

자기치유 기능을 이용하는 SSG공법의 공학적 특성

Engineering Properties of Self-healing Smart Grouting Method

문 인 종 ¹	Moon, In-Jong	김 병 일 ²	Kim, Byoung-II
허 준 ³	Heo, June	최 용 성 ⁴	Choi, Yong-Sung
최 용 기 ⁵	Choi, Yong-Ki		

Abstract

SSG (self-healing smart grouting) method, which is developed recently, has the characteristics such as an improvement of durability and waterproofing, prevention of leaching and pollution. In this study, we performed several tests such as gel-time measurement, uniaxial compression test, permeability test, fish poison test and chemical resistance test to compare the engineering properties of SSG with the other chemical grouting method (LW, SGR). As results of tests, the SSG method has low possibility of groundwater and ground pollution caused by leaching, furthermore, it has advantages like long/short term waterproofing, strength and durability. Therefore the SSG method can be applicable in the fields as an alternative of existing chemical grouting methods with problems.

요 지

최근 개발된 자기치유 그라우팅(SSG, self-healing smart grouting)공법은 지반의 내구성 및 차수성의 향상, 용탈 및 환경오염 방지 등의 특성을 가지고 있다. 이 연구는 SSG공법의 공학적 특성을 규명한 것으로서 기존 약액주입(LW, SGR)공법과의 공학적 특성을 비교하기 위해 겔타임 측정, 일축압축강도 시험, 투수 시험, 어독성 시험, 내화학성 시험을 수행하였다. 연구결과, SSG공법은 장·단기 차수성능 유지, 강도 발현, 내구성 확보에 유리하고 용탈에 의한 지하수 및 지반의 오염 가능성이 낮은 것으로 나타났다. 이를 통해 SSG공법은 기존 약액주입공법의 문제점들을 최소화할 수 있는 대체 공법으로 현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : SSG (self-healing smart grouting), Durability, Waterproofing, Leaching, Engineering properties

1. 서 론

일반적으로 강도와 자립도가 낮은 지반에서 공사를

수행할 때에는 지하수위가 높아 지하수 유출에 따른 주변 지반의 침하가 예상되거나 지반의 이완영역이 넓은 경우 지반의 안정성을 확보하기 위해 적절한 보강공법

- 1 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 석박사통합과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Myongji Univ.)
- 2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Myongji Univ., Tel: +82-31-330-6415, Fax: +82-31-336-9705, bikim@mju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
- 3 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Non-member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Myongji Univ.)
- 4 정회원, SSC산업(주) 차장 (Member, Deputy General Manager, SSC Industry Co., Ltd.)
- 5 정회원, 대원토질 주식회사 대표 (Member, President, Daewon Soil Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2016 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 적용한다. 이러한 보강공법 중에서 물유리계 약액주입공법은 준비 및 설비가 간단하고 소규모이기 때문에 협소한 장소에서도 시공할 수 있으며, 진동이나 소음에 대한 영향이 작을 뿐만 아니라 화학반응을 통한 겔타입 확보 등의 이유로 많은 건설현장에서 사용하고 있다 (Kim et al., 2015). 하지만 물유리계 약액주입공법은 겔화 후에도 물에 의해 강알칼리 용탈현상이 발생하여 지반 및 지하수 오염, 겔형태가 약해지는 문제와 수축 및 균열이 쉽게 발생하여 지반과의 밀착성이 낮아짐에 따라 차수성능 저하 문제가 발생하기도 한다(Chun, 2011).

국내의 약액주입공법은 1970년대 서울지하철 건설과 함께 본격적으로 도입되었으며, 1980년대 일본으로부터 LW공법과 SGR공법 등 다양한 약액주입공법이 도입되어 현재까지 많은 건설현장에서 사용되고 있다(Kim et al., 2001). 1990년대에는 약액의 내구성 문제가 다양화되어 다양한 항구성 그라우팅제 개발이 본격화 되었고, 2000년대에 들어서는 세계적인 추세에 맞춰 친환경 약액이 개발되었다(Marion et al., 2005). 근래에는 도시화가 급속히 진행되면서 가시설물의 존치기간이 길어져 굴착 후 측벽의 이완작용으로 인한 지상구조물의 손상 등 다양한 건설재해와 약액 주입에 의한 환경안전사고 사례가 보고되면서 주입재의 내구성, 환경영향성, 침투성 등을 종합적으로 해결하기 위한 개발연구가 진행되고 있다.

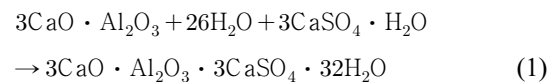
최근 국내에서 기존 물유리계 약액주입공법의 문제점을 개선하고자 개발된 자기치유 그라우팅(SSG, self-healing smart grouting)공법이 개발되었다. 이 공법에 사용되는 주입재는 지반내 물과 반응하여 결정성장형 자기치유 특성을 발휘한다. 이로 인해 주입재와 지반이 일체화 되어 지반의 내구성 및 차수성 향상, 용탈방지 및 친환경성 등을 기대할 수 있다. 하지만 SSG공법은 최근에 개발되어 연구가 이제 시작된 단계이므로 국내외 연구 사례는 거의 없는 실정이다.

따라서 이 연구에서는 기존 공법의 문제점을 개선하기 위해 개발된 SSG공법의 특성(강도, 차수성, 환경영향성, 내구성)을 검토하기 위해 다양한 실내시험(겔타입 측정, 일축압축강도 시험, 투수 시험, 어독성 시험, 내화학성 시험)을 수행하였고, 일반적으로 많이 사용하는 LW공법과 SGR공법의 연구결과와의 비교 및 분석을 통해 공학적 특성을 검토하였다.

2. SSG공법의 특징

2.1 주입재의 자기치유 개념

Fig. 1은 SSG공법의 자기치유 원리를 나타낸 그림이다. 그라우트 경화체에 균열이 발생하면 균열부로 물(H₂O)과 이산화탄소(CO₂)가 투입되어 SSG 시멘트의 혼화제(팽윤제, 팽창제, 석출반응제 등)와 반응하게 된다. 이때 팽윤제와 팽창제는 물과 반응하여 균열부에 팽창성 반응물의 침착이 유도되며, 식 (1)과 같이 팽창성 수화물(Ettringite)을 생성하기 때문에 균열부가 복원된다.



또한 석출반응제는 식 (2), (3)과 같이 이산화탄소와 반응하여 탄산화 반응물(CaCO₃, R₂CO₃)을 생성하기 때

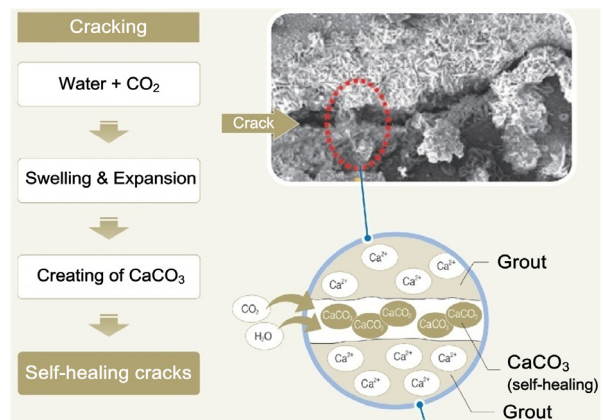


Fig. 1. Concept of self-healing

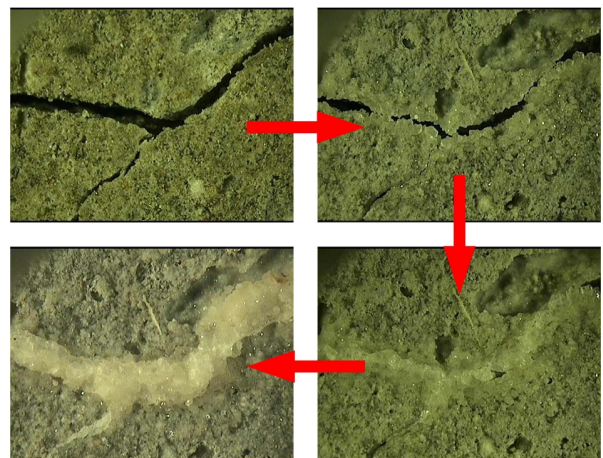
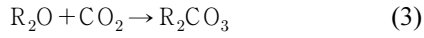


Fig. 2. Process of self-healing

문에 균열 복원 및 균열부 경도 증진에 기여하게 된다.



2.2 주입재의 물리적 특징

SSG공법에 사용하는 주입재의 특성은 등록특허 제 10-1507091에서 자세히 설명하고 있다. 본 논문에서는 주입재의 물리적 특징에 대해서 간단히 요약하였으며, 자세한 내용은 Ahn et al.(2015)의 등록특허를 참고하기 바란다.

2.2.1 내구성 및 차수성 우수

SSG공법에 사용하는 주입재는 미세결정화체를 포함하고 있기 때문에 겔형성 경화 후 그라우팅 경화체와 지반 사이 또는 그라우팅 경화체 내부의 미세균열에 미세결정이 형성되면서 충전됨에 따라 자기치유 특성을 발휘할 수 있으며, 또한 팽윤제를 포함하고 있기 때문에 겔형성 후에도 주입재의 수축현상을 최소화할 수 있다. 이에 따라 지반에 지속적인 차수효과가 발현되고, 지반과 그라우팅 경화체 사이의 밀착성이 향상되면서 내구성이 증대된다.

2.2.2 용탈방지 및 친환경성

규산소다를 사용하는 주입재의 큰 결점은 수화 생성물 속의 겔 공극과 모세관 공극 중의 유리 CaO가 물과 접촉 및 흡착되어 있다가 대부분이 수중에서 유실되고, 대기 중에서 증발되면서 수축 및 균열이 발생하여 지반과의 밀착성이 낮아짐으로써 차수성능 문제가 발생하는 것이다. 하지만 SSG공법은 규산소다계 용액과 2가 금속 급결재의 반응에 의한 겔화 진행과 더불어 추가적으로 시멘트의 수화반응에 의한 경화가 진행되기 때문에 겔화된 규산소다에서 겔 형태가 소실되거나 강알칼리이온이 용탈되는 문제를 최소화 할 수 있다. 이에 따라 지반과 지하수 오염 우려가 적고, 그라우팅 경화체 형태와 강도성능 유지에 유리한 측면이 있다.

2.2.3 동결기 켈타임 확보

SSG공법에 사용하는 주입재는 2가 금속 급결재를 포함하고 있는데, 이 재료는 온도 의존성이 낮아 물의 온

도에 관계없이 급격한 켈형성이 가능하기 때문에 동결기 저온수 사용시에도 짧은 켈타임과 경화 후 우수한 물리성능 확보가 가능하다.

3. 실내시험

3.1 사용재료 및 배합조건

이 연구에서는 기존 그라우팅 재료의 문제점을 개선하고자 개발된 SSG공법의 특성(강도, 차수성, 환경영향성, 내구성)을 규명하기 위해 LW공법과 SGR공법을 비교공법으로 선정하였고, 현장에서 실제 사용되고 있는 Table 1의 배합조건에 따라 공시체를 제작하였다. LW공법은 현장에서 많이 사용되는 보통포틀랜드시멘트(OPC, ordinary portland cement)를 B액의 시멘트로 사용하였고, SGR공법의 B액은 보통포틀랜드시멘트와 SGR #7(급결용)로 구성된다. SSG공법에 사용된 B액의 시멘트는 자체 개발된 자기치유주입재(SSG, self-healing smart grout)를 사용하였으며, SSG의 화학조성은 Table 2와 같다. A액의 경우에는 SSG공법, LW공법, SGR공법 모두 응결제로 규산소다 3호(물유리)를 사용하였다.

3.2 시험방법

3.2.1 켈타임 측정

겔타임(gel-time)은 그라우트 약액을 혼합한 후 서서히 점성이 증가하면서 유동성을 상실하고, 경화할 때까지의 소요시간을 의미한다. 따라서 Table 1의 배합조건에 따라 A액과 B액을 각각 1L용 컵에 250mL씩 담아서 그라우트 혼합기를 사용하여 사전에 2분간 혼합한 뒤

Table 1. Standard mixing ratio

		SSG	LW	SGR
A liquid (200L)	Water (L)	156	100	100
	Water glass (L)	44	100	100
B liquid (200L)	Cement (kg)	100	80	60
	SGR #7 (kg)	-	-	24
	Water (L)	162	175	168
w/c (%)		162	219	280

Table 2. Chemical composition of SSG

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃
75.6%	9.0%	7.1%	1.8%	1.1%

두 약액을 좌우로 혼합시켜 컵 안에서 유동성이 상실할 때의 시간을 측정하였다. 이 연구에서는 상온(22±2°C)과 저온(10±2°C)에서의 겔타임을 각 공법별로 비교하기 위해 Table 3과 같이 시험 조건을 구성하였으며, 각 조건별로 최소 3회 이상 실시하여 평균 겔타임을 산정하였다.

3.2.2 일축압축강도 시험

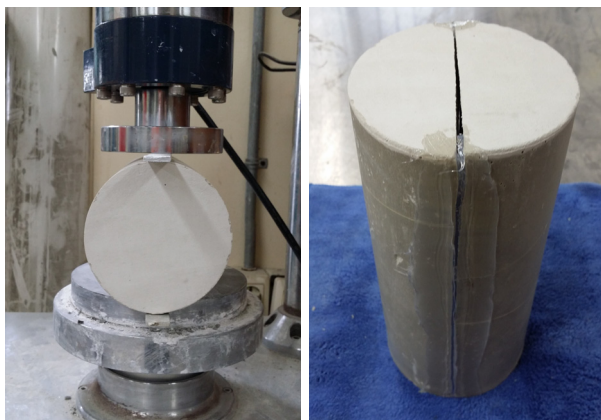
SSG공법의 일축압축강도 시험 결과는 Choi et al.(2015)에 의해 발표된 바 있다. 하지만 재령일 조건이 28일까지이기 때문에 장기 강도측면에서의 평가가 다소 미흡한 것으로 판단하였다. 따라서 이 연구에서는 60일까지의 재령일 조건을 추가하여 각 공법별로 일축압축강도 시험을 추가 수행하여 일축압축강도를 비교 및 분석하였다.

3.2.3 투수 시험

투수 시험에 사용된 공시체는 φ10×20cm 규격의 실린더몰드를 사용하여 제작하였고, 제작된 공시체는 22±2°C의 수중에서 28일 동안 수중 양생하였다. 28일 양생된 공

Table 3. Test conditions of gel-time

Case number	Case name	Method	Curing temperature
Case 1	LW-H	LW	High (22±2°C)
Case 2	LW-L		Low (10±2°C)
Case 3	SGR-H	SGR	High (22±2°C)
Case 4	SGR-L		Low (10±2°C)
Case 5	SSG-H	SSG	High (22±2°C)
Case 6	SSG-L		Low (10±2°C)



(a) Cleavage (b) Adhesion
Fig. 3. Permeability test - specimen preparation

시체는 Fig. 3과 같이 길이방향으로 할렬한 뒤 약 0.5~1.0mm의 균열 폭이 생기도록 할렬된 공시체 옆면을 실리콘을 사용하여 누수를 방지하였다. 투수 장치는 수두가 10cm로 일정한 정수두투수시험이 가능하도록 Fig. 4와 같이 구성하였고, 약 2주 동안 일별 투수량을 측정한다. 뒤 식 (4)를 통해 투수저감율(PRR, permeability reduction ratio)을 산정하여 균열부의 자기치유 특성을 비교 및 분석하였다.

$$PRR(\%) = \frac{Q_0 - Q_i}{Q_0} \times 100 \quad (4)$$

where, *PRR* : permeability reduction ratio

*Q*₀, *Q*_{*i*} : amount of water at *t*=0 & *t*=*i*

3.2.4 어독성 시험

어독성 시험은 KS I 3217을 기준으로 하여 주입재료부터 용탈되는 알칼리성 물질에 의한 어독성을 측정함으로써 지하수 및 지반에 미치는 환경영향을 간접적으로 평가하고자 하였다. 시험에서 오염원으로 사용하는 공시체의 개수는 예비 시험을 실시하여 결정하였으며, 최종 결정된 어독성 시험 조건은 Table 4와 같다.

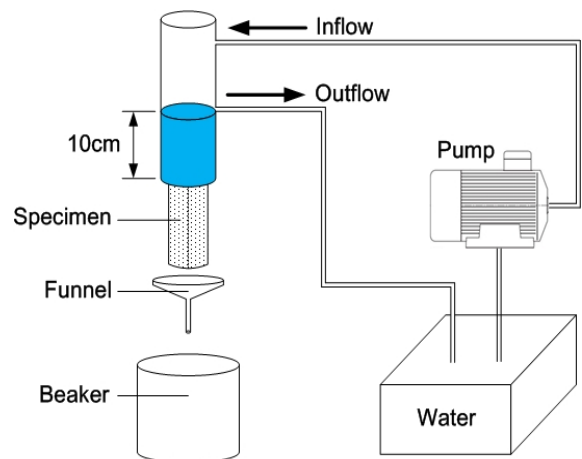


Fig. 4. Configuration of permeability test

Table 4. Test conditions of fish poison test

Method	SSG, LW, SGR
Number of test fishes	20
Number of specimens	12 (5×5×5 cm cube mold)
Volume of water tank	50 L
Testing time	96 hours
List of measurement	Mortality, pH

3.2.5 내화학적 시험

내화학적 시험은 시멘트 수화반응 과정에서 염화물에 대한 내구성을 확인하기 위해 수행하였다. 시험에 사용된 공시체는 $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ 규격의 실린더몰드를 사용하여 제작하였고, 공시체를 침지시킬 용액은 Chun(2005)의 연구에서 사용된 자연해수의 6배(25g/L)에 해당하는 MgCl_2 수용액을 사용하였다. 공시체 제작 후 1일간 항온항습기에서 양생 후 탈형하여 MgCl_2 수용액에 침지시키고, Fig. 5와 같이 1주~8주 동안 길이와 중량을 측정하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 겔타임 측정

Fig. 6과 Table 5는 겔타임 측정 시험결과이다. 겔타임의 빠르기는 SGR공법, SSG공법, LW공법의 순서로

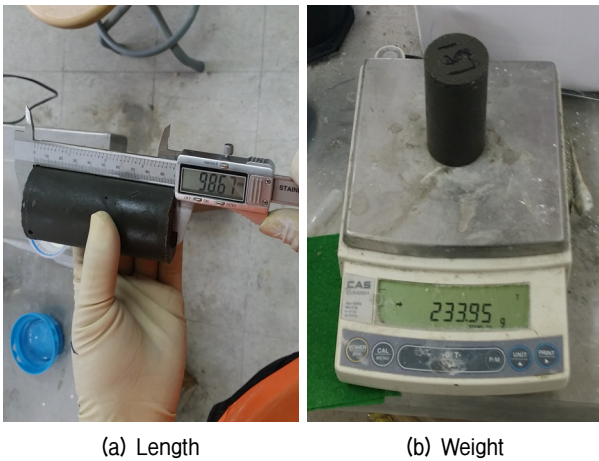


Fig. 5. Chemical resistance test - measurement of length and weight

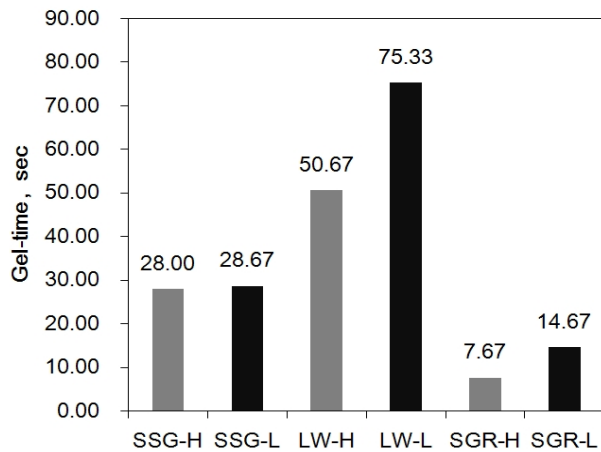


Fig. 6. Gel-time measurement

나타났으며, LW공법과 SGR공법은 저온의 겔타임이 상온의 겔타임에 비해 각각 약 1.49배, 약 1.91배 정도 느리게 나타났다. 반면, SSG공법은 타공법과 달리 상온과 저온의 겔타임 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

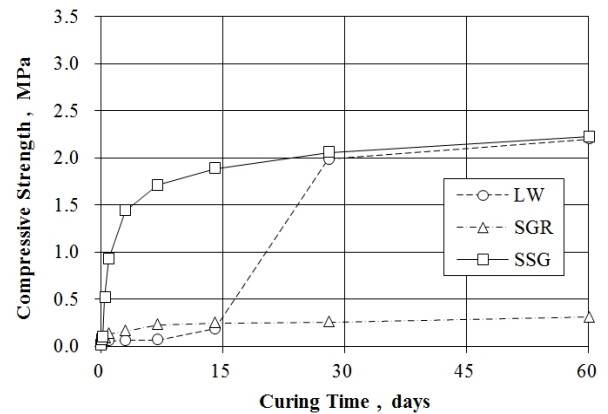
SSG공법이 타공법에 비해 저온수에서 겔타임 확보가 용이한 이유는 주입재에 함유된 2가 금속 급결재가 온도 의존성이 낮아 물의 온도에 관계없이 급격한 겔형성이 가능하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 저온수 사용시에도 짧은 겔타임과 경화 후 우수한 물리성능 확보가 가능하여 동절기 차수성능 유지에 효과적일 것으로 예상된다.

4.2 일축압축강도 시험

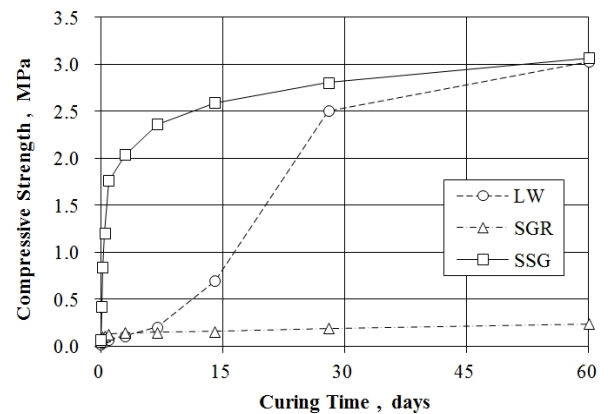
Fig. 7과 Table 6은 Choi et al.(2015)의 연구결과와 이

Table 5. Gel-time measurement

Case name	SSG-H	SSG-L	LW-H	LW-L	SGR-H	SGR-L
Gel-time (sec)	28.00	28.67	50.67	75.33	7.67	14.67



(a) Low temperature



(b) High temperature

Fig. 7. Uniaxial compressive strength

Table 6. Uniaxial compressive strength

Curing time	SSG		LW		SGR	
	Low (MPa)	High (MPa)	Low (MPa)	High (MPa)	Low (MPa)	High (MPa)
1day	0.930	1.761	0.059	0.073	0.132	0.130
3days	1.439	2.038	0.061	0.110	0.164	0.145
7days	1.710	2.363	0.067	0.208	0.231	0.149
14days	1.885	2.592	0.188	0.698	0.247	0.159
28days	2.059	2.803	1.987	2.507	0.257	0.192
60days	2.225	3.068	2.199	3.031	0.313	0.240

연구에서 재령일 60일을 추가하여 얻은 일축압축강도 시험결과를 종합한 것이다. 재령일 60일 기준으로 SSG 공법은 LW공법과 SGR공법에 비해 상온조건의 경우 각각 약 1.01배, 약 12.78배 우수한 것으로 나타났으며, 저온조건의 경우 각각 약 1.01배, 약 7.11배 우수한 것으로 나타났다.

물시멘트비(w/c)는 시멘트의 일축압축강도에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 일반적으로 같은 조건에서 물시멘트비가 높을수록 시멘트의 강도는 낮은 경향을 보인다. 이러한 이유 때문에 SGR공법의 일축압축강도는 가장 낮은 것으로 판단된다. 하지만 SSG공법은 2.2절에 서술한 물리적 특징을 발휘하기 위해 LW공법에 사용하는 보통포틀랜드시멘트와 달리 시멘트에 다양한 혼화재를 포함한다. 이러한 혼화재의 영향으로 SSG 공법의 물시멘트비가 LW공법의 물시멘트비의 0.74배임에도 불구하고 재령일 60일의 일축압축강도 차이가 거의 없는 것으로 판단된다.

위의 시험결과와 같이 장기강도 측면에서 SSG공법의 상온조건과 저온조건에서의 일축압축강도는 LW공법과 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 타공법 대비 적정수준의 일축압축강도를 확보하였기 때문에 장기적인 강도증진을 확보하기 위한 공사에 SSG공법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 투수 시험

Fig. 8과 Table 7은 계획된 시험방법 및 조건에 따라 수행된 투수 시험의 결과이다. 모든 공법이 시험 시작 후 투수저감율이 증가하는 경향을 보인다. 하지만 LW 공법과 SGR공법은 각각 3일차, 5일차부터 투수저감율이 급격히 감소하는 경향을 보이고, SSG공법은 투수저감율이 계속해서 증가하다가 9일차부터 시험 종료까지

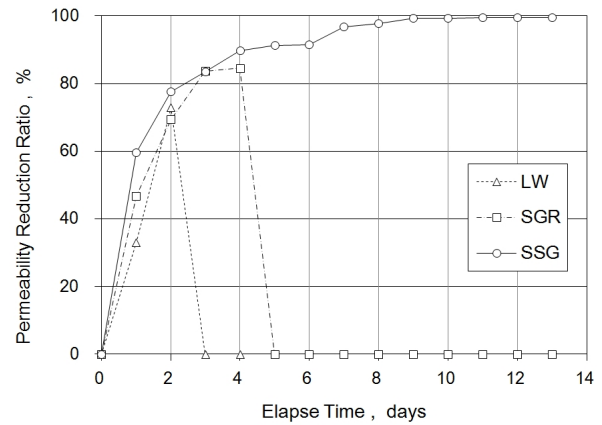


Fig. 8. Permeability reduction ratio

Table 7. Permeability reduction ratio

Time (days)	SSG		LW		SGR	
	Q (g)	PRR (%)	Q (g)	PRR (%)	Q (g)	PRR (%)
0	591.6	59.6	489.6	0.0	448.8	0.0
1	239.2	77.5	327.9	33.0	239.2	46.7
2	132.8	83.5	132.8	72.9	137.6	69.3
3	97.7	89.7	7096.0	-1349.3	73.3	83.7
4	60.9	91.2	6827.0	-1294.3	69.5	84.5
5	52.2	91.5	6713.0	-1271.0	7567.0	-1585.9
6	50.5	96.8	6696.0	-1267.6	7520.0	-1575.4
7	19.0	97.7	6912.0	-1311.7	7520.0	-1575.4
8	13.7	99.3	-	-	-	-
9	4.2	99.3	-	-	-	-
10	4.0	99.4	-	-	-	-
11	3.28	99.5	-	-	-	-
12	3.11	99.5	-	-	-	-
13	3.02	99.5	-	-	-	-

100%에 수렴하는 경향을 보인다.

SSG공법이 시험 종료까지 투수저감율이 계속 증가한 이유는 주입재를 구성하고 있는 재료 중 미세결정화제가 균열부에서 물과 이산화탄소를 만나 미세결정을 형성 및 충전함으로써 균열부를 스스로 자기치유했기 때문인 것으로 판단되며, Fig. 9를 통해 균열부에서 생성된 미세결정을 확인할 수 있었다.

LW공법과 SGR공법이 시험 초기에 투수저감율이 증가한 이유는 SSG공법과 같이 자기치유 성능을 발휘한 것이 아니라 알칼리성 물질의 용탈로 인해 균열부 상부에서 고결체의 일부분이 떨어져 나와 균열부를 일시적으로 메웠기 때문에 일정 기간 동안 투수저감율이 증가한 것으로 판단된다. 일정 기간 이후 알칼리성 물질의 용탈되는 양이 많아지게 되고, 균열부가 초기보다 넓어

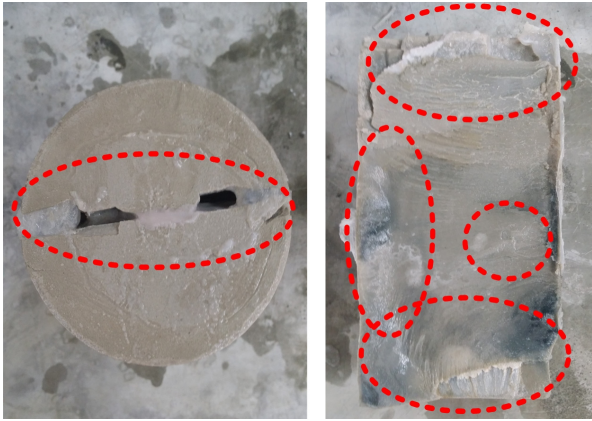


Fig. 9. Self-healing cracks

지면서 투수저감율이 급격히 상승한 것을 알 수 있다.

4.4 어독성 시험

Fig. 10은 경과시간에 따른 pH변화를 보여주고 있다. 어독성 시험에 사용된 물의 초기 pH는 7.3으로 공시어들이 충분히 생존할 수 있는 pH를 나타냈지만, 모든 공법에서 시험 시작 후 1시간 내에 LW공법과 SGR공법은 pH 9.7, SSG공법은 pH 9.5까지 증가함을 알 수 있다. 시간이 지남에 따라 모든 공법에서 pH가 점점 감소하는 경향이 나타나는데, LW공법과 SGR공법은 각각 pH 9.2, pH 9.1로 조금 감소한 반면에 SSG공법은 초기 pH를 거의 회복한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 SSG공법의 경우 LW공법과 SGR공법에 비해 규산소다의 사용이 적었으며, 주입재 구성성분 중 전하량이 낮은 2가 금속 급결재가 겔화반응 시 규산소다와 반응할 때 서로간의 결합력이 강해져 수분에 의한 강알칼리이온 용탈특성이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.

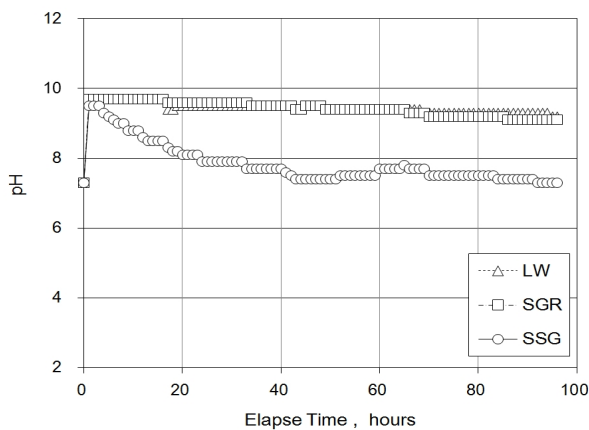


Fig. 10. Change of pH

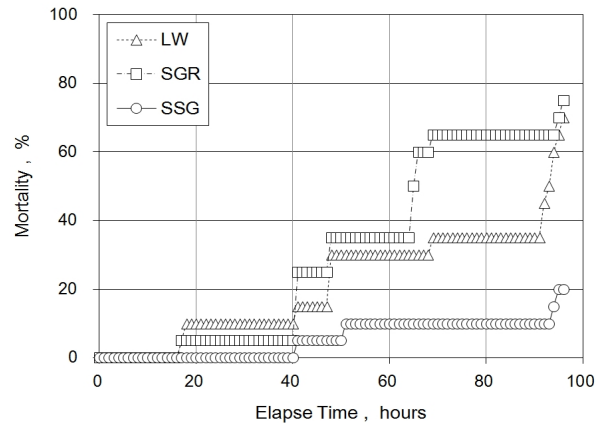


Fig. 11. Change of mortality

Fig. 11은 경과시간에 따른 공시어의 치사율변화를 보여주고 있다. LW공법은 96시간 후 총 폐사어의 수는 14마리로 70%의 치사율을 나타냈으며, SGR공법은 96시간 후 총 폐사어의 수는 15마리로 75%의 치사율을 나타냈다. 하지만 SSG공법은 96시간 후 총 폐사어의 수는 4마리로 20%의 치사율로 타 공법에 비해 낮은 수치를 보인다. 이러한 결과를 통해 SSG공법은 타공법과 비교했을 때 알칼리 용탈에 의한 지하수 및 지반의 오염 가능성이 가장 낮은 공법임을 판단할 수 있으며, 치사율 경향을 통해 96시간 이후 상대적인 공시어 치사 가능성도 가장 낮을 것으로 판단된다.

4.5 내화학적 시험

Fig. 12와 Table 8, Fig. 13과 Table 9는 각각 공시체를 MgCl₂수용액에 침지시킨 뒤 1주~8주 동안 길이변화와 중량변화를 측정한 결과이다.

Fig. 12와 Table 8을 통해 SSG공법과 LW공법의 경우

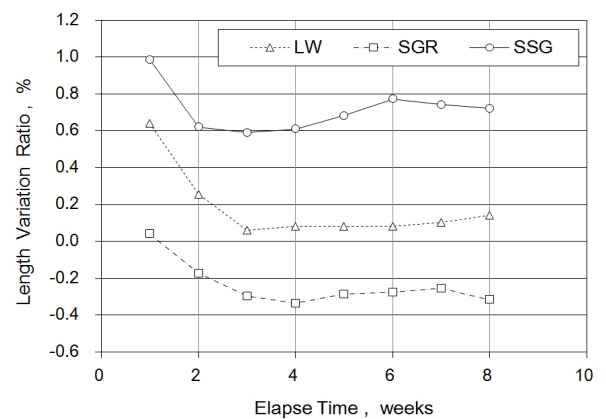


Fig. 12. Length variation ratio

Table 8. Length variation ratio

Time (weeks)	SSG		LW		SGR	
	L (mm)	ΔL (%)	L (mm)	ΔL (%)	L (mm)	ΔL (%)
0	98.37	-	98.47	-	98.01	-
1	99.34	0.99	99.10	0.64	98.05	0.04
2	98.98	0.62	98.72	0.25	97.84	-0.17
3	98.95	0.59	98.53	0.06	97.72	-0.30
4	98.97	0.61	98.55	0.08	97.68	-0.34
5	99.04	0.68	98.55	0.08	97.73	-0.29
6	99.13	0.77	98.55	0.08	97.74	-0.28
7	99.10	0.74	98.57	0.10	97.76	-0.26
8	99.08	0.72	98.61	0.14	97.70	-0.32

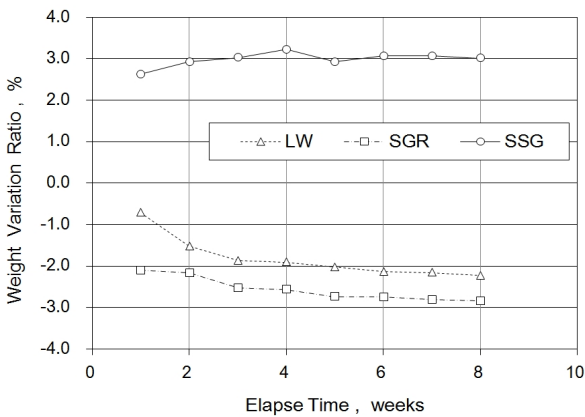


Fig. 13. Weight variation ratio

Table 9. Weight variation ratio

Time (weeks)	SSG		LW		SGR	
	W (kg)	ΔW (%)	W (kg)	ΔW (%)	W (kg)	ΔW (%)
0	226.64	-	232.85	-	227.19	-
1	232.60	2.63	231.19	-0.71	222.41	-2.10
2	233.26	2.92	229.32	-1.52	222.26	-2.17
3	233.50	3.03	228.51	-1.86	221.45	-2.53
4	233.94	3.22	228.41	-1.91	221.36	-2.57
5	233.27	2.93	228.15	-2.02	220.97	-2.74
6	233.60	3.07	227.87	-2.14	220.95	-2.75
7	233.59	3.07	227.83	-2.16	220.81	-2.81
8	233.46	3.01	227.66	-2.23	220.73	-2.84

초기보다 길이변화율은 각각 0.72%와 0.14%로 증가하였으며, SGR공법의 경우에는 0.32% 감소하는 경향을 보인다. 여기서 SSG공법의 최종 길이변화율은 LW공법과 SGR공법보다는 크게 나타나지만, MgCl₂ 수용액에 침지시킨 뒤 1주에서 8주 동안의 길이변화율은 0.27%로 LW공법(0.5%), SGR공법(0.36%)보다 변화폭이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 13과 Table 9를 통해 LW공법과 SGR공법은 알

칼리성 물질의 용탈로 인하여 시간이 지남에 따라 중량이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 SSG공법의 경우 시간이 지남에 따라 무게가 증가하였는데 최종적으로 3.01% 증가했다. 이는 부분적으로 알칼리성 물질의 용탈 및 화학적 반응이 일어나지만, 균열부에서 자기치유의 생성물인 미세결정의 생성으로 인하여 무게가 증가한 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 기존 공법의 문제점을 개선하기 위해 개발된 SSG공법의 특성(강도, 차수성, 환경영향성, 내구성)을 검토하기 위해 다양한 실내시험을 수행하였고, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) LW공법과 SGR공법은 저온의 켈타임이 상온의 켈타임에 비해 각각 약 1.49배, 약 1.91배 정도 느리게 나타났지만, SSG공법은 저온과 상온의 켈타임 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. SSG공법은 저온 수 사용시에도 짧은 켈타임과 경화 후 우수한 물리 성능 확보가 가능하기 때문에 동결기 단기적인 차수 성능 유지에 효과적일 것으로 판단된다.
- (2) 재령일 60일 기준으로 SSG공법의 일축압축강도는 LW공법에 비해 상온과 저온조건 모두 약 1.01배, SGR공법에 비해 상온조건에서 약 12.78배, 저온조건에서 약 7.11배 우수한 것으로 나타났다. SSG공법은 타공법 대비 적정수준의 일축압축강도를 확보하였기 때문에 단기강도 뿐만 아니라 장기강도 증진을 확보하기 위한 공사에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 투수 시험의 결과 SSG공법은 타공법과 달리 자기치유 성능을 발휘하여 투수저감율이 계속해서 증가하는 경향을 보이며 9일차 이후부터 100%에 수렴하는 경향을 보였다. 이를 통해 SSG공법은 그라우팅 시공 후 내구성 확보에 유리하고, 장기적인 차수 성능 유지에 효과적일 것으로 판단된다.
- (4) SSG공법은 96시간 후 초기 pH를 거의 회복했으며, 치사율은 비교적 낮은 수치를 보였다. 이를 통해 SSG공법이 타공법에 비해 알칼리 용탈에 의한 지하수 및 지반의 오염 가능성이 낮은 것을 간접적으로 판단할 수 있다. 최근 약액주입공법의 활용빈도가 증가하면서 이에 따른 환경오염 문제가 대두되고

있는 상황에서 SSG공법은 이런 문제를 최소화할 수 있는 대안으로 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

- (5) 내화학적 시험의 결과 SSG공법은 1주에서 8주 동안의 길이변화율이 0.27%로 변화폭이 가장 낮게 나타났으며, 중량변화율은 타공법이 용탈로 인해 감소한 것과 달리 균열부에서 자기치유의 결과물인 미세결정의 생성으로 인해 증가한 것으로 나타났다. 연구 결과를 통해 염화물에 대한 내구성 확보를 판단하기에는 다소 미흡한 부분이 존재하기 때문에 보다 정량적으로 판단하기 위해서 시험 조건의 다양화 및 용탈시험 등을 추가 수행할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2015년 대원토질(주)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Ahn, S.W., Park, D.C., Jeong, K.S., Lee, J.W., and Choi, Y.K. (2015), KR-101507091.
2. Chun, B.S. (2011), *Principles and Practice for Chemical Grouting*, Goomibook, Seoul, pp.5-8.
3. Chun, B.S. (2015), *Grouting-Theory and Practice, One-technology*, Seoul, pp.169-170.
4. Choi, Y.S., Kim, B.I., Moon, I.J., and Heo, J. (2016), "Evaluation on Uniaxial Compression Strength of SSG Method with Curing Condition", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.2, pp.15-20.
5. Kim, B.I., Cho, S.M., Kim, J.H., and Kim, S.R. (2015), *Soft Ground Improvement Methods*, CIR, Seoul, pp.363-366.
6. Kim, J.C., Choi, Y.C., Jeong, J.J., Shin, S.J., and Yoon, N.S. (2001), "Grouting Technology Trends and Characteristics of MSG Method", *Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.3, pp.40-49.
7. Marion, A, Lanève, M.D., and Grauw, A.D. (2005), *Study of the Leaching Behaviour of Paving Concretes : Quantification of Heavy Metal Content in Leachates Issued from Tank Test Using Demineralized Water*, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, No.5, pp.951-957.

Received : December 21st, 2015

Revised : February 11th, 2016

Accepted : February 24th, 2016