

스테인리스 냉연공정에서 퍼지 형상제어

A Fuzzy Shape Control Method for the Stainless Steel at the Cold Rolling Process

허윤기*
(Yone-Gi Hur)

Abstract: The strip shape for the stainless steel process has made an issue of the strip quality, and hence the shape control method is developed at the Sendzimir rolling mill (ZRM). ZRM is a stainless cold rolling mill and has actuators for the shape control. They are first intermediate rolls and top crown rolls, which are controlled horizontally and vertically, respectively. The shape control of the stainless steel rolling process has difficulty in obtaining the symmetrical shape. The objective of the shape control is to minimize the shape deviation and to maintain stable state, which keeps symmetrical shape pattern in the lateral direction. The method of the shape recognition employs a least squares method and neural network. The shape deviation is the difference between the target shape and actual shape and is controlled by the fuzzy shape control. The fuzzy shape control using operator's informative knowledge is proposed in this paper. The experiments are carried out online for various stainless materials and sizes. The productivity of the rolling process has increased from 9.0 to 9.4 tons per hour.

Keywords: shape control, fuzzy control, stainless steel, Sendzimir mill

I. 서론

그림 1의 쟈지미어 압연기 (ZRM: Sendzimir Rolling Mill)은 20단의 가역식 압연기로서 강도가 높은 스테인리스 강판을 여러 번 반복 압연하여 제품을 생산한다. 표 1에 ZRM을 구성하는 롤의 표기가 나타나 있다. ZRM의 입측과 출측에 설치된 형상계측기는 52 mm 간격으로 32개의 로드 셀로 구성되어 있다. 형상제어용 구동기는 수직 방향으로 구동하는 상부 크라운 롤 (TCR: Top Crown Roll)과 수평 방향으로 구동하는 1차 중간 롤 (IMR: Intermediate Roll)이 있다. 그림 2에서 TCR은 8개 새들로 구성되어 있다. 상부 롤 B와 C 사이에 위치한 랙은 상부와 하부로 구동한다. 이때 롤 B와 롤 C의 새들은 지지 베어링 사이에 위치하고, 베어링은 2차 IMR의 상부에 놓여 있다. 랙이 아래로 움직이면, 롤 B의 새들은 시계 방향으로 회전하고, 롤 C의 새들은 반시계 방향으로 회전한다. 이로써 새들이 베어링에 힘을 전달하고 이 힘은 2차 IMR로 전달 된다. 새들은 TCR의 편심 링에 회전력을 작용한다. TCR은 롤 B(혹은 롤 C) 측에 편심력을 작용하여 강판에 작용하는 힘을 감소시킨다. 그림 3에서 1차 IMR은 2개씩 짝을 이룬 상부와 하부의 롤로 구성되어 있다. IMR은 에지부에 기계적으로 테이퍼 가공이 되어 있어서, 주로 강판의 에지부 형상 결함 (EW: Edge Wave) 방지에 영향을 준다. 상부와 하부 IMR은 서로 반대 방향으로 구동한다. 스테인리스 강판의 형상은 이들 구동기 위치의 조합에 의하여 제어된다.

형상제어용 구동기에는 몇 가지 제약이 있다. TCR의 8개 새들은 한 축에 의하여 연결이 되어 있어서 인접한 새들간에 구동위치 제한이 있다. 한 개의 새들이 올라가고, 인접한 새들이 내려가면, 더 이상 움직일 수 없는 한계에 도달한다. IMR의 경우에도 구동 범위의 제약이 있다. 상부와 하부 IMR간에 이동 위치가 큰 차이를 보이면 강판의 폭 방향으로

양쪽에 힘의 불균형이 작용하여 강판을 한쪽으로 쏠리는 작용을 한다. 따라서 IMR 제어에 있어서는 강판의 폭 방향으로 작용하는 힘의 균형적인 제어가 필요하다.

ZRM에서 형상제어는 전형적으로 작업자에 의하여 수동으로 운전된다. 형상제어는 많은 변수를 고려해야 하는 데, 형상계측기로부터 입력되는 32개의 형상값 (형상계측기의 로드 셀은 32개 혹은 54개의 형태가 있음), 압연 속도, 강종 및 두께 등이다. 두께가 얇을수록 구동기의 이동에 대한 형상변동이 커서 제어하기가 어렵다. 정상적인 작업상태에서 형상제어는 비교적 쉽고 안정된 형상패턴 및 통관성을 확보할 수 있다. 그러나 강판의 폭 방향으로 비대칭 형상이 지속적으로 발생하고 양쪽 에지부의 형상 변화가 심한 비정상적인

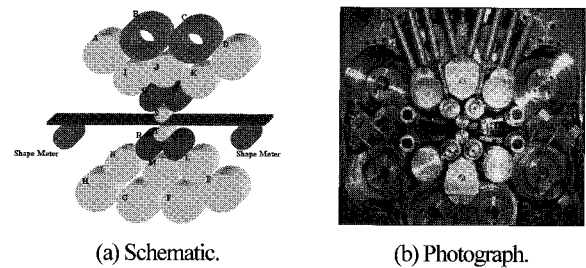


그림 1. 20단 쟈지미어 압연기.
Fig. 1. 20 high Sendzimir mill.

표 1. ZRM 압연기의 구성 롤 표기법.

Table 1. Notation of rolls at ZRM.

	롤의 기능	표기 기호
구동기	상부 크라운 롤 (TCR)	B, C
구동기	백업 롤 (backup roll)	A, D, E, F, G, H
공전 롤	2차 중간 롤	J, M
구동 롤	2차 중간 롤 (2nd IMR)	I, K, L, N
구동기	1차 중간 롤 (1st IMR)	O, P, Q, R
구동기	작업 롤 (work roll)	S, T

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 7. 5., 수정: 2009. 7. 29., 채택확정: 2009. 8. 14.

허윤기: (주)POSCO 기술연구원(tomashur@posco.com)

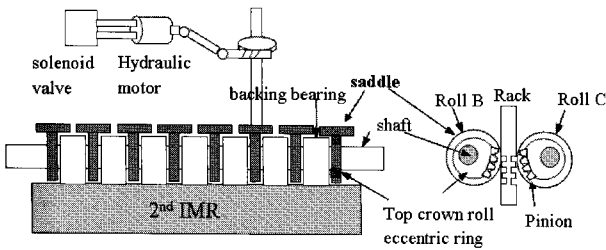


그림 2. 상부 크라운 롤의 구조.
Fig. 2. Structure of top crown roll.

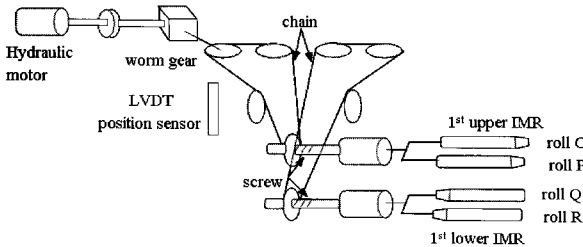


그림 3. 1차 중간 롤의 구조.
Fig. 3. Structure of first intermediate roll.

조업상태에서의 형상제어는 매우 어렵다. 형상이 불안정한 상태에서는 압연 속도를 낮추어야 하고 이는 생산성 감소로 작용한다. 전문적인 운전자는 불안정한 상태에서도 강관의 형상제어를 잘한다. 그러나 대다수의 작업자는 목표형상을 잘 사용하지 않고, 운전자간에 작업표준이 정립 되어있지 않다. 그 결과 형상제어에 관한 체계적인 지식이 정립되어 있지 않아서 수동 형상제어는 형상 품질의 불 균일 및 낮은 생산성의 문제점을 가지고 있다. 따라서 자동 형상제어의 구현을 통하여 강관의 품질 및 제어 정도를 향상시킬 필요가 있다.

비대칭 형상의 영향은 그림 4와 같이 대표적인 결함을 야기한다. 그림 4의 상부의 그래프는 측정된 형상이고 하부의 그림은 강관에 나타나는 실제 형상이다. 중심부 결함 (CW: Center Wave)은 강관의 중심부의 형상이 “-” 방향이고 양쪽 에지부 형상이 “+” 방향으로 측정이 되며 중심부 비틀림을 야기한다. 이는 강관의 한쪽 방향으로 힘이 편중되어 그 부분에서 발생한 연신으로 인하여 길이 방향으로 부분적으로 늘어나게 되므로 형상 계측기에서 상대적으로 “-” 힘을 측정하게 된다. 쿼터부 결함 (QW: Quarter Wave)은 강관의 쿼터부에서 비대칭 형상이 발생하여 쿼터부 비틀림을 야기한다. 쿼터부는 폭 기준으로 1/4과 3/4 지점이다. EW는 양쪽 에지부 형상이 반대 방향으로 나타나며 강관을 한쪽 방향으로 쓸리게 하는 작용을 한다. 이러한 형상패턴은 형상제어 작업 중에 비정상 상태에서 발생한다. 형상제어는 비정상 상태에서도 강관의 형상을 안정화시킬 필요가 있는데, ZRM에서 스테인리스 강관을 대상으로 형상제어의 어려운 점이다.

기존의 연구사례로서는 그림 5에 형상제어의 블록도가 있다[1]. 목표형상과 측정형상의 차이인 형상편차를 계산한 후, 이를 1차 IMR 성분과 TCR 성분 그리고 나머지 성분으로 구분한다. 형상편차의 1차 IMR 성분인 IMR 오차는 PI 제어에 의하여 이동량을 계산하여 IMR을 구동시킨다. 기존 제어는 단지 형상편차의 에지부와 상부 크라운 성분의 4가지 형상

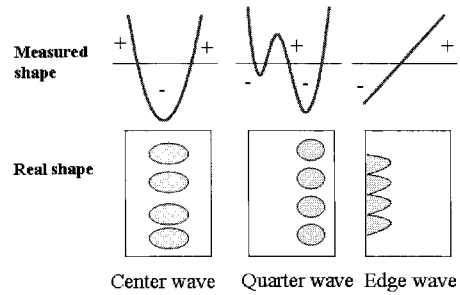


그림 4. 형상 결함의 종류.
Fig. 4. Examples of strip defective.

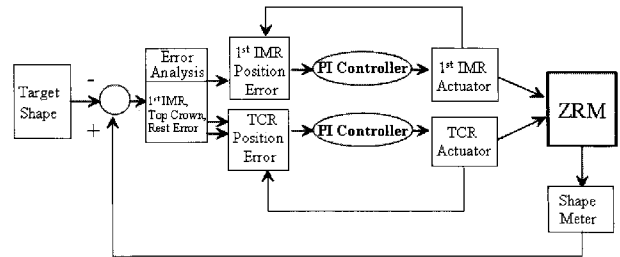


그림 5. 기존 형상제어 방법.
Fig. 5. Conventional shape control method.

오차 패턴만을 다룬다. 4개의 성분 중 1개는 대칭 성분, 3개는 비대칭 성분으로 구성되어 있다. 구동기인 TCR과 IMR의 이동위치를 계산한 후, PI 제어기는 서브 피드백을 통하여 구동기를 움직인다. 기존 제어방식의 문제점은 스테인리스 강관의 두께가 얇아 질수록 제어 응답성이 낮고, 비대칭적 힘에 의한 강관의 사행시에 대처가 매우 약하다. 박물 작업 및 형상 변화가 심할수록 형상 제어능력이 급격히 떨어지는 약점이 있다. ZRM에 대하여 신경회로망으로 형상을 인식하고 자동제어기를 구성하여 현업에 적용한 사례로서[2], 형상이 대칭적이면 인식이 좋으나 다양한 강종 및 치수에 따라 형상이 비대칭적이면 인식이 매우 낮아서 강관의 에지부에 발생하는 비대칭 형상에 대하여 대처를 할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 비대칭 형상에 대해서는 최소 자승법 (LSM: Least Squares Method)을 사용하여 보안을 하였고 박물 작업에 주로 발생하는 비대칭 형상에 대한 판정 및 보상 방법을 개발하여 현업 적용 성능을 향상시켰다. 또한 모델에 의하여 형상 제어기를 구성한 사례로서[3], ZRM 모델을 선형화를 통하여 만들고 시뮬레이션을 통한 제어기의 강인성을 보였다. ZRM모델에 대하여 LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어를 시뮬레이션을 보이거나[4], IMR을 제외한 TCR 8개 새들에 대한 형상제어기를 설계하여 ZRM과 구동기 및 형상 계측기에 대한 모델을 만들고 제어기의 강인성을 모의실험을 통하여 보였으나, IMR을 사용한 EW 제어는 소개되지 않았다[5].

본 논문에서는 ZRM을 대상으로 스테인리스 강관의 퍼지 형상제어 (FSC: Fuzzy Shape Control)를 제안한다. 근사적인 압연기 모델을 가지고 양호한 시뮬레이션 결과를 보이더라도 대부분의 경우 온라인에서는 모의 실험과 다른 결과를 보인다[6]. 본 논문에서 제안하는 형상제어 방법은 기존 제어 방법에서 사례로 소개된 모델기반 제어 방법이 아니라 퍼지 제

여기법을 실제 스테인리스 냉연공정에 적용하여 제품을 생산한 사례를 보여준다. 스테인리스 압연공정의 형상제어는 대칭적인 형상을 얻는 데 어려움이 있다. 대칭적인 형상을 확보하여야 압연 속도를 증가할 수 있고 작업성 및 생산성이 좋아진다. 형상제어의 목적은 형상편차를 최소화하고 안정된 상태를 유지하는 데 있다. 안정된 상대란 강판의 폭 방향으로 대칭적인 형상패턴을 유지하고 형상의 변동이 최소화되는 상태를 말한다. 형상 인식방법은 신경회로망 및 LSM을 사용하고, 형상편차는 전문 운전자의 지식을 활용한 퍼지 형상제어를 통하여 제어한다.

II. 퍼지 형상제어 방법

1. 형상 인식 방법

그림 6에 제안된 FSC 방법이 나타나 있다. 형상 데이터는 출측에 설치된 형상 계측기로부터 측정된다. 형상 계측기는 압연기의 입측과 출측에 각각 설치되어 있으며, 가역식 압연이므로 패스가 바뀔 때 따라 출측이 교대로 바뀐다. 목표 형상과 측정형상과의 차이인 형상편차가 신경회로망 및 LSM

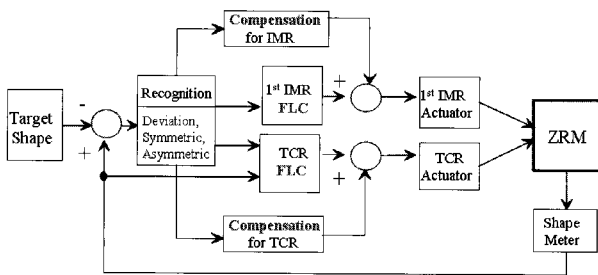


그림 6. 퍼지 형상제어 방법.

Fig. 6. Fuzzy shape control method.

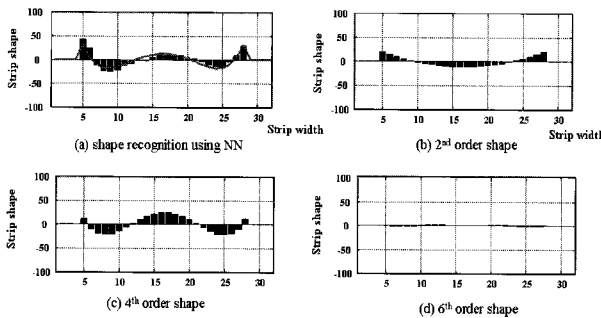


그림 7. 신경 회로망을 이용한 형상 인식의 예.

Fig. 7. Shape recognition example using neural network.

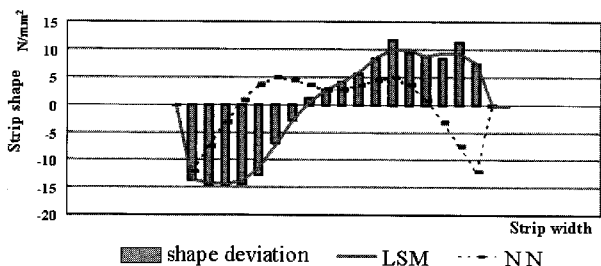


그림 8. 신경회로망과 LSM을 이용한 형상 인식결과.

Fig. 8. Shape recognition result using least squares method and neural network.

을 사용하는 형상 인식부에 입력이 된다. 여기서 강판 형상의 비대칭 정도가 계산된다. 보상부는 비대칭 형상의 정도에 따라 제어량 (FSC 출력량)에 보상이 된다. 추정된 형상 및 측정 형상 모두 퍼지제어기로 입력이 되며 TCR과 IMR의 제어량 계산에 사용된다. 강판의 폭에 따라 몇 가지 형상인식 방법이 고려된다. 형상 인식방법은 측정된 형상을 직접 이용하는 방법, LSM과 신경회로망을 통한 추출된 대칭 성분을 이용하는 방법이다. 강판 형상이 대칭적이면 신경회로망의 출력값이 사용되고, 형상이 비대칭이면 LSM 방법으로 비대칭 형상인식을 인식한다. 대칭과 비대칭 형상을 판별하기 위하여 측정된 형상을 직접 사용된다. 신경회로망에서는 전형적인 대칭형상 패턴인 2차, 4차와 6차 곡선이 사용된다. 이들 패턴은 모두 y축에 대하여 대칭적이고 이들 패턴의 다양한 조합으로 실제형상을 모사할 수 있다. 그림 7(b, c, d)에 이들 대칭 패턴이 나타나 있다. 2차 곡선은 CW와 EW를 표현하고, 4차 곡선은 CW, QW와 EW를 나타낸다. 6차 곡선은 강판의 폭이 4 피트(약 1220 mm) 이상에서 주로 보여진다.

신경회로망의 구조는 역전파 학습을 갖는 다층 퍼셉트론 구조이다. 다층 퍼셉트론은 32개 노드를 갖는 입력 층, 15개 노드를 갖는 은의 층 그리고 3개 노드를 갖는 출력 층으로 구성되어 있다. 출력 층의 3개 노드는 3가지 대칭 패턴의 정도를 출력한다. 그림 7(a)는 신경회로망을 사용한 형상인식의 예를 보인다. x 축은 강판의 폭이고 y 축은 형상이다. 막대 그래프는 실제 형상을 나타내고, 선 그래프는 신경회로망의 출력값을 의미한다. 그림 8은 신경회로망과 LSM의 형상인식 결과의 차이를 보인다. 선 그래프는 LSM의 출력이고 점선 그래프는 신경회로망의 출력이다. 형상에 비대칭 성분이 나타나면, 신경회로망 출력값은 형상제어에 부적합하다. 이 경우에는 LSM의 결과를 형상제어의 입력값으로 사용한다.

2. TCR의 퍼지 형상제어

그림 9에 TCR에 대한 형상제어 순서도가 나타나 있다. 형상 제어기는 TCR과 IMR의 초기위치를 입력 받은 후, 압연 속도와 압하력과 장력 등의 공정 변수를 초기화한다. 운전자가 수동 개입을 하면, 제어기는 수동 개입 량을 출력한다. 자동 형상제어 모드에서는 형상 제어기는 압연 속도를 고려한다. 압연 속도가 30mpm 이상이면 TCR에 관한 FSC가 구동된다. 속도가 150mpm 이상에서는 IMR에 관한 FSC가 동작이 된다. 즉, 150mpm 이상에서는 TCR과 IMR이 모두 구동된다. IMR은 기계적으로 작업 롤 상부에 직접 접촉하여 있으므로 압연기 특성상 저속에서는 구동하기 곤란하다. 형상 제어기의 입력은 형상편차와 신경회로망 출력인 대칭형상이다. 형상 계측기가 폭 방향으로 32개 영역으로 나누어져 있으므로 형상은 32개 값의 조합으로 나타난다. 형상 제어기는 FSC 출력값이 8개 새들의 구동 범위 내에 있는 지를 점검한다. 8개 새들 위치의 DC 레벨을 계산하고 비대칭 형상에 대한 제어량을 보상한다. DC 레벨이란 TCR의 새들 위치의 평균값으로서, 이 값이 너무 작은 값을 갖거나 너무 큰 값을 가지면 TCR 제어가 구동 범위 좁아지므로 적절한 범위를 유지할 필요가 있다. 최종적으로 형상 제어기는 인접한 새들간의 구동 범위 제한을 고려하여 8개 새들의 위치값을 출력한다. 새들 간에는 25mm 범위 내에서 상하로 움직일 수 있다.

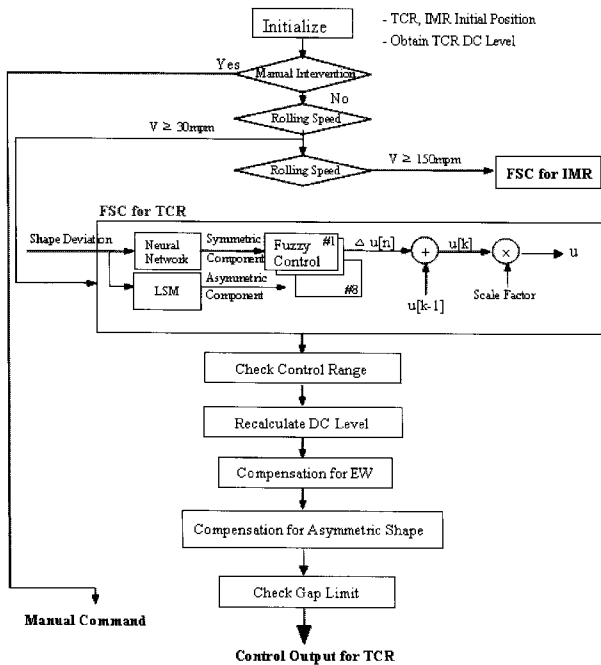


그림 9. 퍼지 형상제어 순서도.
Fig. 9. Procedure of shape control for TCR.

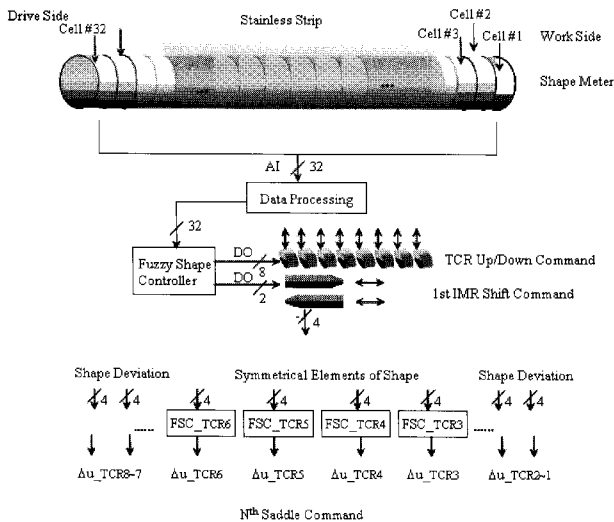


그림 10. 퍼지 형상제어의 개요도.
Fig. 10. Outline of fuzzy shape control.

그림 10에 FSC의 개요도가 나타나 있다. 형상 데이터는 전처리 과정을 통하여 AO값으로 변환되어 형상 제어기로 입력된다. 제어기의 출력은 TCR과 1차 IMR의 위치 값이다. FSC는 구동기의 위치 변화량을 출력하고, 제어기는 이전 위치 값을 고려하여 최종 위치 값을 출력한다. “N”의 의미는 데이터 개수이다. FSC의 입력은 형상편차의 대칭과 비대칭 성분이다. FSC 출력은 TCR 새들의 이동 값이다. TCR 구동용 FSC는 4입력 1출력으로 구성된 8개의 제어기로 구성된다. 새들 1개당 1개의 FSC가 구성되고, FSC의 입력 변수는 강판 폭에 따라 결정된다. 예로서, 그림 11에 TCR의 FSC 방법이 나타나 있다. 그림 11은 강판 형상에 CW가 발생하였을 경우 제어량을 계산하는 방법을 보여준다. 강판의 폭이 4피트이면,

형상 계측기에서 출력된 형상 중 13에서 20번째 형상 값이 CW로 간주 된다. 그림 11은 4번째 새들에 대하여 제어량 계산 방법(Δu_{TCR4})을 보여준다. 형상편차를 퍼지화하고, 퍼지화된 형상을 규칙과 함께 합성된다. 형상편차 값이 shape deviation[13] = 1.0, shape deviation[14] = 15.0, shape deviation[15] = 16.0 그리고 shape deviation[16] = 16.5 이라면, 아래의 규칙이 관여가 된다. 여기서 “[]”는 폭 방향으로 셀의 위치 번호이다. CW에 대한 퍼지 규칙의 예는 표 2에 나타나 있다.

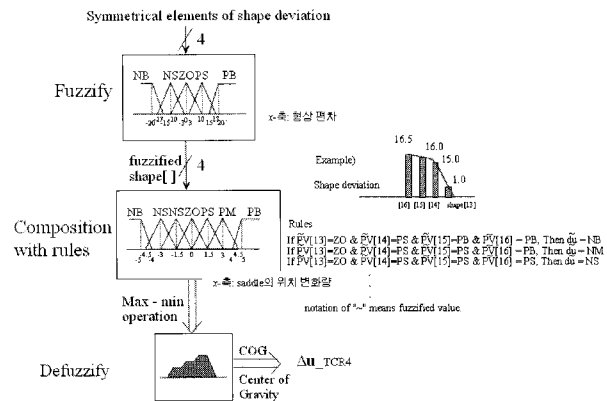


그림 11. CW 제어를 위한 TCR의 소속함수.
Fig. 11. Membership functions of TCR for CW.

표 2. CW에 대한 퍼지 규칙의 예.
Table 2. Examples of the fuzzy rules for CW.

PV[BC]	PV[BC+1]	PV[BC+2]	PV[BC+3]	DU
ZO	PS	PB	PB	NB
ZO	PS	PS	PB	NM
ZO	PS	PS	PS	NS
ZO	ZO	PB	PB	NB
NS	ZO	PB	PB	NM
NS	ZO	ZO	PB	NS
NS	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	NS	PB	PB	NS
NS	NS	PS	PB	NS
NS	NS	PS	PS	ZO
NS	NS	ZO	PS	ZO
NS	NS	NS	ZO	PM
PB	PB	PS	ZO	NS
PB	PS	PS	ZO	NS
PB	PS	ZO	ZO	NS
PS	ZO	ZO	ZO	ZO
PB	PB	ZO	NS	PS
PB	PS	ZO	NS	PS
PS	PS	ZO	NS	PM
PB	ZO	ZO	NS	PM
PS	ZO	ZO	NS	PM

(중략)

BC: Begin Cell, 1st load cell at work side
BC+1: 2nd load cell at work side
BC+N: Nth load cell at work side

Rules:

If PV[13] = ZO & PV[14] = PS & PV[15] = PB & PV[16] = PB,
Then DU = NB.

If PV[13] = ZO & PV[14] = PS & PV[15] = PS & PV[16] = PB,
Then DU = NM.

If PV[13] = ZO & PV[14] = PS & PV[15] = PS & PV[16] = PS,
Then DU = NS.

.....

여기서, [N]은 형상 계측기의 N번째 셀 번호이고, PV는 퍼지화된 형상편차, DU는 퍼지화된 제어 출력 변화량이다. NB는 Negative Big, NM은 Negative Medium, NS는 Negative Small, ZO는 Zero, PS는 Positive Small, PM은 Positive Medium 그리고 PB는 Positive Big을 나타내는 퍼지 값이다. 퍼지화된 형상편차

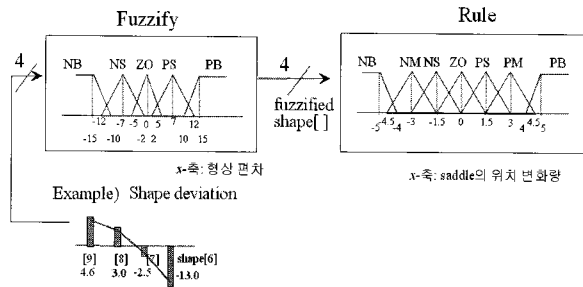


그림 12. EW 제어를 위한 TCR의 소속함수.

Fig. 12. Membership functions of TCR for EW.

표 3. EW에 대한 퍼지 규칙의 예.

Table 3. Examples of the fuzzy rules for EW.

PV[BC]	PV[BC+1]	PV[BC+2]	PV[BC+3]	DU
ZO	PS	PB	PB	NB
ZO	PS	PS	PB	NM
ZO	PS	PS	PS	NS
ZO	ZO	PB	PB	NB
NS	ZO	PB	PB	NM
NS	ZO	ZO	PB	NS
NS	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	NS	PB	PB	NS
NS	NS	PS	PB	NS
NS	NS	PS	PS	ZO
NS	NS	ZO	PS	ZO
NS	NS	NS	ZO	PM
PB	PB	PS	ZO	NS
PB	PS	PS	ZO	NS
PS	PS	PS	ZO	NS
PB	PB	ZO	ZO	NS
PB	PS	ZO	ZO	NS
PS	ZO	ZO	ZO	ZO
PB	PB	ZO	NS	PS
PB	PS	ZO	NS	PS
PS	PS	ZO	NS	PM
PB	ZO	ZO	NS	PM
PS	ZO	ZO	NS	PM
ZO	ZO	ZO	NS	PS
PB	PB	NS	NS	PM

(중략)

의 소속 정도를 관련된 규칙과 함께 합성한다. 퍼지 추론은 Mamdani의 max-min방법을 사용하였고 비퍼지화는 COG를 사용하였다. 그 결과 TCR의 4번째 새들의 구동 값을 FSC는 출력한다.

그림 12에서 TCR에 대한 FSC의 다른 예로서 강판 형상의 EW에 대한 FSC 방법을 보여 준다. 강판의 폭이 4피트이면, 시작 셀이 6번째이고 마지막 셀이 27번째 셀이다. 이 경우, 작업 측(work side)으로부터 6번째부터 9번째 셀까지가 EW로 간주 된다. 마찬가지로 구동 측(drive side)에서는 27번째부터 24번째 가지가 EW로 간주된다. 번호의 순서는 WS부터 시작 되므로 DS로 갈수록 번호가 커진다. 그림 12는 2번째 새들의 위치 변화 값(Δu_{TCR2})을 어떻게 얻어지는 지 보여준다. 형상편차 값이 shape deviation[6] = -13.0, shape deviation[7] = -2.5, shape deviation[8] = 3.0 그리고 shape deviation[9] = 4.6, 이라면 아래의 규칙이 관련 된다. EW에 대한 퍼지 규칙의 예는 표 3에 나타나 있다.

Rules:

If PV[6] = NB & PV[7] = NS & PV[8] = PS & PV[9] = ZO, Then DU = PM.

If PV[6] = NB & PV[7] = ZO & PV[8] = PS & PV[9] = PS, Then DU = PM.

If PV[6] = NB & PV[7] = ZO & PV[8] = ZO & PV[9] = PS, Then DU = PM.

퍼지 규칙의 수는 약 300개이다. 상기의 과정을 통하여 TCR 구동기의 위치 변화량(Δu_{TCR})이 FSC로부터 출력된다. 제어기의 출력($u_{TCR}[k]$)은 아래 식으로부터 얻어진다.

$$u_{TCR}[k] = u_{TCR}[k-1] + \Delta u_{TCR}[k] * ScaleTCR,$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad n: 정수.$$

ScaleTCR은 FSC 출력값에 대한 조정 값을 의미하며 압연 속도의 가속, 감속 및 입측 두께에 의하여 결정된다. 속도가 가속/감속될 때는 형상변화가 심하여 제어량을 줄이고, 스테인리스 강종에 따라서 강도가 높은 것과 낮은 것을 구분하여 제어량을 결정하며, 두께가 박물이 경우 형상변화가 민감하고 변화가 빠르므로 이를 고려한 변수이다.

3. IMR의 퍼지 형상제어

그림 13에 IMR에 대한 형상제어 순서도가 나타나 있다. IMR에 대한 FSC의 입력은 강판 양쪽 형상의 에지 성분에 대한 형상편차이다. FSC의 출력은 상부와 하부 IMR의 이동 값이다. IMR에 대한 FSC는 2개의 제어기로 구성되어있고, 각 제어기는 2입력 1출력 시스템이다. FSC의 출력이 계산되면, 형상 제어기는 EW의 정도에 따라서 상부 IMR의 이동 범위를 설정한다. EW의 크기가 50 N/mm² 이하이면 상부 IMR의 구동 범위는 FSC 출력값의 ±20 mm 이내에서 결정된다. 즉, 이후의 계산된 보상량이 이 범위 내에 있어야 한다. 다음, 형상 제어기는 하부 IMR의 구동 범위를 상부 IMR의 현재 위치에 따라 설정한다. 상부와 하부 IMR의 위치 차이가 크면, 강판이 한 쪽을 심하게 쏠림 현상이 나타나므로 이를 방지하기 위함이다. EW가 50 N/mm² 이내이면 하부 IMR의 구동 범위는 상부 IMR의 ±20 mm 이내의 값을 갖는다.

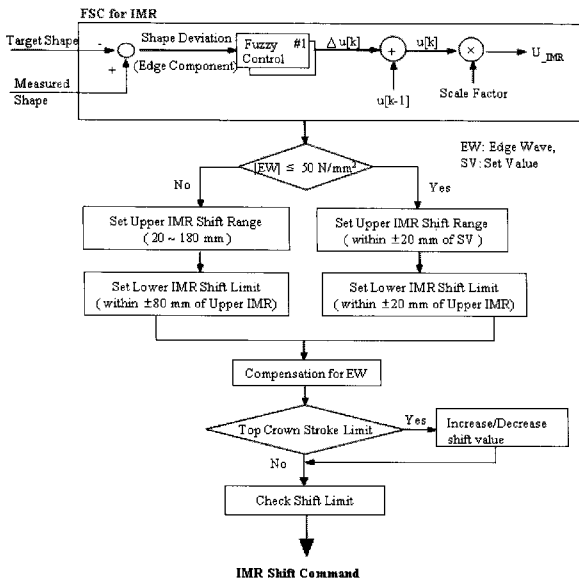


그림 13. IMR 제어를 위한 형상제어 순서도.
Fig. 13. Procedure of shape control for IMR.

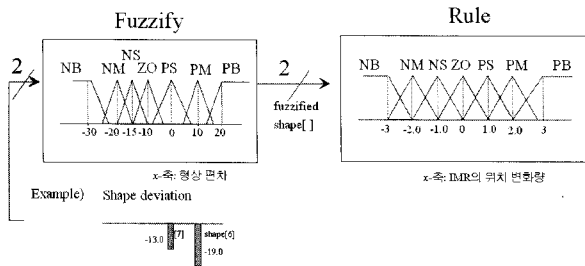


그림 14. IMR의 소속함수.
Fig. 14. Membership functions of IMR.

그리고 EW의 비대칭 형상에 대한 보상량을 계산한다. TCR을 제어함에 있어서 TCR이 구동 범위 제한에 놓여 있으면, IMR의 이동 량을 증감시켜서 이를 해제시킨다. 제어기는 상부와 하부 IMR의 이동 가능한 범위를 고려하여 계산된 위치 값을 출력한다.

그림 14에서 IMR에 관한 FSC의 소속함수가 나타나 있다. 예로서, 강판의 폭이 4 피트이면 시작위치는 6번째 셀이다. 이 경우, 상부 IMR은 EW를 제어하기 위하여 6과 7번째 셀 값을 사용한다. 형상편차가 shape deviation[6] = -19.0이고 shape deviation[7] = -13.0이면 아래의 규칙이 관련된다. 상부 IMR에 대한 퍼지 규칙은 표 4에 나타나 있다.

표 4. 상부 IMR의 퍼지 규칙의 예.

Table 4. Examples of the fuzzy rules for upper IMR.

PV[BC] \ PV[BC+1]	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	PS	PS	PS
NM	NB	NM	NM	NS	PS	PS	PS
NS	NB	NM	NS	PS	PS	PM	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NB	NM	PS	PS	PS	PB	PB
PM	NB	NM	NS	PM	PM	PM	PB
PB	NB	NM	NS	PM	PB	PB	PB

표 5. 구동기에 따른 입력 셀의 사용의 예 (강판의 폭: 4 피트 경우).

Table 5. Examples of the input cell number on TCR and IMR (strip width: 4 feet).

형상 결함	방향	입력 셀 번호	구동기
EW	WS	6, 7, 8, 9	TCR의 2 번째 새들
	DS	27, 26, 25, 24	TCR의 7 번째 새들
CW	WS	13, 14, 15, 16	TCR의 4 번째 새들
	DS	20, 19, 18, 17	TCR의 5 번째 새들
IMR	WS	6, 7	상부 IMR
	DS	27, 26	하부 IMR

Rules:

If PV[6]=NM & PV[7]=NS, Then DU_IMR=NM.

If PV[6]=NM & PV[7]=ZO, Then DU_IMR=NM.

If PV[6]=NS & PV[7]=ZO, Then DU_IMR=NS.

.....

DU_IMR은 1차 IMR의 퍼지화된 제어 출력값이다. FSC의 출력은 IMR의 위치 변화량 (Δu_{IMR}) 이다. 제어기의 출력 ($u_{IMR}[k]$) 은 아래 식으로 계산된다.

$$u_{IMR}[k] = u_{IMR}[k-1] + \Delta u_{IMR}[k] * ScaleIMR,$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad n: 정수.$$

ScaleIMR 은 FSC 출력값에 대한 조정 값이다. 조건은 TCR의 조정 값을 결정 때와 같은 조건이지만, ScaleTCR 과 ScaleIMR 값은 서로 다르다.

표 5에 4피트 폭을 갖는 스테인리스 강판에 대하여, 구동기에 따른 입력으로 사용하는 형상 측정기의 셀 번호가 정리되어 있다.

4. 비대칭 형상의 판정 및 보상 방법

형상의 비대칭 성분을 얻기 위하여 LSM을 사용하여 아래와 같이 6차 다항식으로 피팅된다.

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1x + \alpha_2x^2 + \alpha_3x^3 + \alpha_4x^4 + \alpha_5x^5 + \alpha_6x^6 \quad (1)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_6$ 는 상수이고, $x \in [-1, +1]$ 그리고 $f(x) \in [-1, +1]$ 이다.

x는 정규화된 강판의 폭에 따른 위치이고, f(x)는 정규화된 형상이다. 강판의 폭과 f(x)는 -1과 1사이에 정규화 된다. 형상은 대칭과 비대칭 성분을 모두 가지고 있으므로 식 (1)은 식 (2) 같이 재 표기 된다.

$$f(x) = f_s(x) + f_a(x) \quad (2)$$

여기서, $f_s(x)$ 는 대칭 성분이고 $f_a(x)$ 는 비대칭 성분이다.

$$f_s(x) = \alpha_0 + \alpha_2x^2 + \alpha_4x^4 + \alpha_6x^6 \quad (3)$$

$$f_a(x) = \alpha_1x + \alpha_3x^3 + \alpha_5x^5 \quad (4)$$

실제형상 y(k)를 추정한 형상이 f(k)이고, 그 차이인 오차 e(k)는 아래와 같이 정의한다.

$$e(k) = y(k) - f(k), \quad y(k) = f(k) + e(k)$$

$$y(k) = [\alpha_0 + \alpha_1x(k) + \alpha_2x(k)^2 + \dots + \alpha_6x(k)^6] + e(k) \quad (5)$$

식 (5)에서 $k=1, 2, \dots, N$. 을 대입함으로써 아래와 같은 벡터 행렬 방정식이 구해진다.

$$Y(N) = A(N) \Phi(N) + E(N) \quad (6)$$

여기서,

$$Y(N) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}, \quad \Phi(N) = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_6 \end{bmatrix}, \quad E(N) = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ \vdots \\ e(N) \end{bmatrix},$$

$$A(N) = \begin{bmatrix} 1 & x(1) & \dots & x(1)^6 \\ 1 & x(2) & \dots & x(2)^6 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x(N) & \dots & x(N)^6 \end{bmatrix}$$

성능평가 함수(performance index) J_N 은 아래와 같이 정의된다.

$$J_N = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N e^2(k) = \frac{1}{2} e^T(N) e(N) \quad (7)$$

여기서, $e^T(N)$ 은 $e(N)$ 의 전치 행렬이다.

식 (6)과 (7)을 사용하여 J_N 은 아래와 같이 된다.

$$J_N = \frac{1}{2} [Y(N) - A(N) \Phi(N)]^T [Y(N) - A(N) \Phi(N)]$$

$A(N)$ 에 관하여 J_N 을 최소화하면,

$$\frac{\partial J_N}{\partial A(N)} = \frac{1}{2} [A^T(N) A(N) \Phi(N) - A^T(N) Y(N)] = 0$$

이로서, 식 (8)의 최적의 $\Phi(N)$ 이 구해진다.

$$\Phi(N) = [A^T(N) A(N)]^{-1} A^T(N) Y(N) \quad (8)$$

따라서, 식 (1)과 (3) 그리고 (4)의 계수가 구해진다.

식 (1)로부터 비대칭 형상이 결정되고 분류된다. 정규화된 x축의 4점 $x_{we} = 0.9$, $x_{wq} = 0.7$, $x_{dq} = -0.7$ 과 $x_{de} = -0.9$ 에서의 $f(x)$ 의 기울기는 아래와 같이 정의된다.

$$G_{we} = \frac{d}{dx} f(x_{we}) : \text{우측 에지부의 기울기(gradient on the right edge side)} \quad (9)$$

$$G_{wq} = \frac{d}{dx} f(x_{wq}) : \text{우측 쿼터부의 기울기(gradient on the right quarter side)} \quad (10)$$

$$G_{dq} = \frac{d}{dx} f(x_{dq}) : \text{좌측 쿼터부의 기울기(gradient on the left quarter side)} \quad (11)$$

$$G_{de} = \frac{d}{dx} f(x_{de}) : \text{좌측 에지부의 기울기(gradient on the left edge side)} \quad (12)$$

비대칭 형상은 아래의 조건으로 판별된다.

$$\text{Center wave: } G_{wq} > 0 \text{ and } G_{we} > 0 \text{ and } G_{dq} < 0 \text{ and } G_{de} < 0 \quad (13)$$

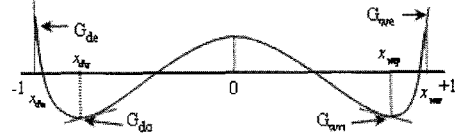


그림 15. 비대칭 형상의 판별 방법.

Fig. 15. Distinction of asymmetrical shape.

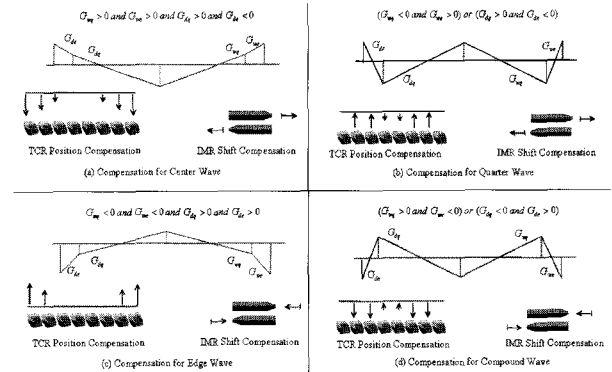


그림 16. 비대칭 형상의 제어량 보상 방법.

Fig. 16. Compensation method for asymmetrical shapes.

$$\text{Quarter wave: } (G_{wq} < 0 \text{ and } G_{we} > 0) \text{ or } (G_{dq} > 0 \text{ and } G_{de} < 0) \quad (14)$$

$$\text{Edge wave: } G_{wq} < 0 \text{ and } G_{we} < 0 \text{ and } G_{dq} > 0 \text{ and } G_{de} > 0 \quad (15)$$

$$\text{Compound wave: } (G_{wq} > 0 \text{ and } G_{we} < 0) \text{ or } (G_{dq} < 0 \text{ and } G_{de} > 0) \quad (16)$$

그림 15에 비대칭 형상 판별에 대한 예가 나타나 있다. 정규화된 x축의 4점은 추정된 형상 곡선의 변곡점에 해당된다. 그림 16은 CW, QW, EW 그리고 복합성 형상을 갖는 비대칭 형상에 대한 보상 방법이 나타나 있다. 예로서, 강판 형상이 수식 (13)에 의하여 CW로 분류가 되면, 형상제어기는 수식 (9)-(12)에 의하여 정규화된 4점의 기울기를 구한다. 그림 16(a)의 CW는 중심부 형상이 에지부 보다 상대적으로 매우 낮은 패턴을 갖는다. 이 경우, TCR의 에지부 새들은 화살표 방향으로 아래로 구동하고 IMR은 바깥방향으로 향한다. 즉, 상부 IMR은 작업 측 방향으로, 하부 IMR은 구동 측 방향으로 향한다.

III. 현업 적용 결과

퍼지 형상제어는 POSCO 스테인리스 냉연공장의 ZRM을 대상으로 자동제어에 의한 조업을 실시하였다. 퍼지 형상제어의 규칙과 소속함수는 온라인 테스트를 통하여 지속적으로 수정되고 갱신되었다. 퍼지 형상제어의 성능을 검증하기 위하여, 스테인리스 강판의 다양한 강종과 두께와 폭에 대하여 수행되었다.

그림 17과 18은 목표형상에 대하여 대칭적이고 추종 성능을 보인다. 그림 17(a)는 퍼지 형상제어의 구동 직전의 수동 운전으로 작업 시 비대칭이고 큰 형상편차를 보이고 있다. 온라인 테스트는 작업 시작 때는 수동운전을 실시하다가 즉시 자동제어로 전환하여 실시하였다. 선 그래프는 목표형상이고 막대 그래프는 폭 방향으로의 실제형상이다. 목표형상

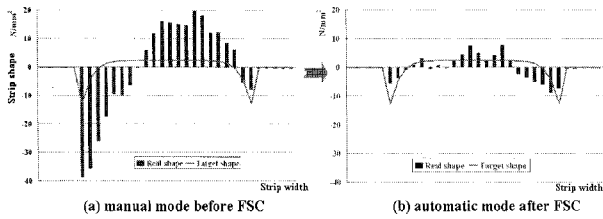


그림 17. 온라인 테스트 결과1: 수동운전과 FSC의 추종성능 비교. (a) FSC前的 수동운전 (b) FSC전환 후의 자동 제어.

Fig. 17. Online test result 1: tracking performance of the manual mode and FSC.

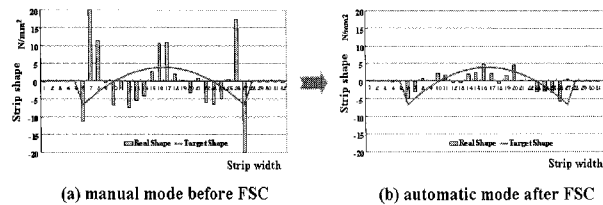


그림 18. 온라인 테스트 결과2: 수동운전과 FSC의 추종성능 비교.

Fig. 18. Online test result 2: tracking performance of the manual mode and FSC.

은 폭 방향으로 평평한 형태이고 양 끝은 아래로 감소하는 패턴이다. x축은 형상 계측기의 로드 셀의 위치 번호이다. 소재 정보는 강판의 두께 1.42 mm, 폭 1242 mm, 총 5패스 압연을 수행하였다. 그림 17(b)는 퍼지 형상제어를 구동한 이후의 4 패스 때의 실제 형상을 나타낸다. 목표 형상에 대한 추종 성능이 우수하고 형상편차가 매우 작으며 안정된 상태를 보이고 있다.

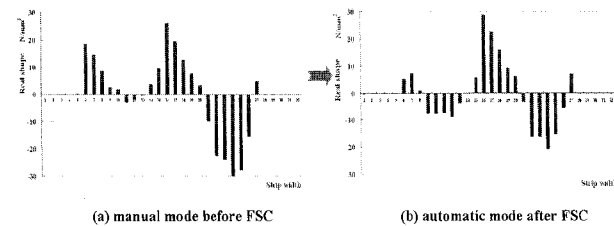


그림 19. 온라인 테스트 결과3: QW에 관한 FSC의 대칭 성능. Fig. 19. Online test result 3: the symmetry performance of FSC on QW.

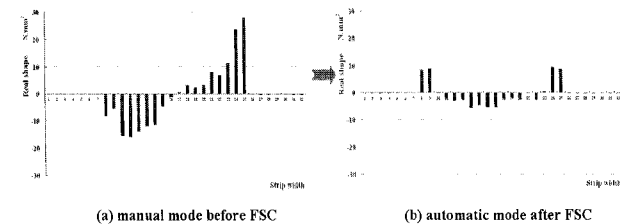


그림 20. 온라인 테스트 결과4: EW에 관한 FSC의 대칭 성능. Fig. 20. Online test result 4: the symmetry performance of FSC on EW.

그림 18(a)는 퍼지 형상제어의 수행 직전의 수동 운전 때의 큰 형상편차를 보인다. 그림 18(b)는 앞의 예와 다른 포물선 형태의 목표형상을 사용하였고, 퍼지 형상제어의 구동 직후의 4패스 때의 형상이다. 소재 정보는 두께 1.93 mm, 폭 1223 mm, 총 9 패스 압연을 수행하였다. 형상제어 결과는 최소 형상편차를 유지하면서 목표형상에 접근하는 것을 보이고 있다. 이는 퍼지 형상제어로 전환 전의 비대칭 형상임에도 불구하고 양호한 추종성능을 나타내고 있다.

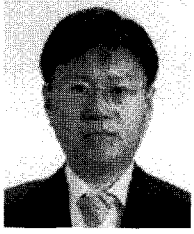
그림 19와 20은 비대칭 형상이 퍼지 형상제어를 수행한 이후, 대칭 형상으로 전환되고 있음을 보이고 있다. 그림 19(a)는 퍼지 형상제어로 수행 직전의 QW를 갖는 비대칭 형상을 나타낸다. 그림 19(b)는 비대칭 형상에 대한 상부 크라운 롤의 위치 값을 보정한 이후의 실제 형상을 보이고 있다. 그림 20(a)는 퍼지 형상제어로 수행 직전의 EW를 갖는 비대칭 형상을 나타낸다. 그림 20(b)는 비대칭 형상에 대한 IMR 구동 값에 대하여 보정한 이후의 실제 형상을 보이고 있다. 온라인 테스트 결과는 스테인리스 강판의 QW와 EW에 대한 퍼지 형상제어의 우수한 대칭 성능을 보이고 있다.

IV. 결론

본 논문에서 20단 스테인리스 강판의 전용 압연기인 ZRM을 대상으로 퍼지 형상제어 기법에 대하여 제안하였다. 형상제어 방법은 신경회로망 및 최소 자승법을 사용하여 강판의 형상을 인식하고, 형상제어는 형상제어용 구동기인 TCR과 1차 IMR의 구동 위치를 퍼지회로를 사용하여 제어하였다. 본 논문은 대칭형상과 비대칭 형상의 판별 방법을 소개하였고, 비대칭 형상에 대하여 TCR과 IMR에 대한 퍼지 형상 제어기의 출력값에 대한 보상 방법을 소개하였다. 실험은 POSCO 스테인리스 냉연공장의 ZRM을 대상으로 온라인 테스트를 실시하여 목표형상에 대한 추종성과 대칭성으로 제어성능을 검증하였다. 퍼지 형상제어는 비대칭 형상에도 불구하고 효율적인 성능을 보였고 강판의 형상품질 및 높은 생산성을 달성하였다.

참고문헌

- [1] Dept. measurement products and systems, *Flatness control system*, ABB, Sweden, 1994.
- [2] 허윤기, 이대근, “Neural Net. 및 Fuzzy 기법에 의한 스테인리스 냉간 압연기의 판 형상제어,” POSCO 연구논문, vol. 4, no. 1, pp. 128-135, 1999.
- [3] J. V. Ringwood, “Shape control systems for Sendzimir steel mills,” *Journal of IEEE transactions on control systems technology*, vol. 8, no. 1, pp. 70-86, 2000.
- [4] S. O. R. Moheimani, D. Stirling, I. R. Petersen, and D. C. McFarlane, “Robust control of a Sendzimir mill,” *Proceedings of the third Conference on IEEE*, pp. 1789-1794, 1994.
- [5] M. J. Grimble, “The design of strip shape control systems for Sendzimir mills,” *Journal of IEEE transactions on automatic control*, vol. 27, no. 3, pp. 656-665, 1982.
- [6] Y. G. Hur and Y. K. Choi, “A shape decision and control scheme for the stainless steel at the skin pass mill,” *Journal of Iron and Steel Institute of Japan International*, vol. 49, no. 6, pp. 859-867, 2009.

**허 윤 기**

1992년 부산대학교 전기공학과 학사.

1994년 KAIST 전기전자공학과 석사.

2007년~2009년 부산대학교 전자전기공

학과 박사. 1992년~현재 POSCO 기술연

구소 책임연구원, MBB. 관심분야는 지

능제어(Fuzzy, 신경망, GA를 이용한 학

습제어) 및 응용, 실시간 제어, PLC 기반 공정제어, 6 Sigma,

창의공학, 문제해결 방법론, TRIZ, 통계, 실험계획법(DOE,

RSM, 다꾸찌), Data mining, 철강 계측 및 제어, 형상과 두께

제어, Laser와 Plasma 표면처리 등.