

마이크로 복합실리카 그라우트의 공학적 특성에 관한 연구

A Study on the Engineering Properties of Micro Fine Hybrid Silicate Based Grout

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 김진춘²⁾, Jin-Chun Kim, 최영철³⁾, Young-Chul Choi,
정종주⁴⁾, Jong-Ju Jung, 신상재⁵⁾, Sang-Jae Shin, 이홍재⁶⁾, Hong-Jae Lee

- 1) 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University
- 2) 마이크로실리카공법협의회 회원사, (주)한국지오텍 대표이사, a member of Micro Fine Hybrid Silica Grout Association, President, Korea Institute of Geotechnology Inc.
- 3) 마이크로실리카공법협의회 회원사, 홍지기술산업(주) 상무이사, a member of Micro Fine Hybrid Silica Grout Association, Director, Hong Ji Engineering & Construction Co., Ltd.
- 4) 마이크로실리카공법협의회 회원사, (주)대보기술단 대표이사, a member of Micro Fine Hybrid Silica Grout Association, President, Daebo Engineering Co., Ltd.
- 5) 마이크로실리카공법협의회 회원사, (주)동진기초 대표이사, a member of Micro Fine Hybrid Silica Grout Association, President, Dong Jin Foundation Co., Ltd.
- 6) 마이크로실리카공법협의회 회원사, 중앙개발(주) 이사, a member of Micro Fine Hybrid Silica Grout Association, Director, Joong Ang Development Co., Ltd.

SYNOPSIS : In 1925, H.J. Joosten was the first in the world to use chemical injection grouts composed of sodium silicate and calcium chloride. This unique development prompted the introduction of other chemical grouting techniques. Among these chemical grouting techniques, sodium silicate based grout has been the most widely used in the world, but it has not been generally considered to be a permanent material. Therefore, studies to improve the weak points of sodium silicate based grout have been conducted, and new applications of grout were recently developed. We also developed the micro fine hybrid silicate grout of suspension type which properties are specialized as the high strength and durability, according to the reactant of special sodium silicate grout and the high strength hardener. As the results of this study we could derive the 2 times over high strength of Micro fine hybrid Silicate grouting method(MS method) more than that of the ordinary sodium silicate grout. And also we could confirm that the alkali leakage of micro fine hybrid silicate grout is less than that of ordinary sodium silicate grout. So we could get the high strength and durability of hybrid silicate grout are superior to those of ordinary sodium silicate grout.

Key words : chemical injection grout, micro fine hybrid silicate based grout, sodium silicate grout, Micro fine hybrid Silicate grouting method(MS method), alkali leakage, high strength and durability

1. 서론

1.1 종래 주입재의 문제점

1824년 영국의 Joseph Aspdin에 의해서 포틀랜드시멘트가 발명(Nevile, 1982)된 이후 19세기 동안에 수리 및 광산분야에서 시멘트를 주입하는 약액주입기술이 적용되기 시작하였으며 시멘트 현탁액을 암반의 균열, 틈새에 주입하는 기술이 발전하였다. 보통시멘트의 주입효과가 확인되면서 토목·건축 건설공사에서 약액주입이 본격적으로 도입되었지만 평균입경 15~20 μm , 최대입경 80~100 μm 로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적이었으며, 시멘트계 약액주입에서 침투성 저하의 주요한 원인이 되었다.(김진춘, 1999)

종래의 무기계 현탁형 그라우트는 시멘트-벤토나이트를 경화제로 한 CB그라우트 또는 보통시멘트를 단독으로 사용하는 밀크그라우트가 대표적이었다. 그러나 최근 분쇄·분급기술이 급속히 발전하면서 분체의 마이크로화가 가능하여졌고 무기계 현탁형 그라우트도 용액형 그라우트에 필적하는 침투성을 발휘할 수 있는 요소기술이 확보되었다. 현탁형 그라우트의 침투성에 영향을 미치는 주요 인자는 분체입자의 크기와 현탁액의 점성이 가장 큰 영향을 미친다. 그러나 마이크로화 될 경우 이 두가지 특성이 서로 대치되는 영향을 미친다. 즉, 마이크로화 됨으로서 침투영역이 실트성 지반까지 확대될 수 있는 반면에 현탁액의 점성은 급격히 증가하여 침투성을 저하시킨다. 여기서 현탁입자의 입경은 현장에서 조절할 수 없지만 현탁액의 점성은 현장에서 조절이 가능한 배합인자다. 따라서, 점성을 낮추기 위한 방법으로 물결합재비를 높이거나 전기화학적 분산작용을 유발시킬 수 있는 화학혼화제를 사용하는 기술이 적용되고 있다. 종래의 경우 물결합재비를 높이는 방법이 범용적으로 적용되어 왔지만 최근에는 정밀화학의 발전에 힘입어 경제적인 유동화제를 사용할 수 있는 제품선택의 기회가 많아졌고 유동화제를 사용함으로써 주입현탁액의 물시멘트비를 낮출 수 있기 때문에 Bleeding에 의한 부피감소와 건조수축량을 대폭 경감시킬 수 있으며 재주입의 필요성이 줄어들기 때문에 시공속도를 향상시킬 수 있다.

그라우트 고결체의 내구성 저하는 해수환경에서와 같은 화학적 침식작용에 의한 강도저하와 고결체의 화학적 결합의 자가분해에 의해서 강도가 저하되는 현상으로 분류할 수 있다.(김진춘, 1999) 일반적으로 해안지역의 지반개량공법에 시멘트계 주입제나 고화제가 많이 활용되고 있지만 해성점토의 염분, 유기물 또는 SO_4^{-2} 이온 등의 작용으로 인해서 시멘트계 수화물이 팽창 파괴되기 때문에 개량지반의 내구성이 내륙지방에 비하여 크게 저하된다. 또한 용액형 약액으로 가장 많이 사용되는 규산소다를 주입한 고결체의 경우 알카리의 용탈작용으로 고결체가 분해되기 때문에 3개월 이상의 장기 재령에서는 주입전의 지반보다 전단저항력이 약화되는 것은 자명한 일이다. 따라서 최근 내구성그라우팅에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 일반그라우팅과 내구성그라우팅의 특징을 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 일반그라우팅과 내구성그라우팅의 특성 비교

분 류	특 징
일 반 그라우팅	①시공장비, 소음이 작고, 주택밀집지나 지장물이 있어도 시공 용이, 주변환경에 영향을 미치는 기간이 짧다. ②산업폐기물의 발생이 거의 없다. ③경제적이다. ④지수성, 고결체끼리의 연속성이 우수하다. ⑤피압수하에서도 지반개량이 우수하다.
내 구 성 그라우팅	①상기 일반그라우팅의 특징을 모두 포함한다. ②강도수준이 40~50 kg/cm^2 이상 발휘될 수 있기 때문에 내구적 지반강화의 구축이 가능하다. ③수십시간의 연속주입이 가능한 배합을 만들 수 있기 때문에 액상화 방지를 위한 대용량의 경제적 주입시공이 가능하다. ④공해물질의 용출이 거의 없으므로 지하수를 오염시키거나 식물의 성장을 방해하지 않는다.

1.2 최근의 연구동향

토질의 조건에 따른 주입형태는 일반적으로 표 2와 같다(일본약액주입협회, 1995). 즉, 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 자갈섞인 굵은 모래층 또는 투수계수 $k = a \times 10^{-2} \text{cm}/\text{sec}$ 까지만 침투가 가능하지만, 저점도의 용액형 주입재를 적용할 경우 실트질 모래

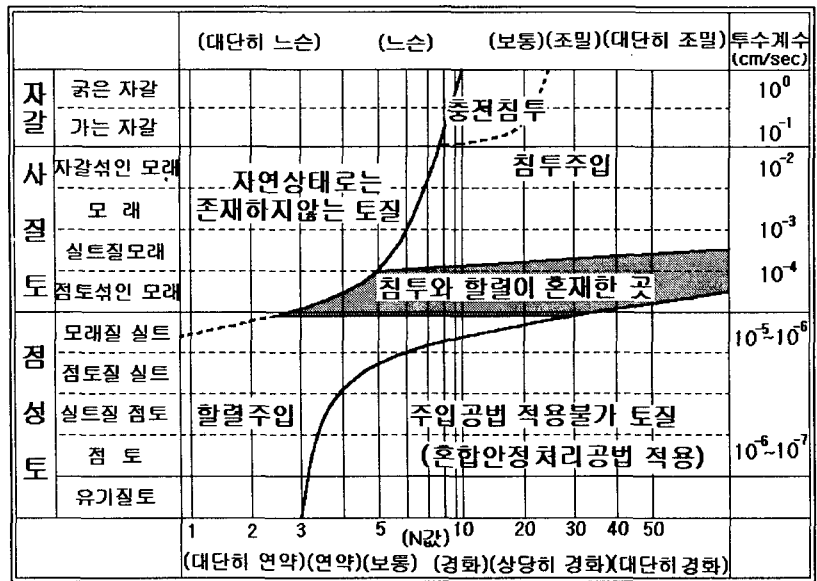
지반까지 침투주입을 확장시킬 수 있다.

최근에는 환경오염의 염려도 없고 침투성도 용액형에 필적할 만한 주입성을 발휘하는 무기계 주입재인 마이크로시멘트가 일본, 프랑스, 독일, 미국, 영국 등과 함께 국내에서도 개발되어 실용화 단계에 와 있다. 국내에서도 김진춘 등에 의해서 마이크로시멘트의 생산 및 사용기술에 대한 기초연구가 상당히 진전된 바 있다.(김진춘, 1997)

90년대 이후 그라우팅 기술의 신뢰성을 향상시키기 위한 재료개발과 정량적인 시공관리에 대해서 많은 연구들이 발표되고 있으며, 최근의 국제적인 연구개발동향을 요약

하면 표 3과 같다. 즉, 입자형 그라우팅 효과의 한계를 극복하기 위해서 입자를 마이크로화 하였지만 마이크로화로 인한 경제적인 문제 해결과 점성증가로 인한 침투성 저해를 방지하기 위해서 현장 마이크로화, 수화속도제어, 분산성 개선 등으로 연구의 초점이 맞춰져 있다고 할 수 있다. 또한 용액형 그라우트의 대표적인 약액은 물유리이지만 물유리를 사용할 경우 용탈현상에 의해서 내구한도가 길어야 1년 짧게는 3개월정도부터 차수효과가 현저히 저하된다. 따라서 최근 물유리의 용탈현상을 촉진하는 소디움을 제거하고 순수하게 실리카만을 결합재로 활용함으로써 실리카의 용탈을 억제하는 실리카졸계 주입재가 사용되고 있다. 그러나 국내현장에서는 아직도 물유리가 대중적으로 활용되고 있기 때문에 그라우팅에 의한 지반개량의 안정성이 취약한 상황이다. 한편, 그라우팅의 신뢰를 향상시키기 위한 시공관리 연구동향을 보면 최근 선진국에서는 컴퓨터를 이용한 시공관리체계가 점차 확대되어 시공관리의 정량화가 시도되고 있지만 국내의 경우 그라우팅공사가 상당히 많음에도 불구하고 시공관리는 아직도 경험에 의한 관리가 일반화되어있는 실정이다.(김진춘, 1999)

표 2. 토질조건과 주입형태 관계



1.3 연구범위

표 3. 최근의 국제적인 연구개발 동향

본 연구에서는 무기계 시멘트를 주재료로 한 현탁액형 주입재의 문제점인 침투성 저하, 유동성 손실, 내구성 저하 등에 대한 대책과 환경에 대한 안정성 확보, 고결체의 강도발현을 개선 등을 목적으로 고기능성 주입재인 마이크로계 복합실리카

분 야	연구 과 제
Suspension Grouting	① 현장 마이크로화 기술 개발
	② 현탁액의 수화속도 제어기술 개발
	③ 현탁액의 유동성 조절 혼합제 이용기술 개발
Solution Grouting	④ 고내구성 실리카졸 주입재 개발
	⑤ 고강도형 무기염류계 주입재 개발
	⑥ 속경성 주입재 개발
시공관리	⑦ In Situ Soil Injection Simulator 개발
	⑧ Computer Aided Grouting Evaluation System 개발

카시멘트-E, N, R type 주입재를 개발하여 이에 대한 물리적 특성을 평가하고 사용방안을 제시하는 것을 연구의 범위로 한다. 마이크로계 복합실리카 주입재는 평균입경 4 μ m의 마이크로실리카를 주성분으로 하고, 점성을 낮추기 위한 분산제, 강도를 향상시키기 위한 고강도혼화제가 최적으로 조합된 첨단 주입재이다. 또한, 응결조절제로 사용되는 소디움실리케이트는 고결체의 강도와 내구성을 향상시킬 수 있는

특히 제조된 활성규산으로 종래의 규산소다에 비해서 알카리용출을 억제하도록 설계되어 있다. 한편 본 연구에서는 마이크로계 복합실리카를 주재료로 사용하고 활성규산을 응결제로 사용하여서 1.0shot 공정 또는 1.5shot 공정 등 기존의 어느 공법에도 그대로 적용할 수 있지만 주입효율은 높이기 위해서 주입 선단장치 개선도 병행하고 있다. 그러나 본 연구에서는 재료적인 측면의 실험실적 연구를 통해서 마이크로계 복합실리카 공법의 특성을 평가하고, 표준배합을 대상으로 기존의 SGR공법 등 대응공법과의 경제성검토도 함께 시도하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 연구에 사용된 마이크로계 복합실리카 경화제는 적용처별 시공목적 및 겔화시간에 따라서 구성재료의 조성을 변경시킴으로서 촉진형(Early hardening type), 표준형(Normal hardening type), 지연형(Retarding hardening type)으로 구분하였다. 따라서 각각에 대한 화학성분, 입도분포, 광물특성 등을 분석하고 응결제인 활성실리카와 보통시멘트에 대한 특성도 분석한다. 화학성분은 X-ray 형광분석(XRF), 입도분포는 레이저투과방법(Malvern Mastersizer), 광물분석은 X-ray 회절분석(XRD) 및 전자현미경(SEM) 등 기기장치를 이용하여 분석하였다.

2.2 실험배합 및 측정항목

현장에서 가장 범용적으로 사용되는 배합을 기준으로 1.0shot 공정의 배합을 표 4와 같이 선정하고 3종류의 복합실리카 중에서 표준형을 대상으로 배합실험을 실시한다. 한편 본 연구대상인 복합실리카와 비교를 위해서 보통시멘트에 대해서도 동등한 배합으로 비교실험을 실시한다. 표 4의 배합에 의해서 Bleeding을, 점도를 측정하였으며 샌드퀵럼 주입장치를 이용한 침투성 시험도 실시함으로써 마이크로계 복합실리카 약액의 재료분리

표 4 1.0shot 공정의 시멘트밀크 배합비 (기준:400 l)

물시멘트비 (wt%)	마이크로실리카-N type		보통시멘트	
	물(ℓ)	시멘트(kg)	물(ℓ)	시멘트(kg)
약 200	343	171	345	173

표 5. 1.5shot 공정의 주입재 배합비 (기준:400 l)

	마이크로실리카-N type			보통시멘트		
	물	활성규산	시멘트	물	규산3호	시멘트
A액(응결제) 200 ℓ	100 ℓ	100 ℓ	-	100 ℓ	100 ℓ	-
B액(경화제) 200 ℓ	171kg	-	86kg	173kg	-	87kg

안정성, 저점도성, 주입성 등을 확인하고자 한다. 한편, 국내 현장의 LW공법, SGR공법 등에서 가장 많이 적용되고 있는 1.5shot 공정의 배합을 표 5와 같이 선정하고 겔타임, 알카리용출량 및 시편변형도, 호모겔강도 등을 측정함으로써 복합실리카 약액의 강도발현성, 내구성, 시공성 등을 확인하고자 한다. 표 5의 1.5shot 공정은 차수효과가 크고 경제적이기 때문에 지하철 등 연약지반 주입공사에서 가장 범용적으로 활용되는 공법이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 사용재료

마이크로 복합실리카 약액에 관해서 화학성분, 광물성상 및 SEM촬영, 입도분포, 시멘트물리특성 등을 분석하였으며 그 결과들은 다음과 같다.

3.1.1 화학성분 분석

마이크로 복합실리카 약액의 종류별 화학성분 분석결과는 표 6과 같다. 마이크로 복합실리카 약액은 실리카, 알루미늄, 라임,

표 6. 마이크로 복합실리카 약액의 화학성분 분석치(단위:%)

종 류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.-loss
마이크로실리카-E	20.2	5.1	3.3	60.1	3.5	0.14	0.69	3.8	3.5
마이크로실리카-N	26.3	11.4	1.6	50.2	3.6	0.17	0.52	3.5	2.8
마이크로실리카-R	32.2	16.9	0.2	41.8	5.6	0.22	0.42	0.5	2.1

석고 및 강열감량을 조절하기 위해서 혼합물의 배합이 복합적으로 조정된 것을 특징으로 한다. 강열감량과 석고가 많은 것은 복합실리카가 마이크로화 됨에 따라 현탁액의 점성이 증가하고 응결시간이 지나치게 빨라지는 것을 방지하기 위한 목적으로 첨가된 혼합물에 의해 성분이 조정된 것이고 실리카와 알루미늄 및 라임은 수화물의 반응율을 조정하고 내구성을 향상시키기 위해서 첨가된 혼합물에 의해서 함량이 조정된 것이다. 한편 응결조절제인 규산소다 3호는 시중의 판매제품을 사용하였으며 본 연구의 적용제품인 활성규산은 일반규산소다에 반응성이 우수한 알카리토류금속을 혼합하여 특수처리한 것으로 반응물질의 조직을 치밀화시켜 알카리의 용출을 억제하고 내구성을 향상시킬 수 있도록 성분이 조합된 것이다.

3.1.2 광물성상 및 형상 분석

본 연구의 주요재료인 마이크로 복합실리카 약액과 활성규산의 광물성상 및 형상을 분석하기 위해서 X-ray 회절분석 및 SEM촬영을 실시하였으며 결과는 그림 1 및 2와 같다.

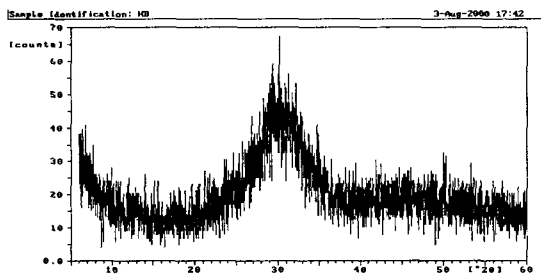


그림 1.a 마이크로실리카-N type의 XRD chart

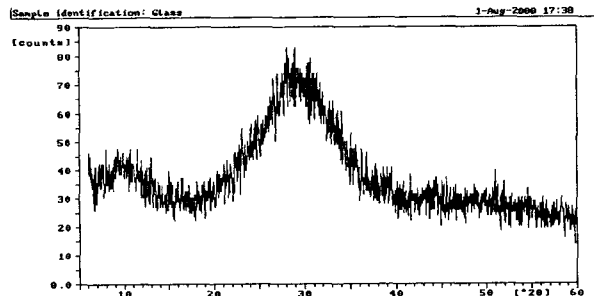


그림 1.b 활성규산의 XRD chart

그림 1로부터 마이크로실리카-N type과 활성규산은 대부분 비정질로 구성되어 있기 때문에 반응성이 우수할 것으로 판단되고 마이크로실리카-E, R type도 유사한 결정특성을 갖고 있을 것으로 기대된다.

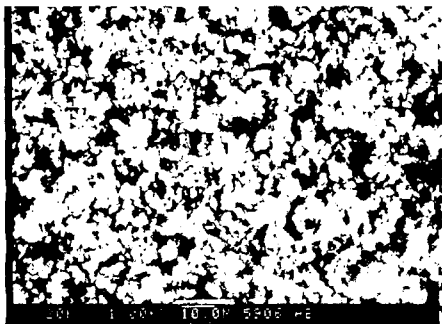


그림 2.a 마이크로실리카-N type의 SEM 영상

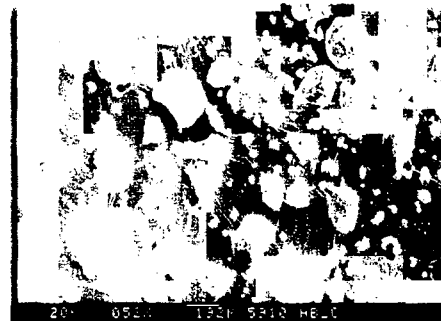


그림 2.b 활성규산의 SEM 영상

그림 2로부터 마이크로실리카-N type은 10μm 이하의 미세한 입자들이 균질하게 분포되어 있고 활성규산은 유리질의 비정형 입자들이 잘 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다.

3.1.3 입도 분석

마이크로실리카-N type의 입도를 분석하기 위해서 Malvern Mastersizer를 사용하였으며 비교를 위해서 보통시멘트도 같이 분석하였다. 입도분석결과는 표 7과 같다.

표 7. 시멘트 입도분석 결과(단위:%)

종류 \ μm	1	2	3	4	6	8	10	12	16	24	32	44	64	88	100	d50
마이크로실리카-N	19.1	27.3	41.9	54.1	78.4	91.8	96.7	98.9	99.9	100	100	100	100	100	100	3.7
OPC	4.9	7.3	10.2	14.3	21.5	27.1	33.2	37.0	45.3	62.3	84.7	92.1	96.0	98.8	100.0	18.2

표 7에서 마이크로실리카-N의 경우 평균입경은 $3.7\mu\text{m}$, 최대입경은 $10\mu\text{m}$ 로 보통시멘트의 평균입경 18.2, 최대입경 $100\mu\text{m}$ 에 비해서 약 5분의 1로 매우 미세하기 때문에 토사층 그라우팅에서 미세한 모래층은 물론이고 실트샌드층 토사지반까지 침투주입이 가능할 것으로 추정된다. 한편 암반그라우팅의 경우도 G.A. Kravetz의 주입비에 의해서 보통시멘트는 주입한계 균열폭이 $300\mu\text{m}$ 정도인 반면 마이크로실리카 약액의 주입한계 균열폭은 $30\mu\text{m}$ 정도까지 침투주입이 가능할 것으로 판단된다.

3.1.4 시멘트 물리적 성질

마이크로계 복합실리카-N type의 시멘트 물리적 특성을 KS 규격에 의해서 시험하였으며 보통시멘트도 같은 방법으로 비교하였다. 시험결과는 표 8과 같다. 표 8에서 마이크로실리카-N은 보통시멘트에 비해서 응결특성과 유동특성은 유사하지만 압축강도 발현특성은 매우 우수함을 알 수 있다. 그러나 마이크로실리카-E

표 8. 시멘트 물리성능

종류	비중	Blaine (cm^2/g)	응결(길모아)			Flow (%)	w/c (%)	압축강도(kg/cm^2)			
			w/c (%)	초결 min	종결 h:m			1일	3일	7일	28일
마이크로실리카-N	3.0	8,650	30.2	160	7:10	107.5	51.2	126	305	428	668
OPC	3.15	3,210	26.1	180	7:40	105.2	48.5	94	187	265	375

나 R은 그 화학적 조성이 상당히 다르기 때문에 시멘트로서의 물리적 특성은 마이크로실리카-N과 전혀 다를 것으로 판단된다.

3.2 주입재 물리성능

마이크로실리카-N type과 보통시멘트에 대해서 표 4의 1.0shot공정 배합비를 이용해서 B형점도, Bleeding율, 샌드컬럼 침투성 등을 측정하였으며 표 5의 1.5shot공정 배합비를 이용해서 젤타입, 알카리 용출특성, 시편변형도, 호모겔압축강도 등을 시험하였다. 각각의 시험결과는 표 9 및 10과 같다.

3.2.1 1.0shot공정의 물리특성 분석

마이크로실리카-N type 및 보통 시멘트의 현탁액에 대해서 회전마찰력저항력에 의한 B형점도,

Bleeding율, 샌드컬럼에 의한 침투성 등을 측정한 결과는 표 9와 같았다. Sand Column Test는 $\varnothing 10\text{cm} \times \text{H}25\text{cm}$ 의 아크릴 컬럼에 주문진표준사를 적당히 다져서 채워넣고 -5torr정도의 진공압으로 흡인하여 침투시험을 실시한 것이다. 본 실험장치는 필자에 의해서 실용신안으로 고안된 간이 침투성 실험장치로서 침투성을 간접적으로 비교하는 데 매우 효과적이라고 판단된다. 표 9에서 볼 수 있듯이 마이크로실리카-N은 보통시멘트에 비해서 점도가 낮고 Bleeding율이 작으며 침투성이 양호한 것으로 측정되었다.

표 9. 시멘트밀크 현탁액의 물리적 특성치

종 류	B형 초기점도	Bleeding 율	침투성		
			시간	재료분리	Caking량
표준범위	10cps 이하	작을수록 양호			
마이크로실리카-N	4cps	약 3%	90sec 초과	70%	多
OPC	12cps	약 40%	3sec	無	無

3.2.2 1.5shot공정의 물리특성 분석

마이크로실리카-N type 및 보통시멘트의 1.5shot 공정 배합에 대한 겔타임, 알카리용출특성, 시편변형도, 호모겔압축강도 등을 시험한 결과 표 10과 같았다. 표 10으로부터 마이크로실리카-N은 보통시멘트와 동등한 정도의 겔타임을 확보하고 있기 때문에 기존의

표 10. 1.5shot공정 주입재(A액+B액)의 물리적 특성치

종 류	겔타임 (초)	96시간 후의 pH	호모겔압축강도(kg/cm ²)				용탈에 의한 시편변형
			1일	3일	7일	28일	
표준범위	60~90	7~8.5	1이상	-	-	10이상	無
마이크로실리카-N	67	9.3	5.5	18.2	35.9	43.1	無
OPC	72	10.7	1.8	4.7	23.6	15.1*	모서리부 부분탈락

그라우트제를 사용할 경우와 거의 유사한 경험으로 주입시공이 가능할 것으로 판단된다. 주입시간이 짧아야 할 경우는 마이크로실리카-E type을, 주입시간이 길어야 할 경우는 마이크로실리카-R type을 사용하는 것이 적합하다. 한편 고결체로부터 용출되는 알카리량을 간접적으로 평가하기 위해서 일정용기량의 담수에 호모겔고결체 시편을 침전시켜 96시간 후 pH농도를 측정한 결과 마이크로실리카-N의 경우 pH농도가 9.3 정도인 반면 보통시멘트의 경우는 10.7로 알카리 방출량이 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 마이크로실리카 호모겔은 보통시멘트 호모겔에 비해서 알카리 함유량이 적고 고강도이기 때문에 알카리 용출량이 감소하는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 호모겔압축강도 측정결과와 용탈현상에 의한 시편변형으로부터도 확인할 수 있다. 특히 보통시멘트 호모겔 고결체는 28일정도의 단기적인 재령에서도 용탈현상이 심하게 발생하므로 강도가 저하되는 경향을 보이고 있다. 따라서 보통시멘트와 규산소다 3호가 결합된 호모겔 고결체는 내구연한이 몇 개월 단위로 매우 짧다는 것을 알 수 있다.

4. 경제성 비교

마이크로실리카 약액을 사용한 MS공법의 경제성을 평가하기 위해서 국내에서 가장 범용적으로 사용되고 있는 SGR공법과 동일한 시공방법으로 가정하고 현탁액형 주입재료비에 한해서 비교검토하기로 한다. MS공법과 SGR공법의 표준배합은 표 11과 같이 적용하였다. 표 11에서 MS공법의 주입재료비는 SGR공법에 비해서 약 25% 비싸지만 SGR공법에 사용되고 있는 마이크로믹서의 손료(203,324원/일) 및 운전비 등을 고려하면 오히려 SGR공법보다 더 경제적일 것으로 판단된다. 한편 MS공법의 경우 마이크

로실리카를 공장에서 기 제조된 것을 사용할 수도 있고 현장에 마이크로분쇄기를 도입하여 사용할 수도 있기 때문에 현장조건에 맞게 마이크로실리카 혼합물질을 조합을 자유롭게 조정하여 주입공사를 최적화 할 수 있는 장

표 11. 각 공법별 표준배합표(400 ℓ 기준) 및 주입재료비 산정표

구 분	MS공법			SGR공법			
	활성규산	물	마이크로실리카-N	규산3호	물	약액	시멘트
A액(규산액)	100 ℓ	100 ℓ	-	100 ℓ	100 ℓ	-	-
B액 (현탁액)	급결	172 ℓ	86kg	-	168 ℓ	24kg	60kg
	완결	172 ℓ	86kg	-	169 ℓ	23kg	60kg
단가/ℓ or kg	350원	0.426원	550원	324.9원	0.426원	1,240원	63.8원
합계/400 ℓ	82,416원			66,192원			

점이 있다. 그러나 SGR공법의 경우 마이크로믹서를 사용하는 것이 공법의 요소기술로 되어있지만 실제 현장에서는 사용되지 못하고 있는 기술적인 모순점과 사용되지 않고 있는 부분에 대해서도 시공비로 책정되어 발주되는 등 예산상의 부조리한 점도 함께 갖고 있다.

5. 결 론

첨단 그라우팅기술의 발전동향은 주입재료의 마이크로화, 고내구화, 무공해화, 시공관리의 자동화 등으로 요약될 수 있다. 본 연구는 주입재료의 첨단기술분야를 해결할 수 있는 마이크로실리카 약액을 개발하여 실험실적인 공학적 특성을 평가한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 마이크로실리카는 화학조성을 변화시켜 겔화시간 범위를 수초에서 수시간까지 조정할 수 있기 때문에 적용대상에 따라서 주입공사를 최적화 할 수 있을 것으로 기대된다.
- (2) 마이크로실리카는 평균입경 4 μ m 정도로 토사층에서는 실트샌드층까지, 암반층은 30 μ m 균열대까지 침투주입이 가능할 것으로 판단되며 샌드컬럼을 이용한 침투성 실험에서도 그 효과를 확인할 수 있었다.
- (3) 마이크로실리카와 활성규산을 조합한 MS공법의 주입재는 환경에 대한 안정성, 강도발현성, 내구성 등 모든 면에서 기존의 적용공법에 비해서 우수한 것으로 평가되었다.
- (4) MS공법은 SGR공법에 비해서 주입재료비는 20% 이상 비싸지만 기계손료 등을 반영하면 오히려 경제적인 것으로 판단되고, 시공품질이 향상되기 때문에 그라우팅의 신뢰성을 대폭 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글 ; 본 연구는 마이크로실리카공법협의회 연구비 지원사업으로 협조하여 주신 홍지기술산업(주), (주)대보기술단, (주)동진기초, 중앙개발(주) 등 회원사에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김진춘(1997), **지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구**, 건설교통부, R&D/95-0084, pp.56~77.
2. 김진춘(1999), "지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구", **한양대학교 박사학위논문**, pp. 1~6., 69~72.
3. Neville, A. M.(1982), *Properties of Concrete*, Pitman, London, pp.1~2.