

# 대형구조물 구동계통 실시간 시뮬레이션 모델 유도 및 연동 특성 분석에의 응용

A derivation of real-time simulation model on the large-structure driving system and its application to the analysis of system interface characteristics

김재훈\*      최영호\*\*      유웅재\*\*      유준\*\*  
Kim, Jae-Hun, Choi, Young-Ho, Yoo, woong-Jae, Lyou, Joon

## ABSTRACT

A simulation model is developed to analyze the large-structure driving system and its integrated behavior in the whole weapon system. It models every component in the driving system such as mechanical and electrical characteristics, and it is programmed by simulation language in a way which strongly reflects the system's real time dynamics and reduces computation time as well. A useful parameter identification method is proposed, and it is tuned on the given physical system. The model is validated through comparing to real test, and it is applied to analysis and prediction of integrated system functions relating to the fire control system.

주요기술용어 : simulation model(시뮬레이션 모델), large-structure driving system(대형구조물 구동계통), real-time(실시간), parameter identification(매개변수 식별), fire control system(사격통제장치)

## 1. 서론

본 연구는 대형구조물 구동계통에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하여 체계에서 연동되는 사격통제장치와의 연동특성을 예측하여 분석함으로써 체계 종합 측면에서의 성능을 개선하기 위한 연구활동의 일환이다. 추적기, 사격통제장치, 대형구조물 구동계통으로 이어지는 화기 체계에서 대형구조물 구동계통

의 조준 성능은 화기 체계의 성능에 절대적인 영향을 미치며, 따라서 대형구조물 구동계통 및 사격통제장치에 대한 체계 종합 측면에서의 기술 분석 활동은 매우 필요하고 이를 위한 적절한 방안 마련이 요구된다. 본 연구는 이러한 기술 분석 활동의 필요성으로부터 착수되었으며, 기 개발된 대형구조물 구동계통 및 사격통제장치간의 연동특성 분석을 위한 시뮬레이션 모델을 개발하여 응용함으로써 소기의 목적을 달성하고자 하였다. 시뮬레이션 모델로는 실제 체계가 가지는 실시간 특성을 제대로 분석하기 위하여 하드웨어 및 소프트웨어를 종합할 수 있고 선형 및

\* 국방과학연구소 선임연구원  
\*\* 국방과학연구소 책임연구원  
\*\*\* 충남대학교 전자공학과 교수

비 선형적인 동적 특성을 잘 묘사할 수 있는 시간 영역의 모델 식을 유도하였으며, 모델 개발을 위해 필요한 미지의 매개변수들은 실험 체계를 통해 직접 식별함으로써 실험물과 동등한 시뮬레이션 모델을 유도하였다. 모델을 구현하기 위한 시뮬레이션 프로그램은 범용 시뮬레이션 언어인 Matlab<sup>TM</sup>과 Simon<sup>TM</sup>으로 작성함으로써 변경 및 수정이 용이하고 유사 체계 분석에 쉽게 응용이 가능하도록 하였으며, 시뮬레이션 시 요구되는 연산 량의 정도에 따라 상기한 시뮬레이션 언어의 연산 시간 및 언어 특성을 분석하여 프로그램에 반영함으로써 연산 시간 측면에서 효율적인 시뮬레이션을 할 수 있도록 하였다. 매개변수 식별을 위해서는 대형구조물 구동계통이 가지는 비 선형적인 특성과 운용시 장비 및 운용 요원의 안전성을 고려한 식별 방법을 마련하여 사용하였으며, 또한 이를 분석하기 위한 방안으로 시간 영역에서 식별방안을 제안하여 활용함으로써 정확성과 아울러 분석 노력을 절감할 수 있도록 하였다.

개발된 시뮬레이션 모델은 실험 체계를 비교 실험을 통하여 동등함을 확인하였으며, 통상 대공 및 대함 화포체계에 널리 활용되는 위치 정보 방식의 대형구조물 구동계통의 연동특성에 대한 분석에 적용함으로써 문제점을 분석하고 연동특성을 개선하기 위한 방안을 제시하였으며, 사격통제장치와 연동시 잡음 감소 효과를 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 대형구조물 구동계통<sup>(1)-(5)</sup>

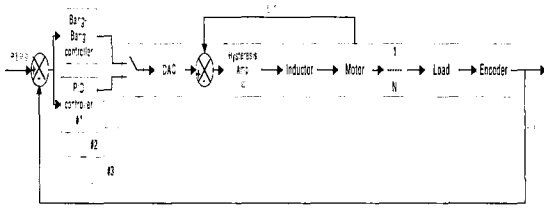
대형 구조물 구동계통의 성능 요구조건은 첫째 원하는 위치로 최단시간에 구동이 될 수 있어야 하며, 둘째 이동하는 표적에 대한 구동오차가 작아야하고,

셋째 마찰 등의 외란에 대해 견고히 성능이 유지될 수 있어야 한다. 첫째 요건은 반응시간에 영향을 미치며, 둘째 요건은 조준성능에 영향을 주고 셋째요건은 성능의 신뢰성유지 측면에서 중요한 요소가 된다. 이러한 요구조건을 달성하기 위해 구동계통은 그림1과 같이 대용량 구동이 가능하고 정밀제어에 유리한 대형 전동식 직류모터를 구동기로서 채택하였으며, 구동방식으로는 기존의 전압제어방식 대신 토크를 직접 제어할 수 있는 직류제어방식을 채택하였다. 또한 디지털 서보제어기를 사용함으로써 표적상태 및 구동 오차에 따른 다중제어기법을 실현하도록 하였다. 즉 최초 표적 지정 시는 최대 토크 제어가 가능한 일종의 Bang-Bang방식의 제어를 함으로써 최단시간에 구동이 될 수 있도록 하였으며, 고속으로 이동하는 표적에 대해 구동 오차크기에 따른 가변이득 PID제어방식을 취하도록 하였다. 대형구조물 구동계통은 외부장치로부터 50Hz 마다 구동명령을 받으나, 서보제어기는 이를 외삽하여 100Hz마다 서보제어가 이루어지도록 하였으며, 이를 통해 조준 유지성을 향상함으로써 외란 등에 대한 특성이 견고히 유지되도록 하였다.

## 2.2 각 요소별 모델링

### 2.2.1 모터 및 부하 결합모델

모터는 구동기어를 통해 감속되어 부하를 구동하며, 1차 측인 모터와 2차 측인 부하 사이에 존재하는 기어의 backlash 영향과 spring 효과 등은 크기가 작다고 가정하여 무시하였다. 또한 마찰은 대형구조물의 구동 위치에 따라 크기가 일정하다고 가정하였고, 점성마찰력 계수는 속도에 대해 변화가 없이 일정하다고 가정하였다. 이 경우 모터 측으로 환산한 수식은 다음과 같다.



(그림 1) 대형구조물 구동계통 구성도

$$V = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + K_b \cdot \omega \quad (1)$$

$$T = K_t \cdot I$$

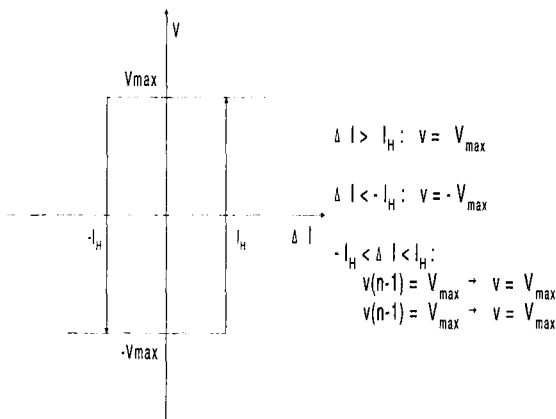
$$= J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega + F \cdot \text{sgn}(\omega) \quad (2)$$

(단,  $J = J_m + \frac{J_L}{N^2}$ ,  $B = B_m + \frac{B_L}{N^2}$ ,

$$F = F_m + \frac{F_L}{N}$$

### 2.2.2 히스테리시스 앰프

제어기로부터 받은 전류명령과 모터 측에서 측정된 전류 값을 비교하여 조정범위 이상 오차가 발생하면 H-형 전력 트랜지스터를 스위칭하여 전압(Vmax)를 모터에 공급시킨다. (그림 2)



(그림 2) 히스테리시스 앰프

### 2.2.3 디지털 제어기<sup>(5)</sup>

디지털제어기는 위치 명령 값과 자체 위치 센서인 디지털 엔코더 값을 비교하여 위치오차 크기에 따른 뱅-뱅 방식 (Global mode)과 추적 방식(Fine mode)으로 구분되며, 각 방식별로 구동 속도오차 및 구동 위치오차 크기를 고려한 세부 제어 알고리즘을 수행한다. Global Mode는 최초 목표지점 지정 시 원하는 위치로 최단 시간에 구동하기 위하여 사용되며, 가속 구간과 감속 구간으로 나누어진다. 가속 구간은 오차의 극성에 따라 최대 전류 값이 인가되도록 하며, 감속 구간은 구동속도 및 위치오차를 고려하여 결정한다. 또한 감속 시점 판단은 브레이크 정지거리와 오차 크기가 같게되는 시점으로 한다.

#### 1) 가속모드

$$\theta_e > 0 : I_c = I_{\max}$$

$$\theta_e < 0 : I_c = -I_{\max}$$

#### 2) 감속모드

$$I = \frac{F}{K_t} - \frac{J \cdot N}{2 \cdot K_t \cdot \theta_e} \cdot \omega_e^2 \quad (3)$$

#### 3) 브레이크 정지거리

$$\theta_{id} = \frac{J \cdot N}{2 \cdot (F + K_t \cdot I_{\max})} \cdot \omega_e^2 \quad (4)$$

Fine Mode는 표적에 대한 연속적인 추적시 사용하며 구동 오차의 크기에 따라 3가지 가변 이득의 PID 제어기를 사용한다. 또한 제어기의 제어명령의 포화를 방지하기 위한 논리를 수행한다.

#### 4) 제어 법칙

$$\theta_e > 1.5^\circ : I_c = I_{\max}$$

$$\theta_e < -1.5^\circ : I_c = -I_{\max}$$

$$-1.5^\circ \leq \theta_e \leq 1.5^\circ :$$

$$I_c = K_P \cdot \theta_e + K_D \cdot \omega_e + K_I \cdot \int \theta_e dt \quad (5)$$

전류제한  $I_c > I_{max} : I_c = I_{max}$   
 $I_c < -I_{max} : I_c = -I_{max}$

5) 가변이득 선택

$|\theta_e| > 0.5^\circ : \text{PID \#3 (} K_I \text{ 최소)}$

$0.1^\circ < |\theta_e| \leq 0.5^\circ : \text{PID \#2 (} K_I \text{ 중간)}$

$|\theta_e| \leq 0.1^\circ : \text{PID \#1 (} K_I \text{ 최대)}$

2.3 시뮬레이션 프로그램 작성

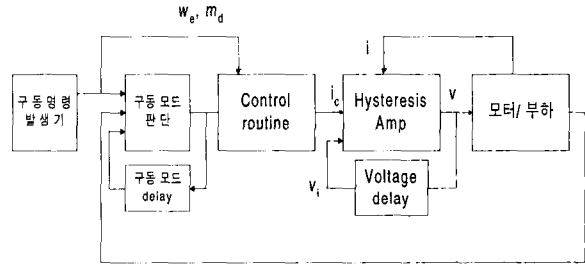
2.3.1 SIMNON™ 프로그램<sup>(7)</sup>

SIMNON은 비선형 계통의 시간영역 시뮬레이션을 위해 개발된 시뮬레이션 툴로서 선형/비선형 및 시불변/시변등에 모두 활용할 수 있으며, 상태 방정식의 수식을 거의 그대로 사용할 수가 있어 프로그램 작성이 쉬우며, 더욱이 구성 블록들간의 연결만 정의하면 전체 시스템을 구성할 수가 있어 실시간 특성을 표현하기에 적합한 언어이다. 또한 시뮬레이션 수행 시간 등이 아주 짧아 결과를 빨리 얻을 수 있어 다량의 시뮬레이션에 적합하다. 단 불편한 점은 언어 구조상 대수적인 loop나 feedback loop를 허용하지 않으며, 프로그램 수행이 순차적일 것을 필요치 않으므로 Data flow는 허용하나 Control flow를 허용치 않는다. 특히 Control flow를 허용치 않으므로, Decision Logic이나 제어 전략 등의 프로그램 작성을 필요로 하는 본 연구에서는 상당한 약점이 될 수가 있다. 본 연구는 이와 같은 문제점을 해소하기 위해 다소 불편하지만 Control flow부분을 Data flow로 바꾸어 이 부분을 해결하였다. 개념을 설명하면 다음 표 1과 같다.

[표 1] control flow의 data flow 변환

CONTROL FLOW	DATA FLOW
if $ \theta_e  > 0.5^\circ$ PID #3	L1= $ \theta_e  > 0.5^\circ$ ; logical eq. L2= $ \theta_e  \leq 0.1^\circ$ ; PID #3계수 set( $K_{p3}, K_{i3}, K_{d3}$ )
else if $ \theta_e  \leq 0.1^\circ$ PID #1	PID #2계수 set( $K_{p2}, K_{i2}, K_{d2}$ ) PID #1계수 set( $K_{p1}, K_{i1}, K_{d1}$ )
else PID #2	$K_p = \text{if L1 then } K_{p3} \text{ elseif L2 then } K_{p1} \text{ else } K_{p2}$ $K_i = \dots$ $K_d = \dots$

SIMNON을 이용한 프로그램구성을 보면 그림 3과 같다.



(그림 3) simnon을 사용한 프로그램 구성

2.3.2 Matlab™ 프로그램<sup>(8)</sup>

Matlab은 matrix을 기본으로 처리하며, Built-in으로 제공되는 많은 기능을 이용하면 기계, 전자를 막론하고 거의 전체 응용을 지원할 수 있는 막강한 시뮬레이션 도구이다. MATLAB의 용도에 따라서는 별도의 Toolbox를 설치하면 용도에 해당하는 다양한 시뮬레이션을 쉽게 구현할 수 있으며, 제어 시스템을 GUI (Graphic User Interface)방식으로 즉석에서 구성하고 수정하며 시뮬레이션한 결과를 바로 출력할 수 있는 이상적인 도구이다. 그러나 Built-in 기능으로 제공되는 그래픽 블록 등을 바로 사용할 수 없는 경우에는 해당 블록을 S-function interface에 맞도록 직접 작성



도록 하였다. 즉,

$$I = I_b + a \cdot \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

여기서 a는 sinusoidal 한 최대전류크기

이며  $I_b$ 는 직류 옴셋 전류로서 구동 속도 방향의 여유를 고려하여 다음과 같이 주었다.

$$I_b = \frac{F_s}{K_T} \cdot 1.2 + a \quad (9)$$

#### 2.4.3.2 주파수 응답특성을 이용한 식별방법

상기 입력을 인가하면 출력 값으로 엔코더에 의한 위치 측정값을 얻을 수가 있다. 대상 시스템을 선형 시스템으로 고려할 경우 입력 주파수를 가변 시 측정 위치 값은 크기와 위상은 다르나 동일한 주파수를 가지는 특성이 나타나게되며, 각 주파수별로 입력에 대한 상대 크기와 위상 차이를 구하면 전달함수 ( $G(i\omega)$ )를 구할 수가 있다.

입력에 대한 출력의 크기 및 위상을 구하는 방안은 입력주파수를 가진 sine 및 cosine 신호와 출력 값과의 내적값을 각각 구함으로 써 계산 할 수가 있다.<sup>(9)</sup> 즉, 입력을  $u(t)$ , 출력을  $y(t)$ 라 하면,

$$u(t) = u_1 \sin(\omega t) \quad (10)$$

$$y(t) = |G(i\omega)| * u_1 * \sin(\omega t + \Phi(\omega)) \quad (11)$$

여기서,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\Phi(\omega) = \arg(G(i\omega))$

입력과 동일한 주파수를 가지는 sine 및, cosine 신호와 출력에 대한 내적을 구하면,

$$\begin{aligned} S_T(\omega) &= \int_0^T y(t) \cdot \sin \omega t \, dt \\ &= \frac{1}{2} T |G(i\omega)| u_1 \cos \Phi(\omega) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_T(\omega) &= \int_0^T y(t) \cdot \cos \omega t \, dt \\ &= \frac{1}{2} T |G(i\omega)| u_1 \sin \Phi(\omega) \end{aligned} \quad (13)$$

그러면 다음과 같이 상기 결과를 이용하여 입출력 이득 및 위상차이를 계산할 수가 있다.

$$|\hat{G}(i\omega)| = \frac{2}{Tu_1} \sqrt{S_T^2(\omega) + C_T^2(\omega)} \quad (14)$$

$$\hat{\Phi}(\omega) = \tan^{-1} \frac{C_T(\omega)}{S_T(\omega)} + k\pi \quad (15)$$

각주파수에 대한 입출력 주파수 응답특성이 얻어지면 매개변수는 잘 알려진 Levy의 complex curve fitting 방법에 의해 계산할 수가 있다.<sup>(9)</sup>

이와 같은 주파수 응답특성에 의한 매개변수 식별시는 다음과 같은 조건이 고려되어야 정확히 계산할 수가 있다.

- (i) 입력 및 출력 자료는 정상 상태 자료만을 사용하여야 한다. 즉 과도기간 자료는 제외하여야 한다.
- (ii) 출력 자료를 처리하여 DC 성분을 제거한 AC 성분을 계산하여야한다. 즉, 대형구조물 계통에 인가하는 입력 전압은 비 선형적인 마찰의 특성을 제거하기 위하여 DC 옴셋 전류를 인가하여야 하므로, 출력은 시간에 대해 증가하는 DC 성분의 위치 값을 포함하고 있다. 따라서 적절한 방법으로 출력에 대한 DC 성분을 제거하여야 계산 시 오차를 유발하지 않는다.

#### 2.4.3.3 시간 영역에서 식별 방법

부하 식(2)로부터

$$\dot{\omega} = -\frac{B}{J} \cdot \omega + \frac{1}{J \cdot N} (K_t \cdot I - F_c) \quad (16)$$

Fc 값은 미리 구하였으므로 이 식을 이용하면 모터 전류를 가변 시 출력에 대한 최소제곱방법(Least square method)으로 매개변수 J, B를 구할 수 있다. 즉 측정값으로 구동위치, 구동속도, 구동가속도를 별도의 센서나 방법으로 구할 수가 있다면, (16)식은 다음과 같은 최소제곱식으로부터 바꿀 수가 있으며, 이로부터 매개변수 J, B를 구할 수가 있다.(9)-(11)

$$Y = X \cdot C \tag{17}$$

로부터

$$C = (X^T \cdot X)^{-1} X^T Y \tag{18}$$

$$\text{여기서 } Y = \begin{bmatrix} \dot{\omega}(t_1) \\ \dot{\omega}(t_2) \\ \vdots \\ \dot{\omega}(t_n) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} \omega(t_1) & u(t_1) \\ \omega(t_2) & u(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ \omega(t_n) & u(t_n) \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} \\ -\frac{1}{JN} \end{bmatrix}, \quad u = K_t \cdot I - F_c$$

본 연구는 앞에서 언급한 주파수 영역에서 구할 경우의 제한 요소를 피하고 시간 영역에서 매개변수를 직접 구할 수 있도록 상기와 같이 유도된 시간영역의 매개변수 식별 방법을 사용하였다.

즉, 주파수 영역에 의한 식별 방법은 실험결과로부터 과도기간을 제외하여야 하며, 또한 출력 값으로부터 처리하여 DC성분을 제거하여야 하는 번거로움이 따른다. 또한 이렇게 하여 구한 주파수 응답특성으로부터 다시 Levy에 의한 복소수 curve fitting식을 적용하여야 매개변수를 식별할 수가 있는 데 이 과정에서 모델의 부정확성이 있거나 저주파 응답 시 존재하는 측정 오차 등의 영향으로 매개변수의 식별 정확성 등이 떨어지는 단점이 있다.

반면에 위에서 언급한 시간 영역의 식별 방법을 적용 시는 과도기간 영역을 포함하여 전 구간의 측정자료를 활용할 수가 있으며, 측정값으로부터 DC성분을 제거하지 않아도 식별 값을 구할 수가 있는 장점을 가진다.

한편 이 방법은 계산 과정에서 필요한 coulomb 마찰력 값을 미리 알아야 하며, 측정되는 구동위치 값 이외에 구동 속도 및 구동 가속도를 알아야 하므로 별도의 측정 센서가 소요되거나 아니면 위치 측정값을 이용한 구동위치, 구동속도, 구동가속도에 대한 상태추정을 하여야 할 필요가 있고, 이러한 추정 정확도가 식별 정확도에 영향을 미칠 수가 있는 단점이 있다.

그러나 이 방법을 사용할 때 필요한 coulomb 마찰력은 앞에서 언급한 방법을 통해 비교적 정확히 알아낼 수가 있으며, 또한 마찰력이 약간 부정확하더라도 이에 따라 매개변수 (J, B)의 식별 정확성에 미치는 영향이 작음을 시뮬레이션을 통해 확인 할 수가 있으므로 별 문제가 되지 않는다. 문제가 되는 것은 별도의 측정 속도 및 가속도 센서가 없을 경우 신뢰성 있는 상태추정을 할 수가 있는 나의 여부가 관건인데 여기서는 입력에 대한 정보와 측정값에 대한 이동구간 smoother를 구현함으로써 충분히 정확성 있는 추정 값을 얻을 수가 있도록 하였다.

#### 2.4.3.4 이동구간 smoother

인가한 입력에 대해 출력 위치 값이 얻어지면 속도 및 가속도인  $\omega$  및  $\dot{\omega}$ 는 측정위치 센서에서 측정된 위치 정보를 2차 가속도 모델로 하여 이동구간(moving average) smoother를 이용하여 구할 수가 있다. 사용된 자료구간을 H라 하면 모델 식은 다음과 같다.

$$\theta(t + T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 \tag{19}$$

$$\left(-\frac{H}{2} \leq T \leq \frac{H}{2}\right)$$

(19)식을 활용하면 (16), (17), (18)식과 동일한 방법으로 최소제곱방법에 의한 계수  $a_0, a_1, a_2$ 을 구할 수가 있다. 즉, (19)식을 측정된 자료 구간에 대한 식으로 표현하면

$$Y = X \cdot C \quad (20)$$

여기서,

$$Y = \begin{bmatrix} \theta(t+t_1) \\ \theta(t+t_2) \\ \vdots \\ \theta(t+t_n) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & t_n^2 \end{bmatrix}$$

이며 이에 대한 Least square 추정 값은

$$C = (X^T \cdot X)^{-1} X^T Y \quad (21)$$

여기서

$$C = [ a_0 \ a_1 \ a_2 ]^T \quad (22)$$

이 경우  $\omega$  및  $\dot{\omega}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\omega = a_1 + 2a_2 T \quad (23)$$

$$\dot{\omega} = 2a_2 \quad (24)$$

상기 결과로 구한  $\omega$  및  $\dot{\omega}$ 는 위치에 대한 1차 미분 및 2차 미분에 해당하는 추정 값으로서 위치 값에 잡음이 존재 시 잡음이 증폭되어 튀는 현상이 발생한다. 이 경우 튀는 값에 의해 추정된 매개변수가 bias되어 부정확한 결과가 얻어질 수가 있다.<sup>(7)</sup> 따라서 측정값의 튀는 성분을 적절히 제거하여 상태추정을 하여야 하며(전처리필터링), 추정된 결과가 매개변수 식별에 사용되므로 추정 결과의 튀는 성분을

역시 마찬가지로 제거하여야(후처리필터링) 식별의 정확성을 이룰 수가 있다.

본 연구는 입력으로 DC 옵션 전류를 인가함으로써 측정되는 출력 값의 측정값이 단조적(monotonic)으로 변화하도록 하였으므로 random 잡음 제거에 탁월한 median 필터를 이용하면 측정값의 튀는 성분을 효과적으로 제거할 수가 있다.<sup>(12)</sup> 한편 추정된 속도 및 가속도 값은 AC 성분의 영향이 지배적이므로 튀는 성분을 제거 시 인가된 AC 주파수의 크기와 반비례적으로 median 필터의 자료구간을 선정해야 monotonic구간이 아닌 구간에서 median 필터의 오차를 줄일 수가 있다. 자료구간을 늘릴 경우 smooth한 추정값이 얻어질 수가 있으나 입력 주파수의 크기에 따른 상기 모델 식의 모델링 오차를 고려하여본 연구에서는 주파수별로 이동 구간의 크기를 반비례적으로 선정하여

$$H = \frac{1}{(12 \cdot f)} \quad (25)$$

로 함으로써 모델식 (19)가 가지는 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

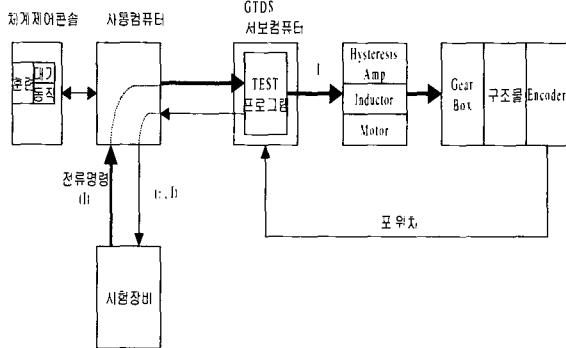
## 2.5 시험결과 및 응용사례

### 2.5.1 매개변수 식별 시험을 위한 장비구성

그림 5에 대형구조물 구동시스템의 매개변수 식별을 위한 장비 구성을 나타내었다. PC를 이용하여 시험장비를 구성하였으며, 체계의 사격통제컴퓨터와 연결함으로써 구동시스템을 구동하기 위한 전류명령을 인가하였으며, 구조물의 위치를 받아 기록하여 분석을 하였다. 이 과정동안 대형구조물 구동시스템의 디지털 서보제어기는 매개변수 식별 목적으로 단지 입력되는 명령을 히스테리시스 앰프로 전달하는 역할과 구조물의 위치를 읽어 전달하는 역할만을 수행할



수 있도록 TEST 모드로 동작하도록 하였다.

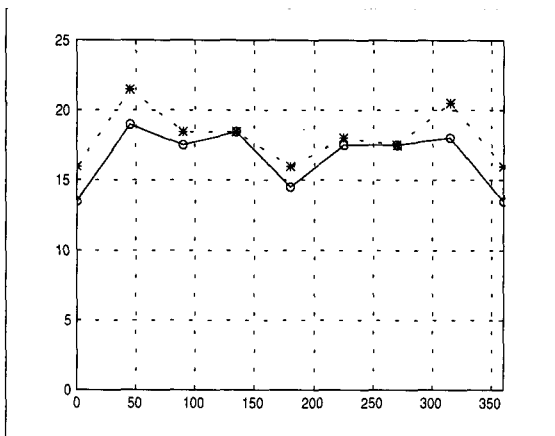


(그림 5) 매개변수 식별을 위한 장비구성

### 2.5.2 대형구조물 매개변수 식별 결과

상기 모델링을 위한 매개변수 식별시험 결과 얻어진 마찰력 값은 그림 6과 같다. 여기서는 (2.4.1)의 방법에 의한 정지마찰력에 해당하는 모터의 기동전류 ( $I_s$ )를 나타낸 것으로서 정지마찰력( $F_s$ )은  $F_s = K_t \cdot I_s$ 인 관계를 가진다.

그림 6에서 보는 바와 같이 대형구조물 구동계통은 방위각 위치별로 정지마찰력이 약간씩 차이가 있음을 알 수가 있으며, 시계방향 및 반 시계 방향의 크기가 약간씩 차이가 있음을 알 수가 있다. (2.4.2)에



(그림 6) 대형구조물의 위치별 정지마찰력 분포

언급한 coulomb 마찰력의 실험 결과 위의 값보다 약간(5%이내) 작은 것으로 관측되었는데 위치별로 위와 유사한 크기의 변화가 관측되었다. 모델링에 사용한 마찰력은 상수로 가정하였으므로 이 결과로부터 시뮬레이션에 사용한 마찰력의 크기는 마찰력의 분포 범위 이내에서 시뮬레이션과 실제 시험 결과가 가장 잘 일치하는 대표 상수 값을 시뮬레이션을 통해 적용하였다.

한편, 대형구조물 계통의 관성 계수 및 점성마찰 계수에 대한 식별은 2.4.3.3 및 2.4.3.4의 방법을 적용하여 구하였으며 관성계수 J 및 점성마찰계수 B는

$$J = 2.7 \pm 0.2 [lb - inch / (rad / sec^2)] \quad (26)$$

$$B = 0.6 \pm 0.3 [lb - inch / (rad / sec)] \quad (27)$$

가 얻어졌다. 점성마찰계수(B)는 상대적으로 분포가 넓었으며, 시뮬레이션 결과 이 값이 구동특성에 미치는 감도도 예민하였다. 따라서 시뮬레이션 모델에서 사용한 관성계수(J)는 대표 값으로 2.7을 적용하였으며, 점성마찰계수(B)는 실 장비와의 시험 결과와 비교하여 잘 일치되는 값을 찾았으며, 속도가 45도/sec 이하인 경우는 0.7을 적용하였으며, 그 이상의 속도인 경우에는 실 장비의 STEP 구동 시험 결과로부터 속도에 대해 비례하는 fitting 식을 찾았으며 다음과 같다.

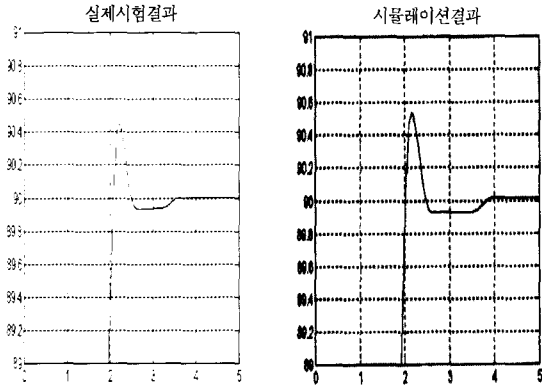
$$B = \frac{1.1}{45} \cdot (\omega_L - 45) + 1.1 \quad (28)$$

이것은 속도가 클 경우 점성마찰계수가 상수라고 한 가정이 잘 맞지 않거나 불확실성이 높음을 의미한다.

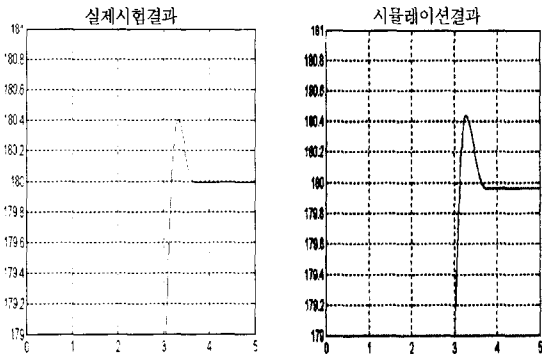
### 2.5.3 시뮬레이션 모델 정확성 확인

대형구조물 구동장치의 실제 시험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하면 그림7 및 그림 8과 같다.

Global과 Fine 모드 연동 특성을 보기 위해 Step 명령 결과를 나타내고 있는 데 그림에서 보는 바와 같이 실제 구동 결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 알 수가 있다. 따라서 이를 이용하여 사격통제장치와의 연동 특성을 시뮬레이션 하였으며, 또한 연동 특성 분석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.



(그림 7) step response(90 degree)



(그림 8) step response(180 degree)

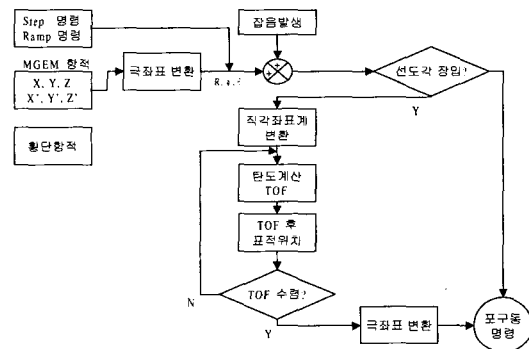
2.5.4 사격통제장치와 연동 특성 시뮬레이션

사격통제장치와 대형구조물구동계통 간 연동 특성을 시뮬레이션 하기 위해 사격통제장치에서 수행하는 내용을 간략 화한 모델을 작성하였다. 이 내용은 MATLAB을 사용하여 프로그램 하였으며 Flow를 나타내면 그림 9와 같다. 항적으로는 기본적으로 Step, Ramp 이외에 횡단 항적과 MGEM(Modern Gun

Effectiveness Model)<sup>(6)</sup>에서 제시된 4가지 항적을 사용하였다.

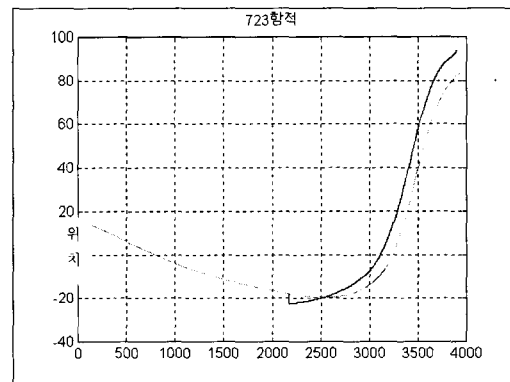
2.5.4.1 연동 잡음이 없는 경우 시뮬레이션

사격통제장치로부터 대형구조물 구동계통으로 전달되는 구동명령에 연동 잡음이 없을 경우 구동명령을 나타내면 그림 10과 같고 이를 대형구조물계통에 인가한 경우 시뮬레이션 결과를 나타내면 그림 11과 같다.

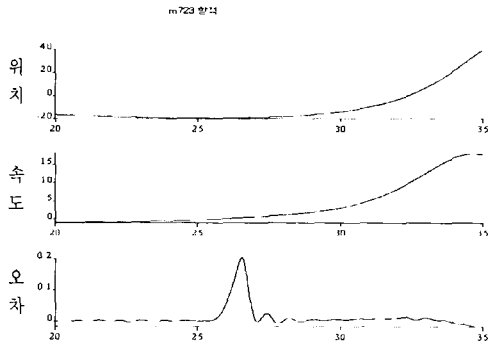


(그림 9) 사격통제장치 간이 시뮬레이션 모델

그림 10, 그림 11에서 보는 바와 같이 표적이 급격히 선화하는 경우를 제외하고는 대부분 구동이 양호함을 알 수가 있다.



(그림 10) 723항적 구동명령

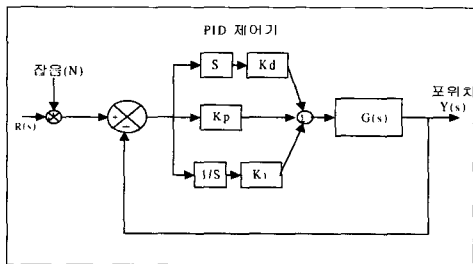


(그림 11) 723 항목 시뮬레이션

2.5.4.2 연동 잡음을 고려한 연동 방식 개선

대형구조물 구동계통에 대한 블록도를 제어기를 중심으로 하여 나타내면 그림 12와 같다. 여기서는 연동 명령에 잡음이 인가되는 환경을 고려하여 기존의 연동방식에 대한 검토를 하였다. 상당수의 화포 체계에 있어 대형구조물은 사격통제장치와 연동시 위치방식의 연동방식을 취하고 있으며, 화포내부는 위치오차를 최소화하기 위한 제어기 형태를 취하고 있으므로 그림 12와 같은 구성을 취하게 된다.

그러나 이와 같은 구성은 구동 명령에 잡음이 없을 경우에는 문제가 없지만 연동 잡음이 존재 시는 구조적으로 취약함을 확인 할 수가 있으며, 이를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.



(그림 12) 포 구동장치 블록선도 (Fine 모드)

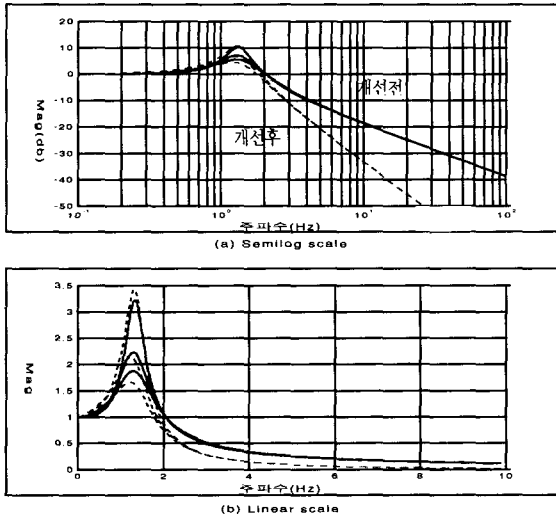
즉 그림 12 계통을 잡음을 고려하여 전달함수로 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y(S) &= \frac{G_{PID} \cdot G}{1 + G_{PID} \cdot G} (R(S) + N(S)) \\
 &= \frac{(K_P + \frac{K_i}{S} + K_D \cdot S) \cdot G}{1 + (K_P + \frac{K_i}{S} + K_D \cdot S) \cdot G} \cdot R(S) \\
 &\quad + \frac{(K_P + \frac{K_i}{S}) \cdot G}{1 + (K_P + \frac{K_i}{S} + K_D \cdot S) \cdot G} \cdot N(S) \\
 &\quad + \frac{(K_D \cdot S) \cdot G}{1 + (K_P + \frac{K_i}{S} + K_D \cdot S) \cdot G} \cdot N(S) \quad (29)
 \end{aligned}$$

위 식에서 보는 바와 같이 연동 구동 명령 상에 잡음이 존재 시 PID 제어기의 D항에 의해 잡음성분이 증폭되게 되어 구동계통에 소음이 발생되거나 이로 인한 기계적 마모 발생 및 화기 체계의 운용 자체를 불안하게 할 가능성이 높다. 즉 이와 같은 위치 구동 방식에 있어 연동 잡음을 줄이기 위한 방안으로 구동 위치 명령에 잡음을 제거하기 위한 저주파 필터를 고려할 수도 있지만 저주파 필터의 특성상 필터링 시 시간지연을 반드시 유발하게 되므로 이것은 구동 명령 자체의 시간 지연이 발생되어 화기 체계 전체의 성능을 희생하게 되어 바람직하지 않다.

본 연구는 종전의 위치 연동 방식이 가지는 위에 열거한 문제점의 분석결과로부터 속도정보를 추가한 연동 방식을 제안한다. 대부분의 현대식 사격통제장치는 내부에 표적상태 추정기를 가지고 있으며 추정 위치는 물론 추정 속도 정보를 가지고 있다. 따라서 연동 방식으로 위치 방식과 더불어 속도 방식을 아울러 취하면 시간지연에 의한 성능의 희생이 없이도 대형구조물 구동계통의 잡음 증폭을 방지할 수가 있어 잡음특성을 개선할 수가 있다. 종전 연동 방식과 개선된 연동 방식의 주파수 특성을 비교하여 그림 13에 나타내었다. 이로부터 알 수 있듯이 대략 2Hz를 구동계통의 주파수 대역으로 볼 때 5Hz 잡음은 1/2.5,

10Hz 명령에 대해 1/5로 제거능력이 개선됨을 알 수가 있다.



(그림 13) 연동방식 개선에 따른 주파수 특성비교

한편 대형구조물 구동계통은 화포의 특성을 고려하여 사격통제장치와 연동 시는 연동 방식에 의한 잡음제거 능력에 더욱 차이가 벌어짐을 확인 할 수 있는 데, 예를 들면 표적의 사거리가 주어진 경우 표적까지 탄자의 비행시간을  $T_f$ 라 하면 속도정보를 추가한 경우에는 그렇지 않은 경우와 비교하여 약  $\frac{2}{T_f * f}$  ( $f \geq 2\text{Hz}$ ,  $T_f \geq 1.$ ) 만큼의 잡음 개선 효과가 있음을 확인할 수가 있으며,  $T_f$ 가 5초인 경우 3Hz 잡음인 경우엔 1/7.5, 5Hz 인 경우엔 1/12.5로 잡음제거 능력이 개선됨을 알 수가 있다.

### 3. 결 론

본 연구를 통하여 대형 구조물 구동계통에 대한 실시간 모델을 유도하였으며, 실 체계 시험을 통해 매개변수를 식별함으로써 실 체계와 동등한 실시간

특성을 가지는 모델이 될 수 있도록 하였다. 유도된 모델을 사격통제장치와 연동 시 연동특성의 분석에 활용하였으며, 기존의 연동방식으로 널리 쓰이는 위치방식에 사격통제장치가 지닌 속도정보만을 추가하 기만 해도 체계 측면에서는 성능의 희생이 없이 대 폭적으로 향상된 잡음 개선 특성을 얻을 수가 있음 을 보였다.

향후 연구 사항으로는 모터의 기어를 통한 1차, 2 차 동력전달 시 Backlash 영향과 스프링 요소 추가 및 마찰계수 등에 대한 보다 정밀한 모델 및 매개변수 식별 방안 등이 마련된다면 더욱 정교한 모델이 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 김재훈 외3, “현대식 대공화기의 포/포탑구동장치 체계 연동특성 분석”, ‘98군사과학기술학회학술대회 논문집’, pp. 69-74, 1998
2. 김재훈 외3, “대형구조물 구동계통 실시간 시뮬레이션 모델”, ‘98 정밀공학회 학술대회 논문집’, pp. 326-329, 1998
3. 김재훈 외1, “비호체계 연동기술분석”, GWSD-519-990479, 국방과학연구소, 1999. 6
4. 최영호 외3, “터렛구동 서보체계 연구2권”, EDAP-419-84121, 국방과학연구소, 1984
5. 대우중공업, “GTDS 실용시제 개발보고서”, 1988
6. 김장일 외3, “대공포 효과분석모델 소개”, EDAP-419-83058, 국방과학연구소, 1983
7. K.J. Astrom, “Simnon™ User’s Guide”, SSPA systems, ver3.0, 1990
8. “Matlab™ User’s Guide”, Mathworks, ver5.2, 1998
9. Rolf Johansson, “System Modeling and Identification”, Prentice-Hall, Chapter 5, 1993

10. G.C Goodwin & R.L.Payne, "Dynamic System Identification:Experiment Design and Data Analysis", Chapter 2, AP, 1977
11. 박성현, "회귀분석", 6장, 대영사, 1981
12. R.C. Gonzalez, R.E Woods, "Digital Image Processing", pp191-195, Addison-wesley, 1993