

레이저 센서를 이용한 항타말뚝의 관입량 측정

Measurement of Pile Rebound and Penetration using Laser Sensor

하익수* · 한송수** · 한석구*** · 김명모****

Ha, Ik Soo · Han, Song Soo · Han, Suk Gu · Kim, Myoung Mo

1. 서 론

항타말뚝의 시공시 단순히 말뚝을 설계된 깊이까지 타입하는 것으로 원하는 지지력을 얻을 수 있는 것은 아니다. 왜냐하면 지반조건의 위치별 변화 양상에 따라, 말뚝이 정해진 깊이까지 타입되지 않더라도 목표로 하는 지지력에 도달할 수도 있고 정해진 깊이까지 타입되더라도 목표로 하는 지지력을 얻을 수 없는 경우도 있으며, 때로는 과항타로 인해 말뚝에 손상을 주는 경우도 있기 때문이다. 따라서 말뚝이 관입되는 도중에 지지력을 확인하고 항타의 종료시점을 결정할 합리적인 항타관리 기준이 필요하다.

항타관리 기준은 정재하시험이나 PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용한 동재하시험 결과 분석으로부터 얻어진 정보를 종합하여 얻어지며 일반적으로, 최종항타시 매타당 관입량이나 25cm 관입시 요구타수 등으로 주어진다. 이러한 단순한 기준은 항타 시공업자에게는 모든 감독과 감리 과정의 기준이 되며, 소규모의 프로젝트에서는 정재하시험이나 동재하시험 없이 최종 항타시 관입량을 측정하여 재래의 동역학적 공식을 사용하여 허용지지력을 추정하고 있다.

최종항타시 관입량이나 주어진 관입깊이에 요구되는 타수의 측정은 오래 전부터 수작업에 의해 이루어져 왔는데 이러한 수작업에 의한 방법은 이상적인 환경에서의 측정이나 기록 즉, 작업내용을 충분히 이해한 작업자가 최대한 주의를 기울여서 작업자의 실수를 최소화하고 주관적 판단을 배제한 상태에서의 측정과 기록은 일반적으로 정확한 계측치를 준다. 하지만 계측 수단이나 방법 등에 대한 표준화된 기준이 없으며 항타관입량에 대한 기록이 시간에 따라 기록되지 않아 임의적인 기록작성이 가능해서 시공관리 측면에서 계측자료에 대한 객관성이나 신뢰성이 결여되기 쉽다. 특히, 매타당 관입량을 인력으로 측정하는 경우, 작업시 안전성에 대한 문제가 제기될 수 있다. 그림 1은 말뚝 항타 중에 동시에 수행되는 수작업에 의한 관입량 측정 예를 보여 준다. 따라서 측정자료에 대한 객관성과 측정시 안전성을 확보하기 위해서 인력이 아닌 기계에 의한 자동계측이 요구되며 이에 대한 연구들이 진행중에 있다.



그림 1. 수작업에 의한 항타말뚝 관입량 측정 예

이러한 취지로 본 연구에서는 레이저 센서를 이용하여 말뚝의 관입량과 리바운드량을 시간에 따라 측정할 수 있는 장비를 개발하였다. 본 연구의 목적은 5개 현장, 27본의 말뚝에 대해서 이상적 환경에서의 수작업과 레이저 장비를 이용하여 항타관입량을 측정하여 그 결과를 비교하고, 수작업과 레이저 장비 측정 오차가 지지력 산정에 미치는 영향을 평가하고, 항타시 진동이 관입량 측정치에 미치는 영향을 평가함으로써 개발된 레이저 장비의 현장 적용성을 검토하는데 있다.

* 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail:molafrog@snu.ac.kr - 발표자

** 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 장비연구팀 · 공학박사 · E-mail:songhan@samsung.com

*** 삼성물산(주)건설부문 건설장비관리팀 · 차장 · E-mail:okjinju@samsung.com

**** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · E-mail:geotech@snu.ac.kr

2. 시험개요

5개 현장에서 27본의 말뚝에 대해서 항타관입량을 측정하였다. 말뚝 항타시 잘 훈련된 토목 엔지니어에 의한 수작업과 레이저 계측장비로 관입량을 동시에 측정하였고 측정치의 정확성을 평가하기 위해서 진동의 영향을 받지 않도록 말뚝에서 평균 30m 정도 떨어진 거리에 Level을 설치하여 정밀계측을 병행하였다. 표 1은 계측현장과 계측 말뚝의 종류와 제원을 나타낸다.

표 1. 항타관입량 계측현장과 계측말뚝의 제원

현장	말뚝번호	말뚝의 종류	말뚝의 제원 (직경(mm)×두께(mm)×길이(m))	비고
현장1	1	강관말뚝	609 × 12 × 19	
현장2	2 ~ 3	PHC말뚝	500 × 80 × 9	
현장3	4 ~ 7	강관말뚝	508 × 9 × (18~27)	
현장4	8 ~ 25	강관말뚝	508 × 9 × (6.5~12)	
현장5	26 ~ 27	PHC말뚝	400 × 65 × (10~15)	

수작업과 레이저 장비로 계측한 관입량과 리바운드량의 차이가 지지력 산정에 미치는 영향을 평가하기 위해서 계측량을 동력학적 지지력 공식에 대입하여 그 결과를 분석하였다. 또한 말뚝번호1, 11, 15, 17, 21, 25에 대해 수행된 정제하 시험과 말뚝번호 12, 13, 22, 23, 24, 26, 27을 제외한 모든 말뚝에 대해 수행된 동제하 시험결과로부터 산정된 지지력으로 동력학적 공식으로 산정된 지지력의 유효성을 검증하였다.

강관말뚝, PHC말뚝 각각 1본에 대해서 말뚝표면, 지반과 레이저센서 고정대에 계측기를 설치하여 항타진동이 레이저 장비로 측정된 관입량에 미치는 영향을 평가하였다.

레이저 센서를 이용한 항타관입량 측정장치는 PC와 Counter Board, Sensor Controller를 일체화하여 건설현장에서 계측을 용이하게 하고 진동, 충격 등의 열악한 조건에서도 사용 가능하도록 구성하였다. 시스템의 구성요소는 크게 Displacement Mesuring Sensor, System Controller with Counter Board, Data Acquisition & Processing Software의 3가지로 나눌 수 있으며 시스템의 구성도는 그림 2와 같다.

시험에 사용된 센서는 Speckle Laser Sensor로써 산업용으로 사용되는 일반 Doppler Laser Sensor와는 달리 수직변위 측정에 적합하다. Data Sampling Interval은 8msec이다. 센서에서 측정된 신호는 Digital Pulse로 변환되고 이러한 Pulse Signal을 읽어 들이게 되어 있어 충격하중에서도 안정적인 Data를 취득할 수 있다. 그림 3은 레이저 계측장비를 보여주며, 그림 4는 레이저 계측 시스템으로 측정된 항타관입량 측정 예와 함께 측정된 최종관입량과 리바운드량을 구분하여 보여준다.

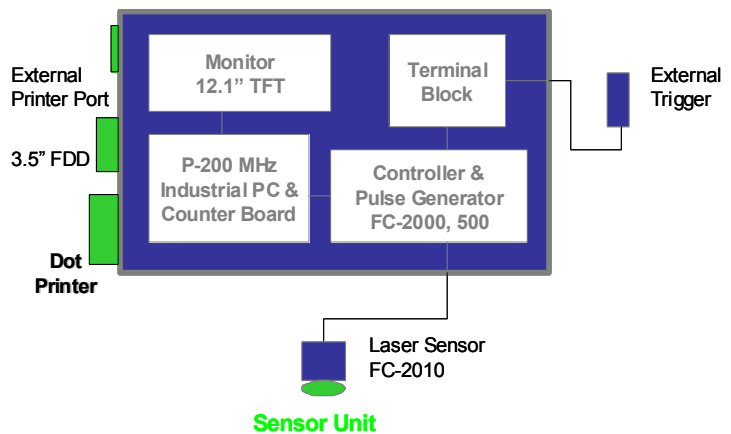


그림 2. 레이저 측정 장비의 시스템 구성도



그림 3. 레이저 계측 장비

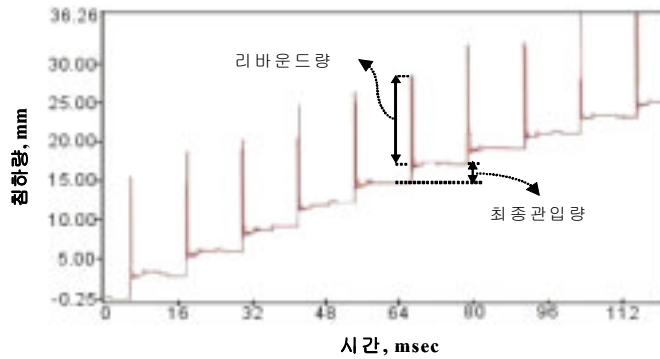


그림 4. 레이저 센서를 이용한 항타관입량 측정기록 예

3. 시험결과 및 분석

최종항타 동안의 말뚝의 전체관입량은 level로 계측한 값이 가장 정확한 것으로 여겨진다. 왜냐하면 측정시 수작업이나 레이저 계측과는 달리 진동의 영향을 거의 받지 않기 때문이다. 그림 5는 최종항타시 각 시험말뚝에 대해 수작업으로 계측한 말뚝의 관입량을 Level로 계측한 관입량으로 나눈 값들을 나타낸다. 그림 5에서 보듯이 수작업에 의한 계측치의 Level 계측치에 대한 비는 평균은 0.95, 표준편차는 0.08이었다. 이러한 차이는 그림 1에서 보듯이 수작업 측정시 작업대가 말뚝에 근접해 있어 말뚝 타입시 근접지반이 말뚝 근입과 함께 다소 침하를 일으켜 관입량을 과소 평가하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 그 차이는 미미하기 때문에 Level 측정치를 기준으로 했을 때 본 연구과정에서 수행한 수작업에 의한 계측치는 이상적인 환경에서 잘 훈련된 토목 엔지니어에 의해 측정된 것으로 판단된다. 그리고, 최종 항타과정중 전체관입량은 Level에 의한 측정치가 가장 정확하다고 판단되나 Level로는 매타당 관입량과 리바운드량을 측정하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이상적 환경에서 수행된 수작업에 의한 계측치를 기준으로 레이저 장비에 의한 계측결과를 검증하였다.

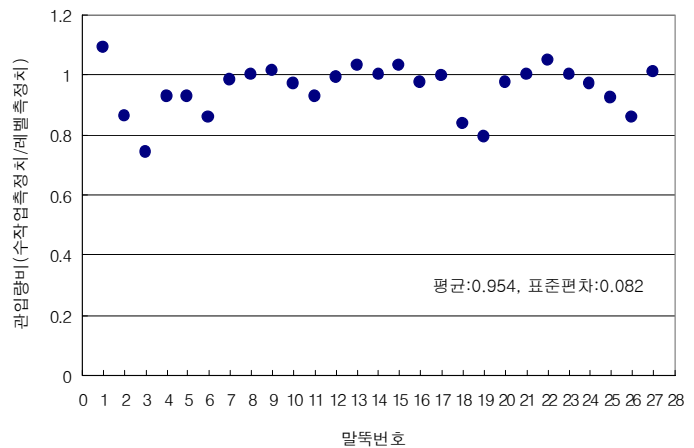


그림 5. 최종항타시 수작업에 의한 관입량 계측치의 레벨 계측치에 대한 비

3.1 최종관입량과 리바운드량 측정결과

그림 6과 그림 7은 각각 레이저 장비로 계측한 관입량과 리바운드량의 수작업으로 계측한 값에 대한 비를 나타낸다. 그림 6과 그림 7에서 보는 것처럼 관입량 비와 리바운드량 비는 각각 0.94와 0.90으로 나타났다. 즉, 수작업에 의한 계측치보다 레이저 장비에 의한 계측치가 관입량의 경우 6%, 리바운드량의 경우는 10% 정도 작게 측정되는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 레이저 장비의 Sampling Interval이 8ms로 다소 길어 최대값을 놓쳤을 가능성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

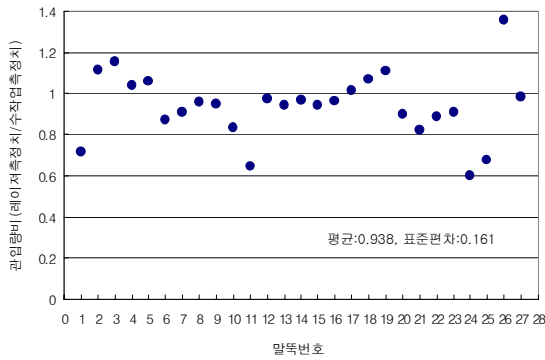


그림 6. 레이저 장비로 측정한 관입량의 수작업 측정치에 대한 비

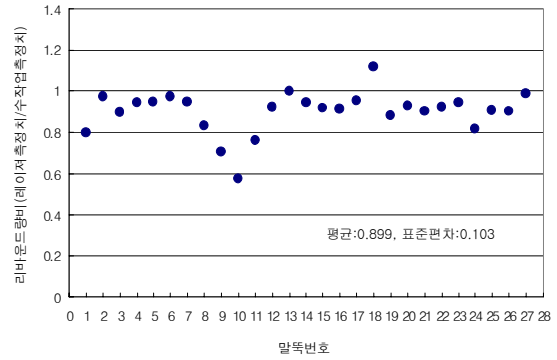


그림 7. 레이저 장비로 측정한 리바운드량의 수작업 측정치에 대한 비

3.2 지지력 비교

본 절에서는 앞 절에서 언급된 수작업과 레이저 장비 측정 결과로 나타난 최종관입량과 리바운드량의 차이가 지지력 산정에 미치는 영향을 검토해 보았다. 그림 8은 수작업과 레이저 장비로 측정한 항타관입량과 리바운드량을 동력학적 공식인 Hiley공식에 대입하여 구한 허용지지력, 동재하 시험과 정재하 시험에 의해 구한 허용지지력을 각 시험말뚝별로 보여준다. 동력학적 공식중 Hiley공식을 사용한 이유는 이 공식이 현재 많이 사용되고 있고 특히, 관입량과 리바운드량을 함께 고려할 수 있는 방법이기 때문이다. Hiley공식에 의한 극한지지력(R_u) 산정식은 식 (1)과 같다.

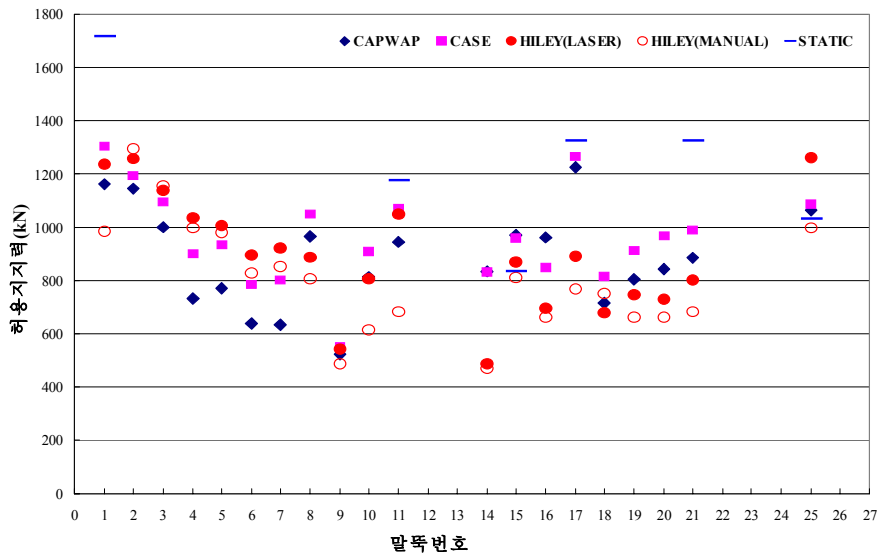


그림 8 허용지지력 산정

$$R_u = \frac{e_f E_h}{S+1/2(C_1+C_2+C_3)} \cdot \frac{W+n^2W_p}{W+W_p} \quad (1)$$

여기서, n : 반발 계수, e_f : 해머의 효율, W : 해머무게, W_p : 말뚝무게,

E_h : $W \cdot H$ (해머타격 높이), S : 최종관입량,

C_1 : 말뚝 머리와 캡의 일시적 탄성압축량,

C_2 : $C_2 = R_u L / AE_p$ (E_p :말뚝탄성계수, L:말뚝길이, A:말뚝단면적),

C_3 : 지반진동에 대한 일시적인 압축량

동력학적 공식과 동재하 시험에 의한 결과는 연속된 10회의 항타시 측정결과를 평균하여 구한 값이며 동재하 시험에 의한 허용지지력은 극한지지력에 안전율 2.5를 적용하였고 정재하 시험에 의한 허용지지력은 Davisson's offset 방법을 적용하여 구한 지지력이다. 그림 8에서 Hiley공식에 의한 결과는 보다 정확한 지지력을 예측하는 정재하, 동재하 시험 결과에 크게 벗어나지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 8에서 레이저 장비 계측결과로부터 구한 지지력은 수작업에 의한 값에 비해 다소 지지력을 크게 산정하나 그 차이는 평균 10%정도로 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 앞 절에서 언급한 레이저 장비의 최종관입량과 리바운드량의 과소평가로 인해 식 (1)의 분모 값을 작게 만들어 지지력을 크게 산정한 것으로 인해 나타난 결과이다.

3.3 진동영향평가

레이저 센서는 말뚝과는 비접촉식으로 설치되어 관입량을 측정하나 이를 고정시키는 고정대는 말뚝과 가까이 지반에 거치된다(그림 3). 따라서 항타시 진동흐름은 말뚝→지반→고정대로 순차적 또는 동시에 영향을 주므로 관입량 측정시 진동의 영향을 검토해 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 현장4 말뚝번호8의 강관말뚝과 현장5 말뚝번호26의 PHC말뚝, 2본에 대해 진동영향 평가를 실시하였다. 말뚝표면, 지반과 레이저 센서 고정대에 계측기를 설치하여 각 위치에서 진동가속도와 변위를 계측하여 진동신호 시점에 대한 지체시간과 상대변위 차이를 측정하여 관입량 측정시 진동의 영향을 검토해 보았다. 실험결과 강관말뚝인 경우는 항타시 말뚝에 진동이 가해진 후 지반과 고정대 진동신호가 2.4ms후에 동시에 도달하였고 항타진동으로 인한 지반의 최대 수직변위는 약 0.3mm로 나타났다. PHC말뚝인 경우는 항타시 말뚝 상에 부착된 정밀 센서가 파손되어 말뚝 진동후 지반과 고정대에 진동 신호가 도달하는 시간은 계측할 수 없었다. 따라서 진동 전달 경로에 따른 전체적인 지체시간은 구하지 못했다. 하지만 지반과 고정대간의 지체시간은 0.1ms로서 강관말뚝의 경우와 마찬가지로 말뚝 진동후 지반과 고정대에 진동신호가 동시에 도달됨을 알 수 있었고 항타진동으로 인한 지반의 최대 수직변위는 약 0.1mm인 것으로 나타났다. 또한, 이러한 지반의 수직변위가 진동을 고려하지 않았을 때와 비교하여 생기는 Heily공식에 의한 지지력의 차이는 강관말뚝인 경우는 4.2%, PHC말뚝인 경우는 2.8%로 나타났다. 결과적으로 항타관입량 측정시 수작업과 마찬가지로 레이저 장비도 진동의 영향을 받으나 그 영향은 미미한 것으로 판단된다.

3.4 항타기 종류에 따른 말뚝 관입량 시간이력

수작업에 의한 매타당 관입량 측정이나 25cm 관입시 요구타수 측정 등은 시간에 따른 관입량 변화 분석이 불가능하고 항타기록이 시간에 따라 기록되지 않기 때문에 작업자들에 의한 임의적 기록작성 가능성이 존재한다. 하지만 레이저 장비의 경우에는 그림 9에서 보듯이 시간에 따른 항타기록이 가능하므로 항타시 관입량 변화 분석이 가능하며 임의적 기록작성을 방지할 수 있다. 그림 9는 현재 많이 사용되고 있는 두 종류의 유압해머에 대해 항타시 파형을 레이저 장비로 계측한 결과를 예로써 보여준다. 두 해머의 차이점은 램이 말뚝을 타격후 램을 끌어 올리기 위해서 유압이 다시 걸리는 시기에 그 차이가 있다. 유압해머1의 경우는 한번 말뚝 타격후 곧바로 유압에 의해 램이 끌어 올려져서 Peak가 하나로 나타나지만 유압해머2의 경우는 타격후 램이 거의 멈출 때가 되어서 유압에 의해 램이 다시 끌어 올려진다. 따라서 유압해머2의 경우는 유압해머1과는 달리 낙하 높이의 차이는 있지만 한번이 아니라 여러번 말뚝을 타격하게 된다(multiple hammering). 본

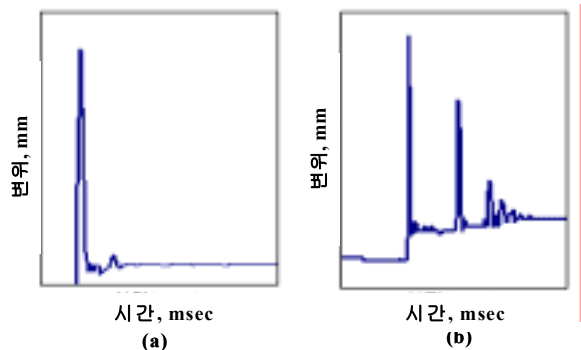


그림 9. (a)유압해머1, (b)유압해머2를 사용한 항타시 말뚝 관입량 시간이력

연구에서는 현장2의 2분의 말뚝에 대해 유압해머2가 사용되었는데 레이저 장비로 측정한 본 결과, 최초의 타격이후에 유압이 걸리기 직전까지의 잔타에 의한 관입량이 전체관입량에 대해서 2분의 말뚝에 대해 각각 평균 34%와 22%로 나타났다. 그리고 2차 타격은 1차 타격 후 약 300ms후에 나타났다. 따라서, 항타시 관입량 시간이력 분석 없이 수작업에 의한 매타당 관입량이나 25cm 관입시 요구타수로 항타관리 기준을 주는 것은 항타기 종류나 항타기 부대설비 조건에 따라서는 다른 의미를 가질 수 있음을 확인하였다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 수작업에 의한 항타관입량 측정시 발생하는 제반 문제점을 극복하고자 레이저 장비에 의한 항타관입량 측정 시스템을 개발하였다. 5개 현장, 27분의 말뚝에 대해 수행한 수작업과 레이저 장비에 의한 현장계측 결과 비교, 수작업과 레이저 장비 측정 오차가 지지력 산정에 미치는 영향 평가, 그리고 계측장비의 진동영향평가를 통하여 개발된 레이저 장비의 적용성을 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이상적인 환경에서의 수작업 측정 결과와 비교하여 레이저 장비로 측정한 항타관입량은 최종관입량의 경우 6%, 리바운드량의 경우 10%의 오차를 보였다. 수작업과 레이저 장비로 측정한 관입량을 동력학적 공식에 대입하여 구한 지지력은 정·동재하 시험결과로 산정된 지지력에 크게 벗어나지 않았고 이상적 환경하의 수작업과 레이저 장비로 측정된 항타관입량의 차이로 인한 지지력의 차이도 작게 나타났다.
2. 항타진동이 레이저 장비로 측정한 항타관입량에 미치는 영향을 평가해 본 결과, 항타시 말뚝에 진동이 가해진 후 지반과 센서 고정대에 진동신호가 도착하는 시간 차가 2.4ms로 작고 항타진동으로 인한 고정대가 거치된 지반의 수직변위가 0.1~0.3mm로 작은 것으로부터 항타관입량 측정시 레이저 장비는 진동의 영향은 받으나 그 영향은 작은 것으로 나타났다.
3. 시간에 따른 말뚝 관입량 변화를 분석해 본 결과 해머의 종류에 따라서는 최초 타격이후에 잔타에 의한 관입량이 전체관입량에 대해 34%, 22%를 차지할 수 있는 것으로 나타나 항타시 시간에 따른 관입량 변화 분석 없이 수작업에 의한 매타당 관입량이나 25cm 관입시 필요타수로 항타관리 기준을 주는 것은 항타기 종류나 부대설비 조건에 따라서는 다른 의미를 가질 수 있음을 확인할 수 있었다.
4. 항타관리 측면에서 수작업이 아닌 레이저 장비에 의한 원격측정 작업이 이루어진다면 작업시 안전사고의 위험을 배제할 수 있고, 시간에 따른 자료 수집, 기록이 가능해 임의적 기록작성을 방지할 수 있어 측정결과에 대한 신뢰성을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이상적인 환경에서 측정한 수작업 측정치와 비교해 생긴 최종관입량과 리바운드량의 오차는 대부분 레이저 장비의 Sampling Interval이 길기 때문인 것으로 판단되었다. 이러한 문제점을 극복하고자 하는 연구가 현재 진행중에 있으며 이를 통해 향후 상세한 말뚝변위의 시간이력을 파악하고 항타시 말뚝과 지반의 상호관계에 대한 폭넓은 이해를 통해 현장에서 필요한 보다 합리적인 시공관리 기준을 제시할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 연구비 지원(1999년)에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. *Design and Construction of Driven Pile Foundation: Workshop Manual-vol.3*. Publication No. FHWA-HI-96-033. FHWA, U.S. Department of Transportation, December 1996.
2. H.G. Poulos, and E.H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1980, pp.52-58.