

널말뚝의 횡방향진동이 진동타입력에 미치는 영향에 대한 연구

이승현¹, 김병일^{2*}

A Study on the Effect of Lateral Vibration of Sheet Pile on Vibratory Driving Force

Seung-Hyun Lee¹ and Byoung-II Kim^{2*}

요 약 널말뚝의 관입속도 예측을 위한 해석수단 중 많은 경우에 얇은 근입깊이에 대해서 관입속도를 지나치게 크게 평가하기 때문에 해석법의 신뢰성을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 이러한 해석상의 단점을 보완하고자 널말뚝의 횡진동모델을 정립하고 횡진동에 의해 발생하는 에너지 손실량을 평가하였다. 또한 횡진동에 의한 에너지손실에 따른 진동타입력의 감소를 하중감소계수를 써서 반영하고자 하였다.

키워드 : 관입속도, 횡진동모델, 에너지손실, 진동타입력, 하중감소계수

Abstract Many numerical analysis tools for predicting penetration speed of sheet pile are thought to be unreliable because they overestimate penetration speed for shallow depth of penetration. In order to overcome the defects of numerical analysis, lateral vibration model of sheet pile was suggested and energy consumption due to lateral vibration of sheet pile was estimated. Also, load reduction factor which explains reduction of vibratory driving force due to lateral vibration was introduced.

Key words : penetration speed, lateral vibration model, energy consumption, vibratory driving force, load reduction factor

1. 서론

널말뚝을 진동에 의해 지반에 관입시키는 방법은 타입 및 압입에 의한 방법보다 소음이 적을 뿐만 아니라 무엇보다 시공시간을 단축시키는 잇점이 있다[1]. 진동에 의한 널말뚝의 시공시 주된 관심사는 얼마나 빠른 속도로 관입이 이루어질 수 있는 가이며 이러한 진동관입성(vibro-driveability)의 척도로 관입속도(penetration speed)를 사용한다. 진동기에 의한 널말뚝의 관입속도를 예측하는 다양한 방법들 중에서 비교적 최근에 나온 방법은 적분모델(integration model)을 사용하는 방법으로서 이 방법은 기본적으로 진동기-말뚝-흙으로 구성되는 진동시스템에 대한 운동방정식으로부터 가속도를 구한 다음 이를 시간에 대하여 적분하여 관입속도를 구하게 된다. 현재까지 적분모델을 적용한 몇몇 방법들이 연구목적을 위해

개발되었지만 시공시 널말뚝의 관입깊이가 작은 경우 관입속도를 과대하게 평가하는 단점이 있다.

Viking[2]은 이러한 원인을 널말뚝의 횡방향 진동에 의한 진동기의 에너지 손실 때문으로 추정하고 있는데 본 연구에서는 널말뚝의 횡방향 진동이 진동타입력의 거동에 미치는 영향을 정량적으로 고려할 방법을 제안하고자 하였다.

2. 진동타입력의 이론적 일률

진동타입력의 이론적 일률 계산을 위해 고려하는 진동시스템은 그림 1과 같다.

Warrington[3]은 정적 상재하중(bias weight)이 있는 진동타입기에 대하여 일률, N 을 식 (1)과 같이 제안하였고 O'Neill & Vipulanandan[4]은 식 (2)와 같은 진동타입력의 일률을 제안하였다.

¹선문대학교 토목공학과

²명지대학교 토목환경공학과

*교신저자: 김병일(bikim@mju.ac.kr)

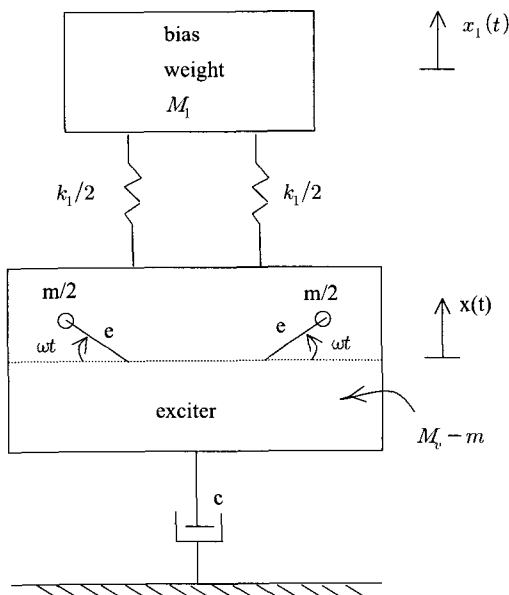


그림 1. 진동시스템

$$N = \frac{M_e^2 \omega^3}{2M_v} \frac{2500}{5000 - 3000m' + 9m'^2} \quad (1)$$

M_e : 편심모멘트(= me)

ω : 회전각속도

M_v : 기진체의 질량

m' : 질량비(= M_1/M_v)

M_1 : 정적 상재하중의 질량

$$N = \frac{M_e \omega}{\pi M_v} (M_e \omega^2 + 2W) \quad (2)$$

식 (2)에서 W 는 정적 상재하중의 무게를 나타낸다.

3. 널말뚝의 휨진동에 따른 일률 소모량

진동타입기에 의한 널말뚝 시공시에는 기진체 하부에 부착된 클램프로 널말뚝의 복부(web)를 묶어 널말뚝을 진동시키게 된다.

그림 2에 나타나 있는 바와 같이 클램프로 인해 연직 방향의 진동하중이 가해지는 위치가 널말뚝 단면의 중립축으로부터 편심되어 있으므로 널말뚝 단면에는 연직하중과 더불어 편심모멘트가 작용하게 되고 이 편심모멘트

에 의해 널말뚝의 횡방향 진동이 발생하게 된다. 따라서 널말뚝의 횡방향 진동시 진동타입기의 일률의 일정부분이 횡방향 진동에너지로 소모되게 된다.

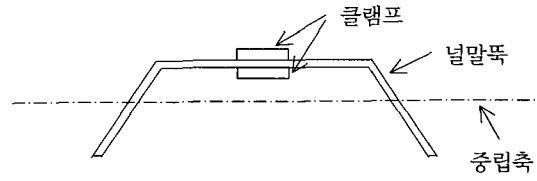
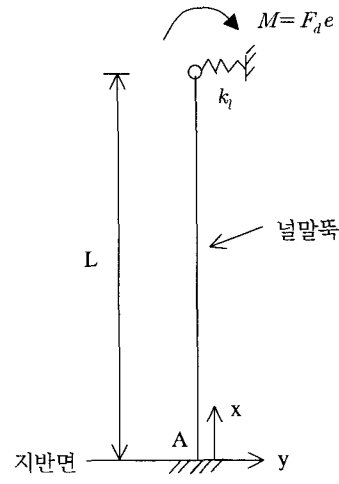
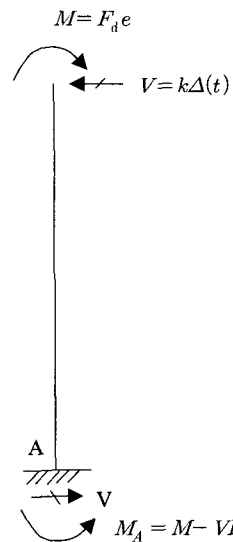


그림 2. 널말뚝에 대한 진동하중 작용위치



(a) 자유길이의 고려



(b) 자유물체도

그림 3. 자유길이를 고려한 널말뚝의 진동모델

그림 3은 널말뚝 시공시 지표면으로부터 널말뚝 두부까지의 자유길이에 해당하는 널말뚝에 작용하는 힘들을 나타낸 것이다.

그림 3에서 M 은 편심모멘트를 나타내는데 F_d 는 진동기 편심질량체의 회전에 따른 진동타입력(unbalanced driving force)을 의미하며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$F_d = M_e \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3)$$

M_e : 편심질량체의 편심모멘트

ω : 편심질량체의 회전각속도

t : 시간

또한 그림 3에서 e 는 널말뚝 단면의 중립축에서 진동타입력이 가해지는 지점까지의 편심거리를 나타낸다. 식 (3)을 참조하여 볼 때 편심모멘트 M 은 시간의 함수임을 알 수 있다. 그림 3에서 말뚝머리에서의 횡방향변위량, $\Delta(t)$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\Delta(t) = \frac{3ML^2}{2k_l L^3 + 6EI} \quad (4)$$

k_l : 횡방향 스프링상수

식 (4)에서 EI 는 널말뚝의 휨강성을 의미하며, 식 (4)를 통해 알 수 있듯이 말뚝머리의 횡방향 변위진폭은 k_l 의 크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. 그림 3(b)로부터 말뚝 단면에 발생하는 모멘트는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M(x,t) = M + \frac{3ML^2 k_l}{2k_l L^3 + 6EI} (x - L) \quad (5)$$

널말뚝의 횡방향 힘에 의해 지반면으로부터 x 만큼 떨어진 미소요소에 저장되는 포텐셜에너지(dU)는 보의 휨이론을 적용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dU = \frac{1}{2} M(x,t) d\theta \quad (6)$$

식 (6)에서 θ 는 휨곡선의 기울기를 의미한다. 널말뚝 자유길이 전체에 대하여 힘에 의해 저장되는 포텐셜에너지(U)는 식 (6)을 널말뚝 길이에 대하여 적분하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{M^2 L}{2EI} \frac{1}{2k_l L^3 + 6EI} \left\{ 6EI + \frac{k_l^2 L^6 - k_l L^3 (6EI)}{2k_l L^3 + 6EI} \right\} \quad (7)$$

따라서 식 (7)로부터 진동타입의 한 주기(period)동안 포텐셜에너지로 저장되는 일률(P_U)은 그림 3과 식 (7)을 참조하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_U = \frac{M_e^2 \omega^4 e^2 L}{4EI} \frac{1}{2k_l L^3 + 6EI} \left\{ 6EI + \frac{k_l^2 L^6 - k_l L^3 (6EI)}{2k_l L^3 + 6EI} \right\} \quad (8)$$

한편 지반면으로부터 거리 x 만큼 떨어진 널말뚝의 미소요소에 소모되는 운동에너지(dK)는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$dK = \frac{1}{2} \mu dx \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \quad (9)$$

식 (9)에서 μ 는 널말뚝의 선질량밀도를 나타내며 횡방향변위량, $y(x,t)$ 는 식 (5)를 보의 휨이론에 적용하여 식 (10)과 같이 표현된다.

$$y(x,t) = \frac{1}{EI} \left\{ \frac{1}{2} Mx^2 + \frac{3ML^2 k_l}{2k_l L^3 + 6EI} \left(\frac{1}{6} x^3 - \frac{L}{2} x^2 \right) \right\} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하고 널말뚝 길이에 대하여 적분을 하면 운동에너지를 구할 수 있으며 이에 대하여 진동타입의 주기를 고려하면 널말뚝의 횡방향 진동에 의한 일률 소모량(P_K)을 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$P_K = \frac{\mu M_e^2 \omega^6 e^2}{4(EI)^2} \left\{ \frac{L^5}{20} - \frac{13k_l L^8}{60(2k_l L^3 + 6EI)} + \frac{11L^7}{420} \left(\frac{3L^2 k_l}{2k_l L^3 + 6EI} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

널말뚝의 횡방향 진동으로 인해 소모되는 전체 일률(P_C)은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_C = P_U + P_K \quad (12)$$

식 (8), (11)을 통해 알 수 있듯이 널말뚝의 휨진동에 소모되는 일률에 영향을 미치는 인자는 진동기 및 널말뚝의 물성값과 말뚝머리에서의 횡방향 스프링상수, k_l 이다.

4. 휨진동을 고려한 진동타입력의 수정

널말뚝의 자유길이에 따른 휨진동을 고려하여 진동타입력을 수정하는 방법은 식 (1), (2)에 나타난 일률에서 식 (11)에서 구한 일률소모량을 빼준 값이 식 (13)과 같이 하중감소계수, C_l 을 적용하여 다시 구한 일률과 같게 되는 하중감소계수값을 구하는 것이다. 따라서 하중감소계수는 횡방향 스프링상수, k_l 의 함수임을 알 수 있다.

$$F_d = C_l M_c \omega^2 \sin(\omega t) \quad (13)$$

휨진동에 의한 일률소모량을 고려한 널말뚝의 거동특성을 파악해 보고자 진동타입기 모델 MRZV 800V를 고려해보았다. 고려한 진동타입기와 널말뚝의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 진동타입기와 널말뚝의 제원

| 구분 | 입력값 |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 진동기 | 불균형 모멘트 $M_t = 6.0kgm$ 진동수 $f_d = 41Hz$ 진동기의 동적 질량 $m_r = 2450kg$ 진동기의 정적 질량 $m_0 = 1020kg$ |
| 널말뚝 | 단면적 $A_t = 95.2cm^2$ 둘레길이 $\chi = 150cm$ 길이 $L = 14m$ 질량 $m_p = 1010kg$ 편심거리 $e = 7.42cm$ 탄성계수 $E = 2 \times 10^{11} N/m^2$ 단면2차모멘트 $I = 5560cm^4$ |

표 1에 나타난 자료를 바탕으로 k_l 에 따른 하중감소계수의 변화양상을 살펴보기 위해 k_l 값을 5000N/m, 10000N/m 그리고 20000N/m로 변화시켜 Warrington이 제안한 일률산정식에 근거하여 자유길이에 따른 C_l 값을 계산하여 보았는데 그 결과는 그림 4와 같다. 그림 4를 통해 알 수 있듯이 하중감소계수는 자유길이가 크지 않

은 경우는 1에 가까운 값을 보이며 자유길이가 증가할수록 작아진다. 또한, 그림 4에서 말뚝머리 횡방향 스프링상수가 작을수록 감소폭 또한 커짐을 알 수 있다.

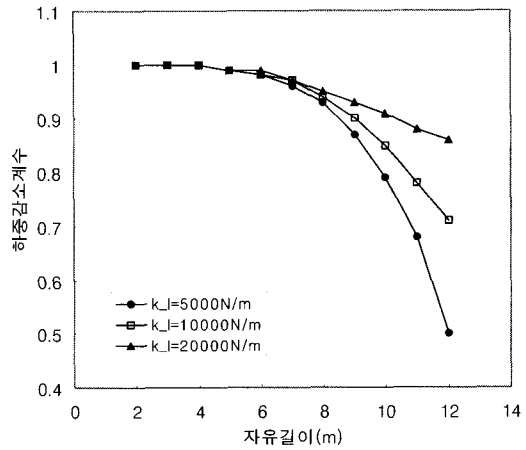


그림 4. 자유길이에 따른 하중감소계수

하중감소계수를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 널말뚝의 관입속도를 간단한 지반조건을 가정하여 비교하여 보았다. 관입속도 예측 프로그램은 VIBVEL을 사용하였다[5]. 대상지반은 깊이에 따라 동적 선단저항력과 동적 주면마찰력이 일정한 지반으로 가정하였는데 관입속도를 예측한 결과는 그림 5와 같다.

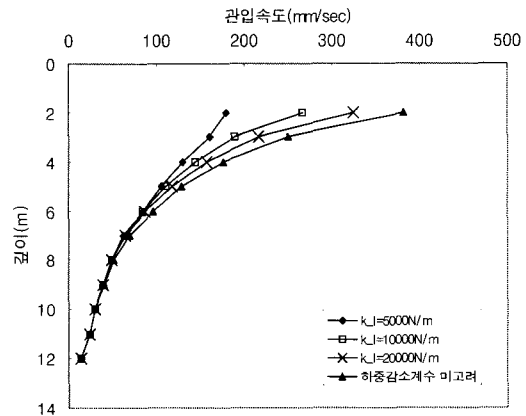


그림 5. 깊이에 따른 관입속도

그림 5에 나타나 있는 바와 같이 하중감소계수를 고려하지 않은 경우 초기 관입깊이에 대하여 관입속도를 과대하게 평가함을 알 수 있으며, 또한 횡방향 스프링상수

k_2 이 클수록 횡방향력이 작아져 관입속도가 크게 예측됨을 알 수 있다. 이러한 경향의 결과는 GRL-WEAP 등의 기존의 상용해석 프로그램에서도 관찰된다. 그림 5에 나타난 바와 같이 초기 관입깊이에 대하여 횡방향 스프링 상수를 적용하여 초기 깊이에서의 관입속도를 제어할 수 있으며 현장시험시 널말뚝의 횡방향 변위거동을 파악한다면 보다 신뢰성 있는 해석이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

널말뚝을 진동타입기로 시공하는 경우에 대해 수치해석을 통해 관입속도를 예측하고자 할 때 관입깊이가 얇은 경우에 대해서는 관입속도를 지나치게 크게 예측하는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 널말뚝의 자유길이에 따른 휨진동모델을 정립하고 역학적 에너지손실량을 정량적으로 평가하여 이를 연직방향의 진동항타력에 대해 하중감소계수를 써서 반영하였다. 하중감소계수는 휨진동모델에서 고려한 횡방향 스프링상수의 함수로서 널말뚝의 자유길이가 증가할수록 감소하는데 말뚝머리 횡방향 스프링상수가 작아질수록 감소폭 또한 크다. 간단히 가정한 지반조건에 대하여 하중감소계수의 적용여부에 따른 관입속도의 변화양상을 살펴본 결과 본 연구를 통해 유도된 하중감소계수를 적용하여 초기 관입속도를 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] Holeyman, Alain E., Legrand, Christian., Van Rompaey, Dirk.,(1996). "A method to predict the driveability of vibratory driven piles., Proc. of 5th Int. Conf. on the application of Stress-Wave theory to piles., September 11-13, Orlando FL., pp. 1101-1112.

[2] Viking, K.(2002). Vibro-driveability -a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils. PhD Thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology.

[3] Warrington, D.C. (2006). "Development of a Parameter Selection Methods for Vibratory Pile Driver Design with Hammer Suspension", Colloquium of the Department of Mathematics of the University of Tennessee at Chattanooga 26 September.

[4] O'Neill, M.W., and Vipulanandan, C.(1989). "Laboratory Evaluation of Piles Installed with Vibratory Hammers", NCHRP Report 316. Washington: Transportation

Research Board, National Research Council.

[5] 이승현, 김병일, 이종구, 윤기용(2006). "진동타입기에 의한 스위트파일의 관입속도 예측", 한국산학기술학회논문지 제 7권 제 4호, pp.679-683.

이 승 현(Hyun-Gi Hong)

[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-Il 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