



## 타코펄스 불균일성 보정이 포함된 펄스간 시간 측정방법

손준원<sup>1</sup>

### Elapsed-time Method With Tacho Pulse Non-uniformity Correction

Jun-Won Son<sup>1</sup>

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea

#### ABSTRACT

In ideal configuration, elapsed-time method can measure the exact reaction wheel speed. But in real configuration, the speed measurement error exists due to tacho pulse non-uniformity. In this research, we study the method which overcome the non-uniformity effects. First, we introduce the method which spin the wheel at the specific speed and measure the non-uniformity. Then, we propose the real-time measurement error correction method which uses the obtained non-uniformity information. This method calculate the speed candidates from the elapsed-time method's counts and non-uniformity information, and choose the closest speed to the real speed. Through simulation, we show that proposed method measure the exact speed regardless of non-uniformity, and fast wheel speed control is possible.

#### 초 록

펄스간 시간측정방법은 이상적인 조건에서는 정확한 반작용휠 속도를 측정할 수 있지만, 실제로는 타코펄스 불균일성 때문에 측정속도 오차가 존재한다. 본 연구에서는 불균일성을 극복하는 방법을 살펴본다. 우선 휠을 특정한 속도로 회전시켜서 타코펄스 불균일성을 측정하는 방법을 소개한다. 이렇게 획득된 불균일성 정보를 이용하여 실시간으로 측정오차를 보정하는 방법을 제안한다. 해당 방법은 펄스간 시간 측정방법의 카운트와 사전 측정된 불균일 정보로부터 속도 후보군을 계산하고, 이 중에서 실제속도와 가장 가까운 값을 선택한다. 시뮬레이션을 통해서 제안된 방법이 타코펄스 불균일성을 극복하고 정확한 속도를 측정하며 빠른 휠속도 제어도 가능함을 보인다.

**Key Words** : Reaction Wheel Speed Measurement(반작용휠 속도 측정), Elapsed-time Method (펄스간 시간 측정방법), Tacho Pulse Non-uniformity(타코펄스 불균일성)

#### 1. 서 론

반작용휠 회전속도 측정은 휠모터가 특정 지점을 지날 때 생성되는 타코펄스를 이용한다. 이론상으로는 펄스 생성 지점이 일정한 각도로 균일하게 분포되어 있어야 하지만, 기계가공오차 등으로 인해서 생성지점에 미세한 오차가 있다. 따라서 모터가 일정한

속도로 회전해도 타코펄스가 일정한 시간 간격으로 생성되지 않는다.

타코펄스 기반 속도 측정방법 중에서 펄스개수측정방법(M-방식)은 타코펄스 불균일이 존재해도 측정 결과의 변화가 작다. 하지만 분해능이 낮아서 정확한 속도를 측정하기 위해서는 이동평균을 취해야 하는데, 이는 제어속도를 느리게 만든다[1-4].

† Received : January 10, 2022    Revised : March 3, 2022    Accepted : March 8, 2022

<sup>1</sup> Senior Researcher

<sup>1</sup> Corresponding author, E-mail : jwson@kari.re.kr

펄스간 시간 측정방법(T-방식)은 M-방식의 분해능을 극복하기 위해 제안된 방법으로 이론상으로는 매우 정확하게 속도를 측정할 수 있지만 타코펄스 불균일이 존재할 경우에는 측정오차가 커진다[4].

M/T-방식이나 CSDT-방식은 M-방식과 T-방식을 결합한 방법이며 타코펄스 불균일 영향성을 줄이는 연구도 이루어졌다[5,6]. 하지만 현재 국내위성에 탑재되는 위성컴퓨터는 M-방식과 T-방식만을 지원하고 있어서 위성 반작용휠 속도 측정 및 제어에는 사용할 수 없다[7].

본 연구에서는 T-방식을 소프트웨어적으로 보완하여 타코펄스 불균일성을 극복하는 방법을 살펴본다. 우선 반작용휠을 일정한 속도로 회전시키며 펄스 불균일 정보를 측정하는 방법을 알아본다. 그리고 측정된 불균일 정보를 토대로 T-방식을 보완하는 방법을 제안한다. T-방식의 측정값과 사전 측정된 펄스 불균일정보를 이용하여 속도 후보군을 만들고, 이들 중에서 가장 정확한 속도를 선택하는 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해서 제안된 방법으로 정확한 속도 측정 및 신속한 제어가 가능함을 보인다.

본 연구에서 제안한 방법은 다음과 같이 적용할 수 있다. 국내 위성의 탑재컴퓨터가 M-방식과 T-방식을 모두 지원하므로 위성이 모두 조립된 상태에서 M-방식과 T-방식을 이용한 속도측정이 모두 가능하다. 우선 지상시험에서 타코펄스 불균일성에 덜 민감한 M-방식에 이동평균을 취하여 특정한 회전속도로 제어를 하면서 펄스 불균일정보를 측정하고, 이를 비행소프트웨어에 반영한다. 본 측정은 1회만 수행하면 된다. 위성 발사 후 궤도상에서는 T-방식으로 속도를 측정하고, 비행소프트웨어에 반영된 불균일정보로 타코 불균일성을 보정하여 정확한 속도 측정 및 신속한 제어를 수행한다.

본 논문에서는 M-방식과 T-방식에 대해서는 필요한 부분만 간략하게 설명한다. 해당 방식에 대한 상세한 내용은 기존 연구결과[1-4]를 참고하면 된다.

본 논문에서 사용하는 기호 및 예제에서 사용하는 값은 Table 1을 따른다.

## II. 본 론

### 2.1 불균일로 인한 T-방식 영향성

Figure 1과 같이 타코펄스 생성 구간을  $\phi_i$ 로 구분하였다. 이상적인 경우  $\phi_i$ 는 모두  $360/P$ 의 크기를 가진다. 하지만 불균일로 인해 펄스 생성지점이 최대  $\theta_e$ 만큼 변한다면  $\phi_i$ 는  $\pm 2\theta_e$ 만큼 달라질 수 있다.

$$\phi_{i,ideal} = \frac{360}{P}, \quad i=1, \dots, 360/P \quad (1)$$

$$\frac{360}{P} - 2\theta_e \leq \phi_i \leq \frac{360}{P} + 2\theta_e, \quad i=1, \dots, 360/P \quad (2)$$

Table 1. Symbols of Equation

	Meaning	Value
P	Tacho pulses per revolution	18
$T_s$	Sampling period (sec)	0.1
$f_h$	High frequency for T-method measurement (Hz)	25M
$w_{real}$	Real Speed (RPM)	-
$\phi_i$	Angle between tacho pulse generation points (deg)	
$\phi_m$	Angle between tacho pulse generation points where tcnt is measured (deg)	
$\theta_e$	Max tacho pulse generation point change (deg)	0.3
$K_m$	Wheel Motor gain (RPM/Ts/V)	2.0
$V_{cmd}$	Wheel Motor Voltage Command (V)	$\leq 10$

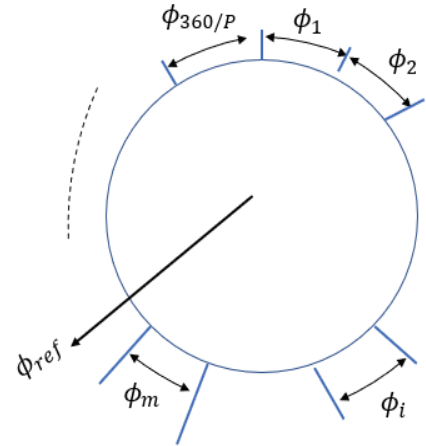


Fig. 1. Tacho pulse generation region

#### ○ 예제 1

Table 1과 같이 P가 18인 경우 이상적인 타코펄스 생성지점은  $20^\circ$  간격으로 분포된다. 하지만 펄스 불균일로 인해서 생성지점이  $\pm 0.3^\circ$ 만큼 이동한다면 두 지점 사이의 간격은  $\pm 0.6^\circ$ 만큼 변할 수 있다. 예를 들어서  $0^\circ$ 에 위치해야 할 타코펄스 생성지점이 가공 오차 때문에  $-0.3^\circ$ 에 위치하고,  $20^\circ$ 에 위치해야 할 생성지점이  $20.3^\circ$ 에,  $40^\circ$ 에 위치할 지점이  $39.7^\circ$ 에 위치한다면  $\phi_1$ 는  $20.6^\circ$ ,  $\phi_2$ 는  $19.4^\circ$ 가 된다.

샘플링 시점에서 휠의 기준점 위치가 Fig. 1에서 표시된 바와 같이  $\phi_{ref}$ 일 경우 T-방식의 측정값(tcnt)은 기준점이 마지막으로 지난 구간인  $\phi_m$ 을 기준으로 생성된다.

$$tcnt = \frac{\phi_m}{w_{real}} \cdot \frac{60}{360} \cdot f_h \quad (3)$$

참고로 휠이 계속 회전하므로  $\phi_m$ 의  $m$ 은 고정된 값이 아니고 시간에 따라서 계속 변하는 값이다.

$\phi_m$ 의 정확한 값을 모르는 상태에서  $\phi_{i,ideal}$ 을 이용하여  $w_T$ 를 계산하면 다음과 같이 부정확한 측정속도를 얻는다.

$$w_{T,incorrect} = \frac{\phi_{i,nominal}}{tcnt} \cdot \frac{60}{360} \cdot f_h = \frac{360/P}{\phi_m} \cdot w_{real} \quad (4)$$

$\phi_m$ 도  $\phi_i$  중에서 하나이므로 식 (2)와 같은 범위 안에 있으며, 이를 이용하여 T-방식 측정값의 오차범위를 계산하면 다음과 같이 나온다.

$$\frac{360/P}{360/P+2\theta_e} w_{real} \leq w_{T,\in correct} \leq \frac{360/P}{360/P-2\theta_e} w_{real} \quad (5)$$

$$\left(1 - \frac{2\theta_e}{360/P+2\theta_e}\right) w_{real} \leq w_{T,\in correct} \leq \left(1 + \frac{2\theta_e}{360/P-2\theta_e}\right) w_{real} \quad (6)$$

위의 오차는 우리가  $\phi_m$ 의 정확한 값을 모르기 때문에 발생한다. 하지만 우리가 모든  $\phi_i$ 의 정확한 값을 알고 있고 tcnt가 측정된  $\phi_m$ 이 여러  $\phi_i$  중에서 어디에 해당하는지를 안다면 정확한 속도를 얻을 수 있다.

$$w_{T,correct} = \frac{\phi_m}{tcnt} \cdot \frac{60}{360} \cdot f_h = \frac{\phi_m}{\phi_m} \cdot w_{real} = w_{real} \quad (7)$$

## ○ 예제 2

실제 회전속도는 1,000 RPM이고, tcnt가 측정된 펄스구간  $\phi_m$ 은 20.6°라고 하자. tcnt는 식 (3)에 따라서 85833이 된다.  $\phi_{i,ideal}$ 인 20°를 이용하여  $w_T$ 를 계산하면 식 (4)에 따라서 970.87 RPM이 나온다. 하지만 정확한  $\phi_m$ 을 사용하면 식 (7)로부터 1,000 RPM이 나온다.

2.2절에서는 M-방식을 이용하여 지상에서 모든  $\phi_i$ 의 정확한 값을 측정하는 방법을 살펴보고, 2.3절에서는 궤도상에서 T-방식을 이용하여 tcnt가 측정된  $\phi_m$ 이  $\phi_i$  중에서 어느 구간에 해당하는지를 찾아서 불균일 정보를 보정하는 방법을 살펴본다.

## 2.2 불균일 정보 측정방법

측정된 tcnt로부터  $\phi_i$  정보를 구하기 위해서는 회전속도  $w_{real}$ 을 정확하게 알아야 한다. 이는 M-방식과 이동평균을 이용하면 가능하다.

기존 연구[8]에 따르면 M-방식으로 측정된 속도에 이동평균을 취하면 타코 펄스 불균일 효과를 제거하

고 정확한 속도를 측정할 수 있다. 다만 이동평균을 취하는 샘플의 개수가 많아야 하므로 제어속도가 느려지는 문제가 있다. 하지만 여기서 우리의 목적은 빠른 휠속도 제어가 아니라 불균일정보를 측정하기 위한 정확한 속도 제어이므로 문제가 되지 않는다. 또한 본 측정은 항상 수행되는 것이 아니라 위성 발사전 지상시험에서 1회만 수행되면 된다.

tcnt에서  $\phi_i$  정보를 얻기 위한 두 번째 조건은 모든  $\phi_i$ 가 순차적으로 나타나는 것이다. 이는 회전속도를 특정한 값으로 설정하면 가능하다.

매 샘플링 시간동안 휠이 회전하는 각도는 아래와 같다[8].

$$\begin{aligned} w_{real} \cdot \frac{360}{60} \cdot T_s \\ = N_1 \cdot 360 + N_2 \frac{360}{P} + \phi_{rem}, 0 \leq \phi_{rem} < \frac{360}{P} \end{aligned} \quad (8)$$

$N_1$ ,  $N_2$ 와  $\phi_{rem}$ 을 아래와 같이 설정하면 매 샘플링 시간동안  $\phi_{ref}$ 는  $360/P/N_{repeat}$ 만큼 이동한다.

$$\begin{aligned} N_1 &= 0, 1, 2, \dots \\ N_2 &= 0 \\ \phi_{rem} &= 360/P/N_{repeat} \end{aligned} \quad (9)$$

따라서  $\phi_i$  구간에 대한 tcnt가  $N_{repeat}$  번만큼 측정되고, 이후에는  $\phi_{i+1}$  구간에 대한 tcnt가  $N_{repeat}$  번 만큼 측정되며,  $P \cdot N_{avg}$  번 후에는 모든  $\phi_i$  구간에 대한 정보가 측정되고, 이후로는 동일한 tcnt 측정결과가 반복된다. 측정된 tcnt값을 토대로 다음과 같이  $\phi_i$ 값을 계산할 수 있다.

$$\phi_{i,measured} = \frac{w_{real} \cdot tcnt_{measured}}{60/360 \cdot f_h} \quad (10)$$

## ○ 예제 3

휠의 회전속도를 603.333 RPM으로 회전시키면서 tcnt를 측정하는 경우를 살펴본다.

기존 연구결과[8]에 따르면 M-방식 측정결과에 180개의 이동평균을 취하면 정확한 속도 603.333 RPM을 얻을 수 있다. 역으로 이야기하면 M-방식에 180개의 이동평균을 취한 측정값으로 속도 제어를 하면 휠의 회전속도를 603.333 RPM으로 만들 수 있다.

휠의 회전속도가 603.333RPM이면 식 (8)과 (9)에 따라서  $N_1 = 1$ ,  $N_2 = 0$ ,  $N_{repeat} = 10$ 이 되고, 휠의 기준점  $\phi_{ref}$ 는 매 샘플링 구간마다 2°씩 움직인다.  $\phi_{ref}$ 가 2°씩 이동하므로  $\phi_i$ 에 대한 tcnt 값이 1초 동안 총 10번 반복되고, 그 다음 1초 동안에는  $\phi_{i+1}$ 에 대한 tcnt값이 1초 동안 반복된다. 18초가 지나면 180번의 측정이 이루어지면서 모든  $\phi_i$ 의 정보가 측정된다. 이후로는 동일한 측정결과가 반복된다.

## 2.3 불균일 정보 보정방법

앞 절의 방법을 통해서 모든  $\phi_i$  값을 알 수 있지만 회전하고 있는 휠에서 측정된 tcnt가  $\phi_1 \sim \phi_{360/P}$  중에서는 어느 구간에서 측정된 것인지 모른다. 따라서 아래와 같이 360/P개의 속도 후보군  $w_{est,i}$  만을 가지고 있고, 이들 중에서 정확한 속도인  $w_{est,m}$  을 선택해야 한다.

$$w_{est,i} = \frac{\phi_i}{tcnt} \cdot \frac{60}{360} \cdot f_h, \quad i=1, \dots, 360/P \quad (11)$$

$$w_{est,i} = \frac{\phi_i}{\phi_m} \cdot w_{real}, \quad i=1, \dots, 360/P \quad (12)$$

본 연구에서는 간략한 반작용휠 모델을 이용하여  $w_{est,m}$  을 선택하는 방법을 제안한다.

### 2.3.1 반작용휠 모델

반작용휠은 모터에 인가되는 전압 명령에 비례하여 회전속도의 가감속이 이루어진다. n-1번째 샘플링 구간동안 인가된 전압 명령이  $V_{cmd}(n-1)$  일 때  $T_s$  동안 휠 속도 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta w_{real}(n) &= w_{real}(n) - w_{real}(n-1) \\ &= K_{m,real} \cdot V_{cmd}(n-1) \cdot T_s \end{aligned} \quad (13)$$

예를 들어  $K_{m,real}$  이  $2RPM/T_s/V$  이고 휠의 전압 명령으로 10V를 인가하면  $T_s$  (0.1초) 동안 2RPM의 변화가 발생한다.

모터의 이득값인  $K_{m,real}$  은 휠의 회전속도나 가동시간에 따라서 변하므로 정확한 값 대신 대표값  $K_m$  만을 알 수 있다. 이를 이용해서 다음과 같이 속도 변화량 모델을 표현한다.

$$\Delta w_{model}(n) = K_m \cdot V_{cmd}(n-1) \cdot T_s \quad (14)$$

### 2.3.2 속도 후보군 선정 방법

본 연구에서 제안하는 속도 후보군 선정방법은 다음과 같다.

반작용휠 모델을 이용하여 매 샘플링 구간마다 속도 모델  $w_{ref}$  를 업데이트한다. 그리고 tcnt와 사전 측정된 불균일정보로 구한 속도후보군  $w_{est,i}$  중에서  $w_{ref}$  와 가장 가까운 값을 실제 속도로 간주한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$w_{ref}(n) = w_{sel}(n-1) + \Delta w_{model}(n) \quad (15)$$

$$w_{sel}(n) = w_{est,i}(n) \text{ with } \min(|w_{ref}(n) - w_{est,i}(n)|) \quad (16)$$

#### ○ 예제 4

$w_{real}$  이 998 RPM에서 1,000 RPM으로 증가하고

$w_{sel}(n-1)$  과  $\Delta w_{model}(n)$  은 실제 값인  $w_{real}(n-1)$  인 998 RPM 및  $\Delta w_{real}(n)$  인 2 RPM과 동일하다고 하자. 이 경우  $w_{ref}(n)$  은 식 (15)에 의해 1,000 RPM이 된다.

$\phi_i$  가  $20.6^\circ$  와  $19.4^\circ$  로만 이루어져 있고 tcnt가 측정된  $\phi_m$  이  $20.6^\circ$  라면 tcnt로 85833이 얻어진다. 측정된 tcnt와 2.2절의 방법으로 사전에 확보된 불균일 정보를 결합하여 계산한  $w_{est,i}$  는 식 (11)에 따라 1,000 RPM과 942 RPM 두 가지 값이 존재한다.  $w_{sel}(n)$  은 식 (16)에 따라서  $w_{ref}(n)$  과 가까운 1,000 RPM이 선정된다.

위의 예제는 이상적인 경우이며, 실제 환경에서는  $w_{sel}(n-1)$  및  $\Delta w_{model}(n)$  이 실제값과 달라져서  $w_{ref}(n)$  도  $w_{real}(n)$  과 다를 수 있다. 이 경우 식 (16)에서 선택되는  $w_{sel}$  이 실제 tcnt가 측정되는 지점의 값, 즉 정확한 속도인  $w_{est,m}$  과 일치한다는 보장을 할 수 없다.

하지만 아래처럼 식 (17)~(20)의 조건이 충족되는 경우에는  $w_{ref}(n)$  이  $w_{real}(n)$  과 근접하게 되면서 정확한 속도인  $w_{est,m}$  이 선택된다.

- case 1)  $w_{real}(n) \geq w_{ref}(n)$

Figure 2와 같이  $w_{real}(n) \geq w_{ref}(n)$  인 경우는 식 (17) 또는 식 (18)과 같은 조건이 충족될 때  $w_{est,m}$  이 선택된다. 여기서  $\phi_{i,s}$  는  $\phi_i/\phi_m < 1$  을 만족하는  $\phi_i$  를 의미한다.

$$\frac{\phi_i}{\phi_m} \geq 1, \text{ for all } i \quad (17)$$

$$w_{real} - w_{ref} \leq \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\max(\phi_{i,s})}{\phi_m} \right) w_{real} \quad (18)$$

식 (17)과 같은 조건에서는 tcnt가 측정된 구간인  $\phi_m$  의 후보군 속도  $w_{est,m}$  이 다른 구간의 후보군 속도보다 작고  $w_{ref}$  와 가장 가까워진다.

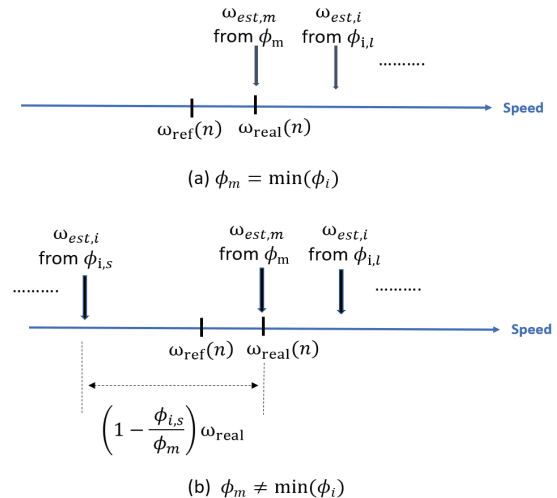


Fig. 2.  $w_{est,m}$  selection ( $w_{real}(n) \geq w_{ref}(n)$ )

식 (18)과 같은 조건에서는  $w_{ref}$ 보다 크면서 가장 가까운 값은  $w_{est,m}$ 이 되고,  $w_{ref}$ 보다 작으면서 가장 가까운 값은  $\phi_{i,s}$ 에서 얻어진  $w_{est,i}$ 가 된다. 그리고  $w_{est,m}$ 과  $w_{ref}$  사이의 거리가  $\phi_{i,s}$ 에서 얻어진  $w_{est,i}$ 와의 거리보다 작으므로  $w_{est,m}$ 이 선택된다.

● case 2)  $w_{real}(n) < w_{ref}(n)$

Figure 3과 같이  $w_{real}(n) < w_{ref}(n)$ 인 경우는 식 (19) 또는 식 (20)과 같은 조건이 충족될 때  $w_{est,m}$ 이 선택된다. 여기서  $\phi_{i,l}$ 은  $\phi_i/\phi_m > 1$ 을 만족하는  $\phi_i$ 를 의미한다.

$$\frac{\phi_i}{\phi_m} \leq 1, \text{ for all } i \quad (19)$$

$$w_{ref} - w_{real} \leq \frac{1}{2} \left( \frac{\min(\phi_{i,l})}{\phi_m} - 1 \right) w_{real} \quad (20)$$

식 (17)~(20)의 조건이 충족되지 않는 경우에는  $w_{sel} \neq w_{est,m}$ 이 되어서 아래와 같은 속도 오차가 발생한다.

$$\begin{aligned} w_{sel, err} &= w_{real} - w_{sel} = w_{est,m} - w_{est,i} \\ &= \left( 1 - \frac{\phi_i}{\phi_m} \right) \cdot w_{real} \end{aligned} \quad (21)$$

하지만 시간이 지나면 이들 오차도 결국 보정이 된다. 2.1절에서도 언급하였듯이  $\phi_m$ 의 m은 고정된 값이 아니다. 따라서 휠이 회전하면서 식 (17)~(20)을 만족하는  $\phi_m$ 이 나타나며,  $w_{real}$ 과  $w_{ref}$ 의 차이로 인한 오차는 보정된다. 다음 예제에서 이를 살펴본다.

○ 예제 5

휠을 600 RPM으로 회전시키려고 하는데, 실제 휠 속도( $w_{real}$ )가 637 RPM인 경우를 살펴본다. Fig. 1의  $\phi_{ref}(n-1)$ 은  $0^\circ$ 이며,  $\phi_i$ 는 다음과 같다고 가정한다.

$$\phi_i = \begin{cases} 20.6^\circ, & i = 1, 3, 5, \dots \\ 19.4^\circ, & i = 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (22)$$

•  $w_{sel}(n-1)$

오차 때문에  $w_{sel}(n-1)$ 은 600 RPM으로 인식되었다고 가정하자.  $w_{sel}(n-1)$ 이 휠 목표속도와 동일하므로 휠 속도 제어기는 동작하지 않고,  $V_{cmd}$ 도 인가되지 않는다. 따라서 기존 휠 속도 637 RPM이 유지된다.

•  $w_{sel}(n)$

휠속도가 637 RPM일 경우  $T_s(0.1\text{초})$ 동안  $382.2^\circ$ 를 회전하므로  $\phi_{ref}(n)$ 은  $22.2^\circ$ ,  $\phi_m = \phi_1 = 20.6^\circ$ 가 된다. 이때의  $tcnt$ 와  $w_{est,m}$ ,  $w_{est,i}$ ,  $w_{ref}$ 는 아래와 같다.  $w_{sel}(n)$ 은  $w_{ref}(n)$ 과 가장 가까운 값을 선택하므로 600 RPM을 선택한다.

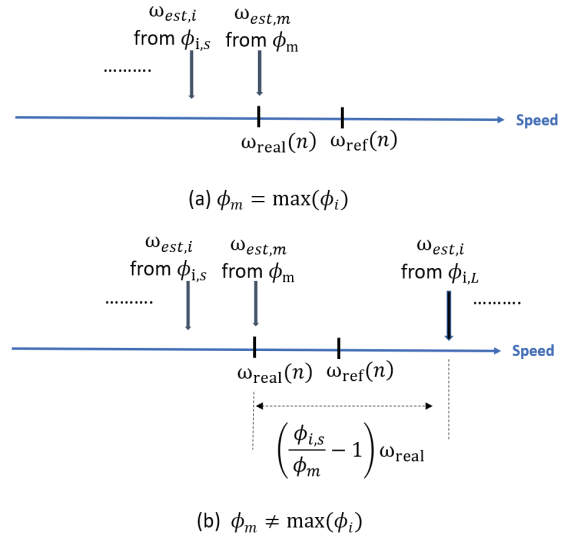


Fig. 3.  $w_{est,m}$  selection ( $w_{real}(n) < w_{ref}(n)$ )

$$w_{real}(n) = 637$$

$$w_{ref}(n) = w_{sel}(n-1) = 600$$

$$tcnt(n) = \frac{20.6}{637} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 1.34746e5$$

$$w_{est,m}(n) = \frac{20.6}{1.34746e5} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 637 \quad (23)$$

$$w_{est,i}(n) = \frac{19.4}{1.34746e5} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 600$$

$$w_{sel}(n) = 600$$

$w_{sel}(n)$ 이 600 RPM이므로 여전히 휠속도제어기는 동작하지 않고, 휠 속도 637 RPM이 유지된다.

•  $w_{sel}(n+1)$

$\phi_{ref}(n+1)$ 이  $44.4^\circ$ ,  $\phi_m = \phi_2 = 19.4^\circ$ 가 되며 관련 값들은 아래와 같다.  $w_{ref}$ 와 가장 가까운 값이 637이므로  $w_{sel}(n+1)$ 은 637 RPM이 되어 측정 오차가 제거된다. 이는  $\phi_i/\phi_m$ 가 19.4/20.6에서 20.6/19.4로 변경되면서 식 (17)의 조건을 충족시켰기 때문이다.

$$w_{real}(n+1) = 637$$

$$w_{ref}(n+1) = w_{sel}(n) = 600$$

$$tcnt(n+1) = \frac{19.4}{637} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 1.26896e5$$

$$w_{est,m}(n+1) = \frac{19.4}{1.26896e5} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 637 \quad (24)$$

$$w_{est,i}(n+1) = \frac{20.6}{1.26896e5} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 676$$

$$w_{sel}(n+1) = 637$$

휠 속도 제어기는  $w_{sel}(n)$ 인 600 RPM을 기반으로 하므로  $V_{cmd} < 0$ 가 인가되어 휠 속도가 감소하기 시작한다.

Table 2. Speed Selection Example

	$\phi_{ref}$	$m$	$w_{real}$	$w_{ref}$	$w_{est,m}$	$w_{est,i}$	$w_{sel}$
n-1	0	-	637	-	-	-	-
n	22.2	1	637	600	637	600	600
n+1	44.4	2	637	600	637	676	637
n+2	66.6	3	634.8	635	634.8	597.8	634.8

- $w_{sel}(n+2)$   
 $\phi_{ref}(n+2)$ 이  $66.6^\circ$  근처가 되며,  $\phi_m = \phi_3 = 20.6^\circ$ 가 된다.  $\Delta w_{model}$ 과  $\Delta w_{real}$ 의 차이 때문에  $w_{real}$ 과  $w_{ref}$ 가 0.2 RPM 차이가 날 경우의 tcnt는 아래 식과 같다.  $w_{ref}(n+2)$ 가  $w_{real}$ 과 크게 차이가 나지 않으므로  $w_{sel}$ 은 실제 속도를 정확하게 선택한다.

$$\begin{aligned}
 w_{real}(n+2) &= 634.8 \\
 w_{ref}(n+2) &= w_{sel}(n+1) + \Delta w_{model}(n+2) = 635 \\
 tcnt(n+2) &= \frac{20.6}{634.8} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 1.35213e5 \\
 w_{est,m}(n+2) &= \frac{20.6}{1.35213e5} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 634.8 \\
 w_{est,i}(n+2) &= \frac{19.4}{1.35213e5} \cdot \frac{60}{360} \cdot 25e6 = 597.8 \\
 w_{sel}(n+2) &= 634.8
 \end{aligned} \quad (25)$$

Table 2에는 매 샘플링 구간별 실제속도 변화, 측정값 변화 및 추정값 변화를 정리하였다.

## 2.4 시뮬레이션

타코펄스 생성지점이 아래와 같이 불균일한 경우에 대해서 시뮬레이션해보았다.

$$\phi_i = \begin{cases} 20.30, 19.40, 20.60, 19.70, 20.20, \\ 19.80, 20.25, 19.75, 20.30, 19.70, \\ 19.90, 20.10, 19.85, 20.15, 19.80, \\ 20.20, 19.75, 20.25 \end{cases} \quad (26)$$

휠 모델은 실제 반작용휠의 특성을 고려한 정밀모델을 사용하였으며, 휠속도 제어기는 PI 제어기를 사용하였다.

### 2.4.1 불균일 정보 측정

예제 3에서 살펴본 바와 같이 휠의 회전속도 명령을 603.333 RPM으로 설정하고, M-방식으로 측정값에 180개의 이동평균을 취하여 속도제어의 입력으로 사용하였다. 제어기 대역폭은 이동평균 시간(18초,  $180 \cdot T_s$ )을 고려하여 0.0028 Hz( $1/18/20$ )로 매우 좁게 설정하였다.

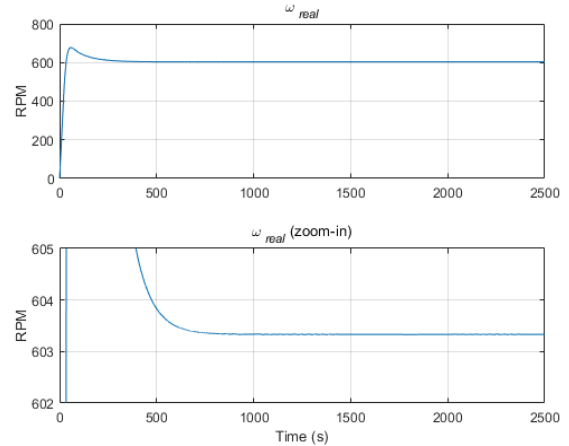


Fig. 4. Wheel Speed (M-method &amp; avg)

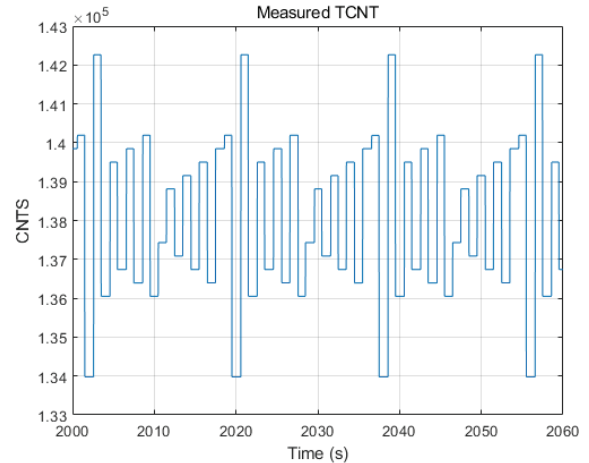


Fig. 5. Measured TCNTs

Figure 4는 실제 휠 속도 제어 결과로, 좁은 제어기 대역폭 때문에 느린 반응속도를 보이지만 정확하게 속도를 제어한다. 이때 측정된 tcnt는 Fig. 5 및 식 (27)과 같다. 속도가 일정하므로 동일한 tcnt가 반복되고 있다.

$$tcnt_{measured} = \begin{cases} 140193, 133977, 142265, 136049, 139502, \\ 136740, 139847, 136394, 140193, 136049, \\ 137430, 138812, 137085, 139157, 136740, \\ 139503, 136395, 139848 \end{cases} \quad (27)$$

측정된 tcnt와 실제 휠 속도 603.333 RPM, 식 (10)을 이용하여  $\phi_{i,measured}$ 를 계산해보면  $\phi_i$ 와 0.0001° 수준의 오차만을 가지는 값이 나온다.

### 2.4.2 불균일 정보 보정

사전 측정된  $\phi_i$  정보와 식 (16)의 방법을 이용하여 tcnt에서 정확한 속도 추정값  $w_{sel}$ 을 구하고 이를 속도제어의 입력으로 사용하였다. M-방식과는 달리 정확한 속도를 얻기 위해서 이동평균을 취할 필요가 없으므로 제어기 대역폭은 0.1 Hz로 설정하여 빠른 응답을 유도하였다.

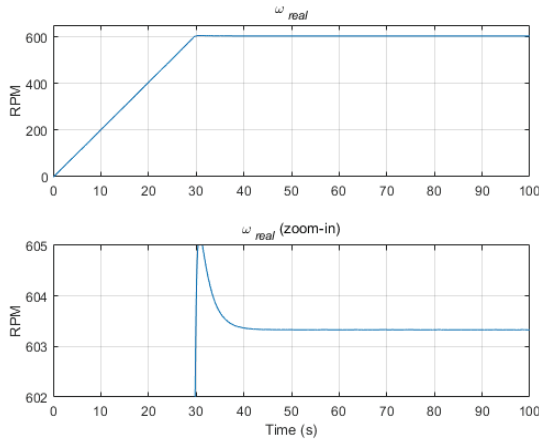


Fig. 6. Wheel Speed (Proposed Method)

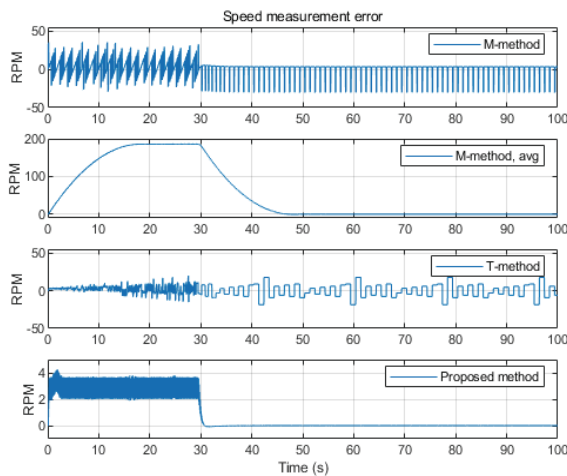


Fig. 7. Speed Measurement Error

Figure 6은 휠속도 제어 결과로, Fig. 4 대비 원하는 속도에 빨리 도달하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 각 방법의 속도 측정 오차를 보여주고 있다. M-방식은 1개의 카운트에 해당하는 오차가 발생하며, 이동평균을 취했을 때는 정상상태 속도는 정확하게 측정하나 속도가 변하는 구간에서는 오차가 크게 발생한다. T-방식은 불균일 정보 때문에 측정 오차가 발생하나, 제안된 방법을 사용하면 오차가 보정됨을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

펄스간 시간측정방법(T-방식)은 타코펄스 불균일성으로 인해서 측정오차가 발생한다. 본 연구에서는 이를 보상하는 방법을 살펴보았다. 우선 일정한 속도로 휠을 회전시켜 불균일 정보를 측정한다. 이를 토대로 실제 휠속도 제어에서는 T-방식으로 측정된 카운트

에 불균일 정보를 반영하여 속도 후보군을 계산하고, 실제 휠속도와 가장 가까운 속도를 선택하는 방식을 제안하였다. 시뮬레이션으로 제안된 방식이 오차를 줄이면서 빠른 속도제어가 가능함을 보였다.

### References

- 1) Petrella, R., Tursini, M., Peretti, L. and Zigliotto, M., "Speed Measurement Algorithms for Low-Resolution Incremental Encoder Equipped Drives: a Comparative Analysis," *2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, September 2007, pp. 780~787.
- 2) Lygouras, J. N., Pachidis, T. P., Tarchanidis, K. N. and Kodogiannis, V. S., "Adaptive High-Performance Velocity Evaluation Based on a High-Resolution Time to Digital Converter," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 9, September 2008, pp. 2035~2043.
- 3) Tsuji, T., Kobayashi, H., Mizuochi, M. and Ohnishi, K., "A Wide-Range Velocity Measurement Method for Motion Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 2, February 2009, pp. 510~519.
- 4) Oh, S.-H. and Yong, K.-L., "Error Analysis of Reaction Wheel Speed Detection Methods due to Non-uniformity of Tacho Pulse Duration," *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 2, 2009, pp. 92~97.
- 5) Kavanagh, R. C., "Improved Digital Tachometer With Reduced Sensitivity to Sensor Nonideality," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 4, August 2000, pp. 890~897.
- 6) Kavanagh, R. C., "Performance Analysis and Compensation of M/T-Type Digital Tachometers," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 50, No. 4, August 2001, pp. 965~970.
- 7) Lee, J.-N., Park, S.-H., Heu, S.-J. and Lee, Y.-K., "The Implementation of the Speed Measurement Board for Reaction Wheel on the LEO Satellite using the T, M-Method," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 40, No. 9, 2012, pp. 827~832.
- 8) Son, J.-W., "Tacho Pulse Non-uniformity Effects on Pulse Count Method," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 4, 2021, pp. 301~309.