

## PFC 보상기를 응용한 6 축 전기 유압매니플레이터의 강인 제어

안경관\*, 정연오\*\*

### Robust Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator using Parallel Feed forward Compensator

Kyoung-Kwan Ahn\*, Yeon-Oh Jung\*\*

#### ABSTRACT

An electro-hydraulic manipulator using hydraulic actuators has many nonlinear elements, and its parameter fluctuations are greater than those of an electrically driven manipulator. So it is relatively difficult to realize not only stable but also accurate trajectory control for the autonomous assembly tasks using hydraulic manipulators. In this report, we propose a two-degree-of-freedom control including parallel feedforward compensator (PFC) where PFC plays a very important role in the stability of a proposed control system. In the experimental results of the 6-link electro hydraulic manipulator, it is verified that the stability and the model matching performance are improved by using the proposed control method.

**Key Words:** Fluid Power Systems(유압 시스템), Robust Control(강인 제어), Hydraulic Manipulators(유압 매니플레이터), 2DOF Control(2 자유도제어), Parallel Feedforward Compensator(병렬피드포워드보상기)

#### 1. 서론

최근 정보통신기기의 급증으로 배전선의 보수 공사를 수행할 때, 송전을 멈추지 않고 공사를 수행하는 활선배전보수공사(Maintenance Task of Active Electric-Line, 이하 활선공사)가 증가하고 있다. 그런데, 상기 활선공사는 높고 불안정한 장소에서의 작업일 뿐만 아니라, 작업시 감전 등의 안전사고와 3D 산업에서의 작업자의 감소 등의 원인으로 이와 같은 작업을 원격제어 혹은 기계의 완전 자율에 의해 수행할 필요가 있다. 현재는 일본, 캐나다, 미국 등지에서 상기 활선공사를 전용공구

에 의한 원격조작 매니플레이터에 의하여 반 자동적으로 수행하고 있으며 그 대부분은 마스터 슬레이브(Master-Slave) 방식의 원격조작 매니플레이터 시스템이다<sup>1,4</sup>. 한편, 활선 공사에 이용되는 매니플레이터는 전기절연성을 높이기 위해서 플라스틱과 같은 절연성의 재료를 사용하고 있으며 또한 전기서보 시스템을 대신하여 유압 서보 시스템에 의한 구동방식을 채용하고 있다. 유압 매니플레이터의 경우, 대부분 감속기를 포함하고 있지 않아, 외란의 영향을 직접 받기 쉽고, 또 다관절 매니플레이터의 경우에는 매니플레이터의 자세의 변화에 의한 관성모멘트의 변동 등의 시스템의 파라미터 변

<sup>1,4</sup> 2002년 9월 24일 접수  
\* 울산대학교 기계자동차공학부  
\*\* 동경공업대학 정밀기계시스템 대학원

동이 크기 때문에, 고정도의 조립작업에는 적합하지 않다. 현재 저자들은 유압 동력으로 구동되는 다관절 매니플레이터의 고정도 강인제어에 관한 연구를 수행하고 있다. 현재까지, 외란추정보상제어수법, 안정화 필터를  $H_\infty$ 제어 이론에 의해 설계한 외란추정 보상제어수법 등을 실제의 매니플레이터 시스템에 적용하여 비교함으로써 결과적으로 안정화 필터를  $H_\infty$ 제어이론에 의해 설계한 외란추정보상제어 수법이 6 축 전기 유압 매니플레이터에 최적의 제어수법이라고 결론을 내리고 있다<sup>5-7</sup>.

그러나, 안정화 필터를  $H_\infty$ 제어이론에 의해 설계한 외란추정 보상제어수법은 고정도의 위치, 궤적제어는 달성되나, 그 설계를 수행하기 위해서는  $H_\infty$ 제어이론의 지식이 필요하고, 조건에 따라서는 항상 안정화 필터를 도출할 수 있는 것은 아니고, 모델과 가중함수의 설정에도 어느 정도 시행착오가 필요하므로 설계가 용이하다고는 말하기가 힘들다. 또한, 도출된 안정화 필터는 고차의 보상기로 컴퓨터의 연산부하도 커지게 된다. 여기서, 본 논문에서는 병렬 피드포워드 보상기(Parallel Feedforward Compensator: 이하 PFC)를 응용한 2 자유도 제어에 정상상태오차 보상루프를 부가한 제어수법을 제안한다. PFC 는 단순적응제어(Simple Adaptive Control: 이하 SAC)<sup>8</sup>에 사용되는 보상기로, ASPR(Almost Strictly Positive Real)하지 못한 플랜트에 대하여 ASPR 성을 가지도록 하는 역할을 한다. 본 논문에서 제안하는 제어 수법은, 우선, PFC 를 제어대상에 병렬로 부가함으로써 제어대상과 PFC 를 포함한 확장계 플랜트의 출력이 ASPR 성을 가지도록 하여 안정성을 향상시킨다. 나아가 목표치 응답특성을 독립적으로 조정가능 하도록 그 확장계에 대하여 2 자유도 제어계를 구성함과 동시에 정상상태 오차를 없애기 위한 정상상태 보상 루프를 가진 제어 시스템을 제안한다.

마지막으로 제안한 제어 수법의 유효성을 검증하기 위하여, 6 축 전기 유압 매니플레이터에 PFC 보상기를 응용한 2 자유도 제어 수법을 적용하여 제어 성능을 검증한다.

## 2. 실험장치

실험에 사용되는 6 축 전기 유압 매니플레이터의 시스템 구성을 그림 1 에 나타낸다. 매니플레이터에 공급되는 유압원의 공급압력은 10[MPa]이다.

각 축의 제어 알고리즘은 1 대의 마이크로 컴퓨터(CPU: MMX Pentium 200[MHz])에 의해 샘플링 주파수 1kHz 내에 연산되어, 12Bit 의 D/A 보더로부터 서보앰프를 거쳐 서보 밸브가 구동된다. 각 관절 축에는 위치검출기로서 0.0044[°]의 분해능을 가지는 로우터리 엔코더를 가지고 있으며, Up/Down Counter 를 거쳐 각 관절각이 컴퓨터에 입력된다.

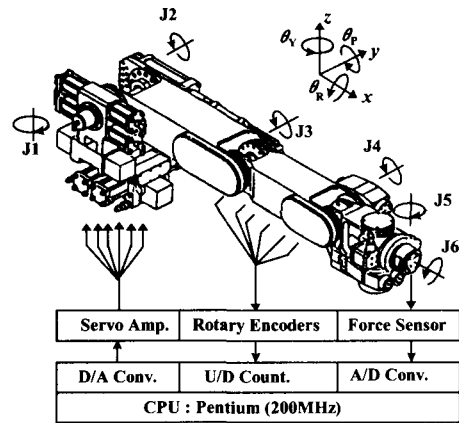


Fig. 1 System configuration of a 6-link hydraulic manipulator

## 3. 병렬 피드포워드 보상기(PFC)를 응용한 2 자유도 제어계

### 3.1 병렬 피드포워드 보상기(PFC)

본 논문에서 언급하는 병렬피드포워드 보상기는 플랜트  $P(s)$ 에 병렬로 부가하는 보상기를 의미한다. PFC 의 목적은 확장계 전달함수  $P_a(s) = P(s) + PFC(s)$ 가 ASPR 조건을 만족하도록 함으로서, 제어계의 안정성을 높이는 데 그 목적이 있다. ASPR 의 조건은 단일입력 단일출력계의 경우, 다음 조건을 만족해야한다.

- (A) 확장계플랜트  $P_a(s)$ 는 최소위상계
- (B) 확장계플랜트  $P_a(s)$ 의 상대차수는 0 또는 1
- (C) 확장계플랜트  $P_a(s)$ 의 계인은 양수

PFC 의 안정성을 검증하기 위하여 본 연구의 실험장치인 6 축전기유압 매니플레이터의 2 축을 대상으로 단위계단응답 실험을 실시하였다. 그림 2 는 PFC 를 적용하지 않은 비례제어기에 대한 블록선도를 나타내고 있으며, 그림 3 은 PFC 를 플랜트에 병렬로 부가한 비례제어 시스템의 블록선도를

나타내고 있다. 여기서 플랜트 모델은 아래의 식(1)과 같은 적분기+2 차 모델을,  $PFC(s)$ 는 아래의 식(2)를 적용하였다. 플랜트 모델은 비례제어에 의한 계단응답의 시뮬레이션 및 실험 결과에 있어서, 비례게인이 5 이상에서 불안정하게 되며,  $PFC(s)$ 부가시의 계단응답의 안정성이 거의 일치하도록 시행착오에 의하여 결정하였다.

또한  $PFC(s)$  는 확장계( $P_a(s) = P(s) + PFC(s)$ )의 분자다항식과 분모다항식의 차수의 차이가 1 이 되도록 설정하였다. 아래의 식(3)은 확장계의 전달함수를 나타낸다.

$$P(s) = \frac{k_n \omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

$$k_n = 4, \zeta_n = 0.5, \omega_n = 20$$

$$PFC(s) = \frac{k(s + \beta)}{(s + \alpha)^2} \quad (2)$$

$$k = 5, \alpha = 40, \beta = 120$$

$$P_a(s) = \frac{5(s + 119)(s + 9)(s^2 + 12s + 472)}{s(s + 40)^2(s^2 + 20s + 400)} \quad (3)$$

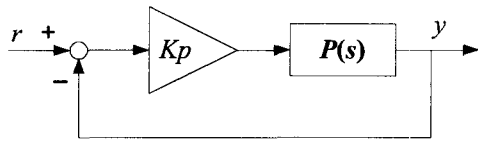


Fig. 2 Block Diagram of Proportional Control

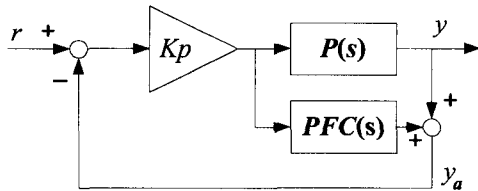
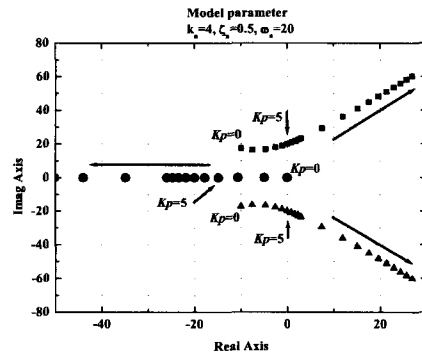


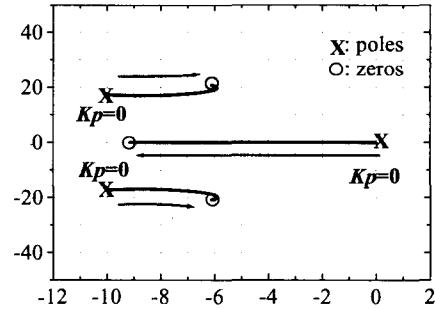
Fig. 3 Block Diagram of Proportional Control with PFC

다음으로,  $PFC(s)$ 를 부가하지 않은 경우와 부가한 경우에 대한 근궤적선도를 그림 4에 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 비례게인이 5

일 경우 임계안정이 됨을 알 수 있다. 반면 그림 4(b)에서 알 수 있듯이,  $PFC$  를 플랜트에 병렬로 연결함으로써 확장계가 ASPR 성(즉, 근궤적이 좌반면에 존재)을 가짐을 알 수 있다. 이상의 결과를 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 5에 나타내고 있다. 그림 5(a)는 플랜트  $P(s)$ 에



(a) In the case of Proportional Control



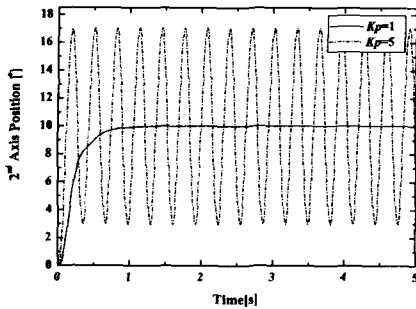
(b) In the Case of Proportional Control with PFC

Fig. 4 Comparison of Root Locus

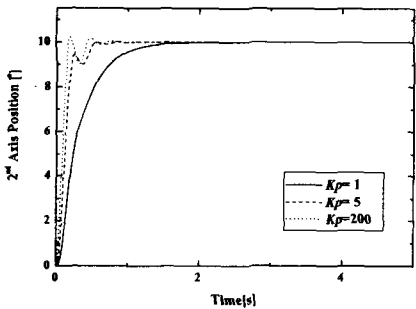
대하여 비례게인  $Kp$  를 1 과 5 로 설정한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 이는 그림 4(a)의 근궤적선도의 결과로부터도 알 수 있듯이, 비례게인  $Kp$  가 5 에서 안정한계가 되며 그 이상 게인을 올리면 불안정하게 된다. 한편, 플랜트  $P(s)$ 에  $PFC(s)$ 를 부가한 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 5(b)에 나타내고 있다.  $PFC(s)$ 를 부가한 경우, 비례게인  $Kp$  를 200 까지 올리더라도 (이론적으로는 게인을 아무리 크게 하더라도 안정) 안정성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 한편,  $PFC(s)$ 의 설계(여기서는  $k, \alpha, \beta$ )에 대한 지침을 얻기 위하여 그림 6과 같은

ASPR 조건의 판정면을 작성한다. 이 판정면은 식 (1)의 플랜트 모델과 식(2)의 보상기를 이용하여 보상기의 설계파라미터  $k, \alpha, \beta$ 를 변화시켜가면서 ASPR 조건의 만족여부를 판정한 결과이다. 그림 6(a)의 ASPR 조건의 판정면을 이용한 PFC(s)의 설계 파라미터의 결정법을 관하여 이하에 설명한다.

멀어지는 방향인,  $k$  와  $\beta$ 는 크게 그리고  $\alpha$ 는 작게, 함으로서, PFC의 효과를 강하게 할 수 있다. 단, PFC의 효과가 너무 강하면 응답이 늦게 되어, 정상상태오차가 너무 크게 되므로, 실험을 통하여 스텝응답을 확인하면서 결정해야 한다.



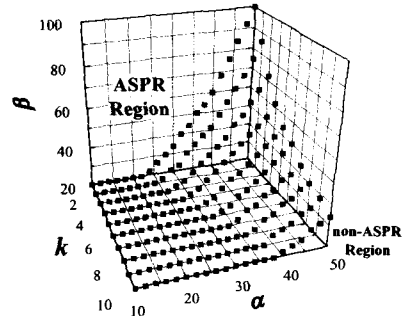
(a) In the case of Proportional Control ( $K_p = 5$ )



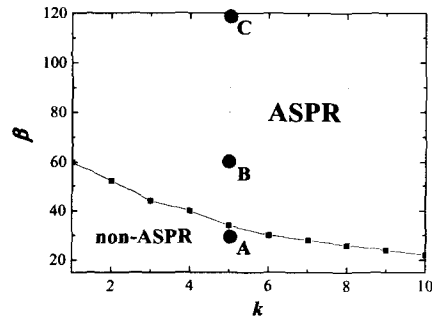
(b) In the case of Proportional Control with PFC ( $K_p = 10$ )

Fig. 5 Comparison of Step Response

우선, 판정면과 파라미터의 관계를 알기 위하여, 그림 6(b)에서 나타낸 바와 같이 파라미터  $k$  및  $\alpha$ 를 고정하고  $\beta$ 를 30 (A 점), 60 (B 점) 및 120 (C 점)으로 변경시킨 경우의 2 축에 대한 단위계단 입력에 대한 실험 결과를 그림 7에 나타내고 있다. 이때, 비례게인( $K_p$ )은 10으로 설정하였다. 그림 7의 결과로부터 그림 6의 ASPR 영역에 있어서의 판정곡선으로부터 가장 떨어진 위치에 있는 파라미터를 선정함으로써 (여기서는 그림 6(b)의 C), 비례게인을 비례제어에서의 안정 한계에 해당하는 게인( $K_p = 5$ )의 2 배가 되어도 안정성이 확보됨을 알 수 있다. 식(2)의 3 개의 파라미터의 선정기준으로, 그림 6(a)에서 ASPR 판정면으로부터 거리가



(a) Discriminate Plane



(b) Discriminate Curve

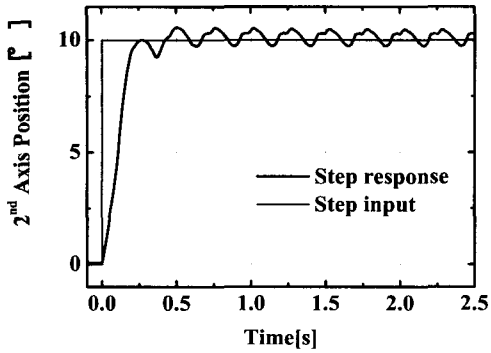
Fig. 6 ASPR Condition

### 3.2 ASPR 조건의 강건성(Robustness)

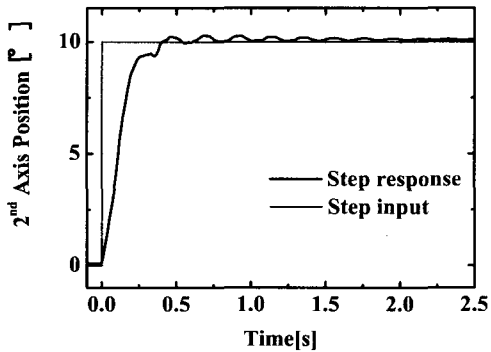
매니플레이터에 부하변화 등으로 인하여 시스템의 파라미터 변화가 발생한 경우, 어느 정도까지 ASPR 조건이 만족되는가를 고려하기 위하여, 그림 8에 플랜트의 파라미터 중  $\zeta_n, \omega_n$ 을 각각 0.1에서 1.0 및 1에서 30까지 변화시키면서 ASPR 조건을 판정한 결과이다.

그러나,  $K_n$ 은 부하변화 등으로 인한 시스템의 파라미터의 변화에 그다지 큰 영향을 미치지 않으므로, 4로 고정한다. 그림 8의 결과로부터 플랜트의 근사 모델을 식(1)과 같은 3 차식으로 둔 경우, 식(1)의 파라미터의 정규값(Nominal Value, 즉, 그림 8의 A 점에서의  $\zeta_n$ 과  $\omega_n$ )으로부터 모델이 변

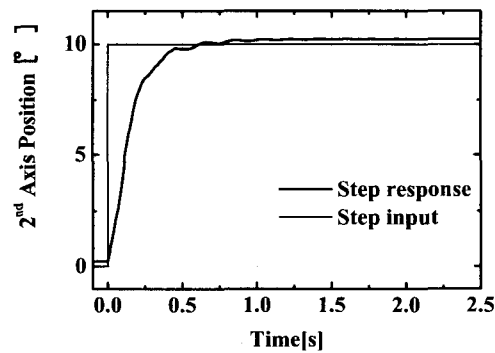
하더라도 ASPR 조건은 충분히 만족함을 알 수 있다.



(a)  $\beta = 30$



(b)  $\beta = 60$



(c)  $\beta = 120$

Fig. 7 Comparison of Step response with different  $\beta$

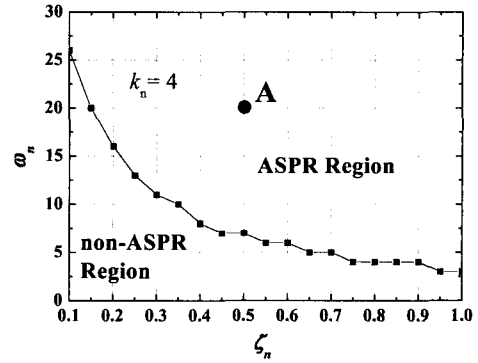


Fig. 8 Discriminate curve of ASPR condition with respect to  $\xi_n$  and  $\omega_n$

### 3.3 PFC를 응용한 2 자유도 제어기

앞에서 설명한 PFC는 시스템에 ASPR 성을 가지게 함으로서 강건 안정성(robust stability)을 보장할 수는 있으나, 제어성능을 제어설계자가 원하는 대로 설정할 수 없는 단점이 있다. 여기서는 시스템의 안정성과는 분리하여, 시스템의 응답특성을 독립적으로 설정가능한 2 자유도 제어계를 앞에서 제안한 PFC 제어기에 응용한다. 제안하는 PFC를 응용한 2 자유도 제어시스템의 블록선도를 그림 9에 나타내고 있으며 여기서 일점쇄선으로 둘러싸인 부분이 2 자유도 제어기를 나타낸다. 2 자유도 제어계의 각 전달함수는 다음과 같이 설정한다 (PFC(s)는 이전과 동일).

$$K(s) = G_M(s) / N(s)$$

$$G_M(s) = \frac{K_m}{s^2 + 250s + K_m}$$

$$N(s) = \frac{K_m}{s(s + 250)}$$

$$C(s) = \frac{(K_p s + K_I)}{s} \tag{4}$$

이 때 제어기 C(s)의 파라미터의 값은 다수의 실험을 통하여 시행착오법으로 구한다. 여기서는 다수의 실험결과 얻어진  $(K_p, K_I) = (4, 1)$ 을 이용한다. 그림 10(a)는 매니플레이터의 2 축의 스텝응답 실험 결과를 나타낸다. 여기서, Model Response는

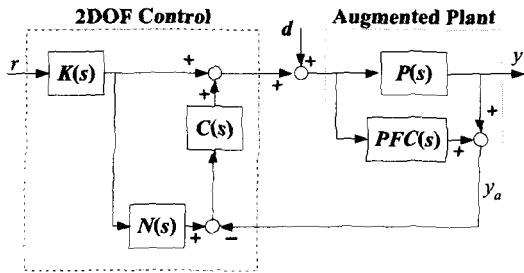
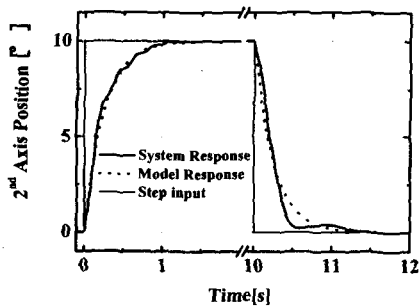
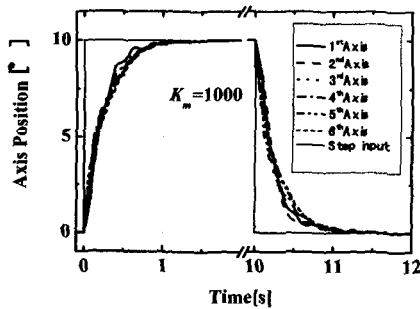


Fig. 9 Block Diagram of 2DOF Control with PFC

규범모델(식(4)의  $G_M(s)$ 에서  $K_m=1000$  인 경우)의 스텝응답 시뮬레이션 결과이고, System Response는 2 축의 실험결과이다. 이 결과로부터 시스템의 응답이 규범모델에 거의 일치, 2 자유도제어에 의한 모델매칭제어가 실현 됨을 알 수 있다. 또한, 매니플레이터의 각 축의 응답이 크게 다름에도 불구하고, 스텝입력  $10[^\circ]$ 에 대한 각 축의 응답(그림 10(b))을 보면, 식(4)의 규범모델에의 모델매칭제어가 실현됨을 알 수 있다.



(a) Comparison of model and system response



(b) Comparison of step response of each axis

Fig. 10 Step response by 2DOF control including PFC

### 3.4 정상상태오차 보상루프를 가진 PFC 를 응용한 2 자유도 제어계의 제안

상기 제안한 PFC 를 응용한 2 자유도 제어계의 경우 시스템의 안정성 및 목표치 응답특성은 우수하나, 피드백루프에 적분요소가 포함되어 있음에도 불구하고 정상편차가 남는 문제가 발생하였다. 이는 PFC 를 도입함으로써 PFC 를 포함하는 2 자유도제어에서는  $r-y_a$  를 0 으로 만들기 위하여 적분요소가 작동하기 때문에 PFC 의 출력  $y_p$  가 유한값을 가질 경우,  $r-y_a$  가 0 이 되었다하더라도  $r-y$  는 0 이 되지않고 정상상태 오차가 남게된다. 그래서, Kaufmann 등<sup>9</sup>이 제안하고 있는 정상편차 보상루프를 도입함으로써 본 논문에서 도입하여 정상상태 편차를 없애고자 한다. 제안하는 정상상태오차 보상루프를 가진 PFC 를 응용한 2 자유도 제어계의 블록선도를 그림 11 에 나타낸다. 블록선도에서 일점쇄선으로 나타난 부분이 정상상태오차 보상의 역할을 한다.

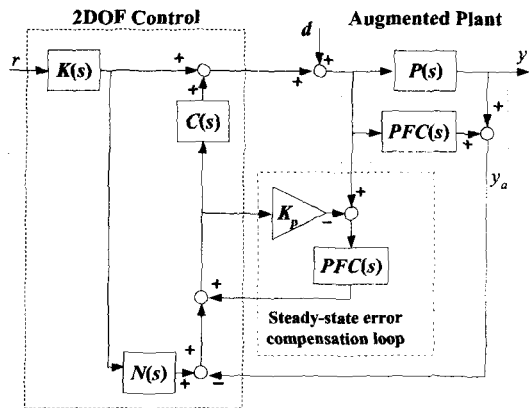
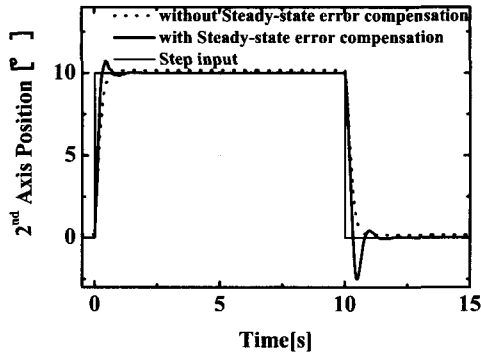


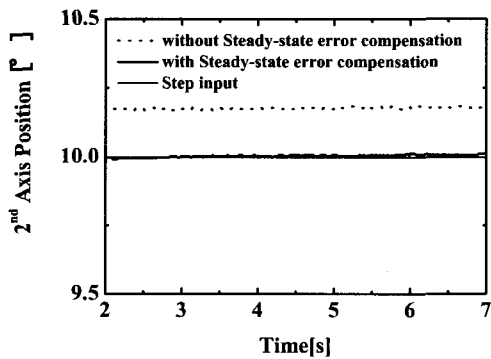
Fig. 11 Proposition of block diagram with 2DOF control with PFC and steady state error compensation loop

제안한 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여 스텝응답 실험을 실시하였다. 실험 결과를 그림 12(a)에 나타내고 있다. 여기서 실선은 정상상태 오차에 대한 보상루프가 있는 경우, 점선은 보상루프가 없는 경우를 각각 나타내고 있다. 그림 12(b)에서는 그림 12(a)에서의 정상상태오차 부분을 확대하여 나타내고 있다. 이 결과로부터 제안한 정상상태오차 보상루프를 가진 PFC 를 응용한

2 자유도 제어계의 유효성을 검증할 수 있다.



(a) Step response between with and without steady state error compensation loop



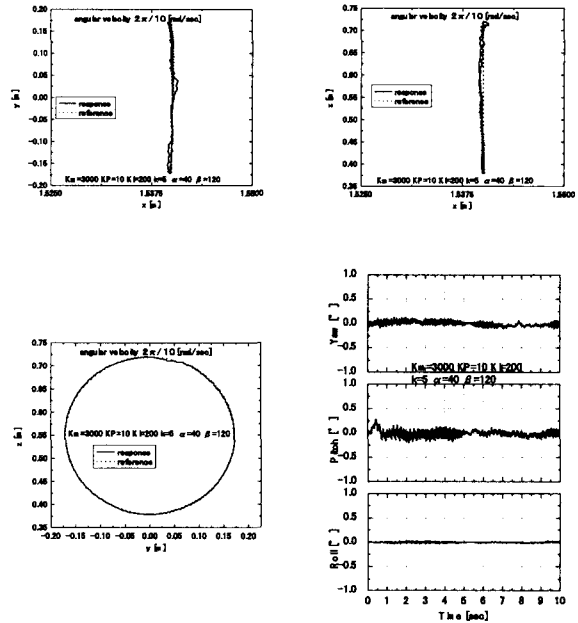
(b) Comparison of steady state error

Fig. 12 Comparison of step response between with and without steady state error compensation loop

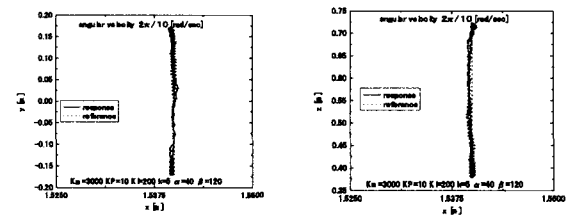
#### 4. 3 차원궤적제어 실험결과

제한한 PFC 를 응용한 2 자유도 제어계를 6 축 전기유압매니플레이터에 적용하여 3 차원궤적 제어실험을 실시하였다. 이 때, 제어기 파라미터의 값은  $(K_m, K_p, K_i)=(3000, 10, 200)$ 으로 두었으며, 제어기의 강인성을 확인하기 위하여 매니플레이터 끝단을 무부하로 한 경우와 5kg 의 부하를 단 경우의 2 가지 경우에 대하여 궤적제어 실험을 실시하였다. 이 때, 반경 17[cm], 회전각속도  $2\pi/10$  [rad/s]의 원궤적을 목표궤적으로 두고, 이에 추종하도록 제어한 결과를 그림 13 의 (a)와 (b)에 나타내고 있다. 각각의 그래프는 매니플레이터 끝단의 궤적을 3 개의 평면(x-y, y-z, y-z 평면) 내에 투영한

궤적과 매니플레이터의 끝단의 3 가지 자세(Roll, Pitch, Yaw)를 각각 나타내고 있다. 실험 결과, Pitch



(a) No load condition



(b) 5 kg load condition

Fig. 13 Trajectory control by 2DOF control including PFC

각도에 미소한 진동이 보여지나, 목표제적과 시스템의 응답의 평균오차는 무부하인 경우 8.25[mm], 부하인 경우 8.39[mm]로 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 제어기의 강인성을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 PFC 를 제어대상에 병렬로 부가함으로서 제어대상과 PFC 를 포함한 확장계 플랜트가 ASPR 성을 가지도록 함으로서 안정성을 향상시킴을 확인하였다. 그리고, ASPR 조건의 판정면을 작성하여 PFC(s)의 설계의 지침을 얻을 수 있었다. 나아가 목표치 응답특성을 독립적으로 조정가능하도록 그 확장계에 대하여 2 자유도 제어계를 구성함과 동시에 정상상태 오차를 없애기 위한 정상상태오차 보상루프를 가진 제어 시스템을 제안하여 다음과 같은 본 제어수법의 유효성을 확인하였다.

(1) 목표치 응답특성은 피드포워드 특성을 결정하는 전달함수의 파라미터에 의해 조정 가능하며, 특성이 다른 각축의 응답을 규범모델의 응답특성에 모델 매칭가능함을 알 수 있다.

(2) 정상상태오차 보상루프를 도입함으로서, PFC 를 부가함으로서 발생하는 정상상태오차를 없앨 수 있게 되었다. 마지막으로 제안한 제어 수법의 유효성을 검증하기 위하여, 6 축 전기 유압 매니플레이터의 궤적제어에 적용하여 그 성능을 확인할 수 있었다.

(3) 본 논문에서 제시한 PFC 를 응용한 2 자유도 제어계는 저차의 제어기로, 제어계설계도 용이하게 이루어질 뿐만아니라, 제어계의 파라미터의 조정만으로 개별적으로 향상시키고 싶은 제어성능을 조정할 수 있는 효과적이고 강인한 제어수법임을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국과학 재단 지정 울산대학교 기계 부품 및 소재 특성평가 연구 센터의 일부 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. Nakashima, M., Yakabe, H., Maruyama, Y., Yano, K., Morita, K. and Nakagaki, H., "Application of Semi-

Automatic Robot Technology on Hot Line Maintenance Task," Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp. 843-850, 1995.

2. Nakashima, M., Maruyama, Y., Yano, K. and Yakabe, H., "The Hot-Line Work Robot System and its Human-Robot Interface "MOS"," Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp116-123, 1995.

3. Boyer, M., "System Integration in Telerobotics : Case Study: Maintenance of Electric Power Lines," Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on R&A, pp. 1042-1047, 1996.

4. Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA, Tomohiko OZEKI and Toshirou YAMAMOTO, "Compliance Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator (Application to the Peg-in-Hole Task)," Trans. of JSME(C), Vol. 64, No. 624, pp. 3019-3025, 1998.

5. Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA and Toshirou YAMAMOTO, "Application of an Impedance-Force Control to a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator," Proc. of Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control, pp. 111-121, 1998.

6. Toshirou YAMAMOTO and Shinichi YOKOTA, "Application of Control Theory for 2-DOF Control System (A Design Method of Robust Controller for Each Axis of a Hydraulic Manipulator)," Trans. of JSME(C), Vol. 64, No. 617, pp. 177-184, 1998.

7. 안경관, 조용래, 이병룡, 양순용, "전기 유압 매니플레이터의 강건 힘 제어," 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 4, pp. 202-208, 2002.

8. 岩井善太, 単純適応制御 (SAC), 計測と制御, Vol. 35, No. 6, pp. 409-413, 1996.

9. Ozcelic, S. and Kaufman, H., "Robust Direct Model Reference Adaptive Controllers," Proc. of the 34th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3955-3960, 1995.