

〈논 문〉

임의 불량형상을 갖는 냉연판의 퍼지형상제어 시뮬레이션

정종엽* · 임용택*

(1995년 4월 25일 접수)

Simulation of Fuzzy Shape Control for Cold-Rolled Strip with Randomly Irregular Strip Shape

Jong-Yeob Jung and Yong-Taek Im

Key Words: Cold Rolling(냉간압연), Shape Control(형상제어), Fuzzy Rule(퍼지규칙), Fuzzy Control(퍼지제어), Emulator(에뮬레이터)

Abstract

In this study, a fuzzy control algorithm was developed for the randomly irregular shape of cold-rolled strip. Currently developed fuzzy control algorithm consists of two parts: the first part calculates the changes of work and intermediate roll bender forces based on the symmetric part of the irregular strip shape, and the second part calculates the weighting factors based on the asymmetric part and modifies the pre-determined roll bender forces according to the weighting factors. As a result of this, bender forces applied at the both sides of the cold-rolled strip were different. In order to simulate the continuous shape control, fuzzy controller developed was linked with emulator which was developed based on neural network. The fuzzy controller and emulator developed simulated the cold rolling process until irregular shape converged to a tolerable range in producing uniform cross-sectional strip shape. The results obtained from the simulation were reasonable for various irregular strip shapes.

1. 서 론

냉연공정을 통해 생산되어지는 강판은 자동차 산업 등과 같은 다른 산업의 기본재료로 바로 이용되어지므로, 사용자가 원하는 크기나 재질 등에 부합되어 생산되어야 하고, 또한 생산성의 향상과 최종 제품의 질을 높인다는 측면에서 두께나 단면형상의 정밀도가 높아야 한다.

이에 따라 냉연강판의 형상정도를 개선하기 위해 많은 연구들이 수행되어져 왔다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 냉연

공정 자체에 많은 공정변수들이 관계되고, 또한 형상의 불량도 특정한 요인에 의한 것이 아니라 여러 요인들이 복합적으로 작용되어 나타나므로 판의 형상을 적절히 제어하기가 어려운 실정이다. 실제 작업현장에서도 종래의 제어이론 식을 이용하여 판형상의 자동제어를 수행하고 있으나, 시스템에 예기치 못한 외란이 개입되는 경우에는 숙련된 작업자가 직접 개입하여 수동제어를 통한 조업의 안정화를 도모한다. 그러나 이런 수동조업의 경우 조업의 안전성을 높일 수는 있지만 보통 압연속도를 떨어뜨리기 때문에 생산성이 떨어지게 되고 또한 높은 정밀도를 기대할 수 없는 실정이다.

일반적인 제어시스템 구성의 기본은 제어대상인

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

시스템의 특성을 수학적으로 모델링하고 이를 바탕으로 구성되어지는데, 냉간압연공정과 같은 경우, 공정의 비선형 특성이 크며 또한 공정변수들이 지속적으로 변하므로 고전적인 제어이론을 이용한 수학적 모델링이 매우 어렵게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 기존의 접근방법과 다른 새로운 지능형 제어기법이 모색되었으며, 그 예로 퍼지이론이나 신경회로망 등을 이용한 제어기법이 발전하게 되었다. 특히 퍼지이론을 이용하여 제어를 수행하는 경우, 숙련된 작업자의 지식을 기반으로 하여 제어모델을 작성할 수 있으므로 작업자의 경험을 이용한 제어를 수행할 수 있으며, 시스템의 안정화는 물론이고 생산성과 정밀도도 향상시킬 수 있다. Mamdani에 의해 처음으로 퍼지이론이 제어에 적용된 후,⁽⁶⁾ 다양한 분야에 응용되어 좋은 결과를 얻고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

이에 본 연구에서는 임의의 불량형상을 갖는 냉연강관에 대해 퍼지제어 알고리즘을 개발하여 형상제어를 수행하였다. 이미 정 등⁽¹¹⁾은 4차 맥급수로 모델링된 냉연강관의 불량형상 중에서 대칭성분의 불량형상에 대한 퍼지제어 알고리즘을 개발하여 형상제어 시뮬레이션을 수행한 바 있다. 그러나 대칭성분 불량형상의 제어만으로는 고정도의 판형상을 얻을 수 없으므로 본 논문에서는 비대칭성분을 포함한 임의의 판 불량형상에 대하여 형상을 제어할 수 있는 방법을 제안하고, 이에 근거한 퍼지제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 두께가 0.3~0.5 mm 인 박물에 대한 실제 조업데이터를 이용하여 신경회로망으로 학습시킨 에뮬레이터를 개발하고 이를 연속적인 형상제어 시뮬레이션에 적용하였다. 본 연구에서 다루어진 냉간압연 시스템은 각각 한 쌍의 작업롤(work roll)과 중간롤(intermediate roll), 그리고 백업롤(back-up roll)로 구성되어 있는 탄담 밀(tandem mill) 시스템으로 4개의 스탠드(stand)를 가지고 있으나, 이중 실제로 형상제어가 적용되는 4번째 스탠드에 대한 데이터에 근거하여 퍼지제어 알고리즘을 개발하였다.

냉연판의 불량형상을 제어하기 위해서는 롤에 작용하는 굽힘력(bending force), 롤과 판 사이의 마찰조건, 냉각수를 이용한 롤의 국부변형방지, 작업롤에 편심을 주는 법 등 여러가지 방법이 이용되고 있다.⁽¹²⁾ Hasegawa 등⁽¹³⁾은 냉연판의 형상제어를 위해 판 불량형상의 대칭성분과 비대칭성분에 대해 각각 작업롤의 굽힘력과 냉각수, 그리고 압하기 위

치 등을 제어하는 퍼지 알고리즘을 개발하여 형상제어를 수행하였다. 그러나 정 등⁽¹¹⁾은 판 형상에 크게 영향을 미치고 조업에서도 쉽게 조절할 수 있는 공정변수인 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량을 제어대상 변수로 설정하여 판 불량형상 중 대칭성분에 대해 형상제어를 수행하였었다. 따라서 본 연구에서도, 비대칭성분까지 고려한 임의의 냉연판 불량형상을 제어하기 위한 제어변수로 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량을 이용하였다. 이때 대칭성분의 불량형상만을 제어할 경우에는 판 폭 방향으로 양쪽 끝부분(edge)에서의 변형정도가 같으므로 롤에 작용하는 굽힘력 변화량도 판 폭 방향으로 양쪽 끝부분에서 같은 양으로 계산된다.⁽¹¹⁾ 그러나 비대칭성분을 고려하는 경우에는 판의 양쪽 끝부분에서 변형정도가 다르므로 작용되는 굽힘력의 변화량도 달라져야 한다. 이에 따라 본 연구에서 제안한 기본적인 형상제어 방법은 임의의 냉연판 불량형상을 제어하기 위하여 형상의 비대칭성분에 따른 가중치를 계산하고, 이에 근거하여 롤의 양쪽에 작용하는 굽힘력에 차이를 두어 적용하는 것이다. 즉, 임의의 불량형상에 대하여 우선 대칭성분만을 고려한 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량을 계산한 후, 비대칭성분에 대한 가중치를 계산하여 이미 계산한 굽힘력 변화량에 가중치 만큼의 영향을 고려하여 롤의 양쪽에 작용하는 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량에 차이를 두는 것이다. 이때 가중치를 계산하는 경우에도 역시 퍼지제어 알고리즘을 구성하여 계산하였다.

2. 냉연판 형상의 모델링

냉간압연되어지는 판재를 폭방향으로 잘랐을 때, 압연변형의 차이에 의해 두께방향으로 생기는 판재 단면의 불균일한 정도를 판재의 형상이라고 정의한다.⁽¹⁴⁾ 예를 들어 판 폭방향으로 판재를 잘랐을 때, 양쪽 끝부분(edge)에서의 늘어난 정도가 판 폭중앙부보다 큰 경우는 판의 형상이 아래로 오목한 불량형상이 형성되게 되는데, 결국 형상을 제어한다는 것은 이러한 불량형상이 발생할 경우 판 폭방향으로 판재의 변형량을 균일하게 하므로써 편평한 판재형상(flat shape)을 얻도록 하는 것이다. 실제 압연공정에서 이러한 판의 불균일한 변형정도를 표시하기 위해 굽준도(steeptness), 연신율(elongation), 그리고 I-unit 등의 기본단위들을 이용한

다.⁽¹¹⁾ 급준도와 연신율은 각각 ' $y/x_{desied} \times 100\%$ ' 그리고 ' $(x_{actual} - x_{desied})/x_{actual}$ '로 정의되는데, 이때 y 는 두께방향으로 판재가 늘어난 양을, x_{desied} 와 x_{actual} 는 각각 폭방향으로 판재의 원래 폭길이와 실제 늘어난 폭길이를 나타낸다. 즉 x_{desied} 와 x_{actual} 사이에 차이가 생기면 그 크기에 따라 판재의 두께방향으로 불량형상이 유발되므로 판재의 불량형상 정도를 연신율을 이용하여 나타낼 수 있다. 그러나 실제 판재의 변형량은 매우 작은 값이므로 연신율로 정의되는 기본단위에 10^5 을 곱하여 I-unit라고 정의하고, 판재의 변형정도를 나타낼 때 이러한 I-unit 단위를 이용하여 나타내도록 한다. 이와 같은 기본단위를 이용하여 다음과 같이 냉연판재의 형상을 수학적으로 모델링 할 수 있다.

2.1 형상매개변수의 도입

불균일한 냉연판재의 형상을 수학적으로 모델링하기 위해 4차 멱급수를 이용하여 임의의 형상을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.⁽¹³⁾ 이때 판재의 형상은 4차 이상의 멱급수, 또는 푸리에(Fourier) 급수법 등을 이용하여 모델링할 수도 있지만, 4차 멱급수가 취급하기가 쉽고 또한 형상을 직관적으로 파악하기가 쉬우므로 이를 이용하여 형상을 모델링하였다.

$$y = \lambda_1 x + \lambda_2 x^2 + \lambda_3 x^3 + \lambda_4 x^4 \tag{1}$$

이때 y 는 앞서 언급한 바와 같이 두께방향으로 판재가 늘어난 양을 의미하고 I-unit 단위를 이용하여 표시되며, x 는 판재의 폭을 -1부터 +1까지 정규화한 길이를 나타내고, $\lambda_i (i=1\sim 4)$ 는 판 형상에 따라 정해지는 상수값이다. 이때 롤의 구동측면(drive side, 이하 'D/S' 라고 표기)을 -1로, 작업측면(work side, 이하 'W/S' 라고 표기)을 +1로 하여 판 폭을 정규화하였으며, 판 폭의 중앙($x=0$)을 기준으로 하여 판 폭방향으로 판재의 변형량을 나타내기 위해 식 (1)의 상수항은 0으로 하였다(즉, $x=0$ 에서 $y=0$). 위와 같이 근사시킨 판 형상을 다음 식과 같이 대칭성분 y_1 과 비대칭성분 y_2 로 분리시킬 수 있다.

$$y = y_1 + y_2$$

여기서,

$$y_1 = \lambda_2 x^2 + \lambda_4 x^4 : \text{대칭성분}$$

$$y_2 = \lambda_1 x + \lambda_3 x^3 : \text{비대칭성분} \tag{2}$$

그러나 y_1 과 y_2 로 표현되는 판 형상의 대칭성분과 비대칭성분을 좀 더 쉽게 직감적으로 파악할 수 있도록 식 (3), (4)로 정의되는 형상매개변수 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ 를 도입하여 판 형상을 나타내었다.

- 대칭성분 형상매개변수

$$\Lambda_2 = y_1(\pm 1) = \lambda_2 + \lambda_4$$

$$\Lambda_4 = y_1(\pm \frac{1}{\sqrt{2}}) = \frac{1}{2}\lambda_2 + \frac{1}{4}\lambda_4$$

또는,

$$\begin{vmatrix} \Lambda_2 \\ \Lambda_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_2 \\ \lambda_4 \end{vmatrix} \tag{3}$$

- 비대칭성분 형상매개변수

$$\Lambda_1 = y_2(1) = \lambda_1 + \lambda_3$$

$$\Lambda_3 = y_2(\frac{1}{\sqrt{3}}) = \frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_1 + \frac{1}{3\sqrt{3}}\lambda_3$$

또는, $\begin{vmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3\sqrt{3}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_3 \end{vmatrix}$ (4)

식 (3), (4)에서 알 수 있듯이 Λ_2 와 Λ_4 는 대칭성분을 나타내는 형상매개변수이므로, $W/S(x=+1)$ 와 $D/S(x=-1)$ 에서 같은 값을 가지며, Λ_1 과 Λ_3 는 W/S 와 D/S 에서 서로 부호가 다른 값을 가짐을 알 수 있다.

2.2 임의 판 형상의 표현

식 (1)~(4)에서 주어진 관계들을 이용하여 임의의 판 형상에 대하여 형상을 근사화시키고 형상매개변수 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ 를 유도할 수 있다. 따라서 실제 작업에서는 형상측정기(shape meter)에 의해 마지막 스탠드에서 형상이 측정되면 식 (1)~(4)를 이용하여 형상매개변수 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ 를 구할 수 있다. 즉, W/S 와 D/S 의 형상을 측정하여 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ 값을 결정하게 되면 역으로 식 (3), (4)의 역행렬을 구하여 식 (5), (6)과 같이 ($i=1\sim 4$)의 계수값을 구하게 되고, 전체적인 판 형상을 식 (7)과 같이 근사시킬 수 있다.

- 대칭형상계수

$$\lambda_2 = -\Lambda_2 + 4\Lambda_4$$

$$\lambda_4 = 2\Lambda_2 - 4\Lambda_4,$$

또는, $\begin{vmatrix} \lambda_2 \\ \lambda_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & 4 \\ 2 & -4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Lambda_2 \\ \Lambda_4 \end{vmatrix}$ (5)

- 비대칭형상 계수

$$\lambda_1 = (-1/2)A_1 + (3/2)\sqrt{3}A_3$$

$$\lambda_3 = (3/2)A_1 - (3/2)\sqrt{3}A_3$$

또는,
$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 3 \\ 3 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

- 근사화된 판 형상

$$y = -\frac{1}{2}A_1 + \frac{3}{2}\sqrt{3}x + (-A_2 + 4A_4)x^2$$

$$+ \left(\frac{3}{2}A_1 - \frac{3}{2}\sqrt{3}A_3x^3 + 2A_2 - 4A_4\right)x^4 \quad (7)$$

이 때 비대칭성분의 형상을 제어하기 위한 변수로 W/S (x=+1)의 형상과 D/S(x=-1)의 형상을 식 (8)과 같이 정의하여 가중치를 계산하는 퍼지 알고리즘의 입력변수로 이용하였다.

$$\text{lamp} = y(+1) = A_1 + A_2 : W/S \text{의 판 형상} \quad (8a)$$

$$\text{lamm} = y(-1) = -A_1 + A_2 : D/S \text{의 판 형상} \quad (8b)$$

이와 같이 주어진 판 형상매개변수 $A_1 \sim A_4$ 로부터 판 형상을 근사화하는 과정의 예를 Fig. 1에 나타내었다.

3. 냉연 판 형상제어를 위한 퍼지제어기 구성

3.1 임의의 형상에 대한 퍼지제어기 구조

참고문헌⁽¹¹⁾에 냉연판의 불량형상중 대칭성분만을 고려한 퍼지제어 알고리즘을 개발하여 시뮬레이션한 결과를 보고하였다. 이 때 제어기의 입력변수로 대칭성분 형상매개변수인 A_2 와 A_4 가 입력되었

고, 주어진 판 형상에 대하여 퍼지제어기는 제어규칙을 바탕으로 한 퍼지추론을 통하여 작업롤(work roll)과 중간롤(intermediate roll)의 굽힘력 변화량 ($\Delta Fw, \Delta Fi$)을 계산하여 판의 불량형상을 보정할 수 있도록 하였다. 이 때 불량형상의 대칭성분(Fig. 1)은 판의 W/S와 D/S에서 변형정도가 같으므로 퍼지제어기로부터 추론한 제어변수인 ΔFw 와 ΔFi 도 W/S와 D/S에서 같은 값이 구해진다. 그러나 비대칭성분을 포함한 임의의 형상의 경우, 냉연판의 변형정도가 W/S와 D/S에서 다르게 나타나므로 양쪽에 같은 양의 ΔFw 와 ΔFi 를 적용하여서는 적절하게 판 형상을 제어할 수가 없게 된다.

이에 따라 냉연판의 비대칭형상을 고려한 임의의 형상을 제어하기 위해 본 연구에서 제안한 제어방법은 다음과 같다. 주어진 임의의 판 불량형상에 대하여 이미 개발한 퍼지제어 알고리즘을 이용하여 우선 대칭성분의 불량형상에 대한 ΔFw 와 ΔFi 를 계산하고, 그리고 비대칭성분을 고려한 가중치(weighting factor)를 계산하여 판의 W/S와 D/S에 작용하는 ΔFw 와 ΔFi 에 차이를 두어 적용하고자 하였다. 이러한 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

즉, 2장에서 모델링한 판의 형상매개변수인 $A_1 \sim A_4$ 이용하여 판의 불량형상을 입력시키면, 대칭성분 형상매개변수인 A_2 와 A_4 에 근거하여 ΔFw 와 ΔFi 를 계산한다. 그리고 비대칭성분을 고려하기 위해 식 (8)에서 정의한 변수인 lamp와 lamm을 계산하고, 이 변수값에 근거하여 세운 퍼지제어규칙과 추론방법을 이용하여 W/S와 D/S에서 굽힘력 변화량을 결정하게 될 가중치인 wtp(W/S의 작업롤 가중치), wtm(D/S의 작업롤 가중치), itp(W/S의 중간롤 가중치), itm(D/S의 중간롤 가중치)을 계산하였다. 이때 계산되는 가중치는

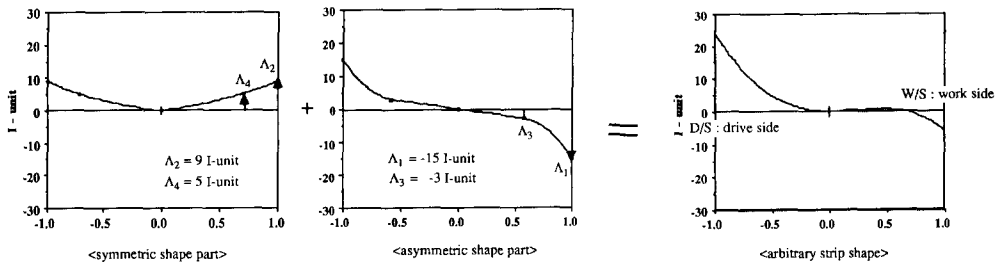


Fig. 1 Modeling of randomly irregular cross-sectional strip shape

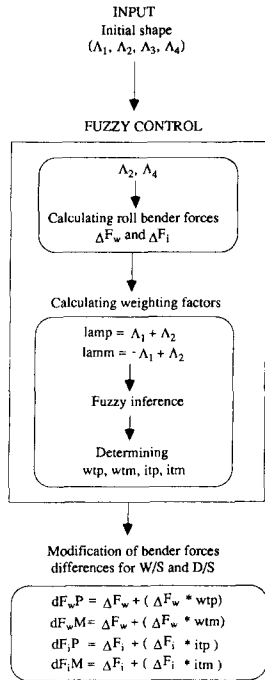


Fig. 2 Fuzzy control algorithm for arbitrary strip shape control

-1~+1 사이의 값을 가지게 된다. 가중치 값이 계산되면 미리 구한 ΔF_w 와 ΔF_i 에 더하여 각각 W/S와 D/S에 작용하게 될 작업롤과 중간롤의 최종 굽힘력 변화량을 식 (9)와 같이 구한다.

$$dF_wP = \Delta F_w + (\Delta F_w * wtp);$$

W/S의 작업롤 굽힘력 변경량 (9a)

$$dF_wM = \Delta F_w + (\Delta F_w * wtm);$$

D/S의 작업롤 굽힘력 변경량 (9b)

$$dF_iP = \Delta F_i + (\Delta F_i * itp);$$

W/S의 중간롤 굽힘력 변경량 (9c)

$$dF_iM = \Delta F_i + (\Delta F_i * itm);$$

D/S의 중간롤 굽힘력 변경량 (9d)

3.2 가중치 계산을 위한 퍼지제어 알고리즘

냉연판 불량형상의 비대칭성분을 제어하기 위한 가중치의 계산에는 식 (8)에서 정의한 lamp와 lamm을 입력변수로 하여 퍼지추론을 하게 된다. 이 때 lamp와 lamm은 각각 W/S와 D/S에서 판의 불량정도를 나타내는 양이다. Table 1과 같이 lamp와 lamm 값의 범위에 따라 구간을 나누어 이산화(discretization)하였고, 이산화된 등급에 따라

Table 1 Discretization table of 'lamp' and 'lamm'

lamp. lamm. (I-unit)	Level number
20 or above	3
10~20	2
5~10	1
-5~5	0
-10~-5	-1
-20~-10	-2
-20 or below	-3

Table 2 Linguistic variables and membership table.

Level No.	-3	-2	-1	0	1	2	3
LPA					0.2	0.6	1.0
SPA				0.3	0.7	0.9	0.5
ZEA		0.2	0.4	1.0	0.4	0.2	
SNA	0.5	0.9	0.7	0.3			
LNA	1.0	0.6	0.2				

Table 2와 같이 언어변수집합(linguistic variable)에 속하는 소속정도를 결정하였다.

예를 들어 W/S에서의 판 불량형상인 lamp가 20 I-unit로 입력되었을 때, 이 값은 2라는 값으로 이산화되고, 이것은 다시 LPA, SPA, ZEA라는 언어변수에 속하게 되며, 각각의 소속정도는 0.6, 0.9, 0.2가 된다. 이러한 퍼지화과정과 또한 각각의 형상유형에 대해 미리 정해진 퍼지제어 규칙에 따라 퍼지추론 과정을 통하여 W/S와 D/S에서의 작업롤과 중간롤의 가중치를 계산하게 된다. 이 때 퍼지추론 방법으로는 일반적으로 가장 많이 이용되는 Mamdani의 최소 연산법추론(minimum operation inference method)을 이용하였으며, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법(center of area)을 사용하였다.⁽¹⁵⁾

Table 3에 대칭성분은 모두 0보다 크고(Λ_2, Λ_4)

Table 3 Example of fuzzy logic rules

Fuzzy logic rules ($\Lambda_1, \Lambda_3 < 0$ and $\Lambda_2, \Lambda_4 > 0$)						
Rule	Precondition		Consequence			
	lamm	lamp	wtm	wtp	itp	itm
1	LPA	LPA	PSA	ZRA	.	.
2	LPA	SPA	PSA	ZRA	.	.
3	LPA	ZEA	PSA	NSA	.	.
4	LPA	SNA	PBA	NSA	.	.
5	LPA	LNA	PBA	NBA	.	.
6	SPA	SPA	PSA	ZRA	.	.
7	SPA	ZEA	PSA	ZRA	.	.
8	SPA	SNA	PSA	NSA	.	.
9	SPA	LNA	PBA	NBA	.	.

Table 4 Output fuzzy variables and values of weighting factor control

wtp	PBA	1.0
	PSA	0.5
wtm	ZRA	0.0
itp	NSA	-0.5
	NBA	-1.0

0), 비대칭성분은 모두 0보다 작은 경우 ($\Lambda_1, \Lambda_3 < 0$)의 불량형상에 대하여 가중치를 구하는 퍼지제어 규칙의 예를 보였다. 이러한 퍼지제어 규칙은 비대칭형상이 굽힘력 변화량에 어떤 영향을 주는가를 알기 위하여 실제 압연조업 데이터의 분석을 통하여 구성되었다. 이와 같은 불량형상의 경우, lamm은 항상 0보다 큰 값이 되기 때문에 (lamm = $-\Lambda_1 + \Lambda_2$), lamm이 속하게 되는 언어변수는 LPA, SPA, ZEA가 된다. 그러나 lamm이 ZEA에 속하는 경우에는 형상의 불량정도가 작은 경우이므로 제어대상에서 제외하기로 하면 결국 제어규칙의 선행조건부(precondition part)에서 lamm이 관계되는 언어변수는 LPA와 SPA의 두 변수로 제한될 수 있다. 또한 결론부(consequence part)에서는 중간롤의 굽힘력 변화량 차이가 판 형상에 크게 영향을 미치지 못하므로 중간롤 굽힘력 변화에 대한

가중치는 고려하지 않고, 대칭성분 제어에서 구한 중간롤의 굽힘력 변화량인 ΔF_i 를 W/S 와 D/S 에 같이 적용하도록 하였다. 이 때 결론부에서는 PBA, PSA, ZRA, NSA, NBA와 같은 5개의 언어 변수를 이용하였으며, 각각의 언어변수들은 Table 4에 나타난 것과 같은 퍼지 단일값(fuzzy singleton)을 갖는다.

임의의 판 불량형상에 대하여 퍼지제어기가 W/S 와 D/S 에서 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량을 계산하는 한 예를 들면 다음과 같다. $\Lambda_1 = -15$ I-unit, $\Lambda_2 = 9$ I-unit, $\Lambda_3 = -3$ I-unit, $\Lambda_4 = 5$ I-unit으로 주어지는 불량형상에 대하여, 우선 퍼지제어기는 대칭형상 성분인 Λ_2 와 Λ_4 에 따라 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량인 ΔF_w 와 ΔF_i 를 구하고 이들 값은 각각 1.59, 0.94 (ton)이 된다. 이어 비대칭형상 성분을 고려하기 위해 가중치를 계산하는데, 우선 lamp와 lamm을 계산하면 각각 -6 I-unit와 24 I-unit이며 이 값들은 또한 각각 -1과 3의 등급으로 이산화된다. -1과 3으로 이산화된 등급은 각각 ZEA, SNA, LNA와 LPA, SPA의 언어변수에 속하게 되며, 각각의 소속정도는 0.4, 0.7, 0.2 그리고 1.0, 0.5가 된다. 이렇게 결정된 소속정도와 Table 3에 주어진 제어규칙을 이용하여 퍼지추론과 비퍼지방법을 통하여 가중치를 계산하면 wtp (W/S 의 작업롤 가중치)는 -0.67, wtm(D/S 의 작업롤 가중치)은 0.86, 그리고 itp(W/S 의 중간롤 가중치)와 itm(D/S 의 중간롤 가중치)은 0이 되고 식 (9)에 주어진대로 최종의 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량을 구하면 다음과 같이 된다.

$$dF_wP = 1.59 + (1.59 * -0.67) = 0.52 \text{ (ton)}$$

$$dF_wM = 1.59 + (1.59 * 0.86) = 2.96 \text{ (ton)}$$

$$dF_iP = 0.94 + (0.94 * 0.0) = 0.94 \text{ (ton)}$$

$$dF_iM = 0.94 + (0.94 * 0.0) = 0.94 \text{ (ton)}$$

4. 연속적인 형상제어 시뮬레이션 결과

3장에서 구성한 퍼지제어기로부터 임의의 냉연 판 불량형상에 대하여 제어변수인 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화량을 비대칭성분을 고려하여 W/S 와 D/S 에서 각각 구하였다. 이렇게 구한 제어결과 값을 적용하였을 때 판의 불량형상이 어떻게 제어되는가를 알아보기 위해 신경회로망을 이용한 에블레이터를 구성하여 Fig. 3과 같이 원하는 판 형상을 얻을 때까지 연속적인 형상제어를 수행하였

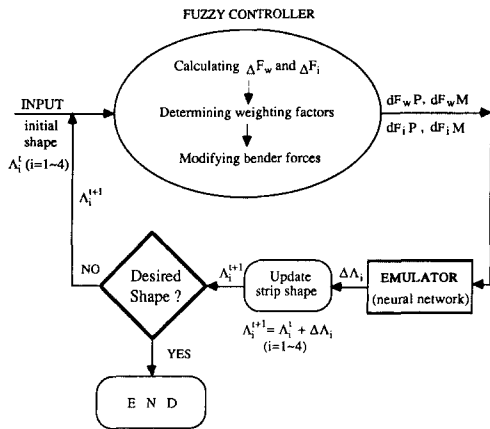


Fig. 3 Schematic diagram of fuzzy shape control simulation using emulator

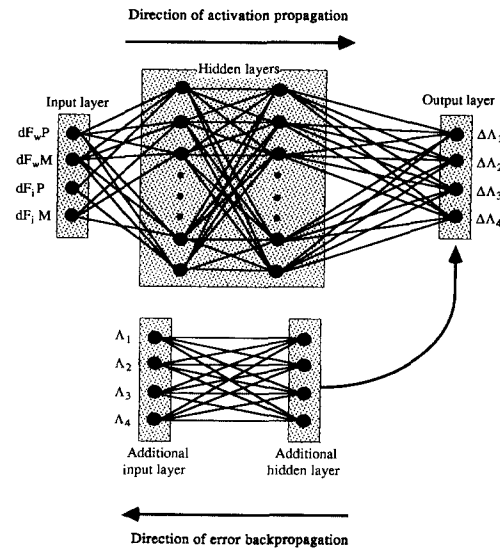


Fig. 4 Structure of emulator based on neural network

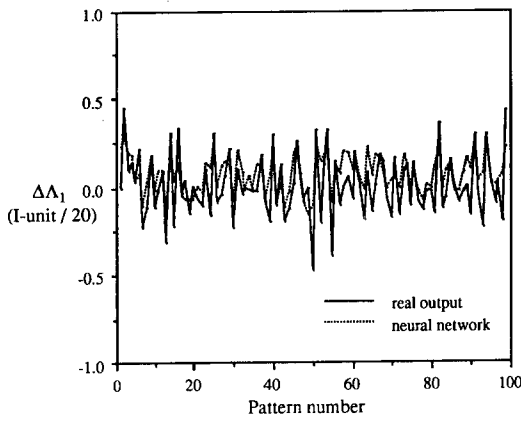
다. 즉, 퍼지제어기를 이용하여 주어진 형상에 대하여 W/S 와 D/S 에서의 작업률과 중간물의 굽힘력 변화량을 구하고, 이 값을 적용하였을 때 형상이 어떻게 변화할 것인가를 에뮬레이터를 이용하여 예측하고, 바뀌어진 형상을 다시 퍼지제어기로 피드백(feed back)하여 lamp와 lamm 이 10 I-unit 보다 작은 목표형상으로 수렴할 때까지 반복해서 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 에뮬레이터의 구조와 학습

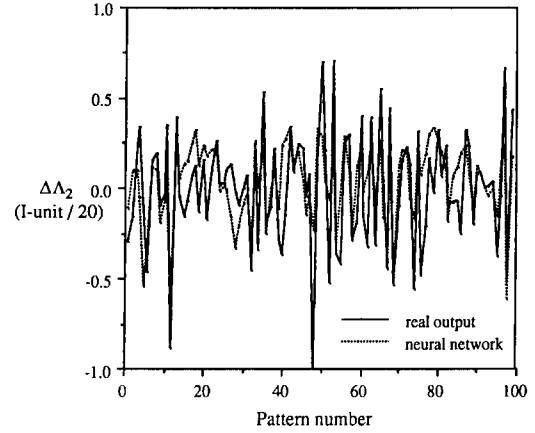
에뮬레이터는 신경회로망을 이용하여 실제의 조업데이터에 근거하여 학습되었다. 학습에 이용된 데이터는 판 두께가 0.3 mm~0.5 mm의 박물로 모두 520개의 패턴을 학습에 이용하였다. 신경회로망의 구조는 MLP(Multi Layer Perceptron) 구조를 이용하였으며, 신경망 출력층의 오차함수가 최소화 되도록 역전파(backpropagation) 알고리즘을 사용하여 각 노드 사이의 연결강도를 조절하였다.⁽¹⁶⁾ 신경망은 Fig. 4와 같이 입력층(input layer)과 두 개의 은닉층(hidden layer), 그리고 출력층(output layer)으로 구성되어져 있다. 신경망의 입력층에는 각각 W/S 와 D/S 에 작용하는 시간 t 에서의 작업률과 중간물의 굽힘력 변화량인 $dF_w P$, $dF_w M$, $dF_i P$, $dF_i M$ 이 입력되고 각각 30개씩의 노드를 갖는 두개의 은닉층을 거쳐 출력층과 연결된다. 이때 시간 t 에서의 판 형상인 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ 도 바이어스(bias) 형태로 또 다른 신경망으로 구성되어 4개의 노드를 갖는 하나의 은닉층을 거쳐 출력층과 연결

되었다. 출력층에서는 주어진 제어 변수에 대해 시간 $(t+1)$ 에서의 형상변화량인 $\Delta \Lambda_1 \sim \Delta \Lambda_4$ 가 구해지고, 이 값들이 시간 t 에서의 형상매개변수값에 더해져 시간 $(t+1)$ 에서의 형상매개변수인 $(\Lambda_1 \sim \Lambda_2)^{(t+1)}$ 을 예측하였다. 이 때 출력층은 임의의 값에 대해 학습이 가능하도록 활성화함수(activation function)로 선형함수를 이용하여 신경회로망의 출력값과 조업데이터의 교사신호(desired signal)를 직접 비교할 수 있도록 하였으며, 은닉층에서는 시그모이드(sigmoid) 함수를 이용하여 각 은닉층의 출력값이 $-1 \sim +1$ 사이로 정규화되도록 하였다.

520개의 박물 조업데이터를 이용해 학습시킨 에뮬레이터를 이용해서 학습데이터(learned data)와 시험데이터(test data)에 대하여 신경회로망의 출력값과 실제 조업데이터의 형상 변화량 사이의 유사성을 분석한 $\Delta \Lambda_1$ 과 $\Delta \Lambda_2$ 를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이 때 학습데이터란 에뮬레이터를 학습시킬 때 이용한 데이터를 의미하며, 시험데이터란 에뮬레이터의 학습에 이용되지 않은 데이터로서, 에뮬레이터의 출력값이 시험데이터의 값과 유사해질수록 에뮬레이터는 잘 학습되었음을 의미한다. Fig. 5와 6에서 알 수 있듯이 학습데이터의 경우에 에뮬레이터 출력값과 실제값이 더 잘 일치하지만, 시험데이터의 경우에도 변화경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해 에뮬레이

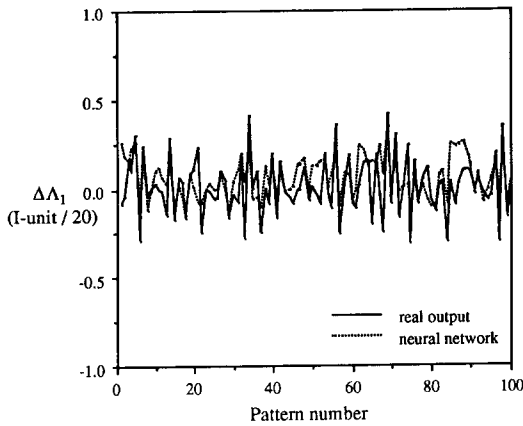


(a) Variation of $\Delta\Lambda_1$

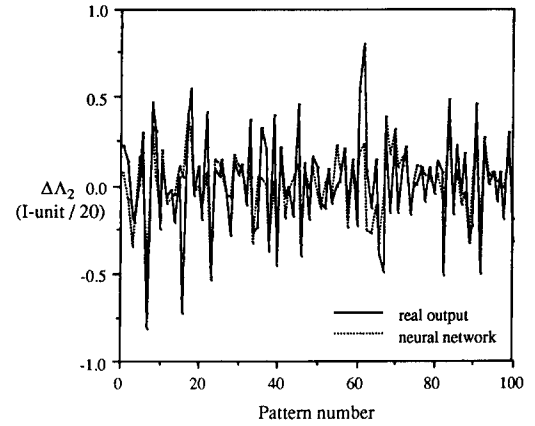


(b) Variation of $\Delta\Lambda_2$

Fig. 5 Comparisons of outputs $\Delta\Lambda_1$ and $\Delta\Lambda_2$ obtained from emulator based on neural network and real data in the case of learned data



(a) Variation of $\Delta\Lambda_1$



(b) Variation of $\Delta\Lambda_2$

Fig. 6 Comparisons of outputs $\Delta\Lambda_1$, $\Delta\Lambda_2$ obtained from emulator based on neural network and real data in the case of test data

터가 시간 t 에서의 제어변수에 대해 시간 $(t+1)$ 에서 판의 형상변화를 제대로 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

4.2 형상제어 결과 및 고찰

Fig. 7~Fig. 11에 임의의 판 형상에 대하여 개발한 퍼지제어 알고리즘과 신경회로망을 이용하여 학습시킨 에뮬레이터를 이용하여 형상제어 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내었다. 주어진 임의의 판 형상에 대하여 W/S 와 D/S 에서의 판 변형정도인 $lamp$ 와 $lamm$ 이 ± 10 I-unit 이내로 수렴할 때까지 계속해서 제어를 수행하였고, 식 (7)을 이용하

여 계속적으로 바뀌어지는 판 형상을 표현하였다.

Fig. 7에 3.2절에서 예로 든 불량형상에 대하여 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 굵은 실선으로 표시된 형상이 초기형상 ($\Lambda_1 = -15, \Lambda_2 = 9, \Lambda_3 = -3, \Lambda_4 = 5$ I-unit)이며 흐린 실선으로 표시된 형상이 9번의 제어가 수행된 후 ± 10 I-unit 내로 수렴된 최종형상을 나타낸다. 주어진 초기형상에 대해 퍼지 제어기는 3.2절과 같이 W/S 와 D/S 에서 작업물과 중간물의 굽힘력 변화량인 $dF_wP, dF_wM, dF_iP, dF_iM$ 을 각각 0.52, 2.96, 0.94, 0.94톤으로 계산하였고, 이 값과 초기형상 값에 근거해서 에뮬레이터는 $\Lambda_1 = -16, \Lambda_2 = 2.5, \Lambda_3 = -8, \Lambda_4 = 0.29$

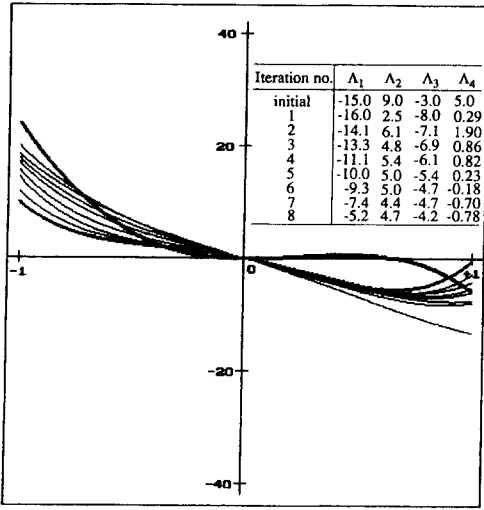


Fig. 7 Simulation result of continuous shape control for arbitrary strip shape in the case of $\Lambda_1, \Lambda_3 < 0$ and $\Lambda_2, \Lambda_4 > 0$

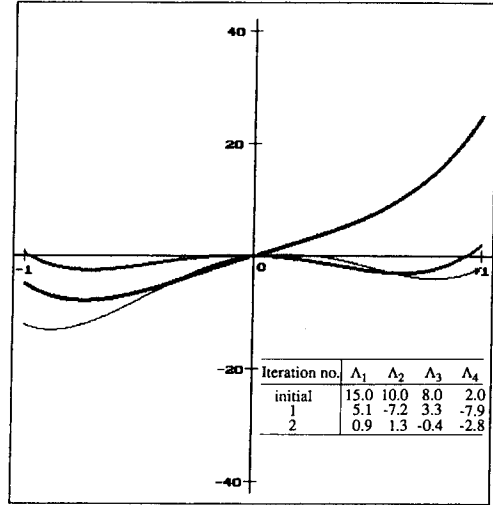


Fig. 9 Simulation result of continuous shape control for arbitrary strip shape in the case of $\Lambda_1, \Lambda_3 > 0$ and $\Lambda_2, \Lambda_4 < 0$

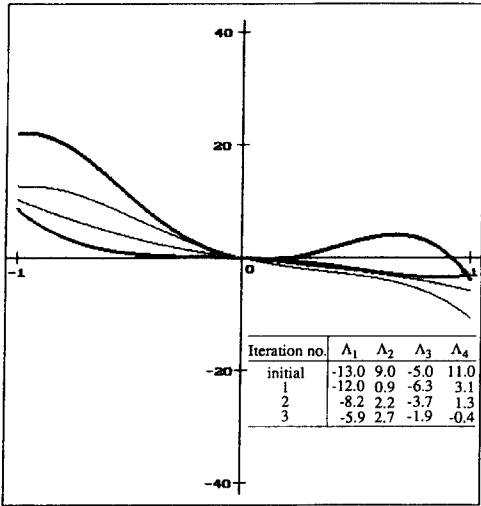


Fig. 8 Simulation result of continuous shape control for arbitrary strip shape in the case of $\Lambda_1, \Lambda_3 < 0$ and $\Lambda_2, \Lambda_4 > 0$

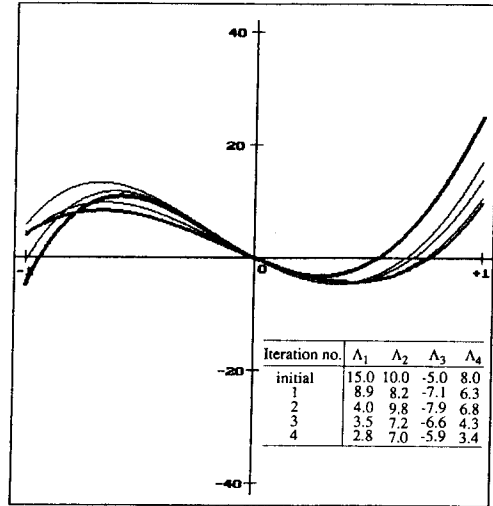


Fig. 10 Simulation result of continuous shape control for arbitrary strip shape in the case of $\Lambda_1 > 0, \Lambda_3 < 0$ and $\Lambda_2, \Lambda_4 > 0$

I-unit인 변화된 판 형상을 예측하였다. 이러한 제어과정을 9번 반복한 후에 얻어진 임의의 불량형상은 목표형상 이내로 수렴되었음을 알 수 있다. 이때 D/S 에서는 초기의 불량정도가 매우 크지만 제어가 수행됨에 따라 일정하게 불량정도가 줄어드는 반면, W/S 에서는 초기형상의 불량정도는 작지만 첫번째 제어에서 lamp가 -13.5 I-unit의 큰 값으

로 변화했다가 서서히 목표형상으로 제어됨을 알 수 있다. 이는 초기의 제어에서 D/S 의 변형정도가 크므로, D/S 의 굽힘력 변화량인 $dF_w M$ 이 큰 값으로 계산되고 이것이 W/S 의 판 형상에도 영향을 미치기 때문이다. Fig. 8은 Fig. 7과 유사한 불량형상 유형($\Lambda_1, \Lambda_3 < 0, \Lambda_2, \Lambda_4 > 0$)에 대하여 제어한 결과를 보여준다. 이 경우에도 제어경향은 Fig. 7

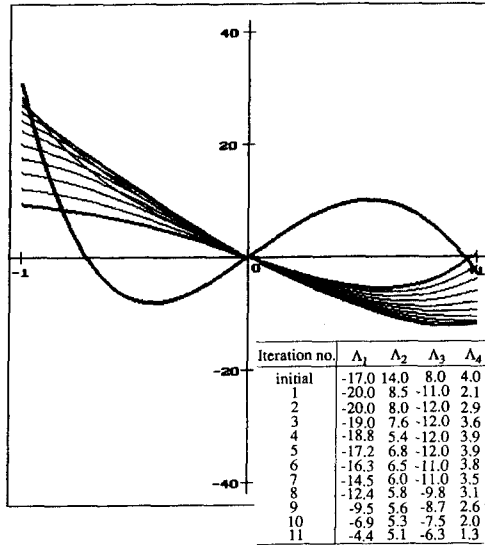


Fig. 11 Simulation result of continuous shape control for arbitrary strip shape in the case of $\Lambda_1 < 0$, $\Lambda_3 > 0$ and $\Lambda_2, \Lambda_4 > 0$

과 유사하고 3번만에 목표형상으로 수렴되었다. Fig. 9는 $\Lambda_1 \sim \Lambda_4$ 가 모두 0보다 큰 불량형상의 경우 2번만에 목표형상으로 수렴되었음을 보여주고 있다. 이 경우에는 Fig. 7과 반대로 초기에 W/S 의 불량정도가 커서 $dF_w P$ 가 매우 큰 값으로 계산되었고 이 값이 D/S 에도 영향을 미쳐 첫번째 제어후에 lamm 이 -12.3 I-unit로 변화되었으나 두번째 제어에서 원하는 목표형상으로 바로 수렴되었다. Fig. 10은 Λ_3 만 0보다 작은 경우의 불량형상에 대하여 제어를 수행한 결과인데 4번만에 목표형상으로 수렴되었다. 그러나 이 경우에는 4번만에 목표형상으로 수렴했지만 초기의 불량형상 자체가 복잡해서인지 제어결과가 만족스럽지 못했다. Fig. 11은 Λ_1 만 0보다 작은 경우의 불량형상에 대해 제어를 수행한 결과이다. Fig. 10의 경우와 마찬가지로 초기 불량형상이 복잡한 경우인데, 첫번째 제어에서 단순한 형태의 모양으로 바뀐 뒤 연속제어가 수행됐으며 Fig. 7과 유사한 제어경향을 보이고 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 임의의 불량형상을 갖는 냉연판의 형상제어를 위한 퍼지제어 알고리즘을 개발하고 실제 조업데이터에 근거해서 학습시킨 에뮬레이터를

이용하여 형상제어 시뮬레이션을 수행하였다. 퍼지제어 알고리즘은 대칭성분 형상에 대하여 제어대상 변수인 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변경량을 구하고, 비대칭성분에 대한 가중치를 퍼지추론하여 판의 W/S 와 D/S 에서 서로 다른 굽힘력을 가하도록 하여 임의의 형상을 갖는 냉연판에 대하여 효과적으로 형상제어가 될 수 있도록 개발되었다. 여러가지 불량형상에 대하여 시뮬레이션을 수행해 본 결과 단순한 불량형상의 경우에는 대체로 3~4번만에, 그리고 복잡한 형상의 경우에는 9~12번의 제어 후에 목표형상으로 수렴되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구결과에 의하면 W/S 와 D/S 에서 서로 다른 굽힘력을 적용함으로써, 실제 조업에서도 냉연판의 임의의 불량형상에 대해 효과적으로 형상제어를 할 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 연구를 수행할 수 있도록 도와주신 광양제철소 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Yukio, H., Yukifumi, O., Mitsuru, Y., Shitoshi, M., Toshinori, M. and Sadakazu, M., 1983, "Development of New Plane View Control Technique in Plate Rolling," *Nippon Kokan Tech. Report*, No. 39, pp. 21~30.
- (2) Ishikawa, T., Tozawa, Y. and Nishizawa, J., 1988, "Fundamental Study on Snaking in Strip Rolling," *Trans. ISIJ*, Vol. 28, pp. 485~490.
- (3) Yamamoto, H., Shiraiishi, T., Kawanami, T., Shinya, S., Goto, T., Koyama, T. and Mineura, T., 1988, "Fundamental Studies for Application of New Compact Multi-Reduction Mill," *Trans. ISIJ*, Vol. 28, pp. 491~497.
- (4) Leven, J., Jonsson, N. G., Wiklund, O. and Edberg, J., 1990, "Strip and Plate Profile and Edge Drop in Flat Rolling," *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol. 2, pp. 595~600.
- (5) Yamamoto, H., Baba, K. and Kikuma, T., 1990, "Dynamic Simulation for the Optimal Automatic Control System of Strip Shape in Cold Rolling," *Advanced Tech. of Plasticity*, Vol.

- 2, pp. 797~802.
- (6) Mamdani, E. H., 1975, "Applications of Fuzzy Algorithms for Simple Dynamic Plant," *Proc. IEEE*, 121(12), pp. 1585~1589.
- (7) Ostergaard, J. J., 1977, "Fuzzy Logic Control of a Heat Exchanger Process," in *Fuzzy Automata and Decision Process* (M. M. Gupta, G. N. Saridis, and B. R. Gaines, Eds.), North-Holland, pp. 285~320.
- (8) Tong, R. M., Beck, M. B. and Latten, A., 1980, "Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process," *Automatica*, Vol. 16, No. 6, pp. 695~701.
- (9) Yasunobu, S. and Hasegawa, T., 1986, "Evaluation of an Automatic Container Crane Operation System Based on Predictive Fuzzy Control," *Control Theory Adv. Tech.*, Vol. 2, No. 3, pp. 419~432.
- (10) Bernard, J. A., 1988, "Use of a Rule-Based System for Process Control," *IEEE Cont. Sys. magazine*, Vol. 8, No. 5, pp. 3~13.
- (11) 정중엽, 임용택, 이광형, 진철제, 이해영, 1994, "퍼지제어를 이용한 냉연공정 형상제어 시뮬레이션," 대한기계학회논문집, 제18권, 제2호, pp. 302~312.
- (12) William, L., R., 1978, *Cold Rolling of Steel*, New York: Marcel Dekker, Inc., USA.
- (13) Hasegawa, A. and Taki, F., 1991, "Development of Fuzzy Set Theory-Based Shape Control System for Cold Strip Mill," *Nippon Steel Tech. Rep.*, No. 49, pp. 59~62.
- (14) Satoshi, H., Massaki, N. and Yasunory, K., 1992, "Fuzzy Control Algorithm and Neural Networks for Flatness Control of a Cold Rolling Process," *Hitachi Review*, No. 1, Vol. 41, pp. 31~38.
- (15) Lee, C., C., 1990, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I, II," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. 20, No. 2, pp. 404~435.
- (16) Kim, K., C., Eum, K., S. and Park, D., J., 1993, "Joint Development of Intelligent Shape Control of Cold-Rolling Mills," Project Report, KAIST.