

# 헬리컬 파일 설계식 고도화 연구\*

## Advancement in Design Criteria of Helical Pile

박종배\*\* · 박용부\*\*\* · 권영환\*\*\*\*

Jong-Bae Park\*\* · Yong-Boo Park\*\*\* · Young-Hwan Kwon\*\*\*\*

### Abstract

Korea has begun to use the Helical pile prevalent in Europe. Korea hasn't still set up the standard design criteria on Helical pile due to the lack of relevant researches. In this regard, this study carried out static and dynamic load tests on Helical pile and then performed reliability analysis including the previous research data. The results present that Road bridge design standard design criteria for pre-boring pile with regard to Modified Davison method showed good reliability and consistency because Resistance bias factor of this design criteria approached '1.0' and Design C.O.V. showed 'low' level.

**Keywords :** Helical Pile, Design Criteria, Resistance Bias Factor, C.O.V.

### 1. 서론

최근 국내는 대규모 택지개발에 의한 아파트 건설 뿐 아니라, 도시재생사업 및 공공리모델링 임대주택 등 소단위 공동주택 사업도 빠르게 증가하고 있는 추세이다.

도심지에서의 소규모 건축물 시공은 여러 가지 제약이 많은데, 가장 큰 문제는 협소부지에 시공하기 때문에 대형 장비에 의한 국내에서 많이 시공하는 일반 말뚝공법을 시공하기 어렵다는 것이다. 종종 국내에서 오피스텔 등 소형 주택의 침하 문제는 정확한 지반 조사 없이 최소한의 기초만을 설계/시공하여 발생하는 것으로 불리한 시공여건 속에서 경제

성 위주로 접근하면 이러한 문제가 앞으로도 발생할 가능성이 있다.

도심지 및 협소부지에서는 소단위 건축물 공사를 위해 접근성이 용이한 소형 장비에 의한 기초 시공이 가능하고 소음, 진동을 저감할 수 있는 기초 시공법이 필요하다.

유럽에서는 협소부지에서의 소규모 건축물에 적용하는 다양한 기초공법을 개발하여 활용하고 있으며, 국내에서도 유럽에서 많이 사용하는 헬리컬 파일을 광범위하게 사용하고 있으나, 설계기준을 만들려고 하는 노력이 부족하여 표준설계식도 마련되어 있지 않은 실정이다.

유럽에서 사용하고 있는 설계식들은(Perko, 2009)

\*본 논문은 LH토지주택연구원에서 수행한 「고강도 강관 회전압입 파일의 설계 및 시공 표준화 연구」(2021) 결과의 일부를 정리한 것이다.

\*\*한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원(주저자, 교신저자: jbpark@lh.or.kr)

\*\*\*한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원(parkyb@lh.or.kr)

\*\*\*\*한국토지주택공사 토지주택연구원 주임연구원(kyh@lh.or.kr)

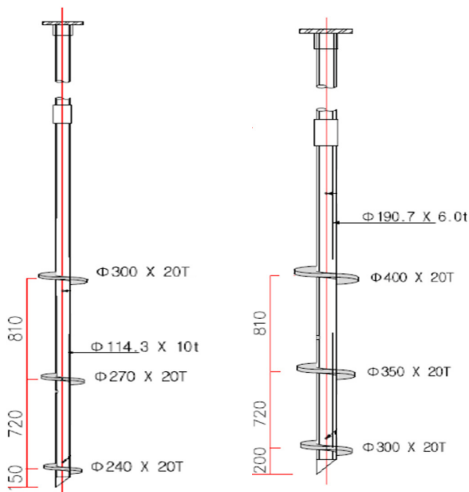
국내에 지반조건과 시공방법이 달라서 그대로 사용하기 어려운 것으로 파악되었다. 즉 유럽은 점성토 계열의 지반이 우세하고 헬리컬 시공 시 그라우팅을 하지 않는 경우도 많은데, 국내는 사질계열의 지반이 우세하여 그라우팅을 하지 않으면 소정의 지지력을 얻기 어려운 조건이다.

박종배 등(2019), 박종배·박용부(2020)는 헬리컬 파일에 대한 현장 재하시험 결과를 토대로 국내에서 사용하기 용이한 설계식을 제안하였으나, 실험자료가 많지 않아 만족할 만한 신뢰성을 얻기 어렵다고 판단되었다. 이에 본 연구에서는 헬리컬 파일의 추가 시공과 재하시험을 수행한 데이터(박종배 외, 2021)와 선행 연구(박종배 외, 2019, 2020)의 데이터에 대한 신뢰도 분석을 통하여 설계식을 고도화시키고자 하였다.

## 2. 이론 고찰

### 2.1 헬리컬 파일 개요 및 지지메커니즘

헬리컬 파일은 나선형 회전운동을 통하여 지반에 관입시키면서 시공되며 말뚝(Shaft)의 주면 마찰저



(a) shaft dia. (114.3mm) (b) shaft dia. (190.7mm)

Fig. 1. Helical Pile Specification

항과 나선형 지지날개(Helix)에서 선단지지력으로 압축에 강한 지지력을 발휘하며 본 연구에서 검토한 말뚝 제원은 Fig. 1과 같다.

### 2.2 헬리컬 파일 연직 설계지지력 산정 방법

정역학적 방법 중 파일의 S/D Ratio에 따라 개별선단지지 식(Individual Method)과 원통형 식(Cylindrical Method)으로 구분하며 S(Helix 간격)/D(Helix 직경) Ratio가 2이하이면 Cylindrical Method, 4 이상이면 Individual Method로 적용하고 있다 (Fig. 2)(Narasimha Rao et al., 1991).

#### 2.2.1 정역학적 방법

정역학적 방법으로는 개별선단지지 식(Individual Method)과 원통형 식(Cylindrical Method)이 있으며(Perko, 2009), 본 연구에서는 2가지 방법을 모두 검토하였다.

#### 1) 개별선단지지 식(Individual Method)(Perko, 2009)

개별선단지지 식(Individual Method)은 각각의 나선형 지지날개(Helix)의 선단지지력과 말뚝(Shaft)의 주면마찰력의 합으로 구해지며 산정 방법은 식 (1)과 같다(Perko, 2009).

$$P_u = \sum_n q_{ult} A_n + \alpha H(\pi d) \quad (1)$$

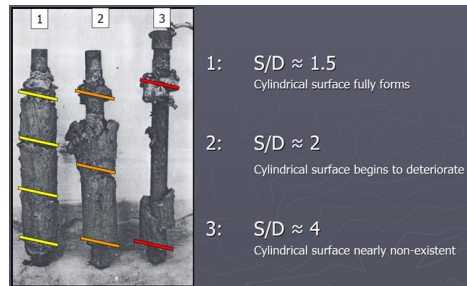


Fig. 2. Calculation Method of Bearing Capacity of Helical Pile (Narasimha Rao et al., 1991)

여기서  $P_u$ 는 헬리컬 파일의 극한지지력,  $q_{ult}$ 는 나선형 지지날개(Helix)의 극한지지력,  $A_n$ 은  $n$ 번째 Helix의 면적,  $\alpha$ 는 흙과 말뚝(Shaft) 사이의 부착력,  $H$ 는 지표면에서 최상단 Helix까지의 Shaft길이,  $d$ 는 말뚝(Shaft) 직경을 의미한다.

나선형 지지날개(Helix)의 개별 극한지지력은 다음 식 (2)와 같다(Perko, 2009).

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + q' N_q s_q d_q + 0.5\gamma B N_r s_r d_r \quad (2)$$

여기서  $C$ 는 점착력,  $q'$ 는 지지력 계산 위치에서의 유효응력,  $\gamma$ 는 지반의 단위 중량,  $B$ 는 Helix 직경,  $N_c, N_q, N_r$ 는 지지력계수,  $s_c, s_q, s_r$ 는 형상계수들의 미한다.

위 식에 사용된 지지력계수(식 (3)), 형상계수(식 (4)), 깊이계수(식 (5))는 다음 식과 같다(지지력계수는 Meyerhof(1951)의 수정지지력 계수)(Perko, 2009).

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi, \quad N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right),$$

$$N_r = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad (3)$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}, \quad s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi,$$

$$s_r = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad (4)$$

$$d_c = 1 + 0.4K, \quad d_q = 1 + 2K \tan \phi (1 - \sin \phi)^2,$$

$$d_r = 1, \quad K = \arctan \left( \frac{H}{B} \right) \quad (5)$$

Helix는 원형이므로 기초의 폭(B)과 길이(L)는 직경(D)과 동일하여 B/L=1이며 Helix의 설치 깊이 H는 Helix의 직경 D에 비하여 매우 큰 값으로 H/B값이 커지게 되어 결론적으로 K값은  $\pi/2$ 에 가까운 값이 된다.

지지력계수, 형상계수, 깊이계수를  $N'_c = N_c s_c d_c$ ,  $N'_q = N_q s_q d_q$ ,  $N'_r = N_r s_r d_r$ 로 그룹화하고, 헬리컬 파일의 자중과 Helix 상부 토사의 자중을 고려하여 식 (2)를 정리하면 다음 식 (6)과 같다(Perko, 2009).

$$q_{ult} = cN'_c + q'(N'_q - 1) + 0.5\gamma D N'_r \quad (6)$$

2) 원통형 식(Cylindrical Method)(Perko, 2009)

원통형 식(Cylindrical Method)은 선단부 나선형 지지날개(Helix)의 선단지지력과 원통형(Cylinder) 토체에 작용하는 전단력의 합과 말뚝(Shaft)에서의 주면마찰력의 합으로 구해지며 산정 방법은 다음 식 (7)과 같다(Perko, 2009).

$$P_u = q_{ult} A_1 + T(n-1)s\pi D_{AVG} + \alpha H(\pi d) \quad (7)$$

여기서  $A_1$ 는 최하부 Helix의 단면적,  $T$ 는 흙(원통형 지반)의 전단강도,  $D_{AVG}$ 는 원통형 토체의 평균 직경,  $(n-1)s$ 는 Helix 사이에 형성된 원통형 지반의 높이를 의미한다. 즉,  $n$ 는 헬리컬 날개갯수를,  $s$ 는 날개사이의 간격을 의미한다.

지반이 교란되지 않았을 경우, 수평방향 유효응력은 다음 식 (8)과 같다(Perko, 2009).

$$\sigma'_n = K_0 P'_0 \quad (8)$$

여기서  $K_0$ 은 정지상태에서의 수평방향 토압계수,  $P'_0$ 은 깊이  $z$ 에서 유효상재응력을 의미한다.

파일 시공시 주변 지반이 수평방향으로 압축되므로, 정지토압계수 대신 수평방향 토압계수를 적용한다(식 (9))(Perko, 2009).

$$K_h = 0.09e^{0.08\phi} \quad (9)$$

### 2.2.2 매입말뚝 도로교설계기준 식(한국지반공학회, 2015)

국내에는 헬리컬 파일에 대한 설계 식이 없으므로 도로교설계기준에서 제안한 매입말뚝 설계 식(한국지반공학회, 2015)의 극한선단지지력과 극한주면지지력 산정식을 사용하였다(Table 1).

**Table 1.** Calculation Method of Bearing Capacity for Bored Piles and Cast-in-place Concrete Piles (Korean Geotechnical Society, 2015)

Type	Ultimate end bearing capacity per unit area $q_B(kN/m^2)$	Ultimate skin bearing capacity per unit area $f_S(kN/m^2)$
Bored pile	$200N(\leq 12,000)$ (Sandy soil)	$2.5N(N \leq 50)$ (Sandy soil)

### 2.3 헬리컬 파일 재하시험에 의한 품질 관리

헬리컬 파일 시공 현장은 중, 소규모이거나 적은 예산으로 시공이 이루어지기 때문에 품질확인시험으로서 정재하시험보다 동재하시험을 선호하는 경향이 있으나, 헬리컬 파일에 대한 합리적인 재하시험 방법 및 현장 규모, 중요성에 대한 고려와 시험 횟수에 대한 검토 및 지침이 필요하다(박종배 외, 2018).

정재하시험은 신뢰도가 높은 시험이지만, 정재하시험을 하기 위해서는 반력말뚝이 적절한 위치에 시공되어야 하므로 중, 소규모 도시재생 사업이나 중, 소형 건축물에서는 협소한 부지 탓에 반력말뚝 설치가 어렵다는 문제가 있다(박종배 외, 2018).

동재하시험 시에는 낙하추가 충분히 커야 좋으며(타격에너지에 영향), 시멘트풀을 주입하여 충분한 양생 기간을 가진 이후에 시험할 것을 권장하고 있다(박종배 외, 2018).

#### 2.3.1 정재하시험-수정 Davisson 판정법

말뚝 주변에서의 부차력은 매우 작은 변위(일반적으로 5mm 이하)에도 발현된다고 하였다. 그리고 굵

은 입자의 지반에서는 말뚝 직경에 20%, 가는 입자의 지반에서는 말뚝직경 10%의 큰 변위가 발생하여도, 선단지지력이 완전히 발현되지 않는다고 주장하였다(Perko, 2009).

헬리컬 파일은 주면이 가늘고, 선단 지지부가 큰 독특한 형태를 갖고 있기 때문에, 일반적인 헬리컬 파일(비그라우팅)은 선단지지 말뚝에 가깝게 거동한다. 그러므로, 헬리컬 파일의 지지력 해석방법은 선단지지력을 완전히 발현할 수 있는 방법을 사용하여야 한다. 그렇지 않으면, 헬리컬 파일의 지지력을 과소평가할 수 있다(Perko, 2009).

유럽의 헬리컬 파일 실무자들은 헬리컬 파일의 지지력을 판정하는 방법으로 수정 Davisson 방법을 많이 사용하고 있다(Perko, 2009). 이 방법은 헬리컬 파일의 극한지지력은 말뚝 지지날개 평균직경의 10%에 해당하는 순침하(말뚝재료의 탄성변형 배제)를 유발하는 하중으로 규정하였다(ICC-Evaluation Services, Inc, 2007). 순침하는 말뚝머리의 전침하에서 말뚝재료의 길이방향 탄성변형을 뺀 값이다.

말뚝의 길이방향 탄성변형량은 잘 알려진 다음 식 (10)으로 계산할 수 있다(Perko, 2009).

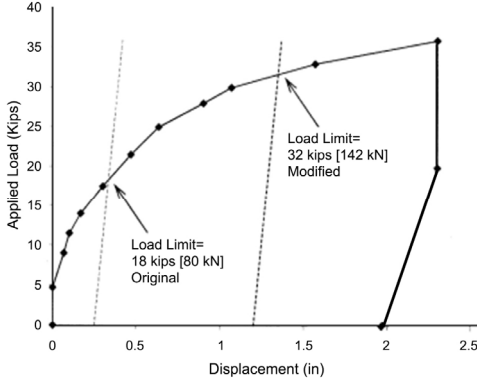
$$\delta = \frac{Pz}{A_g E} \tag{10}$$

여기서  $\delta$ 는 탄성변형량, P는 하중, z는 말뚝심도,  $A_g$ 는 헬리컬 파일의 축단면적, E는 말뚝 축 강재의 탄성 계수를 의미한다.

기존 Davisson 방법은 탄성변형량( $\delta$ )에 오프셋 변위량(0.15inch+D/120)을 더한 것이고, 유럽에서 헬리컬 파일에 많이 사용하는 수정 Davisson 방법은 탄성변형량( $\delta$ )에 헬리컬 날개 평균직경의 10%를 오프셋 변위량으로 더한 것이다.

Fig. 3에서 첫 번째 점선은 기존 Davisson offset line이고, 두 번째 점선이 헬리컬 파일 날개 평균직경

의 10% 만큼 이동한 offset line으로 두 번째 점선이 하중-침하곡선과 교차할때의 하중이 수정 Davisson 방법의 지지력이다(Perko, 2009).



Note: 1 kip = 4.45 kN, 1 in = 25.4 mm

Fig. 3. Modified Davisson Method (Perko, 2009)

지지날개가 큰 헬리컬 파일에 수정 Davisson 방법을 적용할 경우에는 지지력이 과대하게 평가될 수 있다. 이러한 경우에는 설계하중 하에서 허용침하량을 제한하는 방법을 병행 사용할 수 있을 것이다.

### 3. 역학 성능 검증

#### 3.1 헬리컬 파일 연직 설계지지력 산정

헬리컬 파일 연직 설계지지력 산정을 위해 정역학적 방법과 매입말뚝 도로교설계기준 식을 사용하였다(Table 2, Table 3). 헬리컬 파일들은 매입말뚝과 비슷한 70%의 물/시멘트비로 그라우팅 하였다.

연직 설계지지력 산정 결과(안전율 3 적용) 개별 선단지지 방법을 적용했을 때 114.3mm 파일은

Table 2. Design Bearing Capacity for Helical Pile (Apply Individual Method)

Site	Shaft Diameter (mm)	Helix average Dia. (mm)	Length (m)	Individual method (Perko) (tonf)			Road bridge design standard (tonf)		
				Total	Skin	End	Total	Skin	End
Pilot research	114.3 (Pin)	270	11.9	118.2 (39.4)	15.3	102.9	161.2 (53.7)	27.8	133.4
	114.3 (Screw)	270	11.7	117.1 (39.0)	14.5	102.6	160.8 (53.6)	27.4	133.4
	190.7 (Screw)	350	11.5	197.2 (65.8)	25.6	171.6	263.4 (87.8)	41.5	221.9
Icheon	114.3 (Pin-1)	270	6.8	100.0 (33.3)	6.5	93.5	150.4 (50.1)	14.7	135.6
	114.3 (Pin-2)	270	6.6	99.6 (33.2)	6.2	93.4	128.1 (42.7)	12.2	115.9
Jamsil	190.7 (Pin)	350	15.0	200.4 (66.8)	20.0	180.4	323.8 (107.9)	56.5	267.3

Note 1: Depth of penetration was based on Static load test

Note 2: ( ) Values in parentheses applied factor of safety3

Table 3. Design Bearing Capacity for Helical Pile (Apply Cylindrical Method)

Site	Shaft Diameter (mm)	Helix average Dia. (mm)	Length (m)	Cylindrical method (Perko) (tonf)			Road bridge design standard (tonf)		
				Total	Skin	End	Total	Skin	End
Pilot research	114.3 (Pin)	270	11.9	62.9 (21.0)	22.8	40.1	72.4 (24.1)	27.2	45.2
	114.3 (Screw)	270	11.7	61.8 (20.6)	22.0	39.8	72.2 (24.0)	27.0	45.2
	190.7 (Screw)	350	11.5	98.4 (32.8)	35.7	62.7	109.9 (36.6)	39.2	70.7
Icheon	114.3 (Pin-1)	270	6.8	31.8 (10.6)	10.3	21.5	60.4 (20.1)	15.2	45.2
	114.3 (Pin-2)	270	6.6	31.5 (10.5)	10.0	21.5	58.3 (19.4)	13.1	45.2
Jamsil	190.7 (Pin)	350	15.0	81.7 (27.7)	28.9	52.8	133.8 (44.6)	63.1	70.7

Note 1: Depth of penetration was based on Static load test

Note 2: ( ) Values in parentheses applied factor of safety3

33.2~39.4tonf, 190.7mm 파일의 경우 65.8~66.8 tonf로 나타내었다. 원통형 방법을 적용했을 때는 114.3mm 파일은 10.5~21.0tonf, 190.7mm 파일의 경우 27.7~32.8tonf로 나타내었다.

일반적으로 선단부의 날개가 N치 50에 시공되고 중간부, 상단부의 날개는 N치 40이하에 안착되기 마련이나, 잠실 현장 특성상 지반 중간지점부터 전석층이 나와 소요 깊이까지 사전 천공을 실시한 후 헬리컬 파일을 관입시키다보니 날개 모두가 N치 50에 안착되어 설계지지력이 높게 산정되었다.

유럽에서는 연직 설계지지력에 대해 안전율 2를 적용하고 있다(Perko, 2009). 유럽에서 안전율 2를 사용해도 되는 것은 헬리컬 파일에 대한 많은 시공 경험으로 시공능력이 우수하며, 품질 관리가 철저하여 품질의 균질성이 좋기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 국내는 헬리컬 파일에 대한 시공경험이 풍부하지 않고 품질관리 기준이 확립되지 않은 점 때문에 본 연구에서는 안전율 3을 적용하였다.

### 3.2 정재하 및 동재하시험 결과

헬리컬 파일 설계식과 비교·분석을 위해 현장에서 정재하 및 동재하시험을 수행하였으며, 현장(이천, 잠실) 2곳에서 정재하시험 총 3회(헬리컬 파일 직경 114.3mm 2회, 190.7mm 1회), 동재하시험 총

2회(헬리컬 파일 직경 114.3mm 2회)를 실시하였다. 그리고 데이터의 신뢰성을 향상시키기 위하여 선행 연구의 데이터(정재하시험 3회, 동재하시험 3회)도 추가하였다.

#### 3.2.1 정재하시험 결과

헬리컬 및 마이크로 파일의 극한지지력 확인을 위해 최대 160.0tonf 재하 또는 파괴하중이 확인될 때까지 재하하였다. 헬리컬 파일은 파일축의 직경이 작아 말뚝 두부에 편심이나 좌굴이 발생할 수 있으므로 충분한 하중의 재하를 위해 말뚝 두부를 보강하였다.

지지력 판정 방법으로 침하량에 의한 판정법, Davisson 방법, 수정 Davisson 방법(Perko, 2009)을 선정하였으며 허용지지력은 Table 4와 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6과 같다.

정재하시험 결과(안전율 2 적용) 114.3mm 파일에서 25mm 침하기준은 38.0~42.7tonf(평균 39.9 tonf), Davisson 방법은 22.0~31.0tonf(평균 25.7 tonf), 수정 Davisson 방법은 51.0~56.5tonf(평균 54.3tonf)의 허용지지력을 나타내었다.

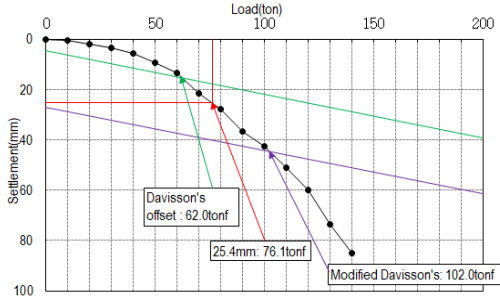
190.7mm 파일의 경우 25mm 침하기준에서 62.5~82.6tonf(평균 72.5tonf), Davisson에서 80.0~95.0 tonf(평균 87.5tonf), 수정 Davisson에서 80.0~

**Table 4.** Static Load Test Results

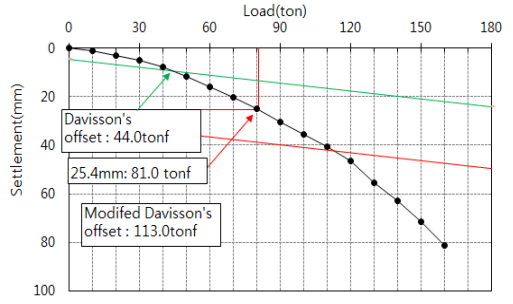
Site	Shaft Diameter (mm)	Helix average Dia. (mm)	Length (m)	Static load test (tonf)		
				25mm Settlement	Davisson	Modified Davisson
Pilot research	114.3 (Pin)	270	11.9	76.1 (38.0)	62.0 (31.0)	102.0 (51.0)
	114.3 (Screw)	270	11.7	77.2 (38.6)	50.0 (25.0)	110.0 (55.0)
	190.7 (Screw)	350	11.5	165.3 (82.6)	190.0 (95.0)	232.0 (116.0)
Icheon	114.3 (Pin-1)	270	6.8	81.0 (40.5)	44.0 (22.0)	113.0 (56.5)
	114.3 (Pin-2)	270	6.6	85.3 (42.7)	50.0 (25.0)	110.0 (55.0)
Jamsil	190.7 (Pin)	350	15.0	125.0 (62.5)	160.0 (80.0)	160.0 (80.0)

Note: ( ) Values in parentheses applied factor of safety 2

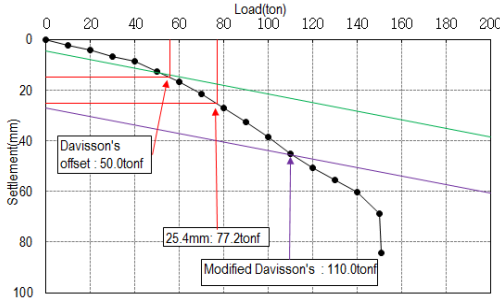




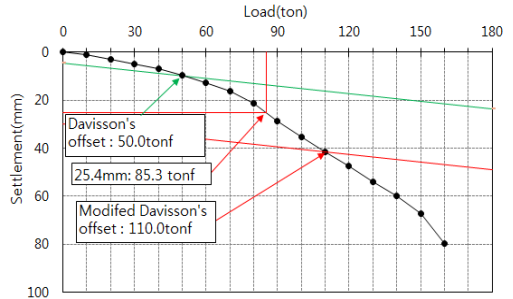
(a) D=114.3mm (Pin)



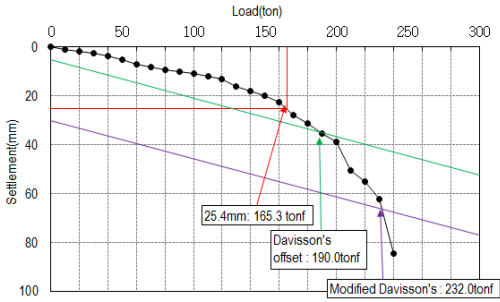
(a) D=114.3mm (Pin-1)



(b) D=114.3mm (Screw)



(b) D=114.3mm (Pin-2)



(c) D=190.7mm (Screw)

Fig. 4. Static Load Test Load Settlement Curve (Previous Research)

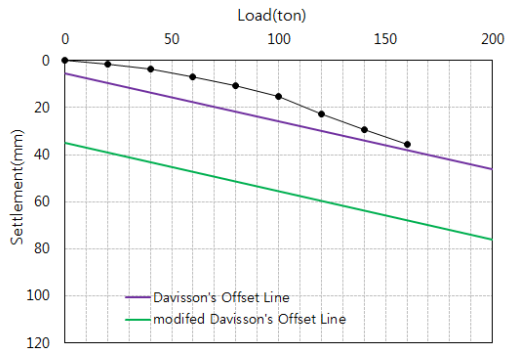
116.0tonf(평균 98.0tonf)로 나타났다.

25mm 침하기준과 기존 Davisson 방법 및 수정 Davsson 방법 중 수정 Davisson 방법으로 판정한 지지력이 가장 크게 나타났다.

### 3.2.2 동재하시험 결과

말뚝의 최종 지지력을 확인하기 위한 시험으로 재향타동재하시험(Restrike)을 실시하였다(Table 5).

Fig. 5. Static Load Test Load Settlement Curve (Icheon)



D=190.7mm (Pin)

Fig. 6. Static Load Test Load Settlement Curve (Jamsil)

지지력 판정 방법으로 CAPWAP과 Davisson, 수정 Davisson 방법을 선정하였으며, 헬리컬 파일에 대한 지지력 분석 시 제원에 맞춰 탄성계수를 적용하였다(PDA 장비에서 도출된 지지력을 모델링할 때의 D는 말뚝 축단면적의 직경 기준).

동재하시험 결과(안전율 적용) 114.3mm 파일에서

**Table 5.** Dynamic Load Test Results

Site	Shaft Diameter (mm)	Helix average Dia. (mm)	Length (m)	Dynamic load test (tonf)		
				CAPWAP	Davisson	Modified Davisson
Pilot research	114.3 (Pin)	270	11.7	106.1 (42.4)	74.0 (37.0)	111.2 (55.6)
	114.3 (Screw)	270	11.4	116.3 (46.5)	70.0 (35.0)	117.6 (58.8)
	190.7 (Screw)	350	11.7	192.0 (76.8)	190.0 (95.0)	192.6 (96.3)
Icheon	114.3 (Pin-1)	270	8.3	114.0 (45.6)	69.0 (34.5)	114.0 (57.0)
	114.3 (Pin-2)	270	6.9	114.0 (45.6)	51.0 (25.5)	114.0 (57.0)
Jamsil	190.7 (Pin)	350	15.0	-	-	-

Note: ( ) Values in parentheses allowable bearing capacity; Safety factor (CAPWAP = 2.5, Davisson & Modified davisson = 2) applied

CAPWAP은 42.4~46.5tonf(평균 45.0tonf), Davisson 방법은 25.5~37.0tonf(평균 33.0tonf), 수정 Davisson 은 55.6~58.8tonf(평균 57.1tonf)로 나타났다.

190.7mm 파일의 경우 CAPWAP은 76.8tonf, Davisson 방법은 95.0tonf, 수정 Davisson 방법은 96.3tonf을 나타내었다.

#### 4. 설계식 고도화(신뢰도 분석)

헬리컬 파일 재하시험(정재하 및 동재하시험) 결과와 연직 설계지지력을 산정한 결과를 토대로 신뢰도(편향계수)를 분석하였으며, 편향계수가 1.00에 근접하거나 변동계수가 낮은 값을 신뢰도가 높다고 평가한다(박종배 외, 2019).

참고로 ① 변동계수(COV, Coefficient Of Variation)가 25% 미만일 때 변동성이 낮다고 한다. ② 변동계수가  $25\% \leq COV < 40\%$  일 때 변동성을 보통이라고 한다. ③ 변동계수가  $COV \geq 40\%$  일 때 변동성을 높다고 평가한다(박종배 외, 2019).

헬리컬 파일 연직 재하시험(정재하 및 동재하시험)과 연직 설계지지력(개별선단지지 방법과 매입말뚝 도로교설계기준 식)에 대한 편향계수를 분석하였다(Table 6 참조). 설계식 중 원통형 방법의 경우 재하시험 값보다 현저히 작은 것으로 나타나 신

뢰성 분석에서 제외하였다.

편향계수(재하시험지지력 / 연직 설계지지력)가 1.00에 근접하고 변동계수가 양호한 식이 설계 정확도가 높은 것으로 평가할 수 있는데 편향계수가 1.00보다 작은 것(경제적 설계)보다 1.00보다 약간 큰 것(안전측 설계)을 선택하는 것이 헬리컬 파일 도입기에서 설계식과 지지력 판정법에 대한 기준 정립을 위해 안전측 설계를 하는 것이 타당하다(박종배 외, 2019).

Table 6의 신뢰도 분석결과를 보면 매입말뚝 도로교설계기준 식과 수정 Davisson(정재하, 동재하시험 모두) 방법의 편향 계수가 1.00에 가까우면서 1.00보다 약간 크게 나타나 정확성과 안전성을 가장 잘 충족시키는 것으로 나타났다.

또한, Table에서 선행 연구 보다 이천과 잠실의 데이터가 추가된 본 연구의 매입말뚝 도로교설계기준 식의 편향계수가 1에 더 가까워지고 변동계수도 낮아져 설계신뢰도가 더 높아졌다고 할 수 있다.

즉, 표에서 보면 도로교매입말뚝 식이 정재하시험 값(수정 Davisson)에 대한 변동계수가 0.3에서 0.2로 감소하였고, 동재하시험값(수정 Davisson)에 대한 변동계수도 0.3에서 0.17로 감소하여 변동성이 보통에서 낮음 수준으로 되었다.



**Table 6.** Deflection Coefficient of Helical Pile

Division	Bearing capacity of load test /					
	Individual formula		Road bridge design standard formula			
	Previous Research	This research	Previous Research	This research		
Static load test	25mm Settlement	①	1.07	1.11	0.79	0.78
		②	0.32	0.15	0.30	0.17
	Davisson	①	0.96	0.92	0.71	0.65
		②	0.32	0.36	0.30	0.37
	Modified Davisson	①	1.49	1.50	1.10	1.08
		②	0.32	0.16	0.30	0.20
Dynamic load test	CAPWAP	①	1.15	1.14	0.84	0.84
		②	0.32	0.11	0.30	0.16
	Davisson	①	1.09	0.89	0.81	0.66
		②	0.32	0.40	0.30	0.43
	Modified Davisson	①	1.44	1.39	1.08	1.03
		②	0.32	0.13	0.30	0.17

Note 1: Research is the result of three piles, and this research is the result of six piles (Including research results)

Note 2: ① Resistance bias factor, ② C.O.V

Note 3: Coefficient of variation (C.O.V) = C.O.V < 0.25: Low, 0.25 ≤ C.O.V < 0.4: Normal, 0.4 ≤ C.O.V: High

## 5. 결론

최근 국내에서 도입되어 사용하고 있는 헬리컬 파일의 설계지지력 식과 재하시험(정재하 및 동재하시험) 결과를 비교하여 설계식에 대해 신뢰도를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 헬리컬 파일은 항복점이 명확하게 나타나지 않는 데도 침하량이 큰 경향이 있으므로, 침하량 기준에 의한 지지력 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 매입말뚝 도로교 설계기준 식과 유럽에서 헬리컬 파일의 지지력 판정에 많이 사용하고 있는 수정 Davisson 방법의 편향 계수가 1.00에 가까우면서 1.00보다 약간 크게 나타나 정확성과 안전성을 가장 잘 충족시키는 것으로 나타났다.
- (3) 설계값과 재하시험값의 선형 및 추가 데이터로 신뢰도 분석을 한 결과 매입말뚝 도로교설계기준 식이 신뢰도도 높아지고 변동성이 낮아지는

등 설계식의 고도화가 이루어진 것으로 판단되나, 아직도 충분한 데이터가 아니므로, 다양한 조건(심도, 지반 및 시공조건 등)에서의 설계법과 재하시험 판정법의 선택에서는 신중한 검토가 필요하다.

## 참고문헌

1. 박종배·박용부·이범식·오규승·권영환(2018), 「소규모 도시재생 뉴딜사업에 적합한 기초공법 설계/시공 가이드 개발」, 한국토지주택공사 토지주택연구원.
2. 박종배·박용부·김용범·권영환(2019), 「협소부지에 건설되는 공동주택/교량에 적합한 중구경 기초공법의 적용성 분석 및 설계/시공지침 개발」, 한국토지주택공사 토지주택연구원.
3. 박종배·박용부(2020), “중·소경 헬리컬 파일의 지지력 특성”, 『LHI Journal』, 11(2): 75~86
4. 박종배·박용부·김성범·명기완·권영환(2021), 「고강도 강관 회전압입 파일의 설계 및 시공 표준화 연구」, 한국토지주택공사 토지주택연구원.

5. 한국지반공학회(2015), 「국토교통부 제정: 구조물 기초 설계기준 해설」, 한국지반공학회.
6. ICC-Evaluation Services (2007), "AC308 Acceptance Criteria for Helical Pile Foundations and Devices", www.icc-es.org.
7. Meyerhof, G. G. (1951), "The ultimate bearing capacity of foundations", *Geotechnique*, 2(4): 301~331.
8. Narasimha Rao, S., Y.V.S.N. Prasad and M. Dinakara Shetty (1991), "The behavior of model screw piles in cohesive soils", *Soil and Foundations*, 31(2): 35~50.
9. Perko, H.A. (2009), *Helical PILES: A Practical Guide to Design and Installation*, WILEY Book, 103~214.

---

## 요약

국내에는 유럽에서 널리 사용하고 있는 헬리컬 파일을 많이 사용하기 시작하였지만, 헬리컬 파일의 설계기준을 만들려고 하는 노력이 부족하여, 여전히 헬리컬 파일의 표준설계기준을 가지고 있지 못하다. 따라서, 본 연구는 현장에서 헬리컬 파일을 시공하고 재하시험을 실시한 후, 이전 데이터를 포함하여 신뢰도 분석을 실시하였다. 그 결과 매입 말뚝에 대한 도로교설계기준 식이 수정 Davisson 분석법과 연계하여 좋은 신뢰도와 일관성을 보여주었는데, 이 설계식의 저항편향계수가 '1.0'에 가까웠고 변동성도 '낮음' 수준을 보여 주었기 때문이다.

**주제어** : 헬리컬 파일, 설계기준, 저항편향계수, 변동계수

---