

속도 오차 외란이 반작용 휠 제어에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

김지철[†] · 이형준 · 유지훈 · 오화석

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Experimental Study on Effects of Speed Error Disturbance on Reaction Wheel Control

Jichul Kim[†], Hyungjun Lee, Jihoon Yoo and Hwasuk Oh

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract : There are many possible disturbance sources on such a spacecraft, but reaction wheel assembly (RWA) which is generally used for spacecraft attitude control is anticipated to be the largest. These effects on degradation of performance of spacecraft such as attitude stability. In reaction wheel, disturbance caused by imbalance and speed error. It is hard to emulate speed error disturbance because it is not coincide with wheel frequency. This paper concentrates on emulating and analyzing the speed error disturbance. Firstly, classify the causes that lead to speed error disturbance which generate RPM fluctuation. Secondly, simulated with disturbance driver module and reaction wheel assembly which are developed by Spacecraft Control Lab. Experimental investigations have been carried out to test the disturbance emulator module as a disturbance generator for RWA. Measurements and test have been conducted on various fault. Frequency analysis of test data show that speed error disturbance effects on wheel settling wheel speed or fluctuation type.

Key Words : Reaction Wheel, Speed Error Disturbance, Disturbance Generator

1. 서 론

최근 인공위성의 임무의 고도화에 따라 요구조건이 높아짐에 따라 자세 정밀도와 안정성의 요구가 높아지고 있다. 이러한 요구조건을 만족하기 위하여 위성의 정밀한 자세제어가 뒷받침 되어야 한다. 자세 제어의 정밀도 및 안정성을 저해하는 요인으로는 지구대기, 태양 복사압, 지자기장 같은 운용 환경에서 오는 외부적 외란과 구동기나 시스템의 쿨러 등에서 오는 내부적 외란이 있다. 이러한 복합적인 외란이 지속적으로

작용하게 될 경우, 위성 자세제어의 기능 저하와 직접적으로 연결되고 나아가 기능 상실의 위험성에 노출된다. 실질적인 예로 태양 폭발로 인해 AT&T사의 Telstar 401 위성의 기능상실로 인한 2억 달러 이상의 손실이 발생되었다. 위성에 작용한 외란과 고장은 엄청난 손실을 야기하기 때문에 위성에 작용하는 외란에 대한 대비가 필요한 상황이다.[1]

위성에 작용하는 외란의 내부요인들을 살펴보면, 위성 자세제어를 위한 회전형 구동기와 극저온 냉각 cooler 등이 외란을 야기하는 주요 요소들로 꼽히고 있다. 위성에 미치는 영향이 가장 큰 회전형 구동기 중 반작용 휠의 경우 그동안 정확한 휠/교란 모델링이 다양하게 연구되었다. 하지만 기존의 연구는 반작용 휠의 외란 요인 중 정적 불균형 (Static Imbalance)과

Received: Nov. 03 2015 Revised: Feb. 22 2016 Accepted: Feb. 23, 2016

[†] Corresponding Author

Tel: +82-2-3159-0147, E-mail: jimoony@kau.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

동적 불균형(Dynamic Imbalance)에 대한 모델링과 모사장치 개발에 대한 것이 대부분이고, 제어외란(Speed Error)에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.[2-5]

본 논문에서는 모사용 Driver module을 직접 개발하고 고장을 원인별로 모사하기 위해 드라이버의 신호를 적절히 변경하여 고장과 동일한 현상을 나타나도록 하였다. 모사된 고장을 외란 측정 테이블로 제어외란을 측정하여 제어외란이 반작용 휠에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 위성 구동기 외란

2.1 외란 분류

위성의 외란은 외부외란 (External Disturbance), 내부외란 (Internal Disturbance)로 구분된다. 일반적으로 내부외란에 비해서 외부외란은 매우 작다. 내부외란의 주요 원인은 위성의 자세제어용 구동기이다. 위성의 구동기는 Reaction Wheel, Control Moment Gyro(CMG) 등과 같은 회전형이다.

회전형 구동기의 특성상 휠 회전으로 인한 진동형태의 외란이 발생한다. 회전형 구동기의 외란은 휠의 불균형에 의한 외란과 제어 외란으로 나눌 수 있다.

휠의 질량 불균형에 의하여 발생하는 외란은 정적 불균형과 동적 불균형으로 나눌 수 있다. 휠의 질량 불균형에 의한 외란은 반경 방향의 외란에 해당하고, 휠의 질량 중심의 변위와 관련이 있다.

휠의 제어 외란은 휠의 속도 변화에 의해 발생하게 된다. 휠 구동속도인 휠 속도를 변화시키는 요인은 일반적으로 구조적인 원인과 제어적 외란 원인으로 나눌 수 있다. 구조적인 원인의 대표적인 경우는 전력공급 이상, Motor Stator 파손, Hall Sensor 파손 등이 있다. 제어적 외란 원인은 통신 오류 등으로 야기되는 제어기 성능저하와 속도 측정 정확도 저하 등이 있다. 위성에 주요한 영향을 미치는 구동기의 외란을 정리하여 Fault Tree Analysis를 그려보면 Fig. 1과 같이 나타 낼 수 있다. [6]

2.2 반작용 휠의 제어외란

위성 외란의 주요 원인인 회전형 구동기 중 반작용 휠은 모터, 인버터, 드라이버로 구성된다. 일반적으로 Sensored BLDC 직류모터로 제작된 반작용 휠을 구동하기 위해서 Hall sensor의 신호를 받아 인버터를 통해 모터로 신호를 넣어준다. 인버터는 U, V, W상을 제어하기 위해 6개의 MOSFET이 2개씩 짝을 이루어 로터의 자극방향에 맞춰 신호를 주어 모터를 구동한

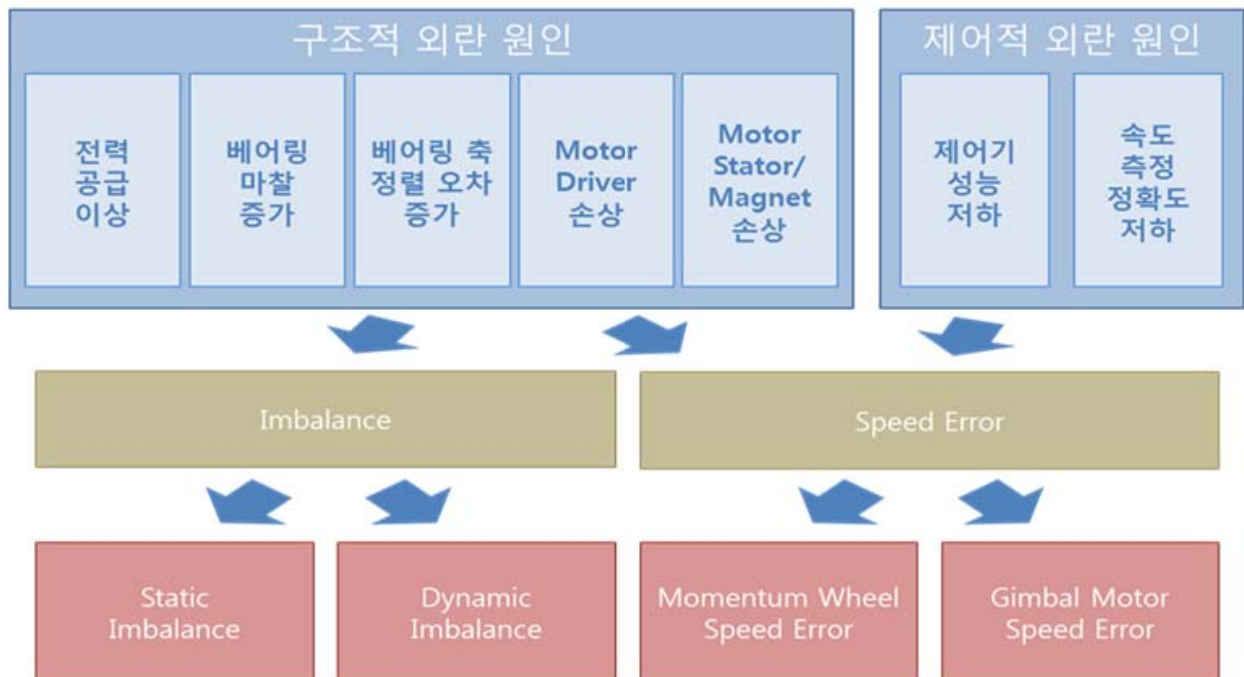


Fig. 1 Internal Disturbance Fault Tree Analysis

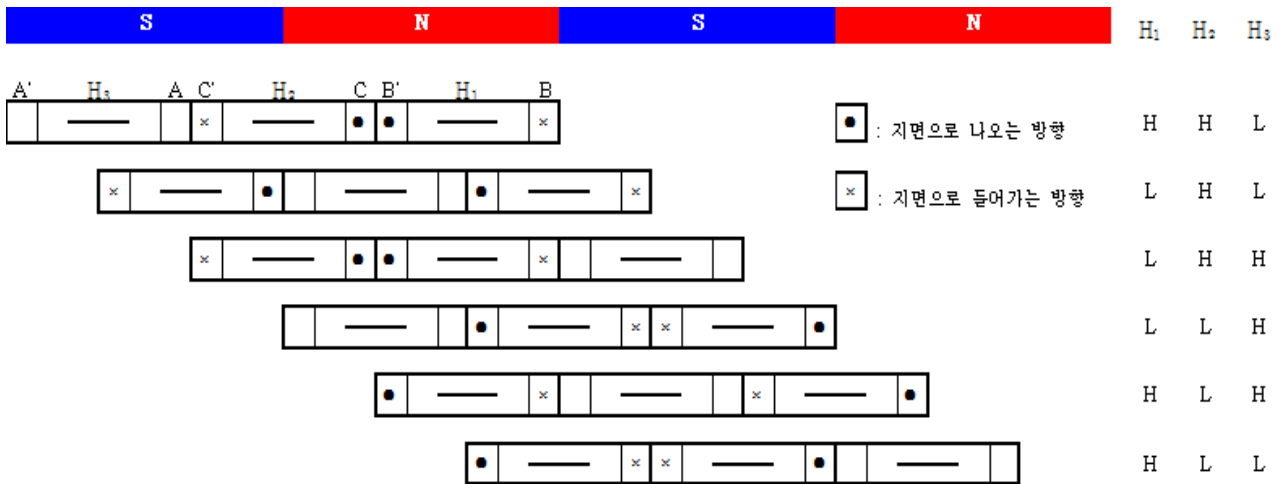


Figure 2 BLDC Motor Sequence

다. 2극 3상 모터의 경우 6개의 sequence가 존재하고 이를 정리하여 도식화하여 나타내면 Fig. 2와 같다.[7] 2극 3상 BLDC 모터는 2개의 극과 3개의 상을 갖는 모터로, Fig.2의 경우 2극 3상 radial type을 전개하여 도식화하였다. 여기서 \bullet , \times 는 각각 전류의 방향을 나타낸 것이다. 따라서 H_1 , H_2 , H_3 3개 홀센서 신호를 받아 해당 신호에 맞게 U, V, W Coil에 신호를 넣어주는 것을 보여주고 있다.

만약 U, V, W Coil 중의 하나가 파손되어 단락된다면 전류가 제대로 흐르지 못하여 정상 sequence 구동을 할 수가 없게 된다. 또한, Hall sensor 하나가 파손되어 신호가 제대로 나오지 않게 되면 하나의 Hall sensor에서는 High 또는 Low의 신호만을 출력하기 때문에 기존의 6개의 sequence 중 3개만 작동하게 된다. 전원공급이상의 경우 회로의 신호가 주기적으로 On/Off 현상을 반복하게 되는데 이로 인해 sequence가 주기적으로 On/Off 되기 때문에 휠 속도 변화가 생기게 된다. 언급한 3가지의 원인 이외에도 다양하게 휠 속도 변화를 야기할 수 있는 원인들이 존재하게 된다. 이러한 휠 속도의 변화는 제어외란 토크를 만들게 되고 이로 인해 휠의 성능이 저하되게 된다. 본 논문에서는 앞서 언급한 3가지 경우에 대해 Driver module을 제작하여 이를 모사하고, 외란에 따른 휠의 RPM을 분석하여 외란 토크의 영향성을 분석한다.

3. 제어외란 모사 장치 및 측정 방법

3.1 제어외란 모사장치

앞서 정의한 제어외란을 모사하여 외란 토크를 만들기 위해서는 휠의 속도를 직접적으로 변화시켜야 한다. 제어외란을 발생시키는 요인을 크게 3가지로 분류하면 전력공급이상, Motor Stator 파손, Hall Sensor 파손이다. 위와 같은 요인들은 실제 모터가 고장이 발생한 경우에 나타나는 요인들로, 반작용 휠의 파손 등의 상황을 구현하는 데에는 어려움이 있다. 고장 상황과 동일한 모사 신호를 넣어 이를 모사하였다. 따라서 Fig. 3과 같이 Disturbance Driver Module을 제작하였다. 개발된 드라이버 모듈을 반작용 휠에 연결하여 구동하며 각 고장 모드별 신호를 인가하여 고장상황을 모사하였다.

Disturbance Driver Module의 경우 Atmel사의 Atmega 2560과 Atmega 16으로 구성되어 있다. Atmega 2560의 경우 모터의 제어를 담당하고, Atmega 16의 경우 기존의 상용 드라이버의 모터의 신호를 넣어주는 역할을 한다. 기존의 상용 드라이버의 칩의 경우 정상 sequence의 신호만을 출력하기 때문에 고장상황을 모사하기 위해 Atmega 16을 사용하여 각 상황에 맞는 Sequence의 신호를 내보내도록 구현하였다.



Fig. 3 Disturbance Driver Module

Atmega 2560의 경우 반작용 휠을 Motor를 제어하는 역할을 담당하고, 실제 구동 RPM을 측정한다. 또한 고장모사에 대한 모드를 선택하는 역할을 수행한다. 또한 BLDC 모터를 구동하기 위해 6개의 MOSFET으로 이루어진 인버터가 있으며, 이를 통해 각 sequence의 신호를 이용하여 U, V, W상 전류흐름을 제어하는 역할을 수행한다.

개발된 Disturbance Driver Module과 반작용 휠을 통해 제어외란의 각 원인별 모사를 수행한다. 고장 모사에 사용된 반작용 휠은 Fig. 4와 같고, 이는 한국항공대학교 위성제어실험실에서 자체 개발된 SRV-451을 사용하였으며, 제원은 Table 1과 같다.[8]



Fig. 4 Reaction Wheel [SCL RWA SRV-451]

Table 1 SRV-451 Specifications

Specification	SRV-451
Angular Momentum @ nom. Speed	0.45 Nms
Dimensions	∅ 139mm x 70mm
Total mass	1.25 kg
Wheel Inertia	0.00143kg.m ²
Nominal Wheel Speed	4000 rpm
Max Wheel Speed	4200 rpm
Max Reaction Torque	
- @ 0 rpm	48 mNm
- @ nominal Speed	15.9 mNm

3.2 제어외란 측정

반작용 휠 SRV-451과 Driver Module을 이용하여 제어 외란을 발생시키고, 외란을 측정하기 위해 Fig. 5의 위성제어실험실에서 개발한 3축 외란측정 테이블을 이용하였다. 외란측정 테이블은 3축 load cell 4개를 조합하여 1024Hz로 힘과 토크를 측정가능하다. 외란측정 테이블의 제원은 Table 2와 같다. [9]

앞서 말한 반작용 휠을 외란테이블에 설치 후 Disturbance Driver Module을 연결하여 고장상황들을 모사한 후 Data를 측정한다.

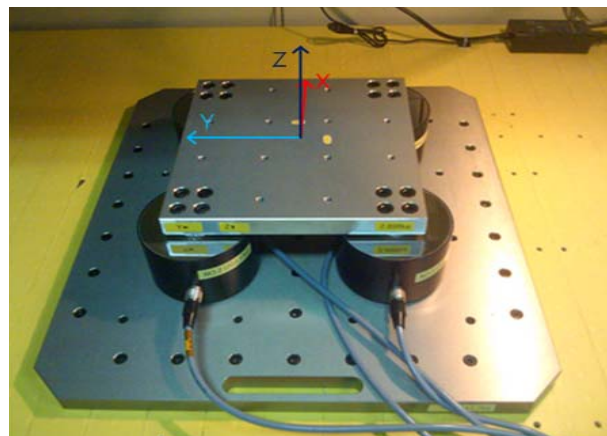


Fig. 5 Disturbance Measurement Table

4. 제어외란 영향성 실험

Table 2 Disturbance Measurement Table

Specification						
	F_x	F_y	F_z	T_x	T_y	T_z
Range (N,N-m)	±1200	±1200	±1200	108	108	216
Natural Frequency (Hz)	450	433	667	890	892	606
Noise (N/√Hz, N-m/√Hz)	< 0.028					
Resolution	16bit					

발생된 외란의 영향성을 분석하기 위해, 휠의 임의의 정적 Imbalance를 포함시키고, 이를 측정하여 이를 Low-pass Filter를 이용하여 노이즈를 제거하면 Fig 6과 같다. 이를 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼 분석을 통해 휠의 속도를 분석하여 외란의 영향을 분석한다. FFT분석을 거치면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있으며, Imbalance 발생 주파수를 구동 RPM을 보다 정확하게 얻을 수 있다.

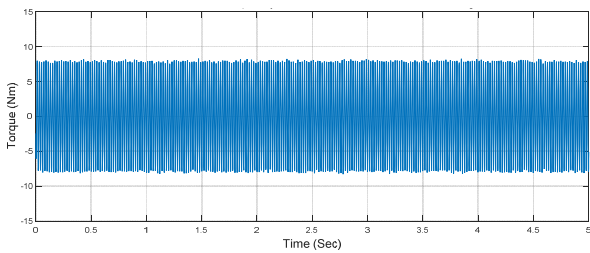


Fig. 6 1-axis Force (Filtered Data)

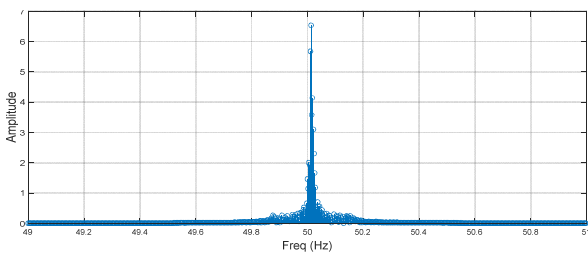


Fig. 7 FFT of 1-axis Force Data

4.1 정상모드

정상상태인 2극 3상의 모터 기준으로 경우 6가지의 종류의 시퀀스 통해 회전이 일어난다. 인버터 모터와 드라이버를 도식화 하여 6개의 sequence에 따른 전류의 방향을 Fig. 8에 나타냈다. 3개의 Coil은 각각 U, V, W 상의 Coil을 의미한다. Fig 9는 임의의 Imbalance가 추가된 휠을 구동하였을 때, 기존의 반작용 휠의 RPM 측정과 외란 측정 테이블의 data를 FFT 분석한 후의 RPM 결과이다.

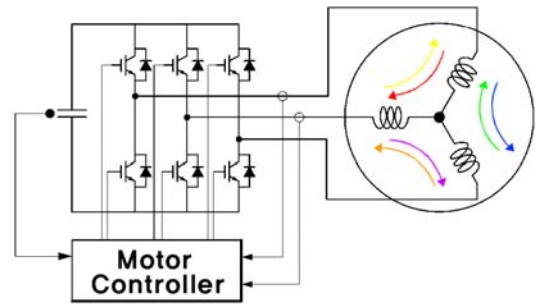


Fig. 8 Normal Operation

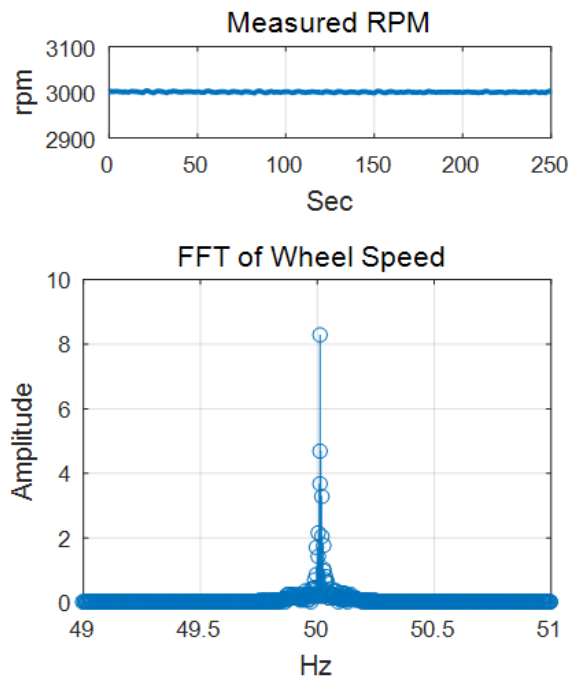


Fig. 9 Normal Operation

4.2 전원공급이상

전원공급이상인 경우 전원부의 커넥터나 인버터 보드의 PCB 결함, 진동으로 인한 구동기 보드 손상 등으로 접촉 부분이 불안정해진 경우에 발생할 수 있다. 전원공급이상의 경우 Fig. 10에서 나타난 것과 같이 전류의 흐름은 정상모드와 동일하지만 전원이 On/Off를 반복되는 현상을 의미한다. Driver Module을 통해 주기적으로 신호를 반복하며 고장을 모사하였다. Fig 11은 임의의 Imbalance가 추가된 휠을 구동하였을 때, 기존의 반작용 휠의 RPM 측정과 외란 측정 테이블의 data를 FFT 분석한 후의 RPM 결과이다.

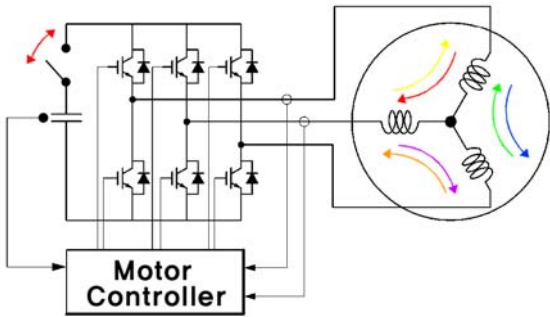


Fig. 10 Power Fault

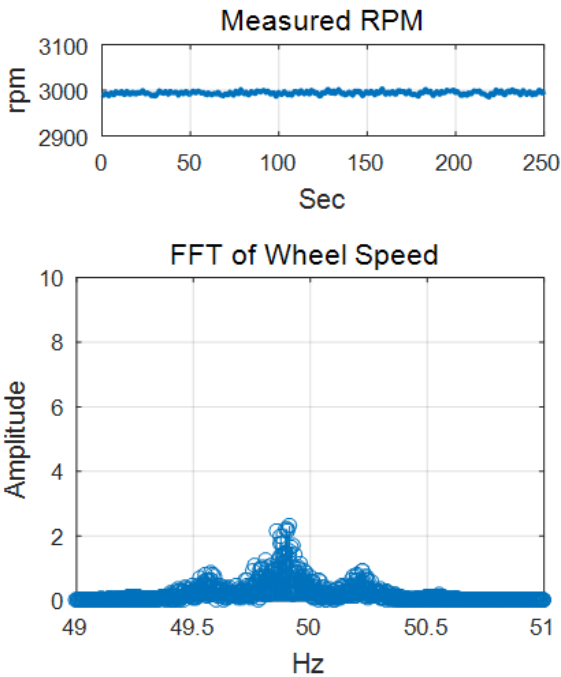


Fig. 11 Power Fault

4.3 Motor Stator 파손

Motor Stator 파손의 경우 Fig. 8에 나타난 것과 같이 모터의 Coil, 즉 Phase의 일부가 끊어져 정상적인 역할을 하지 못하는 현상이다. 우주환경에 의한 결함 절단이나 진동으로 인한 Coil의 절단, 구동 중의 마찰이나 열에 의해 발생할 수 있다. Motor Stator 파손의 경우 2개의 시퀀스만 들어가기 때문에 정상상태에 비해 1/3 들어가게 된다. 따라서 Driver Module을 통해 2개의 시퀀스만 넣어 고장상황을 모사하였고, Fig 13은 반작용 휠의 RPM 측정과 외란 측정 테이블의 data를 FFT 분석한 후의 RPM 결과이다.

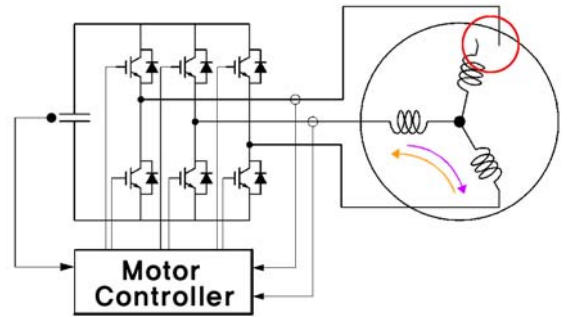


Fig. 12 Phase cut fault

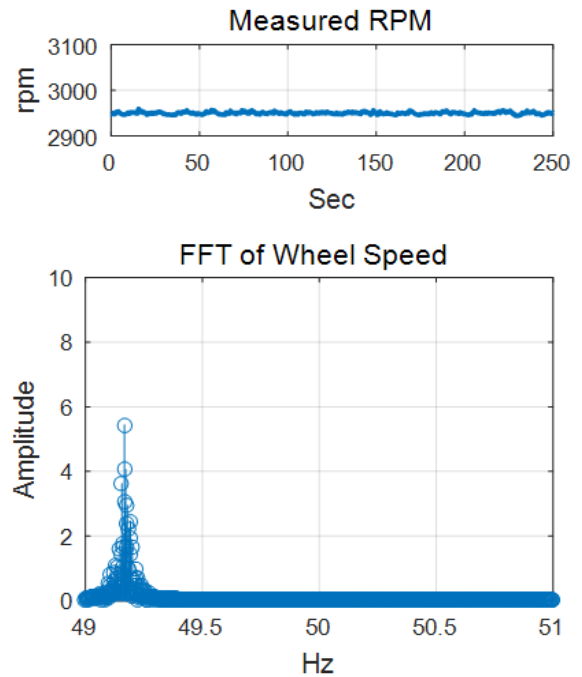


Fig. 13 Phase cut fault

4.4 Hall sensor 파손

Hall Sensor 파손은 신호가 정상작동하지 않은 경우이다. 진동 등으로 인해 Hall sensor의 파손되어 신호가 제대로 나오지 않아 발생한다. Hall sensor 파손을 모사한 경우 추가적인 RPM 측정 장치가 존재하여 RPM 측정에는 문제가 없다는 가정 하에 이루어진다. Hall sensor 파손의 경우 Fig. 9와 같이 모터의 전류는 3개로 줄어들게 된다. Hall sensor 중 하나가 신호가 제대로 나오지 않아 하나의 신호만 나오게 되어 1개의 부작용과 2개의 오작동이 나오게 된다. Driver module을 통해 Hall sensor 하나의 신호를 고정시켜 고장상황을 모사하였다. Fig 15는 측정 결과이다.

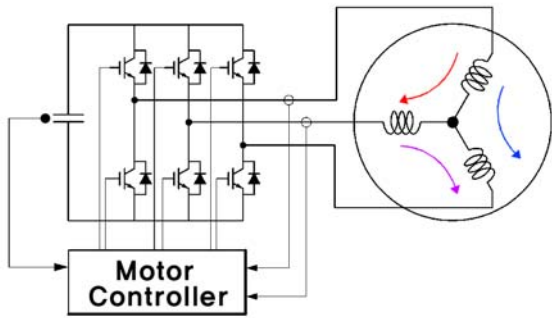


Fig. 14 Hall Sensor Fault

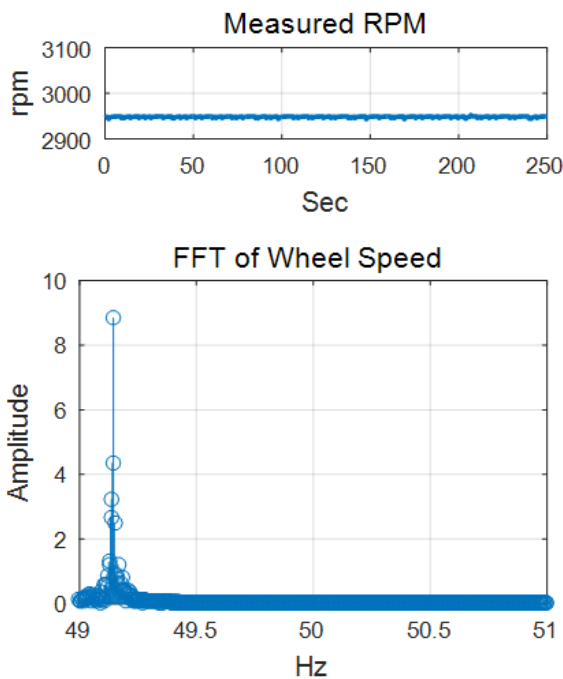


Fig. 15 Hall Sensor Fault

5. 제어외란 영향성 분석

속도 오차로 발생하는 제어외란의 각 원인별 분석을 위하여 임의의 불균형 질량을 부착하고 불균형성 때문에 발생하는 힘을 분석하여 속도 변화를 확인하였다.

정상 모드의 경우 3000 RPM으로 회전하는 상태에서 약 ± 10 RPM 정도로 제어가 되고 있는 상태로 정상 운행되고 있음을 확인할 수 있다.

여기에서 전원공급이상이 발생을 했을 때, 반작용 휠의 속도 제어가 잘 되지 않는 것을 볼 수 있다. 짧은 시간이지만 전원 off 상태가 지속되면 3000 RPM을 기준으로 -30 RPM가량 속도가 떨어지고 다시 전원이 on 상태가 되면 제어가 작동을 하면서 부족한 속도를 보상을 하지만 전체적인 속도가 정상모드보다 낮다는 것을 알 수 있다.

또한 Motor Stator 파손으로 인한 Phase cut의 경우 기존의 6개의 Sequence 중 2개의 Sequence만 들어가기 때문에 제어가 정확하게 작동을 하지 못하고 정상 모드 보다 50 RPM 가량 낮은 속도로 수렴하는 것을 볼 수 있다. Hall sensor 고장의 경우 위의 경우와 비슷한 경향을 보이게 되는데 Phase cut과의 차이는 수렴하는 속도는 비슷하지만 속도의 변화가 적은 것을 알 수 있다. 이는 Phase cut의 경우 1/3의 Sequence가 작동을 하고 Hall sensor 고장의 경우 1/2의 Sequence가 작동하기 때문에 Sequence 손실에서 오는 속도 변화가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다.

각 고장 원인별 현상을 정리하면 Table 3과 같이 정리할 수 있다.

Table 3 Result of All Fault Operation

구분	Normal Operation	Power Fault	Phase cut Fault	Hall Sensor Fault
Settling RPM	3000	3000	2950	2950
Range of Oscillation	± 0.15 Hz	± 0.3 Hz	± 0.25 Hz	± 0.15 Hz
Number of Operable Sequence	6	6	2	3

6. 결 론

본 논문에서는 위성의 외란의 주요한 원인인 회전형 구동기인 반작용 휠의 외란에 대해 분류하였고, 휠의 외란 중 제어외란에 대해 모사장치를 개발하여 반작용 휠과 외란추정 테이블을 통해 외란 모사 시험을 진행하여 영향성을 분석하였다. 3개의 원인에 대한 분석을 통해 각 원인별로 휠의 영향성을 관별해 보았고, 이를 통해 제어외란이 발생하였을 경우 진단에 대한 기초 정보를 제공하였다.

외란의 정확한 크기에 대한 분석과 외란이 발생하였을 경우 외란을 분류 및 진단하는 알고리즘에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

[1] J. Liliensten, J. Bornarel, "Space Weather, Environment and Societies", 1st Ed., Springer, Jan. 2006.

[2] Bialke, B., "High Fidelity Mathematical Modeling of Reaction Wheel Performance", in 21st Annual American Astronautical Society Guidance and Control Conference, AAS paper 98-063, 1998.

[3] Masterson, R. A. and Miller, D. W., "Development and Validation of Empirical and Analytical Reaction Wheel Disturbance Models", Thesis of Master Degree at MIT, 1998.

[4] Bosgra, J. and Prins, J. J. M., "Testing and Investigation of Reaction Wheels, in Automatic Control in Space", 9th Symposium, pp. 449~458, 1982

[5] S. Lee, D. Kim, D. Cheon, H. Oh, Y. Kim, K., Kim, "RWA Disturbance Effects on the LOS stability", Journal of Aerospace System Engineering, Vol.2, No.1, pp.13-16, Mar, 2008

[6] D. Choi, "Attitude Stability Analysis of Spacecraft on Disturbance", Thesis of Master Degree at KAU, 2012

[7] J. Kim, "Reaction Wheel Controller of Flight Model Design and Verification", thesis of Master Degree at KAU, 2012

[8] S. Beck, "Frequency Analysis of Control Disturbances in Actuators and the Development of Disturbance Emulator", thesis of Master Degree at KAU, 2015

[9] D. Cheon, E. Jang, H. Oh, "Reaction Wheel Disturbance Reduction Method Using Disturbance Measurement Table", Journal of Astronomy and Space Sciences, vol 28, Issue 4, pp. 311-317, 2011

후 기

"본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다."

저 자 소 개



김 지 철

2009년 한국항공대 기계공학과 졸업.
2011년 동 대학 석사과정 졸업. 2012~현재 동 대학원 항공우주 및 기계공학과 박사과정. 관심분야는 제어 및 동역학



이 형 준

2014년 한국항공대 기계공학과 졸업.
2015년~현재 동 대학 항공우주 및 기계공학과 석사과정. 관심분야는 제어 및 동역학



유 지 훈

2014년 한국항공대 기계공학과 졸업.
2014년~현재 동 대학 항공우주 및 기계공학과 석사과정. 관심분야는 제어 및 동역학



오 화 석

1980 한국항공대 항공기계공학과 졸업.
1988/1992년 Texas A&M University 석사/박사 졸업. 1997년~현재 한국항공대 항공우주 및 기계공학과 교수.
연구 관심분야는 제어 및 동역학