



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(4), 301-309(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.4.301

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

타코펄스 불균일성으로 인한 펄스개수측정방법 영향성

손준원¹

Tacho Pulse Non-uniformity Effects on Pulse Count Method

Jun-Won Son¹

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

Pulse count method is the classical reaction wheel speed detection method. In this study, we represent the pulse count method as mathematical equations. Instead of rotation speed, we model the reaction wheel rotation through rotation angle during sampling periods. We verified the effectiveness of the proposed model by comparing the pulse counts variation and averaging method effects from the model and previous research results.

Then, we add tacho pulse non-uniformity to this verified model, and examine the errors of pulse count method. We express the measurement error increasement due to non-uniformity as mathematical equations, and also shows the requirement of moving average numbers to offset the measurement errors.

초 록

펄스개수측정방법은 반작용휠의 속도를 측정하는 고전적인 방법이다. 본 연구에서는 펄스개수측정방법을 수식으로 표현하였다. 반작용휠의 회전을 속도가 아니라 샘플링 시간 동안의 회전각도로 모델링하였다. 제안된 모델의 유효성은 모델에서 얻어진 펄스개수 변화와 이동평균의 효과가 기존 연구결과와 동일함을 확인하는 방법으로 검증하였다.

이렇게 검증된 모델에 타코펄스 불균일성을 추가하고 펄스개수측정방법의 오차에 대해서 살펴보았다. 불균일성으로 인해서 증가하는 측정오차의 크기를 수식으로 표현하였으며, 측정오차를 상쇄하기 위해서 취해야 하는 이동평균의 개수 조건을 제시하였다.

Key Words : Reaction Wheel Speed Measurement(반작용휠 속도 측정), Pulse Count Method (펄스개수 측정법), Tacho Pulse Non-uniformity(타코펄스 불균일성)

1. 서 론

반작용휠은 모터와 플라이휠로 구성되며, 모터가 플라이휠을 일정한 속도로 회전시켜 모멘텀을 생성하거나 특정 가속도로 가감속시키면서 토크를 생성한다. 따라서 반작용휠의 회전속도 측정은 모터 회전속도 측정과 동일하다고 볼 수 있다. 모터가 회전하

면서 타코 펄스가 생성되고 이를 측정하여 실제 회전속도를 추정한다. 기본적인 속도 측정 방법은 펄스개수 측정방법(Pulse Count Method, M-method)이 있으며, 그 외에도 펄스간 시간 측정 방법(Elapsed-time method, T-method), M/T-방법, CSDT 방법 등이 있다[1-9]. 펄스개수 측정방법은 샘플링 시간동안 발생한 타코펄스 개수를 측정하는 고전적인 방법으

† Received : November 6, 2020 Revised : February 19, 2021 Accepted : February 23, 2021

¹ Senior Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : jwson@kari.re.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

로 측정오차가 크다는 단점이 있다[3-5,7,9,10]. 이를 보완하기 위해서 펄스간 시간측정방법, M/T 방법, CSDT 방법 등이 제안되어 모터 제어 등에 사용되고 있지만 위성에서는 HW 구현의 용이성 및 신뢰도 때문에 펄스개수측정방법이 주로 사용되고, 펄스간시간측정방법이 보조적인 방법으로 사용되고 있다[10,11].

펄스개수측정방법에 대한 기존 연구는 펄스 개수로부터 속도를 추정하는 방법을 정의하고, 1개의 펄스를 놓쳤을 경우를 기준으로 측정오차를 설명하는 식으로 펄스 개수 중심으로 서술하고 있다. 하지만 회전속도에 따라서 펄스 개수가 어떻게 측정되는지에 대한 설명은 없다. 예를 들어서, 휠의 회전속도가 일정하면 펄스 개수는 N 또는 N+1로만 나오는데 기존 연구결과는 이에 대한 명확한 설명이 없다.

이에 본 연구에서는 펄스개수측정방법을 모델링하고, 펄스 개수가 N이 나오는 경우와 N+1로 나오는 경우를 수식으로 표현해본다. 휠의 회전을 속도가 아닌 측정시간동안의 회전각도로 표현하고, 마지막 타코 펄스 생성지점과 휠의 회전각도 사이의 정보인 ϕ_{rem} 을 사용하여 펄스개수측정방법을 표현하였다. 그리고 수식으로 확인한 펄스개수측정방법 특성과 기존연구결과의 일치여부로 모델링의 정확성을 확인하였다.

실제 반작용휠은 기계가공오차로 인해서 불균일하게 펄스가 생성되며, 이는 속도 측정에 추가적인 오차로 작용한다. 펄스간 시간측정방법이나 M/T-방법과 관련해서는 불균일로 인한 영향성에 대한 연구가 수행되었으나[1,2,4,10], 펄스개수측정방법에 대해서는 단순히 불균일로 인한 오차의 크기는 미미하다고만 기술되어 있다[10]. 이에 본 연구에서는 펄스개수측정방법 모델에 타코펄스 불균일성을 추가하고, 측정오차를 수식으로 표현해보았다. 아울러, 불균일성이 존재하는 경우에는 그렇지 않은 경우에 비해서 이동평균을 취하는 개수를 증가시켜야만 정확한 속도를 추정할 수 있음을 확인하고 필요한 이동평균의 개수를 보였다.

II. 본 론

2.1 펄스개수측정방법 모델링

본 논문에서 사용하는 기호와 예제에서 사용하는 값을 Table 1에 정리하였다. 상용 위성에 탑재되는 반작용휠은 제조사마다 다르지만 대체로 1회전에 18개에서 30개 정도의 펄스를 발생시키며, 위성탑재컴퓨터의 샘플링 간격은 0.1초 내지 0.125초 정도이다.

휠의 회전 및 타코펄스 발생은 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. 타코펄스 발생지점이 $360/P$ 의 간격으로 분포되어 있으며, 휠이 해당 지점을 지날 때마다 펄스가 발생한다.

휠의 실제 회전속도가 w_{real} (RPM)일 때, T_s 동안 회전한 각도는 아래와 같이 표현할 수 있다.

Table 1. Symbols of Equation

	Meaning	Value
P	Tacho Pulses per revolution	18
T_s	Sampling Period	0.1sec
mcnt	M-method measured counts	-
w_{real}	Real Speed (RPM)	-
w_M	MRPM measurement $\frac{60mcnt}{PT_s}$	
w_{M1CNT}	MRPM corresponding to 1count. $\frac{60}{PT_s}$	33.33
w_{M,PN_1+N_2}	MRPM corresponding to PN_1+N_2 counts. $\frac{60(PN_1+N_2)}{PT_s}$	-

$$w_{real} \cdot \frac{360}{60} \cdot T_s = N_1 \cdot 360 + N_2 \frac{360}{P} + \phi_{rem}, 0 \leq \phi_{rem} < \frac{360}{P} \quad (1)$$

여기서 N_1 은 T_s 동안 360° 회전한 횟수를, N_2 는 남은 360° 미만의 회전동안 통과한 타코펄스 발생구간의 개수를, ϕ_{rem} 은 마지막 타코 펄스 구간 통과 이후와 최종 회전각 사이의 간격을 의미한다.

초기에 휠의 0° 에 위치하는 지점을 ϕ_{ref} 라고 정할 경우, n번째 샘플링 시각의 ϕ_{ref} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_{ref}(n) &= \text{mod}\left(w_{real} \frac{360}{60} T_s \cdot n, 360\right) \\ &= \text{mod}\left(\left(N_2 \frac{360}{P} + \phi_{rem}\right) \cdot n, 360\right) \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 mod는 360으로 나눈 후의 나머지 값을 의미한다.

n-1번째 샘플링 시각에서 마지막으로 지나온 타코 펄스 발생지점 위치를 $360/P \cdot a$ 라고 하고, 이 지점과 $\phi_{ref}(n-1)$ 사이의 각도를 θ_s 라고 하자. 그러면 $\phi_{ref}(n)$ 은 식 (4)와 같은 방식으로 표현할 수 있다.

$$\phi_{ref}(n-1) = \frac{360}{P} a + \theta_s \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_{ref}(n) &= \text{mod}\left(\phi_{ref}(n-1) + w_{real} \cdot \frac{360}{60} \cdot T_s, 360\right) \\ &= \frac{360}{P} (a + N_2) + \theta_s + \phi_{rem} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\theta_f = \theta_s + \phi_{rem} \quad (5)$$

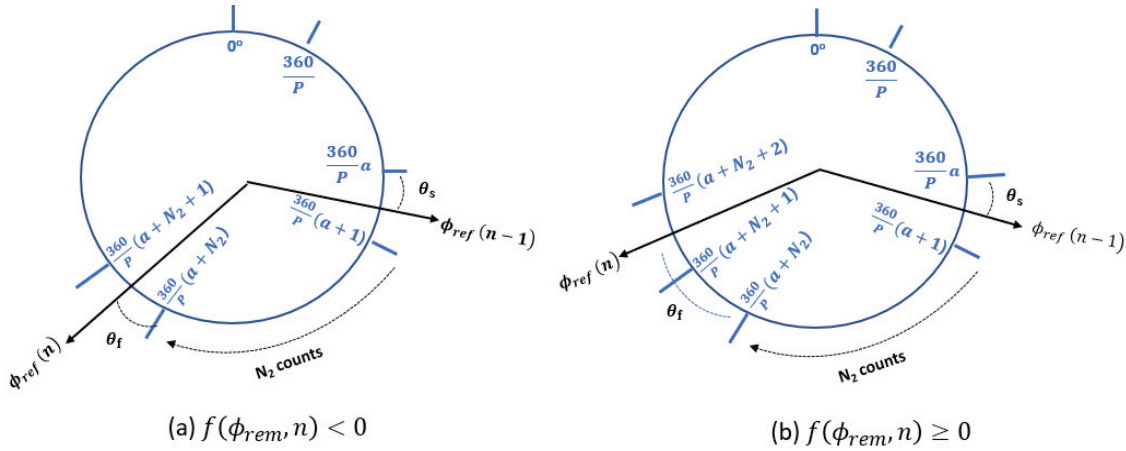


Fig. 1. Rotation and tachopulse generation region

n번째 샘플링 시각에 측정되는 펄스개수(mcnt)는 식 (1)에 따라 기본적으로 $PN_1 + N_2$ 값을 가지며 ϕ_{rem} 에 따라서 $PN_1 + N_2 + 1$ 이 될 수 있다. 즉, 서론에서 언급된 N은 $PN_1 + N_2$ 으로 표현된다.

$$mcnt = \begin{cases} PN_1 + N_2, & \text{if } f(\phi_{rem}, n) < 0 \\ PN_1 + N_2 + 1, & \text{if } f(\phi_{rem}, n) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$f(\phi_{rem}, n) = \text{mod}\left(\phi_{rem} \cdot (n-1), \frac{360}{P}\right) + \phi_{rem} - \frac{360}{P} \quad (7)$$

펄스개수가 $PN_1 + N_2 + 1$ 이 나오는 빈도는 다음과 같다.

$$f_{PN_1 + N_2 + 1} = \frac{\phi_{rem}}{360/P} \quad (8)$$

펄스개수는 정수로만 표현되므로 실제 값과는 오차가 있다. 실수로 표현되는 정확한 값 및 정수로 표현되는 측정값과의 관계는 다음과 같다.

$$mcnt_{exact} = \frac{w_{real}PT_s}{60} = PN_1 + N_2 + \frac{P}{360}\phi_{rem} \quad (9)$$

$$PN_1 + N_2 \leq mcnt_{exact} \leq PN_1 + N_2 + 1 \quad (10)$$

식 (9)에 따르면 펄스개수는 ϕ_{rem} 이 0 또는 $360/P$ 이 되는 속도는 정확하게 측정을 하며, 그 외의 속도에서는 오차가 발생한다. ϕ_{rem} 이 $360/P$ 가 되는 속도는 rpm으로 표현했을 때 아래와 같으며, 이는 기존 연구결과의 펄스개수측정방법 분해능 분석 결과와 일치한다[3-5,10].

$$\phi_{rem} / \left(\frac{360}{60} \cdot T_s\right) = \frac{360}{P} / \left(\frac{360}{60} \cdot T_s\right) = \frac{60}{PT_s} \quad (11)$$

우리는 측정되는 펄스개수가 $PN_1 + N_2$ 에 대응되는 값인지, $PN_1 + N_2 + 1$ 에 대응되는 값인지를 알 수 없다. 따라서 펄스개수로부터 측정한 속도 mrpm이

w_M 일 경우, 실제 속도는 다음과 같은 구간에 위치한다고 추정해야 한다.

$$w_M - w_{w_{M,1CNT}} \leq w_{real} \leq w_M + w_{w_{M,1CNT}} \quad (12)$$

○ 예제 1

휠이 50 RPM으로 회전할 경우, T_s 동안 30° 를 회전한다. 따라서 N_1 은 0, N_2 는 1, ϕ_{rem} 은 10° 이다.

$$w_{real} \cdot \frac{360}{60} \cdot T_s = 30 = 0 \cdot 360 + 1 \cdot \frac{360}{P} + 10 \quad (13)$$

휠의 회전은 Fig. 2와 같이 표현할 수 있으며, n번째 샘플링 시각에서의 펄스개수 및 mrpm은 아래 Table 2와 같다.

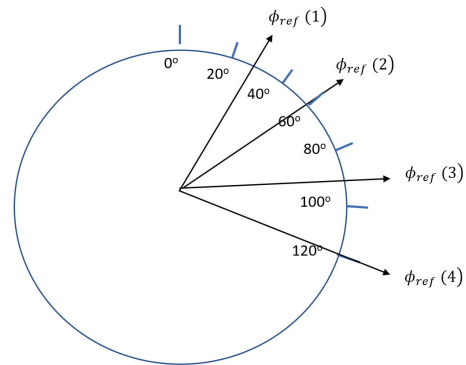


Fig. 2. Rotation at 50 RPM speed

Table 2. mcnt at 50 RPM speed

n	ϕ_{ref}	$f(\phi_{rem}, n)$	mcnt	mrpm
1	30°	0 (0-0)	1	33.333
2	60°	1 (1-0)	2	66.666
3	90°	0 (1-1)	1	33.333
4	120°	1 (2-1)	2	66.666

○ 예제 2

휠의 회전속도가 33.33 RPM에서 66.66 RPM 사이 일 경우, mcnt는 1 또는 2가 나온다. 하지만 mcnt가 1이 나오는 빈도는 Table 3 및 Fig. 3과 같이 차이가 있다.

○ 예제 3

휠의 회전속도가 50 RPM일 경우에 mcnt는 1 또는 2가 나오며, 휠의 회전속도가 83.333RPM일 경우에 mcnt는 2 또는 3이 나온다. 따라서 mcnt가 2가 나왔을 경우, mrpm은 66.66 RPM이며, 실제 속도는 33.33 RPM에서 100 RPM 사이에 있다.

펄스개수측정방법으로 인해 정확하게 측정하지 못하는 구간의 속도는 이동 평균(moving average)를 통해서 보정할 수 있다[3-5]. 예를 들어서 예제 2에서 언급된 50RPM의 경우 펄스개수가 1과 2를 반복하므로, 2개의 펄스개수를 평균한 1.5로부터 50RPM을 정확하게 얻는다. 하지만 35 RPM이나 65 RPM의 경우 정확한 속도 정보를 얻으려면 20개의 펄스개수에 대해서 이동평균을 취해야만 하며, 이는 상당한 시간 지연을 의미한다[3-5].

Table 3. mcnt and speed relation

w_{real}	33.33	35.00	50.00	65.00	66.66
ϕ_{rem}	0°	1°	10°	19°	0° (20°)
freq of mcnt = 2	0	1/20	1/2 (10/20)	19/20	20/20

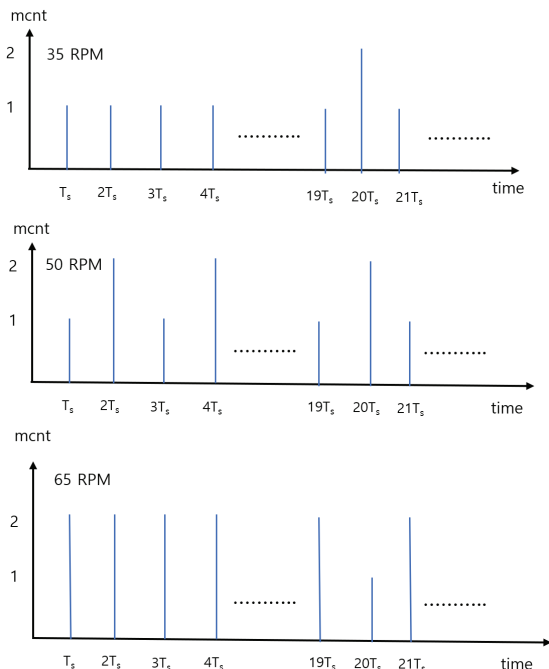


Fig. 3. mcnt and speed relation

우리가 N_{avg} 만큼의 이동 평균을 취한다면, 아래와 같은 조건을 만족시키는 $f_{PN_1+N_2+1}$ 을 정확하게 보정할 수 있다.

$$\frac{1}{N_{avg}} \cdot k = f_{PN_1+N_2+1}, \quad k = 1, \dots, N_{avg} \quad (14)$$

식 (8)과 식 (14)를 조합하여 ϕ_{rem} 과 N_{avg} 의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\phi_{rem} = k \cdot \frac{1}{N_{avg}} \cdot \frac{360}{P}, \quad k = 1, \dots, N_{avg} \quad (15)$$

위 식에 따르면 이동 평균을 취하면 $\frac{1}{N_{avg}} \cdot \frac{360}{P}$ 의 배수에 해당하는 ϕ_{rem} 의 정보를 정확하게 알 수 있다. 따라서 이동평균을 적용하면 분해능이 식 (11) 대비 $1/N_{avg}$ 로 감소하며, 이는 기존 결과와 일치한다[5].

$$\frac{1}{N_{avg}} \cdot \frac{360}{P} / \left(\frac{360}{60} \cdot T_s \right) = \frac{1}{N_{avg}} \cdot \frac{60}{PT_s} \quad (16)$$

2.2 타코펄스 불균일로 인한 펄스개수 변화

타코 생성 구간의 변화를 살펴보기 위해서, Fig. 1의 $\phi_{ref}(n-1)$ 과 $\phi_{ref}(n)$ 이 위치한 구간을 Fig. 4 및 식 (17)~식 (19)와 같이 $S_1 \sim S_3$, $F_1 \sim F_6$ 으로 구분하였다. $F_4 \sim F_6$ 구간은 $f(\phi_{rem}, n) \geq 0$ 가 되어서 펄스개수가 PN_1+N_2+1 이 되는 구간이다.

참고로 위 구간은 θ_s 와 θ_f 로도 표현할 수 있다. 예를 들어 S_1 은 θ_s 가 0과 θ_e 사이의 값을 가지는 구간, F_1 은 θ_f 가 0과 θ_e 사이의 값을 가지는 구간, F_4 는 $360/P$ 와 $360/P+\theta_e$ 사이의 값을 가지는 구간이다.

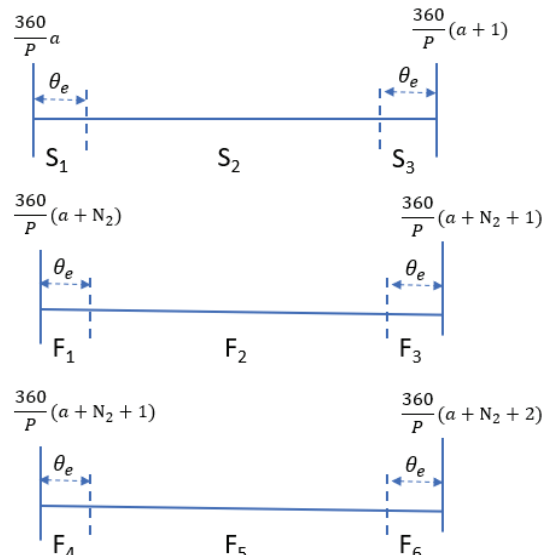


Fig. 4. Tacho Pulse generation region

$$\begin{aligned}
 S_1 &: \frac{360}{P}a \leq \phi_{ref}(n-1) \leq \frac{360}{P}a + \theta_e \\
 S_2 &: \frac{360}{P}a + \theta_e < \phi_{ref}(n-1) < \frac{360}{P}(a+1) - \theta_e \\
 S_3 &: \frac{360}{P}(a+1) - \theta_e \leq \phi_{ref}(n-1) < \frac{360}{P}(a+1)
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 F_1 &: \frac{360}{P}(a+N_2) \leq \phi_{ref}(n) \leq \frac{360}{P}(a+N_2) + \theta_e \\
 F_2 &: \frac{360}{P}(a+N_2) + \theta_e < \phi_{ref}(n) < \frac{360}{P}(a+N_2+1) - \theta_e \\
 F_3 &: \frac{360}{P}(a+N_2+1) - \theta_e \leq \phi_{ref}(n) < \frac{360}{P}(a+N_2+1)
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 F_4 &: \frac{360}{P}(a+N_2+1) \leq \phi_{ref}(n) \leq \frac{360}{P}(a+N_2+1) + \theta_e \\
 F_5 &: \frac{360}{P}(a+N_2+1) + \theta_e < \phi_{ref}(n) < \frac{360}{P}(a+N_2+2) - \theta_e \\
 F_6 &: \frac{360}{P}(a+N_2+2) - \theta_e \leq \phi_{ref}(n) < \frac{360}{P}(a+N_2+2)
 \end{aligned} \tag{19}$$

타코펄스가 균일한 경우 $\phi_{ref}(n-1)$ 이 $S_1 \sim S_3$ 구간 중 어디에 위치하든 $360/P \cdot (a+1)$ 을 지날 때 첫 번째 펄스가 발생한다.

$\phi_{ref}(n)$ 이 $F_1 \sim F_3$ 구간에 위치할 때는 $360/P \cdot (a+N_2)$ 를 지나면서 마지막 펄스가 발생하여 펄스개수는 PN_1+N_2 가 되며, $F_4 \sim F_6$ 구간에 위치할 때는 $360/P \cdot (a+N_2+1)$ 을 지나면서 추가로 하나의 펄스가 더 발생하여 PN_1+N_2+1 이 된다. 시작구간($S_1 \sim S_3$)과 종료구간($F_1 \sim F_6$)의 조합에 따른 펄스개수를 Table 4에 정리하였다.

다음과 같은 조합은 실제로는 불가능하므로 Table 4에서 제외하였다.

- $S_2-F_1, S_3-F_1, S_3-F_2$

식 (5)에 따르면 θ_f 는 항상 θ_s 보다 크다. 따라서 S_i-F_j 조합은 항상 $i < j$ 만 가능하다.

- $S_1-F_5, S_1-F_6, S_2-F_6$

ϕ_{rem} 이 0과 $360/P$ 사이의 값을 가지므로 S_1 에서 출발할 경우 S_1 에서는 F_4 까지, S_2 에서는 F_5 까지만 도달할 수 있다.

이제 타코펄스 불균일로 인한 영향성에 대해서 분석해본다. 가공오차 등으로 인해서 타코펄스의 발생 지점이 최대 θ_e 만큼 이동할 수 있다고 가정하였다. 타코 펄스가 $360/P$ 마다 발생하지 않고, $360/P \pm \theta_e$ 마다 발생할 때는 아래와 같이 각 구간별로 펄스개수의 변화가 발생한다.

Table 4. mcnt (ideal)

	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
S ₁	0	0	0	+1	-	-
S ₂	-	0	0	+1	+1	-
S ₃	-	-	0	+1	+1	+1

- $\phi_{ref}(n-1) \in S_1$
 $\phi_{ref}(n-1)$ 이 S_1 구간에 위치하고, 타코 펄스가 생성되는 지점이 $\frac{360}{P}a$ 가 아니라 $\frac{360}{P}a \pm \theta_e$ 구간 내의 지점일 경우를 살펴보자. 펄스가 생성되는 지점이 $\phi_{ref}(n-1)$ 보다 작은 경우에는 회전에 따라서 추가로 발생하는 펄스가 없고 펄스개수의 변화도 없다. 하지만 펄스 생성지점이 $\phi_{ref}(n-1)$ 보다 큰 경우에는 1개의 펄스가 더 발생한다.

- $\phi_{ref}(n-1) \in S_2$
 S_2 구간에 위치할 때는 타코펄스 불균일로 인한 영향성이 없다.

- $\phi_{ref}(n-1) \in S_3$
 S_3 구간에 위치할 때는 S_1 구간과 반대로 펄스 생성 지점이 $\phi_{ref}(n-1)$ 보다 작으면 1개의 펄스가 덜 발생한다.

- $\phi_{ref}(n) \in F_1$ or F_4
 $\phi_{ref}(n)$ 이 F_1 또는 F_4 구간에 위치하고, 펄스가 생성되는 지점이 $\phi_{ref}(n)$ 보다 큰 경우에는 펄스가 1개 덜 발생한다.

- $\phi_{ref}(n) \in F_2$ or F_5
 F_2 또는 F_5 구간에 위치할 때는 타코펄스 불균일로 인한 영향성이 없다.

- $\phi_{ref}(n) \in F_3$ or F_6
 F_3 또는 F_6 구간에 위치하고, 펄스가 생성되는 지점이 $\phi_{ref}(n)$ 보다 작은 경우에는 펄스가 1개 더 발생한다.

각 구간별 타코펄스 변화를 Figs. 5~7 및 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 $\pm \theta_e$ 는 해당 구간의 펄스가 생성되는 지점이 + 또는 -로 이동했다는 의미이며, 표에 기재된 숫자는 PN_1+N_2 기준이다. 타코펄스 생성지점 변화(불균일)로 인한 펄스개수 변화량은 $F_4 \sim F_6$ 이 $F_1 \sim F_3$ 와 동일하다. 하지만, $F_4 \sim F_6$ 은 Table 4에서 언급하였듯이 기본적으로 +1이 더해지기 때문에 $F_1 \sim F_3$ 대비 +1의 차이를 가진다.

Table 5의 결과를 토대로 $\phi_{ref}(n-1)$ 이 위치하는 $S_1 \sim S_3$ 와 $\phi_{ref}(n)$ 이 위치하는 $F_1 \sim F_6$ 의 조합에 따른 펄스개수 변화를 계산하면 Table 6과 같다. 예를 들어 S_1-F_1 조합은 S_1 에서 0 또는 +1의 펄스 개수 변화가 가능하고 F_1 에서 0 또는 -1의 펄스 개수 변화가 가능하므로 이를 조합하면 -1(0+1), 0(0+0 or +1-1), 1(+1,0)이 가능하다.

○ 예제 4

휠이 33.33 RPM으로 회전하면 $T_s(0.1초)$ 동안 20° 회전을 한다. $\phi_{ref}(n-1) = 0.5^\circ$ 이면 $\phi_{ref}(n) = 20.5^\circ$ 가 되어 S_1-F_1 조합이 되며, 펄스개수는 1이 된다.

하지만 타코 펄스 생성구간이 $\pm 1^\circ$ 와 $20^\circ \pm 1^\circ$ 로 변할 경우 펄스개수는 Table 7과 같다.

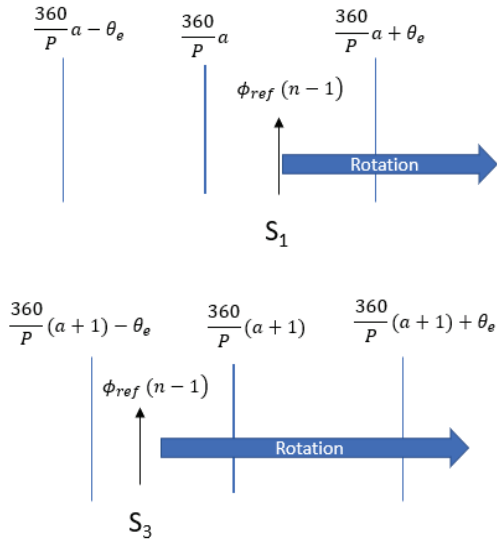
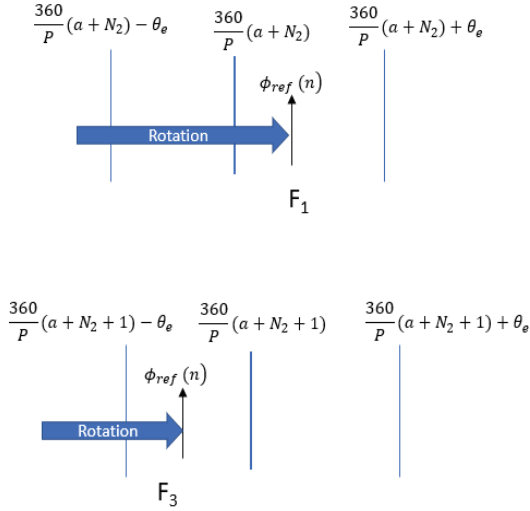
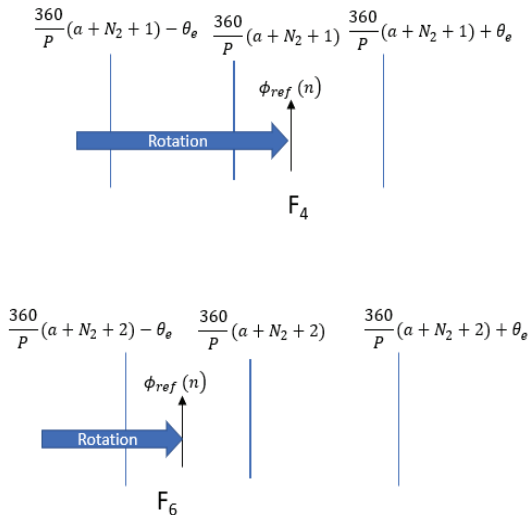
Fig. 5. mcnt change at S_1 and S_3 Fig. 6. mcnt change at F_1 and F_3 Fig. 7. mcnt change at F_4 and F_6

Table 5. mcnt change (non-uniform)

	$-\theta_e$	0	$+\theta_e$
S_1	0	0	+1
S_2	0	0	0
S_3	-1	0	0
F_1	0	0	-1
F_2	0	0	0
F_3	+1	0	0
F_4	+1	+1	0
F_5	+1	+1	+1
F_6	+2	+1	+1

Table 6. mcnt (non-uniform)

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
S_1	-1, 0,+1	0,+1	0,+1, +2	0,+1, +2	-	-
S_2	-	0	0,+1	0,+1	+1	-
S_3	-	-	-1, 0,+1	-1, 0,+1	0,+1	0,+1, +2

Table 7. mcnt example (non-uniform)

	19°	20°	21°
-1°	1	1	0
0°	1	1	0
$+1^\circ$	2	2	1

식 (10) 및 Table 4에서 살펴보았듯이, 이상적인 경우의 펄스개수는 $PN_1 + N_2$ 와 $PN_1 + N_2 + 1$ 에서 발생한다. 하지만 불균일로 인해 타코펄스 생성지점이 일정하지 않을 경우, Table 5에서 정리된 것처럼 $PN_1 + N_2 - 1$ 에서 $PN_1 + N_2 + 2$ 로 펄스개수의 범위가 변한다. 즉, 펄스개수가 N 또는 $N+1$ 이 아니라 $N-1$ 에서 $N+2$ 사이의 정수값이 된다.

이로 인해 식 (10) 및 식 (12)가 다음과 같이 변하며, 펄스개수 측정방법의 오차 범위가 3배로 커진다.

$$PN_1 + N_2 - 1 \leq mcnt \leq PN_1 + N_2 + 2 \quad (20)$$

$$w_M - 3w_{w_{M,1CNT}} \leq w_{real} \leq w_M + 3w_{w_{M,1CNT}} \quad (21)$$

하지만 펄스개수가 $PN_1 + N_2 - 1$ 또는 $PN_1 + N_2 + 2$ 이 되는 구간을 자세히 살펴보면 펄스개수 측정방법의 오차 범위가 식 (20) 및 식 (21)보다는 작아진다.

Table 6에서 펄스개수가 -1과 +2가 되는 조합을 취하여 해당 조합에서의 ϕ_{rem} 을 살펴보면, Table 8과 같이 ϕ_{rem} 이 0 근처 또는 $360/P$ 근처에 있다.

○ 예제 5

θ_e 는 1° 로 가정하고, 34 RPM 또는 66 RPM인 경우를 가정하자. 이 경우 N_2 는 1이 되며, $\phi_{ref}(n-1)$ 이 $0^\circ \sim 20^\circ$ 사이이면 $F_1 \sim F_3$ 는 $20^\circ \sim 40^\circ$, $F_4 \sim F_6$ 은 $40^\circ \sim 60^\circ$ 가 된다. 몇 가지 경우에 대한 결과를 Table 9에 정리하였다.

Table 8에 따르면 -1이 발생하는 구간은 ϕ_{rem} 이 $2\theta_e$ 보다 작을 때로, 실제 mcnt_exact는 $PN_1 + N_2$ 근처에 있다. 반면에 +2가 발생하는 구간은 ϕ_{rem} 이 $360/P - 2\theta_e$ 보다 클 때로, mcnt_exact는 $PN_1 + N_2 + 1$ 근처에 있다. 그 외의 구간에서는 mcnt가 타코펄스가 이상적인 경우와 동일하게 펄스개수가 +0 또는 +1이 나온다. 이를 그림으로 표현하면 Fig. 8과 같다.

Table 8의 결과를 이용하여, 실제 속도와 타코펄스 불균일로 인한 측정속도의 오차를 구해보면 아래와 같다.

- $0 \leq \phi_{rem} \leq 2\theta_e$

w_{real} 이 다음과 같은 구간에 속할 때이다.

Table 8. S-F region and ϕ_{rem}

	mcnt anomaly	ϕ_{rem}
S ₁ -F ₁	-1	$0 \leq \phi_{rem} \leq \theta_e$
S ₁ -F ₃	+2	$\frac{360}{P} - 2\theta_e \leq \phi_{rem} < \frac{360}{P}$
S ₁ -F ₄	+2	$\frac{360}{P} - \theta_e \leq \phi_{rem} < \frac{360}{P}$
S ₃ -F ₃	-1	$0 \leq \phi_{rem} \leq \theta_e$
S ₃ -F ₄	-1	$0 \leq \phi_{rem} \leq 2\theta_e$
S ₃ -F ₆	+2	$\frac{360}{P} - \theta_e \leq \phi_{rem} < \frac{360}{P}$

Table 9. S-F region and ϕ_{rem} example

	w_{real}	ϕ_{rem}	$\phi_{ref}(n-1)$	$\phi_{ref}(n)$
S ₁ -F ₁	34	0.4	0	20.4
S ₁ -F ₃	66	19.6	0	39.6
S ₁ -F ₄	66	19.6	0.4	40
S ₃ -F ₃	34	0.4	19.2	39.6
S ₃ -F ₄	34	0.4	19.6	40
S ₃ -F ₆	66	19.6	19.2	58.8

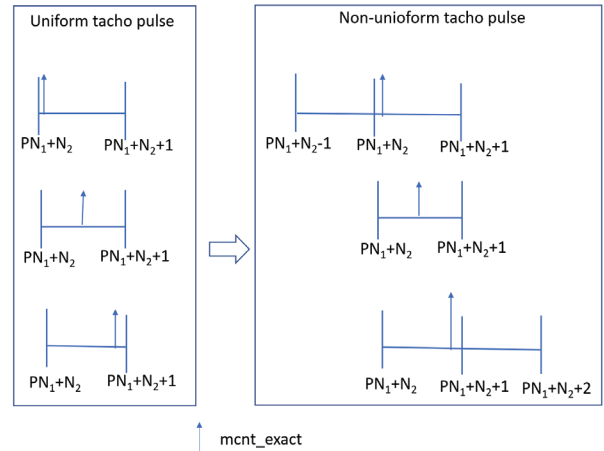


Fig. 8. mcnt change and mcnt_exact

$$w_{M,PN_1+N_2} \leq w_{real} \leq w_{M,PN_1+N_2} + \frac{2\theta_e}{T_s} \cdot \frac{60}{360} \quad (22)$$

이 구간에서는 Table 8에서 살펴본 바와 같이 펄스개수가 $PN_1 + N_2 - 1$ 가 될 수 있다. 이때 w_M 은 식 (23)과 같으며, 실제 속도와 오차는 식 (25)와 같다.

$$w_{M,PN_1+N_2-1} = \frac{60}{T_s} \left(N_1 + \frac{N_2}{P} - \frac{1}{P} \right) \quad (23)$$

$$w_{real} - w_{M,PN_1+N_2-1} = \frac{60}{T_s} \left(\frac{\phi_{rem}}{360} + \frac{1}{P} \right) \quad (24)$$

$$w_{M,1CNT} \leq w_{real} - w_{M,PN_1+N_2-1} \leq w_{M,1CNT} + \frac{60}{360} \cdot \frac{2\theta_e}{T_s} \quad (25)$$

- $360/P - 2\theta_e \leq \phi_{rem} < 360/P$

w_{real} 이 다음과 같은 구간에 속할 때이다.

$$w_{M,PN_1+N_2+1} - \frac{2\theta_e}{T_s} \cdot \frac{60}{360} \leq w_{real} \leq w_{M,PN_1+N_2+1} \quad (26)$$

이 구간은 Table 8에서 살펴본 바와 같이 펄스개수가 $PN_1 + N_2 + 2$ 가 될 수 있다. 이때 w_M 은 식 (27)과 같으며, 실제 속도와 오차는 식 (29)와 같다.

$$w_{M,PN_1+N_2+1} = \frac{60}{T_s} \left(N_1 + \frac{N_2}{P} + \frac{2}{P} \right) \quad (27)$$

$$w_{real} - w_{M,PN_1+N_2+1} = \frac{60}{T_s} \left(\frac{\phi_{rem}}{360} - \frac{2}{P} \right) \quad (28)$$

$$-w_{M,1CNT} - \frac{60}{360} \cdot \frac{2\theta_e}{T_s} \leq w_{real} - w_{M,PN_1+N_2+1} \leq -w_{M,1CNT} \quad (29)$$

측정되는 mcnt로부터 얻어진 mrpm이 w_M 일 때, 실제 속도는 식 (25)와 식 (29)를 조합하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w_M - w_{M1CNT} - w_e \leq w_{real} \leq w_M + w_{M1CNT} + w_e \quad (30)$$

$$w_e = \frac{60}{360} \cdot \frac{2\theta_e}{T_s} \quad (31)$$

식 (12)와 비교하면 타코펄스 발생지점의 불균일 인해서 w_e 만큼 오차 범위가 늘어났다.

○ 예제 6

θ_e 는 1°이고 mcnt는 2일 경우, w_M 은 66.66RPM이며 실제 속도는 30 RPM과 103.33 RPM 사이에 있다. 예제 3과 비교해보면 w_e 에 해당하는 3.33 RPM만큼의 범위 변화가 생긴다.

2.3 타코펄스 불균일과 이동평균의 관계

Table 4와 Table 6에서 살펴보았듯이, 타코펄스 발생지점의 불균일로 인해서 펄스개수가 변한다. 이로 인해서 이동평균도 영향을 받는다.

○ 예제 7

타코펄스 발생지점이 Table 10과 같다고 가정하고 휠이 33.33 RPM, 16.66 RPM, 600RPM으로 회전할 때를 살펴보자.

휠이 33.33 RPM으로 회전할 경우, ϕ_{ref} 는 20°씩 회전하며, 펄스개수는 Table 11과 같다. 회전속도 33.33 RPM에서 mcnt_exact가 정수가 되므로 이상적인 경우에는 이동평균 없이도 속도를 측정할 수 있다. 하지만 타코펄스 발생지점의 불균일이 발생하면 이동평균을 통해서만 정확한 속도를 얻을 수 있다.

휠이 16.66 RPM으로 회전할 경우 ϕ_{ref} 는 10°씩 변하며, 펄스개수는 Table 12와 같다. 이상적인 경우에는 2개의 펄스개수(mcnt)에 대해서만 이동평균을 취하면 되었지만, 불균일이 발생한 경우에는 4개의 펄스개수에 대해서 이동평균을 취해야 한다.

Table 10. tacho pulse generation angle

	Tacho pulse generation angle
ideal	0°, 20°, 40°, 60°, 80°,
non uniform	1°, 19°, 41°, 59°, 81°,

Table 11. mcnt change - 33.33 RPM

n	ϕ_{ref}	mcnt	
		ideal	non-uniform
1	20	1	2
2	40	1	0
3	60	1	2
4	80	1	0

Table 12. mcnt change - 16.66 RPM

n	ϕ_{ref}	mcnt	
		ideal	non-uniform
1	10	0	1
2	20	1	1
3	30	0	0
4	40	1	0

회전속도가 600 RPM일 경우 ϕ_{ref} 는 매 샘플링구간마다 360° 회전을 한다. 따라서 타코펄스 불균일 효과가 모두 생체되고 펄스개수는 항상 P에 해당하는 18이 나온다.

예제 7에서 확인할 수 있듯이 타코펄스 불균일 효과를 보정하려면 이상적인 경우보다 더 많은 펄스개수 측정값으로 이동평균을 취해야 한다. 360/P개의 타코 구간 정보를 모두 취했을 때만 정확한 값을 알 수 있으므로 이동평균을 취할 개수 N_{avg} 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$|\phi_{ref}(n + N_{avg}) - \phi_{ref}(n)| \geq 360 \quad (32)$$

III. 결 론

펄스개수측정방법을 모델링하고 펄스개수 변화, 분해능 특성, 이동평균의 효과를 수식으로 표현하였다. 여기에 타코펄스 불균일성을 추가하고 펄스개수측정방법의 영향성에 대해 살펴보았다. 불균일성으로 인해 발생하는 현상은 크게 다음과 같다. 첫 번째로 펄스개수가 N과 N+1이 아닌 N-1과 N+2 사이로 변하게 된다. 두 번째로 펄스개수로 추정된 w_M 과 실제 속도의 차이는 식 (12) 및 Table 1의 w_{M1CNT} 에서 식 (30) 및 (31)의 w_e 로 변하며, 이러한 변화는 실제속도를 펄스개수로 변환한 mcnt_exact가 정수가 되는 지점 근처에서 발생한다. 세 번째로 정확한 속도를 얻기 위해서 취해야 할 이동평균의 개수가 증가한다. 단 샘플링 시간마다 정확하게 360° 회전을 하는 경우에는 타코펄스 불균형으로 인한 영향을 받지 않는다.

References

- 1) 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.

- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Chen, Y., Yang, M., Long, J., Xu, D. and Blaabjerg, F., "M/T Method based Incremental Encoder Velocity Measurement Error Analysis and Self-Adaptive Error Elimination Algorithm," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, 2017, pp. 2085~2090.
- 7) Brugnano, F., Concari, C., Imamovic, E., Savi, F., Toscani, A. and Zanichelli, R., "A Simple and Accurate Algorithm for Speed Measurement in Electric Drives Using Incremental Encoder," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, 2017, pp. 8551~8556.
- 8) Vazquez-Gutierrez, Y., O'Sullivan, D. L. and Kavanagh, R. C., "Evaluation of three optical-encoder-based speed estimation methods for motion control," *The Journal of Engineering*, Vol. 2019, No. 17, pp. 4069~4073.
- 9) Anuchin, A., Dianov, A. and Briz, F., "Synchronous Constant Elapsed Time Speed Estimation Using Incremental Encoders," *Journal IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 24, No. 4, 2019, pp. 1893~1901.
- 10) 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.
- 11) 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.