

자이로 이상상태가 있는 경우의 확장칼만필터를 이용한 무궁화위성 3호의 자세결정 연구

박영웅*, 박봉규*, 방호충**
*한국항공우주연구원, **한국과학기술원

Study on the Attitude Determination of KOREASAT3 using Extended Kalman Filter about Gyro Anomaly Case

Youngwoong Park*, Bongkyu Park*, Hyochong Bang**
*Korea Aerospace Research Institute, **KAIST

Abstract - 본 논문에서는 정지궤도 통신위성인 무궁화위성 3호 버스시스템을 모델로 하여 확장칼만필터를 이용한 자세결정 알고리즘을 개발하였다. 그리고 자이로에 바이어스가 있는 경우 및 자이로가 고장이 난 경우에 대한 결과를 시뮬레이션을 통해 필터의 성능을 검증하였다. 특히, 추정된 상태변수를 이용한 2Hz 자세제어를 동시에 수행하였다.

위 식에서 각속도($\omega_x, \omega_y, \omega_z$)는 정지궤도 궤도회전을 포함한 것을 의미하고 식(2)와 같이 오일러 각으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\phi \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \cos\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1. 서 론

우주궤도에서 임무를 수행하는 위성은 자신의 위치와 자세에 대한 정확한 정보를 획득할 수 있어야 제어 알고리즘에 의한 위치유지 및 자세제어를 수행할 수 있다. 때문에 고정밀 센서들을 장착하는 것으로 그 중 각속도에 대한 정보는 대부분 자이로 센서에 의해 얻게 된다 [1]. 그러나, 자이로 센서는 정확도 높은 반면 시간에 대한 표류율을 가지고 있어 지구센서나 태양센서 등을 통한 보정을 해야 한다. 또한, 자이로 센서 내부 바이어스나 위성 장착 오류 등과 같은 외부 바이어스에 의해 측정값에 일정한 오프셋이 존재하게 된다.

또한, 무궁화위성 3호의 하드웨어 구성에 따른 관계식은 참고문헌 [4]에 정리되었다.

칼만필터 상태변수는 3축 자세각(ϕ, θ, ψ)과 각속도($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) 및 휠모멘텀($h_{w1}, h_{w2}, h_{w3}, h_{w4}$)이고 자이로 바이어스(b_1, b_2, b_3, b_4)를 추가하였다. 갱신변수(Update Parameter)는 3축 자세각, 4개의 자이로 각속도 그리고 4개의 휠모멘텀을 선정하였다. 이때, 휠모멘텀은 자세제어 결과로부터 얻어지므로 동역학 식에 사용되는 3축 토크(T_x, T_y, T_z)로부터 그 값을 산출해야 하고, 각속도의 경우에는 4개의 자이로 각속도($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$)와 기하학적인 관계가 있다.

이러한 바이어스 값은 센서를 통해 얻을 수 없으므로 오차원인으로 규정하거나 추정 알고리즘을 통해 정밀도를 높게 된다. 이러한 알고리즘의 대표적인 것이 칼만 필터이며 그 계산량이 비교적 많아 보통 위성의 탑재컴퓨터에 사용되지 못하고 지상에서 처리하였지만 무궁화위성 3호 버스 모델인 'A2100'에서는 탑재컴퓨터의 자세결정 알고리즘에 확장칼만필터(EKF : Extended Kalman Filter)를 사용하여 4개의 자이로 바이어스까지 추정하고 있다[2-3]. 또한, 이 필터를 위성분야에서 동역학 모델의 변수 추정 및 궤도결정을 정밀도 향상을 위한 연구들이 수행되었다[4-6].

2.2 시뮬레이션

참고문헌 [4]에서는 초기 각도 오차가 있는 경우 칼만필터로 추정된 변수들을 통해 2Hz로 자세제어가 가능함을 검증하였다. 본 절에서는 정지궤도 통신위성이 정확히 자세를 유지하고 있는 경우 외란에 의한 각속도 변화가 생기는 것을 가정하여 초기 각속도 오차와 가스 랜덤 노이즈를 고려하고, 4개의 자이로 중 특정 자이로의 고장에 대해 칼만필터의 사용 유무에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

본 논문에서는 필터를 사용하지 않은 경우와 필터를 사용한 경우를 고려하였고 각 경우마다 자이로 바이어스가 있는 경우 및 자이로 고장이 있는 경우 2Hz의 자세제어를 수행한 자세결정에 대해 확장칼만필터의 성능을 분석하였다.

2.2.1 환경 설정

동역학 모델 및 확장칼만필터 상수값과 설계 변수들은 참고문헌 [4]에 정리되었고, 초기 오차에 대한 값은 아래의 (표 1)에 정리하였다.

(표 1) 칼만필터 초기 오차

2. 본 론

2.1 동역학 모델 및 칼만필터 설계

모든 위성의 동역학 모델은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ax} \\ h_{ay} \\ h_{az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{ax} \\ h_{ay} \\ h_{az} \end{bmatrix} \quad (1)$$

축	Angle (deg)	Rate (deg/sec)	번호	Wheel Momentum (in-lbf-sec)	Gyro Bias (deg/sec)
x	0.0	0.01	1	-10	0.02
y	0.0	-0.02	2	5	-0.01
z	0.0	0.02	3	10	0.01
			4	-15	-0.02

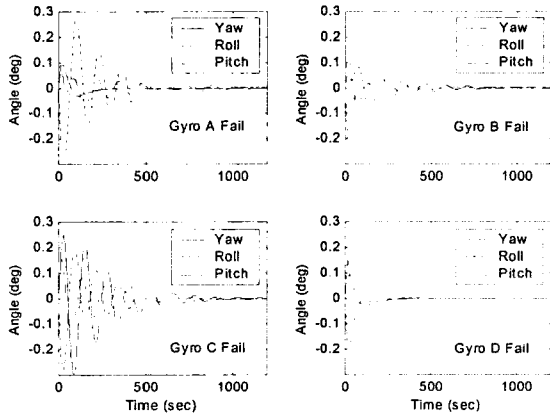
이 후 시뮬레이션을 수행하기 위한 4가지 경우에 대한 조건들은 다음과 같다.

- ① Case 1 : No EKF, No Gyro Bias, Gyro Fail
- ② Case 2 : No EKF, Gyro Bias (On/Off), Gyro Fail (On/Off)

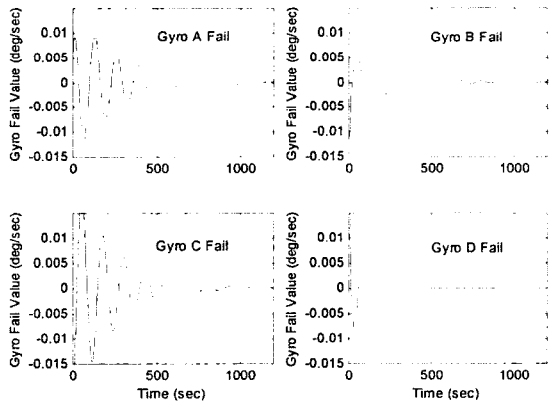
- ③ Case 3 : EKF, Gyro Bias (On/Off), Noise (On/Off), No Gyro Fail
- ④ Case 4 : EKF, Gyro Bias, Noise, Gyro Fail

2.2.2 Case 1

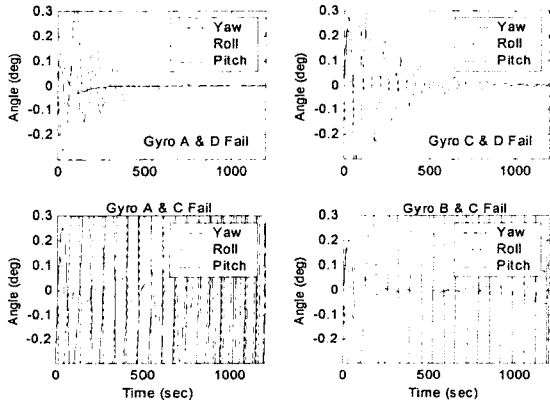
(그림 1)과 (그림 2)는 자이로가 1개만 고장난 경우에 대한 자세각과 고장난 자이로에서 얻지 못한 각속도를 보여주고 있다. (그림 3)은 2개의 자이로가 고장날 수 있는 6가지 경우 중에 4개를 선택한 결과이다.



(그림 1) 위성 자세각 - Gyro 1개 고장 (Case 1)



(그림 2) 잃어버린 각속도 - Gyro 1개 고장 (Case 1)

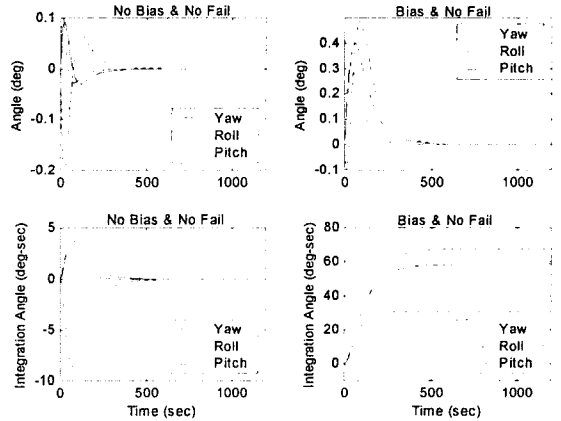


(그림 3) 위성 자세각 - Gyro 2개 고장 (Case 1)

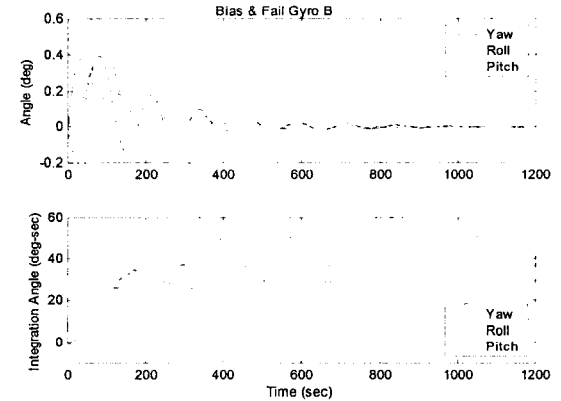
이 결과로부터 1개의 자이로가 고장난 경우에 대해서는 자이로에 대한 Redundancy 설계가 잘 되어있음을 알 수 있지만 2개가 고장난 경우에 대해서는 자세결정 및 자세제어를 수행할 수 없음을 알 수 있다.

2.2.3 Case 2

(그림 4)는 정상동작을 하는 경우 자이로 바이어스의 On/Off에 따라 PID 제어를 위한 자세각과 자세적분각 사이의 관계를 보여주고 있다. (그림 5)는 자이로 바이어스가 On이면서 B 자이로가 고장난 결과이다.



(그림 4) 자세각 & 자세적분각 (Case 2)



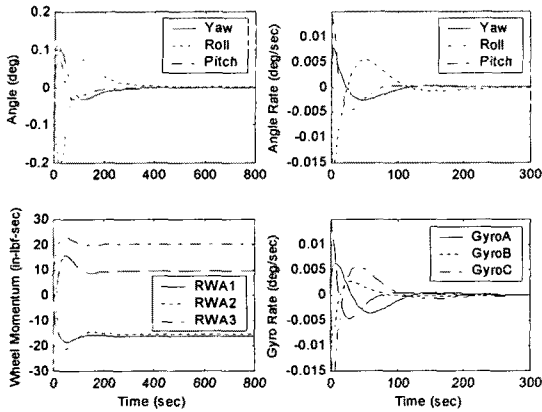
(그림 5) 자세각/자세적분각 - Gyro B 고장 (Case 2)

(그림 4)로부터 자이로 바이어스가 지속되는 경우 위성의 자세각은 시간에 따라 증가할 것으로 예상되지만 실제 적분게인에 사용되는 자세적분각이 각속도 바이어스를 보상하는 결과를 알 수 있다. 즉, PID 제어로직만으로도 자이로 바이어스에 대한 영향은 자세결정에 중요하지 않음을 알 수 있다. 물론, 이것은 자세각에 대한 정확한 정보를 얻을 수 있다는 조건과 바이어스가 시불변이라는 조건이 만족되어야 한다.

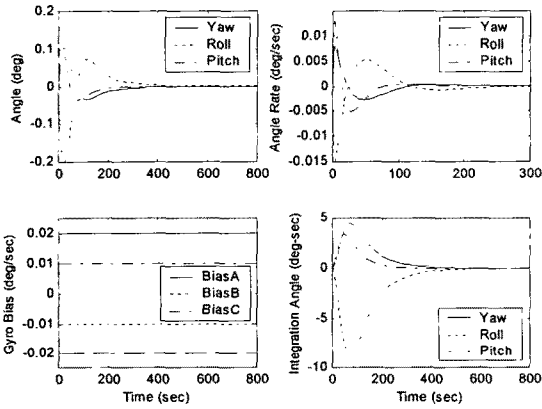
(그림 5)에서는 1개의 자이로(Gyro B)가 고장난 경우 자세각/자세적분각의 추이가 (그림 4)와 다르게 진행되지만 결국에는 동일한 결과를 얻게됨을 알 수 있다.

2.2.4 Case 3

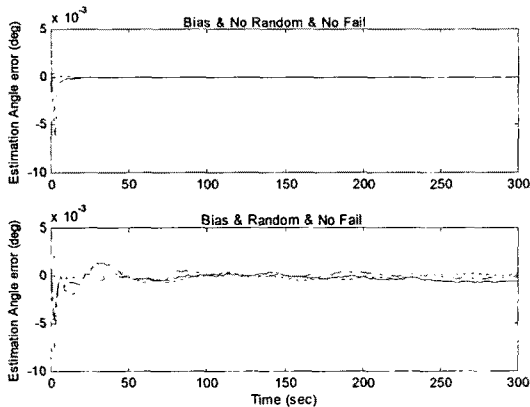
(그림 6)은 필터를 사용하면서 바이어스와 노이즈 값이 없는 결과를 보여주고, (그림 7)은 바이어스 On, 노이즈는 Off한 결과를 보여주며, (그림 8)은 바이어스가 On된 상태에서 랜덤 노이즈가 자세각 추정오차에 미치는 영향을 보여준다. (그림 9)는 자이로 고장만 없는 경우 필터의 상태변수 추정결과를 보여준다.



(그림 6) 상태변수 - No Bias, No Noise (Case 3)



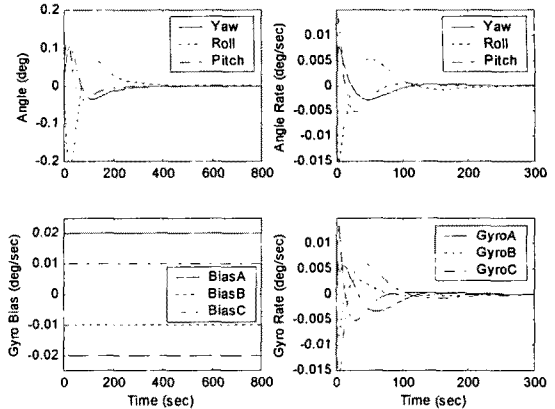
(그림 7) 상태변수 - Bias & No Noise (Case 3)



(그림 8) 자세각 추정오차 - Bias & Noise (Case 3)

(그림 6)의 결과는 (그림 4)에서 보여준 결과와 동일 한데 이것은 위성에서 자세결정을 확장칼만필터로 하고 그 결과를 자세제어에 사용해도 성능에 전혀 문제가 되지 않음을 알 수 있다. 또한, (그림 7)에서 자이로 바이 어스를 정확하게 추정함을 알 수 있고 자세적분값은 (그림 4)의 결과 중에서 바이어스가 없는 결과와 같게 나 타나는데 이것은 바이어스를 추정하였기 때문에 위성의 각속도를 정확하게 추정하고 있음을 보여주는 것이다. (그림 8)은 가우스 랜덤 노이즈가 있는 경우에는 시변 현상이 있지만 전체적인 자세결정 및 자세제어 성능에는

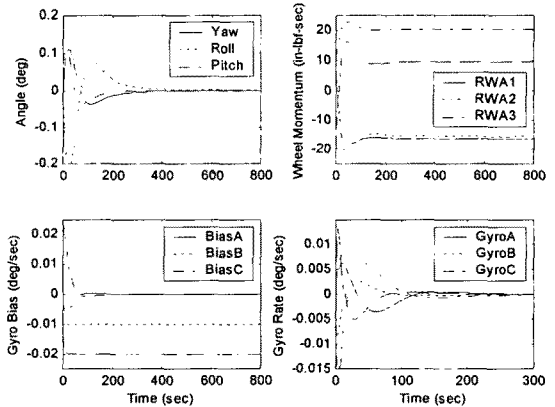
큰 영향을 주지 않으며 (그림 9)의 결과를 통해 확실하 게 알 수 있다. 물론, 노이즈 크기에 따라 다르지만 시 스템에 큰 영향을 주는 노이즈의 경우는 우주환경에서 발생하지 않는다.



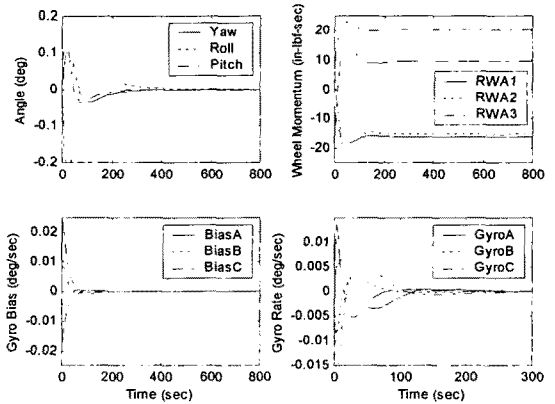
(그림 9) 상태변수 - Bias & Noise (Case 3)

2.2.4 Case 4

(그림 10)과 (그림 11)은 자이로 바이어스와 노이즈 가 모두 있는 조건에서 자이로가 고장난 경우의 자세결 정 및 제어 결과를 보여주고 있다.



(그림 10) 상태변수 - Gyro A & C 고장 (Case 4)



(그림 11) 상태변수 - Gyro All 고장 (Case 4)

(그림 10)은 (그림 3)에서 A와 C 자이로가 고장난

경우 자세제어가 수행되지 못한 결과에 대해 확장칼만필터를 사용하면 전혀 문제없이 자세제어가 되며, A와 C 자이로가 고장나지 않은 (그림 9)의 결과와 동일한 자세각속도를 출력해 주고 있음을 알 수 있다.

(그림 11)은 앞의 모든 경우에 대한 확장칼만필터의 성능을 단적으로 보여주는 결과로 4개의 자이로가 모두 고장이 발생해도 3축 자세각만 정확하게 결정할 수 있으면 4개의 자이로가 모두 정상적으로 동작하고 있는 결과와 동일한 자세각을 추정할 수 있음을 보여준다. 이 결과는 확장칼만필터가 동역학 관계식으로부터 자세각과 커플링되어 있기 때문에 자이로 각속도를 추정할 수 있는 것이다.

확장칼만필터의 선형성이 실제 위성의 비선형 동역학과 많은 차이가 있는 경우에는 별도의 비선형 해석이 필요하지만 그동안 연구되어진 위성의 동역학 관계식은 앞에 기술한 식(1)과 큰 차이가 없다.

3. 결 론

본 연구에서는 정지궤도 통신위성인 무궁화위성 3호 버스시스템을 모델로 하여 확장칼만필터를 이용한 자세결정 알고리즘을 개발하고 그 결과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 특히, 정확한 추정을 위한 칼만필터의 필터 이득을 결정하기 위해서는 초기에 입력된 추정변수들의 값에 변동이 없는 상황을 가정하게 되는데 본 연구에서는 2Hz로 자세제어도 동시에 수행하면서 필터 이득을 구하였고, 자이로 바이어스 및 자이로 고장에 대해 개발된 필터의 성능을 검증하였다.

본 연구를 통해 위성의 자세결정 및 자세제어를 위한 확장칼만필터 사용은 자세제어계의 안정성을 높이면서 성능을 보장할 수 있는 방안을 검증하였다.

향후 자세제어에 필수적인 반작용휠의 고장에 대해서도 개발된 필터를 통해 성능을 검증하는 연구가 수행되어질 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Shmuel Merhav, *Aerospace Sensor Systems and Applications*, Springer, 1996.
- [2] ---, *Koreasat 3 Critical Design Review Data Package*, Vol. 5, Lockheed Martin, 1998.
- [3] Frank L. Lewis, *Optimal Estimation*, John Wiley & Sons, 1986.
- [4] 박영웅, 박봉규, "확장칼만필터를 이용한 정지궤도위성 자세결정 연구", 한국항공우주학회 추계학술대회, pp. 33~36, 2001.
- [5] 윤진원, 박봉규, 방효충, "무궁화위성 1.2호의 지상용 자세 데이터 추정기법 연구", 한국항공우주학회지, 제28권 제1호, pp. 87~96, 2000.
- [6] 박봉규, 안태성, "칼만필터를 이용한 무궁화위성 궤도결정 성능분석 연구", 한국항공우주학회지, 제28권 제8호, pp. 98~108, 2000.