

논문 96-5-4-07

## 동조자이로스코프의 해석 및 응용 (전자광학추적기의 회전각속도 센서)

임 성 운

### Analysis and application of the dynamically tuned gyroscope (Angular velocity sensor of EOTS)

Sung-Woon Im

#### 요 약

속도제어루프내에서 외란의 각속도를 감지하여 짐발을 안정화시키기 위해 사용하는 동조자이로스코프에 대한 기본원리 및 특성을 분석하였다. 또한 비레모드 자이로스코프의 모델을 정확하게 제시하였으며, 제시된 모델은 공진특성을 가지고 있기 때문에 기존에 사용하고 있는 2차 시스템 모델보다 실제 시스템의 특성과 유사하므로 일반적인 비레모드 자이로스코프에서도 적용가능하다. 실제 시스템인 전자광학추적기에 사용할 경우 발생하는 문제점을 알아보고 그 해결 방안을 제시하였다.

#### Abstract

The basic principle and characteristics of a DTG(dynamically tuned gyroscope) are presented in this paper, which is used for the detection of disturbance and for the stabilization of gimbal. An accurate model of the rate mode DTG is proposed. This model has a resonance characteristics which is more similar to the characteristics of practical systems than the conventional 2nd order system model. Therefore, this model is applicable to the general rate mode gyroscope. Some problems at using DTG for a real electro optical tracking system are discussed and a solution is described.

#### 1. 서론

미국 MIT대학의 Draper에 의해 각속도센서인 자이로스코프(gyroscope)가 발명된 뒤로 자이로스코프 기술은 많은 발전을 이루어 현재 약 20여종의 자이로스코프가 있으며 오늘날 가장 정밀한 센서로 인정받고 있다.

현재 사용하고 있는 자이로스코프에는 항공기, 잠수함, 대륙간 탄도미사일의 관성유도 등의 정밀도가 높은

시스템에 사용되는 FRIG(Floated Rate Integrating Gyro)와 단거리 미사일, 탱크, 어뢰 등 입력이 클 때 척도 계수가 선형성을 유지할 수 있는 동조 자이로스코프(dynamically tuned gyroscope: DTG) 및 링 레이저 자이로스코프(ring laser gyroscope: RLG), 그리고 연구개발이 활발한 광섬유 자이로스코프(fiber optic gyroscope: FOG)등이 존재한다. FRIG와 DTG의 기본원리는 뉴턴 제 2법칙인 각 운동량 보존법칙을 이용하지만 RLG와 FOG는 회전하는 폐광로를 역회전하는 두 관측자(광자)가 서로 만날 때 측정된 시간이 일치하지 않는다는 일반 상대론이 기본원리이다. 이 중 DTG는 다른 것들에 비해 가장 먼저 실용화되었으며, 정밀도는 다소 떨어지지만 가격이 싸고 부피가 적으며,

경북산업대학교 공과대학 제어계측공학과  
(Dept. of Control & Instrumentation Eng.  
Kyungpook Sanup University)  
<접수일자 : 1996년 2월 27일>

전기적으로는 다소 복잡하지만 기계적으로 간단하고 특히 동작범위가 넓어서 초정밀을 요하지 않는 시스템에서 더욱 많이 채택되는 추세이다<sup>[1,2]</sup>.

전자광학추적기(electro optical tracking system: EOTS)는 관측자에게 목표물을 인식하게 하여 이동하는 목표물을 자동적으로 추적하면서 목표물에 대한 안정된 시선(line of sight: LOS)을 제공할 뿐만 아니라 표적의 위치, 속도, 가속도 등의 표적정보를 제공해 주는 장치로서 영상센서부, 영상추적부 및 안정화구동부로 구성되어 있다. 이중 안정화구동부는 EOTS를 탑재한 차량 등에 의한 외란을 차단하기 위하여 짐발(gimbal)에 장착된 자이로스코프로부터 짐발 주위의 외란 정보를 검출하여 제어회로로써 LOS를 유지하도록 하는 역할을 한다.

이러한 전자광학추적기에서 주로 사용되는 자이로스코프는 DTG이며, DTG는 회전 각속도 정보를 감지하는 비례모드(rate mode)와 회전 각변위 정보를 감지하기 위한 비례적분모드(rate integrated mode)로 사용될 수 있다. 전자광학추적기는 속도제어루프와 위치제어루프를 가지고 있으며, 기본적인 원리 측면에서 보면 자이로스코프는 속도제어루프내에서 외란의 각속도를 감지하여 짐발을 안정화시키기 위하여 사용되며, 따라서 비례모드로 동작된다<sup>[3-5]</sup>.

비례모드에서 DTG는 외부에서 인가되는 각속도 신호에 비례하여 자이로스코프의 관성휠(inertia wheel)이 편이되고 그 편이 양을 자이로스코프가 감지하여 출력한다. 그리고 편이된 자이로스코프의 관성휠을 원래의 위치로 되돌려 주기 위하여 재평형루프(rebalance loop)라고 하는 전자부에서 자이로스코프 내부의 토크모터를 구동시키게 된다. 이러한 DTG와 전자제어 회로는 자이로스코프를 제작하는 회사가 모든 것을 일괄 공급하는 형편으로 지금까지 DTG의 내부 구성도만 주어졌을 뿐 자세한 모델이 제시되지 않기 때문에 독자적인 응용에는 많은 제약이 있었다.

본 논문에서는 전자광학추적기에서 주로 사용하는 DTG에 대한 기본원리 및 특성을 분석하고, 기존에는 간단히 2차 시스템으로 모델링하여 사용한 비례모드 자이로스코프를 자이로스코프와 재평형루프까지 포함된 시스템 모델을 정확하게 구현하였다. 그리고 전자광학추적기에 적용하여 DTG의 비례모드 제어특성을 분석하였으며, 실제 시스템에서 발생하는 문제점의 해결 방안을 제시하였다.

## II. 본론

### 1. DTG의 동작원리<sup>[1,2]</sup>

DTG는 뉴턴의 각 운동량 보존법칙을 이용한 것으로 그림 1과 같은 회전자 구조를 가진다.

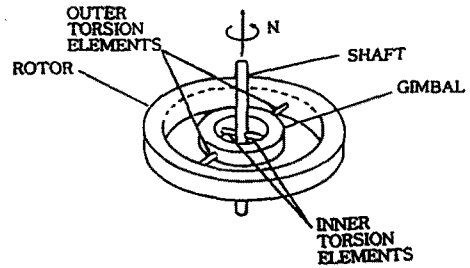


그림 1. DTG의 구조

Fig. 1. Structure of DTG.

DTG 회전자는 유니버설 조인트 형태를 갖는 짐발과 비틀림자(torsion element)로 구성된 지지기구에 의해 모터의 회전축과 연결되어 회전축과 함께 회전하게 된다. 그러므로 회전자와 짐발은 모터의 회전속도와 그들의 관성에 의해 결정되는 각 운동량을 가지게 된다. 따라서 외부로부터 속도입력이 들어오게 되면 케이스와 회전축은 그 들어온 각도만큼 기울어지게 되지만 회전자는 관성공간에 대해 원래의 자세를 유지하려고 하게 된다. 따라서 회전자는 회전축 및 케이스에 대하여 가해진 입력만큼 기울어지게 되고 따라서 회전자는 비틀림자로부터 스프링효과에 의한 힘을 받는다. 또한 회전자는 회전하는 회전자와 짐발의 역학적인 효과에 의해 음의 스프링효과에 의한 힘을 받게 되는데 이 효과의 크기를 나타내는 음의 스프링 계수의 크기는 회전자의 회전속도의 제곱에 비례한다. 따라서 회전자의 회전속도가 증가함에 따라 음의 스프링 계수가 점점 증가하여 마침내는 원래 탄성체인 비틀림자의 양의 탄성계수와 그 크기가 같아져서 회전자와 회전축 사이의 스프링 결합률이 영(zero)이 되는데 이와 같은 상태를 동조상태라 하고, 이때의 주파수를 동조주파수(tuning frequency)라 한다. 이 동조의 원리를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다.

회전자 지지 기구는 그림 1에서 보는 바와 같이 짐발과 비틀림자로 구성된다.

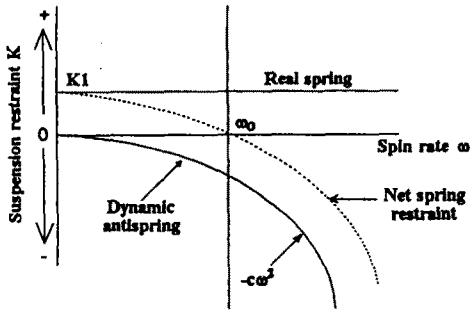


그림 2. DTG에서 동조의 원리  
Fig. 2. Principle of tuning in the DTG.

DTG 케이스에 대한 상대 각속도  $N$ 으로 회전하고 있는 회전축 좌표계 내에서 외부 입력이 인가될 때 회전자에 유기되는 토크는 비틀림자에 의한 탄성 토크와 짐발의 운동에 의해 일어나는 관성 토크의 합으로 표시된다. DTG 케이스가 관성 좌표계(inertial frame:  $x, y, z$ )에 대해 각각  $\phi_x$ 와  $\phi_y$ 만큼 회전하였을 때 자이로스코프의 회전자에 유기되는 토크( $T_{cx}$ )를 DTG 케이스 좌표계상에서 표현하면 다음과 같다.

$$T_{cx} = 1/2 [(K_x + K_y) - (J_x + J_y - J_z)N^2] \phi_x + 1/2 [(K_x - K_y) + (J_x + J_y - J_z)N^2] \phi_x \cos(2Nt) + 1/2 [(K_x - K_y) + (J_x + J_y - J_z)N^2] \phi_y \sin(2Nt) \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 동조주파수,  $K_x, K_y$ 는 비틀림자의 탄성계수,  $J_x, J_y, J_z$ 는 짐발의 관성모멘트이다.

식 (1)에서 삼각함수의 곱으로 표시된 항은  $2N$  주파수 함수로 나타나므로 평균값은 '0'이 된다. 따라서 짐발의 관성모멘트와 회전주파수를 식 (2)와 같이 적절히 선정하면 비틀림자에 의한 탄성토크와 짐발의 관성모멘트를 서로 상쇄시킬 수 있게 되어서 외부의 움직임에 의해 DTG의 회전자는 외란을 받지 않으므로 자유 회전자의 특성을 갖게 된다. 식 (2)와 같이 표현된 회전주파수를 동조주파수라 하며, 이와 같은 동조조건을 만족하도록 설계된 자이로스코프를 DTG라 한다.

$$N = \sqrt{\frac{K_x + K_y}{J_x + J_y - J_z}} \quad (2)$$

DTG는 외부의 회전을 감지하는 감지부와 감지부의

회전자 조립체에 큰 각운동량을 발생시키기 위해 회전을 제공하는 모터부, 그리고 감지부와 모터부의 전원 및 신호처리를 담당하는 구동부로 구성되어 있으며, 그림 3은 자이로스코프의 블럭선도이다.

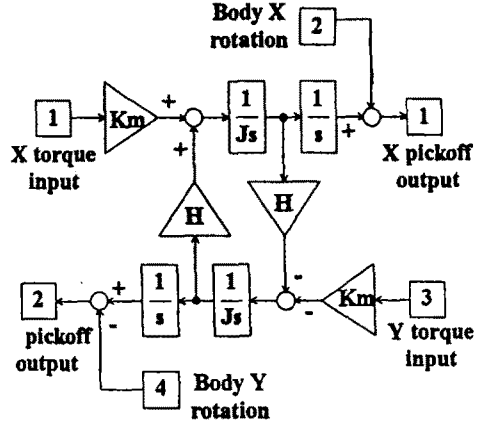


그림 3. 자이로스코프 블럭선도  
Fig. 3. Block diagram of gyroscope.

X축 토크 입력에 대한 자이로스코프 자체의 출력은 식 (3)과 같으며, X축 몸체의 변화에 대한 자이로스코프 자체의 출력 특성은 식 (4)와 같다.

$$\frac{X_{pickoff}}{X_{torque}} = \frac{JK_m}{J^2s^2 + H^2}, \quad \frac{Y_{pickoff}}{X_{torque}} = -\frac{K_m H}{s(J^2s^2 + H^2)} \quad (3)$$

$$\frac{X_{pickoff}}{X_{body}} = 1, \quad \frac{Y_{pickoff}}{X_{body}} = 0 \quad (4)$$

식 (3)에서 보면 자이로스코프의 출력은 토크 입력에 대한 X축과 Y축이 결합되어 나타난다. 그러나 몸체의 변화에 대해서는 X축과 Y축이 서로 독립적임을 식 (4)에서 알 수 있으며 Y축에 대해서도 같은 관계임을 찾을 수 있다.

논문에서 사용한 자이로스코프는 DTG의 하나인 SAGEM사 제품인 GSL82-21을 사용하였으며, GSL82-21 모델에서 사용한 변수는 표 1과 같다<sup>6)</sup>.

표 1. GSL82-21 자이로스코프 모델 변수

Table 1. GSL82-21 gyroscope model parameter.

H(Kinetic momemntum)	$8420 \times 10^{-7} \text{Kgm}^2/\text{rad/s}$
J(Cross inertia)	$2.44 \times 10^{-7} \text{Kgm}^2$
$K_m$ (Torque efficiency)	$64 \times 10^{-7} \text{mN/A}$

그림 4와 그림 5는 표 1의 변수를 사용하여 본 논문에서 사용한 자이로스코프 자체의 주파수 응답특성이다. 그림 4는 X축으로 몸체가 변화할 경우 자이로스코프 출력특성으로 X축에 대해서만 영향을 미치고, Y축에 대해서는 아무런 영향을 미치지 못하게 된다. 그림 5는 X축의 토크 입력에 대한 자이로스코프 출력특성으로 X축 입력에 대한 X축 출력은 Y축 출력에 비해 거의 무시할 수 있으므로 X축과 Y축에 대해서 서로 결합되어 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 토크입력에 대해서는 자이로스코프 출력이 적분기 형태로 동작하며, 약 500Hz 근처에서 공진하고 있다는 것을 알 수 있다. Y축 입력에 대한 특성은 X축과 같은 결과이므로 본 논문에서는 생략하였다.

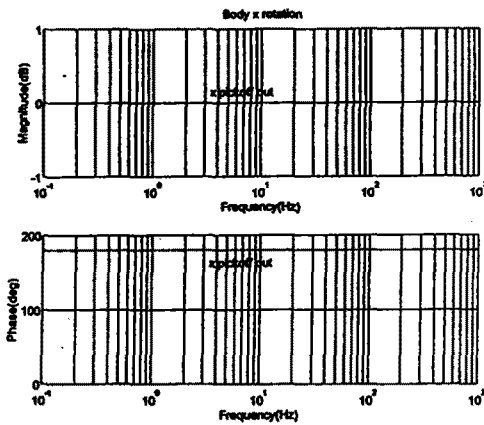


그림 4. X축 몸체의 변화에 대한 자이로스코프 출력  
Fig. 4. Gyroscope output for X-body variation.

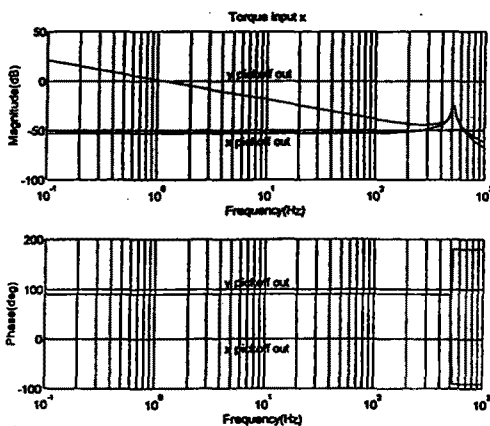


그림 5. X축 토크입력에 대한 자이로스코프 출력  
Fig. 5. Gyroscope output for X-torque input.

### 2. 비례모드 DTG 구성

자이로스코프의 회전자를 동조주파수로 회전시킴으로서 프리자이로(free gyro)처럼 동작하는 DTG를 비례모드 자이로스코프(rate mode gyroscope) 특성을 가지게 하기 위해서는 그림 6과 같이 재평형루프(rebalance loop)를 구성하여 자이로스코프의 출력을 제어하여야 한다.

### 3. 재평형루프 해석

비례모드로 동작하는 DTG는 외부에서 인가되는 각속도 신호에 비례하여 자이로스코프의 관성휠이 편이되고, 그 편이 양을 자이로스코프의 검출기(pick off)가 감지하여 자이로스코프 외부로 전압신호를 출력하게 된다. 이때 자이로스코프의 전자부에서는 외부 출력 신호량에 비례하는 음극성의 신호를 자이로스코프 내부의 토크모터에 인가하여 편이된 자이로스코프의 관성휠을 원래의 위치로 되돌려 주게 된다. 이것을 수행하는 부분을 재평형루프라고 하며, 비례모드에서 자이로스코프를 사용할 경우 반드시 필요하며 블록선도는 그림 7과 같다.

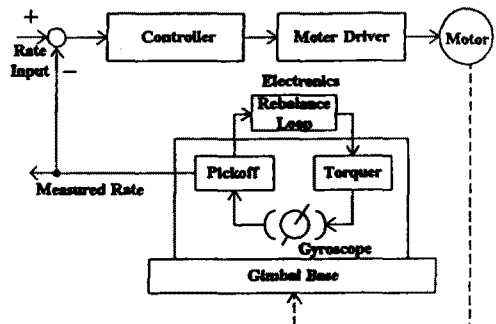


그림 6. 비례모드 자이로스코프와 짐발의 신호흐름도  
Fig. 6. Signal flowchart of rate mode gyroscope and gimbal.

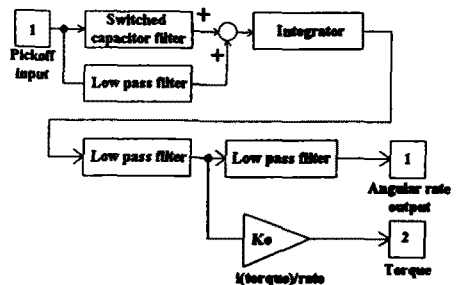


그림 7. 재평형루프 블록선도  
Fig. 7. Block diagram of rebalance loop.

그림 7의 각 블럭에 대한 전달함수는 다음과 같다.

- Switched capacitor filter:

$$\frac{K_4(1+\lambda)}{2} \cdot \frac{1-e^{-ts}}{1-\lambda e^{-ts}} \cong \frac{K_4(1+\lambda)}{2} \cdot \frac{ts}{\lambda ts+1-\lambda} \quad (5)$$

$$(\because e^{-ts} = 1 - ts + \frac{(ts)^2}{2!} + \dots \cong 1 - ts)$$

- Low pass filter 1:

$$\frac{K_3}{1+(\tau_1+\tau_2)s+\tau_2\tau_3s^2} \quad (6)$$

- Integrator:

$$\frac{1}{1+\tau_4s} + \frac{1}{\tau_5s} = \frac{(\tau_4+\tau_5)s+1}{\tau_4\tau_5s^2+\tau_5s} \quad (7)$$

- Low pass filter 2:

$$\frac{K_2}{1+(\tau_6+\tau_7)s+\tau_7\tau_8s^2} \quad (8)$$

- Low pass filter 3:  $\frac{K_1}{1+\tau_9s}$  (9)

- i(torque)/rate:  $K_o$  (10)

본 논문에서는 재평형루프를 구성하는 전기적인 회로는 SAGEM사 제품인 20BM00-52-08을 사용하였으며, 각 변수들은 다음과 같다.

표 2. 재평형루프의 전기적인 회로 모델 변수  
Table 2. Electric circuit model parameter of rebalance loop.

$K_o$	$0.027 \times 10^{-3}$ A/volt
$K_1$	2.27
$K_2$	1
$K_3, K_4$	2.15
$\lambda$	0.76
t	$3.1 \times 10^{-3}$ sec
$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_5$	$3.16 \times 10^{-3}$ sec
$\tau_4$	$214.8 \times 10^{-6}$ sec
$\tau_6, \tau_7$	$0.068 \times 10^{-6}$ sec
$\tau_8$	$0.32 \times 10^{-6}$ sec
$\tau_9$	$33 \times 10^{-6}$ sec

#### 4. 비례모드 DTG 모델링 및 해석

비례모드 DTG는 자이로스코프와 전자제어 장치인 재평형루프로 구성되어 있으므로 해석이 복잡하고, 동작원리가 잘 알려지고 정리되지 못하여 일반적인 응용에서는 제작사에서 주어진 주파수 응답특성을 이용하여 근사화된 2차 시스템으로 모델링하였다. 이 모델은 저주파수 영역의 통과대역 안에서는 아주 잘 맞으며 시스템 해석상에도 문제가 없다.

그러나 궤환제어에 의해서 시스템의 차수가 증가하고 디지털 제어를 할 경우 근사적인 비례모드 DTG 모델은 시스템 결합에 의해서 나타나는 공진이나 고주파 외란에 대한 정확한 해석이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 공진이나 고주파 외란의 영향까지 포함한 비례모드 자이로스코프 모델을 제시하였다.

그림 8은 그림 3의 자이로스코프 블럭선도와 그림 7의 재평형루프까지 포함한 비례모드 자이로스코프의 모델이고, 각 변수들의 값은 표 1과 표 2를 사용하였다. 그림 8의 자이로스코프 부분은 X축 토크입력에 대한 X축 출력은 Y축 출력에 비해 거의 무시할 수 있으므로 식 (3)과 표 1을 이용하여 구하였으며, 이득은 SAGEM사로부터 주어진 실험 데이터를 이용하여 구하였다. 그림 8은 하나의 축에 대해서만 논하였으며, 다른 축도 같은 구조로 되어 있으므로 본 논문에서는 생략하였다. 자이로스코프는 토크입력에 대해서는 X축과 Y축이 서로 결합되어 있으므로 전자부의 X축 각속도 출력을 Y축 토크입력에 인가하여 자이로스코프 내부의 토크 모터를 구동시킴으로써 재평형루프가 이루어지게 된다. 따라서 전체적인 비례모드 자이로스코프는 X축 몸체의 변화에 대해서 X축 각속도 출력이 나오게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 비례모드 DTG의 블록도는 그림 9와 같이 나타나며, 전달함수는 식 (11)과 같다.

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{1}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \quad (11)$$

그림 10은 식 (11)로 표현된 비례모드 DTG의 주파수 응답특성으로 약 50Hz 정도의 대역폭을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 8에서 보면 그림 5에서 나타나는 공진점은 공진을 제거하기 위하여 노치 필터를 사용하지 않았으나 궤환루프내로 들어감으로서 마치 비례모드 DTG의 주파수 응답 특성이 자이로스코프가 가지고 있는 공진을 제거하기 위하여 약

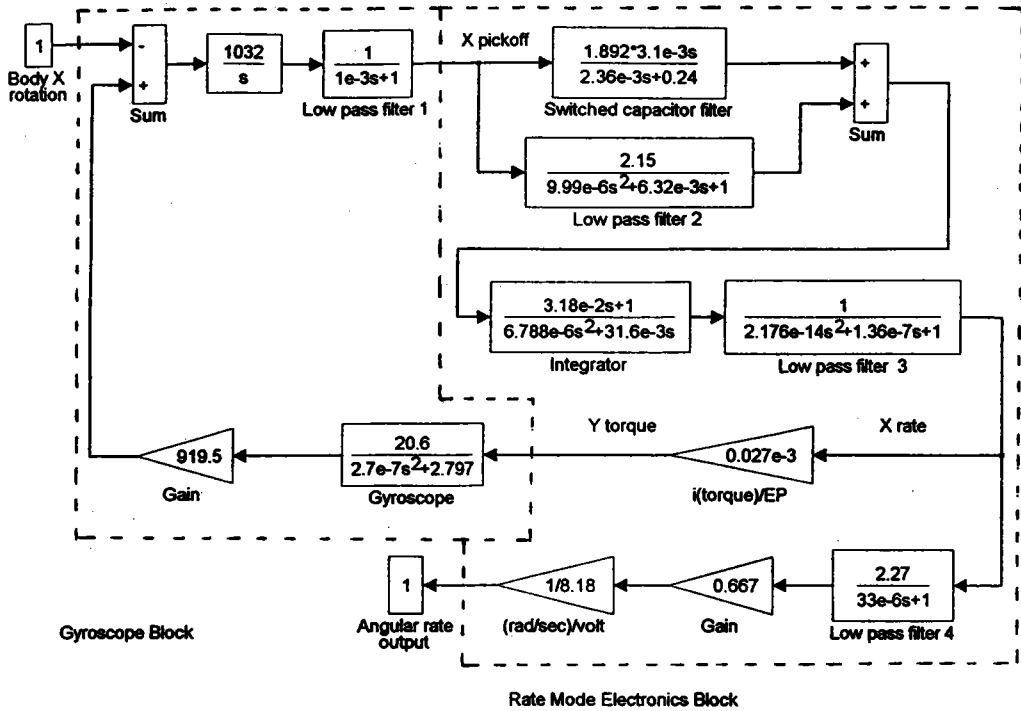


그림 8. 비례모드 DTG의 모델

Fig. 8. Model of rate mode DTG.

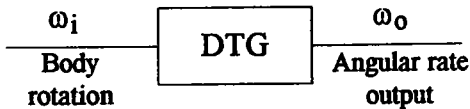


그림 9. DTG의 비례모드 블럭도

Fig. 9. Rate mode block diagram of DTG.

500Hz 근처에서 노치 필터를 사용한 것과 같은 효과를 나타내며, 따라서 비례모드 DTG에서는 그림 7의 재평형루프내에 따로 노치 필터를 사용하지 않아도 된다.

5. 시스템 구성 및 실험

EOTS는 관측자에게 목표물을 인식하게 하여 이동하는 목표물을 자동적으로 추적하면서 목표물에 대한 안정된 시선을 제공할 뿐만 아니라 표적의 위치, 속도, 가속도 등의 표적정보를 제공해주는 장치로서 영상센서부, 영상추적부 및 안정화구동부로 구성되어 있다. 이중 안정화구동부는 EOTS를 탑재한 차량 등에 의한 외란을 차단하기 위하여 짐발에 장착된 자이로스코프로부터 짐발 주위의 외란 정보를 검출하여 케환제어함으로써 시선 안정화 기능을 수행한다.

본 논문에서는 제시된 자이로스코프의 모델을 검증하기 위하여 그림 11과 같이 EOTS의 안정화 구동부를 구성한다. 그러면 테스트 입력에 의해서 모터가 움직이며, 자이로스코프는 모터와 결합되어 있으므로 이 움직임이 자이로스코프에서 감지되어 케환됨으로써 자이로스코프의 속도응답 특성을 측정할 수 있다.

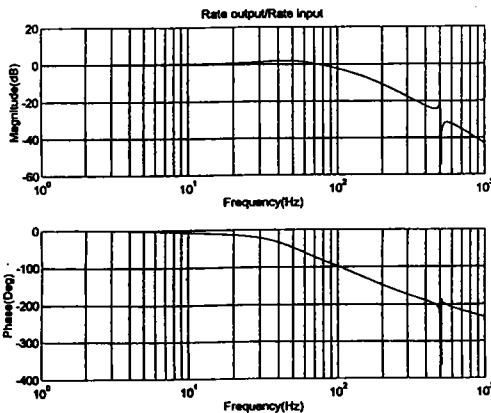


그림 10. 비례모드 자이로스코프의 주파수 응답

Fig. 10. Frequency response of rate mode gyroscope.

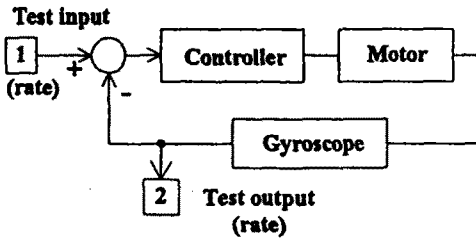


그림 11. EOTS의 속도제어 블록선도(비례모드)  
Fig. 11. Speed control block diagram of EOTS (rate mode).

측정 시스템의 개루프 전달함수는

$$\frac{R}{U} = C \times M \times G \quad (12)$$

이며, 여기서,  $U$ : 입력,  $R$ : 출력,  $C$ : 제어기 이득,  $M$ : 모터,  $G$ : 자이로스코프이다. 따라서 속도이득에 대한 폐루프 전달함수는

$$\frac{R}{U} = \frac{CMG}{1 + CMG} \quad (13)$$

이 되며,  $C$ 가 1일 때 능동 신호분석기를 이용하여 측정된 EOTS의 폐루프 주파수응답 특성은 그림 12와 같다.

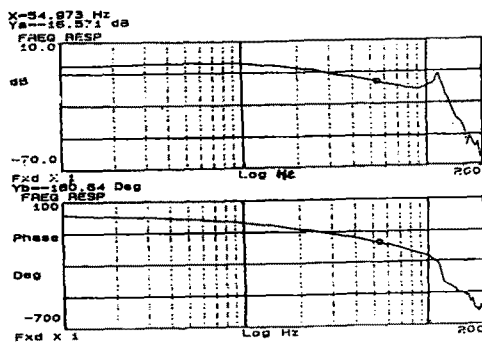


그림 12. EOTS의 폐루프 주파수응답(실험치)  
Fig. 12. Closed loop frequency response of EOTS (experimented).

그리고 이때 사용된 모터는 Magnetic Technology 회사의 4590C-095-043 모델이며, 그 사양은 표 3과 같다.

표 3. 모터 사양

Table 3. Motor specification.

No load speed	80 rad/sec
Moment of inertia	$3.31 \times 10^{-5}$ kg-m-sec <sup>2</sup>
Load inertia	$1.58 \times 10^{-3}$ kg-m-sec <sup>2</sup>
Viscous friction	$69.584 \times 10^{-6}$ kg-m
Inductance(L <sub>m</sub> )	1.5 mH
Resistance(R <sub>m</sub> )	9.5 Ω
Torque sensitivity	0.0339 kg-m/amp
Back EMF	0.333 volts/rad/sec
Voltage at T <sub>p</sub> (V <sub>p</sub> )	28.2 volts

그림 13-(a)는 자이로스코프 모델을 기존에 사용하고 있는 2차 시스템을 사용한 경우의 폐루프 주파수응답이며, 그림 13-(b)는 본 논문에서 제시한 모델(그림 8)을 사용하여 구한 폐루프 주파수응답이다. 그림 12와 그림 13을 비교하여 보면 본 논문에서 제시한 모델이 실측 특성과 비슷함을 알 수 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션에서는 기계 구조물에 대해서는 기계적인 공진을 고려하지 않고 단순한 강체로 간주하였으므로 실험에서 구한 주파수 응답인 그림 12와는 약간의 차이가 존재함을 알 수 있다. 특히 그림 13-(a)에서는 약 40Hz 이상에서는 이득은 거의 60dB/decade 정도의 크기로 감소하고, 위상은 180° 이하로 떨어짐을 알 수 있으나, 그림 8의 모델을 이용하여 구한 그림 13-(b)의 응답은 약 40Hz 이상의 주파수에서 이득의 감소는 줄어들고, 위상은 180° 이하로 떨어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 약 500Hz 근처에서 2차 시스템 모델을 사용한 경우는 아무 이상이 없으나 그림 9의 제시된 모델을 사용할 경우 실제 자이로스코프 자체의 공진을 제거하기 위하여 노치 필터를 사용한 것과 같은 현상이 나타나며, 이들은 전체 시스템 해석에 심각한 영향을 줄 수 있다.

그림 14-(a)는 기존에 사용하고 있는 2차 시스템 모델을 사용한 경우의 속도응답 특성이며, 그림 14-(b)는 본 논문에서 제시한 모델을 사용하여 구한 속도응답 특성이다. 낮은 주파수에서는 두 모델의 차이가 거의 없으나, 높은 주파수에서 동작할 경우 기존에 사용한 모델은 위상이 거의 180° 정도 차이가 있으나 본 논문에서 제시한 모델은 약 135° 정도 위상차가 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 기존의 모델을 사용할 경우 높은 주파수에서 정확한 시스템 해석을 할 수 없다.

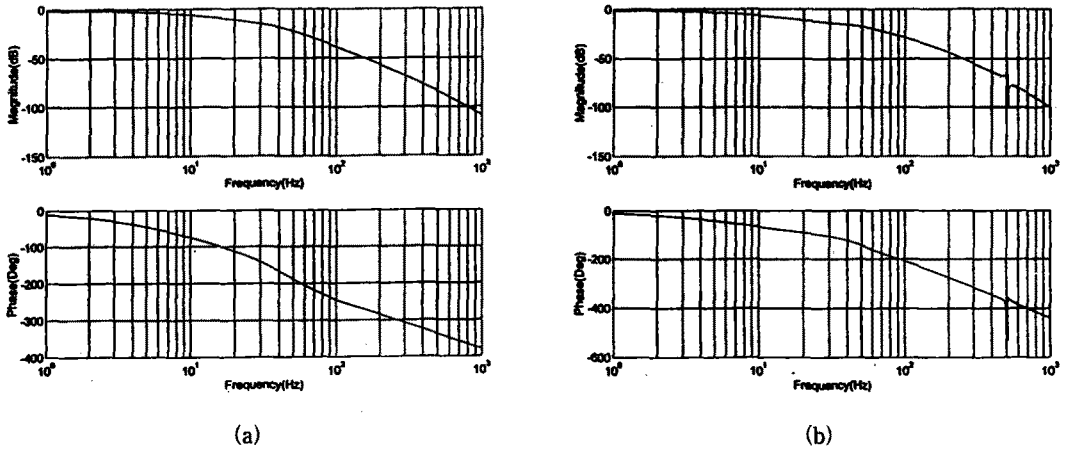


그림 13. 페루프 주파수응답

(a) 일반적인 2차 모델 (b) 본 논문에서 제시된 모델

Fig. 13. Closed loop frequency response

(a) general 2nd order model (b) presented model in this paper.

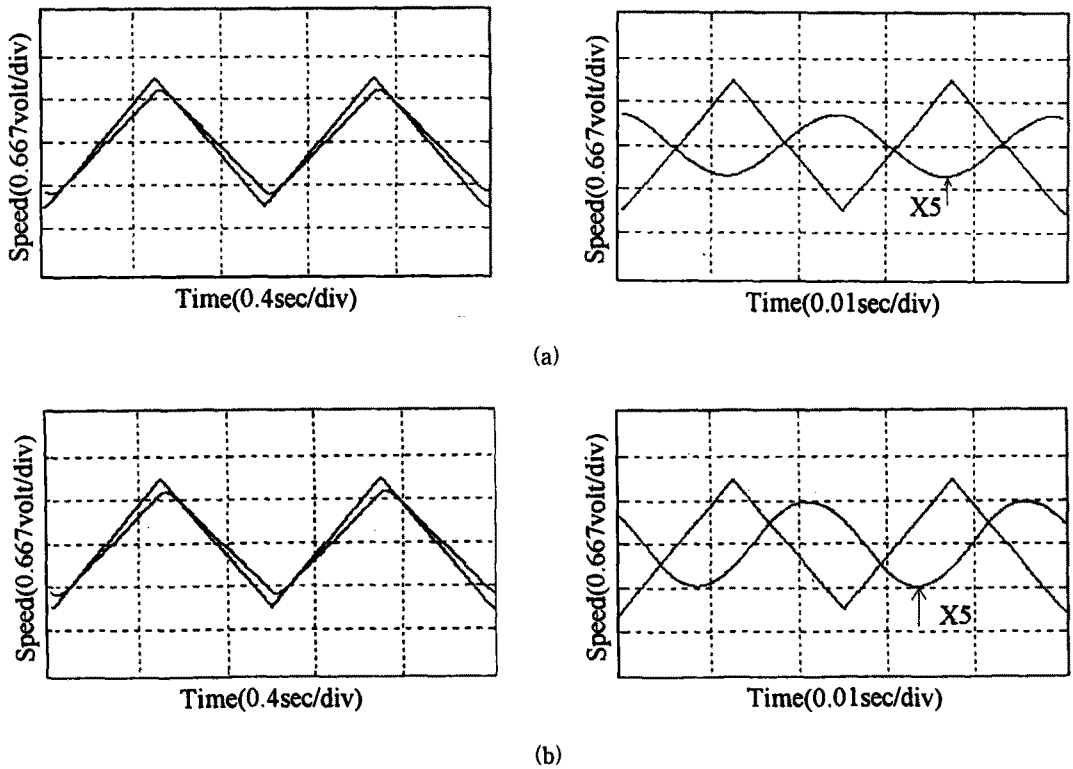


그림 14. 삼각과 속도입력에 대한 시스템 속도응답

(a) 일반적인 2차 모델 (b) 본 논문에서 제시된 모델

Fig. 14. System speed response for triangular speed input

(a) general 2nd order model (b) presented model in this paper.



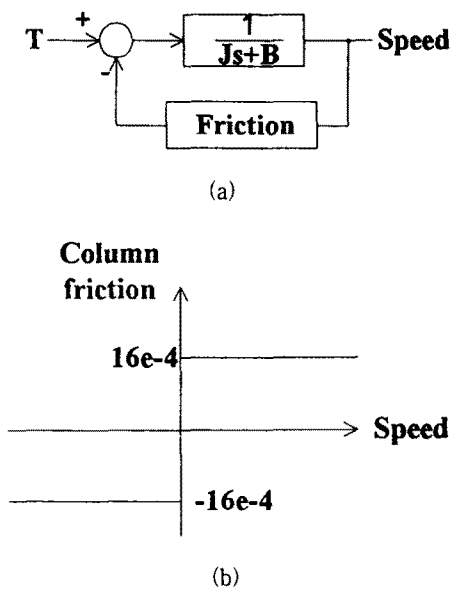


그림 15. 비선형 컬럼마찰 특성 및 시스템 구조  
 (a) 비선형 컬럼마찰 특성 (b) 시스템구조  
 Fig. 15. Nonlinear column friction characteristic and system configuration  
 (a) nonlinear column friction characteristic (b) system configuration.

또한 실제 시스템은 비선형 마찰특성을 가지고 있으므로 과도 시간응답에서 많은 차이를 가진다. EOTS에서는 일반적으로 모터등에서 비선형 마찰특성을 가지며 이는 그림 15와 같은 비선형 컬럼마찰로 모델 되어진다.

그림 16은 그림 11의 속도제어 블록선도에서 제어기 이득 C가 1일 때의 삼각파 속도입력에 대한 시스템의 속도응답 특성이다. 그림에서 보면 실제 시스템의 비선형 마찰특성이 저속에서 나타난다는 것을 알 수 있다. 또 실험과 컴퓨터 시뮬레이션 특성이 거의 일치하므로 본 논문에서 제시한 비레모드 자이로스코프 모델이 비교적 정확하다는 것을 알 수 있다.

### 6. 검토 및 고찰

비레모드 DTG는 현재의 각속도 출력을 자이로스코프의 토크입력으로 사용하고 있으므로 외부로부터 별도의 토크입력을 인가해 줄 필요가 없으며 따라서 단순한 속도변환기로 사용할 수 있어 편리하다. 따라서

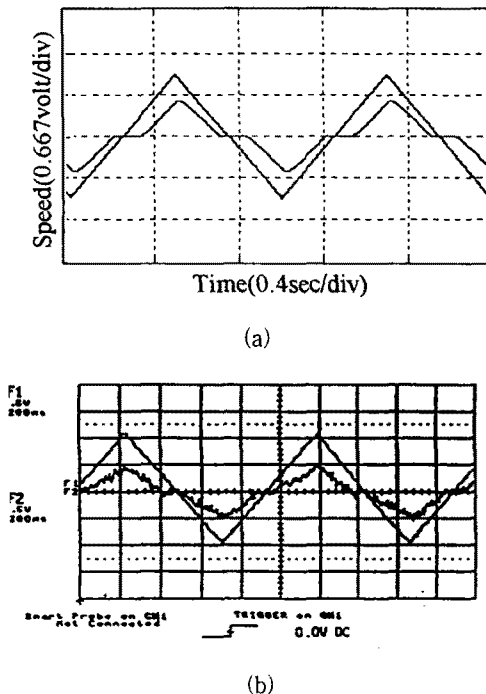


그림 16. 삼각파 속도입력에 대한 시스템 속도응답  
 (a) 시뮬레이션파형 (b) 실험파형  
 Fig. 16. System speed response for triangular speed input  
 (a) simulated waveform (b) experimental waveform.

초기 조준경시스템 개발에 많이 사용되어 왔다. 그러나 비레모드는 속도변환기이므로 정적이상의 외부 외란이 인가되면 속도제어루프가 어긋나게 되고 이는 자이로스코프가 초기 위치를 상실하게 되므로 자이로스코프의 안정성을 위하여 관성휠이 자동적으로 구속(caging)되고 더 이상 동작하지 않게 된다. 즉, 일단 관성휠이 구속되면 자이로스코프를 리셋시켜야 다시 재동작하고, 이것은 실제 시스템의 운용시 아주 커다란 비레모드 사용의 제약조건이 된다. 또 비레모드에서는 자이로스코프의 이득이 크지 못하므로서 마찰과 점성이 있는 짐발에서 크기가 작은 외란에 대한 자이로스코프의 출력에 오차가 생기고 이로 인하여 전체 속도루프가 개루프처럼 동작하여 원하는 안정화 정밀도를 얻지 못하는 결과가 발생한다. 이러한 문제점들을 자이로스코프를 위치 센서로 사용하는 비레적분모드로 동작하도록 하여 해결하고 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 프랑스 SAGEM사의 GSL82-21 자이로스코프와 20BM00-52-08 전자 제어회로를 사용하여 전자광학추적기에서 주로 사용하는 DTG에 대한 특성을 분석하고, 자이로스코프가 비레모드로 동작할 경우 재평형루프를 포함한 자이로스코프 시스템 전체모델을 제시하였다. 비레모드에서는 재평형루프가 필요하고 이를 자이로스코프 전자 제어회로가 수행하며, 이 경우에는 자이로스코프 전자 제어회로의 별도의 외부 회로를 사용하지 않고 전체시스템의 성능 평가를 비교적 간단히 수행할 수 있다. 따라서 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 모델의 타당성을 확인하였다. 제시된 모델은 공진특성을 가지고 있으므로 기존에 사용하고 있는 2차 시스템 모델보다 실제 시스템의 특성과 유사하다는 것을 알 수 있었다. 그 결과 일반적인 비레모드 DTG에서도 본 논문에서 제시된 모델을 적용할 수 있을 것이라 사료된다. 그러나 비레모드로 동작시에는 정격이상의 외부 신호가 인가되면 자이로스코프가 자동으로 안전모드(safe mode)로 들어가서 자이로 스핀축이 고정되므로 더 이상 동작되지 않는다. 이것은 실제 시스템의 운용시 상당한 문제점으로 지적되고 있으며, 이러한 문제점의 해결방안으로 자이로스코프의 동작모드를 각 위치제어가 가능한 비레적분모드로 사용하기도 한다.

### 참고 문헌

- [1] R. J. G. Draig, "Theory of operation of an elastically supported, tuned gyroscope," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-8, no. 3, pp. 280-288, 1972.
- [2] R. Carrall, "Inertial technology for the future, part VI: Dynamically tuned gyroscope," *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-20, no. 4, pp. 425-426, 1984.
- [3] M. Iecovich, "Line of sight stabilization requirements for target tracking systems," *SPIE*, vol. 1304, pp. 100-111, 1990.
- [4] W. J. Bigley and S. P. Tsao, "Optimal motion stabilization control of an electro-optical sight system," *SPIE*, vol. 1111, pp.116-120, 1989.
- [5] C. F. Lin, *Modern navigation, guidance, and control processing*, Prentice-Hall, 1991.
- [6] *Two axes gyroscopic system 20BM00-52-\*\* description manual*, SAGEM

### 著 者 紹 介



#### 임 성 운(任 成 雲)

1964年 10月 24日生. 1987年 경북대학교 전자공학과 졸업. 1995年 2月 동대학원 전자공학과 졸업(공학). 1995年 9月 ~ 현재 경북산업대 제어계측공학과 전임강사. 주관심분야는 센서시스템 해석 및 응용