

항타공식에 의한 말뚝지지력 산정의 신뢰도 연구 A study on the reliability of dynamic pile formulae

홍헌성¹⁾, Hun-Sung Hong, 조천환²⁾, Chun-Whan Cho, 김성회³⁾, Sung-Hoe Kim,
엄재경⁴⁾, Jae-Kyung Um, 이명환⁵⁾, Myung-Whan Lee

- 1) 파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers
- 2) 파일테크 상무, Managing Director, Piletech Consulting Engineers
- 3) 파일테크 과장, Chief Engineer, Piletech Consulting Engineers
- 4) 파일테크 대리, Assistant Chief Engineer, Piletech Consulting Engineers
- 5) 파일테크 연구소장, Research Fellow, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : The reliability of dynamic pile formulae has long been questioned. Even so, they are regarded as the most practical tool of pile quality control by most engineers. In this study the reliability was analysed based on PDA EOID values. It has again been confirmed that the reliability was too low. However a new way of application has been proposed.

Key words : Dynamic pile formula, Bearing capacity, Energy ratio, Site specific factor of safety

1. 서론

말뚝을 항타시공하면서 측정된 자료로부터 말뚝지지력을 추정하는 항타공식은 그 간편, 단순함 등 장점으로 실무기술자들에게 높은 호응을 받고 있다. 그러나 항타공식은 이미 수많은 연구를 통하여 그 신뢰도가 극히 낮은 것이 밝혀진 상태인 바, 선진외국에서는 그 결과로부터 말뚝지지력을 확인하는 목적으로 적용되지 못하고 단지 시공관리의 보조수단으로 제한되어 있다고 판단된다.

국내에서는 이 주제에 대한 연구노력이 극히 부진한 상태에서 항타공식 적용의 불합리성이 보고되기도 하였으나(이명환, 윤성진, 1992) 아직까지도 실무기술자들에게 항타공식의 신뢰도는 거의 절대적인 실정이다. 실제로 국내에서 집행되는 거의 모든 공사에서 항타공식을 전제로 한 최종관입량 기준이 시공관리의 거의 유일한 척도가 되고 있으며, 말뚝재하시험 대신 항타공식에 의한 말뚝지지력 확인이 인정되는 경우도 상존하고 있다. 특히 일부 기관의 시방서상 항타공식을 기준한 최종관입량 기준은 조속히 시정되어야 할 부분이다.

최근의 말뚝지지력 연구결과 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화현상은 말뚝지지력에 영향을 미치는 가장 중요한 요소들 중의 하나로 인식되고 있다(이원제 등, 1995). 이는 에너지보존법칙을 이론적 배경으로 하는 항타공식의 신뢰도 평가에 심각한 조건이 된다. 즉 항타시 측정된 자료를 토대로 하여 계산된 항타공식 계산결과는 항타시의 말뚝지지력과 비교되어야 한다. 그러나 이제까지 보고된 많은 연구결과들은 항타공식 계산결과와 상당시간이 경과한 후 실시한 말뚝재하시험 결과를 비교하였으며 따라서 엄밀한 의미에서 합리적인 신뢰도 평가가 되지 못하였다.

본 연구에서는 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화영향을 배제하기 위하여 항타시 수행한 동재하시험결과를 기준으로 하여 항타공식의 신뢰도 평가를 실시하였다. 이를 위하여 그간 국내에서 수행한 60개소의 시공사례를 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 연구결과 현재 국내에서 사용되는 항타공식들의 신뢰도는 극히 낮은 것으로 확인되었다. 즉 시간경과 효과가 배제된 상태에서도 항타공식의 신뢰도는 매우 낮으며, 이는 항타공식 제안시 말뚝재하시험 결과를 각종 경험적 계수로 반영한 데에서 기인한 것으로 추측된다.

2. 항타공식의 신뢰도

2.1 항타공식

본 연구에서는 현재 국내에서 일반적으로 적용되는 항타공식을 대상으로 그 신뢰도를 분석하였다. 표 1에는 이들 항타공식의 개요와 적용에 필요한 계수들을 표시하였다.

표 1 분석대상 항타공식의 개요

Hiley 공식	$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S + (C_r + C_b + C_g)/2} \cdot \frac{W_r + n^2 W_b}{W_r + W_b}$
	R_u : 극한지지력(ton), e_h^{*1} : 해머효율, W_r : 램중량, W_b : 말뚝중량+말뚝머리부착물 중량, H : 낙하고(cm) S : 타격당 관입량(cm), C_r^{*2} : 말뚝머리 부착물의 탄성변형량(cm), C_b : 말뚝재료의 탄성침하량(cm) C_g : 지반의 탄성변형량(cm), n : 해머와 말뚝머리의 반발계수, 구조물기초 설계기준(1986) 참조
ENR 공식	$R_u^{*4} = \frac{W_r \cdot H}{S + 0.25}$
	R_u : 극한지지력(ton), W_r : 램중량(ton), H : 낙하고(cm), S : 타격당 관입량(cm)
Danish 공식	$R_u = \frac{e_h \cdot W_r \cdot H}{S + C_1} \quad C_1 = \sqrt{\frac{e_h \cdot W_r \cdot H \cdot L}{2AE}}$
	R_u : 극한지지력(ton), e_h^{*1} : 해머효율, H : 낙하고(cm), S : 타격당 관입량(cm), L : 말뚝길이(cm), A : 말뚝의 단면적(cm^2), E : 말뚝의 탄성계수(ton/cm^2)
일본건축학회공식(J1)	$R_u = \frac{e_f \cdot F}{S + K/2}$
	R_u : 극한지지력(ton), S : 타격당 관입량(cm), e_f : 해머효율(0.5), K : 리바운드량(cm), $F^{*3} = W_r \cdot H$ (드롭해머), $F = 2W_r \cdot H$ (디젤해머)
일본건설성고시식(J2)	$R_u^{*4} = \frac{F}{5S + 0.1}$
	R_u : 허용지지력(ton), F : 타격에너지($\text{ton} \cdot \text{m}$), S : 타격당 관입량(m)

- *1. 건설부 구조물 기초설계기준(1986)에는 해머효율이 상이하게 추천되었으나 해석의 신뢰도를 높이기 위해 미국 GRL사에서 제안한 값을 적용 (유압해머 $e_h=0.95$, 디젤해머 $e_h=0.72$)
- *2. 콘크리트 말뚝에 대하여는 구조물기초 설계기준(1986) 제안값을, 강관말뚝에 대하여는 강관말뚝 설계와 시공(1994)에서 제안한 값 적용
- *3. 유압해머에 대한 적용기준이 없는 바, 드롭해머 기준을 적용
- *4. 이들 2개 공식에는 해머효율이 적용되지 않는 바, 타격에너지는 [램중량×낙하고]로 계산

2.2 연구대상 말뚝

본 연구에서는 말뚝항타시 항타기록이 측정되고 항타시 동재하시험이 실시된 60개소의 말뚝에 대하여 분석하였다. 60개의 말뚝은 27개소의 강관말뚝, 22개소의 PC 및 PHC말뚝과 11개소의 H말뚝자료이며 표 2에는 말뚝개요, 항타장비 및 각 항타공식 계산결과들을 요약하였다.

표 2 말뚝개요 및 항타공식 계산결과

No.	말뚝규격	항타장비	E OID	HILEY	EN	DANISH	J1	J2	e_n
1	Dia.318.5 mmX9	DKH7	103.5	168.0	494.1	183.0	110.5	32.3	0.86
2	Dia.318.5 mmX9	DKH7	101.2	186.4	893.6	200.5	125.7	37.8	0.76
3	Dia.406.4 mmX9	K25	121.2	263.7	2000.0	282.4	631.6	58.5	0.45
4	Dia.406.4 mmX9	K25	116.2	255.1	1333.3	297.9	571.4	54.5	0.37
5	Dia.406.4 mmX9	K25	97.5	238.6	1333.3	257.1	571.4	54.5	0.40
6	Dia.406.4 mmX9	DKH7	157.0	324.2	1272.7	316.7	218.8	60.9	0.87
7	Dia.406.4 mmX9	DKH7	75.0	250.9	531.6	257.4	159.1	33.1	0.88
8	Dia.406.4 mmX9	DKH7	78.0	293.1	777.8	306.9	185.8	36.7	0.90
9	Dia.406.4 mmX9	DKH7	80.0	329.5	700.0	311.1	209.0	43.9	0.82
10	Dia.406.4 mmX9	DKH7	118.0	279.2	1366.0	266.0	198.6	51.9	0.79
11	Dia.406.4 mmX12	BSP7	114.0	297.5	1666.7	309.3	230.3	64.5	0.73
12	Dia.406.4 mmX12	DKH7	125.9	275.7	1428.6	299.5	213.4	62.5	0.81
13	Dia.508.0 mmX12	K35	115.5	275.0	1596.5	287.4	812.5	78.4	0.33
14	Dia.508.0 mmX12	NH100	126.5	225.2	1011.2	269.7	200.9	68.2	0.94
15	Dia.508.0 mmX12	BSP5	94.5	360.5	833.3	395.8	256.4	35.9	0.95
16	Dia.508.0 mmX12	DKH7	180.4	314.8	861.5	322.4	233.3	46.7	0.86
17	Dia.508.0 mmX12	DKH7	155.0	250.8	1400.0	328.4	200.0	52.1	0.88
18	Dia.508.0 mmX12	BSP5	68.5	270.4	526.3	312.5	192.3	37.0	0.90
19	Dia.508.0 mmX12	BSP5	92.5	368.2	733.3	384.2	261.9	44.0	0.75
20	Dia.508.0 mmX13	K35	158.0	381.1	2757.6	464.7	928.6	87.5	0.43
21	Dia.508.0 mmX13	K25	160.0	229.2	1578.9	375.7	612.2	56.3	0.75
22	Dia.609.6 mmX12	BSP9	152.5	271.8	1384.6	388.6	230.8	75.0	0.68
23	Dia.609.6 mmX12	DKH10	175.0	344.1	1538.5	399.2	270.3	83.3	0.89
24	Dia.800.0 mmX13	YBH12	180.0	417.4	1565.2	435.7	406.8	107.9	0.61
25	Dia.800.0 mmX13	YBH12	88.4	422.1	1694.1	445.6	411.4	110.8	0.67
26	Dia.800.0 mmX13	YBH12	142.0	376.9	1190.1	398.8	367.3	97.3	0.63
27	Dia.800.0 mmX13	YBH12	165.5	398.7	1694.1	407.1	411.4	110.8	0.66
28	Dia.350 mm PC	D25	40.0	178.4	571.4	245.5	461.5	42.9	0.37
29	Dia.400 mm PC	YBH7	50.0	152.3	528.3	283.0	159.1	24.6	0.82
30	Dia.400 mm PC	YBH7	82.3	163.4	500.0	279.4	166.7	28.6	0.83
31	Dia.500 mm PC	BSP7	60.3	178.0	933.3	353.1	190.9	38.2	0.71
32	Dia.400 mm PHC	K35	83.0	311.2	1654.5	436.8	1300.0	79.1	0.25
33	Dia.400 mm PHC	K35	70.0	240.9	2022.2	468.0	866.7	82.7	0.30
34	Dia.400 mm PHC	K35	81.0	266.9	1820.0	412.1	1070.6	80.9	0.25
35	Dia.400 mm PHC	D35	113.2	168.5	2600.0	372.3	674.1	79.1	0.58
36	Dia.400 mm PHC	K35	71.7	288.3	2022.2	425.5	1300.0	82.7	0.35
37	Dia.400 mm PHC	K35	70.0	244.6	1248.0	366.0	910.0	72.8	0.38
38	Dia.400 mm PHC	K35	112.0	313.4	2022.2	425.5	1516.7	82.7	0.29
39	Dia.400 mm PHC	K35	78.0	262.1	1213.3	412.1	910.0	72.8	0.46
40	Dia.400 mm PHC	DKH7	28.0	91.8	204.9	123.5	85.7	22.1	0.71
41	Dia.400 mm PHC	NH40	104.0	248.6	715.3	333.9	264.3	46.8	0.53
42	Dia.400 mm PHC	NH40	120.0	249.9	1064.0	388.8	280.0	47.3	0.56
43	Dia.400 mm PHC	NH40	106.0	239.5	1013.3	370.3	285.0	41.5	0.61
44	Dia.400 mm PHC	NH40	119.0	237.8	1013.3	383.4	268.2	41.5	0.50
45	Dia.400 mm PHC	NH40	173.7	235.7	1302.9	404.9	304.0	43.4	0.64
46	Dia.400 mm PHC	DKH7	113.0	167.7	1044.8	302.3	182.3	57.9	0.91
47	Dia.500 mm PHC	K35	91.0	279.2	1820.0	541.5	1040.0	80.9	0.42
48	Dia.600 mm PHC	NH100	104.5	205.0	1011.0	346.0	283.0	68.2	0.70
49	Dia.600 mm PHC	NH100	128.3	222.8	1200.0	367.0	310.3	72.0	0.76
50	H244X252X11X11	DKH7	119.0	233.5	1200.0	218.0	155.6	40.0	0.79
51	H300X300X10X15	DKH7	106.0	187.0	763.6	220.4	131.3	36.5	0.88
52	H300X300X10X15	DKH7	117.5	178.1	792.5	222.9	125.0	36.8	0.95
53	H300X300X10X15	DKH7	133.0	225.0	1105.3	243.3	157.9	39.4	0.90
54	H300X300X10X15	DKH7	167.0	315.7	1627.9	393.5	221.5	64.2	0.87
55	H300X305X15X15	DKH7	120.0	294.2	982.5	274.2	212.1	48.3	0.86
56	H300X305X15X15	DKH7	120.0	287.7	1600.0	309.3	207.4	53.3	0.82
57	H344X354X16X16	DKH7	141.0	260.8	864.2	313.7	193.4	54.7	0.96
58	H344X354X16X16	DKH7	170.0	357.7	1489.4	371.5	265.2	63.1	0.96
59	H344X354X16X16	DKH7	170.0	325.6	1555.6	375.7	241.4	63.6	0.97
60	H344X354X16X16	DKH7	167.0	319.6	1428.6	367.4	234.9	62.5	0.99

- 주 : 1. EOID값은 Davisson판정법에 의한 허용지지력, HILEY, EN, DANISH 및 J1은 항타공식상의 극한지지력, J2는 항타공식에 의한 허용지지력
 2. HILEY공식 및 J1공식 계산시 temporary compression값은 실측값 적용
 3. e_n 값은 PDA측정에 의한 실측 에너지 효율

2.3 연구대상 항타공식의 신뢰도

60개소의 측정자료에 의한 각 공식별 말뚝지지력은 표 2에 나타난 바와 같이 각 공식별로 큰 차이를 보여주고 있다. 이들의 신뢰도를 평가하기 위하여 ① 동재하시험결과 대비 항타공식 계산결과의 비율(안전율) 계산 ② 60개 데이터의 각 공식별 평균 안전율을 계산 ③ 평균 안전율을 적용시 각 공식별 말뚝의 허용지지력 계산의 과정을 거친 후 분석하였다. 분석결과는 그림 1에 표시하였다.

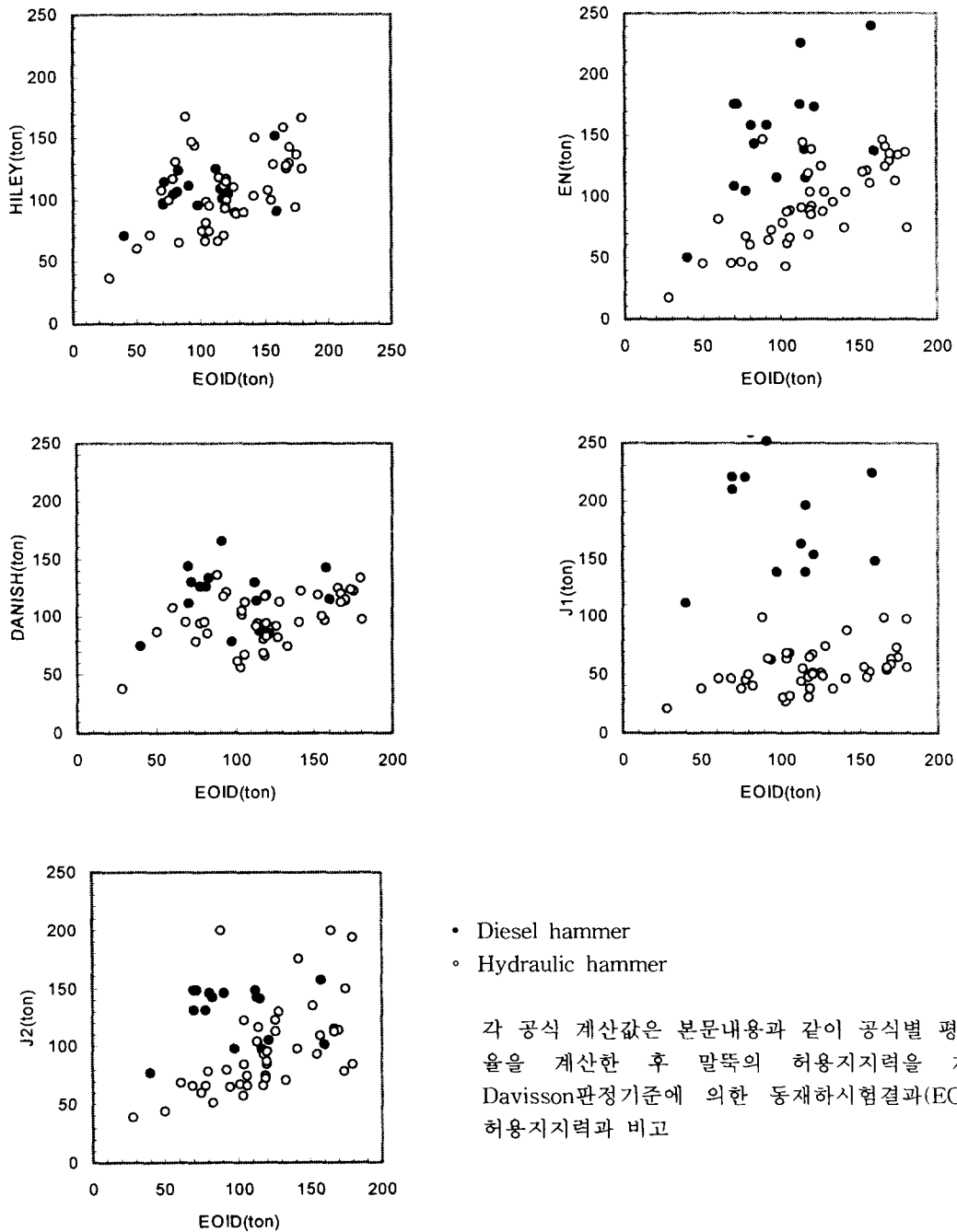


그림 1 각 항타공식에 의한 말뚝지지력과 동재하시험결과(EOID)의 비교

그림 1에 나타난 바와 같이 각 공식들의 신뢰도는 극히 낮은 것으로 평가할 수 있다. 각 공식별 신뢰도를 가시적으로 평가하기 위하여 표 3에 이들 결과를 신뢰도 범위별로 요약하였다.

표 3 각 공식별 신뢰도 분포

	HILEY	EN	DANISH	J1	J2
±10%	18.3%	6.7%	13.3%	1.7%	15.0%
±20%	33.3%	26.7%	26.7%	5.0%	31.7%
±30%	58.3%	56.7%	50.0%	11.7%	50.0%
±30%이상	41.7%	43.3%	50.0%	88.3%	50.0%
평균 안전율	2.52	11.53	3.27	4.14	0.56
최소 안전율	1.36	4.77	1.77	1.06	0.25
최대 안전율	4.78	28.89	6.69	18.13	1.25

표 3에 나타난 바와 같이 일본건축학회 공식(J1)을 제외한 나머지 항타공식들의 신뢰도는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. J1공식이 다른 공식들에 비하여 신뢰도가 낮은 것은 공식적용시 해머효율을 일률적용토록 한 것과 특히 디젤해머에서 2 W,H 라는 비논리적인 타격에너지를 적용하도록 한 것에 기인하고 있다.

이와 같은 분석에서 분명한 것은 어떤 항타공식을 쓰더라도 전체 데이터의 40~50%는 ±30%이상 큰 오차를 나타낼 수 있으며 따라서 항타공식 결과로부터 말뚝의 지지력을 예측하는 것은 극히 위험하다고 할 수 있다.

3. 항타공식의 실무적용 방안

앞장에서 나타난 바와 같이 각종 항타공식의 신뢰도는 실무에 적용하기에는 문제가 있다. 그러나 현실적으로 수많은 말뚝을 시공하는데 품질관리를 위하여 모든 말뚝에 대하여 동재하시험을 실시할 수도 없다. 그 결과 거의 모든 경우, 항타공식의 문제점을 인식하는 경우에도, 항타공식을 적용하여 품질관리가 되고 있다.

선진외국에서도 이러한 현실적 한계 때문에 시공관리에 항타공식을 활용하고 있으며 그 개선방안 모색에 많은 연구노력을 경주하여 왔으나 아직까지 가시적인 효과는 거두지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 항타공식 신뢰도 평가에 최대 결림돌인 시간경과 효과를 배제하였으며 이를 바탕으로 하여 항타공식의 실무적용 방안을 강구하였다.

3.1 타격에너지 값의 개선

본 연구에서 대상으로 한 5개 항타공식중 일부 공식에서는 에너지 효율을 고려한다. 그러나 과거 이를 실제로 측정하기는 거의 불가능하였으며 따라서 해머종류에 따라 일률적인 값이 사용되었다. 근래 국내에서도 널리 적용되고 있는 동재하시험에서는 말뚝에 실제 전달되는 타격에너지를 실측할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 이 실측 에너지를 항타공식에 적용하여 그 신뢰도를 분석하였으며 그 결과는 표 4에 요약하였다.

표 4 실측된 에너지값을 적용하였을 경우 각 공식별 신뢰도 분포

	HILEY	EN	DANISH	J1	J2
±10%	26.7%	26.7%	13.3%	18.3%	25.0%
±20%	48.3%	51.7%	40.0%	43.3%	46.7%
±30%	71.7%	75.0%	60.0%	58.3%	68.3%
±30%이상	28.3%	25.0%	40.0%	41.7%	31.7%
평균 안전율	1.86	7.14	2.66	3.25	0.35
최소 안전율	0.91	3.65	1.58	1.70	0.17
최대 안전율	3.82	13.32	5.16	6.35	0.84

실측에너지 값을 적용했을 경우 항타공식의 신뢰도는 크게 향상되었다. 그러나 이는 상대적인 개념이며, 실측에너지 값을 사용하더라도 실무에서 이를 신뢰할 수 있을 만한 정도에는 크게 미흡한 실정이다.

3.2 지반조건의 고려

말뚝지지력은 말뚝조건, 지반조건 및 항타장비 조건의 조합으로 결정되는 값이다. Hiley공식에서는 지반의 탄성압축량(C_q)을, 일본 건축학회 공식에서는 실측 temporary compression값을 공식에서 고려하고 있지만 그 영향을 충분히 반영하였는지는 미지수이다.

본 연구에서 대상으로 한 60개소의 말뚝들중 일부 현장에서는 수개소에서 측정한 자료들이 포함되어 있다. 이들 지반조건을 일률적으로 규정하기는 곤란하지만 동일 현장의 경우 유사한 지반조건일 가능성이 높으며, 따라서 현장별로 구분하여 분석하였다. 이 비교에서는 항타공식의 신뢰도 제고를 위하여 타격에너지는 실측값을 적용하였다.

이와 같은 분석결과 전체 데이터를 대상으로 할 때와는 상당히 상이한 결과를 발견할 수 있었다. 동일 현장에서 시공된 말뚝들의 경우, 비교적 일관된 항타공식 계산결과가 얻어졌으며, 경우에 따라서는 실무에서 활용할 수 있을 정도의 신뢰도까지도 기대할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

A공사의 경우(시험번호 1~6) 5개 연구대상 항타공식중 Danish공식에 의한 극한지지력이 동재하시험 결과와의 상관성이 가장 높게 나타나고 있다(그림 2). 총 6개의 말뚝시험이 실시된 A현장에서 Danish공식을 적용할 때의 평균 안전율은 1.80이 되며 6개 측정 데이터의 안전율 범위는 1.66~1.92로 $\pm 10\%$ 의 오차범위 이내가 된다.

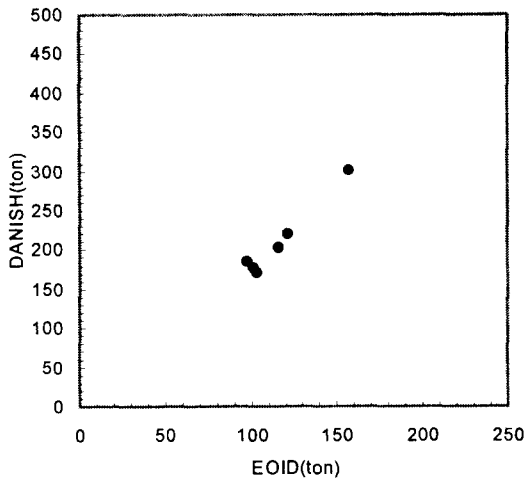


그림 2 A공사 동재하시험결과와 Danish공식의 계산결과 비교

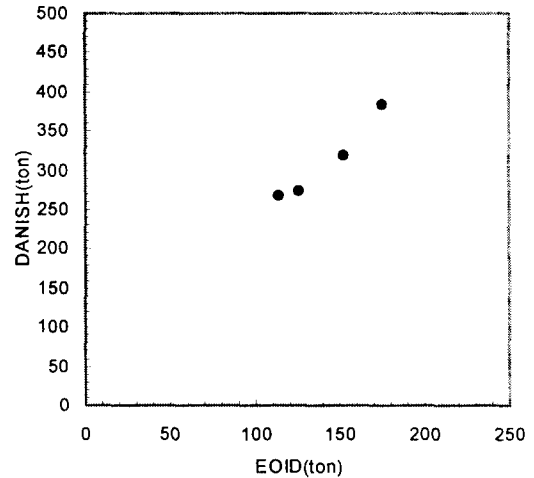
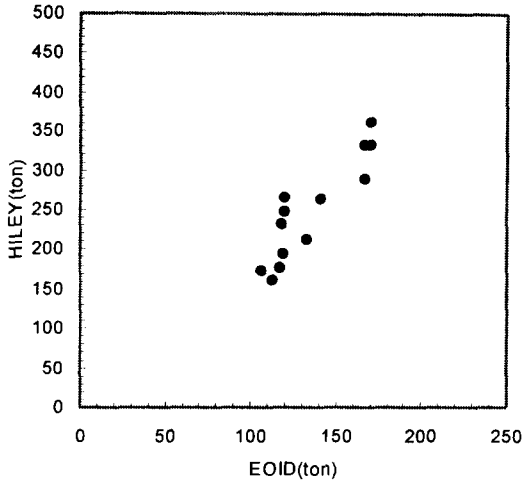


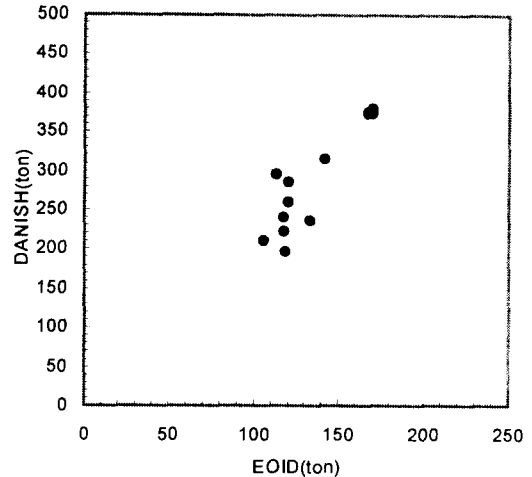
그림 3 B공사 동재하시험결과와 Danish공식의 계산결과 비교

B현장의 경우(시험번호 11, 12, 22, 23)에도 Danish공식이 가장 우수한 결과를 나타내준다(그림 3). 총 4개소의 데이터에 의한 평균 안전율은 2.20이며 안전율 범위는 2.09~2.34로 $\pm 10\%$ 의 오차범위 이내가 된다.

C공사의 경우(시험번호 10, 46, 50~60)에는 Hiley공식 및 Danish공식의 적용성이 비교적 양호한 것으로 나타나고 있다. 총 13개소의 시험말뚝중 10번은 강관말뚝, 46번은 PHC말뚝이며 나머지 11개소는 H말뚝자료이다(그림 4). 이 경우에는 앞의 A 및 B공사 만큼 양호한 상관관계는 나타내 주지 못하고 있으나, 실무적으로 현장에서 시공관리에 적용할 수는 있을 것으로 사료된다. Hiley공식의 경우 평균 안전율은 1.97, 안전율 범위는 1.42~2.22이며 Danish공식에서는 평균 안전율은 2.13, 안전율 범위는 1.66~2.61이 된다.



(a) Hiley 공식



(b) Danish 공식

그림 4 C공사, 동재하시험결과와 항타공식의 계산결과 비교

이밖에 1개 공사에서 3개소의 시험이 실시된 5개 공사의 경우에도 같은 분석을 하였으며 그 결과를 표 5에 요약하였다.

표 5 공사별 항타공식 적용성 분석결과

공 사	말뚝번호	적용공식	평균안전율	안전율분포
D	7, 8, 9	Hiley	3.40	3.10 3.56 3.56
		Danish	3.53	3.26 3.82 3.52
		J1	4.10	3.73 4.29 4.29
E	13, 16, 17	J1	2.27	2.32 2.23 2.27
F	15, 18, 19	Hiley	3.57	3.82 3.74 3.14
		Danish	4.04	4.19 4.38 3.54
		J1	4.81	5.16 5.05 4.24
G	14, 48, 49	Hiley	1.53	1.76 1.45 1.39
		Danish	2.45	2.12 2.73 2.49
		J1	3.48	2.99 3.79 3.68
H	32, 33, 34	Hiley	1.29	1.30 1.43 1.14
		J1	3.65	3.92 3.71 3.31

표 5의 분석에서 나타난 바와 같이 공사에 따라 적용공식이 상이하며 동재하시험 결과와의 비율(안전율)도 상이하게 나타난다. 또 D, F, G 공사에서는 이와 같은 방법적용이 의문시 되기도 하나 현장조건에 대한 고려없이 일률적인 안전율을 적용하던 과거의 적용방식에 비하여 오차범위를 크게 줄힐 수 있는 장점이 있다.

3.3 시간경과 효과의 고려

이제까지의 논의는 모두 말뚝의 항타시 지지력, 즉 시간경과 효과는 고려되지 못한 상태에서 항타공식 적용방안이다. 실제로 말뚝의 지지력은 항타후 경과한 시간에 따라 변화하며 그때의 타격당 관입량

(S), temporary compression 값 등도 변화한다. 표 6에는 몇개 말뚝에 대한 항타시 및 재항타시 항타기록과 지지력 변화를 나타내었다.

표 6 시간경과에 따른 말뚝항타 거동의 변화

말뚝번호	항타시점	항타기록(cm)		EOID (ton)	HILEY (ton)	EN (ton)	DANISH (ton)	J1 (ton)	J2 (ton)
		S	$C_p + C_q$						
40	항타시	1.80	1.30	28.0	91.8	204.9	123.5	85.7	22.1
	1시간후	0.77	1.90	81.5	120.5	411.8	181.4	122.1	30.3
	22시간후	0.35	2.20	88.0	139.1	700.0	224.2	144.8	35.7
48	항타시	0.64	1.90	104.5	205.0	1011.0	346.0	283.0	68.2
	50분후	0.50	2.90	130.0	239.4	1680.0	450.0	323.1	100.8
26	항타시	0.96	2.0	142.0	376.9	1190.1	398.8	367.3	97.3
	재항타시	0.04	1.1	230.0	1252.1	4965.5	545.0	1220.3	141.2

이표에서 나타난 사례에서는 시간경과에 따라 S값은 감소하지만 $C_p + C_q$ 값은 감소 또는 증가한다. 그러나 시간경과에 따라 S값이 증가하였다는 보고도 있는 바 현재의 기술수준으로 시간경과에 따른 말뚝거동을 사전에 예측하는 것은 불가능하다. 따라서 시간경과 효과는 항타시 동재하시험과 재항타 동재하시험을 수행하여 지지력산정에 반영하는 것이 유일한 방안이 된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 검토한 5개 항타공식의 경우, 그들의 신뢰도는 극히 저조하며 따라서 실무적용시 심각한 문제가 될 수 있다.
- (2) 항타공식 입력자료중 타격에너지를 실측값으로 보정할 경우 항타공식의 신뢰도는 크게 향상될 수 있다.
- (3) 항타공식의 실무적용을 위해서는 각 공사별로 최소 3개소 이상의 시험항타를 실시하고 여러 가지 항타공식 계산결과와 동재하시험결과를 비교하여 적용공식 및 안전율을 결정한 후 적용하는 것이 바람직하다.
- (4) 시간경과 효과는 항타시 동재하시험결과와 재항타 동재하시험 결과를 비교하여 지지력 평가에 감안하도록 한다.

참고문헌

1. 이명환, 윤성진(1992), "말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교", 한국지반공학회 '92년도 봄학술발표회 논문집, pp.69-102.
2. 이원제, 전영석, 홍현성, 이명환(1995), "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력변화 연구", 한국지반공학회 '95년도 봄학술발표회 논문집, pp.69-90.