



간척지 온실기초 나무말뚝의 인발저항력 예측을 위한 실내모형시험 결과 비교·분석

Comparison Analysis of Model Test for Prediction of Uplift Resistance in the Reclaimed Land Greenhouse Foundation

송창섭* · 김명환*[†] · 장응희**

Song, Chang Seob · Kim, Myeong Hwan · Jang, Ung Hee

Abstract

The object of this paper was to evaluate modified proposed design equation in model test result in order to estimate uplift-resistance of timber pile of reclaimed land greenhouse foundation. Uplift resistance result of model test was increased to according to increased of contact area. Uplift-resistance result of field test tend to lineary increased to according to increased of embedment depth and contact area. Results of field uplift-resistance was evaluate compare with modified proposed design equation results of model test and Effective stress method. As the Effective stress method tend to underestimate, modified proposed design equation results of model test tend to similar type. As the contact area increase, difference between field uplift-resistance results and modified proposed design equation results of model test was considered uplift-speed.

Keywords: Embedment depth; Uplift resistance; Greenhouse foundation; Contact area

1. 서론

우리나라의 간척지 내 농경지의 고도이용을 위해 대단위의 온실단지가 조성되었거나 조성 중에 있다. 이러한 간척지를 고부가가치의 시설원예단지로 개발하기 위한 환경 친화적 입지선정, 작목선정, 적정규모, 재배유형 등에 관한 연구가 필요하다. 일반적으로 구조물의 기초는 상부구조물의 하중을 지반에 안전하게 전달할 수 있도록 압축지지력을 가져야 함은 물론, 지지력이나 풍압 등에 의해서 큰 인발력을 받을 수도 있기 때문에 인발이나 전도 등에 대해서도 충분한 저항력을 가져야 한다 (Kang et al., 2014).

말뚝의 인발저항력은 점토지반과 모래지반에서 강관, PHC, 현장타설말뚝에 대해서만 대부분 진행되어 왔다. 정규압밀 점토에 대하여 $\beta=(1-\sin\phi')\tan\phi'$ 가 말뚝의 부마찰력에 미치는 영향에 관하여 연구하여 보통 $\beta=0.24\sim 0.29$ 의 범위를 보이고 있으며 (Burland, 1973), 그 이후 말뚝길이에 대한 β 값이 0.15까지 될 수 있다고 연구하였다 (Meyerhof, 1976).

사질토 지반에서는 주면마찰저항시험으로부터 탄성거동을 보이는 한계변위량을 약 12.7 mm 이며 말뚝지름의 10%에 해당한다고 하였으며 (Kulhawy et al., 1989), 단단한 사질토 지반에 매설된 강관말뚝에 인발하중과 압축하중을 작용시켜 주면마찰력을 비교한 결과 압축시의 주면마찰력이 크게 증가한다고 하였다 (O Neil et al., 1991).

최근 온실기초의 파이프 골조온실의 원주형 콘크리트 기초와 민말뚝 기초, 주름말뚝 기초의 인발저항력에 대한 연구를 함수상태, 지반의 조건, 매입깊이, 말뚝의 규격에 대한 시험을 수행하여 인발하중이 증가함에 따라 인발저항력은 증가하지만 인발변위가 발생한 직후의 하중단계에서 극한인발저항력에 도달한다고 하였다 (Yoon et al., 1998).

간척지에서 나무말뚝기초에 대한 현장인발재하시험을 통한 인발저항력을 기존의 인발저항력 산정 이론식과 비교한 결과 나무말뚝의 인발저항력은 근입깊이가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, α 방법이 이론식 결과와 유사하게 나타남을 확인하였다 (Yun et al., 2015).

국내 간척지에 온실기초에 대한 나무말뚝에 대한 연구는 최근 현장시험을 통하여 말뚝의 근입깊이에 따라 인발저항력이 증가하는 경향만을 분석하였지만, 나무의 특성상 직경과 길이의 제한이 있는 말뚝의 현장 적용성을 감안하였을 때 직경의 차이로 인한 지반과의 접촉면적의 차이와 현장지반의 상태에 따라 인발저항력 특성이 서로 다르게 나타날 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 간척지 지반에 설치된 나무말뚝의 직경과 근입

* Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

** Korea Rural Community Corporation

[†] Corresponding author

Tel.: +81-43-261-2572 Fax: +81-43-271-5922

E-mail: mhkim3306@cbnu.ac.kr

Received: January 8, 2016

Revised: March 3, 2016

Accepted: March 7, 2016

깊이 및 접촉면적에 따른 인발저항력을 모형토조에 재현하여 수행한 결과에서 제안된 수정식 결과와 기존의 나무말뚝 이론산정식과 현장인발재하 시험결과와 비교하여 검토하였다.

II. 이론적 배경

점성토 지반에서의 말뚝의 인발저항력 산정방법은 대표적으로 α , β , λ 방법이 있다. 점성토 지반의 인발저항력 산정방법은 말뚝의 재질에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 재질에 따라 나무말뚝의 경우 곧고 견고하며 결합이 없는 나무를 사용하고 있으며, 길이는 10~15 m, 말뚝선단은 15 cm 이상이고 말뚝머리의 직경은 30 cm 이상으로, 저렴하고 취급이 간편하며, 수중에 설치하면 잘 부식되지 않는 장점이 있다. 콘크리트 말뚝의 경우 제작공장에서 적절한 길이로 제작되어 현장에서 운반되어 사용되며, 제작방법에 따라 큰 하중 지지와 높은 강도로 영구적이지만, 유기질 흙의 산이나 해수는 콘크리트에 손상을 유발하는 단점이 있다. 따라서, 본 연구와 같이 간척지 소규모 구조물에 적용할 수 있는 나무말뚝의 인발저항력에 대한 자료를 검사한 결과, Timber Pile Design and Construction Manual (2002)에 수록된 미국 도로연방 설계시방 매뉴얼 (FHWA-HI-97-013)에서는 나무말뚝의 설계방법 중 사질토와 점성토에서 모두 적용할 수 있도록 Effective Stress 방법을 이용하는 인발저항력 산정식을 식 (1)과 같이 제안하였다. Effective Stress에 의한 설계는 흙의 성질에 따른 콘 저항값을 사용하여 흙의 점착계수를 구하고, 말뚝 하부

의 토압과 저항력을 이용하여 말뚝을 설계하는 방법이다. Table 1은 β 계수의 범위를 나타낸 것이며, Fig. 1은 흙의 마찰각과 β 계수와의 관계를 나타낸 것이다.

$$R_s = \sum (f_s \cdot A_s) = \sum (\beta \cdot \bar{P}_0 \cdot A_s) \quad (1)$$

Where, f_s : Unit shaft resistance

A_s : Pile shaft surface area = (perimeter) x (embedded length)

β : Bjerrum-Burland beta coefficient = $K_s \tan \delta$

\bar{P}_0 : Average effective overburden pressure along the pile shaft

δ : Friction angle between the pile and the soil

K_s : Earth pressure coefficient

III. 재료 및 시험방법

1. 시험장치

온실기초의 나무말뚝을 매입하여 인발저항력 측정에 사용된 모형토조 시험장치는 100 cm×50 cm×70 cm (가로×세로×높이)이며, 하중에 충분히 견딜 수 있도록 강성 프레임을 사용하여 제작하였다. 모형토조의 전면부는 지반의 조성높이와 다짐상태를 확인할 수 있도록 아크릴을 사용하였다. 모형토조 상부에는 최대 5톤까지 측정할 수 있는 로드셀과 1.0 mm/min의 제어속도로 0.001 mm의 범위까지 확인할 수 있는 내부 변위계를 설치하였다. 특히 인발시험시 나무말뚝을 고정할 수 있는 클램프를 설치하여 사용하였다. Photo 1은 나무말뚝 인발저항력 시험을 위한 모형토조와 나무말뚝을 고정하여 인발저항력을 측정하기 위한 지그의 사진이다.

2. 재료 및 시험조건

가. 재료

말뚝기초에 대한 연구는 강관, PHC, 현장타설말뚝에 대한 연구는 활발하게 진행되어 왔으나, 고가이며 공기와 습기로 인한 부식이 쉽다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 소규모 시설물일 경우 나무말뚝을 사용하면 강관 또는 콘크리트 말뚝에 비하여 강도는 낮은 단점은 있지만, 재료의 무게가 가벼워 취급이 용이하고 쉽게 구득이 용이하며, 가격이 저렴하고 공기가 단축되며, 충분한 내구성을 확보할 수 있다. 특히 간척지의 연약층 두께가 두꺼운 경우에는 말뚝을 선단지형식으로 설치하는 것이 불가능하여 주로 마찰말뚝 형태로 상부하중을

Table 1 Range of β coefficients (Fellenius, 1991)

Soil Type	ϕ	β
Clay	25~30	0.23~0.40
Silt	28~34	0.27~0.50
Sand	32~40	0.30~0.60

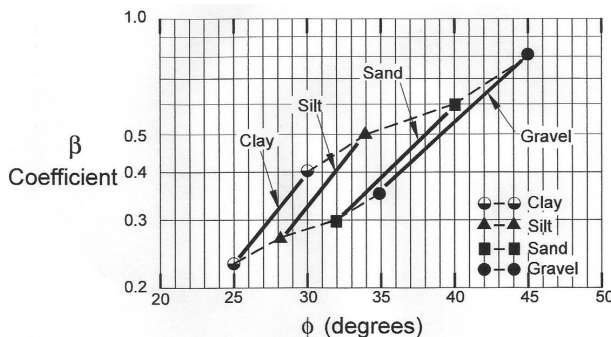
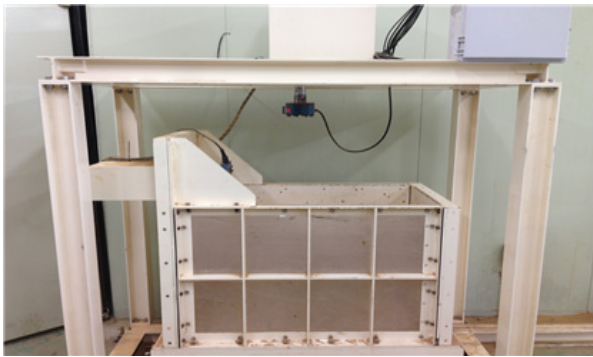


Fig. 1 Chart for Estimating β Coefficient versus Soil Type ϕ (after Fellenius, 1991)



(a) Model test box



(b) Fixing zig head

Photo 1 Equipment of model test

Table 2 Strength of wooden pile (Forest&Forestry Technique, 2000)

Longitudinal compressive strength (kPa)	Longitudinal tensile strength (kPa)	Bending strength (kPa)	Shear strength (kPa)	
			Radiation	Tangent
53,200	58,400	98,600	11,300	11,000

Table 3 Test condition of uplift resistance test for wooden pile

Diameter (mm)	25		33				40		
Embedment depth (mm)	250	390	500	240	400	480	230	340	450
Slenderness ratio	10.0	15.6	20.0	7.3	12.1	14.5	5.8	8.5	11.3
Contact area (cm ²)	196.3	306.3	392.7	248.8	414.7	497.6	289.0	427.3	565.5

Table 4 Physical properties of the soil used

LL (%)	PI (%)	Gs	Grain size distribution (%)		γ_d (kN/m ³)	OMC (%)	USCS
			4.76mm	0.074mm			
39.4	12.5	2.62	100	94.8	15.10	20.0	ML

지지하게 되며, 지반조건, 하중조건, 말뚝의 규격 등에 따라 마찰저항이 달라지게 되는데, 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 또한, 간척지에 설치되는 원예시설의 경우 강풍 등에 의한 인발에 의해서도 파괴가 자주 발생하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 온실기초에 사용하는 나무말뚝의 인발저항력을 파악하기 위하여 모형시험에 사용된 나무말뚝을 널리 사용되고 있는 낙엽송으로 선정하였다. 낙엽송은 건축, 갯목, 침목, 토공용재 등으로 주로 사용되고 있으며, 본 연구에서 사용한 모형토조의 크기와 근입비를 고려하여 직경 25 mm, 33 mm 및 40 mm로 제작하였다. Table 2는 모형시험에 사용된 낙엽송의 재료강도를 보여주고 있으며, Table 3은 시험에 적용한 근입비와 접촉면적을 나타낸 것이다.

모형토조 시험에 사용된 재료는 경기도 화성시 간척지에서 채취하였으며, 물리역학적 특성시험을 실시하여 Table 4와 Fig. 2와 같이 나타내었다. 시험에 사용된 흙은 통일분류법상 저소성의 ML로 0.074 mm 통과량이 94.8 %이며, 건조단

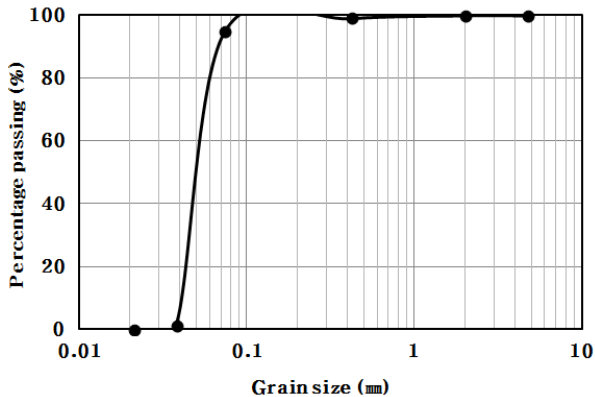
위중량은 15.10 kN/m³으로 나타났다.

나. 시험조건

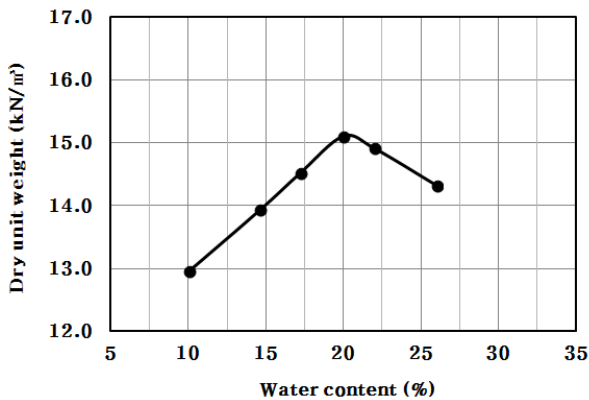
모형토조를 이용한 온실기초의 인발저항시험은 지역적 특성을 고려하여 현장에서 채취한 시료를 채취 지반의 현재 상태인 포화도 50 %와 비교대상으로 최악의 지반조건을 포화도 100 %로 가정하여 시험하였다. 또한, 모형토조 크기를 고려하여 나무말뚝의 직경은 3종류, 근입비는 3종류로 조합하여 9개의 조건에 대하여 인발저항시험을 수행하였다. Table 5는 포화도에 따른 시료의 역학적 특성을 나타낸 것이다.

3. 시험방법

지반의 포화도에 따른 나무말뚝의 인발특성을 규명하기 위하여 현장에서 채취한 시료를 포화도 50 % 및 포화도 100 %의 조건으로 토조에 모델링하였다. 시료는 통풍이 잘되는



(a) Grain size distribution curve



(b) Compaction curve

Fig. 2 Physical and mechanical test result

Table 5 Mechanical properties with degree of saturation

	Condition of saturation	
	Sr = 50 %	Sr = 100 %
γ_{dmax} (kN/m ³)	14,22	13,24
w (%)	13,0	37,0
γ_t (kN/m ³)	16,08	18,14

곳에서 자연 건조하여 사용하였으며, Photo 2는 모형토조 시험 진행과정을 보여준 것이다.

시료는 (a)와 같이 토조의 높이와 포화도에 따른 무게를 일정하게 계량하여 사용하였으며, (b)와 같이 시료다짐은 시료의 성토 높이를 5개 층으로 구분하여 층별 동다짐으로 모델링하였다. 하부 지반의 모델링이 완료된 후 나무말뚝의 근입은 (c)와 같이 나무말뚝의 근입비를 고려한 높이까지 지반 다짐을 실시한 후 수직으로 설치하여 말뚝의 변위가 발생하지 않도록 다짐을 실시하여 설치하였다. 지반의 모델링과 나무말뚝 설치가 완료된 후 (d)와 같이 나무말뚝의 인발저항력은 지반과 말뚝에 편심하중이 작용하지 않도록 중심에 연직으로



(a) Measuring of soil

(b) Compaction of soil



(c) Embedded of pile

(d) Uplift resistance test

Photo 2 Procedure of model test

설치하고, 토조 상부의 로드셀(load cell)에 결합한 지그(zig)로 나무말뚝을 고정시킨 후 시험하였다.

나무말뚝의 인발저항력 시험은 KS F 2732의 규정에 준하여 시험을 수행하였다. 인발속도는 1 mm/min의 일정하게 유지하여 진행하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 근입비와 주면면적에 따른 인발저항력

Fig. 3는 지반의 포화도에 따른 나무말뚝의 인발저항력을 근입비에 따라 비교한 것이며, Fig. 4은 지반의 포화도에 따른 나무말뚝의 인발저항력을 주면면적에 따라 비교하여 나타낸 것이다. Table 6은 모형시험에 사용한 나무말뚝의 직경과 근입에 따른 인발저항력 시험결과를 나타낸 것이다.

지반의 포화도에 따른 나무말뚝 직경에 따른 인발저항력은 근입비와 주면면적이 증가할수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 나무말뚝의 최소 근입비와 최대 근입비의 증가비율이 2.0배 증가하는 경우 인발저항력의 변화는 포화도 50%의 지반에서는 직경 25 mm의 경우 2.3배, 직경 33 mm의 경우 2.9배, 직경 40 mm의 경우 2.1배 증가하는 것으로 나타났다

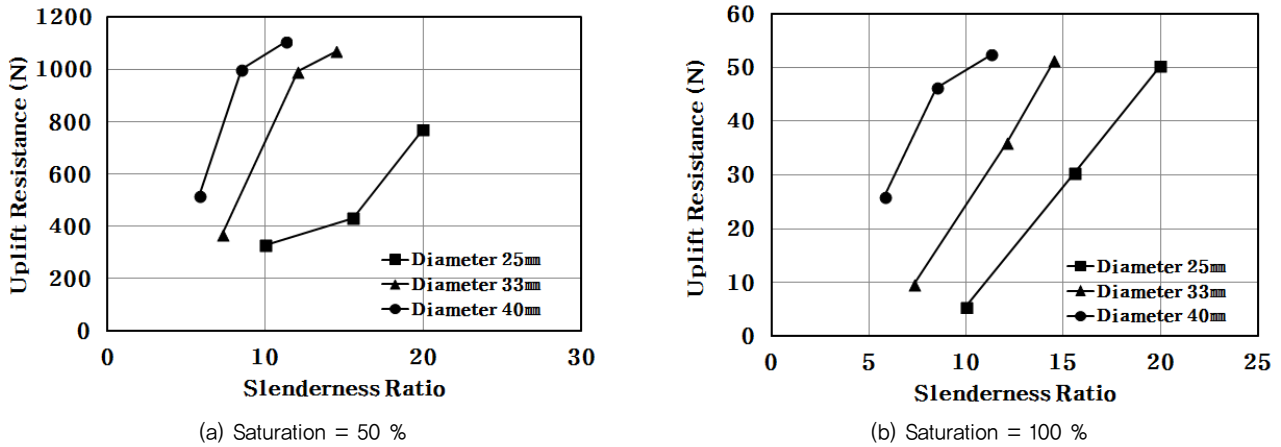


Fig. 3 Uplift resistance according to Slenderness ratio

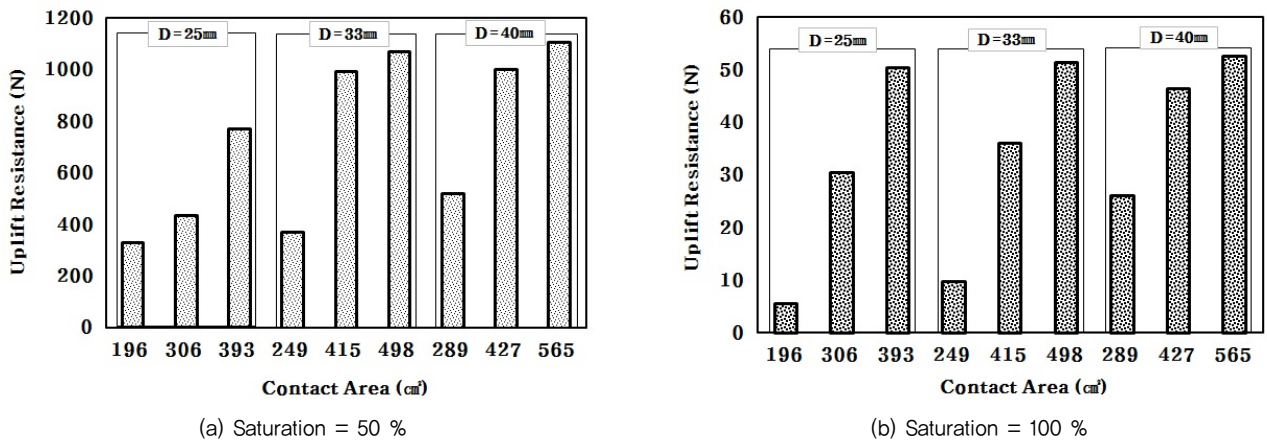


Fig. 4 Uplift resistance according to Contact area

Table 6 Uplift resistance results according to slenderness ratio

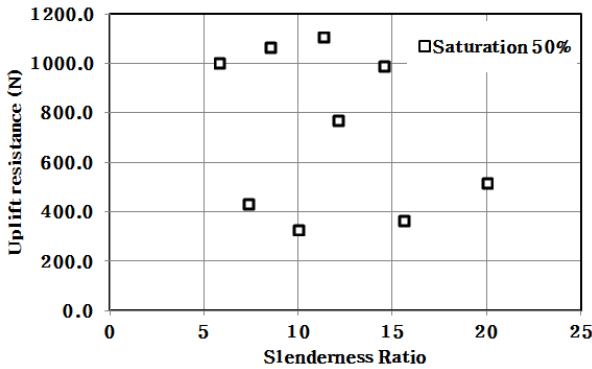
Diameter (mm)	25			33			40			
	L/B	10	15.6	20	7.3	12.1	14.5	5.8	8.5	11.3
Uplift resistance (Sr=50 %)		329.0	432.4	770.3	367.5	991.8	1068.2	516.5	1001.6	1106.4
Uplift resistance (Sr=100 %)		5.5	30.5	50.3	9.6	36.1	51.3	26.0	46.3	52.4

으며, 포화도 100%의 지반에서는 직경 25 mm의 경우 9.2배, 직경 33 mm의 경우 5.3배, 직경 40 mm의 경우 2.0배 증가하는 것으로 나타났다. 나무말뚝의 인발저항력은 포화도가 100%인 지반에서 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지반의 함수상태에 따라 나무말뚝과 지반의 상호작용력 점착력의 증가로 인한 부착력을 더 크게 증가시켰기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 나무말뚝의 직경 33 mm와 직경 40 mm에서 주면면적이 400 cm² 이상일 경우 포화도에 관계없이 인발저항력은 1.1~1.4배 정도로 변화가 작은 것으로 나타났다.

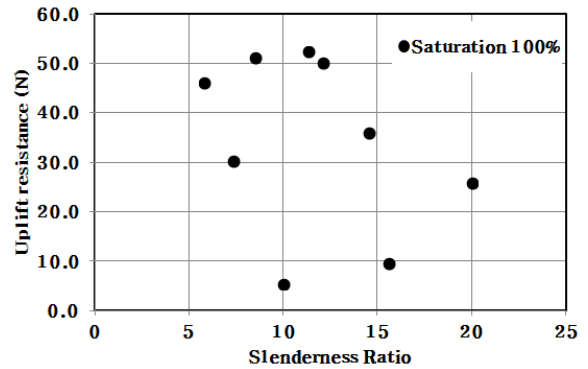
2. 근입비와 주면면적 증가에 따른 인발저항력 관계

나무말뚝의 모형토조 시험결과를 근입비와 주면면적의 크기순으로 나열하여 인발저항력의 관계를 파악하였다. Fig. 5는 나무말뚝의 근입비에 따른 인발저항력을 나타낸 것이며, Fig. 6은 나무말뚝의 주면면적 크기에 따른 인발저항력을 나타낸 것이다.

나무말뚝의 근입비 크기에 따른 인발저항력은 일정한 경향이 없이 산포하고 있으며, 주면면적 크기에 따른 인발저항력은 지반과의 접촉면적이 증가할수록 증가하는 경향을 보였

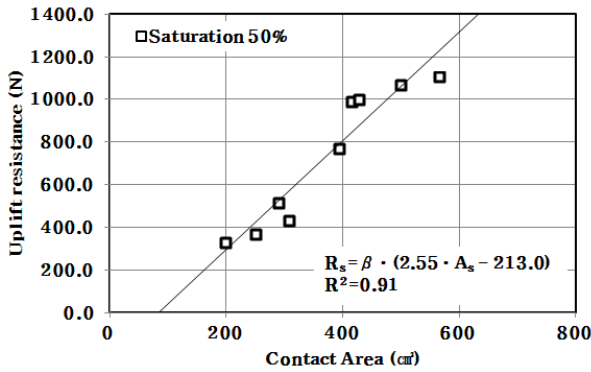


(a) Saturation = 50 %

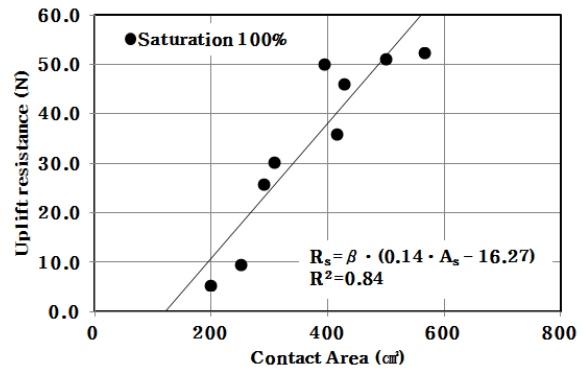


(b) Saturation = 100 %

Fig. 5 Relation of uplift resistance according to Slenderness ratio



(a) Saturation = 50 %



(b) Saturation = 100 %

Fig. 6 Correlation equation of uplift resistance according to contact area

다. 이는 시험조건에서 나무말뚝의 근입깊이가 증가하여도 직경이 더 큰 경우 주면면적이 증가하기 때문에 근입비와 인발저항력의 관계는 산포를 보이는 것으로 사료된다. 또한, 나무말뚝이 받는 인발저항력은 지반과의 상호작용에서 근입깊이 보다는 말뚝과 지반의 접촉면적에 의한 영향이 더 크게 작용함을 의미한다. 모형토조 시험결과, 포화도에 따른 나무말뚝의 인발저항력은 14~60배까지 차이를 나타내는 것을 알 수 있으며, 지반의 함수상태에 따른 마찰저항력이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 주면면적과 인발저항력 관계에서 말뚝 주면이 지반과의 접촉면적이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.

나무말뚝의 인발저항력이 주면면적에 의한 영향을 크게 받으며 증가하는 경향에서 주면면적과 인발저항력과의 관계를 분석하였다. 주면면적에 따른 인발저항력의 결정계수는 0.91과 0.84로 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 지반의 포화도에 따른 나무말뚝의 인발저항력 산정식을 미국 도로연방 설계시방 매뉴얼에서 제시한 인발저항력 산정식의 토압계수와 말뚝과 지반사이의 마찰각 β 계수 관계를 고려하

여 수정 제안식을 아래 식 (2) 와 식 (3) 과 같이 제시하였다.

$$R_s = \beta \cdot (2.55 \cdot A_s - 213.0) : S_r = 50\% \quad (2)$$

$$R_s = \beta \cdot (0.14 \cdot A_s - 16.27) : S_r = 100\% \quad (3)$$

Where, A_s : Contact area (cm^2)

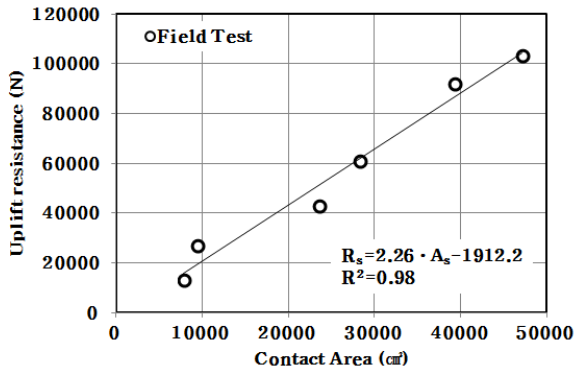
3. 인발저항력 적용성 검토

모형토조 시험결과서 제시한 수정 제안식은 현장인발재하시험 결과와 Timber Pile Design and Construction Manual (2002)에 수록된 미국 도로연방 설계시방 매뉴얼 (FHWA-HI-97-013)의 나무말뚝의 설계방법 중 Effective Stress의 방법을 이용하여 비교하여 적용성을 검토하였다.

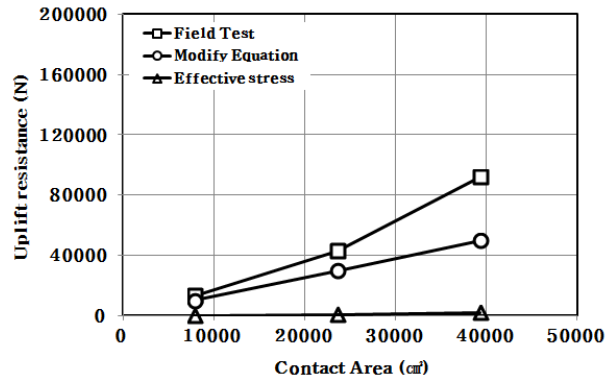
현장인발재하시험은 전북 부안군 계화 간척지구에서 Yun et al. (2015) 실시한 시험으로, 시험에 사용한 말뚝의 제원은 직경 25 cm, 30 cm와 매입깊이는 1 m, 3 m, 5 m로 하였으며,

Table 7 Results of field uplift resistance test

Diameter (cm)	Contact area (cm ²)	Uplift resistance (N)
25	7,854	13,026
	23,562	42,833
	39,270	91,964
30	9,425	26,735
	28,274	61,068
	74,124	103,528



(a) Correlation equation of field test



(b) Compare of uplift resistance

Fig. 7 Compare of uplift resistance according to contact area

set-up 효과를 고려하여 3일 후 인발저항시험을 실시하였다. 인발시 재하속도는 백호의 버킷을 분리한 후 하중계를 연결하여 나무말뚝 상단부에 고정된 후 최대한 느린 속도로 인발한 시험결과이다.

Table 7은 나무말뚝의 현장인발재하시험결과를 정리한 것이며, Fig. 7(a)는 나무말뚝의 현장인발재하시험결과를 주면면적과의 관계를 Fig. 7(b)는 Effective Stress 방법과 현장시험결과 및 모형시험결과의 수정 제안식 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

모형토조 시험결과의 수정 제안식 중 포화도 50% 제안식은 현장인발재하 시험결과 관계식과 유사한 것으로 나타났다. 지반의 상태를 최악의 조건으로 가정한 포화도 100%의 제안식과 예측결과를 비교한 결과, 인발저항력의 차이가 크게 발생하여 현장시험결과와의 비교·적용성 검토결과를 생략하였다.

모형토조 시험결과를 통한 포화도 50% 지반에 대한 수정 제안식 결과는 현장인발재하 시험결과와 유사한 것으로 나타났다지만, Effective Stress 방법은 현장인발재하 시험결과를 과소평가하는 것으로 나타났다. 모형시험결과를 통한 수정 제안식 결과와 현장인발재하시험결과는 주면면적이 증가하면서 값의 차이가 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

Das et al. (1982)의 연구에 의하면 포화 또는 거의 포화된

점토에 근입되어 있는 말뚝의 순극한인발저항력은 말뚝의 근입 깊이, 말뚝의 직경, 점토의 비배수전단강도, 말뚝사이의 간격과 같은 인자의 영향을 받으며, 흙과 말뚝 접촉면에서의 부착력을 비배수 점착력에 대한 함수로 제시하여 표면의 거칠기에 따라 증가한다고 하였다. 또한, Shin et al. (2002)은 점토 지반에서 근입비와 인발속도가 콘크리트 말뚝의 인발부착계수에 미치는 영향을 현장모형시험으로부터 인발속도가 클수록 임계근입비 이상에서는 부착계수가 증가하여 말뚝기초의 인발저항력 산정을 위해서는 근입비와 인발속도에 대한 고려가 필요하다고 하였다.

본 연구에서도 나무말뚝이 흙과의 접촉면적 증가에 따라 증가하는 경향은 동일하게 나타났지만, 모형시험 지반조건과 현장 지반조건에 의한 마찰력 차이와 현장시험과 모형시험 인발속도 차이로 인하여 주면면적이 증가하면서 결과의 차이를 보인 것으로 사료된다. Effective Stress 방법을 이용한 결과값은 매우 낮게 측정되어 국내의 토질지반에 적용시 충분한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 간척지 나무말뚝의 인발저항력을 평가하기

위하여 기존의 인발저항력 산정식과 현장인발재하시험결과를 실내 모형시험에서 주면면적에 따라 검토하여 인발저항력 수정 제안식을 제안하였으며 현장 적용성을 비교·검토하였다.

1. 지반의 포화도에 따른 나무말뚝의 인발저항력 모형시험은 근입비와 주면면적이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 지반의 포화도가 증가하는 경우 근입비와 주면면적이 증가할수록 최대 9.2배의 인발저항력이 증가하는 것으로 나타났으며, 주면면적이 400 cm² 이상일 경우 인발저항력의 변화는 작은 것으로 나타났다.
2. 나무말뚝의 근입비와 주면면적의 크기에 따른 인발저항력을 비교한 결과, 근입비가 증가할수록 나무말뚝의 직경이 서로 상이하여 근입비 차이가 크지 않은 경우 인발저항력이 더 작게 측정되어 산포하는 경향을 보였지만, 주면면적의 경우 인발저항력은 크기에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.
3. 나무말뚝의 주면면적에 따른 인발저항력의 관계는 지반의 상태에 따라 결정계수가 0.91과 0.84로 매우 높은 관계를 갖는 것으로 나타났다. 주면면적에 따른 인발저항력 관계는 토압계수와 마찰각 사이의 β 계수와와의 관계로부터 수정 제안식을 제안하였다.
4. 모형시험을 통한 인발저항력 수정 제안식은 현장인발저항력 시험결과와 Effective Stress 방법과 비교하여 분석한 결과, 현장인발재하 시험결과와는 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났지만, Effective stress 방법의 경우 지반의 인발저항력을 과소 평가하는 경향을 보여 설계 적용시 충분한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2014).

REFERENCES

1. Burland, J. B. 1973. Shaft Friction on Piles in Clay - A Simple Fundamental Approach, *Ground Engineering*, 6(3): 30-42.
2. Das, B. M. and G. R. Seeley, 1982. Uplift Capacity of Pipe Piles in Saturated Clay. *Soils and Foundations*, The Japanese Society and Foundation Division, ASCE 89 (SM3), 63-94.
3. Fellenius, B. H. 1991. Foundation Engineering Handbook, Editor H.S. Fang, Van Nostrand Reinhold Publisher, New York, 511 - 536.
4. Kang, Y. S., Y. C. Yoon, C. S. Song, and S. Y. Lim, 2014. Uplift Resistance of Wooden Pile using Soil box According to Soil type. *Journal of Agriculture & Life Science*, 48(1): 173-182 (in Korean).
5. Korea Forest Service, 2000. Forest&Forestry Technique, (4): 18-38 (in Korean).
6. Kulhawy, F. H., C. W. Jackson, and P. W. Mayne, 1989. First order estimation of K_0 in sands and clays, *Foundation Engineering: Current Principles and Practices*, ASCE, 1: 121-134.
7. Meyerhof, G. G. 1976. Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 102(GT3): 195-228.
8. O'Neill, M. W. and D. R. Richard, 1991. Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand. ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(8): 1208-1226.
9. Shin, E. C., J. I. Kim, and I. D. Kim, 2002. Effect of Slenderness Ratio and Pullout Rate on Uplift Adhesion Factor of Concrete Pile Driven in Clay. *Journal of the Korean Society for Railway*, 8(4): 367-371 (in Korean).
10. Timber Piling Council, 2002. Timber pile design and construction manual. Vancouver (WA): American Wood Preservers Institute, 31-54.
11. Yoon, Y. C., C. S. Yoon, W. M. Suh, M. H. Kang, and K. Shino, 1998. A Study on the Uplift Capacity of Cylindrical Concrete Foundations for Pipe-Framed Greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 40(4): 109-119 (in Korean).
12. Yun, S. W., M. K. Choi, Y. L. Si, Y. Chan, and Y. C. Yoon, 2015. Uplift Capacity of Wood Pile for Greenhouse Foundation. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 24(2): 123-127 (in Korean).