물에 미치는 영향

수 만년 혹은 수 십 만년에 걸쳐 형성된 석회암 공동은 주변 조건의 변화가 없는 상태에서는 대체로 안정하게 존재한다. 그러나 공동 주변의 지하수위 변동과 같은 내적요인 및 상재하중의 증가와 같은 외적요인에 의해 공동의 발달이 촉진되어 공동이 합몰되기도 한다. 지하수위 변동은 주로 공동을 상향으로 발전시켜 지표상부의 합몰을 발생시키며, 자연적인 지하수위 변동보다는 과도한 지하수 개발과 같은 인위적인 지하수위 변동에 더 큰 원인이 있다. 상부면의 침강은 주로 공동상부에 상재하중(구조물하중, 교통하중, 진동하중)이 작용하는 경우에 발생한다.

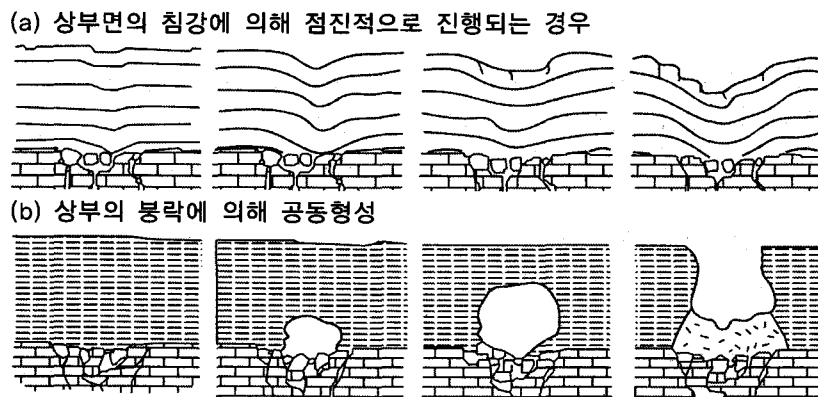


그림 9. 석회암 공동의 발전단계

4. 주요구간 공동보강 및 안정성 검토

4.1 동해방향 STA.0+139~0+154 구간

본 구간은 단기간내에 함몰의 우려가 없는 것으로 추정하였으나 불확실성에 대한 대비로, 시멘트 모르타르 Arch 구조체를 형성하여 공동이 함몰될 경우 하중을 지지하여 터널의 안정성을 확보하였으며 System Rock Bolt(L=4m)로 지반을 보강하여 지중보강체(Rock Arch)를 형성하고 이 보강체가 보강체 외측으로부터 작용하는 하중을 지지하므로, 시멘트 Mortar Arch도 Rock Arch와 일체거동을 하여 Rock Bolt 길이와 동일한 4m 두께의 구조체를 형성하였다.

시멘트 모르타르 타설시 경화되어 구조체로서 역할을 수행하기 이전에는 하중으로 작용하므로, 이 하중을 지지하기 위해 강지보재의 규격변경(H-100×100×6×8→H-150×150×7×10) 및 간격 조정(1m→0.5m), 슛크리트 타설두께를 변경(16cm→30cm, Wire Mesh 2겹) 하였다.

또한, 원지반과 시멘트 모르타르 경계면, 단계별로 주입된 시멘트 모르타르 층간을 일체화시키기 위해 강판다단 그라우팅을 공동 전후에 시공하였고, 공동상부가 함몰될 경우 붕괴도의 단위중량이 커서 작용 하중이 크므로, 터널천단 상부 4m ~ 9.2m(약 1D) 구간은 하중을 경감시키기 위해 경량기포 모르타르로 충전하였다.

4.2 강릉방향 STA.0+230~0+257 구간

지표면에서부터 43m 구간은 활동면의 형상이 썩기형상으로 채워진 상태이므로 현상태를 유지하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단되었으며 공동이 형성된 15m 구간중 상부 10m는 자중이 작은 경량콘크리트로 채우고, 나머지 5m 구간은 경량콘크리트 또는 시멘트 모르타르로 충전시켰다. 터널지보에 있어서는 만약의 사태를 대비하여 강성이 큰 H형강(H-150×150×7×10 이상)을 50 ~ 100cm 간격으로 설치하여 안정성에 대비하였다.

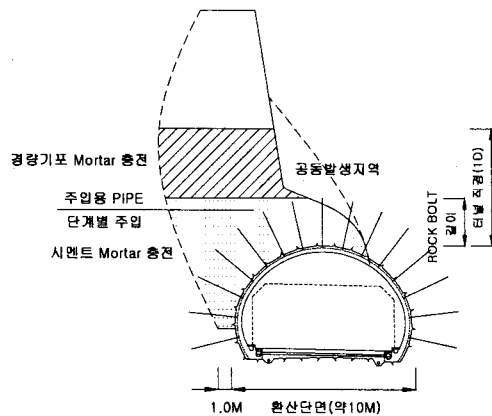


그림 10. 공동처리 (동해방향 STA.0+139)

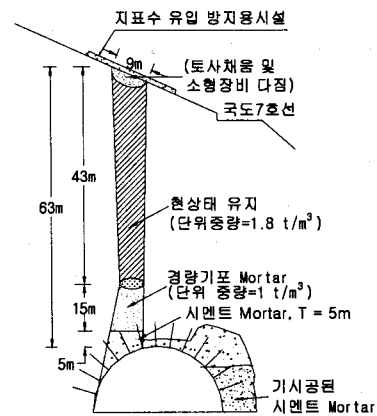


그림 11. 공동처리 (강릉방향 STA.0+240)

4.3 강릉방향 STA.0+280~0+305 구간

본 구간은 A구간과 B구간으로 나누어 보강하였으며 A구간은 터널천단부에서 5m까지는 시멘트몰탈로 보강하였고 상부 7.4m는 경량기포콘크리트로 보강하였다. B구간은 지표면에서 함몰이 발생된 바 터널 안정성에 중대한 문제가 있을 것으로 판단하여 지상에서 43.5m구간을 시멘트밀크 그라우팅으로 보강하였고 터널천단부에서 대구경강판다단 그라우팅을 적용하였다.

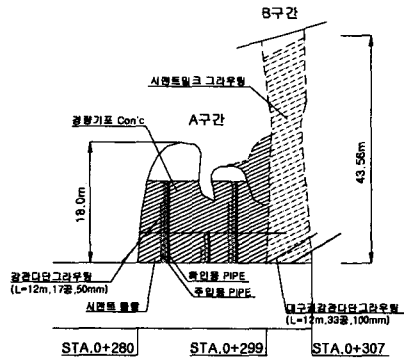


그림 12. 공동처리 (종단면도)

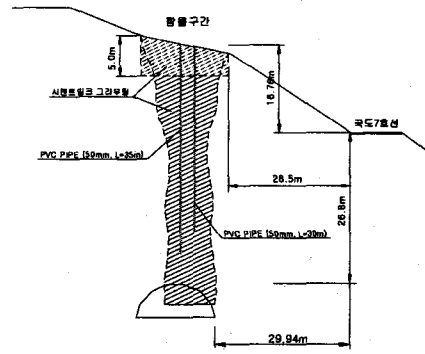


그림 13. 공동처리 (강릉방향 STA.0+299)

4.4 공동보강시 안정성 검토

공동발생구간에 대하여 시멘트몰탈과 경량기포콘크리트 타설 등의 보강 실시 후 터널 안정성을 확인하기 위하여 다음과 같이 수치해석을 수행하였다. 해석단계는 시공순서를 고려하여 동해방향 상반굴착 후 강릉방향 상반굴착의 순서로 진행하였으며 해석에 적용된 지반물성치는 표1과 같다.

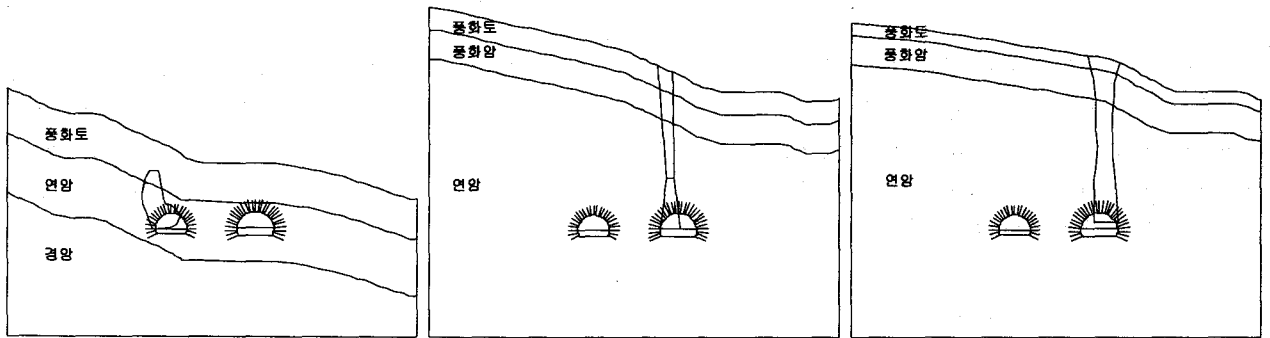


그림 14. 해석단면 A (STA. 0+139) 그림 15. 해석단면 B (STA. 0+240) 그림 16. 해석단면 C (STA. 0+299)

표 1. 해석 적용 지반물성치

구 분	풍화토	풍화암	연암	경암	점토층전 공동	강관다단 그라우팅	시멘트 모르타르	경량기포 콘크리트
단위중량(tonf/m ³)	1.95	2.10	2.20	2.50	1.85	2.10	2.15	1.00
탄성계수(tonf/m ²)	4,000	30,000	150,000	500,000	5,000	170,214	150,000	23,000
포아송비	0.35	0.32	0.30	0.25	0.45	0.29	0.30	0.30
점착력(tonf/m ²)	3.0	15.0	20.0	50.0	2.0	20.0	20.0	15.0
내부마찰각(°)	30.0	32.0	33.0	38.0	25.0	32.0	33.0	32.0

터널 안정해석 결과 공동발생구간에 대하여 보강을 실시한 후 상부반단면 구간에 대하여 안정성검토 결과 다음과 같이 안정한 것으로 판단되었다.

표 2. 해석결과

(tonf/m²)

구 분	STA.0+139		STA.0+240		STA.0+299		허용치
	동해	강릉	동해	강릉	동해	강릉	
천단변위(mm)	-2.179	-5.348	-14.246	-15.096	-14.345	-10.663	-
Rock Bolt 축력 (ton)	2.33	2.07	7.62	6.10	2.72	1.60	8.7
Shotcrete 휨압축응력	455.8	321.1	725.9	580.9	814.0	546.9	840
Shotcrete 전단응력	3.186	3.367	6.971	6.097	8.475	6.373	35.4

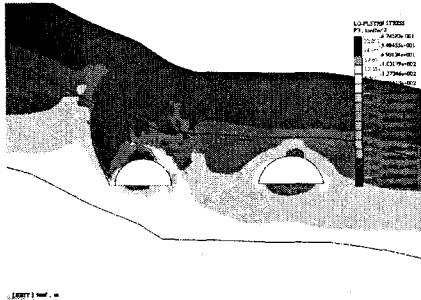


그림 17. 주응력도(Sta.0+139)

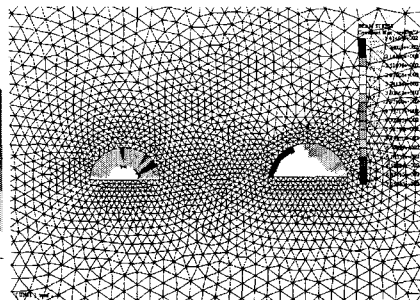


그림 18. 슛크리트응력도(Sta.0+240)

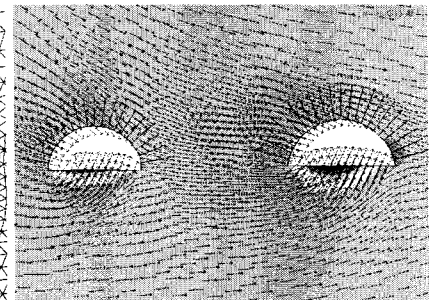


그림 19. 변위도(Sta.0+299)

5. 공동발생구간 터널 하반굴착시 보강대책

5.1 측벽부 횡방향 강관다단 그라우팅 적용

하부 반단면 굴착시 불안정한 구간에 대해서 보강방법 검토 결과 측벽부 횡방향 강관다단 그라우팅 보강시 터널 상·하반 경계에서 국부적으로 큰 휨 인장응력이 발생하지만 시공시 일정간격으로 Steel Rib 로 보강하므로 초과된 인장응력을 충분히 수용할 수 있을 것으로 판단되었다. 터널 슛크리트 지보재의 안정성을 충분히 확보하기 위해서는 추가로 종방향 강관다단 그라우팅 보강이 필요하지만 보강효과 및 추가 공사비 비교시 다소 비경제적인 것으로 판단되었다.

표 3. 보강대책 비교

구 분	측벽부 종방향 강관다단 그라우팅	측벽부 횡방향 강관다단 그라우팅
공 법 개요도		
공 법 특 징	<ul style="list-style-type: none"> • 터널측벽하부에 종방향 강관삽입 및 시멘트 그라우팅으로 강관과 주변 지반을 고결 • 측벽부 보강시 시공성 양호 • 보강효과가 우수하고 시공실적이 풍부 	<ul style="list-style-type: none"> • 터널측벽하부에 하향경사로 강관삽입 및 시멘트 그라우팅으로 강관과 주변 지반을 고결 • 하반굴착시 측벽변위 억제효과 우수 • 보강효과가 우수하고 시공실적이 풍부
적용성	<ul style="list-style-type: none"> • 측벽부 보강공사시 시공성이 측벽부 횡방향 강관다단그라우팅에 비해 유리하나 터널 하반 측벽부와 그 하부의 지반보강 측면에서 불리 • 동일한 범위, 동일한 구간의 보강에 있어 측벽부 종방향 강관다단그라우팅보다 강관다단 공사수량이 많아 공사비 고가 	<ul style="list-style-type: none"> • 측벽부 보강공사시 측벽부 종방향 강관다단그라우팅에 비해 시공성은 불리하나 터널 하반 측벽부와 인버트 하부에 파쇄대나 연약지반이 분포하는 경우, 지반보강 효과 우수 • 측벽부 종방향 강관다단그라우팅에 비해 공사수량이 적어 경제적인 공법

5.2 인버트 콘크리트 설치 검토

동해 1터널 시점부에 분포하는 석회암 지반은 용식 작용에 의해 공동이 형성되어 있고 공동 내부에 함수비가 높은 다량의 토사가 충전되어 있어 터널에 큰 편압의 작용이 우려되기 때문에 공동부와 굴착 시 붕락이 발생한 구간, 시공중 변위 발생량이 허용범위를 초과하고 강지보재 변형이나 슛크리트 크랙이 발생한 구간 등에 대해 터널 하반의 측방변위를 방지할 수 있도록 인버트 설치를 검토하였다.

공동붕락이 발생하였거나 터널 굴착 중 변위 발생량이 커 강지보재 변형이나 슛크리트 크랙이 발생한 구간에 대하여 시공중 내공 및 천단침하 계측자료를 검토하여 인버트 설치구간을 결정하였다. 터널 계측치에 대한 평가는 지반을 고려하여 내공변위 10cm를 기준으로 하였으며 동해방향 0+139~0+154, 0+400~0+425의 공동은 규모가 작고 계측자료 확인 결과 변위 발생량도 크지 않으므로 인버트 보강은 필요 없는 것으로 판단되었다.

표 4. 동해방향 계측결과

(단위:cm)

구 간	변 위				비 고
	내공변위	천단침하	좌측대각	우측대각	
0+139~0+154	0.6	- 1.6	0.4	- 0.1	공동 및 붕락발생구간 인버트 설치 필요 없음
0+340~0+350	- 12.2	- 9.0	- 6.4	- 5.8	강지보재 변형 및 슛크리트 크랙 발생구간 인버트 설치 필요
0+400~0+425	- 0.5	- 0.3	- 0.7	- 0.3	공동 및 붕락 발생구간 인버트 설치 필요 없음
	- 0.5	- 1.3	- 2.4	-	

표 5. 강릉방향 계측결과

(단위:cm)

구 간	변 위				비 고
	내공변위	천단침하	좌측대각	우측대각	
0+320~0+330	- 13.5	-4.2	- 1.0	- 5.1	강지보재 변형 및 슛크리트 크랙 발생구간 인버트 설치 필요
0+360~0+385	- 3.4	- 8.8	- 1.5	- 13.7	강지보재 변형 및 슛크리트 크랙 발생구간 인버트 설치 필요
0+505~0+535	- 10.7	-2.4	- 2.7	- 4.1	강지보재 변형 및 슛크리트 크랙 발생구간 인버트 설치 필요
	- 10.4	-3.3	- 2.4	- 2.7	

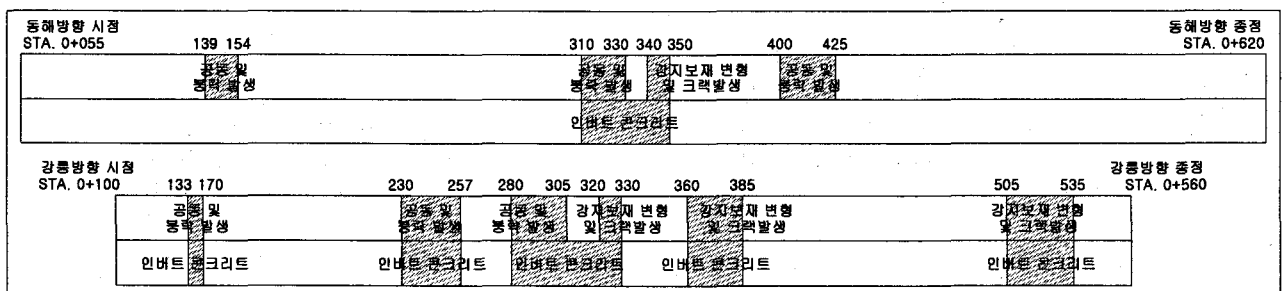


그림 20. 터널현황 및 인버트 콘크리트 설치

6. 결 론

본 시공사례를 통하여 석회암공동이 발생한 터널구간에 대하여 적절한 공동충전 및 터널보강공법을 통하여 안전하게 터널시공을 완료하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 석회암 분포지역에서 터널굴착시 사전에 전기비저항탐사, 시추조사, TSP탐사 등을 통해 공동위치, 규모, 연장, 충전물 등을 확인할 필요가 있음을 알 수 있었고 특히, 공동에 토사 등의 충전물 존재시 터널굴착 과정에서 예기치 못한 붕락사고 등 위험이 존재하므로 반드시 사전에 확인을 하여야 한다.

(2) 터널 천단부 공동구간은 Arch 구조체를 형성할 수 있도록 시멘트 몰탈로 보강하고 그 상부는 경량 기포 콘크리트로 보강하였으며 하반 굴착시 측벽부 횡방향 강관다단그라우팅을 보강 후 터널굴착을 안전하게 수행할 수 있었고 수치해석을 통하여 안정성을 확인하였다.

(3) 공동 붕락구간 및 계측결과 분석 후 변위발생량이 과다한 구간에는 인버트를 설치하여 터널 안정성을 향상시켰다.

참고문헌

1. (주)용마엔지니어링(2002), “동해1터널 공동발생구간 처리방안검토”, 동해자문단 기술검토서.
2. (주)용마엔지니어링(2002), “동해1터널 막장붕락에 따른 대책방안검토”, 동해자문단 기술검토서.
3. (주)용마엔지니어링(2004), “동해1터널 라이닝보강 및 인버트시공 적정성검토”, 동해자문단 기술검토서.
4. 박광준 외(2002), “석회암 공동이 터널의 안정성에 미치는 영향”, 한국터널공학회 학술논문.
5. 한공창 외(2002), “석탄 채굴공동 상부터널의 안정성분석”, 한국터널공학회 학술논문.
6. 송승훈(2006), “공동변화에 따른 석회암지반의 변형특성에 관한 논문”, 한양대학교 석사논문.
7. Fookes, P.G and Hawkins, A.B(1998), “Limestone weathering ; its engineering significance and a proposed classification scheme”, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 19, pp.191~201.