

시멘트계 주입재의 침투특성에 관한 실험적 연구

A Study on the Infiltration Properties of Cement Grout Material

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 신동훈²⁾, Dong-Hoon Shin, 이종욱³⁾, Jong-Wook Lee,
김진춘⁴⁾, Jin-Chun Kim, 이준우⁵⁾, Jun-Woo Lee, 안익균⁶⁾, Ik-Kyun An, 이승범⁶⁾, Seung-Bum Lee

¹⁾ 한양대학교 공과대학 교수, Professor, College of Engineering, Hanyang University

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원, Senior researcher, WRRI, KOWACO

³⁾ 한국수자원공사 수자원연구소 연구원, Researcher, WRRI, KOWACO

⁴⁾ (주)한국지오테크 대표이사, President, Korea Institute of Geo Technology Inc.

⁵⁾ (주)유니벡 토목사업2본부 터널팀, Lead Engineer, Tunnelling Dept., UNIVTEC Co.

⁶⁾ 한양대학교 대학원 석사과정, Graduate student, Hanyang University

SYNOPSIS : This study is about penetrability of Micro Cement(MC) used for ground improvement. In this study, the characteristics of chemical grouting such as solidification, penetrability were analyzed experimentally by changing permeability of ground, grain size and relative density of grout material. For evaluating applicability of grout material, solidification test and penetrability test were performed. From the results of the tests, effective solidification ratio and penetrability ratio of MC was each 75%, 86% to be excellent when ground permeability was in the range of 10^{-2} and 10^{-4} cm/sec. Otherwise, those of Ordinary Portland Cement(OPC) were both lower than 50% to be poor.

When penetrability of grout material is needed for improvement of dam foundation and soft ground, application of MC is much superior to that of the other materials. The results of the grouting tests in the water flowing ground show that solidification effect of long gel-time grout material is excellent as injection pressure increases when groundwater velocity is relatively low. But when groundwater velocity is relatively high, solidification effect of long gel-time grout material is very poor because most grout materials are outflowed. Therefore, as groundwater velocity is high, effective solidification ratio of long gel-time grout material is better than that of short gel-time grout material, also penetration distance of long gel-time grout material is longer than that of short gel-time grout material.

Key words : Infiltration, Solidification, Micro Cement, Permeability, Gel-time

1. 서 론

2001년 국내에 건설된 댐 높이 15m이상의 대댐은 약 800개에 이르며 산업의 기반시설로서 중요한 기능을 하고 있다. 그러나 최근에는 지진발생 빈도증가, 기상이변 및 댐 노후화 등에 따라 댐체가 손상되는 문제가 빈발하는 등 댐의 안정성 확보를 위한 설계, 시공 및 유지관리 기술의 개발 및 향상이 절실히 요구되고 있다(시설안전기술공단, 1997). 특히, 1960년대부터 건설되어 온 다목적댐들이 점차 고령화 되어감에 따라 보수·보강의 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 또한, 댐 부지가 고갈됨에 따라서 지반조건이 열악한 지점에서 댐을 축조할 수 밖에 없는 실정이며, 이러한 현상은 날로 증대되고 있다. 이처럼 연약한 지반이나 암반의 균열이 발달된 지점에 댐을 건설할 경우 기초부 보강효과가 저하되어 댐의 안전에 막대한 영향을 미친다. 기초부의 처리를 위한 그라우팅 공법 시행시 일반시멘트는 암반기초부의 미세한 균열면에는 원활한 침투가 되지 않으므로 보통포틀랜드시멘트(OPC)보다 입경이 매우 작은 시멘트(예 : Micro Cement)를 사용하

는 것이 바람직하다(천, 1998). 따라서, 본 연구에서는 고결성, 침투성 및 동수지중 모형실험과 같은 실내 약액주입 모형실험을 통하여 시멘트계 주입재의 침투특성을 파악하고자 하였다.

2. 시멘트계 주입재의 기본물성

시멘트계 주입재는 제조방법, 혼합물의 종류 및 배합비율에 따라 물리·화학적 특성이 상이하며, 범용적으로 사용되는 주입재는 포틀랜드슬래그계 OPC, Micro Cement(이하 MC)와 그 중간단계인 포틀랜드슬래그계 Colloid Cement 등이 있다. 본 연구에서는 국내에서 실용화된 이들 제품을 사용하였으며, 이들의 물리·화학적 특성은 다음과 같다(김진춘, 1999).

2.1 화학성분

MC 및 Colloid Cement는 OPC와 마찬가지로 무기물질로 구성되어 있으며, 독성과 냄새가 없는 무공해 주입재로서 화학성분의 대표적인 분석결과는 표 1과 같다. MC는 초미립화됨으로써 초기에 수화활성이 지나치게 크면 침투성 저하가 빨라지기 때문에 초기 수화반응 속도조절이 가능하도록 염기도를 낮게 조절하는 것이 유리하다.

표 1. 시멘트계 주입재의 화학성분 구성비 예(단위: %)

	MC	Colloid Cement	OPC
① SiO ₂	28.5	26.2	20.3
② CaO+MgO+Al ₂ O ₃	66.8	67.0	69.5
염기도 = ②/① ≥1.4	2.3	2.6	3.4

2.2 물리적 특성

각 나라마다 포틀랜드계 시멘트나 혼합계 시멘트에 대한 품질기준을 국가규격으로 관리하고 있지만, 아직까지 MC에 관한 별도의 국가규격은 없다. 따라서, 본 연구에서는 한국 산업규격을 기준으로 품질을 평가하기로 하며, 물리적 특성의 대표적인 시험결과는 표 2와 같다. 표 2에서 볼 수 있듯이 MC나 Colloid Cement는 OPC에 비해서 매우 우수한 강도특성을 나타내어 그라우트로서 고강도가 발현되므로 내구성이 큰 것이 일반적이다.

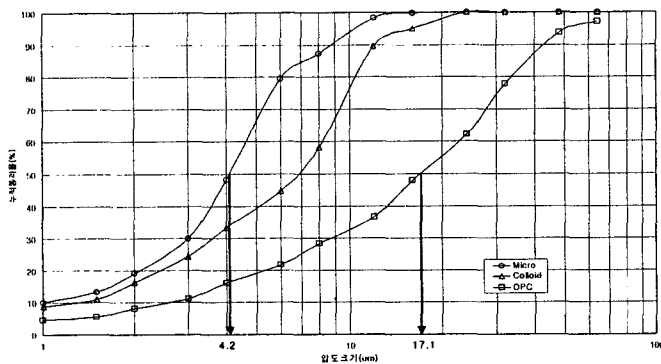
표 2. 시멘트계 주입재의 물리적 특성치

		KS규격 제한값	MC	Colloid Cement	OPC
비 중		-	2.94	3.02	3.15
비표면적(cm ² /g)		2,800 이상	8,150	6,620	3,250
길모아 응 결	W/C(%)	-	30.5	29.3	28.7
	초결(분)	60 이상	205	195	170
	종결(시:분)	10 이하	8:05	7:45	7:30
압 축 강 도	W/C(%)	-	50.7	49.4	48.5
	1일(kg/cm ²)	-	162	162	61
	3일(kg/cm ²)	110 이상	356	299	202
	7일(kg/cm ²)	190 이상	535	480	264
	28일(kg/cm ²)	290 이상	689	570	405

2.3 입도분포 및 형상

입도분포 및 입자형상은 현탁액형 그라우트의 전단응력과 밀접한 관계가 있다. 즉, 입자가 미세할수록, 입자형상의 장축직경과 그 구체의 이상적인 구(球)의 직경과의 비로써 표현되는 구상화율(球狀化率)

이 작을수록 현탁액형 그라우트의 점성은 증가하고 전단응력은 커진다. 본 연구에 사용된 시료의 입도 분석 결과는 그림 1과 같으며, 시험장비는 Particle Size Analyzer(Malvern Instruments 社의 Mastersizer Microplus)를 사용하였다. 분체공학에서 입자의 형상을 판정하는 것이 중요한 변수이며, 구상화율(球狀化率)이 형상판정계수로서 활용된다. 주입재가 미분말화 될수록 입자의 구상화율이 커지며, 구상화율이 크다는 것은 현탁액 주입재의 전단응력이 작아지기 때문에 주입압의 손실이 줄어든다. 따라서, 침투력을 높이고 주입반경을 넓히는 데 유리하다.



범례
 Micro ; Micro Cement
 Colloid ; Colloid Cement
 OPC ; Ordinary Portland Cement

그림 1. 시멘트계 그라우트제의 입도분포 곡선

3. 실험조건 및 대상시료토

3.1 실험 조건

본 시험에는 현장에서의 실제 주입상황을 재현하고 그에 대한 주입효과의 차이와 대상지반의 주입한계를 파악하기 위한 실험으로서 토질 삼축압축시험기를 응용한 직경 400mm×높이 500mm의 대형 몰드를 제작하여 실험을 하였다. 이 시험에 사용한 대상시료토는 가는모래 50% + 실트 50% 혼합한 실트모래를 사용하였고 주입재는 OPC, MC를 사용하였다. 주입재의 온도는 20℃로 유지하면서 시료의 다짐상태, 주입재 종류에 따라 달리하여 각각의 실험시간에 따른 압력, 유량을 측정하였다. 다짐은 상대밀도에 따라 조밀, 보통, 느슨한 지반으로 나누었고, 상재압은 지반심도 -15m로 정하여 압력을 주었으며, 주입속도는 1 l/min, 주입량은 10 l (A액 5 l, B액 5 l)로 설정하고, 한계주입압은 5kg/cm²로 설정하였다.

상기와 같은 조건에서 고결성 및 침투성 시험을 실시하여 주입 후 얇은 관에 의한 채취방법(Thinwal-led Tube Sampling)을 사용해 고결토(직경 50mm×높이 100mm)를 채취하고 채취한 샘플을 재령별로 일축압축강도와 투수계수를 측정하였다. 단, 고결성 및 침투성 실험에서 2가지 가정을 전제조건으로 하여 실험을 수행하였다. 첫째, 지반심도에 대한 상재압을 결정하기 위해서 지반은 동일한 흙으로 100% 포화지반이며 둘째, 지반의 상태가 흐름의 변화가 없는 정수(靜水)지반으로 가정하였다(건설교통부, 2001).

3.2 대상시료토의 물성

본 실험에서는 가는모래 50% + 실트 50% 혼합한 실트모래를 사용하였으며, 입도분석결과는 표 3에 나타내었으며, 물리적 특성은 표 4에 나타낸 바와 같으며, OPC와 MC의 주입재로서의 적용한계 평가를 위해서 아래와 같이 설정하였다.

표 3. 대상시료토의 입도분석 결과

대상 시료	D ₁₀ (mm)	D ₂₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	통과량(%)				통일 분류
							No. 4	No.10	No.40	No.200	
실트모래	0.03	0.07	0.09	0.14	4.7	2.0	100	100	100	20.7	SM

표 4. 대상시료토의 물리적 특성

비 중	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	$\gamma_{dmin}(g/cm^3)$	건조단위중량(상대밀도) $g/cm^3(\%)$		투수계수(cm/sec)	공극율(%)
2.70	1.712	1.439	조밀	1.634	6.42×10^{-4}	34.1
			보통	1.564	4.38×10^{-5}	39.3
			느슨	1.498	5.50×10^{-2}	45.2

4. 고결성 및 침투성 시험

4.1 개요 및 시험장치

고결성 시험은 실내주입시험시 널리 사용되는 방법으로 약액주입에 의하여 주입대상 시료토가 어느 정도의 고결을 가지는가에 대한 평가로서 대상시료를 대형 또는 소형몰드에 넣어서 일정한 압력으로 약액을 주입하여 대상지반에서의 약액주입 효과를 판정하는 것으로, 시험장치는 그림 2와 같다(건설교통부, 2001). 주입조건에는 대상토의 입도, 주입압, 포화정도, 공극율, 주입재의 배합, 주입구의 거리 등 다양한 영향인자가 있다. 본 고결성 시험에서는 시료의 종류 및 공극율, 주입재 종류 등을 시험인자로 하여 검토하였고, 대상시료는 실트모래를 사용하였으며, 물리적 특성 및 입도분포는 2절에 소개한 바 있다. 고결을 및 침투를 측정용 주입몰드는 어느 정도 큰 것이 좋으나 작업성을 고려하여 주입몰드 크기는 $\phi 400mm \times H 500mm$ 로 주입 후 고결체의 형상을 정확히 파악할 수 있도록 몰드를 분리할 수 있도록 제작하였으며, 그림 2에 나타내었다.

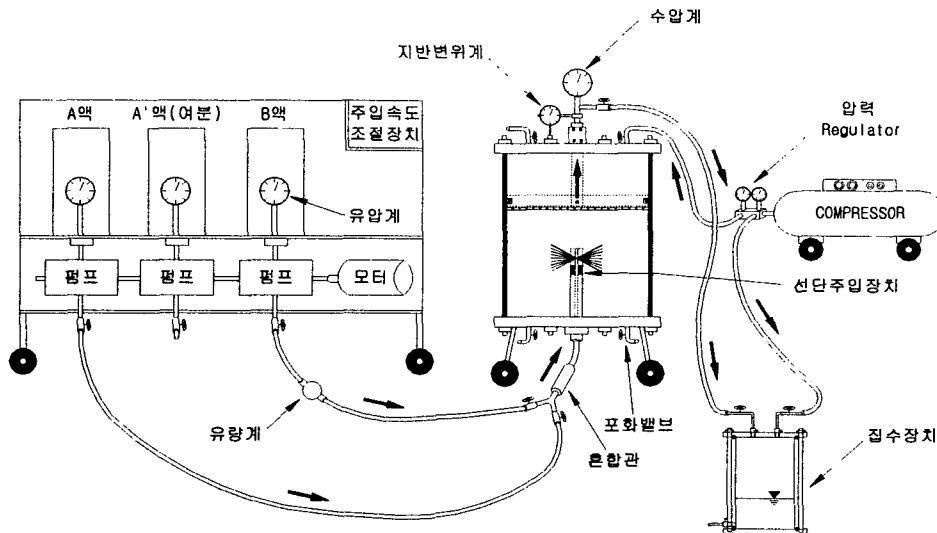


그림 2. 고결성 및 침투성 시험장치

시료를 토조에 적절한 다짐도에 따라 다진 후 토조에 상재압을 가하고, 시료를 포화시킨 후 분사구멍이 시료에 의해 막히는 현상을 없애기 위해, 분사 전에 주입선단의 분사구멍을 덮고 있던 부분을 내려서 약액의 주입이 원활히 되도록 하기 위한 유도공간을 만들어 주었다.

4.2 시험계획

주입재의 배합비는 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 200%를 기준으로 다음의 표 5와 같이 설정하였으며, OPC와 MC를 사용할 경우는 시편 채취의 편의성을 위해 경화촉진제(Sodium Aluminate)를 사용하였다.

상기의 배합계획에 의해서 식 (1)과 같이 고결율을 평가한다.

$$\text{고결율 (\%)} = \frac{\text{실제 고결된 흙의 체적}}{\text{주입대상 흙의 체적}} \times 100 \quad (1)$$

고결체의 실제 형상은 복잡하여 고결토의 정확한 체적을 구하는 것은 어렵지만, 대형수조에 물을 가득 채운다음 고결체를 물속에 담근후 빼내고 수조에 남은 물의 무게를 측정하여 무게차를 고결토의 부피로 결정하였다.

표 5. 고결성 및 침투성 시험용 주입재 배합계획

주입재명	배합량		비고
	물(ℓ)	주입재(kg)	
OPC	320	160	시편 채취시간 단축과 시험의 편의성을 위해서 경화촉진제(Sodium Aluminate) 사용
MC	320	160	

주입재는 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 OPC와 MC를 현탁액상태로 주입하고, 대상토는 다짐 정도에 따라서 3종류, 주입압은 주입펌프로 일정하게 하고, 주입재의 물시멘트비는 200%로 선정하여 공극율, 주입재 종류에 따른 OPC, MC 현탁액의 고결성을 평가하기 위해 다음의 표 6과 같이 시험을 계획하였다.

본 시험에서는 지반심도 -15m를 가정하여 상대밀도 정도에 따라 조밀한 상태에서는 1.99kg/cm², 보통 상태에서는 1.97kg/cm², 느슨한 상태에서는 1.95kg/cm²로 상재압을 설정하여 Cell Pressure로 가하였다(건설교통부, 2001).

표 6. 고결성 및 침투성 시험을 위한 시험계획

대상토 종류	상대밀도(공극율)	주입재 종류	주입속도 (한계주입압)	주입심도	비고
실트 모래	조밀(34.1%)	OPC, MC	1 ℓ/min (5kg/cm ²)	-15m	OPC, MC는 경화촉진제 사용
	보통(39.3%)				
	느슨(45.2%)				

침투성 시험의 주입재는 OPC, MC의 현탁액을 대상으로 하며, 대상토는 다짐 정도에 따라서 3종류, 주입압은 2~3kg/cm², 주입재의 W/C비는 200%로 선정하고 시료토의 공극율, 주입재 종류에 따른 주입재의 침투성을 평가하였다.

공시체 제작시 주입압에 의해 시료가 위로 뜨지 않도록 압력변동에 주의한다. 주입관은 토조의 밑에 연결하고 일정한 압력으로 가압한다. 한편, 몰드내에서 Cement 입자의 침투가 막히면서 과도한 압력이 작용할 경우 몰드 상단의 배출구로 자연적으로 토출되도록 밸브를 개방시켜 놓았다. 지반의 심도를 -15m정도로 고려하여 상재압을 가하였으며, 침투주입율은 식 (2)와 같이 평가한다.

식 (2)에서 대상시료토 공극의 체적은 시료토의 체적에 공극율(%)을 곱하면 쉽게 구할 수 있다.

$$\text{침투주입율(\%)} = \frac{\text{주입량}}{\text{대상시료토 공극의 체적}} \times 100 \quad (2)$$

4.3 고결성 시험결과

표 6의 시험계획에 의해서 OPC, MC의 현탁액을 주입하여 고결성 시험을 시행한 결과는 그림 3과 같으며, 부록에는 고결성 시험에서 OPC 및 MC를 주입재로 사용할 경우 상대밀도 보통과 조밀한 지반에

대한 고결체의 형상을 나타내었다. MC의 경우는 입자크기가 OPC에 비해서 입자의 크기가 미세하기 때문에 침투성이 뛰어나 고결율이 높았다.

결과에서 볼 수 있듯이 OPC의 경우는 원지반의 투수계수가 10^{-2} cm/sec정도일 경우에는 침투주입이 가능하여 고결율이 컸지만, 10^{-3} ~ 10^{-4} cm/sec정도의 투수계수를 가지게 되면 침투주입이 불가능하여 고결율이 현저히 저하되는 것으로 나타났다. 한편, 지반의 상대밀도에 따른 투수계수를 10^{-2} ~ 10^{-4} cm/sec정도로 변화시킨 경우 MC는 투수계수 10^{-4} cm/sec에서도 침투주입이 원활하여 고결율이 우수한 것으로 보여지므로, 댐 침투수 조절을 위하여 기초지반의 보강을 실시할 경우는 상기와 같은 결과를 염두에 두고 대상지반의 투수계수가 10^{-4} cm/sec정도가 된다면 MC로 그라우팅을 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

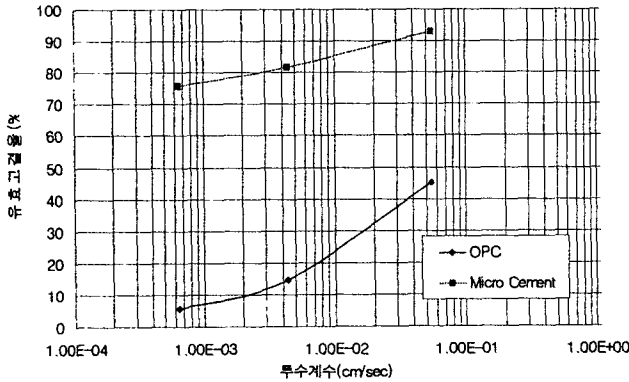


그림 3. 모형토조 지반의 투수계수 변화에 따른 유효고결율 변화

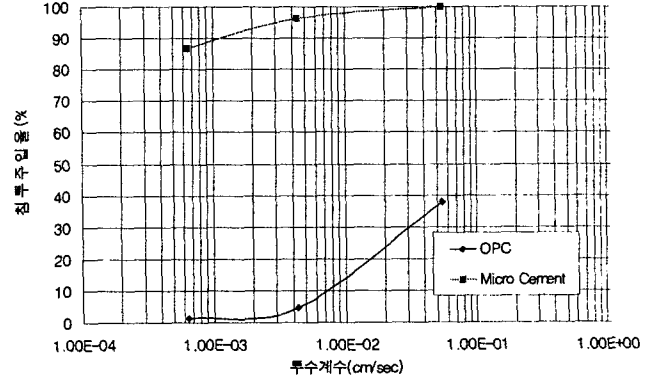


그림 4. 모형토조 지반의 투수계수 변화에 따른 침투주입율 변화

4.4 침투성 시험결과

주입조건에 따른 OPC, MC의 침투성 시험결과는 그림 4와 같으며, 침투성 시험결과 초미립자인 MC의 경우는 지반의 투수계수가 10^{-2} ~ 10^{-4} cm/sec일 경우 거의 침투주입이 가능하였지만, OPC의 경우 시멘트 입자가 상대적으로 크기 때문에 원지반의 투수계수가 10^{-3} ~ 10^{-4} cm/sec정도 일때에는 침투주입이 불가능하고, 할렬주입되는 경향을 육안으로 확인할 수 있다. 투수계수가 10^{-4} cm/sec정도 보다 작을 수도 있는 댐 기초암반에 대한 그라우팅 시공시 MC를 사용하는 것이 침투수량을 억제 혹은 저감시킴으로써 댐의 안정성을 증대시킬 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 현장에서 MC를 사용할 경우에는 그라우팅 공사전에 주입목적에 파악하고 충분한 현장답사 및 지반조사를 통하여 적절한 주입재를 선정하여 현장 상황에 맞게 실시하여야 할 것이다(森 ; 千, 1987).

5. 동수지중 모형시험

5.1 개요

지반주입공법은 복잡하고 불규칙한 지반을 대상으로 하기 때문에 고도의 기술과 경험을 요한다. 특히 지반에 지하수의 거동이 있을 경우 지반주입의 효과는 더욱 불투명하다. 동수지중 모형시험은 대상지반 및 주입재에 대하여 유속과 Gel-time의 변화에 따른 고결효과 검토 및 공극율~주입압~주입재의 종류~유효고결율 등과의 상관관계를 도출하여 대수층에서 주입효과를 증대시키기 위한 것이다. 일반적으로 시멘트계 주입재는 Gel-time 조절이 불가능하기 때문에 Gel-time 조절이 용이한 물유리계 약액이 사용되고, 내구성 증대를 위해서는 Silicasol계 약액을 사용하기도 한다. 본 시험에서는 OPC+규산소다 3호와 MSG(MC+규산소다 3호) 2가지를 사용하였다.

5.2 시험계획

본 시험에서는 MC를 주입재로 사용하고, 침투형상을 가지적으로 보기 위하여 규산소다 3호를 첨가하였다. 주입압은 2, 4kg/cm² 두가지로 설정하였으며, 유속은 10⁻¹cm/sec 정도에 해당되는 유속에 대하여 1가지, 10⁻²cm/sec 정도에 해당되는 유속 2가지로 유속의 변화에 따른 3가지 경우에 대하여 시험을 계획하여 지중유속~주입압~Gel-time(주입재종류)~유효고결율의 관계를 파악하고자 하였다.

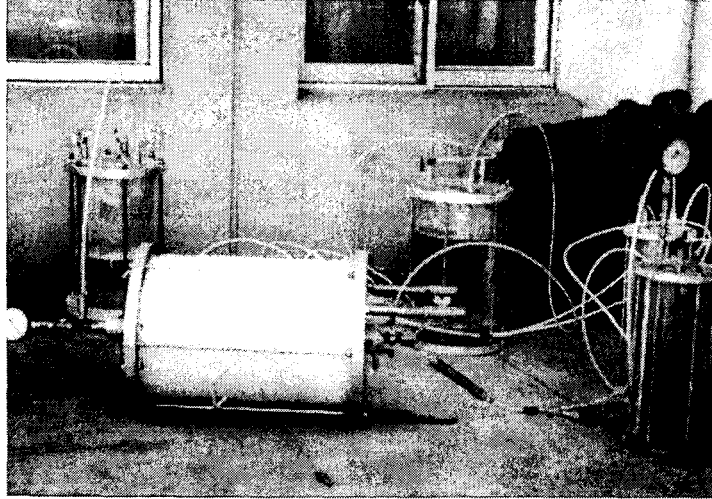


그림 5. 동수지중 모형시험 광경

5.3 시험결과

동수지중에서 주입시험결과 유속이 상대적으로 느린 경우($V_s = 10^{-3}$ cm/sec정도) 주입압이 높을수록, 완결형(Gel-time 60~90sec) 주입재가 유효고결율이 높게 나와 고결효과가 우수하였다. 반면, 유속이 빠른 경우($V_s = 10^{-2}$ cm/sec)에는 완결형의 경우 주입재의 대부분이 외부로 유출되는 등 유효고결율이 매우 낮아 고결효과가 불량함을 알 수 있었다. 따라서, 유속이 빠른 경우는 Gel-time을 짧게 설계하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 일반적으로 Gel-time이 상당히 짧은 급결형보다는 완결형과 같이 Gel-time이 긴 경우가 침투거리도 길고 유효고결율도 높게 나타났다.

표 7. 동수지중 모형시험의 결과

지중수평유속 (cm/sec)	주입압 (kg/cm ²)	Gel-time (sec)	고결토 부피 (cm ³)	이동거리 (cm)	유효고결율 (%)	비고
4.87×10^{-3}	2	9~12	2700	11.5	4.64	
		60~90	4000	15.0	6.87	
	4	9~12	2900	14.0	4.98	
		60~90	10500	18.5	18.04	
1.22×10^{-2}	2	9~12	3000	14.5	5.15	
		60~90	21000	28.0	36.08	
	4	9~12	2950	13.0	5.07	
		60~90	18000	21.0	30.93	
3.65×10^{-2}	2	9~12	16950	17.5	29.12	
		60~90	7500	15.5	12.89	일부 주입재가 외부로 유출
	4	9~12	500	4.0	0.86	중간에 시멘트층 형성됨(주입재유출)
		60~90	-	-	-	대부분의 주입재가 외부로 유출

이상과 같이 유속이 커서 주입재의 희석, 유실이 커질 경우에는 물유리계 용액형 주입재를 차수재로 사용하여 물의 흐름을 억제한 후 OPC 또는 MC와 같은 현탁액형 주입재를 복합적으로 사용하면 투수

성이 큰 침투지역에서도 효과적으로 차수가 가능할 것으로 기대된다. Gel-time이 상당히 짧은 급결형보다는 완결형과 같이 Gel-time이 어느 정도 적정한 주입재가 침투거리도 길고 유효고결율도 높일 수 있는 것으로 판단되며, 이는 Gel-time이 너무 짧은 주입재의 경우는 먼저 주입된 주입재가 토중에서 경화가 되어버리면서 뒤편에 주입되는 주입재가 들어오는 것을 차단시키는 악영향을 끼치는 것으로 보인다.

6. 결론

시멘트계 주입재를 이용한 침투특성에 관한 실험적 연구결과 다음과 같은 주요한 결론을 도출하였다.

- (1) 시멘트계 주입재인 OPC, MC의 입도분석 결과, D_{50} 에 해당하는 입자의 크기는 $17.1\mu\text{m}$, $4.2\mu\text{m}$ 로써 MC가 OPC에 비해서 약 4배정도 미세하여 지반주입재의 침투가 요구되는 경우에는 MC를 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.
- (2) 시멘트계 주입재의 적용성을 실험적으로 평가하기 위하여 고결성 시험을 실시한 결과, 모형토사지반의 상대밀도에 따른 투수계수를 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 변화시킨 경우, MC는 투수계수 10^{-4}cm/sec 에서 유효고결율 75% 이상으로 고결성이 우수한 결과를 나타낸 반면, OPC는 10^{-2}cm/sec 에서도 유효고결율이 50% 미만으로서 고결율이 떨어지는 것으로 나타났다.
- (3) 침투성 시험에서 모형토사지반의 상대밀도에 따른 투수계수를 $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 변화시킨 경우, MC는 투수계수 10^{-4}cm/sec 에서 침투주입율 86% 이상으로서 침투성이 우수하였지만, OPC는 10^{-2}cm/sec 에서도 침투주입율이 50% 미만으로서 OPC를 사용하는 경우 원활한 침투주입이 될 수 없을 것으로 판단된다.
- (4) 동수지중 모형시험 결과 유속이 빠를수록 Gel-time을 짧게 하는 것이 주입재의 유실을 방지하고 고결율을 높이는 데 효과적이었으며, Gel-time이 9~12초 정도로 너무 짧은 급결형보다는 Gel-time이 60~90초 정도의 완결형이 침투거리도 길어지고 유효고결율도 높아지는 것으로 나타났다.
- (5) 이상과 같은 결과를 종합적으로 분석해 볼 때, 댐 기초지반 및 연약지반의 보강을 위해 주입재의 침투성이 요구되는 경우에는 MC계 그라우팅이 효과적일 것으로 판단되며 특히, 댐지초지반의 침투유량이 큰 손상부에서 보수그라우팅을 할 경우 규산소다계의 완결재를 이용한 1차 차수그라우팅을 실시하여 다량의 침투수량을 억제시킨 후 미세한 균열부까지 침투가 가능한 MC계 밀크그라우팅을 실시함으로써 내구적인 차수그라우팅이 가능할 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구성과를 더 발전시키기 위해서 주입목적, 적용지반 및 주입재 종류에 따른 좀 더 세부적인 그라우팅 적용기준에 대한 추가적인 연구가 장기적으로 시행되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국수자원공사 수자원연구소의 지원에 의한 것으로, 이에 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), "마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적그라우팅 시스템 개발 연구" 2000년 산·학·연 공동연구개발사업 제 1차년도 연구보고서, pp. 85~100.
2. 김진춘(1999), "지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구", 박사학위논문, 한양대학교 대학원, pp. 30~80.
3. 시설안전기술공단(1997), "댐안전을 위한 보수대책의 체계화 연구", pp. 291~302.
4. 천병식(1998), "최신지반주입-이론과 실제-, 원기술, pp. 61~73, 107~120.
5. 森 麟, 千柄植(1987), "砂質地盤における割裂發生機構", 日本土木學會論文集, 第388号, III-8, pp. 61~70.