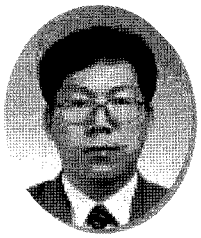
AGS(automatic grouting system)을 이용한 동이 1교 하부기초 지반보강그라우팅 시공사례

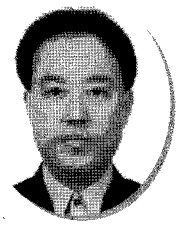
전 정 배
(주)제일엔지니어링
종합건축사사무소
적성~전곡 2공구 감리단장

문 형 찬
롯데건설 토목사업본부
적성~전곡 2공구
현장소장

이 세 희
롯데건설 토목사업본부
적성~전곡 2공구
공무팀장



김 진 춘
(주)한국지오텍 대표이사



현 정 용
(주)한국지오텍 이사
(kig-2000@hanmail.net)

1. 서론

연약지반상에 구조물을 설치하거나 도로, 교량 등을 시공하는 경우에는 기초지반의 지지력 부족, 사면활동파괴, 과도한 침하, 측방변위 등의 많은 지반 공학적 문제점을 내포하고 있다. 때문에 안정적인 시공을 위해서는 지반의 정확한 공학적 특성을 조사 · 분석하여 그에 맞는 지반의 안정성 확보가 필요하다.

본 시공사례는 경기도 연천읍 적성면에 위치한 "적성~전곡 도로건설공사 중 동이 1교 주탑(PY1, PY2) 하부기초에 대한 보강" 사례로써 지반조사를 실시한 결과, 풍화 및 절리가 발달한 연약지반으로 이루어져 교각하부의 안정성이 우려됨에 따라 지반의 안정성을 확보하고자 보강 그라우팅을 실시하였고, 그라우팅 중 자동화 그라우팅 공법인 AGS(automatic grouting system)를 이용하여 시공조건평가 및 정량화된 시공관리를 통하여 보다 정밀하고 안정성을 확보한 시공사례를 소개하고자 한다.

2. 현장현황

본 현장의 지반특성을 확인하기 위해 지질조사 및 투수시험, 수압시험, 공내재하시험, BIPS 등의 현장시험을 실시하였다. 지질조사 결과, 과업구간은 선캠브리아기의 편마암을 기반암으로 그 상부로는 다공질 및 치밀 분출현무암지역으로 주상절리 및 과상의 절리면이 다양한 방향으로 보임을 알 수 있었다. 또한, 소규모의 공동이 관찰되었으며, 우기시 지하수의 침입에 의한 풍화발달과 붕괴위험

구간으로 관찰되었다.

그림 1, 2와 같이 주탑 PY1구간과 PY2구간의 경우 기초하부에 파쇄대가 발생되어 있으며, 불안정한 적벽과의 인접으로 안정성을 위협받는 상황이다.

3. 보강방안 검토

동이 1교 교각하부기초의 지반조사 결과 파쇄대 및 공극발달 그리고 불안정한 적벽으로 인해 하부기초 지반에

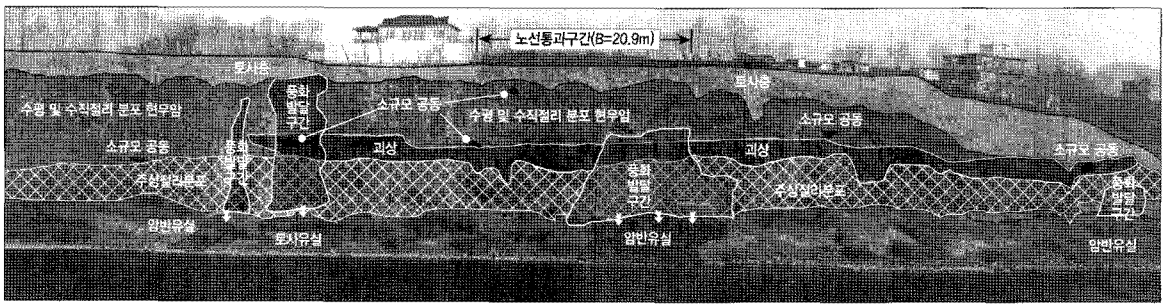
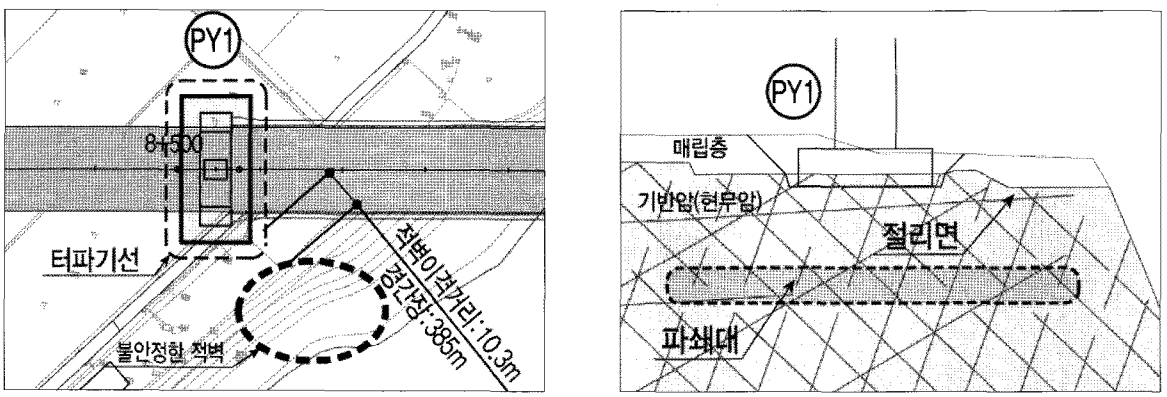
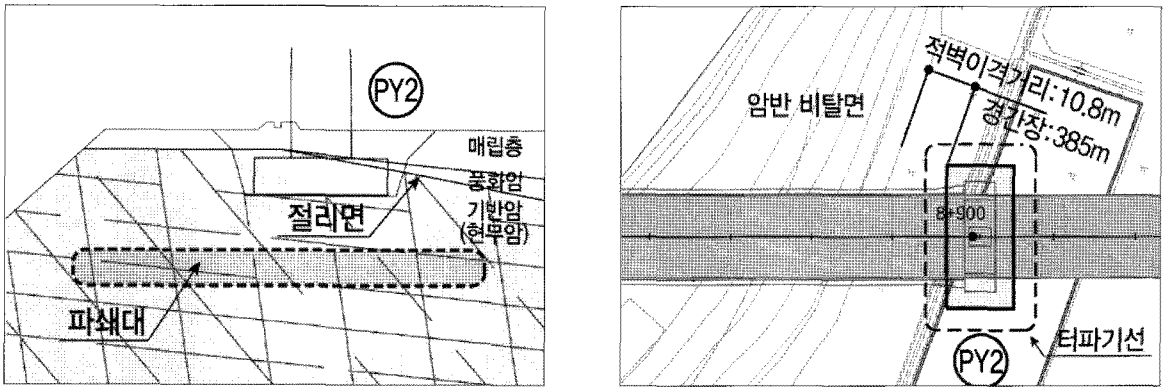


그림 1. 과업구간 지질조사 결과



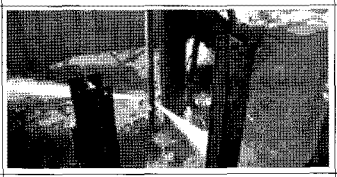
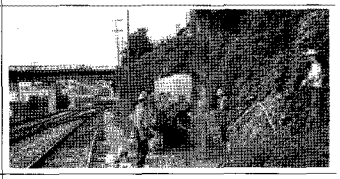
(a) 주탑 PY1 구간



(b) 주탑 PY2 구간

그림 2. 주탑(PY1, PY2)의 지층 및 현황

표 1. 보강공법 비교표

구 분	저압주입공법	고압분사교반공법	마이크로파일공법
개 요	• 천공 후 케이싱이나 Rod를 이용 응결재와 첨가물을 저압주입하여 지반의 차수 · 보강함.	• 초고압수로 지반을 절삭하고 슬라임을 지표로 배출시켜 주입재를 충진 원주상 고결체 형성함.	• 천공 후 천공장비와 인력에 의한 말뚝체를 삽입한 후 시멘트 밀크를 충진하여 말뚝을 형성함.
시공사진			
특 징	• 모든지반에 적용가능. • 지반거동에 맞게 적용가능. • 미세한 암반크랙까지 주입가능.	• N<30 이하 지층에 적용 가능. • 사석층 충전시 주입재 손실 큼 • 암반에 주입 곤란.	• 높은 주변마찰력 발휘. • 그라우팅공사비에 비해 고가의 경제성.
장비 사용성	• 작업공간이 작아 대부분 위치에서 시공가능.	• 넓은 작업공간이 필요함.	• 협소한 작업공간에도 시공가능.

대한 안정성 확보방안 수립이 시급하여 교각기초하부의 안정성 확보를 위한 보강공법을 검토하였으며, 보강공법으로는 저압주입공법, 고압분사공법, 마이크로파일공법 등을 비교 검토 하였다(표 1 참조).

검토결과, 파쇄대 및 불균질한 공극의 보강효과 증진을 위해 저압주입공법을 선정하였으며, 암반주입효과를 극대화 시키고 적벽부의 유실을 최소화 시키기 위해 보통시멘트, 마이크로시멘트, 활성실리카계 경화재 등의 재료조합으로 보강계획을 수립하였다.

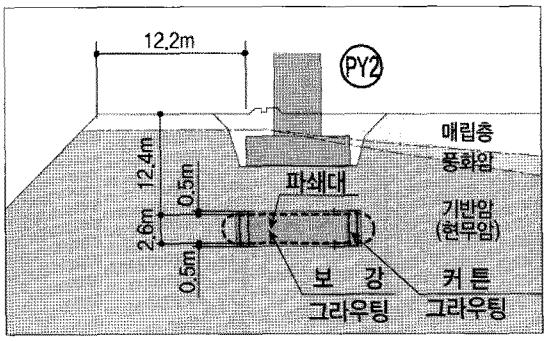


그림 3. 보강 범위

3.1 보강계획

3.1.1 주입공 배치

본 현장의 주입공 배치는 주탑 PY1과 주탑 PY2의 보강구간에 걸쳐 각각 밀크보강공(1.0shot, C.T.C=1.8m, Φ=2.0m) 162공을 밀크주입하여 연약지반의 안정성을 확보하고자 하였으며, 주입구간의 외측 1열에 대한 유실방지차수공(1.5shot, CTC=0.8m, Φ=1.0m)을 107공 시공함으로써 적벽으로의 주입재 유실방지를 통해 환경문제 발생을 예방하였다(그림 3, 4참조).

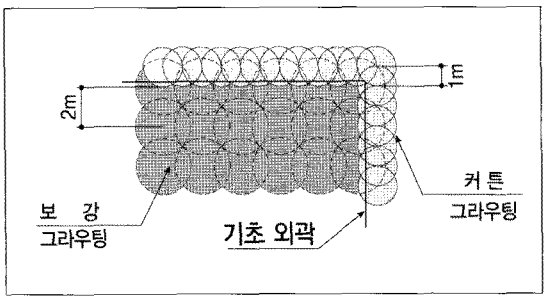


그림 4. 주입공 배치도

3.1.2 주입재 관리

본 시공에서 유실방지 차수공은 분말도 3,000cm²/g 이상의 보통시멘트(슈퍼셈-4000)와 활성실리카계인 TPS

표 2. 유실방지 차수공(1.5shot) 그라우트재의 표준배합비 (1m³당)

구 분		완 결	비 고
A액[200L]	TPS (L)	200	Gel-time 완결 : 30~90sec
	물 (L)	300	
B액[200L]	슈퍼셈-4000 (kg)	250	
	물 (L)	420	

표 3. 밀크보강주입공(1.0shot) 그라우트재의 표준배합비 (1m³당)

A액 (500L)		B액 (500L)		비 고
슈퍼셈-8000	600 kg	물	800 L	-

경화재를 조합하여 1.5shot 공정으로 주입재의 유실을 방지하였으며, 밀크보강공은 분말도 8,000cm²/g 이상의 마이크로시멘트(슈퍼셈-8000)를 이용하여 1.0shot 공정으로 주입하였다.

그라우팅재의 표준배합은 다음 표 2, 3과 같다.

4. 그라우팅 시공관리

본 현장은 그라우팅 시공조건을 최적으로 제어 및 관리할 수 있으며 최적화 그라우팅을 위해 주입 전 현장주수시험, P~q~t chart 유형분석, 주입중단 자동관리 등 시공품질을 관리할 수 있는 기법이 적용되어 그라우팅 시공 · 품질관리가 정성적 수준에서 정량적 수준으로 관리될 수 있도록 개발된 첨단 그라우팅을 실현할 수 있는 AGS(Automatic Grouting System)를 적용함으로써 시공 전 대상지반 특성평가, 설계사양 검토 및 조정, 시공 중 주입현황감시, data 축적 및 주입시공보고서 작성 등을 통합적으로 관리 할 수 있으며 적용 모식도는 그림 5와 같다.

4.1 주입지반 시공조건 평가

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

4.1.1 암반층 Lugeon 시험

암반지반의 주수시험은 국내에서도 많이 시험하고 Lugeon 시험을 시스템화 시킨 방법으로 단계별로 압력을 변화시키면서 Lugeon시험을 하면 암반의 상태 즉 절리에 끼어있는 점토분의 유거, 파쇄, 변위여부를 알 수 있으며, 시공 시 적용할 적정 주입압력을 결정하기 위해서

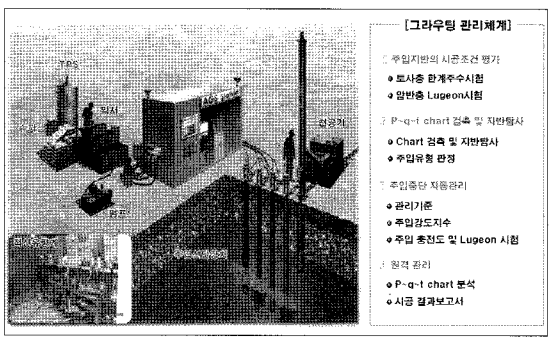


그림 5. AGS 적용 모식도

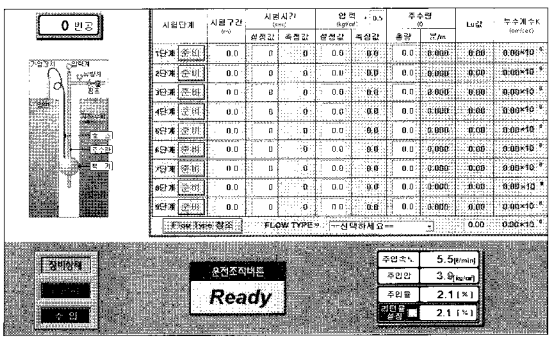


그림 6. Lugeon 시험

임의의 압력(random pressure)을 가하면 암석의 파쇄압력(cracking pressure)도 알 수 있다(그림 6 참조, 농촌공사, 2001).

4.1.2 공내재하시험

공내횡방향 재하시험은 깊은기초(Deep foundation), 터널, 댐 등의 설계 및 시공관리에 필요한 자료 즉 기초의 침하, 횡방향 변위해석, 횡방향 K치, 기초의 지지력, 정지토압 등과 암반의 내압강도 및 변형관계를 알기 위한 시험이다. 시험방법은 지반내의 임의의 깊이에서 지반의 변형-강도 관계를 현장에서 측정함으로써 정확한 값을 얻을 수 있어 기초와 지반의 해석에 유용하게 이용된다. 특히 터널 및 기초의 변위해석에 가장 많이 이용되고 있다.

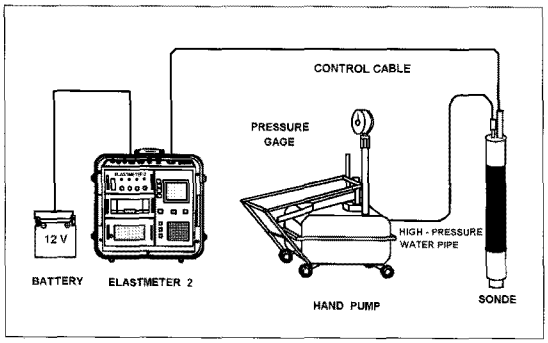


그림 7. 공내재하시험기

시험에 앞서 Calibration ring을 사용하여 전체적인 보정을 실시한 후 Sonde를 조사공의 측정심도까지 관입하여 압력조건을 5, 10, 20...200kg/cm²까지 단계 재하방법을 채택하였으며 지반의 상태에 따라 압력조건을 달리하였다. 또한 각 압력에서의 변형특성을 파악하기 위하여 측정압력을 가한 후 15, 30, 60...120초까지 2분의 시간간격으로 측정을 실시한다.

4.2 P~q~t chart 검측 및 지반탐사

보이지 않는 주입지반에서는 어떻게 주입이 되고 있는지를 알기 위해서 P~q~t (pressure~quantity~time) 관리가 필수적이며 P~q~t 곡선의 몇 가지 주요패턴(pattern)과 해석에 따라서 적절한 주입압, 주입속도 및 주입재 농도(w/c비)를 조절하거나 주입계속, 주입중단 여부 등을 판단 할 수 있다. 이에 있어서 P~q~t chart에 의한 다수의 기준 패턴과 현재 P~q~t chart를 동시에 화면 출력하여 관리자에게 현재 주입 유형을 판정하고 조치를 할 수 있도록 하였다(그림 8참조).

그림 9와 같이 주입전 P~q~t chart 검측 및 지반탐사를 통해 주입시공조건을 조정하고, 주입재의 배합 및 종류를 현장지반에 적절하게 조정할 수 있다.

4.3 주입중단 자동관리

4.3.1 Chart형 관리

현장 기술자의 경험적 판단에 의해서 주입압(p)을 관리하는 것이 보통이지만, P_{max}값과 P_{min}값 범위 내에서 실시

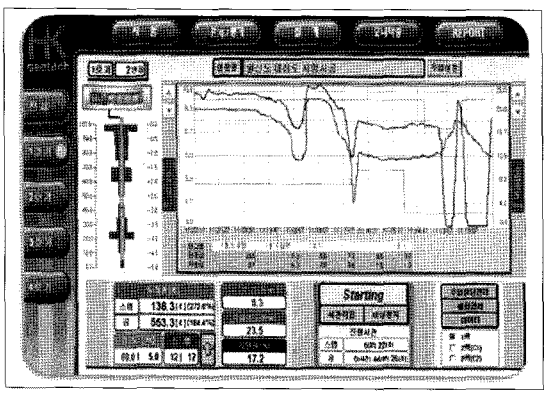


그림 8. P~q~t chart 검측화면

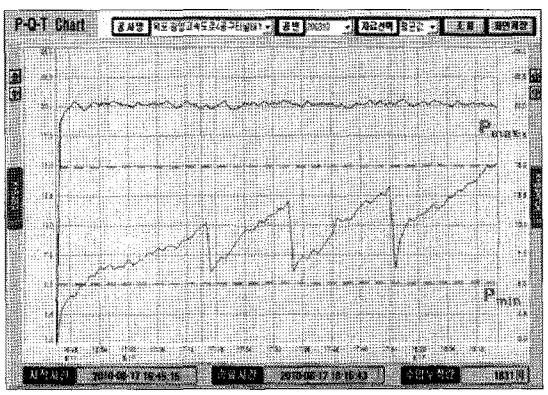


그림 9. 지반탐사

간 주입모니터링을 통해 체크되는 p~q값을 표시하며, P_{max}값과 P_{min}값 범위에서 관리가 가능한 AGS(automatic grouting system)를 이용하여 주입중단에 대한 시공관리를 Chart형 4가지 모드로 정립하여 현장에서 실시간으로 적용함으로써 주입중단 관리기준을 자동으로 적용할 수 있다(그림 10 참조).

① 정량주입: P_{max}와 P_{min}값 내에서 설계주입량이 주입된 경우.

② 정량~정압주입: 설계주입량이 주입되면서 주입압이 P_{max}까지 도달한 경우.

③ 과압~과소주입 : 설계주입량에 도달하기 전 주입압이 P_{max}에 도달하였을 때, 주입압력을 관리하나 지속적으로 3회 이상 반복될 때 주입을 종료한 후 배합비 조정 후 재주입 또는 반복시에는 스텝인발.

④ 저압~과소주입 : 설계주입량에 도달하기 전 주입압이 P_{min}에 도달하였을 때, 주입압력을 관리하나 지속적으로 3회 이상 반복될 때 주입을 종료한 후 배합비 조정 후 재주입을 실시한다.

4.3.2 주입강도지수(GIN) 관리

주입강도지수(GIN)를 이용한 주입중단 자동관리는 대상지반 특성에 따라 GIN 값을 선정하여 주입 대상 지반에 발달한 불연속면을 따라 주입재가 주입되면서 충진이 이루어진다. 이때, 정해진 GIN곡선 범위 안에서 주입압이 관리되며 q/p곡선이 GIN곡선을 교차하였을 때 주입을 중단한다. GIN-curve는 최대 주입압력(p_{max}), 최대 주입량(V_{max}), GIN-value에 의해 결정된다. GIN-value는 (식 1)로 정의한다(그림 11참조).

$$GIN = p \times V \quad (1)$$

여기서, p= 단위시간당 주입량이 0일 때 주입 압력
V= 단위시간당 주입량이 0일 때 그라우트재 주입량

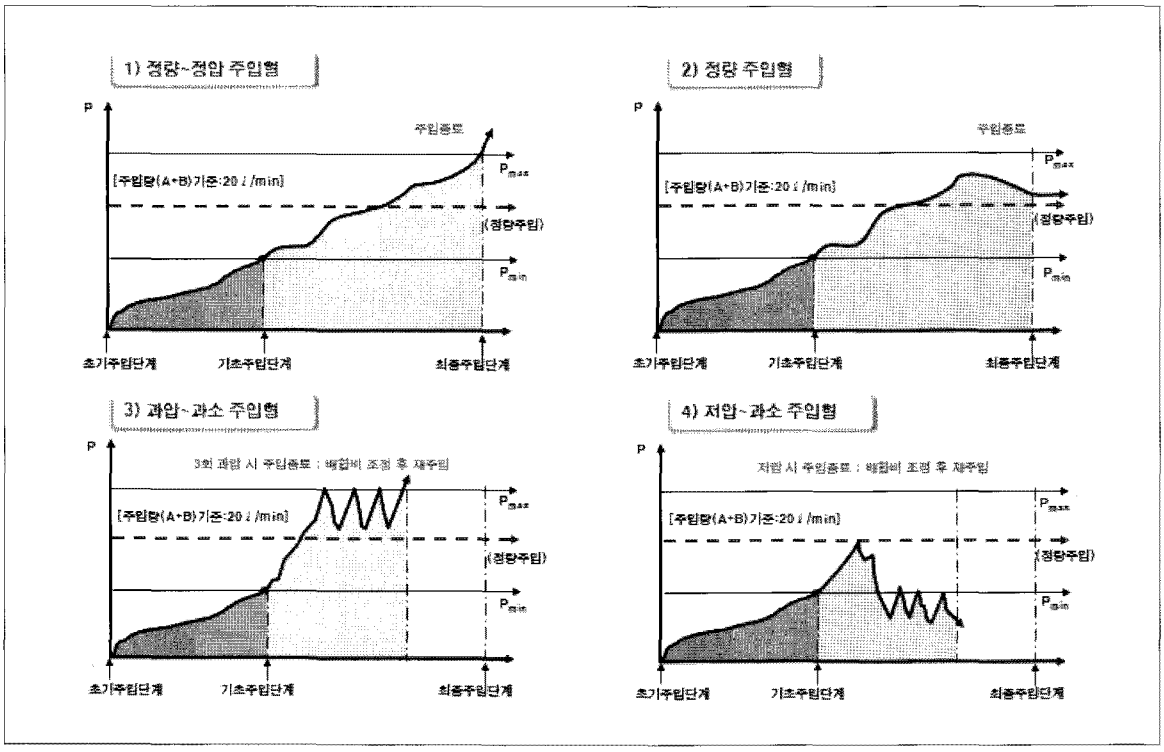
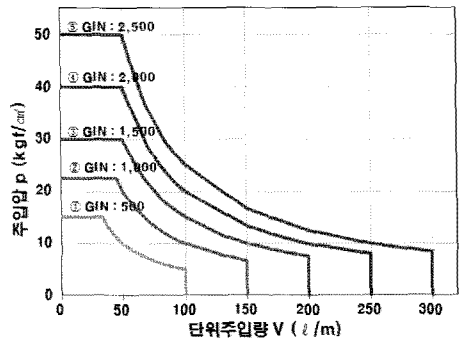


그림 10. Chart형 주입중단 자동관리



구 분	GIN	P_{max} (kgf/㎠)	V_{max} (ℓ/m)
①	500	15.0	300
②	1,000	22.5	250
③	1,500	30.0	200
④	2,000	40.0	150
⑤	2,500	50.0	100

그림 11. GIN-method의 개념

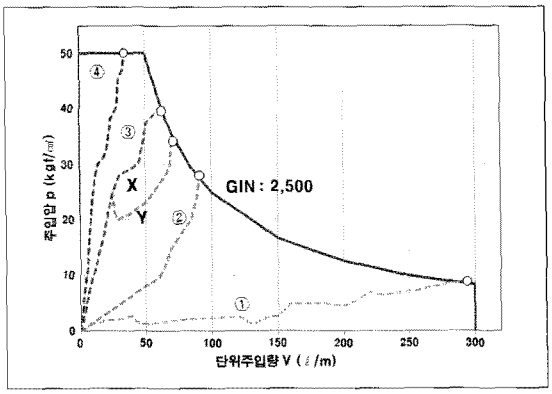


그림 12. Grouting path 예

그림 12와 같이 Grouting Path 예로 보면 ①번 경로는 절리 틈새가 매우 큰 경우를 나타내는 것으로 그라우팅 주입압력의 큰 증가 없이 많은 양의 그라우트재가 주입되는 것을 알 수 있다. 또한 ②번 경로는 일반적인 절리를 나타내는 것으로 주입압력이 증가함에 따라 주입량도 완만하게 증가함을 알 수 있다. ③, ④번 경로는 절리 틈새가 매우 작은 경우를 나타내는 것으로 그라우팅 주입압력이 크게 증가함에도 불구하고 매우 소량의 그라우트재가 주입되는 것을 보여주고 있다. 연속적인 그라우팅 주입 과정에서 초기 주입공의 grouting path는 그림 12의 ①번 경로를 따를 가능성이 크다. 하지만 그라우팅 주입이 진행됨에 따라 주변 지반의 절리가 그라우트재로 채워지고, 이로 인해 지반의 투수성이 낮아짐에 따라 이후 주입공의 grouting path는 ②→③→④의 순으로 갈 가능성이 크다.

5. 시공결과

5.1 P~q~t chart 검측 및 지반탐사 결과

주입 중 AGS(automatic grouting system)를 이용한 실시간 모니터링을 통하여 P~q~t chart를 검측하였으며, P~q~t chart 검측을 통하여 본 주입구간에 대한 한계주입압력(p_{cr})은 8~15kgf/cm² 이하, 한계주입속도(q_{cr}) 19~20ℓ/min로 평가되었다(그림 13참조).

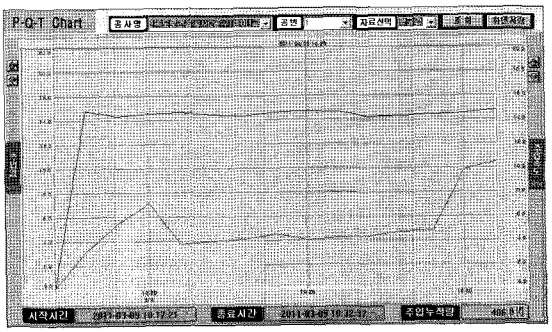


그림 13. P~q~t chart 검측

P~q~t chart 검측에 따른 주입유형은 그림 14와 같은 A_2형을 보였으며 이는 최고압력에 달한 후에도 압력은 계속 상승하고 주입율은 적정선에서 일정함을 보이는 형태이다. 이러한 주입유형으로 보아 지반형태로는 최고압력에 도달한 후 균열의 열림(opening)현상으로 일시적인 압

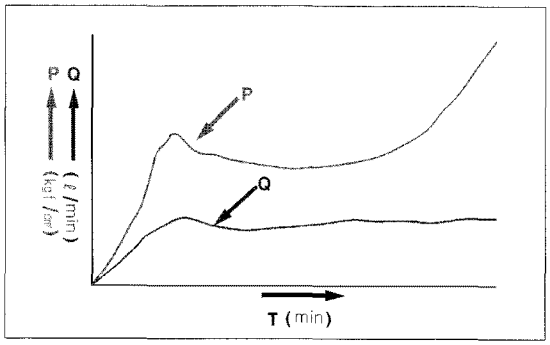


그림 14. 주입유형(A_2형)

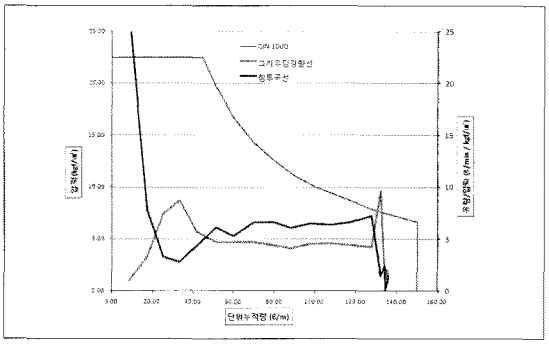


그림 15. 주입강도지수를 이용한 주입경향선

력저하 후 주입재가 채워지면서 압력이 다시 상승하는 지반형태로 볼 수 있다.

P~q~t chart 주입결과 최대압력(P_{max})범위 내에서 AGS를 이용한 주입중단 자동관리를 통해 주입실시하였으며, 주입형태를 분석하여 배합비 조절을 통해 한계범위 내에서 그라우팅이 완료 될 수 있도록 시공관리 하였다.

5.2 주입중단 자동관리 결과

주입중단 자동관리는 4.3절에서 언급한 방법인 4가지 Chart형 관리와 주입강도지수(GIN)를 이용하여 주입중단 자동관리를 실시하였으며, 그 결과 과대~과압 주입을 방지하고 안정화된 주입을 실시하였다.

그림 15와 같이 주입강도지수(GIN)를 이용한 주입경향선을 분석한 결과, 초기에는 절리 틈새로 주입재가 충진되면서 주입압이 상승하였으나, 균열의 열림(opening)현상으로 일시적인 압력저하 후 주입재가 채워지면서 압력이 다시 상승하는 형태의 모습을 띄었다. 이는 P~q~t chart 검측에 의한 주입유형분석과 일치함을 알 수 있다.

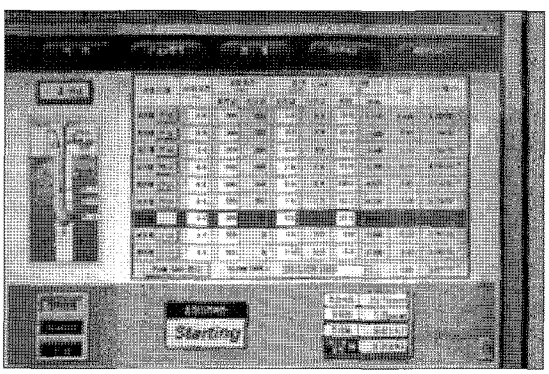
5.3 Lugeon 시험 결과

주입지반의 주입형태, Lu치, 투수계수 등을 평가하여 주입 전 · 후 암반의 투수특성을 통해 주입효과 상태를 평가하였다(그림 16 참조).

Lugeon 시험은 주입공에서 수직으로 팩커를 설치하고, AGS(automatic grouting system)를 이용하여 단계별로 압력을 변화시키면서 시험을 실시한 결과 다음 표 4와 같다.

주입 전 · 후 Lu, K의 비교검토 결과 PY1구간과 PY2구

(a) AGS를 이용한 시험관리 장면



(b) AGS Lugeon 시험화면

그림 16. Lugeon 시험관리 및 시험화면

표 4. 주입 전 · 후 Lu 및 K 비교검토

구 간	주입 전		주입 후		주입효과	
	Lu	K(cm/sec)	Lu	K(cm/sec)	Lu	K(cm/sec)
PY1	79.8	1.04×10^{-3}	5.19	6.8×10^{-5}	15배 저감	1/100 저감
PY2	67.2	1.14×10^{-3}	4.13	5.4×10^{-5}	16배 저감	1/100 저감

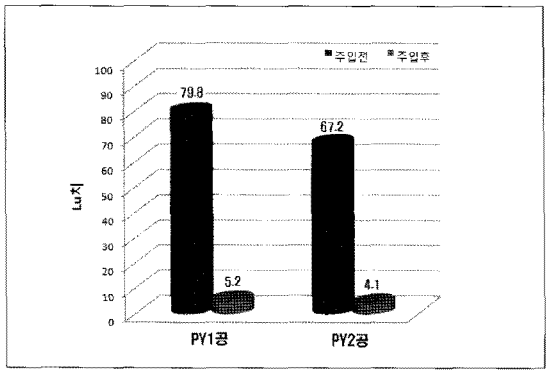


그림 17. 주입 전 · 후 Lu치 비교표

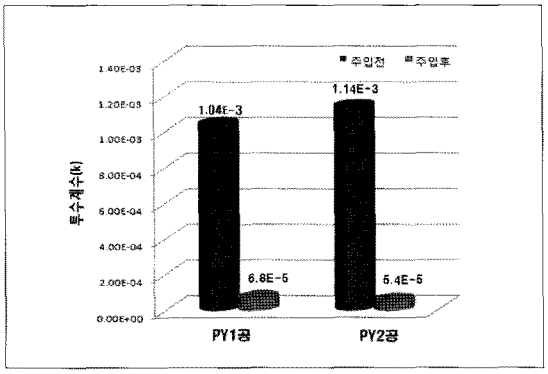


그림 18. 주입 전 · 후 투수계수(k)값 비교표

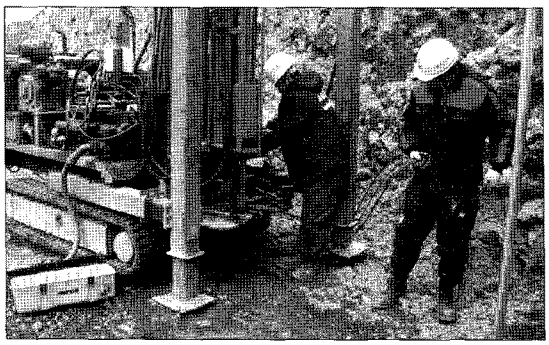


그림 19. 공내재하시험 전경

간 모두 Lu값이 67.2~79.8에서 4.13~5.19로 약 15~16배 감소함을 알 수 있었으며, K값은 약 1/100 감소하여 개량 목표에 달하였으며, 시험결과 본 연약지반에 대한 차수 · 보강 효과는 우수한 것으로 판단된다.

5.4 공내재하시험 결과

지반특성 파악 및 주입효과를 확인하고자 주입지반에 대하여 주입 전 · 후 공내재하시험을 실시하여 표 5와 같

표 5. 공내재하시험 시험결과

주입공	주입 전(D)	주입 후(D)	주입효과
PY1	7.17E+02 MPa	7.90E+03 MPa	약 10배 증가
PY2	9.42E+02 MPa	1.22E+03 MPa	약 1.5배 증가

은 결과를 도출하였다.

표 5와 같이 공내재하시험 결과, 주입 후 D값의 변화는 주입 전에 비교하여 약 1.5배~10배 증가되었음을 확인하였으며, 이는 그라우팅 주입 후 지반보강이 양호한 것으로 판단된다.

6. 결과분석

적성~전곡 도로건설공사 중 동이 1교 하부기초 지반보강공사 중 AGS를 이용한 그라우팅 시공결과를 다음과 같이 도출하였다.

1) 주입 전 지반대상평가 결과 한계압력(p_{cr})은 8~15kgf/cm^2 이하, 한계주입속도(q_{cr}) 19~20ℓ/min로 평가되었다.
2) P~q~t chart 검측결과 A_2형의 유형분석으로 최대압력(P_{max})범위 내에서 AGS를 이용한 주입중단 자동관리를 통해 주입하며, 배합비 조절을 통해 한계범위 내에서 그라우팅을 실시하였다.
3) Lugeon시험 결과 층류(Laminar)의 형태로써 Lu값은 주입 전 · 후 대비 약 16배 이상 감소하였고, 투수계수(K)는 $\alpha\times10^{-3}$cm/sec에서 $\alpha\times10^{-5}$cm/sec 이하로 약 1/100 이하로 균질하게 개량됨을 확인하였다.
4) 공내재하시험 결과 지반변형계수(D)값이 주입 후 약 10배까지 증진됨을 확인하였으며, 이는 주입 후 지반보강이 양호한 것으로 판단된다.

본 현장에 적용된 AGS(automatic grouting system)를 이용하여 지반특성과 주입조건을 위한 주입 전 시험을 통해 현장여건을 고려한 주입을 실시할 수 있었으며 주입 전 · 후에 대한 주입효과분석을 통해 본 보강공사 목적인 동이1교 교각 하부기초 보강공사의 안정성 및 지반보강효과를 보았다.

참고문헌

1. 서울시(1996), "지반보강편람-주입공법 중심".
2. 농어촌공사(2001), "댐그라우팅 설계 및 시공 실무지침서".
3. 한국토지공사(2005), "고성능 그라우팅 자동관리시스템 개발", 보고서, 한국토지공사.
4. 김진춘(2007), "컴퓨터로 도출한 주입압(p)~주입율(q)~시간(t) 차트를 이용한 선진주입공법" 한국터널공학회 기술기사.
5. 국토해양부(2009), "지반차수 및 보강을 위한 고성능그라우팅 개발", 4년차 보고서, 국토해양부.