

반작용휠 속도측정방법의 오차 분석

오시환[†], 이혜진, 이선호, 용기력
한국항공우주연구원

Error Analysis of Reaction Wheel Speed Detection Methods

Shi-Hwan Oh[†], Hye-Jin Lee, Seon-Ho Lee and Ki-Lyuk Yong
Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea
E-mail: oshysh@kari.re.kr

(Received October 20, 2008; Accepted November 19, 2008)

요약

반작용휠은 인공위성의 기동 및 자세제어에 사용되는 주요 구동기 중의 하나로 회전체의 속도를 변화시켜 발생하는 토크로 위성의 자세제어를 수행하므로 정밀한 자세제어를 위해서는 정확한 회전속도의 측정이 요구된다. 타코 펄스를 이용한 고속 회전모터의 대표적인 속도 측정방법에는 Elapsed-time 측정방법과 Pulse-count 측정방법의 두 가지가 있으며 이 연구에서는 반작용휠의 속도 측정을 하는 동안 발생할 수 있는 속도 측정의 오차 및 정밀도를 두 가지 방법에 대해 분석, 비교하였다. 그 결과 Pulse-count 측정방법은 반작용휠의 등속 구동 시 회전속도에 상관없는 일정한 오차를 가지는데 비해 Elapsed-time 측정방법은 회전속도가 작을수록 오차가 줄어드나 저속일 때 오차가 현저히 커질 수 있음을 해석적으로 확인하였다.

Abstract

Reaction wheel is one of the actuators for spacecraft attitude control, which generates torque by changing an inertial rotor speed inside of the wheel. In order to generate required torque accurately and estimate an accurate angular momentum, wheel speed should be measured as close to the actual speed as possible. In this study, two conventional speed detection methods for high speed motor with digital tacho pulse (Elapsed-time method and Pulse-count method) and their resolutions are analyzed. For satellite attitude maneuvering and control, reaction wheel shall be operated in bi-directional and low speed operation is sometimes needed for emergency case. Thus the bias error at low speed with constant acceleration (or deceleration) is also analysed. As a result, the speed detection error of elapsed-time method is largely influenced upon the high-speed clock frequency at high speed and largely effected on the number of tacho pulses used in elapsed time calculation at low speed, respectively.

Keywords: reaction wheel, satellite attitude control, speed detection, tacho pulse, elapsed-time method, pulse-count method, error analysis

[†]corresponding author

1. 서 론

작용-반작용 법칙을 이용하여 위성의 자세를 변화시키는 반작용휠은 인공위성에 사용되는 대표적인 구동기 중의 하나이다. 반작용휠은 토크를 발생시키는 모터와 회전 관성을 가지고 있는 회전체(Rotor) 그리고 이들을 고정하는 지지대(Stator)로 구성되어 있다. 위성의 임무 수행 시 반작용휠 내부의 회전체가 일정 속도로 회전하고 있다가 위성의 자세를 변화시켜야 하는 경우 자세제어 로직에 의하여 회전체의 회전속도를 변화시킨다. 그러므로 반작용휠의 속도는 인공위성의 정밀한 자세제어를 위해 매 순간 정확하게 측정되어야만 한다.

종류에 따라 다르지만 일반적으로 반작용휠은 한 바퀴를 회전할 때마다 작게는 1개에서 많게는 100개가 넘는 펄스(pulse)를 발생하도록 설계되어 있고 이를 이용하여 반작용휠의 회전 속도를 측정하게 된다. 반작용휠의 회전 속도를 측정하는 방법은 일반적인 디지털 타코미터(Digital Tachometer)를 이용하는 모터의 속도 측정 방법과 유사하며 그 방법들로는 펄스 수 측정방법(M method or Pulse-count method), 펄스 간 시간 측정방법(T method or Elapsed-time method), M/T method, CSDT를 이용한 방법, Double-Buffered method 등이 있다(Ohmae & Matsuda 1982, Kavanagh 2000, Fujita & Sado 1992, Bonert 1989, Prokin 1991, Prokin 1994). 이를 방법에 대한 분해능, 정밀도 등은 이미 여러 문헌들을 통하여 해석된 바 있고 모터의 비선형성(Non-linearity) 및 부정확성(Non-ideality)을 고려한 성능 분석도 수행되었다. 이 논문에서는 이러한 방법들을 기반으로 한 인공위성 반작용휠의 속도 측정 방법을 소개하고 선행된 연구 결과를 바탕으로 하여 각 방법의 분해능 및 정밀도를 비교하였고 특히 등가속도 구동 시의 바이어스 오차 및 저속에서 발생할 수 있는 오차를 예측하고 비교하였으며 모의 실험을 통해 유도된 오차 분석 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 반작용휠의 속도측정 방법

반작용휠의 속도측정방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫째는 Pulse-count 측정방법이고 또 다른 하나는 Elapsed-time 측정방법이다. Pulse-count 측정방법은 정해진 시간 안에 반작용휠에서 발생하는 펄스의 개수를 측정하여 이를 속도로 환산하는 방법이고 Elapsed-time 측정방법은 반작용휠의 펄스가, 미리 정해놓은 개수만큼 발생할 때까지의 걸리는 시간을 측정하여 속도를 계산하는 방법이다. 이들의 측정 원리는 그림 1과 그림 2에 각각 나타나 있다.

Pulse-count 측정방법에서, 측정되는 반작용휠의 속도를 $\hat{\omega}$, 한바퀴 회전 시 발생하는 펄스의 개수를 P , 측정주기를 T_m , 측정주기 동안 발생하는 펄스 개수를 m_1 이라 하면 반작용휠의 회전 속도는

$$\hat{\omega} = \frac{60m_1}{PT_m} \text{ (rpm)} \quad (1)$$

와 같이 표현될 수 있다. 한편 Elapsed-time 측정방법에서 측정되는 반작용휠의 속도는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\hat{\omega} = \frac{60fN}{Pm_2} \text{ (rpm)} \quad (2)$$

이 때, 반작용휠의 N 개의 펄스가 발생하는 시간동안 주파수 f 의 고주파 클럭에서 발생하는 펄스의 개수가 m_2 이다.

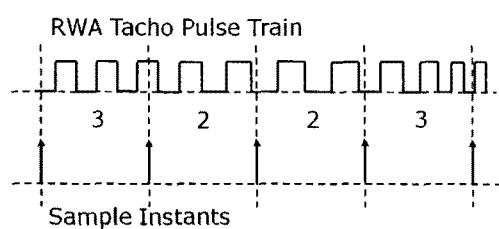


그림 1. Pulse-count 측정방법(M method).

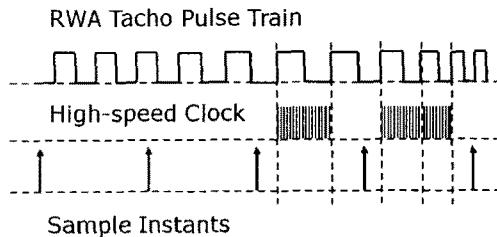


그림 2. Elapsed-time 측정방법(T method).

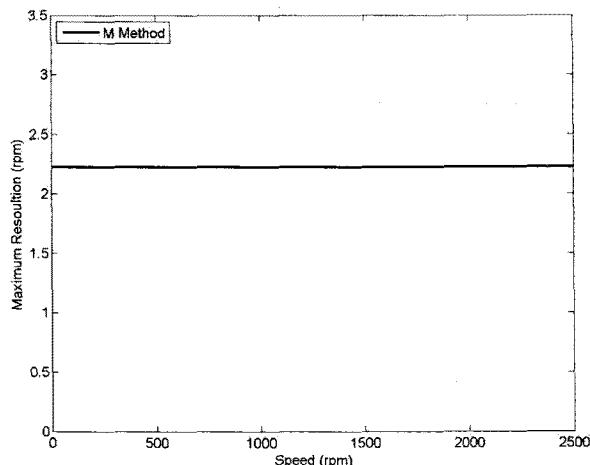


그림 3. Pulse-count 측정방법의 분해능.

2.2 속도측정방법의 분해능 및 정밀도

Pulse-count 측정방법의 분해능은 측정 주기 동안 발생하는 펄스의 개수를 한 개 놓칠 때의 속도 측정 오차와 같으므로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{60}{PT_m} \text{ (rpm)} \quad (3)$$

Elapsed-time 측정 방법의 분해능 역시 임의의 속도에서 고주파 펄스의 개수를 실제보다 한 개 놓칠 때 발생하는 속도 측정 오차와 같으므로

$$R = \frac{\omega^2 P}{60fN + \omega P} \text{ (rpm)} \quad (4)$$

와 같이 표현될 수 있다. 두 측정방법의 분해능을 비교해 보면 Pulse-count 측정방법은 현재의 회전 속도에 상관없이 분해능이 일정하나 Elapsed-time 측정방법은 회전속도가 커질수록 분해능이 나빠진다. 그러나 일반적으로, Elapsed-time 측정방법에 사용되는 고주파 클럭의 주파수 f 는 사용자가 선택할 수 있으므로 충분히 크게 선택하면 고속에서도 분해능을 상대적으로 향상시킬 수 있다. 이들 두 방법의 분해능을 비교하기 위하여 회전속도에 따른 분해능의 변화를 그려보았다.

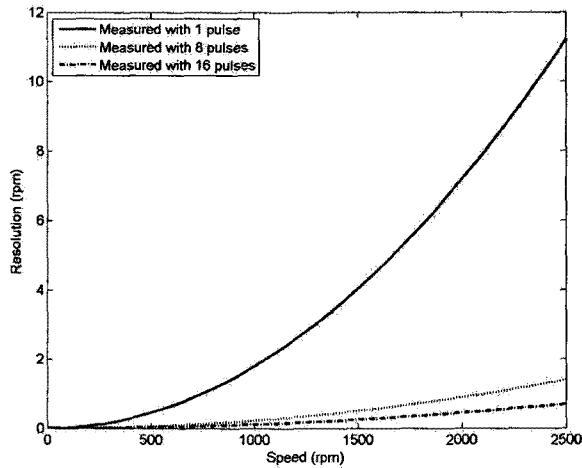


그림 4. 시간측정에 사용되는 펄스개수에 대한 Elapsed-time 측정방법의 분해능($f=1\text{MHz}$, $N=1, 8, 16$).

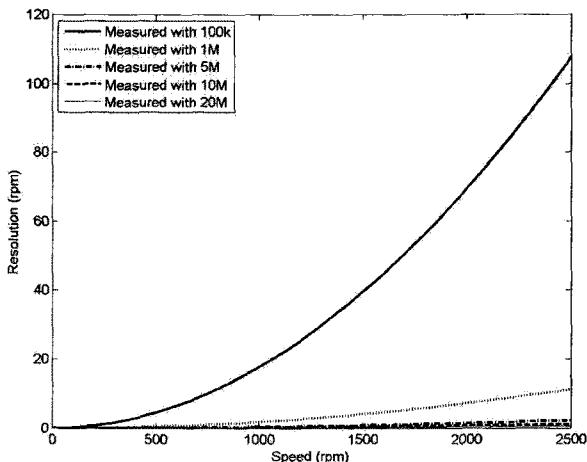


그림 5. 시간측정에 사용되는 고주파 클럭의 변화에 따른 Elapsed-time 측정방법의 분해능($N=1$, $f=0.1, 1, 5, 10, 20\text{MHz}$).

Pulse-count 측정방법의 회전속도에 따른 분해능이 그림 3에 나타나 있다. 이 때, $T_c = 0.25\text{초}$, $P = 108$ 로 가정하였다. 회전속도에 관계없이 분해능이 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다. 반면 Elapsed-time 측정방법은 회전속도의 제곱에 비례하여 분해능이 커진다. f 및 N 에 의해 분해능이 바뀌므로 다양한 f 및 N 에 대해 분해능을 그림 4와 그림 5에 보였다.

속도가 커질수록, 시간측정에 사용되는 반작용휠 펄스의 개수 N 이 작을수록, 시간측정을 위해

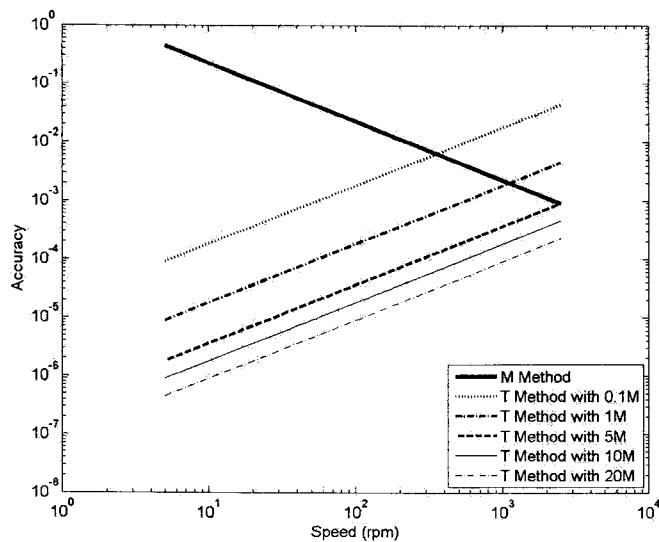


그림 6. Pulse-count 측정방법과 Elapsed-time 측정방법의 정밀도.

사용되는 클럭의 주파수 f 가 낮을수록 분해능이 커져 성능이 저하되나 반작용휠의 최고 속도에서의 분해능이 사용자가 원하는 요구조건을 만족시키도록 이 값을 조절할 수 있다. 정밀도는 보통 현재 속도에 대한 분해능의 비율로 표현되므로 Pulse-count 측정방법은 속도가 증가할수록 정밀도가 향상되고 Elapsed-time 측정방법은 회전속도가 증가할수록 정밀도가 저하된다(Kavanagh 2000). 이는 그림 6에 나타나 있다.

2.3 등가속 회전 시의 속도측정 오차

반작용휠의 회전속도가 일정하거나 매우 서서히 변한다면 회전속도 측정방법은 단순히 분해능 또는 정밀도에 의해 그 성능이 좌우된다고 말할 수 있다. 그러나 반작용휠의 속도 변화가 무시할 수 없을 만큼 존재한다면 이에 의한 바이어스 오차가 발생하게 된다.

Pulse-count 측정방법은 다른 말로, 측정주기 동안의 평균 속도라고 표현할 수 있다. 그러므로 가감속이 존재하는 경우에는 측정된 속도와 정확한 실제 순간속도 사이에 오차가 존재한다. 이 바이어스 오차는 다양한 속도 프로파일에 따라 그 값이 바뀌나, 반작용휠의 각각속도가 일정하게 증가한다고 가정하면 바이어스 오차를 정량적으로 예측할 수 있다. Elapsed-time 측정방법은 N 개의 반작용휠 펄스가 발생할 때마다 속도를 측정하므로 속도가 큰 경우에는 시간을 측정하는 펄스 사이의 간격이 짧아 속도 변화량이 크지는 않으므로 바이어스 오차가 작으나 속도가 작은 경우에는 오히려 더 큰 바이어스 오차를 유발할 수 있다.

먼저 Pulse-count 측정방법에서 발생하는 바이어스 오차는 식 (5)와 같이 근사화 될 수 있다.

$$B_{M-Method} = \frac{\alpha \cdot T_m}{2} \quad (5)$$

여기서 α 는 각각속도이며 단위는 rpm/sec이다. 그러므로 각각속도가 클수록, 측정주기가 길수록 바

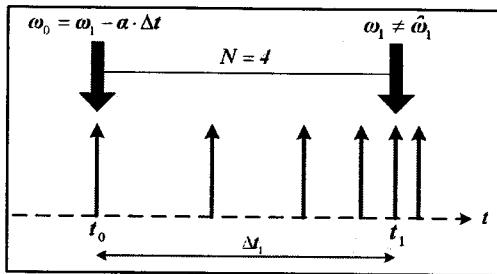


그림 7. 등가속 회전 시 Elapsed-time 측정방법에서 발생하는 바이어스 오차.

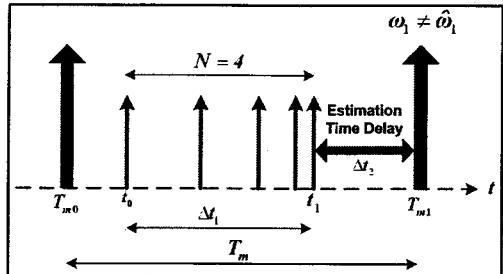


그림 8. 등가속 회전 시 Buffer에 저장된 값을 읽어오는 시간차에 의해 발생하는 Elapsed-time 측정방법의 바이어스 오차.

이어스 오차는 점점 커지나 가속도가 일정하다면 현재 속도와는 무관하게 일정한 바이어스 오차를 가진다.

Elapsed-time 측정방법에서의 바이어스 오차 해석은 Pulse-count 측정방법에 비해 복잡하다. Elapsed-time 측정방법에서 가속 또는 감속 시에 바이어스 오차가 발생하는 원인은 두 가지가 있으며 그 중 첫 번째 이유는 그림 7에 나타나 있다.

N 개의 반작용휠 펄스가 발생하는 동안의 시간을 측정하여 속도를 계산하는데 그 사이에도 반작용휠의 속도는 계속 증가 또는 감소하므로 측정 시간에서의 실제 속도와 계산된 속도 사이에 바이어스 오차가 존재한다. 즉, Elapsed-time 측정방법은 N 개의 반작용휠 펄스가 발생하는 동안의 평균 속도라고 말할 수 있기 때문에 Pulse-count 측정방법에서 발생하는 원인과 유사한 이유로 바이어스 오차가 존재한다. N 개의 펄스가 발생하는데 걸리는 시간을 Δt_1 , N 개의 펄스 중 처음 펄스가 발생할 때의 속도를 ω_0 , 마지막 N 번째 펄스가 발생할 때의 속도를 ω_1 이라 하면 식 (6)이 성립한다.

$$\omega_1 = \omega_0 + \alpha \Delta t_1, \quad \Delta\theta = \left(\omega_0 \frac{2\pi}{60} \right) \Delta t_1 + \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{2\pi}{60} \right) \Delta t_1^2 = \frac{2\pi N}{P} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 Δt_1 을 계산한 후 이를 이용하여 Elapsed-time 측정방법에서 발생하는 첫 번째 바이어스 오차 $\Delta\omega_A$ 를 유도하면 식 (7)과 같이 계산된다(이혜진 등 2007).

$$\begin{aligned} \Delta\omega_A &= \omega_1 - \hat{\omega}_1 = \omega_1 - \frac{60N}{P} \frac{f}{m_2} \\ &= \omega_1 - \frac{60N}{P} \frac{1}{\Delta t_1} \\ &= \frac{\omega_1}{2} - \sqrt{\frac{\omega_1^2}{4} - \frac{30N\alpha}{P}} \quad (\text{rpm}) \end{aligned} \quad (7)$$

Elapsed-time 측정방법은 매 N 번마다 회전속도를 제공하므로 Pulse-count 측정방법과는 달리 고속일 경우는 펄스가 많이 발생하여 자주 속도 정보를 제공하고 저속일 때는 천천히 속도를 제공하게 된다. 일반적으로 인공위성의 On-board 컴퓨터는 모든 센서 및 구동기 데이터를 주고받는 샘플링 주파수를 고정시켜 사용하는데 Pulse-count 측정방법은 훨의 속도를 제공받는 주기 T_m 을 On-board 컴퓨터가 사용하는 샘플링 주파수와 동기 시켜 사용할 수 있지만 Elapsed-time 측정방법은 속도를 제공받는 주기가 일정하지 않고 속도에 따라 달라지므로 On-board 컴퓨터의 샘플링 주파수와 동기

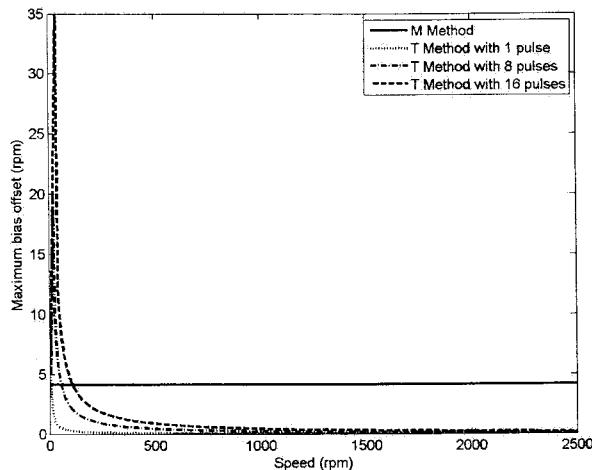


그림 9. 등가속 회전 시 회전속도의 변화에 따른 Elapsed-time 측정방법과 Pulse-count 측정방법의 바이어스 오차.

를 맞출 수 없게 된다. 그러므로 베퍼를 이용하여 측정된 속도를 저장하고 있다가 On-board 컴퓨터의 샘플링 주파수 동기신호에 맞춰 훨의 속도를 컴퓨터에 제공해야만 한다. 이러한 이유 때문에 Elapsed-time 측정방법은 추가적인 바이어스 오차를 가지게 된다. 이러한 오차는 측정된 속도가 베퍼에 저장되자마자 컴퓨터로 전달되면 존재하지 않게 된다. 이는 그림 8에 나타나 있다.

새로 계산된 속도가 베퍼에 저장되고 이를 컴퓨터가 읽어갈 때까지 걸리는 시간을 Δt_2 라 할 때 추가로 발생할 수 있는 바이어스를 $\Delta\omega_B$ 의 최대값은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\omega_B = \alpha\Delta t_2 \leq \alpha\Delta t_1 \quad (8)$$

이러한 두 가지 요인으로 발생하는 바이어스 오차 $B_{T-Method} = \Delta\omega_A + \Delta\omega_B$ 로 표현될 수 있으며 이는 반작용휠의 회전속도가 작을수록 시간지연이 길어지기 때문에 커지고 회전속도가 클수록 시간지연이 줄어들기 때문에 점점 작아지게 된다. $N = 1$ 인 경우의 Elapsed-time 측정방법의 바이어스 오차는 아무리 커도 Pulse-count 측정방법의 바이어스 오차보다 커지지 않으나 $N \geq 2$ 가 되면 저속에서의 바이어스 오차는 Pulse-count 측정방법보다도 커진다. 등가속 시의 Pulse-count 측정방법과 Elapsed-time 측정방법의 최대 발생 가능 바이어스 오차를 그림 9에 나타내었다. 이 때, 반작용휠의 각가속도는 33rpm/sec으로 일정하다고 가정하였다.

종합적으로, 각각의 속도측정방법에서 발생할 수 있는 오차는 분해능 오차와 바이어스 오차의 합($R + B$)이므로 등가속 회전을 할 때 임의의 속도에서 발생하는 최대 오차를 그리면 그림 10과 같다. Pulse-count 측정방법은 회전속도에 상관없이 최대발생오차가 동일하나 Elapsed-time 측정방법은 회전속도에 따라 최대발생오차가 달라지며 저속에서는 시간지연에 의한 바이어스 오차가, 고속에서는 고속 클럭 주파수의 영향을 받는 분해능 저하에 의한 오차가 주를 이루게 된다. Elapsed-time 측정방법의 성능을 향상시키기 위해서는 클럭 주파수를 가능한 높게, $N = 1$ 로 설정하면 된다.

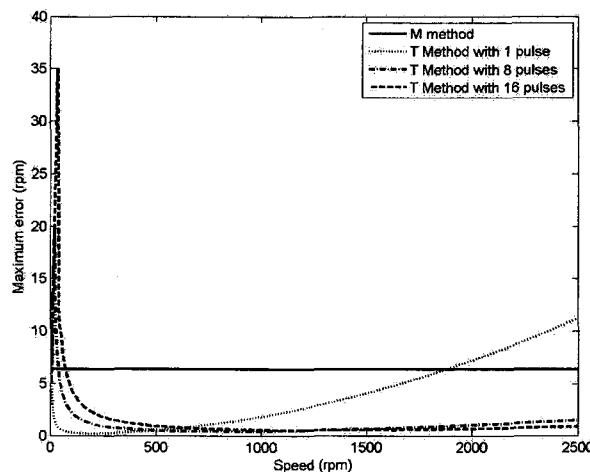


그림 10. 등가속 회전 시 회전속도의 변화에 따른 Elapsed-time 측정방법과 Pulse-count 측정방법의 분해능과 바이어스 오차의 합($f=1\text{MHz}$).

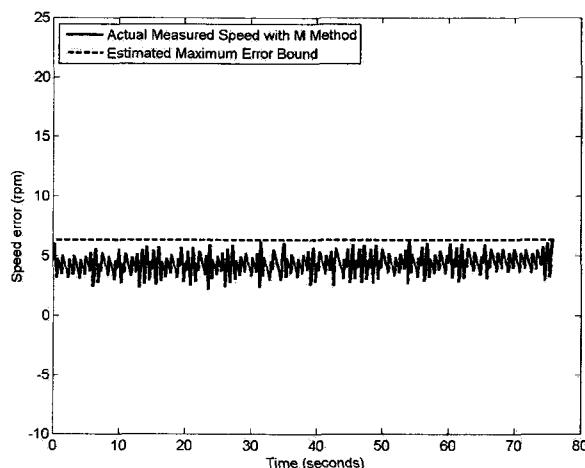


그림 11. 모의실험결과: 등가속 회전 시 실제 발생하는 Pulse-count 측정방법의 오차(실선)와 2.3절에서 예측된 최대오차(점선)의 비교.

2.4 모의 실험을 통한 검증

각가속도는 33rpm/sec으로 일정하고 반작용휠은 정지한 상태에서 2500rpm까지 증가한다고 가정했을 때 Pulse-count 측정방법과 Elapsed-time 측정방법에 의해 측정되는 속도와 실제 속도와의 오차를 모의실험을 통하여 계산해 보았고 2.2~2.3절에서 해석된 최대 오차 범위와 비교해 보았다. 이

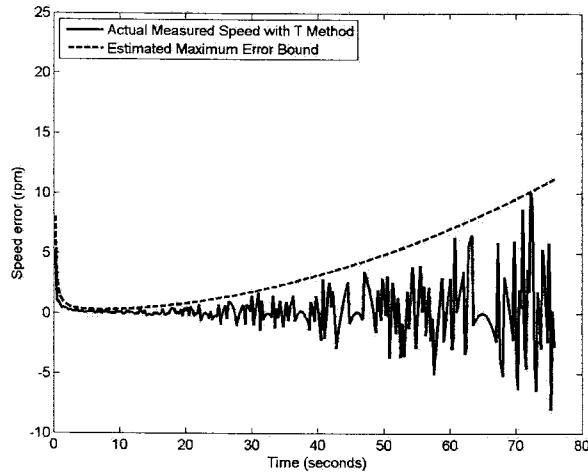


그림 12. 모의실험결과: $N=1$ 일 때 등가속 회전 시 실제 발생하는 Elapsed-time 측정방법의 오차(실선)와 2.3절에서 예측된 최대오차(점선)의 비교.

때, 속도측정변수인 $P = 108$, $T_c = 0.25$ 초, $f = 1\text{MHz}$, $N = 1,8$ 로 각각 가정하였다.

그림 11에서 실선은 Pulse-count 측정방법에서 실제로 측정되는 반작용휠의 속도이고 점선은 2.2~2.3절에서 계산된 최대 오차이며 여기에는 분해능 오차와 바이어스 오차가 포함되어 있다. 예측된 최대 오차 범위 내에서 실제 오차가 존재함을 확인할 수 있다. Pulse-count 측정방법은 가속도가 일정할 경우, 회전 속도에 상관없이 일정한 오차가 발생함을 확인하였으며 만약 가속도가 더 증가한다면 분해능 오차는 일정하나 바이어스 오차가 커져 전체 오차는 현재보다 커지게 된다.

그림 12에서 실선은 Elapsed-time 측정방법을 이용하여 1개의 펄스 사이의 시간간격을 측정했을 때 실제 발생하는 오차이다. 점선은 이 경우에 발생 가능한 최대 오차를 예측한 결과이다. 역시 실제 발생오차가 최대 오차범위 안에 존재함을 확인할 수 있으며, 1개의 펄스 사이의 시간간격을 측정하므로 저속에서 발생하는 바이어스 오차는 Pulse-count 측정방법의 오차를 넘지 않으나 고속에서는 측정하고자 하는 시간간격이 점점 짧아져 분해능의 저하가 일어나 측정 오차가 커짐을 확인할 수 있다. 이 때 고주파 클럭을 1MHz 보다 더 증가시키면 그림 5와 같이 고속에서의 오차가 점점 줄어들게 되며 이 모의실험의 경우 대략 5MHz 이상의 클럭을 사용하면 2500rpm 미만의 모든 회전 속도에서 Pulse-count 측정방법보다 항상 작은오차를 가진다.

마지막으로 그림 13은 Elapsed-time 측정방법을 이용하여 8개의 펄스 사이의 시간간격을 측정했을 때 실제 발생하는 오차와 최대 오차를 예측한 결과이다. 8개의 펄스 사이의 시간간격을 측정하므로 고속에서의 분해능 오차가 1개의 펄스 사이의 시간간격을 측정했을 때 보다 향상됨을 확인할 수 있으나 오히려 저속에서는 바이어스 오차가 커졌음을 확인할 수 있다. 즉, 저속에서는 8개의 펄스가 다 들어오기 전까지는 속도를 계산할 수 없으므로 그만큼의 긴 시간 지연이 발생하여 오차가 상당히 커지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 고속에서는 시간간격 측정에 사용되는 펄스의 개수를 키우고 저속에서는 줄이는 방법, 고속에서는 Elapsed-time 측정방법을, 저속에서는 Pulse-count 측

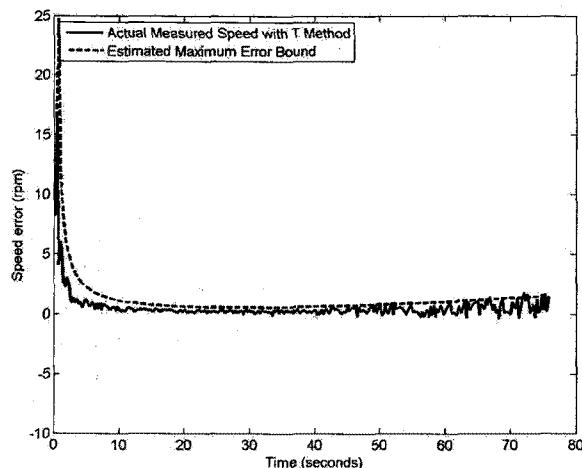


그림 13. 모의실험 결과: $N=8$ 일 때 등가속 회전 시 실제 발생하는 Elapsed-time 측정방법의 오차(실선)와 2.3절에서 예측된 최대오차(점선)의 비교.

정방법을 선택적으로 사용하는 것을 고려 할 수 있다(Ohmae & Matsuda 1982).

3. 결 론

이 연구에서는 반작용휠의 대표적인 속도측정방법을 소개하고 각 방법이 갖는 분해능 및 오차를 분석하여 장단점을 비교하였다. 특히 일반적인 고속 모터와는 달리 양방향을 포함한 모든 속도 범위에서 운용을 해야 하는 반작용휠에 대해 고속 및 저속에서의 오차 해석을 수행하였으며, 모의실험을 통해 분석 결과의 정확성을 확인하였다. 이를 토대로, 다양한 속도측정 변수에 따른 분해능, 정밀도 및 오차를 미리 예측할 수 있다. 그러나 이러한 예측은 하드웨어적인 문제를 배제한 단순한 소프트웨어적인 측면에서의 분석이므로 하드웨어적인 측면에서의 분석이 함께 이루어져야 한다.

참고문헌

- 이혜진, 오시환, 이선호, 임조령, 서현호, 용기력 2007, 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집 (서울: 한국항공우주학회), p.1758
- Bonert, R. 1989, IEEE Trans. Instrum. Meas., 38, 1104
- Fujita, K. & Sado, K. 1992, IEEE Trans. Ind. Appl., 28, 864
- Kavanagh, R. 2000, IEEE Trans. Ind. Electr., 47, 890
- Ohmae, T. & Matsuda, T. 1982, IEEE Trans. Ind. Electr., 29, 207
- Prokin, M. 1991, IEEE Trans. Instrum. Meas., 40, 606
- Prokin, M. 1994, IEEE Trans. Ind. Electr., 41, 550