

# 과학기술위성 반작용휠의 미소진동 측정 및 분석

## STSAT RWA Micro-Vibration Test and Analysis

오시환\*·남명용\*\*·박연묵\*\*·임조령\*·金正훈\*·이승우\*

Shi-Hwan Oh\*, Myeong-Ryong Nam, Yon-Mook Park, Jo-Ryeong Yim\*,  
Jung-Hoon Keum\* and Seung-Wu Rhee\*

**Key Words** : RWA(반작용휠), Micro-Vibration(미소진동), Static Unbalance(정적불균형), Dynamic Unbalance (동적 불균형), Jitter (지터).

### ABSTRACT

STSAT RWA (Reaction Wheel Assembly) micro-vibration is measured using KISTLER dynamic plate that can provide the time signals of three orthogonal forces and torques simultaneously up to 400Hz. In the post-processing, measured data are evaluated with respect to the wheel spin rate in both time and frequency domains, and the static/dynamic unbalances are evaluated from the extracted first harmonic component. Also the friction torque profile at each wheel speed is estimated from the measured data. Several higher order harmonic components are observed, that comes from its rotor shape as well as the wheel bearing characteristics. One of the most peculiar characteristics of this wheel is that the dynamic properties of two radial unbalance components are much different from each other as the RWA mounting configuration on a spacecraft is different from conventional RWA mounting configuration. Rocking mode is not appeared below 400Hz for all operating speed because the wheel size is very small. The post-processed results will be used for jitter analysis of STSAT due to RWA micro-vibration.

### 기호설명

$F_x$ : x 방향 불균형력,  $F_y$ : y 방향 불균형력  
 $C_x$ : x 방향 불균형토크,  $C_y$ : y 방향 불균형토크

## 1. 서론

반작용휠은 인공위성에 사용되는 중요한 구동기 중의 하나로서 작용-반작용 법칙을 이용하여 위성의 자세를 변화시킨다. 이러한 반작용휠은 위성의 임무 수행 시 일정 속도로 회전하고 있다가 자세를 변화시켜야 하는 경우 자세제어 로직에 의하여 회전속도를 변화시키므로 반작용휠을 사용하는 위성은 내부에 회전체에 의한 진동이 항상 존재하게 된다. 이러한 진동은 위성의 탑재체에까지 전달되며 탑재체가 광학 장비인 경우 영상의 해상도를 저하시키는 중요 요인중의 하나로 작용한다. 그러므로 반작용휠의 미소진동 측정 및 해석 기법, 위성구조체 내부에서의 미소진동의 전달 및 전파 특성, 탑재체에 전달되는 미소진동의 특성 및 크기 예측은 이미 위성선진국에서 지속적으로 연구되어 온 분야이며 고해상도 관측 위성에는 항상 적용되어 온 기술이다.

국내에서도 다목적실용위성 1, 2 호, 과학기술위성 2 호 등 고정밀 관측을 필요로 하는 위성의 개발이 진행됨에 따라 이러한 미소진동 측정, 예측 기술 (jitter analysis)이 필요하게 되었다<sup>(1)</sup>. 실제로 다목적실용위성 2 호는 반작용휠의 미소진동이 탑재체 카메라에 미치는 영향과 그에 따른 해상도 저하를 예측하기 위한 지터 해석 및 시험이 수행되었으며 과학기술위성 2 호에도 수행될 예정에 있다. 본 논문은 과학기술위성 2 호의 지터 해석을 수행하기 위하여 과학 위성에 사용되는 반작용휠의 동특성을 측정하고 측정 데이터를 분석한 결과를 요약하여 정리한 것이다.

## 2. 시험 구성

### 2.1 시험 장비의 동특성

반작용휠의 시험 장비는 3 축 힘과 토크를 동시에 측정할 수 있는 KISTLER plate 와 방진 시스템 그리고 DSP 보드로 구성되어 있으며 전체 시스템의 주파수 응답 특성을 Fig. 1 에 나타내었다. 6 개의 FRF (Frequency Response Function) 중 가장 안 좋은 동특성을 가지고 있는 성분은 y 축 힘과 x 축 토크 성분이며 이 때의 고유진동수는 665 Hz 이다. 이는 KISTLER plate 의 마운팅 특성을 강화시켜서 지난해보다 약 100Hz 이상 고유진동수를 끌어 올린 결과이다<sup>(2)</sup>.

\* 한국항공우주연구원 위성제어그룹  
E-mail : oshysh@kari.re.kr  
Tel : (042) 860-2446, Fax : (42) 860-2603

\*\* 한국과학기술원 인공위성연구센터

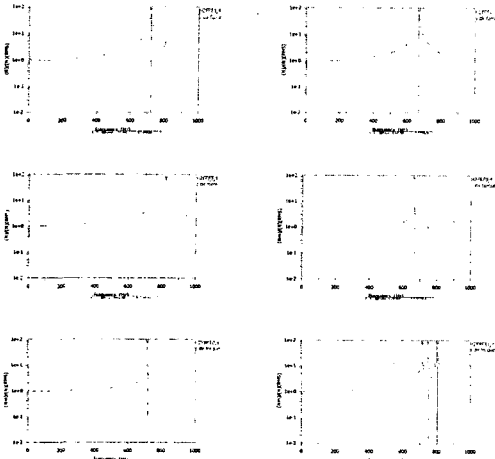


Fig. 1 시험장비의 6축 FRF

## 2.2 반작용휠의 장착

반작용휠이 시험 장비 위에 장착된 모습은 Fig 2 와 같다.

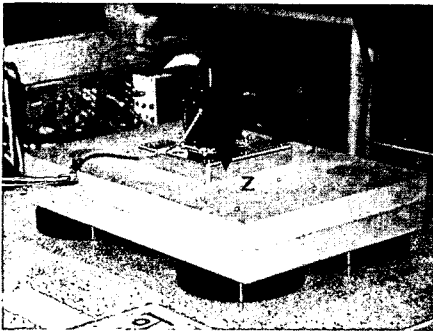


Fig. 2 자유 감속하는 반작용휠의 회전 속도

과학기술위성 반작용휠은 그 지지구조물의 특성 상 회전축이 연직방향이 아니라 수평 방향으로 놓이게 된다. 그러므로 시험장비에 측정되는 데이터는 x 축과 z 축 방향이 반경 방향이 되고 y 축 방향이 축방향이 된다. 이러한 형태의 지지는 반작용휠의 회전축이 연직 방향이 되어 고정 면에 납작한 형태로 붙게 되는 구조보다 진동 특성이 나빠진다. 이에 대해서는 측정된 데이터를 분석하면서 자세히 언급하도록 한다.

## 3. 시간영역 응답

### 3.1 반작용휠의 자유 회전 감속 특성

반작용휠의 회전 속도를 3000rpm 까지 올린 후 자유 감속시키면서 시간에 따른 속도의 변화를

측정하였다. 그 결과는 Fig 3 에 나타나 있다.

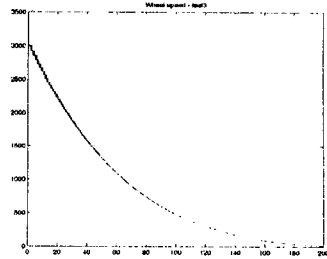


Fig. 3 자유 감속하는 반작용휠의 회전 속도

과학기술위성 반작용휠은 한바퀴를 회전하며 한 개의 펄스를 발생시키는 신호가 존재하는데 이를 이용하여 속도를 측정하였다. 그러므로 정확한 속도를 얻기 위해서는 가능한 빠른 clock 신호를 이용해야만 하나 본 시험에서는 진동 데이터를 측정하는데 사용된 2kHz 의 샘플링 주파수를 동일하게 사용하여 고속에서는 속도의 정밀도가 많이 떨어지는 것을 그래프를 통하여 알 수 있다.

### 3.2 3축 불균형력 및 불균형토크

반작용휠이 자유 감속하면서 측정된 3 축 불균형력과 토크의 시간 영역 선도는 Fig. 4~5 에 나타나 있다. 이 때 x, z 축은 반경 방향이고 y 축은 회전축 방향이다.

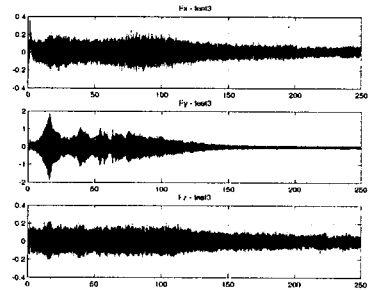


Fig. 4 측정된 3축 힘의 시간 영역 선도

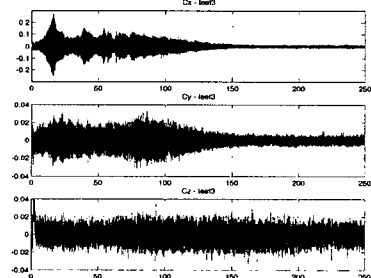


Fig. 5 측정된 3축 토크의 시간 영역 선도

측정된 3축 힘 신호를 보면 x, z 축의 두 반경 방향의 신호가 유사한 모습을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 y 축의 축방향 불균형력은 반경 방향보다 5 배 이상 크게 측정되었다. 일반적으로 축방향의 불균형력은 반경방향보다 작은 것이 정상이다. 그 이유는 휠 내부에 존재하는 회전체(rotor)의 무게 중심이 정확히 회전축의 중심에 존재하지 못함으로 인해 발생하는 정적 불균형(static unbalance)에 의하여 반경방향의 불균형력이 발생하나 축방향의 불균형력은 이러한 정적 불균형이 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고 본 시험에서 축방향의 진동이 크게 발생한 것은 반작용휠의 마운팅 특성 때문이다. 즉, 반작용휠의 지지구조물이 회전 평면 방향으로 휠을 안정하게 지지해 주지 못하고 회전 반경의 모서리 일부만만 지지해 주는 형태가 되므로 (Fig. 2) 반작용휠은 y 축 방향으로 진동이 발생하게 된다. 이 진동이 축방향 진동에 함께 측정된 것이다. y 축 방향으로의 구조 진동이 발생하면서 자연스럽게 x 축 방향의 토크도 함께 커진 것을 Fig. 5 를 통해 알 수 있다.

#### 4. 주파수영역 응답

Fig. 4~5 의 데이터를 이용하여 회전속도 구간별로 FFT 를 수행하였고 이를 waterfall spectrum 으로 나타낸 그림이 Fig. 6 이다.

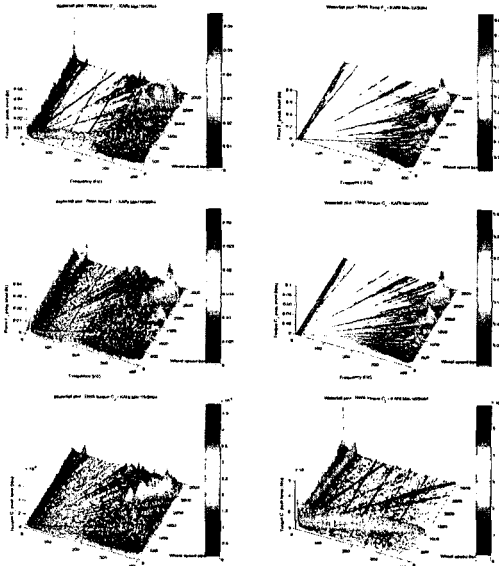


Fig. 6 z 축 waterfall spectrum

시간영역 응답에서와 같이 주파수영역 응답에서도 y 방향의 힘과 x 방향의 토크가 다른 방향보다 5 배 이상 크게 측정되었고 일차 및 고차 조화 성분이 나타남을 알 수 있다. 지지구조물의 특성 상 x 축 보다 z 축이 더 단단히 고정되므로 구조 진동이 x 축에 약간 섞였을 것으로 추측된다. 정적 불균형에 의한 순수한 회전 진동은 x 축과 z 축이 거의 유사할 것으로 예측되지만 x 축 힘이 구조진동의 영향을 받아 순수한 회전 진동을 왜곡시켰다. 이것은 일차 조화 성분을 추출한 결과에서도 나타난다.

미소진동 측정 장비 위에 붙어 있는 반작용휠은 센서 자체의 높이와 휠의 반경 때문에 그 무게 중심이 -z 축으로 약간 이동하게 된다. 그러므로 x 축 방향의 힘은 y 축 방향의 토크를, y 축 방향의 힘은 x 축 방향의 토크를 유발시킨다. 그러므로 x 축 방향의 토크는 순수한 회전 진동에 의한 성분 외에 y 축 힘에 의한 성분이 섞여 있다. 실제로 위성체에 반작용휠이 장착되면 측정된 진동 신호 그대로가 위성체 내부로 전달되지만 반작용휠의 고유진동 특성을 분석해 보기 위해 회전 진동에 의한 순수한 토크 성분을 회복시켜 보았다.

rotor 의 회전으로 순수하게 발생한 토크를  $C_{original}$ , 측정된 토크를  $C_{measured}$  라 하면

$$C_{x,original} = C_{x,measured} - r \cdot F_{y,measured}$$

$$C_{y,original} = C_{y,measured} + r \cdot F_{x,measured}$$

로 표현된다. 회복시킨 토크들의 waterfall spectrum 을 그려본 결과는 Fig. 7 과 같다.

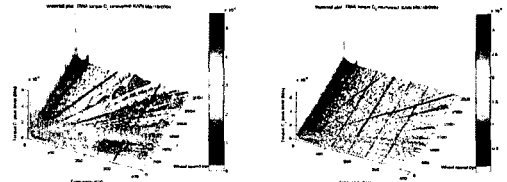


Fig. 7 회복시킨 x, y 축 토크의 waterfall spectrum

그 결과, x 축 방향의 토크는 같은 반경 방향인 z 축 방향의 토크와 유사하게 나왔으며 순수한 회전에 의해 발생하는 축방향 토크는 측정된 y 축 토크보다 상당히 작음을 알 수 있다.

#### 5. 일차조화성분 및 마찰력 계산

##### 5.1 불균형력/토크의 일차 조화 성분 추출

반경 방향의 시간영역 신호로부터 일차 조화 성분의 크기를 추출하였다. 그 결과는 Fig. 8 이다

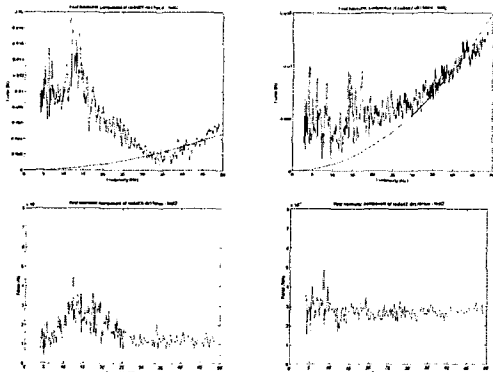


Fig. 8 불균형력의 일차 조화 성분

x 방향 힘 신호는 회전 진동에 의한 성분 외에 구조 진동에 의한 성분이 포함되어 있으므로 z 방향 힘 신호와 그 모양이 다르며 z 방향 힘 신호에서 추출해낸 일차 조화 성분은 회전 속도의 제곱에 비례하여 커짐을 알 수 있다. 반경 방향 토크 신호에서 추출해낸 조화 성분 역시 x 방향과 z 방향이 다르나 구조 진동이 아닌 회전 진동에 의한 토크 성분에서 일차 조화 성분을 추출해 보면 Fig. 9 와 같이 두 반경방향에서의 일차 조화 성분이 비슷한 레벨을 가짐을 알 수 있다.

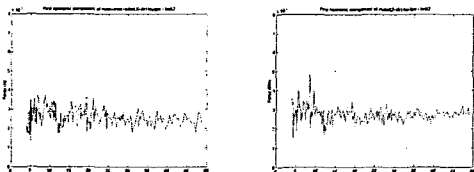


Fig. 9 회복시킨 토크의 일차 조화 성분

## 5.2 회전속도에 따른 마찰력의 변화

마지막으로 측정 데이터를 이용하여 과학기술 위성 반작용휠의 회전속도에 따른 마찰 토크를 계산하여 보았다. 그 결과는 Fig. 10 이다.

반작용휠에 작용하는 마찰토크는 크게 3 가지로 분류될 수 있는데 하나는 회전 속도에 비례하여 커지는 점성 (Viscous) 마찰토크이고 다른 하나는 고착 (Sticking) 마찰토크를 포함한 쿨롱 마찰 토크이며 마지막 하나는 내부 공기 저항에 의한 마찰토크이다. 이러한 영향이 Fig. 10 에 모두 나타나 있다. 고착마찰토크는 대략 0.0001Nm 정도이며 공기 저항에 의한 마찰토크는 점성 마찰토크에 비해 매우 작은 값을 가진다. 공기 저항에 의한 마찰토크는 회전 속도의 제곱에 비례하는데 이러한 성분이 약하게 존재함을 볼 수 있다.

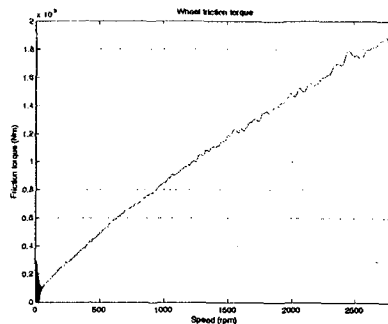


Fig. 10 회전속도에 따른 마찰토크의 변화

## 6. 결론

본 논문에서는 과학기술위성 반작용휠의 회전 시 발생하는 미소진동을 측정하였고 측정 데이터를 이용하여 반작용휠 회전 시의 진동 특성을 규명하였다. 과학기술위성 반작용휠에서 발생하는 진동은 회전수의 일차 및 고차 조화 성분과 지지 구조물에 의한 회전속도와 상관없는 진동 성분이 존재한다. 회전체의 특성에 의하여 회전체에서만 발생하는 forward/backward whirling (또는 Rocking 모드)는 400Hz 미만에서는 존재하지 않았으나 지지 구조물에 의한 진동이 상당히 크게 발생하는 것이 과학기술위성 반작용휠의 가장 큰 특징이라 할 수 있다. 이 영향으로 인하여 두 반경 방향 (x, z 방향)의 특성이 일치하지 않으나 회전에 의한 진동 성분만을 추출한 신호에서는 두 반경 방향의 특성이 유사하게 나왔다. 지지구조물의 형태를 바꾸어 반작용휠의 회전축이 휠이 고정 될 면과 수직이 되도록 장착한다면 반작용휠에서 위성구조체까지의 전달 진동을 줄일 수 있다. 본 시험에서 얻어진 결과는 과학기술위성 2 호의 지터 해석에 사용될 예정이다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부, 산업자원부와 공공기술연구회의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 오시환, 이승우, 2002, "인공위성 반작용휠의 미소진동 측정, 해석 및 저감 기술", 한국항공우주공학회, Vol. 30, No. 8, pp. 126~132.
- (2) 오시환 외, 2003, "TAMAM 반작용휠의 미소진동 측정 및 분석", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동 공학회, pp. 836~839