

## 지지력 향상을 위한 확장형 강관말뚝에 관한 연구

# Development of Expandable Steel Pipe Piles to Improve Bearing Capacity

김 의 석<sup>1)</sup> · 김 정 훈<sup>2)</sup> · 김 지 윤<sup>3)</sup> · 민 병 찬<sup>4)</sup> · 최 항 석<sup>†</sup>

Uiseok Kim · Junghoon Kim · Jiyeon Kim · Byungchan Min · Hangseok Choi

Received: July 1<sup>st</sup>, 2021; Revised: September 1<sup>st</sup>, 2021; Accepted: November 4<sup>th</sup>, 2021

**ABSTRACT** : Expandable steel pipe piles have been developed to ensure stability and reduce construction costs during underground floor remodeling and extension work. Expandable steel pipe piles are more economical and stable than micropiles. Extensible steel pipe pile is a method of improving the performance of steel pipes by expanding steel pipes underground. In this paper, the changes in buckling strength according to the shape of steel pipes in an extended steel pipe pile were identified, a numerical analysis model was developed to determine the expanded part effect of bumps due to steel pipe expansion, and the optimal steel pipe expansion was calculated through material tests. The larger the expansion diameter of the steel pipe and the greater the number of expanded part, the greater the buckling strength. Numerical results showed that the number of expanded part has a greater effect on buckling strength than the expansion rate. When the expansion rate is more than 1.2 times, it can be seen that as the number of expanded part increases, the effect of increasing buckling strength increases significantly. It was also noted that the expanded part effect of the bumps occur significantly when the extension angle is less than 45° and the expansion rate is 1.3 times higher. When the steel pipe is failure, the expanded rate is 20 to 32%, averaging 25.4%. Through the material test, it was analyzed that it is desirable to limit the maximum expansion rate for performing steel pipes to 16%.

**Keywords** : Expansion, Buckling strength, Small diameter pile, Floating structure method

**요 지** : 기존의 뜬구조공법의 문제점을 개선하여 지하층 리모델링, 증축 시 안정성 확보와 공사비 절감이 가능한 공법을 개발하기 위하여 일반적인 마이크로파일에 비해 경제적이고 안정성 높은 확장형 강관말뚝을 개발하였다. 확장형 강관말뚝은 지중에서 강관을 확장하여 강관의 성능을 향상하는 공법으로 본 논문에서는 확장형 강관말뚝의 강관 형상에 따른 좌굴강도의 변화를 파악하고, 수치 해석 모델을 개발하여 강관확장으로 인한 요철부의 턱효과를 규명하고, 재료시험을 통하여 최적 강관 확장량을 산정하였다. 강관의 확장 직경이 클수록 확관 턱 개수가 많을수록 좌굴강도가 커짐을 알 수 있었으며, 수치해석 결과에 따르면 확관률보다 확관 턱 개수가 좌굴강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있었으며, 확관률은 1.2배 이상일 때, 확관 턱 개수는 증가할수록 좌굴강도 증가 효과가 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한, 확장 각도가 45° 이하이고, 확관률이 1.3배 이상일 때 요철부의 턱효과가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 강관이 파단되는 항복 시, 신율은 20~32%로 평균 25.4% 수준으로 확인되어 그 이상 변형은 강관의 성능을 발휘할 수 없었다. 재료시험을 통해 강관의 성능을 발휘하기 위한 최대 확관량은 항복 시 최저값으로 확인된 신율 20%에 안전율 80%를 고려하여 16%로 제한하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다.

**주요어** : 확관, 좌굴강도, 소구경말뚝, 뜬구조공법

## 1. 서 론

기존건축물 하부의 지하공간 확보 공사 중, “소구경 말뚝을 활용한 뜬구조공법”은 좁은 지하공간에서 소구경의 마이크로파일을 설치한 뒤, 굴착 중 말뚝을 엮어 상부 구조물의 하중을 지지하는 공법이다. 이 공법은 일반 마이크로파일의 좌굴 위험 및 지지력 부족에 의한 보강 공사비 과다로 널리 사용하지 못하는 실정이다(박춘배, 2012).

이에 본 연구에서는 기존의 뜬구조공법의 문제점을 개

선하여 지하층 리모델링, 증축 시 안정성 확보와 공사비 절감이 가능한 공법을 개발하기 위하여 기존 마이크로파일보다 경제적이고 안정성 높은 확장형 강관말뚝을 개발하였다.

확장형 강관말뚝은 강관을 지중에 삽입한 후 강관내부에 확장장비를 삽입하여 강관을 확장시키는 공법으로 뜬구조역타공법에서 기존에 사용되는 마이크로파일과 비교하여, 말뚝의 확장을 통해 말뚝의 성능을 향상시킬 수 있는 공법이다. 확장형 강관말뚝은 확공유압장치에 의해 강관말뚝을

1) Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Manager, Institute of technology, Samho engineering Corporation

3) Assistant Manager, Institute of technology, Samho engineering Corporation

4) CEO, Samho engineering Corporation

† Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : hchoi2@korea.ac.kr)

확장하므로 천공단면적에 비해 증가된 단면적을 확보하고, 배토말뚝과 같이 말뚝 주변 지반을 횡방향으로 이동시켜서 주위의 흙을 다져주는 효과가 있다. 따라서 확장형 강관말뚝은 단면적 증가에 의한 선단지지력 향상 및 구속응력 증대 및 턱효과에 의한 주변마찰력 증가, 그리고 주변지반의 다짐효과 유도에 의한 지반 전단강도 증대를 기대할 수 있다. 또한, 외주부로 확장에 의한 2차 단면모멘트 증가에 의해 좌굴강도가 증가하는 효과를 가진다. 따라서 본 연구에서는 확장형 강관말뚝 구조체의 연구를 위한 사전연구로서 문헌 및 시공사례 분석을 통하여 확장형 강관말뚝과 같은 비정형식 말뚝의 지지력 산정법을 조사하고, 강관 형상에 따른 좌굴강도의 변화를 파악하고, 개발된 수치해석 모델을 적용하여 강관확장으로 인한 요철부의 턱효과를 규명하고, 재료시험을 통하여 최적 강관 확관량을 산정하였다.

## 2. 기술 동향

확장형 말뚝의 적용성을 평가하기 위해 비정형식 말뚝의 특성에 대해 검토하였다. 파형 마이크로파일, 헬리컬파일, 마디말뚝은 각각 특별한 형상과 시공방법을 통해 말뚝의 성능을 향상시킬 수 있는 말뚝 공법들이다.

먼저 기존의 마이크로파일에 제트그라우팅을 적용한 파형 마이크로파일에 관한 연구는, Jang(2018)이 연직지지력에 대하여 파형 마이크로파일과 기존의 마이크로파일을 비교·분석하였다. 파형 마이크로파일은 원통형의 기존 마이크로파일과 비교하여 주변 마찰력을 향상시키므로 더 높은

지지력을 가진다. 그에 반해, 연직지지력에 대한 검토가 필요하여 연직지지력의 향상성을 확인하고 적용성을 평가하기 위해 현장시험을 수행하였다. 특히, 파형 마이크로파일 매입에 있어 제트그라우팅을 사용함에 따라 시험체 구근의 확인이 요구되어, 시험 후에는 말뚝 주변의 지반을 굴착하여 파형 마이크로파일의 형상을 확인하였다. 재하시험을 통해서 파형 마이크로파일의 연직지지력은 기존의 마이크로파일과 비교하여 1.4~2.3배 증가했으며 이는 파형의 형상에 따라 차이가 발생하였다. 변위계를 사용한 하중 전이 데이터를 통해 파형 마이크로파일은 지층에서 주변 마찰력이 증가하였을 뿐만 아니라 침하량을 감소시키며, 연직지지력 또한 증가하는 경향이 나타났다.

헬리컬 파일은 한 개 이상의 나선형 원판을 중공형 축에 부착한 후 지반에 회전 관입시켜 지지력을 발현하게 하는 말뚝기초로 항타와 굴착의 공정이 필요하지 않아 무소음 시공이 가능한 공법이다(이종원, 2014). 또한, 헬리컬 파일은 중공형 축에 축보다 큰 직경을 갖는 나선형 원판이 부착되어 있으므로 각기의 나선형 원판이 선단지지력을 발휘할 수 있어(Livneh, 2008) 기존의 강관말뚝에 비해 재료비에 대한 지지력 측면에서 큰 이점을 갖으며 이외에도 시공성 및 경제성, 친환경성 등을 동시에 갖는 이점으로 송전탑의 기초, 중소형 건물 및 도로의 기초, 사면 안정 등의 목적으로 널리 사용되고 있다.

마지막으로 비정형 형태의 마디말뚝(Nodular Pile)은 대부분이 프리보링(preboring) 근고정공법으로 시공되고 있으며, 일본건축구조기술사협회(Japan Structural Consultants Association)의 말뚝기초공법의 일람표에서 마디말뚝에 대한 시공법을 찾아 볼 수 있다. 정찬우 등(2006)은 마디 말뚝에 대한 13가지의 산정식을 통해 마디말뚝의 연직지지력 산정에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 마디말뚝과 원통말뚝과의 비교실험을 통하여 연직지지력을 검토하였으며, 간단한 마디말뚝에 대한 모형실험을 통하여 마디말뚝의 연직지지력 특성을 고찰하였다. 마디말뚝의 선단지지력은 동일한 직경을 가지는 원형말뚝의 선단지지력의 75% 정도가 되며, 주변마찰력은 약 2.5-5배의 값을 보였다. 이는 연직지지력이 1.4-1.8배의 증가함을 의미한다. 또한, 마디 수가 증가함에 따라 마찰지지력의 증가를 축소모형실험을 통하여 검토하였다. 연직지지력은 선단지지력과 마찰지지력의 합으로 나타나며, 위의 결과로부터 마디부가 있는 말뚝의 연직지지력은 원형말뚝에 비해 1.6배 증가함을 알 수 있다. 이는 앞의 각 시공법의 지지력에 대해 1.4-1.8배의 범위에 속함을 알 수 있다.

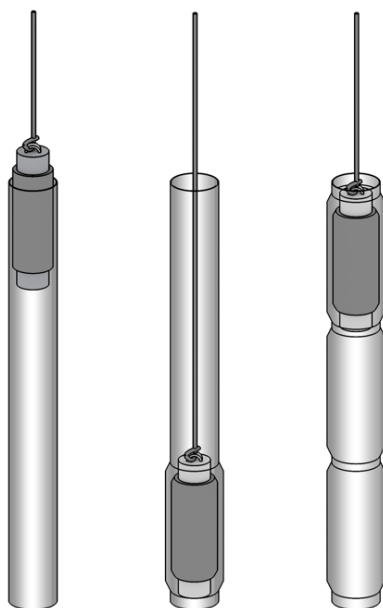


Fig. 1. Concept of expandable steel pipe piles

### 3. 확장형 강관말뚝 형상 및 구조체 성능 검토

#### 3.1 강관형상에 따른 좌굴강도 평가

강관형상에 따른 좌굴강도의 변화를 파악하기 위해 확관 직경과 확관한 턱 개수를 다르게 하며 좌굴강도를 산정하는 강관 수치해석모델을 상용 유한요소프로그램인 Comsol Mutiphysics(3D solid mechanics linear buckling module)를 통하여 개발하였다. 확장 강관말뚝에 하중재하를 통해 확관 직경과 확관한 턱 개수에 따른 좌굴강도 검토를 위한 수치해석을 수행하였다. 하중은 각 모델에 따라 동일하중 재하 조건에서 확관 직경, 확관한 턱 개수의 변화에 따른 좌굴강도 변화를 분석하였다.

균질한 핀고정 기둥에 압축하중  $P$ 를 가정할 때, 핀 고정에 의해 기둥 끝 부분의 모멘트가 0이 된다. 이를 도식하면 Fig. 1과 같다.

위 자유 물체도에 따라, 기둥의 어떤 위치의 section에서라도, 모멘트  $M = Pv$ 를 만족해야 하며 이를 빔의 탄성 거동 식( $Elv'' = M$ )에 대입하면 Eq. (1)과 같다.

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} + Pv = 0 \quad (1)$$

여기서,  $E$ : 재료의 탄성계수(Young's modulus),  $I$ : 단면 2차 모멘트

위 2차 상미분방정식을 풀기 위해 일반적인 해를 다음과 같이 대입해주어야 한다.

$$v(x) = c_1 \sin(cx) + c_2 \cos(cx) \quad (2)$$

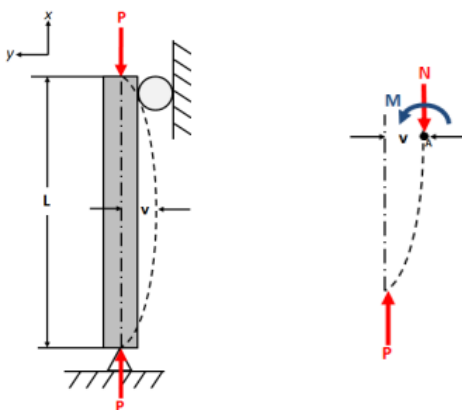


Fig. 2. Pin-fixed load-loaded columns and forces—even free objects of moment

여기서,  $c = \sqrt{\frac{P}{EI}}$ 를 대입하면 Eq. (3)과 같다.

$$v(x) = c_1 \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) + c_2 \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}x\right) \quad (3)$$

경계조건으로서,  $x=0$  일 때  $v=0$ 을 대입하면 위 식에서  $c_2=0$ 을 구할 수 있다. 또한, 추가적인 경계조건으로서  $x=L$ ,  $v=0$ 을 대입해주면,  $0 = \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EI}}L\right)$ 을 구할 수 있으며, 이는  $\sqrt{\frac{P}{EI}}L = n\pi$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ )으로 나타낼 수 있다. 이 식을  $P$ 에 대해 정리하면 좌굴강도를 구할 수 있는 Eq. (4)를 유도할 수 있다.

$$(P_{cr})_n = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (4)$$

여기서,  $n$ : 단말계수,  $L$ : 좌굴길이,  $E$ : 재료의 탄성계수(Young's modulus),  $I$ : 단면2차 모멘트

예비수치해석 모델의 검증에 위해 위에서 구한 좌굴강도와 수치해석을 통해 구한 좌굴강도를 비교하였다. 강관말뚝의 수치해석 형상제원은 통상적인 강관말뚝의 값을 사용하였으며 이는 Table 1과 같다.

위의 제원과 좌굴강도 식을 이용하면, 다음과 같이 계산된다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2} = \frac{\pi^2 \times 210,000 [MPa] \times 2.07854 \times 10^{-5} [m^4]}{(2 \times 5)^2 [m^2]} = 137,128.4459 N \quad (5)$$

동일 조건에 대해 면 하중으로서  $1.0 kN/mm^2$ 을 가하고, 기둥 밑은 변위 구속 조건에 대해 수치해석을 수행하였으며, 좌굴강도는  $P_{cr} = 156,662.9 N$ 으로 계산되었다.

Table 1. Expansion steel pipe pile numerical analysis shape specifications

Classification	Steel pipe pile
Outer diameter (mm)	300
Thickness (mm)	4.0
Height (mm)	5,000
Weight (kN/mm <sup>2</sup> )	1.0
Elastic modulus (GPa)	210
Poisson's ratio	0.3
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	78.5

이론식에 의한 좌굴강도와 수치해석으로 구한 좌굴강도 (Fig. 2)를 Table 2에 비교하였다. 강관 두께가 4mm로 얇아 격자(Mesh)가 균질 되게 형성되지 않았다는 점을 고려한다면, 수치해석을 통해 좌굴강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있다고 판단된다. 따라서, 개발된 수치해석 모델을 통해 매개변수해석을 수행하여 형상에 따른 좌굴강도의 변화양상을 분석하였다.

강관의 확관률(확관 직경) 및 확관 턱 개수에 따른 좌굴강도의 변화를 검토하기 위하여 직경 300mm에서 1.1배, 1.2배, 1.3배, 1.4배, 1.5배 확관 및 확관된 턱 개수 1, 2, 3, 4, 5개로 총 25건의 매개변수 해석을 수행하였으며, 대표적으로 확관된 턱 5개일 때의 확관률에 따른 강관말뚝의 형상은 Fig. 4와 같다.

강관말뚝의 확관률 및 확관 턱 개수 증가에 따른 좌굴강도는 강관 확관률이 클수록, 확관된 턱 개수가 많을수록 증가하였다. Fig. 5는 1.3배 확관 시 턱 개수에 따른 강관말뚝의 좌굴형상을 보여주며, 확관된 턱 개수의 증가함에 따라 좌굴강도가 증가하는 경향을 나타냈다.

총 25건의 매개변수 해석결과를 이용하여 강관의 확관률 및 확관 턱 개수에 따른 좌굴강도의 변화를 분석했으며, 이를 종합하여 Fig. 6에 비교하였다.

Fig. 6은 전반적으로 강관의 확관률(확장 직경)이 클수록 확관 턱 개수가 많을수록 좌굴강도가 커지나, 확관률 보다

Table 2. Comparison of steel pipe pile buckling strength results

Classification	Steel pipe pile
Theoretical buckling strength (N)	137,128.45
Numerical analysis Buckling strength (N)	156,662.9
Error (%)	14.25

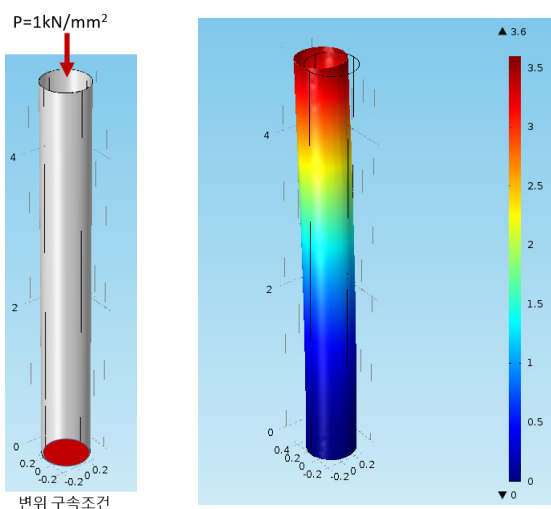


Fig. 3. Load and displacement conditions, and numerical analysis results

확관 턱 개수가 좌굴강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며, 확관률이 원 직경 대비 1.2배 이상일 때, 확관 턱 개수는 증가할수록 좌굴강도 증가 효과가 크게 발생함을 알 수 있다.

### 3.2 확장형 말뚝의 예비 수치해석 모델 개발

확장형 말뚝의 예비 수치해석 모델개발은 유한요소해석을 통해 수행하였으며, 유한요소해석프로그램은 상용프로그램인 MIDAS GTS NX를 사용하였다. 예비 수치해석모델은 지반속에 확장 강관말뚝이 매립된 형태에서의 하중재하를 통해 하중에 따른 변위검토를 수행하였다. 하중은 각 모델에 따라 동일한 하중으로 작용시키는 형태로서 동일하중에서 지반, 확장폭, 확장각도의 변화에 따른 거동 분석을 목

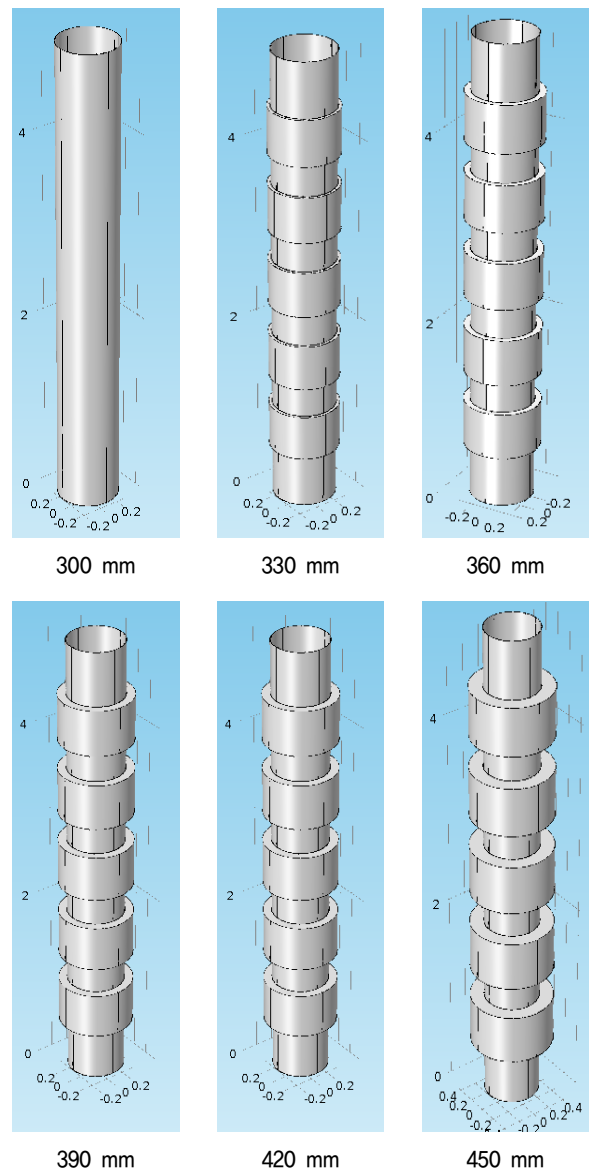


Fig. 4. Steel pipe pile shape (5 jaws) by expanded piping (Extended diameter)

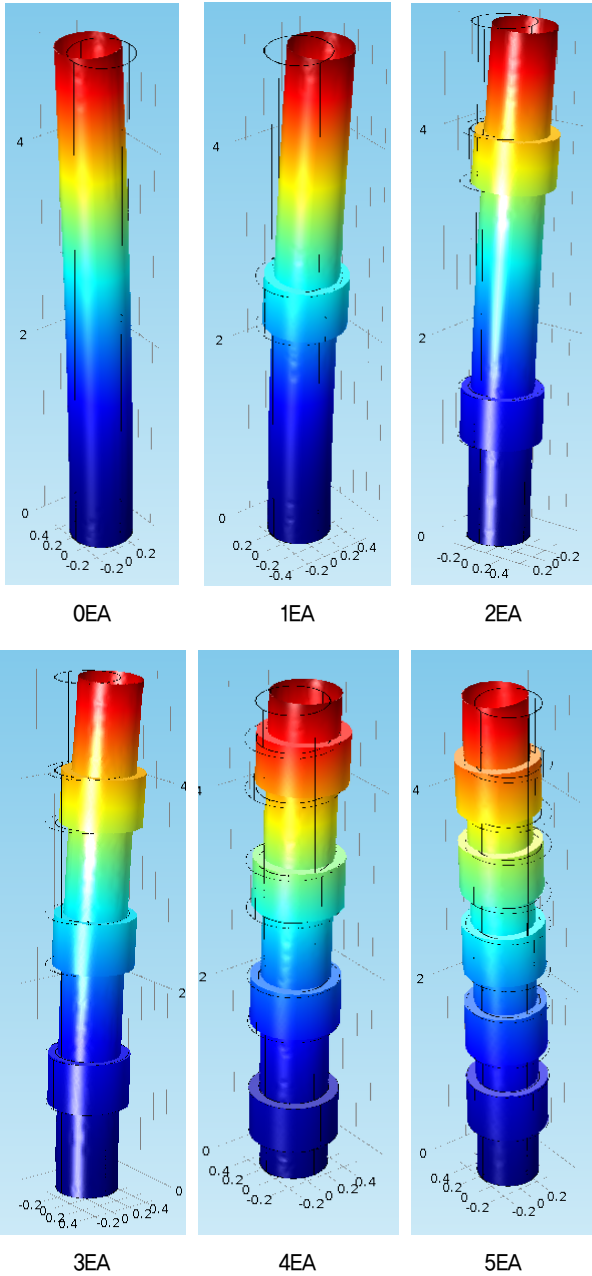


Fig. 5. Buckling shape of steel pipe pile according to the number of jaws

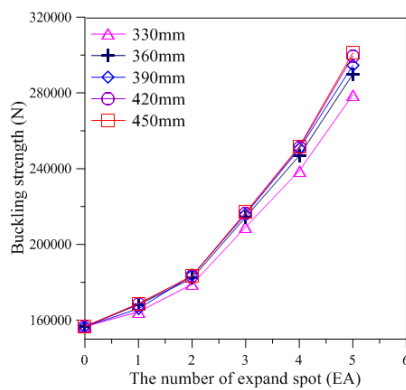


Fig. 6. Expanded piping and flare changes in buckling strength according to the number of jaws

Table 3. Expansion steel pipe pile numerical analysis shape specifications

Classification	Steel pipe pile	Ground
Outer diameter (mm)	300	6000
Thickness (mm)	4.0	-
Height (mm)	1200	12000
Weight (kN/mm)	1.0	-

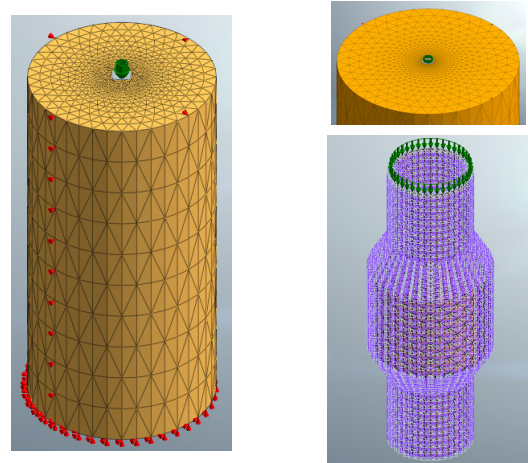


Fig. 7. Schematic diagram of preliminary numerical analysis model of extended steel pipe pile

적으로 하였다. 지반형상은 강관직경의 20배, 높이의 10배를 확장하여 형성하였고 지반요소의 X, Y방향 변위제어를 통한 지반경계조건을 Table 3과 같이 설정하였으며, Fig. 7과 같이 모델링 하였다. 또한, 인터페이스 요소의 적용을 통해 강관말뚝과 지반의 거동을 모사하였다. 인터페이스 요소에는 수직강성계수( $K_n$ )와 전단강성계수( $K_t$ )의 값의 설정을 통해 영향을 모사하고, 형성 시의 활용한 계산식은 아래와 같다.

$$K_n = E_{oed,i}/t_v$$

$$K_t = G_i/t_v$$

$$G_i = R \times G_{soil}$$

$$E_{oed,i} = 2 \times G_i \times (1 - v_i)/(1 - 2v_i)$$

$$G_{soil} = E/2(1 + v_{soil}) \quad (6)$$

$t_v = 0.01 \sim 0.1$ (지반과 구조부재의 강성차이가 클수록 작은값을 입력),

$R = 0.6 \sim 0.7$ (사질토/강재) /  $0.5$ (점토/강재),  $v_i = 0.45$ ,

$v_{soil}$  = 지반의 포아송비

$K_n$  = 수직강성계수,  $K_t$  = 전단강성계수

수치해석모델은 확장형 강관말뚝의 적용지반에 따른 거동 분석을 위해 각각 점성토, 사질토의 두 지반과 최적 형상을 찾기 위한 목적으로 확장 폭의 변화에 따른 변화양상 파악을 위해 확장 폭과 확장되는 요철부의 확장 각도에 따른 영향이 클 것으로 판단되어 확장부의 확장 각도를 매개변수로 하여 개발하였다. 확장 폭의 경우 확장 각도에 따른 영향이 크다고 판단되어 확장 각도가 45°, 60°의 두 경우에서의 해석을 수행하였다. 개발된 예비수치해석모델은 총 28건(확장폭 24건(사질토/점성토(각 6건), 45°/60°(각 6건)), 확장각도 4건)으로 적용 물성치는 Table 4, 상세 형상은 Fig. 8~9 과 같다.

### 3.3 강관 확장으로 인한 요철부의 턱효과 규명

요철부의 턱효과는 확장형 강관말뚝의 지지력을 상승시키기 위한 주요 지지력 상승 메커니즘으로 개발된 예비수치해석모델을 통한 턱효과의 규명은 확장형 강관말뚝의 연구를 위한 필수 불가결한 요소이다. 턱효과는 수치해석모델의 강관말뚝요소 상부에 하중재하를 통한 변위양상의 변화를

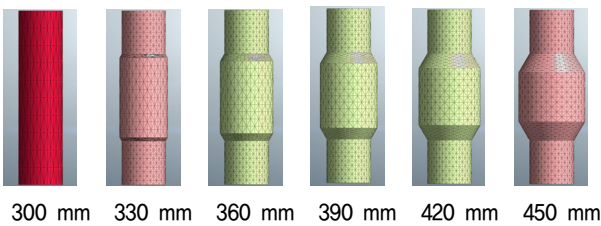


Fig. 8. Shape of steel pipe pile according to expansion width

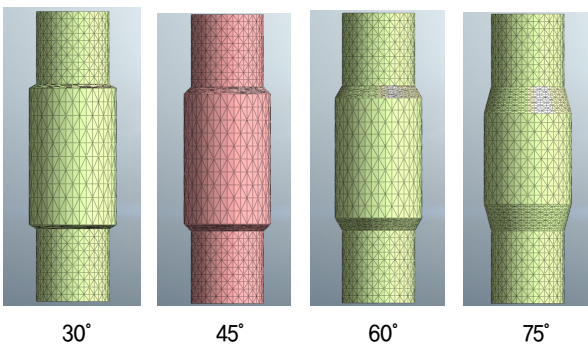


Fig. 9. Shape of steel pipe pile according to expansion angle

Table 4. Expansion steel pipe pile numerical analysis physical property table

Classification	Pile	Sandy soil	Clay soil
Elastic modulus (MPa)	210,000	25	5
Poisson's ratio	0.30	0.30	0.35
Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	78.5	17.0	17.0
Cohesion (KPa)	-	15	20
Friction angle (°)	-	25	20

통해 규명하였다.

확장형 강관말뚝의 두부, 선단부의 z방향 변위는 확장각도가 45°에서 60°로 변할 때 변위의 상승 폭이 다른 각도에 서와 달리 큰 폭으로 증가하는 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 본 수치해석의 결과를 통해 확장 폭에 대한 매개변수 해석은 확장 각도가 45°인 경우와 60°인 경우로 구분하여 수행하였다.

확장 각도가 60°인 경우의 확장 폭에 따른 강관말뚝의 두부, 선단부의 z방향 변위는 확장폭이 늘어날수록 요철부의 턱효과에 의하여 변위가 감소하는 변위양상을 나타냈다. Fig. 11과 같이 점성토지반과 사질토지반에서 동일하게 강관말뚝의 거동은 확장폭이 강관말뚝 폭의 1.3배인 390mm 이상에서 변위가 급격히 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 10의 확장 각도에 의한 변위 결과를 보면 45°에서 60°로 변할 때 변위가 급격히 증가하므로 최적 확장 각은 45°로 판단된다. 이 결과에 따라 추가적인 수치해석을 수행했으며 결과는 Fig. 12와 같다.

확장 각도가 45°인 경우의 확장 폭에 따른 강관말뚝의 두부, 선단부의 z방향 변위는 확장폭이 늘어날수록 요철부의 턱효과에 의하여 변위가 감소하는 변위양상을 나타냈다. 점성토지반에서 강관말뚝의 거동은 확장 폭이 강관말뚝 폭의

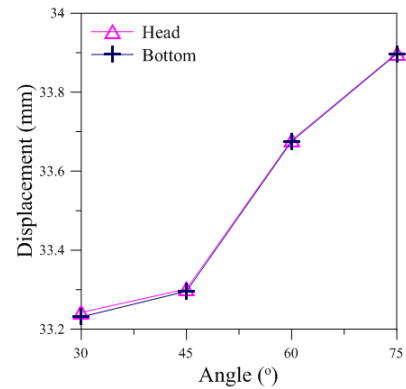


Fig. 10. Displacement of steel pipe pile head and tip according to expansion angle (Expansion width 360 mm, sandy soil)

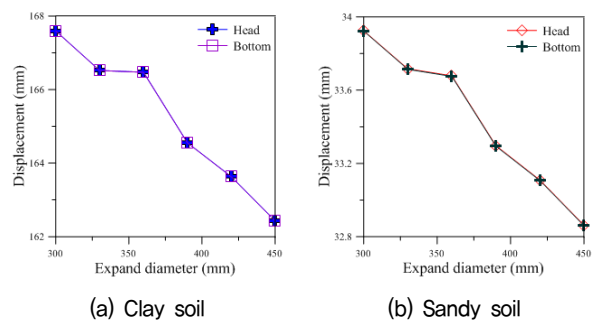


Fig. 11. Displacement of steel pipe pile head and tip according to expansion width (Expansion angle 60°)

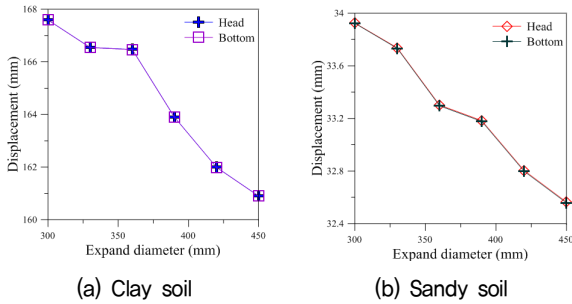


Fig. 12. Displacement of steel pipe pile head and tip according to expansion width (Expansion angle 45°)

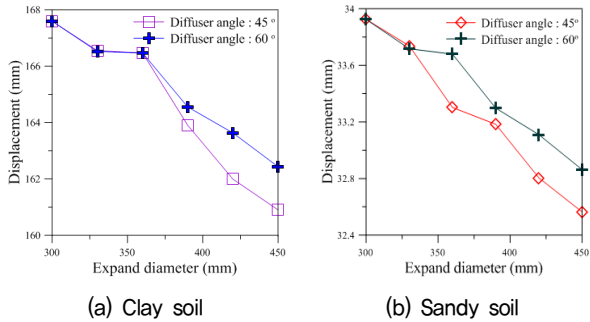


Fig. 13. Displacement of steel pipe pile head and tip according to expansion width and angle

1.3배인 390mm 이상에서 변위가 급격히 감소하는 경향이 나타났고 사질토 지반의 경우 강관말뚝 폭의 1.2배인 360mm 이상에서 변위가 급격히 감소하는 경향을 보였다.

본 절에서의 수치해석 결과는 Fig. 13과 같다. 결과적으로 수치해석의 결과에 따르면 확장 각도가 45° 이하이고, 확장 폭이 강관 폭의 1.3배 이상일 때 요철부의 턱효과가 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

### 3.4 재료시험을 통한 강관 확장량 산정

강관 확장에 따른 강관의 단면적의 변화로 강관자체의 강도가 저하될 가능성이 있으므로 확장된 강관이 강도를 유지할 수 있는 확장량을 판단하기 위해 강관확관 시험을 실시하였다. 강관에 임의의 하중을 재하하여 강관의 파단 시 항복강도를 확인하여, 최대 변형량을 산정하기 위해 다음 시험을 시행하였다. KTR한국화학융합시험연구원에 시험을 의뢰하였고, 재질은 구조용 흑관 파이프(KS D 3566)를 적용하였다. 시험장비는 SHIMADZU UH-F1000kNX이고, 시험속도는 3mm/min로 제어하였으며, 하중재하 원추형 심봉(45°)을 이용하였다. 시험체 강관의 제원은 Table 5와 같다.

Fig. 14는 시험 중 시험체의 변형 과정을 표현하였고, 5가지 시험체의 항복강도 시험 결과(KTR한국화학융합시험연구원, 2019) 63.8~82.1kN의 결과(Table 6)가 확인되었으나, CASE-1을 제외한 항복하중의 경향은 직경이 커질수록 항

Table 5. Diameter, thickness and length of test piece steel pipe-Continued

Classification	Outer diameter $\Phi$ (mm)	Thickness (mm)
CASE-1	42.1	1.8
CASE-2	48.1	1.8
CASE-3	48.6	2.9
CASE-4	50.8	1.8
CASE-5	60.0	1.8

Table 5. Diameter, thickness and length of test piece steel pipe

Classification	Length (mm)	Remarks
CASE-1	100	
CASE-2		
CASE-3		
CASE-4		
CASE-5		

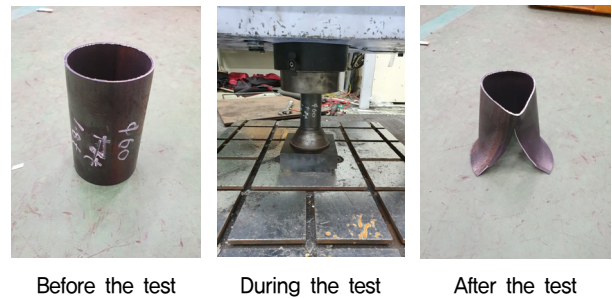


Fig. 14. Photographs before, during, and after the test piece

Table 6. Outline of yield strength of test piece steel pipe-Continued

Classification	Outer diameter $\Phi$ (mm)	Thickness (mm)	Yield load (kN)
CASE-1	42.1	1.8	82.1
CASE-2	48.1	1.8	114.7
CASE-3	48.6	2.9	121.5
CASE-4	50.8	1.8	109.4
CASE-5	60.0	1.8	63.8

Table 6. Outline of yield strength of test piece steel pipe

Classification	Elongation at yield (%)	Remarks
CASE-1	25	
CASE-2	27	
CASE-3	23	
CASE-4	32	
CASE-5	20	

복 강도가 감소하는 경향을 보였다. 단, CASE-2와 CASE-3의 경우 직경이 커졌으나 항복강도가 증가하는 이유는 두께의 영향으로 판단된다.

Fig. 15에서 강관이 파단되는 항복 시 연신율은 20~32%

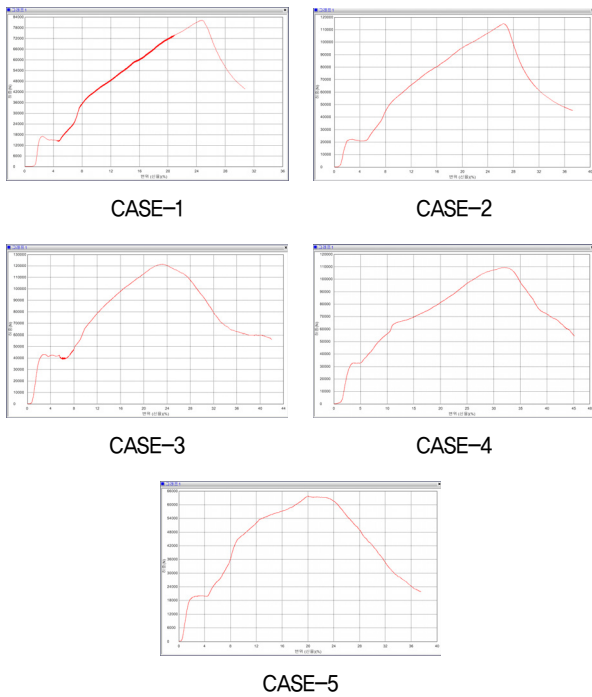


Fig. 15. Yield strength of test piece steel pipe

로 평균 25.4% 수준으로 확인되어 그 이상 변형에서는 강관의 성능을 발휘할 수 없었다. 강관의 성능을 발휘하기 위한 최대 확장량은 본시험의 항복 시 최저값으로 확인된 연신율 20%에 안전율을 고려하여 최저값의 80%인 연신율 16%로 최대 확장량을 결정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

기존의 뜬구조공법의 문제점을 개선하여 지하층 리모델링, 증축 시 안정성확보와 공사비 절감이 가능한 공법을 개발하기 위하여 기존 마이크로파일에 비해 경제적이고 안정성 높은 확장형 강관말뚝을 개발하였다. 본 논문에서는 확장형 강관말뚝의 강관 형상에 따른 좌굴강도의 변화를 파악하고, 수치해석 모델을 개발하여 강관확장으로 인한 요철부의 턱효과를 규명하고, 재료시험을 통하여 최적 강관 확장량을 산정하였다.

(1) 강관형상에 따른 좌굴강도의 변화를 확인하기 위하여 강관의 직경을 1.1~1.5배(5CASE), 확장된 턱 개수 1~5개(5CASE) 총 25건의 매개변수 해석을 수행하여 분석한 결과 강관의 확장 직경이 클수록 확장 턱 개수가 많을수록, 좌굴강도가 커짐을 알 수 있으나, 결과적으로 수치해석 결과에 따르면 확장률보다 확장 턱 개수가 좌

굴강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며, 확장률은 1.2 배 이상일 때, 확장 턱 개수는 증가할수록 좌굴강도 증가 효과가 크게 발생함을 알 수 있다.

- (2) 최적 형상을 찾기 위한 목적으로 확장 폭의 변화에 따른 변화양상 파악을 위해 확장 폭과 확장되는 요철부의 확장 각도에 따른 영향이 클 것으로 판단되어 확장부의 확장 각도(45°, 60°)를 매개변수로 분석하였다. 확장형 말뚝의 예비 수치해석 결과, 확장 폭에 따라 강관말뚝의 두부, 선단부의 z방향 변위는 확장폭이 늘어날수록 요철부의 턱효과에 의하여 변위가 감소하는 변위양상을 나타냈다. 점성토지반과 사질토지반에서 동일하게 강관말뚝의 거동은 확장폭이 강관말뚝 폭의 1.3배인 390mm 이상에서 변위가 급격히 감소하는 경향이 나타났다.
- (3) 확장 각도에 의한 변위 결과를 토대로 변위가 급격히 감소하는 최적 확장 각은 45°로 판단하여 추가적인 수치해석의 결과 확장 폭에 따른 강관말뚝의 두부, 선단부의 z방향 변위는 확장폭이 늘어날수록 요철부의 턱효과에 의하여 변위가 감소하는 변위양상을 나타냈다. 점성토지반에서 강관말뚝의 거동은 확장 폭이 강관말뚝 폭의 1.3배인 390mm 이상에서 변위가 급격히 감소하는 경향이 나타났고 사질토 지반의 경우 강관말뚝 폭의 1.2배인 360mm 이상에서 변위가 급격히 감소하는 경향을 보였다.
- (4) 재료시험을 통한 강관의 최적 확장량을 산정하기 위한 목적으로 강관에 임의의 하중을 재하하여 강관의 파단시 항복강도를 확인한 결과 항복하중의 경향은 직경이 커질수록 항복 강도가 감소하는 경향을 보였다. 강관이 파단되는 항복 시 연신율은 20~32%로 평균 25.4% 수준으로 확인되어 그 이상 변형에서는 강관의 성능을 발휘할 수 없었다. 강관의 성능을 발휘하기 위한 최대 확장량은 본시험의 항복 시 최저값으로 확인된 연신율 20%에 안전율으로 고려하여 최저값의 80%인 연신율 16%로 최대 확장량을 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구에서는 확장형 강관은 일정 간격의 확장을 통해 좌굴강도를 확보할 수 있음을 확인하였으며, 강관 확장시 최적의 확장폭(1.2배)과 확장각도(45°)를 결정할 수 있었다. 또한 재료의 확장시험을 통해 강관의 성능을 확보할 수 있는 최대확관량(16%)를 결정하였다.
- (6) 향후 상기 연구결과를 “소구경말뚝을 활용한 뜬구조공법”의 확장장비를 개발에 기초자료로 활용할 계획이다.



## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업(노후 구조물의 운영 중 지하공간 확장 시 경제성 10% 향상을 위한 확장형 강관파일의 적용된 뜬구조 역타공법의 설계 및 시공법 개발, 21CTAP-C152159-03)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

1. 박춘배(2012), 기존 구조물 하부공간 확장을 위한 뜬구조공법 (USEM) 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교, pp. 4~5, pp. 22~26.
2. 삼호엔지니어링㈜(2019), 강관 압축시험 결과 성적서, KTR한

국화학융합시험연구원.

3. 이종원(2014), 헬리컬 파일의 형상과 지지력에 관한 연구, 석사학위논문, 고려대학교, pp. 1.
4. 정찬우 외 2인(2006), 마디말뚝의 연직지지력 산정에 대한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, pp. 129~132.
5. Jang Young-Eun and Han Jin-Tae (2018), Field study on the axial bearing capacity and load transfer characteristic of waveform micropile, National Research Council of Canada, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 55, No. 5, pp. 653~665.
6. Livneh, B. and Naggar, M. H. (2008), Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, Issue 8, pp. 1142~1155.
7. 小椋仁志, 山肩邦男, 大杉富美一 (昭和63), 実大杭の押し込み実験による節杭の支持力特性の検討、日本建築学会構造系論文報告集、第386号、日本、pp. 66~77.