

매입말뚝공법의 지지력 예측식 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Bearing Capacity Prediction Equation for Auger-drilled Piling

최도웅¹⁾, Do-Woong Choi, 한병권²⁾, Byung-Kwon Han, 서영화³⁾, Young-Hwa Seo, 조성한⁴⁾, Sung-Han Cho

¹⁾ LG건설 기술연구소 연구개발팀 책임연구원, Researcher, Research Development Team, LG E&C

²⁾ LG건설 기술연구소 연구개발팀 연구원, Researcher, Research Development Team, LG E&C

³⁾ LG건설 기술본부장 겸 기술연구소장, Vice-President & Principal Researcher, LG E&C

⁴⁾ LG건설 기술본부 토질및기초팀 차장, 공학박사, Ph. D., Soil & Foundation Team, LG E&C

SYNOPSIS : Recently, auger-drilled piling has been widely used in urban area to reduce the air pollution and noise. But this construction method that its basic theory was introduced from Japan may be changed depending on the each piling company and construction field condition. Therefore, the design code and management method for auger-drilled piling is not defined yet. Especially, the lack of research on the bearing capacity of auger-drilled piling leads to the absence of rational bearing capacity prediction equation. This paper presents the optimum design code and economical construction method of the auger-drilled piling by proposing the new bearing capacity prediction equation based on the site specific soil types and construction conditions. In this paper, existing bearing capacity prediction equations and current pile load tests were compared. And the end bearing capacity and skin friction characteristics were also analyzed by comparing the results of CAPWAP. From the results of analysis, a reliable bearing capacity prediction equation considered soil types is proposed.

Key Words : auger-drilled piling, pile load test, CAPWAP, end bearing capacity, skin friction

1. 서론

말뚝 시공법 중 항타공법은 다른 공법에 비해 경제적이며 지지력 측면에서 신뢰도가 높다는 장점이 있지만, 항타시 발생하는 매연 및 소음 등의 건설공해로 인하여 인근 주민들의 민원을 초래하는 문제점이 있다. 기존의 디젤해머를 대체하여 유압해머에 의한 항타공법을 사용할 경우 매연과 소음 수준을 감소시킬 수 있기는 하지만, 완벽한 공해대책 공법으로 채택하기에는 미흡하다. 또한, 말뚝의 항타 시공이 어려운 경우의 대안으로 현장타설말뚝 공법이 적용되어 왔으나, 현장 조건과 경제성 측면에서 적용에 한계가 있고 비교적 침하량이 크게 나타나며 품질관리가 까다로운 문제점을 갖고 있다. 이러한 국내 건설 환경 여건의 변화에 부응하여 지반을 먼저 천공하고 시멘트 밀크(cement milk)를 주입, 교반한 후 기성말뚝을 삽입하는 SIP(soil cement injected pile)공법이나 DRA(dual respective auger)공법 등의 매입말뚝공법(auger-drilled piling)의 적용이 최근 급속히 증대되고 있다. 그러나, 국내에서 적용되고

있는 매입말뚝공법의 경우, 기본 이론은 일본에서 도입되었으나, 장비나 시공법은 국내 항타 업체나 시공 현장 별로 변형되어 적용되고 있다. 따라서, 이론과 실체가 부합되지 않고 설계기준이나 시공관리 기법이 아직까지 명확히 정립되지 않은 상태이다. 특히, 국내에서 매입말뚝공법으로 시공된 말뚝의 지지력 특성에 대한 연구가 부족하여 실무에 적용할 수 있는 신뢰성 있는 지지력 예측식은 아직까지 제안되지 못한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 지반조건 및 시공수준을 반영한 합리적인 매입말뚝공법의 지지력 예측식을 제안하여 최적설계 및 경제적인 시공의 기술적 바탕을 제시하고자 한다. 이를 위해 매입말뚝공법의 지지력 산정에 적용 가능한 국내외 예측식을 선별하고, 최근 5년간 수행된 총 134회의 말뚝재하시험 결과와의 비교를 통해 이들 예측식의 신뢰도를 분석하였다. 또한, 동재하시험의 CAPWAP 해석결과를 지반조건과 연계하여 통계 분석함으로써 매입말뚝의 선단지지력 및 주변마찰력 특성을 분석하고, 이를 통해 기존의 지지력 예측식을 개선한 보다 신뢰성 있는 지지력 예측식을 제안하였다.

2. 매입말뚝공법의 지지력 예측식

2.1 일본의 지지력 예측식

매입말뚝공법은 1968년 일본 기초기술연구소에서 개발되어 1987년 국내에 도입되었으며, 일본과 국내에서만 적용되고 있는 지역적 특수성을 갖는 말뚝 시공법이다. 일본 매입말뚝공법의 지지력 예측식은 말뚝 선단부 처리 방법이나 최종 항타 수준 등에 따라 다양한 형태를 갖고 있으며, 기본적으로 Meyerhof(1976)가 제안한 표준관입시험값(N)을 이용한 항타공법에 대한 지지력 예측식의 변형된 형태를 취하고 있다. 다음 표 1은 일본에서 적용되고 있는 대표적인 매입말뚝공법의 지지력 예측식들을 정리하여 나타낸 것이다.

표 1. 대표적인 일본 매입말뚝공법의 지지력 예측식

구분	지층	q_p^{*1} (t/m ²)	q_s^{*2} (t/m ²)	출처
시멘트풀 주입공법	사질토층	20N(≤1000)	0.2N(≤5)	건설성 고시기준
	점성토층		0.625N(≤10)	
선굴착 근고공법	사질토층	25N(≤1500)	0.2N(≤5)	건설성 인정공법
	점성토층		0.625N(≤10)	
선굴착 최종타격공법	사질토층	30N(≤1800)	0.2N(≤5)	NEO-PILE社 특허공법
	점성토층		0.625N(≤10)	
선굴착 최종경타공법	사질토층	25N(≤1500)	0.9	건설성 인정공법
	점성토층		2.4	
선굴착 확대근고공법	사질토층	25N(≤1500)	0.2N(≤5)	건설성 인정공법
	점성토층		0.625N(≤10)	

*1) q_p : 단위 극한선단지지력 *2) q_s : 단위 극한주면마찰력

표 1에 나타낸 공식들의 특징을 살펴보면, 선단지지력은 선단부 시공 방법에 따라 20N~30N의 값을 적용하고 있으며 N치의 상한으로는 50을 적용하는 국내 기준과는 달리 일본에서는 대부분 60을 적용하고 있음을 알 수 있다. 주변마찰력은 사질토와 점성토로 구분하여 0.2N~2.0N의 값을 적용하고 있다.

2.2 국내의 지지력 예측식

국내의 경우 매입말뚝공법의 지지력 예측식이 명확히 규정된 설계 기준은 아직까지 없다. 최근에 몇몇 기관이나 연구진이 국내 현장에서 수행된 말뚝재하시험 결과를 바탕으로 기존의 지지력 공식을 개선하려는 연구를 수행하였으나, 아직까지 실무에 적용하기에는 연구 성과가 미흡한 실정이다. 구조물기초 설계기준(1997)에서는 선굴착(pre-boring) 말뚝의 지지력이 항타말뚝의 1/3~1/2 정도 되는 것으로 제시되어 있으나, 적용 근거가 없고 실제 매입말뚝의 지지력을 과소평가하는 것으로 판단된다. 최근에 도로교시방서를 개정한 도로교설계기준(2000)에서는 말뚝의 극한지지력 산정방법으로 AASHTO법과 일본 도로교시방서 방법을 추천하고 있으나, 이들 방법에서도 매입말뚝공법의 지지력 공식은 명시되어 있지 않은 실정이다.

기존의 연구성과로는 이경동(1997)이 국내에서 SIP공법으로 시공된 57개 재하시험 자료를 수집하여 일본 건설성 고시 기준과 비교 분석을 통해서 수정된 지지력 산정기법을 제시하였다. 황세환(1997)은 SIP공법으로 시공된 25개의 PC, PHC 말뚝에 대한 정재하시험 결과를 근거로 하여 도로교시방서 기준, 구조물기초설계기준, 일본 건설성 기준, NEO-PILE공법 기준에 대한 신뢰성 분석을 통해서 개선된 지지력 추정기법을 제시하였다. 최근에 대한주택공사 주택연구소(2001)에서는 현장 재하시험과 이론식의 비교분석을 통해 Meyerhof(1976) 공식의 선단지지력 산정 공식을 일부 수정한 예측식이 국내 매입공법의 지지력 특성에 비교적 부합된다는 연구결과를 발표한 바 있다.

2.3 지지력 예측식 개선의 필요성

상기에서 논의한 국내 매입공법에 대한 지지력 예측식은 일본에서 적용되고 있는 방법을 수정 없이 도입하거나 일부 지지력 계수를 조정하여 적용하고 있기 때문에, 국내의 지반조건 및 시공조건을 충분히 반영하기에는 미흡한 실정이다. 일본에서는 선단 부근에 확대 구근을 형성하거나 부배합의 시멘트 밀크를 주입하여 최종 경타를 최소화하는 매입공법이 일반화되어 있다. 그러나, 국내에서는 N치 50이상의 단단한 지층에 선단을 관입하고, 충분한 최종 항타를 통해 선단지지력을 발현시키게 된다. 따라서, 국내 매입공법은 일본 매입공법과 기존 항타공법의 특징을 절충한 형태를 가지며, 선단지지력이 상대적으로 크게 발현되는 특성을 나타낸다. 또한 일본에서는 배합비를 달리하여 선단과 주변 시멘트 밀크를 다르게 적용하고 있는 반면, 국내에서는 장비의 단순화와 시공 편의의 편이를 위해 선단과 주변을 구별하지 않고 일정한 배합비의 시멘트 밀크를 주입하고 있다.

그리고, 국내에서 적용하고 있는 지지력 예측식은 선단지지력 산정 과정에서 N치의 상한을 50으로 한정하고 있다. 따라서, 선단이 풍화암이나 연암에 관입된 경우의 선단지지력과 선단이 풍화도($N \geq 50$)에 관입된 경우의 선단지지력이 동일하게 산정되는 불합리성을 내포하고 있다. 주변마찰력의 지지력 예측식도 주변 지층을 단순히 사질토와 점성토로 대별하여 산정하고 있으나, 매립층, 모래층, 점토층, 모래자갈층, 풍화토층, 풍화암층 등 다양한 지층 구성을 보이는 국내 지반의 특성을 반영할 수 있도록 개선할 필요성이 있다.

3. 기존 지지력 예측식의 신뢰도 분석

3.1 기존 지지력 예측식 선정

기존 지지력 예측식의 신뢰도 분석을 위해 일본과 국내 기관에서 제안한 각종 지지력 산정식을 수집하고, 국내 매입공법의 원리와 시공법에 가장 근접한 4개의 대표적인 지지력 예측식을 선정하였다. 다음 표 2는 선정된 지지력 예측식의 출처와 각 공식별 선단지지력 및 주변마찰력 산정 방법을 정리하여 나타낸 것이다.

표 2. 대표적인 매입말뚝공법의 지지력 예측식

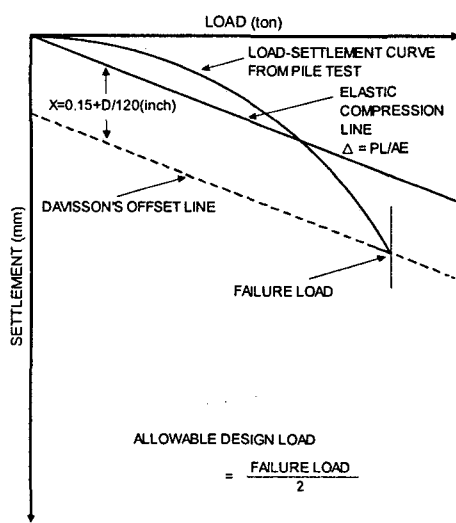
구분	지층	q_p (t/m ²)	q_s (t/m ²)	출처
도로교설계기준 제안식*	사질토층	30N(≤1500)	0.1N(≤5)	도로교설계기준 해설(하부구조편)
	점성토층	-	0.5N(≤10)	
Meyerhof 제안식	사질토층	20N(≤1000)	0.2N(≤10)	항타공법의 공식을 일부 수정
	점성토층	-	0.625N(≤5)	
일본건설성 제안식	사질토층	20N(≤1200)	0.2N(≤5)	일본 건설성 고지 제 111호
	점성토층	-	2.0N(≤8)	
NEO-PILE社 제안식	사질토층	30N(≤1800)	0.2N(≤5)	저소음 저진동 말뚝기초
	점성토층	-	0.625N(≤5)	

*) 최종타격방식의 내부굴착말뚝공법에 대한 제안식

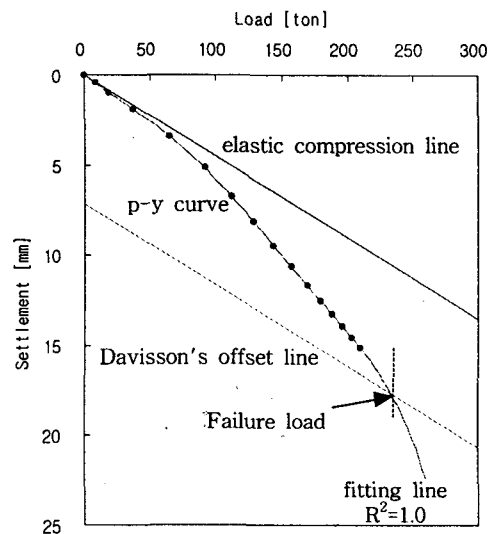
3.2 말뚝재하시험 자료 수집

상기의 지지력 공식에 대한 신뢰도 분석은 각 공식을 통해 산정된 예측값과 실제 시공된 말뚝에 수행된 재하시험 결과를 비교함으로써 이루어졌다. 이를 위해 최근 5년간 매입공법으로 시공된 총 250본의 말뚝 시공기록과 이들 말뚝에 수행된 재하시험 자료를 수집하였다. 도출된 결과의 객관성 및 신뢰도를 확보하기 위해 최대한 많은 항타업체(9개社)와 재하시험 업체(3개社)의 자료를 수집하였고, 다양한 지반 조건을 반영하기 위해 전국에 분포한 총 175개 현장의 지반조사보고서를 분석하였다. 그리고, 수집된 자료에 대해 다음의 엄격한 기준을 통해 실제 분석에 사용할 자료를 선별하였다.

- ① 수집된 자료 중에 명확한 시공관리 기록(관입깊이, 시공법, 최종관입량, 낙하고 등)과 지반 조건(깊이 별 지층 및 N치, 말뚝 두부 레벨, 기반암 특성 등)의 파악이 어려운 자료는 분석에서 제외하였다.
- ② 재하시험을 통한 말뚝의 허용지지력은 그림 1의 (a)와 같이 Davisson 방법을 통해 항복하중(failure load)을 판정하고 여기에 안전율 2.0을 적용하여 산정하였다. Davisson 방법은 각종 허용지지력 판정법 중 가장 합리적인 방법으로 인정되어 구미 각국과 국내에서 널리 사용되고 있는 방법이다.



(a) Davisson 판정법



(b) 회귀분석에 의한 항복하중 판정

그림 1. 재하시험에 의한 허용지지력 판정

③ 허용지지력 판정시 보다 엄밀한 기준 적용과 객관적인 분석을 위해, 하중-침하량 곡선이 Davisson offset line을 넘어 선 자료를 우선적으로 선정하였다. 하중-침하량 곡선이 Davisson offset line에 미치지 못한 경우에는 그림 1의 (b)와 같이 회귀분석(curve fitting)을 통해 항복하중을 판정하였으며, 이 때에도 하중-침하량 곡선이 탄성변위 곡선을 넘지 못한 경우는 분석에서 제외하였다.

상기에서 논의한 기준을 통해 선별한 말뚝재하시험 자료 현황을 다음 표 3에 나타내었다. 최종 분석에 사용된 재하시험 자료는 총 134회이며 동재하시험(restrike)이 127회, 정재하시험이 7회이다. 현재 정재하시험은 시험 최대하중을 설계하중의 200~225%로 한정하여 시험하고 있으므로, 대부분의 정재하시험에서는 Davisson의 항복하중 확인이 어려우며 탄성침하량 곡선에도 미치지 못하는 경우도 상당수 존재하고 있다. 따라서 수집된 정재하시험 자료 중 많은 수가 자료 선별 과정에서 제외되었다.

표 3. 말뚝재하시험 자료 현황

자료 수	현장	지역	직경(mm)			시공법		전체 지층구성 비율(%)					
			350	400	450	SIP	DRA	매립토	사질토	점성토	모래 자갈	풍화토	풍화암
134	30	12	4	58	72	71	63	14.1	14.6	7.1	9.1	33.7	21.4

3.3 실측값과 예측값 비교

그림 2는 4개의 지지력 예측식에 의해 산정된 허용지지력과 실제 재하시험을 통해 판정된 허용지지력을 비교하여 나타낸 것이며, 표 4는 지지력비(예측값÷실측값)의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다.

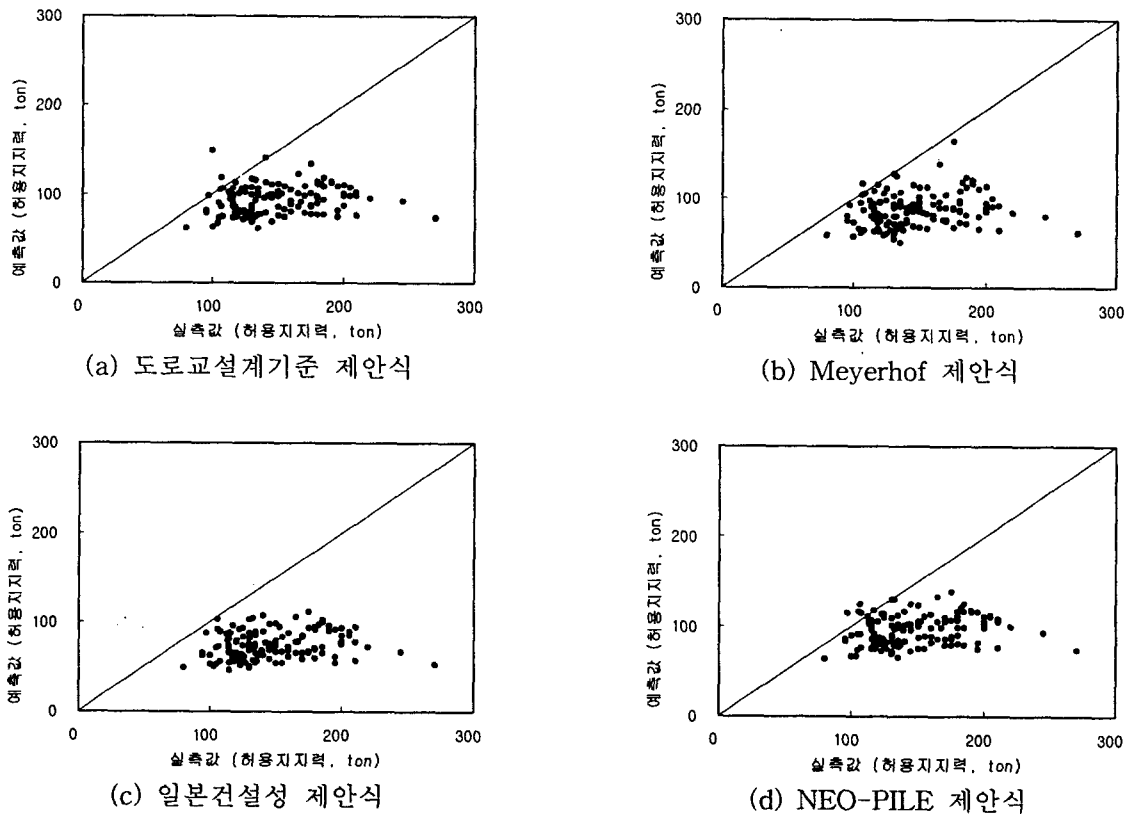


그림 2. 지지력 예측식별 예측값과 실측값 비교

표 4. 지지력비(bearing capacity ratio, 예측값÷실측값)의 통계 분석 결과

구분	도로교설계기준	Meyerhof	일본건설성	NEO-PILE
평균	0.66	0.62	0.52	0.68
표준편차	0.15	0.16	0.13	0.16

그림 2와 표 4의 결과로부터 전체적으로 기존 지지력 예측식에 의한 허용지지력은 재하시험을 통해 판정된 허용지지력의 52~68%의 낮은 수준에 머무르고 있으며, 예측값의 분산도 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 기존 지지력 예측식에 의해 국내에서 매입공법으로 시공된 말뚝의 지지력을 산정하는 데는 한계가 있으며, 정확도와 정밀도가 개선된 새로운 예측식 개발이 필요한 것으로 판단되었다.

4. 지지력 예측식 개선

4.1 개선방법 및 방향

말뚝의 지지력을 파악할 수 있는 방법 중에 가장 신뢰도가 높은 방법은 재하시험에 의한 방법이다. 특히, 기존의 정재하시험을 대체하여 활발하게 적용되고 있는 동재하시험은 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program) 해석을 통해 재하에 따른 말뚝의 침하량과 지반의 정적저항력 관계를 나타내주며 이와 함께 주면마찰력의 분포도 제시해준다. 본 연구에서는 CAPWAP 해석결과를 지반조건과 연계하여 통계 분석함으로써 선단지지력 및 주면마찰력 특성을 분석하고, 이를 통해 기존식을 개선한 보다 신뢰성 있는 지지력 예측식을 제안하였다. 다음의 그림 3은 동재하시험의 CAPWAP 해석 결과이다.

Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru Tons	Force in Pile at Ru Tons	Sum of Ru Tons	Unit Resist. w. Respect to Depth Tons/m	Resist. Area Tons/m ²	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
깊이			주면마찰력						
1	2.0	1.7	2.6	352.4	2.6	1.28	.82	.968	2.540
2	4.1	3.8	4.3	348.1	6.9	2.11	1.34	.968	2.540
3	6.1	5.8	4.5	343.6	11.4	2.20	1.40	.968	2.540
4	8.1	7.8	8.5	335.2	19.8	4.16	2.65	.968	2.540
5	10.2	9.9	5.5	329.7	25.3	2.68	1.71	.968	2.540
6	12.2	11.9	25.6	304.1	50.9	12.61	8.02	.968	2.540
7	14.2	13.9	32.6	271.5	83.5	16.04	10.21	.968	2.540
8	16.3	16.0	33.1	238.4	116.6	16.26	10.35	.968	2.540
9	18.3	18.0	34.0	204.4	150.6	16.72	10.64	.968	2.425
Average Skin Values			16.7			8.36	5.24	.968	2.514
Toe			204.4			선단지지력 1042.89		.966	3.400

그림 3. 동재하시험의 CAPWAP 해석 결과

4.2 선단지지력 예측식 개선

기존식은 말뚝의 선단 지지층을 암반보다는 토사층으로 한정하였기 때문에 선단지지력을 획일적인 N치에 의해서 산정하였다. 그러나, 국내 매입공법에서 말뚝 선단은 대부분이 풍화암 이상 암반층에 관입되어 시공되기 때문에 토사층의 획일적인 N치를 적용하는 것은 비합리적이다. 따라서, 본 연구에서는 선단조건이 세분화된 선단지지력 예측식 제안을 목표로 하였다. 이를 위해 재하시험이 수행된 현장의 지반조사보고서를 토대로 기반암 특성을 분류하였고, N치도 타격횟수에 따른 관입량으로 세분화하여 분석하였다. 기반암의 분류 기준을 설정하기 위해 국내 175개 현장의 기반암 종류를 통계 분석한 결과, 편마암(56%)과 화강암(33%)을 기반암으로 하는 현장이 전체의 약 90%를 차지하였다. 그 외의 현장에서는 안산암, 응회암, 이암, 사암 등이 기반암으로 나타났다. 따라서 기반암의 종류를 편마암, 화강암,

기타로 구분하여 수집된 동재하시험 결과를 분석하였으며, 기반암 종류와 N치에 따른 단위 극한선단지지력(q_p)의 평균값을 다음 표 5에 나타내었다.

표 5. 기반암 종류와 N치에 따른 단위 극한선단지지력의 평균값 (t/m²)

구분	편마암	기타	화강암
50/15~50/10	1500	1400	1200
50/9~50/5	2100	1900	1600
50/4이하	3200	2900	2500

표 5를 보면 매입공법으로 시공된 말뚝의 선단지지력은 기반암이 편마암인 경우 가장 크게 나타나고, 화강암인 경우 상대적으로 작은 선단지지력이 발현됨을 알 수 있다. 그리고, 분석된 단위 극한 선단지지력을 N치(=50)를 기준으로 환산하면 24N~64N의 범위를 나타내므로, 기존 지지력 예측식의 선단지지력 공식인 20N~30N은 실제 매입말뚝의 선단지지력을 과소평가함을 알 수 있다.

4.3 주변마찰력 예측식 개선

기존의 경험식들에서 주변마찰력 산정을 위한 지반 분류는 모래와 점토의 2가지 형태로만 제한되어 있다. 그러나 실제 지반은 공학적 특성이 다른 많은 지층들로 구성되어 있으며, 특히 국내 지반조건처럼 다층지반인 경우에는 기존 경험식의 적용에 한계가 있는 실정이다. 따라서, 주변마찰력의 정확한 예측을 위해서는 다양한 지층 특성을 포함한 예측식이 요구되며, 이에 본 연구에서는 지층 조건을 국내 대부분의 현장에서 조사되는 지층인 매립토, 모래, 점토, 모래자갈, 풍화토, 풍화암으로 구분하여 주변마찰력 예측식을 제안하고자 하였다. 이를 위해 수집된 자료에 대해서 지층 종류별로 N치에 따른 단위 극한주변마찰력(q_s)을 회귀분석하였으며, 그 결과를 다음 표 6에 나타내었다.

표 6. 지층 종류에 따른 단위 극한주변마찰력 (t/m²)

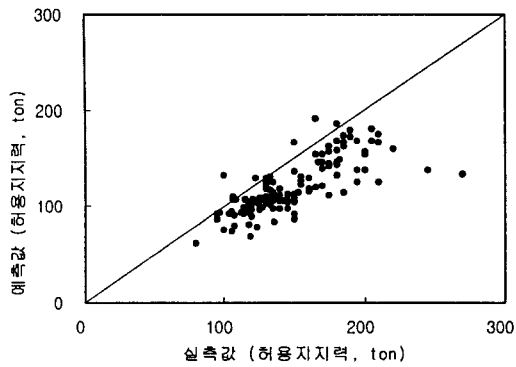
매립토	모래	점성토	모래자갈	풍화토	풍화암
0.2N(≤5)	0.3N(≤5)	0.5N(≤10)	0.2N(≤5)	0.3N(≤5)	15.0

4.4 기존식과 개선식의 신뢰도 비교

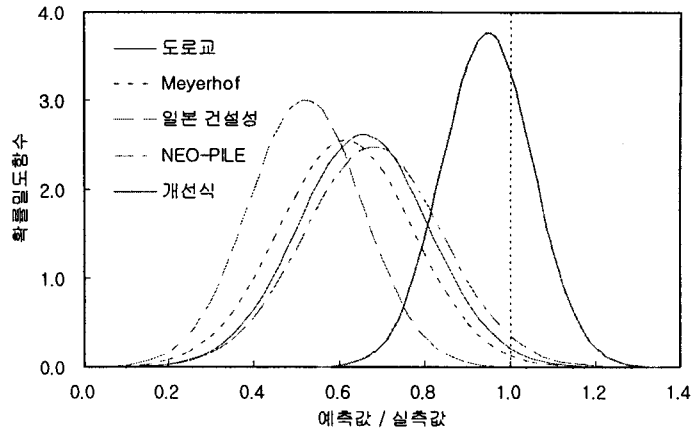
다음 표 7은 기존 4개의 지지력 예측식과 개선된 지지력 예측식에 의해 산정된 허용지지력과 실제 재하시험을 통해 판정된 허용지지력을 비교하여 통계 분석한 결과이며, 그림 4는 개선식에 의한 예측값과 실측값의 분포 및 기존식과의 신뢰도를 비교하여 나타낸 것이다. 표 7과 그림 4를 보면 재하시험 자료의 feedback을 통해 선단지지력과 주변마찰력 특성을 개선한 새로운 지지력 예측식이 기존식들에 비해 정밀도와 정확도가 월등히 우수해졌음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구를 통해 제안된 매입말뚝공법의 지지력 예측식을 통해 향후 설계단계에서 보다 합리적인 지지력 예측이 가능할 것으로 기대된다.

표 7. 지지력비(bearing capacity ratio, 예측값÷실측값)의 통계 분석 결과

구분	도로교설계기준	Meyerhof	일본건설성	NEO-PILE	개선식
평균	0.66	0.62	0.52	0.68	0.95
표준편차	0.15	0.16	0.13	0.16	0.11



(a) 개선식의 예측값과 실측값 분포



(b) 기존식과 예측식 비교

그림 4. 개선식과 기존식의 신뢰도 분석

5. 결론

본 연구에서는 일본과 국내에서 적용되고 있는 매입공법 지지력 산정식에 의한 예측값과 최근 수행된 총 134회의 말뚝재하시험 결과를 비교하고, 동재하시험의 CAPWAP 해석결과로부터 산출된 선단지지력 및 주변마찰력 특성을 국내 지반조건과 연계하여 통계 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 일본과 국내의 대표적인 지지력 예측식에 의해 산정된 허용지지력과 실제 재하시험을 통해 판정된 허용지지력을 비교한 결과, 기존식에 의한 예측값은 재하시험을 통해 판정된 실측값의 52~68%의 낮은 수준에 머무르고 있으며 예측의 분산도 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 기존식에 의해 국내 매입말뚝의 지지력을 산정하는 데는 한계가 있는 것으로 판단되어, CAPWAP 해석결과로부터 선단지지력 및 주변마찰력 특성을 수집하여 보다 신뢰성 있는 지지력 예측식을 제안하였다. 이를 통해 향후 설계단계에서 보다 합리적인 지지력 예측이 가능할 것으로 기대된다.
- (3) 매입말뚝공법의 경우 지반조건 및 시공 수준에 따라 지지력의 편차가 크므로, 시공 전에 반드시 시험시공과 재하시험을 수행하여 지반조건에 대해 세밀히 검토하고 명확한 시공관리기준을 설정하는 노력이 수반되어야 할 것이다.

6. 감사의 글

본 연구의 재하시험 자료 수집 및 방향 설정에 많은 도움을 주신 (주)파일테크와 (주)경인엔지니어링 기술진 및 주택연구소 박종배 박사님에게 감사드리며, 지반조사 자료와 파일 시공기록 수집 및 철저한 시공관리에 도움을 주신 (주)LG건설 여러 현장의 직원분들에게 미약하나마 감사의 마음을 전합니다.

7. 참고문헌

1. 건설부(1986), 구조물기초설계기준, pp. 191~197, pp. 306~308.
2. 대한토목학회(2001), 도로교설계기준 해설(하부구조편), pp. 217~238.
3. 대한주택공사 주택연구소(2001), SIP공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구, pp. 56~57.
4. 정백(역)(1996), 저소음·저진동 말뚝기초, 엔지니어즈, pp. 382.
5. 황세환(1996), 말뚝의 정역학적 지지력공식의 적용성 연구, 서울대학교 토목공학과 석사학위 논문, pp. 20~24
6. 이경동(1997), 선굴착 시멘트풀 주입 말뚝(SIP)의 지지력, 명지대학교 토목공학과 석사학위 논문, pp. 23~82