

무기질계 지반주입재의 내구성 및 친환경적 특성에 관한 연구

A Study on the Durability and Environmentally Friendly of Inorganic Grouting Material

천 병 식[†] · 박 덕 흠¹⁾ · 강 형 남²⁾ · 도 종 남²⁾

Chun, Byungsik · Park, Dukhyum · Kang, Hyoungham · Do, Jongnam

ABSTRACT : Inorganic injection material, which is one of the ground improvement materials, consists of cement accelerator and inorganic micro particle. The inorganic injection material is known to overcome the major limitations of water glass type improvement materials, which are leaching and accompanying strength loss. The inorganic injection material is superior in durability and strength, and environmentally friendly since leaching is prevented. In this study, the effectiveness and environment-friendliness of the MIS(Micro Injection-process System) using the inorganic injection material is compared to SGR, which uses the water glass. The performed tests were unconfined compression test, chemical resistance test, and fish poison test. The unconfined compression tests showed that the MIS results in 1.7 times higher 28 day strength compared to the SGR. In addition, the strength continually increased with time for the MIS, while it decreased for the SGR. The chemical resistance tests indicated that the rate of change in length using the MIS is 10~25 times smaller than when using the SGR. The fish poison test proved that MIS was more environmentally friendly. The analysis of chemical ingredients of leached showed that the amount of Cr⁶⁺, Pb and Si leached from the MIS is less compared to the SGR. Accordingly, the MIS grout is more high-strength than existing SGR grout. It is excellent in shortening of construction period, structural stability of foundation and environmentally friendly. So, it is considered that it has not little the problem about groundwater pollution.

Keywords : MIS, Inorganic injection material, Environmentally friendly, Fish poison test, Leaching

요 지 : 무기질계 주입재는 지반개량 재료로서 기존의 물유리계 재료를 사용할 경우 발생하는 용출현상 및 강도저하를 보완한 시멘트계 급결재와 무기질계 초미립자를 주원료로 하는 순수 무기질 재료를 사용한 것으로서, 시공 후 내구성 및 강도가 우수하고 주입재의 용출 현상이 발생하지 않아 환경오염 문제가 거의없는 영구적인 차수 및 보강에 적합한 친환경적인 재료이다. 본 연구는 지반개량 재료로서 급결성 시멘트계 재료와 순수 무기질 주입재를 주원료로 배합된 MIS(Micro Injection-process System)와 기존에 많이 쓰여지고 있는 물유리계 주입재인 SGR의 내구성 및 친환경적특성을 일축압축강도시험, 내화학성시험, 어독성시험, 화학성분 분석 등의 실험으로 비교·분석 하였다. 일축압축 시험결과 재령 28일 강도는 MIS가 SGR재료에 비해 1.7배 크게 발현 되었고, 재령 40일 이후 SGR재료는 강도가 저하하는 반면 MIS는 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 내화학성시험 결과 MIS의 길이변화율이 물유리계주입재에 비해 10배~25배 작게 나타났다. 그리고, 어독성시험 결과 MIS가 물유리계주입재에 비해 친환경적이 증명되었고, 화학성분 분석 결과 MIS 용출액이 물유리계주입재의 용출액에 비해 Cr⁶⁺, Pb, Si 성분이 적게 검출됨을 확인할 수 있었다. 따라서, MIS 주입재는 기존의 SGR 주입재에 비해 고강도로 공기단축 및 기초지반의 구조적 안정성이 우수하며 친환경적이라 지하수 오염 등의 문제도 적을 것으로 판단된다.

주요어 : MIS, 무기질계주입재, 친환경, 어독성시험, 용출

1. 서 론

지반에 주입을 한다는 개념을 사용하여 연약지반을 처리 하게 된 것은 1802년 프랑스의 C.Berigny가 점토와 석회의 수용액을 percussion pump에 의해 주입한 것이 시초로서 1856년에는 영국, 1896년에는 이집트에까지 소개되어 많이 쓰여졌다고 전해지고 있다. 시멘트를 주입용으로 사용하게 된 것은 1876년 영국의 T.Hawksley가 Tunstall 댐의 기초암

반에 자연유하식으로 주입한 것을 시작으로, 1880~1905년 프랑스의 Reumanx 등이 탄광에서 용수처리에 고압분사 펌프에 의해 주입을 한 바 있는데 이들은 주입재의 혼합방식이나 주입시공에 관해 많은 개량이 시도되어 현재의 암반 주입재의 기초가 되었다(천병식, 2005).

국내에서의 약액주입공법은 일부 산악터널과 댐의 curtain grout에 극히 일부만이 적용되었을 뿐 그 실적이 거의 없는 상태였다(천병식, 2005). 그러나 1970년대 서울지하철

† 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

1) 비회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

건설과 함께 도입되기 시작하였고(천병식 등, 2002a) 현재는 대구, 인천, 광주, 대전 등 전국 5대 광역시 건설공사뿐 아니라 대규모 건물건축, 고속도로 및 비행장, 고속철도, 연약지반처리, 항만건설공사 등 건설현장에는 어디에나 쓰여지고 있으며, 이제는 건설현장에서 없어서는 안 될 공법으로 자리매김 하고있고, 이러한 현상은 앞으로 더욱 증대될 전망이다(천병식, 2005).

이러한 지반주입공법에 대한 국내의 연구로는 진병익 등(1984)의 물유리계 주입재를 주로 한 지반강도 증대와, 천병식의 불투수성 지반에서의 종합열주입압에 관한 기초적 연구(천병식, 1986)에 의해서 국내 약액주입의 연구가 본격적으로 시작되었다고 볼 수 있다.

약액주입 공법의 주재료의 하나인 물유리계를 사용하는 공법은 주로 자갈층, 모래층에 전면 침투 가능하며 0.6mm 이하 세사층에서는 주입이 곤란하고, 연약한 점성토 및 실트층에는 맥상으로 주입되어 침하방지, 지반강화 등의 효과가 있다. 또한, 고결물의 강도가 30~60kgf/cm² 내외로 고강도이고, 침투성이 양호하고 주입 후 주입효과가 불량한 위치에서 쉽게 재주입할 수 있는 등의 장점이 있어 광범위하게 시공되고 있다.

이러한 물유리계의 재료를 사용한 지반주입 공법의 내구성(차수효과)은 흙과 물유리계 주입재의 점착력으로 볼 수 있는데 지하수 유속이 커질수록 약액의 희석, 유실이 심해져서 점착력이 감소하고 약액의 용출이 커져서 내구성이 떨어진다. 따라서 물유리계를 사용하는 공법을 동수 지반에 적용시 고결시간(gel-time)을 짧게 하는 한편 약액의 농도, 주입률, 주입속도를 높여야 효율성이 커진다고 보고된 바 있다(천병식 등, 1994).

물유리계를 사용한 지반주입공법의 환경영향성에 관한 내용으로서 실험실에서 이상적으로 배합된 물유리계 공시체에 대한 어독성 시험결과 96시간 후의 최종 알칼리 농도인 pH가 10.9에서 공시어는 모두 치사하였고 지하수를 오염시킬 수 있다는 시험적 평가를 한 바 있다(천병식 등, 2000). 그라우팅 공법의 주재료로 사용되는 시멘트 물질이 주변 토양 및 지하수 환경에 미치는 영향에 대해서도 비교적 많은 연구가 이루어져 왔다. 건설재료로부터 용출된 중금속의 도심 토양내 거동에 관한 연구에 따르면, Cu, Pb,

Zn, Cd는 대부분이 도심토양 내에 흡착되는 반면 Cr⁶⁺의 경우는 토양 간극수 사이로 침출 가능성이 있으며 이동도(移動度)도 가장 큰 것으로 보고된 바 있다.

이처럼 물유리계공법은 내구성, 강도, 용출 등의 문제로 인하여 가시설 차수의 목적으로는 사용(천병식, 1997)이 가능하나 syneresis현상(겔이 내부의 액체를 방출하여 부피를 감소시키는 현상) 등으로 인해 영구적인 지반 보강이 불가능하고(천병식 2005), 차수를 위한 공법으로서의 본질적인 문제점(천병식, 2002b)과 균질한 품질의 확인과 시공속도에 대응할 수 없는 문제점(김진춘 등, 2001)을 가지고 있다. 또한 평균입경 15~20 μ m, 최대입경 80~100 μ m로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적(천병식, 2002a)이고, 보통 포틀랜드시멘트를 주재료로 사용하는 각종 교반공법 또는 고압 분사주입의 경우 발암물질인 Cr⁺⁶(木暮敬二, 2000) 등의 유해물질이 발생하여 지반을 오염시킬 수 있다(박주양 등, 2001).

이러한 물유리계 주입재를 사용할 경우 발생하는 용출현상 및 강도저하를 해결하기 위해 여러공법들이 연구되어지고 있는데, 국내에서는 최근 지반개량 재료로 시멘트계 급결재와 무기질계 초미립자를 주원료로 하는 NDS(Natural and Durable Stabilizer)공법 등의 개발이 천병식 등(2006)에 의해 활발하게 진행되고 있다.

이에 본 연구는 지반보강 목적으로 MIS공법을 적용할 경우에 사용되는 무기질계주입재의 내구성 및 친환경적특성을 일축압축강도시험, 내화학성시험, 어독성시험, 화학성분분석 실험 등으로 물유리계 주입재와 비교·분석 하였다.

2. 시료제작

2.1 시료의 특성

기존의 여러 지반주입공법은 급결성 확보 또는 고결시간을 조절하기 위하여 물유리를 사용하고 있으나 연구대상 재료는 물유리 대신 급결용 시멘트계 재료를 사용하여 물과 반응하는 즉시 에트링가이트(Ettringite, 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O)를 형성하여 토질 간극에서 흙 입자들을 가교상으로 연결하고, 이후에 칼슘실리케이트 수화물이 공극을 충전하여 고결체의 강도를 증가시킨다. 이러한 급결

표 1. OPC와 비교한 급결성 시멘트계 재료의 화학성분 및 물리적 성능

구분	Ig.loss*	Insol.**	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	비중	분말도(cm ² /g)
급결재료(MIS QS)	0.6	0.8	2.2	23.9	0.7	42.6	0.2	28.3	2.9	5,500
OPC	1.9	0.3	20.7	4.2	3.1	63.3	3.9	2.3	3.1	3,200

* Ig.loss : 강열감량

** Insol : 불용잔분(Insoluble Residue)

성 시멘트계 재료는 석회석, 보크사이트 및 석고를 분쇄, 혼합하여 1,600℃ 이상의 고온에서 제조된 용융 소성물을 급랭시킨 후, 분쇄 및 분급과정을 통하여 미립자로 제조한 무기질계 재료로서 주성분은 일반 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 유사한 성분인 CaO, Al₂O₃, CaSO₄ 등이 주성분으로 구성되어 있다(표 1 참조).

2.2 시료의 배합비

본 실내시험에 사용된 MIS시료와 SGR시료는 급결(short type ; gel-time 5-7초)과 완결(middle type ; gel-time 30-60초)로 구분하여 제작하였으며 각 시료의 배합비는 표 2와 같다.

비교시험에 사용된 물유리계 공법의 재료는 국내에서 널리 시공되고 있는 물유리계 SGR 공법을 선택하였으며, MIS 및 SGR 공시체는 A액과 B액을 1:1 비율로 배합하여 제작하였다.

3. 내구성시험

3.1 일축압축강도시험

3.1.1 시험개요 및 방법

일축압축강도는 디지털형 만능 재료시험기를 이용하여 KS

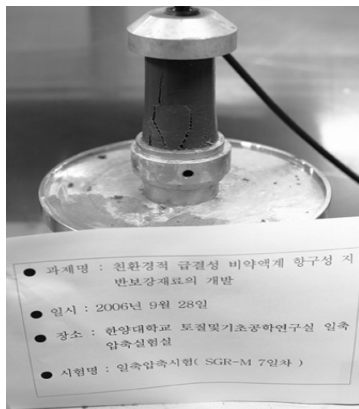
F 2314의 방법으로 측정하였다. gel-time은 A액, B액을 각각 200cc 컵에 50cc씩 채운 후 연속 좌우 혼합시켜 컵에서 유동성에 정지되는 시간을 측정하여 이것을 주입재(A액+B액)의 gel-time으로 선정하였다. 고결체의 일축압축강도 시험은 그림 1과 같이 Ø5cm × 10cm 원형시편으로 제작하여, MIS 시료와 SGR 시료에 대해서 gel-time에 따라 각각 급결(short type ; gel-time 5-7초)과 완결(middle type ; gel-time 30-60초)로 나누어서 실시하였으며 원형몰드에 재령 3일, 7일, 14일, 21일, 28일, 42일, 60일, 80일, 100일별로 공시체를 제작한 후, 일축압축강도시험을 실시하여 일축압축강도를 산출하였다.

3.1.2 일축압축강도시험 결과 및 분석

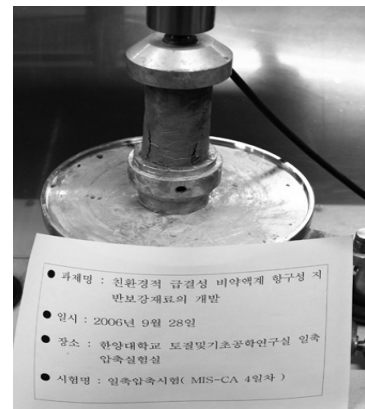
SGR과 MIS의 공시체에 대해서 재하속도 1.0mm/min로 수행한 일축압축시험을 실시하였고, 그 결과는 표 3에 나타내었다. 재령별 일축압축강도 시험결과 SGR 공법은 재령 약 40일에 short type과 middle type 모두 최대강도가 발현되었고, 40일이 경과한 뒤에는 강도가 감소되는 경향을 보였다. 이는 공시체의 수증양생 중 용출현상에 의한 것으로 판단된다. 한편, MIS 시료의 일축압축강도시험결과 재령일별 강도는 SGR 시료와는 달리 지속적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 100일 경과 후 일축압축강도는 short

표 2. 시료의 배합비

구분		A 액(200L)			B 액(200L)		
MIS	재료	물	초미립시멘트 (MIS QS)	첨가제 (MIS-AS)	물	무기질지반주입재 (MIS SP)	활성제 (MIS-DS)
	short type	151L	A type 140kg	0.6kg	147L	160kg	0.15kg
	middle type	186ml	B type 40kg	0.6kg	160L	120kg	0.15kg
SGR	재료	물	물유리		물	보조제	시멘트
	short type	100L	100L		167L	A type 60kg	23kg
	middle type				31L	B type 60kg	24kg



(a) SGR 일축압축시험



(b) MIS 일축압축시험

그림 1. 일축압축시험

표 3. 일축압축강도시험 결과

(단위 : kPa)

재령일		3	7	14	21	28	42	60	80	100
SGR	short	604.286	835.919	1212.20	1387.93	1704.00	1781.57	1707.92	1629.37	1521.60
	middle	454.734	531.324	895.053	1487.17	1786.57	1986.04	1898.96	1815.89	1737.54
MIS	short	953.795	1356.45	1933.47	2355.16	2807.84	3061.04	3349.56	3449.39	3453.51
	middle	702.254	1192.78	1845.41	2276.81	2859.81	3272.67	3684.65	3757.61	3768.30

type은 3453.51kPa, middle type은 3768.30kPa로 middle type의 강도가 조금 더 우수하게 나타났다.

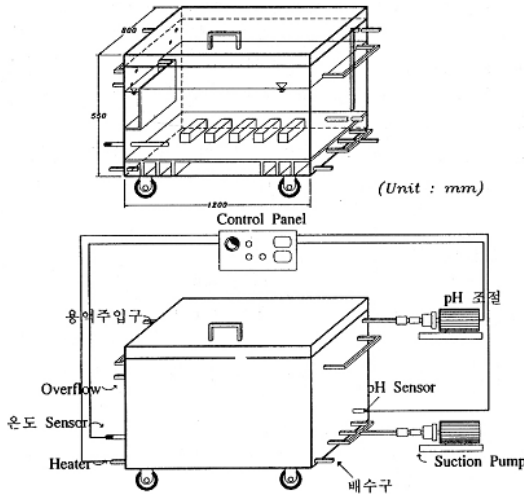


그림 2. 내구성 시험장치(천병식, 2005)

3.2 내화학적시험(길이변화를 측정)

3.2.1 시험방법

내화학적평가시험은 내구성시험 장치에 자연해수의 6배 (25g/L)의 Cl₂용액 및 자연해수의 10배(25g/L)의 SO₄용액에 1"× 1"× 4"크기의 각주형 시편을 SGR시료와 MIS시료를 사용하여 제작한 뒤 그림 2와 같은 내구성시험장치에 침적시키고 3일, 1주, 3주, 5주, 7주, 9주의 길이변화율과 각각의 일축압축강도를 측정하였다(천병식, 2005).

3.2.2 시험결과

길이변화율 측정 및 경과기간별 일축압축강도 시험결과 는 표 4~5와 같으며, MIS시료는 SGR시료보다 염화물 및 황산염 수용액에 침적시킨 경우 수축량이 약 12~27배 정도 적게 발생하는 것으로 나타났다. gel-time에 따른 비교를 보면 short type의 경우 초기 수축량은 적었고, 재령일 28일 이후에는 Middle type의 수축량이 적은 것으로 나타났다. 한편,

표 4. 내화학적 시험 결과(길이변화 측정)

침적용액		재령	길이변화(10 ⁻² mm)					
			3일	1주	3주	5주	7주	9주
2500g/ml MgCl ₂ (자연해수 6배)	SGR	short	132	164	246	278	352	391
		middle	157	183	227	259	334	349
	MIS	short	11	12	13	14	14	14
		middle	12	13	13	13	13	13
2500g/ml MgSO ₄ (자연해수10배)	SGR	short	218	307	길이변화 측정 불가			
		middle	231	315	길이변화 측정 불가			
	MIS	short	12	13	15	17	18	18
		middle	13	14	14	15	16	16

표 5. 내화학적 시험 결과(일축압축강도 측정)

침적용액		재령	일축압축강도(kPa)					
			3일	1주	3주	5주	7주	9주
2500g/ml MgCl ₂ (자연해수 6배)	SGR	short	972.1454	1028.522	1151.644	915.1962	620.1728	351.284
		middle	670.3515	787.5528	1016.498	967.7991	664.8912	383.587
	MIS	short	1086.185	1414.669	2107.106	2607.566	3015.958	3248.95
		middle	982.6268	1310.561	2015.463	2671.843	3293.718	3562.41
2500g/ml MgSO ₄ (자연해수10배)	SGR	short	252.7763	510.9659	강도 측정 불가			
		middle	152.921	394.7767	강도 측정 불가			
	MIS	short	848.6875	1051.76	1607.115	1993.104	2326.53	2561.89
		middle	726.9575	868.085	1526.308	2051.817	2563.45	2806.87

SGR시료의 경우 황산염 수용액에 침적시킨 경우 7일 이후에는 용출로 인한 길이측정이 불가능했다. 이는 황산염 수용액으로 인한 SGR시료의 화학적재료분리 현상으로 사료된다. 일축압축강도 시험 결과는 MIS시료의 경우 30일까지는 short 타입이 강도가 우수하게 나타났으나, 그 이후에는 middle 타입의 강도가 우수한 것으로 나타났다. SGR의 경우 약 21일에 최대강도를 나타내고 이후에는 감소하는 경향을 보였다. 내화학성 시험결과 SGR 시료의 일축압축강도가 감소하는 것으로 보아 MIS 시료에 비해 SGR시료의 화학적결합의 견고성이 낮아 화학적 민감도가 큰 것으로 사료된다.

4. 환경영향성평가

4.1 어독성시험

4.1.1 시험방법

약액주입에 의한 환경오염의 정도를 파악하기 위해 「어

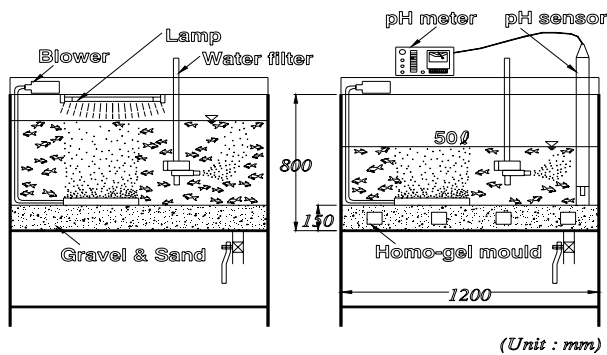
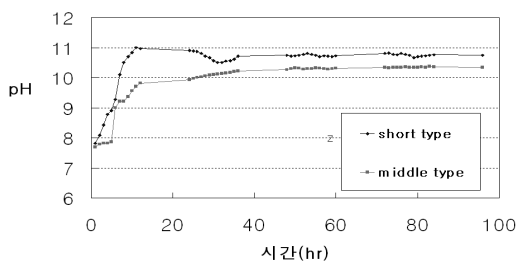
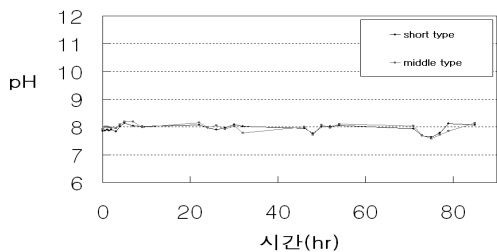


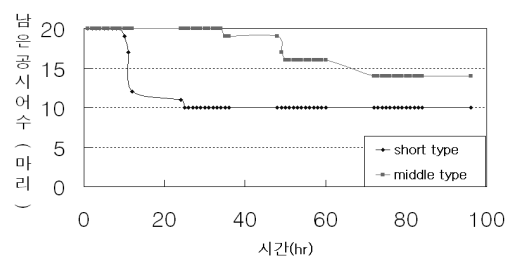
그림 3. 어독성 시험 장치(천병식, 2005)



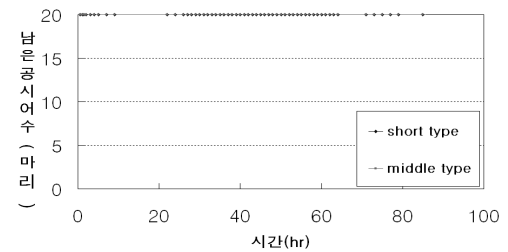
(a) SGR 주입재의 pH 변화량



(c) MIS의 pH 변화량



(b) SGR 주입재의 공시어수 변화량



(d) MIS의 공시어수 변화량

그림 4. SGR공법 및 MIS의 어독성시험 결과

류에 의한 급성 독시험(KS M 0111)의 규정(한국표준협회, 1993)을 바탕으로 시험을 실시하였다(천병식 등, 1998a). 또한, 알칼리 용출에 의한 pH변화를 측정 하였다.

시험수조는 깨끗한 유리 및 스테인레스틸로 용량이 약 50ℓ 이상 되도록 설계하고, 공기송풍이 가능하고 수온은 25℃로 지정온도를 유지할 수 있도록 자동온도조절장치를 부착하였다. 또한, 공시어의 급격한 환경변화에 대한 대책으로 수조에서 순응할 수 있도록 7일간 방치하였다(그림 3 참조). 공시어는 수온, 먹이, 취급 등 시험실 내의 생존조건에 적합한 것으로 크기가 고르고 건강하며 구입하기 쉬운 금붕어로 하였다. pH meter는 경과시간에 따라 pH를 측정하기 위해 portable pH meter를 사용하였으며, 충분한 산소를 공급하기 위해 blower를 부착하였다. 또한 본 시험의 시험조건 결정을 위해 사용된 공시어는 길이 6~8cm의 금붕어 20마리를 1조로 하였다(천병식 등, 1998b). 본 시험의 시험조건을 결정하기 위해서 SGR 시료와 MIS 시료의 각각 short type과 middle type의 시편을 표면적이 일정하게 유지되도록 물로 채워진 수조에 넣고 시험하였다.

4.1.2 시험결과

시험 결과는 그림 4와 같으며 SGR의 경우 short type은 pH 10.99, middle type은 pH 10.33까지 증가하였고 MIS의 경우는 short 및 middle type 모두 pH 8을 전후로 소폭 변화하였다. 그리고, 공시어는 SGR short type은 50%, middle type은 70%의 생존율을 보였으나 MIS short 및 middle type은 초기 숫자인 30마리를 유지하여 알칼리 용출에 의한 오염도가 적은 것으로 판단되어 친환경적임을 알 수 있었다.

표 6. 화학성분분석 결과(용출성분 및 유해중금속 성분)

시료명	분석항목	측정결과			
		6가크롬(Cr+6)	규소 (Si)	카드뮴 (Cd)	납 (Pb)
Distilled water		불검출	1.860mg/L	불검출	불검출
SGR공법 short type		0.049mg/L	313.0mg/L	불검출	0.004mg/L
SGR공법 middle type		0.049mg/L	366.50mg/L	불검출	0.001mg/L
MIS short type		불검출	4.630mg/L	불검출	0.001mg/L
MIS middle type		불검출	7.840mg/L	불검출	0.003mg/L

4.2 용출시험

무기질계지반주입재(MIS) 및 물유리계지반주입재(SGR)를 증류수에 35시간동안 침적시킨 용출액에 대해 화학성분 분석을 실시하여 강도변화에 미칠 수 있는 주성분의 용출 정도(Si 측정) 및 환경오염과 관련된 유해중금속(Cr⁶⁺, Cd, Pb 측정)의 용출 정도를 측정하였으며, 시험결과는 표 6과 같다.

화학성분 분석결과 카드뮴(Cd)은 검출되지 않았으며, 납(Pb)은 환경부수질기준인 0.05mg/L에 비해 미소한 양이 검출되었다. 또한, 6가크롬(Cr⁶⁺)은 환경부수질기준인 0.05mg/L을 넘지 않았다. 규소(Si)는 MIS 용출액 비해 SGR 용출액에서 크게 검출되었는데, 이는 MIS 용출액이 SGR 용출액보다 어독성시험시 pH변화가 작은 것으로 나타났으므로 MIS가 SGR보다 친환경적임을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 무기질계주입재(MIS)에 대한 일축압축강도시험, 내화학성시험, 어독성시험, 용출시험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 재령별 일축압축강도시험 결과 SGR 시료는 재령 약40일에 short type과 middle type 모두 최대강도가 발생되었고, 40일이 경과한 뒤에는 강도가 감소되는 경향을 보였다. 한편, MIS 시료의 일축압축강도시험결과 재령 일별 강도는 SGR 시료와는 달리 지속적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 100일 경과 후 일축압축강도는 short type은 3453.51kPa, middle type은 3768.30kPa로 middle type의 강도가 더 크게 나타났다. 이는 MIS의 화학적 결합성이 SGR에 비해 우수한 결과로 현장적용시 공기 단축 및 기초지반의 안정화를 가져 올 것으로 사료된다.
- (2) 내화학성시험 결과 MIS 시료는 SGR 시료보다 염화물 및 황산염 수용액에 침적시킨 경우 수축량이 약 12~27배 정도 적게 발생하는 것으로 나타났다. gel-time에

따른 비교를 보면 short type의 경우 초기 수축량은 적었고, 재령일 28일 이후에는 middle type의 수축량이 적은 것으로 나타났다. 또한, 일축압축강도 시험 결과는 MIS시료의 경우 30일까지는 short 타입이 강도가 우수하게 나타났으나, 그 이후에는 middle 타입의 강도가 우수한 것으로 나타났다. SGR시료의 경우 약 21일에 최대강도를 나타내고 이후에는 감소하는 경향을 보였다. SGR 시료의 일축압축강도가 감소하는 것으로 보아 MIS 시료에 비해 SGR시료의 화학적결합의 견고성이 낮아 화학적 민감도가 큰 것으로 사료된다. 또한, 지하수해수에 접하는 환경에 MIS공법 적용시 강도저하가 발생하지 않아 기초지반의 안정성이 SGR공법 적용시 보다 더 클 것으로 사료된다.

- (3) 환경영향성평가(어독성시험) 결과 SGR의 경우 short type은 pH 10.99, middle type은 pH 10.33까지 증가하였고 MIS의 경우는 short 및 middle type 모두 pH 8을 전후로 소폭 변화하였다. 또한, 공시어는 SGR short type은 50%, middle type은 70%의 생존율을 보였으나 MIS short 및 middle type은 초기 숫자인 30마리를 유지하여 알칼리 용출에 의한 오염도가 적은 것으로 판단되어 친환경적임을 알 수 있었다.
- (4) 용출시험 결과 중금속 성분 중 카드뮴(Cd)은 검출되지 않았으며, 납(Pb)은 환경부 먹는물수질기준인 0.05mg/L에 비해 미소한 양이 검출되었다. 또한, 6가크롬(Cr⁶⁺)은 환경부수질기준인 0.05mg/L을 넘지 않았다. 규소(Si)는 MIS 용출액에 비해 SGR공법 용출액에서 크게 검출되었는데, 이는 MIS 용출액이 SGR 용출액보다 어독성시험시 pH변화가 작게 나타났으므로 MIS가 SGR보다 친환경적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김진춘, 최영철, 정종주, 신상재, 윤남식(2001), 그라우팅기술 동향과 MSG 공법의 특징, *한국지반공학회지*, 제 17권, 제 3호, pp. 40~49.

2. 박주양, 천병식(2001), 시멘트 그라우팅으로 인한 지반환경문제 및 대책, 2001 학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp. 59~65.
3. 진병익, 천병식(1984), 물유리계 주입재를 주로 한 지반강도증대, 대한토목학회논문집, 제 4권, 제 2호, pp. 89~98.
4. 천병식(1986), 불투수성 지반에서의 종할열주입압에 관한 기초적 연구, 대한토목학회논문집, 제 6권, 제 3호, pp. 43~51.
5. 천병식, 정종주, 오민열(1994), 동수지반에서 주입된 물유리계 약액의 내구성에 관한 실험적 연구, 1994년도 대한토목학회 학술대회논문집(I), pp. 685~688.
6. 천병식(1997), 지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구, 연구보고서, 건설교통부, pp. 152~186.
7. 천병식, 강형남, 도종남, 임주현(2006), 환경 친화적인 무기질계 지반주입재의 내구성 및 차수효과에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 7, No. 6, pp. 113~119.
8. 천병식, 김진춘(1998a), 어독성 시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가, 대한토목학회논문집, 제 18권, 제 III-4호, pp. 531~538.
9. 천병식, 김진춘(1998b), 지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구, 1998년도 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 321~326.
10. 천병식, 김진춘(2000), FPT시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가에 관한 연구, 창립기념학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp. 85~90.
11. 천병식, 김진춘, 이준우(2002a), MSG 주입재의 침투특성, 대한토목학회논문집, 제22권, 제 2호, pp. 161~171.
12. 천병식(2002b), S.R.C 공법의 특성 및 현장 적용성에 관한 검토 연구, 연구보고서, 한양대학교, pp. 1~5.
13. 천병식(2005), 최신 지반주입 이론과 실제, 원기술, pp. 23, 32~33, 169~170.
14. 한국표준협회(1993), KS M 0111, 공장폐수 시험방법.
15. 木暮敬二(2000), 地盤環境の汚染と浄化修復システム, 技報堂出版, pp. 44.
16. Markiewicz-Patkowska, J., Hursthouse, A. and Przybyla-ij, H. (2005), Sorption Behaviour of Cd, Cu, Cr, Pb and Zn with a Typical Mixed Brownfield Deposit, The Interaction of Heavy Metals with Urban Soils, Environment International, Vol. 31, No. 4, pp. 513~521.

(접수일: 2008. 3. 6 심사일: 2008. 3. 21 심사완료일: 2008. 7. 1)