

## 낙동강 하구지역 연약 점성토의 물리특성 및 압밀특성 The Physical and Consolidation Characteristics of Soft Clay in Nakdong River Lower Basin

강성욱\* · 장정욱\*\* · 정연인\*\*\*

Sung Uk Kang\*, Jeong Wook Jang\*\* and Youn In Chung\*\*\*

**요 지 :** 낙동강 하구지역에 위치하고 있는 녹산지역과 장유지역에서 채취한 불교란 연약 점성토에 대한 물리적 특성시험과 압밀시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 낙동강 하구지역 점성토의 주요 점토광물은 Kaolinite, Illite 계열로 분류되었다. 자연함수비는 녹산지역 및 장유지역이 각각 50.4~92.8%, 46.6~99.0%의 범위로 비슷하게 분포하고 있으며, 두 지역 모두 액성한계는 자연함수비( $W_n$ )보다 낮게 나타났다. 압축지수는 녹산지역이 0.44~1.57의 범위로 분포하고, 장유지역은 0.67~1.94의 범위로 분포하고 있어 녹산지역보다 장유지역이 다소 높게 나타났다. 이차 압축지수 역시 장유지역이 0.027~0.092로 녹산지역 0.024~0.075보다 높은 것으로 나타났다. 회귀분석결과 함수비( $W_n$ )와 압축지수와의 관계는 선형적이며, 초기간극비와 압축지수와의 관계는  $C_c=0.80e_0-0.58$ 로 나타났다.  $C_u/C_c$ 비는 0.03~0.08로 다소 넓은 범위의 값을 나타내었다.

**핵심용어 :** 연약점성토, 물리적특성, 압밀특성, 낙동강 하구지역, 압축지수

**Abstract :** From having an experimental study of physical and consolidation characteristics of soft clay in Nakdong river lower basin, we come to the conclusion as follow. Clay minerals in Nakdong river lower basin are classified into Kaolinite and Illite. Water content( $W_n$ ) is similarly distributed in a range of 50.4% to 92.8% in Noksan and 46.6% to 99.0% in Jangyu, and liquid limit(LL) of both areas appears lower than water content. In the case of compression index, the index of jangyu is a little higher than that of Noksan because Jangyu is in a range of 0.67 to 1.94 and Noksan in a range of 0.44 to 1.5. The second compression index of Jangyu in a range of 0.027 to 0.092 is also higher than Noksan in a range of 0.024 to 0.075. As a result of regression analysis, a relation between water content and compression index is linear, and between initial void ratio and compression index is shown to  $C_c = 0.80e_0 - 0.58$ . The ratio of  $C_u/C_c$  in a range of 0.03 to 0.08 expresses a wide range.

**Keywords :** soft clay, physical characteristics, consolidation characteristics, Nakdong river lower basin, compression index

### 1. 서 론

낙동강 하구지역은 남해안에 인접한 지리적 특성으로 인하여 해성퇴적토가 발달되어 있다. Fig. 1은 낙동강 하구 주변 지역의 대표적인 지질학적 지층구조를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 시료 채취 위치를 나타내고 있다.

낙동강 주변 지역 지층은 지표로부터 매립층 및 퇴적층의 순으로 이루어져 있으며, 해성 퇴적토층은 점토층과 점토(실트)질 모래층이 서로 교호하면서 퇴적되어 있는 특징을 나타내며 상부 점토층은 매우 연약한 상태를 보여주고 있다. 연약 점성토층의 두께는 20m에서 40m까지 위치에 따라 다양하게 분포하고 낙동강 어귀에서는 그 두께가 70m를 초과하는 곳도 존재한다(Chung et al., 2002).

일반적으로 연약한 점성토 지반에 도로 및 대규모 구조물을 설치하는 경우 지반 파괴 및 과도한 침하의 문제가 발생하여 구조물의 안정성 및 사용성에 큰 영향을 미치게 된다. 낙동강 하구 지역은 연약 점성토층이 두껍게 분포하고 있으나 용지난의 어려움으로 1990년대부터 신항만 및 산업주거단지 등 개발이 가속화되고 있다. 이와 같은 개발에 있어서 하부 연약지반의 침하량 및 침하시간의 산정이 정확히 예측되지 않으면 막대한 경제적 손실의 발생 우려가 있으므로 연약 점성토의 압밀특성에 관한 명확한 규명이 절실히 요구되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 하구 지역에 위치하고 있는 녹산지역(미음지구, 국제물류단지, 가달지구)과 장유지역에서 채취한 72개의 불교란시료를 대상으로 물리적 특성시험과 압

\*동성지오테크(Dongsung Geotech Engineering Co.)

\*\*장원대학교 토목환경화학융합공학부(Corresponding author : Jeong Wook Jang, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University, Changwon, Gyeongnam 51140, Korea, Tel:+82-55-213-3775, Fax:+82-55-213-3775, jang@changwon.ac.kr)

\*\*\*계명대학교 건축토목공학부(School of Architecture and Civil Engineering, Keimyung University)

밀시험을 수행하여 낙동강 하구 지역 연약 점성토의 물리적 특성 및 압밀특성을 규명하고자 한다(Gang, 2014; Gang et al., 2014).

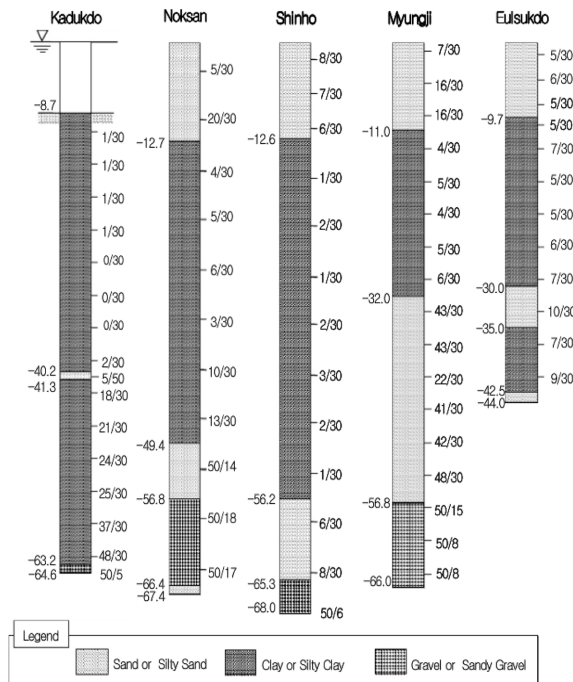


Fig. 1. Structure of the earth's strata in the estuary of Nakdong River(Kim, 2003).

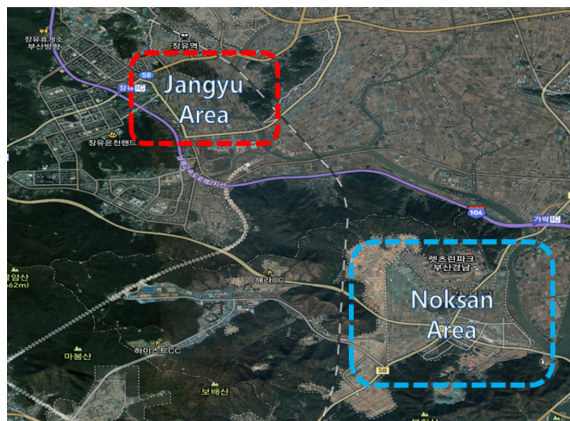


Fig. 2. Sampling location.

## 2. 시 험

Table 1은 본 연구에서 수행한 시험 내역을 정리한 것이다.

본 연구에서 수행한 물리·역학적 시험은 함수비시험, 비중 시험, 입도분석시험, 액·소성한계시험, 표준압밀시험으로 액·소성한계시험을 제외한 시험들은 KS F 규정에 의거하여 실시하였다. 일반적으로 액·소성한계시험은 KS F 2303에 규정되어 있는 Casagrande 법에 의거하여 국내에서는 수행되고 있으나 시험자의 숙련도에 따라 개인적인 오차가 많이 발생되는 것으로 알려져 있어서 본 연구에서는 여러 선진 국가에서 사용하고 있는 Fall cone test를 수행하여 액성한계와 소성한계를 결정하였다. Fall cone test는 국내에서는 시험 규정이 제정되어 있지 않아 BS 1377, 1399에 의거 실시하였다.

## 3. 시 험 결 과

### 3.1 물리적 특성

Table 2는 물리적 특성시험 결과를 정리한 것이다.

Table 2의 Noksan-A는 미음지구, Noksan-B는 국제물류단지, Noksan-C는 가달지구의 시험결과를 나타낸 것이다. 자연 함수비( $W_n$ )는 46.6~99.0%의 넓은 범위의 분포를 보였으며 녹산지역과 장유지역 모두 비슷한 범위를 나타내었다. 습윤 단위중량( $\gamma_i$ )은 14.5~17.2 kN/m<sup>3</sup>의 범위를 보였으며 두 지역 모두 비슷한 범위의 분포를 나타내었다. 액성한계(LL)는 44.8~83.2%의 범위로 나타났으며 장유지역이 녹산지역에 비하여 다소 높은 값을 나타내며 두 지역 모두 자연함수비보다 낮은 값을 나타내는 특징을 보였다.

Table 1. Details of tests conducted in this study.

Type of tests	Standards Applied	Test Number
Water Content	KS F 2306	72
Specific Gravity	KS F 2308	72
Liquid and Plastic (Fall Cone test)	BS 1377 / 1399	72
Sieve Analysis	KSF 2301 / 2302	72
Standard Consolidation	KS F 2316	72

Table 2. Results of physical characteristic tests.

Location	$W_n$ (%)	$\gamma_i$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$G_s$	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LI	$A_c$
Noksan-A	50.6 ~ 92.8	14.8 ~ 17.1	1.36 ~ 2.51	2.68 ~ 2.71	44.8 ~ 77.3	23.3 ~ 31.1	21.2 ~ 48.8	1.04 ~ 2.04	0.50 ~ 1.02
Noksan-B	50.4 ~ 90.5	14.6 ~ 16.7	1.42 ~ 2.51	2.67 ~ 2.71	46.0 ~ 70.7	20.1 ~ 33.0	24.1 ~ 45.1	0.90 ~ 1.62	0.54 ~ 1.10
Noksan-C	52.1 ~ 86.2	15.3 ~ 17.2	1.39 ~ 2.26	2.67 ~ 2.71	47.0 ~ 71.8	20.8 ~ 33.0	24.0 ~ 41.1	1.19 ~ 1.69	0.51 ~ 0.87
Jangyu	46.6 ~ 99.0	14.5 ~ 16.8	1.44 ~ 2.71	2.67 ~ 2.72	50.1 ~ 83.2	21.4 ~ 41.5	23.5 ~ 41.8	0.78 ~ 2.0	0.49 ~ 1.09

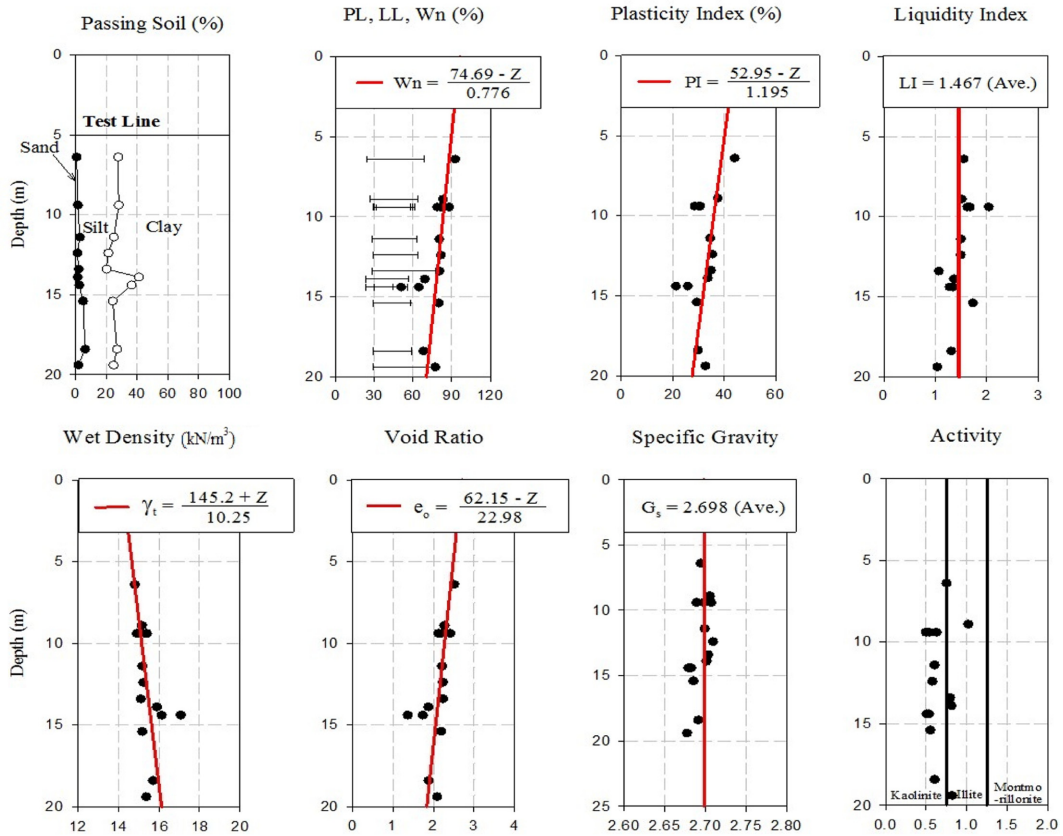


Fig. 3. Physical characteristics of Noksan-A by depth.

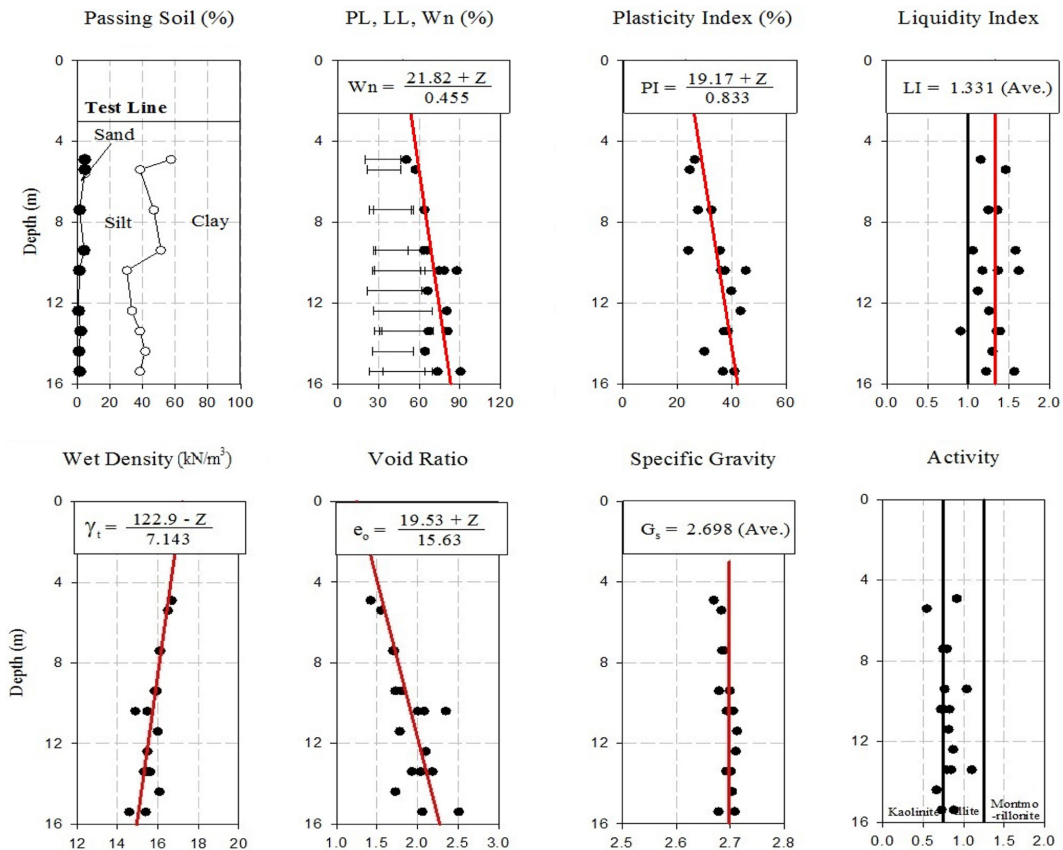


Fig. 4. Physical characteristics of Noksan-B by depth.

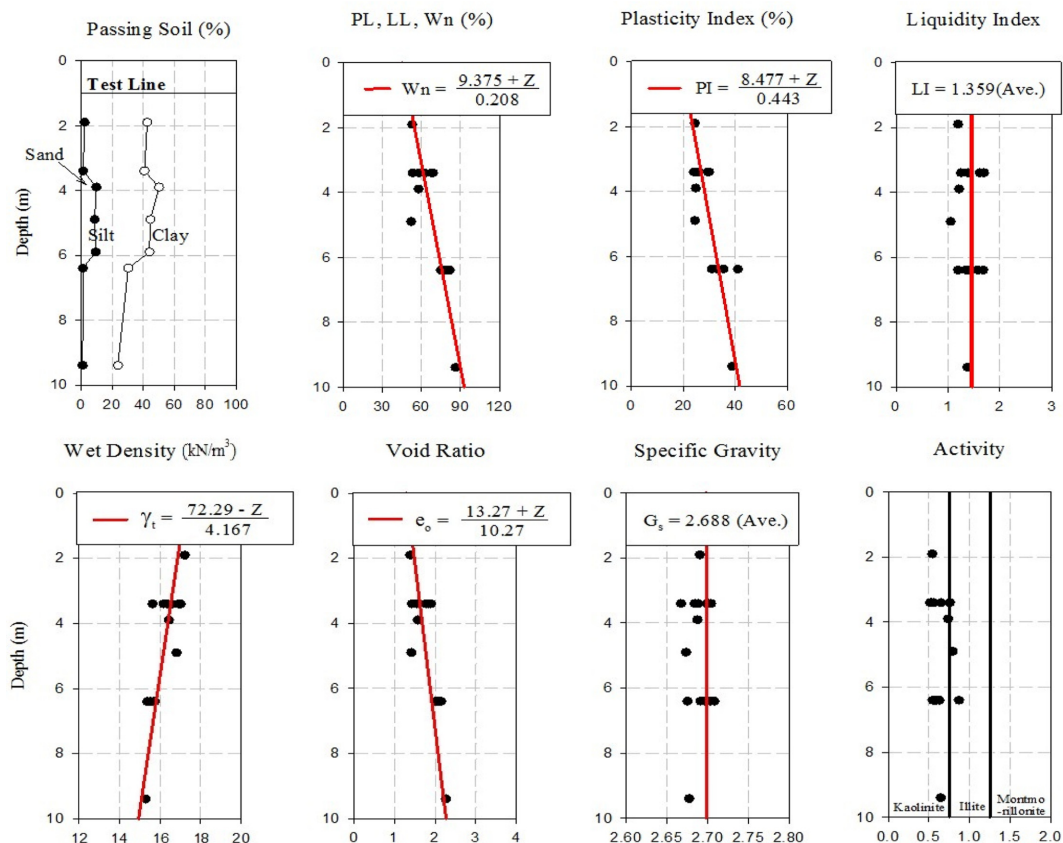


Fig. 5. Physical characteristics of Noksan-C by depth.

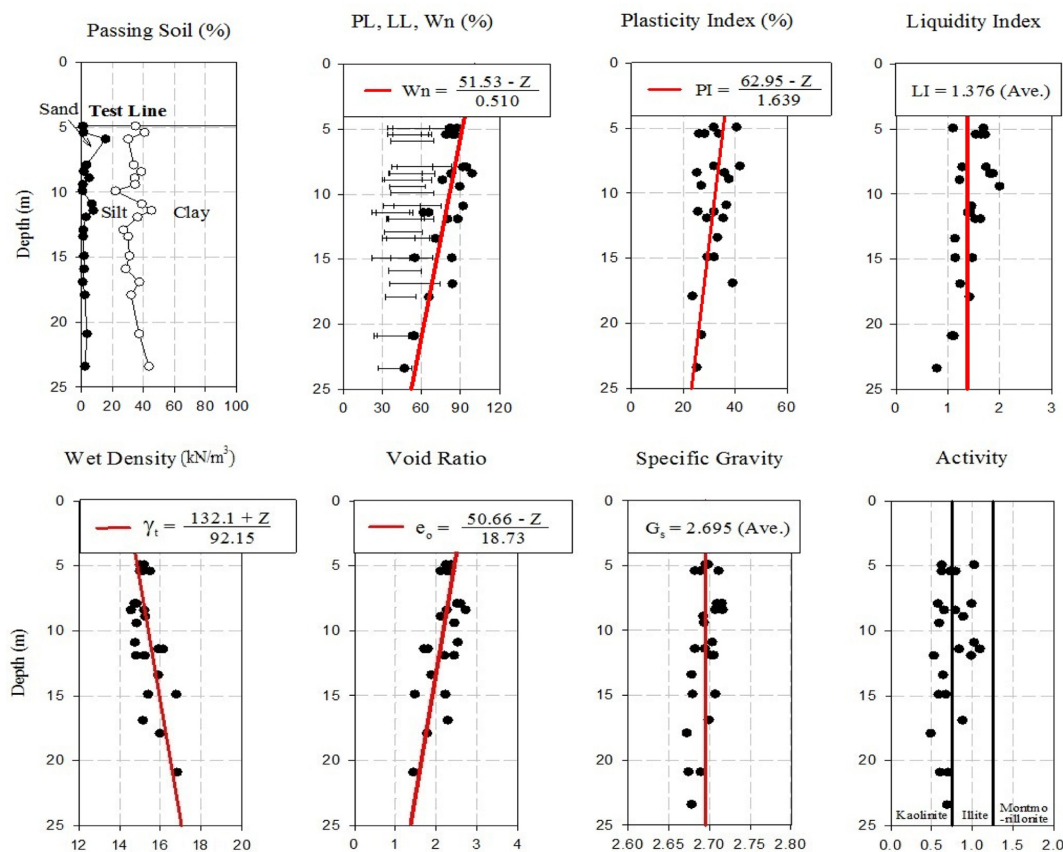


Fig. 6. Physical characteristics of Jangyu by depth.



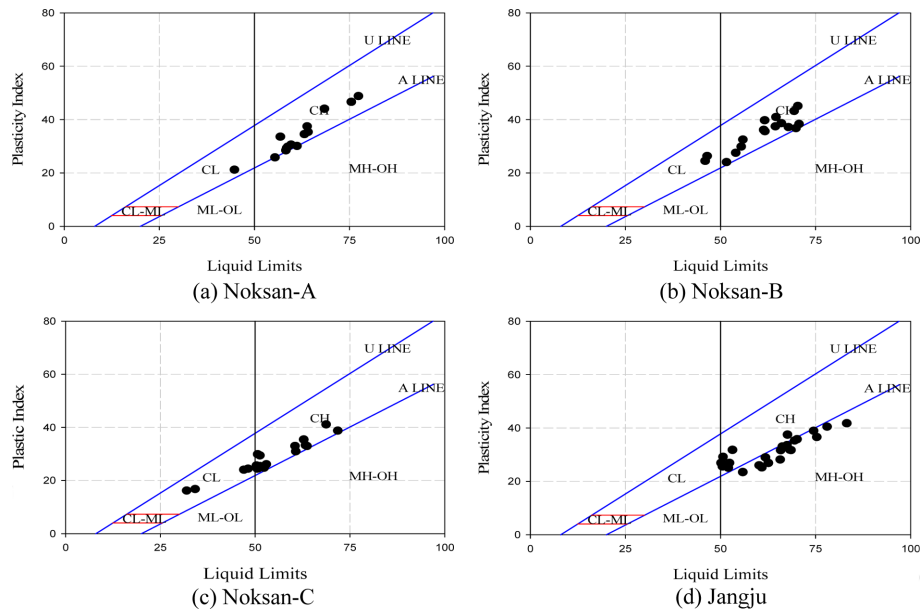


Fig. 7. Classification of soil by plastics chart.

Table 3. Results of consolidation tests.

Location	$C_c$	$C_a$	$\frac{C_c}{1+e_o}$	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)
Noksan-A	0.90 ~ 1.57	0.038 ~ 0.062	0.32 ~ 0.49	$1.71 \times 10^{-4} \sim 6.88 \times 10^{-4}$
Noksan-B	0.44 ~ 1.30	0.031 ~ 0.075	0.18 ~ 0.39	$2.07 \times 10^{-4} \sim 7.03 \times 10^{-4}$
Noksan-C	0.52 ~ 1.52	0.024 ~ 0.069	0.21 ~ 0.45	$2.02 \times 10^{-4} \sim 5.74 \times 10^{-4}$
Jangyu	0.67 ~ 1.94	0.027 ~ 0.092	0.27 ~ 0.52	$1.41 \times 10^{-4} \sim 2.66 \times 10^{-4}$

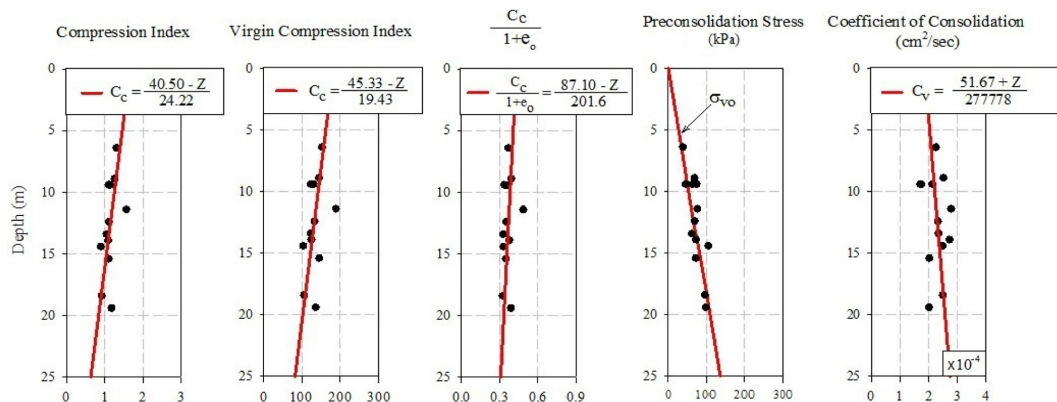


Fig. 8. Consolidation characteristics of Noksan-A by depth.

Fig. 3~Fig. 6은 각 지역의 물리적 특성값의 심도별 분포를 나타낸 것이다. 자연함수비( $W_n$ )와 소성지수( $PI$ ) 그리고 초기간극비( $e_o$ )의 심도별 변화양상은 미음지구(Noksan-A)와 장유지역은 심도가 깊어짐에 따라 값이 작아지는 경향을 보였으나 국제물류단지(Noksan-B)와 가달지구(Noksan-C)는 커지는 경향을 보였다. 그리고 습윤단위중량( $\gamma$ )은 심도증가에 따라 미음지구(Noksan-A)와 장유지역은 증가하는 반면 국제물류단지(Noksan-B)와 가달지구(Noksan-C)는 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 7은 소성도표에 의한 공학적 분류를 나타낸 것으로, 녹산지역은 CL과 CH로 분류되었으나 장유지역은 CH와 MH-OH로 분류되어 다소 차이를 보였다.

### 3.2 압밀 특성

Table 3은 압밀시험 결과를 정리한 것이다. 압축지수( $C_c$ )값은 녹산지역이 0.44~1.57의 범위로 분포하고, 장유지역은 0.67~1.94의 범위로 분포하고 있어 녹산지역보다 장유지역이

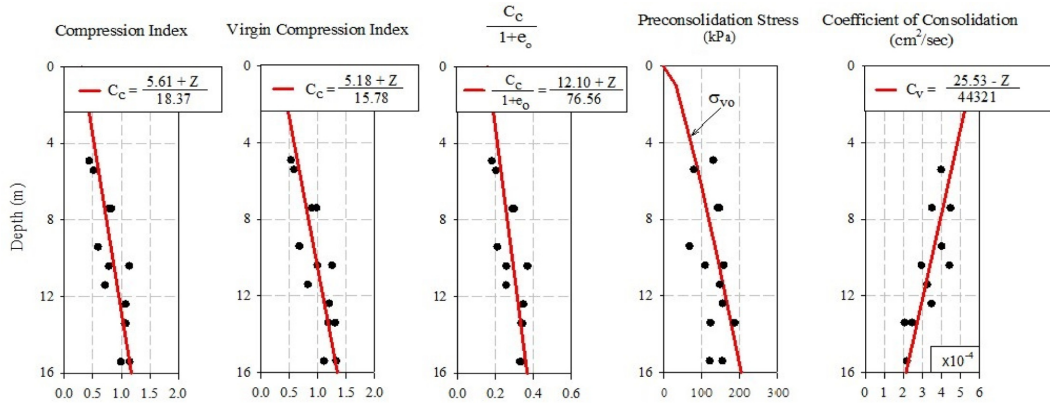


Fig. 9. Consolidation characteristics of Noksan-B by depth.

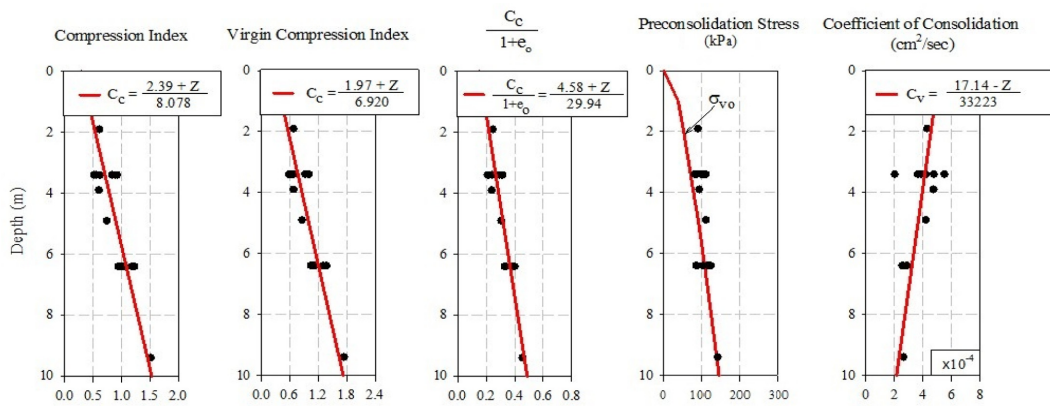


Fig. 10. Consolidation characteristics of Noksan-C by depth.

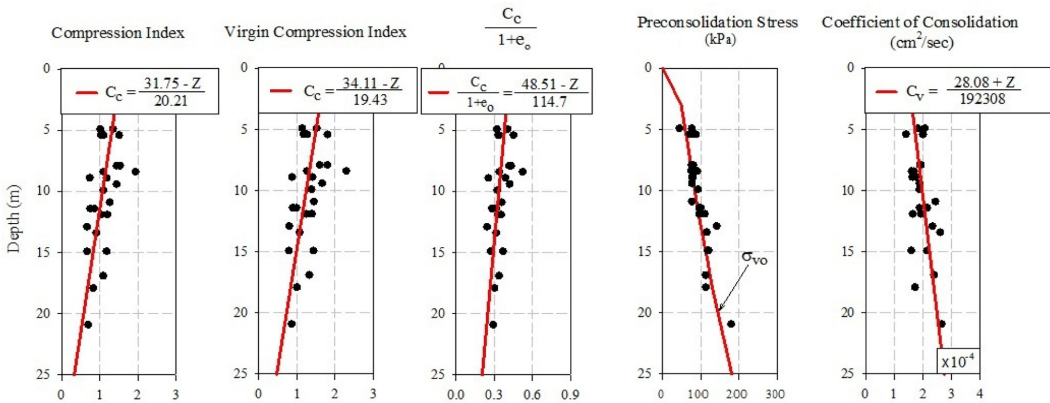


Fig. 11. Consolidation characteristics of Jangyu by depth.

다소 높게 나타났으며, 이차압축지수( $C_a$ ) 역시 장유지역이 0.027~0.092로 녹산지역 0.024~0.075보다 다소 높은 것으로 나타났다. 압밀계수( $C_v$ ) 값은  $1.41 \times 10^{-4} \sim 7.03 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 두 지역 모두 비교적 비슷한 범위로 분포하는 것으로 나타났다.

Fig. 8 ~ Fig. 11은 각 지역의 압밀특성값의 심도별 분포를 나타낸 것이다. 미음지구(Noksan-A)와 장유지역은 심도가 깊어짐에 따라 압축지수( $C_c$ )는 감소하는 경향을 보였으나 국

제물류단지(Noksan-B)와 가달지구(Noksan-C)는 증가하는 경향을 보였다. 반면 압밀계수( $C_v$ ) 값은 미음지구(Noksan-A)와 장유지역은 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보였고 국제물류단지(Noksan-B)와 가달지구(Noksan-C)는 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 12는 단계 하중별 이차압축지수( $C_a$ ) 값을 나타낸 것이다. 이차압축지수( $C_a$ )는 선행압밀하중( $P_c$ )에서 가장 높게 나타났다. 이후 점차 감소하는 경향을 보였다.

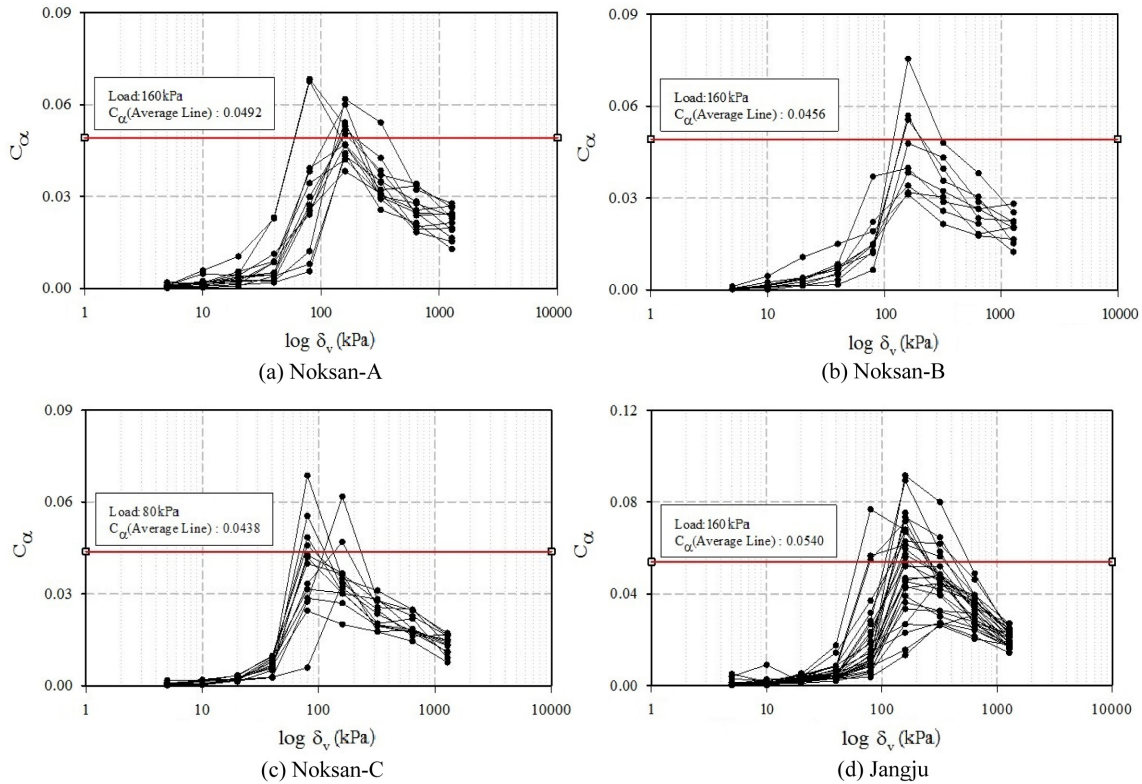


Fig. 12. Secondary compression index by load.

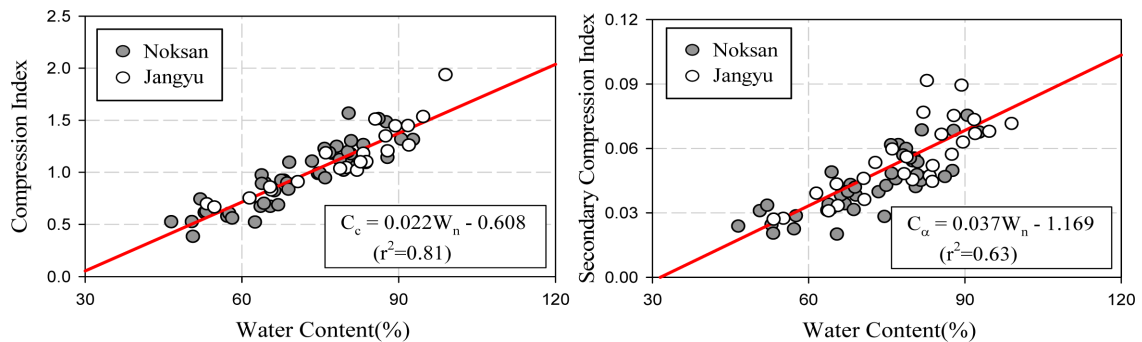


Fig. 13. Correlation of natural water content with compression index.

## 4. 결과 분석

### 4.1 함수비와 압축지수

Fig. 13은 자연함수비( $W_n$ )와 압축지수( $C_c$ ) 및 이차압축지수( $C_\alpha$ )와의 상관성을 회귀분석하여 나타낸 것이다. 자연함수비( $W_n$ )가 증가함에 따라 압축지수( $C_c$ )와 이차압축지수( $C_\alpha$ ) 값도 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 두 값 간의 상관성은 비교적 높게 나타났다.

### 4.2 초기간극비와 압축지수

Fig. 14는 초기간극비( $e_0$ )와 압축지수( $C_c$ ) 및 이차압축지수( $C_\alpha$ )와의 상관성을 회귀분석하여 나타낸 것이다. 초기간극비( $e_0$ )가 증가함에 따라 압축지수( $C_c$ )와 이차압축지수( $C_\alpha$ ) 값도

비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 두 값 간의 상관성은 비교적 높게 나타났다. 압축지수와 초기간극비와의 관계는 Jang et al.(2001)이 김해지역 점토에 대하여 제안한 관계식( $C_c = 0.7(e_0 - 0.34)$ )과 유사한 것으로 나타났다.

### 4.3 소성지수와 압축지수

Fig. 15는 소성지수(PI)와 압축지수( $C_c$ ) 및 이차압축지수( $C_\alpha$ )와의 상관성을 회귀분석하여 나타낸 것이다. 소성지수(PI)와 압축지수( $C_c$ ,  $C_\alpha$ )간의 상관성은 매우 낮은 것으로 나타났다.

### 4.4 액성한계와 압축지수

Fig. 16은 액성한계(LL)와 압축지수( $C_c$ ) 및 이차압축지수( $C_\alpha$ )와의 상관성을 회귀분석하여 나타낸 것이다. 압축지수( $C_c$ ,

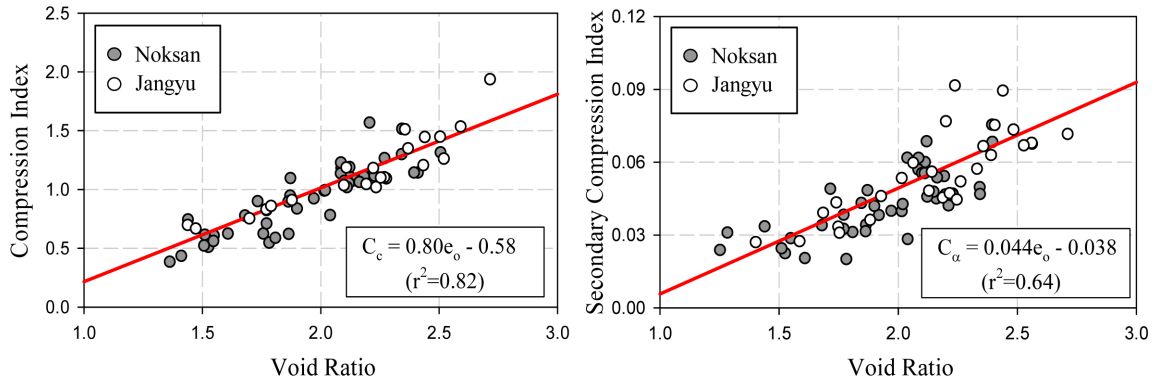


Fig. 14. Correlation of void ratio with compression index.

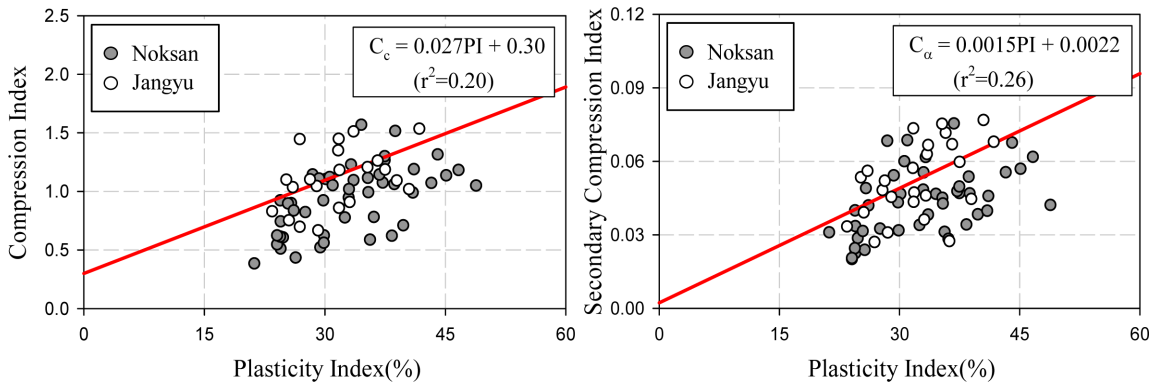


Fig. 15. Correlation of plasticity index with compression index.

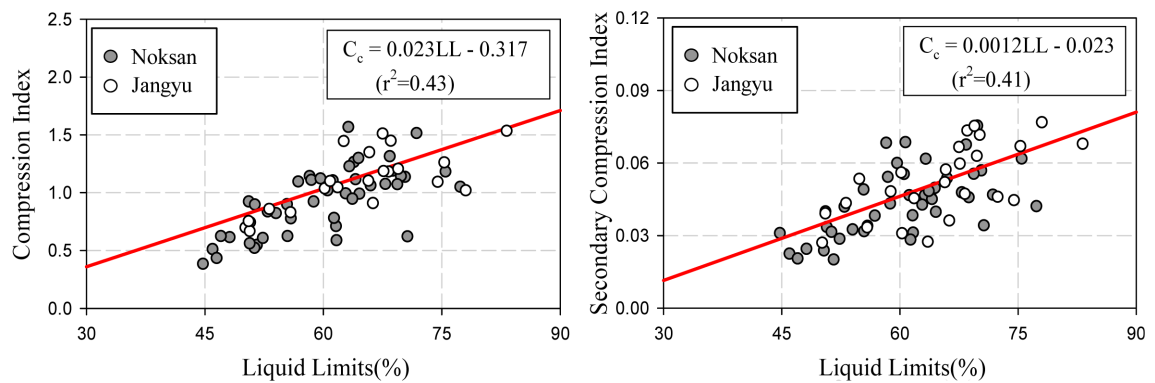


Fig. 16. Correlation of liquid limit with compression index.

$C_\alpha$ 와 액성한계(LL) 간의 상관성은 소성지수와의 상관성에 비하여 높은 것으로 나타났으나 다소 분산된 경향을 보였다.

#### 4.5 압축지수와 이차압축지수

Fig. 17은 압축지수( $C_c$ )와 이차압축지수( $C_\alpha$ )와의 상관성을 회귀분석하여 나타낸 것이다. 두 지수 간의 상관성은 다소 분산된 경향을 보이고는 있으나 선형적인 관계로 나타났다.  $C_\alpha/C_c$  값은 0.03~0.08의 다소 넓은 범위로 분포하는 것으로 나타났다. Mesri et al.(1987)은 무기질 점토의 경우는  $C_\alpha/C_c = 0.04 \pm 0.01$ , 유기질 점토의 경우는  $C_\alpha/C_c = 0.05 \pm 0.01$ 의 범위에 존재한다고 발표하였는데, 낙동강 하구지역 연약 점

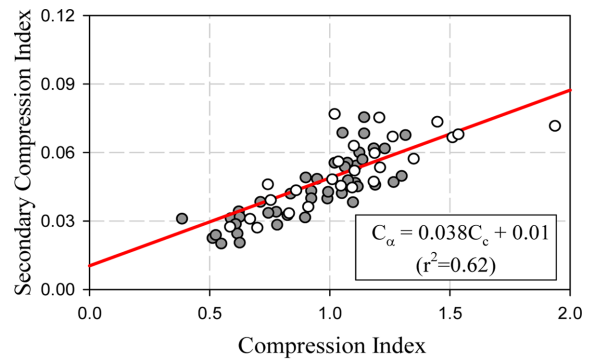


Fig. 17. Correlation of compression index with secondary compression index.



성토의  $C_u/C_c$  비는 Mesri et al.(1987)가 제안한 값보다는 다소 넓은 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

낙동강 하구지역에 위치하는 녹산지역과 장유지역의 연약한 점토층에 대한 물리적특성 및 압밀특성의 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 낙동강 하구지역 점성토의 주요 점토광물은 Kaolinite, Illite 계열로 분류되었으며, 소성도표에 의한 분류결과 녹산지역은 CH로 분류되었으나, 장유지역은 MH-OH로 분류되어 다소 차이를 보였다.

2. 자연함수비( $W_n$ )는 녹산지역 및 장유지역이 각각 50.4~92.8%, 46.6~99.0%의 범위로 비슷하게 분포하고 있으며, 액성한계(LL)는 두 지역 모두 자연함수비( $W_n$ )보다 낮게 분포하는 것으로 나타났다. 압축지수는 녹산지역이 0.44~1.57의 범위로 분포하고, 장유지역은 0.67~1.94의 범위로 분포하고 있어 녹산지역보다 장유지역이 다소 높게 나타났으며, 이차 압축지수 역시 장유지역이 0.027~0.092로 녹산지역 0.024~0.075보다 다소 높은 것으로 나타났다.

3. 낙동강 하구지역의 물리적특성에 따른 압축지수( $C_c$ )를 회귀분석한 결과 자연함수비( $W_n$ )와 압축지수와는 선형적이며 다소 높은 상관성을 보였으며, 또한 초기간극비( $e_0$ )의 경우 Jang et al.(2001)의 연구 결과  $C_c = 0.7(e_0 - 0.34)$ 와 유사한 것으로 나타났다.

$$C_c = 0.80e_0 - 0.58$$

4. 이차압축지수( $C_u$ )는 0.024~0.092의 값으로 두 지역 모두 비슷한 범위로 분포하고 있으며,  $C_u/C_c$  비는 0.03~0.08의 범위로 유기질 점토에 대한 Mesri et al.(1987)가 제안한  $C_u/C_c = 0.05 \pm 0.01$ 보다 다소 넓은 범위의 값을 나타내었다.

## 감사의 글

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

## References

- Chung, S. G., Giao, P.H., Kim, G. J. and Leroueil, S.(2002). Geotechnical properties of Pusan clay. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, No. 5, 1050~1060.
- Gang, S. U.(2014). A Study on consolidation characteristics of clay in Noksan and Jangyu area. Master's Thesis, Changwon University (in korean).
- Gang, S. U., Jang, J. W. and Chung, J. G. (2014). A study on consolidation characteristics of caly in Noksan and Jangyu area. Joint Conference on Ocean Sciences, Busan, Korea, May 22 - 23, 1486 (in korean).
- Jang, J.W., Choi, S. M. and Park, C. S.(2001). A Study on the Relationship between the Physical Properties of Soil and the Compression Index of Soft Clay in Gyungnam Coastal Region. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 13(4), 282~289 (in korean).
- Kim, Y.T. (2003). A study on geotechnical characteristics of Busan clay. Samsung Construction Co. Ltd., Busan, Korea(in korean).
- Mesri, G. and Castro, A.(1987). The  $C_u/C_c$  concept and  $K_o$  during secondary compression. Journal of geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, No. GT3, 230~247.

Received 18 October, 2016

Revised 26 October, 2016

Accepted 28 October, 2016