

블레이드 기어를 적용한 X-밴드 안테나 미소진동 절연성능 Micro-vibration Isolation Performance of X-band Antenna using Blade Gear

전수현‡ · 권성철* · 김태홍** · 김용훈** · 오현웅†

Su-Hyeon Jeon‡, Seong-Cheol Kwon*, Tae-Hong Kim**, Yong-Hoon Kim**
and Hyun-Ung Oh†

Key Words : X-band Antenna(X-밴드 안테나), Blade Gear(블레이드 기어), Micro-vibration Isolation(미소진동 절연)

ABSTRACT

X-band antenna has been widely used to effectively transmit the high resolution image data from the observation satellite to the ground station. To achieve above mission, X-band antenna is mainly composed of the 2-axis gimbal system using stepping motors and gears. However, the micro-vibration induced by the stepping motor actuation and the imperfect gear teeth alignment during this on-orbit operation is the main source of image quality degradation. In this paper, X-band antenna combined with a blade gear for micro-vibration isolation was suggested and investigated. The structural safety of the blade gear with low rotational stiffness was confirmed by structure analysis based on the derived torque budget. The isolation performance of the X-band antenna with the blade gear was verified through micro-vibration measurement test using the dedicated micro-vibration measurement device proposed in this study.

1. 서 론

2000년 전 위성영상은 주로 지도제작, 측량, 군사, 첩보 등과 관련된 국가사업을 목적으로 활용되었으나, 고해상도 영상수요가 급격하게 증가하기 시작하면서 제한된 촬영기회에 다수의 표적에 대한 고해상도 영상정보 획득이 가능한 고기동 위성시스템이 요구되는 추세이다. 이와 같은 요구사항을 만족시키기 위해 고기동·초정밀 위성개발은 물론 위성영상의 해상도 및 관측폭이 증가하고 있으며, 이에 따른 영상자료의 양과 크기 또한 증가하는 추세에 있

다⁽¹⁾.

따라서 고해상도 관측위성으로부터 촬영된 대용량 영상데이터를 효율적으로 지상국에 전송하기 위해 X-밴드 안테나를 2축 짐벌에 장착하여 위성의 궤도운동과 무관하게 지상의 안테나 지향이 가능하도록 하여 대용량 데이터 전송이 가능해졌다. 최근 국내·외에서 개발되고 있는 고해상도 관측위성도 상기와 같은 짐벌형 안테나를 탑재하고 있다⁽²⁾.

2축 짐벌 시스템을 갖는 X-밴드 안테나는 방위각 단(Azimuth Stage)과 고각 단(Elevation Stage)으로 구성되어 있으며, 각 축의 구동을 위해서는 안테나 구동을 위한 토크 버짓 만족을 위해 주로 일정 기어비의 기어모듈과의 조합으로 구동되는 스텝핑 모터의 사용이 적용되고 있다. 스텝핑 모터 구동에 따른 외란 및 기어 간의 부정확한 맞물림과 동적 불균형 등은 2축 짐벌형 X-밴드 안테나의 미소진동을 발생시켜 고해상도 관측위성의 영상품질 저하를 유발하는 주요 원인으로 작용한다⁽³⁾.

† 교신저자; 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

Tel : 062-230-7183, Fax : 062-230-7729

‡ 발표자; 조선대학교 항공우주공학과

* 조선대학교 항공우주공학과

** 광주과학기술원 기전공학부

본 연구에서는 2축 짐발형 X-밴드 안테나의 방위각 구동에 따른 미소진동 절연을 목적으로 Kozilek et al.⁽⁴⁾이 제안한 기법에 기반하여 구동모터의 출력축에 장착되는 기어에 저 회전강성을 부여한 블레이드 기어를 설계하였으며, 안테나 구동에 요구되는 토크 버짓을 기반으로 구조해석을 수행하여 저 회전강성 블레이드 기어에 대한 구조건전성을 확인하였다. 이를 기반으로 제작된 블레이드 기어를 X-밴드 안테나에 적용하여 설계된 블레이드 기어가 소성변형 없이 안테나 구동에 필요한 토크 전달이 가능함을 확인하였다.

또한, X-밴드 안테나의 미소진동특성을 목적으로 안테나가 장착된 지지판의 중력방향을 탄성와이어로 지지하여 비교적 3축에 대한 구속 자유 조건에서의 미소진동 측정이 가능한 계측시스템을 제안하였으며, 이를 이용해 회전강성이 상이한 기어적용에 따른 미소진동 측정시험을 수행하였다. 블레이드 기어의 미소진동절연성능 검증에 있어서는 안테나의 등속도 구동조건에서의 성능 검증만을 수행한 선행연구⁽⁴⁾와 달리, 본 연구에서는 안테나의 실제 궤도 운용을 모사한 TPF(Tracking Parameter File) 구동 프로파일 적용을 통해 안테나의 방위각과 고각 방향이 동시에 구동되며 안테나 구동속도가 가변되는 구동 조건에서의 미소진동시험을 실시하여 저 회전강성 블레이드 기어 적용에 따른 미소진동절연의 유효성을 검증하였다.

2. 블레이드 기어를 적용한 X-밴드 안테나

2.1 2축 짐발 시스템 X-밴드 안테나

X-밴드 안테나는 위성으로부터 획득된 데이터를 효율적으로 지상국에 송신하기 위해 사용되며, 위성의 자세각과 안테나의 지향각에 따라 방위각 축과 고각 축으로 동시에 회전구동이 가능하도록 2축 짐발 시스템으로 이루어져 있다⁽²⁾. Figure 1은 2축 짐발 시스템을 갖는 X-밴드 안테나에 대한 형상을 나타내며, 안테나의 무게는 총 11kg으로 방위각 단과 고각 단으로 구성되어 있다. 방위각 축의 회전 영역은 360°로 요크(Yoke) 조립체가 구동되며, 이와 달리 고각 축은 15°~145° 범위 내에서 혼 안테나의 회전 구동이 이루어진다. 방위각과 고각방향의 회전 구동을 위해서 Phytron사의 2상 스텝핑 모터

(ZSS 43.200.06.-HD)가 사용되었으며, 각 구동축의 회전 변환을 위해 1:1.6 기어 비를 갖는 스피어 기어(Spur Gear)와 베벨 기어(Bevel Gear)가 각각 적용되었다.

하지만 궤도 상에서 2축 짐발 시스템의 X-밴드 안테나 구동을 위해 불연속적인 진동 특성을 발생시키는 스텝핑 모터 사용^(5,6)은 미소진동 외란을 유발하며, 이는 고해상도 관측위성의 영상품질을 저하시키는 주요 요인 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 X-밴드 안테나 구동 시 발생하는 미소진동 성분을 저감하기 위해 회전강성이 비교적 낮은 블레이드 기어를 설계하였으며, 이를 적용하여 미소진동 절연 성능을 확인하였다.

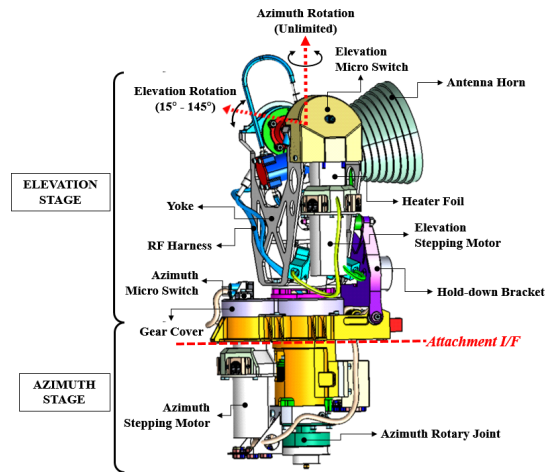


Figure 1 Configuration of a X-band antenna

2.1.1 토크 버짓 (Torque Budget)

2축 짐발 시스템을 갖는 X-밴드 안테나의 방위각 회전구동을 위해 요구되는 토크를 구하기 위해 ECSS 설계기준⁽⁷⁾에 근거하여 토크 버짓을 산출하였으며, 식은 다음과 같다.

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

여기서, T_R 는 안테나 구동을 위해 요구되는 토크 값이며, T_G 는 1g 환경에서의 지상 시험을 고려한 중력 토크, $T_{L/S}$ 는 안테나의 구동위치 확인을 위한 리미트 스위치(Limit Switch)의 작동 토크, T_{Bea} 는 베

어링(Bearing)의 마찰 토크, $T_{S/L}$ 는 슬립 링(Slip Ring)의 마찰 토크 그리고 T_{Acc} 는 가속 토크를 의미한다.

Table 1은 식 (1)을 통해 산출된 안테나 구동을 위해 요구되는 토크 버짓을 나타내며, X-밴드 안테나의 방위각 축의 회전구동을 위해서는 1.57Nm 이상의 토크 규격이 요구된다.

Table 1 Required torque budget for azimuth driving of a X-band antenna

Torque Quantities	Torque Value [Nm]	Remarks
T_g	0.477	
$T_{L/S}$	0.108	
T_{bea}	0.028	2 EA
$T_{S/L}$	0.014	1 EA
T_{acc}	0.00395	
T_R	1.57	required torque for azimuth driving

2.2 블레이드 기어

X-밴드 안테나의 방위각 방향 구동에 따른 미소 진동 저감을 위해, 회전방향에 대해 저장성 구현이 가능한 블레이드 기어를 설계하였다. Figure 2는 본 연구에서 제안한 블레이드 기어가 X-밴드 안테나에 결합되어 있는 형상을 나타내며, X-밴드 안테나의 방위각 축 회전변환을 위해 1:1.6 기어비를 갖는 스피어 기어가 적용되었다. 스피어 기어 중 방위각 스텝핑 모터의 출력축에 장착되어 있는 블레이드 기어는 스텝핑 모터의 출력 토크로부터 회전이 이루어지며, 이와 맞물리는 기어는 블레이드 기어로부터 동력을 전달받아 안테나의 방위각 회전구동을 구현한다.

50개의 치를 갖는 블레이드 기어의 외경, 내경, 높이는 각각 52mm, 10mm, 5mm이며, 회전방향에 대한 저장성 구현이 가능하도록 두께, 높이, 길이가 각각 0.7mm, 2.5mm, 10mm인 블레이드 4개를 기어 내부에 원주방향으로 배치하였다.

2.2.1 구조 해석

X-밴드 안테나의 방위각 방향 회전구동 시 발생하는 미소진동을 저감하기 위해 설계되었던 블레이드 기어의 구조 건전성 및 회전강성을 확인하기 위해 구조해석을 수행하였다.

블레이드 기어의 구조해석을 위해, 전처리 프로그램 MSC_PATRAN을 사용하여 블레이드 기어의 유

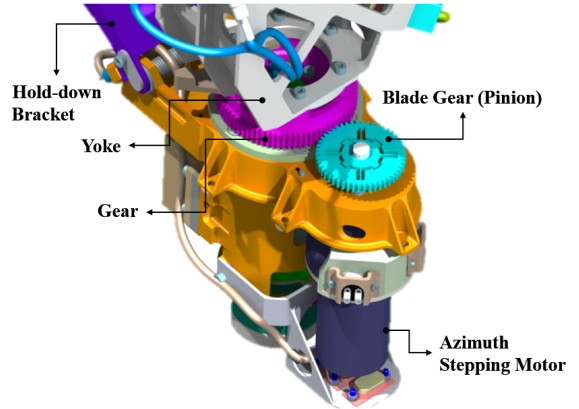


Figure 2 Configuration of a X-band antenna combined with a blade gear

한요소 모델링을 수행하였으며, Fig. 3에 나타내었다. 블레이드 기어는 CTETRA를 이용하여 모델링 되었으며, 기어의 회전을 위해 구동 모터 출력 토크가 인가되는 부분은 RBE3 요소로 모델링 되었다. 유한요소 모델에 사용된 총 요소 수 및 절점 수는 각각 69341개, 107445개이며, 기어에 적용된 재료는 티타늄으로 Table 2에 재료의 물성치를 나타내었다. 또한, 경계조건의 부여는 기어 간의 맞물림을 고려하여 블레이드 기어 치에 3자유도에 대한 변위 구속조건을 부여하였으며, 하중의 경우 RBE3 요소의 절점 중심에 상기 토크 버짓으로부터 산출된 출력 토크 1.57Nm를 부여하였다.

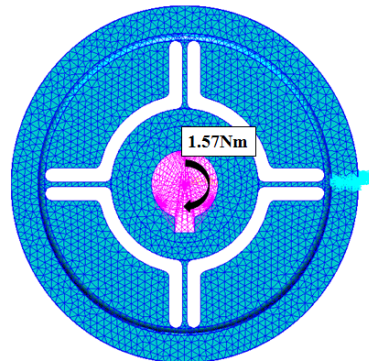


Figure 3 Finite element model of a blade gear

Table 2 Material property of titanium

	Young's Modulus [Gpa]	Poisson's Ratio	Density [kg/m ³]	Yie. Stress [Mpa]	Ult. Stress [Mpa]
Titanium	105	0.3	4500	1000	1070

블레이드 기어의 유한요소모델을 구성 한 후, 후처리 프로그램인 MSC_NASTRAN을 통해 정적 해석을 수행하였으며, 이에 대한 응력분포 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

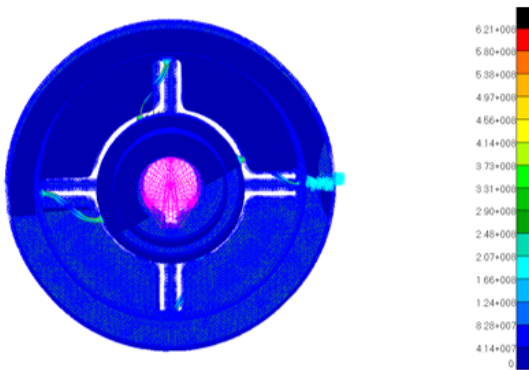


Figure 4 Stress contour map

해석 결과, 기어의 회전강성은 132.27Nm/rad이며, 블레이드의 끝단에 621Mpa의 최대응력이 가해지는 것을 확인하였다. 또한, 블레이드 기어의 구조건전성을 판단하기 위해 재료의 허용응력($\sigma_{allowable}$), 유한요소모델로부터 계산된 최대응력(σ_{max}) 그리고 안전계수(SF: Safety Factor)로부터 안전 여유(MoS: Margin of Safety)를 산출하였으며, 식은 다음과 같다.

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

여기서, 안전 계수는 항복응력(Yield Stress)일 때 1.25, 극한응력(Ultimate Stress)일 때 1.5가 적용되며, 이로부터 산출된 안전여유는 각각 0.29, 0.15로 블레이드 기어의 구조건전성이 확보됨을 입증하였다.

2.3 미소진동 절연 시험

회전강성이 상이한 기어적용에 따른 X-band 안테나의 미소진동측정을 위해 Fig. 5처럼 3축에 대한 구속 자유 조건에서의 미소진동측정이 가능한 미소진동 측정시스템을 구축하였다. 미소진동 측정시스템은 X-밴드 안테나가 장착된 지지판을 러버(Rubber)계열의 탄성와이어로 지지하고 있으며, 지지판에 부착된 가속도계를 통해 안테나의 미소진동을 측정한다.

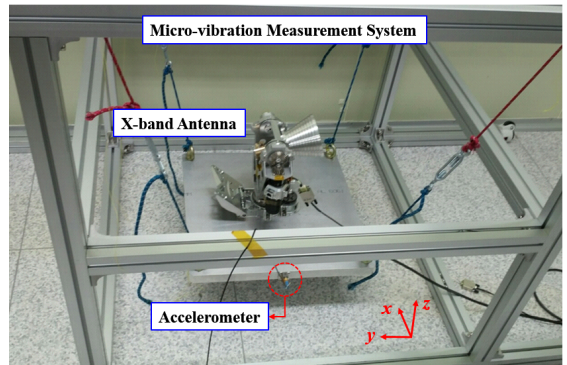


Figure 5 Test set-up for micro-vibration test of an X-band antenna

상기의 미소진동 측정시스템을 이용해 안테나의 미소진동 시험을 실시하였으며, 안테나의 방위각에 대해 5deg/sec의 구동속도로 2cycle 회전시켜 이로 부터 발생하는 미소진동을 측정하였다. Figure 6은 상기의 시험조건으로부터 회전강성이 상이한 일반 기어와 블레이드 기어적용에 따른 외란력의 시간 이력 비교 그래프를 나타내며, 처음 0~10sec 구간은 속도 0에서 5deg/sec까지 가속되는 영역이다. Figure 6으로부터 일반 기어가 적용된 X-밴드 안테나를 구동시킬 경우 처음 가속구간에서 최대 8N의 외란력이 발생되나 저 회전강성 블레이드 기어를 적용 시 6배 감소됨을 확인하였으며, 등속구간에서도 최대 4배 저감된 경향을 보아 안테나의 방위각 방향 구동에 대해서 저 회전강성 블레이드 기어의 미소진동 절연성능을 확인하였다.

Figure 7은 Fig. 6의 시간 이력에 대한 주파수 응답을 나타낸다. 이로부터 X-밴드 안테나의 미소진동 요구규격의 충족여부를 확인하였으며, X-밴드 안테나의 미소진동 요구규격은 0~150Hz 대역에서

0.05N 이하, 150~500Hz 대역에서 10N 이하이다. Figure 7에서 확인할 수 있듯이 회전강성이 상이한 두 기어 모두 X-밴드 안테나의 미소진동 요구규격을 충족하지만, 기존 기어를 적용했을 때 주로 구조물 공진모드가 발생하는 40~200Hz 대역에서의 주요 피크들이 블레이드 기어 적용 시 약 10배 감소됨을 확인하였다.

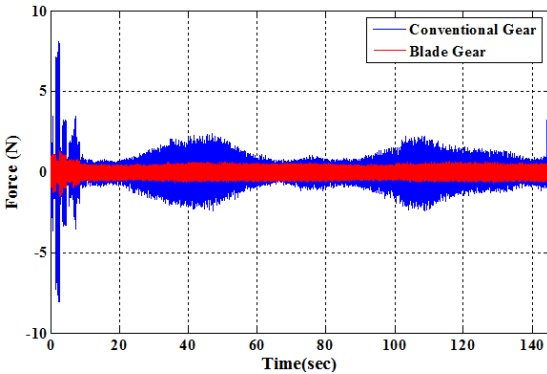


Figure 6 Comparison of force-time profile(Fy) for a conventional gear and a blade gear

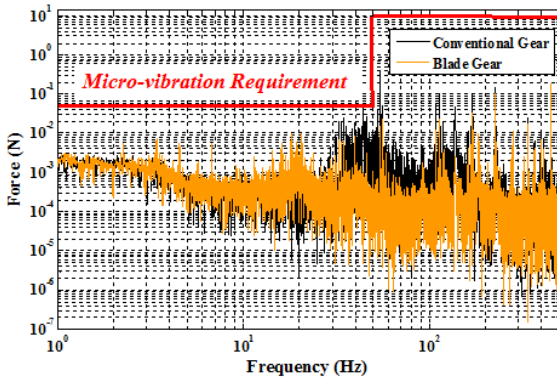


Figure 7 Comparison of force at frequency domain(Fy) for a conventional gear and a blade gear

상기의 등속도(5deg/sec) 구동조건에서의 블레이드 기어의 미소진동 절연 성능 및 요구조건 충족여부 확인 후, 안테나의 실제 궤도 운용을 모사한 TPF(Azimuth High) 구동 프로파일 적용을 통해 안테나의 방위각과 고각방향이 동시에 운용되며 안테나 구동속도가 가변되는 구동조건에서의 미소진동

시험을 수행하였다. TPF 구동프로파일을 Fig. 8에 나타내었으며, 이에 대해 측정된 각 축별 외란력은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 저 회전강성 블레이드 기어 적용 시 X-밴드 안테나의 외란력은 기존 기어를 적용할 때보다 전반적으로 저감되는 경향을 보이나, 190~225sec 및 280~465sec 영역에서는 방위각 회전구동이 이루어지지 않아 블레이드 기어의 성능이 나타나지 않은 것으로 보인다. 이는 블레이드 기어가 회전방향으로 강성이 비교적 약하게 설계되어 있어 안테나의 방위각 회전구동이 이루어지는 구간에 대해서만 미소진동 절연성능이 나타나는 것으로 판단된다. 아울러, 회전강성이 상이한 기어 적용에 따른 진동특성 분석을 위해 TPF 구동에 따른 외란력의 시간 이력으로부터 waterfall을 계산하였으며, Fig.10에 안테나 방위각 방향과 일치하는 y축에 대한 waterfall의 예를 나타내었다. Figure 10에서 확인할 수 있듯이 본 연구에서 제안한 저 회전강성 블레이드 기어를 적용할 경우, 주로 구조의 공진모드가 존재하는 저주파의 영역의 진동원이 크게 감소됨을 확인할 수 있었다.

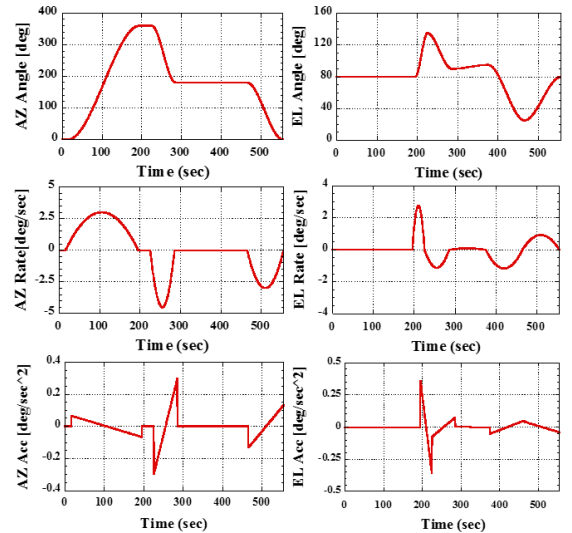


Figure 8 A X-band antenna driving profile in azimuth high (TPF)

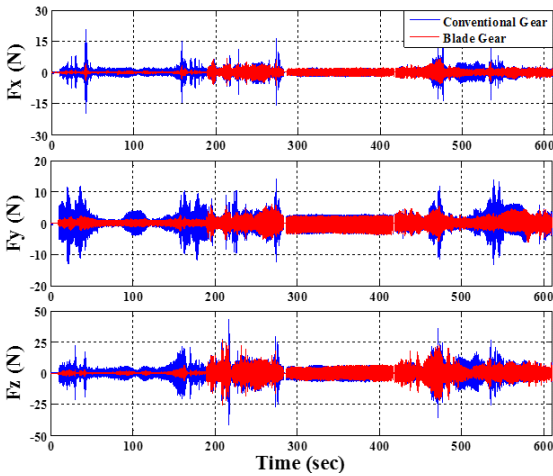


Figure 9 Comparison of force-time profile in azimuth high TPF activation for a conventional gear and a blade gear

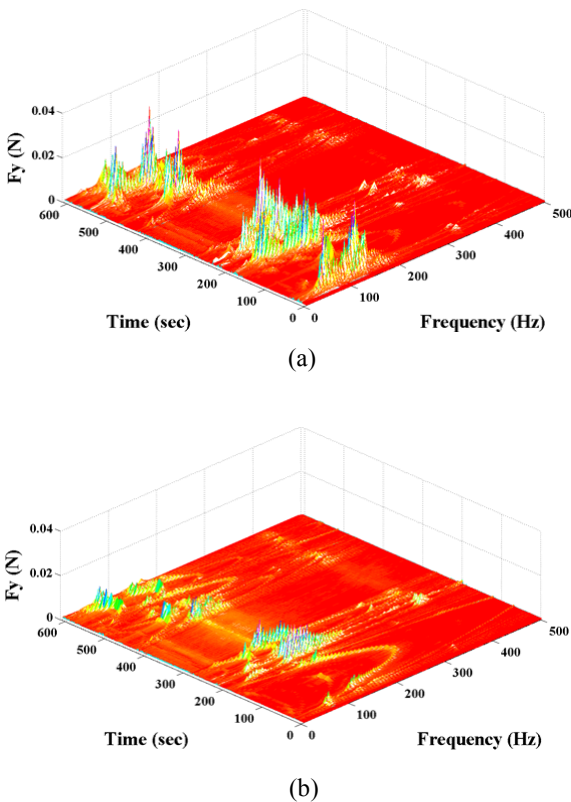


Figure 10 Waterfall plots of disturbance force(F_y) for azimuth high TPF activation [(a): conventional gear, (b): blade gear]

또한, 회전강성이 비교적 낮은 블레이드 기어의 절연 성능을 세부적으로 분석하기 위해 안테나의 방위각이 구동하는 구간을 0~190sec: 구간 I, 225~280sec: 구간 II, 465~555sec: 구간 III로 나누었으며, 각 구간에 대한 축별 피크 감소율(Peak Reduction) 및 표준편차 감소율(Standard Deviation Reduction)을 분석하여 Table 3에 정리하였다. 그 결과, 세 구간영역 모두 저 회전강성 블레이드 기어 적용 시 미소진동 외란력에 대해서 감소율을 보이지만, 구간 I은 구간 II와 III에 비해서 감소율이 뛰어난 경향을 보인다. 이러한 결과는 블레이드 기어가 방위각 축 회전구동 시 발생하는 미소진동 절연을 목적으로 설계되었기 때문에 방위각과 고각이 동시에 구동되는 구간 II, III에서는 블레이드 기어가 고각 방향 구동에서 발생하는 미소진동 절연에 효과가 없음을 확인하였다. 따라서, 안테나의 방위각 구동만 이루어지는 구간 I에서는 저 회전강성 블레이드 기어를 적용할 경우, x방향 외란력에 대해서 피크 감소율이 최대 80.30%, 평균 82.56%이며, 표준편차는 80.39%로 큰 감소율을 보이고 있으며, 이외의 다른 방향의 외란력도 유사한 감소율을 보인다. 이로부터 블레이드 기어는 안테나의 방위각 방향 회전구동에 대해서 미소진동 절연 성능이 뛰어남을 확인할 수 있다.

Table 3 Disturbance reduction ratio for a conventional gear and a blade gear

		Peak Reduction (%)		STD Deviation Reduction (%)
		Max	Mean	
Region I	Fx	80.30	82.56	80.39
	Fy	77.03	69.69	77.03
	Fz	72.75	80.13	78.73
Region II	Fx	63.63	19.75	29.33
	Fy	58.01	30.12	33.23
	Fz	26.30	10.14	11.40
Region III	Fx	53.12	53.05	48.45
	Fy	60.75	52.06	56.24
	Fz	38.46	39.48	29.34

따라서 본 연구에서 제안된 저 회전강성 블레이드 기어는 X-밴드 안테나 구동 시 발생하는 미소진동 절연을 위해 기 설계된 안테나의 구조 형상 및 인터페이스 변경 없이 기어자체에 저 회전 강성을 부여하였으며, 미소진동시험을 통해 안테나의 방위

각 축 구동에 대한 미소진동 절연성능을 보였다. 그러나 고각 축의 회전구동 영역에서는 블레이드 기어의 절연성능을 보이지 않았으며, 이는 고각 축 회전 변환을 위해 적용된 베벨 기어도 낮은 회전강성을 갖도록 설계변경이 필요함을 의미한다. 하지만 고각 단 베벨 기어의 경우 가용면적이 좁아 기어 자체에 블레이드를 적용함에 있어 어려움이 존재하며, 다른 방식의 저 회전강성을 갖는 설계가 요구된다. 따라서 상기의 어려움을 해결한다면 방위각과 고각의 동시 구동영역에서도 미소진동 수준을 효과적으로 저감할 수 있을 것이라 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 2축 X-밴드 안테나 구동 시 발생하는 미소진동절연을 목적으로 회전강성이 비교적 낮은 블레이드 기어를 제안하였으며, 설계된 블레이드 기어의 구조건전성 확인을 위해 안테나 구동에 요구되는 토크 버짓을 기반으로 구조해석을 수행하였다. 이를 기반으로 제작된 저 회전강성 블레이드 기어를 X-밴드 안테나에 적용하여 본 연구에서 제안한 미소진동 측정시스템을 통해 등속도(5deg/sec) 및 TPF 구동조건에서의 미소진동시험을 수행하였다. 또한, 상기로부터 얻어진 측정 데이터를 통해 안테나의 미소진동 수준을 분석하였으며, 저 회전강성 블레이드 기어를 적용할 경우 안테나의 외란력이 기존 기어에 비해 약 80% 저감됨을 입증하였다. 이로부터 기 설계된 안테나의 인터페이스 변경 없이 간단한 기어형상 변경으로 안테나 구동 시 발생하는 미소진동을 충분히 절연이 가능함을 확인하였다. 한편, 본 논문에서 제안한 저 회전강성 블레이드 기어는 안테나의 방위각 구동 외에 고각 구동에 대해서 미소진동 절연성능을 보이지 않았으며, 이를 극복하기 위해 고각 단에 적용된 베벨기어도 저 회전강성을 구현하도록 설계변경이 필요할 것으로 판단된다. 하지만 기 설계되어 있는 베벨 기어의 경우 가용면적이 좁아 본 연구에서 제안한 블레이드 기어의 형상을 모사하기에 제약이 따른다. 따라서, 향후 고각 축 회전구동 시 발생하는 미소진동 절연을 위해 새로운 형태의 블레이드를 설계할 것이며, 이로부터 미소진동시험을 통해 설계의 유효성을 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 2013년 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행했습니다.

(NRF-2012M1A3A3A03033597)

참 고 문 헌

- (1) Lim, J. H., Kim, K. W., Kim, S. W., Kim, J. H. and Hwang, D. S., 2010, Recent Trend of the Configuration Design of High Resolution Earth Observation Satellites, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 8, No. 1, pp. 45~54.
- (2) Lee, S. G., Lee, J. T., Kang, E. S. and Yong, S. S., 2013, Technical Trends of X-band Antenna for Space Program, Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 11, No. 2, pp. 81~89.
- (3) Kim, D. K., Oh, S. H., Kim, H. B., Lee, W. B. and Yong, K. R., 2010, Micro-vibration Test of X-band Antenna with Two-axis Gimbal System, Proceedings of the KSAS Annual Autumn Conference, Vol. 11, No. 2, pp. 927~930.
- (4) Kozile, H., Specht, B., Yong, S. S. and Lee, S. G., 2013, Micro Vibration Improvement of a Stepper Actuated Mechanism, 15th European Space Mechanism and Tribology Symposium.
- (5) Lee, J. H., Ahn, H. S., Wang, S. M. and Choi, S. J., 2011, A Study on Efficient TPF Approximation for Low-orbit Satellites, Proceedings of the KSAS Annual Spring Conference, pp. 1221~1224.
- (6) Choi, S. J., Jung, O. C., Kang, C. H., Kim, Y. W. and Jung, D. W., 2009, An Algorithm to Eliminate TPF Discontinuity for LEO Satellite, Proceedings of the KSAS Annual Spring Conference, pp. 904~907.
- (7) European Cooperation for Space Standardization (ECSS-E-ST-33-01C): Mechanism.