

## 광파이버 자이로의 동특성 해석

정 삼, 권용수, 김성진, 이상식, 진상윤  
해군사관학교

### Analysis of Dynamic Characteristics in a Fiber Optic Gyro

S. Jung, Y.S. Kwon, S.J. Kim, S.S. Lee, S.Y. Jin  
Naval Academy

**Abstract** - An analytical study of the Dynamic Characteristics of a Fiber Optic Gyro is presented. A mathematical model appropriate to the Fiber Optic Gyro system suffering from the system vibration of a driving motor is derived. It is shown that the analysis is directly applicable to the Gyrocompass system.

#### 1. 서 론

기존의 자이로는 고도의 기계식 정밀부품으로 가격이 비싸고, 기동시간이 길며, 전력 소모면에서 큰 단점을 지니고 있는 반면 Sagnac 효과를 이용한 광파이버 자이로(Fiber Optic Gyro : FOG)는 소형으로서 저가격, 저전력 소모, 속응성, 무보수의 측면에서 산업 및 군사적 목적으로서의 실용화 요구가 높아지고 있다.

본 연구의 목적은 광파이버 자이로센서의 해석적 연구를 통한 자이로콤팩스로서의 적용 가능성 제시이다. FOG센서는 매우 민감하기 때문에 센서 구동용 모터의 진동에 대한 해석은 선행 연구과제이다. 이러한 측면에서 구동모터를 중점으로 한 종합적인 해석을 통하여 FOG센서의 동특성을 나타낼 수 있는 수학적 모델을 도출하고, 자이로콤팩스로서의 적용 가능성 을 제시한다.

#### 2. 광파이버 자이로의 기본 원리

광파이버 자이로의 기본 동작 원리는 Sagnac 효과 [1]라고 불리는 원리를 이용하고 있다. 그림 1은 Sagnac 효과를 설명하고 있다. 광원에서 출사된 빛은 분광기를 거친 후 시계방향과 반시계방향으로 나누어져 폐루프 모양의 광로인 감지코일로 각각 입사된다. 이때 감지코일이 정지되어 있는 경우 두 방향의 광은 동일 길이의 광로를 따라 서로 반대방향으로 회전한 후 다시 분광기로 돌아올 때의 위상차 가 0이 된다. 그러나 감지코일이 관성공간에 대하여

회전각속도  $\Omega$ 로 회전하면, 시계방향의 광과 반시계 방향의 광 사이에는 광로차  $\Delta L$ 이 발생한다. 이와 같이 시계방향과 반시계방향의 광로의 길이가 다른 현상을 Sagnac 효과라고 한다.

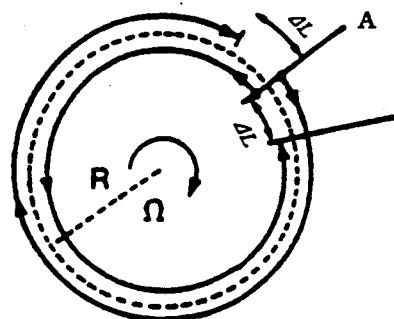


그림 1. Sagnac 효과의 원리

시계방향의 각속도  $\Omega$ 로 회전하는 광이  $t=0$ 에서 주어진 한점 A로 부터 반지름 R인 원형 광로를 따라 일주하여 다시 원점 A에 도달하는데  $t$  시간이 걸렸을 때, 시계방향과 반시계방향으로 회전하여 움직인 광로의 길이차  $\Delta L$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta L = \frac{4\pi R^2}{c} \Omega t \quad (1)$$

여기서  $A = \pi R^2$ ,  $c$ 는 광속을 나타낸다.

한편, 시간  $t$ , 주파수  $v$ , 그리고 전공 속에서 진행하는 광원의 파장  $\lambda$ 와 위상차  $\Delta\phi$ , 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\lambda = ct \quad (2)$$

$$\Delta\phi_s = 2\pi v \Delta t \quad (3)$$

여기서 전공이 아닌 어떤 굴절률  $n$ 을 가진 다른 매질에서는 루프 경과시간이 굴절률  $n$ 만큼 증가된다. 그러나 두 빛이 겪는 위상이동은 매질의 굴절률과

무관한 결과를 나타낸다. 그러므로 식(1)의 적절한 전개와 정리에 의해 다음과 같이 위상차에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} Q \quad (4)$$

여기서 L과 D는 각각 광파이버코일의 길이와 직경을 나타낸다. 위상차가 회전율에 비례하기 때문에 일정한 회전율은 일정한 위상차를 발생시킬 수 있다. Sagnac 간섭계는 회전감지계의 감긴 길이와 관계되어 있으므로 광파이버 회전 감지계 부분의 직경과 루프의 감긴 수가 많으면 Sagnac 위상차는 증가한다.

### 3. 광파이버 자이로의 해석 접근

그림2(a)와 같이 설치된 FOG가 일정한 회전 각속도  $\Omega$  ( $= 2\pi f_0$ )로 회전하면, 이상적인 경우 FOG 출력신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_\alpha = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e \Omega_e \sin(\Omega t + \varphi_e) + k \sin \theta_e \cos \theta_e \Omega \quad (5)$$

여기서

$\Omega_e$  : 지구자전 각속도 [deg/sec]

$f_0$  : 회전주파수 [Hz]

$\varphi_e$  : 기준파형과 FOG 출력파형 사이의 위상차

k : 광파이버자이로 센서 scale factor

$\theta_e$  : 위도

식(5)의 우변 첫째와 둘째항은 각각 상대적인 특성을 갖는다. 즉,  $\theta_e = 0^\circ$  일 때 FOG의 출력은 지구의 자전율만이 감지되며  $\theta_e$ 가  $90^\circ$ 에 가까워짐에 따라 Gyroscope는 지구의 자전율보다는 FOG의 일반적인 가능인 움직임만을 감지하게 된다.

이상적인 경우와 달리, 실제로 있어 광파이버 자이로스코프의 출력에는 random walk 잡음, 열잡음, 드리프트, 시스템진동, 회전각속도의 변동 등을 포함하고 있다. Random walk의 스펙트럼은 백색잡음의 특성을 갖고 속도가 증가함에 따라 감소되며, 지구 자전율에 따른 자이로스코프의 출력과 상호관련이 없다. 그러나 FOG 센서를 정속으로 회전시켜 얻어지는 연속적인 정현파의 출력신호로 부터 방위정보를 얻기 때문에 정적방식과 달리 드리프트 자체가 크게 문제되지 않는다. 편의상 random walk 잡음을 시간에 따른 함수로서 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

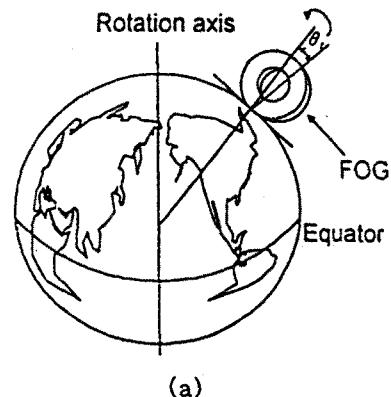
$$\overline{U_{rw}} = R(t) \text{ [deg}/\sqrt{\text{sec}}\text{]} \quad (6)$$

FOG 센서는 매우 민감하기 때문에 고정도의 정속운전이 필수적이다. 회전각속도의 변동에 대한 주 원인은 모터 자체에 가해지는 전기적인 원인 이외에도 FOG 시스템의 구성에 따른 기계적인 요인을

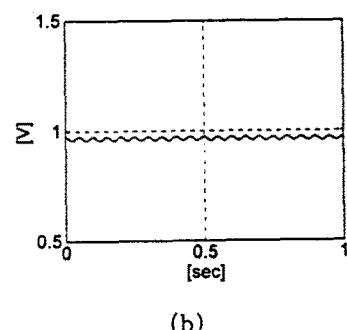
많이 내포하고 있다. 회전원판은 높은 관성력으로 회전의 균일성을 얻을 수 있으나, 회전원판 재질의 밀도가 균일하지 못할 때에는 편심으로 인한 회전 불균형으로 인하여 오히려 속도 변동을 더 악화시킬 수 있다. 또한 베어링의 마찰 저항도 하나의 원인이 될 수 있다.

FOG 구동모터 회전자 자체의 시간에 따른 위치변동을 나타내는 식은 일반적으로 다음과 같이 쓸 수 있다[2].

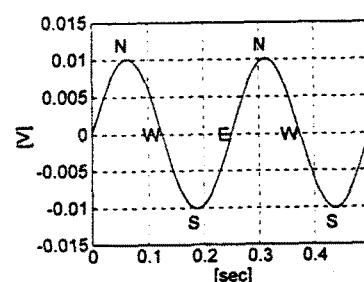
$$\theta(t) = \omega_0 t - \delta + \theta_0 \sin \alpha t \quad (7)$$



(a)



(b)



(c)

그림 2. 광파이버 자이로의 원리와 FOG 출력파형

식(7)을 미분함으로써 불안정시의 회전자 각속도에

관한 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\omega(t) = \omega_0 + a\theta_0 \cos at \quad (8)$$

여기서, 식(8)이 나타내고 있는 바와 같이 FOG 회전속도에서 정속운전에 관련된 안정성은 정상상태 속도에 중첩되어 나타나는 저주파의 속도 진동에 의해 결정됨에 주목해야 한다.

그러므로 먼저 위상변조에 의한 속도 불균일을 고려 할 때, FOG 출력신호에 대한 식(5)는 다음과 같 이 된다.

$$U_{em} = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e Q_e \sin(\omega_0 t - \delta + \theta_e) \\ \sin at + \varphi_e + k \sin \theta_e \cos \theta_e (\omega_0 + a\theta_0 \cos at) \quad (9)$$

식(9)를 전개하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$U_{em} = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e Q_e [\sin(\omega_0 t + \varphi_e') \\ \cdot \cos(\theta_e \sin at) + \cos(\omega_0 t + \varphi_e') \cdot \sin(\theta_e \sin at)] + k \sin \theta_e \cos \theta_e (\omega_0 + a\theta_0 \cos at) \quad (10)$$

여기서  $\varphi_e' = \varphi_e - \delta$

$\cos(\theta_e \sin at)$ 과  $\sin(\theta_e \sin at)$ 을 제1종 Bessel 함수로 전개하면, 식(10)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_{em} = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e Q_e [J_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_e') + \sum_{m=1}^{\infty} J_m [\sin((\omega_0 + ma)t + \varphi_e')] + (-1)^m \sin((\omega_0 - ma)t + \varphi_e')]] + k \sin \theta_e \cos \theta_e (\omega_0 + a\theta_0 \cos at) \quad (11)$$

여기서  $J_m$ 은 독립변수가  $\theta_0$ 인 m차 제1종 Bessel 함수 계수이다. 식(11)이 기본주파수( $\omega_0$ ) 외에도 합주파수( $\omega_0 + ma$ )와 차주파수( $\omega_0 - ma$ )의 성분을 포함하고 있다는 사실은 중요한 의미를 갖는다. 특히,  $\omega_0 \pm ma$ 의 두 주파수성분은 beat라고 불리는 진동의 주요 원인이 된다.

회전을 변동의 또 다른 원인은 전체 시스템에 의한 진동으로 정확한 해석에 어려움이 따르며, 편의상 다음과 같이 가정한다.

$$\overline{U_{sw}} = V(t) \quad (12)$$

그러므로 random walk 잡음, 회전각속도의 변동 및 전체 시스템진동 등을 고려한 FOG의 출력신호에 대한 표현식  $U_e$ 는 식(6), (11), 및 (12)의 합으로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_e = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e Q_e [J_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_e') + \sum_{m=1}^{\infty} J_m [\sin((\omega_0 + ma)t + \varphi_e') + (-1)^m \sin((\omega_0 - ma)t + \varphi_e')]] + k \sin \theta_e \cos \theta_e (\omega_0 + a\theta_0 \cos at) + kR(t) + kV(t) \quad (13)$$

여기서, 식(13)의 첫번째 항에 대한  $R(t)$ 의  $V(t)$ 의 상대적인 영향은 FOG 시스템의 최적 설계에 의해 크게 좌우된다.

편의상 만족스런 FOG 구동시스템을 가정하자. 따라서  $J_0 = 1$ ,  $J_1 = \theta_0/2$  와  $J_2 = J_3 = J_4 =$

$\dots = 0$  을 만족하도록  $\theta_0$ 가 매우 적다고 가정하고,  $m=1$  까지만 고려하면 식(13)은 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$U_e = (1 - \sin \theta_e) k \cos \theta_e Q_e \cdot [\sin(\omega_0 t + \varphi_e') + \theta_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_e') \cdot \sin at] + k \sin \theta_e \cos \theta_e (\omega_0 + a\theta_0 \cos at) + kR(t) + kV(t) \quad (14)$$

여기서  $\theta_e = 0^\circ$  이고, FOG 시스템의 이상적인 관성부하 운전인 경우에 대하여 식(14)는 지구자전율에 따른 출력이 지배적이며 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$U_e = k \cos \theta_e Q_e \sin(\Omega t + \varphi_e) \quad (15)$$

그림2(b)는  $\theta_e$ 가  $90^\circ$  일 때 출력으로서 FOG 자체의 각속도 변화에 따른 출력값을 나타내며, 그림2(c)는  $\theta_e$ 가  $0^\circ$  일 때 이상적인 FOG 출력으로서 회전원판이 일정한 속도  $\Omega$ 로 회전함에 따라 정형파형으로 나타난다. 그림2(a)와 같이 FOG의 축을 남북으로 정렬하고 위도각 만큼 수평면에 대해 경사지게 하면 지구의 자전 속도를 감지 할 수 있어 FOG의 출력신호가 측정되며, FOG의 축을 동서로 정렬하면 FOG의 광파이버 코일에 지구의 자전속도가 감지되지 않아 FOG의 출력신호는 없게 된다. 이러한 특성은 FOG를 Gyro compass로서 사용할 수 있음을 나타낸다.

### 3. 결 론

본 연구의 목적은 광파이버 자이로시스템의 해석적 연구를 통한 자이로콤파스로서의 적용 가능성 제시이다. 구동모터를 불안정을 고려한 종합적 해석을 통하여 FOG센서의 동특성을 나타낼 수 있는 수학적 모델을 도출하고, 제시된 해석적 특성식을 통하여 자이로콤파스로서의 적용 가능성을 제시했다.

### (참 고 문 헌)

[1] Sagnac, G., "L'ether lumineux demonstre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interference de l'interferometre en rotation uniforme", Comptes rendus de l'Academie des Science, vol.95, pp.708-710 . 1913.

[2] Yongsoo Kwon, "A Study of the Dynamic Instability Characteristics and Stabilisation of Variable-Reluctance Stepping Motors". The University of Manchester Dept. of Electrical Eng.. Ph.D thesis, 1993.

[3]. S.I.Grossman and W.R.Derrick, "Advanced Engineering Mathematics". Harper Collins Publishers, 1994.