

고소성점토 및 실트의 비선형 압밀특성

Nonlinear Compression Characteristics of Highly Plastic Clays and Silts

한대희¹⁾, Dae-Hee Han, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 권정근³⁾, Jung-Keun Kwon

1) 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Busan University

2) 부산대학교 토목공학과 정교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Busan University

3) 부산대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Busan University

SYNOPSIS : Highly plastic clays in their normally consolidated state are not linear but are concave upwards. Thus their compression index decreases with the increase in consolidation pressure. Likeness the $e - \log \sigma_v'$ curves of the silts are not linear but are convex upwards. In this paper, conducted consolidation test with four undisturbed field soil and found that their $e - \log \sigma_v'$ plots are not linear. And analyzed difference of settlement between computed value with compression index(C_c) and computed value with improved compression index(C).

Key words : nonlinear compression index, highly plastic clay, plastic silt, non-plastic silt, improved compression index

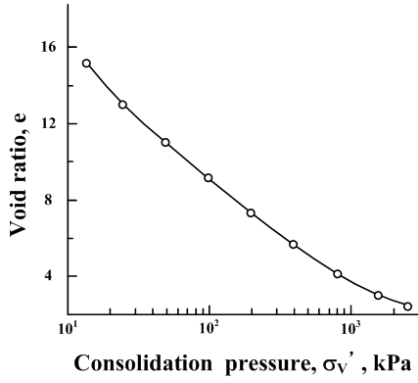
1. 서 론

도로 성토 및 구조물의 시공으로 인해 증가된 지중응력은 지반내에 과잉간극수압을 발생시키고, 발생된 과잉간극수압의 소산으로 인해 지반의 압밀침하가 발생한다. 이런 압밀침하를 예측하기 위해 압밀대상층의 비교란 시료를 채취하여, Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 압밀시험이 수행된다.

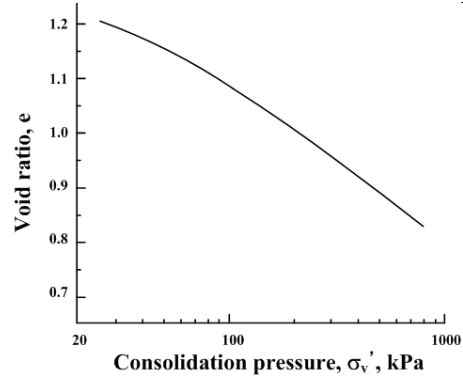
1차원 압밀시험 결과 압밀침하량 산정에 필요한 간극비(e)-유효압밀압력($\log \sigma_v'$) 그래프가 산정되며, 일반적으로 정규압밀된 점토의 경우 $e - \log \sigma_v'$ 의 처녀압축곡선은 선형이며, 그 기울기를 압축지수(C_c)로 정의하여 압밀침하량 산정시 편리하게 이용되고 있다. 실제 정규압밀된 점토에 있어서 $e - \log \sigma_v'$ 가 선형이라는 가정은 토질역학에서 신성불가침의 주장처럼 여겨지고 있다(Butterfield, 1979). 그러나 Butterfield(1979)에 의하면 이는 항상 사실이 아니며, 그림1(a)처럼 정규압밀상태인 고소성점토의 경우 $e - \log \sigma_v'$ 의 관계가 아래로 오목한 형태임을 보여주고 있다. 따라서 고소성 점토의 경우 압밀압력의 증가에 따라 압축지수가 감소하며, 이는 다른 고소성 점토에서도 보고되고 있다(Mesri(1975), Burland(1990)). 이와 달리 그림1(b)처럼 실트질이 많이 함유되어 있는 자연상태의 점토에서는 압밀압력의 증가에 따라 압축지수가 증가하는 경향이 나타나며, 인공적으로 만든 비소성 및 소성 실트의 압밀시험결과에서도 동일한 결과가 얻어졌다(Robinson, 2002).

우리나라의 고소성점토에서도 $e - \log \sigma_v'$ 의 처녀압축곡선이 선형이 아닌 위로 오목한 경향을 나타낸다. (그림 2(a)) 또한 실트질의 함유율이 높은 점토에서는 $e - \log \sigma_v'$ 가 위로 볼록한 경향이 나타났다. 그러나 현재 한국 점토에 대해 압축지수의 비선형성에 대한 연구는 거의 전무한 실정이며, 이로 인해 압축지수의 비선형성이 명확히 나타나는 흙에 대해서도 직선으로 가정하여 압축지수를 구하는 사례가 자료

의 분석결과 나타났다. 이는 대상 흙의 종류에 따라 압밀침하량을 과소 또는 과대평가하므로, 우선 이에 대한 인식의 확보가 필요하다고 하겠다. 이에 본 연구에서는 광범위한 압밀시험자료를 바탕으로 한국점토의 압축지수의 비선형성을 분석하고 Butterfield가 제안한 수정압축지수를 이용하여 침하량을 비교·분석하고자 한다.

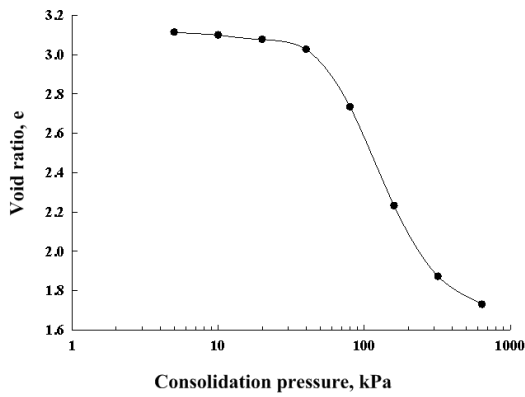


(a) 고소성점토

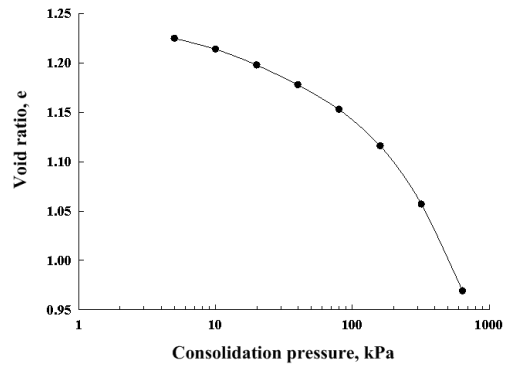


(b) 소성 및 비소성 실트

그림 1. 점토 및 실트의 압축지수의 비선형거동



(a) 남해안 고소성 해성점토



(b) 비소성 실트질 함유량이 높은 점토

그림 2. 우리나라 점토의 압밀특성

2. 선행연구

2.1 고소성점토의 압밀특성

Mexico City Clay는 자연함수비 421 ~ 574%로 고함수비를 가지고 있고 액성한계 500%, 소성한계 150% 그리고 소성지수가 350으로 고소성의 점토에 해당된다.

표준압밀시험은 교란되지 않은 점토를 사용하였으며 그 결과, 고소성의 점토에서는 $e - \log \sigma_v'$ 그래프에서 처녀압축곡선이 선형이 되지 않고, 위로 오목한 그래프 형상을 나타나게 된다. 따라서 압축지수의 값은 압밀하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 C_c 는 선행압밀하중을 약간 초과하는 응력상태까지는 급격히 증가하다가 이를 초과한 후에는 압밀응력이 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다.(Mesri, 1975)

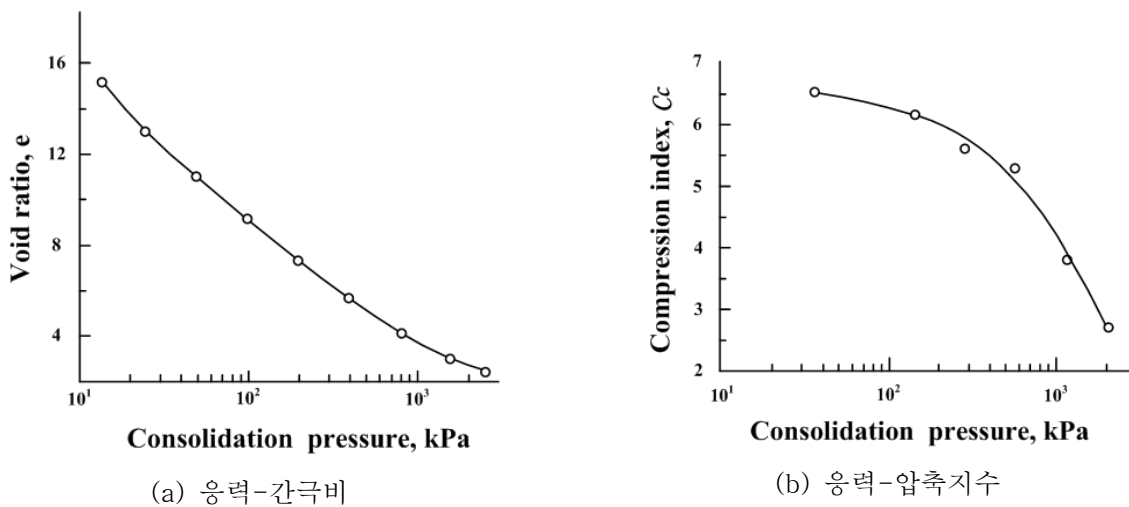
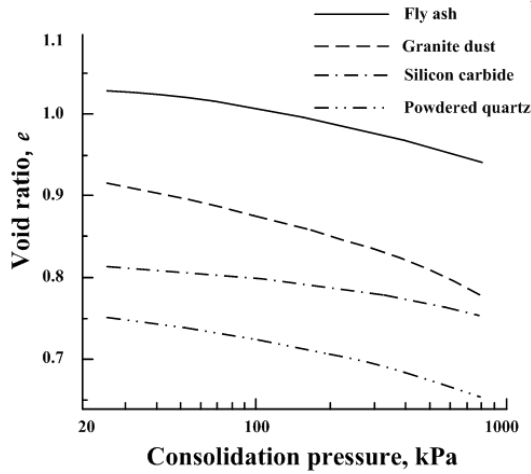


그림 3. Mexico City clay 압축특성

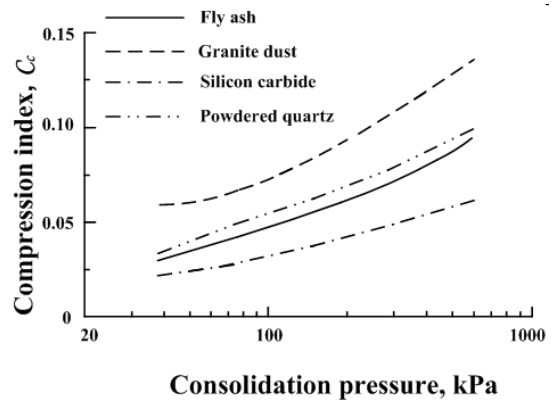
2.2 비소성실트의 압밀특성

네 가지의 비소성실트인 powdered quartz, granite dust, fly ash 그리고 silicon carbide의 압밀특성을 분석하였다. 네 가지 실트는 인도의 임의의 장소에서 채취된 시료로 비중은 각각 2.64, 2.68, 2.03 그리고 3.19이다. 또한 압밀시험에 사용한 네 가지 비소성실트는 초기함수비가 각각 액성한계의 약 1.2 배인 37.6%, 36.2%, 42% 그리고 32%의 슬러리상태로 만든 다음, 압밀링에 재성형하여 시험을 수행하였다. 이 때, 24시간 간격으로 하중증가비 1을 적용하였다.

비소성실트의 압밀시험 결과를 분석하면, 그림 4(a)와 같이 $e - \log \sigma_v'$ 그래프는 선형이 아닌 위로 볼록한 형상으로 나타난다. 또한 압밀하중이 증가함에 따라 압축지수 C_c 도 증가하는 경향을 보이고 있다.(Robinson, 2002)



(a) 응력-간극비



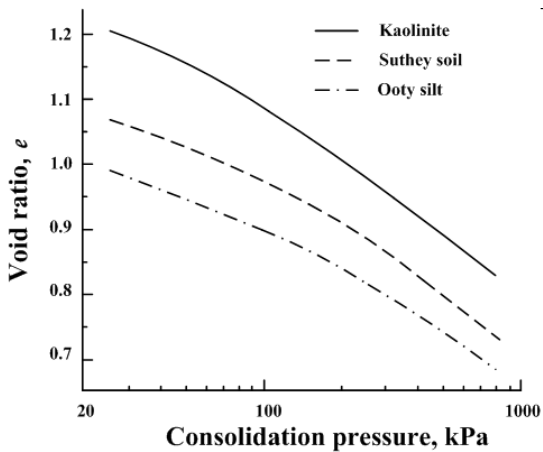
(b) 응력-압축지수

그림 4. 비소성실트의 압축특성

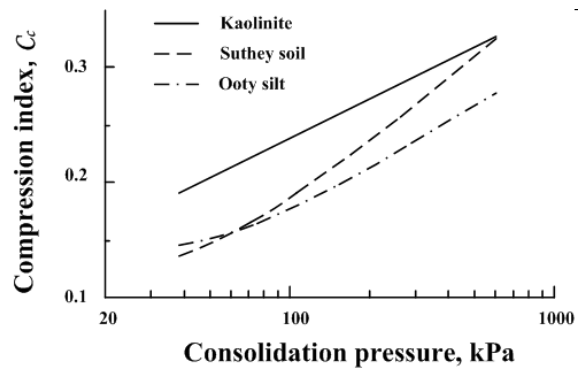
2.3 소성실트의 압밀특성

시험에 사용된 시료는 Kaolinite, Ooty silt 그리고 Suthey silt로 소성도표의 A-line 밑에 존재하는 실트성분을 50%이상 함유하고 있는 실트성분의 흙이다. 여기서 사용된 Kaolinite는 순수 점토가 아닌 71%의 실트성분을 포함하고 있다. 그러므로 소성이 있는 실트로 분류되었다.

소성실트의 표준압밀시험 결과, 비소성실트와 유사하게 $e - \log \sigma'_v$ 그래프는 선형이 아닌 위로 볼록한 형상으로 나타났으며, 또한 압밀하중이 증가함에 따라 압축지수 C_c 도 증가하는 경향을 보이고 있다.(Robinson, 2002)



(a) 응력-간극비



(b) 응력-압축지수

그림 5. 소성실트의 압밀특성

2.4 Butterfield의 수정 압축지수

정규압밀 된 점토에 있어서 $e - \log \sigma'_v$ 가 선형이라는 가정은 실험적인 근거에 의해 토질역학에서 신성 불가침의 주장처럼 여겨지고 있다. 그러나 응력에 따라서 간극비의 변화가 상대적으로 큰 흙에서는 압축성이 더 크다. 이러한 샘플의 압밀시험 결과의 $e - \log \sigma'_v$ 곡선은 일반적인 선형이 아니다.

비선형성을 선형적으로 표현하기 위해 대안으로 $\ln p'$ 에 대한 $\ln(1+e)$ 의 그래프를 이용하여 압축지수를 산정할 수 있다.

$$d(\ln(1+e)) = \frac{de}{1+e} = -C_c d(\ln \sigma') = -C_c \frac{d\sigma'}{\sigma'} \quad (1)$$

여기서 C_c : 수정압축지수

또는 간극비를 사용하지 않고 $\ln v$ 에 대한 $\ln p'$ 그래프를 그리기 위해 비체적($v = 1+e$)을 이용하여 표현할 수 있다.

$$d(\ln v) = \frac{dv}{v} = -C_c d(\ln p') = -C_c \frac{dp'}{p'} \quad (2)$$

여기서, 비체적 v 의 변화는 실험에 입각한 정확도 내에서 매우 작기 때문에 $\ln v - \ln \sigma'$ 의 그래프 곡선은 거의 선형에 가깝다. 그러므로 새로운 방정식의 선형성은 기존의 방정식만큼 알맞다. 또한 응력의 변화에 대한 부피의 변화로 수정압축지수를 구할 수 있기 때문에 수정압축지수를 구하는 식은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\log \frac{h_f}{h_0} = -C_c \left(\log \frac{\sigma_f'}{\sigma_0'} \right) \quad (3)$$

$\ln v - \ln \sigma'$ 에서 얻어진 각 지역의 수정압축지수에 대한 실험값이다.

표 1

	C_c
Mexico City Clay	0.498
London Clay	0.083
Newfoundland peat	0.214
Newfoundland silt	0.103
Chicago Clay	0.154
Boston blue Clay	0.122
Drammen Clay, plastic	0.140
Drammen Clay, lean	0.104

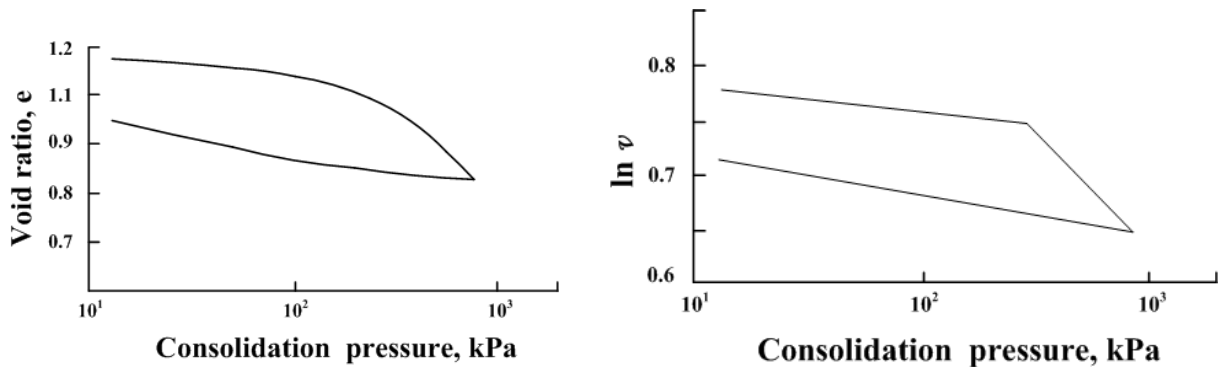


그림 6 Butterfield가 제안한 $\ln v - \ln \sigma'$ 적용 그래프

또한 dE 가 실제 현장의 체적 변형률의 증가라면, $\ln v - \ln \sigma'$ 그래프의 극소 변형에서 $E \approx \epsilon$ 이기 때문에 실제 변형률에 대한 식은 다음과 같다.

$$dE = -\frac{dv}{v} = -d(\ln v) = -\frac{de}{1+e} \quad (4)$$

유효응력의 변화로 발생하는 변형률을 식 (4)과 식 (2)로 부터 나타내면

$$E = \int_0^E dE = -\int_{v_0}^v \frac{dv}{v} = -\ln(v/v_0) = \int_{p_0'}^{p'} C d(\ln p') = C \ln(p'/p_0') \quad (5)$$

되고, 침하량은 다음과 같은 식으로 산출할 수 있다.

$$\therefore \Delta H = C \ln(p'/p_0') \times H$$

(6)

3. 한국 점토의 압밀특성

한국의 고소성 점토 및 실트성분 흙의 압축지수의 거동을 분석하기 위해서 여러 현장에서 시료를 채취하여 각각의 시료는 심도 4m이상에서 채취된 불교란 상태이다. 도계 - 초정 구간, 녹산 - 생곡 구간, 화명 - 양산 구간, 양산 - 물금 구간의 시료는 액성한계 50% 이상인 고압축성의 성질을 가지고 있으며 낙동강 삼각지구의 시료는 SM으로 비소성의 흙으로 구성되어 있다. 각 현장의 지반 상태는 함수비가 액성한계와 근사하므로 초연약지반으로 보여 진다.

압밀시험은 압력증가비가 1이 되도록 총 9단계의 재하를 하고, 각 단계에서 24시간 동안 침하량을 측정하는 표준압밀시험을 적용하였다.

표 2는 각 현장 시료의 물리적 특성을 나타내고 있다.

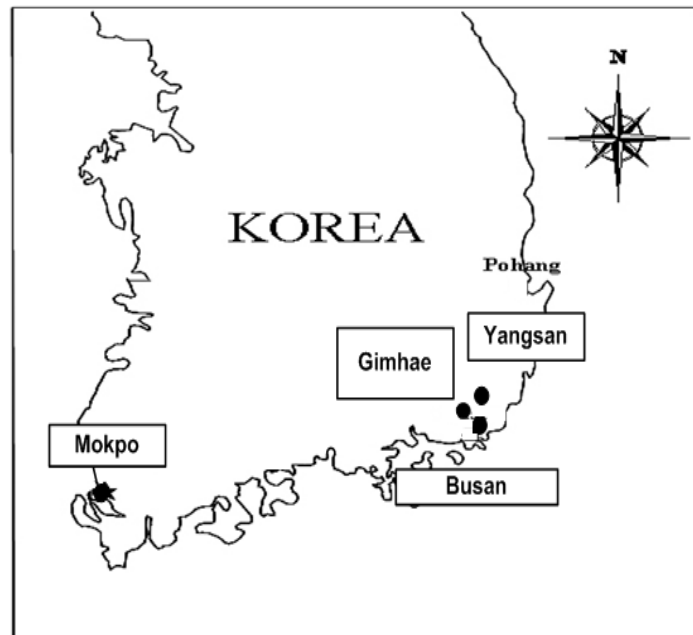


그림 7 현장 위치도

표 2 각 현장 시료의 물리적 특성

항목 위치	통일분류법(USCS)	함수비 (W_n)	비중 (G_s)	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI)	모래 (%)	실트 및 점토 (%)
Mokpo	CL	45.25	2.61	49.41	25.37	35.5	3.2	96.80
Gimhae	CH	52.74	2.66	56.45	21.09	35.36	3.86	96.14
Busan	SM	29.81	2.65	31.75	23.74	8.02	87.89	12.11
Yangsan	CH	64.43	2.68	53.78	26.23	27.54	3.61	96.39

우리나라의 여러 현장의 점토 및 실트를 채취하여 표준압밀시험을 수행한 결과, $e - \log \sigma'_v$ 그래프는 처녀압축곡선의 거동이 비선형성을 나타내고 있다. 그러나 Butterfield가 제안한 $\ln v - \ln \sigma'$ 로 표현한 그래프에서는 선행연구와 같이 고소성점토의 처녀압축곡선이 거의 선형에 근접하게 거동하는 것을 알 수 있다. 표 3과 그림 8 ~ 그림 10은 표준압밀시험결과를 나타내고 있다.

표 3 각 현장 시료의 압밀시험 결과

항목 위치	σ'_{vp} (kPa)	e_0	C_c	C
Mokpo	100	1.08	0.474	0.109
Gimhae	120	1.69	0.845	0.156
Busan	93	0.91	0.149	0.031
Yangsan	109	1.67	0.674	0.145

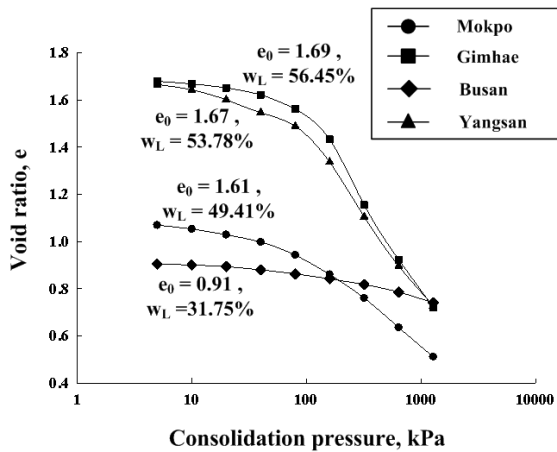


그림 8 $e - \log \sigma'_v$

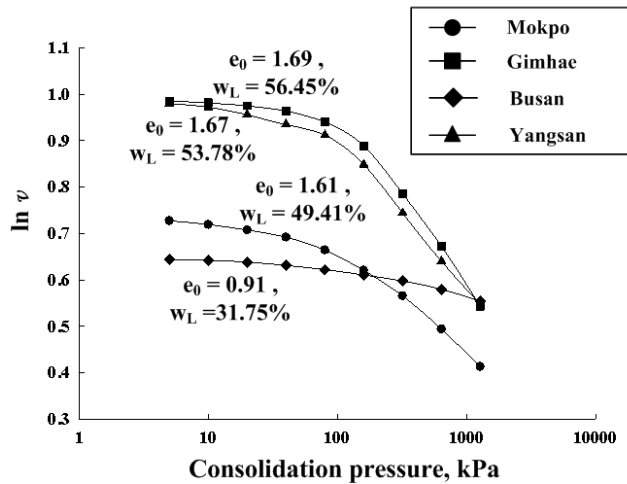


그림 9 $\ln v - \ln \sigma'$

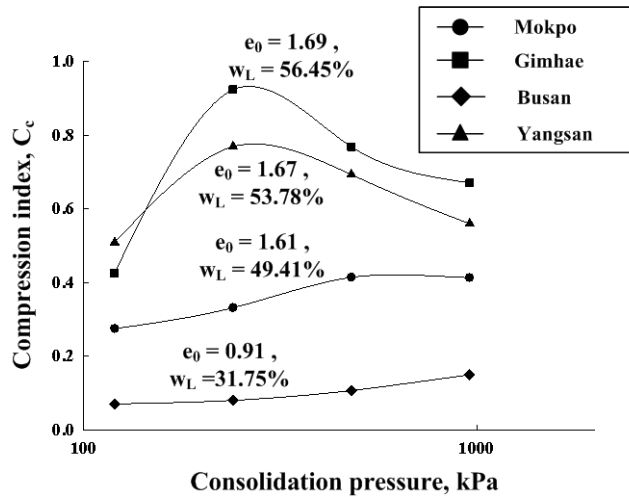


그림 10 비선형성의 응력-압축지수

3.2 침하량 산정

각 현장의 압밀층 두께가 10m이고, 상재하중은 비선형성을 보이는 곡선의 초반부 160kPa과 중반부 320kPa의 값을 적용하여 침하량을 산정하였다. 침하량은 압축지수를 이용하여 산정하는 방법(식 (7))과 Butterfield가 제안한 수정압축지수를 이용하여 산정하는 방법(식 (8)), 이 두 가지 방법을 이용하여 산정하였으며 각각 현장의 침하량을 비교하였다. 본 연구에서는 2차 압밀량은 고려하지 않았다.

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad (7)$$

$$S_C = C \ln(\Delta\sigma' / \sigma'_0) \times H_0 \quad (8)$$

표 3 각 현장 침하량

위치	항목	σ'_0 (kPa)	H_0 (m)	$\Delta\sigma'_v$			
				160kPa		320kPa	
				S_c (m)	S_C (m)	S_c (m)	S_C (m)
Mokpo		100	10	1.24	1.28	2.26	2.80
Gimhae		120	10	1.66	1.55	3.13	3.72
Busan		93	10	0.50	0.38	0.91	0.81
Yangsan		109	10	1.50	1.56	2.79	3.57

160kPa의 하중단계에서는 두 가지 경우의 침하량이 거의 유사하게 나타났으나, 640kPa의 하중단계에서는 침하량의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

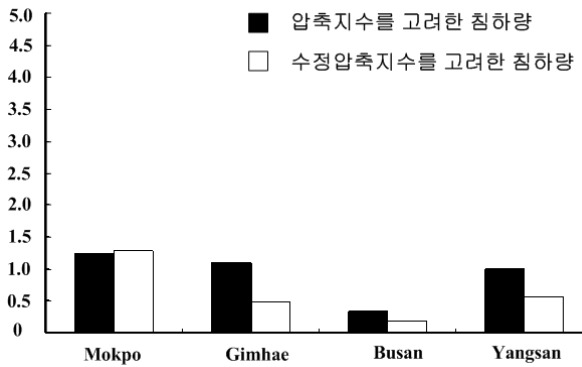


그림 11 하중 160kPa 적용시 침하량

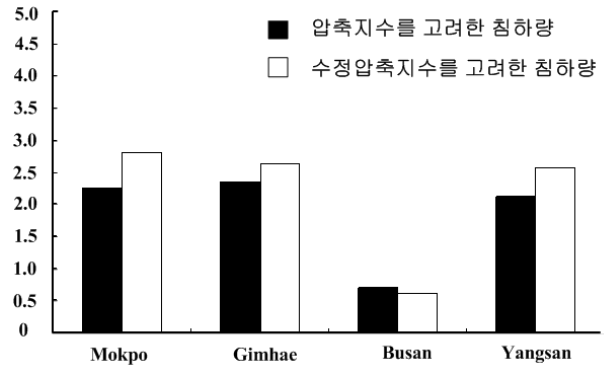


그림 12 하중 640kPa 적용시 침하량

4. 결론

한국 흙에서 처녀압축곡선의 비선형성을 파악하기 위해 4개 현장의 불교란 시료를 추출하여 표준압밀 시험을 시행하였으며, 그 결과로 부터 압축지수(C_c)와 수정압축지수(C)를 산출해 침하량을 비교·분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 통일분류법 상 CH로 분류되는 현장의 흙과 SM로 분류되는 흙에서 비선형성이 나타났으며, 액성한계와 초기간극비가 클수록 비선형성이 뚜렷하게 나타났다.
2. 침하량 차이는 하중단계가 160kPa이상에서 비선형성이 뚜렷하게 나타나는 흙일수록 크게 발생하였다.
3. 압축지수가 급격히 증가하는 240kPa이전에는 기존의 압축지수를 이용하여 산정한 침하량 값이 수정 압축지수를 이용하여 산정한 침하량 값보다 크게 나타났으나 그 후 압축지수가 감소하는 구간에서는 수정 압축지수를 이용하여 산정한 침하량 값이 더 크게 나타나는 상반된 결과를 확인할 수 있다.

참고문헌

1. 임종철(2005), **토질공학의 길잡이**, 새론 도서출판.
2. Butterfield(1979), R., "A Natural Compression Law for Soils(An Advance on e -log p')," *Geotechnique*, Vol. 29, pp. 469-480
3. Mesri, G. and Olson, R. E., "Consolidation Characteristics of Montmorillonite," *Geotechnique*, Vol. 21, No. 4, 1971, pp. 341-352.
4. Mesri, G., Rockhsar, A., and Bohor, B. F.(1975), "composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay," *Geotechnique*, Vol. 25. pp. 527-554.
5. Olson, R. E., and Mesri, G.(1970) "Mechanisms Controlling Compressibility of Clays," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE*, Vol. 96, No. SM 6, pp. 1863-1878.
6. R. G. Robinson and M. M. Allam(2002), "Compression index of clays and silts", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 31, No.1