

## 저수지 제방 보수보강을 위한 하이브리드형 그라우트재 연구

### A Study on Hybrid Grout Material for Reservoir Embankment reinforcement

박성용<sup>1</sup>, 심홍근<sup>2</sup>, 강희진<sup>2</sup>, 임원빈<sup>2</sup>, 사미 플림반<sup>3</sup>, 김용성<sup>4\*</sup>  
Sung-Yong Park<sup>1</sup>, Houg-Gen Shim<sup>2</sup>, Hee-Jin Kang<sup>2</sup>, One-Bin Lim<sup>2</sup>,  
Ghazali-Flimban Sami<sup>3</sup>, Yong-Seong Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Researcher, National Disaster Management Research Institute, 406-33, Jongga-Ro, Jung-gu, Ulsan, 44538, Republic of Korea

<sup>2</sup>Ph.D Candidate, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 200-701, Republic of Korea

<sup>3</sup>Ph.D Candidate, Department of Biological Environment, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, 1, Kangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 200-701, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Cement grouting method is generally applied for the purpose of reinforcement of deteriorated reservoir. Problems have been raised due to the limit of the injection material. In order to solve these problems, various grout materials have been developed. However, there are many cases in which the grounds are disturbed in actual field. In this study, the physical properties of hybrid grout with high fineness and high viscosity characteristics were analyzed to enable penetration into the ground. Optimum inflation agent was selected and mixed with the grout. The pressure and compaction effect on expansion was examined and its effectiveness was verified. From the result of confirming expansion ratio, uniaxial compressive strength, expansion pressure and compaction effect, the HI-E (2%) sample was analyzed to be excellent in improvement effect by the inflation agent. Hence, hybrid grout can be effectively applied for the impermeable and reinforcement method of deterioration reservoir and tide embankment.

#### 요 지

노후저수지 체체 보강을 목적으로 시멘트 그라우팅공법이 일반적으로 적용되고 있으나, 주입재의 재료적 한계로 인해 여러 문제점이 제기되어 왔다. 이를 극복하기 위하여 국내에서도 다양한 그라우트 재료들을 개발하고 현장에 적용하고 있으나 실제 현장에서 침투주입시 원지반 교란으로 인한 문제가 야기되는 경우가 많다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 원지반에의 이상적인 침투주입이 가능하도록 고분말, 고점도의 특성을 가지며 실트질 모래층까지 침투주입을 확장시키고 복합조건인 지반에서도 적용할 수 있는 하이브리드형 그라우트재의 물리적 특성을 분석하였으며, 최적의 팽창제를 선정하여 그라우트재와 혼합한 후 부피팽창에 따른 압력과 다짐효과를 검토하여 실효성을 검증하고자 하였다. 팽창율, 일축압축강도, 팽창압력 및 다짐효과확인시험 결과, HI-E(2%) 시료는 팽창제에 의한 개선효과가 탁월한 것으로 나타나 이를 혼합한 하이브리드형 그라우트재는 노후저수지, 방조제 등의 차수 및 보강공법에 효과적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords** : Grouting, Hybrid grout, Inflation agent, Deterioration reservoir, Impermeable, Reinforcement

#### 1. 서 론

우리나라 저수지 총 17,427개소 중 약 96%정도가 1980년대 중반 이전에 건설되어 노후화가 심한 것으로 확인되었으며, 시간경과에 따라 노후화의 계속적 진행에 따른 저

Received 28 Aug. 2017, Revised 18 Sep. 2017, Accepted 18 Sep. 2017

\*Corresponding author

Tel: +82-33-250-6463; Fax: +82-33-251-6463

E-mail address: yskim2@kangwon.ac.kr (Y.-S. Kim)

수지 붕괴위험, 하부 토사퇴적에 따른 저수량 감소 등 심각한 문제점을 내포하고 있다(Park et al., 2016). 저수지는 우리에게 농업용수를 제공하는 중요시설이지만 붕괴시에는 많은 피해를 야기할 수 있는 재난시설이기도 하다. 시간경과에 따른 노후화는 불가피하지만 지속적인 유지관리를 통한 보수보강을 통해 구조적 안정성을 확보할 수 있다(Rural Research Institute, 2015).

이러한 노후저수지 제체 보강 및 누수억제를 목적으로 시멘트 그라우팅공법을 일반적으로 적용하고 있으며, 특히 누수의 위험성이 있는 저수지 제체보강을 위한 그라우팅은 보통포틀랜드 시멘트를 주재료로 하는 시멘트 현탁액, 시멘트-벤토나이트, 시멘트-점토 주입재가 폭 넓게 사용되어 오고 있으나, 제체하부 풍화대의 간극을 통한 누수나 공극이 매우 작은 경우의 누수는 지수효과가 상대적으로 떨어지는 문제점이 지적됨에 따라 분말도가 상대적으로 높은 초미립자 시멘트를 이용한 그라우팅을 적용하고 있다(Song et al., 2003).

1980년대 이후 환경과 지하수 보호에 대한 요구가 증가하면서 화학약액 주입이 거의 사라지고 용액형에 필적하는 침투성을 발휘하는 초미립자시멘트에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. Tomio and Shuzo(1982)는 산악터널 기반주입에 적용될 초미립자시멘트의 품질기준을 제시하였으며 Kubota(1992)는 암반기초의 투수성이 5Lu이하에서 초미립자시멘트를 적용할 경우 추가적인 천공주입을 하지 않고도 설계목표 차수성을 달성할 수 있기 때문에 초미립자시멘트를 사용하는 것이 유리하다고 제안하고 있다. 한편 Ichikawa et al.(1996)은 사질지반의 액상화를 방지하기 위한 그라우팅에서도 초미립자시멘트가 효과적이라고 보고하고 있다.

한편, 초미립자시멘트를 단독으로 사용할 경우 점도가 높아지기 때문에 오히려 침투성을 악화시킬 가능성이 높다. Karol(1990)은  $k=\alpha \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 의 실트질 사질지반에서 침투주입의 한계점도를 5cps이하  $k=\alpha \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 사질지반에서 침투주입의 한계점도를 10cps 이하로 제시한 바 있다. Hakansson et al.(1992)는 물시멘트비별 유동화제 종류 및 첨가량별로 유동성 변화와 시간경과에 따른 전단응력을 검토하였으며, 그 결과 유동화제의 종류는 폴리 카본산 카르복실계가 가장 적합하고 최적 첨가량은 초미립자시멘트량의 중량비로 2~3% 사용할 것을 제시하고 있다.

1980년대 이후 분쇄-분급기술이 급속히 발전하면서 초

미립자시멘트의 생산이 가능하게 되었고, 일본 등 분체산업이 발달된 국가에서 평균입경 10 $\mu\text{m}$ , 최대입경 40 $\mu\text{m}$ , 비표면적 6,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  이상의 콜로이드시멘트와 평균입경 4 $\mu\text{m}$ , 최대입경 10 $\mu\text{m}$ , 비표면적 8,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  이상의 초미립자시멘트가 실용화 되었으며(Kim, 1999), 초미립자시멘트는 용액형에 필적하는 침투성을 발휘하는 것으로 보고되고 있다(Shunichi and Koji, 1993).

그라우팅공법은 주입재의 재료적 한계로 인해 여러 문제점이 제기되어 왔으며, 이를 극복하기 위하여 국내에서도 다양한 그라우트 재료들을 개발하고 현장에 적용하고 있으나 실제 현장에서 침투주입시 원지반 교란으로 인한 문제가 야기되는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 원지반에의 이상적인 침투주입이 가능하도록 고분말, 고점도의 특성을 가지며 실트질 모래층까지 침투주입을 확장시키고 복잡조건의 지반에서도 다양하게 적용할 수 있는 그라우트 재료를 하이브리드형 그라우트재(Park et al., 2017)로 규정하고, 상기와 같은 문제점을 개선하기 위하여 하이브리드형 그라우트재의 물리적 특성 및 최적의 팽창제를 선정하여 그라우트재와 혼합한 후 부피팽창에 따른 압력과 다짐효과를 검토하여 실효성을 검증하고자 하였다.

## 2. 그라우트재와 팽창제 메카니즘

### 2.1 그라우트재의 침투한계 주입비

#### 2.1.1 주입재 및 토립자 직경에 의한 침투성 분석

주입재가 쉽게 침투하기 위해서는 주입재 입자가 토립자 사이 또는 균열공극을 무리없이 통과할 수 있을 정도로 입자가 충분히 작아야 하며 Kravetz(1958)는 주입재 및 침투가능한 토립자에 대한 침투성 시험결과를 통해 주입비 (Groutability ratio) 관계식을 제안한 바 있다

$$N_1 = D_{15}/D'_{85} > 15 \text{ 또는 } N_2 = D_{10}/D'_{95} > 8 \quad (1)$$

여기서,  $N_1, N_2$  : 주입비

$D_{15}, D_{10}$  : 토립자 입경가적곡선의 15%, 10%

$D'_{85}, D'_{95}$  : 주입재 입경가적곡선의 85%, 95%  
입경

또한, 암반균열 주입에 관해서 암반균열폭과 주입가능한 주입재의 최대입자경과의 관계를 Mitchel(1981)이

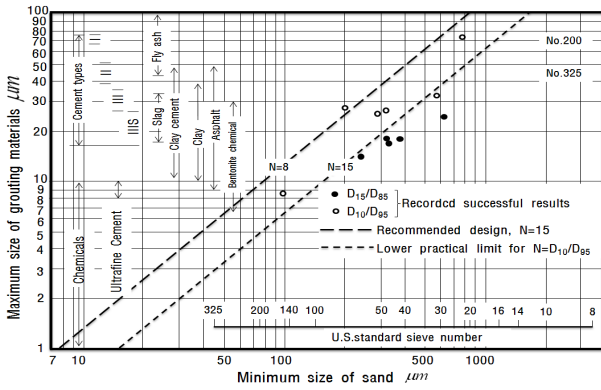


Fig. 1. Penetration limit by practical size (King and Bush, 1961)

제안한 주입비 N은 식 (2)와 같다.

$$N = D_{\text{fissure}} / D'_{\text{max}} > 3 \quad (2)$$

여기서,  $D_{\text{fissure}}$  : 암반 균열 폭

$D'_{\text{max}}$  : 주입재 입자의 최대 입경

시멘트계 주입재의 최대입경을 보통시멘트  $100\mu\text{m}$ , 콜로이드시멘트  $20\mu\text{m}$ , 초미립자시멘트  $10\mu\text{m}$  수준으로 가정하면 식 (2)에 의해서 주입이 가능한 암반균열의 최저폭은 각각  $300\mu\text{m}$ ,  $60\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$  수준이 된다. 그러나, 토립자 입경의 크기를 매번 측정하는 것은 매우 번거롭고 시공대상 토질의 대표성을 확보하기 어려운 경우가 많기 때문에 실용적인 측면에서는 King and Bush(1961)에 의해서 제안된 Fig. 1과 같은 도표를 이용해서 사용될 주입재의 침투한계 토질을 선정하는 것이 편리하다.

식 (1)의 관계를 만족하면 주입재가 토립자 공극을 무리없이 침투주입 될 수 있다고 판단할 수 있다. 즉, Fig. 1에서 초미립자시멘트를 사용하는 경우 식 (1)의 관계를 만족하는 토립자의 최소입경이  $50\sim 150\mu\text{m}$  정도로 화학약액에 필적하는 침투성 영역에 위치하고 있다. 반면, 보통시멘트를 사용하는 경우는 토립자의 최소입경이  $500\sim 1,200\mu\text{m}$  정도로 토립자 입경이 약 10배 정도 커야한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 주입대상 토질이 가는 모래나 실트질 모래로 구성되어 있는 경우 공극율은 크지만 유효공극경의 크기가 작기 때문에 주입재의 입자가 큰 보통시멘트는 침투주입이 어렵고 주입재의 입자가 충분히 작은 초미립자시멘트를 사용하면 가능하다는 것을 의미한다.

### 2.1.2 주입재 및 토립자 직경에 의한 침투성 분석

King and Bush(1961)는 일반적인 사질지반의 흡을 대

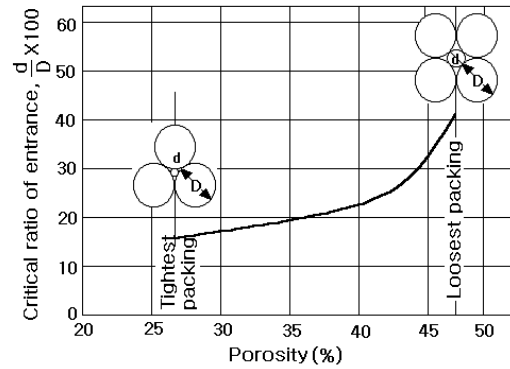


Fig. 2. Relationship between  $d/D$  (%) and  $n$

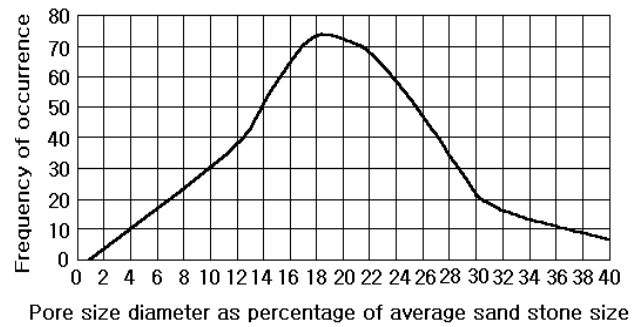


Fig. 3. Frequency of  $d/D$  (%)

상으로 토립자 공극경  $d$ 와 토립자 유효입경  $D$ 와의 관계에 대해서 Fig. 2와 같은 관계를 제안하였다. 즉, 주입대상 토질의 평균입경과 동일한 유효입경이  $D$ 인 이상적인 구형 토립자를 가정하고 이와 같은 토립자의 평균입경으로 형성된 토립자들의 공극율을  $n$ 이라고 가정하면, 이에 대응하는 토립자 공극경  $d$ 와의 관계는 가장 조밀하게 다져진 상태에서의 공극율  $n=26\%$ 에 대하여  $d=0.15D$ , 가장 느슨하게 다졌을 때의 공극율  $n=48\%$ 에 대해서  $d=0.41D$ 임을 제시하였다.

Fig. 3은 여러 종류의 사질지반의 흡에 대해서  $d/D$ 의 관계를 실험실에서 측정된 결과이며,  $d=0.2D$ 의 빈도가 가장 많음을 보여주고 있다. 공극경  $d$ 는 주입재의 미립자경 ( $D'$ )의 3배 이상이어야 침투가 가능하므로  $d=0.2D$ 에서  $3D'=0.2D$ , 따라서 주입비  $N=D/D'=15$ 가 된다.

이상과 같이 주입제로서 요구되는 가장 중요한 특징은 지반의 토립자 공극을 침투하기 위해서 약액의 입자가 충분히 작아야 한다.

## 2.2 팽창제의 작용 메카니즘

팽창제를 시멘트에 적당량 혼합하여 사용하면 경화과

Table 1. Type of composition of expansion agent

Division	Z Co.	S Co.	H Co.
Production	Self production / Korea	Self production / Korea	Import / UK
Composition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CSA (Calcium Sulfur Aluminate)</li> <li>• Expansion: 1%, 2.5%, 5%, 10%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CSA (Calcium Sulfur Aluminate)</li> <li>• Expansion: 0~20%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansion: 4.5% (1 day)</li> </ul>
Sample name	Type-1	HI-E	C-100

정에서 미세한 침상 또는 봉상결정의 고허산염 수화물 (Ettringite)이 생성되며, 이 수화물이 팽창력을 발휘하여 경화체의 구조를 치밀하게 해 주고 건조수축 및 경화수축을 최소화하게 된다.

팽창제의 특성은 시멘트에 적정량 혼합 사용함으로써 콘크리트의 건조수축 및 경화수축을 최소화할 수 있으며,  $C_4A_3\bar{S}$ 는 콘크리트 경화 시  $CaSO_4$  및  $CaO$ 와의 반응에 의해 미세한 침상의 Ettringite 결정을 생성시켜 팽창작용을 하므로 건조 및 경화수축을 최소화하여 균열발생을 억제해 준다. 또한 Ettringite가 시멘트 경화체의 공극을 채워줌과 동시에 주변 수화물을 압밀하여 보통콘크리트에 비해 치밀한 구조와 높은 밀도를 갖게 해준다.

팽창제 사용 시 사용량은 사용 목적에 따라 적절한 양을 사용해야 하며, 과도한 사용은 팽창에 의한 균열 등 구조물의 열화를 초래할 수 있다. 또한, 혼합은 보통시멘트를 사용하는 경우 보다 충분한 시간동안 혼합해 주어야 하며, 불충분한 혼합은 국부적인 수축, 팽창에 의한 균열발생의 원인이 된다.

일반적으로 팽창제의 사용은 콘크리트 균열억제나 충전재의 블리딩 방지 등의 목적으로 많이 사용되고 있으나 본 연구에서는 그라우팅 다짐효과를 발휘할 수 있는 배합비를 찾기 위해서 시멘트계 팽창제로서 국산 2가지 시료와 해외 1가지 시료 등 총 3가지 시료를 선택하여 사용하였으며, 주요성분 및 특성은 Table 1과 같다.

### 3. 하이브리드형 그라우트재 특성시험

#### 3.1 그라우트재 특성시험 방법

##### 3.1.1 분말도 시험

하이브리드형 그라우트재의 분말도 시험은 주입재의 비표면적을 평가하는 시험으로 분말도 시험 측정방법은 한국산업규격 KS L 5106(공기 투과 장치에 의한 보통 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험 방법)에 의하여 측정하였다. KS 규격에서의 분말도 시험은 보통 포틀랜드 시멘트를 기

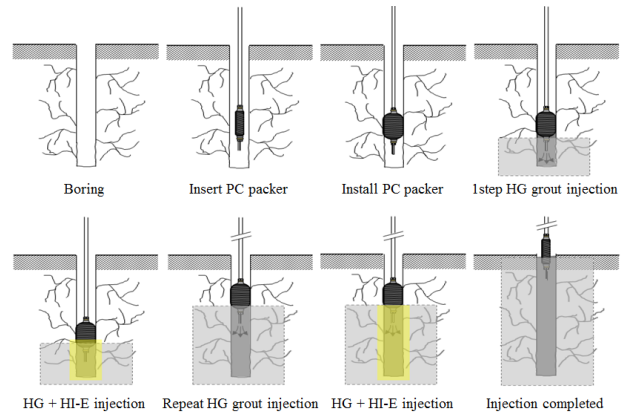


Fig. 4. Method of viscosity test

준으로 정한 것이므로 하이브리드형 그라우트재와 같은 초미립자 재료에 대해서는 KS 시험방법을 따르되 기타 전처리 과정 및 시료계량, 기공을 적용에 있어서 차이나는 요소들은 별도로 평가하여 시험하였다.

##### 3.1.2 점도시험

저수지와 같은 저압 그라우팅에 사용되는 슬리브 형태의 주입은 Fig. 4와 같이 밀크 페이스트를 1차로 주입하고 2차로 팽창제를 첨가한 주입재를 주입하는 방식으로 순차적으로 주입과 동시에 팽창다짐(expansive compaction)을 발생시켜 주입효과의 극대화를 도모하게 된다. 본 시험에서도 그라우트의 점도시험시 하이브리드형 그라우트재는 W/C 120~200%를 기준으로 통상적으로 현장에서 많이 사용되는 밀크페이스트 W/C 범위에서 점도시험을 실시하였으며, 팽창제를 혼합한 팽창효과 시험은 W/C 70~90% 범위에서 실시하였다.

점도시험방법은 점도계를 사용하여 시험온도 23°C에서의 액상, 용액상 또는 현탁상 수지의 점도를 측정하는 방법에 대하여 규정하며, 뉴턴성 물질 및 비 뉴턴성 물질에 적용한다. 본 연구에서는 액상 수지의 회전 점도계에 의한 점도시험방법으로 시험을 실시하였으며, 분말도가 높은 초미립자 주입재의 경우 응집력이 강하므로 분산제 사용이 필수적인데, 분산제 종류별로 1~2% 첨가하여 점도의

변화를 관찰하며 시험을 수행하였다.

### 3.1.3 어독성 시험

약액주입공법에 의한 지반개량시 고결체로부터 약액의 성분이 용탈됨으로써 주변의 토양 및 지하수를 오염시킨 사례가 종종 보고되고 있으므로, 주입공사를 수행해야 할 경우 주변 환경에의 영향을 고려하여 적절한 공법과 재료를 선택하도록 법적으로 규제하는 등 환경오염 방지를 위해서 노력하고 있다. 그러나, 국내에서는 지금까지 약액주입공법에 의한 피해사례가 보고된 적이 없고 외국의 사례를 통해서 추정만 할 뿐이다. 1974년 일본 건설성에서 제정한 「약액주입공법에 의한 건설공사 시공에 관한 잠정지침」에 의하면 주입 시공 후 주변의 수질기준인 pH를 8.60 이하(공사 직전의 측정치가 8.60을 초과할 때에는 해당 측정치 이하)로 제한하고 있기 때문에 오염성이 낮은 물유리계 약액조차 항상 안전하다고 할 수는 없다.

고결체로부터 용탈된 알칼리에 의한 어독성을 평가하기 위하여 「KS M 0111」에 규정된 「어류에 의한 급성 독성시험」법과 어류에 대한 주입재 영향 평가 시험방법 등에 근거하여 시험장치를 구성하였다. 시험수조는 깨끗한 유리 및 스테인레스제로 용량이 약 50L 이상 되도록 설계하고, 수온은 8~10°C의 지정온도를 유지하도록 하였다.

본 시험의 표준배합비는 물시멘트비 90%의 부배합에 팽창제는 1~2% 혼합하여 공시체를 제작하였으며(Table 2 참조), 어독성 시험의 시험조건은 공시체 부피대비 수조에 넣는 물은 약 5배수 조건으로 0, 12, 24, 48, 96h로 공시어 치사율, pH 측정을 실시하였다.

## 3.2 특성시험 결과

### 3.2.1 분말도 시험결과

분말도 시험은 총 3회씩 투과시간을 측정하고 평균시간으로 측정값을 도출하여 시험의 신뢰도를 높였다. 분말도 시험결과 보통 포틀랜드 시멘트의 비표면적은 3,310cm<sup>2</sup>/g 인 반면 하이브리드형 그라우트재의 비표면적은 8,711~8,746cm<sup>2</sup>/g(평균 8,725cm<sup>2</sup>/g)으로 나타났다(Table 3 참조).

본 시험결과, 하이브리드형 그라우트재의 비표면적이 보통시멘트의 비표면적보다 약 2~3배정도 높게 나타나, 하이브리드형 그라우트재의 입자가 보통시멘트의 입자보다 약 2~3배 작은 것을 알 수 있다. 이는 보통시멘트 주입재의 최대입경이 100 $\mu$ m일 경우, 하이브리드형 그라우트재의 최대입경은 약 50~30 $\mu$ m이며, 토립자의 최소입경이 50~150 $\mu$ m 정도일 경우에도 침투주입을 확장시킬 수 있어 보통시멘트 주입에 할렬이 발생하는 지반에서 적용성이 높을 것으로 판단된다.

### 3.3 점도시험결과 분석

하이브리드형 그라우트는 고분말시멘트로 콜로이드급 응집계 입자가 많기 때문에 분산제를 사용하는 것이 필연적인데, 대표적인 국산 분산제 2종류를 대상으로 주입재 중량비 1~2%를 첨가하여 점도값을 측정한 결과 Table 4와 같은 결과를 도출하였다.

하이브리드형 그라우트재는 물시멘트비 200% 빈배합일 경우 분산제를 1% 첨가함으로써 8.82cps로 점도를 낮출 수 있다. 이는 물시멘트비 200% 이상의 배합비의 경우 분산제를 전혀 사용하지 않아도 사질지반에서의 침투주입

Table 2. Standard mixing ratio of Hybrid Grout

W/C	Water (kg)	Cement (kg)	Expansion agent (kg)	Note
90	377.5	420.0	4.1~8.4	1~2% added

Table 3. Result of fineness test

Division	Porosity	Weight (g)	Time (sec)	Average time (sec)	Value of measured (cm <sup>2</sup> /g)	Value of average (cm <sup>2</sup> /g)
Nomal portland cement	0.5	2,8366	75,10	74.67	3,310	3,310
			74,67			
			74,20			
Hybrid grout	0,57	2,3644	207,02	207.91	8,711	8,725
			208,66		8,746	
			208,05		8,720	

Table 4. Result of viscosity test

Type	Amount of dispersing agent			W/C (%)	Temperature (°C)	Viscosity (cps)
	Type	(%)	(g)			
Hybrid grout	No. 1	1	2,2	200	18,0	8,82
			2,7	150	19,3	11,50
			3,3	120	20,1	18,40
	No. 2	1	2,2	200	18,8	17,80
			2,7	150	18,8	30,90
			3,3	120	19,4	56,8

Table 5. Result of fish toxicity test

Measured value \ Time (h)	0	12	24	48	96
Lethality (%)	0	0	0	0	0
pH	8,0	9,1	9,2	8,3	8,1
Temperature (°C)	10	10	9	10	8

의 한계점도인 10cps 이하로 점도를 낮추는 것이 가능할 것으로 판단된다. 점도시험결과 Karol(1990)이 제시하는  $k=\alpha \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 의 실트질 사질지반에서 침투주입의 한계 점도를 5cps이하  $k=\alpha \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 사질지반에서 침투주입의 한계점도를 10cps 이하로 제시하는 점도기준 조건에 배합비와 분산제 혼합량을 통해 한계점도를 만족함을 확인 할 수 있으며, 표준배합을 통해 다양한 지층에서 대응할 수 있는 주입재임을 검증하였다.

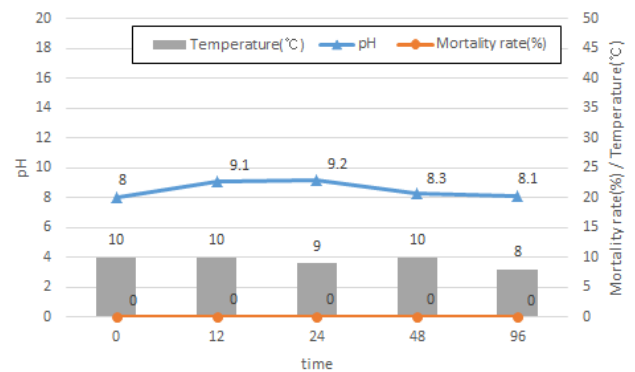


Fig. 5. Result of fish toxicity test

### 3.4 어독성 시험결과 분석

어독성 시험결과 초기에는 pH가 급격히 증가하여 24h에 최대점에 이르는데, 이는 주입재에서 발생하는 알카리 용출량이 24h까지는 많이 배출되는 것을 확인할 수 있지만 그 유해성은 공시어의 치사율 0%를 보면 문제가 없는 것을 확인할 수 있다(Table 5, Fig. 5 참조). 또한, 48h에는 pH가 다시 감소하여 일정하게 수렴하는 경향을 보이는데, 공시어 치사율은 시간별로 0%로 유지되어 생태환경에 적합한 pH 8.6이하를 유지할 수 있으며, 지하수가 오염되지 않는 것으로 판단된다.

## 4. 하이브리드형 그라우트재의 팽창제 시험

### 4.1 팽창제 시험방법

본 시험의 목적은 팽창력을 발휘하여 경화체의 구조를 치밀하게 해 주고 건조수축 및 경화수축을 최소화 해주는

역할을 하는 팽창제와 하이브리드형 그라우트를 혼합한 하이브리드형 그라우트재를 이용한 침투와 팽창제에 의한 다짐효과를 검증하기 위함이다. 이를 위하여 각 팽창제의 첨가율에 따른 팽창율, 일축압축강도, 팽창압력 및 다짐효과확인시험을 수행하였다.

팽창제는 Table 1에서 제시한 국산 2가지 시료와 해외 1가지 시료 등 총 3가지 시료를 선택하여 사용하였으며, 팽창제를 이용한 팽창율 및 팽창효과확인 시험은 실내시험으로 검증하였다. 팽창율 검증시험방법은 팽창제의 종류 및 투입량에 따른 팽창압력을 측정하여 각 종류별 팽창제의 팽창율을 비교분석하는 시험을 실시하였다. 시험방법은 Fig. 6, 7과 같이 밀폐된 원형 아크릴 관 양쪽에 압력 센서를 설치하여 주입재의 경화 후 팽창되는 팽창압력을 측정하였으며, 다짐효과 시험은 Fig. 8, 9와 같이 원형몰드에 직경 3.9cm의 홀을 제작하여 주변에 건조된 주문진 표준사를 일정하게 다져서 채운 후 팽창제가 혼합된 주입재



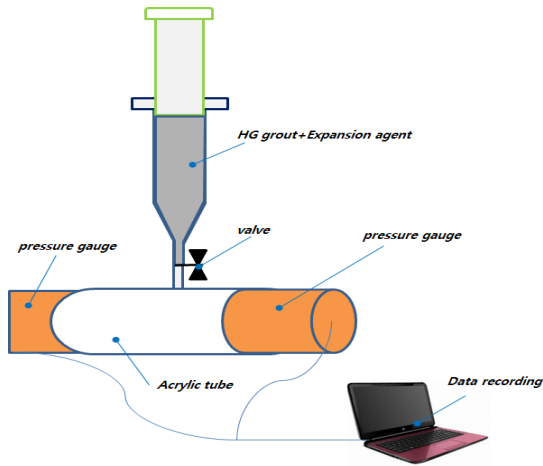


Fig. 6. Expansion pressure measuring device



Fig. 7. Expansion pressure measurement

와 미 첨가된 주입재를 주입 후 12시간 경과 후 체적율을 비교하여 팽창효과를 검증하였다.

시험은 팽창제를 첨가하지 않은 2가지 시료와 3가지 시료를 팽창제 1% 및 2%를 혼합한 6가지 시료 등 총 8가지 시료로 시험에 적용한 배합비는 Table 6과 같다.

## 4.2 팽창제 시험결과 분석

### 4.2.1 팽창율

팽창율의 측정은 팽창제를 첨가하지 않은 시료를 기준으로 하여 공시체의 높이를 비교하였다. 먼저, W/C 배합

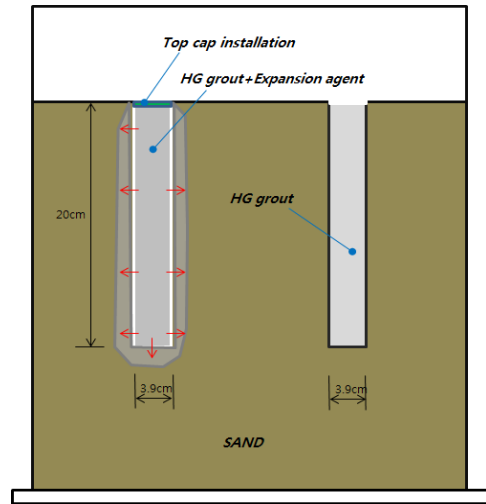


Fig. 8. Verification of compaction effect



Fig. 9. Compaction effect test using mold

비에 따른 C-100(1%)의 팽창율을 분석한 결과, W/C=90% 시료가 18.9%, W/C=70% 시료가 23.4%로 W/C 배합비가 줄어들수록 팽창율이 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 본 시험의 배합비는 C-100(1%)에서 사용한 두 배합비 중 팽창율이 상대적으로 많이 발생한 W/C=70%로 동일하게 결정하였으며, 이에 따라 팽창제 혼입량을 변화시켜 시험한 결과, Type-1(1%)은 6.3% 증가하였으나 Type-1

Table 6. Mixing ratio of Hybrid grout

Division	Water (L)	Hybrid Grout (g)	Expansion agent (g)	W/C
-	377.5	420.0	-	0.9:1
	377.5	539.3	-	0.7:1
C-100	377.5	420.0	4.2 (1%)	0.9:1
	377.5	539.3	5.4 (1%)	0.7:1
Type-1	377.5	539.3	5.4 (1%)	0.7:1
			10.8 (2%)	
HI-E	377.5	539.3	5.4 (1%)	0.7:1
			10.8 (2%)	

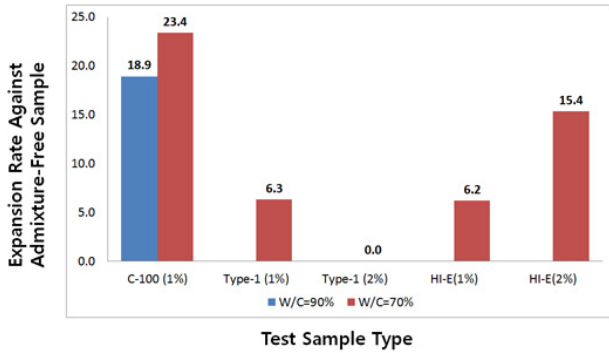


Fig. 10. Result of expansion ratio test

(2%)은 변화가 나타나지 않았다. HI-E(1%)은 6.2%, HI-E(2%)는 15.4% 증가하였으며 팽창제 혼입량이 증가하면 팽창율이 비례하여 증가하였다(Fig. 10 참조). Type-1시료는 팽창제 혼입량이 증가하여도 팽창율의 증가현상이 나타나지 않아서 본 연구의 목적에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 일축압축강도

본 시험의 배합비는 C-100(1%) 시료에서 사용한 두 배합비 중 팽창율이 상대적으로 많이 발생한 배합비인 w/c=70%로 동일하게 결정하였으며, 팽창제 미첨가, C-100(1%), Type-1(1%, 2%) 및 HI-E(1%, 2%) 시료 총 6가지 시료를 1일, 7일 및 28일의 일축압축강도를 측정하였다.

시험 결과 팽창제 미첨가 시료의 경우 1일 재령강도는

2.33MPa에서 28일 재령강도는 13.54MPa으로 측정되었고 1일 재령강도가 가장 높게 측정된 시료는 Type-1(2%)이며 팽창율이 가장 높았던 C-100(1%)의 경우 1일 재령강도 0.73MPa에서 28일 8.90MPa로 1일 재령강도는 타 시료에 비하여 2~3배정도 낮았지만 28일 재령강도는 1.5~2배정도로 차이로 감소하였다.

Type-1(2%)시료는 28일 재령강도가 19.12MPa로 가장 높은 값을 기록하였으나 팽창이 발생하지 않았기 때문에 추후 시험에서는 제외하였다. HI-E(1%)시료는 28일 재령강도가 17.37MPa이며 HI-E(2%)시료는 14.00MPa로 측정되었다.

본 결과를 바탕으로 팽창압력 및 다짐효과확인시험에서는 C-100(1%)와 HI-E(1%, 2%)시료를 선택하였다(Table 7, Fig. 11 참조).

#### 4.2.3 팽창압력

팽창압력 시험은 팽창율과 일축압축강도의 결과에서 최종 결정된 C-100과 HI-E 2 가지 시료를 선택하여 실시하였으며, W/C=70%로 적용하였다. 시험결과 C-100은 1% 첨가시 최대압력 0.7kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었으며 초결이 완료되는 시점은 약 30분으로 추정되었다. HI-E의 경우 1% 첨가시 최대압력 0.4kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되며 2% 첨가시 최대압력이 0.5kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었는데, 초결시간은 각각 1시간 23분, 38분으로 측정되었다. HI-E의 경우 초결이 완료되

Table 7. Result of uniaxial pressure test

Material age (day)	Uniaxial compressive strength(MPa),(HG, W/C=70%)					
	None	C-100 (1%)	Type-1 (1%)	Type-1 (2%)	HI-E (1%)	HI-E (2%)
1	2,33	0,73	2,19	2,28	1,99	2,10
7	10,41	5,59	11,06	11,74	10,63	8,57
28	13,54	8,90	15,21	19,19	17,37	14,00

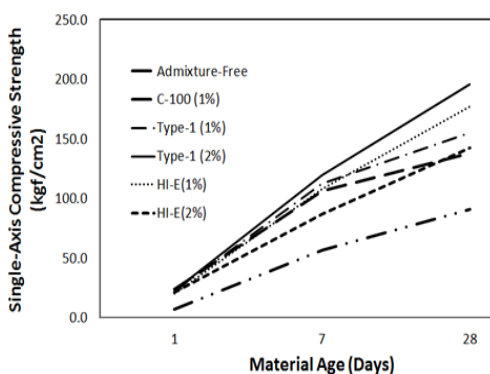


Fig. 11. Result of uniaxial pressure test

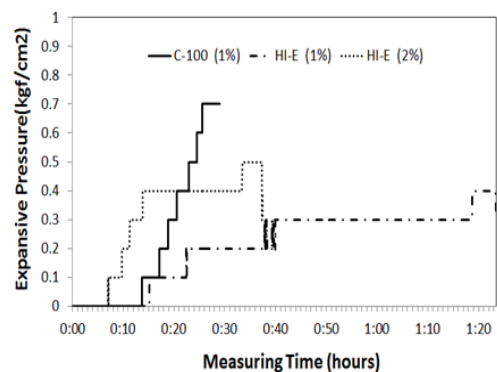


Fig. 12. Result of expansion pressure test



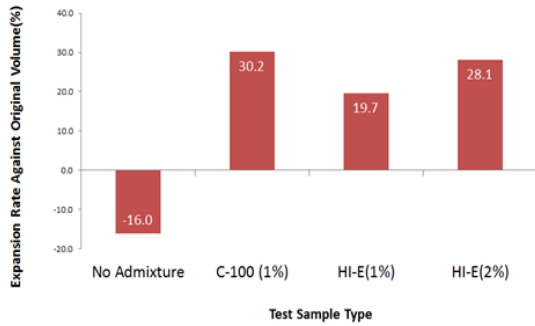


Fig. 13. Result of compaction effect test

는 시점과 팽창이 완료되는 시점이 동일한 것으로 판단되며, 팽창력이 클수록 초결 완료가 빠른 것으로 사료된다 (Fig. 12 참조). C-100시료의 경우 팽창율과 팽창압력은 높지만 일축압축강도는 타 시료에서 낮은 특성이 있다. HI-E(2%)시료가 팽창율과 팽창압력 그리고 일축압축강도 등을 고려할 때 가장 적합한 시료로 분석되었다.

#### 4.2.4 다짐효과

다짐효과확인 시험을 위하여 건조된 모래 토조에 팽창제가 첨가된 시료를 W/C=70% 기준으로 주입 후 12시간 이후 다짐효과를 확인하였다. 239cm<sup>3</sup>(직경 3.9cm, 높이 20cm)의 체적을 가진 토조에 각각 주입재와 팽창제 혼합한 시료를 주입 후 체적 변화를 측정된 결과는 Fig. 12와 같다. 팽창제를 혼합한 시료는 체적이 증가 하였으며 팽창제를 혼합하지 않은 시료는 주입 체적 대비 16%가 감소하였다. C-100의 경우 주입 후 체적 대비 약 30%가 증가하였으며 HI-E 경우 혼합율 1% 및 2% 측정 결과 약 19% 및 28% 증가하였다. Fig. 13은 다짐실험 결과를, Fig. 14는 HI-E(2%)시료의 시험 후 구근형성을 나타내고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 하이브리드형 그라우트제에 대한 침투 및 내구, 환경적 특성을 분석하였으며, 적정 팽창제를 선정하고, 그라우트제와 혼합하여 부피팽창에 따른 압력과 다짐효과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 하이브리드형 그라우트제의 비표면적은 보통시멘트의 비표면적보다 약 2~3배정도 높은 것을 확인하였으며, 최대입경은 약 50~30 $\mu$ m로 보통시멘트 주입재의 최대입경 100 $\mu$ m보다 약 2~3배 작았는데, 이는 최



Fig. 14. Bulb formation shape

소입경이 50~150 $\mu$ m정도의 토립자에도 침투주입을 확장시켜 보통시멘트 주입에 할렬이 발생하는 지반에서 적용성이 높을 것으로 판단된다.

- (2) 하이브리드형 그라우트는 물시멘트비 200%일 때 분산제 1%정도 첨가하면,  $k=\alpha \times 10^{-3}$ cm/sec정도의 실트질 모래지반에서 침투주입의 한계점도를 5cps이하,  $k=\alpha \times 10^{-2}$ cm/sec의 사질지반에서 침투주입의 한계점도를 10cps 이하의 조건에서도 침투주입이 가능함을 확인하였다.
- (3) 어독성 시험결과 초기에는 pH가 급격히 증가하여 24hrs에 최대치를 나타내고, 48hrs에는 pH가 다시 감소하여 일정하게 수렴하는 경향을 보여 생태환경에 적합한 pH 이하를 유지할 수 있고, 지하수가 오염되지 않는 것으로 판단된다.
- (4) 팽창제 시험결과, 팽창율은 물-시멘트 배합비가 줄어들수록 증가하였으며, 일축압축강도는 팽창제 미첨가 시료의 경우 1일 재령강도는 2.33MPa에서 28일 재령강도는 13.54MPa으로 측정되었고, 팽창율이 높은 경우 1일 재령강도는 타 시료에 비하여 2~3배정도 낮았지만 28일 재령강도는 1.5~2배정도로 차이로 감소하였다.
- (5) 다짐효과시험에서 C-100의 경우 주입 후 체적 대비 약 30%증가함을 확인하였으며 HI-E 경우 혼합율 1% 및 2% 측정 결과 약 19% 및 28%가 증가하여 팽창제에 의한 다짐효과를 확인할 수 있었다.
- (6) 팽창율, 일축압축강도, 팽창압력 및 다짐효과확인시험 결과 HI-E(2%) 시료는 팽창제에 의한 다짐효과가 탁월한 것으로 나타나 이를 혼합한 하이브리드형 그라우트제는 노후저수지, 방조제 등의 차수 및 보강공법에 효과적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구를 통한 하이브리드형 그라우트재의 기초연구 자료는 노후저수지 성능개선 및 유지보수를 통한 시설안정화 사업에 중요한 방재기술로 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This research was supported by a grant [MPSS-NH-2015-78] through the Natural Hazard Mitigation Research Group funded by Ministry of Public Safety and Security of Korean government.

## Reference

1. Kravetz, G. A. (1958), "Cement and Clay Grouting of Foundation : The Use of Clay in Pressure Grouting", *proceeding of ASEC, Journal of SMFE, SM 1*, pp.1546-1-30.
2. Ichikawa, K., Matsuo, O. and Kozuna, K. (1996), "On the penetrability by injection of superfine particle cement suspension for the purpose of solution liquefaction (part 5)", *The 31th Geotechnical Exposition Inaugural Exhibition Collection*, pp.119-120 (in Japanese).
3. King, J. C. and Bush, E. G. W. (1961), "Symposium on Grouting : Grouting of Granular Materials", *ASCE Proceeding, Journal of SMFE, Vol.87, SM.2*, pp.1-32.
4. Mitchel, J. K. (1981), "soil improvement state of the art report", *proc of XICSMFE, Vol.4*, pp.528-533.
5. Kubota, T. (1992), "About construction of Shiro River dam", *Dam Japan, No.606*, pp.71-83 (in Japanese).
6. Park, S. Y., Chang, S. H., Lim, H. T., Kim, J. M. and Kim, Y. S. (2016), "Behavior of Seepage and Seismic for the Deterioration Reservoir Using Numerical Analysis", *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, Vol.58, No.3*, pp.81-90 (in Korean).
7. Park, S. Y., Shim, H. G., Kang, H. J., Lim, O. B. and Kim, Y. S. (2017), "Grouting injection effectiveness of a permeable compacting grout using permeable compaction type packer", *Journal of Korean Geosynthetic Society, Vol.16, No.2*, pp.149-158 (in Korean).
8. Karol, R. H. (1990), *Chemical Grouting*, 2nd Ed., New York and Basel, Marcel Dekker Inc., pp.49-54.
9. Rural Research Institute (2015), *Study on Deterioration Status and Repairing & Reinforcing Method on Facility Reservoir (II)*, Korea Rural Community Corporation (in Korean).
10. Shunichi, Y. and Koji, N. (1993), "Basic properties and penetrability comparisons of various cement grouts changing grain size", *Civil Engineering Association Proceedings, No.462*, pp.101-110 (in Japanese).
11. Song, S. H., Yong, H. H., and Jang, E. W. (2003), "Evaluation of Reinforcement with Grouting Materials in Reservoir Dike", *Journal of The Korean Society of Mineral and Resources Engineers, Vol.40, No.2*, pp.69-77 (in Korean).
12. Tomio, O., Shuzo, K. (1982), "Medicinal infusion work from 360m above the ground-Nakayama tunnel Takayama engineering district Joetsu Shinkansen", *Tunnel and underground, Vol.13, No.2*, pp.109-115 (in Japanese).
13. Hakansson, U., Hassler, L. and Stille, H. (1992), "Rheological Properties of Microfine Cement Grouts with Additives", *ASCE, Geotechnical Conference, New Orleans, LA*, pp.551-563.