

## 실구조물의 동특성 파악을 위한 축소모형에 적용되는 상사비 분석

박건<sup>1</sup>, 윤형철<sup>2</sup>, 김성보<sup>3\*</sup>

### Analysis of Scaling Factor applied to Lab-Scale Model for Estimating Dynamic Characteristics of Real Structures

Gun Park<sup>1</sup>, Hyungchul Yoon<sup>2</sup>, Sung Bo Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract** : The earthquakes are the natural disasters that can cause the most serious damage to civil structures. Therefore, various studies are being conducted to secure the safety of structures against earthquakes. Most studies on the safety or mechanism of civil structures during earthquakes are being conducted based on lab scale test, because real structure tests are impossible when considering the scale of civil structures. The scaling factor proposed by Iai is mainly cited, but when applying the scaling factor proposed by Iai, there are many difficulties in selecting the structural members necessary for the production of the lab scale model. This is because when applying the scaling factor proposed by Iai, the scaling factor must be applied to the elastic modulus, which is the material property of the structure. Therefore, a new method based on Iai's similarity law for determining scale factor is applied in this study where the material property of real structure is same as that of lab-scale model. Through the results of this study, it is considered that the characteristics of the structure calculated through the lab scale model test can more accurately reflect the characteristics of the real structure.

**Keywords**: Scaling Factor, Lab-Scale Model, Shaking Table Test, Earthquake, Dynamic Characteristics

## 1. 서 론

전 세계적으로 발생하는 지진은 인명과 재산 피해에 있어 큰 영향을 미치는 자연재해 중 하나이다. 최근 들어 이러한 지진은 점차 강도 및 빈도가 증가하고 있으며, 그로인해 피해 또한 증가하고 있다. 1988년 아르메니아에서 발생한 지진은 25,000명 이상의 사망자가 발생하였으며, 1995년 고베 지진은 5,500여명의 사망자와 20만 명의 이재민이 발생하였다. 또한, 2011년 일본에서 발생한 지진 및 해일은 1만명이 넘는 사망자뿐만 아니라, 후쿠시마 원자력 발전소 폭발에 의한 방사능 유출이라는 최악의 상황을 발생시켰다.

세계적으로 발생하는 이러한 지진에 대하여 구조물의 안전성을 확보하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. Benedetti, et al. (1998)은 2층 석조 건물의 1/2 축소모델에 손상을 입힌 후 실험체를 보강하여 진동실험을 수행하였다. 이때, 구조물의 보

강에 사용된 다양한 보강기술의 효율성을 평가하고, 손상에 따른 구조물 시스템의 동적 특성 변화를 확인하였다. Dolce, et al. (2005)는 3.5m 높이의 철근콘크리트 구조물에 대해 1/3.3 축소모형을 제작하고, 특수 브레이싱의 부착 유·무에 따른 구조물의 지진 저항성 향상에 대한 연구를 수행하였다. Hokmabadi (2014)는 지진시 지반-말뚝-구조물 상호작용(Seismic Soil - Pile-Structure, SSPSI)의 효과를 명확히 규명하기 위해 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 얇은기초, 지반-구조물 상호작용을 고려한 얇은기초, 지반-구조물 상호작용을 고려한 말뚝기초의 세 가지 경우에 대하여 실험과 해석을 수행하고 구조물의 안전성을 비교하였다. Yu, et al. (2018)은 홍콩-주하이-마카오 대교 프로젝트의 일환으로 40m 길이의 터널에 대해 1/60 축소모형을 제작하고, 다지점에서 균일하지 않은 지진하중이 작용할 때 터널의 안전성을 확인하였다. Kim과 Shin (2011)은 지하 역사를 1/60 축소모형으로 제작하고, 장주기인 Kobe 지진파와 단주기인 Northridge 지진파를 적용한 원심모형 진동대 시험을 수행하여 지하역사의 내진성능을 평가하였다.

지진시 토목구조물의 안전성이나 메커니즘에 대한 연구는 대부분 축소모형실험을 바탕으로 진행되고 있다(Lee and Yhim, 2013; Kim, et al., 2018; Ko, 2020). 이는 토목구조물의 규모를 고려하였을 때 실구조물 실험이 불가능에 가깝기 때문이다. 따

<sup>1</sup>정회원, 충북대학교 토목공학부, 박사후 연구원

<sup>2</sup>정회원, 충북대학교 토목공학부, 부교수

<sup>3</sup>정회원, 충북대학교 토목공학부, 교수

\*Corresponding author: sbkim@chungbuk.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungdae-ro 1, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 실구조물의 거동을 정확히 모사할 수 있는 축소모형을 만들기 위한 다양한 상사법칙 관련 연구가 수행되어 왔다. Kagawa (1978)은 하중의 비를 사용하여 동적하중을 받는 지반에 대한 상사법칙을 연구하였으며, Kokusho와 Iwatate (1979)는 Buckingham의  $\pi$ 이론을 사용하여 지반의 비선형 동적 응답에 대한 상사법칙을 연구하였다. 또한, Iai (1989)는 지반-구조물-유체의 지배방정식을 바탕으로 시스템에 대한 상사법칙을 제안하였다.

Iai가 제안한 상사법칙은 기본 이론식을 바탕으로 다양한 물리량을 수학적으로 유도하고 있으므로 높은 신뢰성을 가지고 있어 많은 연구에서 인용되고 있다. Iai가 제안한 상사법칙은 표준형태를 바탕으로 지반의 특성과 재료의 단위중량에 따라 Table 1에 보인 바와 같이 세 종류의 형태를 제공한다. 그러나 이 세 종류의 상사법칙은 구조물의 재료특성인 탄성계수에 상사비를 적용하여야 하기 때문에 축소모델의 제작에 많은 어려움이 수반되며, 따라서 지반-구조물 상호작용 관련 연구들(Han, et al., 2010; Kim, et al., 2015; Al-Isawi, et al., 2019)에서는 축소모델의 재료특성에 대해서는 자세히 기술하지 않고 있다.

따라서, 이 논문에서는 지진하중에 의한 구조물의 동적 거동 분석을 위한 진동대 실험에 사용되는 축소모형을 제

작할 때, 재질 특성을 일정하게 유지하면서 실제 구조물의 동특성을 구현하는 상사비를 Iai의 법칙에 근거하여 제시하였다. 이를 위해 실제 구조물의 재료특성을 상사비에 적용하지 않을 경우 Iai가 제안한 상사법칙의 표준형태에 대한 변화를 확인하고 그 결과를 실험과 해석을 통하여 검증하였으며, 이상의 내용에 대한 개략적인 흐름을 Fig. 1에 나타내었다.

## 2. 축소모형 실험 및 해석

### 2.1 축소모형 실험

지진하중이 작용할 때 지반의 거동은 반복 유동성 거동(Cyclic mobility type)과 변형률 연화 거동(Strain softening type)으로 구분된다. 문헌에 발표된 연구(Shin et al., 2011)에서 지반이 반복 유동성 거동을 보이는 경우 지반-구조물 시스템의 동적거동은 변형률에 대한 상사비  $\lambda_e$ 을 고려하는 것이 매우 중요함을 밝히고 있다. 모형 지반의 전단파 속도에 대한 자료가 있으면 변형률에 대한 상사비  $\lambda_e$ 은 식 (1)에 의해 산정될 수 있으며, 여기서  $(V_s)_m$ ,  $(V_s)_p$  및  $\lambda$ 는 각각 모형지반, 원형지반의 전단파 속도 및 원형과 모

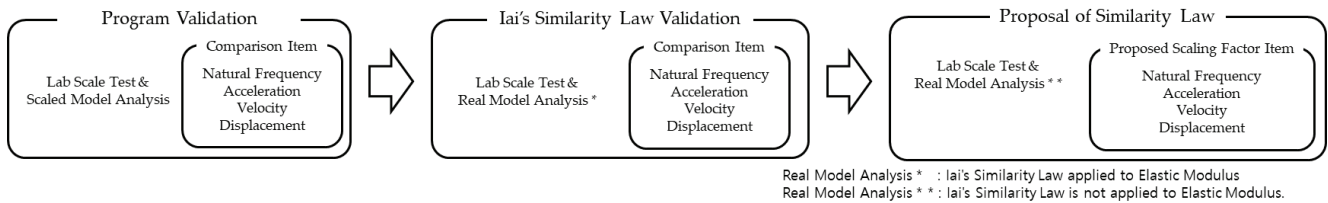


Fig. 1 Flow Chart

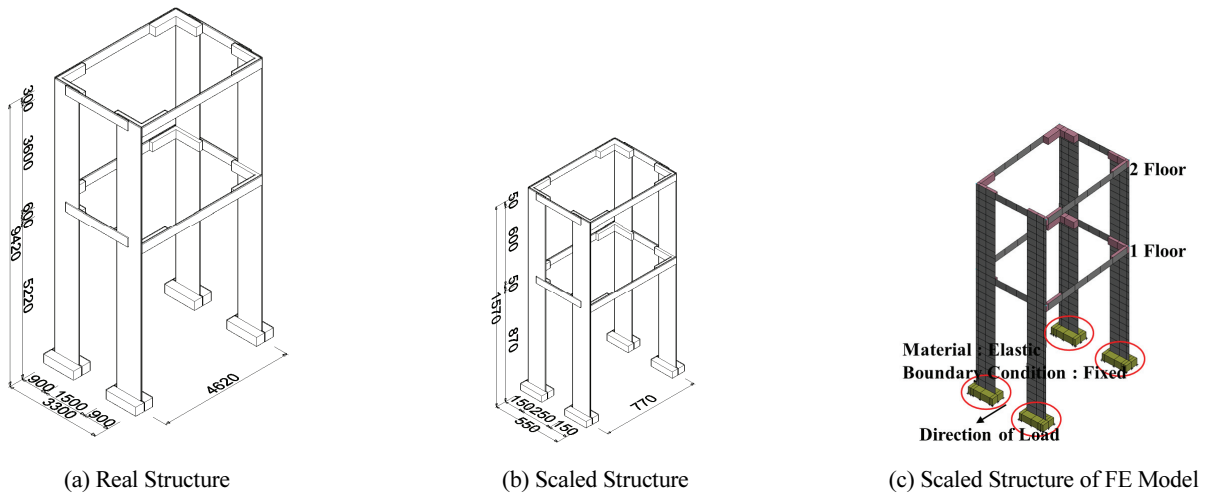


Fig. 2 Real and Scaled Structure

**Table 1** Iai's Similarity Law

Item	Scaling Factors (Prototype/model)			
	Standard	The 1st Form ( $\lambda_\rho = 1$ )	The 2nd Form ( $\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$ )	The 3rd Form ( $\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$ )
Length	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$
Density	$\lambda_\rho$	1	1	1
Time	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Acceleration	1	1	1	1
Velocity	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Displacement	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	$\lambda$
Modulus of Elastic	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	$\lambda/\lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	$\lambda$

형의 기하학적 크기의 비를 나타낸다.

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[ \frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (1)$$

축소모형의 지반과 원지반의 전단파 속도에 대한 자료가 없는 경우에는 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다고 가정하여, 변형률에 대한 상사비  $\lambda_\epsilon$ 을 식 (2)에 의해 산정할 수 있다(Iai의 상사법칙 제 2형태).

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (2)$$

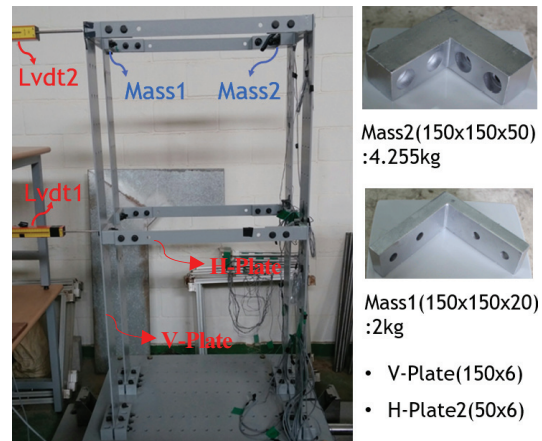
지반이 변형률 연화거동을 보이는 경우, 이 지반은 대변형이 발생하므로 변형률에 대한 상사비  $\lambda_\epsilon$ 을 도입할 수 없으며, 원지반의 거동을 모사하기 위하여 축소모형지반의 상대밀도를 원지반의 상대밀도보다 낮게 조성하여야 한다. 이 경우 Iai의 상사법칙 중 제3형태를 적용할 수 있다(Shin et al., 2011).

이 논문은 지진에 의한 구조물의 동적특성을 축소 모형실험을 통하여 효율적으로 규명하기 위하여, 진동대 실험에 사용되는 상부 구조물의 상사비를 제안하는 것에 중점을 두고 있다. 그러므로 구조물에 미치는 지반의 영향을 최소화하기 위해 지반이 강체 거동을 한다고 가정하였다. 강체 거동을 하는 지반은 강도가 매우 큰 경암이 일반적이며, 내진설계기준 (KDS 17 10 00)에서는 전단파 속도 760m/s를 초과하는 지반을 경암으로 규정하고 있다. 그러므로 이 연구에 적용한 원지반과 모형지반의 전단파 속도는 모두 760m/s를 초과하며, 그 값은 동일하다고 가정하였다. 이상의 가정사항을 Iai의 상사법칙 중 제 1 형태에 적용하여 Table 2에 보인 상사비를 작성하였으며, 이렇게 작성된 상사비를 Fig.2(a)와 같은 실구조물에 적용하여 Fig.2(b)에 나타난 축소모형을 제작하였다. 강제인 지반을 고려한 진동대 실험을 수행하기 위해 Fig.3과 같이 구조물을 진동대에 거치하고, Fig. 4의 Chalfant Valley(1986) 지진을 진동대에 하중으로 재하하였다.

Chalfant Valley 하중은 단주기와 장주기의 특성을 모두 포

**Table 2** Similarity Law applied to the Real Structure

Item	Equation	Scaling Factor ( $\lambda$ )
Length	$\lambda$	6
Time	$\lambda$	6
Acceleration	1	1
Velocity	$\lambda$	6
Displacement	$\lambda^2$	36
Modulus of Elastic	1	1



**Fig. 3** Shaking Table Test Setup

함하고 있는 하중으로 구조물의 동적 특성을 파악하기에 적절한 하중으로 판단된다. 진동대 실험에 적용된 구조물이 축소모형이므로 적용되는 하중 또한 상사비가 적용된 하중을 사용하여야 한다. 그러나 원지진하중의  $\Delta t$ 인 1/50초에 상사법칙을 적용할 경우 실험에 적용되는 축소지진하중의  $\Delta t$ 가 1/300초가 되며, 이는 실험에 사용된 진동대에서 시간이력으로 재하할 수 있는 진동수를 초과한다. 따라서, 이 연구에서는 원지진하중을 축소모형에 적용하고, 원구조물의 해석에 상사법칙을 적용한 지진하중을 사용하였다.

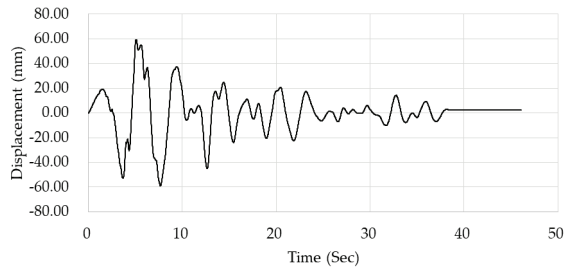


Fig. 4 Time-Displacement History of Chalfant Valley Earthquake

Table 3 Material Properties

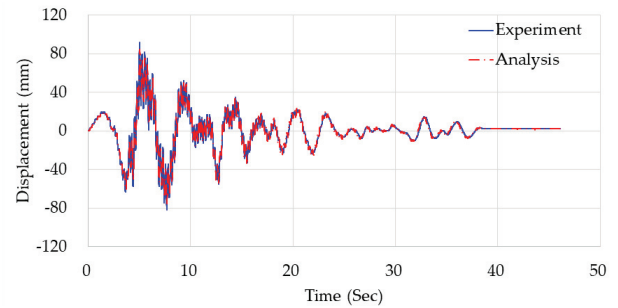
	Column	Cross Beam	Connection
Material	SS275	SS275	SS275
Modulus of Elastic (MPa)	210,000	210,000	210,000
Poisson's Ratio	0.30	0.30	0.30
Weigh Density (kN/m <sup>3</sup> )	78.50	78.50	78.50

## 2.2 축소모형의 유한요소해석

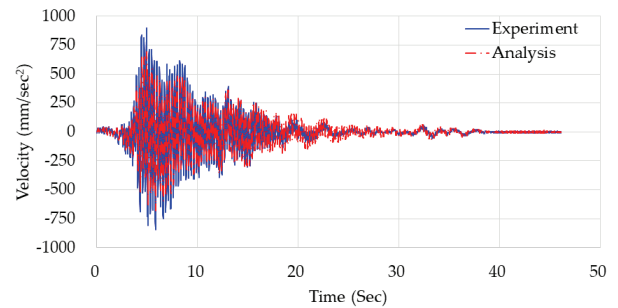
지진하중을 받는 구조물의 유한요소 해석기법의 타당성을 확인하기 위하여, 축소모형에 대한 유한요소 해석 모델을 작성하고 동적해석을 수행한 후 그 결과를 축소 모형실험과 비교하였다. 구조해석에 적용한 해석모델은 Fig.2(c)와 같으며 재료 특성은 Table 3과 같다.

기둥과 보 연결부에 집중질량이 부가된 연결부를 적용하였으며, 구조물에 편심이 발생하여 1방향 지진하중에 대하여 2방향의 거동이 나타나도록 질량이 상이한 두 종류의 집중질량을 적용하였다. Fig. 3에서 보인 바와 같이 2kg의 Mass 1은 1층 네 곳과 2층 세 곳에 부착되었으며 L 형태의 150×150×20mm 부재이다. 또한, 4.255kg의 Mass 2는 2층의 우측 후면부 한 곳에 부착되었으며 150×150×50mm 부재이다. 연결부에 부착된 L 형태의 집중질량을 유한요소해석에 적용하기 위하여 8절점 솔리드 요소를 사용하였다. 그리고, 기둥(V-Plate)과 가로보(H-Plate)는 두께 6mm의 강판부재로서, 유한요소모델에서 실험에 적용된 구조부재의 특성을 모사할 수 있도록 4절점 쉘요소를 적용하였다. 또한, 기둥 하면을 고정단으로 처리하였고, LS-DYNA의 Prescribed motion을 사용하여 Fig. 4에 보인 지진하중을 구조물 하면에 재하하였다. 모형실험과 유한요소해석을 통해 구조물의 각 층에서 발생되는 변위, 속도, 가속도 및 Frequency Response Function (FRF) 그래프를 작성하여 Fig.5에 도시하였으며, FRF 그래프를 바탕으로 구조물의 고유진동수를 추출하여 Table 4에서 유한요소 해석결과와 비교하였다.

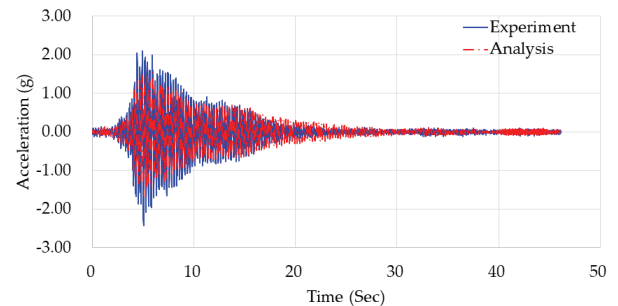
축소모형 실험에 의해 산정된 구조물의 고유진동수는 1차 모드에서 3.457Hz, 2차 모드에서 14.004Hz로 나타났으며, 유한요소해석을 통해 산정된 구조물의 고유진동수는 1차 모드에서 3.721, 2차 모드에서 13.594로 나타났다.



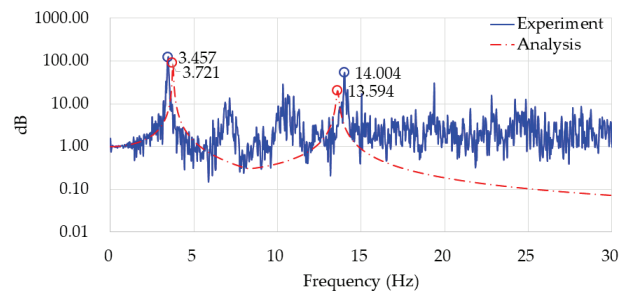
(a) Time-Displacement History (Floor 2)



(b) Time-Velocity History (Floor 2)



(c) Time-Acceleration History (Floor 2)



(d) Frequency Response Function Curve

Fig. 5 Comparison of Experiment and Validation Analysis

Table 4 Comparison of Natural Frequency between Experiment and Validation Analysis

Mode	Test (Hz)	Analysis (Hz)	Error (%)
1st	3.457	3.721	-7.627
2nd	14.004	13.594	2.929

실험과 해석의 정확도는 1차 모드에서 약 7%, 2차 모드에서 약 3%의 오차를 보이는 것으로 확인되었다. 또한,



**Table 5** RMS Error between Experiment and Validation Analysis

	Displacement (%)	Velocity (%)	Acceleration (%)
Floor 1	1.144	11.250	9.278
Floor 2	1.223	7.689	5.427

Table 5에서 실험과 해석에 대한 각층별 변위, 속도, 가속도 응답의 Root Mean Square Error (RMSE)를 산정한 결과, 변위의 경우 1층과 2층에서 모두 약 1%의 오차를 보여 매우 높은 정확도를 보였다. 속도와 가속도의 비교에서는 최대 약 11%와 약 9%의 오차를 보여 변위에 비하여 상대적으로 높은 오차를 나타내었으나, 변위, 속도, 가속도 모두 최소 89%이상의 정확도로 지진하중을 받는 구조물의 유한요소 해석결과가 실험결과를 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 3. 상사법칙의 적용성 분석

#### 3.1 Iai의 상사법칙을 적용한 실구조물 해석

정확한 상사비의 검증은 위해서는 축소모형과 실구조물을 실험으로 비교하는 것이 가장 명확하다. 그러나 실험장비의 한계 등을 고려하였을 때 실구조물의 진동 실험을 수행하는 것은 거의 불가능에 가깝다. 따라서 이 논문에서는 범용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 실구조물 실험을 대체하였다.

일반적인 축소모형의 경우 실구조물을 기준으로 축소모형을 제작하지만, Iai가 제안한 상사법칙을 적용하여 실구조물의 크기 및 재질을 변경할 경우 축소모델의 제작시 사용되는 재료의 선정이 어려워진다. 따라서 축소모델을 일반적인 구조재료인 강철로 제작하고, 실구조물의 해석모델에 Iai의 상사법칙을 고려한 재료특성을 적용하여 Iai가 제안한 상사법칙이 정확히 고려되도록 하였다. 이상의 방법으로 작성된 실구조물의 형상은 Fig.2(a)와 같으며, 각 물리량에 대한 Iai의 상사비는 Table 6에 나타내었다. 특히, 실구조물의 해석모델에 탄성계수를 2.449배 증가시켜 514,290 MPa의 값을 적용하였다.

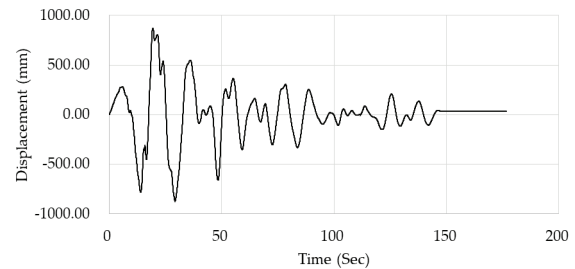
실구조물의 진동해석에 사용된 지진하중은 Fig.6에 보인 바와 같다. 여기서 지진하중은 상사비를 고려하여 Fig.4에 보인 지진하중에 시간 간격은 3.834배를 증가시켰고, 변위는 14.697배가 증가하도록 수정하였다.

#### 3.2 실험 및 해석의 결과 비교

Iai의 상사법칙을 적용한 실구조물해석과 축소모형실험의 변위, 속도, 가속도 및 고유주기에 대하여 비교를 수행하여 Fig. 7, Table 7 및 Table 8에 나타내었다. 이 때, 두 결과의 비

**Table 6** Iai's Similarity Law applied to the Real Structure

Item	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	Scaling Factor ( $\lambda$ )
Length	$\lambda$	6
Time	$\lambda^{0.75}$	3.834
Acceleration	1	1
Velocity	$\lambda^{0.75}$	3.834
Displacement	$\lambda^{1.5}$	14.697
Modulus of Elastic	$\lambda^{0.5}$	2.449

**Fig. 6** Time-Displacement History applied to Iai's Similarity Law**Table 7** Comparison of Natural Frequency between Experiment and Analysis for Real Structure applied to Iai's Similarity Law

Mode	Scaled Model (Hz)	Real Structure based on Iai's Similarity Law (Hz)	Error (%)
1st	3.457	3.803	9.098
2nd	14.004	13.922	-0.589

교는 실구조물 해석에 상사비를 적용하여 축소모형 실험결과와 비교하였다.

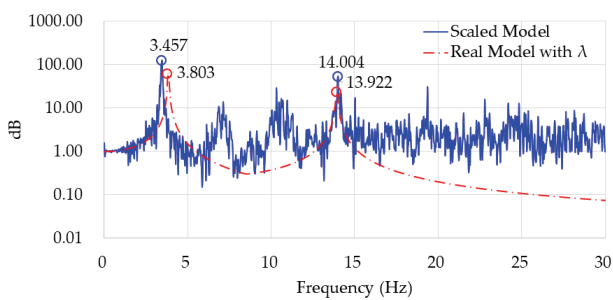
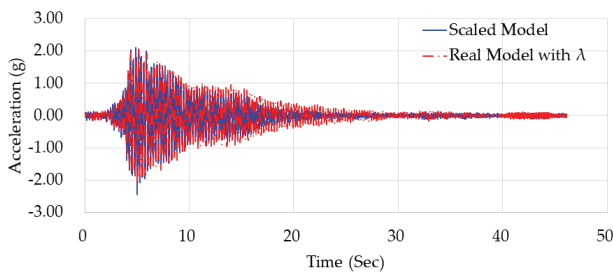
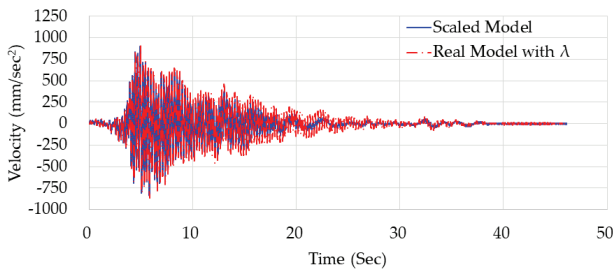
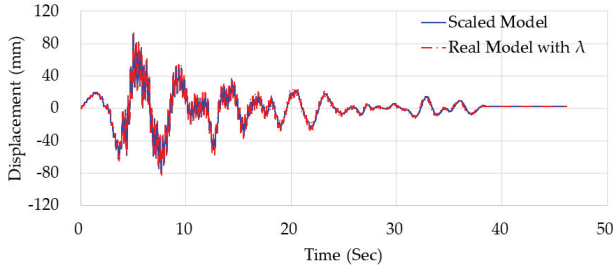
고유진동수의 비교에서 1차 모드는 약 9%의 오차를 보였으며, 2차 모드는 약 1%의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 변위의 경우 1층과 2층 모두에서 2%미만의 오차를 보여 Iai의 상사법칙을 적용한 축소모형실험은 실제 구조물의 거동을 매우 정확히 예측한 것으로 확인되었다. 속도와 가속도의 경우 최대 약 14%의 오차를 보여 변위에 비해서는 상대적으로 높은 오차율을 나타내었다. 이상의 결과를 바탕으로 Iai가 제안한 상사법에 근거한 축소모형 실험결과는 실구조물의 동특성을 비교적 정확하게 나타내고 있다고 판단된다.

#### 3.3 상사비 검증

3.1절과 3.2절의 내용을 통하여 Iai의 상사법칙은 실구조물의 동적거동을 축소모형을 이용하여 구현할 때 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다. 그러나 이는 실구조물과 축소모형의 탄성계수가 2.449배의 차이를 보일 경우 가능하다. 이와 같이 실구조물의 재료특성에 대한 상사비를 적용하여 축

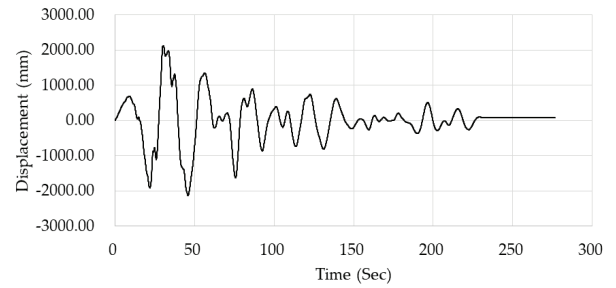
**Table 8** RMS Error between Experiment and Analysis for Real Structure applied to Iai's Similarity Law

	Displacement (%)	Velocity (%)	Acceleration (%)
Floor 1	1.487	13.962	12.103
Floor 2	1.786	10.630	8.388

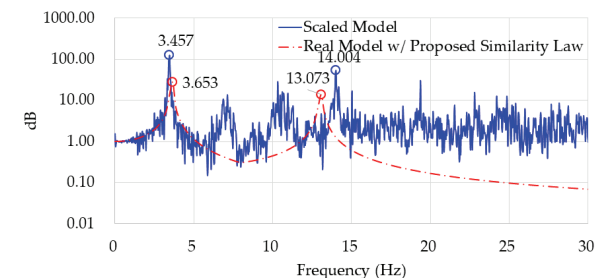
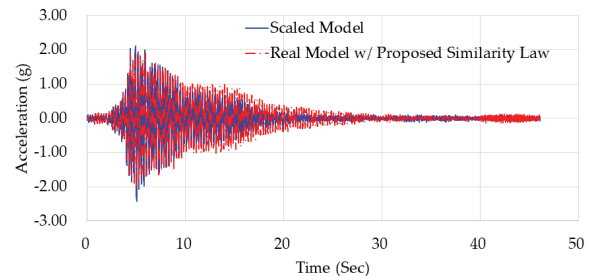
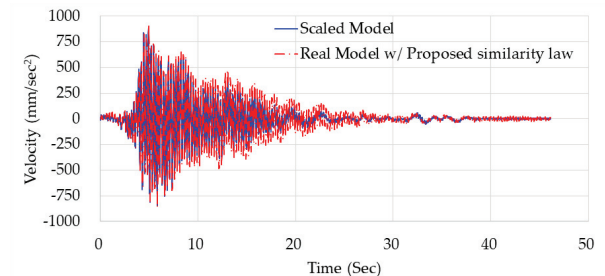
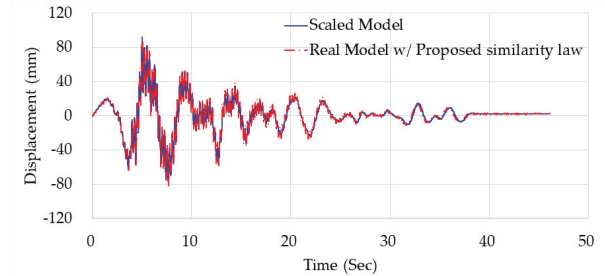


**Fig. 7** Comparison of Experiment and Analysis for Real Structure applied to Iai's Similarity Law

소모형을 제작하여 진동실험을 수행하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 이 절에서는 Table 2에 보인 상사비를 사용하여 수



**Fig. 8** Time-Displacement History of Chalfant Valley Earthquake based on Proposed Similarity Law



**Fig. 9** Comparison of Experiment Curve and Analysis Curve for Real Structure applied to Proposed Similarity Law

**Table 9** Comparison of Natural Frequency between Experiment and Analysis for Real Structure applied to Proposed Similarity Law

Mode	Scaled Model (Hz)	Real Structure based on Proposed Method (Hz)	Error (%)
1st	3.457	3.653	5.361
2nd	14.004	13.073	-7.117

**Table 10** RMS Error between Experiment and Analysis for Real Structure applied to Applied Similarity Law

	Displacement (%)	Velocity (%)	Acceleration (%)
Floor 1	1.580	14.880	13.156
Floor 2	1.945	11.635	9.483

행된 실구조물해석과 실험값을 비교하여 Iai의 상사법칙을 바탕으로 작성된 상사비의 실효성을 검토하였다. Iai의 법칙을 바탕으로 작성된 상사비를 적용한 지진하중은 Fig. 8에 도시한 바와 같으며, Fig.4의 지진하중에 시간 간격은 6배 증가시켰고, 변위는 36배가 증가하도록 수정하였다. 실구조물의 해석모델에 적용된 탄성계수는 축소모형의 탄성계수와 동일한 값을 적용하였다.

Iai의 법칙을 바탕으로 작성된 상사비를 실구조물 해석 모델에 적용하여 지진하중 해석을 수행하였으며, 구조물의 고유진동수, 변위, 속도, 가속도에 대하여 축소모형 실험의 결과와 비교하여 Fig. 9, Table 9 및 Table 10에 나타내었다.

고유진동수의 비교에서 1차 모드는 약 5%의 오차를 보였으며, 2차 모드는 약 7%의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 변위의 경우 1층과 2층 모두에서 1%대의 오차를 보여 Iai의 법칙을 바탕으로 이 논문에서 적용한 상사비가 축소모형과 실구조물 사이의 상사관계를 정확히 반영할 수 있는 것으로 확인되었다. 속도와 가속도의 경우 최대 약 15%의 오차를 보여 변위에 비해서는 상대적으로 높은 오차율을 나타내었으나, 유한요소해석의 한계성 및 실험의 오차를 고려하였을 때 신뢰할 수 있을 만한 결과를 도출하였다고 판단된다.

#### 4. 결론

지진시 토목구조물의 안전성이나 메커니즘에 대한 연구를 위해서 다양한 축소모형실험이 수행되고 있다. 기존의 축소모형실험 관련 연구들이 참고한 상사법칙의 경우 축소모형의 재질 특성을 실제 구조물과 다르게 적용하여 진동실험을 수행해야만 실제 구조물의 동적 거동을 파악할 수 있었다.

이 논문에서는 실구조물과 축소모형의 재료 특성을 동일하게 적용할 수 있는 상사비를 Iai의 법칙을 바탕으로 작성하고,

이를 바탕으로 축소모형을 제작한 후 실제 지진파를 적용한 진동대 실험을 수행하였다. 실험 결과 도출된 축소모형의 진동 특성을 실제 구조물에 대한 유한요소해석 결과와 비교·분석하였다. 이 논문에서 수행된 축소모형실험과 실제구조물의 진동 특성을 분석한 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) Iai의 상사법칙을 직접적으로 적용하여 축소모형과 실제 구조물의 재료특성을 다르게 반영한 경우, 실제 구조물과 축소모형의 고유진동수에 대한 차이는 1차 및 2차 모드에서 각각 9.1%, 0.6%이지만, 이 논문에서 제시한 방법을 적용하면 각각 5.4%, 7.1% 로서 진동 모드와 무관하게 실제 구조물과 유사한 진동특성을 파악할 수 있었다.
- 2) Iai의 법칙을 바탕으로 실구조물과 축소모형의 재료특성이 동일하도록 작성된 상사비를 적용한 축소모형에 실제 지진파를 이용한 진동대 실험결과 변위, 속도 및 가속도의 RMS오차가 각각 1.9%, 14.9%, 13.1%이므로 축소모형이 실제 대형구조물의 동적 응답을 유사하게 제공하고 있음을 확인하였다.
- 3) 실제 계측된 지진하중을 사용하여 축소모형 실험과 실구조물 수치해석의 결과를 비교하였으며, 이상의 결과를 바탕으로 재료특성에 상사비를 적용하지 않으면서 Iai의 상사법칙을 반영한 축소모형을 제작할 수 있으므로, 이를 통해 실제 다양한 대형구조물의 진동 특성을 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원을 받아 제작되었습니다.

#### References

1. Al-Isawi, A.T., Collins, P.E.F., & Cashell, K.A. (2019), Fully Non-Linear Numerical Simulation of a Shaking Table Test of Dynamic Soil-Pile-Structure Interactions in Soft Clay Using ABAQUS, Geo-Congress 2019, *American Society of Civil Engineers*.
2. Benedetti, D., Carydis, P. & Pezzoli, P. (1998), Shaking table tests on 24 simple masonry buildings, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(1), 67-90.
3. Dolce, M., Cardone, D., Ponzo, F.C. & Valente, C. (2005), Shaking table tests on reinforced concrete frames without and with passive control systems, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(14), 1687-1717.
4. Dolce, M., Cardone, D. & Ponzo, F.C. (2007), Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(5), 573-596.
5. Fan, W. & Yuan, W.C. (2014), Numerical simulation and analytical

- modeling of pile-supported structures subjected to ship collisions including soil-structure interaction, *Ocean engineering*, 91, 11-27.
6. Goktepe, F., Celebi, E. & Omid, A.J. (2019), Numerical and experimental study on scaled soil-structure model for small shaking table tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 308-319.
  7. Grange, S., Kotronis, P. & Mazars, J. (2009), A macro-element to simulate 3D soil-structure interaction considering plasticity and uplift, *International Journal of Solids and Structures*, 46(20), 3651-3663.
  8. Haeri, S.M., Kavand, A., Rahmani, I. & Torabi, H. (2012), Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 38, 25-45.
  9. Han, J.T., Yoo, M.T., Choi, J.I. & Kim, M.M. (2010), A study on the dynamic py curves in soft clay by 1 g shaking table tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 26(8), 67-75.
  10. Hallquist, J. O., LS-DYNA Keyword user's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, Calif., Arp., 2000.
  11. Hokmabadi, A.S., Fatahi, B. & Samali, B. (2014), Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations, *Computers and Geotechnics*, 55, 172-186.
  12. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, *Soils and Foundations*, 29(1), 105-118.
  13. Ko, S. (2020), Failure Behavior of Non-seismic RC Column with aspect ratio of 4.0, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(6), 59-66.
  14. Kagawa, T. (1978), On the similitude in model vibration tests of earth-structures. In *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Japan Society of Civil Engineers, 1978(275), 69-77.
  15. Kokusho, T., & Iwatate, T. (1979), Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic response of soft ground: *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1979(285), 57-67.
  16. Kim, J. & Shin, M. (2011), Centrifuge-Shaking Table Test for Seismic Performance Evaluation of Subway Station, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(3), 99-105.
  17. Kim, S., Ahn, K. & Kang, H. (2018), A Study on the Characteristics of Bridge Bearings Behavior by Finite Element Analysis and Model Test, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(5), 96-106.
  18. Lee, J., Jung, H., Oh, J., Park, J. & Kim, S. (2014), Dynamic behavior of group piles according to pile cap embedded in sandy ground, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 19(10), 35-41.
  19. Lee, W. & Yhim, S. (2013), Study on Seismic Performance of RC Column with Super-Flexibility Membrane, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(5), 1-12.
  20. Ling, H.I., Mohri, Y., Leshchinsky, D., Burke, C., Matsushima, K. & Liu, H. (2005), Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(4), 465-476.
  21. Liu, S., Li, P., Zhang, W. & Lu, Z. (2020), Experimental study and numerical simulation on dynamic soil-structure interaction under earthquake excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 138, 106333.
  22. Ptilakis, D., Dietz, M., Wood, D.M., Clouteau, D. & Modaressi, A. (2008), Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing, *Soil dynamics and earthquake Engineering*, 28(6), 453-467.
  23. Qaftan, O.S., Toma-Sabbagh, T., Weekes, L. & Augusthus-Nelson, L. (2020), Validation of a finite element modelling approach on soil-foundation-structure interaction of a multi-storey wall-frame structure under dynamic loadings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106041.
  24. Rayhani, M.H. & El Nagggar, M.H. (2008), Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil, *International Journal of Geomechanics*, 8(6), 336-346.
  25. Shin, E.C., Kang, H.H., Kim, T.J., Chae, Y.S. & Park, J.J. (2011), Experimental Study on Seismic Performance Evaluation of Lake Dike Structures under Earthquake Loading, *Journal of Korean Geosynthetic Society*, 10(3), 53-62.
  26. Yu, H., Yan, X., Bobet, A., Yuan, Y., Xu, G. & Su, Q. (2018), Multi-point shaking table test of a long tunnel subjected to non-uniform seismic loadings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(2), 1041-1059.

Received : 12/13/2020  
 Revised : 02/26/2021  
 Accepted : 02/26/2021

**요 지 :** 세계적으로 자연재해의 빈도와 규모가 증가하고 있으며, 이러한 자연재해는 토목구조물에 다양한 손상을 유발할 수 있다. 이 증가된 심각한 손상을 유발할 수 있는 자연 재해 중 하나가 지진이다. 따라서 지진에 대하여 구조물의 안전성을 확보하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 지진시 토목구조물의 안전성이나 메커니즘에 대한 연구는 대부분 축소모형실험을 바탕으로 진행되고 있으며, 이는 토목구조물의 규모를 고려하였을 때 실구조물실험이 불가능하기 때문이다. 이러한 축소모형연구에서는 Iai가 제한한 상사법칙이 주로 인용되고 있으나, Iai가 제한한 상사법칙을 적용할 경우 축소모델 제작에 필요한 구조부재의 선정에 많은 어려움이 따르게 된다. 이는 Iai가 제한한 상사비를 적용할 경우 구조물의 재료특성인 탄성계수에 상사비를 적용하여야 하기 때문이다. 따라서 이 논문에서는 실제구조물과 동일한 재료특성을 갖는 축소모형에 적용되는 상사비를 Iai의 상사법칙에 근거하여 적용하고, 유한요소해석을 통하여 축소모형과 실구조의 동특성을 비교·분석하였다. 이 논문에서 적용한 상사법칙에 근거한 축소모형실험을 통해 선정된 구조물의 특성이 실구조물의 특성을 더욱 정확히 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 상사비, 축소모델, 진동대실험, 지진, 진동특성