creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000267304

2019년 2월

석사학위 논문

초탄성 형상기억합금 메쉬와셔를 이용한 김벌형 안테나의 미소진동저감에 관한 연구

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

박 연 혁

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

초탄성 형상기억합금 메쉬와셔를 이용한 김벌형 안테나의 미소진동저감에 관한 연구

- A Study on Micro-vibration Isolation of Gimbal Type Antenna Using by Pseudoelasticity SMA Mesh Washer -

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

박 연 혁

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

초탄성 형상기억합금 메쉬와셔를 이용한 김벌형 안테나의 미소진동저감에 관한 연구

지도교수 오 현 웅

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함.

2018년 10월

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

박 연 혁

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

박연혁의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	이 창 열 (인)
위 원	조선대학교	교수	김 태 규 (인)
위 원	조선대학교	교수	오 현 웅 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES ····· vii

LIST OF TABLES ····· x

ABSTRACT ····· xi

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 구조설계 ····· 7

제 1 절 2축 김벌형 위성용 X-밴드 안테나 개요 ····· 7

제 2 절 제 2 절 2축 김벌형 X-밴드 안테나 구조해석 10

1. 모드 해석 ····· 18

2. 안테나 조립체에 대한 준정적해석 ····· 23

3. 안테나 조립체의 체결부에 대한 준정적해석 ··· 26

4. Ball & Socket Mechanism에 대한 준정적 해석 31

제 3 장 X-밴드 안테나의 미소진동 저감을 위한 초탄성 SMA 메쉬와셔 기어 ····· 41

제 1 절 종래의 티타늄 블레이드 기어 ····· 41

제 2 절 초탄성 형상기억합금 메쉬와셔 기어 ····· 47

1. SMA 메쉬와셔의 구성 및 원리 ····· 47

2. 초탄성 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어 ····· 52

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 SMA 메쉬와셔 기어의 기본특성 시험 ·····54
제 1 절 SMA 메쉬와셔의 두께방향 정하중 시험 ·····54
제 2 절 SMA 메쉬와셔 기어의 기본특성 시험 ·····57
1. 자유감쇠 진동시험 ·····57
2. 회전 방향 정하중 시험 ·····60
3. SMA 기어와 기존 강기어의 전달함수 선도 비교 ·····73
4. 가속수명 시험 ·····77
5. 온도특성 시험 ·····81
제 5 장 SMA 메쉬와셔 기어의 미소진동절연 성능 검증 ·····86
1. 등속도 구동시험 ·····88
제 6 장 결론 ·····94
【참고문헌】 ·····95
【연구실적】 ·····99
【감사의 글】 ·····101

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Image Quality Degradation due to Micro-vibration Disturbance Source 6
Fig. 2 Configuration of a Two-axis Gimbal-type X-band Antenna ·····9
Fig. 3 Finite Element Model of a 2-axis Gimbal-type X-band Antenna ·····12
Fig. 4 FEM of a Ball Bearing ·····13
Fig. 5 FEM of Launch Lock Mechanism ·····14
Fig. 6 Mode Shape of a 2-axis Gimbal-type X-band Antenna in On-orbit ·····19
Fig. 7 Mode Shape of a 2-axis Gimbal-type X-band Antenna in Launch Environment ·····21
Fig. 8 Stress Contour of a 2-axis Gimbal-type Antenna ·····24
Fig. 9 Mounting Interfaces on Base Bracket of X-band Antenna ·····28
Fig. 10 Composition of Launch Lock Mechanism ·····34
Fig. 11 Definition Number of Ball & Socket Mechanism ·····35
Fig. 12 Holding Force and Torque of Torque Spring for Launch Lock Mechanism ·····36
Fig. 13 Relation of MoS for Ball & Socket Mechanism's Gapping and Bolt ·····40
Fig. 14 Margin of Safety for Titanium Blade Gear ·····45
Fig. 15 Titanium Blade Gear Configuration before and after Induced Over-driving Torque [(a): Before, (b): After] ·····46
Fig. 16 SMA Material Close-up View w.r.t Phase Transformations [(a): Austenite Phase, (b): Martensite Phase] ·····49
Fig. 17 Configuration of SMA Washer ·····50
Fig. 18 Configuration of SMA Mesh Washer Gear [(a): Explode View, (b):Assembly View] ·····53
Fig. 19 Static Load Test Configuration of SMA Mesh Washer ·····55
Fig. 20 Displacement-Load Relation of SMA Mesh Washer ·····56
Fig. 21 Free-vibration Test Set-up ·····58

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 22 Free-vibration Test Results of the SMA and Titanium Blade Gear ····59
Fig. 23 Rotational Characteristic Test Set-up for SMA Mesh Washer Gear ····64
Fig. 24 Comparison of Hard and Soft SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±1°) ····65
Fig. 25 Comparison of Hard and Soft SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±2°) ····66
Fig. 26 Titanium and SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±1°) ····67
Fig. 27 Titanium and SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±2°) ····68
Fig. 28 Rotational Characteristic Test Results for SMA Mesh Washer Gear ····69
Fig. 29 SMA Mesh Washer Gear Configuration before and after Rotational Characteristic Test ····70
Fig. 30 Values of Equivalent Stiffness and Damping of SMA Gear ····71
Fig. 31 Transmissibility Curves According to Rotational Angle of SMA Mesh Washer Gea ····72
Fig. 32 Transmissibility Curves of Conventional, SMA Mesh Washer Gear based on Experimentally Obtained Characteristics. ····76
Fig. 33 Comparison of Rotational Stiffness w.r.t Accelerated Life Test between SMA Mesh Washer and Titanium Blade Gear ····78
Fig. 34 Titanium Gear for Accelerated Life Test [(a): Before, (b): After] 79
Fig. 35 SMA Mesh Washer Gear for Accelerated Life Test [(a): Before, (b): After] ····80
Fig. 36 Rotational Characteristics of SMA Mesh Washer Gear at Variable Temperature Conditions ····83
Fig. 37 Value of Equivalent Stiffness and Damping of SMA Mesh Washer Gear in Variable Condition ····84
Fig. 38 Rotational Characteristics of SMA Mesh Washer Gear at Before and After Temperature Test ····85
Fig. 39 Micro-jitter Measurement Test Set-up ····89

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 40 Comparison of Time Profiles for Force between Conventional Gear and SMA Mesh Washer Gear ·····90
Fig. 41 Waterfall Plots of Disturbance Forces for Azimuthal Rotating Movements of the Antenna applying the Conventional Gear ·····91
Fig. 42 Waterfall Plots of Disturbance Forces for Azimuthal Rotating Movements of the Antenna applying the SMA Mesh Washer Gear ·····92

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1 Information of Finite Element Model ····· 15
Table 2 Stiffness of Azimuth and Elevation Bearings ····· 16
Table 3 Material Properties for Structural Analysis ····· 17
Table 4 Modal Analysis Results in On-orbit Condition ····· 20
Table 5 Modal Analysis Results in Launch Condition ····· 22
Table 6 Quasi-static Analysis Results of a 2-axis Gimbal-type Antenna ····· 25
Table 7 Quasi-static Analysis Results of Antenna's Mounting I/F ····· 29
Table 8 Margin of Safety for Mounting I/F (Axial and Shear Direction) ····· 30
Table 9 Margin of Safety for Mounting I/F (Combined Force w.r.t Axial and Shear Direction) ····· 30
Table 10 Reaction Force of Ball & Socket in Case 1 ····· 37
Table 11 Reaction Force of Ball & Socket in Case 2 ····· 37
Table 12 Margin of Safety for Ball & Socket Gapping ····· 37
Table 13 Margin of Safety for Ball & Socket Mechanism's Bolt (Axial and Shear Direction) ····· 38
Table 14 Margin of Safety for Ball & Socket Mechanism's Bolt (Combined Force w.r.t Axial and Shear Direction) ····· 38
Table 15 Parameter Value for Torque Budget ····· 44
Table 16 characteristic value of SMA ····· 51
Table 17 Parameter Values of X-band Antenna ····· 75
Table 18 Total Disturbance Reduction Ratio Between the Conventional Gear and SMA Mesh Washer Gear ····· 93

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Micro-vibration Isolation of Gimbal Type Antenna Using by Pseudoelasticity SMA Mesh Washer

by Park, Yeon-hyeok
Advisor : Prof. Oh, Hyun-Ung, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering
Graduate School of Chosun University

As recent satellite imagery markets require much higher resolution images, the size of satellite image data transmitted to ground stations is generally increasing. Therefore, high-resolution observation satellites require an effective management strategy to transmit huge and high-resolution image data to the desired ground station through omnidirectional or directional X-band antennas. However, since the directional X-band antenna can directly point the antenna in a specific direction without being influenced by the attitude of the satellite or the movement on the orbit, it can transmit the large-capacity image data more effectively in the real-time mission than the omnidirectional antenna. The effective pointing ability of the directional gimbal-type antenna can be improved by attaching it to a multi-axis gimbals system operated by a stepper motor. Such a X-band antenna with multi-axis gimbal system is installed outside the satellite and experiences a severe launch vibration environment until it enters the target orbit. The above-mentioned severe launch vibration environment include a dynamic disturbance such as a quasi-static load, random vibration and shock. The various launch loads affect the two rotational drives parts provided to direct the antennas of the ground station irrespective of the orbital motion and attitude of the

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

satellite in the operation of the 2-axis gimbal-type X-band antenna. Therefore, a launch locking system is applied to enable successful survival from the various launch loads in order to perform a successful mission of the X-band antenna. In addition, a stepper motor is used to operate the two rotation driving parts and a gear module having a constant gear ratio is used to transmit the power of the motor to the two rotation driving units. However, the micro-jitter disturbances caused by imperfect intermeshed teeth of the harmonic drive gear configuration and dynamic imbalance of the whole antenna system during the stepper motor activation are one of the serious micro-jitter sources to degrade the image quality of the high resolution observation satellite. Therefore, Kozilek et al. proposed a titanium gear with a blade shape for the purpose about attenuated micro-vibration generated during azimuth rotational driving of a 2-axis gimbal-type X-band antenna. Because of the low rotational stiffness due to the blade shape, the desired micro vibration reduction performance is ensured by simple shape change of the gear without changing the complex design of the antenna hardware through frequency separation. However, when the above gear is applied, unexpecting over driving torque is applied to the titanium blade gear due to the actual antenna assembly process or alignment imbalance of gear axis caused by the severe launch vibration loads or orbit-thermal environment. At this time, plastic deformation occurs in the titanium blade, and there is a problem that it is impossible to transmit accurate power for driving the antenna from the motor shaft. In terms of the structural safety, above mentioned problem can be easily solved by increasing the stiffness of the blade shape to guarantee the structural safety of the titanium gear under the condition that a much higher driving torque is induced. However, this approach might result in degrading the micro-jitter attenuation capability because the function of attenuating the micro-jitter depends on the torsional

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

stiffness of the gear. In other words, the micro-jitter attenuation capability cannot be expected anymore with the highly stiffened blade gear design. Therefore, We focused on pseudoelasticity behavior of Shape Memory Alloy (SMA) to overcome the problems of the titanium blade gear proposed by Kozilek et al.. pseudoelasticity behavior is a characteristic that significant deformations under excessive loading and recover its original shape when the load is removed, without undergoing plastic deformation, which is caused by a stress induced phase transformation. Therefore, In order to attenuate the micro-vibration generated at the azimuth stage of the 2-axis gimbal-type antenna, We proposed gears with SMA mesh washer. This application makes it possible to achieve a lower torsional stiffness and higher damping in the torsional direction of the gear. The lower torsional stiffness and higher damping are main contributors to the micro-jitter isolation capability of the gear when the stepper motor is actuated. In addition, the pseudoelasticity of the SMA mesh washer guaranteed the structural safety of the gear itself even under unexpected circumstances such as over-driving torque induced into the gear.

In this study, we describe the structural design of a two-axis gimbal-type X-band antenna and analyze the dynamic response characteristic of the antenna under different constraint conditions depending on whether or not the launch lock device is constrained under launch and on-orbit environment. In addition, the quasi-static analysis was performed to confirm the structural safety of antenna structure and bolt I/Fs between antenna base and satellite. The suitable range of constraint force on launch lock device was also determined to ensure the structural safety and mechanical gapping of ball & socket Interfaces, which provides multi-constraints on the azimuth and elevation stage of antenna. and, This paper describes the introduction and structural design of the proposed SMA mesh washer gears for micro-vibration isolation that occurs when the

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

mission of the X-band antenna is performed in orbit. In order to verify the design validity of the gears, basic characteristics tests for gears, static load tests under various temperature conditions, and accelerated life tests were carried out. The effectiveness of the micro-jitter attenuation capability of the SMA mesh washer gear was demonstrated by the miro-jitter measurement tests by using a 2-axis gimbal-type stepper actuated x-band antenna.

Key Word : 2-axis Gimbal-type X-band Antenna, Launch Vibration, Micro-jitter, SMA Mesh Washer Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

최근 고해상도 영상에 대한 수요가 증가함에 따라 제한된 촬영기회에 다수의 표적에 대한 고해상도 영상정보가 획득이 가능한 고기능/고성능의 위성시스템 구축이 요구된다. 또한, 고해상도 영상정보로 인해 누적되는 고용량 영상데이터를 지상 안테나로 효율적인 송신을 위한 안테나 개발이 요구되고 있다. 상기 요구조건을 충족시키기 위해 좁은 폭의 빔과 높은 안테나 이득을 가지는 지향성 안테나가 적용될 경우 특정 방향으로 강하고 정확한 전파를 지상국으로 송신하여 장거리임에도 불구하고 고효율의 데이터 전송을 가능하게 한다. 아울러, 이를 2축 김벌형 지향조정 장치에 적용함으로써 위성의 궤도 및 자세 운동과는 무관하게 지상국의 안테나를 지향할 수 있도록 한다[1-3]. 이와 같은 2축 김벌형 X-밴드 안테나는 지상국의 안테나와의 원활한 통신을 수행하기 위해 위성체의 외부에 장착되며, 목표하는 궤도에 진입하기까지 극심한 발사진동 환경을 겪는다. 상기 발사진동 환경은 발사체 추진에 의한 정적가속과 발사체 엔진의 추진이 중단될 시 발생하는 5~100Hz 대역의 정현진동이 조합되어 나타나는 준정적 하중 및 대기와의 충돌과 발사체 추진 시 음압 등의 동적외란요소에 의해 발생하는 20~2000Hz 범위의 랜덤진동이 존재한다. 아울러, 발사체의 단 분리와 페어링 분리, 위성체의 분리 등에 의해 유발되는 충격하중을 경험하게 된다. 이와 같은 다양한 발사하중은 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 궤도 운용 시 전술한바 와 같이 위성의 궤도 및 자세 운동과는 무관하게 지상국의 안테나를 지향하기 위해 마련된 두 회전구동부에 영향을 미친다. 따라서 X-밴드 안테나의 성공적인 임무수행을 위해 상기의 다양한 발사하중으로부터 생존이 가능하도록 별도의 발사구속장치가 적용된다[4-5]. 또한, 궤도상에서 X-밴드 안테나는 임무 수행 시 상기 발사구속장치의 구속이 해제되며, 두 회전구동부를 동작시키기 위해 스텝핑 모터가 적용된다. 상기 스텝핑 모터의 동력을 두 회전구동부에 전달하기 위해 일정한 기어비를 갖는 기어모듈이 사용되나, 스텝핑 모터 구동에 따라 발생하는 외란 및 기어 간의 부정확한 맞물림, 안테나 조립체의 동적 불균형 등의 원인으로 인해 안테나 구동 시 목적하는 임무를 수행함과 동시에 미소진동을 수반한다. 비록 미소진동의 크기는 극히 미소하나 위성체 구조물을 통해 광학 탑재체에 전달될 시 카메라의 시선 각에 영향을 미쳐 Fig. 1과 같

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 고해상도 관측위성의 영상품질 저하를 유발하는 주요 요인으로 작용한다[6-8]. 따라서 상기의 문제를 보완하기 위해 Kim et al. [9]은 2축 김벌형 안테나에 적용된 스텝핑 모터의 종류에 따라 안테나 구동 시 발생하는 외란력을 측정하여 진동특성을 분석하였다. 따라서, 2상 스텝핑 모터에 비해 적은 토크 리플 (Torque Ripple)이 발생되는 5상 스텝핑 모터를 사용 시, 최대 피크 감소율이 56%로써 위성의 지터성능을 향상시킬 수 있는 설계 기법을 제안하였다. 또한, Kim et al. [10]은 X-밴드 안테나로부터의 미소진동을 저감시키기 위해 속도 최적화 기법을 제안하였다. 속도 최적화 기법은 임의의 탑재장비와의 구조적 공진을 발생시킬 수 있는 구동속도를 회피하여 특정 구동 속도로만 이루어진 최적화된 TPF (Tracking Parameter File) 프로파일을 생성하는 것으로써, X-밴드 안테나에 대한 미소진동 시험을 수행하여 속도 최적화 기법의 적용 가능성을 검증하였다. 그러나 위성관련 기술이 지속적으로 발전함에 따라 고해상도의 영상정보 획득을 위해 관측위성의 영상 흔들림 (Jitter)에 대한 요구조건은 점차 엄격해지고 있다. 따라서, 상기에서 언급된 기술적 접근으로는 안테나 구동에 따른 근본적인 진동외란 저감이 불가능하고, 엄격해지는 지터 요구조건을 만족시키는데 한계가 존재한다. 따라서, Oh et al. [11]은 2축 김벌형 X-밴드 안테나 조립체의 진동절연을 목적으로 Ring Type의 형상기억합금 메쉬와셔가 적용된 진동절연기를 제안하였으며, 미소진동 측정시험을 통해 설계 유효성을 입증하였다. 그러나 발사환경이 고려된 진동절연기의 배치를 위한 설계의 부재로, 실제 안테나에 적용을 위해서는 별도의 발사구속장치의 적용 및 절연기의 적절한 배치설계가 요구되는 등 실제 임무적용에는 한계가 존재한다. Kozilek et al. [12]은 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 방위각 단 회전구동 시 발생하는 미소진동절연을 목적으로 블레이드 형상을 갖는 티타늄 기어를 제안하였다. 이는 블레이드 형상에 따른 저 회전강성에 기인하여 주파수 분리를 통해 기존의 안테나 하드웨어의 복잡한 설계 변경 없이 기어의 간단한 형상변경만으로 목적하는 미소진동 저감성능을 확보하였다. 그러나 상기의 기어를 적용할 경우, 실제 안테나 조립과정 또는 발사 및 궤도 열 환경에 기인한 축 정렬 불균형 및 오차에 의해 티타늄 블레이드 기어의 설계규격을 상회하는 과도한 토크가 인가된다. 이때, 티타늄 블레이드에 소성변형이 발생하며, 이에 따라 모터 축으로부터 안테나 구동을 위한 정확한 동력전달이 불가능한 단점이 존재한다. 또한, 미소진

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

동 절연성능 향상시키기 위해 티타늄 블레이드 기어의 회전강성을 낮출 시 소성변형에 대한 취약성 및 구조적 관점에서의 설계여유가 감소하여 안테나 구동을 위한 설계요구토크 규격에 부합하지 못하는 단점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 Kozilek et al. [12]이 제안한 티타늄 블레이드 기어의 문제점을 보완하고자 형상기억합금 (Shape Memory Alloy: SMA)의 초탄성 효과에 주목하였다. 여기에서, 형상기억합금은 하중의 변화나 온도 조건에 의해 형상기억합금의 상변화가 발생되어 대표적인 두 개의 상 (Phase)인 마르텐사이트 (Martensite)나 오스테나이트 (Austenite) 상의 특징을 갖게 된다. 또한, 고온에서는 격자 형상의 결정구조를 이루고 있는 오스테나이트 상으로 존재하고 저온 조건에서는 평행사변형 형상의 결정 구조를 갖는 마르텐사이트 상으로 존재하게 된다. 따라서, 형상기억합금의 특징은 잔류 변형률이 존재할 때 온도 변화에 의해 본래의 상태로 복원하는 형상기억효과 (Shape Memory Effect)와 상변화에 의해 10%가 넘는 큰 변형률이 발생 시에도, 하중을 제하 시 초기의 변형 전 상태로 복원하는 거동 특성인 초탄성 특성(Pseudouelastic)을 나타낸다. 전자의 형상기억효과를 이용한 형상기억합금의 경우, 우주용 구속분리장치 등으로서 국내/외 위성사업에 활발하게 적용되고 있으며[13-15], 다수의 우주용 제품군이 존재한다. 또한, 후자의 초탄성 효과를 이용한 형상기억합금을 활용한 종래의 연구는 아래와 같다. Hu et al. [16]은 초탄성 형상기억합금을 프레임 구조물에 하중이 작용될 시 내진성능 및 잔류변위의 효율적 감소를 목표로 변위가 집중되는 가새 프레임 (Based Frame)부에 적용하여 충격완화 및 소성변형 방지의 가능성을 입증하였다. Roh et al. [17]은 이중 구조물의 경우 간극을 줄이기 위해 별도의 항복이력장치가 적용되나, 상기 장치의 강성이 과도할 시 이력장치의 에너지 소산능력이 감소하는 단점을 해결하기 위해 항복이력장치를 초탄성 형상기억합금 소재로 변경하였다. 이로부터, 이력장치의 일정범위 내에서 유연성을 확보하고 에너지 소산능력이 향상됨을 보고 하였다.

또한, 우주분야에서도 연구를 통해 형상기억합금의 초탄성 효과를 적용한 진동 절연기 및 충격 저감기로 적용한 사례가 존재한다. Youn et al. [18]은 초탄성 형상기억합금 와이어로 직조된 메쉬와셔 절연계를 파이로 충격 절연을 위해 제안하였다. 따라서, 파이로 충격 및 랜덤진동 시험을 수행하여 제안한 절연계의 설계 유

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

효성을 입증하였다. Oh et al. [19,20]은 우주용 냉각기의 발사 및 궤도 미소진동 절연을 목적으로 의탄성 형상기억합금 메쉬 와셔를 적용한 수동형 진동절연기를 제안하였고, 기본특성 시험을 통해 진동 하중에 따라 절연기의 주파수 및 댐핑특성 가변이 가능함을 입증하였다. 아울러 인증시험수준의 발사 진동 시험[19] 및 궤도 미소진동 측정 실험을 통해 설계의 유효성을 입증하였다[20]. Jeong et al. [21]은 파이로 충격 저감과 저주파 진동증폭을 방지하는 효과를 위해 초탄성 특성을 갖는 형상기억합금 메쉬와셔 및 SMA 와이어 액츄에이터를 적용한 주파수 가변형 충격 절연기를 제안하였다. 이는 충격환경에서는 저주파 특성에 맞춰 주파수 분리에 기인한 고주파 충격저감 성능이 나타나며, 100Hz 미만의 정현파 환경에서는 절연기의 100Hz 이상으로 가변시켜 저주파에서의 진동증폭 방지 성능을 실험적으로 입증하였다.

상기의 예와 같이 형상기억합금의 초탄성 특성은 다양한 연구에서 진동절연계로의 응용이 이루어지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 전술한 2축 김벌형 안테나의 방위각 단 구동 시 발생하는 미소진동 절연을 목적으로 Kozilek et al. [12]이 제안한 티타늄 블레이드 기어의 한계점을 보완하기 위해 형상기억합금의 초탄성 특성에 주목하였으며, SMA 메쉬와셔가 적용된 기어를 제안하였다. SMA 메쉬와셔 기어는 저 회건강성 및 높은 댐핑특성으로 스텝핑 모터 작동 시 발생하는 미소진동에 대한 절연성능을 확보와 동시에 예기치 않은 과도한 토크가 발생하여도 소성변형 없이 기어의 구조 건전성을 보장가능하다.

따라서, 본 논문에서는 제안된 기어의 적용대상인 2축 김벌형 X-밴드 안테나에 대한 구조설계에 관해 서술하였으며, 구조해석을 수행하여 발사 및 궤도환경 하에서 발사구속장치 (Launch Lock Device)의 구속여부에 따른 상이한 구속조건하에서 안테나의 동적응답특성을 파악하였다. 또한, 발사하중에 대한 구조건전성 확보여부를 검토 하였으며, 구속분리장치 (Holding & Release Mechanism)의 구속력에 따라 안테나의 두 회전구동부를 구속하는 Ball & Socket Mechanism의 이격 및 볼트 자체의 구조 건전성을 파악하여 X-밴드 안테나에 적용된 구속분리장치의 적정 구속력을 도출하였다. 아울러, 궤도상에서 X-밴드 안테나의 임무 수행 시 발생하는 미소진동 절연을 위해 제안된 SMA 메쉬와셔 기어에 대한 소개 및 구조설계에 대해 서술하고, 상기 기어의 설계 유효성을 검증하기 위해 기어에 대한 기본특성 시험,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다양한 온도조건 하에서의 정하중 시험 및 가속수명시험을 수행하였다. 이와 더불어 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔 기어의 미소진동 절연성능검증을 위해 기어 적용에 따른 X-밴드 안테나의 미소진동 측정시험을 수행하여 기존 강기어 적용 시 측정된 미소진동과 비교하였다. SMA 메쉬와셔가 적용된 기어의 미소진동 절연성능 검증에 있어서는 안테나의 등속도 구동조건에서의 성능검증을 수행하였다. 따라서, 전술한 시험들로부터 본 연구에서 제안된 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어가 소성변형 없이 안테나 구동에 필요한 토크 전달이 가능함과 동시에 미소진동 저감에 유효함을 입증하였다.

본 논문의 구성으로 1장에서는 X-밴드 안테나의 소개 및 SMA 메쉬와셔 기어의 제안배경을 서술하였다.

제 2장에서는 X-밴드 안테나 구조 설계 및 구조해석 결과를 서술하였다.

제 3장에서는 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔 기어의 구성 및 원리를 서술하였다.

제 4장에서는 제안된 기어의 기본특성 파악을 위해 수행된 자유감쇠 진동 시험, 정하중 시험, 온도특성, 가속수명 시험 결과를 서술하였다.

제 5장에서는 SMA 메쉬와셔 기어의 미소진동 절연성능 검증을 위해 안테나의 등속도 대한 미소진동 절연성능 측정시험 결과를 서술하였다.

제 6장에서는 결론, 참고문헌 및 연구실적을 정리하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

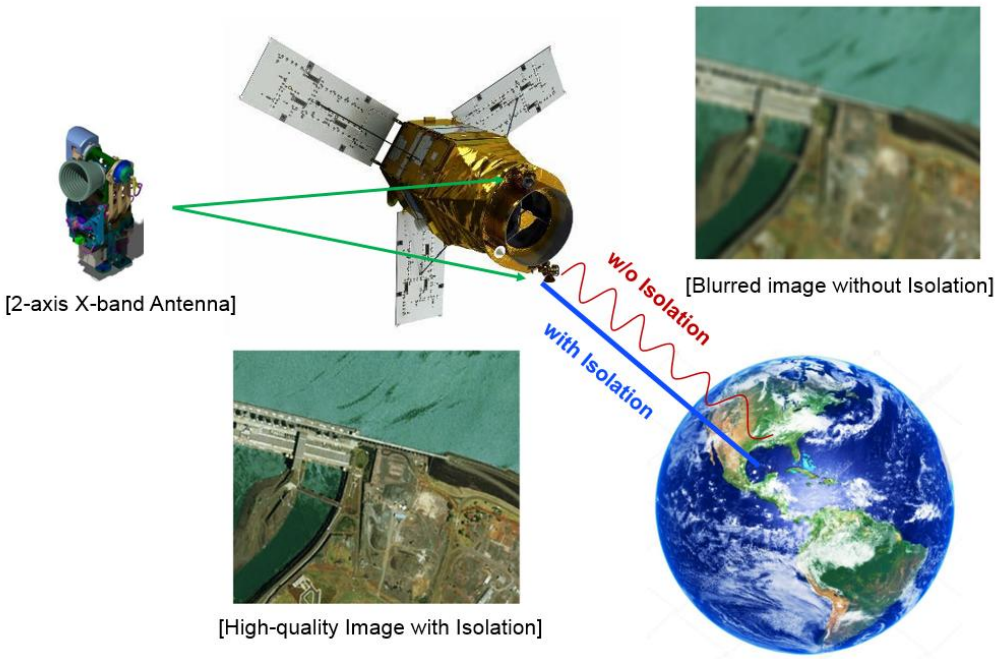


Fig. 1 Image Quality Degradation due to Micro-vibration Disturbance Source

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 구조설계

제 1 절 2축 김벌형 위성용 X-밴드 안테나 개요

Figure 2는 고해상도 관측위성에 사용되는 2축 김벌형 X-밴드 안테나 형상으로 궤도상에서 영상 촬영 임무수행 중 획득된 대용량의 영상 데이터를 지상국의 안테나로 송신하는 역할을 수행한다. X-밴드 안테나의 무게는 총 6.8kg으로 2축 김벌형 지향 조정 장치에 장착됨으로써 지상국을 실시간으로 지향이 가능하여 안정적인 대용량 영상 데이터 전송이 가능함과 동시에 고기동성의 장점을 가진다. 2축 김벌형 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 Phytron사의 2상 스테핑 모터 (ZSS 43.200.06.-HD) 가 사용되었다. 또한 스테핑 모터의 출력축은 1:50 기어비의 하모닉 드라이브 기어와 연결되어 있으며 각 구동축의 회전 구동을 위해 1:1.6 기어 비를 갖는 스퍼 기어 (Spur Gear)와 베벨 기어 (Bevel Gear)가 적용되었다[3]. 따라서, X-밴드 안테나의 회전속도 ω (deg/sec)에 대하여 식(1)을 적용 시 1차 구동 주파수 (Harmonic Frequency)를 계산할 수 있다.

$$H_1 = (200 \times 80 \times \omega)/360 \qquad (1)$$

또한, 2축 김벌형 위성용 X-밴드 안테나는 전술한 바와 같이 두 회전 구동부가 존재하기 때문에 발사환경에서의 두 회전 구동부의 구조건전성을 확보하기 위해 별도의 구속분리장치가 적용되었다. 상기 구속분리장치는 두 회전 구동부를 동시에 구속이 가능하도록 안테나의 Yoke 단과 Horn 안테나가 Ball & Socket 방식으로 구속분리장치에 의해 구속이 된다. 이 후 궤도 운용 시 발사 구속 장

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

치의 구속 해제로 Hold-down Bracket이 전개됨과 동시에 안테나의 임무수행이 이루어진다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

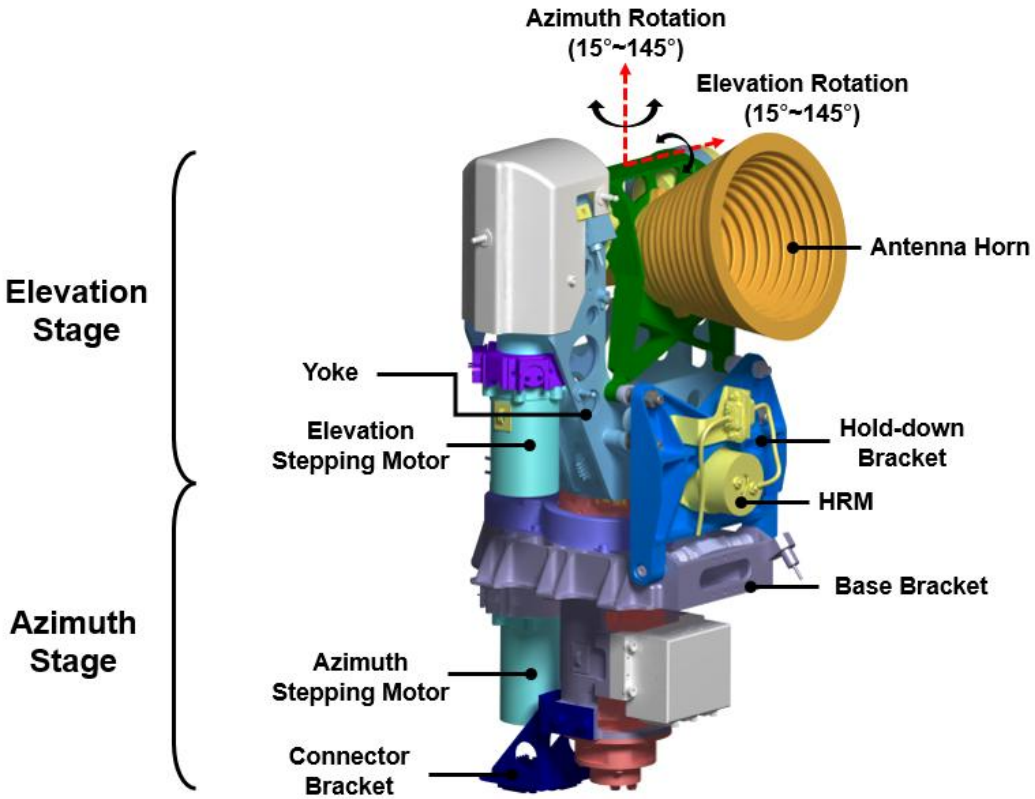


Fig. 2 Configuration of a Two-axis Gimbal-type X-band Antenna

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 2축 김벌형 X-밴드 안테나 구조해석

본 절에서는 발사진동환경 하에서 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 구조 건전성 확보여부를 검토하고자 유한요소모델 (Finite Element Model: FEM)을 상용 구조해석 툴인 MSC. Patran/Nastran으로 구축하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 각각 모드해석 및 준정적해석을 실시하였으며, 모드해석으로부터 발사구속장치의 구속/해제 조건에 대해 안테나의 동적응답특성을 파악하여 발사구속장치 구속 여부에 따른 강성요구조건 만족 여부를 검토하였다. 또한 준정적 해석을 수행하여 설계하중 하에서 안테나 조립체에 발생하는 응력에 대한 안전여유로부터 구조 건전성 확보여부를 검토하였으며, 안테나 기저면과 위성체 간 체결부에서 발생하는 반력으로부터 볼트에 대한 안전여유를 산출하였다. 아울러, 발사구속장치의 구속력 크기에 따라 Ball & Socket Mechanism의 소켓부과 볼트머리 간 발생하는 이격 (Gapping)에 대한 안전여유와 Ball & Socket Mechanism에 적용되는 볼트 자체의 안전여유를 비교하여 안테나에 적용된 발사구속장치의 적정한 구속력을 결정하였다. 상기 안테나의 구조설계 요구조건은 발사진동환경 하에서 1차 고유진동수가 100Hz 이상을 만족해야하며, 설계하중 50.5g가 안테나 조립체에 작용 될 시 구조건전성이 확보되어야 한다. 따라서, 상기 요구조건의 만족여부를 파악하기 위해 구축된 안테나의 유한요소모델은 Fig. 3과 같이 구축하였으며, 구축된 모델의 무게는 약 7.6Kg이다. 안테나의 주요 구성품의 경우, 형상 및 특성에 따라 적절한 요소로 구축되었으며, Table 1에 각 구성품에 적용된 요소의 종류 및 개수를 나타내었다. 안테나를 구성하는 주요 구조체의 경우 CHEXA8, CPENTA6과 같은 Solid Element 및 Shell Element인 CQUAD4, CTRIA3를 적용하여 모델링을 구축하였다. 또한 CBAR Element와 RBE2 (Rigid Body Element 2)를 조합하여 각 구조물 간의 볼트 체결조건을 모사하였다. 방위각 및 고각 단 등의 회전구동부에 적용된 볼 베어링의 경우 상세 모델링으로 구축하지 않고 Fig. 4와 같이 CBUSH Element 와 내륜 및 외륜에 회전 자유도를 부여하기 위해 RBE 3 (Rigid Bidy Element 3)를 조합하여 구축하였다. 여기에서 CBUSH Element에 적용될 볼 베어링 강성은 Table 2와 같으며, 상기 적용된 두개의 RBE 3의 경우 DoF를 (Ux=Uy=Uz=0)과 같이 설정하여 회전에 대한 자유로운 운동을 가지도록 구현하였다. 또한, 발사 진동환경에서 안테나의 회전구동부에 대한 구조건전성

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

확보를 위해 적용된 발사구속장치에 마련된 Ball & Socket Mechanism은 Fig. 5와 같이 Ball과 Socket부를 RBE2로 구현하고, 강체구속으로 모사하기 위해 CBUSH Element에 1E+12N/m의 강성치를 각 축에 적용하였다. 그리고 안테나 조립체의 스텝모터와 같은 비관심 구조체의 경우 집중질량 (CONM2)으로 구축하였으며, 기저면 브래킷 (Base Bracket)을 통해 안테나가 위성 구조체에 볼트 마운팅으로 장착되는 조건을 모사하기 위해 체결부 6개에 6자유도 (Ux=Uy=Uz=Rx=Ry=Rz=0) 구속조건을 부여하였다. 이때, 안테나의 각 구성품에 적용된 물성치는 Table 3에 정리하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

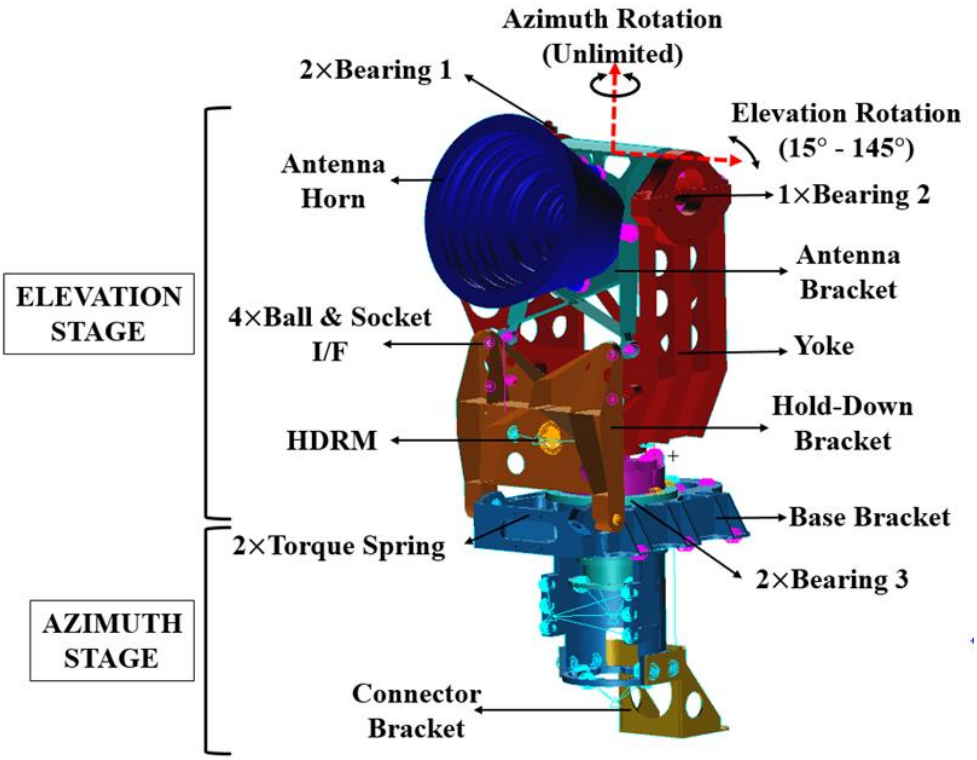


Fig. 3 Finite Element Model of a 2-axis Gimbal-type X-band Antenna

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

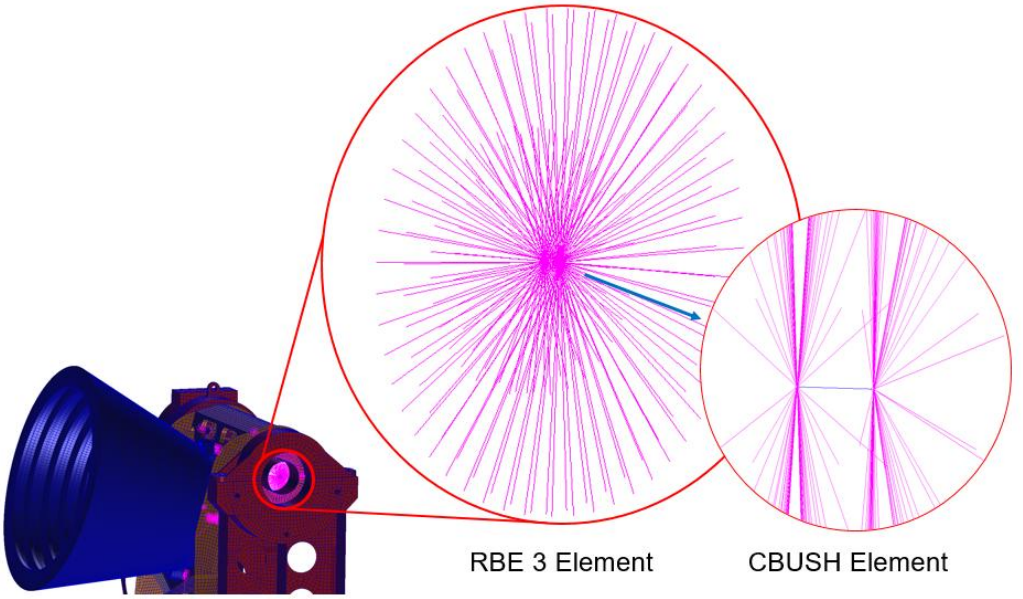


Fig. 4 FEM of a Ball Bearing

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

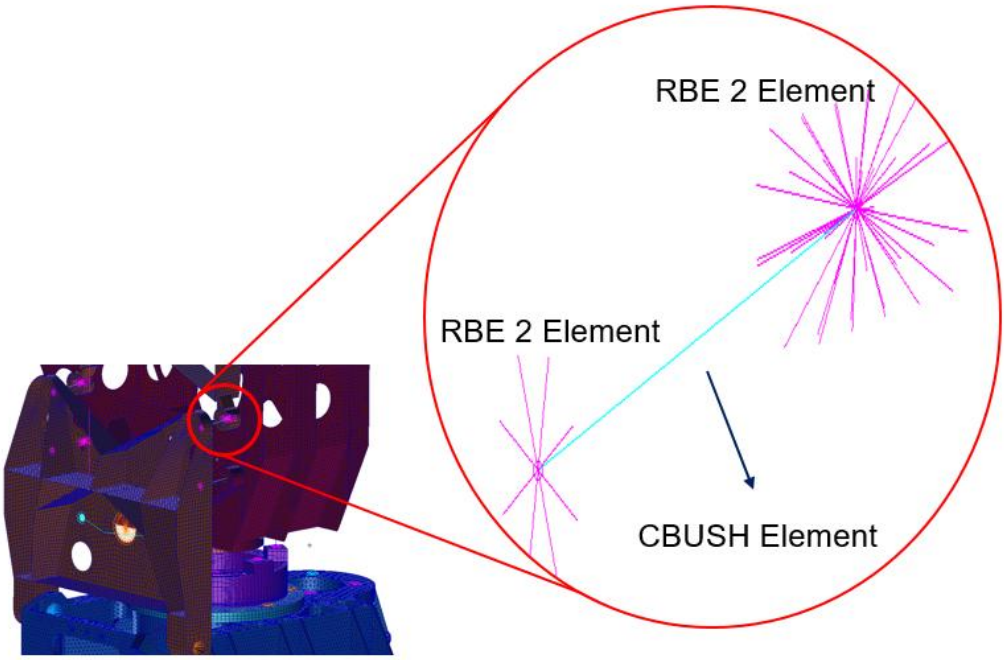


Fig. 5 FEM of Launch lock Mechanism

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1 Information of Finite Element Model

Node or Element			Number	Total
Node			307474	307474
Element	Solid	CHEXA8	68072	344392
		CPENTA6	251253	
	Shell	CTRIA3	747	
		CQUAD4	24123	
		CBAR	32	
		CBUSH	11	
		CONM2	13	
		RBE2	125	
		RBE3	16	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2 Stiffness of Azimuth and Elevation Bearings

Dir.	Stiffness Value[N/m]		
	El. Stage		Az. Stage
	Bearing 1	Bearing 2	Bearing 3
Axial	63×10^6	0	113×10^6
Radial	156×10^6	80×10^6	208×10^6

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 Material Properties for Structural Analysis

Parts	Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m^3)
Gear	Titanium	150	0.3	7900
Fastener	SUS 304	201	0.3	4500
Antenna Bracket	Al6061 -T4	68.9	0.33	2700
All Other Parts	Al7075 -T7	72	0.33	2800

Collection @ chosun

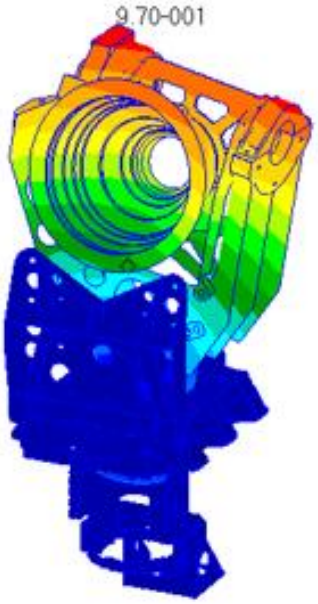
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 모드 해석

전술한 바와 같이 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 발사 및 궤도 환경에 대한 동적응답특성을 파악하기 위해 Fig.3의 유한요소모델로부터 모드 해석을 수행하였다. 상기 해석은 발사환경과 궤도환경 하에서 발사구속장치의 구속 유무에 따른 안테나의 상이한 형상조건을 구축하기 위해 Ball & Socket Mechanism 모사하는 CBUSH Element의 연결 유무에 따라 수행하였다. Fig. 6, 7은 각각 발사환경과 궤도상에서의 안테나 형상에 따른 모드 형상과 응답 주파수를 나타내며, Table 4, 5에 각각의 모드해석에 대한 10차까지의 해석 결과를 정리하였다. Fig. 6과 같이 발사구속장치의 구속이 해제되었을 때 안테나의 Yoke 조립체 전체에 탄성모드가 발생하는 것을 알 수 있으며, 이때 1차 고유진동수는 40.35Hz가 나타났다. 또한, 발사환경 하에서 발사구속장치가 적용된 안테나의 모드해석 결과는 Fig. 7과 같이 1차 고유진동수는 103.39Hz로 안테나의 강성요구조건을 만족하기 위해 발사구속장치의 적용이 유효함을 확인 하였다. 또한 안테나의 유한요소모델의 경우 실제 안테나의 무게에 비해 0.7Kg이 더 높아 고유진동수 관점에서 모드해석이 상대적으로 악조건에서 수행 된 것으로 상기 모드해석 결과의 3% 이상의 마진이 확보 될 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[Mode 1: 40.35Hz]

[Mode 2: 50.53Hz]

[Mode 3: 79.27Hz]

[Mode 8: 390.29Hz]

Fig. 6 Mode Shape of a 2-axis Gimbal-type X-band Antenna in On-orbit

Collection @ chosun

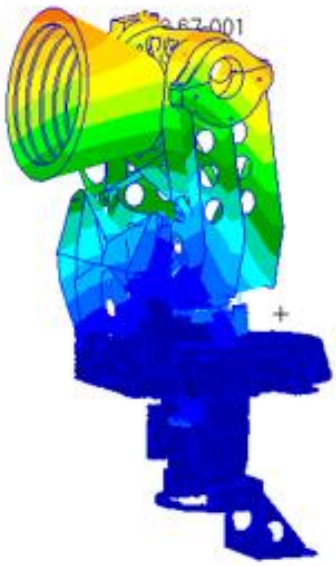
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4 Modal Analysis Results in On-orbit Condition

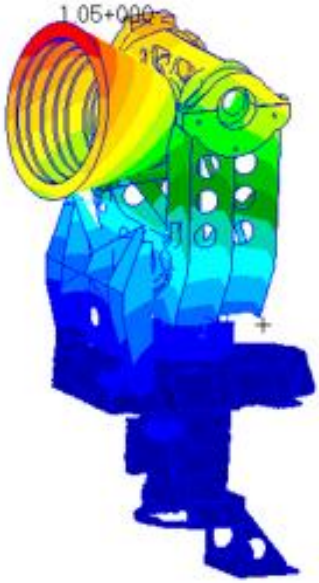
Mode	Frequency (Hz)	Remark
1	40.35	York Assy.
2	50.53	York Assy.
3	79.27	Antenna Bracket
4	175.83	York Assy.
5	228.12	York Assy.
6	361.35	Connector Bracket
7	376.34	Antenna Bracket
8	390.29	Connector Bracket
9	405.43	Connector Bracket
10	474.38	Connector Bracket

Collection @ chosun

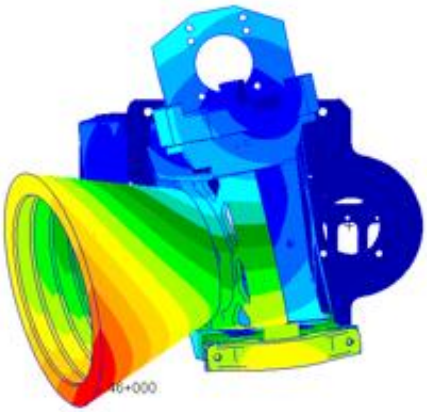
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[Mode 1: 103.39Hz]



[Mode 2: 115.32Hz]



[Mode 3: 164.25Hz]

[Mode 8: 378.87Hz]

Fig. 7 Mode Shape of a 2-axis Gimbal-type X-band Antenna in Launch Environment

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5 Modal Analysis Results in Launch Condition

Mode	Frequency (Hz)	Remark
1	103.39	York Assy.
2	115.32	York Assy.
3	164.25	York Assy.
4	189.09	York Assy.
5	214.96	York Assy.
6	357.81	Antenna Bracket
7	359.27	York Assy.
8	378.87	Connector Bracket
9	417.68	Connector Bracket
10	479.00	Connector Bracket

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 안테나 조립체에 대한 준정적해석

발사환경 하에서 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 구조건전성 검토를 위해서 구조해석 시 안테나의 각 축인 X, Y, Z 방향으로 설계하중 50.5g를 인가하고, 안테나 조립체에 발생하는 최대응력으로부터 안전여유를 식 (2)으로부터 산출하였다.

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

여기에서, $\sigma_{allowable}$은 재료의 허용응력, $\sigma_{\max}$는 구조해석으로부터 산출된 최대응력, $S.F$는 안전계수를 나타낸다. 이때 항복강도 및 극한강도에 대한 $S.F$는 각각 1.25, 1.5의 값을 적용하였다[22]. Fig. 8은 준정적 해석의 결과로서 각 축 방향에 대해 설계하중 50.5g를 인가 시 안테나 조립체에 발생하는 최대응력의 분포를 각각 나타낸다. Table 6은 상기 최대응력으로부터 산출된 MoS의 계산결과를 나타낸 것으로 각 축에 대하여 MoS 값이 모두 0 이상이 산출되는 것을 확인 가능하다. 따라서 설계하중에 대해 해석적으로 안테나 조립체의 구조건전성이 확보됨을 알 수 있다. 한편 Fig. 8의 Y축 결과로부터 Hold-down Bracket의 힌지부 구조체에서 0.1 이하의 안전여유가 산출되고 있다. 상기 안전여유의 값은 유한요소모델 구축의 용이성을 위해 구조체 단순화 작업이 수행되는 과정에서 Fillet 형태가 삭제됨에 따라 Edge형태로 해석이 수행된다. 따라서 응력이 Edge부에 국부적으로 집중되는 형상이 발생함에 따라 X, Z 축에 비해 비교적 낮은 0.09, 0.05의 안전여유가 도출되었다. 하지만 실제 안테나의 경우 Fillet 처리로 인해 해석상에서 도출된 수준의 응력이 발생하지 않을 것으로 판단되며 상기 식 (2)의 경우 $S.F$ 값이 포함된 악조건으로 산출된 값이므로 현재 확보된 안전여유 값으로 부터 안테나 조립체의 구조건전성이 충분하게 확보된 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

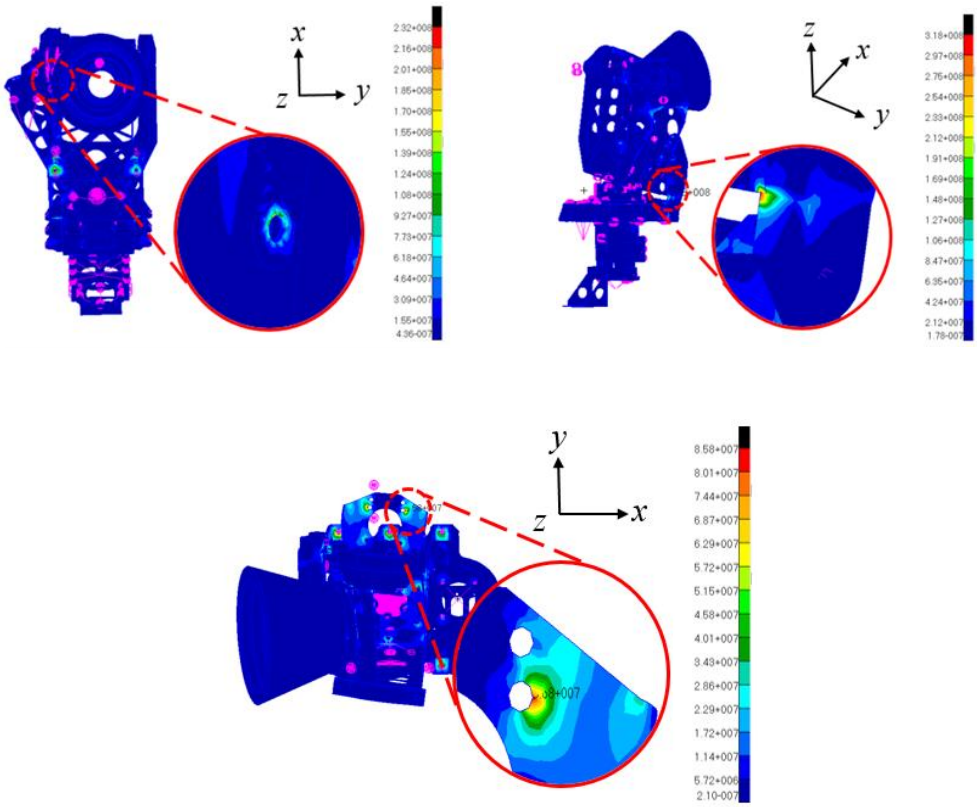


Fig. 8 Stress Contour of a 2-axis Gimbal-type Antenna

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6 Quasi-static Analysis Results of a 2-axis Gimbal-type Antenna

Material	$\sigma_{allow_yie.}$ [MPa]	$\sigma_{allow_ult.}$ [MPa]	σ_{max} [MPa]			S.F		MoS		
			X Dir.	Y Dir.	Z Dir.			X Dir.	Y Dir.	Z Dir.
Aluminum 7075-T7	435	505	232	318	85.8	Yie.	1.25	0.50	0.09	3.05
						Ult.	1.5	0.45	0.05	2.92

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 안테나 조립체의 체결부에 대한 준정적해석

발사환경 하에서 2축 김벌형 X-밴드 안테나 조립체와 위성체 간의 체결을 위한 Mounting Interface (I/F)에 적용된 볼트의 구조건전성을 검토하였다. Fig. 9는 X-밴드 안테나 조립체에 마련된 6곳의 체결부 Mounting I/F를 나타내고 있으며, 체결부에 적용된 볼트는 Steel 계열의 M5 볼트 (LN29949)가 적용되었다. 체결부에 대한 준정적 해석을 통해 산출된 Shear 및 Axial 방향과 두 방향의 반력이 조합되어 동시에 발생하는 조합력에 대해 볼트의 유효단면적으로부터 산출된 최대응력에 기반하여 전술한 식 (2)을 통해 안전여유를 계산하였다. Table 7은 X-밴드 안테나의 각 축에 대해 준정적해석을 수행한 결과로부터 도출된 체결부의 X, Y, Z 방향 반력을 나타낸다. 여기에서 볼트의 최대 축 방향 반력 (Max Axial Force)인 Z 방향에 대한 반력은 1391.8N으로 산출되었으며, 볼트의 전단방향인 X, Y 방향에 대한 최대 전단반력 (Max Shear Force)은 1157.04N으로 산출되었다. 상기 결과로부터 계산된 볼트의 축 및 전단 방향에 대한 응력은 각각 69.2Mpa, 57.5Mpa를 나타내며, 이에 기반하여 볼트의 안전여유 계산 결과를 Table 8에 나타내었다. 여기에서 상기 볼트에 대한 안전계수를 적용 시 보수적으로 고려하기 위해 항복 및 극한강도에 대해 각각 안전계수를 1.25와 2.0을 적용하였다[23]. 상기 Table 8의 안전여유 계산 결과로부터 축방향 및 전단방향에 대해 안전여유가 0 이상의 값을 갖는 것을 확인 가능하다. 또한, 전술한 축 및 전단방향의 힘이 동시에 작용하는 조건에서의 조합력에 대한 볼트의 구조건전성을 검토하기 위해 아래의 식 (3)~(5)를 적용하여 안전여유를 계산하였다.

$$R = \frac{S.F \times \sigma_{\max}}{\sigma_{allowable}} \tag{3}$$

$$\sqrt{R_{shear}^{2} + R_{axial}^{2}} = R_{comb} \tag{4}$$

$$MoS_{comb} = \frac{1}{R_{comb}} - 1 \geq 0 \tag{5}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기에서, R은 허용응력에 대한 최대응력의 이용률 (Utility Ratio)을 나타내며 [24] MoS를 계산하는 식 (4)에 역수를 취함으로서 계산이 이루어진다[9]. Table 9는 상기의 식으로부터 산출된 MoS 결과를 나타내며, 조합력에 대한 MoS가 양수의 값을 나타냄에 따라 설계하중 하에서 체결부의 Mounting I/F에 사용되는 볼트에 대한 구조 건전성이 확보됨을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

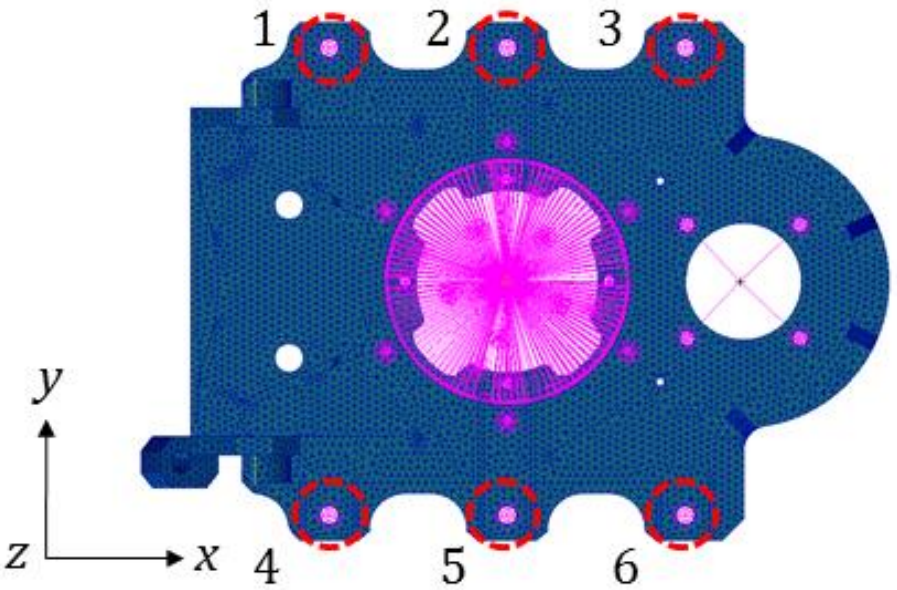


Fig. 9 Mounting Interfaces on Base Bracket of X-band Antenna

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 7 Quasi-static Analysis Results of Antenna's Mounting I/F

Bolt	X Dir.			Y Dir.			Z Dir.		
	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_x [N]	F_y [N]	F_z[N]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
1	404.96	385.04	940.76	470.64	703.52	1391.8	140.80	319.39	887.23
2	919.63	702.16	390.66	371.95	627.41	65.56	86.23	364.07	786.66
3	787.77	556.91	548.65	167.41	583.56	76.90	61.76	619.85	588.62
4	130.50	614.87	1043.0	477.85	685.42	1391.0	87.25	267.56	296.95
5	756.25	689.17	613.40	171.83	571.51	77.58	41.12	584.48	549.17
6	802.06	167.78	431.09	374.75	629.74	55.14	53.31	451.24	692.84
Max Shear Force	$\sqrt{F_x^2+F_y^2}$ =1157.04N								
Max Axial Force	1391.80N								

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 8 Margin of Safety for Mounting I/F (Axial and Shear Direction)

Load Dir.	Material	σ_{allow_yie} [MPa]	σ_{allow_ult} [MPa]	σ_{max} [Mpa]	S.F		MoS	
					Yield	Ult.	Yield	Ult.
Axial	A-286 Steel	950	1100	69.2	1.25	2.0	9.98	7.06
Shear	A-286 Steel	548	655	57.5	1.25	2.0	6.62	4.69

Table 9 Margin of Safety for Mounting I/F (Combined Force w.r.t Axial and Shear Direction)

Load Dir.	Material	R_{axial}		R_{shear}		$R_{comb.}$		MoS	
		Yie.	Ult.	Yie.	Ult.	Yie.	Ult.	Yie.	Ult.
Combined	A-286 Steel	0.091	0.124	0.151	0.175	0.176	0.214	4.68	3.629

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. Ball & Socket Mechanism에 대한 준정적 해석

Figure 10은 2축 짐벌식 X-밴드 안테나에 적용된 총 4개의 상세한 Ball & Socket Mechanism의 형상을 나타낸다. 상기 Ball & Socket Mechanism은 볼트와 Socket으로 구성되어져 있으며, Hold-down Bracket에 마련된 볼트의 머리부가 고각 방향으로 회전구동이 가능한 Antenna Bracket과 방위각 방향으로 회전구동하는 Yoke단에 마련된 Socket에 HRM의 구속력으로 결합되게 된다. 여기에서, HRM의 체결 토크로 인한 구속력이 작은 경우 Ball 과 Socket Mechanism 간의 이격 (Gapping)이 발생하게 된다. 이는 X-밴드 안테나의 두 회전구동부의 구속이 제대로 이루어지지 않음에 따라 구조건전성 확보에 어려움이 존재함을 의미하기 때문에 HRM의 충분한 구속력으로 Ball & Socket Mechanism에 Gapping이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하다. 그러나 HRM의 구속력이 과도할 경우 Ball & Socket Mechanism에 적용된 볼트부에 가해지는 초기 하중도 증가하게 되어 구조건전성 관점에서 문제가 발생한다.

따라서 HRM의 적정 구속력을 결정하고자 Ball & Socket Mechanism에 대한 준정적 해석을 통해 Gapping에 대한 MoS와 볼트 자체의 MoS를 도출하였다. 우선 Gapping에 대한 MoS를 계산하기 위해 식 (6)을 적용하였다.

$$MoS = \frac{F_{axial_case2}}{S.F \times F_{axial_case1}} - 1 \geq 0 \tag{6}$$

여기에서, F_{axial_case1}은 HRM에 의해 구속이 이루어지지 않은 상태를 Case 1으로 정의하였을 때, 설계 하중에 대해 준정적 해석으로부터 도출된 Ball & Socket Mechanism의 최대 반력이며, F_{axial_case2}는 HRM의 구속력 및 Torque Spring의 토크가 Hold-Down Bracket의 전개 방향으로 작용할 경우를 Case 2로 정의하였을 때 Ball & Socket Mechanism의 최소 반력을 나타낸다. 여기에서 Case1, 2에 대해 각각 최대, 최소값의 반력을 적용한 이유는 상대적으로 악조건일 경우의 MoS를 도출하기 위함이며, 안전계수에 1.2를 적용하였다[25]. 이때 MoS가 0 이상의 값이 도출되는 경우에는 상기 구속력이 설계 하중에 의한 반력보다 높음에 따라 Gapping이 발생하지 않는다는 의미를 나타내며, 반대로 0 이하의 값이 도출될

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시 Case 2에서 적용되는 HRM의 구속력이 부족함을 의미한다. Fig. 11와 같이 각각의 Ball & Socket Mechanism을 정의 하였으며, Fig. 12에 전술한 발사구속장치의 구속력 및 전개 및 수납을 위한 Torque Spring의 토크값을 나타내었다. 따라서, Table 10은 각 축에 설계하중 인가 시 발생하는 Ball & Socket Mechanism의 Case 1에 대한 반력, Table 11의 경우 설계하중 인가 및 임의로 발사구속장치의 구속력이 11kN, Torque Spring의 토크가 39Nm일 때 발생하는 Case 2에 대한 반력을 나타낸다. 또한, 상기의 Tables 10과 11은 Table 7과 동일한 방법으로 계산된 Axial 및 Shear 방향의 반력을 나타낸다. 이때 Gapping의 경우 Axial 방향에 대한 MoS를 산출하여 Table 12에 나타내었다. Table 12의 결과에 따르면 4개의 Ball & Socket Mechanism 모두 MoS가 0 이상의 값을 가짐으로서 Gapping에 대한 구조 건전성이 확보됨을 확인하였다. 이어서 상기의 구속력과 토크 작용 시 볼트 자체의 구조 건전성을 검토하였다. Ball & Socket Mechanism에 적용된 볼트의 종류는 Beryllium-copper 계열의 M6 볼트 (CDA 172)이며, Table 11의 결과를 토대로 4개의 Ball & Socket Mechanism 중 최대 반력이 나타난 1개의 Mechanism을 선정하였다. 또한 식 (3)~(5)로 부터 안전여유를 계산하여 Axial과 Shear 방향 및 조합력에 대한 MoS를 Tables 13과 14에 나타내었다. 결과를 살펴보면, Axial 방향의 안전여유는 양수의 값을 가지지만 Shear 및 Combined 방향에 대해서는 볼트의 안전여유가 음의 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 발사구속장치의 구속력이 11kN 조건에서 Gapping에 대한 구조건전성이 확보 되었지만, Ball & Socket Mechanism에 사용되는 볼트의 구조 건전성은 확보되지 못함을 나타낸다.

따라서 Ball & Socket Mechanism의 Gapping과 볼트 자체의 구조 건전성이 모두 확보되는 HRM의 적정 구속력을 결정하기 위해 발사구속장치의 구속력 범위가 5~11kN, 2개의 Torque Spring에 각각 19.5Nm의 고정된 토크가 Hold-Down Bracket의 전개 방향으로 작용한다는 조건으로 해석을 수행하였다. Fig. 13은 상기의 해석으로 부터 도출된 Ball & Socket Mechanism의 Gapping에 대한 안전여유와 볼트 자체의 안전여유를 나타낸다. Fig. 13에 따르면 발사구속장치의 구속력이 증가함에 따라 Gapping에 대한 MoS는 증가함이 확인되지만 볼트 자체의 MoS는 감소하고 있음을 확인 가능하다. 따라서 발사구속장치의 구속력에 따른

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

두 조건의 안전여유 모두 확보되는 약 7~10kN의 구속력의 범위가 Ball & Socket Mechanism에 Gapping을 발생시키지 않음과 동시에 볼트에 대한 구조 건전성 모두 만족시키는 안테나에 적용된 발사구속장치의 적정 구속력 범위임을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

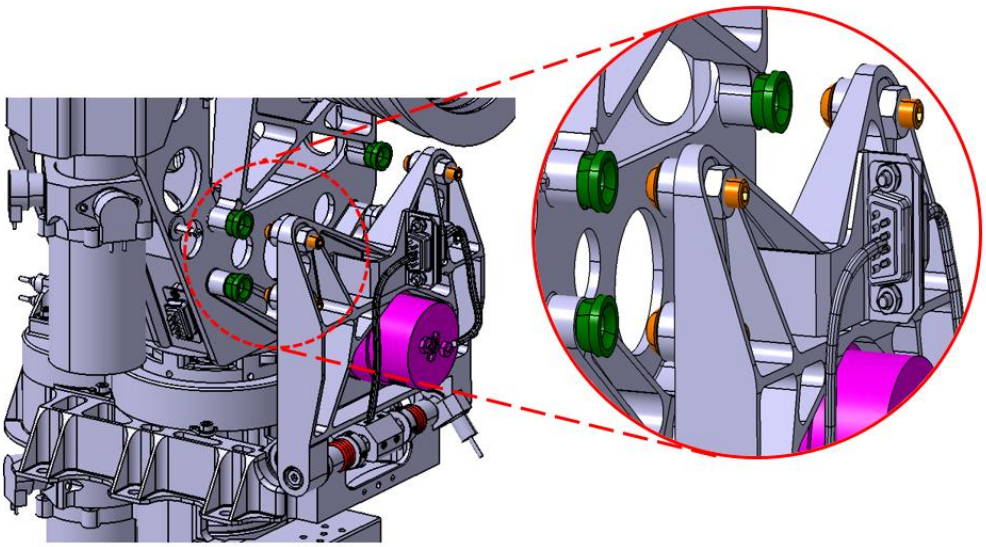


Fig. 10 Composition of Launch Lock Mechanism

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

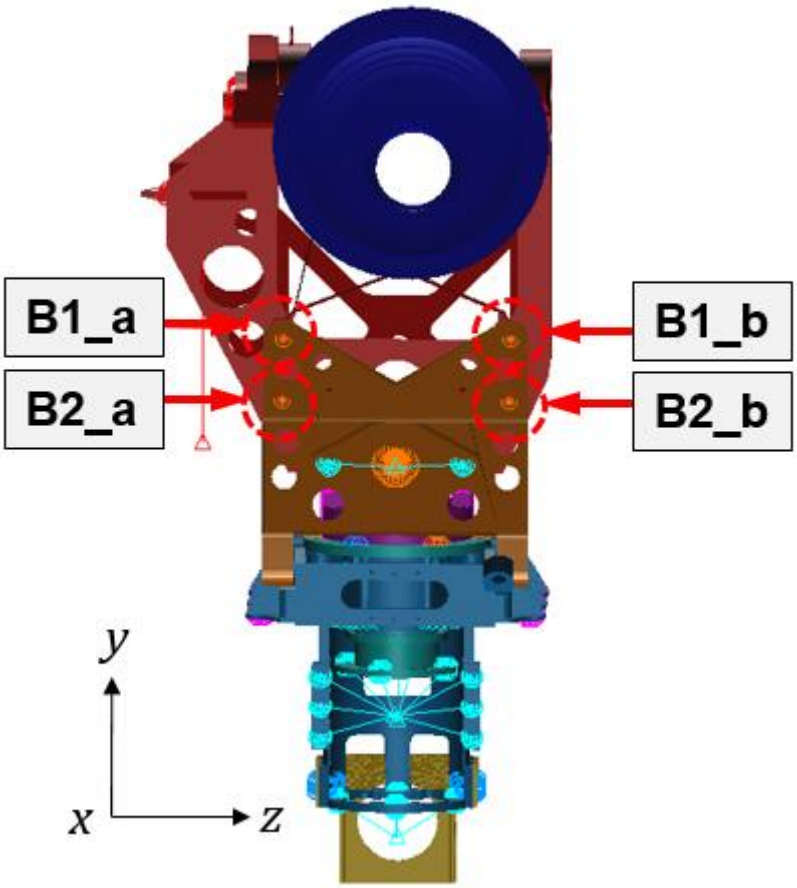


Fig. 11 Definition Number of Ball & Socket Mechanism

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

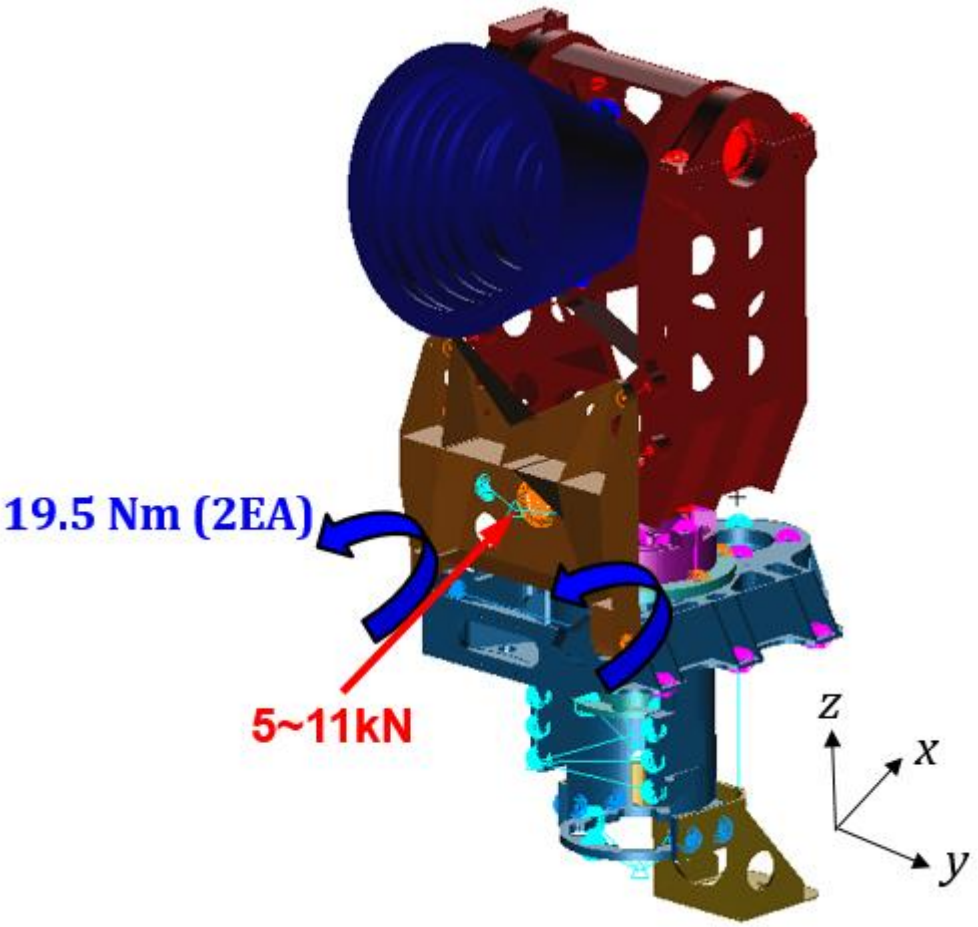


Fig. 12 Holding Force and Torque of Torque Spring for Launch Lock Mechanism

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 10 Reaction Force of Ball & Socket in Case 1

No.	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_{axial} [N]	F_{shear} [N]
B1_a	247.3	263.9	556.6	247.3	616.0
B1_b	319.8	362.4	609.7	319.8	709.3
B2_a	477.1	648.1	1240.1	477.1	1399.1
B2_b	302.4	223.0	940.8	302.4	966.9

Table 11 Reaction Force of Ball & Socket in Case 2

No.	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_{axial} [N]	F_{shear} [N]
B1_a	512.3	480.4	1146.0	512.3	1242.6
B1_b	563.8	383.5	1350.6	563.8	1404.0
B2_a	1263.9	1666.5	4111.1	1263.9	4436.0
B2_b	1946.5	1364.0	4334.1	1946.5	4543.6

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 12 Margin of Safety for Ball & Socket Gapping

No.	Margin of Safety
B1_a	0.73
B1_b	0.61
B2_a	1.31
B2_b	4.35

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 13 Margin of Safety for Ball & Socket Mechanism's Bolt (Axial and Shear Direction)

Load Dir.	Material	σ_{allow_yie} [MPa]	σ_{allow_ult} [MPa]	σ_{max} [MPa]	S.F		MoS	
					Yield	Ult.	Yield	Ult.
Axial	CDA 172	620	750	96.74	1.25	2.0	4.12	2.88
Shear	CDA 172	310	375	225.83	1.25	2.0	0.09	-0.17

Table 14 Margin of Safety for Ball & Socket Mechanism's Bolt (Combined Force w.r.t Axial and Shear Direction)

Load Dir.	Material	R_{axial}		R_{shear}		$R_{comb.}$		MoS	
		Yield	Ult.	Yield	Ult.	Yield	Ult.	Yield	Ult.
Combined	CDA 172	0.19	0.26	0.91	1.20	1.10	1.06	-0.08	-0.19

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

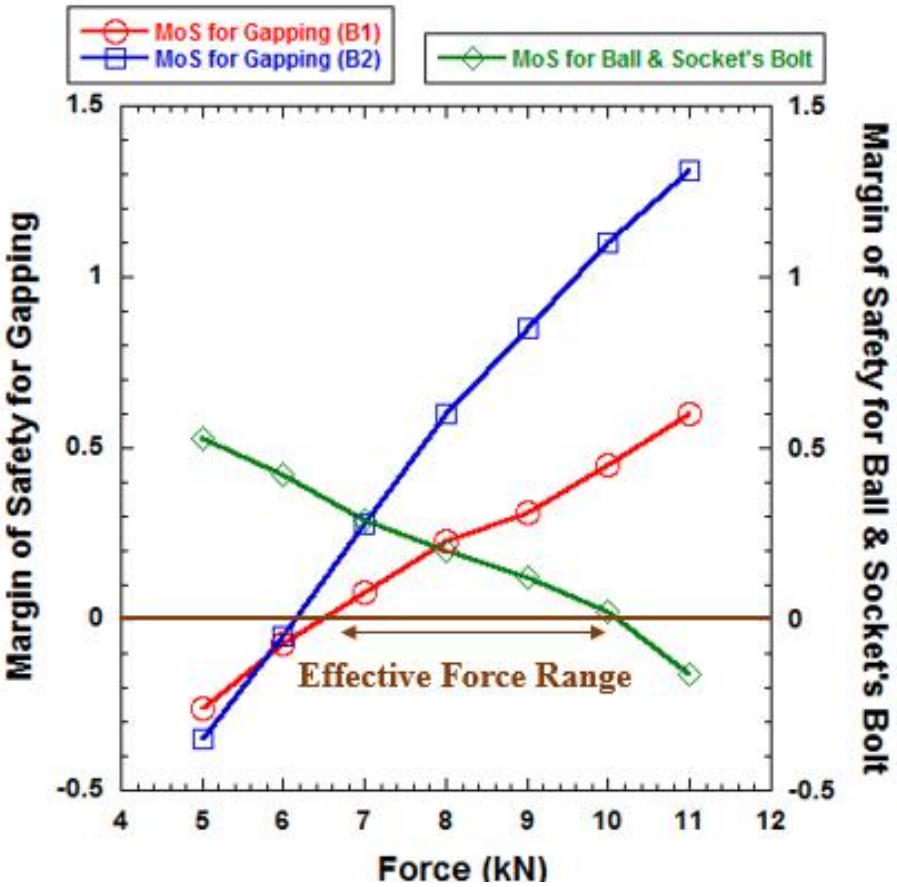


Fig. 13 Relation of MoS for Ball & Socket Mechanism's Gapping and Bolt

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 X-밴드 안테나의 미소진동 저감을 위한 초탄성 SMA 메쉬와셔 기어

제 1 절 종래의 티타늄 블레이드 기어

2축 김벌형 X-밴드 안테나의 방위각 단 회전 구동 시 발생하는 미소진동을 절연하기 위한 목적으로 Kozilek et al.[12]은 티타늄 블레이드 기어를 제안하였다. 상기 기어는 치형으로 형성된 외륜과 스텝 모터와의 결합을 위한 내륜 사이에 균일한 간격으로 얇은 리브로 설계되었다. 따라서 X-밴드 안테나의 복잡한 설계 수정이 요구되지 않고 기어의 간단한 형상 변경으로 저 회전강성 구현을 통해 미소진동절연 성능을 확보가 가능하다. 티타늄 블레이드 기어 적용 시 X-밴드 안테나의 1차 고유진동수는 저 회전강성에 기인하여 위성의 주요 탑재체의 구조모드 주파수와 충분한 주파수 분리가 이루어져야하며, 안테나의 방위각 단 회전구동을 위한 설계요구토크에 대해 티타늄 블레이드 기어의 설계여유가 0 이상을 만족해야한다[26]. 하지만 티타늄 기어의 설계여유가 상기 설계요구토크에 대해 0 이상의 값을 만족하더라도 실제 조립과정, 발사 및 궤도 열 환경에 의해 축 정렬의 불균형이 발생하여 설계요구토크를 상회하는 과도한 토크가 기어에 작용될 시 티타늄 블레이드 기어에 소성변형이 발생하는 문제점이 존재한다. 따라서, 상기 설계 요구조건을 고려하여 미소진동절연을 목적으로 충분한 주파수 분리를 구현하기 위해 기어 및 리브의 두께를 최소한으로 설계할 경우, 저 강성에 기인하여 안테나 조립체의 1차 고유진동수가 낮은 대역에 존재하도록 하는 방법이 존재하나, 강성이 낮을수록 구조 건전성을 확보하기 어려운 한계점이 존재한다. 일례로서, 기어 리브의 두께가 0.6mm인 티타늄 블레이드 기어의 경우, 기저면의 전달률 측면에서 약 6배의 진동 절연 성능이 확보될 것으로 기대되나 저 강성으로 인한 소성변형의 문제점이 존재한다. 이에 대하여 이론적 검토 및 접근방법으로 0.6mm 티타늄 블레이드 기어에 대한 안전여유를 도출하였다. 안테나의 회전 구동을 위해 요구되는 설계요구토크를 산출하기 위해 ECSS Rule[22]에 제시된 식 (7)을 적용하였으며, 수식의 각 파라미터에 대한 수치는 Table 15에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$T_R \geq 2(1.1T_G + 1.2T_{L/S} + 3T_{Bea} + 3T_{S/R}) + 1.25T_{Acc} \quad (7)$$

여기에서, T_R은 안테나 회전구동을 위한 설계요구토크 값이며, T_G는 지상 시험의 환경조건을 고려한 1g에 해당하는 중력 토크, $T_{L/S}$는 리미트 스위치의 작동 토크, T_{Bea} 및 $T_{S/R}$은 베어링 및 슬립 링의 마찰토크, T_{Acc}은 안테나 구동의 가속토크를 의미한다. 상기 식 (7)로부터 산출된 안테나의 방위각 단 회전구동을 위한 설계요구토크 값은 1.57N/m이다.

따라서, 산출된 설계요구토크에 준하여 기존 티타늄 블레이드 기어의 구조건전성에 대한 평가를 위해 안전여유를 전술한 식 (2)을 통해 도출하였다. 상용 구조해석 툴을 이용하여 식 (7)로부터 도출된 설계요구토크를 상회하는 1.8Nm의 토크를 기어 내륜에 인가 시 기어 리브단에 발생하는 최대 응력 값은 811Mpa이다. 이때, 안전계수는 ECSS Rule[22]에 근거하여 위성 설계 시 적용되는 금속성 부품에 대한 안전계 1.25를 사용하고, 티타늄 재료의 허용 응력 값인 1000Mpa에 대한 안전여유를 검토 하였다. 이로부터 MoS가 0 이하의 값인 -0.01이 산출되었으며, 이는 종래의 티타늄 블레이드 기어가 1.8Nm의 토크에 대해 구조 건전성이 미 확보됨을 나타낸다. Fig.14는 티타늄 블레이드 기어에 작용하는 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 과도한 토크 인가 시 0 이하의 설계여유를 나타내고 있다. 따라서 Kozilek et al. [12]이 제안한 종래의 티타늄 블레이드 기어는 실제 안테나의 축 정렬 틀어짐에 의해 요구규격토크를 상회하는 토크가 인가될 시, 소성변형이 발생하여 구조건전성을 확보하지 못하는 한계점이 존재한다.

Figure 15는 상기 소성변형의 대표적인 형상을 나타내며, Fig. 15 (b)는 티타늄 블레이드 기어에 ±2 회전각에 대한 회전방향 정하중 시험 결과로서 상기 설계요구토크 보다 과도한 토크가 기어에 작용하여 소성변형이 발생하여 기어의 리브의 위치가 Fig. 15 (a)의 초기 위치와 부합하지 않은 것을 확인 가능하다. 따라서 상기 소성변형이 발생함에 따라 X-밴드 안테나의 구동을 위한 동력을 정

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

확히 전달할 수 없는 원인으로 작용하기 때문에 이에 대한 개선이 필수적임을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 15 Parameter Value for Torque Budget

Factor	Torque (Nm)	Number of Set (EA)
T_G	0.477	-
$T_{L/S}$	0.108	1
T_{Bea}	0.028	2
$T_{S/R}$	0.014	-
$T_{A\alpha}$	0.003995	-
T_R	1.57	-

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

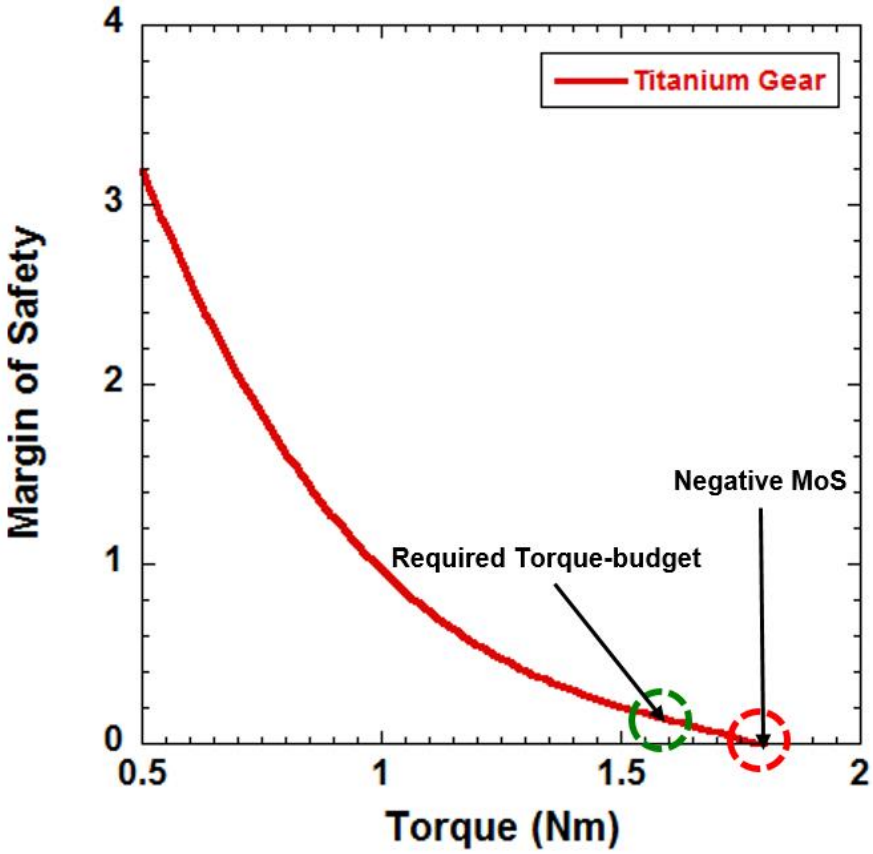
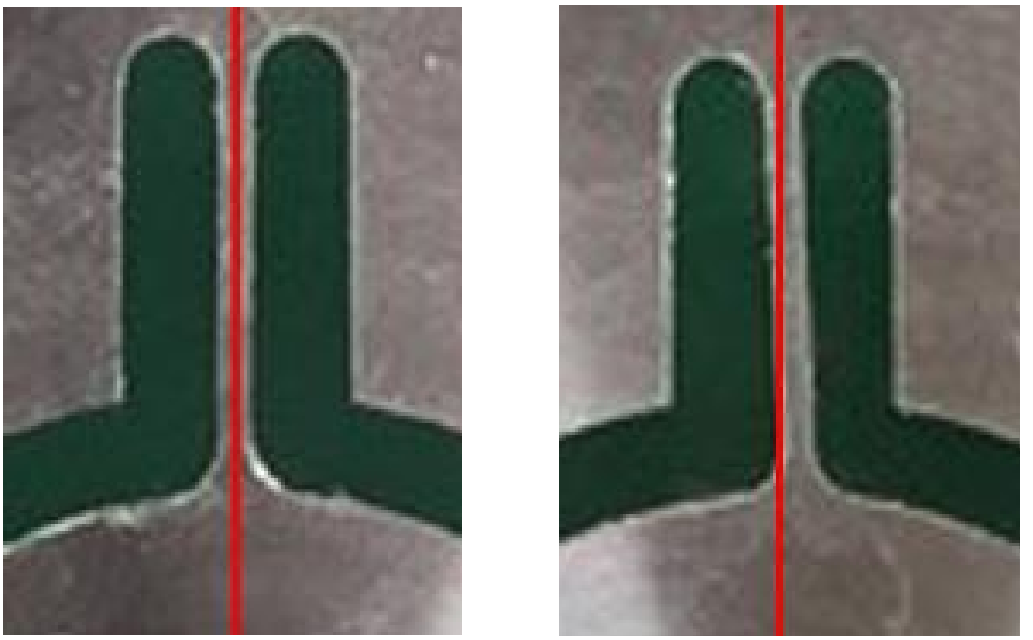


Fig. 14 Margin of Safety for Titanium Blade Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

Fig. 15 Titanium Blade Gear Configuration before and after Induced Over-driving Torque [(a): Before, (b): After]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 초탄성 형상기억합금 메쉬와셔 기어

1. SMA 메쉬와셔의 구성 및 원리

본 연구에서는 종래의 티타늄 블레이드 기어가 갖는 단점인 과도한 토크 인가 시 발생하는 소성변형 문제를 보완하고자 형상기억합금의 초탄성 특성에 주목하였다. 형상기억합금은 전술한 바와 같이 크게 오스테나이트 상과 마르텐사이트 상으로 나뉘며 상호간에 변태가 발생할 시, 두 개의 상이 동시에 혼재하는 구간이 존재한다. Fig. 16은 각 상의 확대된 형상을 나타내며 높은 온도에서 (a)와 같이 격자형상 (Cubic Form)의 결정 구조를 갖는 오스테나이트 상으로 존재하고 낮은 온도에서는 (b)와 같이 평행사변형 형상 (Parallelogram)의 결정구조를 갖는 마르텐사이트 상으로 존재하게 된다. 이러한 상변화의 기준이 되는 4개의 천이 온도 (Transition Temperature)가 다음과 같이 정의된다. 1) M_f : Martensite Finish Temperature, 2) M_s : Martensite Start Temperature, 3) A_s : Austenite Start Temperature, 4) A_f : Austenite Finish Temperature. 일반적으로 상기 4개의 천이온도는 $M_f<M_s<A_s<A_f$ 관계를 가진다. 본 연구에서 주목한 초탄성 특성의 경우, 주변의 작동환경 온도를 형상기억합금의 특정온도인 오스테나이트 종료온도 (Af) 이상의 온도범위로 설정할 시 하중이 인가됨에 따라 형상기억합금이 오스테나이트 상에서 역쌍정 마르텐사이트로 변태가 일어난다. 상기 변태는 하중이 인가될 시 소성변형 없이 10%이상의 변형이 발생하더라도 하중을 제하 시 잔류응력 없이 본래의 형상으로 복원하는 특징을 가진다. 또한, 초탄성 특성은 응력에 의한 상변화 현상에 의하여 소성변형이 발생하지 않은 상태일 때 일반적인 금속에 비해 10배 이상의 큰 변형이 가능하다[18].

Figure 17은 상기 초탄성 특성을 가지는 형상기억합금을 이용한 Ring 타입의 SMA 메쉬와셔의 형상을 나타낸다. SMA 메쉬와셔는 편조된 (Knit)된 와이어 형상의 메쉬를 별도의 금형을 이용하여 압착 공정을 수행하여 제작된 와셔로서 내부의 50~70%가 빈 공간으로 이루어져 있다. 본 연구에서 제안한 형상기억합금의 물성치는 Table 16에 나타내었다. 지상시험 수행 시 형상기억합금의 초탄성 특성을 이용하기 위해 오스테나이트 종료 온도가 15℃인 NDC (Nitinol Devices & Components)사의 와이어 소재 (SE508)를 사용하였으며, 제안된 SMA 메쉬와셔의

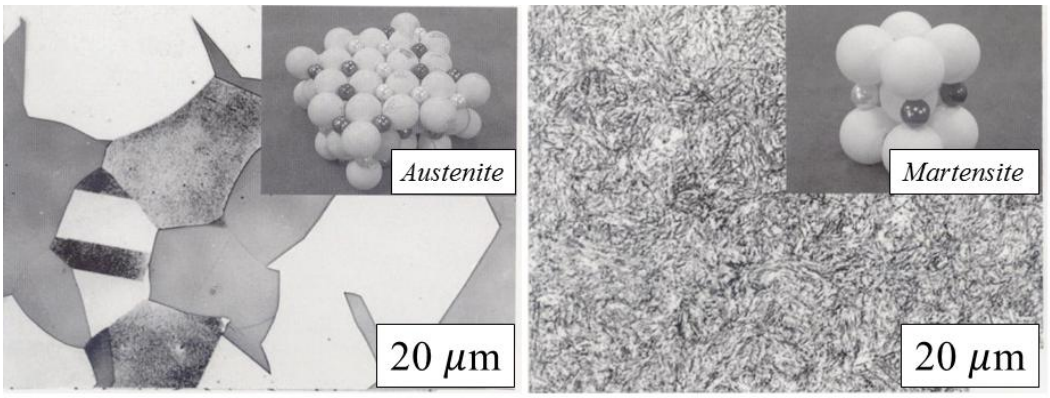
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

외경, 내경 및 높이는 각각 16㎜×8㎜×5㎜ 이다[18].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

Fig. 16 SMA Material Close-up View w.r.t Phase Transformations [(a): Austenite Phase, (b): Martensite Phase]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 17 Configuration of SMA Washer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 16 characteristic value of SMA [27]

Characteristic		Value
Martensite Finish Temperature (M_f)		-21℃
Martensite Start Temperature (M_s)		-12℃
Austenite Start Temperature (A_s)		-5℃
Austenite Finish Temperature (A_f)		15℃
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^3
Poisson's Ratio (ρ)		0.33

dCollection @ chosun

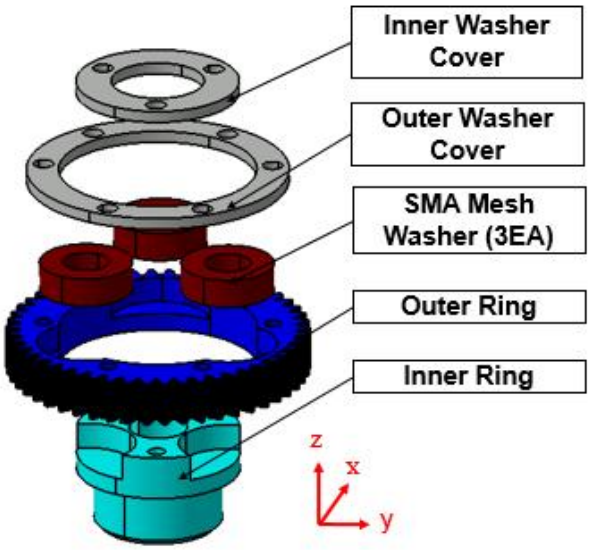
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 초탄성 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어 형상

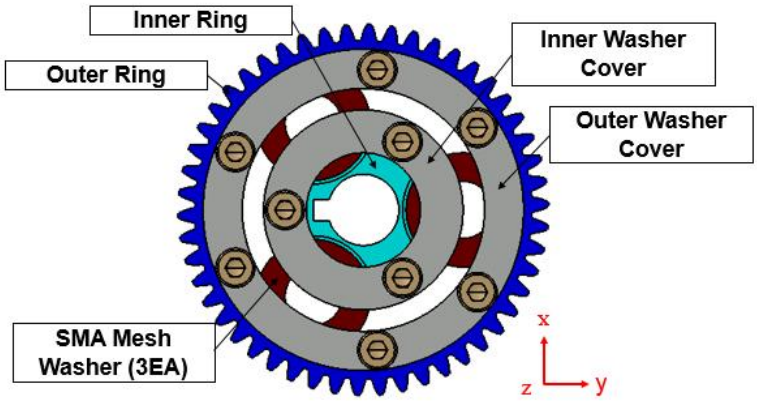
본 절에서는 전술한 초탄성 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어 형상에 대해 기술하였다. SMA 메쉬와셔가 적용된 기어의 형상은 Fig. 18 (a), (b)에 나타내었다. 동력전달을 위한 외부기어와의 접촉을 위해 치형이 형성된 외륜 (Outer Ring)과 모터 축단과 결합되는 내륜 (Inner Ring) 사이를 제안된 초탄성 SMA 메쉬와셔가 120° 간격으로 블레이드 형태로 3개가 배치가 되어있다. 상기 메쉬와셔는 기어 구동 시 발생하는 이탈현상을 방지하기 위해 각각의 내륜과 외륜 사이에 마련된 홈에 끼워 맞춤으로 In-Plane (X-Y Plane)을 구속하고, 별도 2개의 커버 (Inner Washer Cover, Outer Washer Cover)를 적용하여 Out-of-plane (Z-direction)에 대해 구속이 가능하도록 설계하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)

Fig. 18 Configuration of SMA Mesh Washer Gear [(a): Explode View, (b): Assembly View]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 기본특성 시험

제 1 절 SMA 메쉬와셔의 두께방향 정하중 시험

Figure 19는 SMA 메쉬와셔의 기본특성을 파악하기 위한 두께방향 정하중 시험 구성을 나타내며, 시험을 위해 INSTRON 재료시험기 810 유압 시험 장비 (MTS, Material Testing System)가 사용되었다. 상기의 시험구성으로부터 SMA 메쉬와셔의 초탄성 효과를 구현하기 위해 시험환경 온도를 오스테나이트 종료 온도(A_f)보다 높은 25℃에서 수행 하였으며, 압축변위 증가에 따른 하중 부하 및 제하를 반복 수행하였다.

Figure 20은 SMA 메쉬와셔의 두께방향 압축변위 인가에 따른 변위-하중 선도를 나타낸다. 초기 압축변위 인가 시 SMA 와이어의 국부적인 변형에 의해 와이어 사이의 존재하는 공간이 채워지면서, 작은 인가하중에도 SMA 메쉬와셔에 변형이 발생한다. 그러나, 어느 정도의 공간이 채워진 후에는 대부분의 SMA 와이어에 응력이 작용하여 추가적인 변형을 위해서는 더 큰 하중이 요구된다. 따라서 인가되는 압축변위가 증가 될수록 이에 상응하는 하중은 비선형적인 거동을 보이며, 히스테리시스 곡선을 보이고 있다. 상기 히스테리시스 곡선은 인가압축에 따라 발생하는 하중에 의한 SMA 와이어의 상변화 및 SMA 와이어 간의 마찰로 인해 유발되며, 히스테리시스 거동의 내부 면적이 클수록 에너지 소산능력이 우수함을 나타낸다. 또한 Fig. 20의 결과선도로부터 2.5mm의 큰 압축변위에도 불구하고 형상기억합금의 초탄성 특성으로 하중을 제하 시 본래의 현상으로 복원함을 확인 가능하다[19].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

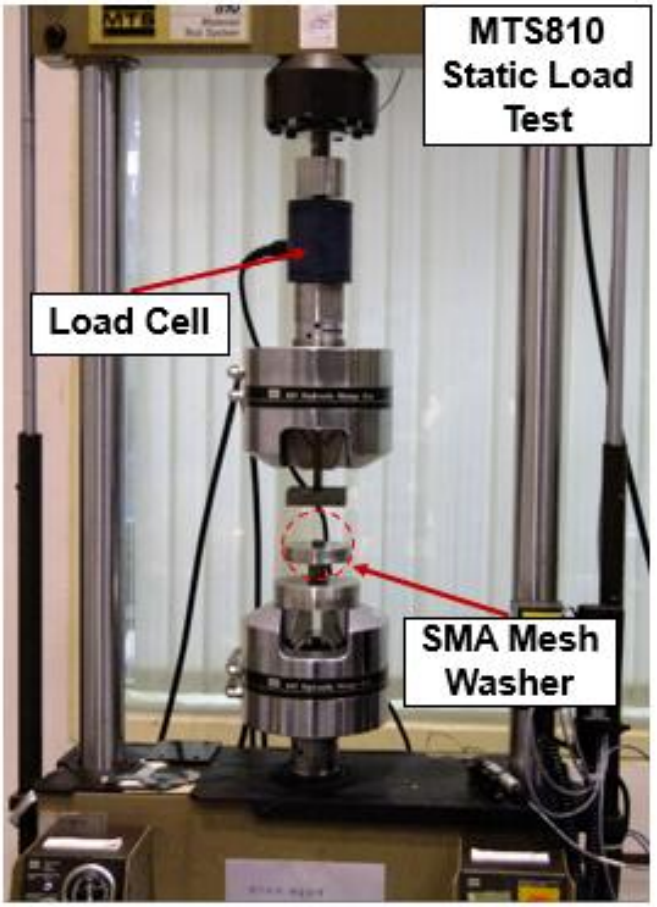


Fig. 19 Static Load Test Configuration of SMA Mesh Washer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

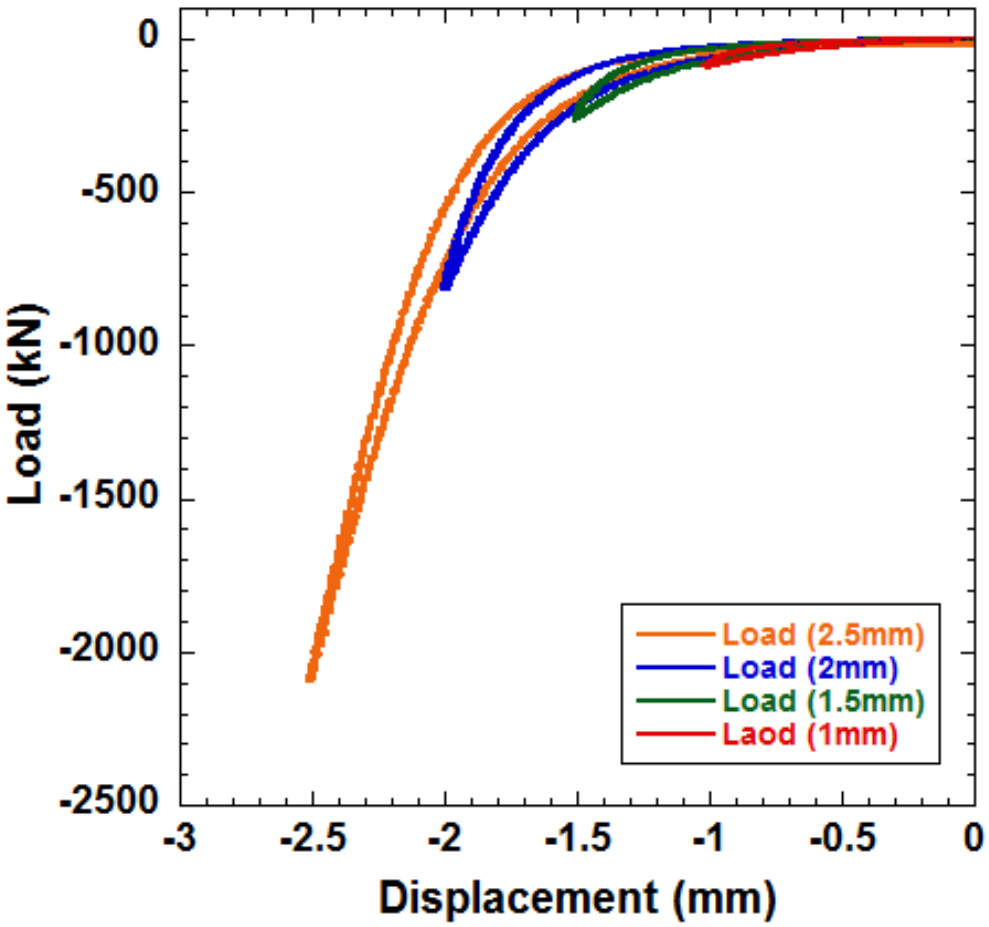


Fig. 20 Displacement-load Relation of SMA Mesh Washer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 SMA 메쉬와셔 기어의 기본특성 시험

1. 자유감쇠 진동시험

Figure 21은 초탄성 SMA 블레이드 기어의 회전방향 자유감쇠 진동시험 구성을 나타내며, 회전방향으로 초기 약 1° 인가 후 자유감쇠 진동 하에서 가속도 응답의 시간이력을 측정하였다. Fig. 22는 초탄성 SMA 메쉬와셔 기어의 회전방향 자유감쇠 진동시험 수행 결과로서, SMA 메쉬와셔 기어의 특성 비교 대상으로 기존의 티타늄 블레이드 기어의 응답을 비교하였다. 티타늄 블레이드 기어의 경우, SMA 메쉬와셔 기어와 비교하여 전체적으로 진동 응답의 감쇠율이 작은 경향을 보이고 있으며 0.1초 이후까지 잔여진동이 지속되고 있다. 반면, SMA 기어의 경우 약 0.025초까지 진동 응답이 크게 감소하고 있으며, 0.05초까지 대부분의 미소진동 응답이 제진된 결과를 보이고 있다. 처음 0 ~ 0.025초 구간은 SMA 메쉬와셔 기어에 작용한 대 변형에 기인하여 SMA 메쉬와셔의 국부적인 부분에 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로의 상변화가 유도되고, SMA 와이어간의 마찰에 의해 큰 진동 감쇠율이 나타나는 구간이다. 해당 구간에서 산출된 진동 감쇠율은 약 0.62이며, 티타늄 기어의 진동 감쇠율 0.046보다 약 13배 큰 수치이다. 한편, SMA 기어의 0.025초 이후 미소진동 구간에서는 블레이드 자체에 작용하는 응력이 미소해짐에 따라 오스테나이트 상의 응답이 나타나는 구간으로, 해당 구간의 진동 감쇠율은 약 0.06이다. 상기의 결과를 종합해 볼 때, SMA 메쉬와셔의 진동 감쇠율은 티타늄보다 우수한 특성을 보이며 미소진동 절연관점에서 SMA기어 적용 시 티타늄 기어보다 공진점에서의 향상된 피크저감 성능구현이 가능하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

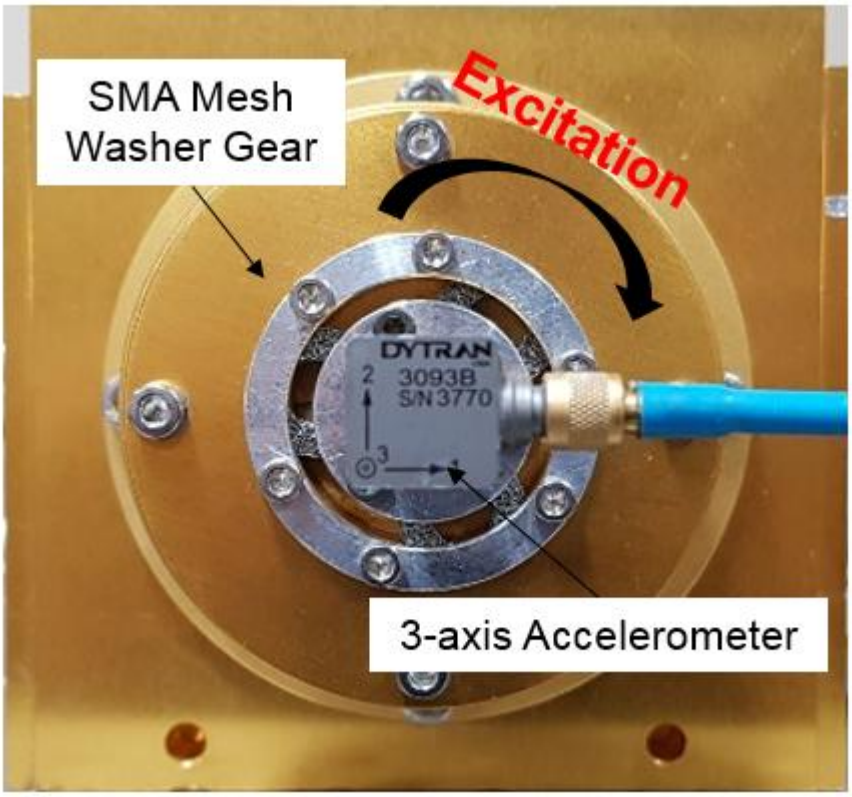


Fig. 21 Free-vibration Test Set-up

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

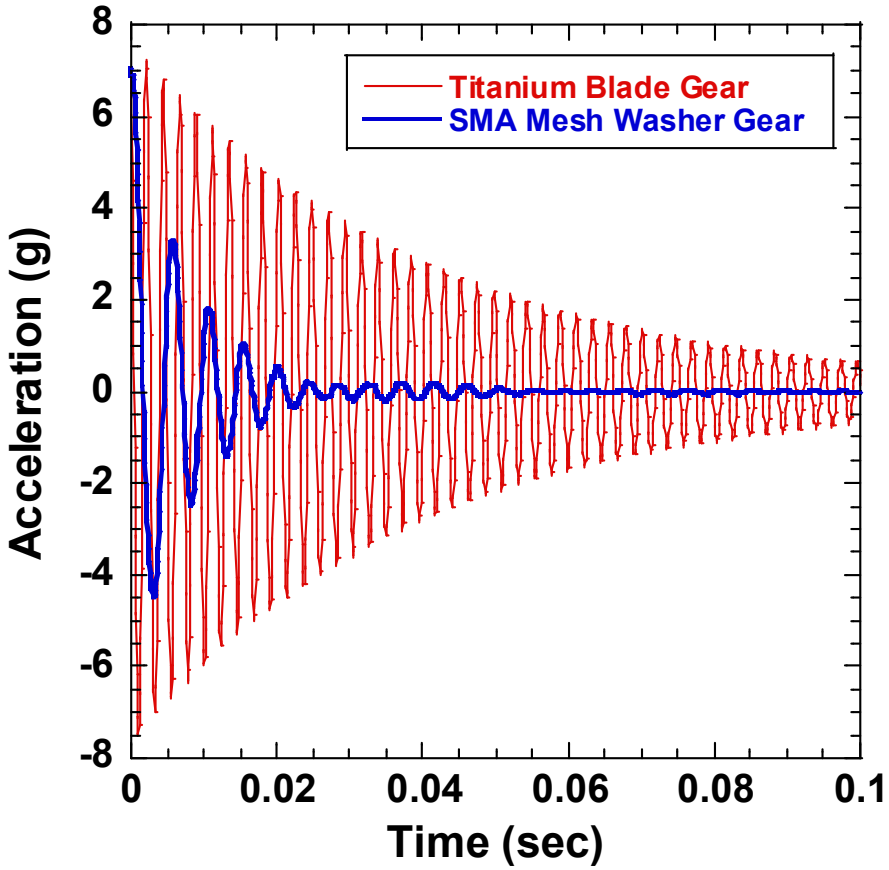


Fig. 22 Free-vibration Test Results of the SMA and Titanium Blade Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 회전방향 정하중 시험

본 절에서는 앞서 수행한 SMA 메쉬와셔에 대한 두께방향의 정하중 시험으로 압착변위에 따른 SMA 메쉬와셔의 기본특성을 파악하였으며, 본 절에서는 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어의 회전방향에 대한 정하중 시험으로부터 회전각 인가조건에 따른 기본특성을 파악하였다. Fig. 23은 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어의 회전방향 정하중 시험구성을 나타내며, 토크를 인가하기 위한 스텝핑 모터(AZM66AC-HS100, Ina Oriental Motor Co.), 토크를 측정하기 위한 토크 센서(TR-5K, TESTA), 측정 시편의 회전각을 측정하기 위한 엔코더(I65L10000ZCU100L2, Lika Electronic)로 구성되어 있다. 또한 조립 과정에서 발생하는 축 정렬 시 발생하는 오차를 보상하기 위해 별도의 커플링을 사용하였다.

상기의 시험구성을 활용하여 SMA 메쉬와셔 기어의 정하중 시험을 수행 시 형상기억합금의 초탄성 특성을 구현하기 위해 시험환경온도는 25℃ 조건에서 수행하였다. 또한 스텝 모터로부터 0.1deg/sec의 속도를 설정하였으며, ±1° ~ ±11° 회전각 범위 안에서 재현성 확인을 위해 시계 및 반시계 방향으로 3회 왕복시험에 대한 회전특성을 측정하였다. Fig. 24, 25는 상기 시험구성으로부터 SMA 메쉬와셔 기어에 ±1°, ±2°의 회전각을 인가함에 따라 도출된 각도-토크 선도를 각각 나타내며, 동일한 조건에서 직조된 SMA 와이어의 밀도가 약 2배 조밀한 조건의 SMA 메쉬와셔가 적용된 기어의 회전방향 정하중 시험결과와 비교하였다. 이때, 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔의 밀도는 6.5g/cm^{3}이며[5], 비교대상으로 약 2배의 밀도를 갖는 SMA 메쉬와셔를 선정하여 각각의 SMA 메쉬와셔를 Case 1, Case 2로 나타내었다. Fig. 24는 ±1°의 회전각이 인가될 시 밀도가 서로 다른 SMA 메쉬와셔가 적용된 두 기어의 선도를 나타내고 있으며, 두 선도는 히스테리시스 거동을 보이고 있다. 히스테리시스의 내부 면적은 전술한바와 같이 SMA 메쉬와셔 기어의 에너지 소산특성을 나타내는 것으로, 두 선도의 내부면적을 비교 시 큰 차이가 없음에 따라 SMA 메쉬와셔의 밀도 차이는 에너지 소산특성에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 또한 곡선의 기울기는 기어의 회전강성을 나타내며, Case 2의 회전강성은 20.6Nm/rad, Case 1의 회전강성은 17.7Nm/rad으로 Case 2가 밀도가 2배 높음에 따라 높은 회전강성을 보이고 있

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. Fig. 25는 ±2° 회전각 인가조건에서 두 기어의 각도-토크 선도를 나타내며, ±1° 시험의 결과와 동일하게 히스테리시스 거동을 보이고 있다. 또한 제시된 두 개의 기어 모두 ±2° 까지의 회전각 인가 시 발생된 토크범위 안에서 밀도에 상관없이 초탄성 특성에 따라 본래의 형상으로 복원됨을 알 수 있다.

Figures 26, 27은 상기와 동일한 시험구성을 활용하여 회전각 ±1° , ±2° 인가조건에 따른 각도-토크 선도를 나타내며, SMA 메쉬와셔 기어와 티타늄 블레이드 기어의 회전방향에 대한 정하중 시험결과를 비교하였다. Fig. 26에 따르면 회전각 ±1° 인가 시 티타늄 블레이드 기어는 선형탄성 거동을 보이고 있으며, 이는 인가된 회전각에 상응하는 토크범위 내에서 티타늄 블레이드 기어가 탄성구간에 존재함을 나타낸다. 그러나 Fig. 27과 같이 회전각 ±2° 인가 시 티타늄 블레이드 기어는 일정각도 인가 이후 곡선의 기울기가 변화하는 비선형 거동을 보이고 있으며, 시험 사이클이 누적됨에 따라 초기선도에 부합되지 않는 것이 관찰된다. 이는 회전각 인가에 의해 티타늄 블레이드 기어에 발생한 소성변형에 기인한 결과로써 이는 X-밴드 안테나의 스텝핑 모터로부터 정확한 동력 전달이 불가능함을 의미한다. 그러나 Fig. 25, 26의 SMA 메쉬와셔 기어의 경우 ±1° , ±2° 인가 회전각 범위에서 앞 절의 SMA 메쉬와셔에 대한 두께방향 정하중시험에서 전술한 원인에 따라 히스테리시스 곡선이 나타고 있으며, 인가된 회전각에 상응하는 토크 범위에서 상기 SMA 메쉬와셔 기어는 초탄성 특성으로 소성변형 없이 본래의 특성 및 형상을 유지하고 있다.

Figure 28은 SMA 메쉬와셔 기어에 ±5° , ±7° , ±11° 까지 과도한 회전각 인가조건에 따른 각도-토크 선도를 나타낸다. 도출된 선도로부터 히스테리시스 거동을 보이고 있으며, 인가된 회전각이 증가함에 따라 곡선의 기울기가 감소하는 경향으로부터 회전강성이 감소하고 있음을 확인 가능하다. 또한 회전각 ±11° 인가 조건에서 설계요구토크를 상회하는 약 2.8Nm의 토크가 SMA 메쉬와셔에 작용됨에도 형상기억합금의 초탄성 효과로 인해 소성변형이 없이 본래의 형상으로 복원이 가능하며 이로부터 안테나 구동을 위한 스텝핑 모터의 동력을 정확히 전달 가능함을 유추할 수 있다. 또한, 상기 일련의 시험 수행한 후에 회전각 ±1° 인가조건에서 정하중 시험을 수행하여 큰 회전각 시험 후에도 SMA 메쉬와셔 기어의 특성 변화가 없음을 입증하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 29는 SMA 메쉬와셔 기어의 ±11° 까지의 회전각 인가 전과 후의 기어 형상을 나타내며, Fig. 29 (b)와 같이 SMA 메쉬와셔 기어는 과도한 회전각 인가 시에도 초탄성 특성으로 인해 본래의 형상으로 복원되어 어떠한 변형이 관찰되지 않음을 확인 가능하다.

한편, 상기 시험에서 적용된 티타늄 블레이드 기어와 SMA 메쉬와셔 기어의 회전강성을 도출하기 위해 도출된 선도의 기울기를 계산하였다. 티타늄 블레이드 기어의 회전강성은 선형탄성 범위에서 110Nm/rad으로 계산되며, SMA 메쉬와셔 기어의 회전강성은 인가 회전각마다 변화함에 따라 설계요구토크인 1.57Nm와 유사하게 인가되는 회전각 ±5° 인가 조건의 정하중 시험 결과로부터 10.7Nm/rad을 도출하였다. 도출된 회전강성 값의 경우 티타늄 블레이드 기어에 비해 SMA 메쉬와셔 기어가 약 10배 낮음에 따라 진동절연성능이 상대적으로 우수할 것으로 판단된다. 또한, 등가 댐핑값은 식 (8)을 이용하여 Fig. 26의 정하중 시험 결과선도에 나타난 히스테리시스 곡선 내부의 넓이 및 도출된 등가강성 값으로부터 유추 하였다. 또한, 계산의 용이성을 위해 에너지 평형법에 기반하여 비선형 특성을 갖는 강성 및 댐핑을 선형조건으로 가정 하였다[28].

$$\zeta_{eq}(\theta) = \frac{\Delta E(\theta)}{2\pi\theta^2 k_{eq}} \tag{8}$$

여기에서, ΔE는 히스테리시스 곡선 내부의 넓이를 의미하며, θ는 SMA 메쉬와셔 기어에 인가되는 회전각을 의미한다. Fig. 30은 SMA 메쉬와셔 기어에 인가되는 ±1° ~ ±11° 회전각에 따른 등가강성 및 등가댐핑 값을 나타내며, 인가 회전각이 증가할수록 등가강성 및 등가댐핑 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 SMA 메쉬와셔 기어의 형상에 기인한 결과로서 직조된 SMA 와이어의 압착 공정을 통해 나타나는 평면방향의 각 층을 구성하는 SMA 메쉬 와이어가 원주방향의 하중 작용 시 박리현상에 취약하기 때문이다.

Figure 30의 결과를 토대로 X-밴드 안테나 방위각단에 SMA 메쉬와셔 기어를 적용 시 미소진동절연 성능을 파악하기 위해 식 (9)를 적용하여 전달률을 도출하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$Transmissibility = \sqrt{\frac{1+(2\zeta_\theta\gamma)^2}{(1-\gamma^2)^2+(2\zeta_\theta\gamma)^2}} \quad (9)$$

여기에서, ζ_θ는 SMA 메쉬와셔 기어의 진동 감쇠비를 나타내며, γ는 X- 밴드 안테나 조립체의 1차 고유진동수와 안테나 방위각 단 회전구동 시 발생하는 가진주파수의 비 ω/ω_n를 나타낸다. 안테나 조립체의 고유진동수 ω_n은 $\sqrt{k_\theta/J}$ 로부터 도출되며, J는 안테나 방위각 단의 관성모멘트 0.012kgm^2를 나타내고, k_θ는 SMA 메쉬와셔 기어 및 안테나 요크 (Yoke) 부에 구성된 출력기어 상호간의 강성치를 $k_{\theta_{out}}k_{\theta_{ti}}/(k_{\theta_{out}}+k_{\theta_{ti}})$로 도출되며 방위각단 기어 모듈의 회전 강성을 나타낸다. 출력단 및 티타늄 기어의 회전강성 $k_{\theta_{out}}$, $k_{\theta_{ti}}$는 구조해석으로부터 도출 가능하다.

Figure 31은 상기의 식을 적용하여 SMA 메쉬와셔 기어에 ±1°, ±5°, ±11° 의 회전각 인가 조건에 따른 전달률 선도를 나타낸다. 도출된 전달률 선도에 따르면 X-밴드 안테나의 회전구동에 필요한 설계요구토크범위에 해당하는 ±5° 및 이를 상회하는 ±11° 의 회전각 인가 조건에서 안테나 조립체의 1차 회전 고유진동수는 각각 4.6Hz와 4.2Hz로서 X-밴드 안테나 조립체의 1차 고유진동수에 큰 변화를 야기하지 않으며, 이는 회전각 증가에 따른 회전강성 감소는 미소진동절연 성능의 차이를 발생시키지 않음을 나타낸다. 또한 상기의 1차 고유진동수는 위성체의 주요 탑재체가 갖는 구조공진모드와 충분한 주파수 분리가 이루어짐에 따라 진동절연성능 확보가 가능하게 된다. 또한 댐핑특성 관점에서는 인가 회전각 증가에 따른 댐핑특성이 감소하는 영향으로 공진점에서의 피크 성분이 다소 증가하나, 고주파수 대역에서 인가되는 회전각 증가 시 더욱 효과적인 미소진동절연이 가능함을 알 수 있다. 일례로 50Hz에서는 SMA 메쉬 와셔 기어에 ±5° 회전각 인가 시 전달률이 0.09로 약 11배 저감되며, ±11° 인가 시 동일 주파수에서 0.07로 약 14배의 진동절연 성능이 확보되게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

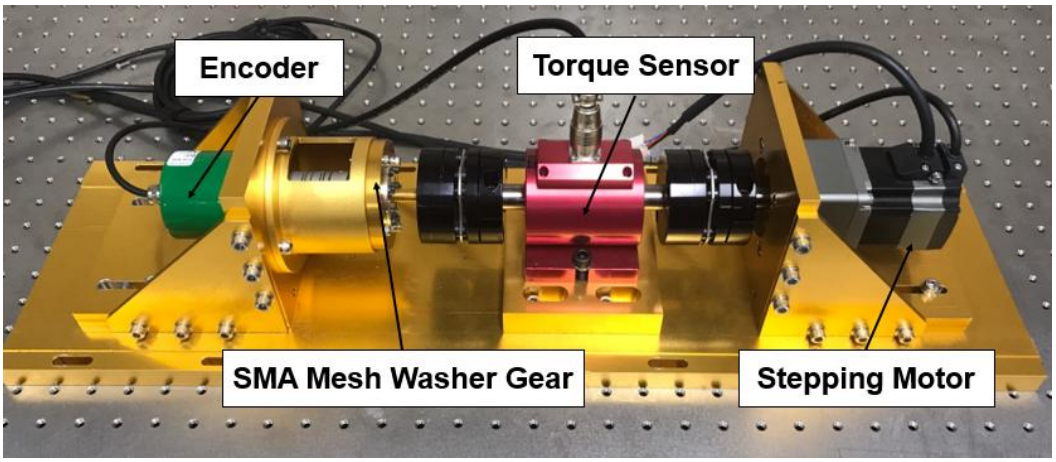


Fig. 23 Rotational Characteristic Test Set-up for SMA Mesh Washer Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

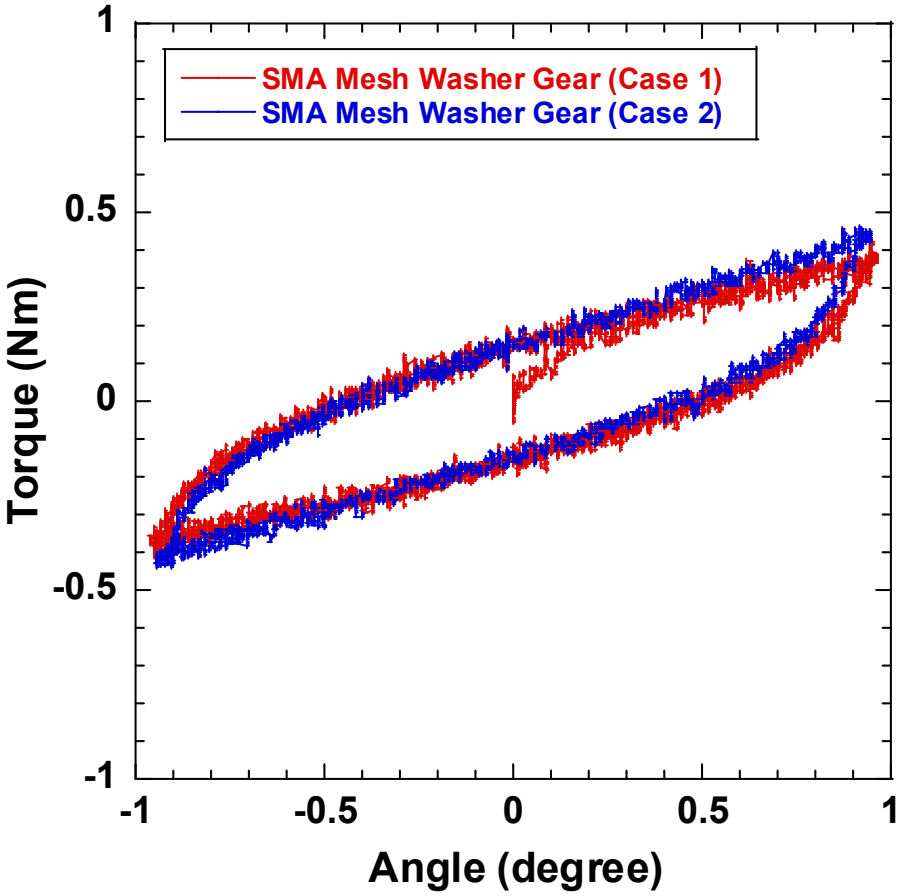


Fig. 24 Comparison of Hard and Soft SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±1°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

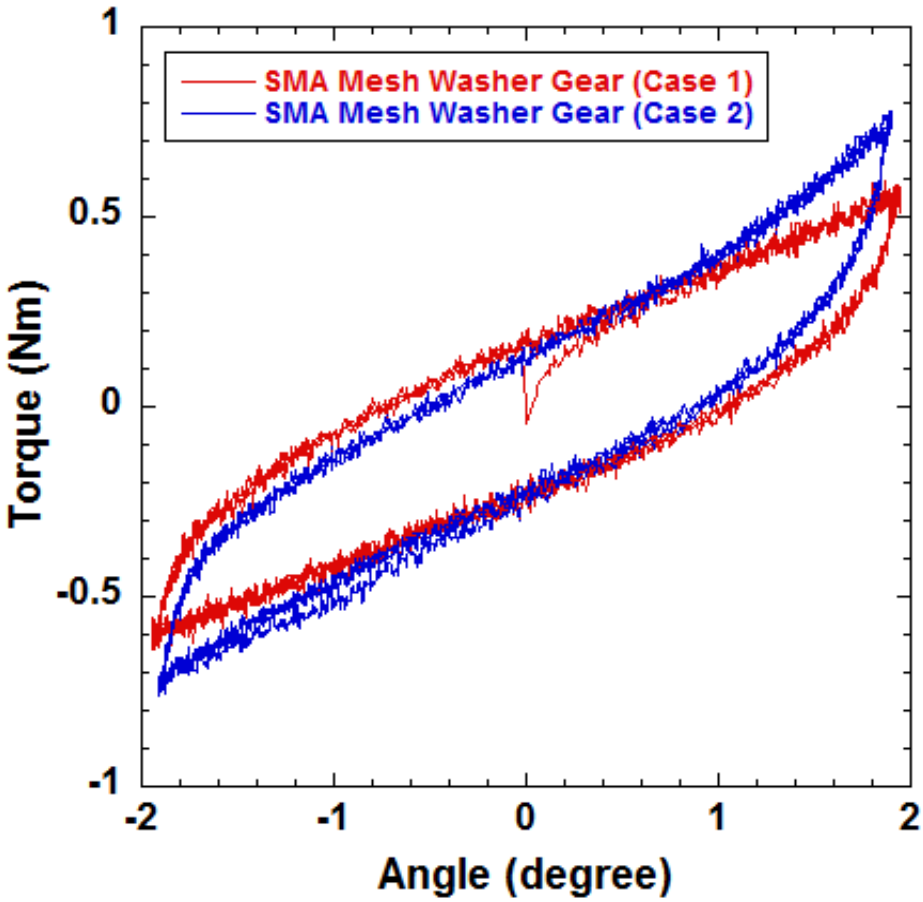


Fig. 25 Comparison of Hard and Soft SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±2°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

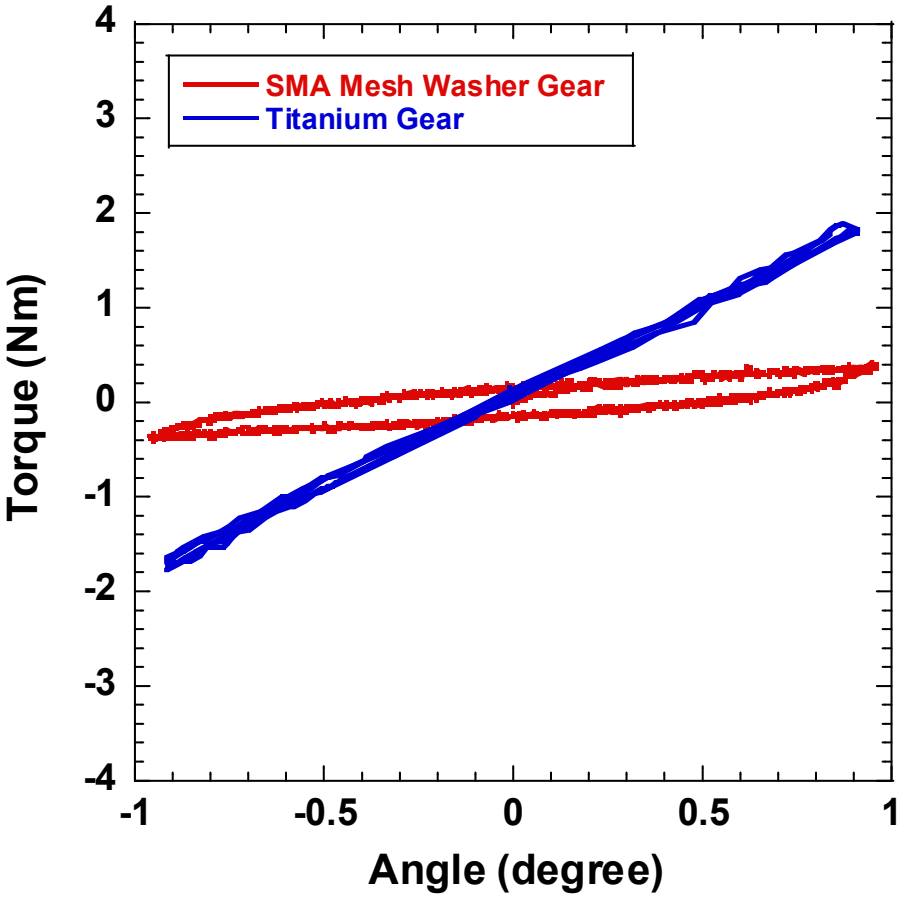


Fig. 26 Titanium and SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±1°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

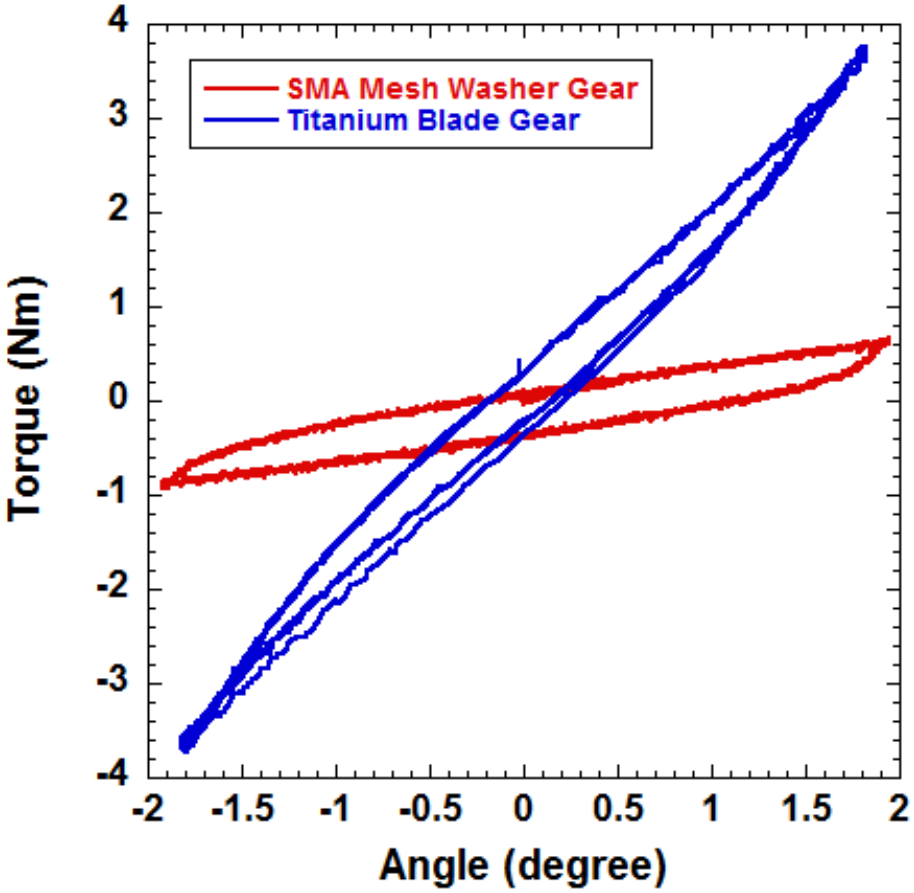


Fig. 27 Titanium and SMA Mesh Washer Gear Rotational Characteristics (±2°)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

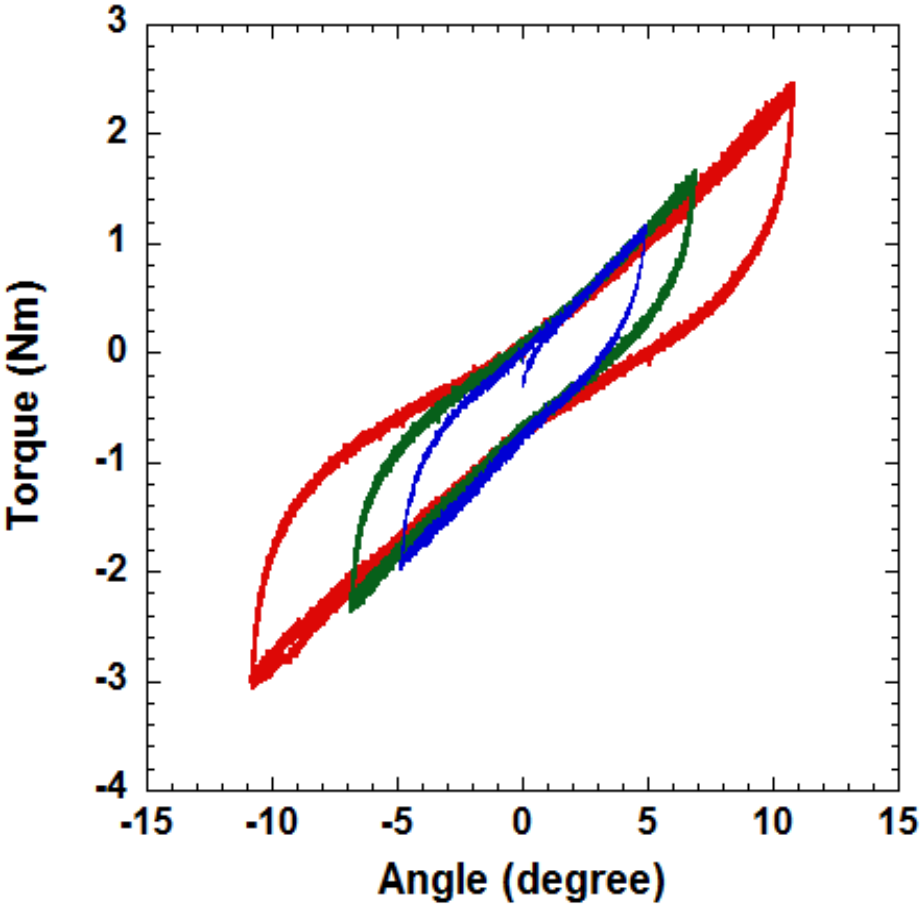


Fig. 28 Rotational Characteristic Test Results for SMA Mesh Washer Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

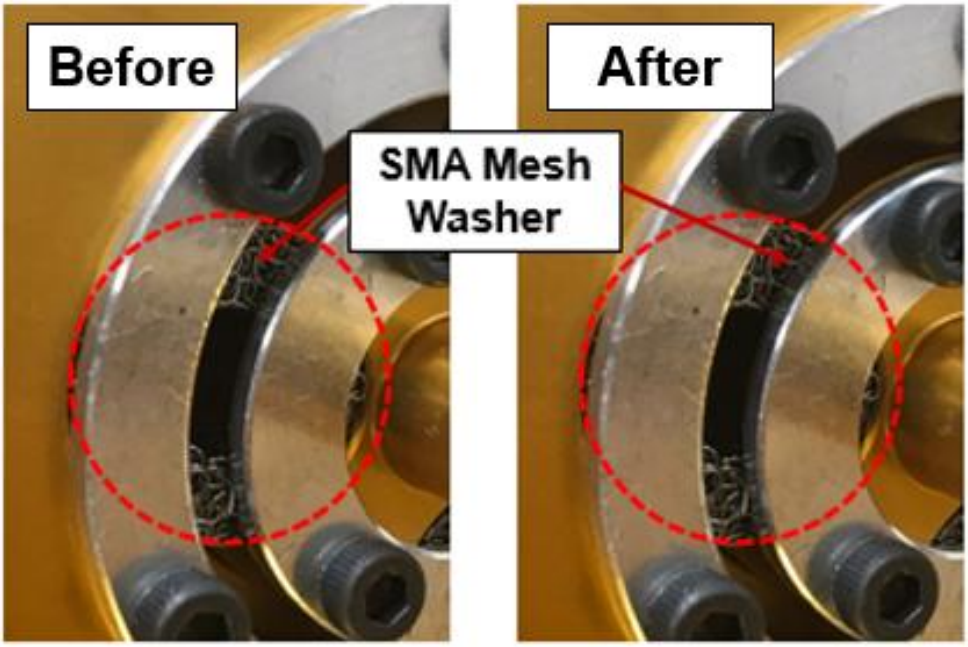


Fig. 29 SMA Mesh Washer Gear Configuration before and after Rotational Characteristic Test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

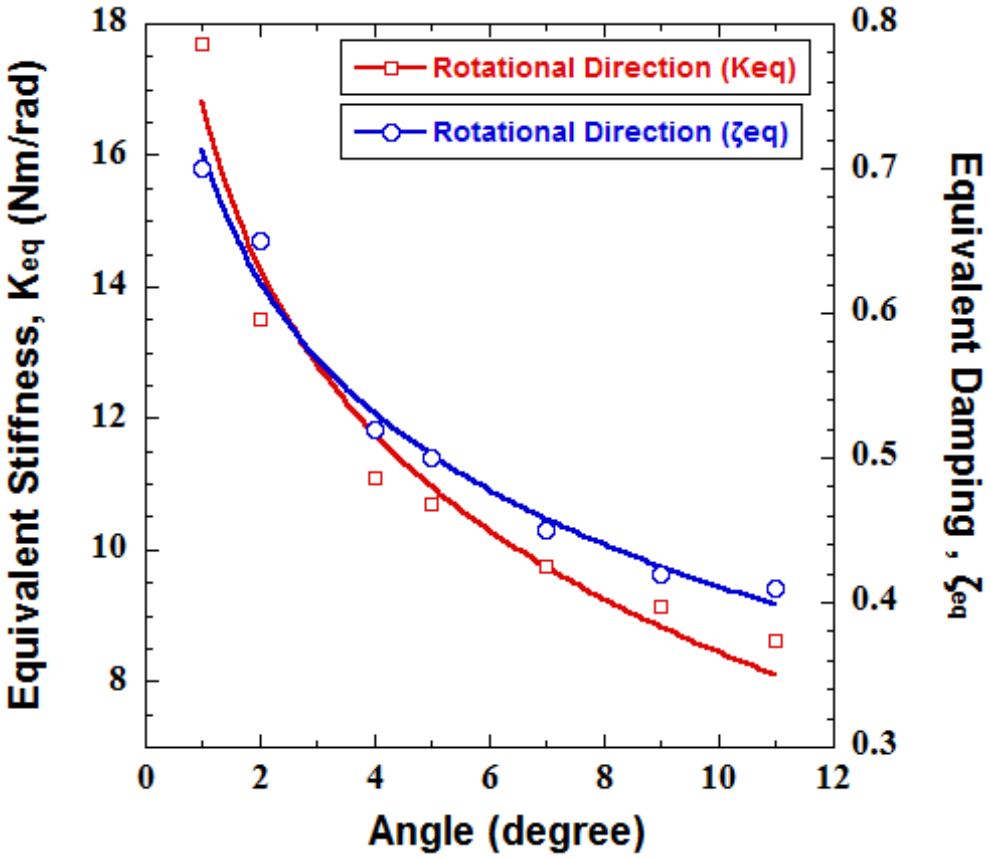


Fig. 30 Values of Equivalent Stiffness and Damping of SMA Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

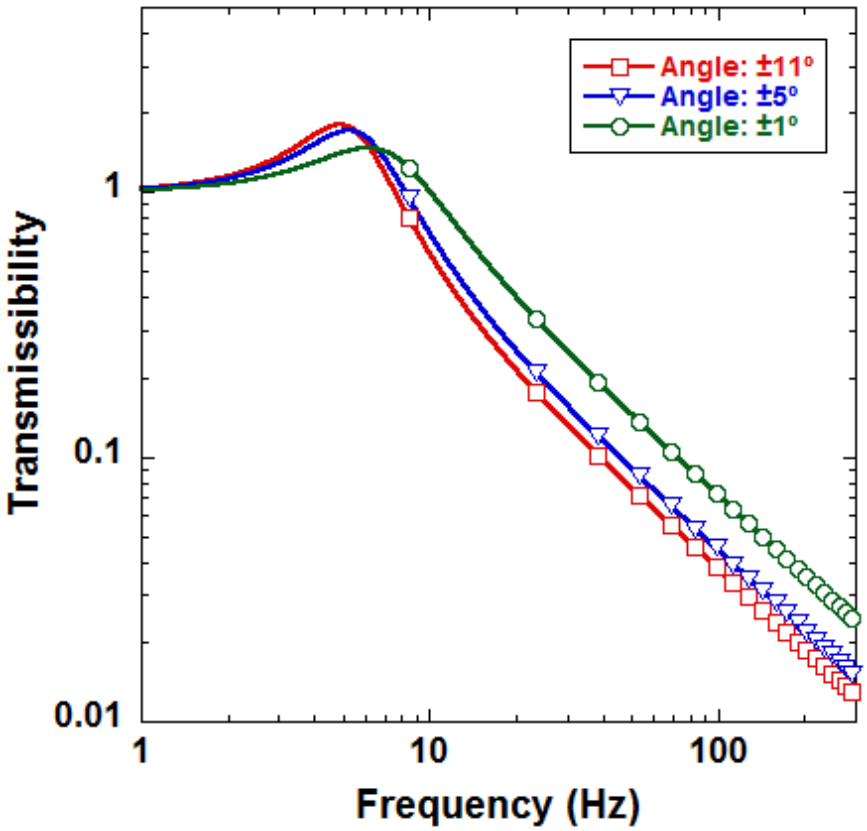


Fig. 31 Transmissibility Curves According to Rotational Angle of SMA Mesh Washer Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. SMA 기어와 기존 강기어의 전달함수 선도 비교

상기 회전방향 정하중 시험으로부터 획득된 SMA 메쉬와셔 기어의 회전강성 및 자유감쇠 진동시험으로부터 획득된 감쇠비 측정치와 X-밴드 안테나의 구조형상으로 고려하여 전달함수 선도를 도출함으로써 본 연구에서 제안한 SMA 메쉬와셔 기어 적용에 따른 X-밴드 안테나의 진동특성 변화를 파악하였다. 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 방위각 단 회전구동에 따른 시스템은 식 (10)과 같은 1자유도계 시스템으로 구성될 수 있다.

$$J\ddot{\theta}(t) + c_\theta \dot{\theta}(t) + k_\theta \theta(t) = F(t) \tag{10}$$

여기에서, J는 방위각 단의 질량관성모멘트를 나타내며, C_θ와 K_θ는 모터 단에 장착된 기어모듈의 점성감쇠 요소 및 등가 회전강성을 의미한다. 등가 회전강성 K_θ의 경우, SMA 메쉬와셔 기어 및 안테나 요크 (Yoke) 부에 구성된 출력기어 상호간의 강성치를 $k_{\theta_{out}} k_{\theta_{SMA}} / (k_{\theta_{out}} + k_{\theta_{SMA}})$로 도출되며 방위각단 기어 모듈의 회전 강성을 나타낸다. 출력단 기어의 회전강성 $k_{\theta_{out}}$은 구조해석으로부터 도출 가능하며, $F(t)$는 안테나의 방위각 단 구동 시 발생하는 외란을 나타낸다. 또한, 상기 회전운동방정식으로부터의 바닥면 전달력은 다음 식 (11)과 같다.

$$c_\theta \dot{\theta}(t) + k_\theta \theta(t) = F_T(t) \tag{11}$$

여기에서, 안테나 조립체의 고유진동수 ω_n은 $\sqrt{k_\theta / J}$, $C_\theta = 2Jw_n\zeta_\theta$ 로 가정될 시, 식 (10), (11)의 운동방정식으로부터 외란에 대한 바닥 전달력의 전달함수는 전술한 식 (9)와 같다. Table 17은 상기 전달함수 선도를 도출하기 위해 적용된 파라미터 값들을 정리하였으며, Fig. 32는 Table 17의 파라미터 값을 기반으로 식 (9)을 통해 도출된 구동 주파수에 대한 전달함수 선도를 나타낸다. 본 연구에서 제안된 SMA 메쉬와셔 기어의 적용에 따른 X-밴드 안테나의 주파수 특성은

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

상기 파라미터 중 K_θ의 값에 따라 변화한다. 따라서 방위각 단에 SMA 메쉬와셔 기어를 적용할 경우 기어 모듈의 등가 회전강성 값은 10.47Nm/rad으로 기존 강기어 적용 시의 등가 회전강성인 309.89Nm/rad보다 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, SMA 메쉬와셔 기어 적용으로 인해 기존의 강기어가 적용된 X-밴드 안테나의 방위각 단 회전에 대한 1차 고유진동수 25.5Hz에서 4.9Hz로 가변함을 확인할 수 있다. 또한, SMA 메쉬와셔 기어 적용의 우수한 댐핑 성능으로 기존 강기어에 비해 약 10배의 피크감소율을 보이고 있다. 이로부터, SMA 메쉬와셔 기어의 적용으로 인해 X-밴드 안테나 조립체의 1차고유진동수는 위성의 주요 광학탑재체의 고유진동수 기점으로 충분한 주파수 분리가 기인한 진동절연 성능을 확보함을 의미한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 17 Parameter Values of X-band Antenna

Parameter	Value
J	0.012
ζ_{SMA}	0.62
K_θ (with SMA Mesh Washer Gear)	10.47
K_θ (with Conventional Gear)	309.89

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

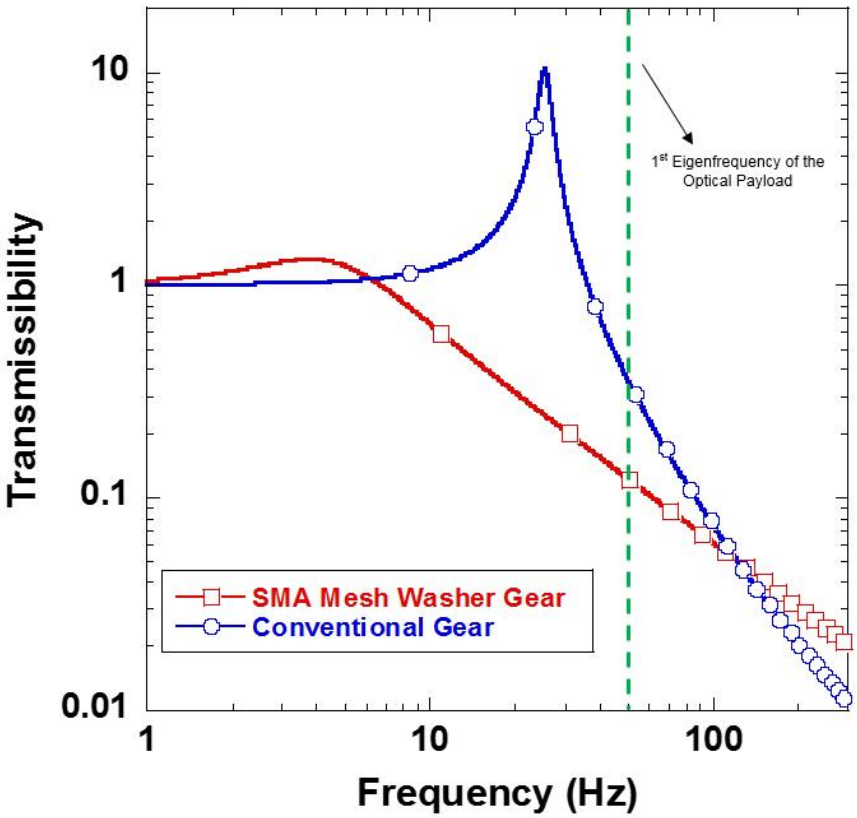


Fig. 32 Transmissibility Curves of Conventional, SMA Mesh Washer Gear based on Experimentally Obtained Characteristics

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 가속수명시험

본 연구에서 소개된 2축 김벌형 X-밴드 안테나는 지상에서의 기능시험 및 궤도상에서 위성의 임무수행을 위해 모터구동이 반복적으로 수행된다. 제안된 SMA 메쉬와셔 기어가 설계요구토크에 비해 과도한 토크에 대한 구조건전성이 확보되더라도 반복적인 토크가 기어의 SMA 메쉬와셔단에 인가됨에 따라 피로가 누적되어 열화현상 및 피로파괴가 발생될 경우, 실제 임무수행 시 모터로부터의 동력전달이 불가능 하여 안테나의 임무실패를 야기한다. 따라서 반복적인 토크가 작용에 따라 열화현상 및 피로파괴에 대한 신뢰성 확보가 요구된다.

본 절에서는 누적된 사이클에 대한 SMA 메쉬와셔 기어의 열화현상 및 피로파괴를 검토 하고자 가속수명시험을 수행하였다. 상기 시험 수행 시 상온 (25℃) 조건 및 궤도상에서 안테나 TPF (Tracking Parameter File) 프로파일에[29] 따른 안테나의 방위각 회전 속도중 하나인 3° /sec, 인가 회전각도 ±2° 조건 하에서 수행하였으며, 동일한 조건에서 티타늄 블레이드 기어의 시험결과와 비교하였다. Fig. 33은 피로 누적에 따른 SMA 메쉬와셔 기어와 티타늄 기어의 강성특성 변화를 나타낸다. 여기에서, 기어의 강성은 임의의 일정한 주기동안 시험을 수행한 후에 각도-토크 선도로부터 기울기를 반복적으로 도출하는 방식으로 수행하였다. 시험 초기에는 기어의 정확한 피로파괴/열화현상 시점을 파악하기 어려움이 존재하기에 약 500 주기의 비교적 좁은 간격으로 강성측정을 수행하고, 시험이 진행됨에 따라 점차적으로 측정 간격을 증가시키며 강성 측정을 수행하였다. 따라서 티타늄 블레이드 기어의 경우, 약 843 사이클에서 Fig. 34와 같이 피로에 의한 파단이 발생하는 것을 확인 가능하다. 이는 정하중 시험 결과부터 파악된 ±2° 범위의 인가 회전각 조건에서 상기 기어는 소성변형 영역에 존재하여 상대적으로 적은 사이클에서 파단이 발생한 것으로 판단된다. 그러나 SMA 메쉬와셔 기어의 경우 동일한 인가 각도 범위 안에서 탄성범위에 존재하여 2만 사이클까지 열화현상 및 피로파괴 없이 강성이 유지되는 것을 확인 가능하다. 또한 가속수명시험 후에도 Fig. 35와 같이 SMA 메쉬와셔의 형상이 유지되고 있다. 따라서 상기 가속수명시험 결과로부터 SMA 메쉬와셔 기어가 티타늄 블레이드 기어 보다 회전강성이 약 5배 낮고 인가된 회전각도조건이 동일함에도 불구하고 SMA 메쉬와셔 기어가 티타늄 블레이드 기어보다 반복적인 회전구동에 대하여 장시간의 수명이 보장됨을 입증하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

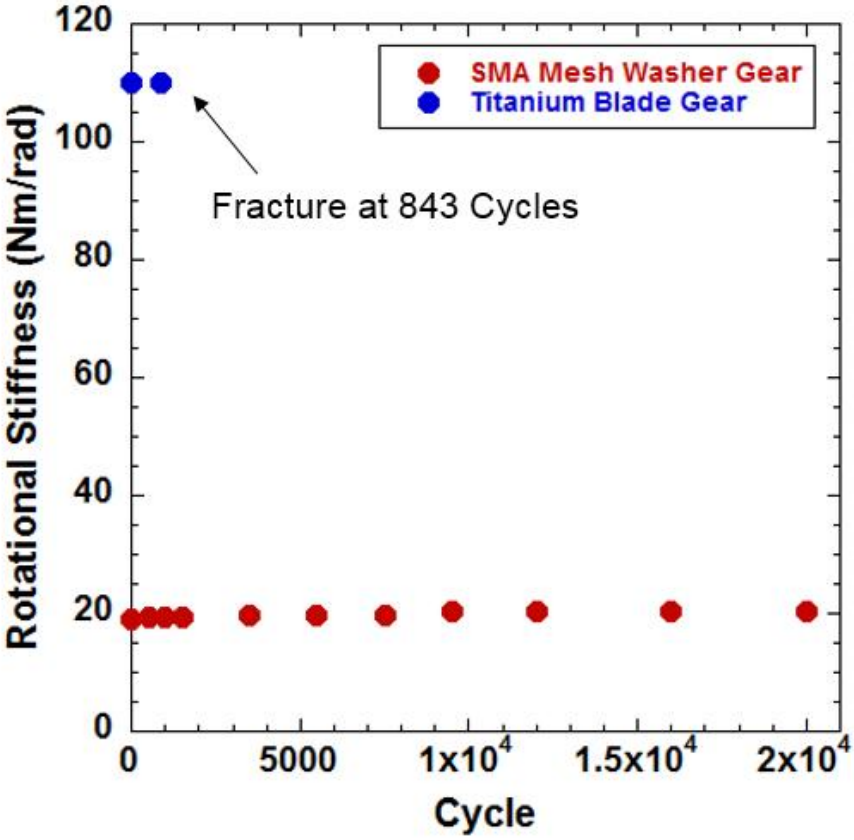
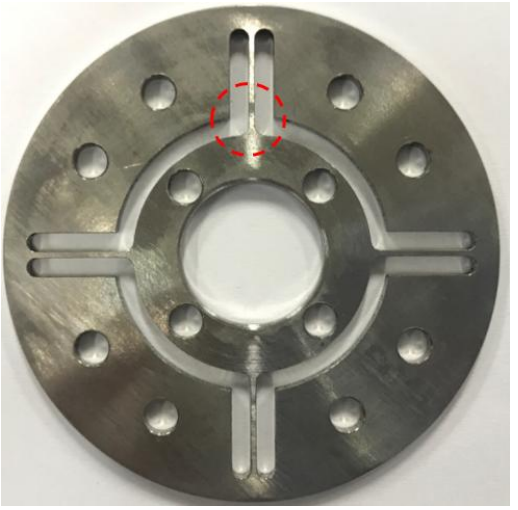


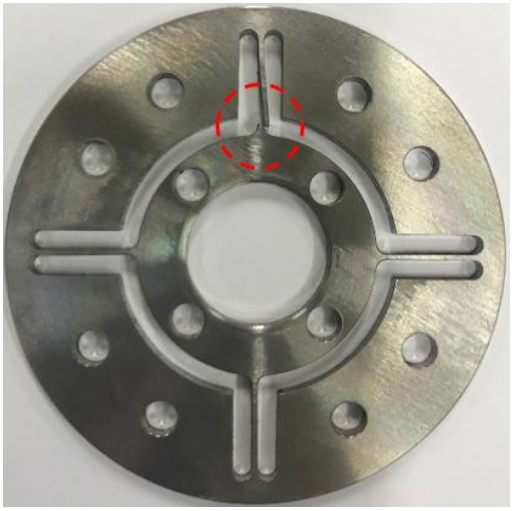
Fig. 33 Comparison of Rotational Stiffness w.r.t Accelerated Life Test between SMA Mesh Washer and Titanium Blade Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)

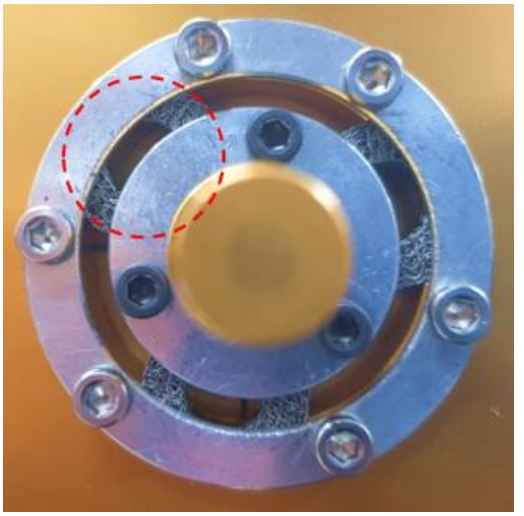


(b)

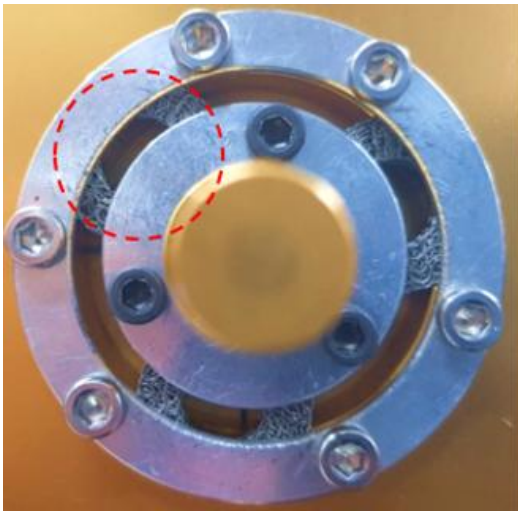
Fig. 34 Titanium Gear for Accelerated Life Test [(a): Before, (b): After]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)

Fig. 35 SMA Mesh Washer Gear for Accelerated Life Test [(a): Before, (b):After]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 온도특성 시험

2축 김벌형 X-band 안테나는 궤도상에서 임무수행 동안 반복적인 궤도 열주기 환경을 겪게 된다. 형상기억합금은 전술한바와 같이 주변작동환경의 온도조건에 따라 발생하는 상변화에 기인하여 금속의 특성변화가 나타난다. 따라서 온도조건에 민감한 SMA 메쉬와셔 기어의 특성을 분석하기 위해 다양한 온도범위 조건에 따른 정하중 시험을 수행하였다. 따라서, 온도특성시험은 기어의 SMA 메쉬와셔에 온도센서를 부착하여 저온 조건인-20℃, 상온 조건인 27℃, 고온 조건인 50℃에서 이루어졌으며, 인가각도 범위는 전술한 상온조건의 정하중 시험 시 티타늄 블레이드 기어에 소성변형이 발생했던 회전각 ±2° 에 대한 기본특성을 확인하였다.

Figure 36은 온도특성시험 결과로서, SMA 메쉬와셔 기어의 고온 및 저온조건에 따라 도출된 각도-토크 선도를 나타낸다. 상기 선도로부터, 각 온도 조건에 따라 선도의 기울기가 변화하는 것이 관찰된다. 이는 전술한 마르텐사이트상과 오스테나이트상의 탄성계수 차이에 의해 나타나는 것으로, 고온 조건인 50℃ 온도는 오스테나이트 종료온도인 15℃비해 높은 환경온도 조건임에 따라, 상변화 임계 응력 (Critical Stress)이 높아져, 하중 인가 시에도 상변화 없이 오스테나이트 상으로 존재한다. 반면에 저온 조건인 -20℃ 시험에서는 마르텐사이트 시작 온도보다 낮은 작동환경 온도조건임에 따라 마르텐사이트 상이 주를 이루게 된다. 따라서 마르텐사이트 상은 오스테나이트 상보다 상대적으로 낮은 탄성계수를 보유함으로, 이에 기인하여 SMA 메쉬와셔 기어는 고온 및 상온 조건하에서 보다 낮은 13.7Nm/rad의 회전 강성치를 나타낸다. 또한, 시험 결과 선도로부터 모든 온도조건에서 히스테리시스 거동이 나타나는 것을 확인가능하며, 이는 전술한바 와같이 SMA 와이어 간의 마찰 및 국부적인 상변화에 의해 나타난다.

Figure 37은 다양한 온도조건 하에서 하중을 인가 시 측정된 등가강성 및 등가댐핑특성을 나타낸다. Fig. 36에 따르면, 주변작동환경 온도가 증가함에 따라 강성특성이 증가하는 것이 관찰되며, 이는 전술한바와 같이 오스테나이트상의 탄성계수가 마르텐사이트 상에 비해 높기 때문에 나타난다. 또한, 작동환경온도가 증가함에 따라 댐핑특성은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 오스테나이트 종료온도 보다 주변 작동환경온도가 높을 시 상변화 임계 응력이 높아짐에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라, 상변화가 이루어지지 않아 나타나는 결과이나, SMA 메쉬와셔의 특성상 SMA 와이어의 마찰에 의한 에너지 소산능력으로 고온 조건에서도 높은 댐핑특성을 보인다.

Figure 38은 온도특성시험 전에 수행한 정하중 시험결과와 시험 후 에 측정한 각도-토크 선도로서, 이로부터 다양한 온도조건에 따른 시험 수행 후에도 SMA 메쉬와셔 기어의 특성변화가 없음을 나타낸다.

따라서 실제 정상운용 상태에서의 구동 토크가 약 0.6Nm임을 고려하였을 때 저온조건에서도 충분한 동력전달이 가능과 동시에 저 강성에 기인한 미소진동 절연성능 확보가 가능할 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

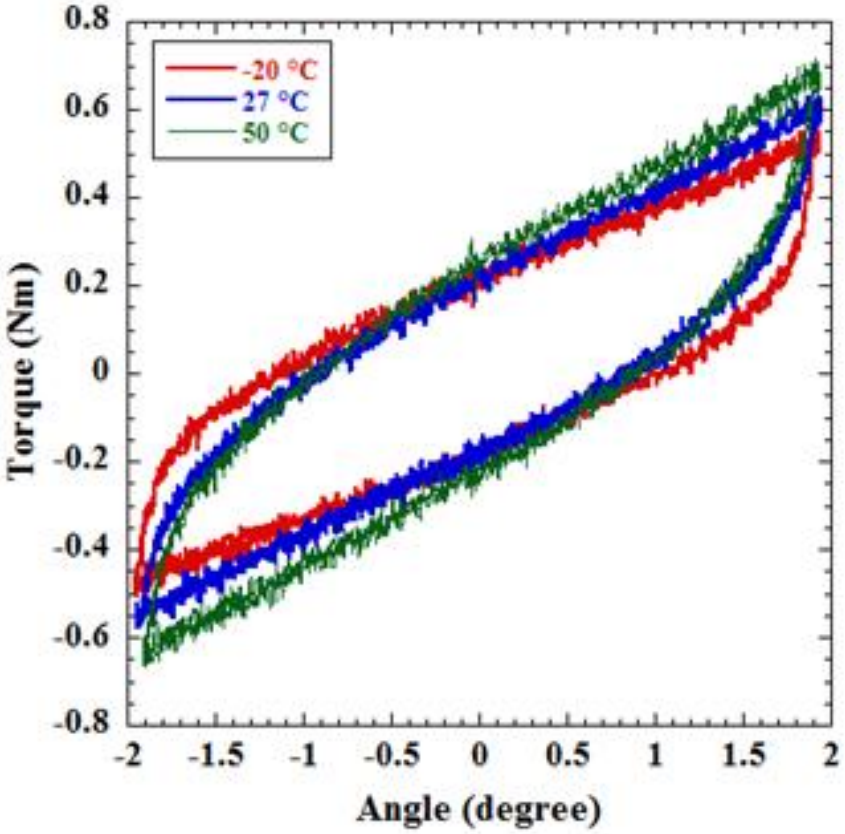


Fig. 36 Rotational Characteristics of SMA Mesh Washer Gear at Variable Temperature Conditions

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

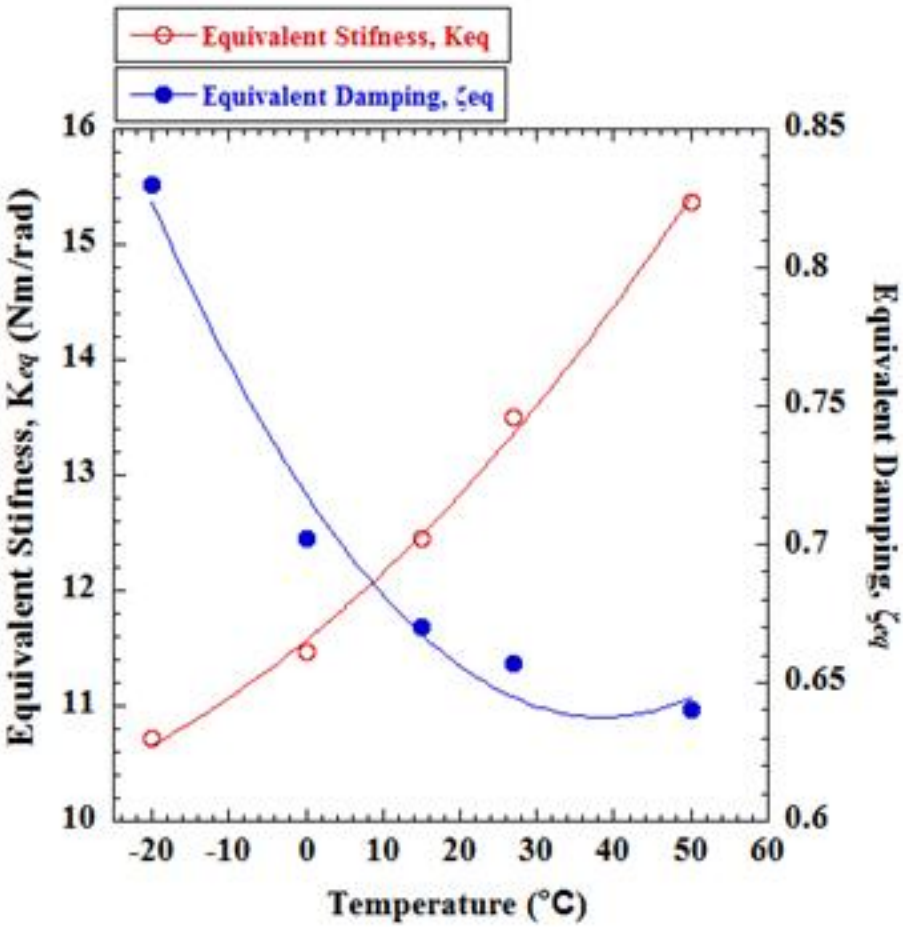


Fig. 37 Value of Equivalent Stiffness and Damping of SMA Mesh Washer Gear in Variable Condition

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

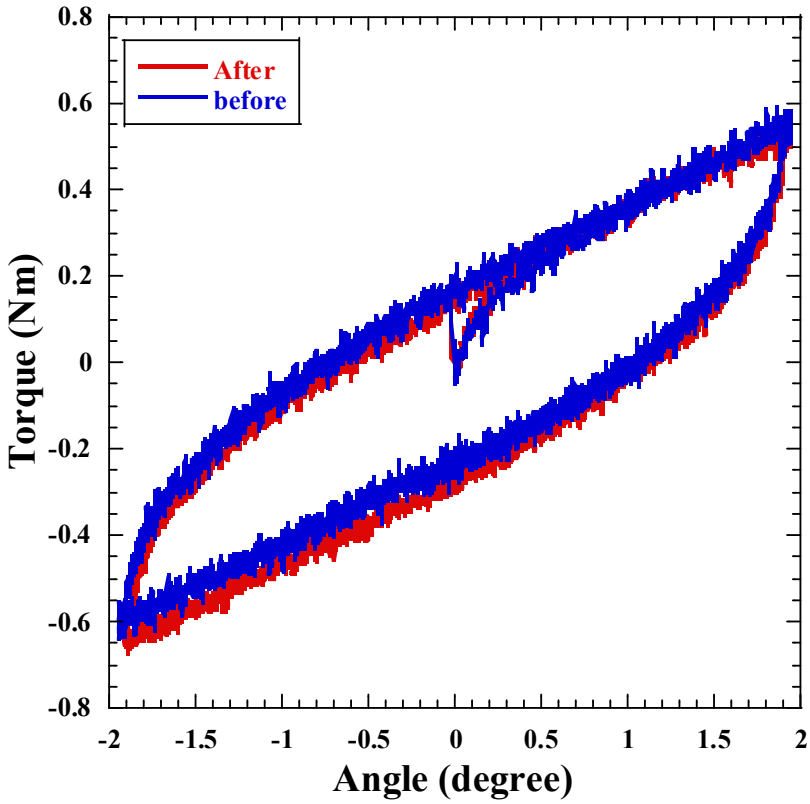


Fig. 38 Rotational Characteristics of SMA Mesh Washer Gear at Before and After Temperature Test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 SMA 메쉬와셔 기어의 미소진동절연 성능 검증

1. 등속도 구동 시험

SMA 메쉬와셔 기어가 적용된 X-밴드 안테나의 미소진동절연 성능을 파악하기 위해 Fig. 39와 같은 미소진동 측정 시험구성을 활용하였다. 시험 구성은 X-밴드 안테나의 회전 구동에 의해 발생되는 관성모멘트를 최소화하기 위해 500㎜×500㎜의 면적을 갖고 무게가 20Kg인 지지판을 사용하였다. 또한, 상기 지지판에 고무 계열의 탄성와이어로 각 3축에 Free-Free한 조건을 부여하였으며, X-밴드 안테나의 미소진동을 측정하기 위해 지지판에 가속도 센서를 부착하였다.

상기의 시험 구성을 활용하여 SMA 메쉬와셔 기어 적용 시 미소진동측정 시험 결과를 Fig. 40와 같이 시간-힘 선도로 나타내어 강기어 적용 시 측정된 미소진동과 비교하였다. 강기어 및 SMA 메쉬와셔 기어에 대한 미소진동 측정은 5deg/sec의 일정한 회전속도에 따른 안테나의 방위각 회전 운동 시 이루어졌으며, 재현성을 파악하기 위해 2회전 수행하였다. 또한, 설정한 X-밴드 안테나가 5deg/sec의 속도에 도달하기 위해 0~38초까지 가속구간이 존재하며, 이후 39~160초까지 등속구간이 존재한다. 초기 가속화 단계에서, X-밴드 안테나의 회전구동에 의해 유발되는 진동외란 성분은 방위각 방향으로 구동을 시작하는 순간적인 시점에서 발생하는 과도진동 및 안테나의 구조공진 주파수와 동적 커플링, 스텝핑 모터의 구동에 따른 조화진동성분에 의해 발생한다. 등속도 구간의 경우, 진동외란 성분은 주로 스텝핑 모터의 작동에 의한 안테나의 방위각 방향 회전운동에 의해 나타난다. 그러나 안테나의 방위각 단에 SMA 메쉬와셔 기어를 적용함으로써 상기 진동외란 성분은 기존 강기어 적용조건에 비해 크게 감소되는 것을 확인 가능하다. 상기의 측정된 진동외란 성분은 특히, X-Y 축 측정 시 크게 나타나고 있으며, Z축 방향 측성 시에도 외란 성분이 감쇠되는 것을 확인 가능하나 X-Y축 에 비해 적게 감쇠됨을 알 수 있다. 이는 SMA 메쉬와셔의 경우 Z방향인 두께방향으로의 강성이 회전방향인 X-Y방향에 비해 높은 강성을 가짐에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라 나타나는 결과이다.

Figure 41, 42는 각각 종래의 강기어 및 SMA 메쉬와셔 기어를 적용한 X-밴드 안테나 조립체의 방위각 단 회전운동에 대한 외란력을 Waterfall로 나타낸 결과이다. 결과로부터, 종래의 기어가 적용된 안테나 조립체의 1차 고유진동수가 안테나 구조모드에 기인한 약 55Hz에서 관찰되고 있으며, 상기 55Hz 대역의 진동외란 성분은 위성의 주요 탑재체의 구조모드 주파수인 50Hz와의 충분한 이격이 되지 않음에 따라 고해상도 관측위성의 정밀지향성능에 영향을 미쳐 고해상도 관측위성로부터 획득되는 영상품질의 저하가 야기된다. 그러나 X축 미소진동 측정 결과로부터, SMA 메쉬와셔가 적용될 시 1차 고유진동수가 5.8Hz에서 0.128N의 외란력이 발생함에 따라 기존 강기어 적용 시 1차 회전 고유진동수 대역인 55Hz의 1.443N의 외란력에 비해 약 11.2배의 진동저감 성능을 나타낸다. 그러나 상기 SMA 메쉬와셔 기어를 적용 시 5.8Hz 대역에서의 외란력은 Waterfall 상에 식별되지 않으며, 이는 X-밴드 안테나가 5deg/sec의 일정한 속도로 회전 시 발생하는 스텝핑 모터의 구동 주파수 222Hz가 5.8Hz 대역의 주파수를 충분히 가진시키지 못함과 동시에 형상기억합금의 우수한 댐핑효과로 인해서 Fig. 29의 결과로부터 유추한 값이다. 또한, 안테나의 구조 공진모드인 110~130Hz 대역 및 전술한 안테나 회전구동 주파수인 222Hz 대역의 진동외란 성분이 주파수 분리에 의해 크게 감쇠된 것을 확인 가능하다.

SMA 메쉬와셔 기어의 미소진동 절연 성능의 유효성을 보다 상세하게 판단하기 위해 강기어와 SMA 메쉬와셔 기어 적용 시에 대한 진동외란 성분의 감소 비율을 Table 18에 나타내었다. 상기 Table 18 으로부터, 최대 및 평균 피크 감소 비율과 각 축에 대한 표준 편차 감소를 나타내고 있으며, 최대 피크 감소율은 각각 68.9% 및 67.1%가 X축과 Y축에서 확인되었다. 상기 두 축은 Z축에 비해 상대적으로 높은 피크 감소 및 표준편차 감소 성능 나타내고 있으며, 이는 전술한바와 같이 SMA 메쉬와셔의 두께 방향과 원주방향의 강성의 차이로 인해 발생한다. 이로부터 미소진동 절연성능은 SMA 메쉬와셔의 초탄성 특성이 아닌 강성특성에 크게 의존함을 나타낸다. 그러나 초탄성 특성과 메쉬형상으로부터 과도한 토크 인가조건에서도 SMA 메쉬와셔가 소성변형이 발생하지 않도록 보장한다. 따라서 미소진동 절연 측정 시험으로부터 SMA 메쉬와셔 기어를 적용 시 기존의 강기어를

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

적용한 조건보다 회전 방향뿐만 아니라 축 방향에 대해서도 진동 절연 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

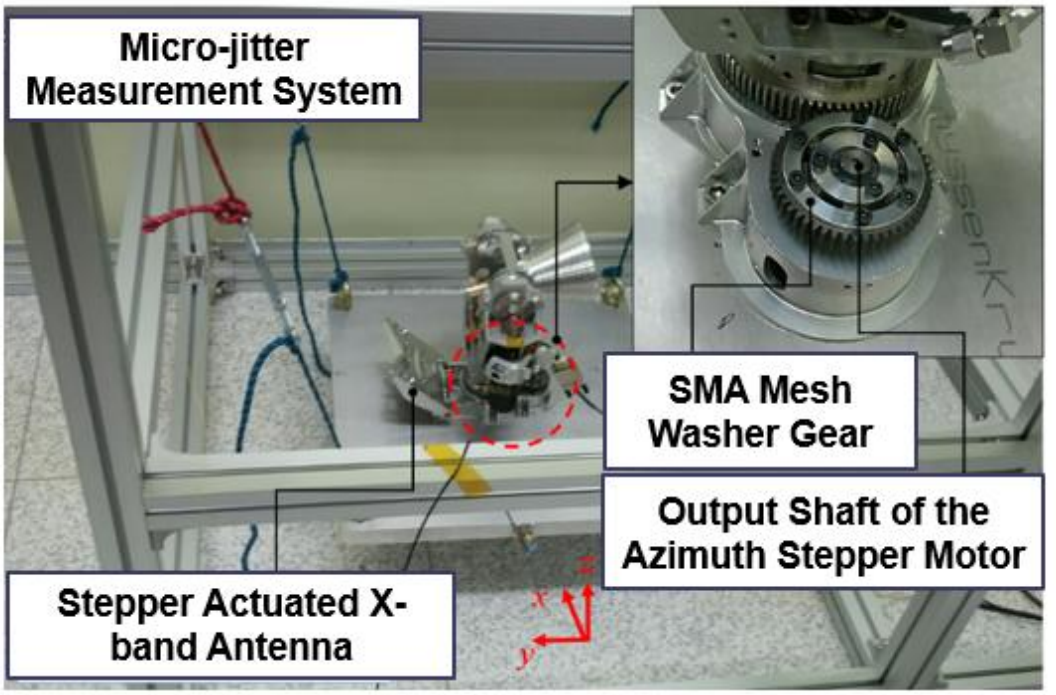


Fig. 39 Micro-jitter Measurement Test Set-up

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

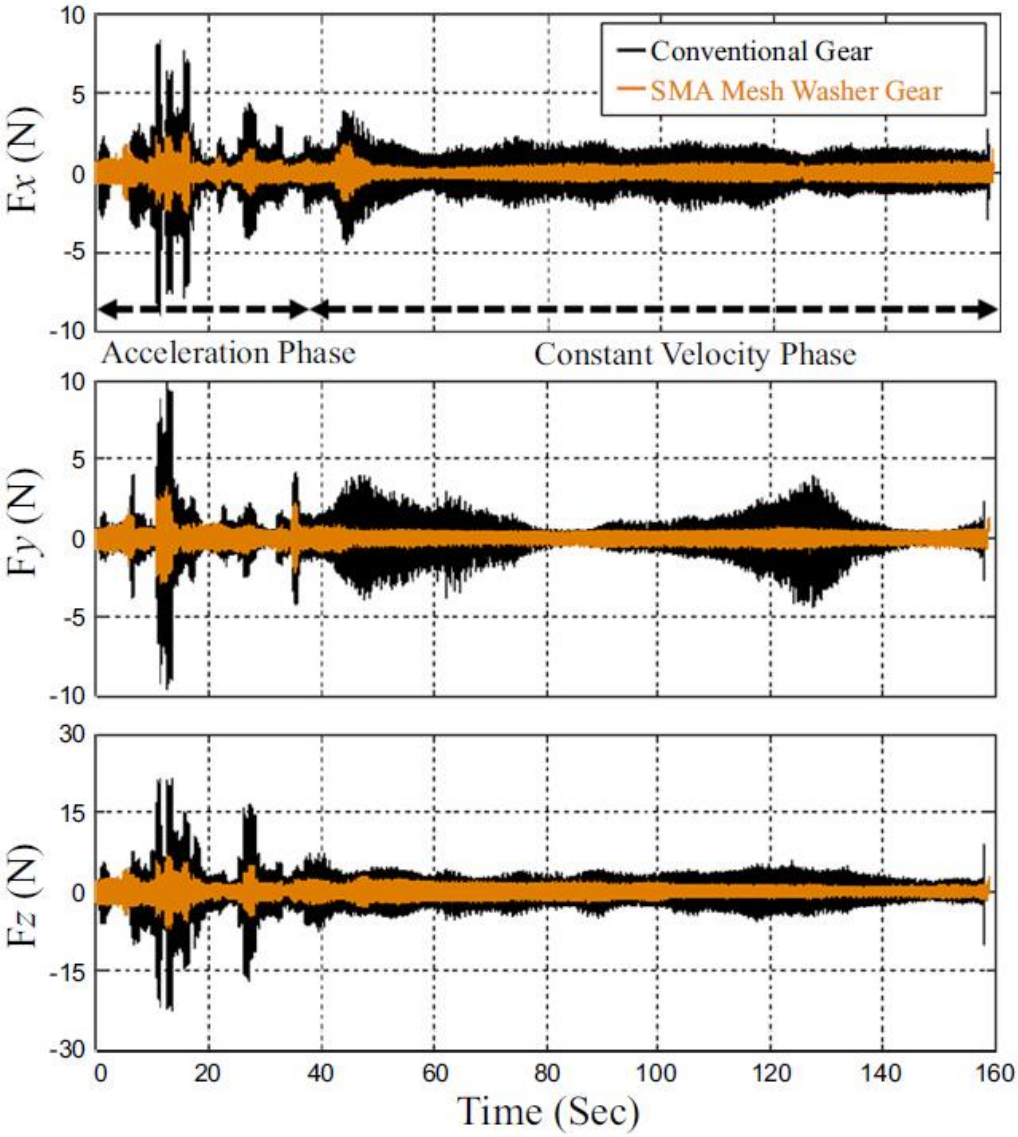


Fig. 40 Comparison of Time Profiles for Force between Conventional Gear and SMA Mesh Washer Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

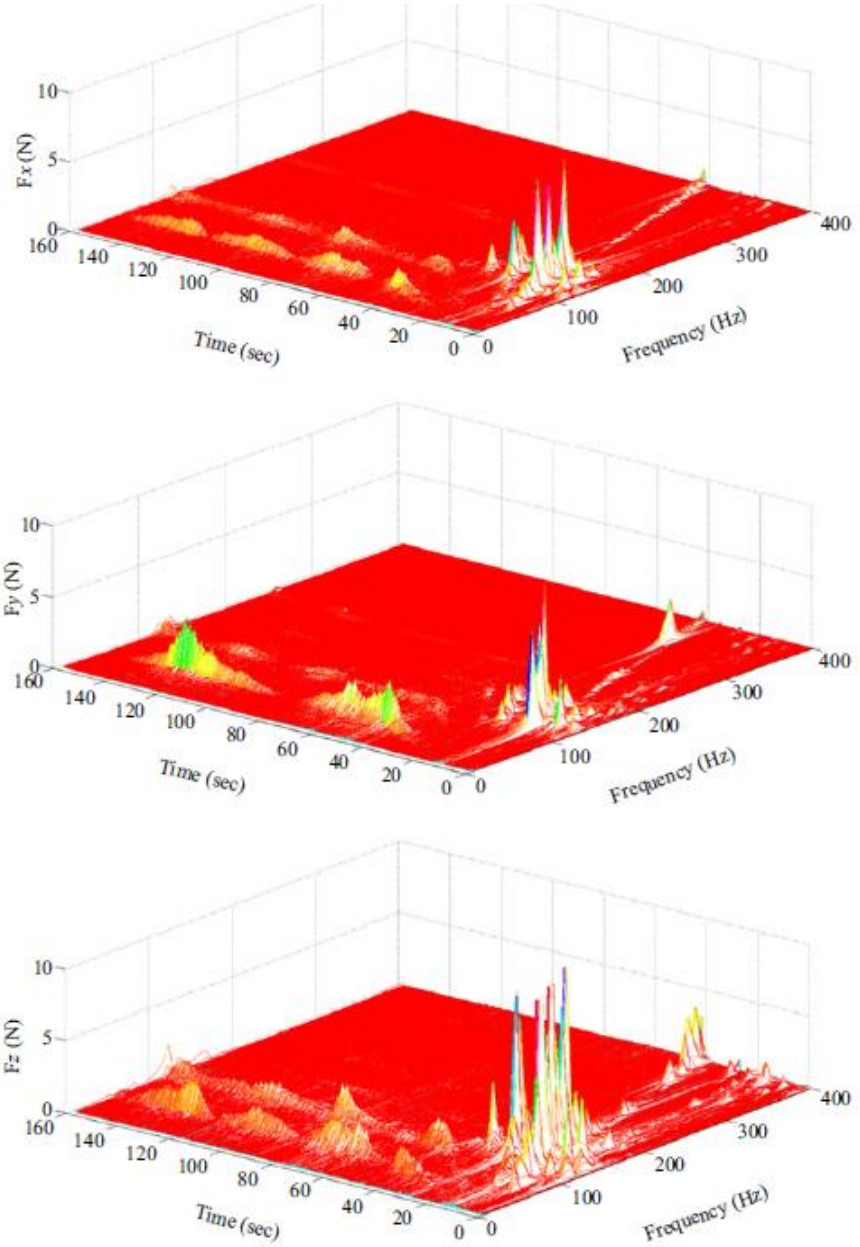


Fig. 41 Waterfall Plots of Disturbance Forces for Azimuthal Rotating Movements of the Antenna applying the Conventional Gear

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

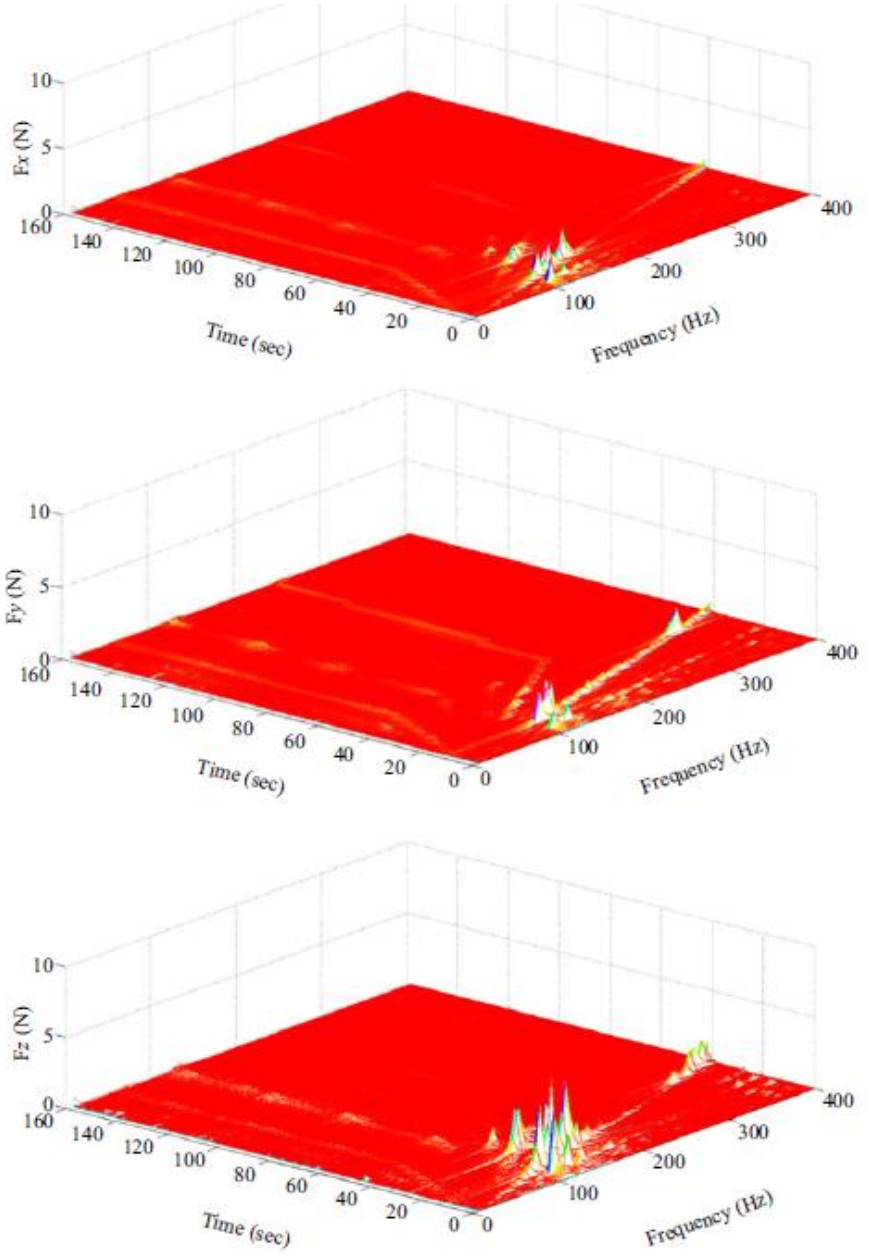


Fig. 42 Waterfall Plots of Disturbance Forces for Azimuthal Rotating Movements of the Antenna applying the SMA Mesh Washer Gear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 18 Total Disturbance Reduction Ratio Between the Conventional Gear and SMA Mesh Washer Gear

	Peak Reduction (%)		STD Deviation Reduction (%)
	Max.	Mean.	
F_x	68.9	62.8	65.2
F_y	67.1	63.9	67.5
F_z	56.7	49.5	52.1

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

본 연구에서는 발사진동환경 하에서 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 구조건전성 확보 여부를 파악하기 위해 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 모드해석과 준정적 해석이 수행 되었으며, 모드해석 결과로부터 극심한 발사진동환경 하에서 발사구속장치에 의해 구속된 조건에서 안테나의 강성요구조건을 만족함을 확인하였다. 또한 설계하중에 대해 준정적 해석을 수행하여 안테나 조립체에 대한 안전여유를 산출 시 구조건전성이 확보됨을 확인하였으며, 안테나 기저면과 위성체 간의 체결을 위한 I/F부의 반력을 도출하여 체결부에 적용되는 볼트의 안전여유로부터 구조건전성이 확보됨을 검증하였다. 아울러, Ball & Socket Mechanism에 적용된 소켓과 볼트머리 간의 이격에 대한 안전여유 및 볼트 자체의 안전여유를 산출하여 발사구속장치의 적정 구속력이 7~10kN임을 도출하였다.

또한, 본 연구에서는 궤도환경 하에서 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 임무 수행 시 발생하는 미소진동을 절연을 위해 제안된 Kozileck et al. [12]의 티타늄 블레이드 기어의 한계점을 극복하고자 초탄성 SMA 메쉬와셔 기어를 제안하였다. 상기 SMA 메쉬와셔 기어의 설계 유효성을 입증하기 위해 자유감쇠 진동 시험을 수행하였으며 SMA 메쉬와셔의 두께 방향 정하중 시험과 SMA 메쉬와셔가 적용된 회전방향 정하중 시험으로부터 기본특성을 파악하였다. 회전방향 정하중 시험은 서로 조밀도가 다른 SMA 메쉬와셔 기어의 특성을 비교하였으며, 티타늄 블레이드 기어와의 특성 비교로 4.3배 낮은 회전강성을 가짐에도 불구하고 안테나의 설계요구토크인 1.57Nm을 상회하는 과도한 토크가 작용하더라도 초탄성 특성으로 본래의 형상으로 복원이 가능한 것을 입증하였다. 또한, 다양한 인가 회전각에 따른 SMA 메쉬와셔 기어의 등가강성 및 등가댐핑 값이 감소하는 현상을 파악하였으며, 전달률 선도의 결과로부터 상기 등가강성 값의 감소는 2축 김벌형 X-밴드 안테나의 1차 고유진동수에 큰 변화를 유발하지 않아 주파수 분리에 의한 미소진동절연 성능에 큰 영향을 끼치지 않음을 입증하였다. 마지막으로, SMA 메쉬와셔 기어를 적용된 X-밴드 안테나 조립체에 대한 등속운동 하에서 미소진동절연 측정 시험을 수행하여 기존 강기어 적용 조건에 비해 우수한 미소진동절연 성능이 확보됨을 입증하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참 고 문 헌】

1) J. H. Beak, “Modeling on a gimbal with an antenna and investigation on the influence of backlash“, *JSME International Journal Series C Mechanical System, Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 49.3, pp.

2) Z. Zhang, G. S. Aglietti, and W. Zhou, " Microvibrations Induced by a Cantilevered Wheel Assembly with a Soft-suspension System", *AIAA Journal*, Vol. 49, pp. 1067~1079, 2010

3) 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”, *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, pp. 927-930, 2014

4) S. Y. Jeong, H. U. Oh, K. J. Lee and B. S Kim, "Mechanical Stability Analysis of PCB and Component for Launch and On-orbit Environment based on Fatigue Failure Theory and FEM", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 39, No. 10, October, 2011

5) D. S. Hwang, “Design and Analysis of Satellite Structure” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 27, No. 2, April, 1994

6) D. Kamesh, R. Pandiyan and A. Ghosal, “Passive Vibration Isolation of Reaction Wheel Disturbances using a Low Frequency Flexible Space Platform”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 331. No. 6, 2012, pp.1310-1130.

7) L. Vailon, B. Petitjean, B. Frapard and D. Lebihan, “Active Isolation in Space Truss Structures: from Concept to Implementation”, Smart Material and Structure, Vol. 8, 1999, pp.781-790.

8) J. Onoda, T. Endo, H. Tamaoki and N. Watanabe, “Vibration Suppression by Variable-stiffness Members”, AIAA Journal, Vol. 29, No. 6, 1991, pp.997-983.

9) D. K. Kim, K. L. Yong, H. T. Choi and G. Y. Park, “Micro-vibration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Test on a Two-axis Gimbal Antenna System with Stepping Motors", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 11, 2012, pp.1042-1048.

10) D. K. Kim and H. T. Choi, "Velocity Optimization Method of X-band Antenna for Jitter Attenuation", 21th Int. Congress on Sound and Vibration, 2014.

11) H. U. Oh, S. H. Jeon, T. H. Kim and Y. H. Kim, "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, pp.1-12.

12) H. Kozilek, B. Specht, S. S. Yong and S. G. Lee, "Micro Vibration Improvement of a Stepper Actuated Mechanism", 15th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2013.

13) https://www.neaelectronics.com/

14) https://tiniaerospace.com/

15) https://www.apco-technologies.eu/

16) J. W. Hu, "Seismic Behavior and Performanc Evaluation of Buckling-restrained Braced Frames (BRBFs) using Superelastic Shape Memory Alloy (SMA) Bracing Systems", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 3, 2013, pp.875-888.

17) H. S. Roh, S. H. Hong, S. Y. Lee and J. H. Lee, "Cyclic Modeling and Behavior of PT Segmental Bridge Piers with Superelastic SMA MA Bars", 36th Korean Society of Civil Engineers Symposium, 2010.

18) S. H. Youn, Y. S. Jang and J. H. Han, "Pyroshock and Vibration Isolation using SMA Mesh Washer Isolator", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 37, No. 3, 2009, pp.307-313.

19) H. U. Oh, S. C. Kwon and S. H. Youn, "Characteristics of Spaceborne

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Cooler Passive Vibration Isolator by Using a Compressed Shape Memory Alloy Mesh Washer”, Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 1, 2015, pp.1-12.

20) S. C. Kwon, S. H. Jeon and H. U. Oh, “Performance Evaluation of Spaceborne Cryocooler Micro-vibration Isolation System Employing Pseudoelastic SMA Mesh Washer”, Cyrogenics, Vol. 67, 2015, pp.19-27.

21) 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 Materials Systems and Structures, Vol. 25, 2013, pp.908-919.

22) Space Engineering, Mechanisms, *ECSS (European Cooperation For Space Standardization)*, March, 2009

23) Space Engineering, Threaded Fasteners Handbook, *ECSS (European Cooperation For Space Standardization)*, April, 2010

24) B. E. Steeve and R. J. Wingate "Aerospace Threaded Fastener Strength in Combined Shear and Tension Loading", *https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.n sa.gov*, March, 2012

25) Requirements for Threaded Fastening System in Spaceflight Hardware, *NASA Technical Standard 5020*, December, 2012

26) S. C. Kwon, S. H. Jeon, and H. U. Oh, “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.

27) http://smalloy.co.kr/

28) X. J. Yan and J. X. Nie, " Study of a New Application Form of Shape Memory Alloy Superelasticity", *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, pp. 14~23, 2003

29) S. H. Jeon, S. C. Kwon, T. H. Kim and H. U. Oh, "Enhancement of Microjitter Attenuation Capability for a Stepper-Actuated Two-Axis

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Gimbal-Type Antenna by Using a Spring-Blade Isolator", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.30, No. 4, 2017

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【연 구 실 적】

<국내논문>

1. 박연혁, 유창목, 오현웅, "스텝모터 구동형 짐벌 안테나의 미소진동저감을 위한 초탄성 형상기억합금 메쉬 와셔 기어의 기본특성 분석", 제 12권, 제 2호, 2018, pp.46-58
2. 박연혁, 유창목, 강은수, 오현웅, "차세대 중형위성용 2축 짐벌식 안테나의 구조해석", 제 12권, 제 2호, 2018, pp.37-45
3. 박연혁, 고지성, 채봉건, 이성호 오현웅, "나일론선 절단방식 6U 큐브위성용 태양전지판 구속분리장치의 기능검증", 제 46권, 제 10호, 2018, pp.867-875

<학회발표>

1. Y. H. Park, M. S. Jo and H. U. Oh, "Structural Design and Analysis of On-board Tilt Mirror Calibration Mechanism without Launch Lock Device", Proceedings of Asian Joint Symposium on Aerospace Engineering (AJSAE), Gyeongju, Republic of Korea, 2018
2. S. C. Kwon, Y. H. Park and H. U. Oh, "Characteristics of Spaceborne Cooler Vibration Isolator using a Pseudoelastic Shape Memory Alloy", SPIE 2017 (Smart Structures + Nondestructive Evaluation) Portland, USA, 2017
3. Y. H. Park, C. M. You and H. U. Oh, "Structural Analysis for Spaceborne 2-axis Gimbal-Type Antenna", The 9th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science & The 2nd Asian Joint Symposium on Aerospace Engineering, Beijing, China, 2017
4. 박연혁, 권성철, 오현웅, "초탄성 형상기억합금 메쉬와셔를 적용한 김벌 안테나 미소진동 저감 기어", 항공우주시스템공학회 2017 춘계학술대회

<수상>

1. 전영현, 박연혁, "발사구속장치를 불필요로 하는 반작용 휠 미소진동 저

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감용 진동 절연기에 관한 연구" 2017 제 5회 한국항공우주학회 학부생 논문경진대회 우수상

2. Y. H. Park, M. S. Jo and H. U. Oh, "Structural Design and Analysis of On-board Tilt Mirror Calibration Mechanism without Launch Lock Device" 2018 Asian Joint Symposium on Aerospace Engineering, Best Paper Award

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【감 사 의 글】

2016년 12월부터 실험실 생활을 시작하여 2년의 시간이 눈 깜짝할 사이에 지나고 벌써 석사 졸업을 앞두게 되었습니다. 여기까지 오기까지 도움을 주신 모든 분들께 감사의 인사를 드립니다.

학부 4학년, 곧 졸업을 앞둔 저에게 사회에 나가서 경쟁하기 위해서는 본인만의 무기가 필요하다고 조언해 주시고, 무기 찾으러 연구실 생활을 추천해주신 오현웅 교수님. 교수님의 열정적인 지도와 지원으로 제가 어느덧 석사졸업을 앞두고 있습니다. 저 뿐이 아닌 연구실 더 나아가 항공우주공학과의 학생 모두에게 많은 가르침과 목표의식을 제시해주시는 교수님의 노력과 시간이 아깝지 않도록 더욱 정진하도록 하겠습니다. 진심으로 감사드립니다.

그리고, 2년동안의 연구실 생활을 하며 동거동락하고 힘들거나 기쁠 때 항상 함께한 랩장 태용이, 더머 영현이, 멘탈 갑 수현이, 못하는게 없는 혜인이, 잘생긴 지성이, 병원생활중인 주성이 이 외에도 저의 영원한 멘토 성철이형, 동생이지만 배울게 많은 봉건이에게도 큰 고마움을 표합니다. 뒤 늦게 연구실에 합류한 석진이, 성문이, 민지, 재원이, 먼 나라에서 온 바트라이 샹카, 하루 응원의 말을 전합니다.

아울러, 혼자 광주광역시에 떨어져서 자주 만나지 못하고 연락이 뜸해져도 언제나 마음으로는 서로를 응원하는 안산 친구들 종벽이, 찬영이, 해진이, 종성이, 철현이, 민우, 승현이, 용혁이 포함 모든 자랑스러운 친구들에게 고마움을 전하고 싶습니다.

특히, 처음 실험실의 문을 두드린 날부터 지금까지 항상 많은 도움을 주고 사소한 것부터 배울게 많은 태용이, 본인일이 바빠도 짜증 하나 없이 도와주고 실험실 멤버를 위해 책임감 있는 행동으로 우리를 이끌어줘서 감사하다는 말을 전합니다. 그리고, 덤앤더머라 불리고 항상 세트로 같이 연구하고 연구실 생활을 하고나니 이젠 같이 석사 졸업을 앞둔 영현이. 정신적 지주로서 서로 멘탈이 흔들릴 때마다 잡아주고, 안 좋은 일 있을 때 마다 옆에 항성 있어줘서 고맙다는 말을 전합니다. 연구실 멤버들 모두 잘되길 기도하고 항상 지혜가 빛나길 바랍니다. 감사합니다.

2018년 12월

박연혁

Collection @ chosun