

(Pile Installation Recorder-Driven Pile)

Study on Application of PIR-D(Pile Installation Recorder-Driven Pile)  
in Driven Pile

<sup>1)</sup>, Bong-Keun Park,      <sup>2)</sup>, Min-Cheul Park,      <sup>3)</sup>, YongKyu Choi

<sup>1)</sup> ( ) , Member, Director, Backyoung G & C. Co., Ltd.,

<sup>2)</sup> ( ) , Member, Manager, Backyoung G & C. Co., Ltd., Technical Team

<sup>3)</sup> . , Member, Prof., Dept of Civil & Environmental Eng., Kyungshin Univ.

**SYNOPSIS** : Driven pile has the excellent bearing characteristics and good economics, so it is known as the comparative piling method. To use the advantages of driven pile fully, it is necessary to perform the proper construction management. Engineers must drive pile to the proper bearing layer with proper blow energy and measure the blow count and penetration per certain depth to analyze the bearing capacity and driveability. In conventional method, these parameters have been measured manually so it was difficult to get good accuracy. After PIR-D(Pile Installation Recorder-Driven Pile) was attached to the driving equipment, the hammer efficiency, blow count and penetration in blow/10cm were measured automatically. In this paper, to give the rational judgement criteria of bearing layer, driveability, blow/10cm according to pile depth during pile driving, the some relationship between the driving resistance and ground layer distribution was analyzed. The ground investigation during piles (PHC  $\Phi 450$ ,  $\Phi 400$  & Steel Pile  $\Phi 609 \times 16t$ ) installation in the marine clay layer in Incheon, the sandy soil layer in Yongin and the tuff layer in Pusan was done. And measuring hammer efficiency not doing recently, we could compare hammer efficiency(Eh) by PIR-D and energy transfer ratio(ETR) by Pile Dynamic Analyzer(PDA).

**Key Words** : Driven pile, PIR-D, bearing layer, marine clay layer, tuff layer, hammer efficiency

## 1. 서론

말뚝 항타 공법은 지지력 특성이 우수하고 경제성이 좋아서 소음과 진동에 대한 민원이 없는 곳에서는 가장 경제적인 말뚝공법이다. 항타 공법의 장점인 경제성 및 지지력 특성을 잘 활용하기 위해서는 시공관리가 잘 이루어져야 한다. 즉, 적정한 에너지에 의해 목표 지지층까지 타격하고 깊이 별 타격수 및 최종관입량을 측정하여 설계지지력과 시공성을 분석하여야 한다. 아직까지 이러한 시공관리에 관련된 항목들이 수작업 또는 목측(目測)에 의해 이루어지는 관계로 항타 작업의 정확성이 떨어지고 또한 안전관리상의 문제도 발생할 수 있다.

항타관리 시스템인 PIR-D(Pile Installation Recorder-Driven Pile) 장비는 항타기에 부착하여 말뚝의 관입깊이, 깊이별 타격수, 최종관입량 및 항타기의 효율을 자동으로 측정할 수 있어 안전하고 정확한 시공관리가 가능하다. 말뚝 항타 관리에 널리 사용되는 PDA와 비교 해볼 때 일부 기능은 중첩되지만 최종관입량 및 말뚝 관입깊이 측정값은 CAPWAP 분석의 입력 값으로 활용되기 때문에 상호 보완적인 관계에 있다. 더욱이 항타관리시 PDA는 모든 말뚝에 대해서 적용하는 것은 현장 여건을 고려 할 때 불가능하지만 PIR-D 장비의 계측장비는 항타기에 부착시킬 수 있으므로 전체 말뚝에 대한 시공관리가 가능

하여 동재하시험과 연계하여 보다 확실한 시공관리가 가능하다(박봉근 등, 2003).

본 연구에서는 인천 OO현장의 해성퇴적토층, 용인 OO현장의 사질토층, 부산 OO현장의 풍화암층 등에 대해 항타관리 시스템인 PIR-D(Pile Installation Recorder-Driven Pile) 장비를 항타기에 부착하여 시항타 과정에서 지층별, 말뚝별, 해머 종류 등에 따른 10cm 관입시키는데 소요된 타격수를 관입깊이별로 측정하였다. 아울러 이러한 결과를 지반조사 결과와 비교 분석하여 지층 상태에 따른 항타관입성, 심도별 타격횟수 변화에 대해 비교 검토하였고, 항타분석기(PDA)로는 측정할 수 없었던 해머효율( $E_h$ )을 측정하여 에너지전달율(ETR)과 비교 검토하였다.

## 2. 현장 및 항타관리 시스템(PIR-D) 적용 개요

### 2.1 PIR-D 장비의 구성

본 연구에 사용된 항타분석기는 미국 PDI사의 MODEL PAK, 항타관리 시스템은 PIR-D(PDI, 2000)를 사용하였으며, PIR-D의 크기는 20cm x 14cm x 5cm, 무게 1.3kg으로 되어 있으며, 다음과 같은 구성요소로 이루어져 있다.

- ① PIR-D 본체(사진 1) : 타격 횟수, 심도, 해머의 타격에너지, 날짜, 항타 시작 및 종료 시간 등을 내장된 PCMCIA 카드에 저장하는 PIR-D 본체.
- ② 회전 엔코더(Rotary encoder, 사진 2) : 회전식 기록기의 연결선이 유압 해머 상단에 연결되어 관입 심도를 측정하기 위한 장치.
- ③ 에너지 센서(사진 3) : 유압 해머의 타격 속도를 측정하여 해머의 운동에너지를 측정하는 에너지 센서.
- ④ 가속도계 : 해머 캡에 부착하여 최대변위량(탄성 및 소성)를 측정하기 위한 가속도계

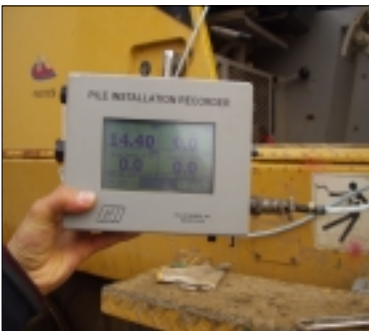


사진 1. PIR-D의 본체



사진 2. 회전 엔코더



사진 3. 에너지 센서

### 2.2 현장 시험 내용

본 연구의 목적은 인천의 해성퇴적토 지반의 경우 직경 450mm의 PHC(A-종) 말뚝에 대해 시항타 과정에서 유압해머(DKH-7)로 항타할 때 항타관입성을 분석하여 지반조사를 근거로 한 말뚝 길이 산출 결과와 비교하여 본 시공을 위한 지반의 기초 자료를 확보하기 위하여 시험을 수행하였다. 특히 인천의 OO현장의 경우 PIR-D와 일부 PDA 시험을 병행하였다. 용인 OO현장의 사질토 지반에서는 직경 400mm의 PHC(A-종) 말뚝을 유압해머(DKH-7)로 항타하였으며 아파트 동당 6분에 대한 항타관입성을 측정하여 지층 상태를 분석하고 말뚝 길이를 예측하였다. 부산의 응회암 지반에 시공한 강관 말뚝(SPS 400  $\phi$ 609\*16t)에 대하여 유압해머(DKH-10)로 항타하면서 PIR-D장비로 측정된 관입 깊이별 타격수를 지반조사결과의 지층분포와 비교분석하였으며, 이 분석결과를 이용하여 실제 시공 시에 더욱 합리적인 지지층을 판별할 수 있는 방안에 대해 검토하였다.

## 2.3 지반조사 결과

현장별 지반조사 자료를 요약하면 다음과 같다.

### (가) 인천 OO현장

본 현장의 지반조사 결과를 요약하면 지표면 상부로부터 매립층(지표로부터 5.1m), 해성퇴적층(지표로부터 30.0m), 풍화토층(지표로부터 31.3m), 이하 풍화암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 해성퇴적층은 주로 실트질 세립사층으로 구성되어 있는 것이 특징이다. 공내지하수위는 지표면으로부터 1.0m 이내에서 형성되었다(그림 1 참조).

### (나) 용인 OO현장

본 현장의 지반조사 결과를 요약하면 지표면 상부로부터 매립층(지표로부터 3.0m), 풍화토층(지표로부터 9.0m), 이하 풍화암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 공내지하수위는 지표면으로부터 1.0m 이내에서 형성되었다(그림 2 참조).

### (다) 부산 OO현장

본 현장의 지반조사 결과를 요약하면 지표면 상부로부터 매립층(지표로부터 5.4m), 해성퇴적층(지표로부터 29.6m), 풍화암층(지표로부터 32.0m), 이하 연암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 해성퇴적층은 주로 모래층, 실트층, 점토층, 자갈질 모래층 등으로 구성되어 있는 것이 특징이다. 공내지하수위는 지표면으로부터 1.7m 이내에서 형성되었다(그림 3 참조).

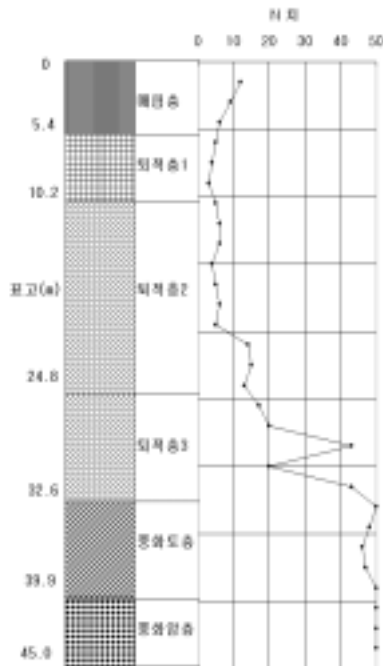


그림 1.지질주상도(인천 OO현장)

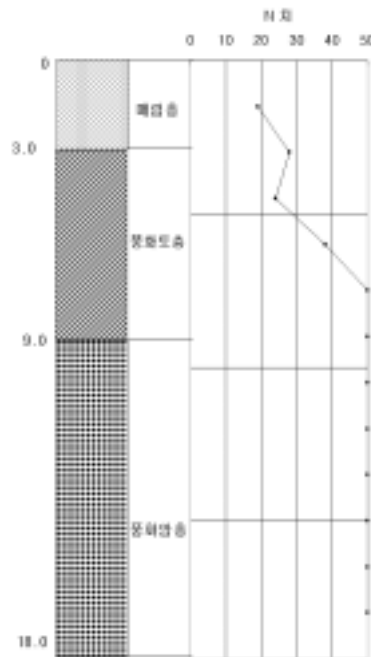


그림 2.지질주상도(용인 OO현장)

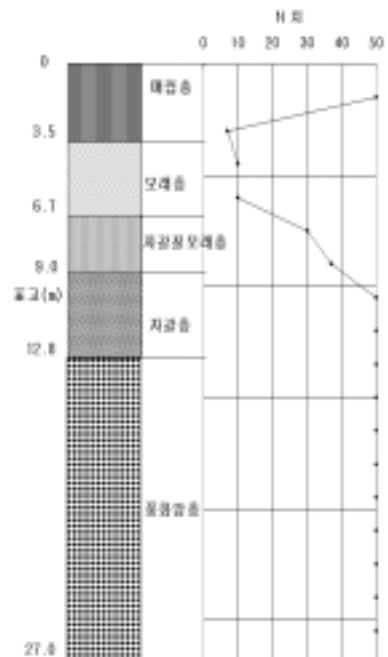


그림 3.지질주상도(부산 OO현장)

## 2.4 시험 수량 및 결과

3개 지역에서 많은 수량에 대해 PIR-D에 의한 시험타를 수행하였으나 그중 대표적인 사례에 대하여 현장별 시공 조건과 수량을 표 1에 나타내었다.

표 1.현장별 시공 조건 및 수량

현 장 명	시 험 말뚝 번 호	말뚝 종류 및 설계하중	시공조건
인천 OO현장 (7개소)	PIR-D 1~3	- PHC $\phi$ 450(A종) - 설계하중 : 80ton/본	- 유압 해머 : DKH-7 - 낙하고 : 0.9m
	PIR-D & PDA (a)~(d)		
용인 OO현장 (5개소)	PIR-D 4~8	- 고강도 PHC $\phi$ 400(A종) - 설계하중 : 70ton/본	- 유압 해머 : DKH-7 - 낙하고 : 0.7m
부산 OO현장 (5개소)	PIR-D 10	- PHC $\phi$ 500(A종) - 설계하중 : 105ton/본	- 유압 해머 : DKH-10 - 낙하고 : 0.6m
	PIR-D 11~14	- 강관 말뚝 $\phi$ 609*16t - 설계하중 : 292ton/본	- 유압 해머 : DKH-10 - 낙하고 : 1.1m

註. PIR-D는 항타관리 시스템(PIR-D)에 의한 시항타말뚝, PDA는 항타분석기(PDA)에 의한 시항타말뚝을 나타냄.

### 3. 항타 말뚝에서 항타관리 시스템(PIR-D)의 적용성

#### 3.1 항타관입성 분석

설계 단계에서 말뚝의 관입깊이를 단순히 선단부의 N값으로 결정하는 것은 관입깊이 산정에 오류를 줄 수 있으며, 따라서 이에 의해 결정된 지지력에도 문제가 있음을 유추할 수 있다. 결국, 타입말뚝의 관입 깊이를 결정하는 경우 주요 인자로서 선단저항은 물론 주변저항도 고려되어야 할 것이다(조천환, 2003). 이러한 측면을 고려하여 실제로 말뚝을 항타 하면서 10cm 관입시키는데 소요된 타격수를 관입깊이별로 그래프화 한다면 시추기로 천공 후 표준관입시험을 하는 지반조사 방식과 병행하여 검토함으로써 현장 조건과 매우 밀접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그림 4는 인천 OO현장의 아파트동 시항타 과정에서 PIR-D를 적용한 결과를 지반조사 결과와 비교하여 나타내었다. 본 현장의 경우 단지 지반조사 결과에 근거하여 주변마찰력을 고려하지 않고 N값이 50인 지지층을 선단지층으로 판단하여 예상 관입깊이를 약 40m 수준으로 판단하였으나 시항타 과정에서 PIR-D를 적용하여 10cm 관입시키는데 소요된 타격수를 관입깊이별로 측정된 결과 말뚝의 예상 관입깊이는 25m~29m 수준으로 판단되었다. 이와 같이 해성퇴적토층에서는 지반조사 결과만으로 말뚝깊이를 산출하기 보다는 동재하시험(EOID) 또는 PIR-D를 병행하여 충분한 수량에 대해 시항타를 수행하여 지반조건, 말뚝조건, 해머조건 및 시공조건 등에 따른 항타관입성에 대한 충분한 검토를 하는 것이 무엇보다 중요할 것으로 판단된다((주)백경지앤씨, 2003).

그림 5는 용인 OO현장의 아파트동 시항타 과정에서 PIR-D를 적용한 결과를 지반조사 결과와 비교하여 나타내었다. 본 현장의 경우 인천 OO현장과 달리 중간 조밀층이 없어 매우 양호한 항타관입성을 보여 설계지지력 확보를 위한 시공 관리가 용이하였다. 이와 같이 전석 또는 자갈 등이 없는 N치가 50이하인 풍화토층에서는 단말뚝의 경우 타격력에 비해 주변마찰력이 상대적으로 작기 때문에 10cm 관입시키는데 소요되는 타격수가 10타 이하인 반면 풍화암층 상단부에 이르러 선단저항력 때문에 타격수가 10타 이상으로 급격히 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. PIR-D 4~9의 관입심도에 따른 타격수(blow/ 10cm) 변화를 볼 때 10~20타인 지점이 0.5m 이내에서 나타나는 특징을 보이고 있다. 이는 사질토층에서 단단한 풍화토 또는 풍화암층 상단부에 말뚝이 근입 되어있는 것으로 판단된다.

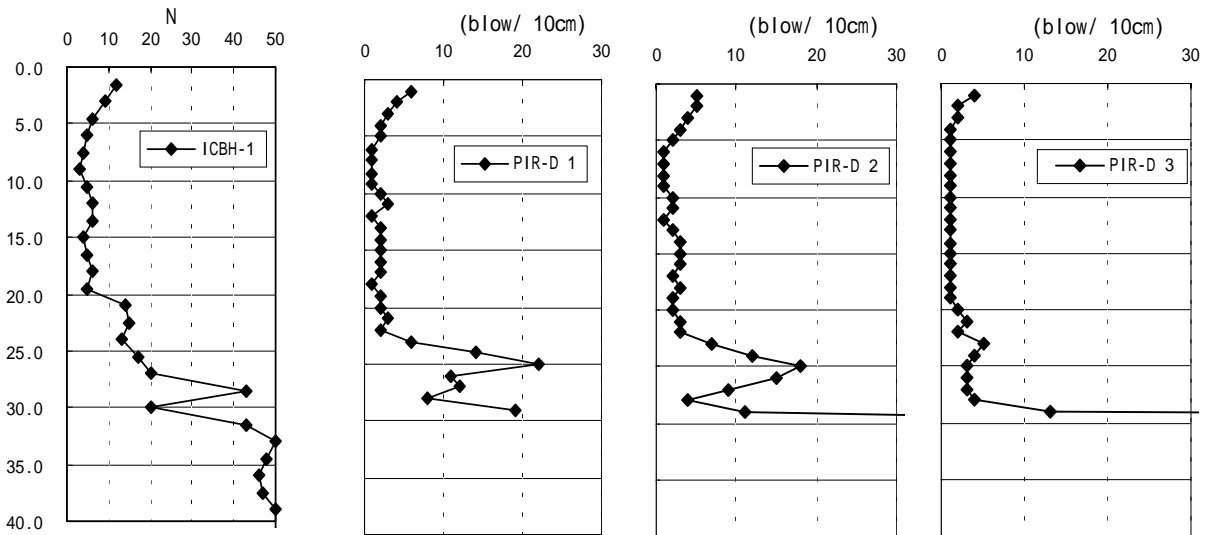


그림 4. 지질주상도(인천 OO현장)와 PIR-D에 의한 시험타 결과 비교

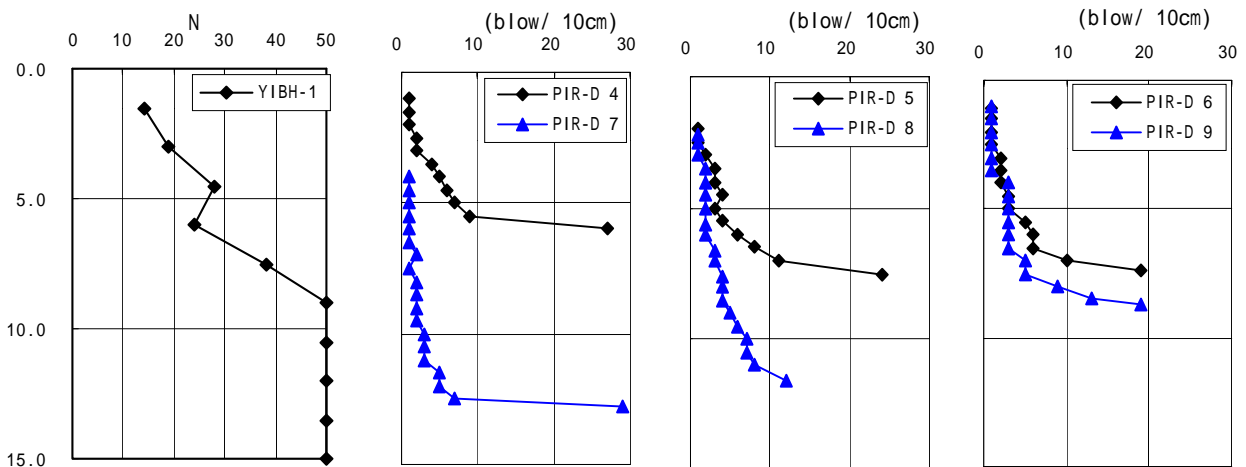


그림 5. 지질주상도(용인 OO현장)와 PIR-D에 의한 시험타 결과 비교

부산 OO 현장((주)백경지앤씨, 2002)에서 설계 전에 초고층 아파트 신축 동별 기초말뚝의 예상 심도 및 예상되는 선단지지층을 확인하기 위한 PIR-D 측정 결과와 지반조사 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 BSBH-1~2에서와 같이 자갈층은 9~12.8m, 풍화층은 13~27m 까지 분포하고 있는 것으로 조사 되었으며, PHC 말뚝인 PIR-D 10은 12.5m, 강관 말뚝(SPS 400  $\phi$ 609\*16t)인 PIR-D 11와 PIR-D 12는 각각 12.9m, 14.9m에서 10cm 관입시키는데 소요된 타격수가 30타 이상인 점으로 볼 때 PIR-D 10은 선단부가 자갈층 하단부 또는 풍화암층 상단부에 근입 되어있는 것으로 판단되며, PIR-D 11~12은 자갈층을 통과하여 풍화암층 상단 또는 약 2m 정도 근입 되어있는 것으로 판단된다. 그러나 시험 말뚝간 거리가 5m이내인 PIR-D 13과 14의 경우 각각 19.1m와 19.6m에서 10cm 관입시키는데 소요된 타격수가 50타 이상인 점으로 볼 때 N치 50/5 수준의 풍화암층 까지도 관입 가능한 점을 알 수 있었다. 또한 풍화암층 내에서도 무려 4~6m이상 관입심도 변화가 있음을 알 수 있었다. 이러한 원인은 N치는 50/6~50/1 수준이지만 기반암인 응회암이 화산회가 쌓여서 고결된 지층으로 암석의 강도가 약하기 때문으로 판단된다.

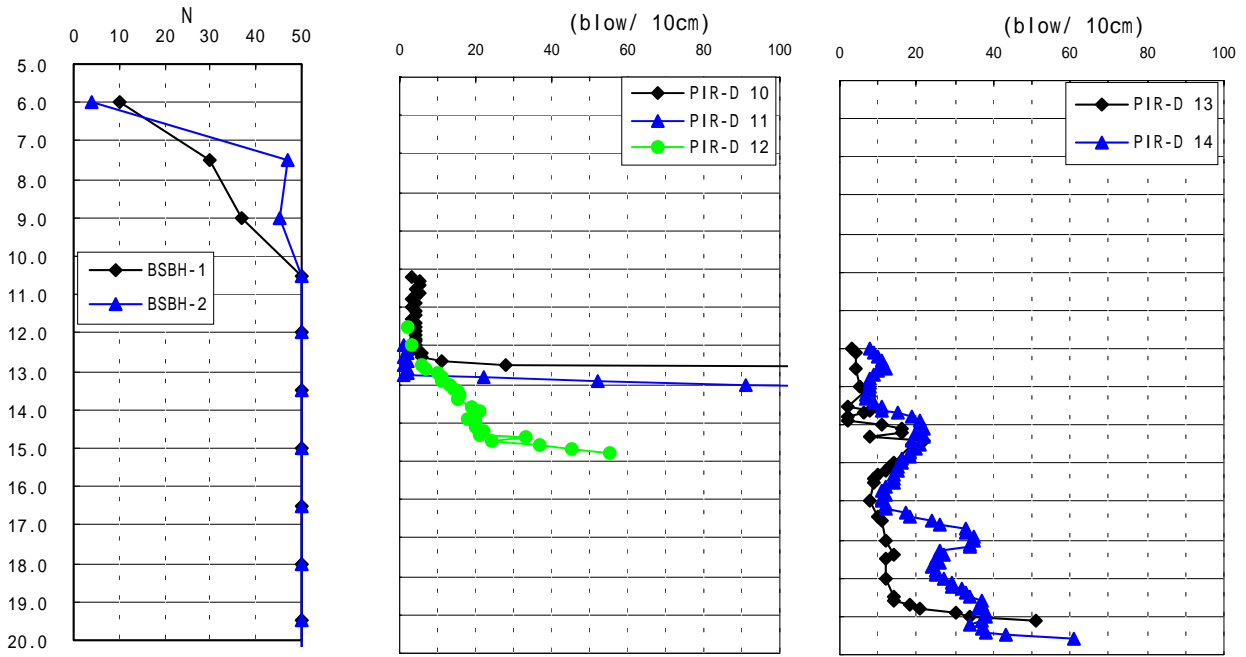


그림 6. 지질주상도(부산 OO현장)와 PIR-D에 의한 시험타 결과 비교

### 3.2 지반조사결과와 PIR-D에 의한 심도별 타격횟수 비교

그림 4에서와 같이 지반조사 결과(ICBH-1)와 PIR-D 1 결과를 살펴보면 관입심도에 따른 N 값 변화와 관입심도에 따른 타격수(blow/ 10cm) 변화의 형태가 거의 유사함을 나타내고 있다. 여기서 관입심도 면에서 다소 차이는 있으나 이는 시추위치와 시험타 위치상의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 PIR-D 1~3 결과를 비교해 보면 관입심도에 따른 타격수가 20타 이상인 관입심도가 약 30m 수준으로 거의 일정하게 나타났으나 25m 부근 지점에서의 타격수가 10타 이상인 중간 조밀층이 0~4m 정도로 분포하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 해석퇴적층의 중간 조밀층 분포수준에 따라 말뚝의 관입심도는 커다란 차이를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 5의 사질토층에서 YIBH-1와 PIR-D 4~9 결과를 살펴보면 관입심도상 차이점은 있으나 해석퇴적층과 달리 중간 조밀층이 나타나지 않고 유사한 지층 상태를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이와 같이 지반조사 결과에서 지층 상태를 판단하고 PIR-D에 의한 관입심도에 따른 타격수 변화를 검토할 경우 효율적인 지층 상태 파악, 신뢰성 있는 말뚝 길이 산출, 경제적이고 안정적인 시공 관리가 가능할 것으로 판단된다.

그림 6에 나타난 PIR-D측정 결과는 N치 50이상인 풍화암층의 관입심도에 따른 타격수 변화인데 나타난 것으로 지반 조사의 N치 기준으로는 거의 동일한 풍화암층으로 볼 수 있으나 PIR-D에 의한 관입심도에 따른 타격수 개념에서는 보다 세밀하게 풍화암층을 나타낼 수 있었다. 이러한 결과는 향후 초고층 구조물, 해상구조물 및 발전 설비 등의 기초로 대규격 강관말뚝을 설계할 때 풍화암층에 대한 관리 기준을 설정하는데 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

### 3.3 해머효율( $E_h$ )과 에너지전달율(ETR)의 비교

해머가 말뚝을 타격할 때 타격에너지 전달 메카니즘은 램, 해머쿠션, 캡블럭, 말뚝쿠션, 말뚝 등의 순서로 이루어진다. 따라서 말뚝에 전달된 에너지는 운동에너지보다 작게 된다( $KE > EMX$ ). 일반적으로 항타장비의 효율을 나타내는 용어는 해머의 효율( $E_h$  : Hammer Efficiency)과 에너지 전달율(ETR : Energy Transfer Ratio)로 나타내며 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 해머 효율( $E_h$ )

$$E_h = \frac{KE}{PE} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{WH}$$

$$ETR = \frac{EMX}{PE} = \frac{\int [F(t)V(t)]de}{WH}$$

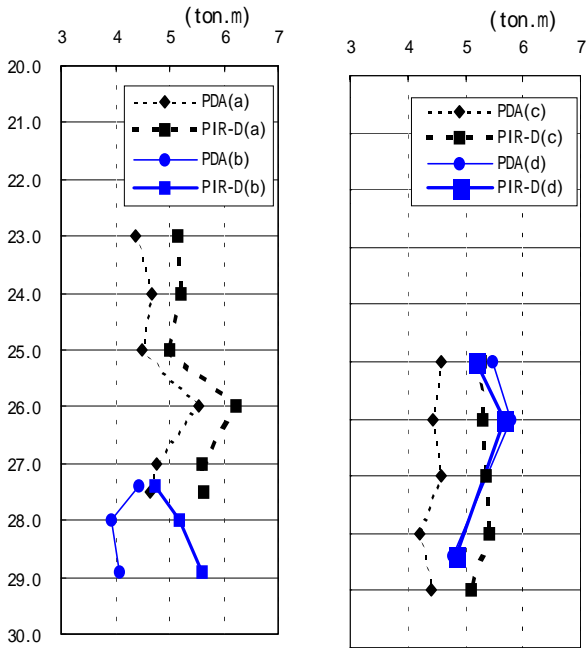


표 2.PDA와 PIR-D의 관입심도별 타격에너지 비교

말뚝 번호	관입 심도 (m)	전달 에너지 (EMX, t.m)	에너지 전달율 (ETR, %)	운동 에너지 (KE,t.m)	해머 효율 ( $E_h$ , %)	비 고
a	23.0	4.36	69.2	5.15	81.7	1.EMX는 동재하시험에 의한 측정값임. 2.KE는 PIR-D에 의한 측정값임. 3.ETR=EMX/PE 4. $E_h$ =KE/PE 5.PE는 이론적 위치 에너지임. 6.DKH-7, H=0.9m PHC $\phi$ 400 사용
	24.0	4.68	74.3	5.21	82.7	
	25.0	4.48	71.1	4.99	79.2	
	26.0	5.54	87.9	6.22	98.7	
	27.0	4.77	75.7	5.61	89.0	
	27.5	4.65	73.8	5.62	89.2	
b	27.4	4.44	70.5	4.74	75.2	
	28.0	3.92	62.2	5.18	82.2	
	28.9	4.07	64.6	5.61	89.0	
c	25.0	4.58	72.7	5.26	83.5	
	26.0	4.43	70.3	5.31	84.3	
	27.0	4.57	72.5	5.36	85.1	
	28.0	4.21	66.8	5.43	86.2	
d	29.0	4.40	69.8	5.10	81.0	
	25.0	5.47	86.8	5.19	82.4	
	26.0	5.79	91.9	5.69	90.3	
	28.4	4.79	76.0	4.84	76.8	

그림 7. PDA와 PIR-D의 관입심도별 타격에너지 비교

해머의 효율( $E_h$ )은 운동에너지(KE)와 이론적 정격 위치에너지(PE)와의 비(Ratio)이며, 일반적으로 에너지 전달율(ETR)보다 크다. 해머효율은 향타분석기(PDA)에 의해서는 현장에서 직접 측정할 수 없으며, 해머의 효율을 측정하기 위해서는 램의 낙하속도를 측정하는 것이 필수적이다(파일테크, 1997). 이와 같이 운동에너지 값을 측정할 수 없었기 때문에 에너지 전달율을 기준으로 해머의 성능을 평가할 때 장비와 지반의 유기적인 특성을 고려하여 판단해야하는 어려움이 있었다. 그러나 본 연구에서는 PIR-D 장비를 이용하여 해머의 속도에 의한 운동에너지(KE)를 측정하여 해머효율( $E_h$ )를 측정하고 향타분석기(PDA)를 이용하여 에너지 전달율을 측정할 수 있었다. 결국 지반 특성과 무관하게 해머효율만을 평가할 수 있어 향타 장비의 고장 유무를 쉽게 판단할 수 있는 방법임을 알 수 있었다. 표 2와 그림 7에 관입심도별 PDA에 의한 전달 에너지와 PIR-D에 의한 운동에너지를 측정한 결과를 나타내었다. 본 현장에 대한 PDA에 의한 평균 에너지 전달율(ETR)은 73.9% 였으며, PIR-D에 의한 평균 해머효율은 84.5%로 측정되었다. 앞서 언급한 것과 같이 타격에너지 전달 메카니즘 상에서 약 10% 수준의 에너지 손실이 있었음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인천 OO현장의 해성퇴적토층, 용인 OO현장의 사질토층, 부산 OO현장의 풍화암층 등에 대해 향타관리 시스템인 PIR-D 장비를 향타기에 부착하여 시향타하는 과정에서 지층별, 말뚝별, 해머 종류등에 따른 10cm 관입시키는데 소요된 타격수를 관입깊이별로 측정하였다. 이상의 연구 결과를 요약 정리하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 인천 OO현장 해성퇴적토층의 경우 말뚝 항타 과정에서 중간 조밀층의 존재를 확인하였으며, 부산 OO현장의 경우 강관 말뚝(SPS 400  $\phi$ 609\*16t)을 유압해머(DKH 10)로 항타한 결과 N치 50/5 수준의 풍화암층 까지도 관입 가능한 점을 알 수 있었다. 따라서 시항타 과정에서 PIR-D에 의한 항타관입성에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

(2) PIR-D측정 결과 지반 조사의 N치 기준으로는 거의 동일한 풍화암층(N = 50/5)으로 볼 수 있으나 PIR-D에 의한 관입심도에 따른 타격수 개념에서 보다 세밀하게 풍화암층을 나타낼 수 있었다. 이러한 결과는 향후 초고층 구조물, 해상구조물 및 발전 설비 등의 기초로 대구경 강관말뚝을 설계할 때 풍화암층에 대한 관리 기준을 설정하는데 중요한 자료가 될 것으로 판단되었다.

(3) 지반조사 결과에서 지층 상태를 판단하고 PIR-D에 의한 관입심도에 따른 타격수 변화를 검토할 경우 효율적인 지층 상태 파악, 신뢰성 있는 말뚝 길이 산출, 경제적이고 안정적인 시공 관리가 가능 할 것으로 판단되었다.

(4) PIR-D 장비를 이용하여 해머의 속도에 의한 운동에너지(KE)를 측정하여 해머효율( $E_h$ )를 측정하고 항타분석기(PDA)를 이용하여 에너지 전달율을 측정할 수 있었다. 아울러 타격에너지 전달 메카니즘 상에서 약 10% 수준의 에너지 손실이 있었음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구 센터의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 박봉근, 최용규, 임해식, 박종배, 박민철(2003), “항타관리 시스템(PIR-D)을 이용한 특이 지층에서의 지지층 확인 연구”, 2003년도 기초기술위원회 봄 학술발표회, 한국지반공학회 기초기술위원회, p.105-117
2. Pile Dynamics, Inc.(2000), “Pile Installation Recorder for Driven Piles(PIR-D)”
3. 조천환(2003), “타입 강관말뚝의 항타관입성 분석”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제5호, pp.128-129.
4. (주)백경지엔씨(2003), “고강도 PHC 말뚝에 대한 PIR-D 현장 적용성 검토 보고서”
5. (주)백경지엔씨(2002), “강관말뚝에 대한 PIR-D 현장 적용성 검토 보고서”
6. 파일테크(1997), “항타장비 성능측정시험 보고서”