

함상 안테나 구동용 안정화장치의 정밀 위치제어

조택동*, 서승호**, 남기정***

A Precision Position Control of Antenna Driving System in Naval Vessel

Taik-Dong Cho*, Song-Ho Seo**, and Ki-Jung Nam***

ABSTRACT

The naval vessel must moves rolling, pitching, yawing by wave when it runs in ocean. Some narrow beam antenna needed position compensation by stabilizer or gimbal for best performance. This paper presents the precision position control for heavy weight(130kg) in roll and pitch direction. Generally it's called for gimbal. This gimbal uses P-I controller, and it's driven by linear actuator and servo motor. This gimbal gets ship's gyro signal and synchro, which have the absolute angle value. Some other similar equipments are driven by huge hydraulic power, but this gimbal is driven by small servo motor. This control loop gets the following procedure repeatedly ; reading ship gyro and gimbal synchro, calculating compensated error and control output, driving motor and actuator The performance of gimbal system was satisfied.

Key Words : Gimbal(안정화장치), Naval Vessel(함정), Roll and Pitch(롤· 피치), P-I Control(비례-적분 제어), Linear Actuator(전동 실린더), Servo Motor(서보모터), Synchro(싱크로)

기호설명

- θ = Angle of Gimbal System
- ψ = Angle of Ship Motion
- F_a = Trust Force of Linear Actuator
- T = Motor Torque

1. 서론

재밍 송신장치는 함정을 미사일로부터 방어하는 전자전 장비로 고풍력의 RF(Radar Force)부품과 안테나 등으로 구성된다. 그리고 재밍송신장치의 고각(Azimuth) 빔폭이 6° 인 반면 함정의 해상 운

용시 운동특성을 예측결과 ± 20° 의 범위에서 10° /sec의 최대속도로 운동을 한다. 따라서 재밍송신장치의 성능을 보장하기 위해 함정의 운동을 보상하기 위한 안정화장치가 필요하다.

본 논문에서는 최초 설계단계에서 이론적 해석을 통해 안정성 및 응답특성을 판단하고 실제의 입력과 유사한 입력을 가하여 시스템의 거동을 예측하고 장치의 실험을 통해 이론을 입증하고 요구 성능을 만족하도록 하여 그 결과를 고찰한다.

재밍 송신장치의 최종 출력은 송신 안테나 부분에서 출력되고 이 부분을 안정화 시켜 항상 수평을 유지하는 것이 안정화 장치의 기능이다. 이 기능을

* 충남 대학교
 ** 국방과학 연구소
 *** LG 이노텍 연구소

구현하기 위해 모터에 의해 구동되는 전동 실린더 (Linear actuator)를 이용하고 안정화 장치의 현재 각을 감지(Sensing)하기 위해 절대각의 검출이 가능한 싱크로(Synchro)를 이용한다.

2. 시스템 모델링

2.1 장치의 구성 및 기구학적 거동

안정화 장치는 수평유지가 요구되는 냉각판조립체(130kg)와 송신안테나와 전동 실린더, 베어링,

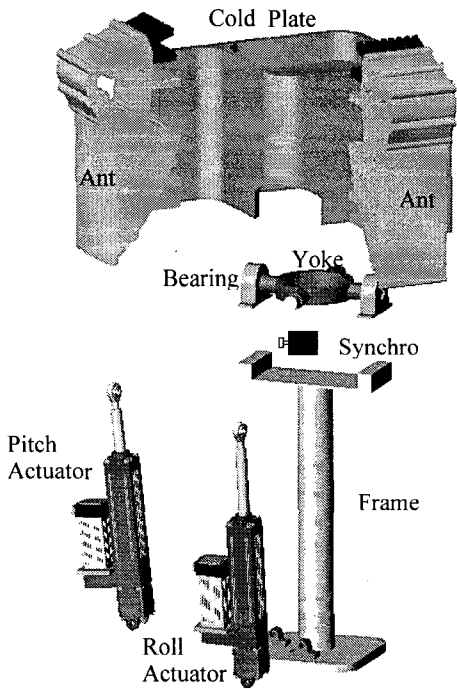


Fig. 1 Component of gimbal

싱크로, 구조물 조립체로 구성된다.

안정화 장치의 기구학적 거동은 Fig.2에 도시된 바와 같이 냉각판 조립체의 회전 중심인 'O'를 중심으로 하고 전동실린더의 추력(Trust force)을 제어 입력으로 평형상태를 유지하는 방식이다.

함정의 회전각 ψ 를 무시하고, θ 가 크지 않다고 가정하면 회전운동의 운동방정식은⁽¹⁾

$$J_L \ddot{\theta}(t) = F_a \cdot e \quad (1)$$

이다. 여기서 J_L 은 냉각판 조립체의 관성 모멘트이고, F_a 는 전동 실린더의 추력이다.

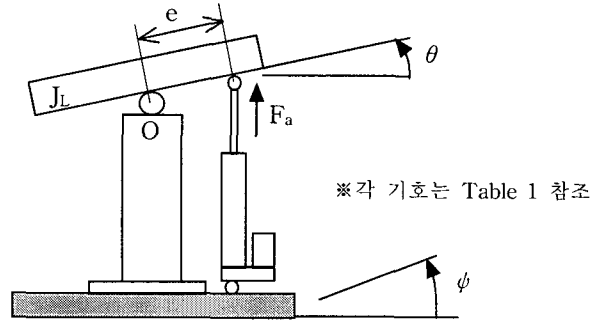


Fig. 2 Schematic diagram of gimbal

또한 함정의 회전각 ψ 를 함께 고려하여 회전 중심 "O"에서 절대각 검출기인 싱크로의 측정치는 $\theta_o = \theta + \psi$ 가 된다.⁽²⁾

2.2 전동 실린더

전동실린더는 회전력을 발생시키는 모터부과 이 회전력을 직선운동으로 변환시키는 실린더부로 구성된다.⁽³⁾

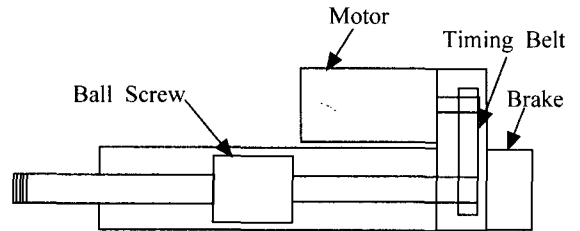


Fig. 3 Schematic diagram of linear actuator

모터는 일반적인 Brushless DC Servo 타입이다. 따라서 다음식으로 표현 할 수 있다.⁽⁴⁾

$$T = K_2 \cdot i_a \quad (2)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_0 \frac{d\theta}{dt} = K_1 e_a \quad (3)$$

$$J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + f_0 \frac{d\theta}{dt} = T \quad (4)$$

실린더 부분은 모터의 토오크를 입력으로 하여 추력(Trust Force)을 출력으로 하는 부분으로 다음의 식으로 표현된다.^{(3),(5)}

$$T = \frac{F_a \cdot L}{\eta_b \cdot \eta_t \cdot 2\pi \cdot N} \quad (5)$$

식 (2),(3),(4),(5)를 Laplace Transform 하여 블록 선도로 표현하면 다음의 Fig. 4와 같다.

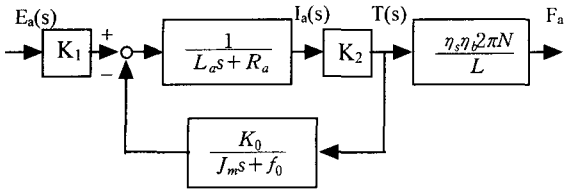


Fig. 4 Block diagram of linear actuator

2.3 싱크로

안정화 장치에 이용된 센서는 전원이 ON/OFF 되는 상황에서도 절대각의 검출이 가능하고 정밀도가 우수한 싱크로(Synchro)를 사용한다.

이 싱크로는 Reference(115VAC,60Hz)를 입력으로 하여 3개의 싱크로 신호인 S1, S2, S3(90VAC, 60Hz)를 출력하고 3개의 싱크로 신호의 위상과 전압의 차이를 이용하여 각도신호를 표현한다.⁽⁶⁾ 또한 이 싱크로 신호는 S/D(Synchro to digital)변환기를 이용한다. 물리적 현상인 각도를 Digital화 과정에서 필수 불가결한 지연요소가 포함되어있고 이를 고려하여 싱크로 및 S/D 변환기의 모델링은 다음의 Fig. 5와 식(6)과 같다.⁽⁷⁾

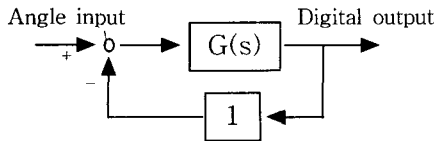


Fig. 5 Block diagram of S/D conversion

$$G_s(s) = \frac{A_1 \cdot A_2 s + A_1 \cdot A_2}{B} \quad (6)$$

$$\frac{1}{10 \cdot B s^2 + (\frac{A_1 \cdot A_2}{B} + 1)s + A_1 \cdot A_2}$$

2.4 블록선도

안정화 장치의 전체 블록선도는 다음과 같다.

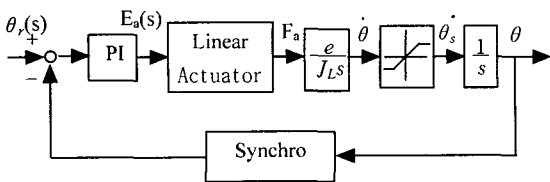


Fig. 6 Block diagram of gimbal system

3. 제어기 설계

3.1 P-I 제어기

비례 제어는 오차제어동작신호 $e(t)$ 에 비례이득 또는 비례감도인 K_p 를 곱하여 제어기의 출력 신호인 $m(t)$ 를 생성하는 제어로써 본질적으로 이득의 조정이 가능한 증폭기라고 할 수 있다. 적분 제어는 오차제어동작신호 $e(t)$ 의 시간에 대한 적분값에 비례이득 K_i 를 곱하여 제어기의 출력 신호인 $m(t)$ 를 생성하는 제어로써 적분된 신호에 따라 반응을 하므로 Noise에 강하고 정상상태 오차를 0으로 한다.⁽⁴⁾

$$m(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

비례 적분 제어는 비례제어와 적분제어의 조합으로 시스템의 속도 특성을 향상시키고 정상상태 오차를 제거하여 신뢰성을 향상시킨다.

본 논문에서 비례 적분 이득은 4.2의 전산 모사의 과정에서 시행착오(Trial & error) 방법으로 구하였고, 이에 대한 검증은 Minitap을 이용하였다. 여기서 적용된 실제 값은 비례이득 2.93, 적분이득 1.26 이다. 또한 이론상 미분제어기를 이용하면 응답특성이 향상되나 본 안정화장치에 적용한 결과 전기적 노이즈와 기계적 공차의 영향으로 응답특성이 저하되어 이를 적용시키지 않았다.

3.2 최고속도 제한기⁽⁸⁾

함정의 해상 운용시 롤(Roll)과 피치(Pitch) 방향의 운동을 MIL-STD-1399 301A를 근거로 예측한 결과 롤 방향의 최대 각속도가 $10^\circ / s$, 피치 방향의 최대 각속도가 $5^\circ / s$ 를 초과하지 않는다. 따라서 안정화장치의 롤 방향 최대속도는 $20^\circ / s$, 피치 방향 최대속도는 $10^\circ / s$ 이면 충분하다.

따라서 안정화장치에서 비정상적인 운동(Noise, Cable의 단선등)으로 인해 발생하는 입력으로 인해 과도한 동작을 함으로써 장비전체에 미치는 악영향 제거 및 신뢰성 향상을 위해 최고 속도를 제한하는 것이다.

즉 $20^\circ / s$ 이상으로 구동을 하여도 $20^\circ / s$ 로 제어하는 것이다.

4. 시뮬레이션(Simulation)

안정화장치의 시뮬레이션은 Matlab을 이용하였고 이에 이용된 데이터는 각부품의 Catalog 및 실측 데이터를 이용하였고 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Parameter used in system

Parameter	Description	Value
J_L	냉각판조립체 관성모멘트	0.79 kgf·m·s ²
J_M	모터 관성모멘트	1.37E-5 kgf·m·s ²
J_A	전동실린더 관성모멘트	4.39E-5 kgf·m·s ²
c	추력 작용점 거리	16 cm
L	전동 실린더 리이드	5.08 mm/rev
η_b	볼 스크류 효율	0.9
η_t	타이밍벨트 효율	0.9
N	전동 실린더 기어비	1.5
A_1	싱크로 동적 지연 계수	0.31
A_2	싱크로 동적 오차 계수	4000
B	싱크로 동적 성능 계수	52
K_0	역기전력 상수	0.24 volt·sec/rad
K_1	증폭기 이득	15.2
K_2	모터 토크 상수	0.29 N·m/amp
L_a	모터 인덕턴스	1.06E-3 henry
R_a	모터 저항	2.58 Ω
f_0	모터 점성 마찰계수	3.1E-2 N·m/rad/s

4.1 안정도 판별

안정화장치의 안정도 판별은 s 평면상에서 페루프 시스템의 극점과 영점을 도시하여 안정성을 점검하는 일반적 방법인 근궤적법을 이용한다.⁽⁴⁾

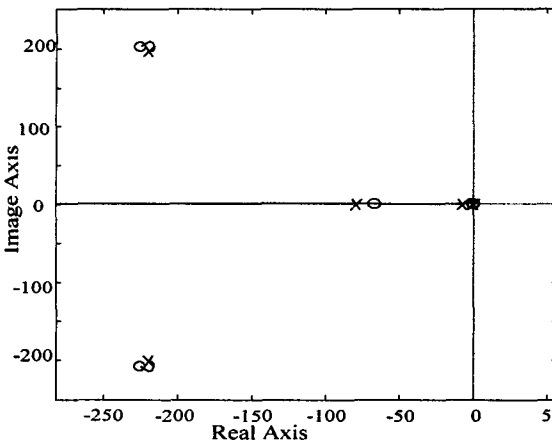


Fig. 7 Root locus diagram

여기에 이용된 페루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{(G_c \cdot G_e \cdot G_I \cdot G_f)}{(G_c \cdot G_e \cdot G_I \cdot G_f \cdot G_s)s + 1} \quad (7)$$

여기서 G_c 는 제어기의 전달함수 이고, G_e 는 전동실린더의 전달함수이고, G_I 는 부하의 전달함수 이고, G_f 는 속도제한기의 전달함수이고, G_s 는 싱크로의 전달함수 이다.

Fig. 7은 Fig. 6의 시스템에 각 변수를 적용하고 식 (7)의 페루프 전달함수를 구하여 극점과 영점을 도시한 근궤적 선도이다. 여기서 본 시스템의 모든 극점과 영점이 Real 축의 "0"선 좌측에 위치하여 안정(Stable)함을 알 수 있다.

그리고 본 시스템의 입력은 파도와 함정의 크기에 의해 발생이 되는 정현파(Sinusoidal)의 형태로 예측되므로 주파수 응답특성을 분석하기 위하여 Bode 선도를 Fig.8에서 나타내었다. 여기서 시스템의 대역폭(Band width)은 약 5 rad/sec 이고, 저주파 대역에서 인정적 임을 알 수 있다.⁽⁹⁾

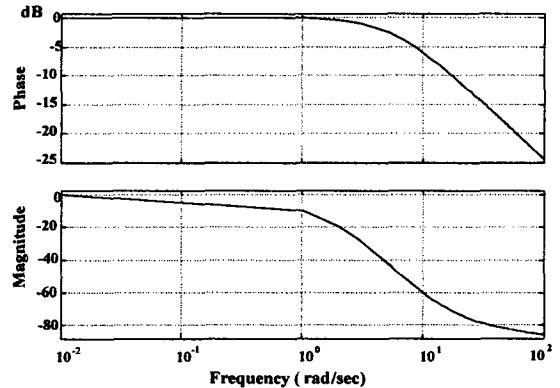


Fig. 8 Bode diagram

4.2 시뮬레이션

Fig. 9는 안정화 장치에 20° (0.35rad)의 계단 입력을 가했을 때 거동을 보여준다. 이때 Settling Time(2%)은 약 0.8초이고 약간의 정상 상태 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 안정화 장치에 실제의 해상 운용을 고려하여 20sin(π · t/4)를 입력으로 가했을 때의 거동을 나타낸 것으로 시간 지연 요소(Time delay)영향으로 인해 약 0.1초 지연(Shift)되어 추종한다.⁽¹⁰⁾

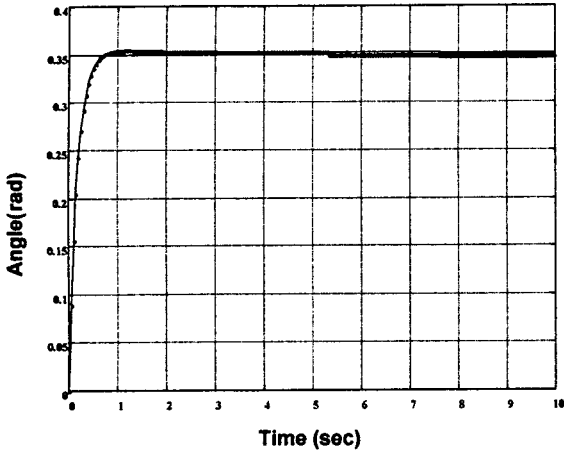


Fig. 9 Step input response

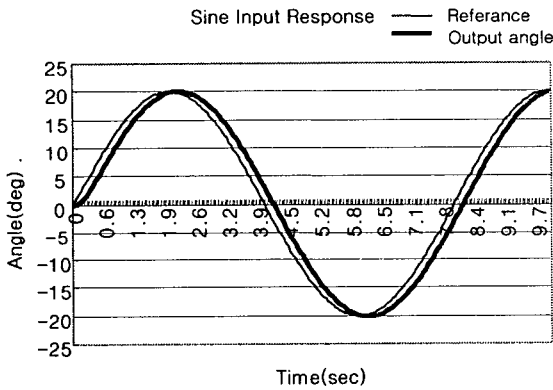


Fig. 10 Sine input response

5. 실험

5.1 실험장치 구성

본 실험장치의 구성은 통신을 주고받기 위한 통신제어판(LGP)과 싱크로 신호를 디지털 신호로 변환하여주는 S/D 변환판(LGP), 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하여주는 D/A 변환판(LGP), 모터를 구동시켜주는 모터드라이버(Parker사, APEX10), 추력을 발생하는 전동실린더(Parker사, ETB50-B05-PB23-DFBG150-A) 및 절대각을 감지하는 싱크로(Axsys사, 15CX-6C, MIL-STD-20708)로 구성되어진다.

Fig.11은 시험시 초기 설치된 상태를 보여준다. 여기서 제어컴퓨터는 통신제어판의 플래시 롬에 실행파일을 전송 및 실행시키고 한번의 실험 실시 후 통신제어판의 램에 저장된 각 데이터를 내려 받는(Down-load) 역할을 한다.

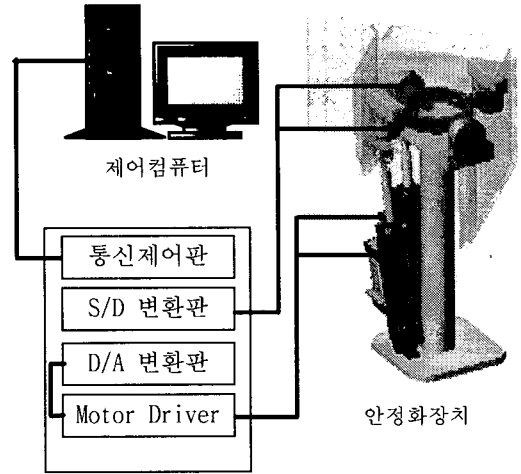


Fig. 11 Experiment set-up

실험시 신호의 개략 흐름도는 Fig. 12에서 나타나고 있다. 최초 통신제어판(Com&Con)에서 IFXL (Interface Translator)과 안정화장치의 싱크로 신호를 읽어서 오차값을 계산하고, 여기에 제어 알고리즘을 적용하여 제어입력을 생성하고, D/A 변환판에서 전압값을 생성한다. 이 전압값은 모터 드라이브를 구동하고 모터는 전동실린더의 추력을 발생하여 오차값을 보상한다. 보상된 오차값은 다시 싱크로를 통해 감지하여 되먹임(Feedback)제어를 계속한다.

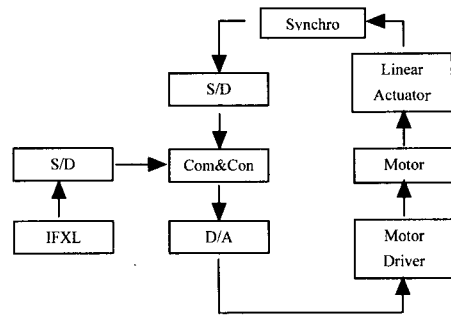


Fig. 12 Schematic diagram of electric line

5.2 실험 결과 분석

5.2.1 Step 입력 실험

Fig.13은 20° 의 Step Signal을 입력으로 주었을 때 응답을 시뮬레이션과 실험치를 비교하여 나타낸 것이다. 실험 시간은 5초로 하였고 5초 이후의 특성은 변함이 없었다. 실험에서 정착시간은 약 0.9초로 유사하고 시뮬레이션과 실험의 최대 차이는 약

2.0° 로 10%를 나타내어 시스템 모델링 및 시뮬레이션 과정이 적절하였음을 알 수 있다. 여기서 전산모사와 가장 큰 오차를 보이는 부분은 약 0.7초 시점에서 생기는 굴곡이고 이 부분의 원인은 전기적 기계적 노이즈의 원인으로 판단을 내렸다. 그리고 이러한 현상은 실제의 운용시험 및 정현과 입력시험시 나타나지 않았다. 그리고 실험 결과에서 정상 상태 오차가 약 0.1° 가 존재하여 시뮬레이션과 차이를 나타낸다. 이 정상상태 오차는 제어의 Dead zone이 실제 시스템에 존재하여 나타나는 결과로 예측 할 수 있다. 안정화 장치의 요구 정확도가 ± 0.5° 이므로 현 상태를 유지하였다.

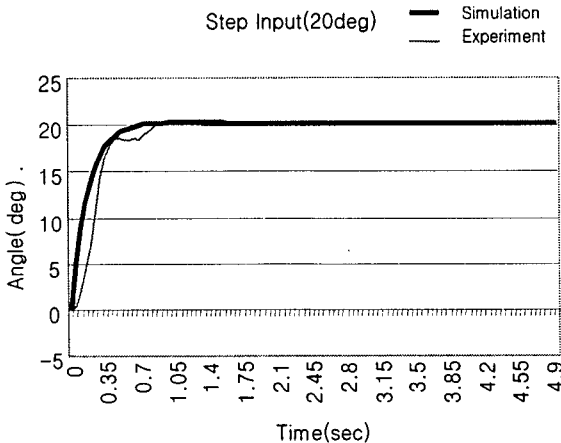


Fig. 13 Step input response

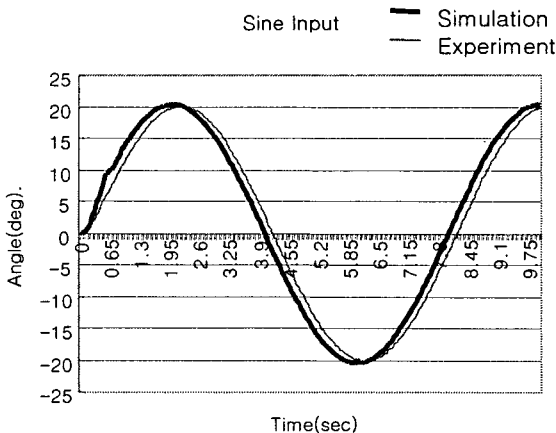


Fig. 14 Sine input response

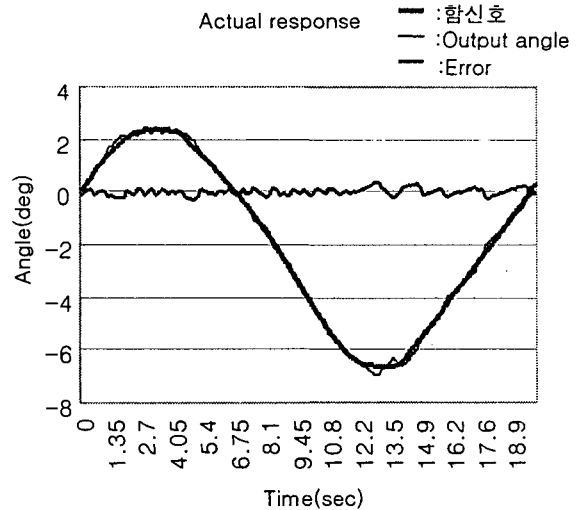


Fig. 15 Real operation response

5.2.2 Sine 입력 실험

Fig. 14는 실제의 입력과 가장 유사하도록 $20\text{sine}(\pi \cdot t/4)$ 를 입력으로 하여 $10^\circ/\text{sec}$ 를 유지하도록 하였고 실험시간은 20주기까지 계속 같은 특성이 반복되어 10초로 제한하였다. 본 실험에서도 시뮬레이션과 실험치의 최대 오차가 약 7%에 불과하여 시스템 모델링 및 시뮬레이션 과정이 적절하였음을 알 수 있고, 정확도는 약 $\pm 0.3^\circ$ 로 요구 규격을 만족하였다. 실험 결과에서 미세한 떨림($\pm 0.2^\circ$)이 존재하고 이는 각 연결(Joint)부위에서 공차로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 그리고 실험치에서 최초 구동시 오차값이 $\pm 1.0^\circ$ 를 초과하는 현상이 있으나 실제 운용조건은 연속적인 동작이 요구되므로 이를 무시하였다.

5.2.3 실제 운용중 시험 결과

Fig. 15는 안정화장치를 실제 함에 장착하고 함정의 운항중 데이터를 확보하여 이를 그래프화 한 것이다. 여기서 함신호의 최대속도는 약 $1.0^\circ/\text{s}$ 정도이고 이때의 최대 오차는 $\pm 0.2^\circ$ 를 초과하지 않고 정확한 안정화를 유지시키고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

안정화장치의 설계 및 제작 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 함정의 운동(max 10° /s)이 입력으로 작용하여 저속으로 구동이 되는 본 안정화 장치에서는 P-I 제어기법만을 이용하여도 요구성능을 만족시키는 것을 확인 하였다.

2. 모델링 과정에서 모터의 토오크를 출력값으로 모델링하여 적용하였고, 이 방법으로 시뮬레이션과 실험을 실시하여 그 결과가 10% 미만의 오차를 보이므로 모델링, 시뮬레이션 및 설계가 타당함을 확인하였다.

3. 중량물(130kg)의 구동시 모터와 전동실린더를 이용하여 실시간으로 위치제어를 실행하여 $20\sin(\pi/4 \cdot t)$ 의 입력조건에서 $\pm 0.5^\circ$ 의 정확도를 만족하였다.

참고문헌

1. J. L. Meriam, L. G Kraige, "Engineering Mechanics," Third Edition, 1993.
2. 조택동, 서송호, 양상민 "편로드 유압시스템의 강인 위치제어에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제3호, pp. 128-135, 1999.
3. Parker Hannifin Co, "Stepper and Servo Driven Linear Actuators," Catalog 8892/USA, 1998.
4. Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering," Prentice-Hall , Inc., 1987.
5. Parker Hannifin Co, "Step Motor and Servo Motor Systems and Controls," Catalog 8000-1/USA, 1998.
6. MIL-S-20708E, "Military Specification Synchros, General Specification For," 1992.
7. ILC Data Device Co., "Synchro Conversion," Catalog, Second edition, USA, 1988.
8. MIL-STD-1399 301A, "Ship Motion and Attitude," 1990.
9. 김종식, 선형 제어 시스템 공학, 청문각, pp. 178-188, 1992.
10. 조택동, 서송호, 양상민 "유압안정화 시스템의 강인제어에 관한 연구," 한국군사과학기술학회지, 제2권, 제2호, pp. 226-233, 1999.