

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(11), 967-974(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.11.967

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

반작용휠 저속구간에서의 위성자세제어

손준원*, 박영웅**

Satellite Attitude Control on Reaction Wheel Low-Speed Region

Jun-Won Son* and Young-Woong Park**

Korea Aerospace Research Institute*·**

ABSTRACT

Reaction wheel shows nonlinear torque response on low-speed region due to friction. Thus precise satellite attitude control on this region is hard to achieve. Previous research tries to solve this problem, by compensating friction or applying dither command. However, due to difficulties of drag torque modeling or frequent zero wheel speed crossing, these methods are not suitable to apply on the real satellite attitude control. To solve this problem, we propose the attitude controller gain adjustment method based on the attitude error.

초 록

반작용휠은 저속구간에서 마찰로 인해서 비선형 토크 응답을 보인다. 따라서 이 구간에서는 위성의 정밀한 자세제어를 달성하기 어렵다. 기존 연구들은 마찰력 보상이나 디터 명령을 인가하는 방법을 사용하여 본 문제를 해결하려 하였다. 하지만 마찰력 모델링의 어려움이나 휠속도의 빈번한 영점 교차 때문에, 이러한 방법을 실제 위성 자세제어에 적용하기에는 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해서, 자세오차에 따라서 자세제어기의 이득 값을 조절하는 방법을 제안한다.

Key Words : Satellite Attitude Control(위성 자세 제어), Reaction Wheel(반작용휠), Friction(마찰력)

1. 서 론

반작용휠은 휠과 베어링의 마찰 때문에 인가된 토크 명령과 토크 출력 사이에 차이가 난다. 휠이 고속으로 회전할 때에는 마찰력이 회전속도에 비례하는 선형성을 보이지만, 휠이 저속으로 회전하거나 정지 상태 근처일 때는 비선형성을 보인다[1-4].

반작용휠을 위성 자세제어에 사용할 때는 일반적으로 네 개의 휠을 피라미드 형태의 클러스터로 배치하고, 위성이 기동하지 않을 때인 정상상태의 휠 속도를 최대 속도의 절반으로 설정한다[5-6]. 이렇게 하면 휠 클러스터 전체 모멘텀은 0이 되며, 위성이 기동할 때의 반작용휠 속도는 0과 최대 휠속도 사이에 위치하게 된다. 이 구간에서의 마찰력은 대체로 선형성을 보이기 때문

† Received : June 5, 2017 Revised : September 12, 2017 Accepted : September 23, 2017

* Corresponding author, E-mail : jwson@kari.re.kr

에, PID와 같은 선형 자세제어기를 사용하면 반작용휠 마찰력으로 인한 자세오차를 극복할 수 있다.

하지만 네 개의 휠 중에서 하나가 고장날 경우, 휠 클러스터 전체 모멘텀을 0으로 만들기 위해서, 정상 동작하는 휠들의 정상상태 속도를 0으로 설정해야 한다. 이 경우 저속구간에서 휠이 동작하는 것을 피할 수 없으며, 마찰력의 비선형성 때문에 정밀한 자세제어가 어렵다[7].

반작용휠과 같은 모터의 마찰력 모델링과 이를 보상하는 방법에 대한 연구는 많은 논문에서 수행되었다[1-2]. 또한 반작용휠이 저속구간에서 운용될 때의 위성자세제어에 관한 연구도 이루어졌다[3-4].

이들 연구는 반작용휠 (모터)의 마찰력을 정밀하게 모델링할 수 있거나, 회전속도와 같은 내부상태를 정확하게 알 수 있다는 전제하에 수행되었다. 하지만 실제 위성 자세제어에 사용되는 반작용휠은 정확한 마찰력 모델링이 어렵다.

위성 탑재용 반작용휠의 마찰력 측정 시험 결과를 살펴보면, 지상시험에서도 매 번 측정된 계수 값이 큰 차이가 나며, 궤도상에서는 정확한 값의 측정에 어려움이 있다[8-9].

또한 반작용휠의 마찰력은 온도 및 휠이 이전에 얼마나 오랫동안 회전했는지의 여부에 따라서도 변한다. Table 1은 위성 탑재용 휠의 환경시험동안 측정된 마찰력이다. 초기 성능시험에서 측정된 마찰력을 1로 두고, 이후 시험에서 측정된 마찰력을 그에 대한 비율로 환산하였다. 결과를 살펴보면, 온도에 따라서 마찰력에 큰 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 온도에서 수행된 초기 성능 시험 때의 측정값과 최종 성능 시험 때의 측정값도 차이가 발생하는데, 이는 휠이 초기 성능시험과 열진공시험을 거치면서 회전을 계속 하였기 때문에 발생한 현상이다. 이러한 변화 때문에, 마찰력의 정밀한 모델링을 통한 보상에는 한계가 있다.

실제 위성자세제어환경에서 마찰력의 정밀한 보상을 어렵게 하는 또 다른 원인은 바로 정확하지 않은 휠속도이다. 위성용 반작용휠의 타코미

Table 1. Wheel Friction Measurement

Env. Test	Friction
Initial Performance	1.00
Thermal Vac. (High)	0.75
Thermal Vac. (Low)	1.42
Final Performance	0.92

Table 2. Wheel Speed Error

Pulses / Rev.	Speed Error
18	26.67 RPM
108	4.44 RPM

Table 3. Estimated Friction Value

	Fv	Fc
Real	1.00*Fv	1.00*Fc
Estimated Friction 1 (using real speed)	0.91*Fv	1.02*Fc
Estimated Friction 2 (using measured speed) (108pulses/rev)	0.71*Fv	0.40*Fc
Estimated Friction 3 (using measured speed) (18pulses/rev)	1.70*Fv	-4.06*Fc

터는 1회전당 108개의 타코 펄스를 생성하는 제품도 있으나, 일반적으로 18개 수준의 타코 펄스를 생성한다. 널리 사용되며 구현이 간편한 펄스 간 시간 측정 방법을 사용하고, 측정주기를 0.125초로 할 경우, 실제 휠속도와 타코펄스를 통해서 측정된 휠속도의 오차는 Table 2와 같다[10].

이러한 휠속도 오차는 마찰력 모델링 및 보상에 큰 영향을 준다. Table 3은 [4]에서 사용된 방법을 이용하여 휠의 viscous friction(Fv)과 coulomb friction(Fc)를 시뮬레이션해본 결과이다. 휠 모델에서 얻어진 실제 속도를 이용하여 마찰력을 추정해보면 추정값 1처럼 인가한 마찰력 모델과 유사한 값이 나오지만, 타코 펄스를 통해서 계산된 휠 속도를 이용하여 마찰력을 추정해보면 추정값 2와 추정값 3처럼 큰 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

위와 같은 문제 때문에, 위성 자세제어시 반작용휠의 저속구간, 특히 영속도 근처에서 마찰력을 모델링 하고 보상을 하는 것은 어렵다.

디더 명령을 이용하는 경우에는 정확한 반작용휠 모델링이나 속도 정보를 필요로 하지 않는다는 장점이 있다[3]. 하지만 디더 명령으로 인해서 정밀한 자세제어 달성은 어려우며, 휠의 수명을 단축시키는 휠속도 0점 교차가 계속해서 일어나는 문제점이 있다[4].

본 논문에서는 반작용휠 마찰력에 대한 직접적인 보상 및 제어 보다는, 위성 자세제어기 자체의 이득값을 조절하는 방식을 연구해본다. 위성의 자세제어가 안정화되는 단계에 도달하면, 반작용휠이 영속도 근처의 저속구간에 위치하게

되며, 이 때 I-제어기와 반작용휠 마찰력의 상호 영향 때문에 정밀 자세제어가 일어나지 못함을 보인다. 그리고 위성이 안정화 단계에 접어들었을 때, I-제어기를 사용하지 않고, PD 제어기의 이득값을 증가시키는 방법으로 자세오차를 줄이는 방법을 제안하고자 한다.

II. 본 론

본 논문에서는 반작용휠 저속구간에서의 특성 및 자세제어성능을 살펴보기 위해서 Fig. 1 및 Table 4-5와 같은 1축 자세제어 환경을 가정하였다. 반작용휠 모델은 Honeywell사로부터 제공 받은 정밀 모델을 사용하였다.

2.1 반작용휠 저속구간에서의 특성분석

본 절에서는 반작용휠 저속구간에서의 특성을 살펴보기 위해서, 반작용휠의 정상상태 속도가 2000RPM일 때와 0 RPM일 때를 비교해본다. 본 절의 내용은 휠 정상상태가 영속도일 때는 자세오차가 발생한다는 기존 연구결과[7]을 토대로 다음을 보완한 내용임을 밝혀둔다.

- 자세제어기 내부 필터 삭제 및 이득값 조정
반작용휠 특성과 제어기 사이의 관계를 명확하게 보이기 위해서 필터를 삭제하고 이득값을 조정하였음
- 저속구간에서의 자세제어 성능저하 원인 분석
기존 연구결과는 자세제어 성능이 저하되는 현상만을 보였지만, 본 연구는 자세제어 성능저하가 휠 마찰력의 비선형성과 I-제어기의 상호 영향 때문임을 보임

Figure 2~4는 반작용휠 정상상태 속도가 2000RPM일 때의 시뮬레이션 결과이다. 자세 안정화 단계인 약 700초 이후 반작용휠은 정상상태인 2000 RPM 근처에 도달한다. 이 구간에서의 마찰력은 선형성을 유지하므로, 큰 무리 없이 위성의 자세가 안정화되는 것을 볼 수 있다.

Figure 5~7은 반작용휠의 정상상태 속도가 0 RPM일 때의 시뮬레이션 결과이다. 자세 안정화 단계인 약 700초 이후 반작용휠이 정상상태인 0 RPM 근처에 도달한다. 이 구간에서는 마찰력이

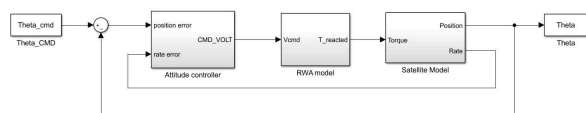


Fig. 1. 1-axis control diagram

Table 4. Satellite and RWA Configuration

Description	Value
Satellite Inertia	1000 $kg \cdot m^2$
Max Wheel Torque	0.254 Nm
Max Wheel Momentum	50 Nms
Max Wheel Speed	4000 RPM

Table 5. Controller Gain

	Kp	Kd	Ki	I_limit
PID	0.0045	0.1056	0.00004	10
PD-1	0.0045	0.1056	0	0
PD-2	1.0313	1.6249	0	0

비선형성을 보이기 때문에 자세 안정화가 이뤄지지 못하고, 자세오차와 휠속도가 계속해서 +와 -를 반복하는 현상을 보이고 있다.

이러한 현상의 원인은 Fig. 7에서 알 수 있다.

- 1) 자세 안정화 단계에 따른 토크 명령 감소
700초 이후 자세안정화 단계에 접어들면서 반작용휠에 인가되는 토크 명령(Tcmd)의 크기가 감소됨
- 2) 반작용휠 정지
토크 명령이 작아지면서 약 730초에 휠이 정지하게 되고, 더 이상의 토크를 생성하지 못함
- 3) I error 증가
휠이 토크를 생성하지 못하여 제어가 이뤄지지 않으므로 I error가 계속해서 증가하게 됨
- 4) 반작용휠 재기동
I제어기에서 생성되는 토크 명령이 정지 마찰력을 이길 정도의 수준이 되면 휠이 다시 동작
- 5) 반작용휠 정지
반작용휠이 재기동하면서 다시 자세오차가 줄어들고 반작용휠이 정지

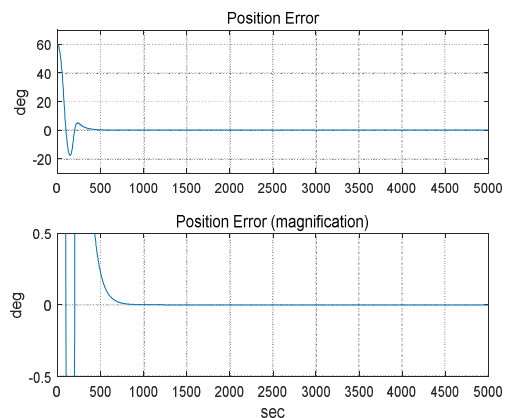


Fig. 2. Postion Error (PID, 2000 RPM)

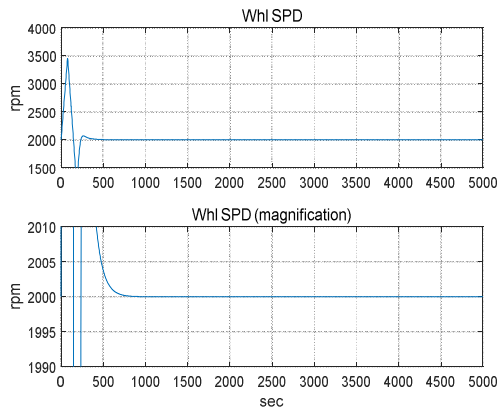


Fig. 3. Wheel Speed (PID, 2000 RPM)

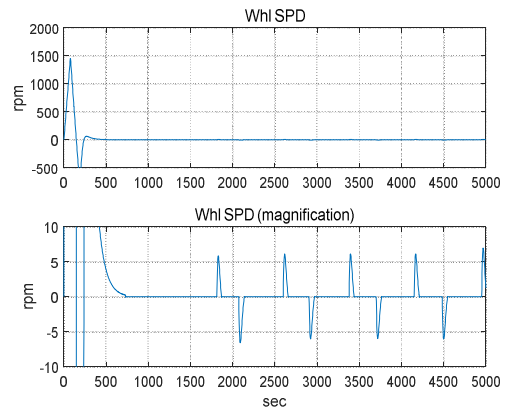


Fig. 6. Wheel Speed (PID, 0 RPM)

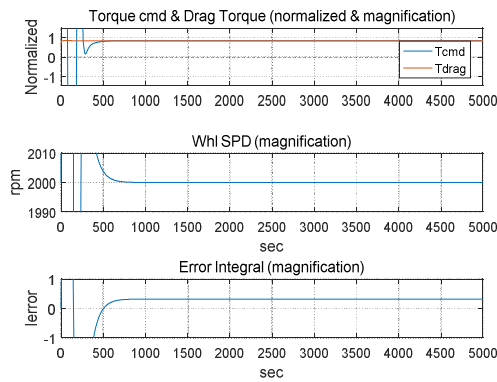


Fig. 4. Drag Torque (PID, 2000 RPM)

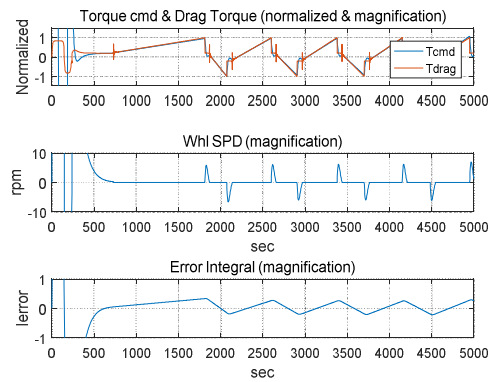


Fig. 7. Drag Torque (PID, 0 RPM)

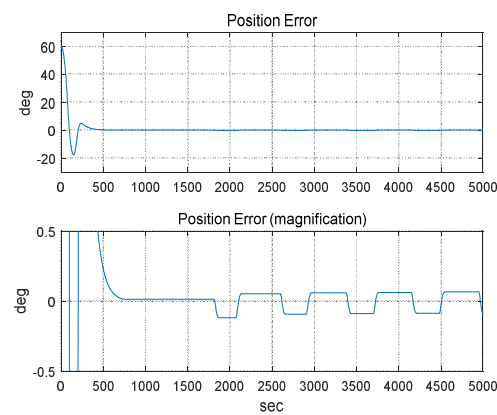


Fig. 5. Position Error (PID, 0 RPM)

휠 속도가 2000RPM일 경우에는 자세 안정화 단계에서 인가되는 토크 명령이 작아져도 휠의 속도가 감소할 뿐 휠이 정지하지는 않는다. 이 경우에는 I 제어기가 계속 정상적으로 동작하여 Fig. 4처럼 휠의 마찰력을 이겨내는 수준의 명령을 계속 인가하게 된다.

하지만 0 RPM 근처에서는 휠이 정지하는 특

성과, 회전 방향에 따라서 마찰력 극성이 바뀌는 현상으로 인해 정상적인 제어가 어렵다.

2.2 자세제어기 이득값 조절을 통한 제어

앞에서 살펴본 바와 같이 반작용휠 정상속도를 0으로 두었을 때 자세안정화가 되지 않는 문제는 I제어기와 마찰력의 비선형성 간의 상호 작용 때문에 발생한 현상이다. 이를 해결하기 위해서 PD 제어기만 사용하는 것을 고려할 수 있다.

Figure 8~10은 자세제어기로 PID 제어기 대신 PD 제어기를 사용할 경우의 시뮬레이션 결과이다. 휠의 영속도 근처에서 자세안정화를 수행하는 I 제어기가 없으므로 휠의 영점 교차가 반복되는 현상은 방지할 수 있지만 0.08도의 자세오차가 제어되지 못하고 그대로 존재하는 것을 확인할 수 있다.

휠의 마찰력을 이기지 못하고 휠을 정지하게 만드는 수준의 토크 입력을 $T_{cmd, standstill}$ 이라고 하자. 위성이 자세 안정화 단계에 접어들어서 각속도는 거의 0이 되어 있다고 가정하면, 토크 입력과 자세오차의 관계는 아래와 같이 표현된다.

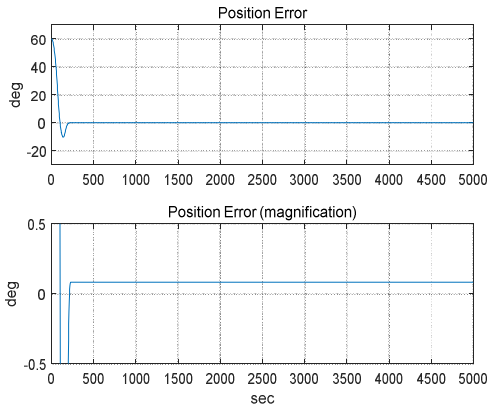


Fig. 8. Position Error (PD-1, 0 RPM)

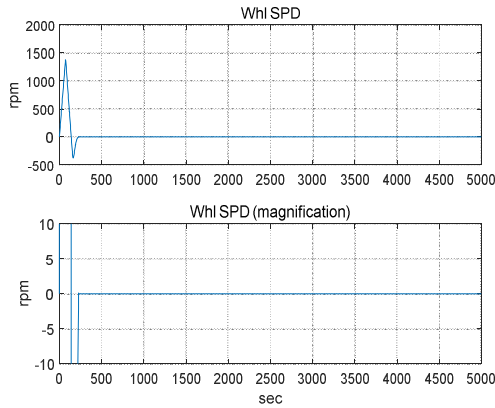


Fig. 9. Wheel Speed (PD-1, 0 RPM)

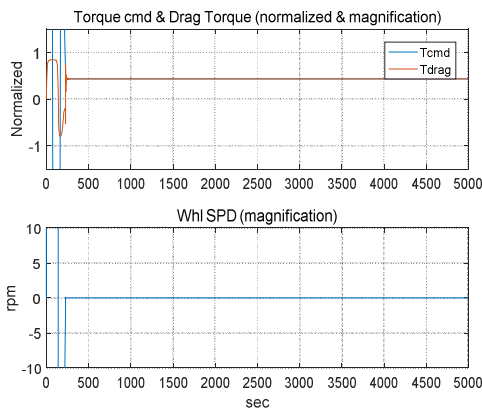


Fig. 10. Drag Torque (PD-1, 0 RPM)

$$T_{cmd, standstill} = K_p \theta_e + K_d \omega \approx K_p \theta_{ss} \quad (1)$$

즉, 제어기의 이득값을 증가시키면 자세오차를 줄일 수 있다는 의미가 된다. 이를 검증하기 위해서 PD 제어기의 이득값을 Table 5에 나와 있는 PD-2와 같이 증가시키고 시뮬레이션 하였다. Fig. 11~13에서 확인할 수 있듯이, 자세오차는

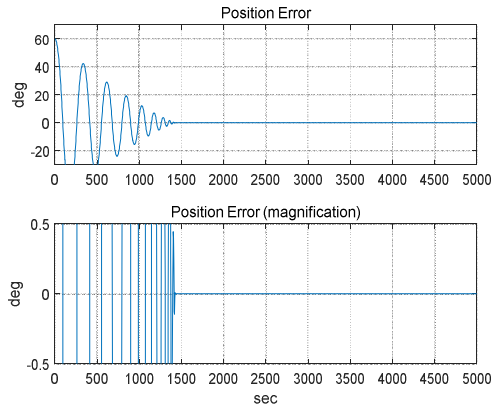


Fig. 11. Position Error (PD-2, 0 RPM)

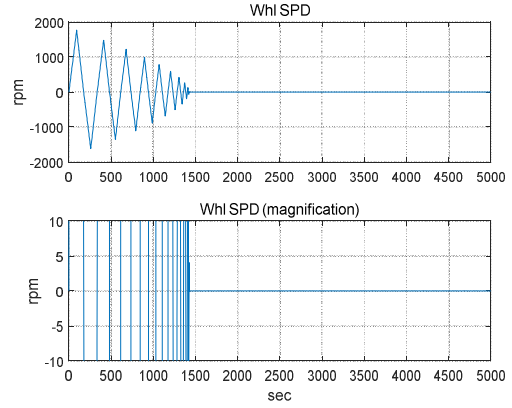


Fig. 12. Wheel Speed (PD-2, 0 RPM)

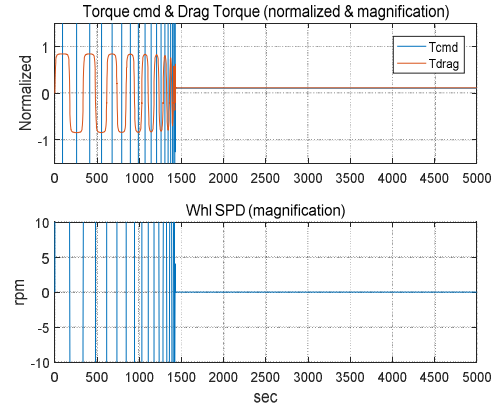


Fig. 13. Drag Torque (PD-2, 0 RPM)

감소하였지만, 안정화 시간이 길어졌고, 안정화 과정도 매끄럽지 못하다.

이는 제어기의 이득값 증가로 토크 명령의 크기도 증가하였으나, 반작용휠의 한계 때문에 토크 출력이 이를 따라가지 못하면서 발생한 현상이다. Fig. 14를 살펴보면 자세제어기에서 요청한 명령이 실제 반작용휠의 최대 토크보다 훨씬 큰

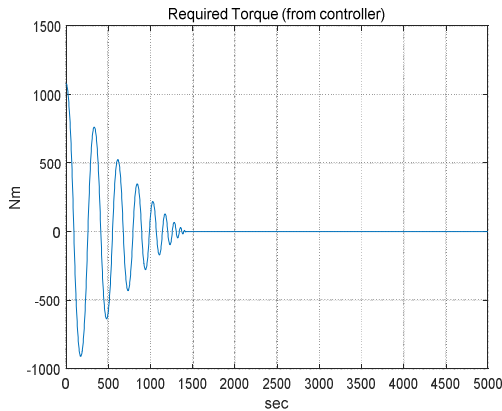


Fig. 14. Required Torq. (PD-2, 0 RPM)

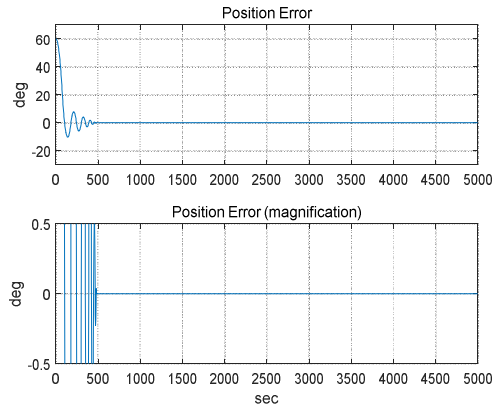


Fig. 16. Position Error (Proposed, 0 RPM)

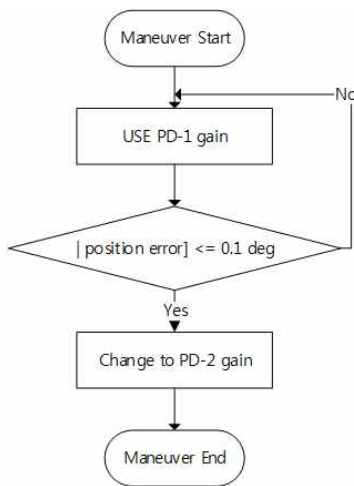


Fig. 15. Proposed Controller Algorithm

것을 알 수 있다.

이를 방지하기 위해서 Fig. 15와 같은 제어기를 설계하였다. 위성기동 초기에는 PD-1의 이득값을 사용한다. 이를 통해서 자세오차가 0.1deg 수준으로 줄어들면 PD-2의 이득값으로 전환한다. 자세오차가 줄어든 상태에서 PD 제어기의 이득값을 증가시키기 때문에 자세제어기에서 요구하는 토크의 크기도 상대적으로 줄어든다. 위성이 다시 기동할 경우에는 PD-1 이득값으로 전환하고 같은 과정을 반복한다.

참고로 0.1deg는 반복적인 시뮬레이션을 통해서 설정한 값이며, 위성 및 반작용휠, 그리고 제어기의 이득값이 변경될 경우에는 적절하게 변경해야 한다.

Figure 16~18은 이와 같이 설계한 자세제어기의 제어성능을 보여주고 있다. 자세오차가 0에 가깝게 되는 것을 확인할 수 있으며, 자세 안정화 시간 및 과정보다 PD-2에 비해서 개선된 것을 확인할 수 있다. Fig. 19~20은 자세제어기에서 요

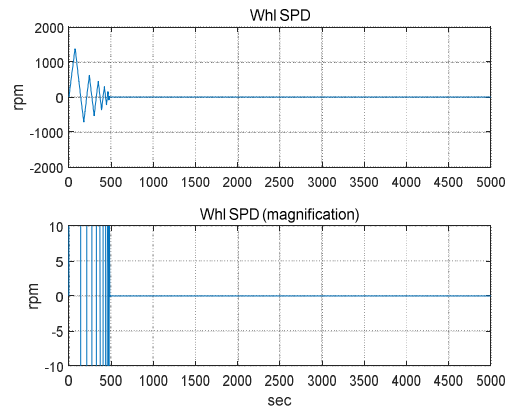


Fig. 17. Wheel Speed (Proposed, 0 RPM)

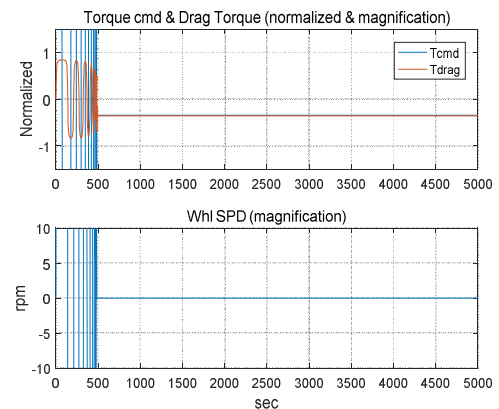


Fig. 18. Drag Torque (Proposed, 0 RPM)

구하는 토크 및 이득값의 전환을 보여주고 있다.

2.3 실제 위성자세제어환경 모사

실제 위성 자세제어에서는 구조체의 공진현상을 방지하기 위하여 자세제어기에 필터를 적용하여 특정 주파수 이상의 토크가 위성에 가해지지 않도록 한다. 또한 위성 외부에서 계속해서 들어

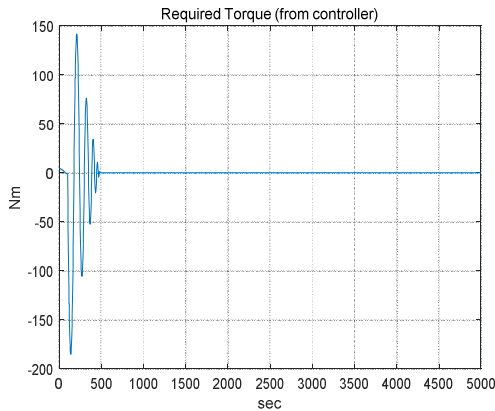


Fig. 19. Required Torq. (Proposed, 0 RPM)

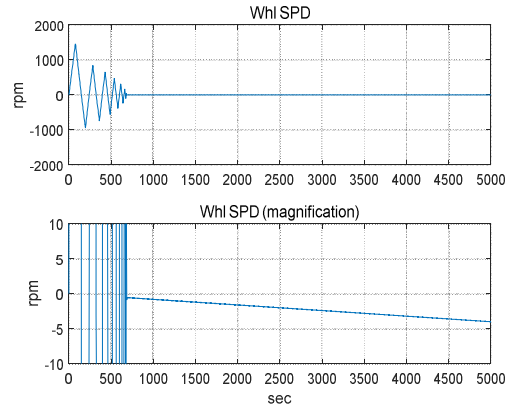


Fig. 22. Wheel Speed (Real Config.)

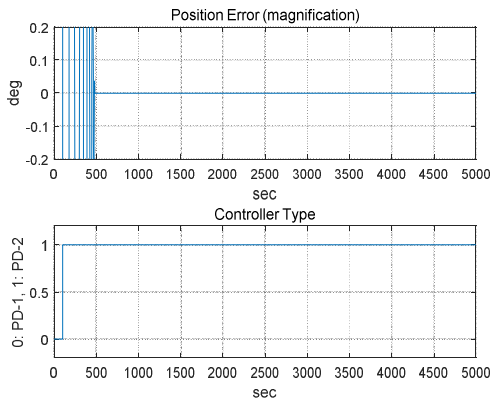


Fig. 20. PD gain change (Proposed, 0 RPM)

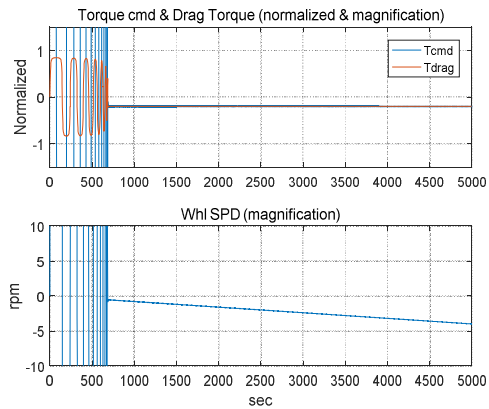


Fig. 23. Drag Torque (Real Config.)

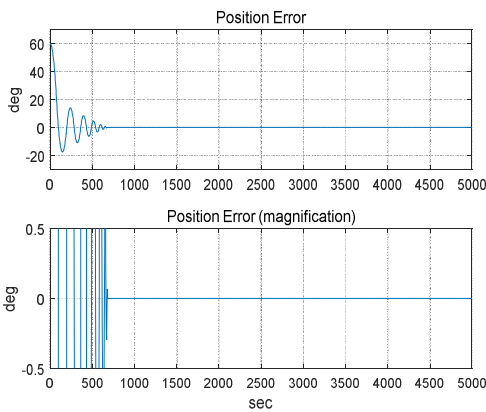


Fig. 21. Position Error (Real Config.)

오는 외란 토크에도 자세제어가 이루어지는지를 확인해야 한다. 본 절에서는 이와 같은 실제 환경에서도, 제안된 자세제어기가 정상 동작하는지를 살펴본다. 필터는 0.3Hz의 대역폭을 가지는 1차 필터를 적용하였으며, 0.01mNm 크기의 외란이 들어오는 상황을 가정하였다.

Figure 16과 Fig. 21을 비교해보면 자세안정화

시간이 증가하였음을 알 수 있다. 이는 필터로 인해서 제어기의 대역폭이 감소하여 반응속도가 늦어짐에 따라서 발생한 현상이다. 하지만 자세 오차는 양쪽 모두 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

Figure 22와 Fig. 23을 보면, 시간이 지남에 따라서 반작용휠 속도가 정상상태인 0에서 벗어나는 현상을 볼 수 있다. 이는 외란에 의해서 위성에 축적되는 모멘텀을 휠이 흡수하기 때문에 나타나는 현상으로 제어기와는 무관하며, 외란에도 불구하고 제어기는 정상동작을 하여 자세오차를 제어하고 있는 것을 확인할 수 있다. 참고로 이렇게 휠에 흡수된 모멘텀은 추력기나 자기토크를 이용하여 제거해준다.

III. 결 론

반작용휠의 정상속도를 0으로 두고 위성자세 제어를 수행할 경우에 대해서 살펴보았다.

우선 반작용휠의 속도가 0 근처가 될 경우, 마

찰력의 비선형성 때문에, I 제어기가 정상동작하지 않고 오히려 자세제어를 방해하는 현상을 확인하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해서, I 제어기 없이 PD 제어기만으로 자세제어를 수행하는 방법을 연구하였다. 초기에는 낮은 이득값의 PD 제어기로 자세제어를 수행하다가, 자세오차가 작아지면 PD 제어기의 이득값을 키우는 방법을 통해서, 정밀한 위성자세제어를 달성하였다.

이상적일 경우에는 PID 제어기는 자세오차를 0으로 만들고, PD 제어기는 자세오차의 크기를 줄일 수는 있어도 자세오차를 0으로 만들 수는 없다. 하지만 본 연구에서 살펴본 바와 같이, 휠의 정상상태속도가 영속도일 경우에는, 휠 마찰력의 비선형성 때문에, 자세가 안정화되는 평형점 근처에서 비선형성이 존재하고, 이러한 비선형성 때문에 PID 제어기는 자세오차를 0으로 만들 수가 없다. 반면 PD 제어기는 이득값을 조절하는 방식으로 위성의 임무 수행에 충분할 정도로 작게 만들 수는 있다.

본 연구에서는 저속구간의 특성이 정밀하게 모사된 반작용휠 모델을 통하여, 저속구간의 반작용휠 특성 및 설계된 제어기의 동작을 확인하였다.

References

- 1) Olsson, H., Astrom, K.J., Canudas de Wit, C., Gafvert, M., and Lischinsky, P., "Friction Models and Friction Compensation," *European Journal of Control*, Vol. 4, 1998, pp. 176~195.
- 2) Bona, B., and Indri, M., "Friction Compensation in Robotics: an Overview," *Proc. of 44th IEEE conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, December, 2005, pp. 4360~4367.
- 3) Steson, J. B., "Reaction Wheel Low-Speed Compensation Using Dither Signal," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 16, No. 4, 1993, pp. 617~622.
- 4) Lee, S.-H., Kim, J.-H., and Lee, S.-R., "Low-Speed Friction Compensation of Reaction Wheels Using Commands Shaping," *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2013, pp.106~111.
- 5) Yoon, H., Seo, H.-H., and Choi, H.-T., "Capacity Analysis of Reaction Wheels and Optimal Control Distribution for Satellite Agility Improvement," *Proceedings of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2014, pp. 568~571.
- 6) Son, J.-W., Lee, S.-H., and Choi, H.-T., "Reaction Wheel Arrangement of 1-axis Highly Agile Satellite," *Proceedings of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2014, pp. 563~567.
- 7) Son, J.-W., Park, Y.-W., "Reaction Wheel Nominal Speed and Satellite Attitude Control," *Proceedings of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2016, pp. 387~388.
- 8) Lee, S.-H., Kim, D.-K., Seo, H.-H., Yong, K.-L., "Model Parameter Extraction Using Torque Measurement of Reaction Wheel," *Conference of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 2011 Spring, pp. 490~491.
- 9) Lee, S.-H., Choi, H.-T., Yong, K.-L., Oh, S.-W., and Rhee, S.-W., "Modeling of Reaction Wheel Using KOMPSAT-1 Telemetry," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 32, No. 3, 2004, pp. 45-50.
- 10) Lee, H.-J., Oh, S.-W., Lee, S.-H., Yim, J.-R., Seo, H.-H., and Yong, K.-L., "Modeling Method of a Digital Tachometer for RWA Speed Detection," *Proceedings of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2007, pp. 1758~1761.