

의탄성 형상기억합금 메쉬 와셔가 적용된 수동형 진동절연기의 수학적 등가모델 도출

권성철¹ · 전수현¹ · 오현웅^{1,†}

¹조선대학교 항공우주공학과

Derivation of Numerical Equivalent Model of Vibration Isolator using Pseudoelastic SMA Mesh Washer

Sung-Cheol Kwon¹, Su-Hyeon Jeon¹ and Hyun-Ung Oh[†]

¹Dept. of Aerospace Engineering, Chosun University,

Abstract : A passive launch and on-orbit vibration isolator using SMA(Shape Memory Alloy) washer for both the structural safety of the micro-vibration source by attenuating the transmitted force under launch loads and the micro-vibration isolation during their on-orbit operation has been proposed, which does not require the additional launch locking mechanism. To measure the characteristics of SMA mesh washer, we performed compressive loading tests with a single SMA mesh washer and a vibration isolator using SMA mesh washer. The numerical equivalent model of vibration isolator using SMA mesh washer composed of two spring and viscous damping elements has been verified that both stiffness and viscous damping varied with respect to compressed deformations. In addition, the effectiveness of launch loads and micro-vibration reduction has been investigated through the dynamic characteristics measurement test of cooler assembly combined with passive vibration isolator

Key Words : Shape Memory Alloy(형상기억합금), 진동절연기(Vibration Isolator), 미소진동(Micro-vibration), 발사진동(Launch-vibration)

1. 서 론

형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA)은 일반적인 금속이나 합금에서는 찾아볼 수 없는 형상기억효과(Shape Memory Effect)와 초탄성(Superelasticity) / 의탄성(Pseudoelasticity) 거동을 보인다. Cu-Zn 합금과 Ni-Ti 합금에서 형상기억 효과가 발견된 이후로 지능형 또는 기능성 재료로서의 사용가능성 때문에 많은 주목을 받아왔으며, 우주항공, 도시, 기계, 의료분야 등에서 크게 상용화되어 이용되고 있다[1].

형상기억효과는 낮은 온도(Martensite Start Temperature, M_s)에서 하중이 가해지면 쌍정(Twinned) 마르텐사이트로부터 역쌍정(Detwinned) 마르텐사이트로의 변태가 일어나며, 오스테나이트 종료 온도(Austenite Finish Temperature, A_f)이상으로 가열함으로써 원상으로 회복되는 특징을 갖는다. 이때, 가열도중 잔류 변형을 구속하면 큰 복원 응력(Recovery Stress)을 유발한다.

형상기억합금의 초탄성/의탄성 거동이란 높은 온도(Austenite Start Temperature, A_s 이상)에서 하중이 가해지면 오스테나이트 상으로부터 역쌍정 마르텐사이트로의 변태가 일어나며, 이러한 변태는 소성 변형 없이 10%이상의 큰 변형을 보인다 하중 제하시 잔류 응력 없이 원래의 형상으

Received: Sep. 18, 2014 Revised: Sep. 24, 2014 Accepted: Sep. 27, 2014

† Corresponding Author

Tel: +82-062-230-7183, E-mail: ohu129@chosun.ac.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

로 복원하는 특징을 갖는다. 이때 하중-변위 선도가 비선형적 이력곡선(Nonlinear Hysteresis Curve)특성을 보이는데 이러한 이력 곡선의 내부 면적은 SMA 자체의 에너지 흡수 능력을 의미하고 이 면적이 클수록 절연 특성이 뛰어난 것을 의미한다. 따라서, 형상기억합금의 의탄성 거동은 에너지 감쇠를 목적으로 절연체로의 응용이 주로 이루어진다. 그 대표적인 예로서, Youn et al. [2]은 파이프 충격 절연을 위해 형상기억합금 소재의 의탄성 효과를 이용한 형상기억합금 메쉬 와셔 절연체를 고안하였으며, 정하중 시험 및 충격 시험, 랜덤 진동시험을 수행하여 그 성능을 입증하였다. Jeong et al. [3]은 형상기억합금 기반의 가변 주파수 절연체를 고안하였으며, 단 분리, 페어링 분리 등의 충격환경에서는 절연체의 고유주파수를 100Hz 이내로 낮추어 충격 절연 성능을 확보하고, 발사환경에서는 절연체의 고유주파수를 100Hz 이상으로 높여 저주파 진동의 증폭을 피할 수 있음을 보고하였다. Yan et al. [4]은 형상기억합금 와이어를 메쉬 형태로 가공하여 절연체를 제작, 하중 선도의 비선형적인 이력 특성을 실험적으로 제시하여 절연 가능성을 확인하였고 랜덤 진동시험을 통해 저주파 영역에서의 절연 성능이 뛰어난 것을 입증하였다. 하지만 종래까지 보고된 형상기억합금을 활용한 메쉬 와셔 절연체의 연구에서는 수학적 모델링이 제시되지 않았으며 실험 결과에 기인한 결과 및 분석만을 보고하고 있다.

본 연구에서는 우주용 냉각기의 미소진동절연을 목적으로 발사구속장치의 적용 없이도 진동환경이 상이한 발사환경과 궤도환경에 동시 적용 가능한 수동형 진동절연기를 제안하였고, 발사환경에서의 저주파 진동성분을 효과적으로 저감시키고자 함을 목적으로 의탄성 SMA 메쉬 와셔를 적용하였다. 수동형 진동절연기는 우주용 냉각기와 조립체 레벨에서 자유감쇠진동시험을 실시하여 인가변위에 따라 주파수가 가변되는 특성이 있음을 파악하였고[5], 수동형 진동절연기 단독 레벨의 기본특성을 측정하여 두 개의 스프링 요소와 점성 감쇠요

소로 구성되며, 압축변위에 따라 강성과 점성 감쇠가 가변되는 수학적 등가모델을 제안하였다. 선행연구에서는 SMA 메쉬 와셔의 변형과정에서 내부 메쉬 와셔간의 마찰요소로 인한 에너지 소산으로 진동절연성능이 뛰어난 것을 보고하고 있으나, 본 연구에서는 인가 압축변위에 따라 강성과 점성 감쇠가 지배적으로 작용함을 입증하였다.

2. 의탄성 SMA 메쉬 와셔 수동형 진동절연기

2.1 의탄성 SMA 메쉬 와셔

Figure 1은 본 연구에서 적용한 의탄성 SMA 메쉬 와셔의 형상으로, 형상기억합금의 의탄성 효과를 이용하기 위해 A_f 가 상온과 비슷한 NDC사의 SE508 와이어 소재가 사용되었다[2]. SMA 메쉬 와셔의 외경, 내경, 높이는 각각 16mm, 8mm, 5mm이다.



Fig. 1 Configuration of Pseudoelastic SMA MeshWasher[2]

2.2 SMA 메쉬 와셔가 적용된 수동형 진동절연기

SMA 메쉬 와셔가 적용된 수동형 진동절연기의 적용대상으로 Pulse Tube형 냉각기를 선정하였으며, 이는 극저온 구현이 필요한 주요 임무 탑재장비의 냉각을 위해 사용된다[6].

Figures 2와 3은 각각 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬 와셔가 적용된 수동형 진동절연기와 이와 결합된 더미 냉각기의 형상으로서, 발사구속장치의 적용 없이도 진동환경이 상이한 발사환경과 궤도환경에 동시적용 가능하며, 발사환경에서 냉

각기로의 전달력 저감을 목적으로 Fig. 1과 같이 의탄성 특성을 갖는 SMA 메쉬 와셔를 적용하였다.

Figure 2의 SMA 메쉬 와셔가 적용된 수동형 진동절연기는 냉각기를 연결하는 고정축과 이를 감싸는 델린 소재의 고정축 커버, 극저온 냉각을 위해 헬륨가스가 통과하는 트랜스퍼라인을 허용 변위내로 유지를 위한 델린 소재의 변위구속블록, 발사하중에서의 댐핑 특성 부가를 위한 SMA 메쉬 와셔, 발사 환경에서의 냉각기 고정축 운동 시 메쉬 와셔의 압축을 유발하여 진동에너지 소산을 부여하는 스틸 와이어(Wire Rope)로 구성된다. 궤도환경에서는 SMA 메쉬 와셔가 초기형상으로 복원함에 따라 냉각기가 공칭 위치로 이동하여 스틸 와이어의 장력이 이완됨과 동시에 냉각기에 구비된 트랜스퍼라인과 냉각기의 열제어를 위한 히트파이프로부터 냉각기가 저항성 탄성 지지되도록 하여 냉각기 운용 시의 주 가진 주파수와 디커플링으로 미소진동 절연성능을 구현하고자 한다.

2.3 정하중 시험을 통한 등가모델 도출

2.3.1 SMA 메쉬 와셔 정하중 시험

Figure 4는 의탄성 SMA 메쉬 와셔 단독의 정하중 시험 형상을 나타낸다. 시험 시 변위 제어 방법을 적용하여 압축변위를 가한 후 하중을 제거하고 압축 변위를 증가하면서 하중 부하/제하를 반복 실시하였다.

Figure 5는 SMA 메쉬 와셔의 압축 변위(d)-하중(p) 시험결과를 나타낸다. 초기 압축을 받을 때에는 국부 와이어의 변형에 의해 와이어 사이의 공간이 채워지면서 작은 하중으로도 변형이 발생하지만 공간이 어느 정도 채워진 후에는 대부분의 와이어에 응력이 작용하여 추가적인 변형을 위해 더 큰 하중이 요구된다. 또 하나의 중요한 특징으로, 하중 부하/제하 시에 이력 하중 곡선의 특징인데 이는 SMA 와이어 소재 자체의 상변화 현상이 유발되는 의탄성 효과에 의한 에너지 소

산이 주도적으로 발생하기 때문이며, 2.7mm의 큰 압축변위에서도 소성변형 없이 원래의 형상으로 복원되는 특징을 나타내었다. 이력 하중 곡선의 내부 면적이 클수록 에너지 소산능력이 뛰어난 것을 의미하고, 이는 절연체로서 뛰어난 절연능력을 보유함을 의미한다.

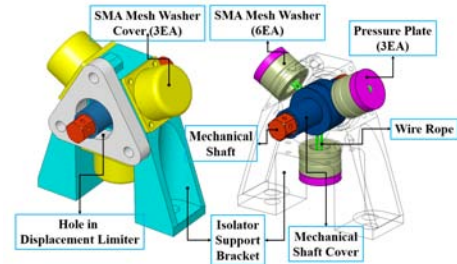


Fig. 2 Passive Launch and On-orbit Vibration Isolation System using SMA Mesh Washer

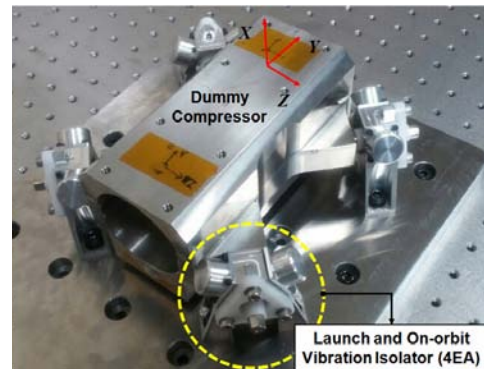


Fig. 3 Dummy Compressor Combined with Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

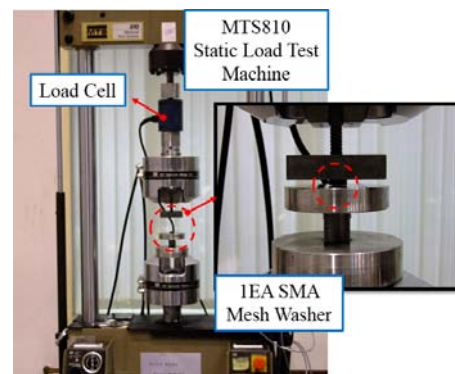


Fig. 4 SMA Mesh Washer Static Load Test Configuration

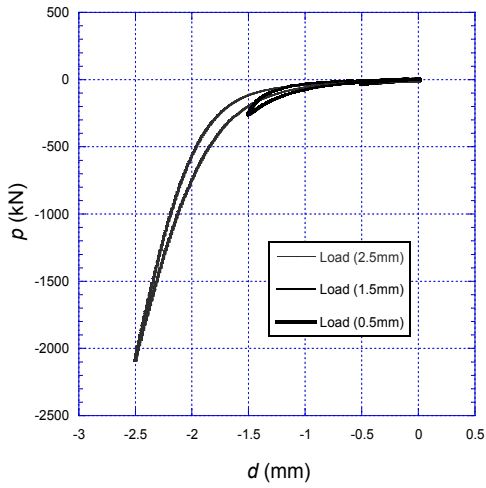


Fig. 5 Displacement-Load Relation of SMA Mesh Washer

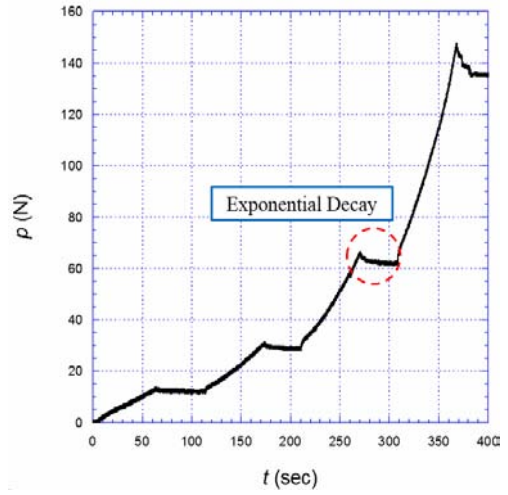


Fig. 8 Time-Load Relation of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

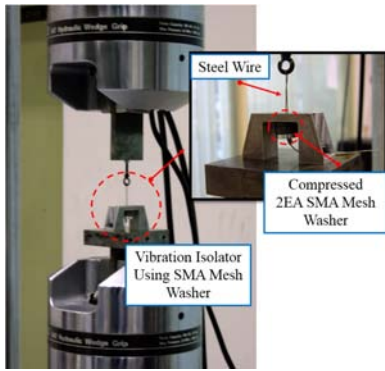


Fig. 6 Compressive Loading Test of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

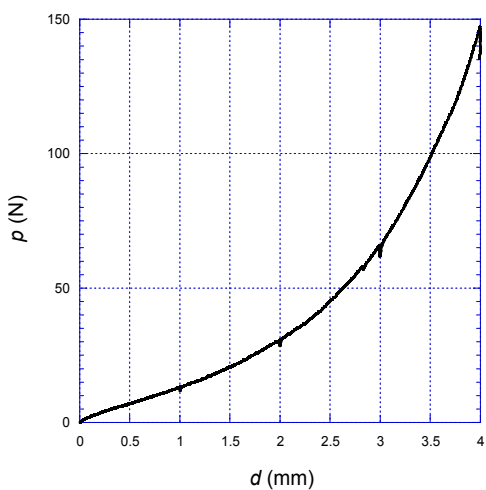


Fig. 7 Displacement-Load Relation of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

2.3.2 SMA 메쉬 와셔 진동절연기 정하중 시험

Figure 6은 SMA 메쉬 와셔가 적용된 진동절연기의 압축 정하중시험 형상을 나타낸다. 정하중 시험 시 1mm의 압축변위 인가 후 일정시간동안 압축변위를 유지하고, 다시 1mm의 변위를 추가 인가하는 방식으로 진행하였다.

Figure 7과 8은 각각 SMA 메쉬 와셔 진동절연기의 정하중시험으로부터 획득된 변위(d)-하중(p) 선도 및 시간(t)-하중(p) 선도를 나타낸다. 변위-하중 선도의 압축변위가 증가함에 따라 강성이 증가함을 알 수 있고, 시간-하중 선도로부터 인가변위 중단 후 작용하중이 지수함수 적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 압축변위가 증가할수록 인가변위 중단시점에서의 작용하중 감소 경향이 더욱 증가함을 알 수 있다.

2.3.3 수학적 등가모델

상기 정하중시험 결과 및 진동절연기의 구조형을 기초로 Fig. 9와 같이 SMA 메쉬 와셔가 적용된 수동형 진동절연기의 수학적 등가모델을 도출하였다. 등가모델은 두 개의 스프링 요소와 점성 감쇠요소로 구성되며, 스프링요소 k_1 및 k_2 는 각각 스틸 와이어와 SMA 메쉬 와셔의 축방향

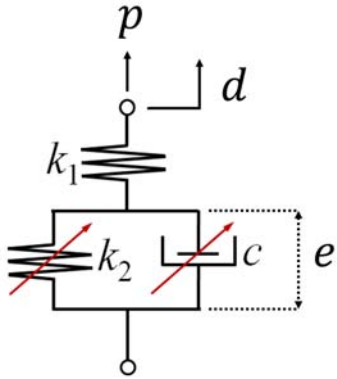


Fig. 9 Numerical Equivalent Model of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

강성을 나타낸다. 점성 감쇠요소 c 는 Fig. 8의 인가변위를 중단하는 시점에서 작용하중이 지수함수적으로 감소하는 경향으로부터 유추되어 수학적 등가모델에 반영되었다. 또한, 등가모델에 반영된 k_2 와 c 는 압축변위에 따라 가변하는 특징이 있으며, 이로부터 Youn et al. [2]이 보고한 SMA 메쉬 와셔의 구성이 마찰요소가 지배적인 것과 달리, 인가 압축변위에 따른 가변 강성과 점성 감쇠요소로 구성되어 있음을 입증하였다.

수학적 모델에 사용된 각각의 강성치는 Fig. 7의 변위-하중 선도로부터 도출되었으며, k_1 은 스틸와이어의 강성 측정치에 근거하고, k_2 는 각각의 압축변위에 따른 기울기 $k_1k_2/(k_1+k_2)$ 로부터 산출하였다. 또한, Fig. 7의 각 기울기가 비선형적 경향을 나타내고 있으나 해석의 용이성을 위하여 k_2 값은 각각의 압축변위에 따라 선형으로 가정하였다.

수학적 모델에 적용된 가변 점성 감쇠요소는 Fig. 8의 실험결과와 실험데이터를 활용한 시뮬레이션결과의 곡선적합(Curve Fitting)을 통해 산출되었다.

Figure 9의 수학적 등가모델로부터 하중 관계식을 나타내면,

$$p = ce + k_2e \quad (1)$$

여기에서, e 는 점성 감쇠요소의 변위, p 는 진동절

연기에 인가된 하중을 나타내며, 점성 감쇠요소의 변위 e 는,

$$e = d - \frac{p}{k_1} \quad (2)$$

여기에서, d 는 진동절연기에 인가된 변위를 나타내고, 식 (1)과 (2)를 조합하면,

$$\dot{p} = -(k_1 + k_2)\frac{p}{c} + k_1\dot{d} + \frac{k_1k_2d}{c} \quad (3)$$

로 정리된다. 점성 감쇠요소 c 는 다음의 평가지표가 최소가 되도록 하여 도출된다.

$$E = \text{Min} \left[\sum_{i=0}^t (\bar{p}_i - p_i)^2 \right] \quad (4)$$

여기에서 \bar{p}_i 는 정하중시험으로부터 획득된 d 와, Fig. 7의 변위-하중선도로부터 산출된 k_1 , k_2 값에 기인하여 식(3)으로부터 수치 해석된 하중 값이고, p_i 는 실제 정하중 시험으로부터 얻어진 값에 근거한다.

Figure 10은 상기 식으로부터, 스틸와이어의 강성 측정치 $k_1 = 460 \text{ N/mm}$ 일 때 산출된 k_2 와 c 의 값을 나타내며, SMA 메쉬 와셔의 압축 변위에 따라 크게 가변 되는 특징을 갖는다.

Figure 11은 상기 식(3)과 Fig. 10의 산출된 파라미터로부터 계산된 \bar{p}_i 와 실제 측정치인 p_i 의 결과를 비교한 것으로, 각각 1mm와 3mm의 압축변위가 인가되었을 때의 결과를 나타낸다. 해석 시 각각의 변위 영역에서 k_2 의 비선형적 경향이 고려되지 않아 곡선적합의 일부구간에서 다소 불일치점이 존재하나 본 연구에서 제안한 수학적 모델이 실제 SMA 메쉬 와셔가 적용된 진동절연기의 특성을 근사적으로 추정하고 있음을 알 수 있다.

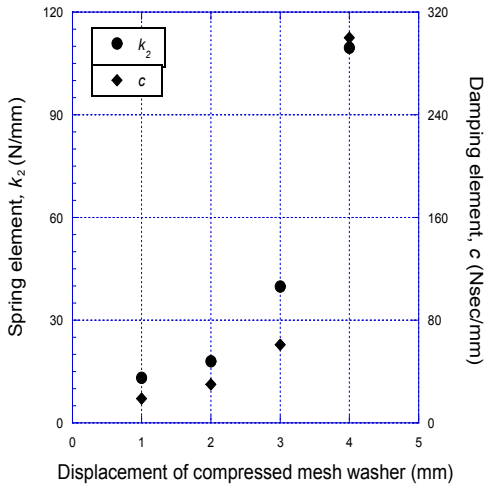
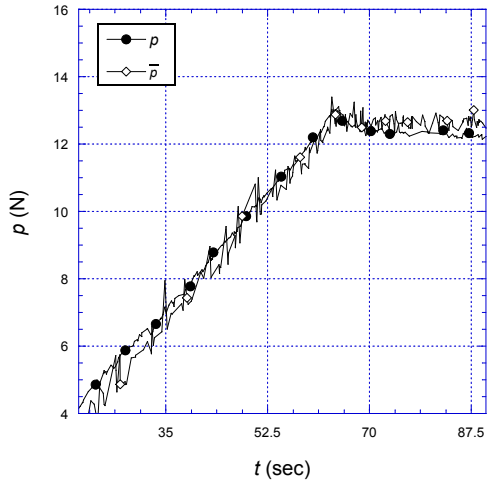
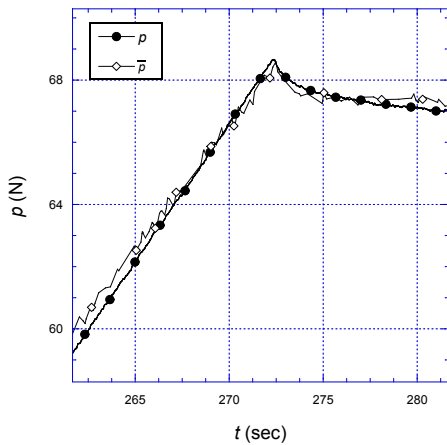


Fig. 10 Estimated Variable Values of k_2 and c



(a) 1mm



(b) 3mm

Fig. 11 Simulated \bar{p} and p

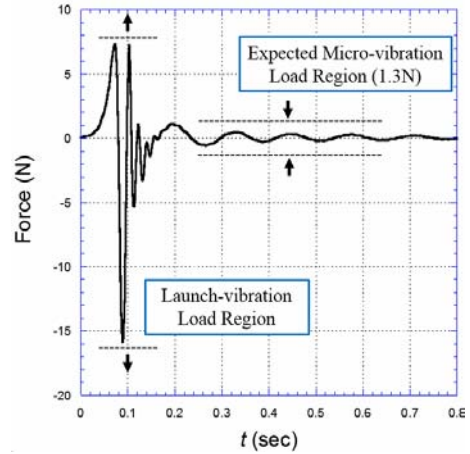


Fig. 12 Time Profile of Free Vibration in Y-axis

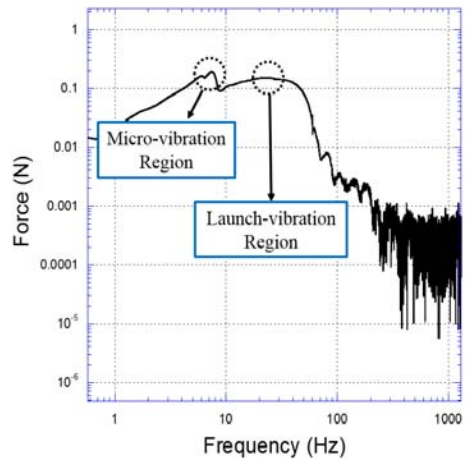


Fig. 13 Frequency Response in Y-axis

2.4 SMA 메쉬 와셔 진동절연기의 자유감쇠진동 시험

SMA 메쉬 와셔가 적용된 진동절연기의 자유감쇠진동시험을 수행하였으며, Figs. 12와 13에 진동절연기가 결합된 냉각기를 1g환경에서 주 가진 축(y)에 3mm의 최대 가용변위를 인가 후 자유감쇠진동 하에서 측정된 시간(t)-힘(Force) 응답특성 및 이에 대한 주파수응답을 나타내었다. 높은 댐핑 특성을 갖는 약 20Hz대역의 고유진동수는 초기 압축된 SMA 메쉬 와셔에 의한 거동특성으로 발사환경에서의 큰 진동레벨을 효과적으로 감쇠 가능함을 의미한다. SMA 메쉬 와셔가 초기 형상을 회복한 후에는 약 8Hz대역의 컴프레서 자중에 의해 장력이 인가된 와이어의 저주파 응답특성이 지배적으로 나타나며, 냉각기의 궤도 운

용 시 발생하는 주 가진 주파수 36Hz와의 충분한 주파수 분리가 가능할 것으로 추정된다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 SMA 메쉬 와셔 진동절연기는 작용 하중의 크기에 따라 주파수가 가변되어 본 연구에서 목적하는 발사하중 저감 및 궤도 미소진동 절연이 가능하며 각 영역에서의 고유진동수 및 감쇠비를 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Summary of Natural Frequency and Damping Ratio

	Natural Freq. (Hz)	Damping Ratio (ζ)
Launch Vibration Region	20	0.1738
Micro-vibration Region	8	0.0564

3. 결 론

본 논문에서 제안한 SMA 메쉬 와셔를 적용한 수동형 진동절연기의 설계유효성을 검증하기 위해 SMA 메쉬 와셔 자체 및 진동절연기 레벨에서의 압축 정하중 시험을 실시하였다. SMA 메쉬 와셔 자체는 큰 압축변위에서도 소성변형 없이 원래의 형상으로 복원되는 특징을 나타내었다. 또한 진동절연기 레벨에서의 정하중시험 결과 및 진동절연기의 구조형상을 기초로 한 수학적 등가 모델로부터 산출한 수치 해 및 추정 파라미터가 실제 실험치의 특성을 근사적으로 모사 가능하여 수학적 등가 모델의 타당성을 입증하였다. 또한, 조립체 레벨에서의 자유감쇠진동시험을 통해 본 연구에서 제안한 수동형 진동절연기는 작용하중의 크기에 따라 주파수가 가변되어 본 연구에서 목적하는 발사 진동저감 및 궤도환경에서의 미소진동 절연이 가능할 수 있음을 추정하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. (NRF-2013 M1A3A3A02041817)

참고문헌

- [1] M. V. Gandhi, B. S. Thompson, "Smart Materials and Structures", Chapman & Hall, London, 1992.
- [2] S. H. Youn, Y. S. Jang, J. H. Han, "Compressed Mesh Washer Isolators using the Pseudoelasticity of SMA for Pyroshock Attenuation", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 21, No. 4, 2010, pp.407-421.
- [3] H. K. Jeong, J. H. Han, S. H. Youn, J. H. Lee, "Frequency Tunable Vibration and Shock Isolator using Shape Memory Alloy Wire Actuator", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 25, No. 7, 2014, pp.908-919.
- [4] X. J. Yan, J. X. Nie, "Study of a New Application Form of Shape Memory Alloy Superelasticity", Smart Materials and Structures, Vol. 12, No. 6, 2003, pp.14-23.
- [5] H. U. Oh, S. H. Jeon, S. C. Kwon, S. H. Youn, H. K. Jeong, "Characteristics of Passive Launch and On-orbit Vibration Isolation System Using Shape Memory Alloy Mesh Washer", The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 2014 Spring Conference, pp. 194-197.
- [6] H. U. Oh, K. J. Lee, M. S. Jo, "A Passive Launch and On-orbit Vibration Isolation System for the Spaceborne Cryocooler", Aerospace Science and Technology, Vol. 28, No. 1, 2013, pp.324-331.

저 자 소 개



권 성 철

2014년 조선대 항공우주공학과 졸업.
2014년 동 대학원 석사. 관심분야는 우주용 진동제어 및 에너지 하베스팅, 스마트 재료의 우주응용, 큐브위성 시스템 등



전 수 현

2014년 조선대 항공우주공학과 졸업.
2014년 동 대학원 석사. 관심분야는 우주 구조물 설계 해석 및 스마트 재료의 우주응용, 우주용 진동제어 등



오 현 응

1993년 한국항공대 항공기계공학과 졸업. 1996년 일본동경대학교 대학원 석사. 1999년 동 대학 박사. 2012년~현재 조선대학교 항공우주공학과 교수. 관심분야는 우주용 진동제어 및 충격 저감 시스템, 스마트 재료의 우주응용, 큐브위성 시스템 및 관련 기술, 위성 및 탑재체 시스템 등