

말뚝의 파동이론분석의 신뢰도 제고방안

An Alternative to Enhance the Reliability of Wave Equation Analysis of Piles

조천환¹⁾, Chun-Whan Cho, 이명환¹⁾, Myung-Whan Lee, 홍현성¹⁾, Hun-Sung Hong,
김성희¹⁾, Sung-Hoi Kim, 전영석¹⁾, Young-Suk Jun

¹⁾ (주)파일테크, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : The bearing capacity of piles driven in soils of set-up tendency increases with time. Though WEAP(Wave Equation Analysis of Pile Driving) is an excellent tool for evaluating the driveability of driven pile, it has some limitations to predict reliable bearing capacity of pile. It is because the existing method can not take into account time dependent soil properties. The set-up effect should be accounted for to obtain a reliable bearing capacity by WEAP. Unfortunately, there are no sufficient methods to take the set-up effect into consideration in wave equation analysis. This paper suggests an alternative to consider time effect in order to improve the reliability of wave equation analysis.

Key words : WEAP, set-up, damping, quake, driven pile

1. 서 론

Smith(1960)가 개발한 말뚝의 파동이론분석법(Wave Equation Analysis of Pile Driving, WEAP)은 원래 항타시(at EOID) 말뚝의 관입성 및 지지력을 예측하기 위해 개발되었다. 그러나 WEAP은 항타후 일정시간이 경과한 시점의 재항타시(Restrike) 지지력을 예측하는 데에도 이용되고 있다. 시간경과효과에 의해서 항타후 지반과 말뚝의 시스템은 시간에 따라 변화하는 성질이 있음에도 WEAP에서는 지반정수에 대한 단일 표준값만을 제시하고 있으므로 WEAP으로부터 도출된 지지력은 측정값과는 물리적으로 다른 의미를 갖게 된다.

항타후 말뚝과 주변지반의 조건은 시간에 따라 변화하게 되고 지지력 특성 또한 시간경과에 따라 변화하므로 WEAP에 의한 말뚝의 지지력의 예측시에는 이러한 상태를 반영해야만 신뢰도있는 지지력을 얻을 수 있는 것이다. 결국 WEAP으로 항타말뚝의 지지력을 예측할 경우 항타시 저항력은 지금까지의 방법으로 유효하다 하더라도, 항타후 지지력을 예측하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 말뚝과 지반간의 상호조건, 특히 지반의 저항변수(quake, damping)의 변화를 고려해야만 한다. 그 동안의 연구는 이러한 고려없이 WEAP으로 계산된 지지력을 정적지지력의 결과와 직접 비교하는 경우도 많이 있다.

상기의 점을 고려하여 Hunt 등(1988), York 등(1994)은 동적측정기의 결과를 WEAP의 입력자료로 활용함으로써 WEAP의 계산값이 측정값에 일치한다는 결과도 보고하였다. 그러나 Rausche 등(1996)의 최근 연구에서조차 WEAP으로 항타시와 재항타시 두 시점의 지지력을 구하는 데 있어 동일한 표준지반

정수를 입력하고 최종 타격당 관입량(set value) 만을 변화시킴으로써 항타시와 재항타시의 지지력을 구하여 비교하고 있다. 더욱이 실무에서는 WEAP에서 평가된 지지력을 장기지지력으로 직접 적용하는 경우도 자주있다.

이와같이 WEAP 분석시에 대한 지금까지의 연구들은 시간경과효과를 적절히 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. WEAP의 입력자료는 크게 지반조건, 말뚝조건, 해머조건으로 구분할 수 있는데 시간경과효과를 반영하기 위해서는 지반조건을 고려하면 된다. 이러한 점에 착안하여 Svinkin(1998)은 WEAP 분석시 시간의존적인 흙의 저항특성을 반영하기 위한 주요 변수로 damping상수를 선정하여 WEAP을 이용한 역계산을 통해 시간경과에 따른 damping상수의 변화함수를 제안하였다(그림 1 참조). 그러나 Svinkin의 방법은 흙의 저항변수에 대한 시간변화를 고려하는데 있어 WEAP에서의 각종 입력변수중 damping 값 만을 변화시킴으로써 지지력중 동적저항만을 고려하였고, 실제로 시간에 따라 크게 변화하는 정적 저항의 입력변수인 quake 값을 무시하였다.

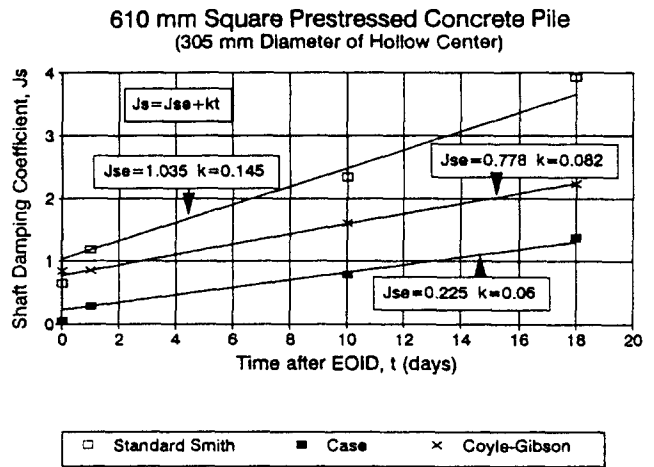


그림 1. 시간경과에 따른 댐핑상수의 변화

또한 Svinkin의 방법을 적용하기 위해서는 시간경과에 따른 댐핑변화의 예측함수를 알아야만 이용이 가능한데 이것은 사전시험없이는 곤란하므로 계획단계에서 예측에 많이 활용되는 WEAP 분석시에는 의미가 없게 된다. 따라서 WEAP분석이 보다 실질적이 되기 위해서는 시간경과에 따른 지반변수를 반영할 수 있는 저항변수의 제시가 필요하다. 이를 위해서 동일한 말뚝에 대해 항타시 및 재항타시에 측정 분석된 저항변수를 분석하여 비교 평가하는 것은 적절한 WEAP의 입력변수를 구하는 측면에서 의미가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 시간경과별로 측정된 동재하시험 데이터를 이용하여 토질별 지지력 증가비, 동적분석에 적용되는 흙의 저항변수(quake, damping)의 시간효과에 대해서 통계분석을 실시하였다. 또한 통계분석자료를 바탕으로 시간경과효과를 반영하여 WEAP 분석을 실시할 수 있는 방법을 제안하였으며, 현장에 대해 이를 적용함으로써 신뢰도를 확인하였다. 본 연구에서는 말뚝지지력의 시간경과효과중 일반 현장에서 주로 일어나는 지지력이 증가하는 set-up 효과만으로 국한하였다.

2. 분석방법

토질별 지지력증가비(set-up factor : 재항타시 지지력/항타시 지지력), 파동분석에 적용되는 흙의 저항변수(quake, damping)의 시간효과에 대한 통계분석을 위해 26개 현장에서 시간경과별로 측정된 동재하시험 데이터를 이용하였다. 결과의 편중성을 배제하기 위해 동일현장에서는 2개 이하의 시험데이터만을 취하였으며 총 말뚝수는 46개이다.

분석자료들은 동재하시험을 통해 얻은 결과들로서 항타시와 재항타시의 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program) 결과들로 구성되었는데 재항타시의 자료들이 여러 개일 경우는 최종시점의 자료를 선택하였다. 대부분의 재항타 시험자료들은 해머용량 및 말뚝재료강도의 한계로 인해 말뚝이 충분히 모빌라이즈 되지 않았으므로 지지력 증가비는 Davisson 판정에 의한 항복하중의 비교, (항타시의 선단지지력 + 재항타시의 주변마찰력)/항타시의 지지력중 큰 값을 선정하였다.

이용된 자료수가 충분치 않으므로 말뚝의 종류는 구분하지 않았지만 선단조건(개단 및 폐단)은 구분하였다. 토질종류는 자료수의 제한으로 많은 종류로 구분하지 못하였다. 선단부의 경우 선단 위치의 토질을 사질토(S), 점성토(C), 실트질모래(SM), 모래자갈(SG) 등 4종류로 구분하고, 주변부의 경우 사질토

(S), 점성토(C), 실트질모래(SM) 등 3종류로 구분하였다. 실트질모래는 대부분 우리나라에서 지지층으로 많이 이용되는 풍화잔류토에 해당된다. 주면부는 일반적으로 말뚝의 관입깊이에 걸쳐 층상으로 이루어진 경우가 대부분이지만 주면지지력에 가장 큰 영향을 주는 층의 토질종류로 분류하였다.

CAPWAP 방법은 시행착오에 의한 signal matching 방법으로 지지력과 토질변수를 구하는 것이므로 분석시 이러한 입력변수들이 상호 영향을 주어 도출된 결과에 뚜렷한 경향이 나타나지 않을 가능성도 있지만, 현실적으로 여러 변수를 일시에 구하기 위해서는 signal matching의 정도(match quality)가 높은 가능한 많은 자료를 통계분석하는 방법이 가장 적절하다고 판단된다.

통계분석에 이용된 자료들은 전술한 바와 같이 CAPWAP 분석결과이므로 이를 바탕으로 결정한 WEAP분석용 제안치 역시 한계를 포함하고 있을 수 있다. 따라서 제안값에 대한 적용성을 분석하기 위해 제안값과 WEAP의 표준값을 이용하여 6개현장에 대해 WEAP분석을 실시하였다. 대상 시험말뚝은 현장당 4개의 자료를 선정하여 총 24개의 데이터를 분석하였다.

WEAP 분석시에는 비교대상의 정확도를 높이기 위해 WEAP 분석결과중 전달된 타격에너지(EMX), 타격력(FMX)을 실측값과 10% 이내로 조정 한 후 단위 m당 타격수(blow per meter, BPM)에 해당하는 지지력을 산출하여 실측지지력과 비교하였다. EMX와 FMX의 동시 조정이 어려운 경우는 EMX를 기준으로 분석하였다. 이외 입력조건(마찰력비, 말뚝조건, 마찰력 분포, 해머조건 등)은 시험조건 및 CAPWAP 분석 결과를 기준하였다.

분석된 WEAP 결과의 신뢰도를 통계적으로 분석하기 위해 본 연구의 제안값과 WEAP의 표준값으로 산출된 각각의 결과와 실측치의 비를 확률밀도함수(probability density function)로 표현하였다. 확률밀도함수에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 비교값의 분포가 0~∞이고 함수곡선의 형상이 비대칭인 것을 고려하여 대수정규확률분포함수(log normal probability density function)를 적용하였다.

3. 분석결과

그림 2는 항타시에 대한 재항타시 지지력비 즉, 지지력 증가비(set-up factor)에 대해 주면부의 토질종류별로 통계분석한 것이다. 그림에서 m은 평균값, SD는 표준편차, N은 분석 자료수를 의미한다. 지지력 증가율은 흙의 입자가 작을수록 크게 나타나고 있으며 이의 평균값은 사질토에서 1.5, 실트질모래에서 1.5, 점성토에서 2.5 정도가 됨을 알 수가 있다. 이러한 값은 WEAP이나 FHWA(1996)의 제안값(표 1 참조)보다 약간 크지만 전술한 바와 같이 재항타시험 결과의 대부분이 극한지지력에 미치지 못하는 것을 감안하면 보수적인 값으로 평가할 수 있다.

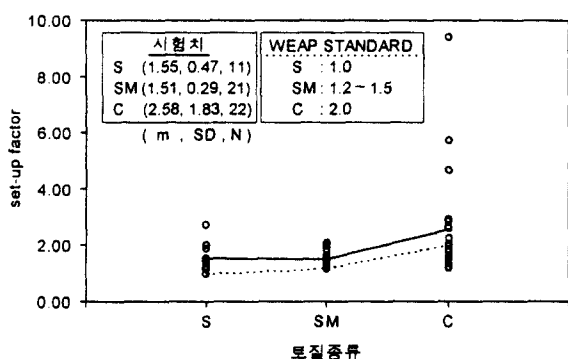


그림 2. 토질별 set-up factor

표 1. 토질종류별 지지력 증가율

말뚝주면의 유력한 토질종류	지지력 증가율 (보수적인 값임)
Clay	2.0
Silt - Clay	1.0
Silt	1.5
Sand - Clay	1.5
Sand - Silt	1.2
Fine Sand	1.2
Sand	1.0
Sand - Gravel	1.0

사질토와 점성토에서는 지지력 증가비의 분산도가 큰데 표준편차를 벗어난 데이터의 현장에 대한 지질주상도를 분석해 보면 하상퇴적토가 대부분인 것으로 보아 set-up 효과는 입자의 크기뿐만 아니라 조성이력에도 영향을 받는 것으로 판단된다. 특히 일반적으로 알려진 것과는 달리 사질토의 경우라 하더라도 하상퇴적토에서는 set-up 효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

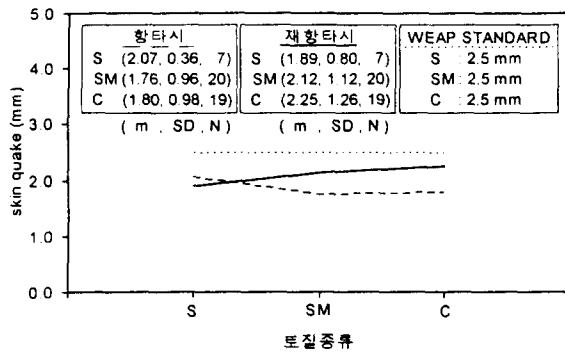


그림 3. 주면부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 quake 값의 변화

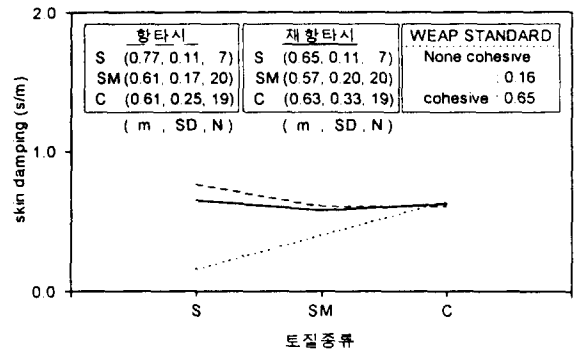


그림 4. 주면부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 damping 값의 변화

그림 3은 말뚝의 주면부에서의 quake 값을 토질별로 항타시와 재항타시에 대해 비교·분석한 것이다. 주면부의 평균 quake 값은 그림 3에서와 같이, 항타시 및 재항타시 모두 토질별로 거의 변화가 없어 뚜렷한 경향은 나타나고 있지 않다. 평균 quake값의 분포는 항타시 및 재항타시 구별없이 $2.0 \pm 0.2(\text{mm})$ 정도이며 이것은 WEAP의 제안값, 2.5 mm 보다 작은 것으로 나타났다.

그림 4는 말뚝의 주면부의 토질종류에 대한 damping 값을 항타시와 재항타시에 대해서 비교·분석한 것이다. damping 값은 토질별로나 시간경과에 따라서 뚜렷한 경향이 없는 것으로 나타났으며 평균 damping 값의 분포는 시간경과 및 토질종류에 관계없이 $0.65 \pm 0.1(\text{s/m})$ 정도로 damping 값의 절대치에 있어서도 실측치가 WEAP의 제안치보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 값은 WEAP에서 토질별로 제시하는 표준치와는 큰 차이를 보여주고 있는데 이는 현장의 토질구조가 표준값의 구분처럼 단순하지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 시간경과별 주면부 damping 값의 차이가 크지 않은 것은 타격시 말뚝의 입자속도에 관련된 것으로 평가된다. 즉, 표 2에서와 같이 시험자료들의 최대입자속도(주면부의 값을 대표하는 것으로 간주할 수 있음)를 분석해 본 결과 주면부에서의 항타시 및 재항타시의 입자속도는 흙의 시간경과효과보다는 타격에너지에 주로 영향을 받는 것으로 보아 선단부와는 달리 주면부의 damping 값은 시간경과효과와 크게 관계가 없는 것으로 평가된다.

표 2. 재항타시에 대한 항타시의 최대입자속도 비교

	최대입자속도비(VMX)	최대에너지비(EMX)	선단부의 입자속도비	선단부의 에너지비
평균	0.94	0.89	1.69	3.26
표준편차	0.19	0.19	0.87	4.80
자료수(개)	43	43	43	43

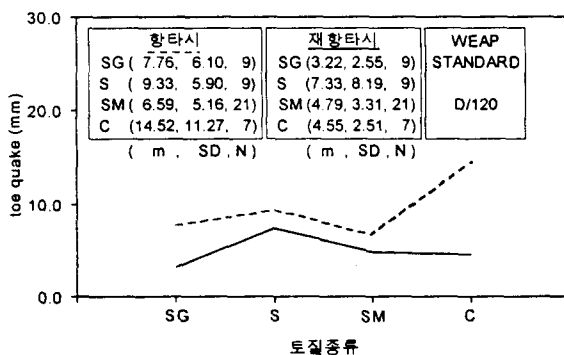


그림 5. 선단부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 quake 값의 변화

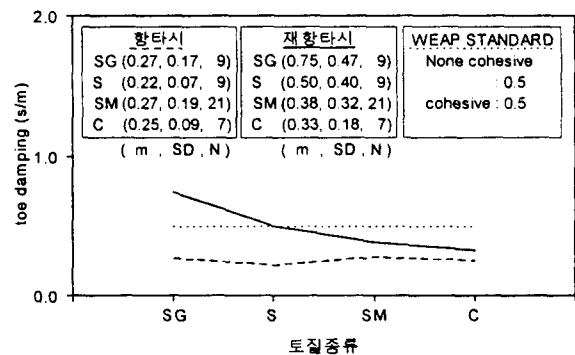


그림 6. 선단부의 토질종류별 항타시 및 재항타시 damping 값의 변화

그림 5는 말뚝 선단부의 quake 값을 토질별로 항타시와 재항타시에 대해 비교·분석한 것이다. 그림 5에서와 같이 재항타시의 quake 값은 항타시의 그것에 비해 크게 감소했음을 알 수 있다. 이러한 경향은 점성토에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있는데, 이는 시간경과에 따른 흙의 강도 경화가 다른 흙에 비해 큰 것에 기인하는 것으로 판단된다. 그림 5에서 보면 토질종류별 quake 값의 변화는 일정한 경향이 없는 것으로 분석되었는데 이는 quake에 대한 영향이 단순히 지반종류에만 국한되지 않은 것에 기인한다. 일반적으로 quake는 Davisson이 제안한 바와 같이 말뚝의 직경과의 관계로 표현되고 있으며 말뚝 선단부의 모양에도 영향받는 것으로 알려지고 있다.

따라서 표 3에는 quake의 변화를 지반종류 및 시간경과 그리고 선단부의 모양에 따라 구분하여 분석하였다. 표 3의 회귀분석에 의하면 상관계수는 전반적으로 비교적 낮은 것으로 평가되지만 전체적인 경향은 분명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 WEAP에서 항타시 분석의 입력치로 제안하고 있는 Davisson의 quake 기준치, $D/120$ (D는 말뚝직경)는 실측치(항타시 $D/52$, 재항타시 $D/94$)보다 작고, 특히 항타시 값과는 큰 차이가 있음을 알 수가 있다.

앞서의 분석에서와 같이 항타시에 비해 재항타시의 quake 값의 감소현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 전체적으로 보아 흙의 입자가 작을수록 quake 값이 크게 나타나고 있지만 SM에서는 약간 차이가 있음을 볼 수 있는데, 이것은 SM의 토질구분에 우리나라에서 지지층으로 많이 이용되는 풍화토와 풍화암이 포함되어 있는 것에 기인한다.

표 3. 지반조건별 시간경과 및 선단부 모양에 따른 quake 값의 변화

구분	구분	항타시 (EOID)			재항타시 (Restrike)			비고 (데이타수)
		회귀식	상관계수 (r^2)	표준편차	회귀식	상관계수 (r^2)	표준편차	
지반 종류	C	$\frac{D}{25}$	0.53	10.31	$\frac{D}{80}$	0.64	2.07	7개
	S	$\frac{D}{51}$	0.52	7.06	$\frac{D}{72}$	0.45	9.53	9개
	SM	$\frac{D}{62}$	0.21	5.40	$\frac{D}{87}$	0.34	3.59	21개
	SG	$\frac{D}{71}$	0.54	7.36	$\frac{D}{177}$	0.61	3.17	9개
전체		$\frac{D}{52}$	0.28	7.64	$\frac{D}{94}$	0.39	5.10	46개
선단 모양	개단	$\frac{D}{58}$	0.10	3.83	$\frac{D}{102}$	0.54	4.07	23개
	폐단	$\frac{D}{47}$	0.34	10.14	$\frac{D}{88}$	0.32	6.03	23개

선단모양에 따른 quake 값의 변화를 살펴보면 역시 시간경과에 따라 quake 값이 감소하고, 폐단말뚝보다 개단말뚝에서 quake 값이 작게 나타나고 있음을 알 수가 있는데 이는 개단말뚝의 plugging 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 6은 말뚝선단부의 토질별 damping 값을 항타시와 재항타시에 대해 비교·분석한 것이다. 그림에서와 같이 시간경과에 따라서 damping 값이 증가하고 있는데 이는 시간효과에 의한 지반강도의 증가 및 재항타시의 에너지 수준에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 표 2에서와 같이 재항타시에는 말뚝 주변 지반의 강도가 증가됨에 따라 선단부의 속도는 상대적으로 작아지게 되므로 damping 계수가 상대적으로 커지는 것으로 평가된다. 세립토일수록 damping 값의 증가량이 작은 것은 재항타시험 측정시간의 상대적인 차에 의한 것으로 보인다.

항타시 선단부의 damping 값은 지반조건에 거의 영향받지 않고 평균값도 0.25 ± 0.02 (s/m) 정도로 WEAP의 제안치(0.5 s/m)보다 훨씬 작게 나타나고 있으며, 재항타시의 평균 damping 값은 WEAP의 제안치와 유사함을 알 수가 있다.

4. 분석결과의 적용 및 신뢰도

전술한 바와 같이 현장에서 측정된 지지력 증가비와 항타시 지반저항 변수는 WEAP에서 제안하는 표준값과 상당히 차이가 있음을 알 수 있으며 이러한 차이는 주로 말뚝지지력의 시간효과에 기인하는 것으로 분석되었다. 따라서 분석결과를 정리하여 말뚝지지력의 시간효과를 반영할 수 있는 WEAP분석을 위한 새로운 값을 표 4와 같이 제안하였다.

표 4. 시간경과효과를 반영할 수 있는 WEAP분석을 위한 제안변수

구 분	항타시(EOID)				재항타시(Restrike)				set-up factor
	주면부		선단부		주면부		선단부		
	quake	damping	quake	damping	quake	damping	quake	damping	
	(mm)	(s/m)	(mm)	(s/m)	(mm)	(s/m)	(mm)	(s/m)	
점 성 토	2.0 (2.54)	0.65 (0.65)	D/25 (D/120)	0.25 (0.5)	2.0	0.65	D/80	0.5	2.0 (2.0)
사질토층	2.0 (2.54)	0.65 (0.16)	D/50 (D/120)	0.25 (0.5)	2.0	0.65	D/70	0.5	1.3 (1.0)
자갈혼합층	2.0	0.65	D/70	0.25	2.0	0.65	D/180	0.5	-
풍화잔류토	2.0	0.65	D/60	0.25	2.0	0.65	D/90	0.5	1.5
비 고			개단말뚝은 1.2배 감소				개단말뚝은 1.2배 감소		

주) ()은 WEAP에서 제안하는 표준값임

동적분석에 적용되는 저항변수는 사실상 흙의 고유한 특성이 아닌 시험 당시의 조건(시험시간, 입자속도, 토질종류 및 성상 등)에서의 값으로 항상 변화의 여지가 있게 된다. 그동안 실내시험 등 일정한 조건하에서 동적분석의 입력변수를 구하기 위한 각종의 시도가 있었지만 결국 이들은 현장조건을 대표한다고 볼 수 없으며 따라서 표 4에서 제시한 바와 같이 많은 현장조건에서 도출된 신뢰도 있는 결과를 이용하는 것이 더 바람직하다고 생각된다.

표 4에서 set-up factor는 분석데이터중 표준편차를 벗어난 값을 제외한 평균값인데 재항타시 충분한 지지력을 측정하지 못한 상황까지 고려하면 상당히 보수적인 값으로 평가할 수 있다. 전체적으로 볼 때 WEAP에서 제안하는 표준값은 측정값과 비교할 때 재항타시(Restrike)의 값과 유사함을 알 수 있다. 실트질모래는 우리나라에서 지지층으로 주로 이용되는 풍화잔류토층으로 된 입경에 의한 토질분류(실트질모래)와는 달리 강도 및 이의 증진효과가 비교적 큰 것으로 나타나고 있다. 이러한 제안값은 분석시 기준치로서 현장상황에 따라 적의 조정할 수 있으며, 특히 시간경과에 따른 말뚝의 저항력을 결정하는데 이용될 수 있다고 판단된다.

표 5는 실측치에 대한 WEAP 해석결과의 비교 내용을 보여주고 있다. 표 5에서와 같이 본 연구의 제안값을 이용한 결과는 WEAP의 표준값을 이용한 결과보다 실측치에 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히 표준값을 적용한 WEAP 분석결과중 최대타격력(FMX)은 전달에너지(EMX)가 유사함에도 실제조건과 차이가 있는 것으로 보아 항타관입성 분석시에도 오차를 줄 수 있는 것으로 평가된다.

그림 7에서 그림 10은 제안변수를 이용한 WEAP 분석 결과의 신뢰도를 파악하기 위해 표 5의 내용을 대수정규분포함수로 나타낸 것이다. 그림 7과 그림 8의 평균, 표준편차 등으로 판단할 때 제안값을 사용한 항타시 및 재항타시 WEAP 결과 모두 신뢰도가 있는 것으로 평가할 수 있다. 특히 그림 9와 그림 10은 항타시 타격력과 전달에너지 비를 확률밀도함수로 나타낸 것인데 전달된 에너지는 표준값 및 제안값에 있어 모두 실측치와 일치함에도 불구하고, 타격력은 표준값으로 분석한 결과의 경우 실측치와 차이가 있는 것으로 보아 표준값을 이용할 경우 항타관입성 분석시에 오차를 줄 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 표준값은 현장조건을 반영하고 있지 못하는 것으로 평가할 수 있다.

표 5. 실측치(CAPWAP)에 대한 WEAP 분석결과비

말뚝번호	최대 타격력				최대 전달에너지				극한지지력			
	ER	ES	RR	RS	ER	ES	RR	RS	ER	ES	RR	RS
포항1	0.90	1.19	1.00	1.00	1.12	1.10	1.11	1.11	0.94	1.04	0.93	0.88
포항2	1.01	1.21	0.98	1.11	0.97	0.93	1.10	1.05	1.04	1.12	0.89	0.98
포항3	1.00	1.24	1.20	1.36	1.05	0.97	0.91	0.91	1.04	1.13	0.99	1.11
포항4	1.02	1.27	1.27	1.51	0.95	0.91	0.91	0.92	1.04	1.16	0.94	1.11
광양1	0.99	1.19	1.09	1.26	1.05	1.04	0.94	0.92	1.01	1.11	1.00	1.09
광양2	0.99	1.15	1.17	1.51	1.05	1.05	0.92	0.92	0.98	1.08	0.98	1.11
광양3	0.96	1.16	1.10	1.37	1.07	1.07	0.90	0.90	1.00	1.11	0.99	1.10
광양4	0.96	1.12	1.09	1.25	1.09	1.11	1.06	1.06	0.94	1.10	0.97	1.10
시흥1	1.02	1.27	1.03	1.14	1.01	0.97	0.99	0.98	0.98	1.06	1.02	1.15
시흥2	0.96	1.22	1.00	1.10	1.02	0.97	1.01	0.99	1.05	1.14	0.99	1.14
시흥3	1.04	1.10	1.01	1.06	1.00	1.00	1.10	1.08	0.95	1.07	0.93	1.12
시흥4	1.03	1.23	0.97	1.00	0.98	0.95	1.04	1.04	1.11	1.16	1.00	1.17
영종도1	1.13	1.13	1.07	1.06	0.94	0.94	0.99	0.99	1.08	1.05	1.06	1.06
영종도2	1.09	1.09	1.11	1.11	0.95	0.95	0.96	0.96	1.05	1.02	1.00	0.99
영종도3	1.07	1.06	1.03	1.01	0.97	0.97	1.02	1.02	1.03	0.94	0.91	0.87
영종도4	1.03	1.15	1.08	1.08	0.94	0.93	1.01	1.01	1.03	0.98	0.92	0.90
동해1	1.00	0.96	1.08	1.00	0.93	0.93	0.92	0.94	1.28	1.48	1.18	1.48
동해2	1.05	1.00	1.07	0.99	0.99	0.99	0.92	0.97	1.13	1.35	1.12	1.40
동해3	1.06	1.00	1.10	1.00	1.02	1.03	0.91	0.95	0.99	1.15	1.04	1.24
동해4	0.98	0.96	1.00	0.94	1.06	1.07	1.02	1.09	1.04	1.42	0.96	1.17
부산1	1.02	1.02	1.10	1.14	0.93	0.94	0.91	0.92	1.14	1.39	0.99	0.96
부산2	1.01	1.18	0.99	1.08	1.01	0.93	0.99	0.97	0.96	1.18	1.04	1.05
부산3	1.11	1.11	1.09	1.09	1.01	1.02	1.00	1.00	0.94	1.08	0.84	0.84
부산4	1.02	1.13	1.26	1.31	1.02	0.97	0.96	0.93	0.93	1.19	0.98	0.99
평균	1.02	1.13	1.08	1.15	1.01	0.99	0.98	0.98	1.03	1.15	0.99	1.08
표준편차	0.05	0.09	0.08	0.16	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.13	0.07	0.15

주) ES, RS : 표준변수에 대한 항타시 및 재항타시의 조건
 ER, RR : 제안변수에 대한 항타시 및 재항타시의 조건

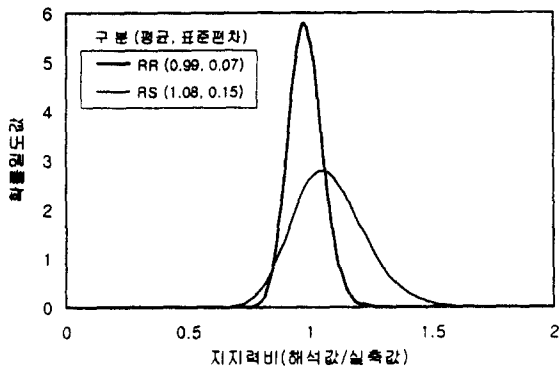


그림 7. 실측지지력에 대한 WEAP 분석값의 대수정규분포(재항타시)

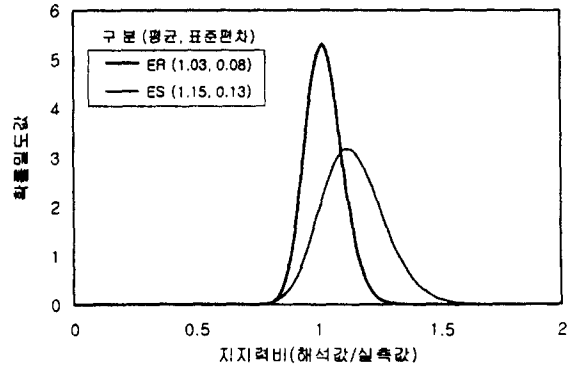


그림 8. 실측지지력에 대한 WEAP 분석값의 대수정규분포(항타시)

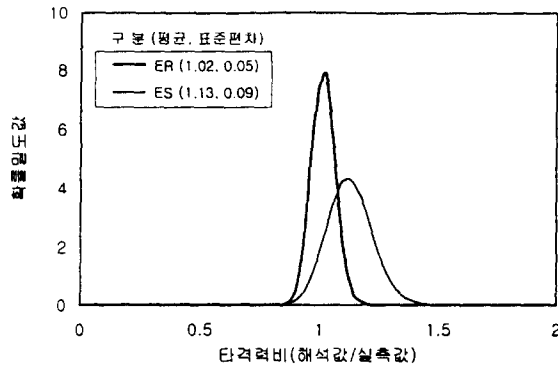


그림 9. 실측타격력(FMX)에 대한 WEAP 분석값의 대수정규분포(항타시)

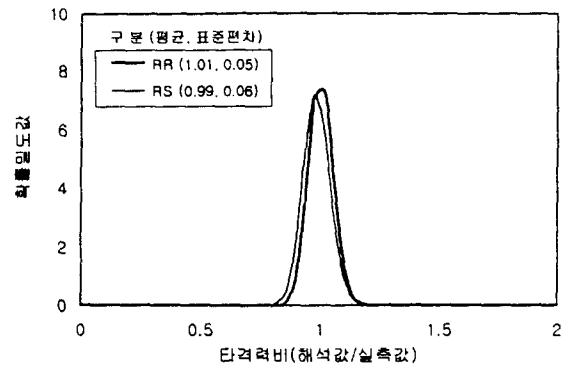


그림 10. 실측에너지(EMX)에 대한 WEAP 분석값의 대수정규분포(항타시)

5. 결 론

항타후 말뚝의 지지력은 시간경과에 따라 변화하게 되므로 WEAP에 의한 말뚝지지력의 예측시에는 이러한 상태를 반영해야만 신뢰도 있는 지지력을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 46개 말뚝에 대해 항타시와 재항타시의 동재하시험을 실시하여 얻은 결과를 이용하여 기존의 WEAP제안치와 비교한 결과 상당한 차이가 있었음을 알 수 있었다. 따라서 분석결과를 바탕으로 시간경과효과를 반영할 수 있는 새로운 WEAP 분석용 지반저항변수(damping, quake)를 제안하였다.

제안된 지반저항변수를 이용하여 WEAP 분석을 실시하고 실측치와 비교하여 이의 신뢰도를 평가해 본 결과, 기존의 WEAP에서 제안된 표준치보다는 실측값에 가까운 향상된 결과를 주고 있는 것으로 나타났다. 향후 더욱 많은 자료가 축적되어 보다 구체적이고 현장조건을 잘 반영할 수 있는 입력치가 제시되기를 기대한다. 또한 항타후 지지력의 변화는 본 연구에서 검토한 set-up 효과가 나타나는 것이 일반적이지만 특수한 토질조건 및 토성상태에서는 relaxation 효과도 간혹 나타날 수 있음에 유념해야 한다.

참고문헌

1. GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual
2. GRL Associates, Inc.(1996), GRLWEAP User Manual
3. Hunt S.W. and Baker C.N.(1988), "Use of Stress-Wave Measurements to Evaluate Piles in High Set-up Conditions", B. Fellenius (ed.), Proceedings of the Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, BiTech Publisher, Ottawa, pp.689-705.
4. Rausche,F., Thendean,G., Svinkin,M. and Likins,G.(1996), "Wave Equation Correlation Studies", Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Pile, pp.144-162.
5. Svinkin M. R and R. D. Woods(1998), "Accuracy of determining Pile Capacity by Dynamic Methods", Conference Papers, 7th Int. conf. and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Austria, 1998, pp.1.2.1-1.2.8.
6. York D.L., Brusey W. G., Clemente F.M. and Law S.K.(1994), "Setup and Relaxation in Glacial Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(9), pp.1498-1513.