KGS Spring Conference 2002 / March 21~22, 2002 / Seoul / Korea

항타장비의 성능평가 연구
A Study on Hammer Performance Evaluation

홍 헌성[1], Hun-Sung Hong, 이 명환[2], Myung-Whan Lee, 조천환[3], Chun-Whan Cho,
김 성회[4], Sung-Hoe Kim, 전 영석[4], Young-Suk Jun

[1] (주)파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers
[2] (주)파일테크 연구소장, Principal Researcher, Piletech Consulting Engineers
[3] (주)파일테크 부사장, Vice-President, Piletech Consulting Engineers
[4] (주)파일테크 부장, Senior Researcher, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : The performance of a hammer/driving systems is a major factor which affects bearing capacity and integrity of installed piles. Hammer performance can be evaluated from the results of dynamic pile testing using Pile Driving Analyzer(PDA). By comparing the rated energy with measured maximum transferred energy(EMX), the energy transfer ratio(ETR) can be calculated. This paper based on the dynamic measurements of 442 cases in 130 piling projects and evaluated ETR according to the hammer types(hydraulic and drop hammers) and pile types(steel and concrete piles).

Key words : hammer performance, hydraulic hammer, drop hammer, PDA, EMX, ETR

1. 서 론

구조물기초형식으로 말뚝기초를 시공하는 경우 말뚝재료의 안정성과 소요의 지지력을 확보하기 위해서는 지반조건, 말뚝재료조건과 함께 항타장비조건이 중요한 고려요소이다. 특히 항타장비의 성능은 말뚝시공시 지지력 및 말뚝재료의 안정성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 항타장비의 성능은 직항타공법뿐만 아니라 소음, 진동 등 건설공해를 감소시키기 위해 근래에 적용이 증가되고 있는 대부분의 매입말뚝공법도 선단지지력 확보를 위해 최종 경타를 실시하는 점을 감안하면 말뚝시공품질에 중요한 요소로 평가할 수 있다.

1994년도부터 국내에 도입되어 현재 국내의 많은 말뚝시공 현장에서 이용되고있는 PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용한 동재하시험은 지지력 확인뿐만 아니라 항타응력, 타격에너지 측정 등 항타시공관입성(driveability) 측정을 통한 시험방법 본래의 적용성을 이용하여 합리적인 항타시공관리를 하는데 이용되고 있다. 특히 PDA는 말뚝에 전달된 실제 에너지를 측정함으로서 해머의 실제 에너지 효율을 확인할 수 있고 해머쿠션과 같은 부속장비 적정성 등을 평가할 수 있다.

본 논문에서는 최근 5년간 국내 130개의 말뚝시공현장에서 이루어진 442회의 동재하시험 결과를 토대로 해머종류별, 말뚝종류별 에너지전달률 측정결과를 조사하여 분석, 평가하였다. 또한 말뚝 시공시 항타장비의 문제점이 발생한 사례 및 항타장비관련 시공관리사례를 제시하였다.

2. 항타장비

2.1 해머종류 및 구조

말뚝을 육상에서 항타 시공하는 경우 항타장비는 크게 크레인(crane), 리드(leads), 해머(hammer)로 구분할 수 있다. 크레인은 해머 및 말뚝을 리드에 고정하여 이동하면서 항타작업을 실시하며 해머의 용량, 리드의 길이 및 기타 부속장비의 규모에 따라 적절한 용량의 것을 사용한다. 리드는 크레인에 장착되어 해머와 말뚝의 수직도를 유지시켜주며 시공 가능한 최대 말뚝 길이에 따라 그 규모가 결정되어진다. 해머는 말뚝을 직접 타격하여 소요의 지지층까지 관입 시키는 장비로 항타장비 중 가장 중요한 장비이다. 따라서 해머의 용량, 성능 등에 따라 지지력, 말뚝재료의 건전도등 말뚝품질에 직접적인 영향을 미친다. 해머는 작동방법에 따라 여러 가지종류로 구분되며 그림 1에는 작동방법에 따른 여러 가지종류의 해머를 나타내었다.

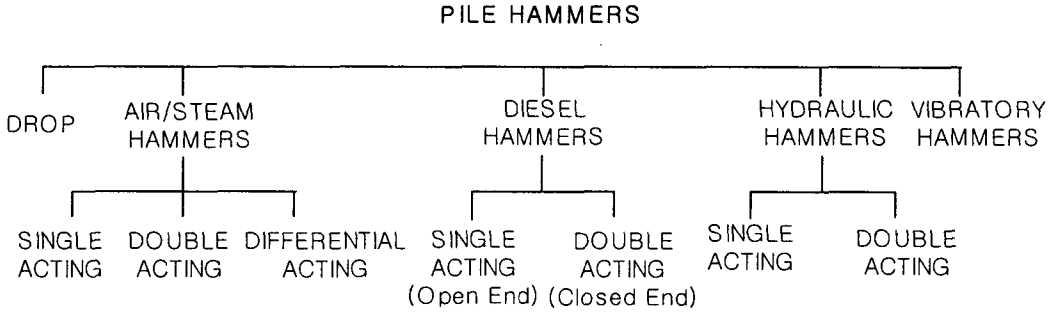
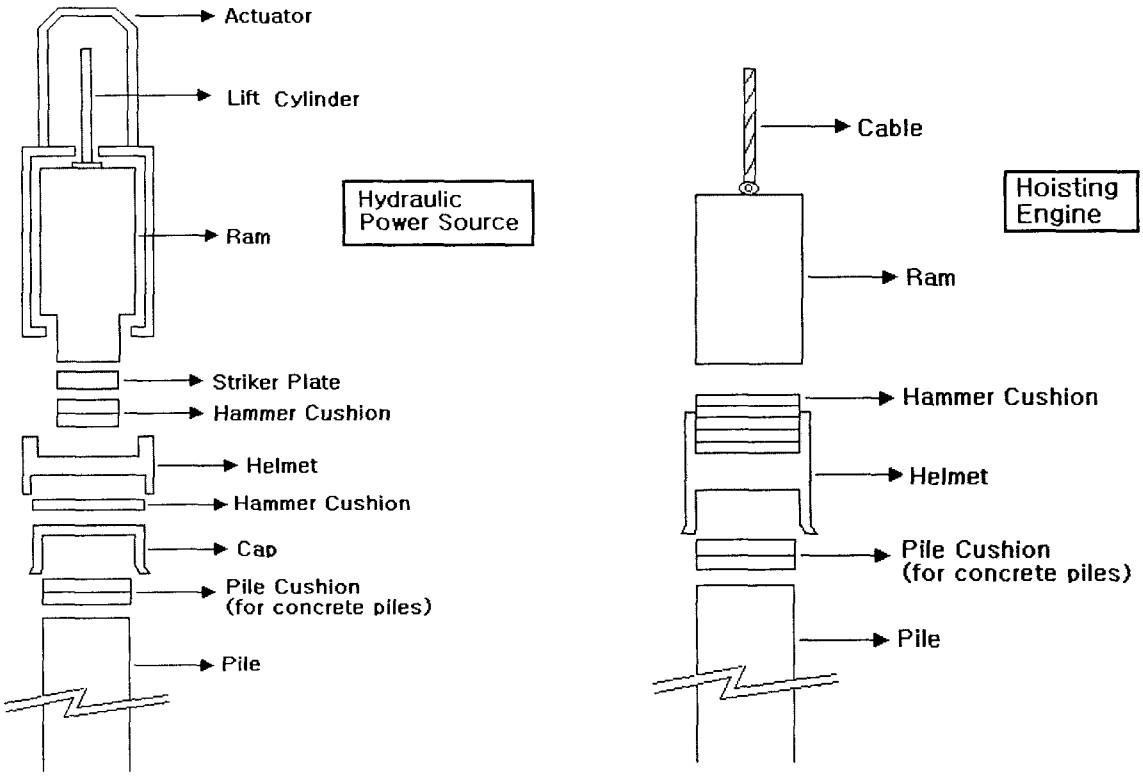


그림 1. 해머의 종류(US DOT., 1996)

그림 1의 해머종류 중 에어/스팀 해머는 외국현장 또는 과거 국내의 해상말뚝공사에서 일부 사용되었으나 최근에는 국내에서는 거의 사용되지 않고 있다. 디젤해머는 과거 국내의 대부분의 말뚝공사 현장에서 사용되었으나 항타시 유연의 비산 등 건설공해 문제로 최근에는 국내현장에서 사용이 거의 중단된 상태이다. 드롭해머는 그 역사가 가장 오래된 해머로 최근에는 매입말뚝공법 시공시 선굴착 후 지지층 안착을 위한 최종 항타용으로 대부분 사용되고 있다. 유압해머는 현재 국내말뚝공사 현장에서 직항타 또는 선굴착 후 항타시 가장 많이 사용되는 것으로 단동식(single acting, 자유낙하식)과 복동식(double acting, 강압식)으로 구분되며 국내에서는 대부분 단동식(자유낙하식)이 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 국내에서 가장 많이 사용되는 자유 낙하식 유압해머와 드롭해머에 대해서만 조사하였으며 이들에 대한 해머장치도를 그림 2에 도시하였다.

드롭해머는 그림에서 보는 바와 같이 램, 해머쿠션, 헬멧(또는 캡), 케이블, 호이스트 엔진 등으로 구성되어 있으며 램의 구동은 호이스트 엔진으로 케이블을 통하여 램을 들어올린 다음 일정한 위치에서 자유 낙하시킨다. 따라서 드롭해머의 성능은 케이블의 상태, 해머쿠션의 두께 및 강성, 운전자의 조작능력등 다양한 요소에의 영향을 받게 된다.

유압해머는 유압구동장치(hydraulic power source)에 의해 구동되며 유압유의 양과 시간을 조절하여 해당 낙하고로 램을 들어 올린 다음 자유 낙하시킨다. 따라서 유압구동장치의 정비상태, 리프트 실린더의 마모상태, 헬멧, 해머쿠션 등 다양한 효소에 따라 그 성능이 영향을 받게 된다.



(a) Hydrulic Hammer (b) Cabled Drop Hammer

그림 2. 유압해머 및 드롭해머 장치도

2.2 해머의 항타에너지

해머가 말뚝을 타격할 때 항타에너지는 이론적 정격 위치에너지(PE : potential energy), 운동에너지(KE : kinetic energy), 말뚝에 전달된 에너지(EMX : maximum energy transferred to the pile top)로 나타낼 수 있다.

① 이론적 정격 위치에너지

이론적 정격 위치에너지(PE : potential energy)는 W(weight)의 중량을 가진 램이 H(stroke)의 낙하높이에서 마찰 등의 저항에 따른 에너지 손실이 없이 자유낙하 할 때의 이론적 에너지이다.

$$PE = W \times H \tag{1}$$

② 운동에너지

m(mass)의 질량을 가진 램이 일정한 속도($v_i = \sqrt{2gh}$)로 낙하할 때 $\frac{1}{2}mv_i^2$의 운동에너지(KE : kinetic energy)를 가지며 이 값은 램이 낙하할 때 리프트 실린더, 케이블의 마찰 등의 기계적 마찰에 따른 에너지 손실 때문에 에너지손실이 없는 이상적인 자유낙하시의 운동에너지 값보다 작다. 따라서 이론적 정격 위치에너지 값보다 작은 값을 갖게된다(PE>KE).

$$KE = \frac{1}{2}mv_i^2 \tag{2}$$

③ 말뚝에 전달된 에너지

해머가 말뚝을 타격할 때 일반적 타격에너지 전달 매커니즘은 그림 2에 나타낸 바와 같이 램, 해머쿠션, 헬멧(캡), 말뚝쿠션, 말뚝으로 이루어지며 말뚝에 전달되는 타격에너지는 이러한 해머와 말뚝사이의 기계적 메커니즘에 의한 에너지 손실이 발생한다. 따라서 말뚝에 전달된 에너지(EMX : maximum energy transferred to the pile top)는 운동에너지보다 작게된다(KE>EMX).

실제 말뚝에 전달된 타격에너지는 동재하시험시 말뚝두부 근처에 가속도계와 변형률계를 부착하여 PDA를 통하여 측정된 힘(F : force at the gauge location)과 속도(V : velocity at the gauge location)를 시간에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

$$EMX = \int F(t) \cdot V(t)dt \tag{3}$$

2.3 해머의 에너지 효율

해머의 에너지효율은 항타작업시 시공품질에 영향을 미치게 된다. 지나치게 낮은 장비효율은 시공속도를 저하시키고 소정의 관입심도를 확보하지 못하여 지지력 미달의 원인이 되기도 하며 지나치게 높은 장비효율은 말뚝에 과잉 항타응력을 발생시켜 때로는 말뚝 파손의 원인이 되기도 한다.

일반적으로 항타장비의 효율을 나타내는 용어는 해머의 효율 (E_h : hammer efficiency)과 에너지전달률(ETR : energy transfer ratio)로 나타내며 다음과 같이 정의할 수 있다.

① 해머효율

$$E_h = \frac{KE}{PE} = \frac{1/2\,mv_i^2}{W \times H} \tag{4}$$

해머의 효율 (E_h)은 운동에너지(KE)와 이론적 정격 위치에너지(PE)와의 비(比)이며 파동이론분석시 입력자료로 사용하는 값으로 일반적으로 에너지전달률(ETR)보다 크다. 해머효율은 PDA로 현장에서 직접 측정할 수 없으며 해머의 효율을 측정하기 위해서는 램의 낙하속도를 측정하여야 하는데 이는 레이더(HPA : hammer performance analyzer)를 사용하여 측정하는 방법이 있지만 현실적으로 어려움이 많아 장비 제작사에서 제공한 값을 사용하거나 WEAP 프로그램에 내장된 값을 사용한다.(유압해머 95%, 디젤해머 80% : GRL and Associate Inc, 1998)

②에너지전달률

실제 현장에서 항타작업시 가장 중요한 것은 이론적인 자유낙하 에너지와 실제 말뚝에 전달된 에너지와의 비(比)인 에너지 전달률(ETR)이다. 엄밀한 의미에서 에너지전달률에는 해머의 효율, 해머쿠션, 말뚝쿠션 등 모든 에너지손실요인의 영향이 포함된 것이며 따라서 에너지전달률을 측정함으로서 항타장비의 효율을 알 수 있으며 적절한 항타시공 관리를 할 수 있다.

$$ETR = \frac{EMX}{PE} = \frac{\int [F(t) \cdot V(t)dt]}{W \times H} \tag{5}$$

3. 측정개요 및 결과

본 논문에 소개된 항타에너지 측정결과는 국내 130개소 현장에서 442개소 말뚝에 대해 최근 5년간 실

시된 PDA를 이용한 동재하시험 결과를 토대로 작성되었다. 측정 대상 말뚝종류는 기성콘크리트말뚝(PHC 및 PC말뚝), 강관말뚝, 현장타설콘크리트 말뚝이며 기성말뚝은 항타시공성(driveability)측정을 위해 항타와 병행시험(E.O.I.D. : End of Initial Driving)시 항타응력, 지지력, 건전도 등과 함께 측정하였으며 현장타설말뚝은 콘크리트양생이 완료된 후 지지력 확인을 위한 동재하시험시 측정하였다. 이상 측정 개요를 표 1에 정리하였으며 에너지전달률 측정결과를 표 2 및 그림 3~그림 7에 도시하였다.

표 1. 항타에너지 측정개요

해머종류	램중량	말뚝종류	측정횟수	측정장비
유압해머	5.0ton~13.0ton	강관말뚝(φ300~φ800)	182 회	PDA
	5.0tonn~7.0ton	기성콘크리트말뚝(φ350~φ600)	198 회	
	1.5ton~5.0ton	현장타설말뚝(φ1200~φ1500)	10 회	
드롭해머	1.5ton~5.0ton	기성콘크리트말뚝(φ350~φ450)	45 회	
	14.0ton~16.0ton	현장타설말뚝(φ1500~φ2500)	7 회	

표 2. 에너지전달률 측정결과

해머종류	말뚝종류	에너지전달률(ETR), %		
		평 균	범 위	표준편차
유압해머	강관말뚝	79.9	50~99	9.9
	기성콘크리트말뚝	73.8	37~98	12.0
	현장타설말뚝	65.8	44~96	16.5
드롭해머	기성콘크리트말뚝	49.9	16~76	13.0
	현장타설말뚝	31.4	16~37	7.0

각 해머별, 말뚝종류별 말뚝에 전달된 에너지전달률 측정결과 유압해머가 드롭해머에 비해 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 원인은 2.1절에 기술한바와 같이 유압해머는 공장 규격제품으로 해머자체의 에너지 손실요인이 비교적 작은 반면 드롭해머는 대부분 현장에서 제작되고 또한 구조상 유압해머에 비해 많은 에너지손실요인과 관리의 부실 때문인 것으로 판단된다. 말뚝종류별 측정결과 강관말뚝에 전달된 에너지전달률이 콘크리트말뚝에 비해 높고 편차도 낮은 것으로 나타났는데 이러한 원인은 콘크리트말뚝 항타시에는 강관말뚝과는 달리 두부손상을 방지하기 위해 말뚝쿠션(일반적으로 합판)을 사용하며 여기서 추가로 에너지손실이 발생하며 말뚝쿠션의 두께와 강성에 따라 편차가 크게 발생한다.

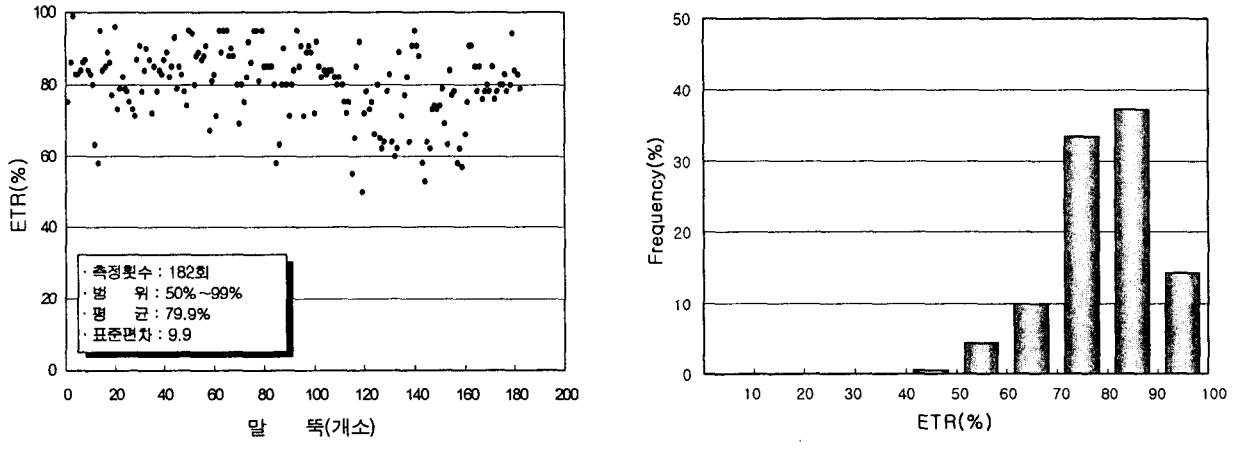


그림 3 에너지전달률 측정결과(유압해머, 강관말뚝)

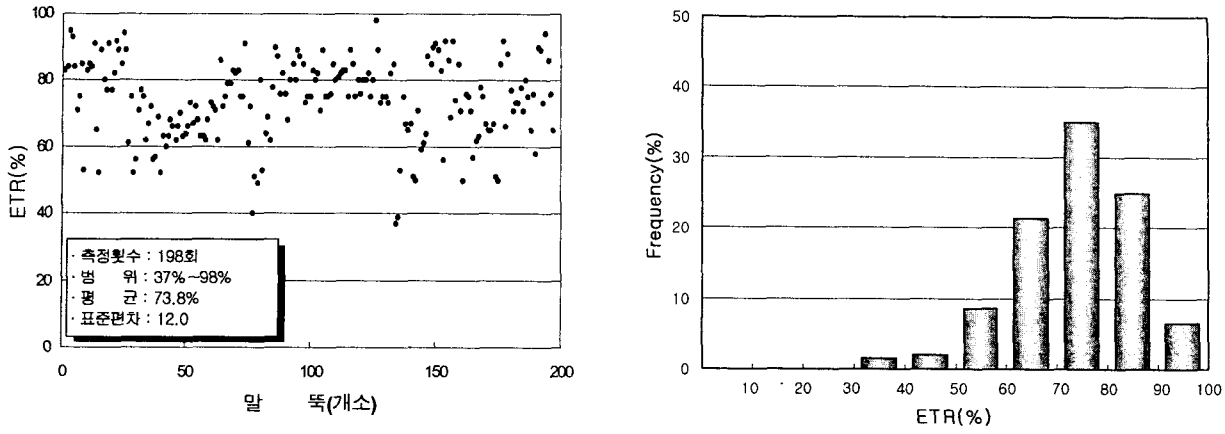


그림 4. 에너지전달률 측정결과(유압해머, 기성콘크리트말뚝)

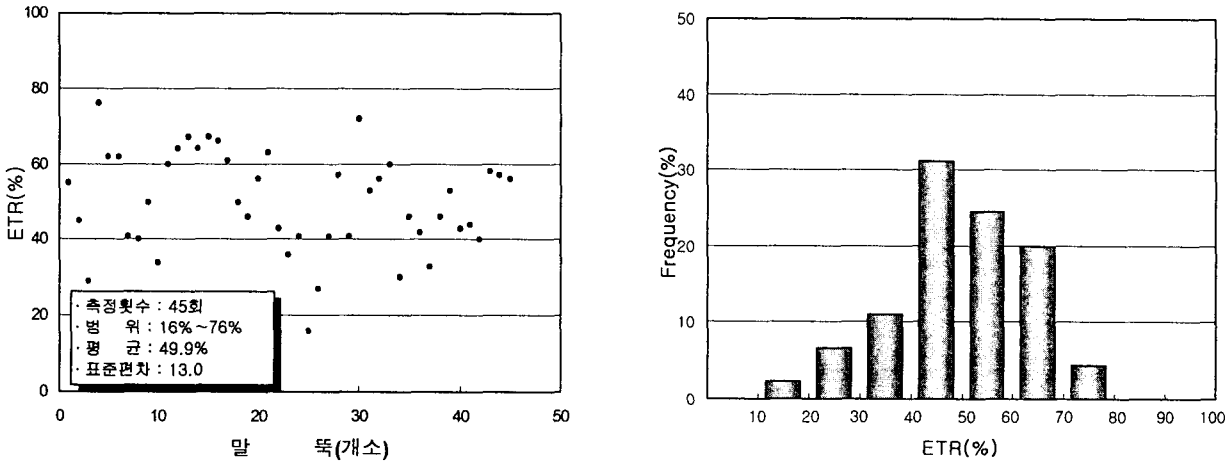


그림 5. 에너지전달률 측정결과(드롭해머, 기성콘크리트말뚝)

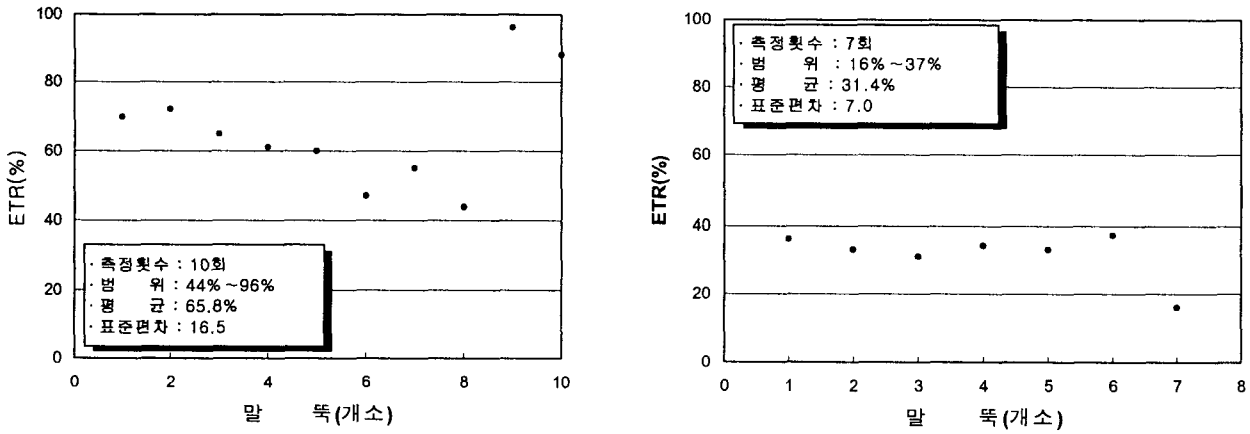
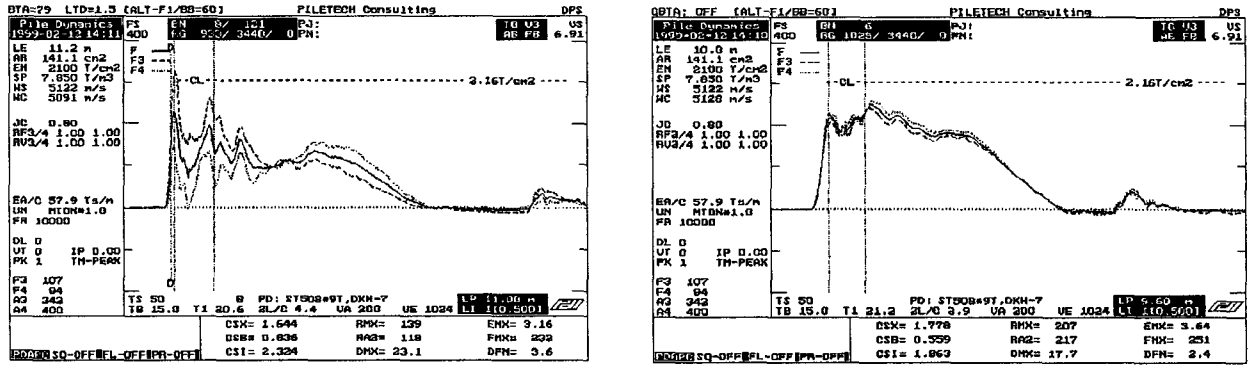


그림 6. 에너지전달률 측정결과
(유압해머, 현장타설 콘크리트말뚝)

그림 7. 에너지전달률 측정결과
(드롭해머, 현장타설 콘크리트말뚝)

4. 항타장비관리 사례

말뚝에 전달된 에너지는 햄멧(또는 캡), 해머쿠션, 리프트 실린더의 마모상태 및 유압조절장치(유압해머), 운전자의 조정능력 및 호이스트 케이블의 낡음정도(드롭해머) 등 해머의 내적 요인뿐만 아니라 말뚝규격, 말뚝쿠션, 항타시저항력, 주면마찰력비율, 헬멧(또는 캡)과 램의 중량비(比) 등 외적 요인에 따라서도 다르게 나타날 수 있는 것으로 보고되고 있다(Abe and Tendean, 1996). 따라서 에너지전달률의 절대값은 지나치게 높거나 낮은 경우가 아니면 크게 문제가 되지 않는다. 말뚝공사시 신뢰성있는 품질을 확보하기 위해서는 에너지전달률을 포함한 항타장비의 성능을 공사기간의 처음부터 끝까지 지속적으로 관리하여 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 유압해머로 기성말뚝을 항타하는 경우 항타장비와 관련되어 자주 발생하는 문제점은 램의 낙하고 조절장치의 고장으로 요구되는 낙하고로 일정하게 고정되지 못하고 불규칙하게 작동하는 경우와 해머 및 말뚝재료 보호를 위해 사용되는 해머쿠션의 손상 등이 있다. 낙하고 조절장치의 불량은 낙하고를 육안으로 확인하여 이상 발생시 수리 또는 교체가 가능하다. 그러나 해머쿠션은 해머 내부에 장착되어 있어 해머를 해체하여야 확인이 가능하다. 해머쿠션이 심하게 손상된 경우에는 낙하고를 일정하게 유지시켜도 정상적인 상태에 비해 타격에너지전달이 불규칙하게 되며 편타 발생 등으로 인해 말뚝재료손상이 발생하게 된다. 동재하시험시 숙련된 동재하시험 기술자는 PDA 화면의 측정파형을 면밀히 관찰하여 해머쿠션의 손상여부를 확인할 수 있다. 그림 8에는 해머쿠션이 손상된 상태의 PDA화면과 손상된 해머쿠션을 교체한 후의 PDA화면이다.



(a) 해머쿠션 교체 전 (b) 해머쿠션 교체 후

그림 8. 해머쿠션 교체 전·후의 PDA측정화면

그림 8에서 보는 바와 같이 해머쿠션이 손상된 경우 2개(F3, F4)의 게이지에서 측정된 파형이 불규칙하게 편차를 나타내고 있으나 교체후 에는 2개의 파형이 거의 일치하고 있다.

그림 9는 동일현장에서 약 3개월의 말뚝공사기간동안 에너지전달률을 측정한 결과이다. 말뚝은 ϕ 406.4×12(t)mm 강관말뚝이며 해머는 램중량 10ton 유압해머를 사용하였다. 램낙하고는 시험시공시 동재하시험 결과를 토대로 1.0m로 고정하여 항타하였으며 최초 장비반입시 해머쿠션의 재질 및 두께, 헬멧(캡포함) 상태, 낙하고 조절장치 등을 확인/기록한 후 공사기간 동안 일정한주기(항타시간을 기준으로 100시간, 또는 이상 발견시)로 육안 확인하여 이상 발견시 수리 또는 교체하였다. 동재하시험은 현장 시방서에 따라 지지력확인 및 항타장비의 성능측정을 목적으로 실시되었으며 측정된 에너지전달률은 그림 9에서 보는 바와 같이 큰 편차없이 일정하게 유지되고 있다. 본 현장에서는 동재하시험시 실측된 타격에너지와 지지력을 항타공식에 적용 상관관계를 도출하여 시공되는 모든 말뚝에 대해 신뢰성있는 지지력확인이 이루어졌다.

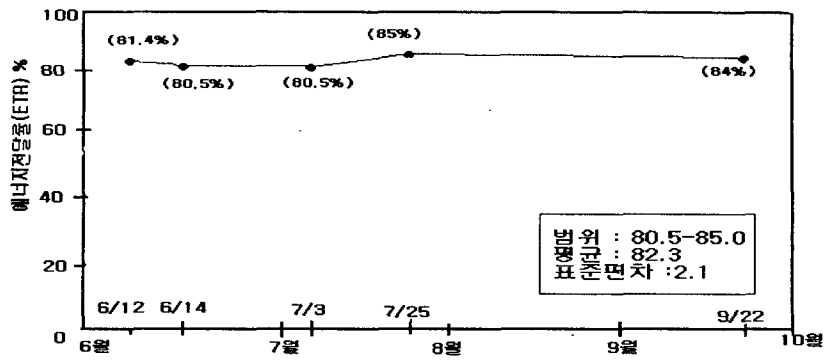


그림 9. 동일 현장 및 해머의 에너지전달률 측정결과

5. 결론

국내 말뚝공사 현장에서 PDA를 이용하여 항타장비의 에너지전달률 등 항타장비의 성능을 측정한 결과 다음과 같은 사항을 확인할 수 있었다.

1) 유압해머로 강관말뚝 및 기성콘크리트 말뚝을 항타할 때 측정된 에너지전달률은 각각 50%~90%, 30%~90%의 범위를 나타내었으며 이들의 평균은 각각 80% 및 74%정도로 측정되었다.
2) 드롭해머로 기성콘크리트말뚝을 항타할 때 측정된 에너지전달률은 10%~70%의 범위를 나타내었으며 평균값은 50%정도로 측정되었다.
3) 전체적으로 유압해머가 드롭해머에 비해 에너지전달률이 높게 나타났는데 이는 기계적 특성차이 때문인 것으로 판단된다. 또한 강관말뚝말뚝에 전달된 에너지전달률은 콘크리트 말뚝에 비해 높게 나타나고 편차는 작게 나타났는데 이는 말뚝쿠션의 사용여부가 주된 원인인 것으로 판단된다.
4) 본 논문에서 제시된 에너지전달률 측정결과는 파동이론분석시 계산된 값과 비교를 통하여 해머효율의 조정 등 참고자료가 될 수 있을 것으로 판단되며 현장에서 실제 측정된 에너지전달률 결과와 비교하여 해당 장비의 성능에 대한 개략적인 판단기준이 될 수 있을 것으로 판단된다.
5) PDA를 이용하여 해머의 성능측정뿐만 아니라 공사기간중 육안검사 등 주기적으로 항타장비를 관리할 경우 신뢰성있는 말뚝품질을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 이명환, 홍헌성, 조천환(1999), "합리적인 항타시공관리방안", 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.201~208
2. 홍헌성, 이명환, 조천환, 이원제, 황천복(1996), "동재하시험을 이용한 항타시공관리 적용사례", 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.357~362.
3. Abe, S. and Tendean, G.(1996), "Hammer Performance Evaluations", Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp.912~927.
4. GRL and Associates Inc.,(1998), GRLWEAP Manual.
5. Hussein, M. and Likins, G.(1995), "Dynamic Testing of Pile Foundations during Construction", America and Beyond Proceedings of Structures. Congress XIII.
6. Pile Dynamics Inc., (1995), Pile Driving Analyzer Manual.
7. U. S. Dpt. of Transportation(1996), "Design and Construction of Driven Pile Foundations", Workshop Manual.