

## 지반-말뚝 동적 상호 작용 평가를 위한 1g 진동대 실험의 수치 모델링 Numerical Modeling of 1g Shaking Table Model Pile Tests for Evaluating Dynamic Soil-Pile Interaction

오만교<sup>1)</sup>, Man-Kyo Oh, 김성환<sup>2)</sup>, Seong-Hwan Kim, 한진태<sup>3)</sup>, Jin-Tae Han,  
김명모<sup>4)</sup>, Myoung-Mo Kim

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>3)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사후연구원, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>4)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

**SYNOPSIS** : Numerical analysis using a three dimensional finite element program(ABAQUS) is a powerful method which can evaluate the soil-pile-structure interaction under the dynamic loading and reduce the computation time significantly, but has not be widely used because modeling a soil-pile system and setting the parameter for the entire model are difficult and a three dimensional finite element program is not user friendly. However, a three dimensional finite element program is expected to be widely used because of advance in research of modeling technique and development of the modeling and visualization. In this study, ABAQUS is used to simulate the 1g shaking table model pile test, and the numerical results are compared with the 1g shaking table test results. The application about the soil stiffness and boundary condition change is estimated and then parametric study for various input acceleration amplitudes, various input frequencies, and various surcharge is carried out.

**Keywords** : ABAQUS, numerical analysis, dynamic soil-pile interaction, 1G shaking table model test

### 1. 서 론

말뚝 기초 구조물에서 지반-말뚝 동적 상호 작용은 지진 시 구조물의 응답에 큰 영향을 미치기 때문에 반드시 고려해야 한다. 지반-말뚝 동적 상호 작용은 1g 진동대 실험 및 원심모형 실험 등의 모형 실험과 등가정적 해석 및 동적 해석 등의 수치해석 기법을 적용하여 평가할 수 있는데, 수치해석의 경우에는 현재 말뚝-지반의 정적 p-y 곡선을 이용한 등가정적 해석이 내진 해석 및 설계에 주로 활용되고 있다. 그러나 동적 해석의 경우는 등가정적 해석 기법 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있는 장점에도 불구하고 해석 기법의 어려움으로 인해 적용 및 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 합리적인 동적 해석 기법을 도출하기 위해, 단말뚝에 대해 수행한 1g 진동대 모형 실험에 대해, 기계, 구조 등 여러 공학 분야에서 사용이 되고 있으며 그 효율성이 입증된 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS V6.9과 유한차분해석 프로그램인 FLAC-3D V3.1을 이용하여 시간 영역에서 동

적 해석을 수행하였다. 지반의 강성 및 경계조건 등을 변화시키면서 수치해석을 수행하였으며, 말뚝의 변위와 휨 모멘트를 기준으로 실험 결과와 비교하여 수치해석 기법의 적용성을 평가하고 두 프로그램의 해석 결과를 비교하였다. 또한, 검증된 해석 기법을 이용해 입력 가속도의 주기와 진폭, 그리고 말뚝 상부 하중 크기를 각각 변화시켜 해석을 수행하고, 이를 통해 지반-말뚝의 동적 상호 작용을 분석하였다.

## 2. 1g 진동대 실험

XX대교 현장의 단말뚝을 원형으로 Iai(1989)의 상사법칙을 적용하여 1g 진동대 실험을 수행하였다. 상사비 27.5를 적용하여 말뚝 근입 깊이, 상부하중의 무게, 휨 강성을 결정하였으며, 기본 제원은 표 1과 같다. 시료는 주문진 표준사를 이용하였으며(표 2), 상대밀도 80%의 건조토 단일지반으로 조성하였다.

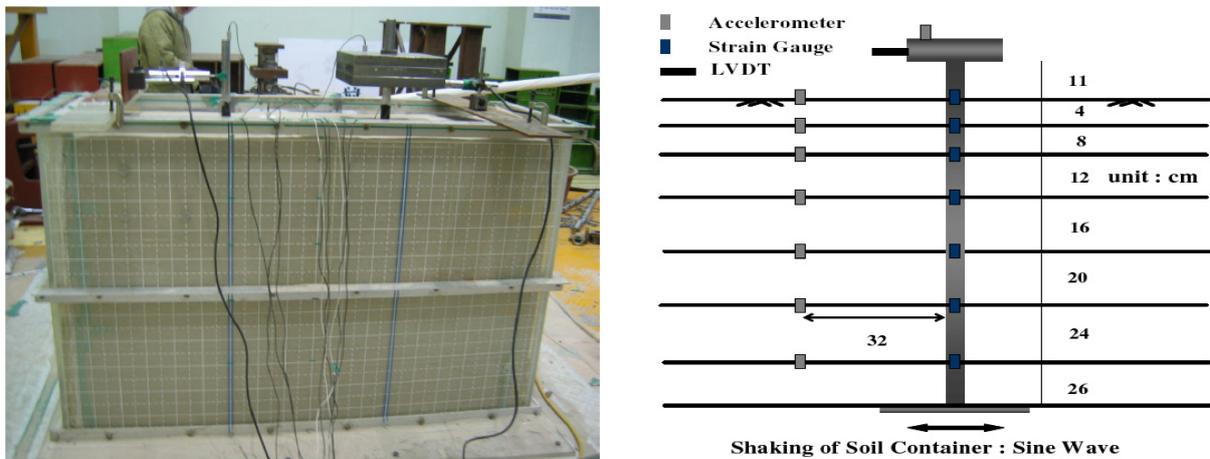


그림 1. 1g 진동대 실험 개요도

표 1. 모형말뚝 제원

제원	근입깊이 (cm)	외경 (cm)	두께 (cm)	탄성계수 (GPa)	휨강성 (tf-cm <sup>2</sup> )	상부질량 (kg)
알루미늄합금	110	3.2	0.5	67.8	2,764	64, 96, 192

표 2. 주문진 표준사 기본 물성값

USCS	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	G <sub>s</sub>	γ <sub>d,max</sub> (t/m <sup>3</sup> )	γ <sub>d,min</sub> (t/m <sup>3</sup> )
SP	0.38	0.58	1.68	2.65	1.66	1.33

그림 1과 같이 암반에 근입된 말뚝을 모사하기 위하여 모형 말뚝은 토조 바닥에 고정시켰다. 말뚝의 깊이별 휨 모멘트와 수평 변위를 측정하기 위하여 깊이 방향으로 14개의 스트레인 게이지를 부착하였으며, 스트레인 게이지와 같은 깊이에 흙의 가속도를 측정하기 위한 가속도계를 설치하였고, LVDT를 통해 상부구조물의 변위를 측정하였다. 또한, 지반과 말뚝의 거동을 쉽게 파악하기 위해 정현파를 입력 진동하중으로 가하였고 가속도 크기와 진동수의 범위는 각각 0.154g~0.4g, 3Hz~12Hz로 하였다. 표 3에 실험 조건을 정리하였다.

표 3. 실험 조건

입력 가속도 진동수(Hz)	입력 가속도 크기 (g)	상부 하중 (kg)
3, 6, 9, 12	0.154, 0.4	64, 96, 192

### 3. 수치 해석

#### 3.1 개요

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS V6.9를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 지반 및 말뚝은 1g 진동대 실험과 같은 크기로 모델링을 하였으며, 지반과 말뚝 요소는 8-node brick 요소를 이용하였다. 말뚝 및 지반은 탄성 모델을 사용하였으며, 말뚝 주변 지반의 큰 변형에 의한 비선형성을 모사하기 위해 등가 선형 개념을 적용하였고, 감소되는 지반의 강성을 역해석을 통해 산출하였다. 지반 요소는 깊이별 탄성 계수를 입력하기 위해 20등분으로 세분화하였으며, 말뚝 요소 역시 깊이별 모멘트 계산을 위해 20등분으로 세분화 하였다. 또한 실험 조건과 동일하게 말뚝은 진동대 바닥면에 고정하였다. 1g 진동대 실험에서는 알루미늄 재질의 중공 원형 말뚝이 사용되었으나, 수치 해석의 안정성을 위하여 중공 말뚝을 휨 강도가 동일한 등가의 사각형 말뚝으로 치환하였으며, 상부 하중은 실제의 위치에 집중 질량을 입력하는 방식으로 모델링을 하였다.

ABAQUS 해석 결과를 지반 분야에 널리 쓰이고 있는 유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D 해석 결과와 비교하였는데, FLAC 3D에서의 모델링은 interface 요소를 추가하여 해석을 하였다. 그 외에 mesh 형상 및 물성값 등에 대한 모델링 방법은 동일하게 적용하였다.

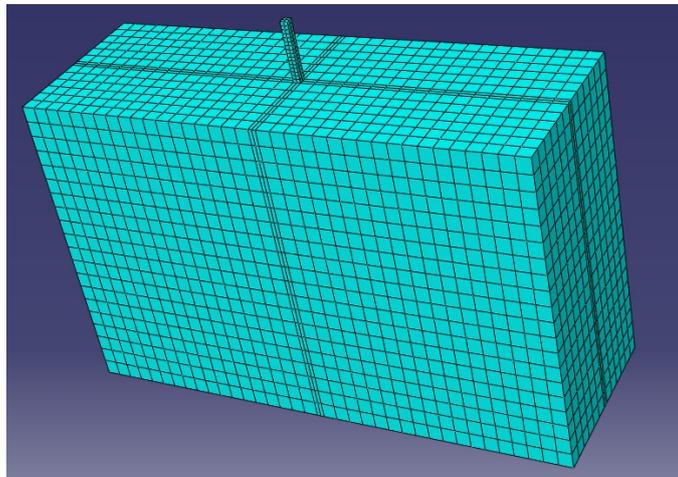


그림 2. ABAQUS mesh

#### 3.2 입력 물성값

수치해석 시 지반-말뚝 동적 상호작용에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 지반의 강성이다. 각 층의 최대 전단 탄성 계수는 최대 전단 탄성 계수와 전단파 속도의 관계인 식(1)과 최대 전단 탄성 계수에 대한 경험식인 식(2)를 통해 산출되었다. 식(2)에서 상수 A, n은 주문진 표준사에 대한 Bender element 실험 결과를 이용해 회귀분석하여 각각 247.73 kPa, 0.567로 결정하였다(양의규, 2009). 지반의 강도는 삼축 실험을 통해 얻어진 결과를 적용하였으며, 말뚝에 대한 입력변수는 알루미늄 합금의 물성치를 사용하였다. 1g 진동대 실험의 정확한 수치 해석을 위해 지반 요소를 20등분하여 깊이에 따라 서로 다른 탄성 계수를 적용하였으며, 수치해석에 적용된 입력 변수는 표 4 및 그림 3과 같다.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$G_{\max} = AF(e)(OCR)^k P_a^{1-n} (\sigma'_m)^n \quad (2)$$

여기서,  $F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$  (Hardin, 1978)

표 4. 입력 변수

	포아송비	단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	마찰각 (°)	상대밀도 (%)	탄성계수 (MPa)
말뚝	0.30	2.70	-	-	67820
지반	0.30	1.58	42	80	그림 3에 표시

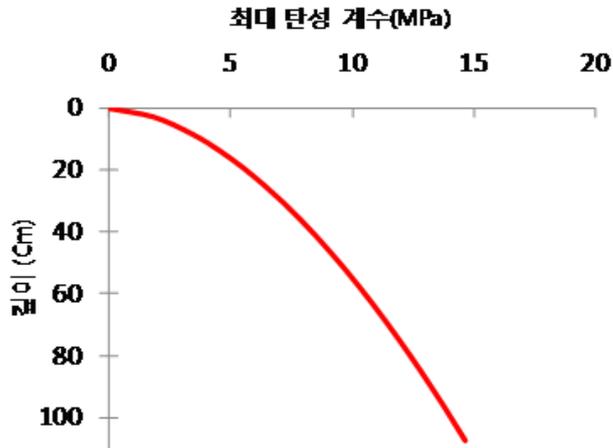


그림 3. 깊이에 따른 지반 최대 탄성 계수

### 3.3 적용성 평가

#### 3.3.1 지반 강성 변화에 따른 결과

최대 전단 탄성 계수는 미소 변형 영역(전단변형율  $\gamma$ : 0~0.001%)에서 얻을 수 있지만, 1g 진동대 실험에 사용된 입력 가속도 0.154g, 0.4g는 비교적 큰 진동 하중이므로 말뚝-지반의 상호 작용에 의해 중간 변형 영역(전단변형율  $\gamma$ : 0.001~0.1%)에서 감소된 전단 탄성 계수를 갖게 된다. 따라서 지반 강성 변화에 따른 적용성 평가를 위해 전단 탄성 계수의 값을 최대 전단 탄성 계수의 35%, 50%, 100%조건에서 수치 해석을 수행하였다.

그림 4는 1g 진동대 실험으로부터 예측된 말뚝의 변위 및 모멘트 분포 곡선을 입력가속도 0.154g, 9 Hz, 상부 하중 96kg 조건에서 지반 강성 변화에 따른 수치해석 결과와 비교한 결과이다. 실험에서 예측된 말뚝 상부의 최대 변위는 1.38mm로 나타났으며, 지반의 강성을 변화시키면서 수치해석을 수행한 결과, 말뚝의 최대 변위는 실험 결과에 비해 최대 전단 탄성 계수의 35%인 경우 9% 작게, 50%인 경우 41% 작게, 100%인 경우 51% 작게 예측하였다. 말뚝의 최대 휨 모멘트는 실험 결과와 비교하여 35%인 경우 17% 작게, 50%인 경우 38% 작게, 100%인 경우 43% 작게 예측하였다. 해석 결과 전단

탄성 계수를 최대 전단 탄성 계수의 35%로 입력하였을 경우가 1g 진동대 실험 결과와 비교했을 때 가장 적합한 해석 조건으로 판단된다. 입력가속도 0.154g, 9 Hz, 상부 하중 96kg 조건에서 ABAQUS 해석 결과는 FLAC 결과에 비해 변형 형상, 모멘트 분포 그리고 최대값 모두 실험 결과와 유사한 것으로 나타났다. FLAC 해석에서는 최대 상대 변위가 3.2mm로 이는 실험 결과에 비해 130% 큰 결과이며, 곡률 변화가 실험에 비해 더 깊은 지점에서 발생하기 때문에 말뚝 최대 휨 모멘트는 실험 결과보다 48% 작게 평가되었다.

ABAQUS 해석에서 발생하는 말뚝 최대 상대 변위와 휨 모멘트의 오차는 1) 수치해석에서 지반-말뚝 인터페이스 모사의 어려움, 2) 지진 가속도 입력 시 1g 진동대 실험의 한계로 인해 발생하는 반사파에 대한 모사의 어려움, 3) 연속체로 모델링된 말뚝 요소로부터 휨 모멘트를 산출하는 과정에서 발생한 오차 등 때문인 것으로 판단된다. ABAQUS에서는 말뚝 요소에서 발생한 휨 모멘트를 직접적으로 산정할 수 없으며, 말뚝 요소에 발생한 응력을 이용하여 빔 이론에 따라 간접적으로 산정해야 한다. 이 과정에서 말뚝 직경과 비교하여 요소의 크기가 충분히 작지 못하였기 때문에 오차가 크게 발생하였을 것으로 판단된다.

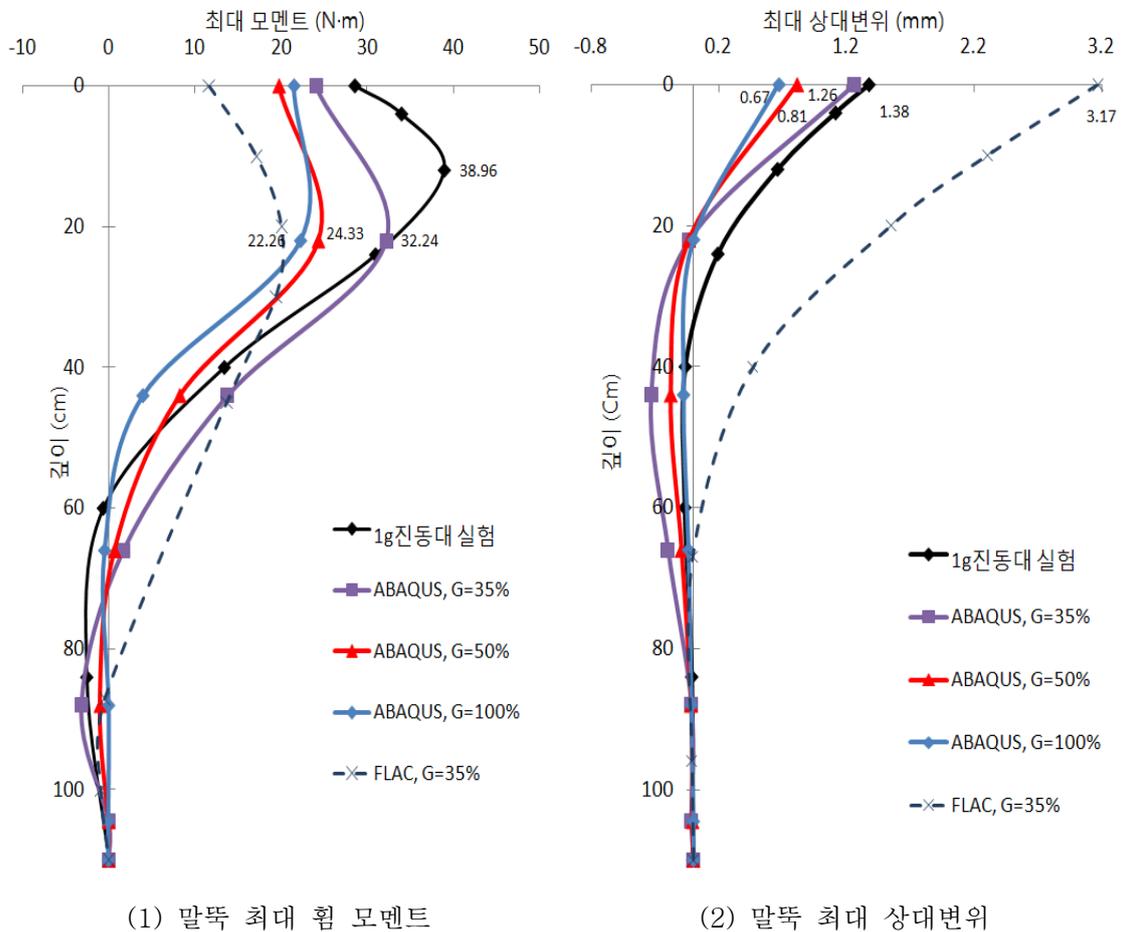


그림 4. 깊이별 말뚝의 최대 변위와 최대 휨 모멘트

### 3.3.2 경계 조건 변화에 따른 결과

1g 진동대 실험에서는 입력 가속도 방향으로 발생하는 반사파를 제거하기 위해 스펀지를 사용하였으며, 수치 해석에서는 이 스펀지를 모사하기 위해 경계 조건으로 dashpot을 토조와 강성 벽체 사이에 설치하였다(그림 5). 그림 6은 입력가속도 0.154g, 9Hz, 상부 하중 96kg 조건에서 경계 조건 변화에 따

큰 말뚝 최대 변위와 말뚝 최대 휨 모멘트를 실험결과와 비교하고 있다. 경계 조건 유무에 관계없이 동일한 해석 결과 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 1g 진동대 실험에서는 1) 스펀지를 사용하여 입력 가속도 방향으로 발생하는 반사파를 제거하였으며, 2) 토조의 길이 및 폭을 말뚝 직경의 10배 이상으로 하여 자유장 조건을 모사하였다. 해석 결과, 1g 진동대 실험의 이러한 자유장 조건을 수치해석에서 적절하게 모델링하고 있는 것으로 판단된다.

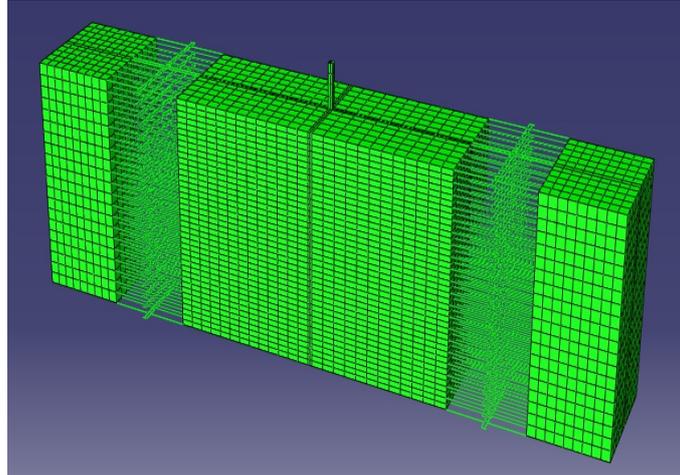


그림 5. 경계 조건 모델링

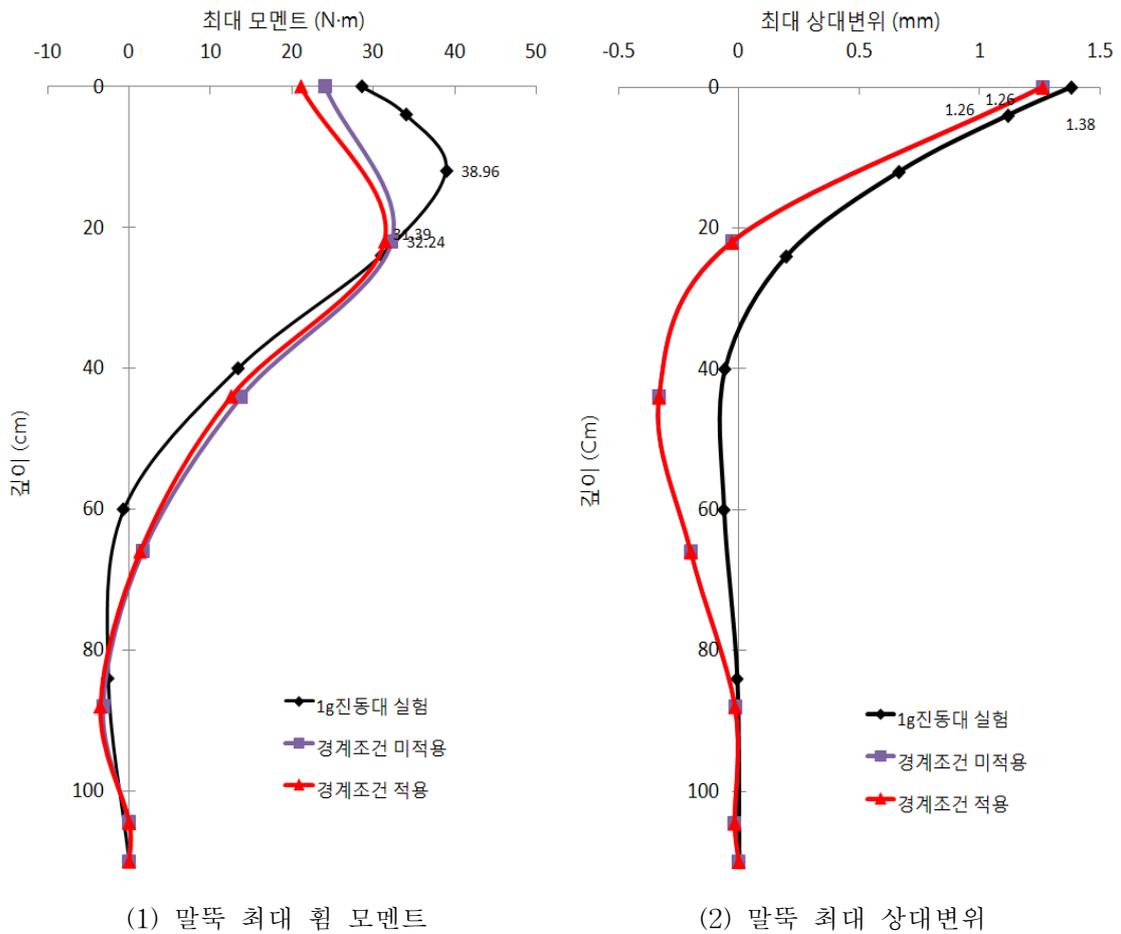


그림 6. 깊이별 말뚝의 최대 변위와 최대 휨 모멘트

### 3.4 매개변수 연구

#### 3.4.1 입력가속도 크기 및 주파수 변화에 따른 결과

그림 7은 입력 지진파의 최대 가속도가 0.154g일 때 주파수 변화에 따른 1g 진동대 실험과 ABAQUS 해석 결과를 나타낸다. 입력 지진파의 주파수가 3, 6Hz일 때 수치 해석에서는 최대 휨 모멘트가 실험 결과에 비해 각각 56% 작게, 144% 크게 예측되었다. 입력 주파수에 따라 이와 같이 크게 변화하는 원인을 알아보기 위해, 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수를 평가하였다. 1g 진동대 실험의 경우 고유진동수는 3Hz 근처로 나타나며, ABAQUS 해석에서는 Eigenvalue extraction 해석을 통해 고유진동수가 4.2Hz로 산정되었다. 3, 6Hz는 상대적으로 고유진동수에 가까운 값이므로 이 주파수 대역에서는 응답이 입력 주파수에 민감하다. 수치 해석 상 고유 진동수가 실험 시 고유 진동수와 정확하게 일치하지 않기 때문에 고유 진동수와 가까운 3, 6Hz에서는 오차가 크게 발생한다고 판단할 수 있다. 그러나, 고유 진동수로부터 상대적으로 먼 9Hz의 경우 실험 결과에 비해 17% 정도 작게 예측하여 실험값을 근사하게 예측하고 있다.

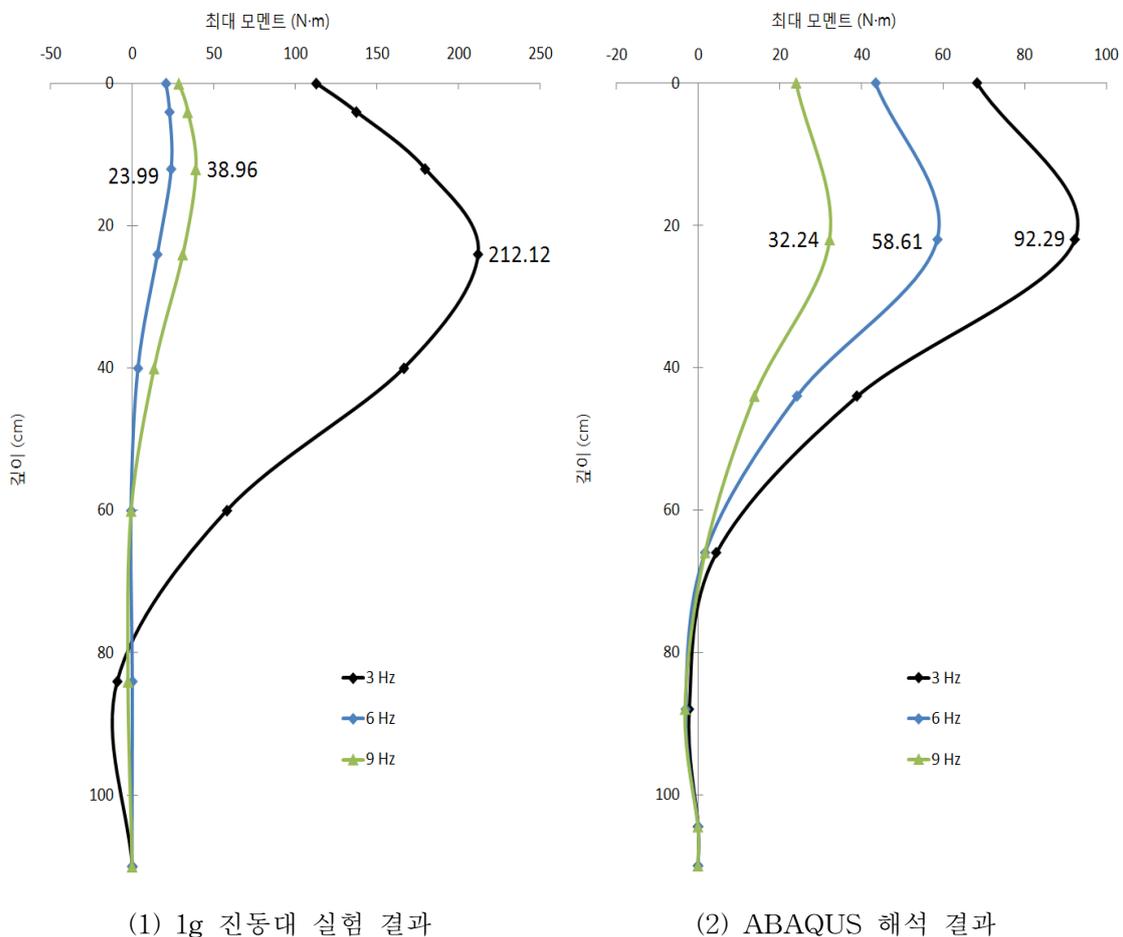
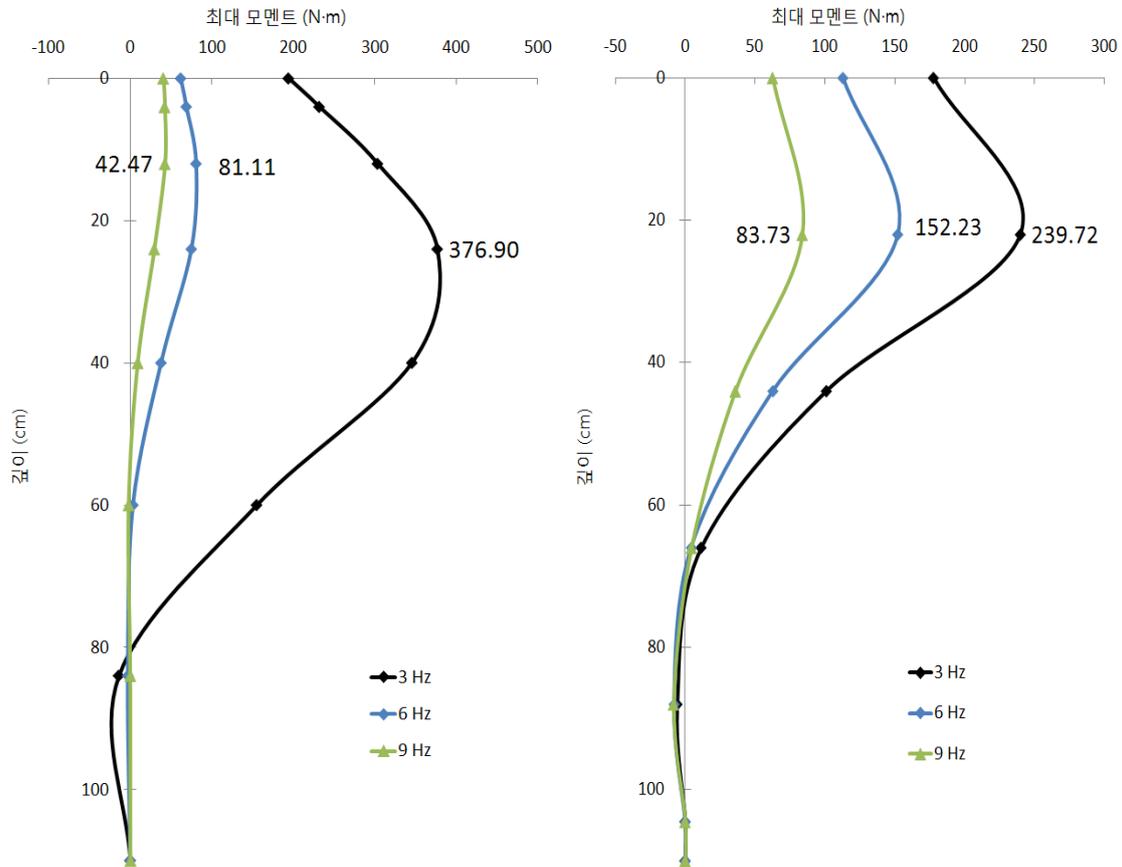


그림 7. 깊이별 말뚝의 최대 휨 모멘트

그림 8은 입력 지진파의 최대 가속도가 0.4g일 때 주파수에 따른 1g 진동대 실험과 ABAQUS 해석 결과를 나타낸다. 지진파의 최대 입력 가속도가 0.4g인 경우 입력 주파수 별 응답은 0.154g 조건의 경우와 동일하게 실험 결과와 경향이 일치한다. 3, 6Hz일 때의 최대 휨 모멘트는 실험 결과에 비해 각각 36% 작게, 88% 크게 예측되었다. 3, 6Hz에서 최대 휨 모멘트의 차이는 0.154g 조건과 마찬가지로 1g

진동대 실험 모델과 ABAQUS 모델의 고유 진동수 차이에 의한 오차 때문인 것으로 판단된다. 9Hz의 경우 실험 결과에 비해 97% 크게 예측하고 있다.



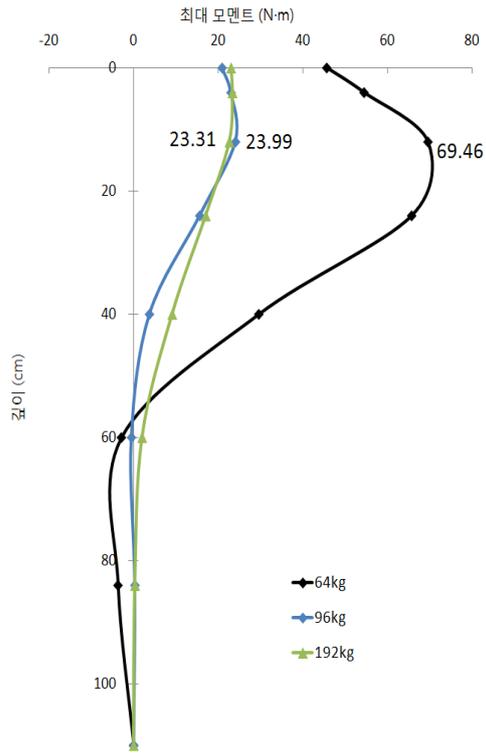
(1) 1g 진동대 실험 결과

(2) ABAQUS 수치해석 결과

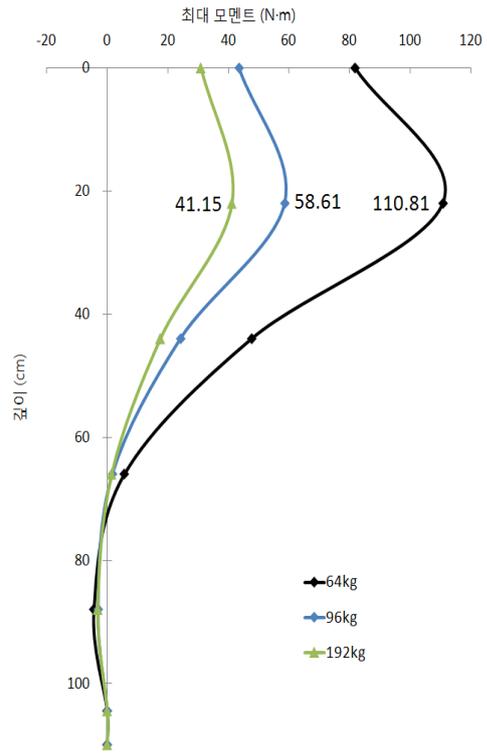
그림 8. 깊이별 말뚝의 최대 휨 모멘트

### 3.4.2 말뚝 상부 하중 크기에 따른 결과

그림 9는 입력가속도 0.154g, 6Hz 조건에서 말뚝 상부 하중 크기에 따른 수치해석 결과이다. 실험 결과와 비교하여 말뚝의 최대 휨 모멘트는 64kg 조건에서 59% 크게, 96kg 조건에서 144% 크게, 192kg 조건에서 82% 크게 예측하였다. 그림 10은 입력가속도 0.4g, 6Hz에서 말뚝 상부 하중 크기에 따른 수치해석 결과이다. 실험 결과와 비교하여 말뚝의 최대 휨 모멘트는 64kg 조건에서 125% 크게, 96kg 조건에서 102% 크게, 192kg 조건에서 128% 크게 예측하였다. 상부 하중이 증가하면 관성력이 증가하기 때문에 말뚝의 응답이 증가할 것이라는 예측과는 상반되게 1g 진동대 실험과 수치해석 결과 모두 상부 하중이 증가할수록 최대 모멘트가 작아지는 결과를 보인다. 이는 상부 질량이 증가할수록 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 감소하게 되고, 이에 따라 입력 진동수 6Hz가 고유 진동수와 점점 멀어지는 효과가 크게 발생되어 응답이 감소하는 결과가 나타난 것으로 판단된다. 수치 해석은 1g 진동대 실험에서 보인 고유 진동수와 입력 진동수의 이러한 상관 관계를 적절히 모사하고 있다.

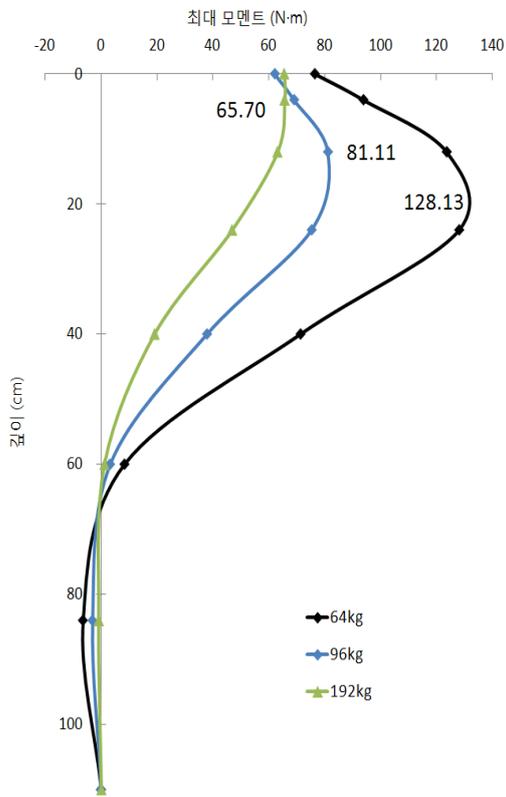


(1) 1g 진동대 실험 결과

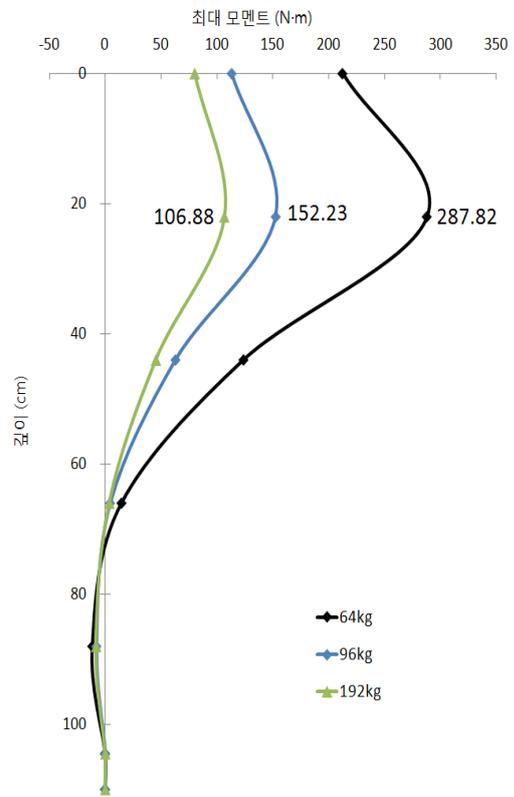


(2) ABAQUS 수치해석 결과

그림 9. 깊이별 말뚝의 최대 휨 모멘트



(1) 1g 진동대 실험 결과



(2) ABAQUS 수치해석 결과

그림 10. 깊이 별 말뚝의 최대 휨 모멘트

## 4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 1g 진동대 실험에서 수행한 동적 모형말뚝실험을 모사하였고 유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D 해석 결과와 비교하였다. 또한 지반 강성, 경계 조건을 변화시키면서 수치해석을 수행함으로써 수치해석 기법의 적용성을 검증하였다. 또한 검증된 해석 기법을 이용해 입력 가속도의 주파수와 진폭, 그리고 말뚝 상부 하중 크기를 각각 변화시켜 해석을 수행하고, 이를 통해 지반-말뚝의 동적 상호 작용을 분석하였다.

- (1) 지반 강성의 변화에 따른 수치해석 결과를 알아보기 위해, 지반 최대 전단 탄성 계수의 35%, 50%, 100% 값을 입력하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 말뚝의 최대 변위 및 최대 휨 모멘트를 1g 진동대 실험 결과와 비교했을 때 전단 탄성 계수가 최대 전단 탄성 계수의 35% 경우가 가장 적합한 해석 조건으로 판단된다.
- (2) 입력가속도 0.154g, 9Hz, 상부 하중 96kg 조건에서 ABAQUS 해석 결과는 말뚝의 변형 형상, 휨 모멘트 분포에서 FLAC 3D 해석 결과보다 진동대 실험 결과와 유사한 것으로 나타났다. FLAC 3D 해석은 최대 상대 변위를 실제보다 크게 계산하며 곡률 변화가 더 깊은 지점에서 발생하기 때문에 말뚝 최대 휨 모멘트를 실제보다 작게 평가하였다.
- (3) 입력가속도 0.154g, 9Hz, 상부 하중 96kg 조건에서 경계 조건 유무에 관계없이 말뚝 최대 변위와 말뚝 최대 휨 모멘트는 동일한 해석 값을 나타내었다. 동일한 해석 결과 값은 1g 진동대 실험에서 모사한 자유장 조건을 수치해석에서 적절하게 모델링하고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 수치해석으로부터 구한 입력가속도 크기 및 주파수 변화에 따른 말뚝 최대 휨 모멘트는 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수와 상대적으로 가까운 3Hz와 6Hz의 경우에서 오차가 크게 발생하며, 고유 진동수로부터 먼 9Hz의 경우 실험값을 근사하게 예측하였다.
- (5) 수치해석으로부터 구한 말뚝 상부 하중 크기에 따른 말뚝 최대 휨 모멘트는 1g 진동대 실험결과와 비교하여 50~150% 크게 예측하였다. 또한, 상부 질량이 증가할수록 지반-말뚝 시스템의 고유 진동수가 감소하게 되고, 이에 따라 입력 진동수와 고유 진동수가 점점 멀어지는 효과가 크게 발현되어 응답이 감소하는 결과가 나타났는데, 이는 진동대 실험 결과와 일치하는 결과이다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018864).

## 참고문헌

1. 나선홍(2010), "1g 진동대 실험의 수치 모델링을 통한 지반-말뚝 상호 작용 평가", 석사학위논문, 서울대학교.
2. 한국 지반공학회(2002), "지반공학시리즈-지반 구조물의 내진 설계", 구미서관.
3. 양의규(2009), "1g 진동대 실험을 이용한 사질토 지반의 동적 p-y 곡선 평가", 박사학위논문, 서울대학교.
4. Hardin, B. O.(1978), "The nature of stress-strain behaviour of soils", Earthquake engineering and soil dynamics, Pasadena. Vol. 1. pp. 3-90.
5. Iai, S.(1989), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational

field", *Soils and Foundation*, JSSMFE, 29(1), 105-118.

6. Masoud Hajjalilue-Bonab, Jean-Louis Chazelas, and Daniel Levacher(2007), "Procedure used for dynamically laterally loaded pile tests in a centrifuge", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.30, No.1. pp.73-81.
7. Surendran Balendra(2005), "Numerical modeling of dynamic soil-pile-structure interaction", Master Degree Thesis, Washington State University, Washington, USA.