

콘관입시험결과를 이용한 널말뚝의 관입속도 예측기법 개발

Predicting Method of Penetration Rate of Sheet Pile Using Cone Penetration Test Results

이 승 현¹ Lee, Seung-Hyun

임 남 규² Lim, Nam-Gyu

김 병 일³ Kim, Byoung-Il

Abstract

A program for predicting rate of penetration of sheet pile using cone penetration test results was developed. Especially, energy consumption occurring from lateral vibration of sheet pile was estimated quantitatively in order to overcome overprediction of rate of penetration for shallow depths of pile installation. Penetration rates of pile calculated from developed program were compared with those of field test. Predicted rates of pile penetration for the depths to 12m were 47%~120% of the measured values. As pile penetration depth decreases, the difference between the predicted rate of penetration and the measured rate of penetration decreases.

요 지

콘관입시험결과를 이용하여 널말뚝의 관입속도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 특히, 널말뚝의 시공에 따른 자유길이를 고려하여 널말뚝의 횡방향 진동에 따른 에너지 손실량을 정량적으로 평가하고 이를 해석 프로그램에 반영함으로써 초기 관입깊이에 대하여 말뚝의 관입속도를 과대하게 예측하는 것을 극복하고자 하였다. 개발된 프로그램에 의한 관입속도 계산결과를 기존의 현장시험결과와 비교분석하였는데 총 12m의 관입깊이에 대하여 예측한 관입속도값은 실측값의 47%~120% 범위였으며 관입깊이가 작을수록 실측값과 예측값의 편차는 작았다.

Keywords : Cone penetration test results, Energy consumption, Lateral vibration, Rate of penetration

1. 서 론

보통 차수의 목적으로 시공되는 널말뚝은 주로 진동 타입기에 의해 시공된다. 진동타입기는 크게 기진체(exciter)와 기진체 상부에 위치하는 정적 상재하중(static surcharge weight or bias weight)으로 구성되는데 기진체와 정적상재하중은 스프링으로 연결되며 기진체 하부에는 클램프가 있어 시공시 널말뚝이 물리도록 하여 기진체와 클램프 및 널말뚝이 일체로 거동하게 된다.

기진체 내부에는 동일한 질량을 갖는 한쌍의 편심질량체가 있는데 이들이 서로 반대방향으로 회전함으로써 수평방향 진동력은 상쇄되고 연직방향의 진동력만 발생하게 되어 널말뚝의 관입이 가능하게 된다. 진동해머의 장점으로는 소음이 적고 일반적으로 시공속도가 타입말뚝에 비해 빠르다는 사실을 들 수 있다. 따라서 진동타입기를 사용하여 널말뚝을 시공할 때의 주된 관심사는 얼마나 빨리 말뚝의 관입이 가능하냐 하는 점이다. 진동타입기에 의해 시공되는 말뚝의 빠른 관입속도는

1 정회원, 선문대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate prof., Dept. of Civil Engrg., SunMoon Univ.)

2 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Master student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., MyongJi Univ.)

3 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., MyongJi Univ., bikim@mju.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

말뚝의 연직방향 진동으로 인해 지반의 주면마찰력 및 선단저항력이 상당히 감소되기 때문에 파악된다. Barkan (1957)은 진동에 의한 말뚝 설치에 영향을 주는 인자들을 연구하였는데 이들 영향인자들로는 진동기의 최대 가속도(vibrator peak acceleration), 변위진폭(displacement amplitude), 진동수(frequency), 정적 상재하중(bias weight), 말뚝 단면적, 흡입자 크기, 내부마찰각 등을 들 수 있다. 현장에서 적용하고 있는 진동 타입기의 대부분은 진동수, 5~40Hz 범위에서 작동되는데(Wong 등, 1993) 최근까지 이러한 진동타입말뚝의 시공성(driveability)을 예측하고자 하는 시도들이 상당히 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(Viking, 2002). 운동방정식에 의한 적분법의 경우 기존의 다른 방법들과는 달리 진동시스템의 거동을 비교적 합리적으로 모사하기 때문에 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 본 논문에서는 운동방정식에 의한 적분법을 이용하여 널말뚝의 관입속도를 예측하는 프로그램을 개발하였는데 운동방정식을 구성하는 동적 선단 지지력 및 동적 주면마찰력은 콘관입시험결과를 이용하여 추정토록 한 제안식(Holeyman, 1993)을 사용하였다. 개발된 프로그램에 있어서는 시공시 널말뚝의 횡방향진동에 따른 에너지손실을 반영함으로써 초기 관입 깊이에 대하여 널말뚝의 관입속도가 과대하게 예측되는 것을 극복하고자 하였다. 또한, 개발된 프로그램에 의한 관입속도 예측결과를 문헌에 소개된 현장시험결과와 상호비교분석하였다.

2. 운동방정식 및 동적 지반저항력

2.1 운동방정식

널말뚝을 진동타입기에 의해 시공하는 경우에 있어 진동시스템에 대해 작용하는 힘들을 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서 상향을 (+)로 보고 하향을 (-)로 보면 하향 운동 및 상향 운동시 운동방정식은 각각 식 (1), (2)와 같이 표현되며 식 (1), (2)의 운동방정식에 대한 해가 말뚝의 관입속도가 된다.

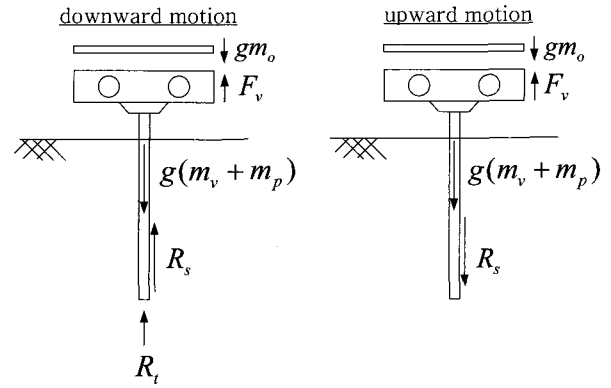


그림 1. 진동 시스템에 작용하는 힘

$$m_{dyn}a = -F_v - g(m_o + m_v + m_p) + R_s + R_t \quad (1)$$

$$= -M_e \omega^2 \sin(\omega t) - g(m_o + m_v + m_p) + R_s + R_t$$

$$m_{dyn}a = F_v - g(m_o + m_v + m_p) - R_s \quad (2)$$

$$= M_e \omega^2 \sin(\omega t) - g(m_o + m_v + m_p) - R_s$$

여기서, m_o : 진동기의 정적 질량

m_v : 진동기의 동적 질량

m_p : 널말뚝 질량

m_{dyn} : 진동시스템의 동적 질량 ($=m_v+m_p$)

a : 동적 질량의 가속도

R_s : 동적 주면마찰력(dynamic soil resistance along the shaft)

R_t : 동적 선단저항력(dynamic soil resistance at the toe)

2.2 동적 지반저항력

말뚝의 관입깊이, D에 대한 동적 선단저항력과 동적 주면마찰력은 식 (3), (4)와 같다.

$$R_t = q_d A_t \quad (3)$$

$$R_s = p \int_0^D \tau_d dz \quad (4)$$

여기서, q_d : 동적 단위 선단저항력

A_t : 말뚝 단면적

p : 말뚝 둘레길이

τ_d : 동적 단위 주면마찰력

Holeyman(1993)은 동적 단위 선단저항력 및 동적 단위 주면마찰력을 식 (5), (6)과 같이 제안한 바 있다.

$$q_d = (q_s - q_l)e^{-\alpha} + q_l \quad (5)$$

$$\tau_d = (\tau_s - \tau_l)e^{-\alpha} + \tau_l \quad (6)$$

여기서, q_s : 정적 단위 선단저항력

τ_s : 정적 단위 주면마찰력

q_l : 액상화현상에 따른 단위 선단저항력
(liquefied soil base resistance)

τ_l : 액상화현상에 따른 단위 주면마찰력
(liquefied soil shaft resistance)

α : 가속도비(= a/g)

g : 중력가속도

a : 말뚝가속도

식 (5), (6)에서 q_l 과 τ_l 은 다음의 식 (7), (8)과 같이 표현된다.

$$q_l = q_s [(1 - 1/L)e^{-1/F_R} + 1/L] \quad (7)$$

$$\tau_l = \tau_s [(1 - 1/L)e^{-1/F_R} + 1/L] \quad (8)$$

여기서, F_R : 콘관입시험에 의한 마찰비(friction ratio, %)

L : 경험적 액상화계수(empirical liquefaction factor)

식 (7), (8)에서 액상화계수, L 은 4~10사이의 값을 갖는데 느슨하고 포화된 모래일수록 큰 값을 갖는다. 식 (5), (6)에서 말뚝가속도(a)의 초기값은 식 (9)와 같다.

$$a = \frac{M_e \omega^2}{m_{dyn}} \quad (9)$$

여기서, M_e : 편심질량체의 편심모멘트

ω : 편심질량체의 회전각속도

말뚝가속도는 말뚝관입에 따라 동적 지반저항력에 의해 감소하게 되는데 감소된 말뚝가속도는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{M_e \omega^2 - \delta R_s}{m_{dyn}} \quad (10)$$

식 (10)에서 δ 는 댐핑계수로서 동적 주면저항력에 의해 말뚝의 운동을 감소시키는 역할을 한다. 그리고 R_s 는 가속도비, α 의 함수이므로 말뚝의 관입깊이에 따

른 가속도비를 구하기 위해서는 식 (4)와 식 (10)을 이용하여 가속도 사이의 차이를 무시할 수 있을 때까지 반복하여야 하며 수렴된 말뚝가속도로부터 계산된 가속도비의 값을 이용하여 지반의 동적 저항력을 결정하게 된다.

3. 말뚝의 횡방향진동에 의한 진동항타력

말뚝의 관입속도 예측기법을 적용할 경우 시공중에 존재하는 말뚝의 자유길이 즉, 지표면으로부터 말뚝머리까지의 거리의 존재로 인해 특히, 얇은 관입깊이에 대해 관입속도를 과대평가하는 경향이 있어 해석기법의 신뢰성이 떨어지게 된다. 이러한 원인에 대해 Viking(2002)은 말뚝시공 중에 자유길이부분에 해당하는 말뚝에 횡방향진동이 발생하기 때문에 연직방향으로 말뚝을 관입시키기 위해 쓰여야 하는 에너지의 일부분이 말뚝의 횡방향진동에 쓰였기 때문으로 설명하였다. 따라서 개발된 프로그램에 대해서는 말뚝의 횡방향진동에 의한 에너지 손실을 정량적으로 평가하고 이를 연직방향 진동항타력의 감소에 반영하도록 하였다.

3.1 말뚝의 횡방향진동 발생 원인

진동타입기에 의한 널말뚝 시공시에는 그림 2에 나타난 바와 같이 기진체 하부에 부착된 클램프로 널말뚝의 복부(web)를 물어 널말뚝을 진동시키게 된다. 그림 2에 나타나 있는 바와 같이 클램프에 의해 연직방향의 진동하중이 가해지는 위치가 널말뚝 단면의 중립축으로부터 편심되어 있으므로 널말뚝 단면에는 연직하중과 더불어 편심모멘트가 작용하게 되고 이 편심모멘트에 의해 널말뚝의 횡방향 진동이 발생하게 된다. 널말뚝의 횡방향 진동시 진동타입기의 일률의 일정부분이 횡방향 진동에너지로 소모되게 된다.

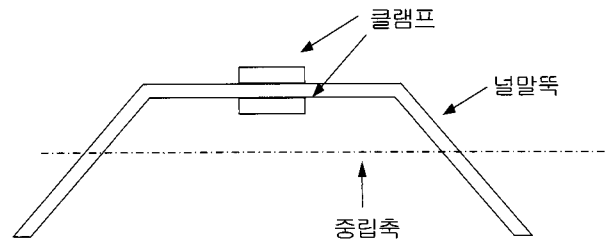


그림 2. 널말뚝에 대한 진동하중 작용위치

3.2 횡방향진동에 따른 에너지 소모

말뚝의 횡방향진동에 따른 에너지소모량을 계산하기 위해 그림 3과 같은 횡방향진동 모델을 고려하였다. 그림 3에는 널말뚝 시공시 지표면으로부터 널말뚝 머리까지의 자유길이에 해당하는 널말뚝에 작용하는 힘들이 나타나 있다. 그림 3에서 말뚝머리에 있는 횡방향 스프링은 횡방향 진동시 말뚝머리의 횡방향진폭을 제어하기 위한 것이다.

그림 3에서 e 는 널말뚝 단면의 중립축에서 진동항타력이 가해지는 지점까지의 편심거리를 나타낸다. 그림 3에서 말뚝머리에서의 횡방향변위량, $\Delta(t)$ 는 다음의 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\Delta(t) = \frac{3ML^2}{2k_t L^3 + 6EI} \quad (11)$$

여기서, k_t : 횡방향 스프링상수

식 (11)에서 EI 는 널말뚝의 휨강성을 의미한다. 널말뚝의 횡방향 휨에 의해 지반면으로부터 x 만큼 떨어진 미소요소에 저장되는 포텐셜에너지(dU')는 보의 휨이론을 적용하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dU' = \frac{1}{2} M(x,t) d\theta \quad (12)$$

식 (12)에서 θ 는 휨곡선의 경사(slope)를 의미한다. 널말뚝 자유길이 전체에 대하여 휨에 의해 저장되는 포텐

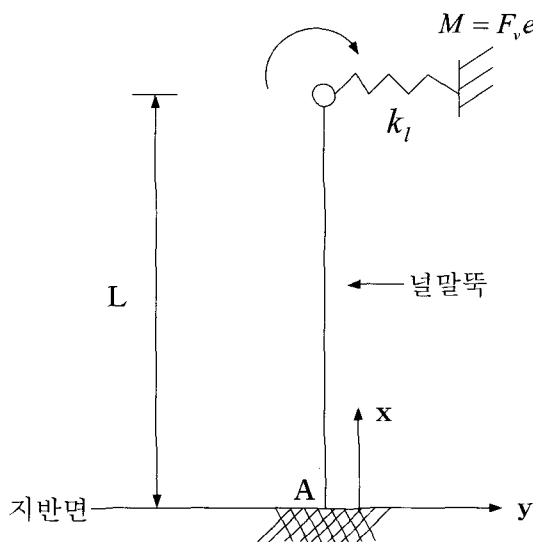


그림 3. 자유길이를 고려한 널말뚝의 횡방향 진동모델

셜에너지는 식 (12)를 널말뚝 자유길이에 대하여 적분하여 구할 수 있으며 진동타입의 한 주기를 고려하여 널말뚝의 휨에 의해 소모되는 일률($P_{U'}$)을 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{U'} = \frac{M_e^2 \omega^4 e^2 L}{4EI} \frac{1}{2k_t L^3 + 6EI} (6EI + \frac{k_t^2 L^6 - k_t L^3 (6EI)}{2k_t L^3 + 6EI}) \quad (13)$$

또한, 횡방향 스프링에 저장되는 포텐셜에너지(U'')는 식 (14)와 같다.

$$U'' = \frac{1}{2} k_t (\Delta(t))^2 \quad (14)$$

진동타입의 한 주기를 고려하여 스프링에 저장되는 에너지를 일률($P_{U''}$)로서 나타내면 식 (15)와 같다.

$$P_{U''} = \frac{9}{4} \frac{k_t M_e^2 \omega^4 e^2 L^4}{(2k_t L^3 + 6EI)^2} \quad (15)$$

따라서 횡방향 진동시스템에 저장되는 포텐셜에너지는 식 (16)과 같다.

$$P_U = P_{U'} + P_{U''} = \frac{M_e^2 \omega^4 e^2 L}{4EI} \frac{1}{2k_t L^3 + 6EI} (6EI + \frac{k_t^2 L^6 + k_t L^3 (3EI)}{2k_t L^3 + 6EI}) \quad (16)$$

한편 지반면으로부터 거리 x 만큼 떨어진 널말뚝의 미소요소에 소모되는 운동에너지(dK)는 식 (17)과 같이 표현된다.

$$dK = \frac{1}{2} \mu dx (\frac{\partial y}{\partial t})^2 \quad (17)$$

식 (17)에서 μ 는 널말뚝의 선질량밀도(linear mass density)를 나타낸다. 식 (17)을 널말뚝 자유길이에 대하여 적분하면 운동에너지를 구할 수 있으며 이에 대하여 진동타입의 한 주기를 고려하면 널말뚝의 횡방향 진동에 의한 일률 소모량(P_K)을 다음의 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$P_K = \frac{\mu M_e^2 \omega^6 e^2}{4(EI)^2} (\frac{L^5}{20} - \frac{13k_t L^8}{60(2k_t L^3 + 6EI)} + \frac{11L^7}{420} (\frac{3L^2 k_t}{2k_t L^3 + 6EI})^2) \quad (18)$$

널말뚝의 횡방향 진동으로 인해 소모되는 전체 일률(P_C)은 다음의 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_C = P_U + P_K \quad (19)$$

식 (16), (18)를 통해 알 수 있듯이 널말뚝의 횡방향진동에 소모되는 일률에 영향을 미치는 인자는 진동기 및 널말뚝의 물성값과 말뚝머리에서의 횡방향 스프링상수, k_t 이다.

3.3 횡방향진동을 고려한 진동항타력의 수정

Warrington(1989)은 정적 상재하중(bias weight)이 있는 진동타입기에 대하여 일률, N 을 식 (20)과 같이 제안한 바 있다.

$$N = \frac{M_c^2 \omega^3}{2m_v} \frac{2500}{5000 - 3000m' + 9m'^2} \quad (20)$$

여기서, m' : 질량비(= m_0/m_v)

널말뚝의 자유길이에 따른 횡방향진동을 고려한 진동항타력의 수정은 식 (20)에 나타난 일률에서 식 (19)에서 구한 일률소모량을 빼준 값이 다음의 식 (21)에 나타난 하중감소계수, C_t 를 적용하여 수정한 진동항타력을 식 (20)에 적용하여 다시 구한 일률과 같게 되는 하중감소계수값을 구하는 것이다. 따라서 하중감소계수는 횡방향 스프링상수, k_t 의 함수임을 알 수 있다.

$$F_v = C_t M_c \omega^2 \sin(\omega t) \quad (21)$$

하중감소계수가 결정되면 식 (18)에 나타난 수정 진동항타력을 진동시스템의 운동방정식을 나타내는 식 (1), (2)에 대입하여 최종적인 해를 구하도록 하였다.

4. 관입속도 예측기법

진동타입기에 의해 시공되는 널말뚝의 관입속도 예측은 수정 진동항타력을 적용한 식 (1), (2)의 해를 통해 구할 수 있는데 널말뚝의 연직방향 운동에 있어 변위방향에 따라 동적 지반저항력의 크기도 변하므로 일반적인 해석해를 구하는 것은 불가능하며 수치적분 개념을 적용하여야 한다. 즉, 일정 관입깊이에 대하여 식 (1), (2)에 나타난 운동방정식으로부터 시간에 따른 가속도(a)를 구하고 가속도를 시간에 대해 적분함으로써 속도를 구할 수 있고 다시 속도를 시간에 대해 적분함으로써 연직변위량을 구할 수 있다. 그러나 널말뚝의 관입

운동에 있어서의 정상상태(steady state)에 대한 관입속도를 구하기 위해서는 해석 초기에 관입속도를 가정해야 하고 이 관입속도를 이용하여 수치적분을 통해 계산된 관입속도가 같아질 때까지 반복계산을 수행하여야 한다.

널말뚝의 관입속도 계산을 위한 해석 흐름도는 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 n 은 해석시간 간격수를 의미하며 t 는 시간, v 는 속도, d 는 변위 그리고 a 는 가속도를 의미한다. 또한 m_{tot} 은 $m_0 + m_v + m_p$ 를 의미한다.

5. 예측기법에 의한 결과 및 현장시험결과의 비교 분석

널말뚝의 관입속도 예측을 위해 개발된 프로그램에 의한 관입속도 예측값과의 비교를 위해서 기존의 현장 시험결과를 이용하여 보았다(Viking, 2002). 기존 문헌에 나타나 있는 현장지반조건은 약 40m 깊이까지 중간 정도의 밀도를 갖거나 또는 느슨한 모래로 구성되어 있으며 지하수위는 지표면으로부터 2m 깊이에 있다. 현장지반의 입도분포는 비교적 양호하며 실트질 모래 또는 자갈질 모래로 분류된다. 현장시험시 원지반 지반조사방법으로 CPT시험이 수행되었는데 CPT 시험결과로부터 계산된 정적 선단저항력 및 주변마찰력을 프로그램의 입력자료로 하였다. 정적 단위 선단저항력 및 정적 단위 주변마찰력은 콘선단저항력 및 콘주면마찰력을 이용하여 다음의 식 (22)와 식 (23)을 통해 계산된다.

$$q_s = \frac{1}{2}(I + II) \quad (22)$$

$$\tau_s = \frac{1}{2}(2III) \quad (23)$$

식 (22)에서 I 는 널말뚝 선단과 선단에서 상부로 $b/4$ (b : 널말뚝의 폭) 길이까지의 콘선단저항력의 평균값을 나타내고 II 는 널말뚝 선단과 선단에서 하부로 $3b/4$ 길이까지의 콘선단저항력의 평균값을 나타낸다. 또한, 식 (23)에서 III 는 콘주면마찰력 측정위치를 중심으로 상하부로 $b/2$ 길이까지의 평균 콘주면마찰력을 의미한다. CPT 시험결과로부터 결정한 정적 지반저항력자료는 2cm 간격으로 그래프에 나타나 있지만 입력 데이터는 그래프로부터 10cm 단위로 읽도록 하였다. 프로그램 입

력자료를 요약하면 표 1과 같다. 현장시험시 사용된 진동타입기 종류는 MRZV 800V이며 널말뚝 시공시 시간에 따른 관입깊이 측정은 Celesco사의 깊이 측정장치(depth measuring drum)를 이용하여 하였으며 이로부터 깊이별 관입속도가 구해진다.

그림 5는 널말뚝 근입깊이 10m에 대하여 계산된 시간에 따른 가속도, 속도, 변위관계를 보여준다. 추가적으로 그림 5의 맨 앞에는 시간에 따른 불균형력의 변화 양상을 보여주고 있는데 이 값은 식 (1), (2)의 우변에서 동적 지반저항력을 제외한 값을 나타낸다.

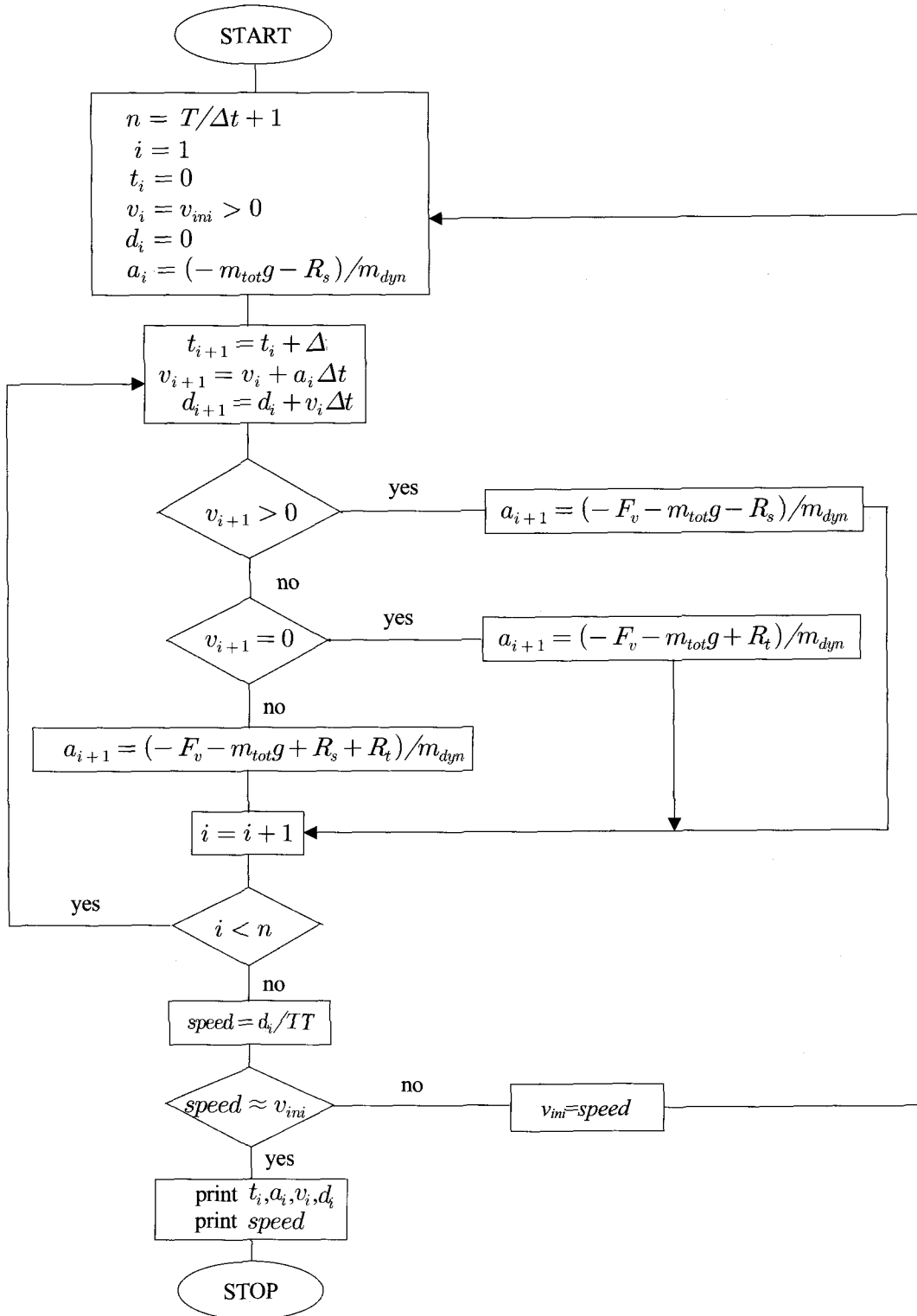


그림 4. 해석 흐름도

그림 5의 시간-가속도 관계에서 가속도가 급변하는 두 군데를 관찰할 수 있는데 이는 시간-속도 관계곡선을 통해 설명될 수 있다. 즉, 가속도가 급변하는 두 곳에 대응하는 시간은 시간-속도 관계곡선에서 속도의 방향이 변하는 시간을 의미하는데 이때에는 기진체 및 말뚝의 속도변화에 따라 식 (1), (2)에 나타낸 바와 같이 지반의 동적 저항력이 달라지게 되고 결과적으로 가속도값이 급변하게 된다. 시간-속도 관계곡선에서는 반복계산 과정을 통해 가정한 관입속도값과 한 주기가 경과한 다

음 계산된 관입속도가 같음을 확인할 수 있다. 수치적분 과정을 통한 널말뚝의 관입속도는 그림 5의 시간-변위 관계곡선에서 한 주기 경과동안 최종변위량을 주기로 나누어 구할 수 있다.

개발된 프로그램에 의한 깊이별 관입속도 계산결과를 현장시험결과와 비교하여 그림 6에 나타내었는데 하중감소계수를 고려하지 않은 경우에 대한 예측결과도 함께 나타내었다. 그림 6에는 기존의 프로그램(vipere)에 의한 해석결과도 나타나 있는데 이는 기존 자료값을

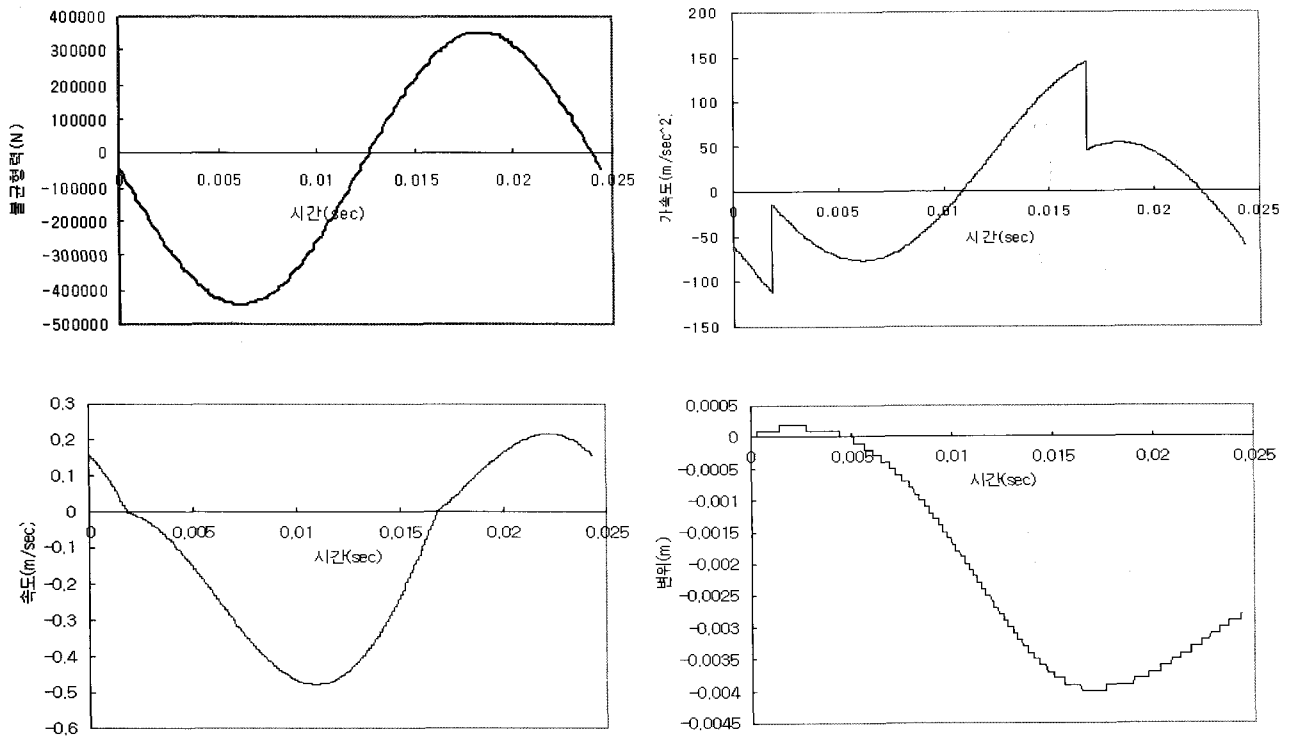


그림 5. 계산결과(z=10m)

표 1. 진동기 및 말뚝제원

구분	제원
진동기	편심 모멘트, $M_e = 6.0kgm$ 진동수, $f_d = 41Hz$ 진동기의 동적 질량, $m_v = 2450kg$ 진동기의 정적 질량, $m_o = 1020kg$
널말뚝	단면적, $A_t = 95.2cm^2$ 둘레길이, $p = 150cm$ 길이, $L = 14m$ 선질량밀도, $\mu = 72.1kg/m$ 편심량, $e = 74.2mm$ 탄성계수, $E_p = 2 \times 10^7 N/cm^2$ 단면2차모멘트, $I = 5560cm^4$

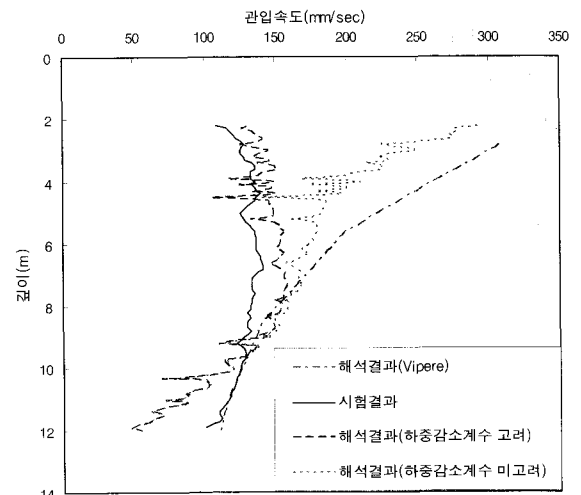


그림 6. 현장시험결과와 계산결과의 비교

그대로 인용한 것이다(Vanden Berghe, 2001).

그림 6에 나타나 있는 프로그램에 의한 해석결과를 액상화계수(L)를 10으로 하고 댐핑계수(δ)를 1.0으로 하여 계산한 결과이다. 널말뚝의 횡방향 진동에 따른 하중 감소계수 고려시에는 횡방향 스프링상수값을 5,000N/m로 하여 계산하였다. 개발된 프로그램에 의한 관입속도 예측값이 부분적으로 깊이에 따라 심하게 튀는 이유는 2cm 깊이간격으로 결정된 정적 지반저항력값을 10cm 깊이간격으로 읽어 입력자료로 했기 때문에 발생한 결과로 보인다. 그림을 통해 알 수 있듯이 기존의 프로그램(vipere) 및 개발된 프로그램에서 하중감소계수를 고려하지 않은 경우 초기 관입깊이에 대한 널말뚝의 관입속도 예측결과가 실제와 상당히 차이가 남을 알 수 있다. 하중감소계수를 적용한 경우에는 관입깊이가 작은 경우 다른 두 경우에 비해 시험결과와 상당히 유사한 값을 보이며 관입깊이 10m 이후에서는 실제보다 보수적인 결과를 보임을 알 수 있다. 하중감소계수를 적용한 경우 관입깊이 전체에 대하여 관입속도 예측값은 시험결과에 의한 값에 비해 47%~120% 정도의 값을 보인다. 특히 관입깊이 10m까지는 예측값이 시험결과에 의한 값의 77%~120%로 시험결과와 유사함을 알 수 있다. 따라서 널말뚝의 횡방향진동을 하중감소계수로 고려하여 적용하는 방법을 통해 널말뚝의 초기 관입속도를 신뢰성 있게 결정할 수 있으리라 기대된다.

6. 결론

콘관입시험결과자료와 진동타입기에 의한 진동타입과정의 합리적 모사를 통해 널말뚝의 관입속도를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 개발된 프로그램에 의한 예측결과를 문헌에 소개된 현장시험결과와 비교분석하였다. 본 연구를 통해 유도된 결론은 다음과 같다.

- (1) 널말뚝에 작용하는 지반의 동적 저항력을 콘관입시험결과를 이용하여 평가하는 방법을 적용하고 진동시스템을 수치적분법을 통해 모사하여 널말뚝의 관입속도를 평가하는 기법을 개발하였다. 개발된 기법에 있어서는 널말뚝의 초기 관입깊이에 대하여 관입속도가 과대하게 예측되는 것을 극복하기 위해 널말뚝의 횡방향 진동에 따른 역학적 에너지 손실량을 정량적으로 평가하고 이를 프로그램에 반영하도록 하였다.

- (2) 개발된 프로그램에 의한 예측결과를 기존의 현장시험결과와 비교하여 보았는데 횡방향진동에 따른 역학적 에너지 손실량을 고려한 경우 초기 관입깊이에 대해 해석을 통해 구한 널말뚝의 관입속도가 시험결과와 유사하게 나타나 횡방향 진동에 따른 에너지 손실량을 고려하는 방법을 통해 널말뚝의 관입속도가 과대하게 예측되는 것을 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 널말뚝의 횡방향 진동에 따른 에너지 손실을 고려한 경우 프로그램에 의한 예측결과를 시험결과와 비교해 볼 때 총 12m의 근입깊이에 대해 예측값은 실측값의 47%~120% 사이였으며 근입깊이 10m까지는 예측값이 실측값의 77%~120% 정도로 나타났다.
- (3) 본 연구를 통해 개발된 해석기법의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 향후 다양한 현장시험을 수행하고 그 결과를 해석결과와 비교할 필요가 있다. 특히, 지반종류별 액상화계수와 댐핑계수의 합리적 결정이 필요하며 말뚝의 횡방향 진동거동을 파악하여 지반조건별로 신뢰성 있는 횡방향 스프링상수를 결정할 필요가 있다. 그 밖에 관입속도에 영향을 주는 인자들에 대한 매개변수연구 또한 필요하다.

참고문헌

1. Barkan, D. D. (1957), "Foundation Engineering and Drilling by Vibration Method". *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.3-7.
2. Holeyman, A., (1993), *An Analytical Model-Based Computer Program to Evaluate the Penetration Speed of Vibratory Driven Sheet Piles*, Research report prepared for BBRI, HYPERVIB1, p.23.
3. Vanden Berghe, J-F. (2001), *Sand Strength Degradation within the Framework of Vibratory Pile Driving*, Ph.D. thesis presented to the Faculty of Applied Science, Universite Chatolique de Louvain., Belgium.
4. Viking, K. (2002), *Vibro-driveability, A field Study of Vibratory Driven Sheet Piles in Non-Cohesive Soils*, Ph.D. thesis, Div. of Soil and Rock Mechanics, Royal Inst. of Technology, Stockholm, Sweden.
5. Warrington, D.C. (1989), "Theory and Development of Vibratory Pile Driving Equipment". *Proceedings of the Twenty-First Annual Offshore Technology Conference*, Dallas, TX. OTC 6030, pp.541-550.
6. Wong, D., O'Neill, M. W., and Vipulanandan, C. (1992), "Modelling of Vibratory Pile Driving in Sand". *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol.16, No.4, pp.189-210.

(접수일자 2007. 8. 21, 심사완료일 2007. 11. 20)