

주파수 보정법에 의한 구동기 외란 파라미터 정밀 결정

이현호[†], 전동익, 오화석
한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

PRECISION IDENTIFICATION OF ACTUATOR DISTURBANCE PARAMETER BY FREQUENCY COMPENSATION

Hyunho Lee[†], Dong-Ik Cheon, and Hwa-Suk Oh
School of Aerospace and Mechanical Engineering, Hankuk Aviation University, Goyang 412-791, Korea
E-mail: hosat@hau.ac.kr

(Received March 31, 2005; Accepted April 18, 2005)

요 약

위성자세제어용 구동기인 반작용 휠은 축 방향 토크뿐만 아니라 횡축 방향 외란 토크와 힘을 발생시켜 위성의 정밀 지향 안정성에 영향을 미치게 된다. 이를 위해서는 반작용 휠 구동시의 발생 외란을 정밀하게 측정할 필요가 있다. 그러나 반작용 휠의 구동은 측정테이블의 진동을 야기시키고 테이블의 공진 주파수 영역에서 큰 측정 오차를 유발한다. 본 논문은 이러한 진동오차를 줄이기 위하여 주파수 보정법에 의한 사후처리 과정을 제시하고, 이 보정법으로 얻어진 데이터들로부터 외란 파라미터를 결정함으로써 구동기 외란의 보다 정밀한 측정을 가능케 하기 위함이다. 이 보정법을 적용함으로써 구동기 외란 측정 주파수범위를 넓힐 수 있다.

ABSTRACT

A reaction wheel, an actuator for satellite attitude control, produces disturbance torque and force as well as its axial control torque. The disturbances have an influence on the pointing stability of high precision satellites. The measurement of disturbances for such a satellite, therefore, is necessary. The wheel's rotation, however, causes the vibration of the table and its vibration induces measurement errors, especially large near the resonance frequency of the Measurement table. For the purpose of overcoming these defects, a calibration method using frequency compensation is suggested in this paper. Disturbance parameters are identified from data examined by frequency compensation. Measurement frequency range can be expanded far higher than the resonance frequency, since the degradation of data accuracy caused by its vibration is well alleviated even in the resonance area.

Keywords: reaction wheel, torque disturbance, measurement table, frequency compensation disturbance parameter

[†]corresponding author

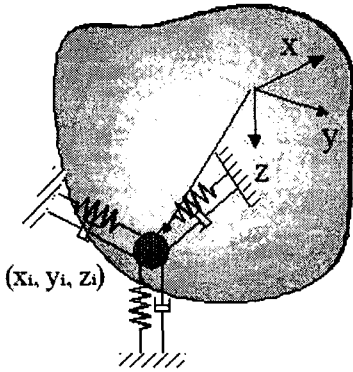


그림 1. 외란측정 테이블의 동역학 모델.

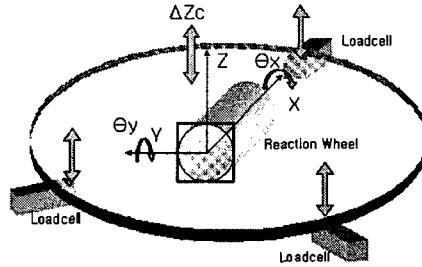


그림 2. HAU 외란측정테이블 개념도.

1. 서 론

위성의 자세제어 구동기로 사용되는 반작용 휠은 실제 구동 시에는 힘 및 토크 외란이 생겨서 위성 자세 제어에 영향을 주게 되므로, 휠을 위성에 장착하기 전에 토크 및 힘 외란에 대한 위성 자세 안정성 검증을 위한 외란 모델링이 필요하다. 외란을 측정함에 있어 가장 널리 사용되는 로드셀을 장착한 측정 테이블로 실험을 수행하였다(Bosgra & Prins 1982, De Weck 1998, Masterson et al. 1999, 오화석 외 2001). 측정 테이블에 반작용 휠을 올려놓고 구동시켰을 때, 로드셀의 탄성에 의하여 3차원 병진운동과 회전운동에 의한 진동을 유발시키고, 저울의 고유진동 주파수 부근의 공진현상으로 실제보다 큰 외란이 측정되어 데이터의 신뢰도를 떨어뜨린다. 본 연구에서는 측정저울의 진동현상을 주파수 분석에 의해 공진현상을 보정함으로써 반작용 휠의 순수 토크 및 힘 외란을 측정하는 방법을 제시코자 한다(서윤경 2002, 오화석 외 2004). 이를 통해 휠의 외란을 모델링하고 외란 모델 파라미터를 결정함으로써 차후 위성 자세 안정화 검증에 활용가능 하도록 하였다. 측정과 보정 방법은 과학위성 1호용으로 개발된 HAU 반작용 휠 3호기의 실험을 통해 검증되었고 본 연구 방법은 한국항공대학교 위성제어실험실에서 자체 개발한 HAU 외란 측정테이블에서 신뢰할만한 결과를 보여주었다(오화석 2003).

2. 반작용 휠의 외란 모델링

반작용 휠 발생 힘/토크 외란은 휠의 회전수에 비례하는 성분과 회전수에 상관없이 주파수별 일정한 성분으로 구별할 수 있으며, 비례하는 성분의 경우 각 축별로 다음과 같이 모델링이 가능하다(Bosgra & Prins 1982, Masterson et al. 1999).

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \Omega^2 \sin(2\pi h_i \Omega t + \alpha_i) \tag{1}$$

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \Omega^2 \sin(2\pi h_i \Omega t + \alpha_i) \tag{2}$$

여기서 F, T 는 힘과 토크 외란이며, F_i 는 i 번째 조화진동 외란의 계수를 말한다. Ω 는 휠의 속도, f_i 는 i 번째 조화수이다.

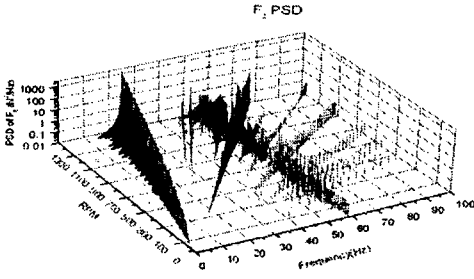


그림 3. F_z 의 PSD.

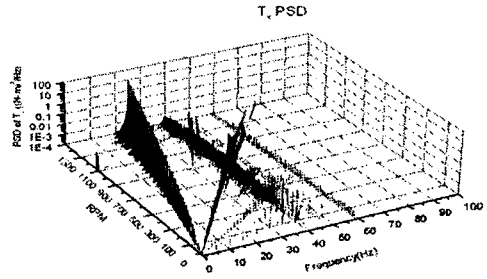


그림 4. T_x 의 PSD.

3. 단축 로드셀을 이용한 외란 측정

그림 1, 2는 반작용 휠 외란측정테이블의 동역학적 모델링과 측정테이블 개념도이다. 로드셀을 대칭으로 배치시킬 경우에 운동방정식이 비연성이 되며, 로드셀과 저울의 무게중심 높이를 같게 하고, 각 축변위가 작고 저울의 진동현상을 무시할 경우 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$F_x = -\sum_i f_{x_i}, \quad F_y = -\sum_i f_{y_i}, \quad F_z = -\sum_i f_{z_i} \quad (3)$$

$$T'_x = T_x + zF_y = -\sum f_{z_i}y_i, \quad T'_y = T_y - zF_x = \sum f_{z_i}x_i, \quad T_z = -\sum_i f_{x_i}y_i - \sum_i f_{y_i}x_i \quad (4)$$

여기서 F_x, F_y, F_z 는 각 축 방향 발생 힘, $f_{x_i}, f_{y_i}, f_{z_i}$ 는 i 번째 로드셀에 작용하는 힘, x_i, y_i, z_i 는 i 번째 로드셀 위치이며, $T_x + zF_y$ 와 $T_y - zF_x$ 는 반작용 휠 장착점에 작용하는 상당 토크 외란이다. 반작용 휠의 외란 힘 및 토크는 각 로드셀에 측정되는 데이터로부터 얻을 수 있다. 특히, $z_i \equiv z$ 의 경우 f_{z_i} 만 측정하여도 x, y 축의 상당 외란 토크를 얻을 수 있다(오화석 외 2001). 한편, 외란의 속도별 주파수 특성을 알아보기 위하여 속도를 0rpm에서 20rpm씩 1500rpm까지 증가시켜서, 각 rpm별 측정된 $F_z, T'_x(T'_y)$ 의 PSD(Power Spectral Density) 값과 주파수, 반작용 휠의 속도를 그림 3, 4에 3차원으로 나타내었다(Silva 1999).

4. 진동현상 보정

그림 3, 4와 같이 측정테이블의 공진으로 불필요한 외란이 측정됨을 볼 수 있다. 본 장에서는 주파수 처리 방법을 통한 보정법을 제시한다. 힘 및 토크 외란 보정을 위해 3차원 진동을 고려한 측정테이블 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$F_z = M_z \Delta \ddot{z}_c + C_z \Delta \dot{z}_c + K_z \Delta z_c \quad (5)$$

$$T'_x = I_x \ddot{\theta}_x + C_x \dot{\theta}_x + K_x \theta_x, \quad T'_y = I_y \ddot{\theta}_y + C_y \dot{\theta}_y + K_y \theta_y \quad (6)$$

여기서 측정테이블 시스템의 동적 파라미터들을 충격시험을 통하여 얻었다. 식 (5), (6)을 Fourier 변환하여 다음과 같은 주파수 보정식을 얻을 수 있다(오화석 외 2004):

$$F_z(\omega)F_z^*(\omega) = [(-M_z\omega^2 + K_z)^2 + (C_z\omega)^2]\Delta Z_c(\omega)\Delta Z_c^*(\omega) \quad (7)$$

$$T_x(\omega)T_x^*(\omega) = [(-I_x\omega^2 + K_x)^2 + (C_x\omega)^2]\theta_x(\omega)\theta_x^*(\omega) \quad (8)$$

$$T_y(\omega)T_y^*(\omega) = [(-I_y\omega^2 + K_y)^2 + (C_y\omega)^2]\theta_y(\omega)\theta_y^*(\omega) \quad (9)$$

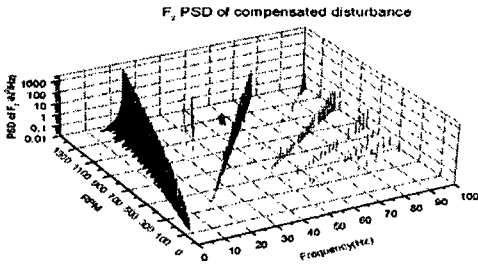


그림 5. 보정된 F_z 의 PSD.

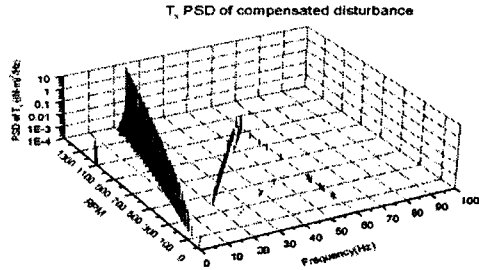


그림 6. 보정된 T_x 의 PSD.

휠의 각속도별 $\Delta z_c, \theta_x, \theta_y$ 를 구하여 식 (7), (8), 그리고 (9)를 통해 그림 5, 6과 같이 보정된 $F_z, T'_x(T'_y)$ 의 PSD Waterfall을 얻었다. 그 결과 60Hz와 30 ~ 40Hz사이의 공진 주파수 성분이 사라져 보다 정확한 외란을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 외란 모델 파라미터 추출 및 시뮬레이션

주파수 보정으로 얻어진 PSD Waterfall data로부터 외란모델의 조화진동수 및 크기를 얻고, 최소자승법을 써서 각 조화진동수에 해당하는 외란 파라미터의 크기를 결정한다. 외란계수는 식 (10)과 (11)을 이용하여 최적화함으로써 구할 수 있다.

$$\text{Min } J = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2}(d_{ij} - F_i \Omega_j^2)^2, \quad \text{Min } J = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2}(d_{ij} - T_i \Omega_j^2)^2 \quad (10)$$

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^m d_{ij} \Omega_j^2}{\sum_{j=1}^m \Omega_j^4}, \quad T_i = \frac{\sum_{j=1}^m d_{ij} \Omega_j^2}{\sum_{j=1}^m \Omega_j^4} \quad (11)$$

여기서 m 은 측정 개수이고 외란 크기는 $d_{ij} = \sqrt{4Sp_{ij}/n}$ 로 결정된다. Sp_{ij} 는 j 번째 rpm에서 i 번째 Harmonic에서의 PSD 첨두치, n 은 FFT 데이터 수이다. 위 식에서 결정되어진 외란 계수는 첫 번째 조화수가 가장 크며, 시뮬레이션을 통해 외란 PSD를 구한 후 보정된 실제 외란 데이터와 비교함으로써 외란모델의 적합성을 검증하였다. 그림 7, 8은 파라미터 결정에 따른 모델링 후 $F_z, T'_x(T'_y)$ 의 PSD Waterfall이다.

실험데이터에 따른 보정된 Waterfall과 비교해 보면, 서로 상당히 일치하는 Harmonic 산맥이 나타남을 볼 수 있다. 주파수 영역에서 구현한 PSD Waterfall 그래프를 보면, 반작용 휠의 외란 모델의 신뢰성과 정확성이 높다는 것을 보여준다. 진동현상의 보정과 외란 계수의 정밀 결정 및 외란 모델의 검증 과정을 통해서 보다 정확한 외란 값을 위성의 자세 영향 시뮬레이션에 입력할 수 있다.

6. 결 론

구동기의 힘 및 토크 외란을 본 논문에서 제시된 3개의 단축 로드셀을 이용한 토크 측정 방법을 사용한 테이블로 1축 힘과 2축 토크를 측정할 수 있음이 밝혀졌다. 이 측정테이블에 본 연구팀이 개발한 HAURW 반작용 휠을 수평 장착하여 측정된 외란데이터를 제시된 주파수 보정과정을 거쳐 외란 계수를 결정하였다. 결정된 외란 계수로 구동기 외란의 정량적 모델링을 하였으며, 이 모델링 결

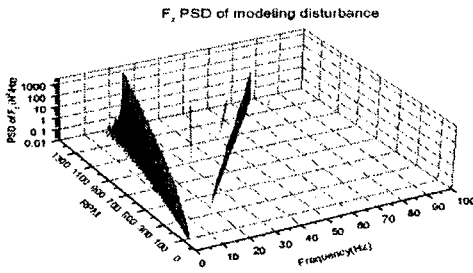


그림 7. 모델링 후 F_z PSD.

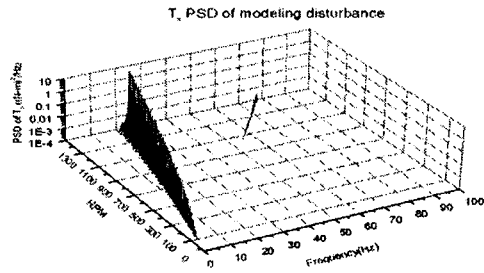


그림 8. 모델링 후 T_x PSD.

과를 주파수 영역의 PSD Waterfall 그래프와 시간영역에서 특정 회전의 외란 구현 그래프를 이용하여, 보정 전의 측정치와 보정 후의 모델링 값을 비교한 결과 높은 차수까지 실제측정값과 같음이 확인 되었으며, 이러한 비교 검증 과정을 통해서 본 논문에서 제시된 힘과 토크 외란의 2차원 저울을 통한 측정, 보정법 및 외란계수 모델링 등에 대한 신뢰성과 정확성을 확인 할 수 있었다

감사의 글: 본 연구개발은 한국과학재단의 2003-2004 지역대학우수과학자 육성 지원연구사업 “반작용휠 외란 측정 및 모델링 연구” 과제에 의해 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

서운경 2002, 석사학위논문, 한국항공대학교
 오화석 2003, 특허등록번호 0375628
 오화석, 임유신, 서운경, 장영근, 황재혁, 박영창, 이현우, 남명룡, 박동조 2001, 추계학술발표회 논문집 (서울: 한국항공우주학회), pp.96-99
 오화석, 전동익, 서운경 2004, 특허출원번호 4-1999-026719-6
 Bosgra, J. A., & Prins, J. J. M. 1982, IFAC Automatic Control in Space
 De Weck, O. 1998, MIT-SSL-NGST-98-1
 Masterson, R. A., Miller, D. W., & Grogan, R. L. 1999, AIAA, A99-24904
 Silva, C. W. 1999, Vibration (New York: CPR Press), pp.186-189