

## 반작용휠 토크측정을 통한 모델 파라미터 추출

### Model Parameter Extraction Using Torque Measurement of Reaction Wheel

이선호\*† · 김대관\* · 서현호\* · 용기력\*

Seon-Ho Lee, Dae-Kwan Kim, Hyun-Ho Seo, and Ki-Lyuk Yong

#### 1. 서론

궤도상에서 주어진 다양한 임무수행을 위해서 인공위성의 롤, 피치, 그리고 요축 자세지향 성능이 필수적으로 요구된다. 위성체 자세제어에 사용되는 구동기로서 반작용휠, 추력기, 자장토크, 제어모멘트자이로 등이 있다. 그 중에서 반작용휠은 인공위성의 정밀 자세제어에 널리 사용되는 구동기로서, 물리학의 반작용원리를 이용하여 모멘텀 교환을 통한 위성 자세기동과 자세안정화 기능을 수행한다. 특히, 임무기동을 위해서 자세 안정화 피드백시스템은 반작용휠을 구동하여 위성체를 원하는 자세로 신속히 기동시킨 후 영상획득을 위한 안정된 자세를 유지하도록 한다. 반작용휠은 구조적으로 플라이휠(Flywheel), BLDC 모터, 고정자, 베어링, 모터 드라이버 등으로 구성된다. 일반적으로 반작용휠 내부 베어링 마찰력에 의한 마찰토크(Friction Torque)와 영구자석의 배향 및 구동전류 파형의 편성에 의한 리플토크(Ripple Torque) 외란이 존재한다. [1]은 궤도상의 운영중인 위성체 원격전송데이터를 활용한 반작용휠 모델링 기법을 제안하였다. 이에 반해, 본 논문은 지상시험기간 동안 반작용휠에 명령토크 전압을 인가하여 측정된 휠속도와 측정된 발생토크를 이용하여 반작용휠의 모터이득, 마찰계수, 리플계수 등의 모델 파라미터를 추출한 시험적 결과를 소개한다.

#### 2. 반작용휠 모델링

인공위성 자세제어 시스템 설계에 사용되는 반작용휠 모델은 Figure 1 과 같이 관성모멘텀, 적분기, 마찰토크, 리플토크, 모터이득으로 구성된다. 반작용휠의 발생토크( $\tau$ )는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_c - \tau_f + \tau_r$$

단,  $\tau_c$ 는 명령토크,  $\tau_f$ 는 손실토크, 그리고  $\tau_r$ 는 리플토크이며 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau_c &= K_M v_c \\ \tau_f &= f(w) = C_V w + C_C \text{sign}(w) \\ \tau_r &= h(\theta) = C_R \sin(3N\theta) \end{aligned}$$

이때,  $v_c$ 는 명령전압,  $w$ 는 휠속도,  $\theta$ 는 휠회전각,  $N$ 는 모터극성수이다.

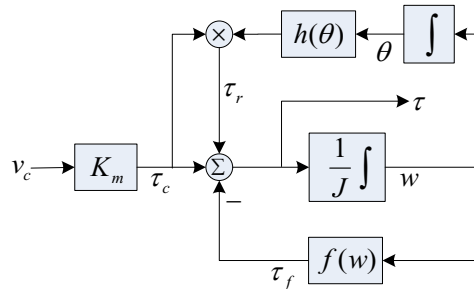


Figure 1 Reaction Wheel Model

#### 3. 반작용휠 모델 파라미터 최적화

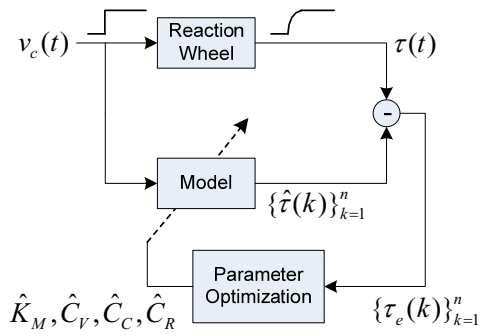


Figure 2 Model Parameter Optimization

반작용휠 모델 파라미터를 추출하기 위해서 Figure 2 와 같이 반작용휠에 일정한 명령토크 전압 ( $v_c(t)$ )을 인가하고 이때 생성되는 발생토크( $\tau(t)$ )를 측정한다. 그리고 반작용휠 모델에 동일한 명령토크 전압을 입력할 경우의 출력토크( $\{\hat{\tau}(k)\}_{k=1}^n$ )를 이용하

† 교신저자; 한국항공우주연구원 위성제어팀  
E-mail : shlee71@kari.re.kr  
Tel : (042) 860-2035, Fax : (042) 860-2898  
· 한국항공우주연구원 위성제어팀

여 다음과 같은 오차토크( $\{\tau_e(k)\}_{k=1}^n$ )를 계산한다.

$$\tau_e = \tau - \hat{\tau}$$

그리고 오차토크를 이용하여 다음과 같은 비용함수 ( $J$ )를 최소화하는 모델 파라미터( $\hat{K}_M, \hat{C}_V, \hat{C}_C, \hat{C}_R$ )를 구한다.

$$J = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\tau_e(k))^2$$

#### 4. 반작용휠 토크측정 시험

반작용휠에 명령토크 전압을 인가하고 발생토크를 측정하기 위해서, Figure 3 과 같이 DSP Board 기반 DAQ PC, Kistler Platform, Charge Amplifier, Anti-Aliasing Filter, Power Supply 등으로 이루어진 시험장치를 구성한다. Figure 4 는 실제 시험을 통해 측정된 반작용휠 명령토크 전압, 휠속도, 발생토크 신호를 도시한다.

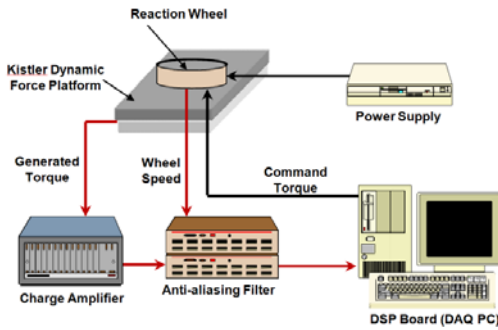


Figure 3 Torque Measurement Test Setup

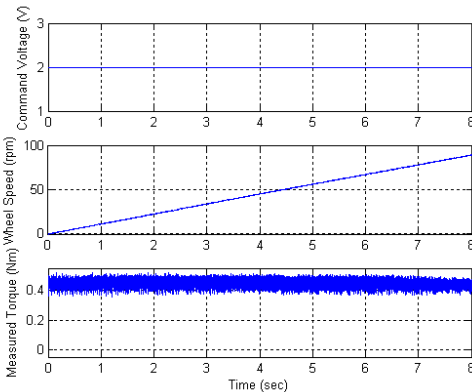


Figure 4 Measurement Data of Reaction Wheel

인가된 명령토크 전압과 발생토크를 MATLAB 의 비선형 다중변수 최적화함수(fmincon)이용하여 모델 파라미터를 추출한다. Table 1 은 4 회 시험을 통해

추출한 반작용휠 모델 파라미터 결과를 정리하고 있으며 Figure 5 는 추출된 파라미터를 적용한 모델출력과 시험결과를 비교한다. 즉, 최종 추정된 파라미터를 모델에 적용한 경우, 모델의 출력토크가 실제 반작용휠 시험결과에 서 측정된 발생토크와 거의 유사함을 확인할 수 있다.

Table 1 Extracted Model Parameter

Test Case	Command Voltage	$K_M$	$C_V$	$C_C$	$C_R$
1	+2	0.226	1.12E-3	0.015	0.100
2	-2	0.222	5.02E-5	0.018	0.071
3	+2	0.220	7.49E-8	0.009	0.100
4	-2	0.230	8.79E-4	0.015	0.098
Mean	N/A	0.226	5.12E-4	0.014	0.092

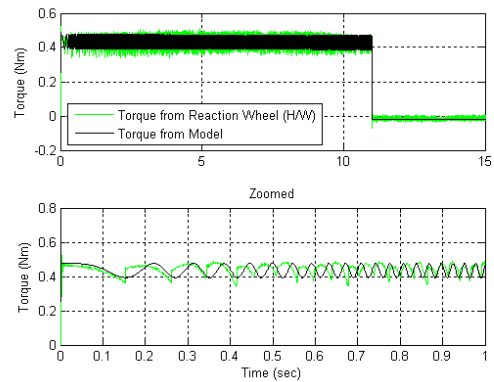


Figure 5 Comparison of Torques from Reaction Wheel and Model

#### 5. 결론

본 논문은 토크측정 시험을 통한 반작용휠 파라미터(모터이득, 마찰계수, 리플계수) 추출결과를 소개하였다. 본 연구 결과는 반작용휠의 특성을 분석을 위한 실험적인 모델링뿐만 아니라 장시간 지상시험 기간 동안 반작용휠 주요 파라미터의 경향성 분석(Trend Analysis)을 통해 하드웨어 건전성(Health)을 검증하는데 유용할 것으로 판단된다.

#### 6. 참고문헌

[1] 이선호, 최홍택, 용기력, 오시환, 이승우, KOMPSAT-1 Telemetry 를 활용한 반작용휠 모델링, 한국항공우주학회, vol. 32, no. 3, pp. 45-50, 2004