

## 폴리머 콘크리트를 이용한 엘리베이터 기인 구조 진동저감 성능 연구

염지혜<sup>1</sup>, 김정진<sup>2</sup>, 박준홍<sup>1\*</sup>

### Study on Elevator Induced Structural Vibration Reduction Performance Using Polymer Concrete

Jihye Yeom<sup>1</sup>, Jeong-Jin Kim<sup>2</sup>, Junhong Park<sup>1\*</sup>

**Abstract:** With the increased interest on quiescent place for residential place, the noise generation from facilities needs to be minimized. One important noise source include sounds from operation of elevators. The elevator operates between floors and generates significantly annoying sounds to the nearby living spaces. It is recognized as the significant contributor inducing noise annoyance to residents. Elevator is supported to the building structure at several locations for movements between floors. In this study, the vibration reduction by use of polymer concrete on the support location was demonstrated. By measuring and comparing the vibration generation when supported on cement and polymer concrete, the noise reduction performance was evaluated. The polymer concrete was made in the form of being inserted into the wall that imitates the hoistway. The impact vibration was induced to the bracket and vibration transfer magnitude was measured. The damping ratio was evaluated through normalization and curve fitting of transient response, and comparison was performed for each resin mixing ratio. By use of polymer concrete, it was possible to reduce the vibration generation in an effect manner without sacrifice on the structural rigidity.

**Keywords:** Polymer concrete, Dynamic stiffness, Loss factor, Elevator, Transfer Function Method, Transient response, Curve fitting

## 1. 서 론

최근 정온한 환경의 조성에 대한 관심이 증가하면서 공동주택의 설비로부터 발생하는 소음의 저감에 대한 관심이 높아지고 있다. 엘리베이터 설비는 모터에 의해 층간으로 빠른 속도로 움직이면서 다양한 소음원으로 작용함으로써 설비 근처에 위치한 거주공간에 구조기인 소음 발생을 유발하고 있다. 특히 심야에 엘리베이터 구동에 의해 발생하는 소음의 최소화는 거주민의 삶의질을 확보하기 위해 중요한 요소가 되고 있다. 엘리베이터의 작동 소음은 엔진룸과 승강로에서 발생한다. 원치가 작동함에 따라 발생하는 진동은 건물의 벽을 통과하여 주거 공간에 방사된다(Igolkin et al., 2020; Oh et al., 2020).

대부분의 건설 현장에서 사용되는 콘크리트는 강도와 내구성에서 뛰어난 성능을 보이는 반면에 소음과 진동에 있어서는 감쇠 성능이 적다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해

결하기 위하여 다양한 소재와 골재를 혼합하여 제작하는 복합재료인 폴리머 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Ahn et al., 2016(a); Ahn et al., 2019(b); Kim and Shim, 2019; Bedi et al., 2014).

Golestaneh et al.(2010)은 폴리머 콘크리트 제조에 사용되는 충전제로 실리카 분말을 사용하는 연구를 진행하였다. 시멘트콘크리트와 비교하여 폴리머 콘크리트는 압축 강도가 크게 향상되었다. Niaki et al.(2018)은 현무암 섬유와 점토의 나노입자를 사용하여 폴리머 콘크리트를 제작하였을 때 기계적 특성이 개선되는 것을 실험적으로 조사하였다. 현무암 섬유는 폴리머 콘크리트의 열 안정성을 증가시키고 점토의 나노입자는 압축, 굽힘, 충격 강도를 향상시킨다.

폴리머 콘크리트를 이용하여 진동을 저감하는 방법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. Jeon et al.(2015)은 철도 레일과 슬라브 사이에 탄소 섬유 강화 폴리머 콘크리트를 사용한 레일 슬리퍼를 사용하였다. 충격 진동을 활용하여 폴리머 콘크리트의 강성과 손실률을 도출하는 실험을 수행하였다. Rajoria and Jalili(2005)는 탄소나노튜브-에폭시 복합재를 이용한 진동 저감에 대한 연구를 진행하였다. Single-walled nanotube와 multi-walled nanotube 각각의 비율에 따른 진동 저감 성능을 감쇠비로 측정하였다.

<sup>1</sup>정희원, 한양대학교 기계공학과

<sup>2</sup>정희원, 롯데건설 기술연구원 수석연구원, 공학박사

\*Corresponding author: parkj@hanyang.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 시멘트 콘크리트보다 높은 감쇠 성능을 발휘하는 폴리머 콘크리트를 이용하여 엘리베이터에 의한 진동을 저감하는 새로운 방법을 제시하였다. 콘크리트의 동적 물성을 비파괴적으로 알기 위하여 전달함수 법을 사용하였다. 엘리베이터의 레일과의 마찰에 의해 진동이 발생하고 전달되는 경로를 고려하여 전체 구조물이 아닌 브래킷의 후면 부분에만 폴리머 콘크리트를 삽입하여 구조물을 제작하여 적은 양으로 진동 저감 효과를 발휘할 수 있는 연구이다. 부분적으로 삽입하여 사용하면서 보다 좋은 성능을 발휘할 수 있도록 폴리머 콘크리트의 제작 시 골재와 함께 혼합하는 레진의 비율을 다르게 하여 보다 좋은 성능을 발휘하는 비율을 검증하고자 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 폴리머 콘크리트의 동적 물성

#### 2.1.1 전달함수법을 이용한 콘크리트 보의 동적 특성 도출

감쇠 성능을 검토하기 위해 시멘트 콘크리트와 폴리머 콘크리트를 보의 형상을 갖도록 제작한 후 충격시험을 실시하였다. 폴리머 콘크리트는 보의 아래 단에 8 mm를 적층식으로 제작하였다. 시편은 50 mm × 50 mm × 450 mm 크기로 제작하였으며 Fig. 1과 같이 실험장치 시편을 제작하였다. 해머(PCB 086C02)를 이용하여 시편 끝단을 가진 하여 진동을 발생시켰다. 진동측정은 가속도계(B&K 4507)를 사용하였으며 측정 위치는 가진 지점으로부터 30 mm 떨어진 위치에서 수행하였다.

측정한 데이터의 전달 함수를 구해 동적 특성을 검토하였다. 시편을 Euler-Bernoulli beam으로 가정하였을 때 운동방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서  $E$ 는 탄성계수,  $I$ 는 관성모멘트,  $\rho$ 는 밀도,  $A$ 는 단

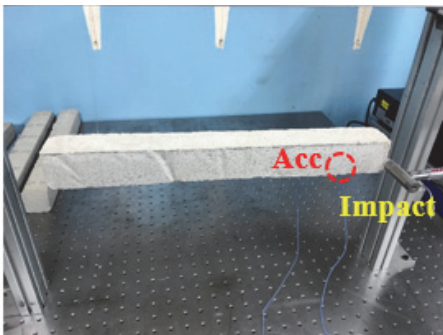


Fig. 1 Dynamic properties experiment setup of concrete

면적,  $w$ 는 변위,  $x$ 는 위치를 나타낸다. 위와 같은 운동방정식을 풀기 위하여 방정식의 해를 조화해로 가정하였을 때 식 (2)와같이 나타낼 수 있으며 경계조건은 식 (3)과 같이 설정할 수 있다(Park, 2005).

$$w(x) = A_1 \sin k_b x + A_2 \cos k_b x + A_3 e^{k_b(x-L)} + A_4 e^{-k_b x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 w(0)}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^3 w(0)}{\partial x^3} = 0, \frac{\partial^2 w(L)}{\partial x^2} = 0, EI \frac{\partial^3 w(L)}{\partial x^3} = F \quad (3)$$

여기서  $A_i$  ( $i=1,2,3,4$ )는 미분방정식의 계수,  $k_b$ 는 파수,  $L$ 은 보의 길이이고,  $F$ 는 입력되는 힘을 나타낸다. 미분방정식의 계수는 식 (3)을 식 (2)에 대입하면서 도출한다.

실험을 통해 취득한 데이터의 전달함수에 Newton-Rapson 법을 통해 파수를 도출해내며, 다음과 같은 식을 통해 동적 강성과 진동 손실률을 계산할 수 있다.

$$EI = E(1+i\eta)I = \frac{w^2 \rho A}{k_b^4} \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 진동 손실률을 나타낸다.

Fig. 2는 콘크리트와 폴리머 콘크리트가 삽입된 두 개의 시편에 대한 강성 값과 진동 손실률을 나타낸다. 전 주파수 영역의 수치해석을 통해 도출된 값들의 평균값을 도출해 냈다. 두 개의 시편의 손실률을 비교해보면 시멘트 콘크리트로만 제작된 시편보다 폴리머 콘크리트가 삽입된 시편의 손실률이 더 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 손실률이 높으면 진동 저감이 높아진다. 도출된 값들을 통해 폴리머 콘크리트가 진동 감쇠에 뛰어난 성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

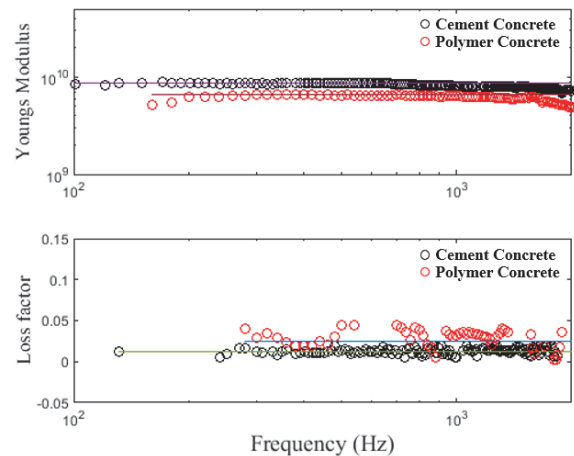
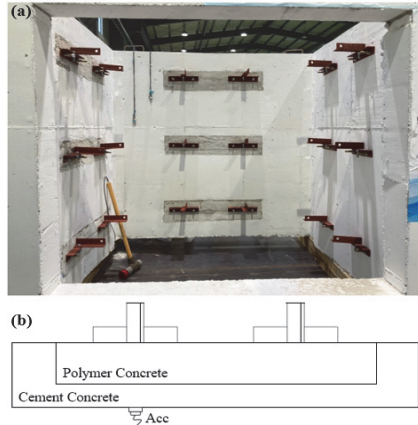


Fig. 2 Estimation of stiffness and loss factor of cement and polymer concrete

## 2.2 엘리베이터 구조물의 진동저감 측정 시험

### 2.2.1 폴리머 콘크리트 삽입 엘리베이터 구조물 제작

엘리베이터 구조물은 시멘트와 폴리머 콘크리트를 이용하여 200 cm x 200 cm x 200 cm 크기로 Fig. 3(a)와 같이 제작하였다. 엘리베이터의 레일이 주행 중 가이드레일에 진동을 발생시키고 가이드레일과 결합되어 있는 브래킷을 통해 진동이



**Fig. 3** The shape of the hoistway structure (a) the overall structure and (b) the part where the polymer concrete is inserted.

**Table 1** Cement concrete mixing ratio

Type	Unit weight ( $kg/m^3$ )					
	Water	Cement	Sand1	Sand2	Gravel	Fly ash
CC	172	305	580	249	950	42

**Table 2** Polymer concrete mixing ratio

Type	Mixing ratio		
	Resin	Sand	
PC-15%	1.5	8.5	Silica sand #4 : #6 1 : 2
PC-20%	2.0	8.0	
PC-25%	2.5	7.5	

**Table 3** Properties of resin

Density ( $g/cm^3$ )	Adhesive strength ( $N/mm^2$ )	Tensile strength ( $N/mm^2$ )	Compressive strength ( $N/mm^2$ )	Bending strength ( $N/mm^2$ )
1.03	3.7	2.3	4.1	2.5

**Table 4** Properties of sand

Sand	Density ( $g/cm^3$ )	Size (mm)	Absorption (%)	Fineness modulus
Silica #4	2.64	0.85 - 1.2	0.4	3.48
Silica #6	2.60	0.25 - 0.6	0.5	1.71

전달된다. 또한 브래킷을 통해 전달되는 진동이 콘크리트 후면을 거쳐 거주공간 내로 들어가기 때문에 브래킷 후면부에 폴리머 콘크리트를 위치하여 진동 저감 성능을 측정하였다.

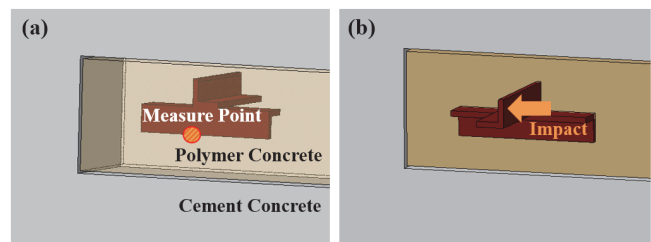
적은 양의 폴리머 콘크리트로 진동 감쇠를 유도하기 위하여 Fig. 3(b)에 표시된 것처럼 일부분만 삽입하는 형상으로 제작하였다. 시멘트 콘크리트로 구조물을 제작할 시에 폴리머 콘크리트를 넣을 100 cm x 25 cm x 15 cm 크기의 공간을 뚫어 놓고 시멘트 콘크리트가 들어가지 않도록 막은 후 제작을 먼저 하였으며, 그 후 폴리머 콘크리트를 이미 만들어 놓은 빈 공간에 채워 넣는 방식으로 실험 장치를 설계하였다. 제작 후 레일용 브래킷을 설치하여 엘리베이터 구조를 제작하였다.

설치한 시멘트 콘크리트(CC) 및 폴리머 콘크리트(PC)의 혼합비율은 각각 Table 1, Table 2와 같다. 시멘트, 레진, 골재는 각각 KS L5201, KS L 5405, KS F 2567 규격에 맞는 제품을 사용하였다. 시멘트 콘크리트 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물과 섞어 제작하였고 폴리머 콘크리트는 골재와 레진을 혼합하여 제작하였다. 골재는 4호와 6호를 1:2 비율로 혼합하여 사용하였다. 레진은 주체와 경화제를 5:1 비율로 혼합하여 제작하였다. 레진과 골재의 물성 값은 각각 Table 3, Table 4와 같다. 폴리머 콘크리트의 전체 중량 중 레진의 중량 비율을 혼합비로 하였다. 레진의 비율을 15%, 20%, 25% 차이하게 하여 세 종류의 시편을 제작하였다.

### 2.2.2 가속도계를 이용한 진동전달 측정 실험

엘리베이터가 주행하면서 레일의 떨림이 발생하여 가이드레일에 진동이 전달되며 이는 가이드레일과 부착되어 있는 브래킷을 타고 주거공간으로 전달되어 문제를 야기한다. 따라서 진동이 전달되는 주된 경로의 데이터를 받기 위하여 Fig. 3(b) 및 Fig. 4(a)와 같이 브래킷이 설치된 구조물의 후면부에 가속도계(BW 14200E)를 설치하여 데이터를 취득하였다.

브래킷에 진동을 가해주기 위하여 해머(Dytran 5803AT)를 사용하였다. 브래킷과 가이드레일은 서로 수직하게 설치가 되기 때문에 가이드레일로 전달되는 진동은 브래킷에 횡방향으로 들어오게 된다. 전달되는 진동 방향을 고려하여 Fig. 4(b)와 같이 브래킷의 측면에 충격 신호를 가하여 진동을 발생하



**Fig. 4** Experiment setup of vibration test with accelerometer (a) rear part of the structure and (b) front of the structure

였다. 가속도계와 해머 데이터는 NI 사의 cDAQ-9178장비 모델을 사용하여 시간 데이터의 형태로 수집하였다.

### 2.2.3 시간데이터를 이용한 진동저감 성능 비교

본 연구에서는 수집한 시간데이터를 기반으로 진동 저감 성능에 대한 검증을 진행하였다. Fig. 5(a)는 네 종류의 시편에 대한 실험 데이터이다. 충격 신호가 발생하고 난 후 진폭이 0으로 수렴하는 것을 통해 진동이 소멸되는 것을 알 수 있다. 모든 시편에서 1초 이내로 진동 신호가 소멸되는 것을 확인할 수 있다.

시간 데이터가 사라지는 기울기를 통해서 감쇠율을 검토할 수 있다. 그러나 해머로 가한 충격 신호는 랜덤신호와 달리 진폭의 크기가 일정하게 들어오는 것이 아니기 때문에 비교하기에 앞서 정규화 과정이 필요하게 된다. 각 시편에서 취득된 시간 데이터의 가장 큰 값으로 전체 데이터를 나누어 정규화를 진행하였다. 시편 별로 진행하기에 기울기에는 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 정규화를 거친 데이터의 기울기를 찾기 위하여 최댓값들의 envelope를 Matlab을 이용하여 도출하였다. 도출한 envelope의 기울기를 알기 위하여 지수함수를 이용하여 곡선 맞춤을 수행하였다. 이러한 과정은 Fig. 5(b)에 표시되어 있다. 지수함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$y = Ae^{Bt} \quad (5)$$

여기서  $y$ 는 envelope,  $A$ 는 amplitude,  $B$ 는 기울기를 나타내며  $t$ 는 시간 변수를 나타낸다. 최댓치들을 지수함수로 표현하는 과정이다.

지수함수의 기울기는 감쇠를 나타내는 모델로 사용할 수 있다. 네 가지 시편의 데이터들을 위와 같은 동일한 과정을 거쳐 기울기를 도출하여 감쇠율에 대한 비교를 진행하였다.

## 2.3 실험 결과 분석

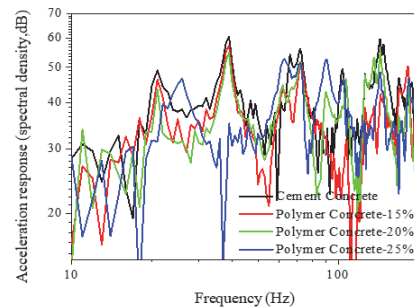
측정된 시간 데이터를 검토하였을 때 1초 이내로 발생한 진동 데이터가 소산되는 것을 알 수 있어, 네 가지 조건이 다른 구

조물의 진동 감쇠율을 비교하기 위해 1초의 시간 데이터만을 검토하여 비교를 진행하였다. 시멘트 콘크리트만으로 만들어진 구조물의 경우 지수함수의 기울기가 가장 작은 것을 보이며 진동감쇠가 가장 느리게 되는 것을 알 수 있다. 폴리머 콘크리트의 혼합 레진 비율이 증가할수록 기울기가 증가하여 25%일 경우 가장 빠르게 진동감쇠가 일어나는 결과는 Table 5에서 확인할 수 있다.

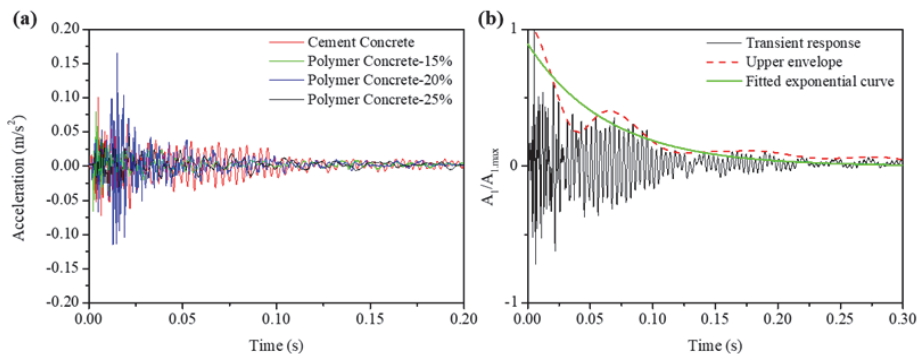
시간 데이터뿐만 아니라 주파수 영역의 데이터를 검토하기 위하여 주파수 성분을 도출하여 비교하였다. 그 결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있으며 주파수 영역에서도 시멘트 콘크리트만 사용된 구조물보다 폴리머 콘크리트가 삽입된 구조물의 값이 더욱 작은 것을 알 수 있다. 주파수응답의 결과를 보면 주요 응답은 30 - 50 Hz대역에서 가장 크게 발생하는 것을 볼 수 있으며 이러한 부분은 폴리머 콘크리트를 사용하면 저감이 되는 것을 알 수

**Table 5** Vibration damping slope of each specimens

Type	Slope
CC	5.31
PC-15%	15.28
PC-20%	30.98
PC-25%	48.50



**Fig. 6** Frequency spectrum for vibration responses of concrete structures



**Fig. 5** Transient response data (a) the raw data of four specimens and (b) the process of normalization, envelope and curve interpolation of polymer concrete-15%

있다. 특히 혼합 레진 비율이 25%로 제작된 폴리머 콘크리트의 경우 거의 소산된다. Roh, et al.(2019)에 의하면 승강기가 운행 될 때 가이드레일의 브래킷에서 발생하는 주요 진동 주파수는 100 - 200 Hz 대역이며 본 연구 결과에서도 104 Hz와 144 Hz에서 발생하는 것을 보인다. 이러한 부분에서 시멘트 콘크리트 대비 폴리머 콘크리트의 4 - 17 dB까지 감소하는 것을 보여 실제 승강기 운동을 통해 발생하는 진동 저감에 기여할 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 엘리베이터의 작동에 의해 발생하는 진동을 폴리머 콘크리트를 활용하여 저감하는 방법과 실험적인 검증결과가 제시되었다. 폴리머 콘크리트가 일반 콘크리트보다 진동 저감에 좋은 성능을 발휘하는 것을 검토하기 위하여 동적 물성을 도출하여 비교하였다. 또한 엘리베이터 구조물에 진동을 저감할 수 있는 형상의 폴리머 콘크리트를 삽입하여 시험하는 방법을 설계하였다. 폴리머 콘크리트의 성능을 최적화하기 위해 혼합되는 레진 비율을 다르게 하여 제작하였다. 감쇠 성능을 검토하기 위해 엘리베이터 레일과 마찰이 일어나는 브래킷에 충격 신호를 주어 진동을 발생시키고 시간 데이터를 취득하였다. 또한 해머의 각기 다른 입력신호의 크기를 고려하여 취득한 시간데이터의 가장 큰 값으로 나누는 정규화를 수행하였으며 지수함수로 보간 하여 감쇠 성능을 검토하는 방법을 제시하였다. 실험 결과로부터 혼합 레진의 비율이 높을수록 진동 감쇠가 더욱 빠르게 일어나는 것을 확인하였으며 폴리머 콘크리트를 사용하여 설비 구동에 따른 진동을 효율적으로 저감할 수 있는 방법을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 구조를 사용하여 엘리베이터 이외에도 콘크리트가 사용되는 복도 및 계단 등 집중적으로 진동이 전달되는 구조에도 적용 가능 할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(21CTAP-C153015-03)에 의해 수행되었습니다.

### References

1. Igolkin, A., Rodionov, L., Balyaba, M., and Rodionova, E. (2020, September), Elevator Equipment Noise Reduction in Multi-Apartment Buildings. In 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM) (pp. 1-5). IEEE.
2. Oh, Y., Kang, M., Lee, K., and Kim, S. (2020), Construction management solutions to mitigate elevator noise and vibration of high-rise residential buildings. *Sustainability*, 12(21), 8924.
3. Ahn, S., Jeon, E. B., Koh, H. I., Kim, H. S., and Park, J. (2016), Identification of stiffness distribution of fatigue loaded polymer concrete through vibration measurements. *Composite Structures*, 136, 11-15.
4. Ahn, S., Kwon, S., Hwang, Y. T., Koh, H. I., Kim, H. S., and Park, J. (2019), Complex structured polymer concrete sleeper for rolling noise reduction of high-speed train system. *Composite Structures*, 223, 110944.
5. Kim, J. J., and Shim, H. B. (2019), Experimental Study on Vibration Reduction Characteristics of Polymer Concrete. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(7), 58-65.
6. Bedi, R., Chandra, R., and Singh, S. P. (2014), Reviewing some properties of polymer concrete. *Indian Concrete Journal*, 88(8), 47-68.
7. Golestaneh, M., Amini, G., Najafpour, G. D., and Beygi, M. A. (2010), Evaluation of mechanical strength of epoxy polymer concrete with silica powder as filler. *World Applied Sciences Journal*, 9(2), 216-220.
8. Niaki, M. H., Fereidoon, A., and Ahangari, M. G. (2018), Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete. *Composite Structures*, 191, 231-238.
9. Jeon, E. B., Ahn, S., Lee, I. G., Koh, H. I., Park, J., and Kim, H. S. (2015), Investigation of mechanical/dynamic properties of carbon fiber reinforced polymer concrete for low noise railway slab. *Composite Structures*, 134, 27-35.
10. Rajoria, H., and Jalili, N. (2005), Passive vibration damping enhancement using carbon nanotube-epoxy reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 65(14), 2079-2093.
11. Park, J. (2005), Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures. *Journal of Sound and Vibration*, 288(1-2), 57-79.
12. Roh, S. K., Kim, E., Oh, J. S., and Cho, J. U. (2019), An Analysis on the Effect of Application on Vibration Isolation Liner of Elevator Guide Rail Bracket. *Journal of the Korea Convergence Society*, 10(8), 145-151.

Received : 10/15/2021

Revised : 10/28/2021

Accepted : 12/06/2021

**요 지** : 주거지에서의 정숙함에 대한 관심이 높아짐에 따라 구조물에서 발생하는 소음을 최소화할 필요가 있다. 중요한 소음원 중 하나는 엘리베이터 작동 소음이다. 엘리베이터는 층 사이에서 작동하며 인근 생활 공간에 상당히 성가신 소리를 생성한다. 입주민들에게 성가심을 유발하는 주요 소음원으로 인식되고 있다. 엘리베이터는 층간 이동을 위해 여러 위치에서 건물 구조에 지지되어 있다. 본 연구에서는 지지 위치에 폴리머 콘크리트를 사용하여 진동을 감소시키는 것을 실증하였다. 시멘트 콘크리트와 폴리머 콘크리트에 지지했을 때의 진동 발생량을 측정 및 비교하여 소음 저감 성능을 평가하였다. 폴리머 콘크리트는 승강로를 모방한 벽에 삽입되는 형태로 제작되었다. 브래킷에 충격진동을 인가하고 진동전달크기를 측정하였다. 감쇠비는 과도응답의 정규화 및 곡선맞춤을 통해 평가하였고, 각 레진 혼합 질량비에 대하여 비교하였다. 폴리머 콘크리트를 사용하여 구조적 강성에 대한 손실 없이 효과적인 방식으로 진동 발생을 감소시킬 수 있다.

**핵심용어** : 폴리머 콘크리트, 동적 강성, 손실계수, 엘리베이터, 전달함수법, 과도응답, 곡선맞춤