

P-q-t chart 분석기법을 이용한 그라우팅 신뢰성 향상 방안에 관한 실험적 연구

천병식¹, 최동찬², 김진춘^{3*}

An experimental study on the improving reliability of grouting by using p-q-t chart analyzing technique

Byung-Sik Chun, Dong-Chan Choi, Jin-Chun Kim

Abstract The grouting is one of the improved techniques which is aim to decrease the permeability and to strengthen the soft ground. But The grouting method has many problems about a suitability of grouting procedure and an effectiveness of grouting after grouting work because of a technical characteristic operated inside the soil. The grouting p~q~t chart of a typical index about grouting rate and time alteration of grouting pressure is one method to estimate the suitability of grouting factor with monitoring during grouting procedure. This study is automatic grouting system (AGS) which can control the testing and grouting procedures. It can make the detailed p~q~t chart and analyze the grouting characters of the ground by comparing the detailed pattern of p~q~t chart with standard pattern. If using the p~q~t chart derived from AGS in the grouting work, it is an objective standard estimating the suitability of grouting factor with grouting materials, grouting method, grouting rate and grouting pressure, as results it expects successfully to improve reliability of the grouting work.

Keywords: Grouting, p-q-t chart, AGS (automatic grouting system), flow, pressure

요 지 연약지반개량 기술 중의 하나인 그라우팅이 차수·보강 목적으로 다양한 건설공사에서 널리 활용되고 있지만 그라우팅공법이 지반내부에서 시행되는 기술적 특성상 그 시공과정의 적합성 및 시공 후 효과확인 방법에 대한 문제점이 많다. 본 연구 대상의 그라우팅 p-q-t chart는 주입속도(q)와 주입압(p)의 경시변화(t)에 대한 관계를 나타내는 지표로서 그라우팅 시공과정을 모니터링하여 시공인자의 적합성을 평가하여 조정할 수 있는 유일한 수단이다. 본 연구에서는 시험 및 시공과정을 일괄적으로 관리할 수 있는 자동 주입관리 시스템(AGS; automatic grouting system)를 이용하여 정밀한 p-q-t chart를 검출할 수 있었으며, 검출된 p-q-t chart의 유형을 표준유형과 비교분석을 통해서 대상지반의 주입특성에 대한 정보를 추정할 수 있었다. 향후 본 연구에서 적용한 자동 주입관리 시스템을 이용하여 도출된 p-q-t chart를 활용한다면 주입재료, 주입공법, 주입속도 및 주입압 등 시공인자의 적합성을 판정하고 조정하는 객관적 지표로 활용하여 그라우팅 시공의 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 그라우팅, p-q-t 차트, 그라우팅 자동관리 시스템, 유량, 압력

1. 서 론

전 세계적으로 장대 산악터널, 해저터널, 지하 저장시설 등 지하공간 개발의 활성화 및 프로젝트의 대형화로 굴착, 지보와 함께 차수·보강공사가 제 3의 요소기술로 발전하고 있다(천병식, 1998). 차수·보강공사는 크게 재료, 장비 및 시공관리기술로 구분할 수 있으며 최근 건설현장에도 컴퓨터를 이용한 유비쿼터스 시스템 도입이

시도되면서 그라우팅분야도 조사, 설계, 시공 및 사후관리까지 종합적으로 관리할 수 있는 통합관리형 시공관리시스템 적용의 필요성이 요구되고 있다(김진춘, 1999; 한국지오텍, 2003; 천병식 등, 2000).

본 연구에서는 연약지반 개량공법으로 그라우팅 적용시 약액의 주입범위 균질화 및 주입고결토의 강도증대 효과를 증대시키는 등 지반개량의 확실성을 향상시키기 위해서 컴퓨터로 시공조건을 기록하여 도출된 주입압(p)-주입속도(q)-시간(t) 관계의 차트를 이용하여 주입효과를 평가할 수 있는 기법을 정립시키고 정립된 기법의 효용성을 평가하는 데 연구의 목적이 있다.

¹정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

²비회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

³정회원, (주)한국지오텍 대표이사

*교신저자: 김진춘(kig-2000@hanmail.net)

2. 이론적 배경

2.1 그라우팅의 적용범위

건설공사 시 차수 및 지반보강을 위한 연약지반 개량 공법은 모래 등 양질의 흙으로 치환하는 방법, 지반의 토립자를 다짐하여 고밀도화 시키는 방법, 고화재를 지반에 주입하거나 혼합처리하여 고결시키는 방법, 파일, 지오그리드 등 타 재료를 사용하여 보강하는 방법 등 크게 4가지로 구분할 수 있다.

그라우팅은 이 중에서 고결시키는 방법 중의 하나로서 1802년 프랑스의 기술자 Charles Berigny가 지반침하로 손상된 수문기초의 공동부를 채우고 기초 하부에 석회나 점토의 불안정한 주입재를 주입하여 퇴적된 층적층을 안정화시키기 위해서 약액주입공법을 적용한 이래 그라우팅의 역사는 약 200년이 경과되었으며 토질조건별 주입공법의 적용형태는 그림 1과 같다(김진춘, 1999).

그림 1에서 볼 수 있듯이 그라우팅에 의한 지반개량은 침투주입이 가장 양호한 적용형태이지만 그 적용범위가 매우 제한적임을 알 수 있다. 따라서, 일반 토사지역이나 암반기초지반에서 침투주입의 영역을 확대하기 위해서 시공 장비 및 재료의 개선을 위한 노력이 세계적으로 꾸준히 진행되어 왔지만 국내의 경우 그라우팅 기술수준이 상대적으로 낙후되어 있는 것으로 평가된다.

2.2 주입공법 시공 중 피해사례

주입재를 지반에 주입하기 위해서 일반적으로 0.5~1.5 MPa의 압력을 가한다. 주입재가 어느 정도 주입되면 주입량이 감소하고 압력이 갑자기 상승한다. 이 때

주입을 멈추지 않으면 지반내에서 연약한 부분으로 수압파쇄현상이 발생하여 균질한 주입이 형성되기 어렵다. 이와 같이 지반내에서 급작스런 압력상승으로 인한 그라우팅 효과저하를 막기 위해서는 주입펌프를 수시로 중단시키든가 가압을 조절할 수 있는 별도의 장치가 필요하다. 그러나, 주입펌프를 수시로 중단시키는 것은 시공속도를 지연시키고 주입호스가 막힐 가능성이 커지기 때문에 주입펌프를 중단시키는 일은 거의 없다. 따라서, 주입펌프의 가동을 중단시키지 않고 지반내의 급작스런 압력상승을 일으키지 않도록 주입펌프 후단부에 주입속도 조절밸브를 장착하여 주입압과 주입속도를 관리할 수 있는 시스템이 필요하다. 그러나, 지금까지 국내 현장에서는 이와 같은 관리장치가 도입되어 있지 않았고 그 필요성조차 인식하고 있지 못한 안타까운 현실이기 때문에 주입공사의 효율성이 많이 저하되고, 주입압력의 급작스런 상승에 의해서 인접구조물에 측방유동이 발생하는 피해사례가 발생하기도 하였다. 그림 2는 이러한 비효율적인 주입으로 인하여 발생할 수 있는 대표적인 문제점들을 예시한 것들이다(한국지오텍, 2006).

주입압과 주입속도를 조절할 수 있는 장치를 도입하여 주입시공을 관리할 수 있다면 그림 2에 예시된 것과 같은 여러 가지 문제점들을 감소시킬 수 있을 것이다. 따라서, 본고에서는 국내에서 개발되어 실용화 단계에 와 있는 주입압(p)과 주입속도(q)를 자동으로 관리함으로써 시공 중에 발생 가능한 피해사례를 제어하면서 시공할 수 있는 자동 주입관리 시스템의 현장 적용을 통해서 p-q-t chart를 생성시키고 이 차트를 통해서 주입 대상지반의 지반 내부 상황을 분석함으로써 주입효율을 향상시킬 수 있는 방안을 정립하고자 한다.

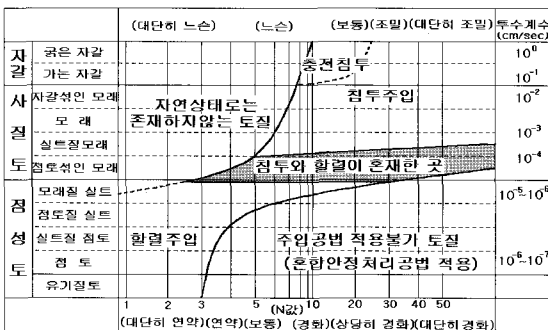


그림 1. 토질형태별 주입공법의 적용형태(藥液注入工法設計·施工指針, 平成元年)

2.3 p-q-t chart를 이용한 주입압 관리

2.3.1 주입압 관리기준

국내에서는 일반적으로 일본약액주입협회에서 제시하고 있는 주입압 관리기준을 적용하고 있으며 상세한 내용은 다음과 같다(藥液注入工法設計·施工指針, 平成元年).

- (1) 주입압은 주입재가 대상 지반에 양호하게 주입될 수 있도록 하여야 할 뿐만 아니라 주입에 의하여 지반이 할렬(hydraulic fracturing)되거나 응기되는 것을

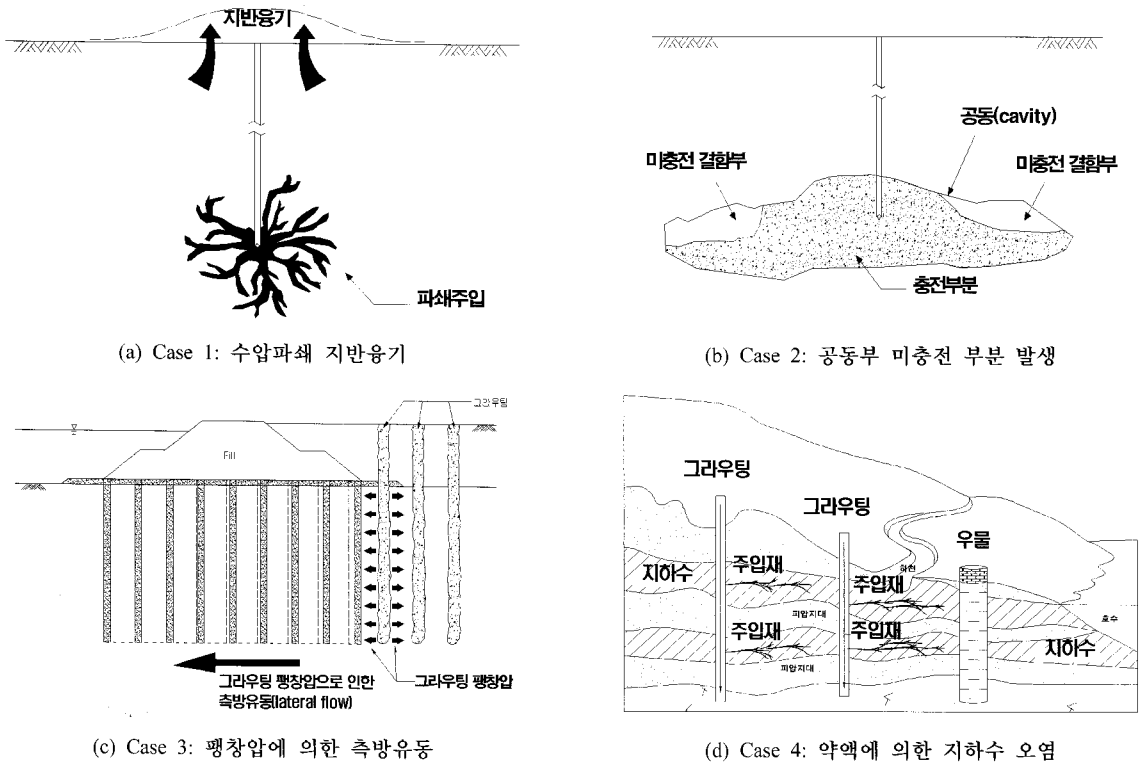


그림 2. 그라우팅 주입 시 발생하는 문제점(한국지오택, 2005)

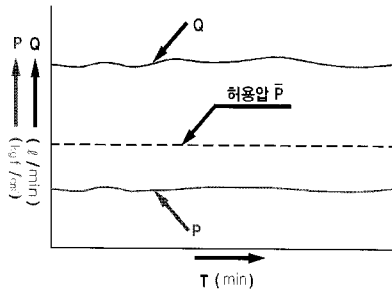


그림 3. 변화가 없는 주입형태

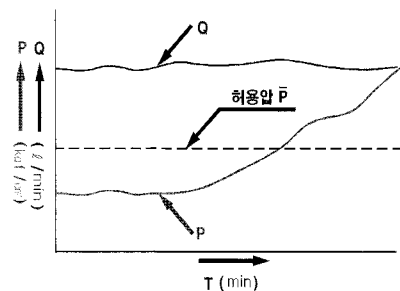


그림 4. 급격한 변화 주입형태

방지할 수 있도록 결정한다.

- (2) 주입관, 주입호수, 주입펌프의 부하, 인접구조물이나 지장물에 대한 영향을 고려하여 최소주입압은 $3P'$ (P' =간극수압)로 하고 최대한계주입압은 $5P'$ 로 설정한다.
- (3) 정량주입으로 주입하면서 계획된 주입량이 허용압 이하에서 압력의 상승이 없을 경우에는 주입작업을 계속하고, 한계압력의 범위 내에서 이상적인 상승압

력의 곡선을 나타낼 경우에는 주입작업을 종료하게 된다(그림 3).

- (4) 계획된 주입량이 설계량에 도달되지 않은 상태에서 주입압력 곡선의 급격한 변화가 발생할 경우에 완전한 충전으로 추정하여 주입작업을 종료하게 된다. 단, 저속·저압 주입인 경우 주입압력이 0.1~0.2 MPa 정도만 상승하여도 주입이 완료된 것으로 판단할 수 있다(그림 4).

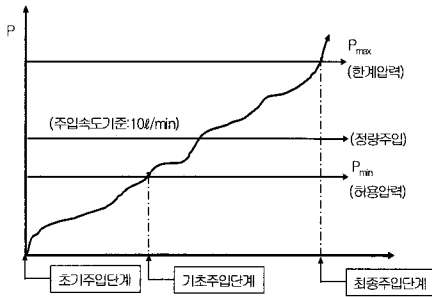


그림 5. 주입압 관리 3단계도(藥液注入工法 設計·施工指針, 平成元年)

- (5) 주입압은 저압주입으로 통상 0.3~0.7 MPa로 하며 지하수의 하부 지반에 대해서는 간극수압보다 커야 하고 간극수압의 3~5배 이내로 조절해야 한다. 단, 암반에서의 주입압은 전상재압(total stress)의 4배 까지 가능하다. 현장 조건에 따라서는 주입속도와 주입압의 검토를 통하여 최대주입압 범위 내에서 결정 할 수 있다.
- (6) 주입관리는 예상 주입량을 기준으로 하여 주입압에 의해 그림 5와 같이 3단계로 관리 한다.

2.3.2 주입유형 판정 및 조치방안

그라우팅의 성공은 정해진 압력에서 암반이나 토사층의 현장조건에 손상을 주지 않는 범위내에서 절리나 공극에 들어가는 주입량에 의해 좌우 된다. 따라서 보이지 않는 지하에서는 어떻게 주입이 되고 있는지를 알기 위해서 p-q-t (pressure-quantity-time) 관리가 필수적이며 p-q-t 곡선의 몇가지 주요 패턴(pattern)과 해석에 따라서 적절한 주입압, 주입속도 및 주입재 농도(w/c비)를 조절하거나 주입계속, 주입중단여부 등을 판단할 수 있다(垂水尙志, 1996; 草野一人, 1992; Arvind, 1993; Mitchel, 1970).

지금까지는 국내 현장에서는 주입 중에 반드시 기록되는 주입압의 데이터인 p-t chart(주입압의 시간경과 변화)가 효율적으로 이용되지 못했다. 이것은 지반 및 주입조건에의 차이에 의해서 p-t chart가 어떻게 변화하는가에 대하여 정립된 기술적 판단이 요구되지 않았기 때문이다. 또한 주입심도나 상재하중에 의해 p-t chart 및 고결체가 어떻게 변화하는가에 대해서도 규명되어 있지 못하였다. 이러한 관점에서 각 주입패턴에 대한 해석을

통한 시간에 따르는 고결체의 거동과 지반주입상황을 예측할 수 있다면 주입시공에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 이와 관련하여 토사층 및 암반층에 대해 각각 6가지 패턴이 제시되어 있으며 각 패턴에 대한 유형판정 및 조치방안은 표 1, 2와 같다.

3. 현장실험

3.1 현장개요

본 연구에서는 p-q-t chart 시스템의 현장 적용성을 평가하기 위해 시험시공을 실시하였다. 시험시공 현장은 충청남도 천안에 위치한 ○○택지조성공사에서 실시하였으며 컴퓨터를 이용한 p-q-t chart 자동검출장치가 연결된 그라우팅 플랜트를 적용한 현장 주입시험으로 2007년 5월 중 p-q-t chart를 집중적으로 검출하여 유형분석을 시도하였다. 본 현장의 지질 특성은 상부 10 m 이내에 매립층, 풍화토층, 풍화암층이 분포되어 있으며 N치가 50/20~5 cm 수준으로 지반의 굳기가 차별화 되어있기 때문에 토사층과 암반층을 대상으로 p-q-t chart 유형의 변화를 단일현장에서 검출하여 비교할 수 있는 유리한 입지로서 단시일 내에 집중적으로 경제적인 시험이 가능하였다.

3.2 시험계획

본 연구를 위해서 시험구간, 사용될 재료의 특성, 주입공 배치 및 시공 순서, 주입 전·후 투수시험 및 p-q-t chart 검출방법 등에 대한 계획은 다음과 같다.

(1) 시험구간

주입 전 투수시험은 토사구간에 대한 한계투수시험과 암반구간에 대한 루전시험으로 구분되며, 각 주입공 지층구조와 투수시험 구간, 천공 및 주입계획은 표 3과 같다.

표 3에서 P(pilot)는 주입 전 지층조사와 조사가 완료된 후 1차 주입을 시행하는 주입홀이다. P에 대한 주입이 완료된 후 일정시간 경과 후 G(grouting)에 대해서 2차 주입을 완료하여 P~G벨트의 주입 보강구역을 완성하였다. 주입보강 7일 후 CH의 주입효과 검사홀에 대해서 천공 및 주입효과 확인시험을 시행하였다.

표 1. 토사층의 주입유형 판정 및 조치방안

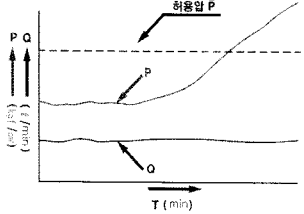
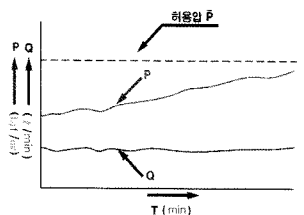
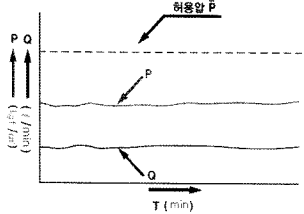
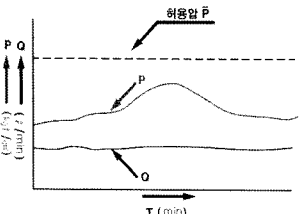
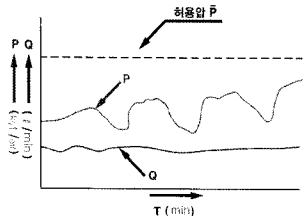
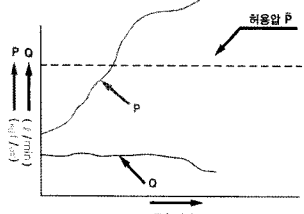
p-q-t chart	유형판정 및 조치방안
	<p>A형: 주입개시 후 적당한 시간에 주입압이 반응을 보여 급상승</p> <p>① 사질토에서 이상적인 침투주입 경우.</p>
	<p>B형: 주입압이 상승하지만 구배가 비교적 완만하고 쉽게 목표 주입압에 도달하지 않음</p> <p>① 점성토의 양호한 맥상주입 경우. ② 사질토에서 침투주입을 목표로 하지만 일부 맥상주입이 나타나고 토질이 예상보다 느슨한 경우. ③ 침투주입은 이루어지고 있으나 주입재의 농도가 낮고 겔타입이 긴 경우. ④ 약액의 일부가 대상지층 밖으로(상부 점성토 혹은 경계면 등) 유출되고 있는 경우.</p>
	<p>C형: 주입압이 전혀 상승하지 않거나 오히려 하강함</p> <p>① 점성토에서 맥상으로 주입되면서 주입재가 광범위하게 유출되고 있는 경우. ② 주입재가 지표로 유출되는 경우. ③ 지표근처의 공극으로 유출되는 경우. ④ 지하매설물 내로 유출되는 경우. ⑤ 희석이나 그 밖의 원인으로 주입재가 충분히 겔화되지 않고 넓게 확산되는 경우.</p>
	<p>D형: 상승된 주입압이 어떤 시점에서 돌연 강하하고 그 후 회복되지 않음.</p> <p>① 주입관 주변 packing이 파괴되고 주입재가 유출되는 경우. ② 주입속도가 너무 빨라 지반을 교란하면서 유출되는 경우. ③ 지반의 공극이나 약한 부분을 만나 맥상주입으로 전환되어 주입되는 경우.</p>
	<p>E형: D형 상승하강 패턴을 반복하며 주입압이 상승해감.</p> <p>① 주입시간에 비해 겔타입이 짧은 경우. ② 먼저 주입되어 겔화한 주입재가 후에 주입된 주입재에 의해 순차적으로 할렬파괴되면서 침투하는 경우로 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있는 경우.</p>
	<p>F형: 주입개시 직후에 주입압이 급상승하여 허용압력을 넘어버림.</p> <p>① 토층이 조밀한 경우. ② 겔타입이 너무 짧은 경우. ③ 주입관이 막히는 경우.</p>

표 2. 암반층의 주입유형 판정 및 조치방안

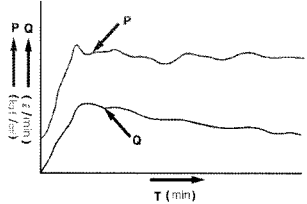
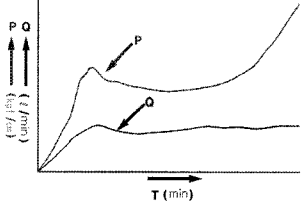
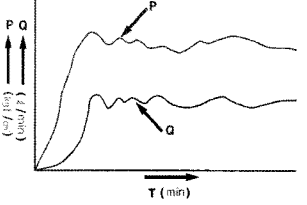
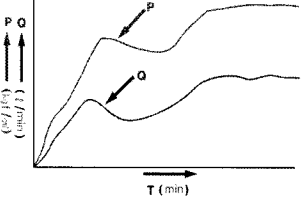
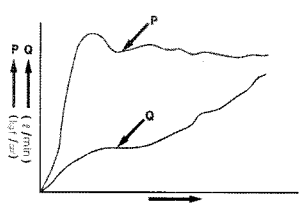
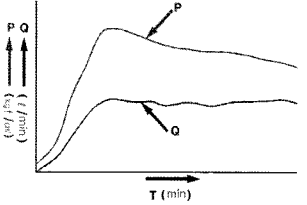
p-q-t chart	유형판정 및 조치방안
	<p>A1 형: 최고압력에 도달한 후 주입압은 균일하게 유지되면서 주입속도는 감소함.</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 균열이 주입재로 채워지면서 최고의 압력에 도달한 후에도 수개의 미세한 균열이 발생되고 다시 이들 틈새가 채워지는 경우. ② 가장 이상적인 암반 주입형태로 거부반응(refusal)이 일어날 때까지 정압주입을 계속해야 함.
	<p>A2 형: 최고압력에 달한 후에도 압력은 계속 상승하며, 주입속도는 일정함.</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 최고압력에 도달한 후 균열의 열림(opening)현상으로 일시적인 압력저하 후 주입재가 채워지면서 압력이 다시 상승. ② 이때는 주입량이 허용량 이내이더라도 주입을 중단해야함. ③ 최종압력이 시방서 압력보다 높더라도 적당히 펌프속도를 낮춰서 재 주입되 시방압력에서 거부반응이 일어날 때까지 계속함.
	<p>B1 형: 최고압력에 달한 후에도 주입압과 주입속도는 일정하게 유지됨.</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 최고압력 상태에서 확인되지 않은 균열로 들어가는 경우. ② 커텐지수벽 범위를 벗어나는 경우. ③ m당 50-75 kg의 시멘트 주입 후 균열이 부분적으로 고결된 주입재로 막힘(sealing)이 발생되고 48시간 경과 후 재천공, 재주입을 실시함.
	<p>B2 형: 주입압과 주입속도가 어느정도 올라갔다 급격히 떨어짐.</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 최고압력에서 다른 균열(new cracks)이 열리는 경우. ② 이 균열을 채우기 위해 압력과 주입속도를 일정하게 유지하면 압력이 서서히 상승함. ③ 만일 2차 최고압력에 도달하였는데도 압력과 주입속도가 변하지 않고 계속 되면 B1곡선 처리 경우처럼 48시간 경과 후 재천공, 재주입을 실시함.
	<p>C1 형: 주입압이 어느정도 올라간 후에 변함없이 일정수준을 유지하지만 주입속도는 계속 상승함.</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 구조대 층리를 따른 누출, 주입공 상부 또는 연결공간의 누출, 지중압과가 용기되는 등의 경우. ② 누출이 확인되거나 주입구간(stage) m당 75 kg 이상 주입되면 주입을 중단하고 48시간 지난 후 재천공, 재주입. ③ 누출공은 쇠파 등을 박아 탈출을 방지하고 누출공 인접 미주입공은 즉시 공내 세척을 실시하여 본 주입 이전에 폐쇄되는 것을 방지해야함. ④ 지반용기 현상이 발견되면 주입을 즉시 중단함.
	<p>C2 형: 주입압이 어느정도 상승하였다가 갑자기 떨어지지만 주입속도는 변함없이 일정함.</p> <ol style="list-style-type: none"> ① C1형과 마찬가지로 구조대를 통한 누출, 주입공간의 연결누출, 지반의 용기에 의해 나타나는 경우로 C1형과 같은 방법을 조치함.

표 3. 투수시험 구간 계획

지층구조	한계주수시험 구간	주입 전·후 투수시험 구간
매립층 0~0.7 m → 충적층 0.7~1.3 m → 풍화토 1.3~6.0 m → 풍화암 6.0~10.0 m	풍화토 4 m	풍화암 6~10 m

표 4. 표준배합 및 물리특성

		A액 [200 ℓ]		B액 [200 ℓ]	
		규산3호(ℓ)	물(ℓ)	슈퍼셉-8000(kg)	물(ℓ)
표준배합		80	120	80	170
물리특성	시멘트 분말도	8,000 cm ² /g 이상			
	현탁액[B액] 점도	6 cps 이하			
	'A액+B액' 겔타임	20~40초			
	호모겔강도(MPa)	7일재령 ; 1 이상, 28일재령 ; 2.5 이상			

(2) 주입재료

본 시험에 적용한 주입재는 국내현장에서 차수 및 보강공사로 가장 일반적이고 비교적 기술 수준이 높은 주입재 조합을 선택하였으며, 국내 현장에서 적용되고 있는 표준배합과 사용되고 있는 재료의 대표적인 물리특성의 값은 표 4와 같다.

(3) 주입공 배치

본 시험에서 주입공은 시험전 지반조사 및 본 주입에 사용되는 P(pilot)공, 연속된 인접 주입공 G(grouting) 및 주입공 그룹에 대한 검사공 CH(check hole)로 구분하였다. 주입공 간격은 국내 현장에서 가장 일반적으로 설계되고 있는 C.T.C=0.8 m, 확산반경 1.0 m로 하여 20%정도 중복 주입이 되도록 계획하며 주입공 배치 계획은 그림 6에 나타내었다.

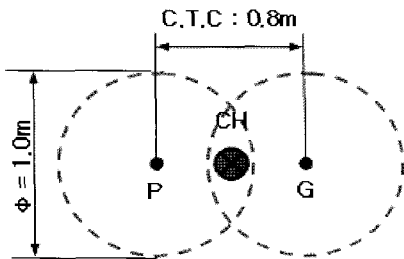


그림 6. 주입공 배치도

(4) 주입시공 flow

본 연구 현장시험에는 『조사·계획·설계·시공모니터링·효과확인·자료축적』의 각 분야를 일괄적으로 시행할 수 있는 자동 주입관리 시스템(AGS; automatic grouting system)을 적용하는 통합관리형 약액주입공법을 활용하여 주입시공과정을 그림 7과 같이 시행하였다.

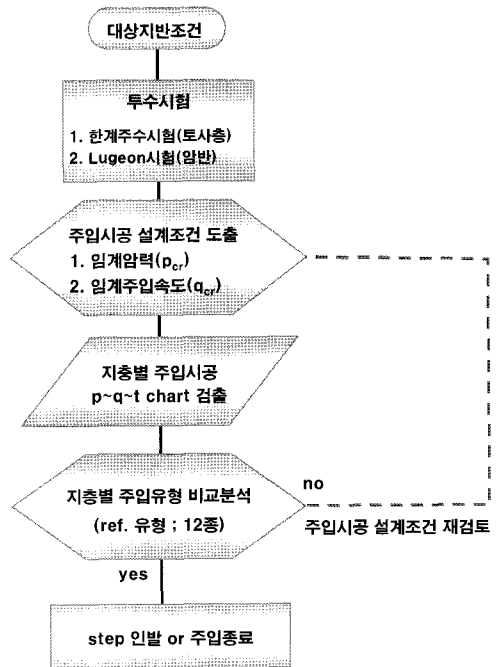


그림 7. 주입시공 Flow Chart

(5) 투수시험

그림 7에서 시행한 주입 전·후 투수시험은 컴퓨터를 이용한 제어관리 시스템을 도입한 AGS를 적용하였다. 상부지층의 충전·매립토와 풍화토 지층에서는 한계주수시험으로 지반의 한계주입압(p_{cr})과 한계주입속도(q_{cr})를 평가하여 적절한 주입압을 선정하고자 하였으며, 하부지층 풍화암에서는 Lugeon 시험을 실시하여 암반층의 주입특성을 파악하고자 시도 하였다. 이와 같이 주입 전·후 투수시험을 통해서 대상지반의 지반특성을 파악하는 목적은 대상지반의 특성에 적합하게 주입압(p)과 주입속도(q)를 설계하여 적용함으로써 주입효과 향상과 주입시공의 안정성을 확보하고자 하는 것이다.

(6) p-q-t chart 검출시험

그림 7에서 p-q-t chart 검출은 AGS의 컴퓨터 제어관리 시스템을 활용하였으며, AGS의 장치구성 모식도는 그림 8과 같다. 주입시공은 대상토에 대한 과도한 수압 파쇄현상을 방지하기 위해서 최대주입(P_{max})을 설정하고 주입효율을 촉진하기 위해서 최소주입압(P_{min})을 설정하여 시공하는 것이 일반적이지만 p-q-t chart 검출시험은 주입 대상토의 주입특성을 파악하기 위해서 최대주입압과 최소주입압을 설정하지 않고 자연적인 조건에서 주입시험을 시행하였다. 그림 8의 AGS의 장치구성을 현재 국내에서 적용되고 있는 일반 그라우팅공법 장치구성과 비교하면 기존의 공법에서는 주입압(p)과 주입속도(q)를 단순히 기록하는 장치를 사용하는 반면 AGS는 주입압(p)과 주입속도(q)를 시공조건에 적합하게 자동으로 제어관리할 수 있을 뿐만 아니라 컴퓨터에 저장

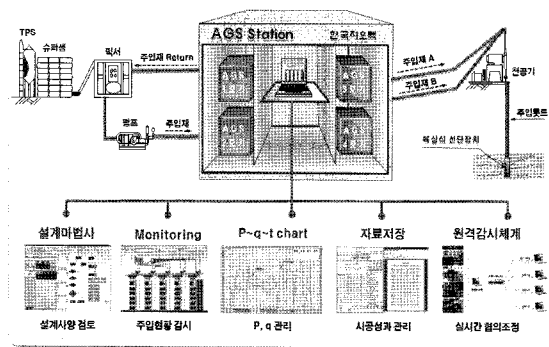


그림 8. AGS의 장치구성 모식도

된 주입압(p)과 주입속도(q)에 대한 자료를 이용하여 다양한 관리 data를 생산할 수 있기 때문에 해당 현장의 사후관리는 물론이고 타 현장에 대한 시공관리 참고자료로 확대될 수 있다.

그림 9, 10은 현장에서 AGS를 설치해서 p-q-t chart 분석을 실시하는 장면이다.

4. 실험결과

4.1 주입 전·후 주수시험

(1) 한계주수시험

P 주입홀 4 m의 풍화토 구간에서 주입대상지역의 지반특성을 파악하고자 한계주수시험을 실시한 결과 P 주입홀에서의 p-q chart는 그림 11과 같이 풍화토층에서는 주입속도가 비교적 큰 20 l/min 이하로 관리할 경우 주입속도(q)와 주입압(p)이 거의 비례적으로 증가하는 경향을 보이고 주입속도 증가에 대한 주입압의 상승이 완만하였다.



그림 9. AGS 설치장면



그림 10. p-q-t chart 검출시험

(2) 루전시험

P 주입홀 6-10 m의 풍화암 구간에서 주입대상지역의 지반특성을 파악하고자 루전시험을 실시한 결과 P 주입홀에서 주입 전 루전시험 결과는 그림 12와 같고, P 주입홀과 G 주입홀에 대한 주입을 완료하고 7일 후 CH 검사홀에서 루전시험 결과는 그림 11과 같다. 루전시험 대상층인 풍화암 바로 상부 풍화토층에서 적정 주입압이 0.5 MPa 이하로 평가되었기 때문에 안전을 고려해서 루전시험 대상 풍화암층에서도 최대 주입압을 0.5 MPa로 설정하고 압력을 '0.1→0.2→0.3→0.4→0.5→0.4→0.3→0.2→0.1' 9단계로 순차적으로 조정하면서 주수량을 측정하였다. 한편, 주입 전·후 flow type과 투수성의 정량적 평가 결과는 표 5와 같다.

(3) 수위강하 투수시험

현장에서 주입 전·후 투수성을 평가하기 위해서 가장 일반적으로 사용되는 시험방법은 간편법인 수위강하법을 이용한다. 본 시험 지역에 대한 4~7 m 구간의 풍화토 및 풍화암 구간에서 주입대상지역의 투수성 개량효과

를 평가하기 위해서 1.5 m 간격으로 주입 전·후에 수위강하법에 의한 투수시험을 실시한 결과는 표 6과 같다.

4.2 주입시공 중 p-q-t chart 검출시험

P 및 G 주입공에 대해서 표 4의 표준배합 주입재를 풍화암 10 m에서부터 매립 표층까지 주입하면서 p-q-t chart를 검출한 시험결과는 표 7, 8과 같다.

5. 결과분석

5.1 주입 전·후 주수시험

(1) 한계주수시험

그림 9에서 볼 수 있듯이 풍화토층에서 주입속도(q)와 주입압(p)이 거의 비례적으로 증가하는 경향을 보이고

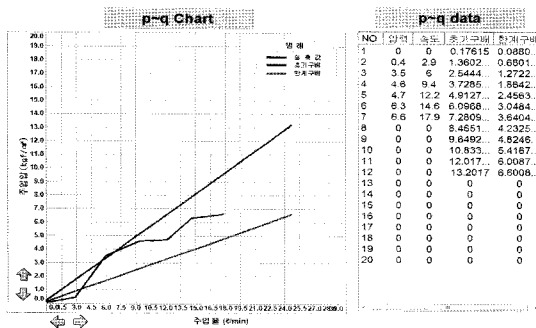


그림 11. 주입홀 P에서 측정된 한계주수시험 p-q chart

표 5. 주입 전·후 flow type과 투수성 측정치

공변	flow type	Lu값	개량효과
P	난류(turbulent)	7~14	OK
CH	난류(turbulent)	2~3	

표 6. 주입 전·후 투수성 변화 경향

심도(m)	4	5.5	7	개량효과
P	3.2E-04 cm/sec	3.6E-04 cm/sec	1.6E-04 cm/sec	투수성 감소
CH	2.2E-05 cm/sec	6.1E-05 cm/sec	3.2E-05 cm/sec	

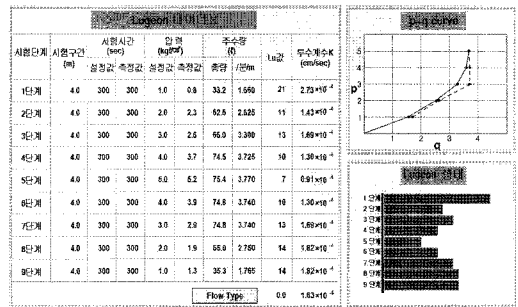


그림 12. 주입홀 P에서의 주입 전 주입형태

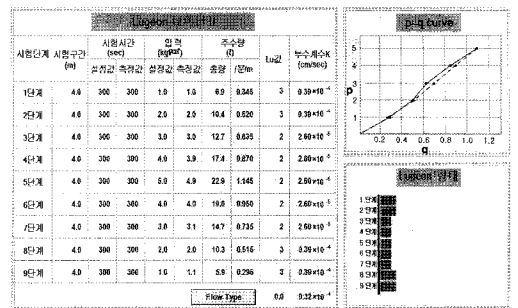


그림 13. 검사홀 CH에서 주입 후 주입형태

표 7. P공의 p-q-t chart

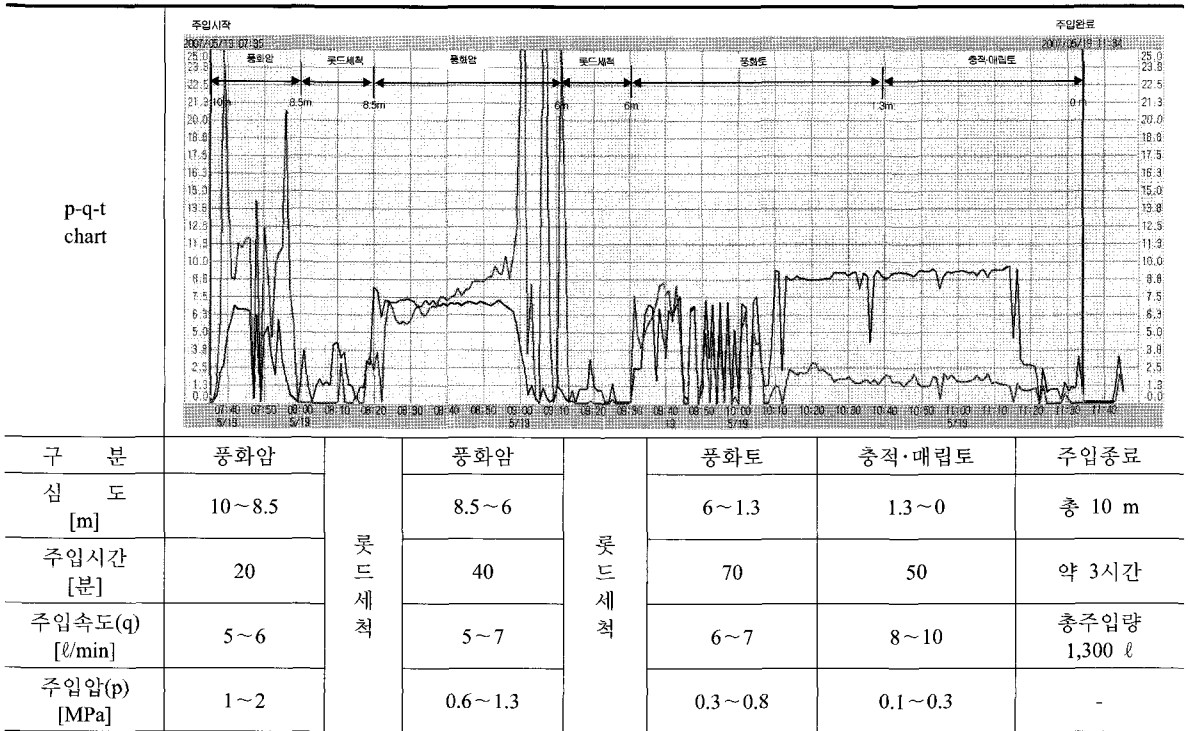
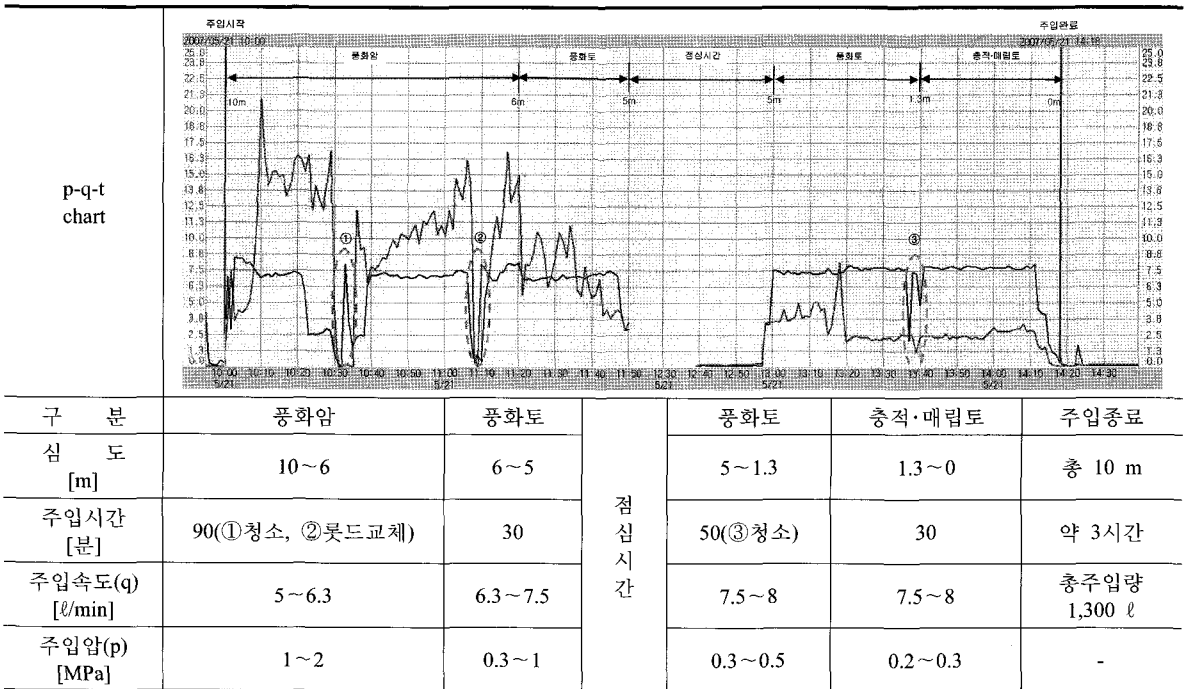


표 8. G공의 p-q-t chart



주입속도 증가에 대한 주입압의 상승이 완만하였으며, 그림 9에 의해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- ① 주입재 점도 한계비 m 의 최대값 0.5 (통상 $0.3 \leq m \leq 0.5$)(垂水尙志, 1996)를 적용하여 한계구배선(붉은 선)을 도출하고 ‘주입속도: 주입압’비를 도출하면 고속주입영역에서는 ‘ $20 \text{ l/min} \rightarrow 0.5 \sim 0.6 \text{ MPa}$ ’, 중속주입영역에서는 ‘ $10 \text{ l/min} \rightarrow 0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$ ’, 저속주입영역에서는 ‘ $5 \text{ l/min} \rightarrow 0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ ’로 주입속도 대비 주입압 수준이 산출되었다.
- ② 즉, 그림 2에서 제시된 파쇄주입으로 인한 지반유기, 그라우팅 팽창압으로 인한 측방유동 등 주입시공 시 발생될 수 있는 문제점들을 사전에 예방하면서 안정적으로 주입시공이 가능한 주입압은 고속주입에 해당하는 20 l/min 수준일 경우 적정 주입압이 $0.5 \sim 0.6 \text{ MPa}$, 중속주입에 해당하는 10 l/min 수준일 경우 적정 주입압이 $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$, 저속주입에 해당하는 5 l/min 수준일 경우 적정 주입압이 $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 로 비교적 낮게 평가되었다.

이와 같은 수준의 주입압은 실제 국내 현장에서 시행되고 있는 주입압 수준과 상당히 괴리가 있다. 이는 국내 현장에서 상대적으로 고압주입이 일상화 되고 있는 현실을 반증하는 것으로 주입시공 중 수압파쇄나 측방유동 등의 문제점들이 발생될 수 있는 가능성이 높을

것으로 판단된다.

(2) 루전시험

그림 12, 13 및 표 5에서 볼 수 있듯이 주입대상층이 풍화암이기 때문에 주입압을 0.5 MPa 정도로 낮게 안전측으로 적용할 경우 주입 전의 주입형태가 난류(turbulent)에서 주입 후의 주입형태도 난류로 변화가 없이 안정적으로 주입되어 루전값이 7~14에서 2~3으로 개량되었다. 따라서, 주입 전·후에 주입형태의 변화가 일어나지 않도록 사전에 시험을 통해서 적정 주입압을 선정할 경우 지반내부의 변상을 방지하면서 주입효과를 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

(3) 수위강하 투수시험

4~10 m 구간, 즉 풍화도 및 풍화암 지층에 걸쳐서 수위강하 투수시험 결과와 루전시험 결과는 표 5, 6에 제시된 바와 같이 주입 전·후에 약 10배 정도 투수성이 감소되었고 일반적으로 암반층에서의 개량목표인 3루전 이하로 투수성이 저감되었다.

5.2 주입시공 중 p-q-t chart 검출시험

P 및 G 주입공에 대해서 표 4의 표준배합 주입재를 풍화암 10 m에서부터 매립 표층까지 주입하는 도중에

표 9. P공의 p-q-t chart 유형 분석

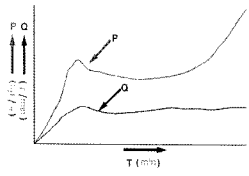
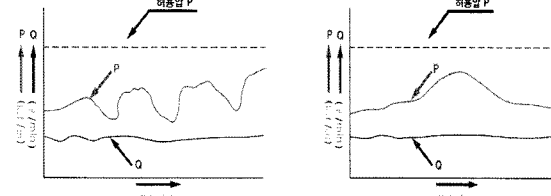
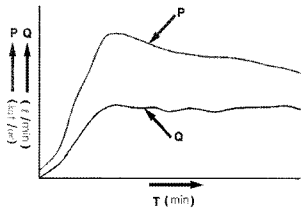
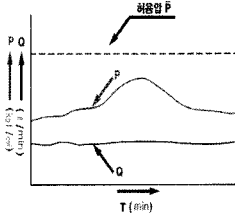
풍화암; 6~10 m	풍화도; 0~6 m
<ul style="list-style-type: none"> · 주입초기 콧드막힘으로 과압발생 → 콧드세척 후 40분정도 풍화암지반의 정상적인 주입형태 유지 → 콧드막힘으로 과압 재발생. · 정상주입 범위에서 주입압은 중간정도이고 주입속도는 낮은 편으로 풍화암에서의 정상적인 주입형태를 보이고 있음. · 정상주입 범위의 주입유형은 ‘최고압력에 도달한 후에도 압력은 계속 상승하며 주입속도가 일정한’ <표-2>의 『A₂형』으로 판정되며 <표-2>에 제시된 조치방안에 따라 주입조건을 조정하는 것이 필요하다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 주입압은 비교적 낮고 주입속도는 평균적인 수준으로 토사층 지반에서의 정상적인 주입형태를 보이고 있음. · 정상적인 주입구간의 주입유형은 1단계는 ‘상승하강 패턴을 반복하며 적절한 주입이 완성되가는’ <표-1>의 『E형』에서 2단계는 ‘상승된 주입압이 어떤 시점에서 돌연 강하하고 그 후 회복되지 않는’ 『D형』으로 전환되는 주입패턴을 보이고 있다. 즉, 1단계에서는 지반이 비교적 단단한 풍화도 지반의 전형적인 주입패턴을 보이다가 2단계에서는 상부로 올라올 수록 이원된 지반특성에서 보이는 주입패턴으로 전환된 것을 보여주고 있다.
	

표 10. G공의 p-q-t chart 유형 분석

풍화암; 6~10 m	풍화토; 0~6 m
<ul style="list-style-type: none"> · 주입압은 비교적 높고 주입속도는 낮은 편으로 풍화암에서의 정상적인 주입형태를 보이고 있음. · 주입유형은 ‘주입압이 어느정도 상승하였다가 갑자기 떨어지지만 주입속도는 변함없이 일정한’ 『C₂형』으로 판정되며 <표-2>에 제시된 조치방안에 따라 주입조건을 조정하는 것이 필요하다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 주입압은 비교적 낮고 주입속도는 평균적인 수준으로 토사층 반에서의 정상적인 주입형태를 보이고 있음. · 주입유형은 ‘상승된 주입압이 어떤 시점에서 돌연 강하하고 그 후 회복되지 않는’ 『D형』으로 전환되는 주입패턴을 보이고 있다. 이와 같은 패턴은 충전도나 매립층과 같이 이원된 지반특성에서 보이는 전형적인 주입패턴으로 주입재 유출에 의해서 주입효과가 반감되고 지반환경 오염의 우려도 커짐으로 주입효율 향상을 위해 주입조건 조정을 검토해야 한다. 

검출된 p-q-t chart를 근거로 표 9, 10과 같이 유형을 분석하여 조치방안을 제시할 수 있었다.

표 9, 10으로부터 알 수 있듯이 주입시공 중 검출된 p-q-t chart의 유형을 정밀하게 분석하면 지반내부의 충전도, 공극여부, 공극 재발생 여부 등 상세한 정보를 유추하여 판단할 수 있기 때문에 현장에서 적용되었던 주입재료, 주입공법, 주입속도, 주입압 등 주입인자의 적정성을 평가할 수 있다. 반면 종래의 주입시공방법에서는 객관적인 근거가 부족하기 때문에 주입중 주입인자를 조정하면서 주입공사의 안정성과 효과향상을 도모하기 위한 조치를 취하는 것은 거의 불가능한 일이며, 시공중 사고가 발생할 경우에도 객관적인 판단이 가능하도록 제시될 수 있는 자료가 많지 않기 때문에 사고원인 조사에 어려움이 따른다.

6. 결 론

주입 전·후 투수시험을 통해서 주입시공 인자인 주입속도(q)와 주입압(p)의 적정범위를 선정하고 주입시공 중 검출된 p-q-t chart의 유형을 정밀하게 분석하는 기법을 통해서 대상지반의 주입특성을 파악하고자 시행한 본 연구의 현장시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 풍화토 지층의 한계투수시험 결과 ‘주입속도(q): 주

입압(p)’ 관계인 한계구배선에 의해서 적절한 주입속도와 주입압 관계가 ‘고속주입 20 ℓ/min: 0.5~0.6 MPa, ‘중속주입 10 ℓ/min: 0.2~0.3 MPa, ‘저속주입 5 ℓ/min: 0.1~0.2 MPa로 산출되었다. 이 결과는 현재 국내 현장에서 시행되고 있는 수준과 큰 차이를 보이고 있으며 이는 국내 현장에서 과주입압이 일상화 되어 있음을 반증한다고 판단된다.

2. 풍화암 지층의 루전시험에서 최대 0.5 MPa정도로 원지반의 변형을 일으키지 않을 만한 주입압을 적용할 경우 주입 전의 루전 형태인 난류(turbulent)가 주입 후 루전시험에서도 루전형태가 변화되지 않고 안정적으로 주입되었으며, 투수성도 7~14 Lu에서 암반지층에서 개량목표수준인 2~3 Lu으로 충분히 개량되었다.
3. 수위강하 투수시험에서도 루전시험에 의한 투수성 평가와 유사한 결과를 얻었다.
4. P-q-t chart의 유형분석을 통해서 지반상황을 비교적 정확하게 판독이 가능하므로 과도한 주입속도나 주입압을 사전에 방지할 수 있으며 이와 같이 객관적인 평가 결과에 의해서 시공과정을 조정할 수 있는 자료가 제공되기 때문에 시공중 문제가 발생되거나 시공 조건 변경이 필요한 경우 당사자간 의견조율이 합리적으로 조정될 수 있다.
5. 자동화된 주입관리 시스템인 AGS(automatic grouting

system)를 적용한 결과 주입공사 중 발생될 수 있는 각종 data가 축적되므로 그라우팅 설계에 필요한 data base 구축이 용이할 것으로 기대된다.

본 연구는 일부 지역의 풍화토와 풍화암을 대상으로 제한적인 현장조건에서 시행된 것이지만 연구성과는 나름대로 시사성이 있다고 판단된다. 향후 풍화토와 풍화암의 특성변화, 사질지반, 점성토지반 및 연암 등 대상지반의 영역을 확대하면서 추가적인 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(05건설핵심 D10-01-해저시설물차폐기술 연구단)에 의해서 연구가 수행된 것으로 본 연구를 가능케한 해당 기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. 천병식 (1998), “최신 지반주입 -이론과 실제”, 원기술, pp. 23-37.
2. 김진춘 (1999), “지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구”, 한양대학교, 박사학위논문, pp. 1-7.
3. 한국지오텍 (2003), “마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적그라우팅 시스템 개발 연구”, R&D/목적 1-07, 건설교통부, pp. 187-200.
4. 한국지오텍 (2005), “고성능 그라우팅 자동관리 시스템 개발”, 보고서, 한국토지공사.
5. 한국지오텍 (2006), “해저지반 차수 및 보강을 위한 고성능 그라우팅 개발”, 1년차 보고서, 건설교통부.
6. 천병식, 이한진, 정병헌 (2000), “A Case Study on Ground Improvement by ENPASOL & SINNUS Grouting Systems”, 대한토목학회논문집, Vol. 20, No. 6, pp. 507-517.
7. 薬液注入工法 設計・施工指針(平成元年), (社)日本薬液注入協会.
8. 垂水尚志 (1996), “p~q曲線及びP~tチャートに基づく注入形態の検討”, 薬液注入工法における注入効果の豫測確認手法に関するシンポジウム, pp. 145-152.
9. 草野一人 (1992), “薬液主入工法ハンドブック”, p~q管理, pp. 166-169.
10. Arvind V. S. (1993), “grouting technology in tunnelling and dam construction”, pp. 444-475.
11. Mitchel, J.K. (1970), “In Place Treatment of Foundation Soils”, P. of ASCE, J. of SMFE, Vol. SMI, pp. 73-110.



천 병 식

한양대학교
토목공학과
교수

E-mail: hengdang@unitel.co.kr



최 동 찬

한양대학교 대학원
토목공학과
박사과정

E-mail: dcchoil@kunhoenc.com



김 진 춘

(주)한국지오텍
대표이사

E-mail: kig-2000@hanmail.net