

# 산업단지에서의 흡착 성토재로서 제올라이트 토양혼합물의 특성평가

권재우\* · 라 힘\*\* · 박준범\*\*\*

Kwon, Patrick Sun\*, Rahim Shahrokhishahraki\*\*, Park, Jun Boum\*\*\*

## Assessment of Zeolite Soil Mixture as Adsorptive Fill Material at Industrial Zones

### ABSTRACT

A number of industrial zones in South Korea were reported contaminated by heavy metals. Such contamination could cause severe damage to the subsurface environment including soil and groundwater. The treatment of zeolite mixing with soil at the bottom of such industrial zones might prevent, or at least reduce the damage of contamination by adsorption of the heavy metals from the leakage. However, such mixtures should maintain the proper bearing capacity as a foundation fill material from the geotechnical point of view at the same time. To investigate the effect of mixtures of zeolite with local soils for the adsorption of heavy metals (Zn, Pb) and sustainability of bearing capacity, adsorption isotherm tests and direct shear test with compaction tests were performed. Results showed that the mixing zeolite with local soils effectively reduces the spreading of the heavy metal contamination when maintaining its proper geotechnical properties as a fill material of industrial zones.

**Key words :** Industrial zone, Fill material, Zeolite mixed soil, Heavy metal adsorption

### 초 록

현재 많은 국내 산업단지들은 여러 가지 중금속오염에 노출되어있다. 이러한 오염은 토양과 지하수에 심각한 오염을 초래할 수 있다. 산업단지의 하부지반을 제올라이트를 토양과 섞은 혼합물로 대체하여 이러한 오염을 방지하고자 한다. 혼합물들을 성토재를 사용하기 위해서는 최소한의 지지력을 갖춰야 한다. 제올라이트 혼합물의 중금속(아연, 납)에 대한 흡착특성과 지지력을 실험하기 위하여 등온 흡착시험, 직접 전단시험, 및 표준다짐시험을 실시하였다. 실험결과, 혼합물들은 효과적으로 오염물질의 확산을 줄일 수 있고 동시에 적절한 지지력을 확보할 수 있다.

**검색어 :** 산업단지, 성토재, 제올라이트 혼합물, 중금속 흡착

## 1. 서론

최근에는 국내의 급격한 산업의 발전으로 인하여 국내 산업단지의 수가 증가하고 있다. 이에 그 지역의 환경오염 문제가 심각한 사회적인 문제로 떠오르고 있다. 여러 환경오염 중 특히 토양오염의 경우, 대기 또는 수질 오염과 달리 이동성이 없으므로 그 지역에 장기간 잔류하고 있으며 육안으로 오염을 파악하기가 쉽지 않아 오염이 상당히 진행되어 피해를 본 후에야 이는 경우가 많다. 또한, 토양오염의 경우, 다른 환경오염과 마찬가지로 한번 오염이 되면 정화하는데 막대한 비용과 시간이 투자된다. 국내 토양환경 보전법에서 정한 토양오염물질들은 총 17개 항목이 있으며 그중 중금속은 As, Cd, Cu, Cr<sup>6+</sup>, Pb, Ni, Zn, Hg의 8개 항목으로 제시되어 있다.

\* 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 (Seoul National University · [kjw0559@snu.ac.kr](mailto:kjw0559@snu.ac.kr))

\*\* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Seoul National University · [rahim.shahrokhi@yahoo.com](mailto:rahim.shahrokhi@yahoo.com))

\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · Seoul National University · [junbpark@snu.ac.kr](mailto:junbpark@snu.ac.kr))

Received November 12, 2018/ revised December 3, 2018/ accepted December 6, 2018

이러한 중금속들은 자연상태에서 휘발이나 생물학적 분해로 쉽게 분해가 되지 않기 때문에 더 큰 피해를 일으킬 수 있다(Ministry of Environment, 2014).

중금속을 많이 사용하는 산업단지의 경우 기타 주택용지나 농업 용지보다 중금속오염이 심각한 수준이며 특히 기계 및 조선 공단 지역의 경우 중금속 오염도가 매우 높게 나타났다(Lee and Koh, 2003). 또한, 여수국가산업단지의 경우 비철금속 공정이나 제강공정 등을 포함하는 금속산업으로 인하여 다른 시화 또는 울산 국가산업단지보다 중금속 농도가 높게 나타났다(Jeong et al., 2015) 환경부에서 산업단지를 대상으로 실시 중인 ‘산업단지 토양 지하수 환경조사’에서 2011년에 조사한 바에 따르면 산업단지 내의 업체 중 15.3 %가 토양오염 우려 기준을 초과했고 그중 16.7 %는 지하수까지 오염되었다(Ministry of Environment, 2012). 이러한 산업단지 하부지반 토양오염의 확산을 줄이고 지하수 오염을 방지하고자, 하부지반에 흡착성을 지닌 흡착층을 만들고자 한다. 대체재로 사용될 흡착제는 좋은 흡착능은 물론 성토제로 사용할 수 있는 적절한 지지력을 가져야 한다.

본 연구에서는 흡착성을 지닌 흡착제로 천연 제올라이트를 사용하였다. 제올라이트는 국내에서는 경상북도 영일만 일대에 많이 분포하고 있다. 제올라이트는 높은 양이온 교환능력과 다공성 구조로 인해 중금속 흡착능력이 매우 높은 물질로 알려져 있다(Erdem et al., 2004, Ören et al., 2006, Perić et al., 2004, Wijesinghe et al., 2016). 제올라이트의 결정구조는 기본적으로 SiO<sub>4</sub>와 AlO<sub>4</sub> 사면체로 이루어져 있으며, 이러한 공동구조 내에 다양한 양이온과 물 분자가 정전기적 결합으로 결합하고 있어서 수용액 내의 양이온과 쉽게 교환되는 특성을 보인다(Noh, 2014). 천연 제올라이트 경우 합성 제올라이트에 비해 순도가 떨어져 상대적으로 흡착능력은 떨어지지만, 가격이 더욱 저렴해 국내외적으로 천연 제올라이트를 이용한 중금속 제거에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 연구에 사용된 천연 제올라이트의 경우 나라별로 그 특성이나 구성하고 있는 광물에 있어서 약간의 차이가 있지만 중금속 제거에 뛰어난 효율을 보여주고 있다(Erdem et al., 2004, Inglezakis et al., 2007, Ören et al., 2006, Perić et al., 2004, Wijesinghe

et al., 2016, Wingenfelder et al., 2005). Hong(2016)은 뒷채움재로 제올라이트와 기존의 재료를 섞어 흡착능의 증가에 대해서 제시한 바가 있으며, Joanna and Kazimierz는 제올라이트와 모래를 섞어서 PRB (Permeable Reactive Barrier)로 사용했을 때의 흡착능 증가에 대해서 제시한 바가 있다.

본 연구에서는 천연 제올라이트의 흡착성을 활용해, 산업단지 하부지반의 오염범위를 줄여 추후 정화해야 할 토양의 양을 줄여 정화비용을 줄이고자 한다. 기존 연구들의 경우, 제올라이트의 흡착능에 보다 초점을 맞추었다면 본 연구의 경우 제올라이트의 흡착능 뿐만 아니라 강도적인 특성들을 활용해 성토제로 사용 가능성을 알아보고자 한다. 이를 위해 기존의 성토제인 풍화토를 제올라이트와 일정 비율(25 %, 50 %, 75 %)로 섞어 각각에 대해 흡착능 및 강도를 비교 분석하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료

본 연구에서 사용한 제올라이트는 경상북도 포항 근처 영일만 일대에서 채취했다. 기존 성토제의 경우 관악산에서 채취한 풍화토를 사용했다. 제올라이트와 풍화토의 기본 물성값은 Table 1과 같다. 제올라이트와 토양은 오븐에서 105 °C로 하루 동안 건조한

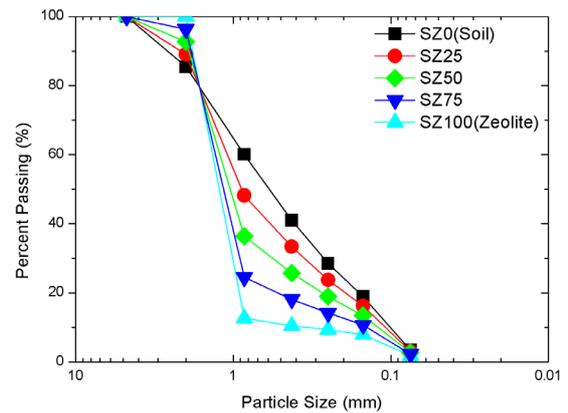


Fig. 1. Particle Size Distribution Curves of Specimens

Table 1. Chemical and Physical Properties of Specimens

	pH	Classification (USUCS)	Chemical composition	Specific surface (m <sup>2</sup> /g)	Cation exchange capacity (meq/100g)	Specific gravity
Test Soil	7	SP (C <sub>u</sub> =8.5, C <sub>g</sub> =0.74)	SiO <sub>2</sub> - 59.55; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 19.28; Na <sub>2</sub> O - 1.32; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6.68; CaO - 0.74; Na <sub>2</sub> O - 1.32; K <sub>2</sub> O - 2.96; LOI - 9.46	11.97	9.43	2.68
Zeolite	6.5	SP -	SiO <sub>2</sub> - 70.87; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 13.96; Na <sub>2</sub> O - 2.23; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 2.72; CaO - 1.59; Na <sub>2</sub> O - 3.84; K <sub>2</sub> O - 3.13; LOI - 3.87	44.97	69.58	2.33

후에 사용했다. 시료를 배합하기 전에 각 시료의 흡착특성 및 최대흡착능을 발휘할 수 있는 입경을 알고자 먼저 입경 별 흡착실험을 수행하였다. 시료의 입도는 KS F 2302에서 규정한 체를 기준으로 #10체(2 mm) 이상, #10-40체(2-0.42 mm), #40-100체 (0.42-0.149 mm), #100-200체(0.149-0.075 mm), #200체(0.075 mm) 이하(통과)를 기준으로 분리하였다. 제올라이트와 토양은 3가지 비율로 배합되었다. 배합은 중량비를 기준으로 진행하였으며 배합비는 25 %, 50 %, 75 %로 각기 SZ25, SZ50, SZ75로 명명하였으며 제올라이트와 토양은 각기 SZ0와 SZ100으로 명명했다. 시료들의 입도 분포표는 Fig. 1과 같다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 회분식흡착시험

시료들의 흡착능을 실험하기 위해 회분식흡착시험을 수행하였다. 각기 4 g의 건조 시료를 배치에 넣고 40 mL의 중금속수용액과 24시간 동안 등온반응 시킨 후 잔류 중금속 이온의 양을 원자흡광 광도기(Atomic Absorption Spectroscopy)를 통해 측정하였다. 중금속수용액의 농도는 50, 125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000 mg/L로 저농도부터 고농도까지 사용하였다. 분석에는 주로 사용되는 랭뮤어(Langmuir)와 프로인틀리히(Freundlich) 등온흡착식을 사용하여 분석했다.

### 2.2.2 표준다짐시험 및 직접전단시험

표준다짐시험은 ASTM D698-12의 규정에 따라 진행했으며 직접전단시험은 ASTM D3080에 따라 수행하였다. 표준다짐시험은 10 cm의 지름을 가진 몰드에 시료를 3층으로 나누어 넣으면서 600 kN·m<sup>3</sup>의 에너지를 가해서 다지는 시험으로 이를 바탕으로 함수비와 건조단위중량사이의 관계인 다짐곡선을 그려 최대 건조단위중량을 구한다. 표준다짐시험을 통해 최적함수비와 최대 건조

밀도를 구하였고 이를 바탕으로 90 %의 다짐도로 직접전단시험을 수행하였다. 직접전단시험은 시료를 상하로 나누어진 두 개의 전단 상자에 넣은 후 아래 쪽 상자는 고정하고 위쪽 상자에 고정된 수직력(구속압)에 전단력을 점점 증가시키며 흙을 전단 시키는 시험이다. 직접전단시험에서 사용한 구속압은 40, 80, 160 KPa을 사용하였고, 상자의 크기는 높이 40 mm 지름 60 mm로 실험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 회분식시험 결과

#### 3.1.1 입경 별 흡착시험 결과

원자 흡광 광도기를 통해 분석한 잔류 중금속 이온을 바탕으로 흡착능을 분석하였다. 흡착된 중금속의 양은 Eq. (1)을 통해 계산하였다.

$$C_s = (C_i - C_e) \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

여기서,  $C_s$ 는 흡착된 중금속 이온의 양(mg/g),  $C_i$ 는 초기 중금속 용액의 농도(mg/L),  $C_e$ 는 평형상태 도달 이후 용액에서의 중금속 농도(mg/L),  $V$ 는 용액의 부피,  $m$ 은 흡착제의 질량(g)이다.

제올라이트와 흙을 배합하기 전에 먼저 제올라이트와 흙의 입경 별 흡착시험을 수행하였다. 제올라이트의 경우, 10번체를 통과하지 못한 제올라이트에 비해 #10-40번체 사이의 제올라이트는 약 1.25 배 그 외의 제올라이트의 경우 1.37배 정도의 중금속 이온이 흡착되었다. 입경이 작아질수록 흡착률이 증가하지만, 입경이 일정 이하로 작아지는 경우 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 경향은 Malliou 등이 보고한 클리노프틸로라이트의 흡착능 시험과 유사한 결과를

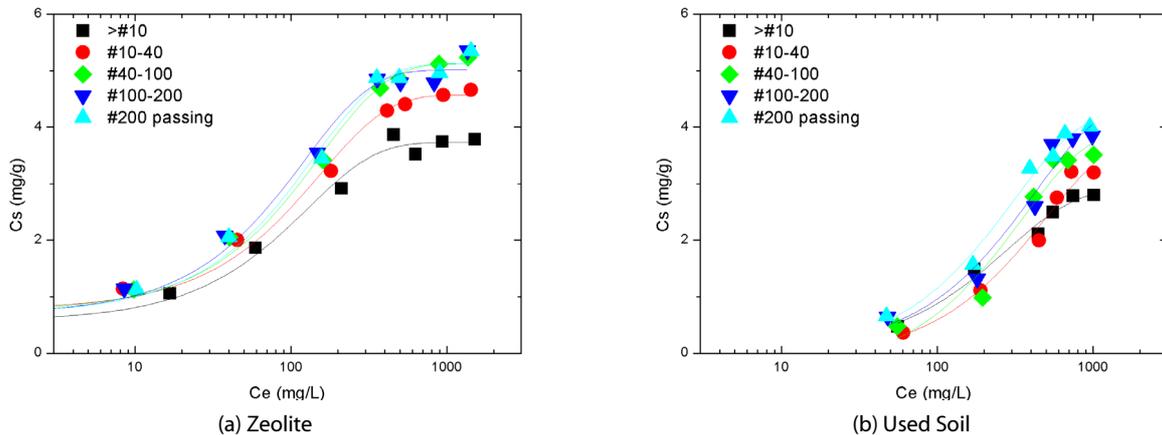


Fig. 2. Adsorption of Metal Ions by Different Particle Size of Soil and Zeolite (m = 4 g, V = 40 mL, time = 24 hr)

보여준다. 중금속 흡착에 있어서 가장 주요한 요소는 양이온치환능력과 비표면적이다. 일반적인 물질은 입경이 작아짐에 따라 비표면적 및 양이온 치환능력이 증가한다(Helffeich and Kunin, 1963). 그러나 제올라이트의 경우, 내부에 공동이 많아 내부와 외부에 양이온치환능력과 비표면적이 차이를 보인다. 외부의 비표면적과 양이온치환능력은 입경이 작아짐에 따라 감소하나 외부의 양이온치환능력과 비표면적은 전체의 비표면적과 양이온치환능력에 대해서 상대적으로 작은 비중을 차지하고 있다(Guan et al., 2010, Zhan et al., 2002). 따라서 Fig. 2와 같이 일정 입경 이하에서는 흡착능이 비슷해지는 경향을 보여준다. 흡의 경우, 입경이 작아짐에 따라 흡착능이 증가하는 경향을 보이는데 이는 비표면적 및 양이온치환능력의 증가로 인한 것으로 보인다(Dube et al., 2001). Bradl(2004)에 의하면 일반적으로 사질토가 점성토에 비해 흡착물이 떨어지는 것으로 보이며, 중금속이온의 선택적 흡착에 있어서 납과 구리가 다른 중금속들(카드뮴, 아연, 니켈, 망간)에 비해 높다고 제시했다. 또한, 점토의 경우 pH가 낮아지면 표면에 음전하를 띄는 경향을 보이는데, 이로 인해 흡착능이 증가한 것으로 보인다(Elliott et al., 1986).

혼합물들의 아연과 납 흡착 곡선은 Fig. 3과 같다. 아연과 납 수용액 모두 제올라이트의 함량이 높아짐에 따라 높아졌다. 이는 제올라이트의 양이온 교환능력이 흙 시료에 비해 높기 때문으로 보인다. 납과 아연의 흡착 그래프를 비교해봤을 때, 흙과 제올라이트 모두 납의 흡착률이 아연보다 월등히 높은 것을 알 수 있다. 이는 납의 수화이온반경이 아연에 비해 작으므로 제올라이트 및 토양의 양이온과 교환이 더 잘 이루어져서 라고 생각된다. 이러한 경향은 흙과 제올라이트 모두, 다른 여러 연구자의 결과와 같은 경향을 보인다(Elliott et al., 1986, Lim, 1999, Perić et al., 2004, Zamzow and Murphy, 1992).

### 3.1.2 등온흡착식

본 연구에서 랭뮤어와 프로인틀리히 등온흡착식을 통해 실험결과를 분석하였다. 랭뮤어와 프로인틀리히 식은 가장 많이 사용되는 흡착식들이다(Erdem et al., 2004, Joanna et al., 2013). 먼저 랭뮤어 등온흡착식은 Eq. (2)와 같다.

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{Q_L \cdot K_L} + \frac{C_e}{Q_L} \quad (2)$$

여기서,  $C_s$ 와  $C_e$ 는 위에서 언급한 것과 같고,  $Q_L$ 은 최대 흡착능,  $K_L$ 은 랭뮤어 상수이다. 랭뮤어 흡착식은 단일 흡착층을 전제로 가정하여, 하나의 흡착지점이 하나의 분자만 수용한다. 따라서 흡착반응이 진행됨에 따라 흡착 가능한 공간이 점점 부족해지므로 일정 시간 이후로는 흡착이 더 이루어지지 않아 그 기울기가 점점 수렴하는 형태를 보인다. 이에 흡착 질의 농도가 낮을 때는 높은 친화력을 보이나 흡착 질의 농도가 높아질수록 친화력이 낮아지는 경향을 보인다(Langmuir, 1918)

프로인틀리히 식은 Eq. (3)와 같다.

$$\ln C_s = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

여기서,  $C_s$ 와  $C_e$ 는 위에서 언급한 것과 같고,  $K_F$ 은 프로인틀리히 상수,  $\frac{1}{n}$ 은 흡착제와 흡착질 간의 결합 세기를 나타내며  $\frac{1}{n}$ 이 1이 되면 선형그래프로 나타난다. 프로인틀리히식은 오염물질의 농도와 흡착량이 비선형을 가진다. 프로인틀리히는 랭뮤어식과 다르게 한 개의 분자 만이 아니라 여러층의 흡착층을 형성한다고 가정한다. 각각 아연과 납을 두 등온흡착식으로 분석한 결과는 Tables 2 and 3과 같다.

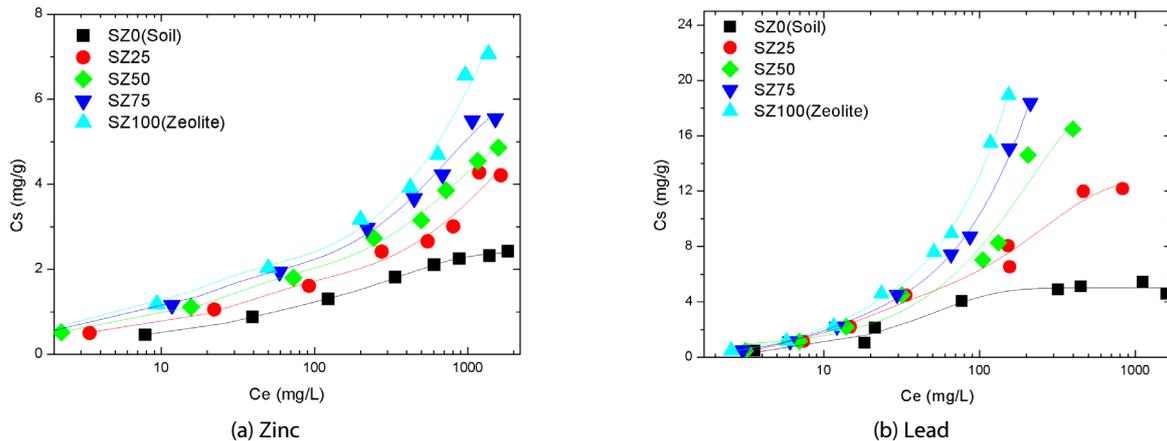


Fig. 3. Adsorption of Metal Ions by Soil-Zeolite Mixtures (m = 4 g, V = 40 mL, time = 24 hr)

Table 2. The Result of Zinc Adsorption by Langmuir and Freundlich Equation

Mixing ratio	Langmuir Model			Freundlich Model		
	$Q_L$	$K_L$	$R^2$	$K_F$	$\frac{1}{n}$	$R^2$
SZ0	2.44	0.011	0.96	0.32	0.26	0.96
SZ25	4.44	0.005	0.86	0.36	0.33	0.96
SZ50	4.98	0.006	0.91	0.37	0.34	1.00
SZ75	5.96	0.005	0.91	0.44	0.35	0.99
SZ100	8.63	0.003	0.90	0.47	0.41	0.98

Table 3. The Result of Lead Adsorption by Langmuir and Freundlich Equation

Mixing ratio	Langmuir Model			Freundlich Model		
	$Q_L$	$K_L$	$R^2$	$K_F$	$\frac{1}{n}$	$R^2$
SZ0	4.92	0.055	0.99	0.32	0.49	0.89
SZ25	13.57	0.011	0.99	0.38	0.57	0.94
SZ50	22.08	0.007	0.90	0.28	0.71	0.97
SZ75	33.78	0.005	0.88	0.24	0.82	0.99
SZ100	45.87	0.004	0.88	0.24	0.88	0.99

이연의 경우, 전체적으로 제올라이트의 함량이 높아질수록 최대 흡착능이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 랭뮤어식보다는 프로인틀리히식에 더 비슷한 경향을 보이는 것을 확인했다. 납의 경우 역시 제올라이트의 함량이 높아질수록 최대흡착능이 증가하는 것을 볼 수 있었다. SZ0과 SZ25의 경우는 랭뮤어가, 나머지 혼합물 및 SZ100 (제올라이트)의 경우에는 프로인틀리히식과 더 비슷한 경향을 나타냈다. 이는 Erdem et al.(2004)이나 Ören et al.(2006)과는 다른결과인데, 이는 낮은 농도에서는 랭뮤어식이 더 정확하나 본 연구에서는 낮은 농도 뿐만아니라 2000 mg/L까지의 고농도로 실험을 진행하여 프로인틀리히 식과 더 비슷한 결과를 얻은 것으로 보이며 이러한 결과는 Shin et al.(2014)의 실험결과와 일치한다. 납의 흡착능의 경우 이연보다 월등히 뛰어난 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Perić et al.(2004)등이나 Zamzow and Murphy의 연구결과와 일치한 결과이다. 이를 바탕으로 산업단지 내에 중금속 제거 순서를 결정할 설계요소로 사용할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 아연과 납 모두 제올라이트의 함량이 증가할수록 프로인틀리히 상수인  $1/n$ 이 증가하는 모습을 보였다. 이는 흡착제와 흡착 질의 결합 세기 또는 친화도가 증가하는 것으로 추후 우수 또는 다른 영향으로부터 흡착된 중금속이온이 탈착이 적어짐을 나타내며 이는 추후 성토제내의 중금속이온으로 인한 2차오염의 가능성이 줄어든다고 보인다.

### 3.2 표준다짐시험 및 직접전단시험 결과

#### 3.2.1 표준다짐시험

표준다짐시험은 ASTM D698-12에 따라 진행하였다. Fig. 4는 표준다짐 시험결과이다. 제올라이트의 함량이 증가할수록 최적함수비는 커지고 최대건조단위 중량은 감소한다. 이는 제올라이트가 용수량이 큰 다공성 물질로 물을 많이 흡수하고 상대적으로 풍화토보다 비중이 작기 때문이라고 생각된다. 제올라이트가 가진 내부의 공동에 물이 저장됨으로 풍화토보다 최적함수비가 더 높게 나온 것으로 보여진다. 제올라이트-풍화토 혼합물 중에 SZ75를 제외하고 나머지는 국토교통부에서 제시한 도로 토공 KDS 44 30 00에서 제시하는 성토 재료 사용 가능한 최대건조단위 중량인  $1.471 \text{ t/m}^2$ 을 만족한다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2016). 도로 토공 KDS 44 30 00에서는 90 % 다짐도로 시공한 후에 건조단위중량을 기준으로 하는데 이때 값은 각각 SZ25가  $1.595 \text{ t/m}^2$ , SZ50이  $1.508$ , SZ75가  $1.419 \text{ t/m}^2$ 로 나타났다.

#### 3.2.2 직접전단시험

직접전단시험은 ASTM D3080에 따라 수행하였다. 그 결과는 Table 4와 같다. 제올라이트의 함량이 증가할수록 내부마찰각은 감소하고 점착력은 증가하는 경향을 보였다. 모든 혼합물 및 제올라이트는(Lee et al., 2011)에서 제시한 성토재료들의 평균 내부마찰각인  $30\sim 45^\circ$ 의 값을 가지는 것을 확인했다. 본 연구에서 사용된 제올라이트는 Yukselen-Aksoy (2010)에서 제시한 값보다는 조금

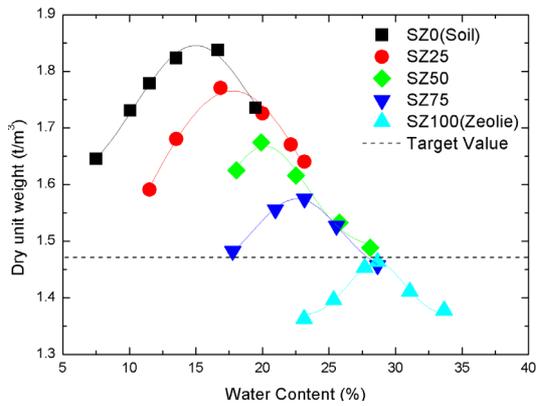


Fig. 4. Result of Standard Compaction Test (Target Value = 1.471 t/m<sup>2</sup>)

Table 4. The Result of Direct Shear Test

	SZ0	SZ25	SZ50	SZ75	SZ100
Friction angle (°)	40.2	37.3	35.8	31.7	31.6
Cohesion (kPa)	18.3	30.6	32.5	31.2	34.6

낮게 내부마찰각이 측정되었는데 이는 본 연구에서는 보다 빈입도의 제올라이트를 사용했기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구는 제올라이트를 활용한 흡착성 성토재개발을 목표로 회분식흡착시험, 표준다짐시험 및 직접전단시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 성토제에 사용될 혼합물의 흡착능을 평가하기 위한 회분식흡착 시험결과, 제올라이트의 함량이 높아질수록 흡착능이 증가하는 경향을 보였으나 그 증가 폭이 함량과 정비례하지는 않았다. 25%로 배합한 SZ25의 경우 기존 성토제인 풍화토보다, 이연 흡착은 1.82배, 납 흡착은 2.76배 증가하였다. 또한, 혼합물들은 납 흡착률이 제올라이트 흡착률에 비해 높게 나타났는데 이를 이용하여 중금속 이온의 선택적 흡착에 이용할 수 있을 것으로 보여진다.
- (2) 표준다짐시험 결과, 75% 제외한 모든 혼합물의 최대건조단위 중량은 국토교통부에서 제시한 기준이상의 값을 나타냈다.
- (3) 직접전단시험 결과, 75%를 포함한 모든 혼합물은 기존의 성토제로 사용되는 재료 중 하나인 풍화토의 일반적인 값 범위 (30~45°)에 포함된 것을 알 수 있었다.

본 연구는 제올라이트를 활용해 산업단지 하부지반에 흡착성 성토층을 형성해 오염범위 확산을 줄이고자 수행한 기초적인 연구

로서, 연구결과를 이용해 실제 현장에 적용하는 연구의 수행이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(17CTAP-C132706-01)에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

#### References

Bradl, H. B. (2004). "Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents." *Journal of colloid and Interface Science*, Vol. 277, pp. 1-18.

Dube, A., Zbytniewski, R., Kowalkowski, T., Cukrowska, E. and Buszewski, B. (2001). "Adsorption and migration of heavy metals in soil." *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 10, No. 1, pp 1-10.

Erdem, E., Karapinar, N. and Donat, R. (2004). "The removal of heavy metal cations by natural zeolites." *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 280, No. 2, pp. 309-314. DOI : 10.1016/j.jcis.2004.08.028.

Guan, H., Bestland, E., Zhu, C., Zhu, H., Albertsdottir D., Hutson, J., Simmons, C. T., Milena, G.-M., Tao, X. and Ellis, A. V. (2010). "Variation in performance of surfactant loading and resulting nitrate removal among four selected natural zeolites." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 183, pp. 616-621.

Hellferich, F. and Kunin, R. (1963). "Ion exchange." *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 110, No. 6, p. 121C.

Hong, C. S., Shackelford, C. D. and Malusis, M. A. (2016). "Adsorptive behaviour of zeolite amended backfills for enhanced metals containment." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 142, No. 7, p. 04016021.

Inglezakis, V. J., Stylianou, M. A., Gkantzou, D. and Loizidou M. D. (2007). "Removal of Pb(II) from aqueous solutions by using clinoptilolite and bentonite as adsorbents." *Desalination*, Vol. 210, pp. 248-256.

Jeong, T. U., Cho, E. J., Jeong, J. E., Ji, H. S., Lee, K. S., Yoo, P. J., Kim, G. G., Choi, J. Y., Park, J. H., Kim, S. H., Heo, J. S. and Seo, D. C. (2015). "Soil contamination of heavy metals in national industrial complexes, Korea." *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol. 34, No. 2, DOI : <http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2015.34.2.19> (in Korean).

Joanna, F. and Kazimierz, G. (2013). "Evaluation of zeolite-sand mixtures as reactive materials protecting groundwater at waste disposal sites." *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 25, No. 9, pp. 1764-1772.

Langmuir, I. (1918). "The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica, and platinum." *Journal of the American Chemical*

- Society*, Vol. 40, pp. 1361-1403.
- Lee, B. K. and Koh, I. H. (2003). "Analysis on heavy metal contamination in soils of the Ulsan area." *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, Vol. 25, No. 11, pp. 1436-1447 (in Korean).
- Lee, S. J, Kim, Y. K., Koh, T. H., Lee, S. H. and Shin, M. H. (2011) "A study on the basic and compression characteristics of lightweight waste for use as fill materials." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 5, pp. 61-74 (in Korean).
- Lim, K. (1999). "Adsorption of heavy metal ions from wastewater used zeolites." *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 437-448 (in Korean).
- Malliou, E., Loizidou, M. and Spyrellis, N. (1994). "Uptake of lead and cadmium by clinoptilolite." *The Science of the Total Environment*, Vol. 149, pp. 139-144.
- Ören, A. H. and Kaya, A. (2006). "Factors affecting adsorption characteristics of  $Zn^{2+}$  on two natural zeolites." *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 131, No. 1-3, pp. 59-65. DOI : doi:10.1016/j.jhazmat.2005.09.027.
- Perić, J., Trgo, M. and Medvidović, N. V. (2004). "Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite-a comparison of adsorption isotherms." *Water research*, Vol. 38, No. 7, pp. 1893-1899. DOI : 10.1016/j.watres.2003.12.035.
- Shin, E. C., Park, J. J., Jeong, C. G. and Kim, S. H. (2014). "Adsorption characteristics evaluation of natural zeolite for heavy-metal contaminated material remediation." *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 13, No. 2, pp. 59-67 (in Korean).
- Sprynskyy, M., Buszewski, B., Terzyk, A. P. and Namieśnik, J. (2006). "Study of the selection mechanism of heavy metal ( $Pb_2^+$ ,  $Cu_2^+$ ,  $Ni_2^+$ , and  $Cd_2^+$ ) adsorption on clinoptilolite." *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 304, No. 1, pp. 21-28. DOI : 10.1016/j.jcis.2006.07.068.
- Wingenfelder, U., Hansen, C., Furrer, G. and Schulin, R. (2005). "Removal of heavy metals from mine waters by natural zeolites." *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, No. 12, pp. 4606-4613.
- Yukselen-Aksoy, Y. (2010). "Characterization of two natural zeolites for geotechnical andgeoenvironmental applications." *Applied Clay Science*, Vol. 50, pp. 130-136.
- Zamzow, M. J. and Murphy, J. E. (1992). "Removal of metal cations from water using zeolites." *Separation Science and Technology*, Vol. 27, No. 14, pp. 1969-1984. DOI: 10.1080/01496399208019459.