터널 보강용 고성능 침투 주입재 연구개발
Development of New Micro-Cement Grouting Materials for Tunneling

임유진[1], Yujin Lim, 이강호[2], KangHo Lee, 김형겸[3], Hyung-Kyum Kim, 홍창수[4], ChangSoo Hong, 안준희[5], Joon-Hee Ahn

[1] 배재대학교 공과대학 건설환경공학과 부교수, Assoc. Prof., Dept. of Civil Engg., PaiChai Univ.
[2] 삼성물산 건설부문 품질경영본부 터널전문위원, Tunnel Tech. Advisor, Quality Mang. Div., Samsung Eng. & Const. Corp.
[3] 지산특수토건(주) 대표이사, President, Ji San Specialty Construction Co., Ltd., .
[4] 삼성물산 건설부문 기술본부 선임, Senior Engineer, E&D Team, Samsung Eng. & Const. Corp.
[5] 지산특수토건(주) 기술주임, Engineer, Ji San Specialty Construction Co., Ltd.,

개요(SYNOPSIS) : A new grouting material named 3S is developed that can be used effectively for reinforcing cut surface of weathered rock in processing of tunneling. The new material is composed of mostly micro slag cement and general Portland cement, but the material is foundered again upto 8,000 cm^2/g of specific area so that it can be easily infiltrated in to the ground. For verifying technical and engineering quality of the material several laboratory tests with specially designed test apparatus were performed including compression tests, infiltration tests and resonant column tests. It was verified that the newly developed grouting material at early age of 1 or 3 days generates 200~1500% higher compressive strength and 400~560% larger elastic modulus than those of the LW(LW-1) or micro-cement(LW-2) grouting materials in the market. In addition, the new 3S grouting material could be so easily infiltrated into the model ground in the lab tests that it produces 4 times larger grouted roots in average compared to the usual water glass type grouting material(LW-1). Thus, it can be said that the newly developed grouting material can effectively prevent inflow water into tunnel compared to LW grouting materials.

주요어(Key words) : 주입재, 압축강도, 탄성계수, 침투효과

1. 서 론

터널 공사시 강관다단 등의 지반 보강목적으로 사용되는 그라우팅 공법은 그라우트 재료의 물성, 주입압(p) 및 주입 대상지반의 특성(불연속면 발생 패턴, 풍화도, 입도분포)에 따라 주입효과 즉, 지반보강의 효과가 결정된다. 특히, 최근 초미립자 시멘트를 이용한 주입재가 다수 개발되어 시공되어왔으나 풍화가 상당히 진행되거나 불연속면이 심하게 발달된 풍화암~풍화토 경계에 있는 지반에서의 보강을 위해서는 보다 큰 압축강도 및 강성을 지닌 주입재의 개발 필요성이 대두되었다. 이러한 풍화암 영역에서는 균열, 절리 등의 불연속면이 발달되어 있을 뿐만 아니라 풍화가 크게 진행됨에 따라 밀도가 암반에 비하여 치밀하지 못하여(공극의 발달) 연암 및 경암 등에 비해 상대적으로 느슨한 형태를 갖는 특징을 보인다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 지반의 보강에 적합한 초미립자 시멘트 계열의 주입재(3S-1호)를 개발하였으며 실내시험을 통하여 새롭게 개발된 초미립자 시멘트 계열 주입재의 주입효과과 차수효과를 분석하고 재령에 따른 강도 및 강성의 발현특성을 관찰, 분석하였다.

2. 3S 초미립자 시멘트 주입재의 특성

2.1 사용재료의 특성

2.1.1 3S 초미립자 시멘트의 화학적 특성

본 연구에서 개발된 3S 주입재의 화학적 특성은 표 1.과 같다. 3S 주입재는 슬래그(slag)를 분쇄하여 만든 슬래그 시멘트를, 보통포틀랜드 시멘트 및 미량의 혼화제와 혼합, 재분쇄 및 재가공하여 초미립자형태의 시멘트로 만든 것으로서 일반적으로 시멘트계 그라우트재는 제조방법, 혼합물의 종류 및 배합비율에 따라서 물리화학적 특성이 달라지는 것으로 알려져 있다.

표 1. 3S 주입재와 일반 포틀랜드 시멘트의 화학성분 구성비 비교 (단위, %)

	3S	OPC	시험방법
SiO_2	29.8	22	KS L 5120
Al_2O_3	8.27	6	
Fe_2O_3	1.50	2.5	
CaO	52.6	63	
MgO	3.3	2.6	
SO_3	1.9	2.0	
Ig. loss	0.7	3% 이하	
불용분잔해분	0.5	0.7	
비중(G_s)	3.31	3.15	KS A 0602

2.1.2 3S 초미립자 시멘트의 물리적 특성

초미립자 시멘트를 사용한 주입재에 대한 별도의 한국산업규격(KS)은 규정되어 있지 않으나 비중, 비표면적 및 길모아응결 등의 물리적 특성을 일반 포틀랜드 시멘트와 비교하면 표 2.와 같다. 연구 개발된 본 주입재에 사용되는 주재는 슬래그 미분말과 일반 포틀랜드 시멘트를 혼합, 재분쇄한 것으로서 슬래그 미분말은 공정에 따라 비표면적이 7,000~10,000(cm^2/g)에 이르기도 하며 주입재의 고결후 내구성과 장기강도의 개선을 촉진한다.

표 2. 3S 주입재의 물리적 특성 비교

		3S	OPC	KS규격	시험방법
비중(G_s)		3.31	3.15	-	KS A 0602
비표면적(cm^2/g)		7,273	3,170	2,800이상	
길모아응결	w/c(%)	27	28.2	-	
	초결(분)	220	160	60이상	
	종결(시:분)	4:40	8:10	10이하	

2.1.3 3S 초미립자 시멘트의 입도특성

개발된 3S 주입재의 주입효과와 상대적인 강도 및 강성특성을 비교하기 위하여 선정된 보통포틀랜드 시멘트 (OPC)와 마이크로 시멘트는 상용으로 시중에서 쉽게 구할 수 있는 포대형 제품을 사용하였으며 OPC는 LW-1 주입재의 경화재로, 마이크로 시멘트는 LW-2 주입재의 경화재로 사용하였다. 주입재의 비교 시험에 사용된 각 주재(경화재)의 입도분포 특성은 표 3.과 같다. 특히, 3S 초미립자 시멘트의 평균입

경 4.2 μm는 비교 주입재에 사용된 일반 OPC의 평균입경 18.3 μm의 25% 이하로 매우 미세함을 알 수 있다.

표 3. 3S 초미립자 시멘트의 입도분포 특성 (누적통과율, 단위 : %)

입경(μm) / 시멘트	1	2	3	4	6	12	24	48	64	평균입경 (d_{50}, μm)
3S-1호	12.56	27.07	39.52	49.79	67.07	91.2	100	100	100	4.3
OPC	4.9	9.5	12.8	15.9	20.7	35.2	60.5	92.1	95.7	18.3
마이크로시멘트	3.1	7.3	15.2	27.3	50	73.9	100	100	100	6

2.1.4 기타 사용 재료의 특성

(1) 급결재의 특성

본 연구에서 개발하여 사용한 급결재는 합성실리카로서 3S 주입재를 위하여 특별히 제작된 액상형 제품이다. 본 제품의 화학적 구성성분은 표 4.와 같다.

표 4. 3S 주입재에 사용된 급결재의 화학적 특성

구성성분	SiO_2	Na_2O	Gs	n (몰비)	pH
구성비 (%)	28.33	8.70	1.375	3.36	12~13

주입재 LW-1 및 LW-2의 급결재로 사용된 규산소다3호는 시중에서 쉽게 구득되는 되는 것으로서 이산화규소(SiO_2)가 28~38%, 산화나트륨(Na_2O)이 약 9~10% 정도 혼합된 액상형의 제품이다.

(2) 주문진 표준사의 특성

샌드겔(sand gel) 및 주입시험 대상지반을 형성하기 위하여 주문진 표준사를 선택하였으며 재료특성은 표 5.와 같으며 세립질의 사질토임을 알 수 있다.

표 5. 주입대상토인 주문진 표준사의 재료 특성

비 중 (G_s)	입도분포	300 μm 통과분	투수계수 (k, cm/sec)	통일분류
2.6	300~600 μm	6% 이하	$3\sim4\times10^{-3}$	SM

(3) 3S 주입재용 혼화재

3S 주입재의 혼화재는 표 6.과 같은 성분으로 구성되었으며 비중(G_s)은 2.56, 분말도 6235 cm^2/g이었다.

표 6. 3S 주입재용 혼화재의 성분비

화학성분	CaO	SiO_2	SO_3	합계
함유량(%)	68.49	1.24	30.27	100

2.2 3S 사용 주입재의 배합비

최적 주입효과와 강도를 획득하기 위하여 결정된 제 1호 3S 초미립자 시멘트 사용 주입재의 최종 배합비와 비교 대상으로 선정된 LW-1(일반 OPC 사용) 및 LW-2(마이크로 시멘트 사용) 물유리계 주입재의 배합비는 표 7.과 같다. LW-1 및 LW-2 주입재 공히 규산3호를 급결재로 사용하였으며 3S-1호 주입재는

합성실리카 재료를 사용하였다. 3S 배합비는 공정목적에 맞도록 추가 조정될 예정이다.

표 7. 3S-1 초미립자 시멘트 사용 주입재의 구성비

주입재 구분	A 액 (200 liter)		B 액 (200 liter)			비고
	급결재 (liter)	물 (liter)	경화재 (kg)	혼화재 (kg)	물 (liter)	
3S-1호(초미립자 시멘트)	60	140	87	8.7 kg	168	합성 실리카
LW-1 배합 (OPC)	100	100	80	8 kg	175.2	규산 3호
LW-2 배합 (마이크로 시멘트)	100	100	86	주재에 혼입	172	규산 3호

3. 실내시험 및 결과분석

실내시험은 강도 및 강성 평가시험과 주입재의 침투효과를 검토하기 위한 침투시험 및 고결정도를 파악하기 위한 고결성 시험으로 구성되었다.

3.1 강도 및 강성 평가시험

개발된 주입재가 재령에 따라 발현하는 강도와 강성을 평가하기 위하여 큐빅형 몰드(5cm×5cm×5cm)와 원주형 몰드(D=10cm, H=20cm)를 사용하여 호모겔(homo-gel)형태의 공시체와 샌드겔(sand gel)형태의 공시체를 별도로 제작하였으며 각 3 시간후 탈형하여 양생수조(20° C)에서 양생하고 소정의 재령에서 압축강도 및 강성시험을 실시하였다(그림 1. 참조).

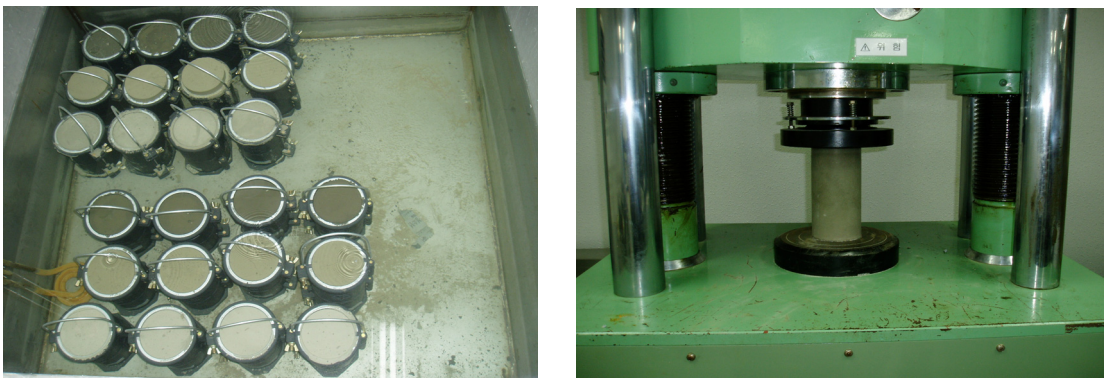

그림 1. 주입재 별 공시체의 양생 및 압축강도시험

3.1.1 재령별 호모겔 및 샌드겔 압축강도시험

개발된 공법은 1.5 shot 주입방법을 채용한다. 따라서 별도로 준비된 급결재와 경화재의 혼합 및 교반이 필요하므로 급결재인 A액과 경화재인 B액(혼화재 포함)을 부피비 1:1로 혼합하고 예상 겔 타임의 60%까지 교반한 직후 사전 준비된 몰드(원형 및 큐빅형)에서 양생되도록 하였으며 이에 따라 압축강도 측정시험에 의하여 지반 내 주입된 주입재의 재령에 따른 고화후 호모겔 고결강도 및 샌드겔 강도를 추정하였다. 샌드겔의 경우, 투입되는 경화재의 2.45배 무게비에 해당하는 주문진 표준사를 투입하여 샌드겔 시편을 제작하였다. 압축강도는 만능재하시험기를 이용하여 KS 규격에 따라 재령별로 구하였다.

원주형시편 및 큐빅형 시편을 이용하여 재령 1, 3, 7, 및 28일에 각 3개 시편의 평균 일축압축강도값을 구하였으며 그 결과를 표 8., 표 9. 및 그림 2와 그림 3에 정리하였다. 원주형 시편의 경우 3S-1호 주입재는 재령 1일에 이미 26.4 kgf/cm^{2}의 상대적으로 높은 압축강도를 조기 발현하여 초기 재령에서 3S-1 주입재의 강도발현 속도가 타 주입재에 비하여 매우 빠른 특성을 갖고 있음이 확인되었다. 개발된 3S-1호 주입재의 원주형 시편 호모겔 강도가 기존 LW-1 주입재의 호모겔 강도보다 재령 1일에서 15배 이상, 재령 3일에서 17.5 배 이상, 재령 7일에서 3.95배 이상 및 재령 28일에서 1.8 배 이상 강도발현이 큰 것으로 판명되었다. 또한 개발된 3S-1호 주입재의 원주형 시편 호모겔 강도가 마이크로 시멘트를 사용한 기존 LW-2 주입재의 호모겔 강도보다 재령 1일에서 200% 이상, 재령 3일에서 16% 이상, 재령 7일에서 32%배 이상 및 재령 28일에서 33% 이상 강도발현이 큰 것으로 판명되었다.

샌드겔 강도의 경우 3S-1주입재의 강도발현 속도와 그 크기가 타 주입재에 비하여 훨씬 커서 재령 1일에 35.0 kgf/cm^{2}에 이르렀으며 재령 28일에 61.4 kgf/cm^{2}에 도달하였다. 반면, 현장에서 통상사용하는 LW-1 주입재의 경우, 재령 1, 3일 등의 초기 재령에서 호모겔 강도와 거의 차이가 나지 않았으며 이후 강도발현이 진행됨을 확인 할 수 있었다. 아울러 마이크로 시멘트를 사용하는 LW-2 주입재의 경우, 재령 1일에 호모겔에 비하여 강도 발현속도가 확연히 개선되지 않는 특징을 보였으며 재령 3일 이후 강도증가가 확인되었다. 3S-1호 주입재를 사용한 샌드겔은 호모겔에 비하여 모든 재령에 걸쳐 31% ~ 60%의 압축강도 증가가 확인되어 실지반 주입시 풍화암편 및 풍화토와의 교반에 의해 더 큰 강도가 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

큐빅형 시편의 경우, 시편 크기의 감소영향과 작은 시편으로 인한 조기 양생효과로 인하여 원주형 시편에 비하여 모든 주입재에서 전반적으로 강도가 큼이 확인되었다. 원주형시편에서와 같이 큐빅형 시편에서도 3S-1호 주입재의 압축강도 발현속도와 그 크기 또한 타 주입재에 비하여 탁월하게 큰 것을 확인할 수 있었다. 3S-1호 주입재의 경우, 큐빅형 시편을 이용한 압축강도시험 결과가 원주형 시편을 이용한 압축시험에 비하여 보다 뚜렷한 강도증진 경향이 있음을 확인 할 수 있었다.

표 8. 원주형 시편의 호모겔 및 샌드겔 압축강도 측정값 재령별 변화추이 비교

구분 / 시험편종류	주입재 구분	재령별 일축압축 강도 (kgf/cm^2)			
		1일	3일	7일	28일
호모겔	3S-1호	26.4	29.9	35.2	39.3
	LW-1	1.7	1.7	8.9	21.8
	LW-2	12.8	25.7	26.6	29.5
샌드겔	3S-1호	35.0	39.2	56.3	61.4
	LW-1	1.8	1.9	26.2	32.2
	LW-2	11.7	32.2	34.4	39.6

표 9. 큐빅형 시편의 호모겔 및 샌드겔 압축강도 측정값의 재령별 변화추이 비교

구분 / 시험편종류	주입재 구분	재령별 일축압축 강도 (kgf/cm^2)			
		1일	3일	7일	28일
호모겔	3S-1호	26.8	35.8	45.8	66
	LW-1	2.4	7.6	9.8	28.2
	LW-2	9.7	22.2	35.4	44
샌드겔	3S-1호	36.4	44.2	46.6	63.6
	LW-1	2.5	8.9	31.2	40.6
	LW-2	17.8	37.4	39	47.8

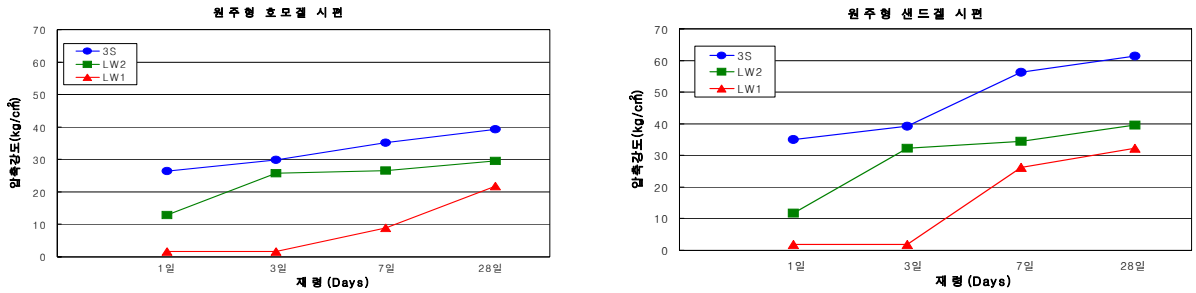

그림 2. 원주형 시편을 이용한 호모겔과 샌드겔 압축강도 측정값의 재령별 변화 추이

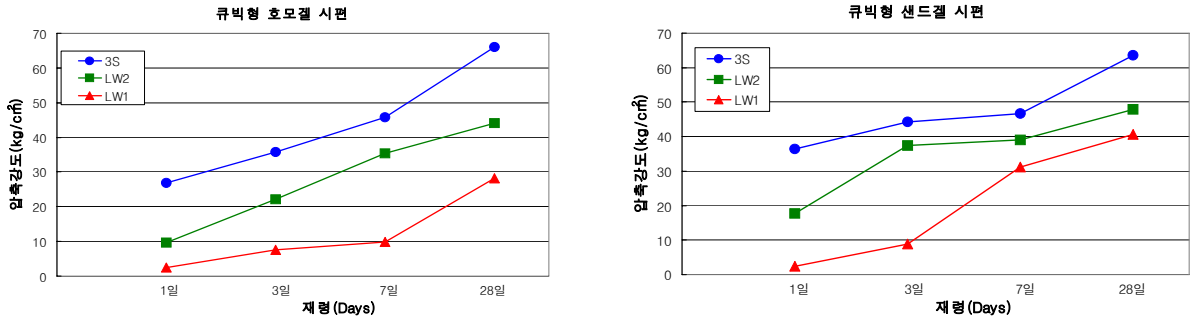

그림 3. 큐빅형 시편을 이용한 호모겔과 샌드겔 압축강도 측정값의 재령별 변화 추이

3.1.2 재령별 강성 평가시험

주입재의 조기 강성확보는 터널내공변위의 억제에 큰 효과를 발휘한다. 따라서 본 연구에서는 그림 4.와 같은 공진주시험(RCT; Resonant Column Test) 시스템을 구성하고 주입재별 재령에 따른 호모겔 및 샌드겔의 강성발현 추이를 원주형 시편을 이용하여 조사하였다. 공진시험은 가진을 위한 강제구슬 타격장치와 가속도계 및 데이터 수집장치(DAQ)로 구성된다. 공진주시험으로부터 각 시편의 1차모드에서의 공진주파수(f_r)(그림 10. 참조)를 구하고 재료의 밀도를 고려하면 압축파속도(v_c)를 획득할 수 있으므로 시편의 탄성계수(E)는 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다. 통상 터널 막장부의 굴착면을 천공한후 주입재를 주입하므로 고결된 주입재에 대한 구속압력(σ_3)을 무시하고 강제구슬(steel ball)에 의한 충격(가진)과 이로 인한 압축파의 전달만을 고려하였다.

$$v_c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{1}$$

여기서, v_c = 압축파속도, E = 시편재료의 탄성계수, ρ = 재료의 밀도.

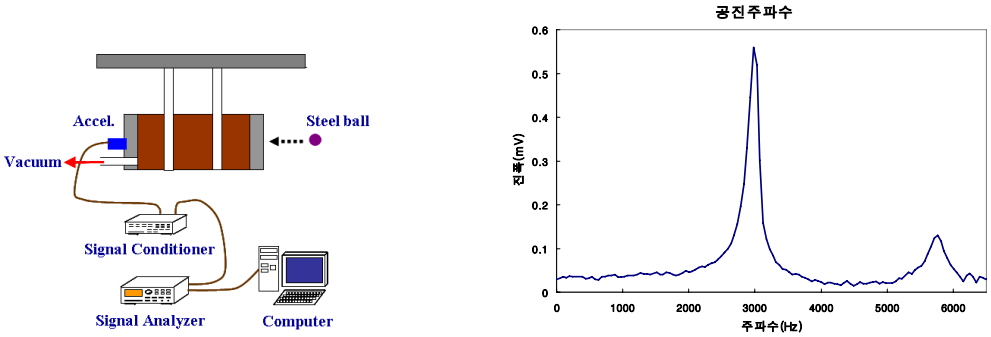

그림 4. 강성평가를 위한 공진주시험 시스템의 구성

표 19.과 그림 5.는 재령에 따른 공시체의 탄성계수 변화를 정리한 것이다. 공진주 시험을 이용한 탄성계수 측정은 원주형 시편을 이용하여 해당 재령에서 각각 이루어 졌으며 일반 LW-1 주입재의 경우 재령 3일까지는 강도측정이 가능함에도 불구하고 탄성계수의 측정이 불가능 하였다. 이는 시편 내부의 주입재가 탄성을 충분히 발현할 만큼의 굳기(stiffness)가 확보되지 않았음을 의미하며 여전히 액상(liquid)을 띠고 있음을 알 수 있다. 따라서 불연속면 또는 연약대를 따라 맥상으로 주입되는 LW-1 주입재는 초기 재령에서 강성의 확보가 상당히 어려움을 확인할 수 있었다. 아울러 3S-1호 주입재의 탄성계수는 재령 1일에 이미 760 MPa (호모겔) 및 1484 MPa (샌드겔)에 도달하여 마이크로 시멘트를 사용하는 LW-2 주입재에 비하여 조기에 뛰어난 강성확보가 가능함을 확인(약 4배 ~ 5.6배)하였으며 재령 28일에는 약 1.5배(샌드겔) ~ 2배(호모겔)에 이르는 큰 강성이 확보됨을 확인하였다.

표 10. 공진주 시험에 의한 호모겔 및 샌드겔의 탄성계수 측정값의 재령별 변화추이 비교

구분 / 시험편종류	주입재 구분	재령별 탄성계수 변화 (MPa)			
		1일	3일	7일	28일
호모겔	3S-1호	760	980	1375	1642
	LW-1	-	-	104	242
	LW-2	186	266	782	824
샌드겔	3S-1호	1484	1690	1725	1895
	LW-1	-	-	728	821
	LW-2	265	901	1110	1245

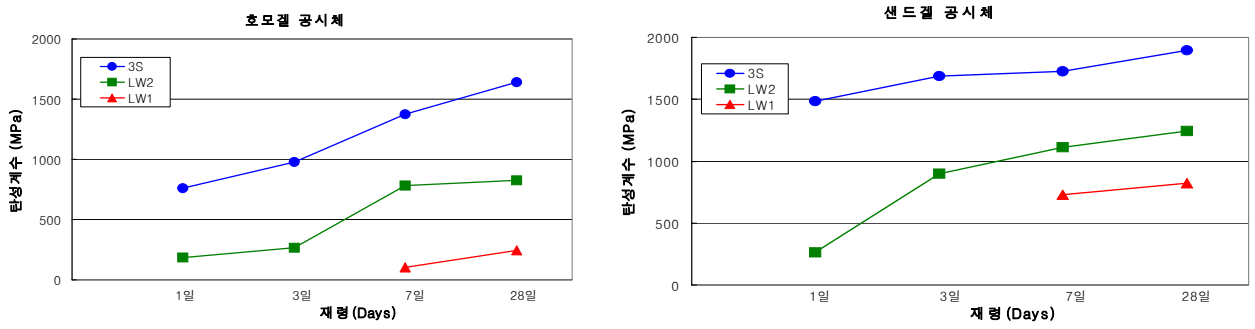

그림 5. 주입재별 호모겔과 샌드겔의 탄성계수 측정값의 재령에 따른 변화 추이

3.2 주입시험

주입재의 주입특성을 파악하기 위하여 실내 침투시험(소형침투시험, 중형침투시험)을 실시하였으며 주입에 따른 침투정도와 고결체의 형성크기를 파악하기 위한 고결성 시험을 실시하였다. 중형 침투시험을 완료한 후 형성된 고결 모형지반에 대하여 투수시험을 실시하여 주입재의 주입과 고결에 따른 차수효과(투수계수 감소)를 검토하였다.

3.2.1 소형 침투시험

그림 6.과 같은 소형의 침투시험기(원통크기 내경 D=10cm, 높이 H=20cm, 두께 t = 1cm)를 제작하고 투명한 원통내에 주문진 표준사로 모형지반을 조성하고 일정량의 준비된 주입재를 투입한 후 3.0 kgf/cm^{2}의 공기압을 가하여 침투시험을 실시하였다. 주입재는 표 7.과 같은 배합비로 급결재(A액) 및 경화재(B액)를 준비하고 이를 교반 후 침투시험기에 넣고 Plexiglass로 제작된 투명한 원통을 통해 침투된 주입재의 침투깊이를 목측으로 관찰하여 침투율을 산정하였다. 개발된 3S-1 주입재의 침투효율을 비교평가 하기위하여 LW-1 및 LW-2 주입재 또한 동일한 방법으로 침투시험을 실시하였다. 침투율 산정계산식은 다음과 같다.

$$H_f = \frac{H_g}{H_S} \times 100 \ \ (\%) \tag{2}$$

여기서, H_f = 침투율(%), H_g = 주입재 침투깊이(cm), H_s = 모형지반깊이(cm).

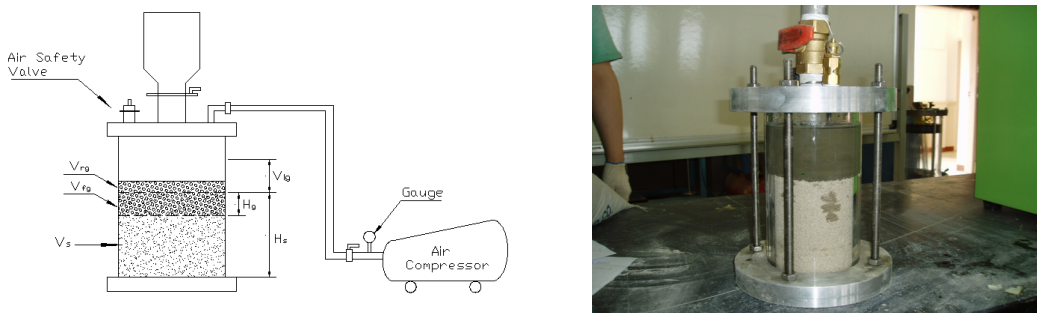

그림 6. 소형 침투시험기의 개략도 및 침투시험 장면

입상 그라우트 재료가 지반 내에 침투하기 위하여 요구되는 주입재 침투능(groutability ratio)에 대한 최소기준은 Mitchell(1970)에 의하여 아래 식(3) 및 식(4)와 같이 토사와 암반에 대하여 별도로 제시된 바 있다.

$$\text{토사} : \ \frac{(D_{10})_{soil}}{(D_{85})_{grout}} > 25 \tag{3}$$

$$\text{암반} : \ \frac{D_{fissure}}{(D_{\max})_{grout}} > 3 \tag{4}$$

주문진 표준사를 토사로 간주하고 각 주입재의 침투능을 평가하면 3S-1호 및 LW-2 주입재는 Mitchell (1970)의 침투능 요구조건을 만족하였으나 LW-1 주입재는 만족하지 못하였다. 각 주입재를 35초 동안 3 kgf/cm^{2}의 압력으로 주입시 3S-1호 주입재와 LW-2는 100% 침투율을 보였으나 LW-1 주입재는 평균 88.5

%의 침투율을 보여 상대적 주입효과가 떨어짐을 확인하였다. 소형침투시험은 주입재의 침투능을 평가하는데 한계가 있으므로 중형 및 대형 침투시험을 실시하였다.

3.2.2 중형 및 대형 침투시험

급결재(A액)와 경화재(B액)의 효율적인 교반을 위하여 제작된 교반/압송기와 중형 및 대형침투시험장치의 개요도는 그림 7.과 같다. 급결재 및 경화재 교반/압송기는 재료를 교반하는 공기모터(air motor)와 경화재 및 급결재를 담아서 교반하는 탱크 및 압력유지장치(regulator)로 구성되었으며 급결재와 경화재는 각각의 배합탱크에서 먼저 충분히 배합된 후 소정의 압력하에 유도관을 따라 Y자 합류관에 도달(1.5 shot 방식)되어 혼합된 직후 조성된 모형지반에 주입되도록 하였다. 이때 주입재는 중형침투시험의 경우 토조 상단부에서 strainer(주입관) 없이 직접 침투되도록 하였으며 대형 침투시험(고결성 시험)의 경우 strainer를 이용하여 침투되도록 하였다. 주입재의 모형지반 내 주입에 사용되는 strainer는 길이 l= 750mm, 직경 15mm, 두께 t= 1.25mm의 원통형 스테인리스 스틸 강관으로서 직경 d = 2mm의 소구경 출수구가 70mm 간격으로 각 4개씩 총 36개 뚫리도록 하였다(그림 8.).

중형 침투시험용 모형지반 몰드는 내경 D= 22.8 cm, 높이 h= 50.0 cm, 두께 t= 1.0 cm 의 투명 강화 아크릴을 사용하였으며 대형 침투시험용(고결성시험) 모형지반 몰드는 직경(내경) D= 500 mm, 높이 h= 800 mm, 두께 t= 5 mm의 강제 원통형 조립박스를 사용하였다. 모형지반은 공히 주문진 표준사를 사용하여 몰드 내에서 진동다짐방법을 사용하여 조성하였다. 그림 9(a)는 중형침투시험장치를 이용한 침투시험 장면이며 그림 9(b)는 대형 침투시험장치를 이용한 침투시험장면을 각각 도시한 것이다. 그림 10.은 대형침투시험에 의해 형성된 고결체 크기를 비교 도시한 것으로서 3S-1 주입재는 준비된 A액(급결재)와 B액(경화재)을 30초 동안 각 20 liter를 모두 소진하여 침투되었으나 LW-1 주입재는 일부 주입후 더 이상의 주입이 불가능하였다. 형성된 3S-1 고결체의 고결후 무게는 97.2 kgf 이었으며 LW-1 고결체의 고결후 무게는 53.2 kgf(주입부 막힘에 의한 판상형 케이크 포함)이었다. 이는 3S주입재가 지반내에서 물유리계 주입재에 비하여 보다 밀실한 고결체를 형성 할 수 있음을 의미한다.

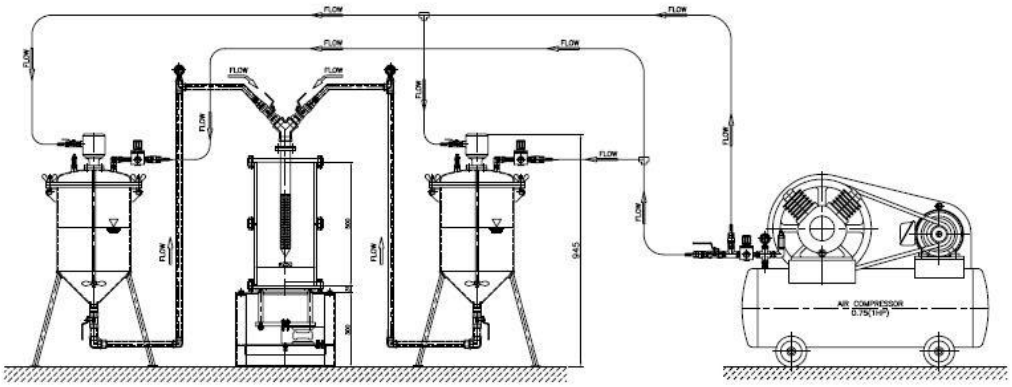

그림 7. 교반기와 대형 침투시험 장치 개요도

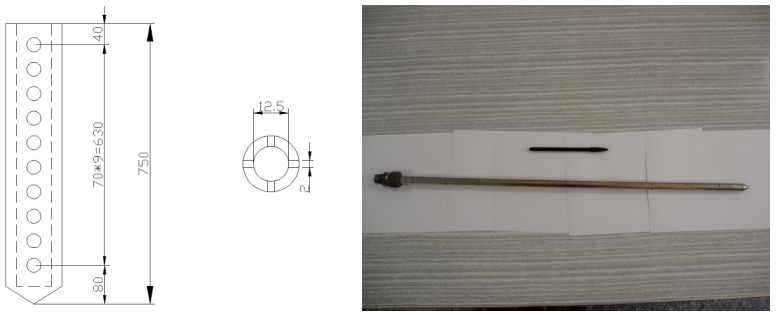

그림 8. 주입 스트레이너의 설계 개요도 및 실물 사진

그림 9. 3S-1 주입재에 대한 중형 침투성 시험 및 대형 침투(고결성) 시험

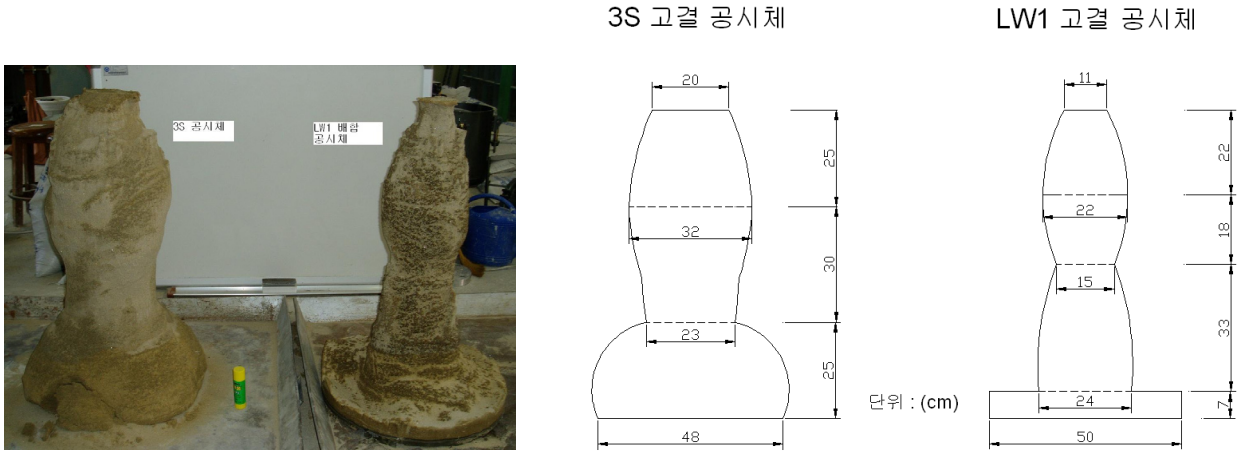

그림 10. 대형침투시험에 의한 주입재의 고결후 고결체 크기 비교

대형침투시험에 의한 고결체 형성시 LW-1 및 3S주입재 모두 2단계 이상의 단계별 고결체가 형성되었음을 확인하였다. 이는 초기 주입재 침투시 주입재가 표준사와 혼입되며 먼저 고결이 시작되고 이에 따라 후에 주입되는 주입재가 별도의 구근을 형성하기 때문으로 판단된다. 1단계 주입 고결체의 크기를 비교하면 LW-1 주입재 고결체가 약 9074 cm^3의 체적이었고 2단계 주입 고결체가 약 8390 cm^3의 체적을 형성하였으며 3단계 고결체는 13737 cm^3의 판상형의 케이크를 형성하였다. 판상형 케이크는 LW-1 고결체에서만 관측되었다. 이는 침투불량으로 인한 주입부 막힘에 의해 형성된 것으로 판단된다. 또한 1단계 구근을 형성한 3S 주입재의 고결체의 크기는 약 29186 cm^3의 체적이었고 2단계 주입시 고결체가 약 41526 cm^3의 체적을 형성하였다. 따라서 주입부 막힘에 의해 형성된 LW-1 주입재의 판상형 고결체 부분을 제외하고 고려할 때에 3S 주입재가 LW-1 주입재에 비하여 약 4 배의 충전도를 갖게 됨을 확인 할 수 있었다. 이는 3S 주입재가 LW-1 주입재에 비하여 동일 압력하에 체적기준으로 4 배의 지반 보강이 가능함을 의미한다.

3.2.3 투수시험

중형 침투시험에 의해 모형지반 내에 고결체가 형성됨에 따라 해당 주입재의 차수효과를 검토할 수 있다. 차수효과 검증방법은 중형 침투시험에 의해 고결된 고결체시편을 투수시험 장치(그림 11. 참조)에 연결한 후 변수위 시험방법에 따라 투수계수 변화를 측정하였다. 투수시험장치는 주입장치와 함께 구성되어 주입재 주입에 따른 투수계수 저감효과를 직접 검증할 수 있도록 하였으며 정수위 시험과 변수위

시험을 한 시스템에서 실시할 수 있도록 하였다. 따라서 주문진 표준사의 투수계수는 정수위 시험으로 실시하였고 주입재의 주입에 따른 투수계수 감소효과 검토는 변수위 시험법을 이용하였다.

고결체 형성에 따른 공시체의 투수계수는 약 8.0×10^{-4}~1.3×10^{-3}(cm/sec)로 측정되어 초기 주문진 표준사로 구성된 공시체 투수계수의 약 25 ~ 43 % 수준으로 떨어져 차수효과가 큼을 확인하였다. 다만, 주입재가 모형 지반몰드 내에 그림 10.과 같이 맥상으로 주입되면서 표준사와 혼합되어 주입재 케이크와 원주형 고결체를 형성함으로서, 측정된 투수계수는 형성된 고결체 바깥 순 모래부분에서의 투수(k_s)와 모래와 주입재의 복합체를 관통하는 투수($k_{g\text{-}s}$)로 인해 이 둘의 복합투수계수인 평균투수계수(k_{avg})로 판정되었다. 따라서 표준사와의 혼합체인 주입재 고결부분 만의 투수계수($k_{g\text{-}s}$)는 별도로 정확히 산정하기 곤란하나 평균값에 비하여 매우 작을 것으로 판단된다.

따라서 3.2.3절에서 확인된 고결체 구근의 크기(반경)를 주입재의 침투장 I로 가정하고 주입재의 고결체 형성에 따라 감소된 지반의 투수계수를 k_g라 한다면 터널 굴착면에 대해 단위면적당/단위시간당 입수되는 물의 양이 감소되는 정도를 아래 식을 이용하여 계산, 비교해 볼 수 있다. 주입재의 침투반경(I)이 증가되고 주입재의 침투에 따른 투수계수(k_g)가 감소됨에 따라 터널 내부로의 유입수가 감소되므로 3S 주입재는 기존 LW-1 주입재에 비하여 터널 내부로의 유입수 차단과 감소에 매우 효과적일 것으로 판단된다.

심부터널 :
$$q=\frac{2\cdot\pi\cdot k_g\cdot H}{\ln(\frac{R_t+I}{R_t})+\frac{k_g}{k}\cdot(\frac{2\cdot H}{R_t+I})} \tag{5}$$

천부터널 :
$$q=\frac{2\cdot\pi\cdot k_g\cdot(H-R_t)}{\ln(\frac{R_t+I}{R_t})} \tag{6}$$

여기서, R_t = 터널 반경, H = 수압, k = 지반의 주입재 주입전 투수계수

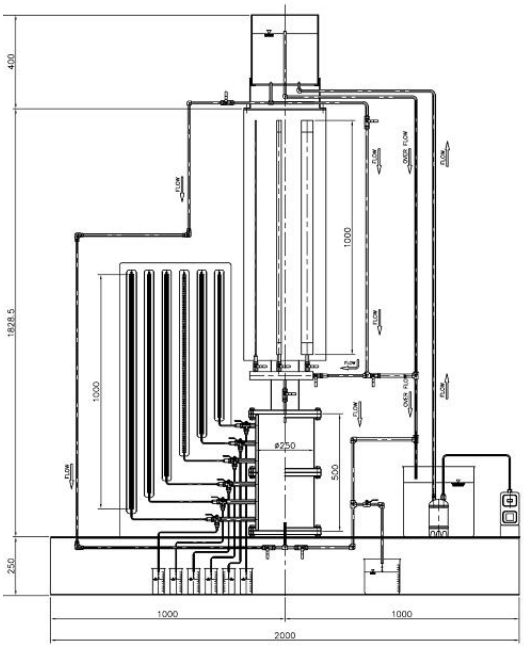

그림 11. 투수시험장치 개요도

4. 결 론

미분말 슬래그시멘트와 일반 포틀랜드 시멘트 및 합성실리카 계열의 혼화재를 일정비율로 혼합, 재가공 분쇄하여 초미립자시멘트 계열의 3S 경화재를 개발하였다. 본 3S 경화재와 급결재를 혼합하여 조성하는 주입재의 침투성, 압축강도 및 강성 등 공학적, 물리적 특성을 파악하기 위하여 실내에서 관련시험을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실내 일축압축강도시험 결과 3S 주입재의 초기 재령(1~3일)에서의 고결후 압축강도가 물유리계인 LW-1 주입재 및 마이크로시멘트 계열의 LW-2 주입재에 비하여 약 200(2배)~1500%(15배) 더 크게 발현됨을 확인하였다.

2) 공진주시험을 이용한 탄성계수 측정시험에서 초기 재령(1일~3일)에서의 고결후 탄성계수가 물유리계인 LW-1 주입재 및 마이크로시멘트 계열의 LW-2 주입재에 비하여 약 400~560% 더 크게 발생됨을 확인하였다.

3) 중형침투시험 후 형성된 고결체 포함 모형지반에 대한 투수시험 결과, 3S 주입재를 사용할 경우 모형지반의 투수계수는 약 8.0×10^{-4}~1.3×10^{-3}(cm/sec)로 측정되어 초기 주문진 표준사로 구성된 공시체 투수계수의 약 25 ~ 43 % 수준으로 떨어져 차수효과가 매우 큼을 확인하였다. 아울러 측정된 투수계수는 표준사와 주입재가 혼합된 고결체와 순수 표준사의 평균투수계수로서 고결체 만의 투수계수는 이에 비하여 더 크게 떨어질 것으로 판단되어 유효한 차수기능 또한 갖추고 있음을 확인하였다.

4) 대형 침투시험장치를 이용한 침투시험에서 고결체의 크기비교를 통하여 주입재의 침투효과와 고결체 충전도를 파악하였다. 3S 주입재가 LW-1 주입재에 비하여 약 4 배의 충전도를 갖게 됨을 확인 할 수 있었으며 이는 동일 압력하에 체적기준으로 4 배의 지반 보강이 가능함을 의미한다.

참고문헌

1. 김진춘 (1999), “지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위논문
2. 천병식(1998), “최신지반주입-이론과 실제-, 원기술
3. 천병식, 김진춘, 장의웅 (2001), “그라우트재의 호모겔과 샌드겔의 강도증진 성상에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, pp.167~172
4. 천병식, 김진춘, 남순성, 하광현 (2002), “국내 그라우팅 재료별 특성에 따른 설계사양에 관한 연구 -LW 공법 및 MSG 공법을 중심으로-”, 한국지반환경공학회 논문집, 제3권, 제4호, pp.67~79
5. Mitchell, J. K.(1970), "In-Place Treatment of Foundation Soils", J. of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, pp.73~110