

진동타입기에 의한 쉬트파일의 관입속도 예측

이승현^{1*}, 김병일², 이종구³, 윤기용⁴

Prediction of Penetration Rate of Sheet Pile Driven by Vibratory Pile Driver

Seung-Hyun Lee^{1*}, Byung-Il Kim², Jong-Ku Lee³ and Ki-Yong Yoon⁴

요약 진동타입기에 의한 말뚝의 관입과정을 운동방정식으로 나타내고 수치적분법을 이용하여 말뚝의 관입속도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램에 의한 관입속도 계산결과를 기존의 현장시험결과와 비교분석하였다. 프로그램에 의해 계산된 관입속도값은 말뚝의 근입깊이가 클수록 실측값에 가까운 값을 보였다. 작은 근입깊이에서 실측값과 계산값의 차이가 큰 이유는 실제 시공시 작은 근입깊이에서는 말뚝의 휨운동과 비틀림운동이 커서 결과적으로 말뚝에 전달되는 연직방향 압축력이 감소되어 나타난 결과로 판단되었다.

핵심어 : 수치적분, 진동타입기, 관입속도, 휨운동과 비틀림운동

Abstract Numerical integration-based program which simulates motion of pile driven by vibratory pile driver was developed for predicting rate of penetration of pile. Rate of penetration of pile calculated from developed program was compared with those of field test. As pile penetration depth increases, the difference between predicted rate of penetration and measured rate of penetration decreases. It was concluded that the reason for large difference between the predicted value and the measured value at shallower depths was attributed to decrease of vertical compressive force caused from relatively larger flexural and torsional motion of sheet pile.

Key Words : numerical integration, vibratory pile driver, rate of penetration, flexural and torsional motion

1. 서론

말뚝설치에 있어 진동타입기가 사용되기 시작한 때는 1930년대 초반이며 1934년에 Barkan은 말뚝의 연직방향 진동으로 인해 말뚝과 말뚝주면에 인접해 있는 흙 사이의 주면마찰력이 상당히 감소한다고 밝힌 바 있다[1]. Barkan[2]은 진동에 의한 말뚝 설치에 영향을 주는 인자들을 연구하였는데 이들 영향인자들로서는 진동기의 최대 가속도(vibrator peak acceleration), 변위진폭(displacement amplitude), 진동수(frequency), 비관성하중(bias weight), 말뚝 단면적, 흙입자 크기, 내부마찰각 그리고 주면저항을 들 수 있다. 현장에서 적용하고 있는 진동 타입기의

대부분은 진동수, 5~40Hz 범위에서 작동되는데[3] 최근 까지 진동타입말뚝의 시공성(driveability)을 예측하고자 하는 시도들이 상당수 있어 왔다. 진동말뚝의 시공성을 예측하는 방법은 크게 매개변수에 의한 방법(parametric method), 하중평형법(force-balance method), 에너지평형법(energy-balance method), 운동량보존법(momentum-conservation method) 그리고 운동방정식에 의한 적분법(integration of the laws of motion)으로 대별할 수 있다 [4]. 운동방정식에 의한 적분법의 경우 기존의 다른 방법들에서는 모사하기 힘들었던 말뚝진동관입에 관한 물리적현상을 합리적으로 모델링하기 때문에 그 결과의 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 본 연구에서는 최근 들어 연구가 활발한 운동방정식에 대한 수치적분법을 이용하여 널 말뚝의 관입속도를 예측하는 프로그램을 개발하였으며 개발된 프로그램에 의한 결과와 현장시험결과를 상호 비교분석하고자 하였다.

¹선문대학교 토목공학과

²명지대학교 토목환경공학과

³포항산업과학연구원

⁴선문대학교 토목공학과

*교신저자: 이승현(shlee02@sunmoon.ac.kr)

2. 관입속도 예측 프로그램의 개발

2.1 운동방정식에 대한 적분법

운동방정식에 대한 적분법에서는 말뚝을 강제로 고려하게 된다. 널말뚝 시공시 진동시스템에 작용하는 힘들을 나타내면 그림 1과 같다.

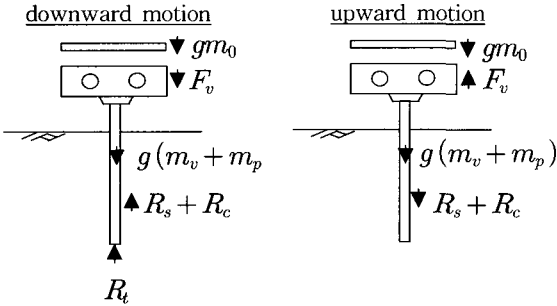


그림 1. 진동 시스템에 작용하는 힘

그림 1에서 하향을 (-)로 보고 상향을 (+)로 보면 하향 운동시 운동방정식은 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 m_{dyn}a &= -F_v - g(m_0 + m_v + m_p) + R_s + R_c \\
 &= -M_e \omega^2 \sin(\omega t) - g(m_0 + m_v + m_p) + R_s + R_c
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- m_0 : 진동기의 정적 질량
- m_v : 진동기의 동적 질량 ($=m_{eb} + m_{cl}$)
- m_{eb} : 진동기를 구성하는 기진기(exciter block)의 질량
- m_{cl} : 클러치 질량
- m_{dyn} : 진동시스템의 동적 질량 ($=m_v + m_p$)
- a : 진동시스템의 가속도
- R_s : 동적 주변저항력(dynamic soil resistance along the shaft)
- R_c : 널말뚝 사이의 동적 클러치 저항력(dynamic resistance in the clutch between the sheet piles)
- R_t : 동적 선단저항력(dynamic soil resistance at the toe)

식 (1)에서 시간에 따른 가속도(a)를 구할 수 있으면 가속도를 시간에 대해 적분하여 속도를 구할 수 있으며 속도를 시간에 대해 적분하여 변위량을 구할 수 있다. 운

동주기($T=1/f_d$)에 대해 가속도, 속도 그리고 변위량을 구했다면 최종변위량을 주기로 나누어 널말뚝의 관입속도를 구할 수 있다[5]. 그러나 진동시스템의 상하향 운동시의 가속도, 속도 그리고 변위량을 해석적 방법을 통해 구하기가 어려우므로 이들 값들을 수치적분을 통해 구하는 게 편리하다. 이러한 수치적분 개념을 이용하여 널말뚝 관입속도 예측 프로그램을 개발하였는데 프로그램의 흐름도는 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 n 은 해석시간 간격수를 의미하며 t 는 시간, v 는 속도, d 는 변위 그리고 a 는 가속도를 의미한다.

2.2 개발된 프로그램과 현장 시험결과와의 비교

운동방정식에 대한 적분법을 이용하여 널말뚝 관입속도 예측 프로그램을 개발하였다. 프로그램에 의한 예측값과의 비교를 위해서 기존의 현장시험결과[4]와 비교하였다. 현장시험시 원지반 지반조사방법으로 CPT시험이 수행되었는데 CPT시험결과로부터 계산된 동적 선단저항력 및 주변마찰력을 이용하였다.

현장시험결과와의 비교를 목적으로 개발된 프로그램을 이용하여 깊이별 널말뚝의 관입속도를 예측하여 보았다. 12m 깊이에 대한 입력자료를 요약하면 다음의 표 1과 같다. 현장시험시 사용된 진동타입기 종류는 MRZV 800V이다.

표 1 입력자료(z=12m)

입력값의 구분	입력값
진동기	불균형 모멘트 $M_e = 6.0kgm$ 진동수 $f_d = 41Hz$ 진동기의 동적 질량 $m_v = 2450kg$ 진동기의 정적 질량 $m_0 = 1020kg$
널말뚝	단면적 $A_t = 95.2cm^2$ 둘레길이 $\chi = 150cm$ 길이 $L = 14m$ 질량 $m_p = 1010kg$
지반	동적 선단저항력 $R_t = 19.0kN$ 동적 주변마찰력 $R_s = 140kN$
적분 매개변수	초기 관입속도, $v_{ini} = 0.25m/sec$

계산결과는 그림 3과 같다. 그림 3(a)에서 하중값은 식 (1)의 우변에서 관입저항값을 제외한 부분을 나타낸다. 그림 3(b)는 식 (1)로부터 구한 시간에 따른 진동시스템의 가속도 곡선이며 그림 3(c),(d)는 각각 가속도를 시

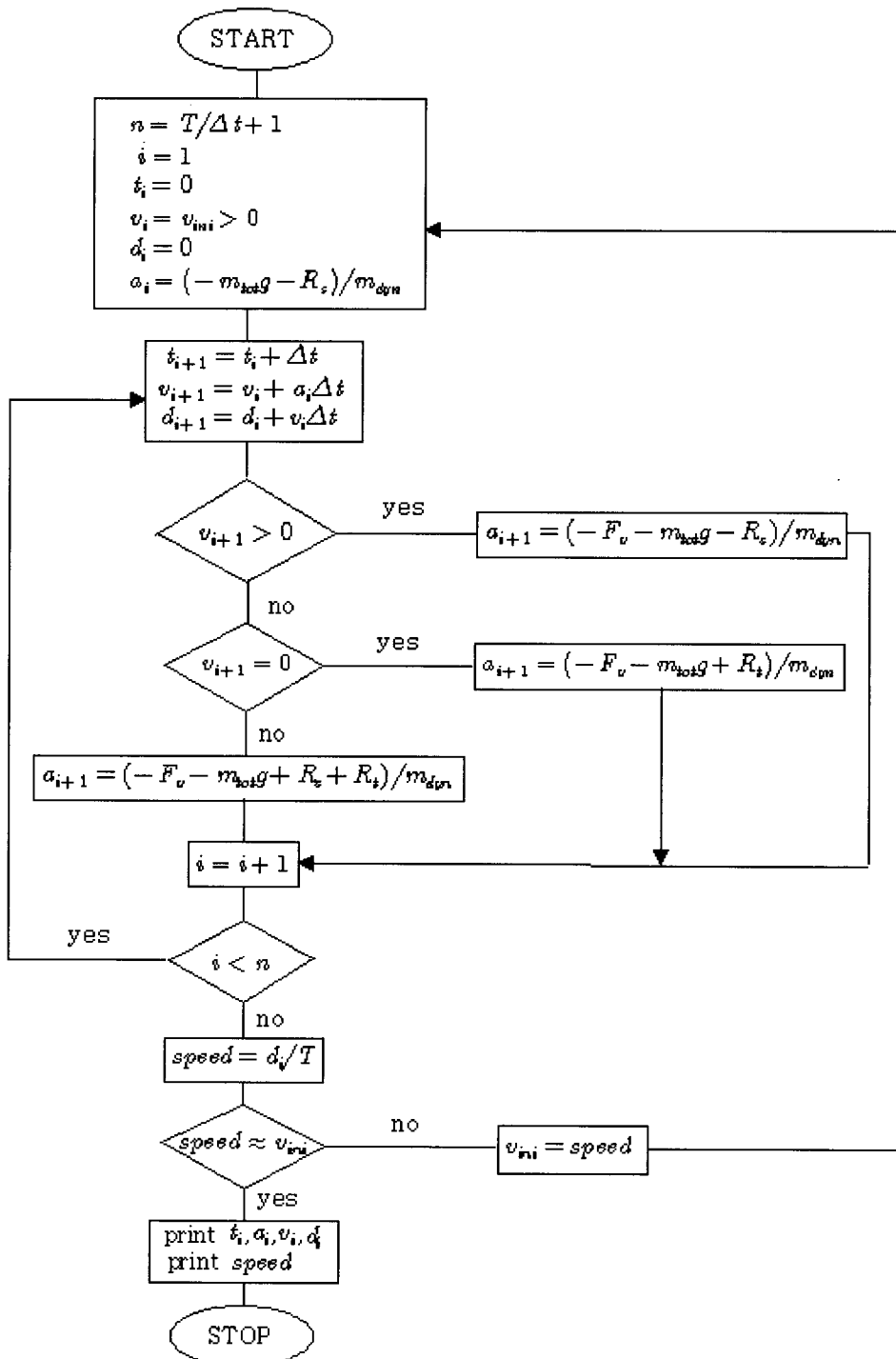


그림 2. 해석 흐름도

간에 대해 적분한 속도 및 속도를 시간에 대해 적분한 변위를 의미한다.

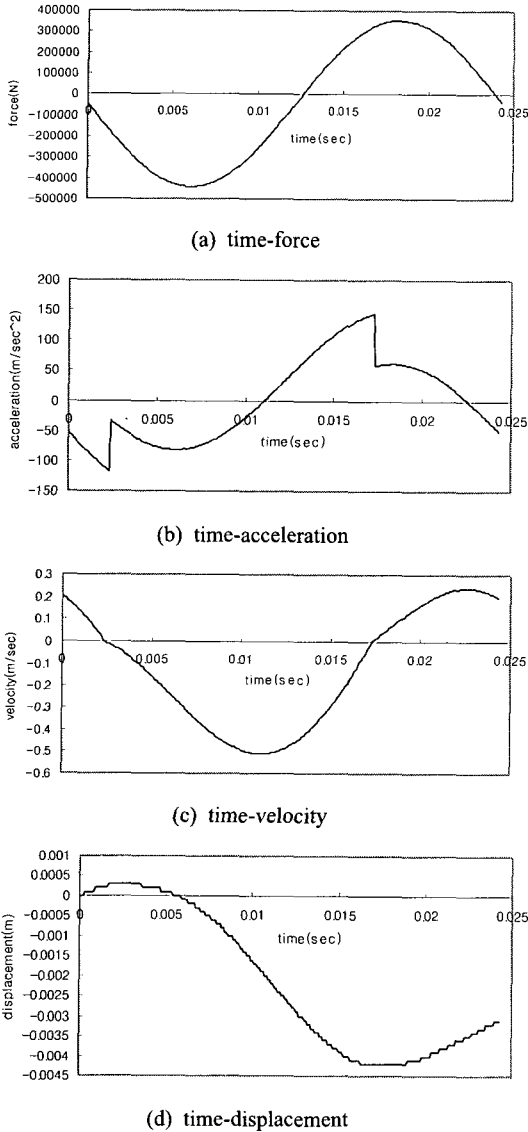


그림 3. 계산결과(z=12m)

개발된 프로그램에 의한 계산결과를 현장시험결과와 비교하여 그림 4에 나타내었다. 현장시험시 널말뚝은 단독시공되어 동적 클러치 저항은 없다.

그림 4를 통해 알 수 있듯이 현장시험결과와 계산결과를 비교하여 볼 때 말뚝의 근입깊이가 커짐에 따라 실측값과 계산값의 차이가 줄어들음을 알 수 있다. 그림 4에 나타난 현장시험결과와 관련하여 Viking[4]은 널말뚝의 하

향운동시 실제로 널말뚝에 작용하는 최대 압축하중을 측정하였는데 그 크기가 이론값의 40%정도였다. 실제 널말뚝에 작용하는 하중의 감소 이유는 클램프와 널말뚝 사이에 발생하는 미끄러짐과 타입시 널말뚝의 휨운동과 비틀림운동때문으로 볼 수 있는데 Viking은 주된 이유를 널말뚝의 휨운동과 비틀림운동때문으로 설명하였다. Viking은 널말뚝의 횡방향 가속도를 측정하였는데 그 값은 초기 관입깊이에서 크게 관측되어 널말뚝의 관입속도 저하와 큰 지반진동결과를 낳았다고 설명하고 있다. 따라서 근입깊이가 작은 경우 실측값과 계산값 사이에 차이가 큰 이유는 널말뚝의 근입깊이가 작은 경우 휨운동과 비틀림운동이 크게 됨과 관련하여 널말뚝에 전달되는 축방향 하중이 감소되었기 때문으로 판단된다.

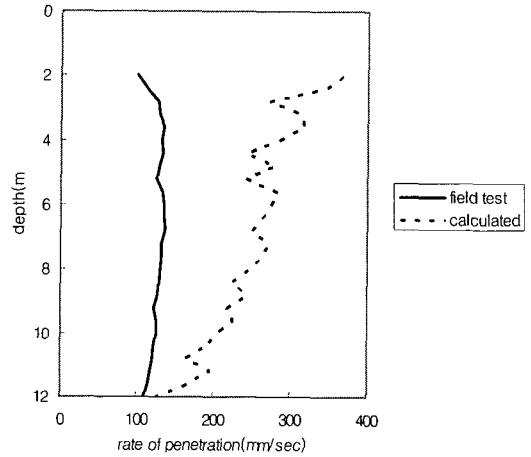


그림 4. 현장시험결과와 계산결과와의 비교

3. 결론

진동타입기에 의한 진동타입과정을 운동방정식으로 나타내고 적분법을 이용하여 널말뚝의 관입속도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 계산결과를 현장시험결과와 비교분석하였다. 본 연구를 통해 유도된 결론은 다음과 같다.

1. 말뚝 진동타입기의 진동타입과정을 모사한 운동방정식에 대해 적분법을 적용하여 널말뚝의 관입속도 예측 프로그램을 개발하였다.
2. 현장에서 측정된 관입속도 실측값과의 비교를 위해 개발된 프로그램을 이용하여 관입속도를 예측해본 결과 말뚝 근입깊이가 깊을수록 실측값에 가까운 계산값을 나타내었다. 따라서 개발된 프로그램을 이용하여 말뚝

의 관입속도를 예측할 경우 말뚝 근입깊이가 증가함에 따라 프로그램에 의한 결과의 신뢰성은 증가할 것으로 추측된다.

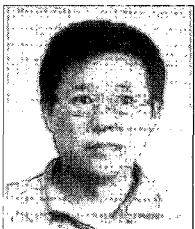
- 본 연구에서 개발된 프로그램에 의한 계산결과와의 비교를 위해 나타난 현장시험의 시험 수행자의 연구결과에 따르면 작은 근입깊이에서는 말뚝의 휨운동과 비틀림운동이 큰 근입깊이에 비해 상대적으로 커서 결과적으로 말뚝에 전달되는 연직하중의 감소로 인해 관입속도가 감소하는 것으로 결론짓고 있다. 따라서 향후 이러한 현상을 적절히 평가하는 기법이 반영된다면 보다 신뢰성 있는 관입속도 예측이 가능하리라 판단된다.

참고문헌

- Rodger, A.A., and Littlejohn, G.S. (1980). "A study of vibratory driving on granular soils". Geotech., 30(3), 269-293
- Barkan, D. D. (1957). "Foundation engineering and drilling by vibration method". Proc., Fourth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., 2, 3-7.
- D. Wong, Michael W. O'Neill and C. Vipulanandan (1992). "Modelling of vibratory pile driving in sand". International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 16, 189-210.
- Viking, K., (2002). Vibro-driveability, a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils, PhD thesis, Div. of Soil and Rock Mechanics, Royal Inst. of Technology, Stockholm, Sweden.
- Holeyman, A.,(1993). HYPERVIB1, An analytical model-based computer program to evaluate the penetration speed of vibratory driven sheet piles., Research report prepared for BBRI, June-93, 23pp.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-II Kim)

[정회원]

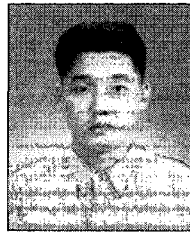


- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학

이 중 구(Jong-Ku Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2003년 11월 ~ 현재 : 포항산업·과학연구원 강구조연구소 선임연구원

<관심분야>
기초공학, 강구조공학

윤 기 용(Ki-Yong Yoon)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>
강구조공학, 내진공학