

세립분 함유율에 따른 중간토의 컨시스턴시 분석

Consistency Analysis of Intermediate Soil Based on the Fines Contents

오 세 욱¹⁾ · 배 우 석²⁾ · 방 성 택[†]

Sewook Oh · Wooseok Bae · Seongtaek Bang

Received: March 23rd, 2021; Revised: April 5th, 2021; Accepted: May 18th, 2021

ABSTRACT : Ground investigation and result analysis generally used to examine all sorts of structures' subsidence or stability can be classified into sandy soil and cohesive soil, and analysis on the liquid limit of soil is utilized to evaluate the physical properties of ground and types or technical behavior of soil. The most widely used method to analyze liquid limit is Casagrande with which liquid limit can be calculated relatively easily; however, it is fairly difficult to apply it to soil equipped with intermediate properties. Therefore, concerning the properties of soil having the intermediate properties of sedimentary ground, this researcher mixed the clay from Yangsan, Gwangyang, and Busan with sandy soil to make intermediate soil and then carried out the test of consistency limit and also evaluated applicability by using the suggested formula of consistency revision. The sample of intermediate soil was the mixture of clay and sandy soil, and to produce intermediate soil, the content (F_c) of fine soil was applied as 50%, 75%, or 100%. Regarding the physical properties of intermediate soil, to maintain the properties of clay in the natural state, bentonite was added at a fixed rate for controlling the properties of clay, and then, consistency was analyzed. By adopting the formula of consistency revision suggested in advanced research, this author analyzed consistency based on the experiment and consistency based on the suggested formula of revision. Also, about intermediate soil collected at the site, consistency based on the experiment and consistency based on the suggested formula of revision were analyzed comparatively, and about intermediate soil collected, this researcher analyzed particle size and calculated the content (F_c) of fine soil to analyze intermediate soil in diverse conditions. Moreover, about intermediate soil collected at the site, the suggested formula of consistency revision was applied to calculate the compression index, and the compression index based on the experiment and the compression index based on the suggested formula were analyzed comparatively to evaluate the applicability of the suggested formula.

Keywords : Intermediate soil, Consistency, Liquid-plastic limit test, Compression index

요 지 : 일반적으로 각종 구조물 등의 침하 또는 안정성 검토 등에 사용하는 지반조사 및 결과분석은 사질토와 점성토에 따라 다르며, 세립토의 경우 주로 흙의 컨시스턴시를 이용하여 지반의 물리적 특성과 흙 분류, 공학적 거동을 평가하고 있다. 가장 일반적으로 액성한계를 분석하는 방법은 Casagrande로 비교적 간단하게 액성한계를 구할 수 있으나 사질토를 함유한 중간적인 성질을 가지는 흙에 적용하기에는 많은 어려움이 발생한다. 본 연구에서는 점토의 액·소성한계를 가지고 압축지수를 추정할 때 세립분 함유율에 따라 액성한계치를 수정하는 방안을 제안하고자 한다. 이를 위해 사질토를 함유한 중간토의 특성을 고려하여 양산, 광양, 부산지역의 점토와 사질토를 혼합한 중간토를 제작하여 컨시스턴시 한계시험을 수행하였으며, 컨시스턴시 보정 제안식을 활용하여 적용성 평가를 하였다. 중간토는 점토와 사질토의 혼합비율로써 중간토 제작을 위해 세립분 함유율(F_c)을 50%, 75%, 100%를 적용하였다. 중간토는 자연 상태의 점토 특성을 재현하기 위해 벤토나이트를 일정 비율로 혼합하여 시료를 성형 한 다음 물리적 특성 시험 및 컨시스턴시 시험을 수행하였으며, 기존 연구에서 제안된 컨시스턴시 보정식과 실험에 의한 컨시스턴시 결과치를 비교·분석하였다. 또한, 현장에서 채취한 시료의 컨시스턴시와 보정 제안식에 의해 수정된 컨시스턴시를 비교·분석하고, 보정된 컨시스턴시 값을 적용하여 사질토가 함유된 중간토의 압축지수 등 공학적 특성을 비교·분석함으로써 제안식의 적용성을 평가하였다.

주요어 : 중간토, 컨시스턴시, 액·소성한계시험, 압축지수

1. 서 론

우리나라는 서·남해안은 지역 특성상 수심이 얇고 일반적으로 점토질 실트 내지 실트질 점토로 이루어진 갯벌 지역으로 지반 공학적 특성이 불량하여 산업단지 및 주거단지

등의 부지로 활용하기 위해서는 다양한 조사와 시험 및 연약지반을 개량하는 등 양질의 지반 조건을 만족하도록 하는 대처와 방안이 요구된다(Lee et al., 2012). 연약지반 점토의 지반 공학적 특성은 지반의 형성 및 퇴적, 점토광물의 종류 그리고 물리·화학적 결합 상태 등에 따라 매우 복잡해진다.

1) Professor, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

2) Professor, Department of Civil and Environmental Convergence Engineering, Korea National University of Transportation

† Lecturer, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University (Corresponding Author : bst91@knu.ac.kr)

또한, 향만 지역에서는 퇴적환경으로 인해 사질토와 점토로 구분하기 어려운 중간적인 성질을 가진 흙이 퇴적된 지역이 많다(Bang, 2020). 일반적으로 각종 구조물 등의 침하 또는 안정성 검토 등에 사용하는 지반조사 및 결과분석은 사질토와 점성토로 구분되며 흙의 액성한계를 분석하여 지반의 물리적 특성과 흙 분류, 공학적 거동을 평가하고 있다. 가장 일반적으로 액성한계를 분석하는 방법은 Casagrande로 비교적 간단하게 액성한계를 구할 수 있고 컨시스턴시 한계시험은 활용되는 시료의 양이 적고 교란된 상태의 시료에서도 가능하며, 실험 비용도 저렴한 장점으로 인해 지반조사에서 필수적으로 수행되는 실험항목이다(Kim et al., 2009). 그러나 국내 표준 액성한계 실험방법(KS F 2303)에 의하면 425 μ m 체를 통과하는 흙 시료를 사용하고 있으나, 세립분의 함유율이 많은 흙이나 모래가 섞인 중간적인 성질을 가지는 흙의 적용에는 많은 어려움이 있다(Sim, 2015). Kim(2018)은 모래와 점토의 혼합토에 대한 역학적 특성을 연구한 결과, 세립분 함유율이 증가할수록 정규압축상태선도 증가하는 것으로 분석하였다. Kim et al.(2001)은 세립분 함유율에 따른 다짐 화강풍화토의 전단강도 특성을 수행한 결과, 세립분 함유율이 증가할수록 점착력은 증가하고 내부마찰각이 감소하며, 한계상태 마찰계수가 감소하여 잔류강도와 최대강도의 비가 경화거동을 나타낸다고 분석하였다. 또한 Kim et al.(2017)은 정적 및 동적 시험방법과 시험자에 따른 점토의 액·소성 한계를 비교 평가하였고, Na(1999)는 광양만 지역의 불교란 점토의 압축지수에 대한 경험식 개발에 관한 연구를 수행하였으며, Hong(2001)은 점토의 토질정수와 압축지수의 상관성에 관한 연구논문을 발표한 바 있다.

본 연구에서는 퇴적지의 중간적인 성질을 가지는 흙의 특성을 고려하여 양산, 광양, 부산지역의 점토와 사질토를 혼합한 중간토를 제작하여 컨시스턴시 한계시험을 수행하였으며, 실험에 의한 액성한계 및 소성지수와 보정 제안식에 의한 액성한계 및 소성지수를 산정하여 적용성 평가를 수행하였다. 또한, 현장에서 채취한 중간토에 대하여 컨시스턴시 보정 제안식을 적용하여 압축지수를 산정하였으며, 실험에 의한 압축지수와 제안식에 의한 압축지수를 비교 및 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 중간토의 특성

일반적으로 흙 입자는 탄성, 소성, 점성을 공유하고 있어 하나의 통합된 모델을 제시하는 것은 한계가 있다. 사질토의 경우에는 모래 골격구조와 밀도의 느슨하고 조밀한 정

도, 점토의 경우 응력 이력에 의한 과압밀 또는 정규압밀 정도에 따라서 강도 특성이 변화한다. 또한, 흙의 강도정수 산정은 배수 조건과 하중 재하속도에 따라서 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 사질토 지반에 지진과 같이 하중 재하속도가 단기간에 걸쳐 발생할 경우 배수 상태에서 점차 비배수 상태로 전환되므로 액상화와 같은 문제점을 검토할 필요가 있고 점토 지반의 경우에도 하중 재하속도가 장기간으로 지속되게 된다면 배수 상태로 전환될 가능성이 있다. 따라서, 중간토의 강도 특성은 사질토와 점토의 중간적인 성질을 나타내므로 합리적인 강도정수 산정 방법이 요구된다(Sim, 2015). 일본의 향만시설물 설계 기준(2007)에 의하면 75 μ m체를 기준으로 모래 함유율이 80% 이상인 흙을 사질토로 분류하고, 50% 이하인 흙을 점토로 분류하고 있다. 또한, 모래 함유율이 80% 이하이며 점토가 50% 이상인 지반에 대해서는 세립토와 점토의 중간적인 거동 특성을 나타내므로 혼합토 또는 중간토(Intermediate soil)로 지칭한다.

2.2 중간토의 세립분 함유율

사질토와 점토에 대한 기존의 연구는 많지만 세립분 함유율을 고려한 연구는 많지 않으며, 중간토에 대한 다양한 접근방식의 연구가 필요하다. 사질토의 강도정수 중 내부마찰각은 세립분 함유율이 증대한 영향을 미친다. 모래와 벤토나이트 혼합토에 대한 전단시험 결과를 보면 한계상태 내부마찰각은 세립분 함유율이 증가하면서 감소한다는 것을 알 수 있고 낮은 세립분 함유율의 모래에서는 내부마찰각이 높게 평가되었다. 순수한 모래와 세립분의 혼합토에 대해서 한계상태선은 비소성 세립토의 함유율에 따라서 변동한다고 알려져 있으며, 세립분의 증가가 느슨한 구조의 흙인 것을 의미하며 높은 압축성을 가지고 있다고 할 수 있다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 실험재료

3.1.1 점토

본 연구에 활용된 점토는 양산, 광양, 부산에서 채취된 점토를 사용하였다. 특히, 양산지역에서 채취한 점토는 액성한계가 43.8%로 저소성($PI < 15$)을 대표하는 점토로 활용하여 C1으로 표기하였으며, 중간소성과 고소성 특성에 따른 컨시스턴시를 분석하기 위해 광양 및 부산에서 채취한 점토와 벤토나이트를 혼합하여 중간소성 점토($15 < PI < 40$, C2), 고소성 점토($PI > 40$, C3)로 구분하여 연구를 수행하였다. Table 1은 연구에 사용된 시료의 물리적인 특성을 나타내고 있다.

Table 1. Physical properties of sample

Division		C1	C2	C3	S1	S2
LL (%)		48.3	74.9	78.4	29.2	27.5
PI		14.0	38.8	44.9	6.5	N.P
Component (%)	Gravel	0	0	0	2.2	7.0
	Sand	25.8	12.4	1.6	73.4	82.1
	Silt	50.6	63.9	74.5	24.4	6.7
	Clay	18.0	23.7	23.9	0	0
USCS		ML	CL	CL	SM	SW

3.1.2 사질토

중간토의 주체가 되는 사질토는 입경의 크기에 따른 컨스 시턴시를 분석하기 위해 광양 및 양산지역에서 채취된 모래를 활용하였다. 광양지역에서 채취된 모래를 S1으로 표기하였으며, KS F 2302에 의거하여 입도시험을 수행한 결과 균등계수 1.3, 곡률계수 1.35로 통일분류법 상 'SM'으로 분류되었다. 또한, 양산지역에서 채취된 모래를 S2로 표기하였으며 입도시험 결과 균등계수 9.3, 곡률계수 1.2로 통일분류법 상 'SW'로 분류되었다. 사질토의 최대건조밀도를 구하기 위해 KS F 2312에 근거하여 다짐시험을 수행한 결과 S1과 S2의 최대건조단위 중량은 각각 18.2kN/m³, 18.4kN/m³으로 나타났다.

3.1.3 벤토나이트

본 연구에서는 소성도 조절을 위하여 점토에 벤토나이트

Table 2. Physical properties of bentonite

G _s	W _L (%)	P _L (%)	I _p	USCS
2.21	198.8	33.3	165.5	CH

Table 3. Mixing ratio of sample

No	Content	Mixing ratio (%)					Clay : Bentonite	F _c
		Clay			Sand			
		C1	C2	C3	S1	S2		
1	C1-S1-0	100					-	100
2	C1-S1-1	75			25		-	75
3	C1-S1-2	50			50		-	50
4	C1-S2-1	75				25	-	75
5	C1-S1-2	50				50	-	50
6	C2-S1-0		100				1 : 0.5	100
7	C2-S1-1		75		25		1 : 0.5	75
8	C2-S1-2		50		50		1 : 0.5	50
9	C2-S2-1		75			25	1 : 0.5	75
10	C2-S2-2		50			50	1 : 0.5	50
11	C3-S1-0			100			1 : 2	100
12	C3-S1-1			75	25		1 : 2	75
13	C3-S1-2			50	50		1 : 2	50
14	C3-S2-1			75		25	1 : 2	75
15	C3-S2-2			50		50	1 : 2	50

를 혼합하였다. 중간 정도의 소성점토 구성을 위해 광양지역 점토 중량 대비 벤토나이트를 약 1:0.5의 비율로 배합하였으며, 고소성점토 구성을 위해 부산지역 점토 중량 대비 약 1:2의 비율의 조건을 적용하여 각각의 조건에 부합하는 점토를 재구성하였다. Table 2는 본 연구에 사용된 벤토나이트의 물리적 특성을 나타내고 있으며, Table 3은 점토 및 사질토, 벤토나이트의 혼합비율을 나타내고 있다.

3.2 중간토 제작 방법

北郷繁 & 鈴木輝之(1973)은 모래와 점토를 각종의 비율로 혼합한 포화도에 대하여 압밀비배수 삼축압축시험 결과로부터 모래와 점토의 비율에 따라 압밀특성, 전단 시 간극수압, 전단변형특성, 강도정수 등의 거동을 연구하였다. 그 결과 모래영역과 중간영역의 경계는 세립분 함유율이 20~30%, 점토영역과 중간영역은 세립분 함유율이 60~70%라고 제시하고 있다. 또한, 중간영역에서 세립분 함유율이 40% 이상인 중간토는 점성토에 가깝다는 것과 세립분 함유율이 30% 부근에서 사질토와 점성토의 과도기적인 상태가 존재한다고 하며, 이때 세립분 함유율은 Eq. (1)로 정의한 바 있다.

$$F_c = \frac{W_{fc}}{(W_{fc} + W_s)} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, F_c : 세립분 함유율

W_{fc} : 세립분(75μm 이하 토립자) 건조중량(g)

W_s : 조립분 건조중량(g)

또한 Eq. (2), Eq. (3)과 같이 액성한계 추정값 및 소성지수 추정값을 제안하였다.

$$w_{L,m} = \left[1.2 \frac{F_c}{100} - 0.2 \right] w_{L,f} + 19 \left[1 - \frac{F_c}{100} \right] \quad (2)$$

여기서, w_{L,m} : 액성한계 추정값(%)

w_{L,f} : 실험에 의한 액성한계(%)

$$I_{pm} = \left(1.2 \frac{F_c}{100} - 0.2 \right) I_{pf} \quad (3)$$

여기서, I_{pm} : 소성지수 추정값

I_{pf} : 실험에 의한 소성지수

F_c : 세립분 함유율(%)

Table 4. Mixing ratio for F_c Value

Fine powder content (F_c)	Clay (C), %	Sand (S), %
50	50	50
75	75	25
100	100	0

본 연구에서는 세립분 함유율 F_c 값을 각각 50, 75, 100으로 결정하여 연구를 수행하였다. Table 4는 세립분 함유율 F_c 값에 대한 혼합비율을 나타내고 있다.

3.3 압축지수 산정

순수한 점토의 압축지수와 액성한계는 밀접한 관계가 있으며 예민비가 작은 점토에 대하여 압축지수와 액성한계의 관계는 Eq. (4)와 같다(Skempton, 1944).

$$C_c = \alpha(w_L - \beta) \quad (4)$$

여기서, C_c : 압축지수

α, β : 계수

w_L : 액성한계(%)

Eq. (4)에서 계수 α 와 β 는 유럽의 경우 $\alpha=0.009$, $\beta=10$ 을 사용하며, 일본의 경우 $\alpha=0.004 \sim 0.03$ (평균 0.0125), $\beta=0 \sim 30$ (평균 20)을 사용한다. 그러나 동일한 액성한계에서도 소성한계가 달라지면 압축지수도 변하기 때문에 Eq. (5)와 같이 간편화 할 수 있으며, 이를 활용하여 압축지수를 분석하였다.

$$C_c = 0.0116I_{pm} \quad (5)$$

여기서, C_c : 압축지수

I_{pm} : 제안식에 의한 소성지수

4. 실험결과 및 분석

4.1 중간토 컨시스턴시 분석

4.1.1 액·소성한계 분석결과

양산, 광양, 부산에서 채취한 점토를 활용하여 벤토나이트를 일정비율로 혼합한 저소성 점토(C1), 중간소성 점토(C2), 고소성 점토(C3)를 제작하였으며, 사질토 두 종류를 세립분 함유율에 따라 혼합하여 중간토의 액·소성한계를 분석하였

Table 5. Test result of intermediate soil

NO	Content	F_c (%)	G_s (g/cm^3)	W_L (%)	P_L (%)	I_p
1	C1-S1-0	100	2.70	48.3	34.3	14.0
2	C1-S1-1	75	2.69	36.5	21.3	15.2
3	C1-S1-2	50	2.68	23.8	15.4	8.4
4	C1-S2-1	75	2.65	38.9	23.6	15.3
5	C1-S2-2	50	2.62	26.3	15.5	10.8
6	C2-S1-0	100	2.66	115.5	44.7	70.8
7	C2-S1-1	75	2.64	81.6	30.4	51.2
8	C2-S1-2	50	2.62	55.2	21.6	33.6
9	C2-S2-1	75	2.69	78.6	25.8	52.8
10	C2-S2-2	50	2.62	57.4	31.3	26.1
11	C3-S1-0	100	2.63	171.0	44.4	126.6
12	C3-S1-1	75	2.69	120.7	35.4	85.3
13	C3-S1-2	50	2.63	80.2	29.1	51.1
14	C3-S2-1	75	2.65	125.8	35.9	89.9
15	C3-S2-2	50	2.67	75.8	21.2	54.6

다. Table 5는 중간토의 액·소성한계 분석 결과를 나타내고 있다.

Fig. 1은 저소성 점토(C1)의 액성한계 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 세립분 함유율 100%($F_c=100$)인 점토의 경우 액성한계는 48.3%로 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 사질토 S1을 세립분 함유율 75% 적용 시 액성한계는 38.9%로 $F_c=100$ 의 액성한계 보다 약 20% 감소하는 것을 알 수 있었고, 세립분 함유율 50% 적용 시 액성한계는 26.3%로 $F_c=100$ 의 액성한계 보다 약 45% 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 사질토 S2를 세립분 함유율 75% 적용 시 액성한계는 36.5%로 $F_c=100$ 의 액성한계 보다 약 25% 감소하며, 세립분 함유율 50% 적용 시 액성한계는 23.8%로 $F_c=100$ 의 액성한계의 약 50%를 나타내어 세립분의 함유율이 적을수록 액성한계는 점차 감소하는 것을 알 수

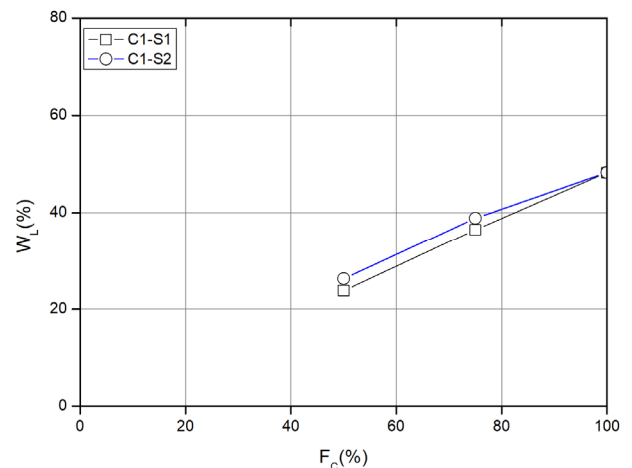


Fig. 1. LL test result of low plasticity clay (C1)

있었다. 이는 퇴적지에서 채취된 자연 상태의 점토($F_c=100$)는 세립토로 구성되어 액성한계 결과가 높게 평가되지만, 조립성질의 사질토 혼합비율이 증가함에 따라 중간성질의 점토로 변형되어 액성한계는 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2는 중간소성 점토(C2)의 액성한계 실험 결과를 나타내고 있다. 중간소성 점토의 경우 세립분 함유율 100%($F_c=100$)의 액성한계는 115.5%로 나타나는 것을 알 수 있었다. 사질토 S1을 세립분 함유율 75% 적용 시 액성한계는 81.6%로 $F_c=100$ 의 액성한계 보다 약 30% 감소하는 것을 알 수 있었으며, 세립분 함유율 50% 적용 시 액성한계는 57.4%로 $F_c=100$ 인 경우 액성한계의 약 50%로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 사질토 S2를 세립분 함유율 75% 적용 시 액성한계는 78.6%로 $F_c=100$ 의 액성한계 보다 약 32% 감소하는 것을 알 수 있었으며, 세립분 함유율 50% 적용 시 액성한계는 55.2%로 $F_c=100$ 인 액성한계의 약 48%로 평가되었다.

Fig. 3은 고소성 점토(C3)의 액성한계 실험 결과를 나타내고 있다. 고소성 점토의 경우 세립분 함유율이 100%($F_c=100$)인 경우 액성한계는 171.0%로 나타났으며, 사질토 S1

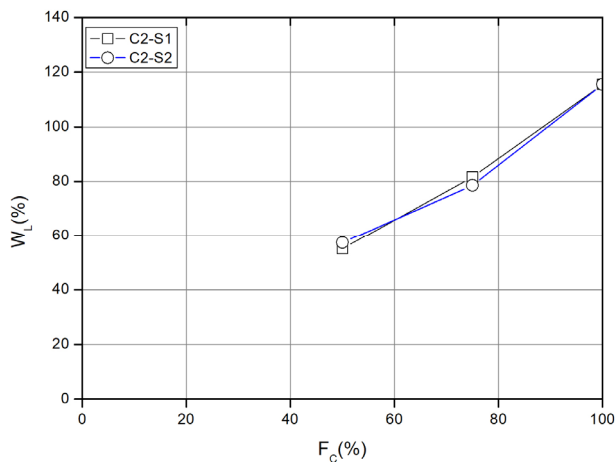


Fig. 2. LL test result of intermediate plasticity clay (C2)

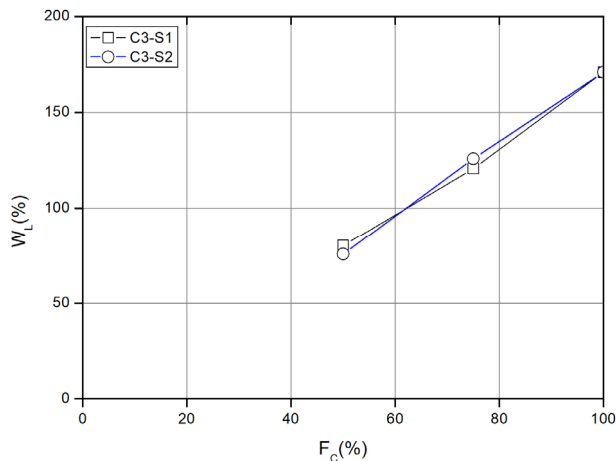


Fig. 3. LL test result of high plasticity clay (C3)

을 세립분 함유율 75% 적용 시 액성한계는 125.8%로 $F_c=100$ 인 액성한계 보다 약 26% 감소하였고, 세립분 함유율 50% 적용 시 액성한계는 75.8%로 $F_c=100$ 인 액성한계의 약 47%로 감소하였다. 또한, 사질토 S2를 세립분 함유율 75% 적용 시 액성한계는 120.7%로 $F_c=100$ 인 액성한계 보다 약 29% 감소하였으며, 세립분 함유율 50% 적용 시 액성한계는 75.8%로 $F_c=100$ 인 액성한계의 약 45%로 감소하였다. 위의 결과에서 나타나듯이 자연 상태의 점토($F_c=100$) 액성한계와 비교·분석한 결과 사질토의 혼합에 따라 액성한계는 감소하며, 세립분 함유율이 적을수록 액성한계는 감소하는 것으로 평가되었다. 특히, 세립분 함유율 75%에서 $F_c=100$ 인 액성한계와 비교하여 약 20~32% 감소하며, 세립분 함유율 50%의 경우 $F_c=100$ 인 액성한계와 비교하여 약 50~55%의 감소율이 나타나는 것을 알 수 있었다.

4.1.2 중간토의 액성한계 보정

세립분 함유율 50%, 75%, 100%에 따른 중간토에 대하여 실험에 의한 액성한계 결과와 제안식 Eq. (2)에 의한 보정 액성한계 결과를 Table 6과 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 나타나는 바와 같이 C1, C2, C3 점토에 모래(S1, S2)를 25%($F_c=75$)를 혼합한 중간토의 경우 실험에 의한 결과와 제안식에 의한 결과를 분석한 결과 거의 유사한 경향이 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 모래(S1, S2)를 50%($F_c=50$)를 혼합한 조건에서 중간토는 실험에 의한 결과와 제안식에 의한 결과는 약 25~143%의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 점토에 조립질 모래가 많이

Table 6. Liquid limit by experiment of intermediate soil and suggestion formula

NO	Number of sample	F_c (%)	Experiment LL W_{L_f} (%)	Suggestion LL W_{L_m} (%)
1	C1-S1-0	100	48.3	48.3
2	C1-S1-1	75	36.5	38.6
3	C1-S1-2	50	23.8	19.0
4	C1-S2-1	75	38.9	38.6
5	C1-S2-2	50	26.3	20.0
6	C2-S1-0	100	115.5	115.5
7	C2-S1-1	75	81.6	85.6
8	C2-S1-2	50	55.2	31.6
9	C2-S2-1	75	78.6	85.6
10	C2-S2-2	50	57.4	32.5
11	C3-S1-0	100	171.0	171.0
12	C3-S1-1	75	120.7	124.5
13	C3-S1-2	50	80.2	41.6
14	C3-S2-1	75	125.8	124.4
15	C3-S2-2	50	75.8	31.2

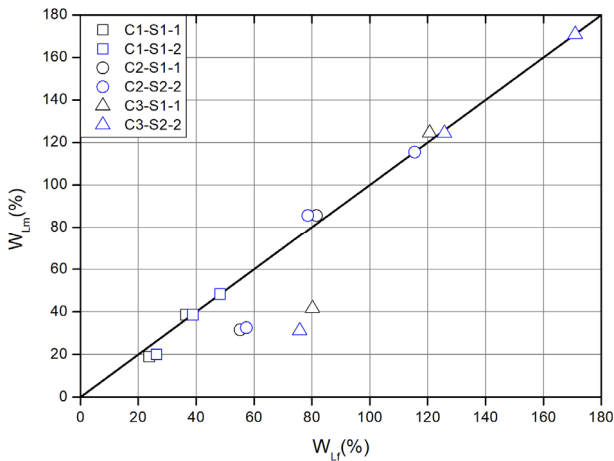


Fig. 4. Comparison of Liquid limit by experiment of intermediate soil and suggestion formula

혼합될수록 점토의 성질을 벗어나 다른 성질의 흙으로 변질되어 실험결과와 제안식에 따른 결과가 상이한 것으로 판단된다. 따라서, 제안식 Eq. (2)는 세립분 함유율 $F_c=75$ 이상의 중간토에 적용하는 것이 유용하다고 판단된다.

4.1.3 중간토의 소성지수 보정

중간토의 세립분 함유율에 따른 소성지수의 보정을 위해 제안된 Eq. (3)을 사용하여 중간토의 액·소성한계 실험 결과와 제안식에 의한 결과를 비교 및 분석을 수행하였다. Fig. 5는 세립분 함유율 50%, 75%, 100%에 따른 중간토에 대하여 실험에 의한 소성지수와 제안식 Eq. (3)에 의한 보정된 소성지수 결과를 나타내고 있다. Fig. 5에 나타나는 바와 같이 C1, C2, C3 점토에 모래(S1, S2)를 25%($F_c=75$)과 50%($F_c=50$)의 경우 실험에 의한 결과와 제안식에 의한 결과를 분석한 결과 오차는 약 3% 내외로 나타나 제안식의 신뢰도가 높은 것을 알 수 있었다. 그러나 저소성 특성을 가진 점

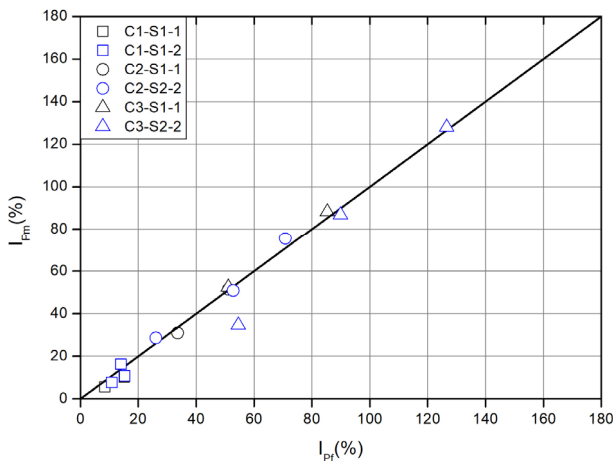


Fig. 5. Comparison of plasticity index by experiment of intermediate soil and suggestion formula

토에서는 세립분 함유율과 관계없이 실험 및 제안식의 분석 결과 최대 48%의 오차가 형성되어 저소성 점토에 대한 제안식의 신뢰도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제안식 Eq. (3)은 세립분 함유율과 관계없이 모두 적용이 가능하지만 저소성 점토에 대하여 신뢰도가 낮아 중간소성 이상의 점토에 적용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

4.2 현장토의 컨시스턴시 분석

4.2.1 액·소성한계 분석결과

현장토의 액성한계 및 소성지수 제안식의 적용성 평가를 위해 부산 및 광양지역에서 채취한 점토를 사용하였으며,

Table 7. Test result of in-situ soil

Site	F_c (%)	G_s (g/cm^3)	W_L (%)	P_L (%)	I_p
F-C1	65.0	2.68	38.6	19.2	19.4
	91.0	2.67	53.8	26.0	27.8
	85.6	2.72	62.8	23.6	39.2
	70.2	2.70	39.8	20.5	19.3
F-C2	92.0	2.64	79.9	30.7	49.2
	94.0	2.66	82.8	32.8	50.0
	85.0	2.64	75.8	32.2	43.6
	58.0	2.62	56.4	20.9	35.5
F-C3	89.0	2.70	58.8	28.7	30.1
	90.0	2.72	53.6	25.2	28.4
	71.0	2.71	71.4	28.9	42.5
	85.0	2.64	78.3	31.0	47.3
F-C4	93.0	2.66	65.0	26.9	38.1
	79.0	2.60	50.7	24.3	26.4
	97.6	2.65	81.5	45.1	36.4
	96.0	2.68	72.2	26.7	45.5
F-C5	83.9	2.64	49.5	24.4	25.1
	51.6	2.70	34.2	22.1	12.1
	96.2	2.71	75.1	28.1	47.0
	94.8	2.66	83.5	31.1	52.4
F-C6	96.6	2.63	77.4	26.6	50.8
	58.7	2.69	36.7	24.4	12.3
	55.8	2.65	36.1	21.9	14.2
	71.2	2.70	38.2	22.2	16.0
F-C6	54.9	2.69	41.4	22.3	19.1
	95.5	2.65	52.0	23.3	28.7
	52.8	2.65	34.7	19.5	15.2
	59.2	2.71	34.1	20.7	13.4
	88.4	2.66	63.0	27.1	35.9
	96.9	2.67	67.9	29.3	38.6
	95.7	2.62	79.5	28.4	51.1
	99.5	2.64	85.9	32.5	53.4
	98.8	2.70	91.5	32.2	59.3
	96.8	2.65	77.1	23.4	53.7
	93.1	2.64	68.4	24.4	44.0
	93.2	2.63	68.1	28.3	39.8
67.4	2.67	60.3	27.7	32.6	

입도분석을 통해 입경 $420\mu\text{m}$ 이하의 흙이 차지하는 세립분 함유율(F_c)를 산정하였고, 실내실험을 통해 액·소성한계를 분석하였다. Table 7은 현장토의 액·소성한계 시험 결과를 나타내고 있다. Table 7에서 나타나듯이 임의의 지점에 채취한 점토는 입도분석 결과, 세립분 함유율(F_c)의 범위는 최소 54%에서 최대 99.5%로 분포하는 것을 알 수 있었으며, 액성한계 시험 결과 최소 34.2%에서 최대 91.5%로 저소성 및 중간소성의 점토로 구성되어 있다.

4.2.2 현장토의 액성한계 보정

현장토에 액성한계 보정 제안식 Eq. (2)를 사용하여 적용

Table 8. Liquid limit by experiment of in-situ soil and suggestion formula

Site	F_c (%)	Experiment LL W_{Lr} (%)	Suggestion LL W_{Lm} (%)
F-C1	65.0	38.6	29.1
	91.0	53.8	49.7
	85.6	62.8	54.67
F-C2	70.2	39.8	31.25
	92.0	79.9	73.75
	94.0	82.8	77.98
	85.0	75.8	65.01
	58.0	56.4	35.95
	89.0	58.8	53.13
F-C3	90.0	53.6	49.07
	71.0	71.4	52.06
	85.0	78.3	67.06
	93.0	65.0	60.87
	79.0	50.7	41.91
F-C4	97.6	81.5	79.61
	96.0	72.2	69.49
	83.9	49.5	43.00
	51.6	34.2	23.53
F-C5	96.2	75.1	72.39
	94.8	83.5	79.30
	96.6	77.4	74.85
	58.7	36.7	26.35
	55.8	36.1	25.35
	71.2	38.2	30.48
	54.9	41.4	27.56
	95.5	52.0	50.03
F-C6	52.8	34.7	24.02
	59.2	34.1	25.16
	88.4	63.0	56.45
	96.9	67.9	65.99
	95.7	79.5	76.20
	99.5	85.9	85.45
	98.8	91.5	90.42
	96.8	77.1	74.74
	93.1	68.4	64.05
	93.2	68.1	63.85
67.4	60.3	42.93	

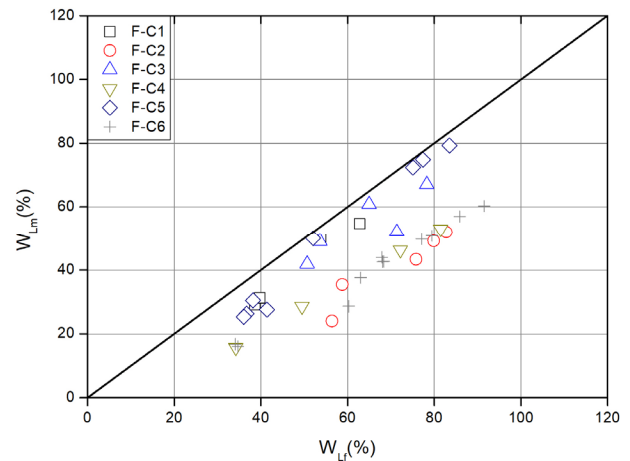


Fig. 6. Comparison of Liquid limit by experiment of in-situ soil and suggestion formula

성을 평가하였다. Table 8은 임의의 지점에서 채취된 현장토의 실험에 의한 액성한계 결과와 제안식에 의한 보정한 액성한계 결과이며, Fig. 6과 같이 나타내었다.

Fig. 6에 나타나는 바와 같이 임의의 지점에서 채취한 현장토는 실험에 의한 액성한계 결과보다 제안식에 의한 액성한계 결과가 약 0.5~36% 작게 산정되었음을 알 수 있었으며, 세립분 함유율이 감소할수록 제안식에 의한 액성한계 결과 또한 감소하는 것을 알 수 있었다. 실내실험의 오차를 고려할 경우 세립분 함유율 83% 이상에서 실내실험 결과와 근접하는 것으로 평가되었다. 따라서, 제안식 Eq. (2)를 현장토에 적용할 경우 세립분 함유율 83% 이상의 점토에서 활용 가능하며, 액성한계 추정을 위한 적용이 유용할 것으로 판단된다.

4.2.3 현장토의 소성지수 보정

실내에서 재성형된 중간토를 활용하여 소성지수 보정 제안식 Eq. (3)에 따라 적용성을 평가한 결과 세립분 함유율

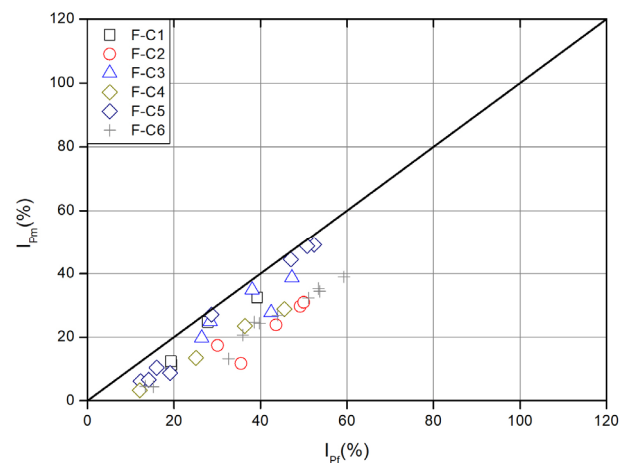


Fig. 7. Comparison of plasticity index by experiment of in-situ soil and suggestion formula

과 관계없이 모두 적용이 가능하지만 저소성 점토에 대하여 신뢰도가 낮아 중간소성 이상의 점토에 적용이 유용한 것으로 평가되었다. Fig. 7은 임의의 지점에서 채취한 현장토의 실험에 의한 소성지수와 제안식에 의한 보정한 소성지수 결과를 나타내고 있다. 그림에 나타나는 바와 같이 임의의 지점에서 채취한 현장토는 실험에 의한 소성지수 결과보다 제안식에 의한 소성지수 결과가 약 0.7~57% 작게 산정되었으며, 세립분 함유율이 감소할수록 제안식에 의한 소성지수 결과 또한 감소하는 것을 알 수 있었다.

4.4 압축지수 검토

점토의 압축지수는 액성한계와 밀접한 관계가 있는 것으로 기존 연구를 통해 발표된 바 있다. Skempton(1944)은 영국에서 채취된 점토에 대하여 압축지수와 액성한계의 관계를 Eq. (4)와 같이 제안하였다. 그러나 동일한 액성한계 값이라도 소성한계가 다르면 압축지수도 다르기 때문에 소성지수에 따른 압축지수와와의 관계를 Eq. (5)와 같이 제안하였다. 본 연구에서는 Eq. (4)에 근거하여 실험에 의한 액성한계에 따른 압축지수와 보정된 액성한계에 따른 압축지수를 산정하여 제안식의 유효성을 검토하였으며, 제안식 Eq. (5)에 근거하여 실험에 의한 소성지수에 따른 압축지수와 보정된 소성지수에 따른 압축지수를 산정하여 제안식의 유효성을 검토하였다.

4.4.1 액성한계에 따른 압축지수 검토

Fig. 8(a)는 제안식 Eq. (4)에 현장토의 실험 액성한계를 적용한 유럽 및 일본 제안식의 압축지수를 나타내고 있다. 유럽과 일본의 제안식은 동일한 식에 계수 α , β 값을 다르게 적용한다. 본 연구에서 유럽의 제안식은 $\alpha=0.0125$, $\beta=20$ 을 적용하였으며, 일본의 제안식은 $\alpha=0.009$, $\beta=10$ 을 적용하였다. 그림에 나타나듯이 유럽 제안식 및 일본 제안식은 액성한계가 증가할수록 압축지수는 증가하는 경향이 나타나며, 액성한계 50%를 기준으로 저소성 특성에서는 유럽 제안식이 일본 제안식보다 크게 산정되지만 중간소성 특성에서는 일본 제안식이 크게 산정되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8(b)는 제안식 Eq. (4)에 현장토의 보정 액성한계를 적용한 유럽 및 일본 제안식의 압축지수를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 실험에 의한 액성한계를 적용한 조건과 동일한 경향이 나타나고 있으며, 실험에 의한 액성한계를 적용한 조건에 대하여 약 5% 과소평가가 되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해 액성한계 보정식을 적용하여 압축지수 추정이 가능할 것으로 판단된다.

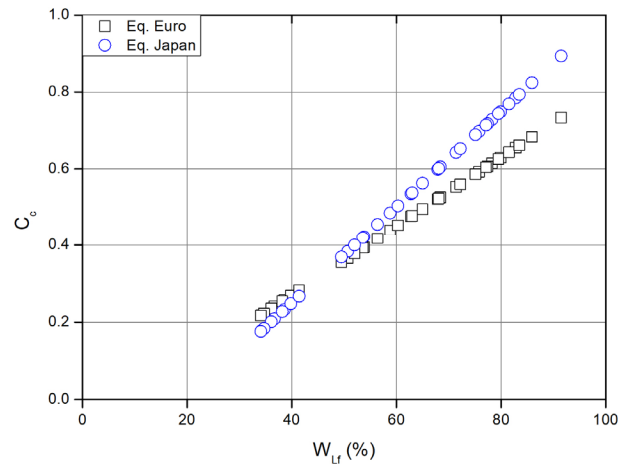


Fig. 8. Comparison of Eq. (4) with experimental liquid limit of in-situ soil (a)

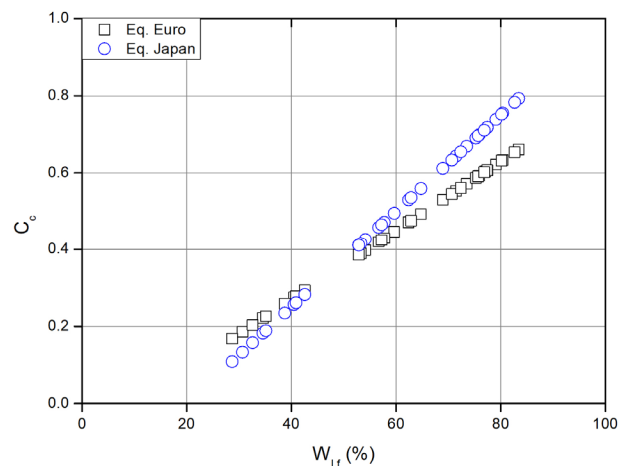


Fig. 8. Comparison of Eq. (4) with correction liquid limit of in-situ soil (b)

4.4.2 소성지수에 따른 압축지수 검토

Fig. 9(a)는 실험에 의한 소성지수로 산정된 현장토의 압축지수와 제안식 Eq. (5)에 의한 압축지수를 나타내고 있다. 그림에서 나타나는 바와 같이 소성지수가 증가할수록 압축지수가 증가하는 것을 알 수 있으며 제안식에 의하여 산정된 압축지수가 실험에 의한 소성지수를 적용하여 압축지수를 산정한 결과보다 약 19% 과소평가 되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9(b)는 현장토의 보정 소성지수에 의한 압축지수와 제안식 Eq. (5)에 의한 압축지수를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 소성지수가 증가할수록 압축지수는 증가하며, 보정 소성지수를 적용하여 압축지수를 추정된 결과 실험에 의한 압축지수보다 약 12% 과소평가 되는 것을 알 수 있었다. 또한, 압축지수 분석 시 소성지수를 적용하여 분석하는 것이 액성한계를 적용하는 방법보다 더욱 합리적인 것으로 판단된다.

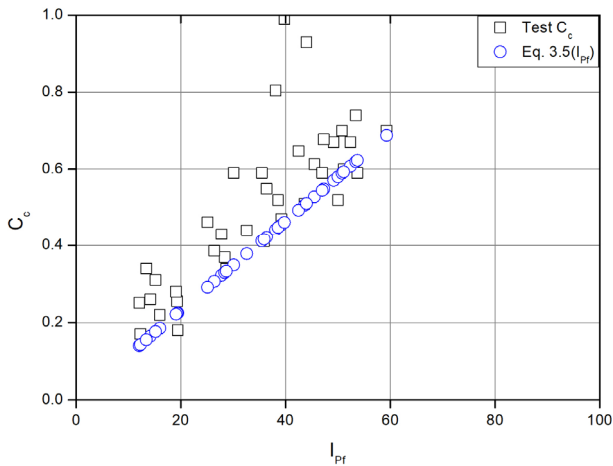


Fig. 9. Comparison of Eq. (5) with experimental plasticity index of in-situ soil (a)

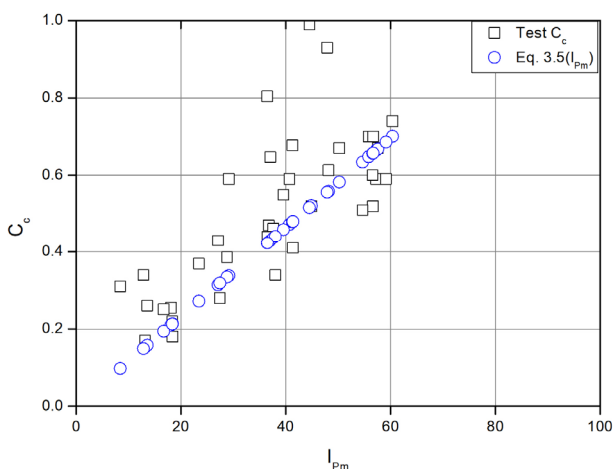


Fig. 9. Comparison of Eq. (5) with correction plasticity index of in-situ soil (b)

5. 결 론

본 연구에서는 중간성질을 갖는 흙의 컨시스턴시 분석을 위해 액성한계 및 소성한계 시험을 수행하고 실험결과와 제안식에 의하여 점토와 사질토의 혼합비율에 따른 소성지수 및 압축지수 관계를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 자연 상태 점토($F_c=100$)의 액성한계와 사질토를 혼합한 시료의 액성한계를 비교·분석한 결과, 사질토의 혼합율에 따라 액성한계는 감소하며, 세립분 함유율이 적을수록 액성한계의 감소율이 증가하는 것으로 평가되었다. 특히, 세립분 함유율 75%에서 자연 상태의 액성한계와 비교하여 약 20~32%의 범위로 감소하며, 세립분 함유율 50%의 경우 자연 상태의 액성한계와 비교하여 약 45~55%의 감소율이 나타나는 것을 알 수 있었다.

- (2) 실험에 의한 액성한계와 제안식에 의한 액성한계를 비교·분석한 결과, 모래(S1, S2)를 25%($F_c=75$)를 혼합한 경우 실험에 의한 결과와 제안식에 의한 결과가 유사한 것을 알 수 있었다. 그러나 모래(S1, S2)를 50%($F_c=50$)를 혼합한 조건에서 실험에 의한 결과와 제안식에 의한 결과가 약 25~143%의 오차가 발생하는 것으로 나타나 점토에 조립질 모래가 많이 혼합될수록 점토의 성질을 벗어나 다른 성질의 흙으로 변질되어 실험결과와 제안식에 따른 결과가 상이한 것으로 판단된다. 따라서, 제안식은 세립분 함유율 75% 이상의 중간토에서 적용이 유용할 것으로 판단된다.

- (3) 현장토에 액성한계 보정 제안식 및 소성지수 보정 제안식을 적용하여 평가한 결과, 현장토는 실험에 의한 결과보다 제안식에 의한 결과가 약 0.5~57% 작게 산정되었으며 특히, 세립분 함유율 83% 이상에서 실내실험 결과와 근접하는 것으로 평가되어 제안식을 현장토에 적용할 경우, 세립분 함유율 83% 이상의 점토에 적용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

- (4) 현장토의 실험결과와 유럽 및 일본의 제안식을 적용하여 압축지수를 비교·분석한 결과, 저소성 점토의 경우 유럽의 제안식이 실험에 의한 압축지수에 비해 약 25% 과대평가 되지만 중간소성 점토의 경우 약 5% 내외로 근접하는 것을 알 수 있었다. 또한, 일본 제안식을 적용한 경우 실험에 의한 압축지수와 비교하여 약 21% 과대평가 되지만 중간소성 점토의 경우 약 3% 내외로 유럽식보다 더욱 근접하여 평가되는 것을 알 수 있었다.

- (5) 현장토의 보정된 실험결과와 유럽 및 일본의 제안식에 의한 압축지수를 비교·분석한 결과, 유럽 제안식이 저소성 점토일 경우 약 80%, 중간소성 점토의 경우 약 20% 과대평가 되는 것을 알 수 있었다. 또한, 일본 제안식의 경우, 저소성 점토의 경우 약 60% 이상 과대평가 되지만 중간소성의 경우, 약 10% 내외로 근접하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제안식을 통해 보정된 액성한계를 이용하여 압축지수를 산정할 경우 중간소성 점토에 적용하는 것이 신뢰성이 더 높은 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

References

1. 北郷繁 & 鈴木輝之 (1973), 鈴木輝之砂と粘土の混合土の土質工學的性質に関する實驗的研究, 北海道大學工學部研究報告 Vol. 68, No. 2, pp. 243~251 (In Japanese).
2. Bang, S. T. (2020), Characteristics of shear strength and consolidation behavior of soft ground according to stage fill, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 21, No. 7, pp. 17~26 (In Korean).
3. Hong, S. G. (2001), Correlation between parameters of marine clay and compression Index, Master's thesis, Keonkuk University, pp. 10~15 (In Korean).
4. Japan's port facility design standards (2007).
5. Kim, C. K., Yeo, J. S., Park, H. Y. and Kim, T. H. (2017), Liquid and plastic limits of cohesive soil by static and dynamic test methods and testers, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 33, No. 3, pp. 5~15 (In Korean).
6. Kim, J. H. (2018), Undrained shear strength characteristics of intermediate soils depending on fines content, Master's thesis, Kangwon National University, pp. 3~21 (In Korean).
7. Kim, J. Y., Lee, Y. H., Park, J. Y. and Lee, J. S. (2001), The effect of fines on the mechanical characteristics of compacted decomposed granite soils in triaxial compression, Academic Conference Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 2, pp. 443~446 (In Korean).
8. Kim, Y. H., Jang, J. H., Choi, D. C. and Chun, B. S. (2009), Evaluation of piezocone factors for soft ground in the region of nakdong river estuary using statistical analysis, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 7, pp. 53~66 (In Korean).
9. Lee, S. H., Jung, J. S., Ji Y. H. and Kim, S. M. (2012), A study on the long-term settlements characteristics and settlement prediction of soft ground in west-south region, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 13, No. 4, pp. 77~91 (In Korean).
10. Na, P. Y. (1999), Development of empirical equations for compression index of undisturbed clay in kwangyang bay area, Master's thesis, Yonsei University, pp. 6~33 (In Korean).
11. Sim, J. R. (2015), A study on the calculation technique of the shear strength of intermediate soils with low plasticity from western coastal areas, Ph D. dissertation, Chonnam National University, pp. 9~36 (In Korean).
12. Skempton, A. W. (1944), Note on Compressibility of Clays, Quarterly Journal of the Geotechnical Society of London, Vol. 100, 1944, pp. 119~135.