

SCL EM 반작용 휠의 시간응답 최적화를 위한 비례 이득 추정

김준호* · 이상욱* · 전동익* · 오화석**

Proportional Gain Estimation for Optimum Time Response of SCL EM Reaction Wheel

Joon-Ho Kim* · Sang-Wook Lee* · Dong-Ik Cheon* · Hwa-Suk Oh**

ABSTRACT

The driver's speed control to the satellite's mission is required. Therefore, optimal control over the value of benefits is required. Driver to control the characteristics of the driver and the driver was analyzed. Experimental results based on the estimated parameters using the equations of motion and was passed to save the function. Using optimization techniques applied to estimate the proportional term gain was the result of the analysis.

Key Words: P Control, P gain, Transfer Function, Settling time

1. 서 론

인공위성의 자세 제어는 임무 수행에 있어서 절대적이며 매우 중요하다. 우주 환경에서는 태양 복사압, 태양풍, 공기 저항 등에 의해 지속적인 외란이 작용되고, 궤도수정 및 임무 수행시 신속한 자세 제어가 필요하다. 따라서 위성 구동기의 제어 시 명령 값을 잘 추종하는 제어 방법을 적용하는 것이 중요하다.[1]

본 연구는 페루프 기법중 하나인 비례이득의 최적화된 값을 추정하기 위해 수행되었다. 명령 값에 대한 응답 특성과 비례제어기의 비례이득 값에 따른 결과를 비교 분석하여 최적화된 비례이득을 추정하였다.

2. 반작용 휠의 구성

2.1 반작용 휠의 제원

본 연구에서는 BLDC (Brushless Direct Current)-Motor인 FB-806A1을 사용하였다. 최대 속도는 약 3000 RPM 이다. 반작용 휠은 MOI (Moment of Inertia)가 $0.00773606 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이며, 재질은 Stainless Steel 이다.



Fig. 1 Reaction Wheel

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : bazra11@kau.ac.kr

TEL : (02)3159-0147 FAX : (02)300-0147

2.2 Encoder

엔코더는 회전각 위치와 직성변위를 측정하는 디지털방식 위치 센서이다. 본 연구에서는 모터의 속도 측정을 위해 메트로닉스사의 H40-8-2048Z0을 사용하였다. 엔코더 신호를 이용하여 반작용 휠의 속도 및 회전 방향을 측정하였다.[2]

2.3 Driver

본 연구에 사용된 Driver는 (주)D&J 사의 LBD-V DRIVER이다. 이 드라이버는 기본적인 정역회전, 브레이크 기능과 속도 제어가 가능하고, 최대 10 A, 200 W 급으로 BLDC-Motor 제어에 용이하며, 안정성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 속도 제어는 0~10 V의 전압 명령으로 이루어진다.

2.4 Hall Sensor 변환부 제작

모터의 홀 센서는 6상인 반면, 드라이버는 3상이므로, 신호의 전압 레벨이 다르다. 따라서, 모터의 홀 센서 신호를 드라이버에 맞게 디지털 신호로 바꿔야 한다.[3, 4]

홀 센서의 6상의 신호를 Op-amp(LM358N)을 이용 비교 증폭 하였다. 이 과정에서 3상이 된 신호를 NOTAND gate (HD74LS00P)를 사용하여 디지털 신호로 변환하였다. 회로는 Fig. 2에 나타내었다.

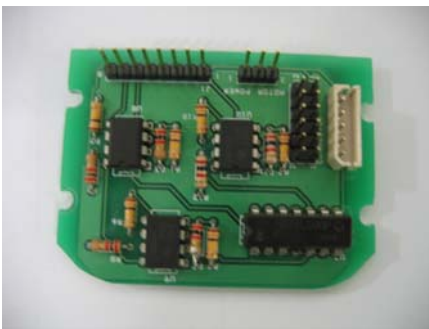


Fig. 2 Hall Sensor Converter

2.5 F-V Converter 제작

Encoder를 이용한 반작용 휠의 속도 측정시 출력되는 고 주파수 신호의 직접측정이 어렵다. 따라서, 반작용 휠의 속도를 측정하기 위해서

FVC (Frequency-Voltage Converter)를 제작하였으며 아날로그 신호를 측정하였다. 사용한 칩은 NJM4151D로서 측정범위가 1 Hz ~ 100 k Hz로 모터 운용범위를 포함하고 있다.[5]

3 운동방정식 계수 추정

3.1 RPM/V 관계식

반작용 휠 제어시 입력 전압에 따른 회전 속도의 변화 즉 RPM/V 관계식이 필요하다. 입력전압을 0.5 V 씩 증가하며 Steady state에서 속도를 측정하였다. 측정된 값을 Curve Fitting 한 결과는 Fig. 3과 같고, 데이터 분석을 토대로 관계식을 도출하였다.

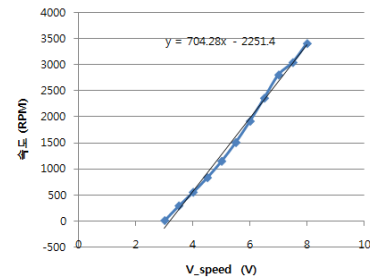


Fig. 3 Curve Fitting of RPM/V

3.2 데이터 분석을 이용한 계수 추정

반작용 휠의 운동방정식은 Eq. 1과 같다.[6] 이때, 모터의 입력 토크는 입력 전압에 비례한다고 가정하여 관계식을 세웠다.

$$J\dot{\omega} + b\omega = A(V - V_0) \quad \text{Eq. 1}$$

J : 관성모멘트

b : 댐핑 계수

A : 속도/전압 계수

V : 입력 전압

반작용 휠에 1500 rpm Step Input시 측정된 결과는 Fig. 4에 나타내었으며, Curve Fitting 한 결과는 Eq. 2이다. 이를 운동방정식과 비교하여 추정된 계수는 Table 2와 같다.

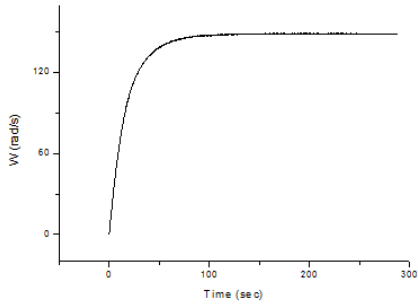


Fig. 4 Curve Fitting

$$w(t) = 147.546(1 - e^{-0.05774t}) \quad \text{Eq. 2}$$

Table 2. Factor of Equation

$J \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$	0.00773606
$A \text{ (w/V)}$	0.0317
$b \text{ (kg} \cdot \text{m}^2/\text{s)}$	0.0004467

3.3 블록 선도

운동방정식의 전달함수와, 비례이득을 적용한 블록선도는 Fig. 5에 나타내었다. 블록선도의 페루프 전달함수를 이용하여 각속도 식을 Eq. 3과 같이 도출하였다.

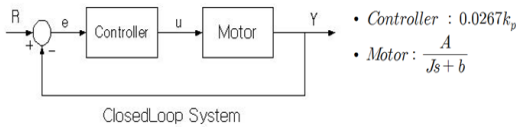


Fig. 5 Block Diagram of Close Loop System

$$w(t) = \frac{0.0267k_p A}{b + 0.0138k_p A} \left(1 - e^{-\frac{b + 0.0138k_p A}{J}t}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

4. 비례 이득(kp) 추정

4.1. 비례 제어 이론

제어기는 명령 값과 현재 값의 차이를 줄이는 방향으로 제어되어 진다. 비례제어기는 kp의 크

기가 크면 명령 값으로 수렴이 빠르지만, 진동이 발생하거나 오차가 커지는 등의 단점이 있고 이는 제어의 안정성을 해친다.[7] 따라서 반작용 휠에 맞는 최적의 비례이득 추정이 필요하다.

4.2 요구조건에 맞는 비례 이득 범위

요구조건에 의한 비례 이득 범위를 구하였다.

첫째, Settling Time은 30 sec 이내이어야 한다. 이 요구조건을 Eq. 3에 적용한 결과는 Eq. 4,5이며, Eq. 6와 같은 결과가 나왔다.

$$e^{-\frac{b + 0.0138k_p A}{J}t} = 0.05 \quad \text{Eq. 4}$$

$$t \leq 30 \quad \text{Eq. 5}$$

$$k_p \geq 1.7319 \quad \text{Eq. 6}$$

둘째, 인공위성 제어에 사용되는 반작용 휠이므로 정밀한 제어가 필요하다. 따라서 Steady State Error 은 20 rpm보다 작아야 한다. 이 요구조건을 Eq. 3에 대입하면 Eq. 7과 같고, 이 식을 통하여 kp의 범위를 계산하였다.

$$0.98 \leq \frac{0.0267k_p A}{b + 0.0138k_p A} \leq 1.02 \quad \text{Eq. 7}$$

$$3.056 \leq k_p \leq 4.564 \quad \text{Eq. 8}$$

4.3 Simulation

요구 조건에서 시뮬레이션하여 최적화된 비례 이득을 구하였다. 그 결과는 Fig. 6 및 Table 2에 나타내었다.

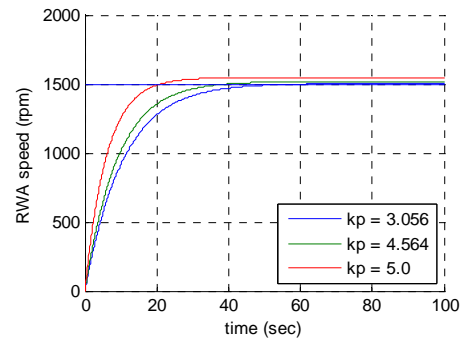


Fig. 6 Response by Changes of P Gain

Table 5. Response by Changes of P Gain

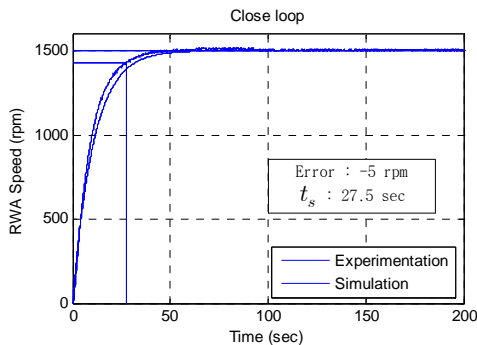
비례이득 (k_p)	Settling time (sec)	Error (rpm)
3.056	31.4	-4.22
3.5	27.4	-10.13
4.564	25.3	-19.08

시뮬레이션 결과 비례이득이 커짐에 따라 Settling Time 이 줄어드는 반면 Error값은 증가함을 알 수 있다.

위성 제어 시에는 신속한 자세 제어를 위하여 반작용 휠의 빠른 응답이 요구되므로, 비례이득이 4.564에서 최적값임을 알 수 있다.

4.4 결과 비교

시뮬레이션 결과와 실험한 결과는 Fig. 7과 같이 비슷한 양상을 보였다. 따라서, 가정한 운동방정식이 적용가능하다는 것을 알 수 있다. 하지만 Settling Time 및 Error값이 차이를 보였는데 이는 운동방정식의 단순화 및 RPM/V 수식화 과정에서 발생한 오차로 판단된다.

Fig 7 Step Input Response($k_p = 4.5674$)

5. 결론

본 연구는 최적화 기법을 이용한 비례이득 추정기법을 사용하였다.

비례이득 추정에 앞서 기존의 반작용 휠을 상용

드라이버로 구동하기위해 홀 센서 변환부를 제작하였고, 속도측정을 위해 FVC를 제작하였다.

최적화된 비례이득을 적용한 결과 명령 값을 잘 추종하는 것을 알 수 있었다. 또한 최적화 기법을 이용한 비례이득의 추정이 가능함을 보였다.

향후 본 연구를 바탕으로 비례 미분, 비례 미분 적분 이득에 대해서도 최적화 기법을 이용한 추정이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국항공대학교 산학협력단에서 주관하고, 한국항공대학교 위성제어실험실에서 수행하는 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Wie, B. and Barba, P. M., "Quaternion Feedback Spacecraft Large Angle Maneuvers", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.8, No.3, May-June 1985, pp.360-365.
- [2] Metromix, "Encoder-H40," Datasheet.
- [3] Toshiba, "Motor Driver-TA7712P," Datasheet, 2001.
- [4] Motorola, "Motor Driver-MC33035," Datasheet, 1996.
- [5] JRC, "F-V Converter-NJM4151D," Datasheet.
- [6] Katsuhiko Ogata, "System Dynamics" 4th Ed.. pp. 336-343.
- [7] Clement J. Savant, Jr, Gene H. Hostetter, "Design of Feedback Control Systems," 2002, pp. 79-102.