

고층건물 시공자동화를 위한 다중 클라이밍 유압로봇의 운동 동기제어

Synchronous Motion Control of Multi-Climbing Hydraulic Robots for High-Rise Building Construction Automation

홍윤석¹, 장효환^{1,✉}

Yun Suk Hong¹ and Hyo Whan Chang^{1,✉}

¹ 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Univ.)

✉ Corresponding author: hwchang@korea.ac.kr, Tel: 02-3290-3354

Manuscript received: 2007.12.20 / Revised: 2009.5.29 / Accepted: 2009.5.30

Multi-climbing hydraulic robots are used to lift construction factory (CF) synchronously for applications in the automation of a high-rise building construction. In this study, synchronous motion controller is proposed for the hydraulic robots, whose strategy is not only to make each robot follow the reference path basically by sliding-mode control, but also to synchronize motions of two adjacent robots consecutively by cross-coupled control technique. Simulations are performed by using SIMULINK for a system similar to a practical application that includes unbalance in CF and wind disturbance. The results show that the proposed controller significantly reduces synchronous errors, compared to the individual controller for each hydraulic robot.

Key Words: Synchronous Motion Control (운동 동기제어), Cross-Coupled Control (교차식 제어), Sliding Mode Control (슬라이딩모드 제어), Construction Automation for High-Rise Building (고층건물 시공자동화), Climbing Hydraulic Robots (클라이밍 유압로봇),

1. 서론

최근 국내 건설사업은 노무 생산성 저하, 임금 상승으로 인한 채산성 악화 품질의 균일성 및 안정성 확보의 및 시공기술 경쟁력의 약화의 문제점을 가지고 있으며 이를 해결하기 위한 최선의 기술적 접근 방법인 시공자동화 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 고층건물 시공자동화 시공에서는 건설공장(Construction Factory: CF) 개념을 도입하고 있는데 CF는 외부 환경 영향으로부터 작업자를 보호할 수 있는 밀폐형 또는 반밀폐형 작업공간이다. 이 CF 내에 로보틱 크레인과 H빔 조립용 로봇 등이 설치되어 있어 철 구조물 시공

의 자동화가 이루어진다. 또한, CF는 한 층의 시공이 완료되면 클라이밍 유압로봇이라 불리는 유압 모듈에 의해 CF 구조체가 상승되어 다음 층을 시공할 수 있도록 하는 이동형 건설공장이다.

Fig. 1은 1998년에 일본 오바야시 건설회사가 시공한 건물의 CF 구조체의 전경사진이다.¹ CF 구조체는 수 백 ton의 무게를 갖고 있으며, 보통 10~20개의 유압로봇에 의해 상승된다. 상승행정은 한 층을 여러 단계로 나누어 CF 상승→유지(hold)→유압로봇기반 상승 및 고정→CF 재상승 순으로 이루어진다. 상승행정 과정에서 CF 구조체의 수평을 유지하는 것이 가장 중요하며, 이를 위해 모든 유압로봇의 운동을 동기화하는 것이 필요하다.

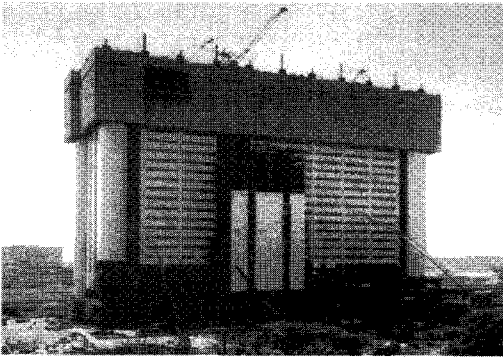


Fig. 1 Overview of construction factory installed by Obayashi Corporation¹

대부분의 기존 연구들은 로봇팔 또는 전기모터를 사용한 구동시스템의 위치 동기제어에 관한 것이며²⁻⁴ 최근에 와서 전기유압 서보밸브를 사용한 2 개 실린더의 운동 동기제어에 관하여 연구되었다.⁵ 하지만, CF 에서 요구되는 대용량 유압 실린더를 대상으로 한 연구는 찾아 볼 수 없었다.

본 연구에서는 4 개의 기둥(mast)에 각각 3 개씩 설치된 총 12 개 유압로봇으로 400,000 Kg 의 CF 구조체를 상승시키는 다중 클라이밍 유압로봇의 운동을 동기제어하는 문제를 다뤘다. 한 기둥에 있는 3 개의 유압로봇들은 기구학적인 구속조건에 의해 동일한 운동을 한다고 가정하여 1 개조로 그룹화하였다. 본 연구에서 제안한 유압로봇의 운동 동기제어는 기본적으로 각 유압로봇이 슬라이딩모드 제어(sliding-mode control)에 의해 기준경로를 추적하도록 하는 동시에 각 유압로봇의 운동을 동기화하도록 제어하는 것이며, 이를 위해 순차적 교차식(cross-coupled) 동기제어와 평균오차기준 동기제어 기법을 제안하였다.

MATLAB 을 이용하여 다중 클라이밍 유압로봇 시스템을 모델링한 후 SIMULINK 환경에서 CF 구조체에 의한 편하중과 강풍 등에 의한 풍하중 등 실제와 유사한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 제어기법 각각의 동기제어 성능을 고찰하였고, 개별적으로 슬라이딩모드 제어만을 적용한 경우와 비교하였다.

2. 시스템 모델링

Fig. 2 는 다중 클라이밍 유압로봇 시스템의 개략도이며, 복동 편로드 유압실린더, 비례유량제어 밸브, 펌프, 탱크, 릴리프밸브 등으로 구성되어 있

다.

Fig. 3 은 CF 구조체의 부하하중과 좌표를 개략적으로 나타낸 그림이다. CF 구조체의 바닥과 기본 골격은 H 빔으로 견고하게 만들어지기 때문에 변형이 일어나지 않는다고 가정하였다. CF 내 강구조물 운반을 위한 크레인의 이동에 따라 수직하중 F_L 이 CF 바닥중심으로부터 x, z 축으로 각각 l_a , l_b 벗어난 곳에 집중하중으로 작용한다고 가정할 때 CF 구조체의 수직방향 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \ddot{y}_c = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 - F_L - \sum_{i=1}^4 F_{yi} - Mg \quad (1)$$

여기서 M 과 \ddot{y}_c 는 CF 구조체의 질량과 무게중심에서의 가속도, f_i 는 i 번째 유압로봇에 의해 CF 에 전달된 수직력, F_{yi} 는 i 번째 기둥의 컬롱마찰력을 나타낸다.

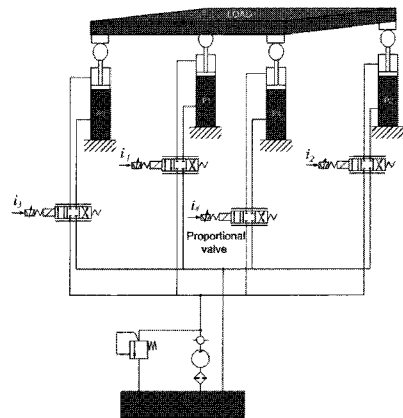


Fig. 2 Multi-climbing hydraulic robots system

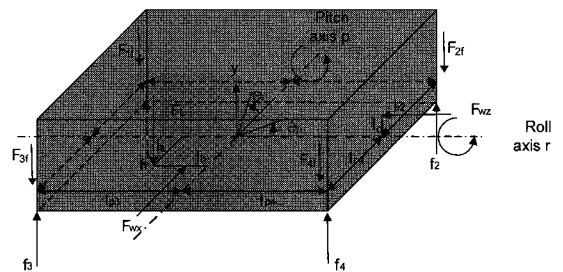


Fig. 3 Construction factory

고층건물 시공 시 CF 구조체는 대용량의 자체 하중 외에도 강풍과 돌풍 등에 의한 횡방향 힘을 많이 받는다. x, z 방향의 풍압에 의한 힘을 각각 F_{wx} , F_{wz} 라 할 때 CF 구조체의 모멘트 방정식은 다음과 같다.

$$J_r \ddot{\theta}_r = \sum_{i=1}^2 \{(f_i - F_{if})l_{ri}\} - \sum_{i=3}^4 \{(f_i - F_{if})l_{ri}\} + F_L l_a - F_{wx} l_c \quad (2)$$

$$J_p \ddot{\theta}_p = \sum_{i=2,4} \{(f_i - F_{if})l_{pi}\} - \sum_{i=1,3} \{(f_i - F_{if})l_{pi}\} + F_L l_b + F_{wz} l_c \quad (3)$$

여기서 l_c 는 수직방향 (y 방향)으로 CF 구조체의 기하학적 중심과 무게중심 사이의 거리이다.

CF 구조체는 모서리 4 곳에 설치된 가이드레일을 따라 상승하게 되는데 CF 구조체와 가이드레일 사이의 쿨롱마찰력은 CF 구조체가 기울어짐에 따라 가이드레일과의 틈새가 줄어들어 증가하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 쿨롱마찰력 F_{if} 가 CF 구조체의 물축과 피치축의 회전각도의 평균값에 비례하여 가변적으로 변한다고 가정하여 다음 식과 같이 나타내었다.

$$\alpha_r = \frac{0.95}{|(\theta_r)_{\max}|} |\theta_r| + 0.05 \quad (4)$$

$$\alpha_p = \frac{0.95}{|(\theta_p)_{\max}|} |\theta_p| + 0.05 \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_r + \alpha_p}{2} \quad (6)$$

$$F_{if} = \alpha F_{ic} \quad (7)$$

여기서 $(\theta_r)_{\max}$, $(\theta_p)_{\max}$ 는 각각 물축과 피치축의 최대 기울기 각도이고 α 는 비례상수를, F_{ic} 는 최대 쿨롱마찰력을 나타낸다.

Fig. 4 는 전기유압시스템으로 구성된 i 번째 클라이밍 유압로봇을 보여주고 있다. 로봇 i ($i=1\sim 4$) 의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_i \ddot{y}_i + B_{ip} \dot{y}_i = P_{i1} A_{i1} - P_{i2} A_{i2} - m_i g - \frac{f_i}{3} \quad (8)$$

여기서 m_i 는 부하질량을, B_{ip} 는 점성마찰계수를 나타낸다.

실린더 i ($i=1\sim 4$)의 연속방정식은 다음과 같다.

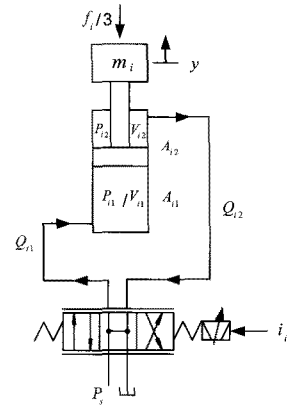


Fig. 4 The i th climbing hydraulic robot

$$Q_{i1} = A_{i1} \dot{y}_i + \frac{V_{i1}}{\beta_e} \frac{dP_{i1}}{dt} \quad (9)$$

$$Q_{i2} = A_{i2} \dot{y}_i - \frac{V_{i2}}{\beta_e} \frac{dP_{i2}}{dt} \quad (10)$$

여기서 P_{i1} , A_{i1} , V_{i1} 및 P_{i2} , A_{i2} , V_{i2} 는 피스톤 하실과 상실의 압력, 면적, 부피를 각각 나타내며 β_e 는 유효체적탄성계수이다.

유압로봇 실린더에 유입되는 유량 Q_{i1} 은 비례제어밸브에 작용한 제어기 출력전류 i_i 에 의해 제어된다. 밸브 i ($i=1\sim 4$)의 유량방정식은 다음과 같다.

$$Q_{i1} = k_f i_i \sqrt{P_s - P_{i1}} \quad (11)$$

$$Q_{i2} = k_f i_i \sqrt{P_{i2}} \quad (12)$$

여기서 P_s 는 공급압력, k_f 는 유량계수이다.

위에서 구한 수학적 모델에 근거하여 MATLAB으로 모델링 한 후 시뮬레이션에 사용하였다.

3. 제어기 설계

3.1 기준경로 추적제어

각 유압로봇은 기본적으로 기준경로를 추적해야 한다. 기준경로는 큰 질량을 갖는 CF의 관성에 의한 영향을 감소시키기 위해 가속도의 변화를 완만하게 만든 가속도 프로파일을 두 번 적분하여 생성한 것이다. 본 연구에서는 기준경로 추적제어에 슬라이딩모드 제어기법을 사용하였다.

슬라이딩모드 제어는 시스템 파라미터의 변화와 외란에 대한 강인성을 갖고 있기 때문에 불확실성이 내재된 비선형시스템의 제어에 효과적인 방법이다.⁶ 다중 클라이밍 유압로봇 시스템은 유압 시스템 특유의 비선형성과 채적탄성계수 등 파라미터의 변화를 내포하고 있을 뿐만 아니라 CF 구조체 내부에 설치된 크레인의 이동에 따른 편하중과 풍압에 의한 편하중 등 변동성이 큰 외란과 가드레일에서 발생하는 쿨롱마찰력의 비선형성과 불확실성을 모두 갖추고 있다.

Fig. 5는 슬라이딩모드 제어에서 사용한 슬라이딩평면(σ_i)을 나타낸 그림이며 λ_i 는 슬라이딩평면의 기울기, ϕ_i 는 채터링(chattering)의 폭이다.

슬라이딩평면(σ_i) 방정식은 다음과 같다.⁷

$$\sigma_i = \frac{d^2}{dt^2} \tilde{e}_i + 2\lambda_i \cdot \frac{d}{dt} \tilde{e}_i + \lambda_i^2 \cdot \tilde{e}_i \quad (13)$$

$$\sigma_i = -\lambda_i^2 \cdot e_i + 2\lambda_i \cdot \dot{y}_i + \ddot{y}_i \quad (14)$$

$$\tilde{e}_i = -e_i = y_i - y_{ri} \quad (15)$$

슬라이딩평면이 존재하는 필요조건은 식(16)과 같으나 불연속성을 갖는 sign 함수를 부드럽게 하기 위해 saturation 함수를 사용하면 식(17)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\sigma}_i < -I_i \cdot \text{sgn}(\sigma_i) \quad (16)$$

$$\dot{\sigma}_i = -I_i \cdot \text{sat}\left(\frac{\sigma_i}{\phi_i}\right) \quad (17)$$

여기서 I_i 는 비례유량제어밸브의 최대 전류값이며, sat 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{sat}\left(\frac{\sigma_i}{\phi_i}\right) = \begin{cases} \text{sgn}\left(\frac{\sigma_i}{\phi_i}\right) : |\sigma_i| > \phi_i \text{ 일 때} \rightarrow 1 (\sigma_i > \phi_i) \\ -1 (\sigma_i < -\phi_i) \\ \frac{\sigma_i}{\phi_i} : |\sigma_i| \leq \phi_i \text{ 일 때} \end{cases} \quad (18)$$

슬라이딩 영역내에서의 제어법칙은 다음과 같다.

$$u_{ri} = -I_i \cdot \text{sat}\left(\frac{\sigma_i}{\phi_i}\right) \quad (19)$$

λ_i 와 ϕ_i 값에 따라 채터링 발생 정도와 추적제어의 정밀도가 달라지며, 본 연구에서는 $\lambda_i = 38$ 과 $\phi_i = 1$ 을 적용하였을 때 가장 바람직한 추적제어 성능을 얻을 수 있었다.

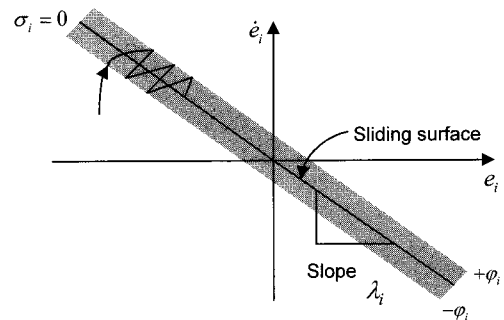


Fig. 5 Graphical interpretation of sliding region in phase plane with chattering⁷

3.2 운동 동기제어

각 유압로봇에 앞에서 기술한 슬라이딩모드 제어를 개별적으로 적용하여 기준경로를 독립적으로 추적하도록 하는 경우(이하 개별제어라 함) 각 유압로봇의 부하가 균일할 때는 비교적 양호한 추적제어와 동기제어 성능을 얻을 수 있었다. 하지만, CF 구조체와 풍압에 의한 편하중 등으로 인해 각 유압로봇에 가하여진 부하에 상당한 불균형이 발생할 때는 유압로봇들의 동기제어 성능이 현저히 저하되었다. 이런 문제점을 보완하기 위해 개별제어에 ‘순차적 교차식 동기제어’ 또는 ‘평균오차기준 동기제어’를 추가하는 방안을 제안하였고 2 가지 동기제어 기법의 성능을 비교하였다.

순차적 교차식 동기제어 윤곽오차의 개념을 도입한 것이다. Fig. 6 은 윤곽오차(contour error) ϵ 와 추적오차(tracking error) e 의 기하학적 관계를 나타낸 그림이다. 윤곽오차 ϵ 는 기준경로 상의 가장 가까운 점 s_c 와 실제 위치 s 와의 차이이며, 추적오차 e 는 기준경로 위치 s_r 과 실제 위치 s 와의 차이이다.

윤곽오차 벡터와 크기는 각각 식(20)과 식(21)로 표현된다.¹

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \sin^2 \theta - e_2 \cos \theta \cdot \sin \theta \\ e_2 \cos^2 \theta - e_1 \sin \theta \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \|\epsilon\| &= |(e_2 - e_1 \tan \theta) \cos \theta| \\ &= |e_2 \cos \theta - e_1 \sin \theta| \end{aligned} \quad (21)$$

이중(dual) 클라이밍 유압로봇의 운동 동기제어는 2 차원 평면상의 윤곽오차의 특수한 형태이다. 로봇의 두 축을 Fig. 6 의 좌표평면 y_1 축과 y_2 축에

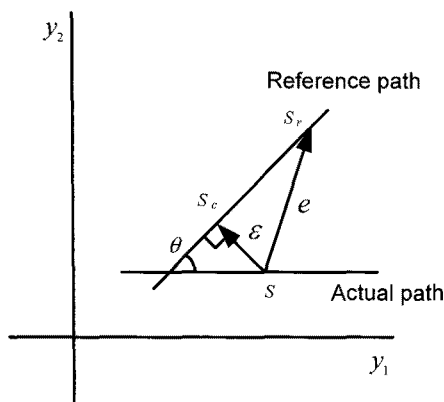


Fig. 6 Definition of tracking and contour errors

대응시키면 동기제어 문제는 그림에서 $\theta = 45^\circ$ 인 직선 경로를 추종하는 윤곽제어 문제로 변환된다. 이 원리를 유압로봇들의 상승 축들 각각에 적용하여 $\theta = 45^\circ$ 를 식(20)에 대입하면 윤곽오차는 다음과 같이 단순화된다.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(e_1 - e_2) \\ \frac{1}{2}(e_2 - e_1) \end{bmatrix} \quad (22)$$

다중 클라이밍 유압로봇의 경우에는 이웃하는 유압로봇들 사이에 이중 클라이밍 유압로봇의 윤곽오차의 개념을 순차적으로 적용하면 윤곽오차는 다음과 같다(즉, i/j 1 과 2, 2 와 3, 3 과 4, 4 와 1).

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_i \\ \epsilon_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(e_i - e_j) \\ \frac{1}{2}(e_j - e_i) \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서 동기오차(synchronous error)는 추적오차들의 차 $e_i - e_j$ 로 정의된다.

평균오차기준 동기제어는 각 유압로봇들의 추적오차를 평균한 값(평균오차)을 기준으로 정하고 각 유압로봇들의 추적오차가 기준 평균오차에 수렴하도록 제어함으로써 동기화하는 기법이다. 제어기에 입력되는 오차 e_{mi} 는 식(24)로 정의되는 평균오차 e_m 과 각 유압로봇의 추적오차 e_i 와의 차 즉, $e_{mi} = e_m - e_i$ 이다.

$$e_m = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + e_4}{4} \quad (24)$$

Fig. 7 은 본 연구에서 제안한 운동 동기제어의 구조를 보여주는 블록다이어그램이다. 각 유압로봇의 비례제어밸브로 보내지는 제어입력신호(u_i)는 추적오차에 슬라이딩모드 제어를 적용한 값($u_{t,i}$)과 동기제어 오차 ϵ_{ij} 또는 e_{mi} 에 PID 제어를 적용한 값($u_{s,i-1}, u_{s,i}$)을 합하여 만들어진다. 동기오차를 추적오차의 10 분의 1 정도가 되도록 하기 위해서 PID 제어의 계수 K_p, K_I 는 각각 8000 으로 설정하였고, 응답의 떨림을 방지하기 위해 K_D 는 1000 으로 설정하였다.

4. 시뮬레이션

본 연구에서는 CF 구조체를 사용하여 고층건물의 시공을 자동화한 사례를¹ 참조하여 실제와 유사와 사양을 갖는 다중 클라이밍 유압로봇 시스템을 대상으로 SIMULINK 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다.

질량 100,000 Kg 인 크레인 및 부하를 포함한 CF 구조체의 총 질량을 400,000 Kg 으로 가정하고, 크기는 27m x11m x9m(가로 x 세로 x 높이)로 설정하

였다. 유압로봇 시스템은 크레인 및 부하가 CF 구조체의 한 쪽 기둥에 모두 편중되었을 때에 실린더 1 개조에 가하여지는 최대하중을 설계부하로 가정하고, 최대 쿨롱마찰력 F_{ic} 를 설계부하의 20%로 가정하여 설계하였다. Table 1 은 본 연구에서 사용한 유압로봇 시스템의 설계사양을 보여주고 있다.

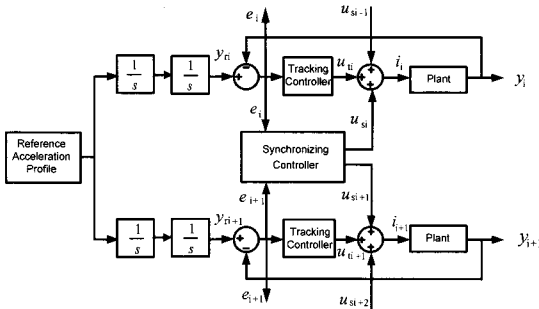


Fig. 7 Block diagram of the synchronous motion control system

Table 1 Design specifications for the hydraulic system

Parameter	Specification
Piston diameter	0.243 m
Rod diameter	0.171 m
Initial volume	$2.31 \times 10^{-3} m^3$
Stroke	0.5 m
Supply pressure	210 bar
Bulk modulus	7000 bar

크레인 및 부하가 CF 중심으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 지점($l_a = 5m, l_b = 10m$)에 위치해서 CF 바닥에 집중하중으로 작용하고 있으며, 동시에 풍속 30m/s 의 바람이 횡방향(x 방향)으로 일정하게 불고 있다고 가정하였다. CF 구조체는 상부보다 하부에 무게가 집중되어 있어 CF 의 무게중심이 기하학적 중심보다 1.5m 아래에 위치한다고 가정하여 l_c 값(= 1.5m)을 설정하였다(Fig. 3 참조).

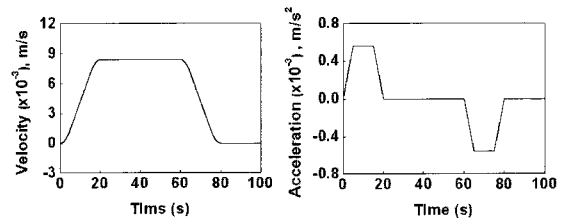
건물 한 층의 높이는 4m, CF 의 한 단계 상승행정은 0.5m 로 가정하고 CF 의 평균상승속도를 $5 \times 10^{-3} m/s$ 로 설정하면 한 단계 상승행정에 100 초가 소요된다. 여기서 평균 상승속도는 유압로봇이 목표위치까지 상승한 거리를 그곳에 도달할 때까지 걸린 시간으로 나눈 값이다.

Fig. 8 은 기준경로 생성을 위해 본 연구에서 사

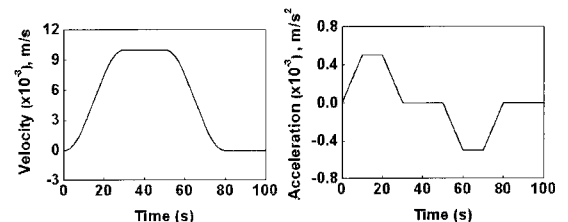
용한 기준속도와 가속도 프로파일을 보여주고 있다. 최대상승속도는 가속이 끝난 후 일정속도를 유지할 때의 속도이며 이 경우 $8.33 \times 10^{-3} m/s$ 이다(기준조건). 상승행정 완료시점에서 속도가 0 이 되도록 기준속도 프로파일을 설정하면 CF 구조체의 큰 관성으로 인해 최종 추적오차와 동기오차가 모두 크게 나타났다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 상승행정 완료시점 전(본 연구에서는 20 초 전)에 기준속도가 0 이 되도록 프로파일을 조정하면 유압로봇이 목표위치에 도착한 후 잔존해 있는 추적오차와 동기오차를 줄이기 위해 남은 시간(20 초) 동안 추가로 제어를 수행시킴으로써 결과적으로 정상상태 오차가 현저히 감소되는 효과를 얻었다.

Fig. 9 는 최대 상승속도가 제어성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 평균 상승속도는 기준조건으로 유지한 상태에서 최대 상승속도를 기준조건보다 빠르게 $10 \times 10^{-3} m/s$ 로 설정한 경우의 기준속도와 가속도 프로파일을 보여주고 있다.

본 연구에서는 위와 같은 기준조건에서 시뮬레이션을 수행하여 동기제어 기법 각각의 제어성능을 고찰하였고, 개별제어만을 적용한 경우와 비교 검토하였다. 또한 쿨롱마찰력이 제어성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 최대 쿨롱마찰력 F_{ic} 를 설계부하의 10%, 15%, 20%로 각각 가정하여 시뮬



(a) Velocity (b) Acceleration
Fig. 8 Proposed reference velocity and acceleration profiles with low maximum lift velocity



(a) Velocity (b) Acceleration
Fig. 9 Proposed reference velocity and acceleration profiles with high maximum lift velocity

레이션을 수행하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 10 은 개별제어만 적용한 경우의 추적제어와 동기제어 성능을 보여주고 있는데, (a)~(d)는 각각 변위, 부하압력, 추적오차, 동기오차에 대한 과도응답을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 편하중에 의해서 각 유압로봇의 부하압력에 상당한 불균형이 발생하였고 이로 인해 유압로봇들의 추적제어와 동기제어 성능이 현저히 저하되었다.

Fig. 11 과 Fig. 12 는 평균오차기준 동기제어와 순차적 교차식 동기제어 기법을 각각 적용한 경우의 추적제어와 동기제어 성능을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 동기제어 기법을 적용한 경우에서 각 유압로봇들의 추적오차는 개별제어만을 적용한 경우에 비해 평균화되었으며 결과적으로 동기오차가 현격히 감소하였다. 두 가지 동기제어 기법 중에서는 순차적 교차식 동기제어를 적용한 경우에서 평균오차기준 동기제어를 적용한 경우에 비해 추적오차는 크게 차이나지 않았지만 동기오차는 더 작게 발생함을 알 수 있었다. 모든 경우에서 최대 추적오차는 편하중이 가장 많이 작용한 유압로봇 3 에서 발생하였으며, 최대 동기오차는 유압로봇 3 과 대각선으로 반대편에 위치한 유압로봇 2 와의 사이에서 발생하였다.

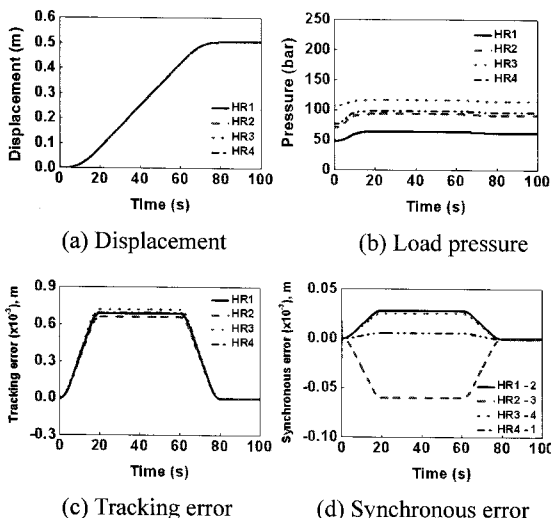


Fig. 10 Transient responses of each hydraulic robot with the individual control

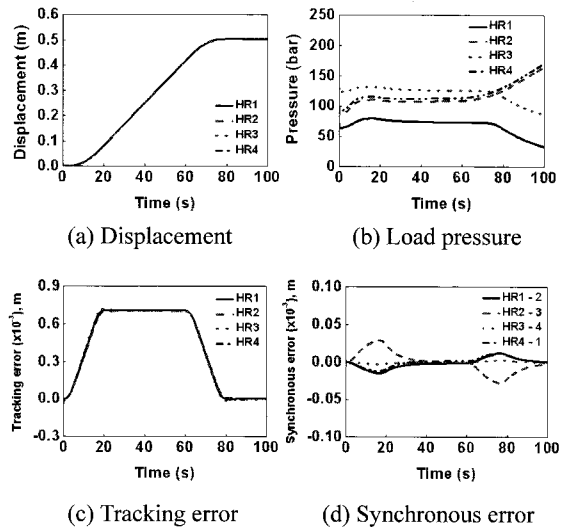


Fig. 11 Transient responses of each hydraulic robot with the average-error based synchronizing control

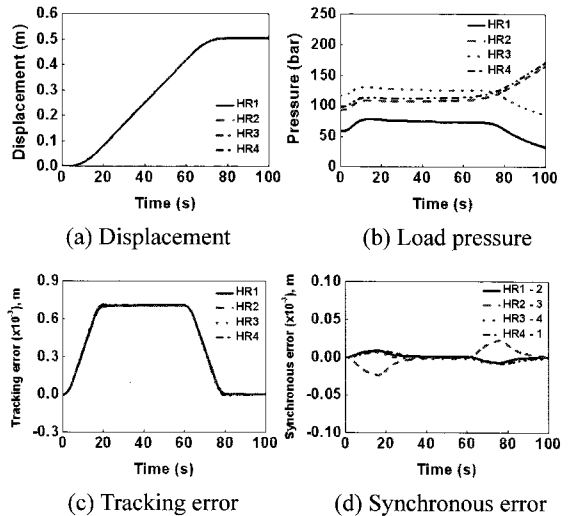


Fig. 12 Transient responses of each hydraulic robot with the cross-coupled synchronizing control

강구조 건축물에 적용되는 규정인 한계상태 설계기준에서는 처짐에 의한 바닥 기울기를 1/300 이내로 제한하고 있다.⁸ 본 연구에서 순차적 교차식 동기제어를 적용한 경우에 발생한 최대 동기오차는 이 기준으로 계산한 허용 동기오차인 0.09m 보다 훨씬 작은 2×10^{-5} m 이며, 한 층을 8 단계로 나눠 상승행정을 반복하더라도 충분히 안전한 수준이다.

Fig. 13 은 동일한 평균 상승속도를 유지하면서 최대 상승속도를 $8.33 \times 10^{-3} m/s$ 와 $10 \times 10^{-3} m/s$ 로 각각 설정한 기준속도 프로파일을 사용한 경우에 로봇 3 의 추적오차와 동기오차를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 최대 상승속도를 낮게 설정한 경우에서 높게 설정한 경우에 비해 동기오차는 거의 차이가 없었지만 추적오차는 더 작게 발생하였다.

Fig. 14 는 최대 쿨롱마찰력 F_{ic} 를 최대 설계하중의 10%, 15%, 20%로 각각 가정한 경우 로봇 3 의 추적오차와 동기오차를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 쿨롱마찰력이 작은 경우에서 추적오차와 동기오차가 모두 더 작게 나타났다.

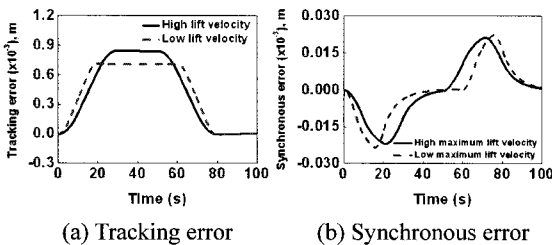


Fig. 13 Transient responses of the 3rd hydraulic robot with the cross-coupled synchronizing control for two different maximum lift velocities

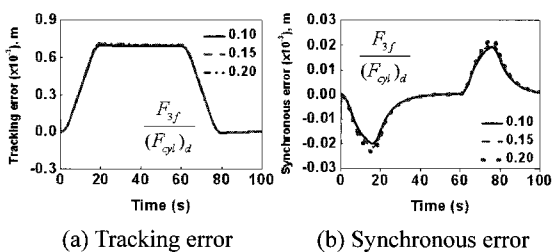


Fig. 14 Transient responses of the 3rd hydraulic robot with the cross-coupled control for various coulomb frictions at CF guide rails

6. 결론

고층건물 시공자동화에 사용되는 대용량의 다중 클라이밍 유압로봇의 운동 동기제어는 기본적으로 각 유압로봇이 슬라이딩모드 제어를 사용하여 기준경로를 추적하도록 하는 동시에 각 유압로봇의 운동을 동기화하도록 제어하는 것이며, 이를 위해 순차적 교차식 동기제어와 평균오차기준 동

기제어 기법을 제안하였다. SIMULINK 환경에서 실제와 유사한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 제어기법 각각의 동기제어 성능을 고찰하였고, 개별적으로 슬라이딩모드 제어만을 한 적용한 경우와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동기제어 기법을 적용한 경우에서 각 유압로봇들의 추적오차는 개별제어만을 적용한 경우에 비해 평균화되었으며 결과적으로 동기오차가 현저히 감소하였다.

2) 순차적 교차식 동기제어를 적용한 경우에서 평균오차기준 동기제어를 적용한 경우에 비해 추적오차는 크게 차이 나지 않았지만 동기오차는 더 작게 발생함을 알 수 있었다.

3) 최대 추적오차는 편하중이 가장 많이 작용한 유압로봇 3 에서 발생하였으며, 최대 동기오차는 유압로봇 3 과 대각선으로 반대편에 위치한 유압로봇 2 와의 사이에서 발생하였다.

4) 최대 상승속도를 낮게 설정한 기준속도 프로파일을 사용한 경우에서 높게 설정한 경우에 비해 동기오차는 거의 차이가 없었지만 추적오차는 더 작게 발생하였다.

5) 쿨롱마찰력이 작은 경우에서 큰 경우에 비해 추적오차와 동기오차가 모두 더 작게 나타났다.

후 기

이 연구는 2007 년도 건설교통부 첨단융합건설 기술개발사업의 연구비에 의해 수행되었으며 관계 기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

1. Maeda, J., "Planning and Development of the Construction Plant for an Automated Building Construction System," The 1st International Seminar on Construction Automation, pp. 6-23, 2007.
2. Chu, B., Kim, S., Hong, D., Park, H.-K. and Park, J., "Optimal Cross-Coupled Synchronizing Control of Dual Drive Gantry System for a SMD Assembly Machine," JSME Int. J. Ser. C : Mech. Systems, Mach. Elem. Manuf., Vol. 47, No. 3, pp. 939-945, 2004.
3. Sun, D. and Mills, J. K., "Adaptive Synchronized Control for Coordination of Multirobot Assembly Tasks," IEEE Trans. on Robotic and Automation, Vol.

- 18, No. 4, pp. 498-510, 2002.
4. Feng, L., Koren, Y. and Borenstein, J., "Cross-Coupled Motion Controller for Mobile Robots," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 13, No. 6, pp. 35-43, 1993.
 5. Sun, H. and Chiu, G. T.-C., "Motion Synchronization for Dual-Cylinder Electro Hydraulic Lift System," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 171-181, 2002.
 6. Chen, H. M., Renn, J. C. and Su, J. P., "Sliding Mode Control with Varying Boundary Layers for an Electro-Hydraulic Position Servo System," *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 1-2, pp. 117-123, 2005.
 7. Situm, Z., Petric, J. and Crnekovic, M., "Sliding Mode Control Applied to Pneumatic Servo Drive," *Proc. of the 11th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2003.
 8. Architectural Institute of Korea, "Design Application with Limit State Design Method for Structural Steel Buildings," *Kimoondang*, pp. 42-44, 2002.