

위성동역학 시뮬레이터용 T-방식을 이용한 반작용휠 속도 측정 및 펄스 생성

김용복*, 오시환**, 이선호***, 용기력****, 이승우*****

Measuring and Generation the speed of reaction wheel for Spacecraft Dynamic Simulator using the T-Method

Yong-bok Kim*, Si-Hwan Oh**, Seon-Ho Lee***, Ki-Lyok Yong****, Seung-Wu Rhee*****

Abstract

The M-Method that measures the speed of actuator with counting the number of Reaction wheel Tacho Pulse has the many advantages such that a realization is simple and measuring time is uniform, but it also has the disadvantage that measuring speed becomes worse as the wheel speed goes lower. On the contrary, the T-Method that measures the time duration between the pulses is more accurate at lower-speed and its time delay is smaller than M-Method, but its realization is more difficult than M-Method because measuring time is varying with wheel speed variation. Thought M/T Method mixing M-Method with T-Method is widely used in order to measure the speed in the motor industrial area, one of two methods has been used in the spacecraft design area. Therefore, we try to apply both methods together to measuring the speed of Reaction Wheel, the core actuator for low earth orbit satellite. This paper provides the Reaction Wheel simulation board located in the Spacecraft Dynamic Simulator, ground support test set.

초 록

일정한 샘플링 시간 T마다 발생하는 반작용 휠 타코 펄스의 개수를 세어 구동기의 회전 속도를 측정하는 M 방식은 구현이 간단하고 측정 시간이 일정하다는 장점이 있으나, 저속에서 속도 측정의 해상도가 나빠진다는 단점이 있다. 그에 반해, 펄스와 펄스 사이의 시간 간격을 측정하는 T방식은 저속에서 정밀한 속도를 측정할 수 있으며 측정에 따른 시간 지연이 적다는 장점이 있다. 그러나 이 방법 역시 실제 구현 시 나눗셈이 필요하고 속도 측정 시간이 속도에 따라 가변되는 문제점이 있다. 현재 산업계에서는 전동기의 속도를 측정하기 위하여 M방식과 T방식을 조합한 M/T방식이 널리 사용되고 있지만, 현재 위성 분야에서는 M방식과 T방식중 하나만을 사용하고 있는 실정이다. 그럼으로, 저궤도 위성에서 핵심 구동장치로 사용되는 반작용 휠의 속도를 측정하기 위해서, 기존의 M 방식의 속도 측정방식에 저속에서의 속도 정확도 향상을 위하여 T 방식도 이용해서 속도 측정을 하려 한다. 본 연구에서는 이러한 측정 요구조건을 만족할 수 있도록 지상 시험 장비인 위성동역학 시뮬레이터에서 반작용 휠의 모사를 위한 보드 설계를 제시하려 한다.

키워드 : 반작용휠(Reaction Wheel), T-방식(T-Method), M-방식(M-Method), 타코 펄스 측정(Tacho Pulse Measurement), 타코 펄스 발생(Tacho Pulse Generation), 위성 동역학 시뮬레이터(Spacecraft Dynamic Simulator)

* 위성제어팀/yong1973@kari.re.kr

** 위성제어팀/oshysh@kari.re.kr

*** 위성제어팀/shlee71@kari.re.kr

**** 위성제어팀/klyong@kari.re.kr

***** 위성미래기술연구실/srhee@kari.re.kr

1. 서 론

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

반작용 휠의 종류에 따라 다르지만 일반적으로 반작용 휠은 한 바퀴를 회전할 때마다 작게는 1개에서 많게는 100개가 넘는 펄스(pulse)를 발생하도록 설계되어 있고 이를 이용하여 반작용 휠의 회전 속도를 측정하게 된다. 회전 속도를 측정하는 방법은 일반적인 디지털 타코미터(Digital Tachometer)를 이용하는 모터의 속도 측정 방법과 유사하며 그 방법들로는 M method, T method, M/T method 등이 있다.

본 논문에서는 인공위성 반작용 휠의 속도 측정 방법을 소개하고 각 방법의 분해능 및 정밀도를 2장에서 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 T-방식을 적용한 반작용 휠의 지상 검증 장비로서 위성동역학 시뮬레이터용 반작용 휠 모사 보드를 구현하려고 한다. 자세한 설명은 3장에서 다루어질 것이다.

2. 반작용 휠의 속도 측정 방법

2.1 반작용 휠의 속도 측정 방법

반작용 휠의 속도를 측정하는 방식을 설명하고 각 방식의 특성을 분석한다.

2.1.1 M-방식을 이용한 속도 측정

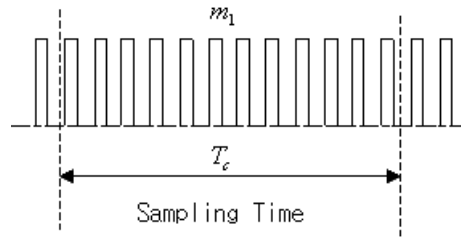


그림 1. M-Method

이 방식의 기본 원리는 그림1.에서 보는 바와 같이, 일정한 샘플링 시간 T_c 마다 발생하는 반작용 휠의 타코 펄스의 개수를 세어 전동기의 회전 속도를 측정한다. 측정되는 반작용 휠의 속도를 ω , 한 바퀴 회전 시 발생하는 펄스의 개수를 P , 측정 주기를 T_c , 측정주기 동안 발생하는 펄스의 개수를 m_1 이라 하면, 반작용 휠의 속도는 아래 식(1)과 같이 주어진다.

$$\omega = \frac{60 \cdot m_1}{P \cdot T_c} \text{ (r/min)} \quad (1)$$

2.1.2 T-방식을 이용한 속도 측정

이 방식은 타코 펄스와 펄스 사이의 시간 간격을 측정하는 것으로, 펄스와 펄스 사이의 간격에 $f_c(\text{Hz})$ 의 클럭 펄스가 m_2 개 들어간다고 했을 때, 측정되는 반작용 휠의 속도를 ω , 한 바퀴 회전 시 발생하는 펄스의 개수를 P 라면, 반작용 휠의 속도는 식(2)와 같이 주어진다.

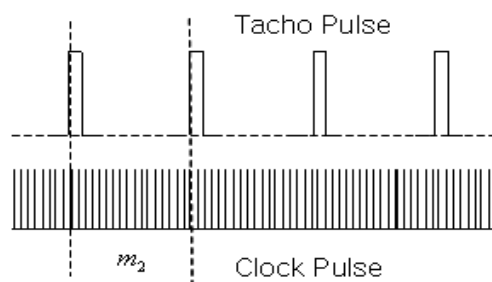


그림 2. T-Method

$$\omega = \frac{60 \cdot f_c}{P \cdot m_2} \quad (r/min) \quad (2)$$

2.2 속도 측정 방법의 분해능과 정밀도

2.2.1 M-방식의 해상도

M-방식의 분해능은 측정 주기 동안 발생하는 펄스의 개수가 한 개일 때와 같으므로 식(3)과 같이 표현된다.

$$R = \frac{60}{P \cdot T_c} \quad (r/min) \quad (3)$$

2.2.2 T-방식의 해상도

T-방식의 분해능은 임의의 속도에서 고주파 펄스의 개수를 실제보다 한 개 놓칠 때 발생하는 속도의 차이와 같으므로 아래 식(4) 와 같이 표현될 수 있다.

$$R = \frac{\omega^2 \cdot P}{60 \cdot f_c + \omega \cdot P} \quad (r/min) \quad (4)$$

2.2.3 M-방식과 T-방식의 비교

두 측정방법의 분해능을 비교해 보면 M-방식의 속도 측정 방법은 현재의 회전속도에 상관없이 해상도가 일정하나 T-방식의 속도 측정 방법은 회전속도가 커질수록 분해능이 증가하는 경향을 가진다. 그러나 일반적으로 T-방식의 속도 측정 방법에 사용되는 고주파 클럭의 주파수 f_c 를 크게 잡을 수 있으므로 저속에서의 해상도가 T-방식의 속도 측정 방법보다 좋을 수 있다. 그림 3에서 저속시의 M-방식의 특성을 보여준다. 이 경우 측정되는 속도가 각 샘플링 주기에서 순간적으로 50%의 차이가 생기게 되어 속도 제어 특성이 매우 나쁘게 된다. 또한 이들 두 방법의 해상도를 비교하기 위하여 회전속도에 따른 해상도 변화를 그림4와 그림5에서 보여준다.

그림4는 M-방식의 회전속도에 따른 해상도를 보여준다. 이 때, $T_c = 0.25$ 초, $P = 108$ 로 가정하였다. 회전속도에 관계없이 분해능이 일정한

값을 가짐을 볼 수 있다. 반면 T-방식의 속도 측정 방법은 회전속도의 제곱에 비례하여 분해능이 커진다. f_c 에 의해 해상도가 바뀌므로 다양한 f_c 에 대해 해상도를 그림5에서 보여준다.

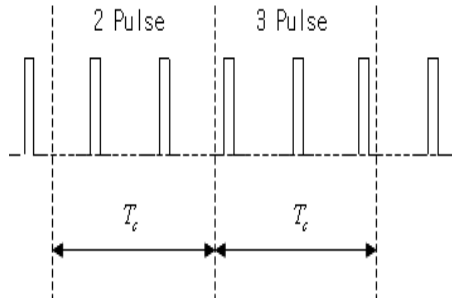


그림 3. M-Method at low rate

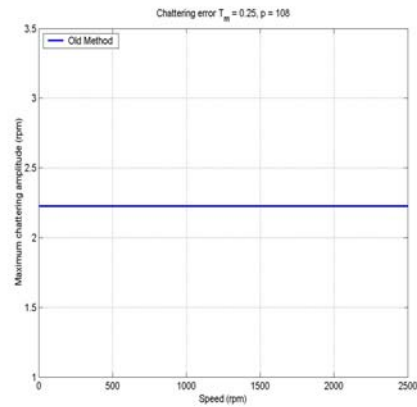


그림 4. Resolution for speed in M-Method

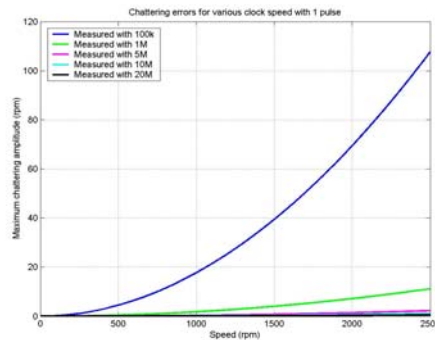


그림 5. Resolution for rate in T-Method

T-방식의 속도 측정 방법에서 속도가 빨라질수록, 시간측정을 위해 사용되는 클럭의 주파수 f 가 낮을수록 해상도가 떨어지는 특성을 보여주고 있다. 그러나 1M(Hz) 이상의 클럭 주파수를 사용할 경우에는 M-방식의 해상도 보다 좋음을 확인할 수 있다.

정밀도는 보통, 현재속도에 대한 해상도의 비율로 표현되므로 M-방식의 속도 측정방법은 속도가 증가할수록 정밀도가 향상되고 T-방식의 속도 측정 방법은 회전속도가 증가할수록 정밀도가 저하된다.

3. 반작용 휠 모사 보드

3.1 반작용 휠 모사 보드의 구성

반작용 휠 모사 보드의 하드웨어 구성은 그림 6에서 보여주듯이, 전원 부, 리셋 부, 클럭 부, VME Bus 방식을 이용하기 위해서 사용된 GLUE LOGIC부, 자체 검증과 발생 시켜야 할 펄스의 개수를 계산 하는 Micro Processor부 그리고 클럭 부로부터 받은 클럭을 분주시켜주며, 반작용 휠의 타코 펄스 개수를 측정하고, 타코 펄스를 발생 시켜주는 기능뿐만 아니라, 자체 검증을 위한 기능의 프로그램을 내장하고 있는 FPGA 부로 이루어져있다.

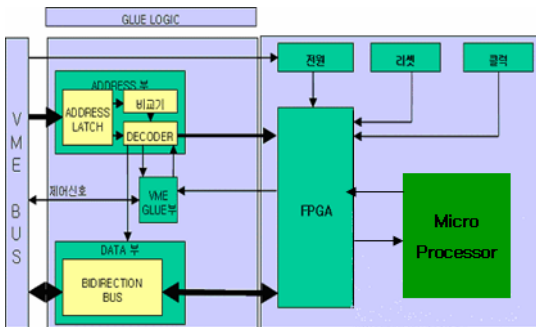


그림 6. Configuration of RWA Simulation Board

3.2 FPGA 상세 설명

반작용 휠의 모사를 위한 대부분의 기능은 요구 사항에 따라 확장 및 변경이 용이하도록 FPGA를 이용하여 구현하였다.

3.2.1 Clock Generation Circuit

클럭 발생 회로는 두 개의 세분화된 회로로 구성된다. 하나는 2M(Hz) 클럭 신호를 받아들여 500K(Hz), 1M(Hz), 2K(Hz), 20K(Hz) 신호를 만들어 낸다. 그리고 다른 회로는 앞서 만든 회로로부터 입력으로 20K(Hz) 신호를 받아 들어 1(Hz), 8(Hz), 40(Hz), 250(Hz) 신호를 생성한다. 회로도에는 그림 7과 그림 8에서 각각 보여준다.

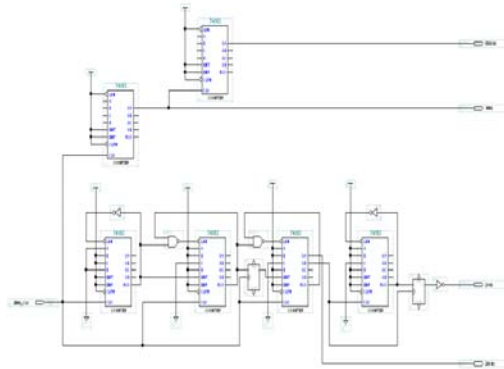


그림 7. Clock Generation Circuit 1

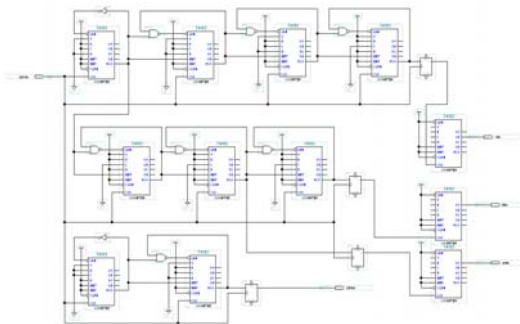


그림 8. Clock Generation Circuit 2

3.2.2 RWA Pulse Counting Circuit

유틸리티 보드의 외부로부터 들어오는 8Hz 기준신호의 1주기 동안에 발생하는 RWA TACHO Pulse 신호의 주기를 측정한다. 1주기 동안에 발생하는 RWA TACHO Pulse 신호의 최소 HIGH Pulse 구간은 20usce 이고, 가장 짧은 1주기는 40usec 라고 가정한다.

8Hz 기준신호(125ms SYNC)의 1주기 동안에 단 한 개의 RWA TECHO Pulse신호가 발생할 시에는 8Hz 기준신호의 1주기 동안에 여러 개의 RWA TACHO Pulse신호가 발생할 때 RWA TACHO 신호의 한 주기의 측정 방법은 RWA TACHO 신호 중에 가장 마지막에 발생한 신호의 주기를 채택한다. 그러나 8Hz 기준신호의 1주기 동안에 1개의 RWA TACHO Pusle 신호가 발생하면 발생하지 않은 것으로 치부한다. 그 이유는 RWA TACHO 신호의 한 주기의 측정 방법으로 RWA TACHO신호의 RISING EDGE에서 부터 다음 8Hz신호의 RISING EDGE까지가 불분명하므로 맨 앞과 맨 뒤는 주기를 카운팅 하는데 있어서 정확도가 떨어지기 때문이다. 그림 9와 그림 10에서 RWA TACHO Pulse 신호에 대한 위의 설명을 보여준다.

그림 12에서는 8Hz 기준신호에 따라 측정된 값이 래치되고, 래치된 값은 VME MAIN컴퓨터에서 8Hz의 RISING EDGE를 인식하고 읽어 가게 되며, 다음 8Hz 기준신호 RISING EDGE가 뜨기 전까지 유틸리티 보드가 발생해야 할 펄스 개수를 보드에 써 놓아야 한다.

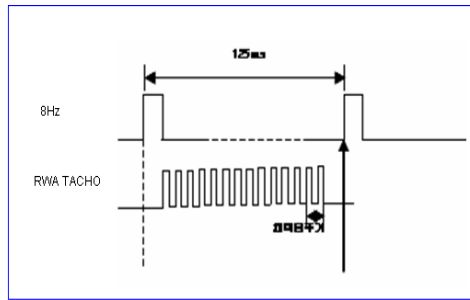


그림 9. Pulse duration in many Tacho pulses

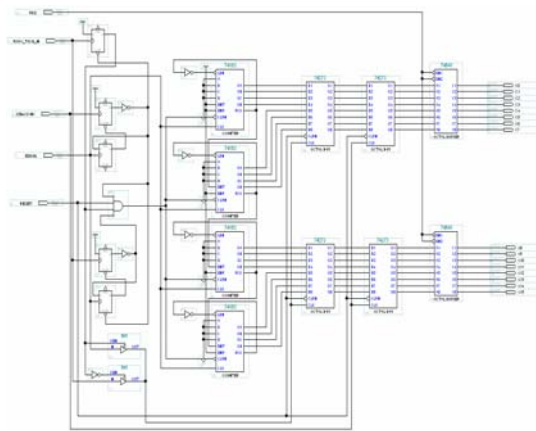


그림 11. Clock Counting Circuit

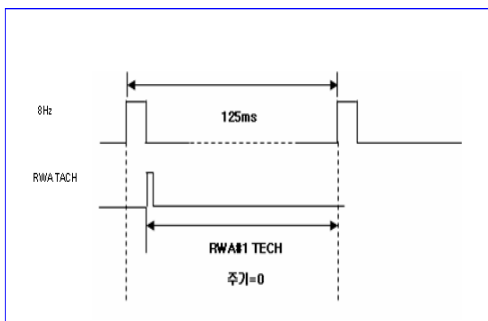


그림 10. Pulse duration in one Tacho pulse

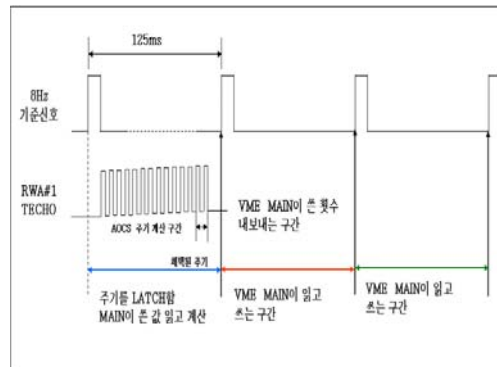


그림 12. Counting Sequence of RWA Tacho Pulse

3.2.3 RWA Pulse Generation Circuit

VME MAIN 컴퓨터가 유틸리티 보드에 일정 값을 쓰고 읽어서 보드의 이상 유무를 확인해 보고, 반작용 휠 모사 보드가 측정한 RWA TACHO Pulse 신호의 주기를 읽어간 후, 보드가 125ms마다 발생해야 할 모터제어 신호의 횟수를 보드에 기록해두는 역할을 한다.

3.3 시뮬레이션 결과

3.3.1 Clock Generation Circuit

클럭 발생 회로의 각 클럭 신호들의 생성된 결과를 그림 11~ 그림 14 에서 각각 2MHz, 250Hz, 40Hz, 1Hz의 신호들이 정확히 발생됨을 보여주고 있다.

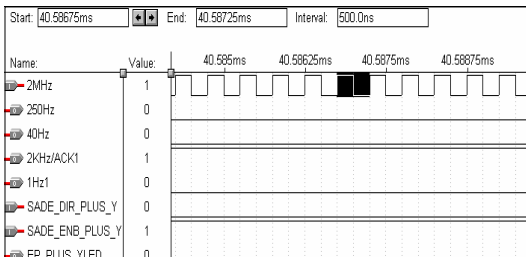


그림 13. Input Clock Signal 2MHz

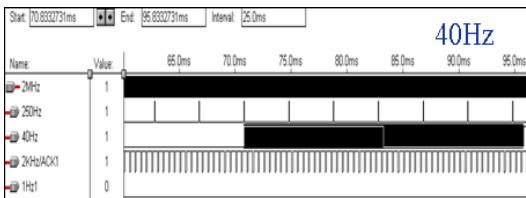


그림 14. Output Clock Signal 40Hz

3.3.2 RWA Pulse Counting Circuit

그림 17에서는 반작용 휠에서 발생되어 들어오는 타코 펄스와 펄스 사이의 시간을 측정된 결과를 보여주는 것으로써, 펄스 사이의 시간 간격이

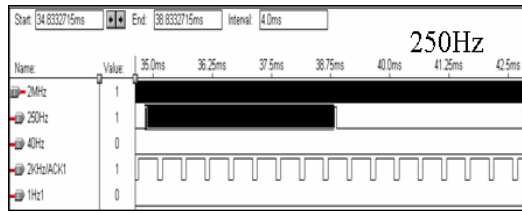


그림 15. Output Clock Signal 250Hz

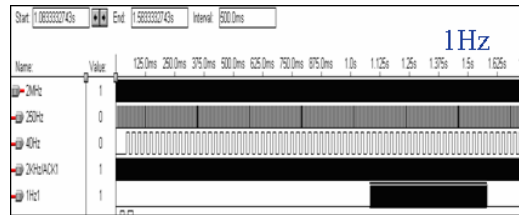


그림 16. Output Clock Signal 1Hz

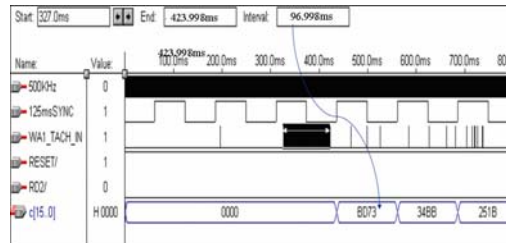


그림 17. Tacho Pulse Counting Result

96.998msec 를 나타내고 있다. 이는 클럭 펄스의 개수가 48499(0xBD73)개가 발생했음을 보여준다..

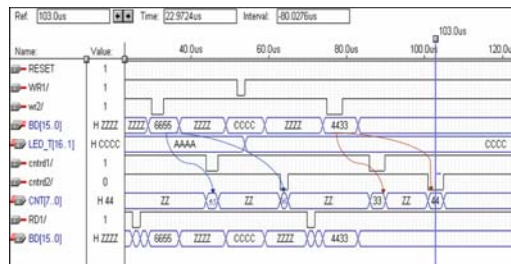


그림 18. RWA Pulse Generation

3.3.3 RWA Pulse Generation Circuit

그림 18에서는 발생되어야 할 펄스의 개수를 나

타내는 데이터 “6655”를 8 bit 메모리에 하위비트부터 실어서 보내주고 있음을 확인 할 수 있다.

3.4 실험 결과

3.4.1 DATA Latch

CPU 가 보내준 데이터를 래치시키기 위해서는 VME Bus에서 보내주는 WR/ 신호가 Low로 된 상태에서 FPGA에서 WR1/ 신호를 보내게 되고, WR1/ 신호가 Rising Edge에서 CPU가 보내준 데이터 값을 래치시키게 된다. 그림19와 그림 20에서 오실로스코프의 2번 채널은 WR/, 3번 채널은 WR1/, 4번 녹색채널은 데이터를 나타낸다.

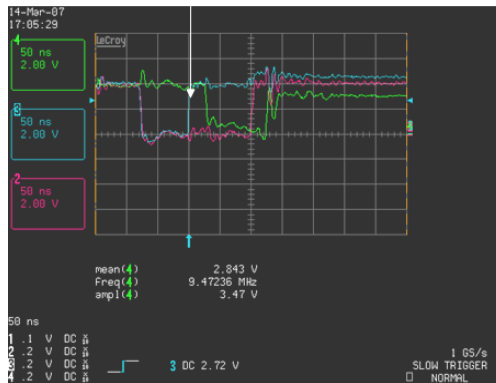


그림 20. Dat Latch for data=1

24에서는 펄스 개수를 나타내는 1999(0x07cf) 를 나타내고 있으며, 이 역시 2usec의 오차를 가지는 4msec(250Hz) 신호임을 확인 할 수 있다.

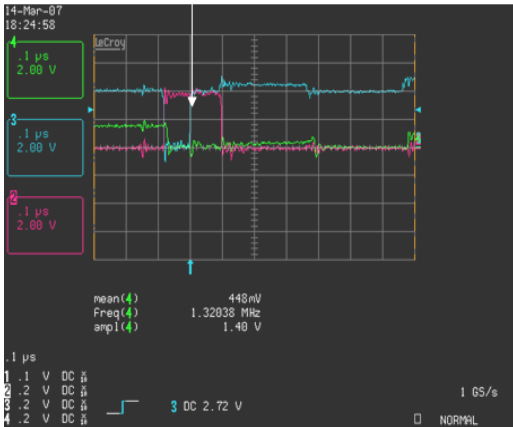


그림 19. Dat Latch for data=0

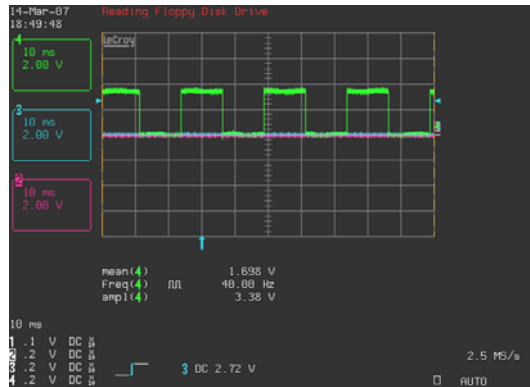


그림 21. Simulated Tacho Pulse , 40Hz

3.4.2 RWA Pulse Counting

반작용 휠로부터 들어오는 타코 펄스와 펄스 사이의 시간 간격을 측정하기 위하여, 보드 자체 내에 40Hz와 250Hz 클럭을 발생시켜서 그 펄스 간격을 측정함으로써, 보드의 성능을 검증하였다. 그림 21에서는 40Hz 클럭이 정확하게 발생됨을 보여주고, 그림22에서는 발생된 펄스간의 시간 간격을 나타내는 펄스 개수인 12499(0x30d3)를 나타내는데, 이 값은 2usec의 오차를 가지는 25msec(40Hz) 신호임을 확인 할 수 있다. 또한 그림 23은 250Hz 클럭 발생을 보여주고, 그림

3.4.3 RWA Pulse Generation

반작용 휠을 모사하는 보드내의 클럭을 발생시키는 회로내의 메모리 번지에 샘플링 주기동안에 발생시킬 펄스의 개수를 입력시키면, 일정한 간격의 펄스를 만들어 내는지를 확인하였다. 그림25와 그림26에서 오실로스코프의 3번 채널은 인터럽트 신호이며, 4번 채널은 모사된 반작용 휠의 펄스를 나타낸다. 그림 25에서 보면 125msec 동안 125개의 펄스를 발생시켰을 때의 펄스와 펄스 사이의 시간 간격을 보면 1msec 임을 확인할 수 있다. 그리고 그림 26에서도 1250

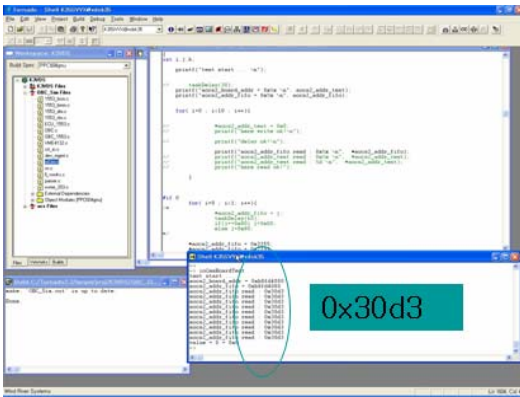


그림 22. Measured Pulse Number for 40Hz

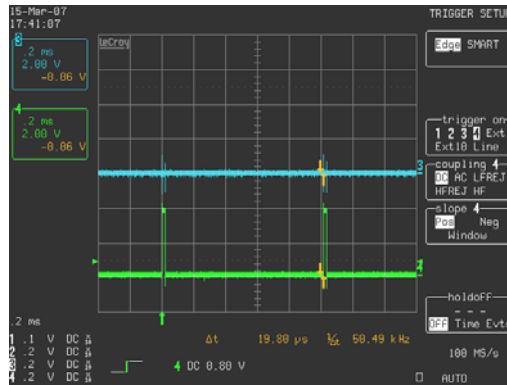


그림 25. 125 Pulse Generation

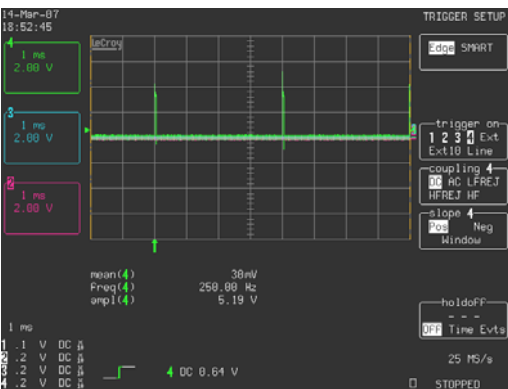


그림 23. Simulated Tacho Pulse , 250Hz

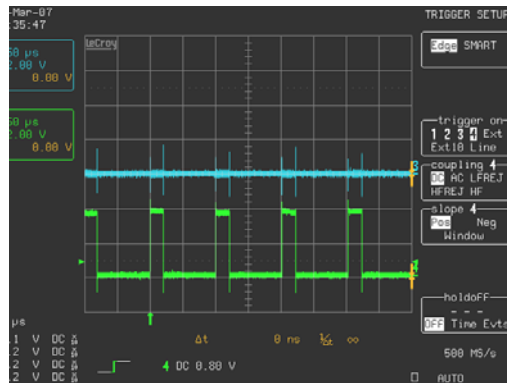


그림 26. 1250 Pulse Generation

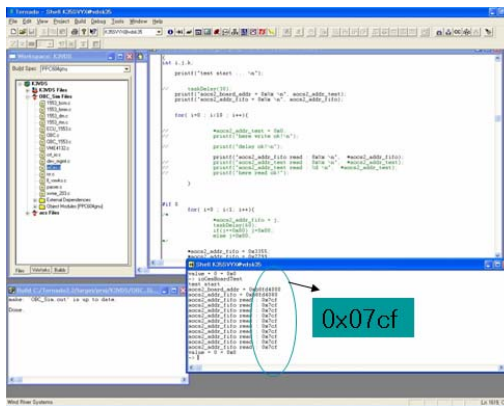


그림 24. Measured Pulse Number for 250Hz

개의 펄스를 발생시켰으므로, 펄스와 펄스 사이의 시간 간격은 100μsec 임을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 반작용 휠의 속도 측정 방법을 소개하고 각 방법이 갖는 해상도 및 정밀도를 비교하였다. 이런 비교 분석에 근거하여 저속 일 때의 정확도를 높이기 위하여 기존에 사용해왔던 M-방식보다 T-방식을 추가 고려하여 반작용 휠의 속도 측정을 수행한다. 그러므로 지상 검증 장비인 위성 동역학 시뮬레이터내의 반작용 휠의 속도를 측정 및 펄스를 발생 시킬 수 있는 보드의 설계 및 실험 결과를 제시하였다. 그러나 현재는 보드 자체의 성능 검증만 이루어진 상태이므로, 향후 반작용 휠과 기타 전장박

스와의 연동시험을 통한 검증이 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. T. Ohmae, T. Matsuda "A Microprocessor -Controlled high-Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives", IEEE Trans on Ind. Elec. vol IE29, No 3,pp. 207~211, 1982.
2. R. Kavanagh, "Improved Digital Tachometer with Reduced Sensitivity to Sensor Non-ideality", IEEE Trans on Ind. Elec. Vol 47, No 4, pp.890~897, 2000.
3. K. Fujita, K. Sado " Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for ac Servo Systems", IEEE Trans on Ind. App. Vol 28, No 4, pp.864~872, 1992.
4. Randy H. Katz , "Contemporary Logic Design", The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.,1994.