

# 노치 필터 제어기법을 이용한 반작용 휠 미소진동 절연장치의 절연성능 평가

## Performance Evaluation of RWA Vibration Isolator Using Notch Filter Control

박지용\* · 서종은\*\* · 이대은\*\*\* · 한재홍†

Geeyong Park, Jong-Eun Suh, Dae-Oen Lee and Jae-Hung Han

(Received March 21, 2016 ; Revised June 9, 2016 ; Accepted June 20, 2016)

**Key Words** : RWA Disturbance(반작용 휠 미소진동), Vibration Isolator(진동절연장치), Microvibration(미소진동), Active Vibration Control(능동제어기법), Notch Filter(노치필터)

### ABSTRACT

Vibration disturbances induced by the reaction wheels can severely degrade the performance of high precision payloads on board satellites with high pointing stability requirements. The unwanted disturbances produced by the reaction wheels are composed of fundamental harmonic disturbances due to the flywheel imbalance and sub/higher harmonic disturbances due to bearing irregularities, motor imperfections and so on. Because the wheel speed is constantly changed during the operation of a reaction wheel, the vibration disturbance induced by the reaction wheels can magnify the satellite vibration when the rotating frequency of wheel meets the natural frequency of satellite structure. In order to provide an effective isolation of the reaction wheel disturbances, isolation performance of a hybrid vibration isolator is investigated. In this paper, hybrid vibration isolator that combines passive and active components is developed and its hybrid isolation performance using notch filter control is evaluated in single-axis. The hybrid isolation performance using notch filter control show additional performance improvement compared to the results using only passive components.

### 1. 서 론

고정밀 광학 탑재체와 같은 고정밀 임무장비를 탑재한 인공위성은 임무를 수행하기 위해 매우 높은 지향 안정성(pointing stability)을 요구하고 있다. 하지만 인공위성의 다양한 고정밀 임무장비와 구성품은 인공위성의 자세 제어를 위해 사용되는 반작용

휠(reaction wheel assembly: RWA)이나 온도 제어를 위한 극저온 냉각기(cryogenic cooler) 등 지속적인 진동원에 노출되어 있으며, 매우 적은 수준의 진동에 의해서도 성능이 크게 저하될 위험이 있다<sup>(1-4)</sup>.

그 중에서도 특히 반작용 휠에 의해 발생하는 미소진동의 경우 위성 탑재체에 영향을 미치는 가장 큰 고주파수 교란 중 하나로 평가되고 있기 때문에<sup>(5)</sup> 그동안 반작용 휠로부터 유발된 미소진동을 절연하기

† Corresponding Author; Member, Dept. of Aerospace Engineering, KAIST

E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr

\* Korea Aerospace Industry

\*\* Dept. of Aerospace Engineering, KAIST

\*\*\* Agency for Defense Development

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

위한 방법들이 다양하게 연구되었다<sup>(6-9)</sup>. 인공위성의 고정밀 탑재체의 미소진동을 절연하기 위한 방법은 진동원을 재설계하는 방법, 탑재체를 재설계하는 방법, 진동원에서 탑재체까지의 진동 경로에서의 진동을 차폐하는 방법 등이 있으나 그 중 진동 경로에서의 진동을 차폐하는 방법이 가장 실용적인 대안이다 (Fig. 1). 이 연구에서는 Fig. 2와 같이 진동원인 반작용 휠과 인공위성 본체 사이에 절연장치를 장착하므로써 탑재체까지 전달되는 진동을 진동 경로에서 효과적으로 절연시키고자 한다.

진동절연장치의 경우 크게 수동절연장치, 능동절연장치 그리고 이를 혼합한 하이브리드 절연장치로 나뉠 수 있다. 수동절연장치의 경우 비교적 비용이 저렴하며 간단하고 신뢰성이 높다는 장점이 있지만 수동절연장치만으로 요구조건을 만족시키지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 해결책으로는 수동요소에 능동요소를 추가 하여 하이브리드 진동 절연장치를 설계함으로써 요구조건을 만족시킬 수 있다. 이 연구에서는 반작용 휠의 교란으로부터 고정밀 임무 장비들의 성능을 보호하기 위해 수동 요소와 능동 요소를 결합한 하이브리드 진동 절연장치를 개발하였으며 반작용 휠의 교란 특성을 고려한 노치 필터 제어기법을 적용하여 특정 주파수에서의 추가적인 진동 절연 성능을 평가하였다.

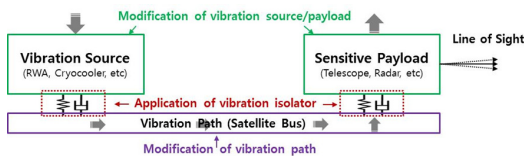


Fig. 1 Various methods to reduce vibration transmitted to the sensitive payload

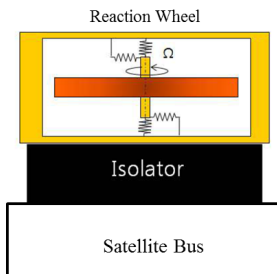


Fig. 2 Configuration and schematic drawing of RWA, isolator and satellite bus

## 2. 하이브리드 진동 절연장치 성능 평가

### 2.1 진동 절연장치 설계

하이브리드 진동 절연장치는 수동 요소로 기본적인 절연 성능을 확보하고 능동 요소로 미소진동의 특성을 반영해 절연 성능을 조절할 수 있는 장점을 가진다. 하이브리드 절연장치 개발을 위해 먼저 수동 절연장치를 구성하였다. 스프링과 감쇠 요소로 구성된 일반적인 2파라미터 절연장치의 경우 감쇠 값이 클수록 공진에서 전달되는 진동이 작아지는 반면 고주파수 대역에서의 절연 성능이 저하된다(Fig. 3). 하지만 스프링과 스프링으로 지지된 감쇠 요소가 평행으로 연결된 3파라미터 절연장치의 경우 감쇠 값과 스프링 값을 적절하게 조절하면 공진영역에서의 높은 감쇠와 고주파수 영역에서의 높은 절연 성능을 동시에 확보할 수 있다<sup>(7)</sup>(Fig. 4). 2 파라미터 절연장치와 달리 3파라미터 절연장치는 감쇠 값이 증가함에 따라 공진영역에서 전달률이 작아지다가 특정 감쇠 값 이후 전달률이 다시 커지게 된다. 이론적으로 최적의 감쇠 값은  $\xi_{opt} = N\sqrt{(N+2)} / (N+1)$ 로 표현될 수 있으며 여기서 N은 두 스프링 강성 값의 비율이며 1~10 사이의 값을 가질 때 높은 절연 성능을 확보할 수 있다.

3파라미터 수동 절연장치를 Fig. 5와 같이 벨로즈 (bellows)와 점성유체(viscous fluid)를 사용하여 설계하였다. 점성 유체의 경우 벨로즈 안쪽에 채워지며 오리피스(orifice)를 통해 두 개의 벨로즈 사이를 이동하게 된다. 이와 같이 벨로즈를 사용할 경우 점성유체의 실링이 용이하며 벨로즈의 강성을 조절하여 설계할 수 있기 때문에 스프링 요소로 사용될 수 있다. 절연장치에 사용된 벨로즈 1과 2의 자유 길이는 각각  $12.6 \pm 2$  mm와  $8.2 \pm 2$  mm이며 두 벨로즈의 내부와 외부 외경은 각각 17 mm와 30 mm이다. 벨로즈는 AM350 강으로 제작되었으며 그 외의 부분은 SUS304이다. 예기치 못한 진동으로부터 벨로즈의 영구 변형과 손상을 보호하기 위해 기계적 스톱퍼(stopper)를 추가하였다. 해석결과에 따라 선정된 최적의 스프링 상수 값은  $k_1 = 5000$ 과  $k_2 = 25\ 000$  N/m이며 최적의 감쇠 값을 위해 350 N/(m/s)의 점성계수를 가지는 실리콘 오일이 선정되었다. Fig. 4는 다양한 점성에 따른 설계된 절연장치의 전달률을 보여

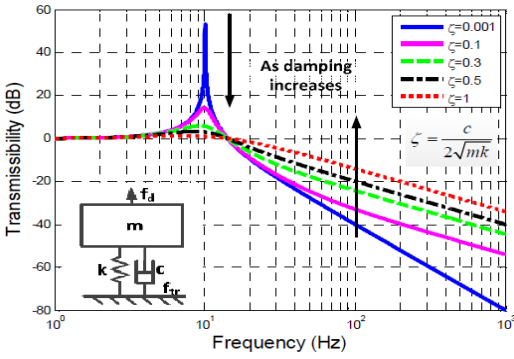


Fig. 3 Transmissibility of 2 parameter isolator

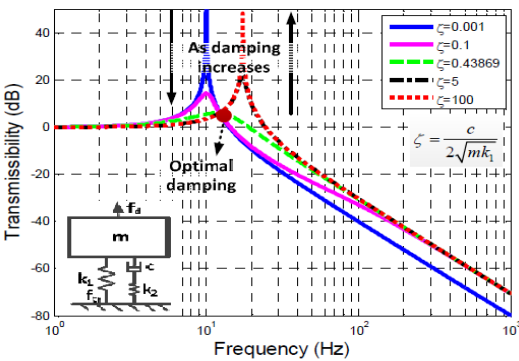


Fig. 4 Transmissibility of 3 parameter isolator

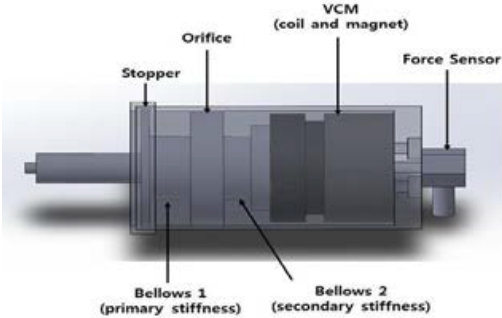


Fig. 5 Designed hybrid vibration isolator

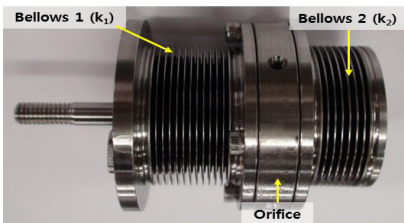


Fig. 6 Developed passive vibration isolator

주고 있으며 최적의 감쇠 값을 가질 경우 약 10 Hz에서부터 진동 절연 효과가 나타나며 약 2.11의 감쇠 값(Q-factor)과 -40 dB/dec의 높은 절연성능을 보일 것으로 예측되었다. Fig. 6은 실제 제작된 3 파라미터 수동 절연장치이며 이 연구에서는 제작된 3 파라미터 수동 절연장치에 전자석 작동기, 힘 센서, 노치 필터 알고리즘을 추가하여 능동 요소를 구현하였다. 전자석 작동기는 Moticont사의 HVCM051-032-01 모델로 영구자석의 외경과 높이는 각각 50 mm와 25.4 mm이며 코일의 헤드부는 외경 50.8 mm 높이 12.7 mm, 코일은 외경 43.7 mm와 길이 24.0 mm이다. 힘 피드백을 위해 사용된 센서는 PCB사의 208C01이다. 연결봉과 센서를 포함한 절연장치의 총 길이는 192 mm이며 총 무게는 약 0.9 kg이다.

Fig. 7은 실제 제작된 3파라미터 수동 절연장치에 다양한 점성을 가지는 점성유체를 채웠을 때 절연장치의 전달률을 나타낸다. 실리콘 오일의 점성계수를 100 N/(m/s)부터 3000 N/(m/s)까지 증가시키면서 최적의 감쇠 값을 찾았으며 약 350 N/(m/s)의 점성계수를 가지는 점성유체를 사용하였을 때, 약 17.44 Hz에서부터 진동 절연 효과가 나타나고 약 2.11의 감쇠 값(Q-factor)과 -40 dB/dec의 높은 절연성능을 보임을 확인하였다.

설계된 하이브리드 절연장치는 Fig. 8과 같이 단순 화시킬 수 있으며 하이브리드 절연장치의 전달률은 식 (1)~(7)과 같이 유도할 수 있다. 여기서  $f_a$ 는 전자석 작동기로부터 발생되는 힘,  $f_d$ 는 반작용 휠로부터 발생되는 교란력 그리고  $f_w$ 은 휠의 교란력이 절연장치를 통해 전달되는 힘이다.

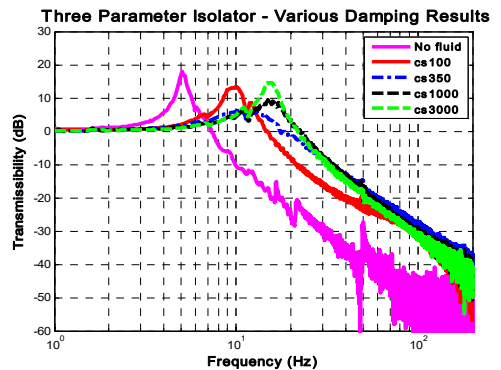
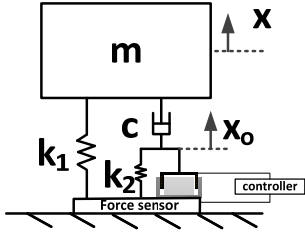


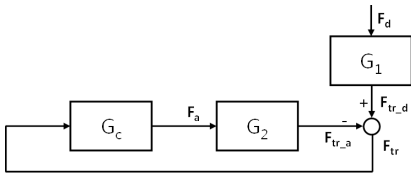
Fig. 7 Comparison of transmissibility for various damping

**Table 1** Comparison of magnification factor and natural frequency of bellows isolator for various fluids

	Magnification factor	Cutoff frequency(Hz)
No fluid	15.12	7.17
CS 100	5.23	14.88
CS 350	2.11	17.44
CS 1000	2.97	22.36
CS 3000	5.6	22.03



**Fig. 8** Simplified schematic of hybrid vibration isolator



**Fig. 9** Block diagram of hybrid vibration isolator

$$m\ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{x}_0) - k_1x + f_a \tag{1}$$

$$c(\dot{x} - \dot{x}_0) = k_2x_0 - f_a \tag{2}$$

$$f_{tr} = k_1x + k_2x_0 - f_a \tag{3}$$

$$F_a(s) = G_c F_{tr}(s) \tag{4}$$

하이브리드 절연장치의 블록선도는 Fig. 9와 같이 표현된다. 식 (1)~(3)을 라플라스 변환하면 반작용 휠으로부터 발생하는 교란력과 수동 절연장치를 통해 전달되는 전달력( $F_{tr,d}$ , 이때  $f_a = 0$ ) 사이의 전달함수( $G_1$ )와 능동요소인 전자석을 통해 발생하는 힘과 능동 절연장치를 통해 전달되는 전달력( $F_{tr,a}$ , 이때  $f_d = 0$ ) 사이의 전달함수( $G_2$ )를 식 (5)와 (6) 같이 유도할 수 있다. 식 (7)에서  $G_c$ 는 제어기의 전달함수를 나타내며 제어기에 따라 능동 절연 특성이

결정된다. Fig. 10은 전달함수의 크기와 위상을 Bode 선도로 보여주고 있다.

$$G_1(s) = \frac{F_{tr,d}}{F_d} = \frac{k_1x + k_2x_0}{(ms^2 + cs + k_1)x - csx_0} \tag{5}$$

$$= \frac{c(k_1 + k_2)s + k_1k_2}{mcs^3 + mk_2s^2 + c(k_1 + k_2)s + k_1k_2}$$

$$G_2(s) = \frac{F_{tr,a}}{F_a} = \frac{k_1x + k_2x_0 - f_a}{f_a} \tag{6}$$

$$= \frac{k_1x + k_2x_0}{(cs + k_2)x_0 - csx} - 1$$

$$= \frac{-mcs^3}{mcs^3 + mk_2s^2 + c(k_1 + k_2)s + k_1k_2}$$

$$\frac{F_{tr}(s)}{F_d(s)} = \frac{G_1}{1 + G_c G_2} \tag{7}$$

$$= \frac{c(k_1 + k_2)s + k_1k_2}{mcs^3 + mk_2s^2 + c(k_1 + k_2)s + k_1k_2 - G_c mcs^3}$$

**2.2 Notch filter 제어기법**

노치 필터는 밴드 리젝트 필터의 한 종류로서 특정 주파수의 아주 좁은 주파수 대역의 성분만을 제거시킬 수 있는 장점이 있어 소음 및 진동 제어에 널리 쓰이는 필터이다. 반작용 휠의 경우 비교적 넓은 구동속도 범위(0 r/min ~ 20 000 r/min)를 갖고 있어 위성체 구조의 공진 주파수와 만나 매우 큰 진동을 유발할 수 있다. 따라서 반작용 휠과 위성체 구조 공진 주파수에서의 추가적인 절연성능을 확보하기 위해 이 연구에서는 노치 필터 제어기법이 사용되었다. 이 연구에서 사용된 노치 필터의 전달함수는 식 (8)와 같이 나타낼 수 있으며 여기서  $K_a$ 는 필터게인,  $\omega_0$ 는 노치 주파수,  $\zeta_1, \zeta_2$ 는 노치 필터의 대역폭과 크기를 결정하는 감쇠변수이다.

$$G_c = K_a \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_0s + \omega_0^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_0s + \omega_0^2} \tag{8}$$

노치 필터의 전달함수에서 감쇠변수  $\zeta_1, \zeta_2$ 의 효과는 Figs. 11~13까지 나타낼 수 있다. Fig. 11은  $\zeta_1$ 가 일정할 때  $\zeta_2$ 의 변화에 따른 전달함수를 나타내고 있으며 Fig. 12는  $\zeta_2$ 가 일정할 때  $\zeta_1$ 의 변화에 따른 전달함수를 나타내고 있다. Figs. 11~12에서 볼

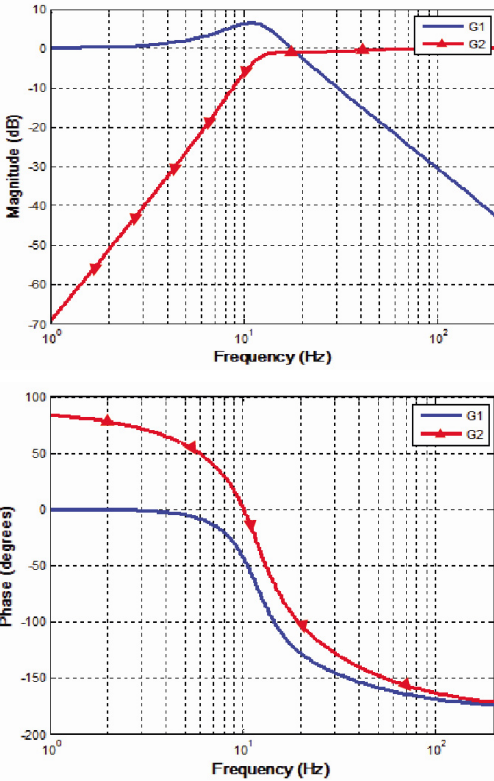


Fig. 10 Bode plot of  $G_1$  and  $G_2$  : magnitude and phase

수 있듯이,  $\zeta_1$ 는 필터의 대역폭을 결정하며  $\zeta_2$ 는 노치 주파수에서 피크점의 크기를 결정한다. Fig. 13은 감쇠변수 비( $\zeta_1/\zeta_2 = 10$ )가 일정할 때  $\zeta_1, \zeta_2$ 의 변화에 따른 전달함수의 모습을 보여주고 있으며 전달함수의 피크점의 크기와 주파수 대역이  $\zeta_1, \zeta_2$ 의 값에 따라 제어될 수 있음을 확인할 수 있다. 이 연구에서는 위성체 구조의 공진 주파수가 30 Hz라고 가정하고 30 Hz에서의 추가 절연을 위해 감쇠변수를 변화시키면서 하이브리드 절연장치의 전달률을 살펴보았다. Fig. 14에서 볼 수 있듯이 추가적으로 절연을 원하는 30 Hz의 주파수 대역폭에서 매우 큰 절연 성능을 확인하였으나 30 Hz 주파수 이후 다소 성능이 악화될 수 있음을 확인하였다.

2.3 절연장치 성능평가 시험

개발한 하이브리드 진동 절연장치에 노치 필터 제어기법을 적용하여 단축 절연 성능 평가를 수행하였다. Figs. 15~16은 절연장치의 성능을 평가하기 위한 시험장치의 도식과 실제 시험장치의 모습을 보여

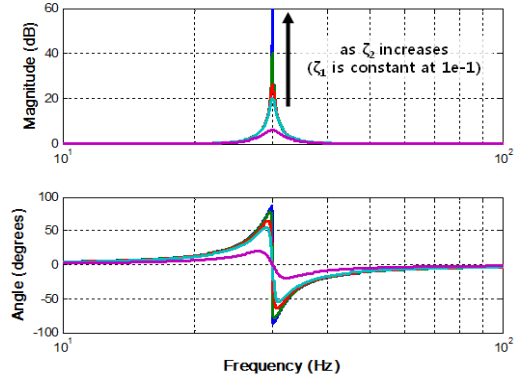


Fig. 11 Transfer function of notch filter as  $\zeta_2$  is varied ( $\zeta_1$  is constant)

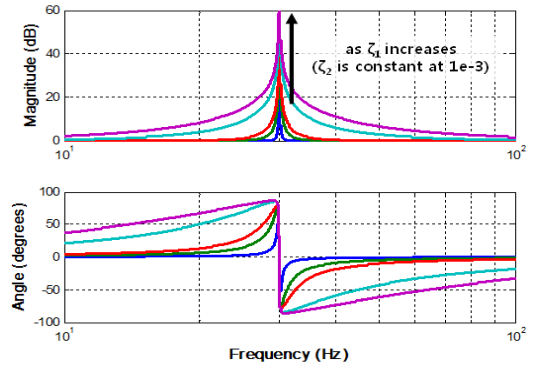


Fig. 12 Transfer function of notch filter as  $\zeta_1$  is varied ( $\zeta_2$  is constant)

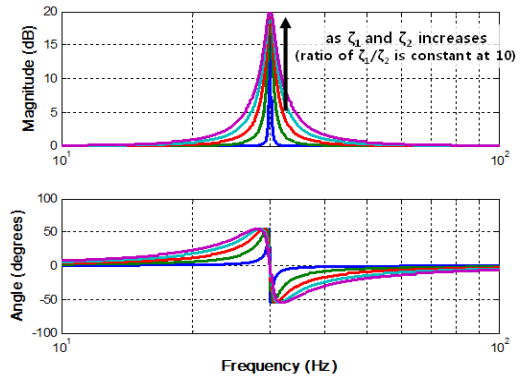


Fig. 13 Transfer function of notch filter as  $\zeta_1$  and  $\zeta_2$  is varied ( $\zeta_1/\zeta_2$  is constant)

주고 있다. 단축 절연장치의 성능은 가진력으로부터 발생하는 가진력이 절연장치를 통해 전달되는 전달력을 측정함으로써 평가되었다. 가진력과 전달력을

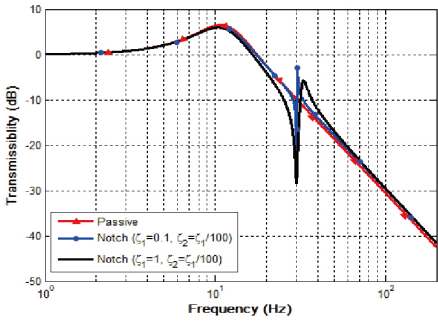


Fig. 14 Predicted transmissibility of hybrid three parameter isolator with notch filter at 30 Hz

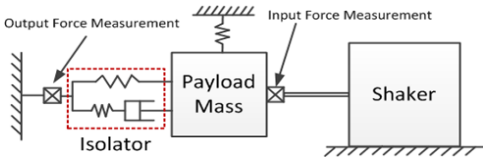


Fig. 15 Schematic of test setup for evaluating isolation performance

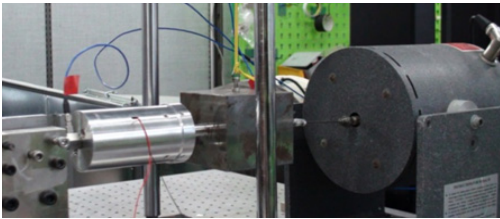


Fig. 16 Picture of test setup for evaluating isolation performance

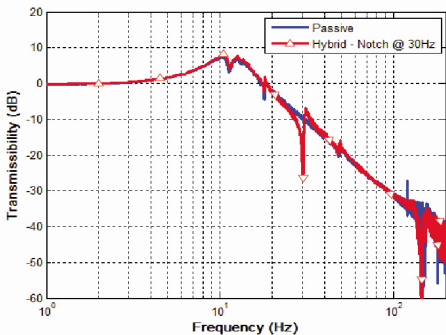


Fig. 17 Measured transmissibility of hybrid three parameter isolator with notch filter at 30 Hz

측정하기 위해 2개의 단축 힘센서(PCB, Model 208C01)가 사용되었으며 교란력 발생을 위해 가진

기(MB Dynamics, Model PM50A with SS250 power amplifier)가 사용되었다. 가진력은 관심 주파수 영역인 1 Hz에서 200 Hz를 일정하게 정현 스위프(sine sweep)하였으며 약 1.4N RMS 크기의 가진력을 발생시켰다.

실제 가진기로부터 발생하는 힘과 절연장치를 통해 전달되는 전달력을 측정함으로써 능동 제어와 절연 성능을 평가하였다. Fig. 17은 하이브리드 절연장치에 노치 필터(30 Hz)를 적용하여 성능평가 시험을 수행한 결과이다. 시험 결과에서 확인 할 수 있듯이 기존의 수동 절연장치의 특성을 그대로 유지한 채 30 Hz에서 약 20 dB의 추가적인 절연 성능을 확보할 수 있었다.

### 3. 결 론

이 연구에서는 반작용 휠 교란 절연을 위해 벨로즈와 점성유체를 이용한 수동요소와 전자석을 이용한 능동 요소를 결합한 하이브리드 형태의 진동 장치를 설계 및 개발하였다. 반작용 휠의 진동 특성상 휠의 구동 주파수가 위성의 고유 진동수를 지날때 매우 큰 진동을 유발하기 때문에 특정 주파수의 진동 크기를 크게 절연시킬 수 있는 노치 필터 제어기법을 개발된 하이브리드 절연장치에 적용하였다. 노치 필터 제어기법이 적용된 하이브리드 절연장치의 절연 성능을 평가한 결과 수동 절연에 비해 진동 절연 성능(약 20 dB)을 추가로 향상 시킬 수 있는 것을 확인하였다.

### 후 기

이 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 N04150066).

### References

- (1) Bialke, B., 1998, High Fidelity Mathematical Modeling of Reaction Wheel Performance, in 21st Annual American Astronautical Society Guidance and Control Conference, AAS paper 98-063.
- (2) Masterson, R. A., 1999, Development and

Validation of Empirical and Analytical Reaction Wheel Disturbance Models, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

(3) Bosgra, J. and Prins, J. J. M., 1982, Testing and Investigation of Reaction Wheels, in Automatic Control in Space, 9th Symposium, pp. 449-458.

(4) Lee, D., Yoon, J. and Han, J., 2012, Development of Integrated Simulation Tool for Jitter Analysis, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 13, No. 1, pp. 64-73.

(5) Kim, D. K., Oh, S. H., Yong, K. L. and Yang, K. H., 2010, Numerical Study on a Reaction Wheel and Wheel-disturbance Modeling, Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 38, No. 7, pp. 702-708.

(6) Lee, D. and Han, J., 2012, A Comparison of Vibration Isolation Characteristics of Various Forms of Passive Vibration Isolator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 817-824.

(7) Lee, D., Park, G. and Han, J., 2014, Development of Vibration Isolation Platform for Low Amplitude Vibration, Proceedings of SPIE, 905708-1~905708-7.

(8) Lee, D., Park, G. and Han, J., 2015, Experimental Study on On-orbit and Launch Environment Vibration Isolation Performance of a Vibration Isolator using Bellows and Viscous Fluid, Aerospace Science and Technology, Vol. 45, pp. 1-9.

(9) Lee, D., Park, G. and Han, J., 2015, Hybrid Isolation of Reaction Wheel Disturbance Using Filtered-x Least Mean Squares Algorithm, CANSMART 2015: International Conference on Smart Materials and Structures, Vancouver, Canada, Jul 16, 2015.

(10) Park, G., Lee, D. and Han, J., 2012, Development of Multi-DOF Active Micro vibration Emulator, Proceedings of 2012 ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2012-8240.

(11) Park, J., Lee, D., Park, G. and Han, J., 2012, Design of Performance Evaluation Testbed for Micro-vibration Isolator on Satellite, Proceedings of Fall Conference on the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, pp. 946-950.

(12) Park, G., Lee, D. and Han, J., 2014, Development of Multi-degree-of-freedom Micro-vibration Emulator for Efficient Jitter Test of Spacecraft, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 25, No. 9, pp. 1069-1081.



**Geeyong Park** received M.S. degree in aerospace engineering at University of Michigan, Ann Arbor in 2010. He then received Ph.D. degree from KAIST in 2016. Dr. Park is currently a research engineer at the rotary-wing aircraft system integration team at Korea Aero-space Industry (KAI). His research interests are vibration emulator, vibration isolator and vibration control system.



**Jong-Eun Suh** received B.S. degree in mechanical engineering from KAIST in 2015. He is a M.S. candidate in aerospace engineering at KAIST. His research interests are structural dynamics and deployable structures.



**Dae-Oen Lee** received M.S. and Ph.D. degree in aerospace engineering from KAIST in 2010 and 2015. Dr. Lee is currently a senior researcher at ADD. His research interests are structural dynamics and vibration control.



**Jae-Hung Han** received a B.S. degree in aerospace engineering from KAIST in 1991. He then received M.S. and Ph.D. degree from KAIST in 1993 and 1998, respectively. Dr. Han is currently a professor and department head of the department of aerospace engineering at KAIST in Daejeon, Korea. His research interests are in the area of smart materials, structures and systems.