

외부짐발 선구동에 의한 EOTS의 기동성 개선

Maneuverability Improvement of EOTS by Driving the Outer Gimbal First

임정빈, 김성수, 유준*

(Jong-Bin Yim¹, Sung-su Kim², and Joon Lyoo¹)

¹Dept. of Electronics Eng., Chungnam National University

²Agency for Defense Development

Abstract: An EOTS (Electro-Optical Tracking System) provides stabilized images while tracking a moving target. This paper presents a novel concept of driving the outer gimbal first for improving the maneuverability of an EOTS, contrary to the conventional inner gimbal mode. It has the advantages of faster positioning performance and stable operation in Nadir-point. Analysis of frequency responses reveal that the present scheme results in a wider control bandwidth and larger gain margin, compared to those of the previous one. The actual experimental results confirm that the maneuvering is stable although the input command has a large angular acceleration.

Keywords: EOTS, gimbal, FLIR, nadir

I. 서론

전자광학 추적장비(EOTS: Electro-Optical Tracking System)는 영상 신호를 이용하여 이동하는 목표물을 자동적으로 추적하면서 운용자에게 목표물에 대한 안정화된 영상을 제공하고 표적의 속도, 각속도 등의 표적정보를 사격통제 시스템에 제공하는 장치이다. 최근에는 관측 또는 항법 보조와 같은 기본적인 기능 뿐 아니라 사격통제를 위한 TADS (Target Acquisition Designation Sight) 기능과 정보, 감시, 정찰 및 추적 기능을 보유한 복합 시스템으로 진화하고 있다. 안정화 성능 개선에 대한 연구들은 다수 진행되어 왔으며 [1-5], 영상센서의 탐지거리와 해상도 향상, 정보수집 기능 등의 추가, 기구물의 소형화에 초점이 모아지고 있다[6,7]. 하지만, 탐지레이더/사격통제장비 등과의 연동으로 기동성이 점차 요구되고 있음에도 전자광학 추적장비의 위치제어 성능을 높이기 위한 제어기법의 연구는 다소 부족한 실정이다.

전자광학 추적장비는 주로 항공기 또는 함정 등에 장착되며, 탑재 플랫폼(Platform)의 외란을 제거하여 안정화된 영상을 제공하는데 최우선의 목적을 갖는다. 이를 위해 그림 1에 나타낸 것처럼 안정화를 담당하는 내부짐발과 구동을 담당하는 외부짐발의 이중짐발 구조를 가지고 있다[8]. 내부짐발에는 열상카메라 및 자이로스코프(Gyroscope)등의 센서가 탑재되며, 약 $\pm 3^\circ$ 도의 제한된 각도로 구동이 가능하다. 자이로스코프를 통해 외란을 측정하고 이를 보상하여

안정화 제어를 수행한다. 외부짐발은 방위각으로 360도, 고각으로는 $+20^\circ \sim -120^\circ$ 도의 범위로 구동이 가능하며, 내부짐발에 종속되어 구동된다[9].

내부짐발 선구동 방식으로는 빠른 위치/속도 구동명령 인가시 불안정한 구동이 발생하였다. 실장비로부터 측정을 통해 수립한 모델의 주파수 응답 분석을 통해 제어구조의 한계로 인한 것임을 확인하였다. 이를 극복하기 위한 방안으로 외부짐발 선구동 방식을 제안한다. 이 제어방식은 관성모멘트가 큰 외부짐발을 위치명령에 따라 우선적으로 구동하고, 이에 내부짐발이 추종하도록 하는 것이다.

기존의 내부짐발 선구동 방식과 본 외부짐발 선구동 방식의 주파수응답을 비교함으로써 빠른 위치제어시 제시된 방식이 더 안정적인임을 보였고, 실장비 시험 결과를 통해 이의 장점을 입증하였다. 또한, 내부짐발 선구동으로는 불안정할 수 밖에 없는 직하방(Nadir) 지점에서의 현상이 외부 짐발 선구동에서는 안정적인임을 보였다.

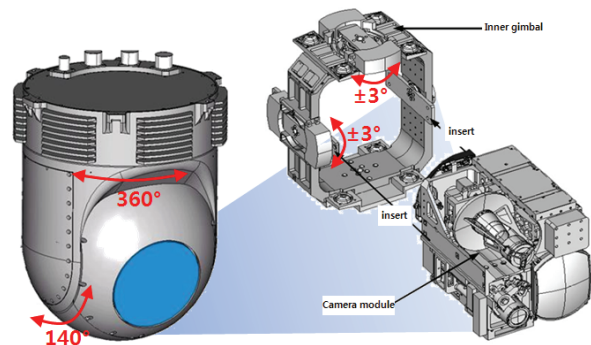


그림 1. 이중 짐발 구조를 갖는 전자광학 추적장비.
Fig. 1. Dual-gimbal structure of EOTS.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received April 26, 2013 / revised June 5, 2013 / accepted August 4, 2013

임정빈, 유준: 충남대학교 전자공학과

(jbin.yim@gmail.com/jlyou@cnu.ac.kr)

김성수: 국방과학연구소(kimsungsu@add.re.kr)

II. 본론

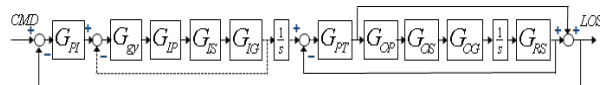
1. 내부짐발 선구동 방식

전자광학 추적장비는 최우선의 목적인 영상안정화를 위하여 그림 2와 같이 특화된 제어구조를 갖고 있다.

먼저 운용자로부터 구동명령(CMD)이 인가되면, 위치제어기를 통해 자이로스코프의 토크(Torquer) 명령으로 인가되고, 자이로스코프의 출력신호는 다시 속도제어기를 거쳐 내부짐발을 구동하게 된다. 외부짐발은 퍼텐쇼미터(Potentiometer)를 통해 내부짐발의 위치를 추종하게 된다. 이때, 자이로스코프의 축과 내부짐발은 약 ±0.3도 이내에서 제어가 되어야 하고, 내부짐발과 외부짐발은 ±3도 이내의 범위에서 제어가 되어야 축 간의 충돌이 발생하지 않는다. 만약 자이로스코프 축과 내부짐발 또는 내부짐발과 외부짐발 사이의 충돌이 발생하면, 충격이 자이로스코프에 전달되고, 자이로스코프의 출력이 최대/최소값으로 진동하게 되어 제어가 불안정해 질 수 있다. 내부짐발 모드가 거의 모든 EOTS에서 사용되는 이유는 안정화 제어 시에 탑재 항공기의 기동에 의한 외란이 발생하여 외부짐발이 흔들리더라도 내부짐발은 자이로스코프를 통해 관성좌표계에 대하여 안정화를 수행하므로 내부짐발은 흔들리지 않게 되고, 따라서 안정화된 영상을 얻을 수 있는 장점 때문이다. 위치제어를 수행하는 경우에도 그림 2에서처럼 위치제어기를 통해 속도명령을 인가하면 안정화 제어구조를 그대로 사용하여 영상안정화를 하는 동시에 위치제어가 가능하다.

그림 3은 내부짐발 모드에서 구동명령의 속도 및 가속도를 증가시키며 위치제어를 수행한 결과이다. 그림 3에서 더욱 빠른 기동을 위해 속도 및 가속도가 큰 구동명령을 인가하면 제어가 불안정해지며 발산하였다. 내부짐발 및 외부짐발의 제어가 이득 등을 조정하여도 제어성능이 개선되지 않았으며, 오히려 이득이 커질 경우 외부짐발의 공진현상이 발생하여 위치명령이 없는 안정화 제어모드에서도 외부짐발이 좌우로 진동하는 현상이 발생하였다. 그림 3에서 각속도가 3rad/sec, 각가속도가 4rad/sec2인 명령(V3A4)에도 구동이 다소 불안정해 짐을 볼 수 있으며, 속도가 3rad/sec 각가속도가 12rad/sec2의 명령(V3A12)에는 큰 폭의 진동이 일어남을 볼 수 있다.

내부짐발은 관성모멘트가 작고 제어대역폭이 넓어 빠른 기동이 가능하나 외부짐발은 내부짐발에 비해 관성모멘트가 크고 제어대역폭이 좁으므로, 내부짐발의 빠른 기동시 외부짐발이 내부짐발과의 위치를 충분히 추종하지 못해 내



- G_{PI} : 위치제어기
- G_{gy} : 자이로스코프
- G_{IP} : 내부짐발속도제어기
- G_{IS} : 내부짐발서보앰프
- G_{IG} : 내부짐발
- CMD : 위치명령 (Command)
- LOS : 시선(line-of-Sight)
- G_{PT} : 포텐시미터
- G_{OP} : 외부짐발위치제어기
- G_{OS} : 외부짐발서보앰프
- G_{OG} : 외부짐발
- G_{RS} : 레졸버

그림 2. 내부짐발 모드의 블록도.

Fig. 2. Block diagram of the inner gimbal mode.

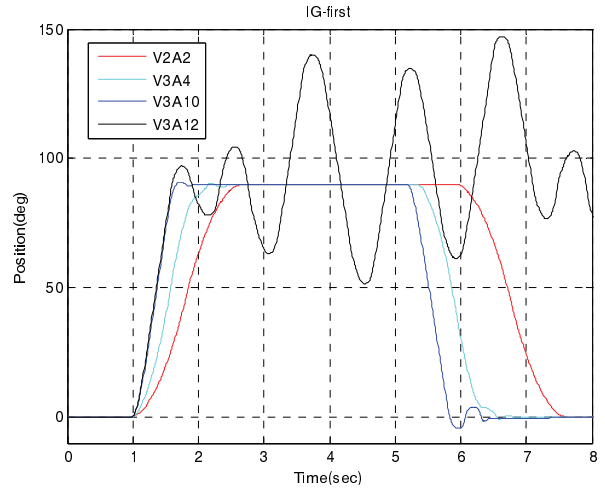


그림 3. 내부짐발 모드에 의한 계단 응답.

Fig. 3. Step responses by the inner gimbal mode.

부짐발과의 충돌이 발생하게 된다. 따라서 내부짐발의 기동은 외부짐발의 제어 대역폭에 제한받게 되며, 이런 제어구조로 인해 최근 전자광학 추적장비에 요구되는 빠른 기동성을 만족시킬 수 없다. 이를 확인하기 위해 실장비 주파수 응답으로부터 실장비의 모델을 유도하고 이를 바탕으로 내부짐발과 외부짐발의 응답특성을 분석하였다.

1.1 내부짐발 선구동 방식 전달함수

그림 2에서 각도 측정 센서인 퍼텐쇼미터(G_{PT})와 레졸버(G_{RS})는 위치각에 선형적으로 비례하는 출력을 가지므로, 일관성을 잃지 않고 전달함수는 '1'로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 블록도를 간략화하면 그림 4과 같다.

그림 2와 4에서 LOS (Line of Sight)는 전자광학 추적장비의 시선방향으로 열상카메라가 장착된 내부짐발의 위치(POS_{IG})와 같다. 내부짐발의 위치를 직접적으로 측정할 수 없으므로, 내부짐발과 외부짐발의 각도차이를 나타내는 퍼텐쇼미터와 외부짐발의 각도센서인 레졸버(Resolver)를 이용하여 계산한다. 그림 4에서 나타난 루프를 정리하면, 위치명령에 대한 시선방향(내부짐발 위치)의 전달함수는 식 (1)과 같다. 그리고 위치명령에 대한 외부짐발 위치(POS_{OG})의 전달함수는 식 (2)와 같다.

$$\frac{LOS}{CMD} = \frac{TF_{IG}}{1 + TF_{IG}} \tag{1}$$

$$\frac{POS_{OG}}{CMD} = \frac{TF_{IG} \cdot TF_{OG}}{1 + TF_{OG} + TF_{IG} \cdot TF_{OG} \cdot TF_{OG}} \tag{2}$$

이때, TF_{IG} 와 TF_{OG} 는 내부짐발 및 외부짐발의 자체 특

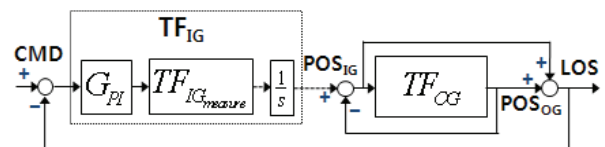


그림 4. 그림 2의 간략화.

Fig. 4. Simplification of the Fig. 2.

성에 해당하는 forward 전달함수로 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TF_{IG} = \frac{G_{PI} \cdot TF_{IG_{measure}}}{s} \quad (3)$$

$$TF_{OG} = \frac{G_{OP} \cdot G_{OS} \cdot G_{OG}}{s} \quad (4)$$

이때,

$$TF_{IG_{measure}} = \frac{G_{gy} G_{IP} G_{IS} G_{IG}}{(1 + G_{gy} G_{IP} G_{IS} G_{IG})} \quad (5)$$

1.2 내부짐발 선구동 방식 주파수응답

식 (5)와 식 (4)로 주어진 내부짐발과 외부짐발의 forward 전달함수는 실장비 측정실험을 통해 취득한 주파수 응답 데이터로부터 다음과 같이 추정할 수 있다[10]. 그림 5에서 파란 실선은 내부짐발의 자체 특성에 해당하는 주파수 응답 데이터이며, 붉은 점선은 이를 선형화 모델링한 전달함수 $TF_{IG_{measure}}$, (5)의 주파수 응답을 가리킨다. 약 35Hz의 대역폭과 30도 정도의 위상여유를 가진다.

그림 6에서 파란 실선은 외부짐발의 자체 특성에 해당하는 주파수 응답 데이터이며, 붉은 점선은 이를 근사화하여 구한 전달함수 TF_{OG} , (4)의 주파수 응답 그래프이다. 약 4Hz의 대역폭에 대략 60도의 위상여유를 가진다.

이제 그림 3과 식 (3)에 나와 있는 위치제어기 G_{PI} 를 다음의 비례 적분 형태로 도입한다. 위치제어에 있어 대부분의 외란은 저주파에서 발생하며, 이를 제거하기 위해 제어기는 높은 개루프 이득을 갖는 비례적분 제어기를 사용한다. 또한 이득교차주파수 부근에서 위상여유를 증대시키기 위한 진상보상기를 추가로 구성하였다.

$$G_{PI} = \frac{s + z_1}{s + p_1} \cdot K_p \frac{s + z_2}{s} \quad (6)$$

앞서 선형화를 통해 구한 $TF_{IG_{measure}}$ 를 이용하여 내부

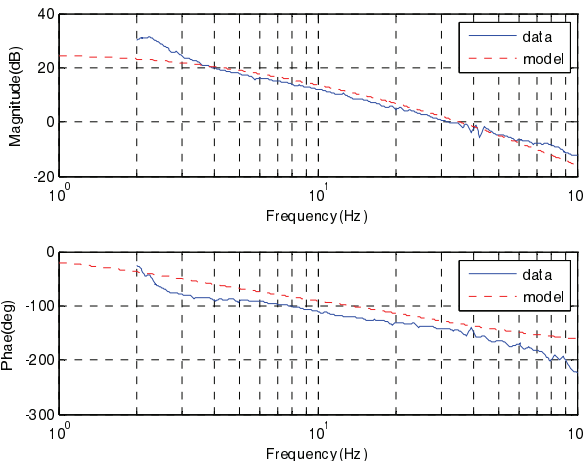


그림 5. 내부짐발 forward 전달함수 $TF_{IG_{measure}}$ 의 주파수 응답 데이터 및 선형 모델.

Fig. 5. Frequency response data and its fitted linear model for the inner gimbal forward transfer function $TF_{IG_{measure}}$.

짐발 모드의 전체 전달함수를 구할 수 있고 이의 특성을 관찰한다. 그림 7은 식 (1), 위치명령에 대한 내부짐발의 주파수 응답이며, 그림 8은 식 (2), 위치명령에 대한 외부짐발의 주파수 응답이다.

그림 7과 8에서 위치제어기 식 (6)의 이득 K_p 를 변경하여 이의 영향을 고찰하였다. 그림 8에서 내부짐발 모드 경우, 약 4Hz에서 공진이 발생하여 외부짐발의 구동이 불안정해 짐을 볼 수 있다. 위치제어기의 이득이 커질수록 공진은 심해지며, 이는 내부짐발과 외부짐발의 충돌을 일으키게 되므로 위치제어에 제약으로 작용하며 결국 외부짐발의 응답특성이 제한될 수밖에 없다.

1.3 Nadir 지점에서의 구동제한

1.2절에서 살펴본 것처럼 빠른 기동성능을 위한 이득의 크기는 외부짐발의 공진으로 인해 제한되며, 또 다른 제한

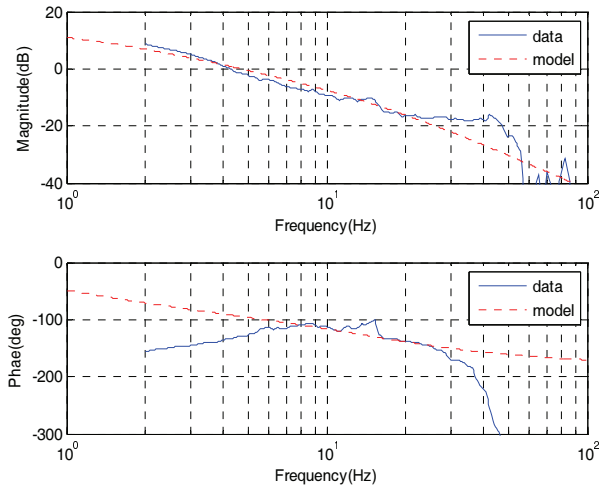


그림 6. 외부짐발 forward 전달함수 TF_{OG} 의 주파수 응답 데이터 및 선형 모델.

Fig. 6. Frequency response data and its fitted model for the outer gimbal forward transfer function TF_{OG} .

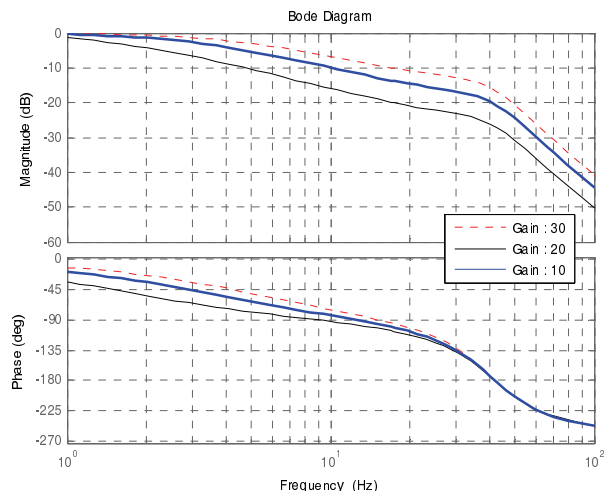


그림 7 내부짐발 모드 경우, 내부짐발에 관한 주파수 응답.

Fig. 7. Frequency responses for the inner gimbal in case of the inner gimbal mode.

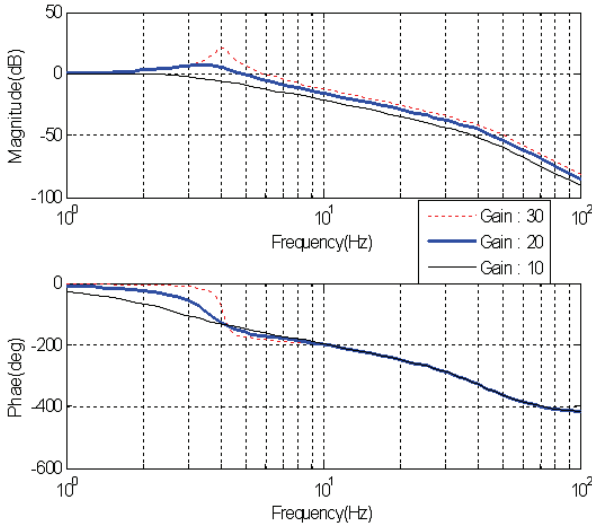


그림 8. 내부짐발 모드의 경우, 외부짐발에 관한 주파수 응답.
 Fig. 8. Frequency responses for the outer gimbal in case of the inner gimbal mode.

요인은 이중짐발의 구조로 인한 것이다. 그림 2에서 나타낸 내부짐발 모드의 경우, 위치구동명령과 시선방향과의 차이 (CMD_{err})가 내부짐발의 자이로스코프 토크 명령으로 인가 되게 되는데, 이때 위치 구동명령은 외부짐발 좌표계 기준으로 인가된다. 전자광학 추적장비의 이중짐발 구조로 인해 고각(θ_{EL})이 커지면, 외부짐발 방위각(Azimuth)의 구동방향과 내부짐발 방위각(자이로스코프 토크축)의 구동방향이 어긋나게 되므로, 방위각을 구동하기 위한 내부짐발 방위각의 구동명령(CMD_{IG-AZ})은 식 (7)과 같이 작아져야 한다. 그림 9는 고각이 0도 및 60도 일 때, 같은 방위각 구동을 위한 내부짐발 구동명령의 크기를 비교한 것이다.

$$CMD_{IG-AZ} = CMD_{err} \times \cos(\theta_{EL}) \quad (7)$$

아울러 내부짐발 모드의 경우, 고각에 따른 외부짐발의 방위각 구동명령(CMD_{OG-AZ})은 내부짐발의 작은 구동값을 보상하기 위해 식 (8)과 같이 고각의 코사인 값에 반비례하여 커지게 된다.

$$CMD_{OG-AZ} = POT \times \sec(\theta_{EL}) \quad (8)$$

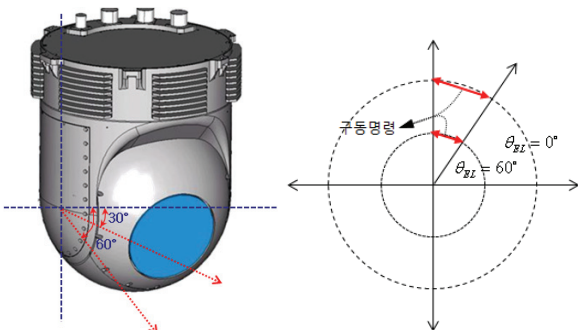


그림 9. 고각에 따른 구동명령.
 Fig. 9. Velocity command according to the elevation angle.

여기서 POT는 퍼텐쇼미터의 측정치로 내부짐발과 외부짐발의 각도차이다. 고각이 직하방 지점에 가까워지면, 코사인 값이 '0'에 가까워지고, 코사인의 역수인 secant 값은 매우 큰 값을 갖는다. 내부짐발과 외부짐발의 각도 차가 작게 변화하더라도 외부짐발 구동명령은 큰 값으로 변화하게 되어 방위각 제어가 불안정해진다. 따라서 외부짐발 방위각 제어 이득은 고각이 직하방 지점에 가까울 때에도 외부짐발이 불안정해지지 않는 수준으로 제한되며, 이는 외부짐발의 제어대역폭을 제한한다.

전자광학 추적장비는 일반적으로 탑재 플랫폼의 전방을 관찰하게 되지만 다목적 헬리콥터 등에 탑재되어 특정지역 관찰, 구조임무, 보급임무 등을 수행시에는 항공기의 직하방(Nadir point, 고각 90도 지점) 부근을 관찰해야 한다. 하지만, 위와 같은 문제로 인해 실제 운용시 고각이 85-95도인 구간에서는 고각만 구동이 가능하며, 방위각 구동은 제한된다.

2. 외부짐발 선구동 방식

본론의 1장에서 살펴본 바와 같이, 내부짐발 선구동방식은 제어구조로 인해 위치제어 이득이 커지면 외부짐발에 공진이 발생하고, 고각이 커짐에 따라 방위각 구동이 불안정해지는 현상이 발생한다. 이로 인해 제어기의 이득이 제한되고, 따라서 기동성에 제한을 갖는다. 이를 극복하기 위한 방안으로 외부짐발 선구동 방식을 제안한다. 외부짐발 선구동방식은 기존의 내부짐발 모드와는 다르게 관성모멘트가 큰 외부짐발을 먼저 위치 명령에 따라 구동하고 이에 따라 내부짐발을 추종하도록 제어하는 방식이다.

전자광학 추적장비의 이중짐발 구조와 유사하게 연속된 이중의 구동부를 갖는 고속의 가공기계 및 하드디스크 등에서는 관성모멘트가 큰 구동부를 먼저 구동하고, 작은 관성모멘트를 갖는 구동부를 나중에 구동시킴으로써 빠른 위치이동과 정밀구동을 구현한다[11,12]. 고속의 가공기계등과 달리 전자광학 추적장비는 고각과 방위각의 구동이 연관을 갖으며, 자이로스코프를 통한 안정화가 필요한 차이점이 있으므로, 이를 고려하여야 한다.

내부짐발 선구동 방식과 본 외부짐발 선구동 방식의 주파수 응답을 비교함으로써 빠른 위치제어시 제시된 방식이 더 안정적인임을 보였고, 실장비 시험 결과를 통해 이의 장점을 입증하였다.

2.1 외부짐발 선구동 방식 전달함수

그림 10은 외부짐발 모드의 제어 블록도를 나타낸 것이다. 그림 10의 블록도를 간략화 하면 그림 11과 같고, 루프를 정리하면 외부짐발 모드에서의 위치명령에 대한 각 짐발 축의 위치 전달함수를 구할 수 있다.

식 (9)는 외부짐발 모드에서의 위치명령에 대한 시선방향(내부짐발 위치)의 전달함수이며, 식 (10)은 위치명령에 대한 외부짐발 위치의 전달함수이다.

$$\frac{LOS}{CMD} = \frac{TF_{OG}}{1 + TF_{OG}} \cdot \frac{TF_{IG}}{1 + TF_{IG}} \quad (9)$$

$$\frac{POS_{OG}}{CMD} = \frac{TF_{OG}}{1 + TF_{OG}} \quad (10)$$

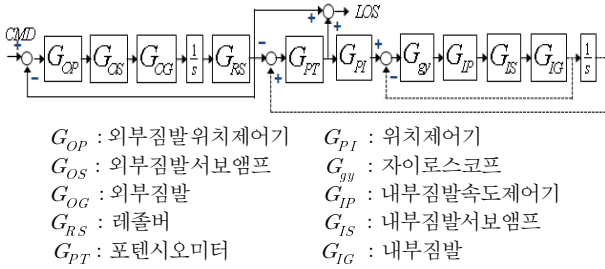


그림 10. 외부짐발 모드의 블록도.
 Fig. 10. Block diagram of the outer gimbal mode.

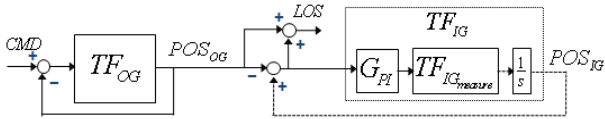


그림 11. 그림 10의 간략화.
 Fig. 11. Simplification of the Fig. 10.

2.2 외부짐발 선구동 방식 주파수응답

그림 12는 두 모드 경우에 대한 내부짐발에 관한 전달함수, 식 (1)과 (9)의 주파수 응답을 하나에 그려 비교한 것이다. 내부짐발 모드(파란 실선)의 경우가 보다 특성이 우수하나 실제 위치제어가 이루어지는 5Hz 이하의 영역에서는 외부짐발 모드의 경우(붉은 점선)와 큰 성능차이가 없음을 확인할 수 있다. 그림 13은 외부짐발 모드의 경우, 위치명령에 대한 외부짐발의 주파수응답이다. 그림 8의 내부짐발 모드와 달리, 외부짐발 모드의 경우 이득이 커지더라도 안정한 응답특성을 보이므로, 위치제어기에 높은 이득을 설정할 수 있으며 따라서 기동성 개선 등 위치제어 성능이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

2.3 Nadir 지점에서의 구동

그림 10과 11의 외부짐발 모드에서 내부짐발 제어명령 및 외부짐발 제어명령을 구하면 식 (11), (12)와 같다.

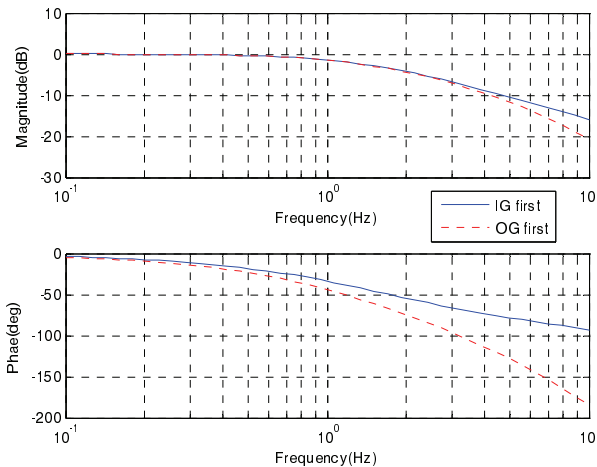


그림 12. 내부짐발과 외부짐발 모드의 경우, 내부짐발에 관한 주파수 응답의 비교.

Fig. 12. Comparison of frequency responses for the inner gimbal in cases of the inner and outer gimbal modes.

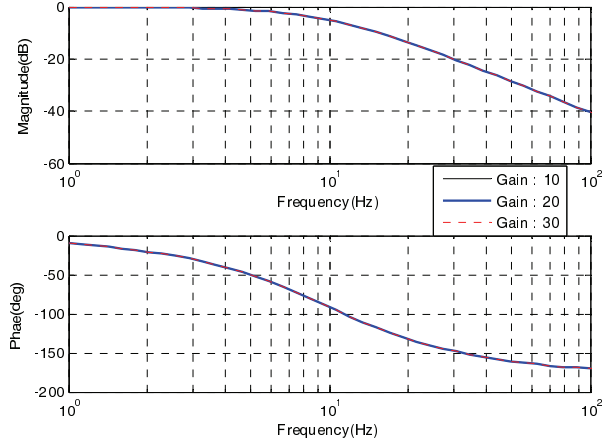


그림 13. 외부짐발 모드의 경우, 외부짐발에 관한 주파수 응답.
 Fig. 13. Frequency responses for the outer gimbal in case of the outer gimbal mode.

$$CMD_{OG-AZ} = CMD \tag{11}$$

$$CMD_{IG-AZ} = POT. \tag{12}$$

식 (11)에서 나타낸 것처럼 외부짐발 구동명령은 식 (8)의 내부짐발 모드와 달리 좌표계 변환의 필요가 없다. 외부짐발의 구동명령은 그림 11에 나타낸 것처럼 고각과 관계없이 위치명령(CMD)만을 추종하게 되므로, 어떤 고각에서도 방위각 구동은 안정하다. 이때 내부짐발은 외부짐발을 추종하는 과정에서, 제어대역폭이 넓으므로 빠르게 수렴하여 안정한 제어가 이루어진다. 내부짐발 모드에서 고각이 85-95도인 구간에서는 방위각 제어가 불안정해지므로, 방위각 구동이 제한되지만, 외부짐발 모드에서는 고각에 따른 방위각 구동각도의 제한 없이 운용이 가능하다. 따라서 외부짐발 제어기에 높은 이득을 설정하여 기동성을 향상시킬 수 있다.

2.4 실장비 시험결과

그림 14는 실장비 시험결과로 외부짐발 모드에 따른 위치제어 결과(계단 응답)이다. 그림 3의 시험과 동일한 조건으로 90도의 위치명령을 속도 및 가속도 제한 조건을 변경하며 인가하여 시험하였다. 실장비의 기구적 설계 최대치인

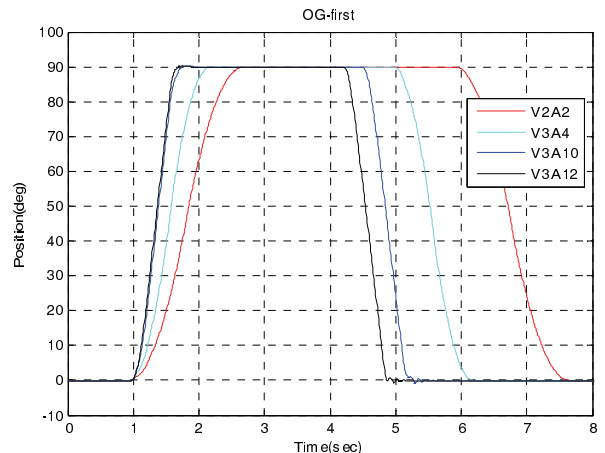


그림 14. 외부짐발 모드에 의한 계단 응답.
 Fig. 14. Step responses by the outer gimbal mode.

속도가 3rad/sec, 가속도가 12rad/sec²인 명령(V3A12)에도 구동이 안정적임을 알 수 있다. 따라서 외부짐발 모드로 위치 제어를 수행함으로써 안정적으로 최단시간에 위치 이동을 완수할 수 있다.

III. 결론

기존의 내부짐발 모드는 영상 안정화에 특화된 제어구조이며 각가속도가 큰 위치명령에 대해서는 불안정한 구동이 발생하게 되므로 각속도 및 각가속도를 제한하여 운용해야만 한다. 하지만 새로운 개념의 외부짐발 선구동 모드는 최근 전자광학 추적장비에 요구되는 빠른 기동성을 만족시킬 수 있다. 실측 데이터를 이용하여 유도된 전달함수 및 주파수 응답을 통해 외부짐발 모드는 가속도가 큰 위치명령에 대해서도 안정함을 확인하였고, 각속도 및 각가속도 제한값을 다양하게 변경하며 수행한 실장비 시험 결과에서도 기존의 3배에 이르는 각가속도를 갖는 명령에도 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 또한, 이종의 짐발 구조로 인해 발생하는 Nadir 지점 부근에서의 불안정한 구동특성이 외부짐발 모드에서는 나타나지 않아, 고각에 관계없이 안정된 방위각 구동이 가능하다는 장점도 있다.

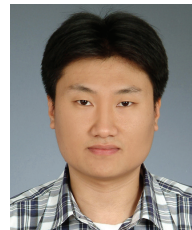
본 연구 결과는 이종의 짐발 구조를 갖는 유사장비에서 위치제어시 가감속 성능을 높여 정착시간을 크게 줄이는데 기여할 수 있다.

REFERENCES

- [1] J. S. Ma, M. S. Kang, and W. H. Kwon, "Vibration suppression control based on model reference approach for LOS stabilization gimbal," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 5, no. 5, pp. 540-549, 1999.
- [2] J. K. Park, Y. K. Bae, and S. Jung, "Experimental studies of a time-delayed controller to stabilize image stabilization system," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 13, no. 1, pp. 58-64, 2007.
- [3] L. Kai, W. Zhang, and H. Zhu, "Multi-rate H[∞] control for electro-optical tracking system based on internal model algorithm," *International Colloquium Computing, Communication, Control, and Management*, vol. 2, pp. 53-60, 2008.
- [4] M. Dongxi and F. Dapeng, "Dynamic nonlinear control for electro-optical tracking system," *2nd International Conference Intelligent Computation Technology and Automation*, pp. 782-784, 2009.
- [5] B. Wenliang and H. Xianlin, "Control system design of multi-gimbal electro-optical platform by the technique of μ -synthesis," *29th Chinese Control Conference*, pp. 3447-3452, 2010.
- [6] S. W. Lee, D. J. Han, and K. M. Kang, "Review on present state and future development direction for the electro-optical systems," *Journal of Korea Association of*

Defense Industry, vol. 14, no. 2, pp. 163-191, 2007.

- [7] C. H. Kang, S. H. Oh, and B. S. Lee, "Current status of EOTS for fighter and its technical trends," *Proc. of the Korean Society for Aeronautical and AeroSpace Sciences*, vol. 2012, no. 4, pp. 693-698, 2012.
- [8] S. E. Lee and T. W. Lee, "Vibration characteristic analysis of gimbal structure system with observation reconnaissance camera module," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 35, no. 4, pp. 409-415, 2011.
- [9] S. Y. Youn and K. S. Youn, "Controller design of line of sight stabilization/tracking systems," *Research Review Kyungil University*, vol. 13, no. 2, pp. 725-736, 1996.
- [10] S. W. Lim and J. S. Ma, "Characteristics Comparison according to operating mode of dynamically tuned gyroscope in the electro-optical tracking system," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 3, no. 3, pp. 311-317, 1997.
- [11] J. C. Kim, "Design of dual-stage actuator controller for hard disk drive," Master Thesis, Hanyang University, 2001.
- [12] B. M. Chung, I. J. Yeo, and T. J. Ko, "High Precision hybrid milling machine using dual-stage," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 25, no. 7, pp. 39-46, 2008.



임정빈

2002년 충남대학교 전자공학과 졸업. 2004년 동 대학원 석사. 2013년 동 대학 박사. 2006년~2012년 삼성탈레스 선임연구원. 관심분야는 영상안정화 및 영상추적, 항법시스템, 계측제어.



김성수

2001년 경일대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 충남대학교 메카트로닉스 공학과 석사. 2004년~2006년 한국원자력연구원 위촉연구원. 2006년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 제어시스템, 시선안정화 장치, 표적추적제어.



유준

1978년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 전기전자공학과 박사. 1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 1989년 2월~1990년 2월 미쉬건 주립대학교 객원교수. 1993년 12월~1994년 2월 독일 IPA 연구소 방문연구원. 1997년 2월~1998년 2월 캘리포니아 주립대학교(데이비스) 객원교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서신호처리, IT기반 로봇, 항법시스템.