

## 특수주입선단장치에 의한 마이크로시멘트계 약액주입의 풍화대, 단층파쇄대의 지반보강 및 차수효과 사례연구

### A Case Study on the Ground Reinforcement and Waterproofing Effect of Weathering and Fault Zone by Special Injection Tip Equipment Using Microcement Type

도종남<sup>1)</sup> · 정종주<sup>1)</sup> · 천병식<sup>†</sup>

Do, Jongnam · Jung, Jongju · Chun, Byungsik

**ABSTRACT :** A grouting method has been widely used in construction of large-scale structure to reduce permeability and reinforce the ground. If cement and grout material were not mixed well in the injection tip equipment, an opposite flow and interception state of the chemical grouting can occur. McG (Multi-mixing counterflow prevented Grouting, McG) method installed a special grouting device to allow better mixing of the grouting material(above fineness 6,000 cm<sup>2</sup>/g) and prevent backward flow. The block of nozzle also diversify powder rate of cement. YSS (Youngil Special Silicate, YSS) that lowers Na<sub>2</sub>O and thereby increases durability was developed by gel-forming reaction material. The seepage state and unconfined compressive strength of the injection material using the special injection tip equipment was tested in this study. The results of this study showed that the uniaxial compressive strength, permeability, N-value, TCR and RQD were improved by this method. Engineering characteristics obtained by the special injection tip method will be compared with those by the other method through various field tests from now on.

**Keywords :** Multi-mixing counterflow prevented Grouting (McG), Youngil Special Silicate (YSS), Special injection tip equipment

**요 지 :** 최근 고속철도, 지하철, 댐, 항만, 고속도로, 도심지의 주상복합건물 등 대형 건설공사가 진행되면서 약액주입공법, 고압분사주입공법, 혼합처리공법 등이 다양하게 적용되고 있으나 침투성, 강도, 내구성, 환경성, 주변지반의 용기, 지하매설물에 대한 영향, 산업폐기물발생 등 많은 문제점이 지적되어 왔다. 이에 본 연구에서는 특수 주입선단장치 및 변성실리케이트 재료를 개발하여 주입재료의 혼합이 용이하고 주입중 주입재의 역류 및 주입노즐의 막힘이 없이 연속작업이 가능하며, 분말도 6,000cm<sup>2</sup>/g이상인 마이크로시멘트를 사용 침투효과를 증가시켰다. 또한, 겔형성반응재는 내구성과 환경성에 영향을 끼치는 Na<sub>2</sub>O 함량을 대폭 낮춘 변성실리케이트를 개발하여 지하수에 의한 용탈현상을 최소화하고, 장기의 고강도, 고침투, 고내구성, 친환경성이 요구되는 곳에 적합한 마이크로 무기질급결재를 개발하여 실용화에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 일축압축강도, 투수성, N치 및 TCR, RQD 등이 개선됨을 알 수 있었으며, 향후 본 연구결과를 바탕으로 특수 주입선단장치를 활용한 다양한 현장적용성 시험을 추후 시행하여 타공법과 공학적 특성을 비교, 검토하고자 한다.

**주요어 :** 맥그라우팅공법, 변성실리케이트, 특수주입선단장치

## 1. 서 론

지반에 주입을 한다는 개념을 사용하여 연약지반을 처리하게 된 것은 1802년 프랑스의 C.Berigny가 점토와 석회의 수용액을 진동펌프에 의해 주입한 것이 시초로서 1856년에는 영국, 1896년에는 이집트에까지 소개되어 많이 쓰여졌다고 전해지고 있다. 시멘트를 주입용으로 사용하게 된 것은 1876년 영국의 Hawksley가 Tunstall 댐의 기초암반에 자연유하식으로 주입한 것을 시작으로, 1880~1905년 프랑

스의 Reumanx 등이 탄광에서 용수처리에 고압분사 펌프에 의해 주입을 한 바 있는데 이들은 주입재의 혼합방식이나 주입시공에 관해 많은 개량이 시도되어 현재의 암반주입재의 기초가 되었다(천병식, 2005).

국내에서의 약액주입공법은 일부 산악터널과 댐의 커튼그라우트에 극히 일부분이 적용되었을 뿐 그 실적이 거의 없는 상태였다(천병식, 2005). 그러나 1970년대 서울지하철 건설과 함께 도입되기 시작하였고(천병식 등, 2002) 현재는 대구, 인천, 광주, 대전 등 전국 5대 광역시 건설공사

1) 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

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

뿐만 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 종할열주입압에 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/cm<sup>2</sup> 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 동수지반에 적용시 고결시간(gel-time)을 짧게 하는 한편 약액의 농도, 주입률, 주입속도를 높여야 효율성이 커진다고 보고된 바 있다(천병식 등, 1994). 물유리계공법은 내구성, 강도, 용출 등의 문제로 인하여 가시실차수의 목적으로는 사용(천병식, 1997)이 가능하나 시네레시스현상 등으로 인해 영구적인 지반 보강이 불가능하고(천병식, 2005), 차수를 위한 공법으로서의 본질적인 문제점(천병식, 2002)과 균질한 품질의 확인과 시공속도에 대응할 수 없는 문제점(김진춘 등, 2001)을 가지고 있다. 또한 평균입경 15~20 $\mu$ m, 최대입경 80~100 $\mu$ m로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적(천병식, 2002)이고, 보통 포틀랜드시멘트를 주재료로 사용하는 각종 교반공법 또는 고압분사주입의 경우 발암물질인 Cr<sup>+6</sup>(木暮敬二, 2000)

등의 유해물질이 발생하여 지반을 오염시킬 수 있다(박주양 등, 2001).

이에 본 연구에서는 특수 주입선단장치를 장착, 주입재료의 혼합이 잘되고 주입도중에 주입재의 역류 및 주입노즐의 막힘이 없이 연속작업이 가능하도록 하였으며, 주입주재료는 분말도 6,000cm<sup>2</sup>/g이상인 마이크로시멘트를 사용하여 침투효과를 증가시켰다. 또한, 겔형성반응제는 내구성과 환경성에 영향을 끼치는 Na<sub>2</sub>O 함량을 대폭 낮춘 변성실리케이트를 개발하여 지하수에 의한 용탈현상을 최소화 하였으며, 무엇보다도 장기의 고강도, 고침투, 고내구성, 친환경성이 요구되는 곳에 적합한 마이크로 무기질급결재를 개발하여 실용화 등에 대한 기초 연구로서 일축압축강도 시험을 실시하는 한편 및 지하철공사 개착구간 토류벽 배면, 고속철도공사 중 저수지하부 저토퍼 터널의 단층파쇄대 등의 건설현장에서 현장시험을 통한 주입효과평가를 실시하였다.

## 2. 특수 주입선단장치의 특징

기존 주입공법들 본래의 선단장치는 현탁액을 주입재로 사용할 경우 주입도중 주입재 역류 및 막힘 현상이 발생하므로 그림 1과 같이 변형되어 사용되므로 주입재(급결, 완결)의 혼합이 이루어지지 않아 주입효과가 미흡하다.

특수 주입선단장치는 제 1 혼합가이드 날개에서 A액과 B액이 통과하는 과정에 시계방향으로 소용돌이가 형성되면서 1차 혼합이 이루어지고 제 2 혼합가이드를 통과하는 과정에서 반시계방향으로 소용돌이가 형성 되어 주입재가 완전히 혼합되는 장치이다(그림 2 참조).

주입관 선단부의 특수선단장치에는 주입재의 역류현상을 방지할 수 있는 역류 방지밸브장치가 장착되어 있어, 주입도중 또는 주입작업을 일시 중단하는 과정에서도 주입관의 막힘 현상 없이 연속적인 작업이 가능하다. 또한, 주입재가 통과되는 노즐부가 수평·수직 4방향으로 구성되어 있어 주입재의 분사가 균질하며 주입압력에 의한 지반의 거부감을 최소화하여 침투효과가 우수하다(그림 2 참조).

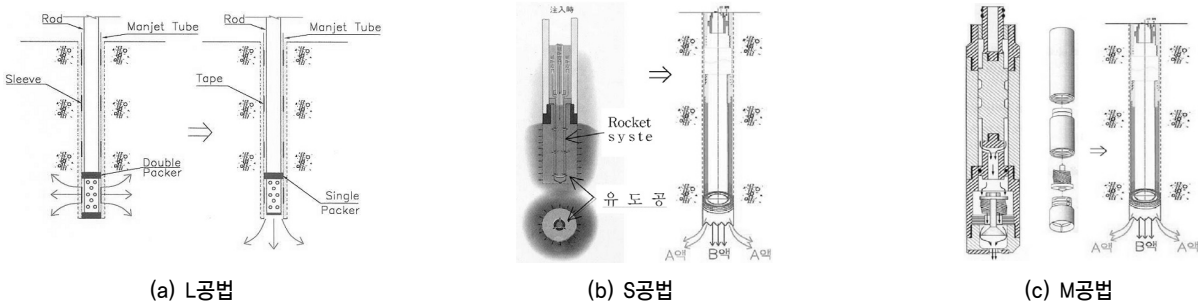


그림 1. 기존공법들의 주입선단장치

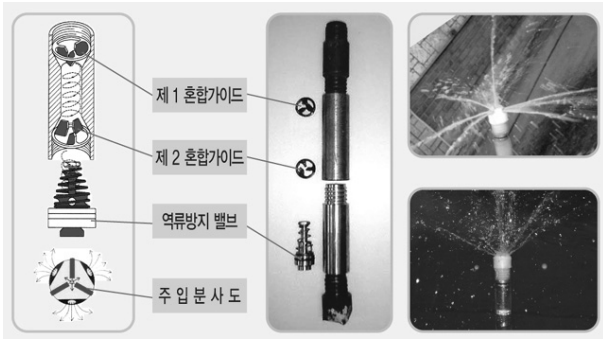


그림 2. 제 1, 2 혼합가이드가 장착된 특수 주입선단장치

### 3. 주입재료의 특성

#### 3.1 마이크로시멘트

그라우팅용 마이크로시멘트의 원재료는 1종 시멘트와 고로슬래그분말이며 일부 소량의 부원료가 첨가된다. 원재료는 KDS-90형 분급기에 의해 미분, 초미분, 조분으로 분급되고 조분은 입도를 증가시키기 위하여 고분말도 분쇄용 볼밀로 압송되어 진다. 볼밀에서 분쇄된 원재료는 다시

표 1. 원재료인 시멘트와 초미립자 시멘트 화학성분

구 분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ig.loss
1종시멘트	24.47	7.04	2.08	50.82	2.49	1.33	0.08	0.29	0.09	0.18	1.31
슬래그미분말	33.54	14.13	0.36	44.22	3.82	0.41	0.33	0.51	0.18	0.03	0.96
완제품(급결형)	21.33	5.59	2.03	50.43	2.81	1.15	0.42	0.22	0.11	0.14	2.50
완제품(완결형)	28.22	11.06	1.01	47.54	3.33	0.67	0.47	0.42	0.17	0.07	0.95

표 2. 초미립자 시멘트 물리적 특성

시 험 항 목		단 위	KS 규격	OPC	UFC
분말도(비표면적)		cm <sup>2</sup> /g	2,800 이상	3,200±300	6,500±500 8,500±500
응결시간 (길모아)	초결	분	60 이상	220±50	200±50
	종결	시간	10 이하	6:40±1:00	7:00±0:40
압축강도	3일	kg/cm <sup>2</sup>	130 이상	200±20	300±40
	7일	kg/cm <sup>2</sup>	200 이상	300±30	550±50
	28일	kg/cm <sup>2</sup>	290 이상	380±30	650±50
입도분포	평균입경	μm	-	20-25	4.0~5.0
	최대입경	μm	-	70-100	10
초기점도	W/C 200%	cps	-	-	4~6
블레이딩	W/C 200%	%	-	-	3~4
화학성분	SO <sub>3</sub>	%	3.5 이하	2.0±0.5	2~5
	강열감량	%	3.0 이하	1.5±0.5	1.5±0.5

표 3. 약액주입공법별 주입재의 알칼리 용탈물질(Na<sub>2</sub>O)의 비교

공 법	L, S	M	McG		실리카졸
			변성실리케이트(YSS)	마이크로 무기질 급결재(MQC)	
사용재료	규산소다 3호	특수규산	변성실리케이트(YSS)	마이크로 무기질 급결재(MQC)	실리카졸
용탈물질 함량	9%~10%	6%~8%	4%~6%	1% 이하	1% 이하

분급기로 공급되어 입도 분급되는 공정을 거치게 된다. 분급된 원료는 입도별로 사일로에 저장된 후 겔타입의 구분에 따른 제품 배합에 의해 계량 및 혼합되고 포장된다. 원재료인 시멘트와 고로슬래그 미분말 및 겔타입 구분에 따른 급결형(7~13초)과 완결형(40~100초) 제품의 화학성분을 표 1에 나타내었다(박원춘, 2005).

일반시멘트에 대한 품질 기준은 한국산업규격 KS L 5201로 제정하여 관리하고 있으나, 초미립자 시멘트에 관하여는 KS 규격이 제정되어 있지 않아 보통시멘트의 기준에 의거하여 물리적 특성을 평가하여 표 2에 나타내었다.

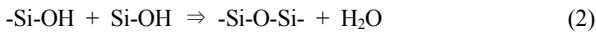
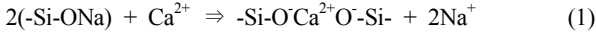
#### 3.2 겔형성 반응재

겔형성 반응재인 실리케이트는 용탈물질인 Na<sub>2</sub>O의 함량을 4~6%로 낮춘 변성실리카계 약액(YSS) 또는 용탈물질이 거의 생성되지 않는 마이크로 무기질 급결재(MQC)를 사용, 용탈현상을 최소화하여 친환경성과 내구성을 증대시켰으며 약액주입공법별 용탈물질(Na<sub>2</sub>O) 함량을 비교하여 표 3에 나타내었다.

변성실리케이트의 초기반응은 일반규산소다와 같은 방

식으로 진행되거나 변성처리를 통해 알칼리금속의 일부를 불활성염의 형태로 변환시켜 용탈물질이 크게 감소되었으며, 최종적으로는 강도 및 내구성이 우수한 완성도 높은 콜로이드간 결합을 형성한다.

주입 초기에는 식 (1)과 같은 이온교환 반응이 일어나고, 주입 후기에는 식 (2)와 같은 실록산 생성 중축합반응 및 삼차원 가교반응이 일어난다.



마이크로무기질급결재의 초기반응은 칼슘 알루미늄에이트계 수화물에 의해 급결 및 초기강도 특성이 나타나고, 후기에 칼슘 실리케이트계 수화물에 의해 조직이 더욱 치밀해지고 강도가 증진됨으로써 알칼리 성분의 용출을 극소화한다. 초기반응은 칼슘 알루미늄에이트계 반응으로 식 (3)과 같고, 후기반응은 칼슘 실리케이트계 반응으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

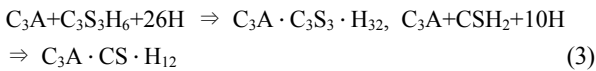
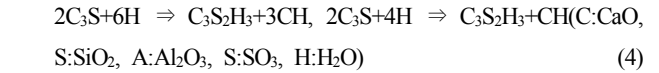
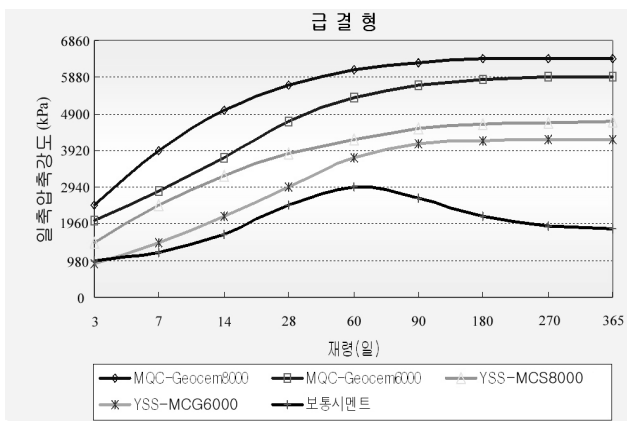


표 4. 표준배합(마이크로시멘트 분말도: 8000~6000cm<sup>2</sup>/g 이상)

구 분	A 액(마이크로 무기질급결재:MQC)			B 액(마이크로시멘트: Geocem8000, Geocem6000)			
	표 준 배 합		용적	표 준 배 합			용적
	MQC	물		E형(급결)	N형(완결)	물	
급결액	56 kg	180 L	200 L	80kg	-	172 L	200 L
완결액	56 kg	180 L	200 L	-	80kg	172 L	200 L

표 5. 표준배합(마이크로시멘트 분말도: 8000~6000cm<sup>2</sup>/g 이상)

구 분	A 액(변성실리케이트: YSS)			B 액(마이크로시멘트: MCS 8000, MCG 6000)			
	표 준 배 합		용적	표 준 배 합			용적
	YSS	물		E형(급결)	N형(완결)	물	
급결액	80 L	120 L	200 L	80kg	-	172 L	200 L
완결액	80 L	120 L	200 L	-	80kg	172 L	200 L



## 4. 실내시험

### 4.1 주입재별 공시체 제작

주입재별 실내시험을 위한 공시체의 표준배합은 마이크로 무기질 급결재(MQC)계 재료의 경우 표 4와 같고, 변성 실리카(YSS)계 재료의 표준배합은 표 5와 같다.

### 4.2 일축압축강도시험

각각의 주입재료별 배합비에 따른 강도변화를 측정하기 위하여 KSF 2314에 의거 재령별 일축압축강도를 측정하였다. 시험 결과 그림 3과 같이 급결형과 완결형 모두 분말도가 클수록 강도가 크게 발현되는 유사한 경향을 나타내었으며 변성실리케이트재료에 비해 마이크로무기질급결재 재료의 강도가 약 1.5배 더 크게 발현되었다.

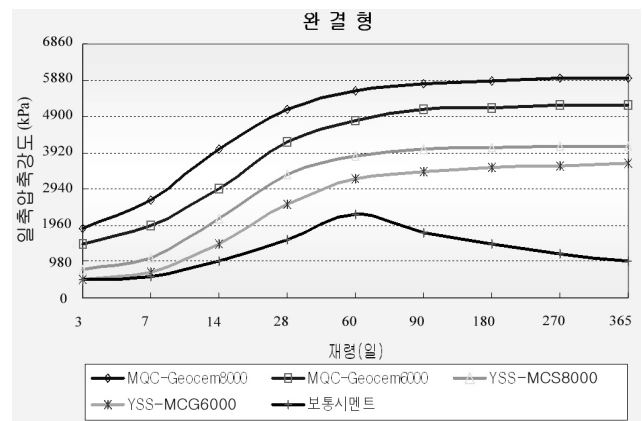


그림 3. 급결형 및 완결형 배합비에 따른 강도변화

## 5. 현장시험

특수 주입선단장치의 실제 주입효과를 평가하기 위하여 지하철공사 개착구간 토류벽 배면, 고속철도공사 중 저수 지하부 저토피 터널의 단층파쇄대 등 그림 4~6과 같은 건

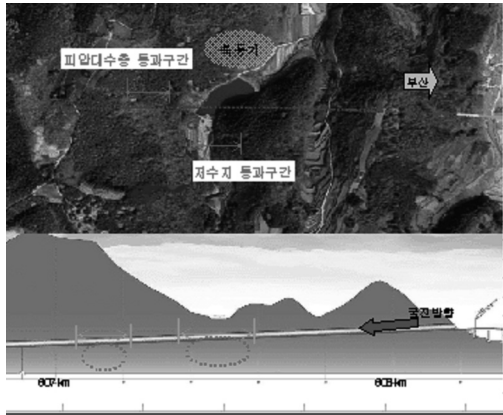
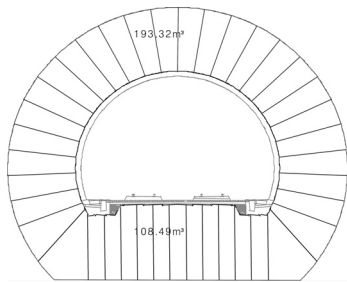


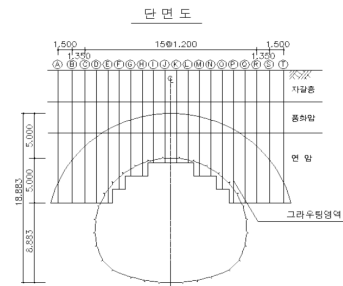
그림 4. 저수지하부 저토피 터널 단층파쇄대 종단도



그림 5. 단층대 저토피터널 상부 저수지 담수 상태



(a) 갱내 경사 및 수직 그라우팅 단면도



(b) 지상 수직 그라우팅 단면도

그림 6. 저수지하부 저토피 터널 단층 파쇄대 그라우팅 단면도

표 6. 주입효과의 품질관리기준(토목공법연구회, 1999)

시험항목	품질관리 기준	비고
1. 현장투수시험	투수계수 $k = \alpha \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이하이면 양호	일반적으로 불투수층 기준이 $K = \alpha \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이므로 주입지반의 투수계수가 $k = \alpha \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이하이면 주입효과가 양호
2. 표준관입시험	주입 전·후 지반의 N값 비교	각 지반종류별 판정기준은 없으나 일반적으로 주입 후 지내력이 증대되므로 N치가 증가하면 양호
3. 육안관찰에 의한 침투성 확인	적색반응이면 양호	페놀프탈레인( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ )은 산염기로 알칼리성인 주입재와 반응하면 붉은색으로 나타남
4. 누수량 측정	직각3각 V-notch 설치, Barr의 유량 산출공식 $Q = 0.014H^{5/2}$ (H : 월류수심)	

표 7. 현장투수시험 및 표준관입시험 결과

측정심도	지층명	투수계수(k, cm/s)		표준관입시험 결과치		적용현장
		주입 전	주입 후	주입 전	주입 후	
G.L-5.0m	매립층	$3.02 \times 10^{-4}$	$6.26 \times 10^{-5}$	18 / 30	27 / 30	지하철 OO공구 (개착구간 토류벽배면)
G.L-7.5m	풍화토층	$3.31 \times 10^{-4}$	$6.22 \times 10^{-5}$	19 / 30	50 / 29	
G.L-10.0m	풍화토층	$5.38 \times 10^{-4}$	$5.82 \times 10^{-5}$	12 / 30	48 / 30	
G.L-15.0m	풍화암층	$2.14 \times 10^{-4}$	$4.39 \times 10^{-5}$	50 / 10	50 / 7	
G.L-3.0m	매립층	-	-	0 / 30	11 / 30	지하철 OO공구 개착구간 토류벽배면
G.L-6.0m	충적층	$6.51 \times 10^{-4}$	$1.76 \times 10^{-5}$	5 / 30	18 / 30	
G.L-10.0m	풍화토층	$3.33 \times 10^{-4}$	$8.94 \times 10^{-6}$	49 / 30	50 / 30	
G.L-16.0m	풍화토층		$9.72 \times 10^{-6}$	49 / 30	50 / 26	
G.L-17.0m	풍화암층	$2.41 \times 10^{-4}$	$7.42 \times 10^{-6}$	50 / 8	50 / 8	

표 8. 코아회수율/암질지수 및 현장투수시험 결과

측정심도	지층명	TCR / RQD		투수계수(k, cm/s)			적용현장
		주입 전	주입 후	심도	주입 전	주입 후	
G.L-4.5m~6.0m	연암층	54 / 0	56 / 0	G.L-4.0m	$3.55 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-5}$	경부고속철도 OO-O공구 저수지하부 저토퍼터널 단층파쇄대
G.L-6.0m~8.0m	연암층	71 / 15	100 / 20	G.L-6.5m	$1.49 \times 10^{-3}$	$9.40 \times 10^{-6}$	
G.L-8.0m~10.0m	"	93 / 34	100 / 20	G.L-8.5m	$1.40 \times 10^{-3}$	$1.90 \times 10^{-5}$	
G.L-10.0m~12.0m	"	32 / 0	88 / 49	G.L-12.0m	$6.29 \times 10^{-3}$	$1.31 \times 10^{-5}$	
G.L-12.0m~14.0m	"	92 / 0	73 / 16	G.L-14.0m	$4.11 \times 10^{-3}$	$1.34 \times 10^{-5}$	

표 9. 수압시험 및 루전 테스트 결과

시험심도	지층명	투수계수(k, cm/s)		Lugeon		적용현장
		주입 전	주입 후	주입 전	주입 후	
G.L-1.5m~4.0m	연암파쇄대	$2.11 \times 10^{-4}$	$3.22 \times 10^{-5}$	11.3	2.6	고속철도 OO-O공구 터널구간 단층파쇄대
G.L-1.5m~4.0m	"	$2.42 \times 10^{-4}$	$3.16 \times 10^{-5}$	12.6	2.5	
G.L-1.5m~4.0m	"	$2.52 \times 10^{-4}$	$2.56 \times 10^{-5}$	14.5	2.4	
G.L-1.5m~4.0m	"	$2.99 \times 10^{-4}$	$2.80 \times 10^{-5}$	15.9	2.6	
G.L-1.5m~4.0m	"	$2.24 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-5}$	14.4	1.4	
G.L-1.5m~4.0m	"	$3.40 \times 10^{-4}$	$2.26 \times 10^{-5}$	40.4	2.0	

표 10. 누수량 측정 결과

지층명	시공전 수량(m³/일)	시공후 수량(m³/일)	감소율(%)	적용현장
연암파쇄대	202	15.8	92	고속철도 OO-O공구 OO저수지하부 단층파쇄대
"	516	4.8	99	

전경 및 주입재 침투성 확인은 그림 7~9와 같다.

풍화토 지반에서 주입 전 투수계수는 표 7과 같이  $k=2.14 \times 10^{-4} \sim 6.51 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 에서 주입 후  $k=1.76 \times 10^{-5} \sim 9.72 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 측정되어 투수성 감소가 10배 이상인 것으로 나타났다. 단층파쇄대에서는 표 8, 9와 같이 주입 전 투수계수  $k=2.11 \times 10^{-4} \sim 3.40 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 에서 주입 후  $k=1.45 \times 10^{-5} \sim 3.22 \times$

$10^{-5} \text{cm/s}$ 로 루전치도 주입 전  $Lu=11.3 \sim 40.4$ 에서 주입 후  $Lu=1.4 \sim 2.6$ 으로 10배 이상 투수성 감소효과를 확인하였다. 또한, V-notch를 설치한 후 그라우팅 전, 후의 용수량 측정결과 표 10과 같이 저수지 하부 단층파쇄대에서 92~99% 누수량 감소효과를 확인하였다.

암반파쇄대에서 주입 전, 후 TCR과 RQD를 비교한 결

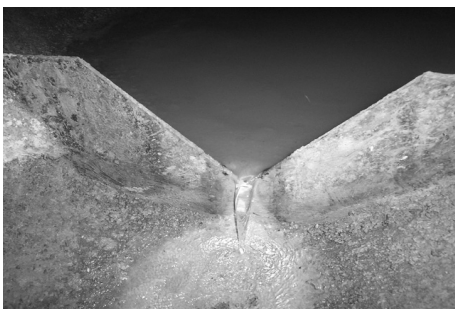


그림 7. 경부고속철도 OO-O공구 V-notch 설치 전경 및 수위측정 전경



그림 8. 육안관찰에 의한 주입재 침투성 확인(지하철 OO공구)



그림 9. 육안관찰에 의한 주입재 침투성확인(경부고속철도 00-0공구)

과 표 10과 같이 다소 증가되었다. 주입에 의한 개량효과도 있을 것으로 사료되나, 불균질한 지반상태가 반영된 결과로 보여진다. 또한, 풍화대 지반에서는 주입 전, 후 표준관입시험 결과 표 9와 같이 전 구간에서 N치가 증가되어 지반강도 개선이 양호하게 나타남을 알 수 있었다.

시추코아를 통한 페놀프탈레인 착색시험 결과 그림 8, 9와 같이 풍화대 지반에서 전체적으로 적색반응이 나타나 주입재의 침투성이 양호함을 확인할 수 있었다. 암반 파쇄대 구간은 시추시 천공수에 의해 주입재가 유실되어 주입된 흔적만 나타났으나 착색시험 결과 그림 9와 같이 절리면에서 적색반응이 나타나 맥상주입형태로 주입상태가 양호함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 특수 주입선단장치를 사용하여 그라우팅 재료인 마이크로시멘트와 겔형성 반응재인 변성실리케이트를 지중에 주입한 후 주입효과를 평가하기 위하여 지하철공사 개착구간의 토류벽 배면, 고속철도공사 저수지하부 저토피 터널의 단층파쇄대 등에서의 시험시공을 수행하였으며, 주입재 침투성, 강도증가, 투수성 감소 등을 확인하여 현장적용성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 각각의 주입재료별 배합비에 따른 강도변화를 측정하기 위하여 KSF 2314에 의거 재령별 일축압축강도를 측정하였다. 시험 결과 급결형과 완결형 모두 분말도가 클수록 강도가 크게 발현되는 유사한 경향을 나타내었으며 변성실리케이트재료에 비해 마이크로무기질 급결재 재료의 강도가 약 1.5배 더 크게 발현됨을 알 수 있었다.
- (2) 풍화토 지반에서 주입 전 투수계수는  $k=2.14 \times 10^{-4} \sim 6.51 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 에서 주입 후  $k=1.76 \times 10^{-5} \sim 9.72 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로 측정되어 투수성 감소가 10배 이상인 것으로 나타났

다. 단층파쇄대에서도 주입 전 투수계수  $k=2.11 \times 10^{-4} \sim 3.40 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 에서 주입 후  $k=1.45 \times 10^{-5} \sim 3.22 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 루전치도 주입 전  $Lu=11.3 \sim 40.4$ 에서 주입 후  $Lu=1.4 \sim 2.6$ 으로 10배 이상 투수성 감소효과를 확인하였다. 또한, V-notch를 설치한 후 그라우팅 전, 후의 용수량 측정결과 저수지 하부 단층파쇄대에서 92~99% 누수량 감소효과를 확인하였다.

- (3) 암반파쇄대에서 주입 전·후 TCR과 RQD를 비교한 결과 암반상태가 안정적으로 개량됨을 알 수 있었다. 주입에 의한 개량효과도 있을 것으로 사료되나 불균질한 지반상태의 분포 또한 반영되어진 것으로 보였다. 풍화대 지반에서 주입 전·후 표준관입시험 결과 전 구간에서 N치가 증가되어 지반개량효과가 양호함을 알 수 있었다.
- (4) 시추코아를 통한 페놀프탈레인 착색시험 결과 풍화대 지반에서 침투성을 확인한 결과 전체적으로 적색반응이 나타나 주입재의 침투성이 양호함을 확인할 수 있었다. 암반 파쇄대 구간은 시추시 천공수에 의해 주입재가 유실되어 주입된 흔적만 나타났으나 착색시험 결과 절리면에서 적색반응이 나타나 맥상주입형태로 주입이 되었음을 확인할 수 있었다. 향후 본 연구결과를 바탕으로 특수 주입선단장치를 활용한 다양한 현장적용성 시험을 추후 시행하여 타공법과 공학적 특성을 비교, 검토하고자 한다.

## 참 고 문 헌

1. 김진춘, 최영철, 정종주, 신상재, 윤남식 (2001), 그라우팅기 술동향과 MSG 공법의 특징, *한국지반공학회지*, 제 17권, 제 3호, pp. 40~49.
2. 박원춘, 정종주 (2004), 초미립자 시멘트의 지반주입재료의 특성 평가, *한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집*, pp. 301~304.
3. 박주양, 천병식 (2001), 시멘트 그라우팅으로 인한 지반환경 문제 및 대책, *2001 학술발표회 논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 59~65.
4. 진병익, 천병식 (1984), 물유리계 주입재를 주로 한 지반강도 증대, *대한토목학회논문집*, 제 4권, 제 2호, pp. 89~98.

5. 천병식 (1986), 불투수성 지반에서의 종합열주입압에 관한 기초적 연구, *대한토목학회논문집*, 제 6권, 제 3호, pp. 43~51.
6. 천병식, 정종주, 오민열 (1994), 동수지반에서 주입된 물유리계 약액의 내구성에 관한 실험적 연구, *1994년도 대한토목학회 학술대회논문집(I)*, pp. 685~688.
7. 천병식 (1997), *지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구*, 연구보고서, 건설교통부, pp. 152~186.
8. 천병식, 김진춘, 이준우 (2002), MSG 주입재의 침투특성, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제 2호, pp. 161~171.
9. 천병식 (2002), *S.R.C 공법의 특성 및 현장 적용성에 관한 검토 연구*, 연구보고서, 한양대학교, pp. 1~5.
10. 천병식 (2005), *최신 지반주입 이론과 실제*, 원기술, pp. 23, 17~18, 32~33, 169~170.
11. 토목공법연구회 (1999), *그라우팅편람*, 창우출판, pp. 113~120.
12. 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.

(접수일: 2008. 10. 9 심사일: 2008. 10. 24 심사완료일: 2009. 1. 13)