

Fuzzy SOC 를 이용한 하이드로 포밍 공정의 압력제어기 설계

(A FUZZY SOC BASED PRESSURE TRACKING CONTROLLER DESIGN FOR HYDROFORMING PROCSS)

김 문중 박 회재 조형석
(M. J. Kim, H. J. Park, H. S. Cho)

한국과학기술원 생산공학과(KAIST, Dept. of Prod. Eng.)

ABSTRACT

A pressure tracking of hydroforming process is considered in this paper. To account for nonlinearities and uncertainty of the process. A fuzzy SOC based iterative learning control algorithm is proposed. A series of experimentals were performed for the pressure tracking control of the process. the experimental results show that regardless of inherent nonlinearities and uncertainties associated with hydraulic system. A good pressure tracking control performance is obtained using the proposed fuzzy learning control algorithm.

1. 서론

본 논문에서는 유체의 압력을 이용하여 박판소재(Sheet metal)를 정밀성형하는 하이드로 포밍 공정에 퍼지 집합이론에 근거한 압력제어기를 설계하고 자한다. 기존의 성형공정에서는 두개의 다이(Die)를 이용하여 그 사이에 작업소재를 끼워 성형을 하지만 하이드로 포밍 공정은 원하는 형상의 펀치(Punch)금형만 가지고 작업을 할 수 있다. 펀치의 상승과 함께 주위에 유체 압력을 가해 박판소재를 펀치금형에 압착시킨다. 따라서 일정높이의 펀치 상승으로 한번에 성형을 끝내게 된다. 고압의 압력이 시편 주위에 작용하게 되므로 두께가 일정하고 작업 후 변형이 적은 성형품을 얻을 수 있다. 그러나 하이드로 포밍 공정은 성형중의 펀치 상승 높이와 속도 그리고 그때 가해지는 압력에 따라 성형품의 품질이 크게 좌우된다. 만약 작용하는 압력이 작으면 시편의 플랜지(Flange) 부분에서 주름(Wrinkling)이 발생하고 반대로 압력이 너무 높으면 펀치 상단부에서 찢어짐이 나타난다.

이와 같은 결함을 방지하고 두께가 균일한 성형품을 얻기 위해 각 펀치의 변위마다 최적압력을 나타내는 커브가 구해져야 한다. 이러한 압력곡선은 펀치의 형상과 크기, 시편의 기계적 성질과 사이즈에 따라 달라질 수 있다. 소성역학에서 상계해법(Upper Bound Analysis)를 이용하여 최적 압력곡선의 결정을 위한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 위와 같은 방법으로 구한 펀치 변위 대 압력곡선을 잘 추종할 수 있는 제어기를 설계하고자 하는 것이다. 그러나 하이드로 포밍 공정은 초기압력에서 최종압력까지의 넓은 범위의 압력을 추종해야 하므로, 각 유압요소들의 비선형성, 각 운동체 상호간의 마찰력, 펀치의 상승으로 인한 성형실 내부의 압력변화 등과 같은 어려움을 극복해야 한다. 이런 비선형특성과 복잡성 때문에 일반적으로 많이 사용하고 있는 선형화기법으로 설계된 제어기나 비례 적분 미분(PID)제어기를 사용해서는 원하는 압력곡선의 추종이 상당히 어렵다. 특히 특정조건에서 잘 동작시킨 제어기일지

라도 펀치의 형상이 바뀌거나 온도변화에 대한 유압제어대상의 특성이 달라질 경우, 일정한 성능을 기대하기 어렵다. 이와같은 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에는 Fuzzy SOC (Self Organizing Control) 를 이용한 반복학습제어기를 설계하고자 한다. 하이드로포밍기는 대량생산용이므로 이러한 학습제어기를 사용하여 점진적으로 성능을 향상시키는 것이 가능하다. 본 연구에서는 설계된 Fuzzy제어기를 실제 실험을 통하여 그 효용성을 검토한 결과, 제안된 제어기가 우수한 추종성능을 갖는것을 확인하였다.

2. 하이드로 포밍 공정의 작동 원리

하이드로 포밍기는 크게 유압장치와 측정 및 제어장치로 구성되어 있다. 하이드로 포밍기의 전체 전경과 각 요소의 배치는 Fig. 1의 개략도에 나타나 있다. Fig. 1과 같이 작업대상물은 고무판(Rubber pad)과 펀치 사이에서 고무판의 상단부에 작용하는 유체 압력을 받으면서 펀치의 상승과 함께 성형된다. 성형구동 실린더는 직접 성형시 참여 하지 않지만 작업물을 공급, 취출할 수 있도록 성형실을 개폐하는 역할을 한다. 하이드로 포밍기의 유압장치는 Fig. 2와 같이 크게 펀치구동부와 성형실 가압부로 나눌 수 있다. 펀치의 구동은 정속구동으로 유량제어 밸브에 의해 펀치구동 실린더를 제어하고 성형실의 가압은 전기 유압식 압력제어 밸브와 부우스터(Booster, intensifier)에 의해 제어된다. 성형실 가압부는 펌프, 부우스터, 전기 비례형 압력제어 밸브(Proportional Relief Valve)로 구성된다. 펌프에서 공급된 유량은 전기비례형 압력제어 밸브에 의하여 소실되어진다. 이 소실되는 유량을 제어함으로써 부우스터 1차측에 형성되는 압력의 크기를 조절할 수 있다. 부우스터 2차측의 압력 즉 성형실의 압력은 부우스터 1차측의 압력의 원과 평형을 이루는 압력이 될때까지 증가함으로써, 1차측 압력과 부우스터 피스톤의 면적비에 해당하는 비율의 압력을 형성한다.

3. 퍼지 집합 이론을 이용한 하이드로 포밍 공정의 압력제어기 설계

현재까지 연구되어온 제어기들은 주로 제어대상의 수학적 모델링에 의존하여 설계되었지만 제어대상의 비선형성이나 불확실성으로 모델링이 어려울 경우에는 만족할만한 제어성능을 기대하기 힘들다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제어대상의 모호하고 불확실한 정보를 이용하여, 정성적인 틀을 만들어 나가면서 제어성능을 향상 시키는 퍼지 SOC를 기초로한 학습제어기를 설계한다. 퍼지 제어기의 설계에 앞서 퍼지집합이론을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

3. 1 퍼지 집합 이론

퍼지 집합이론은 Zadeh[2] 에 의하여 제안되었는데 인간의 경험이나 지식을 제어 알고리즘으로 구현하여 인간이 갖는 모호성(Ambiguity)이나, 불확실성(Uncertainty)을 표현하는 수단으로 응용되었다. Fuzzy집합은 일반적인 물리적 현상을 참과 거짓보다는 참에 가까운 (혹은 거짓에 가까운)정도를 Membership 함수로 정의하여 표현한다.

3.1.1 Fuzzy 집합의 정의

Fuzzy 집합 A 는 다음과 같이 정의한다.

$$A = \{ x, \mu_A(x) \mid x \in X \} \quad (3. 1)$$

여기서 X 는 전체논의 집합(University of Discourse)

x 는 X 의 원소

$\mu_A(x)$ 는 x 가 집합 A 에 속하는 Membership Value 이다.

$\mu_A(x)$ 는 다음과 같은 값의 범위를 갖는다.

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (3. 2)$$

$\mu_A(x)$ 의 값이 1 에 가까울 수록 x 가 집합 A 에 속하는 정도가 크다.

3.1.2 Fuzzy 집합의 논리와 연산

두개의 Fuzzy 집합 A 와 B 가 주어졌을때 두 집합사이의 기본적인 Fuzzy 논리 연산자인 "OR", "AND", "NOT"의 정의는 다음과 같다.

(1) "A OR B" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{MAX}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3. 3)$$

(2) "A AND B" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{MIN}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3. 4)$$

(3) "NOT A" :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3. 5)$$

3.1.3 Fuzzy 조건 명제의 추론

Fuzzy 집합 A 와 B 가 각각 전체집합 U 와 V 의 부분집합일때

$$\text{" If A then B " (즉 } A \rightarrow B) \quad (3. 6)$$

로 나타나는 명제를 "Fuzzy 조건명제" 라 한다. 이들 관계를 R 이라 정의하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_R(x,y) = \text{MIN}[\mu_A(x), \mu_B(y)] : x \in U, y \in V \quad (3. 7)$$

A 에서 B 로의 Fuzzy관계 R 이 위와 같이 주어지면 Composition Rule of Inference[2] 에 의하여 $A'(x)$ 로 부터 $B'(y)$ 를 추론할 수 있다.

$$\mu_{B'(y)} = \text{MAX MIN}[\mu_{A'}(x), \mu_R(x,y)] \quad (3. 8)$$

3.1.4 Fuzzy 변수의 Defuzzify

추론된 Fuzzy 집합 $B(b_i)$ 로부터 대표값 b_o 를 선정하는 과정을 Defuzzify 라 한다. Defuzzify 하는 방법에는 최대 평균법, 최대중점법 등이 있으나 이들 중 계산이 간단하며, 많이 사용되고 있는 중심법은 다음과 같다.

$$b_o = \frac{\sum B_i \mu_B(b_i)}{\sum \mu_B(b_i)} \quad (3. 9)$$

여기서 B_i 는 Membership 함수의 Quantized Level,

$\mu_B(b_i)$ 는 Fuzzy집합 $B(b_i)$ 의 Membership 함수이다.

3. 2 Fuzzy SOC 원용 학습 제어기 설계

자기구성 제어기는 제어대상이 매우 복잡하고 비선형특성이 강하여 숙련자의 경험이나 사전 지식으로 Rule을 생성하기 어려울때 제어기 스스로가 실제 수행중에 얻어진 정보들을 토대로 새로운 룰을 생성시키거나 기존 룰을 개선시킴으로서 원하는 제어성능을 얻을수 있는 방법이다. 이러한 SOC의 개념은 E.H. Mamdani [3]에 의해 제시되었으며 그 후 많은 응용이 있었다.

3.2.1 역 모델

추종제어에 경우에 있어서 원하는 경로를 잘 추종하기 위해서는 원하는 출력에 대응되는 적절한 입력을 발생시켜야 한다. 이러한 입력을 얻기 위해서는 대상시스템의 역모델(Inverse Dynamics)을 구하면 쉽게 입력을 얻을 수있다. 하이드로 포밍기에 인가되는 전류입력을 u , 출력을 P_r 라하면 역모델은 다음과 같이 표현된다.

$$u(k-d) = g(p_r(k)) \quad (3. 10)$$

여기서 d 는 지연시간이고 $g(\cdot)$ 는 $u(k)$ 와 $p_r(k)$ 의 관계를 나타내는 비선형 함수(Relationship)이다. 본 연구에서는 이 관계를 언어적으로 표현된 룰의 추론을 통하여 구현하여 제어기에 응용하고자 한다.

3.2.2 추론

퍼지학습 제어기에서는 룰 베이스(Rule base)를 열람하여, 전번째 시행에서 얻은 정보로 새로운 추가입력을 추론할 수 있게된다. 오차,오차변화를 다음과 같이 정의하고

$$e(k) = P_d(k) - P_r(k)$$

$$c(k) = e(k) - e(k-1)$$

추가입력을 $Z(k)$ 라고 정의하면 e, c, z 에대한 linguistic value E_j, C_j, Z_j 는 다음과 같다.

$$E_j = \{ (e, \mu_{E_j}(e)) \} \subset E \quad (3. 11)$$

$$C_j = \{ (c, \mu_{C_j}(c)) \} \subset C \quad (3. 12)$$

$$Z_j = \{ (z, \mu_{Z_j}(z)) \} \subset Z \quad (3. 13)$$

그 추론 과정은 다음과 같은 함축적 표현으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_{z_k}(z) = \bigvee_{E \subset C} (\mu_R(e, c, z) \wedge \mu_{E_1}(e) \wedge \mu_{C_1}(c)) \quad (3.14)$$

여기서 R 은 전체 관계행렬이고 \wedge 와 \bigvee 는 각각 Intersection 과 Union 이다.

3.3.3 룰의 수정

각 작업이 끝날때마다 룰 베이스의 룰은 다음과 같은 방법으로 수정된다. 식 (3.10) 을 보면 제어대상의 역모델은 $u(k)$ 와 $p_r(k)$ 관계를 가지고 표현될 수 있음을 알수있다. 그러므로 기존의 룰을 R(k)라 하면 R(k)는 다음과 같이 표현된다.

$$P(k) \rightarrow CP(k) \rightarrow U(k-d) \quad (3.15)$$

$$\rightarrow R(k) = P(k) \times CP(k) \times U(k-d) \quad (3.16)$$

여기서 P, CP는 각각 출력과 출력변화를 나타낸다. 기존의 룰이 정확하게 대상시스템의 역모델을 표현하지 못한다면 추론에 의한 $U(k-d)$ 와 실제 측정된 $U^*(k-d)$ 간에 오차가 발생하게 된다. 그러므로 새로운 룰은 다음과 같이 수정된다.

$$V(k-d) = U(k-d) + \alpha(U^*(k-d) - U(k-d)) \quad (3.17)$$

여기서 α 는 0과 1사이의 값을 갖는 수정계수이고 $V(k-d)$ 는 새로운 룰

$$R'(k) = P(k) \times CP(k) \times V(k)$$

에 사용될 수정값이다. 전체관계행렬을 R이라 하면 R은 다음과 같이 구해진다.

$$R = (R \wedge R') \vee R' \quad (3.18)$$

3.3.4 학습 제어기

퍼지 SOC 룰 이용한 학습제어기는 다음과 같이 과거의 오차와 오차 변화를 사용하여 다음 시행의 입력을 수정해 준다.

$$U_{i-1}(k-d) = U_i(k-d) + \lambda Z_i(k-d) \quad (3.19)$$

여기서 λ 는 학습이득이고 $Z_i(k)$ 는 $e_i(k)$ 와 $c_i(k)$ 를 가지고 3.3.2 에서 제시한 추론 방법으로 추론한 보정량이다. 이상에서 설명한 퍼지 SOC 학습제어기의 블록선도는 Fig. 3 과 같다.

4. 실험

불량이 없는 양질의 성형품을 얻기 위해서는 성형시작후 수 순간마다 최적의 압력을 가해야만 한다. 이 압력곡선은 Punch의 모양과 Size에 따라 다르다. Fig. 4는 대표적인 두 성형품을 나타내고 Fig. 5는 이들 형

상의 성형에 필요한 최적성형 압력곡선을 나타낸다. 본 연구에서는 앞에서 제시한 퍼지 SOC 학습 제어기의 최적성형 압력경로의 추종성능을 실험을 통하여 고찰하고자 한다. 하이드로 포밍기의 실험장치는 Fig. 6 과 같이 구성되어 있다. 제어 및 측정장치로는 각 구동부의 첨단에 부착된 Limit Switch 와 펀치의 상승높이를 측정하는 Linear Potentiometer, 그리고 성형실의 압력을 측정하기 위한 0 - 700 bar 범위의 Pressure Transducer 등이 있다. 작업공정 및 압력 제어를 위하여 제어대상과 Personal Computer 를 Interface 시켜 필요한 명령을 Software 로 처리했다. 본 실험에서는 Sampling 시간은 40 msec로 하고 한번의 성형시간을 8초로 하였다. 이때 사용한 Membership Function 과 Quantization level은 Fig. 7 와 같다.

Fig. 11는 하이드로포밍기의 성형압력의 Open-loop 응답특성을 나타낸다. 퍼지 제어기를 설계하기 이전에 하이드로 포밍기의 동특성을 고찰하기 위하여 압력제어기에 가해지는 입력전류를 200mA, 600mA, 1000mA 로 하여 압력응답특성을 고찰하였다. 초기압력은 압력제어밸브의 가제어 영역의 제한으로 약 27 kgf/cm² 의 값을 항상 나타내고 있다. 작동유체의 압축성과 마찰에 의하여 지연시간이 길고 응답이 느리다는 성격을 확인할 수 있다. 이 기초 실험결과 지연시간은 약 200msec ($m = 5, T = 0.04$ sec)로 파악되었다. Fig. 9는 추종오차의 추종성능에 학습이득이 미치는 영향을 분석한 것이다. 이 실험결과 이득이 크면 ($\lambda = 1.0$) I.S.E. 값은 증가와 감소를 반복하는 경향을 보이면서 수렴하고 작으면 ($\lambda = 0.1$) 수렴속도가 느려지는 것을 알수있다. 그러므로 본 실험에서는 빠르고 부드러운 수렴성능을 보장해 주는 학습이득값으로 $\lambda = 0.5$ 를 선택하였다.

Fig. 10은 $\lambda = 0.5$ 일 경우의 성형압력 추종경향을 보여주고 있다. Fig. 11 은 초기 룰과 5회 시행 후의 수정된 룰을 나타내고 있다. 본 실험을 통하여 제안된 학습 제어기는 약 5 - 6회 정도의 시행 후, 원하는 압력을 추종한다는 것을 관찰하였다.

5. 결론

본 연구를 통하여 박관을 정밀 성형하는 하이드로 포밍기의 성형압력 추종제어기를 설계하였다. 하이드로 포밍기가 가진 비선형성과 불확실성에 대처하기 위하여 퍼지 SOC를 이용한 반복학습 제어기를 제안하였다. 펀치의 상승으로 인한 외란과 비선형에도 불구하고 제안된 제어방법을 통하여 우수한 추종성능을 얻을 수 있었다. 향후에는 SOC구조와 룰의 수정방법의 개선과, 최적학습 이득의 선정 방법에 관한 연구가 있어야 하겠다.

6. 참고 문헌

1. Noh, T.S., and Yang, D.Y., "An Analysis of Hydroforming of Regular Polygonal Boxes" Int. Journal of Mech. Sci., Vol. 29, pp139-148, 1987
2. L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex system and Decision Process" IEEE, Trans. on Systems, man & Cybernetics, Vol. SMC-3, no.1, pp 28-44, 1973
3. T. J. Procyk & E. H. Mandani, "A Linguistic Self-Organizing Controller" Automatica, Vol 15, pp 15-30, 1979
4. Y. F. Li & C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithm for Servo systems" IEEE, Control Systems magazine, pp 65-71, 1989
5. Francois guely & Isao Todo, "A New Fuzzy Self- Organizing Control Algorithm and its Application to the Control of a Robot Arm" 20th ISIR pp 137-144, 1989
6. 정 인수, "로봇의 운동제어를 위한 온라인 자기구성 퍼지 제어기의 설계 및 응용" 한국과학기술원, 석사학위논문, 1990
7. 이 우호, "CMAC를 이용한 하이드로 포밍 공정의 압력제어기의 설계" 한국과학기술원, 석사학위논문, 1990

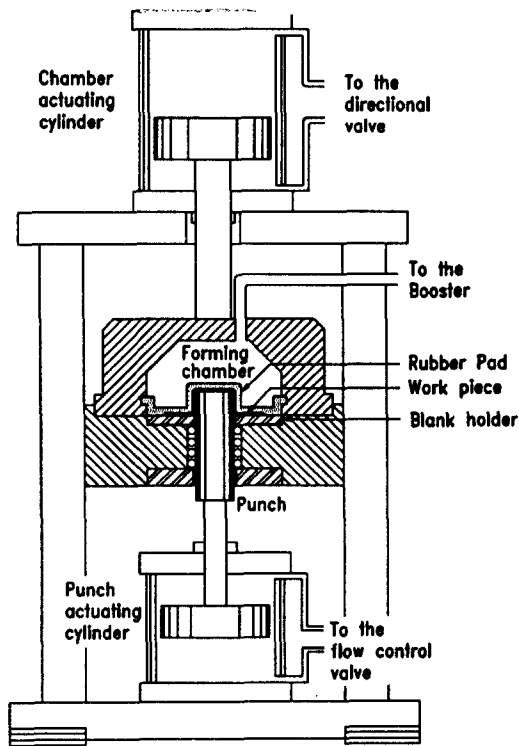


Fig.1 Hydroforming machine

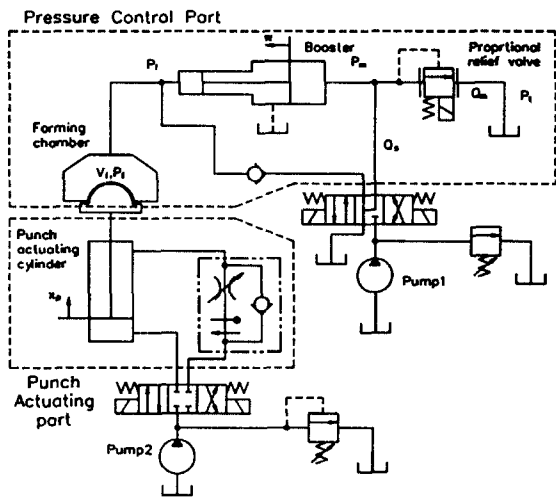


Fig.2 Hydraulic circuit of the hydroforming machine

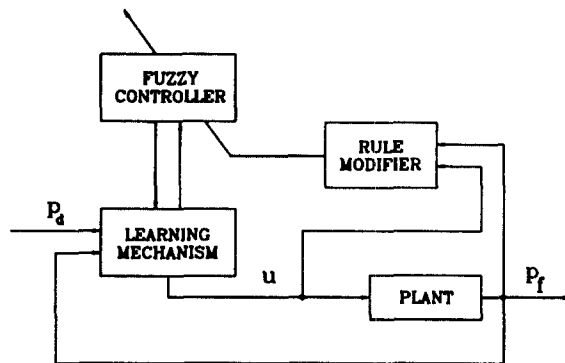


Fig.3 Block diagram of the proposed control

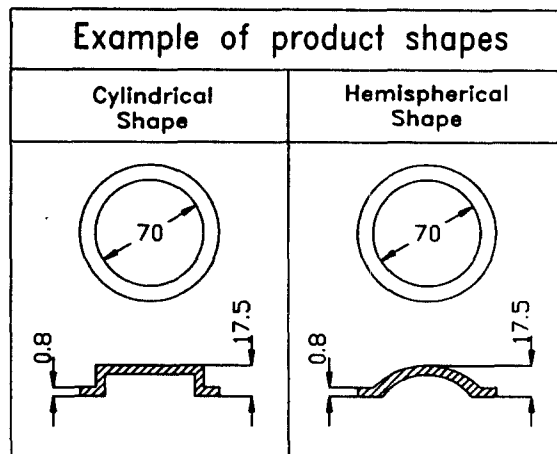


Fig.4 Two examples of product shape

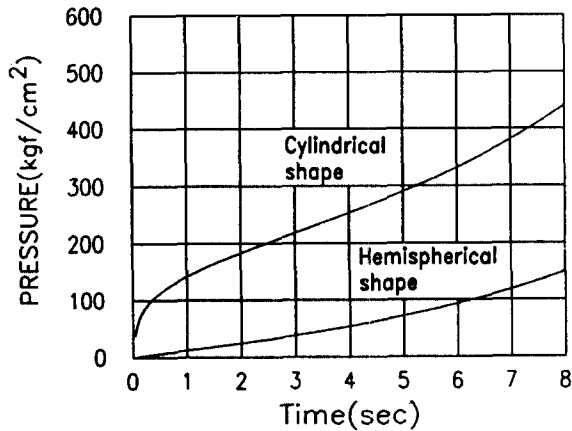


Fig.5 Desired forming pressure of two typical Punch shapes

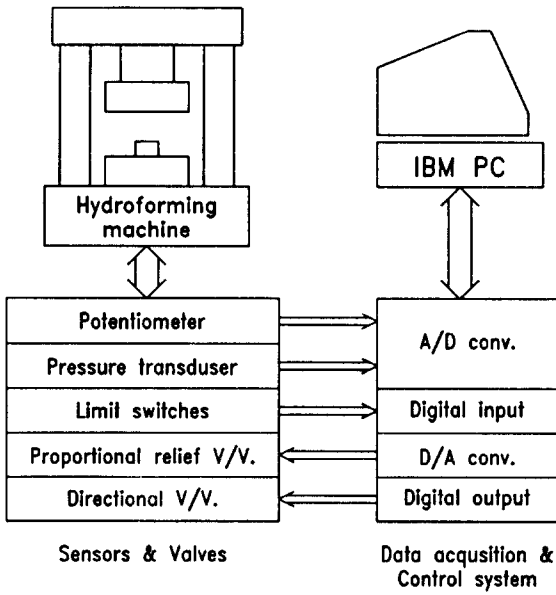


Fig.6 Schematic diagram of experimental setup

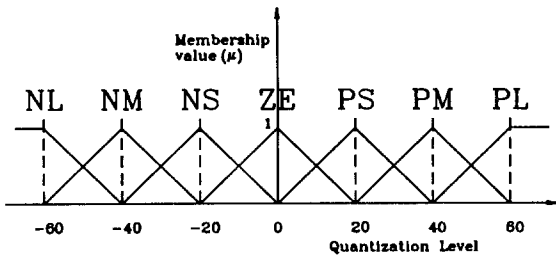


Fig.7 Membership function

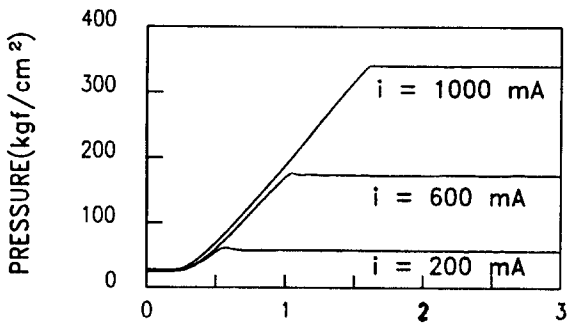
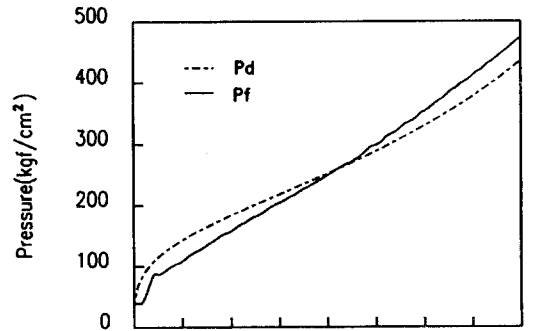
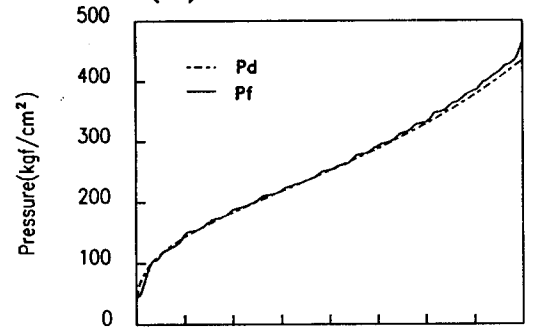


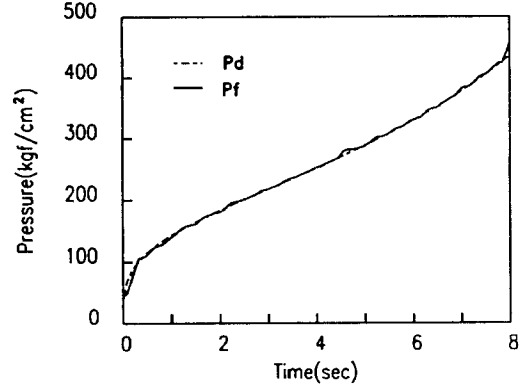
Fig.8 Open loop response of forming pressure (Pf)



(a) 1 st Iteration



(b) 3 rd Iteration



(c) 5 th Iteration

Fig.10 Convergence performances of the proposed learning control algorithm ($\lambda = 0.5$)

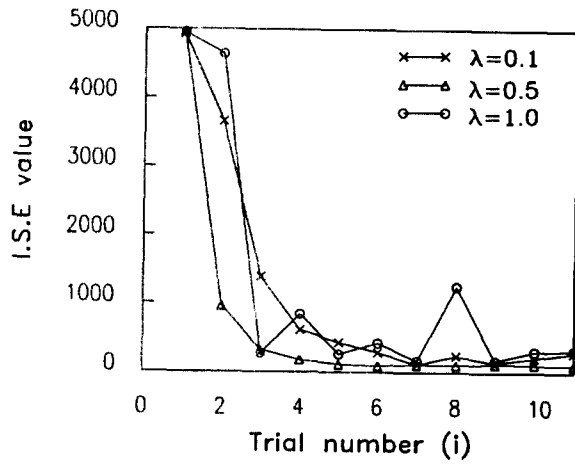


Fig.9 Effect of learning gain (λ) on convergency

		Change in error						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Error	NB	ZE	ZE	ZE	NB	ZE	ZE	ZE
	NM	ZE	ZE	ZE	NM	ZE	ZE	ZE
	NS	ZE	ZE	ZE	NS	ZE	ZE	ZE
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PS	ZE	ZE	ZE	PS	ZE	ZE	ZE
	PM	ZE	ZE	ZE	PM	ZE	ZE	ZE
	PB	ZE	ZE	ZE	PB	ZE	ZE	ZE

(a) Initial rule

		Change in error						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Error	NB	ZE	ZE	ZE	NB	ZE	ZE	ZE
	NM	ZE	ZE	ZE	NM	ZE	ZE	ZE
	NS	ZE	ZE	ZE	NS	ZE	ZE	ZE
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PS	ZE	ZE	PS	PM	PM	PS	ZE
	PM	ZE	ZE	ZE	PM	PM	ZE	ZE
	PB	ZE	ZE	ZE	PB	PB	PB	PB

(b) Modified rule

Fig.11 Initial and modified rules (after 5th trial)