

# 갠트리 크레인의 입력 보상형 분산제어

## Decentralized Control with Input Compensation Form for Gantry Crane Systems

김 환 성, 김 명 규, 유 삼 상  
(Hwan-Seong Kim, Myeong-Kyu Kim, and Sam-Sang You)

**Abstract** : In this paper, we deal with a decentralized control scheme with input compensation form for gantry crane systems. By considering the gantry crane's characteristics, the system is decentralized into two subsystems, the travelling and swaying subsystem and the hoisting subsystem. For decentralizing the system, a simple algorithm is proposed using the observability canonical form. The decentralized subsystems include unknown inputs that one coupled with other subsystems and actuator failures. These unknown input and actuator failures are estimated by using PI observation techniques. And those estimated values are used to construct an input compensation form. Finally, the proposed decentralized control scheme for the gantry crane systems is verified by crane simulation.

**Keywords** : decentralized control, input compensation, PI observer, gantry crane, fault detection

### I. 서론

시스템이 점차적으로 복잡하고 대규모화됨에 따라 보다 다양성, 유연성, 신뢰성의 요구가 증대되고 있으며, 이를 위해 종래의 중앙 집중형 시스템 대신 분산적인 분산제어 시스템이 주목받고 있다[1]-[3].

종래의 중앙 집중형 시스템은 주어진 조건에 대해서만 시스템을 설계하므로 높은 성능을 얻을 수 있으나, 환경 및 시스템 내부 변화로 인하여 시스템의 전체적인 성능이 저하되기 쉬우며, 시스템이 기동된 이후의 사양 및 운용에 대한 수정 또는 변경을 행하기 위해서는 시스템의 설계자는 기본 설계까지 검토할 필요가 있다[1].

이에 반하여 분산 시스템에서는 서브 시스템의 제어에 의존하므로 전체적인 성능은 다소 떨어지나, 시스템의 변화 및 시스템의 사양변경 등에 유연성을 지니고 있다. 또한, 분산제어 시스템의 유연성을 증대시키기 위해서는 각 서브 시스템간에 정보의 연계성이 중요하게 다루어진다. 그러나, 이러한 정보는 때로는 많은 비용을 요구하기도 하며, 획득 불가능한 정보가 포함되기도 한다[2]-[3].

본 연구에서는 갠트리 크레인을 대상으로 입력 보상형 분산제어를 행하고자 한다. 현재의 갠트리 크레인은 대부분 수동제어에 의해 운용되고 있으나, 고성능 제어 및 무인화가 원활히 이루어지기 위해서는 갠트리 크레인의 각 부분별로 모듈화되어 운용되어야 하며, 이를 위해서는 각 부분별로 분산제어가 행해져야 한다. 즉, 각 부분간의 정보의 연계관계에 관계없이 항상 일정제어가 이루어지도록 분산제어기가 설계되어야 한다.

이를 위해, 본 연구에서는 갠트리 크레인을 주행, 횡행,

주권상으로 부분화하여 각 부분별 분산제어계를 구성하도록 한다. 물리적으로는 주행, 횡행, 주권상의 각 요소간에 상호 연계관계를 가지고 있으나, 이러한 연계관계를 외부 요소로 취급하고 이러한 외부요소가 측정 가능한 경우(정보가 확실한 경우) 및 측정 불가능한 경우(고장으로 인하여 정보가 불분명한 경우)에 대해, 이들 외부요소에 대해서 제어입력을 보상할 수 있는 분산 제어계를 구성하도록 한다. 본 연구에서의 입력 보상형 분산 제어계는 PI 관측기법을 통하여 먼저 외부요소의 크기를 파악하며, 이러한 외부 요소가 입력에 미치는 영향이 보상되도록 제어계를 구성하는 방법이다.

본 논문의 주된 내용으로서 먼저, 제 2장에서는 갠트리 크레인을 두 개의 서브 시스템으로 구성하였으며, 서브 시스템 사이의 연계관계를 미지입력 요소로서 다루었다. 제 3장에서는 가관측 정준형에 의해 시스템을 분산화하는 간단한 구성방법을 제안하였다. 또한, 외부입력 요소로서 구동부 고장요소를 포함한 시스템간의 연계정보를 PI 관측기법을 도입하여 추정하였으며, 상태 편차를 이용한 입력 보상형 제어계 설계법을 제안하였다. 제 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 본 입력 보상형 분산제어법의 유효성을 확인하였다.

### II. 갠트리 크레인의 분산 시스템 구성

갠트리 크레인 동작은 주행, 횡행, 주권상으로 분류되며 주로 횡행과 주권상운동이 지배적이다. 먼저, Lagrange 운동방정식을 이용하여 갠트리 크레인의 운동방정식을 나타내면 다음과 같다[4].

$$(M_1 + M_T + M_L)\ddot{r} + M_L\dot{s}\sin\phi - M_Ll\dot{\phi}^2\sin\phi + 2M_Ll\dot{\phi} + M_Ll\ddot{\phi}\cos\phi = F_1 \quad (1a)$$

$$\frac{1}{2}M_L\dot{r}\sin\phi + 2(M_2 + \frac{1}{4}M_L)\dot{l} - \frac{1}{2}M_Ll\dot{\phi}^2 - \frac{1}{2}M_Lg\cos\phi = F_2 \quad (1b)$$

접수일자 : 2000. 8. 28., 수정완료 : 2001. 1. 13.

김환성, 김명규 : 한국해양대학교 물류시스템공학과(kimhs@hanara.kmaritime.ac.kr/mgkim@kccioc.or.kr)

유삼상 : 한국해양대학교 기계·정보공학부(ssyou@hanara.kmaritime.ac.kr)

$$l\ddot{\phi} + 2\dot{l}\dot{\phi} + g\sin\phi + \dot{r}\cos\phi = 0 \quad (1c)$$

여기서  $M_L$  은 컨테이너 질량,  $M_T$  는 트롤리 질량,  $M_1$  은 트롤리 모터 및 기어의 등가질량,  $M_2$  는 주권상 모터 및 기어의 등가질량,  $\phi$  는 컨테이너의 흔들림각,  $l$  은 로프 길이,  $r$  은 트롤리의 수평이동 거리,  $g$  는 중력가속도를 각각 나타낸다.

윗 식에서 컨테이너 흔들림 각도가 작다고 가정한다면,  $\cos\phi \approx 1, \sin\phi \approx \phi$  로 근사화 할 수 있으며, 또한  $\dot{\phi}^2 \approx 0$  으로 간주 할 수 있다. 따라서 윗 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(M_1 + M_T + M_L)\dot{r} + M_L\dot{l}\phi + M_L(l\ddot{\phi} + 2\dot{l}\dot{\phi}) = F_1 \quad (2a)$$

$$\frac{1}{2}M_L\phi\dot{r} + 2(M_2 + \frac{1}{4}M_L)\dot{l} - \frac{1}{2}M_Lg = F_2 \quad (2b)$$

$$l\ddot{\phi} + 2\dot{l}\dot{\phi} + g\phi + \dot{r} = 0 \quad (2c)$$

컨테이너 이동시 횡행과 흔들림각 사이에는 밀접한 관계가 있으며, 주권상 동작과 흔들림사이에는 약간의 간섭만이 존재함을 알 수 있다[4]-[5]. 따라서 위의 컨테이너 모델은 크게 횡행동작과 흔들림 각으로 구성된 서브 시스템과 주권상만으로 구성된 서브시스템으로 분산화 할 수 있다.

먼저, 횡행과 흔들림각으로 구성된 서브 시스템은 다음과 같다.

$$\Sigma_1: \begin{cases} (M_1 + M_T + M_L)\dot{r} + M_L\dot{l}\phi = F_1 + v_{11} \\ l\ddot{\phi} + \dot{r} = -g\phi + v_{12} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $F_1$  은 횡행모터의 구동력을 나타낸다. 단  $v_{11} = -M_L(2\dot{l}\phi + \dot{\phi}^2)$  이며,  $v_{12} = -2\dot{l}\dot{\phi}$  이다.

주권상 동작에 관한 서브시스템은 다음과 같다.

$$\Sigma_2: \begin{cases} 2(M_2 + \frac{1}{4}M_L)\dot{l} = F_2 + v_{21} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $F_2$  는 권상모터의 구동력을 나타낸다. 단  $v_{21} = \frac{1}{2}M_L(g - \phi\dot{r})$  이다.

(3), (4)에서  $v_{ij}$  는 각 서브 시스템간의 상호 연계관계를 나타내며, 이들은 서브 시스템에 입력항으로 가해진다. 윗 식을 일반적인 시스템으로 표현하면 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + D_i v_i \quad (5a)$$

$$y_i = C_i x_i \quad (5b)$$

여기서  $x_i \in R^{\sigma_i}$ ,  $u_i \in R^{m_i}$ ,  $y_i \in R^{p_i}$  는 각각 서브 시스템의 상태벡터, 입력벡터, 출력벡터를 나타낸다. 단,

$$x_2 = \begin{bmatrix} l \\ \dot{l} \end{bmatrix}, v_1 = \begin{bmatrix} v_{11} \\ v_{12} \end{bmatrix}, u_i = F_i, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \alpha & -\alpha M_L \\ -\alpha/l & \alpha M_{TL1}/l \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \\ -\alpha/l \end{bmatrix}, x_1 = \begin{bmatrix} r \\ \phi \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, a_{32} = \alpha g M_L,$$

$$B_2 = D_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/e_{22} \end{bmatrix}, a_{42} = -\alpha g M_{TL1}/l, v_2 = v_{21},$$

$$\alpha = 1/(M_{TL1} - M_L), M_{TL1} = M_T + M_L + M_1,$$

주 1 : 횡행과 흔들림으로 구성된 서브 시스템  $\Sigma_1$  은 로프 길이를 일정으로 하여 선형화한 모델[5]-[6]. (단, 횡행 마찰계수=0)과 동일한 형태로서, 서브 시스템간의 간섭요소가 외부 입력으로 포함된 형태이다. 또한, 호이스팅으로 구성된 서브 시스템  $\Sigma_2$  은 간섭요소가 외부 입력으로 인가되는 시스템이다.

### III. 입력 보상형 분산 제어 알고리즘

#### 1. 분산 시스템 구성

시스템을 서브 시스템으로 분산화하는 방법을 보이기 위해 다음의 선형 시불변 시스템을 고려하자.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6a)$$

$$y = Cx \quad (6b)$$

여기서  $x \in R^n$  는 상태벡터,  $u \in R^m$  는 입력벡터,  $y \in R^p$  는 출력벡터를 나타내며, 각 행렬  $A, B, C$  는 가관측 정준형으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & \cdots & A_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ A_k & \cdots & A_k \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix}, C = [C_1 \cdots C_k]$$

여기서,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & \times \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & \times \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \times \\ \vdots & & & \vdots & \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \times \end{bmatrix}, A_{ij} = \begin{bmatrix} & \times \\ & \times \\ 0 & \\ & \vdots \\ & \times \end{bmatrix}$$

단  $k$  는 서브 시스템 수를,  $\times$  는 임의의 값을 각각 나타낸다.

또한, (6)은 다음과 같이 분산 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + \sum_{j=1, i \neq j}^k A_{ij} x_j + B_i u_i \\ &= A_i x_i + \sum_{j=1, i \neq j}^k a_{i\sigma_j} x_{\sigma_j} + B_i u_i \end{aligned} \quad (7a)$$

$$y_i = C_i x_i \quad (7b)$$

여기서  $\sigma_j$  는  $j$  번째 서브 시스템의 차수를 나타내며,  $a_{i\sigma_j}$

는  $A_{ij}$  행렬의  $\sigma_j$  번째 열 벡터를 의미하고,  $x_{\sigma_j}$ 는  $x_j$  벡터 요소 중에서 마지막 요소를 나타낸다. 즉, (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + D_i v_i \quad (8a)$$

$$y_i = C_i x_i \quad (8b)$$

여기서,

$$D_i = [a_{i\sigma_1} \ \dots \ a_{i\sigma_{i-1}} \ a_{i\sigma_{i+1}} \ \dots \ a_{i\sigma_k}] \in R^{\sigma_i \times (k-1)},$$

$$v_i = [x_{\sigma_1} \ \dots \ x_{\sigma_{i-1}} \ x_{\sigma_{i+1}} \ \dots \ x_{\sigma_k}]^T$$

즉, (8)로부터 시스템을 분산화하는 경우, 서브 시스템간의 연계정보가 시스템의 외부 입력형태로서 나타내어짐을 알 수 있다.

주 2 : 시스템의 분산화를 행할 때, 서브 시스템의 수  $k$ 는 서브 시스템의 최소차수  $\min(\sigma_i)$ 보다 적게 되도록 분산화를 행하는 것이 바람직하다. 즉,  $k < \min(\sigma_i)$ .

주 3 : (8)의 우변 3번째항  $D_i v_i$ 은 서브 시스템간의 간섭요소를 나타내고 있으며, 이러한 간섭요소는 각 서브 시스템으로부터의 정보를 나타내고 있으며, 때로는 이와 같은 정보가 전달되지 못하는 경우가 존재한다.

2. 서브시스템의 간섭요소 추정법

본 절에서는 (8)에 관하여 구동부에 국소고장이 있는 경우, 고장요소를 포함한 서브 시스템간의 간섭요소 추정에 관해서 다루도록 한다. 먼저, 구동부 고장을 포함한 서브 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + B_i a_i + D_i v_i \quad (9a)$$

$$y_i = C_i x_i \quad (9b)$$

여기서  $a_i \in R^m$ 은 구동부 고장벡터를 나타낸다.

최근의 연구 결과에서 (9)에 대해 미지입력 관측기를 이용하여 상태를 추정하여 제어기에 이용하고 있으나[8], 제어입력은 미지입력 요소의 크기를 무시하여 결정하므로, 시스템의 정상편차가 발생된다. 따라서 미지입력 요소의 크기 및 상태를 정확히 고려하여 제어를 행하여야 한다.

(9)에 대해서 구동부 고장 벡터  $a_i$  및 외부 입력  $v_i$ 가 모두 미지요소인 경우, 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + F_i d_i \quad (10a)$$

$$y_i = C_i x_i \quad (10b)$$

여기서,

$$F_i = [B_i \ D_i], \quad d_i = \begin{bmatrix} a_i \\ v_i \end{bmatrix}$$

주 4 : 시스템 (10)에 대해 미지입력 관측기를 설계하는 경우,  $\text{rank}(F_i) \leq \text{rank}(C_i)$ 이 성립하도록 출력수를 정해야 하며[9],  $B_i = D_i$ 인 경우는  $F_i = D_i$  및  $d_i = a_i + v_i$

형태로 나타낼 수 있다.

(10)에서 미지입력  $d_i$ 를 추정할 수 있다면, 이를 이용하여 입력 보상형 제어기를 구성할 수 있다.

먼저, PI 관측기의 특성을 보이기 위해 (10)에서  $d_i = 0$ 인 경우를 고려하자. 선형 시불변 서브 시스템 (10)(단,  $d_i = 0$ )에 대해 PI 관측기는 다음과 같이 설계할 수 있다 [10].

$$\dot{z}_i = \hat{A}_i z_i + \hat{B}_i y_i + \hat{F}_i u_i + \hat{H}_i \omega_i \quad (11a)$$

$$\hat{x}_i = \hat{C}_i z_i + \hat{D}_i y_i \quad (11b)$$

$$\dot{\omega}_i = y_i - C_i \hat{x}_i \quad (11c)$$

여기서  $\hat{x}_i \in R^{\sigma_i}$ 는 상태 추정벡터,  $\omega_i \in R^{\rho_i}$ 는 출력 추정 오차의 적분치를 각각 나타내며,  $\hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i, \hat{D}_i, \hat{H}_i, \hat{F}_i$ 는 적절한 차수의 PI 관측기 이득을 나타낸다.

정리 1[10] : 선형 시불변 서브 시스템 (10) (단,  $d_i = 0$ )에 대해 (11)이 PI 관측기로 성립될 충분조건은

$$\lambda_i \begin{bmatrix} \hat{A}_i & \hat{H}_i \\ -C_i \hat{C}_i & 0 \end{bmatrix} < 0, \quad \forall i \quad (12a)$$

이며, 다음 식을 만족하는 행렬  $U_i \in R^{\sigma_i}$ 가 존재하는 것이다.

$$\hat{A}_i U_i + \hat{B}_i C_i = U_i A_i \quad (12b)$$

$$\hat{F}_i = U_i B_i \quad (12c)$$

$$\hat{C}_i U_i + \hat{D}_i C_i = I_{\sigma_i} \quad (12d)$$

증명 : 참고문헌[10]의 정리 4.2의 증명을 참고. ■

(10)에 대해 PI 관측기의 특징중의 하나인 미지입력값 추정에 관하여 다루기 위해  $d_i \neq 0$ 인 미지입력을 고려하자.

간단히  $\hat{C}_i = I_{\sigma_i}$ 로 두고, 추정오차 벡터  $\xi_i$ 를 다음과 같이 가정하자.

$$\xi_i = z_i - U_i x_i \quad (13)$$

(13)을 양변 미분하여, (10), (11) 및 (12)를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i &= \dot{z}_i - U_i \dot{x}_i \\ &= \hat{A}_i \xi_i + \hat{H}_i \omega_i - U_i F_i d_i \end{aligned} \quad (14)$$

변수  $\zeta_i$ 를 가정하고,  $\hat{H}_i$ 를 (15b)와 같이 설계하면,

$$\zeta_i = \omega_i - d_i \quad (15a)$$

$$\hat{H}_i = U_i F_i. \quad (15b)$$

(14)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\xi}_i = \hat{A}_i \xi_i + \hat{H}_i \zeta_i \quad (16)$$

또한, (11b), (11c)는 (12d)를 이용하여 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\hat{x}_i = \xi_i + x_i \tag{17a}$$

$$\dot{\omega}_i = -C_i \xi_i \tag{17b}$$

(17a)를 양변 미분하고  $d_i$ 를 미소구간에서의 스텝신호로 가정하면, (17b)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}_i = -C_i \xi_i = \dot{\xi}_i \tag{18}$$

따라서, (16)과 (18)을 이용하여 확대계를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_i \\ \xi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{A}_i & \hat{H}_i \\ -C_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \tag{19}$$

정리 1에 의해 (12a)가 만족되므로 (19)에서  $t \rightarrow \infty$  일 때  $\xi_i, \omega_i \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 알 수 있다. 그러므로, (15a)에 의해서 구동부 고장 요소를 포함한 미지입력 요소  $d_i$ 는 출력 추정오차의 적분치에 의해 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{d}_i = \begin{bmatrix} \hat{a}_i \\ \hat{v}_i \end{bmatrix} = \omega_i \tag{20}$$

3. 입력 보상형 분산제어계

일반적으로 외부에서 인가되는 요소를 입력 외란으로 간주하여, 이러한 외란에 대해서 하중함수를 설계하고, 이를 이용하여  $H_\infty$  이론[11] 등을 이용하여 제어기를 설계하거나, 기타 로바스트 제어기법을 이용하여 시스템의 성능을 최적화하는 제어를 행하고 있다. 그러나, 이와 같은 제어법은 시스템의 성능만을 고려할 뿐, 외란의 크기 및 구동부의 고장 정도 등은 무시하고 있다.

따라서, 본 절에서는 (9) 혹은 (10)으로 주어진 서브 시스템에 대해서 외부 입력  $v_{ij}$  및 구동부의 국소고장  $a_i$ 가 인가되는 경우, 입력을 보상하는 입력 보상형 제어계 설계법에 대해서 다루기로 한다.

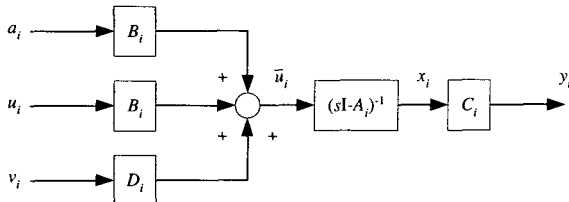


그림 1. 서브 시스템의 입력의 구성.  
Fig. 1. Configuration of input in subsystem.

먼저, 시스템으로 인가되는 입력은 그림 1과 같은 형태로 주어진다.

$$\bar{u}_i = B_i u_i + B_i a_i + D_i v_i \tag{21a}$$

$$= B_i u_{ci} \tag{21b}$$

여기서 종래의 제어기는 단순한 입력  $u_i$  만으로서 (21a)의

우변 첫째항만을 고려하였으나, 입력 보상형 제어기는 구동부 고장 및 외부외란을 고려하여 제어입력을 (21b)의  $u_{ci}$  와 같이 나타낸다.

또한, (9) 및 그림 1에서 시스템에 인가되는  $a_i$  및  $v_i$  는 시스템 상태의 미분값에 직접 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u_i + B_i a_i + D_i v_i \\ &= A_i x_i + B_i u_i + \Delta x_i \end{aligned} \tag{22}$$

다시 말하면,  $\dot{x}_i \rightarrow (\dot{x}_i - \Delta \dot{x}_i)$  로 바뀌며 이로 인하여  $x_i \rightarrow (x_i - \Delta x_i)$  로 바뀌어짐을 알 수 있다. 따라서, 시스템의 상태 편차  $\Delta x_i$  를 직접 제어에 이용할 수 있다.

그러므로, 입력보상을 고려한 상태피드백 제어계의 입력은 다음과 같이 결정된다

$$u_{ci} = -K_i(x_i - \Delta x_i) \tag{23a}$$

$$= -K_i x_i + K_i \Delta x_i \tag{23b}$$

여기서  $K_i$  는 상태 피드백이득이며,  $\Delta x_i$  는 적분을 행함으로서 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \int_0^t (B_i a_i + D_i v_i) dt \\ &\approx \int_0^t (B_i \hat{a}_i + D_i \hat{v}_i) dt \end{aligned}$$

주 5: 입력 보상형 제어계의 안정성은 구동부 고장 추정 오차의 크기에 의존하며, 스텝 및 저주파 성분의 구동부 고장에 대해서는 본 PI 관측기에 의한 입력 보상형 제어법이 유효하나, 특정 주파수 성분의 외란 및 구동부 고장에 대해서는 이들 요소를 고려한 일반 구조형 관측기[12]에 의한 입력 보상형 제어계 설계가 필요하다.

IV. 시뮬레이션 및 고찰

본 시뮬레이션에서는 갠트리 크레인의 서브 시스템 행렬은 (5)를 이용하여 구하였다.

갠트리 크레인은 일정 목표치에 추종해야 하므로 제어계를 로바스트 서보계 설계법[6]에 의해 다음과 같이 설계하였다. 이때 목표치는  $r_{f1} = 10$  [m],  $r_{f2} = 10$  [m]로 하였으며, 샘플링 시간을 10ms로 하였다.

$$u_i = -K_{1i} x_i + K_{2i} \int_0^t y_{ei} dt$$

여기서  $K_{1i}, K_{2i}$  는 각각  $i$  번째 서브 시스템의 상태 피드백 이득과 서보계 적분이득을 나타낸다. 단,  $r_{fi}$  는 제어 목표치를 나타내며,  $y_{ei} = r_{fi} - y_i$  이다.

(23)을 이용하면, 서보계의 입력 보상형 제어입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u_{ci} = -K_{1i}(x_i - \Delta x_i) + K_{2i} \int_0^t (r_{fi} - y_i + \Delta y_i) dt$$

여기서  $\Delta y_i = C_i \Delta x_i$  이며, 각 서보계 이득행렬은 로바스트

서보계 설계법[6]을 이용하여 다음과 같이 설계하였다.

$$K_{11} = [406.3 \ 178.4 \ 2131.6 \ 935.8],$$

$$K_{12} = 38.7298, \ K_{21} = [44.8 \ 200.8], \ K_{22} = 5.0$$

단 하중행렬  $Q_i$  와  $R_i$  는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$Q_1 = \text{diag}\{15, 0.0001, 0.001, 0.0001, 0\},$$

$$R_1 = 0.01, \ R_2 = 0.2, \ Q_2 = \text{diag}\{5, 0.01, 0\}$$

각 서브 시스템에 대한 PI 관측기는 정리 1을 만족하도록 참고문헌[10]을 이용하여 설계하였다. 이때, 서브 시스템  $\Sigma_1$  에 대한 PI 관측기 행렬은 다음과 같이 구하였다.

$$\hat{A}_1 = \begin{bmatrix} -2.4830 & 0.2752 & 0.3668 & 0.6514 \\ -2.3177 & 0.7396 & 1.0746 & 0.5884 \\ -0.1887 & -1.0987 & -1.7605 & 0.2131 \\ -3.6180 & -1.2484 & -1.4370 & 0.9125 \end{bmatrix},$$

$$\hat{B}_1 = \begin{bmatrix} 0.5871 & 1.6767 \\ -0.2714 & 0.4569 \\ 1.9586 & 3.2393 \\ 3.2472 & 5.1773 \end{bmatrix}, \ \hat{C}_1 = I_4,$$

$$\hat{\Gamma}_1 = \begin{bmatrix} 0.00014 \\ 0.00017 \\ 0.00011 \\ 0.00006 \end{bmatrix}, \ \hat{H}_1 = \begin{bmatrix} 0.0001 & -0.0281 \\ 0.0002 & -0.0755 \\ 0.0001 & 0.1121 \\ 0.0001 & 0.1274 \end{bmatrix},$$

$$\hat{D}_1 = \begin{bmatrix} 0.444 & -0.792 \\ -0.387 & -0.891 \\ -0.878 & 0.240 \\ -0.557 & -0.496 \end{bmatrix}$$

단,

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0.5555 & 0.6514 & 0.7928 & 0.2261 \\ 0.3871 & 0.5884 & 0.8910 & 0.0541 \\ 0.8788 & 0.2130 & 0.7598 & 0.8497 \\ 0.5577 & 0.9125 & 0.4965 & 0.8017 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션시, 서브 시스템  $\Sigma_1$  과 서브 시스템  $\Sigma_2$  에 대한 구동부 고장은 각각 다음과 같이 고려하였다.

$$a_1 = \begin{bmatrix} 500 \\ 0 \end{bmatrix}, \ a_2 = 100$$

여기서 구동부 고장은 윤회율 공급라인의 고장으로 증가된 마찰력의 크기를 나타낸다.

이때 시뮬레이션 결과는 그림 2~5와 같다. 그림 2는  $\Sigma_2$  의 구동부의 추정된 고장요소를 나타내고 있으며, 추정 속도가 다소 느리게 나타나고 있다. 이러한 추정속도는 관측기 설계에 의해 다소 빠르게 할 수는 있으나, 시스템간의 연계 관계가 큰 경우는 제어성능의 열화 등을 고려하여 설계해야 된다.

그림 3은 서브 시스템  $\Sigma_1$  에 대한 트롤리 응답을, 그림 4는  $\Sigma_2$  에 대한 주권상 응답을, 그림 5는 흔들림각 응답을 각각 보이고 있다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 외란 및 구동부 고장이 없는 경우의 서보계 응답은 외란 및 고장이

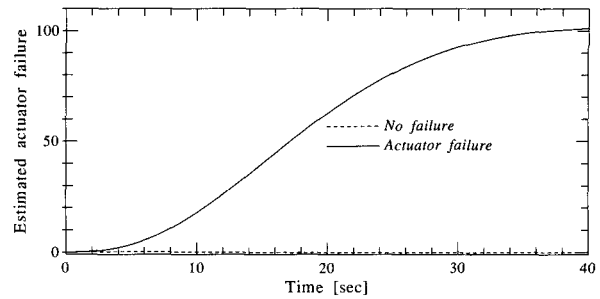


그림 2.  $\Sigma_2$  의 구동부 고장 추정 응답.

Fig. 2. The responses of estimated actuator failure.

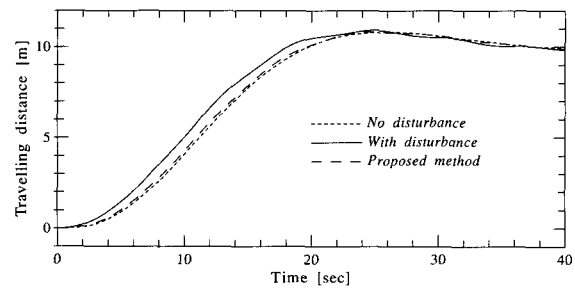


그림 3. 트롤리 제어 응답.

Fig. 3. The responses of the trolley control.

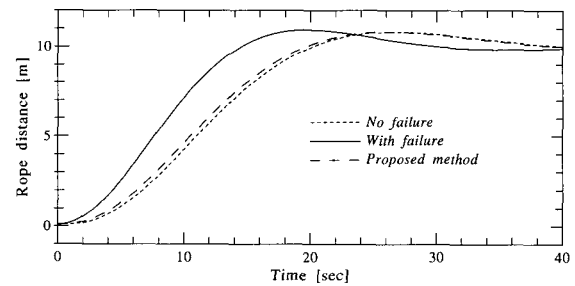


그림 4. 호이스팅 제어 응답.

Fig. 4. The responses of the hosting control.

있는 경우의 응답과 상이함을 알 수 있다. 이는 외란 및 고장에 대해서 입력을 보상하지 않기 때문이다. 이에 비하여, 제어입력을 보상한 제어결과에서는 외란이 없는 서보계 응답과 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 외란 및 구동부 고장을 보상하여 제어 입력을 결정하였기 때문이다.

그러나, 위의 결과에서 구동부의 추정오차가 크어도 불구하고 입력보상제어를 행한 결과에서 약간의 과도상태의 응답 차이만을 나타내고 있다. 이것은 구동부 고장 범위가 구동부의 동작 범위에 비해 상대적으로 작아 크게 영향을 미치지 못하기 때문이다. 만일, 구동부에 큰 고장이 발생한 경우에는 입력 보상제어를 할 수 없으며, 제어 불가능한 상태가 된다.

그림 5는 흔들림각의 응답을 나타내고 있으며, 외란이 없는 경우는 40초 부근에서  $\pm 0.25[\text{deg}]$  의 오차를 지니고 있는 것에 비하여, 외란이 있는 경우의 입력 보상 제어

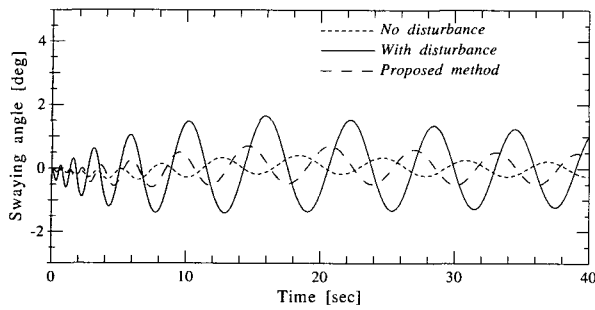


그림 5. 흔들림각 응답.

Fig. 5. The responses of the swaying.

의 경우는  $\pm 0.5[\text{deg}]$ 의 오차를 지니고 있어 다소 좋지 않으나, 입력 보상을 하지 않는  $\pm 1.0[\text{deg}]$  경우와 비교하면 다소 좋은 결과라고 할 수 있다. 여기서 진폭이 커지는 것은 로프의 길이의 증가에 따라 주기가 커지는 것이며, 로바스트 서보계 제어에 의해 제어입력이 원할하므로 초기의 흔들림도 적게 발생한다. 위의 결과에서 약 40초 부근에서  $\pm 0.5[\text{deg}]$  흔들림을 로프 길이를 고려하여 횡방향 흔들림 거리로 환산하면 약  $\pm 0.087[m]$ 가 되어 다소 양호함을 알 수 있다.

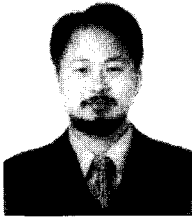
그러나, 본 연구에서 제안한 입력 보상형 분산제어는 한정된 범위 내의 구동부 고장에 한하여 유효하며, 커다란 고장에 대해서는 별도의 구동부로 전환시키는 제어법의 제안이 요구된다.

## V. 결론

본 연구에서는 갠트리 크레인을 대상으로 입력 보상형 분산제어를 행하였다. 중앙 집중형 시스템을 가관측 정준형을 이용하여 간단히 분산화하는 방법을 제안하였으며, PI 관측기를 이용하여 서브 시스템에 인가되는 외란 요소 및 구동부 고장요소를 추정하였다. 또한, 추정한 각 요소를 이용하여 입력 보상형 제어계를 설계하였으며, 갠트리 크레인 시뮬레이션을 이용하여 그 유효성을 확인하였다. 또한, 본 연구 결과는 보다 복잡한 일반적인 분산제어 시스템 제어에 효과적이라 사료된다.

## 참고문헌

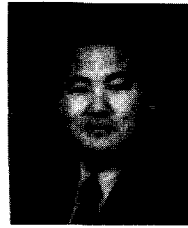
- [1] R. J. Veillette, J. V. Medanic, and W. R. Perkins, "Design of reliable control systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, no. 3, pp. 290-304, 1992.
- [2] 陶山貢市, "Reliable control", *計測と制御*, vol. 35, no. 2, pp. 151-159, 1996.
- [3] M. Aldeen and J. F. Marsh, "Decentralised Observer-Based control scheme for interconnected dynamical systems with unknown inputs", *IEEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 146, no. 5, pp. 349-358, 1999.
- [4] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어 (Part I) : 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차 피드백 제어", *제어·자동화·시스템공학회지*, 제 3권, 제 1호, pp. 23-31, 1997.
- [5] 김환성, 박홍수, 김상봉, "컨테이너 크레인 시스템의 화물 중량 추정에 관한 연구", *한국항만학회 '98 추계 학술대회논문집*, pp. 175-180, 1998.
- [6] 김상봉, 하주식, "메카니칼 시스템제어", 한미출판사, pp. 90-95, 1992.
- [7] T. Kailath, "Linear systems", *Prentice Hall Information and System Sciences Series*, 1980.
- [8] H. S. Kim and S. Kawaji, "Unknown-Input PI observer based reliable control for decentralized interconnected system with actuator failures", *RESCC'E'00*, pp. 199-204, 2000.
- [9] 川路 等, "オブザーバ", コロナ社, 1994.
- [10] H. S. Kim, "Design of robust control system using proportional integral observer", *Ph.D. dissertation*, Kumamoto Univ. Japan, 1996.
- [11] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, "Robust optimal control", *Prentice Hall*, 1996.
- [12] 이충환, 김환성, 김상봉, "일반화 관측기에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 제17권 제9호, pp. 95-101, 2000.



**김 환 성**

1965년 6월 13일생, 1991년 부경대학교(구, 부산수대) 기관공학과 졸업. 1993년 동대학원 기계공학과 석사. 1996년 일본 Kumamoto Univ. 공학박사. 1997년 ~ 1998년 8월 부경대학교 해양산업개발연구소 Post-Doc. 1998

년 8월 ~ 현재 한국해양대학교 물류시스템공학과 조교수. 관심분야는 디스크립터 시스템 및 관측기 설계, 고장진단, 크레인 제어 및 강인 제어 등.



**김 명 규**

1965년 11월 4일생, 1991년 금오공대 전자공학과 졸업. 1999년 부경대학교 대학원 제어계측공학과 석사. 2000년 ~ 현재 한국해양대학교 대학원 물류

시스템공학과 박사과정 재학 중. 1991년 ~ 1995년 (주)대성산소 기술기획부 근무, 1995년 ~ 현재 부산직업훈련원 시스템 제어과 교사로 재직. 관심분야는 강인 제어 및 분산제어 및 이에 대한 응용에 관한 연구 등.



**유 삼 상**

1958년 6월 16일생, 1983년 부경대학교(구, 부산수대) 기관공학과 졸업. 1990년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 기계공학과 석사. 1994년 미국 Iowa State Univ. 기계공학과 공학박사. 1985년 ~ 1988년 현대 자동차

엔진 연구부 근무. 1995년 ~ 1996년 8월 여수대학교 기관공학과 전임강사. 1996년 9월 ~ 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 조교수. 관심분야는 차량 동역학, 전기자동차, Robotics, 강인 제어 등.