

## 소형콘의 관입저항력을 이용한 점토의 액성한계측정에 관한 연구

### Study on the Measurement of Liquid Limit Using a Penetration Resistance of Small Cone in Clay Soil

손 무 락<sup>1</sup> Son, Moorak

이 재 용<sup>2</sup> Lee, Jaeyong

#### Abstract

This study investigated both water content and penetration resistance of small cone of various clay soils that were made of Kaolinite and Bentonite with different mixing ratios and compared the results with those of the existing dynamic (Casagrande test) and static (fall cone test) tests directly. The comparison showed that the water content at the inflection point on a curve of water content and penetration resistance was very similar to the liquid limit from a fall cone test. The penetration resistance of small cone at the inflection point was 0.2 kPa, and it was ascertained that the water content at the inflection point represents a liquid limit of clay soils. From the study results, it was found that the penetration resistance of 0.2 kPa with the small cone can be an indicator of the liquid limit of clay soils in practice. Finally a test procedure to measure the liquid limit of clay soil based on a penetration resistance of small cone was proposed.

#### 요 지

본 연구에서는 소형콘의 관입저항력을 이용한 점토의 액성한계를 측정하기 위하여 카올리나이트 점토와 벤토나이트 점토의 비율을 다양하게 혼합한 점토흙에 대하여 함수비와 소형콘의 관입저항력을 조사하고 기존의 동적(Casagrande 시험법) 및 정적(Fall cone 시험법) 액성한계 시험결과와 직접 비교하였다. 비교결과 다양한 점토흙의 함수비에 따른 관입저항력 관계곡선에서 변곡점이 형성된다는 것을 파악하였으며 이 때의 함수비가 정적액성한계(Fall cone) 시험법에 의한 액성한계 값과 매우 유사함을 파악하였다. 변곡점이 형성된 점에서의 소형콘의 관입저항력은 약 0.2kPa로 나타났으며 이 때의 함수비가 점토흙의 액성한계를 나타낸다는 것을 확인하였다. 이와 같은 연구결과를 토대로 향후 점토의 액성한계를 파악하는데 본 연구에서 조사된 0.2kPa의 소형콘의 관입저항력이 유용한 지표가 될 수 있다는 사실을 파악하였다. 또한 소형콘의 관입저항력을 이용한 액성한계 시험법을 제시하였다.

**Keywords :** Clay soil, Liquid Limit, Penetration resistance, Small cone, Casagrande test, Fall cone test

1 정회원, 대구대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Geotechnical Engr., Daegu Univ., Tel: +82-53-850-6587, [mson@daegu.ac.kr](mailto:mson@daegu.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 대구대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Geotechnical Engr., Daegu Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

점토의 액성한계는 흙의 상태 및 강도 등의 다양한 특징을 파악할 수 있는 중요한 인자로서 점성토지반과 관련한 대부분의 공사에서 측정을 필요로 한다. 일반적으로 점토의 액성한계를 측정하는 방법에는 크게 두 가지 방법이 사용되고 있는데 그 중 하나는 Casagrande (1932)가 제안한 황동접시 등을 이용하는 동적 액성한계 시험법이고 나머지 하나는 Vsailev(1949)가 제안한 정적 액성한계 시험법인 Fall cone 시험법이다. 우리나라에서 점토의 액성한계를 측정하기 위하여 가장 일반적으로 사용하는 방법은 KS F 2303에 규정된 동적 액성한계 시험법으로 1911년 Atterberg가 제안하고 이것을 Casagrande가 개발한 시험방법이다. 하지만 동적인 시험방법으로는 액성한계 값을 정확하게 얻기가 매우 어려우며 그 결과값을 신뢰하기 어렵다고 보고된 바 있다(Sower, 1960). 또한 실험자 및 실험조건 차이에 의하여 액성한계가 다양하게 변하고 오차도 심하게 나타난다고 지적된 바 있다(Karlsson, 1961; Kim et al., 1996; Koester, 1992; Kang et al., 2000). Casagrande 본인도 Atterberg에 의해 제시된 Casagrande 시험장치에 의한 액성한계 시험법은 동적인 전단시험이며, 동적으로 교란중인 상태에서 각각의 반응과 역학특성을 달리하는 세립토에 있어서 일정한 통일된 비교기준을 제시하지 못한다고 하였다. Fall cone 시험은 1942년 구 소련의 Vasilev가 스웨덴의 콘 시험원리를 연구하던 중 세립토의 액성한계를 결정하는 방법으로 콘 관입시험을 제안하고, 1949년에 구 소련에서 표준으로 채택되었으며 이어 일부 다른 나라에서도 Casagrande 방법대신 콘 관입 시험 방법으로 많은 연구(Sowers et al., 1959; Sherwood and Riley, 1970; Houlshby, 1982; Budhu, 1985; Wood, 1985; Moon & White, 1985; Leroueil and Le Bihan, 1996; Kim et al., 2000; Son et al., 2003, Jang et al., 2005;)가 진행되었으며 많은 연구에서 Casagrande 시험법과 비교분석도 수행되었다. 하지만 국제적으로 통일

된 기준이 없고 각 나라마다 조금씩 다른 기준을 사용하고 있는데 이는 각 나라마다 사용된 시료가 다르기 때문일 것이라 Kim et al.(2000)은 판단하였다. 이와 같이 Fall cone 시험법에 대한 통일된 기준이 마련되지 않은 점이 Fall cone 시험법의 가장 큰 문제점으로 여겨지고 있다. 뿐만 아니라 콘 관입으로 인한 용기가 발생함에 따라 결과 값에 영향을 미칠 수 있고 콘의 동적낙하로 오차가 내포할 수 있으며(Choi, 2001), 관입깊이 측정시 시간적인 제약은 시험과정에서 큰 불편함을 야기할 수도 있다.

본 연구에서는 이와 같은 기존 시험법의 여러 가지 문제점을 줄이기 위하여 기존의 Fall cone 시험의 동적 낙하에 의한 관입량을 이용하는 대신 소형콘을 이용한 정적 관입저항력을 이용하여 액성한계를 파악하고자 하였다. 본 연구에서 제안하는 방법에 의한 시험결과를 기존 Casagrande 시험법 및 Fall cone 시험법을 이용한 결과들과 직접적으로 비교하였으며, 이를 통해 소형콘의 관입저항력을 이용하여 액성한계를 파악할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 목적은 점토지반의 액성한계를 측정하기 위한 새로운 콘의 개발에 관한 것이 아니며 기존의 소형콘과 관련장치를 이용하여 액성한계를 추정할 수 있는 방법을 제시하는 것에 있다. 본 연구의 결과가 향후 점토의 액성한계를 파악하기 위하여 유용하게 활용되어질 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 카올리나이트와 벤토나이트 점토를 이용하였으며 카올리나이트와 벤토나이트 구성비를 서로 다르게 하여 다양한 카올리나이트-벤토나이트 혼합점토를 만들어 사용하였다. Tables 1 & 2 및 Fig. 1은 실험에 사용된 점토의 특성, 혼합비율 및 구성재료를 보여주고 있다.

Table 1. Characteristic of clays measured by Casagrande methods

Clay type		Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Specific gravity
Kaolinite	Casagrande	41.5	30	2.4
	Fall cone (Sweden)	44.8		
Bentonite	Casagrande	297	81	2.2
	Fall cone (Sweden)	237		



Fig. 1. Prepared materials for test

Table 2. Mixing ratio of clays

Cases	Kaolinite (g)	Bentonite (g)
K(100%)	500	-
K(95%)B(5%)	475	25
K(90%)B(10%)	450	10
K(80%)B(20%)	400	100
K(70%)B(30%)	350	150
K(60%)B(40%)	300	200

\* K: Kaolinite, B: Bentonite

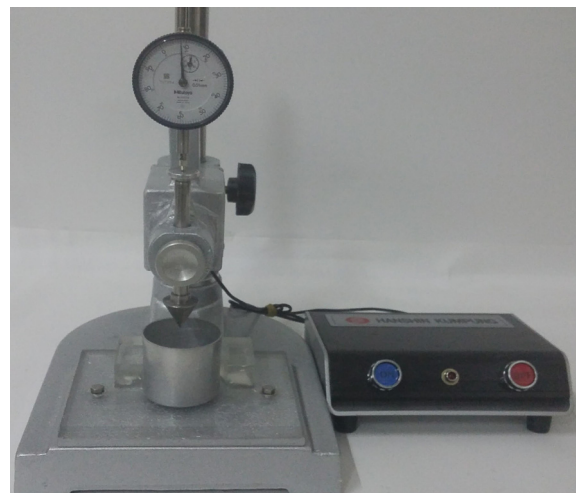
## 2.2 기존 동적 및 정적 액성한계 시험(Casagrande and Fall cone tests)

본 연구에서는 먼저 다양한 구성비로 이루어진 혼합 점토에 대하여 기존 Casagrande 동적액성한계 시험방법을 KS F 2303에 준하여 실시하였다. Casagrande 액성한계 시험법(Fig. 2a)은 황동접시에 높이 약 1cm의 시료를 넣고 흙파기 날을 이용하여 중앙의 시료를 양분한 후 황동접시를 1cm 높이에서 초당 2회의 속도로 낙하시켜

낙하횟수 25회에서 둘로 나뉜 부분의 흙이 양측으로부터 유동하여 약 1.5cm의 길이로 맞닿을 때의 함수비를 액성한계로서 정의한다. 하지만 한 번에 낙하횟수 25회를 얻기가 어렵기 때문에 함수비와 낙하횟수의 관계곡선(유동곡선)을 통하여 액성한계를 구하였다. 정적 액성한계 시험법인 Fall cone 시험(Fig. 2b)은 용기에 점토 시료를 담은 후 콘을 점토표면에 닿도록 고정을 하고 자유낙하로 5초간 관입토록 하며 관입되는 콘 관입량이 1cm(스웨덴) 관입될 때의 함수비를 액성한계로서 정의한다. 마찬가지로 한 번의 시험으로 5초 동안 콘의 관입량 1cm를 얻기가 어려우므로 관입량에 따른 함수비 관계곡선을 통하여 액성한계를 구하였다. 하지만 관입되는 콘의 규격과 콘 관입량의 기준은 나라마다 조금씩 다르며 통일된 기준은 아직 정해진 바 없어 본 연구에서는 스웨덴과 영국규정을 적용하여 시험을 수행하였다. 스웨덴과 영국에서 규정하고 있는 Fall cone 시험규격 및 기준은 Table 3과 같다.



(a) Casagrande test apparatus



(b) Fall cone test apparatus

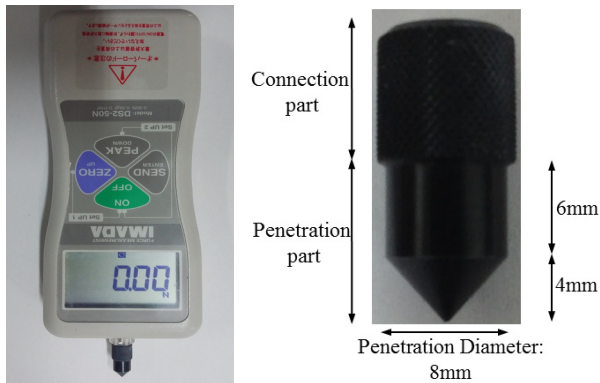
Fig. 2. Casagrande and Fall cone test apparatuses

Table 3. Standards of fall cone test

Country	Standard number	Cone			Container		Max. particle dia. (mm)	Penetration time (sec)	Measure-ment number	Measure-ment point	Penetration range (mm)	Penetration depth for liquid limit (mm)
		Angle (°)	Weight (g)	Length (mm)	Inside diameter (mm)	Height (mm)						
Sweden	SIS027120-90	60	60	>20	60,50	30,25	400	5	2	≥ 3	7~15	10
United kingdom	BS 1377-1990	30	80	35	≥55	40	425	5	2	≥ 4	15~25	20

### 2.3 본 연구의 함수비 변화에 따른 점토시료 관입저항력 측정방법

본 연구에서 수행한 관입저항력을 이용한 액성한계 시험은 다음과 같이 수행되었다. 먼저 관입저항 측정장치(정밀도: 0.01N)와 소형콘(Fig. 3)을 준비하여 체질 및 설치하고 측정기를 영점조정 하였다(Fig. 4). 그런 다음



Measuring device of penetration resistance (Accuracy : 0.01N)

Small cone used in this study (Cone angle : 80°)

Fig. 3. Apparatus for measuring penetration resistance

카올리나이트와 벤토나이트 혼합점토에 함수비를 달리 하여 혼합한 후 용기(내부직경: 60mm, 높이: 30mm)에 담고 이를 높이조절장치 받침대위에 올려놓고 높이조절나사를 이용하여 받침대를 상향으로 올려 용기내의 점토표면이 소형콘과 접하면서 소형콘이 약 5~10초 범위 내에서 10mm 관입되도록 하였다. 이때 관입저항력이 발생하고 이는 측정장치에 의해서 측정되었다(Fig. 4). 1회 측정이 완료된 후 높이조절나사를 이용하여 받침대를 하향으로 내린 후 콘에 묻어있는 점토를 깨끗하게 닦은 후 점토표면의 다른 지점에 대하여 2회째 관입저항력을 앞에서와 같은 방법으로 측정하였다. 이와 같은 과정을 반복하여 서로 다른 지점에서의 총 3회의 관입저항력을 평균하여 시험점토의 관입저항력으로서 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 비교

#### 3.1 기존 시험방법에 따른 액성한계 측정 및 비교

Table 4 및 Fig. 5는 기존 동적 및 정적 액성한계 시험



Test preparation



Measuring penetration resistance at three points

Fig. 4. Process to measure penetration resistance

Table 4. Results of liquid limit tests (unit: %)

Liquid limit (%)	K(100%)	K(95%)B(5%)	K(90%)B(10%)	K(80%)B(20%)	K(70%)B(30%)	K(60%)B(40%)
Casagrande	41.5	43.3	53.9	78	105	135
Fall cone, Sweden	44.8	46	53.7	74.7	96.6	117.2
Fall cone, UK	45.1	45.8	53.6	73.4	94	115

\* K: Kaolinite, B: Bentonite

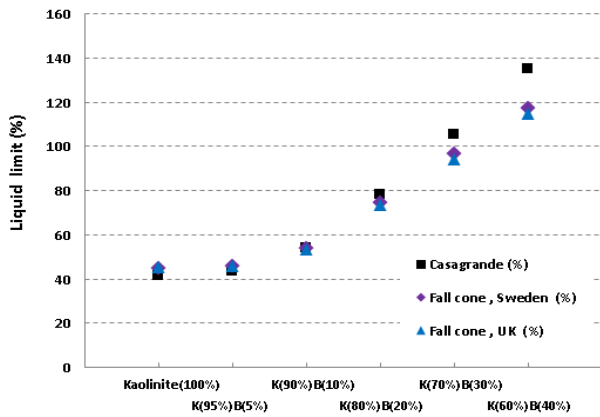


Fig. 5. Comparison of the results of liquid limit tests

(Casagrande test, Fall cone test)을 이용하여 측정된 혼합점토별 액성한계 값을 보여주고 있다. Casagrande 액성한계시험을 통한 액성한계 값은 Fall cone 시험에 의한 액성한계 값과 비교하여 벤토나이트 점토가 적게 혼합된 경우에는 Casagrande 액성한계 값이 더 작은 것으로 나타난 반면 벤토나이트 점토의 혼합량이 증가함에 따라 Casagrande 액성한계 값이 더 크게 측정되는 것으로 나타났다. 두 시험법에 의한 액성한계 값의 차이는 약 6~15%인 것으로 나타났다. 하지만, Fall cone 시험의 경우 스웨덴식과 영국식 기준에 관계없이 같은 구성의 점토에 대해 모두 유사한 액성한계 값을 나타냈다.

### 3.2 함수비에 따른 관입저항력 비교

Fig. 6은 본 연구에서 제시한 방법에 의한 각 혼합점토에 대한 함수비변화에 따른 관입저항력의 크기를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 각 혼합점토는 특정 함수비 근처에서 관입저항력의 큰 변화가 발생한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 함수비 변화에 따른 관입저항력의 변화특성은 기존의 여러 연구자(Norman, 1958; Federico, 1983; Sharma & Bora, 2003; Lee & Freeman, 2007; Park & Nong, 2013)에 의해서도 조사된 바 있다. 본 연구에서는 관입저항력의 변화가

발생하는 변곡점을 파악하기 위하여 기존 연구에서 수행한 것 같이 각 혼합점토에 대해 추세선 분석을 실시하였고 이로부터 변곡점에서의 관입저항력은 혼합점토에 관계없이 대략적으로 0.2kPa라는 사실을 파악하였다. 이와 같이 변곡점이 발생하는 점에서의 함수비를 기존 Casagrande 시험법과 Fall cone 시험에서 측정된 액성한계 값들과 상호 비교하였으며 또한 기존 Casagrande 시험법과 Fall cone 시험에서 측정된 액성한계 값의 함수비에서 관입저항력을 측정하고 본 연구에서 파악한 변곡점에서의 관입저항력과 상호 비교하였다.

Table 5 및 Fig. 7는 본 연구에서 파악한 각 혼합점토의 변곡점에서의 함수비와 기존 Casagrande 시험법과 스웨덴 및 영국식 Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값들을 서로 비교하여 보여주고 있다. 또한, Table 6 및 Fig. 8은 본 연구에서 파악한 각 혼합점토의 변곡점에서의 관입저항력과 기존 Casagrande 시험법과 스웨덴 및 영국식 Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력을 서로 비교하여 보여주고 있다.

각 표 및 그림에서 보는바와 같이 본 연구에서 파악한 변곡점에서의 함수비는 혼합점토의 구성에 관계없이 Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값과 매우 유사한 것으로 나타났다. 또한, Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력이 본 연구에서 파악한 변곡점에서의 관입저항력과 매우 유사하다는 것을 알았다. 이와 같은 사실을 통해 점토의 액성한계를 본 연구에서 사용한 장치 및 소형콘을 이용하여 관입저항력을 측정함으로써 파악할 수 있다는 것을 확인하였다. Casagrande 시험법에 의해 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력은 본 연구의 변곡점에서의 관입저항력과 Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력과는 큰 차이를 나타냈다. 벤토나이트 점토가 적게 혼합된 경우에는 Casagrande 시험법에 의해 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력이 더 크게 측정된 반



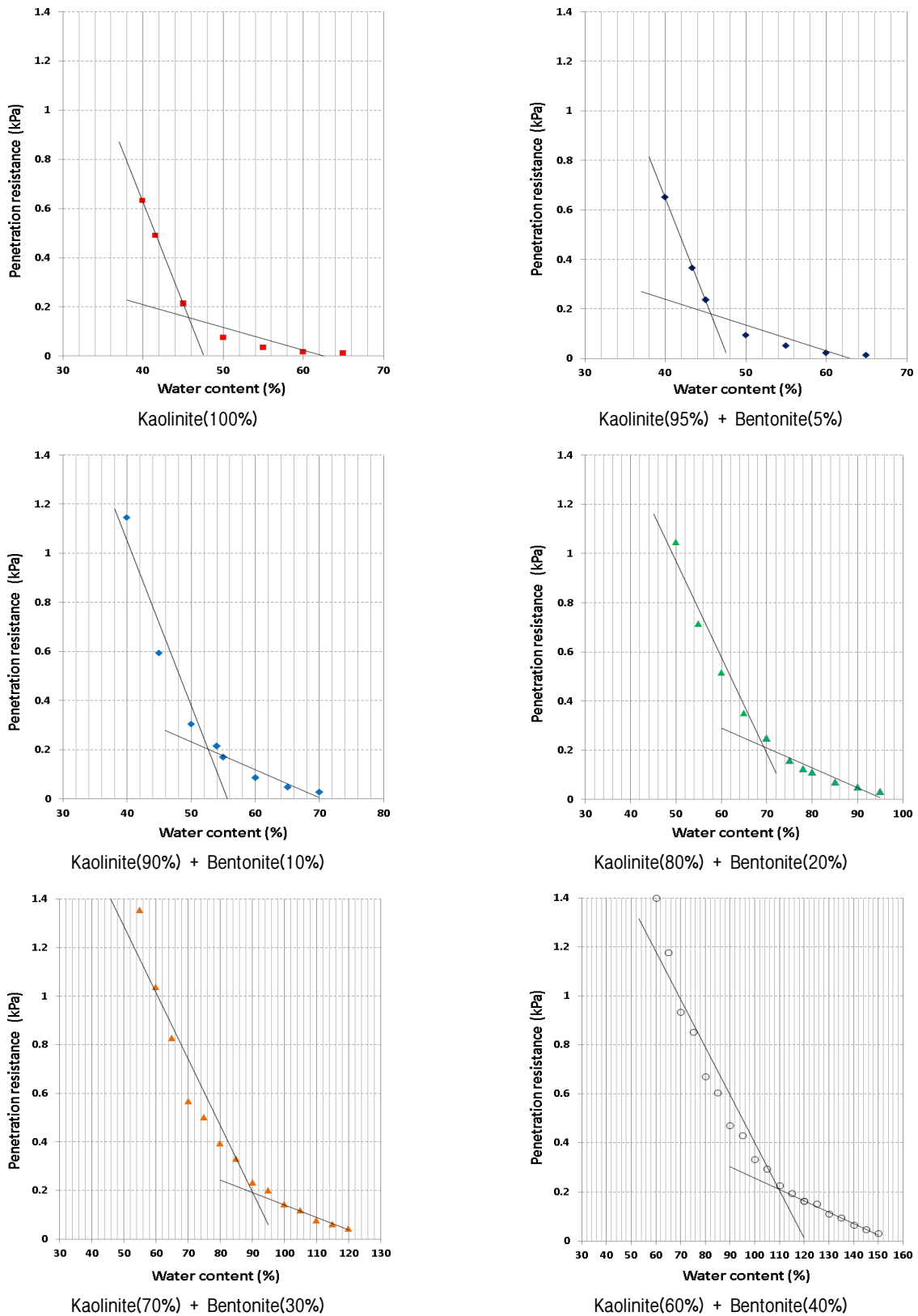


Fig. 6. Comparison of penetration resistance with water content change

면 벤토나이트 혼합량이 증가함에 따라 Casagrande 시험법에 의해 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력이 더 작게 측정되는 것으로 나타났다. 이와

같은 결과는 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 액성한계를 측정함에 있어서 Casagrande 시험법의 문제점 때문인 것으로 판단된다. 또한, 함수비의 작은 변화가 관입

Table 5. Results of water content at liquid limit state (%)

Method	K(100%)	K(95%)B(5%)	K(90%)B(10%)	K(80%)B(20%)	K(70%)B(30%)	K(60%)B(40%)
This study	45.8	45.9	53	69	90	110
Casagrande	41.5	43.3	53.9	78	105	135
Fall cone, Sweden	44.8	46	53.7	74.7	96.6	117.2
Fall cone, UK	45.1	45.8	53.6	73.4	94	115

\* K: Kaolinite, B: Bentonite

Table 6. Results of penetration resistance (kPa)

Method	K(100%)	K(95%)B(5%)	K(90%)B(10%)	K(80%)B(20%)	K(70%)B(30%)	K(60%)B(40%)
This study	0.18	0.19	0.2	0.21	0.19	0.21
Casagrande	0.49	0.36	0.21	0.12	0.12	0.1
Fall cone, Sweden	0.23	0.21	0.21	0.17	0.18	0.18
Fall cone, UK	0.21	0.21	0.21	0.19	0.2	0.19

\* K: Kaolinite, B: Bentonite

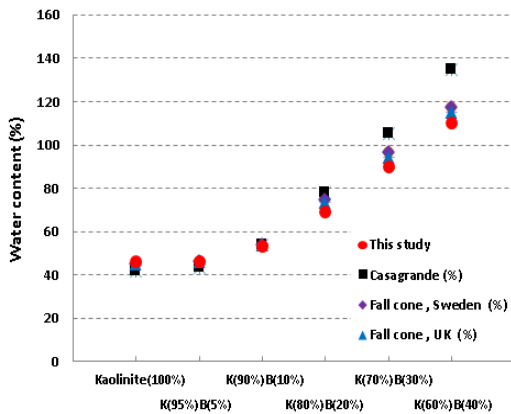


Fig. 7. Comparison of water content

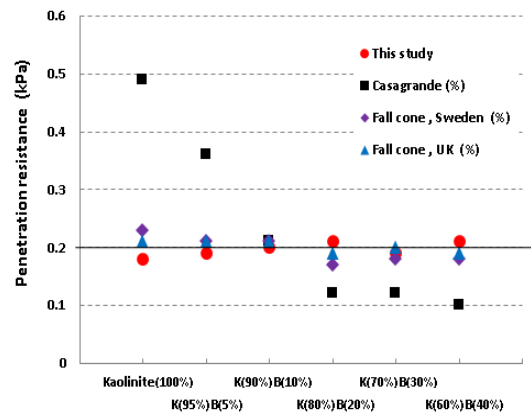


Fig. 8. Comparison of penetration resistance

Table 7. Results of water content at liquid limit state (%)

Method	K(100%)	K(95%)B(5%)	K(90%)B(10%)	K(80%)B(20%)	K(70%)B(30%)	K(60%)B(40%)
This study (at 0.2 kPa)	45.6	45.8	53.5	72.5	93.8	114
Casagrande	41.5	43.3	53.9	78	105	135
Fall cone, Sweden	44.8	46	53.7	74.7	96.6	117.2
Fall cone, UK	45.1	45.8	53.6	73.4	94	115

저항력에 큰 영향을 유발시킨다는 것을 알았으며 이를 통해 본 연구에서 이용한 소형콘의 관입저항력이 함수비에 변화에 따라 민감하게 반응하는 인자라는 것과 이를 통해 점토의 액성한계를 측정함에 있어서 본 연구에서 제시한 방법을 이용할 수 있다는 사실을 다시 한 번 확인하였다. 이와 같은 결과를 종합하여 본 연구에서는 이용된 소형콘의 관입저항력이 0.2kPa일 때의 함수비를 점토의 액성한계로 제시하고자 한다. 소형콘의 관입저항력이 0.2kPa일 때의 함수비와 Casagrande 시험법 및 Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값을 Table 7 및 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. 표 및 그림에서 보는데

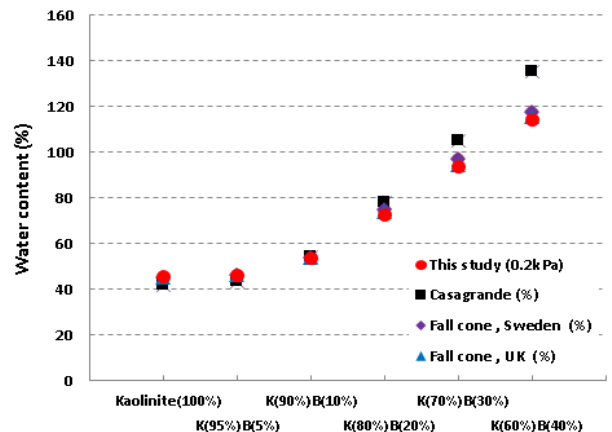


Fig. 9. Comparison of water content

와 같이 본 연구에서 제시한 관입저항력이 0.2kPa 일 때의 함수비는 혼합점토의 구성에 관계없이 Fall cone 시험법에서 측정한 액성한계 값과 아주 유사한 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실을 통해 점토의 액성한계를 본 연구에서 사용한 소형콘의 관입저항력이 0.2kPa 일 때의 함수비로서 나타낼 수 있음을 확인하였다.

Fig. 10은 점토의 액성한계를 측정하기 위하여 본 연구에서 제시하는 관입저항력의 크기(0.2kPa)가 소형콘의

관입시간에 따라 어떠한 영향을 받는지를 조사한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 혼합점토에 소형콘의 관입시간을 5초에서 60초의 범위 내에서 변화시켜 각 관입시간에 해당하는 관입저항력을 조사하였다. 조사결과, 본 연구에서 사용한 소형콘의 관입저항력은 조사범의 내의 관입시간에 대하여 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 이를 통해 시험자가 소형콘의 관입시간을 5초에서 60초의 범위 내에서 수행하면 될 것으로 판단된다.

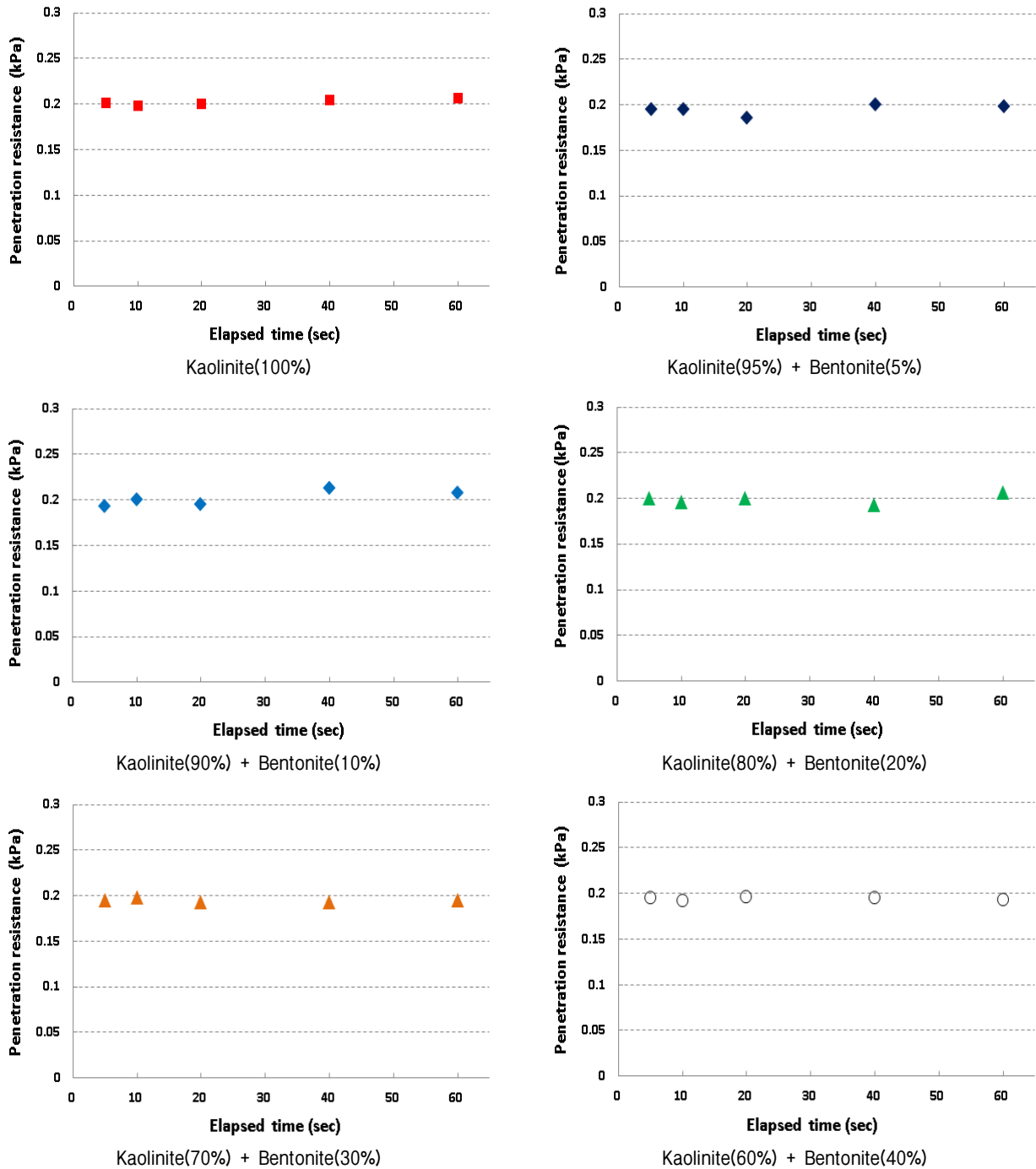


Fig. 10. Comparison of penetration resistance force by the time



#### 4. 소형콘의 관입저항력을 이용한 액성한계 시험법의 제안

본 연구결과를 토대로 소형콘의 관입저항력을 이용한 액성한계 시험법을 다음과 같은 순서에 따라 제안하고자 한다.

- 1) 점토시료를 준비하고 노건조 시킨다.
- 2) 관입저항력 측정장치(정밀도: 0.01N)를 준비하고 소형콘을 결합한다.
- 3) 시료혼합 그릇에 노건조 된 점토시료를 담고 일정 함수비의 물을 첨가해 혼합한다.
- 4) 물과 혼합된 점토를 측정용기(내부직경: 60mm, 높이: 30mm)에 담은 후 이를 높이조절장치 받침대에 올려놓고 높이조절나사를 이용하여 받침대를 상향으로 올려 용기내의 점토표면이 소형콘과 접하면서 소형콘이 약 5~60초 범위 내에서 10mm 관입되도록 하고 그 때의 관입저항력을 측정한다.
- 5) 1회 측정이 완료된 후 높이조절나사를 이용하여 받침대를 하향으로 내린 후 콘에 묻어 있는 점토를 깨끗하게 닦은 후 점토표면의 다른 지점에 대하여 2회째 관입저항력을 앞에서와 같은 방법으로 측정한다. 이와 같은 과정을 반복하여 서로 다른 지점에서의 총 3회 이상의 관입저항력을 평균하여 시험점토의 관입저항력으로서 사용한다.
- 6) 관입저항력과 함수비의 관계도표에 측정 관입저항력과 함수비를 이용하여 시험데이터를 표시한다.
- 7) 3)-6)의 과정을 반복하되 이 때 첨가된 물의 함수비를 점점 크게 하여 점토시료를 혼합한다.
- 8) 관입저항력과 함수비의 관계도표에 표시된 3-4개의 시험데이터에 대한 관계곡선을 작도한다(Fig. 11).

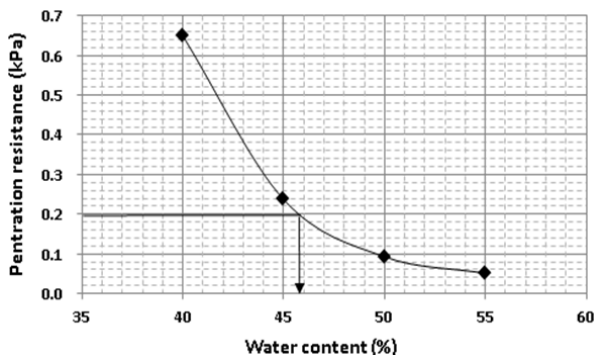


Fig. 11. Determination of liquid limit using the proposed method

- 9) 액성한계를 구하기 위하여 작도된 관계곡선으로부터 0.2kPa의 관입저항력에 해당하는 함수비를 구한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 소형콘의 관입저항력을 이용한 점토의 액성한계를 측정하기 위하여 카올리나이트 점토와 벤토나이트 점토의 비율을 다양하게 혼합한 점토흙에 대하여 함수비와 소형콘의 관입저항력을 조사하고 기존의 Casagrande 시험법 및 Fall cone 시험법을 통한 시험결과와 직접 비교하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Casagrande 액성한계시험을 통한 액성한계 값은 Fall cone 시험에 의한 액성한계 값과 비교하여 벤토나이트 점토가 적게 혼합된 경우에는 Casagrande 액성한계 값이 더 작은 것으로 나타난 반면 벤토나이트 점토의 혼합량이 증가함에 따라 Casagrande 액성한계 값이 더 크게 측정되는 것으로 나타났다. 두 시험법에 의한 액성한계 값의 차이는 약 6~15%인 것으로 나타났다. 하지만, Fall cone 시험의 경우 스웨덴식과 영국식 기준에 관계없이 같은 구성의 점토에 대해 모두 유사한 액성한계 값을 가지는 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구에서 제시한 측정방법에 의한 각 혼합점토에 대한 함수비변화에 따른 관입저항력의 크기를 비교한 결과, 각 혼합점토는 특정 함수비 근처에서 관입저항력의 큰 변화가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 관입저항력의 변화가 발생하는 변곡점을 파악하기 위하여 각 혼합점토에 대해 추세선 분석을 실시하였고 이로부터 변곡점에서의 관입저항력은 혼합점토에 관계없이 대략적으로 0.2kPa라는 사실을 파악하였다.
- (3) 본 연구에서 파악한 변곡점에서의 함수비는 혼합점토의 구성에 관계없이 Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값과 매우 유사한 것으로 나타났으며, 또한, Fall cone 시험법에서 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정된 관입저항력이 본 연구에서 파악한 변곡점에서의 관입저항력과 매우 유사하다는 것을 파악하였다. 이와 같은 사실을 통해 점토의 액성한계를 본 연구에서 사용한 장치 및 소형콘을 이용하여

여 관입저항력을 측정함으로써 파악할 수 있다는 것을 확인하였다.

- (4) 본 연구에서 제시한 소형콘의 관입저항력이 0.2kPa 일 때의 함수비와 Casagrande 시험법 및 Fall cone 시험법에서 측정한 액성한계 값을 비교한 결과 혼합점토의 구성에 관계없이 Fall cone 시험법에서 측정한 액성한계 값과 아주 유사한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 사실을 통해 점토의 액성한계를 본 연구에서 사용한 소형콘의 관입저항력이 0.2kPa 일 때의 함수비로서 나타낼 수 있음을 확인하였다.
- (5) Casagrande 시험법에 의해 측정된 액성한계 값의 함수비에서 측정한 관입저항력은 본 연구의 변곡점에서의 관입저항력과 Fall cone 시험법에서 측정한 액성한계 값의 함수비에서 측정한 관입저항력과는 큰 차이를 나타냈다. 이와 같은 결과는 액성한계를 측정함에 있어서 Casagrande 시험법의 문제점 때문인 것으로 판단된다.
- (6) 함수비의 작은 변화가 관입저항력에 큰 영향을 유발시킨다는 것을 알았으며 이를 통해 본 연구에서 이용한 소형콘의 관입저항력이 함수비에 변화에 따라 민감하게 반응하는 인자라는 것과 이를 통해 점토의 액성한계를 측정함에 있어서 본 연구에서 제시한 방법을 이용할 수 있다는 사실을 확인하였다.
- (7) 본 연구에서 제시하는 관입저항력의 크기(0.2kPa)가 소형콘의 관입시간에 따라 어떠한 영향을 받는지를 조사한 결과, 소형콘의 관입저항력은 5초에서 60초의 관입시간 범위내에서 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- (8) 본 연구결과를 토대로 소형콘의 관입저항력을 이용한 액성한계 시험방법을 제시하였으며, 이를 통해 향후 점토의 액성한계를 보다 용이하고 유용하게 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 점토지반의 액성한계를 측정하기 위한 새로운 콘의 개발이 아니라 기존의 소형콘과 관련장치를 이용하여 액성한계를 추정할 수 있는 방법을 제시하는 것에 그 의의가 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 콘의 크기 및 형상, 시험방법 등이 변하면 관련인자(본 연구에서 파악된 0.2kPa)도 다르게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 서로 다른 크기 및 형상의 콘에 대해서도 액성한계를 추정할 수 있는 관련인자

를 얻을 수 있고 이를 이용하여 액성한계를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌 (References)

1. Budhu, M. (1985), "The Effect of Clay Content on Liquid Limit from a Fall Cone and the British Cup Device", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.8, No.2, pp.91-95.
2. Choi, Y.G. (2001), "A Study on the Estimation of Clay Soil Parameters Using Fall Cone Test", Pusan university master's thesis.
3. Federico, A. (1983), "Relationships (Cu-w) and (Cu-s) for Remolded Clayey Soils at High Water Content", *Riv. Ital. Geological*, Vol.14, No.1, pp.38-41.
4. Hously, G. T. (1982), "Theoretical Analysis of the Fall Cone Test", *Geotechnique*, Vol.32, No.2, pp.111-118.
5. Jang, J.W., Park, C.S., and Chung, Y.I. (2005), "A Comparative Study on Liquid Limit Value by Liquid Limit Tests", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol.17, No.2, pp.375-382.
6. Koester, J.P. (1992), "The Influence of Test Procedure on Correlation of Atterberg Limit with Liquefaction in Fine Grained Soils", *American Society for Testing and Materials*, pp.352-361.
7. Kang, S.J., Park, Y.M., and Hur, S.M., and Kim, J.S. (2000), "Experimental study on the Atterberg limit changes due to experiment condition", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2000, No.2, 2000. pp.451-454.
8. Karlsson, R. (1961), "Suggested Improvements in the Liquid Limit Test with Reference to Flow Properties of Remoulded Clays", *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, France. pp.171-184.
9. Kim, S.C., Choi, I.G., and Park, Y.M. (1996), "Engineering Properties of Samcheok Organics Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.12, No.1, pp.21-33.
10. Kim, S.C., Yu, N.J., and Lee, S.D. (2000), "Relation between the Liquid Limit by Casagrande's Method and Fall Cone Test", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2000, No.2, pp.233-236.
11. Korea Standard Association (2000), KS F 2303, Test method for liquid limit and plastic limit of soils.
12. Lee, L.T. and Freeman, R. B. (2007), "An Alternative Test Method for Assessing Consistency Limits", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.30, No.4, pp.1-8.
13. Leroueil, S. and Le Bihan, J. P. (1996), "Liquid Limits and Fall Cones", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33. pp.793-798.
14. Moon, C. F. and White, K. B. (1985), "A Comparison of Liquid Limit Test Result", *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.59-60.
15. Norman, L. E. J. (1958), "A Comparison of Values of Liquid Limit Determined with Apparatus Having bases of Different Hardness", *Geotechnique*, Vol.8, pp.79-83.
16. Park, S.S. and Nong, Z. (2013), "A Proposal of Flow Limit for Soils at Zero Undrained Shear Strength", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.11, pp.73-84.
17. Son, Y.H., Chang, P.W., and Won, J.Y., Kim, S.P. (2003), "Estimation of Liquid Limit by a Single-point Method of Fall Cone Test", *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.17, No.2, pp.80-85.

18. Sowers, G.F., Vesic, A., and Grandndolfi, M. (1959), "Penetration Test for Liquid Limit", ASTM, STP, No. 254, 216-226.
19. Sharma, B. and Bora, P. K. (2003), "Plastic Limit, Liquid Limit and Undrainded Shear Strength of Soil - Reappraisal", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.8, pp.774-777.
20. Sherwood, P.T. and Riley, M.D. (1970), "An Investigation of Cone-penetrometer Method for Liquid Limit", *Geotechnique*, Vol.20, pp.203-208.
21. Vasilev, A. M. (1949), "Basic Principles of the Methods and Techniques of Laboratory Determination of Physical Soil Properties", Moscow.
22. Wood, D. M. (1985), "Some Fall-cone Tests", *Geotechnique*, Vol. 35, No.1, pp.64-68.

Received : March 15<sup>th</sup>, 2016

Revised : August 25<sup>th</sup>, 2016

Accepted : September 19<sup>th</sup>, 2016