



압밀비배수 삼축압축실험을 이용한 지반의 포아송비 예측

Poisson's Ratio Prediction of Soil Using the Consolidation Undrained Triaxial Compression Test

임성윤^a · 유석철^b · 김유용^c · 김명환^{d,†}

Lim Seongyoon · Yu Seokchoel · Kim Yuyong · Kim Myeonghwan

ABSTRACT

The poisson's ratio was obtained from the effective vertical stress and horizontal stress of consolidation-undrained test. It was analyzed void ratio verse poisson's ratio. At the result, the effective friction angle was increase with relative density increased, was decreased the poisson's ratio. The empirical equation of void ratio and poisson's ratio was showed very high correlation $r^2=0.846$. The empirical equation was showed that the smaller the void ratio in the fine grained soil than granular soil. In the case of 0.85 times the correlation analysis equation of granular and fine grained soil, the experimental results were shown very similarly. In especially, the poisson's ratio prediction results was shown within 5% of the error range, was revalidation 0.85 times the correlation analysis equation using the void ratio. In this study, correlation analysis equation of the granular and fine grained soil was more reliability of the poisson's ratio prediction results apply to the void ratio than dry unit weight.

Keywords: Triaxial shear strength; poisson's ratio; CU test

1. 서론

지반의 선형탄성 특성은 지반의 강성을 표현하는 편리한 방법이지만 한계가 있으며, 토양의 비선형 특성을 파악하지 못하면, 현장과 실험실 측정 결과의 비교가 어려울 수 있다. 또한, 응력-변형 반응의 비선형성이 토양-구조물 상호 작용, 토양 질량의 응력 분포 파악에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Jardine et al., 1986).

작은 변형률에서 지반은 높은 강성과 종종 비선형 특성이 광범위하며, 지반은 변형률이 증가함에 따라 탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하는 비선형 거동을 보인다. 또한, 공용 하중 상태하의 기초 하부 지반 변형에 대한 계측결과 및 역해석을 통한 분석에 따르면 지반이 거동하는 변형률 범위는 대부분 최대 0.1-1.0%이하로 지반은 비선형 영역에서 거동하게

된다 (Burland, 1989).

지반 공학적 측면의 지반 거동은 응력상태의 변화와 재하 하중 변화에 영향을 받으며, 교량, 도로, 댐 등의 토목구조물 설계, 시공, 및 안정성해석 시 매우 중요하다. 특히, 탄성계수와 포아송비는 응력 변화에 따른 지반 거동 규명에 많이 이용되지만, 포아송비의 경우에는 탄성계수만큼 충분한 연구가 이루어지지 못한 상황이다. 포아송비는 비탄성 재료인 흙에 대해서 명확히 정의되지 않았으며, 다른 재료들에서 적용되는 개념을 혼용하여 사용하고 있다 (Yoo and Park, 2014).

흙의 포아송비를 구하기 위한 방법으로 정적 삼축압축실험 기법을 사용하였지만, 신뢰성 문제로 오차의 최소화와 정확도를 높이기 위해서 민감도가 높은 감지기를 셀내부로 이동시켜 시료의 변형을 직접 측정하는 방법들을 적용하였고 (Lo Presti et al., 1999), 국내에서는 지반의 비선형적인 변형특성을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 미소변형 삼축압축실험기를 개발하여 적용성을 확인하기도 하였다 (Ko et al., 2002).

복잡한 지반의 변형을 정확히 예측하기 위해서는 재료의 특성과 강도, 변형 특성 관계를 명확히 규명해야 하지만 (Yoon, 2009), 흙의 포아송비를 산출하기 위한 실험의 종류나 방법 등에 대해서는 명확히 규정된 바가 없다. 최근 밴더 엘리먼트를 적용하여 건조 모래 상태에서의 상대밀도와 구속압 조건에 따른 포아송비의 변화 경향을 연구하였다 (Kumar and Madjusudhan, 2010).

최근 지반의 여러 가지 변형문제와 관련된 해석에 있어 정

^a Agricultural Researcher, Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Sciences

^b Agricultural Researcher, Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Sciences

^c Agricultural Researcher, Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Sciences

^d Project Manager, Geo Mechanics Technology Group

† Corresponding author

Tel.: +82-10-7350-2582

E-mail: mhkim3306@cbnu.ac.kr

Received: June 25, 2020

Revised: July 10, 2020

Accepted: July 10, 2020

적실험의 정확도가 증가하면서 정적물성치와 동적물성치 사이의 오차가 줄어들고 있지만, 변형특성 파악을 위한 실험장비의 구축과 장비보유의 한계로 문헌결과 또는 기실험결과의 대표적인 값들의 사용하고 있어 정확한 해석결과를 파악하는데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 정적 삼축압축실험 중 압밀비배수실험의 유효수직응력과 유효수평응력을 이용하여 단동 비닐하우스 파이프 줄기초부의 지반 거동 특성 파악을 위한 수치해석 입력요소 중 포아송비를 산정하고, 적용성을 분석하였다.

II. 실험방법

1. 시료

강도정수와 포아송비 변화를 관찰하기 위해 경남 산청 (이하 A), 경북 성주 (이하 B), 전북 완주 (이하 C), 충청 장압 (이하 D)에서 시료를 채취하였다. Table 1에 물리·역학적 특성을 정리하였으며, Fig. 1은 흙의 입도 실험방법 (KS F 2302, 2017)을 통해 얻은 입도분포 곡선을 나타낸 것이다.

지역별 시료의 비중은 2.62-2.67이며, 통일분류는 SM, SC, ML로 나타났다. A, B 지역의 시료는 0.074 mm 통과량이 48.0% 이상으로 나타났다. 실내 D다짐 (KS F 2312, 2016)결과 A, B는 18.0 kN/m³ 이상이며, C는 16.95 kN/m³인 것으로 나타

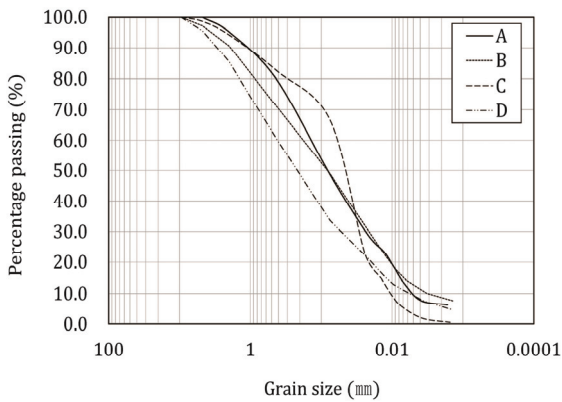
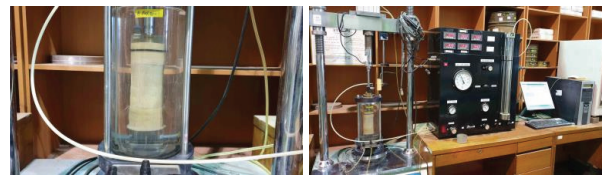


Fig. 1 Grain size distribution curve of soils

났다. 채취된 시료 중 A, B, C는 포아송 예측 분석에 사용된 것이고, D는 예측된 식을 검증하기 위한 비교시료로 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

교란시료를 이용한 압밀비배수실험 (ASTM D 4767) 공시체는 직경 5.0 cm, 높이 10.0 cm로 D 다짐시험 결과에서 얻어진 최대진조밀도의 75%, 80%, 85%, 90%로 제작하였다. 공시체를 포화하기 전에 이산화탄소를 이용하여 공시체 내부의 공기를 제거한 후 포화를 하였다. 삼축셀 내부의 구속압과 배압의 차이를 5 kPa로 유지하면서 B계수가 0.95 이상인 경우 공시체가 포화된 것으로 간주하였으며, 24시간 압밀 후 체적이 더 이상 변하지 않는 것을 확인하고 비배수 전단을 실시하였다. 전단속도는 ASTM D 4767의 삼축압축실험 방법을 참고하여 1.0 mm/min의 속도로 전단응력이 최대강도가 발현될 수 있도록 공시체 높이의 15%이상, 수평변위가 15.0 mm에 도달할 때까지 측정하였다.



(a) Specimen saturation (b) Shear test

Fig. 2 Apparatus of triaxial compression test

III. 결과 및 고찰

1. 압밀비배수실험

Table 2는 상대밀도를 달리한 후 압밀비배수실험을 실시한 결과에 대한 점착력 및 내부마찰각을 나타낸 것이다. 실험결과 A, B, C 시료의 유효 내부마찰각은 24.34-35.41°의 범위로 나타났으며, 상대밀도에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 내부마찰각은 A < B < C의 순으로 크게 나타났으며, 점착력은

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

No.	Gs	LL (%)	PI (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	OMC	Grain size distribution (%)				US CS	Re makrs
						#4	#40	#200	2 μ		
A	2.64	NP	NP	18.40	12.0	100	79.7	48.7	6.5	SM	Sancheong
B	2.67	38.1	17.5	18.25	13.9	97.3	71.0	48.9	8.5	SC	Seongju
C	2.62	NP	NP	16.95	14.6	98.7	82.6	66.6	1.0	ML	Wanju
D	2.65	NP	NP	17.09	16.7	95.6	60.4	33.6	5.5	SM	Cheongju

상대밀도에 따라 경향이 일정하지 않은 것으로 나타났다. A, B 시료보다 C 시료가 큰 유효마찰각을 갖고 있는데, 이는 전단시 C 시료의 간극수압이 증가 후 감소하면서 A, B 시료보다는 작게 측정되었으며, 간극수압의 변화로 구속응력이 내부에서 증가하였기 때문으로 판단된다.

2. 포아송비

포아송비는 재료에 연직하중을 가할 경우 가로변형과 세로변형의 비로서 탄성한도 내에서 일정한 관계를 보는 값으로 응력-변형을 관계에서 높은 비선형 거동을 하므로 수직변형률에 따라 다른 값을 가진다. 포아송비 산정에는 Jaky (1948)의 썩기 모양으로 가정한 응력분포 연구에서 제안된 토압계수 식 (1)을 적용하였다. 식 (1)과 같이 K_0 를 유효수직응력과 유효수평응력으로부터 결정한 후 Hook's 법칙에 의하여 포아송비와의 관계식 (2)를 이용하였다.

$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v \quad (1)$$

$$K_0 = \nu / (1 - \nu) \quad (2)$$

where, K_0 : lateral earth pressure at rest
 σ'_h : horizontal effective stresses

σ'_v : vertical effective stresses

ν : poisson's ratio

Table 3은 상대밀도와 구속압별 삼축압축실험 결과의 유효수직응력과 유효수평응력으로 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 포아송비를 구한 것이다. 유효수직응력은 구속압과 상대밀도가 증가하면서 같이 증가하는 것으로 나타났다. 토압계수는 구속압에 따라 큰 변화를 보이지 않고 있지만, 상대밀도가 증가하면서 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 3(a)은 상대밀도에 따른 유효수직응력의 변화를 나타낸 것이다. A 시료는 상대밀도 90%에서 유효수직응력이 구속압 200 kPa와 300 kPa에서 크게 증가하였다. C 시료는 상대밀도 85%, 90%에서 유효수직응력이 크게 증가하였다. 이는 압밀배수실험결과에서 해당 구속압과 상대밀도의 간극수압이 작게 측정되었기 때문으로 사료된다. 결과적으로 유효수직응력은 간극수압에 영향을 더 크게 받고 있음을 알 수 있으며, 이는 Byun et al. (2012)의 연구결과와도 일치한다.

Fig. 3(b)은 상대밀도에 따른 포아송비 변화를 나타낸 것이다. 포아송비는 상대밀도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. A, B 시료의 포아송비는 상대밀도 85%까지 유사한 경향을 보이면서 감소하지만, 상대밀도 90%에서 다소 차이를

Table 2 Results of CU test according to relative density

Soil	Relative density							
	75%		80%		85%		90%	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
A	5.28	24.34	3.48	25.49	2.87	27.19	8.20	31.14
B	3.60	26.35	6.01	29.09	1.33	31.67	5.97	33.62
C	0.77	30.29	0.23	32.86	4.83	34.50	12.96	35.41

Table 3 Results of poisson's ratio using the σ'_v and σ'_h of samples

Soil	R. D. (%)	Confining pressure (kPa)			K_0			ν		
		100	200	300						
A	75	56.7	114.3	163.5	0.64	0.64	0.65	0.39	0.39	0.39
	80	75.0	140.5	205.9	0.57	0.59	0.59	0.36	0.37	0.37
	85	92.3	155.0	230.3	0.52	0.56	0.57	0.34	0.36	0.36
	90	141.5	268.0	390.1	0.41	0.43	0.43	0.29	0.30	0.30
B	75	57.1	124.3	174.9	0.64	0.62	0.63	0.39	0.38	0.39
	80	67.6	130.9	197.2	0.60	0.60	0.60	0.37	0.38	0.38
	85	88.7	147.8	243.3	0.53	0.58	0.55	0.35	0.37	0.36
	90	120.5	188.6	250.5	0.45	0.51	0.54	0.31	0.34	0.35
C	75	88.2	161.5	235.5	0.53	0.55	0.56	0.35	0.36	0.36
	80	107.8	189.4	250.4	0.48	0.51	0.55	0.32	0.34	0.35
	85	234.5	307.4	412.6	0.30	0.39	0.42	0.23	0.28	0.30
	90	392.6	508.9	638.3	0.20	0.28	0.32	0.17	0.22	0.24

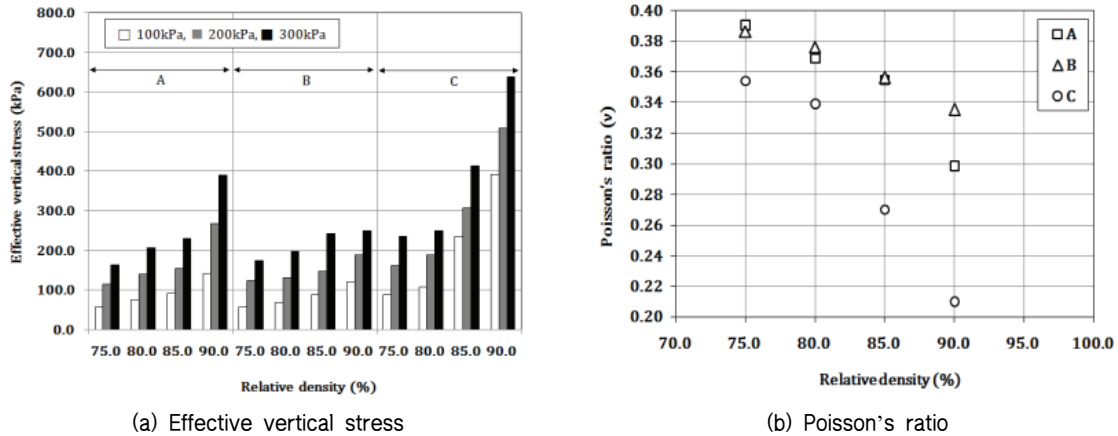


Fig. 3 Results of poisson's ratio and effective vertical stress

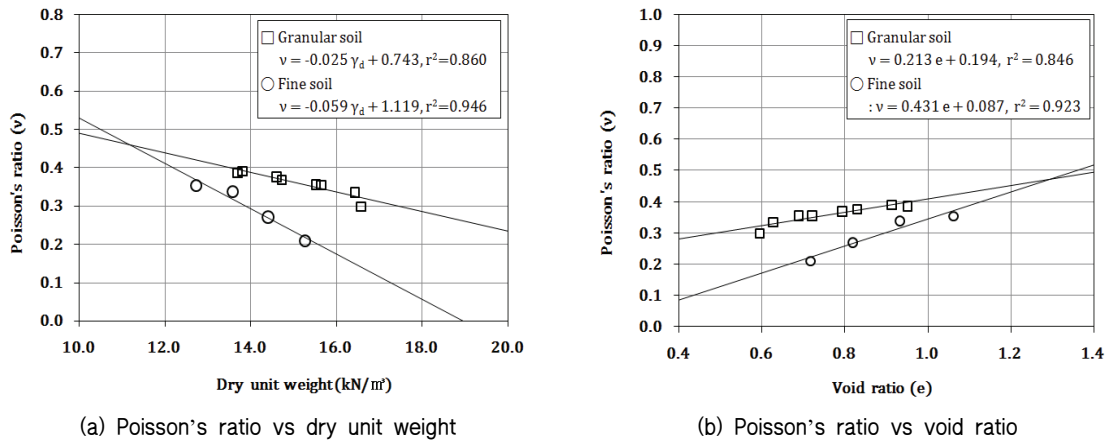


Fig. 4 Prediction of poisson's ratio according to dry unit weight and void ratio

보이고 있다. C 시료는 상대밀도가 증가할수록 A, B시료의 포아송비 보다 작은 결과를 보였으며, 상대밀도 85%와 90%에서 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 간극수압 변화로 인한 유효수직응력의 결과와 같은 원인 때문으로 사료된다.

3. 포아송비 예측

Fig. 4는 단위중량과 간극비를 이용하여 포아송비를 회귀 분석한 것이며, 회귀분석 결과는 Table 4에 정리하였다. 회귀 분석시 A, B 시료는 조립토 C는 세립토로 분류하여 분석하였다. 간극비는 D 다짐의 최대건조밀도를 기준으로 상대밀도별로 단위체적을 이용하여 구하였다. 회귀분석 결과 단위중량과 간극비의 관계로부터 포아송비의 상관계수 0.846-0.946으로 매우 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

단위중량과 간극비를 이용한 포아송비 예측식을 검증하기 위하여 Table 1에 정리한 D 시료의 압밀비배수실험 결과와

Table 4 Prediction equation of poisson's ratio using the void ratio

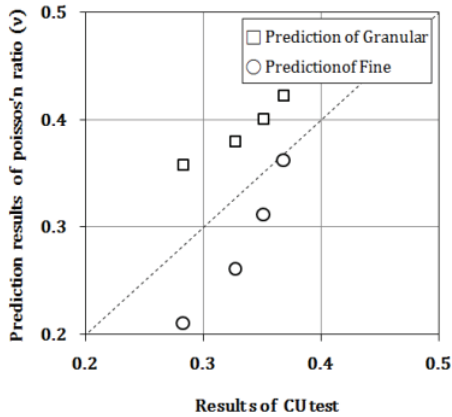
No.		Prediction equation	r^2
Relative density	Granular soil	$\nu = -0.025 \cdot \gamma_d + 0.743$	0.860
	Fine soil	$\nu = -0.059 \cdot \gamma_d + 1.119$	0.946
Void ratio	Granular soil	$\nu = 0.213 \cdot e + 0.194$	0.846
	Fine soil	$\nu = 0.431 \cdot e + 0.087$	0.923

비교하였다. D 시료의 압밀비배수실험은 다른 시료들과 같이 동일한 방법으로 진행하였으며, 토압계수와 포아송비도 같은 방법으로 산정하였다. Table 5는 D 시료의 압밀비배수실험 결과를 나타낸 것이며, Fig. 5(a)와 5(b)는 예측결과를 비교한 것이다.

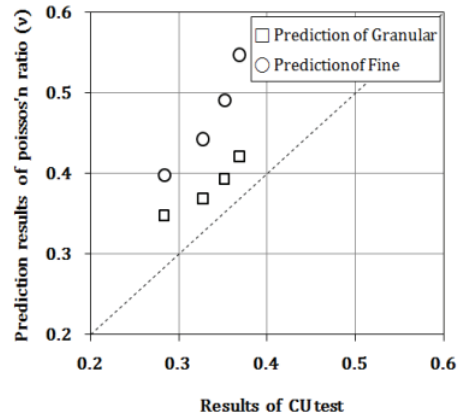
단위중량을 이용하여 예측한 결과는 Fig. 5(a)와 같이 조립토 예측식을 적용한 경우 결과는 더 크게 예측하였으며, 기울기 경향도 유사하게 나타났다. 세립토 예측식을 적용한 경우

Table 5 Results of poisson's ratio using the σ_1' and σ_3' of D sample

Soil	Confining pressure (kPa)			K_0			ν			
	100	200	300							
D	75	72.2	142.4	215.0	0.58	0.58	0.58	0.37	0.37	0.37
	80	88.1	164.5	251.5	0.53	0.55	0.54	0.35	0.35	0.35
	85	135.4	182.2	286.4	0.42	0.52	0.51	0.30	0.34	0.34
	90	195.5	295.2	375.1	0.34	0.40	0.44	0.25	0.29	0.31

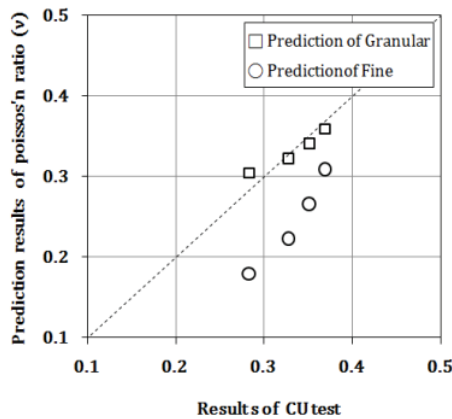


(a) Prediction results of γ_d

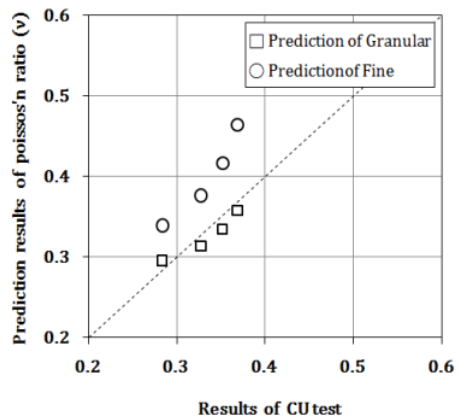


(b) Prediction results of void ratio

Fig. 5 Prediction results of dry unit weight and void ratio



(a) Prediction results of constant apply to γ_d



(b) Prediction results of constant apply to void ratio

Fig. 6 Prediction results of dry unit weight and void ratio

결과도 작고, 기울기 경향도 서로 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

간극비를 이용하여 예측한 결과는 Fig. 5(b)와 같이 조립토와 세립토 예측식을 적용한 경우에서 결과가 더 크게 예측되었으며, 기울기 경향도 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서, 단위중량을 이용한 세립토 예측식으로 조립토의

포아송비를 예측하는 경우 오차가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 간극비를 이용한 조립토와 세립토 예측식 결과도 포아송비 예측결과의 차이를 보이고 있어 구분없이 예측식을 적용하는 것은 무리가 있을 것으로 판단된다.

조립토의 회귀분석식의 정확도와 오차를 최소화하고 보다 정확한 포아송비 예측을 위해 조립토와 세립토 회귀식을 0.85

배하여 분석한 결과를 Fig. 6(a)와 (b)에 도시하였다. 회귀분석 식에 0.85배를 적용하는 경우 조립토 D 시료의 포아송비 예측 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

조립토와 세립토 회귀분석식을 이용한 포아송비 예측의 신뢰성을 높이기 위해 0.85배를 적용한 결과를 재검증하였다. 재검증을 위한 자료는 압밀비배수 실험결과를 이용하여 동일한 방법으로 K_0 와 포아송비를 산정하였다.

Table 6은 CU 시험으로 분석된 회귀분석식에 0.85배 적용한 식을 정리한 것이다. 정리된 조립토와 세립토 회귀분석식

Table 6 Prediction equation of poisson's ratio using the void ratio

No.	Prediction equation	Remarks
Granular soil	$\nu = 0.1811 \cdot e + 0.1649$	SM type (GM except)
Fine soil	$\nu = 0.3664 \cdot e + 0.074$	ML and CL

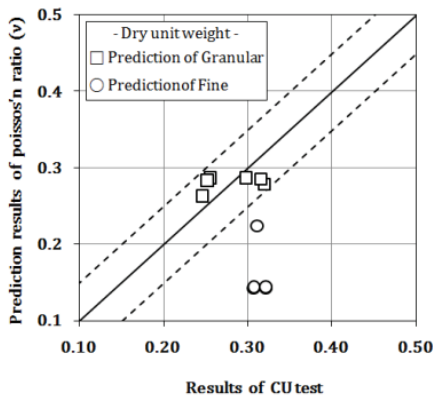
Table 7 Physical properties of verification soils

No.	Gs	LL (%)	PI (%)	γ_d (kN/m ³)	Grain size distribution (%)				US CS
					#4	#40	#200	2 μ	
1	2.66	29.9	9.8	17.36	90.2	66.1	45.9	23.1	SC
2	2.64	25.4	3.7	16.24	80.2	70.9	38.2	16.6	SM
3	2.67	28.0	5.6	16.24	88.5	75.0	40.9	17.2	SM
4	2.66	26.4	4.6	16.60	99.7	76.3	39.2	10.4	SM
5	2.67	23.8	1.7	16.40	97.3	68.1	30.8	7.3	SM
6	2.67	25.0	3.9	16.25	99.5	87.6	35.5	12.5	SM
7	2.68	24.0	3.1	16.12	97.8	85.3	60.7	14.7	ML
8	2.68	37.7	15.5	16.11	99.5	90.4	71.0	28.8	CL
9	2.67	36.3	13.4	14.48	86.3	71.3	60.3	28.9	CL
10	2.72	35.4	11.7	16.10	88.1	63.4	52.1	22.8	CL
11	2.74	29.8	8.3	16.10	85.3	67.5	56.7	20.0	CL

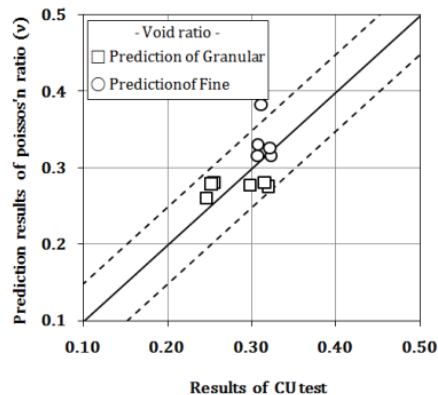
을 이용하여 Table 7의 시료에 대한 포아송비를 산정하여 결과를 비교하였다. Table 7은 재검증 시료에 대한 물리적 특성 결과는 정리한 것이다. Table 8은 재검증을 위한 압밀비배수 실험결과를 정리한 것이다. Fig. 7은 재검증 시료를 조립토와 세립토로 구분하여 회귀식을 각각 적용하여 도시한 것이다. Fig. 7(a)에서 단위중량 예측식에 0.85배하여 예측한 결과는 조립토의 경우 점선으로 표시된 5%의 오차범위 내에서 분포하는 것으로 나타났지만, 세립토의 경우 5% 오차범위를 크게 벗어나 매우 낮게 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 7(b)에서 간극비 예측식에 0.85배하여 예측한 결과는 5%의 오차범위 내에서 분포하는 것으로 나타났다. 재검증 결과 단위중량 예측식보다는 간극비 예측식의 포아송비의 오차가 더 작은 것을 알 수 있다. 단위중량은 공시체 제작시 입자의 배열과 다짐 에너지의 차이로 실험에서 오차가 발생할 수 있지만, 간극비는 제작된 공시체 전체를 대상으로 산정하였기 때문에 단위

Table 8 Results of CU test for verification soils

No.	Confining pressure (kPa)			K_0			ν		
	100	200	300						
1	272.8	390.2	507.3	0.27	0.34	0.37	0.21	0.25	0.27
2	171.4	259.0	346.0	0.37	0.44	0.46	0.27	0.30	0.32
3	255.5	360.0	465.8	0.28	0.36	0.39	0.22	0.26	0.28
4	118.0	225.3	334.4	0.46	0.47	0.47	0.31	0.32	0.32
5	255.7	370.6	485.6	0.28	0.35	0.38	0.22	0.26	0.28
6	127.3	232.5	329.5	0.44	0.46	0.48	0.31	0.32	0.32
7	139.6	208.6	279.3	0.42	0.49	0.52	0.29	0.33	0.34
8	168.0	234.0	300.2	0.37	0.46	0.50	0.27	0.32	0.33
9	137.4	234.6	333.9	0.42	0.46	0.47	0.30	0.32	0.32
10	154.0	202.1	259.9	0.39	0.50	0.54	0.28	0.33	0.35
11	151.6	241.3	331.1	0.40	0.45	0.48	0.28	0.31	0.32



(a) Prediction results of dry unit weight



(b) Prediction results of void ratio

Fig. 7 Verification comparisons of prediction results and experimental data

중량보다는 간극비 예측결과의 오차가 더 작은 것으로 사료된다. 따라서 삼축압축시험결과를 이용한 포아송비 예측에서는 간극비를 이용하는 방법이 유리할 것으로 사료된다. 단, 본 연구결과에서 삼축시험시 부의 간극수압이 나타나는 경우에는 결과 분석에서 제외하였으므로 적용에 참고하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 압밀배수시험 결과를 이용하여 유효수직응력과 유효수평응력을 이용하여 포아송비를 산정하고 간극비와의 관계를 고찰하였다.

1. 압밀배수시험결과 상대밀도가 증가됨에 따라 내부마찰각은 증가하는 경향을 보였으며, 점착력은 상대밀도에 따라 경향이 일정하지 않은 것으로 나타났다. 전단시 발생하는 간극수압 변화로 구속응력이 내부에서 증가한 시료 C의 유효마찰각이 가장 큰 것으로 나타났다.
2. 상대밀도가 증가하면서 A, B, C의 포아송비 차이는 점점 더 큰 차이를 보이고 있으며, 이는 구속압이 커질수록 측정된 간극수압은 감소하여 유효수직응력이 크게 증가하기 때문으로 사료된다.
3. 단위중량과 간극비를 이용한 포아송비의 관계에서 조립토와 세립토로 구분하여 회귀분석한 결과 결정계수가 최소 0.846이상으로 매우 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.
4. 조립토와 세립토로 구분하여 예측한 결과에 0.85배 한 경우에서 실험결과와 매우 근사한 값을 보였으며, 기존에 수행되었던 실험결과로 재검증한 경우에서도 오차범위 5% 이내에서 포아송비 분포를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 조립토와 세립토 회귀분석식은 간극비를 적용한 예측식으로 흙의 포아송비를 보다 정확하게 예측할 수 있으며, 이러한 결과는 단동 비닐하우스 파이프 줄기초부의 지반거동을 파악하기 위한 수치해석 프로그램의 입력요소로도 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호 : PJ013379012020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. ASTM D 4767-95. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. ASTM.
2. Burland, J. B., 1989. Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: small is beautiful - the stiffness of soils at small strains. *Canadian Geotechnical Journal* 26(4): 52-65.
3. Byun, Y. H., S. H. Cho, H. K. Yoon, Y. W. Choo, D. S. Kim, and J. S. Lee, 2012. Void ratio evaluation of unsaturated soils by compressional and shear waves. *Journal of The Korean Geotechnical Society* 28(12): 41-51. doi:10.7843/kgs.2012.28.12.41.
4. Jardine, R. J., D. M. Potts, A. B. Fourie, and B. Burland, 1986. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. *Geotechnique* 36(3): 377-396. doi:10.1680/geot.1986.36.3.377.
5. Jaky, J., 1948. Pressure in silos. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1: 103-107.
6. Ko, D. H., I. H. Lee, J. S. Kim, and D. S. Kim, 2002. Development of the small-strain triaxial testing equipment and application. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C* 22(3C): 219-229 (in Korean).
7. KS F 2302, 2017. Standard Test Method for Particle Size Distribution of Soils. KRISS, Korean (in Korean).
8. KS F 2312, 2016. Standard Test Method for Soil Compaction. KRISS, Korean (in Korean).
9. Kumar, J., and B. Madhusudhan, 2010. Effect of relative density and confining pressure on Poisson ratio from bender and extender elements tests. *Geotechnique* 60(7): 561-567. doi:10.1680/geot.9.T.003.
10. Lo Presti, D.C.F., S. Shibuya, and G. J. Rix, 1999. Innovation in Soil Testing, ISSMGE, Torino, pp. 158-207.
11. Yoo, J. K., and D. H. Park, 2014. Evaluation of characteristics of shear strength and Poisson's ratio through triaxial and bender element tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 30(5): 67-75 (in Korean). doi:10.7843/kgs.2014.30.5.67.
12. Yoon, C. M., 2009. A study on the Poisson's ratio of domestic sands according to the various conditions. Master's thesis. National University of Changwon (in Korean).