

광양점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성

Correlations Between the Physical Properties and Compression Index of KwangYang Clay

배 우 석[†] · 김 종 우¹⁾

Bae, Wooseok · Kim, Jongwoo

ABSTRACT : The correlation equation empirically proposed to obtain compression indexes has been proposed to conveniently obtain the value using the soil parameter that can be obtained through simple tests when the number of time of consolidation testing is low or the distribution is large but most of the analyzed regions are limited to certain regions abroad or in the country and multiple data were integrated for use in many cases, thus it is not very reasonable to apply it. Therefore, to establish a new design method considering the uncertainty of the ground, it was selected the Kwangyang port area of which the data have been collected recently thus are relatively more reliable as the subject region of the study in order to maximally reduce the uncertainty of test data. After performing the verification of the normality of the consolidation test data obtained from the selected region and the transformation of variables, a prediction formula was proposed through the regression model with the transformed variables and the proposed regression model with transformed variables was compared with existing empirical equations to verify the suitability of the proposed model formula. After analyzing, it was confirmed that the coefficient of determination was increased after the Box-Cox variable transformation, thus the explanatory power was being enhanced and through the root-mean-square-error method, it was confirmed that the proposed model formula showed the most closed value to the test value.

Keywords : Compression Index, Regression Model, Variable transformation, Root-mean-square-error method

요 지 : 압축지수를 구하기 위해 경험적으로 제안되고 있는 상관관계식은 압밀실험 횟수가 작거나 분산이 심한 경우에 간단한 시험으로 획득할 수 있는 토질정수를 이용하여 간편하게 구할 수 있도록 제안되었으나 대부분은 분석대상지역이 국외나 국내의 특정지역에 국한되거나 여러 자료를 통합하여 사용한 경우가 많아 적용하는데 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 지반의 불확실성을 고려한 설계법의 새로운 정립을 목적으로 시험자료의 불확실성을 최대한 줄이기 위해 최근에 수집된 비교적 신뢰성이 큰 광양항 지역을 연구대상지로 선정하였다. 선정지역에서 획득된 압밀시험 자료에 대해 정규성 검증 및 변수 변환을 수행한 후 변수변환된 회귀모형을 통하여 예측식을 제안하였으며, 제안된 변수변환 회귀모형을 기존의 경험식과 비교하여 제안모형식의 적합성을 검증하였다. 분석결과 Box-Cox 변수변환 후 결정계수가 증가하며 설명력이 향상되고 있음을 확인하였으며 평균제곱예측오차법을 통하여 제안된 모형식이 실험값과 가장 근접한 값을 나타내고 있음을 확인하였다.

주요어 : 압축지수, 회귀모형식, 변수변환, 평균제곱예측오차법

1. 서 론

주로 연약지반으로 구성되어 있는 우리나라의 서·남해안 지역과 내륙의 하천 인근지역은 대규모 공사들의 시행에 따라 일반적으로 과도한 침하 및 지지력 부족 등으로 인하여 심각한 문제를 야기시키고 있다. 특히 광양항 부근 지역은 최근 대단위 매립공사와 부지조성공사 등을 위해 수많은 지반조사가 실시되고 있으나 연약점성토의 깊은 심도나 큰 예민비 등으로 인하여 설계시 필요한 토질정수가 명확히 제시되고 있지 못하는 실정이다.

또한 현장에서의 지반조사나 실내시험을 통해 분석된 설

계자료라 해도 그 조사방법과 빈도, 지반의 공간적 특성 변화 및 실험절차, 그리고 자연적, 인위적인 다양한 요인으로 지반조사 결과는 불확실성이 여전히 존재한다. 이에 따라 설계자료의 불확실성을 제거하기 위해 다양한 통계적 기법을 활용하는 해석방법에 대한 연구가 진행되고 있으나 현재 까지도 불확실성을 완전히 제거할 수 있는 방법은 많지 않으며, 국내의 지반조사 결과는 자료의 수나 질의 측면에서 단순한 통계적 기법을 적용하는 것조차도 충분치 못한 경우가 대부분인 상황이다.

이러한 실무에서의 한계성을 극복하기 위하여 국내에서는 송만순(1988)이 우리나라 서남해안에서 시행된 토질조

† 정회원, (주)나노지오이엔씨 이사(E-mail : old1007@hanmail.net)

1) 비회원, 청주대학교 이공대학 토목환경공학과 교수

사 결과를 토대로 554개의 자연시료에 대한 토질 물성치와 압축지수의 상관관계를 검토하여 단일변수의 형태로 압축지수 추정을 위한 경험식을 제안하였다. 김동후(2003) 등은 대형 항만공사 자료를 이용하여 회귀모형을 산정하고 물리적 특성과 압축지수의 상관성을 나타내는 최적의 회귀모형은 토질정수의 누승식 또는 지수승식 형태의 비선형회귀식임을 주장하였다. 또한 윤길립(2003, 2004) 등은 1800여개 시료에 대한 압밀시험 결과를 근거로 단일 및 다중회귀 통계분석을 수행하고 경험상관식을 개발하였다.

지금까지 경험적으로 제안되고 있는 상관식들은 경제적으로 압밀시험 횟수가 작거나 분산이 심한 경우에 간단한 시험에 의하여 획득될 수 있는 토질정수를 이용하여 간편하게 구할 수 있도록 제안되었다(김동후 등, 2003). 그러나 제안되어 있는 대부분의 상관식들은 분석대상지역이 국외나 국내의 특정지역에 국한되거나 자료의 숫자를 늘리기 위해 여러 자료를 통합하여 사용한 경우가 많아 적용하는데 무리가 따르는 것이 사실이다.

또한 특정지역을 대상으로 그 지역에서 획득된 자료를 사용하는데 있어서도 회귀모형의 가장 기본적인 통계적 가정인 정규성을 만족시키지 못한다면 추정된 회귀계수가 편의(biased)되어 예측력이 낮아진다는 문제점이 수반됨에도 불구하고, 기존의 압축지수 예측 모형에 관한 연구에서는 제안된 회귀모형의 정규성 검증에 대한 명확한 검증없이 모형이 개발되어 왔다.

본 연구에서는 지반의 불확실성을 고려한 설계법의 새로운 정립을 목적으로 시험자료의 불확실성을 최대한 줄이기 위해 광양항 지역을 연구대상 지점으로 선정하였다. 광양지역은 대형항만공사의 시행으로 비교적 많은 지반조사결과가 있으며 특히 특정 지역에 국한되어 조사와 시험이 실시

되어 자료의 정도가 매우 높아 지역적인 특성을 잘 나타내 줄 수 있어 타지역에 비해 비교적 신뢰성이 크다. 지반조사 결과는 해상점토의 물리적 특성을 구분하여 정리하고 토질정수 사이의 상관관계를 정립하기 위하여 대상지역에서 얻어진 자료에 대해 우선적으로 정규성 검증 및 변수 변환을 수행하였다. 또한 변수변환된 회귀모형을 통하여 예측식을 제안하였으며, 제안된 변수변환 회귀모형식을 기존의 경험식과 비교하여 제안모형식의 적합성을 검증하였다.

2. 대상현장의 지반특성

대상현장이 위치한 광양만 지역은 전라남도 해안의 여수반도와 경상남도 남해시 사이에 위치한 섬진강의 하구지역으로 하천의 영향을 더 많이 받은 넓은 간석지가 위치하며, 퇴적층인 경상누층군으로 구성되어 있다. 대상 지역의 지층은 주로 모래 및 자갈층이 풍화토 또는 풍화암층 위에 놓여 있고 그 층위에 점토가 퇴적되어 있는 구조를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 광양만 지역의 평균 점성토층 깊이는 19.8m 정도로 평가되고 있다(오서현, 2009). 연약점토의 압축지수를 추정하기 위해 제안된 식들은 국내외의 연구결과에 의하면 자연함수비와 액성한계, 간극비, 소성지수 등이 가장 큰 영향을 미치므로 이들을 단일변수로 이용하고 있다(Al-Khafaji & O.B.Andersland, 1982). 따라서 본 연구에서도 많은 변수 중 이들을 대상으로 자료의 특성을 요약하고 분석하여 그 정규성과 상관성을 분석하였다. 본 분석에 사용된 자료는 2001~2003년 사이에 실시된 광양항 2, 3단계 컨테이너부두 축조공사에 따른 지반조사 및 기본, 실시설계 보고서와 광양항 배후도로 및 단지, 준설토 투기장 가호안공사에 따른 지반조사 보고서를 이용하였다.

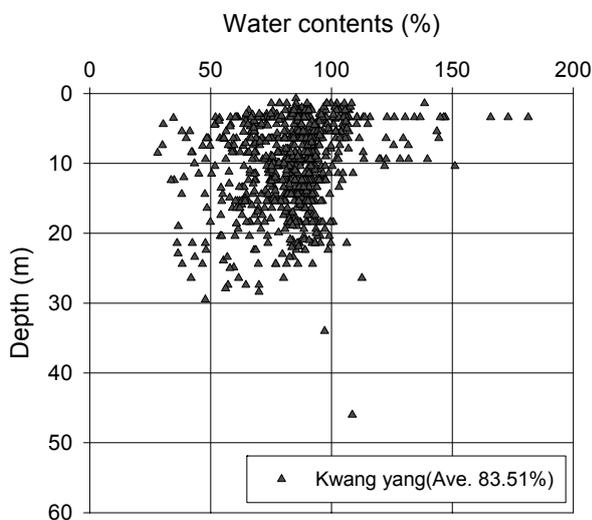


그림 1. 깊이에 따른 함수비 분포

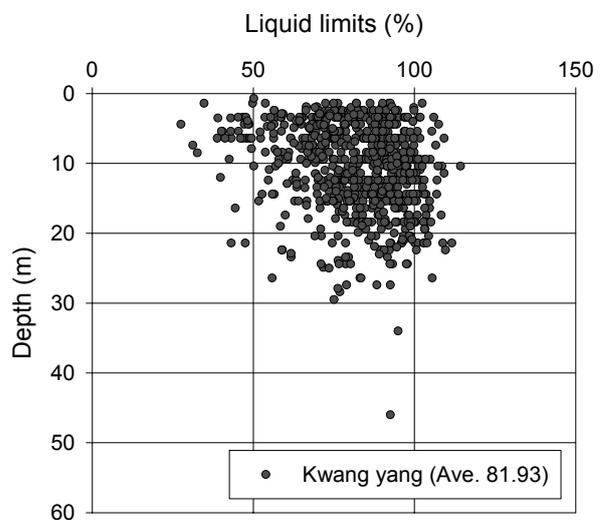


그림 2. 깊이에 따른 액성한계 분포

2.1 함수비

그림 1은 깊이에 따른 함수비 분포를 나타낸 것으로 광양 지역의 함수비는 19.55~181.4%의 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있으며, 평균 함수비는 83.51%를 나타내고 있다. 함수비가 다른 지역에 비해 크게 나타나는 이유는 광양 점토의 세립분 함량이 비교적 크고 광양만 지역이 퇴적암이 우세하여 광물학적인 특성 상 몬모리로나이트가 포함되어 있어 흡착수와 층간수를 다량으로 함유할 가능성이 크기 때문이다.

자연함수비의 왜도(skewness)와 첨도(kurtosis)는 각각 0.1211, 2.193이며, 95% 신뢰구간의 함수비 분포범위는 광양지역에서 81.74~83.82% 정도로 나타나고 있다. 여기서 왜도는 자료의 분포가 대칭인지를 나타내는 척도로 자료들이 중심으로부터 대칭일 경우에는 왜도의 값이 0이고, 오른쪽으로 왜곡되어 있는 경우에는 양(+)의 값을, 그리고 왼쪽으로 왜곡되어 있는 경우에는 음(-)의 값을 갖는다. 첨도는 자료들의 분포가 어느 정도 뾰족한지를 나타내는 척도로서 자료들의 분포가 정규분포의 형태일 경우 3의 값을 나타내고 정규분포보다 뾰족할 경우에는 첨도의 값이 3보다 큰 값을 갖고, 정규분포보다 평평할 경우에는 3보다 작은 값을 나타낸다. 분석결과 광양지역의 자연함수비는 약하게 오른쪽으로 왜곡되어 있으면서 정규분포보다 평평한 모양을 가진 분포를 가진다고 할 수 있다.

2.2 액성한계

그림 2는 깊이에 따른 액성한계의 분포로 깊이에 관계없이 비교적 일정한 경향을 보이며, 액성한계가 50%이상으로 전반적으로 압축성과 팽창성이 큰 고소성점토(CH)에 속한

다고 할 수 있다.

광양지역 점토의 액성한계는 27.5~114.92%로 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있으며, 평균 액성한계는 81.93%를 나타낸다. 이러한 이유도 역시 광양지역의 세립분 함량이 크고 활성도가 큰 몬모리로나이트가 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

액성한계의 왜도와 첨도는 각각 -0.5919, 0.1231이며, 95% 신뢰구간의 함수비 분포범위는 78.99~80.64% 정도로 나타나고 있다. 액성한계의 분포는 자연함수비와는 반대로 자료들이 오른쪽으로 매우 심하게 치우쳐 있는 것으로 나타났으며, 첨도의 경우는 매우 평평한 형태의 분포를 가지고 있음을 알 수 있다.

2.3 초기간극비

초기간극비는 압밀시험, 일축압축시험, 삼축압축시험 시 측정된 결과로 광양지역 점토의 초기간극비는 0.739~4.491 정도로 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있으며, 평균 초기간극비는 2.31로 나타났다. 심도가 깊어짐에 따라 자연함수비가 감소하는 경향을 보이므로 초기간극비도 역시 감소하는 경향을 보이고 있으나 큰 상관성을 나타내지는 않는 것으로 판단된다.

초기 간극비의 왜도와 첨도는 각각 0.218, 0.9439이며, 95% 신뢰구간의 초기간극비 분포범위는 2.2572~2.3249 정도로 나타나고 있다. 초기간극비의 자료들은 평균으로부터 왼쪽으로 치우치고 있는 상황으로 광양지역은 왜곡이 심한 것으로 보이며, 정규분포에 비해 더 평평한 모양의 분포를 가지고 있는 것으로 나타났다.

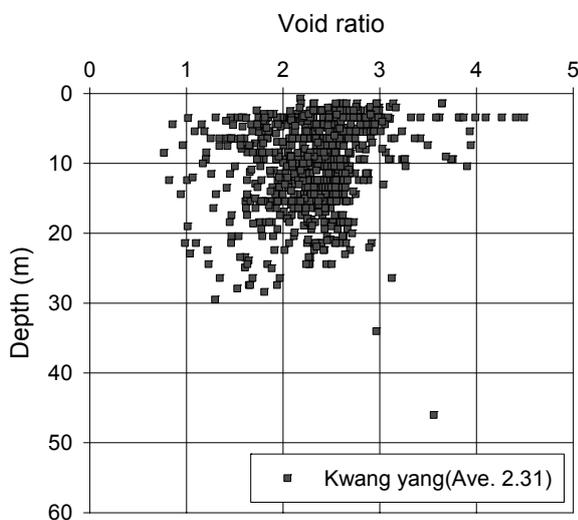


그림 3. 깊이에 따른 초기 간극비 분포

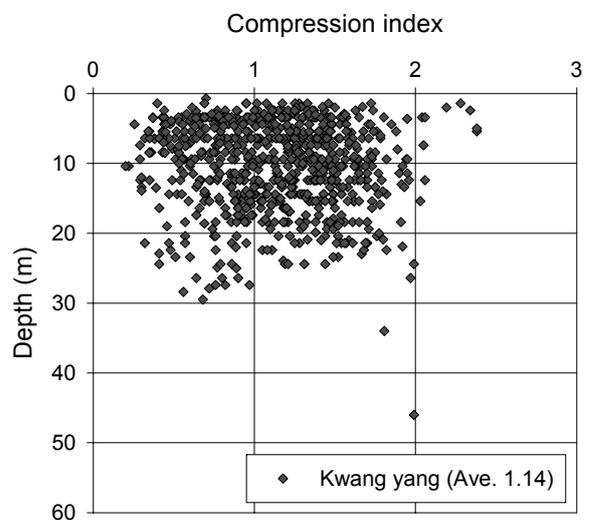


그림 4. 깊이에 따른 압축지수의 변화

2.4 압축지수

그림 4는 표준압밀시험 결과로부터 산정된 깊이에 따른 압축지수(C_c)의 변화를 나타낸 것으로 자료의 분산이 있거나 깊이에 따른 변화없이 일정한 경향을 보이고 있다.

광양지역 점토시료의 압축지수는 0.2~2.381의 범위에 걸쳐 분포하고 있으며, 압축지수의 평균값은 1.14 정도로 다른 지역에 비해 비교적 큰 값을 나타내는 것으로 평가되었다. 시험자료에 대한 분석결과 압축지수 역시 세립분의 함량과 점토광물의 종류에 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

압축지수의 왜도와 첨도는 각각 0.092, -0.46이며, 95% 신뢰구간의 압축지수 분포범위는 1.0877~1.1393 정도로 나타나고 있으며, 정규분포에 비해 매우 평평한 모양의 분포를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

3. 변수변환 회귀모형

3.1 압축지수에 대한 기존 단일변수경험식

기존의 연구결과에 의하면 압축지수에 직접적인 영향을 줄 수 있는 토질정수는 주로 액성한계, 함수비 그리고 초기 간극비로 규정하고 있으며, 이들과 압축지수와의 관계는 선형식으로 제안하고 있다(Al-Khafaji and O.B.Andersland, 1982). 그러나 제안된 예측식은 대부분 토질정수 중 하나의 독립변수와의 상관관계식을 일차함수의 형태로 나타내고 있으며, 대부분의 예측식들은 특정지역에 국한되어 제안되

어 있다. 또한, 이들 경험적 상관관계식들은 대부분 흙의 응력 이력이나 분석 대상 자료의 토질특성 및 광물성분 등에 관한 상세한 정보들이 전혀 제공되지 않으므로 식의 수정 없이 국내의 지반에 그대로 적용하는에는 무리가 따를 것이다. 국내 점토의 연약지반의 압밀특성에 관한 체계적이고 종합적인 연구는 1999년도 양산-물금 지역에 대하여 한국토지공사에서 연구가 수행되었으며, 현재까지 대부분 분석 자료는 특정 지역을 대상으로 토질특성과 압축지수와의 경험적 상관관계식을 제시하고 있는 실정에 있다.

표 1과 2는 국내외의 점토지반을 대상으로 제안되고 있는 단일지반변수를 적용한 다양한 압축지수 예측식들을 보여주고 있다(김동후, 2002; 한국토지공사, 1999).

표 2는 국내에서 제안된 토질정수와 압축지수의 상관관계식으로서 이외에도 많은 경험적 상관관계식들이 제안되어 있으나 대부분 분석대상지역이 특정지역으로 협소하고, 단순회귀분석에 의한 직선식으로 경험적 상관관계를 표현하고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내의 연안별 해성점토에 적합한 압축지수 예측 모형을 제안하기 위하여 비교적 신뢰성이 크다고 할 수 있는 광양지역의 대형 항만공사 현장의 시험값으로 자료를 국한시키고 시험결과를 Box-Cox 변수변환을 통하여 자료를 정규화시킨 후 단순회귀분석을 실시하여 최적의 회귀모형을 개발하고 국내 특정지역에 부합하는 토질 특성 인자와 압축지수의 관계식을 추정하였다.

표 1. 국외의 압축지수 제안식

상관 관계식	적용 대상 토질	제안자	비고
$C_c = 0.85 (W_n/100)^3$	핀란드 점토	Helenclund(1951)	$C_c = f(W_n)$
$C_c = 0.0115 W_n$	유기질 실트 및 점토, peat	Moran et al.(1958)	
$C_c = 0.01 (W_n - 5)$	모든 점토	Azzouz et al.(1976)	
$C_c = 0.01 W_n$	시카고 점토	Koppula(1981)	
$C_c = 0.014 (W_n - 7.549)$	모든 점토	Herrero(1980)	
$C_c = 0.007 (LL - 7)$	교란된 시료	Skempton(1944)	$C_c = f(LL)$
$C_c = 0.0046 (LL - 9)$	브라질 점토	Cozzolino(1961)	
$C_c = 0.009 (LL - 10)$	정규 압밀 점토	Terzaghi&Peck(1967)	
$C_c = 0.006 (LL - 9)$	모든 점토(LL < 100%)	Azzouz et al.(1976)	
$C_c = (LL - 13)/109$	모든 점토	Mayne(1980)	
$C_c = 0.54 (e_0 - 0.35)$	모든 점토	Nishida(1956)	$C_c = f(e_0)$
$C_c = 0.29 (e_0 - 0.27)$	무기질 점성토, 실트질 점토	Hough(1957)	
$C_c = 0.35 (e_0 - 0.50)$	유기질토, 세립토, 유기질실트	Hough(1957)	
$C_c = 0.43 (e_0 - 0.25)$	브라질 점토	Cozzolino(1961)	
$C_c = 0.75 (e_0 - 0.50)$	저소성의 흙	Sowers(1970)	
$C_c = 0.4 (e_0 - 0.25)$	모든 점토	Azzouz et al.(1976)	

표 2. 국내의 압축지수 제안식

상관 관계식	적용 대상 토질	제안자	비고
$C_c = 0.0086 W_n - 0.118$	인천남항	이송 외 2인(2001)	$C_c = f(W_n)$
$C_c = 0.015 W_n - 0.4$	송도매립지	“	
$C_c = 0.0083 W_n - 0.0845$	군장 신항만	“	
$C_c = 0.0085 W_n - 0.1041$	군산 해상신도시	“	
$C_c = 0.022 W_n - 0.693$	새만금	“	
$C_c = 0.0176 W_n - 0.3168$	군산공업용수	“	
$C_c = 0.014(W_n - 14)$	군산 나운지구	“	
$C_c = 0.0097 W_n + 0.3$	마산 신항지역	김승렬 외 1인(2001)	
$C_c = 0.015(W_n - 2)$	김해지역	장정욱 외 2인(2001)	
$C_c = 0.016(W_n - 12.5)$	진해지역	“	
$C_c = 0.013(W_n - 10)$	거제지역	“	
$C_c = 0.016(W_n - 22)$	서, 남해안 점토	송만순(1988)	
$C_c = 0.0066(LL+17)$	군장 신항만	이송 외 2인(2001)	$C_c = f(LL)$
$C_c = 0.0087(LL-4)$	새만금	“	
$C_c = 0.013(LL-15)$	군산 나운지구	“	
$C_c = 0.0059LL+0.74$	마산 신항지역	김승렬 외 1인(2001)	
$C_c = 0.008LL+0.173$	부산 점토	정성교 외 3인(2001)	
$C_c = 0.016(LL-15)$	서, 남해안 점토	송만순(1988)	
$C_c = 0.7(e_0 - 0.34)$	김해지역	장정욱 외 2인(2001)	$C_c = f(e_0)$
$C_c = 0.52(e_0 - 0.38)$	진해지역	“	
$C_c = 0.45(e_0 - 0.4)$	거제지역	“	
$C_c = 0.74(e_0 - 0.7)$	경남(김해+진해+거제)	“	
$C_c = 0.61(e_0 - 0.62)$	서, 남해안 점토	송만순(1988)	

3.2 변수변환

본 연구에서는 압축지수와 자연함수비(ω_n), 액성한계(LL), 초기간극비(e_0)와의 관계를 평가하기 위하여 사용된 자료의 정규성을 평가하고 적절한 변수변환을 통해 단순회귀분석을 수행하였다.

탐색적 자료 분석 결과 압축지수의 값이 정규분포를 따르지 않고 한쪽으로 치우친 형태의 분포를 가지고 있는 것으로 나타났다. 회귀분석을 수행하기 전에 설명변수와 종속변수간의 관계가 비선형이거나 정규분포가 아닌 경우 변수들을 변환하여 정규분포로 근사시킨 후 회귀분석을 수행해야 한다. 따라서 변수변환(variable transformation)을 통하여 정규분포로 근사화시키는 과정을 수행하였으며, 변수변환 방법으로는 가장 많이 활용되는 Box-Cox 변환을 실시하여 종속변수를 변환시켰다.

Box-Cox 변환은 회귀모형에서 가장 중요한 가정 중 하나인 오차항의 정규성을 만족시키기 위하여 종속변수를 변환시키는 방법이다. 만일 오차항들이 정규분포의 가정을 만족하지 않는다면 설정된 회귀모형은 본질적으로 타당하지 않

게 된다. 따라서 이러한 통계적 가정을 만족시키기 위하여 Box and Cox(1964)는 다음과 같은 종속변수에 대한 변환모형을 제안하였다.

$$y_i^* = \begin{cases} \frac{(y_i^\lambda - 1)}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \log y_i, & \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

와 같은 변환을 시행하면 y_i^* 는 근사적으로 정규분포에 가깝다고 제안하였다. 즉, $y = X^t\beta + \epsilon$ 대신 $y^* = X^t\beta + \epsilon$ 을 사용하여 회귀모형의 모수인 β 를 추정하는 모형을 Box-Cox 변환모형이라 한다. 기본적인 통계적인 가정에 부합되는 회귀모형의 구축이 매우 중요하며, 회귀분석 전에 이러한 가정에 대한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 통계패키지인 SAS를 통하여 정규성 검정을 실시하였으나 모두 정규성 가정을 만족하지 않아, 회귀분석을 할 수 있는 SAS의 여러가지 프로시저 중 proc transreg 프로시저를 통하여 Box-Cox 변환에서 가장 타당한 변환 지수인 λ 를 산정하였다.

표 3. 변수변환 전 광양지역의 단순회귀모형

설명변수	모형	R^2
ω_n	$Ce = 0.03215 + 0.01327W_n$	0.352
LL	$Ce = -0.17371 + 0.01604LL$	0.337
e_o	$Ce = -0.01768 + 0.50183e_o$	0.373

표 4. 변수변환 후 광양지역의 단순회귀모형

설명변수	모형	R^2
ω_n	$Ce^{0.75} = 0.25733 + 0.00996W_n$	0.362
LL	$Ce^{0.75} = 0.09754 + 0.01210LL$	0.351
e_o	$Ce^{0.75} = 0.22105 + 0.37608e_o$	0.382

표 3, 표 4는 광양항 지역에서 획득된 실험자료를 바탕으로 Box-Cox 변수변환을 수행하고 변환 전후의 단순회귀모형의 상관성을 비교·평가한 것으로 변수변환 전·후 결정계수(R^2)를 비교하면 모든 설명변수에서 변수변환 후의 결정계수가 증가하고 있는 것으로 나타나 변수변환 후에 전체 분산에 대해 설명이 된 분산의 비가 높아 회귀모형이 잘 만들어 졌으므로 설명력이 증대되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 5~7는 단일지반변수를 갖는 기존의 경험식들과 회귀분석을 통해 산정된 경험식을 산정하고 표준압밀시험을 통해 산정된 압축지수의 값을 비교한 것이다.

그림 5와 같이 함수비에 따른 압축지수의 이산분포가 매우 큰 것으로 나타나고 있으며, Song(1988)의 경험식을 제외한 대부분의 경험식들은 함수비에 따른 압축지수가 유사한 기울기를 보이며 전체적으로 과소평가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 Song(1988)의 경험식은 부산지역과 마찬가지로 다른 경험식과는 상이한 기울기를 보이는 것으로 나타났으며 변수변환된 회귀분석식과 일부구간에서는 유사한 기울기를 보이고 있는 것으로 평가되었다.

그림 6은 단일지반 변수 중 액성한계와 압축지수의 관계

를 나타내는 것으로 함수비와 마찬가지로 부산지역에 비해 이산분포도가 더 크게 나타나고 있다. 기존의 경험식들도 다양한 기울기를 보이며 상이한 경향을 보이고 있으며 Song(1988)이나 Shouka(1964)의 경험식은 압축지수를 비교적 과대평가하고 있으며, 회귀분석식과 유사한 기울기를 나타내고 있다. 또한 Terzaghi(1967)이나 Mayne(1980)의 경험식은 전반적으로 과소평가하는 경향을 보이고 있으며, Yoon

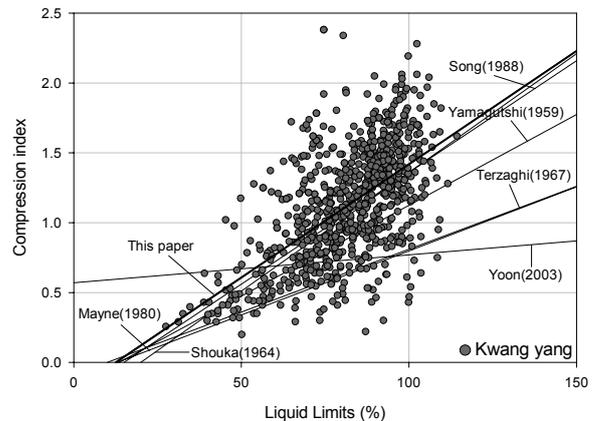


그림 6. 액성한계와 압축지수 관계

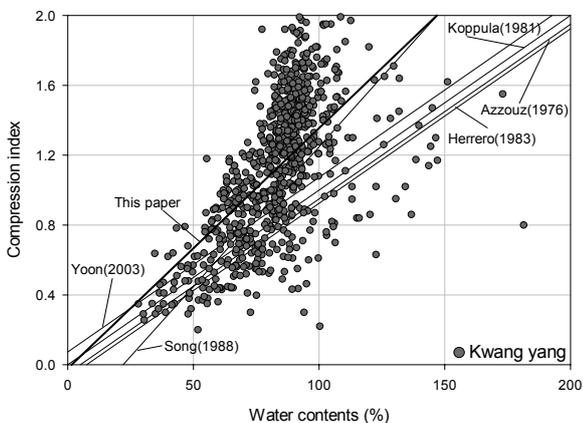


그림 5. 함수비와 압축지수 관계

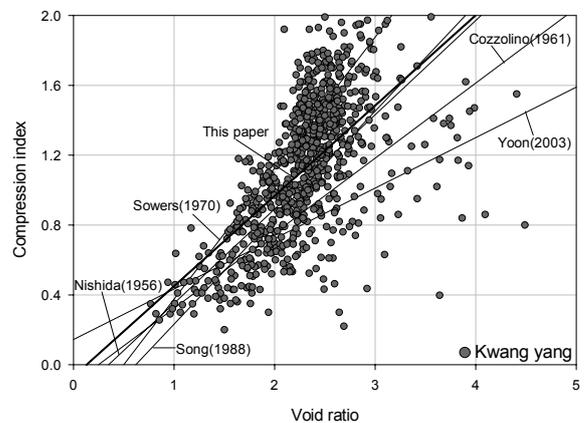


그림 7. 간극비와 압축지수 관계

(2003)과 Yamagutshi(1959)의 경험식은 회귀분석식이나 기존의 경험식과 상이한 기울기를 나타내고 있다.

그림 7은 간극비에 따른 압축지수의 변화로 함수비나 액성한계와 마찬가지로 분포도가 매우 큰 것으로 나타났으며 부산지역과 마찬가지로 Sower(1970)의 경험식은 압축지수를 매우 크게 과대평가하고 있으며 Cozzolino(1961)과 Yoon(2003)의 경험식은 과소평가하는 경향을 보이고 있다. 또한 Nishida(1956), Song(1988)의 경험식은 회귀분석식과 유사한 기울기를 나타내고 있다.

3.3 분석결과 및 고찰

광양항에 대한 압밀실험자료를 이용하여 Box-Cox 방법을 통하여 변수변환을 수행하고 변수변환된 단순회귀모형식을 제안하였다. 제안된 모형식을 통해 산정된 압축지수의 평균값은 기존 경험식과 그 상관성을 비교·평가하였다.

표 5. 제안식과의 상관관계 분석결과

지반변수	제안자	Cc(경험)/Cc(실험) [Cc(경험)/Cc(본논문)]
w_n	Azzouz 등	0.764 [0.69]
	Koppula	0.817 [0.74]
	Herrero	0.737 [0.67]
	Song	0.937 [0.855]
	Yoon	0.894 [0.809]
	This paper	1.105 [-]
LL	Yamagutshi	0.869 [0.787]
	Shouka	1.02 [0.925]
	Terzaghi	0.634 [0.575]
	Mayne	0.56 [0.56]
	Song	1.045 [0.946]
	Yoon	0.76 [0.684]
e_o	This paper	1.105 [-]
	Nishida	1.02 [0.93]
	Cozzolino	0.858 [0.781]
	Sowers	1.3 [1.186]
	Song	0.98 [0.896]
	Yoon	0.804 [0.728]
This paper	1.102 [-]	

표 6. 단일변수 w_n 을 이용한 회귀모형식

제안자	본논문	Azzouz 등	Koppula	Herrero	Skempton	Song	Yoon
MSPE	0.11330	0.23953	0.20647	0.25830	0.20647	0.13648	0.13053

표 7. 단일변수 LL을 이용한 회귀모형식

제안자	본논문	Yamagutshi	Shouka	Terzaghi	Mayne	Song	Yoon
MSPE	0.11256	0.17714	0.11996	0.36640	0.38088	0.11690	0.14468

분석결과 주요함수로 산정한 경험식들은 표 5에 주어진 바와 같이 실험값에 비해 함수비인 경우 6~26% 까지, 액성한계의 경우에는 2~44%, 간극비의 경우에는 2~33% 까지 과대·과소평가하고 있으며, 본 연구에서 제안된 모형식은 변수에 관계없이 압밀시험결과에 비해 약 10% 정도 과대평가하고 있는 것으로 나타났다.

표 5에 의하면 최근 국내의 자료를 이용하여 수정·제안된 Song(1988)의 경험식이 비교적 큰 상관성을 보이는 것으로 나타났으나 기존의 경험식은 지역이나 제안자에 따라서 많은 편차를 보이는 것으로 분석되었다. 광양지역은 제안된 모형식이 다른 경험식에 비해 대체적으로 과대평가하고 있는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

3.3.1 기존의 경험식과의 비교

본 연구에서는 제안된 변수변환 후의 회귀모형의 예측력을 비교·평가하기 위하여 변수변환을 통해 제안한 회귀모형식과 기존 경험식을 아래의 평균제곱예측오차(Mean Squared Prediction Error, MSPE)를 통하여 비교·평가하였다.

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (2)$$

여기서 Y_i 는 실험값, \hat{Y}_i 는 모형으로부터 예측된 값을 의미하며 n 는 전체 개수를 의미한다.

변수 변환된 압축지수 예측모형의 우수성을 입증하기 위하여 평균제곱예측오차(MSPE)를 이용하여 압축지수 예측모형에 대한 예측값 결과를 기존의 경험식과 비교한 결과, 단일변수로 자연함수비(w_n)를 이용한 예측 모형은 가장 작은 평균제곱오차를 보여주고 있어 예측 모형이 적합함을 알 수 있으며, Song(1988)과 Yoon(2003)의 경험식이 압축지수 예측력에 있어 제안식과 매우 유사하다고 평가되었다.

단일변수로 액성한계(LL)를 이용한 압축지수 예측모형도 표 7과 같이 가장 작은 평균제곱오차를 보여주고 있어 예측 모형이 적합함을 알 수 있으며, Song(1988), Shouka(1964)의 경험식이 압축지수 예측력에 있어 제안식과 매우 유사하다고 평가되었다.

표 8. 단일변수 e_o 을 이용한 회귀모형식

제안자	본논문	Nishida	Cozzolino	Sowers	Song	Yoon
MSPE	0.10969	0.11334	0.17269	0.16792	0.12127	0.14169

표 8과 같이 단일변수로 간극비(e_o)를 이용한 압축지수 예측 모형 역시 가장 작은 평균제곱오차를 보여주고 있어 예측 모형이 적합함을 알 수 있으며, Nishida(1956)의 경험식이 제안식과 압축지수 예측력에 있어 제안식과 매우 유사하다고 평가되었다.

특히, 기존의 경험식 중 국내 연구자들의 모형과 본 연구에서 제안된 모형이 유사한 결과를 나타낸다는 것은 결국 지역에 따른 대상지반의 종류에 따라 압축지수 예측 모형이 매우 달라질 수 있다는 것을 의미하기도 한다.

분석결과에 따라 단일변수의 종류나 제안자, 대상 점토에 따라 예측식은 다양한 결과를 나타내며, 기존의 경험식에 비해 제안한 회귀모형식이 실내시험 결과를 비교적 예측하고 있으나 아직까지는 괴리를 나타내고 있어 좀 더 다양한 실험자료와 분석방법을 통한 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 압축지수 예측 모형을 개발하기 위하여 단일지반변수를 이용하는 단순회귀분석을 수행하였으며, 정규성을 만족시키기 위해 Box-Cox 변수변환을 수행하여 회귀모형을 개발하고 기존의 경험식들과 예측식을 평균제곱오차를 통하여 평가하였다.

(1) 분석에 사용된 자료를 대상으로 통계분석을 수행한 결과 자료의 왜곡과 분포를 나타내는 왜도와 첨도가 0과 3의 기준을 만족시키지 못하며, 지역이나 변수에 관계없이 대칭을 이루지 못하고 한 방향으로 치우치며 평평한 분포를 보여 정규분포를 가지고 있지 않는 것으로 나타났다.

(2) 변수변환을 통해 산정된 광양점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 대한 회귀모형식은 지수승식의 비선형회귀식이 적합한 것으로 나타났으며 다음과 같다.

$$Cc^{0.75} = 0.25733 + 0.00996 W_n$$

$$Cc^{0.75} = 0.09754 + 0.01210 LL$$

$$Cc^{0.75} = 0.22105 + 0.37608 e_o$$

(3) 왜곡된 자료의 정규성을 확보하기 위하여 Box-Cox 변수변환 후 단순회귀모형의 적합성을 평가해본 결과, 결정계수가 약 2~4% 정도 증가하며 설명력이 향상되고 있어 회귀모형 개발에 있어 기본적 가정인 정규성 가정

에 대한 선행적 검증이 반드시 수반되어질 필요가 있음을 확인하였다.

- (4) 기존에 제안된 국내외의 경험식을 통해 산정된 압축지수와 회귀분석식의 상관성을 평균제곱예측오차법을 통하여 비교·평가한 결과, 제안된 모형식이 가장 0에 가까운 값을 보여 실험값과 가장 근접하며, 변수에 관계없이 압밀시험결과에 비해 약 10% 정도 과대평가하고 있는 것으로 나타났고 기존 경험식 중에서는 Song(1988)의 경험식이 비교적 큰 상관성을 보이는 것으로 평가되었다.
- (5) 압축지수 예측모형 개발에 있어 단일변수의 종류나 제안자, 대상 점토에 따라 예측식은 매우 다양한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 기존의 경험식에 비해 제안한 회귀모형식이 실내시험 결과와 일치하는 결과를 보이고 있으나 향후 다양한 실험자료와 추가적인 분석방법을 통한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김동후 (2002), *해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성에 관한 연구*, 박사학위논문, 경희대학교, pp. 1~75.
2. 김동후, 김기웅, 백영식 (2003), 해성점토의 물리적 특성과 압축지수의 상관성, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 19, No. 6, pp. 371~378.
3. 송만순 (1988), *우리나라 해성점토의 제 토질계수의 상관관계*, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 1~79.
4. 오서현, 하태균, 정충기 (2009), 국내 연약 점성토 지반의 지반공학적 특성, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp. 922~929.
5. 윤길림, 김병탁 (2003), 국내 해양지반에 적합한 압축지수 예측식 제안, *대한토목학회논문집*, Vol. 23, No. 3C, pp. 169~176.
6. 윤길림 (2004), *차세대 항만 설계기술 개발(IV): 지반의 불확실성을 고려한 토질정수 개발*, 한국해양연구원연구보고서 538.1한15차v.4, 해양수산부, pp. 1~245.
7. 한국토지공사 (1999), *연약지반의 압밀특성에 관한 연구 I*, pp. 73~207.
8. Al-Khafaji, A. W. N. and Andersland, O. B. (1992), Equations for Compression Analysis of Soil Compressibility Index Approximation, *Journal of Geotechnical Engineering. Division, ASCE*, Vol. 118, No. 1, pp. 148~153.
9. G.E.P. Box and D.R. Cox (1964). An Analysis of Transformations, *Journal of Royal Statistic Society, Series B26*, Vol. 2, pp. 211~252.

(접수일: 2009. 5. 11 심사일: 2009. 6. 29 심사완료일: 2009. 10. 19)