

< 논문 >

# 표적지향 시스템의 안정화 성능 향상을 위한 실험적 외란 보상 제어기 설계

임재근<sup>†</sup> · 강민식\* · 유 준\*\*

(2005년 9월 2일 접수, 2006년 5월 26일 심사완료)

## Experimental Design of Disturbance Compensation Control to Improve Stabilization Performance of Target Aiming System

Jae Keun Lim, Min Sig Kang and Joon Lyou

**Key Words:** Target Aiming System(표적지향 시스템), Stabilization(안정화), Disturbance Compensation(외란보상), Filtered-X Least Mean Square Algorithm(FXLMS 알고리즘), Convergence(수렴성), Initial Estimation(초기추정치)

### Abstract

This study considers an experimental design of disturbance compensation control to improve stabilization performance of main battle tanks. An adaptive non-parametric design technique based on the Filtered-x Least Mean Square(FXLMS) algorithm is applied in the consideration of model uncertainties. The optimal compensator is designed by two-step design procedures: determination of frequency response function of the disturbance compensator which can cancel the disturbance of series of single harmonics by using the FXLMS algorithm and determination of the compensator polynomial which can fit the frequency response function obtained in the first step optimally by using a curve fitting technique. The disturbance compensator is applied to a simple experimental gun-torsion bar-motor system which simulates gun driving servo-system. Along with experimental results, the feasibility of the proposed technique is illustrated. Experimental results demonstrate that the proposed control reduces the standard deviation of stabilization error to 47.6% that by feedback control alone. The directional properties of the FXLMS Algorithm such as the direction of convergence and its convergence speed are also verified experimentally.

### 기호설명

$\hat{d}_0(k), \hat{d}_1(k), \dots$  : 보상기 계수 추정치

$G_u(q^{-1}), G_d(q^{-1})$ : 시스템 전달함수

$G_{ff}(q^{-1})$ : 외란 보상기 다항식

$\hat{G}_u(q^{-1})$ : 전달함수  $G_u(q^{-1})$ 의 추정

$J_g, J_m$  : 포신과 모터부의 관성모멘트

$K_o$  : 토션바 비틀림 강성

$L_g, M_g$ : 포신 무게중심 위치과 포신 질량

$T_m$  : 모터 구동 토크

$q^{-1}$  : 한스텝 지연 연산자

$y(k), u(k), \eta(k)$ : 출력, 입력, 외란 샘플데이터

$\ddot{y}$  : 포신 회전축의 직선 가속도

$\phi_g, \phi_m$ : 포신과 모터 회전각

† 책임저자, 회원, (주)바른기술

E-mail : hawkijk@intizen.com

TEL : (031)730-8487

\* 경원대학교 기계공학과

\*\* 충남대학교 전기정보통신공학부

## 1. 서 론

현대의 전차에서 주행 중에도 포신의 지향선을 원하는 방향에 유지시키는 기능은 사격의 정밀도 향상 측면에서 매우 중요하다. 이 기능을 포신의 안정화라 칭한다. 포신의 안정화에 영향을 미치는 주요 요인으로는 구동부의 마찰 토크와 포신의 질량 불균형과 차량의 주행에서 발생하는 포신 회전축의 상하방향 직선가속도의 곱으로 표현되는 토크 외란을 들 수 있다.<sup>(1)</sup> 지금까지 포신 구동계에서 안정화 제어는 되먹임 제어에 의존하여 왔는데, 안정화정밀도를 더욱 향상시키기 위해서는 토크 외란을 보상하는 제어기법에 대한 연구가 필요하다.<sup>(2)</sup>

제어계에서 외란에 의한 영향은 고이득 되먹임 제어에 의해 줄일 수 있지만, 고이득제어는 공진이 발생하여 시스템을 불안정하게 하거나, 측정 노이즈에 대한 민감도를 증가시켜 제어 성능을 저해할 수 있으므로, 이득을 키우는데 한계가 있다. 반면 외란이 측정 가능하다면 외란앞먹임 보상제어기를 이용하여 외란의 영향을 보다 효과적으로 제거할 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

아직까지 전차에서 외란토크 보상제어는 적용되지 않고 있으나, 포신의 질량불균형과 차량의 운동에 의한 토크 외란은 포신 회전축에 직선가속도계를 부착하여 포신의 상하 가속도를 측정하면 간접적으로 측정 가능하므로, 외란보상제어 적용이 가능하다. 본 연구에서는 포신의 안정화 성능 향상을 위한 연구의 일환으로 토크 외란을 측정하여 외란 앞먹임제어를 적용하며, 간단한 실험장치를 이용하여 실험적으로 그 적용성 및 효과를 규명한다.

외란보상제어기 설계에는 제어입력과 출력, 외란과 출력간의 동력학 모델을 이용하는 모델기반 설계방법을 들 수 있으나, 모델이 정확하지 않은 경우 제어성능이 저하된다. 동력학적 모델이 정확하지 않거나 또는 계의 동특성이 시간에 따라 변하는 경우 모델 기반 설계 대신 실험적 적응형 설계 방법을 적용할 수 있다. FXLMS 알고리즘은 그 구조가 간단하고 수렴성이 우수하여 적응형 설계에 적합하며, 능동소음제어, 신호처리 등의 분야에서 유용하게 사용되고 있다.<sup>(5-7)</sup> 그 밖에 회전체의 런아웃제어,<sup>(8)</sup> 진동제어<sup>(9)</sup> 및 전자기

베어링계에서 외란 보상 목적으로 적용되어 그 유용성이 입증된 바 있다.<sup>(10,11)</sup> 선행연구<sup>(10,11)</sup>에서 대상으로 한 전자기 베어링계는 매칭(matching)시스템으로 보상제어기 설계의 수월성과 그 효과가 쉽게 예측 가능하나, 본 연구의 포신구동계는 보다 복잡한 동적 보상이 필요하므로, 보다 일반화된 계에서 FXLMS 알고리즘을 이용한 적응형 보상제어의 적용 가능성을 검증코자 한다.

또한 선행연구<sup>(12)</sup>에서 FXLMS 알고리즘의 수렴 속도와 수렴의 방향성이 초기치에 지배 받을 수 있는 기하학적으로 해석한 바 있는데, 이를 실험적으로 입증한다.

제안된 외란보상제어의 표적 지향계에의 적용 가능성 및 제어성능을 입증하기 위해 전기식 포신구동 시스템을 개념적으로 모사한 모터-토션바-부하 구조의 실험장치를 구성하여 실험한다.

## 2. 적응형 외란보상제어

외란이 측정 가능한 경우 외란 앞먹임 보상제어는 제어 성능 향상에 효과적이다.<sup>(3,4)</sup> 외란 보상제어기는 계의 동력학 모델로부터 설계할 수 있으나, 제어기 성능은 모델의 정확성에 민감한 특성을 갖는다. 모델이 정확치 않거나 또는 시간에 따라 계의 동적 특성이 변하는 경우 적응형 보상제어기를 고려할 수 있다.

### 2.1 Filtered-x LMS (FXLMS) 알고리즘

다음의 이산시간계에서 주어진 선형제어계를 고려하자.

$$y(k) = G_v(q^{-1})u(k) + G_d(q^{-1})\eta(k) \quad (1)$$

식 (1)의 제어계는 안정하며 외란입력  $\eta(k)$ 는 측정 가능한 것으로 가정한다.

만일 외란보상제어기를 다음과 같이 항상 안정성을 보장하는  $N$ -차의 FIR(finite impulse response) 필터 형태로 설계할 경우

$$u(k) = G_{ff}(k, q^{-1})\eta(k) \quad (2)$$

$$G_{ff}(k, q^{-1}) = d_0(k) + d_1(k)q^{-1} + \dots + d_N(k)q^{-N} \quad (3)$$

식 (3)의 다항식 계수는 FXLMS 알고리즘을 이용하여 능동형으로 추정할 수 있다. FXLMS 알고리

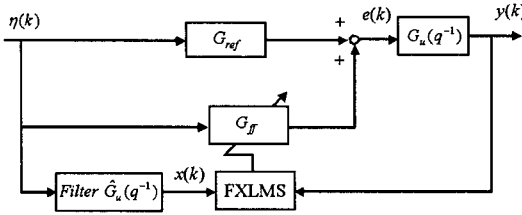


Fig. 1 Disturbance compensator design by FXLMS algorithm

즘을 이용하여 추정하는 경우 계수는 매 샘플링 순간에  $E[y^2(k)]$ 가 최소가 되도록 갱신된다. 여기서  $E[*]$ 는 \*의 앙상블평균(ensemble average)을 나타낸다. FXLMS 알고리즘의 구조는 Fig. 1과 같으며, 계수의 갱신은 다음 식에 따른다.

$$\hat{W}(k+1) = \hat{W}(k) + \mu X(k)y(k), \mu > 0 \quad (4)$$

여기서

$$\hat{W}(k) = [\hat{d}_0(k) \ \hat{d}_1(k) \ \dots \ \hat{d}_N(k)]^T$$

$$X(k) = [x(k) \ x(k-1) \ \dots \ x(k-N)]^T = \hat{G}_u(q^{-1})\xi(k)$$

$$\xi(k) = [\eta(k) \ \eta(k-1) \ \dots \ \eta(k-N)]^T$$

여기서  $\hat{G}_u(q^{-1})$ 은 전달함수  $G_u(q^{-1})$ 의 추정이며,  $\mu$ 는 수렴상수,  $x(k)$ 는 외란이 필터  $\hat{G}_u(q^{-1})$ 를 통과한 출력이다. Fig. 1에서  $G_{ref} = G_d/G_u$ 로 정의된다.

추정식 식 (4)의 수렴조건은 다음과 같다.<sup>(12-14)</sup>

$$-90^\circ < \angle P(e^{-j\omega T}) < 90^\circ \quad (5)$$

$$0 < \mu < \frac{2E[X_f(k) \cdot X(k)]}{E\|X_f(k)\|^2 \|X_f(k)\|^2} \quad (6)$$

여기서 기호  $\angle$ 는 함수의 위상을 나타내며,  $P(q^{-1})$ 와  $X_f(k)$ 는 다음으로 정의된다.

$$P(q^{-1}) = \frac{G_u(q^{-1})}{\hat{G}_u(q^{-1})} \quad (7)$$

$$X_f(k) = P(q^{-1})X(k) = [x_f(k) \ x_f(k-1) \ \dots \ x_f(k-n)] \quad (8)$$

따라서 수렴상수  $\mu$ 와 필터  $\hat{G}_u(q^{-1})$ 가 식 (5), (6)을 만족할 경우 갱신된 계수는 다음과 같이 최적값에 접근하게 된다.

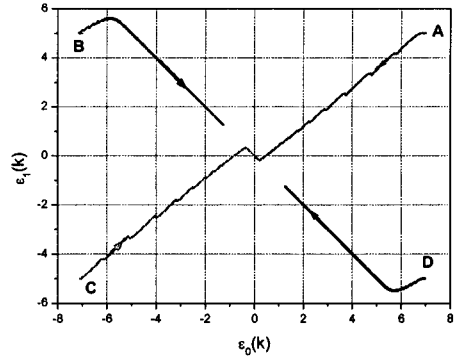


Fig. 2 Directionality of convergence according to initial errors

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{W}(k) = W^* \quad (9)$$

여기서  $W^*$ 는 다음과 같이  $E[y^2(k)]$ 을 최소화시키는 최적 필터계수벡터이다.

$$\frac{\partial E[y(k)^2]}{\partial W} \Big|_{w=W^*} = 0 \quad (10)$$

만일 외란이 단일 주파수 조화함수로 나타날 경우 외란을 제거할 수 있는 식 (3)의 FIR 필터의 차수는 1-차로 제한 할 수 있으며, 나머지 수렴조건 및 최적값에 대한 결과는  $N=1$ 로 한 경우에 해당된다.

외란이 유색잡음일 경우 FXLMS 알고리즘은 특별한 방향에서의 수렴 속도가 다른 방향에서의 수렴 속도보다 더 빠른 방향성을 갖게 된다.<sup>(7,12)</sup> 수렴의 방향과 속도에 관한 해석 결과<sup>(12)</sup>에 따르면 동일한 수렴상수  $\mu$ 를 사용할 경우 수렴속도는 최적 필터계수  $W^*$ 와 추정 계수  $\hat{W}(k)$ 의 차이인 오차벡터  $\epsilon(k) = W^* - \hat{W}(k)$ 가 벡터  $X(k)$ 에 가까울수록 빨라지고, 벡터  $X_f(k)$ 와 수직에 가까워질수록 느려진다. 따라서 필터의 초기치에 따라 수렴의 방향과 속도가 다르다. 이 특성을 1-차 필터인 경우에 살펴보면 외란 주파수에 비해 샘플링 주파수가 충분히 높을 경우 벡터  $X(k)$ 를 기하학적으로 나타냈을 경우 기울기 45°를 갖는 직선에 가깝게 분포하므로, Fig. 2와 같이 45°에

가까운 기울기 방향으로는 빠른 수렴을 보이며,  $-45^\circ$ 에 가까운 방향으로는 느린 수렴 특성을 갖게 된다. Fig. 2에서  $\epsilon_0(k)$ 와  $\epsilon_1(k)$ 는 각각 추정 파라미터  $\hat{d}_0(k)$ 와  $\hat{d}_1(k)$ 의 추정오차이며, A, B, C, D로 표시된 초기 파라미터 오차를 가질 때 FXLMS 알고리즘으로 추정된 파라미터 오차의 변화를 보인다. 앞의 설명과 같이 초기점에서  $45^\circ$ 의 직선 방향을 따라 변화하다, 원점을 지나며  $-45^\circ$ 에 가까운 기울기를 갖는 직선을 만나면 이 직선을 따라 수렴한다. 이 때  $-45^\circ$  직선을 따른 수렴속도는 상대적으로 느린 특성을 갖는다.<sup>(12)</sup> 이 특성을 실험을 통해 검증코자 한다.

## 2.2 FXLMS 알고리즘을 이용한 보상기 설계

이상의 FXLMS 알고리즘은 적응형이므로 시변계(time varying system)에 적용할 수 있다. 그러나 계가 시불변(time invariant)인 경우 적응형에 비해 고정형 보상제어가 유리하다. 실제 전차와 같이 신뢰성이 중요한 경우 적응형은 선호되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 고정형 제어기 설계를 목표로 한다. 즉, 실제 차량을 기동하면서 외란을 발생시킨 다음 2.1절의 FXLMS 알고리즘을 적용하여 보상기 계수가 충분히 수렴된 후 수렴된 보상기 계수를 고정형 보상기 계수로 적용할 수 있다.

고정형 보상기 설계에서 만일 제어기 설계를 위해 외란을 임의의 형태로 제공할 수 있다면 선행연구<sup>(10,11)</sup>에서와 같이 다음의 두 단계 설계방법을 적용하여 보상기를 설계할 수 있다.

외란이 단일 주파수 조화 신호일 경우 식 (3)에서 보상제어기를 1-차 필터로 선정하여 FXLMS 알고리즘으로 필터계수를 추정하면 이론적으로 해당 외란의 영향을 완벽히 제거할 수 있다.<sup>(10,11)</sup> 이 때 수렴된 필터의 계수로부터 해당 주파수 외란을 제거할 수 있는 보상제어기의 주파수 응답을 얻을 수 있다. 이와 같은 실험을 외란의 주파수를 바꾸어가면서 실험하면, 결국 외란제거 보상기의 주파수 응답을 얻게 된다. 다음으로 이 주파수 응답을 가장 잘 표현할 수 있는 IIR(infinite impulse response)필터 또는 FIR 필터를 얻어 최적의 고정형 외란보상제어기를 결정할 수 있다.

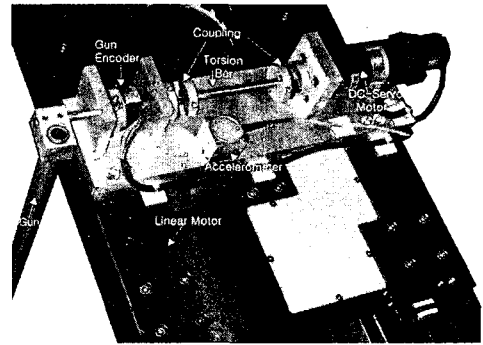


Fig. 3 Experimental set-up

## 3. 실험 결과 및 논의

실험장치는 Fig. 3과 같이 전기식 포신 구동계의 동력학적 특성을 모사하도록 질량불균형을 갖는 포신, 기어의 강성을 대치한 토션바, 그리고 구동 모터로 구성하였다. 포신-토션바-모터 결합체는 차량의 주행에서 발생하는 포신 회전축의 직선운동을 모사할 수 있는 리니어 모터 스테이지 위에 장착되었다. 실제 포구동계는 Fig. 3과 달리 포신이 수평에 가까운 위치가 기준위치가 되나, 실험장치 구현의 편의를 위해 Fig. 3과 같이 포신이 수직인 위치를 기준으로 삼았다. 따라서 실제 포신의 수직방향 운동은 리니어모터에 의한 수평방향 운동으로 대치되었다. 수직방향을 기준 위치로 함에 따라 기준 위치에서 중력에 의한 토크가 존재하지 않게 되는 점이 다른데, 이 외란에 의한 정상상태 오차는 적분기를 포함한 되먹임 제어에 의해 제거될 수 있으며, 본 연구에서는 동적 외란이 주 보상 대상이므로, 실험장치는 연구목적에 적절한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 실험장치의 개념도이다. 모터와 포신의 회전각은 각각 분해능  $0.0009[^\circ/\text{pulse}]$ ,  $0.045[^\circ/\text{pulse}]$ 를 갖는 엔코더로 측정하며, 외란인 리니어모터의 직선가속도는 가속도계를 이용하여 측정한다. 실험에서 제어 및 데이터 획득은 DSP(digital signal processor, dspace DS1102)보드를 장착한 컴퓨터에 의해 이루어지며, 사용된 샘플링 주파수는 1KHz이다.

계의 운동방정식을 구하면 식 (11)과 같다. 여기서 포신의 구동 각도는 작은 것으로 가정한다.

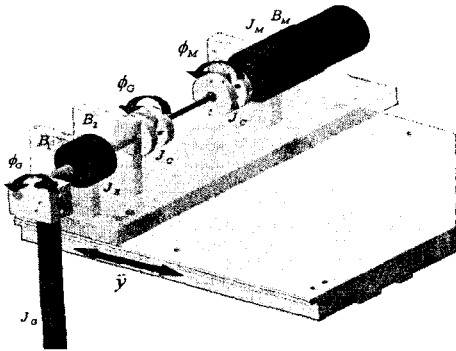


Fig. 4 Schematic of experimental set-up

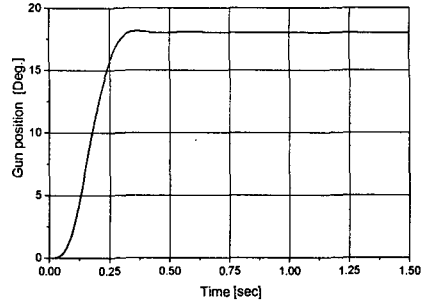


Fig. 5 Step response of gun

Table 1 System parameters

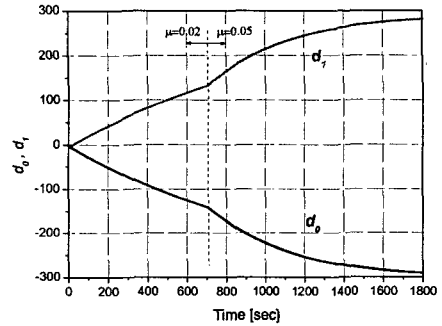
Symbol	Value	Symbol	Value
$J_g$	0.077 [Kgm <sup>2</sup> ]	$J_m$	0.043 [Kgm <sup>2</sup> ]
$M_g$	0.578 [Kg]	$L_g$	0.27 [m]
$K_o$	24.8 [Nm/rad]		

$$J_m \ddot{\phi}_m + B_m \dot{\phi}_m + K_o(\phi_m - \phi_g) = T_m \quad (11)$$

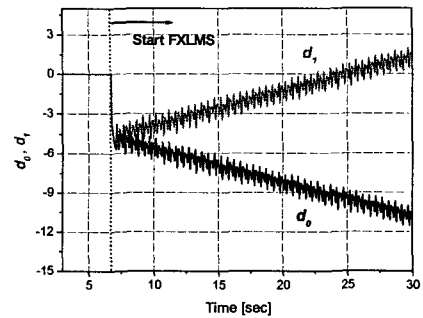
$$J_g \ddot{\phi}_g + B_g \dot{\phi}_g + K_o(\phi_g - \phi_m) = M_g L_g \ddot{y}$$

위 운동방정식에서  $J_m (= J_M + J_c)$ 은 모터의 관성 모멘트  $J_M$ 과 커플링의 관성모멘트  $J_c$ 의 합이며,  $B_m$ 는 모터부 점성마찰계수이다.  $J_g (= J_G + J_E + J_c)$ 는 포신의 관성모멘트  $J_G$ , 엔코더의 관성모멘트  $J_E$ , 커플링의 관성모멘트  $J_c$ 의 합이다.  $B_g (= B_1 + B_2)$ 는 포신 회전부의 점성마찰계수로 엔코더와 베어링 점성마찰계수  $B_1$ 과  $B_2$ 의 합이다. 식 (11)에서 포신의 질량불균형과 포신축의 직선가속도의 곱은 외란토크로 작용함을 알 수 있으며, 모터 토크는 제어입력에 해당된다. 실험장치의 주요 파라미터는 Table 1과 같다. Table 1에서 점성마찰계수들은 그 크기가 매우 작아서 무시하였다.

우선 포신의 위치명령 추종을 위해 되먹임 제어를 설계하였으며, 중력에 의한 정상상태 응답 오차를 제거하기 위해 적분기를 갖는 상태되먹임 제어를 적용하였다. 제어기 이득은 계단입력에 대한 정상상태 오차와 과도응답이 없으며, 상승시간이 0.26초가 되도록 정하였다. Fig. 5는 실험에 의해 얻은 포신의 계단응답이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Estimated parameters by FXLMS when initial parameters are (0, 0)

외란보상제어기는 앞에서 소개한 방법에 의해 설계하였다. Fig. 6은 리니어모터를 3Hz로 가진한 상태에서 FXLMS 알고리즘을 이용하여 추정된 1-차 FIR 필터의 계수  $\hat{d}_0(k)$ 와  $\hat{d}_1(k)$ 를 보인다. 이 때 계수의 초기치는 모두 영이다. Fig. 6(a)에서와 같이 계수들은 매우 느린 속도로 갱신되고

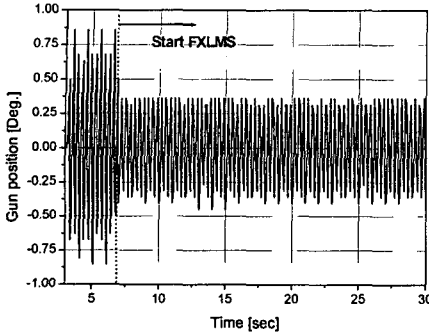


Fig. 7 Gun response with FB and FB+FF control by FXLMS

있으며, 700초에서 수렴상수  $\mu$ 를 0.02에서 0.05로 변화시켜 갱신 속도를 빠르게 했다. 계수들은  $\hat{d}_0(\infty) = -306.5$ ,  $\hat{d}_1(\infty) = 296.6$ 로 수렴하였다. Fig. 6(b)는 초기 30초까지의 계수 추정을 보인다. 계수들은 추정 시작 직후 급격한 변화를 보이며, 그 이후 매우 느린 속도로 갱신되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 이 때의 포신 응답으로 전반부는 되먹임제어만 했을 때, 후반부는 갱신되고 있는 필터로 보상제어를 추가한 경우 포신 응답이다. FXLMS 알고리즘 적용 직후 계수의 큰 변화에 따라 응답은 큰 감소를 보이나, 계수의 갱신량이 작아지면서 매우 느린 감소를 보였다.

외란보상제어기는 앞에서 소개한 방법에 의해 설계하였다. Fig. 6은 리니어모터를 3Hz로 가진한 상태에서 FXLMS 알고리즘을 이용하여 추정된 1차 FIR 필터의 계수  $\hat{d}_0(k)$ 와  $\hat{d}_1(k)$ 를 보인다. 이 때 계수의 초기치는 모두 영이다. Fig. 6(a)에서와 같이 계수들은 매우 느린 속도로 갱신되고 있으며, 700초에서 수렴상수  $\mu$ 를 0.02에서 0.05로 변화시켜 갱신 속도를 빠르게 했다. 계수들은  $\hat{d}_0(\infty) = -306.5$ ,  $\hat{d}_1(\infty) = 296.6$ 로 수렴하였다. Fig. 6(b)는 초기 30초까지의 계수 추정을 보인다. 계수들은 추정 시작 직후 급격한 변화를 보이며, 그 이후 매우 느린 속도로 갱신되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 이 때의 포신 응답으로 전반부는 되먹임제어만 했을 때, 후반부는 갱신되고 있는 필터로 보상제어를 추가한 경우 포신 응답이다. FXLMS 알고리즘 적용 직후 계수의 큰 변화에 따라 응답은 큰 감소를 보이나, 계수의

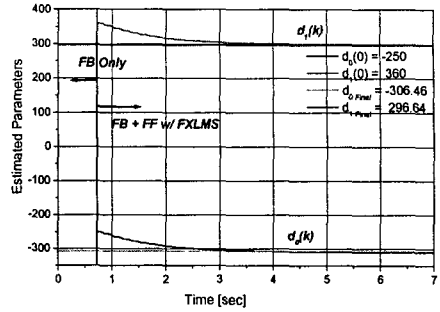


Fig. 8 Estimated parameters by FXLMS when  $[d_0(0), d_1(0)] = [-250, 360]$

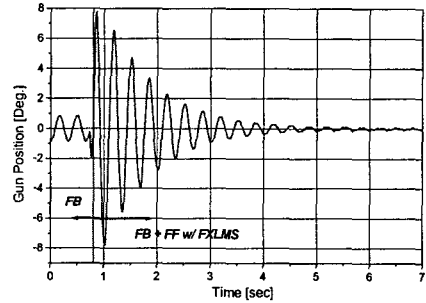


Fig. 9 Gun response with FB and FB+FF control by FXLMS

갱신량이 작아지면서 매우 느린 감소를 보였다.

초기치에 따른 계수의 수렴 속도 차이를 확인하기 위해 초기치를 바꾸어 실험하였다. 앞의 실험과 동일한 3Hz 외란을 가한 상태에서 초기치를  $d_0(0) = -250$ ,  $d_1(0) = 360$ 로 하였을 때 갱신된 계수는 Fig. 8과 같다. 갱신 초기 빠른 속도의 수렴을 보이다가 점차 느려짐을 알 수 있다. 이 때 포신 응답은 Fig. 9와 같이 FXLMS 알고리즘을 적용하는 순간 포신 응답은 갑작스런 큰 증가를 보이다가 계수들이 수렴함에 따라 감소하며, 계수가 최종 수렴값에 도달하게 되면 포신 응답은 거의 포신 엔코더 분해능 수준인  $0.045^\circ$  수준으로 감소되었다. 이와 같이 초기치에 따라 매우 다른 수렴 특성을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 10은 4가지의 초기치, IC1, IC2, IC3, IC4, 에서 25초 동안 계수의 수렴 특성을  $d_0 - d_1$  좌표계에서 나타낸 것이다. Fig. 2에서 설명한 특성이 실제 실험에서도 나타난 것을 알 수 있다.

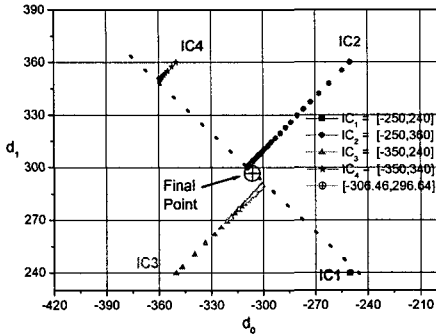


Fig. 10 Directionality of convergence of FXLMS algorithm according to initial errors

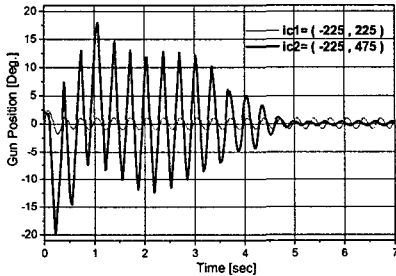


Fig. 11 Gun responses of IC1 and IC2 cases

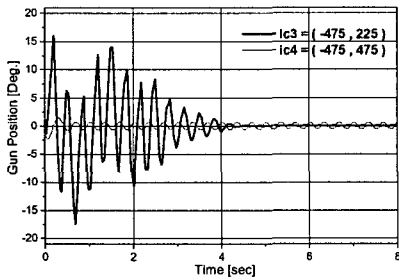


Fig. 12 Gun responses of IC3 and IC4 cases

IC1의 경우 갠신 동안 계수의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 나머지 초기치에서는 점선으로 나타낸 기울기  $-45^\circ$  직선에 거의 수직으로 수렴하며, 이 직선에 도달 한 후 계수의 변화는 매우 작았다. 계속 갠신을 수행할 경우 시간은 많이 걸리지만 모두 동일한 최종치에 접근함을 확인하였다.

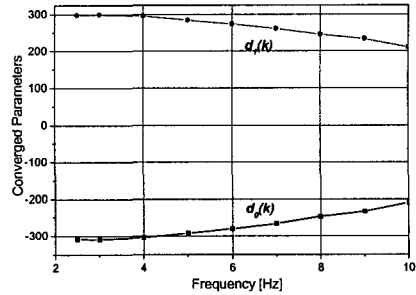


Fig. 13 Converged filter parameters at each disturbance frequency

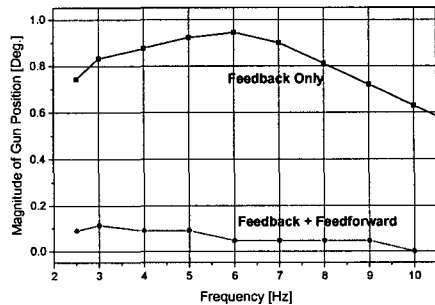


Fig. 14 Gun responses with FF and without FF at each disturbance frequency

Fig. 11과 12는 각각의 경우 포신응답으로 IC2와 IC3는 초기 응답이 오히려 많이 증가하지만 빨리 수렴하여 25초 후 포신응답의 크기는 IC2의 경우  $0.27^\circ$ , IC3의 경우  $0.13^\circ$ 로 감소하였다. IC1과 IC4의 경우 초기 포신응답의 크기 증가는 많지 않으나 앞의 경우에 비해 수렴속도가 작고, 25초 후 포신응답은 IC1의 경우  $0.53^\circ$ , IC4의 경우  $0.46^\circ$ 로 나타났다. 25초에서 IC2, IC3의 경우가 IC1, IC4에 비해 계수의 오차가 더 크므로, 응답이 상대적으로 큰 것으로 분석된다.

이상으로 앞에서 초기치와 수렴방향 및 속도에 관한 분석이 실험결과와 일치함을 확인하였다.

외란의 주파수를 10Hz까지 변경하면서 앞에서와 같이 해당 주파수 외란을 제거할 수 있는 외란보상기 계수추정을 위한 실험을 반복하였다. Fig. 13은 각 주파수에서 FXLMS 알고리즘을 이용하여 얻은 필터의 계수이며, Fig. 14는 각 주파수에서 피드백제어만을 수행한 경우와 계수가 수

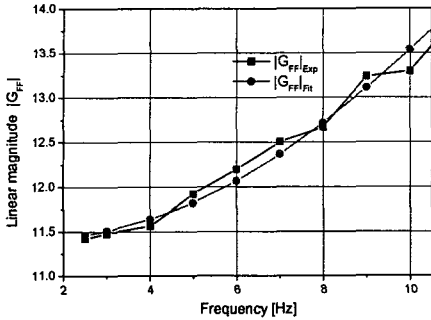


Fig. 15 Magnitude of measured and fitted frequency response functions

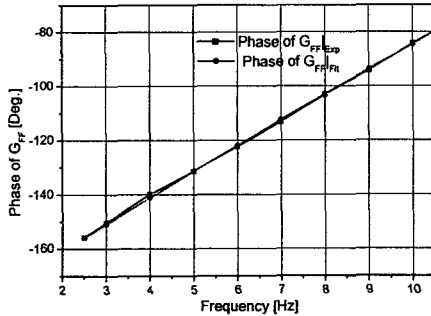


Fig. 16 Phase angle of measured and fitted frequency response functions

렵한 뒤 포신응답의 크기를 주파수별로 나타낸 것이다. 보상제어에 의해 포신의 안정화 성능이 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 15와 16은 Fig. 13의 필터계수를 이용하여 구한 주파수 응답으로, 설계할 보상제어기의 원하는 주파수 응답이 된다. 이 주파수응답을 폭신 맞춤방법을 이용하여 얻은 6-차의 FIR 모델의 주파수 응답은 Fig. 15, 16과 같으며, 비교적 근접함을 알 수 있다.

전차의 주행과 유사한 상황에서 설계된 보상제어기의 성능실험을 수행하였다. 기동 중 토크 외란은 대역폭 10Hz를 갖는 랜덤신호 특성을 갖는데, (1) 이를 모사토록 외란을 2Hz-10Hz 대역폭을 갖는 랜덤 신호로 구현하였다. 단, 2Hz 미만의 운동에서는 리니어모터의 이동거리 한계 때문에 대역폭 최소치는 2Hz로 하였다.

Fig. 17은 동일한 외란 상태에서 되먹임제어의 경우와 되먹임제어+외란보상제어를 적용했을 때

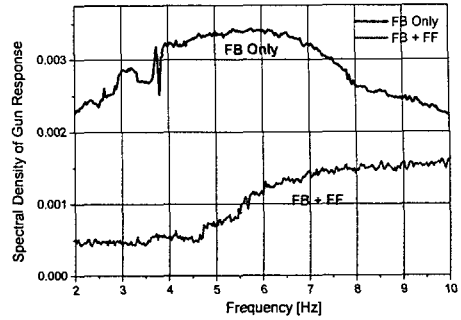


Fig. 17 Spectra of air-gap with FB+FF controls under randomly excited base motion

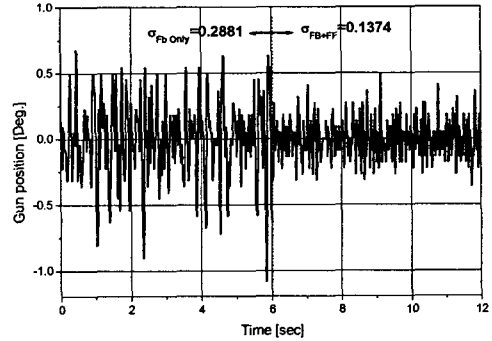


Fig. 18 Air-gap with FB+FF controls under randomly excited base motion

얻은 응답의 스펙트럼을 보인다. 모든 주파수영역에서 보상기를 적용함에 따라 안정화 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 18은 이 때 포신의 시간응답을 보인 것으로 전반부는 되먹임제어만을 하였을 경우(FB Only), 후반부는 보상제어를 추가한 경우(FB+FF) 응답이다. 전반부의 응답의 표준편차는 0.288°, 후반부 응답의 표준편차는 0.137°로 외란보상제어를 추가함에 따라 되먹임 제어만을 할 때의 47.6% 수준으로 감소되었다.

이상의 결과로 본 연구에서 제안한 외란보상제어기 설계 방법이 전차의 안정화 성능 향상에 효과가 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 되먹임 제어에 의해 이루어지고



있는 기존 전차의 안정화제어 성능을 향상시키기 위해 외란을 측정하여 보상하는 외란보상제어를 제안하였다. 전차에서 주요 오차 요인인 주행에 따라 발생하는 외란 토크는 가속도계를 이용하여 측정 가능하므로, 외란보상제어기 적용이 가능하다. 외란보상제어기 설계방법으로는 모델 기반 제어기 설계가 갖는 모델의 불확실성에 의한 성능 저하를 피하기 위해 FXLMS 알고리즘을 기반으로 한 적응형 실험적 설계방법을 적용하였으며, FXLMS 알고리즘에서 초기치에 따른 계수의 수렴방향 및 수렴 속도에 대한 선행 해석 결과를 실험적으로 검증하였다.

실험 결과 제안된 보상제어기가 외란 응답을 감소시키는데 효과가 있음을 확인하였으며, 이로써 제안된 방법은 포신 안정화 제어에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 FXLMS 알고리즘을 기반으로 한 적응형 외란보상제어기 설계가 능동소음제어 분야 뿐 아니라 일반적인 제어계에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2003-000-10857-0) 지원으로 이루어졌으며, 재단의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kang, M. S., Lyu, J., Seok, H. D. and Lim, J. K., 2004, Analysis of Stabilization Error Sources for Main Battle Tank, *Proceedings of Seminar for Ground Weapon Systems Development*, pp. 12~15. Agency for Defence Development Research Report,
- (2) Kim, B. U. and Kang, E. S., 2004, "Control of a Heavy Load Pointing System Using Neural Networks," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 5, pp. 55~63.
- (3) White, M. T. and Tomizuka, M., 1997, "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control and Parameter Adaptation," *Control Engineering Practice*, Vol. 5, No. 6, pp. 741~751.
- (4) Suzuki, Y., 1998, "Acceleration Feedforward Control for Active Magnetic Bearing Excited by Ground Motion," *IEEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 145, No. 2, pp. 113~118.
- (5) Widrow, B., Glover, J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hern, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E. and Goodlin, R. C., 1975, "Active Noise Canceling: Principles and Applications," *Proc. IEEE*, Vol. 63, pp. 1692~1716.
- (6) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, *Active Noise Control Systems*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- (7) Widrow, B. and Stearns, S. D., 1985, *Adaptive Signal processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (8) Kim, S. J. and Lee, J. W., 1998, "On-line Identification of Position and Current Stiffnesses in Active Magnetic Bearing System Equipped with Built-in Force Transducers by LMS Algorithm," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22, No. 12, pp. 2261~2268.
- (9) Oh, J. E., Kim, K. S., Hong, J. S. and Park, S. H., 1997, "Active Vibration Control of a Flexible Cantilever Beam Using Filtered-x LMS Algorithm," *J. of KSPE*, Vol. 14, No. 3, pp. 107~113.
- (10) Kang, M. S., 2003, "Acceleration Feedforward Control in Active Magnetic Bearing System Subject to Base Motion by Filtered-x LMS Algorithm," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 10, pp. 1722~1719.
- (11) Kang, M. S. and Jung, J. S., 2004, "Disturbance Compensation Control of An Active Magnetic Bearing System by Multiple FXLMS Algorithm-theory," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 2, pp. 74~82.
- (12) Kang, M. S., 2005, "Geometric Analysis of Convergence of FXLMS Algorithm," *Trans. of the KIEE*, Vol. 54D, No. 1, pp. 40~47.
- (13) Reason, J. and Ren, W., 1993, "Estimating the Optimal Adaptive Gain for the LMS Algorithm," *Proceedings of CDC*, San Antonio, pp. 1587~1588.
- (14) Ljung, L., 1977, "Analysis of Recursive Stochastic Algorithm," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC-22, No. 4, pp. 551~575.