

# 지반보강용 마이크로시멘트의 기초적 특성

## A fundamental properties of microcement in earth concreting

김진춘\*,  
Kim, Jin chun

최광일\*\*,  
Choi, Kwang il

박재용\*\*\*  
Park, Jae Yong

### ABSTRACT

Generally speaking, grouting on the base stabilizes the ground as the aspects of mechanic and engineering properties, with drilling hole at any depth of the earth, and pressuring the cement milk or special chemical grouting material in it. The purpose of grouting on the base is waterproofness and solidification of the ground by earth concreting that the cement milk pass through particles of soil or crack of rock.

This report shows the fundamental properties of microcement compared with those of ordinary portland cement in a point of grouting. It also describes that experimental applications on the treatment of the weathered rock at the construction of Taegu subway and Boryong earth filled dam site, south of chungchung province, resulted in success.

### 1. 서론

최근 토목공사에서는 지반의 안정성 확보를 위해서 각종 그라우팅 공법이 많이 사용되고 있다. 지하철 연약지반의 차수 및 보강, 댐 기초압반의 변형, 침투유량의 억제 및 강화를 목적으로 보통포틀랜드시멘트를 이용한 시멘트밀크의 주입에 의한 기초처리가 일반적으로 적용되고 있지만, 최근에는 공사지반의 지질에 破碎帶, 마사, 未高結砂岩 등 불균질한 지층이 나타나는 경우가 많아지면서 보통포틀랜드시멘트만으로는 주입효과가 불충분하기 때문에 최대입경 10 $\mu$ m 정도의 Grouting 전용 마이

크로시멘트를 사용함으로써 효과적인 주입 시공이 가능하여 졌다.

한편 댐건설, 도시토목공사 등에 사용되는 주입재는 환경보존, 강도, 내구성 측면에서 어떤 他재료보다도 수경성시멘트가 가장 우수하지만 지금까지 사용되어 왔던 시멘트계 주입재의 粒子徑은 최대입경 100 $\mu$ m, 평균입경 15~20 $\mu$ m 정도로 그 적용 범위에 한계가 있었다. 그러나, 최근에는 시멘트 생산 분야에도 분쇄·분급기술이 급속도로 발달하여 시멘트 粒子徑이 최대입경 10 $\mu$ m, 평균입경 4 $\mu$ m 정도의 마이크로시멘트를 상업적으로 생산이 가능함으로써 Grouting 분야의 새로운 주입재로 각광받게 되었고 마이크로시멘트의 종합적인 특성은 <그림-1>과 같다.

\* 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원

\*\* 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 연구실장

\*\*\* 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 연구원

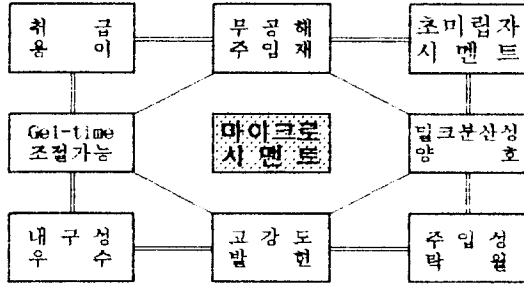


그림-1. 마이크로시멘트 특성

본 연구에서는 지하철 연약지반 및 댐 기초압반의 불균질한 기초에 대해서 현재의 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 처리하고 있는 주입공사 설계 및 시방으로 대처하기에는 한계가 있기 때문에 일본, 구미 등 선진국에서 널리 상용되고 있는 마이크로시멘트를 이용한 기초처리 효과를 주입성, 시공성 및 경제성 측면에서 검토하여 주입공사 설계 및 시방에 대한 기술자료를 제공코자 한다.

## 2. Grouting 영향인자 검토

시멘트밀크에 의한 주입의 원리는 시멘트입자를 다량의 물(W/C=100~1000%)에懸濁시키고 물을 시멘트 입자의 운반수단으로 삼아서 지반내 미소균열 및 공극을 충전시킨후 물은 점차 여과되어 지반내로 먼 거리까지 확산되어 나간다. 따라서, Grouting은 주입재의 입도에 의해서 좌우되는 침투성과 밀크의 안정성 및 유동성에 대해서 검토하면 다음과 같다.

### 2-1 注入材의 浸透性

각종 주입재의 침투를 쉽게 하기 위해서는 주입재 입자가 토립자사이 또는 균열 간극을 무리없이 통과할 수 있을 정도로 입자크기가 충분히 작아야 하며,

G. A. Kravetz는 각종 주입재 및 침투가능한

토립자에 대한 浸透性 실험결과 다음과 같은 注入比(groutability ratio) 관계식을 보고한 바 있다.

$$N1 = \frac{D15}{G85} > 15 \text{ or } N2 = \frac{D10}{G90} > 8$$

여기서,

N1, N2 : 注入比(Groutability Ratio)

D15, D10: 토립자 입경가적 15%, 10% 粒子徑

G85, G90: 주입재 입경가적 85%, 90% 粒子徑

또한, 암반균열 주입에 관해서 암반균열폭과 주입가능한 주입재의 최대입자경과의 관계를 J. K. Michel이 제안한 注入比는 다음과 같다.

$$N = \frac{D_{in\text{sure}}}{G_{max}} > 3$$

여기서,

$D_{in\text{sure}}$  : 암반균열幅,

$G_{max}$  : 주입재 입자의 최대 입경

따라서, 암반균열 주입비에 의하면 보통포틀랜드시멘트로 주입가능한 균열의 최저폭은 0.3mm, 마이크로시멘트로 주입가능한 균열의 최저폭은 0.03mm수준으로 알려져 있다.

注入比로만 판단하면 주입용 시멘트의 입자가 작을수록 좋다고 볼 수 있지만 실리카흄이나 점토광물에서와 같이 지나치게 고분말이기 때문에 오히려 응집현상이 발생함으로써 주입을 방해하는 것도 있다. 따라서 注入比에 의한 주입성의 평가는 마이크로시멘트와 같이 일정범위의 입도범위에 있는 재료가 효과적인 것으로 판단되며 마이크로시멘트를 비롯한 기타 침투성 주입재의 토질별 주입범위는 <그림-2>와 같이 평가되고 있다.

注入材	자갈 층	모래층			실트 층	점토 층
		coarse	medium	fine		
현 탁 형	M/C	[Bar chart showing high permeability across all layers]				
	OPC	[Bar chart showing low permeability across all layers]				
	Ben.	[Bar chart showing moderate permeability across all layers]				
용 액 형	Lig.	[Bar chart showing high permeability across all layers]				
	Ure.	[Bar chart showing high permeability across all layers]				
	Acr.	[Bar chart showing high permeability across all layers]				
土粒子徑 mm	2	0.5	0.25	0.074	0.005	
透水係數 cm/sec	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$

그림-2 침투성 주입재의 토질별 침투범위

<그림-2>에서 알 수 있듯이 마이크로시멘트는 침투성이 유기계의 용액형과 거의 같은 高浸透性일뿐만 아니라 무기계의 특징인 내구성과 고강도성 등을 갖추고 있기 때문에 침투성 주입재로써는 가장 바람직한 재료라고 할 수 있다.

### 2-2 밀크의 안정성

주입재를 현탁시킨 밀크의 安定性은 밀크중의 시멘트 粒子徑과 재료분리에 대한 안정성으로 나눌 수 있다. 보통포틀랜드시멘트는 分散系(10 $\mu$ m이상)와 凝集系(10 $\mu$ m이하)의 혼합계인 반면, 마이크로시멘트는 0.1~10 $\mu$ m의 입도를 갖는 응집계로 구성되어있기 때문에 재료분리에 대한 저항성이 크다.

시멘트입자경의 안정성에 대해서는 수화에 의해서 입자경의 증대 이외에 입자간의 충돌에 의한 응집의 강약에 큰 영향을 받고 실제의 주입에 있어서는 믹서의 교반방법, 교반시간 등에 의해서 복잡하게 영향을 받는다.

주입용 시멘트밀크는 주입 직전까지 균일한 상태로 주입되는 것이 이상적이지만 밀크는 비중이 비교적 큰 시멘트입자와

다량의 물로 묽게 배합되어 있기 때문에 재료분리가 일어나기 쉽고 불안정한 grouting이 일어날 수 있다. 따라서 균일한 밀크를 얻기 위해서 입자의 분산화를 계획할 필요가 있다.

### 2-3 밀크의 流動性

작은 힘으로 운동량이 큰 유체는 유동성이 크다고 하고 유체의 유동성의 양부는 점도로 비교된다. 주입밀크의 유동성(粘度)은 주입효율(주입속도, 주입량)에 영향을 미치고 밀크의 농도, 시멘트의 입도, 반응성 이외에 응집성과 관계가 크다.

즉, 시멘트밀크의 농도를 묽게하고 반응성을 지연시켜줄 수 있는 혼화제를 사용함으로써 유동성을 향상시킬 수 있지만 시멘트의 입도를 미세하게 할 수록 입자의 응집성이 강하므로 오히려 유동성이 떨어지는 경향을 보인다. 따라서, 주입재의 입자를 미세하게 할 경우 밀크의 유동성을 확보하기 위해서 적당한 분산계획을 세워야 한다.

## 3. 실험 및 결과분석

### 3-1 사용재료

#### (1) 시멘트

본 시험에 사용된 시멘트는 국내 S社에서 개발 시판하고 있는 마이크로시멘트(상품명;마이셈8000)와 보통시멘트를 선정 사용하였다.

#### (2) 응결조질제

주입재의 응결조질재로는 규산소다 3호를 사용하였다.

### 3-2 시멘트 품질 분석

#### (1) 화학성분

(단위:%)

종류	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
OPC	20.4	5.8	3.1	62.6	3.6	0.13	0.77	1.9
M.C	27.5	11.2	1.7	51.3	4.8	0.17	0.44	2.1

\*. M.C : Micro Cement

마이크로시멘트는 화학성분에서부터 보통시멘트와 차이가 뚜렷하다. 즉, 초미립화 함으로써 초기에 수화반응이 지나치게 크면 작업성 확보가 어렵기 때문에 초기수화 속도를 조절할 수 있도록 성분이 조정된 시멘트이다.

(2) 입도분포 (단위:누적%)

μm 종류	1	2	4	8	12	16	24	64	MS
OPC	4.9	7.3	14.3	27.1	37.0	45.3	62.3	96.0	18.2
M/C	14.5	27.9	57.2	89.6	98.2	99.6	100	-	3.5

마이크로시멘트는 입도가 보통시멘트보다 훨씬 작았다. 따라서, 마이크로시멘트는 보통시멘트에 비해서 토립자사이 또는 암반균열 사이로 침투되는 비율 (groutability ratio)이 커질 수 있다.

(3) 물리적 성질

종류	비중	Blaiss = 100%	충결 (길묘마)		Flow (%)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )					
			W/C %	충결 종결 % min h.		W/C (%)	1일	3일	7일	28일	
OPC	3.15	3180	25.0	170	7.30	106.2	48.5	96	195	278	368
M/C	3.03	8420	30.5	260	9.30	108.5	51.5	103	295	295	588

마이크로시멘트는 시멘트 물리성능 측면에서도 보통시멘트보다 우수한 특성을 갖고 있다.

### 3-3 주입재의 물리성능 분석

(1) 적용배합 (LW工法: 1.5shot방식)

지하철 등 일반 연약지반 Grouting 공사에서 가장 많이 사용되는 공법은 응결성 (Gel-Time) 조절이 용이하고 경제적인 반현탁형 불유리계 LW工法으로 본시험에서 적용한 배합수준은 다음과 같다.

□ A액 (시멘트용액)

W/C (%)	물 (g)	시멘트 (g)	비 고
200	6000	3000	7리터기준

□ B액 (불유리액)

- 규산소다3호 3.5리터 + 물 3.5리터

(2) 실험결과

종류	Gel-Time (sec)	B액 초가 참도 (cps)	Bleeding 율 (%) 30분後	침투성		
				시간 (sec)	재료분 리 (%)	Caking 발생
요구 수준	60 ~90	10 이하	차음수 목 양호	左同	左同	左同
OPC	64	12	약 40	90초과	70	多
M/C	65	4	약 3	3	-	-

\*. Sand Column Test ; φ10cm×H25cm,  
Sand F.M.=2.8, 펌푸흡인력=-5storr

종류	Homo-gel 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )			
	1일	3일	7일	28일
요구 수준	1일재령이후 1kg/cm <sup>2</sup> 이상, 클수록 양호			
OPC	1.2	2.3	4.6	15.7
M/C	4.1	14.2	34.8	48.5

위 실험결과 중에서 Gel-Time과 Homo-gel 압축강도는 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 Gel化되는 시간과 Gel化後 재령별로 강도발현 특성이다.

위 실험결과에서도 알 수 있듯이 보통시멘트는 침투성이 나쁘고 재료분리 경향이 크기 때문에 주입후 차수 및 지반강화 효과가 떨어질 가능성이 크지만, 마이크로시멘트는 일반적으로 요구되는 품질수준기준을 모든 항목에서 우수한 수준으로 만족하고 있다. 특히, Homo-gel 압축강도 발현에서 큰 차이가 나는 것은 마이크로시멘트가 토립자사이 및 암반균열에 침투후 경화가 되면 보통시멘트를 사용한 경우보다 지반강화 (earth concreting) 효과가 크다는 것을 의미한다.

## 4. 현장적용 사례

### 4-1 대구지하철 1-5공구

(1) 배경

지하철 공사현장에서 불과 20m정도 떨어진 인접지역에 15층짜리 고층아파트가 있고, 그 기초지반은 풍화암지대로 보링조사되었다. 따라서, 지하철을 굴착하면서

지반침하에 의한 인접 구조물의 심각한 균열발생이 우려되고 민원의 가능성이 높기 때문에 사전에 충분한 기술적 검토를 거쳐 확실한 지반보강대책을 세우기 위한 기술 자료를 얻기 위해서 마이크로시멘트를 이용하여 Grouting Test를 실시하기로 하였다.

(2) 현장 Grouting Test 결과

실험항목	결과
주입성	계획량을 일정한 압력으로 계속적으로 주입할 수 있었음
투수계수	-주입전측정치: $8.2 \times 10^{-4}$ cm/sec -주입후개선목표: $5.4 \times 10^{-5}$ cm/sec -마이크로시멘트 grouting後 측정된투수계수: $2.7 \times 10^{-8}$ cm/sec
표준관입 N-value	-주입前측정치: 15/30cm -주입後측정치: 47/30cm

위 결과에서 알 수 있듯이 본 현장의 지반에 마이크로시멘트를 적용할 경우 차수 및 지반보강 효과가 확실하다고 판단하여 아파트 앞부분의 Grouting에 마이크로시멘트를 적용하였다.

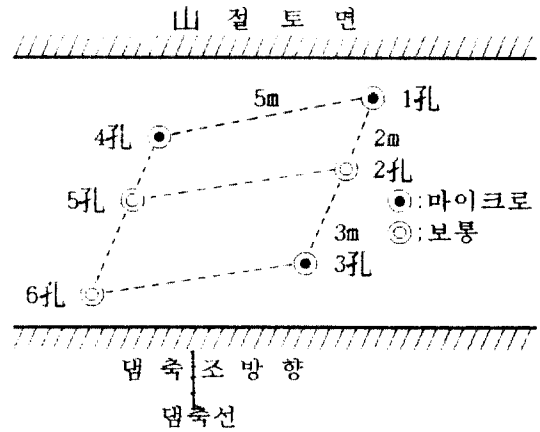
4-2 보령댐 축조현장

(1) 배경

보령댐의 기초지반은 層離가 밀집되고 炭層이 협재한 불균질한 암반으로 보링조사되었고 이와 같은 지반에는 보통시멘트로는 효과적인 Grouting이 어렵다고 판단되었다. 따라서 高浸透性의 마이크로시멘트를 사용할 경우 차수 및 지반보강 효과가 어느정도 개선될 수 있는지 확인하기 위해서 탄층대가 협재된 지역에서 시험 Grouting을 실시하기로 하였다.

(2) 현장 Grouting Test

1) 孔配置



2) 孔깊이 : 탄층대가 협재된 위치까지 보링 (7~12m)

3) 수압시험

孔 No.	천공 깊이 (m)	탄층깊이 (m)	탄층대 투수치 (Lu)	암층대 투수치 (Lu)
1	7.5	4.8~5.7	8.7	-
2	11.4	8.8~10.7	0.1	36.7
3	7.0	4.8~5.5	1.2	33.3
4	11.9	9.8~11.6	0.2	-
5	7.0	5.1~6.0	4.0	-
6	11.5	9.5~11.3	0.1	17.5

탄층대 수압시험결과 孔1 및 5를 제외하고는  $Lu < 3$ 으로 절리가 거의 없는 주입이 불필요한 암층대로 판단되며 실제로 주입을 시도한 결과 거의 주입이 되지 않았다. 한편, 孔2, 3 및 6의 수압시험결과 모두  $Lu > 10$ 으로 투수성이 큰 암층대로 판단되며 보통시멘트와 마이크로시멘트를 각 공별로 주입하였다.

4) 탄층대에서의 실험 결과

孔 No.	탄층깊이 (m)	Step長 (m)	탄층대 투수치 (Lu)	주입 시멘트 (종류)	시멘트 주입량 (kg)	단위 주입량 (kg/m <sup>3</sup> )
1	4.8~5.7	3.0	8.7	M/C	114.7	38.2
5	5.1~6.0	2.5	4.0	OPC	2.3	0.9

탄층대에서의 수압시험결과 10루존이하로 큰 절리는 거의 없고 미세한 절리만 존재하는 암층일 것으로 추정며 실제로 탄층대의 코아 관측결과에서도 큰 절리는 거의 없었다. 탄층대의 주입실험결과 마이크로시멘트를 주입한 孔1은 38.2kg/m, 보통시멘트를 주입한 孔5는 0.9kg/m 정도로 마이크로시멘트의 주입량이 40배이상 컸다. 따라서 미세한 절리만 발달되어 있어서 주입이 어려운 지반일수록 보통시멘트와 같이 입자가 굵은 시멘트보다는 마이크로시멘트를 사용하는 것이 주입성 측면에서 훨씬 유리하다는 것을 알 수 있다.

#### 5) 암층대에서의 실험 결과

孔 No.	탄층깊이 (m)	Step長 (m)	탄층대 루존치 (Lu)	주입 시멘트 (종류)	시멘트 주입량 (kg)	단위 주입량 kg/m
2	0.5~4.5	4.0	36.7	OPC	1508	377
3	0.5~4.5	4.0	33.3	M/C	2459	615

孔2와 3의 단위 주입량으로부터 알 수 있듯이 절리가 집중적으로 발달되어 있는 주입범위에서는 보통시멘트도 주입이 잘 되고 있지만 마이크로시멘트가 보통시멘트에 비해서 주입량이 1.6배이상 컸기 때문에 마이크로시멘트로 그라우팅하는 경우 루존치와 배합비 관계를 적절히 조정해서 시공성을 개선할 수 있고, 注入孔 간격을 넓힘으로써 그라우팅의 경제성을 개선할 수 있다고 판단된다.

### 5. 결론

(1) 마이크로시멘트와 보통시멘트간의 Grouting효과를 비교 파악하기 위하여 주입재의 물리성능 평가실험을 실시한 결과 마이크로시멘트는 밀크의 안정성, 지반침

투성능 및 지반보강효과 측면에서 보통시멘트보다 월등히 우수하였다.

(2) 탄층대와 같이 Grouting이 어려운 지층에서 마이크로시멘트는 보통시멘트보다 40배이상 주입이 잘되었다. 따라서, 미세 균열이 많아서 주입이 어려운 지층일수록 초미분말이면서 밀크의 분산성이 좋은 마이크로시멘트의 주입효과가 크다고 판단된다.

(3) 암층대와 같이 암반절리가 집중되어 있어 보통시멘트로도 Grouting이 잘되는 지층에서도 마이크로시멘트는 보통시멘트보다 2배정도 주입이 많이 되었다. 따라서, 층리가 발달되어 있는 일반 암층대에서도 마이크로시멘트의 주입량이 보통시멘트보다도 많기 때문에 루존치 수준별로 주입재 배합비를 적절히 고배합으로 조정함으로써 시공성을 개선할 수 있고 마이크로시멘트의 高浸透성을 이용하여 注入孔 간격을 넓힐 수 있기 때문에 시공비 절감도 가능할 것으로 판단된다.

### 參考文獻

- 1) 草野一人 ; 藥液注入工法ハンドブック, 吉井書店, 平成4年
- 2) 島田俊介 外 2人 ; 最先端技術の藥液注入工法, 理工圖書, 平成3年
- 3) William J. Clarke 外 2人 ; Ultrafine Cement Tests and Drilling Warm Springs Dam, American Society of Civil Engineers Geotechnical Engineering Division, April, 1993
- 4) 일본 道平川댐건설사무소 ; 道平川ダムのコンソリデ-ショングラウティングについて, ダム技術, No. 42, pp. 58~64, 1990
- 5) 천병식 ; 基礎地盤改良工法, 建設研究社, 1990