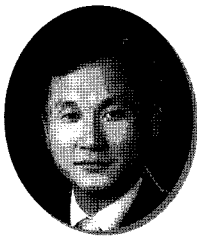


그라우팅 자동관리 시스템(AGS)을 이용한 동홍천-양양 고속도로 14공구 저토피구간 강관보강그라우팅 시공사례



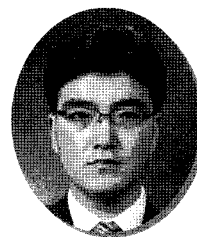
김희철
대우건설 14공구 현장소장
(hckim@dwconst.co.kr)



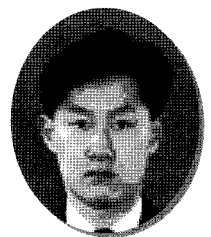
장기영
한국도로공사 차장



김진춘
한국지오텍 대표이사



이왕준
대우건설 14공구 공무팀장



김병웅
대우건설 14공구 설계차장

1. 서론

터널에서의 강관보강 그라우팅은 지반조건과 지하수 조건은 물론 터널 굴착시의 응력분포, 이완영역범위, 주입재의 침투성, 환경영향 등을 고려하여 주입목적에 충분히 달성할 수 있는 방법으로 시공되어야 하며, 터널시공 시와 지반보강을 위한 그라우팅 시공과정은 서로 상이할 수 있으나 그라우트재의 주입은 결국 지반조건에 의존적이다. 특히 손상이 발생한 터널주변 지반에서의 그라우팅의 경우 발생된 손상으로 인한 주입경로의 연결 정도, 손상발생으로 인한 주변지반의 불균질성 등으로 인하여 유사한 지반조건이더라도 발생한 손상정도에 따라 그라우팅 패턴이 달라질 수 있다(서울시, 1996). 특히 저토피 터널구간의 지반은 토립자와 같은 거동을 보이므로 터널 천단부에 토사나 풍화대가 위치하는 경우에는 비록 약간의

여굴이 발생하더라도 진행성 여굴로 인하여 쉽게 터널의 붕괴를 초래할 수 있으므로 지질조건에 맞는 작업순서 및 적합한 보강공법을 적용한 시공이 요구된다.

본 사례는 고속국도 제60호선 동홍천~양양간 건설공사(제14공구)중 서림2터널 저토피부의 굴착중 터널안정성을 확보하기 위하여 보강방안을 검토하였으며 그라우팅 시공 시 시공조건 평가, 막장 전면 지반탐사, 시공모니터링의 각 분야를 일괄적으로 시행할 수 있는 그라우팅 자동관리 시스템(AGS, automatic grouting system)의 현장 적용성을 소개하고자 한다.

1.1 현장현황

서림2터널 저토피부는 Sta. 11+819 ~ Sta. 11+843까지 약24m 분포하고 있으며 물이 흐르지 않는 소규모의

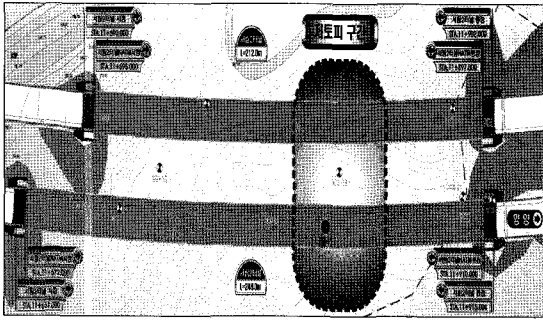


그림 1. 현장위치도(평면)



그림 2. 계곡부 통과 위치

계곡형상을 보이고 있다. 터널 시공 전 측량 결과, 설계시와 상이한 토피고(h=2.68m)가 확인되어 추가 지반조사를 시행하였고 지반조사 결과 봉적토~풍화암의 층후는 2.60m로 터널 천단부까지 봉적토가 높게 분포하고 있어 굴착시, 터널의 적합한 보강 및 시공방법이 필요한 상황이다(그림 1, 2 참조).

1.2 보강공법 선정

토피고에 따라 차이가 있겠지만 터널 저토피부는 3차원적인 아칭효과 발현이 어려워 굴착시 터널 안정성이 우려됨에 따라 저토피부 보강사례를 참고하여 보강공법을 검토하였다.

1.2.1 저토피부 보강사례 검토

저토피가 발생한 타 터널현장의 보강공법을 검토하여 서림2터널의 보강공법 선정시, 고려하기 위하여 표 1, 2와 같이 표로 정리하였다.

1.2.2 강관보강그라우팅 시공성 검토

저토피부에 기존 설계된 대구경 강관(L=12.0m)을 설치각도 10°로 설치시, 강관 끝단으로부터 지표까지 거리가 0.6m이므로 그라우팅 주입시 토피고 부족으로 인한 주입재 유실이 우려되기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다(그림 3 참조).

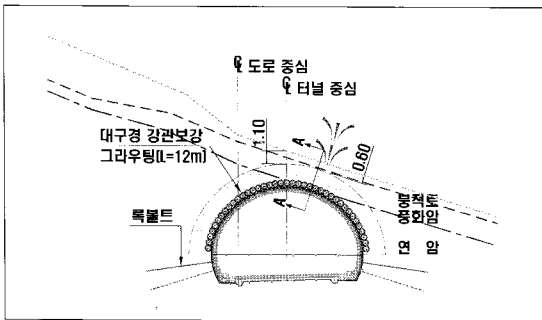
1.2.3 보강공법 선정

표 1. 송학터널의 저토피구간 통과방안

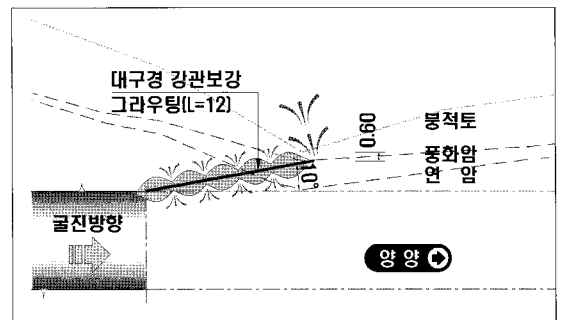
현황	• 태백선 제천~쌍용1공구 현장으로 총 연장 14.29km 복선전철 건설공사
토피/연장	• 1.81m / 33m
설계 문제점	• 폭 3m 도로의 70여호 민가를 통과, 증장비 진입 및 추가 진입로 확보 필요, 대규모 개착을 위한 암파쇄 및 발파작업, 사면절취 및 계곡수 교란등의 환경 파괴 예상 → 극심한 민원 발생예상
통과 대책	• 지상보강 / 대구경강관단단그라우팅 보강(L=12.0m) • 상반 : 기계굴착, 하반 : 발파굴착
보강개요	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>터널통과공법</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>터널 천단 굴착선</p> <p>지상보강 공법</p> </div> </div>

표 2. 삼성터널의 저토피구간 통과방안

현황	• 중앙선 복선전철 덕소-원주간 5공구 건설공사
토피/연장	• 3,23m/30m
설계 문제점	• 설계단계에서의 지반현황과 시공중 실측 결과의 차이로 터널 피복두께가 감소하여 터널의 안정성 우려
통과 대책	• 지보패턴 강화 / 강관다단그라우팅(연장 축소 :4.0~7.5m) 보강 • 상부 : 링컷기계굴착, 하부 : 발파굴착
보강개요	



(a) 횡단면도



(b) 단 면(A-A)

그림 3. 강관보강 개요도

표 3. 보강공법 선정

구분	대안설계	선정안
개념도		
개요	• 소구경강관 천공후 소구경강관 삽입 후 그라우팅 보강	• 직천공 대구경강관 연장을 축소하여 보강 강관의 토피를 확보하고 그라우팅으로 보강
굴착공법	상반 : 기계굴착, 하반:발파	상반 : 기계굴착, 하반 : 제어발파
굴진장	상/하반 : 1.2m/1.2m	상/하반 : 1.0m/1.0m
보조공법	소구경강관보강(180° 보강) ($\phi 60.5\text{mm}$, L=12.0m, 중/횡C.T.C : 6.0m/0.5m)	직천공/대구경강관보강(180° 보강) ($\phi 114\text{mm}$, L=8.0m, 중/횡C.T.C : 4.0m/0.5m)

표 3. 보강공법 선정

구분	대안설계	선정안
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 천공 후 소구경 강관 삽입으로 천공홀 붕괴우려 및 강관 연장 L=12m 적용으로 지상으로 그라우팅 주입시 주입재 유실 우려 • 소구경강관보강 적용에 의한 지반강성 미확보 • 강관보강그라우팅의 적정 주입압 산정 필요 • 용지 임대 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 직천공 대구경강관 연장 L=8m 적용으로 토피고를 확보하고 지반 이완을 최소화하여 굴착 • 직천공 대구경강관 연장 축소로 인한 개소수 증가로 공사비 고가 • 강관보강그라우팅의 적정 주입압 산정 필요 • 용지 임대 불필요

타 현장의 저토피부 보강사례 및 시공성 검토를 통해 대안 설계시 보강방안인 소구경강관보강그라우팅(L=12m, 종방향 C.T.C 4m)을 직천공 대구경강관보강그라우팅(L=8m, 종방향 C.T.C 4m)으로 변경 보강하는 안을 선정하였다.

1.3 시공방안

저토피 구간의 강관보강 시공 방안으로는 지형특성 및 지층구성상 터널 천단부에 붕괴토~풍화암이 분포하고, 저토피부를 따라 추정파쇄대가 발달하여 직천공대구경 강관보강그라우팅 L=8.0m, 종방향 C.T.C 4.0m를 계획하였다. 또한, 강관 설치 시 설치각도는 10° 이하로 설치하며, 강관 그라우팅 주입 시 최대 주입압력을 사전에 현장 시험을 통해 검토하고 수압파쇄 및 이탈현상이 발생되지 않는 범위에서 자동으로 그라우팅 주입관리가 이루어 질 수 있는 AGS(automatic grouting system)을 이용하여 보강영역 지반의 강성을 확보하였다.

본 저토피구간에서의 보강은 AGS(Automatic Grouting

System)를 적용한 직천공대구경 강관보강그라우팅을 다음 그림 4, 5와 같이 시공하였다.

2. 그라우팅 자동화 관리시스템(AGS)

기존의 국내 현장에서는 주입압과 주입속도를 기록 관리하기 위해서 적산유량계를 사용하였다. 적산유량계는 기록되는 시간 사이의 단위주입량을 합산하여 주입량을 정확하게 기록할 수 있다. 그러나, 압력의 경우는 기록되는 시간 사이의 초기값, 중간값, 종값 등 어느 순간값을 기록하기 때문에 압력의 대표성을 어느 기준으로 설정하느냐에 따라서 기록치가 달라진다. 따라서, 기존의 적산유량계에 기록된 주입압과 주입대상지반의 주입특성과의 연관성이 작기 때문에 그라우팅 품질관리의 객관적인 수단으로 사용하는데 신뢰성이 떨어진다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 본 현장은 주입지반의 시공조건 평가, 막장 전면 지반탐사, 시공모니터링, 원격 통합관리의 각 분야를 일괄적으로 시행할 수 있는 그라우

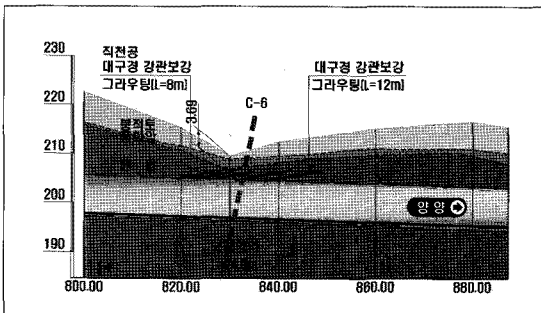


그림 4. 직천공대구경 강관보강그라우팅 시공도(중단)

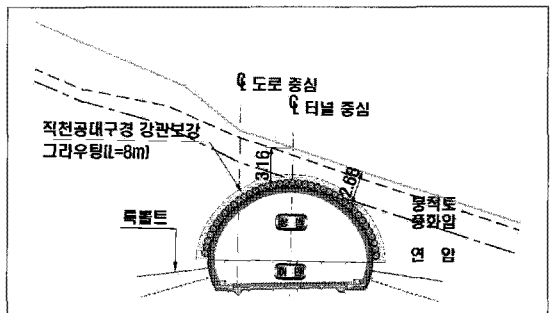


그림 5. 직천공대구경 강관보강그라우팅 시공도(횡단)

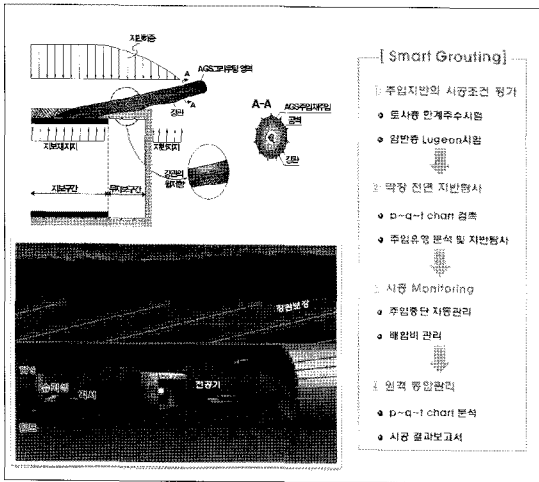


그림 6. AGS 적용 모식도

팅 자동화 관리시스템을 적용함으로써 시공 전 대상지반 특성평가, 설계시양 검토 및 조정, 시공 중 주입현황감시, data 축적 및 주입시공보고서 작성 등을 통합적으로 관리 할 수 있으며 적용 모식도는 그림 6과 같다.

2.1 주입전 지반조건 평가

주입 대상지반의 지반특성과 당초 설계에 반영된 주입 재 조건, 주입방법에 의한 침투유형을 평가하기 위해서 주입지반의 시공조건 평가를 실시하였다.

2.1.1 암반지반 주수시험 ; Lugeon 시험

국내에서도 많이 시험하고 있는 주수시험을 시스템화 시킨 방법으로 단계별로 압력을 변화시키면서 주수시험

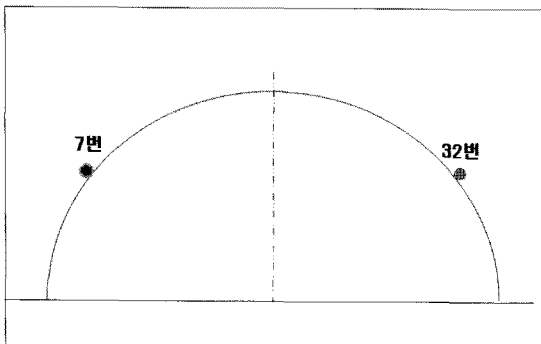


그림 7. 시험공 위치 시험사진

을 하면 암반의 상태 즉 절리에 끼여있는 점토분의 유거, 파쇄, 변위여부를 알 수 있으며, 시공 시 적용할 적정 주입 압력을 결정하기 위해서 임의의 압력(random pressure)을 가하면 암석의 파쇄압력(cracking pressure)도 알 수 있다(농촌공사, 2001).

주입지반의 주입형태, Lu치, 투수계수 등을 평가하여 시공조건을 파악하기 위해서 강관 내 hole에서 수평으로 팩커를 설치하고, AGS(automatic grouting system)를 이용하여 단계별로 압력을 변화시키면서 암반의 지반특 성 상태를 파악하였다. 주입 전 Lugeon test는 그림 7과 같이 저토피 시점부 7번공과 32번 공에서 실시하였다.

주입 전 시험결과 그림 8, 9와 같이 7, 32번공 모두 Lugeon 형태는 압력단계의 Lu값이 비슷하며 이는 물의 흐름이 대부분 층류(laminar)형태로 적은 균열을 따라 물 이 조금씩 흐르는 경우이다. 이때의 Lu값은 평균 값을 적용한다.

본 막장에서의 Lu치는 10~11, 투수계수는 $k=1.4\sim 1.47 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 의 투수도를 보이고 있으며, 주입에 대한 대책으로는 현탁액을 주입함에 있어 P~q~t chart의 유형 을 실시간으로 관찰하여 주입재의 역류 또는 유출현상이 발생될 경우 반현탁액 주입을 병행하여 최대압력(p_{max}) 범위내에서 관리될 수 있도록 주입을 실시한다.

2.1.2 P~q~t chart 검측에 의한 굴착면 지반 탐사

P~q~t chart 검측에 의한 굴착면 지반탐사 시험방법 은 시험구간에서 최대주입압력(p_{max})을 설정하지 않은 상



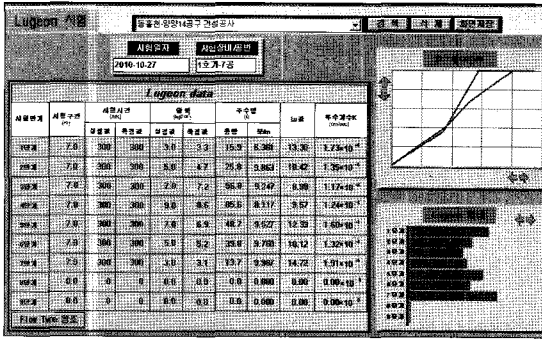


그림 8. 주입 전 7번공 결과
($Lu=10.78 / K=1.4 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)

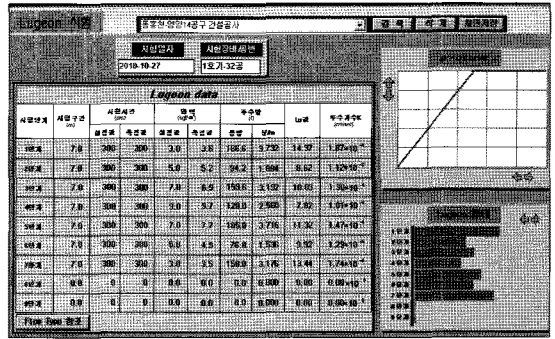


그림 9. 주입 전 32번공 결과
($Lu=11.35 / K=1.47 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)



그림 10. $P \sim q \sim t$ chart 모니터링

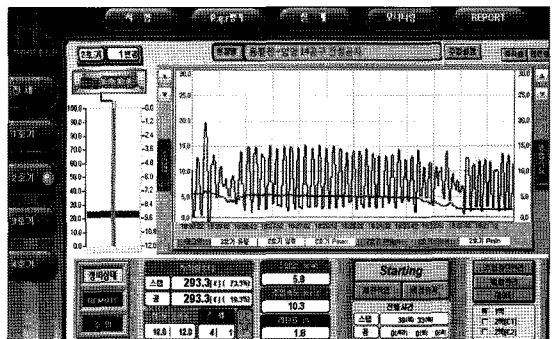


그림 11. $P \sim q \sim t$ chart 검측 화면

태에서 주입재를 적용하여 주입압(p)과 주입속도(q) 및 주입시간(t)의 상관관계를 관측하여 굴착면 전방 지반의 주입재 주입특성을 파악하고 이상대 구간을 예측하는 시험으로서 그림 10, 11과 같이 실시하였다.

$p \sim q \sim t$ chart 검측을 통해 지반유형 및 굴착면 지반탐사 분석은 그림 12 주입유형 분석시례를 통해 분석한다.

본 구간의 $p \sim q \sim t$ chart 검측결과 그림 13과 같이 지반유형은 A2형으로 이는 균열이 주입재로 채워지면서 최고의 압력에 도달한 후에도 수개의 미세한 균열이 발생되고 다시 이들 틈새가 채워지는 경우의 형태로서 가장 이상적인 임반 주입형태로 거부반응(refusal)이 일어날 때까지 정압주입을 계속해야 한다. 본 시험에서는 거부반응(refusal)이 일어나는 P_{max} 를 찾기 위해 현탁액 주입으로 15kgf/cm²까지 주입하였으며, 이때 막장균열에서 주입재가 누출되는 것을 확인하였고 누출 확인 후 반현탁액을 이용하여 주입재의 유실을 방지하는 코킹주입을 실시하

여 주입을 종료하였다. 이를 근거로 본 주입 시 최대압력(P_{max})을 15kgf/cm²로 선정하여 AGS를 이용한 주입중단자동관리를 실시한다.

2.2 그라우팅 시공관리 현황

2.2.1 시공관리

과다한 주입압력은 강관내에서 주입재의 역압에 의한 파카 밀립현상과 지보재에 위해요소로 작용할 우려가 있으므로 주입 전 시공조건 평가를 통해 결정된 p_{max} (15kgf/cm²)범위에서 자동화 관리시스템 AGS(automatic grouting system)을 이용한 대구경 강관다단그라우팅을 실시하여 지반굴착중 작용하는 부가응력의 절감 및 아칭 효과(arching effect)로 안정성을 확보하였다. 다음 그림 14~17은 AGS(automatic grouting system)를 이용한 강관보강그라우팅 시공사진이다.

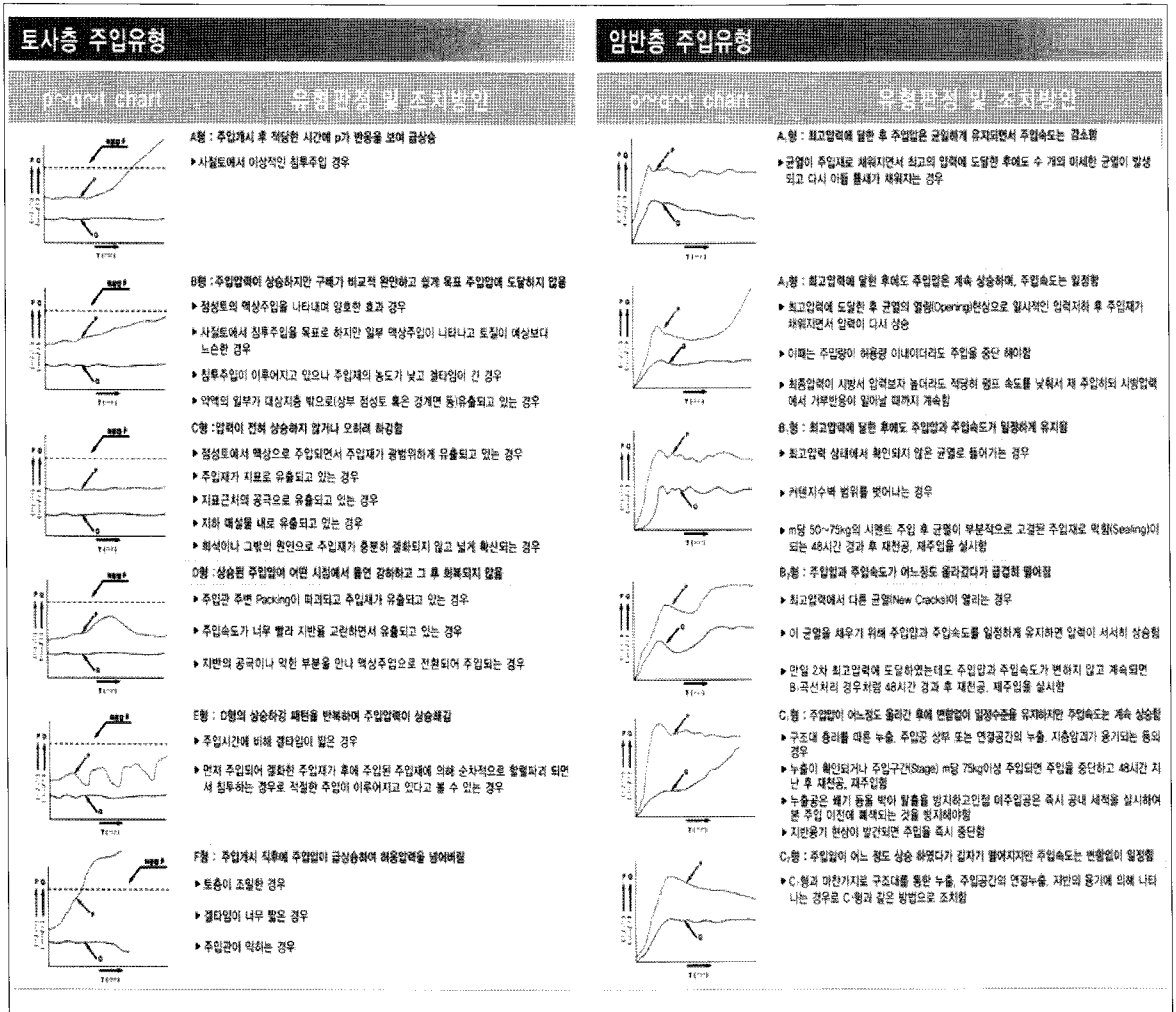


그림 12. 지층별 p~q~t chart 유형분석기법

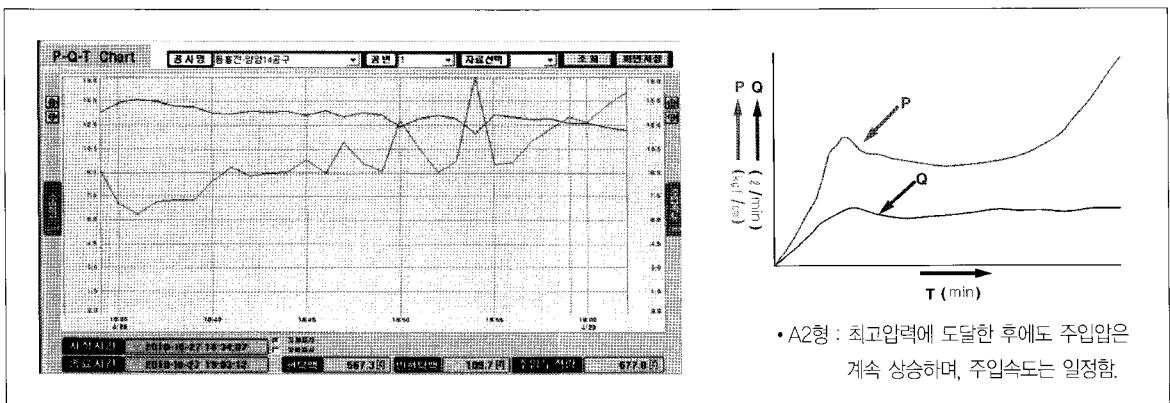


그림 13. P~q~t 검측결과

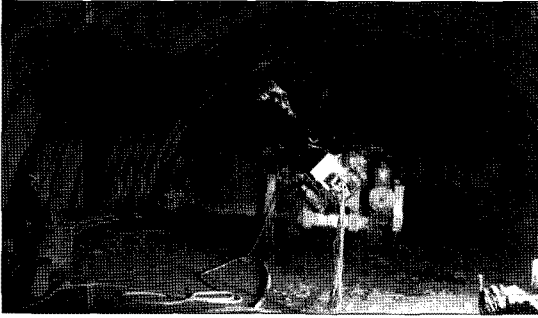


그림 14. 천공



그림 15. 강관설치

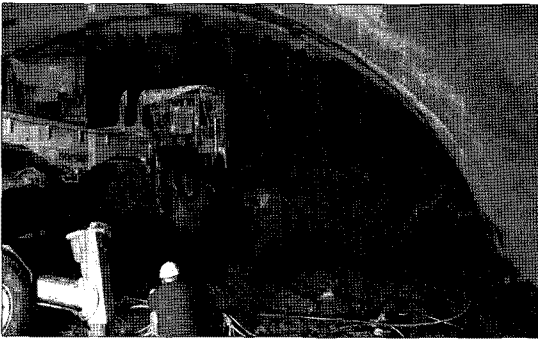


그림 16. 주입장면



그림 17. AGS 주입관리

2.2.2 주입재

주입재는 현탁액 및 반현탁액을 복합적으로 주입하며, 당 현장에서는 주입 시 현탁액 : 반현탁액의 비율은 7 : 3 기준으로 시공하되, 현탁액 및 반현탁액 주입의 적용 비율은 다음과 같을 경우에 조정하여 시공하였다.

㉠ 현탁액 적용 시(표 4 참조)

- 통상적인 상태에서 주입재로 주입
- 지하수 영향이 거의 없는 지층에서 압밀 충전
- 주입재의 일탈, 유출 현상이 없으며 주입재가 과다 주입되지 않을 경우

㉡ 반현탁액 적용 시(표 5 참조)

- 주입재가 저압력하에서 과다하게 주입되거나 역류, 유출될 경우 압력조절용 및 역류방지
- 지하수 유수가 있거나 수량이 풍부할 경우 주입재 희석방지 및 차수
- 1step 주입 완료 후 packer를 다음 step으로 이동하기 전 주입재의 역압력에 의한 역류 방지용

표 4. 현탁액 Grout재의 배합비

구분	1,000ℓ 기준		비고
	슈퍼셀-4000 (kg)	물 (ℓ)	
현탁액형	500	840	

표 5. 반현탁액 그라우트재의 배합비 (1,000ℓ 기준)

구분	A액		B액		비고
	특수구산 (ℓ)	물(ℓ)	슈퍼셀-4000(kg)	물(ℓ)	
반 현탁액형	200	300	250	420	

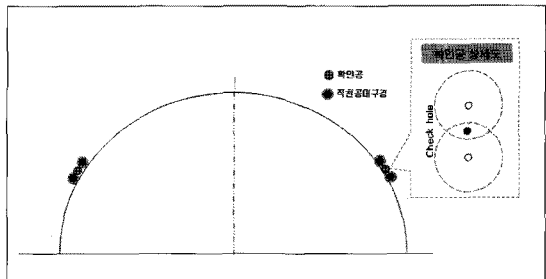


그림 18. 확인공 상세도

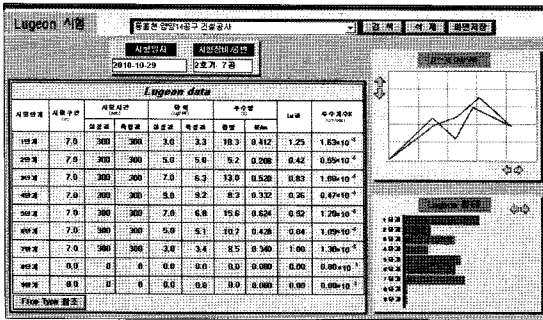


그림 19. 주입 후 7번공 결과(Lu=0.80 / 1.04×10^{-5} cm/sec)

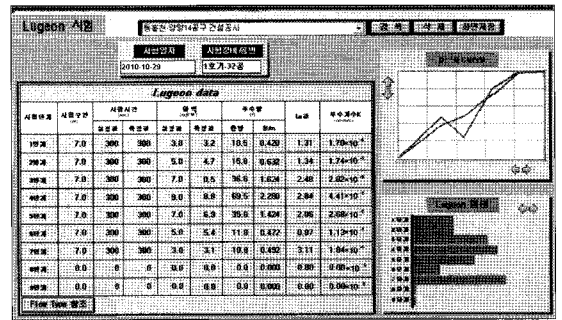


그림 20. 주입 후 32번공 결과(Lu=1.82 / 2.37×10^{-6} cm/sec)

본 현장의 그라우팅의 배합비는 표 4, 5와 같다.

3. 그라우팅 주입효과 확인

3.1 주입 후 Lugeon test 결과

시공 후 주입효과 확인을 위한 그림 18과 같이 시공된 공과 공 사이에 확인공을 시추하여 주입 후 주입형태 및 Lu치, K치의 변화값을 측정하여 비교 분석하였다.

그림 19, 20과 같이 그라우팅 주입 후 시험결과를 얻었

으며, 주입형태(Flow type)는 주입 전과 같은 층류 (laminar)형태로 주입된 것을 확인 하였다. 이는 주입 전 · 후 지층변화가 발생하지 않고 안정되게 주입된 것으로 판단된다.

표 6 및 그림 21, 22와 같이 주입 전 · 후 Lu, k의 비교 검토결과, 7번공은 주입 전 · 후 투수성 주입효과가 약 13 배 저감되었으며, 32번공은 약 6배 저감되는 것을 확인하였다. 이를 통해 AGS를 이용하여 우수한 투수성 개선효과를 확인하였다. 정리하면 아래 표6과 같다.

3.2 P~qt chart 주입분석

표 6. 주입 전 · 후 Lu 치 비교 검토

구분	7번공		32번공		비고
	Lu	k(cm/sec)	Lu	k(cm/sec)	
주입 전	10.78	1.4×10^{-4}	11.35	1.47×10^{-4}	
주입 후	0.8	1.04×10^{-5}	1.82	2.37×10^{-6}	
주입효과	약 13배 저감		약 6배 저감		

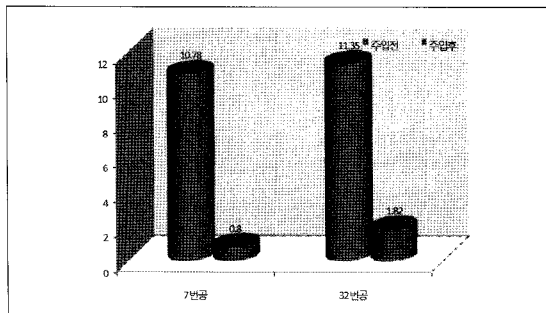


그림 21. 주입 전 · 후 Lu 치 비교

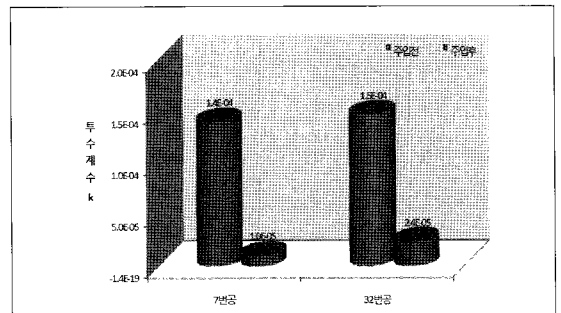


그림 22. 주입 전 · 후 k 치 비교

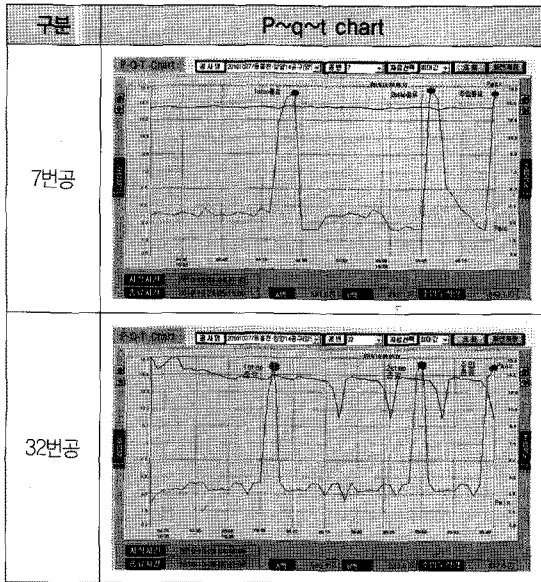


그림 23. P~q~t chart결과

본 현장의 AGS 주입관리는 주입 전 평가시험을 통해 결정된 최대주입압력(p_{max}) 15 kgf/cm²범위에서 자동화 그라우팅 주입관리를 실시하여 직천공대구경 강관보강 그라우팅을 시공하였다.

아래 표 5와 같이 최대압력(P_{max})을 15kgf/cm²로 최소 압력(P_{min})을 4kgf/cm²로 설정한 후 AGS를 이용한 주입 관리를 실시한 결과 한계압력 범위 내에서 그라우팅이 주입되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 그래프에서 한계압력 범위를 벗어나게 되면 작업을 종료하고 다음 step으로 이동하여 주입을 실시한 기록을 명확히 구분할 수 있으며, 그 결과 주입량이 7번공은 0.84m³ 32번공은 0.82m³로 설계량 0.8m³ 대비 약 100% 이상의 주입량을 보였다.

4. 결론

고속국도 제 60호선 동흥천~양양 14공구의 서림2터널 저토파 구간의 굴착시 보강방안으로 설계 시 보다 짧은 직천공 대구경 강관보강그라우팅(L=8m)을 적용하였으며 그라우팅시, 주입재의 유실 및 일탈을 방지하기 위해 그라우팅 자동화 관리시스템(AGS)을 적용하여 성공

적으로 시공하였다. 이에 대한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 그라우팅 시공전, 터널 굴착면의 수평방향으로 Lugeon Test를 시행한 결과 시험대상지반의 지층은 Lu치가 10.78~11.35($K=1.4 \times 10^{-4} \sim 1.47 \times 10^{-4}$ m/sec), 층류(laminar)형태로 나타났으며, 형태는 미세 암반균열로 물이 안정적으로 흐르는 형태로 평가된다.
- 2) 상기 지반에 대한 p~q~t chart 검출시험결과 주입 압력 15kg/cm²에서 거부반응이 발생하여 최대압력(P_{max})을 15kg/cm²로 설정하였다.
- 3) 최대압력(P_{max})은 15kg/cm²까지 주입압력을 관리하였으며, 이는 그래프에서 한계압력 범위를 벗어나게 되면 작업을 종료하고 다음 step으로 이동하여 주입을 실시한 기록을 명확히 구분할 수 있다. 주입은 설계주입량 0.8m³에서 주입작업 완료 후 실주입량은 설계량의 평균 약 100% 이상 주입되었다.
- 4) 주입효과시험 결과 주입 전 · 후 Lu치와 k치의 비교 검토 결과 주입 전 10.78~11.35 ($K=1.4 \times 10^{-4} \sim 1.47 \times 10^{-4}$ m/sec)에서 0.8~1.8($K=1.04 \times 10^{-6} \sim 2.37 \times 10^{-6}$ m/sec)로 평균 약 8배 이상 투수도가 저감되었음을 알 수 있다. 이는 현장 지반상태가 대체적으로 절리면이 발달되어 주입재가 양호하게 침투가 된 것으로 판단된다.
- 5) P~q~t chart의 유형분석을 통해 지반상황을 비교적 정확하게 판독이 가능하며 한계 주입압을 산정하여 시공함으로써 과도한 그라우팅 주입속도나 주입 압으로 발생할 수 있는 수압파쇄 및 일탈현상을 사전에 방지하여 터널안전성 및 경제성 확보에 기여할 수 있을 것이라고 판단된다.
- 6) 그라우팅 자동관리 시스템(Automatic grouting system)을 이용한 주입공사 중, 발생하는 각종 데이터 축적이 용이함으로 추후 현장상황에 따른 그라우팅 설계에 유용한 자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 국토해양부(2009), "지반차수 및 보강을 위한 고성능그라우팅 개발", 4년차 보고서, 국토해양부.
2. 국토해양부(2003), "마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적그라우팅 시스템 개발 연구", R&D/목적 1-07, 건설교통부, pp.187~200, pp.201~218.
3. 농어촌공사(2001), "댐그라우팅 설계 및 시공 실무지침서", pp.254~256.
4. 서울시(1996), "지반보강편람 -주입공법 중심", pp. 17~38.
5. 김진춘(2007), "컴퓨터로 도출한 주입압(p)~주입율(q)~시간(t) 차트를 이용한 선진주입공법" 한국터널공학회 기술기사.
6. 천병식(1998), "최신 지반주입 -이론과 실제-", 원기술, pp.23~37, 388~394.
7. 천병식, 이한진, 정병현(2000), "A Case Study on Ground Improvement by ENPASOL & SINNUS Grouting Systems", 대한토목학회 논문집, Vol.20, No.6, pp.507~518.
8. 한국토지공사(2005), "고성능 그라우팅 자동관리시스템 개발", 보고서, 한국토지공사.

