

정확한 소성한계 측정을 위한 새로운 실험법 제안

고재민*, 이병석
전북대학교 토목공학과

The proposal on the new method for accurate to measure the plastic limits

Jae-Min Ko*, Byung-Suk Lee

Division of Civil engineering, Chonbuk University

요 약 지반조사에서 지반재료 특성의 판단은 매우 중요하다. Casagrande는 재료적 특성을 이용하여 흙을 분류하였다. 액·소성한계 시험은 흙의 기본적인 정보를 얻기 유용하며 실트와 점토를 분류하는 효과적인 방법과 재료 특성인 전단강도, 수축, 팽창 등의 정보를 제공한다. 액성한계와 다르게 소성한계는 시험절차의 모호성으로 많은 지반 공학자 및 기술자들이 시험결과에 의문을 제기하고 있다. 이를 해결하기 위해 낙하에너지를 이용한 새로운 소성한계 측정법을 제안하였다. 본 연구에서는 새로운 소성한계측정법의 정확성을 검토하기 위하여 새로운 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트를 각각 일정비율로 혼합하고 국내 서해안 일대의 시료를 채취하여 소성한계 측정법을 종래 방법과 비교 하였다. 비교 실험을 통한 검토결과 새로운 시험법의 시험값은 기존의 thread rolling 시험의 시험값의 오차 범위가 10%에서 약 2%의 차이로 시험의 재현성이 높으며 기존 소성한계 시험값의 기울기와 차이가 0.11519 ~ 0.1925로 거의 시험의 결과 값이 유사 또는 일치하고 있음을 알 수 있었다. 또한 새로운 시험법을 보다 간편하게 적용할 수 있도록 일점법을 제안하였다.

Abstract An examination of the characteristics of the ground material in is very important in a ground investigation. Casagrande classified soil using the material properties of soils. The liquid-plastic limit test is useful for obtaining basic information of soil, and is an effective method for classifying silt and clay, as well as the material properties, such as shear strength, shrinkage, and expansion. Unlike the liquid limit test, the plasticity limit test is due to the ambiguity of the test procedure. Many geotechnical engineers and scholars have questioned the test results. In this study, a new plasticity limit method was used to compare with the thread rolling method with kaolinite, ilite and bentonite at a certain ratio, and samples were collected from the west coast of Korea. As a result of the comparison, the test value of the new test method showed high reproducibility because the error range of the test value of the conventional thread rolling test was only 10% but the error range of the new test values decreased to 2%. The difference in the slope of the existing plasticity test values was 0.1519 ~ 0.1925, and the results of the test were similar or coincided with each other. Aone - point method was proposed to make it easier to apply the new test method.

Keywords : Atterberg Limit, consistency limit, Fall cone test, Plastic limit, Thread Rolling

1. 서론

액성한계와 소성한계는 다양한 실험법을 통해 얻을

수 있다. 국내에서 액성한계의 측정은 Casagrande가 제안한 KS F 2303을 이용한 기계적인 실험이 이루어지고 있으며 측정 중 오차의 발생의 가능성은 그다지 높지 않다.

*Corresponding Author : Jae-Min Ko (Chonbuk Univ.)

Tel: +82-10-2402-1596 email:gojaemin@naver.com

Received March 12, 2018

Revised (1st April 25, 2018, 2nd May 29, 2018)

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

반면, 소성한계 측정법인 KS F 2304(Thread Rolling, TH) 실험은 작업자의 숙련도에 의존하고 Rolling 과정에서의 압력차이, Rolling 속도, Thread의 구조, 실험절차의 모호성으로 지반 공학자 및 기술자들은 실험 결과에 많은 문제점을 지적하고 있다.

지반의 역학적 조사에서 조사의 크기, 종류에 관계없이 재료 특성의 판단은 중요하다. Casagrande는 흙의 재료적 특성을 이용하여 흙을 처음 분류하였고, 이후 역학적 특성과 재료 특성 사이의 관계를 보다 더 확고하게 구분하는 시도가 몇몇 연구자들에 의해 시도되었다. 액소성한계 실험은 흙의 기본적인 거동에 대한 정보를 얻기에 유용하며, 실트와 점토를 분류하는 효과적인 방법을 제시하며, 재료 특성인 전단강도, 수축, 팽창과 같은 역학적 특성에 관한 정보를 제공한다.

현재 국내에서는 많은 문제점을 지적받고 있는 KS F 2304만이 소성한계 측정법으로 규정화 되어있으며, 정확한 소성한계 측정의 대안으로 제안되는 Fall-cone 실험법에 대한 규정은 해외 다수의 국가와는 다르게 KS규정으로 등록되어 있지 않으며 이에 따른 연구 자료 없다. 때문에 새로운 실험법을 이용하여 정확한 소성한계 측정을 한다면 흙의 분류를 보다 정확히 할 수 있어 다양한 역학적 특성들에 대해 확립할 수 있으며, 국내 지반공학의 발전에 기여할 것으로 생각된다.

1.1 연구 연혁

BS 1377 Part 1 (BSI 1990)에서는 점성토에서의 액성한계와 소성한계 측정법에 대해 규명하였다. 실험 재료는 425 μ m 체가름 한 시료를 사용하며, Fall-cone 실험 혹은 콘 관입실험으로 액성한계 측정에 널리 사용되고 있다. 액성한계는 중량 80g 선단각 30°의 콘을 사용하였을 때 시료에 20mm를 관입한 함수비로 정의하고 있다. 소성한계는 임의의 함수비인 관입량-함수비 관계에서 얻어진다.

소성한계 측정을 위한 실험은 여러 가지 실험법이 제안되고 있으나 현재 Casagrande(1958)이 제안한 방식을 주로 사용한다. 이 방법은 Thread Rolling(TH)라 불리고, 다공관에 흙 시료를 굴러 직경 3mm의 가는 실 모양으로 만들었을 때 파괴될 때의 함수비가 소성한계라 정의하고 있다. 위의 소성한계 실험법은 실험자의 주관적 판단이 중요하며 많은 경험을 요한다. 주관적 판단에 따르기 때문에 많은 학자들은 위 실험의 신뢰성에 많은 의

문을 제기하고 있다[1], [2]. 또한, 동일 시료에 대해 Road Research Laboratory뿐 아니라 다양한 시험기관의 8명의 실험자의 소성한계 측정 결과를 비교한 결과 12% 이상의 차이를 보이고 있으며, 이는 비배수전단강도와 흙의 분류에 중요한 영향을 미친다고 하였다[3].

수많은 연구자들은 정확한 소성한계 측정을 위해 많은 시도가 이루어 졌으며 몇몇은 액성한계 측정에 사용되는 Fall-cone 실험을 이용하는 방법을 연구하였다[4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. 변위 제어 방식으로 소성한계의 비배수 전단강도는 110 ~ 170kPa을 갖는다고 하였고[8], 이는 변위 제어 방법으로 얻은 것과 다른 점토에 대한 소성한계의 값을 나타내지만 콘의 질량에 대해 정확한 값은 주어지지 않았다[9]. Harrison(1988)은 80g의 콘을 사용하여 액성지수와 5 ~ 14mm의 관입량의 대수 눈금 관계의 추세선을 이용하여 2mm의 관입량의 함수비를 통해 소성한계를 얻을 수 있다고 하였다[11]. Feng(200)은 함수비와 관입량을 대수 눈금에 적용하고 추세선을 이용하여 2mm의 관입량에서 함수비를 통해 소성한계를 얻을 수 있다고 하였다[6]. Sivakumar(2009)는 준정적(quasi-static) 방법을 사용하여 54N의 힘을 가한 Fall-cone 시험기를 사용하여, 20mm의 관입량의 함수비를 통해 소성한계를 얻을 수 있다고 하였다[9].

1.2 이론적 배경

Wroth & Wood(1978)은 동적 하중에서의 비배수 전단강도와 관입량의 관계를 아래와 같이 나타내었다.

$$\frac{C_u d^2}{w} = k(\alpha, \chi) \quad (1)$$

여기서 w는 콘의 질량을 나타내며, α 는 콘의 선단각에 따른 콘지수, χ 는 콘과 흙의 마찰에 의한 측정값이다. 만일 χ 가 다양하지 않다고 가정하였을 때 이는 아래와 같은 식으로 제 정립 된다.

$$\frac{C_u d^2}{w} = k_a \quad (2)$$

k_a 는 콘 지수이다. 많은 선행연구자들은 액성한계와 소성한계의 비배수 전단강도를 비교한 결과 100배라는 결론을 얻었다[7], [10], [12], [13]. Sivakumar(2009)는 위의 관계를 이용하여 소성한계의 관입량을 20mm로 바꾸기 위해서는 콘의 무게를 80g에서 8kg이 필요하다고

하였고, 위의 방법이 위험하기 때문에 54N의 하중을 준 정적 상태(quasi-static condition)로 가하여 얻는 방식을 제안하였다.

위의 관계에 따르면 BS1377규정의 30° 각도의 80g의 콘을 소성한계 측정할 때 20mm의 관입량으로 정의한다면 시료의 변형이 유사할 경우 액성한계로 준비된 시료보다 100배 더 변형될 것이다. 따라서, 20mm의 관입량이 소성한계 측정에 사용하기 위해서는 요구되는 콘 관입 에너지는 액성한계에서 사용되는 에너지의 100배 일 것이다. 이 증가된 에너지는 다음과 같은 세가지 방법으로 얻을 수 있다[14].

첫째, 30° 각도의 8kg콘으로 무게를 증가시켜 기존의 Fall - conc 실험과 유사한 방법으로 시료의 Table면에서 낙하시킨다.

둘째, 콘의 무게를 80g으로 유지하고 낙하 거리를 증가시켜 관입시킨다.

셋째, 콘의 무게를 증가시키며, 낙하 거리를 증가시킨다.

첫 번째 제안된 방법인 콘의 무게를 8kg으로 증가시키는 것은 실험의 안정성 문제가 발생한다. 두 번째 제안된 방법으로 낙하 거리를 증가시키기 위해서는 2m의 낙하 거리가 필요하다. 2m의 높이에서 준비된 시료 컵의 정중앙에 자유 낙하시키는 것은 실용적이지 않다. 반면에 콘의 무게와 낙하거리를 동시에 증가시키게 되는 경우 안전성을 높임과 동시에 정확성을 증대시킬 수 있어 효율적인 방법이므로 이는 727g의 질량의 콘을 200mm의 높이에서 낙하시켰을 때 20mm의 관입량이 소성한계라는 결론을 얻었다. 이 관계는 아래와 같이 액성한계와 소성한계의 에너지를 계산하여 얻을 수 있다[14], [15].

$$E_{LL} = m_{LL}gh = 80g \times g \times 20mm \quad (3)$$

$$E_{PL} = 727g \times g \times h \\ = 100E_{LL} = 80g \times g \times 20mm \times 100$$

여기서, m_{LL} = 콘의 질량(g)

g = 중력가속도

h = 콘의 선단으로부터 관입깊이(mm)

본 논문에서는 Kaolinite, Illite, Bentonite를 각 각 10:0, 8:2, 6:4, 4:6, 2:8, 0:10의 비율로 혼합한 시료와 국내 서해안 일대의 시료를 사용하였다. 이론적 근거는 대다수의 연구자들이 제안한 액성한계와 소성한계의 100배 관계를 근거로 제안된 Tefra(2013), Saxena(2016)

이 제안한 새로운 낙하방식의 Fall-cone실험(New Fall-cone test, NFC)과 KS F 2304(Thread Rolling, TH), BS1377 Part 1; BSI, 1990)의 Fall-cone실험을 결과를 비교분석을 통해 정확성을 검토하였으며, NFC 시험기를 사용하여 다수의 실험이 아닌 한가지의 실험을 통해 소성한계를 측정할 수 있는 일점법을 제안하였다.

2. 소성한계 실험

2.1 시료

본 연구에서는 다양한 변화추세를 확인하기 위해 시료를 일정한 비율로 혼합하여 실내 실험을 수행하였다. Bentonite는 엠에스 코퍼레이션사의 것을 사용하였으며, 인도네시아 산 Kaolinite, ㈜메텍스 사의 Illite를 사용하였다. 또한, 국내 서해안 일대의 임의의 7지역에서의 현장시료를 Thin Wall tube를 이용하여 채취하여 실험을 진행하였고, 비중실험과 체가름실험, 비중계실험을 수행하였으며, USCS방법으로 흙을 분류한 결과와 조사위치는 아래의 Fig 1, Table 1와 같다.

Table 1. Specimen classification and properties by uscs

No	Properties	Gs	분류
M1	Bentonite 100%	2.21	CH
M2	Bentonite80% Kaolinite20%	2.29	CH
M3	Bentonite60% Kaolinite40%	2.35	CH
M4	Bentonite40% Kaolinite60%	2.4	CH
M5	Bentonite20% Kaolinite80%	2.52	CH
M6	Kaolinite 100%	2.6	MH
M7	Illite20% Bentonite80%	2.42	CH
M8	Illite40% Bentonite60%	2.52	CH
M9	Illite60% Bentonite40%	2.63	CH
M0	Illite80% Bentonite20%	2.7	CH
M11	Illite 100%	2.85	CL
M12	Kaolinite20% Illite80%	2.74	CL
M13	Kaolinite40% Illite60%	2.67	CH
M14	Kaolinite60% Illite40%	2.64	MH
M15	Kaolinite80% Illite20%	2.6	MH
S1	Gimje-si Seongdeok-myeon	2.62	CL
S2	Buan-gun Boan-myeon	2.42	CL
S3	Seocheon-gun Maseo-myeon	2.64	CL
S4	Muan-gun Samhyang-eup	2.68	CL
S5	Gunsan-si Seongsan-myeon	2.63	CL
S6	Gunsan-Saemangeum	2.72	CL
S7	Hampyeong-gun	2.6	CL

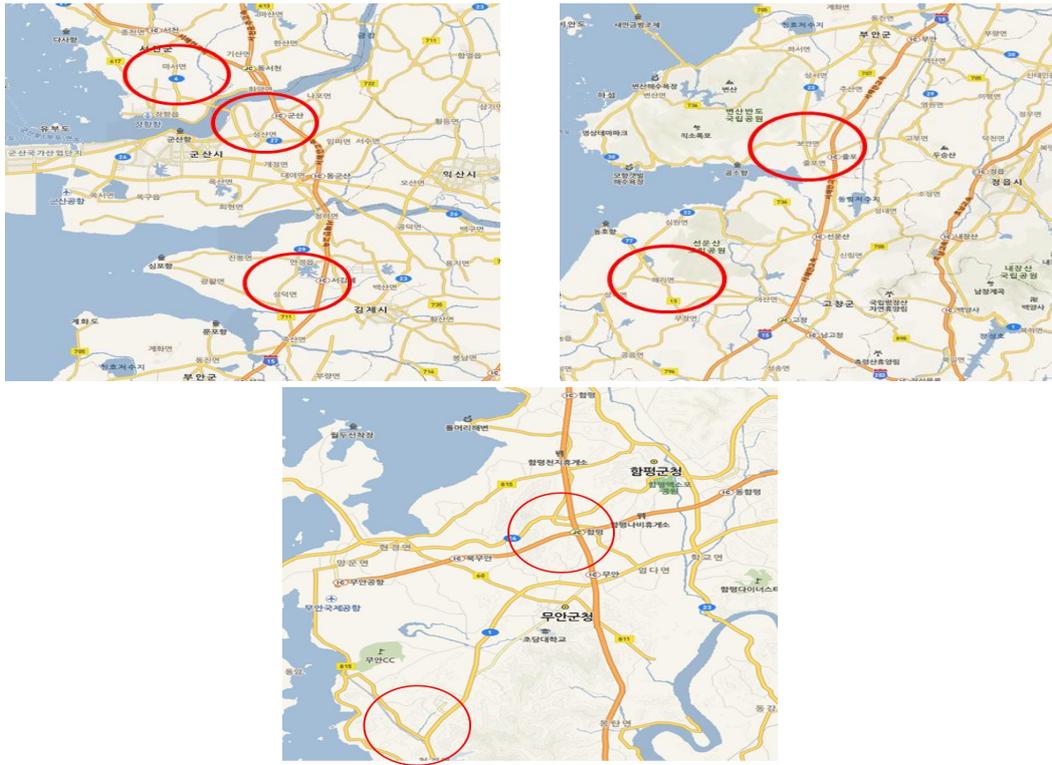


Fig. 1. Specimen sampling location in west coast of Korea

Table 2. Grain - size distribution

	Clay%(<2 μm)	Silt %(2-63μm)	Sand %			
			63-250 μm	250-500 μm	500 μm-1 mm	1mm
M1	84.57	15.43	-	-	-	-
M2	67.73	32.27	-	-	-	-
M3	63.73	36.27	-	-	-	-
M4	59.87	40.13	-	-	-	-
M5	52.50	47.5	-	-	-	-
M6	50.77	49.23	-	-	-	-
M7	64.50	35.5	-	-	-	-
M8	56.62	43.38	-	-	-	-
M9	36.99	63.01	-	-	-	-
M0	36.65	63.35	-	-	-	-
M11	6.64	93.36	-	-	-	-
M12	7.2	92.8	-	-	-	-
M13	8.4	91.6	-	-	-	-
M14	13.62	86.38	-	-	-	-
M15	34.10	65.9	-	-	-	-
S1	17.82	58.5	22.68	0.83	-	-
S2	32.90	62.76	4.34	-	-	-
S3	26.48	51.75	21.77	3.12	-	-
S4	25.10	54.59	20.31	3.74	-	-
S5	4.68	80.52	14.8	4.85	-	-
S6	22.28	75.28	2.44	-	-	-
S7	18.66	43.45	37.89	18.66	-	-

2.2 NFC 시험기기

NFC시험기는 실험자가 쉽게 조작할 수 있으며, 실험자에 따라 실험결과에의 영향을 최소화시키기 위해 제작된 장치이다. 앞선 이론을 근거로 소성한계 측정을 위해 선단각 30°, 무게 727g의 콘을 200mm에서 자유낙하 시킬 때, 소성한계의 관입량은 20mm로 얻을 수 있다. Fig 2는 NFC실험 장치의 도면으로 자유낙하 시 마찰을 최소화시키기 위해 관입봉과 스탠드 사이에는 Ball bearing을 넣어 에너지 손실을 최소화 시켰다. 실험에 사용할 시료는 Feng(2000)이 제안한 방식을 사용하여 Fig 4와 같이 시료컵과 캡을 이용하였다. 이를 사용한 이유는 시료 제작 시 공극이 없이 시료를 제작하기 힘들기 때문에 시료컵 위에 10mm높이의 캡을 씌워 시료를 제작하고, 캡을 제거한 뒤 실패로 자르게 되면 시료컵 크기만큼의 시료를 제작하기 쉽기 때문이다[16].

Fig 3은 NFC 제어장치를 나타내고 있다. 관입량의 변위를 측정하기 위해 Linear Encoder를 사용하여 1/200 초 간격으로 변위를 측정할 수 있게 제작하였다. Linear Encoder에서 획득된 자료는 PC와 연결되어 실시간으로 모니터링 할 수 있으며 PC 프로그램 화면을 통해 제어할 수 있게 제작되었다. PC를 통한 제어는 on/off방식으로 전자석을 사용하여 제어 할 수 있다.

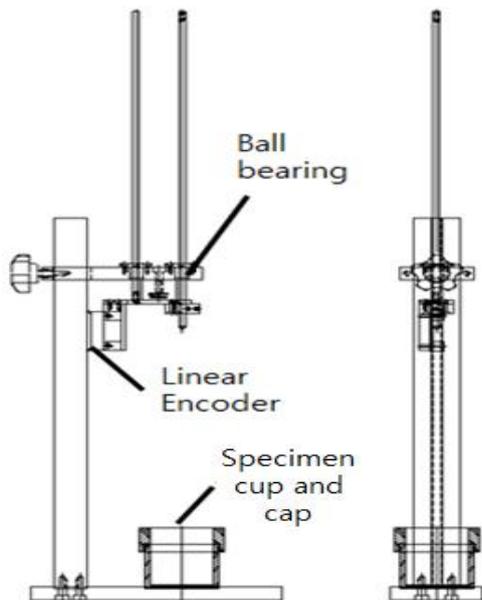


Fig. 2. NFC drawing



Fig. 3. Control Device of NFC



Fig. 4. Specimen cup and cap, rammer

3. 실험결과 및 분석

실험수행에는 500회 이상의 실험의 숙련도가 높은 실험자(E)와 현재 토목공학을 전공으로 하는 재학 중인 임의의 학생 4명(실험자 A, B, C, D)을 대상으로 하였다. 실험자 중 초심자는 실험자 A, 실험자 B, 실험자C 이며 실험자 D의 경우 실험자 E와 비교하여 다수의 경험은 아니지만 약 50실험경험이 있는 실험자를 대상으로 실험을 진행하였다. 실험결과 각 각의 실험자들의 소성한계 측정값은 Table 3과 Fig 5와 같이 나타났다. 전체 실험자들의 평균값은 47.64%로 최대 약 10%정도의 오차를 보이며, 각 실험자들의 결과의 상관계수는 0.235로 재현성이 크게 떨어져 정확한 소성한계 측정에 어려움을 가지고 있다. 숙련자의 결과인 40.97%와 비교하였을 때에는 최대 약 17%의 차이를 나타냈다. 따라서, TH실험은 실험자의 주관적인 판단에 큰 영향을 받으며 실험자의 숙련도에 따라 실험결과 값의 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

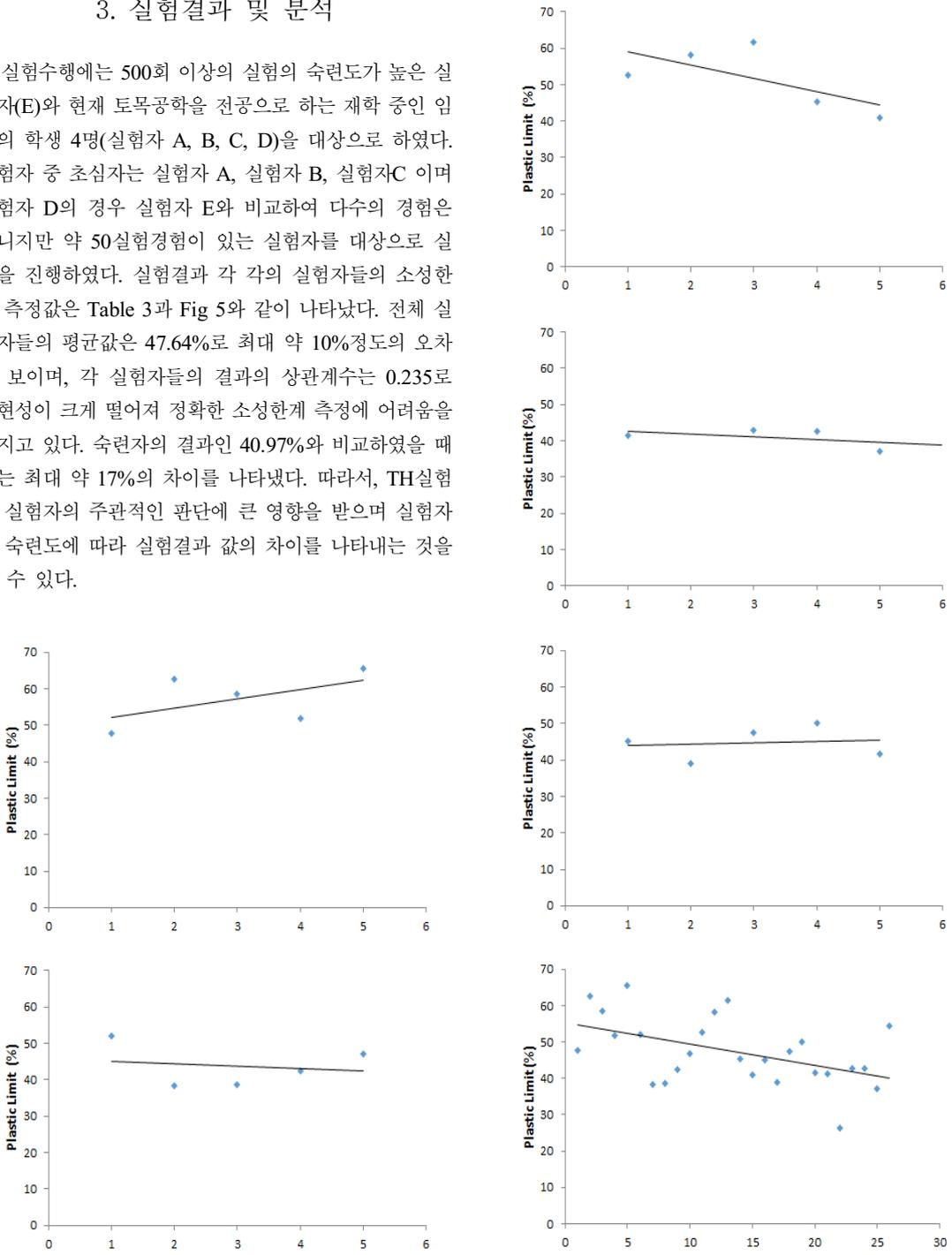


Fig. 5. Thread Rolling(TH) Experiment results by 5 operators at Kaolinite(A, B, C, D, E, Total)

Table 3. Result of Thread Rolling test(Kaolinite)

Sample	Operator	Plastic limit(%)					Average (%)	Standard Deviation
		1	2	3	4	5		
Kaolinite	A	47.62	62.5	58.62	51.85	65.51	57.22	9.572
	B	52.04	38.46	38.71	42.31	46.97	43.7	-3.95
	C	52.54	58.18	61.54	45.24	41.03	51.71	4.06
	D	45.16	38.98	47.37	50	41.67	44.64	-3.01
	E	41.38	-	42.86	42.59	37.04	40.97	-6.68

3.2 NFC 실험결과

실험자에 따른 오차가 큰 문제점을 해결하기 위해 새로운 소성한계 실험법인 NFC실험을 제안하였다. 재현성 및 실험의 신뢰성을 검증하기 위해 기존의 소성한계 측정방법인 KS F 2304(Thread Rolling, TH)과 동일한 실험자 5명을 대상으로 NFC실험을 실시하였다. 비교 결과 TH실험에 비해 NFC실험을 통해 얻은 소성한계의 표준편차는 최대 약 2%의 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 Table 4에 나타내었고, Fig 6에 각 실험자들의 NFC실험 결과를 나타내었다. Fig 6을 통해 실험자 5명의 NFC결과를 종합한 결과 $R^2 = 0.8845$ 로 타났다. 이는 TH실험 종합 결과로 나타난 R^2 값인 0.235와 비교하였을 때 보다 재현성이 높은 것으로 나타났다. 하지만 500회 이상의 숙련된 실험자의 소성한계와는 2.34%의 차이를 나타냄을 알 수 있다.

Table 4. Comparison of NFC and TH (Kaolinite)

Operator	TH	NFC	Standard Deviation		
PL	A	57.22	40.6	-9.6	-1.96
	B	43.7	38.07	3.92	0.57
	C	51.71	38.2	-4.09	0.44
	D	44.64	37.77	2.98	0.87
	E	40.97	38.55	6.65	0.09
Average	47.65	38.64	0	0	

3.3 다양한 소성한계 측정법 비교

현재 제안되고 있는 다양한 소성한계 측정법들의 결과를 NFC실험 결과와 비교하여 검토하여 Table 8에 나타내었다. 정확한 소성한계 측정을 위해 제작한 NFC실험의 정확성 검증을 위해 기존에 소성한계 측정에 널리 사용하고 있는 TH를 기준으로 다양한 측정법의 결과를 비교하였고 이를 Fig 7 ~ Fig 13에 나타내었다. TH의 소성한계 실험은 500회 이상의 숙련도를 갖춘 실험자들

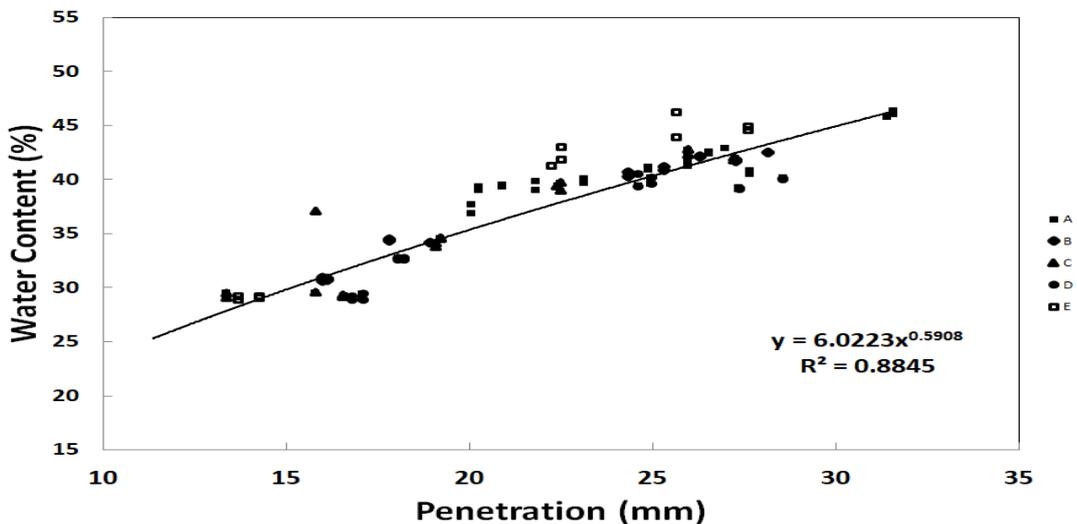


Fig. 6. Experiment results by 5 Operators (Kaolinite)

통해 얻은 소성한계를 사용하였다. Fig 8 ~ Fig 10는 85%이상의 소성한계를 갖는 시료를 포함하여 나타낸 그래프이고 Fig 11 ~ Fig 13는 85%이하의 소성한계의 시료에 대해 나타낸 그래프이다. Table 9는 TH비교하였을 때 각 측정법에 대한 유사성 기울기 차이를 나타낸 표이다. NFC과 TH의 소성한계를 비교한 결과 전체시료의 경우 0.1925의 기울기 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 소성한계 값이 85%이하인 시료의 경우 0.1519의 기울기 차이를 갖는 것으로 나타났다. FC 시험기를 사용하여 소성한계 측정을 제안한 Harison과 Feng의 소성한계와 TH의 소성한계 비교 결과 전체시료의 소성한계를 갖는 시료의 기울기는 각각 0.5167과 0.3529로 큰 차이를 보이고 소성한계 값이 85%이하인 시료의 기울기는 Harison 방법은 0.1666, Feng 방법은 0.0384의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 전체 시료에 대해 비교 분석한 결과 기존의 소성한계실험법인 TH와 유사한 결과를 나타내는 것은 0.1925의 기울기 차이를 보이는 NFC실험 방법이다. 하지만 85%이하의 소성한계를 갖는 시료에 대해 비교한 결과 FC실험을 이용한 Feng의 소성한계 측정법이 0.0384의 기울기 차이를 보여 가장 유사한 측정 방법임을 알 수 있었다.

위의 결과가 나타난 요인을 찾기 위해 Feng이 제안한 함수비-소성한계 관계의 기울기와 NFC의 함수비-소성한계 기울기를 비교 검토하였고, 위 관계는 (3)과 같은 것으로 Fig 7을 통해 알 수 있다. 본 연구를 위해 제작된 NFC실험 기기는 관입 에너지의 100배의 관계를 적용하여 제작하였지만 낙하 시 시료와 콘 사이의 반발력에 의한 에너지의 손실이 발생하여 이론적인 관입량인 20mm을 적용한 결과와 기존의 TH결과 값과 차이를 나타낸 것으로 사료된다. 위와 같은 추가적인 연구가 필요한 이유는 아래와 같다. FC으로 얻어진 관입량 - 함수비 관계의 기울기와 NFC으로 얻어진 관입량 - 함수비 관계

의 기울기를 비교한 결과 $m = \frac{\Delta m_{Fallcone}}{\Delta m_{NFC}} = 0.8629$

로 이것은 Kaolinite에서의 액성한계와 소성한계의 비배수 전단강도의 비를 나타낸다. 따라서 Kaolinite시료의 경우 비배수전단강도의 차이는 86.29배를 나타내고 이외의 시료 또한 동일한 관계를 나타내기 때문에 85%이하의 시료에 대해서는 Feng의 방법이 TH와 유사한 결과를 나타낸 것으로 사료되며, 앞선 문제를 추가적인 연구를 통해 검증한다면 이 문제를 해결할 수 있을 것으로

사료된다.

Table 8. Comparison of experiment results

Soil	New Fall cone (%)	Feng method (%)	Harison method (%)	Thread Rolling (%)
M1	46.110	99.655	118.98	54.870
M2	36.090	97.303	145.22	49.108
M3	34.540	78.689	107.75	47.688
M4	37.140	45.782	52.560	46.037
M5	37.450	42.012	50.820	41.493
M6	38.332	37.321	45.360	40.970
M7	33.740	85.295	62.850	42.605
M8	32.690	87.313	145.85	41.023
M9	30.610	47.177	52.190	35.671
M0	25.360	29.054	33.140	28.388
M11	17.580	15.818	16.630	19.260
M12	21.410	26.219	29.529	24.280
M13	25.370	27.791	28.249	28.140
M14	28.100	28.647	29.410	31.330
M15	31.860	37.145	44.450	34.403
S1	20.080	23.996	27.910	20.420
S2	15.620	22.660	28.340	18.386
S3	15.280	19.933	22.230	18.583
S4	20.120	21.062	25.130	22.773
S5	16.670	21.065	23.070	19.172
S6	18.680	20.827	23.650	22.280
S7	17.140	17.788	24.460	19.607

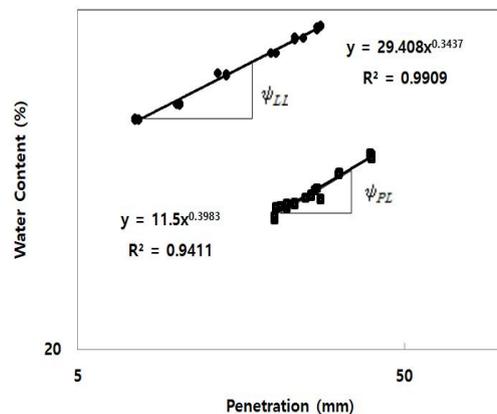


Fig. 7. Comparison of m value (Kaolinite)

Table 9. Difference of the slope by method

method	NFC	Harison	Feng	
Differenc of Slope	all	0.1925	0.5167	0.3529
	85%less	0.1519	0.1666	0.0384

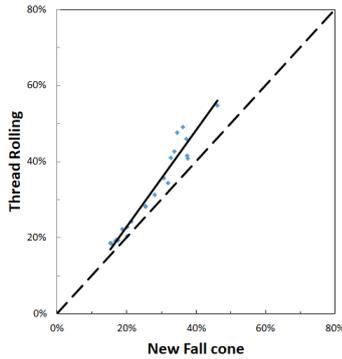


Fig. 8. TH vs NFC(85%upper)

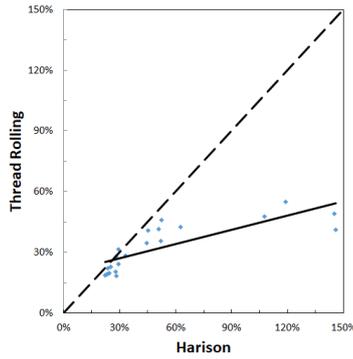


Fig. 9. TH vs Harison(85%upper)

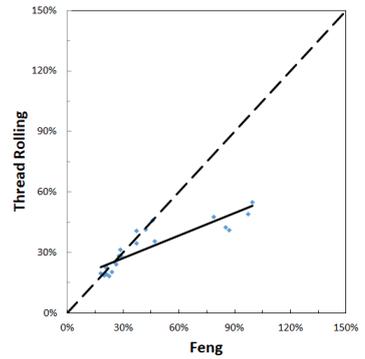


Fig. 10. TH vs Feng(85%upper)

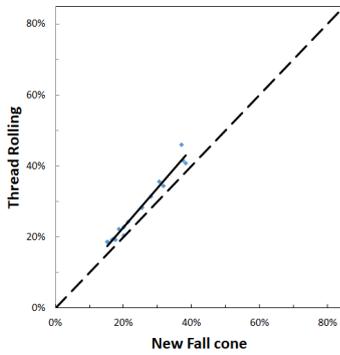


Fig. 11. TH vs NFC(85%less)

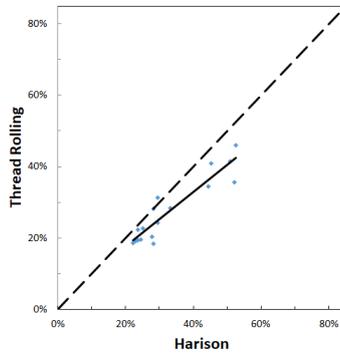


Fig. 12. TH vs Harison(85%less)

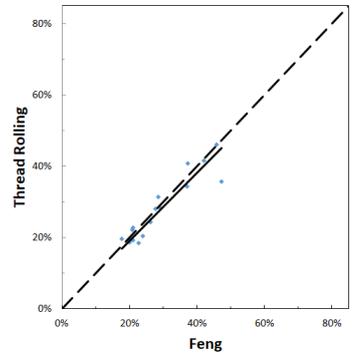


Fig. 13. TH vs Feng(85%less)

3.4 NFC실험의 일점법 제안

TH방식은 실험자의 숙련도에 따라 그 결과값의 정확성에 큰 영향을 받는다. 또한, 숙련도에 따라 실험의 소요시간의 차이를 보이기도 한다. 실제 5명의 실험자들을 비교한 결과 숙련자의 경우 5개의 실험군을 제작하는데 30분에서 1시간이 소요되는 반면에 비숙련자의 경우 최대 2시간에서 3시간의 실험시간이 소요된다. NFC실험과 FC실험의 경우 숙련자와 비숙련자 관계없이 최소 4개의 점을 얻기 위해 시료를 제작해야하며 보통 1개의 시료를 제작하는데 소요되는 시간은 많게는 30분이 소요된다. 때문에, 소성한계를 얻기 위해 숙련도에 관계없이 최소 2시간의 시간이 소요되었다. 이 단점을 보완하기 위해 Feng(2000)은 아래와 같은 관계를 통해 일점법을 제안하였으며, 이를 NFC에 적용하여 일점법을 제안하였다.

$$\log w = \log c + m \log d \quad (6)$$

$$w = c(d)^m, PL = c(2)^m \quad (7)$$

여기서, w = 함수비 d = 관입깊이
 m = 기울기 c = 상수

위의 관계를 이용하여 NFC실험을 통해 얻은 소성한계 실험결과 c, m, R 를 Table 10에 정리하였고, 얻어진 m 을 각 소성한계별로 정리한 결과는 Fig 14로 m 값의 평균값 0.7623을 적용하여 일점법을 제안하였다.

$$W_{PL} = cd^m = c \times 20^m, W_{PL} = c \times \left(\frac{20}{d}\right)^{0.7623} \quad (8)$$

소성한계 결과를 얻기위해 사용된 각 함수비-관입량 데이터를 시료에 대한 전체 실험 관입량 데이터를 (8)에 적용하여 일점법을 통해 얻은 소성한계 결과와 유사성을 검토하였고 이는 Fig 15와 같이 나타났다. 기존의 NFC 실험과 비교하였을 때, 관입량 15 ~ 25mm의 값에 적용할 경우 최소 0.93에서 최대 1.08만큼의 기울기 차이를 보이는 것으로 나타났다. 반면에 최소 12.24mm에서 최대 45.36mm의 관입량에 제안된 일점법을 적용한 경우

최소 0.75에서 최대 1.3까지의 기울기 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 본 제안된 일점법을 사용하여 보다 정확한 소성한계 값을 얻기 위해서는 관입량 15 ~ 25mm의 실험결과에 적용하는 것이 효과적인 것으로 사료된다.

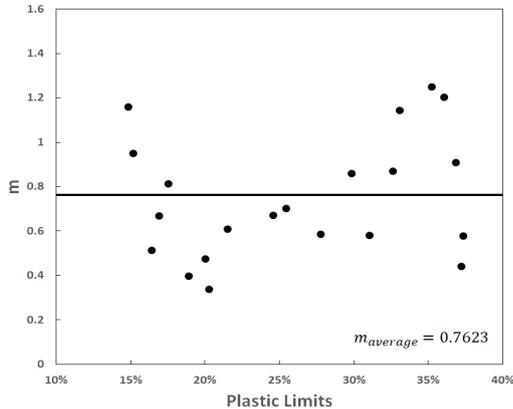


Fig. 14. m value of the plastic limits

Table 10. Results of NFC experiment

List	Fall cone Function Index			PL By NFC
	c	m	R	
M1	0.0206	1.036	0.9771	46.110
M2	0.0098	1.2033	0.9367	36.090
M3	0.0083	1.2511	0.9746	34.540
M4	0.0242	0.9088	0.9748	37.140
M5	0.0661	0.578	0.9824	37.450
M6	0.0992	0.4413	0.9477	37.660
M7	0.0107	1.1454	0.9975	33.740
M8	0.0239	0.8722	0.9358	32.690
M9	0.0227	0.8596	0.9246	30.610
M0	0.031	0.7028	0.9888	25.360
M11	0.0153	0.814	0.9935	17.580
M12	0.0347	0.6089	0.9795	21.410
M13	0.0327	0.6732	0.9447	25.370
M14	0.048	0.5857	0.908	28.100
M15	0.0543	0.5817	0.9086	31.860
S1	0.0733	0.3396	0.9689	20.080
S2	0.0088	0.9506	0.8906	15.620
S3	0.0046	1.1592	0.8229	15.280
S4	0.0482	0.4751	0.9476	20.120
S5	0.0351	0.5146	0.9795	16.670
S6	0.0227	0.6704	0.9322	18.680
S7	0.0571	0.3991	0.9529	17.140

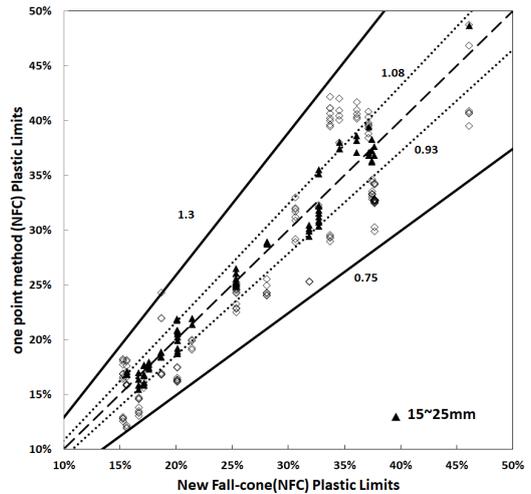


Fig. 15. Application result of one point method (NFC)

4. 결론

본 연구에서는 많은 문제점을 지적받고 있는 기존의 소성한계 측정법인 KS F 2304 (Thread Rolling, TH) 실험을 개선하기 위해 FC실험의 낙하에너지 관계를 이용한 NFC실험을 제안하였다. 이를 국내 서해안 일대에서 채취한 시료와 Kaolinite, Illite, Bentonite를 일정 비율로 혼합한 시료를 사용하였고, NFC실험과 다양한 소성한계 실험을 비교하여 기존의 소성한계를 개선한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 5명의 실험자를 통해 TH실험과 NFC실험의 재현성 검토를 실시한 결과 NFC실험이 0.235의 상관계수를 갖는 TH실험에 비해 0.8845이며, 각 실험자의 소성한계 값의 표준편차는 TH실험에서 최대 10%차이를 보이는 반면 NFC실험의 표준편차는 최대 2%로 실험자의 숙련도와 판단에 영향을 받지 않는 보다 객관적인 실험방법으로 판단된다.
- 2) NFC실험을 TH와 비교하였을 때 전체시료의 경우 기울기 차이는 0.1925로 나타났으며, 85%이하 시료의 경우 기울기 차이는 0.1519를 나타내었다. TH실험을 FC실험의 Harison과 Feng이 제안한 실험법과 비교하였을 때 85%이하 시료에 대해서는 0.5167과 0.3529의 기울기 차이를 보이며 전체시료의 기울기 차이는 0.1666과 0.0384으로 나타났

다. 따라서, 전체 시료에 대해서는 NFC실험의 소성한계 결과가 정확하지만, 소성한계 85%이하의 시료에 대해서는 Feng이 제안한 실험의 소성한계 값이 정확한 것으로 나타났다. 또한, FC실험과 NFC실험의 Kaolinite에 대해 기울기를 비교한 결과 0.8629로 비배수 전단강도의 비로 NFC의 보다 높은 정확성을 위해서는 반발력에 에너지 손실과 같은 요인을 고려하여 추가적인 연구를 수행한다면 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

- 3) 기존의 TH실험에 비해 많은 실험시간이 요구되는 것을 개선하기 위해 일점법을 제안하였으며, 이를 최소 12.24mm에서 최대 45.36mm의 관입량에 적용한 경우 최소 0.75에서 최대 1.3까지의 기울기 차이를 나타낸 반면, 15 ~ 25mm의 관입량에 적용한 경우 최소 0.93에서 최대 1.08 만큼의 기울기 차이를 보였다. 따라서 15 ~ 25mm의 관입량의 시료에 적용한다면 보다 간편하고 정확한 실험을 통한 소성한계 결과값을 얻을 것으로 사료된다.
- 4) 제안된 NFC실험은 기존의 TH실험을 완전히 대체할 수는 없지만 대략적인 소성한계의 범위를 알기 위한 용도로 사용한다면 보다 쉽고 정확하게 소성한계 결과값을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Houlby, G. T., "Theoretical analysis of the fall-cone test", *Can. Geotech. J.*, vol. 32, no. 2, pp. 111-118, 1982.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.2.111>
- [2] Wood, D. M. Wroth, C. P., "The use of the cone penetrometer to determine the plastic limit of soils," *Ground Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 37, 1978.
- [3] Sherwood, P. T., "The reproducibility of the results of soil classification and compaction tests," TRRL Report LR339. Crowthorne, UK: Transport and Roda Research Laboratory, 1970.
- [4] Feng, T. W., "Fall-cone penetration and water content relationship of clays", *Geotechnique*, vol. 50, no. 2, pp. 181-187, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.2.181>
- [5] Feng, T. W., "A linear log d-log w model for the determination of consistency limits of soils", *Can. Geotech. J.*, 38, pp. 1335-1342, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-38-6-1335>
- [6] Feng, T. W., "Determining the consistency limits of high plasticity clays by the BS fall cone method," *gound engineering*, 2004.

- [7] Hansbo, S., "A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test", *Royal Swedish Geotechnical. Institute Proc.*, Royal Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, 14, pp. 7-47, 1957.
- [8] Medhat, F & Whyte, I. L., "An appraisal of soil index tests," *Engeng Geol, Special Publication 2*, pp. 317-323, 1986.
DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.1986.002.01.55>
- [9] Sivakumar, V. Et al., "A new method of measuring plastic limit of fine materials," *Geotechnique* 59, no. 10, pp. 813-823, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.10.813>
- [10] Stone, K. J. L., Phan, K. D., "Cone penetration tests near the plastic limit," *Geotechnique*, vol. 45, no. 1, pp. 155-158, 1952.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1995.45.1.155>
- [11] Harison, J. A., "Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limits of soils", *Geotechnique*, vol. 38, no. 3, pp. 433-438, 1988.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1988.38.3.433>
- [12] Skempton, A. W, Northey, R. D., "The sensitivity of clays," *Geotechnique* 3, No. 1, 30-53, 1952.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1952.3.1.30>
- [13] Wood, D. M., "19oil behaviour and critical state soil mechanics", 1st edn. Cambridge: Cambridge University Press.
- [14] Tefra, T. H., "Measurement of plastic limit of cohesive soils," *Statens vegvesen Nr.* 208, 2013.
- [15] Saxena. M., "An Energy Based Approach to Determine the Plastic Limit of Fine-Grained Soil using Modified Cone penetrometer," *Procedia Technology*, 25, pp. 162-169, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2016.08.093>
- [16] Feng, T. W., "Using a Small Ring and a Fall-cone to Determine the Plastic limit", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2004, vol. 130, no. 6, pp. 630-635, 2004.

고 재 민(Jae-Min Ko)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (학사)
- 2017년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>

지반공학, 암반공학

이 병 석(Byung-Suk Lee)

[중신회원]



- 1986년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (학석사)
- 1992년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 교수
- 2013년 8월 ~ 2015년 8월 : 해양수산부 설계자문위원

- 2014년 12월 ~ 현재 : 한국도로공사 설계심의 분과위원

<관심분야>

지반공학, 암반공학