

技術論文

FFT를 이용한 레이저 관성항법장치 고장검출 기법

유해성*, 김천중*

Fault Detection Method of Laser Inertial Navigation System Using FFT

Hae-Seong Yoo* and Cheon-Joong Kim*

ABSTRACT

Laser Inertial Navigation System(LINS) consists of Ring Laser Gyroscopes(RLG) and accelerometers. RLG has a lock-in region in which there is zero output for input angular rates less than 0.1deg/sec. The lock-in region is generated by the imperfect mirrors in RLG. To avoid the lock-in region, sinusoidal motion which is called dither motion is applied on RLG. Therefore without the fault in LINS, the dither motion must be measured by RLG/accelerometer. In this paper, we propose the method to detect the fault of LINS through checking out whether or not the dither motion is always measured by RLG/accelerometer using the Fast Fourier Transformation(FFT) on the real time. The feasibility of the fault detection method proposed in this paper is verified through the stationary and van test.

초 록

레이저 관성항법장치는 링 레이저 자이로와 가속도계로 구성되어 있다. 링 레이저 자이로는 링 레이저 자이로 내부의 레이저 공진기에 장착된 반사경의 후방산란으로 인하여 0.1deg/sec 이하의 각속도가 측정되지 않는 lock-in 영역이 존재하기 때문에 이를 제거하기 위해서 Dither 운동이라는 정현파 각속도 운동을 몸체에 가한다. 이러한 Dither 운동은 레이저 관성항법장치가 정상동작하는 경우 항상 RLG/가속도계 측정치에 포함되어 나타난다. 이러한 레이저 관성항법장치의 특징을 이용하여 본 논문에서는 RLG/가속도계 측정치를 실시간으로 FFT를 수행하여 Dither 운동이 측정치에 포함되어 있는가를 실시간으로 감시하여 레이저 관성항법장치의 고장을 검출하는 방법을 제안하였으며 정지상태 시험 및 차량탑재 시험을 통해 유용성을 검증하였다.

Key Words : RLG(링레이저 자이로), LINS(레이저 관성항법장치), Dither Motion(Dither 운동), Fault Detection(고장 검출)

1. 서 론

관성항법장치는 자이로 및 가속도계 등 관성 센서를 이용하여 정밀한 위치, 속도, 자세, 각속

도 및 가속도 정보를 실시간 제공하는 장비로서 유도무기 및 무기체계 자동화 목적으로 지상, 해상, 항공, 우주 분야 등 다양한 분야의 운반체에 공통으로 소요되는 핵심부품이다. 특히 관성항법장치는 GNSS(Global Navigation Satellite System)와 같은 전파항법에 비하여 별도의 외부 장비가 필요치 않고, 전파방해를 받지 않는 등의 장점이 있으므로 정밀 항법정보가 요구되는 주요

† 2008년 11월 25일 접수 ~ 2009년 4월 20일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

교신저자, E-mail : haesong7@add.re.kr

대전광역시 유성구 조치원길 462번지

무기체계에서는 관성항법장치를 주 항법장치로 많이 사용하고 있다[1]. 여러 무기체계에 적용되는 관성항법장치의 오동작은 관성항법장치를 사용하고 있는 무기체계의 심각한 오동작을 유발하게 되므로 관성항법장치의 정상동작 여부를 연속적으로 판단하는 기능은 무기체계 운용관점에서 매우 중요하다. 현재 선진국에서 생산 및 운용되는 관성항법장치에는 자체 고장검출 기능을 모두 내장하고 있으며 고장검출 확률 또한 95% 이상을 목표로 관성항법장치를 설계/개발하고 있다[1].

광학식 자이로의 일종인 RLG (Ring Laser Gyroscope)를 탑재한 관성항법장치를 일반적으로 레이저 관성항법장치(LINS; Laser Inertial Navigation System)라 한다[4]. RLG는 일반적으로 RLG 내부의 레이저 공진기에 장착된 반사경의 후방산란으로 인하여 0.1deg/sec 이하의 각속도가 측정되지 않는 lock-in 영역이 존재하기 때문에 이를 제거하기 위해서 강제로 약 400 Hz 주기를 가지며 lock-in 크기의 1000배 정도의 정현파 각속도 진동을 RLG의 레이저 공진기에 가하는데 이를 Dither 운동이라 한다[2-3]. RLG 측정치를 항법에 이용하기 위해서는 항체의 운동과 무관한 Dither 운동을 제거하여야 하며 Dither 운동을 RLG 출력에서 제거하는 방법으로 Trapping 기법과 Stripping 기법 등이 있다[3-4]. 관성항법장치 기능/성능 측면에서 보면 Dither 운동은 제거해야 할 신호이지만 신호특성상 일정한 주파수를 항상 유지하고 진폭 또한 일정한 범위에 있기 때문에 이를 이용하여 관성항법장치의 정상동작 여부를 판단하는데 이용가능할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 RLG를 탑재한 LINS의 고장검출을 위하여 RLG에 인가되는 Dither 운동을 이용하는 방법을 제시한다. 3개의 RLG와 가속도계로 구성된 관성센서 조립체로부터 출력되는 측정치에는 LINS가 정상적으로 동작하는 경우 항상 3축의 RLG에서 인가되는 Dither 운동이 포함되어 있다. 만약 관성센서 조립체, 센서 전자회로, 항법컴퓨터 등으로 구성되는 LINS 신호흐름상에 고장이 발생하는 경우 Dither 운동이 관성센서 조립체로부터 출력되는 측정치에서 감지되지 않게 된다. 이러한 원리를 이용하여 시스템 레벨에서 LINS의 고장검출 기법을 새로이 제시하였다. 고장검출 기법 설계를 위하여 본 논문에서는 관성센서 출력치에 포함된 Dither 운동을 모델링하였으며 이를 근거로 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 관성센서 측정치로부터 Dither 운동을 식별하고 이를 이용하여 LINS의 정상동작 여부를 판단하는 새로운 LINS 고장검

출 기법을 제시하였다. 또한 본 논문에서 제시한 LINS 고장검출 기법의 성능을 확인하기 위하여 정지상태 혹은 운항중 관성센서 측정치에서 Dither 운동을 식별하고 이를 이용하여 LINS의 고장검출을 수행하는 시험결과를 제시하였다.

본 논문의 구성을 살펴보면 2장에서는 LINS의 기본 구성, 동작원리 및 신호 흐름도를 소개하고 3장에서는 LINS의 RLG 및 가속도계에서 출력되는 측정치에 포함된 Dither 운동을 모델링한 결과를 제시하고 이를 근거로 RLG 및 가속도계 측정치에 대한 FFT 수행결과를 이용하여 LINS의 고장을 검출하는 기법에 대하여 기술하였다. 또한 본 논문에서 제시한 고장검출 기법의 유용성을 검증하기 위한 시험 방법 및 결과를 제시하였으며 마지막으로 4장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. LINS 구성 및 동작원리

2.1 LINS 구성

LINS는 RLG와 가속도계를 관성센서로 사용하는 항법장치이며 LINS의 주요 구성품별 개략 기능은 표 1과 같다.

2.2 RLG 동작원리

RLG는 기존의 회전 물리량을 이용한 기계식

표 1. LINS 구성 및 개략 기능

	구성품	세부 구성품	주요기능
LINS	관성센서 조립체	링레이저 자이로	각속도 측정
		가속도계	가속도 측정
	센서 전자회로	자이로 인터페이스 보드	3축 자이로 신호처리, 제어 및 항법컴퓨터로 출력 제공
		가속도계 인터페이스 보드	3축 가속도계 신호처리 및 항법컴퓨터로 출력 제공
	항법 컴퓨터 & 통신보드	항법컴퓨터 보드	정렬/항법/고장검출 기능 수행
		통신 보드	외부로 데이터 전송
	전원공급 회로	저전압공급 보드	LINS 시스템 디지털/아날로그 전원 공급
		고전압공급 보드	자이로 구동/제어 전압 공급
	기구부	관성센서 조립 마운트, 방진기	외부 환경으로부터 관성센서조립체 보호
		하우징 및 커넥터	LINS 장착 및 시스템 연결

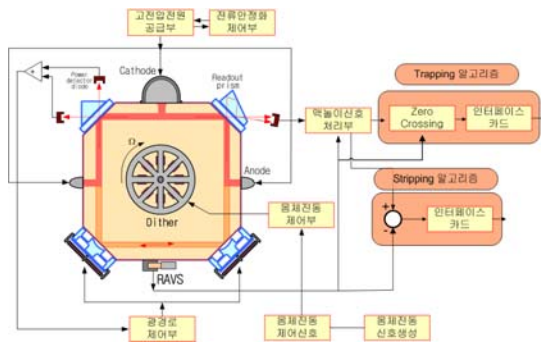


그림 1. RLG의 개략 구성도

자이로와는 달리, 서로 반대 방향으로 회전하는 두 빛의 상대적 주파수차를 이용하여 회전을 감지하는 센서이다. RLG의 개략 구성도를 나타내면 그림 1과 같다. RLG의 주요 구성품을 살펴보면 광경로를 이루는 모노블럭과, 모노블럭을 진동시키는 Dither, 광 유지에 필요한 전원을 연결하는 음극과 양극, 2 개의 평면경, 2 개의 구면경, 광경로 길이를 빛의 파장의 정수배로 유지하는 피에조 구동기(Piezo actuator), 서로 반대방향으로 진행하는 두 빛을 간섭시키는 프리즘, 간섭 무늬를 검출하는 포토 다이오드, 자이로 케이스에 대한 모노블럭의 상대적인 움직임을 검출하는 RAVS(Relative Angular Velocity Sensor) 등으로 이루어져 있다.

RLG는 특정 임계값 이하의 각속도를 감지하지 못하는 lock-in이라는 현상이 있다. 이를 극복하기 위해 Dither를 특정 주파수(약 400Hz)로 진동시키고, 진동 중에도 특정 임계값 이하의 각속도를 계속 경험하게 됨에 따라 짧은 순간동안 계속 lock-in에 빠지게 된다. 이때 랜덤오차가 발생하고, 만약 Dither 진폭을 일정하게 하는 경우에는 온도등 환경변화에 따라 바이어스 변화로 나타난다. 이를 극복하기 위해 Dither 진폭을 랜덤하게 바꾸어 주며, 통상 Dither 최대 각속도를 100deg/s를 중심으로 70deg/s~130deg/s로 변화하도록 제어한다. 자이로의 근본 목적인 관성공간에서의 각속도를 얻어내기 위해 반대 방향으로 진행하는 두 빛을 프리즘에서 간섭시킨 후 파장의 1/4 길이 지점에서 두 개의 포토 다이오드를 이용하여 신호를 검출한다. 이 신호들은 SIN 및 COS 신호로 명명되고, 두 신호의 위상차를 검출하여 각속도가 계산되며 측정된 각속도의 부호도 함께 결정한다. Dither를 고유주파수로 진동시키기 위해서는 위상에 일치시켜 Dither를 구동해야 한다. 이를 위해 RAVS 신호 출력을 이용하여

Dither 각 신호와 Dither 레이트 아날로그 신호를 구성하고, 이로부터 각각 이산 신호인 Dither 각도원점(DTH_ZA : dither zero angle)신호와 Dither 각속도 원점(DTH_ZR: Dither zero-rate)신호를 만들며, 이 신호를 이용하여 Dither의 진동 위상에 맞추어 구동한다.

2.3 가속도계 동작원리

LINS에 사용되는 가속도계는 펜듈럼으로 반도체 진자를 사용하는 가속도계이고, 그림 2에 개략적인 구성도를 나타내었다. 가속도계의 동작원리는 입력가속도가 펜듈럼에 입력되는 상황에서 펜듈럼을 영점 위치로 구동하기 위해, 픽업 단자에서 측정된 신호를 증폭, 복조, 신호처리 등을 통해 복원 코일에 전류를 제공한다. 이때 발생된 전류를 측정하여 가속도를 계측한다.

일반적으로 가속도계의 출력은 V_{out} 단자에 저항을 연결하고 전압을 모니터링하여 가속도를 계측하지만, LINS에서는 보다 정밀한 계측을 위해 가속도계 인터페이스 보드에 적분기 회로를 이용하여 전류방식으로 변환한 후 속도 증분을 계측한다.

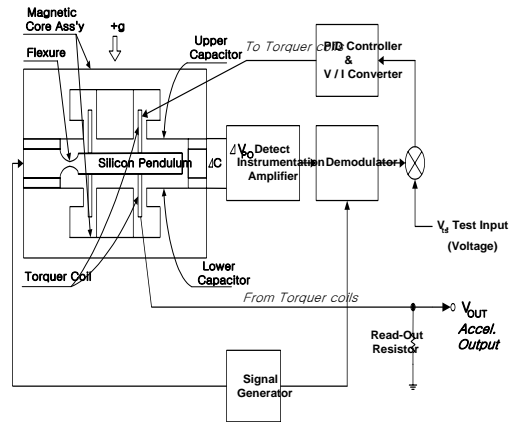


그림 2. 가속도계 구성도

2.4 LINS 주요 전자모듈 기능

2.4.1 저전압/고전압공급 보드

저전압 공급보드는 LINS 동작에 필요한 $\pm 5V$, $\pm 15V$ 전압을 공급한다.

고전압 공급보드는 RLG 동작에 필요한 고전압 전원을 공급하는 역할을 수행하며, 초기 발진에 사용되는 $+3200V$, 방전유지에 사용되는 $-1000V$, 광경로 제어에 사용되는 $-180V$, Dither 운동에 사용되는 $\pm 100V$ 를 제공한다.

2.4.2 자이로 인터페이스 보드

RLG와 관련된 모든 신호를 입력받아 제어를 수행하고 각속도 출력 등을 계산하며, RLG 고장검출 기능을 수행하여 항법컴퓨터로 전송한다.

2.4.3 가속도계 인터페이스 보드

가속도계 인터페이스 보드에서는 가속도계로부터 입력받은 아날로그 신호를 처리하여 항법컴퓨터로부터 제공되는 2400Hz 기준시간 신호에 동기되어 3축 가속도계의 속도증분, 온도 및 LINS 시스템 전원을 A/D 변환하여 항법컴퓨터로 전송한다.

2.4.4 항법컴퓨터 보드

자이로 인터페이스 보드 및 가속도계 인터페이스 보드로부터 입력받은 각종 데이터를 이용하여 항법계산을 수행하고 고장검출 프로그램을 구동하여 실시간 감시를 수행한다.

2.5 LINS 신호 흐름도

표 1의 LINS 구성품들이 모여져 LINS는 관성항법장치로서의 기능을 수행하게 된다. 저전압, 고전압 전원공급장치를 통하여 LINS에 전원이 인가되면 LINS에 장착된 관성센서인 RLG와 가속도계는 외부에서 입력되는 각속도 및 가속도를 측정하게 된다. 측정치는 자이로 및 가속도계 인터페이스 보드를 통하여 펄스 혹은 전압 형태로 항법컴퓨터로 고속 전송되며 항법컴퓨터는 이 값에 척도계수를 곱하여 물리적인 값으로 변환한 후 이를 이용하여 항법을 수행한다. 이 과정에서 항법컴퓨터에서는 관성센서 혹은 관련 인터페이스 보드를 제어하기 위한 신호가 출력되기도 한다. 앞에서 설명한 LINS 신호 흐름도를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림에서 나타낸바와 같이 LINS는 모든 구성품이 정상동작하는 경우 항법컴퓨터에 입력된 RLG 및 가속도계 측정치는 외부에서 입력된 각속도 및 가속도를 정확하게 측정하여야 한다. 만약 RLG 및 가속도계

가 외부에서 계측된 정보를 정상적으로 측정하지 못하는 경우에는 모든 측정오차가 항법오차로 나타나기 때문에 LINS는 관성항법장치로서의 기능을 상실하게 된다. 그러므로 LINS의 고장 여부를 판단하기 위하여 하드웨어적으로 LINS 구성품별 주요 신호를 획득하고 이를 이용하여 고장 여부를 판단하는 방법을 많이 사용한다. 그러나 이를 위해서는 별도의 추가적인 하드웨어의 개발이 필요하며 이는 추가된 하드웨어에 대한 또 다른 고장검출 방법이 요구되므로 일반적으로 고장검출을 위한 하드웨어는 전체 구성 하드웨어의 5~20% 범위가 되도록 일반적으로 시스템을 설계하나 LINS와 같이 높은 고장검출 확률을 요구하는 시스템일수록 고장검출을 위한 하드웨어의 비중이 높아질 가능성이 있다[7]. 그러므로 하드웨어적인 고장검출의 비중을 줄이면서 LINS의 운용성 및 신뢰도를 향상시킬 수 있는 소프트웨어적인 고장검출 기법의 개발이 새로이 요구된다.

III. 고장검출 기법 설계 및 검증

3.1 고장검출 기법 설계

앞에서 언급한 바와 같이 RLG 고유의 특성인 Dither 운동은 RLG의 lock-in을 제거하기 위하여 강제적으로 RLG에 인가해주는 정현파 운동으로서 약 100 deg/sec의 크기에 ±30 deg/sec의 랜덤한 크기가 더해지는 진폭을 가지고 400 Hz 부근의 주기로 RLG에 인가된다. 이러한 정현파 운동은 항법 계산과정에서 원하지 않는 것이므로 이것을 제거하는 두가지 방법이 있다. 하나는 RLG 측정치를 Dither 주기에 맞추어 측정하는 trapping 방식이며, 다른 하나는 RLG 측정치에 RAVS에서 측정된 Dither 운동을 빼주어 Dither 운동을 제거하는 stripping 방식이 있다. 현재 LINS에서 적용된 방법은 구현이 용이한 trapping 방식이며 trapping 방식을 사용하더라도 Dither 운동은 RLG 측정치에 Dither 운동과 다른 주파수를 가지는 정현파 형태로 포함되어 측정된다.

LINS 고장검출 기법 설계를 위하여 관성센서 측정치에 포함된 Dither 운동에 대한 모델링이 요구된다. 이를 위해서는 먼저 LINS 제작시 관성센서 조립체를 구성하는 방법에 대한 언급이 요구된다. 표 1의 LINS 구성품을 이용하여 LINS 구성시 3개의 RLG의 Dither 주파수는 400Hz를 기준으로 하여 축간 상호간섭을 피하기 위하여 약 30 Hz 정도 차이를 두고 축 선정을 하며 대



그림 3. LINS 신호 흐름도

략 370 ± 10 , 400 ± 10 , 430 ± 10 Hz 부근에 Dither 주파수가 설정되도록 3개의 RLG를 선정하여 관성 센서 조립체를 구성한다. 먼저 자이로 출력을 살펴보면 자이로는 trapping 방식을 사용하므로 자이로 자신의 측정치에는 Dither 운동에 의해 가해진 정현파 운동이 측정되지 않으나 자이로 자신의 Dither 주파수와 다른 두 축에 설치된 자이로의 Dither 주파수와 차에 해당하는 주파수를 가진 정현파 진동이 측정된다. 그리고 가속도계의 경우 자이로와 한 몸체에 장착되므로 자이로의 Dither 운동에 의한 정현파 진동이 측정된다. 자이로와 같은 축에 장착된 가속도계 역시 자이로가 장착 축을 기준으로 정현파 진동을 하므로 같은 축의 자이로 Dither 운동은 가속도계가 측정하지 않으며 이와 수직인 두 축의 자이로에서 인가되는 Dither 운동에 의해 정현파 가속도가 측정된다. 그러나 위의 분석은 RLG와 가속도계가 정확하게 측정될 때 이루어져 있고 축간 간섭이 없는 이상적인 경우에 RLG/가속도계 장착축에 대한 Dither 운동이 상호 측정되지 않으나 실제로 측정치를 분석해보면 장착축에 대한 Dither 운동이 다른 두축에 비하여 진폭이 작게나마 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 사실을 근거로 하여 Dither 운동에 대한 RLG/가속도계 측정치를 모델링하면 식 (1), (2)와 같다.

$$\begin{aligned} G_x &= G_{xy} \sin(2\pi|f_x - f_y|t + \theta_{xy}) + G_{xz} \sin(2\pi|f_x - f_z|t + \theta_{xz}) \\ &\quad + G_{yz} \sin(2\pi|f_y - f_z|t + \theta_{yz}) \\ G_y &= G_{yx} \sin(2\pi|f_y - f_x|t + \theta_{yx}) + G_{yz} \sin(2\pi|f_y - f_z|t + \theta_{yz}) \\ &\quad + G_{zx} \sin(2\pi|f_x - f_z|t + \theta_{zx}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$G_z = G_{zx} \sin(2\pi|f_z - f_x|t + \theta_{zx}) + G_{zy} \sin(2\pi|f_z - f_y|t + \theta_{zy}) + G_{xy} \sin(2\pi|f_x - f_y|t + \theta_{xy})$$

$$A_x = A_{xx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{xx}) + A_{xy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{xy}) + A_{xz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{xz})$$

$$A_y = A_{yx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{yx}) + A_{yy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{yy}) + A_{yz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{yz}) \quad (2)$$

$$A_z = A_{zx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{zx}) + A_{zy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{zy}) + A_{zz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{zz})$$

여기서 f_x, f_y, f_z 는 x, y, z축 RLG의 Dither 주파수, G_{ii} 는 i축 Dither 진폭, G_{ij} ($i \neq j$)는 i축과 j축의 상호 간섭에 의한 Dither 진폭을 의미한다.

식 (1), (2)와 같이 이론적/실험적으로 분석된 Dither 운동에 의한 RLG/가속도계 측정치 모델은 LINS의 고유 특성이며 LINS가 정상동작하는

경우에는 항상 RLG/가속도계 측정치에 식 (1), (2) 신호가 항상 포함되어 있어야 함을 의미하며 관성센서, 센서 전자회로, 항법 컴퓨터로 이어지는 LINS 신호흐름 상에 고장이 발생하는 경우 식 (1), (2) 신호는 RLG/가속도계 측정치에서 감지되지 않게 된다. 이러한 원리를 이용하면 식 (1), (2) 신호가 RLG/가속도계 측정치에 포함되어 있는가에 대한 판단이 가능하며 LINS 정상동작 여부의 판단이 가능함을 의미한다.

RLG/가속도계 측정치에서 식 (1), (2) 신호의 존재여부를 확인하는 방법으로 본 논문에서는 RLG/가속도계 측정치를 실시간으로 FFT하여 구한 주파수와 식 (1), (2)에서 모델링된 주파수를 상호 비교하여 식 (1), (2) 신호의 존재여부를 판단하는 방법을 제시한다. 식 (1), (2)에서 나타난 바와 같이 Dither 운동 특성상 진폭은 lock-in을 제거하기 위하여 랜덤하게 $70 \text{ deg/s} \sim 130 \text{ deg/s}$ 의 진폭으로 변하기 때문에 실시간으로 진폭에 대한 검출이 불가능하나 Dither 주파수는 RLG 제작시 정해진 고유의 특성이며 거의 변화가 없이 일정하기 때문에 FFT를 이용하여 RLG/가속도계 측정치에 식 (1), (2) 신호 존재여부를 판단하고 이를 이용하여 LINS의 정상동작 여부를 판단하는 과정에 이용되는 것이 매우 타당할 것으로 판단된다.

3.2 고장검출 기법 구현

본 절에서는 앞 절에서 제시한 LINS 고장검출 기법에 대한 구현방법을 기술한다. 본 논문에서 제시된 LINS 고장검출 기법은 항법 프로그램내에 포함되어 항법 컴퓨터에 구현되며 FFT가 포함되어 있으므로 많은 계산량이 요구되기 때문에 항법을 위해 필수적으로 요구되는 항법계산에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 항법계산에 필요한 Task(Task)보다 우선순위가 낮은 별도의 Task를 형성하여 구현하였다.

LINS에서 RLG/가속도계 측정치는 2400Hz 주기로 획득되며 이와 같이 고속으로 처리되는 RLG/가속도계 측정치를 FFT하여 Dither 주파수를 찾기 위해서는 RLG/가속도계 각 축별로 측정치를 획득하여 실시간으로 FFT를 수행하여야 하며 많은 저장공간과 신호처리시간이 요구된다. 이를 위하여 별도의 FFT 수행 및 고속 데이터 처리를 위한 Task를 생성하여 축별로 순차적으로 FFT를 수행하여 RLG/가속도계 고장검출을 수행한다. 이를 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. 그림 4에서 Task1은 고속으로 관성센서 데이터를 획득/저장하는 기능을 하며 원하는 양의



그림 4. 고장검출 기법 구성도

데이터 획득이 완료되면 Task2에 완료 메시지를 전송하고 획득 데이터에 대한 FFT를 수행한다. FFT 수행이 완료되면 Task2는 다시 데이터의 획득/저장을 위한 메시지를 Task1에 전송하고 Task2는 FFT 결과를 이용하여 고장검출을 수행한다. 이러한 일련의 과정은 실시간으로 반복되어 수행된다.

3.3 시험 평가

시험 평가 방법은 RLG/가속도계의 2400Hz 센서 데이터를 후처리한 결과와 항법 컴퓨터에서 구현된 실시간 FFT 결과를 비교하고 실시간 FFT 된 Dither 주파수가 RLG와 가속도계의 정상 동작 유무를 판단할 수 있는지 정지 상태와 운항 중 상태로 나누어 검증하도록 한다.

3.3.1 정지 상태

2400Hz 가속도계 센서 데이터에 대한 후처리 FFT 결과를 그림으로 나타내면 그림 5-7과 같다. 시험에 사용된 LINS의 Dither 주파수는 X축 RLG 373Hz, Y축 RLG 441 Hz, Z축 RLG는 409 Hz이다. 그림 5-7은 식 (2)에서 모델링한 바와 같이 가속도계 측정치에 3축의 RLG Dither 운동이 모두 포함되어 나타남을 보여주는 결과이며 또한 LINS 정상동작시 가속도계 측정치를 FFT한 결과가 실제 RLG Dither 주파수와 정확하게 일치함을 보여주는 결과로 본 논문에서 제시한 고장검출 기법의 유용성을 보여주는 결과라 하겠다.

또한 그림 5-7은 가속도계 장착축과 동일한

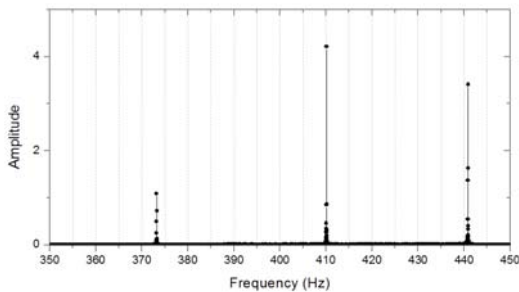


그림 5. X축 가속도계 후처리 FFT 결과

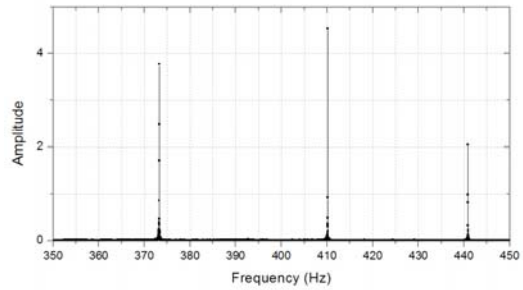


그림 6. Y축 가속도계 후처리 FFT 결과

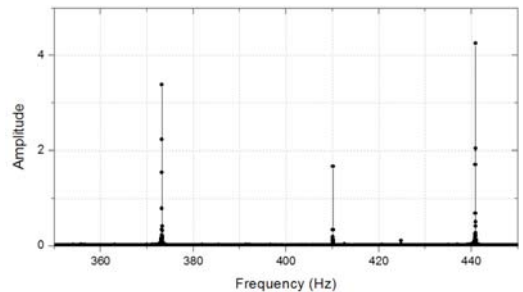


그림 7. Z축 가속도계 후처리 FFT 결과

축의 Dither 운동이 다른 두축의 Dither 운동에 비하여 진폭이 작게 가속도계 측정치에 나타남을 보여주는 결과로 식 (2)의 모델이 정확함을 보여주는 결과이다.

그림 8은 본 논문에서 제시한 고장검출 기법을 그림 4와 같이 구현하여 항법컴퓨터에서 3축 가속도계 측정치를 실시간 FFT 한 결과를 나타낸 것이다. 실제 구현에서는 그림 5-7에서와 같이 3축의 Dither 주파수를 모두 구할 수 없기 때문에 Dither 주파수를 찾아내기 위하여 300~1200 Hz에 해당하는 주파수에서 가장 큰 진폭을 가지는 주파수 하나를 구하고 이 주파수가 3축의 RLG Dither 주파수와 비교하여 일치하는가를 확인하여 LINS의 고장유무를 판단한다. 그림 8에서 나타난바와 같이 X, Y축 가속도계 측정치에는 그림 5-6에서 나타난바와 같이 진폭이 가장 큰 409Hz의 Dither 주파수가 FFT 결과에서 계산되었으며 Z축 가속도계 측정치에는 그림 7에서 나타난바와 같이 진폭이 가장 큰 441Hz의 Dither 주파수가 FFT 결과에서 계산된 것으로 나타나 그림 5-7의 후처리한 결과와 유사한 결과가 나타났다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 Dither 운동의 진폭은 랜덤하게 변하기 때문에 실시간으로 계산된 최대 진폭의 주파수는 항상 변경될 여지가 충분히 있기 때문에 그림 8에서

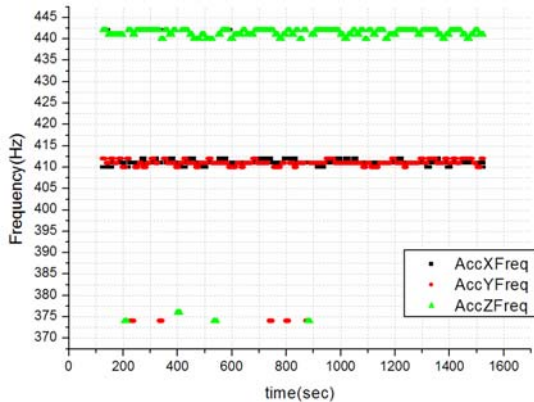


그림 8. 정지상태 실시간 FFT 결과

나타난바와 같이 Y, Z축 가속도계 측정치에 373Hz의 Dither 주파수가 FFT 결과에서 계산된 것은 정상동작 된 것으로 판단이 가능하다.

FFT를 통하여 구한 각 축별 RLG/가속도계 측정치의 Dither 주파수는 고장유무를 판단하기 위하여 입력된 각축별 RLG Dither 주파수와 비교하여 LINS 고장유무를 판단한다. 각축별 RLG Dither 주파수는 LINS 교정시험에서 입력되어 LINS내에 위치한 ROM에 저장되며 LINS 전원인 가시 고장검출에 이용하기 위하여 ROM에서 자동으로 항법컴퓨터에 입력된다. FFT를 이용하여 구한 Dither 주파수와 입력된 Dither 주파수의 비교를 통한 고장검출을 위해서는 비교 주파수에 대한 허용범위를 확보하여야 한다. 이는 Dither 주파수가 외부의 온도변화에 의하여 약간 변하기 때문에 이를 감안하여 허용범위를 선정하여야 한다. 본 논문에서는 LINS의 운용 온도범위에 대한 온도시험을 통하여 Dither 주파수의 변화량을 구하고 이를 근거로 고장검출을 위한 허용범위를 설정하였다.

본 절에서 제시한 고장검출 기법의 성능을 검증하기 위하여 레이저 관성항법장치 전원인가 후 40초 후에 X축 가속도계 고장, 60초 후에 Y축 가속도계 고장, 80초 후에 Z축 가속도계 고장으로 인하여 일정 값의 가속도 정보가 항법 컴퓨터에 입력되는 것을 가정하여 본 논문에서 제시한 고장검출 기법의 성능을 검증한다. 각 축의 가속도계의 고장은 레이저 관성항법장치의 내장 항법 프로그램에서 정상동작하고 있는 각축의 가속도계 신호처리 루틴을 40, 60, 80초 시점에서 끊고 일정 상수의 가속도계 측정치가 신호처리 루틴에서 처리되도록 내장 항법 프로그램을 수정하여 레이저 관성항법장치 고장을 모사하였다. 본 논문에서 제시한 고장검출 성능을 확인하기 위하여

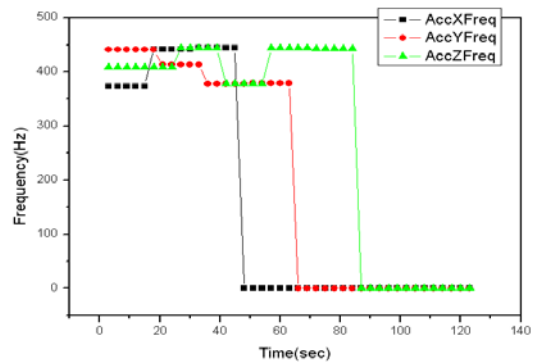


그림 9. 고장 검출을 위한 실시간 FFT 결과

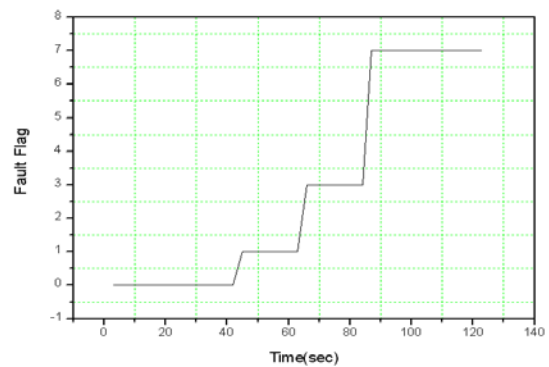


그림 10. 고장 검출 변수

고장검출 변수를 출력하였으며 X축 가속도계 고장시 고장검출 변수의 1번째 비트, Y축 가속도계 고장시 2 번째 비트, Z축 가속도계 고장시 3 번째 비트가 설정(set)되도록 하여 고장검출 발생 여부를 확인하였다. 시험결과를 그림으로 나타내면 그림 9, 10과 같다. 그림 9는 실시간 가속도계 측정치에 대한 실시간 FFT 결과로 레이저 관성항법장치 전원인가 후 초기 정상동작시에는 그림 8에서 나타난 바와 같이 가속도계 측정치의 실시간 FFT 결과가 Dither 주파수를 정상적으로 검출하다가 X, Y, Z축 가속도계 각각의 고장 발생 시점인 40, 60, 80초 시점에서 Dither 주파수가 검출되지 않고 모두 영으로 계산되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 고장 검출 변수도 고장 발생시점에서 모두 고장발생을 알려주는 것을 그림 10에서 확인할 수 있었다. 이러한 시험결과는 본 논문에서 제시한 고장검출 기법이 적용가능함을 증명하는 결과이며 이를 레이저 관성항법장치 적용시 고장검출 확률을 높여 레이저 관성항법장치의 신뢰도를 크게 향상시킬 것으로 판단된다.

3.3.2 운항중 상태

본 절에서는 본 논문에서 제시한 LINS 고장검

상의 고장을 검출할 수 있는 기능이 있으며 RLG/가속도계 각각에 대하여 독립적으로 고장 검출을 할 수 있고 고장검출을 위한 추가적인 하드웨어 없이 소프트웨어적으로 고장검출이 가능한 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시한 기법을 적용할 경우 기존에 각 센서별로 제공하는 고장 검출 기능과 함께 LINS의 고장검출 확률이 크게 높아질 것으로 판단된다.

추후 연구과제로는 항공기 탑재시험을 통하여 외부에서 인가되는 운동이 큰 경우에도 본 논문에서 제시한 고장검출 기법이 유효한지 검증할 예정이며 RLG stripping 방법을 통해 처리된 RLG 측정치를 이용한 운항중 고장검출 기법도 연구가 진행될 예정이다.

참고문헌

- 1) NATO, "Advances in Navigation Sensor Integration Technology", February 2004.
- 2) J. E. Killpartrick, "The Laser Gyro", IEEE Spect. Vol.4, 1967, pp. 44-55 .
- 3) E. J. Post, "Sagnac Effect", Review of Modern Physics, vol.39, Number2, April 1967, pp. 475-493.
- 4) 유기정 외, "RLG Trapping 신호처리 기법의 성능 개선에 관한 연구", 항공우주학회지, 제 36권 제 10호, 2008, pp. 1003-1010.
- 5) 심규민 외, "링레이저 자이로의 몸체진동 진폭 모듈레이션에 의한 lock-in과 불규칙 잡음 특성 연구", 한국항공우주학회, 제29권 제1호, 2001, pp. 72-80.
- 6) A. D. King, "Inertial Navigation - Forty Years of Evolution", GEC Review, Vol. 13, No. 3, 1998.
- 7) MIL-STD-2165, "Testability Program for Electronic Systems and Equipments", 1985.

1) NATO, "Advances in Navigation Sensor