

조준경 안정화 시스템의 설계 및 특성분석

◦ 김 용 관* 백 운 보* 김 중 화** 이 만 형***

부산대학교 대학원 기계공학과* 한국해양대학 제어계측과** 부산대학교 정밀기계과***

Gunner Primary Sight Stabilization System Design and Performance Analysis

◦ Kim Yong Kwan* Baek Woon Bo* Kim Jong Hwa** Lee Man Hyung***

Dept. of Mechanical Eng. Graduate School Pusan National University *
Dept. of Control & Instrumentation Eng. Korea Maritime University**
Dept. of Precision Mechanical Eng. Pusan National University***

Abstract

Gunner primary sight stabilization system is a fully integrated sensor package designed to provide the stabilized Line-of-Sight. In this study, to improve disturbance rejection capabilities, two types of compensator(LQG/LTR, Lead-Lag) were designed and then stabilization performances were compared under severe off-road environment. Simulation results shows that the stabilization performances using LQG/LTR methodology is better than Lead-Lag methodology in spite of dynamic uncertainties.

1. 서 론

조준경 안정화 시스템(Gunner Primary Sight System)은 적 목표물의 인식과 탐지를 위해 조준선을 안정화시키는 것 이외에 목표물의 위치를 알아내어 탄도계산기에 보내주므로 탄도학적 화기제어시스템에서 매우 중요하다.

유도지시 시스템에서 조준경은 포수가 적 목표물을 추정하여 포탑/포를 제어하도록 지시해 준다. 기동중인 탱크에서 원거리 적 목표물을 인지하고 효과적으로 파괴하기 위한 조준선 안정도와 화기제어 정확도는 조준경과 서보시스템 설계에 의해 보장된다. 서보시스템은 속도루우프구조로 구성되는 피이드백루우프에서 160Hz의 높은 주파수 대역을 가지는 속도적분자 이터가 사용된다.

본 연구에서는 조준경 시스템의 운동방정식을 유도하고 이를 토대로하여 시스템요소들 간의 신호흐름을 분석하여 제어를 설계하고 구성된 서보모델을 포함한 페루우프시스템의 성능 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 특히 고각 안정화 시스템에서 밸런서가 있는 경우와 없는 경우에 대해서 터렛의 각속도 외란하에 명령추종성능 및 안정화 특성

을 비교 검토하였다. 실제 주행시험결과 측정된 차량의 각속도를 사용하였으며 한편 가상적인 정현파 외란의 크기와 주파수를 변동시키면서 안정화 특성을 LQG/LTR제어시스템과 Lead-Lag제어시스템에 따라 비교 분석하였다.

2. 다이내믹 모델

완전한 비선형모델을 세우기 위해 고려되는 일반화된 작용력은 시스템의 각 구성요소에 대해 다음과 같다.

- 1) 관성력
- 2) 콜롱마찰과 점성마찰
- 3) 시스템의 요소들을 연결하는 케이블에 의한 등가 스프링력
- 4) Band Driver의 인장력 변화에 기인한 작용토크
- 5) 회전축의 비틀림으로 인한 등가스프링력
- 6) 질량불균형에 기인한 작용토크

Lagrange 방정식을 사용하여 유도한 결과 운동방정식은 다음과 같다.^[1]

$$M_1(\ddot{\theta}_M + \dot{\Phi}_E) + N_M \dot{\theta}_M + C_M \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_M) + r_M^2(K_1 + K_M) \theta_M - r_M r_P K_1 \theta_P - r_M r_B K_M \theta_B = 0 \quad (1)$$

$$P_1(\ddot{\theta}_P + \dot{\Phi}_E) + N_P \dot{\theta}_P + C_P \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_P) + r_P^2(K_1 + K_P) \theta_P - r_P r_M K_1 \theta_M - r_P r_B K_P \theta_B = T_{mp} \quad (2)$$

$$B_1(\ddot{\theta}_B + \dot{\Phi}_E) + N_B \dot{\theta}_B + C_B \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_B) + r_B^2(K_P + K_M) \theta_B - r_B r_P K_P \theta_M - r_B r_M K_P \theta_P = 0 \quad (3)$$

$$g_{33}(\ddot{\theta}_G + \dot{\Phi}_A) + N_G \dot{\theta}_G + \dot{C}_G \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_G) - K_R \Phi_R + K_V V_1 = T_{mg} \quad (4)$$

$$(R_{11} + C_{11})(\ddot{\beta}_1 + \dot{\theta}_P - \dot{\Phi}_E) + N_A \dot{\beta}_1 - \omega R_{12}(\theta_G + \Phi_A) = T_{ma} \quad (5)$$

$$(R_{23}+C_{23})(\ddot{\theta}_2+\ddot{\theta}_G-\ddot{\Phi}_A) + N_E\ddot{\beta}_2 - \omega_{R22}(\dot{\theta}_P+\dot{\Phi}_E) = T_{mE} \quad (6)$$

여기서, 첨자 M, P, B, G, A, E 는 각각 시스템의 구성요소인 Mirror, Platform, Balancer, Gimbal, Azimuth Gyro, Elevation Gyro를 나타내며, Φ_A, Φ_R, Φ_E 는 각각 터렛의 방위각, 롤각, 고각을 나타낸다. N_i, C_i 는 각 구성요소의 점성마찰계수, 쿨롱마찰계수이며 r_i 는 반경, K_i 는 등가스프링계수이다. M_1 은 Mirror의 관성모우먼트, P_1 은 플랫폼의 관성모우먼트, B_1 은 관성균형자의 관성모우먼트, G_{33} 는 방위각 김벌의 관성모우먼트, $R_{11}+C_{11}$ 은 방위각 자이로의 회전자와 내부김벌의 주관성모우먼트의 합, $R_{23}+C_{23}$ 은 고각자이로의 회전자와 내부김벌의 주관성모우먼트의 합이다. T_{mP} 는 플랫폼 구동토크, T_{mG} 는 김벌 구동토크, T_{mA} 는 방위각 자이로의 세차운동을 일으키는 토크, T_{mE} 는 고각 자이로의 세차운동을 일으키는 토크이다.

본 논문에서는 고각 안정화 시스템만을 고려하였으며 모델 단순화 과정을 위한 기본개념 및 가정은 다음과 같다.

- 1) 방위각 안정화 무우프와 고각 안정화 무우프를 독립적으로 설계한다.
- 2) Band Driver의 인장은 무시한다.
- 3) 시스템 요소들을 연결하는 케이블의 등가스프링력이 Band Driver의 인장력변화에 따른 작용토크보다 더 크게 작용된다.
- 4) 밸런서의 쿨롱마찰, 등가스프링력은 무시한다.
- 5) 자이로외 시스템 요소들의 마찰력은 쿨롱마찰이 지배적이다.

2.1 김벌 운동방정식

완전한 비선형모델의 단순화를 위한 기본개념 및 가정 2)에서 플랫폼, 관성균형자, Mirror 플리들의 관계식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_m = K_p = K_B = 0 \\ r_m\theta_m = r_p\theta_p = r_B\theta_B \quad (7)$$

여기서 K, r, θ 는 각각 탄성력계수, 반경, 회전각이며 첨자 m, p, B 는 각각 Mirror, 플랫폼, 밸런서를 나타낸다. 가정 4), 5)에서

$$F_B = K_{BB} = 0 \quad (8)$$

$$N_m = N_p = N_B = 0 \quad (9)$$

여기서, F는 쿨롱마찰계수, N은 점성마찰계수이다.

식 (7), (8), (9)를 비선형모델식 (1), (2), (3)에 대입하고 조준경 및 자이로들의 상대회전에 따른 케이블의 등가스프링력 K_{w1}, K_{w2} 를 고려하여 종합하면 식(10)과 같고 Mirror를 기준으로 다시 정리하면 최

종결과 식은 식(11)과 같다.

$$(J_m\ddot{\theta}_m + C_m\text{sgn}(\dot{\theta}_m) + K_{w1}\theta_m) + (J_B\ddot{\theta}_B) + (J_p\ddot{\theta}_p + C_p\text{sgn}(\dot{\theta}_p) + K_{w2}\theta_p) = T_{mP} \quad (10)$$

$$(J_m + R^2J_B + 4J_p)\ddot{\theta}_m + (C_m + 2C_p)\text{sgn}(\dot{\theta}_m) + (K_{w1} + 2K_{w2})\theta_m = T_{mP} \quad (11)$$

2.2 자이로 운동방정식

특수차량의 안정화 장치에 사용되는 자이로의 종류는 크게 속도자이로와 속도적분자이로로 대별된다. 본 시스템에서는 부속전기회로가 잘 발달되어 있고 오차가 적은 속도적분자이로를 사용하고 있다.

자이로의 일반적인 방정식은 다음과 같다.

$$(I_g p^2 + C_g p + K_g)A_g = H_g[\omega_{IA} - \omega_{cmd} - A_g \omega_{SRA} - (U)\omega_g] - I_g p \omega_{OA} \quad (12)$$

여기서, I_g 는 모우먼트, C_g 는 점성마찰계수, K_g 는 스프링계수이며 A_g 는 각위치, H_g 는 각운동량이다. 식 (12)의 우변에서 셋째항의 상호간섭, 넷째항의 불가피한 편류, 다섯째항의 유니트 지지대의 각속도항을 무시하고 또한 스프링력을 고려하지 않으면 식 (13)과 같이 된다.

$$(I_g p^2 + C_g p)A_g = H_g(\omega_{IA} - \omega_{cmd}) \quad (13)$$

각속도 명령과 실제 구동된 각속도와 차이에 대한 자이로 검출기의 각변위 출력을 전달함수형태로 표시하면 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\frac{A_g}{(\omega_{IA} - \omega_{cmd})} = \frac{H_g}{[C_g s (1 + I_g / C_g s)]} \quad (14)$$

검출기 이득은 K_p 라 하고 각속도차이에 대한 출력 전압의 최종전달함수를 나타내면 식(15)와 같다.

$$\frac{V_A}{(\omega_{IA} - \omega_{cmd})} = \frac{H_g K_p}{[C_g s (1 + I_g / C_g s)]} = \frac{K_g}{s(1 + \tau_g s)} \quad (15)$$

여기서, $\tau_g = I_g / C_g$, $C_g = H_g$, $K_p = K_g$

3. 안정화 시스템 설계

3.1 Lead-Lag 방식

현 조준경 시스템에 적용하고 있는 보상기의 전달함수 형태는 식 (16)과 같다.[7]

$$G(s) = \frac{K(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}{s(1 + \tau_3 s)} \quad (16)$$

클론마찰 및 터렛의 외란 영향을 포함한 전체 시스템의 블록선도는 그림 1에 나타내었다.

3.2 LQG/LTR 방법

LQG/LTR 제어방법은 안정도-강인성 및 시스템의 주파수역 성능을 만족시키는 목표필터루우프(Target Filter Loop ; TFL)를 설계하고 루우프전달회복(Loop Transfer Recovery ; LTR)을 통하여 보상된 시스템의 루우프전달함수의 특이값을 목표필터루우프 전달함수 형상으로 회복시킴으로써 선형타변수 시스템을 조직적으로 설계할 수 있는 방법이다.

1) 목표필터루우프 설계

목표필터루우프 설계는 센서잡음에 대한 목표필터계인 H를 선정하는 것으로 조준경시스템의 설계사양들을 만족시킬 수 있도록 설계파라미터 μ 와 L 그리고 필터계인행렬 H를 다음과 같이 선정하였다.

$$\mu = 3 \times 10^{-5}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.00780 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 14.24789 \\ 182.5742 \\ 0.0000186 \\ 0.0006631 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2) 루우프 전달회복

목표필터루우프로 회복될 수 있도록 ρ 값을 10^{-8} 으로 두었으며 이때 제어계인행렬 G는 식 (18)과 같다.

$$G = [82, 6347 \ 9993.5510 \ 492.4401 \ 0.4209] \quad (18)$$

그림 2는 목표필터루우프와 회복된 루우프의 특이값 선도를 나타낸다.

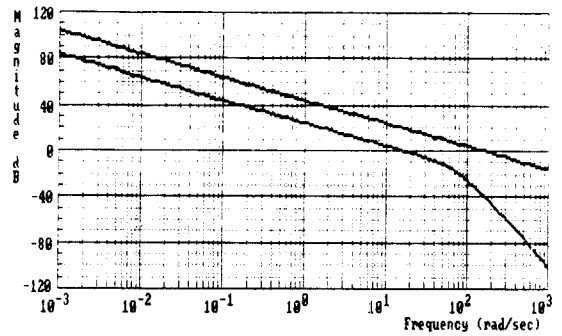


Fig. 2. Bode Diagram of TFL and LQG/LTR Loop.

4. 시뮬레이션 및 고찰

4.1 시뮬레이션 조건

20 deg/sec의 속도명령이 인가되는 동적인 상태에서 별런서가 있는 경우와 없는 경우, 각각 LQG/LTR 제어시스템과 Lead-Lag제어시스템의 안정화 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

가) 실제 측정된 터렛 외란을 사용하여 (차량속도 24 kph, 포각 0 deg) 스텝 레이트 명령이 인가될 때

a) LQG/LTR 제어시스템 (그림 3)

b) Lead-Lag 제어시스템 (그림 4)

나) 정현파 터렛 외란을 사용하여 (진폭 1 deg/sec 주파수 10 Hz) 스텝 레이트 명령이 인가될 때

a) LQG/LTR 제어시스템 (그림 5)

b) Lead-Lag 제어시스템 (그림 6)

4.2 검토 및 고찰

기동시 요구되는 GPPTS 안정화 성능은 다음과 같다. [7]

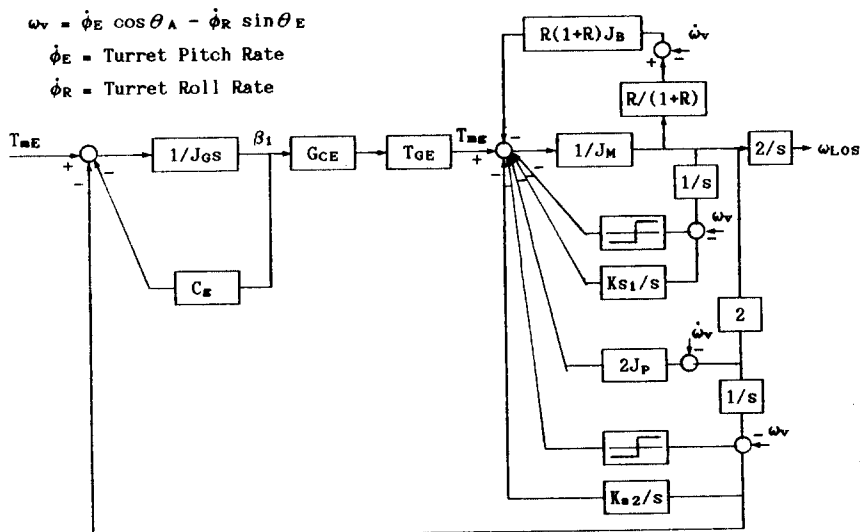


Fig. 1. Guner Primary Stabilized System Block Diagram.

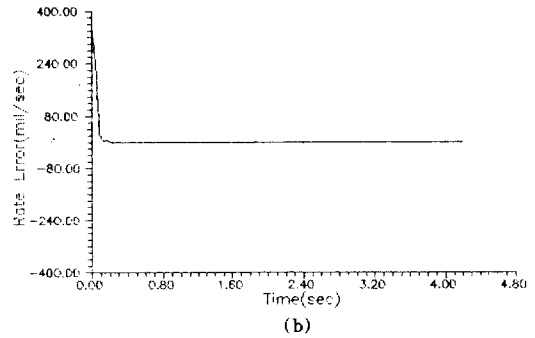
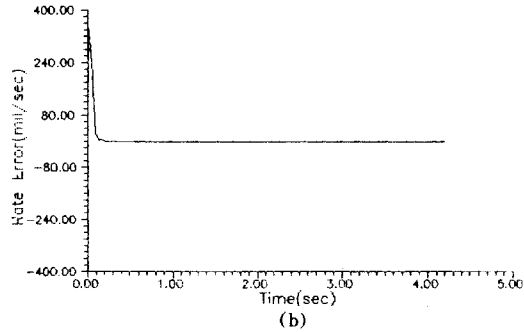
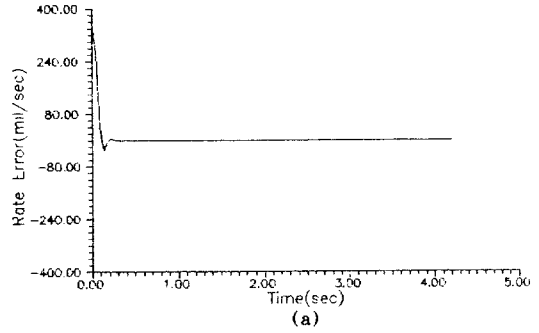
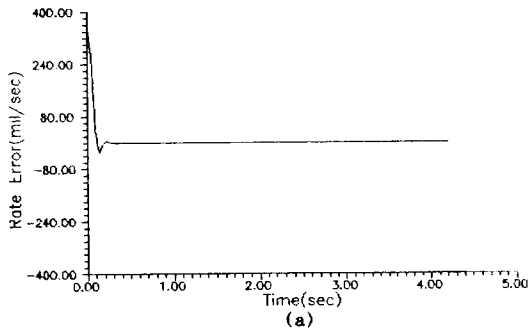


Fig. 3. Rate Error using LQG/LTR Methodology (Command = $20^\circ/s$, Vehicle Vel = 24KPH) (a) with Balancer and (b) without Balancer.

Fig. 5. Rate Error using LQG/LTR Methodology (Command = $20^\circ/s$, Amp=1deg/s, Freq=10Hz) (a) with Balancer and (b) without Balancer.

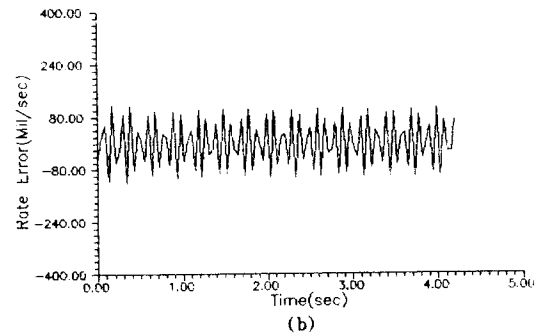
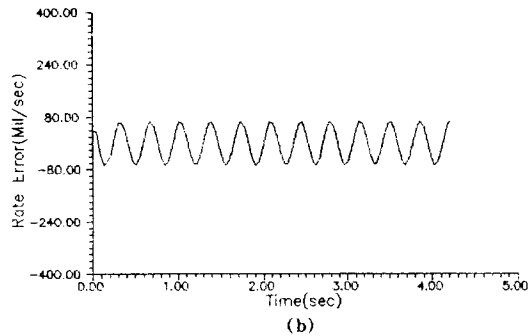
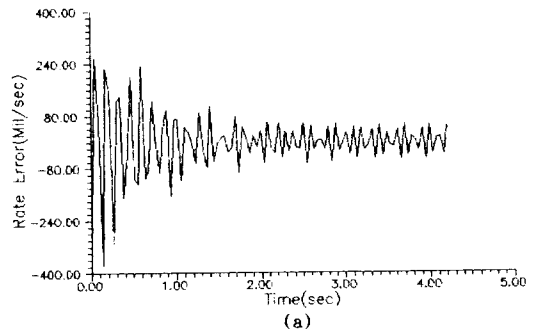
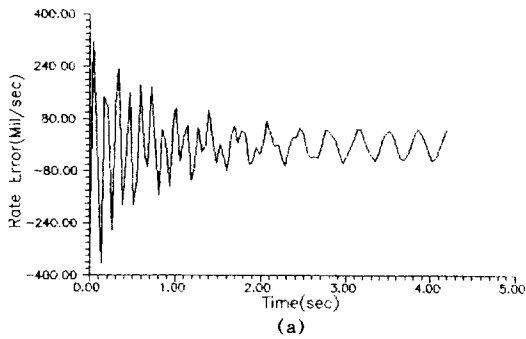


Fig. 4. Rate Error using Lead-Lag Methodology (Command = $20^\circ/s$, Vehicle Vel = 24KPH) (a) with Balancer and (b) without Balancer.

Fig. 6. Rate Error using Lead-Lag Methodology (Command = $20^\circ/s$, Amp=1deg/s, Freq=10Hz) (a) with Balancer and (b) without Balancer.

a) 안정도 ; 약 0.12 mil rms

b) 레이트 추종오차 ; 명령크기의 약 0.3%

가) 경우에 그림 3과 4를 보면 밸런서가 없는 경우와 있는 경우가 별다른 차이가 없음을 볼 수 있으며 비교적 동적 정확도를 만족하고 있음을 볼 수 있다. Lead-Lag방식은 밸런서가 있는 경우와 없는 경우 큰 차이가 없었으며 오히려 밸런서가 있는 경우 오차가 더 크게됨을 알 수 있고 LQG/LTR방식은 밸런서에 관계없이 거의 비슷한 특성을 가짐을 알 수 있다.

나) 경우에 그림 5와 6을 검토해 보면 높은 주파수가 인가될 때 Lead-Lag방식은 밸런서가 없을 때에 비하여 있는 경우가 비교적 나은 성능을 보여 주고 있으며 LQG/LTR방식은 큰 영향을 받지 않았다.

본 시뮬레이션 결과 검토 분석된 내용을 요약하면 다음과 같다.

a) 동적 안정도는 밸런서가 있는 경우가 없는 경우에 비해 Lead-Lag방식은 초기응답시간이 비교적 느림을 볼 수 있었으며 전반적으로 큰 차이는 없었고 LQG/LTR방식은 밸런서가 있는 경우 초기에 언더슈트가 발생하지만 Lead-Lag방식보다 비교적 우수한 성능을 보여주었다.

b) LOS 레이트 추종오차 동적 정확도는 Lead-Lag 방식에서는 밸런서가 있는 경우가 없는 경우에 비해 초기에는 좋지 않은 특성을 나타내었으나 높은 주파수를 가지는 정현파 레이트가 인가 되었을 때 밸런서가 있는 경우가 더 나은 성능을 보여 주었다. LQG/LTR방식은 밸런서에 관계없이 외란에 대해서 비교적 좋은 성능을 나타내었다.

4.3 안정화시스템의 밸런서 영향

밸런서가 없을 경우의 시스템 관성모멘트(J_{nom})와 밸런서가 있을 경우의 관성모멘트(J)는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} J_{nom} &= J_M + J_P \\ J &= J_M + 4J_P + R^2J_B \end{aligned} \quad (19)$$

밸런서는 시스템 관성을 증가시킴으로써 밸런서로 인한 시스템의 댐핑계수의 관계는 다음식과 같다.

$$\xi = \xi_0 \sqrt{\frac{J_{nom}}{J}} \quad (20)$$

여기서 ξ_0 는 밸런서가 없는 경우의 시스템 댐핑계수를 나타낸다.

관성균형자는 시스템의 관성을 증가시킴으로써 댐핑계수를 감소시킬 뿐만 아니라 Bode선도에서 절점 주파수를 고주파방향으로 이동시켜 저주파영역의 시스템 게인은 감소시키고 고주파영역의 시스템 게인은 증가시킨다.

그러므로 저주파영역의 외란입력에 대해서는 밸

런서의 효과를 감소시키고 고주파영역의 외란입력에 대해서는 밸런서의 효과는 증대된다.

그림 7은 단순 2차 시스템에 대하여 시스템의 관성모멘트의 변화에 따른 응답특성을 나타낸다.

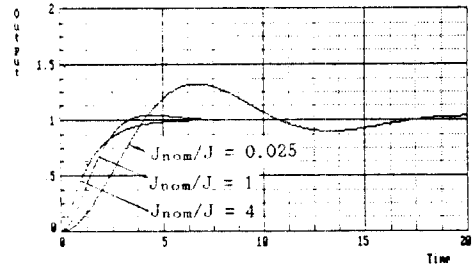


Fig. 7. Step Response with Different Moment of Inertia, $J_{nom}/J = 0.025, 1$ and 4 .

5. 결론

본 연구에서는 조준경 안정화 시스템의 단순화된 비선형 방정식을 유도하였으며 공칭시스템에 대한 분석결과를 기초로하여 새로운 LQG/LTR 보상기를 설계하였다. 구성된 조준경서보에 차체운동이 외란으로 작용할 경우 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 안정화 성능을 Lead-Lag 보상기와 비교 분석하였다.

특히 밸런서가 있는 경우와 없는 경우에 대해서 터렛의 각속도 외란영향하에 명령추종성능 및 안정화 특성을 비교 검토하였다.

실제 주행시험 결과 측정된 차량의 각속도 외란을 사용한 경우, 또한 가상의 정현파 레이트를 사용한 경우, 안정화 특성을 검토하였다.

참고문헌

- [1] 이만형, "Microm Stabilized Mirror System에 대한 완전한 Nonlinear Dynamic Equation의 유도 와 해석," 국방과학연구소 위탁연구 중간보고서 1989.
- [2] 김종화, "화기제어 시스템을 위한 표적추적과 포탑포의 제어," 부산대학교 대학원 박사학위 논문, 8, 1989.
- [3] 김종환, "가변구조제어계의 시변 슬라이딩래임에 관한 연구," 부산대학교 대학원 박사학위 논문, 8, 1989.
- [4] 김인환, "LQG/LTR 방법을 이용한 강인한 터렛서보 제어기 설계 및 성능분석," 부산대학교 대학원 석사학위 논문, 8, 1989.
- [5] 박용운 외 2인, "Mirror 안정화 장치의 제어기 설계," 한국자동제어학술회의 논문집, 10, 1988.
- [6] T. Harrison, "Computer Simulation and Studies of the Behavior of Stabilized Gun Systems

Subeject to Hull Disturbance," The Royal Military College of Science, Dept. of Mechanical Engineering, Report No. 7MVT/4, Oct. 1979.

- [7] " Proposal for a Gunner's Primary Tank Thermal Sight(GPTS) for the XK-1 Tank," Texas Instruments, Oct. 1984.
- [8] W. H. Baykin, et Al., " Derivation and Analysis of the Complete Nonlinear Dynamic Equation of the Micon Stabilized Mirror Systems," Technical Report RG-75-11, Army Missile Research, Development, and Engineering Laboratory, September, 1974.
- [9] 이병호, 동력학 특론, 민음사, 1984.
- [10] Basics of Gyroscopes, TR-6026
- [11] Mil-R-23750A(AS), Rate Integrating Gyro MS 3391, July, 1963.
- [12] D. T. Greenwood, Principles of Dynamics, Prentice-Hall Inc. 1980.
- [13] A. V. Oppenheim and R.W.Schafer, Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1975.
- [14] J.S.Bendat and A.G.Piersol, Random Data, John Wiley and Sons, 1986.
- [15] D.E. Newland, Random Vibration and Spectral Analysis, Longman, 1981.