



다구치방법과 전달행렬법을 이용하여 지반진동을 받는 감쇠전단구조물의 진동저감 연구

Study on Vibration Reduction of Shear Damping Structure Subjected to Ground Vibration Using the Taguchi Method and Transfer Matrix Method

조 찬 우* · 이 정 우* · 김 동 원** · 이 정 윤†

Chan U Jo*, Jung Woo Lee*, Dong-Won Kim** and Jung Youn Lee†

(Received May 23, 2019 ; Revised July 2, 2019 ; Accepted July 2, 2019)

Key Words : Taguchi Method(다구치방법), Shear Damping Structure(감쇠전단구조물), Expanded Damped Transfer Matrix Method(확장된 감쇠전달행렬법), Transfer Function(전달함수), Ground Vibration(지반진동)

ABSTRACT

Damped shear structures are widely used in industrial plant construction and building design but are often excited during ground vibrations. The study of vibration response of these structures is important for both accurate product production and building design. Traditionally, finite element methods such as ANSYS have been used as the main method for calculating the response of these structures. However, when interpreting shear structures, this method is not as efficient because the matrix is larger than the transfer matrix. In this study, we developed an extended transfer matrix method to analyze damping shear structures. The transfer function and the ground vibration are used to obtain the response of the shear damping structure. Using the Taguchi method, optimum design parameters were found to minimize the response of the structure caused by ground vibrations.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 정밀 장비의 사용이 여러 분야에서 급격히 요구되고 있으며 장비가 고집적화, 고용량화, 소형화됨으로써 장비에 요구되는 정밀도가 점진적으로 높아지고 있다. 이에 따라 반도체 공정에서 미세진동에 따른 장비의 진동 감소가 중요한 문제로 나타나고 있으며 신뢰성 및 고정밀도 확보가 시급한 사항이다⁽¹⁻³⁾.

반도체 장비의 허용 정밀도가 나노미터급으로 되어있는 현실에서 장비의 내부진동 뿐 아니라 지반진

동이 정밀도에 큰 영향을 미치므로 문제점으로 나타나고 있다⁽⁴⁾. 지반진동은 장비를 지지하는 외부진동으로 사람의 이동, 인근 차량 운행, 지진, 설비 가동 등 여러 가지 원인을 갖고 있다. 대표적인 지반해석 방법으로 시간이력해석법과 응답스펙트럼해석법⁽⁵⁻⁷⁾이 사용된다. 두 해석 모두 모드 중첩법을 사용하고 있으며 응답스펙트럼해석법은 계산이 용이하지만 구조물의 응답을 시간의 함수로 나타낼 수 없다. 이에 비해 시간이력해석법은 시간 증분마다 변하는 하중을 단계적으로 수치적분을 함으로서 구조물의 응답을 시간에 따라 구하는 방법이지만 막대한 계산량과 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 여기서는 간단하게

† Corresponding Author; Fellow Member, Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University
E-mail : jylee@kgu.ac.kr

* Member, Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

** Member, Dept. of Advanced Materials Engineering, Kyonggi University

‡ Recommended by Editor Won Ju Jeon

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

감쇠전단구조물의 응답을 확장된 전달행렬법을 사용하여 기존 방법에 비해 용이하게 구하는 방법을 개발하였다. 먼저 지반진동을 감쇠전단구조물에 적용하기 위해 지반진동의 가속도 신호를 측정하고 필터링을 하여 변위신호로 변환하였다. 지반과 각 층의 절점과 지반과의 전달함수를 이용하여 확장된 전달행렬법으로 각 절점의 변위를 예측하였다.

감쇠전단구조물의 진동 저감을 위해서는 다양한 설계인자에 대한 검토가 어려우므로 실험계획법 중 하나인 다구치방법을 이용하여 다양한 설계인자의 변위에 대한 영향을 검토하고 진동저감 방안을 제시하였다.

2. 이 론

2.1 감쇠전단구조물의 확장된 전달행렬법

Fig. 1에 전달행렬법의 감쇠전단행렬을 나타내었으며 i 번째 요소의 횡방향 전달행렬은 다음 식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_i^D = \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_{i-1}^U \quad (1)$$

여기서 v 는 횡 변위를 V 는 전단력을 나타내는 상태 벡터이며 U 는 요소의 위쪽을 D 는 요소의 아래쪽을 나타낸다. k 는 감쇠전단구조물의 횡 방향의 강성계수를 c 는 감쇠계수를 의미하며 j 는 허수를 나타낸다. i 번째 질량 m_i 의 점 전달행렬은 관성력이 있지만 아래와 위 변위가 동일하므로 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_i^U = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -m_i\omega^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_i^D \quad (2)$$

여기서 질량과 스프링에 대한 전달행렬을 모두 고려

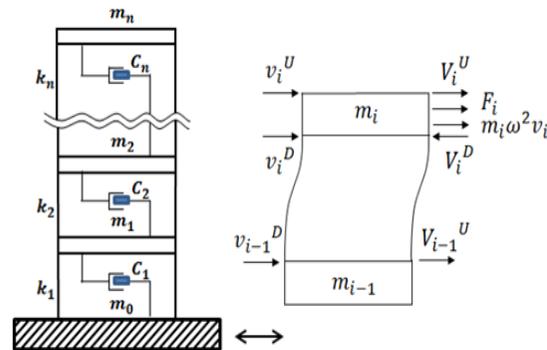


Fig. 1 Transfer matrix schematic diagram and free-body diagram of mass

하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_i^U = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -m_i\omega^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_{i-1}^U \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) \\ -m_i\omega^2 & 1 - \frac{m_i\omega^2}{(k_i + jc\omega)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_{i-1}^U$$

따라서 i 번째 요소에 대한 전달행렬 T_i 는 다음과 같다.

$$[T_i] = \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) \\ -m_i\omega^2 & 1 - \frac{m_i\omega^2}{(k_i + jc\omega)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Fig. 1에서 주기적인 외부 힘 F_i 가 i 번째 질량 m_i 에 작용할 때 관성력과 평형을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_i^U = \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) \\ -m_i\omega^2 & 1 - \frac{m_i\omega^2}{(k_i + jc\omega)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \end{Bmatrix}_{i-1}^U + \begin{Bmatrix} 0 \\ -F_i \end{Bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)를 외부 힘을 고려한 한 개의 전달행렬로 나타내면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_i^U = \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) & \dots & 0 \\ -m_i\omega^2 & 1 - \frac{m_i\omega^2}{(k_i + jc\omega)} & \dots & -F_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_{i-1}^U \quad (6)$$

따라서 i 번째 확장된 전달행렬 $[\overline{T}_i]$ 은 다음과 같다.

$$[\overline{T}_i] = \begin{bmatrix} 1 & 1/(k_i + jc\omega) & \dots & 0 \\ -m_i\omega^2 & 1 - \frac{m_i\omega^2}{(k_i + jc\omega)} & \dots & -F_i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때의 상태벡터는 다음과 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_n^U = [\overline{T}_n] [\overline{T}_{n-1}] \dots [\overline{T}_2] [\overline{T}_1] \begin{Bmatrix} v \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_0^U \quad (8)$$

$$= [\overline{T}_{all}] \begin{Bmatrix} v \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_0^U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_0^U \quad (9)$$

감쇠전단구조물의 경우 최상층이 자유이고 지반이 고정인 경계조건을 갖고 있으므로 상태벡터 $\{Z_i\}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\{Z_n\} = \begin{Bmatrix} v \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_n, \quad \{Z_0\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_0 \quad (10)$$

자유진동일 때 하중 $F_i = 0$ 이 되고 경계조건에서 $u_{13} = 0, u_{23} = 0$ 가 된다. 식 (9)에 식 (10)을 넣어 n 차 방정식을 구한 후 감쇠전단구조물 고유진동수는 다음 식으로 해석할 수 있다.

$$f(\omega) = \det |u_{22}| \quad (11)$$

식 (11)의 n 개의 해가 각각의 고유진동수가 된다. 각 차수의 고유진동수를 식 (10)의 경계 조건과 식 (9)에 넣어 각 차수에 대한 모드를 구한다.

감쇠전단구조물에 강제 진동 F_i 가 존재할 때 식 (9)는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} v \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_n^U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ V \\ \dots \\ 1 \end{Bmatrix}_0^U \quad (12)$$

$$0 = u_{22} V_0 + u_{23} \quad (13)$$

$$V_0 = -\frac{u_{23}}{u_{22}} \quad (14)$$

식 (10)의 $\{Z_0\}$ 인 지반의 상태 벡터를 식 (7)에 넣으면 측정점 i 와 가진점 j 사이의 전달함수 $H_{i,j}(\omega)$ 를 구할 수 있다.

2.2 주파수영역 해석법을 이용한 응답해석

구조물의 가진력 $f(t)$ 와 가진력에 대한 응답 $x(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (15)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (16)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (17)$$

$$X(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (18)$$

여기서 $H(\omega)$ 는 시스템의 전달함수이다.

3. 적용 예

확장된 전달행렬법을 이용해서 지반진동을 받는 전단구조물의 응답해석을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 4층 전단구조물에 대한 고유치 해석을 수행하였다. 수치해석 대상 모델의 제원은 다음과 같다. 질량은 m_1 이 4500 kg, m_2 와 m_3 는 3000 kg, m_4 는 500 kg이다. 스프링 탄성계수는 k_1 이 3200 kN/m이고 k_2 는 2400 kN/m, k_3 는 1600 kN/m, k_4 는 800 kN/m이다. 감쇠계수 ζ 는 0.05로 하였다.

3.1 고유진동수와 전달함수

Table 1에 확장된 전달행렬법과 모드해석법을 사용하여 4층 감쇠전단구조물의 고유진동수를 감쇠계수에 따라 나타내었으며 두 결과가 일치하여 제안된 방법이 타당함을 알 수 있었다. Fig. 3에 $\zeta = 0.02$ 일 때 전달함수를 나타내었다. 10 Hz까지 4개의 고유진동수가 있었으며 피크값이 날카롭지 않아 감쇠가 있음을 알 수 있다.

3.2 지반 가속도의 변위 변환

지반진동으로 인한 구조물의 변위응답을 구하기 위해 측정된 지반 가속도와 변위를 Fig. 4에 나타내었다. 변위함수는 이 지반진동의 가속도를 시간에 따라 적분하고 필터링을 하여 구하였다⁽⁸⁾.

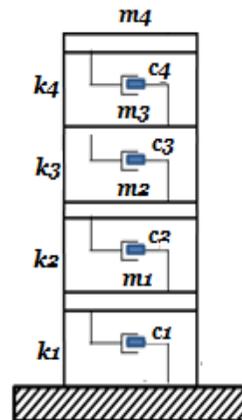
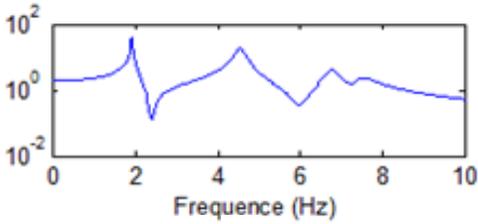


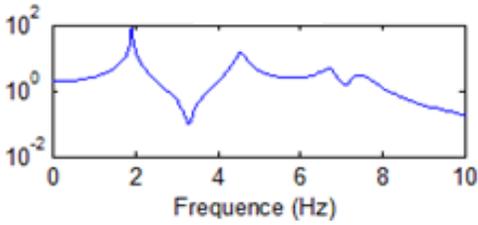
Fig. 2 Model of four story shear damping structure

Table 1 Natural frequencies of four story shear damping building

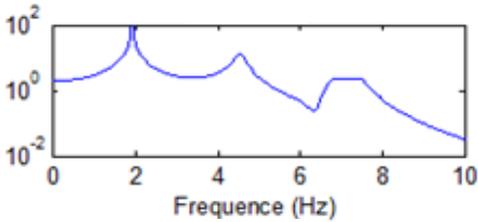
Mode	Natural frequency (Hz)				Remark
	Expanded TMM		Modal analysis		
	$\zeta = 0$	$\zeta = 0.05$	$\zeta = 0$	$\zeta = 0.05$	
1st	1.939	1.938	1.938	1.938	
2nd	4.563	4.556	4.556	4.556	
3rd	6.771	6.767	6.767	6.767	
4th	7.461	7.425	7.425	7.425	



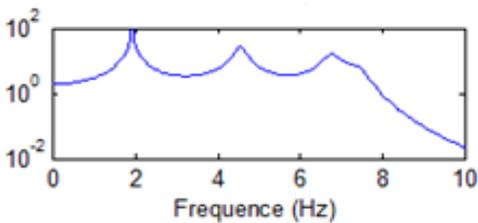
(a) $H_{0,1}(\omega)$



(b) $H_{0,2}(\omega)$



(c) $H_{0,3}(\omega)$



(d) $H_{0,4}(\omega)$

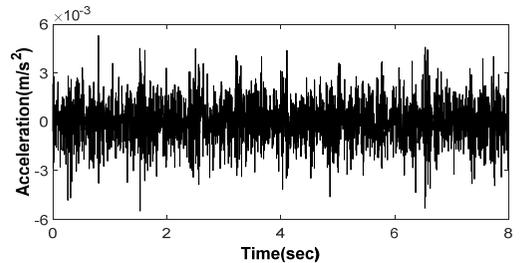
Fig. 3 Transfer function of the four stories shear damping structure

4. 다구치방법

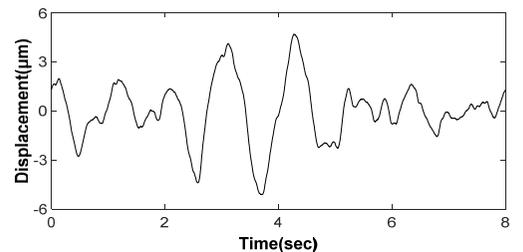
다구치방법은 직교 배열을 사용하여 설계에 영향을 미치는 제어인자를 규명하고 제어인자가 변화할 수 있는 수준을 결정한다. 다구치방법은 최소한의 실험으로 어떤 요소가 제품 품질에 가장 큰 영향을 주는 지 결정하는 데 필요한 데이터를 얻는다⁽⁹⁾. 여기서는 감쇠구조물의 주요 설비가 4층에 있고 지반 진동이 있을 때 4층의 진동 변위가 작을수록 유리하므로 망특성 중 망소특성을 적용하여 해석하였다. 제어인자는 질량, 강성, 감쇠 중 질량은 장비 등의 무게이므로 제외하였고 설계 변경이 가능한 강성과 감쇠로 하였다.

Fig. 2와 같이 감쇠전단구조물에 대한 설계변수는 총 12개로 4개 층에 대하여 각 층의 질량 및 감쇠계수와 강성계수이다.

Table 2에 제어인자별 수준을 나타내었다. k_1 은 초기값을 2수준으로 하고 1수준은 초기값보다 10% 낮은 값으로 하였다. 나머지 k_2, k_3, k_4 는 초기값을 2수준으로 하였으며 1수준은 초기값보다 10% 낮은 값으로 하고, 3수준은 초기값보다 10% 높은 값으로 하였다. $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ 는 초기값을 2수준으로 하고 1수준은 초기값보다 0.01 작은 값을, 3수준은 초기설계안보다 0.01 큰 값으로 하였다.



(a) Acceleration



(b) Displacement

Fig. 4 Ground acceleration signal from the experiment

Table 2 Control factors and level

Control factor	Level		
	1	2	3
k_1	2880 kN/m	3200 kN/m	-
k_2	2160 kN/m	2400 kN/m	2640 kN/m
k_3	1440 kN/m	1600 kN/m	1760 kN/m
k_4	720 kN/m	800 kN/m	880 kN/m
ζ_1	0.04	0.05	0.06
ζ_2	0.04	0.05	0.06
ζ_3	0.04	0.05	0.06
ζ_4	0.04	0.05	0.06

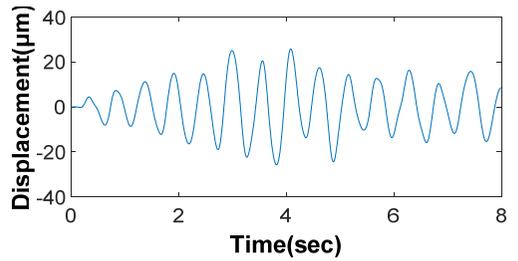
Table 3 $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ orthogonal array

Exp. no.	Control factor							
	k_1	k_2	k_3	k_4	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

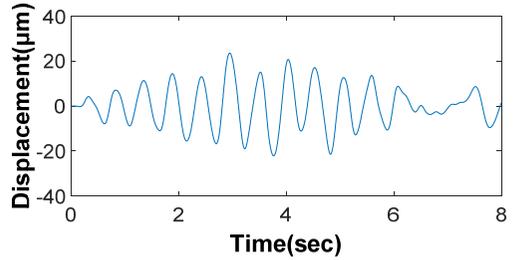
직교배열표는 제어인자가 8개이며 3 수준이므로 Table 3 과 같이 2요소와 3요소의 혼합인 L_{18} 을 사용하였다.

Table 3에 있는 18개 실험방법을 실제 지반진동을 받는 감쇠전단구조물의 4층에 대한 진동 변위에 예측하여 Fig. 5에 나타내었다. 여기서는 대표적으로 실험 번호 1, 5, 9, 13, 18에 대해 나타내었다.

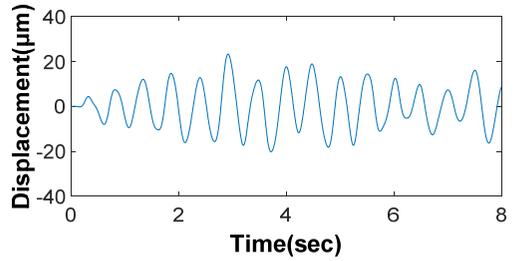
Fig. 5의 실험번호에 의한 응답 변위 함수를 RMS로 계산하여 Table 4에 나타내었으며 최대는 실험번호 1에서 11.880 μm 이고 최소는 실험번호 3에서 9.308 μm 이었다.



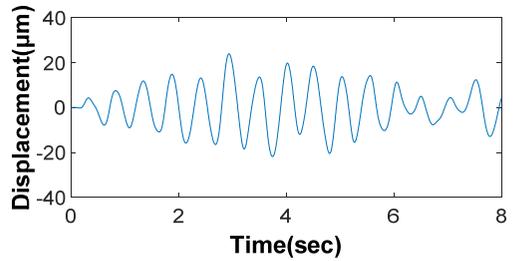
(a) Experiment no. 1



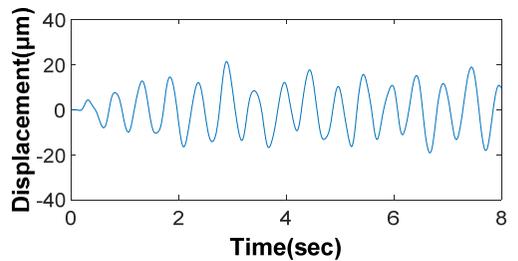
(b) Experiment no. 5



(c) Experiment no. 9



(d) Experiment no. 13



(e) Experiment no. 18

Fig. 5 Displacement of 4th floor of damped shear structure subjected to ground vibration

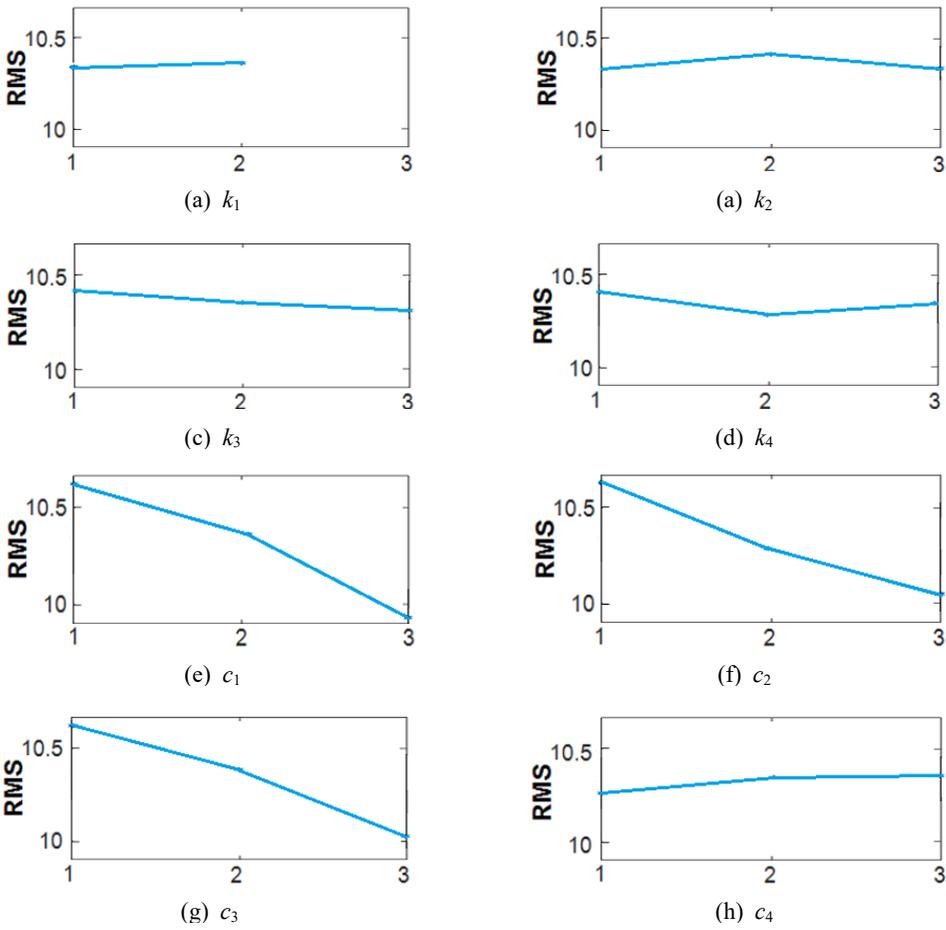


Fig. 6 The main effect of each factor on RMS

Table 4 The RMS of the displacement according to the experiment number

Exp. no.	RMS (μm)	Exp. no.	RMS (μm)
1	11.880	10	9.882
2	10.367	11	10.153
3	9.308	12	10.888
4	10.191	13	10.057
5	9.782	14	11.101
6	10.999	15	10.183
7	10.510	16	1.0462
8	10.354	17	10.301
9	10.207	18	10.124

또한 제어인자의 효과를 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 값이 적을수록 진동변위에 대한 기여도가 적은

인자이다. 여기서진 진동변위가 적을수록 좋은 망소 조건이므로 각 인자의 최저값을 선택하였다.

따라서 최저값의 강성계수는 $k_1 = 2880 \text{ kN/m}$, $k_2 = 2400 \text{ kN/m}$, $k_3 = 1760 \text{ kN/m}$, $k_4 = 800 \text{ kN/m}$ 이며, 감쇠계수는 $c_1(\zeta = 0.06)$, $c_2(\zeta = 0.06)$, $c_3(\zeta = 0.06)$, $c_4(\zeta = 0.04)$ 이다.

최적 설계안을 평가하기 위하여 지반진동에 대한 진동변위의 초기 설계값과 다구치방법을 통한 최적설계값을 나타내어 Fig. 7에 나타내었으며 파란색은 초기 설계값을 나타내고 빨간색은 최적 설계값을 나타낸다.

Fig. 7에 있는 각층의 응답을 RMS로 계산하여 Table 5에 나타내었다. 초기값보다 최적 설계값으로 구한 RMS가 전반적으로 낮아졌으며 4층에서 10.23%로 가장 많이 감소하였다.

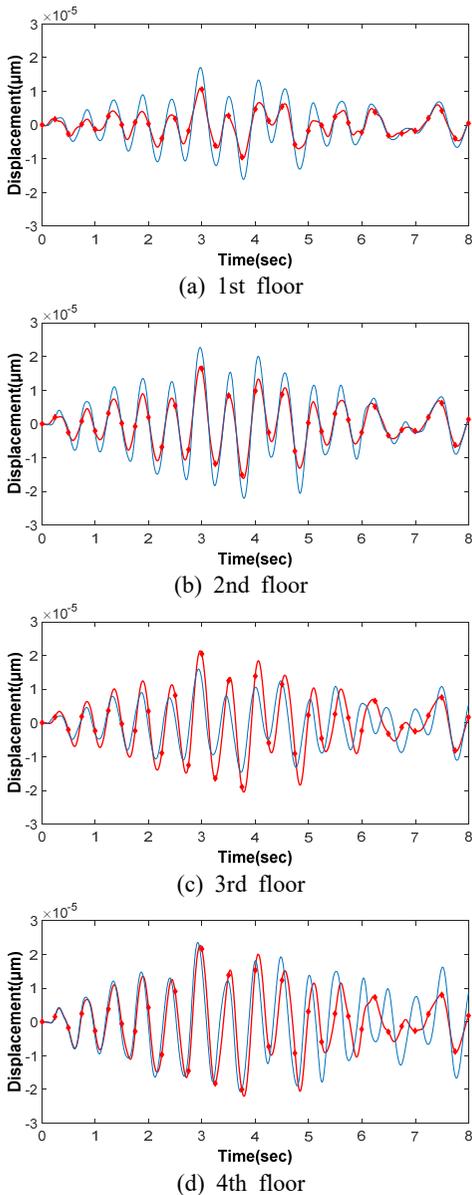


Fig. 7 Comparison of initial and optimum design vibration displacements by ground vibration

Table 5 Comparison of initial and optimum design vibration displacements by ground vibration

No. of floor	RMS (μm)		Ratio (%)
	Initial	Optimum	
1	3.740	3.646	2.51
2	6.385	6.160	3.52
3	9.120	8.243	9.61
4	10.003	8.979	10.23

5. 결론

지반진동이 있을 때 감쇠전단구조물의 응답해석을 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 확장된 감쇠 전달행렬법을 개발하였고 이를 이용하여 감쇠전단구조물의 전달함수를 해석하였다.
- (2) 전달함수와 지반진동에 의해 감쇠전단구조물의 응답을 해석하는 방안을 제시하였다.
- (3) 다구치방법을 이용하여 전단감쇠구조물의 설계 변수를 최적화하여 지반진동에 의한 구조물의 진동 변위를 감소시켰다.

후 기

이 연구는 경기도의 경기도 지역협력연구센터 사업의 일환으로 수행하였음(GRRC경기2017-B02 혁신형제조시스템연구).

References

- (1) Bazhenkov, A. M. and Mikhailov, V. P., 2015, Active and Semi Active Vibration Isolation Systems Based on Magnetorheological Materials, *Procedia Engineering*, Vol. 106, pp. 170~174.
- (2) Wigglesworth, W. and Jordan, S., 2009, Vibration Isolation for Nanolithography, *Semiconductor International*, Vol. 32, No. 10, pp. 24~26.
- (3) Lewyn, L. L., Ytterdal, A. C. and Martin, K., 2009, Analog Circuit Design in Nonoscale CMOS Technologies, *Vol. 97, No. 10*, pp. 1687~1714.
- (4) Schmidt, R. M., 2012, Ultra-precision Engineering in Lithographic Exposure Equipment for the Semiconductor Industry, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 370, pp. 3950~3972.
- (5) Hosseini, M., Hosseini, B. and Safi, Z., 2017, Seismic Design Evaluation of Reinforced Concrete Buildings for Near-source Earthquakes by Using Nonlinear Time History Analyses, *Procedia Engineering*, Vol. 199, pp. 176~181.
- (6) George, P. and Vagelis, P., 2018, Openseismomatlab: A New Open-source Software for Strong Ground Motion Data Processing, *Helion*, Vol. 4, No. 9, pp. 1~39.
- (7) Chopra, A. K., 2012, *Dynamics of Structures: Theory*

and Applications to Earthquake Engineering, 4th Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

(8) Jo, C., Lee, J. and Lee, J. Y., 2018, Response Analysis of Shear Structure Subjected to Ground Vibration Using the Transfer Matrix Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 567~573.

(9) Lim, J., Chung, W., Lee, C. and Lee, J., 2007, Improvement of a Stiffness for High-speed Spindle Using the Taguchi Method, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 127~133.



Chan U Jo received a B.E. in mechanical engineering in 2016 from Kyonggi University in Suwon, South Korea. In march of 2017, he enrolled at Kyonggi University as a master's student under the guidance of professor Jung Youn Lee at mechanical engineering.

Lee at mechanical engineering.



Jungwoo Lee received B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Kyonggi University in 2002, 2004, and 2017, respectively. He is currently an assistant professor at the Department of Mechanical System Engineering of Kyonggi University. His research interests are in structural vibration, composite structures, continuum mechanics, and the transfer matrix method.

interests are in structural vibration, composite structures, continuum mechanics, and the transfer matrix method.



Dongwon Kim completed his Doctoral Degree from KAIST Materials Science and Engineering in 1988. He is currently a professor at the Department of Advanced Materials Engineering of Kyonggi University.



Jung Youn Lee is Professor of Dept. of Mechanical System Engineering at Kyonggi University, where he has been since 1996. He received a B.S., an M.S. and his Ph.D. from Hanyang University in 1979, 1989 and 1992 respectively. His research interests are in System Identification, Structural Modification, Inverse Problem, Modal Analysis and Sensitivity Analysis of Vibration.