

모래지반에 대한 강널말뚝의 진동항타거동 연구

A Study on Vibratory Behavior of Steel Sheet Pile Installed in Sand Ground

이 승 현¹ Lee, Seung-Hyun

이 중 구² Lee, Jong-Ku

유 완 규³ Yoo, Wan-Kyu

김 병 일⁴ Kim, Byoung-Il

Abstract

Behaviors of instrumented steel sheet piles which are installed in sand ground by vibratory hammer were investigated. Especially, stresses acting on the pile during vibratory driving, efficiency factor which reflects differences between theoretical driving force and actually delivered acting force, justifiability of rigidity of steel sheet pile, dynamic resistance characteristics of soil and penetration characteristics of sheet pile were analysed. According to the field test results it is justifiable that steel sheet pile behaves as a rigid body during vibratory driving. And it can be seen that maximum stress acting on sheet pile section is far less than tensile strength of the material. Value of the maximum section force at sheet pile head was 72% of that estimated from theoretical equation. Magnitudes of displacement amplitudes computed from displacement-time history curve corresponding to four penetration depths were in the range of 16~75% of that specified by manufacturer.

요 지

모래지반에 대하여 계측기를 부착한 강널말뚝을 진동항타하고 항타과정을 통해서 계측된 자료를 분석하여 진동항타시 강널말뚝의 진동항타거동을 살펴보았다. 특히, 강널말뚝에 대한 진동항타시 말뚝에 작용하는 응력, 이론적인 항타력과 실제 말뚝에 전달되는 힘의 차이를 반영하는 효율계수, 강널말뚝의 강체거동 여부, 지반의 동적 저항특성, 강널말뚝의 관입특성 등을 분석하였다. 강널말뚝의 진동관입시 말뚝은 거의 강체로 거동하였으며 말뚝머리부에 작용하는 응력의 최대값은 재료의 인장강도보다 상당히 작았다. 진동관입중 실제 말뚝머리부에 전달되는 최대하중은 이론식에 의해 계산된 값의 72% 정도였다. 가속도-시간이력곡선으로부터 4개의 관입깊이에 대해 유도된 변위-시간이력곡선에서의 변위진폭값은 진동기 공운전시의 진폭값의 약 16~75% 정도인 것으로 나타났다.

Keywords : Displacement amplitude, Maximum section force, Rigid body, Sheet pile, Vibratory driving

1. 서 론

말뚝을 지중에 설치하는 다양한 방법중 하나인 진동타입방법은 진동항타기에 연결된 말뚝에 연직방향으로의 진동력을 가하여 타입하는 방법이다. 총격식 타입방

법에 비해 진동항타방법의 장점으로는 소음이 적다는 점과 말뚝에 가해지는 응력이 작아 말뚝재료의 파손이 작다는 점 그리고 진동타입에 적합한 지반에 대해서 상당히 빠른 속도로 관입이 가능하다는 점 등을 들 수 있다. 국내에서도 진동항타기의 사용이 빈번히 이루어

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

2 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 (Member, Associative Researcher, RIST Steel Structure Research Lab.)

3 정회원, 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., MyongJi Univ.)

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

어지고 있으나 지반조건에 따른 진동항타기의 선정은 주로 경험에 근거하고 있는 실정이다. 1930년대 초 진동항타기가 처음으로 쓰이기 시작하였는데 Barkan(1957)은 말뚝의 진동항타거동에 미치는 영향인자들을 조사한 바 있다. 이들 영향인자들로는 진동기의 진동가속도, 변위진폭, 진동수, 정적 상재하중, 말뚝 단면적, 흙의 입경, 내부마찰각 등을 들 수 있다.

진동항타에 따른 말뚝거동연구와 관련하여 해외에서 연구사례(Jonker, 1987; Warrington, 1989; Roger & Littlejohn, 1980; Holeyman, 1993)는 다수 있으나 그 중 현장시험연구는 많지 않아 진동타입말뚝의 항타거동이 명백히 규명되어 있지 않다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 모래지반에 대하여 계측기를 부착한 강널말뚝을 진동항타하고 항타과정을 통해서 계측된 자료를 분석하여 진동항타시 강널말뚝의 진동항타거동을 살펴보았다. 특히, 강널말뚝에 대한 진동항타시 말뚝에 작용하는 응력, 이론적인 항타력과 실제 말뚝에 전달되는 힘의 차이를 반영하는 효율계수, 강널말뚝의 강제거동 여부, 지반의 동적 저항특성, 강널말뚝의 관입특성 등을 분석하였다.

2. 진동항타기의 작동원리 및 관입운동 특성

진동항타기는 작동방식에 따라 전기식과 유압식이 있는데 대부분 진동항타기의 진동수는 5-40Hz 범위에서 운용되며 이들 항타기는 저진동수 항타기로 분류된다 (Wong, et al. 1992). 그림 1에는 일반적인 진동항타기를

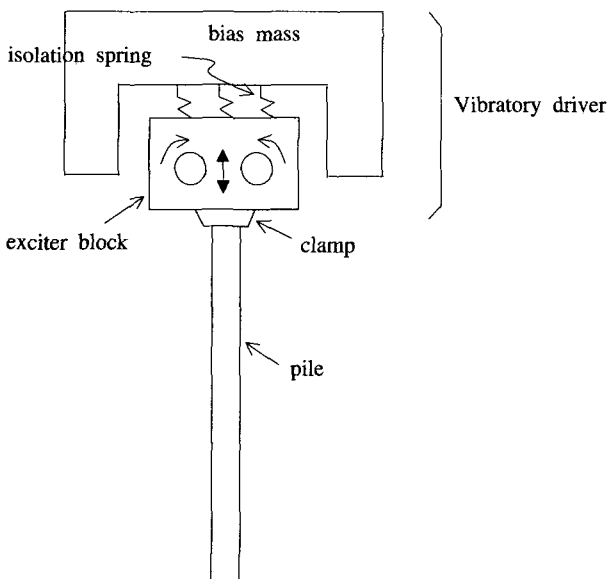


그림 1. 진동항타기의 구성

구성하는 구성요소들이 나타나 있는데 진동항타기는 크게 기진력을 발생시키는 기진체와 진동의 영향을 받지 않도록 고안된 정적 상재하중 그리고 기진체와 말뚝을 연결하는 클램프로 구성되어 있다.

기진체는 서로 반대방향으로 회전운동하는 질량체로 인해 진동하면서 말뚝에 항타력을 가하게 된다. 또한 기진체와 정적 상재하중은 스프링으로 연결되어 정적 상재하중부분은 진동하지 않게 되어 있다. 진동항타에 의해 말뚝에 작용하는 힘(F_d)을 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$F_d = F_0 + F_v = F_0 + M_e w^2 \sin(\omega t) \quad (1)$$

여기서, F_d : 진동항타력(driving force)

F_0 : 정적 상재하중(static surcharge force)

F_v : 불균형력(unbalanced force)

M_e : 회전 질량체에 의한 편심모멘트(eccentric moment)

w : 회전 질량체의 회전 각속도(angular velocity)

t : 시간

말뚝의 진동항타 관입성에 영향을 미치는 요인은 크게 진동항타기, 말뚝 그리고 지반조건으로 나눌 수 있다. 진동항타기에 관련된 요소로서는 정적 상재하중의 크기, 진동수, 편심모멘트의 크기, 변위진폭 그리고 항타장비의 효율 등을 들 수 있다. 진동항타 관입성에 영향을 미치는 요인 중에서 말뚝에 관련된 요소는 말뚝의 형상, 클러치 마찰력 그리고 항타중 말뚝의 종방향과 횡방향거동특성 및 휨거동특성을 들 수 있다. 그리고 지반에 관련된 요소로는 진동에 따른 흙입자의 반복운동특성, 초기 상대밀도, 액상화현상 등을 들 수 있다. 지반의 동적 저항특성에 관해서는 콘관입시험결과를 이용하는 방법(Holeyman, 1993)과 하중전이함수를 이용하여 결정하는 방법(Cudmani, et al. 2002) 등이 있다. 진동항타 관입시 진동항타력과 관입운동 사이의 관계를 나타내면 그림 2와 같다.

그림 2를 통해 알 수 있듯이 이론적인 진동항타력은 말뚝에 하향의 힘을 작용시키며 정적 상재하중을 지나 는 수평축에 대하여 시간에 따라 정현파 거동을 하게 된다. 진동항타력의 작용에 따른 말뚝의 관입운동 또한 진동항타력과 동일한 주기운동을 하게 되며 짧은 시간 범위내에서 일정한 관입속도로 운동하게 된다. 그림 2

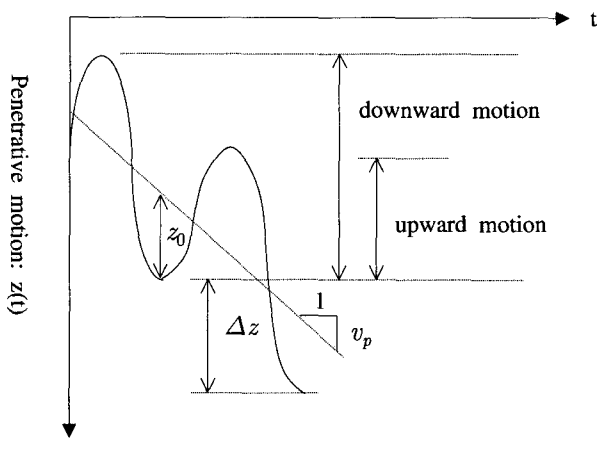
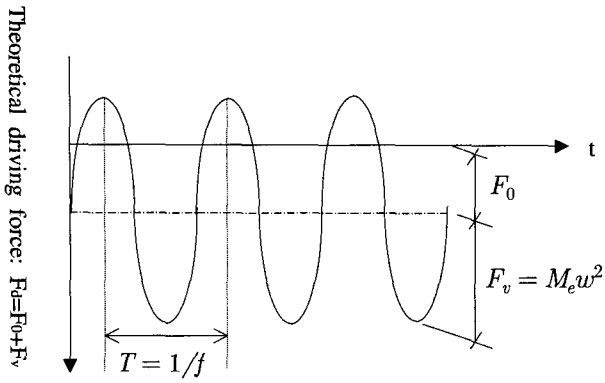


그림 2. 진동항타력과 관입운동 사이의 관계

에서 z_0 는 변위진폭을 나타내고 Δz 는 영구변위량을 의미하며 v_p 는 관입속도를 나타낸다.

3. 현장시험

진동항타기에 의한 타입시 강널말뚝의 진동항타거동특성을 살펴보기 위하여 위하여 현장시험을 수행하였다.

3.1 지반조건

현장시험대상 지반은 하천제방을 구성하는 모래지반으로서 과거 표준관입시험결과를 통해 구한 토질주상은 그림 3과 같다. 현장모래를 채취해 얻은 입도분포곡선은 그림 4와 같으며, 입도분포곡선을 참조하여 통일분류법으로 현장지반을 분류하면 SP로 분류된다.

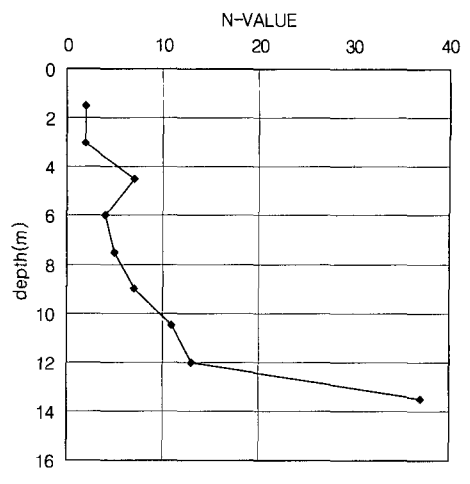


그림 3. 시험대상지반의 N값 분포

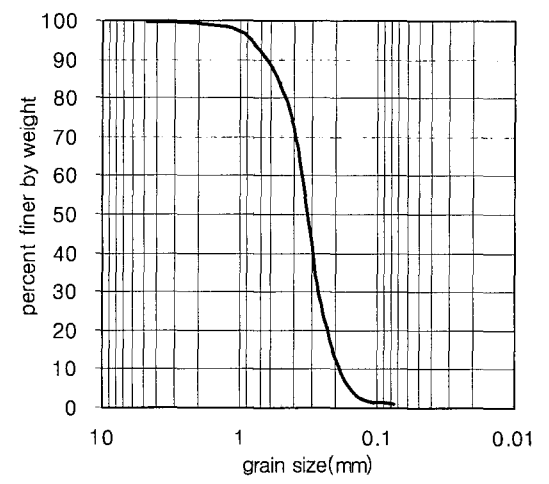


그림 4. 입도분포곡선

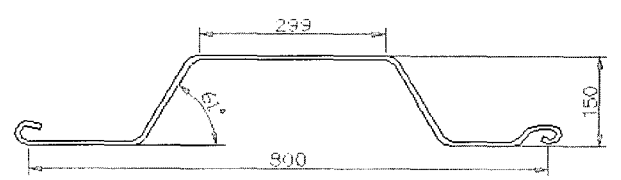


그림 5. 현장시험에 사용한 강널말뚝

3.2 시험말뚝 및 항타장비

현장시험에 적용한 강널말뚝은 그림 5와 같이 U형으로서 단면적은 88.10cm^2 이고 단위길이당 무게는 69.1kg/m 이다. 시험에 사용된 강널말뚝의 길이는 12m이며, 현장시험시에는 가속도계와 변형률계 그리고 깊이 측정장치를 이용하여 항타거동을 분석하였다. 한편, 강널말뚝의 진동항타에는 전기식 진동해머 모델인 FM2-80해머가 사용되었는데 해머의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 해머제원

항목	값
출력	60 kW
편심모멘트	36.0 kg·m
진동수	18.33 Hz
기진력	48.7 ton
전체중량	4750 kgf
진동중량	3800 kgf
공운전시 진폭	9.5 mm
공운전시 가속도	12.8 g

3.3 계측기

강널말뚝의 진동향타거동을 파악하기 위해 변형률계와 가속도계 그리고 깊이 측정장치를 사용하였다. 변형률계는 진동향타시 강널말뚝에 작용하는 단면력을 파악할 목적으로 사용되었으며, 가속도계는 강널말뚝의 가속도를 측정하기 위해 사용되었다. 또한 깊이 측정장치는 향타시간에 따른 강널말뚝의 관입깊이를 측정하기 위해 사용되었다. 사진 1은 시험에 사용된 계측기들

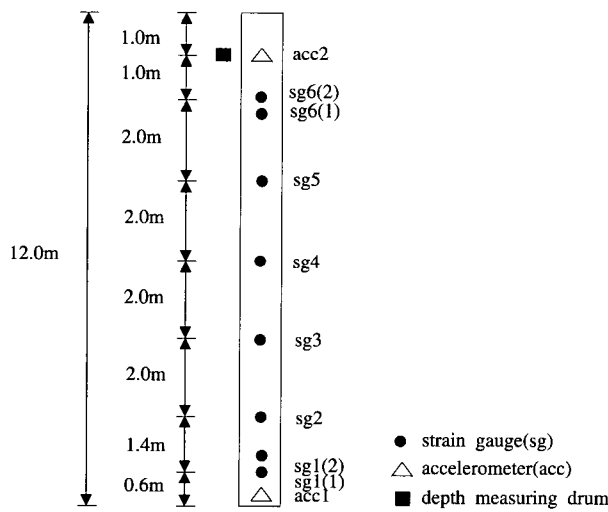
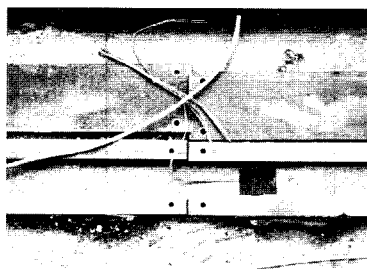
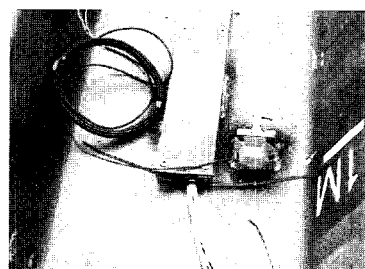


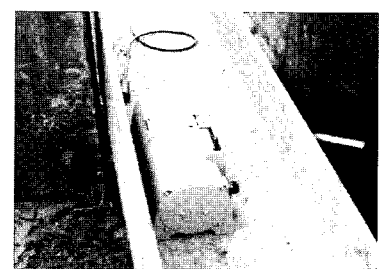
그림 6. 계측기 및 설치위치



(a) 변형률계



(b) 가속도계



(c) 깊이 측정장치

사진 1. 계측기

이 설치된 모습이며, 변형률계와 가속도계는 강널말뚝의 복부에 부착하였고 보호관으로 덮어 향타 중 손상을 방지하도록 하였다.

계측에 사용된 가속도계의 측정범위는 50g이며 깊이 측정장치의 측정범위는 25.4m이다. 계측기들을 통해 측정된 전기신호는 동적 데이터 수집장치를 통해 수집되는데 데이터 획득은 500Hz로 하였다. 각각의 계측기 설치위치는 그림 6에 나타나 있는데 말뚝두부 근처와 선단근처에 각각 2개의 변형률계를 설치하였고 말뚝두부와 선단 사이에 4개의 변형률계를 설치하였다. 가속도계는 말뚝의 두부 및 선단부에 설치하였다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시간-관입깊이 관계 및 관입속도-관입깊이 관계

강널말뚝에 부착한 깊이 측정장치를 통해 측정한 시간-관입깊이 관계는 그림 7과 같고 그림 7을 통해 구한 관입속도-관입깊이 관계는 그림 8과 같다. 그림 8에서의 관입속도는 시간-관입깊이 측정자료로부터 8초 동안의 관입속도를 평균한 것이다.

그림 7에서 관입깊이 약 1.2m까지의 곡선기울기는 이후의 기울기보다 작음을 알 수 있는데 이러한 원인에 대해서 Viking(2002)은 관입초기에는 해머에 의한 에너지가 말뚝을 연직방향으로만 관입시키는데 쓰이지 않고 횡방향으로 힘을 발생시키는데도 쓰이기 때문이라고 설명하였다. 한편, Rao(1993)는 진동향타시 관입성 기준을 다음의 표 2에서와 같이 관입속도(v_p)로 분류하였다. 그림 8에 나타낸 깊이에 따른 관입속도는 표 2와 비교할 때 대체로 22mm/sec 이상으로서 Rao(1993)가 제시한 관입성 기준에 따르면 “비교적 쉽게(fairly easy) 관입” 또는 “쉽게(easy) 관입”으로 분류할 수 있다.

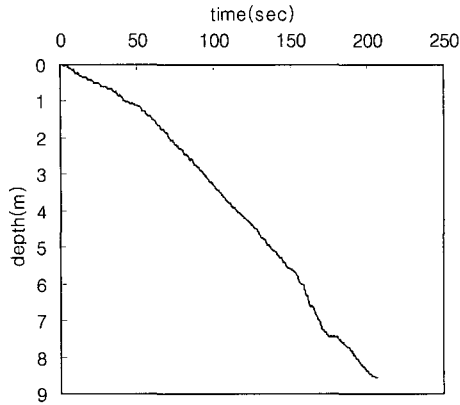


그림 7. 시간-관입깊이 관계

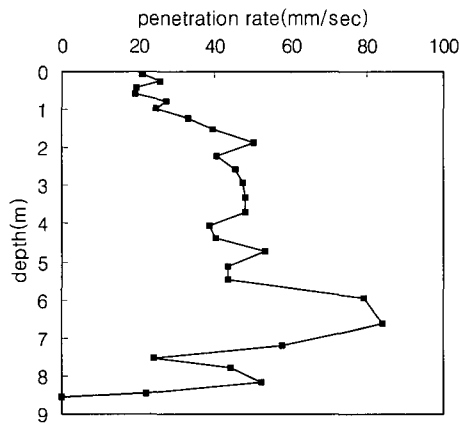


그림 8. 관입속도-관입깊이 관계

표 2. 향타관입성 기준(관입속도 단위는 mm/sec)

관입이 어려움(hard)	비교적 쉬움(fairly easy)	쉬움(easy)
$v_p < 22$	$22 < v_p < 60$	$v_p > 60$

4.2 힘과 가속도

4.2.1 관입깊이에 따른 침두 단면력과 침두 가속도

강널말뚝의 관입에 따라 널말뚝에 발생하는 단면력의 크기 및 변화양상을 알아보기 위해 설치한 변형률계로부터 관입깊이에 따른 변형률값을 측정하고 이들 값으로부터 데이터 필터링 과정을 거쳐 관입깊이에 따른 침두 변형률값을 단면력으로 환산하여 구한 값들이 그림 9에 나타나 있다. 그림 9에서 정(+)의 값은 인장력을 의미하고 부(-)의 값은 압축력을 의미한다. 또한 그림 9는 그림 6에 나타난 변형률계 설치위치에 따라 널말뚝 두부에서부터 시작하여 선단쪽으로 설치된 변형률계 순(sg6, sg5.....)으로 단면력-관입깊이 관계를 나타낸 것이다. 말뚝두부와 선단부에는 두 개의 변형률계를 설치하였으므로 그림 9(a)와 그림 9(f)에는 두 개의 측정값이 음영으로 구분되어 나타나 있다. 그림 9(a)에 나타나 있

는 바와 같이 말뚝 관입깊이에 따른 말뚝머리에서의 침두 단면력 분포양상은 일반적으로 예상되는 바와 같이 관입깊이가 증가됨에 따라 지속적으로 증가하는 양상을 보이지 않고 관입깊이에 따라 곡선분포를 보인다. 이러한 경향은 기존의 현장시험결과(Viking, 2002)에서도 관찰되는 사실로서 관입깊이에 따른 국부적인 지반밀도의 차이 등에 의한 결과로 추정해볼 수 있으나 시험위치에서 실시된 지반조사자료를 포함한 추가적인 현장시험을 통해 명백한 원인규명이 가능하리라 기대된다.

또한 관입시 널말뚝의 가속도를 두부와 선단부에 설치한 가속도계를 통하여 얻었으며 침두 가속도를 관입깊이에 대해 나타내면 그림 10과 같다. 그림 10에서 정(+)의 가속도값은 연직하향을 의미하고 부(-)의 가속도값은 연직상향을 의미한다.

그림 9에서 침두 단면력값은 진동에 따라 정(+)의 값과 부(-)의 값이 반복적으로 나타남을 알 수 있고 대체로 좌우대칭형태를 띠고 있다. 또한 말뚝두부에서 선단부로 갈수록 단면력이 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 그림 9(a)와 관련하여 침두응력 중 최대값은 744kg/cm^2 으로서 강널말뚝 강재의 항복강도인 4500kg/cm^2 의 16.5%에 해당한다.

그림 10에 나타난 깊이에 따른 침두 가속도값은 대체로 10g 근처의 값을 나타냄을 알 수 있으며 말뚝 두부에서의 측정값과 선단에서의 측정값의 차이는 0~1.64g 정도에 불과하다. 말뚝두부와 선단에서의 가속도 값의 차이가 거의 없다는 사실은 향타중 강널말뚝이 거의 강체로 거동한다는 사실을 나타낸다. Viking & Bodare(1998)은 말뚝을 진동타입하는 경우 강체로 간주할 수 있는 기준을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$T/4 \geq 2t_n \quad (2)$$

여기서, T 는 진동주기를 의미하고 t_n 은 응력파가 말뚝을 한번 왕복하는데 걸리는 시간, 그리고 L 은 말뚝길이를 의미한다. 응력파가 말뚝을 한번 왕복하는데 소요되는 시간은 $2L/c$ 이며, 이 때 c 는 응력파속도를 의미하고 강재의 경우 그 값은 약 5100m/sec 이다. 현장시험에 적용한 향타시스템에 대해서 $T/4$ 는 0.014sec 이며, $2t_n$ 은 0.0094sec 이므로 Viking & Bodare(1998)이 제안한 강체 기준을 만족한다고 볼 수 있다. 강널말뚝의 강체로서의 고려는 연직방향의 거동에 국한되는 것으로 횡방향 휨 거동 및 뒤틀림거동과는 구분할 필요가 있다.

Moulai-Khatir 등(1994)은 진동향타시의 효율계수(effi-

ciency factor, ξ)를 진동항타시 이론적으로 말뚝에 전달되는 힘에 대하여 실제로 말뚝에 전달되는 힘으로 정의하였으며, 그 값은 $0.2 < \xi < 0.25$ 정도라고 하였다. Viking(2002)은 현장시험을 통해 효율계수를 알아보았는데 그 값은 0.39였다. Viking(2002)은 이론적으로 말뚝에 전달되는 힘과 실제 말뚝에 전달되는 힘 사이의 차이를 말뚝의 횡방향운동(lateral motion)에 따라 상당량의 에너지가 손실된 때문으로 설명하고 있다. 진동항타시 널말뚝의

두부에 전달되는 이론적인 힘의 침투값을 계산하여 이번 시험에서 얻은 계측값과 비교하여 보았다. 널말뚝의 두부에 전달되는 힘의 침투값(F_d)은 이론적으로 그림 11을 참조하여 식 (3)과 같은 운동방정식을 이용하여 구하였다.

$$F_0 + m_v g + M_e w^2 + m_e a - F_d = 0 \quad (3)$$

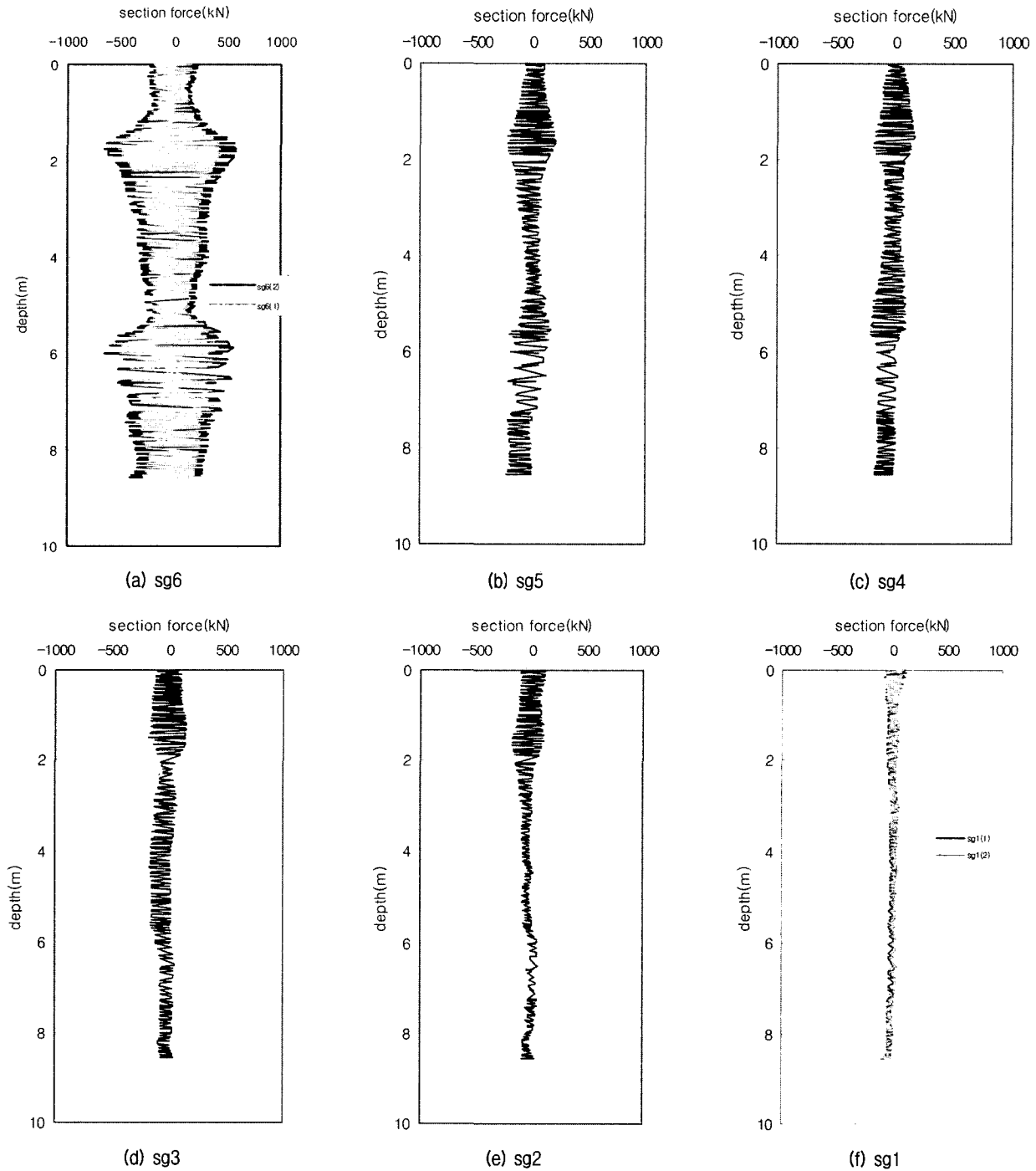


그림 9. 침투 단면력-관입깊이 관계

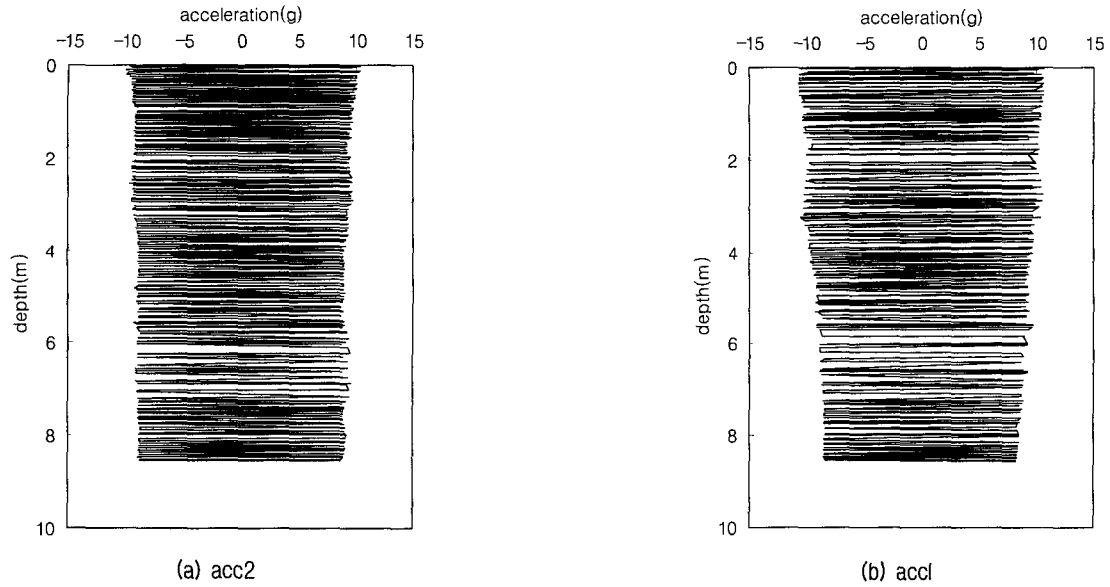


그림 10. 첩두 가속도-관입깊이 관계

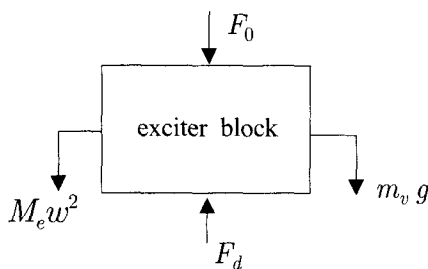


그림 11. 진동기에 작용하는 여러 힘들(첩두하중 작용시)

식 (3)에서 m_v 는 클램프 질량을 포함한 기진체 질량을 의미하며, g 는 중력가속도를, 그리고 a 는 기진체의 가속도를 의미한다. 현장시험에 사용된 FM2-80 해머에 대해 운동방정식을 적용하여 첩두하중을 계산하면 다음과 같이 계산된다.

$$F_d = 9500/1000 + 3800(10)/1000 + 36(2\pi \times 18.33)^2/1000 + 3800(10^2)/1000 = 905kN$$

계산과정에서 기진체의 가속도(a)값은 계측을 통해 구한 값 10g로 보았다. 그림 9(a)에 나타난 첩두 단면력-관입깊이 관계에서 널말뚝에 작용하는 최대 첩두 단면력을 구하면 변형률계 sg6(1)에 대하여 527kN으로 계산되고 말뚝의 가장 위쪽에 설치한 sg6(2)에 대하여 656kN으로 계산된다. 이들 값들은 각각 운동방정식에 의한 값의 약 58% 및 72%에 해당하는 값이다. 또한 변형률계 sg5에 의한 최대 첩두 단면력은 231kN으로서 운동방정식에 의한 값의 약 26%에 해당한다.

강널말뚝 머리부에 대해서 이론적으로 말뚝에 전달되는 힘과 실제 측정된 힘 사이의 차이를 반영하는 효율계수는 Moulai-Khatir 등(1994)에 의한 값보다 상당히 크게 계산되는데 이러한 원인은 변형률계(sg6(1), sg6(2))가 설치된 위치가 클램프 속으로 물리는 말뚝길이를 제외하고 볼 때 클램프 끝단으로부터 약 1.6m 아래에 있어 클램프에 의한 고정단 효과 때문에 횡방향운동 및 비틀림이 그 아래부분의 말뚝보다 상대적으로 제한되었기 때문으로 생각되며, 또한 변형률계를 강널말뚝의 복부에만 설치했기 때문에 추가적인 휨응력도 작용했을 것으로 생각된다. 그림 9에 나타나 있는 바와 같이 강널말뚝 머리부에 설치한 변형률계에 의한 단면력 값과 그 바로 아래에 설치한 변형률계(sg5)에 의한 단면력 사이에 상당한 차이가 발생하는 주된 원인은 변형률계 sg5를 설치한 위치에 있어 말뚝의 횡방향운동과 뒤틀림이 상대적으로 크게 발생한 때문으로 생각된다.

4.2.2 시간에 따른 동적 저항력과 가속도 및 변위

강널말뚝의 진동관입시 시간에 따른 동적 지반저항력과 강널말뚝의 변위거동 양상을 파악하고자 관입깊이 2m, 4m, 6m 그리고 8m에 대하여 시간에 따른 동적 저항력과 변위 거동양상을 살펴보았다. 고려한 시간 범위는 강널말뚝의 전체적인 관입속도(global rate of penetration, v_p)가 일정한 0~0.25sec 범위를 고려하였다. 시간에 따른 동적 선단저항력과 주면마찰력을 계산하기 위하여 그림 12와 같은 하향운동 및 상향운동시의

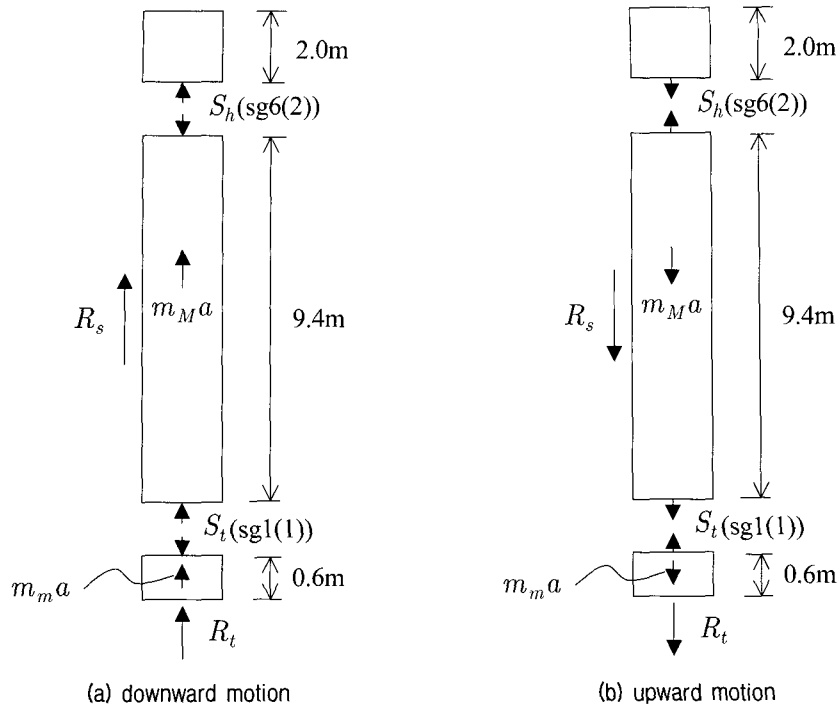


그림 12. 동적 지반저항력 계산을 위한 자유물체도

자유물체도를 고려하였다. 그림 12는 강널말뚝 머리에서 2m 아래 위치에 설치한 변형률계(sg6(2))와 강널말뚝 선단에서 0.6m 위에 설치한 변형률계(sg1(1))를 기준으로 하여 강널말뚝을 3개의 요소로 나누어 작용힘들을 표시한 것이다.

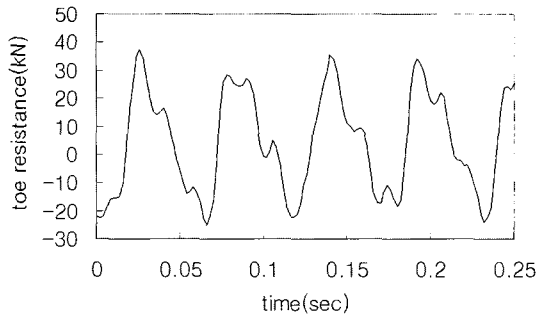
그림 12에서 S_h 와 S_t 는 강널말뚝 두부와 선단에서 변형률계를 이용하여 측정된 단면력을 의미하고 m_m 와 $m_M a$ 는 각각 그림 12에 나타난 말뚝길이에 대응하는 강널말뚝의 질량을 의미한다. 또한 a 는 가속도를 의미하는데 R_t 값의 계산시에는 그림 6에 나타난 가속도계, acc1의 측정값을 이용하였고 R_s 값의 계산시에는 acc1과 acc2 측정값의 평균값을 이용하였다.

강널말뚝의 관입깊이 2m, 4m, 6m 그리고 8m에 대하여 그림 12의 자유물체도에 대한 운동방정식으로부터 계산한 시간-동적 선단저항력 관계 및 시간-동적 주변마찰력 관계를 나타내면 각각 그림 13 및 그림 14와 같다. 그림 13과 그림 14에서 정(+)의 값은 연직상향을 의미한다.

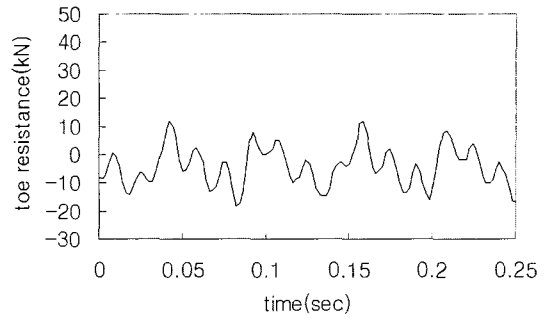
그림 13과 그림 14를 비교하여 볼 때 동적 선단저항력의 경우 불규칙한 파형이 상당히 첨가되어 있음을 알 수 있는데 이는 변형률계 자체의 불안정성을 반영한 결과로 판단된다. 그림 13에 나타난 동적 선단저항력의 침투깊의 크기를 그림 9(a)에 나타난 말뚝머리에서의 침투 단면력의 분포양상과 비교하여 보면 관입깊이에 따

른 상대적인 힘들의 크기에 있어서 관입깊이 6m일 때를 제외하고는 말뚝머리에서의 침투 단면력의 크기와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 그림 14에 나타난 동적 주변마찰력의 침투깊의 크기는 그림 12를 참조로 하여 구해진 값이므로 관입깊이에 따른 상대적인 힘들의 크기에 있어서 그림 9(a)에 나타난 말뚝머리에서의 침투 단면력의 분포양상과 일치한다. 또한 파형이 매끄러운 이유는 말뚝머리에서의 침투 단면력의 파형이 매끄럽고 상대적으로 침투 단면력에 비해 동적 선단저항력이 상당히 작기 때문에 그림 13의 노이즈(noise)가 심한 파형이 동적 주변마찰력의 값에 큰 영향을 미치지 못했기 때문이다.

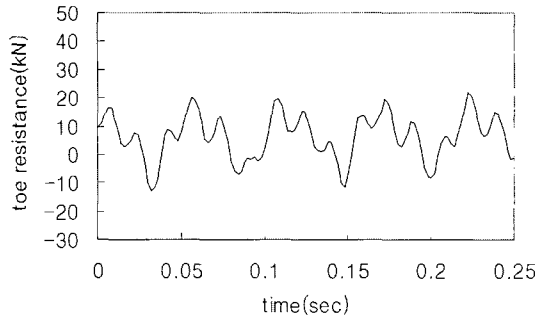
진동타입시 강널말뚝의 변위거동을 살펴보기 위해 강널말뚝 머리부에 설치한 가속도계(acc2)를 통해 측정된 가속도를 사다리꼴 법칙을 써서 시간에 따라 두 번 적분하여 변위를 구하였다. 실제 적분을 수행하기에 앞서 시간-가속도 이력이 시간축을 따라 대칭적으로 나타나는지를 먼저 검토하여 그렇지 않은 경우에 영점보정을 한 후 적분을 수행하여 속도-시간이력 곡선을 구하였다. 시간-변위 이력곡선을 구하기 위한 시간-속도 이력의 적분에 앞서 시간-가속도 이력곡선에 대한 방법과 동일한 방법으로 영점보정을 실시하였다. 최종적인 시간-변위 이력곡선은 보정한 속도에다 깊이측정장치의 계측치를 통해 얻은 속도(v_p)를 더한 후 고려한 시간범위



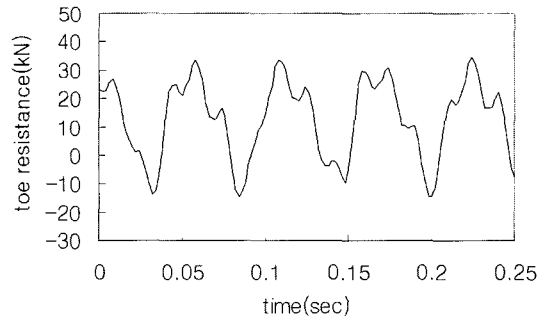
(a) depth=2m



(b) depth=4m

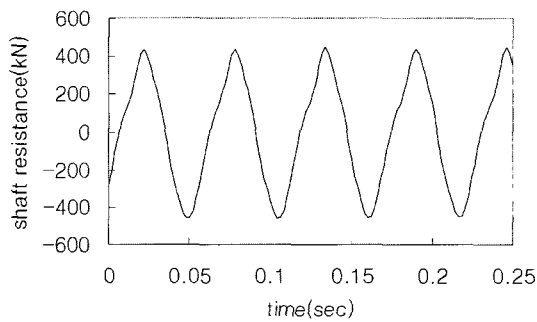


(c) depth=6m

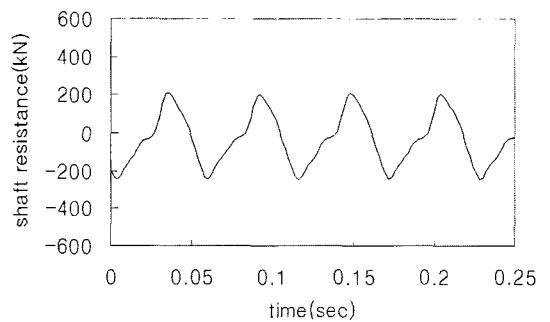


(d) depth=8m

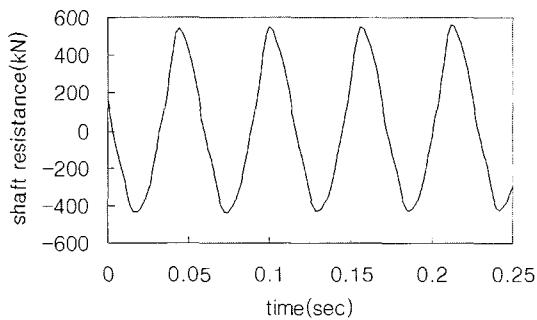
그림 13. 시간-동적 선단저항력 이력곡선



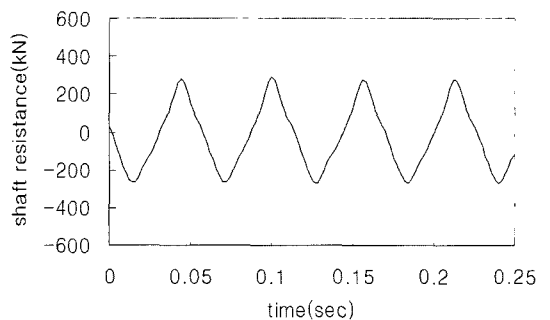
(a) depth=2m



(b) depth=4m



(c) depth=6m



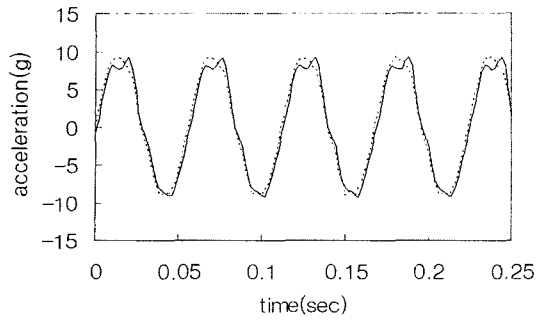
(d) depth=8m

그림 14. 시간-동적 주면마찰력 이력곡선

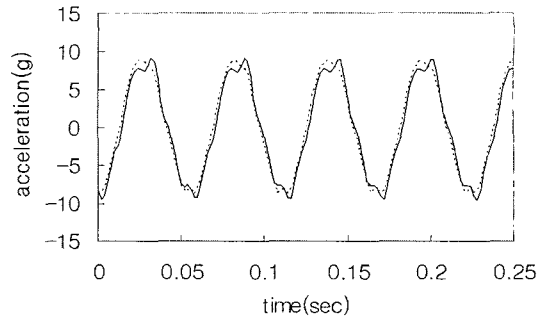
에 대해 적분을 수행하여 구하였다. 얻어진 시간-가속도 이력곡선과 시간-변위 이력곡선은 그림 15 및 그림 16과 같다. 그림 15에서 실선은 강널말뚝 선단부에 설치한 가속도계(acc1)을 의미하고 점선은 머리부에 설치한 가

속도계(acc2)를 의미한다.

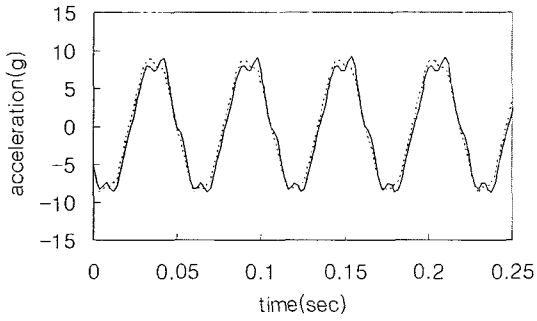
그림 15에 나타낸 시간-가속도 이력곡선을 통해 볼 때 관입깊이에 따라 시간에 따른 가속도값의 크기는 거의 같음을 알 수 있다. 또한 강널말뚝 머리부와 선단부



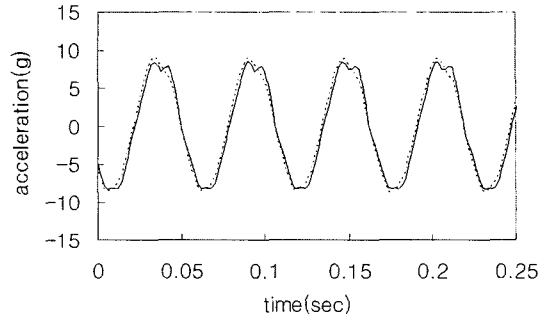
(a) depth=2m



(b) depth=4m

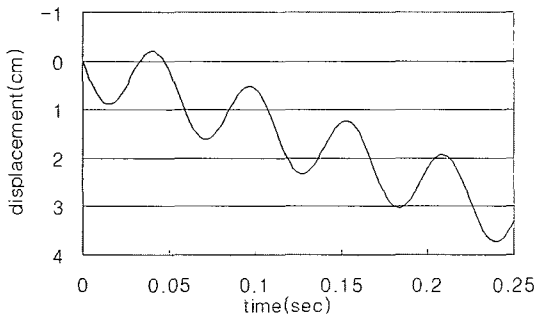


(c) depth=6m

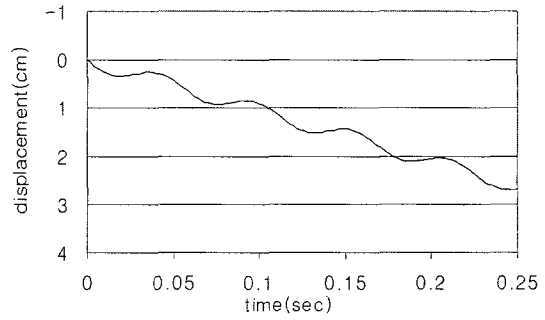


(d) depth=8m

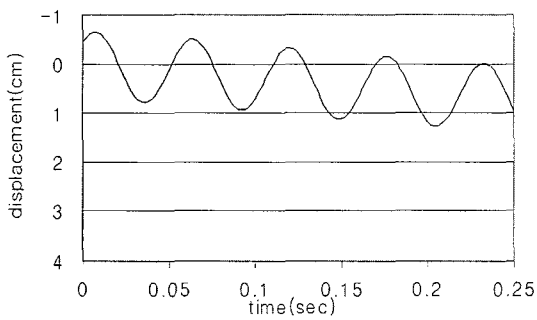
그림 15. 시간-가속도 이력곡선



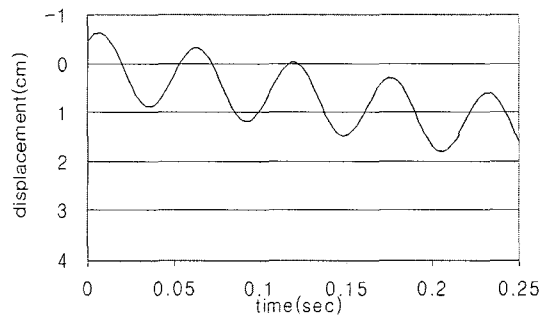
(a) depth=2m



(b) depth=4m



(c) depth=6m



(d) depth=8m

그림 16. 변위-시간 이력곡선

에 설치한 가속도계로부터 측정된 가속도값도 거의 일치함을 알 수 있어 시험에 사용된 강널말뚝이 거의 강체로 거동한다는 사실을 뒷받침하고 있다. 그림 16에 나타난 시간-변위 이력곡선으로부터 그림 2를 참조하여 깊

이별 변위진폭(z_0)과 영구변위량(Δz)을 구해 보았는데 이를 표 3에 정리하였다.

표 3에 나타난 변위진폭값은 현장시험에 사용된 FM2-80해머의 공운전시 진폭(9.5mm)의 약 16~75% 사이의

표 3. 관입깊이별 변위진폭과 영구변위량

관입깊이(m)	변위진폭(z_0), mm	영구변위량(Δz), mm
2	7.1	7.1
4	1.5	5.8
6	6.9	1.9
8	7.1	3.0

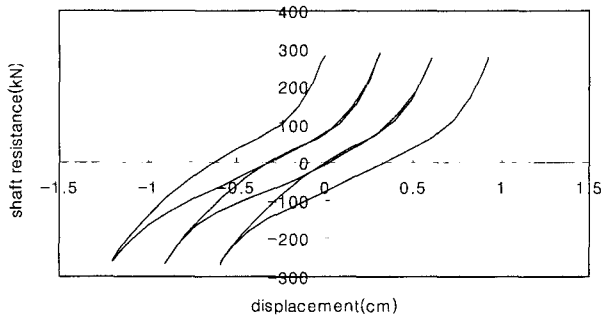


그림 17. 동적 주면마찰력에 대한 하중전이곡선($z=8m$)

값을 나타내어 관입깊이에 따라 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 또한 표 3을 통해 알 수 있듯이 변위진폭의 크기와 영구변위량 사이의 특정한 상관관계를 찾을 수 없다. 관입깊이 8m에 대하여 그림 16(d)의 시간-변위 이력곡선과 그림 14(d)의 시간에 따른 동적 주면마찰력 곡선으로부터 동적 주면마찰력에 대한 하중전이곡선을 구해 보았는데 그림 17과 같다.

그림 17은 강널말뚝의 관입시 주기운동에 따라 연직하향의 침투변위 도달시에 연직상향의 침투 주면마찰력이 발생한다는 가정하에 그림 16(d)와 그림 14(d) 사이의 위상차(phase lag)를 보정하여 유도된 것으로 침투변위와 침투 주면마찰력 사이의 관계가 명확히 밝혀진다면 신뢰성 있는 하중전이곡선을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 동적 선단저항력에 대한 하중전이곡선은 그림 13을 통하여 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 노이즈(noise)가 심하여 뚜렷한 경향성을 파악하기 힘들어 나타내지 않았다.

5. 결론

모래지반에 대하여 계측기를 부착한 강널말뚝을 진동향타하고 향타과정을 통해서 계측된 자료를 분석하여 진동향타시 강널말뚝의 진동향타거동을 살펴보았다. 현장시험결과분석을 통해 유도된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 강널말뚝 관입시 말뚝머리부에 설치한 변형률계로부터 측정된 최대응력값은 현장시험에 사용된 강널말뚝 강재 항복강도의 16.5%에 해당되어 극히 제한된 조건에서 유도된 결론이기는 하나 진동향타기에 의한 말뚝 타입시 우려할 만한 응력발생이 없음을 알 수 있었다.
- (2) 강널말뚝의 머리부와 선단부에 설치한 가속도계를 이용하여 측정된 가속도값에 큰 차이를 보이지 않는 사실로부터 현장시험에 적용한 널말뚝이 거의 강체로 거동한다는 사실을 확인할 수 있었으며 이에 따라 널말뚝의 관입운동 중의 하중분석방법에도 신뢰성이 있다고 볼 수 있다.
- (3) 강널말뚝의 진동향타관입시 강널말뚝 머리부에 작용하는 최대하중을 이론식으로 구하고 이를 계측값과 비교하였는데 말뚝머리부에 설치한 두 개의 변형률계에 의한 침투하중은 이론식에 의한 값의 58% 및 72% 정도였다. 이러한 이론식에 의한 하중과 측정값 사이의 차이는 널말뚝에 설치한 변형률계의 설치위치에 따라 발생한 것으로 생각되는 휨응력의 영향과 진동향타에 쓰이는 에너지의 상당량이 널말뚝의 횡방향운동과 뒤틀림을 발생시키는데 쓰인 영향이 복합적으로 작용한 결과로 생각된다.
- (4) 관입깊이 2m, 4m, 6m, 8m에 대하여 시간-가속도 이력관계로부터 강널말뚝의 연직변위거동을 유도하였는데 변위진폭값은 현장시험에 사용된 진동해머의 공운전시 진폭(9.5mm)의 약 16~75% 사이의 값을 나타내어 모든 관입깊이에 대한 변위진폭값은 변위진폭을 알아보기 위해 고려한 4개의 관입깊이에 대해 구한 값보다 더 큰 차이를 보일 것으로 추정된다. 또한 변위진폭의 크기와 영구변위량 사이의 특정한 상관관계를 찾을 수는 없었다.
- (5) 시간-동적 주면마찰력 이력곡선과 시간-변위 이력곡선에 대하여 주기운동에 따라 연직하향의 침투변위 도달시에 연직상향의 침투 주면마찰력이 발생한다는 가정하에 두 개의 곡선으로부터 위상차를 보정하여 동적 주면마찰력에 대한 하중전이곡선을 구해 보았는데 변위-동적 주면마찰력 사이의 관계가 명확히 밝혀진다면 신뢰성 있는 하중전이곡선을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (6) 본 현장시험을 통해 유도된 결과는 제한된 지반조건 및 진동향타기 그리고 말뚝을 대상으로 한 것이기 때문에 향후 다양한 연구가 추가적으로 진행되

어야 할 필요가 있다. 특히, 널말뚝의 경우 연속시공에 따른 이음부에서의 마찰특성에 대한 연구가 필요하며, 현장계측시에는 변형률계 설치에 대한 세심한 고려가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Barkan, D. D. (1957), "Foundation engineering and drilling by vibration method", *Proc., Fourth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, 2, pp.3-7.
2. Cudmani, R., Hubert, G., and Gudehus, G. (2002), *First International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction in Belgium*, September 2002.
3. 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 1993, 16pp.
4. Jonker, G. (1987), "Vibratory Pile Driving Hammers for Oil Installation and Soil Improvement Projects", *Proc. of Nineteenth Annual Offshore Technology Conf.*, Dallas, Texas, OTC 5422, pp. 549-560.
5. Moulai-Khatir, Reda., O'Neill, Michael W. and Vipulanandan, C. (1994), *Program VPDA Wave Equation Analysis for Vibratory Driving of Piles*, Report to The U.A. Army Corps of Engineerings Waterways Experiments Station., Dept of Civil and Environmental Engineering, UHCE 94-1, Univ. of Houston, Texas, August 1994, pp.187.
6. Rao., Pramod M. (1993), *Effect of pile geometry and soil saturation in the behavior of nondisplacement piles installed by vibration*, MSc thesis presented to the Faculty of the Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, Texas.
7. Roger, A.A., and Littlejohn, G. (1980), "A Study of vibratory driving in granular soils", *Geotechnique*, Vol.30, No.3, pp.269-293.
8. Viking, K. and Bodare, A. (1998), "Laboratory studies of dynamic shaft resistance response of a vibro-driven model pile in granular soil by varying the relative density", *Proc. to XII European Conference on Soil and Foundation Engineering*, pp.6.
9. Viking, K. (2002), *Vibro-driveability -a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils*, Ph.D thesis 1002, Div. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, pp.281, ISSN 1650-9501.
10. Warrington, Don. C. (1989), "Driveability of Piles by Vibration", *Paper presented at Deep Foundation Institute 14th Annual Member Conf.*, pp.139-154.
11. Wong, D., O'Neill, Michael W. and Vipulanandan, C. (1992), "Modelling of Vibratory Pile Driving in Sand", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.16, 1992, pp.189-210.

(접수일자 2006. 11. 25, 심사완료일 2007. 2. 22)