

PSO알고리즘을 활용한 능동 제진 시스템 PID 오토 튜닝에 관한 연구

안일균*·허 현**·김효영**·김기현**†

*한국공학대학교 IT반도체융합공학과, **한국공학대학교 메카트로닉스공학과

A Study on the Active Vibration Isolator PID Auto-tuning Using PSO Algorithm

Il Kyun An*, Heon Huh**, Hyo-Young Kim** and Kihyun Kim**†

*Department of IT Semiconductor Convergence, Tech University of Korea, Republic of Korea,

**†Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea, Republic of Korea

ABSTRACT

Vibration is one of the factors that degrades the performance of equipment and measurement equipment used in high-tech industries such as semiconductors and display. The vibration isolator is classified into passive type and active type. The passive vibration isolator has the weakness of insufficient vibration isolation performance in the low frequency band, so an active vibration control system that can overcome these problems is used recently. In this paper, PID controller is used to control the active vibration isolator. Methods for setting the gain of the PID controller include the Zeigler-Nichols method, the pole placement method. These methods have the disadvantage of requiring a lot of time or knowing the system model accurately. This paper proposes the gain auto tuning method of the active vibration isolator applied with the PSO algorithm, which is an optimization algorithm that is easy to implement and has stable convergence performance with low calculations. It is expected that it will be possible to improve vibration isolation performance and reduce the time required for gain tuning by applying the proposed PSO algorithm to the active vibration isolator.

Key Words : PSO, PID, Vibration Isolation, Auto-tuning, GA

1. 서 론

제진기술은 지반진동, 음향가진 등과 같은 미세진동을 줄이기 위한 기술로, 대표적으로 정밀계측, 반도체, 디스플레이와 같은 정밀공정에 활용된다. 미세진동은 제품의 생산성과 직접적으로 관련되어 있기 때문에 미세진동을 줄이는 것은 공정에서 매우 중요한 부분이다 [1-4]. 제진 시스템은 크게 수동형과 능동형 2가지로 구분할 수 있다. 수동형 제진 대는 저주파 영역에서의 성능이 미흡하여

이러한 약점을 극복할 수 있게 근래에는 액추에이터와 센서를 부착한 능동형 제진 시스템을 사용한다.

본 논문에서는 이러한 제진 시스템을 제어하기 위해 PID제어기를 사용한다. PID제어는 안정적이고 구현하기 쉽기 때문에 많은 제어시스템에서 사용되어왔다 [5]. PID 각각의 게인 튜닝 방법은 지글러-니콜스 방법, 극점 배치법 등 다양한 방법이 있다. 그러나 이러한 방법들은 많은 시도횟수, 시간이 필요하거나, 정확한 시스템모형을 알아야 하는 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 기존에 최적화알고리즘을 이용한 오토 튜닝 방법이 연구되어 왔다. 대표적으

†E-mail: khkim12@tukorea.ac.kr

로 GA(Genetic Algorithm)를 이용한 PID오토 튜닝에 관한 연구가 진행되었다 [6]. GA는 유전 알고리즘으로 자연선택에 기반한 최적화 기법이다. 무작위로 초기 염색체를 생성하고 자연 선택된 염색체들끼리 교차, 변이 연산을 통해 새로운 세대를 생성하는 과정을 반복하여 최적의 해를 찾아가는 방법이다. 그러나 교차, 변이와 같은 계산은 매 세대마다 진행하여야 하고, 파라미터의 수가 많아 복잡한 구조로 되어 있다는 단점이 있다.

본 논문은 능동 제진 시스템의 PID제어기 오토 튜닝을 위해 최적화 알고리즘 중 하나인 PSO(Particle Swarm Optimization)알고리즘을 이용한 방법을 제안한다. PSO는 단순한 구조로 구현이 쉽고, 간단한 계산으로 안정적인 최적화 성능을 가지고 있는 알고리즘이다. PSO의 목적함수로는 일반적으로 PID제어기에 많이 사용되는 4가지 평가지표(ISE, IAE, ITSE, ITAE)를 비교하여 선정한다. 또한 오토 튜닝 성능을 검증하기 위해 유사한 최적화 알고리즘인 GA를 적용 후 비교 및 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PSO-PID오토튜닝 알고리즘 및 성능지표를 제안하였고, 3장에서는 제안된 알고리즘이 적용되는 능동 제진 시스템 모델링이 기술되었으며, 4장에서는 시뮬레이션 결과를 비교 분석하여 PSO의 성능평가를 진행하였고, 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. PSO-PID 오토 튜닝 알고리즘

2.1 PSO 알고리즘

PSO알고리즘은 입자 군집 최적화 알고리즘으로 위치와 속도를 가진 여러 개의 입자들이 점진적으로 최적해를 찾아가는 알고리즘이다. 각 입자는 N 차원을 가지고 있으며 i 번째 입자는 $P_i = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 와 같이 표현할 수 있다. 각 입자 별 반복에서 가장 최적의 위치를 나타낸 값을 $pbest$ 라 하고, 전체 반복 중 가장 최적의 위치를 나타낸 입자를 $gbest$ 라 한다. PSO는 초기화, 속도 계산, 위치 업데이트, 평가 4가지 과정으로 구성되어 있으며, 각각의 반복마다 시행한다. 초기화 과정은 상한과 하한이 정해져 있는 탐색 공간에서 각 입자 별 위치와 속도를 임의의 값으로 초기화 하는 과정이다. 속도계산 과정은 입자들의 현재 위치와 속도에 대해 다음 반복에서의 속도를 계산한다. 이때 입자 개인의 최적위치인 $pbest$ 와 군집 전체의 최적 위치인 $gbest$ 를 고려하여 다음 속도를 계산한다. 계산된 속도를 이용하여 다음 입자의 위치를 결정하는 것이 위치 업데이트 과정이다. 속도계산과 위치 업데이트는 다음과 같은 식으로 표현한다 [7,8].

$$v_{id}^{k+1} = w \cdot v_{id}^k + c_1 \cdot rand() \cdot (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \cdot rand() \cdot (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{G} \times i \quad (3)$$

c_1, c_2 는 가속도 상수로 확률인자인 $rand()$ 에 2를 곱하여 평균이 1이되도록 하기위해 2로 결정하였다. 가속도 값인 w 의 경우 0.9-1.2의 범위로 결정한다 [9]. 평가단계에서는 목적함수를 통해 업데이트된 입자의 위치에 대한 평가를 진행한다.

2.2 PSO-PID 알고리즘

본 논문은 능동 제진 시스템의 PID제어기를 PSO를 이용한 오토 튜닝을 진행한다. 우선 PSO를 적용하기 위해 P, I, D 각 계인을 3차원을 가지고 있는 입자로 $P_i = \{x_p, x_i, x_d\}$ 로 표현한다. 그 후 PID입자에 무작위 값과 속도를 부여하여 탐색공간에 배치 후 시뮬레이션을 진행한다. 매 반복마다 P, I, D 계인을 가진 입자들을 시스템에 적용하여 평가지표를 이용해 입자들의 점수를 각각 부여한다. 반복 시뮬레이션 진행 중 각 입자마다의 최고점인 $pbest$ 를 저장하고 그 중 가장 좋은 점수를 받은 입자의 개인값을 $gbest$ 로 저장한다. 시뮬레이션이 종료된 후 최종적으로 저장된 $gbest$ 값을 PID계인으로 설정한다.

2.3 PSO-PID 알고리즘 성능지표

평균 오차가 작을수록 입력에 대해 출력이 빠르게 수렴한다고 할 수 있다. 이러한 평균 오차는 성능평가지표를 이용해 정의한다. 본 논문은 PSO의 목적함수를 제어 시스템 성능분석에 주로 사용되는 성능평가지표인 ISE(Integral of Squared Error), IAE(Integral of Absolute Error), ITSE(Integral of Time multiply Squared Error), ITAE(Integral of Time multiply Absolute Error)를 각각 비교하여 사용한다. 각 평가지표는 다음 식으로 표현한다.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (5)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (6)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (7)$$

ISE는 오차를 제공하여 평가하는 방법으로, 오차가 커질수록 벌점을 더 주는 결과를 보여준다. IAE는 오차의 절대값을 취함으로써 각 오차에 대한 벌점이 균등하게 부여된다. ITSE와 ITAE의 경우 각각 ISE와 IAE에 시간을 곱한 형태를 갖고 있다. 각 평가지표에 시간을 곱하여 시간에 가중치를 두어 오랜 시간이 지날수록 더 큰 벌점을 부여하는 평가지표이다 [10].

3. 능동제진 시스템 모델링

본 논문에서 사용되는 능동 제진 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 각 모서리에 4개의 패시브 제진 모듈과 함께 수직 및 수평방향의 구동과 측정을 위한 8개의 VCM 및 속도센서(GS-11D)가 설치 되어있다.

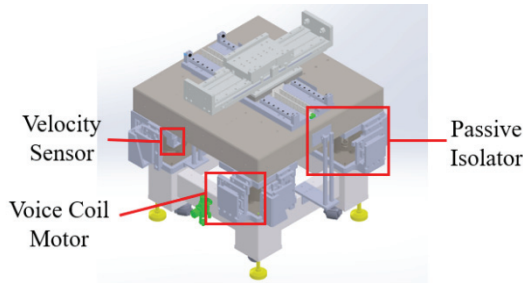


Fig. 1. Configuration of Active Vibration Isolator.

본 논문은 능동 제진 시스템에 적용하기 위해 간략화하여 모델링을 진행하여 식(7)과 Fig. 2와 같이 표현하였다 [11-13].

$$\begin{aligned} (ms^2 + cs + k)Z_p(s) &= (cs + k)B(s) + F_u(s) \\ &+ F_d(s) \end{aligned} \quad (8)$$

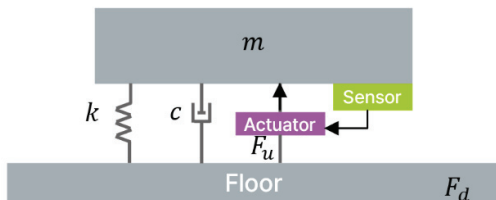


Fig. 2. Active Vibration Isolation System Modeling.

m, c, k 의 값은 각각 질량, 댐핑, 강성을 나타내고, $Z_p(s)$ 는 z축방향의 변위, $B(s)$ 는 지반에서 들어오는 진동, $F_u(s)$ 는 구동기의 힘, $F_d(s)$ 는 직접적인 외란을 나타낸다. Table 1은 능동 제진 시스템의 m, c, k 값을 표로 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1. Parameter of Active Vibration Isolator

Parameter variable	Value	Unit
Mass (m)	163.82	kg
Damping (c)	2,850	Ns/m
Stiffness (k)	233,828	N/m

4. PSO알고리즘 성능평가

4.1 시스템 블록선도

본 논문은 시뮬레이션을 위한 시스템 블록선도는 Fig. 3와 같이PID제어기를 이용한 피드백 시스템을 Matlab & Simulink를 통하여 구성하였다. Passive Isolator, 진동 제거를 위한 Active Isolator는 다음과 같은 전달함수로 표현된다. 여기서 G_p, G_s, G_a, G_c, G_f 는 각각 Passive Isolator, Sensor, Actuator, Controller, Plant의 전달함수를 나타낸다 [14-18].

$$G_p = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} \quad (9)$$

$$Transmissibility = \frac{G_p}{G_f * G_s * G_a * G_c + 1} \quad (10)$$

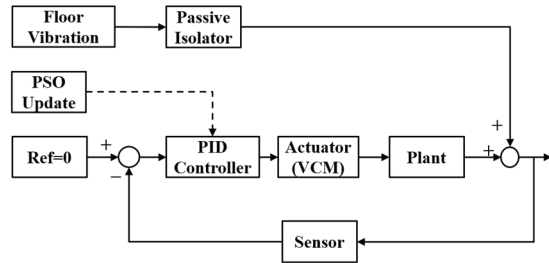


Fig. 3. System Block Diagram.

PSO업데이트를 위한 PSO와 GA(Genetic Algorithm)의 파라미터는 Table 2와 같이 구성하였다. 비교검증을 위해 입자, 인구나 같이 유사한 파라미터는 같은 값을 갖게 하였고, GA의 Selection, Crossover, Mutation은 Matlab최적화 알고리즘 툴의 기본값으로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 입자수, 인구나, 반복횟수는 시간과 성능을 고려하여 각각 20, 20, 50으로결정하였다.

Table 2. Parameter of PSO and GA

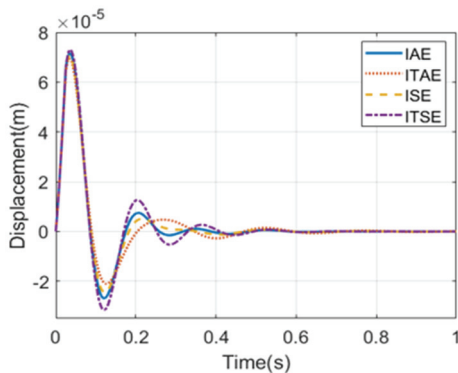
PSO		GA	
Parameters	Value	Parameters	Value
Particle	20	Population	20
Iteration	50	Iteration	50
wMax	1.2	Selection	Stochastic uniform
wMin	0.9	Crossover	Crossover scattered
c1	2	Mutation	Mutation gaussian
c2	2	-	-

4.2 목적함수 평가

목적함수는 식(3)-(6)로 표현된 성능평가지표를 사용하여 PSO-PID시뮬레이션을 진행 후 비교하였다. Table 3과 Fig. 4는 각 목적함수의 출력을 비교하여 나타낸 것이다.

Table 3. Performance of Objective function

Objective Function	Peak Value (μm)	Settling Time (s)
IAE	71.2	0.2895
ISE	70.7	0.2715
ITAE	69.4	0.5324
ITSE	73.0	0.3907

**Fig. 4.** Performance of objective function.

성능비교결과 ISE가 다른 목적함수보다 더 좋은 지표를 보여주고 있어 ISE를 목적함수로 설정하였다.

4.3 시뮬레이션 결과

PSO의 성능을 검증하기 위해 유사한 최적화 알고리즘으로 자주 쓰이는 GA와 비교 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 Table 4와 같이 각 알고리즘에 대한 최적화된 PID계인을 얻었다. Fig. 5와 Fig. 6은 각 알고리즘의 반복마다 가장 좋은

성능을 보이는 목적함수 값을 나타낸 그래프이다. Table 5는 두 알고리즘의 수렴속도를 비교한 표이다. PSO가 초기 웨이트 값에서 48%가 줄어드는 반복횟수는 6회, GA의 경우 5% 줄어드는 횟수가 14회인 것을 확인하였다. 두 알고리즘 비교결과 PSO의 목적함수의 초기값이 GA에 비해 더 높지만 수렴속도가 더 빠른 것을 확인하였다.

Table 4. Optimized PID gains

	PSO	GA
P	249.3	177.4
I	789.4	965.5
D	11.3	7.9

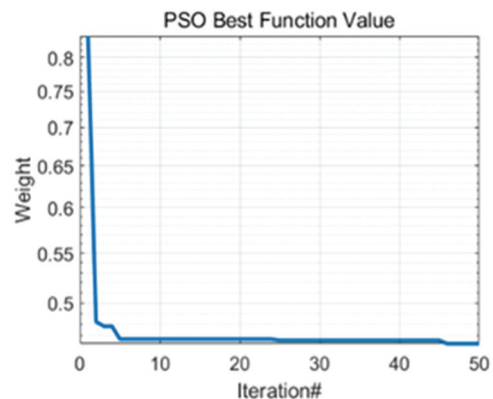
Table 5. Comparison of Iteration number

	PSO	GA
Weight variation ratio	48%	5%
Iteration	6	14

Fig. 7은 제안하는 알고리즘을 적용하여 제진 성능을 비교한 그래프이다. 외란을 $100\mu\text{m}$ 의 임펄스 입력을 주었을 때, PSO의 경우 피크값이 $70.7\mu\text{m}$, 정착시간이 0.2712초, GA의 경우 피크값이 $71.6\mu\text{m}$, 정착시간이 0.2583초인 것을 확인하였다. 두 알고리즘을 비교한 결과 제진 성능은 유사하지만 PSO가 피크값에서, GA는 정착시간의 성능이 우세한 것을 확인하였다. Table 6에 두 알고리즘의 성능을 표로 정리하였다.

Table 6. Comparison of Performance

	PSO	GA	Unit
Peak Value	70.7	71.6	μm
Settling Time	0.2712	0.2583	sec

**Fig. 5.** Convergence of PSO.

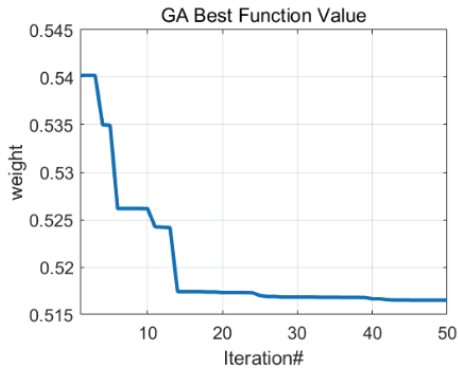


Fig. 6. Convergence of GA.

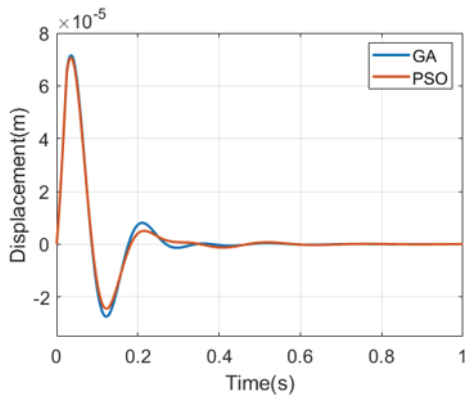


Fig. 7. Performance of Active Isolation with PSO and GA.

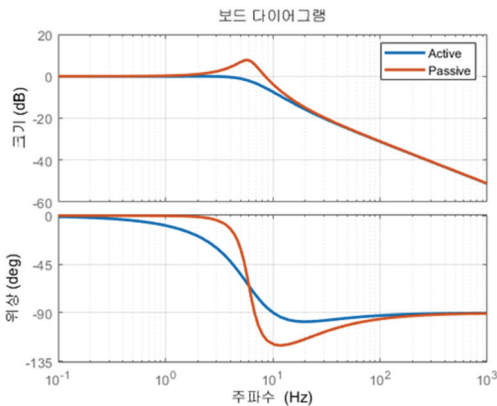


Fig. 8. Performance of Active Isolation.

Fig 8은 능동 제진을 위한 PID제어기를 활성화 시켰을 때 전달율을 나타낸 그래프이다. 능동 제진을 수행하였을 때 공진 주파수에서의 전달율이 줄어든 것으로 제진 성능을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 PSO알고리즘을 활용한 능동 제진 시스템의 PID 제어기 오토 튜닝에 관한 연구를 진행하였다. 능동 제진 시스템 모델링 후 Matlab Simulink를 통해 제어 시뮬레이션을 진행한 결과 PSO-PID 오토 튜닝을 통해 얻은 PID이득값으로 바닥진동 제어가 작동하는 것을 확인하였다. 또한 PSO의 성능을 검증하기 위해 GA와의 비교 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과 PSO의 수렴속도가 GA대비 약 43% 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. 이는 PSO의 경우 복잡한 수식이 없이 간단한 계산으로 구성되어 있고, 탐색체끼리 서로 정보를 공유하고 집단 전체가 하나의 그룹처럼 최적화하는 GA와 달리 gbest값만 다른 입자와 공유를 하기 때문이다. 이와 같은 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 PSO-PID 오토 튜닝을 시스템에 적용하면 제진 성능 향상 및 게인 튜닝에 걸리는 시간이 감소가 될 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업[(GRRC TU Korea2020-B02), 이종소재 접합 제조공정 자동화를 위한 로봇 응용기술 개발]과 2022년도 정부(산업통상자원부)와 한국산업기술진흥원의 '한제코 국제공동 기술개발사업(No.P0019623)으로 수행된 연구 결과입니다.

참고문헌

1. Kim, K. H., LEE, H. Ho. (2018). Vibration Isolation and Reaction Force Compensation for a Precision Positioning system. Korea Polytechnic University.
2. Kim, K. H., Choi, J. S. (2020). Study on an Active Vibration Isolation with respect to inertia variations. Korea Polytechnic University.
3. Kim, B. S., & Kim, K. W. (2018). Cooling Analysis of Super Precision and Large Stage for OLED. Journal of the Semiconductor & Display Technology, 17(4), 51-55.
4. An, C. H., Choi, J. H., Park, J. S., & Park, M. S. (2021). A Review of Experimental Evaluation Method to Floor Environment Vibration Criteria for Semiconductor and Display Equipment. Journal of the Semiconductor & Display Technology, 20(1), 25-31.
5. Ou, C., & Lin, W. (2006, June). Comparison between PSO and GA for parameters optimization of PID controller. In 2006 International conference on mechatronics and automation (pp. 2471-2475). IEEE.
6. Fan, L., & Joo, E. M. (2009, May). Design for auto-tuning PID controller based on genetic algorithms. In

- 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 1924-1928). IEEE.
7. Solihin, M. I., Tack, L. F., & Kean, M. L. (2011, January). Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO). In Proceeding of the international conference on advanced science, engineering and information technology (Vol. 1, pp. 458-461).
 8. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
 9. Shi, Y., & Eberhart, R. (1998, May). A modified particle swarm optimizer. In 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH 8360) (pp. 69-73). IEEE.
 10. Do-Eung Kim, Gang-Gyoo Jin. (2002). Model-based Tuning Rules of the PID Controller Using Real-coded Genetic Algorithms. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 8(12), 1056-1060.
 11. Lee, J. H., Kim, H. Y., Kim, K. H., Kim, M. H., & Lee, S. W. (2017). Control of a hybrid active-passive vibration isolation system. Journal of Mechanical Science and Technology, 31(12), 5711-5719.
 12. Liu, C., Jing, X., Daley, S., & Li, F. (2015). Recent advances in micro-vibration isolation. Mechanical Systems and Signal Processing, 56, 55-80.
 13. Kim, M. H., Kim, H. Y., Kim, H. C., Ahn, D., & Gweon, D. G. (2016). Design and control of a 6-DOF active vibration isolation system using a Halbach magnet array. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 21(4), 2185-2196.
 14. Liu, Y., Matsuhisa, H., & Utsuno, H. (2008). Semi-active vibration isolation system with variable stiffness and damping control. Journal of sound and vibration, 313(1-2), 16-28.
 15. Pérez-Aracil, J., Pereira, E., Díaz, I. M., & Reynolds, P. (2021). Passive and active vibration isolation under isolator-structure interaction: application to vertical excitations. Meccanica, 56(8), 1921-1935.
 16. Fu, Y., Li, S., Liu, J., & Zhao, B. (2021). Design and Experimentation of a Self-Sensing Actuator for Active Vibration Isolation System with Adjustable Anti-Resonance Frequency Controller. Sensors, 21(6), 1941.
 17. Mohamad, M., Mailah, M., & Muhaimin, A. H. (2004). Vibration control of mechanical suspension system using active force control (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).
 18. Mayer, D., & Herold, S. (2018). Passive, Adaptive, Active Vibration Control, and Integrated Approaches. Vibration Analysis and Control in Mechanical Structures and Wind Energy Conversion Systems, 1.

접수일: 2022년 11월 11일, 심사일: 2022년 12월 6일,
 게재확정일: 2022년 12월 12일