

동남해안 점토의 압축지수 추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Compression Index in the East-Southern Coast Clay of Korea

박 춘 식¹ Park, Choon-Sik

김 성 수² Kim, Sung-Su

Abstract

This research has been conducted to suggest an estimation equation of compression index to be practically applied to the southeastern areas by finding out physical and mechanical characteristics of 229 points on the southeastern coast areas (Busan area: 78 points, Gimhae area: 103 points, Geoje area: 18 points, Changwon area: 30 points) through indoor tests and analyzing its relation to the compression index. From the results, we could not only find out correlation between natural water content, liquid limit and initial void ratio versus compression index for soft ground on each of the southeastern coast areas, but also an integrated correlation equation of the southeastern coast areas. In addition, we have performed a comparative analysis of the existing estimated equation of compression index and that found in this paper. As a result, the existing estimated equation suggested by foreign researchers has shown considerable error to be applied to the soft ground on the southeastern coast areas in Korea. The estimated equation of compression index with the water content out of the existing estimated equations has shown minimum 10.8% to maximum 48.1% of error rate, minimum 13.4% to maximum 288.5% of error rate with liquid limit or minimum 9.4% to maximum 211.4% of error rate with initial void ratio. On the other hand, error rates calculated with the estimated equations of compression index from this research have shown minimum 10.5% to maximum 13.4% with water content, minimum 11.6% to maximum 21.3 with liquid limit or minimum 7.1% to maximum 11.7% with initial void ratio, for better results than those with existing estimated equations. In addition, relation between compression index and expansion index has shown $C_s = (1/5 \sim 1/12)C_c$ similar to the existing relation of $C_s = (1/5 \sim 1/10)C_c$.

요 지

본 논문은 동남해안 지역 229개소(부산지역 78개소, 김해지역 103개소, 거제지역 18개소, 창원지역 30개소)의 연약지반의 물리적, 역학적 특성을 실내실험을 통해 밝혀낸 후 압축지수와의 관계를 분석하여 실질적으로 동남해안 지역에 적용 가능한 압축지수 추정식을 제시하고자 수행하였다. 그 결과 동남해안 지역별로 연약지반의 자연함수비, 액성한계, 초기간극비와 압축지수의 상관관계를 밝혀낼 수 있었을 뿐만 아니라 동남해안 지역의 통합적인 상관식 또한 밝혀낼 수 있었다. 또한, 기존에 제시되어 있던 압축지수 추정식과 본 논문을 통해 밝혀진 추정식을 비교분석을 실시하였다. 그 결과 기존에 외국 학자들에 의해 제안된 압축지수 추정식은 한국의 동남해안 지역 연약지반에 적용하기에는

1 정회원, 창원대학교 토목환경화학융합공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environment and Chemical Engrg., Changwon National Univ., Tel: +82-55-213-3772 Fax: +82-55-285-9491, pcs@changwon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, 무성토건 전무 (Member, Executive Director, Musung Civil Engrg. and Construction)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

큰 오차율을 보였다. 기존에 제시된 추정식 중 함수비를 통한 압축지수 추정식에서는 최소 10.8%에서 최대 48.1%의 오차율이 나타났으며 액성한계를 통한 압축지수 추정식에서는 최소 13.4%에서 최대 288.5%, 초기간극비를 통한 압축지수 추정식에서는 최소 9.4%에서 최대 211.4%의 오차율이 나타났다. 반면 본 연구를 통해 산출된 압축지수 추정식을 통하여 오차율을 산정한 결과 함수비를 통한 추정식에서는 최소 10.5%에서 최대 13.4%, 액성한계를 통한 압축지수 추정식에서는 최소 11.6%에서 최대 21.3%, 초기간극비를 이용한 추정식에서는 최소 7.1%에서 최대 11.7%로 기존의 추정식보다 양질의 결과를 구할 수 있었다. 또한, 압축지수와 팽창지수의 관계는 $C_s = (1/5 \sim 1/12)C_c$ 로 기존에 제시된 $C_s = (1/5 \sim 1/10)C_c$ 와 비슷한 관계식을 형성하였다.

Keywords : Soft ground, Compression index, Water contents, Liquid limit, Void ratio

1. 서론

구조물 시공 시 가장 다루기 힘든 곳은 연약지반이 넓게 분포된 곳이다. 대한민국의 경우만 보더라도 전국 어디에서나 쉽게 접하는 지반이 아닌 부산·울산·경남 지역에 가장 많이 분포되어 있으며, 동남해안 인근 지역으로 분포되어 있는 실정이다. 이로 인해 1970년대 이후로 한국의 연약지반 개량기술의 발달과 많은 학자가 이러한 지반을 효율적으로 이용하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

연약지반 상에 시공이 어려운 이유는 정확한 침하량을 예측하기가 어렵기 때문인데, 만약 이러한 침하량 예측에 실패할 경우 막대한 경제적 손실이 발생한다. 침하량의 결정은 압밀실험을 통하여 침하량 결정 시 가장 중요한 인자인 압축지수(C_c)를 구함으로써 결정된다. 하지만 압밀실험은 교란되지 않은 시료를 채취하는 것부터 압밀실험을 위한 시료를 제작하는 과정과 오래 걸리는 실험시간 등으로 인해 압축지수를 구하는 것은 쉬운 일이 아니다.

이러한 어려움 때문에 많은 학자와 기술자들이 흙의 물리적 성질인 자연함수비(W_n), 초기간극비(e_0), 액성한계(W_L), 소성지수(W_p) 등과 압축지수의 상관성을 파악해 간단한 토질 물성실험만으로도 압축지수를 추정해 낼 수 있는 경험식을 규정하여 왔다. 현재까지 연약지반 물성값을 이용한 압축지수 추정식에 관한 연구는 Terzaghi(1923)의 압밀이론을 기반으로 Skempton(1944)이 재성형 시료를 이용한 압축지수 추정식을 처음으로 제안하였으며 이후 Moran et al.(1958), Azzouz et al.(1976), Koppula(1981), Herrero(1983) 등이 함수비를 이용한 압축지수 추정식을 제안, Terzaghi and Peck(1967), Cozzolino(1961), Azzouz et al.(1976), Mayne(1980) 등

이 액성한계를 이용한 압축지수 추정식을 제안하였다. 또한 Nishida(1956), Hough(1957), Cozzolino(1961), Sowers(1970) 등이 초기간극비를 이용한 압축지수 추정식을 제안하였다. 하지만 해외학자들에 의해 규정된 압축지수 추정식은 연구를 실시하였던 그 나라 혹은 그 지역에 분포하고 있는 토질에 적용할 수 있었으며 또한 그 지역에서도 일부 지역 혹은 일부 토질에서만 적용이 가능한 경우가 발생하였다. 이러한 이유로 경험식을 한국에 분포하고 있는 연약지반에는 적용되지 않는 경우가 대다수다.

이러한 문제점으로 인해 국내 학자들에 의해 한반도 실정에 적용 가능한 압축지수 추정식 및 연약지반 개량에 관련하여 많은 연구가 이루어져 왔다. Hong(1974)의 함수비와 밀도변화에 따른 흙의 압축성에 대한 연구를 시작으로 Lim(1982)의 우리나라 점토의 압축지수식의 계수결정에 관한 연구, Choi(1986)의 점성토의 압축지수 C_c 를 추정하는 실험식, Song(1986)의 우리나라 해성점토의 토질계수 상관관계, Lee(1987)의 전남지역 해성점토에 대한 압축지수의 산정에 관한 고찰, Yoon et al.(1988)의 섬진강 하구 지역의 층적점토에 대한 토질공학 특성연구, Shin et al.(1995)의 인천해안지역에 분포하는 해성점토의 토질특성, Kim(1998)의 토성치의 상관관계에 의한 압축지수 결정방법과 그 신뢰성에 관한 연구, Jung et al.(2000)의 부산점토의 압축특성, Kim(2002)의 해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 관한 연구, Kim et al.(2001)의 압축지수의 추정을 위한 인공신경망 적용과 경험식 제안하는 등 한반도 내의 시료를 이용하여 압축지수 산정에 대한 연구 및 추정식을 정립하였다.

본 연구는 연약지반의 분포도가 높은 동남해안 일부 지역의 보다 높은 신뢰성을 가진 압축지수 추정식을 정

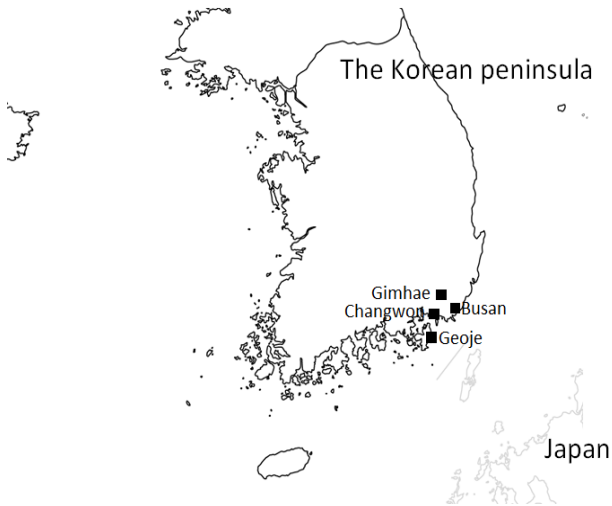


Fig. 1. Research target area of east-southern coast in Korea

립하기 위해 불교란 시료를 이용한 실내토질실험을 통하여 물리적 특성과 역학적 특성을 이용한 데이터를 산출하여 한국 동남해안 지역에서 실질적으로 적용 가능한 경험식을 제안한다.

동남해안 지역의 지반 물리적 특성과 역학적 특성을 파악하기 위해 실내토질실험을 실시한 지역은 Fig. 1과 같으며 그 결과를 지역별로 분류하였다.

2. 시험결과 및 분석

본 연구는 연약지반의 분포가 가장 많은 부산지역 및 경남(김해, 거제, 창원)지역의 연약지반을 대상으로 실시하였다. 본 연구를 실시하기 위한 시료는 시료의 교란이 일어나지 않은 불교란 시료 채취를 시작으로 진행된다. 불교란 시료(비교란 시료, *undisturbed sample*)란 흙 입자가 원래 배치 그대로 있는 시료이다. 단위 중량, 투수성, 압축성, 전단 강도, 압밀 시험 등 흙의 조직에 의해 지배되는 역학적 특성을 추정하는 데 사용된다 (Gwon et al., 2015). 불교란 시료 채취에는 얇은 관 튜브 (*thin-walled tube*, 혹은 셸비 튜브(*Shelby tube*))를 주로 사용한다. 이 튜브를 압입하여 점토층에 관입시켜 시료를 채취한다. 채취된 시료는 짧은 파라핀을 이용해 끝부분이 밀봉된 후 실험실로 운반된다. 운반된 시료를 이용하여 국가표준 시험방법인 KS F 규정에 의거하여 흙의 함수비(KS F 2306), 흙의 액성한계 및 소성한계 시험방법(KS F 2303), 흙의 압밀시험 방법(KS F 2316)을 실시하였으며 흙의 압밀시험 결과는 Schmertmann(1955)의 방법에 따라 교란보정 효과를 적용하였다. 앞서 언급한

시험을 통해 함수비, 액성한계, 소성한계, 간극비, 압축 지수 및 팽창지수를 산정하였다.

2.1 물리적 특성

부산지역의 시료 78개를 대상으로 실내실험을 수행한 결과 함수비 및 간극비는 연구를 실시한 대상 지역의 값과 비슷한 값을 보였으며 액성한계 및 소성한계의 값은 대상 지역 중 가장 큰 값을 가졌다. 액성한계와 소성한계가 크게 나타나는 것은 연구에 사용된 시료에 포함된 점토광물이 입경이 작고 전기적 성질이 활발한 광물이라는 것을 의미한다. 흙의 USCS는 CL-MH에 해당하며 대부분은 점토질 연약지반이다. 액·소성 실험을 통하여 산출된 액성한계와 소성한계를 이용하여 Fig. 2와 같이 Casagrande(1948)가 제안한 소성도상에 나타난 결과 A-Line과 U-Line 사이인 점토질로 나타났으나 압축성이 작은 실트질도 일부 나타났다.

김해지역 연약지반에서 채취한 불교란 시료 103개를 대상으로 실내실험을 수행한 결과 주로 고소성의 시료의 분포가 많았으며 함수비와 소성한계는 넓은 범위의 값을 가졌다. 입도분포의 분석결과 저소성의 점토(CL)부터 고소성 실트(MH)까지 다양한 분포를 보였으며 이를 소성도상에 나타난 결과 상당수의 시료가 A-Line과 U-Line 사이에 분포하고 있었으나 A-Line보다 낮거나 근처에 분포하고 있는 시료도 많은 비중을 차지하였다.

거제지역 일대에서 채취한 불교란 시료 18개를 대상으로 실내실험을 수행한 결과로 얻은 물성값을 소성도

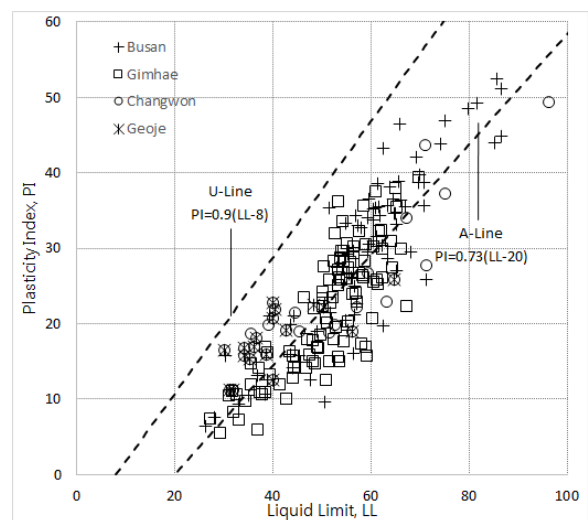


Fig. 2. Plasticity chart

Table 1. Average of soil properties in research area

	Water contents	Specific gravity	Liquid limits	Plastic index
Busan	54.21	2.699	58.49	29.35
Gimhae	72.63	2.708	51.08	21.82
Geoje	55.93	2.708	40.61	18.03
Changwon	53.27	2.708	48.72	22.06

상에 나타내었으며 대부분 U-Line과 A-Line 사이에 존재하며 저소성 점토(CL)에 해당하였지만, 일부 시료는 A-Line 하부에 있는 실트질 흙 역시 존재하였다.

창원지역 일대에서 채취한 불교란 시료 30개를 대상으로 실내실험을 수행한 결과 대부분의 시료는 U-Line과 A-Line 사이의 저소성 점토질(CL) 흙에 속하였으며 고소성 실트질(MH)의 흙도 적지 않게 보였다. Table 1은 지역별 물리적 특성의 평균값을 나타내었다.

2.2 역학적 특성

부산지역 및 경남의 연약지반 압밀정수를 구하기 위해 역학실험을 실시한 결과 부산지역의 연약지반 압축지수(C_c)의 분포범위는 0.207~0.876으로 비교적 넓은 분포도를 보였으며 팽창지수(C_s)의 분포범위는 0.035~0.127로 나타났다. 압축지수와 관계는 약 $C_s = (1/5 \sim 1/11)C_c$ 범위로 나타났다.

김해지역 연약지반의 압축지수(C_c)의 범위는 0.248~1.678로 넓은 범위를 보였으며 팽창지수(C_s)는 0.030~0.178의 범위로 나타났다. 두 정수의 관계는 $C_s = (1/5 \sim 1/12)C_c$ 로 나타났다.

거제지역 연약지반의 압밀실험을 통한 압축지수(C_c)는 0.299~0.898의 범위로 나타났고 팽창지수(C_s)는 0.027~0.091의 범위를 보였다. 두 정수의 관계는 약 $C_s = (1/7 \sim 1/12)C_c$ 로 나타났다.

창원지역 연약지반의 압밀실험을 통해 압축지수(C_c)는 0.299~1.150의 범위로 나타났으며 팽창지수(C_s)는 0.032~0.147의 범위로 나타났다. 두 지반 정수는 약 $C_s = (1/5 \sim 1/10)C_c$ 범위의 관계를 가지는 것으로 나타났다.

모든 지역의 압축지수와 팽창 지수의 관계를 통합하여 보았을 때 두 지반정수의 관계는 $C_s = (1/5 \sim 1/12)C_c$ 로 나타났다. Fig. 3의 타 연구와 비교한 그래프를 살펴 보았을 때 본 연구로서 산정한 두 지반 정수의 관계는 일반적으로 통용되는 $C_s = (1/5 \sim 1/10)C_c$ 와 유사한 관계를 보였으나 북미지역의 시료를 이용하여 기존에 정

립되어 있는 C_s / C_c 의 관계와는 다소 차이가 발생하였다. 이는 본 연구의 서론에 밝혔던 해외 학자들에 의해 정립되어 있는 압축지수 추정식을 국내 연약지반에 적용할 수 없는 실정과 유사한 이유로 판단된다. Fig. 3에는 지역별 C_s / C_c 의 관계 및 타 연구와의 비교를 실시한 그래프를 나타내었다.

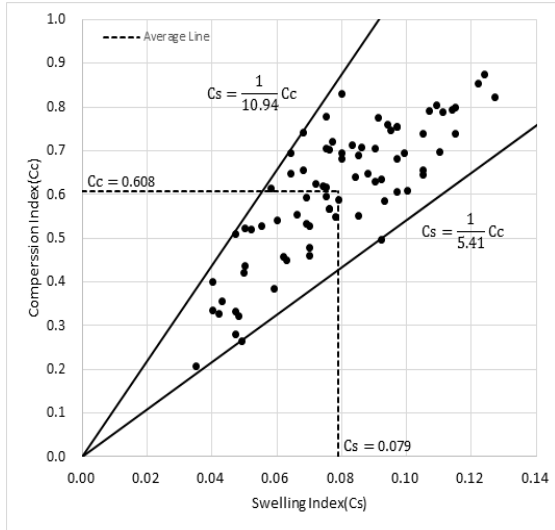
3. 인자별 압축지수 추정식 산정 및 타 연구와의 비교

본 연구에서 시료의 물리·역학적 특성 중 심도, 함수비, 액성한계, 소성지수, 초기간극비와 압축지수의 관계 분석을 통해 압축지수 추정식을 산정하였으며, 기존 해외 및 국내 학자들의 의해 제안된 추정식을 본 연구 대상지역에 적용 후 산출된 압축지수와 실제 압축지수간의 오차를 산정하여 본 연구를 통해 산정된 압축지수 추정식과 비교분석을 실시하였다. 비교대상 추정식은 해외학자들에 의해 제안된 추정식 중 일반적으로 통용되고 있는 추정식 및 모든 연약지반에 적용이 가능한 추정식으로 선정을 하였으며 국내의 추정식은 본 연구의 대상지역과 같은 동남해안 지역을 기반으로 제안된 추정식을 선정하였다. 또한 산정된 추정식 및 비교대상 추정식의 동남해안지역 적용 시 정확성을 판단하기 위해 C_c (추정식을 통한 예측값)/ C_c (실내실험을 통한 측정값) 값을 기반으로 정확성 판단을 위한 RMSE(Root Mean Square Error) 식 (1)을 이용하였다. RMSE 계산결과 가장 작은 값을 가지는 추정식이 보다 정확한 추정식이라 판단 될 수 있다.

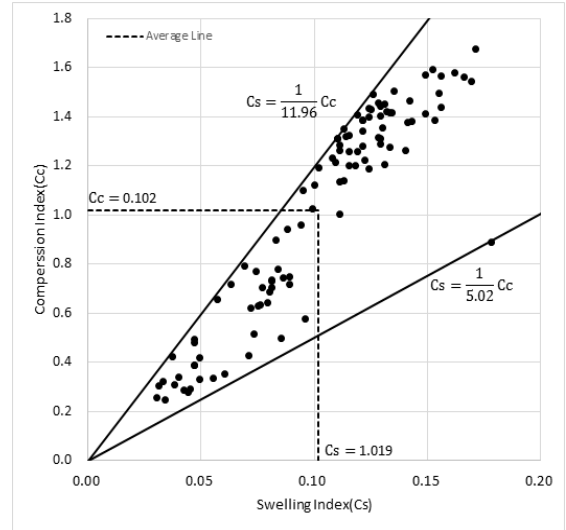
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(C_{c(predicted)} - C_{c(measured)})^2}{n}} \quad (1)$$

3.1 심도 및 소성지수와 압축지수

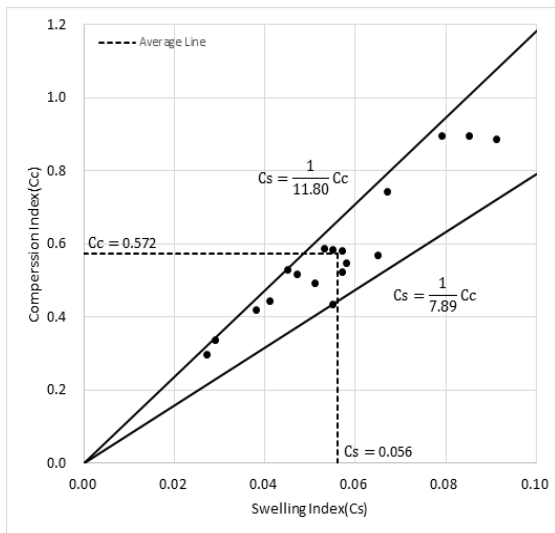
심도 및 소성지수에 따른 압축지수의 관계를 도식화



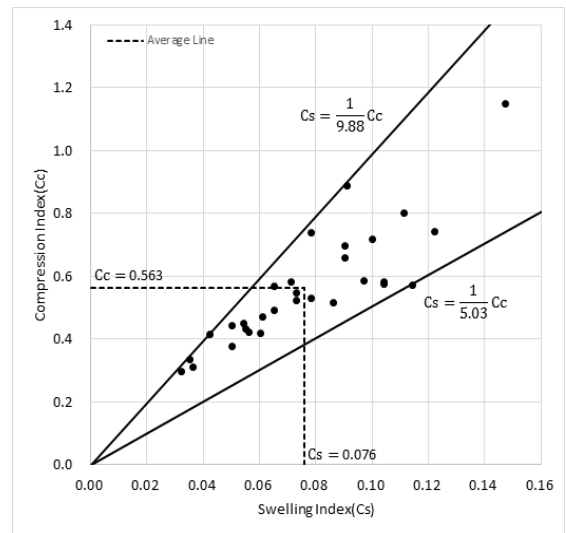
Busan



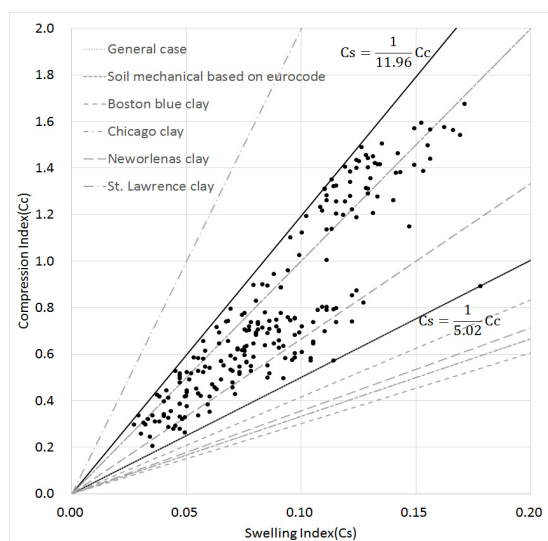
Gimhae



Geoje



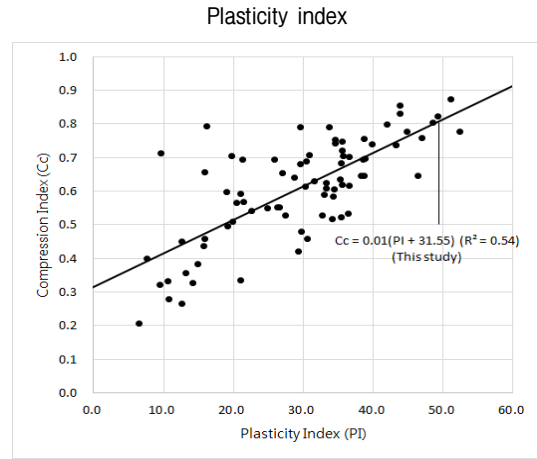
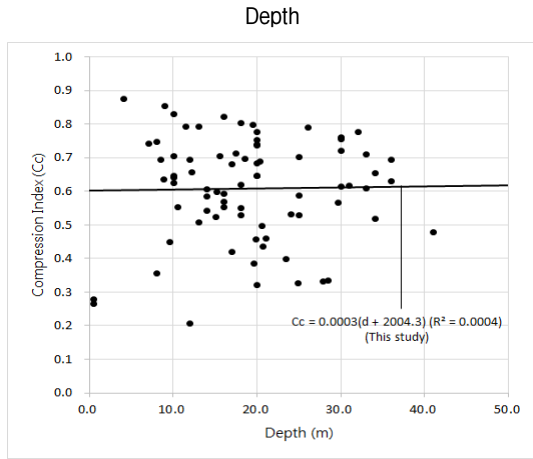
Changwon



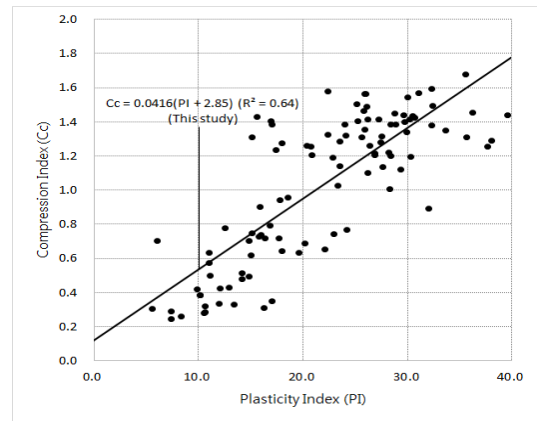
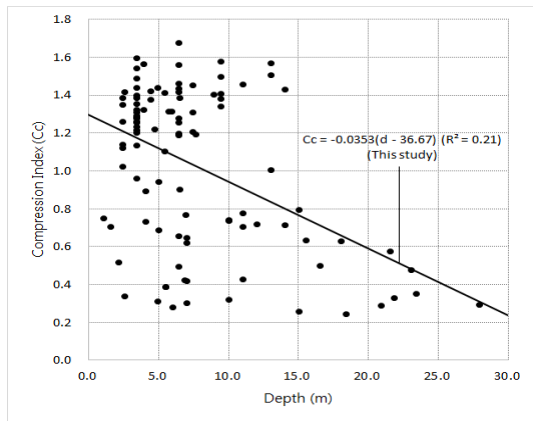
Comparison with existing research

Fig. 3. Relationship between compression index and swelling index

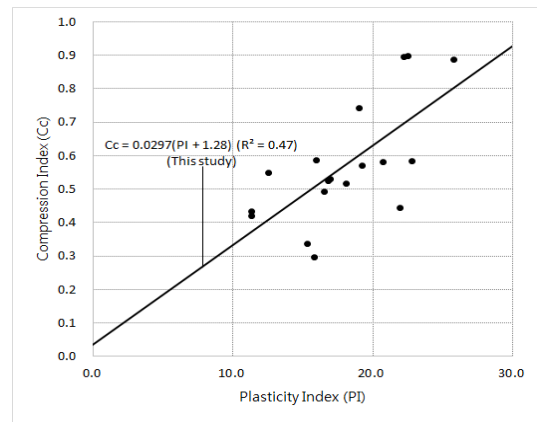
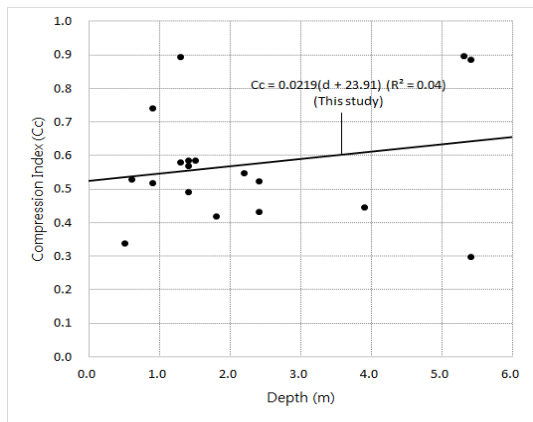
BUSAN



Gihae



Geoje



Changwon

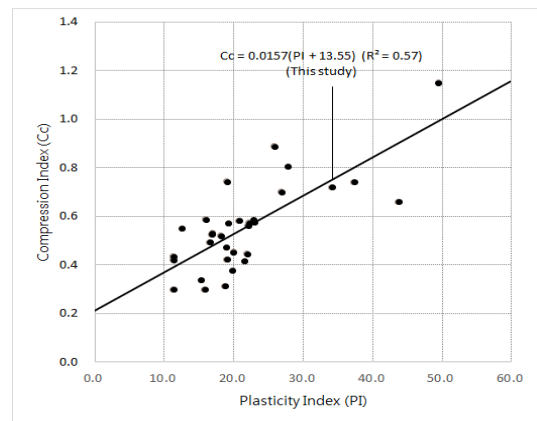
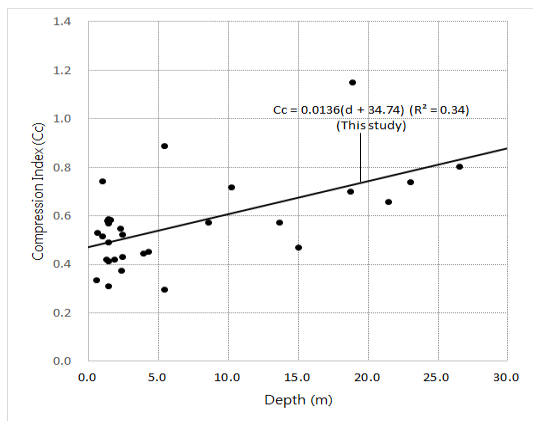


Fig. 4. Relationship between compression index and depth, plasticity index

한 그래프인 Fig. 4를 통해 지역별 압축지수와 심도 및 소성지수와와의 관계를 분석하였다.

우선 심도와 압축지수 관계를 도식화한 그래프를 분석한 결과 심도를 통한 압축지수 추정식을 산출하기에는 데이터의 일관성의 부족함이 있었으며 추정식을 구한다 하더라도 낮은 결정계수(R^2)와 신뢰성으로 추정식을 산출하기가 힘들다고 판단되었다.

소성지수를 통한 압축지수 추정식은 심도-압축지수 데이터와는 달리 어느 정도의 일관된 경향성이 보여 추정식을 산정할 수 있었으나 그 분산 정도가 심하여 낮은 결정계수(R^2)와 신뢰성 있는 관계식을 도출하기에 어려움이 있었다.

3.2 함수비와 압축지수

압축지수와 심도 및 소성지수의 관계와는 달리 자연 함수비와 압축지수의 관계는 비례관계를 보이므로 함수비를 통한 압축지수 추정식을 지역별로 정립할 수 있었으며 산정한 압축지수는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 통하여 거제지역을 제외한 나머지 지역은 기존에 제안된 추정식과는 다소 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며 거제지역은 Koppula(1981)의 추정식과 유사한 경향을 보였다. 이는 오차율을 나타낸 Fig. 6 및 Table 2를 통해 확인할 수 있다. 모든 연약지반에 적용이 가능하다고 제안된 Azzouz et al.(1976) 및 Koppula(1981)의 추정식은 거제지역을 제외한 본 연구대상 지역에 적용하

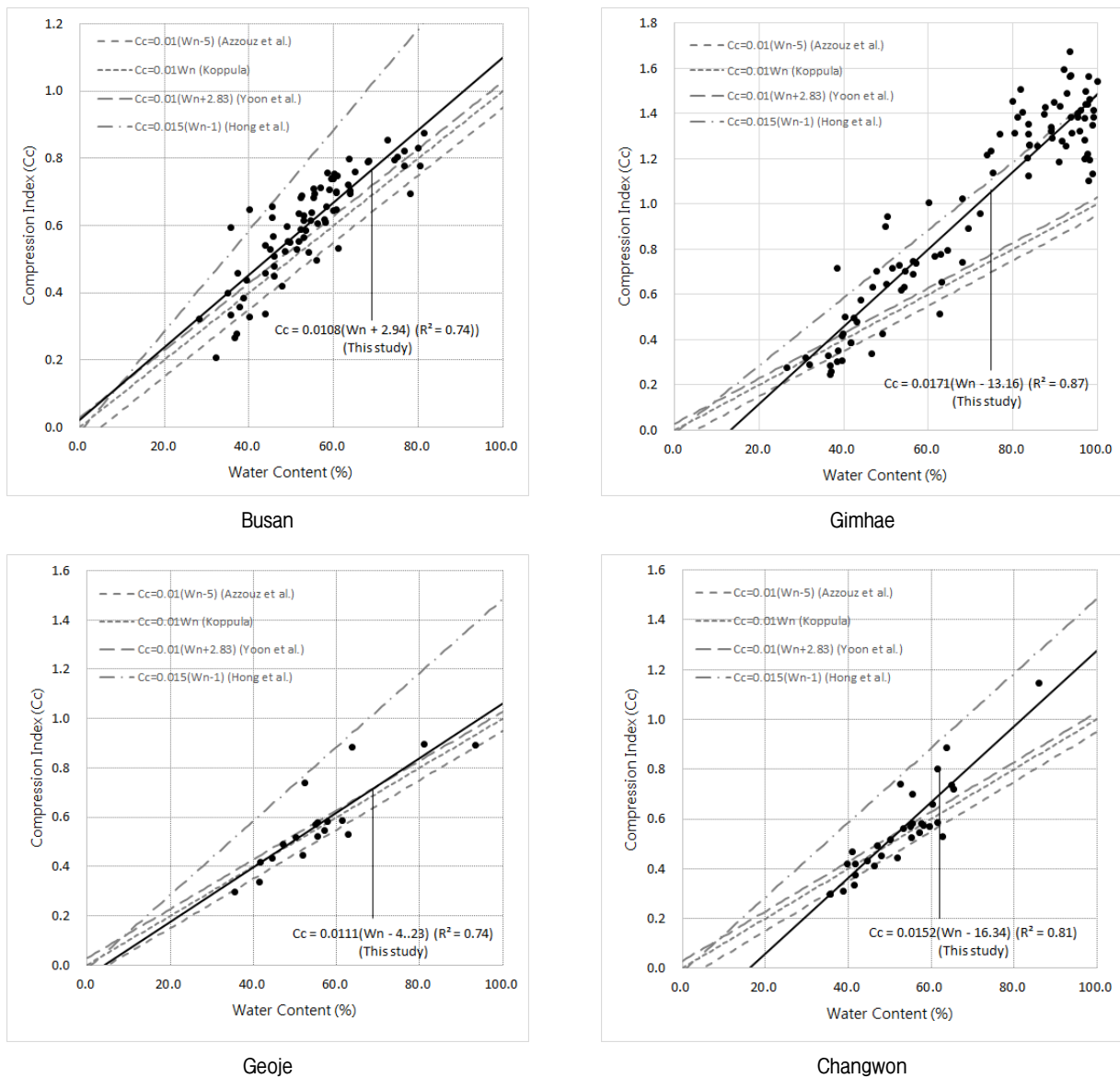


Fig. 5. Relationship between compression index and water content

Table 2. Average of error rate and RMSE in each estimation equation of compression index

Properties	References	Error rate / RMSE			
		Busan	Gimhae	Geoje	Changwon
Wn	Azzouz et al.	26.3 / 0.140	48.1 / 0.408	14.5 / 0.110	17.0 / 0.126
	Koppula	17.0 / 0.102	39.7 / 0.367	10.8 / 0.090	12.5 / 0.102
	Yoon et al.	13.3 / 0.087	35.9 / 0.345	11.8 / 0.091	12.7 / 0.097
	Hong et al.	24.5 / 0.212	15.9 / 0.168	31.0 / 0.272	29.3 / 0.235
	This study	10.9 / 0.078	13.4 / 0.150	10.5 / 0.088	10.7 / 0.081

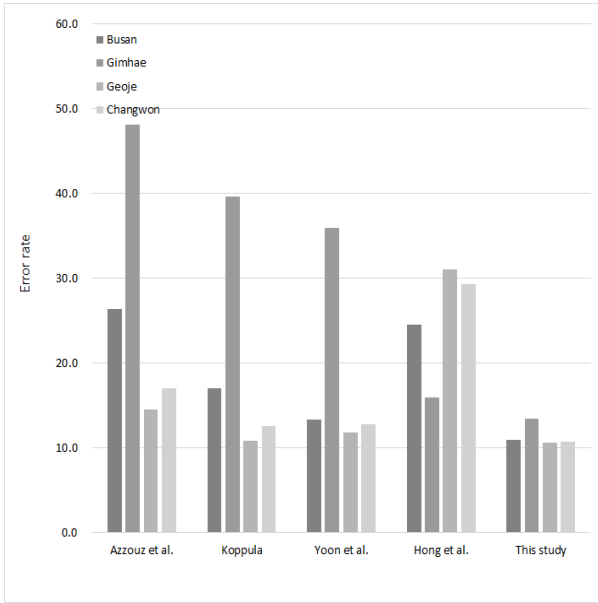


Fig. 6. Comparison of error rate in estimation equation of compression index using water content

기엔 큰 오차율을 보였다. 특히 김해지역에 적용하기에 최대 30%이상의 오차율을 보였다. 이는 모든 연약지반에 적용이 가능하다 하나 국내의 동남해안 연약지반에 통상적으로 적용하기에는 지역별 불균형이 큰 것으로 보아 두 추정식은 국내에 적용하기에는 다소 어려운 점이 있다고 판단된다. 이어서 Hong et al.(2011)의 추정식은 전체적으로 15% 이상의 오차율을 보였으며, Yoon

et al.(2011)의 추정식 김해를 제외한 타 지역의 오차율은 낮은 편으로 나타났다. 이는 Yoon et al.(2011)의 추정식은 본 연구의 대상지역과 인접한 지역을 기반으로 추정식을 산정하였으나 전반적으로 높은 함수비와 압축지수의 지반을 가진 김해지역을 제외한 지역의 추정식을 산정하여 김해지역의 오차율이 크게 나타난 것으로 판단된다.

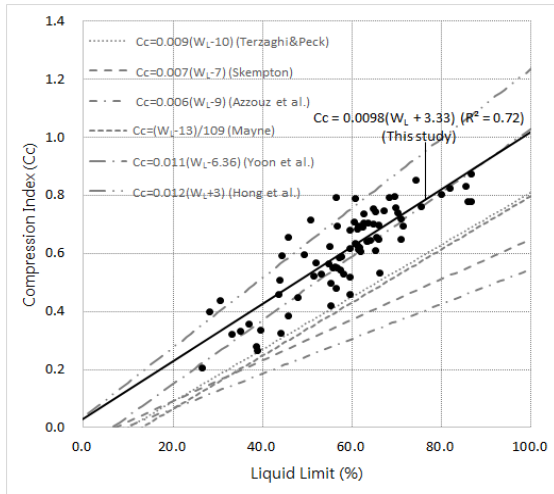
이어서 추정식 적용에 정확성을 판별하기 위해 지역과 추정식별로 RMSE를 산정한 결과 타 추정식에 비해 본 연구의 추정식이 가장 낮은 RMSE를 보여 본 연구의 추정식을 적용하는데 어려움이 없을 것이라 판단된다.

3.3 액성한계와 압축지수

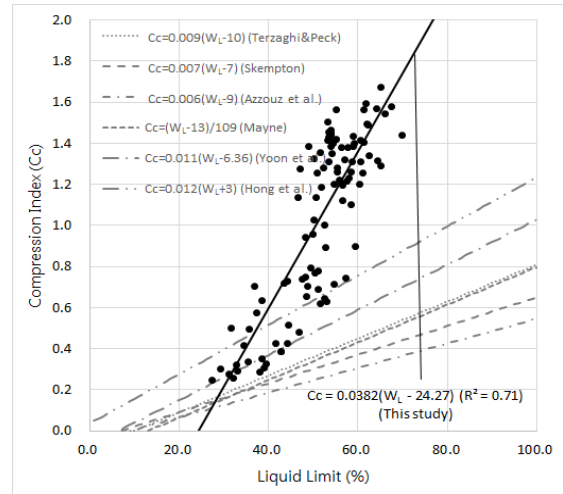
Fig. 7은 액성한계와 압축지수의 관계를 지역별로 도식화 시킨 그래프이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 액성한계와 압축지수는 일정한 경향성을 가진 비례관계에 있어 지역별 추정식을 산정 할 수 있다. 산정 한 추정식은 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 Terzaghi and Peck (1967)과 Skempton(1944)의 추정식을 비롯해 모든 연약지반에 적용이 가능하다고 제안된 2개의 해외 추정식과 2개의 국내 추정식을 선정하여 오차율 및 RMSE값을 산출하여 비교분석을 실시하였다. 오차율을 도식화시킨 Fig. 8을 보면 알 수 있듯이 액성한계를 이용하여 압축

Table 3. Average of error rate and RMSE in each estimation equation of compression index

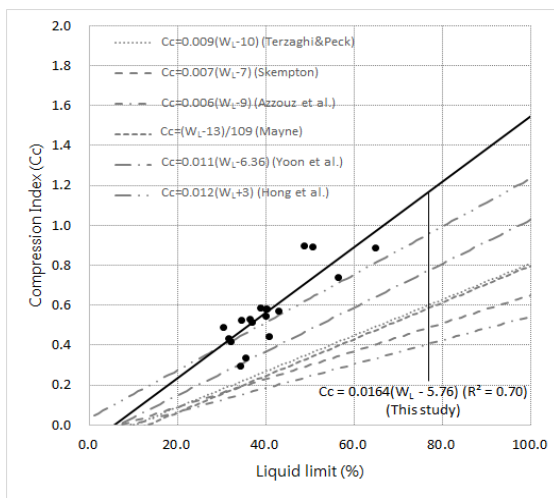
Properties	References	Error rate / RMSE			
		Busan	Gimhae	Geoje	Changwon
WL	Terzaghi&peck	42.1 / 0.190	165.4 / 0.741	109.3 / 0.319	71.5 / 0.236
	Skempton	70.8 / 0.263	217.8 / 0.802	143.5 / 0.360	101.6 / 0.291
	Azzouz et al.	108.3 / 0.325	288.5 / 0.855	203.3 / 0.405	149.4 / 0.343
	Mayne	50.2 / 0.207	181.4 / 0.759	129.8 / 0.399	86.0 / 0.255
	Yoon et al.	13.4 / 0.089	100.3 / 0.629	52.1 / 0.223	28.7 / 0.141
	Hong et al.	19.3 / 0.156	61.4 / 0.500	16.5 / 0.114	17.1 / 0.122
	This study	11.6 / 0.081	21.3 / 0.226	12.8 / 0.095	17.2 / 0.099



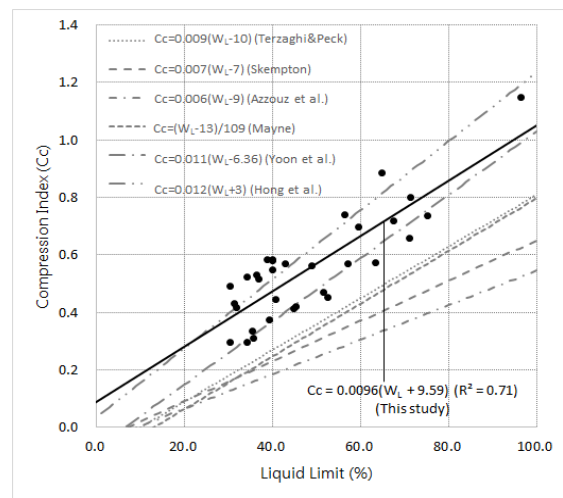
Busan



Gimhae



Gjeoje



Changwon

Fig. 7. Relationship between liquid limit and compression index

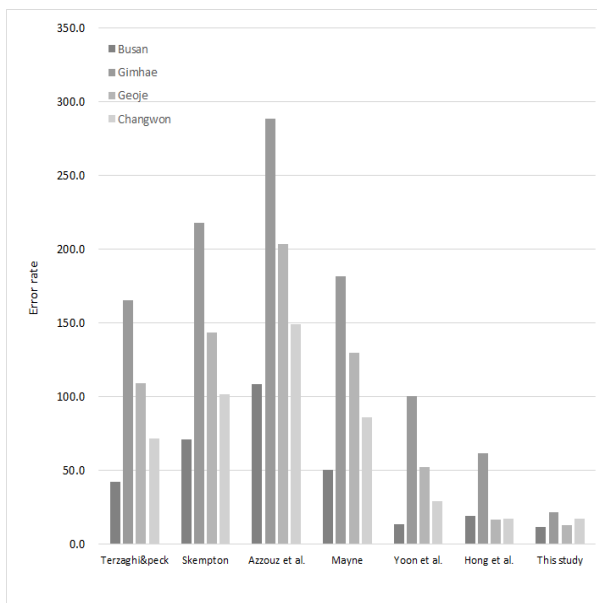


Fig. 8. Comparison of error rate in estimation equation of compression index using liquid limit

지수 추정시 가장 대표적으로 쓰이는 Terzaghi and Peck (1967)과 Skempton(1944)의 추정식은 대부분 지역에서 50%가 넘는 오차율을 보였으며 나머지 해외학자에 의해 제안된 두 개의 추정식 역시 높은 오차율을 나타내었다. 또한 Fig. 7을 통해 해외학자들에 의해 제안된 추정식은 국내의 동남해안 연약지반에 적용하기에는 하향 평가가 된 것을 알 수 있었다. 이를 통해 해외에서 발표된 추정식은 비록 모든 연약지반에 적용이 가능하다 하나 국내의 동남해안 연약지반에 적용하기에는 해외의 연약지반과는 지반특성에 있어 큰 차이가 나는 것으로 판단된다. 이어서 국내에서 발표된 추정식 중 Hong et al.(2011)의 추정식은 김해지역을 제외한 타 지역에서의 오차율은 20% 이하로 나타났으며 Yoon et al.(2011)의 추정식 역시 김해지역을 제외한 나머지 오차율은 해외에서 발표된 추정식 보다는 낮은 오차율을 보였다. 김해

지역은 액성한계 대비 높은 압축지수를 지닌 지반특성상 연구대상에 김해를 포함시키지 않은 두 추정식 특성상 높은 오차율이 나타났다고 판단된다.

이어서 비교를 실시한 추정식들의 RMSE를 산정하였으며 본 연구를 통해 산정한 지역별 추정식이 가장 낮은 RMSE를 보였으며 또한 가장 낮은 오차율로 국내 동남해안 지역에서 압축지수 추정에 적용이 가능하다고 판단된다.

3.4 초기간극비와 압축지수

Fig. 9는 초기간극비와 압축지수의 관계를 도식화시킨 그래프이다. Fig. 9에도 나타나 있듯이 간극비와 압

축지수의 데이터는 일관된 경향성을 가지고 분포되어 있어 이를 통해 압축지수 추정식을 산정할 수 있었다.

산정된 압축지수를 이용하여 해외에서 모든 연약지반에 적용이 가능하다고 발표된 4개의 추정식과 국내에서 인근지역을 대상으로 제안된 추정식 1개를 선정하여 비교분석을 실시하였다. Fig. 10은 각 추정식의 지역별 오차율을 나타낸 그래프이며 자세한 수치와 RMSE값은 Table 4에 나타내었다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 Bowles(1989)와 Nishida(1956)의 추정식은 국내의 동남해안 연약지반에 적용하기에는 큰 오차율을 보였으며 RMSE값 역시 타 추정식보다 월등히 높은 수치를 기록하였다. 반면 Cozzolino(1961)의 추정식과 Yoon et al.(2011)의 추정식은 김해

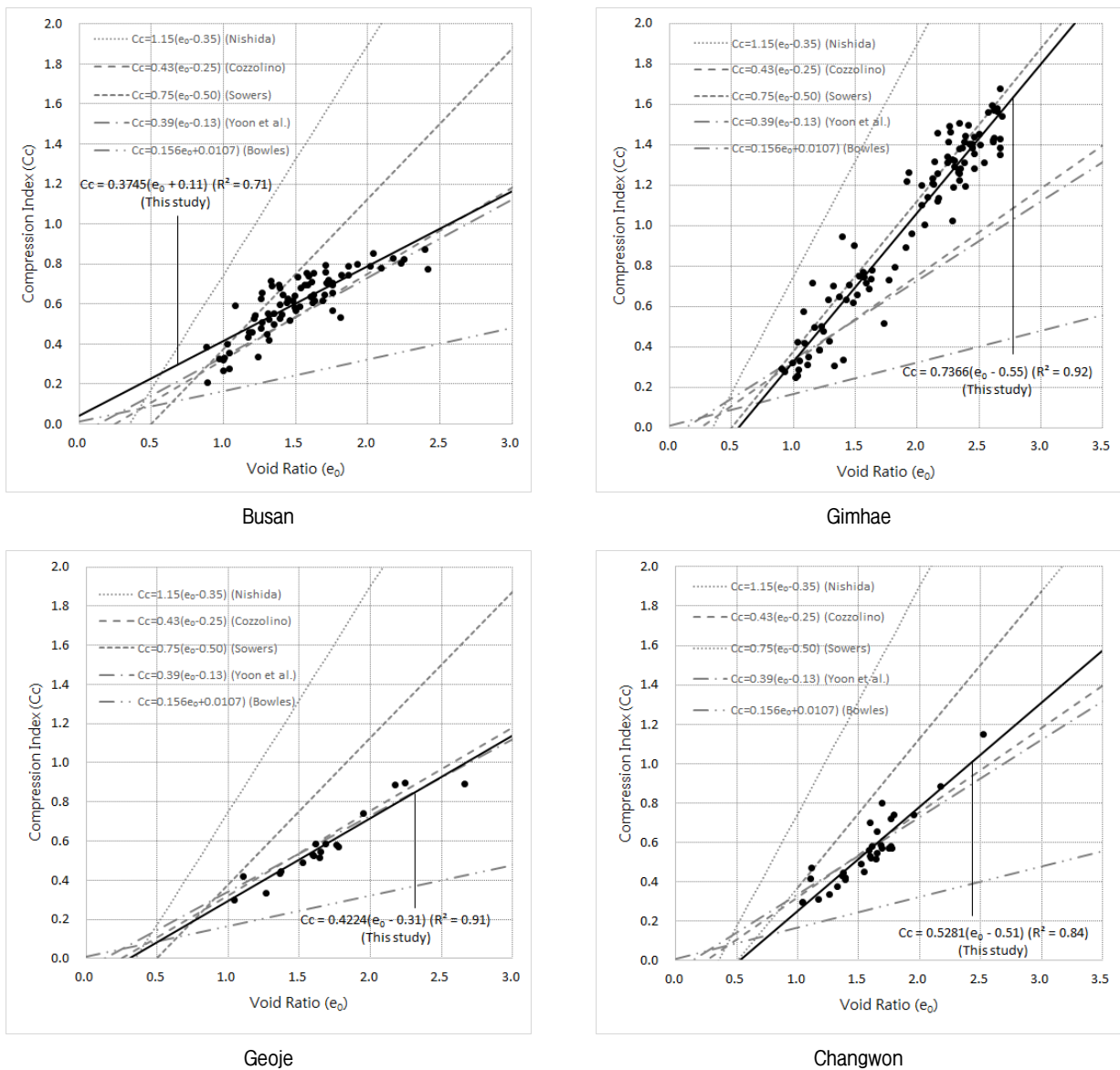


Fig. 9. Relationship between void ratio and compression index

Table 4. Average of error rate and RMSE in each estimation equation of compression index

Properties	References	Error rate / RMSE			
		Busan	Gimhae	Geoje	Changwon
e_0	Nishida	53.6 / 0.778	45.6 / 0.843	62.0 / 0.983	60.5 / 0.877
	Cozzolino	17.3 / 0.107	39.6 / 0.361	9.4 / 0.063	12.8 / 0.081
	Sowers	20.1 / 0.214	12.0 / 0.134	33.3 / 0.322	30.4 / 0.267
	Yoon et al.	17.3 / 0.108	43.6 / 0.389	9.4 / 0.059	13.1 / 0.086
	Bowles	146.1 / 0.378	211.4 / 0.786	108.7 / 0.324	115.1 / 0.335
	This study	11.5 / 0.082	11.3 / 0.121	7.1 / 0.052	11.9 / 0.074

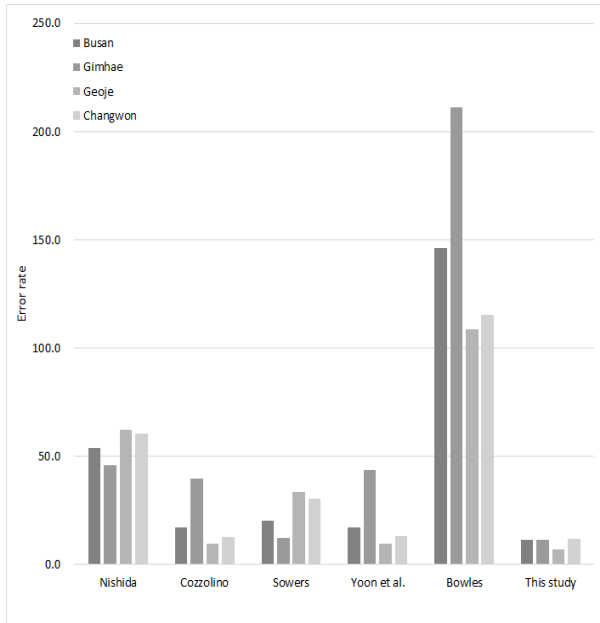


Fig. 10. Comparison of error rate in estimation equation of compression index using void ratio

지역을 제외한 나머지 지역에서 낮은 오차율을 기록하였으며, 특히 거제 지역은 본 연구의 추정식의 오차율과도 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 Sowers(1970)의 추정식은 김해지역에서 가장 낮은 오차율을 보였다.

앞서 말한 두 추정식을 제외한 나머지 추정식은 일부 지역에서 낮은 오차율을 보여 적용이 가능할 것이라 판단되는 추정식이 있었으나 일부 지역에서는 적용하기에는 높은 오차율을 기록하여 실제 적용하기에는 어려울 것으로 판단된다. 하지만 각 지역별로 산정한 본 연구의 추정식이 가장 낮은 오차율과 RMSE값으로 높은 정확성을 보였으므로 본 연구대상 지역에 간극비를 이용한 추정식으로 적용가능 할 것이라 판단된다.

4. 동남해안 지역의 통합 추정식

본 연구를 통해 산출된 부산, 김해, 거제 및 창원지역

Table 5. Comparison between predicted and measured compression index using RMSE of estimation of compression index in the east-southern coast

		Cc (predicted) / Cc (measured)			
		Max	Min	Avg	RMSE
W_n	Hong et al.	2.259	0.779	1.283	0.402
	Yoon et al.	1.691	0.561	0.917	0.232
	Azzouz et al.	1.313	0.464	0.791	0.266
	Koppula	1.555	0.532	0.871	0.235
	This study	1.512	0.502	1.022	0.188
W_L	Hong et al.	1.886	0.445	0.992	0.349
	Yoon et al.	1.342	0.338	0.744	0.363
	Azzouz et al.	0.927	0.238	0.523	0.512
	Mayne	0.672	0.173	0.380	0.634
	This study	2.871	0.521	1.228	0.541
e_0	Yoon et al.	3.683	1.263	2.16	1.249
	Nishida	2.034	0.677	1.228	0.341
	Sowers	1.529	0.519	0.87	0.245
	This study	1.649	0.492	1.023	0.219

의 데이터를 기반으로 동남해안 지역의 전반적인 통합 추정식을 산출하기 위하여 본 연구에 적용된 지반 물성 데이터를 통합하였다. 그 결과 산출된 인자별 압축지수 추정식을 이용하여 해외 학자들의 압축지수 추정식 중 모든 연약지반을 대상으로 제안한 압축지수 추정식과 국내 학자 중 동남해안 지역을 기반으로 제안한 압축지수 추정식을 이용하여 RMSE를 통한 비교분석을 실시하였다.

동남해안에 적용할 수 있는 함수비를 이용한 압축지수 추정식을 비교하기 위해 Fig. 11에 나타낸 것과 같

이 국내에서 부산신항 및 양산지역의 데이터를 기반으로 동남해안 지역을 대상으로 추정식을 제안한 Hong et al.(2011)과 울산 부산 마산지역의 데이터를 기반으로 추정식을 제안한 Yoon et al.(2011)을 선정하였으며 해외에서는 모든 연약지반에 적용이 가능하다고 제안한 Koppula(1981)의 추정식과 Azzouz et al.(1976)의 추정식을 선정하였다. 4가지의 추정식과 본 연구를 통해 산출된 추정식의 RMSE를 산출하였으며 그 결과 Table 5에 나타낸 것과 같이 본 연구를 통해 산출된 추정식이 타 추정식보다 정확성이 높은 것으로 확인되었다. 따라

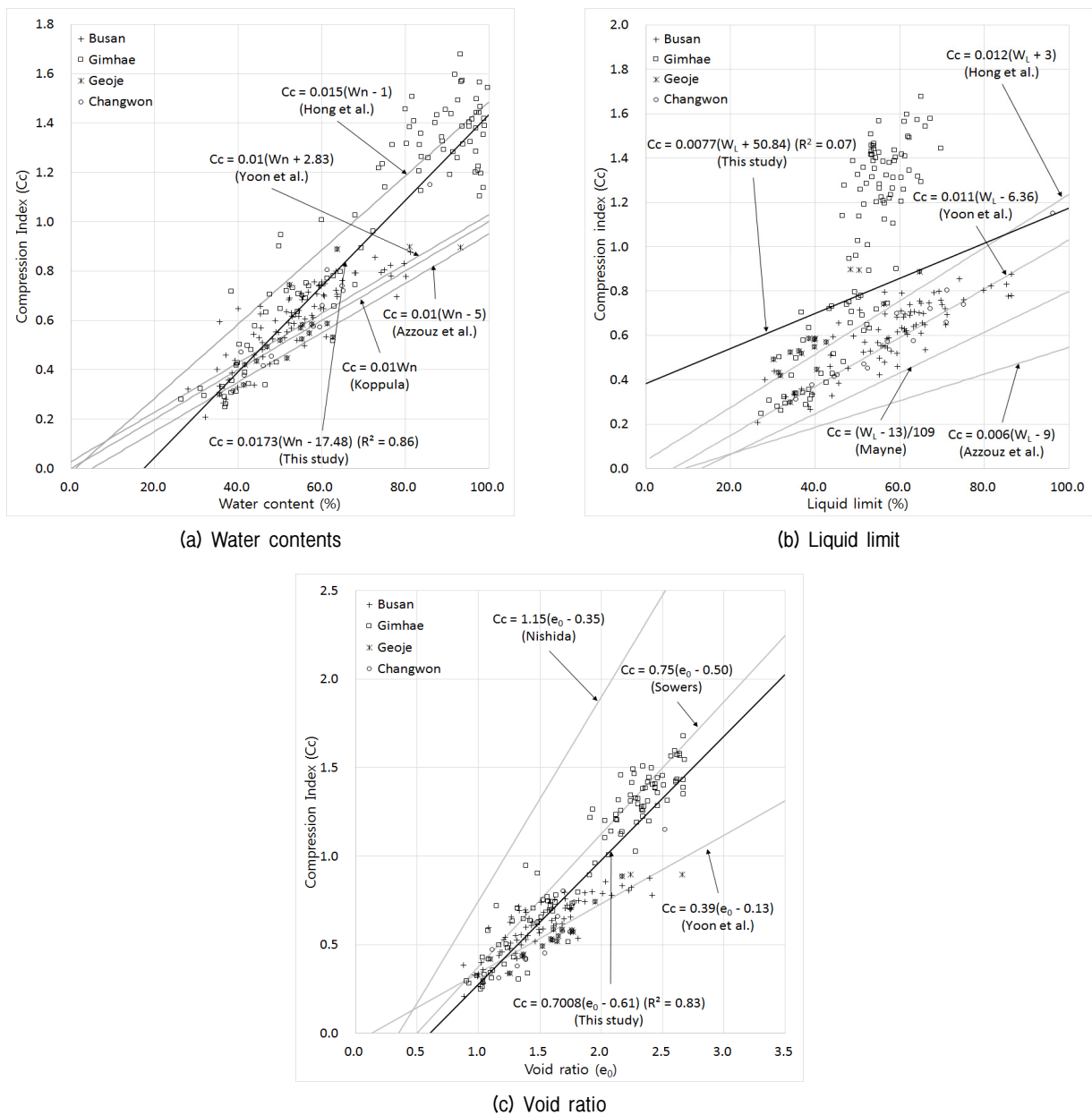


Fig. 11. Relationship between compression and (a) water content, (b) liquid limit, (c) void ratio in integrated estimation equation of compression index

서 함수비를 이용하여 압축지수를 산정 할 경우 본 연구를 통해 산정한 추정식을 적용할 경우 보다 정확한 값을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

이어서 액성한계를 이용한 압축지수 추정식을 타 추정식과 비교하기 위해 Hong et al.(2011), Yoon et al. (2011), Azzouz et al.(1976)의 추정식을 비롯해 Mayne (1980)식을 선정하였으며 5가지 추정식의 RMSE를 산정하였다. 본 연구의 액성한계 추정식 RMSE값은 0.541로 Hong et al.(2011)의 추정식과 Yoon et al.(2011)의 추정식보다 정확성이 낮다는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구의 추정식은 Fig. 11에서 알 수 있다시피 타 지역의 액성한계 값보다 높은 김해지역의 액성한계 값을 포함하여 산정한 추정식이며 이와 달리 Hong et al.(2011)의 추정식과 Yoon et al.(2011)의 추정식은 김해지역을 대상으로 산정한 추정식이 아니며 또한 김해지역의 데이터보다 많은 데이터가 분포되어 있는 구간을 아우르는 추정식이므로 본 연구의 추정식보다 높은 정확성을 보인다고 판단된다.

마지막으로 간극비를 통한 동남해안 추정식의 정확성을 판단하기 위해 국내 동남해안 지역을 대상으로 압축지수 추정식을 제안한 Yoon et al.(2011)의 추정식과 모든 점토지반에 적용이 가능하다고 추정식을 제안한 Nishida(1956)와 Sowers(1970)의 추정식을 선정하여 RMSE값을 산정하였다. Table 5에서 알 수 있듯이 Nishida (1956)와 Sowers(1970)의 추정식은 국내 동남해안 지반에 적용하기에는 정확성이 다소 부족한 것을 알 수 있으며 본 연구를 통한 압축지수 추정식이 가장 높은 정확성을 보였고 동남해안 연약지반의 간극비를 통한 압축지수 추정식을 산정하기에 가장 적합하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 동남해안 지역 연약 점토에 적용이 가능한 압축지수 추정식을 제안하기 위해 불교란 시료를 통하여 물리·역학적 시험을 실시하였다. 시험결과에 따라 지역별, 흙의 종류별로 물성값과 압축지수와의 관계에 대해 분석하였으며, 또한 동남해안 지역에 전반적으로 적용할 수 있는 추정식을 산정하기 위하여 본 연구에 이용된 모든 데이터를 바탕으로 압축지수 추정식을 제안하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존에 해외에서 발표되었던 압축지수 추정식을 본 연구 대상지역에 적용한 결과 함수비를 통한 압축지수 추정식은 11%~26%로 나타났으며 액성한계를 통한 압축지수 추정식은 42%~289%, 간극비를 통한 압축지수 추정식은 9%~211%로 다양한 오차율이 나타났다. 일부 지역에서는 적용이 가능한 오차율과 낮은 RMSE값을 보였지만 전반적으로 국내 연약지반에 적용시 큰 오차율이 나타났다. 또한 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 Terzaghi and Peck (1967)와 Skempton(1944)의 추정식 역시 국내의 연약지반 적용시 큰 오차율을 보였다. 이는 해외의 추정식 발표 시 모든 연약지반에 적용이 가능하다고 하였으나 국내 동남해안 연약지반의 특성은 고려되지 않은 추정식이라 판단된다.
- (2) 본 연구대상 지역과 인접 지역을 대상으로 국내에서 발표된 함수비를 통한 압축지수 추정식 중 Hong et al.(2011)의 추정식은 평균 25% 오차율을 보였으며, Yoon et al.(2004)의 추정식은 평균 18%의 오차율을 보였다. 본 연구에서 제안하는 함수비를 통한 지역별 압축지수 추정식은 평균 11%의 오차율과 지역별로 비교하였을 때 가장 낮은 RMSE값으로 보다 높은 정확성을 가진 추정식이라 판단된다.
- (3) 액성한계를 이용한 압축지수 추정식을 국내 발표 자료와 본 연구에서 제안한 추정식을 본 연구 대상지역에 적용한 결과 Yoon et al.(2004)의 추정식은 약 48%의 평균 오차율을 보였으며 Hong et al.(2011)의 추정식은 약 28%의 오차율을 보였다. 본 연구에서 제안한 추정식은 약 16%의 오차율로 국내외 추정식 중 가장 낮은 오차율을 보였으며 RMSE 역시 가장 낮은 값을 보였다.
- (4) 본 연구를 통해 동남해안 연약지반에 일반적으로 적용이 가능한 통합 추정식을 제안하였으며 정확성 분석을 위해 국내외적으로 발표된 추정식과 RMSE 값을 통하여 비교분석을 실시하였다. 그 결과 함수비 및 간극비를 통한 압축지수 추정식은 가장 낮은 RMSE값으로 타 추정식보다 높은 정확성을 보였으나 액성한계를 통한 압축지수 추정식의 RMSE는 비교를 실시한 추정식 중 높은 편에 속하였다. 본 연구에서 제안한 추정식은 타 지역의 액성한계 값보다 높은 김해지역의 액성한계 값을 포함하여 산정한 추정식이며 이와 달리 낮은 RMSE값을 나타낸 Hong et al.(2011)의 추정식과 Yoon et al.(2004)의

추정식은 김해지역을 대상으로 산정한 추정식이 아니며 또한 김해지역의 데이터보다 많은 데이터가 분포되어 있는 구간을 아우르는 추정식이므로 본 연구의 추정식보다 높은 정확성을 보인다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2019년 2월 창원대학교 박사학위(김성수, 2019) 논문에서 발취하였습니다.

참고문헌 (References)

- Azzouz, A. S., Krizek, R. J., and Corotis, R. B. (1976), "Regression Analysis of Soil Compressibility", *Soils and Foundation*, Japan Society of Soil Mechanics and Foundations Engineering, Tokyo, Japan.
- Casagrande, A. (1948), "Classification and Identification of Soils", *Transaction, ASCE*, Vol.113, pp.901-930.
- Choi, Y. J. (1986), "Experimental equations for estimating compression index C_c ", *Master's Thesis*, Hanyang University (in Korean).
- Cozzolino, V. M. (1961), "Statistical Forecasting of Compression Index", *Proc., 5th Int. Conf. on Soil Mech and Found Engrg*, Paris, France, Vol.1, pp.51-53.
- Gwon, H. J., Kim, D. S., Park, J. B., and Jeong, S. G. (2010), "Foundation engineering", *Goomibook*, Vol.2, pp.27-28.
- Herrero, O. R. (1983), "Universal Compression Index Equation", *Closure, J. Geotech. Engrg*, ASCE, Vol.109, No.5, pp.755-761.
- 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", *Journal of Korean geotechnical society*, Vol.27, No.9, pp.37-46 (in Korean).
- Hong, W. P. (1974), "The compressibility of soil accounting to variation of water content and soil density", *Master's Thesis*, Hanyang University (in Korean).
- Hough, B. K. (1957), "Basic Soils Engineering", *The Ronard Press Company New York*, pp.114-115.
- Jung, S. G., Gwak, J. M., Jang, W. Y., and Kim, D. G. (2000), "Compressibility Characteristics of Busan Clays", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol 2000, pp.361~368 (in Korean).
- Kim, B. T., Kim, Y. S., and Bae, S. G. (2001), "Proposition Empirical Equations and Application of Artificial Neural Network to the Estimation of Compression Index", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.6, pp.25-36 (in Korean).
- Kim, D. H. (2002), "A Study on the Relationship between Physical Properties and Compression Index for Marine Clay", *Doctor's Thesis*, Kyunghee University (in Korean).
- Kim, S. H. (1998), "Determination of compression index using regression analysis and reliability analysis", *Master's Thesis*, Kyunghee University (in Korean).
- Koppula, S. D. (1981), "Statistical Estimation of Compression Index", *Geotech. testing j*, 4(2), pp.68-73.
- Lim, C. W. (1982), "A study on the determination of coefficients of compression index equation for Korean saturated fine-grained soils", *Master's Thesis*, Seoul National University (in Korean).
- Lee, C. G. (1987), "Study on the computation of compression index of marine soft clays in Jeonnam region : Centering Skempton equation and regression equation", *Master's Thesis*, Joseon University (in Korean).
- Mayne, P. W. (1980), "Cam-clay Predictions of Undrained Strength", *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.106, No.11, pp.1219-1242.
- Moran, Proctor, Mueser, and Rutledge, P. C. (1958), "Study of deep soil stabilization by vertical sand drains", *Bureau of Yards and Docks*, Department of the Navy, Washington, D. C.
- Nishida, Y. (1956), "A Brief Note on Compression Index of Soil", *J. Soil Mech. and Found Eng*, ASCE, Vol.82, No.3, pp.1-14.
- Schmertmann, J. H. (1955), "The Undisturbed Consolidation behavior of Clay", *J. Soil Mech. and Found Eng*, ASCE, 120, pp.1201-1233.
- Shin, E. C., Lee, G. J., and Shin, B. W. (1995), "Geotechnical Investigations of Soft Marine Clay in Incheon", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.1995, No.1, pp.15-20 (in Korean).
- Skempton, A. W. (1944), "Note on Compressibility of Clays", *Quarterly Journal of the Geotechnical Society of London*, Vol.100, pp.119-135.
- Song, M. S. (1986), "Correlation of soil properties of marine clay in Korea", *Master's Thesis*, Hanyang University (in Korean).
- Sowers, G. B. (1970), "Introductory soil mechanics and foundations", *The Macmillan Company*, 3rd Ed., London, England..
- Terzaghi, K. (1923), "Die Berechnung Der Durchlassigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydrodynamischen pannungser-scheinungen", *Akademic der Wissenchafton In Wein*, *Mathematisch-Naturwissenschaftlichs Klasse*, Vol.132, pp.125-138 (in German).
- Terzaghi, K. and Peck R. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", *John Wiley and Sons, Inc*, New York N.Y.
- Yoo, N. H., Yoo, Y. T., and Park, S. B. (1988), "Studies on the Engineering Characteristics of Alluvial Clayey Deposits in the Estuary Area of Seomjin River(1)", *Journal of Korean Society of Geotechnical Engineering*, Vol.4, No.1, pp.37-46 (in Korean).
- 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(6), pp.1213-1221.

Received : June 14th, 2019

Revised : July 16th, 2019

Accepted : July 26th, 2019