

## 스텝모터 구동형 짐벌 안테나의 미소진동저감을 위한 초탄성 형상기억합금 메쉬 와셔 기어의 기본특성 분석

박연혁<sup>1</sup> · 유창목<sup>2</sup> · 오현웅<sup>†</sup>

<sup>1,†</sup>조선대학교 항공우주공학과 우주기술융합연구소

<sup>2</sup>극동통신(주) 기계부서

### Characteristics Analysis of a Pseudoelastic SMA Mesh Washer Gear for Jitter Attenuation of Stepper-actuated Gimbal-type Antennas

Yeon-Hyeok Park<sup>1</sup>, Chang-Mok You<sup>2</sup> and Hyun-Ung Oh

<sup>1,†</sup>Department of Aerospace Engineering, Chosun University

<sup>2</sup>Kukdong Telecommunication

#### Abstract

A two-axis gimbal-type X-band antenna is widely used to transmit bulk image data from high-resolution observation satellites. However, undesirable microvibrations induced by driving the antenna should be attenuated, because they are a main cause of image-quality degradation of the observation satellite. In this study, a pseudoelastic memory alloy (SMA) gear was proposed to attenuate the microvibrations by driving the antenna in an azimuth angle. In addition, the proposed gear can overcome the limitations of the conventional titanium blade gear, which is not still enough and is vulnerable to plastic deformations under excessive torque. To investigate the basic characteristics of the proposed SMA mesh washer gear, a static load test was performed on the thickness of the SMA mesh washer and the rotation of the gear. Moreover, The microvibration measurement test demonstrated that the SMA mesh washer gear proposed in this study is effective for microvibration attenuation.

#### 초 록

고해상도 관측위성의 대용량 영상 데이터 송신용인 2축 짐벌식 X-밴드 안테나는 궤도 임무수행 중 안테나 구동에 따라 미소진동을 유발하며, 이는 관측위성의 영상 품질을 저하시키는 요인 중 하나이기 때문에 반드시 절연되어야 할 대상이다. 본 논문에서는 상기 X-밴드 안테나의 방위각 구동에 따른 미소진동절연과 동시에 기존에 제안된 티타늄 블레이드 기어가 소성변형에 취약한 문제점을 보완하기 위해 초탄성 형상기억합금 (SMA)을 활용한 메쉬 와셔 기어를 제안하였다. 상기 SMA 메쉬 와셔 기어의 기본 특성을 파악하기 위해 SMA 메쉬 와셔 두께방향 정하중 시험과 SMA 메쉬 와셔 기어 수준의 회전방향 정하중 시험을 실시하였다. 아울러 안테나 조립체 수준의 미소진동 측정시험을 통해 제안된 SMA 메쉬 와셔 기어의 진동절연이 효과적임을 입증하였다.

**Key Words :** Two-axis Gimbal-type X-band Antenna (2축 짐벌식 X-밴드 안테나), Shape Memory Alloy (형상기억합금), Pseudoelasticity (초탄성), Micro-vibration (미소진동)

## 1. 서 론

고해상도 관측위성의 궤도 임무수행 중 획득된 대용량 영상 데이터를 지상국으로 데이터 누락 없이 전송하기 위해 2축 짐벌식 X-밴드 안테나를 사용한다. 상기 X-밴드 안테나는 빔 폭이 좁고 상대적으로 높은 안테나이득을 갖는 지향성 안테나로, 이를 2축 짐벌식 지향 장치에 장착함으로써 위성의 자세 및 궤도 운동과는 무관하게 지상국을

실시간 지향하여 대용량의 영상 데이터를 지상국으로 송신할 수 있도록 한다. 2축 짐벌식 지향 장치에 장착되는 안테나는 각 축의 회전에 사용되는 스텝 모터의 구동에 따른 외란 및 부정확한 기어 간의 맞물림, 안테나의 동적 불균형 등으로 미소진동이 발생한다. 안테나 구동에 따라 발생하는 미소진동은 그 크기가 극히 미소하지만 위성의 주요 탑재체로 전달되면 카메라의 시선 각을 교란시켜 고해상도 관측위성의 영상품질의 저하를 야기한다[1-3]. 한편 상기의 문제점을 극복하기 위해 Kozilek et al.[4]은 X-밴드 안테나의 방위각 회전 구동 시 발생하는 미소진동절연을 위한 티타늄 블레이드 기어를 제안하였다. 제안된 티타늄 블레이드 기어는 네 개의 블레이드 형상으로 저 회전 강성을 구현하여 미소진동절연 성능을 확보한다. 하지만 안테나 조립과정과 발사진동 및 궤도 열 환경에서 기어의 축정렬이 틀어짐에 따라 설계요구 규격을 상회하는 토크 인가 시 블레이드 기어 자체에 소성변형이 일어나는 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 상기의 문제점을 보완하기 위해 형상기억합금 (Shape Memory Alloy, SMA)의 초탄성 특성에 주목하였다. 초탄성 특성이란 초기 설정한 특정온도인 오스테나이트 종료온도 (Austenite Finish Temperature,  $A_f$ ) 이상의 온도에서 하중이 가해질 시 큰 변형이 발생하더라도 하중을 제하 시 본래의 형상으로 복원되는 특성을 말한다[5]. 상기의 초탄성 특성을 가지는 형상기억합금을 우주 분야에 적용한 선행 연구로써 Youn et al.[6]은 파이프 충격 절연을 위해 초탄성 형상기억합금 와이어의 직조된 메쉬 와셔 절연계를 제안 하였으며, 파이프 충격 및 랜덤진동 시험을 수행하여 형상기억합금 메쉬 와셔 절연계의 설계 유효성을 입증 하였다. 또한 Jeong et al.[7]은 파이프 충격 저감 및 저주파 진동 증폭 방지 효과를 얻기 위해 초탄성 형상기억합금 메쉬 와셔 및 SMA 와이어 액츄에이터를 이용한 주파수 가변형 충격 절연기를 제안하였으며, 충격환경에서는 저주파 특성으로 가변 하여 주파수 분리에 기인한 고주파 충격저감 성능 보장이 가능하고, 100Hz 미만의 정현파 환경에서는 절연기의 주파수를 100Hz 이상으로 가변시켜 저주파에서의 진동 증폭 방지가 가능함을 실험적으로 입증하였다. 상기의 예처럼 형상기억합금의 초탄성 효과는 다양한 연구에서 진동절연계로서의 응용이 이루어진다.

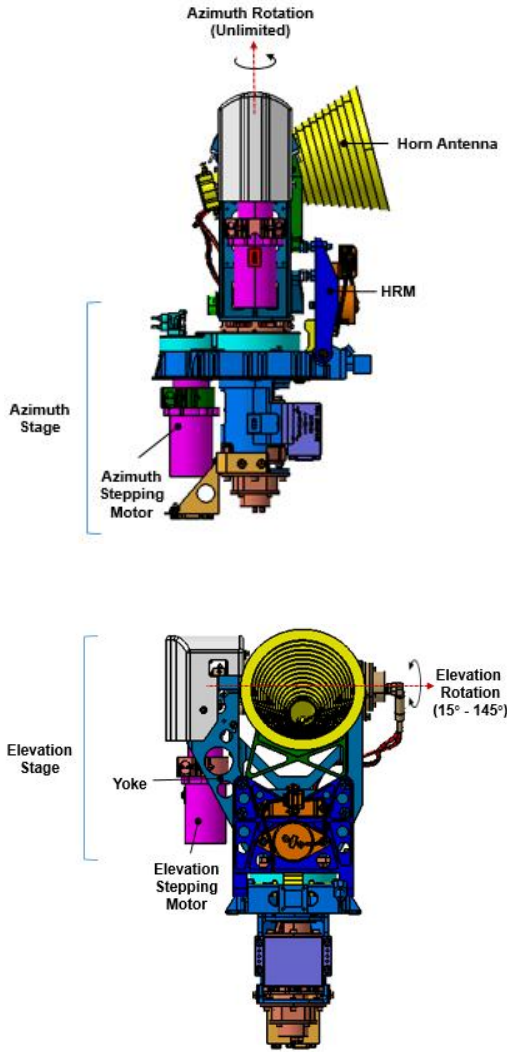
본 논문에서는 Kozilek et al.[4]이 제안한 티타늄 블레

이드 기어에 과도한 토크 인가 시 소성변형 문제를 보완하기 위해 전술한 초탄성 특성을 적용한 SMA 메쉬 와셔 기어를 제안하였다. 상기 기어는 설계 요구규격을 상회하는 과도한 토크 인가 시에도 형상기억합금의 초탄성 특성으로 소성변형 없이 본래의 형상으로 복원이 가능하며, 동시에 저 회전강성 구현을 통해 X-밴드 안테나 구동에 따른 미소진동절연 성능을 가진다. 따라서 X-밴드 안테나에 상기 SMA 메쉬 와셔 기어의 적용 타당성을 검토하기 위해 SMA 메쉬 와셔 두께방향 정하중 시험 및 SMA 메쉬 와셔 기어 수준의 회전방향 정하중 시험을 통하여 SMA 메쉬 와셔를 구성하고 있는 직조된 SMA 와이어의 조밀도에 따른 기본특성을 측정하였다. 또한 지상시험 및 궤도운용 시 발생하는 피로관점에서의 열화현상을 검토하기 위해 가속 수명시험을 실시하였다. 아울러 안테나 조립체의 미소진동 측정시험을 수행하여 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬 와셔 기어의 미소진동절연 성능을 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 X-밴드 안테나의 개요

Figure 1 (a), (b)는 고해상도 관측위성으로부터 획득된 대용량 영상 데이터를 지상국으로 송신하기 위해 사용되는 2축 짐벌식 X-밴드 안테나의 형상을 나타낸다[1]. X-밴드 안테나의 무게는 총 11kg으로 2축 짐벌식 지향 조정 장치에 장착됨으로써 지상국을 실시간으로 지향 할 수 있도록 하였다. 2축 짐벌식 X-밴드 안테나는 크게 방위각 단과 고각 단으로 구성되어 있으며 위성의 자세각과 안테나 지향각에 따라 방위각 축과 고각 축으로 동시에 회전구동이 가능하다. 안테나의 방위각 축은 스텝 모터 구동에 의해 요크 (yoke) 조립체가 회전각도의 제한 없이 360°로 이루어지며, 고각 축은 15° ~ 145°범위 내에서 혼 안테나의 회전구동이 이루어진다. 방위각 단과 고각 단의 회전 구동을 위해 1회전 당 200스텝을 가지며 1개의 스텝은 8개의 마이크로 스텝으로 구성된 Phyttron사의 2상 스텝핑 모터 (ZSS 43.200.06.-HD) 가 사용되었다. 또한 스텝핑 모터의 출력축은 1:50 기어비의 하모닉 드라이브 기어와 연결되어 있으며 각 구동축의 회전 구동을 위해 1:1.6 기어 비를 갖는 스피어 기어 (Spur Gear)와 베벨 기어 (Bevel Gear)가 적용되었다[3]. 한편, 2축 짐벌식 X-밴드 안테나의 방위각단 회전구동을 위해 요구되는 토크는 참고문헌[8]의 식 (1)로 부터 1.57Nm의 설계 요구토크가 도출된다.



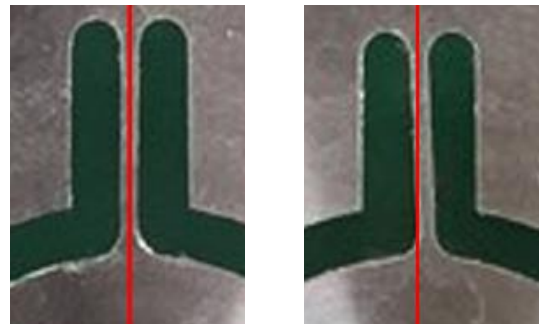
**Fig. 1** Configuration of a Two-axis Gimbal-type X-band Antenna [(a): Side View, (b): Front View]

**2.2 티타늄 블레이드 기어의 문제점**

2축 짐벌식 X-밴드 안테나의 방위각 회전 구동 시 발생하는 미소진동절연을 목적으로 Kozilek et al.[4]은 티타늄 블레이드 기어를 제안하였다. 상기의 기어는 치형이 형성되어 있는 외륜과 모터와 결합되는 내륜 사이를 일정한 간격으로 리브를 형성함으로써 안테나 형상의 설계 수정 없이 간단한 기어 형상 변경으로 낮은 회전강성 구현을 통한 미소진동절연 성능을 확보하였다. 티타늄 블레이드 기어의 설계 요구조건으로, 상기 기어 적용 시 X-밴드 안테나의 1차 고유진동수는 낮은 회전강성에 따라 위성의 주

요 탑재체의 구조모드 주파수와 충분한 주파수 분리가 이루어져야 하며, 안테나의 방위각 방향으로의 회전구동을 위해 전술한 설계 요구토크 1.57Nm에 대한 구조건전성이 확보되어야 한다. 상기 구조건전성 검토를 위해 참고문헌[8]의 식 (2)를 적용하여 안전여유를 도출한 결과 설계 요구토크인 1.57Nm를 상회하는 토크가 인가될 경우 안전여유가 0 이하로 도출되어 구조 건전성 확보 불가로 소성변형이 발생한다.

Figure 2는 상기 소성변형의 대표적인 형상을 나타내며, Fig. 2 (b)는 다음 2.4절에서 티타늄 블레이드 기어의 ±2° 회전각에 대한 회전방향 정하중 시험 결과로 설계요구 토크 보다 과도한 토크가 작용 되어 소성변형이 발생함에 따라 블레이드 위치가 Fig. 2 (a)의 초기 위치와 부합하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 상기의 소성변형은 안테나의 구동을 위한 동력을 정확히 전달할 수 없는 원인이 된다. 이를 극복하기 위해 블레이드의 두께 및 개수 증가로 회전강성을 높이는 방법이 존재하지만 회전강성이 증가함에 따라 미소진동절연 성능은 낮아지게 되는 문제가 야기된다. 따라서 상기 티타늄 블레이드 기어는 X-밴드 안테나 조립과정과 발사진동 및 궤도 열 환경에서 기어의 축 정렬이 틀어짐에 따라 설계요구 토크를 상회하는 토크 인가 시 Fig. 2 (b)와 같이 소성변형이 발생하여 구조 건전성 확보가 불가능한 단점이 존재한다.



**Fig. 2** Titanium Blade Gear Configuration before and after Induced Over-driving Torque [(a): Before, (b): After]

**2.3 초탄성 SMA 메쉬 와셔 기어**

**2.3.1 SMA 메쉬 와셔의 구성 및 형상**

본 논문에서는 기존의 티타늄 블레이드 기어가 갖는 소성변형 문제를 보완하고자 앞서 언급한 형상기억합금의 초탄성 특성에 주목 하였다. 초탄성 특성이란 형상기억합금이 특정온도인 오스테나이트 종료온도 이상의 온도범위에 작동환경 온도를 설정할 경우

하중이 인가됨에 따라 오스테나이트 상으로부터 역쌍정 마르텐사이트로 변태가 일어나며, 이러한 변태는 소성 변형 없이 10%이상의 큰 변형을 가지다 하중을 제하 시에 잔류 응력 없이 본래의 형상으로 복원하는 특징을 가진다[5].

Figure 3은 상기의 초탄성 특성을 가지는 형상기억 합금을 이용한 Ring Type의 SMA 메쉬 와셔를 나타낸다. SMA 메쉬 와셔는 편조 (Knit)된 와이어 메쉬를 특정 금형을 이용하여 압착 공정을 거치면서 제작된 와셔로서 내부의 50~70%가 빈 공간으로 이루어져 있다. 본 논문에서 적용한 형상기억합금의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 지상시험 시 형상기억합금의 초탄성 효과를 이용하기 위해 오스테나이트 종료 온도가 15°C 인 NDC (Nitinol Devices & Components)사의 SE508 와이어 소재가 사용되었으며, SMA 메쉬 와셔의 외경, 내경, 높이는 각각 16mm×8mm×5mm 이다[6].



Fig. 3 Configuration of SMA Mesh Washer[8]

Table 1 Characteristic Values of SMA[9]

Characteristic		Value
Martensite Finish Temperature ( $M_f$ )		-21°C
Martensite Start Temperature ( $M_s$ )		-12°C
Austenite Start Temperature ( $A_s$ )		-5°C
Austenite Finish Temperature ( $A_f$ )		15°C
Young's Modulus	Martensite	75GPa
	Austenite	80GPa
Specific Heat		0.46kJ/(kg·K)
Thermal Conductivity		10W/(m·K)
Tensile Strength		1300MPa
Elongation at Break		45%
Coefficient of Thermal Expansion		10.4um/K
Density		6.45g/cm <sup>3</sup>
Poisson's Ratio ( $\nu$ )		0.33

### 2.3.2 SMA 메쉬 와셔를 적용한 기어

Figure 4 (a), (b)는 SMA 메쉬 와셔 기어의 형상을 나타낸다. 외부 기어와의 접촉을 위해 치형이 형성된 외륜 (Outer Ring)과 모터 축단과 결합되는 내륜 (Inner Ring) 사이를 상기의 초탄성 SMA 메쉬 와셔가 블레이드 타입으로 배치가 되며, 120°간격으로 총 3개의 와셔가 적용되어 있다. 상기의 메쉬 와셔는 기어 구동 시 발생하는 이탈 현상을 막기 위해 각각의 내륜과 외륜 사이의 홈에 끼워맞춤으로 In-plane (x-y plane)을 구속 하였으며, 별도의 커버 (Inner Washer Cover, Outer Washer Cover)를 이용하여 Out-of-plane (z direction)에 대해 구속을 부여하였다.

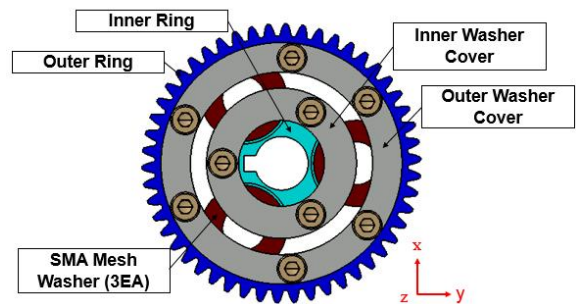
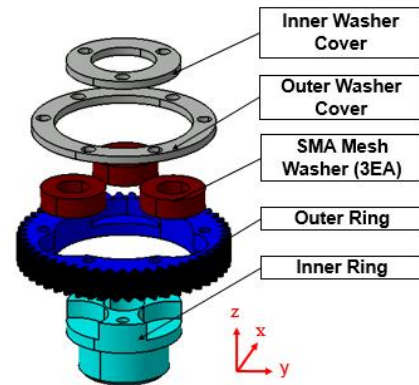


Fig. 4 Configuration of SMA Mesh Washer Gear [(a): Explode View, (b):Assembly View]

### 2.4 두께방향 정하중 시험

Figure 5는 SMA 메쉬 와셔의 기본특성 파악을 위한 두께방향 정하중 시험 구성을 나타내며, 시험을 위해 INSTRON 재료시험기 (MTS, Material Testing

System) 810 유압 시험 장비를 사용하였다. 상기의 시험구성을 활용 시 SMA 메쉬 와셔의 초탄성 특성을 구현하기 위해 시험환경온도를 오스테나이트 종료 온도보다 높은 25℃에서 수행 하였으며, 압축변위 증가에 따른 하중 부하 및 제하를 반복 수행 하였다.

Figure 6은 SMA 메쉬 와셔의 두께방향 압축변위 인가에 따른 변위-하중 선도를 나타낸다. 초기 압축변위 인가 시 SMA 와이어의 국부적인 변형에 의해 와이어 사이의 공간이 채워지며, 작은 하중에도 변형이 발생 하지만 공간이 어느 정도 채워진 후에는 대부분의 와이어에 응력이 작용하여 추가적인 변형을 위해 더 큰 하중이 요구된다. 따라서 압축 변위가 증가 할수록 이에 상응하는 하중은 비선형적인 거동을 보이고 있으며, 히스테리시스 곡선을 보이고 있다. 히스테리시스 곡선은 압축에 따른 하중에 의한 SMA 와이어의 상변화 및 마찰로 인해 유발되며, 내부 면적이 클수록 에너지 소산능력이 우수함을 나타낸다. 또한 2.5mm의 큰 압축변위에도 불구하고 초탄성 특성으로 본래의 현상으로 복원함을 알 수 있다[10].

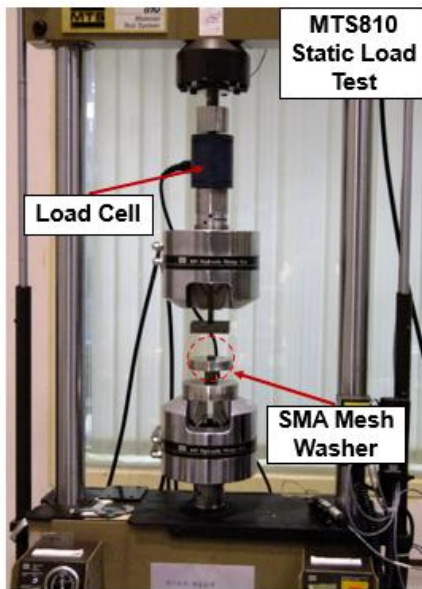


Fig. 5 SMA Mesh Washer Static Load Test Configuration[10]

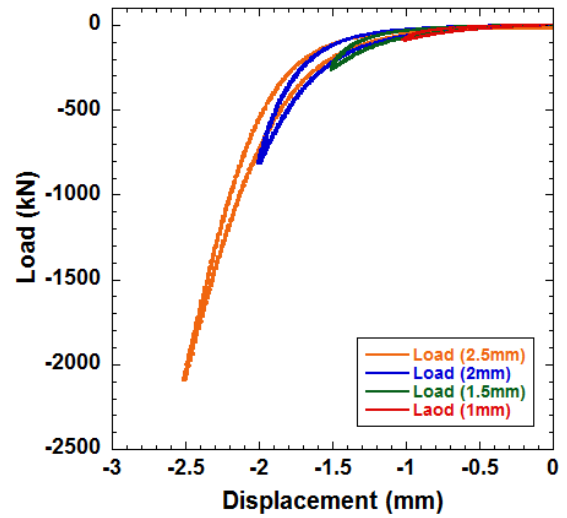


Fig. 6 Displacement-Load Relation of SMA Mesh Washer

## 2.5 회전방향 정하중 시험

앞 절에서 수행한 두께방향의 정하중 시험으로 압축에 따른 SMA 메쉬 와셔의 기본특성을 파악하였으며, 본 절에서는 SMA 메쉬 와셔 기어의 회전방향 정하중 시험으로부터 회전각 인가에 따른 기본특성을 파악하였다. Fig. 7은 SMA 메쉬 와셔 기어의 회전방향 정하중 시험 구성을 나타내며, 토크를 인가하기 위한 스텝 모터 (AZM66AC-HS100, Ina Oriental Motor Co.), 토크 측정을 위한 토크 센서 (TR-5K, TESTA), 측정 시편의 회전각 측정을 위한 엔코더 (I65L10000ZCU100L2, Lika Electronic)로 구성되어 있다. 또한 조립 과정에서 발생하는 축 정렬 오차를 보상하기 위해 별도의 커플링을 적용하였다.

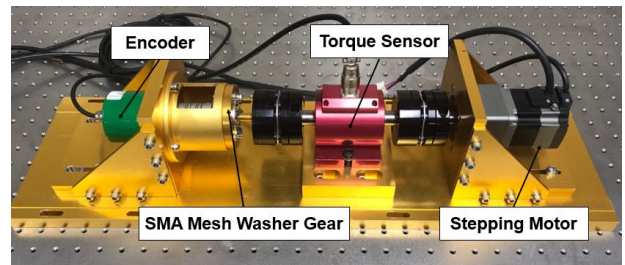
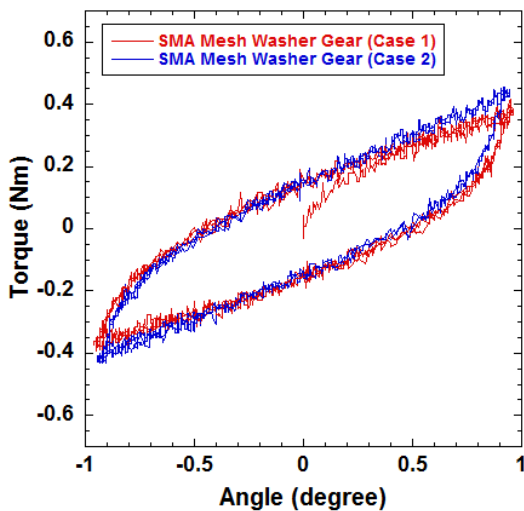


Fig. 7 Rotational Characteristic Test Set-up for SMA Mesh Wash Gear

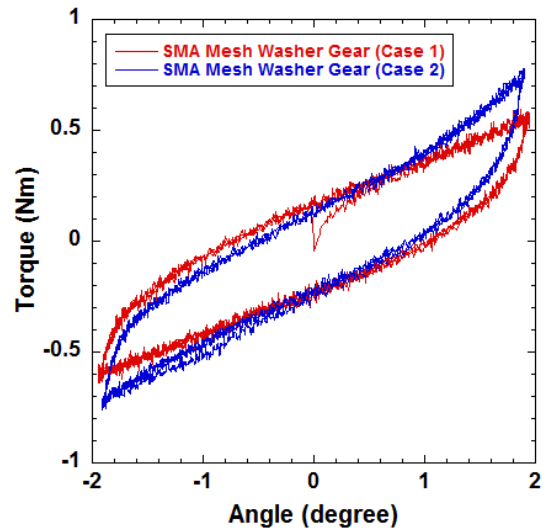
상기의 시험구성을 활용하여 SMA 메쉬 와셔 기어 시험 시

앞 절과 동일하게 형상기억합금의 초탄성 특성을 구현하기 위해 시험환경온도는 25°C 조건에서 수행 하였다. 또한 0.1deg/sec의 속도로  $\pm 1^\circ \sim \pm 11^\circ$  회전각 범위에서 시계 및 반시계 방향으로 재현성 확인을 위해 3회 왕복시험에 대한 회전특성을 측정하였다.

Figures 8 (a)와 (b)는 상기의 시험 구성으로부터 SMA 메쉬 와셔 기어의  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ 의 회전각도 범위를 인가함에 따라 획득된 각도-토크 선도를 각각 나타내며, 동일한 시험 조건에서 SMA 메쉬 와셔를 구성하고 있는 직조된 SMA 와이어의 밀도가 약 2배 조밀한 기어의 정하중 시험 결과와 비교하였다. 이때, 본 논문에서 소개한 SMA 메쉬 와셔의 밀도는  $6.5\text{g}/\text{cm}^3$ 이며[5], 약 2배의 밀도를 갖는 SMA 메쉬 와셔를 비교대상으로 선정하여 각각의 SMA 메쉬 와셔를 Case 1, Case 2로 나타내었다. Fig. 8 (a)는  $\pm 1^\circ$ 의 회전각 인가 시 상기의 두 기어의 선도를 나타내며, 이때 두 선도는 히스테리시스 거동을 보이고 있다. 히스테리시스의 내부 면적은 SMA 메쉬 와셔 기어의 에너지소산 특성을 나타내며, 두 선도의 내부 면적에 큰 차이가 없음을 따라 상기 SMA 와이어의 밀도 차이는 에너지소산 특성에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 곡선의 기울기로 부터 Case 2의 강성은  $20.6\text{Nm}/\text{rad}$ , Case 1의 강성은  $17.7\text{Nm}/\text{rad}$ 으로 Case 2가 밀도 차이에 의해 높은 회전강성을 가짐을 알 수 있다. Fig. 8 (b)는  $\pm 2^\circ$  회전각 인가 시 두 기어의 선도를 나타내며,  $\pm 1^\circ$ 의 결과와 동일하게 히스테리시스 거동을 보이고 있다. 또한 상기의 두 기어는  $\pm 2^\circ$  까지의 회전각에 의해 발생된 토크 범위 안에서 밀도에 상관없이 초탄성 특성에 따라 본래의 형상으로 복원됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison of Hard and Soft SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics [(a):  $\pm 1^\circ$ , (b):  $\pm 2^\circ$ ]

Figures 9 (a)와 (b)는 상기와 동일한 시험구성으로 회전각  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$  인가에 따른 각도-토크 선도로 SMA 메쉬 와셔 기어와 티타늄 블레이드 기어의 결과를 비교 하였다. Fig. 9 (a)의  $\pm 1^\circ$  회전각 인가 시 티타늄 블레이드 기어는 선형탄성 거동을 보이고 있으며, 이는 인가된 회전각에 상응하는 토크범위 내에서 티타늄 블레이드 기어가 탄성구간에 존재함을 나타낸다. 하지만 Fig. 9 (b)의  $\pm 2^\circ$ 의 회전각 인가 시 티타늄 블레이드 기어는 일정각도 이후 곡선의 기울기가 달라지는 비선형 거동을 보이며, 사이클이 누적됨에 따라 초기곡선에 부합되지 않는 것이 관찰된다. 이는 티타늄 블레이드 자체에 발생한 소성변형에 기인한 결과로 스텝핑 모터로부터 정확한 동력 전달이 불가능함을 의미한다. 하지만 Fig. 9 (a), (b)의 SMA 메쉬 와셔 기어는  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$  회전각 범위에서 앞 절의 두께방향 정하중시험에서 언급한 원인에 따라 히스테리시스 곡선이 나타나며 인가된 회전각에 상응하는 토크 범위에서 상기 기어는 초탄성 특성으로 소성변형 없이 본래의 특성을 유지하고 있다.

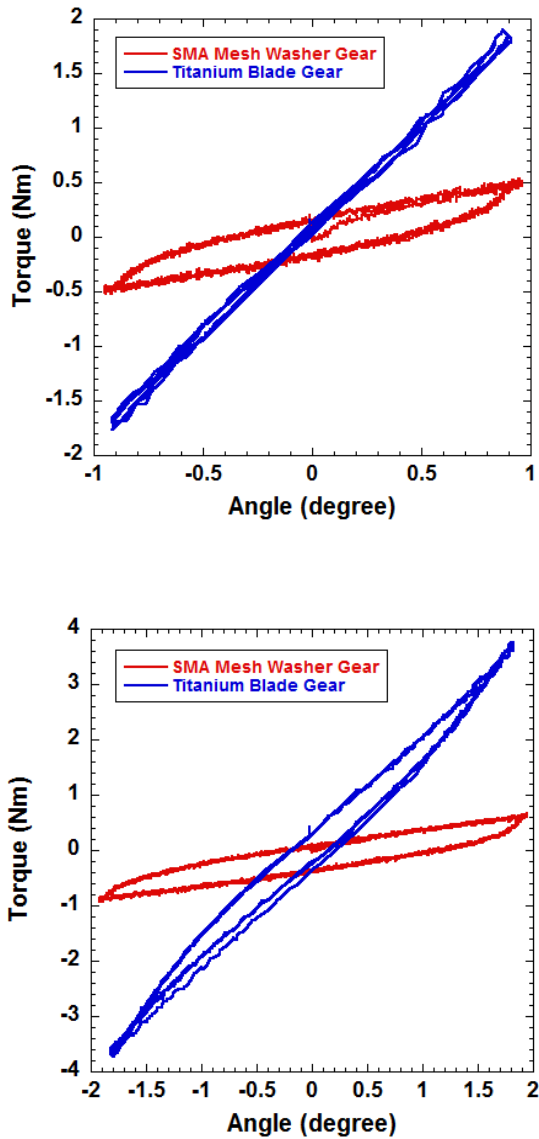


Fig. 9 Titanium and SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics [(a): ±1°, (b): ±2°]

Figure 10은 SMA 메쉬 와셔 기어에 ±5°, ±7°, ±11°까지 회전각을 인가 시 각도-토크 선도를 나타낸다. 상기의 선도는 전술한 히스테리시스 곡선이 나타나며 회전각 증가에 따라 곡선의 기울기가 감소하는 경향으로 부터 회전강성이 감소함을 확인 가능하다. 또한 ±11° 회전각에 따른 설계 요구토크를 상회하는 약 2.8Nm의 토크 작용 시에도 형상기억합금의 초탄성 특성으로 소성변형이 없이 본래의 형상으로 복원하여 안테나 구동을 위한 동력을 정확히 전달 가능함을 유추할

수 있다. 한편 상기 일련의 시험 수행 후 회전각 ±1° 인가 시험을 실시하여 큰 회전각 시험 수행 후에도 SMA 메쉬 와셔 기어의 특성 변화가 없음을 확인하였다.

Figure 11 (a), (b)는 SMA 메쉬 와셔 기어의 ±11° 까지 회전각 인가 전 후의 기어 형상을 나타내며, Fig. 11 (b)처럼 SMA 메쉬 와셔 기어는 과도한 회전각 인가 후에도 어떠한 변형이 관찰되지 않는다.

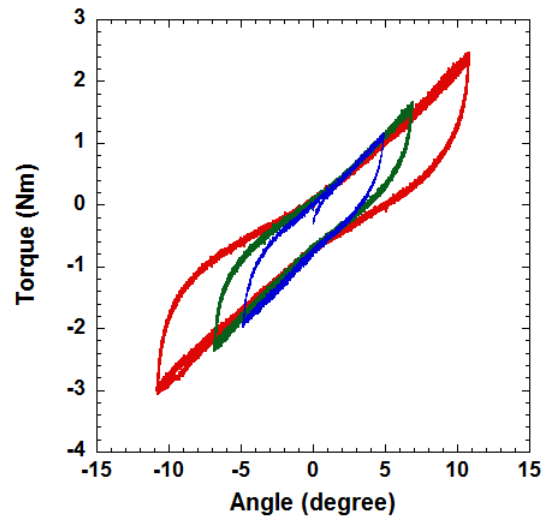


Fig. 10 Rotational Characteristic Test Results for SMA Mesh Washer Gear

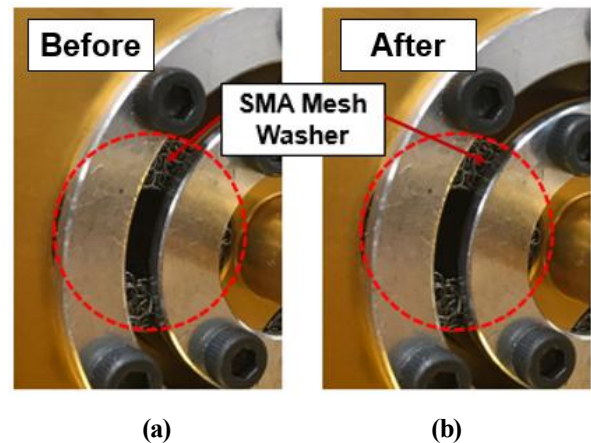


Fig. 11 SMA Mesh Washer Gear Configuration before and after Rotational Characteristic Test [(a): Before, (b): After]

한편, 상기 시험에서 적용된 기어들의 회전강성을 확인하기 위해 도출된 선도의 기울기를 계산하였다. 선형 탄성 범위에서의 티타늄 블레이드 기어 회전강성은 110Nm/rad이며 SMA 메쉬 와셔 기어 회전강성은 인가 회전각마다 변하기 때문에 설계요구 토크 1.57Nm와 유사하게 인가되는  $\pm 5^\circ$  결과로부터 10.7Nm/rad을 도출하였다. 따라서 SMA 메쉬 와셔 기어는 약 10배 낮은 회전강성에 기인하여 진동절연 성능이 티타늄 블레이드 기어보다 상대적으로 우수할 것으로 예측된다. 등가 댐핑값은 식 (1)를 적용하여 Fig. 9의 내부 히스테리시스 곡선 넓이 및 등가 강성으로 부터 유추 하였다. 또한, 계산의 용이성을 위해 에너지 평형법에 기초하여 비선형 특성의 강성 및 댐핑을 선형으로 가정 하였다[11].

$$\zeta_{eq}(\theta) = \frac{\Delta E(\theta)}{2\pi\theta^2 k_{eq}} \quad (1)$$

여기에서,  $\Delta E$ 는 히스테리시스 곡선의 내부 넓이이며,  $\theta$ 는 SMA 메쉬 와셔 기어의 인가 회전각을 의미한다. Figure 12는 SMA 메쉬 와셔 기어에 인가되는  $\pm 1^\circ \sim \pm 11^\circ$  회전각에 따른 등가 강성 및 등가 댐핑값을 나타내며, 인가되는 회전각이 증가할수록 등가 강성치와 등가 댐핑값이 감소하고 있다. 이는 SMA 메쉬 와셔 기어의 형상에 기인한 결과로써, 압착 공정으로 평면방향의 각 층을 구성하는 SMA 메쉬 와이어가 원주방향의 하중에는 박리현상에 취약하기 때문이다.

Figure 12의 결과를 토대로 SMA 메쉬 와셔 기어의 집벌형 안테나 방위각단 적용에 따른 미소진동절연 성능을 파악하기 위해 식 (2)를 적용 하여 전달률을 도출하였다.

$$Transmissibility = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta_\theta\gamma)^2}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\zeta_\theta\gamma)^2}} \quad (2)$$

여기에서,  $\zeta_\theta$ 는 SMA 메쉬 와셔 기어의 진동 감쇠비를 나타내고,  $\gamma$ 는 안테나 조립체의 1차 고유진동수 및 안테나 회전구동 시 발생하는 가진주파수의 비  $\omega/\omega_n$ 를 나타낸다. 안테나 조립체의 고유진동수  $\omega_n$ 은  $\sqrt{k_\theta/J}$ 로부터 도출되며,  $J$ 는 안테나의 방위각 단에 대한 관성모멘트 0.012kgm<sup>2</sup>를 나타내고,  $k_\theta$ 는 SMA 메쉬 와셔 기어 및

안테나 요크 (Yoke) 부에 구성된 출력기어 상호간의 강성치를  $k_{\theta_{out}}k_{\theta_{in}}/(k_{\theta_{out}}+k_{\theta_{in}})$ 로 도출되며 방위각단 기어 모듈의 회전 강성을 나타낸다. 출력단 및 티타늄 기어의 회전 강성  $k_{\theta_{out}}, k_{\theta_{in}}$ 는 구조해석으로부터 도출 가능하다.

Figure 13은 상기의 식을 적용하여 SMA 메쉬 와셔 기어에  $\pm 1^\circ, \pm 5^\circ, \pm 11^\circ$ 의 회전각 인가 조건에 따른 전달률 선도를 나타낸다. 결과에 따르면 안테나 구동에 필요한 요구 토크범위에 해당하는  $\pm 5^\circ$ 와 이를 상회하는  $\pm 11^\circ$ 의 회전각 인가 시 안테나 조립체의 1차 회전 고유진동수는 각각 4.6Hz와 4.2Hz로 안테나 조립체의 1차 고유진동수 관점에서 큰 변화를 야기하지 않으며, 이는 회전각 증가에 따른 회전강성 감소는 미소진동절연 성능의 차이를 발생시키지 않음을 의미한다. 또한 상기의 1차 고유진동수는 위성체 주요 탑재체의 구조공진모드와 충분한 주파수 분리가 이루어짐으로써 진동절연 성능 확보가 가능하게 된다. 이 밖에도 댐핑 특성 관점에서는 회전각 증가에 따른 댐핑 감소의 영향으로 공진점에서의 피크성분이 다소 증가하나, 이 보다 고주파수 대역에서는 회전각 증가에 따라 더욱 효과적인 미소진동절연이 가능함을 알 수 있다. 일례로 50Hz에서는 SMA 메쉬 와셔 기어에  $\pm 5^\circ$  회전각 인가 시 전달률이 0.09로 약 11배 저감이 가능하며,  $\pm 11^\circ$  인가 시 동일 주파수에서 0.07로 약 14배의 진동절연 성능이 확보되게 된다.

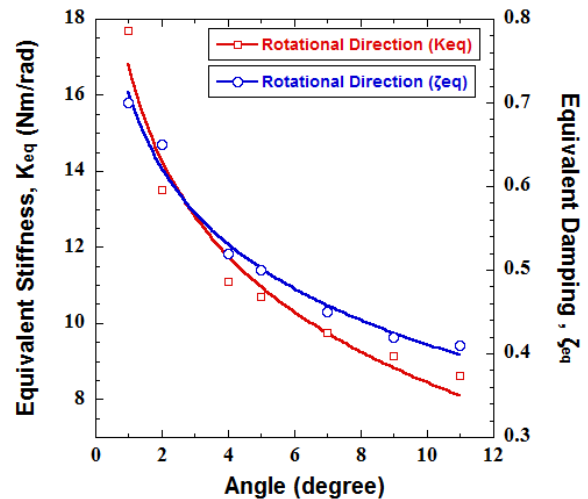


Fig. 12 Values of Equivalent Stiffness and Damping of SMA Gear



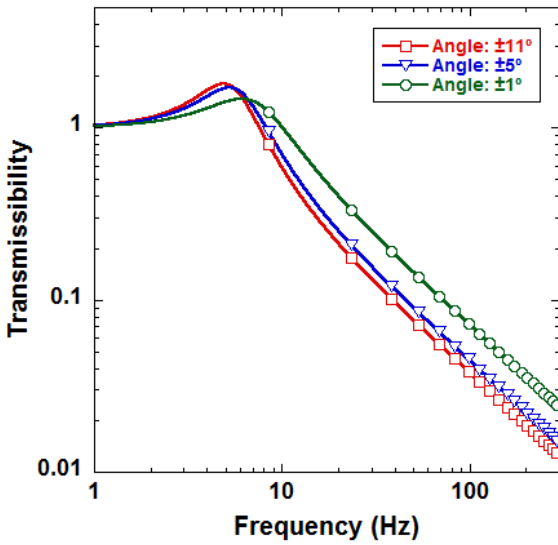


Fig. 13 Transmissibility Curves According to Rotational Angle of SMA Mesh Washer Gear

2.6 가속수명시험

본 연구에서 소개된 2축 짐벌식 X-밴드 안테나는 궤도상에서 위성의 임무수행을 위해 모터구동이 반복적으로 수행된다. SMA 메쉬 와셔 기어가 설계 요구토크를 상회하는 약 2.8Nm에 대해 구조적 안전여유를 만족하더라도 상기 기어에 토크가 지속적으로 작용함에 따라 피로가 누적되어 열화현상 및 피로파괴가 발생할 경우, 기어의 동력전달이 불가능하여 임무실패를 초래하게 된다. 따라서 토크가 반복적으로 작용시 열화현상 및 피로파괴에 대한 신뢰성 검토가 필요하다.

본 절에서는 누적된 사이클에 대한 SMA 메쉬 와셔 기어의 열화현상 및 피로파괴를 검토 하고자 가속수명시험을 수행하였다. 상기 시험 시 궤도상에서 안테나 TPF (Tracking Parameter File) 프로파일[12] 따른 안테나의 방위각 회전 속도중 하나인 3°/sec, 인가 각도 ±2° 및 상온 (25°C) 조건 하에서 수행하였으며, 동일한 조건에서 티타늄 블레이드 기어의 결과와 비교하였다. Fig. 14는 피로주기 누적에 따른 SMA 메쉬 와셔 기어와 티타늄 블레이드 기어의 강성치의 변화를 나타낸다. 여기에서 기어의 강성치는 임의의 주기만큼 시험을 수행한 후 각도-토크 선도로부터 기울기를 도출하는 방식으로 획득하였다. 시험 초기에는 기어의 정확한 피로파괴 시점을 알 수 없기에 약 500 주기의 짧은 간격으로 측정하고, 시험이 진행됨에 따라 점차 간격을 증가시키며 강성 측정을 수행하였다. 따라서 티타늄 블레이드 기어의 경우 앞 절의 정

하중 시험 결과로부터 인가 각도 ±2° 범위에서 소성변형 영역에 존재함에 따라 843 사이클에서 Fig. 15와 같이 피로에 의한 파단이 발생하는 반면 SMA 메쉬 와셔 기어의 경우 상기의 인가 각도 범위에서 탄성범위에 존재함에 따라 2만 사이클까지 열화현상 없이 강성이 유지되는 것을 확인 가능하다. 또한 시험 후에도 Fig. 16과 같이 SMA 메쉬 와셔의 형상이 유지되고 있다. 따라서 상기 가속수명시험 결과로부터 SMA 메쉬 와셔기어가 티타늄 블레이드 기어 보다 회전강성이 약 5배 낮으며, 인가된 회전각도가 동일함에도 불구하고 SMA 메쉬 와셔 기어가 티타늄 블레이드 기어보다 반복적인 회전구동에 대해 장시간 수명이 보장됨을 입증하였다.

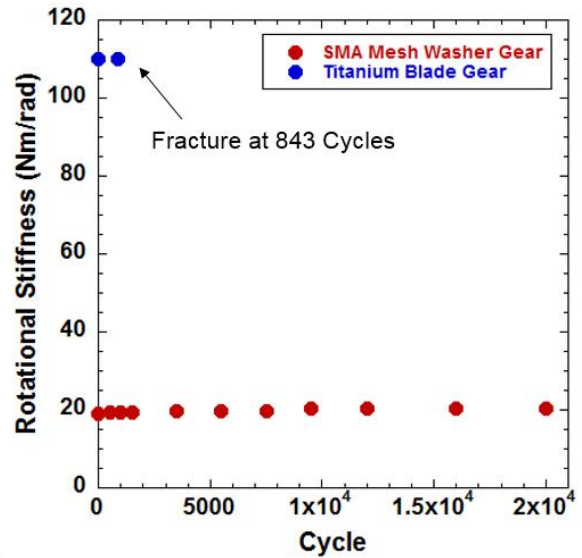


Fig. 14 Comparison of Rotational Stiffness w.r.t Accelerated Life Test between SMA Mesh Washer and Titanium Blade Gear

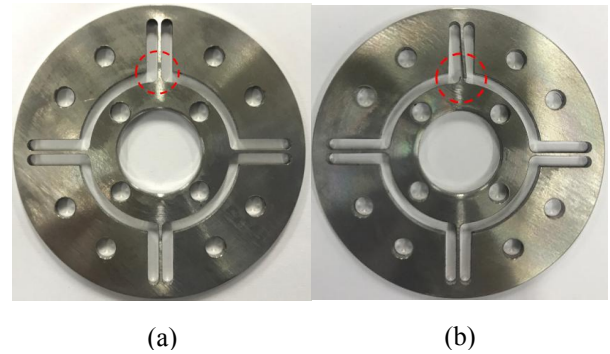
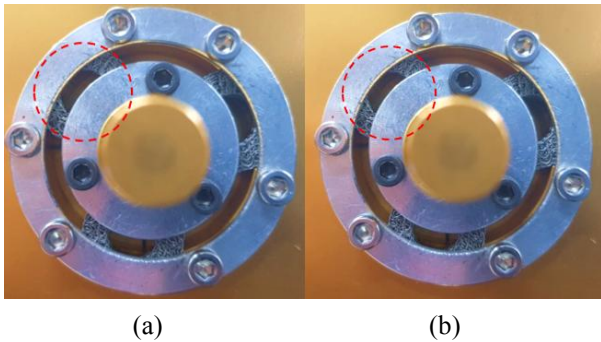


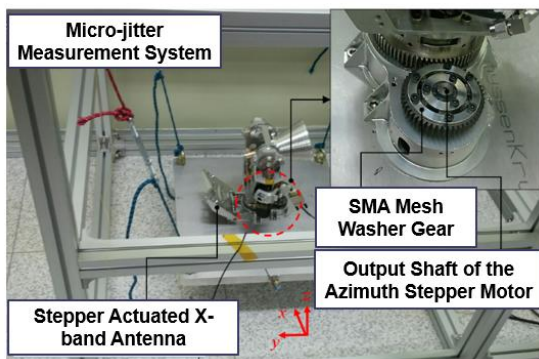
Fig. 15 Titanium Gear for Accelerated Life Test [(a): Before, (b): After]



**Fig. 16** SMA Mesh Washer Gear for Accelerated Life Test [(a): Before, (b): After]

### 2.7 SMA 메쉬 와셔 기어의 미소진동절연 성능 검증

Figure 17은 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬 와셔 기어의 적용에 따른 X-밴드 안테나의 미소진동 절연 성능 측정 실험을 위한 구성을 나타낸다. X-밴드 안테나가 회전 구동 시 발생하는 관성모멘트를 최소화하기 위해 50cm×50cm의 면적에 20kg의 무게의 지지판을 사용하였다. 상기의 지지판에 안테나 조립체를 장착하여 러버 (Rubber) 계열의 탄성 와이어로 3축에 대한 Free-Free 조건을 구현하였으며, X-밴드 안테나의 미소진동 측정은 지지판에 부착된 가속도 센서를 통해 획득된다.



**Fig. 17** Micro-jitter Measurement Test Set-up

상기의 실험구성을 이용하여 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬 와셔 기어의 미소진동절연 성능을 확인 하였으며, 절연 성능을 비교하기 위한 대상으로 티타늄 재질의 일반 강기어를 적용 하였다. 미소진동 측정실험 시 안테나의 방위각 방향에 대해 5deg/sec의 등속으로 재현성 확인을 위해 2회전 수행하였으며, 5deg/sec의 속도에 도달하기 까지 0초부터

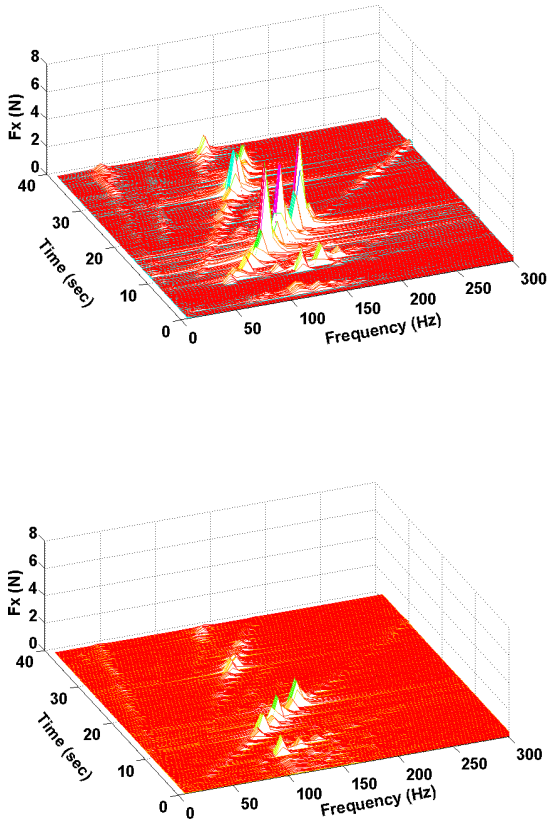
38초까지 가속구간과 39초부터 160초까지 등속구간이 존재한다.

본 논문에서는 안테나의 방위각 방향에 대한 실험이므로 대표적으로 In-plane 방향인 x축에 대한 Waterfall로 미소진동절연 성능을 검토하였다. Fig. 18은 가속 구간에서의 기존 강기어와 SMA 메쉬 와셔 기어를 적용한 경우 x축에 대한 시간에 따른 주파수 및 기저면 전달력의 Waterfall 결과를 나타낸다. 가속구간에서 나타나는 진동 외란 성분들은 안테나의 방위각 방향으로 구동을 시작하는 시점에서 순간적으로 발생하는 과도 진동 및 안테나 조립체3의 구조공진 주파수와 동적 커플링, 스텝 모터 구동에 따른 조화진동 성분에 의해 나타난다. SMA 메쉬 와셔 기어 적용 시 일반 강기어 적용 시 보다 안테나의 가속 구간의 진동 외란성분이 크게 저감 되었으며, 특히 안테나의 구조공진모드인 110Hz ~ 130Hz 주파수 대역에서 진동 외란성분이 약 3배 저감됨을 확인할 수 있다. 이는 SMA 메쉬 와셔 기어의 저 회전강성에 기인한 안테나 조립체의 1차 고유진동수가 5.8Hz 대역으로 이격됨으로써 나타나는 결과이다.

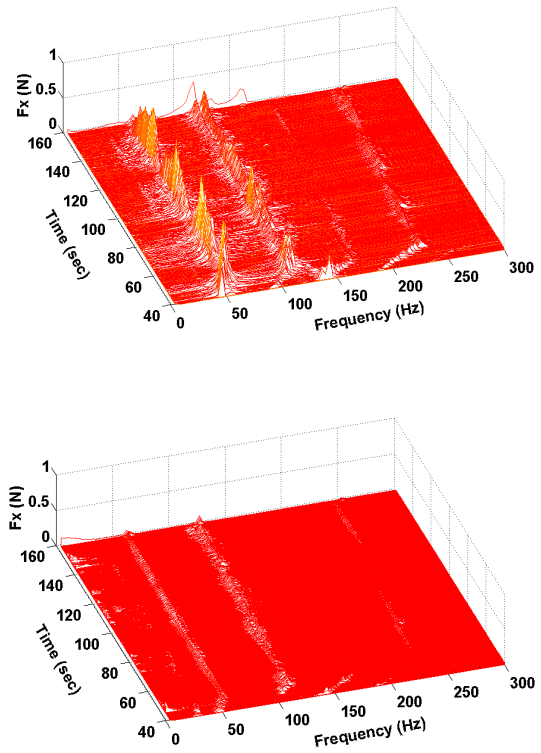
Figure 19는 등속 구간에서의 Waterfall 결과로 등속구간에서 일반 강기어를 적용 시 안테나의 1차 회전 고유진동수는 55Hz이며, 안테나의 구조 공진모드인 110Hz ~ 130Hz 대역, 안테나의 5deg/sec 구동에 의한 회전구동 주파수인 222Hz 대역에서 진동 외란성분이 관찰된다. 1차 회전 고유진동수인 55Hz 대역에서의 외란은 위성의 주요 탑재체의 구조모드 주파수와 충분히 이격 되지 않아 관측위성으로부터 획득되는 영상 품질의 저하를 야기한다. 하지만 SMA 메쉬 와셔 기어 적용 시 1차 고유진동수는 5.8Hz 이며 기존 강기어 적용 시 1차 회전 고유진동수 대역인 55Hz의 외란 보다 약 11.2배의 진동저감 성능을 보인다. 또한 안테나의 구조공진모드 주파수 대역인 110Hz ~ 130Hz 역시 강기어 적용 시 외란성분 보다 약 7배 저감됨을 확인 가능하다. 한편 5.8Hz 대역에서의 1차 피크는 5deg/sec의 안테나 구동을 위한 가진 주파수 222Hz가 5.8Hz 대역의 주파수를 충분히 가진 시키지 못하며, 형상기억합금의 뛰어난 댐핑특성으로 Waterfall 상에서 눈에 식별되지 않아 Fig. 12의 결과로부터 유추되었다.

Table 2는 SMA 메쉬 와셔 기어 적용 시 안테나 구동에 따라 나타나는 가속구간과, 등속구간에 대한 각 축의 피크 감소율과 표준편차 감소율을 나타낸다. 가속구간에서 대표적으로 안테나의 회전구동 방향인 x축에 대한 외란력의 최

대 피크 감소율은 68.9%이며, 등속구간에서의 x축의 피크 감소율은 51.1%이다. 또한 상기 기어의 두께 방향인 z축방향도 가속구간과 등속구간에서 높은 피크 감소율과 표준편차 감소율을 보이고 있으며, 이는 본 논문에서 제안한 SMA 메쉬 와서 기어가 회전 방향뿐만 아니라 축 방향에 대해서도 저항성 구현에 따른 진동절연 성능 확보가 가능함을 나타낸다. 따라서 X-밴드 안테나에 SMA 메쉬 와서 기어 적용 시 가속구간 및 등속구간 모든 구간에서 강기어 적용 시보다 진동절연 성능이 우수함을 확인할 수 있다.



**Fig. 18** Waterfall Plots of Micro Vibration Test at Acceleration Section [(a): Conventional Gear, (b): SMA Mesh Washer Gear]



**Fig. 19** Waterfall Plots of Micro Vibration Test at Stable Section [(a): Conventional Gear, (b): SMA Mesh Washer Gear]

**Table 2** Disturbance Reduction Ratio Between the Conventional Gear and SMA Mesh Washer Gear

Phase	Axis	Peak Reduction (%)		STD Deviation Reduction (%)
		Mean	Max	
Accel.	x	63.7	68.9	68.7
	y	54.1	67.1	62.9
	z	64.4	56.7	67.5
Const.	x	65.5	51.1	63.8
	y	71.4	64.9	74.7
	z	46.7	65.5	48.8

### 3. 결 론

본 연구에서는 기존 티타늄 블레이드 기어의 문제를 보완하고자 초탄성 특성을 갖는 형상기억합금 메쉬 와셔를 적용한 기어를 제안 하였으며, 두께방향에 대한 정하중 시험으로 압착에 따른 SMA 메쉬 와셔의 기본 특성을 파악하였다. 또한 회전방향에 대한 정하중 시험으로부터 SMA 메쉬 와셔를 구성하는 직조된 SMA 와이어의 조밀도에 따라 기본특성을 비교하였다. 또한 SMA 메쉬 와셔 기어가 기존 티타늄 블레이드 기어 보다 약 4.3배 낮은 회전강성임에도 안테나의 회전 구동을 위해 요구되는 토크버저 1.57Nm를 상회하는 과도한 토크 인가 시 초탄성 특성에 의해 소성변형이 발생하지 않고 본래의 형상으로 복원함을 입증하였다. 한편, 회전방향 정하중 시험 시 인가 회전각 크기가 증가에 따른 SMA 메쉬 와셔 기어의 등가 강성 및 등가 댐핑값이 감소하는 특성을 입증하였다. 전달률 선도의 결과로 상기의 등가강성의 감소는 X-밴드 안테나의 1차 고유진동수에 큰 차이를 유발하지 않아 주파수 분리에 의한 미소진동절연 성능에 큰 영향을 끼치지 않음을 확인 하였으며, 고주파수 대역의 미소진동절연 성능이 증가함을 보였다. 또한 SMA 메쉬 와셔 기어를 적용한 안테나 조립체에 대한 미소진동 측정시험을 통해 기존 강기어 적용 시 보다 저 회전강성에 기인하여 가속구간과 등속구간에서 우수한 미소진동절연 성능을 확인하였다.

### 후 기

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

### References

- 1) Beak, J. H., "Modeling on a gimbal with an antenna and investigation on the influence of backlash", *JSME International Journal Series C Mechanical System*,
- 2) Zhang, Z., Aglietti, G. S. and Zhou, W., "Microvibrations Induced by a Cantilevered Wheel Assembly with a Soft-suspension System", *AIAA Journal*, Vol. 49, pp. 1067~1079, 2010
- 3) Kim, D. K., Oh, S. H., Kim, H. B., Lee, W. B. and Yong, K. L., "Micro-vibration test of X-band antenna with two-axis gimbal system", *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, pp. 927-930, 2014
- 4) Kozilek, H., Specht, B., Yong, S. S. and Lee, S. G., "Micro Vibration Improvement of a Stepper Actuated Mechanism", *15th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, Noordwijk, Netherlands, 2013.
- 5) Youn, S. H. "Development of Pyroshock Mesh Isolator based on SMA Pseudoelastic", *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, Doctoral Thesis, 2013.
- 6) Youn, S. H., Jang, Y. S. and Han, J. H., "Compressed Mesh Washer Isolators Using the Pseudoelasticity of SMA for Pyroshock Attenuation", *Intelligent Material System and Structures Journal*, Vol. 21, pp. 407~421, 2009
- 7) Jeong, H. K., Han, J. H., Youn, S. H. and Lee, J. H., "Frequency Tunable Vibration and Shock Isolator Using Shape Memory Alloy Wire Actuator", *Intelligent Materials Systems and Structures Journal*, Vol. 25, pp. 908~1019, 2010
- 8) Kwon, S. C., Jeon, S. H. and Oh, H. U., "Performance Investigation of a Novel Pseudoelastic SMA Mesh Washer Gear Wheel with Micro-jitter Attenuation Capability", *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 5, 2016
- 9) <http://smalloy.co.kr/>
- 10) Oh, H. U., Kwon, S. C. and Youn, S. H., "Characteristics of spaceborne cooler passive vibration isolator by using a compressed shape memory alloy mesh washer" *Smart Materials and Structures*, Vol. 24.1, 2014.

- 11) Yan, X. J and Nie, J. X., " Study of a New Application Form of Shape Memory Alloy Superelasticity", *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, pp. 14-23, 2003
- 12) Jeon, S. H., Kwon, S. C., Kim, T. H. and Oh, H. U., "Enhancement of Microjitter Attenuation Capability for a Stepper-Actuated Two-Axis Gimbal-Type Antenna by Using a Spring-Blade Isolator", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.30, No. 4, 2017