

## 후판 압연공정에서 퍼지 두께제어 구현

### An Implementation of Fuzzy Automatic Gauge Control for the Plate Steel Rolling Process

허윤기\*, 최영규

(Yone-Gi Hur and Young-Kiu Choi)

**Abstract:** The plate manufacturing processes are composed of the reheating furnace, finishing mill, cooling process and hot leveling. The finishing rolling mill (FM) as a reversing mill has produced the plate steel through multiple pass rolling. The automatic gauge control (AGC) is employed to maintain the thickness tolerance. The high grade products are forming greater parts of the manufacturing and customers are requiring strict thickness margin. For this reason, the advanced AGC method is required instead of the conventional AGC based on the PI control. To overcome the slow response performance of the conventional AGC and the thickness measurement delay, a fuzzy AGC based on the thickness deviation and its trend is proposed in this paper. An embedded controller with the fuzzy AGC has been developed and implemented at the plate mill in POSCO. The fuzzy AGC has dynamically controlled the roll gap in real time with the programmable logic controller (PLC). On line tests have been performed for the general and TMCP products. As the results, the thickness deviation range (maximum - minimum of the inner plate) is averagely from 0.3 to 0.1 mm over the full length. The fuzzy AGC has improved thickness deviation and completely satisfied customer needs.

**Keywords:** plate rolling, fuzzy AGC, embedded high speed controller, PLC Implementation

#### I. 서론

후판 제품의 생산 공정은 가열로, 압연기, 냉각공정 그리고 교정기로 구성되어 있다. 그림 1에서와 같이 슬라브(slab)를 압연하기 적합한 고온으로 가열로(reheating furnace)에서 가열한 후, 압연기(FM: Finishing Mill)를 통하여 고객이 원하는 제품 두께를 만든다. 압연기를 통과한 강판은 가속 냉각공정을 경유함으로써 강판의 냉각을 통하여 강도 및 인성의 요구조건을 맞춘다. 냉각공정 경유 시, 강판의 휨을 교정하기 위하여 열간 교정기(hot leveller)를 통과한다. 후판(plate steel)이란, 두께가 두껍고 폭이 넓으며 조선 및 건축용으로 주로 사용되는 철강제품이다. 후판의 압연에서는 두꺼운 슬라브로 비교적 큰 압하율에 맞추기 위해 강판을 여러 번 반복하여 압연하는 가역식 압연기(reverse rolling mill)를 사용한다. 압하율(reduction rate)이란, 입측 두께에 대한 출측 두께의 비를 의미한다. 압하율이 클수록 압연 전후의 두께 변화가 크다. 강판의 압연공정에서는 제품의 기본 품질 지표로 두께 공차(tolerance)가 있으며 두께 정도를 높이기 위하여 자동 두께제어(AGC: Automatic Gauge Control)를 사용한다. 후판 압연에서 사용되는 AGC의 종류에는 폭 압연에 주로 사용하는 BISRA (British Iron & Steel Research Association) AGC, 길이 방향의 압연 패스(pass)별 두께를 확보하기 위한 ABS (Absolute) AGC 그리고 마지막 압연 패스 시에 두께제어 정도를 높이기 위한 모니터(monitor) AGC가 있다. 상세한 내용은 II 장에서 다룬다.

산업화가 발달함에 따라 후판 제품의 사용 환경이 극냉 지대 혹은 심해저 같은 가혹한 조건으로 다변화되고 있고, 선박의 대형화 및 초고층 건물의 등장으로 고급강 제품의 수요가 증가하고 그에 따른 시장 경쟁도 심화되고 있다. 따라서



그림 1. 후판 압연 공정.

Fig. 1. Plate steel rolling process.

조선 및 건축용으로 사용되는 TMCP (Thermal Mechanical Controlled Process) 제품의 고강도, 고인성이 요구되고 있고, 고품질을 위해 치수 불량 비율을 감소시켜야 한다. 후판 제품의 경우, 판내 선단부와 미단부의 두께 불량과 판내 본체(body)부의 두께 편차 불량으로 인한 클레임이 지속적으로 발생하는 문제가 있다. 과거에는 강종이 단순하고 두께 공차 범위가 커서 PI 제어에 기반을 둔 모니터 AGC만으로 충분하였다. 그러나 현재는 과거에 대비하여 TMCP 제품과 스테인리스 제품 같은 고급강 제품의 생산비중이 높아지고 치수도 다양해지고 있으며, 고객의 요구사항인 제품공차가 더욱 엄격해지고 있는 시장 상황하에서 기존의 모니터 AGC 보다 진보된 지능제어 기법이 필요하다.

기존의 연구사례로서는 압연기의 수식모델에 근거한 설정 모델(setup model)에 의한 방법[1,2]과 압하력을 입력으로 하여 수식에 의한 판간 설정에 의한 두께제어[3,4]는 많이 연구되고 있으나, 판내 정밀 제어에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이는 후판 압연의 특성상 두께 측정이 어렵고 압연기에 가까이 계측기가 설치되어야 하지만, 냉각수와 수증기 그리고 온도 등에 의하여 압연기에서 수 m 떨어진 위치에 계측기가 설치되는 관계로 측정 지연에 의한 판내 두께제어 정도가 열위 하거나 제대로 성능을 개선하기 어려운 현실이다[5,6]. 신경회로망을 이용하여 플랜트 모델을 동정(identification)하거나, 개발된 제어 방법을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인해 보이는 정도였고[7,8], 열간 압연의 냉각 공정에 퍼지제어를 사용하여 모델링으로 시뮬레이션 하는 정도이며[9], 또한 열간 압

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 3. 10., 채택확정: 2009. 4. 8.

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

최영규: 부산대학교 전자전기공학부(ykichoi@pusan.ac.kr)

연에서 필터를 설계하여 신호 처리한 두께 값과 압하력을 이용하여 기존 ABS AGC를 개선한 사례[10]는 있으나 지능 제어 기법을 후판 압연 공정에 실제 적용하여 제품을 생산한 사례는 없다.

본 논문에서는 기존 두께제어 방법인 PI 제어에 근거한 모니터 AGC의 느린 응답성과 두께 측정 지연 등의 문제점을 해결하기 위하여, 두께 편차 및 두께 변화 추세(trend)를 반영하고 측정지연을 고려한 퍼지 두께제어 방법을 제안한다. 또한 산업용 제어기인 PLC (Programmable Logic Controller)와 연동하기 위하여 임베디드 시스템 형태의 고속 제어기를 개발하고 POSCO 후판공장에 설치하여 압연기의 동적 두께제어를 실시간으로 실시한다.

## II. 퍼지 두께제어 방법

### 1. 종래의 두께제어 방법

후판 압연에서 사용되는 두께제어 방법에는 BISRA AGC, ABS AGC 그리고 모니터 AGC가 있다. 후판 압연공정은 두꺼운 슬라브를 여러 번 반복 압연을 통하여 원하는 제품 두께를 생산한다. 압연기가 2대인 경우에 조압연기(RM: Roughing rolling Mill)와 마무리 압연기(FM: Finishing rolling Mill)가 있어서, 조압연에서는 강판의 폭 내기 압연을 하고 마무리 압연에서 강판의 길이내기 압연을 수행한다. 반면에 압연기가 1대인 경우, 마무리 압연기에서 강판의 폭 내기와 길이 내기를 여러 번의 패스를 통하여 수행한다.

BISRA AGC는 폭 내기 압연에서 주로 사용하는 두께제어 방법이다. 압하력(RF: Roll Force) 측정값  $P$  와 제어 시작 시점에서 압하력 측정값  $P_{rock-on}$  값을 기준값(reference)으로 하여 그의 차이를 구한 후,  $\Delta P$  값을 줄이는 방향으로 두께 제어를 수행한다. 이를 수식으로 표현하면,

$$\Delta h = \Delta S + K_{bisra} \frac{\Delta P}{M} \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta h = h_{entry} - h_{delivery} \quad (2)$$

수식 (2)는 입측 두께( $h_{entry}$ )와 출측 두께( $h_{delivery}$ )의 차이를 의미한다.

$$\Delta S = S(k) - S(k-1), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad n \text{은 정수.} \quad (3)$$

수식 (3)은 압연기의 롤 간격(roll gap)  $S(k)$ 의 변화량을 의미한다.

$K_{bisra}$ 는 BISRA AGC 이득이고,  $M$ 은 밀 상수(modulus)이다.

$$\Delta P = P_{FB} - P_{rock-on} \quad (4)$$

수식 (4)는 압하력 기준값  $P_{rock-on}$  과 측정값  $P_{FB}$ 의 차이를 의미한다.

BISRA AGC는 현재 롤 간격  $S(k)$ 을 구하기 위하여, 압연

기의 입측과 출측의 두께와 이득, 밀 상수 그리고 압하력 차이를 이용하고 압하력 차이가 줄어드는 방향으로 롤 간격을 계산하는 제어 방법이다. 폭 내기 압연은 강판을 90도 회전시켜, 폭 방향으로 압연을 하므로 압연에 소요되는 시간이 매우 짧다. 따라서 수식모델로 제어하기에는 시간이 부족하므로 압연기에 강판이 취입(metal-in)되는 시점에서의 압하력 값을 기준값으로 간주하여 제어를 수행한다. 제어 모델의 수행시간은 매우 빠른 장점이 있으나, 취입시점의 압하력을 기준값으로 선정하는 관계로 압연 패스 별로 달라지고 제어 정도가 다른 AGC에 비하여 떨어지는 단점이 있다.

ABS AGC는 길이 내기 압연에서 사용하는 두께제어 방법이다. 압하력 측정값  $P$ 와 설정 모델(setup model)에 의한 압하력 계산값  $P_{Model}$ 을 기준값으로 하여 그의 차이를 구한 후,  $\Delta P$  값을 줄이는 방향으로 두께제어를 수행한다. 이를 수식으로 표현하면,

$$\Delta h = \Delta S + K_{ABS} \frac{\Delta P}{M} \quad (5)$$

여기서,  $K_{ABS}$ 는 ABS AGC 이득이다.

$$\Delta P = P_{FB} - P_{Model} \quad (6)$$

수식 (6)은 압하력 기준값  $P_{Model}$ 과 측정값  $P_{FB}$ 의 차이를 의미한다.

ABS AGC는 BISRA AGC와 수식이 유사하나, 제어 방법 및 성능에서 차이가 있다. 설정 모델은 압연 패스 별로 적절한 기준값을 계산하고, 기준값에 근거하여 두께제어를 수행하므로 제어 정도는 통상적으로 BISRA AGC보다 우수하다. 길이 내기 압연은 폭 내기 압연을 수행한 후, 강판을 90도 회전시켜 길이 방향으로 압연하므로 압연에 소요되는 시간이 비교적 길다. 따라서 압연 패스 별로 수식모델이 기준값을 계산할 수 있는 시간은 충분하다. ABS AGC의 특징으로는 밀 상수( $M$ )가 압연을 수행할수록 변화하므로 지속적 측정을 통한 밀 상수 값의 갱신이 어렵다. 또한 다양한 치수(두께, 폭)와 강종에 따라 적절한 이득  $K_{ABS}$  값을 구하여 모델에 반영하여야 하는 데, 실제로는 현업에서 실험을 통한 다양한 형태의 이득을 구하기 어렵다. ABS AGC도 압하력 편차를 줄이는 방향으로 롤 간격을 구하는 제어 방법인데, 강판의 두께가 두꺼우면 압하력과 두께의 상관관계가 높아서 압하력 편차로 두께 편차를 제어하는 것이 가능하다. 그러나 두께제어의 목표는 제품의 두께 편차를 줄이는 것이다. 마무리 패스(final pass)에 가까워질수록 강판의 두께가 얇아지고, 이때는 압하력과 두께간의 상관관계가 떨어지기 시작하여 두께 편차를 이용하는 모니터 AGC에 비하여 두께제어 정도가 떨어지는 단점이 있다.

모니터 AGC는 길이 내기 압연 중 마무리 패스에서 주로 사용하는 두께제어 방법이다. 최종 패스의 두께가 제품의 두께와 일치하므로 대부분의 열간 압연에서는 두께계(thickness meter)를 통해 강판의 두께를 직접 측정 한 후, 제품 목표 두께와 측정 두께의 편차를 줄이는 모니터 AGC를 주로 사용

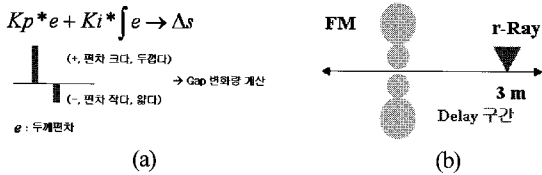


그림 2. 모니터 AGC의 특성.

Fig. 2. Properties of the monitor AGC. (a) consideration of only current thickness deviation (b) delay of thickness measurement.

한다. 열간 압연에 사용되는 두께계는 통상적으로 강판의 두께가 40 mm 이하에서 측정의 정도를 보장한다. 따라서 모니터 AGC는 두께 측정이 가능한 패스부터 적용이 가능하고, 압하력이 아닌 강판의 두께를 직접 입력 받고 목표 두께로부터 두께 편차를 구한 후, PI 제어에 의해 두께를 제어하는 방법이다. 기존 두께제어 방법 중에서 제어 성능이 가장 우수한 모니터 AGC에도 문제점이 있다. 그림 2(a)에서 모니터 AGC는 현재의 두께 편차 (목표 두께와 측정 두께의 차이)만을 고려하여, “두께 편차가 크다” 혹은 “두께 편차가 작다” 등의 정보로부터 롤 간격을 계산한다. 따라서 강판의 선단부에서 종종 발생하는 급격한 두께 변화에 대처가 느려서 미흡한 제어 성능을 보인다. 또한 모니터 AGC는 PI 제어를 기반으로 하므로, 적분기의 특성을 갖는다. 따라서 일정한 시간 동안 오차(두께 편차)가 누적되어야 제어 성능을 발휘하므로 초기 응답성이 느리고 기준값에 추종(tracking) 성능이 나쁘다. 그림 2(b)에서 후판 압연공정의 경우, 두께계가 압연기의 3 m 후방에 위치하고 있어서 이때 측정되는 강판의 두께는 현재 압연 중의 두께가 아니라 과거에 압연한 두께 값이다. 즉, 측정 시 발생하는 지연 효과를 고려하지 못하고 있다.

이러한 특성을 갖는 기존 모니터 AGC의 문제점을 해결하기 위하여, 퍼지 두께제어 방법을 제안한다. 퍼지 두께제어는 퍼지제어를 기반으로 하여, 현재의 두께 편차와 두께 편차의 변화 추세를 고려한다. “두께 편차가 크고, 증가 추세에 있다” 혹은 “두께 편차가 작고, 감소 추세에 있다” 등의 정보로부터 롤 간격의 변화량  $\Delta S$  를 계산한다. 또한 현재와 과거 추세를 고려하여 빠른 제어 응답성을 보이고, 규칙(rule)의 튜닝을 통하여 기준값에 대한 추종성능을 향상시킨다. 두께 측정의 지연효과를 고려하기 위하여 퍼지 제어기의 입력부에 지연요소를 반영한다.

2. 퍼지 두께제어 시스템

그림 3에서 후판 압연의 두께제어 시스템에 대한 개요가 나타나 있다. 두께제어는 압연기의 입측 두께 H를 출측 두께 h로 맞추기 위하여 압연기의 롤 간격 S를 제어 주기(cycle time)마다 계산하는 과정이다. 압연기의 상부의 로드 셀로부터 압하력(압연하중, RF)을 입력 받고 PLG (Pulse Generator)로부터 실린더(SD: Screw Down Cylinder)의 위치 값을 계산한 후, 롤 간격의 정보를 얻는다. 또한 압연기 후방에 위치한 두께계측기로부터 두께 값을 입력 받아서 산업용 제어기인 PLC에서 두께제어가 수행된다. 압하력의 정보로부터 BISRA 혹은 ABS AGC가 수행되고, 두께 정보로부터 모니터 AGC가 구동된다. PLC에서 롤 간격이 계산되면, 유압 제어를 통해 구동기를 움직인다. 구동기는 서보 밸브(SV: Servo Valve)를 움

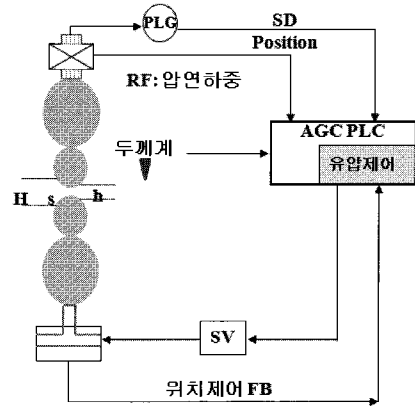


그림 3. 두께제어 시스템 개요도.

Fig. 3. Outline of the AGC system.

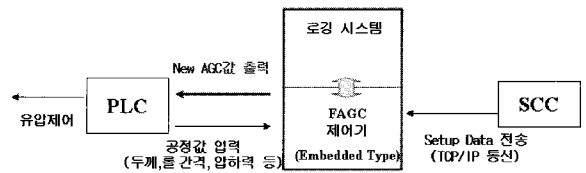


그림 4. 퍼지 두께제어 시스템의 구조.

Fig. 4. Structure of the fuzzy AGC system.

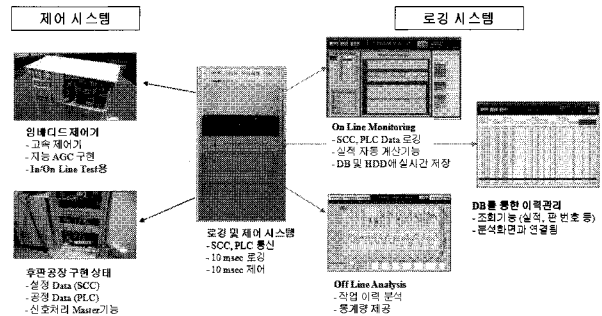
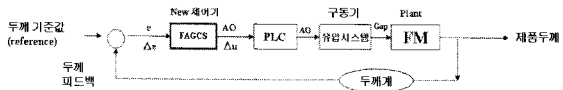


그림 5. 퍼지 두께제어 시스템의 기능.

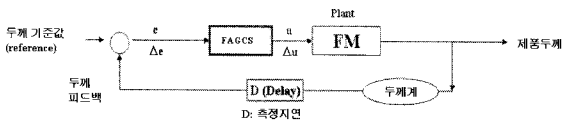
Fig. 5. Functions of the fuzzy AGC system.

직임으로써 압연기 하부의 실린더를 상하로 구동시킨다. 하부의 실린더가 위로 움직이면 롤 간격이 줄어들어 강판의 두께를 얇게 하고, 하부의 실린더가 아래로 움직이면 롤 간격이 증가하여 강판의 두께를 증가시키는 작용을 한다.

퍼지 두께제어를 후판 압연용 PLC에 구현하기 위하여, 퍼지 두께제어 시스템을 개발하여 PLC와 연동하여 구동한다. 이하, 제어 로직을 의미하는 퍼지 두께제어는 FAGC (Fuzzy Automatic Gauge Control)로 표기하고, 하드웨어를 의미하는 퍼지 두께제어 시스템은 FAGCS (Fuzzy Automatic Gauge Control System)로 표기한다. 그림 4에서 FAGCS의 구성이 나타나 있다. 상위 제어용 컴퓨터인 SCC (Supervisor Control Computer)로부터 압연에 필요한 설정 정보를 통신으로 입력 받고, PLC로부터 현재 압연 중인 두께, 롤 간격, 압하력 등의 공정 값을 로깅 시스템(logging system)을 통하여 10 ms 간격으로 입력 받는다. 그리고 FAGCS에서 퍼지제어에 의하여 롤 간격을 계산하고 이를 PLC에 10 ms 주기로 실시간으로 전송하면 PLC가 구동기를 움직이는 구조이다. 그림 5에서 로깅 시스템은



(a) Relation between conventional control system and FAGCS



(b) Fuzzy AGC with measurement delay

그림 6. 퍼지 두께제어 시스템 블록선도.

Fig. 6. Block diagram of the fuzzy AGC system.

공정 값의 저장 및 분석 그리고 작업 이력을 관리하는 기능을 한다. FAGCS는 임베디드 형태의 고속 제어기로서 신경회로망과 퍼지제어의 지능제어 로직 구현이 용이하다. FAGCS는 PLC와 연동하여 구동하기 위해서는 PLC의 제어 주기보다 고속으로 구동이 되어야 한다. Siemens S7 PLC가 유력하게 검토되었지만 10 ms의 제어 주기 확보가 어렵다고 판단되어서 임베디드 형태로 제어 시스템을 구성하였다.

3. 퍼지 두께제어 방법

그림 6에 FAGCS의 블록선도가 나타나 있다. 그림 6(a)에 FAGCS와 PLC 및 압연기와의 관계가 나타나 있다. 여기서,  $e$ 는 두께 기준값과 측정값과의 차이인 두께 편차고,  $\Delta e$ 는 두께 편차 변화량이다. Gap은 롤 간격을 의미한다. 두께 편차와 그 변화량을 FAGCS에서 입력 받아서 롤 간격 변화량  $\Delta u$ 를 출력한다. PLC는 이 값을 구동기로 전달하여 압연기(FM)의 롤 간격을 실시간으로 제어한다. 그림 6(b)는 그림 6(a)를 단순화하여 실제 압연에 있어서 측정지연의 효과를 반영한 퍼지 두께제어를 표시하였다.

FAGCS의 출력은 롤 간격 변화량  $\Delta u$ 를 의미하고 아래 식과 같이 정의된다.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad n: \text{정수.} \quad (7)$$

FAGCS 출력인 롤 간격 변화량  $\Delta u = 0$  이면  $u(k) = u(k - 1)$  이 되어서 이전의 롤 간격을 유지함을 의미한다. 그러나 FAGCS 출력을 롤 간격 변화량 대신 롤 간격  $u$ 로 설정을 하면, FAGCS 출력값이 0이 되는 경우 압연 사고로 이어지므로 규칙 튜닝에 있어서 세심한 주의가 필요하다.

두께 편차  $e(k)$ 는 아래와 같이 표현되고,

$$e(k) = y(k) - y_d(k), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad n: \text{정수.} \quad (8)$$

여기서,  $y(k)$ 은 두께 측정 값이고,  $y_d(k)$ 은 일정한 값을 갖는 두께 기준 값이다. 수식 (8)에 측정 지연효과를 고려하면,

$$e(k - d) = y(k - d) - y_d(k), \quad d: \text{delay term.} \quad (9)$$

수식 (8)과 (9)의 관계로부터,

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - d) = y(k) - y(k - d) \quad (10)$$

수식 (10)에서 측정지연 항목인  $d = n$  이면,  $n$  step 두께 편차 변화량이 된다.

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - n), \quad n: \text{정수} \quad (11)$$

수식 (11)은 두께 편차 변화량  $\Delta e(k)$ 은  $n$  step 이전의 두께 편차와 비교함을 의미한다. 여기서 1 step은 10 ms의 제어 주기를 의미한다. FAGC는 현재 압연 중인 두께 값을 대체하기 위하여 수 ms 이전에 압연한 두께 편차의 패턴을 이용하여 퍼지제어의 규칙에 활용한다.

본 논문에서는 퍼지제어를 기반으로 FAGCS를 설계한다. 그림 7에서 FAGC의 튜닝에 관한 개념이 나타나 있다. 여기서,  $err$ 는 퍼지화된 두께 편차고,  $derr$ 은 퍼지화된 두께 편차 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.

퍼지제어의 장점은 규칙(rule)과 소속 함수(membership function)의 튜닝으로 편차  $err$ 를 신속히 ZO로 접근 시키는 데에 있다. 여기서 ZO란 정확하게 편차를 0로 만드는 것을 의미하는 것이 아니라, 편차가 0의 경계(boundary)에 들어가서 0의 근방을 유지한다는 의미이다. 두께 편차 변화량  $derr$ 에 두께 변화 추세를 반영하여 “두께가 빨리 두꺼워지고 있다” 혹은 “두께가 완만히 얇아지고 있다” 등의 정보를 규칙으로의 반영이 가능하다.

FAGC의 소속 함수의 예는 그림 8에 나타나 있다. DU는 퍼지화된 롤 간격 변화량이다.

FAGC의 규칙의 예는 표 1에 나타나 있다.

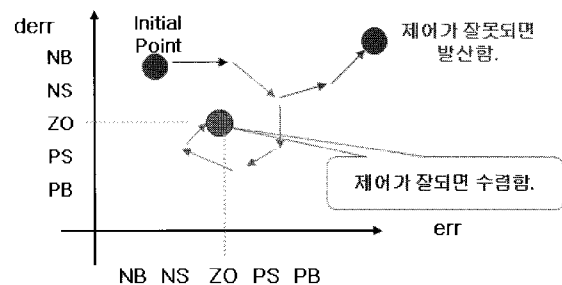


그림 7. 퍼지 두께제어의 튜닝 개념.

Fig. 7. Concept of the fuzzy AGC tuning method.

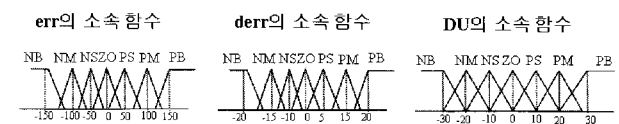


그림 8. 소속 함수의 예.

Fig. 8. Examples of the membership functions.

표 1. 퍼지 규칙의 예.

Table 1. Examples of the fuzzy rules.

derr \ err	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM		PS	
NM	NM	NM	NS	NM		PS	
NS	NM	NM	NS	NS			
ZO	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS
PS				PS	PS	PS	PM
PM				PM	PS	PM	PM
PB				PM	PS	PB	PB

FAGC의 출력 조건은 다음과 같다.

- 1) 롤 간격 변화량 출력의 상한과 하한 값을 설정한다.
- 2) 롤 간격 출력의 상한과 하한 값을 설정한다.
- 3) 작업자의 수동 설정 값이 발생하면 우선하여 설정한다.
- 4) 두께 입력으로부터 두께 편차의 배열(array)을 구한다.
- 5) 압연 속도 > 30 meter/min 이고 강판이 취입(metal in) 되었으며 두께 입력이 시작되면, 제어기 준비(ready) 신호를 발생한다.
- 6) 퍼지 제어기에서 롤 간격 변화량을 계산한다.
- 7) 강종에 따른 롤 간격 보상을 실시한다.
- 8) 강판의 온도 변화에 따른 롤 간격 보상을 실시한다.
- 9) 제어기 출력의 상한과 하한 값 이내로 제한한다.
- 10) 제어기 출력을 DA변환 후, AO와 DO신호로 PLC로 전송한다.

FAGCS의 출력범위는 -10 ~ 10 volt이고 이는 UOD (Universe Of Discourse)로 이용된다. 퍼지화는 계측값의 신뢰도가 크므로 싱글톤(singleton)으로 하였고 퍼지 추론은 Mamdani의 방법을 사용하였으며 비퍼지화(defuzzification)은 COG (Center of Gravity) 방법을 사용하였다. FAGC는 신속히 두께 편차와 그 변화량을 ZO에 접근 시킬 수 있는 장점이 있지만, FAGC 튜닝이 잘못되면 발산하는 단점도 있다. 따라서 현업의 온라인 테스트 전에 인라인(inline) 테스트를 통하여 제어 성능을 충분히 검증할 필요가 있다. 인라인 테스트의 개념은 III 장에서 소개한다.

표 2에서 후판공정에서 두께제어 방법이 비교되어 있다. 제품 두께 품질과 직결되는 마무리 패스에서 기존의 모니터 AGC의 경우 단순히 두께 오차를 이용하여 PI 제어에 의하여 롤 간격을 계산하는 반면에, FAGC에서는 두께 오차 및 그 변화 추세를 이용하여 퍼지제어에 의하여 롤 간격의 변화량을 계산한다. 모니터 AGC는 PI 제어의 특성상 제어 개시 시점에서 응답성이 느리고, 두께 변화가 크게 발생시 제어 성능이 미흡한 단점이 있다. 그리고 압연기 후방에 설치된 두께계의 측정지연의 효과를 반영하지 못한다. 그러나 FAGC는 두께 오차와 그 변화량 추세를 규칙에 반영하여 퍼지제어로 구현이 가능하고, 두께 변화가 크게 발생시 두께 변화를 예측하여 미리 롤 간격 계산에 반영한다. 또한 측정지연의 효과를 제어 입력변수에 반영함으로써 효과적인 대처가 가능하다.

표 2. 후판공정에서 두께제어 방법 비교.

Table 2. Comparison between AGC methods at the plate rolling process.

	모니터 AGC	지능 AGC
제어 로직	PI 제어	퍼지 제어
제어 입력	두께 오차를 이용하여 롤 간격 계산함.	두께 오차와 두께 변화 추세를 이용하여 롤 간격 변화량 계산함.
특징	기준값 주정 및 응답성이 느림. 측정 지연 고려 못함. 두께 편차 클 경우 제어 성능 미흡함.	현재값과 과거추세를 고려한 빠른 응답성. 측정 지연 고려 가능함. 규칙(Rule)의 튜닝을 통한 기준값 추종성능 우수함.

### III. 현업 적용 결과

개발된 FAGCS를 POSCO 후판공장 압연라인에 설치하여 자동제어에 의한 조업을 실시하였다. 인라인과 온라인의 공통점은 FAGCS이 현업에 설치되어 실시간으로 구동되고 있는 것이다. 그런데 FAGCS의 출력값이 실제 압연기에 반영되면 온라인 적용이 되지만, 입력은 실시간으로 받고 출력은 압연기에 반영 되지 않으면 인라인 테스트가 된다. 인라인 테스트는, 제어 상태의 지속적인 모니터링을 통하여 FAGCS의 안정성 및 제어 출력값의 적절성에 대한 판단을 위해 필요한 과정이다. 인라인 테스트를 통하여 얻어진 결과로부터 제어 성능을 분석하고 이를 반영하여 FAGC의 규칙을 튜닝한 후, 다시 현업의 FAGCS에 이식하여 제어 방법을 갱신시킨다. 인라인 테스트는 현업에 온라인 적용이전에 제어 방법을 검증하는 단계이다. 인라인 테스트를 통하여 FAGC의 성능을 검증한 후, 다양한 강종과 치수를 갖는 후판제품에 대하여 온라인 테스트를 수행하였다.

#### 1. 기존 모니터 AGC와 퍼지 두께제어 전환 테스트

현업의 온라인 테스트를 수행하면서 제어 로직을 튜닝하였다. 현업 테스트 과정에서 퍼지규칙을 정밀하게 튜닝하고, 소속 함수를 지속적으로 갱신하였다. 온라인 테스트에서 기존 모니터 AGC보다 제어 성능의 우수성을 검증하기 위하여, 모니터 AGC와 FAGC를 병행하는 단계를 가졌다. 후판 강판의 길이를 기준으로 두께 측정이 가능한 시점부터 모니터 AGC가 우선 수행을 하고, 그 이후 FAGC를 길이 50% 지점부터 적용하기 시작하여 점진적으로 적용시점을 앞당겨서 최종적으로는 모니터 AGC를 대체하였다.

그림 9에 FAGC의 온라인 테스트 결과가 나타나 있다. 여기서, 실선은 두께 편차를 나타내고 점(dot) 선은 모니터 AGC 제어 출력을 나타내며 굵은 실선은 FAGC 제어 출력을 나타낸다. 처음에는 모니터 AGC로서 롤 간격을 제어하여 길이 50% 지점부터 FAGC로 전환하여 두께제어를 수행하였다. 소재 정보는 제품 두께 18 mm, 폭 2055mm이고, 총 17 패스 압연을 수행하였다. 그림 9은 선단부(head부)에 두께가 두꺼워서 롤 간격을 줄여야(roll gap close)하므로, 모니터 AGC가 롤 간격을 줄이는 방향으로 움직이고 있으나 그 값이 매우 적고 응답성이 느려서 두께가 얇아지는 방향으로 진행되고 있다. 이는 모니터 AGC의 한계를 보여준다. FAGC로 전환한 후, 신속히 롤 간격을 늘려서(roll gap open) 두께를 조금 두껍게 회복시키고 있다. FAGC의 양호한 제어 성능을 보인다.

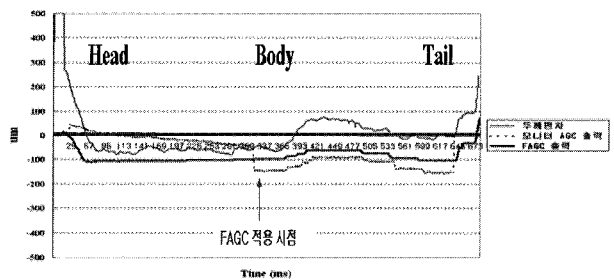


그림 9. 온라인 테스트 결과 1; 길이 50%지점부터 FAGC로 전환.

Fig. 9. Online test result 1; switching to the fuzzy AGC from 50% plate length.

2. 제안된 퍼지 두께제어의 단독 테스트

AGC의 우수한 제어 성능을 바탕으로 모니터 AGC를 대체하는 테스트를 수행하였다. 테스트가 진행될수록 FAGC에 대한 현업 작업자의 신뢰도가 높아졌고, 보다 더 엄격한 제어 성능 요구 및 작업이 비교적 어려운 소재에 대한 테스트가 수행되었다.

그림 10은 FAGC로 강판의 전체 길이에 대하여 테스트를 수행한 결과이다. 소재 정보는 제품 두께 21.1 mm, 폭 3195 mm이고, 총 15 패스 압연을 수행하였다. FAGC로 수행 후, 선단부 두께가 얇은 경향을 보이자 롤 간격을 증가(roll gap open)을 실시하여 신속히 두께 편차를 ZO 근방으로 회복시킨다. 또한 본체부에서 두께가 다시 얇은 경향을 보이자 재차 롤 간격을 증가시켜서 다시 두께 편차를 ZO 근방으로 유지시키고 있다. 이는 FAGC의 안정된 제어 성능을 나타낸다.

그림 11은 기존 모니터 AGC로는 제어하기 힘든 후판 TMCP 제품에 대하여 테스트를 수행한 결과이다. TMCP제품은 압연 중에 온도 변화 및 형상과 두께 변화가 심한 소재로서, 고객의 요구수준인 두께 허용 범위가 엄격하여 제어 성능 미흡 시 불량으로 처리되기 쉬운 제품이다. 그림 11의 소재 정보는 제품 두께 12.0 mm, 폭 2475 mm이고, 총 15 패스 압연을 수행하였다. FAGC로 수행 후, 선단부에서는 두께 편차가 ZO근방을 유지하고 있고, 본체 부에서 두께가 조금 두꺼운 방향으로 전환되며 증가추세를 보이자 롤 간격을 줄임으로써(roll gap close) 두께를 ZO 근방으로 보내고 있다. 이는 FAGC의 두께 추세를 반영하는 제어 성능을 보이고 있다. TMCP제품을 대상으로 두께 편차를  $\pm 50 \mu m$  이내로 제어할 수 있는 것은 상당한 수준이다.

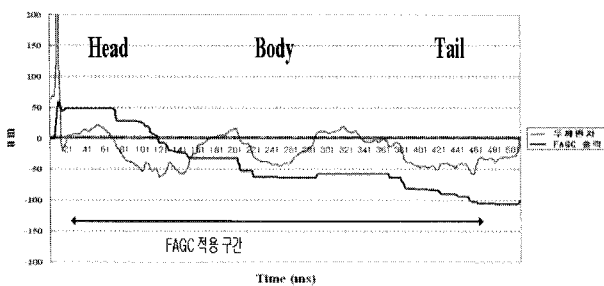


그림 10. 온라인 테스트 결과 2; FAGC 단독.  
Fig. 10. Online test result 2; the fuzzy AGC for overall length.

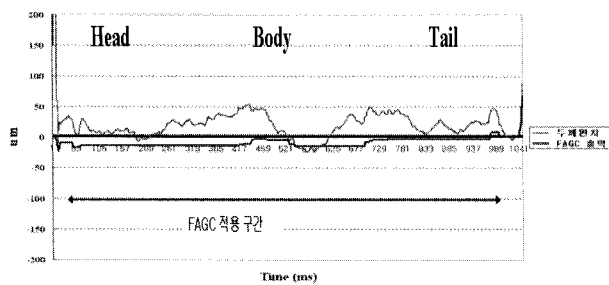


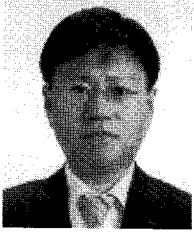
그림 11. 온라인 테스트 결과 3; TMCP대상 실시결과.  
Fig. 11. Online test result 3; the fuzzy AGC for TMCP product.

IV. 결론

본 논문에서 후판 압연라인을 대상으로 후판 제품의 치수 품질을 향상시키기 위하여, 기존 두께제어 방법 보다 진보한 퍼지 두께제어 방법을 개발하고 현업에 적용하였다. 기존 모니터 AGC의 느린 응답성과 두께 측정 지연 등의 문제점을 해결하기 위하여, 두께 편차 및 두께 변화 추세를 반영하고 측정지연을 고려한 퍼지 두께제어 (FAGC) 방법을 제안하였다. 또한 산업용 제어기인 PLC와 연동하기 위하여 임베디드 형태의 고속 제어기를 개발하고 POSCO 후판공장에 설치하여 압연기의 롤 간격을 실시간으로 제어하였다. POSCO 후판공장에서 일반제품과 TMCP 제품을 대상으로 기존 모니터 AGC를 대체하는 FAGC의 온라인 테스트 결과, 두께 편차가 평균 -0.005 mm 이내로 유지되는 우수한 제어 성능을 보였다. 또한 엄격한 측정지표인 판내 두께 편차의 범위(최대값과 최소값의 차이)가 평균 0.3mm에서 0.1mm로 개선되었고, 표준 편차도 0.29mm에서 0.09mm로 개선되었다. 온라인 적용 결과, 두께제어 정밀도에서 상당한 개선이 있었고 고객의 요구사항도 모두 만족시킬 수 있었다.

참고문헌

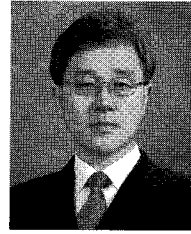
- [1] 水谷, “길이방향의 균질성이 우수한 후판의 제어압연 방법,” 출원번호: 1995-204705, 일본, 1995.
- [2] 河野 信博, “길이방향의 균질성이 우수한 후판의 제어압연 방법,” 출원번호: 1994-277726, 일본, 1994.
- [3] 關村, “후판압연의 절대치 자동 판 두께제어 장치,” 출원번호: 1997-253723, 일본, 1997.
- [4] R. Heeg, O. Fichet, B. Bodefeld, and L. Irastorza, T. Kiefer, and A. Kugi, “Model-based control of plate thickness in heavy plates mills,” *Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Rolling Conference on METEC*, pp. 224-231, June 2007.
- [5] 허윤기, “강판의 지능 두께제어 시스템 및 방법,” 출원번호: 2008-0135232, 한국, 2008.
- [6] 허윤기, “지능 AGC 제어기술 개발,” POSCO, 한국, 보고서, 2008.
- [7] K. Linghu, A. HE, Q. Yang, L. Zhao, and X. Guo, “Dynamic decoupling for combined shape and gauge control system in wide strip rolling process,” *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 15, no. 2, pp. 28-31, 2008.
- [8] E. Z. Luis and R. B. Fabricio, “Representation and control of the cold rolling process through artificial neural networks via sensitivity factors,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 97, pp. 344-362, 2008.
- [9] H. B. Xie, Z. Y. Jiang, X. H. Liu, G. D. Wang, A. K. Tieu, J. Yang, and K. Manabe, “Application of fuzzy control of laminar cooling for hot rolled strip,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 88, pp. 715-719, 2007.
- [10] Y. K. Lee, Y. J. Jang, and S. W. Kim, “Adaptive feed-forward automatic gauge control in hot strip finishing mill,” *Journal of Iron and Steel Institute of Japan(ISIJ), International*, vol. 47, no. 10, pp. 1444-1451, 2006.



### 허 윤 기

1992년 부산대학교 전기공학과 졸업.  
1994년 KAIST 전기전자공학과 석사.  
2007년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사수료. 1992년~현재 POSCO 기술연구소 책임연구원, MBB. 관심분야는

지능제어(Fuzzy, 신경망, GA를 이용한 학습제어) 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 응용 등.



### 최 영 규

1980년 서울대학교 전기공학과 졸업.  
1982년 KAIST 전기 및 전자공학 석사.  
1987년 동 대학원 박사. 1986년~현재 부산대학교 전자전기공학부 교수. 관심분야는 로봇제어, 지능제어, 신경회로망 등.