

ISIS 시스템을 이용한 최적 그라우팅 시스템 개발 연구 A Study to Develop Optimal Injection System Using ISIS(the In-situ Soil Injection Simulator)

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 김진춘²⁾, Jin-Chun Kim, 김경민³⁾, Kyung-Min Kim, 이민호⁴⁾, Min-Ho Lee, 이정훈⁴⁾, Jung-Hoon Lee, 김진수⁴⁾, Jin-Soo Kim, 박종근⁴⁾, Jhong-Geun Balk

¹⁾ 한양대학교 공과대학 교수, Professor, College of Engineering, Hanyang University

²⁾ (주)한국지오테크 대표이사, Present, Korea Institute of Geo Technology Inc.

³⁾ 한양대학교 대학원 박사과정, Ph.D Candidate, Hanyang University

⁴⁾ 한양대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Hanyang University

SYNOPSIS : In this study, a correlation among pressure, time and quantity of injection was organized from the laboratory tests, which were executed many times representing in-situ soil conditions carefully and then it would be applied to the in-situ soil injection simulator which will be developed for optimal injection into the ground.

The sort of sample soils were both sand(A specimen) and silty sand(B specimen). Injection tests were gone into operation by compaction state, injection velocity and the depth individually. In the ground improved with permeation injection, the relation among injection pressure of the same depth, the injected quantities and time were systematic by the depth. By defining the limit range of injection pressure and quantity about the variety of a linear equation obtained from lining each of their trend, the application of laboratory injection monitoring program and the data to evaluate its realization were produced. In the ground improved with root type injection, the relation between injection pressure and the injected quantities was irregular because fracture state occurred quickly.

Key words : in-situ soil injection simulator(ISIS), permeation injection, fracture injection,

1. 서론

약액주입공법은 터널공사, 개착공사 등의 보조공법으로서 폭넓게 쓰이며, 간편하고 즉효성이 있는 지반개량공법으로서, 국내에 도입된 후 많은 건설공사에 적용되어 필수적인 공법으로 인정받고 있다. 그 때문에 실제지반에서 신뢰성이 있는 시공방법의 확립이 요구되고 있다(천, 1981, 1998). 약액주입을 실시함에 있어서 가장 큰 문제는 지반 고결상태를 쉽게 판정하기 어렵다는 것과 약액주입공사시 시공관리를 단지 P(압력)-Q(유량)로 관찰하며 주입 상황에 맞게 조절하여 사용하고 있으나, 사실상 주입을 관리할 수 있는 능력이 장비와 기술력면에서 상당히 떨어져 있다고 할 수 있다. 현재 약액주입 효과의 확인방법으로는 주입 전후의 비파괴 판정시험이나 굴착공에 의한 방법 등이 있지만, 그것들의 대부분은 공사기간이나 공사비면에서 제약이 있는 것이 사실이다(천, 1995). 물론, 시험주입도 행하여지지만 이를 근거로 하여 실제의 주입상태를 파악하는 것은 대단히 어려운 것이 현실이다. 지반의 공극에 약액을 침투 또는 압입하기 위해서는 주입압의 초기주입압을 결정하고 주입압을 변화시켜야 하므로, 약액에 대한 어느 정도의 압력이 필요하다. 주입압의 크기와 변화는 약액에 대한 지반의 저항과 반응을 연속적으로 나타내는 것이며, 눈에 보이지 않은 지반 속에서의 약액의 거동을 파악하기 위한 중요한 자료가 된다. 주입공법은 토립자 간극에 존재하는 공기나 물을 모두 밀어내어 주입재와 치환하는 것을 목적으로 하기 때문에 주입압은 가

능한 크게 해야한다고 하는 주장이 있다. 한편, 그 반대로 주입압이 상재하중보다 커지면 지반이 전단파괴하여 지반을 흐트러뜨리거나 융기시킬 가능성이 있기 때문에 주입압은 가능한 한 작게 해야한다고 하는 주장을 포함하여 두 개의 이론이 있다. 그러나, 상기의 두 개의 이론은, 실제 시공시 주입압의 선택에 명확한 지침을 주고 있지는 않다.

지금까지의 약액주입 효과의 확인은 거의 주입전후의 토질 특성의 차이로부터 추정된 것이다. 즉, 주입 중에 반드시 기록되는 주입압의 데이터인 P-T chart(주입압의 시간경과 변화)가 효율적으로 이용되지 않았다. 이것은 지반 및 주입조건에 의해서 P-T chart가 어떻게 변화하는가에 대하여 정립되지 않았기 때문이다. 또한 주입 심도나 상재하중에 의해, P-T chart 및 고결체 형상이 어떻게 변화하는가에 대해서도 규명되어 있지 않다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 주입효과 확인방법으로서 주입 중에 반드시 기록되는 P-T chart를 이용할 목적으로 P-T chart의 변화와 지반 및 주입조건에의 관계(최항길, 2000; 森麟 등, 1994)를 규명하여 각 심도별 실제 상황을 재현하고, 주입효과 확인을 위해 주입 시뮬레이터를 제작해서 주입에 적절한 대상지반의 실험적 평가와 제안을 통해 주입에 필요한 설계 지침서를 만들고자 한다.

2. 주입시험

2.1 시험조건

- (1) 시료 : A시료(모래 100%), B시료(모래85%+실트15%)
- (2) 모형토조 다짐상태 : 느슨한 상태(상대밀도 25%±2%), 조밀한 상태(상대밀도 75%±2%)
- (3) 상재압 분포

표 1. 지반심도와 다짐상태에 따른 상재압

시료토 종류	지반심도 (m)	상재압 분포(CELL PRESSURE : kgf/cm ²)	
		조밀한 상태	느슨한 상태
A시료 (모래)	-5	0.66	0.65
	-15	1.99	1.95
B시료 (모래85%+실트15%)	-5	0.33	0.31
	-15	0.98	0.94

- (4) 주입재 : 마이크로 시멘트(MSG-N형 사용), 규산소다 3호
- (5) Gel-time의 조정(수온 20℃기준)과 배합량

본 실험에서 사용한 주입재는 MSG-N형(중결: 45~50초)을 주로 사용하였고, 참고적으로 MSG-SE형(급결: 7~9초)을 비교실험을 위해 사용했다. 각 배합은 (A액 5ℓ) + (B액 5ℓ)으로 하여 주입량 10ℓ를 기준으로 하였다. 각각의 배합(단위: kg)은 다음 표 2와 같다.

표 2. 주입재의 겔타임 배합

배합 번호	A		B		Gel-time (sec)	점도 (cps)	비 고
	물	마이크로 시멘트 급결 중결	규산소다 3호	물			
No.1	4.3	2.15	2.8	3.0	9~10	측정불가	*급결, 중결
No.2		2.15			45~50	6.5	-규산:물=4:6

2.2 주입시험계획 및 시험방법

표 3에 나타난 조건에 따라, 각 시험당 2회씩 반복 실험하였다. 주입압은 주입시작 초기에 압력이 0kgf/cm²로 펌프에서 일정압력으로 공급되지만, 주입되면서 모형토조 안에 형성된 간극수압의 영향으로 수초 안에 토조 안의 수압(간극수압)과 동일해져 그 이상의 압력으로 형성되면 주입되기 시작한다. 주입량은 펌프에서 나가는 주입재중

규산소다가 포함된 B액에 유량 게이지를 설치하여 측정하였다.

표 3. 주입시험계획

시료 종류	지반심도 (m)	마이크로 시멘트(MSG-N형)사용			
		조밀한 상태		느슨한 상태	
		주입속도(ℓ/min)		주입속도(ℓ/min)	
		1	3	1	3
A시료 (모래)	-5	A1	A2	A3	A4
	-15	A5	A6	A7	A8
B시료 (모래+실트15%)	-5	B1	B2	B3	B4
	-15	B5	B6	B7	B8

3. 시험결과 및 분석

3.1 P-T Curve

각 시료별 시간에 따른 주입압의 변화를 나타내었다. 각 시료는 지반 다짐도, 주입속도, 심도별로 조건을 달리하여 P-T 관계를 분석하였고, 각 실험별로 2회 반복한 데이터 값을 추세선으로 나타내었다.

가. A 시료

① 각 시료별 P-T Curve

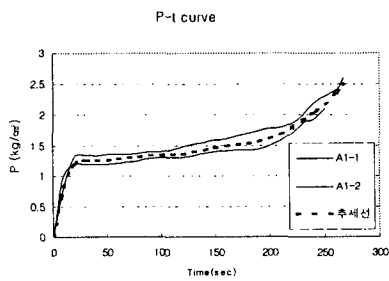


그림 1. A1(조밀, 1ℓ/min, 심도(-)5M)

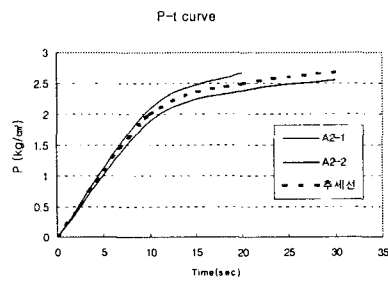


그림 2. A2(조밀, 3ℓ/min, 심도(-)5M)

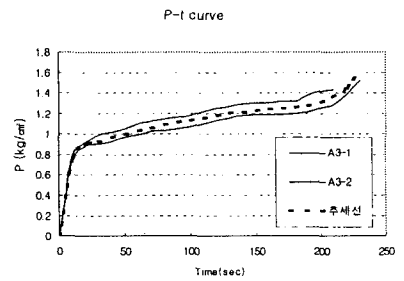


그림 3. A3(느슨, 1ℓ/min, 심도(-)5M)

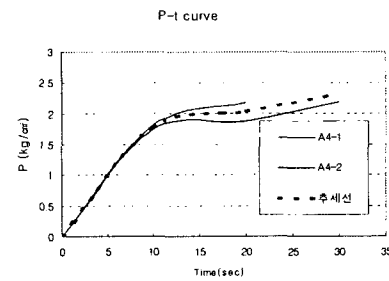


그림 4. A4(느슨, 1ℓ/min, 심도(-)5M)

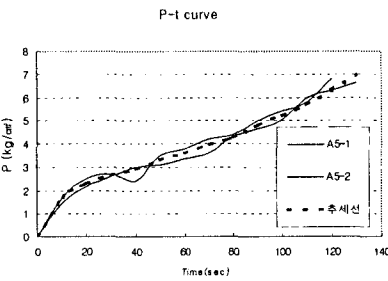


그림 5. A5(조밀, 1ℓ/min, 심도(-)15M)

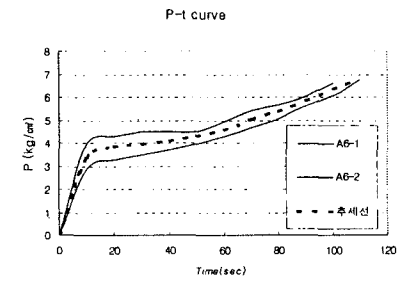


그림 6. A6(조밀, 3ℓ/min, 심도(-)15M)

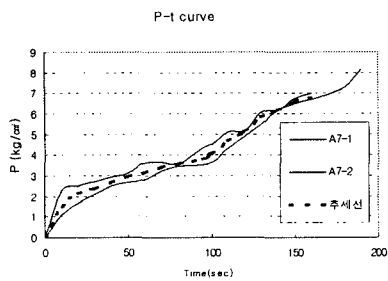


그림 7. A7(느슨, 1ℓ/min, 심도(-)15M)

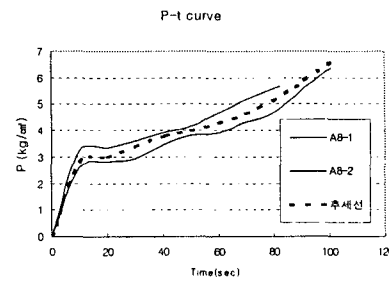


그림 8. A8(느슨, 3ℓ/min, 심도(-)15M)

위의 그림 1 ~ 그림 8처럼 각각의 실험결과를 볼 때, 간극수압의 4배(허용압력)까지 주입압력의 떨어짐이 없이 시간에 따라 곡선이 일정하게 증가되는 것으로서, 대상 지반은 주입재가 침투되고 고결이 진행됨에 따라 주입압이 상승함을 나타내고 있다. 중간정도 모래의 입경을 가진 A시료는 모두 허용주입압까지 도달하였으며 침투주입이 되었다.

② 다짐별 비교

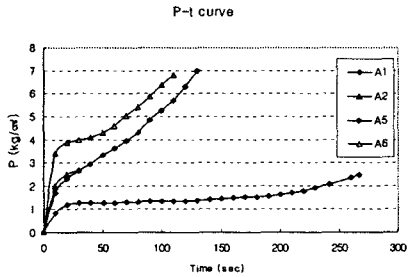


그림 9. A시료, 조밀한 상태

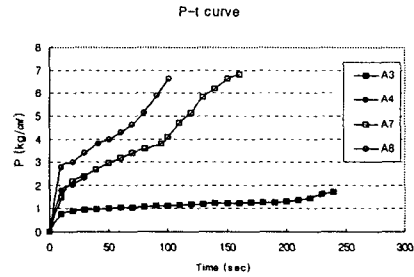


그림 10. A시료, 느슨한 상태

위의 그림 9 ~ 그림 10을 볼 때, 지반심도가 깊고 주입속도가 빠르고 지반이 조밀할수록 주입압이 허용압에 도달하는 시간이 짧았으며, A1과 A3의 경우는 주입압이 초기에는 거의 변화 없이 일정하다가 시간이 흐를수록 점차 상승하면서 침투주입이 되었고 만약, 동수지반에서 이러한 경우에는 주입재의 유출이나 Gel-time의 지연 등으로 고결체의 형성에 영향을 줄 수가 있으므로 주입속도를 높이거나, Gel-time이 짧은 급결제를 쓰는 주입관리가 요구된다.

③ 주입속도별 비교

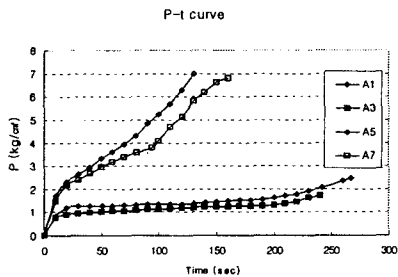


그림 11. A시료, 주입속도 1 l/min

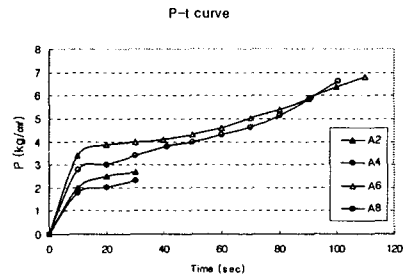


그림 12. A시료, 주입속도 3 l/min

주입속도가 1 l/min인 경우의 지반심도별 P-t관계[(A1, A3)와 (A5, A7) 비교]와 주입속도가 3 l/min인 경우의 지반심도별 P-t관계[(A2, A4)와 (A6, A8) 비교]를 비교한 결과, 주입속도가 1 l/min일 때, 지반심도별 P-t관계의 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있다. 즉, 주입속도가 빠르면 주입압이 높아졌다. 또한, A1과 A3처럼 지반심도가 얇은 경우는 깊은 심도에 비해서 주입속도를 높여주면 주입압의 상승폭이 크게 나타났다.

④ 심도별 비교

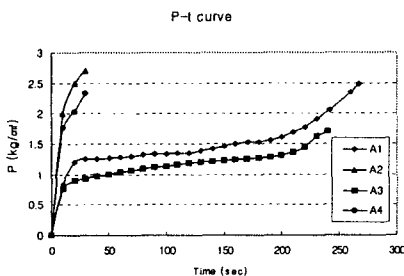


그림 13. A시료, 심도 -5M

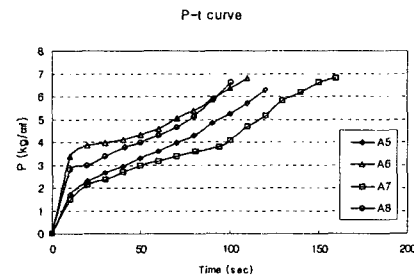


그림 14. A시료, 심도 -15M

지반심도가 얇은 경우는 심도가 깊은 경우에 비해서 주입속도에 영향을 많이 받는 것으로 볼 수 있으므로, 지반 심도가 얇은 지반에서 주입을 할 경우에 주입속도를 제어하는데 주의해야 한다.

나. B시료

① 각 시료별 P-T Curve

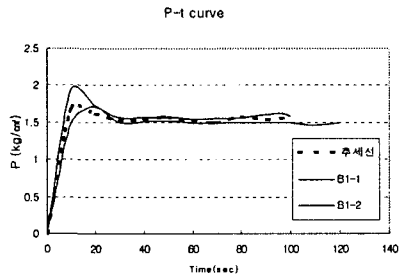


그림 15. B1(조밀, 1 l/min, 심도(-)5M)

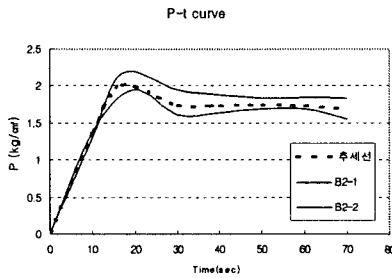


그림 16. B2(조밀, 3 l/min, 심도(-)5M)

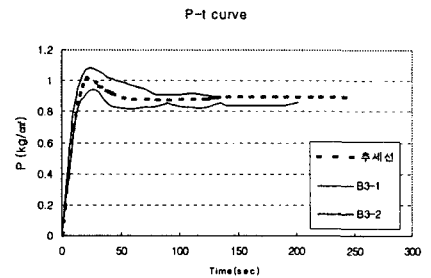


그림 17. B3(느슨, 1 l/min, 심도(-)5M)

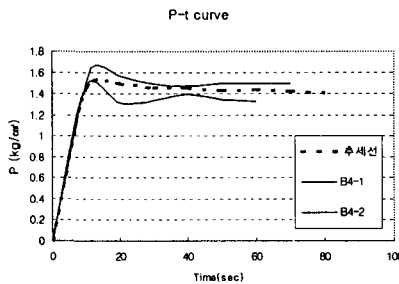


그림 18. B4(느슨, 3 l/min, 심도(-)5M)

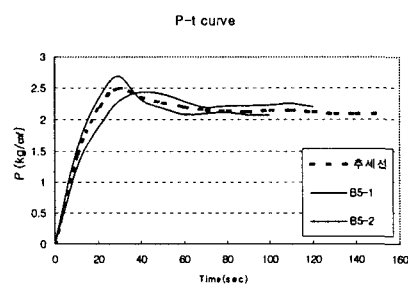


그림 19. B5(조밀, 1 l/min, 심도(-)15M)

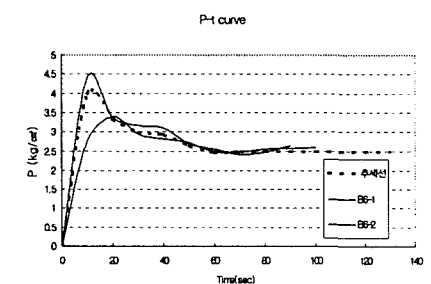


그림 20. B6(조밀, 3 l/min, 심도(-)15M)

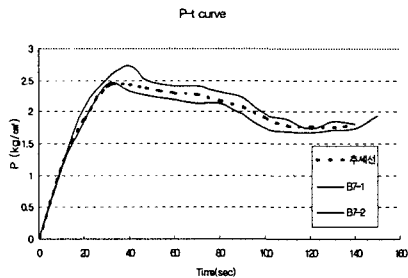


그림 21. B7(느슨, 1 l/min, 심도(-)15M)

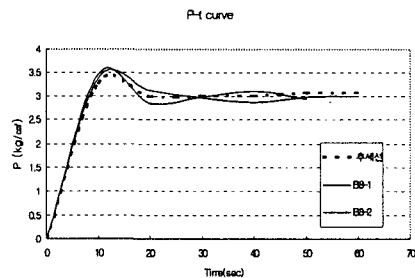


그림 22. B8(조밀, 1 l/min, 심도(-)15M)

위의 그림 15 ~ 그림 22는 짧은 시간에 상승하던 주입압력이 임의의 시점에서부터 떨어지기 시작해서 그 후 회복되지 않는 경우로써, 주입재가 허용주입압에 도달하기 전에 지반의 공극이나 약한 부분에 의해 할렬현상이 발생된 것으로 판단된다.

② 다짐별 비교

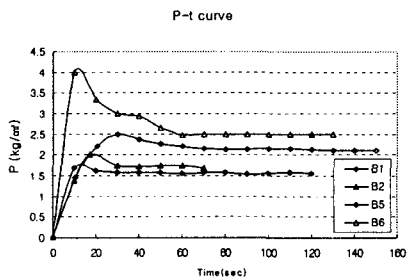


그림 23. B시료, 조밀한 상태

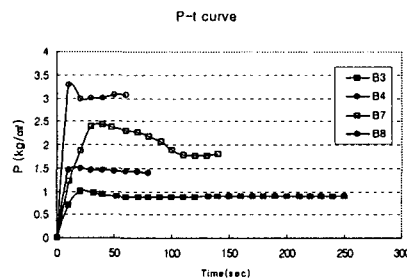


그림 24. B시료, 느슨한 상태

조밀과 느슨한 상태에서 각각 지반심도와 주입속도를 비교해 볼 때[(B1, B2)와 (B5, B6) 비교] 다짐상태에 따른 영향은 적은 것으로 판단된다.

③ 주입속도별 비교

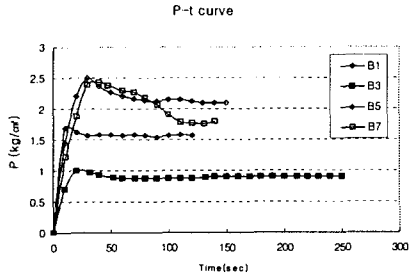


그림 25. B시료, 주입속도 1 l/min

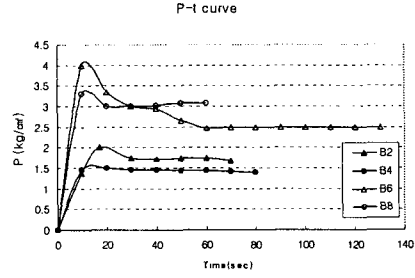


그림 26. B시료, 주입속도 3 l/min

각 시료별로 주입속도가 빠를수록 할렬현상이 짧은 시간내에 발생하는 경향을 볼 수 있었다. 즉, 주입속도가 느릴수록 할렬현상이 지연될 수 있다고 판단된다.

④ 심도별 비교

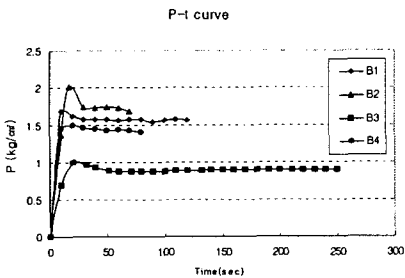


그림 27. B시료, 심도 -5M

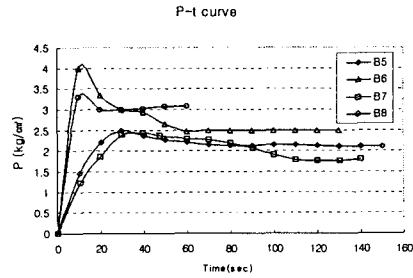


그림 28. B시료, 심도 -15M

깊은 심도의 경우에는 주입속도를 느리게 할수록 할렬현상이 지연되었고, 얇은 심도의 경우에는 주입속도의 영향이 적었다.

3.2 P-Q Curve

각 시료에 대한 P-Q Curve 양상 및 그에 대한 상한선, 하한선 범위를 추정해서, 실시간 모니터링 주입관리기 주입압과 주입량으로 제어될 수 있도록 하는데 목적이 있다.

(1) A시료

전체적인 P-Q curve 양상은 심도가 깊을수록 주입량과 주입압이 상대적으로 증가하는 이상적인 주입형태를 나타내고 있다. 단, 본 실험은 정수지반에서 실험에 의한 것으로서 심도가 깊은 지반의 경우 주입속도를 빠르게, 심도가 얇은 지반의 경우 주입속도를 느리게 하면 주입량이 증가해 모두 침투고결이 됨으로써 고결효과의 증대를 추측할 수 있다. 그림 29그림에 대한 경향을 분석하면 각 시험조건별로 일치성을 보이는데, 각 심도에 따라서 상한선, 하한선의 경계범위를 일차함수 추세선으로 나타내었으며, 표 4그림에 나타내었다. 이것을 심도에 따라 (A1, A3) (A2, A4) (A5, A7) (A6, A8)등을 분석해보면, 지반의 다짐에 상관없이 허용주입압을 받을 때까지 일정하게 증가되는 P-Q의 경향을 보였다. 각 조합별로 유효 주입압과 주입량의 범위를 정하여 실내모형토조를 이용한 주입 시험을 할 경우, 그림 30그림, 그림 31그림의 정해진 유효 범위 안에서 주입압과 주입량이 제어될 수 있도록 하는, 실시간 모니터링 주입 프로그램 적용 및 시현성 평가를 위한 자료(Chun, 1999 ; CAGES, 1997)로 제시할 수 있다.

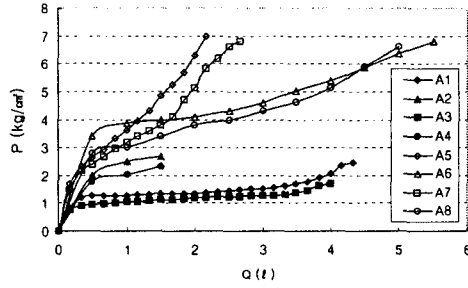


그림 29. A시료에 대한 P-Q curve

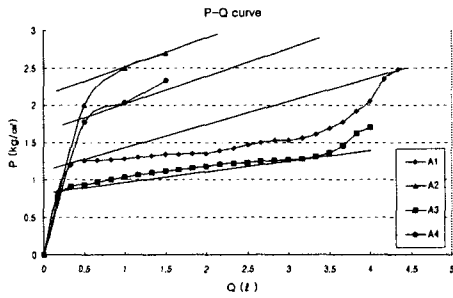


그림 30. A시료, 심도 -5M

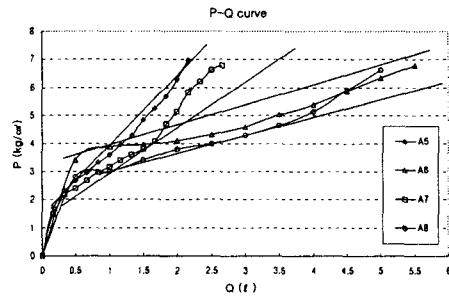


그림 31. A시료, 심도 -15M

표 4. 심도에 따른 각 실험별 P-Q의 추세선

지반조건	실험범위	a	b
A1	-5M, 1ℓ	0.36	1.12
A2	-5M, 3ℓ	0.41	2.20
A3	-5M, 1ℓ	0.30	0.80
A4	-5M, 3ℓ	0.41	1.65
A5	-15M, 1ℓ	2.61	1.52
A6	-15M, 3ℓ	0.67	3.30
A7	-15M, 1ℓ	1.20	1.45
A8	-15M, 3ℓ	0.67	2.40

관계식 $y = a \times x + b$

(2) B시료

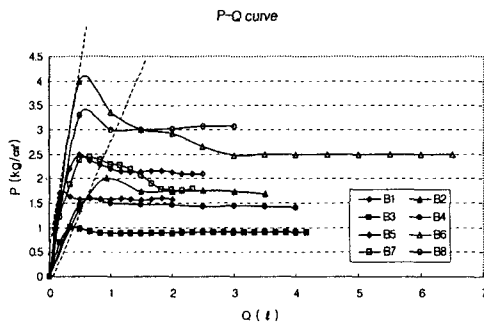


그림 32. B시료에 대한 P-Q curve

A시료와는 달리 B시료의 P-Q curve에서는 모두 수초 안에 허용주입압에 도달하지 못하고 주입압이 떨어지는 경우로 할렬현상이 되었고 전체적으로 보면 일정한 형상을 보이나, 할렬현상이 일어날 때까지의 시간이 매우 짧기 때문에, 주입압과 주입량의 제어를 위한 추세선을 도출하기에는 어렵다고 판단된다.

4. 결 론

실내모형토조 시험장치를 이용해 각각의 심도, 주입속도, 다짐상태에 따른 주입 파라미터(Parameter)의 분석결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- 1) 시간에 따른 주입압 변화에 있어서, 침투로 주입된 지반의 경우는 심도가 깊을수록, 주입속도가 빠를수록, 지반이 조밀할수록 시간에 따라 주입압력이 상승함을 볼 수 있다. 맥상으로 주입된 지반의 경우는 다짐상태, 주입속도, 심도에 따른 경향은 없었으나, 깊은 심도의 경우 주입속도를 느리게 할수록 할렬현상이 발생되는 시간이 지연되는 것으로 나타났다.
- 2) 정수지반에서의 시간에 따른 주입압과 주입량 변화는 침투로 주입된 지반의 깊은 심도에서는 주입속도를 빠르게, 얇은 심도에서는 주입속도를 느리게 하면 높은 주입효과를 나타내었다.
- 3) 침투로 주입된 지반의 경우, 주입압과 주입량의 관계는 지반심도에 따라 비례적으로 증가되는 경향을 보였고 이를 일차함수의 추세선으로 나타내어 주입압과 주입량의 한계범위를 설정함으로써 실내모형토조의 주입 모니터링 프로그램에 적용 및 시현성 평가를 위한 자료로 제시하였다. 맥상으로 주입된 지반의 경우는 수초 안에 할렬현상이 발생하여 주입압과 주입량을 제어하기 위한 경향은 나타내기 힘들다.

감사의 글

본 논문은 2000년 산·학·연 공동연구개발사업(R&D/목적 1-07) “마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공 모니터링을 이용한 최적 그라우팅 시스템 개발 연구”의 세부과제인 ISIS 시스템을 이용한 지반별 주입설계 Parameter 연구수행 중의 얻은 결과로써 연구비를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 천병식(1981), “약액의 침투주입에 의한 토질성상변화”, 대한토목학회논문집, Vol 2, NO.4, pp. 1~9.
2. 천병식(1995), **지반주입공법**, 원기술.
3. 천병식(1998), **지반공학-이론과 실제-**, 구미서관.
4. 천병식(1998), **최신지반주입-이론과 실제-**, 원기술, pp. 61~73.
5. 최항길(2000), **최신지반주입공법 이론·기술총람**, 원기술, p. 94, p. 491.
6. 島田俊介, 佐藤 武, 多久 實(1989), **最先端技術の薬液注入工法**, 理工圖書.
7. 森麟, 千柄植(1987), “砂質地盤における割裂發生機構”, 日本土木學會論文集, 第338号, III -7, pp. 61~70.
8. 森麟, 田村昌仁, 森山健吉, 上澤充, 小峰秀雄(1994) “薬液注入による固結形状に関する現場實驗”, 土質工學會論文報告集, Vol.34, No.2, pp. 131~139.
9. Byung-Sik, Chun, Byung-Heon, Jung(1999), “A Case Study on System Grouting Using ‘ENPASOL’ & ‘SINNUS’”, *Proc. 9th Int. Conf. Offshore and Polar Eng.*(France), pp. 608~612.
10. CAGES(1997), **Computer aided grouting evaluation system**, ECO Grouting Specialists Ltd., Ontario, Canada.
11. K. H. Head, **Manual of Soil Laboratory Testing**, No. 3, pp. 754~757, pp. 1019~1022.
12. RYOZO YONEKURA(1996), *Proc. IS-TOKYO'96 2nd Int. Conf.* Grouting and Deep Mixing.