

◎ 論 文

# 부유식 구조물의 동위치제어에 관한 연구( I )

— 서보계 구성법에 의한 수치시뮬레이션 —

김성근\* · 유휘룡\*\* · 김상봉\*\*\*

(1993년 8월 31일 접수)

## A Study for Dynamic Positioning Control of Floating Platform( I ) — Numerical Simulation by a Servo System Design Method —

Kim Seoung-Gun, Yoo Hui-Ryong, Kim Sang-Bong

### Abstract

A design method of DPS control algorithm for adopting rotatable thruster is introduced by applying a servo system design method and the control algorithm is evaluated on the basis of the results of computer simulations performed for a semi-submersible 2-lower hull 8-column type platform. It is observed from the simulation results that position error due to the irregular drifting forces becomes zero after very short regulating time and dynamic positioning system is robust in spite of random disturbance.

### 1. 서 론

위치제어 시스템은 특수선박(탐사선, 조사선, 구조선 등) 및 해양구조물(해상작업선, 석유시추선 등)에서 사용되고 있으며 앞으로 많은 수요가 예상되고 있다. 이와 같은 위치제어시스템은 조선, 해양공학뿐만 아니라 여러 학문 분야인 기계, 전자 및 제어계측분야의 기술이 결합된 고부가가치의 기술로서 이루어지고 있음으로 인해, 이러한 제어시스템은 선진국이 거의 독점하고 있다.<sup>1), 2), 3)</sup>

구조물의 정점유지를 위한 제어법으로 최적레귤레이터 이론에 의한 설계법, 칼만필터를 이용한 설계법, 적응제어이론에 의한 설계법등<sup>4), 5), 8), 9)</sup>이 있으나, 이들 설계법은 조류나 바람 등의 외란에 대해 강인한 제어계 설계법이라고 할 수 없으므로, 보다 강인한 제어계의 설계법이 요구된다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 강인한 서보계 제어계 설계법중의 하나인 문헌 <6>의 방법을 다변수계에 확장하여 적용할 수 있도록 제안하여 보다 실용적인 DPS의 제어계설계법이 되게 함에 그 목적이 있다.

\* 부산수산대학교 기계공학과 박사후과정

\*\* 부산수산대학교 대학원 석사과정

\*\*\* 부산수산대학교 기계공학과 부교수

실제 조선, 해양업계에서도 그 기술적인 개발에 대한 선호도는 높다고 할 수 있으나, 아직 그 기초분야의 기술적 응용력 부족과 기계, 전자 및 제어계측분야의 결집에 필요한 기술력 부족으로 인해 현대제어이론을 적용한 기술개발이 늦어지고 있다고 할 수 있다. 한편 국내에서의 연구는 수치시뮬레이션 정도에 머무르고 있다<sup>6),7)</sup>

본 논문에서는 부유식 구조물의 동위치 제어 시스템의 설계를 위해, 비선형 동적모델을 평형점 근방에서 선형근사화하여, 선형제어이론인 다변수 디지털 서보계설계법을 적용할 수 있는 설계이론을 보인 후, 본 설계법의 유효성을 검증하기 위해 수치적인 모델에 대해 본 설계 알고리즘을 적용하여 DPS 위치 제어계를 설계하여 수치시뮬레이션을 수행하였다. 시스템에 대한 수치시뮬레이션에서는 초기위치에 설정된 위치로의 명령에 대한 수렴 정도 및 수렴시간을 추정하였으며, 설정된 위치에서 일정외란을 일정시간 동안 가했을 경우 수렴정도 및 수렴시간을 추정하였다.

## 2. 부유식 Platform의 개요

### 2.1 모델의 특성

수치시뮬레이션에 적용할 모델로서는 반잠수식 작업선을 택하였으며 그 주요촌법은 Table 1에 나타난 것과 같다.<sup>5)</sup> 해상환경조건은 Table 2에 보인것과 같다.

또한, 4개의 추진기에 대한 기본촌법은 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Basic Dimension of Semisubmersible Platform

Description	Dimension	Unit
Length	113	m
Breath	69.6	m
Height	36	m
Draft	22	m
Displacement	24,295	ton

Table 2. Environment and Allowable Condition of DP System in Case of Operating Condition

Environment		Allowable Range
Wind Speed	20m/sec	Surge & Sway Direction ( $ \Delta x ,  \Delta y  \leq 0.05 * D$ ) (D : Water Depth)
Wave Height	20m	
Wave Period	10sec	Yaw Direction( $ \Delta \phi  \leq 2deg$ )
Current Speed	2kt	Heave Direction( $ \Delta z  \leq 2m$ )

Table 3. Basic Dimension for Thruster of Platform

Description	Dimension	Unit	Remark
Diameter	3.3	m	
RPM	177	rpm	
Rotating Angle	360	deg	as Cal.
Power	3500	PS	MAX

### 2.2 제어시스템의 개요

DPS는 위치 검출장치, 제어연산장치 및 추력발생장치로 구성되며, 그 구성도는 Fig. 1과 같다.

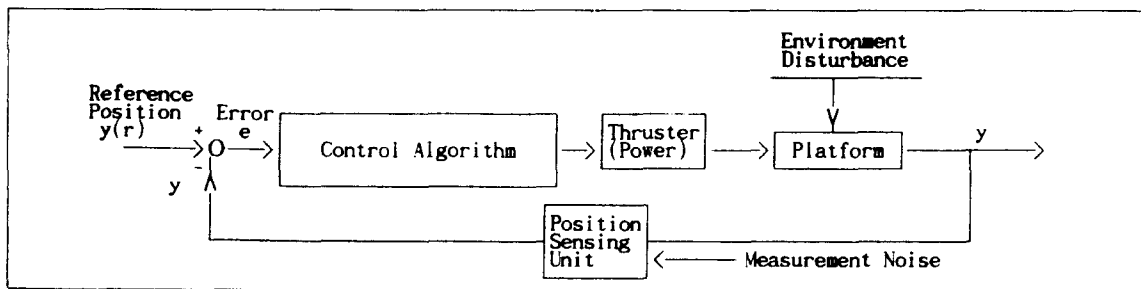


Fig. 1 Control Concept of Dynamic Positioning System

본 논문에서 적용하는 모델에 대한 제어입력치 및 제어대상의 상태변수는 다음과 같다.

- 제어입력치

$T_{B1}, T_{B2}$  : 선수 좌우 추진기의 추력크기

$T_{S1}, T_{S2}$  : 선미 좌우 추진기의 추력크기

$\theta_{B1}, \theta_{B2}$  : 선수 좌우 추진기의 선회각

$\theta_{S1}, \theta_{S2}$  : 선미 좌우 추진기의 선회각

- 제어대상의 상태변수

$x_o, y_o$  : Surge 및 Sway방향 위치

$\phi$  : Platform의 방위각(Yaw 방향)

$u_a, v_a$  : Surge 및 Sway 방향속도성분

$d\theta/dt$  : Yaw 방향 각속도

### 3. 부유식 Platform의 운동방정식 및 상태방정식

#### 3.1 운동방정식

반잠수식 Platform을 예로 할 경우 Platform의 운동방정식은 Fig. 2에 보인 좌표계로부터 다음 식으로 주어진다.

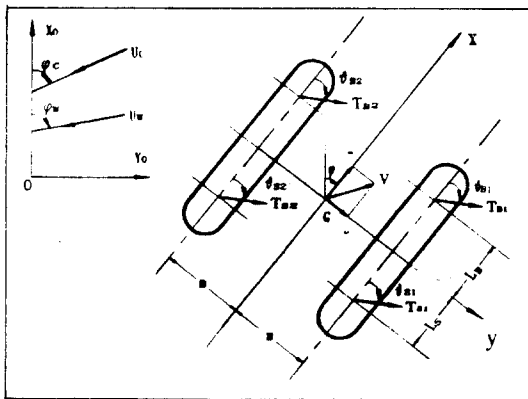


Fig. 2 Coordinate Axes of a Platform Motion

$$(M+m_x) \frac{du}{dt} = (M+m_x) \cdot vr + X_1 + X_2 + X_m + X_w + T_{B1} \cdot \cos\theta_{B1} + T_{B2} \cdot \cos\theta_{B2} + T_{S1} \cdot \cos\theta_{S1} + T_{S2} \cdot \cos\theta_{S2} \dots (3.1)$$

$$(M+m_y) \frac{dv}{dt} = -(M+m_x) \cdot ur + Y_1 + Y_2 + Y_m + Y_w + T_{B1} \cdot \sin\theta_{B1} + T_{B2} \cdot \sin\theta_{B2} + T_{S1} \cdot \sin\theta_{S1} + T_{S2} \cdot \sin\theta_{S2} \dots (3.2)$$

$$(I+J_z) \frac{dr}{dt} = (m_x - m_y) \cdot uv + N_1 + N_2 + N_m + N_w + L_B(T_{B1} \cdot \sin\theta_{B1} + T_{B2} \cdot \sin\theta_{B2}) - L_S(T_{S1} \cdot \sin\theta_{S1} + T_{S2} \cdot \sin\theta_{S2}) + B(-T_{B1} \cdot \cos\theta_{B1} + T_{B2} \cdot \cos\theta_{B2}) + B(-T_{S1} \cdot \cos\theta_{S1} + T_{S2} \cdot \cos\theta_{S2}) \dots (3.3)$$

$$u_a = \frac{dx_o}{dt} = u \cdot \cos\phi - v \cdot \sin\phi \dots (3.4)$$

$$v_a = \frac{dy_o}{dt} = u \cdot \sin\phi + v \cdot \cos\phi \dots (3.5)$$

$$r_a = \frac{d\phi}{dt} \dots (3.6)$$

여기서

- $O(x_o, y_o, z_o)$  : 공간고정좌표계
- $M$  : 플랫폼의 질량
- $G(x, y, z)$  : 플랫폼의 고정좌표계
- $m_x, m_y$  : 플랫폼의 x, y축 방향 부가질량
- $I$  : 플랫폼의 z축 주위 관성모멘트
- $J_z$  : 플랫폼의 z축 주위 부가관성모멘트
- $u, v$  : x, y축 주위의 속도성분
- $\phi$  : 플랫폼의 방위각
- $X_i, Y_i, N_i (i=1,2)$  : 플랫폼의 x, y축 방향의 유체력 및 z축 주위의 유체모멘트 (1: 파랑강제력 및 모멘트, 2: 조류력 및 모멘트)
- $X_m, Y_m, N_m$  : 플랫폼의 x, y축 방향의 계류력 및 z축 주위의 계류모멘트
- $X_w, Y_w, N_w$  : 플랫폼의 x, y축 방향의 풍압력 및 z축 주위의 풍압모멘트
- $T_{B1}, T_{S1} (i=1,2)$  : 선수 및 선미 추진기의 추력크기
- $\theta_{B1}, \theta_{S1} (i=1,2)$  : 선수 및 선미의 선회각

3.2 계수의 결정

운동방정식에서의 힘과 모멘트에 관련된 계수들은 다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>5)</sup>

$$X_1 = -F_o S(\beta) \cos\{\alpha(\beta)\} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$Y_1 = -F_o S(\beta) \sin\{\alpha(\beta)\} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$N_1 = -N(\beta) \frac{1}{2} \rho V_s^2 L_{pp}^2 d \dots\dots\dots (3.9)$$

여기서

- $\rho$  : 해수밀도
- $F_o$  : 유체력
- $S(\beta)$  : 유체력 보정계수
- $N(\beta)$  : 유체력 모멘트 계수
- $\beta$  : 유체력 유입각
- $V_s$  : 플랫폼에 대한 상대 파속
- $d$  : 홀수
- $L_{pp}$  : Platform의 길이

조류와 계류에 대한 힘 및 모멘트  $X_2, Y_2, N_2, X_m, Y_m, N_m$  등은 DPS의 외란으로 가정한다. Surge, Sway 방향 풍력 그리고 Yaw 방향 풍모멘트는 다음과 같다.

$$X_w \simeq Y_w = G(\beta_w) V_w^2 \cos(\beta_w)$$

$$N_w \simeq 0$$

여기서

- $G$  : 풍암저항보정계수
- $\beta_w$  : 풍유입각
- $V_w$  : 플랫폼에 대한 상대 풍속

수진식 추진기에 대한 계수들을 살펴보면 다음과 같다.

선수 추진기는 다음과 같이 나타내어지며,

$$T_{Bi} = \rho n^2 D^4 K_{TB} (J_{Bi}, \psi_{Bi}) \dots\dots\dots (3.10)$$

$$P_{Bi} = \rho n^3 D^5 K_{\theta} (\psi_{Bi})$$

$$K_{TB} (J_{Bi}, \psi_{Bi}) = K_T (\psi_{Bi}) + (\alpha_T \psi_{Bi} + \alpha_c) J_{Bi}$$

$$J_{Bi} = (1-w) \{ U_s \cos \theta_{Bi} + v_s \sin \theta_{Bi} \mp \sqrt{L_B^2 + B^2} \times r \cos(\theta_{Bi} \pm \theta_{Bo}) \} / nD$$

선미 추진기는 다음과 같이 나타내어진다.

$$T_{Si} = \rho n^2 D^4 K_{TS} (J_{Si}, \psi_{Si}) \dots\dots\dots (3.11)$$

$$P_{Si} = \rho n^3 D^5 K_{\theta} (\psi_{Si})$$

$$J_{Si} = (1-w) \{ -U_s \cos \theta_{Si} - v_s \sin \theta_{Si} \pm \sqrt{L_S^2 + B^2} \times r \cos(\theta_{Si} \mp \theta_{So}) \} / nD$$

여기서

- $\psi$  : 익각
- $\theta_{So} : \tan^{-1}(L_B/B), \theta_{Bo} : \tan^{-1}(L_S/B)$
- $n$  : 회전수,  $D$  : 추진기 직경
- $K_T$  : 추력계수,  $K_Q$  : 토크 계수
- $J$  : 전진계수,  $\alpha_T, \alpha_C$  : 추력보정계수
- $w$  : 반류계수

3.3 상태방정식

3.1절의 운동방정식 및 계수들로 부터 다음과 같이 상태방정식을 구하였다.

$t=t_0$ 에서의 상태를 평형상태라고 가정했을 경우, 각 파라미터들은 다음과 같은 값들을 갖는다고 가정할 수 있다.

$$\phi = \phi_0 \simeq 0$$

$$u(t_0) = u_0 \quad v(t_0) = v_0 \quad r(t_0) = \frac{d\phi}{dt} = r_0$$

$$\theta_{B1} = \theta_{B10} \simeq 0, \theta_{B2} = \theta_{B20} \simeq 0,$$

$$\theta_{S1} = \theta_{S10} \simeq 0, \theta_{S2} = \theta_{S20} \simeq 0$$

식(3.4), (3.5)로 부터  $u$ 와  $v$ 를  $u_a, v_a, \phi$ 함수로 표시할 수 있으며, 구해진 식들은 평형점 근방에서 선형 근사화 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx_0}{dt} = u_a + (v_0 - u_0 \sin \phi_0 - v_0 \cos \phi_0) \cdot \phi \dots\dots (3.12)$$

$$\frac{dy_0}{dt} = v_a + (-u_0 + u_0 \cos \phi_0 - v_0 \sin \phi_0) \cdot \phi$$

$$\dots\dots\dots (3.13)$$

식(3.1), (3.2), (3.3)에 대하여 평형점 근방에서 선형화시킨 후 정리하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{M+m_x} \{ (M+m_y) r_0 v + (M+m_y) v_0 d\phi/dt + T_{B1} + T_{B2} + T_{S1} + T_{S2} - \theta_{B0} T_{B1}(0) \theta_{B1} - \theta_{B20} T_{B2}(0) \theta_{B2} - \theta_{S10} T_{S1}(0) \theta_{S1} - \theta_{S20} T_{S2}(0) \theta_{S2} \}$$

$$\dots\dots\dots (3.14)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M+m_x} \{ -(M+m_x)r_0u - (M+m_x)u_0d\phi/dt + T_{B1}(0) \cdot \theta_{B1} + T_{B2}(0) \cdot \theta_{B2} + T_{S1}(0) \cdot \theta_{S1} + T_{S2}(0) \cdot \theta_{S2} + \theta_{B10} \cdot T_{B1} + \theta_{B20} \cdot T_{B2} + \theta_{S10} \cdot T_{S1} + \theta_{S20} \cdot T_{S2} \} \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{I+I_z} \{ (m_x-m_y)u_0v + (m_x-m_y)v_0u + (L_B+B\theta_{B10})T_{B1}(0)\theta_{B1} + (L_B-B\theta_{B20})T_{B2}(0)\theta_{B2} + (-L_S+B\theta_{S10})T_{S1}(0)\theta_{S1} + (-L_S-B\theta_{S20})T_{S2}(0)\theta_{S2} + (L_B\theta_{B10}-B)T_{B1} + (L_B\theta_{B20}-B)T_{B2} + (-L_S\theta_{S10}-B)T_{S1} + (L_S\theta_{S20}-B)T_{S2} \} \dots\dots\dots (3.16)$$

식(3.4), (3.5)에 미분을 취하면 아래의 식을 얻을 수 있으며,

$$\frac{du_a}{dt} = \frac{du}{dt} \cos\phi - \frac{dv}{dt} \sin\phi - u r \sin\phi - v r \cos\phi \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{du}{dt} \sin\phi + \frac{dv}{dt} \cos\phi + u r \cos\phi - v r \sin\phi \dots\dots\dots (3.18)$$

식(3.17) 및 (3.18)을 평행점 부근에서 선형화한 후 정리하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{du_a}{dt} = \cos\phi_0 \frac{du}{dt} - \sin\phi_0 \frac{dv}{dt} - r_0 \sin\phi_0 u - r_0 \cos\phi_0 v + (-u_0 \sin\phi_0 - v_0 \cos\phi_0) \frac{d\phi}{dt} + (-u_0 r_0 \cos\phi_0 + v_0 r_0 \sin\phi_0) \phi \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \sin\phi_0 \frac{du}{dt} + \cos\phi_0 \frac{dv}{dt} + r_0 \cos\phi_0 u - r_0 \sin\phi_0 v + (u_0 \cos\phi_0 - v_0 \sin\phi_0) \frac{d\phi}{dt} + (-u_0 r_0 \sin\phi_0 - v_0 r_0 \cos\phi_0) \phi \dots\dots\dots (3.20)$$

식(3.19) 및 식(3.20)에 식(3.14), (3.15) 및 u, v에 대한 식을 대입하여 새로운 관계를 얻을 수 있으며, 최종적으로 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$dx(t)/dt = Ax(t) + Bu(t) \dots\dots\dots (3.21)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

여기서

$$x^T(t) = [x_0, y_0, \phi, u_a, v_a, r]$$

$$u^T(t) = [\theta_{B1}, \theta_{B2}, \theta_{S1}, \theta_{S2}, T_{B1}, T_{B2}, T_{S1}, T_{S2}]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{13} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{13} = v_0 - u_0 \sin\phi_0 - v_0 \cos\phi_0$$

$$a_{23} = -u_0 + u_0 \cos\phi_0 - v_0 \sin\phi_0$$

$$a_{43} = \left( \frac{\cos\phi_0(u_0 \cos\phi_0 + v_0 \sin\phi_0)}{M+m_x} + \frac{\sin\phi_0(-u_0 \sin\phi_0 + v_0 \cos\phi_0)}{M+m_x} \right) \cdot r_0(m_x - m_y) + (-u_0 r_0 \sin\phi_0 - v_0 r_0 \cos\phi_0)$$

$$a_{44} = \left( \frac{1}{M+m_x} + \frac{1}{M+m_y} \right) \cdot (m_x - m_y) \cdot r_0 \sin\phi_0 \cos\phi_0$$

$$a_{45} = \left( -\frac{\cos^2\phi_0}{M+m_x} + \frac{\sin^2\phi_0}{M+m_y} \right) \cdot (m_x - m_y) r_0$$

$$a_{46} = \left( \frac{u_0 \sin\phi_0}{M+m_y} - \frac{v_0 \cos\phi_0}{M+m_x} \right) \cdot (m_x - m_y)$$

$$a_{53} = \left( \frac{\sin\phi_0(-u_0 \cos\phi_0 - v_0 \sin\phi_0)}{M+m_x} + \frac{\cos\phi_0(-u_0 \cos\phi_0 + v_0 \sin\phi_0)}{M+m_y} \right) \cdot r_0(m_y - m_x) + (-u_0 r_0 \sin\phi_0 - v_0 r_0 \cos\phi_0)$$

$$a_{54} = \left( -\frac{\sin^2\phi_0}{M+m_x} + \frac{\cos^2\phi_0}{M+m_y} \right) \cdot r_0(m_y - m_x)$$

$$a_{55} = \left( \frac{1}{M+m_x} + \frac{1}{M+m_y} \right) \cdot (m_y - m_x) \cdot r_0 \sin\phi_0 \cos\phi_0$$

$$a_{56} = \left( \frac{u_0 \cos\phi_0}{M+m_y} + \frac{v_0 \sin\phi_0}{M+m_x} \right) \cdot (m_y - m_x)$$

$$a_{63} = \frac{m_x - m_y}{I+J_z} \cdot (-u_0^2 \cos\phi_0 + v_0^2 \cos\phi_0 - 2u_0 v_0 \sin\phi_0)$$

$$a_{64} = \frac{m_x - m_y}{I+J_z} \cdot (-u_0 \sin\phi_0 + v_0 \cos\phi_0)$$

$$a_{65} = \frac{m_x - m_y}{I+J_z} \cdot (u_0 \cos\phi_0 + v_0 \sin\phi_0)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} & b_{48} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} & b_{57} & b_{58} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} & b_{67} & b_{68} \end{bmatrix}$$

$$b_{41} = \left( -\frac{\cos\phi_0}{M+m_x} \theta_{B10} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \right) T_{B1}(0)$$

$$b_{42} = \left( -\frac{\cos\phi_0}{M+m_x} \theta_{B20} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \right) T_{B2}(0)$$

$$b_{43} = \left( -\frac{\cos\phi_0}{M+m_x} \theta_{S10} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \right) T_{S1}(0)$$

$$b_{44} = \left( -\frac{\cos\phi_0}{M+m_x} \theta_{S20} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \right) T_{S2}(0)$$

$$b_{45} = \left( \frac{\cos\phi_0}{M+m_x} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \theta_{B10} \right)$$

$$b_{46} = \left( \frac{\cos\phi_0}{M+m_x} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \theta_{B20} \right)$$

$$b_{47} = \left( \frac{\cos\phi_0}{M+m_x} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \theta_{S10} \right)$$

$$b_{48} = \left( \frac{\cos\phi_0}{M+m_x} - \frac{\sin\phi_0}{M+m_y} \theta_{S20} \right)$$

$$b_{51} = \left( -\frac{\sin\phi_0}{M+m_x} \theta_{B10} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \right) T_{B1}(0)$$

$$b_{52} = \left( -\frac{\sin\phi_0}{M+m_x} \theta_{B10} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \right) T_{B2}(0)$$

$$b_{53} = \left( -\frac{\sin\phi_0}{M+m_x} \theta_{B10} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \right) T_{S1}(0)$$

$$b_{54} = \left( -\frac{\sin\phi_0}{M+m_x} \theta_{B10} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \right) T_{S2}(0)$$

$$b_{55} = \left( \frac{\sin\phi_0}{M+m_x} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \theta_{B10} \right)$$

$$b_{56} = \left( \frac{\sin\phi_0}{M+m_x} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \theta_{B20} \right)$$

$$b_{57} = \left( \frac{\sin\phi_0}{M+m_x} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \theta_{S10} \right)$$

$$b_{58} = \left( \frac{\sin\phi_0}{M+m_x} + \frac{\cos\phi_0}{M+m_y} \theta_{S20} \right)$$

$$b_{61} = \frac{(L_B + B\theta_{B10})T_{B1}(0)}{I + J_z}$$

$$b_{62} = \frac{(L_B - B\theta_{B20})T_{B2}(0)}{I + J_z}$$

$$b_{63} = \frac{(-L_S + B\theta_{S10})T_{S1}(0)}{I + J_z}$$

$$b_{64} = \frac{(-L_S - B\theta_{S20})T_{S2}(0)}{I + J_z}$$

$$b_{65} = \frac{(L_B\theta_{B10} - B)}{I + J_z}$$

$$b_{66} = \frac{(L_B\theta_{B20} + B)}{I + J_z}$$

$$b_{67} = \frac{(-L_S\theta_{S10} - B)}{I + J_z}$$

$$b_{68} = \frac{(-L_S\theta_{S10} + B)}{I + J_z}$$

#### 4. 서보제어계의 설계

본 절에서는 DP시스템이 부하 변동이나 목표치 변경에 대해서 페루프시스템은 내부 안정하고, 주어진 목표치에 추종하는 디지털 서보계의 구성 방법을 입출력계에 대해 보인 문헌 [10], [11]의 방법을 다입출력계에 확장하여 정리하면 다음과 같다.

시스템은 3절에서 구한 파라미터로 구성되는 연속 시스템(3.21)을 샘플링 시간 T로 이산화 한

$$x(k+1) = \phi x(k) + \Gamma u(k) + \delta(k), \quad x \in R^n, \quad u \in R^m, \quad y(k) = Cx(k), \quad y \in R^l \dots\dots\dots (4.1)$$

과 같은 이산 시스템을 생각한다. 단,  $\delta(k)$ 는 다음과 같은 차분 방정식으로 나타내어지는 외란 벡터이다.

$$p_d(q^{-1}) \delta(k) = 0 \dots\dots\dots (4.2)$$

$$P_d(q^{-1}) = \text{diag} [P_1^d(q^{-1}), \dots, P_n^d(q^{-1})]$$

여기서,  $q^{-1}$ 는  $q^{-1}\delta(k) = \delta(k-1)$ 를 의미하는 shift operator이며,  $p_d(q^{-1})$ 는  $q^{-1}$ 에 대한 다항식이다. 또한 다음과 같은 차분 방정식 형태로 주어지는 목표치 입력  $y_r(k)$ :

$$p_r(q^{-1}) y_r(k) = 0 \dots\dots\dots (4.3)$$

$$P_d(q^{-1}) = \text{diag} [P_1'(q^{-1}), \dots, P_\ell'(q^{-1})]$$

에 대해 그 오차 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$e(k) = y(k) - y_r(k) \dots\dots\dots (4.4)$$

단,  $e(k) = [e_1(k) \dots\dots e_\ell(k)]^T$

$$y(k) = [y_1(k) \dots\dots y_\ell(k)]^T$$

$$y_r(k) = [y_{1r}(k) \dots\dots y_{\ell r}(k)]^T \dots\dots\dots (4.5)$$

식 (4.4)의 오차 함수는  $k$ 가  $\infty$ 로 갈때 0으로 되는 문제를 생각하기 위해, 먼저 식 (4.2)와 (4.3)에 대해 다음과 같은 최소공배 다항식을 생각한다.

$$P^*(q^{-1}) = \ell c.m [P_1^d(q^{-1}), P_2^d(q^{-1}), \dots\dots,$$

$$P_n^d(q^{-1}), p_1'(q^{-1}) \dots\dots, p_\ell'(q^{-1})]$$

$$= a_s q^{-s} + a_{s-1} q^{-s+1} + \dots\dots + a_1 q^{-1} + a_0$$

$$\dots\dots\dots (4.6)$$

식 (4.6)을 식 (4.4)에 작용 시키면

$$P^*(q^{-1})e(k) = C P^*(q^{-1})x(k) \dots\dots\dots (4.7)$$

를 얻을 수 있다. 식 (4.7)을 상태 방정식으로 표현하면

$$z(k+1) = N_c z(k) + M_c P^*(q^{-1}) x(k)$$

$$\dots\dots\dots (4.8)$$

단,

$$z(k) = \begin{bmatrix} e(k-s) \\ \vdots \\ e(k-1) \end{bmatrix}$$

$$N_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots\dots\dots 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots\dots\dots 0 \\ & & & \ddots \\ & & & & \ddots \\ -\alpha_s & -\alpha_{s-1} & \dots & -\alpha_2 & -\alpha_1 \end{bmatrix} \dots\dots (4.9)$$

$\alpha_i = a_i/a_0,$   
 $i=1,2, \dots\dots, s$

$$M = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ C \end{bmatrix}$$

로 된다. 식 (4.6)을 식 (4.1)에 작용시켜 식 (4.2)의 관계를 이용하면, 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$p^*(q^{-1}) x(k+1) = \phi p^*(q^{-1}) x(k)$$

$$+ \Gamma p^*(q^{-1}) u(k) \dots\dots\dots (4.10)$$

최소공배 다항식을 작용시켜 얻은 식 (4.9)와 식 (4.10)으로 확대계를 구성하면 다음과 같다.

$$x_c(k+1) = \phi_c x_c(k) + \Gamma_c v(k) \dots\dots\dots (4.11)$$

단,

$$x_c(k) = \begin{bmatrix} p^*(q^{-1}) x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}, v(k) = p^*(q^{-1}) u(k)$$

$$\phi_c = \begin{bmatrix} \phi & 0 \\ M_c & N_c \end{bmatrix}, \Gamma_c = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}$$

확대계 (4.11)의 제어치  $v(k)$ 는 다음과 같이 주어진다 하자.

$$v(k) = F x_c(k) \dots\dots\dots (4.12)$$

서보보상기 변수를

$$\zeta(k) = p^*(q^{-1})^{-1} z(k) \dots\dots\dots (4.13)$$

와 같이 정의하면, 서보계의 제어치는

$$u(k) = F [x^T \zeta^T]^T = [F_1 \ F_2] [x^T, \zeta^T]^T$$

$$\dots\dots\dots (4.14)$$

와 같이 주어진다. 식 (4.13)을 이용하여 식 (4.9)를 다시 정리하면 다음과 같은 서보보상기를 얻을 수 있다.

$$\zeta(k+1) = N_c \zeta(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix} e(k) \dots\dots (4.15)$$

또한, 본 서보계 설계 알고리즘으로 설계된 서보계의 구성을 블럭선도로 표시하면 Fig. 3.과 같다.

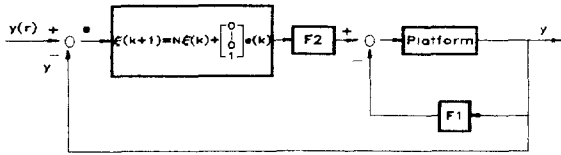


Fig. 3 Block Diagram of Dynamic Positioning System by Servo System Design Method

### 5. 수치 시뮬레이션

식 (3.21)에 아래의 상태조건을 적용하고 서보계 구성법에 의하여 시뮬레이션을 수행하였다. 즉,

$$dx(t)/dt = Ax(t) + Bu(t) \dots\dots\dots (5.1)$$

A, B 행렬은 아래의 평형점 근방조건으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

평형점 근방조건

$$\begin{matrix} r_0 = 0.01 \text{ deg/sec} & T_{B1}(0) = 30\text{kgf} & \theta_{B10} = 0.01\text{deg} \\ r_0 = 0.1 \text{ m/sec} & T_{B2}(0) = 30\text{kgf} & \theta_{B20} = 0.01\text{deg} \\ v_0 = 0.1 \text{ m/sec} & T_{S1}(0) = 30\text{kgf} & \theta_{S10} = 0.01\text{deg} \\ & T_{S2}(0) = 30\text{kgf} & \theta_{S20} = 0.01\text{deg} \end{matrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.00167 & 0 & 0.0067 & 0.067 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0006 & 0.004 & 0 & 0 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.002133 & -0.002133 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0001 & -0.0001 & -0.0001 & -0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 \\ 0.00062 & 0.00062 & 0.00062 & 0.00062 & 0.000002 & 0.000002 & 0.000002 & 0.000002 & 0.000002 & 0.000002 \\ 1515 & 1484 & -1484 & -1515 & -295 & 305 & -295 & 305 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4절의 서보계설계법을 적용하여 설계를 행한 결과는 다음과 같다.

### Step 1

식 (5.1)에 대해 T=0.1(sec)로 이산화한 시스템을 구한다. 이때

$$x(k+1) = \phi x(k) + \Gamma u(k) \dots\dots\dots (5.2)$$

단,  $\phi =$

$$\begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.0300 & 0.1000 & 0 & 0.0015 \\ 0 & 1.0000 & 0.0300 & 0 & 0.1000 & 0.0017 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0.1000 \\ 0 & 0 & -0.0002 & 1.0000 & 1.0007 & 0.0007 \\ 0 & 0 & -0.0006 & 0.0004 & 1.0000 & 0.0040 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0002 & -0.0002 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$\Gamma =$

$$\begin{bmatrix} 0.0774 & 0.0758 & -0.0758 & -0.0774 & -0.0015 & 0.0016 & -0.0015 & 0.0015 \\ 0.0858 & 0.0841 & -0.0841 & -0.0858 & -0.0017 & 0.0017 & -0.0017 & 0.0017 \\ 7.5749 & 7.4200 & -7.4200 & -7.5750 & -0.1475 & 0.1525 & -0.1525 & 0.1475 \\ 0.0503 & 0.0494 & -0.0494 & -0.0504 & -0.0010 & 0.0010 & -0.0010 & 0.0010 \\ 0.3015 & 0.2954 & -0.2953 & -0.3014 & -0.0059 & 0.0060 & -0.0060 & 0.0060 \\ 151.60 & 148.40 & -148.40 & -151.50 & -2.9500 & 3.0500 & -3.0500 & 2.9500 \end{bmatrix}$$

### Step 2

외란  $\delta(k)$ 와 목표치  $y_r(k)$ 는 각각 Step형태라고 가정했을 경우, 식 (4.2)와 (4.3)의 다항식을 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{matrix} P_i^d(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \\ P_j^r(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \end{matrix}$$

### Step 3

식 (4.8)을 구성한다.

$$z(k+1) = N_e z(k) + M_e P^*(q^{-1}) x(k)$$

단,  $N_e = \text{diag}[-1 \ -1 \ -1]$

$$M_e(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### Step 4

확대계에 관한 식 (4.11)를 구성한다.

$$x_c(k+1) = \phi_c x_c(k) + \Gamma_c v(k)$$

단,

$$\phi_c = \begin{bmatrix} \phi & 0 \\ M_e & N_e \end{bmatrix}, \quad \Gamma_c = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}$$



Step 5

식 (4.12)의  $v(k)$ 를 구한다. 이때  $v(k)$ 는 문헌 [12]에서 보인 지정한 디스크 내의 극배치법을 이용하여 구하였다. 그리고, 디스크는 단위원내에 중심 0.1, 반경 0.5인 원으로 하였다.

$$v(k) = Fx_c(k)$$

이때 제어칙 식 (4.14)는 다음과 같이 주어진다.

$$u(k) = [F_1, F_2] [x^T, \zeta^T]^T$$

F1 =					
-243.29	371.82	-27.29	-199.36	654.60	0.04
-243.29	371.82	-27.29	-199.36	654.60	0.04
-243.51	371.91	-27.31	-199.51	654.68	0.03
-243.51	371.91	-27.31	-199.51	654.68	0.03
960.51	972.02	-54.12	2988.59	451.80	0.27
960.52	972.02	-54.12	2988.59	451.80	0.27
960.52	972.02	-54.12	2988.59	451.80	0.27
960.52	972.02	-54.12	2988.59	451.80	0.27
F2 =					
-7.30	7.00	-4.82			
-7.30	7.00	-4.82			
-7.31	7.00	-4.82			
-7.31	7.00	-4.82			
2.24	-1.40	-32.06			
2.24	-1.40	-32.06			
2.24	-1.40	-32.06			
2.24	-1.40	-32.06			

Step 6

식 (4.15)의 서보 보상기를 구한다.

$$\zeta(k+1) = N_c \zeta(k) + e(k)$$

단,  $N_c$ 는 Step 3의 내용과 동일하다.

한편, 시스템의 상태 조건은 다음과 같다.

시스템의 상태조건

M = 24,295ton	$L_B = 50m$
$m_x = 5,588ton$	$L_s = 50m$
$m_y = 24,295ton$	B = 30m
I = 728,850ton-m	$T_{max} = 3500ps$
$J_{zz} = 182,212.5ton-m$	

아래와 같이 조건 1,2에 대한 시뮬레이션으로부터 Fig. 4와 Fig. 5를 얻을 수 있었다.

시뮬레이션 조건 1

구조물의 정위치  $X=0.0m, Y=0.0m, \phi^0=0^0$

일때 아래와 같은 초기외란이 계속 가해질 경우,

$$\delta x = 0.8 + \text{Random}(0.2)$$

$$\delta y = 0.8 + \text{Random}(0.2)$$

Fig. 4는 시뮬레이션 조건 1에 대한 결과, 즉 정위치의 구조물을 1.0m/sec로 이동 시키는 힘에 상당하는 외란이 100초후부터 계속해서 X방향과 Y방향에 작용할 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 외란이 가해진 직후 X, Y방향으로 각각 2m정도의 초기오차와 18deg 정도의 방위각 편차를 보여주고 있으며 약 70초후 외란에도 불구하고 정확히 위치제어되고 있음을 알 수 있다. 특히, 회전각과 추력은 초기에 상당한 량을 필요로 하고 있음을 볼수 있으나, 정위치에 도달한 이후에는 비교적 작은 량의 회전각과 추력으로 바람직한 위치제어 결과를 보여주고 있다.

시뮬레이션 조건 2

시뮬레이션 조건 1에서 250초후 아래와 같은 충격외란이 작용할 경우,

$$\delta x = 0.3$$

시뮬레이션 1을 수행중 250초에서 돌풍과 같은 충격외란이 가해질 경우 바람직하게 위치가 제어되고 있음을 볼 수 있으며, 추진기의 회전각은 상당히 큰 량이 요구됨을 알 수 있다.

이상의 시뮬레이션으로부터 고정좌표 평면에서 허용오차의 한도(수심의 약 5%)내에 구조물이 존재하고 있으며(허용한도를 초과하는 외란의 량에 대한 Calibration은 수치시뮬레이션에서는 그다지 중요한 요소로 생각되지 않음.), 고주파수 성분에 대한 필터링 문제 역시 실험을 전제로 하는 본 논문에서는 중요한 성분으로 생각되지 않는다.

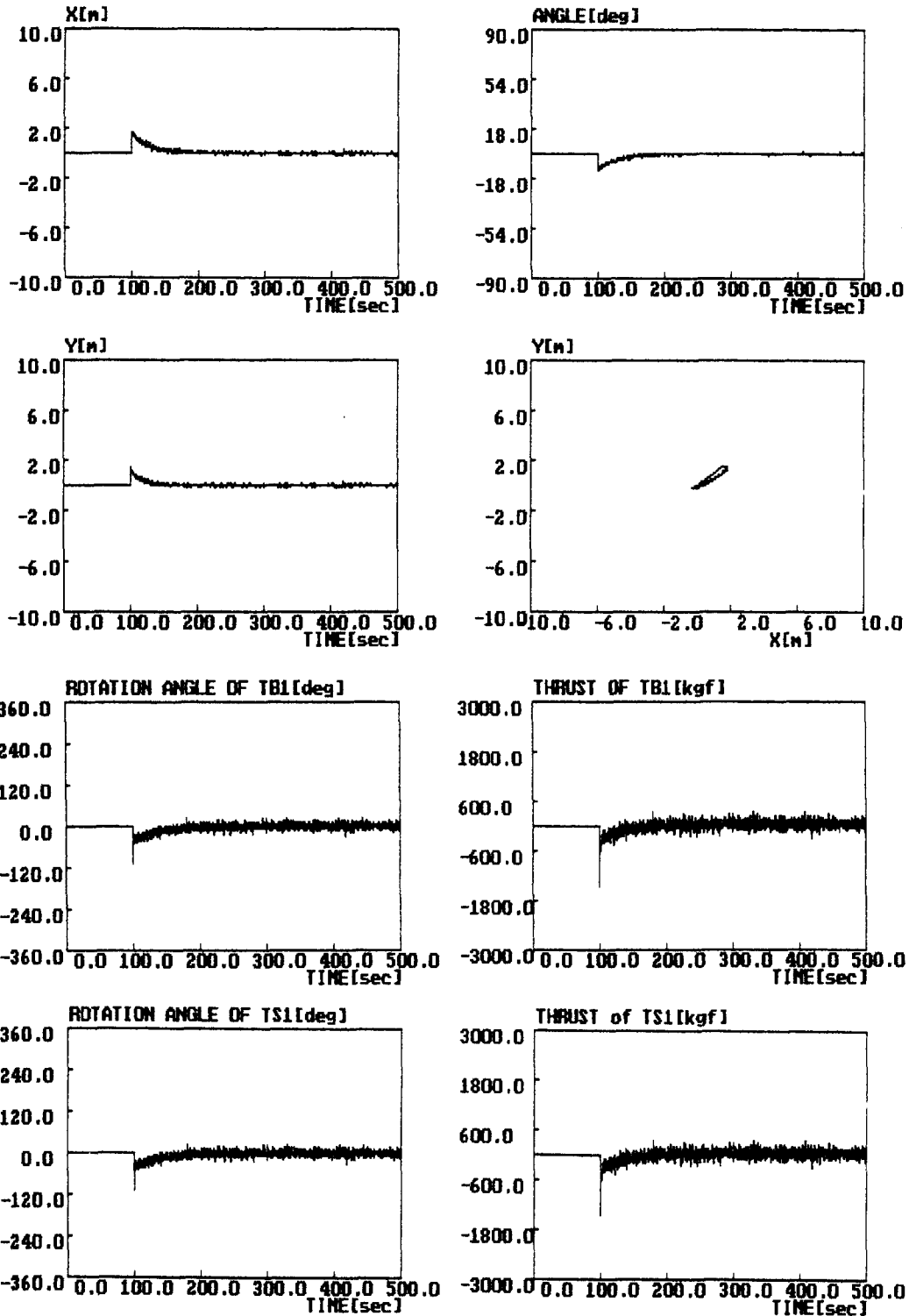


Fig. 4 Simulation Results by Condition 1

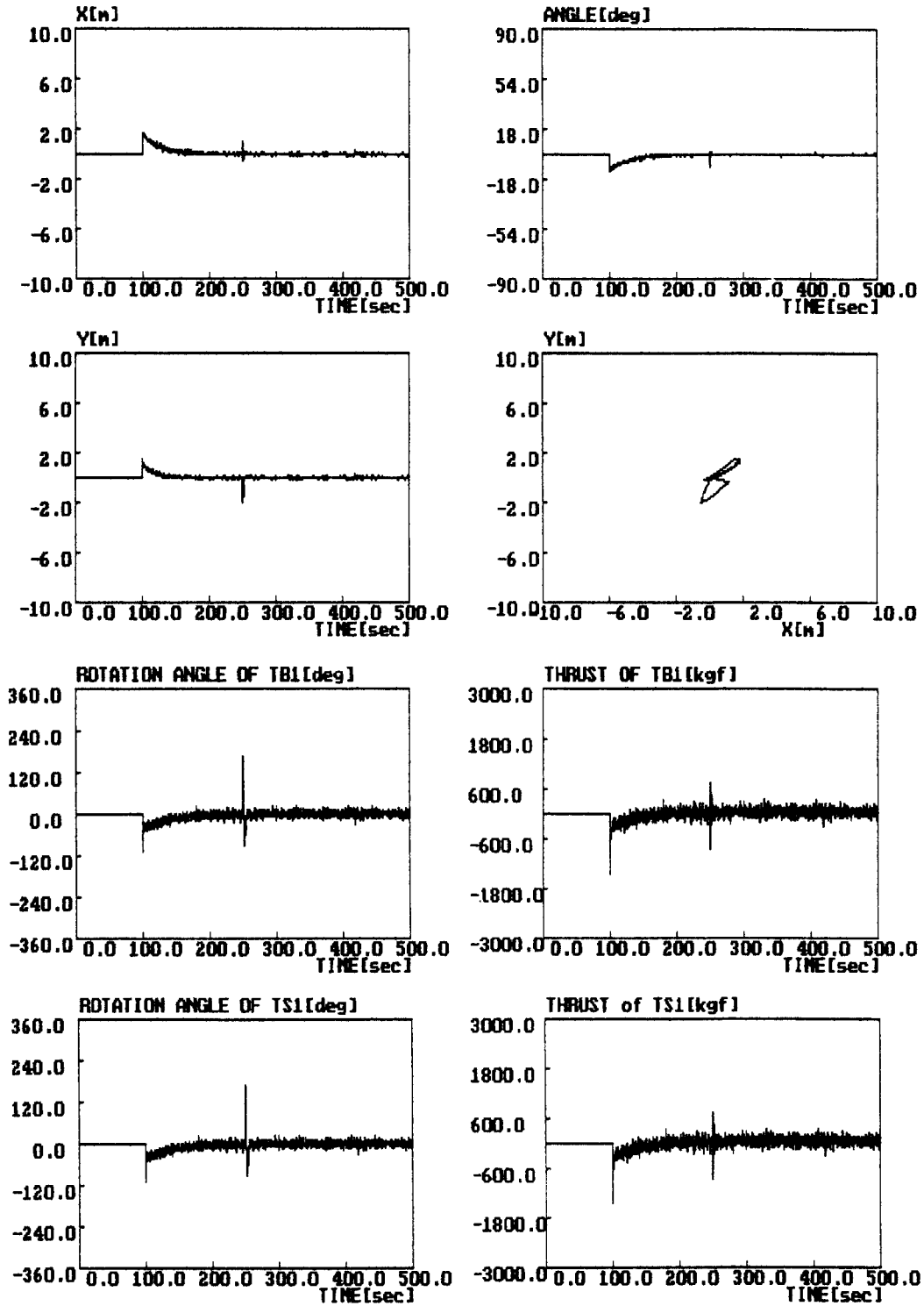


Fig. 5 Simulation Results by Condition 2

## 6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- DP시스템 구조물의 제어를 위해, 비선형 동적 모델을 평형점 근방에서 선형근사화한 후, 선형제어이론인 다변수 디지털 서보제설계법을 적용하여 위치제어계를 구성하는 방법을 제안하였다.
- 서보계 구성법이 불규칙한 자연환경에서 작업되어지는 해양구조물의 위치제어 방법으로서 타당함을 수치시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.
- 특히, 불규칙한 외란과 순간외력이 발생할 경우에도 수렴정도 및 수렴시간에 대하여 상당히 양호한 결과를 볼 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 1993년 산학협동재단의 학술연구비에 의해 수행된 연구결과와 일부임을 밝혀두며, 관계자 여러분께 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Masayuki Tamehiro, Noriyuki Akasaka, Hironao Kasai, Eiichi Miwa, "On Dynamic Positioning System Design in Particular Reference to the Positional Signal Filtering Technique", 일본조선학회논문집 제142호, 1983.
- (2) Steinar Saelid, Nils A. Jenssen, Jens G. Balchen, "Design and Analysis of a Dynamic Positioning System Based on Kalman Filtering and Optimal Control", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 28, No.3, 1983.
- (3) Patrick, Tze-kwai, Fung, Mike. Grumble, "Dynamic Ship Positioning control Using a Self-Tuning Kalman Filter", IEEE Transac-

tions on Automatic Control, Vol. 28, No. 3, 1983.

- (4) Masayuki Tamehiro, Hironao Kasai, "Experimental Study on Positioning Control for a Semi-submergible Lower-hull Type Offshore Platform", 일본조선학회논문집제136호, 1980년.
- (5) 迹坂則之, 岩崎 晃, 三和英一 "首振式スラストによる作業船のダイナミックポジショニング", 三菱重工技報, VOL. 18 No. 2, 1981.
- (6) S. G. Kim & R. S. Park, "The Method of Dynamic Position Control for Wave Energy Conversion Device" 10th Symposium on Ocean Engineering(Tokyo), 1991. 1
- (7) 이관목, 이상무, 홍사영, "칼만필터를 이용한 부유체운동의 최적 제어", 한국해양공학회지 제2권제3호, 37-45, 1988.
- (8) Landau, Y.D., Adaptive Control-The Model Reference Approach, Marcel Dekker, Inc, New York and Basel, 1979.
- (9) Harris, C. J. and Billings, S. A., Self-tuning and Adaptive Control: Theory and Applications, IEE Control Engineering Series 15, London and New York, 1979.
- (10) 김상봉, 김환성, 이동철, 하주식, "디지털서보계 설계법에 의한 유도진동기 시스템의 속도제어," 한국박용기관학회지 제16권4호 1992.
- (11) 김상봉, 박순실, "강인한 서보계 설계와 R/C헬리콥터트레이닝 시뮬레이터 제어에의 응용", 대한기계학회지 논문집 제15권2호 1991.
- (12) K. Furuta, S. B. Kim, "Pole Assignment in a Specified Disk", IEEE Trans. Auto. Control, Vol. 32, No.5, 1987.