

# 해수와 미생물이 흙의 액소성한계에 미치는 영향

## Effect of Sea Water and Microorganism on Liquid and Plastic Limits of Soils

박 성 식<sup>1</sup> Park, Sung-Sik  
 농 쥘 쥘<sup>2</sup> Nong, Zhenzhen  
 정 승 원<sup>3</sup> Jeong, Sueng-Won

### Abstract

Small amount of salt and various microorganisms are contained in natural soils or clays near the shore. In this study, most common clay minerals such as kaolinite and bentonite are used to evaluate the effect of salt and microorganism on liquid and plastic limits. The effect of time after mixing clays with water was also investigated for the consistency limits of clays. The test was conducted immediately, 1 day, or 7 days after mixing soils. For liquid limit tests two different test methods were used, the percussion cup method by Casagrande and the fall cone method. When sea water or microbial solution was used for mixing soils rather than distilled water, the liquid limit of kaolinite decreased by 6-15% and that of bentonite further decreased up to 37-53%. The liquid limit obtained from the fall cone method was approximately 10% for bentonite and 20% for kaolinite, which are higher than those from the percussion cup method. The effect of time on liquid and plastic limits was significant for those tested immediately or 1 day later but the values obtained after 1 day or 7 days did not vary a lot, regardless of soils, mixing waters or test methods.

### 요 지

자연상태의 흙이나 해안과 인접한 지역 점토에는 다양한 종류의 미생물과 소량의 염분이 포함되어 있다. 본 연구에서는 대표적인 점토광물인 카올리나이트(kaolinite)와 벤토나이트(bentonite) 그리고 카올리나이트(50%)+벤토나이트(50%) 혼합토에 혼합수로 증류수를 비롯하여 해수 또는 미생물용액을 혼합한 다음 액소성한계시험을 실시하여 염분이나 미생물이 흙의 액소성한계에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 시간에 따른 액소성한계의 영향을 분석하기 위하여 시료를 반죽 후 즉시, 1일, 그리고 7일 후에 액소성한계시험을 실시하였다. 흙의 액성한계 평가에는 국내에서 주로 사용되는 Casagrande의 동적 액성한계시험과 낙하콘을 이용한 정적 액성한계시험을 이용하였다. 혼합수로 해수나 미생물용액을 사용할 경우 증류수를 사용한 경우보다 카올리나이트의 액성한계는 6-15% 정도 감소하였으며, 특히 벤토나이트의 경우에는 액성한계가 37-53% 정도 감소하였다. 액성한계 평가방법에 따른 결과는 정적인 방법으로 구한 값이 카올리나이트의 경우 20% 그리고 벤토나이트의 경우 10% 정도 높게 나타났다. 시간에 따른 액소성한계의 변화에서 혼합토나 혼합수의 종류 및 시험방법에 관계없이 즉시 또는 1일 후에 실시한 값의 차이는 크게 나타났으나, 1일과 7일 사이의 차이는 크지 않았다.

**Keywords :** Liquid limit, Plastic limit, Salinity, Microorganism, Kaolinite, Bentonite

1 정회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)  
 2 비회원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)  
 3 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3911, Fax: +82-42-868-3911, swjeong@kigam.re.kr, 교신저자)  
 \* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

우리나라 남해안이나 서해안 지역에는 해성점토로 이루어진 두께 약 10-25m의 연약지반이 분포하고 있으며, 최근 이러한 연약지반에 항만이나 산업단지 개발을 비롯한 다양한 토목공사가 진행되고 있다. 이와 같은 연약지반에는 염분이 포함되어 있으므로 해성점토의 액소성한계를 실내시험으로 평가할 때 증류수를 사용하는 것보다 해수를 사용해서 평가하는 것이 바람직하다. 해수에 포함된 염분의 농도는 흙의 액소성한계(Yukselen-Aksoy et al., 2008; Arasan and Yetimoglu, 2008; Rao et al., 1993), 팽창률(Di Maio et al., 2004), 강도(Sridharan et al., 2002; Park and Lee, 2012) 등 여러 가지 공학적 특성에 영향을 미친다. Jeong(2011)에 의하면 염분이 포함된 와이오밍 벤토나이트에서 염분의 농도 차이(0g/L과 30g/L)에 따라 액성한계가 2배 정도 차이가 발생하였다. Jang 등(2005)은 자연상태의 흙과 이를 건조시킨 흙에 대한 액성한계시험을 실시하여 노건조시료보다 자연시료의 액성한계가 4-15% 정도 높은 결과를 얻었으며, 이것은 자연상태의 흙에 존재하는 각종 미생물이나 유기물이 액성한계에 어떤 영향을 미친 것으로 판단된다.

액성한계시험법으로 Casagrande(1932)가 개발한 동적 액성한계시험법인 Percussion cup method를 주로 사용하고 있다. 하지만 시험자에 따라 결과에 많은 차이가 발생한다는 단점이 있다. 따라서 영국을 비롯한 몇몇 국가에서는 콘(cone)을 이용한 정적인 방법으로 액성한계를 구하는 방식을 사용하고 있다. Lee(1997), Lee(2006), Jang 등(2005)은 정적 및 동적 액성한계시험에 따른 차이를 연구하였다. Lee(1997)는 광주 전남지역 흙의 액성한계를 두 가지 방법으로 구하여 비교하였다. 콘을 이용한 정적인 방법으로 구한 액성한계가 동적 액성한계시험법으로 구한 값보다 10% 정도 높게 나타났다. Jang 등(2005)도 부산지역 점토에 대하여 두 가지 방식으로

구한 액성한계를 비교하였으며, Lee(1997)의 결과와 유사하게 정적인 방법으로 구한 액성한계가 2-9% 정도 높게 나타났다.

흙의 액성한계 결정방법과 관련하여 다수의 연구가 수행되었지만 흙 속에 포함된 염분이나 미생물이 액소성한계에 미치는 영향이나 시간에 따른 변화에 대한 연구는 국내외적으로 미흡한 실정이다. 해성점토를 육상 매립토로 사용할 경우 염분이 빠져나가면서 발생할 수 있는 액소성한계의 변화를 연구할 필요도 있다. 따라서 본 연구에서는 동적 및 정적 액성한계시험과 소성한계시험을 이용하여 염분이나 미생물이 액소성한계에 미치는 영향을 비교 분석하였으며, 시간에 따른 흙의 액소성한계 변화도 연구하였다.

## 2. 실험재료 및 액소성시험법

### 2.1 카올리나이트(kaolinite)과 벤토나이트(bentonite)

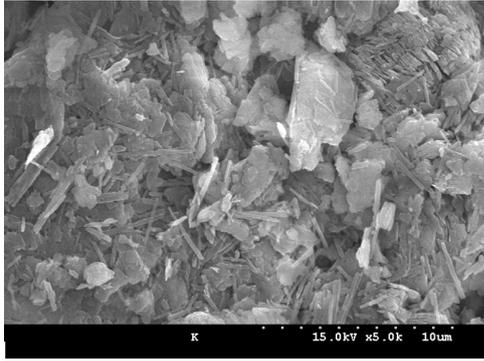
우리나라 서해안에는 주로 카올리나이트가 포함되어 있고, 남해안에는 일라이트(illite)가 그리고 동해안에는 일라이트와 몬모릴로나이트(montmorillonite)가 혼재해 있다. 본 연구에서는 통일분류법 상 CL로 분류되며 가장 안정된 구조를 가진 카올리나이트와 3층 구조로 가장 약한 결합력을 가지며 통일분류법 상 CH로 분류되는 벤토나이트를 사용하여 국내에 분포하는 연약점토에 포함된 염분이나 미생물이 액소성한계에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에 사용한 카올리나이트와 벤토나이트의 비중은 각각 2.47과 2.24이며, 기존 문헌(Ahn, 1997)에서 조사된 값보다는 구성성분 차이로 다소 낮은 값을 보였다. 본 연구에서 사용한 두 종류 점토의 화학적 구성은 Table 1과 같으며, 다른 연구자가 사용하였던 점토의 화학적 구성도 비교하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 점토의 전자현미경 사진을 비교하고

Table 1. Chemical composition of Kaolinite and Bentonite

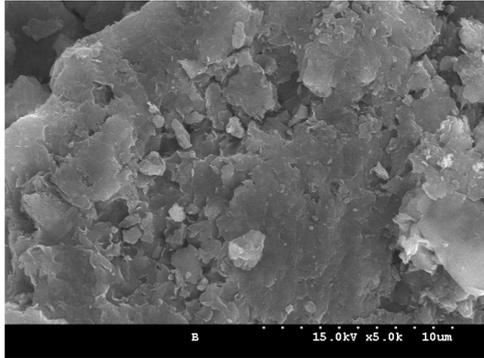
| Soil type   | Components (%)    |       |                                |                  |                  |       |                  |                                |
|-------------|-------------------|-------|--------------------------------|------------------|------------------|-------|------------------|--------------------------------|
|             | Na <sub>2</sub> O | MgO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Kaolinite   | 0                 | 0     | 33.860                         | 46.793           | 0.632            | 4.550 | 0.344            | 3.830                          |
| Kaolinite*  | 0.130             | 0.357 | 43.59                          | 52.73            | 0.74             | 1.015 | 0.480            | 0.902                          |
| Bentonite   | 4.018             | 3.368 | 17.819                         | 59.664           | 0.823            | 3.533 | 0.558            | 4.387                          |
| Bentonite** | 1.77              | 5.03  | 22.39                          | 64.53            | 0.32             | 2.22  | 0.46             | 3.28                           |

\* Park (2003)

\*\* Lee (2004)



(a)



(b)

Fig. 1. SEM photos of (a) Kaolinite and (b) Bentonite

있으며, BET시험에 의하면 카올리나이트와 벤토나이트의 비표면적은 33 및 58m<sup>2</sup>/g으로 벤토나이트의 비표면적이 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 카올리나이트와 벤토나이트를 각각 50%씩 섞은 시료도 사용하였다.

## 2.2 액소성한계시험법

액성한계시험에는 동적 액성한계시험법(Percussion cup method, Casagrande 1932)과 정적 액성한계시험법(Fall cone method, Hansbo 1957) 두 종류를 사용하였으며, 소성한계는 기존의 Casagrande 방법으로 구하였다.

### 2.2.1 동적 액성한계시험법

1911년 미국 Casagrande가 개발한 방법으로 동적인 방법으로 액성한계를 구하는 방법이다. 한국을 비롯하여 일본 미국 등에 표준시험방법으로 채택되어 사용하고 있는 방법이다. 액성한계는 흙이 유동상태를 나타내는 최소의 함수비를 말하며 KS F 2303에서는 황동접시에 경사 60°, 높이 1cm의 인공사면을 조성한 후에 시료를 넣은 접시를 1cm의 높이에서 1초에 2회의 비율로 25회 낙하시켰을 때 돌로 나뉜 부분의 흙이 양측으로부



Fig. 2. Fall cone test device

터 유동하여 약 1.5cm의 길이로 합류했을 때의 함수비라고 정의되어 있다. 그러나 정확하게 25회를 맞추기가 어렵기 때문에 액성한계 전 후의 함수비로 여러 번 시험을 수행하여, 그 결과로부터 25회에 해당하는 함수비를 역추적하여 액성한계를 구한다.

### 2.2.2 정적 액성한계시험법

앞서 언급한 동적 액성한계시험법은 반복성이나 재현성이 부족할 뿐 아니라 시험자에 의해 많은 영향을 받는다(Hansbo, 1957; Stefanov, 1958; Dawson, 1960; Scherrer, 1961; Sherwood and Ryley, 1970; Leroueil and Le Bihan, 1996). 따라서 Hansbo(1957)와 같은 몇몇 연구자는 시험자에 의한 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 2와 같은 콘을 이용한 정적 액성한계시험법을 제안하였으며, 이 방법은 일정 무게를 가진 콘의 관입량과 함수비의 직선관계를 구하여 액성한계를 결정한다. 영국을 비롯하여 스웨덴(Hansbo, 1957), 러시아(Vasilve, 1949), 인도(Uppal and Aggrawal, 1958), 미국(Sowers et al., 1960)과 같은 몇몇 나라가 표준시험방법으로 채택하고 있다. 본 연구에서 실시한 정적 액성한계시험법은 영국 기준을 이용하였다. 접시의 높이는 40mm, 직경은 55mm이며, 두부의 각은 30°, 중량이 80g인 콘을 사용하였다.

### 2.2.3 소성한계시험법

흙이 소성상태로 변할 때의 함수비를 소성한계라 하며, KS F2304에 소성한계시험법이 규정되어 있다. 반죽된 흙을 손바닥으로 밀어 균일하게 지름 3mm의 국수모양으로 만들고, 이것이 부슬부슬 부서질 때까지 행한다. 국수모양의 흙의 지름이 3mm이면서 흙이 부서지기 시작하면 이 흙을 모아 함수비를 측정하고, 이 함수비를

소성한계라 한다. 3회를 실시하여 평균값을 구하였다. 한편 최근에 소성한계를 Casagrande 방법이 아닌 기계적인 방법으로 구할 수 있는 장비가 Sivakumar 등(2009)에 의해 개발된 사례가 있다.

### 2.3 혼합수 및 시료 준비와 보관

염분이 흙의 액소성한계에 미치는 영향을 연구하기 위하여 혼합수로 증류수와 해수를 사용하였다. 또한 자연상태의 흙 속에 존재하는 미생물이 액소성한계에

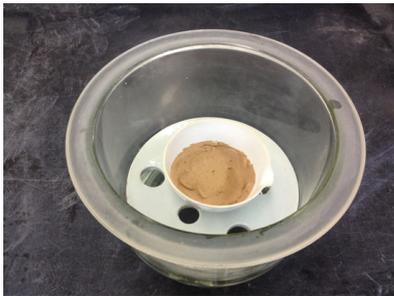


Fig. 3. Soil container for liquid and plastic limit tests

미치는 영향을 평가하기 위하여 유효미생물(effective microorganism, EM)과 증류수를 1:1로 희석시킨 용액도 사용하였다. 토양에서 쉽게 발견할 수 있는 미생물을 사용하기 위해 시중에서 판매되고 있는 미생물 용액을 구입하여 사용하였으며, 여기에 포함된 미생물의 종류와 성분은 Table 2와 같다. 시간에 따른 액소성한계의 변화를 시험하기 위하여 카올리나이트, 벤토나이트 그리고 카올리나이트(50%) + 벤토나이트(50%) 시료를 반죽한 다음 Fig. 3과 같은 데시케이트에 보관하였다. 보관방법은 액소성한계에 해당하는 함수비로 시료를 섞은 후 데시케이트에 보관하였으며, 보관한 시료를 각각 1일 후 또는 7일 후 꺼내어 액소성한계시험을 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 액성한계시험 결과

Table 3은 세 종류의 시료에 세 가지의 혼합수를 섞은 다음 즉시, 1일, 그리고 7일 후 실시한 액성한계시험 결

Table 2. Composition of effective microorganism

| Compound Name | Lactobacillus Plantarum | Saccharomyces cerevisiae | Bacillus subtilis       | Rhodopseudomonas capsulata |
|---------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Components    | $2.9 \times 10^6$ cfu/g | $2.4 \times 10^6$ cfu/g  | $3.1 \times 10^5$ cfu/g | $3.1 \times 10^4$ cfu/g    |

Table 3. Results of liquid limit tests

| Soil               | Mixing water            | Tested immediately |                 | Tested after 1 day |                 | Tested after 7 days |                 |
|--------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                    |                         | LL <sub>c</sub>    | LL <sub>f</sub> | LL <sub>c</sub>    | LL <sub>f</sub> | LL <sub>c</sub>     | LL <sub>f</sub> |
| Kaolinite          | Distilled water (DW)    | 55.8<br>(0%)       | 69.5<br>(0%)    | 60.6<br>(0%)       | 73.0<br>(0%)    | 57.4<br>(0%)        | 71.7<br>(0%)    |
|                    | Sea water (SW)          | 47.3<br>(15%)      | 57.3<br>(18%)   | 51.8<br>(15%)      | 55.6<br>(24%)   | 50.4<br>(12%)       | 51.4<br>(28%)   |
|                    | Microbial solution (MS) | 52.3<br>(6%)       | 62.8<br>(10%)   | 54.0<br>(11%)      | 62.6<br>(14%)   | 53.8<br>(6%)        | 62.6<br>(13%)   |
| Bentonite          | Distilled water (DW)    | 171.1<br>(0%)      | 183.5<br>(0%)   | 195.3<br>(0%)      | 213.6<br>(0%)   | 201.2<br>(0%)       | 209.0<br>(0%)   |
|                    | Sea water (SW)          | 84.2<br>(51%)      | 86.1<br>(53%)   | 86.2<br>(56%)      | 95.1<br>(55%)   | 87.1<br>(57%)       | 100.3<br>(52%)  |
|                    | Microbial solution (MS) | 105.0<br>(39%)     | 116.1<br>(37%)  | 118.5<br>(39%)     | 127.4<br>(40%)  | 129.3<br>(36%)      | 133.0<br>(36%)  |
| Kaolin + Bentonite | Distilled water (DW)    | 117.0<br>(0%)      | 117.0<br>(0%)   | 118.4<br>(0%)      | 125.3<br>(0%)   | 128.0<br>(0%)       | 128.2<br>(0%)   |
|                    | Sea water (SW)          | 60.0<br>(49%)      | 73.6<br>(37%)   | 66.3<br>(44%)      | 76.7<br>(39%)   | 65.8<br>(49%)       | 69.8<br>(46%)   |
|                    | Microbial solution (MS) | 80.8<br>(31%)      | 80.9<br>(31%)   | 83.4<br>(30%)      | 84.7<br>(32%)   | 82.9<br>(35%)       | 85.2<br>(34%)   |

Note: LL<sub>c</sub> is a liquid limit by Percussion cup method, LL<sub>f</sub> is a liquid limit by Fall cone method, Number in the parenthesis indicates the decreasing rate for different mixing water based on distilled water.

과이다. Table 3에서  $LL_c$ 와  $LL_n$ 는 각각 동적 액성한계시험법과 정적 액성한계시험법으로 구한 액성한계로 Fig. 4와 5는 각각의 방법으로 구한 액성한계의 시간에 따른 변화를 비교하고 있다. 시간에 따른 액성한계의 변화는 카올리나이트의 경우는 크지 않았으나 벤토나이트의 경우에는 액성한계가 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 벤토나이트에 증류수를 혼합한 경우 7일 경과 후 실시한 액성한계는 즉시 실시한 경우보다 최대

18% 정도 증가하는 경향을 보였다. 흙의 종류에 따른 액성한계는 혼합수와 시험시간에 관계없이 카올리나이트, 카올리나이트(50%)+벤토나이트(50%), 벤토나이트 순으로 증가하였으며, 이는 카올리나이트는 비활성점토이며 벤토나이트는 활성점토로 물을 잘 흡수하는 구조로 되어 있기 때문이다. 이와 같이 점토의 액성한계는 점토에 포함된 화학적 성분보다는 점토 입자의 구조와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 한편 흙의 종류와 실

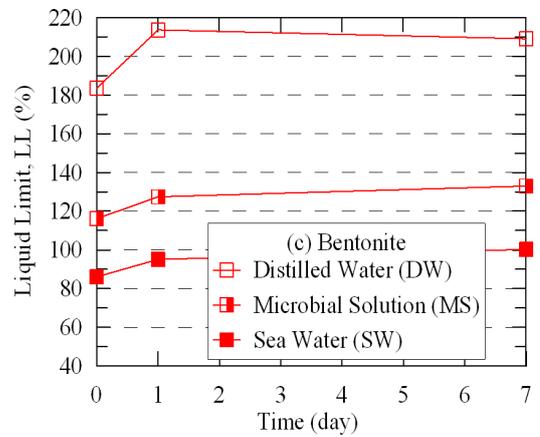
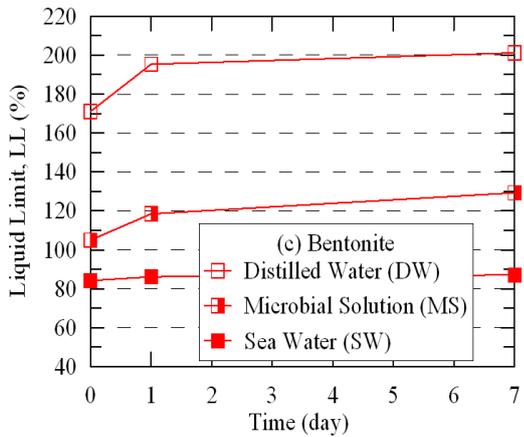
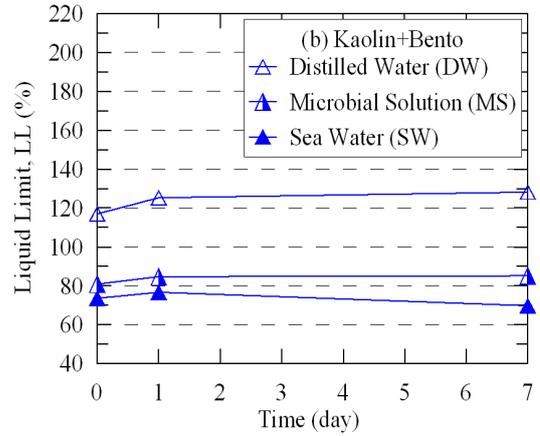
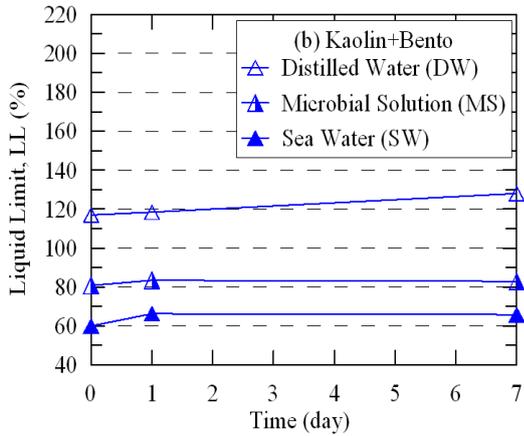
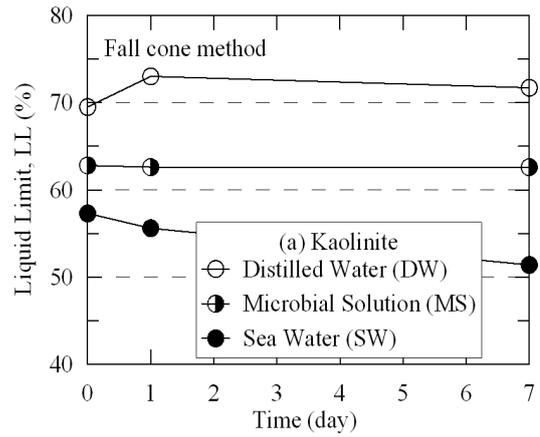
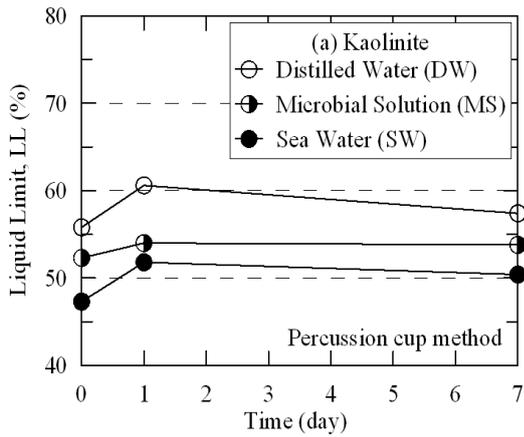


Fig. 4. Liquid limits determined by percussion cup method for different soils

Fig. 5. Liquid limits determined by fall cone method for different soils

험방법에 관계없이 혼합수로 증류수, 미생물용액, 해수 순으로 액성한계가 감소하는 경향을 보였다.

Sridharan 등(2002)은 자연상태의 흙과 이를 공기 중이나 건조로에서 건조시킨 다음 구한 액성한계에 차이점이 있다는 것을 발표하였다. 자연상태의 흙보다 공기 중이나 건조로에 건조시킨 흙의 액성한계가 점점 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 흙 속에 있는 미생물이나 유기물이 흙의 유동현상에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 실시한 액성한계시험에서 흙에 포함된 미생물이 액성한계에 미치는 영향은 다음과 같다. 유용미생물을 혼합하여 구한 액성한계가 카올리나이트의 경우 증류수를 사용한 경우의 6-14% 정도 감소하였으나, 벤토나이트의 경우에는 36-40% 정도로 비교적 크게 감소함을 알 수 있었다. 하지만 해수를 사용한 경우보다는 액성한계가 대부분 높게 나타났다.

Fig. 6은 해수에 포함된 염분이 흙의 액성한계에 미치는 영향을 두 가지 방법으로 구한 액성한계에 대하여

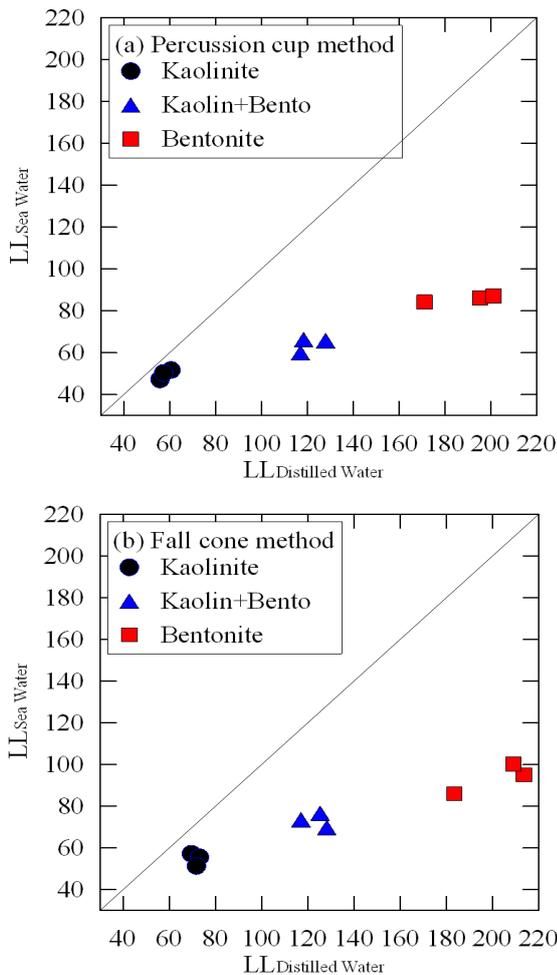


Fig. 6. Liquid limits of soils using distilled and sea water

비교하고 있다. 통일분류법 상 CL로 분류되는 카올리나이트는 증류수를 사용한 경우에 비하여 염분에 의해 액성한계가 12-28% 정도 낮게 나타났다. CH로 분류되는 벤토나이트는 증류수를 사용한 경우보다 해수를 사용할 경우 액성한계가 51-57% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

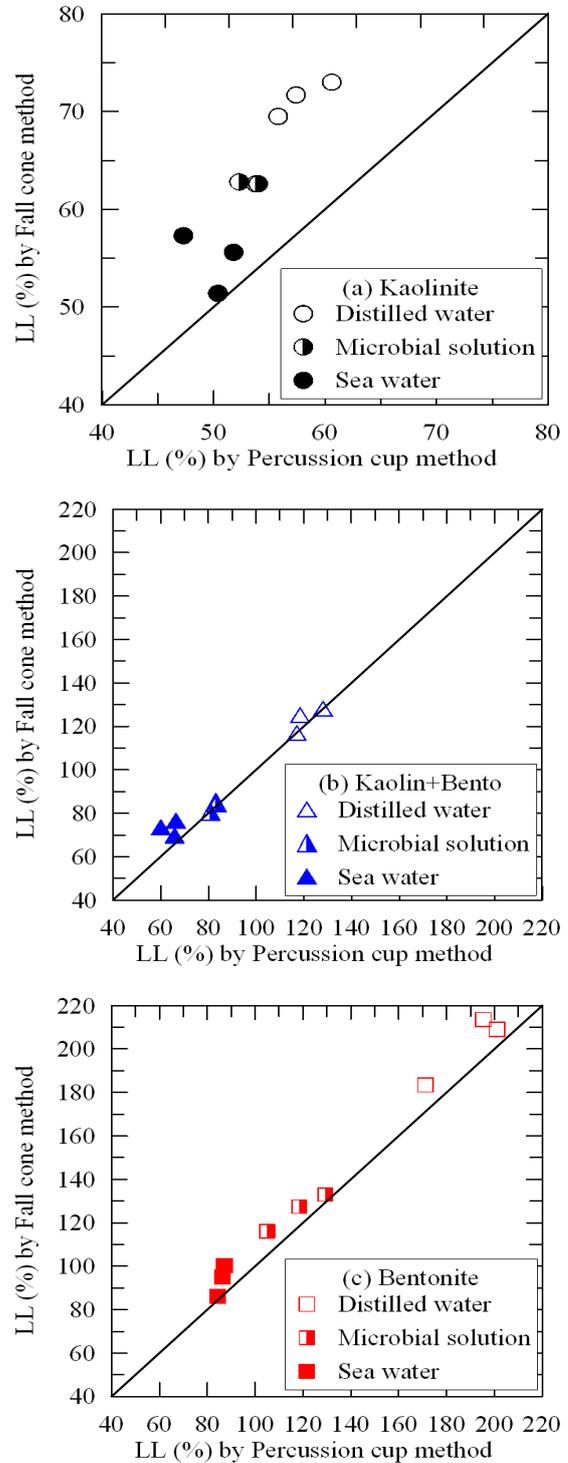


Fig. 7. Comparison of liquid limits determined by different methods

이것은 바닷물로 인한 pH 변화보다는 염분 농도 변화로 van der Waals인력이 지배적으로 변하면서 면대면(face-to-face) 구조를 가진 집합체가 형성되면서(Santamarina and Klein, 2001) 액성한계가 감소한 것으로 판단된다. 여러 연구자들이 이와 유사하게 벤토나이트에 염분이 포함될 경우 액성한계가 급격하게 감소하는 결과를 얻었다(Rao et al., 1993; Di Maio, 1996; Di Maio et al., 2004). 하지만 일부 연구자(Sridharan, 1991; Sridharan et al., 2002; Oren and Kaya, 2003)는 염분 농도가 높을 때 오히려 액성한계가 약간 증가하는 결과를 얻었으며, 일부는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다(Yukselen-Aksoy et al., 2008).

Fig. 7은 정적인 방법과 동적인 방법으로 구한 액성한계를 비교하고 있다. 정적인 방법으로 구한 액성한계가 대체로 높게 나타났으며, 카올리나이트의 경우가 특히 최대 20% 이상 높게 나타났으며, 벤토나이트는 10% 이내로 약간 높게 나타났다. 대부분의 국내 연구자(Jang et al., 2005; Lee, 2006; Lee, 1997)도 이와 유사하게 정적인 방법으로 구한 액성한계가 10% 내외로 약간 높게 나타났으나, Leroueil and Bihan(1996)는 액성한계가 증가하면서 오히려 이와 반대로 동적인 방법으로 구한 액성한계가 더 큰 경향을 보이기도 하였다. 이러한 차이는 실험에 사용하는 점토가 연구자에 따라 다를 뿐 아니라 액성한계를 구하는 실험 방법과 원리가 서로 다르기 때문으로 판단된다.

### 3.2 소성한계시험 결과

세 종류의 흙에 세 종류의 혼합수를 사용하여 즉시, 1일 그리고 7일 후에 실시한 소성한계시험 결과는 아래

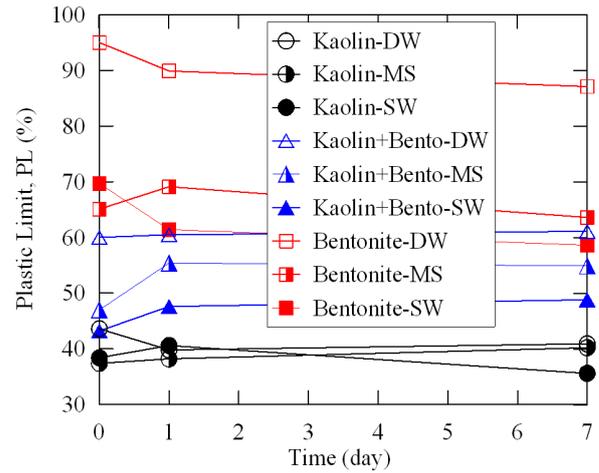


Fig. 8. Comparison of plastic limits

Table 4와 같다. 각각의 경우에 대하여 3회 실시하여 평균값을 사용하였다. Fig. 8은 세 종류의 흙에 대한 시간에 따른 소성한계의 변화를 비교하고 있다. 소성한계는 카올리나이트, 카올리나이트+벤토나이트, 벤토나이트 순으로 증가하는 경향을 보였다. 시간에 따른 소성한계의 변화는 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 혼합수의 종류에 따른 영향은 증류수보다 해수를 사용할 경우 소성한계가 상당히 감소하는 경향을 보였으며, 특히 벤토나이트의 경우 최대 33%까지 감소하였다. 이것은 염분이 단층구조로 된 카올리나이트보다는 벤토나이트의 구조를 변형시키기 때문으로 판단된다.

### 3.3 소성지수 비교

Table 5는 3.1과 3.2절에서 계산된 액성한계와 소성한계를 이용하여 계산한 소성지수(Plasticity index, PI)를 비교하고 있다. Fig. 9는 세 종류의 시료에 대한 시간에

Table 4. Results of plastic limit tests

| Soil               | Mixing water            | Tested immediately |      |      |      | Tested after 1 day |      |      |      | Tested after 7 days |      |      |      |
|--------------------|-------------------------|--------------------|------|------|------|--------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|
|                    |                         | 1                  | 2    | 3    | Avg. | 1                  | 2    | 3    | Avg. | 1                   | 2    | 3    | Avg. |
| Kaolinite          | Distilled water (DW)    | 42.9               | 42.7 | 45.1 | 43.6 | 39.6               | 41.1 | 39.6 | 40.1 | 44.2                | 39.8 | 38.7 | 40.9 |
|                    | Sea water (SW)          | 38.2               | 33.8 | 43.3 | 38.4 | 38.9               | 41.9 | 40.9 | 40.6 | 34.9                | 36.5 | 35.5 | 35.6 |
|                    | Microbial solution (MS) | 34.2               | 38.7 | 39.4 | 37.4 | 42.5               | 34.8 | 37.3 | 38.2 | 40.0                | 41.3 | 39.3 | 40.2 |
| Bentonite          | Distilled water (DW)    | 88.9               | 98.9 | 97.3 | 95.0 | 79.0               | 93.0 | 97.7 | 89.9 | 86.1                | 91.2 | 84.0 | 87.1 |
|                    | Sea water (SW)          | 73.0               | 60.2 | 75.8 | 69.7 | 66.1               | 58.1 | 60.0 | 61.4 | 65.2                | 52.6 | 57.9 | 58.6 |
|                    | Microbial solution (MS) | 62.9               | 63.4 | 68.9 | 65.1 | 70.0               | 66.0 | 71.4 | 69.1 | 64.3                | 62.2 | 64.4 | 63.6 |
| Kaolin + Bentonite | Distilled water (DW)    | 66.7               | 57.0 | 56.3 | 60.0 | 60.8               | 60.0 | 60.7 | 60.5 | 58.1                | 62.0 | 63.2 | 61.1 |
|                    | Sea water (SW)          | 41.2               | 43.7 | 44.6 | 43.2 | 47.9               | 47.5 | 47.4 | 47.6 | 49.3                | 48.1 | 49.1 | 48.8 |
|                    | Microbial solution (MS) | 47.1               | 45.6 | 48.2 | 47.0 | 51.7               | 57.1 | 57.5 | 55.4 | 54.8                | 54.0 | 56.0 | 54.9 |

Table 5. Comparison of plasticity index (PI)

| Soil               | Mixing water            | Tested immediately |                 | Tested after 1 day |                 | Tested after 7 days |                 |
|--------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                    |                         | PI <sub>c</sub>    | PI <sub>f</sub> | PI <sub>c</sub>    | PI <sub>f</sub> | PI <sub>c</sub>     | PI <sub>f</sub> |
| Kaolinite          | Distilled water (DW)    | 12.2               | 25.9            | 20.5               | 32.9            | 16.5                | 30.8            |
|                    | Sea water (SW)          | 8.9                | 18.9            | 11.2               | 15.0            | 14.8                | 15.8            |
|                    | Microbial solution (MS) | 14.9               | 25.4            | 15.8               | 24.4            | 13.6                | 22.4            |
| Bentonite          | Distilled water (DW)    | 76.1               | 88.5            | 105.4              | 123.7           | 114.1               | 121.9           |
|                    | Sea water (SW)          | 14.5               | 16.4            | 24.8               | 33.7            | 28.5                | 41.7            |
|                    | Microbial solution (MS) | 39.9               | 51.0            | 49.4               | 58.3            | 65.7                | 69.4            |
| Kaolin + Bentonite | Distilled water (DW)    | 57.0               | 57.0            | 57.9               | 64.8            | 66.9                | 67.1            |
|                    | Sea water (SW)          | 16.8               | 30.4            | 18.7               | 29.1            | 17.0                | 21.0            |
|                    | Microbial solution (MS) | 33.8               | 33.9            | 28.0               | 29.3            | 28.0                | 30.3            |

Note: PI<sub>c</sub> used a liquid limit by Casagrande method, PI<sub>f</sub> used a liquid limit by Fall cone method

따른 변화, 시험방법에 따른 변화를 비교하고 있다. 카올리나이트의 경우 시간에 따른 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 벤토나이트는 시험방법이나 혼합수에 관계없이 시간이 지남에 따라 소성지수가 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 10은 액성한계와 소성지수의 상관관계를 두 종류의 시험법에 대하여 비교 분석한 결과이다. 흙의 종류나 혼합수에 관계없이 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.95 정도로 비교적 높은 상관관계를 나타내었다.

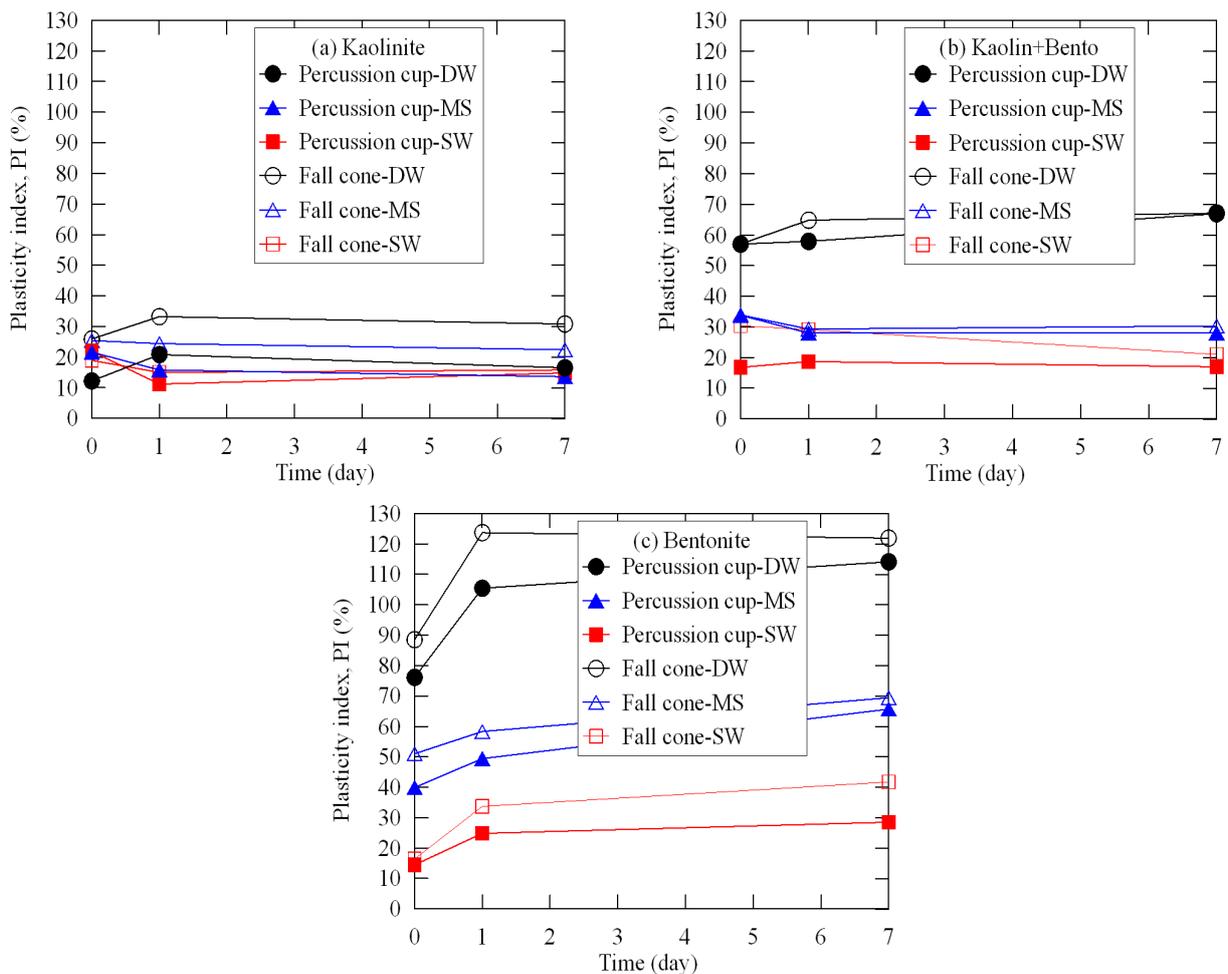


Fig. 9. Comparison of plasticity index (PI)

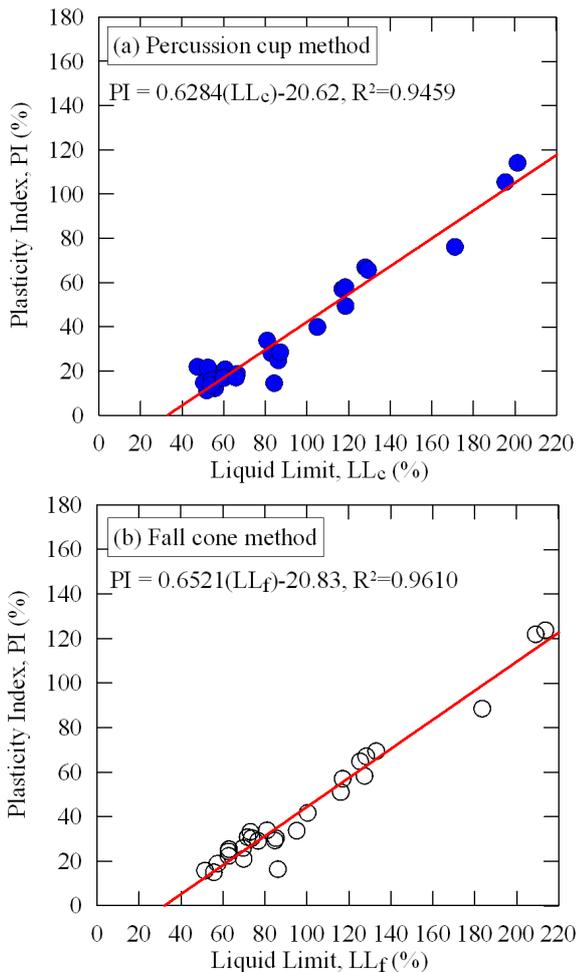


Fig. 10. Relationship between liquid limit and plasticity index

#### 4. 결론

본 연구에서는 흙 속에 포함된 염분이나 미생물이 흙의 액소성한계에 미치는 영향과 시간에 따른 액소성한계 변화를 카올리나이트, 벤토나이트, 그리고 카올리나이트(50%)+벤토나이트(50%) 시료에 대하여 비교 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 흙의 종류에 관계없이 염분이 포함된 흙의 액소성한계가 증류수가 포함된 흙보다 낮게 나타났으며, 특히 벤토나이트의 경우 최대 57% 정도 낮게 나타났다.
- (2) 흙 속에 포함된 미생물에 의해서도 액소성한계가 감소하였으며, 카올리나이트보다 벤토나이트의 경우 더 크게 감소하였으며 최대 40%까지 감소하였다.
- (3) 정적인 방법으로 구한 액소성한계가 동적인 방법으로 구한 액소성한계보다 흙의 종류에 따라 약 10-20% 정

도 높게 나타났다.

- (4) 시간에 따른 액소성한계의 변화는 혼합수에 관계없이 시간이 경과함에 따라 액소성한계가 약간 높게 나타났으며, 소성지수 또한 대체로 증가하는 경향을 보였다. 특히 증류수를 포함한 벤토나이트의 경우 시간에 따른 변화가 가장 크게 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신F01)에 의해 수행되었으며, 일부는 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고 문헌

1. Ahn, T. B. (1997), "Effect of Sodium Chloride on Stress - Deformation of Sand Bentonite Mixture", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.13, No.2, pp.17-27.
2. Arasan, S. and Yetimoglu, T. (2008), "Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32, pp.107-115.
3. Casagrande, A. (1932), "Research on the Atterberg limits of soils", *Public Roads*, 13(8), pp.121-136.
4. Dawson, R. F. (1960), "Investigation of the liquid limit test on soils", *ASTM Special Technical Publication No. 254*, pp. 190-195.
5. Di Maio, C. (1996), "Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects", *Geotechnique*, 46(4), pp.695-707.
6. Di Maio, C., Santoli, L., and Schiavone, P. (2004), "Volume change behavior of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state", *Mechanics of Materials*, 36, pp.435-451.
7. Hansbo, S. (1957), "A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test", *Proceedings of the Royal Swedish Geotechnical Institute*, Stockholm, No.14.
8. Jang, J. W., Park, C. S., Ha, J. H., and Chung, Y. I. (2005), "A comparative study on liquid limit value by liquid limit tests", *Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.17, No.2, pp.80-85.
9. Jeong, S. W. (2011), "The Rheological Characteristics of Wyoming Bentonite: Role of Salinity", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp.81-92.
10. Lee, J. H. (2006), "A Study on Derivation and Correlation between Results Value of Dynamic-Static Liquid Limit test", *Master thesis*, Hankyung National University.
11. Lee, K. M. (2004), "Modification of physical and hydraulic properties of Ca-Bentonite activated by various Na-chemicals", *Master thesis*, Chungnam National University.
12. Lee, W. T. (1997), "An experimental study on the liquid limit characteristics of the soil in Kwang Ju-Junnam with fall cone test", *Journal of the Industrial Technology*, pp.16-32.

13. Leroueil, S. and Le Bihan, J.-P. (1996), "Liquid limits and fall cone", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.793-798.
14. Oren, A. H. and Kaya, A. (2003), "Some engineering aspects of homoionized mixed clay minerals", *Environmental Monitoring and Assessment*, 84, pp.86-98.
15. Park, J. H. (2003), "Synthesis of Alumina powder from Kaolon using ultrasonic energy", *Master thesis*, Pusan National University.
16. Park, S. S. and Lee, J. W. (2012), "Effect of sea water on curing and strength of cemented sand", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.6, pp.71-79.
17. Rao, S. M., Sridharan, A., and Chandrakaran, S. (1993), "Consistency limits behavior of bentonites exposed to seawater", *Marine Georesources and Geotechnology*, 11, pp.213-227.
18. Santamarina, J. C. and Klein, K. (2001), "Re-examination of fabric formation in high specific surface soils", Georgia Institute of Technology, Atlanta (available from the authors).
19. Scherrer, H. U. (1961), "Determination of liquid limit by static cone penetration test", *Proc. 5th Intl. Conf. Soil Mechanics*, Paris 1, pp.319-322.
20. Sherwood, P. T. and Ryley, M. D. (1970), "An investigation of a cone-penetrometer method for the determination of the liquid limit", *Geotechnique*, 20(2), pp.203-208.
21. Sivakumar, V., Glynn, D., Cairns, P., and Black, J. A. (2009), "A new method of measuring plastic limit of fine materials", *Geotechnique*, 59(10), pp.813-823.
22. Sowers, G. F., Vesic, A. and Grandolfi M. (1960), "Penetration tests for liquid limit", *ASTM Special Technical Publication*, No.254, pp.216-224.
23. Sridharan, A. (1991), "Engineering behavior of fine-grained soils: a fundamental approach", *Indian Geotechnical Journal*, 21, pp.1-136.
24. Sridharan, A., El-Shafei, A., and Miura, N. (2002), "Mechanisms controlling the undrained strength behavior of remolded Ariake marine clays", *Marine Georesources and Geotechnology*, 20, pp. 21-50.
25. Stefanov, G. (1958), "Discussion on liquid limit", *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Butterworths Scientific Publications, London, p.97.
26. Uppal, H. L. and Aggarwal, H. R. (1958), "A new method of determining the liquid limit of soils", Bulletin 19, Central Road Research Inst., New Delhi, India.
27. Vasilev, A. M. (1949), "Basic principles of the methods and techniques of laboratory determination of physical soil properties", Moscow.
28. Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., and Oren, A. H. (2008), "Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays", *Engineering Geology*, 102, pp.54-61.

(접수일자 2012. 7. 5, 심사완료일 2012. 10. 25)