

말뚝 시공관리를 위한 비접촉식 관입량 측정장치 활용에 관한 연구

A Study on Non-contact Penetration and Rebound Measurement Device for Quality Control in Driven Piles

서 승 환¹ Seo, Seunghwan 김 주 형² Kim, Juhyong
최 창 호³ Choi, Changho 정 문 경⁴ Chung, Moonkyung

Abstract

The domestic auger-drilled pile method generally manages the driving penetration (set) value with the final stage of construction. The penetration value has been estimated by manual measurement for a long time. The automation technology is yet to be applied due to workability and high-cost limitations, despite safety issues and lack of reliability in measured results. In this study, a non-contact pile penetration measurement device was developed. Further, the field performance was verified by comparing the measurements with a conventional automation device. In addition, the on-site field quality control method was analyzed using the penetration measuring device. The field experiments confirmed that more reliable bearing capacity estimation could calculate the dynamic damping coefficient and the modified Hiley formula with the developed device. Furthermore, it can be used for pile construction management from the bearing capacity viewpoint, even for piles not subjected to dynamic load tests.

요 지

국내 매입말뚝 시공방법은 선굴착 후 최종단계의 향타 관입량으로 관리하는 것이 일반적이다. 관입량은 오래전부터 수기 측정방식에 의해 이루어지고 있으며, 작업자의 안전문제와 측정값의 신뢰도 부족 등에도 작업성의 한계와 비용 문제로 자동화 기술이 적용되지 않고 있다. 본 연구에서는 비접촉식 말뚝 관입량 측정 장치를 개발하고 기존 장치와 비교계측을 통해 현장 성능을 검증하였다. 또한 관입량 측정장치를 활용하여 현장 품질관리 방법에 대해 분석하였다. 실제 현장 실험을 통해 개발 장치를 활용한 관입량 측정과 수정 Hiley 공식 및 동적감쇠계수 산정을 통해 보다 신뢰도 높은 지지력 추정이 가능한 것을 확인하였다. 연구결과에 따라 각 현장마다 수행된 동재하시험으로 부터 현장 보정 절차가 이루어지면 보다 신뢰성 높은 지지력 추정이 가능하며, 실제 현장에서는 동재하시험이 수행되지 않은 말뚝에 대해서도 지지력 관점의 말뚝 시공관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Dynamic load test, Modified Hiley formula, Non-contact device, Pile driving, Set and rebound value

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구원 (Member, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech., Tel: +82-31-910-0219, mkchung@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

국내에서 PHC말뚝과 같은 기성말뚝은 기술의 발전으로 초고강도 및 복합 말뚝 등의 형태로 발전하여 그 활용도는 날로 증가하고 있다. 반면에 말뚝의 시공관리에 있어서는 동재하시험이나 정재하시험의 횟수 등 제한된 관리 규정만 있으며, 전체 말뚝에 대한 시공관리방법은 명확하게 규정되어 있지 않다. 국내 대부분의 기성말뚝 시공현장에서는 전체 물량의 1%에서 최대 3%의 말뚝에 대해 동재하시험을 수행하여 지지력을 확인한 후 말뚝의 최종 관입량(Set value)을 측정하여 관리기준값으로 설정한다. 이후 나머지 97~99%에 해당하는 말뚝은 시공직후의 최종 관입량을 측정하여 관리기준값과 비교 후 적정성을 판단하고 있다. 최근에는 도심지 내 공사가 늘어나면서 소음, 진동의 문제로 인해 항타말뚝 대신 매입말뚝의 적용이 증가하고 있다. 국내 매입말뚝 시공방법은 선굴착 후 최종항타공법이 대부분으로 실제 매입말뚝 시공관리 또한 드롭해머를 이용한 최종단계의 항타 관입량으로 관리하는 것이 일반적이다(Lee et al., 2000; Hong et al., 1997).

최종 항타 시 관입량 및 타수의 측정은 오래 전부터 수기 측정방식에 의해 이루어지고 있다(Ha et al., 2003; Yun et al., 2005). 이러한 수기 측정에 의한 방법은 이상적인 환경에서의 측정이나 작업자가 작업 내용을 충분히 이해한 후 최대한 주의를 기울여서 실수를 최소화할 때 정확한 계측치로 볼 수 있다. 하지만 수기 측정 방법에 대한 표준화 및 기준이 없고, 수작업으로 인해 기록지 판독이 어려운 경우도 많다. 특히 항타 관입량 기록이 시간에 따라 기록되지 않아 임의로 기록지 작성이 가능하여 시공관리 측면에서 계측자료에 대한 객관성을 담보하기 어렵다. 또한 연약점토가 상부에 두텁게 존재하거나 굴착도로 인해 말뚝 주변 지표면이 연약화되는 상황 등 말뚝 주변 환경에 따라 인력 측정이 어려운 경우도 많다. 측정의 신뢰도뿐만 아니라 작업자의 안전성에도 문제가 된다. 인력에 의한 관입량 측정 시 상부 오거에 붙어있는 굵은 점토와 자갈 덩어리 및 항타기의 부속물 등의 낙하로 인해 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 실제로 고용노동부 조사 결과 2012년부터 2017년까지 항타기로 인한 사망사고는 총 11건으로 매년 평균 2명의 사상자가 발생하는 중대 재해 원인으로 제시하고 있다(Park, 2012; Park et al., 2013).

항타 시공 시 항타관입량의 측정 신뢰성과 측정 시

작업 안전성을 확보하기 위해 인력이 아닌 기계를 활용한 자동계측 방법이 요구되면서 이에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 광학식 변위계나 레이저 센서 혹은 라인 스캔 카메라 등을 통한 비접촉식 항타 관입량 측정 방법에 대한 연구가 이루어져 왔다(Ha et al., 1997; Yun et al., 2005; Yeu et al., 2016; Lee et al., 2002). 선행연구는 항타 관입량과 리바운드에 대한 측정 정확도에 초점을 두었으며, 대부분의 방법이 현장에서 계측한 데이터를 별도로 분석해야 하는 등 번거로운 사용법과 절차로 인해 실질적으로 현장 적용이 이루어지지 못하였다. 최근에는 해머에 표식지를 붙여서 관입량을 측정하는 방법, 드롭해머에 자체 센서를 부착하여 관입량을 측정하는 방법 등이 사용되는 경우가 있다. 하지만 이러한 방법은 말뚝의 변위를 직접 측정하는 것이 아닌 해머와 케이싱의 변위를 측정하는 방법으로 관입량 이외의 말뚝 리바운드량을 정확하게 산정하기에는 근본적으로 한계가 있다.

본 연구에서는 비접촉식 항타 관입량 측정과 관련된 선행 연구의 한계를 보완하여 정확한 관입량과 리바운드량을 측정할 수 있는 장치를 개발하였고, 측정결과와 동적지지력공식을 통해 현장 시험말뚝 외에 실제말뚝(working pile) 전체에 대해서 지지력을 추정하여 관리할 수 있는 방법에 대해 검토하였다.

2. 비접촉식 항타 관입량 측정기

2.1 개발 장치

본 연구에서 개발한 항타 관입량 측정 장치(KPM, KICT Pile driving Monitor)는 측정부와 하드웨어 보드, 배터리가 결합된 장치로 별도의 분석 PC 없이 측정이 가능하다. 개발 장치의 측정부는 비접촉식 방식으로 적외선 LED 광원(IR-led transmitter)을 이용하여 관측 대상물에 부착한 반사테이프를 통해 돌아오는 빛 신호를 반사광학계(Receiver)로 감지하도록 구성되어 있다(Fig. 1). 이 때 광원은 광학 렌즈를 통과하면서 빛의 방사각을 집중시켜주며, 최대 70m 거리 내에서 측정 가능하도록 설계되어 있다. 말뚝에 부착하는 반사테이프는 들어온 빛을 반사시켜 원래 왔던 방향으로 돌려보낼 수 있는 역할을 하며 시중에 쉽게 구할 수 있는 재료이다. 따라서 말뚝 항타 전후 움직임에 따라 반사테이프를 통해 돌아오는 빛의 속도와 측정 거리를 통해 말뚝의 변위를

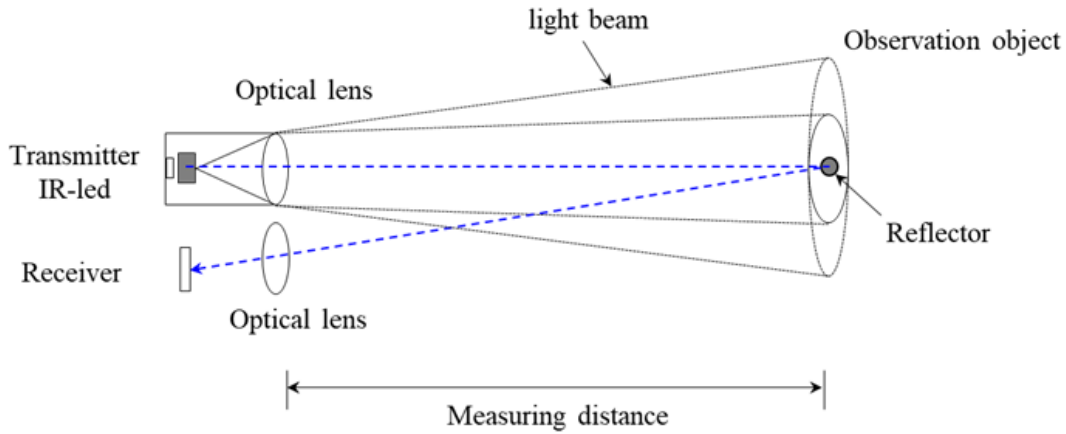


Fig. 1. The main measuring principles of the development device

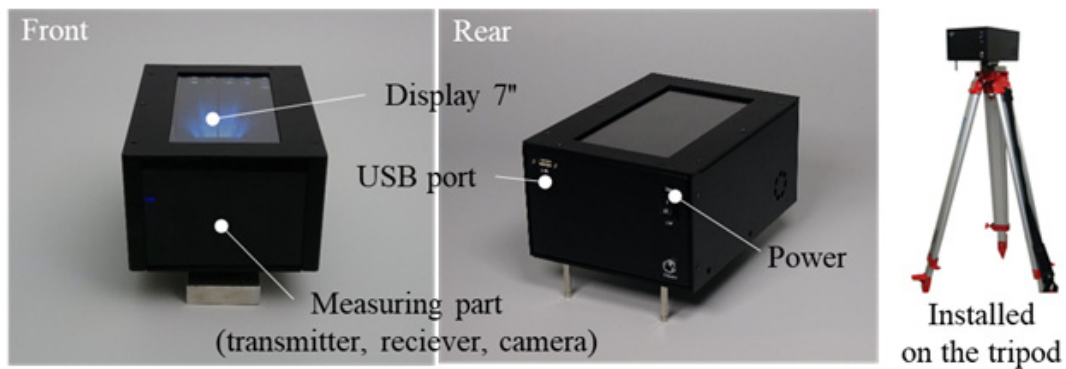


Fig. 2. Device configuration and exterior photos

측정하며, 이때 Sampling rate는 200Hz이다. 개발 장치의 전체 형태는 Fig. 2와 같다. 개발 장치의 외관은 알루미늄 강판으로 제작하여 무게는 약 1kg이며, 측정 결과는 장치에 탑재된 디스플레이를 통해 실시간으로 확인할 수 있다. 개발 장치로 말뚝에 부착된 반사테이프의 위치는 장치 디스플레이를 통해 교정할 수 있으며 측정 준비시간은 1~3분 내이다.

2.2 관입량 및 리바운드량 산출

개발 장치 내부에 탑재된 소형 PC를 통해 항타 종료 후 측정 데이터를 분석하여 관입량과 리바운드량을 산출하게 된다. Fig. 3은 실제 측정 데이터의 일부를 나타내며, 항타에 의한 측정 기록 패턴이 매 타당 일정한 패턴을 확인할 수 있다. Fig. 3과 같이 항타 직후 말뚝, 지반 등 재료의 압축에 의해 리바운드가 발생하고, 이후 해머 반동으로 인한 2차 움직임과 해머를 들어 올림에 따라 변위가 약간 변화하는 패턴을 매 항타 시 나타난다. 여기서 리바운드량(rebound value)은 항타 직후의

최대값이 되고, 관입량(set value)은 해머 반동에 의한 2차 움직임이 없는 시점과 재항타를 위한 해머 상승이전의 시점 사이의 값을 평균하여 계산하였다.

본 연구에서는 항타 과정에서 기록된 변위 시계열 데이터를 윈도우(window) 방법을 사용하여 측정된 값으로부터 관입량과 리바운드량을 산출하였다. 윈도우 방법은 항타 기록 데이터와 같이 시계열 배열의 요소를 일정

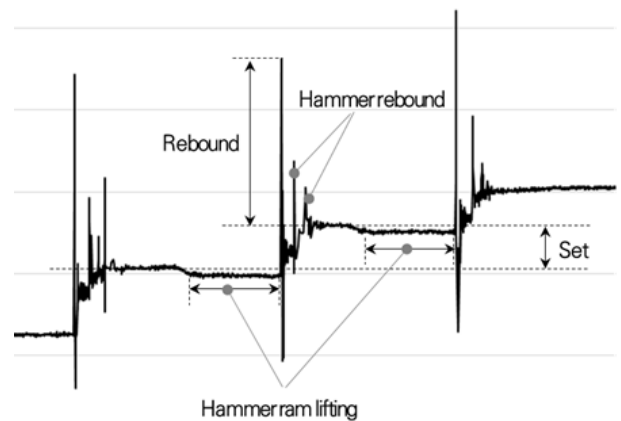


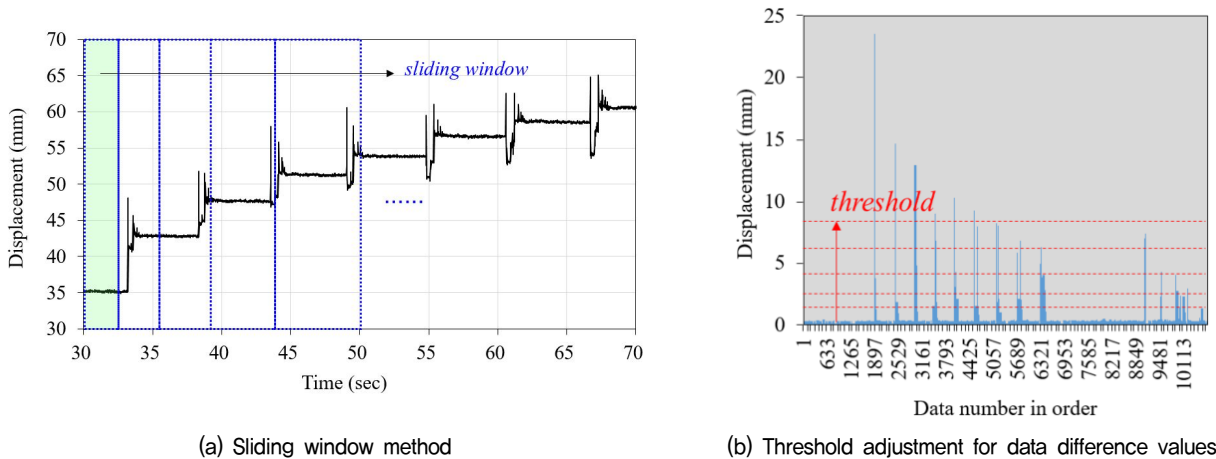
Fig. 3. Example of recording data using the development device

범위 값으로 비교할 때 사용하는 유용한 알고리즘이며, 특정 사이즈의 윈도우가 이동하면서 윈도우 내에 있는 데이터의 특성을 분석하는 방법이다. 매 항타 시 패턴을 분리하기 위해 윈도우 방법을 적용하였다. 먼저 항타 종료 후 취득한 말뚝 전체 시계열 변위값에서 sampling data의 전후 차이와 threshold값을 적용하여 peak point의 값과 각 peak point의 구간을 통해 전체 타수와 항타 구간(blow section)을 구분한다(Fig. 4). 항타 구간에서 최대값은 리바운드량이 되고, 윈도우 방법을 통해 해머 반동에 의한 2차 움직임 등을 구별한다. 관입량은 항타 구간에서 해머 움직임 없는 시점 사이의 평균값을 사용하였다. 이 과정을 통해 매타당 관입량과 리바운드량을 산정하였다.

3. 실험방법

3.1 실험개요

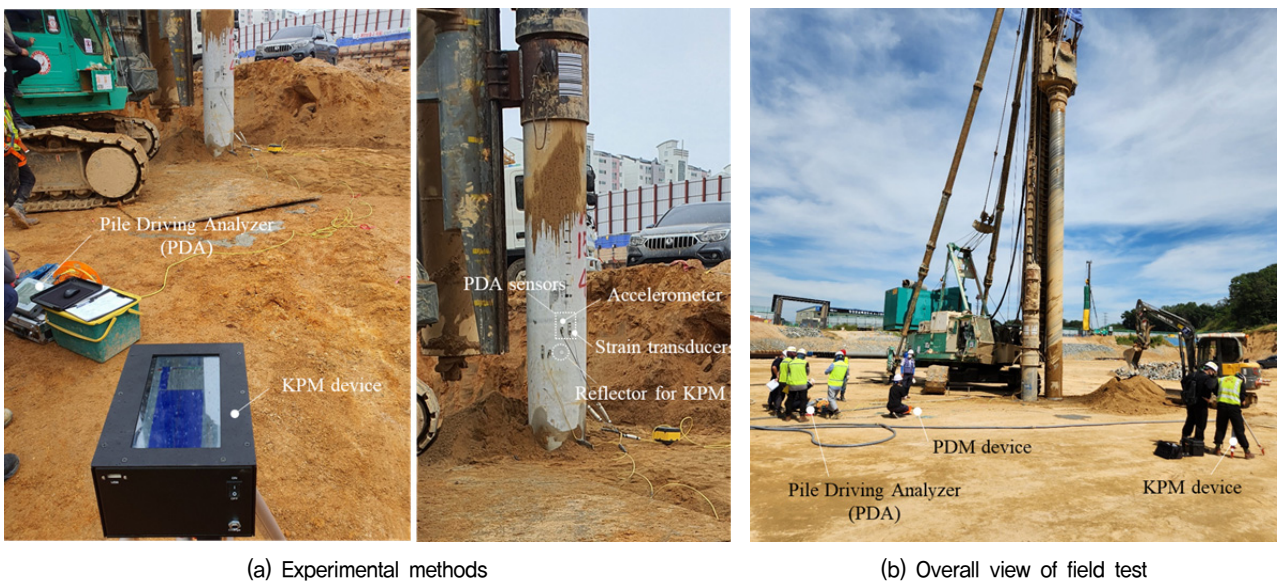
본 연구에서 개발된 장치의 현장 적용성을 확인하기 위해 실제 항타작업이 수행되는 현장에서 개발 장치와 기존 상용장비를 활용하여 관입량과 리바운드량 측정값을 비교하였다. 수기 측정에 의한 관입량 측정은 작업자의 경험 및 숙련도에 의존하여 비교 계측 대상으로는 적절하지 않으므로, 비교계측을 위해 기존 상용 장비로는 AFT社의 PDM장비를 선택하였다. 해당 장비는 상용화된 기술 중 관입량과 리바운드량을 높은 정확도로 측정할 수 있는 장비이다. 또한 최종 관입량을 통한 말뚝의 지지력 추정 가능성을 확인하기 위해 실제 현장에서



(a) Sliding window method

(b) Threshold adjustment for data difference values

Fig. 4. Examples of recording data processing methods



(a) Experimental methods

(b) Overall view of field test

Fig. 5. Experimental methods and field tests

동재하시험(PDA)을 수행하면서 개발 장치로 말뚝의 변위를 측정하였다(Fig. 5). 시험이 수행된 현장의 말뚝은 D600mm PHC말뚝이고 SDA(Seperated Doughnut Auger) 선굴착공법으로 시공되며, 6ton 중량의 드롭해머를 사용하였다. 말뚝은 대부분 단단한 풍화토나 풍화암에 안착되어 시공될 것으로 예상하였으며, 지반조사결과 SPT N값과 시공깊이는 풍화토는 27/30, 13m, 풍화암은 50/3, 17m이었다. 시공 초기에 3본의 시험 말뚝(No.1~3)에 대해 동재하시험과 개발장치를 통한 측정을 동시에 진행하였다.

3.2 동적지지력공식

다양한 항타공식(driving formula) 중 Hiley 공식은 해머의 항타에너지와 말뚝 관입에 필요한 작업 사이의 에너지 균형을 기반으로 하며, 관입량과 리바운드량을 함께 고려할 수 있는 대표적인 방법이다. Hiley공식의 입력변수를 항타분석기의 실측값을 적용할 수 있도록 변형가능하며, 기존 Hiley공식을 간단히 요약하면 식 (1)과 같이 표현된다(Cho and Lee, 2001; Denes and Kroenert, 2019). 여기서, R_u 은 전체 말뚝 저항, η 는 해머의 효율(에너지 손실 허용), W 는 해머의 무게, g 는 중력 가속도, h 는 낙하고로 말뚝에 전달되는 해머 에너지인 EMX와 같으며, S 는 말뚝의 관입량(set value), C 는 말뚝의 임시 압축 또는 탄성 거동을 나타내는 리바운드량(rebound value)이다.

$$R_u = \frac{\eta Wgh}{S + C/2} = \frac{EMX}{S + C/2} \quad (1)$$

본 연구에서 개발한 관입량 측정 장치를 이용하여 관입량(S)과 리바운드량(C)을 측정하고, 해머 무게와 낙하 높이를 수동으로 기록한다. 해머 효율은 일반적으로 추정되며 오류의 원인이 될 수 있으므로 동재하시험 장비를 사용하여 해머 효율을 확인해야 한다. Hiley공식은 동적 및 정적 저항 성분을 모두 포함하고 있으므로 동적 저항을 제거해야 한다. 이 동적 저항 성분을 제거하기 위해 Cho and Lee(2001)은 damping상수를 도입하였으며, damping상수는 지반조건과 항타조건에 관계되는 것으로 현장마다 특성화시킬 수 있는 것으로 보고 있다. 이 damping상수를 현장보정계수 또는 동적감쇠계수(dynamic reduction factor, DRF)이라고 하며, 이 계수는 테스트 시

전체 저항에서 정적 성분을 추정하기 위해 동적지지력 공식에 적용할 수 있다(Cho and Lee, 2001; Damen and Denes, 2017). 동적감쇠계수는 동재하시험을 통해 시험 말뚝의 CAPWAP 정적 저항과 Hiley공식으로 산정한 저항 추정치와 비교하여 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\chi = \frac{Hiley\ Resistance}{CAPWAP\ Resistance} \quad (2)$$

동적감쇠계수(χ)는 일반적으로 관입량이 증가함에 따라 증가하며, 높은 관입량은 전체 저항 중 동적 저항 성분이 높은 것을 의미한다(Cho and Lee, 2001; Denes and Kroenert, 2019). 동적에너지는 속도에 의존하는 말뚝 움직임에 의해 생성되므로 말뚝의 움직임이 클수록 동적 영향이 커지며, 이는 동재하시험에서 저항 추정 방법과 유사하다. 따라서 동적감쇠계수는 시험 말뚝에 대해 동재하시험과 개발 장치를 이용한 관입량 측정을 통해 관입량과의 관계로 표현할 수 있다. 이는 현장마다 다양하게 나타날 수 있으며, 해머 시스템, 말뚝 크기, 선단 조건, 지반조건, 해머의 낙하 높이 등 많은 요인에 영향을 받는다. 식 (3)는 동적감쇠계수를 통해 현장 특성을 반영한 수정 Hiley공식을 나타내며, EOID(End of Initial Driving) 초기항타 시 말뚝의 지지력을 나타낸다.

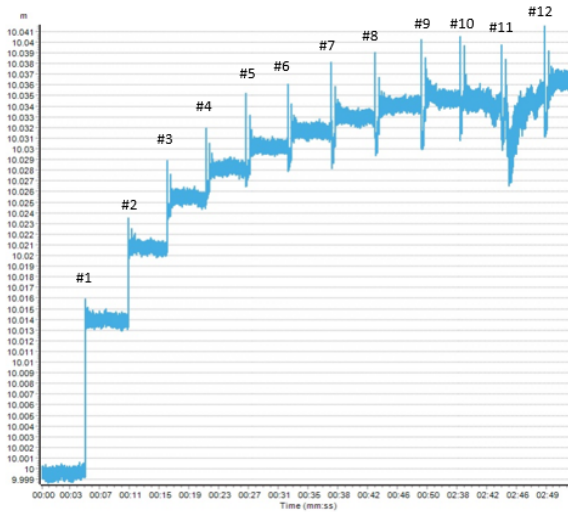
$$R_u = \frac{EMX}{(S + C/2)\chi} \quad (3)$$

시간경과에 따른 장기지지력은 식 (3)에서 지지력증가비를 추가로 고려하여 산정할 수 있다. 지지력증가비(set up factor, SUF)는 현장에서 시험타 말뚝에 대해 EOID 및 Restrike 시험을 통해 산정할 수 있으며, 재항타 지지력을 초기항타 지지력으로 나누어 계산할 수 있다(Chun and Cho, 1999). 본 연구에서는 최종관입량을 활용한 말뚝 시공 품질관리 가능성을 분석하기 위해 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화영향을 배제하고 EOID시험의 결과를 기준으로 하여 평가하였다.

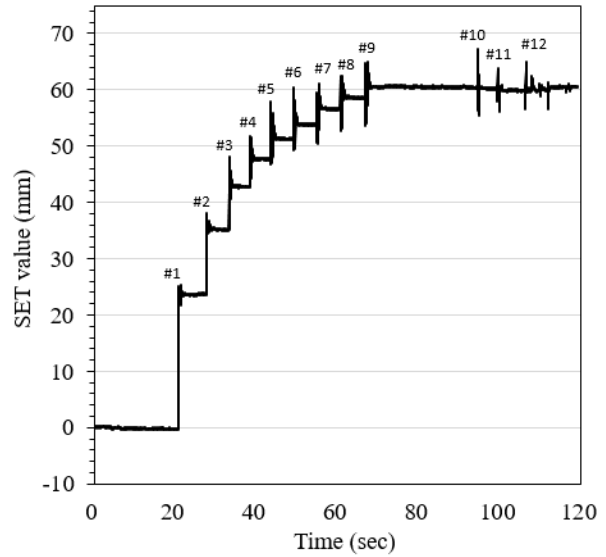
4. 실험결과

4.1 측정장치 비교계측 결과

가장 먼저 개발 장치에 대한 성능 확인을 위해 기존



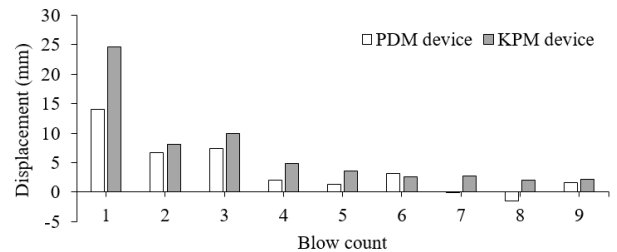
(a) PDM device



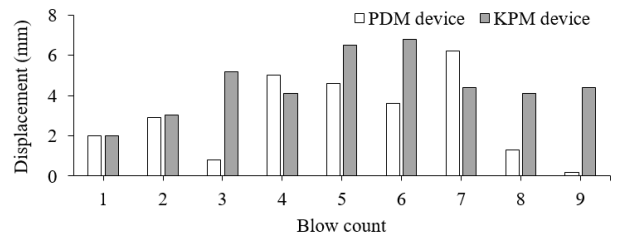
(b) KPM device

Fig. 6. Raw date of measurement result

상용 장비와 비교 계측을 통해 측정값의 신뢰도를 확인하였다. 동일한 시험 말뚝에 대해 개발 장치와 기존 장비를 사용하여 관입량과 리바운드량을 측정하였으며, Fig. 6은 두 장치에서 출력되는 결과 그래프를 나타내며, 두 장치 모두 전체 향타 횟수는 12 blow로 동일하게 카운트되었다. 실제 현장에서는 9 blow까지 수행되고 잠시 멈춘 후 마무리 향타를 하였으며, 실제 상황이 개발장치의 결과에서 잘 나타난 것으로 확인된다. Fig. 7은 두 장치로 측정한 관입량과 리바운드량을 나타낸 것으로, 개발 장치는 2절에서 설명한 절차를 통해 산출된 값을 사용하였고, 기존 장치는 제품에서 제공되는 소프트웨어를 통해 출력되는 결과를 사용하였다. 비교계측 결과 전체 blow에 대한 관입량과 리바운드량의 평균값은 개발장치(KPM)의 경우 6.74mm, 4.51mm이며, 기존장치(PDM)는 3.86mm, 2.96mm로 나타났다. 전반적으로 전체 blow에 대한 측정값의 변화는 유사하며, 개발 장치의 측정값이 약간 높게 나타났다. 마무리 향타시에는 리바운드량이 어느 정도 일정하게 나타는 패턴이 일반적이며, 7~9 blow 구간에서 개발장치는 해당 패턴을 확인할 수 있으나, 기존 장치에서는 리바운드값이 감소하는 것으로 나타났다. 기존 장치의 경우 Fig. 6(a)의 로우데이터 결과와 소프트웨어에서 출력된 결과값이 상이한 것으로 보아 로우데이터를 처리하는 방법 및 과정에서 오류가 발생한 것으로 판단된다. 본 연구에서 제작한 장치의 현장 성능에 대해 확인한 결과 기존 상용 장치와 유사한 수준을 나타내는 것으로 확인하였다. 측정



(a) Set values



(b) Rebound values

Fig. 7. Comparative measurement result for PDM and KPM device

준비 과정에서 기존 장치의 경우 레이저 포인터를 사용하므로 야외에서는 측정 준비까지 5~10분 이상 시간이 소요되는 반면, 개발 장치는 카메라를 통해 측정 위치에서 바로 교정하는 방식으로 측정 준비시간이 1~2분 내로 사용성을 대폭 증가시켰다.

4.2 말뚝에 전달되는 해머 에너지(EMX) 산정

본 시험말뚝에서는 6ton 중량의 드롭해머를 낙하고 1.5m를 기준으로 향타관리기준을 설정하였다. 말뚝이

단단한 층을 관입하기 시작할 때부터 가속도계와 변형률계를 말뚝에 부착하고 매 항타 시 말뚝에 전달되는 에너지인 EMX값을 측정하여 기록하였다. PDA 시험에서 매 항타마다 EMX(말뚝에 전달된 에너지), DMX(말뚝의 최대변위량), VMX(말뚝의 최대속도), RMX(말뚝의 지지력)을 현장에서 확인할 수 있으며, 현장에서 Fig. 8과 같은 그래프를 통해 확인할 수 있다. Fig. 8에서 첫 번째 압축파 영역에서 가속도계 신호와 변형률계 신호가 비례관계를 갖는 것을 알 수 있다. 시험이 수행된 현장은 대부분 매우 연약한 점성토 지반으로 구성되어 초기 항타시(EOID)에는 주변마찰력의 분담이 매우 작고, 대부분 선단지지력에 의해 말뚝의 지지력이 나타나므로 첫 번째 압축파 영역에서 비례관계가 비교적 잘 성립함을 알 수 있다. 이와 같이 현장에서 변형률계와 가속도계의 신호 특성을 대략적으로 판단하며 신뢰도 높은 동재하시험을 수행하며, 매 항타시마다 측정된 EMX값을 기록하였다(Fig. 9). 본 시험에서는 초기항타 시 측정된 작은 값은 제외하고 평균값을 산출하여 말뚝에 전달되는 EMX값을 산출하였다.

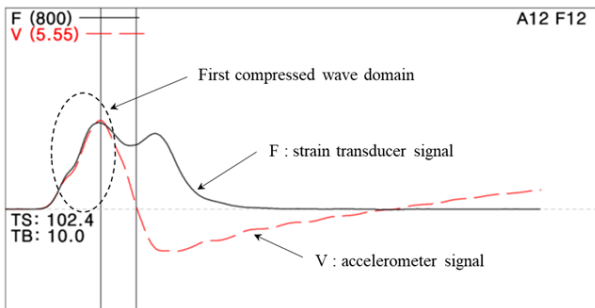


Fig. 8. Example of dynamic load test results

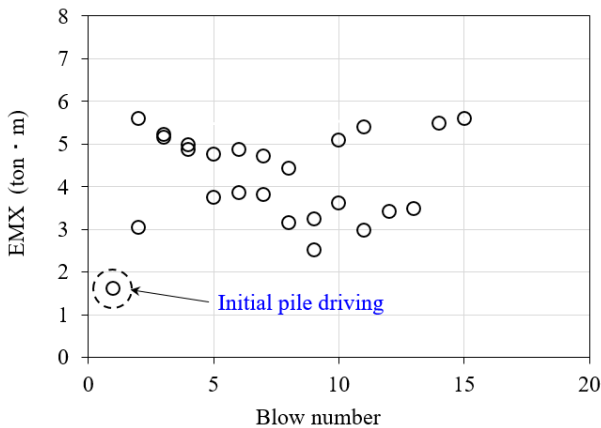


Fig. 9. EMX value for each blow measured from dynamic load test

4.3 동적감쇠계수 산정

Fig. 5(a)와 같이 시험말뚝에 대해 동재하시험과 개발장치를 활용한 관입량 측정 시험을 동시에 수행하였다. 동적감쇠계수(χ)를 산정하기 위해 매 항타 시 동재하시험의 지지력 RMX값을 사용하였다. 보다 정확한 지지력을 구하기 위해서는 CAPWAP을 이용하는 것이 바람직하지만 시험 편의성을 위해 직관적으로 산정되는 RMX값을 이용하였다(Cho, 2003). 시험 현장에서 동재하시험 시 주변마찰력이 작고 대부분 선단지지력으로 발현되기 때문에 실제 CAPWAP분석을 통해 산정한 지지력과 RMX값의 차이가 크게 발생하지 않음을 확인하였다. 항타공식의 지지력은 식 (3)의 수정 Hiley공식을 적용하였으며, 이때 분자의 말뚝에 전달되는 에너지는 동재하시험을 통한 EMX값을 적용하였고, 관입량 및 리바운드량은 개발 장치를 통해 측정된 값을 사용하였다. 이와 같이 산정한 시험말뚝에 대한 동적감쇠계수(χ)와 관입량(set value)의 관계는 Fig. 10과 같다. 다양한 Set값에 대한 함수관계를 산정하기 위해 설계지지력에 해당하는 최종관입량이 산정되기 이전부터 동재하시험 및 개발장치를 통해 관입량을 측정하였다. 본 연구에서 수행한 시험말뚝에 대해 최종적으로 얻은 동적감쇠계수(χ)와 관입량(set value)의 관계는 식 (4)와 같이 산정되었다.

$$\chi = 0.004 \text{ set value} + 0.9875 \quad (4)$$

4.4 개발 장치를 활용한 지지력 추정

시험말뚝 No.1에서 얻은 동적감쇠계수(χ)와 EMX값을 이용하여 시험말뚝 No.2와 No.3에 대해서는 개발장

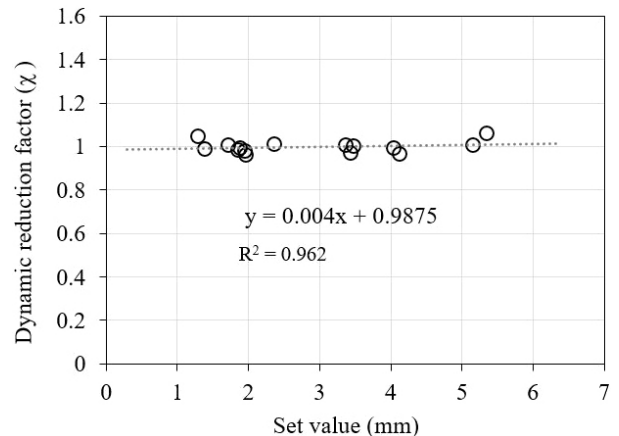


Fig. 10. Dynamic reduction factor for set values

치를 활용하여 지지력을 추정하였다. 식 (3)에서 말뚝에 전달되는 해머 에너지값은 해머의 중량과 낙하고 및 해머의 효율을 사용하거나 PDA의 EMX값을 사용할 수 있다. 이때 해머의 효율은 동재하시험으로부터 산정한 평균적인 해머효율(0.8)을 적용하였다. 또한 동적감쇠계수(χ)는와 관입량(set value) 관계를 나타내는 식 (4)의 회귀식을 사용하여 측정 관입량에 대한 동적감쇠계수를 적용하였다. Fig. 11은 개발 장치를 통해 측정된 관입량과 리바운드량을 활용하여 도출한 지지력과 동재하시험으로부터 구한 말뚝의 지지력 RMX값을 비교한 것이다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 동적감쇠계수를 적용하기 전에는 비교적 정확한 EMX값, 관입량, 리바운드량을 적용하더라도 동재하시험의 지지력과 약 40% 정도의 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 반면 동적감쇠계수를 적용하여 지지력을 보정하는 경우 5~10% 내에서 지지력을 추정할 수 있었다. 따라서 항타공식 지지력 산정 시 말뚝에 전달되는 에너지값(EMX), 항타에 의한 말뚝의 관입량과 리바운드량 그리고, 초기 동재하시험에서 측정된 지지력과 항타공식 지지력 사이의 동적감쇠계수(χ)를 통해 보다 신뢰도 높은 지지력을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

4.5 항타 관입량을 활용한 지지력 추정 절차

본 연구에서 개발한 비접촉식 관입량 측정 장치는 매 항타 시 실시간으로 정확한 관입량과 리바운드량의 측

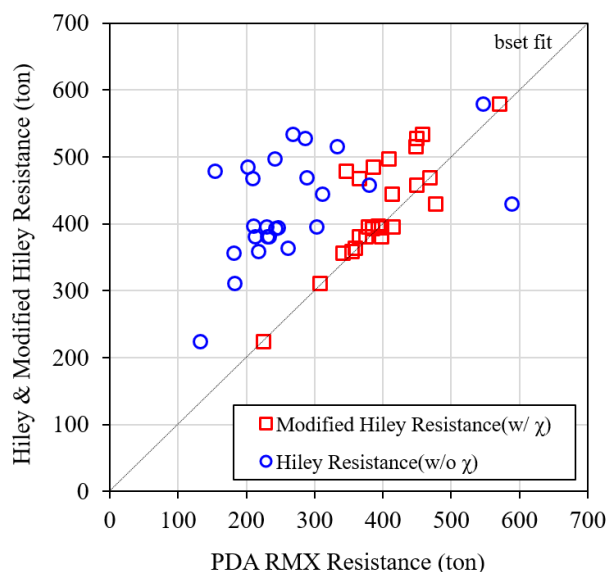


Fig. 11. Comparison of the bearing capacity of the dynamic load test and the estimated bearing capacity using KPM

정이 가능하다. 또한 전절에서 소개한 동재하시험 결과와 개발장치를 활용한 동적감쇠계수 도출, 수정 Hiley 공식 등을 통해 신뢰도 높은 지지력 추정이 가능할 것이다. 본 연구에서는 실제 현장에서 말뚝 관입량을 통해 시공 품질관리 가능성을 분석하기 위해 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화영향은 배제하고 EOID시험 결과를 기준으로 평가하였으며, 전절에 소개한바와 같이 시간경과에 따른 장기지지력은 Restrike시험을 통한 지지력 증가비를 산정하여 적용할 수 있을 것이다. 지지력증가비는 해당 현장에서 수행되는 전체 동재하시험 결과를 사용하여 산정하는 것을 권장한다. 따라서 말뚝 시공 현장에서 말뚝재하시험이 실시되지 않는 말뚝에 대해서도 지지력 개념의 품질관리가 가능할 것으로 판단되며, 지지력 추정 절차를 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다.

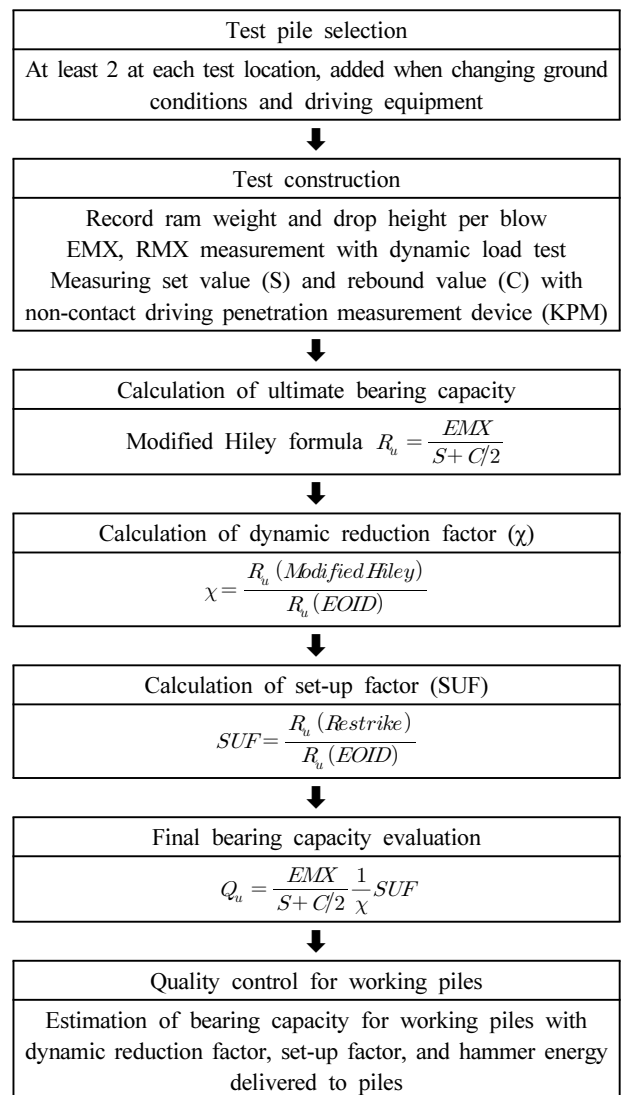


Fig. 12. Procedure of estimation for bearing capacity using non-contact penetration measurement device

5. 결론

본 연구에서는 항타 시공 시 항타관입량의 측정 신뢰성과 작업 안전성을 확보하기 위해 비접촉식 말뚝 관입량 측정 장치를 개발하고, 장치에 대한 현장 사용 가능성을 확인하였다. 또한 개발 장치와 동재하시험 결과를 활용하여 수정 Hiley 공식을 통한 지지력 추정 방법에 대해 분석하였다. 이에 본 연구에서는 다음과 같은 주요 결과를 도출하였다.

- (1) 말뚝의 항타 관입량을 정량적으로 측정하기 위해 비접촉식 항타 관입량 측정 장치를 개발하였고, 기존 사용 장치와 비교계측을 통해 성능 확인 및 사용성을 입증하였다. 수기 측정 방법의 부정확하고 신뢰도가 낮으므로 고정밀 상용화 장치와 비교계측을 통해 성능을 확인하였다. 실제 말뚝 현장에서 기존 사용 장치와 비교계측한 결과 측정 정확도 측면에서 유사한 성능을 나타내는 것으로 확인되었으나, 개발 장치에서는 해머의 2차 반동 및 상승을 고려하여 데이터 처리를 통해 보다 실제 항타 프로파일에 맞는 패턴을 도출하는 것으로 판단된다. 또한 개발 장치는 측정 준비 시간을 1~2분 내로 감소시키고 측정 프로그램을 단순화하여 현장의 사용성을 대폭 증가시켰다.
- (2) 본 연구에서 개발한 관입량 측정 장치를 활용하여 관입량과 리바운드량을 정확하게 측정하고, 수정 Hiley 공식 및 동적감쇠계수를 통해 산정한 지지력과 동재하시험을 통해 구한 지지력(RMX값)을 비교한 결과 비교적 높은 신뢰도로 지지력을 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 동재하시험으로 부터 얻은 지지력과 항타공식으로 부터 구한 지지력은 근본적으로 차이가 발생하며, 이 차이는 동적감쇠계수를 말뚝 관입량에 대한 함수로 표현하여 항타공식을 보정해줌으로써 항타공식을 통한 말뚝의 지지력 산정 신뢰도를 향상시킬 수 있었다. 또한 분석 결과를 통해 비접촉식 관입량 측정 장치를 활용하여 현장에서 말뚝의 지지력을 추정할 수 있는 절차를 제안하였다.
- (3) 국내에서 개발된 자동 관입량 측정기는 관입량(set value)은 비교적 신뢰성 있게 측정되는 것으로 평가되고 있으나, 지반 및 말뚝의 탄성변형을 나타내는 리바운드량(rebound value)의 측정 신뢰성은 부족한 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 장치 및 비교

장치 모두 동재하시험의 DMX값과는 5~15%정도 차이를 보이는 것으로 나타났다. 현장에서는 동적감쇠계수를 통해 보정하므로 지지력 산정에 있어서는 그 영향이 미미하지만, 말뚝의 변위를 측정하는 계측의 관점에서는 기술적으로 보완이 필요할 것이다. 본 연구에서 개발한 장치의 추가적인 현장 적용을 통해 계측 정확도를 개선해 나갈 계획이다.

- (4) 말뚝의 지지력은 재하시험이 수행된 말뚝 이외에는 산정하지 않는 실정이다. 말뚝의 설계지지력 효율이 날로 증대되고 깊은 퇴적층이나 풍화토층을 갖는 지역에서는 말뚝선단이 암반이 아닌 단단한 토사지반에 놓이는 경우가 있으므로 시험말뚝 외에 실제말뚝(working pile)에서도 일정부분 지지력을 추정하여 관리하는 방법이 필요하다. 동적항타공식 자체의 신뢰도에 많은 문제점들이 내포되어 있지만, 연구결과에 의해 각 현장마다 수행된 동재하시험으로 부터 현장 보정 절차가 이루어지면 보다 신뢰성 높은 지지력 추정이 가능하다. 본 연구의 결과와 제안한 지지력 추정 절차를 통해 현장 특성이 반영된 보정된 동적항타공식을 적용하면 동재하시험이 수행되지 않은 말뚝에 대해서도 지지력 개념의 말뚝 시공관리가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 주요사업으로 수행되었습니다(과제번호 20220173-001, 지반분야 재난재해 대응과 미래 건설산업 신성장을 위한 지반 기술 연구).

참고문헌 (References)

1. Lee, M.W., Hong, H.S., Kim, S.H., and Jun, Y.S. (2000), A New Proposal for the Appropriate Quality Control of Driven Piles by Using Set Values, *Proceeding of pile foundation in the Korean Geotechnical Society*, Seoul, pp.53-63.
2. Hong, H.S., Cho, C.H., Kim, S.H., and Lee, M.H. (1997), A Study on the Reliability of Dynamic Pile Formulae, *Proceeding of '97 National Conference in Korean Geotechnical Society*, Seoul, pp. 55-62.
3. Ha, I.S., Han, S.S., Han, S.G., and Kim, M.M. (2003), Measurement of Pile Rebound and Penetration Using Laser Sensor, *Proceeding of Korean Society of Civil Engineering*, pp.3257-3262.
4. Yun, H.S., Seok, J.W., Hwang, D.J., and Kim, M.M. (2005), Quality Control of Driven Piles Using DPRMs, *Proceeding of Korean*

- Society of Civil Engineering*, pp.3945-3948.
5. Park, J. (2012), Safety Management Information System in Plants Construction Work, *Journal of Korea Safety Management & Science*, Vol.14, No.4, pp.23-29.
 6. Park, T., Park, Y., and Kim, T. (2013), An analyzing Safety Education Contents Propriety for Accident Type in Construction Work, *Proceedings of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.13, No.2, pp.94-95.
 7. Yeu, Y., Kim, Y.S., and Kim, D. (2016), Development of Safe and Reliable Real-time Remote Pile Penetration and Rebound Measurement System Using Close-range Photogrammetry, *International Journal of Civil Engineering*, Vol.14, No.7, pp.439-450.
 8. Lee, S.N., You, B.J., Lim M.S., Oh, S.R., Han, S.S., and Lee, S.H. (2002), Visual Measurement of Pile Penetration and Rebound Movement Using a High-speed Line-scan Camera, *Proceeding of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, Vol.4, pp.4307-4312.
 9. Cho, C.W. and Lee, M.W. (2001), The Application of New Pile Driving Formulas, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.5, pp.157-164.
 10. Damen, R. and Denes, D. (2017), Improving Site Specific Modified Driving Formula Using High Frequency Displacement monitoring, Proceeding of 20th NZGS Geotechnical Symposium, CJ Alexander, pp.1-7.
 11. Denes, D. and Kroenert, B. (2019), A Case Study of Pile Testing and Verification. Berth 4 Upgrade - Port of Townsville, *Australasian Coasts & Ports 2019 Conference*, Hobart, pp.1-7.
 12. Chun, B.S. and Cho, C.W. (1999), Consideration of Set-up Effect in Wave Equation Analysis of Pile Driving, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.15, No.2, pp.95-101.
 13. Cho, C.W. (2003), Driveability Analysis of Driven Steel Tubular Piles, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.5, pp. 123-132.

Received : October 25th, 2022
 Revised : November 6th, 2022
 Accepted : November 7th, 2022