

위성용 김벌 구동형 X-밴드 안테나의 미소진동저감 성능 향상을 위한 초탄성 형상기억합금 블레이드 기어에 관한 연구

1. 연구 배경 및 목적

2축 김벌형 X-밴드 안테나는 고해상도 관측 위성으로부터 획득된 대용량 영상 데이터의 효율적 지상국 전송을 목적으로 널리 사용되고 있다. Fig. 1의 안테나 시스템은 하모닉 드라이브 기어와 결합된 스텝 모터에 의해 회전 구동하게 되며, 이때 상기 모터 구동에 따른 외란 및 기어 간의 부정확한 맞물림과 안테나의 동적 불균형 등에 의해 미소진동을 유발한다. 이러한 미소진동은 그 크기는 극히 미소하나 영상 탑재체에 전달될 경우 카메라의 시선 각을 교란시켜 고해상도 관측위성의 영상 품질 저하를 유발한다.

기존 다목적실용위성사업에서는 X-밴드 안테나의 방위각 회전 구동 시 발생하는 미소진동절연에 의한 고해상도 영상정보 획득을 목적으로 티타늄으로 제작된 블레이드 형상의 저 회전 강성 기어를 적용하였다. 하지만, 실제 조립과정 또는 발사 및 궤도 열 환경에 기인한 축 정렬 불량에 의해 티타늄 블레이드 기어의 설계 규격을 상회하는 과도한 토크가 인가될 시, Fig. 2와 같은 소성변형 발생의 문제점이 존재하였다. 또한, 미소진동 절연성능 향상을 목적으로 기어의 회전강성을 낮추게 되면, 소성변형에 대한 취약성 등 구조적 관점에서의 설계여유가 감소하여 안테나 구동을 위한 요구토크 조건에 부합하지 못하는 단점이 존재한다. 상기의 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 형상기억합금(Shape Memory Alloy: SMA)의 초탄성 효과에 주목하여, Fig. 3과 같은 형상기억합금 블레이드 기어를 제안하였다. 상기에서 제안한 초탄성 SMA 블레이드 기어의 설계 유효성을 입증하기 위해 자유감쇠시험, 회전방향 정하중 시험, 가속 수명 시험을 실시하였으며, 김벌형 안테나에 적용하여 미소진동 절연성능을 평가하였다.

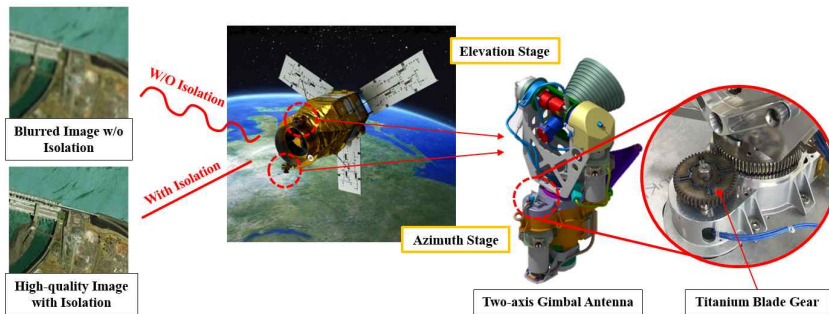


Fig. 1 Conventional Approach for Micro-vibration Isolation of X-band Antenna using Ti Blade Gear

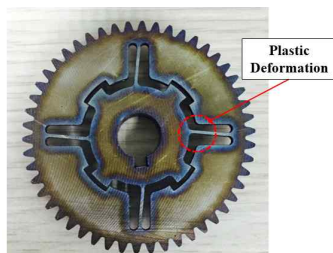


Fig. 2 Plastic Deformed Conventional Ti Blade Gear

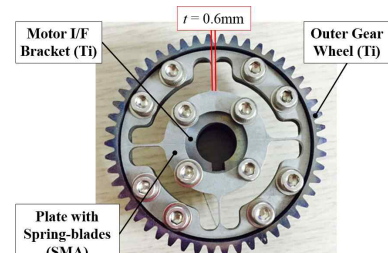


Fig. 3 Hyperelastic SMA Blade Gear

2. 초탄성 SMA 블레이드 기어

2.1 초탄성 SMA 블레이드 기어의 기본특성 시험

초탄성 SMA 블레이드 기어의 회전방향 자유감쇠 시험을 수행하였으며, 회전방향으로 초기 약 1°인가 후 자유감쇠 진동 하에서 가속도 응답의 시간이력을 측정하였다. Fig. 4는 SMA 블레이드 기어의 자유감쇠 진동시험 결과를 나타내며, SMA 기어의 비교 대상으로 동일 형상을 갖는 티타늄 블레이드 기어의 응답을 비교하였다. 각각의 결과로부터 산출된 진동 감쇠비는 SMA 기어가 0.047, 티타늄 기어가 0.0086로, 미소진동 절연관점에서 SMA기어 적용 시 티타늄 기어보다 향상된 피크저감 성능구현이 가능하다.

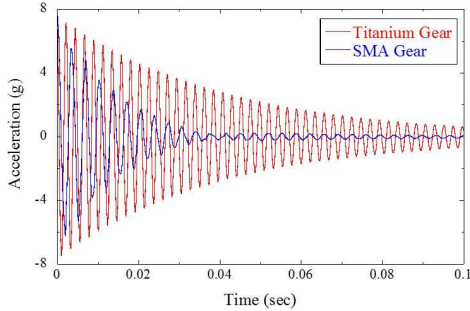


Fig. 4 Time History of Free Vibration

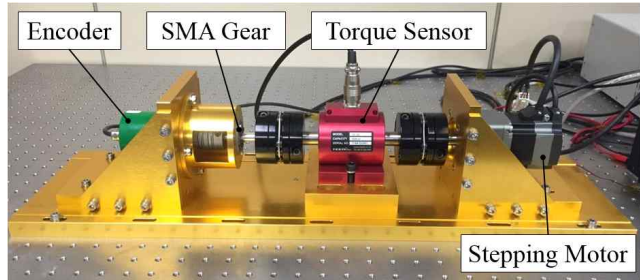


Fig. 5 Rotational Characteristic Test Set-up for SMA Gear

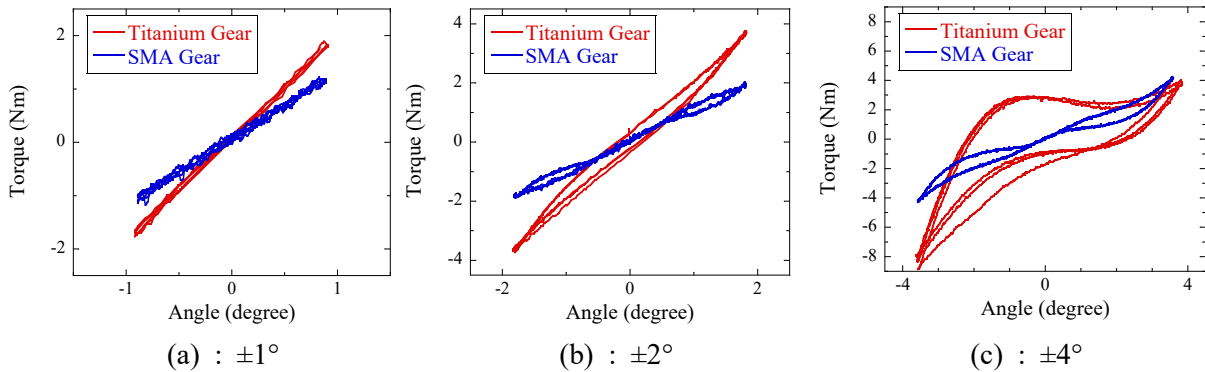


Fig. 6 Titanium and SMA Gear Rotational Characteristics with 3 Cyclic Loadings

Fig. 5는 초탄성 SMA 블레이드 기어의 회전방향 정하중 시험 구성을 나타내며, 토크 인가를 위한 스텝 모터, 토크 측정을 위한 토크센서, 측정 시편의 회전각 측정을 위한 엔코더로 구성되어 있다. Fig. 6은 SMA 블레이드 기어의 회전각에 따른 각도-토크 선도를 나타내며, 동일 형상을 갖는 티타늄 블레이드 기어의 결과를 함께 비교하였다. 각 시험은 반복 구동에 따른 재현성 확인을 위해 3사이클을 실시하였으며, 각 시험별로 촬영한 시편의 형상을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6 (a)는 각 기어의 $\pm 1^\circ$ 회전각에 따른 각도-토크 선도를 나타내며, 전체 각도에 걸쳐 두 기어 모두 선형 탄성에 가까운 거동을 보이고 있다. Figs. 7 (a), (b) 1° 형상 또한 육안검사 결과 두 기어 모두 외관상 아무런 변형이 없음을 알 수 있다. 여기에서, Fig. 6 (a)의 각도-토크 선도 기울기로부터 산출되는 각 기어의 등가 강성은 티타늄 기어가 110.61Nm/rad, SMA 기어가 67.7Nm/rad로 동일 형상임에도 SMA 기어가 더욱 낮은 회전 강성치를 보이고 있으며 진동절연 관점에서 향상된 성능보장이 가능하다. Fig. 6 (b)는 각 기어의 $\pm 2^\circ$ 회전각에 따른 결과이며, Fig. 6 (a)와는 상이한 거동특성을 보이고 있다. 티타늄 기어의 경우 이력곡선 (Hysteresis Curve) 및 일정 각도 이후 곡선의 기울기가 달라지는 비선형 거동을 보이고 있으며, 사이클이 누적될수록 초기 곡선에 부합하지 않는 결과를 보이고 있다. 이는 티타늄 블레이드 자체에 발생한 소성변형에 기인한 결과로, 더 이상 임무적용이 불가능함을 의미한다. 여기에서, 티타늄 기어의 경우 약 1.8Nm 이상 토크 인가 시 소성변형이 발생하였다. Fig. 7 (a) 2°는 $\pm 2^\circ$ 회전특성 시험 이후 티타늄 기어의 형상을 나타내며,

Fig. 7 (a) 1° 와는 상이하게 티타늄 블레이드가 원래의 형상으로 복원하지 않고 소성변형 상태를 유지하고 있다. 한편, SMA 기어의 경우 티타늄 기어와는 상이하게 사이클이 누적되더라도 초기곡선에 정확히 부합하는 결과를 보이고 있으며, 이는 SMA의 초탄성 거동에 기인한 결과이다. Fig. 6 (c)는 각 기어의 $\pm 4^\circ$ 회전각에 따른 결과이며, 티타늄 기어의 경우 이미 소성변형이 일어난 상태에서 수행된 실험인 관계로 매 사이클마다 상이한 비선형적 응답특성을 보이고 있다. Fig. 7 (a) 4°는 $\pm 4^\circ$ 회전시험 이후 티타늄 기어 시편의 형상을 나타내며, 티타늄 블레이드에 파단이 발생하였다. 한편, SMA 기어의 경우 $\pm 4^\circ$ 의 큰 변형이 발생했음에도 아무런 열화현상(Degradation) 없이 원래의 형상으로 완벽하게 복원하는 특성을 보이고 있으며, 이는 진술한바와 같이 SMA의 초탄성 거동에 기인한 결과이다. Fig. 7 (b)는 각 시험이후 촬영한 SMA 기어시편의 형상이며, Fig. 7 (a)의 티타늄 기어와 달리 시험 이후에도 원래의 형상을 완벽하게 유지하고 있다.

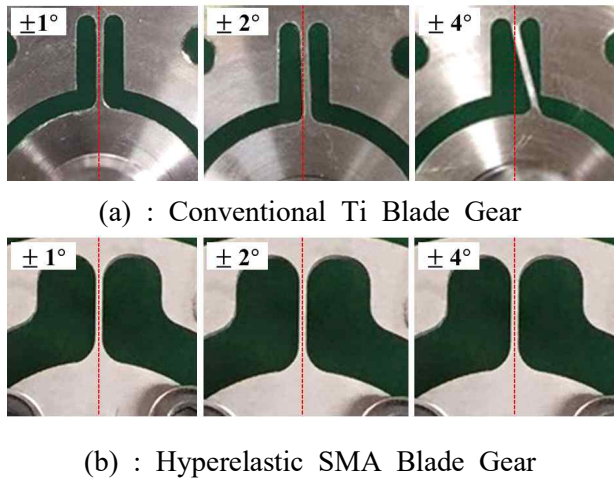


Fig. 7 Gear Configuration after Rotational Characteristic Tests

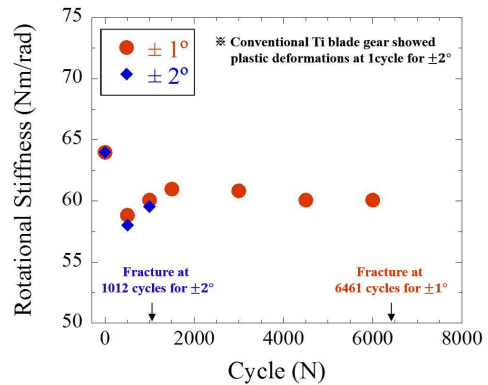


Fig. 8 Rotational Stiffness Variations of SMA Gear w.r.t Accumulated Cycles

2.2 초탄성 SMA 블레이드 기어의 가속 수명 시험

실제 조립과정 또는 발사 및 궤도 열 환경에 기인한 축 정렬 불량에 의해 설계 규격을 상회하는 과도한 토크가 인가될 시, 누적된 사이클에 따른 SMA 기어의 열화현상을 검토하기 위해 가속 수명시험을 실시하였다. 김벌형 안테나의 궤도상 최대 운용 속도인 3°/sec로 $\pm 1^\circ$ 와 $\pm 2^\circ$ 를 시험 기준으로 설정하였다. Fig. 8은 누적된 사이클에 따른 SMA 기어의 강성치를 나타내며 기존 티타늄 기어의 경우 $\pm 2^\circ$ 범위에서 1사이클 만에 소성변형이 발생하는 반면, SMA 기어의 경우 1,000사이클 까지 소성변형 없이 강성이 유지되고 1,012사이클에서 피로파괴가 발생하였다. 실제 안테나 정상운용 상태에서의 회전각도에 비해 두 배를 상회하는 $\pm 1^\circ$ 회전각에 대해서는 약 6,460사이클 까지 수명시험 횟수가 누적되더라도 아무런 열화현상 없이 기어의 강성이 유지되고 있음을 알 수 있다.

3. 미소진동 절연성능 검증시험

Fig. 9는 2축 김벌형 안테나의 미소진동 절연성능 측정시험 구성을 나타낸다. 본 시험을 위하여 SMA 블레이드 기어가 적용된 2축 김벌형 안테나를 탄성 와이어로 지지된 안테나 고정 플레이트에 결합하여 3축에 대한 구속 자유 조건을 부여하였으며, 플레이트 측면부에 3축 미소진동용 가속도 센서를 부착하여 안테나 구동에 따른 미소진동을 측정하였다. SMA 블레이드 기어의 미소진동 절연성능 비교 대상으로 일반 강기어를 적용하였다. Fig. 10은 일반 강기어 및 SMA 블레이드 기어 적용 시 안테나의 방위각에 대하여 3°/sec로 회전 구동 하였을 때, 회전 구동 방향과 일치하는 y축에 대하여 획득된 기저면

전달력의 waterfall을 나타낸다. 일반 강기어를 적용한 안테나 조립체의 1차 고유진동수가 33Hz에서 관측되는 반면, SMA 기어를 적용한 경우 13Hz로써 SMA 블레이드 기어의 저회전강성에 기인하여 저주파 영역으로의 주파수 이동이 관측되고 있다. 이를 기점으로 주파수 분리에 기인한 고주파 영역에서 발생하는 외란력 성분이 크게 감소하고 있다. 추가적으로, 피크 감소율 및 표준편차 감소율 산출을 통해 SMA 블레이드 기어 적용에 따른 절연 성능을 세부적으로 분석하였으며, 이에 대한 결과를 Table 1에 나타내었다. 상기의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 SMA 블레이드 기어는 설계가 의도한대로 안테나의 방위각 단 구동에 대해 뛰어난 미소진동 절연성능 보장이 가능함을 입증하였다.

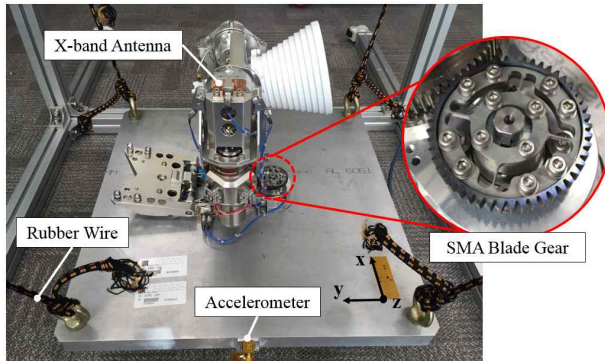


Fig. 9 Test Set-up Configuration for the Micro-vibration Test on Hanging System

Speed	Axis	Peak Reduction (%)		STD Deviation Reduction (%)
		Max	Mean	
3°/s	Fx	59.10	56.85	56.88
	Fy	75.69	37.94	59.34
	Fz	46.63	42.36	41.64
5°/s	Fx	43.26	35.21	31.42
	Fy	54.93	17.83	34.61
	Fz	41.60	41.71	37.65
7°/s	Fx	52.44	57.48	54.26
	Fy	42.67	18.28	32.68
	Fz	54.17	55.00	42.90

Table 1 Summary of Disturbance Reduction Ratios between Conventional Gear and SMA Gear

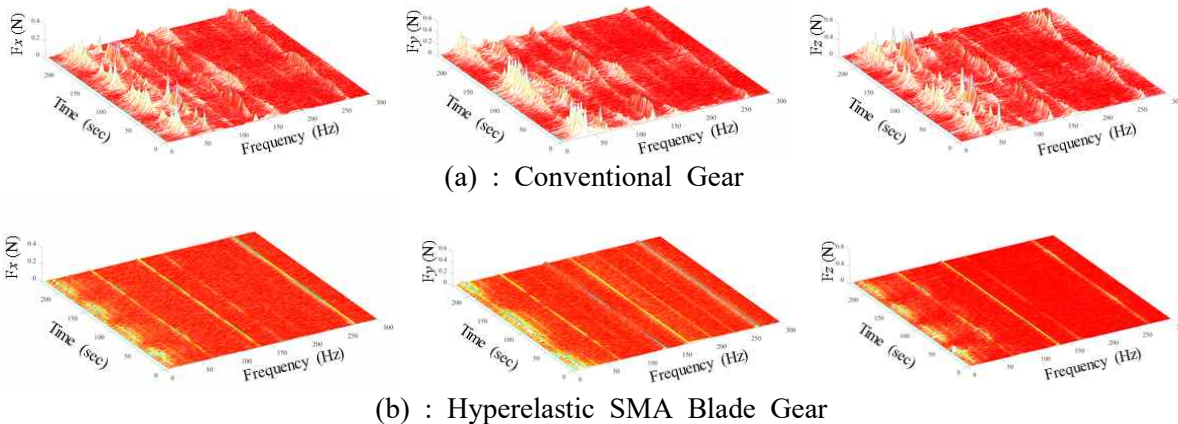


Fig. 10 Waterfall Plots of Disturbance Forces for Azimuth Directional Movements of the Antenna in 3°/sec Constant Speed Operation

4. 결론

본 연구에서는 X-밴드 안테나의 미소진동절연을 목적으로 기존 다목적위성사업에서 적용된 티타늄 블레이드 기어의 장점인 저회전강성 구현에 의한 미소진동절연 성능을 유지하되 티타늄 기어가 갖는 소성변형 취약성의 단점을 극복하고자 초탄성 형상기억합금을 적용한 기어를 제안하였다. 기본특성 시험결과를 통해 초탄성 SMA 기어는 저회전강성, 고댐핑 구현이 가능함과 동시에 과도 토크 인가 시에도 소성변형 없이 원래의 형상으로 복원 가능함을 입증하였다. 또한, 정상 안테나 운용조건 보다 두배를 상회하는 과도 토크 조건에서 가속수명시험을 실시하였으며 6,400사이클 까지 수명시험 횟수가 누적되더라도 아무런 열화현상 없이 기어특성 유지가 가능함을 입증하였다. 또한, 김벌형 안테나의 미소진동 측정시험을 통해 초탄성 SMA 기어의 저회전강성에 기인한 미소진동절연의 유효성을 입증하였다.