

# 바닥구조의 진동응답의 계산식에 대한 분석

## Analysis on Formulas for Floor Vibration Response



이 성 수\*

\*군산대학교 건축공학과 조교수

본 기사는 연구의 분석이 완료되지 않은 것입니다. 그러나, 진동평가기준이나 기술지침서에서 제시하고 있는 진동응답 계산식으로 바닥판의 진동응답을 구하는 과정에 문제가 있을 수 있음을 제기하고자 투고합니다.

이미 현존하는 건물의 경우는 진동실험을 통하여 바닥판에서의 정확한 진동응답을 찾아낼 수 있으나, 현존하지 않는 건물을 설계하고 있는 단계에서는 계산식이나 컴퓨터에 의한 동적해석으로 그 값을 예측할 수밖에 없다. 이러한 과정에서 간편하게 접근할 수 있는 방법이 국내외의 진동평가방법이나 기술지침서에 소개되어 있는 진동응답식을 이용하는 방법이다. 현존하는 건물의 경우에서도 복잡한 진동실험을 하기 전에 간단한 예비적 평가를 하기 위하여 이러한 계산식이 이용되기도 한다.

본 기사에서는 이들 계산식의 종류와 개요를 소개하고, 계산식을 사용하여 대상 바닥구조에 대한 진동응답을 구하여 그 값을 실제 값과 비교함으로써 계산식의 특성과 정확성에 대한 분석을 하기로 한다.

### 1. 진동응답 계산식의 종류와 특성

바닥판의 진동응답을 수식적으로 구하는 계산식을 제시하고 있는 진동평가기준으로는 CAN/CSA S16.1, LRFD, 일본강구조한계상태설계기준·동해설, 일본 철근콘크리트

구조설계기준·동해설을 예로 들 수 있다.

(가) CAN/CSA S16.1 : 식 (1)은 CAN/CSA S16.1에서 제시하는 진동응답식으로서, 10Hz 이하의 고유진동수를 갖는 7m 이상 스패의 바닥구조에서 힐드롭(Heel Drop)에 의한 피크가속도를 구하는 계산식이다. 보의 유효폭은 거더의 상대적인 강성에 따라 달라지는 값으로서, 강성이 큰 거더에 접합된 보의 T형보 유효폭은 보간격으로 하고, 강성이 약한 거더에 접합된 보의 T형보 유효폭은 슬래브 두께의 40배로 정하고 있다.

$$a_0 = 0.9 \frac{2\pi f \times \text{impulse}}{\equiv \text{alent mass}} \frac{100}{g} = \frac{60f}{wBL} \quad (1)$$

$f$ : 진동수(Hz),  $w$ : 바닥하중(kPa),  $L$ : 스패(m),  
 $B$ : 보의 유효폭(m)

(나) LRFD : LRFD에서의 계산식도 힐드롭(Heel Drop) 충격에 대한 진동응답을 구하는 식으로서 식(2)와 같다. 단, 이 식으로 구한 값은 힐드롭에 의한 초기 최대 편진폭에 해당한다.

$$A_0 = \frac{A_{0t}}{N_{eff}}, A_{0t} = (DLF)_{\max} d_s \quad (2)$$

$A_0$ : 힐드롭 충격에 의한 바닥구조의 초기 편진폭(in)  
 $A_{0t}$ : 힐드롭 충격에 의한 단일 T형보의 초기 편진폭 (in)

$DLF$ : 동적증폭계수

$d_s$ : 600파운드 하중에 의한 정적처짐 (in)

$N_{eff}$ : 유효 T형보의 수

보간격(S)이 2.5ft 보다 작은 경우,

$$N_{eff} = 1 + 2\Sigma(\cos\frac{\pi x}{2x_0}) \text{ for } x \leq x_0$$

보간격(S)이 2.5ft 보다 큰 경우,

$$N_{eff} = 2.97 - \frac{S}{17.3d_e} + \frac{L^4}{135EI_T}$$

2방향 바닥구조에 대해서는 진동응답을 식 (3)으로 구하고 있다.

$$A_{os} = A_{ob} + A_{og}/2 \quad (3)$$

$A_{os}$ : 시스템 진폭(in),  $A_{ob}$ : 보의 진폭(in),

$A_{og}$ : 거더의 진폭(in)

(다) 일본 강구조 한계상태설계기준·동해설: 일본의 강구조한계상태설계기준에서는 바닥구조의 중량에 비하여 상대적으로 작은 중량물이 어떤 높이에서 낙하하는 경우에 대한 진동응답을 구하는 식 (4)를 제시하고 있다. 바닥구조는 양단지지된 경우를 대상으로 하며 이 식으로 구한 진동응답은 중량물의 자유낙하에 의한 동적처짐에 해당한다. 다음의 식에서 인간보행을 물체의 충격으로 하여 계산하고자 하는 경우는 3kgf의 물체를 높이 5cm에서 자유낙하 하는 경우의 충격과 같은 정도에 해당하는 것으로 간주한다.

$$\delta_d = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + 2h\delta_{st} \frac{1}{1 + \frac{17}{35} \frac{w_1}{w}}} \quad (4)$$

$\delta_{st}$ : 하중  $w$  가 작용하는 경우의 정적처짐 (cm)

$h$ : 자유낙하 높이 (cm),  $w_1$ : 바닥보의 중량 (kgf),

$w$ : 낙하물의 중량 (kgf)

(라) 일본 철근콘크리트 구조계산규준·동해설: 일본의 철근콘크리트 구조계산규준·동해설에서의 계산식은 장방향 바닥판에서 사람의 도약동작에 의한 최대 변위진폭을 구하는 것으로서 식 (5)와 같다.

$$\delta_d = k \frac{impulse}{2\pi f \times (equivalent mass)} \quad (5)$$

$\delta_d$ : 최대변위진폭 (cm),  $f$ : 바닥구조의 고유진동수,

$k$ : 최대 변위진폭의 계수

인간의 보행시에 대한 최대변위진폭은 식 (5)로 구한 값의 1/6으로 하고 있다. 그리고, 변위진폭의 값을 RMS 가속도 값으로 환산하고자 하는 경우는 식 (6)으로 계산한다. 식 (6)에  $\sqrt{2}$ 를 곱하면 피크가속도가 되고, 이는 식 (1)과 유사한 형태가 된다.

$$a = \delta_a (2\pi f_v)^2 \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

## 2. 실험에 의한 진동응답의 계측

건물의 바닥구조에 대한 사용성 평가는 보행가진에 의한 진동을 기본으로 하고 있으므로 가진력의 유형을 보행가진으로 정하였으며, 진동응답은 가속도계로부터 획득되는 시간이력의 가속도응답을 계측하였다. 표 1은 본 연구에서 수행된 보행가진실험에 대한 기본조건을 정리한 것이다.

진동실험은 상시진동의 최소화를 위하여 현장공사가 종료된 야간 또는 심야에 실시하는 것을 기본으로 하였고, 가속도계는 바닥판의 중앙점과 내부의 단위슬래브 중앙점 중에서 진동응답이 크게 발생하는 곳에 부착하였다. 그리고, 보행가진실험은 동일한 보행자가 동일한 조건으로 가진보행을 하려고 하여도 무의식적인 변화에 의하여 가진력이 달라지게 되므로 바닥판별로 동일한 조건으로 5회의 반복 실험을 하고 최대값과 최소값을 제외한 나머지 3 값의 평균값을 계측값으로 정하였다.

가진보행은 몸무게 70Kg인 25세의 성인 남자 1인이 2.1Hz 속도의 메트로놈 진동음에 맞추어 정속 보행하도록 하였다. 이 때, 보행자는 팔의 높이를 60로 유지하고 발구름과 착지동작을 일정하게 하여 가진력의 변화를 최소화하도록 하였다. 보행방향은 그림 1과 같이 보방향 또는 보직각방향으로 할 수 있는데, 본 연구에서는 진동모드가 보다 명확하게 판별될 수 있도록 보직각방향으로 정하였다. 사진 1은 이와 같은 조건으로 보행 가진 실험을 하는 장면이다.

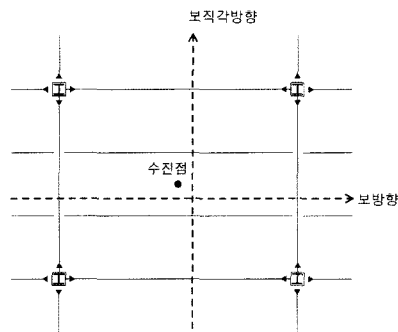


그림 1 보행가진실험의 보행방향

표 1 보행가진실험의 기본조건

실험변수	실험조건설정
가진력의 유형	1인 보행가진
가속도계의 설치	바닥판의 중앙점 또는 중앙부 단위슬래브의 중앙점 중 진동응답이 크게 발생하는 곳에 부착
실험회수	바닥판별로 동일한 조건으로 5회의 실험을 하고 최소/최대 값을 제외한 나머지 3값의 평균값을 측정값으로 정함.
보행자 조건	몸무게 70Kgf의 25세 성인 남자. 고무밑창을 갖는 단화 착용.
보행속도	메트로놈 동조에 의한 2.1Hz 정속보행
보행동작	보행시 팔의 높이는 60로 하고 발구름과 착지동작을 일정하게 함.
보행방향	보 직각방향

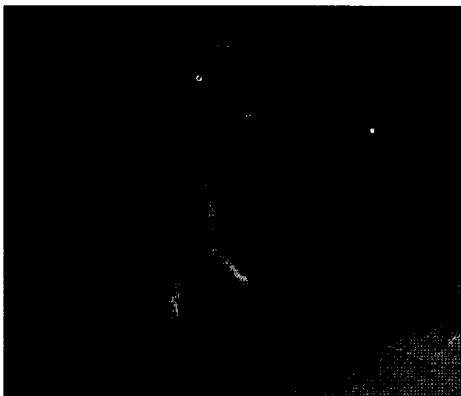


사진 1 보행 가진 실험 전경

보행가진실험에서 진동응답을 측정하기 위하여 사용된 기본장비의 제원은 표 2와 같다.

표 2 진동응답측정에 사용된 실험장비의 제원

장비명	모델명	특징
FFT Analyzer	Scientific Atlanta Model : SA390	4채널 16bit 분해능 512 samples/sec
가속도계	Dytran Modal : 3191A	민감도 : 5120mV/g 측정범위 : 0.2~500Hz

26개 바닥판에 대하여 보행 가진실험으로 구한 진동응답은 표 3에 정리되어 있다.

### 3. 계산식에 의한 진동응답의 계산

26개 바닥구조에 대하여 식 (1), 식 (2), 식 (4)의 진동응답 계산식으로 1인 보행가진에 대한 진동응답을 계산해보기로 한다.

진동응답식에 대한 계산사례는 표 3에서의 (C-g) 바닥판을 대상으로 하였으며, 나머지 바닥판에 대한 것은 그

결과만을 표 3에 정리한다. 진동응답의 계산과정에 대입되는 고유진동수는 보진동식으로 계산된 값으로 한다. 그리고, 식 (3)의 계산과정에서는 인간의 보행하중을 3Kgf의 중량물이 5cm 높이에서 자유낙하는 경우로 대체할 수 있다는 연구결과에 기초한 식이므로 해당 조건에 맞추어 계산하였다.

#### ■ 바닥구조의 조건 (그림 2)

- Deck properties : Truss Deck + 130mm Topping Concrete
- Concrete :  $m = 2400\text{kg/m}^3$ ,  $f_{ck} = 23.52\text{MPa}$ ,  $E_c = 22773\text{MPa}$ ,  $E_s = 210000\text{MPa}$
- Slab+deck weight : 3.06 kPa
- Beam properties : SB2 : H-346×174×6×9  
 $A = 5286\text{ mm}^2$ ,  $I_x = 111 \times 10^6\text{ mm}^4$ ,  $d = 346\text{ mm}$
- Girder properties : SG<sub>4</sub> : H-344×348×10×16  
 $A = 14600\text{ mm}^2$ ,  $I_x = 333 \times 10^6\text{ mm}^4$ ,  $d = 344\text{ mm}$

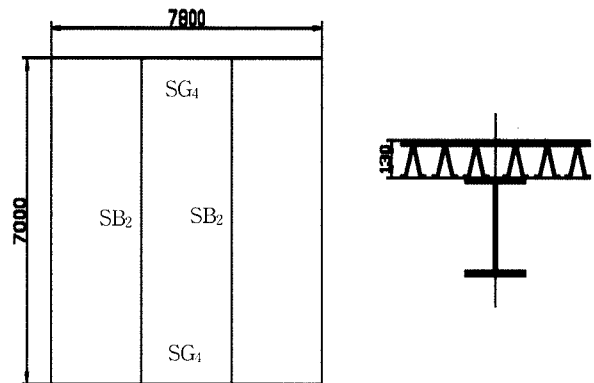


그림 2 바닥구조의 형상

【CAN/CSA S16.1에서의 진동응답식에 대한 계산사례】

$$a_0 = 0.9 \frac{2\pi f \times \text{impulse}}{\text{alent mass}} \frac{100}{g} = \frac{60f}{wBL}$$

$$= (60 \times 10.73) / (3.06 \times 2.6 \times 7) = 11.56 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

【LRFD에서의 진동응답식에 대한 계산사례】

$$N_{eff} = 2.97 - \frac{S}{17.3d_e} + \frac{L^4}{1.35EI_T}$$

$$= 2.97 - \frac{260}{17.3 \times 13}$$

$$+ \frac{700^4}{1.35 \times (210000 \times 14.5) \times 45038.6} = 1.94$$

$$(DLF)_{max} = 1.2177$$

$$\frac{Pl^3}{48EI} = \frac{600 \times (700/2.54)^3}{48 \times (210000 \times 14.5) \times (45038.6/2.54^4)}$$

$$= 0.00794 \text{ in}$$

$$A_{ot} = (DLF)_{\max} d_s = 1.2177 \times 0.00794 = 0.00967$$

$$A_0 = \frac{A_{ot}}{N_{eff}} = 0.00967 / 1.94 = 0.00498 \text{ in}$$

$$a_0 = 4 \times \pi^2 \times 10.72^2 \times 0.00497 \times 2.54 / 100$$

$$= 0.573(\text{m/s}^2)$$

【일본 강구조 한계상태설계기준, 동해설에서의 진동 응답식에 대한 계산사례】

$$w = 3\text{kgf} \quad h = 5\text{cm}$$

표 3 진동응답 계산식으로 구한 바닥판의 보행가진 진동응답

No	바닥판	실험에 의한 실제 진동응답(FFT) (gal)	LRFD (m/s <sup>2</sup> )	CAN/CSA S16.1 (m/s <sup>2</sup> )	일본 강구조 한계상태설계기준(m/s <sup>2</sup> )
1	A-a	0.98	0.26	5.22	0.03
2	A-b	1.02	0.3	6.95	0.04
3	B-a	2.24	0.5	7.78	0.05
4	B-b	1.43	0.46	7.66	0.05
5	B-c	2.27	0.61	13.28	0.09
6	C-a	3.46	0.61	13.28	0.09
7	C-b	3.76	0.64	15.26	0.1
8	C-c	3.46	0.65	15.5	0.11
9	C-d	2.07	1.16	35.06	0.23
10	C-e	2.18	0.52	11.92	0.08
11	C-f	2.16	0.45	8.9	0.06
12	C-g	3.23	0.57	11.57	0.08
13	C-h	2.43	1.05	26.28	0.17
14	D-a	3.00	0.39	7.49	0.05
15	D-b	3.11	0.69	16.93	0.11
16	D-c	1.96	1.69	59.89	0.36
17	D-d	0.68	0.4	7.54	0.05
18	E-a	0.61	0.45	10.79	0.07
19	E-b	1.09	0.55	14.12	0.09
20	F-a	1.46	1.00	16.4	0.11
21	F-b	0.98	0.53	6.35	0.04
22	G-a	2.16	0.28	6.07	0.04
23	G-b	0.83	0.24	4.56	0.03
24	G-c	1.00	0.36	7.21	0.05
25	H-a	0.87	0.46	13.1	0.06
26	H-b	3.10	0.25	5.53	0.03

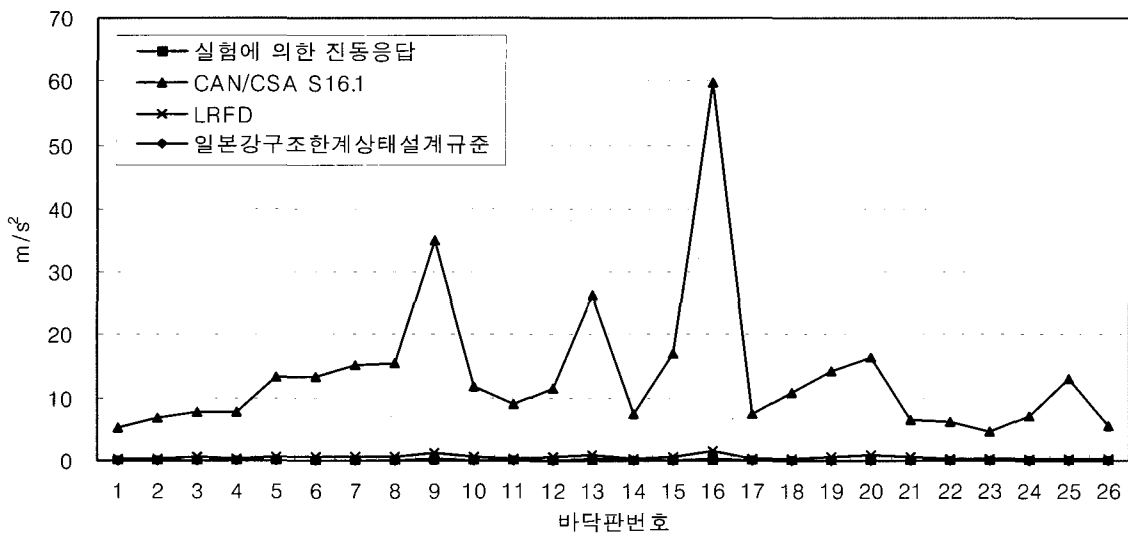


그림 3 실험 진동응답과 계산 진동응답의 비교

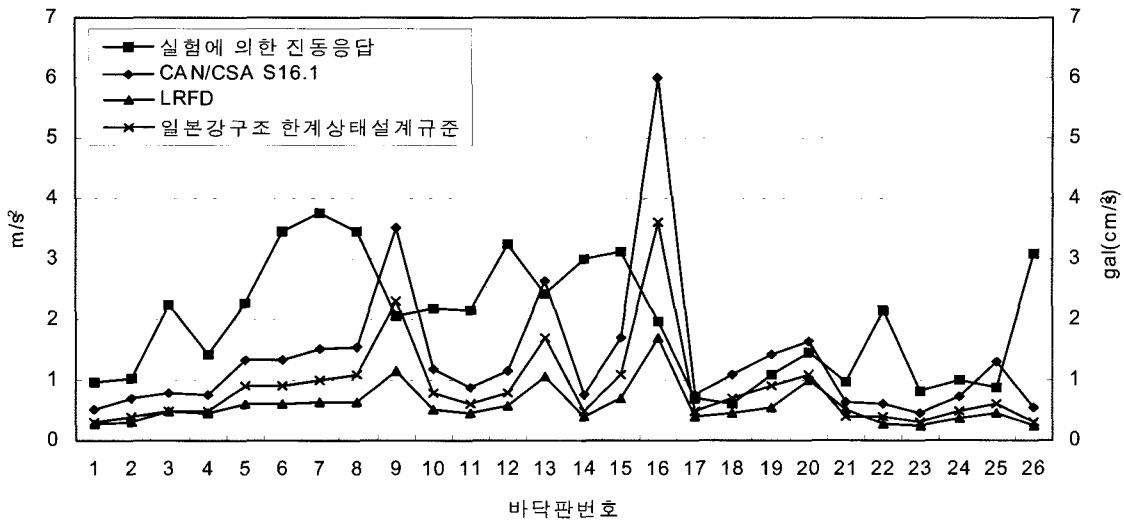


그림 4 진동응답의 실험값과 계산값의 비교 (이중축)

$$\delta_{st} = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{3 \times (700)^3}{48 \times 2100000 \times 45038.6} = 0.00023\text{cm}$$

$$w_1 = 2.6 \times 7 \times 0.13 \times 2400 + 41.4 \times 7 = 5968.2 \text{ kgf}$$

$$\delta_d = \delta_{st} + \sqrt{\delta_{st}^2 + 2h\delta_{st} \frac{1}{1 + \frac{17w_1}{35w}}}$$

$$= 0.00023 + \sqrt{0.00023^2 + 2 \times 5 \times 0.00023 \frac{1}{1 + \frac{17 \times 5968.2}{35 \times 3}}}$$

$$= 0.0018\text{cm}$$

$$a_0 = 4 \times \pi^2 \times 10.72^2 \times 0.0018 / 100 = 0.081 (\text{m/s}^2)$$

#### 4. 진동응답 계산식의 분석

보행하중에 대한 바닥구조의 진동응답을 구하는 계산식으로는 앞에서 소개한 바와 같이 CAN/CSA S16.1, LRFD, 일본 강구조 한계상태설계기준·동해설, 일본 철근콘크리트구조설계기준·동해설 등에 제시된 식이 있으며, 이 중 앞의 세가지 식으로 대상 바닥구조에 대하여 보행가진에 의한 진동응답을 구하고 그 값을 보행가진실험으로 구한 값과 비교하여 정리하면 앞에서 제시한 표 3과 같다. 표 3에서, 실험값의 단위는 gal(cm/s<sup>2</sup>)이고, 계산식에 의한 값의 단위는 m/s<sup>2</sup>이다. 표 3을 그래프로 표시하면 그림 3과 같다.

보행가진실험의 조건과 진동응답은 2항에서 정리한 바와 같다. 한편, 진동응답을 추정하는 계산식은 모두 유효질량에 대한 단자유도계 시스템의 진동응답에서 유도된 것이므로 이들 값에 비교되는 계측 진동응답은 FFT해석

으로 구한 1차모드의 최대진동응답을 대상으로 하였다.

표 3을 살펴보면 계산식으로 구한 진동응답은 실험으로 구한 실제값과 크게 차이가 있음을 볼 수 있고, 그림 3에서는 y축 스케일에 의하여 CAN/CSA 진동응답식에 의한 값만 그래프로 표현되고 나머지 값들은 그 값이 매우 작아서 그래프로 나타나지 않고 있다. 계산과정에서 특별한 오류는 발견되지 않았으나, CAN/CSA의 진동응답식에 의한 값은 실제값에 비하여 수백배의 값으로, LRFD의 진동응답식으로는 10~20배의 값으로, 일본 강구조한계상태설계기준·동해설에서의 식으로는 약 3~5배의 값으로 크게 계산되고 있다.

실험으로 구한 진동응답을 정해로 본다면, 계산식으로 구한 값은 바닥구조의 진동응답을 지극히 고평가하고 있는 것에 해당하므로, 계산식으로 구한 진동응답으로 바닥구조의 진동수준을 평가하여서는 곤란할 것으로 판단된다.

CAN/CSA의 진동응답식으로 구한 값은 그 기준에서 제시한 진동평가곡선에 대입해 보아도 매우 과도한 진동응답에 해당되므로 계산식에 오류가 내제되어 있을 것으로 예상되지만, 이 식의 유도에 관한 배경 문헌을 확인하지는 못하여서, 그 원인을 정확히 분석하지는 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 실험값과 계산값을 직접적으로 비교하여 분석하는 것이 곤란하였으며, 3가지 진동응답 계산식의 상호비교를 살펴보았다. 바닥구조에 작용하는 보행하중에 의한 진동응답을 계산하는 3가지 식의 기본 개요는 다음과 같다.

- CAN/CSA S16.1 : 단자유도계 유효질량계에 충격하중이 작용한 경우의 피크가속도

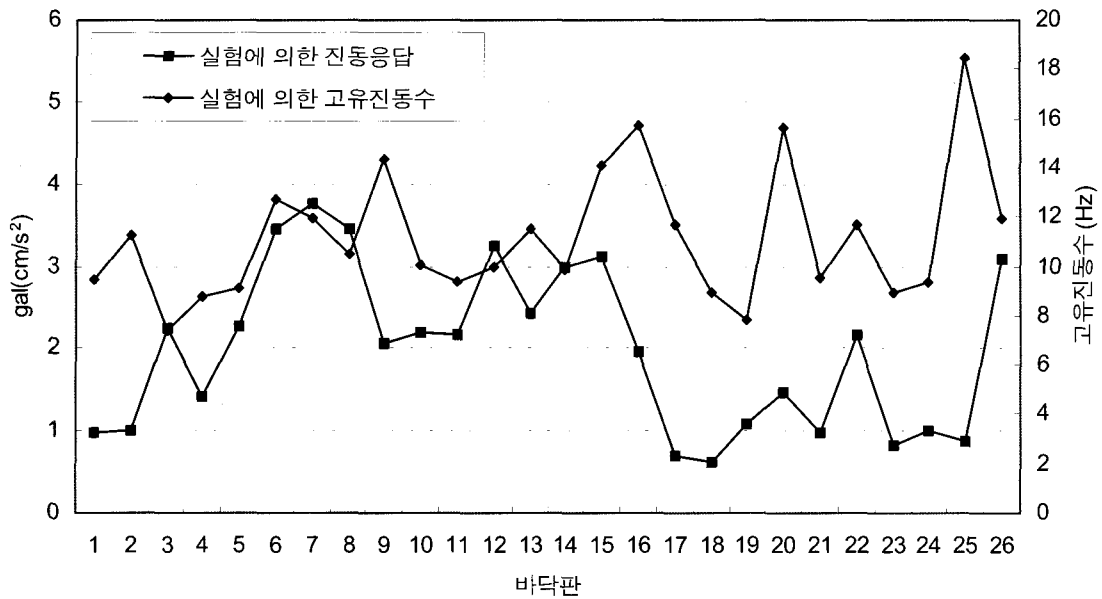


그림 5 실험에 의한 고유진동수와 진동응답의 비교

- LRFD : 헨드롭 충격에 대한 진동응답을 구하는 계산 식으로서 600파운드(272Kgf)의 하중에 의한 정적처짐을 구하고 이 값에 동적증폭계수를 곱하여 단일 T형보의 초기편진폭을 구한 다음에 유효 T형보의 개수로 나누어서 바닥구조의 초기편진폭을 구함.
- 일본 강구조 한계상태설계기준-동해설 : 사람의 보행 하중을 3Kgf의 중량물이 5cm 높이에서 자유낙하할 때 생기는 충격력으로 대체하고, 이에 대한 동적변위를 구함. 이 값에  $(2\pi f)^2$ 을 곱하여 변위를 가속도로 환산함.

위의 3가지 기준에 수록된 진동응답식은 이와 같이 기본 개요가 상이하여 진동응답을 다르게 계산하게 된다. 한편, 이들 계산식은 바닥구조의 강성과 고유진동수에 관계하는 식으로서 CAN/CSA S16.1식을 10으로 나누고, 일본 강구조 한계상태설계기준에서의 식을 10으로 곱한 후에 바닥구조에 대한 진동응답을 계산하여 그래프로 표시하면 그림 4와 같이 응답의 유형이 비슷함을 확인할 수 있다. 즉, 3가지 계산식은 바닥구조의 강성과 고유진동수에 기초한 식이므로 바닥구조의 형상적 조건에 따라 진동응답의 유형은 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

3가지 계산식에 각각 10배의 오차가 있는 이유로 추정되는 원인은 다음과 같다.

- 중력가속도 환산 과정에서의 오류

- 보행하중을 중량물의 자유낙하 충격하중으로 대체하는 과정에서의 오류
- 단위보정에서의 오류
- 변위를 가속도로 환산하는 과정에서의 오류

그림 4에서 오른쪽의 y축은 실험값에 대한 것이다. 실험값은 gal(cm/s<sup>2</sup>) 단위로 계산값보다 매우 작으므로 y축을 우측에 따로 설정하였다. 값의 대소는 논외로 하고, 곡선의 개형을 살펴보기로 한다. 앞서 설명한 바와 같이 3가지 계산식의 곡선은 곡선의 개형이 유사하지만, 실험값의 곡선과는 상관성이 나타나지 않고 있다. 즉, 값의 근사성에 대한 오차가 매우 클 뿐만 아니라, 기존의 진동응답 계산식은 실제 진동응답의 개형과 전혀 상관성을 보이고 있지 않으므로, 계산식에 의하여 구한 진동응답은 실제 진동응답과 관계가 적다고 할 수 있다.

고유진동수의 계산식으로 구한 값은 실제값과 근사성이 있고 보진동식이나 보정-시스템진동식을 통하여 실제값에 매우 근사한 고유진동수를 계산할 수 있다. 그러나, 진동응답은 실험값과 계산값에 어떠한 규칙성이나 근사성도 보이지 않고 있다. 이러한 원인은 그림 5에서 볼 수 있듯이 실제 고유진동수와 실제 진동응답 간에 일정한 규칙성을 보이지 않기 때문이다.

한편, 고유진동수 계산식으로 구한 고유진동수와 진동응답에는 그림 6과 같이 뚜렷한 상관성을 확인할 수 있다.

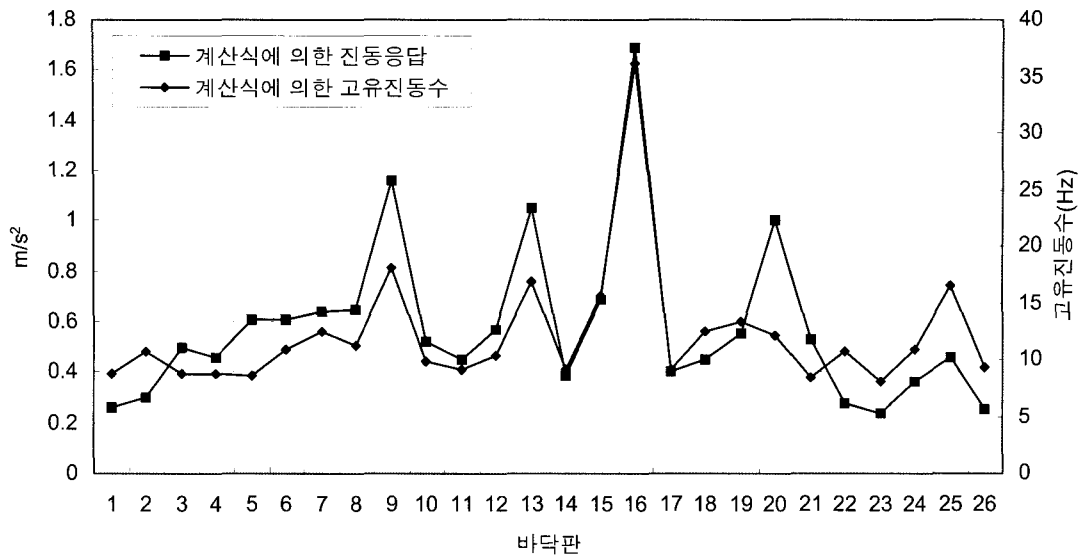


그림 6 계산식에 의한 고유진동수와 진동응답의 비교

본 기사에서는 기존의 진동평가방법이나 기술지침서에 소개되어 있는 진동응답 계산식의 부정확성을 분석하고 이에 대한 사용성에 문제가 있음을 제기하고 있다. 향

후로, 진동응답 계산식의 활용에 대한 오류가 정정되거나, 신뢰성이 높은 진동응답 계산식이 제안되기를 기대한다. 