

진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 해석기법 제고

이승현*

¹선문대학교 토목공학과

Enhancement of the Technique for Analyzing a Pile Driven by Vibro Hammer

Seung-Hyun Lee^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Sunmoon University

요약 진동해머에 의해 시공되는 말뚝의 거동을 분석할 목적으로 개발된 기존의 프로그램을 개선하고자 하였다. 진동해머-말뚝-지반으로 구성되는 진동시스템의 기존 지배방정식에 지반저항의 댐핑효과와 클러치마찰력을 추가하였다. 또한, 개발된 해석기법의 하중전이곡선을 모사하는 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수를 재산정하여 해석기법을 개선하고자 하였다. 수정된 프로그램에 의한 해석결과를 현장시험결과와 비교해 볼 때 시간에 따른 말뚝의 변위 및 하중전이거동이 현장시험결과에 좀 더 유사하였다. 개발된 프로그램에 의한 말뚝 관입깊이별 관입속도를 상용 프로그램에 의한 결과 및 현장시험결과와 비교해 볼 때 상용프로그램보다 훨씬 더 현장시험결과에 가까웠다.

Abstract Enhancement of the existing program for analyzing a pile driven by vibro hammer was tried. Damping effect of dynamic soil resistance and clutch friction were added to the existing governing equation which constitute vibrating system of vibro hammer-pile-soil. Parameters of the modified Ramberg-Osgood model which simulates dynamic load transfer curves for the developed program were recomputed. Comparing the results of the modified program with those of the field tests, pile displacement with time and load transfer behavior were more similar to those of the field test. The penetration rates obtained from the modified program were more close to those of the field test rather than those of the commercial program.

Key Words : Improvement, Vibro hammer, Modified Ramberg-Osgood model, Load transfer curve, Penetration rate

1. 서론

1930년대 개발된 진동해머는 현대에 이르러 충격식 타입해머와 더불어 말뚝을 시공하는 보편적인 장비가 되었다. 진동해머의 장점으로는 사질토지반에 대하여 관입성(vibro-driveability)이 좋고 저소음이며 말뚝두부에 손상을 덜 입히는 점을 들 수 있다. 진동해머로 말뚝을 설치하는 경우 가장 큰 관심사는 관입속도라 할 수 있는데 이와 관련하여 비록 몇몇 연구자들[1,2,3]은 진동해머에 의해 시공되는 말뚝에 대한 거동특성을 규명하기 위한

연구를 한 바 있으나 실물현장재하시험결과가 발표된 경우는 거의 없다고 할 수 있다. 본 연구에서는 진동해머에 의해 시공되는 널말뚝의 관입거동을 파악하기 위해 수행된 실물현장재하시험을 바탕으로 진동시스템을 해석하기 위해 제안된 기존의 지배방정식을 보완하고 그로부터 개발된 해석프로그램에 의한 해석결과를 현장시험결과와 비교해봄으로써 해석기법의 신뢰성을 높이고자 하였다.

이 연구는 2014년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 이루어졌음

*Corresponding Author : Seung-Hyun Lee(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2328 email: shlee02@sunmoon.ac.kr

Received February 16, 2015

Revised April 6, 2015

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

2. 이론적 배경

진동해머는 크게 사하중(static load 또는 bias mass)과 기진기(exciter)로 구성되어 있다. 연직진동력은 기진기를 구성하는 한 쌍의 회전질량체에 의해 만들어지게 된다. Fig. 1은 진동해머-말뚝-지반으로 구성되어 있는 진동시스템을 보여준다.

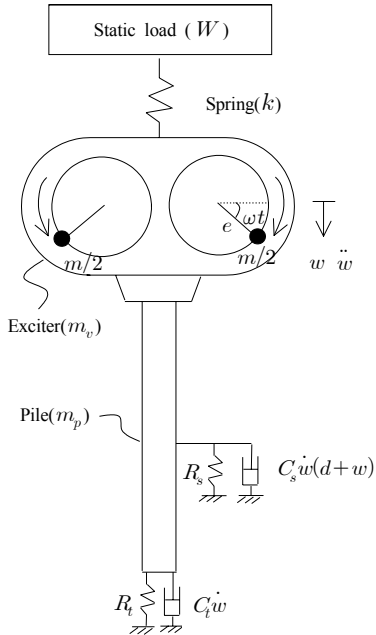


Fig. 1. Vibrating system

Fig. 1에 나타낸 말뚝 진동모델과 관련하여 말뚝은 강체로 가정하는데 진동시스템에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$mv_{p+v} \frac{d^2 w}{dt^2} + C_s \dot{w}(d+w) + C_t \dot{w} + kw + R_s + R_t + R_c = F_h(t) \quad (1)$$

Fig. 1과 식 (1)에서 m_{p+v} 는 말뚝질량과 진동기 질량의 합, w 는 말뚝의 변위, t 는 시간, C_s 와 C_t 는 각각 말뚝주면 및 선단에서의 댐핑계수, d 는 말뚝의 근입깊이, w 는 스프링상수, R_s 는 동적 주면마찰력, R_t 는 동적 선단저항력, R_c 는 클러치마찰력(clutch friction) 그리고 $F_h(t)$ 는 말뚝머리에 가해지는 하중을 의미한다. 클러치

마찰력은 슈트파일을 연속하여 시공할 때 슈트파일간의 연결부에 존재하는 마찰력을 의미하는 것으로 단독으로 시공될 때의 클러치 마찰력은 0이 된다. 이승현 등[4]은 Fig. 1과 유사한 진동시스템에 대하여 지배방정식을 고려한 바 있는데 식 (1)이 기존의 지배방정식에 비하여 추가적으로 고려한 점은 댐핑과 클러치마찰력을 고려한 것이라 할 수 있다. 이론적으로 진동기로부터 말뚝머리로 전달되는 힘은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F_h(t) = me\omega^2 \sin\omega t + W + m_{v+p}g \quad (2)$$

Fig. 1과 식 (2)에서 m 은 회전질량체의 질량, e 는 회전질량체의 편심거리, ω 는 편심질량체의 각속도, W 는 사하중(Bias mass) 그리고 g 는 중력가속도를 의미한다. 진동해머에 의해 설치되는 말뚝의 하중전이곡선을 구하기 위해 수정 Ramberg-Osgood 모델을 적용해 보았는데 Wong et al.[5]에 의해 제안된 동적 단위주면마찰력과 변위 사이의 관계($f-w$ 관계)에서의 재하경로(loading path)는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f_{RL} = \left[\frac{E_f w}{1 + \left| \frac{E_f w}{f_0} \right|^{n_f}} + E_{pf} w \right] F_f - f_n \quad (3)$$

식 (3)에서 E_f 는 하중전이곡선에서 초기경사와 소성 영역의 경사의 차이를 의미하고 f_0 는 기준값(reference value)을 의미한다. n_f 는 형상계수(shape factor)를 의미하고 E_{pf} 는 $f-w$ 곡선의 소성부분의 경사를 의미한다. 또한 F_f 는 주면마찰에 대한 수정계수이고 f_n 는 최대 부주면마찰력을 의미한다. $f-w$ 관계에서의 재하경로(unloading path)는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$f_{UL} = f_c - \left[\frac{E_f (w_c - w_p)}{1 + \left| \frac{E_f (w_c - w_p)}{f_0} \right|^{n_f}} + E_{pf} (w_c - w_p) \right] F_f + f_n \quad (4)$$

식 (4)에서 f_c 는 재하경로의 마지막에서의 단위주면 마찰력을 의미한다. 동적 단위선단저항력과 변위 사이의 관계($q-w$ 관계)에서의 재하경로는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$q_{RL} = \left[\frac{E_q w}{1 + \left| \frac{E_q w^{n_q}}{q_0} \right|^{1/n_q}} \right] F_q (1 - e^{-Kw}) \quad (5)$$

식 (5)에서 F_q 는 수정계수이고 K 는 $q-w$ 곡선의 진폭을 조절하는 상수이다. $q-w$ 관계에서 제하경로는 식 (6)과 같다.

$$q_{UL} = q_c - \left[\frac{E_q (w_c - w_p)}{1 + \left| \frac{E_q (w_c - w_p)^{n_q}}{q_0} \right|^{1/n_q}} \right] \times F_q [1 - e^{-K(w_c - w_p)}] \quad (6)$$

식 (6)에서 q_c 는 재하경로 마지막에서의 단위선단저항력을 의미한다. 식 (3)~(6)에서 꺾쇠안의 식이 Ramberg-Osgood 모델을 나타내는 식이다. 따라서 수정 Ramberg-Osgood 모델은 Ramberg-Osgood 모델에 수정 계수(F_s, F_q)와 최대 부주면마찰력(f_n) 그리고 상수, K 를 추가하여 만들어짐을 알 수 있다. 식 (1)에서의 동적 지반저항력 R_s 와 R_t 는 동적 단위주면마찰력(f)과 동적 단위선단저항력(q)에 주면면적과 선단면적을 각각 곱함으로써 얻을 수 있다. 식 (1)의 미분방정식은 Runge-Kutta 방법과 같은 수치해석을 통해 구할 수 있다.

3. 현장시험 개요

이승현 등[4]은 강널말뚝의 진동관입거동을 분석하기 위해 현장시험을 실시한 바 있는데 강널말뚝에 다수의 계측기를 부착하여 시험을 수행하였고 해석결과와의 비교를 목적으로 검증시험을 수행한 바 있다. 계측시험에서는 진동에 의한 말뚝거동을 살펴보기 위해 두 개의 강제 슈트파일을 진동해머로 시공하면서 계측을 수행하였다. 계측시험에 있어 첫 번째 시공되는 말뚝의 경우 미리 시공된 말뚝이 없으므로 클러치마찰력(clutch friction)이 없으며 두 번째 시공말뚝의 경우에는 첫 번째 말뚝에 연결하여 시공되므로 클러치마찰력이 존재하게 된다. 현장 시험을 수행한 지반은 통일분류법에 따르면 실트질 모래(SM)로 분류된다. 현장시험에 사용한 강널말뚝은 U타입(SPIIIA(D))으로서 길이가 12m이다. 계측시험에 적용한 진동해머는 자유매달림(free-hanging) 형식 및 전기식

(electrical type)이다. 진동해머에 대한 기본자료는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of vibro-hammers

Test	Instrumented	Proof
Eccentric moment (kg · cm)	2500	2500
Frequency(Hz)	18.2	19.0
Amplitude(mm)	4.3	7.7
Motor output(kW)	60	45
Total weight(kN)	55	37.5
Dynamic weight(kN)	48	32.5

계측시험에 사용된 강널말뚝에는 10개의 스트레인게이지와 2개의 가속도계 그리고 깊이 측정장치(depth-measuring drum)를 부착하였는데 클러치마찰력이 있는 경우와 없는 경우에 대한 계측기에 있어 차이는 없다. 계측기는 말뚝머리에 깊이측정장치와 가속도계 그리고 2개의 스트레인게이지를 부착하였고 말뚝선단에 가속도계와 8개의 스트레인게이지를 부착하였다. 검증시험에서는 깊이 측정장치만 사용하였다. 모든 계측기를 설치한 다음에는 자동계측시스템을 이용하여 0.005 초(200Hz)마다 데이터를 얻었다. 식 (1)에서 말뚝은 강재로 가정되는데 이의 확인은 말뚝머리와 선단에 설치한 가속도계에 의한 계측값을 비교해보면 된다. Fig. 2에는 관입깊이에 따른 말뚝의 침투가속도가 나타나 있다.

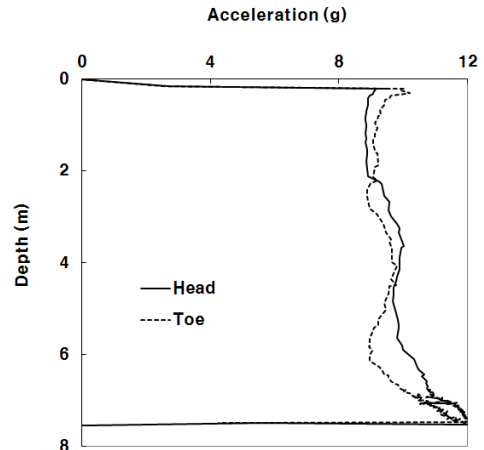


Fig. 2. Peak acceleration with depth

Fig. 2에서 실선은 말뚝머리에 설치한 가속도계 측정값을 나타내고 점선은 말뚝선단부에 설치한 가속도계 측

정값을 나타내는데 두 개의 가속도계에 의한 가속도값을 비교해 볼 때 가속도값의 최대차는 1.4g이고 이러한 가속도값에 있어서의 미소한 차이는 말뚝을 강체로 고려할 수 있는 근거를 뒷받침하는 결과로 볼 수 있다. Viking and Bodare[6]가 제안한 판별식에 의해서도 현장시험에 적용한 말뚝을 강체로 고려할 수 있음을 알 수 있는데 판별식의 핵심은 진동주기의 1/4이 응력파가 말뚝을 2번 왕복하는데 걸리는 시간보다 크다면 강체로 고려할 수 있다는 것이다.

4. 현장시험과 해석결과의 비교

4.1 동적 하중전이 특성

수정 Ramberg-Osgood 모델의 구축에 필요한 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수는 정적 하중전이곡선으로부터 해석적 방법을 통해 얻을 수 있다 [7,8,9]. 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수들은 현장시험을 통해 얻은 동적 하중전이곡선으로부터 결정할 수 있는데 시행착오법을 적용해야 한다. 본 연구에 있어서는 현장 시험결과로부터 얻은 동적하중전이곡선과 해석결과를 좀 더 근사화 시키기 위해 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수를 재산정하고 그로부터 개발된 해석 프로그램에 의한 결과를 현장시험결과와 비교해 보고자 하였다. 현장시험자료로부터 시간에 따른 말뚝변위를 구하고자 할 때는 가속도를 적분하여 구할 수 있다[10]. 관입깊이 3m에 대하여 시간에 따른 말뚝변위를 나타내면 Fig. 3과 같은데 개발된 프로그램에 의해 예측된 결과도 함께 나타내었다.

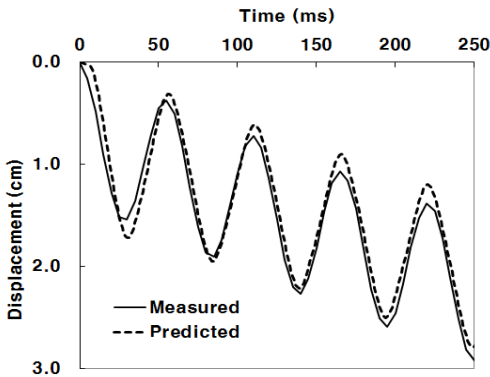


Fig. 3. Pile displacement with time

Fig. 3을 통해 알 수 있듯이 예측된 변위가 실제 측정된 값에 비교적 잘 일치됨을 알 수 있다. 특정 관입깊이에 대한 동적 하중전이곡선은 시간에 대한 변위곡선과 시간에 대한 지반저항력곡선으로부터 얻을 수 있다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에는 관입깊이 3m에 대한 동적 하중전이곡선이 각각 주면과 선단에 대하여 나타나 있는데 점선은 개발된 프로그램에 의해 예측된 동적 하중전이곡선을 나타낸다.

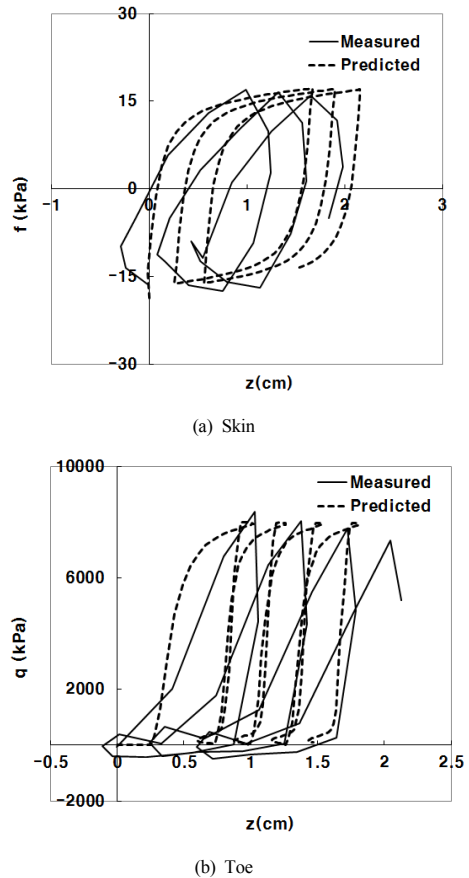


Fig. 4. Dynamic load transfer curves

Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 개발된 해석기법에 의해 예측된 값이 실제값과 대체로 유사함을 알 수 있는데 해석에서 고려한 다른 관입깊이들에 대해서도 유사한 결과를 나타내었다.

4.2 관입속도의 비교

관입깊이에 대한 관입속도는 깊이측정장치로 얻은 시

간-관입깊이자료를 이용하여 구할 수 있다. Fig. 5에는 현장시험 및 프로그램을 통해 예측한 관입깊이별 관입속도가 클리치마찰력의 유무에 따라 나타나 있다.

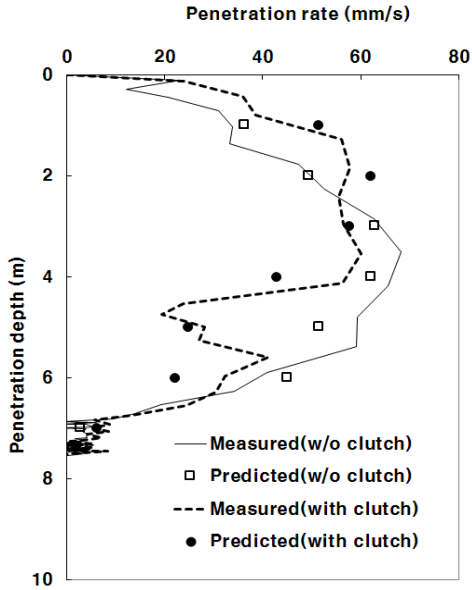


Fig. 5. Comparison of penetration rates(instrumented test)

Vanden Berghe[11]는 클리치마찰력값으로 2.0~20.0kN/m을 제안하고 있다. 클리치마찰력이 있는 경우에 대하여 프로그램을 이용하여 관입속도를 예측하는 경우에는 클리치마찰력값을 10kN/m으로 가정하였다. Fig. 5를 통해 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 예측한 값이 실측값에 가까움을 알 수 있다. Fig. 6에는 검증시험을 통해 얻은 관입속도와 개발된 프로그램에 의한 관입속도 그리고 상용 프로그램인 GRL/WEAP[12]에 의한 관입속도가 나타나 있다.

Fig. 6에서 검증시험을 통해 구한 관입속도는 관입깊이 6~8m 일 때를 제외하고는 전체적으로 관입깊이에 상관없이 약 30mm/sec로 일정함을 알 수 있다. 관입 초기단계에서 예측된 관입속도는 시험결과에 의한 관입속도보다 큼을 알 수 있다. 또한, 개발된 프로그램에 의한 관입속도가 상용 프로그램인 GRL/WEAP에 의해 예측한 관입속도 보다 현장시험에 가까운 결과를 보임을 알 수 있다.

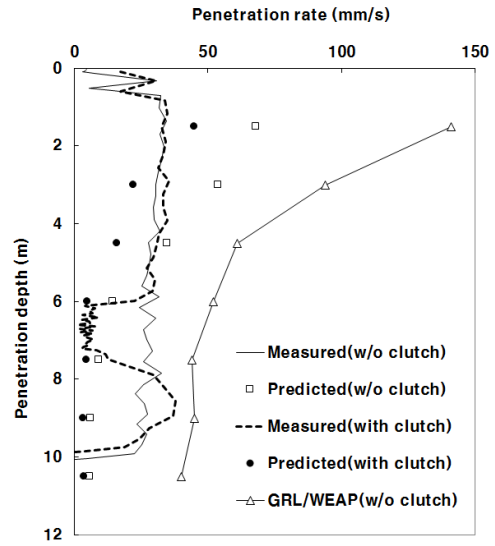


Fig. 6. Comparison of penetration rates(proof test)

5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석을 위해 제안된 진동모델의 전제조건이 되는 강체말뚝에 대한 가정은 말뚝두부와 선단에서 측정된 가속도 사이에 큰 차이가 없는 점과 판별식의 적용을 통해 볼 때 정당함을 알 수 있었다.
- (2) 본 연구에서는 기존의 연구에서 제안된 지배방정식에 비하여 지반저항의 댐핑효과와 클리치마찰력을 고려할 수 있도록 하였으며 현장시험결과로부터 수정 Ramberg-Osgood 모델의 매개변수를 재산정하여 기존의 해석프로그램을 수정하였다. 수정된 프로그램에 의한 해석결과를 현장시험결과와 비교해 볼 때 시간에 따른 말뚝의 변위 및 하중전이거동이 현장시험결과에 좀 더 유사하였다.
- (3) 개발된 프로그램에 의한 말뚝 관입깊이별 관입속도를 상용 프로그램에 의한 결과 및 현장시험결과와 비교해 볼 때 상용 프로그램 보다 훨씬 더 현장시험결과에 가까웠다.
- (4) 향후 추가적인 현장시험자료의 분석을 통해 해석에 필요한 매개변수의 수정을 통해 보다 더 신뢰성 있는 말뚝 관입속도 예측이 가능할 것으로 생각된다.

References

- [1] Jonker, G., "Vibratory Pile Driving Hammers for Oil Installation and Soil Improvement Projects", Proc. of Nineteenth Annual Offshore Technology Conf., Dallas, Texas, OTC 5422, 1987, pp. 549~560
- [2] Warrington, D.C., "Driveability of piles by vibration", Paper presented at Deep Foundation Institute 14th Annual Member Conf., 1989, pp. 139~154.
- [3] 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, 1993, pp. 23.
- [4] Seung-Hyun, Lee, Byoung-II, Kim & Jin-Tae Han, "Prediction of Penetration Rate of Sheet Pile Installed in Sand by Vibratory Pile Driver", KSCE Journal of Civil Engineering
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-012-1317-y>
- [5] Wong, D., O'Neill, M. W. and Vipulanandan, C., "Modelling of Vibratory Pile Driving in Sand", International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 16, No. 4, pp. 189-210, 1992.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/nag.1610160303>
- [6] Viking, K. and Bodare, A., "Laboratory studies of dynamic shaft resistance response of a vibro-driven model pile in granular soil by varying the relative density", Proc. of XII European Conference on Soil and Foundation Engineering, 1998, pp. 6.
- [7] Moulai-Khatir, Reda., O'Neill, Michael W. and Vipulanandan, C., "Program VPDA Wave Equation Analysis for Vibratory Driving of Piles", Report to the U.S. Army Corps of Engineerings Waterways Experiments Station., Dept of Civil and Environmental Engineering, UHCE 94-1, Univ. of Houston, Texas, August 1994, pp. 187.
- [8] Coyle, H. M., and Sulaiman, I. H., "Skin Friction for Steel Piles in Sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, SM6, Paper No. 5590, November, 1967, pp. 261~278.
- [9] Richard, Ralph 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, 1975, pp. 511~515.
- [10] Viking, K., "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, 2002, pp. 184~186.
- [11] Vanden Berghe, J-F., "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, 2001.
- [12] GRLWEAP, "Procedures and Models Version 2005", Pile Dynamics, Inc., 2005, pp.23.

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 건축사회환경학부 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학