

대부하 표적지향 시스템의 정밀 제어 기법 연구

A Study on Precision Control of a Heavy Load Pointing System

김 병 운, 강 이 석*

(Byung-Un Kim and E-Sok Kang)

Abstract : In this study, the performance of a heavy load pointing system has been investigated. The PI controller are being widely used in industrial application because of simple, cheap, and excellent performance. However, the requirement for control precision becomes higher and higher, as well as the plants becomes more and more complex. In order to achieve the satisfied control performance, we have to consider the affection of nonlinear factor contained in plant. In this paper, the neural-PI control law have been evaluated. The proposed controller is compared with the existing controllers through simulations, and the results show that the pointing accuracy of the proposed control system is improved against the disturbance induced by vehicle running on the bump course.

Keywords : acceleration feedforward control, neural-PI control, unbalance moment, pointing system

I. 서론

대부하 표적지향 시스템은 차량이 주행 중 노면으로부터 받는 외란과 무관하게 조준선(line of gun)을 표적에 일정하게 지향하는 장치이다. 대부하 표적지향 시스템의 성능은 포/포탑을 구동하는 구동장치, 목표물에 시선(line of sight)을 안정화시키는 조준경장치, 노면에서 인입되는 외란을 억제하는 현수장치, 포/포탑의 물리적 특성 및 제어장치간의 복합적인 특성에 따라 좌우되며 기동간 명중률을 향상시키는데 중요한 요소가 된다.

대부하 시스템은 구동부의 마찰, 포탑의 무게중심과 회전 중심의 불일치로 인한 불균형모멘트 등의 비선형 특성이 표적지향 성능을 저해하고 있으나, 지금까지의 대부하 표적지향 시스템의 제어기는 선형 PI 제어기를 기반으로 구축되어 있어 이러한 비선형 특성에 의한 성능저하에 적절히 대처하기 어렵다. 따라서 근래에 들어 시스템의 비선형성에 대해 적절히 대처할 수 있는 제어 기법에 대한 연구들이 시도되고 있다. 구동부에 작용하는 마찰을 예측하고 보상하는 제어기법[1, 2], 포신의 가속도를 측정하여 앞먹임 함으로서 주행 중 포신의 불균형량에 의한 가속도 외란을 보상하는 가속도 앞먹임 보상(acceleration feedforward compensation, AFF)[3] 기법 등에 관한 연구가 진행되었다. 그러나 마찰보상의 경우 마찰력의 크기는 접촉면에 가해지는 하중에 직접적으로 관련된 양이므로 불규칙한 노면을 주행하는 대부하 시스템의 특성상 규명이 어렵고 보상을 적용한다 해도 그 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 한편 포 또는 포탑의 불균형 모멘트에 의한 외란을 보상해주는 가속도 앞먹임 제어는 가속도 측정을 위한 센서가 추가되어야 한다.

본 논문에서는 전기식 포/포탑 구동기구를 가진 대부하 시스템의 표적지향오차를 개선하는 제어기법을 제안하여 기

존의 제어기법에 비해 외란제거에 효과적임을 입증하였다. 고정 이득을 갖는 PI 제어기의 단점은 시스템에 변화가 있을 경우 고정된 이득 값으로는 원하는 출력을 얻을 수 없다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 신경망을 이용하여 PI 이득 값을 매 샘플마다 수정하는 방식이 제안되었다[5, 6]. 일반적으로 신경망을 이용하여 학습하는데 역전파 알고리즘이 널리 사용되는데 역전파 알고리즘 적용하기 위해서는 시스템 자코비안을 구해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 신경망을 이용하여 학습 할 때 자코비안 정보가 필요 없는 구조로 하여 PI 제어기의 이득을 경신하는 신경망-PI 제어기(neural-PI controller, NPI)를 설계하였으며, 이 제어기의 성능을 입증하기 위해 기존의 대부하 시스템에 적용하고 있는 PI 제어기[9]와 최근에 연구된 가속도 앞먹임 제어기[3]의 성능과 비교하였다. 또한 포탑의 불균형량은 탑재된 탄의 수량과 포신의 고각 위치에 따라 변하므로, 포탑 불균형량의 변화에 대해 제안된 제어기의 강인성도 평가하였다.

포/포탑의 선회방향과 포의 고저방향 운동은 서로 직교하며, 완전 독립적으로 운동하므로 본 논문에서는 선회방향에 대해서만 다룬다.

II. 대부하 표적지향 시스템 모델

대부하 표적지향 시스템은 Fig. 1에서 보는바와 같이 조준경 장치와 포/포탑 구동장치의 독립적인 속도 제어 루프로 구성되며, 동시에 조준경의 위치를 포/포탑이 추종하도록 하는 위치제어 루프가 추가되어 있다. 여기에 포탑의 큰 관성력을 효과적으로 제어하기 위하여 앞먹임 자이로(feedforward gyro)를 사용한 개루프를 추가한 방식이다.

부하모델은 차체, 구동모터, 바스켓, 포탑, 그리고 벤딩모드로 구성되어 있다. 포의 운동이 보존되고 포의 분산에너지는 이차 동특성을 갖는 시스템이라고 가정하였다. Fig. 2는 부하모델의 기본 도식도를 나타내며, Fig. 3은 벤딩모드 방정식을 구하기 위한 포의 기구학적 도식도이다. 1 자유도

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 12. 26., 채택확정 : 2004. 6. 25.

김병운 : 국방과학연구소(kimbu@add.re.kr)

강이석 : 충남대학교 기계설계공학과(eskang@cnu.ac.kr)

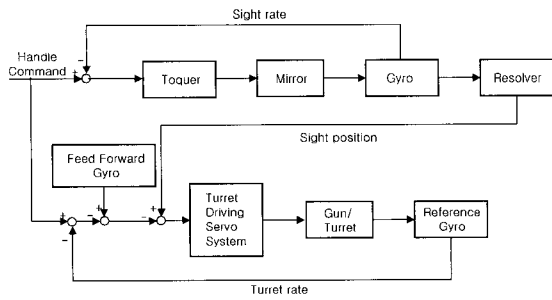


그림 1. 표적지향 시스템의 블록선도.
Fig. 1. Block diagram of the pointing system.

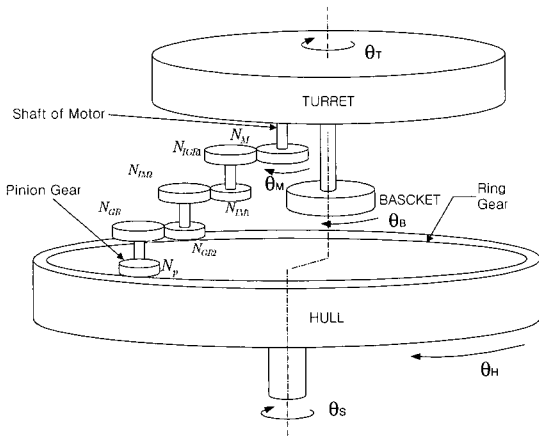


그림 2. 부하모델의 기본 도식도.
Fig. 2. Schematic diagram of the plant model.

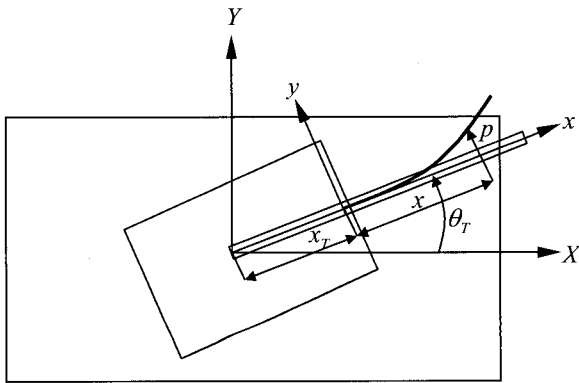


그림 3. 포신 벤딩모델 기본도식도.
Fig. 3. Schematic diagram of the gun bending model.

를 갖는차체, 바스켓, 모터, 포탑의 강체 운동과 포의 벤딩 특성으로부터 선회 구동부에 대한 운동방정식을 구하면 다음과 같다[4]. Table 1은 운동방정식에 사용된 변수 및 파라미터이다.

차체 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & J_H \ddot{\theta}_H + R_{34} K_{GRP} (\theta_{GR} - \theta_P) + K_s (\theta_H - \theta_S) \\
 & + D_{HT} (\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_T) + D_s (\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_S) \\
 & + R_{34} D_{GRP} (\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_S) + T_{HT} \text{sgn}(\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_T) = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

표 3. 운동방정식 변수 및 파라미터.

Table 3. Dynamics variables and parameters.

θ_H	hull position
θ_T	turret position
θ_M	motor position
θ_B	basket position
θ_S	suspension position
η_G	lateral gun bending position
T_M	developed motor torque
$\ddot{\theta}_R$	hull rolling acceleration
$\ddot{\theta}_P$	hull pitching acceleration
J_H	hull moment of inertia
J_{GR}	gear moment of inertia
J_M	motor moment of inertia
J_B	basket moment of inertia
J_T	turret moment of inertia
M_T	turret mass
K_S	suspension spring rate
K_{GRP}	gear train spring rate
K_{TB}	spring rate between turret and basket
D_S	viscous damping coefficient of suspension
D_{GRP}	viscous damping coefficient of gear train
D_{TM}	viscous damping coefficient of motor
D_{TB}	viscous damping coefficient between turret and basket
D_{HT}	viscous damping coefficient between hull and turret
T_{TM}	motor coulomb friction
T_{HT}	coulomb friction between hull and turret
T_M	developed motor torque
R_{34}	gear ratio final pinion-ring gear
R_{12}	gear ratio(reciprocal) motor-final pinion
$\zeta_{\theta IG}$	bending damping factor
$w_{\theta IG}$	bending frequency

여기서

$$\theta_{GR} = R_{12} \theta_M - (R_{12} + 1) \theta_T$$

$$\theta_P = -R_{34} \theta_H + (R_{34} - 1) \theta_T \text{ 이다.}$$

모터 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & (J_M + H_{GR} R_{12}^2) \ddot{\theta}_M + J_{GR} R_{12} (-R_{12} + 1) \ddot{\theta}_T \\
 & + R_{12} K_{GRP} (\theta_{GR} - \theta_P) + R_{12} D_{GRP} (\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_P) \\
 & + D_{TM} (\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_T) + T_{TM} \text{sgn}(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_T) = T_M
 \end{aligned} \tag{2}$$

바스켓운동방정식

$$J_B \ddot{\theta}_B + D_{TB} (\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_T) + K_{TB} (\theta_B - \theta_T) = 0 \tag{3}$$

포탑 운동방정식

$$\begin{aligned}
 & [J_T + J_{GR} (R_{12} + 1)^2] \ddot{\theta}_T + J_{GR} R_{12} (R_{12} + 1) \ddot{\theta}_M \\
 & + K_{TB} (\theta_T - \theta_B) + (R_{12} + R_{34}) K_{GRP} (\theta_{GR} - \theta_P)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ D_{HT}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_H) + D_{GRP}(R_{12} - R_{34})(\dot{\theta}_{CR} - \dot{\theta}_P) \\
 &+ D_{TM}(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_T) + D_{TB}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_B) \\
 &+ T_{HT}sgn(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_H) + T_{TM}sgn(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_M) \\
 &+ 2M_{\theta IG}\eta_G\dot{\eta}_G\dot{\theta}_T + (I_{\theta IG} + S_{\theta IG}x_T)\ddot{\eta}_G \\
 &= -T_M + M_T c_z e_y \ddot{\theta}_R + M_T c_z e_x \ddot{\theta}_P
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

포 벅딩 운동방정식

$$\begin{aligned}
 &M_{\theta IG}\ddot{\eta}_G + 2M_{\theta IG}\zeta_{\theta IG}\omega_{\theta IG}\dot{\eta}_G + M_{\theta IG}\omega_{\theta IG}^2\eta_G \\
 &- M_{\theta IG}\eta_G\dot{\theta}_T^2 = -(I_{\theta IG} + S_{\theta IG}x_T)\ddot{\theta}_T
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서

$$M_{\theta IG} = \int_I \rho \phi_T^2 dx$$

$$S_{\theta IG} = \int_I \rho \phi_T dx$$

$$I_{\theta IG} = \int_I \rho \phi_T x dx \quad \text{이다.}$$

한편, 조준경 모델은 한국형 포수조준경의 모델[7]을 적용하였으며, 대부하 시스템의 구동장치는 BLDC모터를 적용한 벡터제어[8]를 적용하였다.

III. 제어기 설계

신경망-PI제어기를 설계하기 전에 이 제어기의 성능을 입증하기 위해 기존의 PI 제어기[9]와 가속도 앞먹임 제어기[3]를 적용하여 그 성능을 평가한다.

1. PI 제어기

현재까지 개발되어 운용중인 대부하 시스템에서는 PI 제어기[9]를 적용하고 있다.

PI 제어기의 이득을 동조하는 방법에는 여러 가지가 있으나 일반적으로 Ziegler-Nichols 방법을 가장 많이 이용한다. 그러나 이 방법은 폐루프 시스템의 감쇄특성을 저하시키는 단점이 있다. 따라서 정교한 제어 성능을 얻기 위해서는 시행착오(trial and error) 방법을 통해 이득을 동조하여야 한다 [5]. 본 논문에서는 Ziegler-Nichols 방법을 적용하여 이론적인 이득을 구한 후 시행착오(trial and error)방법을 통해 보정하였다.

2. 가속도 앞먹임 제어기(AFF)

포탑의 무게 중심점과 회전축과의 상대적 위치를 알면 포탑의 각속도를 측정하여 앞먹임 함으로서 불균형 모멘트의 보상이 가능하다. 앞먹임 제어기는 귀환 제어기와 독립적으로 설계될 수 있을 뿐 아니라 계의 안정성에 영향을 미치지 않고 설계할 수 있다. Fig. 4는 가속도 앞먹임 제어기의 구조이며 측정된 가속도에 의한 제어입력이 앞먹임되어 귀환제어기의 제어입력에 부가된다. Fig. 4에서 M_{unb} 은 roll 및 pitch 방향의 포탑 불균형 모멘트로서 Fig. 5로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_{unb} = \begin{cases} M_T c_z e_y & \text{for roll motion} \\ M_T c_z e_x & \text{for pitch motion} \end{cases}
 \tag{6}$$

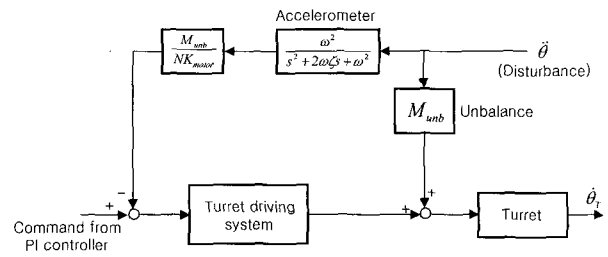


그림 4. 가속도 앞먹임 제어기의 블록선도.
Fig. 4. Block diagram of the acceleration feed-forward compensation.

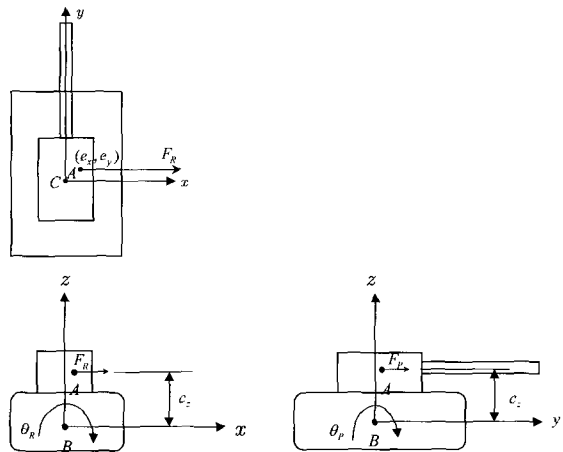


그림 5. 포탑 불균형에 의한 외력.
Fig. 5. External forces due to turret unbalance.

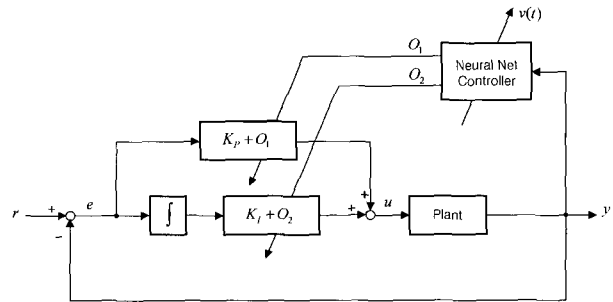


그림 6. 신경망-PI 제어기 의 블록선도.
Fig. 6. Block diagram of Neural-PI system.

3. 신경망-PI 제어기 (NPI)

PI 제어기의 단점은 시스템에 변화가 있을 경우 고정된 PI 이득 값으로는 원하는 출력을 얻을 수 없다는 것이다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 신경회로망을 이용하여 PI 이득 값을 매 샘플링마다 수정하는 방식을 적용하여 그 효과를 입증한다. 여기서 신경망을 이용하여 학습하는데 역전파 알고리즘을 사용한다. 그러나 역전파 알고리즘을 적용하기 위해서는 시스템 자코비안 정보를 알아야 하는데, 본 논문에서는 Fig. 6과 같은 구조로 하여 자코비안의 정보가 필요 없도록 구현하였으며, (9)와 같이 귀환 제어기의 출력을 목적함수로 이용함으로써 제어기로 입력되는 오차를 최소화하도록 한다.

제어입력 u 는 다음과 같이 신경망의 출력이 더해져서 나타난다.

$$u(t) = O_1 e(t) + O_2 \int e(t) dt + v(t) \quad (7)$$

$$v(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (8)$$

목적함수는 다음과 같이 정의한다.

$$E = \frac{1}{2} v^2 \quad (9)$$

신경망의 학습알고리즘으로 역전파 알고리즘을 적용하기 위해서는 델타법칙을 적용해야 한다[11].

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} &= \frac{\partial E}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial w_{jk}} \\ &= \frac{\partial E}{\partial net_k} O_j \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 net_k 는 출력층으로의 입력값으로

$$net_k = \sum_j w_{kj} O_j \quad (11)$$

이며, O_j 와 w_{kj} 는 각각 은닉층의 출력과 가중치이다.

δ_k 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \delta_k &= - \frac{\partial E}{\partial net_k} \\ &= - \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial net_k} \\ &= - v \frac{\partial v}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial net_k} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\frac{\partial v}{\partial O_k}$ 는 (7)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial v}{\partial O_k} = \begin{cases} e(t) & \text{for } K_p \\ \int e(t) dt & \text{for } K_I \end{cases} \quad (13)$$

따라서 (12)를 이용하면 시스템의 자코비안의 정보가 필요 없이 다음과 같이 가중치의 변화량을 계산할 수 있다.

$$\Delta w_{jk} = \eta \delta_k O_j \quad (14)$$

$$w_{jk}(t+1) = w_{jk}(t) + \Delta w_{jk}(t) + \alpha \Delta w_{jk}(t-1) \quad (15)$$

(14)와 (15)에서 η 와 α 는 각각 학습률과 모멘트 변수이다.

신경회로망의 구조는 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되며 은닉층의 경우 실시간제어를 위해 하나의 은닉층을 사용하였다. 은닉층의 유닛 수는 4개에서 10개까지 변화시켰으나 그 결과가 서로 유사하여 4개의 유닛을 적용하였다. 여기서 입력층, 은닉층, 그리고 출력층에 대한 신경 활성화함수

로는 시그모이드 함수를 사용하였다.

IV. 대부분 표적지향 모델 검증

시스템 수학적 모델의 정확성을 입증하기 위해 Fig. 7의 포탑 구동 실험장치에 PI 제어기를 적용하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 8은 0.1 rad/sec의 속도입력을 인가하였을 때의 포탑 선회속도와 제어기의 출력을 나타낸다. 시뮬레이션 결과와 실험결과가 서로 잘 일치하므로 표적지향 시스템의 모델링과 적용된 파라미터의 값이 타당함을 알 수 있다.

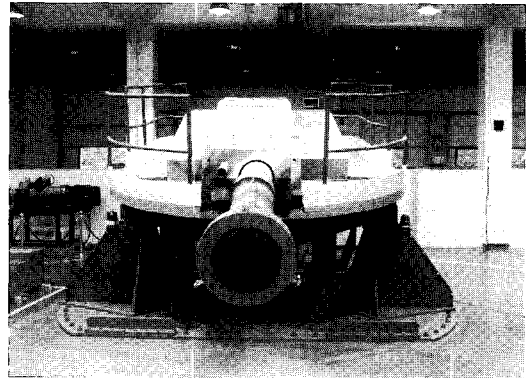
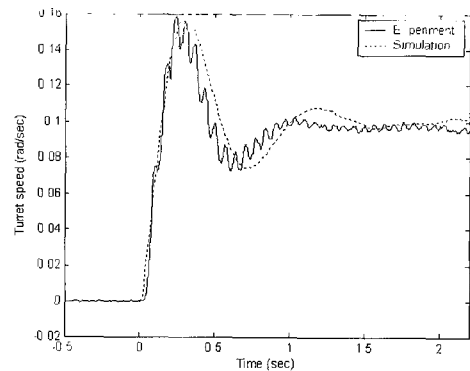
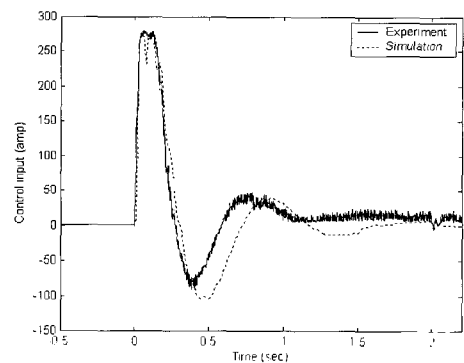


그림 7. 실험장치.

Fig. 7. Experimental equipments.



(a) 포탑 선회 속도



(b) 제어 입력

그림 8. 포탑의 계단 응답.

Fig. 8. Step response of the turret.

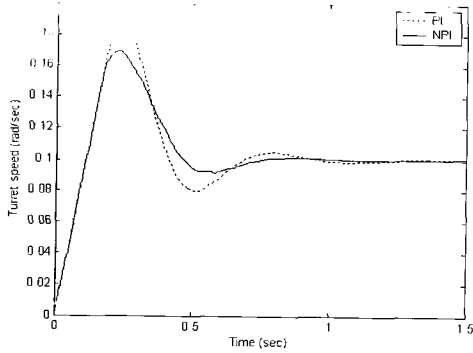


그림 9. PI 제어기와 NPI 제어기의 계단응답 비교.
Fig. 9. Comparison of Step response between the PI and NPI controller.

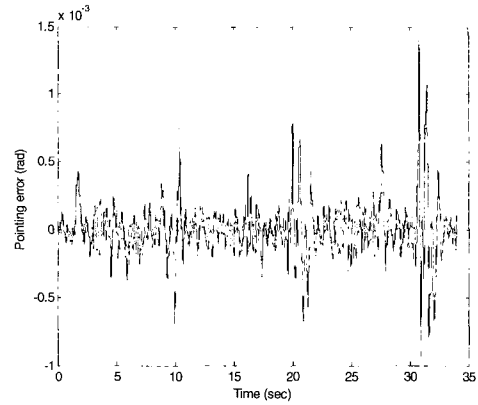


그림 11. 측정된 차량 외란에 대한 표적지향오차.
Fig. 11. Pointing error for the measured hull disturbance.

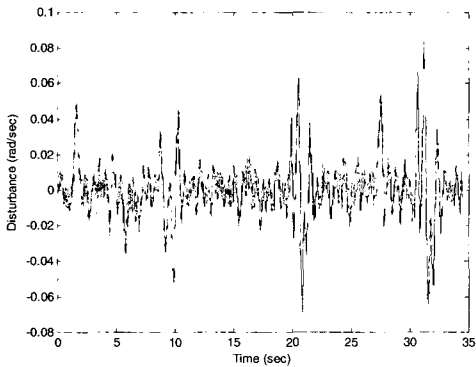


그림 10. 측정된 차량 외란.
Fig. 10. The measured disturbance induced by the vehicle.

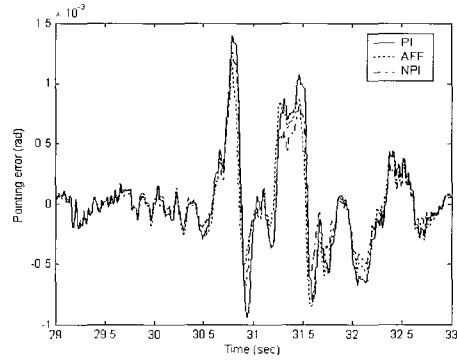


그림 12. 3가지 제어기의 표적지향오차 비교(경우 I).
Fig. 12. Comparison of pointing error between the three controllers(CASE I).

V. 시뮬레이션

대부하 표적지향 시스템의 성능을 분석하고 설계결과의 검증을 위하여 계단명령에 대한 동특성과 외란가진시의 표적지향 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

Fig. 9는 PI 제어기와 신경망-PI 제어기를 적용하였을 경우의 계단응답을 시뮬레이션하여 비교한 것이다. 신경망-PI 제어기의 경우 오버슈트는 약 23% 성능향상을 보였으며, 상승시간은 두 제어기가 유사함을 알 수 있다.

주행간 표적지향 성능 시뮬레이션을 위한 조건은 16 KPH의 속도로 규격화된 범프 노면[10]을 주행할 때이다. 여기서 범프 노면은 주로 좌우 대칭인 범프로 구성되어 있고 세 구간에 걸쳐 좌우 비대칭인 범프가 존재한다. 대부하 시스템이 기동 중 지면으로부터 받는 외란은 유사장비의 실측 외란 데이터[10]를 이용하였으며 Fig. 10에 나타내었다. 전 구간에 걸쳐 상대적으로 외란이 큰 부분이 대부하 시스템이 좌우비대칭 범프를 통과할 때이다. Fig. 11은 기존 대부하 시스템에 적용하고 있는 PI 제어기를 적용하였을 때의 표적지향 오차를 보여주는데, 좌우 비대칭 구간을 통과할 때의 오차가 대칭구간을 지날 때 보다 상대적으로 큼을 알 수 있다. 이는 좌우 비대칭인 범프가 대칭인 범프보다 형상이 큰 이유도 있지만 포탑의 불균형에 의한 영향이 큰 것으로 보인다.

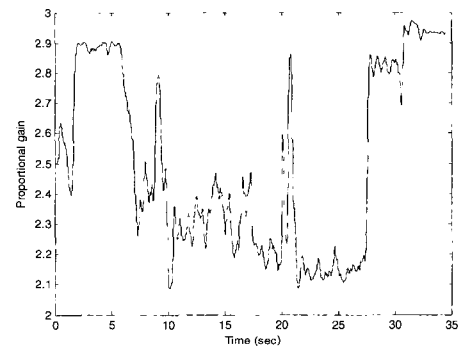


그림 13. NPI 제어기의 비례이득 변화(경우 I).
Fig. 13. P-gain variation of the NPI controller(CASE I).

Fig. 12는 신경망-PI 제어기(NPI)를 적용하였을 때의 표적지향 성능을 가속도 앞먹임 제어기(AFF)와 PI 제어기를 적용한 시스템의 성능과 비교한 것이다. 신경망-PI 제어기와 가속도 앞먹임 제어기를 적용하였을 때의 오차가 모두 PI 제어기를 적용하였을 때보다 감소함을 알 수 있고 특히 좌우 비대칭 범프를 통과할 때의 오차 감소 폭이 큼을 알 수 있으나, 성능향상 폭은 신경망-PI 제어기가 가속도 앞먹임 제어기보다 더 큰 것으로 나타났다. 한편 Fig. 13과 Fig. 14는 각각 신경망

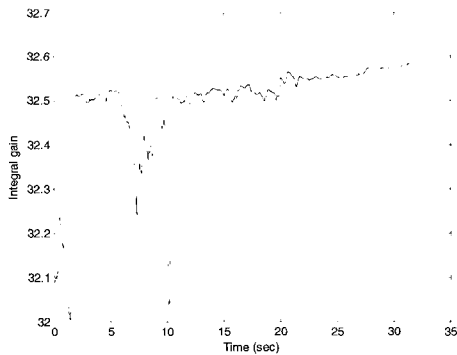


그림 14. NPI 제어기의 적분 이득 변화(경우 I).
Fig. 14. I-gain variation of the NPI controller(CASE I).

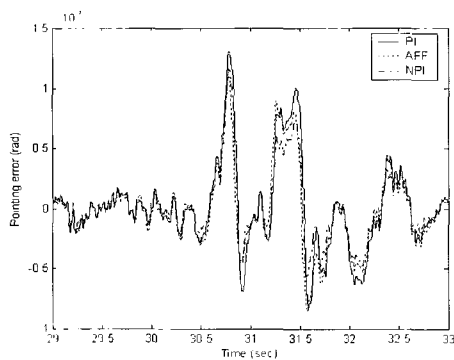


그림 15. 3가지 제어기의 표적지향오차 비교(경우 II).
Fig. 15. Comparison of pointing error between the three controllers (CASE II).

표 2. 표적지향오차의 RMS 값($\times 10^{-4}rad$).
Table 2. RMS values of the pointing error($\times 10^{-4}rad$).

Condition	PI	AFF	NPI
CASE I	1.9831	1.8323	1.6245
CASE II	1.9024	1.8134	1.5529

-PI 제어기를 적용하였을 경우 시간에 따른 비례제어이득과 적분제어이득의 변화를 나타내는데, 큰 외란이 인가될 때 이득 값이 큰 폭으로 변함을 알 수 있다. 여기서 시뮬레이션시 포탑의 불균형량은 대부하 시스템 설계결과를 적용하였고 포/포탑의 조건은 포의 고각과 포탑의 선회 각이 각각 0° 이고 탄약이 전량 탑재된 경우(CASE I)이다.

앞에서 설명하였듯이 포탑의 불균형량은 운용조건에 따라 작은 범위 내에서 변화한다. 따라서 이와 같이 포탑 불균형량의 변화에 대한 제어기의 강인성을 평가하기 위해서 불균형량이 약 20% 감소하였을 경우(CASE II)의 표적지향 성능을 비교하였다. 여기서 제어기는 CASE I에서 설계된 것을 그대로 사용하였다. 그 결과를 Fig. 15와 Table 2에 나타내었는데, 가속도 앞먹임 제어기를 적용하였을 때보다 신경망-PI 제어기를 적용하였을 때의 표적지향오차 감소 폭이 더 크음을 알 수 있다. 즉, CASE I의 경우에 가속도 앞먹임 제어기와 신경망

-PI 제어기를 적용하였을 때 오차가 PI 제어기에 비해 각각 약 7.6%와 18% 감소하였으며, CASE II의 경우는 각각 4%와 18% 감소하여 신경망-PI 제어기가 더 강인함을 알 수 있다.

이는 가속도 앞먹임 제어기 설계시 포탑 불균형량이 일정하다고 가정되어 불균형량이 변할 경우 효과적으로 대처하지 못하기 때문이다.

여기서 Fig. 12와 Fig. 15는 결과 비교를 용이하게 하기 위해 전체 시간에서 일부분만 확대하였다.

VI. 결론

전기식 포/포탑 구동기구를 가진 대부하 표적지향 시스템에 신경망-PI 제어기를 설계하여 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

신경망-PI 제어기를 적용한 결과 기존의 PI 제어기에 비해 성능향상에 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히 포탑의 불균형 모멘트가 많이 작용하는 좌우 비대칭 범프를 통과할 때 신경망-PI 제어기는 PI 제어기뿐만 아니라 가속도 앞먹임 제어기를 적용한 경우보다 표적지향 오차를 더 효과적으로 줄여주는 것으로 나타났다.

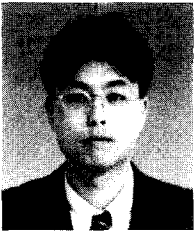
수시로 변하는 포탑 불균형량에 대해서도 PI 제어기와 가속도 앞먹임 제어기에 비해 신경망-PI 제어기가 더 강인한 것으로 나타났다.

또한 가속도 앞먹임 제어기를 적용하기 위해서는 가속도를 측정하는 센서가 추가로 필요하므로 성능뿐만 아니라 비용대 효과 측면에서도 가속도 앞먹임 제어기에 비해 신경망-PI 제어기가 효과적일 것으로 판단되며, 실제 대부하 표적지향 시스템에 적용해볼 가치가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

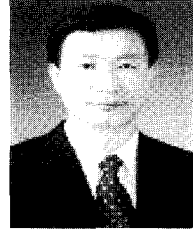
- [1] B. Li, D. Hullender and M. Digenzo, "Nonlinear Induced Disturbance Rejection in Inertial Stabilization Systems," *IEEE Transaction On Control Systems Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 421-427, 1998.
- [2] P. J. Kennedy and I. Agard, "Adaptive Compensation For Pointing and Tracking System Application," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Control Application*, pp. 279-284, 1999.
- [3] M. T. DiRenzo and M. W. Vandegrift, "Adaptive Control for Pointing and Stabilization of a Flexible Gun Tube," *Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control*, pp. 4943-4948, Dec. 1997.
- [4] B. U. Kim, H. D. Seok and W. S. Kang, "A Study on Analysis of Tank Stabilization with electric drive," *Technical Report*, Agency for Defence Development, 2003.
- [5] S. Akhyar and S. Omatu, "Self-Tuning PID Control by Neural Networks," *Proc. of IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks*, pp. 2749-2752, 1993.
- [6] K. Iwasa, N. Morizuumi and S. Omatu, "Pressure Control in a Plant Generating Chloride by Neural

- Network PID Control," *Pro. of IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks*, pp. 627-630, 1995.
- [7] B. H. Lee, "Control Performance Evaluation of the Sight Stabilization System in a Gunner's Primary Sight," *Technical Report*, Agency for Defence Development, 1997.
- [8] S. S. Eun, "Development of the Digital Controller for Electrical Actuation System Using a Brushless DC Motor," *Technical Report*, Agency for Defence Development, 1994.
- [9] D. O. Lee, H. S. Kim and T. Y. Ahn, "The Research on The GTDS System Design and Development of PI MBT," *Technical Report*, Agency for Defence Development, 1995.
- [10] B. Y. Souh, B. U. Kim and E. W. Kim, "Unbalance Moment Effect on Gun Stabilization Performance," *Technical Report*, Agency for Defence Development, 1995.
- [11] Yoh-Han Pao, "*Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks*," Addison-Wesley, 1989.



김 병 운

1989년 인하대 조선공학과 졸업. 동대학원 기계공학과 석사(1991). 1998년~현재 충남대 기계설계공학과 박사과정. 1991년~현재 국방과 학연구소 선임연구원. 관심분야는 제어이론의 응용, 인공지능.



강 이 석

1974년 서울대 기계공학과 졸업. 아주대학교 기계공학과 석사(1983). 한국과학기술원 기계공학과 박사(1994). 1981년~현재 충남대 기계설계공학과 교수. 관심분야는 제어이론의 응용, 로보틱스, 인공지능, 유압공학, 공장자동화.