

# CMAC 제어 기법을 이용한 하이드로 포밍 공정의 압력 제어기 설계

## Design of a CMAC Controller for Hydro-forming Process

이 우 호, 조 형 석  
(Woo Ho Lee and Hyung Suck Cho)

**Abstract** : This study describes a pressure tracking control of hydroforming process which is used for precision forming of sheet metals. The hydroforming operation is performed in the high-pressure chamber strictly controlled by pressure control valve and by the upward motion of a punch moving at a constant speed. The pressure tracking control is very difficult to design and often does not guarantee satisfactory performances because of the punch motion and the nonlinearities and uncertainties of the hydraulic components. To account for these nonlinearities and uncertainties of the process, an iterative learning controller is proposed using Cerebellar Model Arithmetic Computer(CMAC). The experimental results show 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. In addition, regardless of the uncertainties and nonlinearities of the forming process dynamics it can be effectively applied with little a priori knowledge about the process.

**Keywords** : CMAC memory, hydroforming process, generalization, interference

### I. 서론

본 연구에서는 박판 소재의 정교한 성형 가공에 사용되는 하이드로 포밍기의 성형실의 압력 제어를 CMAC를 이용하여 설계하고자 한다. 하이드로 포밍 공정은 박판 소재(sheet metal)를 정밀하게 성형하는 소성 가공의 한 분야로서, 펀치를 성형실(forming chamber)로 전진시키며 성형실에 유체 압력을 가하면서 공정이 이루어진다. 종전의 딥 드로잉에서는 여러 번의 공정에 의해서도 성형품의 품질이 보장되지 않거나, 복잡한 형상을 가공하지 못했었는데, 그림 1에 도시된 하이드로 포밍에서는 단 한번의 공정으로도 두께가 균일하고 스프링 백이 적은 성형품의 가공이 가능하다. 또한 이 공정에서는 펀치 금형만이 필요하고 마모에 의한 손상이 적게 되므로 금형의 가공 및 유지비가 적게 들고 수명이 길어지는 장점이 있다. 따라서, 하이드로 포밍 공정을 이용하여 자동차, 가전 제품, 항공 산업에서 생산성과 품질의 향상을 도모할 수 있다. 하이드로 포밍 공정에 있어서 성형품의 품질(quality)은 성형실에 작용하는 압력에 의해 크게 영향을 받게 된다. 성형 중 작용 압력이 원하는 압력에서 벗어나게 되면 주름(wrinkling)과 넥킹(necking) 현상이 발생한다. 작용 압력이 너무 낮게 되면 플랜지(flange) 부분에서 주름 현상이 발생하게 되고 초기의 압력이 너무 높으면 펀치 쇼울더(punch shoulder) 부분에서 찢어짐이 일어나며 성형 중 압력이 높아지게 되면 펀치 벽(punch wall)과 블랭크 홀더(blank holder) 사이에서 넥킹이 일어나게 된다. 따라서 넥킹이나 주름과 같은 결함이 없고 두께가 균일한 제품을 성형하기 위해서는 전체 성형 시간에 대해서 성형실의 압력을 적절하게 조절해 주어야 한다.

성형 중 요구되는 압력은 펀치의 변위에 따라 결정되기 때문에 원하는 형상의 성형품을 얻기 위해서는 펀치의 변위에 따른 압력을 나타내는 최적 곡선이 반드시 구해져야 한다. 이 압력 곡선은 펀치의 모양, 시편의 재료 성질(property), 두께, 반경 등에 의해 결정되며 이러한 최적 압력 곡선을 구하려는 이론적 연구가 노 테성(1), 티로시(2) 등에 의해서 수행되었다.

이러한 연구에 의해서 구해진 최적 압력 곡선은 다양

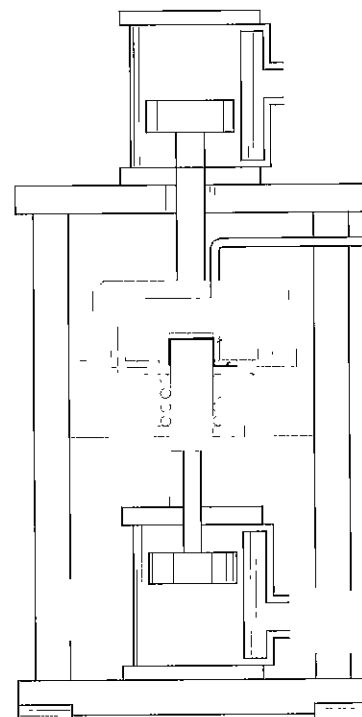


그림 1. 하이드로 포밍기.

Fig. 1. Hydroforming machine.

한 형태를 가지며 또한 압력 범위도 넓다 유체의 압력으로 성형실의 압력이 조절되는 하이드로 포밍기는 유압 요소들에 의해 구성되어 있는 전형적인 유압 시스템으로서 성형실의 압력 제어는 본질적으로 넓은 범위의 압력을 추종해야 하므로 그 작동점이 상당히 넓은 영역에 분포한다. 그러므로 유압 요소 특유의 오리피스와 비선형성, 각 포핏 밸브들의 개구량의 포화, 운동체의 마찰력과 같은 여러 비선형성들에 크게 영향을 받는다. 따라서, 하이드로 포밍기의 압력 제어를 설계하는데 있어 일반적으로 사용되고 있는 선형화 기법에 의한 기존 설계는 상당히 무리가 있다. 또한 일반 PID 제어기는 그 제어기 이득 조정 과정이 어렵고 작업 조건이 바뀌면 동특성이 달라지기 때문에 일정한 성능을 기대하기 어렵다.

위에 열거한 바와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 CMAC(Cerebellar Model Arithmetic Computer) 기법을 이용한 반복 학습 제어기(iterative learning controller)를 하이드로 포밍기의 성형실의 압력 제어기에 적용하고자 한다. 하이드로 포밍 공정은 동일한 부품을 대량 생산하는 공정이므로 이러한 반복 학습 제어기와 같은 점진적 향상을 추구하는 제어기를 사용하는 것이 합당할 것이다.

Albus<sup>(6,7)</sup>에 의해 처음으로 제안된 CMAC은 시스템의 입출력 관계를 공유 메모리(association memory)를 이용하여 표현할 수 있는 신경 구조의 연산 계산기이다. CMAC은 오직 측정된 입출력 자료만을 이용하여 연관된 메모리의 가중치를 변화시키는 점진적 교습(training)에 의해 시스템의 동적 모델을 표현할 수 있는 일종의 블랙 박스(black box) 기법이다. 이렇게 제안된 CMAC을 이용하여 Miller(6,7)가 로보트에 적용 실험하였으며 또한 2축 관절 로보트 모델에 대하여 시뮬레이션 하였다. 학습을 이용한 블랙박스 기법의 하나로써, CMAC과 유사한 신경회로망(neural network)에 의한 로봇의 비집중 제어(15)와 하이브리드 위치/힘 제어에 대한 연구(16)가 수행되었다. 최근에 CMAC의 페루프의 안정성(stability), 수동성(passivity)(17), 그리고 학습에 의한 수렴성(learning convergence)(18)에 대한 이론적 연구가 수행되었다.

본 논문에서는 전형적인 유압시스템의 하나인 하이드로 포밍기의 성형실의 압력 제어를 설계하는데 있어서 다음과 같은 연구를 수행한다. 하이드로 포밍기의 압력제어기로서 사용한 CMAC 학습 제어기에 대한 이론적 고찰 및 제어기 구성에 대하여 설명한다. 이를 바탕으로 CMAC 학습 제어기를 구성, 반복 작업에 의한 추종 오차의 수렴성에 대한 실험을 수행하였으며 실제 성형시의 우수한 추종 제어 성능을 반복 작업을 통하여 확인하였다.

II. 하이드로 포밍기의 구조 및 작동 원리

하이드로 포밍기는 그림 1과 같이 구성되어 있으며 성형 가공할 시편이 블랭크 홀더와 고무 페드 사이에

놓여진다. 펀치를 성형실로 전진시키며 펀치 행정 거리에 따라 미리 정해진 압력을 성형실에 가하며 성형이 이루어진다. 하이드로 포밍기의 유압 회로는 그림 2와 같으며 펀치 구동부(punch actuating part)와 압력 제어부(pressure control part)로 분리된다. 본 논문에서는 제품의 품질에 가장 중요한 영향을 미치는 성형실의 압력을 제어하는 압력 제어부에 초점을 두고 있다.

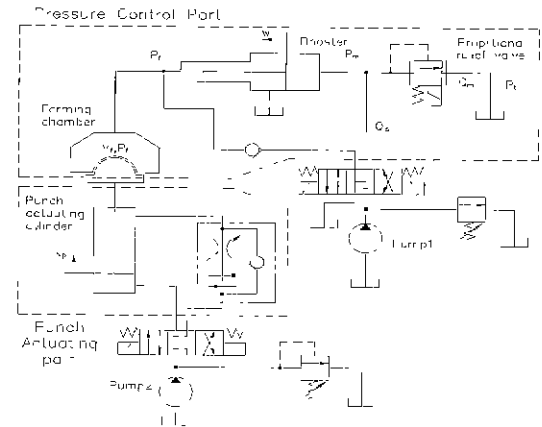


그림 2. 하이드로 포밍기의 유압 회로.  
Fig. 2. Hydraulic circuit of the hydroforming machine.

성형실 가압부는 펌프, 단면적이 다른 부스터 피스톤의 힘 평형을 이용하여 1 차축의 저압으로 2 차축의 고압을 형성시키는 부스터, 비례 압력 제어 밸브, 성형실로 구성되며 성형실 압력 제어의 원리는 다음과 같다. 우선 펌프에서 공급된 유량은 비례 압력 제어 밸브에서 밸브 마그네트에 인가된 전류에 비례하여 기폐되는 오리피스에 의해 일부 소실되는데, 이 소실되는 유량을 제어함으로써 부스터 1 차축에 형성되는 압력( $P_m$ )을 제어할 수 있게 된다. 부스터 2 차축의 압력, 즉 성형실의 압력( $P_f$ )은 부스터 1 차축의 압력에 의한 힘과의 평형을 이루는 압력이 될 때까지 증가하게 되므로 결국 원하고자 하는 적정 압력은 비례 압력 제어 밸브에 인가되는 전류로서 설정할 수 있게 된다. 성형품의 품질은 성형 중 성형실에 작용하는 유체 압력에 의해 결정되는데 성형 압력이 충분하지 못할 경우에는 제품의 표면에 주름이 잡힌 요철(wrinkling)이 발생하며, 반대로 성형 압력의 크기가 너무 클 때에는 크랙과 같은 조기 파열(tearing)이 발생한다. 따라서 양질의 제품을 성형하기 위해서는 전체 성형 시간에 대해서 성형실의 압력을 적절하게 조절해 주어야 한다. 하이드로 포밍기에 있어서 유압 장치의 동특성은 하이드로 포밍 공정에 있어서 중요한 요인이 된다. 하이드로 포밍기의 동특성은 각 오리피스에서의 유량 방정식, 라인과 각 유체 챔버에 대한 연속 방정식, 포핏과 부스터에서의 운동 방정식에 의해 영향을 받는다. 그러나, 성형실에 유량을 공급하는 펌프에서의 비선형성, 부스터에서의 유체의 누설 및 부스터

피스톤과 실린더간의 건 마찰력과 스틱션에 의한 영향, 각 유압 부품과 도관에서의 유체의 압축성에 의한 영향 등에 의해 실제 하이드로 포밍기의 동특성을 정확히 파악하는 것은 매우 어렵다. 이와 같은 이유로 인해 하이드로 포밍기를 수학적으로 정확히 모델링하는 것은 어려우며, 또한 부정확한 모델링에 의한 제어의 제어기에 의해서는 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 없다. 다음 장에서 위에서 설명한 하이드로 포밍기의 압력 제어기로서 CMAC 기법을 이용한 반복 학습 제어기를 제안하였다.

### III. CMAC을 이용한 학습 제어기

#### 1 CMAC 시스템

본 연구에서 사용하고 있는 CMAC(Cerebellar Model Arithmetic Computer) 기법의 기본적인 연산 법칙을 간략히 설명하면 다음과 같다.(3,4) CMAC는 근본적으로, 수학적으로 표현하기 불가능하거나 그 구조가 상당히 복잡하고 비선형인 미지의 함수를 반복적 교습(training)을 통하여 표현하는 기법이다. 즉 미지의 함수  $F(\underline{X})$ 의 입력 벡터를  $\underline{X}$ , 출력 벡터를  $\underline{Y}$ 라 할 때, 미지의  $\underline{X}$ 와  $\underline{Y}$ 의 관계,  $F(\underline{X})$ 를 메모리로 사용하여 표현하는 방법이다. 수학적으로 CMAC는 함수  $F(\underline{X})$ 를 다음의 2단계의 맵핑,  $F_1$ 과  $F_2$ 으로 표현한다.

$$\begin{aligned} f_1 : \underline{X} &\rightarrow \underline{A} \\ f_2 : \underline{A} &\rightarrow \underline{Y} \end{aligned} \quad (1)$$

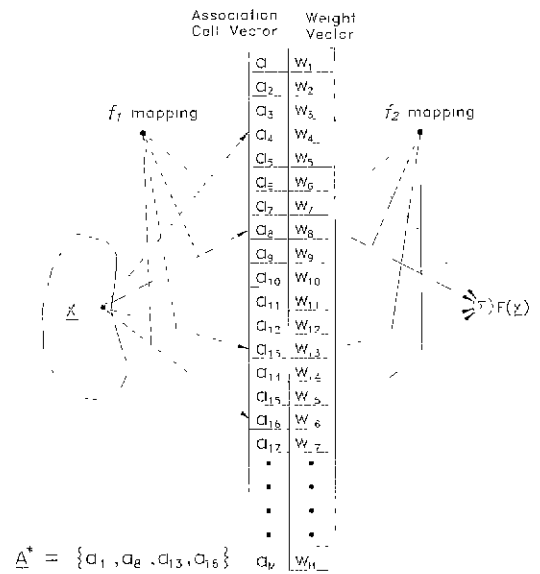
여기서  $\underline{X}$ ={입력 벡터},  $\underline{A}$ ={CMAC 메모리 벡터},  $\underline{Y}$ ={출력 벡터}이다.  $f_1$  맵핑은 입력 벡터에 의해 선택되어지는 메모리를 지정하며  $f_2$  맵핑은 선택되어진 메모리들에 기억되어 있는 가중치(weighting)를 합하는 역할을 한다. 입력 벡터에 대한  $f_1$  맵핑에서는 항상 지정된 메모리를 선택하게 되나  $f_2$  맵핑의 출력값은 메모리에 기억되어 있는 가중치에 의해 결정되며, 가중치의 변경에 의해  $f_2$  맵핑의 출력값이 달라지게 된다.

그림 3 (a)는 기본적인 CMAC의 맵핑 방식을 나타내고 있다. 그림 3 (a)에서  $f_1$  맵핑에 의해서 임의의 입력 벡터  $\underline{X}$ 에 대해 메모리의 세트  $\underline{A}=\{a_1, a_8, a_{13}, a_{16}\}$ 가 지정되며  $f_2$  맵핑에 의해서 지정된 메모리의 세트  $\underline{A}^*$ 의 가중치의 합  $F(\underline{X})=(w_1+w_8+w_{13}+w_{16})$  즉  $\underline{Y}$ 를 출력한다. 입력 벡터  $\underline{X}$ 에 대해 CMAC 맵핑에 의해서  $\underline{A}$  메모리의 가중치만이 출력에 영향을 준다. 따라서 임의의 입력 벡터  $\underline{X}$ 에 대해서 출력벡터  $F(\underline{X})$ 를 변화 시키기를 원하면 단지  $\underline{A}$ 의 가중치만을 변화 시키면 된다.

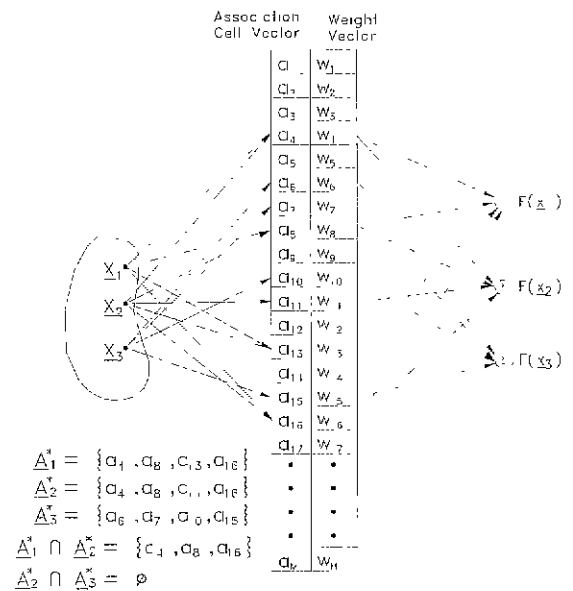
#### 2. 일반화와 간섭

CMAC 시스템은 서로 다른 입력 벡터에 대해 동일한 메모리가 맵핑되는 경우가 발생한다. 이와 같이 메모리를 공유하는 현상은 입력 벡터들의 값이 서로 비슷한 경우에 발생하며, 이러한 구조에 의해서 서로 비슷한 입력 벡터에 대한 출력 값은 서로 비슷한 경향을 나타낸다. 그림 3 (b)에서 보면 두 개의 입력 벡터  $\underline{X}_1$ 과  $\underline{X}_2$ 에 의해 각각 CMAC 메모리 세트  $\underline{A}_1^*=\{a_1, a_8, a_{13}, a_{16}\}$ ,

$\underline{A}_2^*=\{a_4, a_8, a_{11}, a_{16}\}$ 가 지정되어 지며 중복된 CMAC 메모리 세트  $\underline{A}_1^* \cap \underline{A}_2^* = \{a_4, a_8, a_{16}\}$ 를 가지게 된다.



(a) 기본 CMAC 맵핑



(b) CMAC 맵핑의 일반화

그림 3. CMAC 제어의 기본 개념

Fig. 3. The basic control concept of the CMAC[3].

동일한 여러 메모리의 가중치를 합함에 따라 두 개의 입력 벡터  $\underline{X}_1$ 과  $\underline{X}_2$ 에 의한 출력 값  $F(\underline{X}_1)$ 과  $F(\underline{X}_2)$ 가 비슷하게 된다. 만약 입력 벡터  $\underline{X}_2$ 에 의한 출력 값이  $\underline{X}_1$ 의 출력 값과 비슷하기를 원한다면 이와 같은 메모리의 중복 현상이 도움이 된다. 즉  $\underline{X}_1$ 에 의해 적당한 출력 값이 얻어지도록 메모리의 가중치가 조정되어 있다면  $\underline{X}_2$ 에 의해 맵핑되는 메모리세트  $\underline{A}_2^*$ 의 아무런 가중치의 조정이 없었더라도  $\underline{X}_1$ 과 거의 비슷한 출력값을 얻을 수 있다. 이러한 성질을 "일반화(generalization)"라 하며 이

능력은 학습에 의한 경험을 다른 것에 적용하는 생물학적 능력과 비슷하다.

그러나 입력 벡터  $X_2$ 에 의한 출력 값이  $X_1$ 의 출력 값과 현저하게 다르기를 원한다면 이러한 메모리의 중복은 악영향을 끼친다. 즉,  $X_2$ 에 대한 원하는 출력을 얻기 위해서는  $X_1$ 의 출력 값에 영향을 준 메모리 세트  $A_1$ 의 거의 모든 가중치를 바꿔 놓아야 한다. 이러한 성질을 "학습 간섭(learning interference)"이라 하며, 이 능력은 거의 같은 욕구가 다른 결과를 초래하는 생물학적 능력에 기인한다. 이러한 "학습 간섭(learning interference)"은  $X_1$ 과  $X_2$ 에 의해 맵핑되는 메모리 세트  $A_1, A_2$ 의 가중치를 반복된 작업에 의해 조정하는 것으로 해결된다. 간략히 기술하면, CMAC의 일반화와 간섭은  $A_1, A_2$ 의 중복에 의해 발생한다. 그림 3(b)에서 두 개의 입력 벡터  $X_1$ 과  $X_2$ 의 맵핑되는 CMAC 메모리 세트  $A_1, A_2$ 는 중복된 CMAC 메모리를 공유함에 의해 두 개의 입력 벡터에 의한 출력은 서로 비슷한 값을 가지려는 경향을 나타낸다. 반면에 두 개의 입력 벡터  $X^2$ 와  $X^3$ 에 의해 맵핑되는 CMAC 메모리세트  $A_2 = \{a_1, a_9, a_{11}, a_{16}\}, A_3 = \{a_6, a_7, a_{10}, a_{15}\}$ 는 중복된 CMAC 메모리  $A_2 \cap A_3 = \emptyset$ 로 중복이 없기 때문에 두 개의 입력 벡터에 의한 출력 값은 서로 무관하며 또한 일반화 및 간섭 현상이 발생하지 않는다.

3 CMAC을 이용한 학습 제어기

본 연구에서는 하이드로 포밍기의 성형실의 압력을 제어하기 위하여 CMAC 메모리 기법을 이용하였으며 하이드로 포밍기의 역모델을 CMAC 메모리를 이용하여 구하였다. 하이드로 포밍기의 역모델은 성형실의 압력  $P_i$ 에 따른 압력제어 밸브의 전류  $i$ 에 대한 상관관계를 나타내며, 이 관계는 CMAC 메모리의 맵핑에 의해 근사하게 표현할 수 있다. 성형중에 추종해야 되는 압력 범위에 대한 하이드로 포밍기의 역모델을 구하는 방법은 다음과 같다. 성형 시 추종해야 할 압력 범위를 경험할 수 있는 일련의 입력을 가하고 출력되는 성형실의 압력을 실시간으로 측정 한 후, 위의 입, 출력 데이터를 이용하여 CMAC 메모리가 하이드로 포밍기의 역모델을 잘 표현할 수 있도록 학습시켰다. 또한 학습시킨 CMAC 메모리로부터 원하는 압력 곡선을 추종할 수 있는 제어 입력을 구하였다. CMAC 메모리로부터 구한 제어 입력을 피드 포워드 제어기의 입력으로 구성하였고 병렬로 재래의 제어기를 피드백 루프에 구성하였다.

3.1 역모델

하이드로 포밍기에 있어서 비례 압력 제어 밸브에 가해지는 전류  $i$ 가 입력이며 이 입력에 의한 성형실의 압력  $P_i$ 가 출력으로 나타난다. 실제 제어에서는 원하는 출력  $P_i$ 를 구하기 위해서는 그 출력에 해당되는 입력 전류  $i$ 를 구하여야 한다. 일반적으로 로봇 메뉴플레이터의 제어 문제에서는 수학적 모델의 역모델로부터 직접 입력을 계산하여 피드 포워드(feedforward) 제어 방법으로 원하는 경로를 추종하도록 하는 컴퓨터드 토크 방법

(computed torque method) 을 사용하고 있다. 본 논문에서는 하이드로 포밍 공정에서 원하는 출력에 해당하는 적절한 제어 입력을 구하기 위한 방법으로 대상 시스템의 역모델을 이용하였다. 하이드로 포밍기의 역모델을 다음 식으로 표현하였다.

$$u(k) = g(P_i(k)) \tag{2}$$

여기서,  $u(k)$ 는 비례 압력 제어 밸브에 가해질 이산 제어 입력,  $P_i(k)$ 는  $n$ 차의 동특성을 가진 성형실의 압력 벡터,  $\{P_i(k+n), \dots, P_i(k+1), P_i(k)\}$ ,  $g()$ 는  $u(k)$ 와  $P_i(k)$ 에 관계된 비선형 함수이며  $n$ 은 CMAC 메모리에 맵핑할 입력 벡터의 개수이다.

성형실의 압력을 원하는 궤적으로 추종할 수 있는 입력  $u(k)$ 을 예측하는 방법으로 CMAC 메모리에 의한 맵핑을 사용하였다.  $P_i(k)$ 를 CMAC 메모리의 입력 벡터,  $u(k)$ 를 출력 벡터로 구성하여 CMAC 메모리가  $g()$ , 즉 하이드로 포밍기의 역모델을 나타내도록 하였다.<sup>5,6,7)</sup> 본 논문에서  $g()$ 를 구하는 방법은 다음과 같다. 성형 시 원하는 압력 범위를 경험할 수 있는 일련의 입력  $u(k)$ 을 가하고 실시간으로 성형실의 압력  $P_i$ 을 측정하여 다음과 같은 일련의 입출력 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} u &= u(0), u(1), \dots, u(k) \\ P_i &= P_i(0), P_i(1), \dots, P_i(k), P_i(k+1) \end{aligned} \tag{3}$$

(3)을 이용하여 압력 벡터  $P_i = \{P_i(k+1), P_i(k)\}$ 에 대한 CMAC 맵핑을 하여 출력  $u_c(k)$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} u_c(0) &= g(P_i(1), P_i(0)) \\ u_c(1) &= g(P_i(2), P_i(1)) \\ &\vdots \\ u_c(k) &= g(P_i(k+1), P_i(k)) \end{aligned} \tag{4}$$

(4)에 의해 구한  $u_c(k)$ 와 (3)의  $u(k)$ 를 비교하고, 오차에 대해서 해당하는 메모리의 가중치를 변경시켜 CMAC 메모리가 하이드로 포밍기의 역모델을 표현할 수 있게 한다. 위로부터 교습된 CMAC 메모리를 이용하여 원하는 압력 곡선  $P_d$ 를 추종할 수 있는 입력을 CMAC 맵핑에 의해서 구한다.

$$\begin{aligned} u(0) &= g(P_d(1), P_d(0)) \\ u(1) &= g(P_d(2), P_d(1)) \\ &\vdots \\ u(k) &= g(P_d(k+1), P_d(k)) \end{aligned} \tag{5}$$

(5)에서, 추종해야 할 압력 벡터  $P_d(k) = \{P_d(k+1), P_d(k)\}$ 에 대해서 CMAC 맵핑을 통하여 출력  $u(k)$ 를 구한다.

3.2 CMAC 메모리의 맵핑 및 교습 방법

CMAC 메모리 시스템에서 각각의 이산(discretize)된 압력 상태 벡터(pressure state vector, 입력 벡터)  $P_i$ 의 인접 메모리로의 맵핑과 각  $P_i$ 에 대해 공유되는 메모리들의 가중치의 합에 의해 CMAC 메모리의 출력  $g(P_i)$ 가 구해지는 맵핑이 Fig.4에 나타나 있다. 각  $P_i$ 에 의해 선택되어지는 CMAC 메모리는  $a_i$ 의 값 ('0'

또는 '1')에 의해 결정된다. 이 맵핑 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(\underline{P}_i) = \sum_{i=1}^N a_i w_i \quad (6)$$

본 연구에서는 두 개의 압력 상태 벡터  $\{P_i(k+1), P_i(k)\}$ 를 사용하였으며  $P_i(k+1), P_i(k)$ 의 분해능을 2 bar, 압력 범위를 0 - 700 bar로 하였다.

(6)을 예를 들어 상세히 설명하면 다음과 같다. 공유 메모리의 개수를 4, 압력 범위를 16 bar로 가정하는 경우에 대해서 각 압력상태 벡터  $P_i(k+1), P_i(k)$ 에 대한 CMAC 메모리의 맵핑을 아래와 같이 나타내었다.

$P_i(k+1) : 0$	$\rightarrow$ A,B,C,D	$P_i(k) : 0$	$\rightarrow$ a,b,c,d
2	$\rightarrow$ E,B,C,D	2	$\rightarrow$ e,b,c,d
4	$\rightarrow$ E,F,C,D	4	$\rightarrow$ e,f,c,d
6	$\rightarrow$ E,F,G,D	6	$\rightarrow$ e,f,g,d
8	$\rightarrow$ E,F,G,H	8	$\rightarrow$ e,f,g,h
10	$\rightarrow$ I,F,G,H	10	$\rightarrow$ i,f,g,h
	$\rightarrow$ *,*,*,*	-	$\rightarrow$ *,*,*,*
	$\rightarrow$ *,*,*,*	-	$\rightarrow$ *,*,*,*
16	$\rightarrow$ I,J,K,L	16	$\rightarrow$ i,j,k,l

$P_i(k+1), P_i(k)$  2 개의 압력 상태 벡터의 값에 따른 실제 맵핑되는 CMAC 메모리는 표 1과 같으며 알파벳 형식의 메모리 어드레스를 실제로 맵핑되는 숫자 형식의 메모리 어드레스로 바꿔 준 상태의 맵핑이 표 2와 같다. 표 2를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$M_{ij} = INT\left\{\frac{(Pr - j + AMn - 1)}{AMn}\right\} \times AMn + j \quad (7-1)$$

$$A_i = INT\left\{\frac{M_{ij}}{AMn}\right\} \times (Pr - 1 + AMn) + M_{ij} \quad (7-2)$$

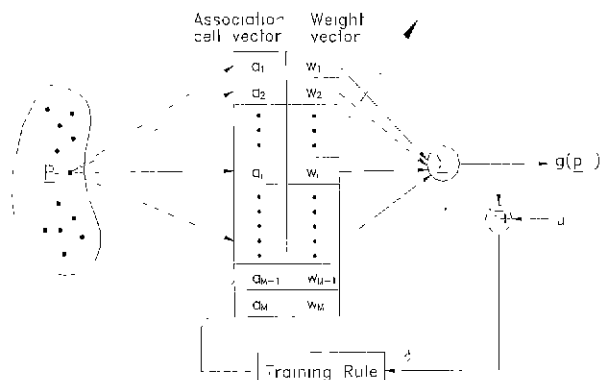


그림 4. 하이드로 포밍공정의 압력 제어를 위한 CMAC 메모리.

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

- 여기서  $i = 0, 1$  (입력 벡터의 번호)
- $j = 0, 1, \dots, AMn-1$
- $AMn$  = 전체 메모리 개수
- $A_j$  = 맵핑되는 메모리의 번지
- $Pr$  = 이산된 압력 범위의 개수 ( $Pr = 9$ )
- $P_i$  = 입력 벡터
- $P_i(k+1) = P_1$
- $P_i(k) = P_0$
- $INT\{\}$  = 정수 변환 함수

여기서 (7-1)은 각각의 압력상태 벡터  $P_i(k+1), P_i(k)$ 에 대한 1차 CMAC메모리 맵핑에 의한 각 메모리 번지  $M_{ij}, M_{ij}$ 를 구하는 식을 나타내며, (7-2)은  $M_{ij}, M_{ij}$ 에 대한 2차 CMAC메모리 맵핑에 의한 번지  $A_i$ 를 나타낸다. (7-1), (7-2)에 나타난 CMAC메모리 맵핑에 의해 서로 유사한 압력 벡터들에 대해서는 메모리를 공유하게 되며 또한 요구되어지는 메모리의 개수를 줄일 수 있다.

한 번의 작업이 끝날 때마다 CMAC 메모리는 다음과 같이 교습된다. 이전 작업시의 측정된 성형 압력 벡터를 사용하여 (6)으로부터 CMAC 메모리에 의해 얻은 출력  $g(\underline{P}_i)$ 와 이전 공정시의 입력된 실제  $u(k)$ 를 비교한다. 오차가 생기게 되면 오차가 발생한 영역에 해당되는 메모리를 다음 식과 같이 교습한다.

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

$$\Delta w = k \frac{u(k) - g(\underline{P}_i(k))}{C} \quad (8)$$

여기서,  $j$ : 작업 회수,  $i$ : 메모리의 어드레스이다. 공유 메모리 수( $C$ )는 입력 벡터에 의해 맵핑되는 공유 메모리의 개수를 나타내며 “일반화(generalization)”의 정도를 나타낸다.  $k_t$ 는 메모리를 교습 시킬 때의 학습 이득이다.

### 3.3 CMAC을 사용한 학습 제어 알고리즘

CMAC를 이용한 학습 제어기의 블록 다이어그램이 그림 5에 나타나 있다. 원하는 압력궤적  $P_d$ 가 궤적 계획기(Trajectory Planner)에 의해 계산되며 CMAC 제어기는 피드 포워드 제어기로 구성된다

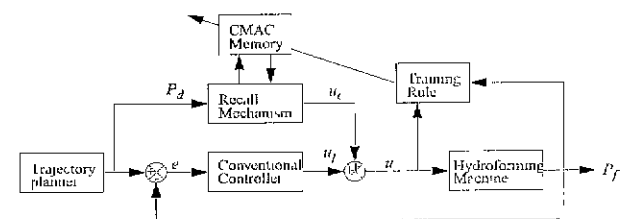


그림 5. 제안된 CMAC 학습 제어기의 블록 선도.

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

메모리가 교습 되기 전까지 어느 정도의 제어 성능을 위하여 피드백 루프로 재래의 제어기를 구성하였다.

표 1. 알파벳 형식의 CMAC 메모리 맵핑  
Table 1. CMAC mapping table of alphabetic symbol.

$P_f(k)$	16	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	E <sub>1</sub> F <sub>1</sub> G <sub>1</sub> H <sub>1</sub>	I <sub>1</sub> J <sub>1</sub> K <sub>1</sub> L <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> N <sub>1</sub> O <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> R <sub>1</sub> S <sub>1</sub> T <sub>1</sub>	U <sub>1</sub> V <sub>1</sub> W <sub>1</sub> X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub> Z <sub>1</sub>
	14	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	E <sub>2</sub> F <sub>2</sub> G <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	I <sub>2</sub> J <sub>2</sub> K <sub>2</sub> L <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub> R <sub>2</sub> S <sub>2</sub> T <sub>2</sub>	U <sub>2</sub> V <sub>2</sub> W <sub>2</sub> X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> Z <sub>2</sub>
	12	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	E <sub>3</sub> F <sub>3</sub> G <sub>3</sub> H <sub>3</sub>	I <sub>3</sub> J <sub>3</sub> K <sub>3</sub> L <sub>3</sub>	M <sub>3</sub> N <sub>3</sub> O <sub>3</sub> P <sub>3</sub>	Q <sub>3</sub> R <sub>3</sub> S <sub>3</sub> T <sub>3</sub>	U <sub>3</sub> V <sub>3</sub> W <sub>3</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>3</sub> Z <sub>3</sub>
	10	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>4</sub> D <sub>4</sub>	E <sub>4</sub> F <sub>4</sub> G <sub>4</sub> H <sub>4</sub>	I <sub>4</sub> J <sub>4</sub> K <sub>4</sub> L <sub>4</sub>	M <sub>4</sub> N <sub>4</sub> O <sub>4</sub> P <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub> R <sub>4</sub> S <sub>4</sub> T <sub>4</sub>	U <sub>4</sub> V <sub>4</sub> W <sub>4</sub> X <sub>4</sub>	Y <sub>4</sub> Z <sub>4</sub>
	8	A <sub>5</sub> B <sub>5</sub> C <sub>5</sub> D <sub>5</sub>	E <sub>5</sub> F <sub>5</sub> G <sub>5</sub> H <sub>5</sub>	I <sub>5</sub> J <sub>5</sub> K <sub>5</sub> L <sub>5</sub>	M <sub>5</sub> N <sub>5</sub> O <sub>5</sub> P <sub>5</sub>	Q <sub>5</sub> R <sub>5</sub> S <sub>5</sub> T <sub>5</sub>	U <sub>5</sub> V <sub>5</sub> W <sub>5</sub> X <sub>5</sub>	Y <sub>5</sub> Z <sub>5</sub>
	6	A <sub>6</sub> B <sub>6</sub> C <sub>6</sub> D <sub>6</sub>	E <sub>6</sub> F <sub>6</sub> G <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	I <sub>6</sub> J <sub>6</sub> K <sub>6</sub> L <sub>6</sub>	M <sub>6</sub> N <sub>6</sub> O <sub>6</sub> P <sub>6</sub>	Q <sub>6</sub> R <sub>6</sub> S <sub>6</sub> T <sub>6</sub>	U <sub>6</sub> V <sub>6</sub> W <sub>6</sub> X <sub>6</sub>	Y <sub>6</sub> Z <sub>6</sub>
	4	A <sub>7</sub> B <sub>7</sub> C <sub>7</sub> D <sub>7</sub>	E <sub>7</sub> F <sub>7</sub> G <sub>7</sub> H <sub>7</sub>	I <sub>7</sub> J <sub>7</sub> K <sub>7</sub> L <sub>7</sub>	M <sub>7</sub> N <sub>7</sub> O <sub>7</sub> P <sub>7</sub>	Q <sub>7</sub> R <sub>7</sub> S <sub>7</sub> T <sub>7</sub>	U <sub>7</sub> V <sub>7</sub> W <sub>7</sub> X <sub>7</sub>	Y <sub>7</sub> Z <sub>7</sub>
	2	A <sub>8</sub> B <sub>8</sub> C <sub>8</sub> D <sub>8</sub>	E <sub>8</sub> F <sub>8</sub> G <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	I <sub>8</sub> J <sub>8</sub> K <sub>8</sub> L <sub>8</sub>	M <sub>8</sub> N <sub>8</sub> O <sub>8</sub> P <sub>8</sub>	Q <sub>8</sub> R <sub>8</sub> S <sub>8</sub> T <sub>8</sub>	U <sub>8</sub> V <sub>8</sub> W <sub>8</sub> X <sub>8</sub>	Y <sub>8</sub> Z <sub>8</sub>
	0	A <sub>9</sub> B <sub>9</sub> C <sub>9</sub> D <sub>9</sub>	E <sub>9</sub> F <sub>9</sub> G <sub>9</sub> H <sub>9</sub>	I <sub>9</sub> J <sub>9</sub> K <sub>9</sub> L <sub>9</sub>	M <sub>9</sub> N <sub>9</sub> O <sub>9</sub> P <sub>9</sub>	Q <sub>9</sub> R <sub>9</sub> S <sub>9</sub> T <sub>9</sub>	U <sub>9</sub> V <sub>9</sub> W <sub>9</sub> X <sub>9</sub>	Y <sub>9</sub> Z <sub>9</sub>
	0	2	4	6	8	10	-	16

표 2. 숫자 형식의 CMAC 메모리 맵핑  
Table 2. CMAC mapping table of numeric symbol.

$P_f(k)$	16	89,1011	209,1011	202,1011	202,2211	202,2223	222,2223	2, 2, 2	2,2, 2,2,2
	14	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9	1, 2, 3	4, 5, 6
	12	85,67	205,67	20,17,67	20,17,87	20,17,819	2,17,819	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	10	45,67	165,67	16,17,67	16,17,87	16,17,819	2,17,819	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	8	45,63	165,63	16,17,63	16,17, 8,1	16,17,815	2,17,815	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	6	45,23	165,23	16,17,23	16,17, 4,3	16,17,415	2,17,415	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	4	11,23	16,12,3	16,13,23	16,13, 13	16,13,115	2,13,1415	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	2	6,12,3	12,13,3	12,13,23	12,13, 4,3	12,13,1415	2,13,1415	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	0	6,12,3	12,13,3	12,13,23	12,13, 4,3	12,13,1415	2,13,1415	2, 2, 2	2,2,2, 2,2,2
	0	2	4	6	8	10	-	16	

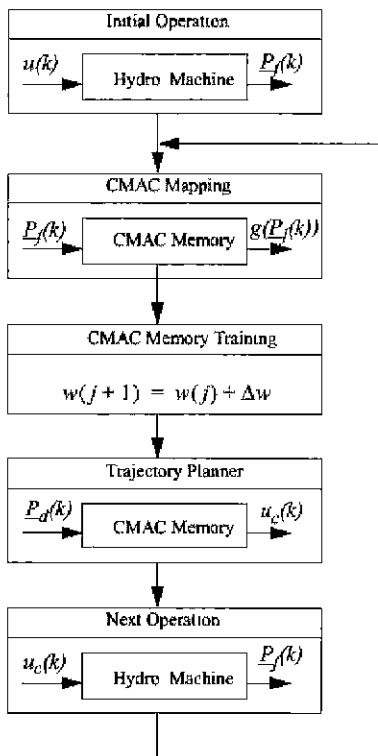


그림 6. CMAC 제어기의 압력 제어 공정 순차도.  
Fig. 6. Flow chart of the CMAC controller sequence.

CMAC 메모리를 이용해 성형실의 압력을 제어하는 공정은 다음과 같으며 플로우차트는 그림 6에 나타내었다.

1) 성형시 원하는 압력 범위를 경험할 수 있는 일련의 입력  $u(k)$ 를 가하고 실시간으로 성형실의 압력  $P_f$ 를 측정하여 일련의 입출력 관계를 얻는다.

2) 실시간으로 입력 벡터  $P_f$ 의 CMAC 메모리로의 맵핑에 의한 출력  $g(P_f)$ 를 구한다.

3)  $g(P_f)$ 와 이전 작업시의 실제  $u(k)$ 를 비교하며 오차가 발생한 영역에 해당되는 메모리를 (8)을 이용하여 교습시킨다. 이 교습에 의하여 처음 공정시 경험한 압력 벡터들에 대해서는 CMAC 메모리가 하이드로 포밍기의 역모델을 나타내게 된다

4) 다음 작업 공정을 하기 이전에 원하는 압력 궤적  $P_d$ 가 궤적 계획기에 의해 계산되며 이  $P_d$ 의 CMAC 메모리로의 맵핑에 의해 원하는 압력을 추종할 수 있는 제어 입력을 구한다. 처음 공정시 경험한 압력 벡터들에 대해서만 CMAC 메모리가 교습되었기 때문에 CMAC 메모리에 의해 구한 제어 입력은 원하는 압력 곡선을 정확하게 추종하지는 못한다. 그러나 처음 공정시 경험한 압력 벡터들에 의해 교습된 CMAC 메모리로 의한 일반화 영향에 의해  $P_d$ 에 맵핑되는 메모리도 교습되어 있기 때문에 원하는 압력 곡선을 근사하게 추종할 수 있게 된다.

5) (1)번에서 구해진 제어 입력을 피드 포워드로 가하면서 두 번째 공정을 한다. 이때에도 실시간으로 입출력 관계를 측정한다. 위의 작업들을 반복적으로 함에 따라 CMAC 메모리는 하이드로 포밍기의 역모델을 정확히 표현하게 되고 또한 원하는 압력 곡선을 보다 정확히 추종할 수 있는 제어 입력을 구하게 되어 작업 횟수가 증가함에 따라 향상된 제어 성능을 얻을 수 있게 된다.

IV. 성형 압력 제어기 성능 실험

1. 실험 목적

하이드로 포밍 공정시 성형실의 압력을 원하는 압력으로 정확히 추종하도록 해야만 양질의 성형품을 얻을 수 있다. 따라서 하이드로 포밍 공정시 성형실의 압력을 정확히 제어할 수 있는 제어기를 설계하는 것이 가장 중요하다. 그러므로 본 장에서는 앞장에서 제안한 CMAC 학습 제어기를 펀치의 모양, 시편의 재질, 지름, 드로잉 비율(drawing ratio) 등의 여러 가지 실험 조건에서 적용시켜 봄으로써 그 효율성과 안정성을 검토하고자 한다. 실험 조건은 표 3에 나타나 있다.

2. 실험 장치

하이드로 포밍기와 컴퓨터(IBM-PC)와의 인터페이스 구성도는 그림 8과 같다. 각 공정 제어와 CMAC 학습 제어를 컴퓨터와 데이터 입출력 장치(data acquisition system)와의 인터페이스를 통해서 실행하였으며 프로그램 언어는 C언어를 사용하였다. 센서로서는 성형실의 압력과 비례 압력 제어 밸브의 토출 압력을 측정하기 위하여 각각 0~700bar, 0~350bar 범위의 압력 센서와 펀치와 부스터의 변위를 측정하기 위하여 2개의 포텐시

표 3. 실험에 사용된 시스템 변수들.

Table 3. System parameter used in the experiments

Parameter	Value
Sampling time	17 msec
Punch speed	0.3 cm/sec
Punch shape1	cylinder type
Punch shape2	hemisphere type
punch diameter	70 mm
forming time	6 sec
workpiece property	cold rolled steel
workpiece diameter	122.5 mm
workpiece thickness	0.8 mm
operating pressure range	16 - 550 kg/cm <sup>2</sup>
learning gain (kc)	0.5
association memory (c)	30
total CMAC memory	13,000

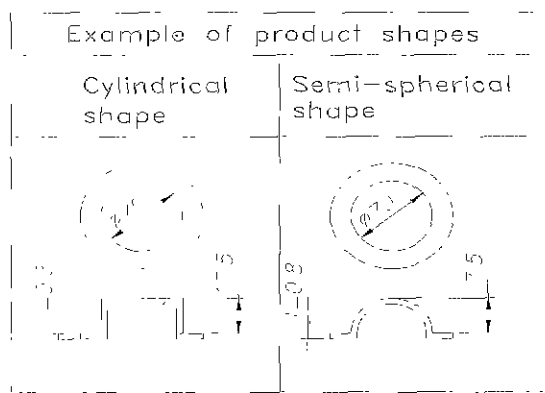


그림 7. 하이드로 포밍 공정에 의한 두 제품  
Fig. 7. Two typical product of the Hydroforming process.

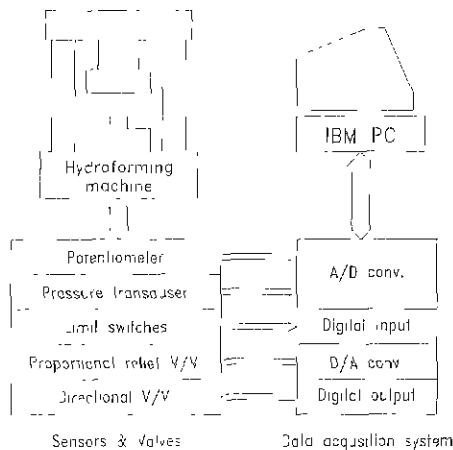


그림 8. 실험 장치의 개략도.  
Fig. 8. Schematic diagram of the experimental setup.

오미터(potentiometer)를 사용하였다. 각 공정시의 ON/OFF는 리미트 스위치에 의해 제어된다.

3 실험 방법

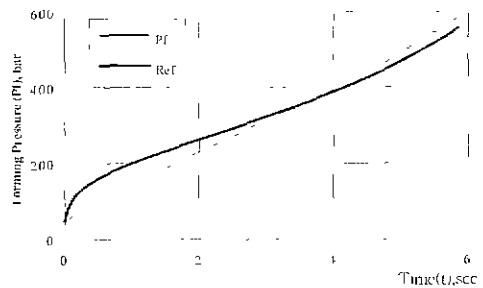
성형실의 압력을 제어하기 위하여 구성한 CMAC 학습 제어기의 블럭 다이어그램은 그림 5와 같다. 전체 시스템의 안정성과 외란의 영향을 줄이기 위하여 먼저 비례 제어를 피드백 루우프로 하고 여기에 피드 포워드 루우프를 개입시킨 구조로 구성하였다.

본 연구에서는  $\{P_f(k+1), P_f(k)\}$  두 개의 압력 상태 벡터를 사용하였다. 전산기 용량의 제한을 받으므로, 분해능을 2 Bar로 하여 작동 압력 범위 0~700 Bar를 350 등분하였다. 추종 오차의 수렴성을 고찰하기 위하여 적분 자승 오차(ISE)를 구하여 비교하였다.

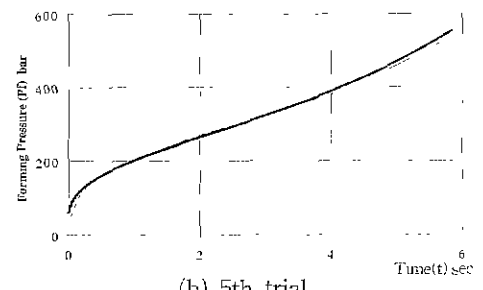
$$(ISE) = \int_{t_0}^T (P_d(t) - P_f(t))^2 dt \quad (9)$$

4 결과 및 토의

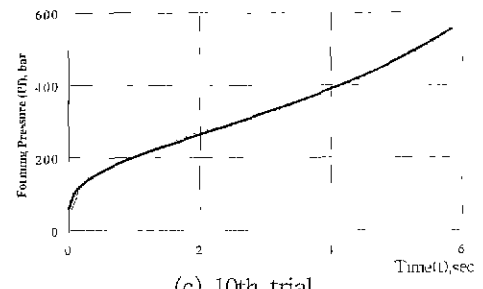
두 가지 형태의 압력 곡선에 대하여 CMAC 학습 제어기의 제어 성능을 실험하였다. 즉 서로 다른 형태의 압력 곡선을 나타내는 실린더형의 펀치와 반구형의 펀치에 대하여 실험하였다. 실험에 사용된 펀치의 형상은 그림 7과 같다.



(a) 1st trial



(b) 5th trial



(c) 10th trial

그림 9. 실린더형 펀치에 대한 CMAC 기반의 학습 제어기의 실험 결과(C = 30, kc = 0.5).

Fig. 9. Experimental results of the CMAC-based learning control for cylindrical punch(C=30, kc=0.5).

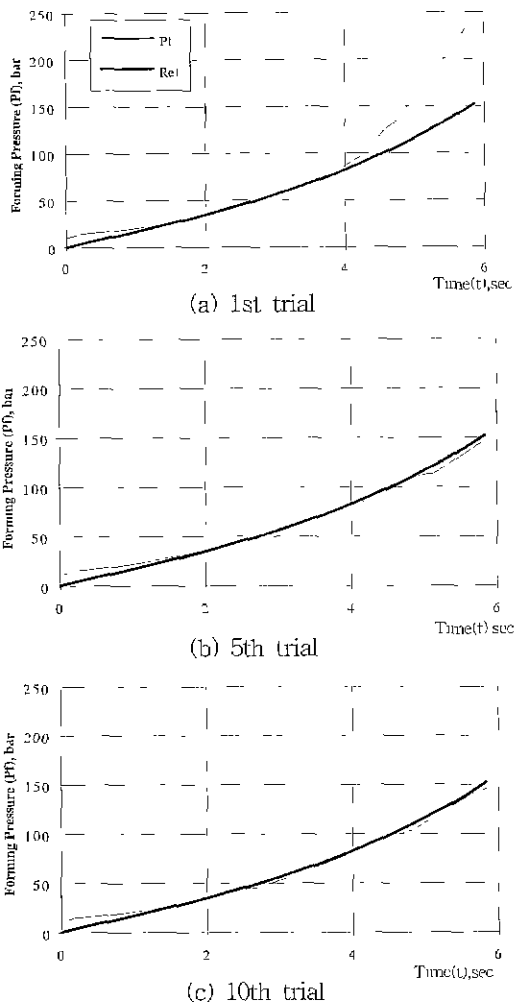


그림 10. CMAC 기반의 학습 제어기의 실험 결과.  
Fig. 10. Experimental results of the CMAC-based learning control.

그림 9, 그림 10에 나타난 바와 같이 CMAC 학습 제어가 각기 다른 범위의 압력을 추종하는 데에도 불구하고 작업 횟수가 증가하게 됨에 따라 추종 성능이 향상 되는 것을 볼 수 있다. 실린더형의 펀치에 대해서는, 그림 11(a)에서 보는 바와 같이 3회 정도의 반복 시행을 거치면 거의 전 구간에서 원하는 곡선에 접근하며, 5회 정도의 반복 작업 후부터는 적분 자승 오차(ISE)가 더 이상 감소하지 않고 약간씩 요동하는 성향을 나타낸다. 5회 이후에 ISE 값이 더 이상 감소하지 않는 이유는 각 시행마다의 초기 상태가 변화할 수 있고 CMAC 메모리 모듈의 최소 분해능의 한계에 기인한다고 평가할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 박판을 정밀 성형하는 하이드로 포밍기의 성형 압력의 추종 제어에 CMAC 기법을 이용한 학습 제어기를 설계하여 실험을 통하여 그 효율성을 고찰하였다. 작동 압력 범위가 넓은 하이드로 포밍기는 유압 시스템 특유의 비선형성 및 여러 가지 매개 변수(parameter)의 불확실성 때문에 우수한 제어 성능을 갖

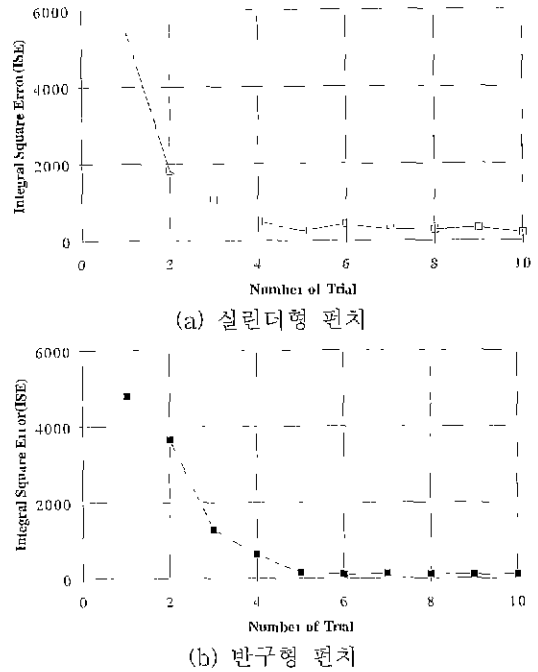


그림 11. CMAC 제어기의 수렴성능(C=30, kc=0.5).  
Fig. 11. Convergency performance of the CMAC control(C=30, Kc=0.5).

는 제어기의 설계를 위해서는 많은 노력이 필요하다. 이러한 문제점에 대응하여 본 연구에서는 별도의 수학적 모델링이 요구되지 않는 CMAC를 이용한 학습 제어를 제안하였다. PID 제어기와 같은 제어의 고정된 게인을 갖는 제어기로서는 하이드로 포밍 공정시 요구되는 여러 형태의 압력 곡선을 정확히 추종하기 위해서는 각 압력 곡선마다 새로운 튜닝이 요구되었다. 그러나, 매 작업마다 학습을 통해서 요구되는 압력 곡선을 추종할 수 있는 새로운 제어 입력을 만드는 CMAC를 이용한 학습 제어기에서는 이 작업이 필요 없게 되는 장점을 가지고 있다. 실험 결과 펀치의 전진에 의한 외란, 시스템의 비선형성에도 불구하고 추종 제어 성능이 우수한 것을 알 수 있었으며, 또한 작업 횟수가 증가하게 됨에 따라 추종 제어 성능이 좋아지는 결과를 얻었다. 차후 하이드로 포밍기의 제어기로서의 보다 좋은 제어 성능을 나타내는 CMAC 학습제어기를 설계하기 위해서는 CMAC 구조와 안정성에 대한 보다 해석적인 연구, 메모리의 효율적 사용에 대한 연구, 그리고 수렴속도 증가를 위한 학습 이득(kc), 공유 메모리 수(C)의 체계적인 선정에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

[1] T. S. Noh and D. Y. Yang, "An analysis of hydroforming of regular polygonal boxes," *Int. Journal of Mech. Sci.*, vol. 29, pp. 139-148, 1987.  
[2] I. Tiros, S. Yossifon, and A. Betzur, "Hydroforming process for uniform wall thickness products," *Trans ASME. J. of Eng. for Ind.*, vol. 99, pp. 685-690, 1977.



- [3] J. S. Albus, "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, 1975.
- [4] J. S. Albus, "Data storage in the cerebellar model articulation controller (CMAC)," *Trans. ASME, J. of Dynamic Syst. Meas., Cont.*, vol. 97, pp. 228-233, 1975.
- [5] E. Ersu and H. Tolle, "A new concept for learning control inspired by brain theory," *IFAC 9th World Congress*, vol. 7, pp. 245-250, 1984.
- [6] W. T. Miller, "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, 1987.
- [7] W. T. Miller, F. H. Glanz, and L. G. Kraft, "Application of a general algorithm to the control of robotic manipulators," *Int. J. Robotic Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 84-98, 1987.
- [8] H. E. Merritt, *Hydraulic Control System*, Wiley, New York, 1967.
- [9] T. Takenake and E. Urata, "Static and dynamic characteristics of oil-hydraulic control valves," *The Fluid Power International Conf.*, Tokyo, Japan, pp. 67-74, 1968.
- [10] K. J. Choi, A study on the Parameter Identification and Dynamic Characteristics of the Electro-Magnetic Relief Valves, M.S. Thesis, Department of Production Eng., KAIST, 1987.
- [11] J. S. Yun, An Adaptive Model Following Controller for Hydraulic Servo Systems Subjected to Unknown Disturbances, Ph.D. Thesis, Department of Production Eng., KAIST, 1987.
- [12] H. J. Park, H. S. Cho, and B. S. Hyun, "A Pressure tracking controller for hydroforming Process." *KACC*, Seoul, Korea, vol. 2, pp. 317-323, 1987.
- [13] W. H. Lee, H. J. Park, H. S. Cho, and B. S. Hyun, "A CMAC-based pressure tracking controller design for hydroforming process," *KACC*, Seoul, Korea, vol. 1, pp. 302-307, 1989.
- [14] W. H. Lee, Design of a CMAC Controller for Hydroforming Process. M. S. Thesis, Department of Production Eng., KAIST, 1990.
- [15] H. T. Chung and G. J. Jeon, "Decentralized control of interconnected systems using a neuro-coordinator and an application to a planar robot manipulator," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 88-95, 1996.
- [16] S. W. Kim and J. J. Lee, "Hybrid position/force control of uncertain robotic systems using neural networks," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 252-258, 1997.
- [17] S. Commuri and F. L. Lewis, "CMAC neural networks for control of nonlinear dynamical systems: structure, stability and passivity," *Automatica*, vol. 33, no. 4, pp. 635-641, 1997.
- [18] C. S. Lin and C. T. Chiang, "Learning convergence of CMAC technique." *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 8, no. 6, pp. 1281-1292, 1997.



#### 이우호

1965년 12월 16일생. 1988년 한양대학교 기계설계학과 학사. 1990년 KAIST 생산공학과 석사. 현재 Rensselaer Polytechnic Institute 기계공학과 박사과정. 관심분야는 동

적 시스템 제어와 modular 변신 robot 임.

#### 조형석

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제1호, 참조