

인공위성 반작용휠의 미소진동 측정 및 분석

오시환*, 이승우**

Satellite Reaction Wheel Micro-Vibration Test and Analysis

Shi-Hwan Oh*, Seung-Wu Rhee**

Abstract

In this paper, we briefly introduce the micro-vibration test bench of KARI and the test and analysis method of RWA (Reaction Wheel Assembly) micro-vibration. The micro-vibration of RWA is measured on a KISTLER dynamic plate which can measure the time signal of 6 DOF simultaneously up to 400Hz. Measured data are extensively evaluated with respect to the wheel spin rate to identify the complicate wheel dynamic characteristics, and the static/dynamic unbalances are estimated from the extracted first harmonic component as a part of evaluation process. The estimated static and dynamic unbalances 0.79gcm and 17.4gcm² respectively. The structural resonance mode and two rocking modes observed as a results of its frequency analysis. Several higher order harmonic components observed, which come from its rotor shape as well as the wheel bearing characteristics.

초 록

본 논문에서는 인공위성 반작용휠의 미소진동 측정을 위한 테스트 장비와 이를 이용하여 실측한 반작용휠의 미소진동을 측정 및 분석 결과를 소개한다. 위성의 미소진동은 KISTLER dynamic platform 이라는 400Hz 이내의 3축의 힘과 3축의 토크를 동시에 측정 할 수 있는 장비에 의해 측정되며 측정된 데이터는 회전 속도에 따라 3차원 주파수 분석, order tracking 등의 방법을 이용하여 분석된다. 반작용휠의 미소진동 분석 결과, 회전 속도와 비례하는 일차 성분 외에 고차 조화 성분, 구조 진동 성분, 회전 속도에 따라 고유 진동수가 변하는 rocking 모드 성분 등을 관찰할 수 있었으며, 휠의 정적 및 동적 불균형은 각각 0.79gcm 과 17.4gcm² 으로 나타났다. 이러한 다양한 진동 성분들은 회전체의 특성, 구조물의 특성 및 베어링의 영향으로 기인한다.

키워드 : 반작용휠(reaction wheel), 미소진동(micro-vibration), 정적 불균형(static unbalance), 동적 불균형(dynamic unbalance), 조화성분검출(order tracking)

* 위성제어그룹/oshys@kari.re.kr

** 위성제어그룹/srhee@kari.re.kr

1. 서 론

고 정밀의 광학장비를 탑재하고 있는 위성은 광학장비의 시선각 (LOS; Line-Of-Sight) 지터에 대한 해석 및 요구조건 설정 등이 매우 중요하다. 위성에 있어서 광학장비는 내부 교란이 존재해도 회전 방향에 대한 LOS 지터 요구조건을 만족시켜야 하며 안정성도 유지해야 한다.

최근 자세제어 장치 각 구성품들의 기능은 점점 더 정밀해져 가며, 복잡하고 다양한 임무의 수행을 위해 고도의 지구지향 정밀도를 갖는 것이 첨단 위성체의 세계적인 추세이며, 고정밀의 광학 탑재체를 사용하여 정밀도 높은 영상을 제공 할 수 있게 한다. 그러나 위성체에서 발생할 수 있는 미소진동의 영향으로 고정밀 광학 탑재체의 영상품질을 저하시킬 수 있으며, 이러한 미소진동을 제거 혹은 회피하기 위해 미소진동의 원인과 그 특성에 대한 세심한 분석이 요구된다.

반작용휠은 인공위성에 사용되는 대표적인 구동기 중의 하나로서 작용-반작용 법칙을 이용하여 회전체의 각운동량 변화를 이용하여 위성의 자세를 변화시킨다. 이러한 반작용휠은 위성의 임무 수행 시 일정 속도로 회전하고 있다가 자세제어 로직에 의하여 자세를 변화시키기 위해 그 속도가 변화된다. 그러므로 반작용휠을 사용하는 위성은 내부 회전체에 의한 진동이 항상 존재하게 된다. 과거에는 이러한 진동은 그 크기가 작아 위성의 임무 수행에 별로 영향을 주지 못했으나 최근에 들어와 고정밀 지향 위성이 개발되면서 상대적으로 반작용휠에서 발생하는 진동에 의한 영향이 위성의 임무 수행 능력을 저하시키는 하나의 중요한 요인으로 대두되기 시작하였다.

여러 문헌^{1,2}에 의하면 위성 본체의 시뮬레이션 및 전달함수 측정으로부터 광학장비에 영향을 미치는 구조 진동의 가장 큰 요인 중의 하나가 반작용휠에 의한 미소진동으로 밝혀져 있다.

반작용휠의 주요 진동 원인은 휠의 회전으로 발생하는 정적 불균형, 동적 불균형, 반경방향 및 축방향 운동이다. 반작용휠의 정적 불균형은 휠 회전축과 휠 무게중심의 불일치로부터 발생하며,

이는 휠 회전축 직각 방향으로 휠 회전 주파수 배수성분의 강제 조화진동을 유발한다. 또한 동적 불균형은 휠 회전축과 휠의 주관성축의 불일치로부터 발생하며, 이는 휠 회전축 직각방향으로 휠 회전 주파수 배수성분의 조화 토크를 발생시킨다. 그리고 휠의 축방향 운동은 회전축과 베어링 레이스의 불일치로부터 발생하며, 이는 휠 회전축 방향으로 휠 회전 주파수 배수성분의 강제 조화진동을 발생시킨다. 그러므로 본 연구에서는 실제 인공위성 반작용휠의 미소진동을 측정하고 분석하여 그 특성을 살펴본다.

2. 시험장비

2.1 방진 시스템

반작용휠의 시험 장비는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 3축 힘과 토크를 동시에 측정할 수 있는 KISTLER 센서와 방진 시스템 그리고 DSP 보드이다³. 이들에 대해 간단하게 설명한다.

먼저 바닥으로부터 들어오는 진동을 고립시키기 위하여 약 850kg의 질량을 가지는 화강암 정반 밑에 능동 air spring을 부착한 방진 시스템을 구축하였다. 이에 대한 사진은 그림 1과 같다.

방진 성능을 알아보기 위하여 air spring을 가동했을 때와 가동하지 않았을 때 충격 시험을 수



그림 1. 화강암 정반과 능동 air spring으로 이루어진 방진 시스템

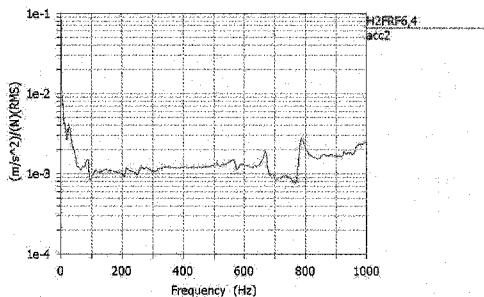


그림 2. air spring 가동 전의 방진 성능

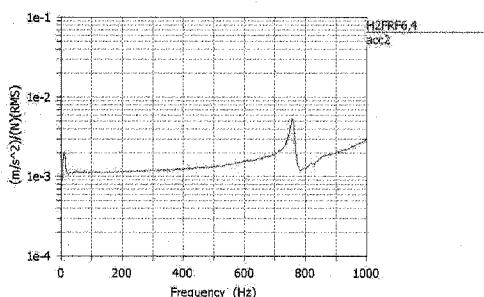


그림 3. air spring 가동 후의 방진 성능

행하였다. 화강암 정반 위에 연직 방향으로 가속도계를 부착하였고 정반 위를 충격 망치로 수직 가격하여 이너턴스(inertance)를 측정하였다. 측정 결과는 그림 2~3 이다.

air spring 가동 전은 예상대로 100Hz 미만의 저 주파 영역에서 방진 특성이 나쁘지만 가동 후 약 100~500Hz 미만의 영역과 유사한 특성을 가짐을 볼 수 있다. 10Hz 미만에 존재하는 작은 피크는 air spring의 공진 주파수이며 이 공진 주파수 이상의 영역에 대해서 효과적인 방진이 이루어진다. 측정된 200Hz 미만의 이너턴스는 약 1.111×10^{-3} ($\text{m/s}^2/\text{N}$) 정도로 900kg의 질량에 해당하며 이는 화강암 정반(850kg)과 KISTLER 센서(47kg)의 질량을 합친 값과 거의 동일하다.

2.2 KISTLER 센서 (dynamic force plate)

화강암 정반 위에 3축 힘과 3축 토크 동시 측정이 가능한 KISTLER multi-component force plate를 단단히 고정시켰으며 방진시스템을 포함한 미소진동 측정 시스템의 각 축 주파수 응답은 그림5~10과 같다.

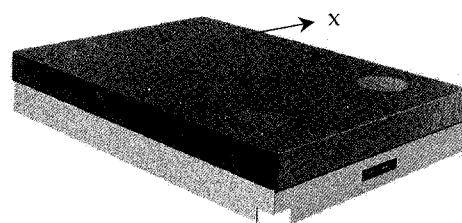


그림 4. KISTLER multi-component force plate

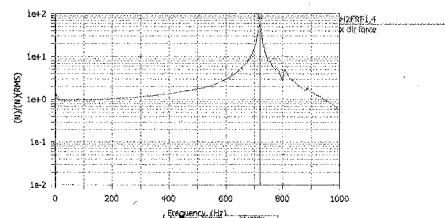


그림 5. x 방향 힘의 주파수 응답 특성

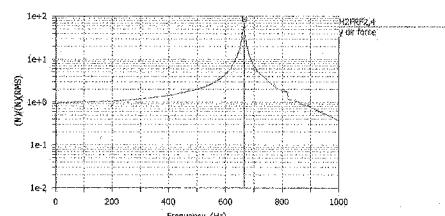


그림 6. y 방향 힘의 주파수 응답 특성

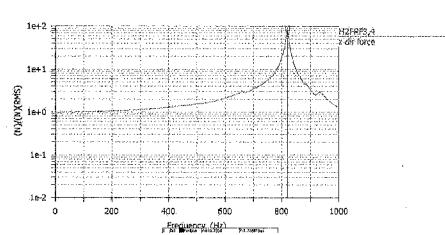


그림 7. z 방향 힘의 주파수 응답 특성

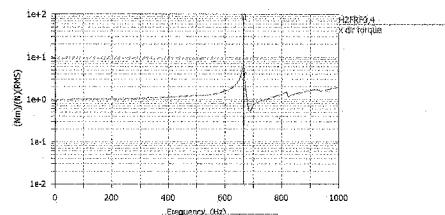


그림 8. x 방향 토크의 주파수 응답 특성

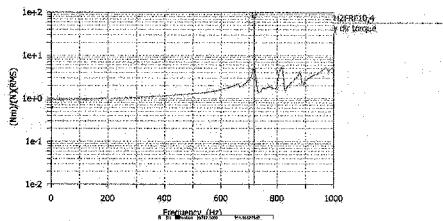


그림 9. y 방향 토크의 주파수 응답 특성

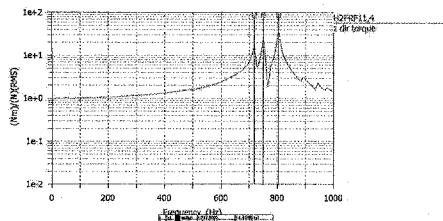


그림 10. z 방향 토크의 주파수 응답 특성

3축 힘, 3축 토크 모두 300Hz 이하의 영역에서는 약 10% 미만의 측정 오차를 가지고 있으며 400Hz에서는 y 방향 힘의 측정 이득이 약 1.4 배로 가장 크다. 이 센서의 측정 분해능은 0.0001N이며 특히 시정수를 10,000 초까지 늘릴 수 있어 미세한 정적 힘 및 토크도 측정이 가능하다.

2.3 DSP 보드

이는 반작용휠의 속도를 제어하고 센서로부터 출력되는 불균형 힘 및 토크를 획득, 저장하는 장비이다. 본 실험에서는 dSPACE사의 DS1103 보드를 사용하여 휠의 속도를 제어하였고 회전 속도 및 6축 불균형 신호를 획득하였다. 이 보드는 AD 20채널과 DA 8채널을 지원하며 16bit 해상도를 가지고 있고 최고 1MHz의 샘플링이 가능하다. 또한 MATLAB Simulink와 호환되어 쉽게 보드 제어가 가능하다. ControlDesk라는 GUI를 사용하면 실시간으로 데이터의 관찰, 저장 및 변수 변경 등이 가능해진다. 그림 11은 이 보드가 PC에 장착된 사진이고 그림 12는 Simulink를 이용한 반작용휠의 속도 및 입력 신호 제어, 그림 13은 ControlDesk를 이용한 데이터의 관찰 및 저장을 각각 보여준다.

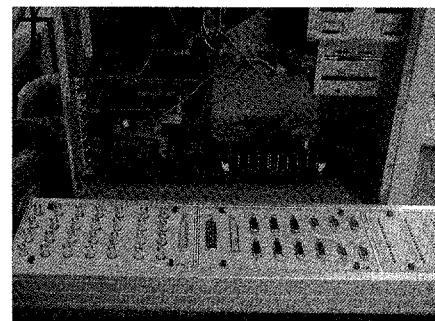


그림 11. PC에 장착된 DS1103 보드 및 front-end

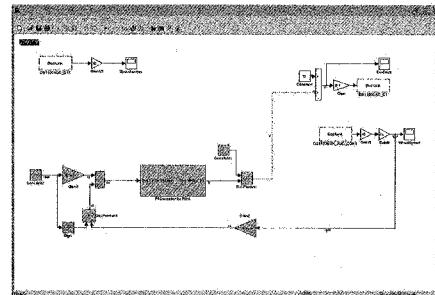


그림 12. MATLAB Simulink를 이용한 입출력 신호의 제어

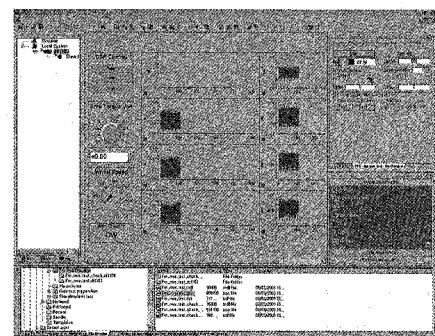


그림 13. ControlDesk를 이용한 데이터의 관찰 및 저장

3. 미소진동시험 결과 및 분석

3.1 전체 시험 구성

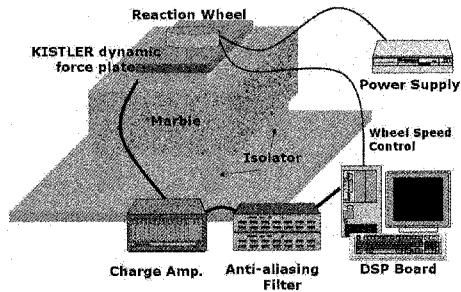


그림 14. 반작용휠 미소진동 측정 시험 구성도

인공위성 반작용휠 미소진동 시험의 전체적인 구성은 그림 14에 나타나 있다. KISTLER 센서에 의해 측정된 6개의 미소진동 신호는 앰프를 거쳐 증폭되고 저역 통과 필터에 의해 고주파 영역이 걸러진 후 DSP 보드에 의해 관찰, 저장된다. 이 때 반작용휠의 속도는 DSP 보드에 의해 원하는 대로 조절되며 측정 전에 최대 회전 속도로 끌어 올렸다가 자유 감속 시키면서 진동 데이터를 획득하게 된다.

3.2 시간영역 특성

3.2.1 자유회전 감속 특성

반작용휠의 회전 속도를 2500rpm까지 올린 후 자유 감속시키면서 시간에 따른 속도의 변화를 측정하였다. 그 결과는 그림 15에 나타나 있다.

위성용 반작용휠은 회전 마찰력이 매우 작아 2500rpm에서 자유감속을 시작하여 정지하기까지 약 1시간정도의 시간이 소요됨을 알 수 있다.

3.2.2 3축 불균형력 및 불균형 토크 선도

반작용휠이 자유 감속하면서 측정한 3축 불균형력과 토크의 시간 영역 선도는 그림 16~21에 나타나 있다. 이 때 x, y축은 반경 방향이고 z축은 회전축 방향이다.

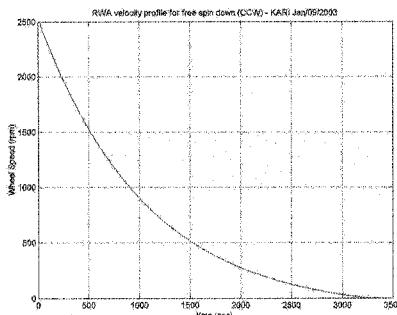


그림 15. 자유 감속하는 반작용휠의 회전속도

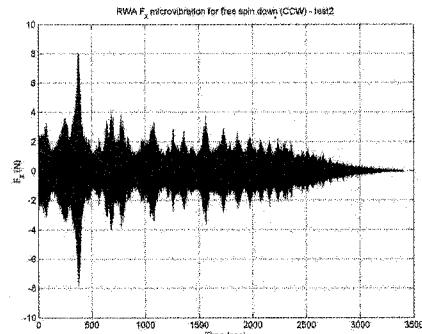


그림 16. 반경(x) 방향 불균형력의 시간 영역 선도

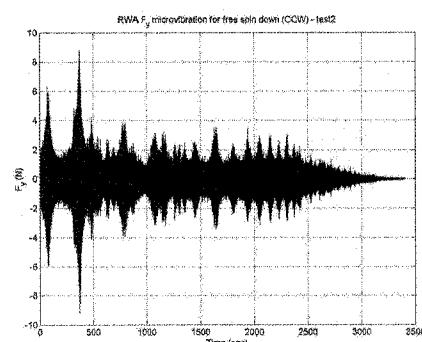


그림 17. 반경(y) 방향 불균형력의 시간 영역 선도

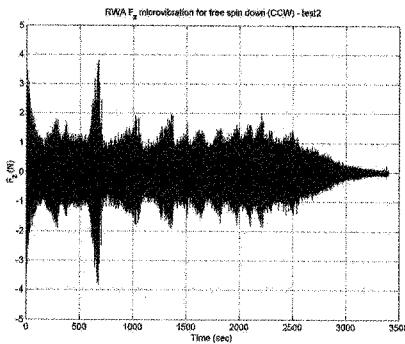


그림 18. 축(z) 방향 불균형력의 시간 영역 선도

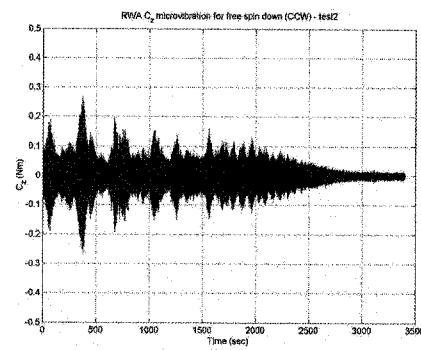


그림 21. 축(z) 방향 불균형 토크의 시간 영역 선도

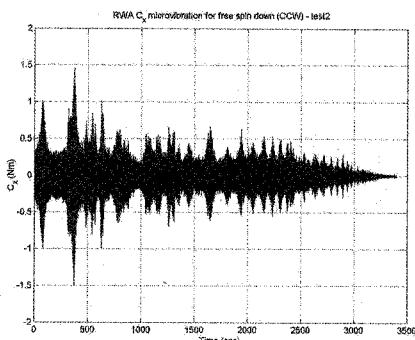


그림 19. 반경(x) 방향 불균형 토크의 시간 영역 선도

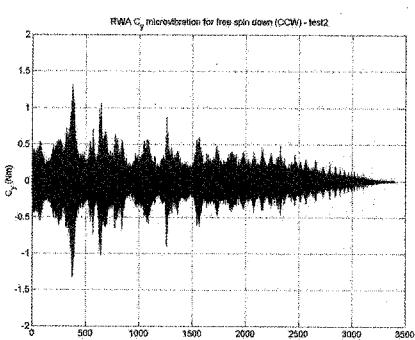


그림 20. 반경(y) 방향 불균형 토크의 시간 영역 선도

반경방향의 불균형력과 토크는 약 1700 rpm 부근에서 각각 최대 9N, 1.5Nm 정도 발생하며 이후 속도가 감소하면서 불균형력은 4N 이하로, 불균형 토크는 1Nm 이하로 점차적으로 감소한다. 반면, 축방향 불균형력은 약 1300rpm 부근에서 최대 4N이 발생하며 이후 속도가 감소하면서 2N 미만으로 줄어든다. 축방향의 불균형 토크는 반경방향에 비해 크기가 상대적으로 작으며 그 이유는 회전 마찰 토크만이 주로 작용하기 때문이다. 반작용휠의 속도가 감소하면서 가진되는 진동 크기도 함께 감소하게 되는데 이들이 공진 모드를 만나면 불균형신호의 크기가 일시적으로 커짐을 관찰할 수 있다

3.3 일차 조화성분 추출 및 분석

3.3.1 일차 조화성분 추출

시간 영역 신호로부터 회전속도와 같은 일차 조화 성분의 크기를 추출하였다. 그 결과는 그림 22~25와 같다. 실선은 실제 측정된 데이터로부터 추출해낸 성분이고 점선은 일차 조화 성분을 속도에 대한 이차 함수로 가정하여 curve fitting을 수행 한 것이다. 이론상으로 일차 조화 성분의 크기는 회전 속도의 제곱에 비례하나 불균형 토크의 결과는 이에서 약간 차이가 남을 알 수 있다.

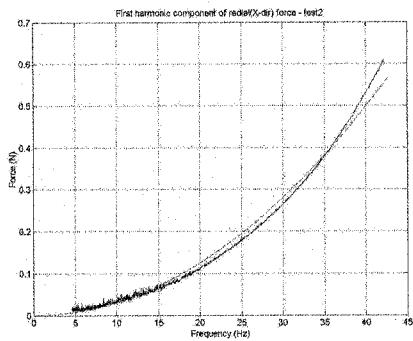


그림 22. 반경(x) 방향 불균형력의 일차
조화 성분 추출 결과

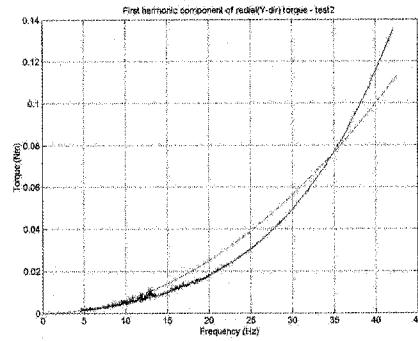


그림 25. 반경(y) 방향 불균형 토크의 일차
조화 성분 추출 결과

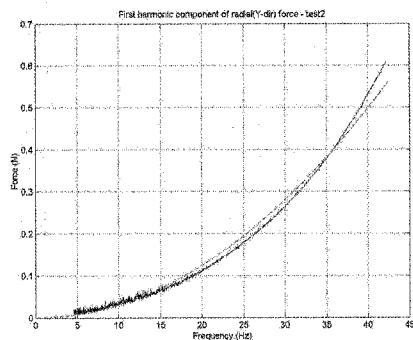


그림 23. 반경(y) 방향 불균형력의 일차
조화 성분 추출 결과

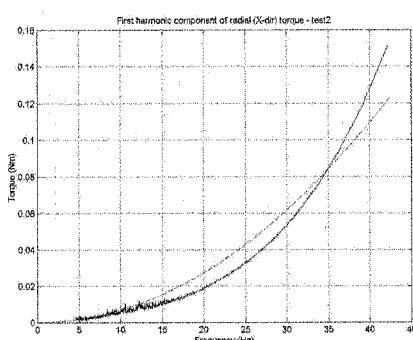


그림 24. 반경(x) 방향 불균형 토크의 일차
조화 성분 추출 결과

3.3.2 정적/동적 불균형의 계산

추출된 일차 조화 성분을 이용한 정적 및 동적 불균형 계산은 다음의 식 (1)로부터 얻어질 수 있다.⁴

$$U_s = \frac{\Sigma(F_\Omega \cdot \Omega^2)}{\Sigma\Omega^4}, U_d = \frac{\Sigma(C_\Omega \cdot \Omega^2)}{\Sigma\Omega^4} \quad (1)$$

여기서 F_Ω 는 회전주파수 Ω 에서의 일차 조화 불균형력의 크기이고 C_Ω 은 일차 조화 불균형 토크의 크기이다. 그림 22~25의 데이터와 식 (1)로부터 계산된 정적/동적 불균형의 값은 각각 $0.79\text{g}\cdot\text{cm}$ 과 $17.4\text{g}\cdot\text{cm}^2$ 로서 매우 작은 값에 속한다. 일반적으로 반작용휠은 회전 관성에 비해 상당히 작은 정적/동적 불균형을 가진다. 그림 22~25를 비교해 보면 정적 불균형에 대해서는 y 축 불균형력으로부터 계산 된 값이, 동적 불균형에 대해서는 x축 불균형 토크로부터 계산 된 값이 약간씩 더 큼을 알 수 있는데 이는 KISTLER 센서의 주파수 특성 때문에 발생한 오차이다. 이론적으로는 x축 데이터나 y축 데이터 모두 반경 방향의 진동이기 때문에 같이 나와야 한다.

3.4 주파수 영역 특성

그림 16~21의 데이터를 이용하여 회전속도 구

간 별로 FFT를 수행하였고 이를 waterfall spectrum으로 나타낸 선도가 그림 26~31이다.

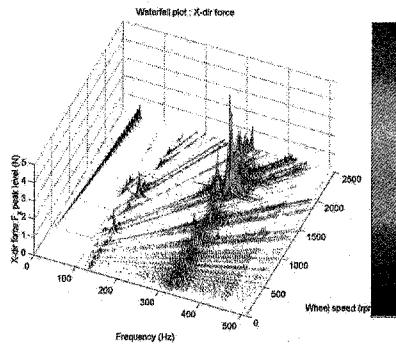


그림 26. 반경(x) 방향 불균형력의 주파수 영역 선도

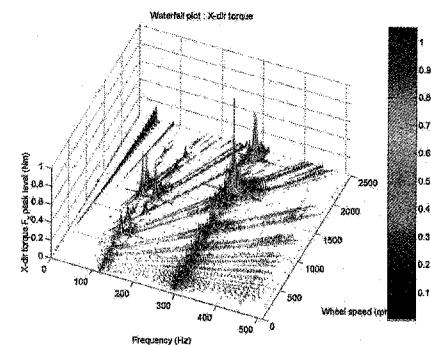


그림 29. 반경(x) 방향 불균형 토크의 주파수 영역 선도

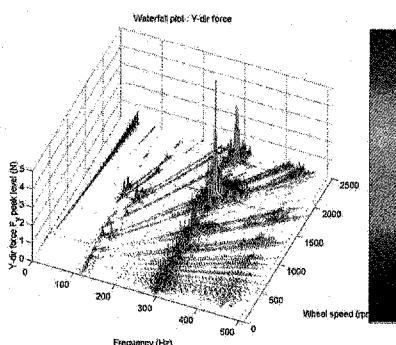


그림 27. 반경(y) 방향 불균형력의 주파수 영역 선도

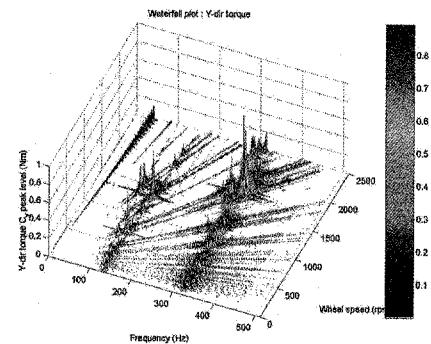


그림 30. 반경(y) 방향 불균형 토크의 주파수 영역 선도

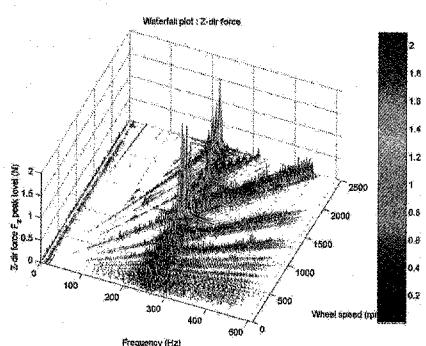


그림 28. 축(z) 방향 불균형력의 주파수 영역 선도

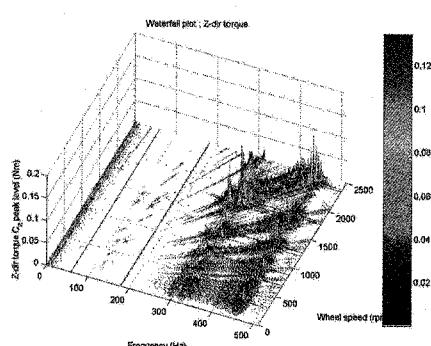


그림 31. 축(z) 방향 불균형 토크의 주파수 영역 선도

반경 방향 선도에 대해서는 50Hz미만에서 일

차 조화 성분을 볼 수 있고 회전 속도에 관계 없는 구조 공진이 약 300Hz 부근에서 발생함을 알 수 있다. 축방향 병진 운동의 구조 공진은 약 250Hz부근에 존재한다. 반경 방향 불균형토크 선도에서 회전 속도가 0Hz일때는 약 130Hz이나 속도가 점점 커지면서 하나는 150Hz 쪽으로, 또 다른 하나는 100Hz 쪽으로 갈라지는 rocking 모드가 존재함을 볼 수 있다. 이 모드는 자이로스코프 현상에 의해 발생하며 반경 방향 불균형력 선도에서는 나타나지 않는 것이 정상이나 본 반작용휠에서는 반경 방향 불균형력 선도에서도 나타남을 볼 수 있다. 이는 반작용휠의 비선형적 특성에서 기인한다.

일차 조화 성분 이외에 회전 속도의 2배, 3배, 8배, 11배 등의 주파수에서도 진동의 크기가 큼을 볼 수 있는데 이는 휠의 베어링에 의한 특성이며 또 반작용휠 내의 회전체 모양이 축대칭이 아님을 인하여 나타난다. 이러한 고차 조화 성분이 rocking 모드, 구조 공진 등의 모드와 만나면 매우 큰 진동이 발생함을 알 수 있다.

반작용휠에서 발생하는 진동 중 일차 조화 성분에 의한 영향은 상대적으로 매우 작으며 주로 구조 공진과 rocking모드에 의하여 발생한다.

이러한 진동은 위성의 구조체를 통해 각종 탑재체에 전파되며 탑재체의 성능을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이를 예측하기 위해서는 반작용휠의 미소진동 측정 결과와 위성 구조체를 이용한 지터 해석이 수행되어야 하며 필요할 경우 시험이 동반되어야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 인공위성 반작용휠의 회전 시 발생하는 미소진동을 측정하였고 이를 분석하였다. 휠을 최대 속도에서 감속시키면서 속도와 3축 불균형력과 3축 불균형 토크를 측정하였다. 이를 이용하여 회전속도와 일치하는 일차 조화 성분을 추출하였고 정적, 동적 불균형을 실험적으로 구해 보았으며 회전 속도에 따른 스펙트럼을 계산하여 3차원 주파수 분석을 수행하였다.

반작용휠에서 발생하는 진동은 회전 속도에 비례하는 조화 강제 진동, 구조 진동, rocking 모드에 의한 진동 등이 복합적으로 섞여 있음을 알 수 있었다. 분석 결과, 일차 조화 성분에 의한 영향은 상대적으로 매우 작으며 주로 구조 공진과 rocking모드가 고차 조화 성분과 만나는 교점에서 진동이 크게 발생함을 확인하였다. 이러한 진동은 회전 속도에 비해 상당히 작은 편이나 고정밀 인공위성의 광학 탑재체 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부, 산업자원부와 공공기술연구회의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. C. Hughes, "Stability of proportional-plus-derivative-plus-integral control of flexible spacecraft," J. of Guidance & Control, Vol. 2, No. 6, 1979, pp.499-503.
2. B. Wie and Q. Liu, "Classical and robust control redesign for the Hubble space telescope", J. of Guidance, Control & Dynamics, Vol 16, No 6, 1993, pp.1069 ~1076.
3. 오시환, 이승우, "인공위성 반작용휠의 미소진동 측정, 해석 및 저감 기술", 한국항공우주공학회, 제 30 권, 8 호, 2002, pp.126~132.
4. R. A. Masterson, D. W. Miller and R. L. Grogan, "Development of Empirical and Analytical Reaction Wheel Disturbance Models," AIAA-99-1204, 1999.