

CMAC 를 이용한 하이드로 포밍 공정의 압력제어기 설계 (A CMAC-BASED PRESSURE TRACKING CONTROLLER DESIGN FOR HYDROFORMING PROCESS)

○ 이우호* 박희재* 조형석* 현봉섭**
(W. H. Lee, H. J. Park, H. S. Cho, B. S. Hyun)

* 한국과학기술원 생산공학과 (KAIST, Dept. of Prod. Eng.)
** 한국과학기술연구원 기계공학부 (KIST, Mech. Eng.)

ABSTRACT A pressure tracking control of hydroforming process is considered in this paper. To account for nonlinearities and uncertainties of the process, an iterative learning control scheme is proposed using Cerebellar Model Arithmetic Computer (CMAC). The experimental result shows that the proposed learning control is superior to any fixed gain controller in the sense that it enables the system to do the same work more effectively as the number of operation increases.

1. 서론

본 연구에서는 박판 소재의 정교한 성형 가공에 사용되는 하이드로 포밍기의 성형실의 압력제어기를 CMAC 를 이용하여 설계하고자 한다. 하이드로 포밍 공정은 정교한 박판 성형품을 제작하기 위하여, 다이캐비티 (die cavity) 없이 성형실에 유체 압력을 가한 상태에서 펀치 (punch) 로 박판을 밀어 올림으로써 성형을 진행한다._deep drawing) 과 비교해 볼때, 성형품의 두께가 균일하고 편지의 코너에 흔히 발생하는 결함이 없으므로, 복잡한 형상의 성형도 단일 공정에 수행할 수 있다. 그밖에도 공구의 마모가 적고, 다이 캐비티를 제작할 필요가 없는 장점이 있다. 이 공정중 성형실의 압력은 최종 성형품의 품질을 좌우하는 중요한 변수중에 하나이다. 성형실의 압력에 따라 두가지의 결함이 발생할 수 있다. 만일 성형실에 과도한 압력이 가해지면 성형중에 찢겨짐 (Tearing) 이 발생할 수 있고, 너무 작으면 주름 (Wrinkling) 이 발생시킨다. 이러한 양쪽의 결함을 없애기 위하여 생성역학의 상계해법 (Upper Bound Analysis) 을 적용하여 편지의 변위에 대응되는 압력 경로를 찾는 해석적인 방법이 유도되었다. [2]

하이드로 포밍기는 Fig.1 과 같이 크게 펀치 구동부와 성형실 가압부로 나눌 수 있다. 펀치의 구동은 정속 구동으로 유량 제어 밸브에 의해 펀치 구동 실린더를 제어하고, 성형실 가압은 전기유압식 압력 제어 밸브와 부우스터 (Booster, intensifier) 에 의해 제어된다.

본 연구는 펀치 구동부와 성형실 가압부를 독립시키고, 주로 성형실 가압부의 압력제어를 다루겠으며 이때 펀치 구동부에 의한 편지의 상승을 성형실 압력제어의 외란 (disturbance) 으로 본다. 성형실의 압력제어는 본질적으로 넓은 범위의 압력을 추종해야 하므로 그 작동점이 상당히 넓은 영역에 분포한다. 그러므로 유압요소 특유의 오리피스 비선형성, 각 포팅 밸브들의 개구량의 포화, 운동체의 마찰력과 같은 여러 비선형성들에 크게 영향을 받는다. 따라서, 하이드로 포밍기의 압력제어기를 설계하는데 있어 일반적으로 사용되고 있는 선형화 기법에 의한 기존 설계는 상당히 무리가 있다. 또한 일반 PID 제어기는 그 유연성 과정이 어렵고 작업조건이 바뀌면서 일정한 성능을 기대하기 어렵다. 위 에 열거한 바와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 CMAC (Cerebellar Model Arithmetic Computer) 를 이용한 반복 학습 제어기

(Iterative learning controller) 를 이용, 하이드로 포밍기의 성형실의 압력 제어기를 설계하고자 한다. 하이드로 포밍기는 대량생산용 기계이므로 이러한 학습제어기와 같은 점진적 향상을 추구하는 제어기를 사용하는 것이 합당할 것이다. 원래 CMAC 는 Albus [3],[4] 에 의해서 처음 주장되었는데, 근본적으로 공유 메모리 (Association memory) 를 이용하여, 시스템의 입출력 관계를 표현할 수 있는 신경구조의 연산 계산기 (Cerebellar Model Arithmetic Computer) 이다. 이 계산기는 기지 (known) 의 입출력 자료를 근거로 각 메모리의 가중치를 변화시키는 점진적 학습 (training) 에 의해 공유 메모리 구조로 시스템을 표현하는 블랙박스 (Black Box) 기법이다.

본 연구에서는 CMAC 원용 학습제어기를 설계함에 앞서 하이드로 포밍기의 수학적 모델링을 통하여 선산기 시뮬레이션으로 CMAC 제어기의 수렴성 조사를 진행하였다. 이 시뮬레이션을 근거로 설계된 CMAC 제어기의 효용성을 실험을 통하여 확인하였다.

2. 성형실 가압부의 구조

성형실 가압부는 펌프, 부우스터, 전기 비례형 압력 제어 밸브 (Proportional relief valve), 성형실 (forming chamber) 로 구성된다. 펌프에서 공급된 유량은 전기 비례형 압력 제어 밸브에 의하여 소실되어진다. 이 소실되는 유량을 제어함으로써 부우스터 1 차측에 형성되는 압력의 크기를 조절할 수 있게 된다. 부우스터 2 차측의 압력 즉 성형실의 압력은 부우스터 1 차측의 압력에 의한 힘과 평형을 이루는 압력이 될때까지 증가함으로써, 1차측 압력과는 부우스터 피스톤의 면적비에 해당하는 비율의 압력을 형성한다.

3. 수학적 모델링

하이드로 포밍기를 유량 방정식, 연속 방정식, 그리고 운동 방정식에 의하여 모델링하였다.

3.1 가 정

수학적 모델링 시스템을 단순화하기 위하여 중요하지 않은 인자를 무시하고 다음과 같은 가정을 하였다.

- i) 유체의 물성치는 온도와 압력에 영향을 받지 않는다.
- ii) 도관이 충분히 커서 유체의 손실이 없다.

- iii) 각 유입부품이나 도관을 유체와 비교하여 강제로 분다.
- iv) 각 오리피스 (orifice) 를 유체의 흐르는 속도가 상당히 커서 난류 유동으로 본다.

3.2 유량 방정식

전기 비례형 압력 제어 밸브에 사용된 오리피스에서의 압력차 (Pressure difference, ΔP) 에 대한 유량 (Q) 의 관계를 구하였다.

가변형 주 오리피스 (Main orifice) 가변형 주 오리피스는 Fig.2 와 같이 구성되어 있으며, 이 오리피스를 통과하여 탱크로 귀환하는 유량 Q_m 은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$Q_m = C_m A_{me} \sqrt{2/\rho (P_m - P_t)} \quad (1)$$

여기서, C_m 은 주 오리피스의 유량계수, A_{me} 는 밸브의 개구 면적, ρ 는 작동유의 밀도, P_m 은 주 압력 (Main pressure), P_t 는 탱크 압력 (Tank pressure) 이다.

(1) 식에서 오리피스의 개구 면적은 다음 식으로 표시된다.

$$A_{me} = \pi d_m \sin \alpha \cdot y \quad (2)$$

여기서, d_m 은 포핏의 평균지름, α 는 포핏 각도, y 는 포핏의 수직 변위이다. 포핏 형태의 오리피스에 대한 유량계수는 Takenaka [8] 의 결과로부터 구하였다.

파일럿 오리피스 (Pilot orifice)

파일럿 오리피스는 주 챔버 (Main chamber) 와 파일럿 챔버를 연결하는 모세관 형태의 튜브 (Tube) 모양으로 이 오리피스를 통과하는 유량 Q_p 는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$Q_p = C_p A_p \sqrt{2/\rho (P_m - P_p)} \quad (3)$$

여기서, C_p 는 파일럿 오리피스의 유량계수, A_p 는 파일럿 오리피스의 단면적, P_p 는 파일럿 챔버 (Pilot chamber) 의 압력이다. 파일럿 오리피스의 단면적은 다음과 같다.

$$A_p = \pi/4 d_p^2 \quad (4)$$

여기서, d_p 는 파일럿 오리피스의 지름이다. 파일럿 오리피스와 같은 short tube orifice 에 대한 유량계수는 Merrit (1967) [7] 에 의해 구하였다.

상부 오리피스 (Upstream orifice)

상부 오리피스는 파일럿 챔버와 상부 챔버 사이에 위치해 있으며 이 오리피스를 흐르는 유량 Q_u 는 다음식과 같다.

$$Q_u = C_u A_u \sqrt{2/\rho (P_p - P_u)} \quad (5)$$

여기서, C_u 는 상부 오리피스의 유량계수, A_u 는 상부 오리피스의 단면적, P_u 는 상부 챔버의 압력이다.

포핏 오리피스 (Poppet orifice)

Fig.2 와같이 포핏 오리피스를 흐르는 유량 Q_r 은 오리피스 양단 의 압력차와 포핏 피스톤 변위에 의해 결정된다.

$$Q_r = C_r A_{re} \sqrt{2/\rho (P_u - P_d)} \quad (6)$$

여기서, C_r 은 포핏 오리피스의 유량계수, A_{re} 는 포핏 오리피스의 개구 면적, P_d 는 하부 챔버의 압력이다. 주 챔버에서와 같이 포핏 오리피스의 개구면적도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_{re} = \pi d_r \sin \gamma \cdot z \quad (7)$$

여기서, d_r 은 포핏의 평균 지름, γ 은 포핏 각도, z 는 포핏의 수평 변위이다.

하부 오리피스 (Downstream orifice)

하부 오리피스는 하부 챔버 (Downstream chamber) 와 탱크 사이에 위치해 있으며, 이 오리피스를 통과하는 유량 Q_d 는 다음식에서 구하였다.

$$Q_d = C_d A_d \sqrt{2/\rho (P_d - P_t)} \quad (8)$$

여기서, C_d 는 하부 오리피스의 유량계수, A_d 는 하부 오리피스의 단면적이다.

3.3 연속 방정식

작동유의 압축성을 고려하면 각 챔버안의 압력은 각 챔버안으로 흘러 들어오는 유량과 빠져나가는 유량으로 부터 구하여진다.

주 챔버 (Main chamber)

주 챔버는 전기 비례형 압력 제어 밸브의 일부분과 부우스터의 일차측과 도관으로 이루어 졌다. 이 챔버의 연속 방정식은 다음식과 같다.

$$\dot{P}_m = \frac{\beta}{V_m} [Q_s - Q_m - Q_p - A_m \dot{y} - A_1 \dot{w}] \quad (9)$$

여기서, \dot{P}_m 은 주 압력의 변화율 (Main pressure change rate), β 는 작동유의 체적 탄성계수 (Bulk modulus), V_m 은 주 챔버의 총 체적, Q_s 는 펌프 토출 유량, \dot{y} 은 주 포핏의 속도, A_1 은 부우스터 피스톤 일차측의 단면적, \dot{w} 은 부우스터 피스톤의 속도이다.

파일럿 챔버 (Pilot chamber)

파일럿 챔버는 파일럿 오리피스와 상부 오리피스 사이에 위치하고 있다. 파일럿 챔버에서의 연속 방정식은 다음 식에 의해 구하여진다.

$$\dot{P}_p = \frac{\beta}{V_p} [Q_p - Q_u + A_m \dot{y}] \quad (10)$$

여기서, \dot{P}_p 는 파일럿 챔버의 압력변화율, V_p 는 파일럿 챔버의 체적이다.

상부 챔버 (Upstream chamber)

상부 챔버의 연속 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{P}_u = \frac{\beta}{V_u} [Q_u - Q_r] \quad (11)$$

여기서, \dot{P}_u 는 상부 챔버의 압력 변화율, V_u 는 상부 챔버의 체적이다.

하부 챔버 (Downstream chamber)

하부 챔버에서의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{P}_d = \frac{\beta}{V_d} [Q_r - Q_d] \quad (12)$$

여기서, \dot{P}_d 는 하부 챔버의 압력변화율, V_d 는 하부 챔버의 체적이다.

성형실 (Forming chamber)

성형실의 총체적은 부우스터의 2차측과 성형실, 그리고 2부분을 연결하는 도관으로 구성되어 있다. 성형실에서의 연속방정식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{P}_f = \frac{\beta}{V_f} [A_f(x_p) \dot{x}_p + A_2 \dot{w}] \quad (13)$$

여기서, \dot{P}_f 는 성형실 압력의 변화율, V_f 는 성형실의 체적, $A_f(x_p)$ 는 펀치의 단면적, \dot{x}_p 는 펀치의 상승속도, A_2 는 부우스터 2차측의 단면적이다.

편지가 성형실로 전진함에 따라 성형실의 제척의 변화는 다음과 같다.

$$V_f(t) = V_{f0} - \int_0^{T_f} A_f(x_p) dt \quad (14)$$

여기서, V_{f0} 는 성형실의 초기 제척, T_f 는 가공 공정시간이다.

3.4 운동 방정식

주 피스톤 (Main piston)

전기 비례형 압력 제어 밸브의 주 피스톤 운동 방정식은 다음과 같다. 외력으로는 스프링력, 유체 압력 등이 작용한다.

$$M_m \ddot{y} + B_m \dot{y} + K_m y = A_{m1} P_m - A_{m2} P_p - F_0 \quad (15)$$

여기서, M_m 은 주 포핏 피스톤의 질량, B_m 은 포핏 피스톤의 감쇄계수, K_m 은 스프링 상수, F_0 는 스프링의 초기 압축력, A_{m1} , A_{m2} 는 주 상하면의 단면적이다.

포핏 (Poppet)

포핏 피스톤에는 유체압력, 자기력, 유동력등이 작용한다. 이 포핏에서의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M_p \ddot{z} + B_p \dot{z} = K_1 i - (P_u - P_d) A_f - K_f (P_u - P_d) z \quad (16)$$

여기서, M_p 는 포핏 피스톤의 질량, B_p 는 포핏 피스톤에서의 감쇄계수, K_1 는 전자기력 상수, K_f 는 유동력 상수, z 는 포핏 피스톤의 변위이다.

부우스터 (Booster)

Fig.3 과 같이 부우스터는 단면적이 다른 부우스터 피스톤의 힘 평형을 이용하여 1차축의 저압으로 2차축의 고압을 형성시키는 역할을 한다. 그 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M_b \ddot{w} + B_b \dot{w} = A_1 P_m - A_2 P_f - F_1 \quad (17)$$

여기서, M_b 는 부우스터 피스톤의 질량, B_b 는 감쇄계수, w 는 부우스터 피스톤의 변위, F_1 는 부우스터 피스톤과 실린더의 마찰력이다.

4. CMAC 원용 학습 제어기 설계

CMAC (Cerebellar Model Arithmetic Computer) 는 시스템의 임출력특성으로부터 시스템의 특성을 공유 메모리 (associate memory) 를 사용한 맵핑 (mapping) 관계로 표현하는 일종의 Table look-up technique 이다. 이 메모리가 시스템의 거동을 잘 표현할수 있도록 점진적으로 학습 (training) 시켜서, 이 메모리값을 이용하여 추종제어에 이용한다.

4.1 역 모델

피드 포워드 제어방법으로 주어진 경로를 추종하도록 하기 위해서는 원하는 출력에 해당하는 적절한 입력을 발생시켜야 한다. 이러한 입력을 발생시키기 위해서는 대상 시스템의 역모델 (inverse model) 을 구하면 쉽게 얻을수 있다. 성형실의 압력을 원하는 바로 추종할수 있는 입력을 선정하는 방법으로 CMAC 테크닉 을 사용한다. 즉 하이드로 포밍기의 역모델을 CMAC 메모리에 테이블화하고 이 테이블에 의해 입력을 구한다. [5], [6] 하이드로 포밍기의 역모델은 다음식으로 표현된다.

$$u(k) = g(P_f(k)) \quad (18)$$

여기서, $u(k)$ 는 이산 제어 입력, $P_f(k)$ 는 n 차의 성형실의 압력 벡터 $\{P_f(k+n), \dots, P_f(k+1), P_f(k)\}$, g 는 $u(k)$ 와 $P_f(k)$ 에 관계된 비선형 함수이다. 여기서 시스템의 역 모델을 표현하는 함수는 CMAC 메모리를 교습함에 의해 테이블형식으로 구해진다.

4.2 CMAC 메모리 시스템

메모리 시스템이 Table look-up 방식으로 제어 시스템에 적용할때, 기존의 메모리 시스템의 결점은 각 어드레스 (address) 간의 1 대 1 맵핑에 의존하므로 메모리 어드레스양이 많이 요구되고 경험에 의한 각 메모리간의 정보의 전달이 없었다. 이에 반하여 CMAC 메모리 시스템은 공유 메모리에 의해 메모리의 양을 줄일뿐만 아니라 모간 (interpolation) 에 의한 일반화 (generalization) 가 가능해진다. CMAC 모듈 (module) 에서 각각의 이산 (discretize) 된 압력상태 벡터 (pressure state vector) P_f 의 인접 메모리로의 맵핑과 각 P_f 에 대한 메모리 장소의 가중치 (weighting) 의 합에 의해 $g(P_f)$ 함수가 구해지는 형태가 Fig.4 에 나타나 있다. 각 P_f 에 대한 메모리 장소의 관계는 a_i 의 값 ('0' 또는 '1') 에 의해 결정된다. CMAC 출력은 다음식에 의해 구해진다.

$$g(P_f) = \sum_{i=1}^N a_i w_i \quad (19)$$

여기서, $a_j = 1$ 또는 0 이다.

4.3 교습 방법 (Traing Rule)

각 작업이 끝날때마다 CMAC 메모리는 다음과 같이 교습 된다. 전 작업시의 성형압력 데이터를 사용, 식 (19)로 부터 CMAC 메모리에 의해 얻은 출력 $g(P_f)$ 와 전 작업시의 실제 $u(k)$ 를 비교한다. 만약 CMAC 메모리가 잘 교습되어 있으면 $g(P_f)$ 와 $u(k)$ 는 같게 된다. 여러가 생기기 되면 여러가 발생한 영역에 해당되는 메모리를 다음 식과 같이 교습한다.

$$w_i(j+1) = w_i(j) + \Delta w \quad (20)$$

여기서, j 는 작업 횟수, i 는 메모리의 어드레스이다.

$$\Delta w = k_c \frac{u(k) - g(P_f(k))}{C} \quad (21)$$

여기서, C 는 인접 메모리수, k_c 는 학습 계인 이다.

4.4 CMAC 원용 학습제어기 (CMAC Based learning Controller)

CMAC 모듈은 다음과 같이 제어에 적용된다. Fig.5 에 나타난 바와 같이 원하는 압력 Trajectory P_f 가 Trajectory Planner 에 의해 계산되며 CMAC 제어기는 피드 포워드 제어기로 구성된다. 메모리가 교습되기전까지 어느정도의 제어성능을 위하여 피드 백 부우프로 재래의 제어기를 구성하였다.

5. 시뮬레이션

3장에서 유도한 하이드로 포밍기의 지배 방정식들을 Runge-Kutta 방법에 의하여 전산기 시뮬레이션하였다. 이때 전체 지배방정식은 비선형 11차 미분 방정식이 되며, 각 매개변수 값들은 선행된 연구와 실험을 통하여 Table.1 과 같이 정했다. 실험이나 측정의 의하여 정하기 어려운 감쇄계수와 유량계수는 전제 Open loop 특성을 비교하면서 맞추어 나갔다. 이러한 방법으로 보고 4장에서 설명한 CMAC 원용 학습제어기를 설계하였다. 본 연구에서는 2개의 입력 state $\{P_f(k+1), P_f(k)\}$ 를 사용하였다. 전산기 용량의 제한을 받으므로, 분해능을 2 bar 로 하여 최대 압력범위 0 - 700 bar 를 350 등분하였다.

추종 오차의 수렴성을 고찰하기 위하여

$$\text{적분자승오차 (ISE)} = \int_0^t (P_d(t) - P_f(t))^2 dt$$

를 구하여 비교하였다. 학습 제어기는 기본적으로 직린포상 형태로 제어되므로, 비례제어기를 도입하여 Fig.5 와 같이 피이드 백 제어기를 구성하였다.

학습개인(k_c)를 0.5 로 고정시키고 공용 메모리(C) 수를 20, 30, 40 으로 변화시키면서 각각 10번의 반복 시뮬레이션을 하였다. Fig.8 에 공용 메모리수의 변화에 따른 ISE 값의 경향을 나타내었다. 공용 메모리수가 증가하게 됨에 따라 초기에는 ISE 값의 수렴속도가 빨라지나, 공용메모리수가 40 인 경우에는 반복횟수가 증가할수록 ISE 값이 발산하려는 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 이 시뮬레이션 결과 공용 메모리의 증가, 즉 일반화의 증가에 따른 모간의 의한 교습되어지는 메모리가 많아지게 됨에 따라 수렴속도가 빨라지는 경향을 보였으나, 부정확한 정보에 의한 교습에 의해 작업 횟수가 증가하면서 제어기의 성능이 악화되는 단점이 생기는 것을 알 수 있다.

6. 실험

6.1 실험 장치

하이프로 포밍기와 컴퓨터 (IBM PC-XT) 와의 인터페이스 구성도는 Fig.7 과 같다. 각 시퀀스 제어와 CMAC 원용 학습제어는 Data acquisition system 을 이용하여 입출력시켰다.

6.2 실험 조건

본 실험에서는 샘플링 시간을 17msec 으로 하고 편지 구동 속도를 0.3cm/sec 로 조절하여 총 성형시간을 6초로 정하였다. 시뮬레이션에서 선정한 k_c (0.5) 와 C (30) 값을 사용하여 직접 실험 더링 가공품을 성형하는 경우에 적용하였다. 가공한 성형품의 모양은 Fig.6 과 같으며, 시편의 재료는 강 (steel) 을 사용하였다.

6.3 실험 결과

실험 결과 CMAC 원용 학습제어기가 넓은 범위의 압력곡선을 추종하는데 있어서, 작업횟수가 증가하게 됨에 따라 Fig.9 와 같이 만족할 만한 성능을 보이는 것을 알 수 있었다. 전체 시간 구간에 걸쳐 추종 성능이 우수하게 나타났으며, 5회 정도의 반복작업후부터는 적분자승 오차 (ISE) 가 더 이상 감소하지 않고 진동하는 경향이 Fig.10 에 나타나 있다. ISE 값이 더 이상 감소하지 않는 이유는 각 작업마다의 초기상태 및 작업조건 변화, CMAC 제어기 설계의 비협합 때문으로 여겨진다.

7. 결론

본 연구에서는 막판을 정밀성형하는 하이프로 포밍기의 압력제어에 대하여 시뮬레이션 실험하였다. 하이프로 포밍기의 비선형성, 넓은 범위의 압력구간을 제어하기 위하여 CMAC 원용 학습제어기가 제안되었다. 편지의 전전에 의한 외란, 서스펙의 비선형성에도 불구하고 추종 성능이 우수한 결과를 얻었으며, 또한 작업횟수가 증가하게 됨에 따라 추종 성능이 좋아지는 결과를 얻었다. ISE 값의 수렴속도의 증가, 그리고 보다 우수한 추종제어 성능을 나타낼 수 있는 CMAC 원용 학습제어기를 설계하기 위해서는 공용 메모리수 및 학습개인의 선정, 메모리의 효율적 사용등 많은 연구가 있어야 하겠다.

8. 참고 문헌

1. Park, H.J., Cho, H.S., Yang, D.Y., and Hyun, B.S (1987). A Pressure tracking controller for Hydroforming process. 87' KACC, Vol.2, pp.317-323.
2. Noh, T.S., and Yang, D.Y., (1987). An Analysis of Hydroforming of Regular Polygonal Boxes. Int. Journal of Mech. Sci., Vol.29, pp. 139-148.
3. Albus, J.S. (1975). A New Approach to Manipulator Control: The Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC). Trans. ASME, J of Dynamic Syst. Meas., Cont. Vol 97 pp.220-227.
4. Albus, J.S. (1975). Data Storage in the Cerebellar Model Articulation controller (CMAC). Trans. ASME, J of Dynamic Syst. Meas., Cont. Vol 97 pp. 228-233.
5. Ersu, E. and Tolle, H. (1984). A new concept for learning control inspired by brain theory. IFAC '84 9th World Congress. Vol.7 pp.245-250.
6. Miller, W.T. (1987). Sensor based control of robotic manipulators using a general learning algorithm. IEEE J of Robotics and Automation. Vol.RA-3 No.2, pp.157-165.
7. Merritt, H.R (1967). Hydraulic Control System, Wiley, NewYork
8. Takenake, T. and Urata, E. (1968). Static and Dynamic characteristics of Oil-Hydraulic Control Valves. The 1968 Fluid Power International Conference, Tokyo, Japan, May, pp.67-74.
9. Choi, K.J. (1987). A study on the parameter identification and dynamic characteristics of the Electro magnetic relief valves. M.S. Thesis, KAIST, July

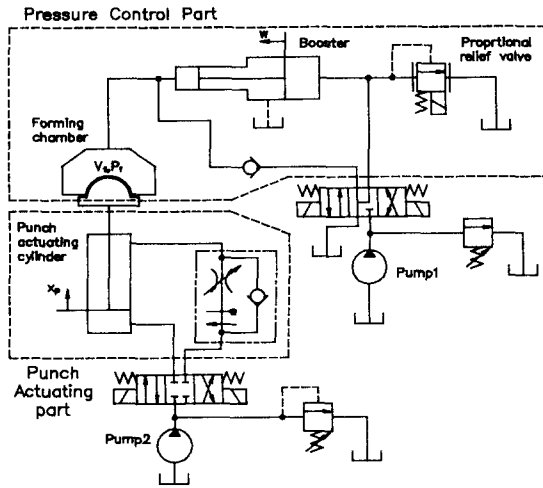


Fig.1 Hydraulic circuit of the Hydroforming machine.

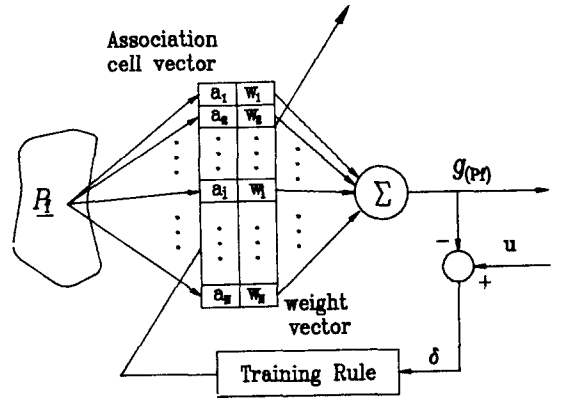


Fig.4 CMAC memory system for the pressure control of the Hydroforming processes.

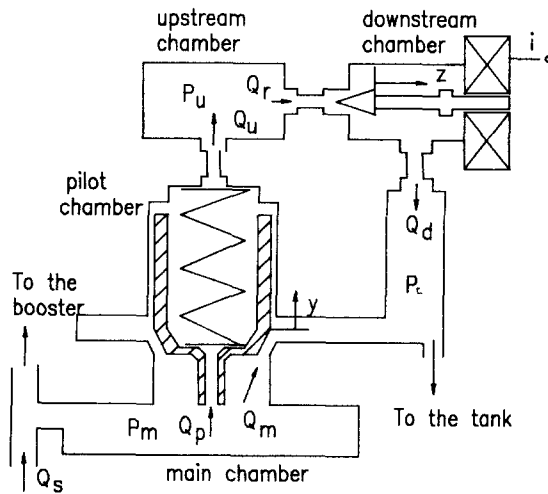


Fig.2 Schematic diagram of the proportional relief valve.

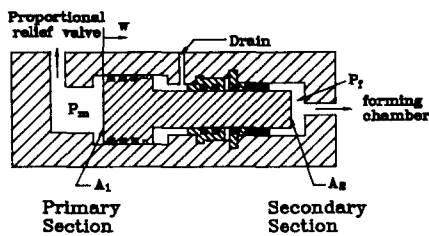


Fig.3 Schematic diagram of the booster.

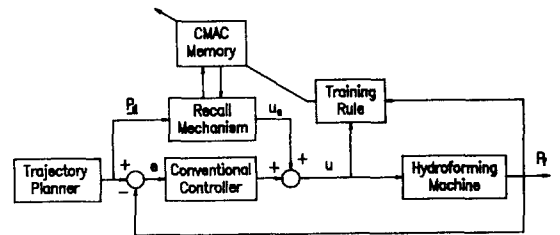


Fig.5 Block diagram of the proposed CMAC-based learning control.

Example of product shapes	
Cylindrical Shape	Semi-spherical Shape

Fig.6 Two typical product shapes of Hydroforming processes.

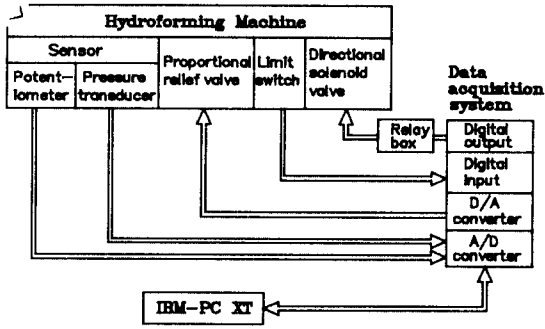


Fig.7 Schematic diagram of Experiment set.

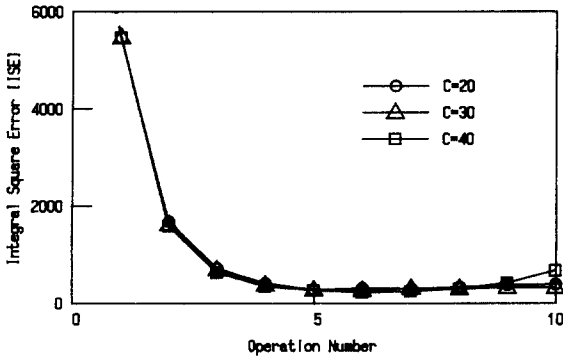


Fig.8 Effect of generalization (C) on convergence.

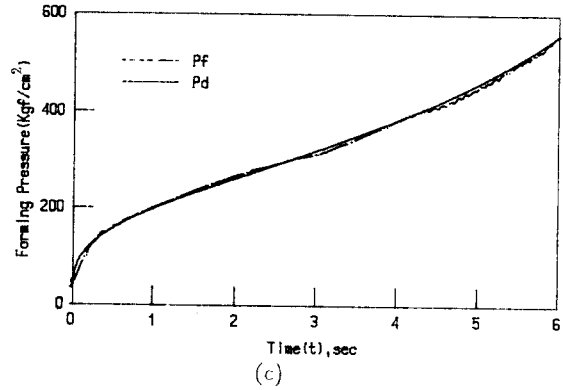
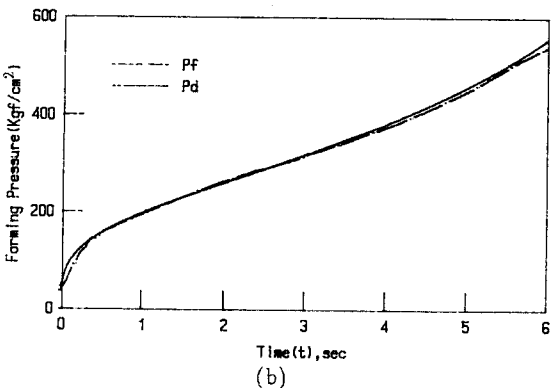
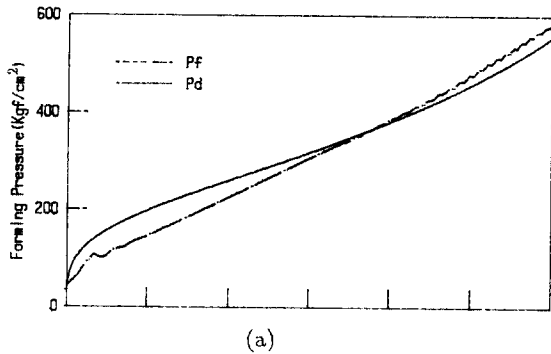


Fig.9 Experimental results of the CMAC-based learning controller. ($C = 30, k_c = 0.5$)

- (a) 1st operation.
- (b) 5th operation.
- (c) 10th operation.

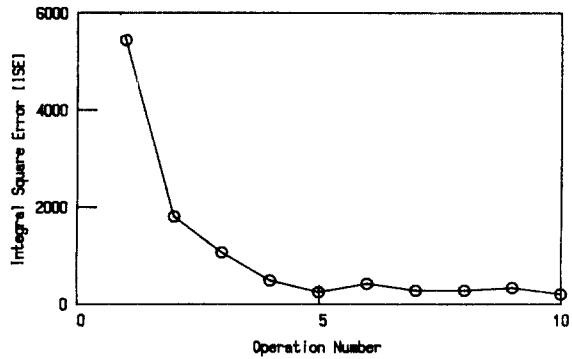


Fig.10 Convergence performance of the proposed control.

($C = 30, k_c = 0.5$)

TABLE 1 System parameters

Parameter	Value	Dimension
M_m	0.128	Kg
M_z	0.004	Kg
M_b	24.80	Kg
K_m	2.110	Kgf/cm
P_0	4.120	Kgf
K_1	0.002	Kgf/m.A
V_m	530.2	cm ³
V_p	5.790	cm ³
V_a	3.160	cm ³
V_d	2.370	cm ³
V_f	1537.	cm ³
A_{b1}	63.51	cm ²
A_{b2}	176.1	cm ²
Q_s	1233.	cm ³ /sec.
α	9.2	degrees
γ	19.5	degrees
C_m	0.60	-
C_p	0.366	-
C_u	0.42	-
C_d	0.780	-
β	6800	Kgf/cm ²