

# 재성형점토의 압축특성을 이용한 자연점토의 압축지수 추정

## Evaluation of Compression Index for Natural Clay Using the Compression Characteristic of Reconstituted Clay

홍 성 진 <sup>1</sup>	Hong, Sung-Jin	김 동 휘 <sup>2</sup>	Kim, Dong-Hee
이 문 주 <sup>3</sup>	Lee, Moon-Joo	지 홍 근 <sup>4</sup>	Jie, Hong-Keun
이 우 진 <sup>5</sup>	Lee, Woo-Jin		

### Abstract

The compression index, representing the compressibility of clay, is generally obtained from the consolidation test, or predicted by empirical correlations using soil properties. However, empirical methods have regional limitations, because the compression index is affected not only by soil properties but also by site characteristics, such as deposition conditions and stress history. In this study, a method evaluating the compression index from typical soil properties is suggested using the characteristics of reconstituted clay. By analyzing the consolidation test results of Busan clay, the suggested method is verified, and the analysis of prediction error is carried out. It is shown that the proposed method evaluates the compression index more accurately than empirical methods previously suggested. The prediction errors occur by assumption, and are inversely proportional to  $e_{cross}/e_0$ , obviously.

### 요 지

압축지수는 점토의 압축특성을 나타내는 대표적인 물성치로 압밀시험으로 직접 결정하거나, 점토의 기본 물성으로부터 경험적 방법으로 추정한다. 그러나 자연점토의 압축지수는 지반 물성치뿐 아니라 퇴적상태에 영향을 받으므로 경험적 추정방법은 지역적 한계를 지닌다. 본 연구에서는 재성형점토의 압축특성을 이용하여 지반 물성치로부터 자연점토의 압축지수를 추정하는 새로운 방법을 제안하였다. 부산점토의 압밀시험 결과를 통해 제안방법의 적합성을 검증하였으며, 오차원인을 분석하였다. 분석결과 제안된 방법은 경험적 추정방법보다 압축지수를 정확하게 추정하였다. 제안방법의 오차는 가정사항에 의해 발생하며, 추정오차는  $e_{cross}/e_0$ 와 명확한 반비례 관계를 나타냈다.

**Keywords :** Compression index, Consolidation test, Natural clay, Reconstituted clay

### 1. 서 론

지반의 침하는 구조물의 안정과 서비스 성능에 큰 영

향을 미치므로 지반 구조물 설계 및 시공 시 지반의 압축특성을 파악하는 일은 매우 중요하다. 압축지수( $C_c$ )는 점성토의 압축특성을 나타내는 대표적인 물성치로 압

1 정회원, 대림산업 대리 (Member, Assistant Manager, Daelim Industrial co., Ltd.)

2 정회원, SK건설 과장 (Member, Manager, SK Engineering and Construction.)

3 정회원, 한화건설 과장 (Member, Manager, Hanwha Engineering and Construction)

4 정회원, 대우건설 상무 (Member, Managing Direct, Daewoo Engineering and Construction)

5 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Professor, School of Civil, Environ. & Arch. Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3319, Fax: +82-2-928-7656, woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 9월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

밀 침하량 산정에 사용된다. 압축지수는  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선에서 정규압밀 영역의 직선기울기를 의미하며, 일반적으로 비교란 시료를 이용한 압밀시험으로 산정한다. 그러나 비교란 시료의 채취와 압밀시험에 많은 시간과 비용이 소요되므로 간편하게 측정할 수 있는 지반 물성치로부터 경험적으로 압축지수를 추정하기도 한다.

Skempton(1944)이 압축지수와 액성한계의 관계를 제시한 이후로 많은 연구자들은 압축지수와 함수비( $w_n$ ), 간극비( $e_0$ ), 간극률( $n_0$ ), 액성한계( $w_L$ ), 소성지수( $I_p$ ), 수축지수( $I_s$ ) 등의 관계를 분석하여 압축지수 추정식을 Table 1과 같이 제안하였다. 이러한 추정식들은 크게 함수비, 간극비, 단위중량 등 지반상태를 나타내는 상태변수(state variable)를 이용하여 제안된 식과 액성한계, 소성지수, 수축지수 등 점토 고유특성을 나타내는 고유변수(intrinsic variable)를 이용하여 제안된 식으로 구분할 수 있다. 두 종류의 추정식 모두 자연시료의 압축지수 추정에는 문제점을 가지고 있다. 상태변수는 퇴적상태뿐만 아니라 구속응력 및 응력이력 등에 영향을 받는다. 그러나 압축지수는 퇴적상태에는 영향을 받지만 구속응력이나 응력이력에는 큰 영향을 받지 않으므로 상태변수로 압축지수를 직접 추정하는 것에는 문제가 있다. 반면, 고유변수는 교란시료를 이용하여 추정하므로 교란시료의 압축지수 추정에는 적합할 수 있으나 퇴적에 의한 자연점토의 특성을 반영하지 못하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 Schmertmann(1955)의 제안과 재성형 점토의 압축특성을 이용하여 자연시료의 압축지수를 추정하는 방법을 제안하였다. 선행연구자들은 압밀시험에서 얻은 압축지수와 단일 또는 복수의 지반 물성치를 통계적으로 분석하는 경험적 방법으로 압축지수 추정식을 제안하였으나 본 연구에서는 자연 및 재성형점토의 압축특성을 이용하여 이론적으로 압축지수 추정식을 제안하였다. 부산지역 점토의 압밀시험 결과를 분석하여 제안된 추정방법을 검증하였으며, 경험적 추정방법과 비교하여 제안방법의 정확성을 확인하였다. 그리고 추정오차 분석을 통해 자연점토의 퇴적상태와 흠구조 붕괴특성( $e_{\text{cross}}/e_0$ )이 제안방법의 압축지수 추정에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 압축지수 추정방법 제안

압밀시험의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선에서 산정한 압축지수는 시료의 채취 및 시험과정에서 발생된 응력이완과 물리적

교란으로 인해 실제보다 과소평가된다. Schmertmann(1955)은 여러 흠에 대한 시험결과 다양한 교란도를 가진 시료의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선이 간극비  $0.37e_0 \sim 0.60e_0$ 에서 일치하며, 일반적인 흠에서는  $0.40e_0 \sim 0.46e_0$  정도에서 대부분 일치한다고 하였다. 이러한 시험결과를 바탕으로 Schmertmann(1955)은 교란된 시료와 현장점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선이  $0.42e_0$ 에서 일치한다고 가정하고, 압밀시험 결과로부터 교란 효과가 보정된 현장의 압축지수를 추정하는 방법을 제안하였다. 이를 식으로 표현하면 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$C_c = \frac{e_o - 0.42e_o}{\log(\sigma'_{0.42}) - \log(\sigma'_{v0})} \quad (\text{NC case}) \quad (1)$$

$$C_c = \frac{e_o - 0.42e_o - C_r \log(\sigma'_p / \sigma'_{v0})}{\log(\sigma'_{0.42}) - \log(\sigma'_p)} \quad (\text{OC case}) \quad (2)$$

여기서,  $\sigma'_{v0}$ 는 현장 연직유효응력,  $\sigma'_p$ 는 선행압밀하중,  $\sigma'_{0.42}$ 는 간극비  $0.42e_0$ 에서의 연직유효응력,  $C_r$ 은 재압축 지수이다. Burland(1990) and Liu and Carter(1999) 역시 자연시료의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선이 구속응력이 증가함에 따라 재성형시료의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선에 접근하는 것을 관찰하였으며, 그 이유는 압밀하중에 의해 흠구조(soil structure)가 점진적으로 붕괴되기 때문이라고 주장하였다. Leroueil et al.(1979)은 자연시료가 항복하중 이상의 하중을 받을 경우 흠구조가 붕괴하기 시작하며, 이러한 현상을 'destruction'이라 정의하였다. 이러한 연구결과들은 Schmertmann(1955)의 연구결과를 뒷받침해준다.

비교란된 자연점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선은 구속응력이 증가함에 따라 재성형점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선에 근접하는 반

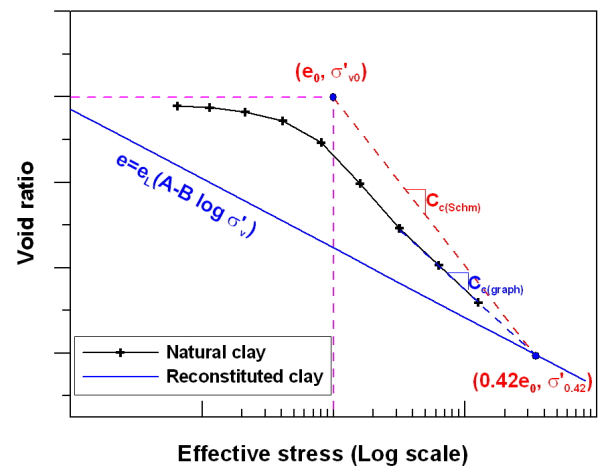


Fig. 1.  $e\text{-log}\sigma'_v$  curves of natural clay and reconstituted clay

면, 완전 교란된 점토인 재성형점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선은 점토의 고유변수와 특정한 관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 선행연구자들은 재성형점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선을 액성한계나 소성지수를 이용하여 표현하였으며, 이를 ‘diffuse double layer theory’ 등을 이용하여 이론적으로 설명하였다(Wroth and Wood, 1978; Sridharan and Jayadeva, 1982; Nagaraj and Srinivasa Murthy, 1983; Nagaraj and Srinivasa Murthy, 1986; Sridharan and Nagaraj 2000; Tripathy et al., 2004; Tripathy and Schanz, 2007). Fig. 1은 자연점토와 재성형점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선을 도시한 예로써, 점선의 기울기는 Schmertmann(1955) 방법으로 보정한 자연점토의 압축지수( $C_{c(Schm)}$ )이다. Nagaraj and Srinivasa Murthy(1983) and Burland(1990)는 재성형시료의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선은 액성한계에서의 간극비( $e_L$ )와 관계가 있다고 주장하였고, Nagaraj and Srinivasa Murthy (1983)는  $e_L$ 을 이용하여 유효응력에 따른 간극비의 변화를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$e = e_L(A - B \log \sigma'_v) \quad (3)$$

여기서, A와 B는 상수로 연직유효응력( $\sigma'_v$ )의 단위가 kPa인 경우 Nagaraj and Srinivasa Murthy(1983)는 각각 1.099와 0.2237, Nagaraj and Miura(2001)는 1.23과 0.28이라 하였으며, Burland(1990)는 점토광물에 따라 다르다고 하였다.

Schmertmann(1955)의 연구결과와 같이 자연점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선이 완전 교란시료라 할 수 있는 재성형점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선과  $0.42e_0$ 에서 교차한다면,  $\sigma'_{0.42}$ 는 식(3)에서부터 구할 수 있으며 식 (4)와 같이 표현될 수 있다. 그리고 식 (3)에서 보면 재성형점토의  $C_c$ 는  $Be_L$ 이며, 일반적으로 점토의  $C_r$ 은  $(0.1 \sim 0.2)C_c$  이므로  $C_r=0.15Be_L$ 로 가정할 수 있다. 식 (3)과  $C_r=0.15Be_L$ 을 식 (1)과 (2)에 대입하면, 식 (1)과 식 (2)는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 즉, 식 (1)과 (2)의  $\sigma'_{0.42}$ 를 압밀시험이 아닌 재성형점토의  $e\text{-log}\sigma'_v$  곡선인 식 (3)으로부터 추정할 수 있다는 것이다. 여기서, 분석대상지반의 A와 B를 안다면 식 (5)를 통해 자연점토의 압축지수를 추정할 수 있다.

$$\sigma'_{0.42} = 10^{\left[ \frac{Ae_L - 0.42e_0}{B_e} \right]} \quad (4)$$

Table 1. Empirical correlations of compression index

	Equation	Applicability	Reference
Intrinsic variable	$C_c = 0.007(w_L - 10)$	Remolded clays	Skempton, 1944
	$C_c = 0.0046(w_L - 9)$	Brazilian clays	Cozzolino, 1961
	$C_c = 0.017(w_L - 20)$	All clays	Shouka, 1964
	$C_c = 0.006(w_L - 9)$	All clays	Azzouz et al., 1976
	$C_c = 0.011(w_L - 6.36)$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = 0.014I_P + 0.02$	North Atlantic clay	Nacci et al., 1975
	$C_c = 0.014I_P + 0.046$	Best for $IP < 50\%$	Nakase et al., 1988
	$C_c = 0.014I_P + 0.165$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = 0.007(I_s - 18)$	Remolded clays	Sridharan & Nagaraj, 2000
State variable	$C_c = 0.01(w_n - 5)$	All clays	Azzouz et al., 1976
	$C_c = 0.01w_n$	All clays	Koppula, 1981
	$C_c = 0.01(w_n - 7.549)$	All clays	Herrero, 1983
	$C_c = 0.01(w_n + 2.83)$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = 0.246 + 0.43(e_0 - 0.25)$	Motley clays, Brazil	Cozzolino, 1961
	$C_c = 1.21 + 1.055(e_0 - 1.87)$	Santos, Brazil	Cozzolino, 1961
	$C_c = 0.75(e_0 - 0.5)$	Soils (low plasticity)	Sowers, 1970
	$C_c = 0.39(e_0 - 0.13)$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = \frac{n_0}{371.747 - 4.275n_0}$	Ariake clay	Park & Koumoto, 2004

$$C_c = \frac{Be_L[0.58e_0 - 0.15Be_L \log(OCR)]}{(Ae_L - 0.42e_0) - Be_L \log(OCR\sigma'_{10})} \quad (5)$$

식 (5)는 액성한계, 함수비, 구속응력으로부터 자연점토의 압축지수를 추정할 수 있는 식이다. Table 1에 나타난 추정식들은 기본물성과 압밀시험결과에서 구한 압축지수를 비교하여 경험적으로 제안한 식인 반면, 식 (5)는 자연점토의 'destruction' 특성과 재성형점토의  $e\text{-}\log\sigma'_v$  곡선과 액성한계의 관계(식 3)를 이용하여 압축지수를 추정하는 방법을 제안한 것이다. Table 1의 경험식들과 달리 제안된 식 (5)에서는 구속응력이 추정식에 포함되어 있다. 이것은 자연점토의 압축지수가 퇴적상태에 영향을 받기 때문이며, 자연점토의 퇴적상태는 간극비와 액성한계 그리고 구속응력과의 관계로 표현된다(Hong et al., 2011). 이와 같이 본 연구에서 제시한 식 (5)는 자연점토의 퇴적상태를 고려할 수 있는 압축지수 추정식이다.

### 3. 연구지역 기본물성 및 압축성

#### 3.1 기본물성 결과

본 연구는 제안방법의 검증을 위해 부산지역인 부산신항만 및 양산지역 압밀시험 결과를 분석하였으며, 대상지반의 위치는 Fig. 2와 같다. 부산점토는 낙동강 하

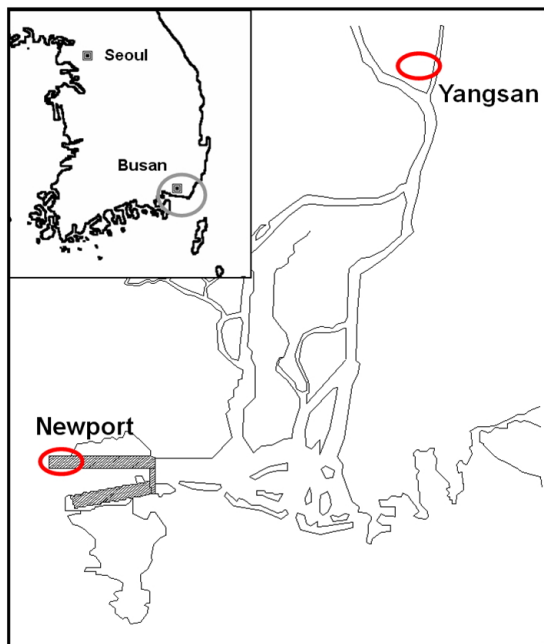


Fig. 2. Locations of test sites

구에 퇴적된 점토로 위치에 따라 다르나 20m~70m 두께로 점토층이 퇴적되어 있으며, 점토층은 심도 10m~30m를 경계로 물성치가 다른 2개 층으로 구분된다(Jang et al., 2006; Chung et al., 2005; Kim, 1999; Kim, 2008). 부산신항만 현장은 해수면 아래로 점토층이 EL-40m~EL-50m까지 퇴적되어 있으며, 항만건설을 위해 5m~6m 정도의 모래를 매립하였다. 양산은 부산광역시 북쪽 내륙에 위치한 지역으로 상부 2m~6m 두께의 매립층 하부에 EL-25m~EL-35m까지 점토층이 퇴적되어 있다.

Fig. 3은 대상 지반의 기본 물성치를 심도에 따라 나타낸 것으로, 평균값과 범위를 표시하였다. 부산신항만 지역의 함수비, 액성한계 및 소성한계는 각각 35%~75%, 40%~90%, 20%~35%로 나타났다. 양산지역의 함수비, 액성한계 및 소성한계는 각각 35%~60%, 40%~75%, 20%~30%로 나타났다. 심도에 따른 함수비와 액성한계의 변화를 보면, 부산신항만 지역은 EL-25m까지의 증가하다 이후에 감소하였으며 양산지역은 명확한 경향이 나타나지 않았다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 부산신항만 지역의 경우 기본물성의 편차가 작은 반면, 양산지역은 기본물성의 편차가 큰 것으로 나타났다. 이것은 양산지역이 부산신항만 지역에 비해 넓은 지역에서 시료를 채취하였기 때문으로 판단되며, 부산신항만 및 양산지역에서 각각 50개와 51개 시료를 채취하여 기본물성시험을 수행하였다.

Fig. 4는 소성도표로 부산신항만과 양산점토는 모두 CH 또는 CL로 분류 된다. 두 지역의 점토는 모두 A-line 위에 위치하고 있어 대상점토의 주요성분이 illite임을

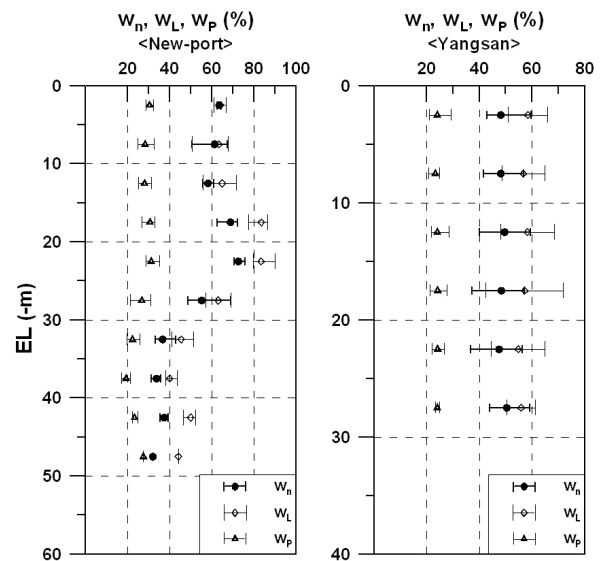


Fig. 3. Typical soil properties

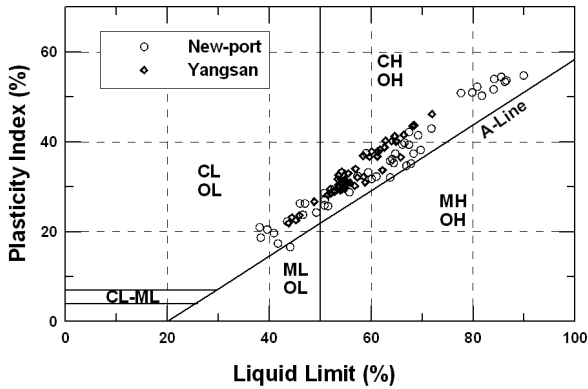


Fig. 4. Plasticity chart

간접적으로 알 수 있다. 이는 XRD 분석으로 부산점토는 illite 계열의 점토임을 밝힌 Locat and Tanaka(1999)와 Hong et al.(2009)의 연구결과와 일치한다.

### 3.2 압밀시험 결과

부산신항만 및 양산지역에서 각각 50개와 51개의 표준압밀시험 결과를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 부산신항만과 양산지역의 과압밀비(OCR)는 상부층을 제외하고는 대부분 0.7~1.5 정도로, 대상 현장지반은 정규압밀된 지반으로 판단된다. Fig. 5의 압축지수는 Schmertmann(1955)의 방법으로 교란효과를 보정한 값으로, 부산신항만 및 양산점토의 압축지수는 대부분 0.4~1.2 사이에 분포하였다. 부산신항만 지역의 압축지수는 Fig. 2의 함수비 및 액성한계 분포와 유사하게 E-25m까지 증가하다 그 이하의 깊이에서는 감소하는 경향이 나타났다.

### 4. 제안방법을 이용한 압축지수 추정

Hong et al.(2011)이 부산신항만 재생형점토에 대하여 압밀시험을 수행한 결과 부산점토의 A와 B는 1.224와 0.256으로 나타났다. 본 연구에서는 이 A와 B를 식 (5)에 대입하여 압축지수를 추정하였다. Fig. 6은 압밀시험으로 구한 압축지수와 제안방법을 이용하여 추정한 압축지수를 비교한 것이다. 압밀시험 구한 압축지수의 경우 Schmertmann의 보정방법을 이용하여 교란효과를 보정한 압축지수이다. 두 지역 모두 추정오차는 대부분 20% 이하였으며, 최대 추정오차는 40% 정도로 나타났다.

본 연구에서는 제안방법을 검증하기 위하여 제안된 방법과 기존의 경험적 방법으로 추정한 압축지수의 정

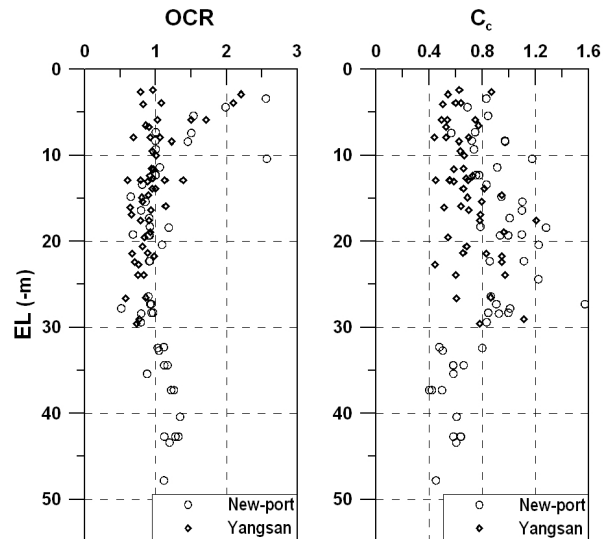


Fig. 5. Results of consolidation tests

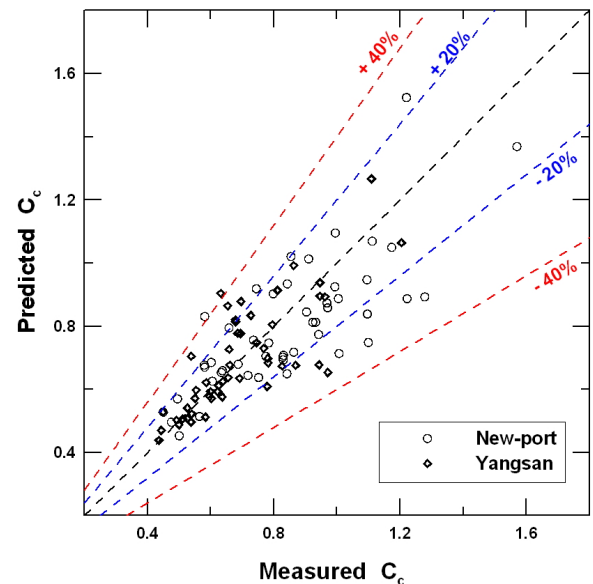


Fig. 6. Comparison of measured  $C_c$  and predicted  $C_c$

확성을 비교하였다. Fig. 7은 액성한계 및 함수비와 압축지수의 관계를 나타낸 그림으로, 이를 바탕으로 함수비와 액성한계로 부산점토의 압축지수를 추정하는 식을 제안하였다. Fig. 7에서 두 추정식을 비교한 결과 함수비를 이용한 추정식의 결정계수( $R^2$ )가 더 크게 나타났으며, 이는 Azzouz et al.(1976) and Yoon et al.(2004)의 결과와 일치한다. Table 2는 본 논문의 제안방법(식 5)과 Fig. 7의 경험적 추정식의 정확성을 비교한 것이다. 결정계수는 데이터의 크기와 분포등에 따라 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 ME(Mean Error)와 MAE(Mean Absolute Error)를 이용하여 각 추정식의 정확성을 비교하였다. ME와 MAE는 추정식의 정확성을 평가하는 지

표로 식 (6) 및 식 (7)과 같으며, ME는 0에 가까울수록 MAE는 작을수록 추정식의 정확성이 높다.

$$ME = \frac{\sum(C_{c(\text{Predicted})} - C_{c(\text{measured})})}{n} \quad (6)$$

$$ME = \frac{\sum|C_{c(\text{Predicted})} - C_{c(\text{measured})}|}{n} \quad (7)$$

여기서, n은 분석 데이터의 개수이다.  $C_{c(\text{predicted})}$ 는 추정식을 통해 추정한 압축지수,  $C_{c(\text{measured})}$ 는 압밀시험에서 구한 압축지수로 Schmertmann의 방법으로 교란효과를 보정한 값이다. Table 2를 보면 부산신항만과 양산지역에 대하여 액성한계를 이용한 압축지수 추정식의 ME는 각각 -0.036과 0.028, 함수비를 이용한 추정식의 ME는 -0.027과 0.022로 나타나 Fig. 7의 경험적 추정식이 부산신항만 지역의 압축지수를 약간 과소평가하며 양산지역의 압축지수는 약간 과대평가하는 것으로 나타났다. 두 지역 모두 함수비를 이용한 추정식의 MAE가 액성한계를 이용한 추정식의 MAE 보다 작아 함수비를 이용한 압축지수 추정식의 정확성이 높았다.

제안방법(식 5)의 경우 부산신항만과 양산지역의 ME

는 -0.028과 0.004, MAE는 0.117과 0.080으로 나타나 신항만지역에 비해 양산지역의 추정 정확성이 높았다. 제안방법은 Fig. 7의 경험적 추정식들에 비해 추정 정확성이 높았으며, 특히 양산지역의 경우 제안방법의 추정 정확성이 경험적 방법에 비해 월등히 뛰어났다. 경험적 방법은 통계분석을 통해 추정식을 제안하므로 신뢰성 있는 추정식을 제안하기 위해서는 다수의 동일지역 압밀 시험 결과가 필요하다. 반면 본 연구방법은 대상지반의 A와 B 그리고 대략적인 응력상태를 안다면 압축지수 추정식을 제안할 수 있다. 또한 본 연구방법은 자연점토의 퇴적상태를 고려하는 방법으로 추정식의 정확성이 경험적 방법에 비해 뛰어났다. 전술하였듯이 A와 B는 재성형점토에 대한 결과로, 구성 점토성분이 유사하다면 비슷한 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 실제 압축지수 추정결과 제안된 A와 B는 부산신항만과 양산지역에 적합한 것으로 판단된다.

### 5. 제안방법의 추정오차 분석

본 장에서는 제안방법(식 5)의 추정오차 원인에 대하여 확인하여보았다. 자연점토의 압축지수 추정 시 물성치 측정오차, 점토의 퇴적상태, 점토의 흙구조 붕괴특

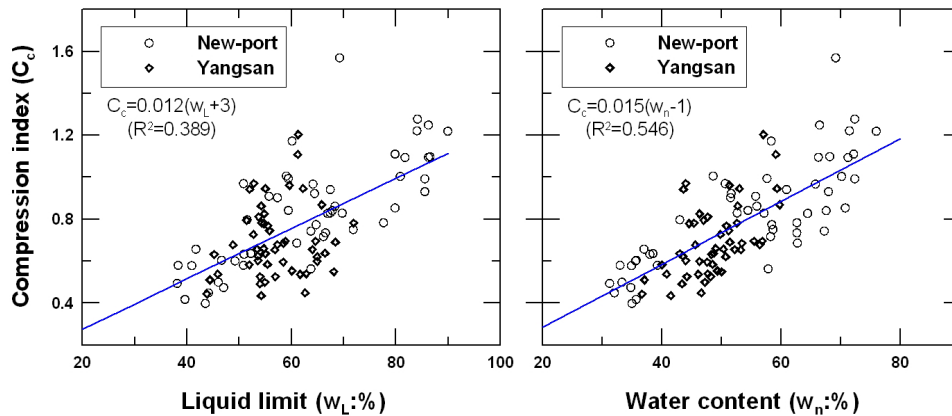


Fig. 7. Relationships between  $C_c$  and  $W_L$  and between  $C_c$  and  $W_n$

Table 2. ME and MAE of  $C_c$  predicted by equation (5) and empirical correlations

Equation	Busan New-port		Yangsan		Total	
	ME	MAE	ME	MAE	ME	MAE
Suggested method (equation (5))	-0.028	0.117	0.004	0.080	-0.012	0.098
Empirical correlations using $w_L$	-0.036	0.125	0.028	0.148	-0.003	0.137
Empirical correlations using $w_n$	-0.027	0.122	0.022	0.116	-0.002	0.119



성, 통계분석의 오류 등으로 추정 오차가 발생할 수 있다. 물성치 측정오차, 통계분석 오류는 불규칙한 오류로 원인을 분석하기 어려우므로 본 연구에서는 자연점토의 퇴적상태 및 흠구조 붕괴특성이 오차에 미치는 영향을 분석하였다.

퇴적상태는 퇴적환경에 따른 지반의 상태특성으로 응력-간극비-액성한계의 관계로 표현된다. Burland(1990)가 간극비수( $I_v$ )로 재성형점토와 자연점토의 퇴적상태를 나타낸 이래, Chandler(2000)은 응력민감도(stress sensitivity,  $S_s$ )를 제안하여 자연점토의 퇴적상태를 수치화 했으며, Hong(2006)은 이를 이용하여 자연점토의 압축지수를 분석하였다. Hong et al.(2011)은 압축지수가 유효응력에 따른 간극비의 변화이므로 간극비개념으로 퇴적상태를 분석하는 것이 퇴적상태가 자연점토 압축성에 미치는 영향을 분석하는데 유리할 것이라고 판단하고  $\Delta e_r/e_L$ 로 자연점토의 퇴적상태를 정량화 하였다. 그리고  $\Delta e_r/e_L$ 이 자연점토 압축지수에 미치는 영향을 분석하여  $\Delta e_r/e_L$ 이 클수록 압축지수가 크다고 하였다.  $\Delta e_r$ 은 자연점토의 항복응력( $\sigma'_{vy}$ )에서 재성형점토와 자연점토의 간극비 차이이며,  $\Delta e_r/e_L$ 은 식 (8)과 같다(Hong et al., 2011).

$$\Delta e_r/e_L = (e_0 - C_r \log(OCR))/e_L - A + B \log(\sigma'_{vy}) \quad (8)$$

여기서, 재압축지수( $C_r$ )는 작은 값이기 때문에 OCR이 크지 않으면  $C_r \log(OCR)$ 는  $\Delta e_r/e_L$ 에 큰 영향을 미치지 못한다. 본 연구에서는  $\Delta e_r/e_L$ 를 이용하여 자연점토의 퇴적상태가 제안방법(식 5)에 미치는 영향을 분석하였다.

자연점토의 압축지수는 퇴적에 의해 발생한  $\Delta e_r$ 의 크기뿐만 아니라 항복응력 이상의 구속응력을 받았을 때  $\Delta e_r$ 이 얼마나 빠르게 없어지느냐에 따라서 달라진다. 즉, 자연점토의  $e-\log \sigma'_v$  곡선이 재성형점토의  $e-\log \sigma'_v$  곡선에 빨리 접근할수록 압축지수는 커질 것이다. 본 연구에서는 이러한 특성을 흠구조 붕괴특성이라고 정의하고  $e_{cross}/e_0$ 를 통해 정량화하였다. 간극비 교차점( $e_{cross}$ )은 자연점토와 재성형점토의  $e-\log \sigma'_v$  곡선이 만나는 간극비로,  $e_{cross}/e_0$ 가 클수록 구속응력에 의해 자연점토의 흠구조가 쉽게 붕괴하는 것을 의미한다. Schmertmann(1955)은  $e_{cross}/e_0$ 를 0.42라 하였으며, 본 연구에서 제안한 식 (5) 역시  $e_{cross}/e_0=0.42$ 로 가정하고 자연시료 압축지수 추정식을 제안하였다. 그러나  $e_{cross}/e_0$ 는 다양한 이유로 변할 수 있으므로, 본 연구에서는  $e_{cross}/e_0$ 가 제안방법(식

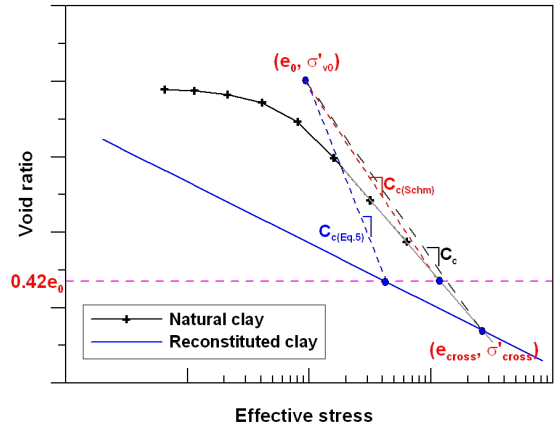


Fig. 8. Effect of  $e_{cross}/e_0$  to the compression index predicted by suggested method

5)에 미치는 영향을 분석하였다.

Schmertmann(1955)방법과 본 논문에서 제안된 압축지수 추정방법은  $e_{cross}/e_0$ 가 0.42라는 동일한 가정을 하며, 두 방법의 유일한 차이점은  $\sigma'_{0.42}$ 를 구하는 방법이다. Schmertmann(1955)방법은 암밀시험을 통해  $\sigma'_{0.42}$ 를 구하는 반면, 제안방법은 재성형점토의  $e-\log \sigma'_v$  곡선을 이용한다. 그러므로 제안방법의 추정오차는  $e_{cross}/e_0$ 가 0.42라는 가정이 잘못되었을 때 발생할 것이다. Fig. 8은  $e_{cross}/e_0$ 가 제안방법에 의한 압축지수의 추정에 어떠한 영향을 미치는지 나타낸 그림이다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이  $e_{cross}/e_0$ 가 0.42보다 작을 경우 Schmertmann(1955)방법으로 구한 압축지수( $C_c(Schm)$ )는 실제 압축지수( $C_c$ )와 큰 차이가 없는 반면, 제안방법은 압축지수를 과대평가하게 된다. 이와 반대로  $e_{cross}/e_0$ 가 0.42보다 클 경우 제안방법은 압축지수를 과소평가하게 되며 이러한 사실은 Fig. 9에서 더욱 명확하게 나타난다.

Fig. 9는 제안방법으로 추정된 오차율과  $e_{cross}/e_0$  및  $\Delta e_r/e_L$ 의 관계를 나타낸 것으로, Fig. 9의  $e_{cross}$ 와  $\Delta e_r$ 은 암밀시험 결과로부터 산정한 값이다. Fig. 9를 보면 앞의 설명처럼  $e_{cross}/e_0$ 는 오차율과 반비례 관계가 나타났다. Fig. 9의 점선은 선형 추세선으로, 추세선의 결정계수는 0.85로  $e_{cross}/e_0$ 는 오차율과 높은 상관성을 보인다. 그리고 추세선은 가정사항인  $e_{cross}/e_0=0.42$ 와 거의 동일한  $e_{cross}/e_0=0.43$ 에서 오차율 0%를 보인다. 이상을 종합하면 제안방법의 오차는 흠구조 붕괴특성인  $e_{cross}/e_0$ 에 의해 발생하며, 경향을 벗어나는 오차는 불규칙한 오차에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 부산신항만과 양산점토의 평균  $e_{cross}/e_0$ 는 각각 0.44와 0.42로 나타나 Schmertmann(1955)의 주장과 거의 일치하였으며, 제안방법의

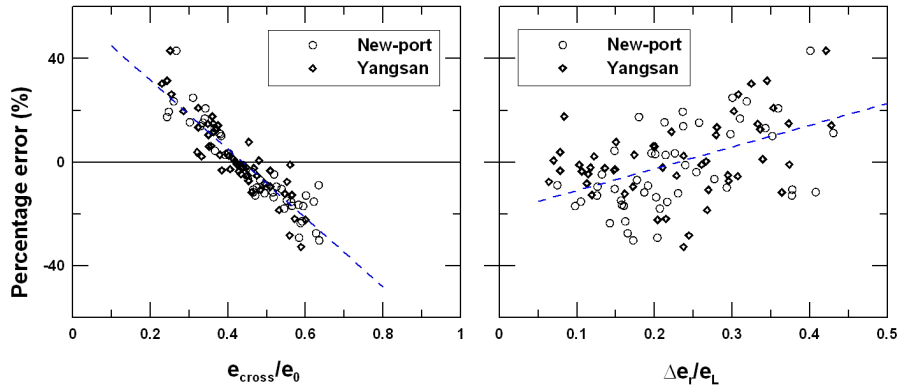


Fig. 9. Relationships between prediction error and  $e_{cross}/e_0$  and between prediction error and  $\Delta e_r/e_L$

가정이 적합한 것으로 판단된다. 부산신항만과 양산점토  $e_{cross}/e_0$ 의 표준편차는 0.12와 0.10으로 나타나 부산신항만 지역이 양산지역에 비해 분산도가 컸다. Table 2를 보면 제안방법은 부산신항만 지역보다 양산지역의 압축지수를 정확하게 추정하였는데, 이것은 양산점토의  $e_{cross}/e_0$  분산도가 작기 때문으로 판단된다.

제안방법은 자연점토의 퇴적상태를 고려하여 압축지수를 추정하는 방법임에도 불구하고, Fig. 9에서 퇴적상태를 나타내는  $\Delta e_r/e_L$ 과 오차율이 낮은 상관성이지만 비례관계로 나타났다. 이는 본 시험데이터에서  $e_{cross}/e_0$ 와  $\Delta e_r/e_L$ 의 연관성 때문으로 판단된다. Fig. 10은  $e_{cross}/e_0$ 와  $\Delta e_r/e_L$ 의 관계를 나타낸 그림으로  $e_{cross}/e_0$ 는  $\Delta e_r/e_L$ 이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났으며, 이로 인해 Fig. 9에서  $\Delta e_r/e_L$ 이 증가함에 따라 오차율이 증가하는 경향이 나타난 것으로 판단된다. Fig. 9의 오차율과  $\Delta e_r/e_L$  추세선 그리고 Fig. 10의  $e_{cross}/e_0$ 와  $\Delta e_r/e_L$ 의 추세선 결정계수가 각각 0.23과 0.26으로 나타나 이러한 사실을 뒷받침한다.

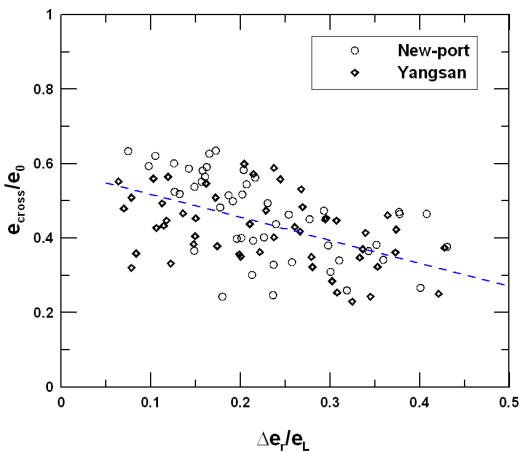


Fig. 10. Relationship between  $\Delta e_r/e_L$  and  $e_{cross}/e_0$

## 6. 결론

본 연구는 자연점토 압축지수 추정에 관한 것으로, 기존의 경험적 추정방법은 통계적 분석을 통해 압축지수 추정식을 제안하는 반면, 본 연구에서는 선행연구자들의 연구결과를 바탕으로 이론적으로 추정방법을 제안하였다. 제안방법의 검증에 위해 부산신항만 및 양산지역의 압밀시험 결과를 분석하고 기존의 경험적 방법과 정확성을 비교하였다. 그리고 오차분석을 통하여 제안방법의 오차원인을 파악하였다.

- (1) 본 연구에서는 재생형점토의 압축특성과 Schmertmann (1955)의 제안을 바탕으로 자연점토의 압축지수 추정방법을 제안하였다. 제안방법을 보면 자연점토의 압축지수는 다양한 물성치에 복합적으로 영향을 받으며, 특히 응력조건에도 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 제안방법이 자연점토의 퇴적상태를 고려하는 압축지수 추정방법이기 때문이다.
- (2) 제안방법과 경험적 방법의 정확성을 비교해 본 결과 제안방법의 MAE가 경험적 방법의 MAE에 비해 작게 나타나 경험적 방법보다 정확하게 부산점토의 압축지수를 추정하였다. 경험적 추정방법은 신뢰성 높은 추정식을 얻기 위해 동일지역의 많은 압밀시험 데이터가 필요하다. 반면에 제안방법은 재생형점토의 압축특성을 대표하는 계수 A와 B를 통해 압축지수 추정식을 제안할 수 있으며, 자연점토의 퇴적상태를 고려하므로 보다 정확하게 압축지수를 추정할 수 있었다.
- (3) 제안방법의 경우 불규칙 오차를 제외하면  $e_{cross}/e_0 = 0.42$  라는 가정사항에 의해 오차가 발생한다. 흙구조 붕괴특성을 나타내는  $e_{cross}/e_0$ 가 0.42보다 크면 압



축지수를 과소평가하며,  $e_{\text{cross}}/e_0$ 가 0.42보다 작으면 압축지수를 과대평가한다. 실제 추정오차를 분석한 결과 추정오차율과  $e_{\text{cross}}/e_0$ 는 명확한 반비례 관계가 나타났다. 부산점토의 경우 평균  $e_{\text{cross}}/e_0$ 가 0.43으로 제안방법의 가정인  $e_{\text{cross}}/e_0=0.42$ 와 거의 같아 제안방법의 가정이 적합한 것으로 판단된다. 두 대상지역을 비교하면 부산신항만 지역의  $e_{\text{cross}}/e_0$  분산이 양산지역에 비해 컸으며, 이로 인해 제안방법으로 압축지수를 추정할 경우 부산신항만 지역의 추정 정확성이 양산지역에 비해 떨어졌다.

## 참 고 문 헌

- Azzouz, A. S., Krizek, R. J., and Corotis, R. B. (1976), "Regression analysis of soil compressibility", *Soils and Foundations*, Vol.16, pp.19-29.
- Burland, J. G. (1990), "On compressibility and shear strength of natural clay", *Geotechnique*, Vol.40, pp.329-378.
- Chandler, B. J. (2000), "Clay sediments in depositional basins : the geotechnical cycle", *J. Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.33, No.3, pp.7-39.
- Chung, S. G., Ryu, C. K., Jo, K. Y. and Huh, D. Y. (2005), "Geological and geotechnical characteristics of marine clays at the Busan New Port", *Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.23, No.3, pp.235-251.
- Chung, S. G., Jang, W. Y., Ninjarav, E. and Ryu, C. K. (2006), "Compressibility characteristics associated with depositional environment of Pusna clay in Nakdong river estuary", *J. Korean Geotechnical society*, Vol.22, No.12, pp.57-65.
- Cozzolino, V. M. (1961), "Statistical forecasting of compression index", *Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France*, Vol.1, pp.51-53.
- Herrero, O. R. (1983), "Universal compression index equation; Closure", *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.109, No.5, pp.755-761.
- Hong, Z. (2006), "Correlating compression properties of sensitive clays using void index", *Geotechnique*, Vol.56, pp.573-577.
- Hong, S. J., Lee, M. J., Kim, T. J. and Lee, W. J. (2009), "Evaluation of CPTu Cone factors for Busan Clay using Pore Pressure Ratio", *J. Korean Geotechnical society*, Vol.25, No.1, pp.77-88.
- Hong, S. J., Kim, D. H., Choi, Y. M. and Lee, W. J. (2011), "Prediction of compression index of Busan and Incheon clays considering sedimentation state", *J. Korean Geotechnical society*, Vol.27, No.9, pp.37-46.
- Kim, S. K. (1999), "Large consolidation settlement occurred during reclamation works in the Nakdong river mouth", *proc. Dredging and Geoenvironmental conf., Korea*, pp.35-48.
- Kim, S. K. (2008), "Characterization of deltaic deposits in the Nakdong River mouth, Busan", *proc. ISC-3, Taipei*, pp.75-88.
- Koppula, S. D. (1981), "Statistical estimation of compression index", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.4, No.2, pp.68-73.
- Leroueil, S., Tavenas, F., Brucy, F., La Rochelle, P. and Roy, M. (1979), "Behaviour of destructured natural clays", *J. Geotechnical Engineering Division*, Vol.105, pp.759-778.
- Liu, M. D. and Carter, J. P. (1999), "Virgin compression of structured soil", *Geotechnique*, Vol.49, No.1, pp.43-57.
- Locat, J. and Tanaka, H. (1999), "Microstructure, mineralogy and physical properties ; Techniques and application to the Busan clays", *Proc. KSG'99 Dredging and Geoenvironmental conference, Seoul*, pp.15-31.
- Nacci V. A., Wang, M. C. and Demars, K. R. (1975), "Engineering behavior of calcareous soils", *Proc. Civil Engineering in the Oceans III*, Newark, Vol.1, pp.380-400.
- Nagaraj, T. S. and Miura, N. (2001), "Soft clay behaviour - analysis and assessment", Balkema, Rotterdam.
- Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy B. R. (1983), "Rationalization of skempton's compressibility equation", *Geotechnique*, Vol.33, pp.433-443.
- Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy B. R. (1986), "A critical reappraisal of compression index equations", *Geotechnique*, Vol.36, pp.27-32.
- Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O. (1988), "Constitutive parameters estimated by plasticity index", *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.7, pp.844-858.
- Park, J. H. and Koumoto, T. (2004), "New compression index equation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.2, pp.223-226.
- Shouka, H. (1964), "Relationship of compression index and liquid limit of alluvial clay", *proc. 19<sup>th</sup> Japan civil engineering conf., Touhoku*, Vol.4, pp.40.1-40.2.
- Sridharan, A. and Jayadeva, M. S. (1982), "Double layer theory and compressibility of clays", *Geotechnique*, Vol.32, pp.133-144.
- Sridharan, A. and Nagaraj, H. B. (2000), "Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index properties", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.712-722.
- Skempton, A. W. (1944), "Notes on the compressibility of clays", *Q. J. Geological Society of London*, Vol.100, pp.119-135.
- Schmertmann, J. H., (1955), "The undisturbed consolidation behavior of clay", *Trans. ASCE*, Vol.120, pp.1201-1233.
- Sowers, G. B. (1970), *Introductory soil mechanics and foundation*, The Macmillan company, London, UK.
- Tripathy, S., Sridharan, A. and Schanz, T. (2004), "Swelling pressures of compacted bentonites from diffuse double layer theory" *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp.437-450.
- Tripathy, S. and Schanz, T. (2007), "Compressibility behaviour of clays at large pressures", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, pp.355-362.
- Worth, C. P. and Wood, D. M. (1978), "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.137-145.
- Yoon, G. L., Kim, B. T. and Jeon, S. S. (2004), "Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp.1213-1221.

(접수일자 2011. 8. 1, 심사완료일 2012. 11. 23)