

파동방정식에 의한 말뚝의 동적해석

(Wave Equation Analysis of Pile Driving)

- 목 차 -

- | | |
|-------------|-----------------|
| 1. 개 요 | 4. WEAP해석의 유의사항 |
| 2. 이론적 배경 | 5. WEAP해석 적용예 |
| 3. 컴퓨터 프로그램 | 6. 참 고 문 헌 |

1. 개요

항타시에 사용되는 말뚝 및 항타장비의 제원과 시공현장에서 파악되는 간단한 측정치로부터 동적이론을 이용하여 말뚝의 지지력을 예측하는 방법을 동적해석이라 한다.

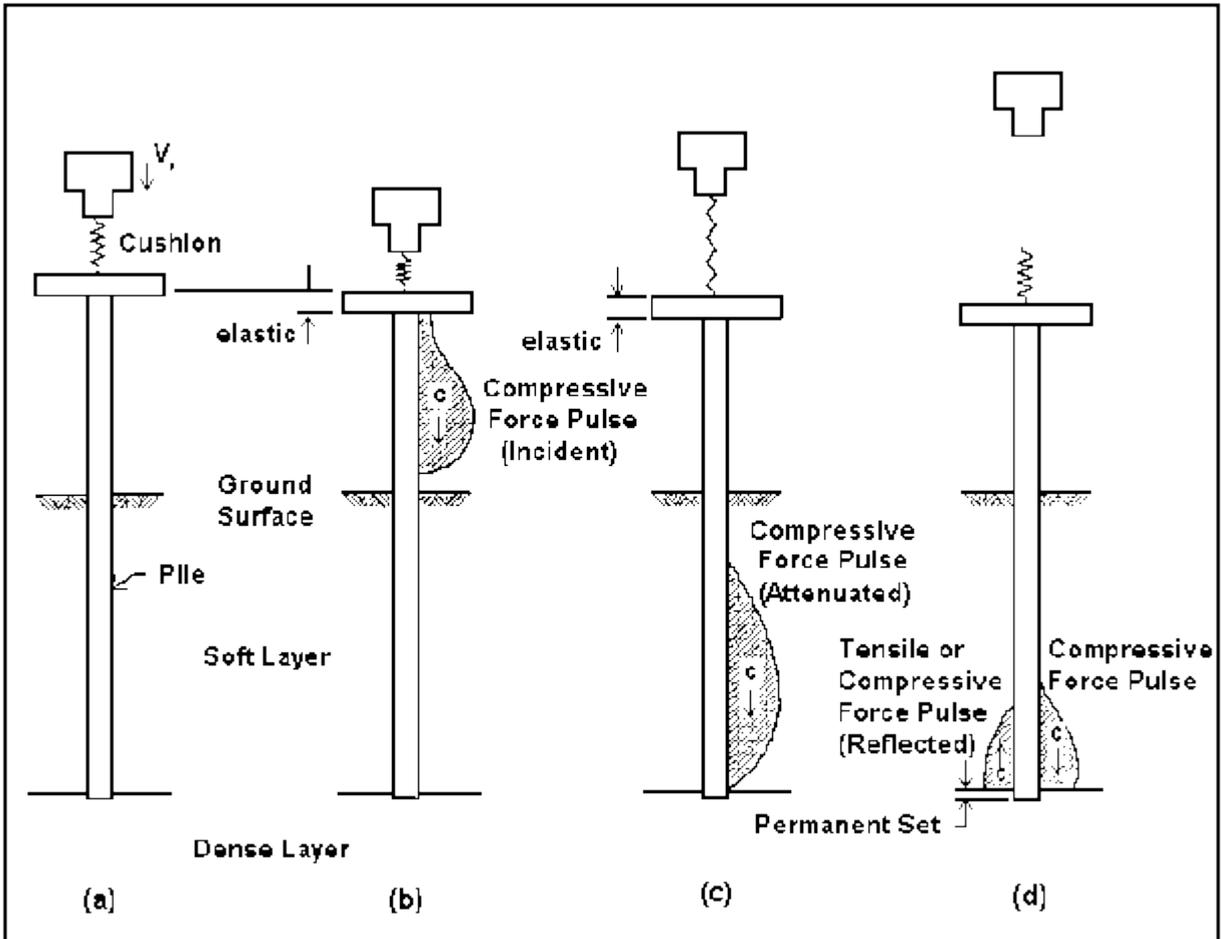
파동이론(wave theory)에 근거한 말뚝의 동적해석방법이 적용되기 전에는 주로 에너지보존법칙을 이용한 항타공식에 의해 말뚝의 지지력이 예측되어 왔다. 그러나 항타공식(dynamic formula)은 그 기본에 있어 말뚝을 하나의 lumped mass 즉, 집중된 질량으로 보았기 때문에 긴 말뚝을 집중질량으로 간주하는 원칙적인 문제점을 갖고 있을 뿐 아니라 말뚝 내에 작용하는 응력을 고려하지 않았기 때문에 신뢰도가 떨어지게 되었고 이를 보완하기 위한 방법으로 1 차원 파동방정식(one-dimensional wave equation)에 근거한 유한요소 수치해석방법이 보다 현실적인 방법으로 적용되기에 이르렀다.

WEAP 프로그램의 실행에 있어 대체로 입력작업은 매우 간단하여 기본적인 항타시스템과 말뚝의 물성치 및 몇 가지 지반특성과 관련된 표준 값을 입력하면 된다. 따라서 WEAP 프로그램은 많은 전문지식이 없어도 사용할 수 있다. 그러나 분석결과에 대한 이해를 돕고, 잘못 적용하는 것을 방지하기 위해서는 파동역학에 관한 기본지식을 갖추는 것이 필요하다.

해머에 의해 말뚝 두부에 충격이 가해지면 처음에는 말뚝과 해머가 접촉하는 인접 구간만 압축되게 된다. [그림 1]에서 보는 바와 같이 이와 같은 압축구간 혹은 압축(응력)파(compressive force pulse)는 말뚝 선단부를 향해 일정한 속도(wave speed)로 진행하게 되며 이때 wave speed 의 크기는 말뚝재료의 탄성계수(elastic modulus)와 밀도(mass density or specific gravity)에 따라 좌우된다.

압축파가 말뚝이 지반에 묻힌 부위에 도달하면 그 진폭은 지반의 정적 및 동적 저항력에 의해 감소하게 되며 말뚝 주면과 선단부에서의 지반저항력의 크기에 따라 말뚝 두부로 향하는 상향의 인장 또는 압축 반사파를 유발시킨다. 이들 반사파는 말뚝 두부에서 다시 반사되어 하향의 압축 또는 인장파가 되며 에너지가 소진될 때 까지 앞서와 같은 경로를 반복하게 된다.

이와 같은 초기 압축파 및 이로 인한 반사파들은 말뚝 선단부에 변위를 발생시키며 이들의 에너지 및 힘의 합이 지반의 동 정적저항력을 극복하기에 충분할 경우 잔류침하량을 유발하여 말뚝은 지반 내로 관입하게 된다.



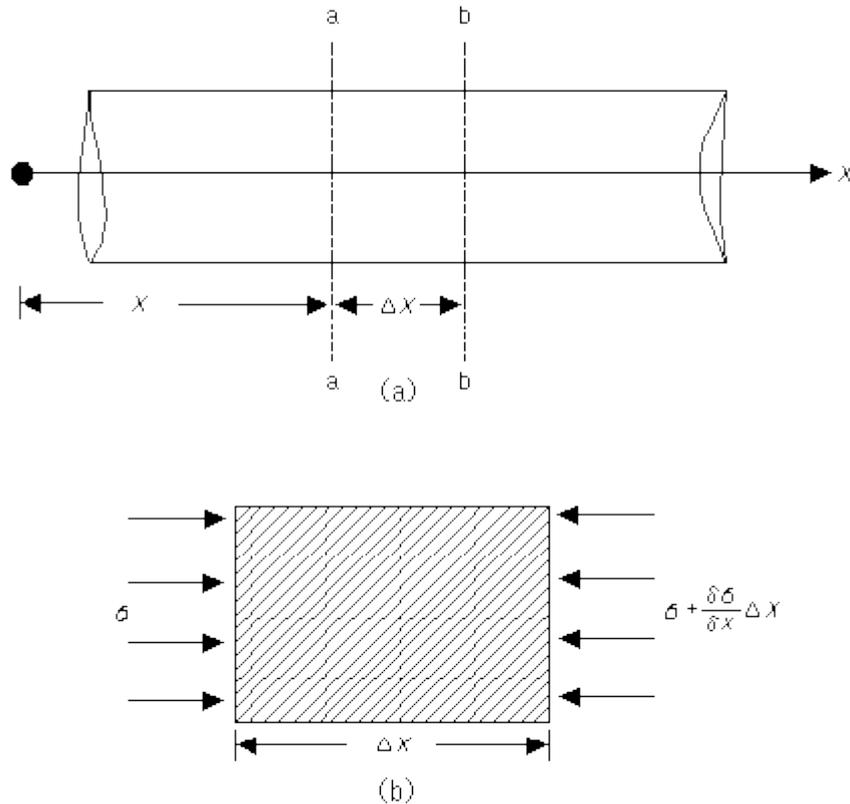
[그림 1] 말뚝내의 파동의 전파(wave propagation in a pile)

이러한 일련의 과정을 파동이론에 근거한 수치 해석적 방법으로 modeling 함으로써 아래와 같은 내용의 분석이 가능하게 되며 이를 말뚝기초 설계 및 시공관리에 이용하여 경제성 및 신뢰성을 증대시킬 수 있다.

- 1) 극한지지력과 이에 상응하는 set value(최종관입량)의 관계
- 2) 말뚝에 발생하는 항타응력
- 3) 지반의 지층변화에 따른 말뚝의 항타시공성
- 4) 적절한 항타장비의 선정 및 말뚝의 최적단면결정

2. 이론적 배경

[그림 2]와 같이 자유공간(free space)에 떠있는 탄성봉(elastic bar)에 충격을 가하면 탄성봉의 선단에서 응력파(stress wave)가 발생하여 반대편 선단으로 전파된다.



[그림 2] 탄성봉 내에서의 응력파

이로 인해 탄성봉 내에서는 시간에 따른 관성력(inertia force) 및 변위(displacement)가 발생하고 이러한 힘과 변위의 관계는 다음과 같이 유도된다.

[그림 2(b)]와 같은 탄성봉 내의 임의의 요소에서 Newton의 제 2 법칙 $F=ma$ 에 의해 힘의 합은

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x\right) A = \rho A \Delta x \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \text{에서 } \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} \text{로 된다.}$$

한편 Hooke의 법칙 $\sigma = \epsilon E$ 에서

$$\epsilon = \frac{\partial D}{\partial x} \text{이므로 } \frac{\partial \sigma}{\partial x} = E_p \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \text{이 되고,}$$

이를 위 식에 대입하여 정리하면 식(1)로 표시되는 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E_p}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, D : 탄성봉의 축방향 변위

E_p : 탄성봉의 탄성계수

ρ : 탄성봉의 밀도

t : 시간

x : 응력파의 위치

그러나 파동방정식을 이용한 말뚝해석에 있어서는, 말뚝은 자유공간이 아닌 지반속에 관입되므로 말뚝의 선단 및 주변지반의 저항치를 고려하여 식(2)와 같이 수정된 식을 사용한다.

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E_p}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \pm R \quad (2)$$

여기서, R : 지반의 저항치

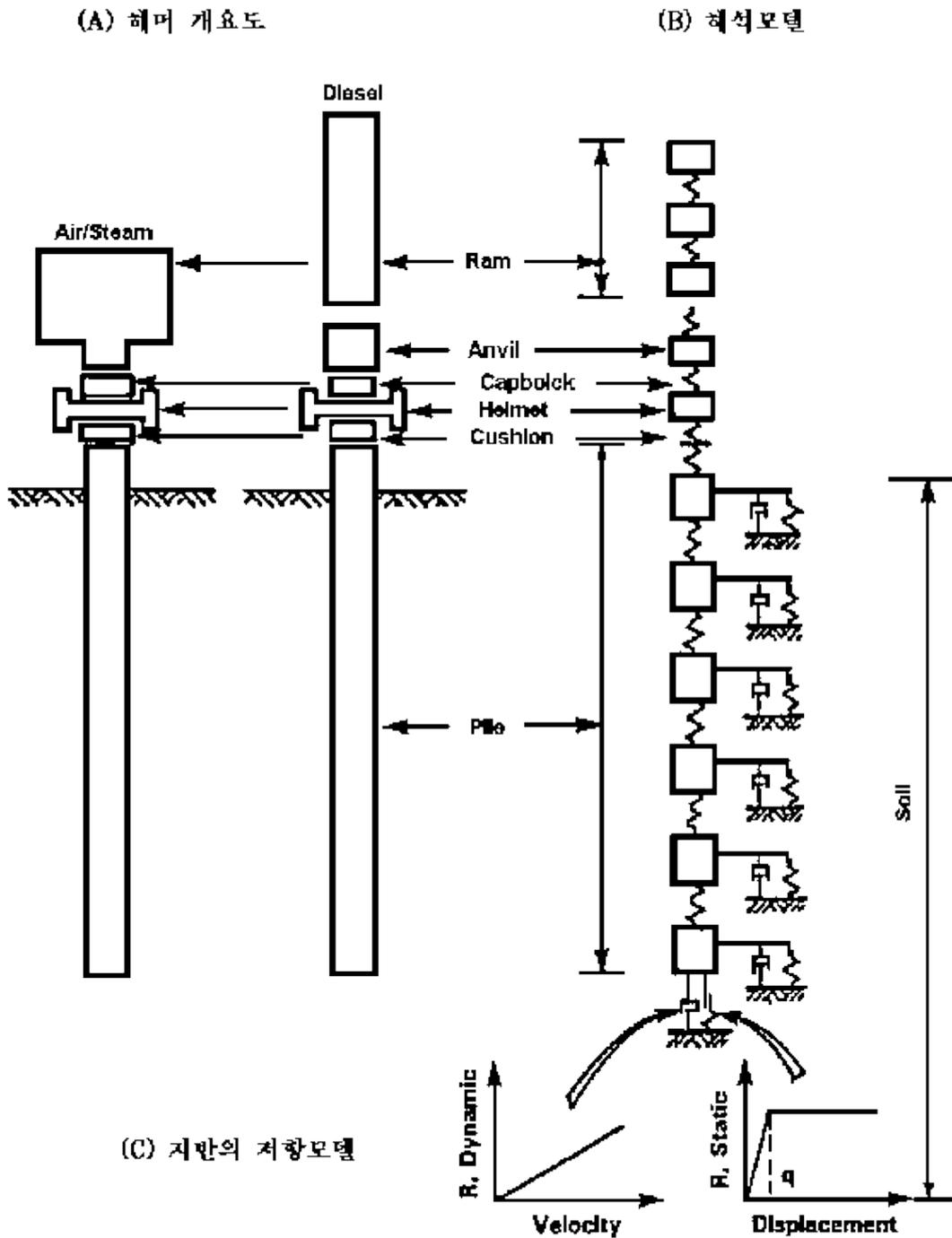
이와 같은 파동방정식은 말뚝내의 응력의 변화로부터 말뚝의 변위와 시간 그리고 요소위치 사이의 관계를 결정하기 위해 초기조건과 경계조건을 사용하여 해를 구할 수 있다. 그러나 실제의 말뚝 항타에 있어서는 말뚝과 항타장비 그리고 주변의 흙의 성질에 관련된 여러 복잡한 인자들로 인해 이론해로써 말뚝의 파동방정식을 해석하기는 상당히 어렵다.

그러므로 파동방정식을 해석하는 방법으로는, 실제의 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 항타에 의한 응력파의 전달과정을 각 요소마다 시간별로 표시하여 변위와 응력 등을 계산하고 극한지지력에 대한 관입저항(set value) 등을 컴퓨터를 사용해서 해석하는 소위 수치해석 방법이 사용되고 있다.

Smith 에 의해 제안된 이 방법은 전술한 바와 같이 항타시 장비의 조합성, 항타응력 및 지지력에 따른 관입저항등을 추정하기 위해 사용되며 컴퓨터 프로그램을 위한 modeling 의 개략은 [그림 3] 과 같다.

[그림 3] 에서 좌측은 실제 말뚝을 나타내고 우측은 컴퓨터 프로그램에 적합하도록 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 이상화시킨 것으로서 각 요소는 재료의 탄성(elasticity)을 나타내는 spring 으로 연결되어 있다. 지표면 이하의 요소에 대해서는

지반의 정적 저항력을 나타내는 soil spring 과 동적 저항력에 대한 지반의 damping 효과를 나타내는 dashpot 를 합하여 저항치 R로 표시되어 있다.



[그림 3] 파동방정식의 수치해석 기본모델

여기서 말뚝선단 및 주면의 정적지반저항을 나타내는 soil spring 은 선형 탄소성으로 modeling 하고 최대 저항력에 해당하는 지반의 탄성변위량 q 를 quake 라 정의한다. 또한 지반의 동적저항은 dashpot 로 modeling 하여 요소의 속도에 비례하는 것으로 나타내며 그 기울기를 damping 계수라 정의한다.

분석이 시작되면 사용자에게 의해 입력된 정적 극한지지력은 구성비율에 따라 말뚝주면과 선단부에 배분되며 damping factor 에 의거 동적 지반저항력을 발휘시킨다.

다음 단계로 파동분석은 입력된 해머의 효율과 낙하고를 이용하여 램의 속도를 계산해 낸다.

램의 움직임은 헬멧과 말뚝두부 스프링의 변위를 가져온다. 이에 따라 각 말뚝요소들의 상·하부는 압축(또는 인장)에 의한 변위와 이에 따른 압축력(또는 인장력)이 발생하게 되며 이와 같은 말뚝요소의 거동은 주위 지반의 저항력을 유발시키게 된다.

어떤 (말뚝)요소에 작용하는 모든 힘의 합을 그 요소의 질량으로 나누면 가속도를 얻을 수 있으며 가속도를 시간에 대해 적분하면 속도를 구할 수 있다. 이 속도와 시간을 곱하면 요소의 변위를 얻을 수 있으며 각 요소들의 변위의 차이는 결국 이들에 작용하는 새로운 힘(spring force)을 나타나게 된다. 이와 같은 힘을 말뚝요소의 단면적으로 나누면 해당 부위에 작용하는 응력(stress)을 구할 수 있다.

이와 같은 방법으로 각 말뚝요소에 대한 계산을 수행하여 첫번째 시간 단계(time step) 동안의 모든 요소들에 대한 가속도와 속도 그리고 변위를 계산한다. 다음으로 파동분석은, 앞서의 시간 단계에서 구해진 각 말뚝요소들의 거동을 기준으로 하여 다음 시간 단계에 대해 같은 방법에 의한 계산을 반복한다.

이와 같은 과정에 의해 시간에 대한 각 말뚝요소들의 가속도, 속도, 변위, 힘 그리고 응력들을 계산하되, 말뚝이 rebound 될 때까지 연속되는 시간 단계에 대한 분석을 진행한다.

말뚝선단부의 잔류침하량은 말뚝선단부의 최대 침하량으로부터 지지력의 크기에 따른 가중치를 주어 계산된 말뚝주면 및 선단부의 평균 quake 를 뺀 값이 되며 meter 당 타격회수로 표시되는 순침하량의 역수(逆數)는 입력된 극한지지력에 상응하는 항타관입저항을 나타낸다.

이상의 방법으로 극한지지력에 대한 파동이론분석을 수행함으로써 극한지지력과 이에 상응하는 관입저항과의 관계를 나타내는 bearing graph 를 얻을 수 있다.

파동이론분석에 의한 bearing graph 는 단일조건의 항타시스템, 해머의 낙하고, 말뚝의

종류, 지반조건 및 특정한 말뚝길이와 연관되어 있으며 이들 중 어느 하나라도 바뀌게 되면 bearing graph 도 변하게 된다. 이밖에 bearing graph 에는 압축응력과 인장응력의 최대 값들이 표시된다.

WEAP 프로그램은 bearing graph 외에 다른 두가지 분석방법, 즉 Inspector s chart 라고도 불리우는 Constant Capacity Analysis 및 Driveability Analysis 를 option 으로 제공하고 있다.

Inspector's Chart 는 사용자가 지정한, 한가지 특정 극한지지력값에 대한 해머 에너지(혹은 stroke)와 관입저항과의 관계를 나타내주며 또한 사용자로 하여금 합리적인 관입저항과 항타응력의 조절을 위해 실제적인 해머 에너지(혹은 낙하고)의 선택이 가능하도록 최대응력값들을 함께 나타낸다.

Driveability Analysis 에서는 사용자가 입력한 주면마찰력과 선단지지력으로부터 사용자가 선택한 관입깊이에서의 관입저항과 항타응력을 계산해 내고 이렇게 계산된 결과는 해당 관입깊이에서의 지지력과 함께 도표로 나타낸다.

Driveability Analysis 는 더 이상 항타에 의한 관입이 불가능한 깊이 및 말뚝재료의 손상을 초래할 정도의 높은 항타응력이 발생할 가능성이 있는 위치를 표시해 준다. 이밖에 예상 항타소요시간 등을 제공해 준다.

3. 컴퓨터 프로그램

지금까지 기술한 파동방정식 적용의 시초는 1955 년 Raymond Pile Driving Company 의 E.A.L Smith 에 의해 그 개념이 발표되면서부터 이며 Smith 는 항타말뚝에 대한 설계, 시공의 해석방법을 개발하여 초창기에는 수계산으로 해석하다가 곧이어 컴퓨터 프로그램에 의한 방법으로 발전시켰다.

Smith 의 연구 이후에 많은 연구자들이 정재하시험을 통하여 파동방정식으로 해석되는 지지력과의 상관성을 검증함으로써 기본이론의 타당성을 확인한 후 1974 년 미국연방도로국(Federal Highway Administration)의 지원 하에 디젤해머에 대한 modeling 을 시작으로 컴퓨터 프로그램 개발에 착수하여 1976 년 Case Institute of Technology 의 연구팀에 의해 WEAP(Wave Equation Analysis of Piles)프로그램이 개발되었다.

1986 년에는 Hery 와 Holloway 의 연구에 기초하여 잔류응력해석(residual stress analysis)기능이 보완된 프로그램으로 발전되었다. 이후에 해머성과 관련된 data file 이 첨가되고 개인용 컴퓨터로 수행 가능한 WEAP 87 package 로 발전되었다.

최근 실용화되어 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 GRLWEAP 은 미국 GRL 社(Goble Rausche Likins and Associates, Inc.)에서 WEAP 87 Code 에 여러가지의 유용한 기능과 data 를 첨가시켜 발전시킨 프로그램 package 이다.

다음에는 GRLWEAP 을 이용한 동적해석을 수행하는 방법에 대하여 기술하였다.

3.1 입력자료

WEAP 을 사용하는 데 있어 파동방정식을 이용한 수치해석에 필요한 입력자료(input data)들을 항타장비, 지반조건, 말뚝에 대해 살펴보면 다음과 같다.

(1) 항타장비

- | | |
|---------------------------|--------------|
| ① 램의 낙하고 및 중량 | ② cap 의 중량 |
| ③ cap block 의 stiffness 값 | ④ cap 의 반발계수 |
| ⑤ cushion 의 stiffness 값 | ⑥ 해머효율 |

(2) 지반조건

- | | |
|--|-----------------|
| ① 지반에 묻힌 말뚝길이 | ② 토질주상도 |
| ③ 지반의 탄성변형량(quake) | ④ 흙의 damping 계수 |
| ⑤ 말뚝 주변마찰력의 분포형태 및 극한지지력에 대한 주변마찰력의 비율 | |

(3) 말뚝

- | | |
|-------------|------------------|
| ① 총길이 및 단면적 | ② 단위중량 |
| ③ 탄성계수 | ④ cushion 의 반발계수 |

위의 입력자료들 중 대부분은 프로그램 내에 여러가지 조건별로 그 값이 내장되어 있으므로 사용자가 쉽게 선택하여 입력 값으로 사용할 수 있게 되어있다. 항타장비에 대한 정보는 hammer data file 이 지원해 주고 있으며 해머효율은 다년간 수행한 현장 검증결과를 토대로 지속적인 update 가 이루어지고 있으며 널리 쓰이는 기존의 경우 제작회사의 협조를 얻어 비교적 적절한 입력 값을 지원해 주고 있다. 또한 지반조건 관련 입력 값의 경우에도 quake 및 damping 계수([표 1] 참조), 주변마찰력 분포형태 및 비율 등을 지반의 종류와 지층형성상태에 따라 적절히 선정, 입력할 수 있도록 지원하고 있다.

3.2 입력자료의 영향

대부분의 공학적 프로그램과 마찬가지로 WEAP 의 실행에 있어서도 실제와 근사한 결과를 얻기 위해서는 적절한 입력 값의 선정이 필수적이다.

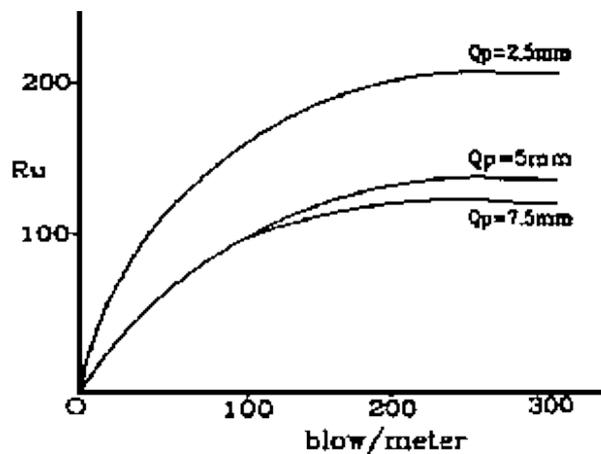
입력 값 선정시의 참고사항 및 적용된 입력 값이 분석결과에 미치는 영향을 간단히 기술하면 다음과 같다.

(1) 극한지지력

극한지지력과 향타시 최종관입량(set value)사이의 그래프(Bearing Graph)를 얻기 위해 일련의 극한지지력 예상 값을 입력하면 각각의 지지력에 해당되는 m 당 타격회수(blow/m)를 산출해 내는데, 극한지지력 산정시 선단지지력과 주면마찰력의 비율은 정역학적으로 구한 말뚝의 지지력을 사용하여 결정한다. 일반적으로 주면마찰력이 차지하는 비율을 증가시키면 거의 관입저항 즉 set value 의 변화 없이 극한지지력을 증가시키는 효과를 가져오게 된다.

(2) 지반의 탄성변형량(Quake)

말뚝 주면부의 quake 값은 지반의 종류에 관계없이 통상적으로 2.5mm(0.1 inch)를 사용하며, 선단부 지반의 quake 값은 지반조건에 따라 [표 1] 에서와 같은 경험적인 값이 주로 사용되지만 향타시 최종관입량 측정에 의해서도 파악할 수 있다. 일반적으로 quake 값은 말뚝선단부가 주면부 보다 크다. Quake 의 크기가 말뚝의 지지력 및 관입저항(m 당 타격회수)에 미치는 영향은 [그림 4] 에서 보는 바와 같다. 또한 향타응력에 있어 선단부 quake 가 크면 압축응력은 감소한다.



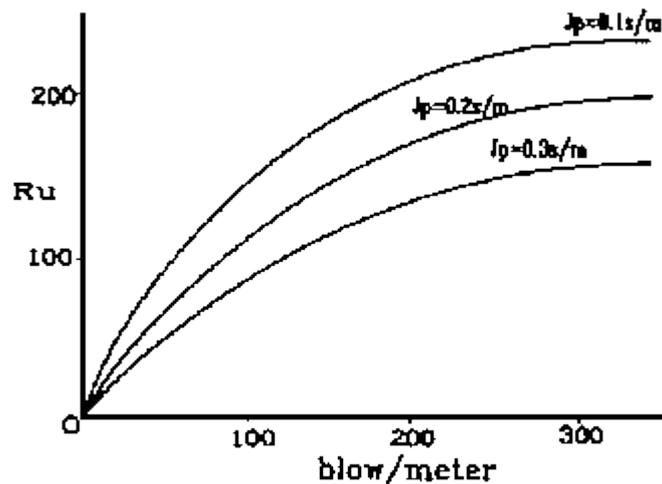
[그림 4] quake와 관입저항의 관계

[표 1] Recommended Quake Values

	Soil Type	Pile Type or Size	Quake (mm)
Shaft Quake	All Soil Types	All Types	2.5
Toe Quake	All Soil Types, Soft Rock	Open ended pipes	2.5
	In dry soils, or in very dense or hard soils	Displacement Piles of diameter D or width D	D/120
	In submerged soils of in loose or soft soils	Displacement Piles of diameter D or width D	D/60
	Hard Rock	All Types	1.0

(3) 지반의 Damping 값

모래 및 점토지반에 있어서 관입저항이 같을 때 damping 이 클수록 말뚝의 지지력은 작아진다 [그림 5] . 경험적인 damping 추천 값은 [표 2] 와 같다.



[그림 5] damping과 지지력의 관계

[표 2] Recommended Damping Values

	Soil Type	Damping Factor (s/m)
Shaft Damping	Non-cohesive soils	.16
	Cohesive soils	.65
Toe damping	In all soil types	.50

(4) 말뚝종류에 의한 영향

말뚝의 종류가 지지력 및 관입저항(타격회수)에 영향을 미치는 요소는 지반에 묻힌 길이, 재료의 탄성계수, 단면적 등이 있으나 탄성계수와 단면적의 영향이 상대적으로 크다. 탄성계수가 크면 관입저항은 감소하지만 항타응력은 증가한다. 반면에 말뚝의 단면적이 증가하면 항타응력이 감소하게 된다.

(5) 항타장비

각종 항타기에 대한 제원은 컴퓨터 프로그램에 내장되어 있으므로 항타에 사용될 장비의 고유번호(예 : Kobe-25 26 번, Kobe-35 28 번)를 입력하면 프로그램 내에서 해당장비에 대한 입력이 수행되며 해머의 효율은 전술한 바와 같이 종류에 따라 프로그램에서 추천하는 값들을 사용할 수 있으나 사용하는 장비의 노후정도, 개조 여부 등에 따라 심한 차이가 있을 수 있으므로 실제 항타작업에 사용할 장비의 효율은 동재하시험(dynamic test) 결과를 이용하거나 사용자의 경험에 의해 적절한 값을 입력하는 것이 바람직하다.

(6) 말뚝 쿠션재(cushioning material)

말뚝두부에 설치되는 쿠션재는 항타 시공성을 저하시키나 항타시 발생하는 응력을 감소시켜 말뚝을 보호하는 효과를 가져온다. 특히 항타응력의 허용 값이 작은 말뚝(대부분의 콘크리트 말뚝 및 목재 말뚝)의 경우 말뚝 쿠션재의 사용이 반드시 필요하다.

3.3 해석결과의 적용

말뚝 설계시 말뚝의 종류와 항타장비를 선정할 다음 전술한 WEAP 프로그램을 사용하여 파동이론분석을 실시하면 아래와 같은 사항을 파악하는데 도움을 얻을 수 있다.

(1) 항타관입성 예측 및 말뚝 단면의 결정

다짐이 잘된 성토지반의 하부, 즉 성토층과 지지층 사이에 연약한 지층이 존재하는 경우 말뚝은 항타에 대한 관입저항이 매우 큰 성토층을 관통하여 연약층 하부의 견고한 지지층까지 도달하여야 한다.

이러한 지반에 직경에 비해 두께가 얇은 강관을 선택하는 경우, 파동이론분석에 의해 항타관입성(driveability)을 검토해 보면 선정된 해머보다 훨씬 큰 중량의 해머를 사용하여도 이 강관말뚝을 지지층까지 항타할 수 없다는 결과를 얻을 것이다.

이는 선택한 강관의 두께가 얇기 때문 즉, 말뚝의 강성이 작아 타격력이 말뚝선단까지 충분히 전달되지 못하기 때문이며 시공성 확보만을 위해 필요이상으로 두꺼운 단면의 강관을 사용해야 한다는 결론을 얻게된다.

이를 해결하기 위해서는 단단한 성토지반을 선굴착 하는 방법 등 보조공법을 고려할 수 있다.

(2) 관입깊이의 확보 및 허용항타응력 조건에 부합하는 말뚝재질의 결정

얇은 단면의 강관말뚝을 소요깊이까지 항타하는 것이 가능하나, 항타응력이 허용치를 초과하는 경우, 해머의 쿠션을 더하거나 에너지를 낮춘다면 항타응력을 낮출 수 있겠지만 말뚝은 더 이상 관입되지 않을 것이다. 이 경우에는 강관의 재질을 고강도로 바꾸는 것이 해결책이 될 수 있다.

항타시 압축응력은 PC 및 PHC말뚝의 경우 대체로 $0.6f_c'$, 즉 일축압축 강도의 60%를 허용치로 하고 있으며, 강관말뚝의 경우는 $0.9f_y$, 즉 항복응력의 90%를 한계로 설계하는 것이 보통이다.

또한 PC(PHC)말뚝의 경우 AASHTO(1994) 규정에 의한 인장응력 허용값은 $0.25\sqrt{f'_c+f_{re}}$ (MPa)이다.

(3) 말뚝길이, 설계지지력 및 말뚝개수의 조정

말뚝을 소요깊이까지 관입시키기 위해 말뚝의 단면을 키우거나 재료의 강도를 높인다면 말뚝의 설계하중을 높여서 총 말뚝 개수를 줄일 수 있다. 단, 이 경우에는

기초의 구조적인 검토가 수행되어야 할 것이다.

이상은 설계단계에서 파동이론분석을 적용하여 구할 수 있는 사항들이며, 시공단계에서는 실제 사용되고 있는 장비에 대해 재차 파동이론분석을 수행함으로써 다음과 같은 사항을 파악할 수 있다.

(4) 향타장비 및 쿠션(cushion)의 선정

말뚝종류(재료 및 형태)와 관입깊이가 결정되면 해머의 크기와 종류가 향타응력에 결정적인 영향을 주는 요소가 된다.

낙하고(stroke)를 조정할 수 있거나 연료조절장치가 장착된 해머는 지반의 연약층을 통과할 때 낙하고를 줄여서 말뚝을 단단한 지층까지 관입시킬 수 있을 것이다.

보통 쿠션은 향타응력을 낮추기 위해 사용되나 연성 재료의 쿠션일수록 많은 향타에너지를 흡수하여 소진함으로써 관입저항을 증대시킨다.

말뚝향타시 타격수를 제한하는 것이 보다 경제적이고 안전하므로(말뚝재료의 피로현상을 줄임) 허용향타응력을 유지하기 위하여 항상 연성 재료의 쿠션을 선택할 수는 없다. 또한 향타응력을 제한하기 위하여 해머쿠션의 종류(재질)를 바꾸는 것은 큰 효과가 없는 것으로 보고되고 있다.

해머의 크기와 에너지(setting)조절 및 쿠션의 재질 등은 최대 관입저항이 400 타/m 이내가 되도록 선택하여야 한다.

(5) 경제적인 향타장비 조합의 선택

설계자가 설계지지력 확보를 위한 가장 안전하고 확실한 향타방법에 관심을 갖는데 반해 시공자는 공사비를 고려하여 시공소요시간을 단축할 수 있는 장비 조합을 원한다.

해머는 작동이 원활하고 경량이며 또한 구조가 복잡하지 않고 내구성이 강하여 타격속도가 빠른 것이 당연히 선호된다.

파동이론분석에 의해 예상되는 향타소요시간과 타격수를 추정할 수 있으며 이는 향타장비 조합의 경제성을 비교하는데 유용하게 사용될 수 있다.

지지층까지의 심도가 매우 깊고 특히 중간에 비교적 단단한 지층이 존재하는 경우 말뚝을 관입시키기 위해서는 많은 시간이 소요되므로, 전체비용을 고려할 경우 강성이 높은 말뚝일수록 재료의 손상가능성을 줄이면서 빠른 시간 내에 공사를 마칠 수 있다는 점을 말뚝종류 선정 기준으로 삼을 수 있을 것이다.

4. WEAP 해석의 유의사항

항타공식은 원칙적인 문제점을 갖고 있어 신뢰성에는 많은 의구심이 제기되어 왔으며, 미국을 비롯한 서구 각국에서는 더 이상 항타공식을 사용하지 않는 형편이다.

파동방정식을 이용한 말뚝해석의 경우 이론상 문제점이 적으며 말뚝의 극한지지력 예측과 함께 말뚝에 작용하는 항타응력을 예측하여, 장비조합을 가능케 하는 등 항타시공성(driveability)을 고려한 말뚝해석방법으로서 비교적 신뢰성 있는 방법임에는 틀림이 없다. 그러나 파동이론분석을 이용하는 경우에도 다음에 기술하는 여러 가지 유의사항을 주지하여야 할 것이다.

4.1 분석방법의 선택

파동이론분석이 지질주상도를 근거로 한 말뚝의 지지력을 결정해 주는 것은 아니며 정적지지력 분석과 혼동되어서는 아니 된다.

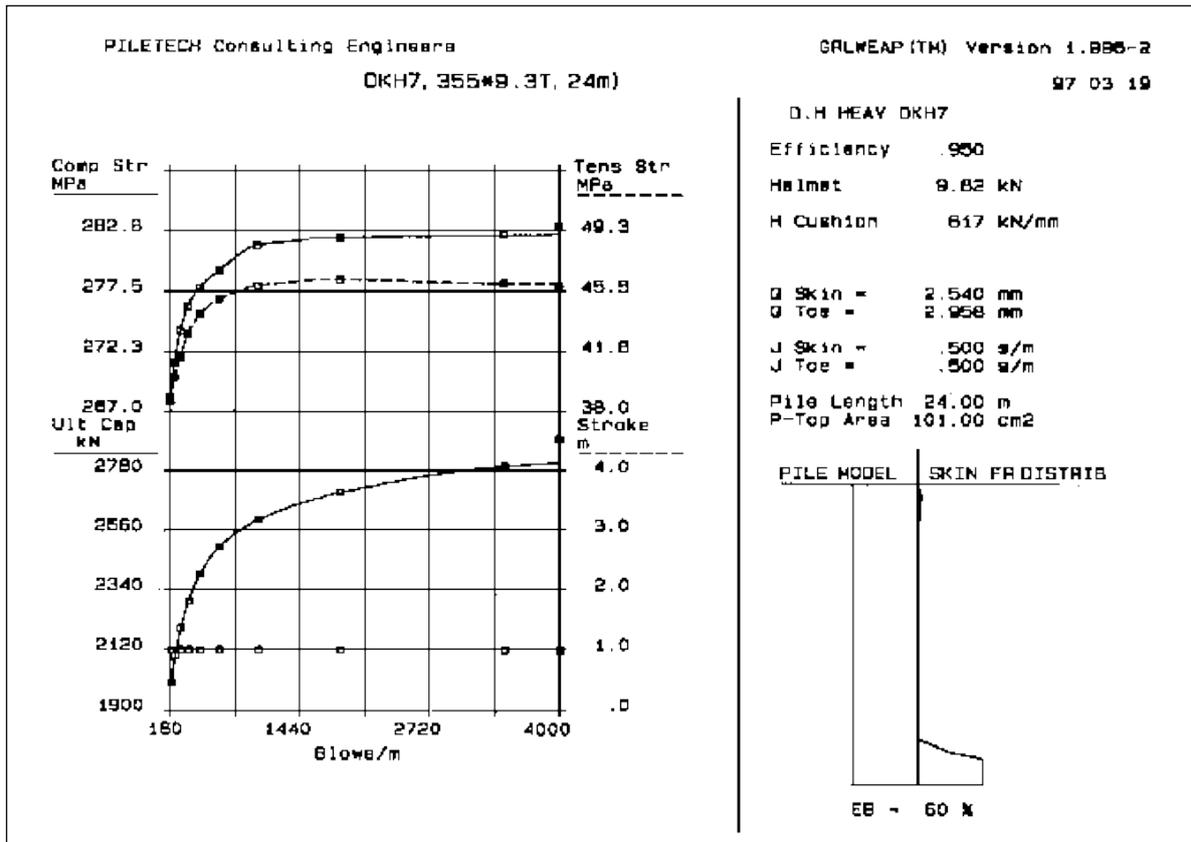
파동이론분석은 정해진 극한지지력에 상응하는 관입저항을 산정해낸다. 바꾸어 말하면 이것은 현장에서 측정된 관입저항을 근거로 예상 극한지지력을 산출해 내는 것이다.

어떤 정해진 지지력에 대해 파동이론분석에 의한 지지력 도표(Bearing Graph)를 구하는 것과 어떤 특정한 관입깊이에서 그 지지력을 실제로 확인하는 것은 완전히 다른 문제이다. 가장 크게 실망하는 경우는 설계시 산정한 것과 실제 시공시의 말뚝관입깊이가 크게 다를 때이며 이를 피하기 위해서는 파동이론분석에 앞서 반드시 정적지지력 분석을 실시할 것이 요구된다.

정적지지력 분석을 실시하면 원하는 지지력을 얻기 위한 개략적인 말뚝관입깊이 또는 어떤 특정한 관입깊이에서의 개략적인 지지력을 구할 수 있다.

정적지지력 분석을 완료한 후 WEAP 해석을 실시하여 지지력 - 관입저항의 상관관계를 나타내는 도표를 얻거나(Bearing Graph Analysis) 관입깊이에 따른 항타관입저항과 항타응력의 관계를 보여주는 항타시공관입성 검토를 수행 할 수 있다(Driveability Analysis).

Bearing Graph Analysis 는 단지 분석을 실시한 지층의 근접범위 내에서만 적용가치가 있으며 Driveability Analysis 는 지정한 여러 위치의 관입깊이(최대 100 개소 까지 가능)에 대해 항타관입저항과 항타응력을 산출해주기 때문에 보다 포괄적인 정보를 제공해 준다.



[그림 6] bearing graph analysis의 예

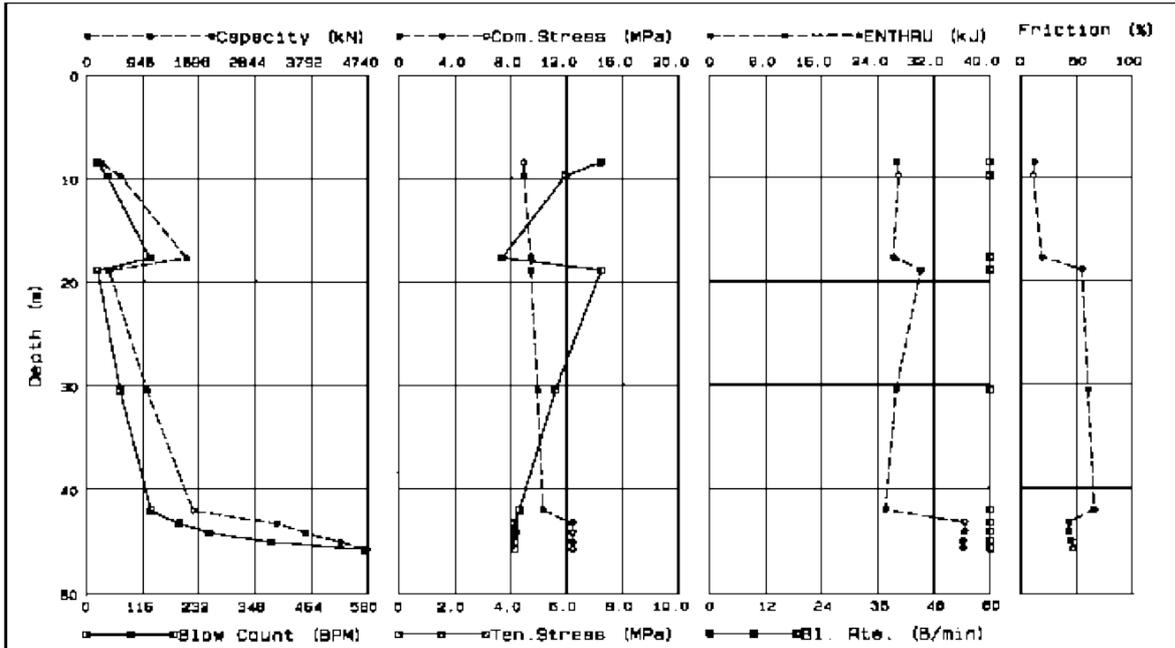
EXAMPLE 11: BLOW COUNT VERSUS DEPTH

1997 11 28

PILETECH Consulting Engineers

Shaft/Toe B/L 1.000 / 1.000

GRLWEAP (TM) Version 1997-2



[그림 7] driveability analysis의 예

그러나 이들 두 가지 분석방법사이에는 매우 근본적인 차이가 있다. 즉, Bearing Graph Analysis 는 어떤 **정해진 관입깊이에서 관입저항에 따른 지지력을 산정** 해주며 Driveability Analysis 는 향타가 진행됨에 따라 지정된 관입깊이에서의 과응력 발생여부, 관입저항의 크기(향타수 과다여부)를 분석하여 **향타과정에서 발생할 수 있는 문제점들을 지적**해준다. 만약 말뚝의 실제 향타결과가 파동이론분석결과와 달리 나타난다면 지반의 parameter 들을 바꾸어 실제 관측된 상황과 부합되도록 재분석을 실시하는 것이 필요하다.

비록 실제와 부합되는 지반요소들을 사용하여 정확한 정적지지력 분석과 파동이론분석을 실시하였다 하더라도 실제 향타시 측정된 지반저항이 예상하였던 것보다 크게 다르게 나타나는 것은 그리 놀랄만한 일이 아니다.

대개 실제 향타시 관입저항은 파동이론 분석에 의한 것보다 낮은 경우가 많다.

예를 들어, 50 ton 의 설계지지력을 가진 말뚝을 점토층에 향타하는 경우 안전율 2.5 를 적용한다면 필요한 극한지지력은 125 ton 이 된다.

정적지지력 설계에 의해 말뚝의 길이는 25 m 가 되어야 하고, 선단지지력은 무시할 정도이며 향타후 시간경과에 따른 지반의 set-up 효과를 고려할 때 향타시에 발휘할 수 있는 지지력(주로 주면마찰력)은 장기 지지력의 50%에 불과한 것으로 분석되었다고 한다면 말뚝은 62.5 ton 의 지지력을 25 m 깊이에서 발휘할 수 있도록 향타하면 된다.

즉 향타종료시(EOID) 지지력은 62.5 ton 이 필요하며 약 일주일 정도 시간이 경과한 후 재향타시(Restrike) 기대되는 지지력은 125 ton 이 되어 EOID 일 때에 비해서 훨씬 큰 관입저항을 발휘하게 될 것이다.

위의 든 예는 분석결과와 실제와의 차이가 발생하는 주요원인의 한가지를 보여준 것이다.

그러나 파동이론 분석결과와 정확도는 주로 분석방법 자체의 현실성과 모델에 적용한 각종 지반특성 계수의 정확도에 따라 결정된다.

즉, 지반모델이나 지반특성계수가 실제 지반의 거동특성을 부정확하게 반영하였다면, 또한 modeling 한 향타장비의 요소들이 해머의 정비상태나 쿠션의 상태를 고려하지 않았다면 파동이론 분석결과와 정확도는 크게 떨어질 것이다.

다음에 파동이론 분석시 범하기 쉬운 몇 가지 잘못들에 대해 고찰해 보기로 한다.

4.2 해머자료의 입력-유압해머

파동이론 분석에 있어 결과에 가장 큰 영향을 미치는 입력 값의 하나는 해머의

효율이다. 해머의 효율은 램의 위치에너지(potential energy)에 대한 타격직전의 램의 운동에너지(kinetic energy)의 비로 나타내며 에너지 손실의 많은 요소들은 일괄하여 이 한가지로 표시된다.

해머효율을 너무 높게 책정하면 낮은 관입저항으로 나타날 것이며 따라서 말뚝의 극한지지력이 과대 평가될 수 있다. 또한 보수적인 말뚝지지력 산정을 위해 효율을 아주 낮게 책정하면 관입저항 즉 항타응력이 과소 평가되어 결국 항타 도중 말뚝이 파손되는 상태에 도달할 가능성이 있다.

사항(斜抗)의 경우는 해머효율을 낮추어야 하며 감소 정도는 해머의 종류와 사항의 각도에 따라 결정된다.

최근의 유압해머들은 대부분 지속적인 램의 운동에너지 조정이 가능하도록 되어 있으며 이를 측정하여 control panel 에 표시하도록 되어있다. 이 경우 해머의 효율은 낙하하는 램의 마찰저항에 의한 감소를 고려할 필요가 없으므로 그 값은 비교적 높다(0.95 정도).

이러한 해머에 대해서는, 파동이론분석을 실시하여 정격에너지보다 다소 낮은 여러 가지 에너지 값(또는 stroke)을 입력해 봄으로써 항타응력의 조절과 경제적인 관입저항 값을 얻기에 가장 적합한 에너지 단계를 선정할 수 있다.

그러나 실제의 경우 흔히 낙하고의 감소가 지나치거나 최대 낙하고까지 충분히 도달하지 못하는 등 정확한 낙하고의 조절이 용이치 않은 경우가 있다는 점을 간과해서는 아니 된다. 즉, 낙하고의 증감에 따라 각각 효율을 증감하여야 할 필요도 있을 것이다.

4.3 해머자료의 입력-디젤해머

디젤해머의 낙하고는 지반의 저항 즉 관입저항 값이 증가함에 따라 같이 증가한다. WEAP 은 이러한 거동을 down stroke 로 나타내며 계산된 up stroke 가 이와 다를 경우 이 값을 사용하여 분석을 되풀이하여 down stroke 를 산출해낸다. 분석결과 산출된 stroke 의 정확도는 전체적인 해머-말뚝-지반의 모델이 얼마나 실제와 부합하느냐에 달려 있으며 따라서 실제 현장에서 측정한 stroke 와 비교되어야 한다.

부정확한 stroke 로 인해 초래되는 결과는 여러 가지가 있을 수 있다. 예를들면 연소압력(combustion pressure)을 높게 책정하면 stroke 를 높이는 결과가 되며 따라서 항타응력 값은 지나치게 높게 추정되는 반면 말뚝의 극한지지력은 실제보다 큰 쪽으로 계산되는 결과를 낳게 된다.

낙하고와 말뚝에 전달되는 에너지사이에는 밀접한 관련이 있으며 파동이론분석에 의한 예상치와 실제와의 사이에 큰 차이(10%이상)가 있을 경우에는 반드시 그 원인이 규명되어야 한다. 낙하고가 높다고 해서 반드시 전달에너지 값이 크게 되는 것은 아니다. 해머가 사전점화(pre-ignition)되면 - 대개의 경우 정비불량으로 인해 - 타격이 발생하기 전에 연료가 연소되며 이로 인해 낙하하는 램의 속도를 늦추게 되어 타격력을 완화시킨다. 그 결과 램에너지의 극히 일부분만이 말뚝에 전달되게 되며 대부분의 램에너지는 해머에 잔류하게 되어 낙하고를 높이게 되는 결과를 가져오는 것이다.

만약 이 경우 정상적으로 작동하는 해머라는 가정 하에 계산된 낙하고와 실측한 낙하고를 일치시킴으로써 연소압을 산출해 낸다면 계산결과 구해진 전달에너지의 크기는 실측된 것보다 훨씬 크게 나타날 것이며 또한 계산된 타격회수는 지나치게 작게 될 것이다.

그러므로 어떤 현장에서 해머에 문제가 발생하면 될 수 있는 한 빨리 이를 교정해야 하며 만약 여의치 못한 경우라면 여러 가지 경우의 낙하고 또는 연소압 값을 사용, 실제 측정치와의 matching analysis 를 실시하여 이들 중 가장 보수적인 결과를 선택하여야 한다.

4.4 쿠션(Cushion)

쿠션은 타격이 가해지는 동안 파괴응력 하에 놓이게 되므로 지속적으로 재질이 변화하게 된다. 말뚝쿠션은 대체로 그 결의 직각방향으로 하중을 받도록 되어있는 연한 재질의 목재로 만들어지기 때문에 계속적으로 타격이 진행됨에 따라 강성의 현저한 증가를 가져오게 된다.

통상적으로 말뚝에 에너지를 전달하는데 있어서 목재쿠션의 효율은 타격이 진행됨에 따라 연소되는 시점까지 계속 증가하고 그 직후 급속히 감소하게 된다. 보수적인 분석결과를 얻기 위해서는 항타응력에 기준을 두는 경우 단단한 쿠션재를 사용하고(탄성계수의 증가, 두께의 감소), 산출되는 지지력의 크기에 기준을 두는 경우 효율이 낮은 쿠션 즉 강성 및 회복지수(Coefficient Of Restitution ; C.O.R)가 낮은 것을 사용하여야 한다. 만약 쿠션의 정확한 특성 값을 알지 못하는 경우라면 통상적인 값의 25%내외의 값들을 적용하여 그 결과를 비교토록 한다.

해머쿠션으로서 wood chip 을 사용하는 것은 재료의 불균질성으로 인해 그 결과를 예측할 수 없으므로 절대 사용해서는 아니 된다. 특히 시공관리기준을 위해 파동이론분석을 실시하는 경우 특별히 유의하여야 한다.

최근에는 쿠션을 사용하지 않는 해머들이 사용되고 있다. 이들 해머에 대한 파동이론분석에 있어서는 쿠션을 modeling 한 스프링이 없으므로 해머와 헬멧사이의 스프링 강성은 램 또는 impact block 의 것을 사용하게 되나 이렇게 되면 이 스프링의 강성이 다른 모든 해머 구성요소들의 강성에 비해 훨씬 크기 때문에 부정확한 타격응력을 도출해 내는 경우가 발생한다.

또한 분석을 위해 나눈 말뚝요소(pile segment)의 개수를 어떻게 결정하는가에 따라 계산결과의 정확도가 달라진다. 일반적으로 말뚝요소의 수효가 많을수록 타격응력의 계산 값은 보다 정확하게 산출된다.

4.5 지반특성 계수의 선정

(1) Set-Up(또는 Relaxation) Factor

파동이론분석에 있어 말뚝의 극한지지력 예측의 가장 큰 오류는 대부분 지반저항을 적절치 못하게 감안했을 때 발생한다. 또한 파동이론분석에 의해 산출된 지지력은 반드시 소정의 안전율(factor of safety)로 나누어 허용지지력을 산출하여야 한다.

항타종료 시점에서 지반은 교란된 상태이기 때문에 말뚝의 지지력 값은 얼마간 시간이 흐른 뒤에 비해 낮은(때로는 높은) 값을 나타내게 된다. 이러한 이유 때문에 재항타시험을 실시하여 시간경과에 따른 지반의 강도변화가 발생한 후의 지지력을 평가해야 한다. 그러나 이러한 재항타시험이 항상 쉬운 것은 아니다. 흔히 재항타시 해머가 충분히 달아있지 않기 때문에 필요한 타격에너지를 발휘하기까지 예비타격을 가하게 되며 이로 인해 지반의 지지력(주로 주면마찰력)은 감소하게 된다.

지반의 특성(민감도-sensitivity)에 따라 다르나 재항타시험시 관입저항 값의 측정엔 말뚝의 침하가 발생하는 경우 초기 75 mm 관입량에 대해 행하도록 한다(set-up 에 대해 매우 민감한 지반이라면 이 경우 보수적인 지지력 값을 나타낼 수도 있다).

항타시공관리를 위한 경우는 시공된 후의 많은 말뚝에 대해 재항타시험을 행하기 보다는 시항타 계획을 수립/실시하여 당해 현장에 대한 set-up factor 를 찾아내는 것이 보다 합리적이다.

재항타시험에 있어 사용해머가 말뚝의 침하를 유발하여 지반의 지지력을 발휘하기에 충분한 타격에너지를 발휘할 수 있다면 여러 동적요소의 측정을 포함한 재항타시험은 set-up factor 를 산출하기에 매우 효과적인 방법이 될 수 있다.

본공사를 위한 말뚝의 시공시 항타종료시점에서 요구되는 말뚝의 지지력은 소요극한지지력을 set-up factor 로 나눈값이 된다. 이렇게 하여 파동이론분석과

조정된 항타시 지지력을 사용하여 항타종료시 최종관입량 또는 타격회수를 산정할 수 있다.

지반의 지지력 분포를 정적해석결과에 의한다면 항타 진행과정에서 주면마찰력을 상실하게 되므로 파동이론 분석시 주면마찰력의 크기가 과다하게 책정될 가능성이 크다. 따라서 이러한 경우 set-up factor 를 적용하여 조정(감소)된 주면마찰력을 사용하여 항타시공성 분석(driveability analysis)을 수행함으로써 정적 해석에 의해 산출된 지지력을 항타시 놓이게 되는 조건으로 조절할 수 있다.

(2) Quake 및 Damping Factor

비록 항타종료시 또는 재항타시의 지지력을 적절히 고려하는 것이 정확한 분석결과와 도출을 위해 가장 중요한 점이지만 흔히 동적인 지반특성 요소들의 선택 또한 매우 중요하다.

Damping factor 들은 항타 후 시간이 경과함에 따라 변화하는 것으로 관찰되었다. 따라서 재항타의 경우 WEAP 매뉴얼상에 제시된 damping 값보다 높은 값을 선택하는 것이 필요할 수도 있다. 어떠한 경우든 또한 어떤 종류의 지반이건 damping factor 값은 일정치 않다.

연약지반의 경우 WEAP 에서의 추천 값보다 훨씬 높을 수도 있고 단단한 암반의 경우 훨씬 낮을 수도 있다. 낮은 damping 값을 선택하게 되면 지지력 예측 값이 보다 큰 쪽으로 나타나게 된다.

Shaft quake 값은 보통 0.1 inch, 즉 2.54 mm 를 사용하는 것으로 만족할 수 있다. 그러나 toe quake 의 경우 통상적으로 사용하는 말뚝직경을 120 으로 나눈 값보다는 큰 값을 사용해야 하며 특히 지반이 동적으로 민감하게 영향을 받는 경우 해당된다.

정확한 지반의 quake 값은 오직 동재하시험에 의해서 측정해 낼 수 있다. 그러나 동재하시험에 의한 측정 data 가 없는 경우, 예상치 못한 문제점에 대비하기 위해서는 보수적인 쪽의 가정치를 사용하는 것이 필요하다.

주면마찰력이 지지력의 주성분이 되는 말뚝의 경우 toe quake 값은 파동이론분석 결과에 심각한 영향을 미치지 않는다. 그러나 선단지지 말뚝의 경우, 특히 배토말뚝을 포화된 지반에 항타 시공하는 경우 큰 toe quake 가 발생하게 되어 선단저항이 매우 더디게 형성되며 따라서 압축응력파가 말뚝선단부에 도달하는 최초의 순간에는 지반저항이 매우 작게 발휘되고 인장파가 발생하게 된다.

콘크리트 말뚝의 경우 인장파의 발생은 말뚝의 손상을 가져올 수 있다. 또한 동시에

큰 값의 toe quake 는 매우 많은 양의 에너지를 소모시키게 되어 타격회수를 증가시키게 된다. 이러한 경우, 쿠션을 더하거나 해머의 낙하고를 낮추는 것 등은 적절한 해결책이 되지 못하며 대신에 더 무거운 램을 가진 해머를 사용하여 낙하고를 낮춤으로써 큰 toe quake 로 인한 위해(危害) 효과를 감소시켜야 한다.

(3) Residual Stress Analysis(RSA)

잔류응력을 고려한 파동이론분석(Residual Stress Analysis : RSA)은 기본 개념상 또는 그 결과에 있어서 보통의 분석방법에 비해 우수하다. 그러나 아직은 잔류응력분석에 사용되어야 하는 동적지반상수들(quake 및 damping)을 결정할 수 있는 충분한 검증작업이 이루어지지 못하고 있다.

RSA 의 채택이 지연되고 있는 또 다른 이유는 분석속도가 느리다는 점이다. 하지만 매우 큰 주면마찰력을 갖는 장대말뚝의 경우 통상적인 파동이론분석과 함께 반드시 RSA 를 수행함으로써 말뚝에 손상이 발생할 수 있는 응력조건 및 일반적인 파동이론분석에 의해 산출되는 것보다 큰 극한지지력을 발휘할 수 있는지의 가능성 등을 예측할 수 있다.

주의할 점은, RSA 를 set-up 에 민감한 지반에 있어 타격회수가 증가할수록 점차 타격에너지가 증가하고 주면마찰력이 계속해서 감소하는 재향타 초기의 상태에 대해 적용할 수는 없다는 점이다. 즉, RSA 는 해머의 에너지와 말뚝의 지지력이 타격이 진행되는 동안 일정하게 지속된다는 가정 하에서만 성립한다.

4.6 동재하시험 결과와의 비교

파동이론분석에 의해 예측된 항타응력과 지지력 값들은 실제 현장에서 측정된 동재하시험 결과와 잘 부합된다고 알려져 있다. 그러나 이에 추가하여 낙하고(stroke), 연소실압력(bounce chamber pressure) 및 전달에너지(transferred energy)와 같은 사항들을 관찰/측정하여 비교하여야 한다.

흔히 실제 전달된 타격에너지는 파동이론 분석에 의해 계산된 값보다 다소 작다. 이 경우 단지 해머의 효율만을 조절하여(낮추어) 측정치와의 부합정도를 향상시킬 수 있지만 대신 항타응력과 지지력 값의 부합에 있어서 차이를 가져올 수 있다. 따라서 해머의 효율을 조절하는 대신 C.O.R 값을 낮추는 것도 고려해야 한다. 실제 측정치와의 부합은 매우 힘든 일이므로 타당한 이유 없이 억지로 해서는 아니 된다. 항타응력과 전달에너지의 경우 10% 이내로 부합된다면 정확도는 충분한 것으로 간주할 수 있다.

파동이론분석 결과에 의한 최대응력 발생 부위는 말뚝전장에 걸쳐 어느 곳이나 될 수 있으므로 실제 측정시 발생하는 수치와 일치하지 않을 수 있다. 따라서, 파동이론분석결과와 실제 측정결과를 비교할 때 측정부위에 해당하는 말뚝요소(pile segment)에 대한 extrema table 상에서의 항타응력을 검토하는 것이 중요하다.

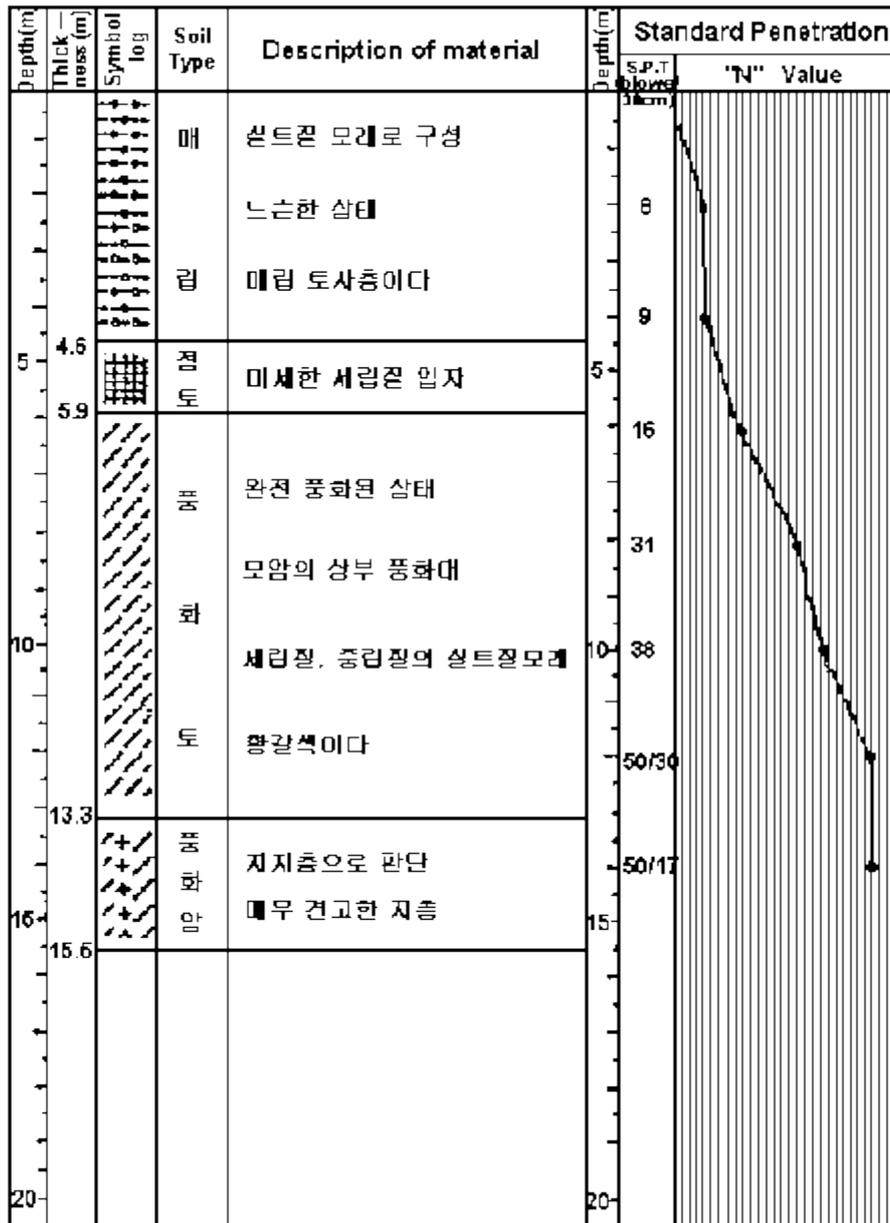
이상을 정리하면 파동이론분석결과와 실제 측정결과를 비교하는데 있어 다음과 같은 과정을 제안할 수 있다.

- ① 모든 입력 값의 조정은 파동이론분석에 의한 결과치가 동재하시험에 의한 측정값의 10%이내가 될 때까지로 한다.
- ② 파동이론분석을 위한 modeling 은 측정시 사용할 항타장비와 가능한 한 정확히 부합되도록 한다. 측정된 낙하고와 CAPWAP 에 의한 지지력 값과 이에 수반된 지반의 특성계수들 그리고 쿠션 재질에 따른 값들을 사용한다.
- ③ 전달에너지 측정값과의 부합을 위해서는 해머의 효율을 최대 0.95 까지 증대시킨 다음 점차 50%정도까지 감소시킨다. 만약 효율의 변화만으로 실측치와의 오차를 10% 이내로 조절하는 것이 불충분할 때는 쿠션의 C.O.R 을 조절한다. 단 쿠션의 C.O.R 값은 0.98 이상 증가시켜서는 안되며 또한 표준추천 값의 50%이하로 감소시켜서도 아니 된다.
- ④ 실측 타격력과 부합시키기 위해서는 말뚝 또는 해머 cushion 의 강성(stiffness)을 조절한다. 이 과정은 다음에 전달에너지를 부합시키기 위해 앞서 ③항에서 언급한 해머효율과 C.O.R 의 재조정을 필요로 할 것이다. 전달된 에너지와 타격력이 실측치의 10%이내가 될 때까지 앞서 ③항과 본 항의 과정을 되풀이 한다.

5. WEAP 해석 적용 예

앞에서 설명한 내용을 예를 통해 설명하기 위하여 국내의 실제 지반조건에서 말뚝기초의 항타시공성을 검토해 보았다. 본 검토에서는 국내의 전형적인 지반조건에 일반적으로 많이 사용되는 PC 또는 PHC 말뚝을 항타 시공하는 경우를 분석하였다.

[그림 8] 은 표토, 풍화토, 풍화암으로 구성된 전형적인 지반조건을 보여준다. 이와 같은 지반에 직경 350 mm 와 400 mm 의 PC 또는 PHC 말뚝을 항타 시공하는 경우 얻을 수 있는 말뚝의 허용지지력은 시공장비 선정에 따라 크게 상이하다.



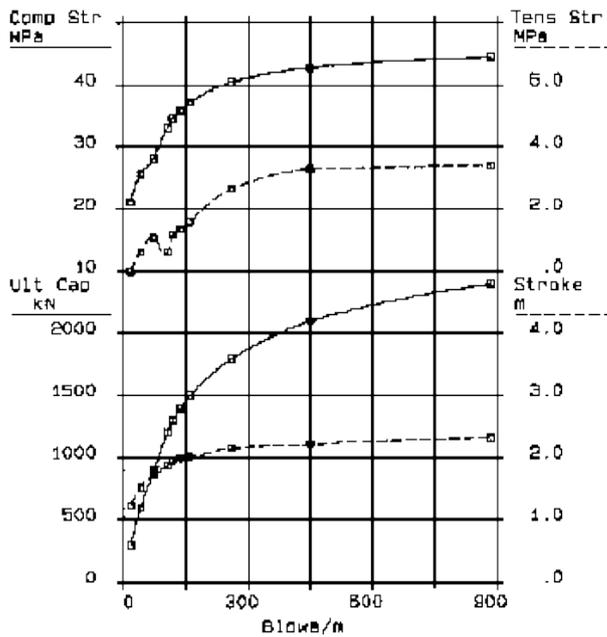
[그림 8] 지 반 조 건 1

[그림 8] 과 같은 지반에 직경 350 mm PC말뚝을 K-25 디젤해머로 항타시공하는 경우의 WEAP해석결과는 [그림 9] 와 같다.

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke	Energy (KN-m)
1	300.0	21,261	0,000	17.4	1,23	30,29
2	600.0	25,719	0,658	40.9	1,53	25,70
3	900.0	28,217	1,112	72.0	1,72	22,88
4	1200.0	33,074	0,602	105.1	1,88	21,75
5	1300.0	34,668	1,204	118.2	1,96	21,75
6	1400.0	35,957	1,397	136.7	2,00	21,28
7	1500.0	37,265	1,640	159.3	2,02	20,88
8	1800.0	40,508	2,691	260.1	2,16	20,52
9	2100.0	42,853	3,296	449.3	2,22	20,69
10	2400.0	44,561	3,412	885.6	2,33	21,17

PILETECH Consulting Engineers
 Example-14A: PC350, K25, D=D/120

GRLNEAP (TM) Version 1997-2
 2000 04 16



KOBE K 25
 Efficiency .800
 Helmet 6.98 KN
 H Cushion 3062 KN/mm
 P Cushion 241 KN/mm
 Q Skin = 2.500 mm
 Q Toe = 2.920 mm
 J Skin = .180 s/m
 J Toe = .500 s/m
 Pile Length 12.00 m
 P-Top Area 562.00 cm²

PILE MODEL SKIN FR DISTRIB



EB = 70 %

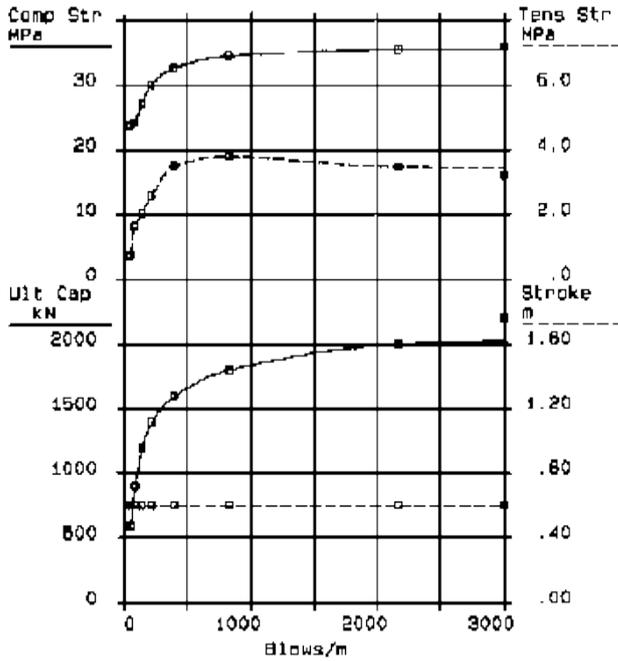
[그림 9] WEAP 해석결과(예)

본 분석에서는 정적지지력 계산(Meyerhof 공식 적용)을 토대로 말뚝의 주변마찰력 비율을 전체지지력의 30%로 가정하였으며 해머효율, damping 계수, quake 값 등은 GRLWEAP 에서 추천하는 값들을 사용하였다.

분석결과 타격회수가 BPM = 80(set value = 12.5 mm)일 때 항타(압축)응력은 PC 말뚝의 허용 값인 300kg/cm² 가 되며, 따라서 그 이상의 항타관입은 과응력(over stress)을 유발시키는 것으로 나타났다. 결국 K-25 해머로 항타 할 경우 최대로 기대할 수 있는 말뚝의 극한지지력은 100 ton 정도가 되며 안전율 2.5 를 적용하는 경우 허용설계하중은 40 ton 이 된다.

[그림 10]은 같은 조건에서 램중량 5 ton 의 유압해머(HH-5)를 사용, 낙하고를 0.6m 로 하여 시공하는 경우를 분석한 결과이다. 분석결과 항타(압축)응력이 상한 값에 도달할 때의 타격회수와 극한지지력은 각각 BPM=216(set value=4.6mm), 140 ton 으로서 허용설계하중을 56 ton 으로 크게 증가시킬 수 있어, 보다 적절한 장비조합임을 보여주고 있다.

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke	Energy (KN-m)
1	600.0	23.986	0.759	50.8	0.60	20.95
2	900.0	24.236	1.668	84.7	0.60	19.18
3	1200.0	27.212	2.072	140.1	0.60	16.92
4	1400.0	30.042	2.608	216.9	0.60	15.50
5	1600.0	32.737	3.533	397.1	0.60	14.23
6	1800.0	34.629	3.827	833.2	0.60	13.44
7	2000.0	35.447	3.492	2172.2	0.60	13.01
8	2200.0	35.917	3.217	9999.0	0.60	12.82



ØP Ø HH 5
 Efficiency .950
 Helmet 8.15 kN
 H Cushion 1961 kN/mm
 P Cushion 241 kN/mm
 Ø Skin = 2.500 mm
 Ø Toe = 2.920 mm
 J Skin = .180 s/m
 J Toe = .500 s/m
 Pile Length 12.00 m
 P-Top Area 582.00 cm²

PILE MODEL SKIN FR DISTRIB



ES - 70 %

[그림 10] WEAP해석결과(예)

[표 3] 에는 같은 지반조건에서 직경 350 mm 및 400 mm PHC말뚝을 디젤해머 2종류(K-25, K-35)와 유압해머 2종류(HH-5, HH-7) 등 4종류의 해머를 사용하여 항타하는 경우에 대한 WEAP 분석결과를 정리하여 나타내었다.

[표 3] 말뚝종류와 장비조합에 따른 허용설계하중(PHC말뚝)

시공조건		시공성 결정요소		허용설계하중 (안전율 2.5)	비 고 (지지력 결정기준)
말뚝규격	항타장비	항타응력 (kg/cm ²)	항타회수 (BPM)		
PHC ø 350	K25	446	400	80 ton	항타회수
	K35	480	120	72 ton	항타응력
	HH - 5	460	400	83 ton	항타회수
	HH - 7	480	400	85 ton	항타응력, 항타회수
PHC ø 400	K25	370	400	84 ton	항타회수
	K35	370	400	84 ton	항타회수
	HH - 5	415	400	95 ton	항타회수
	HH - 7	480	290	104 ton	항타응력

[표 3] 에서 보는 바와 같이 같은 지반조건에서도 해머종류에 따라 활용할 수 있는 말뚝의 허용지지력이 상이함을 알 수 있으며 이를 이용하여 경제성을 감안한 최적의 항타장비를 선정할 수 있다.

6. 참고 문헌

1. Goble Rausche Likins and Associates, Inc., GRLWEAP Program, Procedures and Models, 1998
2. U.S.Department of Transportation, Federal Highway Administration, Manual on Design and Construction of Driven Pile Foundation
3. 한국지반공학회, 포항종합제철주식회사, 개선된 강관말뚝의 설계와 시공, 1997