

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(9), 784-793(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.9.784

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 차세대중형위성 적용가능성 검토를 위한 X-band 안테나의 미소진동 저감용 초탄성 SMA 기어의 특성 측정

전영현\*\*, 백현규\*\*\*, 송다일\*\*\*, 강은수\*\*\*\*, 오현웅\*

### Characteristics Measurement of Hyperelastic SMA Gear for Micro-jitter Attenuation of X-band Antenna of Compact Advanced Satellite

Young-Hyeon Jeon\*\*, Hyeon-Gyu Back\*\*\*, Da-Il Song\*\*\*, Eun-Su Kang\*\*\*\* and Hyun-Ung Oh\*

Department of Aerospace Engineering, Chosun University\* , \*\*

Kukdong Telecommunication\*\*\*

Korea Aerospace Research Institute\*\*\*\*

#### ABSTRACT

A two-axis gimbal-type X-band antenna mounted on an observation satellite can efficiently transmit high-capacity image data to a ground station regardless of both the satellite position and the orbital motion. However, this X-band antenna induces unnecessary micro-jitter which can degrade the image quality of the high-resolution observation satellite. Therefore, to achieve the high-resolution image quality from the observation satellite, micro-jitters have been required to be isolated. In this study, to resolve aforementioned drawback, we proposed blade gear using a shape memory alloy (SMA) applied to azimuth stage of X-band antenna. To investigate the rotational basic characteristics of the proposed SMA blade gear, we performed rotational static loading test. Furthermore, to evaluate the cycle to failure of the gear, accelerated life test was conducted. The temperature test was conducted to confirm rotational basic characteristics at various temperature conditions. To verify the isolation performance for micro-jitter, we performed micro-jitter measurement test.

#### 초 록

관측위성에 탑재되는 2축 짐벌식 X-band 안테나는 위성의 자세 및 궤도 운동과는 무관하게 지상국을 지향하여 광학 탑재체로부터 획득한 대용량의 영상정보를 지상으로 송신하는 임무를 수행한다. 하지만, 상기 X-band 안테나는 지상 안테나로 지향을 위한 모터 구동시 미소진동을 유발하며, 이와 같은 미소진동은 고해상도 관측위성의 영상품질을 저하시키는 주된 요인으로 작용한다. 따라서 관측위성의 임무수행동안 목적하는 영상정보 획득을 위하여, 안테나의 모터 구동에 따라 수반되는 미소진동 절연이 요구된다. 본 논문에서는 상기 안테나의 미소진동 문제를 극복하기 위해 2축 짐벌식 X-band 안테나의 방위각 단계장착되는 초탄성 SMA 블레이드 기어를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 SMA 블레이드

† Received : June 19, 2017      Revised : August 15, 2017      Accepted : August 16, 2017

\* Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

기어의 차세대중형위성 X-band 안테나 적용 가능성 검토를 위해 회전방향 정하중시험을 통해 기본특성을 확인하였으며, 가속수명시험 및 온도특성시험을 수행하였다. 또한 미소진동측정시험을 수행하여 상기 SMA 기어의 미소진동 절연성능 및 기어의 설계 유효성을 입증하였다.

**Key Words** : Two-axis Gimbal-type X-band Antenna (2축 짐벌식 X-band 안테나), Shape Memory Alloy (형상기억합금), Hyperelastic Effect (초탄성 효과), Micro-jitter (미소진동)

## 1. 서 론

최근 위성의 영상수요가 급격하게 증가함에 따라, 관측위성의 고해상도의 영상정보 획득이 요구되고 있다. 2축 짐벌식 X-band 안테나는 차세대중형위성에 탑재되는 대용량의 영상정보 송신용 안테나로서, 높은 안테나 이득과 좁은 빔폭을 가지는 장점으로 장거리에서도 데이터 손실 없이 효율적인 영상정보 송신이 가능하다. 또한, 상기 안테나는 2축 짐벌식 지향 조정 장치에 장착되어 기계적 회전을 통해 위성의 자세 및 궤도 운동과는 무관하게 지상국을 정밀 지향하여 안테나의 지향손실을 최소화한다. 하지만, 상기 X-band 안테나는 지상 안테나로 지향을 위한 기계적 회전 시, 일정 기어 비를 갖는 기어 모듈과 조합된 스테핑 모터의 구동에 따라 모터의 구동 외란, 부정확한 기어 맞물림, 안테나의 동적 불균형 등의 원인으로 불필요한 미소진동을 유발하게 된다. 이러한 미소진동은 광학 탑재체의 시선 각을 교란시켜 영상의 블러(Blur) 현상을 유발하며, 궁극적으로 고해상도 관측위성의 영상정보 품질을 저하시키는 주된 요인으로 작용한다[1-4]. 따라서 목적하는 고해상도 영상정보를 획득하기 위해서는 2축 짐벌식 X-band 안테나로부터 수반되는 미소진동 절연이 요구된다.

이에 따라, 상기 문제점을 극복하기 위한 선행 연구로, Oh et al.[5]는 형상기억합금의 의탄성 효과를 이용한 링 타입의 SMA 매쉬와서 진동 절연기를 X-band 안테나 하단에 배치하여 저항성 지지구조에 기인한 미소진동 절연 성능을 확보하였으며, 미소진동 측정시험을 통해 설계 유효성을 검증한 바 있다. 또한 Kwon et al.[6]는 전술한 SMA 매쉬와서[5]를 X-band 안테나의 방위각 단 기어에 적용하여, 일반적인 강기어에 비해 저회전강성을 구현함에 따라 주파수 분리를 통해 미소진동 절연 성능을 확보하였다. Kim et al.[7]는 X-band 안테나에 의해 유발되는 미소진동 저감을 목적으로 특정 속도도로만 구성된 최적

화 회전각 TPF (Tracking Parameter File)를 생성하여 속도 최적화 기법을 제안하였으며, 속도 최적화 기법이 적용된 X-band 안테나의 위성 조립체 수준에서의 미소진동 측정시험을 통해 상기 논문에서 제안한 속도 최적화 기법의 저감 성능을 실험적으로 검증하였다. 한편, Kozilek et al.[7]은 X-band 안테나의 회전 구동 시, 방위각 단에서 발생하는 미소진동을 절연하기 위해 Fig. 1과 같이 티타늄 소재의 블레이드 기어를 제안하였다. 티타늄 블레이드 기어는 일반적으로 적용되는 강기어에 비해 저회전강성을 가지며, 이에 기인한 위성 주요 탑재 구조물의 구조 공진 주파수와와의 충분한 주파수 분리를 통해 미소진동 절연성능을 확보하였다. 하지만, 상기 연구에서 제안한 티타늄 기어를 적용할 경우, 실제 조립과정, 발사진동 및 궤도 열 환경동안 발생하는 축정렬 불균형에 의해 설계 요구규격에 상회하는 과도한 토크가 기어에 인가되어 소성변형의 위험성이 존재하며, 실제 위성의 임무수행 시 안테나 구동을 위한 동력 전달이 불가능한 가능성이 있다 [1]. 따라서 기어의 블레이드 두께를 얇게 할 경우, 목적하는 미소진동 절연 성능 확보에는 용이하나 소성변형에 대한 구조건전성 확보가 불가능한 단점이 존재한다. 이에 반해, 상기 문제점에 대해 구조 관점에서의 건전성 확보를 위해 블레이드의 두께를 증가시킬 시, 기어의 회전 강성이 증가함에 따라 목적하는 미소진동 절연 성능을 확보하기 어려운 한계점이 존재한다.

본 논문에서는 기존 Kozilek et al.[8]가 제안한 티타늄 블레이드 기어의 소성변형의 문제점을 극복하기 위해 형상기억합금 (Shape Memory Alloy, SMA)의 초탄성 효과에 주목하였다. 형상기억합금의 초탄성 효과란 초기 설정된 특정 온도조건이 작동 환경온도 이하로 설정될 경우, 하중이 인가되어 변형이 발생하더라도 하중을 제할 시 초기의 형상으로 회복하는 효과를 말한다. 따라서 기존 블레이드 기어에 SMA의 초탄성 효과를 적용함으로써, 기존 티타늄 블레이드가 갖는

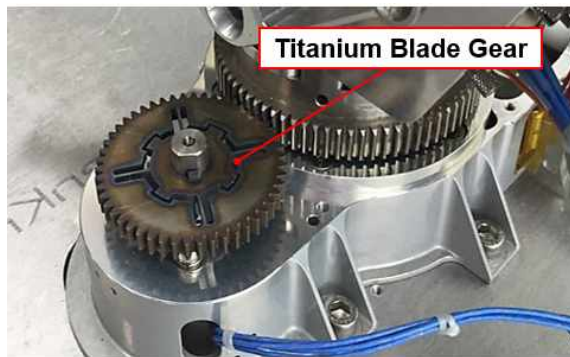


Fig. 1. Titanium Blade Gear proposed by Kozilek et al.[8]

소성변형 문제를 극복함과 동시에 X-band 안테나로부터 수반되는 미소진동 절연성능 확보하고자 한다. 또한 차세대 중형위성에 장착되는 X-band 안테나에 대하여 본 논문에서 제안한 SMA 블레이드 기어의 적용 가능성을 검토하기 위해, 기어의 기본특성 확인을 위한 회전방향의 정하중 시험을 수행하였으며, 지상 설계단계부터 궤도 운영동안 누적되는 피로파괴에 대한 평가 및 열화현상 검토를 위해 가속수명시험을 수행하였다. 또한, 작동온도 조건에 따라 변화하는 SMA의 특성변화 분석을 위해 온도특성시험을 수행하였다. 아울러, 미소진동측정시험을 수행하여 상기 SMA 기어의 미소진동 절연성능 및 기어의 설계 유효성을 실험적으로 입증하였다.

## II. 본 론

### 2.1 2축 짐벌식 X-band 안테나

Figure 2는 2축 짐벌식 X-band 안테나의 전체 형상을 나타낸다. 2축 짐벌식 X-band 안테나는 총 무게 11kg인 대용량 영상정보 송신용 안테나로써,  $\pm 15^\circ$ 의 좁은 빔폭과 15.26dB의 높은 안테나 이득, 최대 소비전력이 17W미만으로 장거리에서 효율적인 영상정보 송신이 가능한 장점을 가진다[7]. 또한 상기 안테나는 지상 안테나로 정밀하게 지향하기 위해 방위각 단과 양각 단으로 나뉘며, 각 단의 회전구동을 위한 2개의 스텝핑 모터가 존재하여 방위각 단은  $360^\circ$ , 양각 단은  $15^\circ \sim 145^\circ$ 의 각도로 동시 구동이 가능하다. 상기 안테나에 사용되는 스텝핑 모터는 Phytron사의 2상 스텝핑 모터 (ZSS 43.200.06-HD)로 1회전 당 200스텝을 가지며, 1개의 스텝 당 8개의 마이크로 스텝으로 구성되어있다. 추가적으로 각 단의 스텝핑 모터에는 1:50의 기어 비를 갖는 하모닉

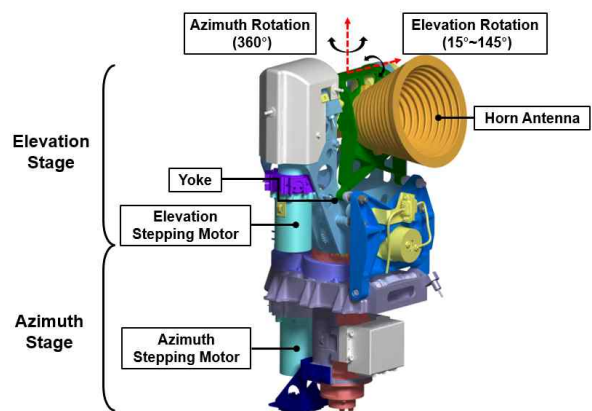


Fig. 2. Configuration of a Two-axis Gimbal-type X-band Antenna

기어와 각 축의 회전 구동을 위한 1:1.6의 스퍼기어 및 베벨기어가 적용된다[3].

### 2.2 기존 티타늄 기어의 문제점

Kozilek et al.[8]는 X-band 안테나의 방위각 단 구동에 따라 수반되는 미소진동 절연을 목적으로 티타늄 블레이드 기어를 제안하였다. 상기 티타늄 기어의 설계 요구조건으로, 티타늄 기어 적용 시 저회전강성 구현에 따라 위성 주요 탑재 구조물의 구조공진 주파수와 충분한 주파수분리가 이루어져야 하며, 이와 동시에 안테나의 방위각 방향의 회전구동을 위한 요구토크에 준하여 0이상의 설계여유를 만족해야한다[6]. 하지만, 티타늄 기어의 설계여유가 0에 가깝게 설계되어 설계 요구조건을 만족하더라도, 전술한 바와 같이 실제 조립과정, 발사 및 궤도 열 환경 동안 발생하는 축 정렬 불균형에 의해 요구규격 토크에 상회하는 과도토크가 기어에 인가될 시 소성변형이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 상기 설계 요구조건을 고려하여, 미소진동 절연을 목적으로 충분한 주파수 분리를 구현하기 위해 기어 블레이드의 두께를 최대한 얇게 하여 안테나 조립체의 1차 고유진동수를 낮추는 방법이 존재하지만, 두께가 얇을수록 구조적 측면에서 건전성을 확보하지 못하는 한계점이 존재한다. 특히, 기어 블레이드의 두께가 0.6t인 기어의 경우, 기저면의 전달률 측면에서 약 6배의 진동절연 성능이 확보될 것으로 기대되나, 실제 0.6t의 기어 적용 시 소성변형의 문제점이 발생하고 있다. 이에 대한 이론적 검토 및 접근방법으로 0.6t 티타늄 기어에 대한 구조설계 안전여유를 도출하였다. 먼저, 안테나의 구동을 위해 요구되는 토크 값을 산출하기 위해 ECSS Rule[9]에 따르는 식 (1)을 적용하였으며, 수식에서 각 인자

Table 1. Parameters Value for Torque Budget

Factor	Torque (Nm)	Number of Set (EA)
$T_G$	0.477	-
$T_{L/S}$	0.108	2
$T_{Bea}$	0.028	-
$T_{S/R}$	0.014	-
$T_{Acc}$	0.003995	-
$T_R$	1.57	-

에 해당하는 수치들을 Table 1에 정리하였다.

$$T_R \geq 2(1.1T_G + 1.2T_{L/S} + 3T_{Bea} + 3T_{S/R}) + 1.25T_{Acc} \quad (1)$$

여기에서,  $T_R$ 은 안테나 구동을 위한 요구토크 값이며,  $T_G$ 는 지상시험 환경조건을 고려하여 1g에 해당하는 중력토크,  $T_{L/S}$ 는 리미트 스위치의 작동토크,  $T_{Bea}$ ,  $T_{S/R}$ 는 베어링 및 슬립 링의 마찰토크,  $T_{Acc}$ 은 안테나 구동의 가속토크를 의미한다. Table 1에 정리된 각 인자들의 값을 적용한 결과, 안테나의 방위각 방향 회전구동을 위한 요구토크 값은 1.57Nm이다.

상기의 식 (1)을 통해 도출한 요구토크에 준하여 기존 티타늄 기어의 구조건전성에 대한 평가로, 설계 안전여유를 도출하는 수식인 식 (2)를 적용할 수 있다[2].

$$MoS = \frac{\sigma_{allowable}}{S.F \times \sigma_{max}} - 1 \geq 0 \quad (2)$$

여기에서,  $\sigma_{allowable}$ 는 재료의 허용 응력, S.F는 안전계수,  $\sigma_{max}$ 는 유한요소해석으로부터 도출된 기어 단에 걸리는 최대 응력을 의미한다. 상용 구조해석 툴을 이용하여 식 (1)로부터 도출한 요구토크에 상회하는 1.8Nm의 토크를 기어 내륜에 인가할 시, 블레이드에 부하되는 최대응력 값은 811Mpa이다. 이때, 안전계수는 ECSS Rule[9]에 근거하여 위성 설계 시 적용되는 금속성의 안전계수 1.25로 설정하고, 티타늄 재료의 허용 응력 값인 1000Mpa에 대한 설계 안전여유를 검토하였을 때, MoS가 -0.01로 구조건전성을 확보하지 못하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 티타늄 기어에 인가되는 토크에 따른 설계여유 선도를 나타낸다. 티타늄 기어에 설계 요구조건에 준하는 요구규격 토크 1.57Nm의 응력이 작용하여도 설계여유가 0 이상을 만족하는 것을 확인할 수 있으나, 전술한 바와 같이 약 1.8Nm 이상의 토크부터 0 이하의 설계여유를 보이고 있다. 따라서 Kozilek et al.[8]

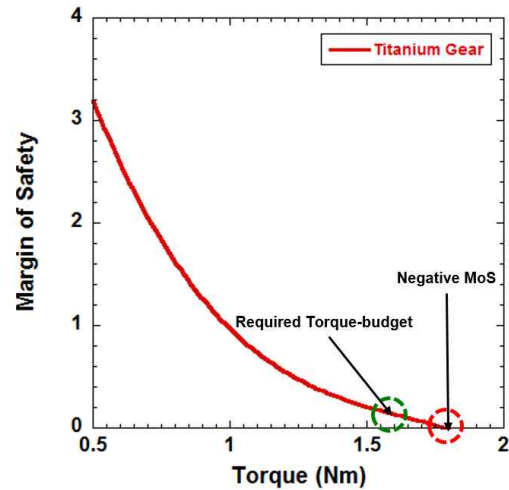


Fig. 3. Margin of Safety of Titanium Blade Gear

이 제안한 기존의 티타늄 기어의 경우에는 실제 안테나의 축 정렬 불균형에 의해 요구규격 토크에 상회하는 과도한 토크가 인가되었을 시, 소성변형이 발생하여 구조건전성을 확보하지 못하는 문제점이 존재하며, 이에 대한 개선이 요구되어진다.

### 2.3 초탄성 SMA 블레이드 기어

본 논문에서는 기존 티타늄 기어의 소성변형의 문제점을 극복하기 위하여 초탄성 형상기억합금을 이용하였다. 형상기억합금이란 금속의 입자구조에 따라 크게 높은 온도에서 격자형태의 결정 구조를 갖는 오스테나이트 (Austenite) 상과 낮은 온도에서 평행사변형 형태의 결정 구조를 갖는 마르텐사이트 (Martensite) 상으로 존재하며, 온도 및 하중 조건에 따라 상호간에 상변화가 발생하여 형상기억효과 및 초탄성 효과를 갖게 된다[10]. 형상기억효과란 작동환경 온도가 오스테나이트 종료온도 ( $A_f$ : Austenite Finish Temperature) 보다 이하의 온도조건에서, 외부 하중에 의해 형상기억합금의 형상이 변형되더라도 오스테나이트 종료온도 이상의 열을 가해줄 경우 초기의 형상으로 회복하는 특성을 말한다. 이와 더불어, 초탄성 효과는 작동환경 온도가 오스테나이트 종료 온도 이상인 온도조건에서 하중이 인가되어 10% 이상의 큰 변형이 발생하더라도, Fig. 4와 같이 하중을 제할 시 잔류 응력 없이 초기의 형상으로 회복하는 특성을 말한다 [10]. 따라서 상기 초탄성 효과를 이용할 경우, 일반적인 금속에 비해 넓은 탄성범위를 가지기 때문에, 본 논문에서는 형상기억합금의 초탄성 효과에 주목하였다. Fig. 5는 본 논문에서 제안

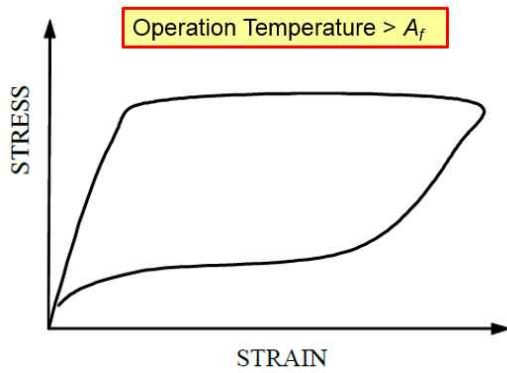


Fig. 4. Hyperelastic Behavior of a Shape Memory Alloy[10]

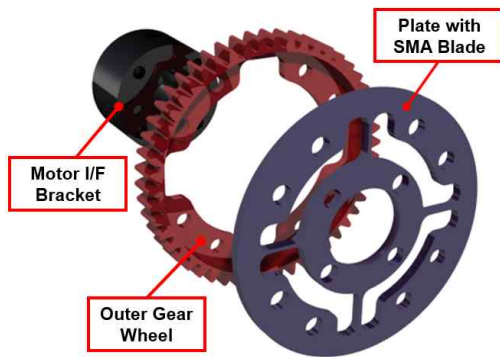


Fig. 5. Configuration of SMA Blade Gear

Table 2. Characteristics of SMA[11]

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	75 GPa
	Austenite	80 GPa
Specific Heat		0.46 kJ/(kg·K)
Thermal Conductivity		10 W/(m·K)
Tensile Strength		1300 MPa
Elongation at Break		45%
Coefficient of Thermal Expansion		10.4 μm/K
Density		6.45 g/cm <sup>3</sup>
Poisson's Ratio ( $\rho$ )		0.33

하는 초탄성 SMA 블레이드 기어의 형상을 나타내며, SMA의 물성치는 Table 2와 같다. 형상기억합금의 오스테나이트 종료온도는 지상 시험 시, 일반 상온조건에서 초탄성 효과를 구

현하기 위해 15°C로 설정하였다.

### 2.4 회전방향 정하중 시험

초탄성 SMA 블레이드 기어의 회전방향에 대한 기본특성을 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 기어의 토크 인가를 위한 스텝핑 모터와 토크측정을 위한 토크센서, 기어의 회전각 측정을 위한 엔코더로 구성되어 정하중 시험을 수행하였다. 시험은 SMA의 초탄성 효과를 이용하기 위해 상기 SMA의 오스테나이트 종료온도보다 높은 25°C의 상온조건에서, 0.1°/sec의 속도로 ±1°, ±2°, ±4° 각도에 대한 회전강성을 측정하였다. 또한, 시험의 재현성 검토를 위해 3사이클의 반복시험을 수행하였으며, 기존 티타늄 기어와 비교분석을 실시하였다.

Figure 7은 티타늄 및 SMA 블레이드 기어의 정하중 시험의 결과로, 각 각도에 따른 각도-토크 선도를 나타낸다. 티타늄 기어의 경우, 회전각 ±1°에서부터 소성변형이 발생하여 선형 거동을 보이고 있으며, 반복실험에도 초기의 그래프와 일부 부합하지 못하고 있다. 회전각 ±4°에서는 각도에 상응하는 과도한 토크를 견디지 못하고 중극에는 파단이 발생하였다. 반면에, SMA 기어의 경우, 회전각 ±1°에서는 탄성범위에 존재하여 곡선의 기울기가 일정하며, ±2°, ±4° 시험에서는 일정 각도 이상부터 곡선의 기울기가 감소하고 있다. 이는 회전각에 상응하는 토크에 의해 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 상변화에 기인한 결과이다. 아울러, 히스테리시스의 내부 면적은 상변화에 기인한 에너지 흡수 능력으로 면적이 클수록 댐핑 특성이 우수함을 의미한다. 또한, ±4°까지 누적되는 반복실험에도 티타늄 기어와는 달리 초기 곡선과 정확히 일치하는 결과를 보이고 있으며, 이를 통해 과도한 토크가 인가되더라도 하중을 제할 시 초탄성 효과에 기인하여 소성변형 없이 초기의 형상으로 회복하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 더불어, 상기 시험결과를 토대로 등가 회전강성을 도출하여 진동감쇠 특성측면에서 고찰하였을 때, 티타늄

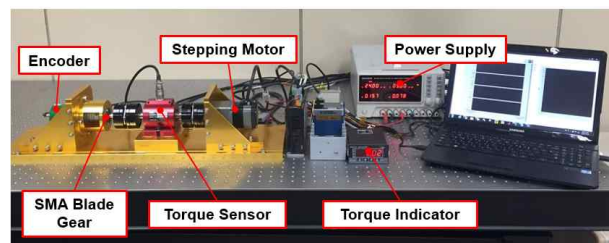


Fig. 6. Rotational Basic Characteristics Test Set-up



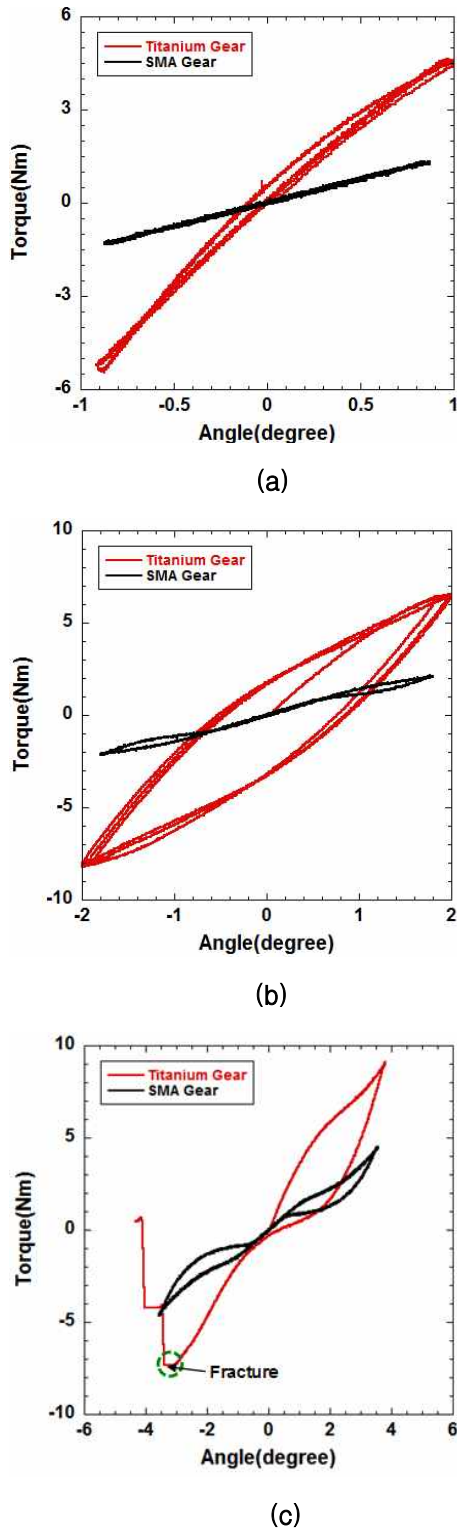


Fig. 7. Rotational Characteristics Test Results [(a): $\pm 1^\circ$ , (b):  $\pm 2^\circ$ , (c): $\pm 4^\circ$ ]

기어는 262.94Nm/rad, SMA 기어는 87.2Nm/rad 으로 동일한 블레이드 두께의 기어임에도 SMA 기어가 티타늄 기어보다 약 3배 낮은 회전강성을 보유하여 SMA 기어의 진동절연 특성이 더 우수

함을 유추할 수 있다. 궁극적으로, SMA 기어의 기본특성 확인을 위한 회전방향에 대한 정하중 시험 결과로, SMA 기어가 티타늄 기어에 비해 저회전강성을 보유하여 진동절연 특성이 우수함과 동시에, 과도한 토크에 대해서도 구조건전성이 확보됨을 입증할 수 있다.

### 2.5 가속수명시험

실제 X-band 안테나는 지상에서의 기능시험 및 위성의 임무수행기간 동안 반복적인 모터구동을 수행하게 된다. SMA 블레이드 기어가 과도 토크에 대한 구조적 설계 여유를 만족하더라도, 지속적인 토크가 기어 블레이드 단에 인가됨에 따라 피로가 누적되어 파단이 발생할 경우, 실제 임무 수행 시 기어의 동력전달이 불가능 하여 목적하는 임무수행이 불가능하게 된다. 따라서 반복적인 토크에 의해 누적되는 피로에 따른 열화현상 검토 및 피로파괴에 대한 신뢰성 평가가 요구되어진다.

본 절에서는 SMA 블레이드 기어의 피로파괴에 대한 신뢰성 검토를 위해 가속수명시험을 수행하였으며, SMA 기어와 회전강성이 유사한 티타늄 기어를 별도 제작하여 비교분석을 수행하였다. 가속수명시험은 짐벌식 X-band 안테나의 궤도 최대 운영 속도를 고려하여 3°/sec의 구동속도로 회전각  $\pm 0.5^\circ$ ,  $\pm 1^\circ$ 에 대한 수명시험을 실시하였다.

Figure 8은 티타늄 및 SMA 기어에 대한 가속수명시험 결과로 각 회전각에 대한 파단 사이클을 나타낸다. 실제 안테나의 정상운용시 방위각 단의 구동 회전각에 근사한  $\pm 0.5^\circ$ 에서는 SMA 기어의 경우 38,228사이클에서 피로에 의한 파단이 발생하였으며, 일정 주기마다 회전강성을 측정하여 약 26,000사이클부터 열화현상이 진행되었음을 확인하였다. 반면에, 기존 티타늄 기어는 SMA 기어보다 약 2.28배 낮은 16,759사이클에서 피로에 의한 파단이 발생하였다.

안테나의 정상운용 상태에서 실제 회전각에 약 두 배를 상회하는  $\pm 1^\circ$ 의 경우에도 SMA 기어는 14,500사이클 (열화현상: 약 6,500사이클), 티타늄 기어는 8,667사이클에서 피로파괴가 발생하였으며, 이는 SMA 기어가 누적되는 피로에 대해 약 1.67배의 장시간을 더 견딜 수 있음을 의미한다. 따라서 상기 가속수명시험 결과로부터 두 기어의 강성이 유사함에도 불구하고, SMA 기어가 티타늄 기어보다 궤도 운영동안 반복적인 토크인가에 따른 피로에

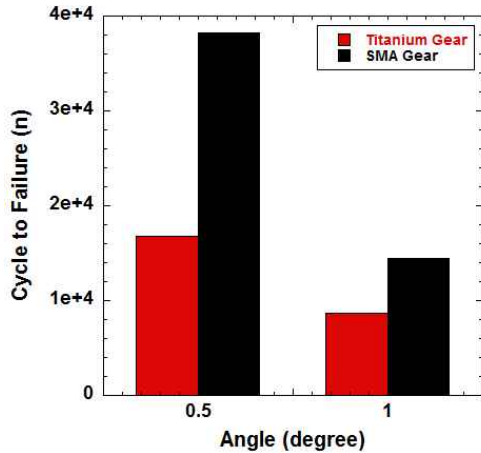


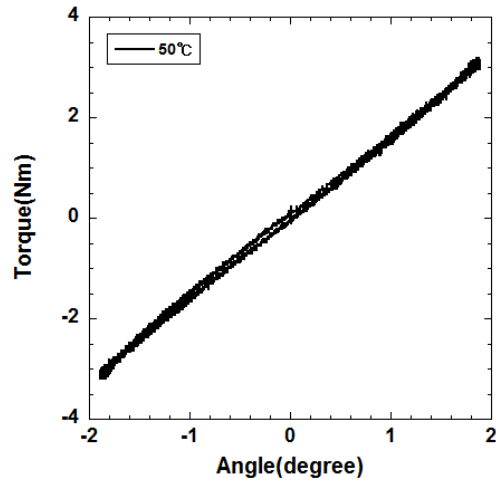
Fig. 8. Accelerated Life Test Results

대하여 장시간 수명보장이 가능함을 입증하였다. 또한, 실제 궤도 운영동안 X-band 안테나는 상기 가속수명시험과 같이 시계 및 반시계 방향에 대해 가속화된 왕복 구동을 수행하지 않기 때문에, 실제 임무 수행기간동안 더 장시간의 피로수명을 가질 것으로 기대된다.

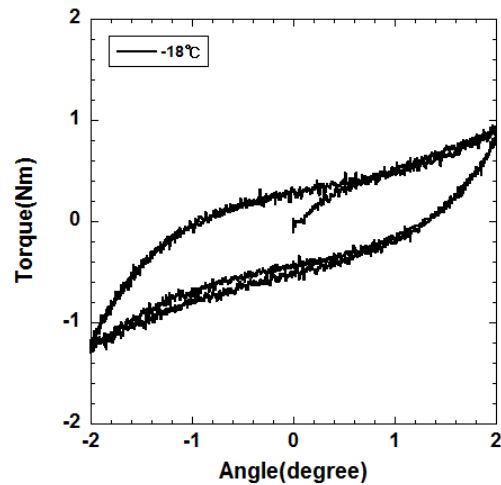
2.6 온도특성시험

실제 X-band 안테나는 임무수행동안 반복적인 궤도 열주기 환경에 노출된다. 형상기억합금은 본 논문 2.3절에 언급한바와 같이 주변 작동환경 온도조건에 따라 상변화에 기인한 금속의 특성변화가 발생한다. 따라서 온도조건에 민감한 SMA 기어의 특성 분석을 위해 다양한 온도조건에서의 정하중 시험을 수행하였다. 온도특성시험은 SMA 기어에 온도센서를 부착하여 저온 조건인 -18℃, 고온 조건인 50℃에서, 앞서 상온조건인 정하중 시험에서 상변화의 거동을 보였던 회전각 ±2°에 대한 기본특성을 확인하였다.

Figure 9는 온도특성시험 결과로, SMA 기어 온도의 고온 및 저온 조건에 따른 각도-토크 선도를 나타낸다. 고온 조건인 50℃ 온도에서는 오스테나이트 종료온도인 15℃보다 훨씬 더 높은 온도를 가지기 때문에, 상변화 임계 응력 (Critical Stress)이 높아짐에 따라, 하중 인가 시에도 오스테나이트 상으로 존재하며, Fig. 9 (a)와 같이 곡선의 기울기가 일정한 선형적 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 반면에, 저온 조건인 -18℃ 시험에서는 마르텐사이트 시작 온도보다 더 낮은 작동환경 온도조건에 따라 마르텐사이트 상이 주를 이루게 된다. 마르텐사이트 상은 오스테나이트 상보다 상대적으로 낮은 탄성계수를 보유함으로써, 이에 기인하여 SMA 기어는 고온 및 상온 조건보다 낮은 27.4Nm/rad의 회전



(a)



(b)

Fig. 9. Rotational Characteristics of SMA Gear at each Temperature Conditions [(a): 50℃, (b):-18℃]

강성치를 나타낸다. 하지만, 실제 정상운용 상태에서의 구동 토크가 약 0.6Nm임을 고려하였을 때, 저온조건에서도 충분한 동력전달이 가능할 것으로 판단된다. 실제로, 안테나의 궤도 운용시 예상되는 최저 온도는 약 28℃로[1], 오스테나이트 종료 온도를 상회함으로써 Fig. 9 (a)와 같은 탄성거동을 가질 것으로 예상되며, 이에 따른 궤도 미소진동 절연성능 보장이 가능하다.

2.7 미소진동측정시험

SMA 기어의 미소진동 절연 성능을 검증하기 위해 Fig. 10과 같이 Hanging System을 구축하여 미소진동측정시험을 수행하였다. X-band 안테나에 Free-Free 조건을 부여하기 위하여 안테나 고정 플레이트를 탄성 와이어로 지지하였으며, X-band 안

테나의 회전방향 구동 시 발생하는 회전 모멘트를 최소화하기 위해 충분한 면적 및 무게를 갖는 50cm×50cm×2cm, 20kg의 플레이트를 사용하였다. 미소진동측정시험은 X-band 안테나를 방위각 방향으로 각각 3, 5, 7°/sec로 등속 구동하여 각 회전속도에 따라 X-band 안테나로부터 수반되는 미소진동을 측정하였으며, 재현성 검토를 위해 2 사이클 반복 수행하였다.

Figure 11은 SMA 기어의 미소진동측정시험 결과로, 안테나의 모터구동에 따라 전달되는 기저면의 외란력을 시간 및 주파수에 대해 워터폴로 나타내었다. 아울러, SMA 기어의 미소진동절연 성능 확인을 위해 일반적인 강기어와 비교하였으며, 안테나의 회전이 기어의 평면방향으로 구동되어 주 가진 방향이 x, y축임을 고려하여, 대표적인 예로 x축에 대한 3°/sec의 시험 결과를 제시하였다. 일반적인 강기어 적용 시, 1차 회전 고유진동수는 33Hz이며, Fig. 11 (a)와 같이 안테나의 회전구동 시, 33Hz에서 공진현상이 발생한다. 이는 위성 주요 탑재 구조물의 구조공진 주파수와 충분히 이격되지 않아 시선 각을 교란시켜 광학 탑재체의 영상품질을 낮추는 요인으로 작용

할 수 있음을 의미한다. 이에 반해, SMA 기어를 적용할 경우, 1차 회전 고유진동수가 13Hz로 저주파 영역으로 이동함에 따라, 이를 기점으로 한 고주파 대역의 외란이 상대적으로 많은 부분 감소하고 있다. 하지만, 주파수 분리에 기인한 수동형 진동절연 특성으로 13Hz에서 여전히 공진현상에 의한 외란이 다소 관측되나, 그 크기는 작고 무시할 만한 수준이다. 이는 3°/sec의 모터구동에 의해 발생하는 회전 구동주파수 122Hz 성분이 SMA 기어 적용 시의 1차 회전구동주파수 13Hz를 충분히 가진시키지 못한 결과이다. 또한, 위성 주요 탑재 구조물의 구조공진 주파수와 주파수 분리 측면에서 고찰하면, 위성 주요 탑재 구조물의 구조공진 주파수와 충분한 주파수 분리가 이루어져 영상품질이 비교적 개선될 것으로 기대할 수 있다.

Table 3은 SMA 기어 적용 시, 안테나의 구동속도 3, 5, 7°/sec에 대한 각 축별 피크 및 표준편차 감소율을 나타낸다. 속도 3°/sec를 대표적인 예로, 주 가진 방향인 x, y축에 대한 외란력의 최

Table 3. Disturbance Reduction Ratios between Conventional Gear and SMA Gear

Speed	Axis	Peak Reduction (%)		STD Deviation Reduction (%)
		Mean	Max	
3°/s	x	56.85	59.10	58.95
	y	37.94	75.69	64.55
	z	42.36	46.63	42.64
5°/s	x	44.54	37.57	38.23
	y	17.83	54.88	32.62
	z	40.01	39.65	44.83
7°/s	x	70.90	46.46	65.28
	y	18.28	49.680	31.36
	z	55.00	54.17	55.59

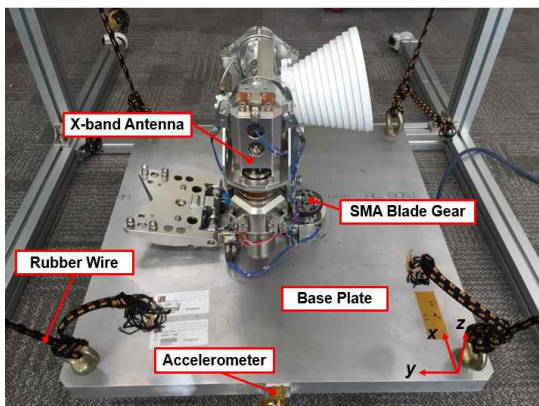


Fig. 10. Hanging System for Micro-jitter Measurement Test

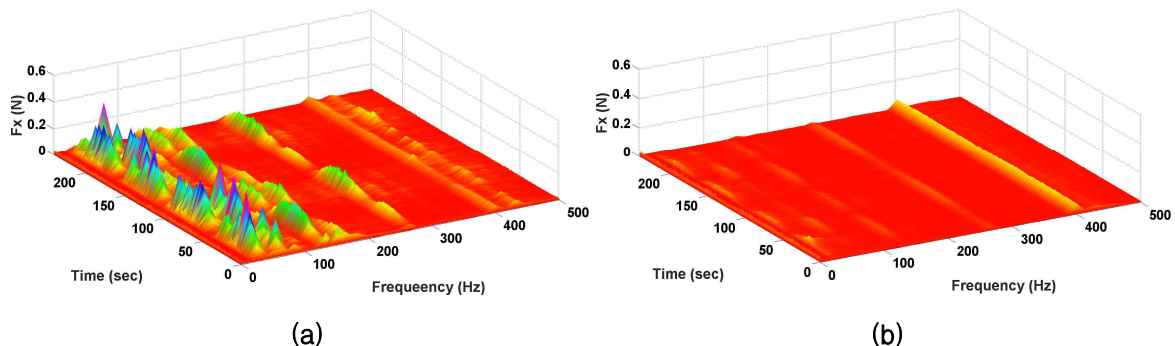


Fig. 11. Micro-jitter Measurement Test Results [(a): Conventional Gear, (b): SMA Gear]



대 피크감소율은 각각 59.10%, 75.69%이며, 표준편차 감소율은 58.95%, 64.55%로 SMA 기어 적용 시, 미소진동 저감 효율이 높음을 확인 할 수 있다. 이와 더불어, 기어의 두께방향인 z축도 46.63%의 저감 효율을 보이고 있다. 궁극적으로, 미소진동 측정시험을 통해 X-band 안테나 방위각 단에 SMA 기어를 적용할 경우, 일반적인 강기어보다 미소진동 절연 성능이 우수함을 입증하였다.

### III. 결 론

2축 짐벌식 X-band 안테나는 지상국으로 지향을 위한 회전방향 구동 시, 불필요한 미소진동을 유발하며 이러한 미소진동은 관측위성의 영상품질을 저하시키는 요인으로 작용한다. 이를 위해, 기 수행된 선행연구에서 X-band 안테나 방위각 단에 티타늄 블레이드 기어를 적용하여 미소진동 절연성능을 확보하였다. 하지만, 티타늄 기어는 실제 조립과정, 발사진동 및 궤도 열 환경동안 발생하는 축 정렬 불균형에 의해 과도한 토크가 기어에 인가될 시, 소성변형이 발생하는 문제점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 상기 문제점을 극복하기 위해 형상기억합금의 초탄성 효과에 주목한 초탄성 SMA 블레이드 기어를 제안하였으며, 차세대대중형위성의 X-band 안테나에 대한 적용가능성에 대해 실험적으로 검토하였다. SMA 기어의 기본특성 확인을 위해 회전방향에 대한 정하중 시험을 수행하였다. 상기 시험을 통해 기존 티타늄 기어의 경우에는 회전각  $\pm 1^\circ$ 부터 소성변형이 발생하고 있으나, SMA 기어는 초탄성 효과에 기인하여  $\pm 4^\circ$ 까지 소성변형 없이 초기의 형상으로 회복 가능함을 확인하였다. 또한 안테나 설계 시, 지상 조립부터 누적되는 피로 파괴에 대한 신뢰성 평가를 위해 가속수명시험을 수행하였다. 시험수행 결과, 회전각  $\pm 0.5^\circ$ ,  $\pm 1^\circ$ 에 대해 SMA 기어가 티타늄 기어보다 약 2.28, 1.67배 더 많은 사이클을 견딜 수 있음을 확인하였다. 온도 특성시험은 고온 및 저온 조건인  $50^\circ\text{C}$ ,  $-18^\circ\text{C}$ 의 온도에서 회전각  $\pm 2^\circ$ 에 대한 정하중 시험을 실시하였다. 오스테나이트 종료온도를 기점으로 고온 조건에서는 오스테나이트 상의 조성비가 증가함에 따라 상변화 임계 응력이 증가하여 선형 거동 특성을 보이고 있다. 또한, 저온조건에서는 마르텐사이트의 상의 조성비가 증가하여 등가 회전강성이 낮아짐을 확인하였으며, 실제 정상운용 상태에서 안테나 구동을 위한 토크를 고려하였을 때 동력 전달에 있어 충분할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안한 SMA 기어의 절연성능 검증을 위해 Hanging System을 구축하여 미소진동 측정시험을 수행하였다. 시험결과 일반적인 강기어에 비해 저회전강성 구현에 기인하여 구동 속도에 따른 가진 주파수와 충분한 주파수 분리로 전반적인 외란이 30%이상 감소함을 확인하였다. 또한 위성 주요 탑재 구조물의 구조공진 주파수 관점에서도 충분한 주파수 분리로 영상품질이 개선될 것으로 기대할 수 있다.

궁극적으로, 본 논문에서 제안한 초탄성 SMA 블레이드 기어가 기존 티타늄 블레이드 기어의 소성변형의 문제점을 극복함과 동시에, 미소진동 절연 성능이 우수함을 실험적으로 입증하여 기어의 설계 유효성을 입증하였다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단의 개인연구지원사업(중견연구)의 지원 (NRF-2015R1A2A2A01003672)으로 수행되었습니다.

### References

- 1) 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
- 2) 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
- 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, 2010
- 4) Jeon, S. H., Kwon, S. C., Kim, D. K. and Oh, H. U., "Investigation of Micro-vibration Isolation Performance of SMA Mesh Washer Isolator for Vibration Isolation of X-band Antenna", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 42, No. 11, pp. 988-995, 2014
- 5) Oh, H. U., Jeon, S. H., Kim, T. H. and

Kim, Y. H., "Experimental Feasibility Study for Micro-jitter Attenuation of Stepper-actuated X-band Antenna-pointing Mechanism by using Pseudoelastic SMA Mesh Washer" *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No.4, 2015.

6) 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.

7) Kim, D. K. and Choi, H. T., "Velocity Optimization Method of X-band Antenna for Jitter Attenuation", *21<sup>st</sup> Int. Congress on Sound and Vibration, Korean Society for Aeronautical and*

*Space Sciences*, Beijing, China, 2014.

8) Kozilek, H., Specht, B., Yong, S. S. and Lee, S. G., "Micro Vibration Improvement of a Stepper Actuated Mechanism" *15<sup>th</sup> European Space Mechanisms and Tribology Symposium*, Noordwijk, Netherlands, 2013.

9) European Cooperation for Space Standardization (ECSS-E-ST-33-01C) : Mechanism, 2009.

10) Youn, S. H. "Development of Pyroshock Mesh Isolator based on SMA Pseudoelastic", *Korea Advanced Institute of Science and Technology*, Doctoral Thesis, 2013.

11) <http://smalloy.co.kr/>