

정적 및 동적시험법과 시험자에 따른 점토의 액·소성한계

Liquid and Plastic Limits of Cohesive Soil by Static and Dynamic Test Methods and Testers

김 찬 기 ¹	Kim, Chan-Kee	여 진 수 ²	Yeo, Jin-Soo
문 영 석 ³	Moon, Young-Seog	박 형 렬 ³	Park, Hyung-Yeol
김 태 형 ⁴	Kim, Tae-Hyung		

Abstract

In this study, the liquid and plastic limit tests were conducted on Paju clay with Casagrande method (dynamic) and the fall cone test method (static) to find out the effects of test methods and testers on their values. Six testers, who already have the experience of test, participated. As a results of liquid limit tests, the fall cone test method showed 4% smaller liquid limit compared to the value determined by Casagrande method. As the number of tests increased, the fall cone test method showed less variation between testers and the variation range of level of proficiency was also more stable. In the case of one point method, the liquid limit determined by the fall cone test method varied with smaller range compared to the Casagrande. Consequently, the fall cone test provided more stable liquid limit value than that of Casagrande method. For the results of plastic limit tests, there were no difference between Casagrande method and the fall cone test unlike liquid limit test results. In other words, both methods showed that plastic limit reached the average value as the number of tests increased, and the tendency level of proficiency also showed to get better.

요 지

본 연구는 파주점토에 대해 Casagrande법(동적)과 원추관입시험법(정적)으로 액성한계와 소성한계시험을 실시하여 시험방법과 시험자에 따른 액·소성한계 결정에 미치는 영향을 검토하였다. 총 6명의 시험경험을 가진 학생이 참여하였다. 액성한계시험결과, 원추관입시험법으로 구한 액성한계는 Casagrande법으로 구한 액성한계보다 약 4% 정도 작게 나타났다. 원추관입시험법에서 시험횟수의 증가함에 따라 비례적으로 시험자별 시험값의 차이가 작아지고, 숙련도의 변화 폭도 양호해지는 경향을 보였다. 1점법에서 원추관입시험법에 의해 결정된 액성한계 값의 변화는 작고 Casagrande법보다 좀 더 양호한 값을 얻을 수 있었다. 소성한계시험결과, 액성한계와는 다르게 두 시험법의 결과 차이는 없는 것으로 나타났다. 즉, 두 시험방법 모두 시험자별 소성한계는 시험횟수가 증가함에 따라 평균 소성한계 값에 근접해 가는 경향을 보이고 있으며 숙련도의 변화도 시험횟수가 증가 할수록 좋아 지는 경향을 보였다.

Keywords : Fall cone test, Casagrande method, Liquid limit, Plastic limit, Tester, Proficiency

1 정회원, 대진대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

2 비회원, 대진대학교 토목공학과 공학석사 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

3 비회원, 대진대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

4 정회원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2017 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

토질역학(Soil Mechanics)이라는 교과목은 전공이 토목공학인 3학년 학생의 전공필수 교과목이다. 토질역학에서는 공학적으로 흙을 이용하기 위해서 필요한 흙의 물리적 역학적 특성에 대하여 설명하고 있다. 흙의 물리적 역학적 특성 규명은 토질실험을 통해 결정된다. 토질실험은 3학년 교과목으로 제공되며 대부분의 토질역학 수강생은 토질실험 교과목을 같이 수강하고 있다.

토질역학 및 토질실험의 주 재료인 흙은 크게 점성토와 사질토로 구분되는데 점성토에 있어서 물리학적 특성은 흙의 기초적인 특성에 해당된다. 물리적 특성 중 액성한계는 흙이 액체에서 소성상태로 넘어가는 경계가 되는 함수비이고, 소성한계는 흙이 소성상태에서 반고체 상태로 넘어가는 함수비이다. 다시 말하면 액성한계는 흙의 유동상태에 있는 최소의 함수비이고 소성한계는 소성상태의 최저함수비를 의미한다. 액성한계와 소성한계는 성토 재료의 적합성 여부, 압축지수 추정 및 액상화 평가 등에 이용되는 중요한 특성 중 하나이다. 예를 들어, 약간의 액성한계 값의 차이는 압밀특성 분석에 있어 큰 차이를 유발하고(Lim, 2014), 모래 또는 실트에서 세립분의 조성 차이는 지반의 액상화에 지배적인 역할을 한다(Ishihara and Koseki, 1989). 따라서 액성한계와 소성한계는 흙의 공학적인 성질을 판단하는데 있어서 기본적인면서도 중요한 역할을 한다.

액성한계는 크게 두 가지 측정방법으로 결정하고 있다. 먼저 가장 일반적인 방법으로 현재 KS F2303인 Casagrande법(동적)이 있다. 이 방법은 현재까지 비교적 합당한 방법으로 알려져 왔다. 그러나 자연상태에서 액성한계는 본래가 정적인 요소인데 이를 동적인 방법으로 구하는데 모순이 있다는 지적이 여러 학자들에 의해 논의되어 왔고, 결정된 액성한계 값도 실험장치, 시료 조제법, 실험자의 숙련도 등에 의한 오차를 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Kim, 2005). 다른 방법은 Vasilev(1949)가 원추관입시험 연구 중 세립토의 액성한계 결정방법으로 제안한 원추관입시험법(정적)이 있다. Hansbo(1957)도 Casagrande법의 근본적인 오차 원인이 실험 장치에 있다고 판단하고 액성한계 실험법으로 원추관입시험(fall cone test)을 제안하였다.

소성한계 결정방법은 흙을 유리 바닥 위에서 손바닥으로 비벼서 약 3mm의 직경이 되었을 때 부서지기 시작하는 함수비로 정하는 Casagrande법(KS F 2304)과 원

추관입시험에 의한 소성한계 결정 방법이 있다. 원추관입시험에 의한 소성한계를 결정하는 대표적인 방법은 Wood et al.(1978)방법과 Feng(2000)방법이 있다.

원추관입시험법은 Casagrande법에 비하여 절차가 단순하여 시험결과에 미치는 장치의 영향이 적고 실험자에 의한 오차를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다(Sowers et al., 1960; Sherwood and Ryley, 1970; British Standards Institute, 1975). Sowers et al.(1960)는 동일한 3가지의 시료를 Casagrande법에 의하여 40개의 기관에서 각각 시험하도록 한 후에 결과를 분석하였는데 각 결과들의 분포가 다양하여 정확한 값을 얻기가 얼마나 어려운지 확인해 주었다. 따라서 여러 국가에서는 Casagrande법 대신 원추관입시험법으로 대체되고 있는 실정이다(Leroueil, 1996). 그러나 국제적으로도 통일된 규정은 없고 각 나라마다 실험장치, 시료, 실험법 등이 조금씩 다르며 우리나라는 아직 규정된 실험방법 없이 보조수단으로 사용되고 있는 실정이다.

지금까지 국내에서도 점토의 액소성한계에 대한 동적 및 정적시험에 대한 연구가 진행되었으며(Kim et al., 2000; You et al., 2003; Jang et al., 2005), 연구 결과 원추관입시험법이 Casagrande법에 비해 시험결과에 미치는 영향이 적음을 확인하였다. 이들 연구는 시험법 외 시료 및 시험기구가 액·소성값 결정에 미치는 영향도 검토하였다. 하지만 토질실험을 배우는 학생들을 대상으로 실험방법과 실험자에 의한 액·소성값의 변화를 검토한 연구는 없었다. 실험값 분석에 있어서 1점법도 고려하지 않았다.

교육현장에서 앞에서 언급된 두 가지 방법을 사용해서 동일 시료에 대해 액성한계 및 소성한계를 결정해보면 실험자 별 서로 값이 다르게 나오고 또한 그 값의 차이가 크게 발생되고 있어 시험을 지도하는 교육자 입장에서 이 부분에 대한 검토 필요성을 항상 가지고 있었다. 그래서 본 연구에서는 액성한계와 소성한계 결정에 있어 실험방법에 따른 실험자인 학생이 실험결과에 미치는 영향을 분석하였다. 실험자마다 Casagrande법과 원추관입시험법으로 반복하여 액성한계실험과 소성한계실험을 실시하고 실험결과 값을 비교 분석(1점법도 적용)하였다. 실험자 외 시험결과에 시료준비나 시험 중 실험실의 온도 및 습도도 시험결과에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 실험자 외 다른 요소에 대한 영향은 검토되지 않았다. 다만 실험에 있어 시료준비 동일한 조건으로 실시하였으며, 시험은 동일한 실험실에서 동일한

시간대에 실시하여 시험결과에 영향을 미칠 수 있는 오류 영향을 가급적 배제하도록 하였다.

2. 액·소성한계 결정 방법

2.1 액성한계시험

2.1.1 원추관입시험법(정적)

원추관입시험에 의한 액성한계 결정방법은 점성토 위에 원추를 올려놓으면 흙의 연경도에 따라 원추의 자중에 의해 관입량이 달라지는 원리를 이용하여 흙의 액성한계를 구하는 실험이다. 원추관입시험 장치는 크게 영국과 스웨덴을 기준으로 나눌 수 있고, 각 나라마다 기준이 조금씩 다르다. 영국의 콘은 선단각이 30°, 콘과 수직관의 무게가 80g으로 표준화된 콘을 사용한다. 액성한계 값은 표준 콘이 5초 동안에 20mm 관입될 때의 함수비이다. 따라서 관입량이 15~25mm에서 4회 이상 즉, 15~20mm에서 2회, 20~25mm에서 2회 이상 실시하여 액성한계를 결정하도록 BS(British Standard)에 규정되어 있다.

원추관입시험에서 1점법에 의한 액성한계 결정방법은 액성한계에 가까운 원추의 관입량과 그 때의 함수비를 측정하고 이 결과 만으로 액성한계를 구하는 방법이다 (Sherwood et al., 1970; Nagaraj et al., 1981; CAN/BNQ2501-092-M-86, 1986).

Sherwood et al.(1970)은 원추각도 30°, 원추와 수직관의 중량이 80g인 원추를 사용하여 식 (1)와 같은 1점법을 제안하였다.

$$LL_C = \frac{40(W-15)}{P_{30}+20} + 15 \quad (1)$$

Nagaraj et al.(1981)은 원추각도 30°, 원추와 수직관의 중량이 80g인 원추를 사용하여 식 (2)와 같은 1점법을 제안 하였다.

$$LL_C = \frac{W}{0.65 + 0.175P_{30}} \quad (2)$$

여기서 LL_C 는 원추관입시험에 의한 액성한계이고, W 는 관입량에 해당하는 함수비이며 P_{30} 는 원추관입량이다.

2.1.2 Casagrande법(동적)

Casagrande법에 의한 액성한계는 KS F2303으로 실험방법이 규정되어 있다. 이 방법을 간단히 설명하면, 황동접시에 흙을 놓고 흙파기 날로 흙을 판 후 1cm 높이에서 1초 2회 정도로 황동접시를 낙하시켜 바닥 흙이 1.5cm 합류 때 낙하 횟수와 실험에 사용된 흙의 함수비로 측정한다. 액성한계는 1cm 높이의 황동접시를 1초간 2회의 비율로 25회 떨어뜨렸을 때, 양분된 부분의 흙이 양측으로부터 흘러날 1.5cm의 길이로 합쳐졌을 때의 함수비이다. Casagrande법에서 1점법에 의한 액성한계는 식 (3)을 이용하여 구한다. 여기서 w_n 은 함수비이고 N 은 낙하횟수이다.

$$LL = w_n \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (3)$$

2.2 소성한계시험

통상의 Casagrande법에 의한 소성한계시험방법은 KS F 2304에 규정되어 있듯이 흙을 유리 바닥 위에서 손바닥으로 비벼서 약 3mm의 직경이 되었을 때 부서지기 시작하는 함수비로 정한다.

원추관입시험에 의한 소성한계시험방법은 액성한계시험과 같은 방법으로 실시한다. 소성한계를 결정하는 대표적인 방법은 Wood 등(1978)방법과 Feng(2000)방법이 있다. Wood 등(1978)의 방법은 원추 관입깊이와 함수비의 관계를 반대수지에 그리고 관입깊이 2mm일 때의 함수비를 소성한계로 결정한다. Feng(2000)방법은 원추 관입깊이와 함수비의 관계를 양 대수지에 그리고 관입깊이가 3mm일 때의 함수비를 소성한계로 결정한다.

3. 실험

3.1 실험자

실험자에 따른 오차를 최소화 줄이기 위해 연구에 참여한 학생은 4학년으로 토질실험 교과목을 3학년에 이수한 학생 중에서 선발하였다. 선발된 6명의 학생들(A, B, C, D, E, F)은 토질실험 교과목을 1년간 수강하면서 흙을 가지고 다양한 실험을 수행한 경험자이다. 또한 본 실험 실시 전 10회 이상의 예비실험을 통해 실험방법인 Casagrande법과 원추관입시험법에 대하여 익숙해지도록

하였다. 이것은 연구에서 실험자별 실험값의 대표성을 확보하기 위한 선행적인 조치였다.

3.2 시료

연구에 사용한 시료는 파주지역에서 채취한 점성토로서 비중은 2.72이고 입도분포는 Fig. 1과 같다. 이 시료를 이용하여 6명의 학생이 Casagrande법과 원추관입시험법으로 액성한계시험과 소성한계시험을 각각 5회 반복 실시한다. Casagrande법에 의한 액성한계와 속성한계시험은 KS F의 규정에 준하여 시험을 수행하였고, 원추관입시험에 의한 액성한계와 소성한계시험은 BS 규정에 의해 실시하였다. 본 시험에 사용된 점토 재료 자체가 가지고 있는 불확실성은 본 연구에서 배제되었다.

3.3 속련도 평가

본 연구에서는 실험자의 속련도를 평가하기 위하여 Z 점수(Z-score)를 사용했다. Z 점수는 통계학적으로 정규분포를 만들고 개개의 경우가 표준편차상에 어떤 위치를 차지하는지를 보여주는 차원없는 수치로 표준점수, 표준값, Z값(Z-value)이라고도 한다. 즉 Z 점수는 원수치인 x 가 평균에서 얼마나 떨어져 있는지를 나타낸다. Z 점수는 상대적인 값으로서 0에 가까울수록 기준 값과 잘 일치한다는 것을 의미한다. 평가기준은 다음 식 (4)와 같다.

$$Z = \frac{x - X}{s} \quad (4)$$

여기서 x 는 실험값, X 는 평가의 기준값으로 실험자들의 실험값의 평균이고, s 는 실험자들 전체의 표준편차이다.

속련도 평가는 Z 점수에 대하여 $|Z| < 2$ 이면 만족, $2 \leq |Z| \leq 3$ 이면 의심, $|Z| > 3$ 이면 불만족으로 정의

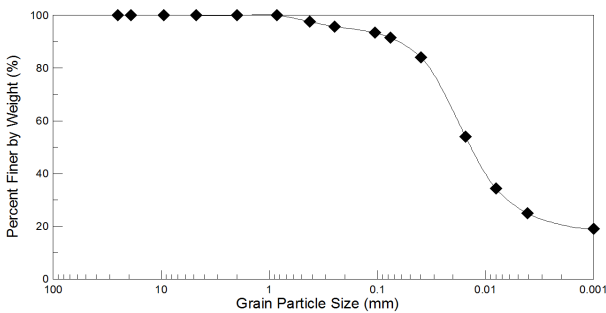


Fig. 1. Grain size distribution curve of the Paju clay

한다. 불만족에 해당하는 Z 점수가 ± 3 한계를 벗어나면 이 참가자는 다른 참가자들보다는 속련도에 문제가 있어 실험방법 보다는 실험자 자체로 인한 실험 오류가 클 수 있음을 의미한다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 Casagrande법에 의해 결정된 액성한계

준비된 시료를 사용하여 6명의 실험자가 Casagrande법으로 각각 5회의 액성한계시험을 반복 실시하여 실험자 별 실험횟수에 따른 액성한계의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 나타난바와 같이 실험자 별 액성한계는 35%에서 38%정도이고 실험자 별 실험횟수에 따른 액성한계는 개인적으로 다소 차이를 보이고 있다. 그리고 실험값의 변화를 보면 실험횟수의 증가에 따라 비례적으로 실험값이 변화하는 경향은 없으며 실험값은 실험 횟수에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

실험자 별 액성한계 값의 평균, 분산, 표준편차는 Table 1에 나타낸바와 같다. 실험자 별 5회의 액성한계 시험 결과를 개인별 평균 액성한계로 나타내면 D실험자가 실험값이 가장 크게 나타나고 C실험자의 실험값이 가장 작게 나타나고 있으며 이들의 차는 2.4%정도 나타나고 있다. 표준편차가 가장 큰 실험자는 A실험자로서 1.1% 정도이고 가장 작은 실험자는 F실험자로서 0.3% 정도를 보이고 있으며 평균 액성한계와 표준편차는 36.7%와 0.58% 정도를 보이고 있다.

Fig. 3은 실험자 별 실험횟수에 따른 속련도 변화를 나타낸 그림이다. 실험자의 속련도를 나타내는 Z 점수

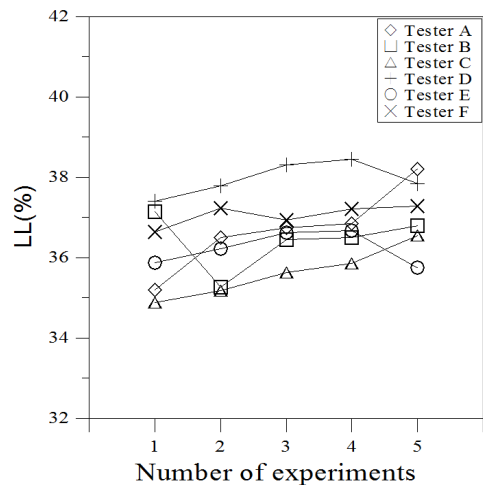


Fig. 2. Test results of liquid limit by Casagrande method

Table 1. Statical analysis on liquid limits obtained from Casagrande method for each tester

	A	B	C	D	E	F	Average
Average	36.7	36.4	35.6	38.0	36.2	37.1	36.7
Variance	1.2	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	
Standard deviation	1.1	0.7	0.6	0.4	0.4	0.3	0.58

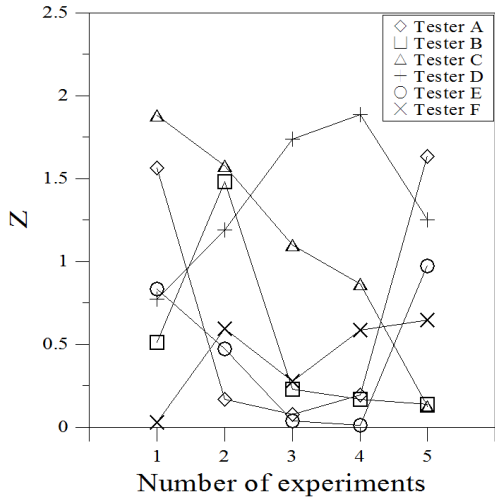


Fig. 3. Proficiency of experiments for each tester in liquid limit through Casagrande method

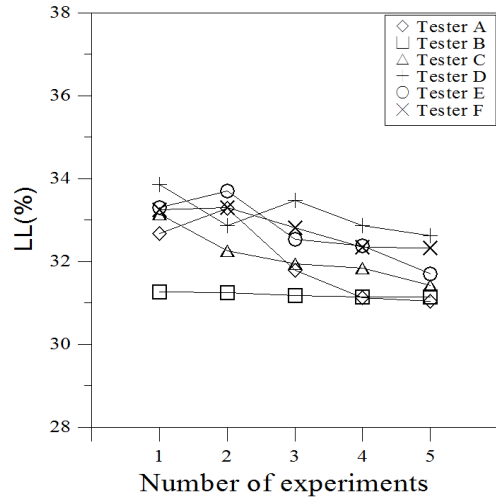


Fig. 4. Test results of liquid limit by fall cone test

가 2보다 작아 모든 실험자가 숙련도 만족에 해당하는 것으로 나타났다. 실험횟수의 증가에 따라 숙련도의 변화를 보면 실험횟수의 증가 할수록 비례적으로 증가하는 경향은 보이지 않고 있다.

4.2 원추관입시험법에 의해 결정된 액성한계

Casagrande법에 사용한 동일한 시료와 동일한 6명의 실험자가 원추관입시험으로 각각 5회의 액성한계실험을 반복 실시하여 실험자 별 실험횟수에 따른 액성한계의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난바와 같이 실험자 별 액성한계 값은 32.1%에서 33.1%정도로 실험자별 실험횟수에 따른 액성한계는 개인적으로 다소 차이를 보이고 있고 실험값의 변화를 보면 실험횟수의 증가함에 따라 비례적으로 실험자별 실험값의 차이가 작아지고 있는 경향을 보이고 있다.

실험자 별 5회의 개인별 평균 액성한계 값은 D실험자가 가장 크게 나타나고 B실험자의 실험값이 가장 작게 나타나고 있다. 그리고 실험자 별 액성한계 값의 평균, 분산, 표준편차의 분포는 Table 2에 나타내었다. 표준편차가 가장 큰 실험자는 A실험자로서 1.0%정도이고 가장 작은 실험자는 B실험자로서 0.1%정도를 보이고 있으며 평균 액성한계와 표준편차는 32.3%와 0.58% 정도를 보이고 있다.

Fig. 5는 실험자 별 실험횟수에 따른 숙련도 변화를 나타낸 그림이다. 실험자의 숙련도를 나타내는 Z 점수가 2보다 작아 숙련도 만족에 해당하는 것으로 나타났다. 숙련도의 변화를 보면 실험횟수의 증가에 따라 비례적으로 숙련도가 변화하는 경향은 보이지 않고 있으나 숙련도의 변화 폭은 실험횟수의 증가에 따라 다소 양호해지는 경향을 보이고 있다. 또한 Casagrande법에 의한 액성한계 값의 평균은 36.6%이고 원추관입시험방법에 의한 액성한계 값의 평균은 32.2%로서 평균 4.4%의 차이를 보이고 있다.

Table 2. Statical analysis on liquid limits obtained from fall cone test for each tester

	A	B	C	D	E	F	Average
Average	32.0	31.2	32.1	33.1	32.6	32.8	32.3
Variance	1.0	0.0	0.5	0.3	0.5	0.2	
Standard deviation	1.0	0.1	0.7	0.5	0.7	0.5	0.58

Fig. 6은 Casagrande법으로 실시한 실험자별 액성한계와 원추관입시험으로 실시한 실험자별 액성한계의 관계를 표시한 그림이다. 그림에서 실선은 두 실험방법으로 얻은 실험결과를 선형관계로 표현한 선이고 파선은 실험값의 분포를 표현한 선으로서 파선은 실선을 중심으로 $\pm 2\%$ 정도의 편차를 보인다. 그리고 Casagrande법으로 얻은 액성한계 값은 원추관입시험으로 얻은 값보다 약 4% 정도 큰 것으로 나타났다. 실험자별 다소의 차이는 있지만 두 시험방법의 관계를 식으로 표현하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$LL = LL_C + 4 \quad (5)$$

4.3 1점법에 의한 액성한계

4.3.1 Casagrande법

Fig. 7은 Casagrande법으로 액성한계시험을 실시하여 얻은 액성한계 값과 1점법으로 얻은 액성한계 값의 비 ($LL/LL_{onepoint}$)를 종축에 나타내고 횡축에는 낙하횟수(N)을 표시한 나타낸 그림이다. 액성한계 비가 0.8에서 1.2사이에 분포되었으며 실험자에 따라 약간의 차이

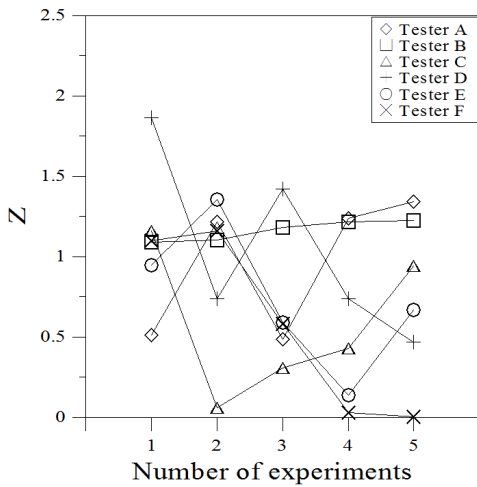


Fig. 5. Proficiency of experiments for each tester in liquid limit through fall cone test

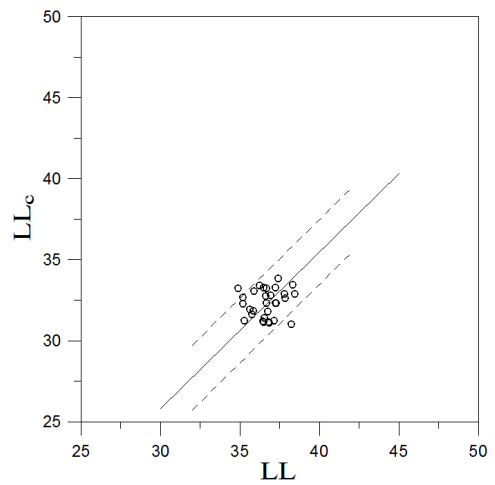


Fig. 6. Relationship of liquid limits between Casagrande method and fall cone test

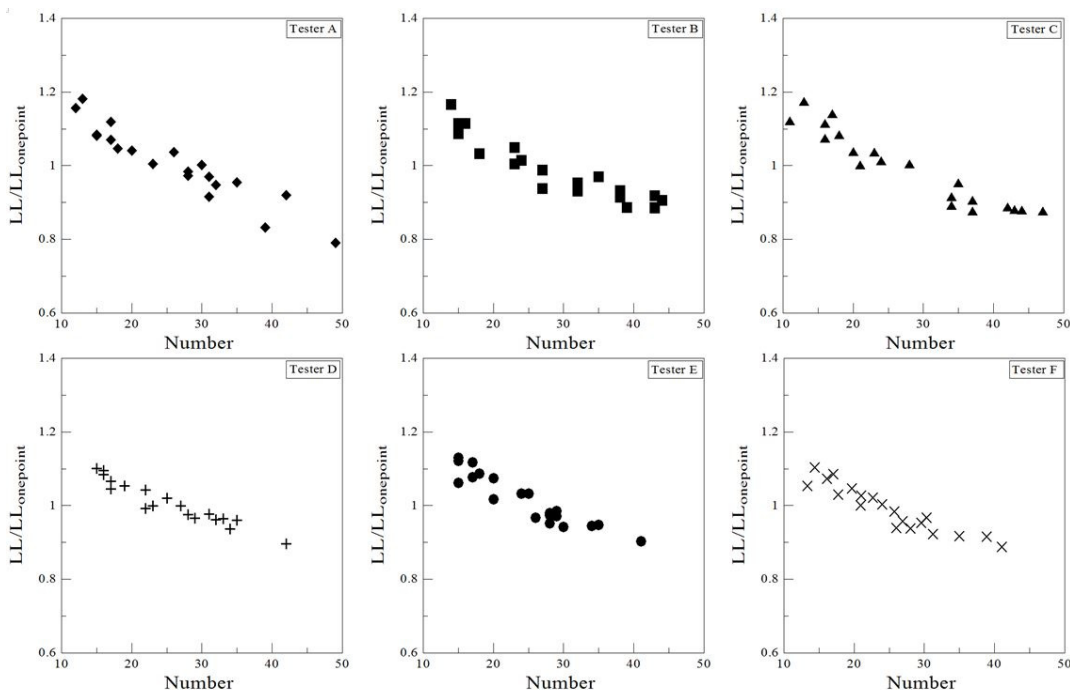


Fig. 7. Liquid limit ratio for each tester by Casagrande's one point method

는 있지만 낙하횟수 10회보다 작은 경우와 40회 이상인 경우는 액성한계 비가 1.1이상과 0.9이하를 나타내고 있고 낙하횟수 20회에서 30회 사이 일 때 액성한계비가 1에 근접하고 있다. 그러므로 1점법을 이용하여 액성한계를 결정할 경우는 낙하횟수가 20~30정도인 경우의 함수비를 이용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

4.3.2 원추관입시험

Fig. 8은 실험자별 원추관입시험을 실시하여 얻은 액성한계 값과 Sherwood가 제안한 1점법으로 얻은 액성한계 값의 비($LL_c/LL_{c-onepoint}$)를 종축에 나타내고 횡축에는 관입깊이(penetration)를 표시한 그림이다. A 실험자의 액성한계 비는 0.9에서 1.1정도이고 다른 실험

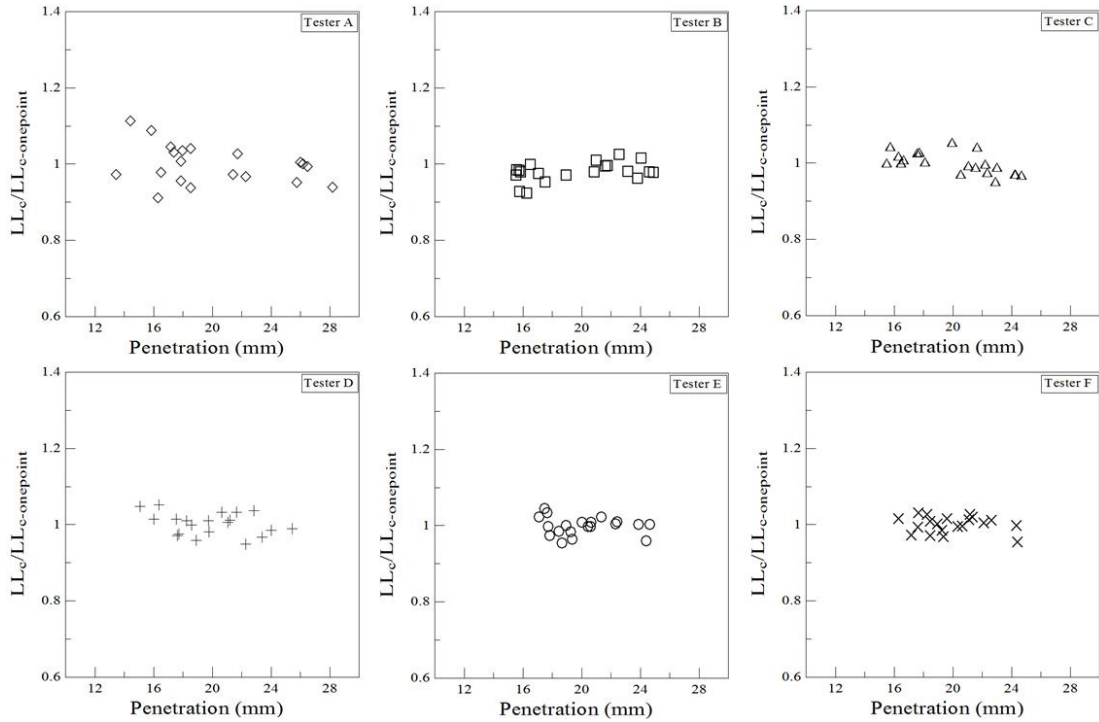


Fig. 8. Liquid limit ratio for each tester by Sherwood's one point method

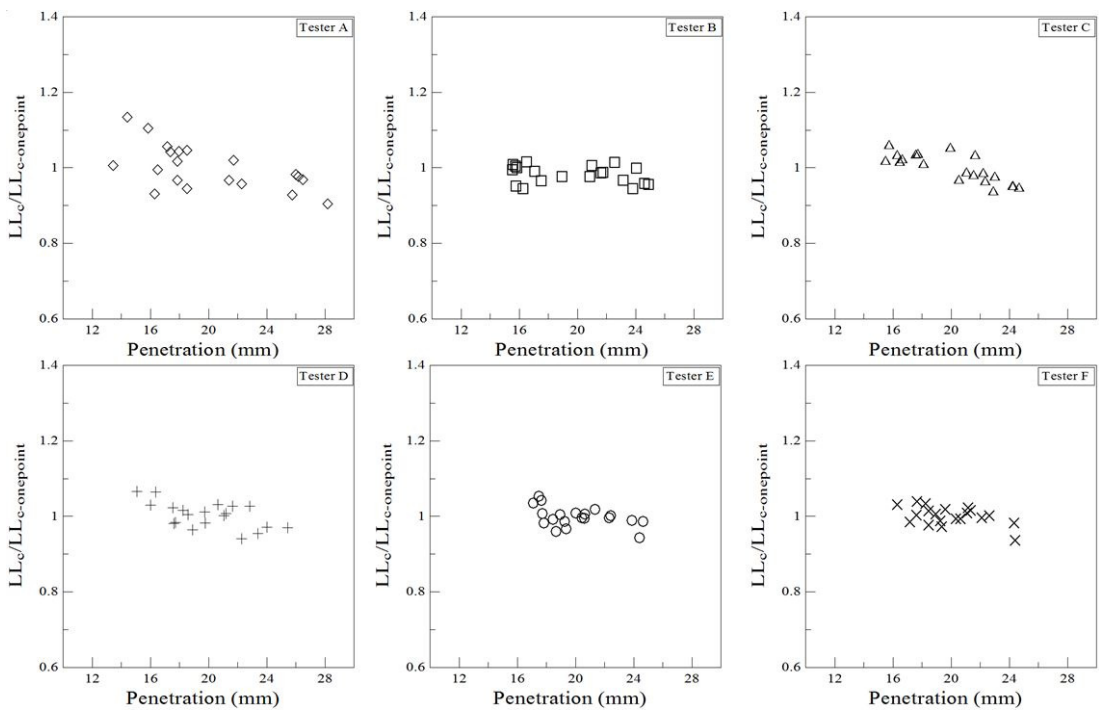


Fig. 9. Liquid limit ratio for each tester by Nagaraj's one point method

자의 액성한계 비는 1.0에 근접한 값을 보이고 있다. 그리고 원추의 관입 깊이에 큰 영향 없이 모든 관입깊이에서 액성한계비가 1에 근접하고 있다.

Fig. 9는 원추관입시험을 실시하여 얻은 액성한계 값과 Nagaraj가 제안한 1점법으로 얻은 액성한계 값의 비를 그림 8과 같은 방법으로 나타낸 그림으로 액성한계비가 0.9에서 1.2 사이에 분포되었으며 관입깊이에 상관 없이 액성한계비가 1에 근접한 결과를 보인다.

이상의 결과로 보아 원추관입시험 결과를 이용하여 두 1점법으로 액성한계를 결정 시 Nagaraj 1점법보다 Sherwood 1점법으로 액성한계를 결정함이 정도가 다소 높은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 Sherwood의 1점법과 Nagaraj의 1점법 모두 통상의 시험 관입깊이에서 유용한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

4.4 소성한계

4.4.1 Casagrande법에 의해 결정된 소성한계

준비된 시료를 사용하여 6명의 실험자가 Casagrande 방법으로 각각 5회의 소성한계시험을 실시하여 실험자 별 실험횟수에 따른 소성한계의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 실험자 별 소성한계는 20%에서 24%정도이고 실험자 별 실험횟수에 따른 소성한계는 개인적으로 다소 차이를 보이고 있다. 그리고 실험값의 변화를 보면 실험

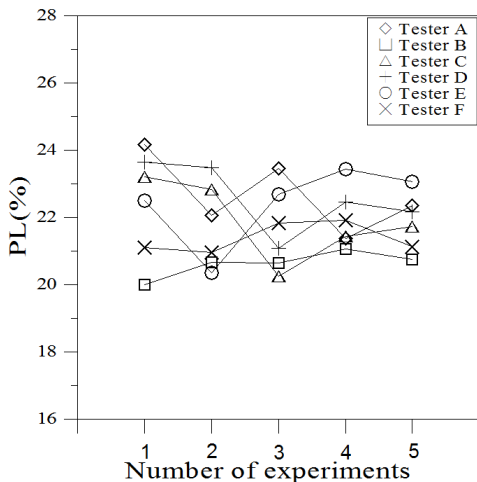


Fig. 10. Test results of plastic limit by Casagrande method

횟수의 증가에 따라 실험값의 변화 폭이 다소 작아지는 경향을 보이고 있다.

개인별 평균 소성한계는 A실험자의 실험값이 가장 크게 나타나고 B실험자의 실험값이 가장 작게 나타나고 있으며 이들의 차는 2.1%정도 이다. 실험자 별 소성한계 값의 평균, 분산, 표준편차는 Table 3에 나타낸바와 같으며 표준편차가 가장 큰 실험자는 A실험자로서 1.2%정도이고 가장 작은 실험자는 F실험자로서 0.4%정도를 보이고 있으며 평균 소성한계와 표준편차는 21.9%와 0.92%정도를 보이고 있다.

Fig. 11은 실험자 별 실험횟수에 따른 숙련도 변화를 나타낸 그림이다. 실험자의 숙련도를 나타내는 Z 점수가 2보다 작아 모든 실험자가 숙련도 만족에 해당하는 것으로 나타났다. 실험횟수의 증가에 따라 숙련도의 변화를 보면 실험횟수가 증가 할수록 숙련도가 약간 좋아지는 경향을 보인다.

4.4.2 원추관입시험법에 의해 결정된 소성한계 : Wood법

Fig. 12는 6명의 실험자가 원추관입시험을 이용하여 Wood방법으로 5회의 소성한계 시험 결과를 나타낸 그림으로 소성한계 값은 20에서 23.7% 정도 나타났다. 실험자별 소성한계는 실험횟수가 증가함에 따라 평균 소성한계 값에 근접해 가는 경향을 보이고 있다. 그리고

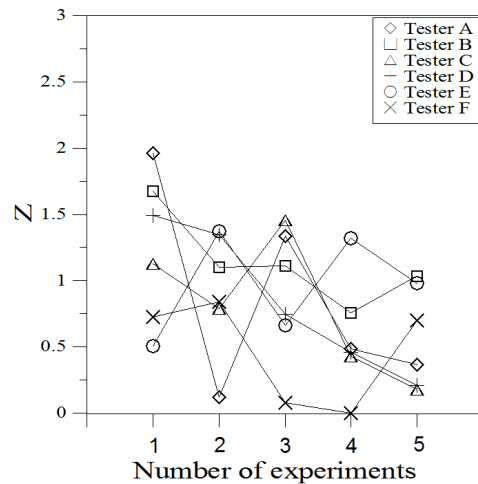


Fig. 11. Proficiency of experiments for each tester in plastic limit through Casagrande method

Table 3. Statal analysis on plastic limit obtained from Casagrande method for each tester

	A	B	C	D	E	F	Average
Average	22.7	20.6	21.9	22.6	22.4	21.4	21.9
Variance	1.4	0.1	1.4	1.1	1.4	0.2	
Standard deviation	1.2	0.4	1.2	1.0	1.2	0.5	0.92

실험자 별 평균 소성한계 값은 C실험자가 22.5%로 가장 크고 F실험자가 21.0%로 가장 작게 나타났으며 개인 별 평균소성한계, 분산 표준편차는 Table 4와 같다. 실험자별 평균소성한계 값은 21%에서 22.5%이고 실험자 간 차이가 1.5%정도이며 전체 평균 소성한계는 21.8%이다. 분산은 0.1%에서 1.6% 정도를 나타내고 있고 표준편차는 0.4에서 1.3정도의 편차를 보이고 있으며 표준편차의 평균은 0.85정도이다.

Fig. 13은 실험자 별 실험횟수에 따른 숙련도 변화를

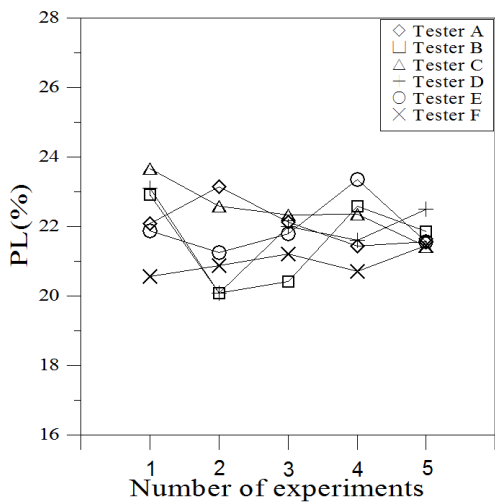


Fig. 12. Test results of plastic limit by Wood method

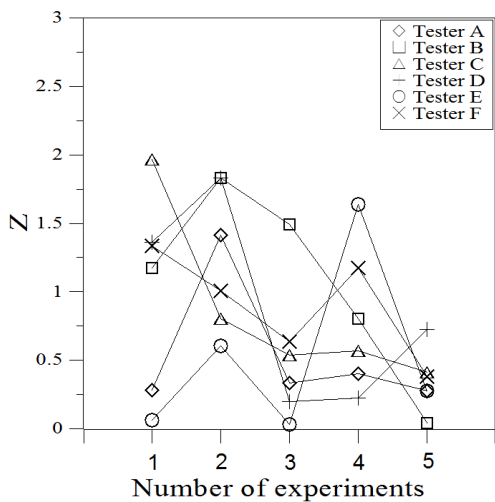


Fig. 13. Proficiency of experiments for each tester in plastic limit through Wood method

나타낸 그림으로 실험자의 숙련도를 나타내는 Z 점수가 2보다 작아 모든 실험자는 숙련도 만족에 해당하는 것으로 나타났다. 실험횟수의 증가에 따라 숙련도의 변화를 보면 실험횟수가 증가 할수록 개인적 차이는 다소 있지만 숙련도가 점점 좋아지는 경향을 보인다.

4.4.3 원추관입시험법에 의해 결정된 소성한계 : Feng법

Fig. 14는 6명의 실험자가 원추관입시험기를 이용하여 Feng방법으로 5회의 소성한계 실험 결과를 나타낸 그림으로 소성한계 값은 20에서 23.8% 정도 나타나고 있다. 실험자별 소성한계는 실험횟수가 증가함에 따라 평균 소성한계 값에 근접해 가는 경향을 보이고 있다. 실험자 별 평균 소성한계 값은 C실험자가 22.5%로 가장 크고 F실험자가 21.0%로 가장 작게 나타났으며 개인 별 평균소성한계, 분산 표준편차는 Table 5와 같다. 실험자별 평균소성한계 값은 21%에서 22.5%이고 실험자 간 차이가 1.5%정도이며 전체 평균 소성한계는 21.9%이다. 분산은 0.1%에서 1.6% 정도를 나타내고 있고 표준편차는 0.4에서 1.3정도의 편차를 보이고 있으며 표준편차의 평균은 0.95정도이다.

Fig. 15는 실험자 별 실험횟수에 따른 숙련도 변화를 나타낸 그림으로 실험자의 숙련도를 나타내는 Z 점수가 2보다 작아 모든 실험자는 숙련도 만족에 해당하는 것

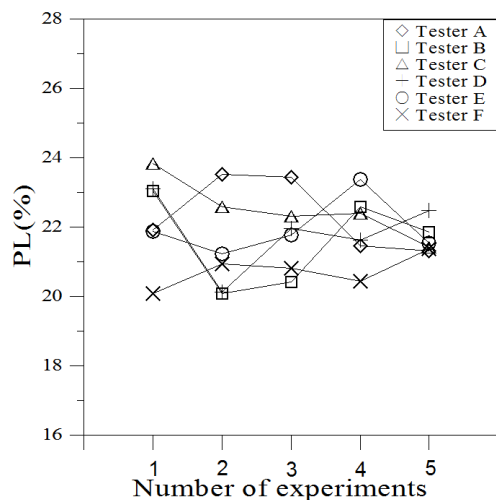


Fig. 14. Test results of plastic limit by Feng method

Table 4. Statal analysis on plastic limit obtained from Wood method for each tester

	A	B	C	D	E	F	Average
Average	22.1	21.5	22.5	21.9	22.0	21	21.8
Variance	0.5	1.6	0.6	1.3	0.7	0.1	
Standard deviation	0.7	1.3	0.8	1.1	0.8	0.4	0.85

Table 5. Statical analysis on plastic limit obtained from Feng method for each tester

	A	B	C	D	E	F	Average
Average	22.3	21.6	22.5	21.9	22.0	21	21.9
Variance	1.1	1.7	0.8	1.3	0.7	0.2	
Standard deviation	1.1	1.3	0.9	1.1	0.8	0.5	0.95

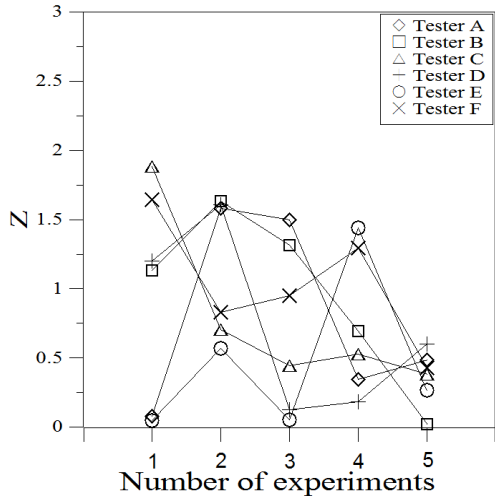


Fig. 15. Proficiency of experiments for each tester in plastic limit through Feng method

으로 나타났다. 실험횟수의 증가에 따라 숙련도의 변화를 보면 실험횟수가 증가 할수록 개인적 차이는 있지만 숙련도가 점점 좋아지는 경향을 보인다.

Wood법과 Feng법에 의한 소성한계는 소성한계 결정 방법의 차이 때문에 서로 차이를 보이고 있으나 두 방법 모두 실험자에 의한 오차가 매우 작고 신뢰할 만한 값을 보이고 있으므로 두 방법 모두 소성한계 결정에 유용한 것으로 판단된다.

4.4.4 Casagrande와 원추관입시험의 상관성

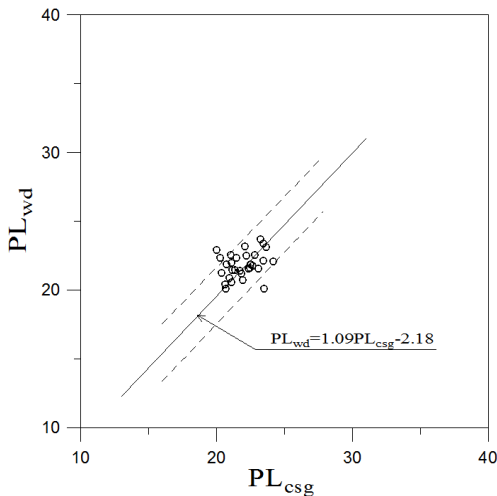
Fig. 16(a)는 Casagrande실험으로 실시한 실험자별 소성한계와 Wood방법으로 실시한 실험자별 소성한계의 관계를 나타낸 그림이다. 모든 실험자의 시험결과가 ± 2% 정도의 편차를 보이고 있으며 Casagrande법에 의한 소성한계(PL_{csg})와 Wood 법에 의한 소성한계(PL_{wd})에 관한 상관관계식은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$PL_{wd} = 1.09PL_{csg} - 2.18 \quad (6)$$

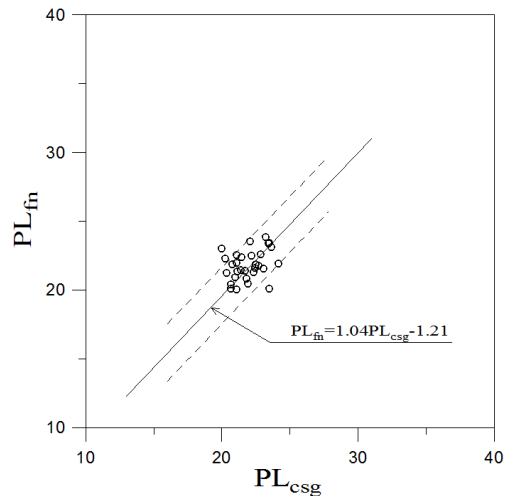
Fig. 16(b)는 Casagrande실험으로 실시한 실험자별 소성한계와 Feng방법으로 실시한 실험자별 소성한계의 관계를 나타낸 그림이다. 모든 실험자의 시험결과가 ± 2% 정도의 편차를 보이고 있으며 Casagrande법에 의한 소성한계(PL_{csg})와 Feng법에 의한 소성한계(PL_{fn})에 관한 상관관계식은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$PL_{fn} = 1.04PL_{csg} - 1.21 \quad (7)$$

이상의 결과로 보아 Casagrande법으로 얻은 소성한계 값은 원추관입시험으로 얻은 값보다 약 1~2% 정도 큰 것으로 나타났다.



(a) Wood vs. Casagrande



(b) Feng vs. Casagrande

Fig. 16. Relationship of plastic limit between Casagrande method and Wood & Feng methods

5. 결 론

본 연구에서는 점토의 액성한계와 소성한계 결정에 있어 시험법과 실험자의 영향을 알아보았다. 사용된 시험법은 Casagrande법과 원추관입시험법이며 비슷한 숙련도를 가진 6명의 실험자가 시험 참여하였다. 개인별 5회의 반복 시험의 결과와 실험자에 따른 시험의 결과를 통계학적으로 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 액성한계

Casagrande법에 의한 실험자 별 액성한계는 35%에서 38%이고 원추관입시험법에 의한 실험자 별 액성한계 값은 32.1%에서 33.1%정도로 나타나 원추관입시험법으로 액성한계를 결정하는 것이 좀 더 안정적인 값을 얻을 수 있다.

Casagrande법의 숙련도는 실험횟수와 아무런 관계가 없는 반면, 원추관입시험법의 숙련도는 실험횟수의 증가에 따라 다소 양호해지는 경향을 보이고 있어 원추관입시험법으로 액성한계를 결정하는 것이 좀 더 안정적인 값을 얻을 수 있다.

Casagrande 1점법에 의한 액성한계 비는 0.8~1.2이고, 원추관입시험법에 의한 Sherwood의 1점법으로 얻은 액성한계 비는 0.9~1.1이고 Nagaraj의 1점법으로 얻은 액성한계 비는 0.9~1.2에 분포되어 원추관입시험법으로 액성한계를 결정하는 것이 좀 더 안정적인 값을 얻을 수 있다. 특히 Sherwood의 1점법 사용 시 정도가 다소 높은 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

2) 소성한계

Casagrande법과 원추관입시험법의 Wood법과 Feng법에 의한 소성한계는 액성한계에 비해 실험자에 의한 차이가 적게 나타나고, 두 방법 모두 개인별 소성한계는 실험횟수가 증가함에 따라 평균 소성한계 값에 근접해 가는 경향을 보이고 있으며 숙련도의 변화도 실험횟수가 증가 할수록 개인적 차이는 있지만 숙련도가 점점 좋아지는 경향을 보였다.

Wood법과 Feng법에 의한 소성한계는 소성한계 결정 방법의 차이 때문에 서로 차이를 보이고 있으나 두 방법 모두 실험자에 의한 오차가 매우 작고 신뢰할 만한 값을 보이고 있어 두 방법 모두 소성한계 결정에 유용한 방법이라 할 수 있다.

참고문헌 (References)

1. British Standards Institute (1975), *Methods of Test for Soils for Engineering Purposes*, London.
2. CAN/BNQ (1986), *Soils-Determination of Liquid Limit by the Swedish fall Cone Test Penetrometer Method and Determination of the Plastic Limit*, Canadian Standards Association and Bureau de Normalization de Quebec, CAN/BNQ 2501-092-M-86.
3. Feng, T.W. (2000), "Fall-Cone Penetration and Water Content Relationship of Clay", *Geotechnique*, Vol.50, No.2, pp.181-187.
4. Hansbo, S. (1957), "A New Approach to the Determination of Clay by the Fall Cone Test, in Proceeding", *National Swedish Geotechnical Institute*, No.14, pp.5-47.it
5. Ishihara, K. and Koseki, J. (1989), "Cyclic Shear Strength of Fines-containing Sands", *Earthquake Geotechnical Engineering, Proceedings of the Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response, 12th ICSMFE*, Rio de Janeiro, Brasil, pp.101-106.
6. 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 Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 17, No.2, pp.80-85.
7. Kim, M.A. (2005), *A Study on Liquid Limit and Plastic Limit of Cohesive Soil in Western Gyengnam by Fall Cone Test*, Master Thesis, Gyeongsang National University, pp.1-11.
8. Kim, S.-C., You, N.-J., and Lee, S.-D. (2000), "Relation between the Liquid Limit by Casagrande's Method and Fall Cone Test", *Conference Proceeding of Korean Society of Civil Engineers (II)*, pp.233-236.
9. Leroueil, S. and Le Bihan J.P. (1996), "Liquid Limits and Fall Cones", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33(5), pp.793-798.
10. Lim, H.-M. (2014), "A Study on Consolidation Characteristics of Remolded Clay due to the Liquid Lim", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.15, No.5, pp.67-74.
11. Nagaraj, T.S. and Jayadev, M.S. (1981), "Re-Examination of On-Point Method of Liquid Limit Determination", *Geotechnique*, Vol.31, No.3, pp.413-425.
12. Sherwood, P.T. and Riley, M.D. (1970), "An Investigation of Cone-Penetrometer Method for Liquid Limit", *Geotechnique*, Vol.20, pp.203-208.
13. Sowers, G. F., Vesic, A., and Grandolfi, M. (1960), "Penetration Tests for Liquid Limit", *ASTM Special Technical Publication No. 254*, pp.216-224.
14. Vasilev, A.M. (1949), *Basic Principles of the Methods and Techniques of Laboratory Determination of Physical Soil Properties*, Referred by somers et al. (1959).
15. Wood, D.M. and Wroth, C.P. (1978), "The Use of the Cone Penetrometer to Determine the Plastic Limit of Soils", *Ground Engng*, Vol.11, No.3, pp.37.
16. You, J.-S., Lee, K.-I., Lee, J.-H., and Chun, W.-J. (2003), "A Study on Liquid Limit Results by Dynamic and Static Liquid Limit Tests", *Conference Proceeding of The Korean Society of Agricultural Engineers*, pp.207-210.

Received : February 12th, 2016

Revised : May 6th, 2016

Accepted : February 7th, 2017