

## 연직진동말뚝의 동적 하중전이 특성

이승현<sup>1</sup>, 김응석<sup>1</sup>, 윤기용<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>선문대학교 토목공학과

### Characteristics of Dynamic Load Transfer for Vertically Vibrating Pile

Seung-Hyun Lee<sup>1</sup>, Eung-Seok Kim<sup>1</sup>, Ki-Yong Yoon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Sunmoon University

**요약** 본 연구에서는 진동해머에 의해 시공되는 강널말뚝에 대한 계측시험결과를 바탕으로 진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 해석에 필요한 이론적인 동적 하중전이함수를 구하고자 하였다. 동적 하중전이함수를 결정하기에 앞서 정적 하중전이함수를 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 모델링하였는데 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수와 N값 사이의 평균 상관계수는 주면마찰의 경우 0.97이었고 선단저항의 경우 0.98로서 신뢰도가 높았다. 동적 하중전이함수는 수정 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 표현하고자 하였는데 결정된 매개변수를 적용하여 해석한 결과를 계측시험결과와 비교해 볼 때 유사한 하중전이특성을 보임을 알 수 있었다.

**Abstract** In this study, the dynamic load transfer function, which is necessary for analyzing a pile installed by a vibro hammer, was determined by comparing the results of the analyses and instrumented tests. The static load transfer function was modeled by the Ramberg-Osgood model through an analytical method before determining the dynamic load transfer curve. The parameters of the Ramberg-Osgood model were correlated with the N value of the standard penetration test and average values of the correlation coefficient were 0.97 for the shaft load transfer and 0.98 for the base load transfer. The dynamic load transfer function was simulated using the modified Ramberg-Osgood model. The results showed that there were little differences in the characteristics of dynamic load transfer between the results of the measurement and prediction.

**Key Words** : Dynamic load transfer function, Static load transfer curve, Ramberg-Osgood model, Modified Ramberg-Osgood model

### 1. 서론

20세기 초반에 실용화되기 시작한 진동해머는 저소음과 진동의 장점 때문에 현재 많이 쓰이고 있다[1]. 진동해머에 의한 말뚝 시공시 가장 큰 관심사는 관입성(driveability)이라 할 수 있는데 관입성 예측을 위해 많은 시도들이 있어왔다. 이러한 예측모델들은 고려되는 역학적 원리 뿐만 아니라 동적 지반저항력과 지반조사자료 입력값에 있어 차이가 나며 어떠한 모델도 말뚝의 관입성 예측을 위해 필요한 역학적 현상을 완전히 고려하지 못한다[2-4]. 진동해머에 의한 말뚝 시공시 관입성 예측

을 위해 개발된 방법들을 대별하여 나타내면 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 분류된다[5-8]. 이들 방법들 중 운동방정식에 의한 적분법이 비교적 정확한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 운동방정식에 의한 적분법을 이용하여 진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 관입성을 예측하고자 할 때 필요한 운동방정식을 구성하는 요소들 중 지반의 동적 저항력과 말뚝변위 사이의 관계를 규정짓는 동적 하

\*Corresponding Author : Ki-Yong Yoon(Sunmoon University)

Tel: +82-41-530-2326 email: kyyoon@sunmoon.ac.kr

Received March 3, 2014

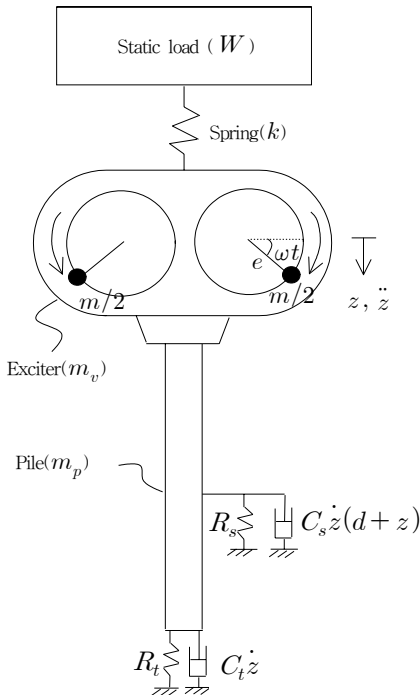
Revised March 21, 2014

Accepted June 12, 2014

중전이곡선의 특징을 시험 및 해석을 통해 살펴보고 동적 하중전이곡선을 구성하는 매개변수를 결정하고자 하였다.

## 2. 진동시스템

Fig. 1에는 진동해머와 말뚝 그리고 지반으로 표현되는 진동시스템이 나타나 있다. 진동해머는 크게 정적하중 ( $W$ , Static load)과 기진기(Exciter)로 구성되어 있으며 정적하중과 기진기는 스프링으로 연결되어 있어 진동시 기진기의 진동이 정적하중에 전달되지 않도록 되어 있다. 진동해머에 의한 말뚝시공시 진동력은 서로 반대 방향으로 회전하는 한 쌍의 편심질량(Eccentric mass),  $m$ 의 회전에 의해 발생하게 된다. Fig. 1에는 말뚝에 작용하는 지반저항력이 스프링과 대쉬팟(Dashpot)으로 나타나 있다.



[Fig. 1] Vibration system

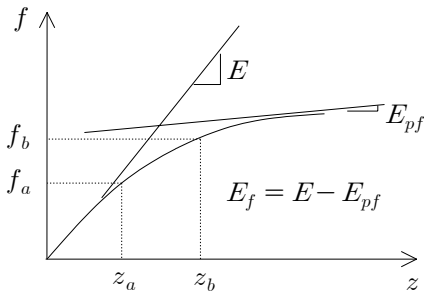
Fig. 1에 나타난 진동시스템에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$m_{v+p} \ddot{z} = me\omega^2 \sin\omega t - C_s \dot{z}(d+z) - C_t \dot{z} - kz - R_s - R_t + W + m_{v+p}g - R_c \quad (1)$$

식 (1)에서  $e$ 와  $\omega$ 는 각각 편심질량의 편심거리와 회전각속도를 의미한다.  $m_{v+p}$ 는 기진기와 말뚝 질량의 합을 의미하고  $z, \dot{z}$  그리고  $\ddot{z}$ 는 각각 기진기와 말뚝의 변위, 속도 그리고 가속도를 의미한다.  $d, k$  그리고  $g$ 는 각각 말뚝의 근입깊이, 스프링상수 그리고 중력가속도를 의미한다.  $R_s$ 와  $R_t$ 는 각각 스프링으로 모사한 동적 주면마찰력과 선단저항력을 의미하며  $C_s$ 와  $C_t$ 는 각각 말뚝주면 및 선단에서의 댐핑계수를 의미한다.  $R_c$ 는 널말뚝을 연결하여 시공하는 경우의 연결부 마찰력을 의미한다. 식 (1)의 해를 구하기 위해서는 무엇보다 동적 지반저항력인  $R_s$ 와  $R_t$ 를 신뢰성 있게 표현하는 것이 중요하는데  $R_s$ 와  $R_t$ 는 말뚝변위의 함수로 표현되고 동적 지반저항력과 말뚝변위 사이를 관계를 규정짓는 것이 동적 하중전이함수(또는 동적 하중전이곡선)이다.

## 3. 하중전이함수

진동해머에 의한 말뚝시공시 말뚝의 거동을 살펴보기 위해 강널말뚝에 가속도계, 변형률계 그리고 깊이측정장치를 설치하고 실물재하시험을 수행하였다. 실물재하시험에 사용된 진동해머는 전기에 의해 작동되는 자유매달림형식(free-hanging type)이며 강널말뚝의 U형으로서 길이가 12m 이다. 재하시험 수행지반은 통일분류법에 따르면 실트질모래(SM)로 분류된다. 실물재하시험과 관련한 계측기 종류와 진동해머제원 그리고 지반조건은 기존 자료[9]에 자세히 나타나 있다. 진동해머에 의해 시공되는 말뚝에 있어서의 하중전이함수의 형태는 많은 학자들에 의해 고려되어 왔으나[10-13] 본 연구에서는 Wong et al.(1994)에 의해 제안된 수정 Ramberg-Osgood 모델을 적용하여 하중전이함수를 표현하고자 하였다[14]. Ramberg-Osgood 모델의 기본적 형태는 Fig. 2를 참고하여 식 (2)와 같이 표현된다[15].



[Fig. 2] Ramberg-Osgood model

$$f = \frac{E_f z}{\left(1 + \left|\frac{E_f z}{f_0}\right|^m\right)^{1/m}} + E_{pf} z \quad (2)$$

Ramberg-Osgood 함수에서는 실측값을 이용하여 식 (2)로부터 지수  $m$  과 기준값(reference value)  $f_0$  를 구하게 된다. 실측값이  $(z_a, f_a)$ 와  $(z_b, f_b)$ 이고  $z_b = 2z_a$ 를 만족한다고 할 때 식 (3) 및 식 (4)가 성립된다.

$$f_a = \frac{E_f z_a}{\left(1 + \left|\frac{E_f z_a}{f_0}\right|^m\right)^{1/m}} + E_{pf} z_a = E_a z_a \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_b &= \frac{E_f z_b}{\left(1 + \left|\frac{E_f z_b}{f_0}\right|^m\right)^{1/m}} + E_{pf} z_b \\ &= \frac{2E_f z_a}{\left(1 + \left|\frac{2E_f z_a}{f_0}\right|^m\right)^{1/m}} + 2E_{pf} z_a = 2E_b z_a \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3) 및 식 (4)에서  $E_a (= f_a/z_a)$ 와  $E_b (= f_b/z_b)$ 는 항선계수를 의미하는데 식 (3) 및 식 (4)는 각각 식 (5)와 식 (6)으로 표현된다.

$$A^m = 1 + \left|\frac{E_f z_a}{f_0}\right|^m \quad (5)$$

$$B^m = 1 + \left|\frac{2E_f z_a}{f_0}\right|^m \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서  $A$ 와  $B$ 는 각각  $E_f/(E_a - E_{pf})$ 와  $E_f/(E_b - E_{pf})$ 를 의미한다. 식 (5)와 식 (6)을 연립하면 식 (7)과 같은 연립방정식을 얻을 수 있으며 시행착오법을 통해  $m$ 을 결정할 수 있다.

$$(2A)^m - B^m + 1 - 2^m = 0 \quad (7)$$

$m$ 이 식 (7)에 의해 결정되었으므로 식 (5)를 이용하여 식 (8)과 같이  $f_0$ 를 결정할 수 있다.

$$f_0 = \frac{E_f z_a}{(A^m - 1)^{1/m}} \quad (8)$$

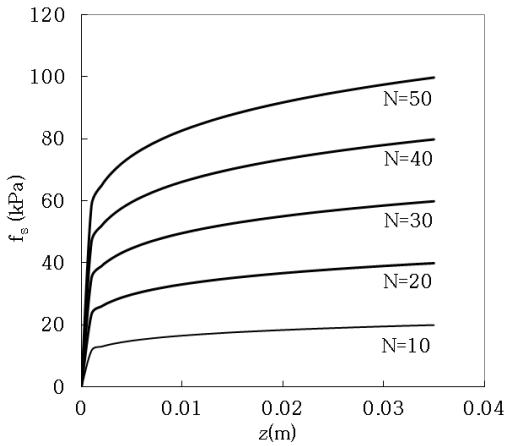
Coyle & Sulaiman(1967)은 모래지반에 설치된 강관말뚝의 주면마찰에 의한 하중전이를 연구하여 식 (9)와 같은 하중전이함수를 제안하였다[16].

$$f_s = K_s \left(\frac{z}{B}\right)^{0.15}, \quad \left(\frac{z}{B}\right) \leq 0.07 \quad (9)$$

식 (9)에서  $f_s$ 는 정적 단위주면마찰력을 의미하고  $B$ 는 말뚝지름을 의미한다.  $K_s$ 는 수정계수인데 식 (10)을 이용하여 결정한다.

$$f_{\max} = K_s (0.07)^{0.15} \quad (10)$$

식 (10)에서  $f_{\max}$ 는 표준관입시험  $N$ 값을 이용하여  $f_{\max} = 2N$  (kPa)을 이용하여 계산하였는데 계산에서 고려한  $N$ 값은 10, 20, 30, 40 그리고 50이다. 하나의  $N$ 값에 대하여 식 (10)으로부터  $K_s$ 가 결정되면 식 (9)를 이용하여 정적 단위주면마찰 하중전이곡선을 구할 수 있는데 고려한  $N$ 값들에 대한 하중전이곡선은 Fig. 3에서와 같다.



[Fig. 3] Static unit load transfer curves for shaft

Fig. 3으로부터  $N$ 값에 따른 각각의 하중전이곡선으로부터 Ramberg-Osgood 매개변수를 구하고 그 값들을  $N$ 값과 관련지어 나타내면 다음과 같다.

$$E_f = 1179.4N + 134.5 \quad (\text{kPa/m})$$

$$f_0 = 1.667N - 1.039 \quad (\text{kPa})$$

$$m = -0.00005N^3 + 0.0019N^2 - 0.0379N + 1.586$$

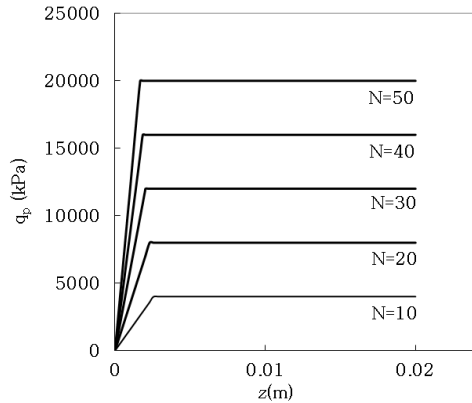
$$E_{pf} = 10.57N - 34.5 \quad (\text{kPa/m})$$

$E_f$ ,  $f_0$ ,  $m$  그리고  $E_{pf}$  와  $N$ 값 사이의 상관계수 (coefficient of correlation)는 각각 1.0, 1.0, 0.88 그리고 0.98이다. 식 (2)에서 단위주면마찰력을 의미하는 ‘ $f$ ’를 단위선단저항력을 의미하는 ‘ $q$ ’로 대체하면 선단에 대한 하중전이함수로 나타낼 수 있다. Vesic(1970)은 모래지반에 설치된 말뚝의 선단에 대한 하중전이관계를 식 (11)과 같이 제안한 바 있다[17].

$$z = \frac{C_w Q_p}{(1 + D_r^2) B q_b} \quad (11)$$

식 (11)에서  $C_w$ 는 침하계수(settlement coefficient)인데 타입말뚝인 경우 0.0372이다.  $Q_p$ 와  $D_r$ ,  $B$  그리고  $q_b$ 는 각각 선단하중(toe load)과 상대밀도(decimal), 말뚝지름 그리고 극한 단위선단저항력을 의미한다. 식 (11)을 적용하기 위해  $N$ 값과  $D_r$  사이의 상관관계를 이용하였고  $q_b = 400N$  (kPa)인 관계식을 적용하였는데  $N$ 값은 말뚝선단 근처에서의 값을 의미한다. 식 (11)을 이용하여

$N$ 값에 따른 정적 단위선단저항( $q_p$ ) 하중전이곡선을 구하면 Fig. 4와 같다.



[Fig. 4] Static unit load transfer curves for base

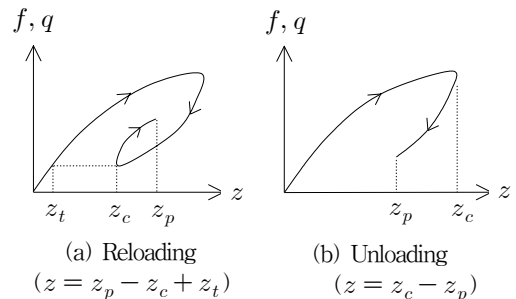
Fig. 4에 나타난  $N$ 값에 따른 각각의 하중전이곡선으로부터 Ramberg-Osgood 매개변수를 구하고 그 값들을  $N$ 값과 관련지어 나타내면 다음과 같은데 식 (2)에서  $m$ 은  $n$ 으로 대체하였다.

$$E_q = 260000N - 1000000 \quad (\text{kPa/m})$$

$$q_0 = 404.14N - 39.297 \quad (\text{kPa})$$

$$n = 0.00009N^3 - 0.0071N^2 + 0.1097N + 4.414$$

$E_q$ 와  $q_0$  그리고  $n$ 과  $N$ 값 사이의 상관계수는 각각 0.99와 1.0 그리고 0.95이며  $E_{pq}$ 는 0으로 가정하였다. 본 연구에서는 말뚝의 상하운동에 따른 지반저항력을 수정 Ramberg-Osgood 모델로 모사하였는데 말뚝의 변위에 따른 동적단위주면마찰력( $f$ )과 동적단위선단저항력( $q$ )의 재하(Reloading) 및 제하(Unloading)에 따른 변화양상은 Fig. 5와 같다.



[Fig. 5] Loading paths for the modified Ramberg-Osgood model

Fig. 5에서 변위  $z_p$ 는 현재의 변위(Present displacement)를 나타내고  $z_c$ 는 이전 계산단계에서 변위의 방향이 바뀔 때의 변위(Displacement at the last reversal)를 나타낸다.  $z_t$ 는 재하에서 재하로 바뀔 때의 저항력에 대응하는 변위(Local displacement corresponding to the stress level at the previous reserval)를 나타낸다. Fig. 5를 참조하여 제안된 동적 단위주면마찰력의 재하 및 제하시의 식은 각각 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$f_{RL} = \left[ \frac{E_f z}{\left(1 + \left| \frac{E_f z}{f_0} \right|^m\right)^{1/m}} + E_{pf} z \right] F_f - f_n \tag{12}$$

$$f_{UL} = f_c - \frac{E_f(z_c - z_p)}{\left(1 + \left| \frac{E_f(z_c - z_p)}{f_0} \right|^m\right)^{1/m}} F_f + E_{pf}(z_c - z_p) F_f \tag{13}$$

Fig. 5에서 동적 단위선단저항력을 재하 및 제하로 나누어 나타내면 식 (14) 및 식 (15)와 같다.

$$q_{RL} = \left[ \frac{E_q z}{\left(1 + \left| \frac{E_q z}{q_0} \right|^m\right)^{1/n}} \right] F_q (1 - e^{-Kz}) \tag{14}$$

$$q_{UL} = q_c - \left[ \frac{E_q(z_c - z_p)}{\left(1 + \left| \frac{E_q(z_c - z_p)}{q_0} \right|^m\right)^{1/n}} \right] \times F_q [1 - e^{-K(z_c - z_p)}] \tag{15}$$

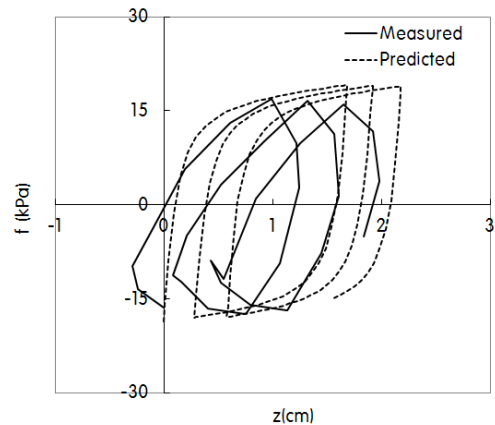
식 (2)와 식 (12)~(15)를 비교해 볼 때 수정 Ramberg-Osgood 함수에 나타나 있는 새로운 매개변수는  $F_f$ 와  $F_q$ ,  $f_n$  그리고  $K$ 이다.  $F_f$ 와  $F_q$ 는 조정계수(Fitting factor)를 의미하고  $f_n$ 은 최대 부(-)의 단위주면마찰력(Maximum negative skin friction)을 의미한다.  $f_c$ 와  $q_c$ 는 Fig. 5(b)에서  $z_c$ 에 대응하는 저항력을 의미한다.  $K$ 는  $q-z$ 곡선의 진폭(Amplitude)을 조절하는 상수이

다. 매개변수  $F_f$ 와  $F_q$ ,  $f_n$  그리고  $K$ 는 시험을 통해 유도된 동적 하중전이곡선에 식 (2)로 표현되는 정적 하중전이곡선을 근사시켜 구할 수 있다. 식 (2)로 표현되는 정적 하중전이곡선을 시험을 통해 구한 동적 하중전이곡선에 근사화 시킴에 있어  $N$ 값을 매개로 하여 얻은  $F_f$ 와  $f_n$ 은 다음과 같다.

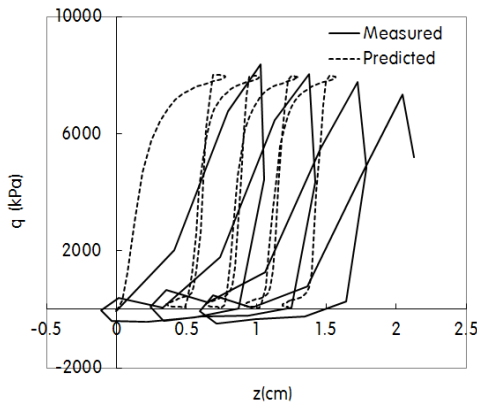
$$F_f = 5464.7(\bar{N})^{-3.1974}$$

$$f_n = -1.7226(\bar{N}) + 39.674 \quad (\text{kPa})$$

$\bar{N}$ 은 지표면으로부터 관입깊이까지의 평균  $N$ 값을 의미한다. 조정계수  $F_q$ 는  $N$ 값과의 상관성이 없어 Wong et al.(1992)에 의한 시험결과를 참조하여 1.0으로 보았으며 시행착오법에 의해 결정된  $K$ 값은 500이다[14]. 결정된 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수를 적용하여 진동해머에 의해 시공되는 말뚝을 해석할 수 있는 프로그램[9]을 개발한 바 있는데 이를 통해 관입깊이 3m에 대하여 얻은 주면 및 선단에 대한 동적 하중전이곡선은 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. Fig. 6과 Fig. 7에서 실선은 시험을 통해 유도된 하중전이곡선을 의미하고 점선은 시험결과에 근사시켜 구한 매개변수를 적용하여 프로그램을 통해 구한 하중전이곡선을 의미한다[9].



[Fig. 6] Comparison of load transfer curves for shaft



[Fig. 7] Comparison of load transfer curves for base

Fig. 6과 Fig. 7을 통해서 알 수 있는 바와 같이 시험을 통해 유도된 하중전이곡선과 해석을 통해 구한 하중전이곡선이 유사함을 알 수 있는데 최대 저항력이 발생하는 해당 변위는 측정결과와 예측결과 사이에 차이가 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 진동해머에 의해 시공되는 강널말뚝에 대한 계측시험결과를 바탕으로 해석에 필요한 이론적인 동적 하중전이함수를 구하고자 하였다.

- 1) 정적 하중전이함수는 Ramberg-Osgood 모델을 이용하여 근사화 시키고자 하였다. 이를 위해 먼저 기준에 제안된 하중전이곡선을 미리 가정한 표준관 입시험  $N$ 값인 10, 20, 30, 40 그리고 50 각각에 대하여 구하고 Ramberg-Osgood 모델로 근사화시켜 모델의 매개변수를 결정하였다. 결정된 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수와  $N$ 값 사이의 상관계수는 주면마찰에 대해서는 평균 0.97이며 최소 상관계수는 0.88이었으며 선단저항에 대해서는 평균 0.98이었고 최소 상관계수는 0.95인데 전체적으로 볼 때 상당히 신뢰성 있는 상관관계를 보였다.
- 2) 동적 하중전이함수를 결정하기 위해 수정 Ramberg-Osgood 모델을 고려하였는데 계측시험을 통해 유도된 동적 하중전이곡선에 수정 Ramberg-Osgood 모델을 적용하여 매개변수를 결정하였다. 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수 중 조정계수  $F_f$ 와 최대 부주면마찰력  $f_n$ 을  $N$

값과 상관지어 제안하였다. 수정 Ramberg-Osgood 모델의 나머지 매개변수인 조정계수  $F_q$ 는 기존 시험결과를 참조하여 1.0으로 보았으며 시행 착오법을 통해 결정된  $K$ 값은 500이었다.

- 3) 시험결과와 해석결과를 상호 비교분석하여 결정된 수정 Ramberg-Osgood 함수를 진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 해석 프로그램에 적용한 결과 시험결과와 해석결과가 유사함을 확인할 수 있었다.
- 4) 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수 중 시험결과로부터 결정된 매개변수의 경우 제한된 시험결과에 근거하고 있으므로 향후 추가적인 시험자료에 의해 수정보완된다면 매개변수 결정에 있어 신뢰성이 커질 것이다.

#### References

- [1] Viking, K., "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, 2002
- [2] Roger, A.A., "Experimental and theoretical investigation of the parameters influencing the vibratory penetration of dry cohesionless soils", PhD dissertation at Aberdeen University, Aberdeen, Vol 1., Chapters 1-15, pp. 338, 1976
- [3] Viking, K., "Vibratory driven piles and sheet piles - a literature survey., Report 3035", Dept. of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, 75pp, ISSN 1400-1306, 1997
- [4] Holeyman, A. E., "Vibratory driving analysis., Keynote Lecture", The Sixth International conference on the application of stress-wave theory to piles, Sao Paulo, Brazil, September 11-13, 16pp, 2000
- [5] Holeyman, A., "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, 1993
- [6] Meirovitch, L. Elements of Vibration Analysis. New York : McGraw-Hill., 1975
- [7] Warrington, D.C. "Driveability of piles by vibration", Paper presented at Deep Foundation Institute 14th Annual Member Conf., pp. 139-154, 1989
- [8] Vanden Berghe, J-F. and Holeyman, A., "Comparison of two models to evaluate the behavior of a vibratory driven sheet pile", XIth Young Geotechnical Engineers

- Conference and Computers, September 24-27, 1997, Madrid, Spain, pp.60-72, 1997
- [9] Seunghyun, Lee, Byungil, Kim and Jintae, Han, "Prediction of penetration rate of sheet pile installed in sand by vibratory pile driver", KSCE Journal of Civil Engineering, DOI 10.1007/s12205-012-1317-y, 2011  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-012-1317-y>
- [10] Dierssens, G., "Ein bodenmechanisches Modell zur Beschreibung des Vibrations-rammens in körnigen Böde", Doctoral Thesis, University of Kalsruhe, Germany, 1994
- [11] Cudmani, R., "Ein bodenmechanisches Modell des Vibrationsrammens in nichtbindigen Böden", Obtained through personell communications, 30pp., 2000.
- [12] Gardner, S., "Analysis of vibratory driven pile", Proc. of 2nd Int. Conf. on Deep foundation, Luxembourg, 5-7 May -87, pp. 29-56, 1987
- [13] Moulai-Khatir, R., O'Neill, M. W., Vipulanandan, C., "Program VPDA Wave Equation Analysis for Vibratory Driving of Piles", Report to The U.A. Army Corps of Engineers Waterways Experiments Station., Dept of Civil and Environmental Engineering, UHCE 94-1, Unive. of Houston, Texas, August 1994, 187 pp., 1994
- [14] D. Wong, Michael W. O'Neill and C. Vipulanandan, "Modelling of vibratory pile driving in sand". International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 16, pp. 189-210, 1992  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/nag.1610160303>
- [15] Richard, R. M., Abbott, Barry J. "Versatile elastic-plastic stress-strain formula". Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 101, Paper No. EM4, August, pp. 511-515, 1975
- [16] Coyle, H. M., and Sulaiman, I. H. "Skin friction for steel piles in sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, SM6, Paper No. 5590, November, pp. 261-278, 1967
- [17] Vesić, A. S. "Tests on instrumented piles, Ogeechee River Site", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, Paper No. S M2, March, pp. 561-584, 1970

**이 승 현(Seung-Hyun Lee)**

[정회원]



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

<관심분야>  
토질역학, 기초공학

**김 응 석(Eung-Seok Kim)**

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 고려대학교 부설 방재과학연구소 선임연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>  
수자원시스템, 상하수도 관망시스템

**윤 기 용(Ki-Yong Yoon)**

[정회원]



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

<관심분야>  
구조공학, 합성구조, 강구조, 내진설계