

## 열처리에 따른 점토의 애터버그 한계 영향

### The Effects on the Atterberg Limits of Clays with Heat Treatment

민 덕 기<sup>1</sup> Min, Tuk-Ki  
황 광 모<sup>2</sup> Hwang, Kwang-Mo  
이 성 호<sup>3</sup> Lee, Sung-Ho

#### Abstract

This study examines the effects of heat treatment under laboratory conditions for mixtures of two types of clay (kaolinite and montmorillonite). Clay samples were burned with different temperatures ranging from 100°C to 500°C. The Atterberg limits such as liquid and plastic limits were influenced with heat treatment. According to the experimental results, the liquid limits slightly decreased between 100°C to 300°C, whereas rapid decreases were observed after 300°C. The plastic limits did not show noticeable differences in the interval 100°C to 400°C. But the clay samples showed non plastic behavior at 500°C. The amount of NaCl was getting decreased with temperature. It also revealed that the pH values were also influenced with heat treatment, and the cation exchange capacity (C.E.C) values decreased with temperature.

#### 요 지

본 연구에서는 카올린광물과 벤토나이트로 혼합물에 대한 열처리의 영향을 조사하였다. 100°C에서 500°C까지 100°C 씩 온도를 증가시켜 인공적으로 생성한 혼합점토시료에 대하여, 열처리에 따른 건설재료의 강도특성을 분석코자 액성한계와 소성한계의 변화를 조사하였다. 실험 결과, 액성한계는 100°C에서 300°C 사이에서는 약간 감소하는 경향을 나타내었으며, 300°C 이후에는 액성한계가 급격히 감소하였다. 반면, 소성한계는 열처리의 영향이 크지 않았으며, 500°C로 처리한 혼합점토시료 모두에서 비소성(N.P.)을 나타내었다. 열처리에 따른 NaCl 함유량은 열처리 온도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 수소이온농도(pH) 역시 열처리의 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 양이온교환능력(C.E.C.) 또한, 열처리 온도에 따라 감소하는 경향을 보여 열처리에 따라 혼합점토의 액·소성한계가 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Atterberg limits, Bentonite, Heat treatment, Kaolinite

#### 1. 서 론

모래나 자갈 등의 조립토에 비하여 점토와 같은 세립 토는 입자가 미세하기 때문에 역학적인 거동이 흙 입자

의 물리·화학적 계면작용의 영향을 현저하게 받는다. 특히, 액성한계에 근접한 고함수비 상태에서 흙의 연경도는 계면작용의 영향을 더 크게 받는다. 일반적으로, 세립토의 연경도에 영향을 주는 인자로서는 ①입도조

1 정회원, 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, tkmin@ulsan.ac.kr)

2 정회원, 경북전문대학 토목과 교수 (Member, Dept. of Civil Engrg., Kyungbuk College, kwang-mo@hanmail.net)

3 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 석사과정 (Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, lsh1499@hotmail.com)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

성, ②입자형상, ③비표면적, ④구성 점토광물의 종류와 함유량, ⑤간극수의 물리·화학적 성질, ⑥입자표면의 전하 강도와 흡착수층의 두께, ⑦유기물의 종류와 함유량 등이 있다. ①~③은 입자의 기하학적 특성이며, 주로 내부마찰각 등의 역학적 특성에 직접적으로 영향을 미친다. 반면, ④~⑦은 흙의 물리·화학적 거동에 영향을 미친다.

점토의 거동은 온도변화에 민감하기 때문에 온도의 변화에 따른 점토의 공학적 성질에 관한 연구가 증가하는 추세이다. Moriwaki 등(1994)의 연구에 따르면, 흙의 거동은 응력·변형·시간뿐만 아니라 온도에도 크게 영향을 받는데, 이것을 흙의 온도 감수성(temperature sensibility)이라 한다. 특히, 점토의 역학적 거동이 온도 변화에 대단히 민감하여 포화 점토가 온도의 영향을 받게 되면 흙 입자와 간극수의 열팽창계수의 차이에 의해 간극수압이 발생하고, 이로 인해 흡수 및 배수가 발생할 수 있다. 이는 포화점토가 단순히 광물입자의 집합체로 거동하기보다는 흙 속의 물이 입자의 의존성 때문에 상호 전기·화학적 힘을 발휘하기 때문이다. 또한, 이강일(2005)은 온도의 변화는 점토의 물리·화학적 거동에 영향을 미치며, 입자의 크기, 비중, 연경도, 다짐특성 및 수리특성, 전단강도 등의 물리·역학적 변화를 동반함을 지적하였다.

최근 연구자들은 열처리방법을 사용하여 폐기물에 의해 오염된 지반처리에 관한 연구를 수행한바 있다. Farag(1993)는 쓰레기매립장의 유출수에 의해 오염된 지반에 대한 처리방법으로 소각방법을 적용하였다. Varlakov 등(1997)은 방사능과 유독성 물질에 오염된 지반의 정화방법으로 100℃~800℃의 열을 가하는 방법을 적용하였다. 또한, Alcocer와 Chowdhury(1993)는 원유로 오염된 지반을 정화시키기 위해 열처리방법을 적용하였으며, Akinmusuru(1994), Yang과 Farouk(1995), Ma와 Hueckel(1992)는 열처리된 흙벽들의 열전도에 대하여 연구한바 있다.

Joshi 등(1994)은 점성토에 300℃~700℃로 열처리를 한 결과, 점성토의 미세구조에 물리·화학적 변화를 일으켜 양이온 교환능력과 압축성이 감소하였으며, 열처리 온도가 증가할수록 흙벽들의 강도가 점진적으로 증가한다는 것을 밝혔다. 뿐만 아니라, Mitchell(1969)은 점성토에 대한 열처리는 내부마찰각, 점착력 등의 강도정수가 긍정적으로 증가하고, 재료의 물리적 성질을 변화시킴을 밝힌바 있다.

본 연구에서는 카올리나이트와 벤토나이트를 혼합한 혼합점토에 열을 가하여 열처리에 따른 연경도 변화를 조사하였다. 또한, 벤토나이트의 함유량을 변화시켜 이에 따른 영향도 함께 조사하였다. 진술한바와 같이, 흙의 연경도에 영향을 주는 인자들 중에서 간접적으로 물리·화학적 거동에 영향을 미치는 인자들은 많다. 따라서, 열처리에 따른 NaCl의 함유량, 수소이온농도, 그리고 양이온 교환능의 변화에 대해서도 부가적인 분석을 실시하였다.

## 2. 시험재료 및 방법

본 연구에서는 열처리에 의한 점토의 연경도 변화를 조사하기 위하여 국내에서 널리 활용되고 있는 대표적인 두 종류의 점토에 대하여 각종 실내시험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 점토시료는 경남 하동지방에서 생산되고 있는 Ca계 카올리나이트(이하, 카올리나이트)와 경북 경주 양북면에서 생산되는 Na계 벤토나이트이다. Na계 벤토나이트는 Ca계 벤토나이트에 비하여 활성도(activity)가 높아 열처리에 따른 혼합점토의 공학적 특성이 민감한 것으로 판단되어 본 연구에서는 Na계 벤토나이트를 적용하였다.

표 1에는 두 점토시료에 대하여 X-선 형광분석을 통하여 조사된 화학조성을 나타내었다.

그림 1과 2는 각 시료에서 100℃~500℃로 가열 한 시료에 대하여 실시한 X-선 회절분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 1에서 볼 수 있는바와 같이, 카올리나이트 시료의 점토광물은 카올리나이트(7.49 Å)로 소량의 일라이트(10 Å)가 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한, 열처리 온도가 400℃까지 증가하면서 무처리시의 7.49 Å 피크가 7.25 Å으로 점차 감소하는 경향을 보였으며, 500℃ 이상에서는 피크가 사라지는 것으로 나타나 본 점토의 주성분은 카올리나이트임을 확인하였으며, 열처리 온도에 따른 역학적 특성의 변화가 있을 것으로 판단되었다. 그림 2에 나타난바와 같이, Na계 벤토나이트는 무처리에서 나타난 12.7 Å 피크가 500℃에서 9.8 Å으로 이동

표 1. 각 시료의 화학 조성(%)

성분	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	L.O.I
Kaolinite(Ca)	54.01	1.31	34.20	0.57	2.48	9.43
Bentonite(Na)	59.56	3.98	19.62	2.65	2.36	7.34

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; Total Fe, L.O.I ; 강열감량

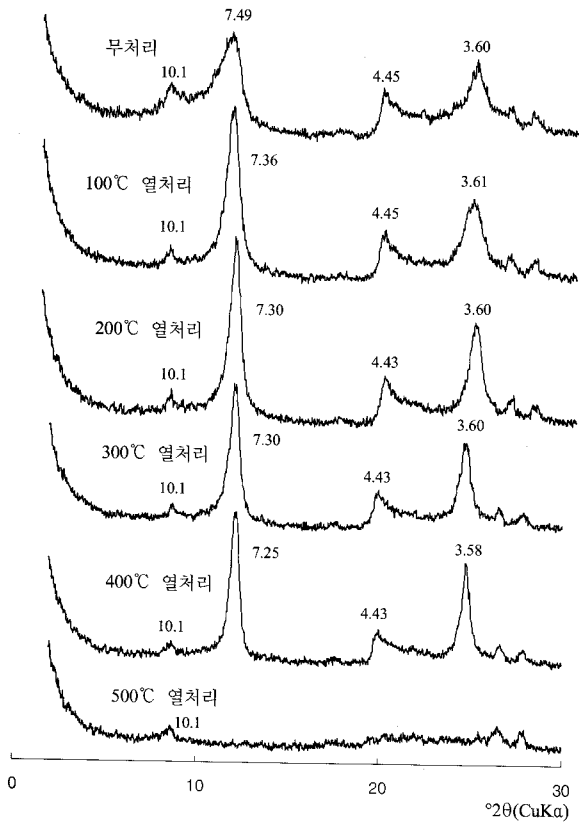


그림 1. Kaolinite(Ca) 시료의 열처리에 따른 X-선 회절분석 결과

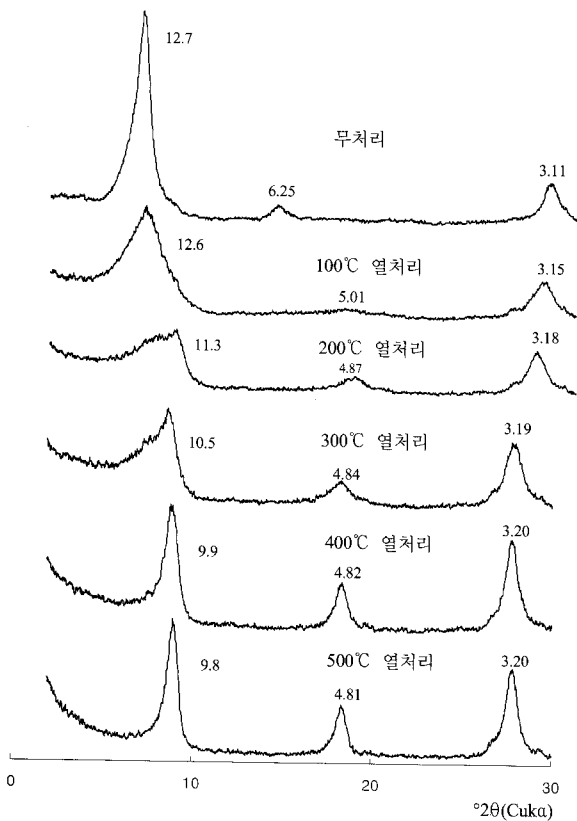


그림 2. Bentonite(Na) 시료의 열처리에 따른 X-선 회절분석 결과

함에 따라 대부분 점토광물이 스멕타이트로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한, 벤토나이트 역시 열처리 온도에 따라 피크가 점차 감소하고 있어 점토가 열처리 온도에 따른 영향을 받은 것으로 예측된다.

본 연구에서 사용된 벤토나이트와 같이 액성한계가 높은 값을 가지는 점토의 경우 Casagrande 시험장치는 시험자의 주관에 따라 많은 편차를 보여 이를 줄이기 위하여 정적액성한계시험(Fall Cone test),(BS 1377-1990)에 의거하여 실험을 실시하였으며, 그 결과 안정적인 액성한계의 결과를 구할 수 있었다.

전술한 두 종류의 점토광물에 대하여 액소성 한계시험을 실시하였다. 일반적으로 벤토나이트의 경우, 카올리나이트에 비해 상대적으로 매우 큰 액성한계를 가지고 있다. 따라서 벤토나이트의 함량에 따른 영향을 보다 명확히 분석하기 위하여 본 연구에서 Na계 벤토나이트 함량을 카올리나이트와 중량비로 0%, 25%, 50%, 75%, 100%가 되도록 혼합하여 총 5종류의 혼합점토시료를 인공적으로 조제하였다.

그림 3에는 Na계 벤토나이트:카올리나이트의 혼합비에 따른 액성한계의 변화를 보여주고 있다. 그림 3에 나타낸바와 같이, Na계 벤토나이트의 함유량이 증가함에 따라 액성한계도 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 여기서, 결정계수  $R^2$ 값이 0.98로 상당히 높은 상관관계를 보여주었다. 이러한 경향은 Ca계 몬모릴노나이트에 대한 Grabowska Olszewska(2003)의 실험 결과에서도 유사한 경향을 나타내었다.

부가적으로, 본 연구에서는 혼합비에 따른 양이온교환능을 기기분석(ICP)으로 분석하였으며, 그림 4에 나타내었다.

Grabowska Olszewska(2003)는 Ca계 벤토나이트에 대

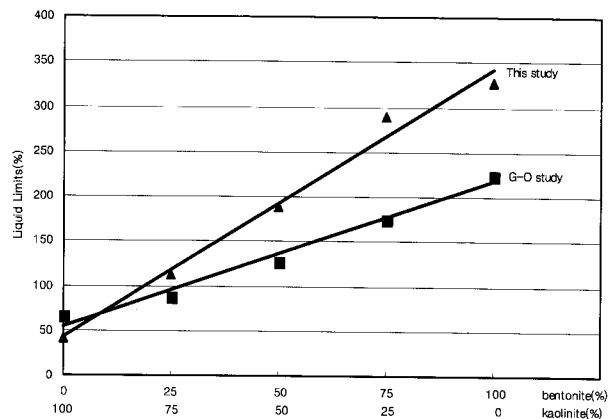


그림 3. 혼합비에 따른 액성한계 변화

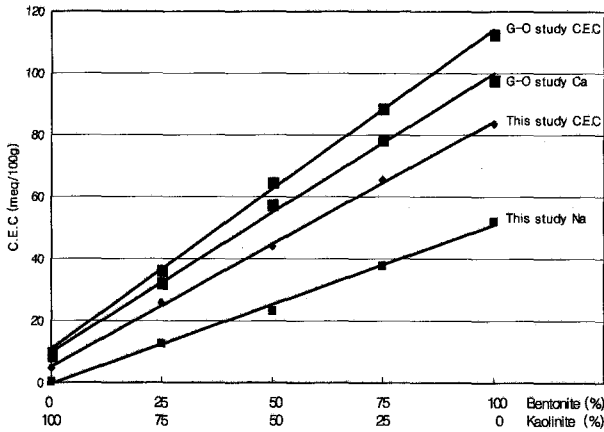


그림 4. 혼합비에 따른 양이온 교환능의 변화

하여 유사한 실험을 실시한바 있는데, Ca계 벤토나이트의 함유량에 비례하여 C.E.C.가 선형으로 증가하는 결과를 보였다. 본 연구에서도 결정계수  $R^2$ 값이 0.99로 상당히 높은 상관관계를 보여주었다.

### 3. 열처리에 의한 실험분석 및 고찰

본 연구에서는 일정한 중량비로 혼합된 각각의 혼합 점토시료에 대하여 열처리를 실시하였다. 열처리는 건조조에 각 열처리 온도로 시료를 24시간 동안 유지하였으며, 처리 후 항온기로 옮겨 상온까지 식힌 후 액·소성한계 시험을 실시하였다. 그 결과를 분석, 고찰한 것은 아래와 같다.

#### 3.1 열처리에 의한 액·소성한계의 변화

점토의 열처리에 대한 영향을 알아보기 위하여 100℃에서 500℃까지 100℃ 간격으로 가열한 시료에 대하여 액·소성한계시험을 실시하였다.

그림 5는 온도변화에 따른 액성한계의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5에 나타난바와 같이, 가열 온도가 증가함에 따라 액성한계가 감소하는 경향을 나타내었으며, 벤토나이트의 함유량이 증가할수록 그 경향이 뚜렷하였다. 특히, 300℃까지는 완만하게 감소하였으며, 300℃ 이후 전 단계에 비하여 약 40%의 급격한 감소율을 나타내었다. 이러한 경향은 선형 연구자들(Abu-Zreig, M. M. 등, 2001; Tan, 2004)의 연구결과와 일치하는 것으로, 사용시료에 따라 다소의 차이는 있었으나, 300℃에서 700℃까지의 범위에서 크게 액성한계가 감소하는 것으로 보고하고 있다. 반면, 안정적인 구조를 가진 카올리나이트의 경

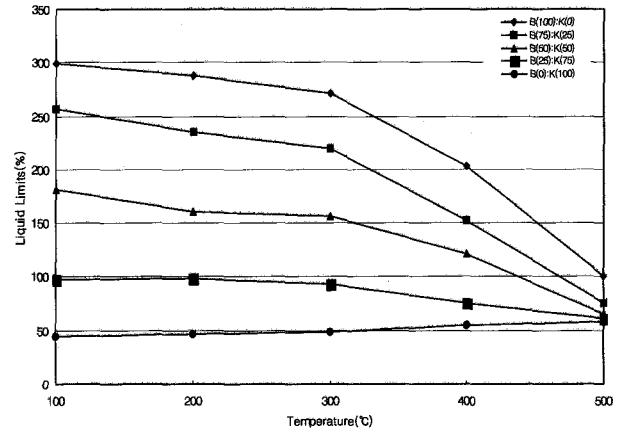


그림 5. 온도변화에 따른 액성한계의 변화

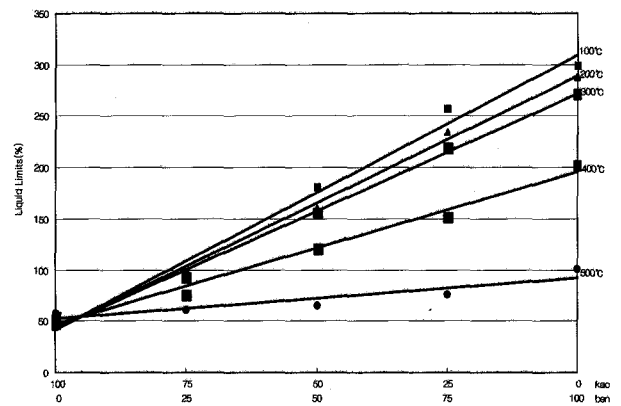


그림 6. 혼합비에 따른 액성한계의 변화

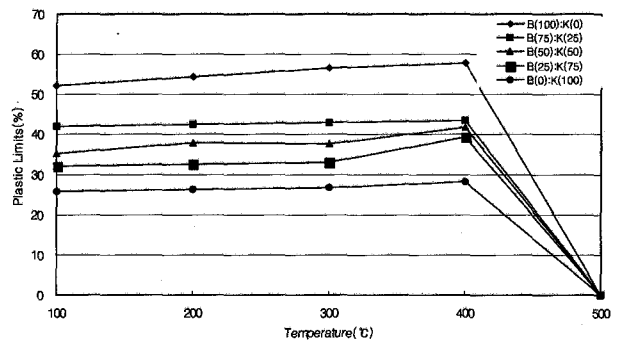


그림 7. 온도변화에 따른 소성한계의 변화

우, 열처리 온도에 따른 영향이 미미한 것으로 나타났다.

그림 6에는 Na계 벤토나이트의 혼합비에 따른 액성한계의 변화 경향을 나타낸 것이다. 그림 6에 나타난바와 같이, 400℃까지는 각 열처리 온도에서 Na계 벤토나이트의 함유량에 비례하여 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. 여기서, 결정계수  $R^2$ 값이 0.84에서 0.99 범위의 상관성을 보여주었다.

열처리에 따른 소성한계의 변화를 그림 7에 나타내었다. 액성한계 변화와는 달리 가열온도 100℃~400℃까지 소성한계는 약간 증가하는 것으로 나타났으며, 500℃

로 처리한 모든 시료에서 비소성(N.P.) 상태를 나타내었다. Abu-Zreig, M. M. 등(2001)의 연구에서도 유사한 결과를 나타내었다.

이는 소성상태의 흙에 열이 가해짐에 따라 흙 입자 사이의 흡착수가 소산되고, 그 결과로 점착력이 없어져 비소성상태가 되는 것으로 판단된다.

### 3.2 열처리에 의한 NaCl 함유량의 변화

점토광물의 혼합비별 온도변화에 따른 NaCl 함유량을 조사하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8에 나타난바와 같이, 모든 시료에서 온도가 증가함에 따라 NaCl 함유량은 감소하는 것으로 나타났다. NaCl 함유량의 감소 폭은 카올리나이트에 비하여 Na계 벤토나이트에서 더 큰 것으로 나타났다.

### 3.3 열처리에 의한 수소이온농도의 변화

그림 9는 열처리에 의한 점토의 수소이온농도의 변화

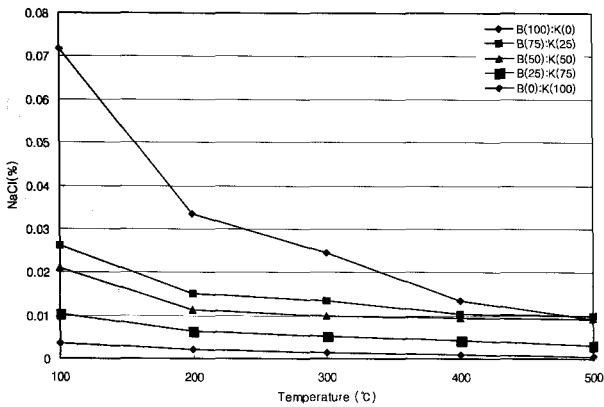


그림 8. 온도변화에 따른 NaCl 함유량의 변화

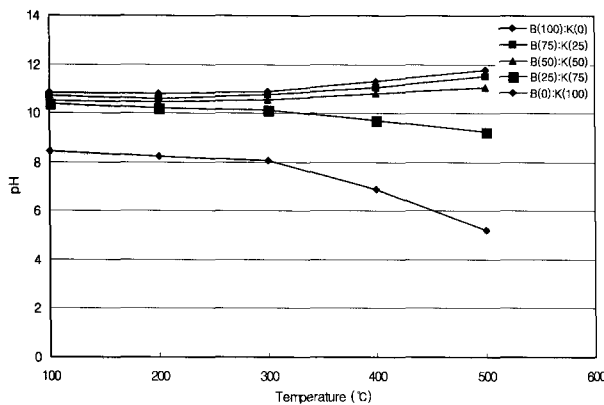


그림 9. 온도변화에 따른 수소이온농도(pH)의 변화

를 나타낸 것이다. Na계 벤토나이트의 경우, 온도가 증가함에 따라 수소이온농도는 300°C까지는 뚜렷한 변화를 나타내지 않았으나, 300°C 이후에서 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 카올리나이트의 경우에는 300°C까지는 큰 변화 없이 약간 감소하는 경향을 보였으나, 300°C 이후에서 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.4 열처리에 따른 양이온교환능의 변화

혼합점토에 열처리 후 양이온교환능을 조사하였으며, 그 결과를 그림 10과 그림 11에 각각 나타내었다. 그림 10에 나타난바와 같이, Na계 벤토나이트의 경우, 온도가 증가함에 따라 양이온교환능의 총량과 Na 양이온은 감소하는 경향을 나타내었고, Ca 양이온의 농도에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 반면, 그림 11에 보여주는 바와 같이 카올리나이트 경우, 벤토나이트에 비해 상대적으로 작은 양의 양이온교환능을 나타내었으며, 온도가 증가함에 따라 양이온교환능 총량과 Ca 양이온은 감소하는 경향을 나타내었으나, Na의 양이온은 큰 변화

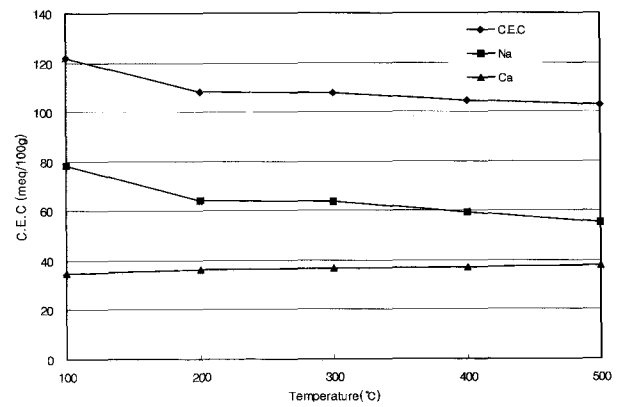


그림 10. 벤토나이트에 대한 온도-양이온교환능 관계

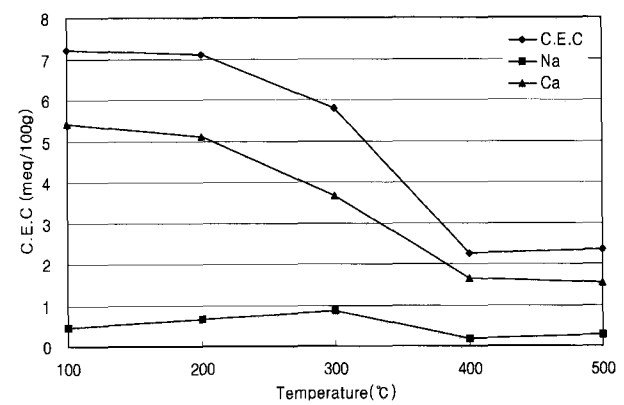


그림 11. 카올리나이트에 대한 온도-양이온교환능 관계

를 보이지 않았다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 점토의 열처리가 흙의 연경도 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Na계 벤토나이트와 Ca계 카올리나이트를 일정한 혼합비로 조제하고, 500°C까지 열처리한 후, 연경도 시험 등을 실시하였다. 시험결과를 분석·고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열처리에 따라 액성한계는 크게 영향을 받았으며, 열처리온도가 300°C까지는 비교적 감소량이 적었으나, 그 이후 급격한 감소 경향을 나타내었다.
- (2) 열처리에 의한 소성한계는 약간 증가하는 경향을 보였으며, 그 변화 폭은 액성한계에 비해 상대적으로 적었다. 그리고 500°C 이후에는 비소성(N.P.)을 나타내었다.
- (3) 열처리 후의 NaCl 함유량 변화를 조사하였으며, 온도가 증가함에 따라 NaCl 함유량은 감소하는 경향을 보였다. 특히, 카올리나이트에서보다 벤토나이트의 경우 NaCl 함유량의 변화가 더 크게 나타났었다.
- (4) 열처리 후 수소이온농도의 변화 양상은 벤토나이트의 경우, 열처리 온도가 증가함에 따라 수소이온농도는 증가하였으나, 카올리나이트의 경우는 감소하였다.
- (5) 열처리 후 온도변화에 따른 양이온교환능의 변화 양상은 벤토나이트의 경우 양이온교환능 총량과 Na 양이온 양이 감소하는 경향을 보였다. 카올리나이트의 경우, 온도가 증가함에 따라, 양이온교환능 총합과 Ca 양이온의 양이 감소하는 경향을 보였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2005년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 사의를 표합니다.

#### 참고 문헌

1. 이강일 (2005), "고온이력을 받는 점토의 압밀 및 전단특성", 한국지반공학학회 논문집, 제21권 제4호, pp.41-49.
2. Abu-Zreig, M. M., Al-Akhras, N. M. and Attom, M. F. (2001), "Influence of heat treatment on the behaviour of clayey soils", *Applied Clay Science*, Vol.20, pp.129-135.
3. Akinmusuru, J. (1994), "Thermal conductivity of earth blocks", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.6(3), pp.341-351.
4. Alcocer, C. and Chowdhury, H. (1993), "Experimental study of an environmental remediation of Gulf Coast crude-oil contaminated soil using low-temperature thermal treatment", Proceedings of the 1993 Western Regional Meeting, Louisiana. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, pp.723-724.
5. Ctori, P. (1989), "The effects of temperature on the physical properties of cohesive soils", *Ground Engineering*, Vol.22, pp.26-27.
6. Farag, I. (1993), "Simulating hazardous waste incineration", *Chemical Engineer*, Vol.538, pp.11-16.
7. Jefferson, I. and Rogers, C. D. F. (1998), "Liquid limit and the temperature sensitivity of clays", *Elsevier Sci. Engineering Geology*, Vol.49, pp.95-109.
8. Joshi, R., Gopal Achari, C., Horsfield, D. and Nagaraj, T. (1994), "Effect of heat treatment on strength of clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.6, pp.1080-1088.
9. Ma, C. and Hueckel, T. (1992), "Effects of inter-phase mass transfer in heated clays, a mixture theory", *International Journal of Engineering Science*, Vol.30(11), pp.1567-1582.
10. Mitchell, J. K. (1969), "Temperature effects on the engineering properties and behavior of soils", Highway Research Board, Special Report, Vol.103, Washington, DC, pp.9-28.
11. Moriwaki, T., Yashima, K. and Nageo, M. (1994), "Shear deformation characteristics of Hiroshima clay cured at high temperature", *Proc. of the international symposium on pre-failure deformation characteristics of geomaterials*, Vol.1, No.4, pp.133-147.
12. Sridharan, A., Rao, S. M. and Murthy, N. S. (1986), "Liquid limit of montmorillonite soils", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.9, pp.156-159.
13. Sridharan, A., Rao, S. M. and Murthy, N. S. (1988), "Liquid limit of Kaolinite soils", *Geotechnique*, Vol.38, No.2, pp.191-198.
14. Varlakov, A., Sobolev, I., Barinov, A., Dmitriev, S., Karlin, S. and Flit, V. (1997), "Method of treatment of radioactive silts and soils", Proceedings of the 1996 MRS Fall Meeting, Moscow, Russia. Materials Research Society, Pittsburgh, PA, pp.591-594.
15. Yang, L. and Farouk, B. (1995), "Modeling of solid particles flow and heat transfer in rotary kiln calcines", Proceedings of the 1995 30th National Heat transfer Conference, Portland, Oregon. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, pp.11-19.
16. Grabowska-Olszewska, B. (2003), "Modelling physical properties of mixtures of clay: example of a two-component mixture of kaolinite and montmorillonite", *Applied Clay Science*, Elsevier, Vol.22, pp.251-259.
17. Tan, O. Yilmaz, L. and Zaimoglu, A. S. (2004), "Variation of some engineering properties of clays with heat treatment", *Materials Letters*, Elsevier, Vol.58, pp.1176-1179.

(접수일자 2006. 6. 29, 심사완료일 2007. 2. 15)