

## 시멘트계 주입재료의 암반그라우팅 효과

### Grouting Effects of Microfine Cement in the Rock-based Sites

공진영<sup>1)</sup> · 김찬기<sup>1)</sup> · 박진환<sup>2)</sup> · 천병식<sup>†</sup>

Kong, Jinyoung · Kim, Chanki · Park, Jinhwan · Chun, Byungsik

**ABSTRACT :** The particle size of microfine cement(MC) is so small that it can be injected into silt layer. But the more particle size is miniaturized, the more the cohesion increases. This phenomenon results in the decrease of the perviousness of MC. In this study, the grouting effects of microfine cement with superplasticizer to maintain cohesion low and that of normal cement were investigated in rock. To estimate the grouting effects, TCR/RQD test for rock quality, lugeon test, borehole loading test for coefficients of elastic and deformative stress, borehole shear test for shear stress, detection p~q~t(pressure~flow~time) chart tests were carried out. The results using MC show a better permeability, modulus of elasticity, deformation, charge per unit, and recover efficiency of grouting material than those of ordinary portland cement except shear stress.

**Keywords :** Grouting, Microfine cement, Lugeon test, p~q~t curve

**요 지 :** 초미립자시멘트는 입자 크기가 마이크로화되어 실트성 지반까지 주입가능하지만 점성이 높아 침투성이 저하되는 단점이 있다. 본 연구에서는 유동화제를 사용하여 점성을 낮춘 초미립자주입재의 그라우팅 효과를 평가하고자 암반에서 초미립자주입재와 보통시멘트주입재의 주입효과를 비교하였다. 시추조사, 현장수압시험, 공내재하시험, 공내전단시험, 단위주입량분석, p~q~t chart 유형 분석을 실시하였다. 시험 결과 초미립자주입재를 사용하는 경우가 보통시멘트 주입재를 사용하는 경우보다 투수성, 탄성계수 및 변형계수, 단위주입량 및 주입재 회수율 등 측면에서는 유리하지만 전단응력 측면에서는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

**주요어 :** 그라우팅, 초미립자주입재, 현장수압시험, p~q~t 곡선

## 1. 서 론

우리나라는 국토가 좁은데다 70% 이상이 산악지역이라 도로나 철도 건설에 있어 터널이 차지하는 비중이 적지 않다. 또한 대도시로의 인구 유입이 가속화되어 지하철이나 지하도로 같은 지하구조물의 수요도 늘어나고 있는 실정이다. 이와 같은 지하구조물은 일반적으로 지하수면 아래 설치되며 풍화암 같은 암반에 위치하는 경우가 종종 있기 때문에 지하구조물의 기초공사에서 차수 및 보강작업이 중요한 비중을 차지한다.

암반기초처리의 차수 및 보강공법으로서 주입공법이 가장 기본적인 기술로 적용되고 있지만 최근 암반 건설현장의 지형적 약조건과 갈수록 까다로워진 설계, 시공여건 때문에 주입공법의 중요성이 더욱 강조되고 있는 실정이다. 그러나, 주입공법은 약액의 정확한 주입범위 및 주입고결토의 강도증대 등 지반개량의 불확실성, 주입효과 판정법의 낮은 신뢰성, 주입재의 저내구성 및 지반환경에 대한 공해문제 등 아직 해결하지 못한 허다한 문제점을 안고 있다.

1824년 영국의 Joseph Aspdin에 의해서 포틀랜드시멘트가 발명된 이후 19세기 동안에 수리 및 광산분야에서 시멘트를 주입하는 약액주입기술이 적용되기 시작하였으며 시멘트 현탁액을 암반의 균열, 틈새에 주입하는 기술이 발전하였다(Nevile, 1982). 포틀랜드시멘트의 주입효과가 확인되면서 토목건축 건설공사에서 약액주입이 본격적으로 도입되었지만 평균입경 15~20 $\mu$ m, 최대입경 80~100 $\mu$ m로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적이었으며, 시멘트계 약액주입에서 침투성 저하의 주요한 원인이 되었다(김진춘, 1999).

종래의 무기계 현탁형 그라우트는 시멘트-벤토나이트를 경화제로 한 cement bentonite(CB) 그라우트 또는 보통시멘트를 단독으로 사용하는 밀크그라우트가 대표적이었다. 그러나 최근 분쇄분급기술이 급속히 발전하면서 분체의 마이크로화가 가능하여졌고 무기계 현탁형 그라우트도 용액형 그라우트에 필적하는 침투성을 발휘할 수 있는 요소기술이 확보되었다. 현탁액형 그라우트의 침투성에 영향을 미치는 주요 인자는 분체입자의 크기와 현탁액의 점성이 가장 큰

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

2) 정희원, 경기관광공사 과장

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

영향을 미친다(한국지오택, 2006a).

그러나 마이크로화 될 경우 이 두가지 특성이 서로 대치되는 영향을 미친다. 즉, 마이크로화 됨으로써 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 물-시멘트비를 높이거나 전기화학적인 분산작용을 유발시킬 수 있는 화학혼화제를 사용하는 기술이 적용되고 있다. 종래의 경우 물-시멘트비를 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 블리딩에 의한 부피감소와 건조수축량을 대폭 경감시킬 수 있으며 재주입의 필요성이 줄어들기 때문에 시공속도를 향상시킬 수 있게 되었다(한국지오택, 2006b).

본 연구에서는 초미립자주입재의 현장적용성을 검토하기 위해 난투수성 암반기초에서 초미립자주입재를 사용하는 경우와 보통시멘트주입재를 사용하는 경우를 비교검토하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 암반내의 틈과 주입재의 침투성

일반적으로 암반 중의 물은 틈(fracture)을 통해 이동하며 암반 투수계수는 대상주입 구간 내에 물을 주입하여 구하게 된다. 투수계수를 구하여 암반의 투수성을 평가하며 식 (1)에 의해 투수계수( $k_s$ )를 구한다.

$$k_s = \frac{Q_s \times \ln(L/r)}{2 \times \pi \times L \times H} \quad (1)$$

여기서,  $k_s$  : 투수계수(cm/sec)

$Q_s$  : 투수율(mL/sec)

$L$  : 주입구간길이(cm)

$H$  : 전수두(cm)

$r$  : 주입공반경(cm)

위 식 (1)의 투수계수는 주입 구간내 틈의 개수는 상관없이 전체적인 투수율을 만족시키도록 1개의 틈으로 대표시켜 산출된다.

투수계수만으로 그림 1의 (a) 및 (b)와 같은 경우를 동일한 침투성을 가진 암반으로 평가한다는 것은 불합리한 점이 있어

이러한 틈의 크기에 따른 침투성을 합리적으로 평가하기 위해서 종래의 투수계수를 「시스템 투수계수(system permeability),  $k_s$ 」, 틈의 크기를 고려한 투수계수를 「틈의 투수계수(fracture permeability),  $k_f$ 」로 구분한다(표 1 참조). 틈으로 흐르는 투수율  $Q_f$ 는 시스템 투수계수( $k_s$ )와 틈의 개구폭( $b$ )과의 관계로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$Q_f = \frac{2 \times \pi \times b \times H \times k_f}{\ln(r_0/r)} \quad (2)$$

$$k_f = \frac{r \times b^2}{12\mu} \quad (3)$$

여기서,  $Q_f$  : 틈의 투수율(mL/sec)

$b$  : 틈의 개구폭(cm)

$r_0$  : 주수영향반경(cm)

$k_f$  : 틈의 투수계수(cm/sec)

$r$  : 유체비중

$\mu$  : 유체동점성계수

또한 틈과 틈의 간격을  $s(=1/n)$ 라 하면, 시스템 투수계수( $k_s$ )는 식 (4)로도 나타낼 수 있다.

$$k_s = \frac{b}{s} \times k_f = \frac{b}{s} \times \frac{\gamma b^2}{12\mu} = \frac{\gamma b^2}{12 \times \mu \times s} \quad (4)$$

이 식 (4)에서  $r_0 = 100$ cm,  $L=100$ cm로 하였을 때 개구폭  $b$ 를 산출하여 그 분포도를 그리면 그림 2와 같다.

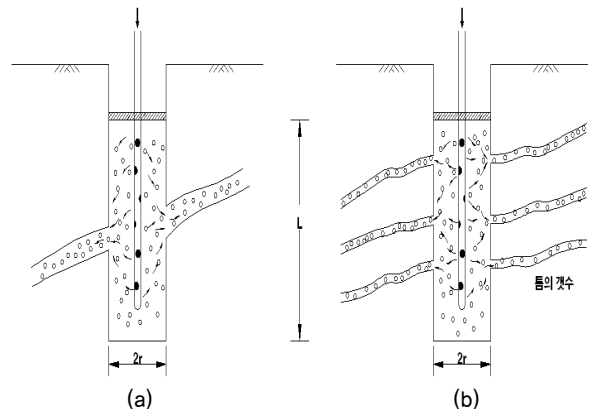


그림 1. 동일한 투수성에서 개별틈의 개수 및 크기가 다른 경우

표 1. 개별틈의 개수에 따른 투수계수(예)

구분	(A)	(B)
· $K_s$ 치, 틈의 개구부 총면적	동일	동일
· 틈의 갯수	적다	많다
· 개별틈의 개구부 면적	넓다	좁다
· 주입재 투입	침투	A ; 可, B ; 不可

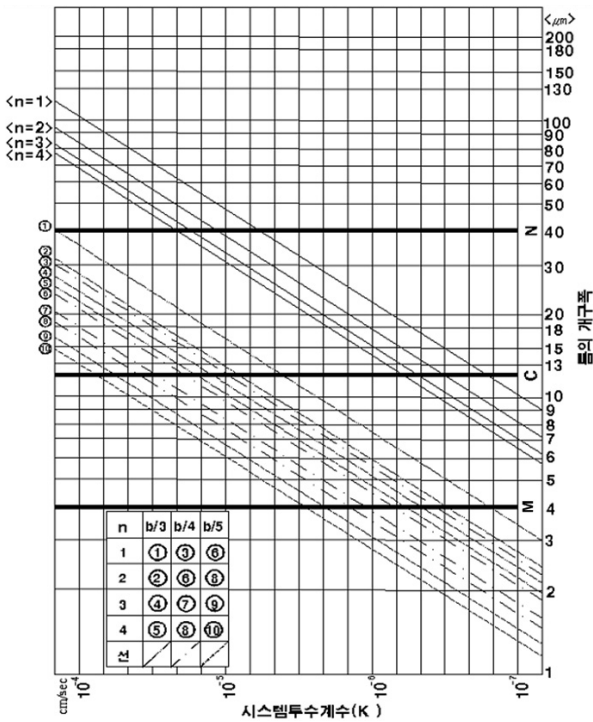


그림 2. 틸의 개구폭 분포에 따른 침투용이성 비교검토 (천병식, 1998; kutzner, 1996)

## 2.2 시멘트계 주입재의 사용기준

Mitchel, J.K.(1970)에 의하면 주입재의 입경(Φ)이 암반 틸의 개구부(b)의 1/3이하일 경우에 침투주입이 가능하다고 제안하였다. 또한 틸의 형상이나 그 결합구조의 양상은 물론 주입재의 입자크기 즉, 보통시멘트( $d_{50\%}$ ;  $20\mu\text{m}$ ,  $d_{\text{max}}$ ;  $100\mu\text{m}$ , 비표면적;  $2,800\text{cm}^2/\text{g}$ 이상), 콜로이드시멘트( $d_{50\%}$ ;  $9\mu\text{m}$ ,  $d_{\text{max}}$ ;  $40\mu\text{m}$ , 비표면적;  $6,000\sim 6,500\text{cm}^2/\text{g}$ ), 초미립자주입재 ( $d_{50\%}$ ;  $4\mu\text{m}$ ,  $d_{\text{max}}$ ;  $10\mu\text{m}$ , 비표면적;  $8,000\sim 8,500\text{cm}^2/\text{g}$ ) 또는 형상(판상, 일장축형, 구형, 입방체 등) 등에 따라 그 주입효과는 달라진다.

틸의 개구폭(b)의 1/3이하일 때 즉, b/3, b/4 및 b/5인 경우의 각 시멘트 주입재의 사용적합 여부를 그림 2를 사용하여 판정해보기로 한다. 보통시멘트(N)는 투수계수( $k_s$ )  $10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$  이하에서 주입재로서는 전혀 불필요하고, 콜로이드시멘트(C)는  $k_s=10^{-4}\text{cm}/\text{sec}$  이상에서만 주입재로서 유효하고,  $k_s=10^{-5}\text{cm}/\text{sec}$  이하에서는 거의 불필요하다.

그러나, 토양지반과는 달리 암반에 있어서는  $k_s=10^{-5}\text{cm}/\text{sec}$  정도로도 누수문제가 제기될 수 있으므로 이러한 암반조건에서도 적용될 수 있음이 판정되어 초미립자시멘트(M)는  $k_s=10^{-6}\text{cm}/\text{sec}$  인 암반까지도 일부 적용이 가능하다는 점을 고려할 때, 현실적인 암반내의 틸의 형상이나 그 결합구조의 양상이 주입재 등으로서의 역할에 제약을 가하지 않는 한, 암반주입용 시멘트주입재로서의 적합하다고 볼 수 있다.

표 2. 주입재 적부 판정표(Mitchel, 1970)

ks(cm/sec)	시멘트	normal			colloid			superfine		
		b/3	b/4	b/5	b/3	b/4	b/5	b/3	b/4	b/5
$10^{-4}$	1	x	x	x	o	o	o	o	o	o
	2	x	x	x	o	o	o	o	o	o
	3	x	x	x	o	o	o	o	o	o
	4	x	x	x	o	o	o	o	o	o
$10^{-5}$	1	x	x	x	o	△	x	o	o	o
	2	x	x	x	o	x	x	o	o	o
	3	x	x	x	x	x	x	o	o	o
	4	x	x	x	x	x	x	o	o	o
$10^{-6}$	1	x	x	x	x	x	x	o	o	o
	2	x	x	x	x	x	x	o	o	o
	3	x	x	x	x	x	x	o	△	x
	4	x	x	x	x	x	x	o	x	x

주) ○ :  $\phi < b/3, b/4, b/5$  ; 적합  
 △ :  $\phi = b/3, b/4, b/5$  ; 적합  
 x :  $\phi > b/3, b/4, b/5$  ; 적합  
 $\phi$  : 주입재 입자직경

표 3. 시멘트계 주입재의 물리적 특성치 비교

	KS규격 제한값	초미립자시멘트 (MSG-N형)	콜로이드 시멘트	보통 시멘트	
비 중	-	2.94	3.02	3.15	
비표면적 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	2,800이상	8,150	6,620	3,250	
길 모 아 용 결	W/C (%)	-	30.5	29.3	28.7
	초결 (분)	60 이상	205	195	1700
	종결 (시:분)	10 이하	8:05	7:45	7:30
압축 강도	W/C (%)	-	50.7	49.4	48.50
	3일 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	110 이상	356	299	202
	7일 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	190 이상	535	480	264
	28일 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	290 이상	689	570	405

그림 2에서 N선, C선, M선은 주입재 종류별 80% 통과입경 수직선이며 이를 근거로 각 주입재별 침투성 적부 판정표를 작성하면 표 2와 같다. 표 3은 보통시멘트 및 초미립자시멘트 등 시멘트계 주입재의 물리적 특성치를 비교하였다 (천병식 등, 2002).

## 3. 현장시험

### 3.1 시험지역의 현황

본 현장시험은 성남시 수정구 신분당선 전철건설 ○공구 #9

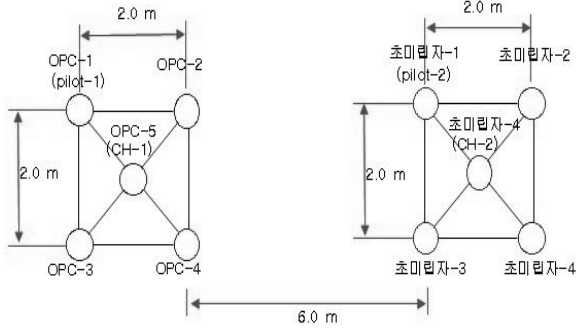


그림 3. 암반층 주입·시험공 배치도



(a) 시험공 배치

(b) 시험공 주입

그림 4. 시험주입공의 배치 및 주입

수직구에서 시행하였으며 지층은 상부로부터 매립층(0.5m), 풍화토(1.5m), 풍화암(1m), 연암(12m) 순으로 거의 대부분이 연암으로 구성되어 있으며, 연암층 15m까지 천공하여 주입재를 주입하였다.

암반지반에서 시험주입에 필요한 주입공의 수와 배열 형태는 일반적으로 주입공 간격에 따른 개량효과를 연속적으로 파악하기 위하여 단계별 주입공 배치를 원칙으로 하나, 본 연구의 경우 제반여건상 시험시공에 있어서는 정사각형의 형태로 배치하여 시험하였으며, 초미립자 주입재 및 보통시멘트에 대한 각각의 배치형태는 그림 3, 4와 같다.

### 3.2 시험조건

조사천공 시 Ø75mm의 유압시추기를 이용하여 심도 15m까지 천공하여 조사하였으며, 주입천공에는 Ø 45mm ROD를 사용하여 주입심도까지 천공하였다.

주입은 상향그라우팅으로 1.0shot 공정을 적용하였다. 컴퓨터를 이용한 p~q~t 계측관리 장치를 적용하여 주입량을 조절하였다. 주입압력은 최대 1MPa 이하로 설정하여 정량과 정압주입을 병행하였다. 사용재료는 투수성이 비교적 작은 암반지층에서 재료적인 차이에 의한 침투성 등 주입효과를 비교하기 위해서 분말도 8,000cm<sup>2</sup>/g급의 초미립자주입재(Microfine Cement, MC)와 분말도 4,000cm<sup>2</sup>/g급의 보통시멘트 주입재(Normal Cement, NC)를 사용재료로 선정하였다. 현장조건에 적합한 표준배합을 표 4와 같이 제안하고 주입시험 중 배합비를 조정하면서 주입하였다.

표 4. 암반층 적용 표준 배합표(1,000L 기준)

	W/C (%)	MC or NC (kgf)	Water (L)	비고
1	100	750	750	현장 주입여건에 따라 배합비 선정 후 주입
2	150	546	818	
3	200	429	857	

### 3.3 시험방법

#### (1) 시추조사

그라우팅 시험공에 대하여 시험 전·후 지층의 성층상태, 기반암의 풍화상태 및 심도의 변화 등을 파악하기 위해서 TCR(코아회수율)과 RQD(등급별 암질지수)를 평가하였으며 기 선정된 2개소의 지점에 대하여 회전수세식 시추기를 사용하여 NX(Ø76.0mm) 규격으로 수직 시추하였다.

#### (2) 현장수압시험

그라우팅 시공 전·후 그라우팅 효과를 확인하기 위한 시험으로 시험 대상구간에서 single parker를 사용하여 하향식으로 수압시험을 실시하였으며 시험 시 주입압력의 증감은 단계별로 실시하여 각 단계에서 주입압력별로 약 5분간 가압 시간을 유지한 후 정확한 주입수량을 측정하였다(Houlsby, 1976).

#### (3) 공내재하시험

원지반 시추공 주변지반과 그라우팅 후 지반의 변형특성을 파악하기 위하여 지반의 탄성계수를 구하는데 그 목적이 있으며, 본 시험에서는 OYO사의 Elastmeter-2 장비를 이용하여 실시하였다.

#### (4) 공내전단시험

원지반 시추공 주변지반과 그라우팅 후 지반의 전단강도 변화를 파악하기 위한 목적으로 실시하였으며 시추공내 수직 및 전단응력을 가하여 지반의 점착력 및 내부마찰각의 강도정수를 직접 얻기 위하여 실시하였다.

#### (5) p~q~t chart

주입 시공 중 주입압(p)과 주입율(q) 관계를 컴퓨터를 이용한 자동관리 시스템(Automatic Grouting System, AGS)으로 검측한다. 즉, AGS는 사전에 설정된 한계압력(pcr)을 범위내에서 주입될 수 있도록 주입율(q)을 조정하면서 주입이 관리될 수 있도록 구성된 시스템이다.

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 시추조사

초미립자주입재 시험공은 지표로부터 매립층(0.0~0.5m), 풍화토(0.5~1.5m), 풍화암(1.5~3.0m), 연암(3.0~15m)순으로 구성되어 있으며, 암질상태(TCR/RQD)를 시험 전·후로 정리하면 표 5와 같다.

시추조사한 암석시편에 페놀프탈레인 지시약을 살포하여 초미립자주입재를 주입한 지반의 약액주입효과를 육안으로 확인하였다(그림 5 참조).

보통시멘트(NC) 시험공은 지표로부터 매립층(0.0~0.5m), 풍화토(0.5~1.5m), 풍화암(2.0~3.0m), 연암(3.0~15m) 순으로 구성되어 있으며, 암질상태(TCR/RQD)를 시험 전·후로 정리하면 표 6과 같다.

보통시멘트를 주입한 지반의 약액주입효과를 육안으로 확인하기 위해 시추조사한 암석시편에 페놀프탈레인 지시

표 5. 초미립자주입재 그라우팅 전·후 암질상태(단위, %)

구분	공변	연 암(TCR/RQD)					
		3~6m	6~9m	9~10m	10~12.5m	12.5~13.5m	13.5~15m
시험전	pilot-2	55/8	37/8	100/13	0/0	70/0	82/12
시험후	CH-2	74/16	83/34	100/26	41/10	90/20	88/38
변화상태		19/8 증가	49/26 증가	0/13 증가	41/10 증가	20/20 증가	6/26 증가
평균		22.5% / 17.2% 증가					



그림 5. 초미립자주입재 시험공에 대한 시추조사 결과

표 6. 보통시멘트 그라우팅 전·후 암질상태(단위, %)

구분	공변	연 암 (TCR/RQD)				
		3~6m	6~9m	9~10m	10~12m	12~15m
시험 전	pilot-1	30/0	0/0	100/55	77/37	75/51
시험 후	CH-1	54/10	33/8	100/57	80/45	100/95
변화상태		24/10 증가	33/8 증가	0/2 증가	3/8 증가	25/44 증가
평균		17% / 14% 증가				

약을 살포하였다(그림 6). 초미립자주입재의 경우에 비교하면 페놀프탈레인 반응은 미소하였다.

본 현장과 같이 연안정도의 암질상태에서 초미립자주입재와 보통시멘트를 주입한 전·후의 암질상태(TCR과 RQD) 변화를 측정된 결과 초미립자주입재를 주입한 경우가 보통시멘트를 주입한 경우에 비해서 암질개선효과가 우수함을 보여주고 있다(그림 7 참조).

### 4.2 Lugeon test 결과

초미립자주입재 구간의 시공 전·후 투수계수 및 루전값(Lu) 변화를 분석한 결과 투수계수는 시공 전 3.342E-05에서 시공 후 5.408E-07로 약 1/100정도 투수성이 저감되었으며, 루전값은 주입 전 2.510에서 주입 후 0.026으로 저감되어 거의 불투성으로 개량되었음을 알 수 있다(표 7 참조).

반면, 보통시멘트 구간의 시공 전·후 투수계수 및 루전값 변화를 분석한 결과 투수계수는 주입 전 1.329E-05에서 주입

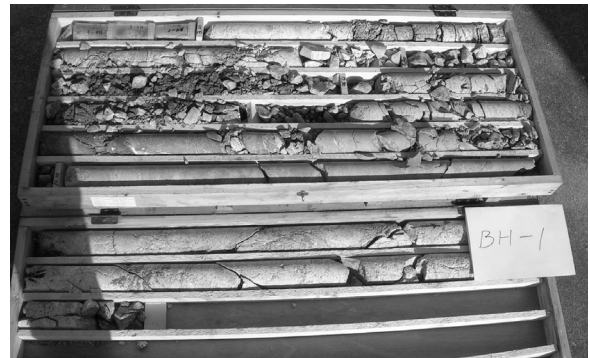


그림 6. 보통시멘트 시험공에 대한 시추조사 결과

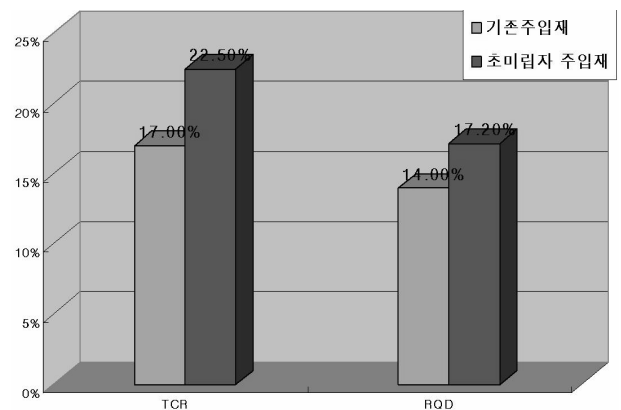


그림 7. 그라우팅 전·후 암질상태(TCR, RQD) 비교

표 7. 초미립자주입재의 그라우팅 전·후 k 및 Lu 변화

구분	공 변	심 도(m)	지 층	투수계수 (cm/sec)	루전값
시험 전	pilot-2	5.0~10.0	연 암	3.342E-05	2.510
시험 후	CH-2	5.0~10.0	연 암	5.408E-07	0.026

후 1.854E-06로 측정되어 약 1/10정도 투수성이 저감되었고, 루전값은 주입 전 0.950에서 주입 후 0.135로 측정되어 초미립자주입재를 사용한 경우에 비해서는 미약하지만 보통시멘

표 8. 보통 시멘트의 그라우팅 전·후 k 및 Lu 변화

구 분	공 변	심 도(m)	지 층	투수계수 (cm/sec)	루전값
시험 전	pilot-1	5.0~10.0	연 압	1.329E-05	0.950
시험 후	CH-1	5.0~10.0	연 압	1.854E-06	0.135

표 9. 초미립자주입재의 시험 전·후 공내재하시험 결과

구 분	공 변	심 도 (GL.-m)	변형계수 (MPa)	탄성계수 (kPa)	비 고
시험 전	pilot-2	9.0	529.85	740.21	연 압
시험 후	CH-2	9.0	833.47	1027.84	연 압
그라우팅 효과			57.3% 증가	38.9% 증가	

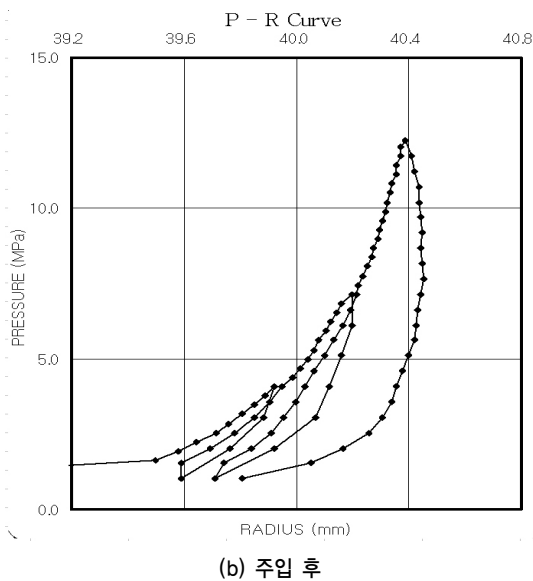
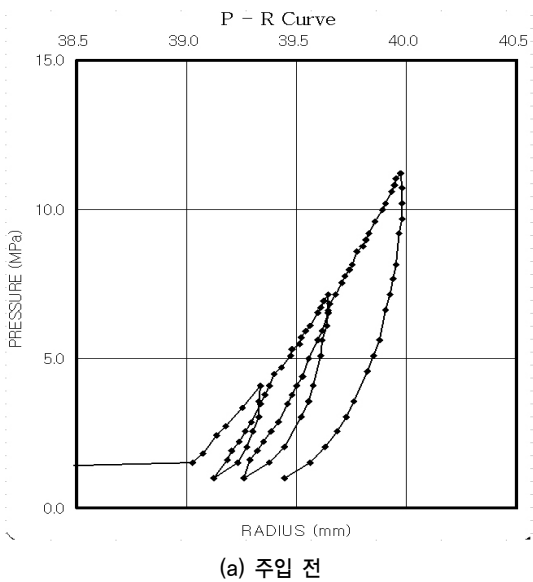


그림 8. 시험 전·후의 P-R Curve 변화(pilot-2, CH-2)

트를 사용한 경우도 차수효과가 향상되었다(표 8 참조).

### 4.3 공내재하시험 결과

초미립자주입재의 그라우팅 전·후의 공내재하시험 결과, 변형계수는 각각 303.62MPa, 탄성계수는 287.63MPa 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다(표 9, 그림 8 참조)

보통시멘트 주입재의 그라우팅 전·후의 공내 재하시험 결과, 변형계수는 15.2MPa, 탄성계수는 30.79MPa 정도 지반 변형특성이 증가하는 것을 볼 수 있었다(표 10, 그림 9 참조).

시험 전 공내재하시험 결과, 초미립자주입재 구간의 탄

표 10. 보통시멘트의 시험 전·후 공내재하시험 결과

구 분	공 변	심 도 (GL.-m)	변형계수 (MPa)	탄성계수 (MPa)	비고
시험 전	pilot-1	10.0	1,145.52	1,473.94	연압
시험 후	CH-1	10.0	1,160.72	1,504.73	연압
그라우팅 효과			1.3% 증가	2% 증가	

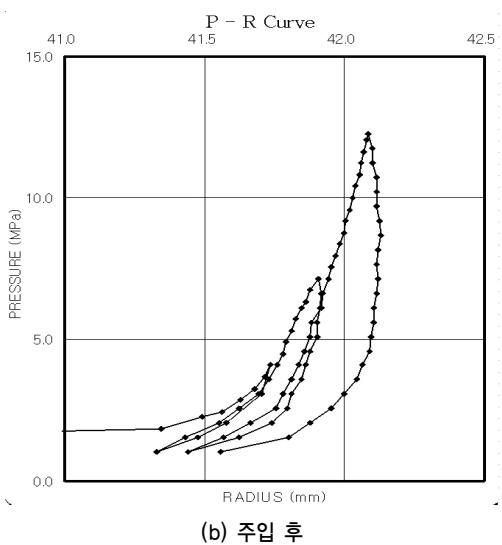
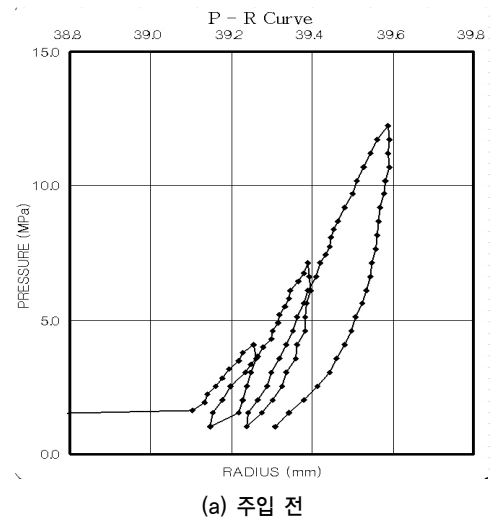


그림 9. 시험 전·후의 P-R Curve 변화 (pilot-1, CH-1)

성계수는 740.21MPa, 변형계수는 529.85MPa로 측정되었고, 보통시멘트 구간에서는 탄성계수는 1,473.94MPa, 변형계수는 1,145.52MPa로 측정되었다. 이들 결과값을 가지고 우리나라 각종 기관에서 제시하고 있는 공내 재하시험에 의한 암반분류를 적용할 경우 초미립자주입재 공의 경우 파쇄연암에서 풍화암 정도 범위를 보이고, 보통시멘트 시험공은 연암정도의 암반상태를 보이는 것으로 나타났다. 초미립자주입재와 보통시멘트를 이용한 주입시험 전·후의 공내재하시험 결과를 정리하면 표 10과 같다.

시험시공 전·후 기반암 변형특성 증가를 비교하여 검토하면 보통시멘트의 경우 시험 전 연암정도의 암반상태에서 주입 후 크게 암반의 변화가 없었던 반면, 초미립자주입재의 경우 시험 전 파쇄연암이나 풍화암 정도의 판정에서 시험 후 연암정도의 탄성계수 및 변형계수 증가가 발생하였다. 이는 초미립자주입재가 암반 보강에도 크게 영향을 미쳐 개량된 것으로 판단된다.

#### 4.4 공내전단시험 결과

공내 전단시험 결과, 그라우팅 시험 전 초미립자주입재 주입공은 점착력 36kPa, 내부마찰각 33.8°, 보통시멘트 주입공은 점착력 24kPa, 내부마찰각 31.8°로 나타나 우리나라 각종 기관에서 제시하고 있는 지반 전단강도 산정범위를 적

표 11. 시험 전·후 탄성계수와 변형계수

구 분	변형계수(MPa)				탄성계수(MPa)			
	MC	지층	OPC	지층	MC	지층	OPC	지층
시험 전	529.85	풍화암	1,145.52	연암	740.21	풍화암	1,473.94	연암
시험 후	833.47	풍화암	1,160.72	연암	1027.84	연암	1,504.73	연암
그라우팅 효과	303.62 증가	-	15.2 증가	-	2,933 증가	-	314 증가	-

표 12. 초미립자 주입재의 시험 전·후 공내전단시험 결과

구 분	공 번	심 도 (GL. -m)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	비 고
시험 전	pilot-2	2.0	36	33.8	풍화암
시험 후	CH-2	2.0	40	36.1	풍화암
그라우팅 효과			11% 증가	6.8% 증가	

표 13. 보통시멘트의 시험 전·후 공내전단시험 결과

구 분	공 번	심 도 (GL. -m)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	비 고
시험 전	pilot-1	2.0	24	31.8	풍화암
시험 후	CH-1	2.0	28	33.2	풍화암
그라우팅 효과			16.7% 증가	4.4% 증가	

용할 경우 풍화암의 범위인 점착력 30~50kPa, 내부마찰각 30~35° 범위와 유사한 것으로 나타났다.

그라우팅 시험 후 초미립자주입재의 시험시공 구간에서 공내전단시험을 실시한 결과, 점착력은 주입 전 36kPa에서 주입 후 40kPa으로 4kPa정도 상승하였으며, 내부마찰각은 주입 전 33.8°에서 주입 후 36.1°로 2.3° 정도 증가하였다(표 12 참조).

보통시멘트의 시험구간에서 공내전단시험을 실시한 결과, 점착력은 주입 전 24kPa에서 주입 후 28kPa로 4kPa증가하였으며, 내부마찰각은 주입 전 31.8°에서 주입 후 33.2°로 1.4°정도 증가하였다(표 13 참조).

전단시험에서는 시험 전·후로 약간 증가 상태를 보이고 있으며 보통시멘트와 초미립자주입재가 큰 변화 없이 유사하게 변화된 것을 확인할 수 있었다. 이는 공내전단시험시 N치를 기준으로 풍화암이나 암석시편상태가 불량한 구간을 포함했기 때문으로 판단된다(천병식 등, 2010). 절리 및 균열이 발달하여 전단판의 요철부가 공벽에 밀착되지 않거나 밀착되었더라도 절리개구의 영향으로 전단력이 감소한 것으로 판단된다.

#### 4.5 단위주입량 분석

본 시험을 통해 주입공 차수별 주입재의 단위주입량을 정리하면 다음 표 14와 같으며, Deere(1982)의 주입량 기준(표 15)에 의하면 초미립자주입재의 경우 보통수준으로 주입되었으며 보통시멘트는 다소 적게 주입된 것으로 판정할 수 있다.

#### 4.6 p~q~t chart 유형분석

초미립자 주입재와 기존 주입재를 이용하여 암반 주입하

표 14. 차수별 주입재 단위주입량(kgf/m)

주입공 차수	1차공	2차공	3차공	4차공	평균	비고
MC	105	61	35	12	53	- 초미립자 비중 ; 3.0
OPC	64	33	36	27	40	- OPC 비중 ; 3.14
						- W/C ; 100%

표 15. 다량주입과 소량주입의 기준(Deere, 1982)

구 분	kgf/m
대단히 많음(very high)	> 400
많음(high)	201~400
약간 많음(moderately high)	101~200
보통(moderate)	51~100
약간 적음(moderately low)	26~50
적음(low)	0~25

였을 때 변화되는 p~q chart를 파악하기 위하여 시험주입 기간 동안 그라우팅 자동화 시스템(AGS)에 의해 기록하였다. 암반기초에서 정량 및 정압 주입시공 중 주입압(p)과 주입율(q) 변화는 AGS를 적용하여 관측하였으며 대표적으로 표 16와 같은 결과를 얻었다.

1차공 주입작업의 경우 초미립자 주입재와 보통시멘트는 암반 주입 유형(천병식 등, 2008)의 B1형으로 판정이 되었으며 이 유형은 최고압력이나 한계압력 상태에서 확인되지 않은 균열로 주입재가 들어가는 것으로 판단할 수 있다.

2, 3차공 주입작업과 4차공 주입작업의 경우 초미립자주입재는 A2, B1형으로 판정되었다. A2의 경우 압력이 최고에 도달한 후 균열의 열림(opening)현상으로 일시적으로 압력저하 후 주입재가 채워지면서 압력이 다시 상승하는 현상이고, B1의 경우 최고압력에서 다른 균열(new cracks)이 열리는 경우이다. 보통시멘트 주입재는 2, 3차공 주입작업과

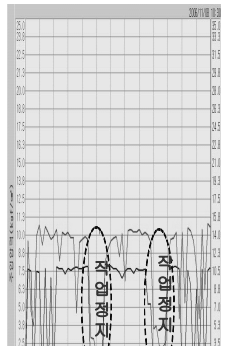
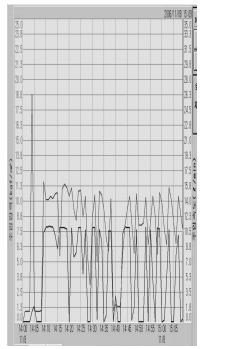
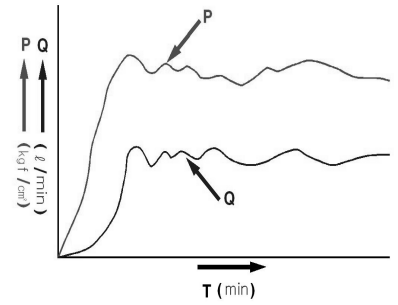
4차공 주입작업의 암반 유형판정이 불가능 할 정도로 주입재가 주입이 안 되고 대부분의 주입재가 리턴라인으로 회수되는 현상이 발생되어 판정이 힘든 p~q~t chart 유형을 보였다. 이는 초미립자 주입재에 비해 입자가 굵은 보통시멘트 주입재의 경우 1차공 주입에 대부분의 암반 절리를 채워준 후에는 2, 3차공과 4차공 주입작업에서 미세 절리의 공극을 채워주지 못하고 모두 리턴라인으로 회수되기 때문으로 판단된다. 즉, 보통시멘트는 입자가 굵기 때문에 1차주입공 이후 인접공에서 주입이 어렵기 때문에 한계압력을 쉽게 초과하여 주입재가 대부분 리턴되어 지반으로 주입이 되지 못하는 반면 초미립자 주입재를 사용하는 경우 1차 주입공 이후 2, 3차 주입공에서도 어느정도 주입이 가능하므로 한계압력에 쉽게 도달하지 않고 주입재의 회수율도 낮아 지반 내로 원활하게 주입되고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 암반지역에서의 초미립자주입재와 보통시멘트 주입재의 주입효과 평가를 위해서 시추조사, 수압시험, 공내재하시험, 공내전단시험, 단위주입량분석, 주입시공 중 p~q~t chart 유형 분석을 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 시추조사 결과 그라우팅 후의 암질상태(TCR/RQD) 변화가 뚜렷하였으며, 초미립자를 주입한 경우가 보통시멘트를 주입한 경우보다 개량효과가 좀더 우수하였다.
- (2) 시공 전 수압시험 결과  $10^{-5} \text{cm/sec}$  정도의 난투수성 지역으로 보통시멘트는 거의 침투가 될 수 없으며 초미립자주입재는 침투가 가능한 지반특성으로 판정된다. 시공 후 수압시험 결과 초미립자주입재 시공구간의 투수계수는  $10^{-7} \text{cm/sec}$  정도로, 보통시멘트 주입재 시공구간의 투수계수는  $10^{-6} \text{cm/sec}$  정도로 개량되었다.
- (3) 시공 전 공내 재하시험 결과, 초미립자 주입대상 지반은 파쇄연암이나 풍화암 정도의 암반상태인 반면 보통시멘트 주입대상 지반은 연암정도의 탄성계수와 변형계수 범위를 나타냈다. 시공 후 공내 재하시험 결과, 초미립자 주입대상 지반과 보통시멘트 주입대상 지반이 모두 연암정도로 개량되었으며, 이는 초미립자주입재가 보통시멘트 주입재에 비해서 암반 보강에도 유리함을 보여 주고 있다.
- (4) 단위주입량 검토결과 초미립자주입재는 Deere(1982)의 기준에 따르면 보통(moderate)수준으로 주입이 되었으며, 보통시멘트 주입재의 경우는 약간 적음(moderately

표 16. 초미립자 주입재의 p~q~t chart 분석

	초미립자 주입재	일반시멘트
p~q~t chart		
주입특성	한계압력 1MPa를 유지하고 주입속도는 작업정지 및 압력조정 이외에는 거의 일정하게 유지됨.	주입압력과 주입속도의 변화주기가 많이 발생하면서 주입됨.
주입유형 판정		
	B1형 : 최고압력에 달한 후에도 압력과 주입율이 일정하게 유지됨.	
조지방안	- 설계압력 보다 주입압력 높음. - 주입을 통한 한계압력 설정 ; 1MPa - 한계압력 1MPa를 컨트롤 하면서 주입속도는 7~10L/min 주입.	- 주입압력 조정을 위해 주입속도 및 주기를 확인 - 주입속도의 불규칙으로 주입량 감소.



low) 수준으로 주입이 되었다. 이를 고려하면 초미립자 주입재가 보통시멘트에 비해 미세한 공극까지 침투가 더 많이 이루어진 것으로 사료된다.

(5) p~q~t chart 변화 검측 결과 초미립자주입재를 사용할 경우 한계압력에 쉽게 도달하지 않고 주입재의 회수율도 낮기 때문에 주입효과와 시공성이 향상될 것으로 판단된다.

본 연구와 같이  $10^{-5}$ cm/sec 정도의 난투수성 암반기초에서 초미립자주입재를 사용하는 경우가 보통시멘트 주입재를 사용하는 경우보다 암반상태, 투수성, 탄성계수 및 변형계수, 단위주입량 및 주입재 회수율 등 측면에서는 유리하지만 전단응력 측면에서는 유의차가 없는 것으로 확인되었다. 따라서, 난투수성 암반기초에서는 기초 차수 및 보강성을 확보하기 위해서는 보통시멘트를 사용하는 것 보다는 초미립자주입재를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김진춘(1999), *지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구*, 박사학위논문, 한양대학교, pp. 10~12.
2. 천병식(1998), *최신지반주입 - 이론과 실제*, 원기술, pp. 45~46.
3. 천병식, 김진춘, 이준우(2002), MSG 주입재의 침투특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 22, No.2-C, pp. 161~171.
4. 천병식, 박두희, 김대영, 채휘영(2010), *지반공학실험 및 조사*, 구미서관, pp. 438~442.
5. 천병식, 최동찬, 김진춘(2008), P-q-t chart 분석기법을 이용한 그라우팅 신뢰성 향상 방안에 관한 실험적 연구, *한국터널공학회 논문집*, Vol. 10, No. 4, pp. 383~395.
6. 한국지오택(2006a), *초미립자 주입재 현장적용(암반층) 결과보고서*, 05건설핵심D09-차세대 시설물용 신재료 활용기술 연구단, 한국철도기술연구원, pp. 1~90.
7. 한국지오택(2006b), *해저시설물 차폐기술 개발 중 그라우팅 설계기술개발 3차년도 보고서*, 건설핵심 D10-01, 건설교통부, pp. 4~9.
8. Deere, D. U.(1982), *Cement-Bentonite Grouting for Dams*, ASCE Grouting in Geotechnical Engineering, pp. 280-282.
9. Houlsby, A. C.(1976), Routine Interpretation of the Lugeon Water-test, *Engineering Geology*, Vol 9, pp. 303~313.
10. Kutzner, C.(1996), *Grouting of Rock and Soil*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 4~6.
11. Mitchel, J. K.(1970), In Place Treatment of Foundation Soils, *Proceeding of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, pp. 73~110.
12. Neville, A.M.(1982), *Properties of Concrete*, Pitman, London, pp. 1~2.

(접수일: 2010. 7. 6 심사일: 2010. 8. 18 심사완료일: 2010. 11. 17)