

# 말뚝항타 분석기를 이용한 말뚝기초의 시공관리 및 해석

Construction Control and Analysis of Pile Foundation  
with Pile Driving Analyzer

이우진\*, 이인모\*\*, 최유중\*\*, 이정학\*\*, 김병철\*\*

---

## ABSTRACT

Five case histories where the PDA and CAPWAP were applied are introduced. In the case histories, these techniques were able to evaluate the performance of hammer and driving system; to check the stresses in the pile due to driving; to determine the damage of pile; to predict the ultimate bearing capacity of pile; to estimate the important soil parameters such as the soil resistance, quake and damping etc.; and to provide the load-displacement curve from the simulated static load test.

It was found that the Energy Transfer Ratio (ETR) on the concrete pile depends on the damage of pile top during driving. The ETR of hydraulic hammer on PC pile is 55-56% with the damage at pile top while it is 73-74% without a damage at pile top. For the diesel hammer on steel pile, it ranges between 30-38%. In one case, the preignition of diesel hammer was also observed. Therefore, the construction control based on the dynamic formula without knowing the performance of driving system can be dangerous.

The piles constructed by filling the mixed cement paste around the pile (SIP) mobilize the significant shaft friction (about 80% of total capacity). However, the magnitude of total capacity shows the large scatter, and it may be caused by the different degree of construction control.

The load-displacement curves by CAPWAP method agree well with those from static load tests, but a further study on this application is required.

---

\* 삼성건설 기술연구소

\*\* 고려대학교 토목환경공학과

## 1. 서론

최근 급속한 산업발달과 더불어 경제규모가 확대됨에 따라 각종 건설을 위한 부지 확보의 어려움으로 인하여 열악한 지반 조건에서의 건설활동이 증가하는 추세로 이는 깊은 기초의 수요를 더욱 가속화 시킬 전망이다. 그러나 대부분의 말뚝 항타 현장은 항타장비의 선정 및 항타 시공 관리의 어려움으로 인하여 많은 문제점을 내포하고 있다. 항타장비는 장비 생산자가 제공하는 도표에 의해 선정되는 경우가 많으며, 항타시 Hiley 등의 동적 항타 공식에 의해 계산된 지지력이 설계 하중보다 크도록 최종관입량을 관리하는 방법이 쓰이고 있다.

이와같은 항타장비의 선정 및 항타관리 방법은 지반조건, 항타기의 거동, 항타기 및 말뚝의 쿠션재, 말뚝의 종류 등이 제대로 반영되지 않은 것으로 말뚝의 지지력 추정에 상당한 오차를 유발할 수 있다. 이러한 문제점 때문에 항타후 정적 재하 시험을 수행하여 말뚝의 지지력을 확인 하는 것이 일반적이다. 그러나, 정적 재하 시험은 많은 시간과 경비를 요하며, 전체 말뚝에 대하여 재하 시험 할 수 있는 말뚝의 수가 제한되는 단점이 있다.

말뚝 항타 분석기 (Pile Driving Analyzer)는 항타로 인한 말뚝의 변위와 가속도를 항타 즉시 분석하여 항타기의 효율적인 작동여부, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 예상 지지력, 말뚝의 손상여부를 출력한다. 따라서 말뚝이 손상되지 않는 범위내에서 소정의 지지력을 얻을 수 있도록 항타관리가 가능하며 항타기의 효율 및 적절성을 판단하여 항타장비 및 항타시스템, 말뚝의 적절한 조합을 유도할 수 있다. 말뚝 항타 분석기는 파동방정식을 이용한 항타해석 (Wave Equation Analysis of Pile Driving)과는 달리 말뚝 두부에서의 힘과 속도를 입력치로 사용하기 때문에 항타기의 모델링 또는 효율의 추정으로부터 생기는 오차를 제거하였다. CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)은 말뚝 항타 분석기로 계산된 힘과 속도를 Wave Matching Technique으로 분석하여, 말뚝의 극한 지지력, Quake 및 Damping 등을 추정하며, 이들을 이용하여 정적 재하 시험을 모사한 하중-변위 곡선, 주면 마찰력의 분포 및 크기, 선단 지지력을 예측한다.

파동 방정식에 의한 말뚝 해석 프로그램 (WEAP), 말뚝 항타 분석기(PDA), 정적 재하 시험을 적절히 조화하여 사용한다면 말뚝의 설계 및 시공성 향상, 시공관리 및 품질 향상, 공비절감 등 상당한 효과를 얻을 것으로 기대된다. 본 초문에서는 말뚝 항타 분석기 및 CAPWAP의 이론적 배경을 논의하고 그 동안 국내의 말뚝시공 현장에 적용한 사례들을 소개하고자 한다.

## 2. 말뚝의 항타해석

1800년대 중반부터 전세계적으로 450개 이상의 동적 지지력 공식이 제안되어 왔으며 현재도 현장에서의 항타관리에 주로 사용되고 있는 실정이다. 이 공식들은 항타기 해머의 에너지를 말뚝의 일과 관계 지우는 다음공식에 근거를 두고 있다.

$$W \times H = R \times S \quad (1)$$

여기서, W : 램의 무게

H : 램의 낙하고

R : 말뚝의 지지력

S : 항타시 말뚝의 관입량

그러나, 동적 지지력 공식들은 항타시스템과 에너지 손실, 말뚝의 강성에 관한 고려가 되어 있지 않으며 흙의 저항이 일정하다고 가정하고 있다. Hiley, ENR 공식 등 식(1)로 부터 파생된 항타공식들은 특정 지반조건, 지역 및 시대의 항타관습으로 부터 형성된 Data Base에 근거하여 1960년대 이전에 개발된 공식들이 대부분으로 항타현장의 지반조건, 말뚝종류, 항타기 등이 다른 경우에는 적용에 신중을 기해야 한다. 그러므로 현재의 국내현장과 같이 고강도 콘크리트 말뚝, 강관 말뚝, 디젤 항타기, 유압 항타기 등이 많이 사용되는 경우 동적 지지력 공식으로 말뚝의 지지력을 추정하는 것은 상당히 신뢰도가 떨어진다.

항타과정의 수치적 해법인 파동 방정식에 의한 해석법은 Smith(1960)에 의해 최초로 소개되었다. 이 해석법에서는 항타기, 쿠션, 헬멧, 말뚝을 스프링으로 연결된 일련의 Rigid Mass로 표현하였으며, 말뚝 - 흙의 거동은 정적 저항을 위해 탄소성 스프링을, 동적 저항을 위해 선형 감쇠기를 각각의 말뚝 요소에 연결하여 표현하였다. 이들 정적, 동적 저항 모델 중 중요한 Parameter는 Quake, Damping, 흙의 정적 저항력이다. 그 이후 파동방정식에 의한 항타해석용 프로그램이 계속 개선되어 왔으며 (WEAP, 1976; WEAP86, 1986; TTI, 1976; CUWEAP, 1987; GRLWEAP, 1991) 최근에 시판되고 있는 GRLWEAP은 545 종류의 항타기 모델링을 포함하고 있다. 파동 방정식에 의한 항타해석은 동적 지지력 공식에 의한 항타관리보다 훨씬 우월하지만, 항타로 인해 말뚝에 전달되는 가속도, 속도, 힘, 변위 등

을 향타기, 쿠션, 헬멧의 모델링으로 부터 계산하므로 향타기의 실제 거동과는 상이한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 파동 방정식에 의한 향타 해석은 말뚝의 극한 지지력 추정보다는 Parametric Study를 통한 향타장비 및 말뚝의 효율적인 선택을 위해 사용되는 것이 적절하다.

1964년 Goble 교수에 의해 Case Western Reserve University에서 시작된 연구는 향타해석을 통해 말뚝의 지지력을 예측할 수 있는 Case방법 (Goble 등, 1975)을 개발하였다. Case방법을 이용하기 위해서는 향타시 말뚝두부에서 힘과 속도를 측정하여야 하며, 이들 측정치를 이용하여 향타기 및 Driving System의 거동 (Likins, 1978), 말뚝의 향타응력 (Goble 등, 1980), 말뚝의 건전도 (Rausche 등, 1978), 말뚝의 지지력 (Rausche 등, 1985) 평가가 가능하다. 이들 분석결과는 향타즉시 말뚝 향타 분석기의 화면을 통해 관찰할 수 있다. 말뚝 향타 분석기는 WEAP해석과는 달리 말뚝의 두부에서 측정된 결과를 이용하므로 향타장비 및 향타 시스템의 모델링으로 인한 오차를 제거하였다.

### 3. 말뚝 향타 분석기

#### 3.1 구성 장비

말뚝 향타 분석기 및 측정장치들은 현장에서 일상적인 시험으로 쉽게 사용할 수 있도록 개발된 것으로 그림 1.과 같이 구성되어 있다. 두쌍의 변형계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)는 말뚝의 두부에 볼트로 고정되며 측정된 말뚝의 변형과 가속도는 힘과 속도로 변환되어 말뚝 향타 분석기의 화면에 향타와 동시에 나타난다. 변형계는 4개의 Resistance Foil Gages를 부착한 Frame으로 재사용이 가능하며, 가속도계는 Quartz Crystal로 구성된 Piezoelectric 방식이 보통 사용된다. 향타시 편타로 인해 동일 위치의 단면에 다른 크기의 압축력 또는 변위가 발생하는 것을 감지하고자 말뚝 주변의 180° 방향으로 한쌍씩의 변형계와 가속도계를 부착한다.

말뚝 향타 분석기는 변형계와 가속도계로 부터 측정된 아날로그 신호에 대해 Signal Conditioning을 실시하며, A/D 변환기를 통해 힘과 속도가 디지털 데이터로 변환된다. 이와함께 Case방법으로 추정된 각종 계산치를 힘과 속도와 함께 말뚝 향타 분석기 화면에 보여준다. 말뚝 향타분석기는 약 36 가지의 Quantity를 계산하며 이들중 중요한 것들이 표 1.에 나열되어 있다.

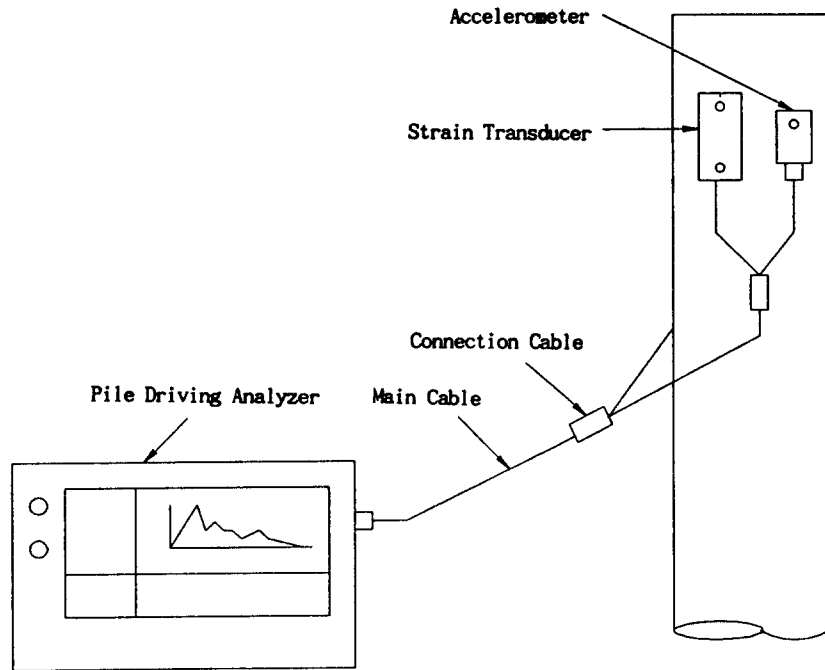


그림 1. 말뚝 향타 분석기의 구성 (Schematic of PDA Set up)

표 1. 중요한 향타분석기 계산 출력치 ( Pile Dynamics, Inc, 1993)

출력치	내 용
CSX(FMX)	Gauge 위치에서의 최대 압축 응력 (최대 압축력)
CSB(CFB)	말뚝 선단부에서의 최대 압축 응력 (최대 압축력)
TSX(CTX)	말뚝에 작용하는 최대 인장 응력 (최대 인장력)
DMX	Gauge 위치에서의 최대 변위
EMX	Gauge 위치에서의 최대 향타 에너지
ETR	에너지 전달율
BTA	말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수
RTL	말뚝의 Total Resistance (정적+동적)
RSP(RP#)	Case방법에 의한 정적 극한 지지력 (RSP w/ JC=0.#)
RMX(RX#)	Case방법에 의한 최대 정적 극한 지지력 (RMX w/ JC=0.#)
RMN	Case방법에 의한 최소 정적 극한 지지력
RSU(RU#)	Early unloading을 보정한 정적 극한 지지력 (RSU w/ JC=0.#)
RAU	Case방법에 의한 선단 지지 말뚝의 극한 지지력

### 3.2 Proportionality

항타시 말뚝두부에 압축변형과 압축력이 발생한다. 이 힘은 다시 말뚝을 따라 아래방향으로 전달되면서 압축변형을 발생시킨다. 이때 압축변형으로 인하여 말뚝내에 변위가 발생하며, 말뚝내 어느 한 요소의 변위 속도를 Particle Velocity(V)라고 한다. 압축파 자체는 Wave Speed(C)로 말뚝을 통해 전파된다.

그림 2.에 보이는 바와 같이 시간  $\Delta t$ 동안 압축파가  $\Delta L = (\Delta t) \cdot C$ 의 거리를 이동하면 말뚝내의 A점에서는  $\delta$  만큼의 변위가 발생한다. 변위  $\delta$ 로 인한 말뚝의 변형율은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{\Delta t \cdot C} \quad (2)$$

이때 A점의 속도는

$$V = \frac{\delta}{\Delta t} \quad (3)$$

이고, 식(2)와 (3)으로 부터 다음식이 얻어 진다.

$$\varepsilon = \frac{V}{C} \quad (4)$$

식 (4)의 양변에 말뚝의 탄성계수(E)와 단면적(A)를 곱하면 식 (5)가 얻어진다.

$$F = \frac{EA}{C} V \quad (5)$$

식(5)는 항타분석을 위한 측정의 기본이 되는 식으로, 비례계수 ( $EA/C$ )는 말뚝의 Impedance라고 한다. 윗식으로 부터 말뚝내 어느 한점에서의 힘은 동일한 점에서의 Particle Velocity에 비례한다는 것을 알 수 있으며, 말뚝 항타 분석기에서 측정된 속도에 말뚝의 Impedance를 곱한 값은 측정된 힘과 같아야 한다. 식 (5)는 측정점에 Reflection Wave가 도달하지 않는 한 유효하며, 주면 마찰이나 선단지지로 인해 Wave가 반사되어 측정점에 도달하면 F는 증가하고 ( $EA/C$ )는 감소하게 되어 식 (5)는 성립하지 않게 된다. 일반적으로 말뚝 항타 분석기에 측정된 속도가 최대값에 도달할 때까지는 힘과 속도가 비례한다.

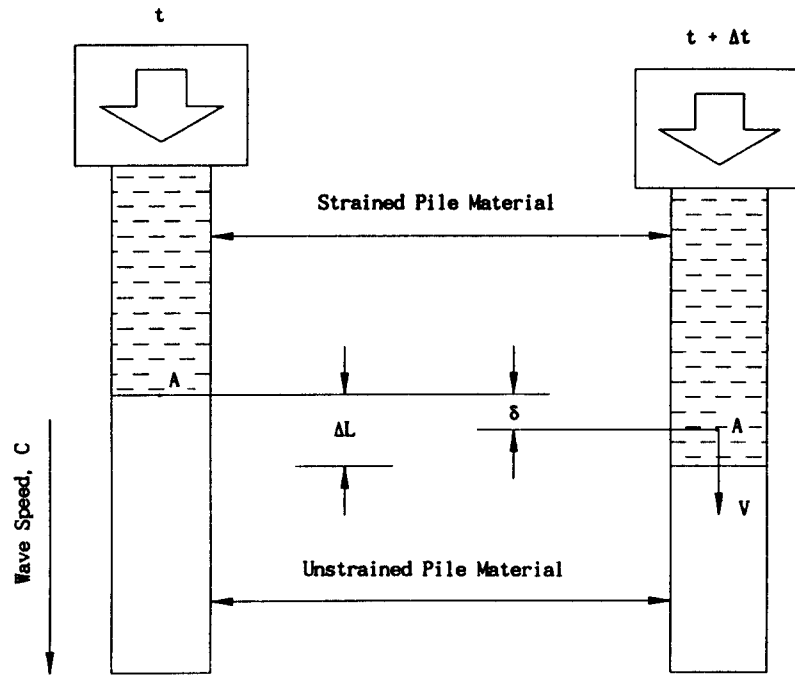


그림 2. Proportionality ( $F=AEV/C$ )

### 3.3 Case 방법

말뚝 항타 분석기는 1차원 파동 전달이론으로 부터 전체 저항 (Total Driving Resistance)과 정적 저항(Static Resistance)을 계산한다.(Rausche 등, 1985: GRL, 1993). Case 방법의 기본이 되는 항타 저항력은 Rausche 등(1985)에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$RTL = \frac{1}{2} [FT_1 + FT_2] + \frac{1}{2} \frac{AE}{C} [VT_1 - VT_2] \quad (6)$$

여기서

RTL : 전체 저항력

FT1, FT2 : 시간 t1과 t2에 말뚝두부에서 측정된 힘

VT1, VT2 : 시간 t1과 t2에 말뚝두부에서 측정된 속도

AE/C : 말뚝의 Impedance

일반적으로 시간  $t_1$ 은 측정된 속도가 최대인 시간으로 하며 시간  $t_2$ 는 시간  $t_1$ 으로부터  $(2L/C)$ 가 경과한 시간을 말한다.

항타시 말뚝의 전체 저항력,  $RTL$ ,은 정적 저항력과 Damping으로 인한 동적 저항력으로 구성된다. Case 방법에서는 동적 저항력을 Case Damping Factor ( $J_c$ ), 말뚝의 Impedance ( $EA/C$ ), 말뚝 선단에서의 Particle Velocity ( $V_t$ )의 곱으로 정의하고 전체 저항력으로 부터 동적 저항력을 제거함으로써 말뚝의 정적 지지력을 추정한다. (Rausche 등, 1985)

$$\begin{aligned}
 RSP &= RTL - J_c \frac{AE}{C} V_t \\
 &= RTL - J_c [VT1(\frac{AE}{C}) + FT1 - RTL] \\
 &= \frac{1}{2} (1 - J_c) [FT1 + VT1(\frac{AE}{C})] + \frac{1}{2} (1 + J_c) [FT2 + VT2(\frac{AE}{C})]
 \end{aligned} \tag{7}$$

Case 방법은 항타와 동시에 말뚝의 예상 지지력을 계산하므로 항타관리에 매우 편리하지만, 말뚝의 실제 지지력 추정시 Case Damping Factor,  $J_c$ ,를 경험적으로 가정하여야 하고 FT와 VT의 계산을 위해 시간  $t_1$ 을 선택하여야 하는 등의 오차 유발 요인을 포함하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 것이 CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) 방법이다.

### 3.4 CAPWAP 방법

CAPWAP 방법은 Case Western Reserve University에서 Rausche(1970)에 의해 최초로 개발되었으며 말뚝 항타 분석기로 얻은 힘과 속도의 기록을 이용해 시행오차법으로 경계조건 (말뚝 지지력, 흙의 저항 분포, Quake 및 Damping 특성)을 결정한다. 이 방법에서는 말뚝을 압축파의 이동 시간이 동일한 연속적인 Segment로 모델링하고, 가정된 경계조건을 이용하여 계산된 파를 측정된 파와 비교하면서 두 파형이 어느정도 일치될 때의 경계조건을 결정한다. 입력치로 사용되는 말뚝 두부의 거동은 힘, Wave Down, 속도 등이며 이 경우 계산되는 출력치는 각각 속도, Wave Up, 힘이 된다. 계산된 파와 측정파를 일치시키기 위한 반복작업시 조정되는 Modeling Parameter중 대표적인 것은 Quake, Unloading Quake, 흙 및 말뚝의 Damping, Unloading Level, Reloading Level, Radiation Damping을 위한



Parameter, Plug Mass, 극한 지지력, 흙의 저항 분포 등이다. CAPWAP은 위에서 계산된 경계조건을 이용, 정적 재하 시험을 모사하여 말뚝의 두부에 하중을 작용시켜 말뚝의 관입과 이에 소요되는 흙의 정적 저항력의 관계를 얻을 수 있으며, 주변 마찰력의 분포를 제시한다.

그러나 CAPWAP 해석법은 다음과 같은 문제점도 가지고 있으므로 유의하여 사용해야 한다. 첫째, 항타로 인한 말뚝의 변위가 충분하지 않으면 CAPWAP은 지지력을 과소 평가하는 경향이 있다. 일반적으로 최소 2mm 이상의 최종관입이 발생하여야 적절히 지지력을 예측한다. 둘째, 어떤 입력파형 (힘, Wave Down, 속도)을 사용하느냐에 따라 추정되는 경계조건에 약간의 차이가 있다. 따라서 CAPWAP에 의한 경계조건은 Unique Solution이 아닌 것으로 판단되며 사용자의 해석 및 속련 정도에 따라 결과가 다를 수도 있다. 셋째, CAPWAP 해석 결과는 말뚝 항타 분석기로 측정된 시점의 말뚝 지지력을 예측하므로 Set-Up이나 Relaxation에 의한 지지력 증감은 기술자에 의해 판단 되어야 한다.

#### 4. 사례연구

본 연구에서는 말뚝 항타 분석기를 적용하였던 5개 국내현장의 결과를 소개하고자 한다. 각 현장에 대한 말뚝 종류 및 연구 대상은 표 2.와 같다.

표 2. 각 현장과 말뚝에 대한 소개 및 연구대상

현장명	말뚝	항타기	설계하중	연구 대상
I현장	PC $\phi$ 400 T = 7.5 cm	유압 햄머 NH - 40	50 Ton	말뚝 손상 사례 항타 시스템의 효율
P현장	PC $\phi$ 350 T = 6.5 cm	낙하추	44 Ton	SIP 공법 주변 마찰력
H현장	Steel $\phi$ 609.6 T = 1.2 cm	디젤 햄머 K - 35	140 Ton	정재하 시험과 비교
D현장	Steel $\phi$ 609.6 T = 1.2 cm	디젤 햄머 K - 35	140 Ton	Preignition
J현장	Steel $\phi$ 508 T = 1.2 cm	디젤 햄머 K - 25	80 Ton	정재하 시험과 비교 항타 시스템의 효율

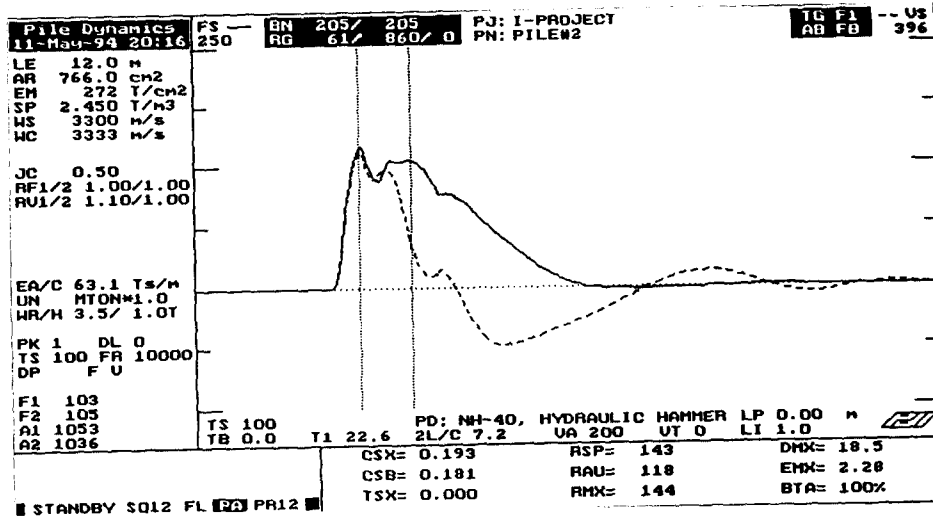
## 1) I 현장

본 현장은 아파트 기초 현장으로서 지반은 깊이 5 ~ 6 m까지는 매립된 실트질 점토층이고 그 이하로는 풍화암층다. 말뚝은 PC 말뚝으로 외경이 40.0 cm, 두께는 7.5 cm, 최종관입깊이는 6 m로 매립층과 풍화암층 경계부에 얹혀져 있다. 항타기는 유압 햄머(NH-40)를 사용하였고 초기 항타시에 시험을 실시하였다.

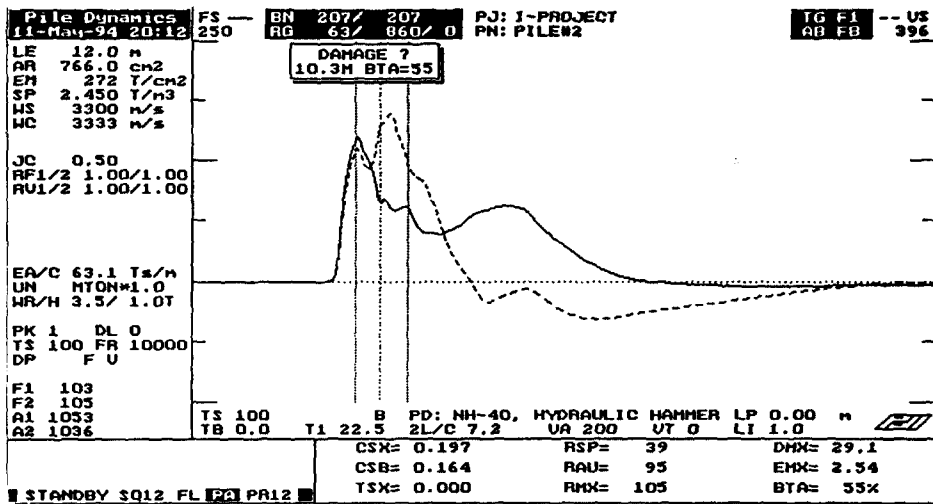
현장에 반입된 PC 말뚝을 말뚝 건전도 시험기 (Pile Integrity Tester)로 시험한 결과 압축파의 속도는 약 3900 ~ 4100 m/sec로 추정되었으나 항타중 말뚝 항타 분석기로 측정된 압축파의 속도는 3300 m/sec까지 감소되었다. 이는 항타로 인해 말뚝에 발생한 잔크랙들이 압축파의 전달을 방해하기 때문으로 판단된다. 따라서 말뚝의 탄성계수는 32 %정도 감소한 것으로 판단된다.

그림 3.은 말뚝에 손상이 생기기 직전과 직후의 항타를 말뚝 항타 분석기로 관찰한 것이다. 205타(그림 3.(a))에서의 항타기록은 흙의 저항으로 인해 말뚝에 작용하는 힘은 증가하고 속도는 감소하는 정상적인 항타를 나타내고 있다. 그러나 207타(그림 3.(b))와 214타 (그림 3.(c))의 항타기록은 말뚝의 속도가 말뚝 중간 부근에서 급격히 증가하는 반면 힘은 상대적으로 감소함을 보이고 있으며, 말뚝 항타 분석기는 말뚝의 손상을 알리는 Blinking Line과 함께 말뚝의 손상위치와 말뚝의 손상정도를 보여주고 있다. 말뚝 건전도 지수 Beta는 말뚝의 손상정도를 나타내는 지수이며 대략적으로 말뚝의 원래 단면에 대한 손상되지 않은 단면의 비율이다. Beta가 1 ~ 0.8 이면 약간 손상, 0.6 ~ 0.8 이면 손상, 0.6 이하이면 말뚝이 완전히 절단된 것으로 판단한다. (Rausche 등, 1978)

207타와 214타의 항타기록을 비교하면 말뚝의 손상정도는 악화되고 있으나 말뚝 선단 부근에 작용하는 힘은 증가하고 이로 인해 말뚝 선단에서의 압축 응력(CSB)이 증가하였음을 관찰할 수 있다. 그러므로 손상된 말뚝이 계속되는 항타로 인해 다시 접촉하면서 항타에너지를 선단부로 전달함을 알 수 있다. 이들 항타시 램의 낙하고는 1.14 m였으므로 본 항타 시스템의 에너지 전달율은 55 ~ 56 %이다. 동일 현장에서 깨끗이 두부정리된 말뚝을 동일한 낙하고로 재항타하면서 측정한 에너지 전달율이 73 ~ 74 %였다. 이로 부터 말뚝의 두부를 파손시키면서 항타하는 경우 전달 에너지중 일부가 두부의 파손에 소모되므로 실제로 말뚝의 관입에 소요되는 에너지는 말뚝 두부가 손상되지 않는 상태의 항타와 비교하여 상당히 적은 것으로 추정된다. 특히 두부가 손상되면서 항타하는 경우 항타관리를 위해 측정된 최종관입량은 과소평가되어 동적 지지력 공식을 이용하여 추정된 말뚝의 지지력이 과대 평가될 수 있음에 유의하여야 한다.

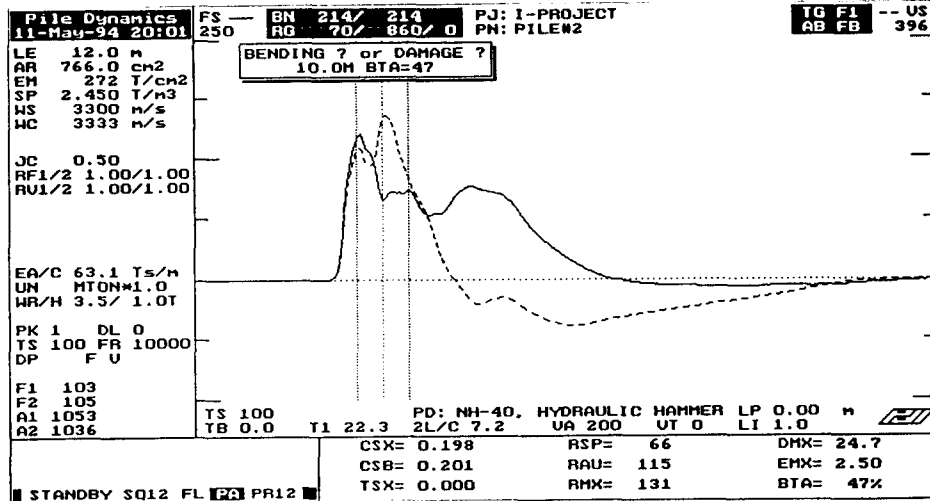


(a)



(b)

그림 3. 말뚝 향타 분석기의 화면 (계속)



(c)

그림 3. 말뚝 항타 분석기의 화면

## 2) P 현장

본 현장의 지반은 깊이 2.3 ~ 3.1 m까지는 매립층으로서 실트질 모래 및 자갈, 잡석 등으로 구성되어있으며, 그 밑으로 12.5 ~ 15.5 m의 깊이까지는 풍화토층이, 깊이 22.3 ~ 22.5 m까지는 풍화암층이 존재하고 있고 그 아래로 연암층이 있다. 말뚝은 외경이 35.0 cm이고, 두께가 6.5 cm 인 PC 말뚝으로 SIP 공법으로 시공되었으며, 최종관입깊이는 9.9 m이다. 지지력 추정을 위하여 말뚝이 완전히 양생된 후 약 3 톤 무게의 낙하추를 이용하여 재항타를 실시하였으며 낙하고는 말뚝에 작용하는 응력을 관찰하면서 서서히 증가시켰다. 시험시 2개의 가속도계 중 한개가 느슨해져 나머지 하나의 가속도계만 사용하여 시험을 수행하였다.

그림 4.에 나타난 바와 같이 Impact까지는 Proportionality가 성립하고 시간 t1 부터 F와 V의 간격이 크게 벌어진체 시간 t2까지 그 간격을 유지하는 것으로 보아 말뚝의 두부쪽에서 상당히 큰 주면 마찰력이 작용하고 말뚝 선단부쪽으로 내려감에 따라 점차로 주면 마찰력이 작아지는 것을 알 수 있으며, 그림 5.의 CAPWAP 해석 결과도 그러한 양상을 보여주고 있다.

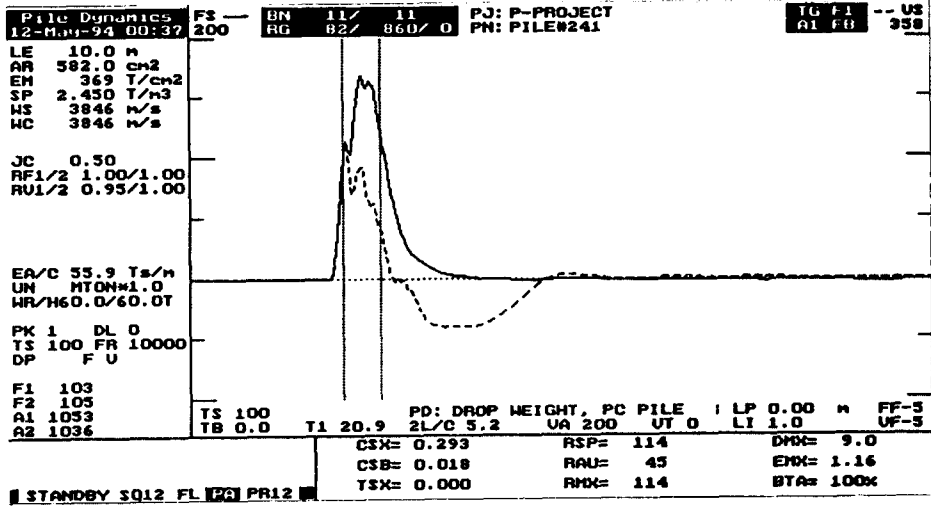


그림 4. 말뚝 향타 분석기의 화면

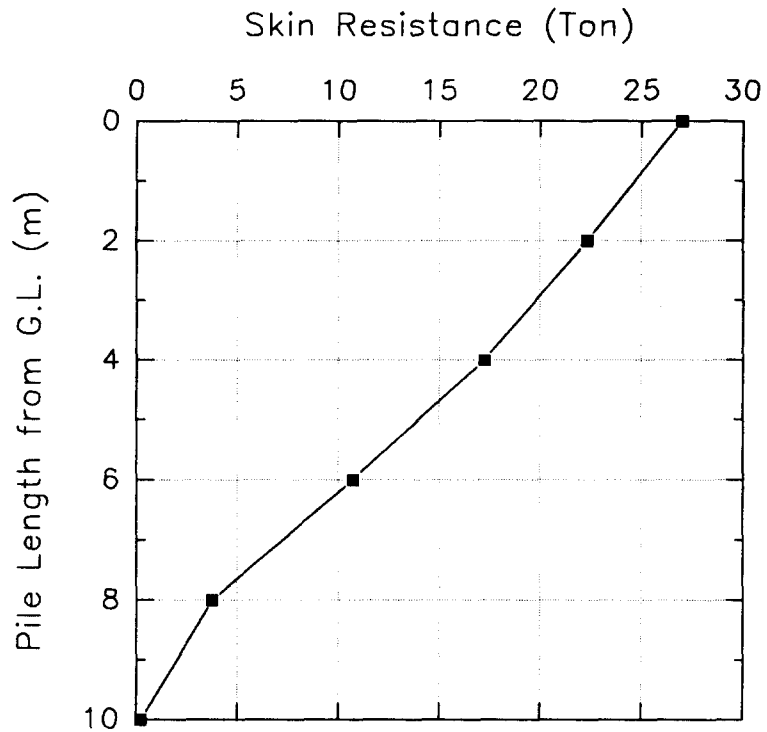


그림 5. 주변 마찰력 분포

이 현장의 말뚝은 주변 마찰력이 전체 지지력의 약 85 %를 차지하므로 SIP 공법에 의하여 시공되는 말뚝은 마찰 말뚝에 가까움을 알 수 있다. 말뚝 항타 분석기 및 CAPWAP에 의한 지지력 해석결과는 표 3.과 같다. 재항타시 말뚝의 소성 변위가 거의 발생하지 않았으므로 해석결과는 과소평가된 것으로 판단된다. 이 현장에서 시험한 10개 말뚝의 해석결과에 의하면 대부분의 SIP 말뚝은 주변 마찰이 전체 지지력의 최소 80 % 이상을 차지하며 시공관리 정도에 따라 주변 마찰력의 크기는 상당히 변화함을 알 수 있었다.

표 3. 말뚝 항타 분석기 해석 결과

최 종 관입량 (mm/bl)	Case Method		CAPWAP Method								
	J <sub>c</sub>	극한 지지력	극한 지지력 (Ton)			지반 정수					
						Case Damping		Smith Damping		Quake ( mm )	
			Skin	Toe	Total	Skin	Toe	Skin	Toe	Skin	Toe
1.2	0.5	114	66.8	12.1	78.9	0.823	0.394	0.680	1.801	3.170	5.170

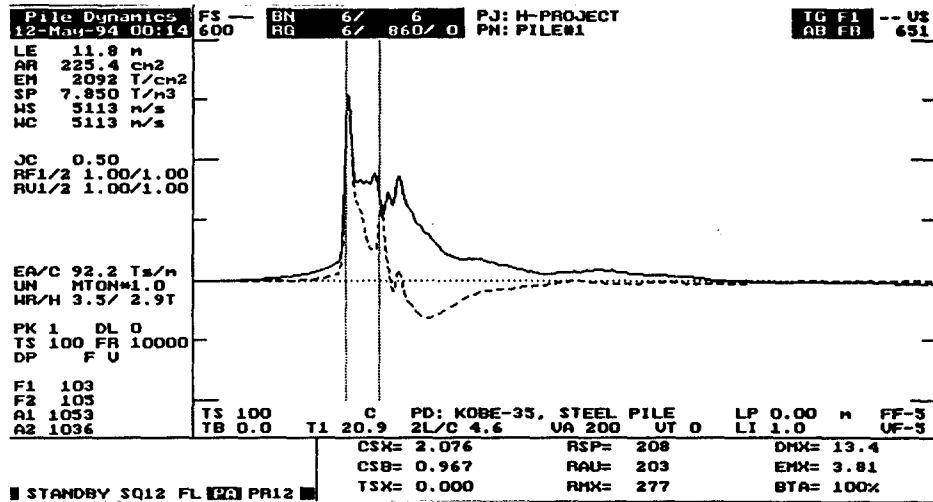
그러나 SIP 공법으로 시공된 말뚝은 말뚝 주변에 고착된 시멘트 Paste들로 인해 말뚝의 정확한 단면적 및 탄성계수 추정에 어려움이 있으므로 본 해석시에는 PC 말뚝의 Impedance를 수정없이 사용하였다. 또한 SIP 공법 특성상 흙 - 말뚝간의 정적 및 동적 저항 모델이 적절치 않고 Radiation Damping에 의한 항타 에너지 소산 등에 관한 고려가 필요하므로, 앞으로 SIP 공법에 의한 시공 말뚝에 관한 말뚝 항타 분석기 적용에 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

### 3) H 현장

본 현장은 철도교량의 피어를 지지하기 위하여 설계하중 140 Ton의 개단 강관 말뚝을 시공하는 현장이다. 강관 말뚝은 외경이 60.96 cm, 두께는 1.2 cm이었다. 지반은 0 ~ 0.5 m까지 세립내지 조립의 모래섞인 실트층, 0.5 ~ 4.0 m까지 자

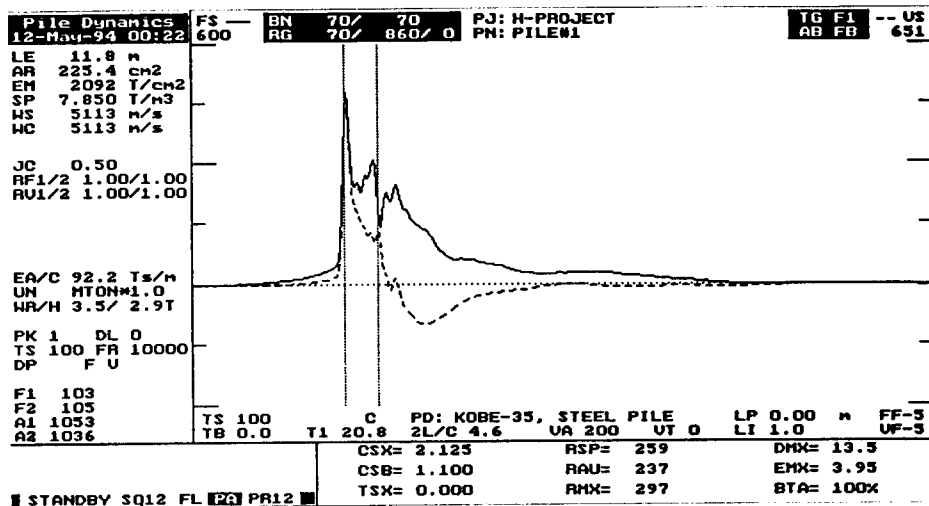
갈 및 실트섞인 세립내지 조립의 모래층, 4.0 ~ 6.0 m까지는 실트 및 세립내지 조립의 모래섞인 자갈층, 6.0 ~ 16.6 m까지는 실트 섞인 세립내지 조립의 모래층, 16.6 ~ 25.8 m까지는 실트 섞인 세립내지 조립의 모래 및 암편으로 분해된 풍화암층이 있으며, 그 아래로 연암층이 존재하고 있다. 항타기는 디젤(K-35)햄머가 사용되었고 11.4 m 관입 후 변형계와 가속도계를 부착하고 말뚝 항타 분석기로 측정하면서 최종관입깊이 11.64 m까지 항타하였다.

그림 6.(a)에 보이는 바와 같이 t2에서 말뚝에 작용하는 힘은 감소하고 속도는 증가하므로 아직까지 말뚝이 지지층에 관입되지 못하였음을 알 수 있으며 말뚝 두부의 최대 압축응력은 2.076 T/cm<sup>2</sup>로 강관의 항복응력 2.8 T/cm<sup>2</sup> 보다 적으므로 과잉 항타 응력은 걸리지 않고 있다. 70타에서의 항타기록인 그림 6.(b)도 t2에서의 상태가 그림 6.(a)와 비슷하며 예상 지지력은 약간 증가한 259 Ton 정도로 설계하중 140 Ton과 비교하여 안전율이 2.0에 미달하고 있다.



(a)

그림 6. 말뚝 항타 분석기의 화면 (계속)



(b)

그림 6. 말뚝 향타 분석기의 화면

말뚝 향타 분석기로 측정하기 시작한 11.4 m 관입시 부터 70타를 향타 후 11.64 m 까지 관입 되었으므로 평균관입량은 약 3.43 mm이고 최종 10타의 평균관입량은 약 3.38 mm였다. 그러므로 말뚝은 3.3 ~ 3.4 mm/blow로 계속 관입되는 양상이며 설계하중의 3배에 해당하는 지지력을 얻기 위해서는 상당량의 향타가 계속되어야 한다. 따라서 좀 더 큰 용량의 향타기를 사용한다면 좀 더 효율적인 향타가 이루어 질 것이다. 본 현장에서 사용된 향타기의 에너지 전달율은 약 36 ~ 37 %로, 디젤 향타기로 강관 말뚝을 향타하는 경우의 일반적인 평균 에너지 전달율 34.9 % (PDI,1993)와 비슷한 것으로 나타났다.

그림 7.은 CAPWAP 해석으로 추정된 재하 시험 곡선과 정적 재하 시험으로 측정 한 하중 - 변위 곡선을 비교한 것으로 하중 220 Ton까지의 두 곡선이 거의 완벽 하게 일치하고 있으나 220 Ton 이상의 하중에서는 큰 차이를 보이고 있다. 그러



나 표 4.에 나타나 있듯이 Case 방법, CAPWAP 방법, 정적 재하 시험으로 측정 또는 추정된 극한 지지력이 각각 259 Ton, 268.2 Ton, 230 ~ 280 Ton으로 크게 차이가 나지는 않고 있다.

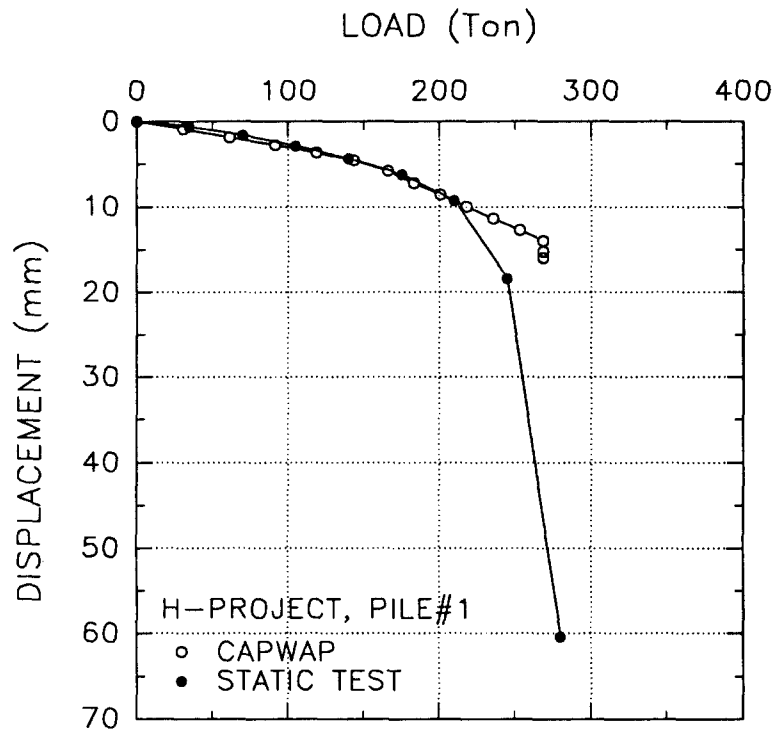


그림 7. CAPWAP 방법과 정적 재하 시험의 하중 - 변위 곡선

표 4. 해석 결과

최종 관입량 (mm/bl)	Case Method		CAPWAP Method								
	J <sub>c</sub>	극한 지지력	극한 지지력 (Ton)			지반정수					
						Case Damping		Smith Damping		Quake (mm)	
			Skin	Toe	Total	Skin	Toe	Skin	Toe	Skin	Toe
3.38	0.5	259	123.2	145.1	268.2	0.610	0.373	0.456	0.237	2.032	7.913



본 현장의 항타시 측정된 기록중 72타 미만 Preignition 이 일어나지 않았으며 이때의 최대 전달 에너지는 3.96 Ton-m (에너지 전달율 약 37.7%)이고 나머지 항타시의 최대 전달 에너지는 3.1 ~ 3.37 Ton-m (에너지 전달율 29.5 ~ 32.1 %)였다.

위의 관찰 결과로 부터 항타기가 적절히 작동하지 않는 상태에서 측정된 최종 관입량을 이용하여 항타관리를 하는 경우 상당한 문제가 야기될 수 있음을 알 수 있다.

#### 5) J 현장

본 현장은 교량의 피어를 지지하기위한 말뚝을 시공하는 현장으로 외경 50.8 cm, 두께 1.2 cm의 개단 강관 말뚝이 사용되었으며 말뚝 1본당 설계하중은 80 Ton이다. 지반은 심도 0 ~ 4.0 m는 모래질 점토, 4.0 ~ 9.8 m은 점토질 모래, 9.8 ~ 10.5 m는 자갈, 10.5 ~ 15.0 m는 점토질 모래, 15.0 ~ 19.5 m는 실트질 모래로 구성된 풍화암층으로 구성되어 있다. 약 7 ~ 8 m 정도를 터파기를 하고 말뚝을 항타하였으므로, 말뚝이 점토질 모래층과 완전 풍화토층의 경계부분까지 관입된 것으로 판단된다.

항타기는 디젤 (Kobe - 25)햄머가 사용되었으며 초기 항타부터 말뚝 항타 분석기로 관찰하면서 6.8 m까지 말뚝을 관입시켰다. 6.8 m 관입되는 동안 약 1400타가 항타되었으며 최종관입시 항타기의 램은 약 3.2 m까지 뛰었으며 마지막 10타의 평균관입량은 1.7 mm/blow였다. 그림 9.는 최종관입시의 항타기록으로 Case방법에 의한 예상 극한 지지력은 279 톤이며 최대 전달 에너지는 2.54 ton-m임을 알 수 있다. 이로부터 항타시스템의 에너지 전달율은 약 32 %정도였음을 알 수 있다.

이들 관찰결과로 부터 항타기는 적절히 작동하고 있으나 충분한 지지력을 얻기 위한 깊이까지 관입시키기 위해서는 과다한 항타 (1400타 이상)가 요구되며 말뚝의 최대 압축 응력은 말뚝 자체의 항복 응력보다 충분히 적으므로 효율적인 항타를 위해 좀 더 큰 용량의 항타기가 적절함을 알 수 있다. 정적 재하 시험은 항타 3일 후에 실시되었으며 그림 10.은 CAPWAP과 정적 재하 시험의 하중 - 변위 곡선을 비교한 것이다. 정적 재하 시험 결과는 최종 재하 단계까지 뚜렷한 파괴점이 나타나지 않았으므로 CAPWAP결과와 직접 비교가 어렵지만 전반적으로 비슷한 양상을 보이고 있다. 표 5.는 그림 9.의 기록을 분석한 결과이다.

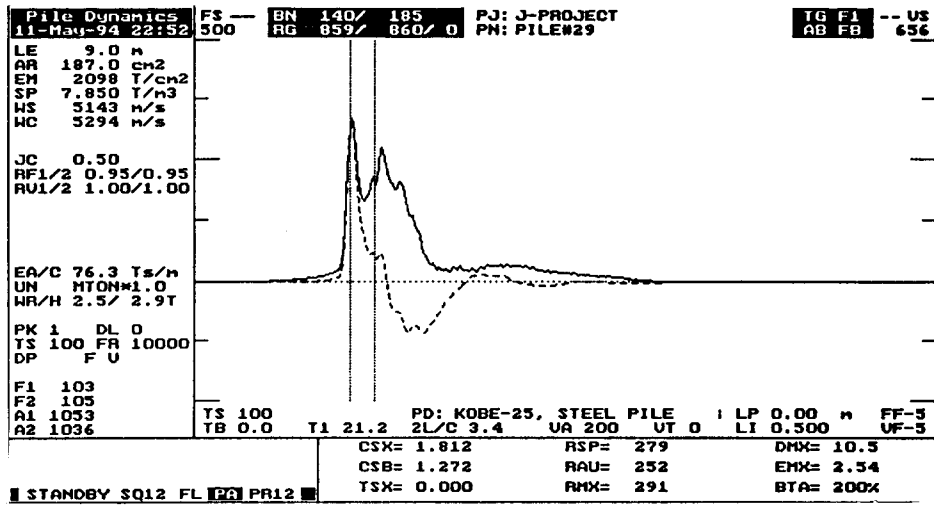


그림 9. 말뚝 항타 분석기의 화면

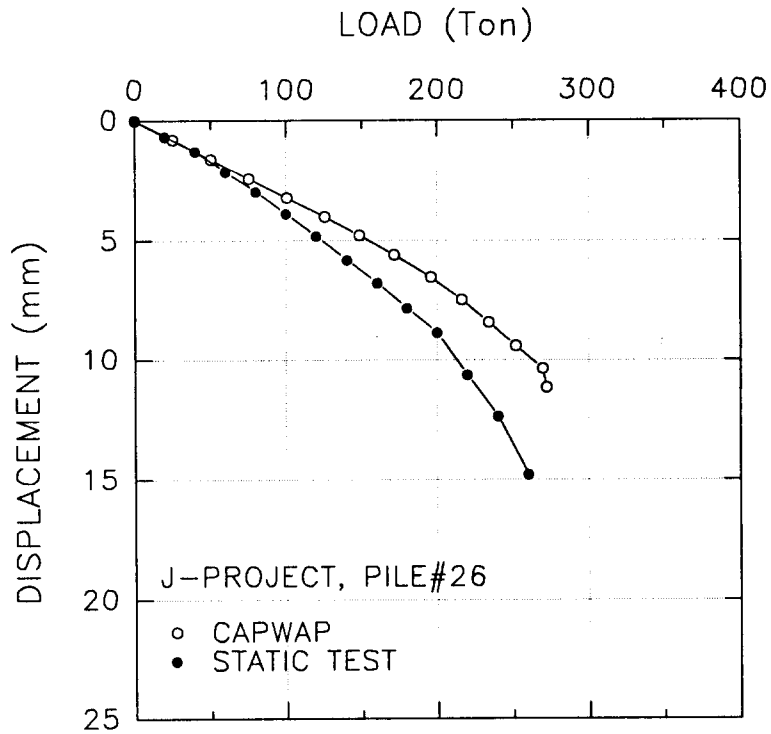


그림 10. CAPWAP 방법과 정적 재하 시험의 하중 - 변위 곡선

표 5. 항타분석기 및 CAPWAP 해석 결과

최종 관입량 (mm/bl)	Case Method		CAPWAP Method								
	J <sub>c</sub>	극한 지지력	극한 지지력 (Ton)			지반 정수					
						Case Damping		Smith Damping		Quake (mm)	
Skin	Toe	Total	Skin	Toe	Skin	Toe	Skin	Toe			
1.7	0.5	279	124.5	147.9	272.3	1.196	0.274	0.740	0.142	2.538	4.706

5. 결론

이상과 같이 총 5 개의 현장에서 말뚝 항타 분석기로 동적 재하 시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 말뚝 항타 분석기를 이용하여 항타관리를 하는 경우 항타기 및 항타시스템의 적절성, 과잉 항타응력 및 말뚝 손상 여부를 즉시 판단할 수 있으며 예상 극한지지력을 얻을 수 있다.
- 2) 콘크리트 말뚝의 경우 항타중 말뚝두부의 파손여부에 따라 에너지 전달율이 변화한다. 말뚝두부를 파손시키면서 항타하는 경우에는 말뚝에 실제로 전달되는 에너지가 말뚝 두부가 손상되지 않는 경우보다 상당히 적으므로 최종관입량이 과소평가되어 동적 지지력 공식을 사용하면 말뚝의 지지력이 과대평가된다.
- 3) 본논문에서 논의된 사례들에 의하면 유압항타기로 PC말뚝을 항타하는 경우 에너지 전달율은 두부파손시 55 - 56 % , 두부 비손상시 73 - 74 % 였다. 전반적으로 디젤항타기는 유압항타기보다 낮은 에너지 전달을 보이며 강관말뚝을 항타하는 경우 그 범위는 30 - 38 % 였다.
- 4) 말뚝 항타 분석기는 반드시 항타기로서 햄머를 필요로 하는 것이 아니라 적당한 중량의 추를 사용하여 이미 시공된 말뚝을 시험할 수 있다.
- 5) SIP 공법으로 시공한 말뚝의 경우 지지력의 80 % 이상을 주면 마찰력이 차지하며 시공관리의 정도에 따라 지지력의 절대값이 상당히 좌우됨이 관찰되었다.

- 6) 디젤 햄머의 경우 Preignition 여부를 말뚝 향타 분석기로 판단할 수 있으며, 향타기가 적절히 작동하지 않는 상태에서 측정된 최종관입량으로 향타관리를 하는 경우 말뚝의 극한 지지력을 과대 평가한다.
- 7) CAPWAP 해석에 의한 하중 - 변위 곡선은 정적 재하 시험 결과와 비교하여 상당히 좋은 예측결과를 제시하고 있으나 이에 관한 많은 연구 및 경험이 축적되어야 할 것이다.

## 6. 참고문헌

- 1) Goble, G. G., Likins, G. E., and Rausche, F., "Bearing Capacity of Piles From Dynamic Measurements-Final Report," Dept. of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1975.
- 2) Goble, G. G., and Rausche, F., "Wave Equation Analysis of Pile Driving - WEAP Program," Volume 1 through 4, FHWA IP-76-14.1 through IP-76-14.4, April 1976.
- 3) Goble, G. G., Rausche, F., and Likins, G. E., "The Analysis of Pile Driving, A State-of-the-Art," The 1st Seminar on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, Sweden, 1980.
- 4) Goble, G. G., and Rausche, F., "Wave Equation Analysis of Pile Foundation - WEAP 86," Volume 1 through 4, FHWA Contract DTFH61-84-C-00100, March 1986.
- 5) Goble Rausche Likins and Associates, Inc., "GRLWEAP-Wave Equation Analysis of Pile Driving," Cleveland, Ohio, 1991.
- 6) Goble Rausche Likins and Associates, Inc., "CAPWAP-Case Pile Wave Analysis Program," Cleveland, Ohio, 1993.
- 7) Hirsch, T. T., Carr, L., and Lowery, L. L., Jr., "Pile Driving Analysis of Wave Equation User's Manuals - TTI Program," Volume 1 through 4, FHWA IP-76-13.1 through IP-76-13.4, April 1976.
- 8) Likins, G. E., "Evaluation the Performance of Pile Driving Hammers," 4th PDA User's Seminar, Amsterdam, Holland, 1982.
- 9) Pile Dynamics, Inc., "PDA-Pile Driving Analyzer," Cleveland, Ohio, 1993.
- 10) Rausche, F., "Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on

Piles," Ph.D. Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1970.

11) Rausche, F., and Goble, G. G., "Determination of Pile Damage by Top Measurements," Behavior of Deep Foundations, ASTM Symposium, Boston, Massachusetts, 1978.

12) Rausche, F., Goble, G. G., and Likins, G. E., "Dynamic Determination of Pile Capacity," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985.

13) Smith, E. A. L., "Pile Driving Analysis by the Wave Equation," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 36, 1960, pp. 36-61.