

〈論 文〉

퍼지제어를 이용한 냉연공정 형상제어 시뮬레이션

정증엽* · 임용택** · 이광형*** · 진철제**** · 이해영*****

(1993년 8월 23일 접수)

Simulation of Shape Control in Cold Rolling Using Fuzzy Control

Jong-Yeob Jung, Yong-Taek Im, Hyung Lee-Kwang,
Chul-Jae Jin and Hai-Young Lee

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

Abstract

In this study, a fuzzy theory is introduced to control the cross-sectional strip shape in cold rolling. A fuzzy controller is developed based on the production data and the operational knowledge. The cold rolled products are characterized into several types based on their irregularities. For each type of irregular strip shape, fuzzy controller calculates the changes of bender forces of work and intermediate rolls using fuzzy control algorithm. To simulate the continuous shape control, fuzzy controller is linked with emulator which is developed using neural network. The developed fuzzy controller and emulator simulate the cold rolling process until the irregularities converge to the tolerable range to produce uniform cross-sectional strip shape. The results from this simulation are reasonable for various irregular strip shapes.

1. 서 론

압연공정은 재료의 두께를 감소시켜 원하는 모양의 단면을 얻는 공정으로, 응용분야와 관계되는 재료에 따라 고온 또는 상온 등에서 수행되어 진다. 그 중 냉간압연되어지는 판재는 자동차산업 등과 같은 다른 산업에 곧 바로 이용되어지므로 판에 불량형상, 잔류응력, 불균일한 표면 등의 결함이 생

기게 되면 최종제품의 질에 심각한 영향을 미치게 된다. 여러가지 결함중에서도 가장 심각한 것은 판폭 방향으로의 불규칙적인 단면형상으로, 최종제품의 품질과 생산효율을 향상시킨다는 관점에서 판형상제어가 중요한 문제로 대두되고 있다.

지금까지 냉연판의 형상제어를 위해 많은 연구들이 수행되어졌다.^(1~3) 그러나 피 압연재의 형상불량은 어떤 특별한 요인에만 따르는 것은 아니고, 압연과정 전체중 작용하는 압연하중의 불균일, 압연진행시에 생기는 롤(roll)의 표면손상, 롤에 작용하는 굽힘력(bender force)의 불균일, 그리고 소재의 불량 등 여러가지 요인이 복합적으로 작용되어 나타나고 있다. 그래서 냉간압연되는 판의 형상을 적절히 제어하기 위해서는 많은 변수들이 관계

*한국과학기술원 정밀공학과 대학원
**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과
***한국과학기술원 전산학과
****포항제철(주) 광양제철소
*****산업과학기술연구소

하는 비선형 제어를 해야 하는데 비선형 모델을 작성하는 것이 어려울 뿐만 아니라, 또한 작성한 제어모델도 실험적으로 구해진 매개변수에 의존하는 부분이 많기때문에 제대로 형상제어를 수행하기가 어려운 실정이다.

최근에 이르러 컴퓨터를 이용한 지식처리 방법의 발전과 함께 인간이 가진 정성적이고 논리적 지식을 이용하여 제어를 할 수 있는 지능형 형상제어 시스템이 실용화되고 있다. 지능형 형상제어 방법으로는 신경회로망(neural networks), 퍼지이론(fuzzy logic) 등이 이용되고 있는데, 특히 퍼지이론을 이용하여 제어모델을 작업자의 정성적인 지식을 기초로 한 제어규칙으로 치환함으로써, 작업자의 감각이 합치된 제어를 행할 수가 있다.

퍼지제어 연구는 1960년대 후반 Zadeh의 퍼지 알고리즘⁽⁴⁾과 언어적 분석⁽⁵⁾의 연구를 바탕으로 하여 Mamdani에 의해 처음 시작되었다.⁽⁶⁾ 그 후 정수장의 수질제어,^(7,8) 자동 컨테이너조작 시스템,^(9,10) 엘리베이터 제어,⁽¹¹⁾ 원자로 제어,⁽¹²⁾ 퍼지컴퓨터⁽¹³⁾ 등에 적용되고 있다. 특히 Hasegawa 등⁽¹⁴⁾은 냉간 압연관의 형상을 개선하기 위하여 퍼지이론을 형상제어에 도입하고, 롤의 굽힘력, 압하레벨위치(screw down leveling), 그리고 냉각수 제어 등을 이용하여 좋은 결과를 얻기도 하였다.

이에 본 연구에서는 냉연공정의 형상제어 시뮬레이션을 수행하기 위해 퍼지이론을 도입하여 제어 알고리즘을 개발하고, 또한 신경회로망을 이용하여 학습시킨 에뮬레이터(emulator)와 연결하여 연속적인 형상제어 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 퍼지제어기를 통해서 계산되어진 제어변수의 결과값이 에뮬레이터의 입력값으로 들어가고 이 값을 근거로 하여 에뮬레이터는 바뀌어지는 새로운 관 형상을 예측하게 된다.

본 연구에서 다루어진 냉간압연 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. 각각 한 쌍의 백업롤(back up roll)과 중간롤(intermediate roll), 그리고 작업롤(work roll)로 구성되어 있고, 형상 검출기에 의해 측정된 판형상은 피드백(feed back)되어 형상에 가장 큰 영향을 미치는 작업롤과 중간롤의 굽힘력 변화를 결정하게 된다. 이 때 판형상은 매개변수에 의해 표현되어지며, 압연도중 나타나는 불량형상에 따라 몇가지 유형으로 분류한 뒤 각각의 유형에 대하여 불량형상을 보정할 수 있는 규칙들을 찾는다. 이 때, 규칙들은 작업자의 경험적 지식들, 또는 실

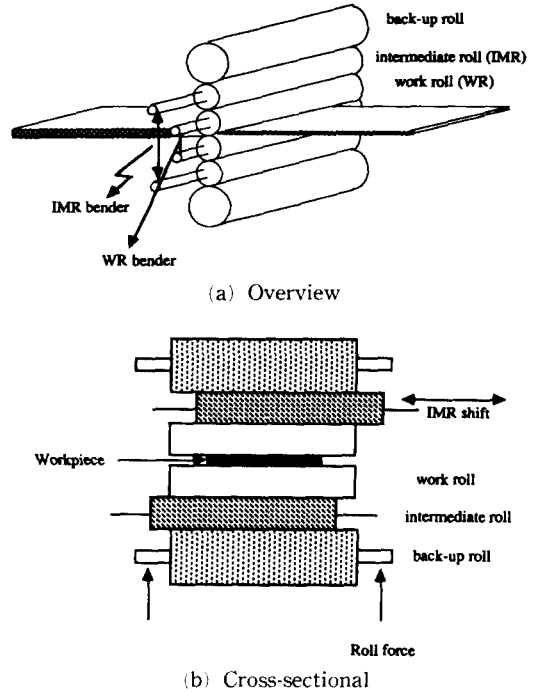


Fig. 1 Schematic diagram of cold rolling system

제 공정 데이터들의 분석을 통하여 찾아내고, 이러한 정보를 바탕으로 퍼지추론을 하여 원하는 결과를 구할 수 있는 퍼지제어기를 구성한다. 퍼지제어 알고리즘은 'C'언어를 이용하여 IBM PC상에서 구현되며, 제어규칙들은 전문가의 경험적 지식들을 적절히 나타낼 수 있도록 'if...then...' 구조를 갖는다. 앞서 언급한 바와 같이 퍼지제어기로 구한 결과의 타당성을 검증하기 위하여, 신경회로망을 이용하여 학습시킨 에뮬레이터와 연결하여 형상변화를 예측함으로써 연속적인 형상제어를 수행하였다. 즉, 퍼지제어기의 결과값을 입력으로 하여 새로운 형상을 예측함으로써 실제의 생산공정을 모사하여 퍼지제어기의 성능을 확인할 수 있게 한다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 각각의 불량형상과, 또한 임의의 외란이 개입됐을때 연속적인 형상제어가 제대로 이루어 지는지 알아보고, 개발된 퍼지제어 알고리즘이 실제의 생산공정에 적합한지의 여부도 검증하였다.

2. 퍼지제어 시스템

최근 인간과 비슷하게 생각하고, 일하는 컴퓨터

를 만들고자 하는 인공지능 연구가 활발히 진행되고 있다. 컴퓨터가 지능을 가지고 인간이 원하는 바를 제대로 수행하기 위해서는 인간이 사용하는 숫자는 물론이고, 애매한 표현을 처리할 수 있어야 하는데 그러한 이론적인 바탕을 제공하는 것이 퍼지이론(fuzzy theory)이다. 퍼지이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해 주는 방법으로서 1965년 미국의 Zadeh 교수에 의해 처음 소개되었으며, 애매하게 표현된 자료를 우리에게 유용한 자료로 만들기 위하여, 퍼지집합(fuzzy set), 퍼지논리(fuzzy logic), 퍼지숫자(fuzzy number) 등의 개념을 포함하고 있다. 퍼지제어(fuzzy control)는 이러한 응용분야 중에서 가장 성공적으로 이용되고 있는 분야이다.

2.1 퍼지제어기의 특성과 응용 예

퍼지제어는 퍼지이론의 응용분야로서 가장 활발히 연구 응용되어 왔으며, 특히 입, 출력관계의 정량적인 분석이 어려운 여러 공정의 제어시스템에서 수식적인 모델에 기준한 기존 제어기의 부적합한 점을 보완 대체하여 성공적인 결과를 얻고 있다. 퍼지논리는 기존 논리체계보다 인간의 사고나 자연어의 특성과 많은 유사성을 가지고 있어서, 실제 일어나는 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 퍼지제어기의 핵심적인 부분은 일련의 언어적 형식의 제어규칙이며, 여기에는 퍼지 연관관계가 포함되어 있고, 퍼지합성규칙에 의해서 제어입력이 생성된다.

일반적으로 퍼지제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 부정확하고, 불확실한 경우에 기존 제어기들보다 우수한 제어 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 좀 더 구체적으로 퍼지 제어기는 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

2.1.1 병렬(분산)형 제어

종래의 제어기에 있어서는 단일개의 제어식에 의해 제어입력이 결정되는데 반해서 퍼지제어는 복수개의 if-then 형식을 가진 제어규칙으로부터 제어입력이 결정되는 병렬형 제어구조를 가진다. 이러한 제어구조는 영역별 제어, 변수별 제어, 목적별 제어의 형태가 복합된 구조이므로, 비선형성이 크고, 복잡한 플랜트의 제어에 효과적으로 적용될 수 있다.

2.1.2 논리형 제어

조건이 느슨하고 유연한 퍼지논리를 도입하고, 제어규칙의 형태가 if-then 형식을 취하며, 언어적인 변수를 도입하므로, 제어규칙의 조건부에 전문가의 지식을 도입하기가 용이하다. 한 언어식으로 다양한 조건을 기술할 수 있고, 물리적인 방법으로 측정할 수 없는 현상도 변수로 이용할 수 있다. 또한 제어규칙이 논리형이므로 예외의 처리에 적합하다.

2.1.3 언어적 제어

제어알고리즘 자체가 일상언어와 대응이 되는 형태이므로, 애매한 인간의 지식에 적용하기 쉬워서 대화형 제어를 구현하는데 적합하다. 또한 언어적이라는 것은 작업자에게 있어서는 제어기의 구조를 이해하기 쉽다는 것을 의미하며, 또한 제어규칙의 수정이 용이하므로 학습능력을 부여하기가 용이하다.

2.2 퍼지제어기의 구조

퍼지제어기를 설명하기 위해 Fig. 2와 같은 일반적인 형태의 제어계를 고려하자.

여기서 제어기(controller)의 역할은 오차(E)를 입력받아서 플랜트에 들어갈 제어입력(u)를 계산하는 것이다. 기존 제어에 있어서는 제어기로의 입, 출력이 모두 단일값(crisp)으로 주어진다. 따라서 이런 경우 제어규칙을 언어적으로 굳이 나타낸다면

$$\text{If } E=0.8 \text{ and } CE=0.2 \text{ Then } U=0.9$$

와 같이 될 것이다. 이때 E 는 오차, CE 는 오차의 변화분, 그리고 U 는 제어입력을 나타낸다. 이에 반해서 퍼지제어기에서는 입력과 출력이 모두 애매한 퍼지값으로 주어지게 된다. 예를 들어 제어규칙은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{If } E \text{ is } PB \text{ and } CB \text{ is } PS \text{ Then } U \text{ is } PB$$

여기서 PB , PS 등은 각각 자연어 Positive Big, Positive Small을 나타내는 퍼지집합이 된다. 일반

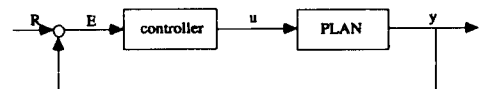


Fig. 2 Schematic diagram of fuzzy control system

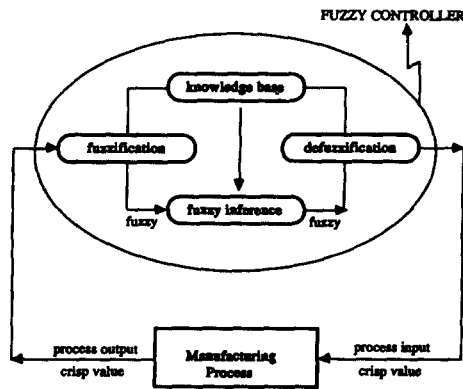


Fig. 3 Structure of fuzzy controller

적인 제어기에서는 제어입력의 결정이 *modus ponens*방식의 추론이 그대로 적용되지만, 퍼지제어기에서는 애매한 값이 주어지므로 *generalized modus ponens*방식을 이용하여 추론을 행한다.⁽¹⁵⁾

퍼지제어기는 위와 같이 애매한 오차입력으로부터 출력을 얻어 내는데, 일반적으로 Fig. 3과 같은 부분들로 구성되고, 각각의 부분은 다음과 같은 역할을 한다.

2.2.1 퍼지화 도입부

- (a) 제어기 입력변수의 값을 측정한다.
- (b) 입력변수값의 영역(*range*)을 이에 상응하는 전체집합으로 크기변환(*scale mapping*)시킨다.
- (c) 입력값의 퍼지화를 수행한다. 즉, 입력데이터를 적절한 언어적인 값으로 변환시킨다. 여기서 언어적인 값은 일반적으로 입력부 전체집합 내에서 정의된 퍼지집합들을 사용한다.

2.2.2 지식베이스

제어대상부에 대한 지식과 제어목적이 기술된다. 지식베이스는 구체적으로 '데이터 베이스'와 '언어적(퍼지) 제어규칙부'로 구성된다.

(a) 데이터 베이스는 퍼지논리 제어에서의 퍼지데이터를 조작하고, 언어적 제어규칙을 정의하는데 필요한 사항들을 정의하고 있다.

(b) 제어규칙부는 제어목적과 이 방면의 전문가의 제어방침을 언어적 제어규칙들로 나타낸다. 제어규칙을 추출하기 위하여 보통 전문가의 경험 및 제어지식을 도입하는 방법, 인간 조작자의 기능을 추출하는 방법, 제어되는 공정의 퍼지모델을 이용

하는 방법, 그리고 제어기에 학습능력을 추가하는 방법 등을 이용한다.

2.2.3 의사결정 논리부

주어진 입력데이터에 대하여, 퍼지제어기는 지식베이스부에 저장되어있는 지식과 퍼지규칙에 근거하여 결과를 추론하게 된다. 이러한 추론방법으로는 Mamdani의 최소연산 추론방법, Larsen의 곱연산규칙, Tsukamoto의 단조형 소속함수 표현법, 그리고 결론부를 조건부 변수의 선형식으로 표현하는 방법등 여러가지가 있다. 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 쓰이는 Mamdani의 추론방법을 퍼지추론 방법으로 이용하였다.

2.2.4 비퍼지화부

의사결정 논리부에서 추론된 결과값은 역시 퍼지값이므로 Fig. 3과 같이 실제 공정에 단일값으로 들어가기 위해서는 비퍼지화가 필요하다. 이러한 비퍼지 방법으로는 최대값 방법(*max. criterion method*), 최대 평균법(*mean of maximum method*), 그리고 무게중심법(*center of area method*) 등이 있다.⁽¹⁶⁾ 본 연구에서는 출력 퍼지집합의 특성을 가장 잘 반영하는 무게중심법을 비퍼지화 방법으로 이용하였다. 이 방법은 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심(*center of gravity*)을 구하여, 그 해당하는 제어값을 제어입력으로 사용한다.

3. 냉연공정 형상제어를 위한 퍼지제어기 구성

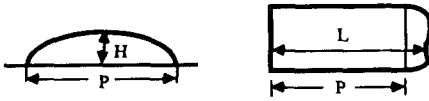
3.1 판형상의 모델링

냉연 판형상을 수학적으로 나타내기 위한 측정단위로 급준도(*steepkness*), 연신율(*elongation*), 그리고 I-unit 등을 이용하고, 이러한 단위들을 Fig. 4에 나타내었다.

판형상을 표현하기 위해서는 푸리에(*Fourier*) 급수법이나 멱급수법(*power series*) 등을 이용할 수 있는데, 취급의 용이성이나 형상의 직관적 파악의 용이성 등의 이유로 4차 멱급수를 이용하여 판의 형상을 나타낸다. 판의 폭방향을 *x*축, 판두께방향으로의 연신량을 *y*축(I-unit 단위)으로 놓았을 때 판형상을 다음과 같은 4차식으로 근사할 수 있다. 이때 판폭은 중앙점을 기준으로 하여 ±1로 정규화한다.

Measurement Unit

Steepness = $H / P \times 100(\%)$
 Elongation = $(L - P) / L$
 I - unit = elongation $\times 100,000$



H : the degree of elongation in the thickness direction
 P : the desired width length
 L : the elongated actual length in the width direction

Fig. 4 Definition of measurement units

$$y = \lambda_1 x + \lambda_2 x^2 + \lambda_3 x^3 + \lambda_4 x^4 \quad (1)$$

이때 λ_i 는 형상계수이며, 위와 같이 근사시킨 판형상은 다음과 같은 대칭성분 y_1 과 비대칭성분 y_2 로 나눌 수가 있다.

$$y = y_1 + y_2,$$

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

$$y_2 = \lambda_1 x + \lambda_3 x^3 : \text{비대칭성분}. \quad (2)$$

그러나 이 때 형상계수 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 가 갖는 물리적 의미가 불분명하고 또한 형상을 직감적으로 파악하기가 곤란하므로 다음과 같이 정의되는 형상변위 매개변수 $\Delta 1 \sim \Delta 4$ 를 도입하여 형상을 선형화한다. (Fig. 5)

- (1) 대칭성분 형상변위 매개변수 $\Delta 2, \Delta 4$

$$\Delta 2 = y1(\pm 1) = \lambda_2 + \lambda_4,$$

$$\Delta 4 = y1\left(\pm \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{1}{2}\lambda_2 + \frac{1}{4}\lambda_4 \quad (3)$$

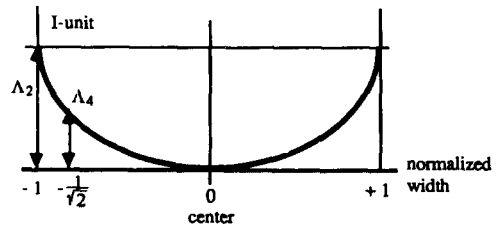
- (2) 비대칭성분 형상변위 매개변수 $\Delta 1, \Delta 3$

$$\Delta 1 = y2(-1) = -\lambda_1 - \lambda_3,$$

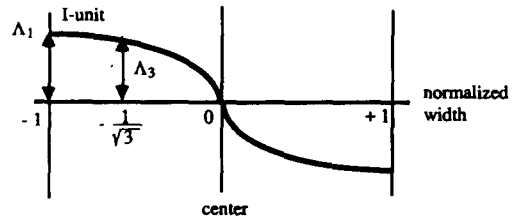
$$\Delta 3 = y2\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = -\frac{1}{\sqrt{3}}\lambda_1 - \frac{1}{3\sqrt{3}}\lambda_3 \quad (4)$$

3.2 제어변수 설정과 퍼지화

얇은 판의 냉간압연 공정에는 압연하중의 불균일, 압연진행 시의 작업물 표면손상, 압연속도, 온도분포, 굽힘력의 불균일, 열연소재의 불량 등 여러가지 요인들이 판형상에 영향을 미친다. 그러나 형상제어에서 이런 모든 요인들을 고려하는 것은 매우 어려운 일이며, 그 중 형상에 가장 크게 영향을 미치는 요인만 제어하는 것이 오히려 더 효과적이다. 실제 공정에서 가장 쉽게 조절할 수 있고,



(a) Symmetric shape part



(b) Asymmetric shape part

Fig. 5 Representation of the shape parameters

또한 형상에 크게 영향을 미치는 요인들은 작업물과 중간롤의 굽힘력 변화량($\Delta F_w, \Delta F_i$), 냉각제 조절, 그리고 롤의 압하위치 변경 등이다. 즉, 대칭성분 제어에는 작업물과 중간롤의 굽힘력 변경량인 $\Delta F_w, \Delta F_i$ 를 이용하고 비대칭성분의 제어에는 롤의 압하위치 변경 등을 이용한다.

본 연구에서는 주로 대칭성분의 형상제어를 주목적으로 하므로 제어변수로 $\Delta F_w, \Delta F_i$ 를 선택한다. 즉, 퍼지제어기는 입력변수로 판 형상의 대칭성분을 나타내는 매개변수인 $\Delta 2$ 와 $\Delta 4$ 를 설정하고, 그에 대한 제어변수로 ΔF_w 와 ΔF_i 를 계산하는 두개의 입력과 두개의 출력 시스템이 된다.

이때, 측정되어진 형상 매개변수는 단일값(crisp value)이므로 언어변수로 변환하는 퍼지화 작업이 필요하다. 이러한 퍼지화작업을 수행하기 위해 다음과 같은 언어변수 집합들을 이용한다.

- * LPB(Large Positive Big)
- * PB(Positive Big)
- * PM(Positive Medium)
- * PS(Positive Small)
- * ZE(Zero)
- * NS(Negative Small)
- * NM(Negative Medium)
- * NB(Negative Big),
- * LNB(Large Negative Big).

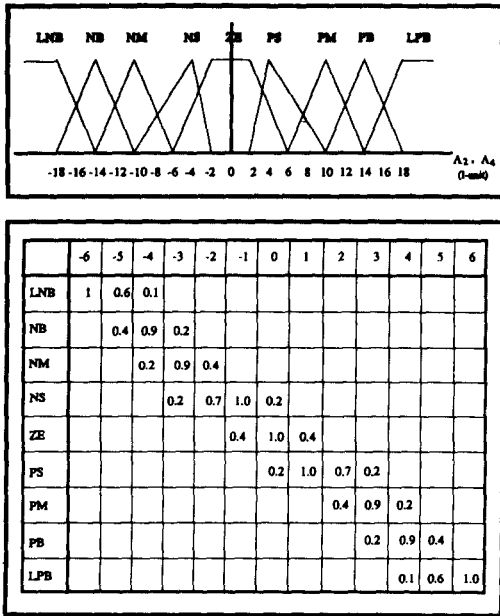


Fig. 6 Linguistic set and look up table

이러한 언어변수들은 Fig. 6에 나타난 것과 같은 주로 삼각형 모양의 퍼지집합을 형성한다. 이 때 제어과정은 개략제어(coarse control)와 미세제어(fine control)의 두 가지로 크게 나누어지는데, 개략제어에서는 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$ 가 ± 5 I-unit 이상일 때 큰 폭으로 제어를 하여 빨리 평탄한 모양으로 수렴하도록 하고, 미세제어에서는 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$ 가 ± 5 I-unit 이내에 들었을 때 적은 폭으로 제어를 하여 안정된 결과를 구하도록 한다. Table 1은 제어 입력 변수들의 실제값에 구간을 나누어 등급화 시킨 것을 보여주고 있다. 실제 변수를 언어적인 퍼지변수로 바꾸어 주면 이것을 바탕으로 이미 세운 제어 규칙에 적용시켜 추론과정을 통하여 제어결과를 구하게 된다. 이 때, 퍼지추론방법은 여러가지가 있지만 본 연구에서는 가장 일반적으로 이용되는 Mamdani의 최소 연산법추론(minimum operation inference method)과정(Fig.7)을 이용하였고, 비퍼지화방법은 무게중심법(center of area method)을 이용하였다. 이상과 같이 구한 제어대상 변수의 퍼지화과정은 광양제철소의 압연 생산 라인에서 수집한 실제 데이터에 근거하여 이루어 졌다.

3.3 퍼지제어 규칙도출

퍼지제어의 목적은 종래의 고전적 제어방법에 의

Table 1 Discretization of input variable

$\wedge 2, \wedge 4$ (I-unit)	Level number
-18 or below	-6
-18 ~ -15	-5
-15 ~ -12	-4
-12 ~ -9	-3
-9 ~ -6	-2
-6 ~ -3	-1
-3 ~ 3	0
3 ~ 6	1
6 ~ 9	2
9 ~ 12	3
12 ~ 15	4
15 ~ 18	5
18 or above	6

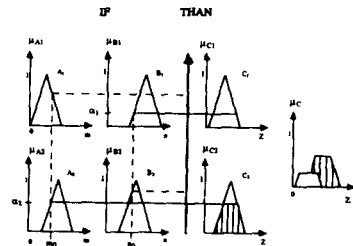


Fig. 7 Fuzzy inference method (Mamdani's minimum operation method)

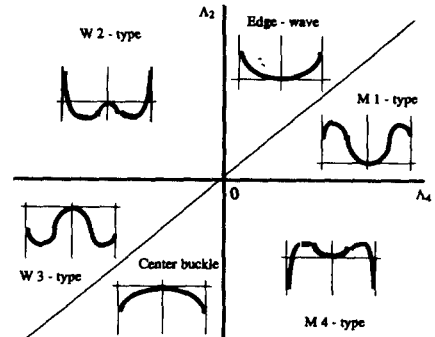


Fig. 8 Classification of the shape patterns

해 적절히 해결되지 못하는 복잡하고 비선형적인 시스템에 대하여 인간이 가진 경험적 지식을 이용하여 좀더 지능적인 제어를 구현하는데 있다. 그래

Table 2 Result of fuzzy control simulation

Input value(I-unit)		Shape pattern	Output value(ton)	
$\wedge 2$	$\wedge 4$		ΔF_w	ΔF_i
15.00	6.00	Edge wave	0.67	0.48
-12.00	-7.00	Center buckle	-0.75	-0.35
7.00	13.00	M1 Pype	0.39	0.72
-7.00	5.00	M4 Type	-0.59	0.44
6.00	-4.00	W2 Type	0.47	-0.21
-4.00	-7.00	W3 Type	-0.18	-0.29
4.10	2.80	Fine control	0.31	0.01

서 퍼지제어 규칙도출에 있어서 실제 생산데이터와 또한 현장 작업자의 경험을 바탕으로 하였다. 우선 냉연판의 불량형상을 형상변위 매개변수인 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$ 의 값의 영역에 따라 'edge wave,' 'center buckle,' 'W type,' 그리고 'M-pype' 등으로 분류하고 Fig. 8에 이러한 불량형상 유형을 나타내었다.

- * Edge wave : $\wedge 2 > \wedge 4 > 0$,
- * Center buckle : $\wedge 2 < \wedge 4 < 0$,
- * M형 wave : $\wedge 4 > \wedge 2 > 0$, (M1형)
- $\wedge 2 < 0, \wedge 4 > 0$, (M4형)
- * W형 wave : $\wedge 4 < \wedge 2 < 0$, (W3형)
- $\wedge 2 > 0, \wedge 4 < 0$, (M2형)

각각의 불량형상 유형에 대하여 제어기의 입력변수인 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$, 그리고 제어 출력변수인 ΔF_w 와 ΔF_i 사이의 제어규칙들을 도출하였다. 이러한 관계를 찾아내기 위해 광양제철소로부터 얻은 실적 데이터들을 분석한 결과 ① $\wedge 4$ 와 ΔF_w , 그리고 $\wedge 4$ 와 ΔF_i 사이에 서로 큰 상관관계가 있음을 알 수 있다.⁽¹⁷⁾ 즉 $\wedge 2$ 의 제어에는 주로 ΔF_w 를 이용하고, $\wedge 4$ 의 제어에는 ΔF_i 가 주로 이용된다. 예를 들어 'center buckle' 유형의 불량형상인 경우는 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$ 가 모두 음의 값을 갖게 되는데, 이 때 실제 판 형상은 판 중앙부의 연신정도가 큰 경우이므로 오목한 모양이 된다. 그러므로 이 경우에 판 형상을 편평하게 하기 위해서는 ΔF_w 와 ΔF_i 를 모두 감소시켜야 한다.

3.4 퍼지제어 시뮬레이션 결과

지금까지 고찰했던 바에 따라 실제 냉연공정에서

형상제어를 할 수 있는 퍼지제어 프로그램을 개발하였다. 우선 입력변수인 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$ 의 값에 따라 미세제어와 개략제어를 결정하고, 언어변수에 속하는 소속정도를 구한다. 그리고 $\wedge 2$ 와 $\wedge 4$ 의 영역별로 6가지 유형으로 분류한 뒤 각각의 유형에 대해 규칙을 적용하고, 추론과정을 통하여 제어결과인 ΔF_w 와 ΔF_i 를 구한다. 이때 굽힘력 변경량은 ± 1 톤 이내의 값에서 구하도록 하였다.

이러한 과정을 거쳐 구한 형상의 퍼지제어 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 표에 의하면 모든 형상에 대해 합당한 결과가 구해졌음을 알 수 있다.

4. 에뮬레이터를 이용한 연속적인 형상제어

퍼지제어기와 에뮬레이터를 이용하여 연속적인 형상제어 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 앞에서 퍼

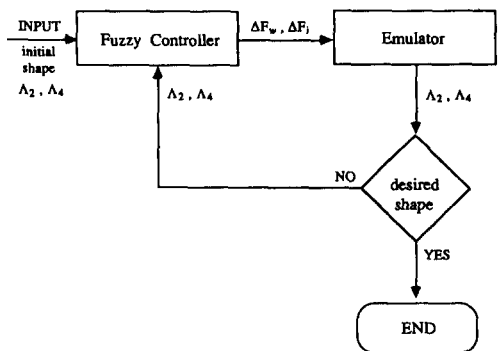
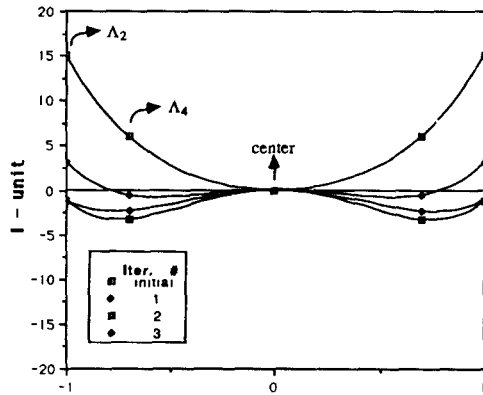


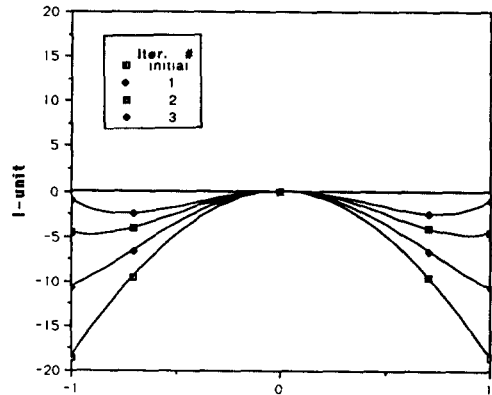
Fig. 9 Schematic diagram of the shape control using emulator

Iter #	$\Delta 2$	$\Delta 4$
Initial	15.000	6.000
1	3.071	-0.566
2	-1.250	-3.293
3	-1.171	-2.364

Iter #	$\Delta 2$	$\Delta 4$
Initial	-18.500	-9.600
1	-10.749	-6.631
2	-4.589	-4.144
3	-1.044	-2.524



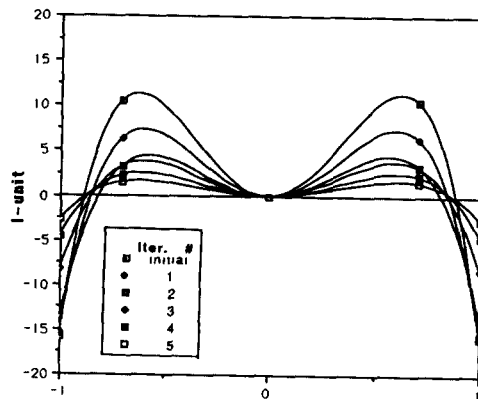
(a) Edge wave



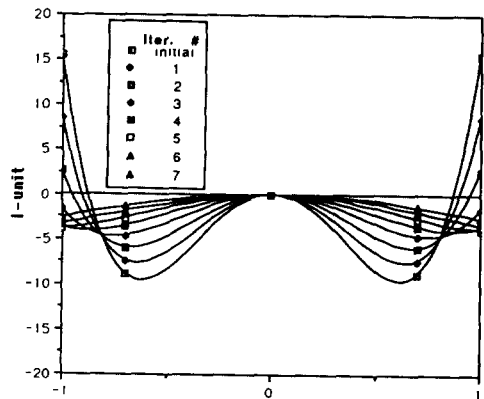
(b) Center buckle

Iter #	$\Delta 2$	$\Delta 4$
Initial	-15.900	10.500
1	-15.356	6.326
2	-13.649	3.349
3	-8.343	3.267
4	-4.581	2.273
5	-2.676	1.507

Iter #	$\Delta 2$	$\Delta 4$
Initial	15.500	-8.900
1	8.517	-7.391
2	2.691	-5.989
3	-1.726	-4.729
4	-3.684	-3.633
5	-3.895	-2.734
6	-3.411	-2.005
7	-2.724	-1.413



(c) M-type



(d) W-type

Fig. 10 Results of continuous shape control

지제어기를 이용하여 주어진 형상에 대하여 제어변수인 ΔF_w 와 ΔF_i 의 값을 구하였는데 이 값을 이용하여 다시 형상이 어떻게 변화할 것인가를 에물레이터를 통하여 예측하고 바뀌어진 형상을 다시 퍼지제어기로 피드백(feed back)하여 원하는 목표형상에 수렴할 때까지 반복해서 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 과정을 Fig. 9에 체계적으로 나타내었다. 이 때 에물레이터는 실제 데이터에 근거하여 신경회로망을 이용하여 학습되었다.

에물레이터의 학습에 이용한 신경망의 입력은 시간 t 의 제어 및 형상 데이터로써 Λ_2 , Λ_4 , ΔF_w , 그리고 ΔF_i 로 제한하였고, 출력은 시간 $t+1$ 의 형상 데이터 변화량인 $(\Lambda_2, \Lambda_4)^{t+1}$ 로 하였다. 그리고 에물레이터를 학습시키기 전에 전처리과정으로 데이터의 정규화를 이용하였다. 즉 제어 데이터와 형상 데이터의 각각에 대하여 평균과 표준편차를 구한 후 각 데이터에서 평균을 빼고 이를 표준편차로 나누어 줌으로써 데이터 각각에 대한 크기의 영향을 줄였다. 또한 신경망의 은닉층(hidden layer)과 출력층(output layer)에서 이용한 시그모이드(sigmoid)함수의 치역이 0~1 이므로 정규화된 목표패턴을 다시 4로 나누고 0.5를 더해줌으로써 95%정도의 데이터가 신경망의 치역에 포함되도록 하였다. 신경망의 출력을 시간 $t+1$ 의 형상의 변화량으로 하였기 때문에 오차의 계산은 정규화된 신경망의 출력과 목표형상 변화량을 원래의 크기로 환원한 후 시간 t 의 형상에 신경망의 출력을 더한 값과 시간 t 의 형상에 목표형상 변화량을 더한 값을 비교하였다.⁽¹⁸⁾

시뮬레이션은 두가지 과정으로 수행하였다. 한 가지는 정적상태의 형상제어로, 이 경우는 각각의 불량형상 유형에 대하여 초기형상을 주고 Λ_2 와 Λ_4 모두 ± 3 I-unit 이내의 값으로 수렴할 때까지 연속적으로 시뮬레이션을 수행하는 것이고, 다른 경우는 형상제어중에 임의의 외란을 개입시켜 형상을 갑자기 변화시키고, 변화된 형상에 대하여 계속적으로 제어를 수행하는 것이다. 이 경우는 실제의 냉연 공정의 동적상태를 모사한 시뮬레이션이다.

4.1 형상제어 결과 및 고찰

4.1.1 6가지 불량형상유형에 대한 제어결과

(1) 6가지 불량형상유형에 대한 제어결과 6가지로 앞서 분류된 각각의 불량 형상유형에 대

하여 연속적으로 형상제어를 한 결과가 Fig.10(a)~(d)에 나타나 있다. 시뮬레이션은 Λ_2 와 Λ_4 모두 목표형상인 ± 3 I-unit보다 작아질 때까지 수행하였다.

'Edge wave'나 'Center buckle' 같은 단순 불량형상의 경우 3~5번만에 목표형상 범위로 제어가 됨을 알 수 있고, 'M-type'이나 'W-type' 같은 복합형상의 경우는 7~9번만에 목표형상 범위로 제어가 되었다. 각각의 형상에 대하여 여러번의 시뮬레이션을 해 본 결과 모두 유사한 패턴으로 원하는 수준까지 제어가 됨을 알 수 있다.

4.1.2 외란에 대한 형상제어 결과

각각의 불량형상에 대해 정적(static)인 상태에서 목표형상 범위까지 형상제어를 수행한 결과 제대로 제어가 이루어 짐을 알 수 있었다. 그러나 실제는 시간에 대하여 연속적으로 공정이 진행되고 어느 순간에 예상치 못했던 외란(disturbance)이 개입될지 모르므로 그러한 동적(dynamic)인 상태에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 임의의 순간에 Λ_2 와 Λ_4 에 대하여 외란을 주어 갑작스럽게 형상을 변화시켰을때, 변화된 형상에 대하여 시간에 따라 연속적으로 제어되는 경향을 Fig. 11에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 임의의 외란에 대해 목표형상으로 빠르게 제어됨을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과로 볼때 퍼지제어기가 실제 공정에서도 임의의 외란이 개입됐을 경우 원하는 방향으로 제어할 수 있는 능력이 있음을 알 수 있다.

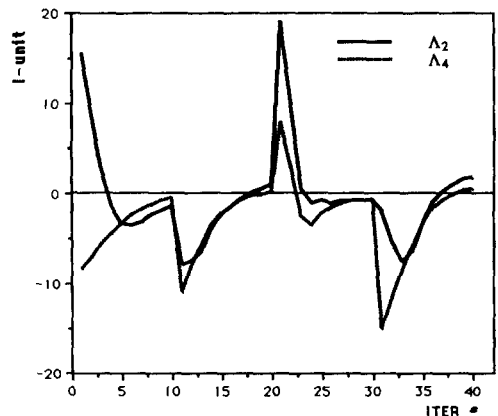


Fig. 11 Shape control result for arbitrary disturbance

5. 결 론

본 연구에서는 냉연공정의 형상제어를 위해 퍼지 제어기를 구성하고 또한 에뮬레이터와 연결하여 연속적인 형상제어 시뮬레이션을 수행하였다. 퍼지형상제어 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 냉연관의 형상을 4차 맥급수를 이용하여 근사했으며, 그중 형상의 대칭성분 제어에 주목적을 두었다. 이 때 형상에 영향을 미치는 요인은 많이 있지만 그중에서 가장 크게 영향을 미치며 또한 쉽게 조절할 수 있는 작업물과 중간물의 굽힘력 변화량을 제어대상 변수로 설정하였다.

(2) 도출된 제어규칙들은 작업자들의 경험적 지식과 실제 데이터들의 분석을 통하여 구성하였고, 각각의 불량형상에 대하여 퍼지추론을 하여 제어변수의 결과를 구하였으며 대체로 합리적인 결과를 구하였다.

(3) 신경회로망을 이용하여 학습시킨 에뮬레이터와 퍼지제어기를 연결하여 연속적인 형상제어를 시뮬레이션 하였다. 단순형상의 경우 3~5번만에, 그리고 복합형상의 경우에는 6~9번만에 원하는 목표형상까지 만족스럽게 제어되었다.

(4) 실제 냉연공정의 특성에 맞게 임의의 외란을 개입시켜 형상을 변화시켰을 때에도 빠르게 형상변위를 감소시켜 원하는 목표형상으로 수렴되었다.

참고문헌

- (1) Ishaikawa, T., Tozawa, Y. and Nishizawa, J., 1988, "Fundamental Study on Snaking in Strip Rolling," *Trans. ISIJ*, Vol. 28, pp. 485~490.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Zadeh, L. A., 1965, *Fuzzy sets*, Inform. Control, Vol. 8, pp. 338~353.
- (5) Zadeh, L. A., 1973, "Outline of a New Approach to the Analysis Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol. SMC-3, pp. 28~44.
- (6) Mamdani, E. H., 1975, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," *Proc. IEEE* 121(12), pp. 1585~1589.
- (7) van Nauta Lemke, H.R. and Kickert, W.J.M., 1976, "Application of a Fuzzy Controller in a Wam Water Plant," *Automatica*, Vol. 12, pp. 301~308.
- (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., Sekino, S. and Hasegawa, T., "Automatic Train Operation and Automatic Crane Operation Systems Based on Predictive Fuzzy Control," *Proc. 2nd IFSA Congress*, Tokyo, Japan, July 1987, pp. 835~838.
- (10) 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.
- (11) Kim, C. B., Seong, K. A. and Lee-Kwang, H., 1993, "Fuzzy Approach to Elevator Grop Control System," *Proc. 5th IFSA Congress*, Seoul, Korea, July pp. 1218~1221.
- (12) Bernard, J. A., 1988, "Use of a Rule-Based System for Process Control," *IEEE Cont. Sys. Magazine*, Vol. 8, No. 5, pp. 3~13.
- (13) Kim, Y.D., Lee-kwang, H. and Park, K. H., 1993, "Parallel Fuzzy Information Processing System," *Proc. 5th IFSA Congress*, Seoul, Korea, pp. 981~984.
- (14) 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.
- (15) Lee-Kwang, H. and Oh, K. L., 1989, *Fuzzy Set Theory and Applications*, Seoul: HongRung Pub., Korea.
- (16) Lee. C. C., 1990, "Fuzzy Logic in Control

- System Fuzzy Logic Controller-Part 1," *IEEE Trans. on Sys., Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, pp. 404~418.
- (17) Jung, J. Y., 1993, *Development of Fuzzy Couctrol Algorithm for Shape Control of Cold Rolling*, MS. Thesis, KAIST, Taejon, Korea.
- (18) Suh, J. W., 1993, *A Reual Network Approach for the Prediction of Strip Shape from Cold Rolling Mills*, MS. Thesis, KAIST, Taejon, Korea.