

# PHC 말뚝의 항타 시공성에 관한 연구

이 인 모\*1

김 상 균\*2

---

## 요 지

본 연구에서는 일반 PC 말뚝과는 달리 제작시 실리카(silica) 재료를 사용하고 증기양생후 고온, 고압의 추가양생(autoclave curing)을 실시 함으로써 말뚝자체의 강성을 높인 PHC 말뚝의 항타 시공성을 컴퓨터 프로그램을 이용하여 파악하였다. 일반적으로 임의의 지반조건, 항타장비에 따른 컴퓨터 프로그램의 실행결과는 PHC 말뚝이 PC 말뚝에 비해 항타장비에 의해서 발휘되는 타격에너지에 대해 보다 큰 저항력을 가지므로 설계지지력을 크게 얻을 수 있으며 항타장비의 선정에 있어서도 보다 큰 효율을 지닌 장비의 선정이 가능하여 경제적인 항타작업을 수행하는데 유리함을 보였다. 이와같은 결과를 실제 현장에서의 말뚝 항타시공을 실시한 후 항타기록 및 재하시험 결과와 비교검토 하였는데 본 연구결과와 재하시험 결과가 잘 일치함을 보였다.

---

\*1 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

\*2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

## 1. 서론

말뚝기초는 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 기초형식 중의 하나로서 상부지층이 구조물로 인한 하중을 견디지 못할 경우 상부의 하중을 하부의 단단한 지반에 전달 시키거나 흙과 말뚝의 접촉면에서 발생하는 마찰저항을 이용하여 구조물을 안전하게 지지하기 위해 사용 되었다. 이러한 말뚝의 설계 및 시공시 상부의 하중조건과 기초지반의 특성 등을 고려해야 함은 물론 말뚝항타시 설계심도까지 말뚝에 손상을 입히지 않고 이를 관입시킬 수 있는 말뚝의 강도, 항타장비의 선정과 말뚝의 설계지지력을 확보할 수 있는 최종항타 관입량 등을 규정하는데 이르기까지 세심한 검토가 필요하다. 그러나 상기의 검토결과에 따라 설계된 말뚝일지라도 실제 시공시 복잡하고 불규칙적인 하부지층을 만날경우 말뚝의 파손은 물론 설계심도까지 말뚝항타가 불가능할 경우가 발생할 수도 있다. 실제로 국내에서 빈번하게 사용되는 말뚝의 하나인 PC (pretensioned spun prestressed concrete piles) 말뚝의 경우 항타에 의한 타격에너지를 극복하지 못하고 파손되는 경우가 적지 않았다. 이와같은 이유로 본 연구에서는 PC 말뚝에 비해 설계지지력을 크게 얻을 수 있고 항타에 의한 타격에너지에 보다 큰 저항력을 지닌 PHC (pretensioned spun high strength concrete piles)말뚝을 사용할 경우의 항타시공성을 파전파이론을 이용한 컴퓨터 프로그램, WEAP 을 사용하여 항타 및 극한지지력 평가시의 특성, 특히 말뚝의 항타에 대한 저항력등을 파악하여 추후 설계 및 시공시 경제적이고 효율적인 말뚝항타 작업을 실시하는데 이용이 되도록 하고자 한다.

## 2. 파동방정식의 이론적 고찰

말뚝머리에 가해지는 충격에 의해 말뚝에 발생하게 되는 충격파의 진행에 의해 말뚝에 관성력과 변위가 생기게 되고 이러한 힘과 변위 그리고 말뚝의 주변 및 선단의 흙의 저항치를 고려하여 다음과 같은 파동방정식을 유도할 수 있다. 이와같은 파동방정

식은 말뚝에서의 응력의 변화로부터 말뚝의 변위와 시간 그리고 요소위치 사이의 관계를 결정하기 위해 초기조건과 경계조건을 사용하여 해를 구할수 있다.

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \pm R$$

D: 말뚝의 축방향 변위

E: 말뚝의 탄성계수

$\rho$ : 말뚝재료의 밀도

t: 시간

x: 진행파의 방향

R: 흙의 저항치

그러나 실제의 말뚝항타시에 말뚝과 항타장비 그리고 주변의 흙의 성질에 관련된 여러 복잡한 인자들로 인해 이론해로서 말뚝의 파동방정식을 해석하기는 상당히 어려운 실정이다. 그러므로 파동방정식을 해석하는 방법으로 적용되고 있는 것은 실제의 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 항타에 의한 충격파의 전달과정을 각 요소마다 시간별로 표시하여 변위와 응력등을 계산하고 극한지지력에 따르는 최종 항타 관입량 (set value)등을 컴퓨터를 사용해서 해석하는 소위 수치해석 방법이다. Smith 에 의해 제안된 이 이론은 항타시 장비의 조합성, 항타응력 및 지지력 등을 추정하기 위해 사용 되어지며 컴퓨터 프로그램을 위한 모델링의 개략은 그림 1 과 같다.

그림 1 에서 좌측은 실제 말뚝을 나타내고 우측은 컴퓨터 프로그램에 적합하도록 말뚝을 유한한 요소로 나누어서 이상화시킨 말뚝을 나타낸 것으로 각 요소는 1번 부터 12번 까지 요소번호가 부여되어 있고 각요소는 재료의 탄성(elasticity) 을 나타내는 spring 으로 연결되어 있다. 지표면 이하의 요소에 대해서는 기초지반의 효과를 나타내는 soil spring 과 동적상태의 하중에 대한 흙의 damping 효과를 나타내는 dash-pot 를 합하여 저항치 R 로 표시 되어 있다.

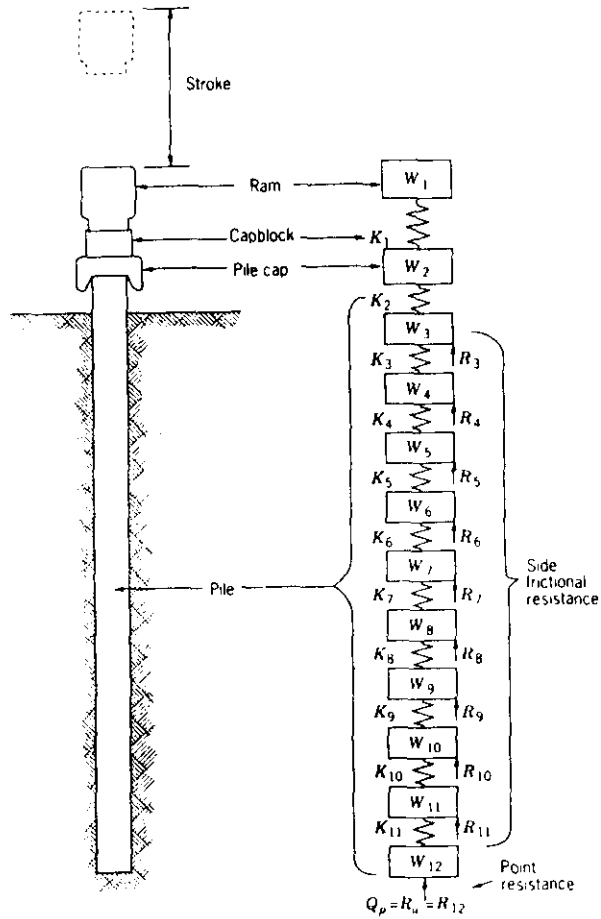


그림 1 파동방정식의 수치해석 기본 모델

말뚝 선단에도 R 이 표시 되어 있는데 이는 항타시 말뚝 선단에서 흙이 밀려 나가면서 말뚝이 밑으로 관입되는 현상을 나타내기 위한 것이다. 여기서 요소(segment)의 번호를  $m$ , 시간간격(time interval)을  $\Delta t$  라고 하면 임의의 시간  $t$  에서의 요소  $m$  의 변위(displacement), 힘(force) 은 그림 2 에서 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D(m, t) = D(m, t-1) + V(m, t-1) \Delta t \quad (1)$$

$$C(m, t) = D(m, t) - D(m-1, t) \quad (2)$$

$$F(m, t) = C(m, t) \cdot K(m) \quad (3)$$

$$R(m, t) = [D(m, t) - D'(m, t)] \cdot K'(m) [1 + J(m) V(m, t-1)] \quad (4)$$

$$V(m, t) = V(m, t-1) + [F(m-1, t) - F(m, t) - R(m, t)] \cdot g \Delta t / W(m) \quad (5)$$

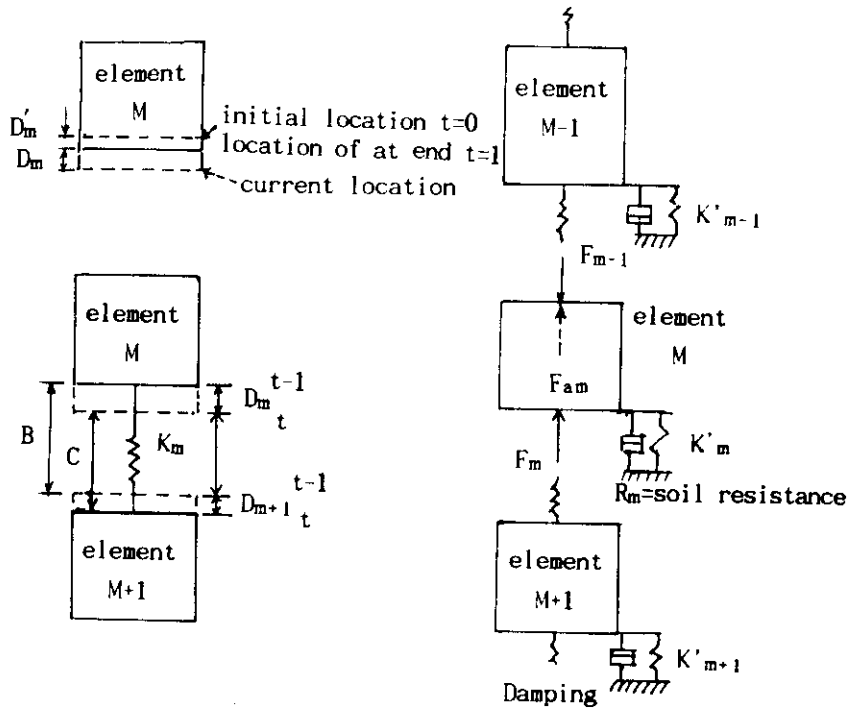


그림 2 말뚝 요소에서의 힘의 평형

상기식에 나타난 변수들은 일반 컴퓨터프로그램 등에 사용되는 변수와 같으며 단일첨자로 된 변수는 시간에 따라 변하지 않는 값이다. 각 변수와 첨자에 대하여 설명하면 다음과 같다.

- |                          |                                       |
|--------------------------|---------------------------------------|
| $m$ : 요소 번호              | $R$ : soil spring이 받는 힘               |
| $t$ : 시간 간격 번호( $DT=t$ ) | $V$ : 요소의 속도                          |
| $\Delta t$ : 시간 간격       | $K$ : 요소 spring의 $K$ 값(말뚝의 stiffness) |
| $D$ : 요소의 변위             | $K'$ : soil spring의 $K$ 값             |
| $C$ : 요소 spring의 순변위     | $J$ : soil의 damping 값                 |
| $F$ : 요소 spring이 받는 힘    | $D'$ : soil의 소성 변위                    |

최초에 ram 이 cap block 에 떨어지는 순간에는 ram 의 속도를 제외한 다른요소의 속도와 변위 등은 영이며, 앞의 식 (1)에 의해서 요소 1 의 변위가 생기고 (2),(3), (4),(5) 식에 의해 각요소의 새로운 속도가 계산되어 다시 (1) 식으로 돌아간다. 계산은 모든 요소의 속도가 영이거나 마이너스이고 말뚝선단의 변위가 앞의 시간에서 구한

값보다 적은 경우 끝나게 된다. Wave equation 에 의한 말뚝 선단의 변위를 시간에 따라 구하면 그림 3 과 같게 된다.

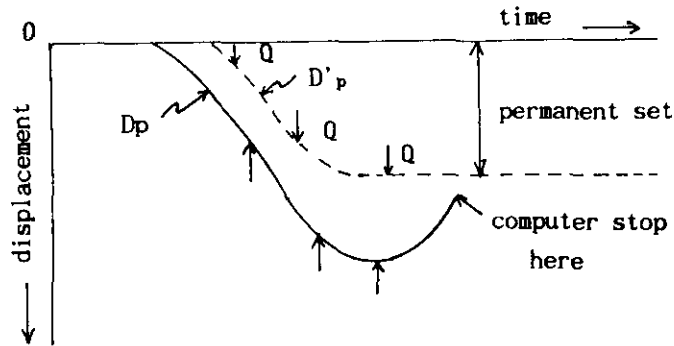


그림 3 말뚝 선단에서의 시간-변위 곡선

이와 같은 Wave equation 에 필요한 입력(input) 자료들을 항타장비, 말뚝, soil 별로 기술하면 다음과 같다.

- pile driver

- ram 의 낙하고 및 중량
- anvil 의 중량
- cap block의 spring 값
- cap의 중량
- cushion의 spring 값
- hammer 효율

- soil

- soil에 묻힌 말뚝 길이
- soil profile
- 말뚝 주변 마찰력의 분포 형태 및 값
- soil 의 탄성 변위 량(quake)
- soil 의 damping 값

- pile

- 총 길이 및 단위면적
- 말뚝의 단위중량
- 말뚝의 탄성계수

본 연구에서 사용한 program 은 현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 WEAP(Wave Equation Analysis for Pile) 으로 이 프로그램은 미국의 케이스 웨스턴 대학에서 개발된 것이다.

### 3. 입력자료(input data)

본 연구의 취지가 PHC 말뚝의 항타 시공성을 파악하기 위한 것이므로 컴퓨터 프로그램 실행시키기 위하여 실제 사용된 입력 자료 즉 soil, 말뚝, 항타장비중 soil 항에 표시된 항목들은 일정하게 말뚝의 경우는 PHC 말뚝과 PC 말뚝에 대해서 항타장비는 Kobe-25 및 Kobe-35 에 대해서 컴퓨터를 실행시켰으며 대입된 수치들은 다음과 같다.

#### (1) 지반조건

본 연구에서 사용된 지반은 서울지역 뿐만아니라, 전국에서 가장 대표적이라 볼 수 있는 매립토/풍화토/풍화암의 지층구조를 이루는 대표단면을 선정하였으며 이의 주상도는 그림 4 와 같다.

-soil에 묻힌 말뚝길이: 11m( N치 44 정도를 지지층으로 설정)

-주변 마찰력 분포: 15D(depth) 까지는 마찰 저항력이 일정하게 증가하고 15D 이상의 깊이에서는 일정한 분포를 적용하였다.

-soil의 탄성 변위량(quake): 말뚝주변 0.1in(0.254cm)

말뚝선단 0.2in(0.508cm)

-soil의 damping 값: 말뚝주변 0.05

말뚝선단 0.1





(2) 입력자료로 필요한 말뚝의 특성 및 타입시 말뚝에 유발되는 응력에 대한 안정성 검토에 필요한 PHC 및 PC 말뚝의 특성은 다음과 같다.

	- PHC 말뚝	- PC 말뚝
말뚝의 길이(m)	11	11
말뚝의 단면적(cm <sup>2</sup> )	546.6	582.0
말뚝의 중량(kg/m)	109.3	151.0
탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )	400000	400000
압축파괴강도(kg/cm <sup>2</sup> )	800	500
항타시 허용압축응력(kg/cm <sup>2</sup> )	480	300

### (3) 항타 장비

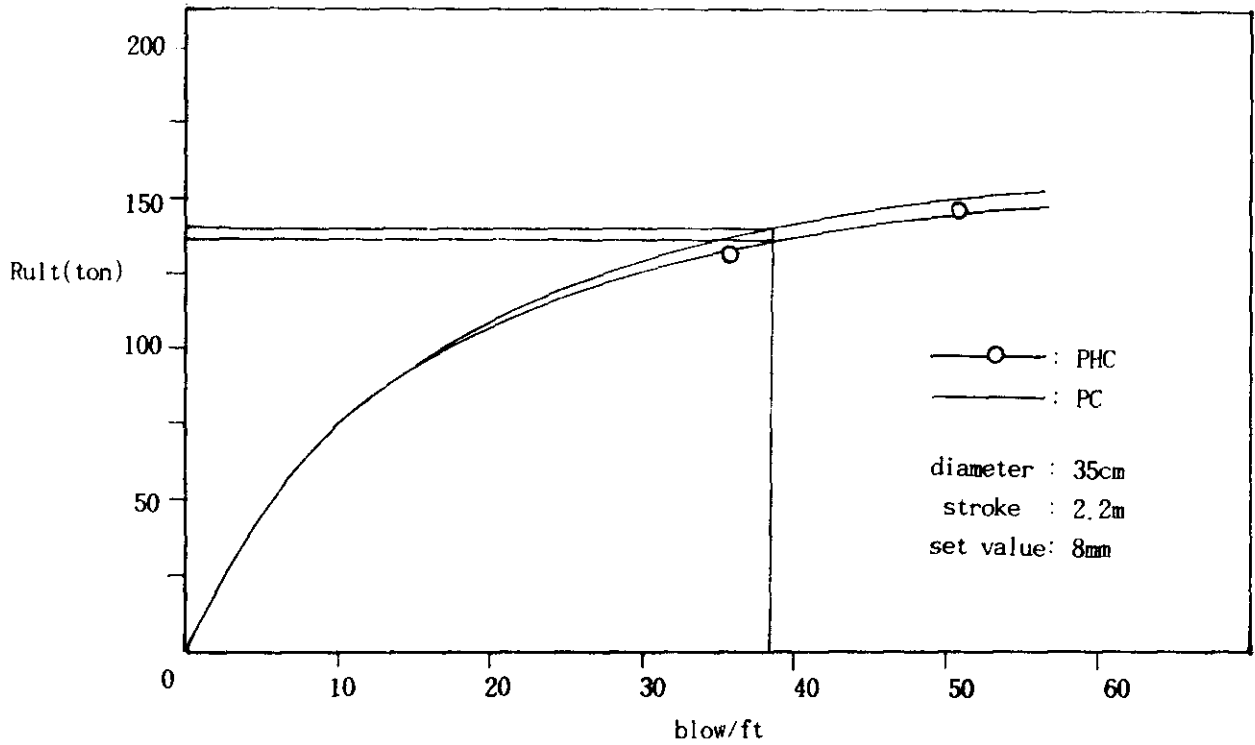
각종 항타기에 대한 제원은 컴퓨터 프로그램에 내장되어 있으므로 항타시 사용하는 장비번호(예: Kobe-25 26번, Kobe-35 28번)를 입력하면 프로그램내에서 번호에 맞는 장비에 의한 계산이 수행되어지며 hammer 의 효율에 있어서는 장비 제작사에서 추천하는 값들이 있으나 사용하는 장비의 성능과 노후정도 등에 따라 차이가 있을 수 있으므로 실제 항타작업에 사용하는 장비의 효율은 실험에 의해 결정되거나 사용자의 경험등에 의해 적절히 조정되어 입력되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 PHC 말뚝 항타 시공성 검토에 목적이 있으므로 diesel hammer 에 대해서 장비 제작사에서 추천한 값을 그대로 적용하였으며 cap 과 cushion 에대한 입력자료 및 낙하고는 각각 다음과 같이 규정하여 사용하였다.

	K-25	K-35
cap의 중량 (ton)	0.5	0.5
cap의 stiffness(K/in)	883	883
cushion의 stiffness(K/in)	753	802
낙 하고 (m)	2.2	2.2
hammer 효율	0.9	0.9

#### 4. 항타 시공성 검토

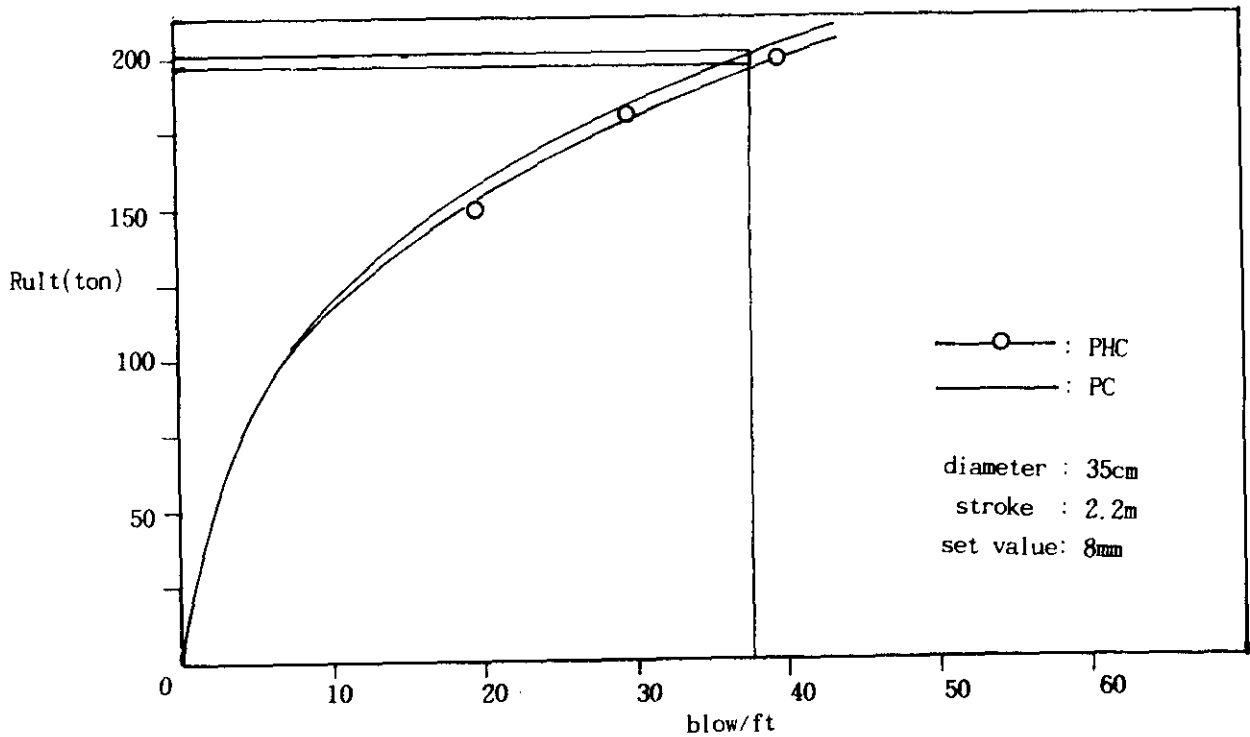
항타시 말뚝의 극한지지력(ultimate soil resistance) 과 정역학적 말뚝지지력(ultimate bearing capacity) 을 함께 고려하여 해석하는 컴퓨터 프로그램, WEAP (Wave Equation Analysis for Piles) 의 출력(output) 결과를 이용하여 극한지지력과 최종항타 관입량 사이의 관계를 나타내는 그림과 최종 항타관입량이 8mm 인경우 말뚝에 유발되는 최대응력 (maximum stress) 은 그림 5,6 과 같다.

Kobe - 25 와 Kobe - 35 항타장비를 입력자료로 실행시킨 결과를 나타내는 그림 5 와 그림 6 에 있어서 극한지지력은 PHC 말뚝과 PC 말뚝이 비슷한 값을 보였고 말뚝에 유발되는 최대응력은 PHC 말뚝이 PC 말뚝에 비해 약간 큰 값을 보이는데 이는 말뚝단면적의 차이로 인한 것임을 입력자료로 부터 알 수 있다. 응력에 대한 안정성 검토에 있어서는 그림 5 와 그림 6 에서 항타시 PC 말뚝에 유발되는 최대응력이 허용응력 ( $300\text{kg}/\text{cm}^2$ )을 초과하여 말뚝항타시 타격에너지를 극복하지 못하고 파손될 우려가 있는 반면 PHC 말뚝의 경우 항타에 의한 최대응력이 항타시 허용응력( $480\text{kg}/\text{cm}^2$ ) 이내임을 알 수 있다. 다시말하여, PHC 말뚝의 경우 Kobe - 25 장비를 Kobe - 35 장비로 바꾸어 항타작업을 시행할 때, 보다 큰 지지력을 얻을 수 있으며 말뚝에 유발되는 최대응력도 허용응력 이내의 값을 가지므로 효율적인 항타작업이 가능함을 알 수 있다. 상기의 결과를 확인하기 위하여 실제로 현장에서 말뚝의 항타작업을 실시한 각각의 말뚝과 항타장비에 대한 항타기록과 재하시험결과는 그림 7 및 그림 8 과 같다. 이와같은 결과로 보아 PHC 말뚝이 PC 말뚝에 비해 말뚝의 손상없이 보다 더 단단한 지반까지 관입이 가능한 것을 알 수 있으며 이로인해 상대적으로 큰 설계지지력을 얻을 수 있고 항타장비의 선정에 있어서도 큰 타격에너지를 발휘하는 장비를 사용할 경우에도 PC 말뚝과 달리 over stress 의 문제없이 항타작업이 가능함을 보여 컴퓨터의 실행결과와 거의 일치 함을 알 수 있다.



- 극한지지력: PHC 134 ton, PC 137 ton - 최대응력: PHC 328 kg/cm<sup>2</sup>, PC 310 kg/cm<sup>2</sup>

그림 5 극한지지력 과 최종항타 관입량 곡선 (Kobe-25)



- 극한지지력: PHC 196 ton, PC 200 ton - 최대응력: PHC 450 kg/cm<sup>2</sup>, PC 428 kg/cm<sup>2</sup>

그림 6 극한지지력 과 최종항타 관입량 곡선 (Kobe-35)

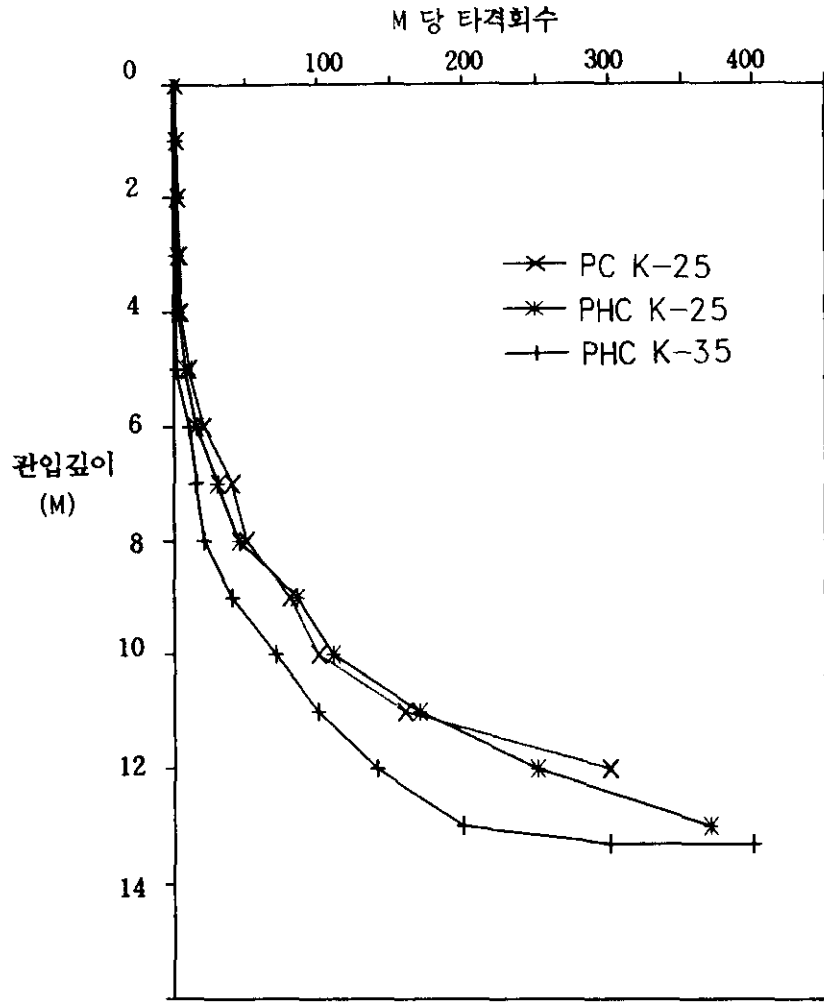


그림 7 말뚝항타 기록

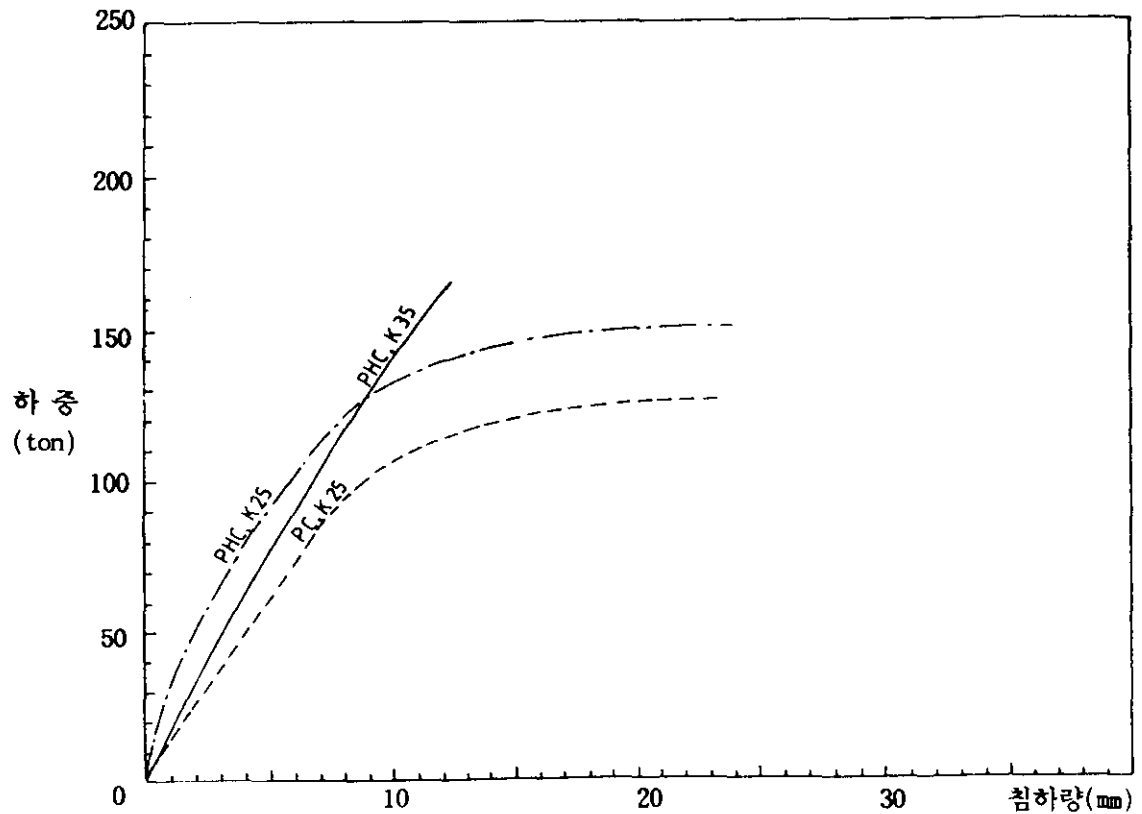


그림 8 재하시험 결과

## 5. 결론

본 연구는 파동방정식의 결과와 항타에 대한 말뚝의 저항력에 근거해서 항타시 말뚝에 미치는 영향을 PHC 말뚝과 PC 말뚝 각각에 대하여 고찰한 것인데 PHC 말뚝에 비해 PC 말뚝의 경우 자주 문제가 되는 것은 말뚝의 Drivability 의 문제이다. 즉 소요의 깊이까지 말뚝이 박혀만 준다면 요구되는 지지력을 얻을 수 있으나, 말뚝이 선단 지지층에 관입되기도 전에 항타로 인한 과응력이 발생하여 말뚝 두부가 깨지는 등 손상을 입어 더이상 관입을 시키지 못하고 boring 을 먼저하고 심는 등의 공법으로 전환하는 경우가 허다하다. 본 연구의 초점은 PHC 말뚝은 말뚝에 유발되는 응력에 대한 저항성이 PC 말뚝에 비해 약 1.5 배 정도 크므로 보다 큰 항타응력에도 over stress 의 문제를 야기 시키지 않을 수 있다는 것이다. 다시말해서 PC 말뚝에 소요되는 항타장비 보다 한단계 큰 항타에너지를 발휘하는 항타장비를 선정하여 시공할 수 있을 것으로 판단되며 동역학적 공식을 보면 극한지지력은 Ram 의 무게에 비례하므로 그만큼 큰 극한 지지력을 가질 수 있는 것으로 판단되어 이러한 면에서 PC 말뚝보다 경제적이고 효율적인 항타작업을 실시 할 수 있을 것으로 본다.