

화산 칼데라를 관통하는 철도터널 설계사례

A Case Study of Railroad Tunnel Design through a Volcano Caldera Area

최효원*[†], 문대중** , 정치광* , 김영덕*** , 김범상*** , 우성원***

H.W. Choi*[†], D.J. Moon** , C.K. Jung* , Y.D. Kim*** , B.S. Kim*** , S.W. Woo***

Abstract It is known that about 20 volcano calderas that are created by igneous activity during Cretaceous period are distributed in South Korea. This is a case study of railroad tunnel design through the Hwa-san caldera which is located between Gun-wi-gun and Young-cheon-si. The tunnel is expected to encounter several faults such as Nogosan ring fault, Woobo fault, Goesanri fault. In addition, there are a good many nearby reservoirs that are containing agricultural water, because this region is considered one of the lowest rainfall areas in South Korea. In this case, groundwater may steadily flow into the tunnel from faults during tunnel excavation, because some of these reservoirs are linked up to the tunnel by faults. Some reinforcement methods such as waterproof grouting was adopted to limit groundwater inflow into the tunnel.

Keywords : Volcano Caldera, Ring Fault, Reservoir, Waterproof Grouting

초 록 백악기의 화성활동으로 인해 생성된 화산(Volcano) 칼데라 지형은 대한민국 내 약 20개소정도 분포하고 있는 것으로 알려져 있다. 본 논문은 이들 칼데라 지형 중 경북 군위 및 영천 지역에 위치하고 있는 화산(The Hwa-San Mountain)칼데라를 관통하는 철도터널의 설계 사례이다. 과업구간에는 화산칼데라에 의해 형성된 수직 정단층인 노고산 환상단층과 가음단층계에 수반되는 우보단층, 피산리단층 등이 있어 터널 굴착시 여러 단층과의 조우가 예상된다. 또한 지역특성상 소우지 지역으로 인근에 다수의 저수지가 분포하고, 일부 단층들은 저수지와 연결된 것으로 나타났다. 이러한 경우 터널 굴착시 단층을 통해 지속적인 지하수 유입이 가능하여 차수 그라우팅 등 보강 계획을 수립하였다.

주요어 : 칼데라, 환상단층, 저수지, 차수 그라우팅

1. 서론

국내에 시공되는 산악터널은 주로 지반조건이 양호한 암반에 건설되는 경우가 대부분이다. 이 경우 터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 암반내 절리와 단층, 파쇄대와 같은 연약대이다. 특히 칼데라 지형의 경우 활발한 화성활동의 결과로 단층의 발달이 예상되어 터널 설계를 위해서는 정밀하고 광범위한 지질 및 지형분석이 요구된다. 본 논문은 경상도 군위 및 영천지역에 위치하고 있는 화산칼데라 지형을 관통하는 철도터널의 설계 사례이다.

† 교신저자: 이원이엔지 지반구조사업본부(threetower@naver.com)

* 이원이엔지 지반구조사업본부, ** 도담이앤씨 지반터널부, *** 포스코건설 토목환경사업본부

2. 본 론

2.1 칼데라(Caldera) 지형

2.1.1 칼데라 개요

칼데라(Caldera)는 요리용 냄비를 의미하는 라틴어 'caldaria'에서 유래된 스페인어로 화산활동에 수반된 침강 또는 함몰 구조에 의해 형성된 지형을 의미하는 것으로 화산 분출 후 생성된 마그마 챔버의 부분적인 공동으로 인해 형성된다. 마그마 챔버는 마그마가 급속히 분출될 때 생긴 빈공간을 말하며 이 빈공간으로 인해 윗부분의 지반이 서서히 가라앉아 함몰이 발생하게 된다. 이 지반의 함몰에 수반하여 균열대(단층)가 형성되고 이 균열대를 따라 추가 분출이 발생하게 된다.

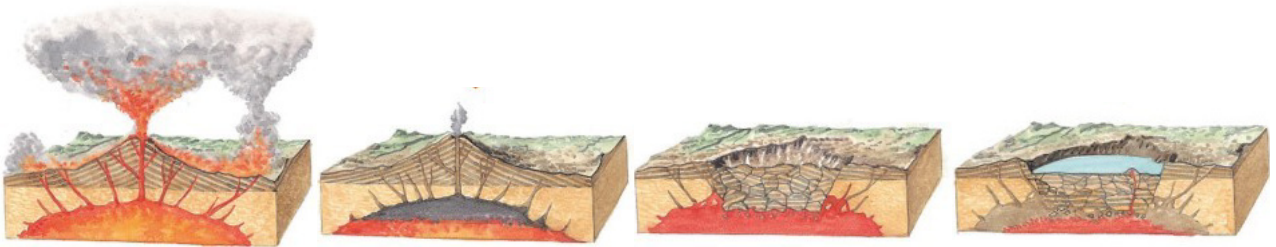


Fig. 1 칼데라 형성 과정 [1]

2.1.2 한반도 칼데라 분포 분석

한반도 화산 함몰구조 및 환상 복합암체에 관한 연구(차문성, 윤성효, 1988)에 의하면 대한민국 내 백악기의 화산 및 심성 활동으로 인한 화산 칼데라 지형은 대략 20개소가 분포하고 있고, 이들은 크게 영동~광주 구역과 부산~대구 구역으로 구분된다. 과업구간에 해당하는 사화산 칼데라인 금성산칼데라와 화산칼데라는 부산~대구 구역에 속한다.

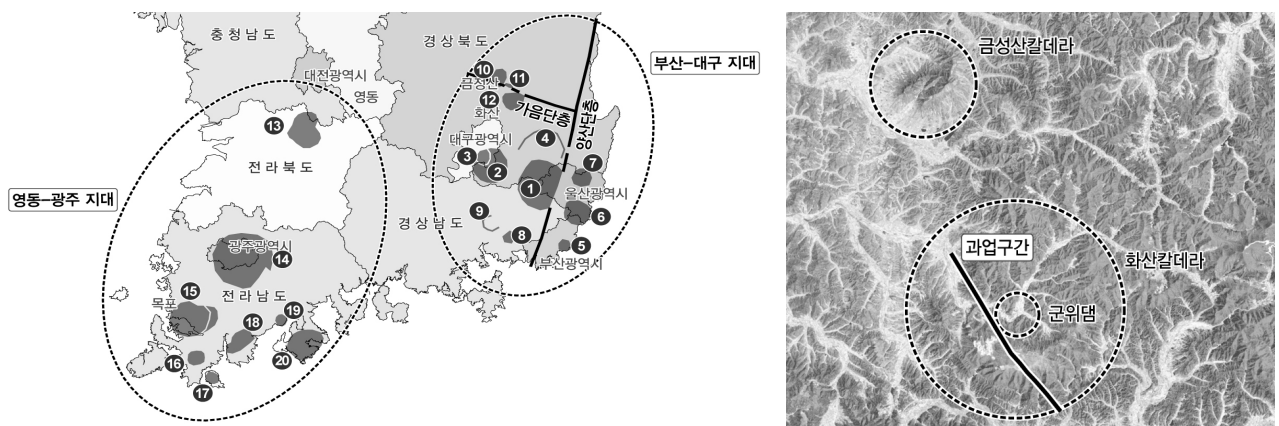


Fig. 2 대한민국 내 사화산 칼데라 지형 분포도 및 과업구간 칼데라 현황 [2,3]

Table 1 과업구간 칼데라 지형 현황(부산-대구 지대) [2,3]

구분	칼데라 명칭	직경(km)(장축×단축)	화산암 종류	Ring intrusion	중양부 심성암
10	금성산	8×10	유문암, 현무암	유문암	-
12	화산	16×13	유문암질 응회암, 응회암	응회암류	-

2.2 과업구간 지형 및 지질특성 분석

2.2.1 과업구간 현황

과업구간은 중앙선 도담과 영천을 연결하는 노선 중 행정구역상 경상북도 군위군 의흥면~영천시 화산면 일원을 통과하는 구간으로 터널은 매성터널과 화북터널이 계획되어 있으며, 장대터널로 계획된 화북터널은 방재 및 공기확보를 위해 경사갱 2개소를 포함하고 있다.



Fig. 3 중앙선 도담~영천 복선전철 노반건설공사 제11공구 프로젝트 현황 [2]

2.2.2 화산(The Hwa-San Mountain)칼데라

예정노선이 통과하는 화산칼데라는 대표적인 사화산 칼데라 지형으로 의성분지 가음단층계에 분포하는 3개의 칼데라(금성산칼데라, 북두산칼데라, 화산칼데라) 중 최남단인 경북 군위군 동부와 영천시 북부에 위치하며, 반경 8km의 환상 단층대가 형성되어 있고, 단층을 따라 관입 응회암이 분포하고 있다. 화산칼데라는 화산체 상부의 칼데라가 심하게 침식 제거되고, 그 하부의 지질분포 및 지질구조로서 칼데라의 하부 잔존구조임을 식별할 수 있는 고기 화산암 복합체이다.

2.2.3 칼데라 지형 및 지질 조사결과

전체적인 지형은 가음단층계에 수반되는 우보단층과 괴산리단층의 전단특성이 나타나고, 칼데라의 환상단층에 의한 함몰로 수직의 정단층이 많이 나타나고 있다. 환상단층 내부에 분포하는 북서~남동 방향 단층계는 노고산 환상단층을 정단하지 않으며, 노고산 환상 단층은 방사상의 선형구조(단층)에 의해 단절되는 형태를 보이고 있다. 과업구간 인근에 총 6조의 단층 분포가 예상되며, 이들 중 5조의 단층(F3 제외)이 터널과 교차할 것으로 예상된다.

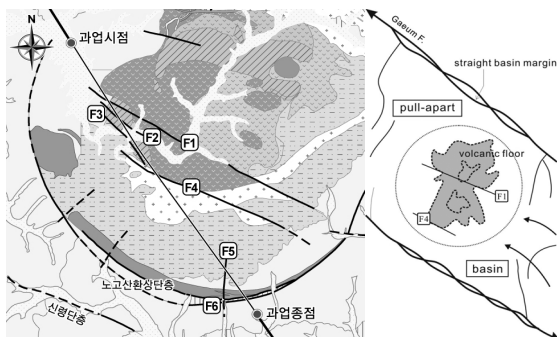


Fig. 4 과업구간 단층평면 현황 및 전단특성 [2]

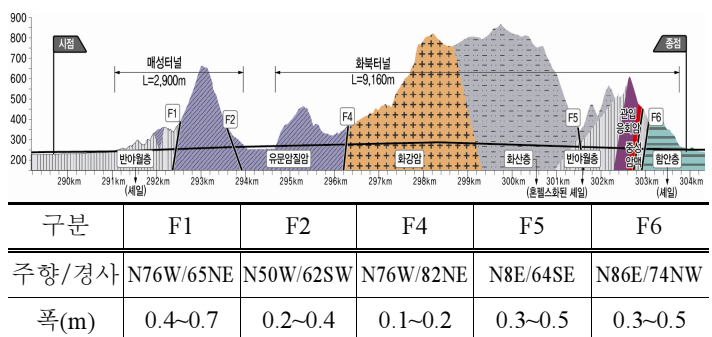
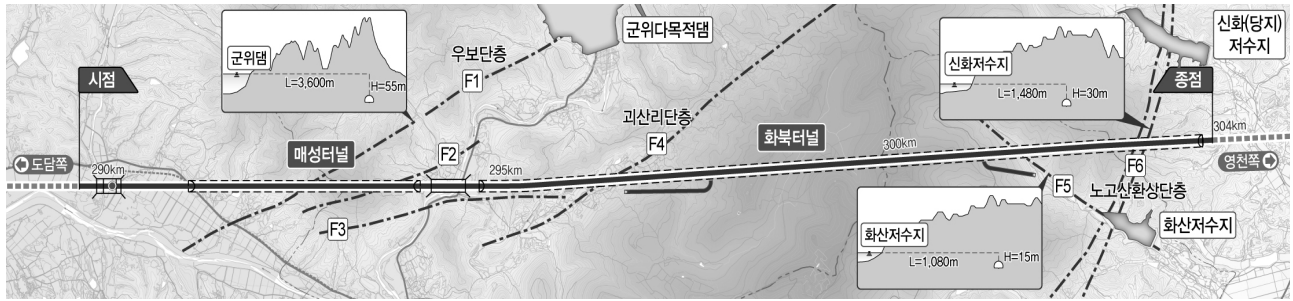


Fig. 5 터널구간 조우 단층 및 암층 현황 [2]

2.2.4 저수지 분포 현황 및 위험요인 분석

과업구간은 편자형(Trap Door Horse Shoe Type) 화산함몰대 지역 내에 위치하고 있어 다양한 암종 및 단층대 출현이 예상된다. 특히 인근 지역은 강수량 1,046mm(1981~2010년 평균값)로 전국에서 강수량이 가장 작은 의성 다음에 해당하는 대표적 소우지 지역으로 군위댐, 화산지, 신화지 등 다수의 저수지가 분포하고 있다. 일부 단층의 경우 저수지와 연결되어 있고, 이로 인해 터널 굴착시 단층을 통한 지속적인 지하수 유입이 가능해 주의가 필요하다.



(a) 군위다목적댐

(b) 화산저수지

(c) 신화저수지

Fig. 6 과업구간 단층 및 저수지 분포현황 [2]

2.3 칼데라 지형 특성을 반영한 터널 설계

2.3.1 구간별 예상 위험요인별 대처 계획

터널이 칼데라 지형을 관통함에 따라 지형 및 지질학적으로 복잡한 요인에 의해 각 구간별로 다양한 문제가 발생할 수 있다. 또한 전 구간에 대한 충분한 지반조사가 불가능함에 따라 정보 부족에 따른 예상치 못한 위험요인들이 다수 존재한다. 이러한 위험에 대처하고 굴착시 안정성을 확보하고자 다음과 같이 구간별로 예상되는 위험요인을 분석하고 발생 가능한 문제에 대한 사전대책을 수립하였다.

Table 2 구간별 예상 위험요인별 및 대책방안 [2]

위험요인	대책방안
급작스런 단층대 및 암종경계 출현으로 붕락 발생	시공중 단계별 조사계획(다중채널 TSP 탐사 등) 수립
예상보다 규모가 크고 파쇄가 심한 단층대 출현	예비 지보패턴 계획(인버트, 지보 확대)으로 안정 확보
저수지와 연결된 단층을 통한 지하수위 저하	단층대 구간 차수그라우팅 계획으로 지하수위 저하 방지
반야월층, 함안층, 중성암맥은 풍화에 민감	지보재 조기 설치, 배수 철저, 필요시 지보패턴 변경
혼펠스화된 화산층, 반야월층 천공효율 저하	고효율 장비 적용, 굴진장 축소 및 발파패턴 변경
관입응회암(황철석 포함)에서 산성수 유입 가능	산성수 유입시 내부식성 록볼트, 내산성 시멘트 적용

2.3.2 단층대 확인을 위한 조사계획

굴착시 다수의 단층 조우가 예상되나 설계시 얻어진 조사정보만으로는 정확한 출현 위치를 예측하기가 쉽지 않다. 그러나 터널 안정성 확보를 위해서는 단층대 위치에 대한 정확한 정보 획득이 선행되어야 하므로 이를 위해 총 4단계 시공중 조사계획을 수립하였다. 경사갱 선형 굴착으로 획득한 지반정보를 본터널 굴착시 사전정보로 활용하며, 막장 전방 연약대 구간에 대한 예측을 위해 가탐심도가 350~500m에 달하는 다중채널 TSP 탐사를 적용하였다. 또한 점보드릴 막장 천공시 천공속도 분석으로 연약대 위치 및 지하수 상태를 확인하고, 마지막으로 선진수평 시추조사를 통해 획득한 시추코아 분석으로 연약대를 최종 확인한다.

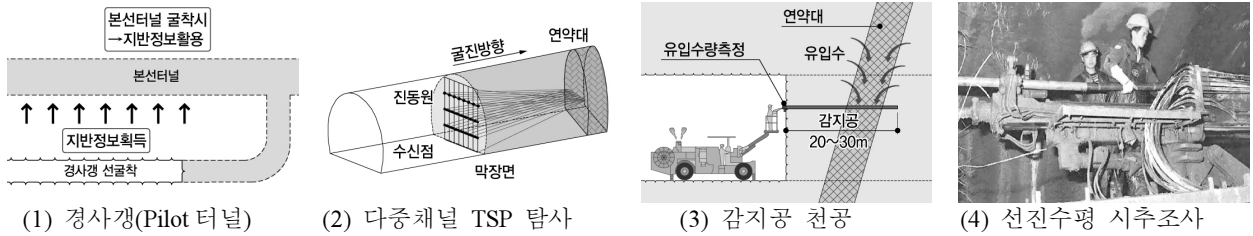


Fig. 7 단층대 확인을 위한 단계별 조사계획 [2]

2.3.3 지하수 유입에 대비한 차수계획

터널 굴착시 지하수가 유입될 경우 시공 효율의 저하뿐만 아니라 유입량이 많을 경우에는 공사 자체가 불가능하고 인근 지하수 고갈에 따른 환경 및 민원문제도 발생한다. 이를 방지하고자 설계시 일반구간과 저수지 연결단층 구간을 분리해서 구간별 차수계획을 수립하였다.

일반구간(F2, F4, 암반등급 4~5등급 구간)의 경우 설계단계에서 특정구간에 대한 차수 그라우팅을 계획하지 않고, 차수를 위한 프리그라우팅 적용여부를 현장에서 판단하여 적용할 수 있도록 그라우팅 적용을 위한 기준 지하수 유입량을 제시하였다. 이를 위해 각종 기준 및 문헌 검토 결과 그라우팅 적용을 위한 지하수 유입량 기준은 아직 제시된 것이 없었고, 기준량 산정을 위해 기존 프로젝트 적용사례를 참고하여 굴착중 감지공(20m)을 통한 지하수 유입량이 6ℓ/min/1hole(=0.3m³/min/km) 초과시 프리그라우팅을 적용하도록 하였다.

저수지 연결단층(F1, F5, F6) 구간의 지하수 유입량 산정을 위해 경험식을 활용한 결과 약 24~45m³/min/km 정도 유입될 것으로 예상되었다. 이 수치는 터널내 배수시설 설계시 적용하는 유입량 기준 2~3m³/min/km에 비해 큰 값이나, 단층대 폭이 작은 점(0.3~0.7m)을 고려하면 최대 약 23ℓ/min 유량이 예상되어 차수 그라우팅을 터널 전주면에 적용하였다. 이때 그라우팅 목표 투수계수는 1×10⁻⁸m/s, 주입범위는 3~5m로 계획하여 차수 후 최종 지하수 유입량이 1m³/min/km 이내가 되도록 하였고 장기적인 내구성을 고려하여 우레탄 주입제를 적용하였다.

F1(우보) 단층	F2 단층	F4(괴산리) 단층	F5 단층	F6(노고산환상-2조) 단층	
폭:0.4~0.7m 굴진 N76W/65NE	폭:0.2~0.4m 굴진 N50W/62SW	폭:0.1~0.2m 굴진 N76W/82NE	폭:0.3~0.5m 굴진 N8E/64SE	폭:0.2~0.4m 굴진 EW/58N	폭:0.3~0.5m 굴진 N86E/74NW

Fig. 8 터널 굴진방향에 따른 단층 조우 현황 [2]

Table 3 터널 지하수 유입량 및 그라우팅 주입범위 산정을 위한 경험식 [4,5,6,7]

터널 지하수 유입량 산정 경험식			주입범위 산정 경험식
Goodman et al., 1965	Lei, 1999	Karlsrud, 2002	Karlsrud, 2002
$q = \frac{2\pi K_1 h}{2.3 \times \log \left[\frac{2h}{r} \right]}$	$q = 2\pi K_1 \frac{h}{\ln \left[\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right]}$	$q = 2\pi K_1 \frac{h}{\ln \left[\frac{2h}{r} - 1 \right]}$	$q = \frac{2\pi K_2 h}{\ln \left[\frac{r+t}{r} \right]}$
q=유입량(m ³ /s/m), K ₁ =투수계수(m/s), K ₂ =그라우팅후 투수계수(m/s), h=수두(m), r=터널반경(m), t=그라우팅 두께(m)			

3. 결론

본 과업의 경우 인근 지역이 소우지임에도 불구하고 인위적인 대규모 저수시설로 인하여 터널 굴착시 지속적인 지하수 유입이 위험 요인으로 지적되었다. 또한 칼데라라는 대규모 화산 및 심성활동 결과로 인해 계획 노선상에 다양한 암종 및 단층들의 분포가 예상되었다.

이러한 지반특성으로 인해 터널 시공시 안전사고 발생 가능성이 높다고 판단하여 암종별 공학적 특성, 단층의 규모 및 방향성, 인근 저수지와 단층과의 연계성 등을 정밀 분석하여 예상되는 위험요인 파악 및 위험요인에 대비한 대책방안을 수립하였다.

또한 차수를 위한 그라우팅 적용연장 및 범위를 산정하고 최종 지하수 유입량을 1m³/min/km 이내로 제한하여 지하수의 지속적인 유입으로 인한 문제가 발생하지 않도록 하였다.

일반적으로 시간, 비용 및 민원과 같은 현장여건으로 인해 충분한 지반조사가 이루어지기 어려운 실정이다. 그러나 안전하고 효율적인 터널설계를 위해서는 정확한 지반정보 획득과 유사한 사례에 대한 분석이 중요하며 지반의 설계 및 시공사례는 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 과업에서 얻어진 칼데라 지형의 터널 설계사례가 향후 유사한 지질조건에서 터널을 설계 및 시공하는데 유용한 자료로 활용되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] UNIGE (2011), Living Geography Textbook, Humanist.
- [2] POSCO E&C (2013), Basic Design Report & Soil Report & Geotechnical and Geological Survey Analysis Report on 11th Section of DoDam ~ YoungCheon Railroad Construction Project.
- [3] Moon Sung, Cha and Sung Hyo, Yun (1988) Cretaceous Volcanic Cauldrons and Ring Complexes in Korea, The Geological Society of Korea, Publication No.24, pp.67-86.
- [4] Lei, S. (1999) An Analytical Solution for Steady Flow into a Tunnel, Ground Water Vol 37, pp.23-26.
- [5] Holmøy, K. (2008) Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels. Phd-thesis 2008:291, NTNU, pp.46.
- [6] Karlsrud, K. (2002) Control of water leakage when tunnelling under urban areas in the Oslo region., Norwegian Tunnelling Society(NFF), Publication No.12, pp.27-33.
- [7] Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp.553.