

# 고진동수 계단의 진동응답 산정을 위한 등가임펄스 산정식 제안

김나은<sup>1</sup> · 이철호<sup>2\*</sup> · 김성용<sup>3</sup>

<sup>1</sup>석사, 서울대학교, 건축학과, <sup>2</sup>교수, 서울대학교, 건축학과, <sup>3</sup>박사과정, 서울대학교, 건축학과

## Formula for Equivalent Impulsive Force to Predict Vibrational Response of High-frequency Staircases

Kim, Na Eun<sup>1</sup>, Lee, Cheol Ho<sup>2\*</sup>, Kim, Sung Yong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

<sup>3</sup>Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

**Abstract** - High-frequency staircases are widely used nowadays to meet aesthetics and functionality needed in modern architecture. Unfortunately, no design guide is available in domestic practice to predict response or evaluate the vibration performance of high-frequency staircases. SCI-P354 published by the Steel Construction Institute of UK provides the formula for effective impulsive force. However, this formula was shown to overestimate the response of high-frequency staircases excited by fast ascending and descending over 2.2Hz pace frequency because it was developed based on the walking test in a slow pace frequency. This study proposes a semi-analytical formula to predict the response of stiff staircases based on analytical and experimental studies of response acceleration for various walking frequencies covering 1.4-4.5Hz.

**Keywords** - Floor vibration, High-frequency floor, Staircase, Equivalent impulsive force, Human walking, Vibration evaluation

### 1. 서론

현대 건축에서 심미성과 기능성이 중요한 요소로 대두되면서, 비교적 경량의 고진동수 계단이 널리 쓰이는 추세이다. 이러한 추세에도 불구하고 국내의 경우 고진동수 계단의 진동응답을 산정하는 방법이 전무한 실정이기 때문에 바닥의 진동응답을 산정하는 방법을 계단에 그대로 준용할 수밖에 없다.

ISO 10137의 부록 A<sup>[1]</sup>에 따르면 계단 보행하중은 평지를 걸을 때 발생하는 하중과는 다르게 대개 하중의 크기가 크고

계단을 급속히 내려오는 경우가 많으므로 가진진동수가 3Hz에서 4Hz정도이며 종종 4.5Hz에 이르기도 한다. 이는 일반적인 보행하중의 범위가 1.8Hz에서 2.2Hz 사이인 것과는 크게 대조적이다. 따라서 일반 바닥과 동일한 기준으로 계단을 설계할 경우 예기치 않은 문제가 발생할 수 있다.

진동응답을 산정하는 방식은 대체로 미국 강구조학회(American Institute of Steel Construction, 이하 AISC)의 "Steel Design Guide Series 11 - Floor Vibration due to human activity"<sup>[2]</sup>와 영국 강구조연구소(The Steel Construction Institute, 이하 SCI)의 "SCI-P354, Design of Floors for Vibrations : A New Approach"<sup>[3]</sup>를 따른다. 이 중 SCI의 지침에서 유일하게 계단의 진동응답을 산정하는 방법을 제시하고 있으며 복잡한 보행하중 모델링 과정을 간소화하기 위한 방안으로 등가임펄스 개념을 도입하여 실측값을 바탕으로 한 경험식을 제시하고 있다.

SCI에서는 Arup에서 제시한 등가임펄스 산정식을 토대로 진동응답을 예측하는데, 일반바닥 보행실험 시 가장 발생

Note.-Discussion open until October 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 22, 2014; revised December 15, 2014; approved on December 29, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-9061 Fax. +82-2-878-9061

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

빈도가 높게 측정된 1.8~2.2Hz의 가진진동수 영역을 유효 범위로 보고 그 범위 내에서 측정된 값을 토대로 식을 제안하고 있다. 따라서 기존의 진동응답 산정식에 따라 설계된 고진동수 계단에서 보행할 경우, 바닥보행에 비하여 가해지는 하중의 크기가 크고 가진진동수의 범위도 넓게 나타나기 때문에 사용성 측면에서 만족스럽지 않은 거동을 보일 가능성이 크다.

이에 본 연구는 1.4~4.5Hz의 넓은 가진진동수 범위에 대한 가속도 응답의 실측값을 바탕으로 계단보행시의 응답을 합리적으로 예측할 수 있는 등가임펄스 산정식을 제안한다.

## 2. 보행가진의 특성

AISC와 SCI는 국내에서 바닥진동과 관련된 설계에 대표적으로 사용되고 있는 설계지침서이다. 그러나 이들 기준은 계단의 진동응답을 판단하는 명확한 기준 및 하중모델은 제시하지 않으며, 바닥의 진동응답을 산정하는 방식을 계단에도 적용하고 있다. 그나마 SCI에서 계단보행에 대한 설계계수를 간략하게 언급하고 있는 것이 전부이다. 이에 본 연구에서는 현재 바닥 및 계단에 적용하고 있는 AISC와 SCI의 바닥 진동응답 산정법을 우선 고찰하고자 한다.

### 2.1 보행가진의 동적 하중

사람이 보행활동을 하는 동안 구조물의 표면에는 동적 하중이 가해지며, 이러한 하중은 연직방향과 횡방향의 방향성을 가진 하중벡터로 구성된다. 구조물에 문제가 발생하는 대부분의 경우 하중의 연직방향 성분이 지배적으로 작용하기 때문에, 주로 이를 대상으로 보행하중 모형을 설정한다<sup>[4]</sup>.

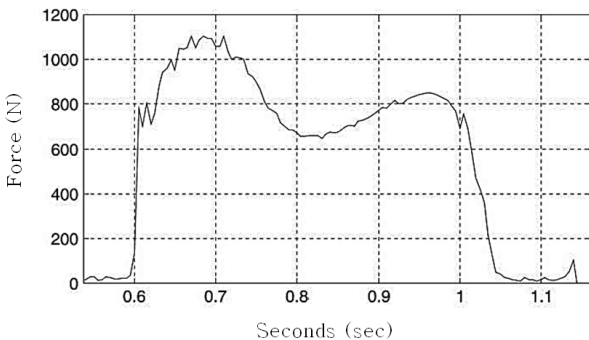


Fig. 1. Footfall force of a 870N male at 2.4Hz (Brownjohn, 2006)

보행하중 모형은 하중의 크기가 급격하게 증가한 뒤 짧은 시간 동안 최대하중과 비슷한 크기의 하중에 머무르다 감소하는 형태를 갖는다. 보행자에 따라 하중의 최대값 및 한 걸음에 대한 주기에만 차이가 있을 뿐 전체적인 하중의 형태는 유사하다. 체중이 870N인 남성이 2.4Hz로 걸은 보행에 대한 하중 모형을 일례로써 Fig. 1에 도시하였다. 위의 보행하중 모형을 바탕으로 하는 연속보행에 대한 하중함수는 푸리에급수 형태로 식 (1)과 같이 주어진다.

$$F(t) = P \left\{ 1.0 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin [2h\pi ft + \phi_h] \right\} \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 보행자의 체중(보통  $76\text{kgf} = 746\text{N}$ ),  $H$ 는 고려하는 조화성분의 개수,  $\alpha_h$ 는  $h$  번째 조화성분의 푸리에계수,  $f$ 는 가진진동수,  $\phi_h$ 는  $h$  번째 성분의 위상각이다.

AISC, SCI 등에서는 보행으로 인한 하중함수를 조화함수로 가정하여 식 (1)에서 푸리에급수의 초기 네 개의 항으로 표현한다. 일반적으로 단순 보행의 경우 가진진동수는 1.4Hz에서 2.4Hz사이로 알려져 있으며<sup>[4]</sup>, 이 중 발생빈도가 높은 1.8Hz에서 2.2Hz 사이를 대상으로 진동응답을 산정하는 것이 보통이다.

### 2.2 저진동수 바닥과 고진동수 바닥

진동응답을 해석하기 위해 바닥의 고유진동수에 따라 저진동수 바닥과 고진동수 바닥으로 나누는데, 이는 두 바닥이 확연하게 다른 동적응답 특성을 보이기 때문이다.

저진동수 바닥에서는 가진진동수의 정수배 진동수와 바닥의 고유진동수가 가까워지면 공진이 발생하여 응답이 증폭되는 현상이 나타난다. 일반적으로 가진진동수의 초기 네 번째 조화성분까지 바닥과 작용하여 공진을 일으킬 수 있다고 판단하고 이로 인해 발생하는 정상상태의 응답을 산정한다. 반면, 고진동수 바닥에서는 한 걸음에 대한 응답이 일시적으로 나타나기 때문에 하중함수가 독립된 임펄스 함수로 표현되며 공진현상이 발생하지 않는다. 네 번째 이상의 고차 모드 조화성분은 공진을 일으킬 수 있는 충분한 에너지를 갖고 있지 않다고 보고 일련의 임펄스 하중으로 인해 발생하는 일시상태의 응답을 산정한다.

일반적으로 가진진동수의 네 번째 조화성분을 기준으로 바닥의 고유진동수가 이보다 낮으면 저진동수 바닥, 높으면 고진동수 바닥으로 판단한다. 이와 같은 기준에 따라 SCI는

저진동수 바닥과 고진동수 바닥의 분기값을 약 10Hz로 제시하고 있으며 다른 연구에서도 이를 인용하는 추세이다.

### 3. 고진동수 바닥의 진동응답 산정법

#### 3.1 kf method (AISC)

AISC는 Ungar and White가 제시한 방법에 따라 한 걸음에 대한 보행 하중의 시간이력을 이상화하고 이를 바탕으로 응답을 산정한다<sup>[5]</sup>.

Fig. 2는 보행하중 모형의 일례로써 제시한 Fig. 1을 단순화시킨 것으로 최대하중까지 순간적으로 도약한 후 잠시 동안 그 값에 일정하게 머무는 형태를 띤다. 한 걸음에 대한 전체 시간  $t$ 에서 하중이 급격하게 변화하는 양 단의 구간 크기를 각각  $t_0$ 로 나타내었다. 시간  $t$ 에서  $t-t_0$ 까지에 대하여 발생하는 하중의 크기를 일정한 상수값  $F_p$ 로 가정한다. 이는 이 구간에서 발생하는 하중을 일정하게 가정하더라도 실제 하중과의 오차가 응답에 미치는 영향이 매우 작다고 판단하기 때문이다. 반면, 이상화 된 보행하중 모형에서 하중이 증가하는 구간은 응답을 산정할 때에 상대적으로 큰 영향을 미치기 때문에  $t = [0, t_0]$  구간에서의 하중 함수는 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$F(t) = 0.5 F_p \{1 - \cos(\pi t / t_0)\} \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (2)$$

단자유도 진동계에서 식 (2)와 같은 하중으로 인해 발생하는 동적변위( $x_{max}$ )는 정적변위( $x_{static}$ )의 증폭계수로 표시할 수 있다. 즉,  $x_{max} = A_m x_{static}$ 와 같이 나타낼 수 있으며,  $A_m$

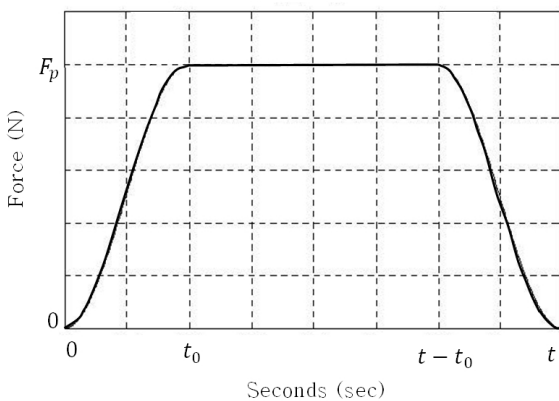


Fig. 2. Idealized footfall force (Brownjohn, 2006)

은 식 (2)에 의한 동적 증폭계수로써 정적변위에 대한 동적 변위의 비율로 표현된다.

$$A_m = \frac{x_{max}}{x_{static}} = \frac{\sqrt{2\{1 + \cos(2\pi f_n t_0)\}}}{1 - (2f_n t_0)^2} \quad (3)$$

여기서,  $t_0$ 는 증폭계수를 도출하는 데에 있어 작용하는 중요한 입력요소이며, 식 (3)에 따르면 증폭계수  $A_m$ 는 오직  $f_n t_0$ 의 영향을 받는다(여기서  $f_n$ 은 바닥의 고유진동수).

보행속도가 빠를수록 발의 지면 접촉시간이 짧아지면서  $t_0$  역시 짧아지는 경향을 보이며 일반적으로 바닥의 고유진동수가 5Hz보다 클 때, 증폭계수가 증가하는 결과를 가져온다. 식 (3)은 설계를 위하여  $f_n t_0$ 가 0.5일 때를 기준으로 다음과 같이 근사하여 사용한다.

$$A_m = \begin{cases} 2 & : f_n t_0 \leq 0.5 \\ \frac{1}{2(f_n t_0)^2} & : f_n t_0 > 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

특히 고진동수 영역에 해당하는  $f_n t_0 > 0.5$ 인 경우, 하중의 진폭  $F_p$ 에 의한 정적변위의 최대값인 식 (5)와 질량과 강성의 관계로 나타낸 고유진동수인 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 고진동수 바닥의 최대변위  $x_{max}$ 와 최대속도  $v_{max}$ 를 표현할 수 있다.

$$x_{static} = F_p / k \quad (5)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (6)$$

여기서,  $F_p$ 는 최대하중,  $k$ 는 바닥 강성,  $M$ 은 모드질량이다.

$$x_{max} = x_{static} \times A_m = \left(\frac{F_p}{k}\right) \times \frac{1}{2(f_n t_0)^2} = 2\pi^2 F_p M / t_0^2 k^2 \quad (7)$$

$$v_{max} = x_{max} (2\pi f_n) = \left(\frac{\pi}{t_0}\right) F_p / k f_n \quad (8)$$

식 (8)은 바닥의 고유 특성인 바닥강성  $k$ 와 고유진동수  $f_n$ 에 대한 함수로 최대속도를 나타낸 것이다. 진동응답을 산정

**Table 1.** Coefficients according to walking pace

	Walking pace (steps/min)	$F_p$ (kN)	$1/t_0$ (1/sec)
Floor walking	100 (fast)	1.4	5.0
	75 (moderate)	1.25	2.5
	50 (slow)	1.1	1.4

하여 실측값과 비교하기 용이하도록 식 (8)을 조화응답으로 가정하여 가속도응답에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$a_{\max} = x_{\max}(2\pi f_n)^2 = \frac{F_p}{2M} \left( \frac{1}{f_n t_0} \right)^2 \quad (9)$$

결과적으로  $v_{\max}$ 와  $a_{\max}$ 는 보행하중에 따른  $t_0$ ,  $F_p$  및 고유진동수  $f_n$ 의 영향을 받는다. 식 (8)과 식(9)에 대한 설계계수는 Table 1에 제시하였다.

### 3.2 등가임펄스 모델 (SCI)

SCI는 Arup이 제시하는 등가임펄스 모델을 차용하고 이를 다시 보정하여 사용한다. Arup의 모델은 Kerr and Bishop<sup>[6]</sup>이 바닥보행 실험을 통해 얻은 880개의 데이터를 토대로 등가임펄스의 개념을 도입하여 진동응답을 산정한다. 임펄스 형태의 보행하중을 단위질량을 가진 진동계에 가하면 임펄스의 크기와 동일한 최대속도응답을 얻을 수 있다. 이와 같이 보행하중을 속도응답의 형태로 나타내면서 진동응답의 해석이 보다 간단해진다.

Willford 등<sup>[7]</sup>이 제안한 Arup의 등가임펄스 산정식은 Kerr and Bishop의 바닥보행 실험에서 발생빈도가 가장 높게 나타난 1.8~2.2Hz의 가진진동수 범위를 대상으로 회귀 분석하여 경험식으로 제안되었다. 25%의 초과확률에 해당하는 Arup의 등가임펄스 산정식은 다음과 같다.

$$I_{eff} = 54 \left( \frac{f^{1.43}}{f_n^{1.3}} \right) \quad (10)$$

여기서,  $I_{eff}$ 는 등가임펄스(N-sec),  $f$ 는 가진진동수(Hz),  $f_n$ 은 계단의 고유진동수(Hz)를 의미한다.

SCI는 Arup의 등가임펄스 산정식인 식 (10)을 바탕으로 임펄스 하중을 받는 바닥의 일시진동응답을 가정하여 최대 가속도응답을 산정한다. SCI에서는 고진동수 바닥의 진동

응답을 산정하는 두 가지 산정식을 제시한다. 하나는 유한요소해석을 통해 얻은 모드 특성을 반영한 일반화된 가속도응답 함수이며, 다른 하나는 일반식을 간략화 시켜 1차 모드의 특성만을 반영한 식이다. 한 걸음에 대한 진동응답은 각 조화성분의 진동모드 별 가속도응답을 모두 합산하여 나타낸다. 가장 보편적인 방법으로 제곱합제곱근(Square Root of Sum of Squares, SRSS)이 쓰이며 구조물의 진동주기가 잘 분리되었을 경우 이는 전체 시간이력에 준하는 결과를 보이는 가장 실용적인 방법이다. 모드 중첩에 따른 일반화된 가속도응답함수는 다음과 같다.

$$a_{\gamma,\eta,h} = \sqrt{\sum_{h=1}^H \left( 2\pi f_n \sqrt{1-\zeta^2} \mu_\gamma \mu_\eta \frac{I_{eff}}{M_h} \right)^2} \quad (11)$$

여기서,  $f_n$ 은 바닥의 고유진동수(Hz),  $\zeta$ 는 감쇠비,  $\mu_\gamma$ 와  $\mu_\eta$ 는 각각 하중이 작용한 지점의 모드형상계수 및 진동응답을 측정할 지점의 모드형상계수,  $I_{eff}$ 는 등가임펄스(N-sec),  $M_h$ 는  $h$  번째 모드의 모드질량이다. SCI에서 사용하는 등가임펄스 산정식은 식 (12)와 같다.

$$I_{eff} = 60 \frac{f^{1.43}}{f_n^{1.3}} \left( \frac{P}{700} \right) \quad (12)$$

여기서,  $P$ 는 보행자의 체중으로 식 (1)과 마찬가지로 보통 746N을 대입한다. 식(12)는 SCI에서 EN 1990 annex C (Eurocode)에 따라 식(10)을 보정하여 제시한 식으로 두 식은 약간의 계수 차이만 있다.

$$a_{\gamma,\eta} = 2\pi f_n \mu_\gamma \mu_\eta \frac{185}{M_h f_n^{0.3}} \frac{P}{700} \quad (13)$$

식 (13)은 가속도응답을 산정하는 간략식으로써 구조물의 유한요소 모델을 사용할 수 없는 경우에 사용한다. 식 (11)과는 다르게 등가임펄스 및 감쇠비를 고려하지 않으며 1차 모드의 특성만을 반영하여 대략적인 가속도응답을 얻을 수 있다.

### 3.3 기존 산정법의 한계점

하중을 단자유도 진동계에 가하면 진동계의 강성과 고유진동수에 따라 최대속도응답이 얻어진다. 이와 같은 방법을 이용하여 Brownjohn은 Arup이 제시하는 등가임펄스 산정

식의 합리성을 검증하고자 실제로 측정한 보행하중 이력과 AISC 및 Arup의 진동응답 산정법을 통해 예측한 보행하중 이력을 시뮬레이션 하여 비교하였다<sup>[8]</sup>. 그러나 비교결과를 보면 AISC 뿐 만 아니라 Arup이 제시하는 진동응답 산정법에도 한계가 존재한다.

$$v_{\max} \propto \frac{1}{k f_n} = \frac{1}{k \left( \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \right)} = \frac{\sqrt{M}}{k^{3/2} / 2\pi} \quad (14)$$

식 (14)는 AISC가 제시한 식 (8)에서 고유진동수를 식 (6)으로 변환하여 속도응답과 질량 및 강성의 관계식을 나타낸 것이다. 식 (14)에서 보듯이 속도응답은 질량의 제곱근에 비례하기 때문에 낮은 수준의 응답을 얻기 위해서는 모드질량을 낮춰야한다. 이러한 현상은 뉴턴의 제 2 법칙인 가속도 법칙에 어긋나는 것으로 물리적 오류를 범하고 있으며, 이로 인하여 실제 속도응답의 경향성을 반영하지 못함을 알 수 있다. 반면, Arup의 모델은 AISC와 같은 물리적 오류를 내포하지 않고 실제 보행하중 이력의 경향성을 비교적 합리적으로 예측하고 있으나 응답의 크기를 약 두 배 가량 과소평가하는 것으로 보고되었다. 즉, 진동응답을 산정할 때에 주로 쓰이는 두 가지 방법 모두 가속도응답을 합리적으로 평가하는데에 문제가 있음을 알 수 있다.

#### 4. 계단 보행실험

고진동수계단의 진동응답 산정식을 합리적으로 제안하기 위하여 실물대 철골보 계단을 제작하여 계단 보행실험을 실시하고 가속도응답을 측정하였다. 모드형상을 고려할 경우 계단 받침보의 중간 지점에서 진폭이 가장 크기 때문에, 고유진동수 측정을 위한 가진 지점 및 응답계측을 위한 가속도계의 부착 지점은 계단 받침보의 중간에 위치시켰다.

##### 4.1 실험 프로그램

목업 실험세트는 계단 받침보의 크기 및 콘크리트의 채움 여부에 따라 총 7개로 구분하였다. 7개의 실험세트는 다시 계단의 용도에 따라 계단 받침보의 길이를 다르게 하여 4개의 주거용(residence) 계단과 3개의 사무용(office) 계단으로 설치하였다. 목업 실험세트는 Fig. 3과 같이 2366mm의 계단 받침보가 계단참에 의해 연결되어 있는 2개의 주거용

계단과 3638mm의 계단 받침보로 연결된 하나의 사무용계단으로 구성된다. 계단 받침보 및 계단판은 일반 구조용 강재 SS400을 사용하여 400MPa의 인장강도를 가지며 콘크리트는 26.16MPa의 재령 28일 강도를 가진다.

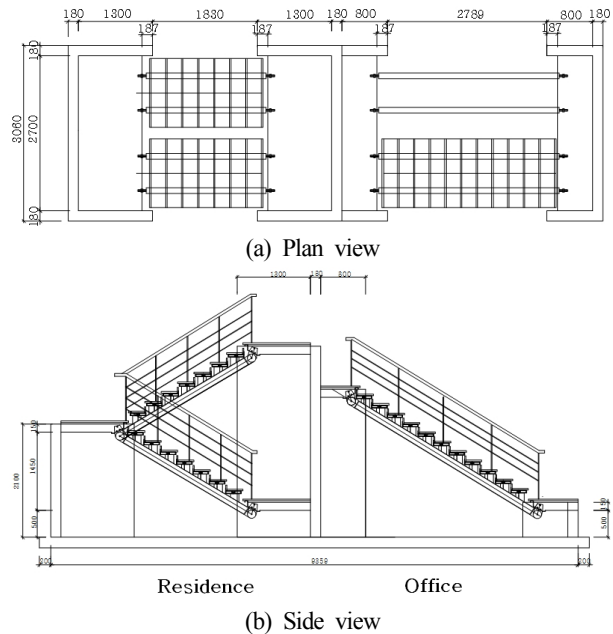


Fig. 3. Schematic drawings for test specimen

Table 2. Summary of test specimen

Specimen	Use	Member size	Concrete
R-□125×75×4.5-F	Residence	125×75×4.5	Filled
R-□125×75×4.5-NF			Non-filled
R-□150×100×4.5-F		150×100×4.5	Filled
R-□150×100×4.5-NF			Non-filled
O-□150×100×4.5-F	Office	200×100×4.5	Filled
O-□200×100×4.5-F			Filled
O-□200×100×4.5-NF			Non-filled

Table 3. Details of test devices

Device	Commercial code	Description
Accelerometer	NP-3131	Frequency range : 5-4000Hz±0.5dB Sensitivity : 10mV/(m/s <sup>2</sup> )±1dB
FFT analyzer	Ono Sokki CF-3650	Frequency accuracy : ±50ppm or less
Impact hammer	Dytran 5802A	Range : 5000lbs Sensitivity : 1mV/lb

Table 2는 실험세트의 정보를 요약하여 정리한 것이며 모든 실험체에 대하여 두 가지 실험을 실시하였다. 먼저 임팩트해머 실험을 통하여 7개의 실험세트를 대상으로 각각의 고유진동수를 측정 한 후에 1.4~4.5Hz의 가진진동수에 대한 계단보행 실험을 실시하여 가속도를 측정하였다. 다양한 연령 및 신체조건 의 남성들을 대상으로 정상 속도 및 빠른 속도의 가속도응답을 실측하였으며 이를 바탕으로 각 보행 이력에 해당하는 등가임펄스 값을 산정하였다. 여기서 1.4~4.5Hz 범위 밖의 데이터 및 비정상적 도움단기로 가속도 응답이 평균에 비해 다섯 배 이상 차이나는 데이터들은 이상점 (outlier)으로 취급하여 대상에서 제외하였다. 실험에 사용한 장비 목록은 Table 3과 같이 정리하였다.

4.2 실험 결과

임팩트해머 실험을 통하여 실측된 계단의 고유진동수와 감쇠비 및 1차 모드질량은 Table 4에 정리하여 나타내었다. 계측 시, Rectangular window function을 사용하였으며, 샘플링 주파수는 200Hz를 사용하여 보다 정확한 데이터를 얻고자 하였다.

Table 4에서 보듯이 고유진동수가 16~32Hz에 속하는 고진동수 계단임을 알 수 있다. 실험 세트는 계단의 용도, 계단 받침보의 단면 크기와 콘크리트의 채움 여부에 따라 구분하였으나 계단 보행실험에서는 이러한 변수에 상관없이 단순히 고진동수 계단으로서 분류하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 주거용과 사무용 계단의 주파수응답함수를 각각 도시한 것이다.

계단보행실험 결과, 고진동수 계단에 가해진 펄스하중은 5% 미만의 낮은 감쇠비로 인해 응답에 미치는 감쇠의 영향이 작음을 알 수 있다. 또한, Fig. 6의 사례에서 보듯이 보행

Table 4. Natural frequency, damping ratio and generalized mass of each specimen

Specimen	Natural frequency (Hz)	Damping ratio (%)	Generalized mass for 1st mode
R-□125×75×4.5-F	31.50	3.50	190.85
R-□125×75×4.5-NF	25.80	4.59	141.38
R-□150×100×4.5-F	32.00	3.85	233.94
R-□150×100×4.5-NF	30.80	2.30	151.03
O-□150×100×4.5-F	16.00	2.13	332.62
O-□200×100×4.5-F	22.00	3.21	388.17
O-□200×100×4.5-NF	24.25	4.05	228.46

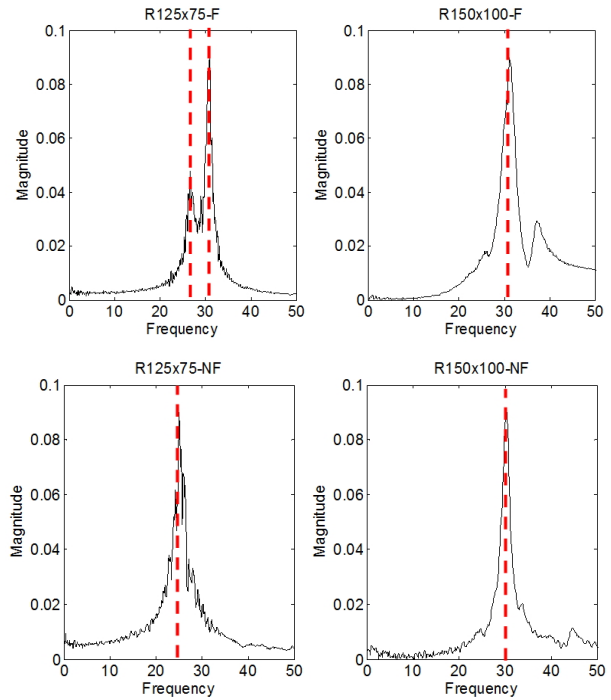


Fig. 4. Frequency response (clockwise from top left) R-□125x75x4.5-F, R-□150x100x4.5-F, R-□150x100x4.5-NF and R-□125x75x4.5-NF

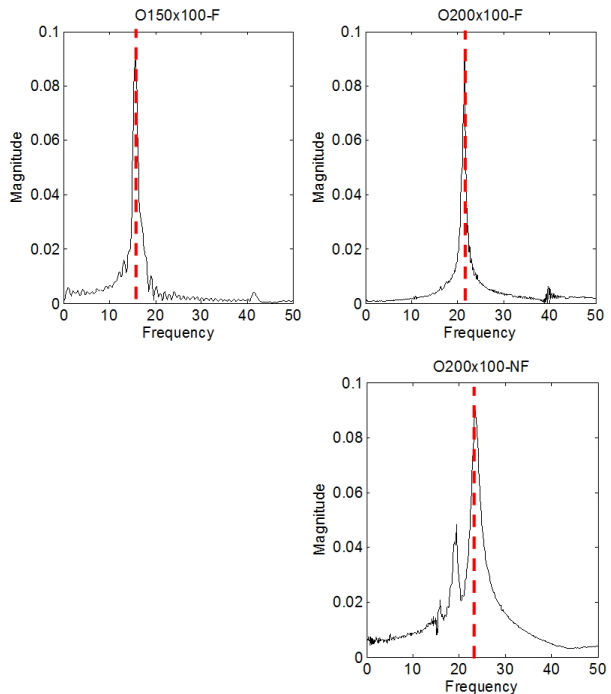
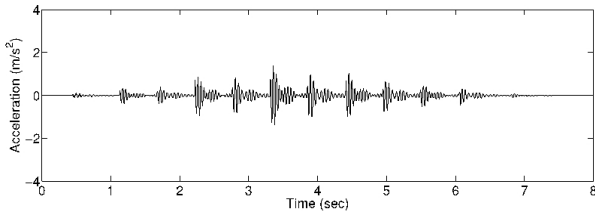
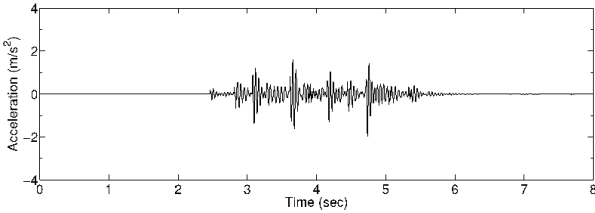


Fig. 5. Frequency response (clockwise from top left) O-□150x100x4.5-F, O-□200x100x4.5-F and O-□200x100x4.5-NF



(a) Walking on normal pace (1.8Hz walking frequency)



(b) Walking on fast pace (3.4Hz walking frequency)

Fig. 6. Acceleration response time histories for normal and fast walking (24.25Hz staircase)

속도가 빨라지고 하중의 크기가 커지더라도 계단의 고유진동수가 저진동수 바닥과 고진동수 바닥의 분기점인 10Hz를 크게 상회하므로 가진에 의한 공진이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉, 정상 보행과 빠른 보행 사이에서 가진진동수 외에 유의미한 차이점이 발견되지 않았다.

## 5. 새로운 등가임펄스 산정식의 제안

### 5.1 가정사항

SCI의 고진동수 바닥의 일시응답을 산정하는 식 (11)을 바탕으로 새로운 산정식을 제안한다. 펄스하중은 응답에 미치는 감쇠의 영향이 미미하기 때문에 계단의 경우 감쇠가 없는 비감쇠 직선보의 시스템으로 가정해도 무방하며, 고진동수 계단은 가진진동수에 비해 고유진동수가 월등히 높아 1차 모드가 지배적으로 작용하기 때문에 1차 모드의 응답만을 고려하는 것으로 가정한다. 또한, 최대가속도응답을 산정하기 위하여 측정 지점에서의 모드형상계수는 최대값인 1로 가정하며, 계단의 경사인  $\theta$ 를 고려한다. Fig. 7은 계단 받침보를 간단하게 모델링하여 도시한 것으로  $I_{eff}\cos\theta$ 는 작용한 보행하중의 등가임펄스(N-sec),  $\gamma$ 와  $\eta$ 는 각각 기준점으로부터 가력지점 및 측정지점의 위치,  $\theta$ 는 계단의 경사이다.

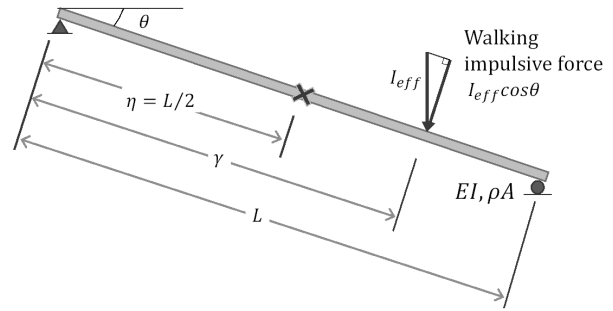


Fig. 7. Applied walking impulsive force and key symbols

### 5.2 등가임펄스와 가속도응답의 관계식 유도

등가단자유도 개념을 사용하여 시간과 위치를 고려한 디랙델타(Dirac delta) 함수 형태의 외력을 받는 균일한 단면을 가진 비감쇠 단순지지보의 운동방정식을 우선 유도한다. 최종적인 운동방정식의 형태는 시간  $t$ 와 위치  $x$ 에 따라 달라지는 변위  $u$ 에 대한 함수이며, 외력은 시간이 0일 때  $\gamma$ 의 위치에 작용하는 임펄스 하중으로 계단의 경사인  $\theta$ 를 고려하여  $I_{eff}\cos\theta\delta(t)\delta(x-\gamma)$  와 같이 나타낸다.

일반화된 단자유도 시스템(generalized single degree of freedom system)의 동적평형방정식을 정식화하기 위하여 가상일의 원리를 적용한다. 이 원리는 평형상태에 놓인 시스템에 가상변위를 가하면 외적가상일과 내적가상일이 같다는 것을 의미한다.

$$\delta W_E = \delta W_I \quad (15)$$

여기서,  $\delta W_E$ 는 외적가상일,  $\delta W_I$ 는 내적가상일이다. 이 식의 해인  $u(x,t)$ 는 식 (16)과 같이 가정하여 변수분리 하는데, 이는 모드형상함수를 통해 전체시스템의 변형형상을 하나의 일반화된 변위로 표현하기 위함이다<sup>[9]</sup>.

$$u(x,t) = \mu(x)q(t) \quad (16)$$

여기서,  $\mu(x)$ 는 모드형상함수,  $q(t)$ 는 일반화된 변위이며 이때에 가하는 가상변위는 가정된 형상함수와 일관성을 갖도록 다음과 같이 취한다.

$$\delta u(x) = \mu(x)\delta q \quad (17)$$

이 시스템은 시간에 따른 관성력과 외력 및 내부의 휨모멘트의 작용 하에서 평형을 이루는데, 이 때 관성력을 포함한 외력과 휨모멘트는 각각 다음과 같다

$$f_E(x,t) = -\rho A [\ddot{u}(x,t)] + I_{eff} \cos\theta \delta(t) \delta(x-\gamma) \quad (18)$$

$$M(x,t) = Eku''(x,t) \quad (19)$$

여기서,  $u$  위의 점( $\dot{\phantom{u}}$ )은 시간에 대한 도함수를 의미하고, 프라임( $\prime$ )은 위치에 대한 도함수를 의미한다.

따라서 가상변위와 이때 작용하는 하중에 의한 외적 가상일은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta W_E &= \int_0^L f_E(x,t) \delta u(x) dx \\ &= -\delta q \left[ \ddot{q}(t) \int_0^L \rho A \{\mu(x)\}^2 dx - \int_0^L I_{eff} \cos\theta \delta(t) \delta(x-\gamma) \mu(x) dx \right] \end{aligned} \quad (20)$$

내적 가상일은 가상변위에 관련한 곡률과 이때 작용하는 휨모멘트의 곱으로 나타내며 가상곡률은 가상변위를 두 번 미분 한 값과 같다. 따라서 내적 가상일은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta W_I = \int_0^L Eku''(x,t) \delta \{u''(x)\} dx = \delta q \left[ q(t) \int_0^L EI \{\mu''(x)\}^2 dx \right] \quad (21)$$

가상일의 원리에 의해 외적가상일과 내적가상일은 같아야 하므로 식 (20)과 식 (21)에서 구한 가상일을 식 (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\delta q [\tilde{M}\ddot{q}(t) + \tilde{K}q(t) - \tilde{P}] = 0 \quad (22)$$

식 (22)는 모든 가상변위에 대하여 성립해야 하기 때문에 다음과 같은 결론에 도달한다.

$$\tilde{M}\ddot{q}(t) + \tilde{K}q(t) - \tilde{P} = 0 \quad (23)$$

여기서,  $\tilde{M}$  은 일반화된 질량,  $\tilde{K}$  는 일반화된 강성,  $\tilde{P}$  는 일반화된 하중으로 다음과 같다. 이 때, 일반화된 하중은 임펄스

함수의 선별특성(sifting property)을 적용하여 간단히 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= \int_0^L \rho A \{\mu(x)\}^2 dx, \quad \tilde{K} = \int_0^L \mu(x) EI \{\mu''(x)\}^2 dx \\ \tilde{P} &= \int_0^L I_{eff} \cos\theta \delta(t) \delta(x-\gamma) \mu(x) dx = I_{eff} \cos\theta \delta(t) \mu(\gamma) \end{aligned} \quad (24)$$

$x=0, x=L$  에서 변위와 모멘트가 영(0)인 양단의 초기조건을 고려하여 비감쇠 단순보의 모드형상함수는 다음 같이 주어진다.

$$\mu(x) = \sin \frac{\pi}{L} x \quad (30)$$

따라서  $\gamma$  지점에 하중이 작용 했을 때의 모드형상계수는  $\mu(\gamma)$ 이며, 이를 식 (23)에 대입하고 각 항을 일반화된 질량으로 정규화 하여 나타내면 다음과 같다.

$$\ddot{q}(t) + (2\pi f_n)^2 q(t) = \frac{I_{eff} \cos\theta}{\tilde{M}} \delta(t) \sin \frac{\pi\gamma}{L} \quad (25)$$

여기서  $f_n$  은 계단의 1차 모드 고유진동수(Hz)이다.

임펄스에 대한 선형 동적 시스템의 응답은 식 (26)과 같이 합성적분(convolution integral)을 통해 임펄스와 단위임펄스 응답함수의 곱을 시간에 따라 이동시키며 적분하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_0^t p(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (26) \\ &= \int_0^t I_{eff} \cos\theta \delta(\tau) \sin \frac{\pi\gamma}{L} \frac{1}{\tilde{M}(2\pi f_n)} \sin [2\pi f_n(t-\tau)] d\tau \end{aligned}$$

단, 위 식에서 단위임펄스 응답함수  $h(t)$ 는 다음과 같다.

$$h(t) = \frac{1}{\tilde{M}(2\pi f_n)} \sin(2\pi f_n t) \quad (t \geq 0) \quad (27)$$

식 (26)을 디랙델타 함수의 선별특성(sifting property)에 의해 적분하여 가력지점의 변위응답과 가속도응답에 대하여 각각 나타내면 다음과 같다.



$$q(t) = \frac{I_{eff} \cos \theta}{\tilde{M}(2\pi f_n)} \sin \frac{\pi \gamma}{L} \sin(2\pi f_n t)$$

$$\ddot{q}(t) = -(2\pi f_n)^2 q(t) \quad (28)$$

따라서 식 (28)에 따른 최대가속도응답은 식 (29)와 같다.

$$a_{max} = \frac{I_{eff} \cos \theta}{\tilde{M}} \sin \frac{\pi \gamma}{L} 2\pi f_n \quad (29)$$

여기서,  $a_{max}$ 는 최대가속도응답 ( $m/s^2$ )이다.

각 걸음에 대해 계측된 최대가속도응답과 그에 상응하는 등가임펄스의 관계식을 양함수의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{eff} = \frac{a_{max}}{2\pi f_n \sin \frac{\gamma \pi}{L}} \frac{\tilde{M}}{\cos \theta} \quad (31)$$

결과적으로 앞서 수행한 계단보행실험에서 얻은 가속도응답을 토대로 식 (31)을 이용하여 계단에 가해진 등가임펄스를 역산하였다.

### 5.3 등가임펄스 산정식 제안

계단 보행에 대한 데이터를 수집하기 위하여 앞서 수행한 실험에서 얻은 가속도응답의 시간이력을 계단 한 칸 즉, 한 걸음에 대하여 모두 분리하였다. 한 걸음에 대한 가속도응답의 시간이력에서 최대가속도 값을 찾고, 이를 식 (31)에 대입하여 등가임펄스를 산출하였다. 이 때, 식 (31)에서 적용한 계단판의 위치에 따른 모드형상계수는 Fig. 8에 도시하였다. 이와 같은 방법으로 얻은 562개의 최대가속도응답을 식 (31)에 대입하여 등가임펄스를 산출하고 이를 바탕으로 회귀분석하여 초과확률 25%에 해당하는 새로운 등가임펄스 산정식을 다음과 같이 도출하였다.

$$I_{eff} = \frac{0.32P}{\cos \theta} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{0.75} \times \frac{1}{f_n} \quad (32)$$

여기서,  $P$ 는 보행자의 체중으로 기존의 SCI와 마찬가지로 보통 746N을 대입한다.

식 (32)의 변수 및 형태는 식 (10)을 바탕으로 하여 Arup

의 모델과 같이 최대가속도응답을 등가임펄스로 취하여 고 유진동수와 가진진동수의 조합으로 나타내고자 하였다. 그러나 식 (10)에서 계수 54는 등가임펄스의 단위인 N-sec와 같고, 진동수의 단위는 무시하면서 물리적 차원의 모순이 발생한다<sup>[7]</sup>. 따라서 이러한 단점에서 벗어나고자 식 (32)와 같이 개선된 형태를 취하였다. 이 때, 식 (32)의 상관계수는 +0.4154로써 뚜렷한 양의 상관관계를 가지고 있으며, p-value 가  $7.35 \times 10^{-25}$  이므로 식의 신뢰성을 뒷받침하기에 충분하다고 판단된다.

고진동수 계단에 가해지는 보행하중은 임펄스 함수 형태의 응답을 야기한다. 따라서 본 연구에서 식 (32)를 통해 개선한 등가임펄스를 가속도응답함수에 대입하여 고진동수 계단의 진동성능을 평가할 수 있다. 이 때, 고진동수 계단의 경우 1차 모드만을 고려하는 경사 있는 비감쇠 단순보로 가정하였기 때문에 식 (11)에 이를 적용한 다음의 식에 의해 가속도응답을 계산한다.

$$a_{\gamma, \eta} = 2\pi f_n \mu_{\gamma} \mu_{\eta} \frac{I_{eff} \cos \theta}{\tilde{M}} \quad (33)$$

여기서, 최대가속도응답을 산정하기 위하여 측정 지점  $\eta$ 에서의 모드형상계수는 최대값인 1로 한다.

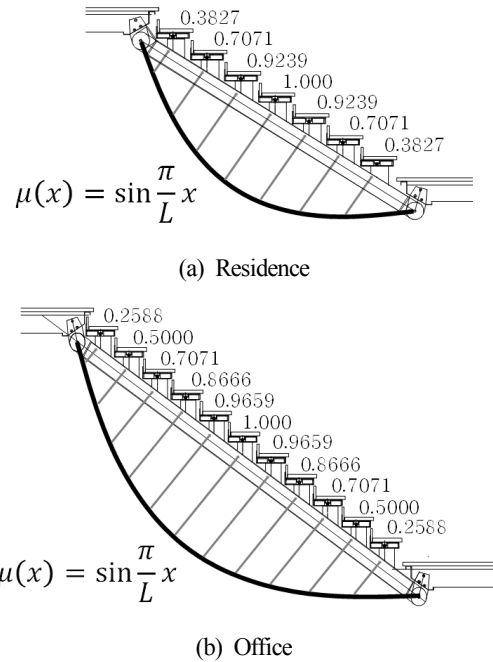


Fig. 8. Values of mode shape factor at  $\gamma$

## 6. 실측 결과와의 비교

제시한 진동응답 산정식이 실제 가속도응답을 얼마나 합리적으로 예측하는지 비교하기 위하여 가속도응답의 잔차도를 Fig. 9와 같이 나타내었다. 이론상으로는 모드형상을 고려하지 않는 AISC의 모델 및 실험을 통해 얻은 가속도응답에도 모드형상계수를 적용한 뒤 비교하였다. 데이터들의 추세선은 실선으로 표시하였으며, y축 값이 점선으로 표시한 0에 가까울수록 응답을 정확하게 예측하는 것이며 0보다 커질수록 응답을 과대평가함을 의미한다. 추가적으로, Fig. 10에 가진진동수에 따른 가속도응답의 잔차를 나타냄으로써 가진진동수에 따른 가속도응답의 예측 정도를 나타내었다.

### 6.1 AISC

AISC는 보행 속도를 크게 세 가지로 나누어 각각에 대한 설계값을 제시한다. Table 1에 제시한 바와 같이 일 분당 걸

은 걸음 수로 속도를 구분하며, 진동수로 환산하면 느린 속도 구간이 0.83Hz, 정상 속도 구간이 1.25Hz, 빠른 속도 구간은 1.67Hz에 해당한다. 이는 정상 보행의 평균 가진진동수가 2Hz 부근인 실제 보행실험 결과에 비해 지나치게 낮은 진동수영역을 기준으로 제시하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 빠른 속도 구간에서 사용하는 설계식을 제안식의 유효범위인 1.4~4.5Hz에 일괄적으로 적용하여 보다 합리적 차원에서 실측 및 예측 가속도응답을 비교하였다.

Fig. 9(a)는 AISC를 통해 예측한 가속도응답을 실측한 가속도응답과 비교하여 도시한 것이다. 전체적으로 응답의 크기를 과대평가하나 가속도응답의 크기가 커질수록 예측하는 응답이 실제 응답에 비하여 뚜렷하게 작아지는 경향을 보인다. 또한, 가진진동수에 따른 가속도응답의 잔차를 나타낸 Fig. 10(a)을 통해 3Hz 이상의 빠른 속도 구간에서는 비교적 정확하게 예측하는 듯 보이나 데이터의 불확실성이 커져 편

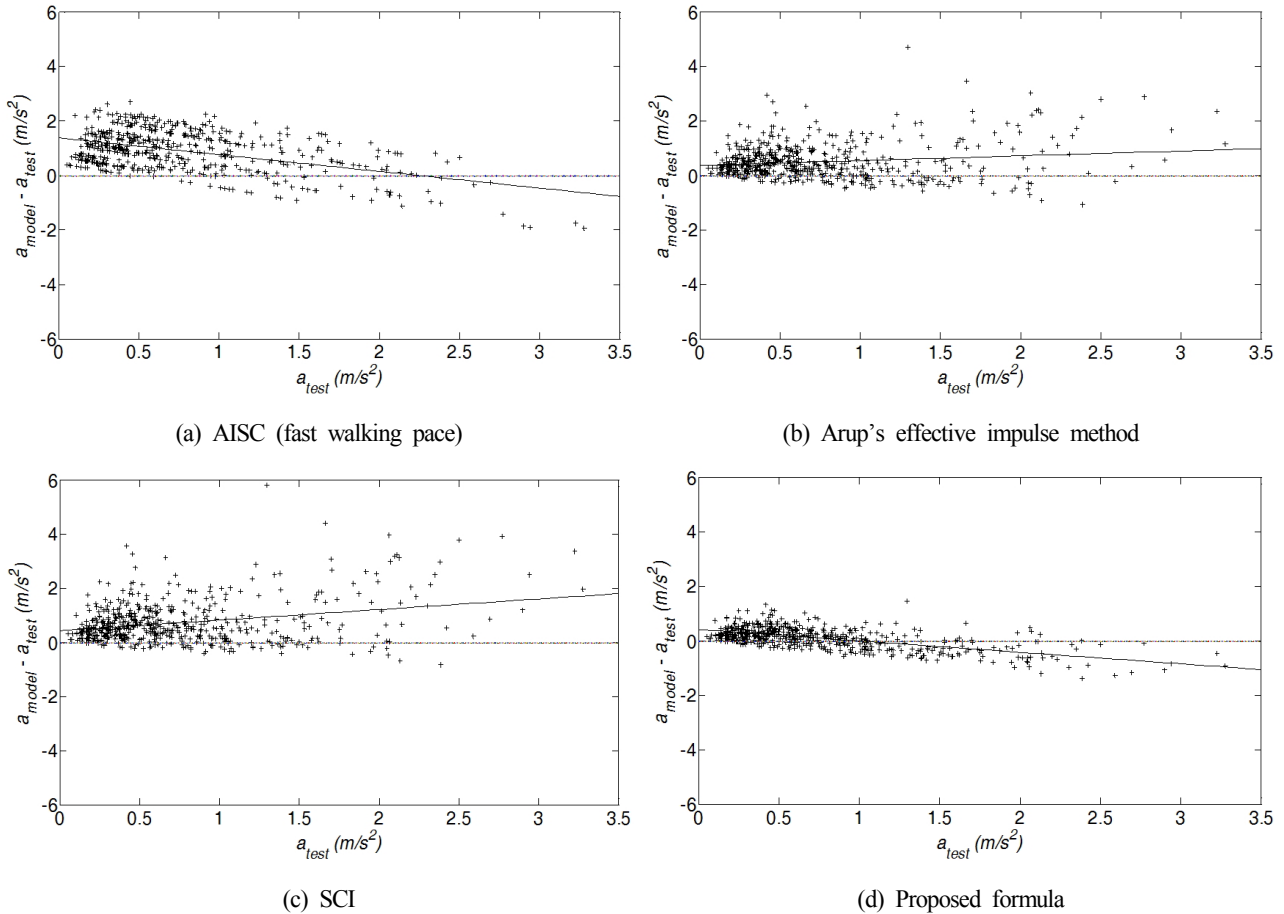


Fig. 9. Residual plots for each model

차가 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 또한 발생빈도가 높은 가진진동수 2Hz부근에서 응답을 약 2배 정도 과대평가하는 문제가 발생한다.

### 6.2 Arup의 등가임펄스 모델

Arup의 모델은 식 (10)을 이용하여 등가임펄스의 형태로 진동응답을 산정하고 식 (33)에 이를 대입하여 가속도의 형태로써 응답을 취한다.

Fig. 9(b)는 실측한 가속도응답과 Arup의 모델을 통해 예측한 가속도응답을 비교한 결과를 도시한 것이다. Arup의 모델은 느린 속도와 정상 속도 구간에서는 응답을 비교적 합리적으로 예측하나, 가속도응답의 크기가 커질수록 예측하는 응답이 실제 응답에 비하여 커지고 그 편차 또한 커지는 경향을 보인다. Fig. 10(b)은 가진진동수에 따른 가속도응답의 잔차를 나타낸 것으로써 Willford가 가진진동수의 유효 범위로 지정하였던 1.8~2.2Hz의 구간과 이보다 낮은 가진

진동수 영역에서는 비교적 합리적으로 가속도응답을 예측한다. 그러나 가진진동수가 높아질수록 응답을 과대평가 하는데, 이러한 경향은 식 (10)이 특정 범위에 대해 응답을 회귀 분석 하여 제시된 것과 상관이 있다. Kerr and Bishop<sup>[6]</sup>의 바다 보행 실험 결과에 따르면, 가진진동수가 2.2Hz미만 일 경우에는 응답이 선형으로 증가하는 경향을 보이나 2.2Hz를 넘어서면서 응답의 크기 증가율이 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 이유로 1.8~2.2Hz의 특정 범위의 응답을 대상으로 제안된 Arup 모델은 2.2Hz 이상의 가진진동수에 대하여 실제 응답의 경향성을 반영하지 못하고 응답을 과대평가한다.

### 6.3 SCI

Fig. 9(c)와 Fig. 10(c)은 실측한 가속도응답과 식 (12)를 통해 산정한 등가임펄스를 토대로 하여 식 (33)에서 구한 가속도응답을 비교하여 도시한 것이다. 가속도응답의 크기 및

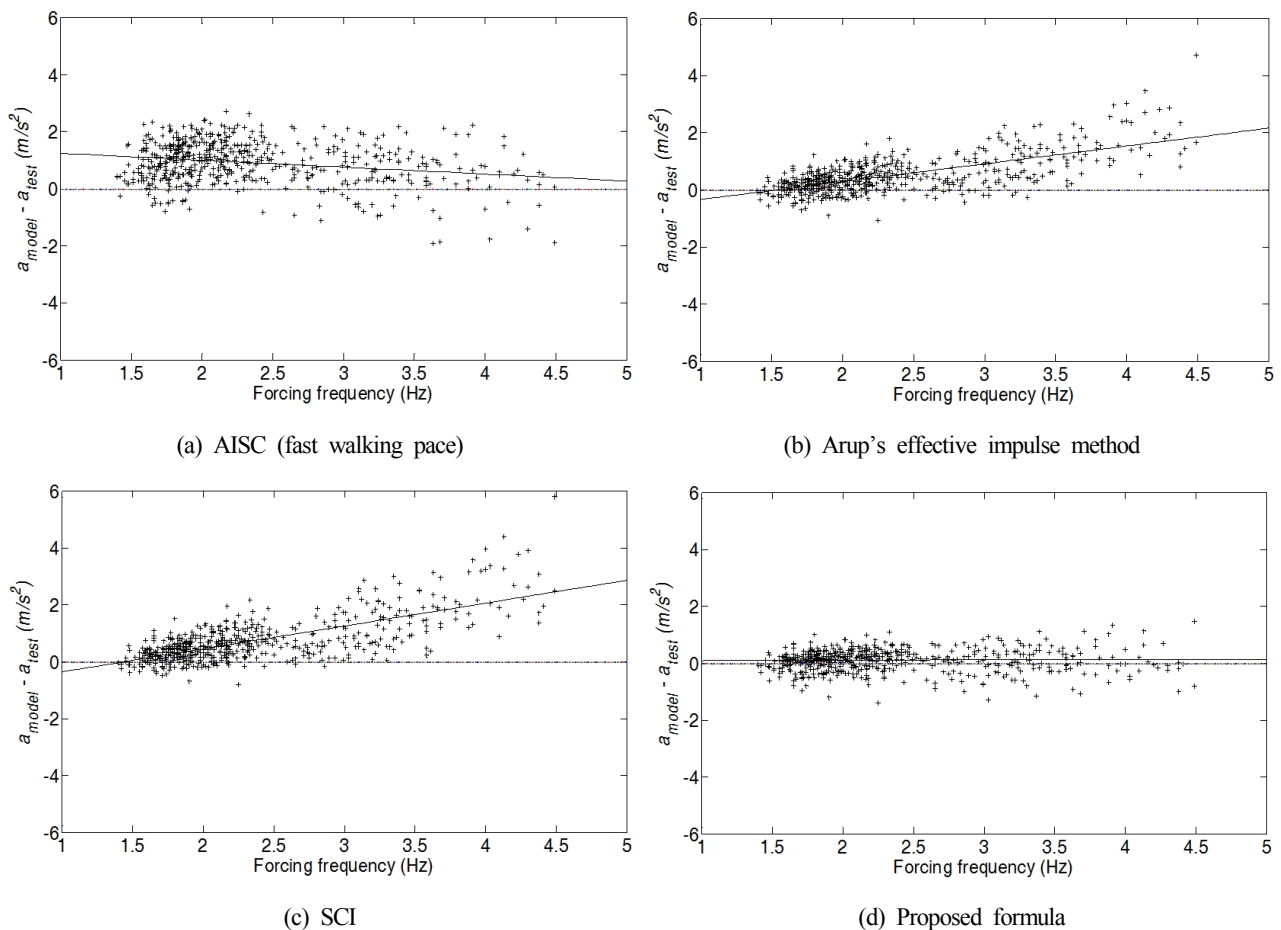


Fig. 10. Residual acceleration responses concerning with forcing frequency

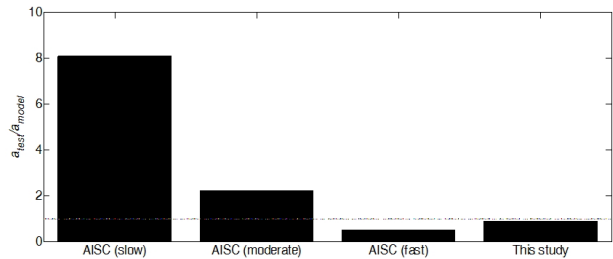
가진진동수가 커짐에 따라 응답을 과대평가하면서 Arup의 모델과 유사한 형태로 응답을 예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 SCI가 등가임펄스를 산정하는 Arup의 식 (10)을 Eurocode에 의해 계수만 보정하여 그대로 사용하면 서 발생한다. 위에서 지적한 바와 같이 2.2Hz 이상의 가진진동수 영역에서 발생하는 응답의 실제 경향성을 반영하지 못하는 식 (10)을 바탕으로 SCI의 진동응답 산정식이 제시되었기 때문에 Arup의 모델과 마찬가지로 높은 가진진동수 영역에서 응답을 과대평가하는 문제가 발생한다.

### 6.4 새로운 제안식의 적합성 확인

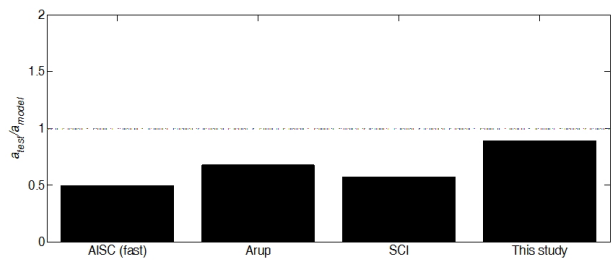
Fig. 9(d)와 Fig. 10(d)은 실측한 가속도응답과 본 연구에서 제안한 식 (32)로 산정한 등가임펄스를 식 (33)에 대입함으로써 얻은 가속도응답을 비교하여 도시한 것이다. 정상 보행 및 빠른 보행의 가진진동수를 모두 포함하는 넓은 구간을 유효범위로 지정하여 분석함으로써 가진진동수의 전 영역에서 비슷한 수준으로 응답을 예측하는 식을 얻을 수 있었다. 낮은 가진진동수의 영역에서는 Arup의 모델, 높은 가진진동수의 영역에서는 AISC가 본 연구와 유사한 수준으로 가속도응답을 예측하는 결과를 나타내었다. 그러나 가속도응답은 보행자, 보행 형태 등 여러 요인들에 따라 다양하게 나타날 수 있기 때문에 특정 범위만을 대상으로 하는 것이 아니라 측정 가능한 전체 영역을 두고 합리성을 판단해야한다. 따라서 부분적으로는 합리적일 수 있는 Arup 및 AISC의 모델 보다 전 영역에서 동등한 수준으로 응답을 예측하는 본 제안식이 계단의 진동응답을 산정하는 데에 보다 적합하다고 판단된다.

Fig. 11은 AISC, Arup, SCI 및 본 연구의 진동응답 산정식으로 예측한 가속도응답의 평균과 표준편차를 실측한 가속도응답에 대하여 정규화 한 그래프이다. 먼저, 보행 속도에 따라 다른 설계계수를 제시하는 AISC를 Fig. 11(a)에 비교하여 도시하였다. 앞서 지적했듯이 AISC는 느린 속도와 정상 속도에서의 보행에 대하여 지나치게 낮은 가진진동수 기준을 제시한다. 그에 따른 결과로 응답을 두 배 이상 지나치게 낮게 예측하고 편차 또한 크다. 이는 Fig. 11(a)을 보면 명확히 알 수 있다. 반면, 빠른 속도의 응답은 비교적 유사한 수준으로 응답을 예측한다. 이에 Fig. 11(b)에는 Fig. 9, Fig. 10과 Fig. 11(a)을 통해 비교적 합리적으로 진동응답을 산정한다고 판단한 빠른 속도 구간에서의 AISC, Arup, SCI의 모델 및 본 연구의 제안식을 비교하여 도시하였다.

Fig. 11(b)에 나타난 진동응답 산정식들은 응답을 과대평가 하고 있으며 약 0.4 정도로 비슷한 수준의 편차를 갖는다. 평균, 표준편차 및 변동계수를 모두 고려한 결과, 본 연구의 제안식이 약 90%의 높은 정확성과 52%의 낮은 변동계수를 가지고 실제 가속도응답을 가장 합리적인 수준으로 예측한다. 따라서 측정 가능한 가진진동수의 전 영역에서 진동응답을 가장 합리적으로 예측한 본 연구의 제안식은 고진동수 계단의 진동응답을 산정하는 방식으로써 적합하다고 판단된다. Fig. 10의 각 진동응답 산정법에 따른 평균 및 표준편차는 Table 5에 요약하여 정리하였다.



(a) AISC (fast, moderate and slow pace) and this study



(b) AISC (fast), Arup, SCI and this study

Fig. 11. Comparison of normalized acceleration

Table 5. Summary of mean, standard deviation and coefficient of variation for normalized acceleration

Model		$a_{test}/a_{model}$		
		Mean	Standard deviation	Coefficient of variation (%)
AISC	slow	8.071	7.030	87.102
	moderate	2.227	1.940	87.102
	fast	0.497	0.433	87.102
Arup		0.679	0.392	57.806
SCI		0.573	0.331	57.806
This study		0.889	0.464	52.217

## 7. 결론

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 진동응답 산정식의 한계를 극복하는 고진동수 계단의 진동응답 산정식을 새로 제안하였다. 계단 보행실험을 통해 측정된 실측값을 토대로 하여 가진진동수와 계단의 고유진동수 및 등가임펄스의 상관관계를 회귀분석하고 이를 바탕으로 25% 초과확률을 만족하는 등가임펄스 산정식을 도출하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 계단의 진동응답을 산정하는 명확한 방법이 없어 기존의 바닥 진동응답 산정식을 계단에 그대로 적용하고 있는 실정으로 실험을 통하여 계단에 적합한 새로운 진동응답 산정식을 제안하고자 하였다.
- (2) 총 7개의 고진동수 계단을 대상으로 고유진동수 및 가속도응답을 측정하였다. 기존의 진동응답 산정법인 AISC, Arup 및 SCI 모델을 통해 유효 가진진동수 범위 내에서 진동응답을 예측하고 이를 실측된 응답과 비교하였다.
- (3) AISC의 모델의 경우, 빠른 속도의 보행에 대한 기준을 일괄적으로 적용하여 실측된 응답과 비교하였으며 전체적으로 진동응답을 과대평가하는 경향을 보였다.
- (4) Arup 및 SCI의 모델 역시 전체적으로 진동응답을 과대평가하였으며, 특히 가진진동수가 낮은 영역에서 진동응답을 보다 합리적으로 예측하는 경향을 보였다.
- (5) 반면, 계단 보행실험을 통해 새로 제안한 산정식의 경우 1.4~4.5Hz의 넓은 가진진동수 구간에서 비교적 합리적인 진동응답 예측값을 제시한다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 진동응답 산정식의 사용이 타당하다고 판단된다.

## 참고문헌(References)

- [1] ISO (1997) *Mechanical Vibration and Shock: Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration. Part 1, General Requirements*: International Standard ISO 2631-1: 1997(E), ISO.
- [2] Thomas, M.M., David, E.A., and Eric. E.U. (2003) *Steel Design Guide Series 11 : Floor Vibrations Due to Human Activity. American Institute of Steel Construction.*
- [3] Smith, A.L., Hicks, S.J., and Devine, P.J. (2009) *Design of Floors for Vibration : A New Approach. The Steel Construction Institute.*
- [4] Hauksson, F. (2005) *Dynamic Behaviour of Footbridges Subjected to Pedestrian-Induced Vibrations, Lund University, Sweden.*
- [5] Middleton, C.J. and Brownjohn, J.M.W. (2010) *Response of High Frequency Floors: A Literature Review, Engineering Structures, Vol.32, No.2, pp.337-352.*
- [6] Kerr, S.C. and Bishop, N.W.M. (2001) *Human Induced Loading on Flexible Staircases, Engineering Structures, ELSEVIER. Vol.23, No.1, pp.37-45.*
- [7] Willford, M., Young, P., and Field, C. (2006) *Improved Methodologies for the Prediction of Footfall-Induced Vibration. Building Integration Solution, pp.1-15.*
- [8] Brownjohn, J.M.W. (2006) *Dynamic Performance of High Frequency Floors. Proceedings, IMACXXIV.*
- [9] Chopra. A.K. (1995) *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering, Vol.3, Prentice Hall, New Jersey.*

---

**요 약** : 심미성과 기능성이 현대 건축의 중요한 요소로 대두되면서 최근 비교적 경량의 고진동수 계단의 활용처가 점차 증가하고 있다. 하지만 국내의 실정 상 고진동수 계단의 진동성능을 평가하기 위한 방법이 전무한 실정이다. 유럽강구조학회의 지침의 경우 등가임펄스하중 개념을 도입하여 고진동수 바닥의 응답예측 및 진동성능 평가에 활용하고 있으나, 이는 서행보행에 대한 실험치를 토대로 제안한 값으로 2.2Hz 이상의 속도 가진에 대한 응답을 과대평가하는 한계를 지니고 있다. 이에 본 연구에는 1.4-4.5Hz의 다양한 가진진동수에 대한 가속도 응답의 실측값을 바탕으로 서행 및 속도 가진 시의 응답을 합리적으로 예측할 수 있는 등가임펄스 식을 제안하였다.

**핵심용어** : 바닥 진동, 고진동수 바닥, 계단, 등가임펄스, 보행하중, 진동평가

---