

자동화 그라우팅 관리기술을 이용한 그라우팅 시공 · 품질관리 기술 II



김진춘
(주)한국지오텍
대표이사
(kig-2000@hanmail.net)



김상균
(주)한국지오텍
기술연구소 연구소장
(kimsg65@hotmail.com)



유병선
(주)한국지오텍
기술연구소 책임연구원
(bsyoosil@naver.com)



강희진
(주)한국지오텍
기술연구소 책임연구원
(kanghj95@empal.com)

2. 시공 · 품질관리 연구동향

2.1 침투 · 다짐형 그라우팅 공법

침투 · 다짐형 그라우팅 공법은 이상적인 침투주입을 유도하며 주입된 지반을 순차적으로 다져주면서 실시간 최적의 상태로 예측 주입관리를 할 수 있는 ICT와 그라우팅기술이 융합된 최신 그라우팅 공법이다. 침투 · 다짐형 그라우팅 공법연구개발의 3가지 핵심기술은 이상적인 침투주입을 구현 할 수 있는 HG(Hybrid Grouts)그라우트와 주입 후 교란된 지반을 다져주는 EC(Expansion Compaction)팩커, 일반토사층 및 저수지 제체 보수 · 보강 그라우팅 공사에서도 실시간으로 주입관리를 수행 할 수 있는 m-ROG

알고리즘 기반 관리기술로 구성되어 있다(그림 8).

HG 그라우트재는 이상적인 침투주입을 구현하기 위해 고분말 및 저점도를 특징으로 실트질샌트지층까지 침투주입이 가능하도록 개발하며 주요 개발 특성인

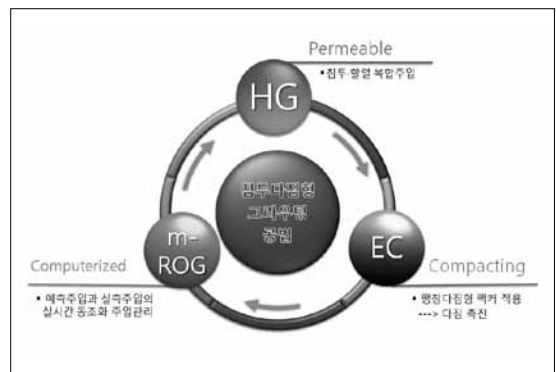


그림 8. 침투 · 다짐형 그라우팅 공법의 개념

고침투성, 하이브리드형 다양한 Gel-time 조절 기능, 고강도성 확보, 고 유동성 그리고 환경친화성에 대한 품질기준을 설정하였다(그림 9).

일반적으로 주입이 가능한 모래 및 모래섞인 실트질 영역에서는 주입형태에 따라서 충전주입, 침투주입, 할렬주입으로 구분될 수 있으며, 주입이 불가능한 점성토 영역에서는 고압분사에 의한 혼합안정처리공법이 적용된다. 침투주입의 영역에서도 종래의 보통시멘트를 주입재로 사용할 경우 자갈 섞인 굵은 모래층 또는 투수계수 $k = \alpha \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 까지만 침투가 가능하지만, 저점도의 용액형 주입재를 적용할 경우 실트질 모래지반까지 침투주입을 확장시킬 수 있다(Karol, 1990).

EC 팩커는 팽창다짐형 선단장치를 이용하여 주입과 동시에 주입지반에 다짐효과가 발휘되어 주입지반의 강도증가와 투수계수가 저감되고 주입지반의 조직이 치밀해져 구조적 안정성이 확보되는 기술이다. 주입효과를 표현하기 위해 원지반상태, 침투 및 할렬주입상태 그리고 교란된 지반을 치밀하게 다진 상태를 모사하였으며 주입시 투수계수와 상향반복 중첩식 다짐후의 투수계수의 저감 효과를 나타내었다(그림 10). 저수지와 같은 저압 그라우팅에 사용되는 슬리브형태의 EC 팩커를 개발하고자 하며 천공을 한 후 케이싱이 인발되고 EC 팩커를 설치한 후 상향주입시공을 하면서 각 단계별 주입시공 이후 순차적으로 EC 팩커에서 주입과 동시에 팽창다짐(expansive compaction)을 발생시켜 주입효과를 극대화 시키게 한다.

m-ROG 기반 자동화 그라우팅 관리기술은 저수지 제방과 같은 토사층에도 적용 가능한 알고리즘을 적용하여 이론적 주입경향선과 실측 주입경향선을 동조화시킬 수 있는 ICT기반 자동화 주입관리 기술로 그라우팅 주입관리 정밀도를 획기적으로 향상시킬 수 있으며 다차원 지반에 적용 가능한 실시간 최적화 그라우팅 주입관리기술이다. m-ROG 알고리즘의 실효성 검증을 위하여 00저수지 제방에 시험시공을 하였다. 그림 11은 00저수지 제방 시공현장을 설명하고 있다. 그림

12는 예측주입량과 실측주입량의 동조화에 의한 주입관리 그래프이며 예측된 주입량곡선과 실측된 주입량곡선이 아주 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 13은 한계주수시험에서 구한 Pmax와 Pmin에 의해 계

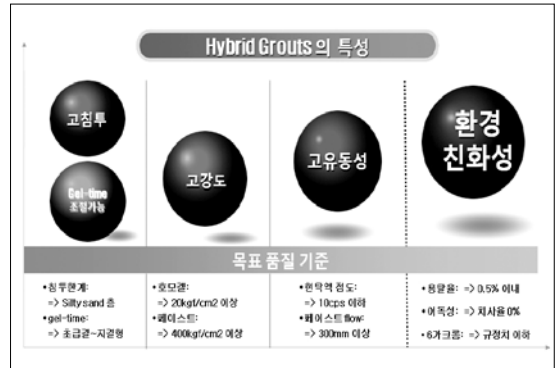


그림 9. HG 그라우트재의 특성과 목표품질기준

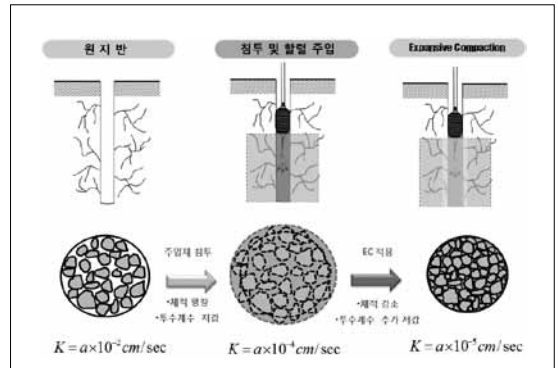


그림 10. EC 팩커의 주입효과

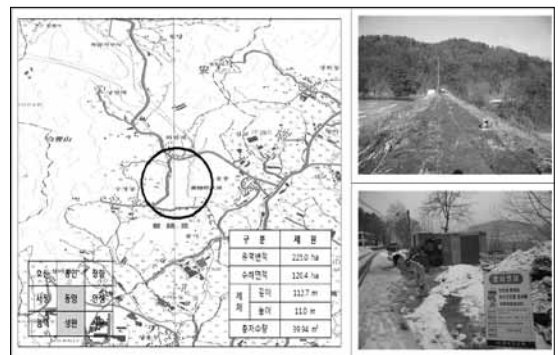


그림 11. 00저수지 제방 그라우팅 시공현장

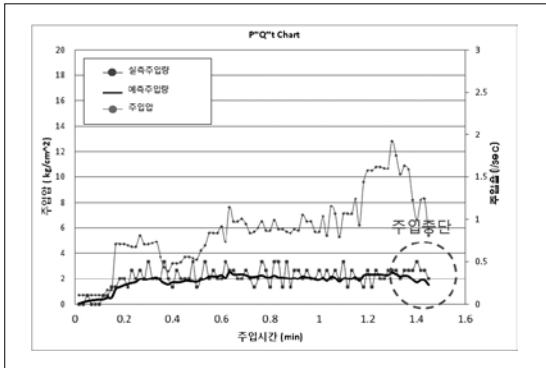


그림 12. 예측주입량과 실적주입량의 동조화에 의한 주입관리

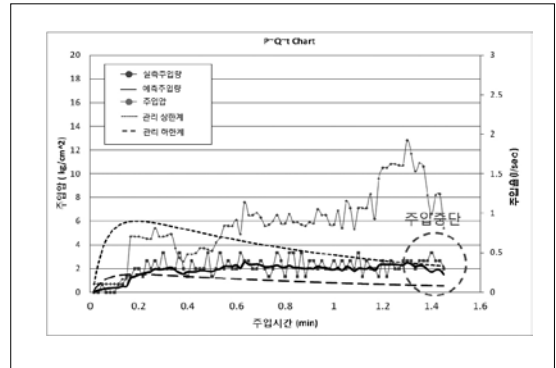


그림 13. Qmax와 Qmin을 이용한 주입관리

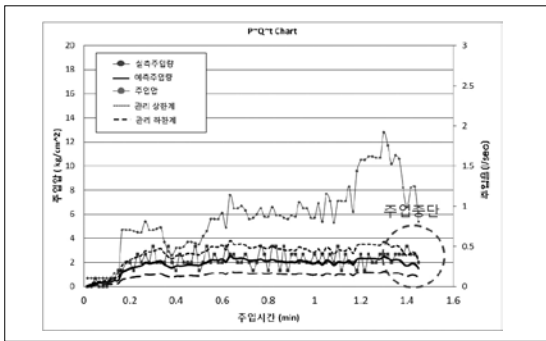


그림 14. 관리한계를 임의 설정한 후 주입관리



그림 15. m-ROG 기반 주입시공 자동관리 및 모니터링

산된 Qmax와 Qmin을 이용한 주입관리 그래프를 나타내며 그림 14는 관리한계를 임의 설정한 후 주입관리를 하고 있는 그래프를 나타낸다.

m-ROG 기반 자동화 그라우팅 관리기술의 전체 구성은 시공전 주입지반의 시공조건을 평가 할 수 있으며 P~Q~T chart 검측 및 지반탐사가 가능하며 주입시공시 m-ROG 알고리즘 기반으로 자동관리를 해주는 기능과 Google Map을 통해 자동으로 현장위치를 찾아주며 원격에서 현장의 상황을 CCTV, 실시간 대화 메신저 및 부재중일 경우 쪽지기능 등으로 쌍방 간 실시간으로 확인이 가능하고 메인화면을 원격에서 관리할 수 있는 기능적 장점이 있다. 저수지 제방과 같은 토사층에도 적용 가능한 m-ROG method를 적용하여 이론적 주입경향선과 실적 주입경향선을 동조화시킬 수 있는 ICT기반 자동화 주입관리 기술로 그라우팅

주입관리 정밀도를 획기적으로 향상시킬 수 있다.(그림 15).

ICT기반 원격 통합관리 체계 구축은 관리자가 원격에서 시공조건 및 조치를 원격으로 제어 할 수 있으며 Google Map을 통한 현장위치 자동설정기능, 현장의 스마트폰 카메라 및 CCTV를 통해 실시간 현장의 상황기능, 메신저를 통한 실시간 의사소통 기능 등이 구비되어 전국에 분산된 그라우팅 시공현장을 통합관리할 수 있으며 또한, 최신 스마트폰기반 원격관리 플랫폼을 동일하게 구축하였다(그림 16).

2.2 해저터널용 통합관리형 그라우팅 시공관리 기술 및 장비개발

해저터널 고수압 조건의 그라우팅 시공 선행기술 조



그림 16. ICT기반 원격 통합관리 체계 구축

사분석에서 고려해야 할 사항으로는 고수압조건의 터널 그라우팅 적용구분과 그라우팅재료에 대한 정의, 고수압 조건의 그라우팅과 지하수유입에 대한 상관관계 분석, 암반의 특성인자연구 및 그라우팅 시공시 필요한 요소기술 및 연구개발이 필요한 주입관리기술들 (Stop criteria)에 검토가 될 수 있다. (그림 17).

해외문헌조사 및 정보조사에 의해 파악된 해저터널용 고수압 조건에서 사용 될 수 있는 통합형 그라우팅 장비는 국내외적으로 Atlas copco사의 장비가 유일하다. 장비의 구성항목으로는 Cement silo, Agitator,

Pump, mixer, controll unit and logger로 구성되어 있다. 메인장비의 구성전략으로는 각 요소기술 장비의 사양을 충분히 검토하여 국내장비사와 공동으로 국산화시키는 것이 효율적이다. 왜냐하면 사용시 발생하는 문제점들을 실시간 파악하여 개선 할 수 있고 보다 나은 장비의 개발을 위해 다소 어려운 점이 있지만 그동안의 (주)한국지오텍사의 자동화 그라우팅 시스템 장비 제작시 문제점 극복하고 순수국산기술로 완성해 낸 기술 Know-how가 있으므로 충분히 가능하리라 판단된다.

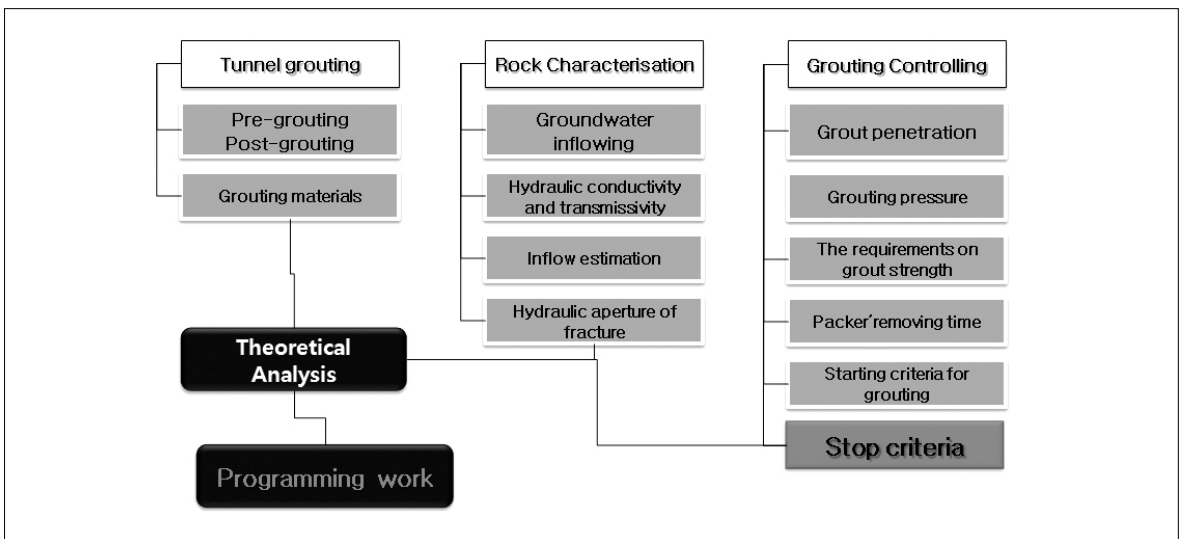


그림 17. 해저터널 고수압 조건의 그라우팅 시공관리기술



그림 18. 해저터널용 통합형 그라우팅 장비 개발 구성도

표 10. 현장 현황표

현장명	00현장 건설공사 중 강관다단 그라우팅 공사		
공사기간	2014년 12월 ~ 시공 중		
시공위치	종점 : 00km100.00 ~ 00km300.00		
공종	대구경 직천공 (Φ=114.3mm) 측벽 하부 보강 (Φ=60.5mm)	수량	1,000공 × 12.0m = 12,000m 400공 × 6.0m = 2,400m
적용공법	RAM	사용자재	슈퍼셈8000-N, 규산
주입공 상세도			
시공 대표단면도			

표 12. Lugeon시험 절차



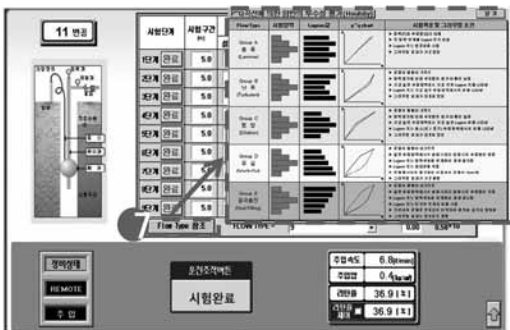
- ① 시험조건입력 (각시험단계)
 시험구간 : 시험대상길이
 시험시간 : 300초 (현장여건에 맞게선정)
 시험압력 : 각 단계별 압력을 변화함.
 압력변화 : 1-3-5-7-9-7-5-3-1
 (압력은 현장여건을 고려하여 설정)
- ② 시험조건 입력 후 Lugeon 시작
 각 단계별 시작클릭 (자동종료)



- ③ 단계별 시험 완료 / 다음단계 시험 시작
- ④ 시험 진행중 속도, 압력 밸브리턴을 표시



- ⑤ 최종단계 완료 후 시험자료 저장
 - 운전조작버튼 클릭
 - 자료 제목 입력
- ⑥ 저장



- ⑦ Flow Type 참조
 - 유형분석

3.2 시공조건 선정을 위한 시험

3.2.1 한계주수시험

일반적으로 토사층 지반에서는 한계주수시험을 시행하며 이는 침투주입으로 양호한 고결체를 형성시킬 수 있는 한계주입압 및 한계주입율을 결정하며 표 11은 한계주수시험의 절차이다.

3.2.2 Lugeon시험

일반적으로 암반기초에는 시공전 · 후 Lugeon시험을 시행하며 단계별로 압력을 변화시키면서 주입하여 암반의 상태를 파악한 후 주입 설계인자를 결정한다. 표 12는 Lugeon시험 절차표이다.

표 13과 같이 한계주수시험결과 p~q 곡선의 구배가 주입속도 10 l/min 이내 완만한 구배를 보이며,

10 l/min 이상부터 주입압력이 급상승 하여 주입속도 13.8 l/min에서 수압파쇄가 발생하였으며, 수압파쇄압력 6.8 kgf/cm²으로 측정 되었다.

표 14와 같이 Lugeon시험결과 시험대상 지반의 지층이 시공 전 Lu치가 8.8 (K = 1.15×10⁻⁴cm/sec) 시공 후 Lu치 4.63 (K = 6.0×10⁻⁵m/sec), flow type 층류형태로 시공 후 투수성 저감 효과 및 수압파쇄 징후가 나타나지 않은 것으로 그라우팅 효과가 양호한 것으로 판단된다.

3.2.3 p~q~t chart 검출시험

본 시공 전 지반에 대한 주입패턴에 대한 해석을 통한 시간에 따르는 고결체의 거동과 지반주입상황을 예측하여 시공대상 지반에 대한 최대압력, 주입량을 결정할 수 있는 기준이 된다. 시험은 최대압력을 설정하

표 13. 한계주수시험 결과

공 사 명	00현장 건설공사 중 강관다단 그라우팅 공사(RAM공법)			
시험 항목	한계주수시험			
공 종	대구경 직천공 (Φ=114.3mm)	시 험 날 짜	2014. 11. 30 (주 · 야 작업)	
위 치	갱문	공 번	16번	
시 험 결 과			시 험 심 도	3.0~6.0m
			지 층 상 태	점성토
			수압파쇄압력	6.8kgf/cm ²
			수압파쇄속도	13.8 l/min
시 험 분 석	시험결과 p~q 곡선의 구배가 주입속도 10 l/min 이내 완만한 구배를 보이며, 10 l/min 이상부터 주입압력이 급상승 하여 주입속도 13.8 l/min에서 수압파쇄가 발생하였으며, 수압파쇄압력 6.8 kgf/cm ² 으로 측정 되었다. 수압파쇄압력 · 속도 분석결과 본 현장의 그라우팅 시공 한계주입압 (3.8 kgf/cm ²) 한계주입속도(17.8 l/min)를 설정 하였다.			
시공관리조건	AGS를 이용하여 수압파쇄 현상이 최대한 방지하고 주입이 밀실하게 되도록 한계주입압, 한계주입속도 이내에서 주입관리가 필요하다.	한계주입압	3.8 kgf/cm ²	
		한계주입속도	17.8 l/min	

표 14. Lugeon 시험결과

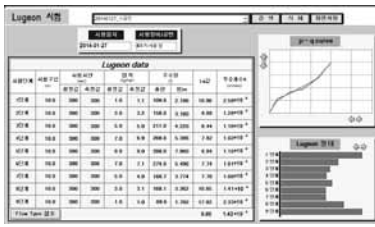
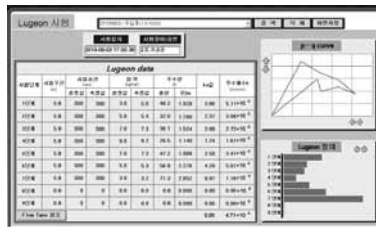

공사명	00현장 건설공사 중 강관다단 그라우팅 공사(RAM공법)			
시험항목	Lugeon 시험			
공종	대구경 직천공 (Φ=114,3mm)			
시험날짜	2014. 11. 30 (주 · 야 작업)	시험날짜	2014. 12. 01 (주간 작업)	
위치	갱문	위치	갱문	
공번	24번	공번	24번 25번 사이	
시험결과 (시공 전)			시험결과 (시공 후)	
Flow type	난류 (Turbulent)		Flow type	층류 (Laminar)
Lu	8.84		Lu	4.63
투수계수	$K = 1.15 \times 10^{-4}$ cm/sec		투수계수	$K = 6.0 \times 10^{-5}$ cm/sec
시공 관리 조건	미세 암반균열로 물이 안정적으로 흐르는 형태. 빈배합 (W/C = 80~100%) 적용이 필요함.			
시공 결과	시험대상 지반의 지층이 시공 전 Lu치가 8.8 ($K = 1.15 \times 10^{-4}$ cm/sec) 시공 후 Lu치 4.63 ($K = 6.0 \times 10^{-5}$ m/sec), flow type 층류형태로 시공 후 투수성 저감 효과 및 수압파쇄 징후가 나타나지 않은 것으로 그라우팅 효과가 양호 한 것으로 판단 된다.			
현장 사진				

표 15. p~q~t chart 검출시험 절차



- ①모니터링 선택
- ②1호기 선택 (타호기로 시험 가능)
- ③주입설정
 - 본 시험은 최대압력을 설정하지 않고 시험을 진행 하여야 하지만, 압력에 대한 안전 문제 등을 고려할 때 약 30kg/cm² 설정한다.



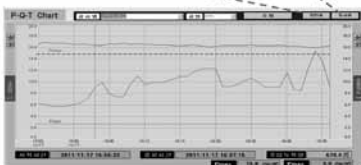
- ④배합비입력
 - 시험주입 배합비 1액, 2액 선택한 후 배합관리 클릭
 - 1액, 2액 시험주입에 맞는 배합비 입력



- ⑤주입설정 (설계참조)
 - 본 주입전 시험위한 설계인자 불러오기
 - 본 시험 중 설계량 이상 주입이 될수도 있으므로 설계설정 시 충분한 양을 설정할 것.



- ⑥ 암반중 토사층 주입유형 참조
 - 유형분석 : 주입관의 최대압력 결정



A₂점 : 최고압력에 달한 후에도 압력은 계속 상승하며, 주입 속도는 일정함

● 암반 균열의 열림(opening) 현상 : 균열이 많음

표 16. p~q~t chart 검출시험

공사명	00현장 건설공사 중 강관다단 그라우팅 공사(RAM공법)			
시험항목	p~q~t chart 검출시험			
공종	측벽 하부 보강 (Φ=60.5mm)	시공 날짜	2014. 12. 20	
위치	경내	공 번	1번 (우측)	
시험 결과			시험심도	3~6m
			주입누적량	24 l
			배합비	W/C = 120%
			주입시간	4~5 분
			한계주입압	13.9 kgf/cm ²
			주입유형	E형, F형
주입 유형 분석		<ul style="list-style-type: none"> • E형 : 상승 하강 패턴이 반복하며 주입압이 상승해감 ① 먼저 주입된 주입재가 후에 주입된 주입재에 의해 순차적으로 할렬파괴가 되면서 침투하는 경우로 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 		
		<ul style="list-style-type: none"> • F형 : 주입개시 직후에 주입압이 급상승하여 허용압을 초과 ① 토층이 조밀한 경우. ② 먼저 주입된 주입재로 인한 지반의 공극이 밀실하게 채워진 경우. 		
시공 관리 조건	<ul style="list-style-type: none"> • 최대압력(Pmax) 13.9kgf/cm 범위 내에서 AGS를 이용한 주입중단 관리. • 최대압력(Pmax) 도달 후 주입시 거부반응이 일어날 때까지 주입 후 완료. 			

표 17. 전체모니터링 작업순서

	<p>1단계 ; 현장명, 현장번호 입력</p> <ol style="list-style-type: none"> ①전체화면 클릭 ②현장명 입력위한 클릭 ③현장명 입력 후 확인 ④현장번호입력 ⑤각 호기별 공번호를 입력
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

표 17. 전체모니터링 작업순서(계속)

	<p>2단계 : 주입시작</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 시작 버튼을 클릭하여 각호기별 시작함 ② 1억, 2억 주입방법에 맞게 선택함 ③ 박스체크시 스텝별 실제 주입량이 설계주입량에 100%으로 될 경우 자동으로 인발 됨. ④ 주입 중 사용자의 판단에 의한 스텝인발 (전체화면에서 관리 가능)
	<p>3단계 : 주입진행 관리</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 전체화면에서 각호기별 그라우팅 주입관리 실시간 그래프를 확인할 수 있다. 박스 체크를 할 경우 대칭으로 올라온다. ② 그라우팅 작업 중 밸브의 작동속도를 조정하기위한 화면을 불러올 수 있다. (밸브의 속도를 느리게 하면 개도를 정확도가 올라가며 속도가빠르면 정확도가 낮다.)
	<p>4단계 : 작업 완료</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 기본 1~4호기 4대를 사용하며, 추가 또는 예비로 5호기를 추가할 수 있다. ② 그라우팅 주입이 완료 되었을 경우 정지버튼을 클릭하여 작업을 종료한다. 이때 데이터는 자동으로 저장되며 다음 공번호 입력 후 재시작을 하면 된다.

지 않은 상태에서 실제 주입재를 주입하여 시공대상 지반에서 주입에 대한 거부압력 또는 이상 현상이 발생 시까지 시험을 실시한다(표 15).

심도 3~6m에서의 p~q~t chart 검출시험은 최대 압력(Pmax) 13.9kgf/cm 범위 내에서 AGS를 이용한 주입중단 관리하였으며 주입유형은 E형 및 F형으로 분석되었다(표 16).

3.3 실시간 주입관리 모니터링

자동화 그라우팅 시스템은 최대 4호기까지 동시에 실시간 주입관리 모니터링이 가능하며 전체 모니터링 작업순서는 표 17과 같다.

표 18. 시공보고 기능 설명

	<p>작업일보</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 REPORT 클릭 2 주입일보 클릭 3 현장명, 날짜 선택 후 검색버튼 클릭 4 기타 추가사항 입력 하여 저장 가능
	<p>지반주입현황도</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 REPORT 클릭 2 지반주입현황도 클릭 3 설정클릭-공번호 정렬 및 스택표현입력 4 현장명 선택 후 검색버튼 클릭 5 심도가 깊고, 공수가 많은 경우 버튼을 클릭하여 추가로 확인
	<p>한계주수시험</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 REPORT 클릭 2 한계주수시험 클릭 3 현장명 선택 후 검색버튼 클릭
	<p>Lugeon 시험</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 REPORT 클릭 2 Lugeon 시험 클릭 3 현장명 선택 후 검색버튼 클릭 4 각 그래프 및 형태의 크기 비율 조절
	<p>P~Q~T Chart</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 REPORT 클릭 2 P~Q~T Chart 클릭 3 현장명선택, 공번호선택, 초,분단위 선택 후 검색버튼 클릭 4 사용자가 필요한 그래프 선택하는 기능 5 압력값, 유량값 수치 조절 기능 버튼

3.4 시공 보고 및 운영

자동화 그라우팅 시스템은 원격에서도 작업일보, 지반주입현황도, 한계주수시험결과, 루전시험결과 및 p~q~t chart 등을 확인 할 수 있으며 현장에서 바로 출력하여 보고가 가능하다(표 18).

4. 시사점 및 결론

지금까지 자동화 그라우팅 관리기술을 이용한 그라우팅 시공 · 품질관리 기술을 기술(記述)하기 위하여 그라우팅 기술(Grouting Technology)의 세계적인 기술동향, 시공 · 품질관리 연구동향 그리고 시공 · 품질관리의 자동화 실례를 살펴보았으며 다음과 같이 시사점을 요약 설명 할 수 있겠다.

그라우팅 기술의 세계적인 기술동향 중 그라우팅 재료개발은 세계적인 수준과 국내의 수준이 거의 비슷하거나 앞서고 있으며 그라우팅 장비개발은 스웨덴, 스위스, 일본, 미국 및 독일 등이 월등히 앞서고 있으나 최근 국내에서도 세계적인 수준에 버금가는 통합형 그라우팅 장비개발을 시작하였으며 그라우팅 시공관리 기술은 크게 1~4세대 기술까지 발전하고 있는데 최근에는 ICT와 그라우팅 기술을 융합하는 4세대 연구가 북유럽 국가(스웨덴, 노르웨이 및 핀란드), 일본 및 한국 등에서 활발하게 진행되고 있다. 특히, 4세대 기술 중 Kobayashi & Stille(2008) 및 J.Y.Rafi(2010)가 개발한 ROG method는 1~2차원 즉, 암반층에만 적용 가능하였으나 m-ROG method(J.C.Kim & I.M.Lee 2014)는 (주)한국지오텍에서 사용하는 기술로써 3차원의 복잡한 지반 혹은 암반층의 파쇄대가 심한 지층 등에서도 적용이 가능하다.

(주)한국지오텍에서는 국내 그라우팅 기술을 세계적인 선진기술 수준으로 한 단계 끌어올리기 위해 HG 그라우트, EC팩커 및 4세대 m-ROG method 기반 최적화 관리기법을 융합한 신개념의 기술인 '일반 토

사층 혹은 저수지 제체를 보강하기 위한 침투 · 다짐형 AGS공법' 을 개발하고 있으며 통합형 장비개발로써 '해저터널용 통합형 그라우팅 시스템 및 장비' 를 국내에서 최초 국책과제로 수행하고 있다.

또한, 최근 2014년 11월에 착공을 시작한 "00현장 건설공사 중 강관보강 그라우팅 공사" 현장의 실례를 들어 AGS를 이용한 자동화 그라우팅 시스템에 의한 시공 · 품질관리 방법을 4단계로 나누어 알기 쉽게 설명하였으며 'AGS를 이용한 그라우팅 관리기술(건설신기술; 제644호)' 은 ICT와 그라우팅기술을 융합한 국내 최초의 시도이며 상대적으로 낙후 된 국내 그라우팅 기술을 한 단계 발전시킨 우수한 사례로 높이 평가받고 있다.

참 고 문 헌

1. (주)한국지오텍(2014), "저수지 제방 보수보강을 위한 침투 · 다짐형 AGS공법 개발", 2014 한국농어촌공사 성과공유과제 계획서
2. (주)한국지오텍(2014), "고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발", 국토교통부 연구과제 1차년도 보고서
3. (주)한국지오텍(2012), "AGS(Automatic Grouting System)을 이용한 그라우팅 관리기술", 국토교통부 신기술 제644호 보고서
4. (주)한국지오텍(2014), "원주~강릉 2공구 복선전철 건설공사 중 강관보강 그라우팅 공사", 한국철도시설공단 시공보고서
5. Kalle Hollmen(2008), "R20 Programme: The Development of Grouting Technique - Stop Criteria and Field Tests", Working Report 2007-101.
6. Kobayashi S., Stille H.(2008) "Real time grouting method", Development and application using ASPO HRL data.