

# 3축 능동마운트를 위한 효율적인 협대역 능동진동제어 알고리즘

## Efficient Active Vibration Control Algorithm for 3-axis Active Mount

허 준 영\* · 신 승 민\* · 박 영 철† · 정 규 철\*\* · 김 영 환\*\* · 손 성 완\*\*

Junyeong Heo\*, Seungmin Shin\*, Youngcheol Park†  
Kyucheol Jung\*\*, Younghwan Kim\*\* and Sungwan Son\*\*

(Received May 30, 2023 ; Revised June 24, 2023 ; Accepted September 25, 2023)

**Key Words :** 3-axis Active Mount(3축 능동마운트), Narrowband Active Vibration Control(협대역 능동 진동 제어), Multi-channel FxLMS

### ABSTRACT

This study proposes an efficient narrowband Filtered-x Least Mean Square (FxLMS) algorithm for the three-axis active mount. The three-axis active mount is an adaptive equipment that controls vibrations in three directions ( $x$ ,  $y$ , and  $z$  axes). The proposed algorithm generates control signals using two-tap filters with in-phase and quadrature-phase signals as input. Secondary paths are also modeled using second-order FIR filters to reduce computational complexity. The control filters are configured in parallel to enable multi-frequency control, and a three-channel narrowband FxLMS is constructed to control vibrations in three directions simultaneously. Through computer simulations and real-time experiments conducted on an actual 3-axis active mount, it has been confirmed that the proposed algorithm could successfully attenuate several pre-determined frequencies in all three axes.

### 1. 서 론

엔진에 의해 발생하는 기계류 진동을 감소시키기 위한 마운트에 대한 연구는 지난 수십년간 활발히 진행되어 왔다. 진동 감쇄에 흔히 사용되는 수동 마운트는 설치가 용이하지만 저주파 진동에 대한 제어 성능이 낮고, 관심 주파수 대역만 선택적으로 제어하기에는 설계 비용이 높다는 단점이 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 수동 마운트의 단점을 극복하기 위한 대안으로서 전자기식 작동기를 이용하는 능동마운트를 사용할 수 있다.

능동마운트는 선박, 함정, 자동차 등 다양한 환경에

서 사용되어 왔다<sup>(1-4)</sup>. 그 중 수직, 수평, 롤(roll), 피치(pitch) 운동을 포함하는 복잡한 진동 제어를 위해서는 3축( $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축) 능동마운트를 사용하는 것이 효과적임을 보인 바 있다<sup>(5)</sup>.

능동마운트의 제어 방법으로는 PID(proportional-integral-derivative), 적응형 필터 방법 등이 있다. PID 방법<sup>(6,7)</sup>은 제어 대상 시스템의 동적 특성을 알고 있어야 하며, 전달 함수 기반의 제어 방법이므로 다 채널 제어 구성이 어렵다. 반면, 적응형 필터 방법은 시스템에 대한 사전 정보가 필요하지 않다. FxLMS(filtered-x least mean square) 알고리즘은 진동제어에 사용되는 대표적인 적응 알고리즘이다. 다양한 형태의 FxLMS 알고리즘들이 능동마운트 제어를 위해

† Corresponding Author ; Member, Dept of Computer Science, Yonsei University, Professor  
E-mail : young00@yonsei.ac.kr

\* Dept. of Computer Science, Yonsei University, Student

\*\* RMS Technology Co., LTD., Researcher

‡ Recommended by Editor Jong-Seok Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

개발되었으며, 그 효율성이 입증된 바 있다<sup>(1,8,9)</sup>. 다채널 형태의 FxLMS를 사용하면 비교적 넓은 영역의 진동 제어도 가능하다<sup>(10,11)</sup>.

하지만 다채널 FxLMS 알고리즘의 경우, 제어 필터와 제어 표적이 되는 에러 센서의 수가 증가할수록 연산량이 급격히 증가한다. 이는 제어 필터와 에러 센서 간 형성되는 이차경로의 수가 이 두 가지 요소의 곱으로 나타나기 때문이다. 이차경로를 높은 차수의 광대역 필터로 모델링하는 경우에는 연산량 부담이 더욱 커진다. 한편 제어 대상 신호가 협대역특성을 갖는 경우, 협대역 FxLMS 알고리즘을 보다 효율적으로 제어가 가능하다<sup>(10)</sup>.

이 논문에서는 3축 능동마운트를 제어하기 위한 효율적인 협대역 FxLMS 알고리즘을 제안한다. 3축 능동마운트는 3축 방향의 에러센서와 각 축 방향으로 작동하는 액추에이터로 구성된다. 제안된 협대역 FxLMS 알고리즘은 마운트에 전달된 진동 신호 중 큰 에너지를 갖는 주파수 성분들을 특정하여 제어 하도록 동작한다. 또한 제어필터와 이차 경로를 모두 협대역 모델링함으로써 효율적인 연산구조를 갖는다. 제안된 알고리즘의 효율성을 확인하기 위해 실제 제작된 3축 능동마운트 구조물을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 시행하였으며, 실제 구조물에서 실시간으로 실험을 통해 효과성을 확인하였다.

## 2. 협대역 FxLMS 알고리즘

### 2.1 단일주파수 제어 알고리즘

엔진에 의해 발생하는 진동은 필연적으로 엔진의 RPM과 관련이 있으며, 특히 수중 함체의 경우, 엔진의 동작 모드에 따른 회전수는 엔진의 규격으로 규정되어 있다<sup>(12)</sup>. 따라서 제어 알고리즘은 특정 주파수를 갖는 신호에 효과적으로 대처할 수 있어야 하며, 이를 위해 협대역 FxLMS 알고리즘을 사용할 수 있다<sup>(10)</sup>.

Fig. 1은 단일주파수의 진동을 제어하기 위한 협대역 FxLMS 알고리즘의 블록도이다. 진동주파수  $f_i$ 를 제어하기 위해, 먼저 동일 주파수를 갖는 참조 신호(정현파 신호)를 생성한다. 이 때 진동주파수는 진동을 발생시키는 소스 주변에 타코미터를 부착하거나<sup>(1)</sup> 참조가속도 센서<sup>(13,14)</sup> 이용하여 추정할 수 있다.

직교 위상 관계에 있는 두 신호  $x_{c,i}(n) = \cos(2\pi f_i n)$ 와  $x_{s,i}(n) = \sin(2\pi f_i n)$ 가 참조신호로 사용된다. 여

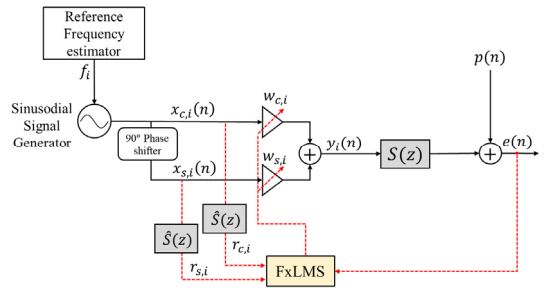


Fig. 1 Block diagram of single-frequency control narrowband FxLMS

기서  $i$ 는 제어 대상 주파수의 인덱스이다. 한편 직교 위상 신호는 Hilbert 변환을 통해 만들거나  $\text{round}(f_s/4f_i)$  만큼의 시간 지연을 적용하여 간편하게 얻을 수 있다<sup>(14)</sup>. 이때 제어 필터 출력은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$y_i(n) = w_{c,i}(n)x_{c,i}(n) + w_{s,i}(n)x_{s,i}(n) \quad (1)$$

제어신호는 이차 경로  $S(z)$ 을 거쳐 에러센서에 도달하게 되며, 에러센서 출력  $e(n)$ 은 제어의 대상인 주 진동신호  $p(n)$ 과 제어기 출력 신호의 결합으로 나타나게 된다. 제어 필터의 계수 갱신을 위한 FxLMS은 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{w}_i(n+1) = \mathbf{w}_i(n) - \mu e(n) \mathbf{r}_i(n), \quad (2)$$

이때  $\mu$ 는 수렴상수,  $\mathbf{w}_i(n) = [w_{c,i}(n), w_{s,i}(n)]^T$ 와  $\mathbf{r}_i(n) = [r_{c,i}(n), r_{s,i}(n)]^T$ 는 각각 진동주파수  $f_i$ 를 제어하기 위한 필터 계수 벡터와 필터링된 참조입력 벡터이다. 필터링된 참조입력 신호는 이차경로를  $L$ 차 FIR 모델로 추정하는 경우, 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$r_{\zeta,i}(n) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l x_{\zeta,i}(n-l), \quad \zeta = c, s \quad (3)$$

식 (3)에서  $s_l, l=0, \dots, L-1$ 은 이차경로  $S(z)$ 의 임펄스 응답 계수를 나타낸다.

### 2.2 이차 경로 모델링

이차경로는 제어기 자체를 제외한 A/D, D/A, 각종 필터, 앰프, 액추에이터, 센서 등에 의한 역학적 현상을 모두 포함한다. 정확한 이차경로 추정은 FxLMS

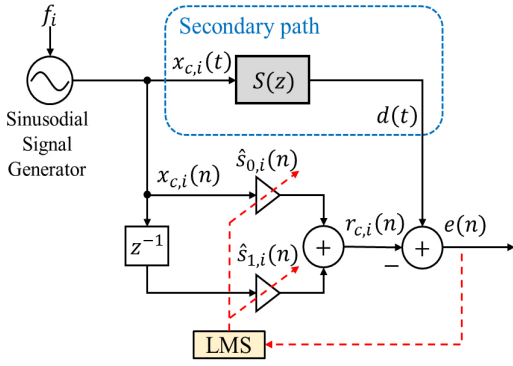


Fig. 2 Secondary path modeling for single frequency

알고리즘 성능을 결정하는 중요한 요소이다<sup>(15)</sup>. 이차 경로를 광대역 모델링 할 경우, 높은 차수의 필터가 필요하며, 높은 차수의 이차경로는 제어 알고리즘의 연산량에 직접적인 영향을 미쳐 실시간 구현의 어려움이 될 수 있다.

능동마운트에 인가되는 진동은 다수의 협대역 진동 성분으로 구성되는 특성이 있다<sup>(16)</sup>. 협대역 진동 신호의 주파수를 알고 있는 경우, 해당 주파수에 해당하는 이차 경로 특성을 낮은 차수의 필터로 모델링할 수 있다<sup>(17)</sup>.

Fig. 2는 협대역 진동 신호에 대한 이차경로 모델링 과정의 블록도이다. 이차경로는 2차 FIR필터로 모델링되며, 이는 이차경로의 주파수 응답에 대한 크기와 위상 특성을 추정하게 된다. 2차 경로 특성 추정을 위해 제어 관심 주파수  $f_i$ 를 갖는 정현파 신호  $x_{c,i}(n) = \cos(2\pi f_i n)$ 를 입력으로 사용한다.

한편 이차경로 특성이 시불변이라고 가정하면, 사전에 추정된 이차경로 특성을 실시간 시스템에서 사용할 수 있다. 이를 위해 관심주파수 대역의 모든 주파수에 대해 Fig. 2의 방법으로 미리 계수를 추정한 후, 이를 메모리에 저장한 다음, 실시간 시스템에서 추정된 주파수에 해당하는 이차경로 계수를 읽어와 사용하면 된다. 이러한 방법은 운항 모드에 따라 엔진 RPM이 고정되는 수중 함정의 경우에 매우 효과적이다.

### 3. 3축 능동마운트를 위한 다중 주파수 진동제어 알고리즘

Fig. 3은 다중 주파수 성분을 3축 방향으로 동시에 제어하기 위한 협대역 알고리즘의 구조이다. 3축 방

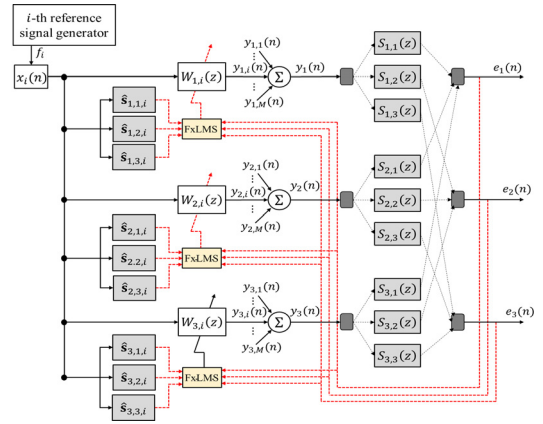


Fig. 3 3-channel narrowband FxLMS algorithm for 3-axis active mount

향의 진동을 제어하기 위해 각 마운트에  $x, y, z$ 축 방향 에리센서와 각 방향 액추에이터가 사용된다. 이때, 이차경로는 총 9개가 형성된다.

또한 다중 주파수 진동 제어를 위해서는 Fig. 1의 협대역 알고리즘이 확장되어야 한다. 제어 대상이 되는 진동 주파수 별로 참고신호가 생성되며, 독립적인 직교위상 제어필터가 사용된다. 한편, 각 축 방향 제어필터는 동일한 참조 신호를 사용한다.

각 축방향으로 구성된 다수의 주파수 성분 제어 필터 출력은 최종적으로 합산되어 제어기에 인가되는데,  $M$ 개의 주파수 성분을 제어하는 경우 각 축방향 제어필터의 출력은 식 (4)와 같다.

$$y_k(n) = \sum_{i=1}^M y_{k,i}(n), \quad k = 1, 2, 3. \tag{4}$$

$k = 1, 2, 3$ 은 Fig. 3의  $x, y, z$ 축 방향을 나타내는 인덱스이다. 위 식에서 진동주파수  $f_i$ 를 제어하기 위한 필터 출력  $y_{k,i}(n)$ 은 식 (5)와 식 (6)과 같이 계산된다.

$$y_{k,i}(n) = \mathbf{w}_{k,i}^T(n) \mathbf{x}_i(n), \tag{5}$$

$$\mathbf{w}_{k,i}(n) = [w_{c,k,i}(n), w_{s,k,i}(n)]^T, \tag{6}$$

$$\mathbf{x}_i(n) = [x_{c,i}(n), x_{s,i}(n)]^T$$

제어 필터 출력에 의한 각 축 방향 에리 센서 신호는 식 (7) 및 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$e_m(n) = p_m(n) + \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^M \mathbf{s}_{k,m,i}^T \mathbf{y}_{k,i}(n). \quad (7)$$

$$\mathbf{w}_{k,i}(n+1) = \mathbf{w}_{k,i}(n) - \mu \sum_{m=1}^3 \mathbf{r}_{k,m,i}(n) e_m(n) \quad (8)$$

여기서  $m = 1, 2, 3$ 은 축방향 인덱스이며,  $p_m(n)$ 은 각 에러센서에 도달한 주 진동 신호로서 다양한 주파수 성분을 포함하게 된다. 또한  $\mathbf{s}_{k,m,i} = [s_{k,m,i}^0, s_{k,m,i}^1]^T$ 는 Fig. 2 방법으로 주파수  $f_i$ 에 대해 모델링된  $k$ 축 제어필터와  $m$ 축 에러 센서 간의 이차경로 계수 벡터이며,  $\mathbf{y}_{k,i}(n) = [y_{k,i}(n), y_{k,i}(n-1)]^T$ 는  $k$ 축 제어필터의 출력 벡터이다.

최종적으로 FxLMS 알고리즘은 시스템 비용함수  $J = E \left[ \sum_{m=1}^3 e_m^2(n) \right]$ 를 최소화 하도록 계수를 갱신한다. 진동주파수  $f_i$ 를 제어하기 위한  $k$ 축 제어필터 계수들 식 (8)과 같이 갱신된다. 여기서 식 (9)와 식 (10)은

$$\mathbf{w}_{k,i}(n) = [w_{c,k,i}(n), w_{s,k,i}(n)]^T, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{k,m,i}(n) &= [r_{c,k,m,i}(n), r_{s,k,m,i}(n)]^T, \\ k, m &= 1, 2, 3, i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (10)$$

각각 제어 필터의 계수 벡터와 필터링된 참조 입력 신호 벡터이다. 참조 입력 신호는 Fig. 2 방법으로 구해진 이차경로 특성 계수를 사용하여 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} r_{\zeta,k,m,i}(n) &= \hat{s}_{k,m,i}^0 x_{\zeta,k,m,i}(n) + \\ &\hat{s}_{k,m,i}^1 x_{\zeta,k,m,i}(n-1), \quad \zeta = c, s \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 3에 보여진 3채널 협대역 FxLMS 알고리즘은 모듈화된 구조를 갖는다<sup>(11)</sup>. 따라서 제어 주파수 또는 채널 수가 증가하면, 모듈을 병렬 연결함으로써 유연하게 대응이 가능하다는 장점이 있다. 또한 제어 주파수의 수가 늘어나더라도 주파수 간 직교성 때문에 전체 알고리즘의 수렴 특성은 크게 변하지 않으며, 독립적인 제어가 가능하다.

## 4. 실험 환경 및 실험 결과

### 4.1 3축 능동마운트 제어 실험 환경

알고리즘의 성능을 검증하기 위해 3축 능동마운트 시스템을 실제 제작하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실시간 실험을 수행하였다.

Fig. 4에 제작된 3축 능동마운트를 나타내었다. 3축 능동마운트는 관성형 전자기식 액추에이터를  $x$ 와  $y$ 축 방향으로 2개씩, 수직( $z$ 축) 방향 1개로 배치하여 3축 방향으로 제어가 가능하도록 구성하였으며 Fig. 4에서 보인 바와 같이 능동마운트 조립체 상단에 수동마운트를 두어 기본적인 진동차단 기능을 갖도록 하였다.

Fig. 5는 알고리즘 테스트를 위해 구성된 시스템을 보여준다. 시스템은 진동신호 발생을 위한 가진부 (Fig. 5(a)), 수동마운트(Fig. 5(b)), 3축 능동마운트

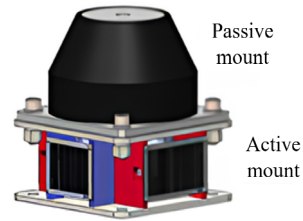
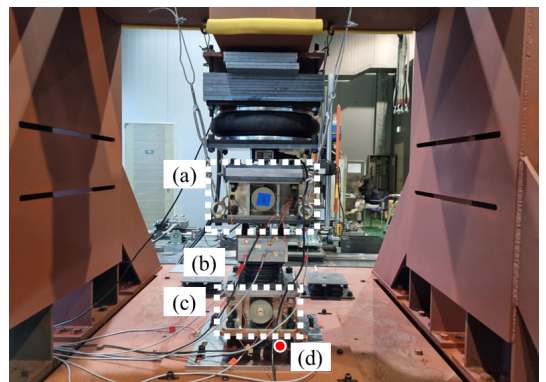


Fig. 4 Diagram of the 3-axis active mount



(a) Test vibrator, (b) Passive mount, (c) Active mount, (d) 3-axis error accelerometer

Fig. 5 Overview of the experimental setting

(Fig. 5(c)), 그리고 에러 신호 측정을 위한 3축 가속도 센서(Fig. 5(d))로 구성되어 있다. 가진부의 상단에 800 kg의 부하를 가하여 실제 기

계 진동 상태를 모사하였으며, 상단 부하와 가진부의 분리를 위해 에어튜브를 두었다. 가속도 센서는 차차 타입의 압전 센서를 사용하였다.

4.2 컴퓨터 시뮬레이션

구성된 시스템에서 측정된 주파수 응답을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 주파수 응답은 가진부와 능동마운트 제어기에 관심 주파수 대역인 30 Hz부터 400 Hz까지 변화하는 sweep sine을 인가한 상태에서 각 축방향 에러 센서의 신호를 계측함으로써 측정하였다.

계측된 주파수 응답을 Fig. 6에 보였다. 시뮬레이션에서는 측정된 주파수 응답을 시간 영역 임펄스 응답으로 변환하여 사용하였으며, 샘플링 주파수는 4000 Hz를 사용하였다.

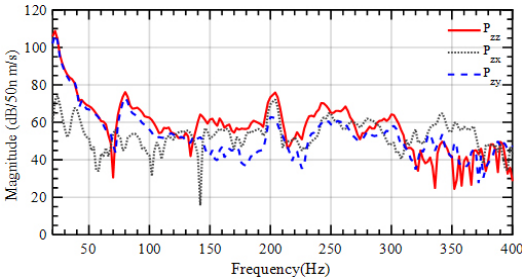
시뮬레이션은 4개의 주파수 성분을 제어하는 상황을 가정하였다. 먼저, 상단에서 9개의 주파수 성분(30 Hz, 50 Hz, 80 Hz, 130 Hz, 165 Hz, 190 Hz, 200 Hz, 325 Hz, 350 Hz)을 갖는 신호로 가진한 후, 상대적으로 에너지가 크게 나타나는 4개의 주파수 성분 80 Hz, 165 Hz, 200 Hz, 325 Hz를 제어하도록 시뮬레이션을 수행하였다. 에러 센서에서의 SNR을 20 dB로 설정하였으며, 수렴 상수는  $\mu = 0.01$ 로 설정하였다.

시뮬레이션 결과로 얻어진 에러 센서 신호를 Fig. 7에 보였다. 5000샘플 지점에서 제어기를 작동시켰다. 모든 축 방향으로 진동을 효과적으로 제어하고 있음을 보여준다. 또한 제어기가 작동된 후 짧은 시간 안에 수렴하는 것을 볼 수 있다.

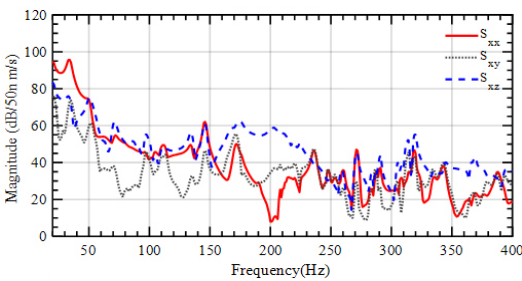
진동 감쇄 수준을 확인하기 위하여 제어 전 후의 스펙트럼을 구하여 Fig. 8에 보였다. 스펙트럼은 제어 대상이 되는 4개의 주파수에서 모두 40 dB이상으로 진동의 크기가 감쇄하는 것을 보여준다. 또한 제어 대상 주파수 이외의 진동은 크기가 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 결론적으로 구성된 협대역 FxLMS 알고리즘이 표적 주파수에 대해서만 효율적으로 동작함을 보여준다.

4.3 3축 능동마운트 제어 실험 결과

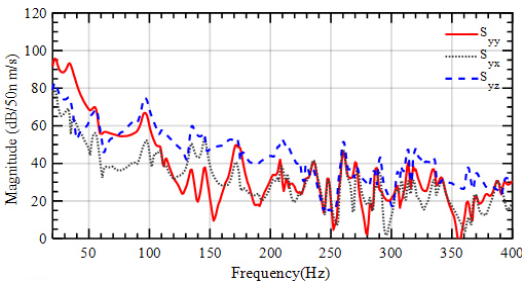
Fig. 4에 구성된 3축 능동마운트 시스템에서 실시간 제어 실험을 수행하였다. Fig. 9는 실시간 제어 실험을 위해 활용한 장비들의 연결을 보여준다. 실시간 실험에서는 구조물을 가진하는 신호와 제어 신호를



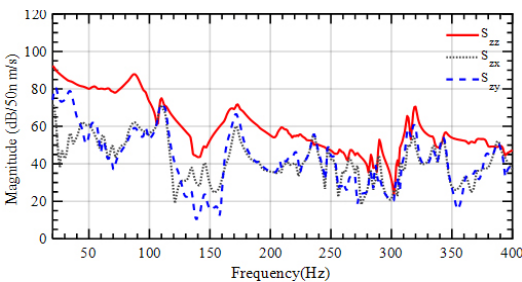
(a) Primary path, paths between the actuators and error sensors



(b) X-axis actuator



(c) y-axis actuator



(d) Z-axis actuator

Fig. 6 Frequency response measured in the test model

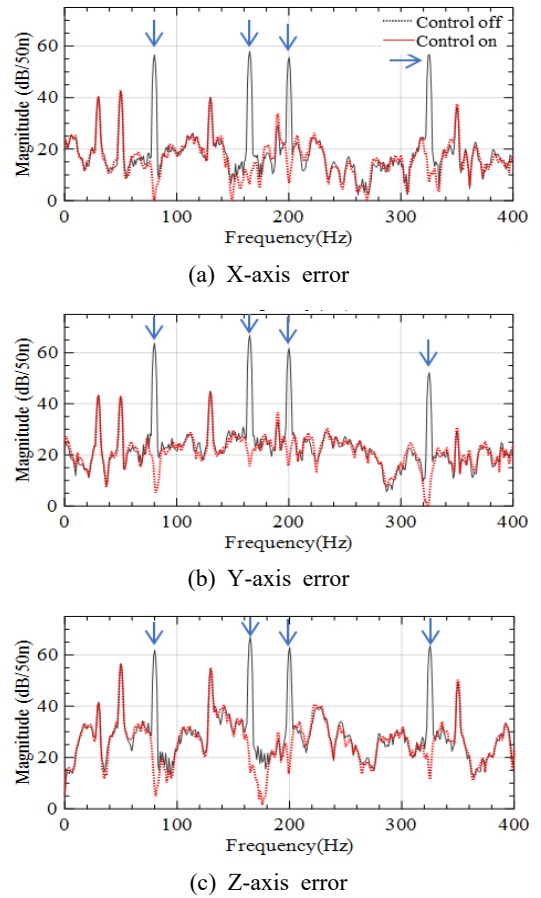
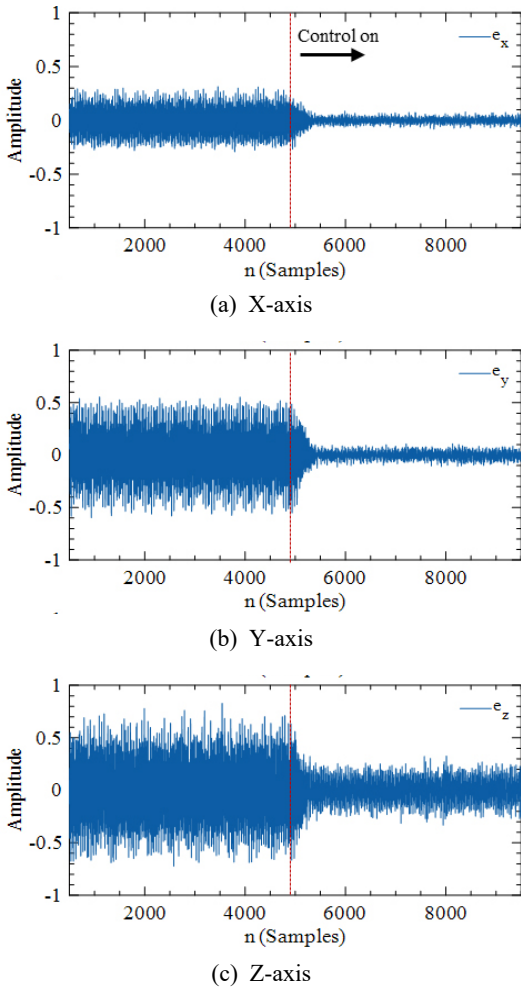


Fig. 8 Power spectral density for error signal

Fig. 7 Time history of error signals and error signals

모두 디지털 제어 보드(DS1202)를 통해 생성하였다. 실시간 진동제어를 수행하기 전에 Fig. 2의 방법을 사용하여 제어 주파수에 대한 이차 경로를 추정하였다. 제어를 위한 FxLMS의 수렴상수는  $\mu = 0.001$ 로 비교적 작게 설정하여 시스템이 충분히 수렴할 수 있도록 하였다. 실시간 실험에서는 제어 대상이 되는 4개의 주파수 성분(80 Hz, 165 Hz, 200 Hz, 325 Hz)만으로 시스템을 가진하였으며, 동일한 주파수 성분들을 제어하도록 시스템을 동작시켰다. 상단 가진부에서는 z축 방향으로만 가진하였다.

Fig. 10에 실시간 제어 전후의 스펙트럼을 비교하였다. 또한 각 주파수 성분에 대한 진동 감쇄 정도를 Table 1에 정리하였다.

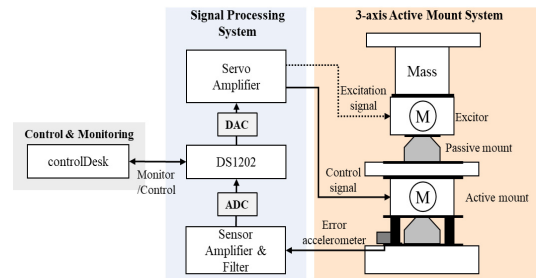
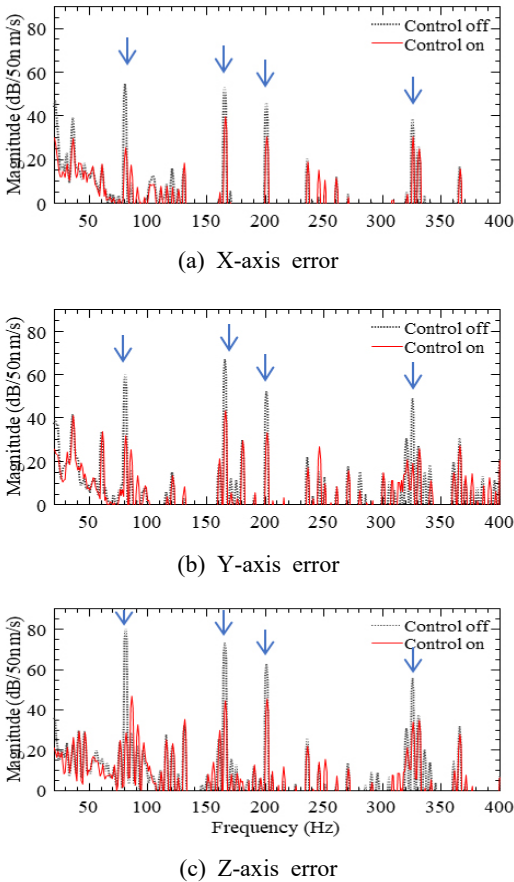


Fig. 9 Schematic diagram of 3-axis active mount

전체적으로는 상단의 진동이 3축 방향 모두에서 최소 8 dB, 최대 51 dB까지 감쇄하였음을 보여준다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 상단의 z축 방향 가진은 x축 방향 센서에서 가장 크기가 작게 나타났다. 이는 진동 제어 결과에도 영향을 미쳐 3축 방향 중 평균적



**Fig. 10** Power spectral density for error signal (80 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 325 Hz control)

으로 가장 낮은 감쇄율을 보였다. 반면 가진 신호가 가장 큰 크기로 관찰되는 z축 방향 진동에 대한 감쇄율이 가장 높은 것을 확인할 수 있다. x, y, z축 방향의 에러 신호에서 측정된 평균 감쇄율은 각각 16.7 dB, 25.09 dB, 29.59 dB로 나타났다.

가진 신호 외의 나타나는 주파수 성분들은 액추에이터와 구조물의 비선형적인 특성으로 인해 발생하는 고조파 성분으로 분석된다. 이러한 상황에서도 제어 대상 주파수 성분들은 적절히 제어됨을 확인할 수 있다. 또한 제어 대상 이외의 주파수 영역에서는 진동은 크기가 전반적으로 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 단, z축 80 Hz 부근에서는 상단의 가진 신호가 높은 크기로 관찰되며, 액추에이터의 출력 또한 높아져 비선형 특성이 증가하는 것으로 보인다. 이로 인해 80 Hz 주변 성분이 일부 증가하나, 그 크기는 원

**Table 1** 3-axis control results vibration signal 80 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 325 Hz

Axis	Frequency [Hz]	Control off [mm/s]	Control on [mm/s]	Attenuation [dB]
X	80	0.02571	0.0009	28.89
	165	0.0222	0.0046	13.51
	200	0.0101	0.0016	15.82
	325	0.0042	0.0017	8.10
Y	80	0.0498	0.0019	28.22
	165	0.1123	0.0074	23.59
	200	0.0201	0.0023	18.90
	325	0.0140	0.0005	29.68
Z	80	0.5048	0.0013	51.49
	165	0.2209	0.0086	28.14
	200	0.0671	0.0094	17.00
	325	0.0305	0.0025	21.73

진동 크기에 비해 무시할 수 있을 정도로 작음을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

이 논문에서는 3축 능동마운트를 위한 협대역 FxLMS 알고리즘 제안하였다. 제어 필터는 주파수 당 2개의 계수를 가지며, 이차경로 모델링 또한 주파수 당 2차 FIR 필터로 수행되기 때문에 연산량 측면에서 매우 효율적이며, 원하는 주파수를 선택적으로 제어하기에 유리하다.

실제 제작된 모델을 통하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실시간 실험을 수행하였으며, 실험 결과는 다수의 주파수 성분을 갖는 상단의 기계적 진동을 최소 8 dB, 최대 51 dB까지 감쇄하며 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주었다.

### 후 기

이 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 진행된 연구임(UC210001DD).

### References

(1) Yang, T., Wu, L., Li, X., Zhu, M., Brennan, M. J. and Liu, Z., 2020, Active Vibration Isolation of a Diesel

Generator in a Small Marine Vessel: An Experimental Study, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 9, p. 3025.

(2) Moon, S.-J., Kwak, J.-S., Chung, J.-H., Ji, Y.-J., Yoon, J.-S., Choi, S.-B., Lee, H.-Y., Jung, W.-J. and Ki, D.-J., 2010, A Study on the Hybrid Mount against Vibration and Shock for Naval Ships, *Shock and Vibration*, Vol. 17, No. 3, pp. 269~283.

(3) Kauba, M., Herold, S., Koch, T., Mayer, D. and Melz, T., 2008, Design and Application of an Active Vibration Control System for a Marine Engine Mount, *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering*, p. 241.

(4) Raoofy, A., Fakhari, V. and Ohadi Hamedani, A. R., 2013, Vibration Control of an Automotive Engine using Active Mounts, *Journal of Engine Research*, Vol. 30, pp. 3~14.

(5) Choi, S.-B., Sohn, J. W., Han, Y.-M. and Kim, J.-W., 2008, Dynamic Characteristics of 3-axis Active Mount Featuring Piezoelectric Actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 19, No. 9, pp. 1053~1066.

(6) López-Romero, M. Á. and Peñas, M. S., 2023, A Positive Position Feedback Controller for Vibration Control of Wind Turbines, *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 1342~1353.

(7) Yang, D.-H., Shin, J.-H., Lee, H. W., Kim, S.-K. and Kwak, M. K., 2017, Active Vibration Control of Structure by Active Mass Damper and Multi-modal Negative Acceleration Feedback Control Algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 392, pp. 18~30.

(8) Kang, M. S., 2021, FxLMS Algorithm for Active Vibration Control of Structure by using Inertial Damper with Displacement Constraint, *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 545~557.

(9) Guo, R., Zhou, Z. and Chen, H., 2020, An FxLMS Controller for Active Control Engine Mount with Experimental Secondary Path Identification, *SAE Technical Paper 2020-01-0424*.

(10) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1999, Active Noise Control: A Tutorial Review, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 6, pp. 943~973.

(11) Shin, J.-H., Jung, W.-J., Bae, S.-R., Lee, S.-K. and Kwak, M. K., 2018, Multi-input Multi-output fxLMS

Algorithm for Active Vibration Control of Structures Subjected to Non-resonant Excitation, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 330~338.

(12) Gang, B.-Y. and Kim, Y.-J., 1992, Explanation on the Characteristics of Diesel Engines and Propellers for Ships, *Journal of Korea Fishing Vessel Association*, Vol. 49, pp. 27~36.

(13) Wang, H., Sun, H., Sun, Y., Wu, M. and Yang, J., 2019, A Narrowband Active Noise Control System with a Frequency Estimation Algorithm Based on Parallel Adaptive Notch Filter, *Signal Processing*, Vol. 154, pp. 108~119.

(14) Noh, E., Woo, S., Lee, D. J., Song, M.-H., Lee, J.-W., Lee, H., Ohm, W.-S., Jang, H., Lee, K., Park, Y. and Seo, Y., 2019, Active Control of Low-frequency Noise in Bubbly Water-filled Pipes, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 33, No. 7, pp. 3127~3135.

(15) Snyder, S. D. and Hansen, C. H., 1994, The Effect of Transfer Function Estimation Errors on the Filtered-x LMS Algorithm, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 42, No. 4, pp. 950~953.

(16) Scribner, K. B., Sievers, L. A. and von Flotow, A. H., 1993, Active Narrow-band Vibration Isolation of Machinery Noise from Resonant Substructures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, pp. 17~40.

(17) Wang, H., Sun, H., Sun, Y., Wu, M., Yang, J. and Li, X., 2018, A Multi-tone Active Noise Control System with a Simplified Local On-line Secondary-path Modeling, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 144, No. 6, pp. EL515~EL521.



**Junyeong Heo** received the B.S. degree in Electronic Engineering from Gangneung-Wonju National University, Gangneung, South Korea. He is currently a M.S. student at the Department of Computer Science of Yonsei University in Wonju, Korea. His research interests are in the area of active vibration control.





**Seungmin Shin** received the B.S. degree in Computer & Telecommunications Engineering from Yonsei University in Wonju, Korea. He is currently a Ph.D. degree candidate at the Department of Computer Science of Yonsei University in Wonju, Korea.

His research interests are in the area of DNN based audio signal processing.



**Youngcheol Park** received B.S., M.S. and Ph.D. degree in Electronic Engineering from Yonsei University in Seoul, Korea. He is currently a professor at the Department of Computer Science of Yonsei University in Wonju, Korea. His research interests

are Active Noise Control, and DNN based audio signal processing.



**Kyuchul Jung** received B.S. and M.S. degrees in Mechatronics Engineering from Korea University of Technology and education in Korea. He is currently working for RMS TECHNOLOGY Co., LTD. and His research interests are MR-damper and Noise Vibration

Control



**Yeonghwan Kim** received B.S. degree in Mechatronics Engineering from Korea University of Technology and education in Korea. He is currently working for RMS TECHNOLOGY Co., LTD. and His research interests are Electromagnetic actuator and

Noise control



**Sungwan Son** received B.S., M.S. degree in Noise and vibration Engineering from Busan University and Ph.D in Noise and vibration Engineering from Sunmoon University.

He is currently a Director of Research in RMS TECHNOLOGY Co., LTD. His research interests are Structural Vibration and Noise Vibration Control.