

## 벤토나이트-해포석-구아검 혼합물질이 코팅된 제강슬래그의 해수에 대한 투수성 평가

정의석<sup>1</sup> · 이성수<sup>2</sup> · 우희수<sup>1</sup> · 박준범<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 건설환경공학부, <sup>2</sup>국립환경과학원 폐자원에너지연구과

## Assessment of the Hydraulic Conductivity of the Furnace Slag Coated with the Mixture of Bentonite-sepiolite-guargum under Sea Water Condition

Euiseok Cheong<sup>1</sup> · Sungsu Rhee<sup>2</sup> · Heesoo Woo<sup>1</sup> · Junboun Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Waste-to-Energy Research Division, National Institute of Environmental Research

### ABSTRACT

Bentonite has been generally used as vertical cutoff barrier material and reported to have several problems regarding its low workability, drying shrinkage cracking by particle cohesion, and ineffective waterproof ability under sea water condition. In this study, the particle sealant, the furnace slag coated by the mixture of bentonite, sepiolite and guar gum, was developed to compensate these weak points and the hydraulic conductivity of the particle sealant was evaluated. Drying shrinkage cracking and swelling index was estimated to find the optimal mixing ratio of bentonite, sepiolite and guar gum. The hydraulic conductivity of the particle sealants having different amount of sealant (bentonite-sepiolite-guargum mixture) coating the furnace slag was estimated using the rigid wall permeameter and flexible wall permeameter. The results showed that drying shrinkage cracking was not found in the bentonite-sepiolite mixture with 20% sepiolite contents and the results from free swelling tests for the sealant having 1 : 0.025, 1 : 0.05 and 1 : 0.075 of weight ratios of bentonite-sepiolite mixture and guar gum under simulated sea water condition were higher than those for the bentonite-sepiolite mixture without guar gum under tap water condition. These three sealants were coated on the furnace slag with 50% and 60% of sealant in the particle sealant and the hydraulic conductivity was estimated. In the cases of the particle sealants having 20% sepiolite in the bentonite-sepiolite mixture and 1 : 0.075 weight ratio of the bentonite-sepiolite mixture and guar gum, the hydraulic conductivity from the rigid wall permeameter was below  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec under simulated sea water condition. The hydraulic conductivity of the particle sealant having  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec by the rigid wall permeameter was estimated using the flexible wall permeameter and found to be below  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec.

**Key words :** Particle sealant, Hydraulic conductivity, Benotnite, Sepiolite, Guar gum, Furnace slag

### 1. 서 론

토지를 효율적으로 이용하기 위해 해안과 지하공간의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 개발에 있어 해안과 지하공간에 만들어진 구조물의 안정성 유지와 시설물의 보호를 위한 구조물과 시설물 외벽의 치수 및 방수 성능의 확보가 필수적이다. 이러한 요구를 만족하는 방법으로 지오멤브레인, 아스팔트 콘크리트, 시멘트, 벤토나이트

트를 이용하여 치수벽을 시공하는 방법이 있다(정문경 외, 1998). 이 중 벤토나이트를 사용하는 방법은 천연 점토를 사용하므로 반영구적으로 사용이 가능하며, 현장토와 함께 혼합하여 사용이 가능하므로 시공 현장에서 널리 사용된다(장용채 외, 2007). 벤토나이트는 스멕타이트(smectite) 그룹의 몬모릴로나이트(montmorillonite)를 주 성분으로 하는 광물로 2개의  $\text{SiO}_4$  사면체판과 1개의  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  팔면체판으로 2:1 구조를 이루며, 층간에는 양이온이 흡착되

\*Corresponding author : junbounpark@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 8. 30 심사일 : 2011. 2. 16 게재승인일 : 2011. 7. 28

질의 및 토의 : 2011. 10. 31 까지

어 존재한다(박성완 외, 2006). 층간에 존재하는 양이온의 종류에 따라 칼슘 벤토나이트와 나트륨 벤토나이트로 구분되며, 나트륨 벤토나이트는 칼슘 벤토나이트에 비해 전단강도는 작으나, 저투수성의 확보가 용이하므로 다짐 차수재나 슬러리월 등의 차단시스템에서는 나트륨 벤토나이트가 주로 활용되고 있다(오명학 외, 2007).

팽윤 특성을 가진 벤토나이트는 현장에서 차수시스템의 재료로 사용되나 다음과 같은 문제점을 안고 있다. 벤토나이트는 수분에 의한 입자의 겔화 팽창 이후 건조 시에 벤토나이트 입자 간의 뭉침에 의하여 방수 시스템에 균열이 발생하고(Tay et al., 2001), 해수와 접할 경우 양이온의 영향으로 벤토나이트의 투수계수가 증가하여 차수재로서의 기능을 상실하게 된다(Stern and Shackelford, 1998; Benson et al., 2009; Ahn and Jo, 2009). 또한 현장에서 벤토나이트로 시공 시 가루 상태의 시료를 이용하므로 작업성이 떨어진다. 현장 여건상 양질의 점토를 구하기가 어려운 경우 차수재의 확보를 위해 현장의 흙과 투수저감 효과가 뛰어난 벤토나이트를 적절히 혼합하여 사용하나(김대만 외, 2006), 점토질 흙과 벤토나이트를 혼합한 경우 모래질 흙의 경우 보다 작업성이 크게 떨어지고 혼합을 위해 별도로 마련된 장소에서 혼합을 시행한 후 현장으로 이송해야 하는 추가적인 공정이 생겨난다(정문경 외, 1998). 이러한 문제점들을 해결하기 위해 많은 연구들이 수행되었으나 대부분의 연구는 아타풀자이트(attapulgite), 프로필렌카보네이트(propylene carbonate), 폴리악릴아미드(polyacrylamide), 해포석(sepiolite), 구아검(guar gum) 등과 같은 물질을 벤토나이트에 첨가하여 벤토나이트가 양이온이 녹아있는 물과 접할 시 증가되는 벤토나이트의 투수성만을 고려하였다(Peterson and Opie, 1958; Stern and Shackelford, 1998; Onikata et al., 1999; Murray, 2000; Bhardwaj et al., 2009).

이에 본 연구에서는 해수 조건에서 차수재 시공 시 발생할 수 있는 벤토나이트의 문제점들을 극복하기 위해 입자차수재를 제작하여 투수성을 평가하고자 하였다. 건조수축균열 제어를 위해 섬유상의 조직을 가지는 해포석을, 해수에 의하여 감소되는 벤토나이트의 팽창성을 유지하기 위해 내염성과 팽창성을 가지는 구아검을 사용하였고, 또한 벤토나이트의 작업성을 향상시키기 위하여 벤토나이트-해포석-구아검 혼합물(이후 '차수물질'로 표기)을 제강슬래그에 코팅하였다. 건조수축균열 제어에 필요한 해포석과 벤토나이트의 비율을 구하기 위해 벤토나이트-해포석 혼합토(이후 '혼합점토'로 표기)의 건조수축균열을 측정하였으며, 해수 조건에서 팽창성 유지에 필요한 혼합점토와

구아검의 비율을 구하기 위하여 모사 해수 조건에서 팽윤도 시험을 수행하였다. 실험을 통하여 얻어진 재료들의 비에 따라 혼합된 차수물질을 제강슬래그의 표면에 코팅하여 입자 형태를 지닌 입자차수재를 제조한 후 해수 조건에서의 투수성을 평가하기 위해 모사 해수를 이용한 강성벽체 투수실험을 수행하였으며, 현장 조건을 모사할 수 있는 연성벽체 투수실험을 수행하여 강성벽체 투수실험 결과값과 비교 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료

벤토나이트는 와이오밍(Wyoming)산 천연 나트륨 벤토나이트를 사용하였으며 해포석은 R사로부터 구입하였다. 두 점토의 물리적 성질은 Table 1에 정리하였다. 구아검은 갈락토스(galactose)와 만노오스(mannose)가 합쳐진 다당류로 본 연구에 사용된 구아검은 비중이 0.68이고 pH는 5.0~6.5이며 S상사가 생산한 상업용 제품을 사용하였다. 제강슬래그의 경우 G제철소에서 발생한 전로슬래그를 사용하였으며 비중은 3.0~3.5이다. 유기물인 구아검을 제외한 벤토나이트, 해포석, 제강슬래그의 화학성분분석을 위해 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer) 분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

본 연구에서 제강슬래그의 경우 작업성 향상을 위하여 입자차수재의 중심체로 이용되었으며 이러한 중심체 역할을 할 수 있는 물질로는 천연골재, 페콘크리트, 슬래그 등이 있으나 본 연구에서는 재료의 재활용이라는 목적 아래 연간 발생량이 300만톤이 되는 제강슬래그를 사용하였다. 벤토나이트-쇄석 골재 혼합체 내 쇄석 골재의 평균적인 입도를 고려하여(Böresson et al., 2003) No.3/8(9.5 mm)체와 No.7/16(11.2 mm)체 사이의 입도를 가진 슬래그를 사용하였으며 모든 재료들은 105°C에서 24시간 이상 노

**Table 1.** Physical properties of bentonite and sepiolite used in this study

	Bentonite	Sepiolite
Specific gravity	2.6	2.5
Liquid limit (%)	393	132
Plastic index (%)	351	47
USCS <sup>a)</sup>	CH	MH
Percentage passing sieve No.200	100%	100%
Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	40~50	80~100
Cation exchange capacity (meq/100 g)	90~120	30~50

<sup>a)</sup>USCS = Unified Soil Classification System

**Table 2.** Chemical composition of bentonite, sepiolite, and furnace slag

	(unit: weight %)		
	Bentonite	Sepiolite	Furnace slag
SiO <sub>2</sub>	59.37	31.04	15.82
MgO	1.64	10.63	3.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.73	0.10	6.03
Na <sub>2</sub> O	2.35	0.09	0.32
K <sub>2</sub> O	0.28	0.11	0.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.89	0.20	33.67
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.01	0.61
MnO	0.07	0.06	3.38
CaO	3.02	34.54	34.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	1.51
L.O.I <sup>a)</sup>	13.02	23.22	0.44
Total	100.00	100.00	100.00

<sup>a)</sup>L.O.I=Loss on Ignition

건조했으며, 제강슬래그를 제외한 모든 재료는 No.200체를 통과한 재료들만 사용하였다. 해수 조건을 모사하기 위하여 3차 증류수(Deionized water) 내 NaCl 함량이 28%, MgCl<sub>2</sub> 함량이 7%인 모사 해수를 제조하였으며, 담수 조건을 모사하기 위하여 수돗물을 사용하였다.

**2.2. 실험 방법**

**2.2.1. 건조수축균열 측정**

벤토나이트의 건조수축균열을 제어하기 위해 섬유상 조직을 가지고 있는 해포석을 벤토나이트와 혼합하였다. 해포석의 함량 증가에 따른 벤토나이트의 균열 특성을 평가하기 위하여 혼합점토(벤토나이트-해포석 혼합물) 내 해포석의 중량비를 0~50%까지 10%씩 증가시키며 총 6가지의 시료를 준비하였다. 준비된 혼합점토에 혼합점토 무게의 1.5배가 되는 물을 첨가하여 반죽한 후 반죽된 혼합점토를 높이 3 mm, 직경 30 mm가 되는 몰드에 넣어 시료를 성형하였다. 완성된 시료는 풍건상태로 상온(약 26°C)

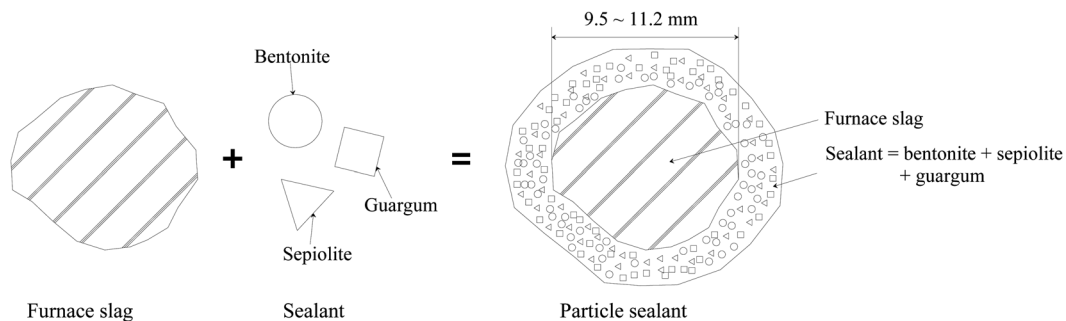
에서 48시간 이상 건조 후 1 cm 이상의 균열 유무를 평가하였다.

**2.2.2. 팽윤도 시험**

해수 조건에서도 담수 조건 이상의 팽윤도를 확보할 수 있는 혼합점토와 구아검과의 비를 구하기 위하여 중량비를 1:0.01, 1:0.0125, 1:0.025, 1:0.05, 1:0.75로 변화시키며 팽윤도 시험(ASTM 5890)을 수행하였다. 제시된 비율로 혼합점토와 구아검이 충분히 혼합되도록 한 후 각 시료를 2 g씩 칭량하였다. 100 mL 매스실린더에 수돗물 또는 모사 해수 90 mL 를 부은 다음 준비된 2 g의 시료를 10분 간격으로 0.1 g씩 20회에 걸쳐 넣되 매스실린더의 벽면에 묻지 않도록 하였다. 시료 첨가가 끝난 후 총 물의 양이 100 mL가 되도록 매스실린더에 수돗물 또는 모사 해수를 첨가하였다. 벤토나이트가 물과 충분히 반응할 수 있도록 24시간 이상 작은 진동이나 충격이 가해지지 않는 곳에서 보관하였으며 24시간이 지난 후 매스실린더의 눈금을 읽어 시료의 팽윤도를 측정하였다.

**2.2.3. 입자차수재 제조**

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 제강슬래그의 표면에 차수물질(벤토나이트-해포석-구아검 혼합물)을 코팅한 구형의 차수재를 입자차수재로 사용하였다. 차수물질을 제조하기 위하여 본 연구에서는 건조수축균열 측정 결과를 바탕으로 벤토나이트와 해포석의 비를 구하였으며, 팽윤도 시험을 통하여 혼합점토와 구아검의 비를 구하였다. 차수물질 중량의 1.5배가 되는 물을 분말 형태의 차수물질에 첨가하여 반죽한 후 반죽된 차수물질을 제강슬래그의 표면에 코팅하였다. 차수물질의 팽윤도를 고려하기 위하여 혼합점토와 구아검의 비를 달리하여 3종류의 차수물질을 준비하였으며, 제조된 차수물질의 함량을 고려하기 위하여 두 가지 함량 조건에 대하여 입자차수재를 제작하였다.



**Fig. 1.** Schematic diagram of the particle sealant.

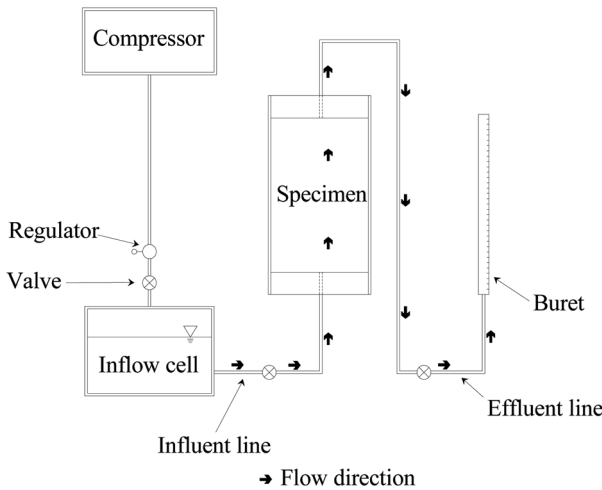


Fig. 2. Schematic diagram of the rigid wall permeameter.

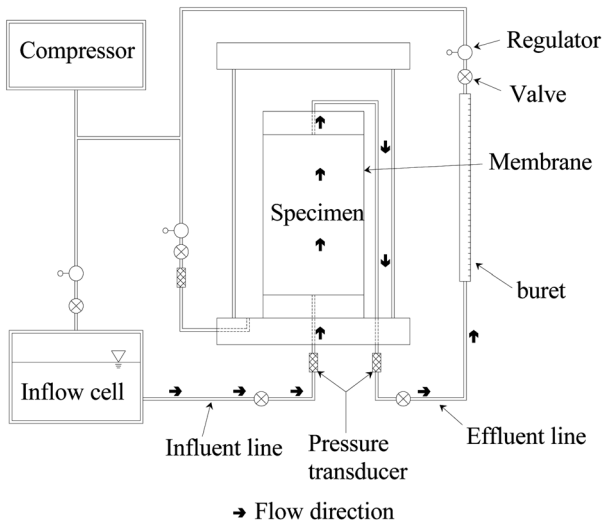


Fig. 3. Schematic diagram of the flexible wall permeameter.

2.2.4. 투수실험

제조된 입자차수재의 해수 조건에서의 투수성을 확인하기 위해 강성벽체 투수실험을 실시하였으며, 현장 토압 상태에서의 입자차수재의 투수성을 확인하기 위해 연성벽체 투수실험을 수행하였고 그 결과를 강성벽체 투수실험 값과 비교하였다. 강성벽체 투수실험(Fig. 2)의 경우 ASTM D 5856을 기초하여 수행하였으며, 입자차수재의 직경을 고려하여 직경 8 cm, 높이 16 cm의 투수실험기에 입자차수재를 다짐 없이 넣은 후 모사된 해수 용액을 20.68 kPa(3 psi)의 압력으로 주입하였다. 연성벽체 투수실험(Fig. 3)의 경우 ASTM D 5084 기초하여 실시하였다. 연성벽체 시험기에 사용된 시료는 입자차수재의 직경을 고려하여 직경 8 cm, 높이 16 cm로 제작되었으며, 질소

가스를 이용하여 투수실험이기 내에 34.47 kPa(5 psi)의 구속압과 20.68 kPa(3 psi)의 주입압을 가하였다.

차수재에 필요한 투수계수는  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 값을 가져야 하므로(유동주 외, 2006) 120시간 경과 후  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이상이 나오는 시료에 대해서는 실험을 중지하였고,  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하가 나오는 시료에 대해서만 지속적으로 실험을 수행하여 일정한 값을 얻을 때까지 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입자차수재 혼합비

본 연구에 사용된 입자차수재가 해수 조건에서 차수 성능을 발휘하기 위해서는 벤토나이트, 해포석, 구아검, 제강슬래그를 적절한 비율로 혼합해야 한다. 건조수축균열 실험을 통해 벤토나이트와 해포석의 비율, 팽윤도 시험을 통해 혼합점토(벤토나이트-해포석 혼합물)와 구아검의 비율, Böresson et al.(2003)의 연구를 토대로 차수물질(벤토나이트-해포석-구아검 혼합물)과 제강슬래그의 비율 각각 결정하였다.

3.1.1. 건조수축균열 실험을 통한 혼합점토의 제조

건조수축균열 측정 결과, 물을 흡수한 혼합점토가 건조됨에 따라 수분은 증발하고 혼합점토의 부피는 감소하여 시료 직경이 3 cm에서 약 2 cm로 줄어들었다. 건조된 혼합점토의 사진을 Fig. 4에 나타내었으며, Table 3에 건조된 혼합점토에서 1 cm 이상이 되는 균열의 유무를 판단하여 표시하였다. 건조수축균열 측정 결과 해포석의 함량이 증가함에 따라 균열은 감소하여 해포석의 중량비가 20% 이상일 경우 건조된 혼합점토에서 균열은 발생하지 않았다. 하지만 해포석의 비가 증가할수록 소성성을 가지는 벤토나이트의 함량이 감소하여 건조된 시료의 변형이 발생하였으며, 해포석의 중량비가 40% 이상인 경우 건조

Table 3. Cracks of the dried mixtures of bentonite and sepiolite

Sepiolite contents (wt.%)	Cracks
0	O <sup>a)</sup>
10	O
20	X <sup>b)</sup>
30	X
40	X
50	X

a) O = Cracks more than 1 cm

b) X = Cracks less than 1 cm

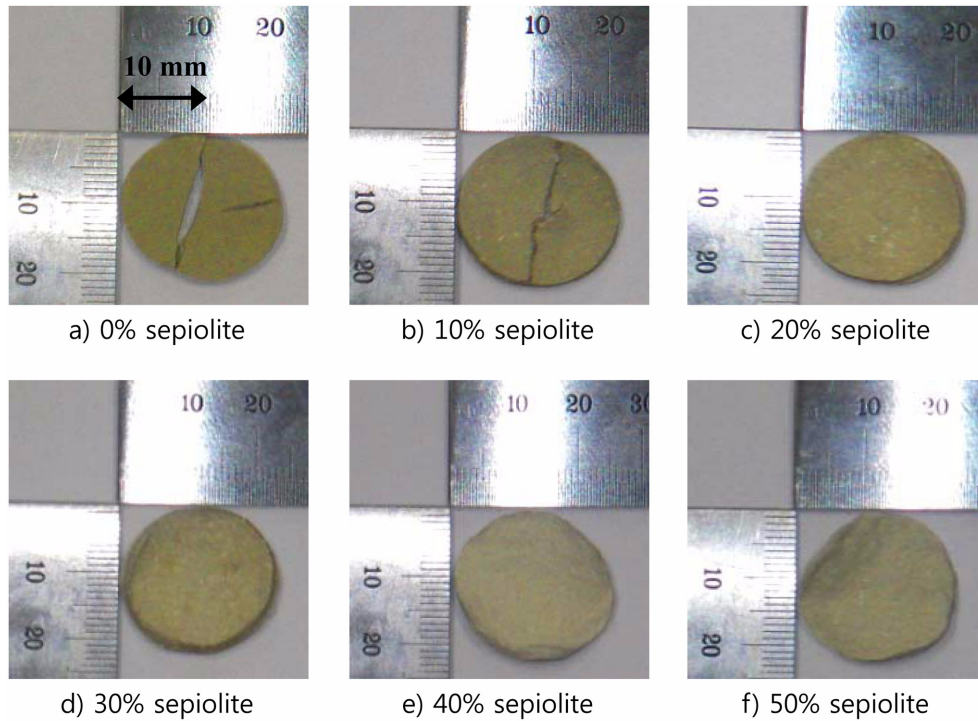


Fig. 4. Photos of the mixtures of bentonite and sepiolite by sepiolite content.

된 혼합점토는 시료 초기의 형태를 유지하지 못하고 큰 뒤틀림 현상이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 입자차수제 제조 시 벤토나이트의 균열을 제어하기 위하여 벤토나이트와 해포석의 중량비를 80 : 20으로 결정하여 혼합점토를 준비하였다.

3.1.2. 팽윤도 시험을 통한 차수물질의 제조

Table 4는 모사 담수 및 모사 해수 조건에서 혼합점토와 구아검의 중량비를 팽윤도 시험을 수행한 결과이다. 시험 결과, 모사 해수 조건에서 내염성을 가지는 구아검의

함량이 증가함에 따라 차수물질의 팽윤도는 증가하였으며, 혼합점토와 구아검의 비가 1 : 0.025 이상일 때 모사 담수 조건에서 혼합점토의 팽윤도인 16.9 mL/2 g보다 큰 팽윤도를 가짐을 확인하였다. 이는 구아검의 함량이 증가함에 따라 해수 조건에서도 벤토나이트의 내염성과 팽창도는 증가하여 벤토나이트가 충분히 팽창했기 때문이라 사료된다. 차수물질의 팽창도는 입자차수제 간의 공극을 메워 입자차수제의 투수계수를 낮추는 주요한 요인이므로 본 연구에서는 모사 해수 조건에서도 모사 담수 조건보다 큰 팽윤도를 가지는 3가지 혼합비(1 : 0.025, 1 : 0.05, 1 : 0.075)를 선택하여 차수물질을 제조하였다.

Table 4. The result of free swelling tests

Condition	Mixing weight ratio	Swelling index (mL/2 g)
	BS Mixture <sup>a)</sup> : Guargum	
Tap water	1 : 0	16.9
	1 : 0	6.8
	1 : 0.01	14.2
Sea water	1 : 0.0125	15.3
	1 : 0.025	17.0
	1 : 0.05	18.9
	1 : 0.075	20.0

<sup>a)</sup>B.S Mixture = Bentonite-sepiolite mixture containing 20% sepiolite by weight

3.1.3. 입자차수제 제작을 위한 중심체와 차수물질의 함량비 결정

입자차수제는 차수물질이 부족할 경우 입자간의 간극을 메우지 못해 차수재로서의 기능을 다하지 못할 가능성이 있고, 과다할 경우 차수재로서의 기능은 수행하나 경제적이 못하므로 입자차수제 제작 시 제강슬래그와 차수물질 간의 적절한 비율을 결정해야 한다. Böresson et al. (2003)은 0~20 mm 사이의 입도를 가진 쇄석골재와 벤토나이트 혼합물의 벤토나이트 중량비가 50% 이상일 경우 쇄석골재간의 간극은 벤토나이트에 의해 모두 채워진다고

**Table 5.** Mixing ratio of the particle sealant

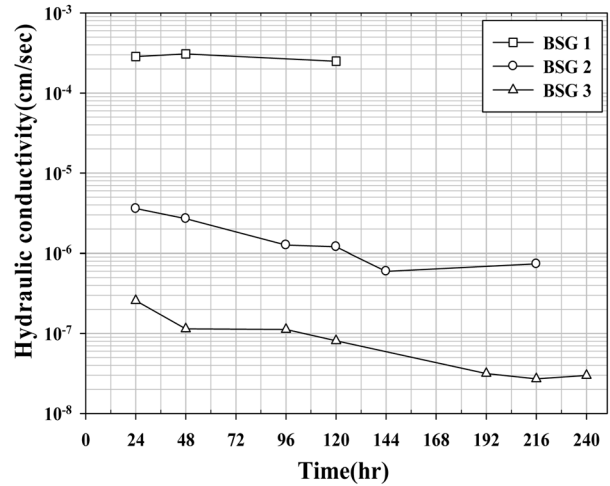
Mixture name	Mixing weight ratio (%)			
	Slag : Sealant	Sealant		
		Bentonite	Sepiolite	Guargum
BSG 1		39.02	9.76	1.22
BSG 2	50 : 50	38.10	9.52	2.38
BSG 3		37.20	9.30	3.50
BSG 4		46.83	11.71	1.46
BSG 5	40 : 60	45.72	11.43	2.85
BSG 6		44.64	11.16	4.20

보고하였다. 이에 본 연구는 제강슬래그의 입경이 9.5~11.2 mm임을 고려하여 입자치수재 내의 치수물질의 함량비를 50%와 60%로 결정하여 제강슬래그를 치수물질로 코팅하였다. Table 5는 제작된 입자치수재의 구성비를 나타내며 각 물질들의 비율에 따라 BSG 1~6로 명명하였다.

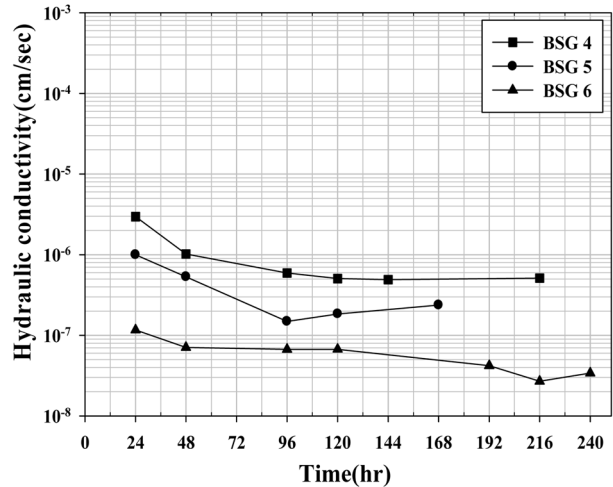
**3.2. 입자치수재의 투수 특성 평가**

**3.2.1. 강성벽체 투수실험**

입자치수재 내 치수물질 중량비가 50%인 입자치수재의 시간에 따른 투수계수 변화는 Fig. 5에, 입자치수재 내 치수물질 중량비가 60%인 입자치수재의 시간에 따른 투수계수 변화는 Fig. 6에 나타내었으며, 입자치수재들의 최종 투수계수는 Table 6에 정리하였다. 실험 결과 입자치수재 내 치수물질 중량비가 50% 및 60%일 경우 입자치수재 내의 구아검 함량이 증가함에 따라 입자치수재의 투수계수는 각각 감소하였으며, 입자치수재 내의 혼합점토와 구아검의 비가 1 : 0.075(BSG 3, BSG 6)인 경우 입자치수재의 투수계수는 치수재 기준 즉  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 값을 각각 만족하였다. 따라서 혼합점토와 구아검의 비가 1 : 0.075이고 입자치수재 내 치수물질의 함량이 50% 이상이면 해수 조건에서도  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 투수계수를 만족할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 치수



**Fig. 5.** Hydraulic conductivity of the particle sealant containing 50% sealant.



**Fig. 6.** Hydraulic conductivity of the particle sealant containing 60% sealant.

물질의 중량비가 50%인 입자치수재는 60%의 입자치수재보다 투수계수의 변화폭은 크게 나타났다. 이는 치수물질의 함량이 60%인 경우 증가된 치수물질이 입자치수재 간

**Table 6.** Final hydraulic conductivity of the particle sealant

Mixture name	Slag : Sealant	Mixing weight ratio of sealant	
		BS mixture : Guargum	Final hydraulic conductivity (cm/sec)
BSG 1		1 : 0.025	$2.50 \times 10^{-4}$
BSG 2	50 : 50	1 : 0.05	$7.39 \times 10^{-7}$
BSG 3		1 : 0.075	$3.41 \times 10^{-8}$
BSG 4		1 : 0.025	$5.13 \times 10^{-7}$
BSG 5	40 : 60	1 : 0.05	$2.38 \times 10^{-7}$
BSG 6		1 : 0.075	$2.98 \times 10^{-8}$

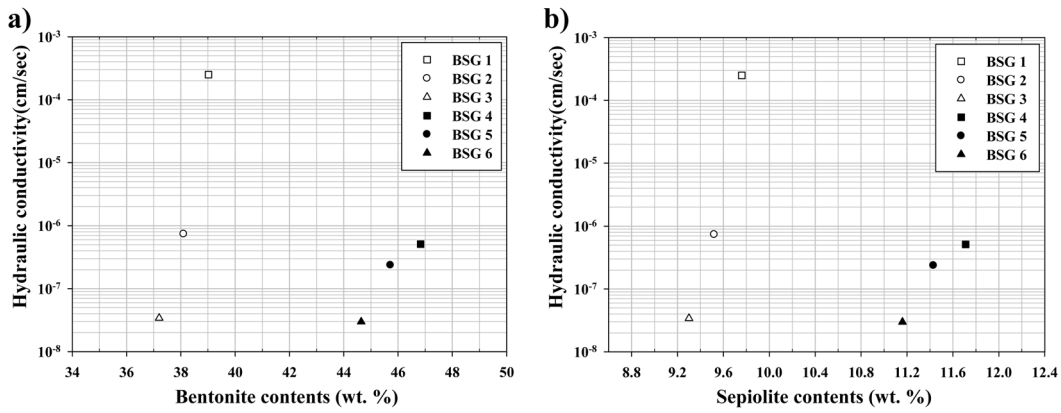


Fig. 7. Hydraulic conductivity of the particle sealant by (a) bentonite and (b) sepiolite content.

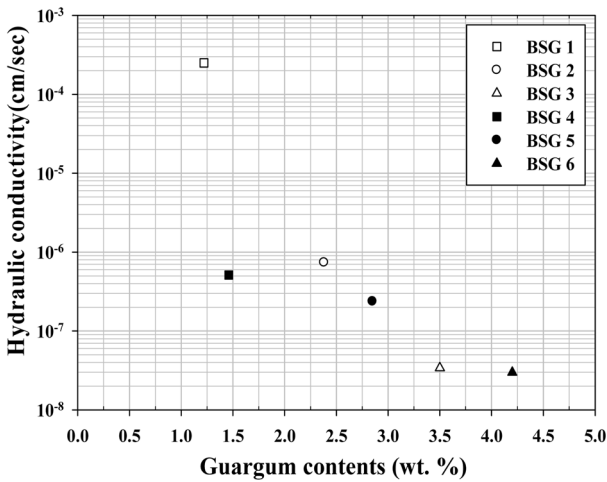


Fig. 8. Hydraulic conductivity of the particle sealant by guar gum content.

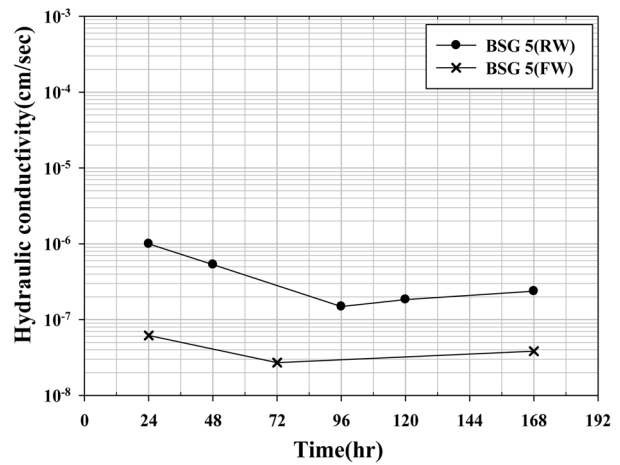


Fig. 9. Hydraulic conductivity of BSG 5 by rigid wall permeameter (RW) and flexible wall permeameter (FW).

의 공극을 메우는 역할을 함으로써 입자치수제의 투수계수 변화폭은 줄어드는 것으로 판단된다

해수 조건에서 입자치수제의 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 구성 성분을 파악하기 위해 벤토나이트, 해포석, 구아검 함량 변화에 따른 입자치수제의 투수계수 변화를 각각 분석하였다. 벤토나이트 및 해포석의 함량에 따른 투수계수는 변화는 Fig. 7에, 구아검 함량에 따른 입자치수제의 투수계수는 변화는 Fig. 8에 각각 나타내었다. 벤토나이트 및 해포석의 함량에 따른 입자치수제의 투수계수는 각각 동일한 양상을 보였으나, 함량 변화에 따른 입자치수제의 투수계수는 특이한 경향성이 발견되지 않았다. 그러나 구아검의 경우 입자치수제 내 구아검의 함량이 증가함에 따라 입자치수제의 투수계수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 입자치수제 내 치수물질의 함량과 관계없이 내염성과 팽창성을 가지는 구아검의 함량이 증가

함에 따라 벤토나이트가 염수에 영향을 받지 않고 팽창할 수 있었기 때문이라 사료된다. 따라서 입자치수제의 구아검 함량이 투수계수를 결정하는 중요한 요인이라 판단된다.

### 3.2.2. 연성벽체 투수실험

Ahn과 Jo(2009)는 연성벽체 투수실험으로 구한 투수계수가 강성벽체 투수실험으로 구한 투수계수 보다 약 10배 정도 낮다고 보고하였다. 따라서 강성벽체 투수실험으로 구한 투수계수가  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 사이의 값을 가지는 입자치수제는 연성벽체 투수실험 시  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 값을 가질 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위해 해수 조건에서  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 사이의 투수계수를 가지는 입자치수제 중 BSG 5를 선택하여 연성벽체 투수실험을 수행하였으며, BSG 5의 강성벽체 투수실험과 연성벽체 투수실험 결과 값을 Fig. 9에 나타내었

다. 실험 결과, 강성벽체 투수실험에 의한 최종 투수계수는  $2.37 \times 10^{-7}$  cm/sec 이었고 연성벽체 투수실험에 의한 최종 투수계수는  $3.83 \times 10^{-8}$  cm/sec 이었다. 따라서 강성벽체 투수 실험으로 측정된  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 사이의 투수계수를 가지는 입자차수재를 사용하더라도 차수재 기준인  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 을 만족할 수 있다고 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 차수시설 시공 시 발생할 수 있는 벤토나이트의 문제점들을 극복하기 위해 입자차수재를 제작하여 투수성을 평가하고자 하였다.

입자차수재 제작에 앞서 균열제어 특성을 가지는 해포석과 내염성을 가지는 구아검을 벤토나이트와 혼합하여 제강슬래그의 표면에 코팅된 차수물질을 제조하였다. 벤토나이트와 해포석과의 혼합비를 도출하기 위하여 건조수축균열을 측정된 결과, 혼합점토(벤토나이트-해포석 혼합물) 중 해포석의 함량이 20% 이상이면 해포석의 균열제어 특성으로 인해 건조된 시료에서 건조수축균열이 발생하지 않음을 확인하였다. 이 비율을 이용하여 구아검과 혼합할 혼합점토를 준비하였으며, 준비된 혼합점토와 구아검과의 적절한 비율을 구하기 위하여 팽윤도 시험을 수행한 결과, 혼합점토와 구아검의 비가 1 : 0.025 이상일 때 차수물질(벤토나이트-해포석-구아검 혼합물)이 해수 조건에서 담수 조건에서 보다 큰 팽윤도를 가짐을 확인하였다. 차수물질의 팽윤도는 입자차수재 간의 공극을 메워 입자차수재의 투수계수를 낮추는 주요한 요인이므로 본 연구에서는 모사 해수 조건에서도 모사 담수 조건보다 큰 팽윤도를 가지는 3가지 혼합비(1 : 0.025, 1 : 0.05, 1 : 0.075)를 선택하여 차수물질을 제조하였다.

입자차수재의 제작을 위해 제강슬래그에 차수물질을 1 : 1 (차수물질 함량 50%), 2 : 3 (차수물질 함량 60%) 비율로 코팅하여 입자차수재를 제작하여 모사해수를 이용한 투수 실험을 강성벽체 조건과 연성벽체 조건으로 수행하였다. 강성벽체 투수실험 결과, 차수물질 내에 혼합점토와 구아검의 비가 1 : 0.075이고, 입자차수재 내에 차수물질의 함량이 50%(BSG 3) 및 60%(BSG 6)일 때 입자차수재의 투수계수는 모두  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 값을 만족하였다. 따라서 보다 적은 양의 차수물질의 사용하는 것이 경제적이므로 입자차수재 중 차수물질의 비중이 50%가 되는 BSG 3의 비율을 사용하여 입자차수재를 제조한다면 시공 시 발생할 수 있는 벤토나이트의 문제점을 극복하는 동시에 경제적으로 입자차수재를 제조할 수 있

을 것이라 기대된다. 현장 조건을 모사하는 연성벽체 투수실험 결과, 강성벽체 투수실험 시 차수재 조건을 만족하지 못하는 BSG 5는  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하의 값을 가짐으로써 차수재 기준을 만족하였다. 따라서 강성벽체 투수 실험으로 측정된  $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 사이의 투수계수를 가지는 입자차수재를 사용하더라도 차수재 기준인  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/sec 을 만족할 수 있다고 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 현대엔지니어링의 연구사업인 “염수조건에서 적용 가능한 차수복합물질 개발”과 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참 고 문 헌

- 김대만, 김기영, 2006, 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성, 한국지반환경공학회, 7(6), 45-56.
- 박성완, 서진형, 이상현, 2006, 토목 산업에서의 벤토나이트의 특성과 활용, 한국광물학회지, 19(1), 64-75.
- 오명학, 유동주, 김용성, 박준범, 2007, 흙-벤토나이트월에 대한 전기전도도 모니터링 기법의 적용성 평가, 한국지반공학회, 23(7), 47-55.
- 유동주, 오명학, 김용성, 박준범, 2006, 벤토나이트 슬러리의 전기적 특성에 의한 영향인자 분석, 한국지반공학회, 22(10), 21-32.
- 장용채, 김진춘, 정옥기, 2007, 폐기물매립지 토사계 혼합 차수재의 공학적 특성에 대한 실험적 연구, 한국지반환경공학회, 8(1), 13-20.
- 정문경, 정하익, 이용수, 최희철, 우재윤, 1998, 폐기물 매립시설의 설계시공 기술에 관한 연구, 한국건설기술연구소, 경기도, pp. 71-141.
- Ahn, H. and Jo, H., 2009, Influence of exchangeable cations on hydraulic conductivity of compacted bentonite, *Appl. Clay Sci.*, 44(1), 144-150.
- Benson, C.H., Oren, A.H., and Gates, W.P., 2010, Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution, *Geotext. Geomembranes*, 28(2), 206-218.
- Bhardwaj, A.K., McLaughlina, R.A., Shainbergc, I., and Levyc, G.J., 2009, Hydraulic characteristics of depositional seals as affected by exchangeable cations, clay mineralogy, and polyacrylamide, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73(3), 910-918.
- Böresson, L., Johannesson, L., and Gunnarsson, D., 2003, Influence of soil structure heterogeneities on the behaviour of back-



fill materials based on mixtures of bentonite and crushed rock, *Appl. Clay Sci.*, **23**, 121-131.

Murray, H.H., 2000, Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: a general overview, *Appl. Clay Sci.*, **17**(5), 207-221.

Onikata, M., Kondo, M., Hayashi, N., and Yamanaka, S., 1999, Complex formation of cation-exchanged montmorillonites with propylene carbonate: osmotic swelling in aqueous electrolyte solutions, *Clays Clay Miner.*, **47**(5), 672-677.

Peterson, L.E. and Opie, J.W., 1958, Flocculation of Slimes by Guar, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**(7), 1013-1016.

Stern, R.T. and Shackelford, C.D., 1998, Permeation of sand-processed clay mixtures with calcium chloride solution, *J. Geotech. Geoenviron.*, **124**(3), 231-241.

Tay, Y.Y., Stewart, D.I., and Cousens, T.W., 2001, Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill, *Eng. Geol.*, **60**, 263-274.