

국내 그라우팅 재료별 특성에 따른 설계사양에 관한 연구

- LW 공법 및 MSG 공법을 중심으로 -

A Study on the Design Specification for Characteristics of Grout Materials - Focus on LW method and MSG method -

천병식* · 김진춘** · 남순성*** · 하광현****

Chun, Byung-Sik · Kim, Jin-Chun · Nam, Soon-Sung · Ha, Kwang-Hyun

Abstract

The purpose of this study is to present criteria of selection of optimum grout materials through analyzing the limitation of permeability of each materials(MSG-N, OPC), in various ground conditions by comparing presentation of strength and permeability of MSG method and LW method(or SGR method). To do that, physical and chemical characteristics of grout materials were analyzed and compressive tests of homogel, mixed coagulation materials and hardening materials in certain mixing ratio, and of milk paste. In addition, permeability tests for each ground soil, each injection pressure, and each materials in combined stratum were performed with massive chamber. The results of tests showed that ultra fine grout materials like grout of MSG is necessary to construct effective grouting in sand and silty sand ground. Also, it is expected to become chemical grouting guide data to layout · construction engineers because presented proper injection pressure by kind of object ground in case using ultra-fine grout material.

Keywords : MSG-N, OPC, Homogel, Milk paste, Permeation test, Ultra-fine grout materials

요 지

본 연구에서는 MSG공법과 LW공법(또는 SGR공법)의 강도발현성, 침투성 등을 비교하여 사질지반, 실트질지반, 점토지반 등 대상지반에 대한 주입재료별(MSG-N, OPC)로 침투한계를 평가함으로써 대상지반별 최적 주입재 선정의 기준을 제시하고자 하였다. 이를 위해 사용된 그라우트재에 대하여 물리화학적 특성을 분석하고 응결재와 경화재가 일정비율로 혼합된 호모겔 강도 및 밀크 페이스트 강도 시험을 실시하였다. 또한 대상토질별, 침투압력별, 복합지층에서의 주입재별, 대형토조를 이용한 침투성 시험을 실시하였다. 시험결과, 사질지반 및 실트질 사질지반에서 효과적인 그라우팅을 시공하기 위해서는 MSG공법 주입재와 같이 초미립자계 주입재를 적용하는 것이 필수적이라고 판단된다. 또한, 초미립자계 주입재를 사용하는 경우에 대하여 지반의 종류에 따른 적절한 주입압력을 제시하였으므로 설계 · 시공기술자들에게 약액주입 지침자료가 될 것으로 기대된다.

주요어 : MSG-N, OPC, 호모겔, 밀크페이스트, 침투성시험, 초미립자계 주입재

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 · (주)한국지오택 대표이사

*** 정회원 · (주)이제이텍 대표이사

**** 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

서울지하철 2호선 건설시 국내에 약액주입공법이 본격적으로 소개된 이래 LW공법과 SGR공법이 가장 일반적인 약액주입공법으로 사용되어 왔으며 이 두 가지 공법의 개념은 수십년동안 지금까지도 전세계적으로 가장 보편화된 개념의 공법으로 인식되고 있다. 즉, LW공법은 완결형 약액 1가지만 사용하여 이중관 더블팩커나 싱글팩커로 주입하는 공법으로 지반보강 및 차수목적으로 적합한 공법인 반면, SGR공법은 급결형과 완결형 약액 2가지를 복합적으로 사용하여 이중관 스트레이너(단상식 또는 복상식)로 주입하는 공법으로서 차수목적에 적합한 공법이다.

본래의 LW공법과 SGR공법은 용액형을 기본으로 한 차수공법이었다. 그러나, 강도가 약하고 겔화 반응제로 사용되는 규산소다의 용탈현상에 의해서 내구성이 취약한 단점을 갖고 있다고 인식되어 최근 논란이 되고 있지만 약액주입공법은 그 자체가 일시적인 차수 목적의 가시설물에만 한정적으로 사용할 목적으로 개발되었던 것이기 때문에 내구성이 중요한 문제가 되지는 않았지만 도시화가 급속히 발전되면서 가시설물의 존치기간이 길어지고 굴착후 측벽의 이완작용에 의한 측방유동과 인근 지상구조물의 손상 등 건설재해가 발생하고, 약액의 주입에 의한 지하수 오염 등 환경안전 사고사례도 보고되면서 약액주입공사의 내구성 및 환경안정성이 강조되고 있는 경향이다. 따라서, 최근에 소개되고 있는 약액주입공법은 종전의 약액주입공법에 비해서 내구성과 환경안정성이 우수한 약액을 사용하는 것이 기본적인 기술동향이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 MSG공법과 LW공법(또는 SGR공법)의 강도발현성, 침투성 등을 비교하여 사질지반, 실트질지반, 점토지반 등 대상지반에 대한 주입재료별로 침투한계를 평가함으로써 대상지반별 최적 주입재 선정의 기준을 제시하고자 한다.

2. 약액주입 기술

원래 유동성을 갖고 있지만 임의 시간에 고결 시키는 것이 가능한 현탁액형 및 용액형 약액을 지반 중에 주입하여 지반의 투수성을 감소시키고, 지반의 강도를 증대시킴으로써 변상방지 등의 복합적인 효과를 기대하는 지반개량공법 중의 하나가 약액주입공법인 바, 최근의 주입공법에서는 보통시멘트에 비해서 침투성 및 내구성이 개선된 마이크로시멘트계 주입재의 적용 사례가 증가하고 있다.

1980년대 이후 분쇄·분급기술이 급속히 발전하면서 마이크로시멘트의 생산이 가능하게 되었고, 일본 등 분체산업이 발달된 국가에서 평균입경 10 μ m, 최대입경 20 μ m, 비표면적 6,000cm²/g 이상의 콜로이드시멘트와 평균입경 4 μ m, 최대입경 10 μ m, 비표면적 8,000cm²/g 이상의 마이크로시멘트가 실용화 되었으며, 마이크로시멘트는 용액형에 필적하는 침투성을 발휘하는 것으로 보고되고 있다.

약액주입에 있어서 기술혁신의 변천과정은 표 1과 같이 집약될 수 있다.

표 1. 약액주입의 기술혁신 변천사

연 대	약액개발	공법개발	사회정세
1802년	• 점토+석회		• 광산개발기
1887년	• 물유리+염화칼슘	• 단관스트레이너공법	• 산업발전의 여명기
1900~1940년대	• 물유리+염류반응제 • 점토+시멘트	• Lugeon Test 확립 • Joosten공법	• 댐건설 융성기
1950년대	• 무기물유리(MI), • 고분자(AM-9) • 물유리+시멘트(LW)	• 롯데주입공법 • LW공법	• 산업의 고도성장기
1960년대	• 아크릴아미드 • 아크릴산염류 • 수지 등 유기물계	• 복합그라우팅 • 맨젯튜브공법	• 석유화학의 발달로 신재료 활용 증대
1970년대	• 유기계·무기계 순결 물유리 • 중성 물유리 • 실리카졸	• 2중관더블팩커공법 • 2중관순결공법	• 복합/한정/강제주입 • 샘플 오염사고 발생
1980년대	• 순결·완결복합물유리그라우트 • 현탁·용액복합실리카졸그라우트 • CO ₂ 를 이용한 기·액반응그라우트 • 초미립자시멘트그라우트	• 주입시스템 자동화 • 3중관식고압분사 그라우팅	• 무공해성 공법,재료 • 경제성/자동화 추구 • 약액의 내구성 향상
1990년대	• 경제적인 초미립화 기술 • 실리카졸,내구성,무공해성 향상	• WMC공법등 • 항구그라우팅	• 약액주입공법이 주공법으로 정착

표 1에서 볼 수 있듯이, 기술적·산업적 사회정세의 변화에 따라서 약 200여년의 약액주입기술 변천역사에서도 여러 가지 변화가 있었지만, 오직 변하지 않고 사용되고 있는 재료는 시멘트와 몰유리 뿐이다. 주입재료를 기준으로 판단할 때 최근의 기술발전 동향은 침투성을 향상시키기 위해서 시멘트를 마이크로화 하고, 몰유리의 내구성을 향상시키기 위해서 몰유리 중의 알카리 성분을 감소시키는 것이다. 몰유리중의 알카리성분을 줄이면 'n=SiO₂/Na₂O'의 n값을 높인 특수규산이 되고, 완전히 제거하면 실리카 줄이 되는 것이다. 이와 같이 개량된 재료를 사용해도 내구성이 영구적으로 향상된다는 것은 아니다. 다만, 그라우팅용으로 가장 일반적으로 사용되고 있는 '몰유리 3호'에 비해서 내구성이 몇 배 향상된다는 이론적인 주장일 뿐이다. 이런 이론적 주장에 대한 실증적 자료가 많지 않고, 특수규산이나 실리카줄은 제조공정이 복잡해지기 때문에 단가가 비싸진다. 따라서, 아직까지도 댐구조물의 긴급보수와 같이 특수한 목적을 제외하고는 범용적으로 사용하는 데는 커다란 장애가 되고 있다.

3. 시험

3.1 사용재료

본 시험에서 사용된 재료로써 경화재는 MSG공법용 표준형(MSG-N), 보통시멘트(OPC)를 사용하였고 응결재는 규산소다 3호를 사용하였다.

침투성 시험용 지반은 크게 두 종류의 지반으로 나누어 압력별 침투성 지반은 주문진 표준사로 복합주입 침투성 지반은 굽은모래층~실트모래층으로 조성하였다. 혼합수는 수돗물을 사용하였다.

3.2 시험 계획

(1) 원재료의 물리화학적 특성 분석

경화재, 응결재에 대해서는 화학성분 및 입도분포, 압축강도 등을 분석하였고, 침투성 시험용 지반에 대해서는 공극율, 입도특성 및 투수계수를 분석하였다.

(2) 호모겔 강도

차수목적의 약액주입공법에서 범용적으로 사용되는

1.5shot 공정과 2.0shot 공정의 주입재는 응결재(A액)와 경화재(B액)가 일정비율로 혼합된 호모겔 강도가 가장 대표적인 물리적 특성이며, 본 실험에 적용한 표준배합은 표 2와 같다.

표 2. 호모겔 강도 시편 제작용 표준배합

실험 No.	주입재 종류	A액 (규산:물=4:6)		B액(시멘트현탁액)		
		규산 3호	물	W/C (%)	Water (g)	Cement (g)
①	MSG-N, OPC	45.2	67.7	50	120.5	60.2
②				75	92.6	69.4
③				100	75.2	75.2
④				150	54.6	82.0
⑤				200	42.9	85.8
⑥				300	30.0	90.1

호모겔 강도용 시편은 표 2의 A액과 B액을 1:1의 부피비로 교반하여 예상 겔타임의 반정도까지 교반을 하고 사전에 조립된 큐빅몰드를 사용하여 시험편을 제작하였다.

표 2의 표준배합에 의한 호모겔 강도 시편은 5cm×5cm×5cm의 큐빅몰드를 사용하였다. 양생은 KS규격에 정해진 습기함 또는 양생수조를 사용하며, KS규격에서 제시한 방법으로 소정의 재령에서 일축압축강도를 측정하였다. 시험편 제작시 몰드 외부로 재료가 유실되는 것을 방지하기 위해서 몰드를 빈틈없이 조립하고 몰드 내부를 탈형유로 균질하면서도 충분히 도포하였다.

(3) 밀크 페이스트 강도

댐 기초 암반 및 산악터널의 암반에서와 같이 지반보강 목적의 약액주입공법에서 범용적으로 사용되는 1.0shot 공정에서는 밀크형 경화재를 주입하며, 지반의 공극상태에 따라서 밀크의 물/시멘트비(W/C:%)를 조정하면서 주입한다. 밀크를 주입하는 경우 밀크의 물/시멘트비에 관계없이 혼합수가 배수(dewatering)되어 지반내 공극에 충전된 주입재는 실제로 물/시멘트비 100% 이하의 페이스 상태로 존재한다. 따라서, 본 실험에서는 물/시멘트비 100% 이하의 밀크 페이스트의 강도변화 특성을 검토하였으며, 본 실험에 적용한 표준배합은 표 3과 같다.

표 3. 밀크 페이스트 강도 시편 제작용 표준배합

실험 No.	주입재 종류	시멘트밀크 현탁액		
		W/C(%)	Water(g)	Cement(g)
①	MSG-N, OPC	50	240	120
②		75	185	139
③		100	150	150

밀크 페이스트 강도용 시편은 표 3의 현탁액을 충분히 혼합한후 사전에 조립된 큐빅몰드를 사용하여 시편편을 제작하였다.

표 3의 표준배합에 의한 밀크 페이스트 강도 시편도 호모겔 강도에서와 마찬가지로 5cm×5cm×5cm 큐빅몰드를 사용하는 것이 적당하지만 본 시험에서는 5cm×5cm×5cm의 큐빅몰드를 사용하였다. 이 때 밀크 페이스트의 물/시멘트비가 클수록 블리딩이 심하게 발생하여 시편이 작아지기 때문에 시편의 측면에서 하중을 재하하며, 매 시편마다 재하면적을 측정하여 응력을 계산하였다. 몰드준비와 양생은 호모겔 강도 시편제작에서와 동일한 방법으로 하였다.

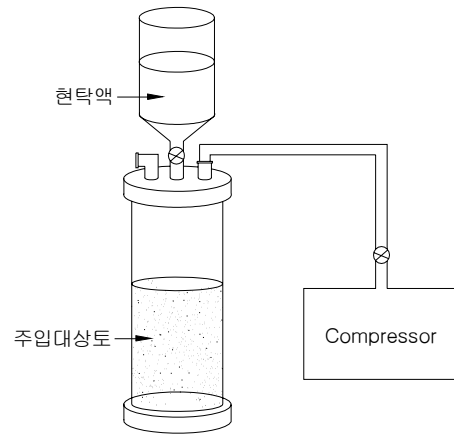
(4) 침투성 시험

약액을 주입하는 데 있어 대상이 되는 지반의 입도분포를 파악하는 것은 공법의 선정 및 주입재, 주입량의 결정 등에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 자갈은 공극이 크므로 어떤 약액도 용이하게 주입된다. 모래의 경우에는 0.45mm를 기준으로 이보다 큰 입경의 모래를 굵은 모래, 작은 입경의 모래를 가는 모래로 구분한다. 본 실험의 시험 대상 주입재 MSG-N형과 OPC를 굵은 모래, 중간 모래, 가는 모래 등 사질층과 실트와 모래가 혼합된 실트질 모래 등을 대상으로 다음과 같은 실험을 실시하여 대상 지반별 최적 주입재를 선정하였다.

- ① 대상토질별 주입재의 침투성 실험
- ② 침투압력 변화에 의한 침투성 실험
- ③ 복합지층에서의 주입재별 침투성 실험
- ④ 대형 토조실험을 이용한 침투성 실험

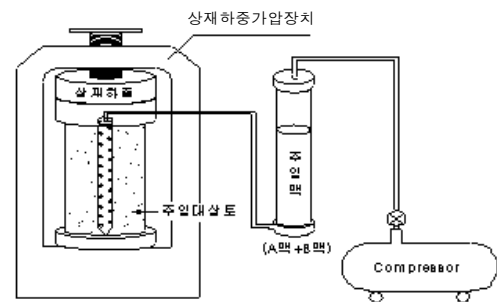
위 실험을 위한 시험장치는 3가지로 구분하였다. 즉, 실험 ①, ②를 위한 실험모식도는 그림 1, 실험 ③은 그림 2, 실험 ④는 그림 3과 같은 모식도의 장치를 이용하여 실험

하였다.



시편크기 ; 직경7cm×높이15cm, 주입압력 ; 3kg/cm²

그림 1. 소형 침투성 장치



시편크기 : Ø 15cm×H30cm

주입압력 : 5kg/cm²

주입속도 : 1~10 l/min

그림 2. 중형 침투성 장치

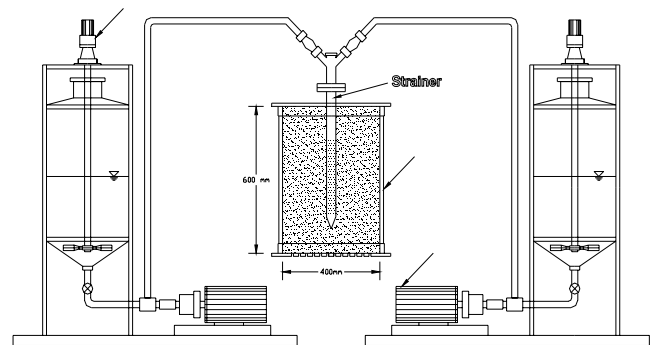


그림 3. 대형 침투성 장치

4. 시험 결과 및 분석

4.1 원재료의 물리화학적 특성

(1) 시멘트계 주입재

시멘트계 주입재는 제조방법, 혼합물의 종류 및 배합비율에 따라서 물리화학적 특성이 상이하므로 본 시험에 사용되는 주입재는 초미립자계 시멘트(MSG-N형), 보통 시멘트(OPC)에 대한 화학성분, 물리성능, 입도특성 및 주입비등을 분석하였다.

① 화학성분

MSG-N 및 OPC에 대한 화학성분 분석결과는 표 4와 같다.

표 4. 주입용 경화재의 화학적 성분

종 류	SiO ₂	CaO+MgO+Al ₂ O ₃	염 기 도
MSG-N	25% 이상	65% 이상	2.0 이상
OPC	18% 이상	65% 이상	3.0 이상

MSG-N은 보통시멘트와 마찬가지로 무기물질로 구성되어 있으며, 독성과 냄새가 없는 무공해 주입재로서 화학성분의 대표적인 분석치는 표 4와 같다. MSG-N과 같은 초미립자시멘트는 초미립화 됨으로써 초기에 수화활성이 지나치게 크면 침투성 저하가 빨라지기 때문에 초기수화 반응속도 조절이 가능하도록 염기도를 낮게 조절하는 것이 유리하다.

② 물리성능

각 나라마다 포틀랜드계 시멘트나 혼합계 시멘트에 대한 품질 기준을 국가 규격으로 관리하고 있지만, 아직까지 초미립자시멘트에 관한 별도의 국가 규격은 없다. 따라서, 본 시험에서는 한국 산업 규격을 기준으로 품질을 평가하였으며, MSG-N 및 OPC에 대한 물리적 특성의 대표적인 시험결과는 표 5와 같다.

표 5. 시멘트계 주입재의 물리적 특성치

		KS규격 제한값	MSG-N	OPC
비 중		-	2.91	3.15
비표면적(cm ² /g)		2,800 이상	8,150	3,250
길모아 응 결	W/C(%)	-	31.4	29.5
	초결(분)	60 이상	185	165
	종결(시:분)	10 이하	8:25	7:40
압 축 강 도	W/C(%)	-	51.2	48.5
	1일(kg/cm ²)	-	157	57
	3일(kg/cm ²)	110이상	349	192
	7일(kg/cm ²)	190이상	506	248
	28일(kg/cm ²)	290이상	588	394

표 5에서 볼 수 있듯이 MSG-N은 OPC에 비해서 매우 우수한 강도특성을 보이고 있다. 따라서, 그라우트로서 고강도가 발현되며 내구성에 유리할 것으로 판단된다.

③ 입도특성

입도분포 및 입자형상은 현탁액형 그라우트의 전단응력과 밀접한 관계가 있다. 즉, 입자가 미세할수록, 입자형상의 장축직경과 그 구체의 이상적인 구(球)의 직경과의 비로써 표현되는 구상화율(球狀化率)이 작을수록 현탁액형 그라우트의 점성은 증가하고 전단응력은 커진다. 본 실험에 사용된 시료의 입도분석 결과의 예는 표 6, 그림 4 및 사진 1과 같다.

표 6. 시멘트계 그라우트재의 입도분포 예
(단위:누적통과율, %)

주입재종류 입경크기(μm)	MSG-N	OPC
1	15.3	5.8
2	21.5	9.5
4	48.2	18.7
6	73.5	23.2
8	88.1	32.1
12	98.2	41.5
16	99.5	47.9
24	100.0	59.4
32	100.0	78.4
48	100.0	92.8
64	100.0	96.1
평균입경(d ₅₀)	4.5	18.3

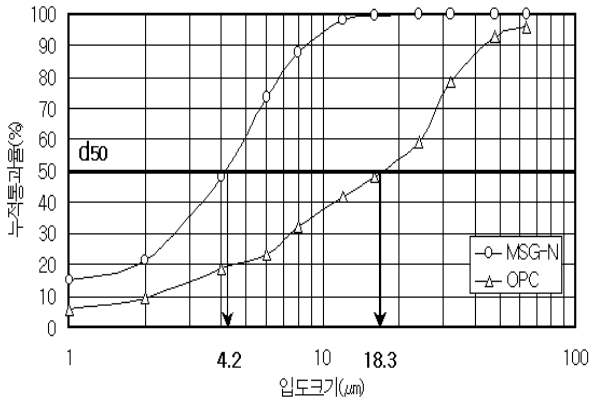
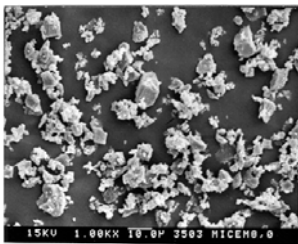
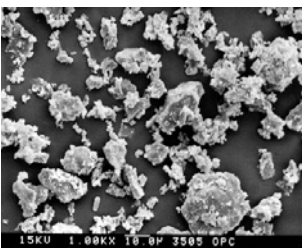


그림 4. 시멘트계 그라우트재의 입도분포 경향

분체공학에서 입자의 형상을 판정하는 것이 중요한 변수이며, 구상화율(球狀化率)이 형상판정 계수로서 활용된다. 주입재를 미분말화 할수록 입자의 구상화율이 커지며, 구상화율이 크다는 것은 현탁액 주입재의 전단응력이 작아지기 때문에 주입압의 손실이 줄어들어 침투력을 높이고 주입반경을 넓이는 데 유리하다. 사진 1은 초미립자시멘트와 보통시멘트에 대한 전자현미경(SEM) 사진이다.



(a) MSG-N형



(b) OPC

사진 1. 시멘트계 주입재의 SEM 촬영 사진

사진 1에서 볼 수 있듯이 OPC의 경우 $10\mu\text{m}$ 이상의 굵은 입자가 많이 포함되어 있기 때문에 지반내의 침투경로를 이들 굵은 입자가 가로막아 주입성이 떨어지지만 MSG-N형과 같은 초미립자시멘트에는 $10\mu\text{m}$ 이상의 굵은 입자가 거의 없기 때문에 침투경로를 가로막는 막힘현상이

발생하지 않아 침투성이 우수하다.

(2) 응결조절제인 규산소다

본 실험에서는 응결조절제로 비중 1.4 이상의 그라우팅용 규산소다 3호를 사용하였다. 규산소다는 규사와 소다회 또는 규사와 가성소다를 원료로 해서 만들어지는 규산(SiO_2)과 알칼리(Na_2O)가 결합된 화합물로 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 로 나타낸다. 여기서 n은 몰비(mole ratio)로 $n=0.5\sim 4$ 의 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있다. n이 1 이하는 결정상의 분말형 물유리, n이 1 이상인 것은 비결정 구조가 되어 액상형 규산소다이다. 국내에서 유통되는 규산소다의 종류와 품질특성은 표 7과 같다.

표 7. 규산소다의 특성

항 목	종 류	1호	2호	3호	메타규산나트륨	
					1종	2종
외 관		물엿형의 무색내지 다소 착색된 상태			백색분말 또는 과립형	백색 결정
이산화규소(SiO_2)(%)		35~38	34~36	28~38	27.5~29	19~22
산화나트륨(Na_2O)(%)		17~19	14~15	9~10	28.5~30	20~22

(3) 표준 시료토

① 입도

본 실험연구에 사용될 표준 시료토에 대한 공극율 및 입도분석을 실시한 결과 표 8과 같다.

표 8. 주입성 평가용 표준 시료토의 공극율 및 입도분석 결과

시료토 종류	공극율(%)	입도가적곡선상의 입경(mm)		
		KS F 2503		
		D ₁₀	D ₁₅	
사 질 층	KS F 2506			
	굵은모래	41.3	0.32	0.41
	중간모래	43.5	0.23	0.29
가는모래	46.2	0.17	0.25	
실트질 모래	55.1	0.04	0.11	

표 6으로부터 주입재의 입경가적곡선에서 MSG-N 및

OPC의 D'_{85} 를 추정하면 각각 0.007, 0.042mm, D'_{95} 는 각각 0.010, 0.055mm로 볼 수 있으므로 G. A. Kravetz의 실험에 의해서 주입비를 평가한 결과는 표 9와 같다.

② 주입비

주입재의 입경가적곡선상 D'_{85} 및 D'_{95} 와 주입대상토의 입경가적곡선상 D_{15} 및 D_{10} 의 주입비 N_1 및 N_2 를 이용해서 대상토질별 주입재의 침투한계를 분석하였으며, 결과는 표 9와 같다.

표 9. 주입대상 토질별 주입비 N_1, N_2 (groutability)

주입대상 시료토질	토립자직경 (mm)		$N_1=D_{15}/D'_{85} > 15,$ $N_2=D_{10}/D'_{95} > 8$				
			MSG-N		OPC		
	D_{10}	D_{15}	N_1	N_2	N_1	N_2	
사 질 층	굵은모래	0.32	0.41	58.6	32.0	9.8	5.8
	중간모래	0.23	0.29	41.4	23.0	6.9	4.2
	가는모래	0.17	0.25	35.7	17.0	6.0	3.1
실트질 모래	0.04	0.11	15.7	4.0	2.6	0.7	

표 9로부터 MSG-N과 같은 초미립자시멘트 모든 사질층에서 음영부분과 같이 침투주입이 가능한 것으로 주입비가 평가되었다. 그러나, OPC는 조립분이 많은 굵은 모래층에서조차 침투가 어려울 것으로 판단된다.

현장의 주입대상 토질은 굵은 모래에서부터 실트질 모래층 또는 점토질 실트층까지 매우 다양하게 구성되어 있는 것이 보통이다. 따라서, 침투주입을 목적으로 하는 주입공사에서는 대상 토질의 주입범위가 매우 넓은 초미립자 주입재를 사용할 경우 시공의 신뢰성이 향상될 것으로 예측된다.

한편, MSG-N 및 OPC의 최대 입경을 각각 $10\mu\text{m}$ 및 $100\mu\text{m}$ 로 가정하면 J. K. Michell의 암반균열 주입비 관계 실험에 의해서 주입재 종류별로 주입이 가능한 암반균열의 최소폭은 각각 $30\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$ 이상으로 평가된다. 따라서, 미세한 균열이 많이 발달된 암반이나 보수가 요구되는 콘크리트 균열과 같은 대상에서도 초미립자시멘트를 사용할 경우 침투성이 우수할 것으로 판단된다.

4.2 호모겔 강도

표 2의 표준배합에 대해서 A액과 B액을 1:1 부피비로 혼합교반하여 제작한 호모겔 공시체의 강도를 각 재령별로 측정된 결과는 그림 5, 그림 6과 같다.

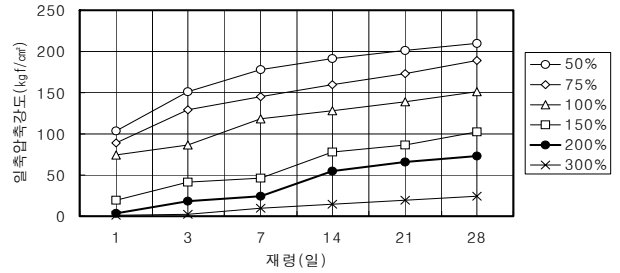


그림 5. MSG-N형 주입재의 호모겔 강도 변화 경향

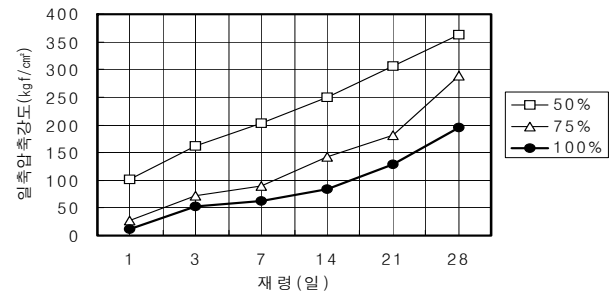


그림 6. MSG-N형 주입재의 밀크 페이스트 강도 변화 경향

그림 5, 그림 6으로부터 시멘트현탁액인 B액의 물/시멘트비(%)에 따라서 호모겔 강도의 변화가 매우 크게 변하고, MSG-N이 OPC를 사용하는 호모겔보다 1.5배 이상 강도발현이 크게 나타났다.

4.3 밀크 페이스트 강도

표 3의 표준배합에 대해서 시멘트현탁액을 표준몰드에 주입하여 각 재령별로 밀크 페이스트 강도를 측정된 결과는 그림 7, 그림 8과 같다.

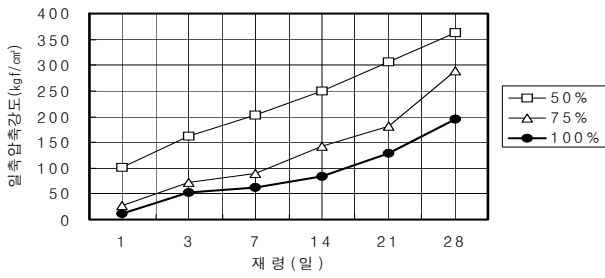


그림 7. MSG-N형 주입재의 밀크 페이스트 강도 변화 경향

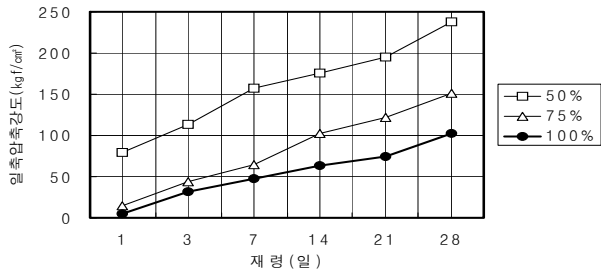


그림 8. OPC 주입재의 밀크 페이스트 강도 변화 경향

그림 7, 그림 8로부터 밀크의 물/시멘트비(W/C:%)에 따라서 페이스트 강도의 변화가 매우 크게 변하고, MSG-N이 OPC를 사용하는 호모겔보다 1.5배 이상 강도 발현이 크게 나타났다.

4.4 침투성

(1) 대상토질별 주입재의 침투성 실험

표 8의 대상토를 그림 1의 소형 침투성 시험장치(직경 7cm×높이 15cm)에 3kg/cm²의 주입압력으로 MSG-N과 OPC를 주입한 실험결과는 표 10과 같다.

표 10. 대상토질별 침투성 실험 결과

시료도 종류	공극율 (%)	침투율 (%) (주입깊이 ÷ 시편높이 15cm) × 100	
		MSG-N	OPC
사 질 층	굵은모래	41.3	70
	중간모래	43.5	20
	가는모래	46.2	10
실트질 모래	55.1	40	5

표 10에서 MSG-N은 어떠한 사질층에서도 100% 침투 주입이 가능하고 실트질 사질층에서도 부분적인 침투주입이 가능함을 알 수 있다. 그러나, OPC는 굵은 사질층에서조차 완전한 침투주입이 어려움을 보여주고 있다.

(2) 침투압력 변화에 의한 침투성 실험

표 8의 대상토 중에서 가는모래를 대상으로 그림 1의 소형 침투성 시험장치를 이용하여 주입압력을 1, 3, 5, 7kg/cm²의 4단계로 변화시키면서 주입실험을 실시하였다. 이때 주입재는 표 2의 5번 배합, 즉 W/C=200%의 호모겔 배합을 주입하였으며 MSG-N과 OPC를 각각 주입하였다. 이들의 실험 결과는 표 11과 같다.

표 11. 가는모래층에서 침투압력 변화에 의한 침투성 실험 결과

침투주입 압력 (kg/cm ²)	침투율 (%) (표 14에서와 동일한 조건)		주입시편 목시관측	
	MSG-N	OPC	MSG-N	OPC
1	100	40	양호	· 시멘트입자 재료분리
3	100	60	양호	· 시멘트입자 재료분리
5	100	85	양호	· 시멘트입자 재료분리 · 주입할렬발생
7	100	100	양호	· 시멘트입자 재료분리 · 주입할렬발생



주입압:1kg/cm² 주입압:3kg/cm²



주입압:5kg/cm² 주입압:7kg/cm²

(a) MSG-N을 주입한 시편



주입압:1kg/cm² 주입압:3kg/cm²



주입압:5kg/cm² 주입압:7kg/cm²

(b) OPC를 주입한 시편

사진 2. 가는모래층에서 압력변화에 의한 침투주입 시편 상태

(3) 복합지층에서의 주입재별 침투성 실험

표 8의 대상토 4종류를 그림 2의 중형 몰드(직경 15cm×높이 30cm)에 5kg/cm²의 주입압으로 실험을 실시하였다. 이때 주입재는 표 2의 5번 배합, 즉 W/C=200%의 호모겔 배합을 주입하였으며 MSG-N과 OPC를 각각 주입하였다. 이때 주입시편을 목시관측한 결과 MSG-N은 사진 3과 같았으며, OPC의 경우 거의 주입이 되지않아 고결된 시편을 만들 수 없었다.



사진 3. 복합지층에 대한 MSG-N형 주입시편

사진 3으로부터 MSG-N은 굵은모래, 중간모래 및 가는 모래 등 대부분의 사질층에서는 거의 100% 침투주입이 가능하지만 실트질 사질층에서는 주입관 주변에만 일부 주입되어 고결된 것을 확인할 수 있었다. 여기서, OPC에 대해서도 동일한 조건으로 시험을 실시하였지만 사진 3과 유사한 고결체를 얻을 수 없었다.

(4) 대형 토조실험을 이용한 침투성 실험

표 8의 대상토 중에서 가는모래를 그림 3의 대형 몰드(직경 40cm×높이 60cm)에 3kg/cm²의 주입압으로 실험을 실시하였다. 이때 주입재는 표 2의 3번 배합, 즉 W/C=100%의 호모겔 배합을 스트레이너 주변에 만들어진 직경 2mm의 125개 구멍을 통해서 MSG-N과 OPC를 각각 주입하였다. 이때 주입시편을 목시관측한 결과 MSG-N은 사진 4와 같이 주입되었으며, OPC의 경우 사진 5와 같았다.



사진 4. 대형몰드에 MSG-N을 주입한 후 고결체

사진 4로부터 MSG-N은 가는모래층에서 100% 완벽하게 주입되어 양호한 고결체를 얻을 수 있었다. 특히, 대형 주입몰드는 현장의 주입장치와 유사한 주입과장을 재현시킬 수 있었기 때문에 현장에서도 이와 같은 주입성능이 양호하게 재현될 수 있을 것으로 추정된다.



(a) 주입 후 고결체



(b) 주입스트레이너와
시멘트 페이스트 케이크

사진 5. 대형물드에 OPC를 주입한 후 미고결체

사진 5로부터 OPC는 가는모래층에서 거의 주입되지 않아 고결체를 얻을 수 없었으며, 스트레이너 주변에 시멘트 페이스트 케이크가 형성되었다. 이때 시멘트페이스트 케이크가 형성되는 것은 주입초기에 시멘트 중의 굵은 입자가 주입경로를 가로막아 뒤따라오는 미세한 시멘트 입자조차 더 이상 주입되지 못하게 장애물의 역할을 한다고 판단된다.

5. MSG-N 주입공사 설계사양

본 연구는 주입재 자체의 원료특성, 호모겔 강도, 밀크 페이스트 강도 및 주입재의 침투특성을 대상으로 실험한 결과를 종합적으로 분석하였으며, 이들 실험 결과 분석을 기초로 대상지반의 특성에 따른 적정 주입재의 선정 및 시공조건을 도출하는 등 주입공사 설계사양을 제시코자 한다.

5.1 실험항목별 실험결과 분석

실험 항목별로 실험결과를 분석한 주요 특성은 다음과 같다.

(1) 주입재의 원료 특성

- 물리성능 평가를 통해서 MSG-N은 OPC에 비해서 입도가 미세하기 때문에 강도발현이 1.5배 정도 크게 발현되는 것으로 나타났다(표 5 참조).
- 입도분석기나 전자현미경 사진(SEM)을 통해서 분석된 입도특성은 OPC의 최대입경이 $60\mu\text{m}$ 정도인데 비해서 MSG-N은 $10\mu\text{m}$ 정도로 OPC의 6분의 1정도로 미세하기 때문에 침투성이 우수할 것으로 추정된다(표 6, 그림 4 및 사진 1 참조).
- 굵은 모래, 중간 모래 및 가는 모래 등 사질층과 실트질 모래층에 대해서 MSG-N과 OPC를 주입하는 경우를 가정하여 주입비(groutability ratio)를 검토한 결과 MSG-N은 모든 사질층에서 완전한 침투주입이 가능하고, 실트질 모래층에 대해서도 어느 정도 침투주입이 가능한 것으로 평가되었지만, OPC는 굵은 모래층에 대해서조차 침투주입이 불가능한 것으로 평가되었다(표 6, 표 8 및 표 9 참조).

(2) 호모겔 강도

- MSG-N의 호모겔 강도는 OPC에 비해서 1.5배 이상 크게 발현되었으며, MSG-N을 주입재료 사용하는 경우 지반보강에도 유리할 것으로 판단된다(그림 5 및 그림 6 참조).
- 일반적으로 C.I.P 배면 그라우팅과 같이 차수목적의 주

입공사에 필요한 일축압축강도는 1일 재령에 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 발현되면 충분한 것으로 알려져 있으며, 이 조건을 만족하면서 경제적인 측면을 고려한다면 물/시멘트비 200% 수준으로 배합하는 것이 적정할 것으로 판단된다(그림 5 및 그림 6 참조).

(3) 밀크 페이스트 강도

- MSG-N의 밀크 페이스트 강도는 호모겔 강도에서와 마찬가지로 OPC에 비해서 1.5배 이상 크게 발현되었으며, MSG-N을 주입재료 사용하는 경우 지반보강에도 유리할 것으로 판단된다(그림 7 및 그림 8 참조).
- 일반적으로 강관다단 그라우팅 공사 등과 같이 지반보강목적의 주입공사에 필요한 일축압축강도는 7일재령에 $30\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 발현되면 충분한 것으로 알려져 있으며, 이 조건을 만족하면서 경제적인 측면을 고려한다면 물/시멘트비 100% 수준으로 배합하는 것이 적정할 것으로 판단된다(그림 7 및 그림 8 참조).

(4) 호모겔 및 밀크 페이스트 강도의 재령별 비교

- 강관 또는 FRP 다단보강 그라우팅에 적용되는 일반적인 표준배합에 대해서 호모겔과 밀크 페이스트 강도발현율을 재령별 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

주입재	물/시멘트비 (W/C ; %)	재령별 일축압축강도(kg/cm^2)				
		1일	3일	7일	14일	28일
MSG-N	호모겔 B액 (100%)	75	86	118	128	151
	밀크현탁액 (75%)	27	73	90	142	288
OPC	호모겔 B액 (100%)	35	46	57	71	92
	밀크현탁액 (75%)	15	44	65	103	151

터널굴착의 보조공법으로 적용되고 있는 강관 또는 FRP 보강 그라우팅에서 종전의 보통시멘트를 사용하는 Milk공법, LW공법 및 SGR공법을 적용한 경우 굴착작업에 필요한 호모겔 강도가 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 발현되면 충분한 것으로 평가되고 있다. 그러나, 안전을 위해서 실험실적 호모겔 강도를 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 볼 때 MSG-N을 사용하는 경우 3일 재령에서 목표 강도가 발현되는 반면, OPC를 사용하면 7일 재령에서 목표 강도가 발현된다.

(5) 침투성

- 규산소다 회석액인 A액과 시멘트 현탁액인 B액을 1:1로 혼합한 주입액을 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력으로 주입한 결과 MSG-N은 모든 사질층에서 100% 주입되고 실트질 모래층에서도 40% 정도 주입된 반면, OPC는 굵은 모래 사질층에서만 70% 정도 주입되고 중간 모래층보다 미세한 지층에서는 주입효과가 현저히 떨어지는 것으로 확인되었다(표 10 참조).
- 가는 모래층을 대상으로 주입압력을 1, 3, 5, $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 변화시켜 가면서 주입시험을 실시한 결과 MSG-N은 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 저압에서도 시멘트 입자가 전혀 재료분리가 되지 않고 균질하게 주입이 완료된 되었다.(표 11, 사진 2-a). 그러나, OPC의 경우는 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 고압으로 주입해야만 100% 침투주입이 가능하였으며, 침투된 부분도 규산소다 회석액과 시멘트 현탁액의 용액부분만 침투되고 시멘트 입자는 재료분리되어 상부에 페이스트 형태로 남아 있는 것이 뚜렷하게 관측되었다.(표 15, 사진 2-b). 한편, 이와 같이 고압으로 주입하는 경우 주입압에 의한 모형토조내에서 할렬이 발생하였으며 이와 같은 할렬 현상은 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 주입압에서부터 관측되었다(표 11, 사진 2-b).
- 굵은 모래, 중간 모래, 가는 모래 및 실트질 모래를 조합한 복합지층의 모형토조를 만들어 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 주입압으로 시멘트 현탁액을 스트레이너로 주입한 결과 MSG-N은 주입고결체가 형성되었지만 OPC의 경우는 주입고결체를 만들 수 없었다. MSG-N은 사질층에서는 양호하게 침투주입이 되었지만 실트질 사질층에서는 스트레이너 주변에만 일부 주입되었다(사진 3 참조).
- 가는 모래층만을 대상으로 직경 40cm, 높이 60cm의 대형 모형토조를 만들어 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 주입압으로 물시멘트비 100%의 현탁액을 주입한 결과 MSG-N은 거의 완벽하게 주입되어 고결체가 형성된 반면, OPC는 스트레이너 주변에만 일부 침투되어 고결되었다(사진 4, 5 참조).

5.2 고품질 그라우팅 설계사양 제안

4.1의 실험결과를 토대로 신뢰도가 높은 균질한 고품질의 그라우팅에 대한 설계 사양을 다음과 같이 제시한다.

(1) 적용범위

균질한 차수 및 지반보강을 목적으로 하는 그라우팅에서는 OPC를 기본으로 사용하는 종래의 공법들에 비해서 MSG공법에서와 같이 침투성이 우수한 초미립자계 주입재를 사용해야 한다.

(2) 차수 및 지반보강을 위한 가시설용 그라우팅 표준배합

OPC를 사용하는 종전의 밀크공법, LW공법의 표준배합에서 경화제인 시멘트현탁액만 MSG현탁액으로 대체해서 사용하면된다. 이 경우 MSG현탁액은 급결용과 완결용이 따로 구분되어 있기 때문에 SGR공법에서와 같이 복합주입공법의 시공효과를 간단하게 발휘할 수 있다.

(3) FRP 또는 강관다단 그라우팅의 표준배합

3일 재령에서 5배 이상 굴착에 필요한 강도(50kg/cm² 이상)가 조기에 발현되는 MSG공법의 표준배합을 다음과 같이 제안한다.

• 1.0shot 공정 그라우팅 표준배합

배합비 (W/C ; wt%)	재료량		표준용적
	MSG-N[C]	물[W]	
75%	927kg	695kg	1000 ℓ

• 1.5shot 공정 그라우팅 표준배합

재료량						표준용적
A액			B액			
규산소다	물	용적	MSG-N	물	용적	
200 ℓ	300 ℓ	500 ℓ	376kg	376kg	500 ℓ	1000 ℓ

(4) 대상토질 및 주입재료별 주입한계

대상토질별 침투성 시험결과를 종합하여 MSG-N과 OPC를 사용하는 경우의 침투주입 한계를 다음과 같이 제안한다.

대상토 주입재	자갈층	모래층			실트질 모래층
		Coarse	Medium	Fine	
MSG-N					
OPC					
토립자 입경(mm)		2	0.5	0.25	0.074
투수계수 (cm/sec)		100	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³ 10 ⁻⁴

즉, MSG-N은 투수계수가 a×10⁻³~10⁻⁴cm/sec의 실트질 모래층까지 침투주입이 가능한 반면, OPC의 침투주입 한계는 a×100~10⁻¹cm/sec의 자갈섞인 모래층 정도까지로 판단된다.

(5) 대상토질 및 주입재료별 주입압력 선정

MSG-N과 OPC를 사용하는 경우 대상토질별로 지반 내에서 할렬이 발생하지 않고 침투주입이 원활하게 시공될 수 있는 적절한 주입압력을 다음과 같이 제안한다.

주입재	굵은 모래	중간 모래	가는 모래	실트질 모래
MSG-N	1kg/cm ² 침투주입	2kg/cm ² 침투주입	3kg/cm ² 침투주입	5kg/cm ² 이하 침투주입
OPC	5kg/cm ² 이하 침투주입	7kg/cm ² 이하 할렬주입	10kg/cm ² 이하 할렬주입	10kg/cm ² 이상 할렬주입

6. 결 언

본 실험연구 결과로부터 사질지반 및 실트질 사질지반에서 효과적인 그라우팅을 시공하기 위해서는 MSG공법 주입재와 같이 초미립자계 주입재를 적용하는 것이 필수적이라고 판단된다.

또한, 실험결과에 의해서 초미립자계 주입재를 사용하는 경우 지반의 종류에 따라서 적절한 주입압력을 제시하였으므로 설계·시공기술자들에게 약액주입 지침자료가 될 것으로 기대된다.

(접수일자 : 2002. 11. 4)

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), 건설공사의 안정시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구 -마이크로시멘트 및 실리카졸을 중심으로-, 건설교통부 '95 연구개발사업 최종보고서, pp. 336~340.
2. 건설교통부(2001), 마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적그라우팅 시스템 개발 연구, 2000년 산·학·연 공동연구개발사업 제 1차년도 연구보고서, pp. 85~100.
3. 김진춘(1999), 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교 대학원, pp. 30~80.
4. 천병식(1998), 최신지반주입-이론과 실제-, 원기술, pp. 61~73, 107~120.
5. 천병식 등(2001), 마이크로 복합실리카 그라우트재의 공학적 특성에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 2, No.1, pp. 101~113.
6. G.A.Kravertz(1958), Cement and Clay Grouting of Foundations: The Use of Clay in Pressure of Grouting, P. of ASCE, J. of SMFE, SMI, pp. 1546-1~30.
7. Mitchell, J. K.(1970), In Place Treatment of Foundation Soils, P. of ASCE, J. of SMFE, Vol. 96, SMI, pp. 73~110.