

쌍용마이셈 8000을 이용한 그라우팅 특성 및 현장적용 사례

김진춘 / 쌍용양회 중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원

최 근 토목공사에서는 지반의 안정성 확보를 위해서 각종 그라우팅 공법이 많이 사용되고 있다. 지하철 연약지반의 차수 및 보강, 댐기 초압반의 변형, 침투유량의 억제 및 강화를 목적으로 보통 포틀랜드시멘트를 이용한 시멘트밀크의 주입에 의한 기초처리가 일반적으로 적용되고 있지만, 최근에는 공사지반의 지질에 파쇄대(破碎帶), 마사, 미고결사암(未高結砂岩) 등 불균질한 지층이 나타나는 경우가 많아지면서 보통 포틀랜드시멘트만으로는 주입효과가 불충분하기 때문에 최대입경 10 μ m 정도의 그라우팅 전용 마이크로시멘트를 사용함으로써 효과적인 주입시공이 가능하여졌다.

한편 댐건설, 도시토목공사 등에 사용되는 주입재는 환경보존, 강도, 내구성 측면에서 어떤 타재료보다도 수경성시멘트가 가장 우수하지만 지금까지 사용되어 왔던 시멘트계 주입재의 입자경(粒子徑)은 최대입경 100 μ m, 평균입경 15~20 μ m 정도로 그 적용범위에 한계가 있었다. 그러나, 최근에는 시멘트 생산 분야에도 분쇄·분급기술이 급속도로 발달하여 시멘트 입자경이 최대입경 10 μ m, 평균입경 4 μ m 정도의 마이크로시멘트를 상업적으로 생산이 가능함으로써 그라우팅분야의 새로운 주입재로 각광받게 되었고 마이크로시멘트의 종합적인 특성은 <그림 1>과 같다.

본란에서는 당사에서 개발 시판하고 있는 마이크로시멘트(상품명 : 마이셈 8000)를 이용한 그라우팅 특성 및 대구지하철 1-5공구의 차수·

지반보강 그라우팅, 보령댐 축조 현장의 현장실험, 신성남~양지간 한전 공동구 터널의 차수그라우팅 및 서해대교

주탑 Sheet Pile 가물막이 근입부(根入部) 차수 그라우팅을 위한 현장실험 등 4건에 대한 현장 적용 및 시험시공 결과를 소개함으로써 현장에서 마이크로시멘트를 사용하는 경우 참고자료가 되길 바란다.

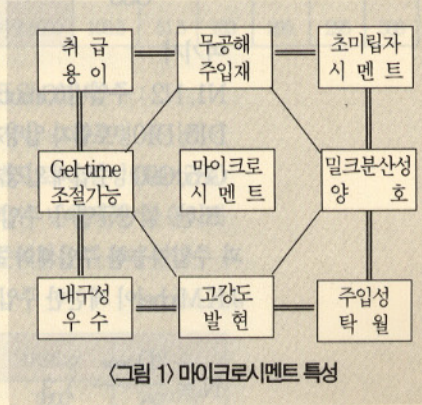
그라우팅 영향인자

시멘트밀크에 의한 주입의 원리는 시멘트입자를 다량의 물(W/C=100~1000%)에 현탁시키고 물을 시멘트 입자의 운반수단으로 삼아서 지반 내 미소균열 및 공극을 충전시킨 후 물은 점차 여과되어 지반내로 먼 거리까지 확산되어 나간다.

따라서, 그라우팅은 주입재의 입도에 의해서 좌우되는 침투성과 밀크의 안정성 및 유동성에 대해서 검토하면 다음과 같다.

1. 주입재 침투성

각종 주입재의 침투를 쉽게 하기 위해서는 주



(그림 1) 마이크로시멘트 특성

입재 입자가 토립자사이 또는 균열간극을 무리 없이 통과할 수 있을 정도로 입자크기가 충분히 작아야 하며, G.A.Kravetz는 각종 주입재 및 침투가능한 토립자에 대한 침투성 실험결과 다음과 같은 주입비(Groutability Ratio) 관계식을 보고한 바 있다.

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

여기서

N1, N2 : 주입비(Groutability Ratio)

D15, D10 : 토립자 입경가적 15%, 10% 입자경

G85, G90 : 주입재 입경가적 85%, 90% 입자경

또한, 암반균열이 주입에 관해서 암반균열폭과 주입가능한 주입재의 최대입자경과의 관계를 J.K.Michel이 제한한 주입비는 다음과 같다.

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

여기서,

D_{fissure} : 암반균열폭

G_{max} : 주입재 입자의 최대 입경

따라서, 암반균열 주입비에 의하면 보통 포틀랜드시멘트로 주입가능한 균열의 최저폭은 0.3mm, 마이크로시멘트로 주입가능한 균열의 최저폭은 0.03mm수준으로 알려져 있으며, 마이크로시멘트를 비롯한 기타 침투성 주입재의 토질별 주입범위는 <그림 2>와 같이 평가되고 있다.

<그림 2>에서 알 수 있듯이 마이크로시멘트는 침투성이 유기계의 용액형과 거의 같은 고침투성일 뿐만 아니라 무기계의 특징인 내구성과 고강도성 등을 갖추고 있기 때문에 침투성 주입재로는 가장 바람직한 재료라고 할 수 있다.

2. 밀크의 안정성

주입재를 현탁시킨 밀크의 안정성은 밀크중의 시멘트 입자경과 재료분리에 대한 안정성으로

주입재	자갈 층	모래층			실트 층	점토 층
		coarse	medium	fine		
현탁형	M/C	[Bar chart showing high permeability]				
	OPC	[Bar chart showing moderate permeability]				
	Ben.	[Bar chart showing low permeability]				
용액형	Lig.	[Bar chart showing high permeability]				
	Ure.	[Bar chart showing moderate permeability]				
	Ac.	[Bar chart showing low permeability]				
토립자경 mm	2	0.5	0.25	0.074	0.005	
투수계수 cm/sec	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-6}

<그림 2> 침투성 주입재의 토질별 침투범위

나눌 수 있다. 보통 포틀랜드시멘트는 분산계(10 μm 이상)와 응집계(10 μm 이하)의 혼합계인 반면, 마이크로시멘트는 0.1~10 μm의 입도를 갖는 응집계로 구성되어 있기 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 시멘트 밀크는 주입 직전까지 균일한 상태로 주입되는 것이 이상적이지만 밀크는 비중이 비교적 큰 시멘트 입자와 다량의 물로 묽게 배합되어 있기 때문에 재료분리가 일어나기 쉽고 불안정한 그라우팅이 일어날 수 있다. 따라서 균일한 밀크를 얻기 위해서 입자의 분산화를 계획할 필요가 있다.

3. 밀크의 유동성

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 묽게 하고 반응성을 지연시켜줄 수 있는 혼화재를 사용함으로써 유동성을 향상시킬 수 있지만 시멘트의 입도를 미세하게 할수록 입자의 응집성이

강하므로 오히려 유동성이 떨어지는 경향을 보인다.

따라서, 주입재의 입자를 미세하게 할 경우 밀크의 유동성을 확보하기 위해서 적당한 분산 계획을 세워야 한다.

쌍용마이셈 8000의 품질 특성

1. 시멘트의 품질

1) 화학성분

(단위 : %)

종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
보통시멘트	20.4	5.8	3.1	62.6
마이셈 8000	27.5	11.2	1.7	51.3

종류	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
보통시멘트	3.6	0.13	0.77	1.9
마이셈 8000	4.8	0.17	0.44	2.1

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

2) 입도분포

(단위 : %)

종류	μm	1	2	4	8	12
보통시멘트		4.9	7.3	14.3	27.1	37.0
마이셈 8000		14.5	27.9	57.2	89.6	98.2

종류	μm	16	24	64	MS
보통시멘트		45.3	62.3	96.0	18.2
마이셈 8000		99.6	100	-	3.5

마이크로시멘트는 입도가 보통시멘트보다 훨씬 작다. 따라서 마이크로시멘트는 보통시멘트에 비해서 토립자사이 또는 암반균열 사이로 침투되는 비율(Groutability Ratio)이 커질 수 있다.

3) 물리적 성질

마이크로시멘트는 시멘트 물리성능 측면에서도 보통시멘트보다 우수한 특성을 갖고 있다.

일반암층대에서의 실험결과

(단위 : %)

종류	비 중	Blaine Cm ² /g	응결(깊모아)		
			W/C (%)	초결 min	종결 h : m
보통시멘트	3.15	3180	25.0	170	7 : 30
마이셈 8000	3.03	8420	30.5	260	9 : 30

종류	Flow (%)	압축강도(kg/cm ²)				
		W/C (%)	1일	3일	7일	28일
보통시멘트	106.2	48.5	96	195	278	368
마이셈 8000	108.5	51.5	103	295	295	588

2. 주입재의 물리성능 분석

1) 적용배합(LW공법 : 1.5 Shot방식)

지하철 등 일반 연약지반 그라우팅 공사에서 가장 많이 사용되는 공법으로 응결성(Gel-time) 조절이 용이하고 경제적인 반현탁형 물유리계 LW공법으로 적용한 표준배합은 다음과 같다.
A액(시멘트 용액)

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

B액(물유리액) : 규산소다 3호 3.5리터 + 물 3.5리터

2) 실험결과

옆 실험결과중에서 Gel-time과 Homo-gel 압축강도는 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 Gel화 되는 시

간과 Gel화 후 재령별로 강도발현 특성이다. 위 실험결과에서도 알 수 있듯이 보통시멘트는 침투성이 나쁘고 재료분리 경향이 크기 때문에 주입 후 치수 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 보통시멘

종류	Gel time (sec)	B형 초기점도 (cps)	Bleeding 율(%) 30분후	Homo-gel 압축강도 (kg/cm ²)			
				1일	3일	7일	28일
요구수준	60~90	10이하	적을수록 양호	1일재령이후 1kg/cm ² 이상, 클수록 양호			
보통시멘트	64	12	약 40	1.2	2.3	4.6	15.7
마이셈8000	65	4	약 3	4.1	14.2	34.8	48.5

트를 사용한 경우보다 지반강화(Earth Concreting) 효과가 크기 때문이다.

현장적용 사례

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 기술자료를 얻기위해서 마이크로시멘트를 이용하여 LW1열 테스트 그라우팅을 실시하기로 하였다.

2) 테스트 그라우팅

실험항목	결과
실험항목	계획량을 일정한 압력으로 계속적으로 주입할 수 있었음.
투수계수	주입전측정치 : 8.2×10^{-4} cm/sec 마이크로시멘트 그라우팅 후 측정된 투수계수 : 2.7×10^{-6} cm/sec
표준관입 N-value	주입전측정치 : 15/30cm 주입후측정치 : 47/30cm

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

2. 보령댐 축조현장

1) 배경

보령댐의 기초지반은 층리(層離)가 밀집되고 탄층(炭層)이 협재한 불균질한 암반으로 보링조사되었고 이와 같은 지반에는 보통시멘트로는 효과적인 그라우팅이 어렵다고 판단되었다. 따라서 고침 투성의 마이크로시멘트를 사용할 경우 차수 및 지

반보강 효과가 어느정도 개선될 수 있는지 확인하기 위해서 탄층대가 협재된 지역에서 마이셈 8000, 보통 시멘트에 대해서 각각 3공씩 Milk 테스트 그라우팅을 실시하기로 하였다.

2) 테스트 그라우팅

탄층대에서의 주입시험 결과

공No.	탄층깊이 (m)	Step깊이 (m)	탄층대루즈치 (Lu)	주입시멘트 (종류)	시멘트주입량 (kg)	단위주입량 (kg/m)
1	4.8~5.7	3.0	8.7	마이셈 8000	114.7	38.2
5	5.1~6.0	2.5	4.0	보통 시멘트	2.3	0.9

탄층대에서의 수압시험결과 10루존 이하로 큰 절리는 거의 없고 미세한 절리만 존재하는 암층일 것으로 추정되며 실제로 탄층대의 코어 관측 결과에서도 큰 절리는 거의 없었다. 탄층대의 주입시험결과 마이크로시멘트를 주입한 공1은 38.2kg/m, 보통시멘트를 주입한 공5는 0.9kg/m 정도로 마이크로시멘트의 주입량이 40배 이상 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.

일반 암층대에서의 실험 결과

공No.	암층깊이 (m)	Step깊이 (m)	암층대루즈치 (Lu)	주입시멘트 (종류)	시멘트주입량 (kg)	단위주입량 (kg/m)
2	0.5~4.5	4.0	36.7	보통 시멘트	1508	377
3	0.5~4.5	4.0	33.3	마이셈 8000	2459	615

공2와 3의 단위 주입량으로부터 알 수 있듯이 절리가 집중적으로 발달되어 있는 주입범위에서는 보통시멘트도 주입이 잘 되고 있지만 마이크로시멘트가 보통시멘트에 비해서 주입량이 1.6배 이상 컸기 때문에 마이크로시멘트로 그라우팅하는 경우 루즈치와 배합비 관계를 적절히 조정해서 시공성을 개선할 수 있고, 주입공 간격을 넓힘으로써 그라우팅의 경제성을 개선할 수 있다고 판단된다.

3. 신성남~양지 S/S 지중 T/L 전력구 차수그라우팅

1) 배경

한국전력에서 발주한 본구간의 지중선 터널공사중 유수량이 많고 지질상태가 매우 복잡하여 기존의 보통시멘트를 이용한 LW공법으로는 소기의 차수효과를 얻을 수 없어서 마이크로시멘트를 이용한 LW공법으로의 설계변경을 추진코자 3종류의 배합과 그라우팅 타입별로 테스트그라우팅을 실시키로 하였다.

2) 테스트 그라우팅 결과

	요구수준	주입 전	주입 후	판 정
Set-time (sec)	30~40	31~40	-	매우양호
평균유수량	작을수록 양호	4.536 Ton/Day	2.868 Ton/Day	37%감소
평균주입량	-	-	858 l	-
평균투수 계 수		1.026×10^4 cm/sec	2.241×10^6 cm/sec	매우양호

주입시험결과 마이크로시멘트로 시공하는 경우 보통시멘트로 시공하는 경우에 비해서는 도저히 얻을 수 없는 좋은 성과가 얻어졌기 때문에 실험결과를 토대로 설계변경이 이루어졌다.

4. 서해대교 주탑 기초부분 시공을 위한 시트 파일 (根入部) 가물막이 차수그라우팅

1) 배경

한국도로공사에서 발주한 서해대교 건설은 국내외적으로 많은 관심의 대상이 되고 있는 국내의 대표적인 해상 교량공사로 주탑 기초부분 시공을 위해서 2년 이상 존치되어 있어야 하는 시트파일 가물막이 설치가 필요하다. 시트 파일의 근입부는 풍화암층에 위치하고 있으며, 이 풍화암층은 절리와 공극이 많은 것으로 판단되며+2m(풍화잔토층)~풍화암~-1m(연암층) 구간에 대한 차수그라우팅이 보통 시멘트를 이용한 SGR공법으로 설계되어 있다. 그러나, 시공중 SGR공법의 차수효과에 대한 문제점들이 제기되어 나머지 구간에 대한 설계변경을 추진코자 마이크로시멘트 및 보통

시멘트에 대한 테스트 그라우팅을 각 3공씩 실시하여 차수효과를 비교하기로 하였다.

2)테스트 그라우팅

주입시험결과 마이크로시멘트로 시공하는 경우 보통시멘트로

	요구수준	주입 전	주입 후	판 정
평균단위 주입량	-	-	약 150kg/m	요구수준의 3배
평균투수 계 수	$\times 10^6$ cm/sec	$\times 10^4$ cm/sec	$\times 10^6$ cm/sec	양호

시공하는 경우에 비해서 월등히 우수한 주입효과가 얻어졌으며 2번

주탑의 가물막이 공사와 주탑기초 암반그라우팅에 대해서 마이크로시멘트를 사용하는 공법으로 설계변경을 적극 검토하고 있다.

맺음말

앞에서 언급된 마이크로시멘트의 장점을 요약하면 다음과 같다.

(1) 마이크로시멘트는 보통시멘트에 비해서 침투성, 밀크의 안정성 및 지반보강효과가 월등히 우수하다.

(2) 마이크로시멘트는 공극이 적고 암반에 미세한 절리가 있을수록 보통시멘트보다 침투효과가 크다.

(3) 암층대와 같이 암반절리가 집중되어 있어 보통시멘트로도 그라우팅이 잘되는 지층에서도 마이크로시멘트는 보통시멘트보다 2배정도 주입이 많이 된다. 따라서, 층리가 발달되어 있는 일반 암층대에서도 마이크로 시멘트의 주입량이 보통 시멘트보다도 많기 때문에 루존치 수준별로 주입재 배합비를 적절히 고배합으로 조정함으로써 시공성을 개선할 수 있고 마이크로 시멘트의 고침투성을 이용하여 주입공 간격을 넓힘으로써 시공비 절감도 가능할 것으로 판단된다.

(4) 4건의 현장시험시공을 통해서도 마이크로시멘트의 우수한 주입효과가 입증되었으며 차후 건설공사의 안전시공을 위한 그라우팅용 신재료로 마이크로시멘트의 활용이 크게 증가할 것으로 기대된다. **S**