技術論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(11), 988-995(2014)
DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.988
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

SMA 메쉬 와셔 진동 절연기를 적용한 X-band 안테나의 미소진동 절연성능 검토

전수현**, 권성철**, 김대관***, 오현웅*

Investigation of Micro-vibration Isolation Performance of SMA Mesh Washer Isolator for Vibration Isolation of X-band Antenna

Su-Hyeon Jeon**, Sung-Choel Kwon**, Dae-Kwan Kim*** and Hyun-Ung Oh*
Space Technology Synthesis Lab, Dept. of Aerospace Engineering, Chosun University*,**
Satellite Control System Team, Korea Aerospace Research Institute***

ABSTRACT

Two axis gimbal type X-band antenna system has been widely used to effectively transmit the real time image data from the observation satellite to the ground station. The micro-vibration generated by stepping motor actuation and imperfect intermeshed gear configuration of the antenna is one of the sources to degrade the image quality. To guarantee a high quality image of high resolution observation satellite, micro-vibration isolation of X-band antenna is required. In this paper, the X-band antenna vibration isolation system using pseudoelastic SMA(Shape Memory Alloy) mesh washer has been newly suggested. The basic characteristics of the SMA mesh washer isolator proposed in this study has been measured through static load tests and its effectiveness has been demonstrated by the micro-vibration isolation test of the X-band antenna.

초 록

관측위성으로부터 획득된 영상데이터를 지상국에 효율적으로 전송하기 위해 2축 짐벌 형태의 지향성 X-band 안테나가 적용되고 있으며, 안테나의 고속 정밀지향성 확보를 위해 구비된 모터 및 기어 간의 부정확한 맞물림으로부터 발생되는 미소진동은 영상품질 저하의 원인으로 작용한다. 고해상도 관측위성의 지향성능 향상을 통한 고해상도 영상정보 획득을 위해서는 안테나 구동시 발생하는 미소진동이 주요 임무장비에 전달되지 않도록 미소진동 절연이 요구된다. 본 논문에서는 X-band 안테나의 미소진동절연을 목적으로 의탄성 SMA 메쉬와셔 진동 절연기를 제안하였으며, 정하중 시험을 통해 진동 절연기의 기본 특성을 확인하였다. 또한, X-band 안테나의 미소진동 시험을 통해 진동절연기 유무에 따른 진동절연성능을 비교 및 분석 하였다.

Key Words : X-band Antenna(X-밴드 안테나), Shape Memory Alloy(형상 기억 합금), Vibration Isolator(진동 절연기), Micro-vibration Isolation(미소진동 절연)

† Received : July 7, 2014 Revised : September 15, 2014 Accepted : September 22, 2014
* Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

Ⅰ. 서 론

위성 자세제어를 위해 사용되는 반작용 휠과 제어모멘트 자이로, 임무장비의 극저온 구현을 위한 냉각기, 지향 조정 장치로 사용되는 2축 짐발 시스템 등과 같이 기계적 구동부를 갖는 탑재장비들은 고해상도 관측위성의 영상품질에 영향을 미치는 대표적인 진동원이다. 따라서 고해상도 관측위성의 지향성능 향상을 통한 영상품질 확보를 위해 이러한 주요 진동원들에 대한 진동특성 분석 및 탑재장비로부터 발생하는 미소진동이 주요 임무장비로 전달이 되지 않도록 절연이 요구된다[1-2].

특히, X-band 안테나는 저궤도 관측위성의 임무장비가 촬영한 실시간 영상데이터를 효율적으로 지상국에 전송하기 위해 사용되는데, 궤도운동과 무관하게 지상안테나를 지향하도록 하기 위해서 X-band 안테나를 2축 짐벌(Gimbal)에 장착하여 위성의 위치 및 자세와 연동토록 하였다. 2축 짐벌형 X-band 안테나는 위성의 자세각과 안테나의 지향각에 따라 방위각(Azimuth) 축과 고각(Elevation) 축이 동시에 회전 구동이 가능하며, 구동장치로는 주로 스텝핑 모터(Stepping Motor)가 사용되는데 이러한 스텝핑 모터의 사용은 불연속적인 진동특성을 발생시키는 원인이 된다. 또한 기어간의 부정확한 맞물림으로부터 발생되는 미소진동성분과 위성체 구조의 간섭으로 인해 고해상도 관측위성의 영상 품질을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 X-band 안테나로부터 발생되는 미소진동크기를 저감시키기 위해 더 정밀한 구동모터와 기어가 요구되지만 제한적일 수밖에 없다[3].

Kozilek el al. [4]은 안테나 방위각 방향 구동에 따른 미소진동 저감을 목적으로 기어의 회전방향 강성이 비교적 낮은 블레이드 기어를 적용하여 미소진동 저감 성능을 검증하였으나, 고각방향 구동 시 발생하는 진동 저감에는 효과적일 수 없는 한계가 존재한다.

본 논문에서는 X-band 안테나의 고각과 방위각 구동 시 발생하는 미소진동 절연을 위해, 축방향에 비해 안테나의 방위각 구동방향과 일치하는 회전방향의 강성이 비교적 낮은 특성을 갖도록 기존의 의탄성 SMA 메쉬와셔[5]의 지지부를 변경하여 적용한 진동 절연기를 제안하였으며, 이에 대한 기본 특성을 파악하기 위해 SMA 메쉬와셔 자체 및 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기 레벨에서의 정하중 시험을 실시하였다. 또한 상기의 시험결과와

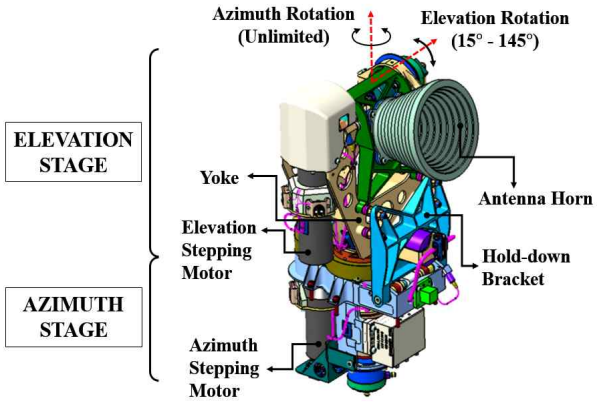

Fig. 1. X-band Antenna Configuration (ref. GIST)

동 절연기 형상을 바탕으로 SMA 메쉬와셔를 적용한 수학적 등가모델을 제안하였다. 또한 진동 절연기와 결합된 X-band 안테나의 미소진동 시험을 통해 설계가 의도한대로 X-band 안테나로부터의 미소진동이 효과적으로 저감됨을 확인하였다.

Ⅱ. X-band 안테나의 미소진동 저감용 진동절연 시스템

2.1 X-band 안테나의 개요

일반적으로 X-band 안테나는 2축 짐발 시스템으로 이루어진 지향 조정 장치에 의해 구동되며, 위성의 자세각과 안테나의 지향각에 따라 방위각 축과 고각 축으로 동시에 회전 구동이 가능하도록 구성되어있다. Fig. 1은 2축 짐발 시스템을 갖는 X-band 안테나의 규격과 형상을 나타내었으며, 크게 Azimuth Stage와 Elevation Stage로 구성된다. 이 때 각 Stage는 스텝핑 모터에 의해 회전구동이 가능하며, Azimuth 회전축은 회전영역에 제한이 없고 Elevation 회전축은 15° ~145° 의 제한된 회전영역 안에서만 구동된다. 이를 구동하기 위해 사용된 구동장치는 2상 스텝핑 모터(Phytron Company, ZSS 43.200.06.-HD)로 1회전당 200스텝(1스텝 당 1.8°)을 갖는다. 또한 Azimuth와 Elevation의 회전축은 각각 1:1.6 기어비를 갖는 스퍼(Spur) 기어와 베벨(Bevel) 기어를 통해 구동 축 변환이 이루어진다. 하지만 스텝핑 모터와 부정확한 맞물림 기어의 사용은 불연속적인 진동 특성을 발생시키는 원인이며, 이때 발생하는 미소진동이 주요 임무장비에 전달되지 않도록 별도의 절연시스템 설계가 요구된다.

2.2 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기

X-band 안테나 구동 시 발생되는 미소진동의 절연을 위해 Fig. 2와 같이 의탄성 특성을 갖는 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기를 제안하였다. SMA의 의탄성 거동은 부하-제하 과정에서 상변화 현상에 의해 소성변형 없이 15%에 가까운 큰 변형률이 유발되며, 하중을 제거하게 되면 잔류응력 없이 원래의 형태로 회복하는 특징을 갖는다. 또한 변형과정에서 SMA 소재자체의 댐핑 특성 및 메쉬 와셔간의 마찰로 인한 에너지 소산으로 절연특성이 뛰어난 특성을 갖는다. Fig. 2의 본 연구에서 적용한 SMA 메쉬와셔는 외경, 내경, 높이는 각각 16mm, 8mm, 5mm이다. SMA 메쉬와셔 제작에 사용된 와이어의 직경은 0.2mm이며 SMA의 의탄성 효과를 이용하기 위해 A_f(Austenite Finish Temperature)가 상온과 비슷한 NDC(Nitinol Devices & Components) 사의 SE508 와이어 소재가 적용되었다[5].

Figure 3은 X-band 안테나의 고각과 방위각 구동 시 발생하는 미소진동 절연을 목적으로 제안된 진동 절연기의 형상을 나타낸다. 기존에는 SMA 메쉬와셔를 구조물과 탑재장비 사이에 배치하여 주로 축 방향에 대한 진동 및 충격성분을 저감하기 위해 개발되었으나, 본 연구에서는 기존 와셔의 배치방식과 달리하여 전 방향에 대한 진동 절연이 가능하도록 새로운 적용방식의 진동 절연기를 제안하였다. SMA 메쉬 와셔를 적용한 진동 절연기는 SMA 메쉬 와셔를 끼움 결합할 수 있도록 접속홈이 구비되어 있는 상하부 지지대로 구성되어 있으며, SMA 메쉬와셔가 상기의 상하부 접속홈에 삽입되었을 때 움직임을 구속할 수 있도록 별도의 구속 브래킷을 마련하여 SMA 메쉬와셔의 중공부 상하부 표면을 가압하여 상하부 지지대와 체결하였다. 이렇게 구성된 진동 절연기의 하단부는 구조물에 체결이 되고 진동 절연기의 상단부에는 진동절연대상체인 탑재 장비를 배치하여 체결류를 통해 체결된다. SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기는 축 방향에 비해 안테나의 방위각 구동방향과 일치하는 회전방향의 강성이 비교적 낮은 특성을 가지며, 적절한 배치방향에 따라 발사환경 및 궤도미소진동 환경에 동시적용 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 2. Configuration of Pseudoelastic SMA Mesh Washer[5]

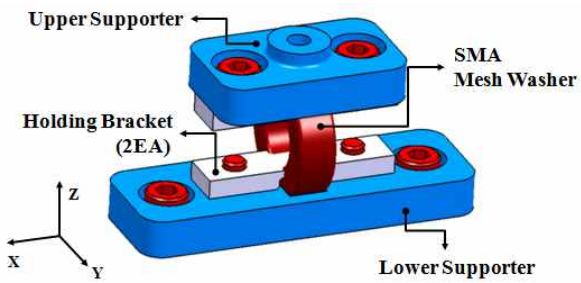

Fig. 3. Configuration of the Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

2.2.1 SMA 메쉬와셔 기본특성시험

전장품 등 주요 구성품의 진동절연을 목적으로 적용된 SMA 메쉬와셔[5] 자체의 두께방향에 대한 기본특성 파악을 위해 정하중시험을 실시하였으며, Fig. 4에 정하중 시험구성을 나타낸다. SMA 메쉬와셔의 정하중 시험은 인장시험기의 치구사이에 SMA 메쉬와셔를 배치하여 압축변위를 가한 후 하중을 제거하는 방식으로 압축 변위를 증가하면서 하중 부하-제하를 반복 실시하였다. 이에 대한 압축 변위(d)-하중(p) 시험결과를 Fig. 5에 나타내었다.

SMA 메쉬와셔에 압축 변위가 가해질 때 초기에는 국부 와이어의 변형에 의해 와이어 사이에 공간이 채워지면서 작은 하중으로도 변형이 발생하지만 공간이 어느 정도 채워진 후에는 대부분의 와이어에 응력이 작용하여 더 큰 하중이 요구된다. 또한 하중 부하-제하 시에 이력 하중 곡선 선도로 나타나는데, 이는 SMA 와이어 소재 자체의 상변화 현상이 유발되는 의탄성 효과에 의한

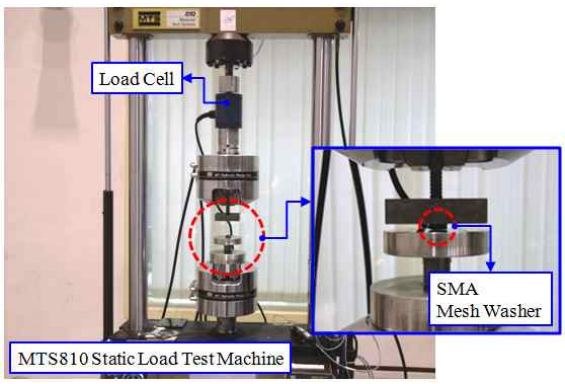

Fig. 4. Configuration of SMA Mesh Washer Static Load Test

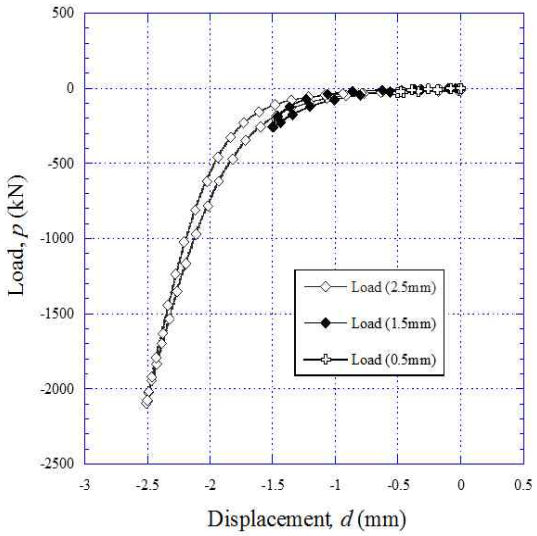

Fig. 5. Displacement-Load Relation of SMA Mesh Wahser

에너지 소산이 주도적으로 발생하기 때문이며, 2.5mm의 큰 압축변위에서도 소성변형 없이 원래의 형상으로 복원되는 특징이 나타난다. 이 때 SMA 메쉬와셔의 압축 변위(d)-하중(p) 선도는 비선형적 이력곡선 특성을 가지며, 이력 하중 곡선의 내부면적이 클수록 에너지 소산능력이 뛰어남을 의미하고, 이는 절연계로서 뛰어난 절연능력을 보유함을 의미한다.

2.2.2 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기 기본특성시험

Figure 5의 SMA 메쉬와셔 자체의 특성파악을 위해 실시된 정하중 시험과 달리 본 논문에서 제안한 SMA 메쉬와셔 진동 절연기의 Z축 방향 기본특성을 측정하기 위해 정하중 시험을 수행하였으며, 이에 대한 시험구성을 Fig. 6에 나타내었다. 진동 절연기를 배치하여 구속시킨 후 일정한

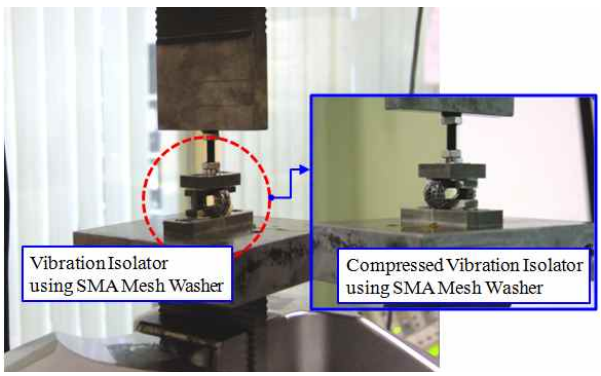

Fig. 6. Extension-Contraction Loading Test of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

변위조건에서의 인장-압축을 3회 반복하여 시험을 수행하였다. Fig. 7과 8은 이로부터 얻어진 시험결과이며, 각각 인가변위에 따른 변위(d)-하중(p) 선도, 시간(t)-하중(p) 선도를 나타낸다. Fig. 7의 d-p 선도에서는 인가 변위에 따라 다소 비선형적 특성이 존재하지만, Fig. 5의 특성과 달리 인가변위증가에 따른 강성변화가 크지 않음을 알 수 있다. 또한, Fig. 8의 t-p 선도에서는 인가변위 중단 직후 작용하중이 지수적으로 감소하는 것으로부터 진동절연기에 댐핑 특성이 존재함을 알 수 있다.

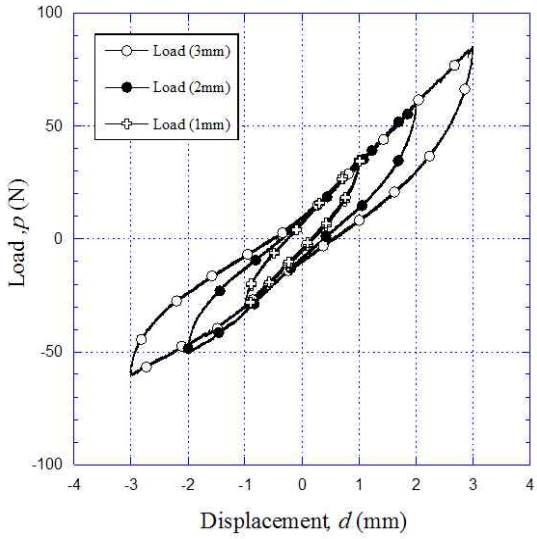

Fig. 7. Displacement-Load Relation of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

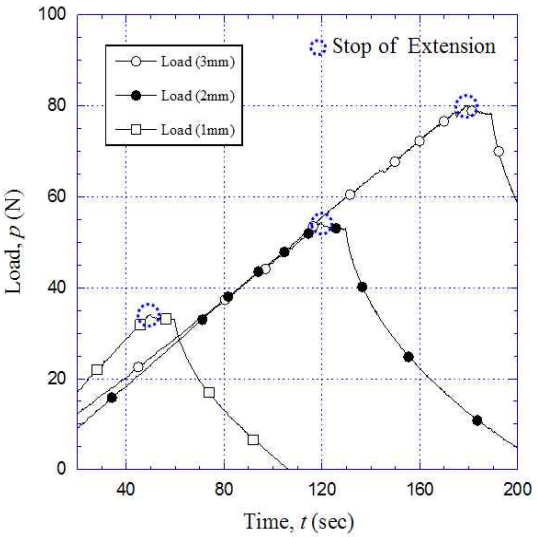

Fig. 8. Time-Load Relation of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

상기의 정하중 시험결과로부터 SMA 메쉬와셔의 배치방향에 따라 서로 다른 진동절연 특성구현이 가능함을 알 수 있다. SMA 메쉬와셔를 두께방향으로 배치할 경우 진동절연 방향이 제한적이나 초기압축변위 조건에 따라 메쉬와셔 자체의 강성이 크게 가변되는 특성을 이용한 가변 진동절연계[6]로서의 적용에 용이하다. 한편, 본 논문에서 제안한 방법과 같이 SMA 메쉬와셔를 원주방향으로 배치할 경우, 초기 인가 압축변위의 크기에 따른 강성이 비교적 일정하여 진동절연계의 설계가 용이하며, 회전방향 등 다축에 대한 진동절연이 가능하여 절연기의 최적화 배치에 따라서는 발사환경 및 궤도 미소진동환경 등 다양한 진동절연에 적용 가능할 것으로 판단된다.

2.2.3 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기 수학적 등가모델

상기에서 수행된 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기의 기본특성 시험과 구조형상을 바탕으로 2개의 스프링 요소 k_1, k_2와 점성 감쇠요소 c로 구성된 진동 절연기의 등가모델을 Fig. 9에 나타내었다. 스프링요소 k_1은 진동 절연기에 결합된 SMA 메쉬와셔를 구성하는 와이어 자체의 강성이며, k_2와 c는 각각 진동절연기의 축 방향에 대한 강성과 점성 감쇠요소를 나타낸다.

여기서, 수학적 등가모델에 사용된 k_1, k_2 그리고 c의 값을 추정하기에 앞서 본 진동 절연기의 경우 변위인가가 증가함에 따라 Fig. 7의 이력곡선이 비선형적 경향을 나타내고 있어 해석의 용이성을 위해 가장 선형적인 특성을 갖는 1mm 변위에서의 정하중 시험결과를 바탕으로 하였다. 따라서 절연기의 강성치 k_2는 k_1과 1mm 변위에서의 변위(d)-하중(p) 기울기 $k_1k_2/(k_1+k_2)$로부터 산출이 가능하지만 본 진동 절연기의 모델에서 k_1과 c의 값을 알 수 없으므로 Fig. 7과 8의 실험결과와 실험데이터를 통한 시뮬레이션결과의 곡선접합(Curve Fitting)으로부터 추정하였다.

Figure 9의 수학적 등가모델에서 하중관계식은

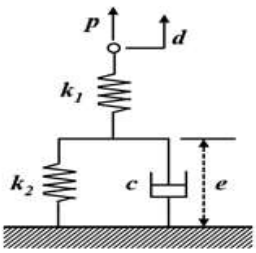

Fig. 9. Numerical Equivalent Model of Vibration Isolator using SMA Mesh Washer

$$p = c\dot{e} + k_2 e \tag{1}$$

이며, e는 점성 감쇠요소의 변위 그리고 p는 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기에 인가된 하중을 의미한다. 점성 감쇠요소의 변위 e는

$$e = d - p/k_1 \tag{2}$$

로 나타낼 수 있으며, d는 진동 절연기에 인가된 변위이다. 식 (1)과 (2)로부터 하중이력 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{p} = k_1\dot{d} + \frac{k_1k_2}{c}d - \frac{(k_1+k_2)}{c}p \tag{3}$$

이 때 스프링 요소 k_1과 점성 감쇠요소 c는 다음과 같은 평가지표가 최소가 되도록 하여 도출된다.

$$J(k_1, c) = Min[\sum_{i=0}^{t}(\overline{p_i} - p_i)^2] \tag{4}$$

식 (4)의 $\overline{p_i}$는 정하중 시험으로부터의 측정치인 d를 통해 식 (3)에서 도출된 하중이며, p_i는 정하중 시험으로부터 측정된 하중을 나타낸다. 여기서, i는 측정 데이터 개수를 의미한다. 상기의 식으로부터 산출된 k_1과 c는 각각 58N/mm, 1209Nsec/mm이며, Fig. 7의 d-p 선도의 기울기 $k_1k_2/(k_1+k_2)$로부터 산출된 k_2는 44N/mm이다.

Figure 10은 상기에서 추정된 수치 해로부터 산출된 수치 해석치 $\overline{p_i}$와 실제 측정치인 p_i를 비교한 그래프로, 실제 측정치가 다소 비선형적인

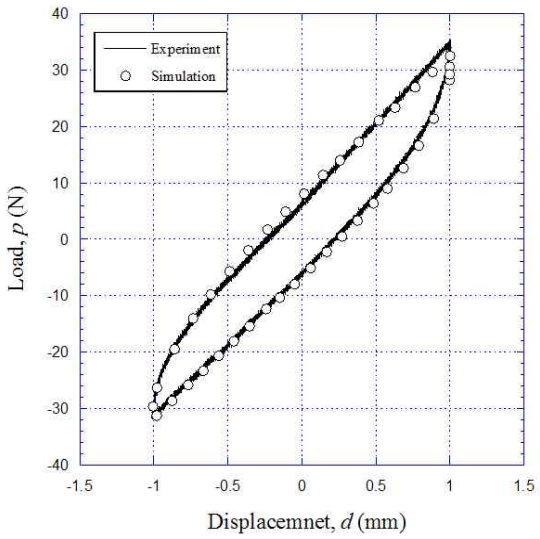

Fig. 10. Comparison of Measured Data with the Simulated Data from the Equivalent Model and Estimated Values

Table 1. Stiffness of Vibration Isolator in Z-axis

Stiffness	Value
k_z	44 N/mm
k_θ	67.9 Nmm/rad

특성이 있어 수치 해석치와의 곡선접합이 완벽하게 부합하지 않으나 경향을 잘 모사하고 있어 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔 진동절연기의 수학적 모델의 타당성을 입증하였다.

아울러 SMA 메쉬와셔 진동 절연기는 축 방향과 함께 회전 방향에 대한 미소진동 저감을 목적으로 설계되었기 때문에 추가적인 시험을 통해 진동 절연기의 회전강성을 산출하였으며 Table 1에 정리하였다. 이로부터 본 논문에서 제안한 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동절연기는 설계가 의도한 대로 Z축 방향의 강성(k_z)에 비해 안테나의 방위각 구동방향과 일치하는 회전방향의 강성(k_θ)이 비교적 낮은 특성 구현이 가능함을 알 수 있다.

2.3 X-band 안테나의 미소진동 절연시험

본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔 진동 절연기를 X-band 안테나에 결합하였을 때, X-band 안테나 구동 시 발생하는 미소진동 특성을 확인하기 위해 미소진동 절연시험을 수행하였다. Fig. 11은 SMA 메쉬와셔 진동 절연기와 결합된 X-band 안테나의 미소진동 시험을 위한 시험 셋업 형상을 나타내며, KISTLER Platform 위에 X-band 안테나를 장착하였다. 진동 절연기(4EA)는 I/F Bracket과 X-band 안테나 사이에 배치되었으며, 이에 대한 절연성능을 확인하기 위해 진동 절연기의 장착 유무에 따른 X-band 안테나의 미소진동 시험을 수행하였다.

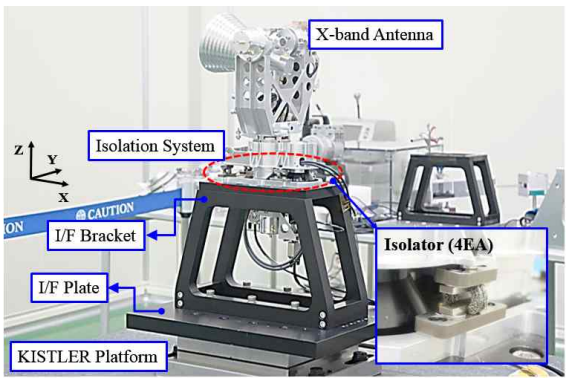

Fig. 11. Configuration of Miciro-vibration Isolation Test Set-up (ref. GIST)

이 연구에서 수행된 X-band 안테나의 미소진동시험은 Fig. 12와 같이 TPF(Azimuth High) 구동프로파일을 따라 방위각과 고각이 동시에 구동되며, 이로부터 KISTLER Platform을 통해 측정

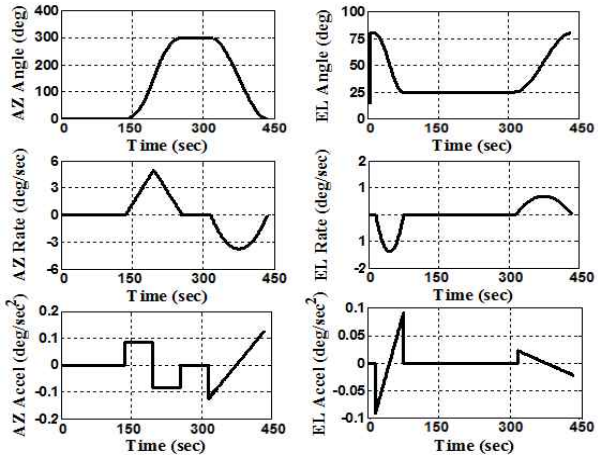

Fig. 12. Stepping Motor Driving Profiles (TPF)

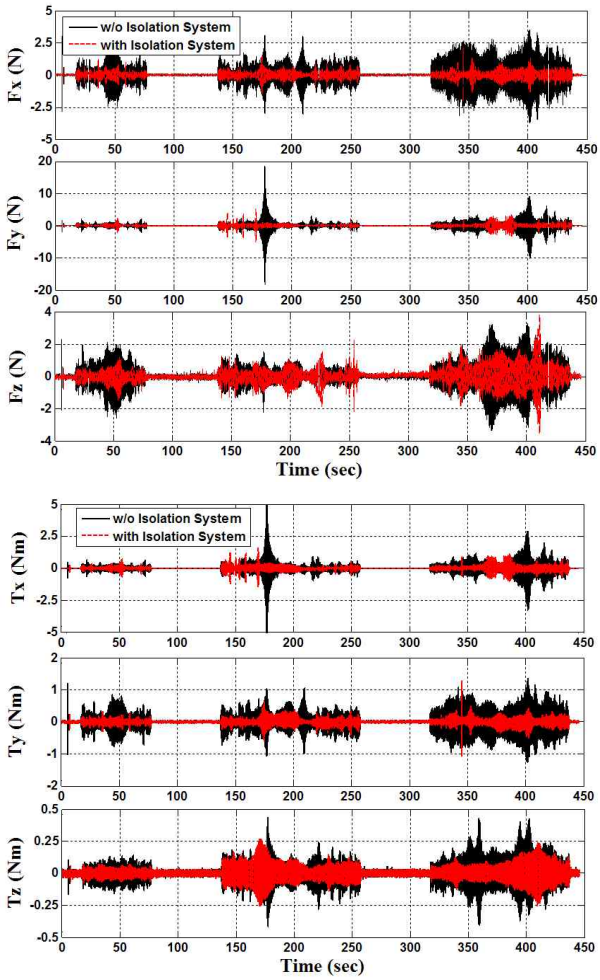

Fig. 13. Results of Micro-vibration Test

Table 2. Disturbance reduction ratio of w/o and with Isolation System

	Peak Reduction (%)		STD Deviation Reduction (%)
	Max	Mean	
F_X	40.08	70.64	52.79
F_Y	70.68	58.56	65.50
F_Z	-16.99	26.46	28.69
T_X	69.70	56.11	63.93
T_Y	4.85	61.75	63.03
T_Z	36.32	26.91	28.46

된 미소진동 절연시험 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13은 SMA 메쉬와셔 진동 절연기의 장착여부에 따른 각 축별 외란력과 토크를 나타내었으며, 시험 결과를 보시다시피 본 연구에서 제안한 진동 절연기를 적용하였을 때 미소진동 크기가 전반적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 SMA 메쉬와셔 진동 절연기와 결합된 X-band 안테나의 미소진동 절연성능을 더 세부적인 분석을 위해 각 축별 피크(Peak) 감소율과 표준편자(Standard Deviation) 감소율을 분석하였으며, Table 2에 정리하였다. 우선 외란력에 대한 피크 감소율을 보면 최대 피크에 대한 감소율이 가장 큰 방향은 Y방향이며, 평균 감소율의 경우에는 X방향이 70.64%로 가장 감소율이 좋은 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 토크의 경우 X방향에서 최대 피크 감소율이 69.70%로 가장 큰 감소율을 보이며, 평균 감소율의 경우 Y방향이 61.75%로 좋은 감소율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 표준편차 감소율의 경우 외란력, 토크 모두 X, Y방향이 Z방향에 비해 약 2배 이상의 감소율을 보임을 확인할 수 있다. 이로부터 본 연구에서 제안한 진동 절연기가 축 방향에 비해 회전 방향에 대한 강성이 낮아 X-band 안테나의 고각보다 방위각에 대한 미소진동 성분을 좀 더 효과적으로 절연할 수 있음을 알 수 있으나, 전 방향에 대한 미소진동성분이 절연되는 것을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 X-band 안테나 고각과 방위각 구동 시 발생하는 미소진동 절연을 위해, 축 방향에 비해 안테나의 방위각 구동방향과 일치하는 회전방향의 강성이 비교적 낮은 특성을 갖는 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기를 제안하였다. 또한 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동 절연기의 설계유효성을 검증하기 위해 정하중 시험으로부터 진동 절연기의 기본 특성을 확인하였으며, 정하중 시험 결과와 구조형상을 토대로 본 연구에서 제안한 진동 절연기의 수학적 모델을 도출하였다. 또한 수학적 모델로부터 산출한 수치 해와 실험 측정치를 곡선접합 해봄으로써 수학적 모델에 대한 타당성을 입증하였다. 또한 SMA 메쉬와셔를 적용한 진동절연기의 장착여부에 따른 X-band 안테나의 미소진동 절연시험을 통해 설계가 의도된대로 진동 절연기 적용 시 미소진동 크기가 효과적으로 저감됨을 확인하였다.

향후 SMA 메쉬와셔 진동절연기의 전 방향에 대한 강성을 측정하고, 이로부터 미소진동 외에 발사환경에서도 진동절연 구현이 가능하도록 진동 절연기의 방향, 위치 그리고 개수를 고려한 최적화 배치를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2013년 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 광주과학기술원 수탁으로 김용훈, 김태홍과 공동으로 수행한 연구결과입니다(NRF-2012M1A3A3A03033597).

References

1) J. S. Park and K. H. Yang, “Trends of the Vibration Isolation System for Spacecrafts“, *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 8, No. 2, 2010, pp. 54～64.

2) D. K. Kim, S. H. Oh, H. B. Kim, W. B. Lee and K. L. Yong, “Micro-vibration Test of X-band Antenna with Two-axis Gimbal System”, *Proceedings of the KSAS Annual Autumn Conference*, 2010, No. 11, pp. 927～930.

3) S. G. Lee, J. T. Lee, E. S. Kang and S. S. Yong, “Technical Trends of X-band Antenna Space Program“, *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace“, roceedings of the KSAS Annual Autumn Conference*, 2013, Vol. 11, No. 2, pp. 81～89.

4) H. Kozilek. B. Specht, S. S. Yong and S. G. Lee, “Micro Vibration Improvement of a Stepper Actuated Mechanism“, *European Space Agency*, No. 718, 2013.

5) S. H. Youn, Y. S. Jang and J. H. Han, "Compressed Mesh Washer Isolators using the

Pseudoelasticity of SMA for Pyroshock Attenuation", *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 21. No. 4, 2010, pp. 407～421.

6) H. K. Jeong, J. H. Han, S. H. Youn and 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.