

## 시멘트계 주입재의 주입특성에 관한 연구

### A Study on the Properties of Grout Materials Based on Cement Type

천 병 식\*<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik

최 중 근\*<sup>2</sup> Choi, Joong-Keun

#### Abstract

In this study, the characteristics of chemical grouting, such as solidification, penetrability, were analyzed experimentally by grain size of grout materials and permeability, relative density of the ground. For evaluating applicability of grout material, solidification tests and penetrability tests were performed. From the results of the tests, effective solidification ratio and penetrability ratio of Micro Cement were 75% and 86% respectively when ground permeability was in the range of  $10^{-4}$  to  $10^{-2}$ cm/sec. On the other hand, effective solidification ratio and penetrability ratio of Ordinary Portland Cement (OPC) were both lower than 50%. When penetrability of grout material is needed for improvement of dam foundation and soft ground, application of Micro Cement is much superior to that of the other materials. The results of the grouting tests in the hydrodynamic ground show that the 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, the solidification effect of long gel-time grout material is very poor because most grout materials are outflowed.

#### 요 지

본 논문은 실용화된 지반개량용 마이크로시멘트 및 보통포틀랜드시멘트의 주입특성에 관한 연구로서 기초물성, 고결율, 침투성과 같이 실험적으로 주입재의 입도와 다짐정도를 조정하고, 주입대상 토사지반의 투수계수를 3종류로 변화시켜 약액주입의 주요 특성을 검토한 것이다. 주입재의 적용성을 평가하기 위하여 고결성 시험 및 침투성 시험을 실시한 결과, 모형토사지반의 상대밀도에 따른 투수계수를  $10^{-4}$ ~ $10^{-2}$ cm/sec로 변화시킨 경우, 마이크로시멘트는 투수계수  $10^{-4}$ cm/sec에서 유효고결율 75%, 침투주입율 86%로서 침투성 및 고결성이 우수한 결과를 나타낸 반면, OPC는  $10^{-2}$ cm/sec에서 유효고결율 및 침투주입율이 50% 미만으로서 원활한 침투주입이 될 수 없음을 알 수 있었다. 댐 기초지반 및 연약지반의 보강을 위해 주입재의 침투성이 요구되는 경우에는 마이크로시멘트가 적용성이 매우 우수한 것으로 판단된다. 동수지중 모형시험 결과 유속이 상대적으로 느린 경우 주입압이 높을수록, 완결형 주입재가 고결효과가 우수한 반면, 유속이 빠른 경우에는 완결형의 경우 주입재의 대부분이 외부로 유출되는 등 유효고결율이 매우 낮아 고결효과가 불량함을 알 수 있었다.

**Keywords :** Gel-time, Micro cement, Penetrability, Permeability, Solidification

\*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Civil Engrg., Institute of Technology, Hanyang Univ., hengdang@Unitel.co.kr)

\*2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

# 1. 서론

2001년 국내에 건설된 댐 높이 15m이상의 대댐은 약 800개에 이르며 산업의 기반시설로서 중요한 기능을 하고 있다. 그러나 최근에는 지진발생의 빈도증가, 기상이변 및 댐의 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 보강 효과가 저하되어 댐의 안전에 막대한 영향을 미친다. 기초부의 처리를 위한 그라우팅 공법 시행 시, 보통포틀랜드시멘트(OPC)는 암반기초부의 미세한 균열면에서 원활한 침투가 되지 않으므로 OPC보다 입경이 매우 작은 마이크로시멘트(Micro Cement)를 사용하는 것이 바람직할 것이다(천병식, 1998).

한편, 건설교통부 과제수행 중 실시한 시험시공 결과에 의하면 암반기초 그라우팅의 경우 Micro Cement를 사용하여 천공간격을 10%만 확대하여도 비용절감의 효과를 볼 수 있는 것으로 나타났으며, 천공간격을 50% 확대할 경우 총 공사비는 반정도 줄어들고 천공길이 감소율이 55%까지 되기 때문에 공사비 및 공기단축에 크게 기여하는 것으로 나타났다(건설교통부, 1997). 그러므로 Micro Cement를 댐 기초처리를 위하여 사용하면 주입공의 배치간격을 넓힐 수 있고, 배치형상도 합리적으로 조절이 가능하기 때문에 OPC에 비해 경제적일 수 있으며, 따라서 댐 기초의 보강 및 침투수 조절에 대한 그라우팅 기술 및 그라우팅 재료에 대한 연구는 우리의 경우 매우 중요하고 시급하다고 본다.

따라서, 본 연구에서는 고결성, 침투성 및 동수지중 모형시험과 같은 실내 약액주입 모형시험을 통하여 시멘트계 주입재의 주입특성을 파악하고자 한다.

## 2. 시멘트계 주입재의 기본물성

시멘트계 주입재는 제조방법, 혼합물의 종류 및 배합 비율에 따라 물리·화학적 특성이 상이하며, 범용적으

로 사용되는 주입재는 포틀랜드계 시멘트 OPC와 Micro Cement가 있다. 본 연구에서는 국내에서 실용화된 이들 제품을 사용하였으며, 이들의 물리·화학적 특성은 다음과 같다(김진춘, 1999).

### 2.1 화학성분

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

### 2.2 물리적 특성

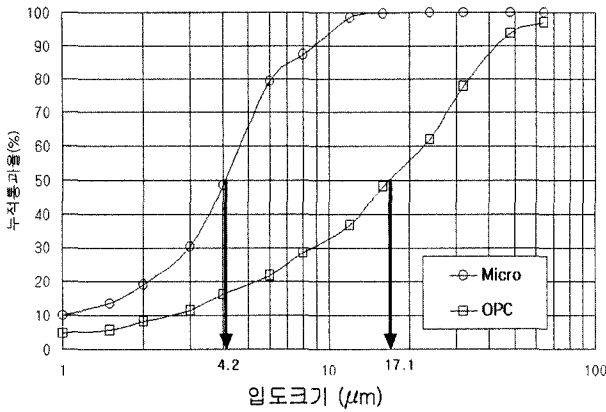
각 나라마다 포틀랜드계 시멘트나 혼합계 시멘트에 대한 품질기준을 국가규격으로 관리하고 있지만, 아직까지 Micro Cement에 관한 별도의 국가규격은 없다. 따라서, 본 연구에서는 한국 산업규격을 기준으로 품질을 평가하기로 하며, 물리적 특성의 대표적인 시험결과는 표 2와 같다. 표 2에서 볼 수 있듯이 Micro Cement는 OPC에 비해서 매우 우수한 강도특성을 나타내어 그라우트로서 고강도가 발현되므로 내구성이 큰 것이 일반적이다.

표 1. 시멘트계 주입재의 화학성분 구성비 예(단위: %)

	Micro Cement	OPC
① SiO <sub>2</sub>	28.5	20.3
② CaO+MgO+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	66.8	69.5
염기도 = ②/① ≥ 1.4	2.3	3.4

표 2. 시멘트계 주입재의 물리적 특성치

	KS규격 제한값	Micro Cement(%)	OPC(%)	
비 중	-	2.94	3.15	
비표면적(cm <sup>2</sup> /g)	2,800 이상	8,150	3,250	
길도 아 응 결	W/C(%)	-	30.5	28.7
	초결(분)	60 이상	205	170
	종결(시:분)	10 이하	8:05	7:30
압 축 강 도	W/C(%)	-	50.7	48.5
	1일(kg/cm <sup>2</sup> )	-	162	61
	3일(kg/cm <sup>2</sup> )	110 이상	356	202
	7일(kg/cm <sup>2</sup> )	190 이상	535	264
	28일(kg/cm <sup>2</sup> )	290 이상	689	405



범 례 Micro : Micro Cement  
 OPC : Ordinary Portland Cement

그림 1. 시멘트계 그라우트재의 입도분포 곡선

### 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 시멘트의 입도분석 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 형상판정계수로써 활용된다. 주입재가 미분말화 될수록 입자의 구상화율이 커지며, 구상화율이 크다는 것은 현탁액 주입재의 전단응력이 작아지기 때문에 주입압의 손실이 줄어든다. 따라서, 침투력을 높이고 주입반경을 넓히는 데에 유리하다.

## 3. 시험 조건 및 대상시료토

### 3.1 시험 조건

본 시험에는 현장에서의 실제 주입상황을 재현하고 그에 대한 주입효과의 차이와 대상지반의 주입한계를 파악하기 위한 시험으로서 토질 삼축압축시험기를 응용한 직경 400mm×높이 500mm의 대형 몰드를 제작하여 시험을 하였다. 이 시험에 사용한 대상시료토는 가는모래 50% + 실트 50% 혼합한 실트섞인 모래를 사용하였고 주입재는 OPC, Micro Cement를 사용하였다. 주입재의 온도는 20℃로 유지하면서, 시료의 다짐상태 및 주입재의 종류에 따

라 각각의 시험시간에 따른 압력, 유량을 측정하였다.

모형토조 내의 대상시료토를 다짐하는 방법은 우선 몰드의 하부에 주입관을 삽입해서 설치한 후 시료를 일정하게 넣어, 다짐횟수와 다짐층을 달리하여 느슨, 보통, 조밀한 상태를 조절하였다.

시료토 무게의 결정에 사용된 식을 나열하면,

$$D_r(\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

$$= \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \times 100$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + w} \quad (2)$$

$$\gamma_t = \frac{W}{V} \quad (3)$$

$$e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} \quad (4)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (5)$$

위의 식 (1)~(5)를 이용해 다짐할 흙의 양을 결정하고 시험진행시 동일한 다짐도를 가질 수 있도록 간극비를 유지하면서 시험을 하였다. 첫째, 대상 시료토의 함수비를 측정된 다음, 목표로 하는 상대다짐도를 식 (1)에 넣어 건조단위중량( $\gamma_d$ )을 구한다. 앞에서 구한 함수비와 건조단위중량을 식 (2)에 대입하여 습윤단위중량을 구하면 식 (3)에서 토조에 넣을 체적과 시료의 비중을 알기 때문에 다짐량을 구하고, 식 (4), (5)에서 간극비와 간극율을 구할 수 있다. 본 연구의 경우 공극율이 34.1%정도일 때를 조밀한 지반, 39.3%일 때 보통지반, 45.2%일 때를 느슨한 지반으로 나누었다. 상재압은 지반심도 GL(-)15m로 정하여 압력을 주었으며, 주입속도는 1 l/min, 주입량은 10 l (A액 5 l, B액 5 l)로 설정하고, 한계주입압은 5kgf/cm<sup>2</sup>로 설정하였다.

상기와 같은 조건에서 고결성 및 침투성 시험을 실시하여 주입 후 얇은 관에 의한 채취방법(Thin-walled Tube Sampling)을 사용해 고결토(직경 50mm×높이 100mm)를 채취하고 채취한 샘플을 재령별로 일축압축강도와 투수계수를 측정하였다. 단, 고결성 및 침투성 시험에서 2가지 가정을 전제조건으로 하여 시험을 수행 하였다. 첫째, 지반심도에 대한 상재압을 결정하기 위해서 지반은 동일한 흙으로 100% 포화지반이며 둘째, 지반의 상태가 지하수의 흐름 변화가 없는 정수지반으로 가정하였다(건설교통부, 2001).

### 3.2 대상시료토의 물성

본 시험에서는 가는모래 50% + 실트 50% 혼합한 실트쉬인 모래를 사용하였으며, 입도분석결과는 그림 2에 나타내었으며, 물리적 특성은 표 3에 나타낸 바와 같으며, OPC와 Micro Cement의 주입재로서의 적용한계 평가를 위해서 아래와 같이 설정하였다.

## 4. 시험

### 4.1 고결성 시험

#### 4.1.1 개요 및 시험장치

고결성 시험은 실내주입시험시 널리 사용되는 방법으로 약액주입에 의하여 주입대상 시료토가 가지는 고결율을 평가하는 시험으로써 대상시료를 대형 또는 소형 몰드에 넣어서 일정한 압력으로 약액을 주입하여 대상지반에서의 약액주입 효과를 판정하는 것으로, 시험장치는 그림 3과 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, 대상시

표 3. 대상시료토의 물리적 특성

비중	$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	건조단위중량 (상대밀도) g/cm <sup>3</sup> (%)	투수계수 (cm/sec)	공극율 (%)
2.70	1.712	1.439	조밀 1.634(77)	$6.42 \times 10^{-4}$	34.1
			보통 1.564(54)	$4.38 \times 10^{-3}$	39.3
			느슨 1.498(25)	$5.50 \times 10^{-2}$	45.2

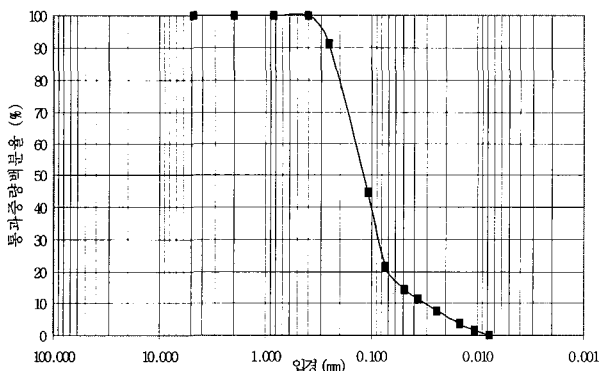


그림 2. 대상시료토의 입도분포 곡선

료는 실트쉬인 모래를 사용하였으며, 물리적 특성 및 입도분포는 3절에 나타내었다.

고결을 측정용 주입몰드의 크기는  $\phi 400\text{mm} \times H 500\text{mm}$ 로 주입 후 고결체의 형상을 정확히 파악할 수 있도록 몰드를 분리할 수 있도록 제작하였다.

시험은 다짐, 포화, 주입, 주입관찰단계로 나눌 수 있으며 첫째, 다짐단계의 경우 시료의 함수비를 측정하여 모형토조 안에 넣을 시료의 무게를 정한 후, 정해진 일정 다짐에 따라 나누어 동일하게 다져 나간다. 둘째 포화단계에서는 시료에 목표 상재압을 가한 후,  $0.1 \sim 0.2\text{kg/cm}^2$ 의 압력으로 물을 공급하면서 포화시킨다. 3시간정도 물을 공급한 후 B-value 값이 95%정도가 나올 때까지 백압(Back pressure)을 주어서 포화상태를 만든 후, 포화단계를 끝낸다. 셋째, 주입단계에서는 각각 준비된 A액과 B액을 주입하면서 주입압, 주입량, 지반변위, 간극수압의 변화를 측정하고 최종적으로 주입 후 페놀프탈레인(지시약)으로 고결형태를 관찰하여 고결 및 침투형상을 파악한다.

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.

#### 4.1.2 시험계획

주입재의 배합비는 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 200%를 기준으로 다음의 표 4와 같이 설정하였으며, OPC와 Micro Cement를 사용할 경우는 시편 채취의 편의성을 위해 경화촉진제(Sodium Aluminate)를 사용하였다.

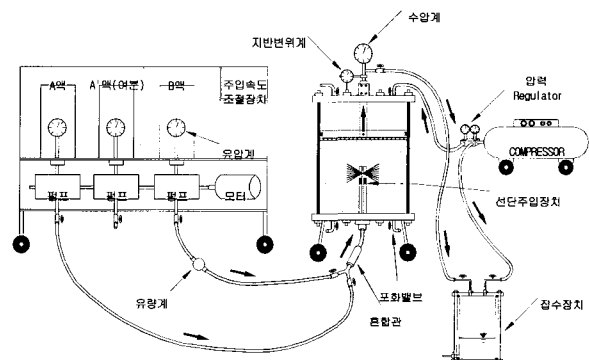


그림 3. 고결성 및 침투성 시험장치

표 4. 고결성 및 침투성 시험용 주입재 배합계획

주입재명	배합량		비 고
	물(ℓ)	주입재(kg)	
OPC	320	160	시편 채취시간 단축과 시험의 편의성을 위해서 경화촉진제(Sodium Aluminate) 사용
Micro Cement	320	160	

상기의 배합계획에 의해서 식 (6)과 같이 고결율을 평가한다.

$$\text{고결율}(\%) = \frac{\text{실제 고결된 흙의 체적}}{\text{주입대상 흙의 체적}} \times 100 \quad (6)$$

고결체의 실제 형상은 복잡하여 고결토의 정확한 체적을 구하는 것은 어렵지만, 대형수조에 물을 가득히 채운 다음, 고결체를 넣어 물이 넘쳐흐른 후의 수조에 남은 물의 무게차이를 측정하여 고결토의 부피로 결정하였다.

주입재는 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 OPC와 Micro Cement를 Paste상태로 주입하고, 대상토는 다짐 정도에 따라서 3종류, 주입압은 주입펌프로 일정하게 하고, 주입재의 물/시멘트 비는 200%로 선정하여 공극율, 주입재 종류에 따른 OPC, Micro Cement Paste의 고결성 및 침투성을 평가하기 위해 다음의 표 5와 같이 시험을 계획하였다.

본 시험에서는 지반심도를 GL(-)15m로 가정하여 상대 밀도에 따라 조밀한 상태에서는 1.99kgf/cm<sup>2</sup>, 보통 상태에서는 1.97kgf/cm<sup>2</sup>, 느슨한 상태에서는 1.95kgf/cm<sup>2</sup>로 상재압을 설정하여 Cell Pressure로 가하였다(건설교통부, 2001).

#### 4.1.3 시험결과

표 5의 시험계획에 의해서 OPC, Micro Cement Paste를 주입하여 고결성 시험을 시행한 결과는 그림 4와 같으며, Micro Cement의 경우는 입자크기가 OPC 보다 미세하기 때문에 침투성이 뛰어나고 고결율이 높았다.

결과에서 볼 수 있듯이 OPC의 경우는 원지반의 투수계수가 10<sup>-2</sup>cm/sec정도일 경우에는 침투주입이 가능하

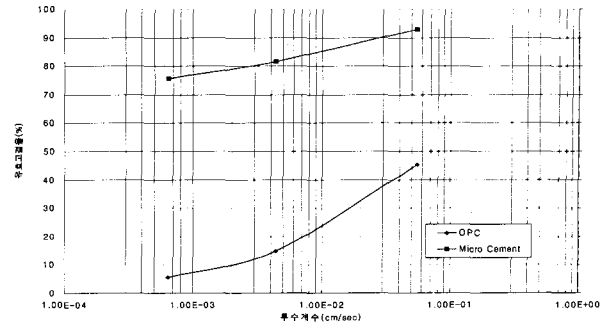


그림 4. 모형토조 지반의 투수계수 변화에 따른 유효고결율 변화

여 고결율이 컸지만, 10<sup>-4</sup>~10<sup>-3</sup>cm/sec 정도의 투수계수를 가지게 되면 침투주입이 불가능하여 고결율이 현저히 저하되는 것으로 나타났다.

한편, 지반의 상대밀도에 따른 투수계수를 10<sup>-4</sup>~10<sup>-2</sup>cm/sec 정도로 변화시킨 경우 Micro Cement는 투수계수 10<sup>-4</sup>cm/sec에서도 침투주입이 원활하여 고결율이 우수한 것으로 보여지므로, 댐 침투수 조절을 위하여 기초지반의 보강을 실시할 경우는 상기와 같은 결과를 염두에 두고 대상지반의 투수계수가 10<sup>-4</sup>cm/sec정도가 된다면 Micro Cement로 그라우팅을 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 4.2 침투성 시험

#### 4.2.1 시험장치

본 시험에서는 OPC, Micro Cement를 사용하여 실트 섞인 모래의 다짐정도(상대밀도)에 따른 침투성을 비교하였다. 대상토질은 실트섞인 모래를 사용하였으며, 물리적 특성 및 입도분포는 2절에서 소개한 바 있으며, 시험장치는 고결성 시험에서 사용한 장치를 사용하였다.

#### 4.2.2 시험계획

본 시험의 주입재는 OPC, Micro Cement Paste를 대상으로 하며, 대상토는 다짐 정도에 따라서 3종류, 주입압은 2~3kgf/cm<sup>2</sup>, 주입재의 물/시멘트 비는 200%로 선

표 5. 고결성 및 침투성 시험을 위한 시험계획

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

정하고 시료토의 공극율, 주입재 종류에 따른 주입재의 침투성을 평가하였다.

공시체 제작시 주입압에 의해 시료가 뜨지 않도록 압력변동에 주의한다. 주입관은 토조의 밑에 연결하고 일정한 압력으로 가압한다. 한편, 몰드 내에서 Cement 입자의 침투가 막히면서 과도한 압력이 작용할 경우 몰드 상단의 배출구로 자연적으로 토출되도록 밸브를 개방시켜 놓았다. 지반의 심도를 GL(-)15m 정도로 고려하여 상재압을 가하였으며, 침투주입율은 식 (7)과 같이 평가한다.

식 (7)에서 대상시료토 공극의 체적은 시료토의 체적에 공극율(%)을 곱하면 쉽게 구할 수 있다.

$$\text{침투주입율}(\%) = \frac{\text{주입량}}{\text{대상시료토 공극의 체적}} \times 100 \quad (7)$$

#### 4.2.3 시험결과

주입조건에 따른 OPC, Micro Cement의 침투성 시험결과는 그림 5와 같으며, 침투성 시험결과 초미립자인 Micro Cement의 경우는 지반의 투수계수가  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  cm/sec 일 경우 거의 침투주입이 가능하였지만, OPC의 경우 Cement 입자가 상대적으로 크기 때문에 원지반의 투수계수가  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm/sec 정도일 때에는 침투주입이 불가능하고, 할렬주입되는 경향을 육안으로 확인할 수 있다. 투수계수가  $10^{-4}$  cm/sec 정도보다 작을 수 있는 댐 기초암반에 대한 그라우팅 시공시 Micro Cement를 사용하는 것이 침투수량을 억제 혹은 저감시킴으로써 댐의 안정성을 증대시킬 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 현장에서 Micro Cement를 사용할 경우에는 그라우팅 공사 전에 주입목적에 파악하고 충분한 현장답사 및 지반조사를 통하여 적절한 주입재를 선정하여 현장상황에 맞게 실시하여야 할 것이다(森麟·千柄植, 1987).

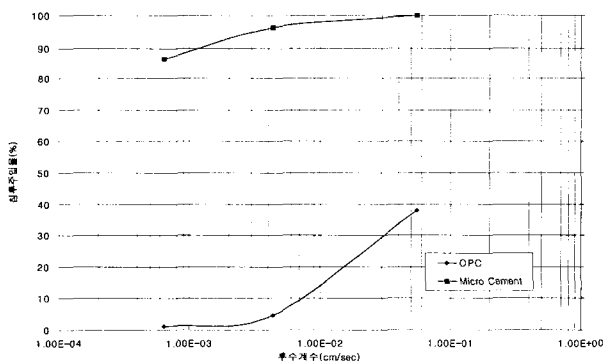


그림 5. 모형토조 지반의 투수계수 변화에 따른 침투주입율 변화

### 4.3 동수지중 모형시험

#### 4.3.1 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~유효고결을 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 실리카졸계 약액을 사용하기도 한다. 본 시험에서는 OPC+규산소다 3호와 MSG(Micro Cement+규산소다 3호) 2가지를 사용하였다.

#### 4.3.2 시험계획

본 시험에서는 Micro Cement를 주입재로 사용하고, 침투형상을 가시적으로 보기 위하여 규산소다 3호를 첨가하였다. 주입압은 2, 4kgf/cm<sup>2</sup> 두 가지로 설정하였으며, 유속은  $10^{-1}$  cm/sec 정도에 해당되는 유속에 대하여 1가지,  $10^{-2}$  cm/sec 정도에 해당되는 유속 2가지로 유속의 변화에 따른 3가지 경우에 대하여 시험을 계획하여 지중유속~주입압~Gel-time(주입재종류)~유효고결율의 관계를 파악하고자 하였다.

#### 4.3.3 시험결과

동수지중에서 주입시험결과를 표 6에 나타내었으며, 유속이 상대적으로 느린 경우( $V_s = 10^{-3}$  cm/sec 정도) 주입압이 높을수록, 완결형(Gel-time 60~90sec) 주입재가

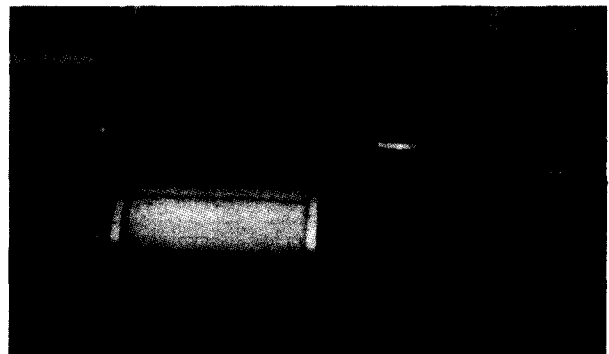


사진 1. 동수지중 모형시험 광경

표 6. 동수지중 모형시험의 결과

지중수평유속 (cm/sec)	주입압 (kgf/cm <sup>2</sup> )	Gel-time (sec)	고결토 부피 (cm <sup>3</sup> )	이동거리 (cm)	유효고결율 (%)	비 고
4.87 × 10 <sup>-3</sup>	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 <sup>-2</sup>	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 <sup>-2</sup>	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

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 빠를 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.

이상과 같이 유속이 커서 주입재의 희석, 유실이 커질 경우에는 물유리계 용액형 주입재를 차수재로 사용하여 물의 흐름을 억제한 후 OPC 또는 Micro Cement와 같은 현탁액형 주입재를 복합적으로 사용하면 투수성이 큰 침투지역에서도 효과적으로 차수가 가능할 것으로 기대된다. Gel-time이 상당히 짧은 급결형보다는 완결형과 같이 Gel-time이 적절한 주입재가 침투거리도 길고 유효고결율도 높일 수 있는 것으로 판단되며, 이는 Gel-time이 너무 짧은 주입재의 경우는 시험시작 직후에 주입된 주입재가 지반 내에서 경화가 되면서 뒤이어 주입되는 주입재가 들어오는 것을 차단시키는 악영향을 끼치는 것으로 보인다.

### 5. 결론

시멘트계 주입재에 대한 주입특성을 파악하기 위해 주입재의 공학적 특성 및 대상시료토의 다짐정도 그리고, 투수계수의 변화에 따른 고결성, 침투성 시험 및 동수지중 모형시험을 수행하였다. 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 시멘트계 주입재인 OPC, Micro Cement의 입도분석 결과,  $D_{50}$ 에 해당하는 입자의 크기는  $17.1\mu\text{m}$ ,  $4.2\mu\text{m}$  로써 Micro Cement가 OPC에 비해서 약 4배정도 미세하여 지반주입재의 침투가 요구되는 경우에는 Micro Cement를 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.
- (2) 시멘트계 주입재의 적용성을 시험적으로 평가하기 위하여 고결성 시험을 실시한 결과, 모형 토사지반의 상대밀도에 따른 투수계수를  $10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm/sec로 변화시킨 경우, Micro Cement는 투수계수  $10^{-4}$ cm/sec에서 유효고결율 75% 이상으로 고결성이 우수한 결과를 나타낸 반면, OPC는  $10^{-2}$ cm/sec에서도 유효고결율이 50% 미만으로서 고결율이 떨어지는 것으로 나타났다.
- (3) 침투성 시험에서 모형토사지반의 상대밀도에 따른 투수계수를  $10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm/sec로 변화시킨 경우, Micro Cement는 투수계수  $10^{-4}$ cm/sec에서 침투주입율 86% 이상으로서 침투성이 우수하였지만, OPC는  $10^{-2}$ cm/sec에서도 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 방지 하고 고결율을 높이는 데에 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 침투

성이 요구되는 경우에는 Micro Cement계 그라우팅이 효과적일 것으로 판단되며 특히, 댐 기초지반의 침투유량이 큰 손상부에서 보수그라우팅을 할 경우 규산소다계의 완결재를 이용한 1차 차수그라우팅을 실시하여 다량의 침투수량을 억제시킨 후 미세한 균열부까지 침투가 가능한 Micro Cement계 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 연구비 지원에 의한 것으로, 이에 심심한 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), 건설공사의 안정시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구 -마이크로시멘트 및 실리카졸을 중심으로-, 건설교통부 '95 연구개발사업 최종보고서, pp.336-340.
2. 건설교통부(2001), 마이크로시멘트 현장제조 및 실시간 시공모니터링을 이용한 최적그라우팅 시스템 개발 연구, 2000년 산·학·연 공동연구개발사업 제 1차년도 연구보고서, pp.85-100.
3. 김진춘(1999), 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교 대학원, pp.30-80.
4. 시설안전기술공단(1997), 댐 안전을 위한 보수대책의 체계화 연구, pp.291-302.
5. 천병식(1998), 최신지반주입-이론과 실제-, 원기술, pp.61-73, 107-120.
6. 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.

(접수일자 2002. 7. 29, 심사완료일 2002. 10. 4)