

## 열연 마무리 압연공정 압연롤 회전속도 설정 기술 개발

(Development of Technology for Setting Rolling Speed of Finishing Rolling Process in Hot Strip Mill)

홍성철\* · 이해영\*\*

(Seong-Cheol Hong · Haiyoung Lee)

### Abstract

Rolling speed, roll gap, and cooling pattern in hot strip finishing mill process should be determined before inserting strip into roll. Such parameters are initially calculated by a mathematical set-up model. The technique to find adequate roll speed via a mathematical model has inherently limit because required working conditions are various and rolling process is nonlinear. To improve the accuracy of initial rolling speed for a finishing mill, this paper suggests a correction technology for initial rolling speed. The proposed method was implemented in hot strip mill process. As the results, the magnitude of width error in strip head-end part caused by excessive strip tension was decreased remarkably.

Key Words : Finishing Rolling Mill, Rolling Speed, Forward Slip, Looper

### 1. 서 론

열간압연공정에서 핵심 설비인 마무리 압연기는 대개 6개 내지 7개 스탠드의 압연기들을 일렬로 늘어놓는 형태로 조합한 것인데, 마무리 압연기를 자동으로 작동시키는데 필요한 소프트웨어의 핵심적 기술은 크게 세 가지이며, 첫째는 ‘압연기 초기설정’, 둘째는 ‘실

시간 제어’, 그리고 셋째는 ‘학습’이다[1-2]. 압연기 초기설정은, 작업할 소재가 마무리 압연기에 들어오기 전에 작업조건을 고려하여 압연롤 회전속도(이하 ‘압연속도’라고 함), 압연롤 간격, 그리고 냉각패턴 등을 수학적 모델을 이용하는 방법으로 예측하여 구한 후 압연기의 초기상태를 설정하는 것이다. 실시간 제어는, 마무리 압연이 시작된 이후부터 센서로부터 필요한 공정변수들을 측정하여 실시간 피드백(Feedback) 또는 피드포워드(Feedforward) 제어들을 하는 것이며, 실시간 제어 기능들의 예를 들면, 자동 두께 제어, 압연속도 제어 및 루퍼장력 제어 등이 있다. 학습은 하나의 소재를 압연한 후 취득된 조업데이터를 이용하여 그 소재에 대한 압연기 초기설정의 값을 보정하는 것이며, 이는 복잡한 물리적 변형이 발생하는 압연 과정을 수학적으로 완전하게 표현하지 못하는 단순화

\* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수  
\* Main author : Doctor course of Electrical Engineering at Yeungnam University  
\*\* Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University  
Tel : 053-810-2485, Fax : 053-810-4767  
E-mail : hylee@ynu.ac.kr  
접수일자 : 2013년 8월 5일  
1차심사 : 2013년 8월 10일  
심사완료 : 2013년 9월 17일

된 수학적 모델을 이용하여 설정되었던 불확실성을 실제 작업을 통해 얻은 데이터로 보정하여 다음에 같은 유형의 소재를 작업할 때 압연기 초기 설정의 정밀도를 향상시키는데 필수적인 기능이다. 위와 같은 학습 기능은 대개 단순화된 선형식의 형태로 구현되며, 수학적 모델에 포함된 학습용 파라미터들을 측정된 오차에 비례하는 값만큼 더하여 보정하는 방법이 사용된다.

그런데 압연기 초기설정용 수식모델은 원래부터 완전한 수식모델을 찾는 것이 현재의 학술적 및 기술적 수준으로는 불가능하므로, 물리현상을 단순화하여 만들어진 것이 널리 사용될 수밖에 달리 방법이 없다[3-8]. 따라서 그러한 단순화된 수학적 모델로 계산된 압연속도는 주어진 소재의 작업에 가장 알맞은 값이 아닐 가능성이 높으며, 그로인해 소재 또는 설비에 여러 가지의 문제를 발생시킬 수 있다. 조업 경험 및 조업 데이터를 분석하여 보면, 그러한 문제들 중 중요한 몇 가지 예로서 조업중단, 생산성 하락, 품질저하, 및 생산비용 상승 등을 들 수 있다.

압연속도는 제품품질향상 및 공정의 안정된 운영(소재의 안정된 이송)을 위해 중요하며 특히 과장력에 관련된 핵심 변수이므로, 본 논문은 마무리 압연기에서 압연기 초기설정 변수들 중에 압연속도의 예측 정밀도 향상 기법을 다루며, 구체적으로는 학습 성능을 향상시킬 수 있는 특별한 보정 방법을 제안하고, 조업 데이터를 이용하여 개발된 기술의 유용성을 입증하며 나아가 실제 압연설비에 적용한 결과도 실용성이 있음을 보인다.

## 2. 기존의 압연속도 설정방법, 문제점 및 공정에의 영향

$v_{R_i}$  를  $i$ 번째 스탠드의 압연속도,  $v_S$  를  $i$ 번째 스탠드 출구에서의 소재 이동속도 및  $f_i$ 를  $i$ 번째 스탠드의 선진율(Forward slip)이라 하면,  $f_i$ 는 식 (1)과 같이 정의되며, 소재와 압연롤 사이의 미끄럼을 표현하는 물리량이다.

$$f_i = \frac{v_S - v_{R_i}}{v_{R_i}} \quad (1)$$

$v_{S_{final}}$  을 마지막 스탠드 출구에서의 소재 이동속도,  $h_{final}$  과  $h_i$  를 각각 '마지막 스탠드 출구에서의 소재 목표 두께' 및 ' $i$ 번째 스탠드 출구에서의 소재 목표 두께'라고 하면, 각 스탠드에서 시간당 이동하는 질량이 일정해야 되는 규정(Mass flow law)에 따라,  $v_{R_i}$  는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$v_{R_i} = \frac{v_{S_{final}} \cdot h_{final}}{(1 + f_i) \cdot h_i} \quad (2)$$

$h_{final}$  는 압연 작업의 목표값이며,  $v_{S_{final}}$  는 몇 가지 방법들(물리적 관계 해석법, 과거 실적 데이터 활용, 수동 설정 방법 등)에 의해 선정되며,  $h_i$  는 설정된 스탠드 부하배분관계로부터 정해지기 때문에, 결국 마무리 압연기의 초기 설정에서  $v_{R_i}$  의 예측 정밀도는 전적으로  $f_i$ 에 의해 확정됨을 알 수 있다.

그런데 압연기의 현재 상태에 가장 알맞은 선진율을 구하는 정확한 방법은  $v_S$  를 현재 시점에서 측정하여 식 (1)로 계산하는 것이지만, 열연공정은 고온의 소재를 압연하면서 냉각수가 분사되고 있기 때문에 소재 속도를 측정하는 것은 어려우므로, 필요할 때마다 선진율을 그와 같은 방법으로 구하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그리고 핵심적인 사실은 압연이 진행되기 전에 초기 압연속도가 설정되어야 하므로 선진율이 미리 예측되어야 되는 것이다.

따라서  $f_i$ 를  $v_S$  의 정보 없이도 찾을 수 있는 다른 방법이 필요한데, 각 제철소마다 수십 년간 연구 및 개발을 통해 축적된 야금학적 지식, 기계공학적 지식 및 조업데이터 등을 기초로 하여  $f_i$ 에 영향을 줄 수 있는 물리량들을 이용하여 만든 간단한 실험식들이 사용된다.

선진율은 압하율(Reduction Rate), 소재 두께, 마찰계수 등에 의해 영향을 받는다[3-5]. 마찰계수는 압연속도, 롤 표면, 윤활유 등과 같은 작업롤과 관련된 조업조건들에 의해 영향을 받으며[5-8], 압연롤과 소재

가 접촉하는 구간내에서 일정한 값을 갖고 있지 않다 [7]. 따라서 선진율에 영향을 주는 모든 인자들의 값을 압연 중에 알아낼 수 있는 방법이 없으므로, 선진율을 표현하는 식을 위와 같은 인자들을 모두 포함하는 함수 형태로 설계하는 것은 불가능하다.

결국 제철소들은 선진율에 대해 가장 큰 영향 인자 이면서 별도의 측정 센서도 필요하지 않는 특징을 가진 압하율만의 함수로 선진율을 간단히 표현하는 방법을 사용하고 있으며,  $r_i$  를  $i$  번째 스탠드의 압하율이라고 약속하면, 식 (3)은 일반적으로 사용되고 있는 선진율 예측 식이다.

$$f_i = \frac{1}{4}r_i \text{ 또는 } f_i = \sqrt{a_1 + a_2r_i} \pm a_3 \quad (3)$$

여기서  $a_1$ ,  $a_2$  및  $a_3$ 는 상수들이다.

위와 같은 방법으로 예측된 선진율의 정밀도를 확인하여 보기위해, 도플러 효과를 활용한 레이저 속도 측정시스템을 소재의 아래쪽에 설치하여 압연중에 소재 아래쪽 표면 속도를 측정하는 방법으로 선진율을 구했다. 그림 1은 측정된 선진율과 위 식으로 예측된 선진율을 보인 것인데, 서로 차이가 크며, 동일한 압하율 작업조건에서도 측정된 선진율들이 변동됨을 알 수 있다.

위와 같은 문제가 발생한 이유는 ‘선진율과 밀접한 관계를 갖는 변수들’과 ‘변수들 사이의 물리적 관계’를 정확하게 알 수가 없어 선진율의 함수관계에 고려되지 못하기 때문이며, 현재까지 이 분야에 대한 기술의 한계라고 볼 수 있다.

결국 위와 같은 선진율 예측 오차의 발생은 소재가 마무리 압연기에 투입된 후 두 개 이상의 스탠드에 물리게 되면 스탠드 사이에 존재하는 소재에 ‘과장력’ 또는 ‘부족장력’의 물리 현상(조업상 문제점)을 유발할 수 밖에 없다. 그로인해 과장력의 경우에는 소재의 ‘두께’와 ‘폭’이 알맞은 장력일 경우에 비해 감소되므로 ‘제품 품질(두께 또는 폭)불량’의 문제가 발생하며, 부족장력의 경우에는 소재에 굴곡이 생겨 이송이 원활하지 못하고 심할 경우 소재가 겹치는 등의 설비사고가 발생할 수도 있다. 결국 이러한 문제는 ‘실수율(實

數率) 하락(제품 선단부의 버리는 량 증가 또는 제품 전부의 고철 처리)’이라는 경제적 손실을 발생시킨다.

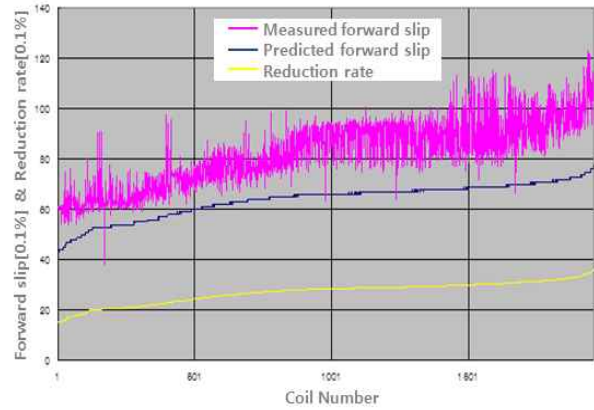


그림 1. 실측 선진율(fr1), 예측 선진율(fr2), 압하율(rer)  
Fig. 1. Measured & Predicted Forward Slips(fr1, fr2), and Reduction Rate(rer)

### 3. 루퍼를 이용한 선진율 오차의 보완 방법, 문제점 및 개선 방향

그림 2에서 볼 수 있듯이, 대개 제철소들은 선진율 예측 오차의 존재에 따라 어쩔 수 없이 발생할 수밖에 없는 위와 같은 제품 및 공정상의 문제들을 해결하는데 다소 도움이 될 수 있도록 루퍼(Looper)라는 기계 설비를 사용하고 있으며, 더불어 숙련된 운전자의 수동 개입 기능까지 두고 있다. 루퍼는 스탠드 사이에 설치되어 소재를 상하로 이동시키는 방법으로 소재에 걸리는 장력을 조절할 수 있는 독립적인 기계적 설비이며, 소재 선단부가 한 스탠드를 통과하고 루퍼를 거쳐 다음 스탠드에 물린 이후부터 제어동작을 한다.

그림 2를 보면, 루퍼는 측정된 공정변수들(루퍼의 각도, 모터전류 등)을 이용하여 소재에 걸리는 장력을 목표값에 일치하도록 ‘각도 보정(장력이 기준값보다 낮으면 각도 증가 및 반대의 경우는 각도 감소)’ 및 ‘압연속도 보정(장력이 기준값보다 낮으면 루퍼 앞쪽 스탠드의 압연속도 감소 및 반대의 경우는 압연속도 증가)’을 하는 방법으로 앞뒤 스탠드들이 서로 독립적으로 작동하도록 유도하며, 운전자도 자신의 운전 경험을 활용하여 장력이 알맞은 값을 유지하도록 온라인

상태에서 압연 상황을 보면서 직접 압연속도를 보정 하기도 한다.

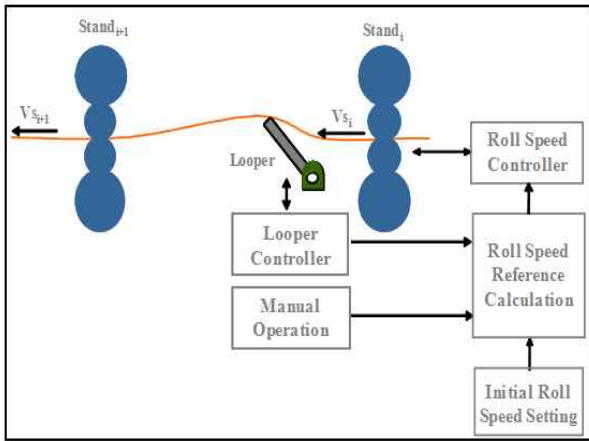


그림 2. 마무리 압연기의 압연속도 설정 및 제어 구성도  
Fig. 2. Roll Speed Setting & Control Diagram in a Finishing Rolling Mill

그림 3은 320개의 소재들(목표 두께 2mm~10mm, 목표 폭 1,000mm~1,500mm)을 작업하였을 때, 마무리 압연기 4번 스탠드와 5번 스탠드 사이에 있는 루퍼 각도와 소재 장력을 획득하여 표시한 것이다. 그림 3은 루퍼가 매 제어주기마다 측정된 소재 장력을 보고 그에 따라 각도를 어떻게 변경시켰는지를 알려 주고 있다.

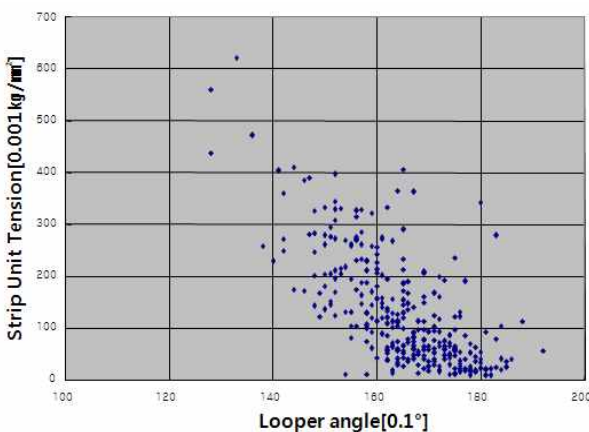


그림 3. 루퍼 각도와 소재 장력의 관계  
Fig. 3. The Relation between Looper Angle and Strip Tension

앞에 기재한 바와 같이 루퍼는 장력이 기준보다 적을 때는 각도를 증가시키고 반대의 경우에는 각도를 감소시키고 있음을 알 수 있다. 즉 루퍼는 장력과 루퍼 각도가 서로 반비례 형태의 관계를 갖도록 작동하고 있다.

그러나 루퍼가 소재의 전 범위(선단부에서 제품의 끝까지: 대개 수백[m] 내지 수[km])에 대해 선진을 예측의 불확실성에 따른 공정상 문제들을 해결하여 줄 수는 없다. 설비의 구조와 루퍼장력 제어 동작시점을 살펴보면, 소재의 선단부(대개 수십[m])는 루퍼의 정상적 작동 이전에 이미 마무리 압연기를 빠져 나간다. 따라서 만약 마무리 압연기가 선단부를 압연하고 있을 때 그 선단부가 물려있는 스탠드들의 압연속도가 그 소재와 작업 조건에 알맞게 초기 설정되어 있지 않으면, 결국 루퍼의 존재 유무와 관련 없이 소재의 선단부에서는 과장력 또는 부족장력의 문제가 발생하게 된다. 즉 루퍼는 소재의 선단부 이외 나머지 부분에서만 선진을 예측의 오차에 따른 공정 문제들을 효과적으로 완화시켜주는 기능을 가지고 있다.

선진을 예측 오차의 존재에 따라 선단부에서 과장력이 발생할 수 있음을 조업데이터로 입증할 수 있다. 그림 4는 하나의 코일에 대해 마무리 압연기 입측에서 소재 폭 편차와 마무리 압연기 출측에서의 소재 폭 편차를 보인 것이다. 이 코일은 고객의 요구하는 폭보다 8mm 크게 폭 마진을 줘서 작업된 제품이며, 따라서 목표 폭 편차가 8mm이다. 샘플링 번호 71번 이전을 소재의 선단부라 할 수 있는데, 이 구간을 살펴보면 압연기 입측에서의 소재 폭 편차는 후단부에 비해 오히려 크지만, 압연기 출측에서의 소재 폭 편차는 후단부에 비해 상대적으로 작다. 소재가 마무리 압연기로 들어가서 압연되어 나옴에도 불구하고 폭 편차의 경향이 다른 이유는 전후 스탠드의 시간당 통과하는 소재량이 일치하도록 초기 압연속도 설정이 이루어지지 않아 소재 선단부에 과장력이 발생하여 폭이 감소했기 때문이다. 소재 폭 편차가 0으로 유지하다가 크게 변동하는 시점이 소재가 폭 측정기들을 통과하기 시작하는 부분이고 그 이후 폭 변동을 보면 과장력 발생으로 인한 큰 폭 감소를 보이고 있다( Sampling Number=20)에 따라 서서히 목표 폭 편차

인 8mm로 접근해감을 알 수 있다. 즉 루퍼가 소재의 선단부에 대해서는 선진율 오차에 따른 공정 문제들을 해결하지 못한다는 사실이 조업데이터를 통해서도 입증되는 것이다.

나아가 언급한다면 특히 선진율 예측 오차가 커서 초기 압연속도 설정값이 알맞은 값에서 많이 벗어나 있을 경우, 루퍼가 소재 선단부에서 장력을 신속히 조절하여 압연 작업을 안정된 영역에 진입하게 하는 것이 매우 어렵다. 즉 루퍼는 다소의 불확실성을 해결해주는 것으로서 그 기능의 한계가 있다.

결국 마무리 압연이 시작되기 전 압연기 초기설정에 있어서 중요한 문제는 초기 압연속도(선진율)의 예측정밀도를 향상시켜 주로 소재의 선단부에서 발생할 수 있는 과장력 및 부족장력에 따른 제품 품질저하, 안전을 위해 과잉 마진을 설정하는 문제 및 공정문제 발생 등을 예방하는 것이다.

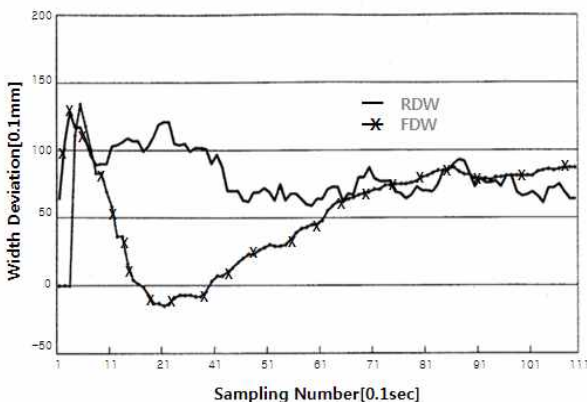


그림 4. 입측에서의 소재 폭 편차(RDW)와 출측에서의 소재 폭 편차(FDW)

Fig. 4. Strip Width Deviation(RDW) in input side and Strip Width Deviation(FDW) in output side

마무리 압연기의 작동 과정을 자세히 살펴보면, 선진율 계산의 불확실성으로 인해, 마무리 압연이 시작되기 전에 주어진 소재와 작업조건에 알맞지 않은 압연속도가 설정되어 있었다고 할지라도, 마무리 압연이 진행되면서 루퍼의 주기적인 보정 및 운전자의 간헐적 보정에 따라 소재의 선단부 이외의 부분에서는 알맞은 압연속도로 운전된다. 따라서 다음에 유사한 제품에

대한 마무리 압연의 초기 압연속도 설정값을 계산할 때는, 위와 같이 압연작업 중에 루퍼와 운전자가 보정했던 압연속도 정보를 이용하여 수식모델에 의해 계산된 압연속도에 미리 보정을 하여 압연속도를 설정하면 소재의 선단부에서 발생할 수 있는 문제들의 절대적 크기를 낮추거나 발생을 예방하는 것이 가능할 것이다.

#### 4. 초기 압연속도의 보정 방법

셋(Set)이란 유사한 압연조건을 가지며 계속하여 압연되는 소재들의 모임이다. 하나의 셋내에는 하나 내지 수십 개의 소재들이 있다. 본 논문은 하나의 셋내에 있는 소재들에 대한 압연조건이 큰 차이가 없는 경우에 대해 다룬다. 그 이유는 실제 작업에서도 하나의 셋은 그와 같은 소재들의 조합으로 구성될 수밖에 없기 때문이다.

마무리 압연기의 작동 과정을 살펴보면, 선진율이 압하율만의 함수 형태로부터 계산됨에 따른 불확실성으로 인해, 마무리 압연이 시작되기 전에 ‘주어진 소재 및 작업조건’에 정확하게 맞지 않은 압연속도가 설정되어 있었다고 할지라도, 마무리 압연이 진행되면서 ‘루퍼의 주기적인 보정’ 및 ‘운전자의 간헐적 보정’에 따라 소재의 선단부 이외의 부분에서는 알맞은 압연속도로 운전된다. 따라서 동일한 셋내에서 첫 번째 소재 이후의 소재들에 대한 마무리 압연의 초기 압연속도 설정값을 계산할 때는, 앞의 소재에 대한 압연작업 중에 취득된 조업데이터(예: 루퍼 각도, 루퍼 및 운전자의 압연속도 보정정보 등)를 이용하여 수식모델에 의해 계산된 압연속도에 미리 알맞은 보정을 한 후 보정된 압연속도를 목표값으로 설정하면, 소재의 선단부에서 발생할 수 있는 문제들(과장력, 부족장력)의 절대적 크기를 낮추거나 예방하는 것이 가능할 것임은 명백하다.

##### 4.1 초기 압연속도 보정량 계산에 적합한 ‘조업정보’의 선정 및 검증

조업정보의 선정 문제란 주어진 소재와 압연조건에

서 간략화된 수식모델로 계산된 압연속도에 보태지면 적합할 것으로 추정되는 보정량을 찾는 데 사용될 수 있는 가장 적합한 조업데이터를 선택하는 것이다. 위와 같은 목적에 부합되는 조업데이터를 찾기 위해서는 해당 압연공정의 조업과정에 대한 정확한 이해, 운전 중 취득된 다년간의 조업데이터에 대한 관찰과 분석, 조업에 참여했던 운전자들과의 상담 및 확인 등을 거쳐야만 한다. 그렇지 않을 경우에는 실제의 압연공정에 적용할 수가 없게 된다.

먼저 선단부에서 루퍼의 반응 정보를 이용하는 방법을 살펴본다. 소재의 선단부가 스탠드에 투입된 후 루퍼가 처음 작동을 시작하였을 때 측정된 루퍼 각도를 ‘선단부 루퍼 각도’라고 한다. 선단부 루퍼 각도는 간략화된 수식모델로 계산된 선진율의 불확실성에 대한 정보도 포함된 중요한 물리량이다. 따라서 선단부 루퍼 각도를 이용하여 알맞은 보정량을 구하는 방법을 고려하여 볼 수 있지만, 선단부 루퍼 각도와 압연속도 보정량과의 관계가 ‘계산할 수 있는 명확한 식의 형태’로 표현되지 않는 공정상의 특수성이 있다.

본 논문에서는 마무리 압연이 안정된 과정에서 루퍼와 운전자의 보정 정보를 이용하는 방법을 제안한다. 먼저 압연 속도의 최종 목표값이 계산되는 과정을 순차적으로 살펴 본다. 첫째,  $i$ 번째 스탠드의 압연속도는 간략화된 선진율 식을 이용하여 계산된다( $v_{R_i}$ ). 둘째, 압연속도는 항상 일정하게 유지되는 것이 아니라 생산성이나 압연 작업의 안정된 진행 등을 위해 가속 및 감속될 수 있으며, 그러한 가속 및 감속은  $v_{R_i}$ 에 압연속도 조정계수( $k_s$ )라고 부르는 비례상수를 곱하는 방법으로 반영되며,  $v_{R_{i.ref}}$ 를 가속 및 감속이 반영된  $i$ 번째 스탠드의 압연속도라고 하면,  $v_{R_{i.ref}}$ 는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$v_{R_{i.ref}} = k_s \cdot v_{R_i} \quad (4)$$

셋째, 루퍼와 운전자는 압연 작업중에 초기 압연속도의 불확실성을 보정하는 보정량을 각각 출력하는데, 그 출력값은  $v_{R_{i.ref}}$ 의 몇%라는 비율형태로 반영되기 때문에, 보정량을 대개 보정율이라고 부르며,  $Cr_i$ 를  $i$

번째 스탠드의 보정율(루퍼 및 운전자 보정 등이 합하여진 값)이라고 하고,  $v_{R_{i.ref}}$ 을 보정된  $i$ 번째 스탠드의 압연속도라고 하면,  $v_{R_{i.ref}}$ 는 식 (5)와 같이 구해진다.

$$v_{R_{i.ref}} = v_{R_{i.ref}} (1 + Cr_i) \quad (5)$$

그런데  $v_{R_{i.ref}}$ 는 이미 초기 압연속도의 계산을 통해 알고 있는 양이며,  $v_{R_{i.ref}}$ 는 결국 압연기 구동 모터로 출력되어야 하는 값이므로 측정되는 양이다. 따라서  $Cr_i$ 는 식 (5)를 이용하면, 다음과 같이 계산될 수 있는 압연공정상의 특별한 성질을 가지고 있다.

$$Cr_i = \frac{v_{R_{i.ref}}}{v_{R_{i.ref}}} - 1 \quad (6)$$

여기서  $Cr_i$ 는 가속 및 감속과는 무관하고 선진율과 관련된 압연조건에만 관련이 있는 물리량이며 매 제어주기마다 변동할 수 있는 양이다. 만약 선진율의 계산에서 불확실성이 전혀 없었다면 이상적으로는 0이 되어야 한다. 그러나 선진율의 계산식에서 살펴 본 바와 같이,  $Cr_i$ 는 0이 될 수 없으며, 조업데이터로서도 그와 같은 사실이 입증된다. 그렇다면  $Cr_i$ 는 ‘선진율의 불확실성에 대한 정보를 가지고 있음’이 분명하다.

따라서 소재의 선단부가 압연기를 통과한 다음에 소재 두께제어 및 루퍼제어 기능 등이 작동하여 선진율 예측 오차에 따른 문제를 해결하고 있는 과정에서 알맞은 구간을 정한 후 그 구간내의 각  $Cr_i$  값들을 평균한 값을 ‘보정과정의 평균 보정율’이라고 약속하기로 한다. 본 논문에서는 초기 압연속도의 알맞은 보정량 계산에 적합한 조업정보로서 ‘보정과정의 평균 보정율’을 제안한다.

본 논문에서 제안된 ‘보정과정의 평균 보정율’이 하나의 셋내에서 다음에 작업할 소재의 초기 압연속도에 대한 보정량을 계산하는데 사용될 수 있는 성질을 가지고 있는 물리량인 지를 검증하기 위하여, 한 롤단위(두께: 1.4~12mm, 폭: 900~1,400mm, 강종: 탄소강) 작업 시 획득한 78개 코일에 대한 조업데이터에서 ‘선단부 루퍼 각도(계측값)’와 ‘보정과정의 평균 보정

율(조업데이터를 이용하여 계산한 값)’의 관계를 확인하였다.

그림 5는 78개 코일에 대해 4번 루퍼의 선단부 루퍼 각도와 마무리 압연기 4번 스탠드에 대한 압연이 안정된 상태에서의 ‘보정과정의 평균 보정율’의 관계를 보여준다. 그림 5를 살펴 보면, 선단부 루퍼 각도와 보정과정의 평균 보정율은 전체적으로 볼 때 반비례 관계를 가짐을 알 수 있다.

위와 같은 특별한 관계를 갖게 된 이유는 선단부 루퍼 각도가 목표값(18° 내지 20°)보다 크면 루퍼 이전의 스탠드에서 들어오는 소재량이 적정량보다 상대적으로 많은 것이므로 선단 스탠드의 압연속도를 낮추고 선단부 루퍼 각도가 목표값보다 작으면 반대로 압연속도를 높였기 때문이다. 즉 보정과정의 평균 보정율이 선단부 루퍼 각도와 위와 같은 명확한 물리적 관계를 가지고 있음이 입증되므로, 결국 보정과정의 평균 보정율이 하나의 셋내에서 다음에 작업할 소재의 초기 압연속도에 대한 보정량을 계산하는데 필요한 적절한 물리량으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

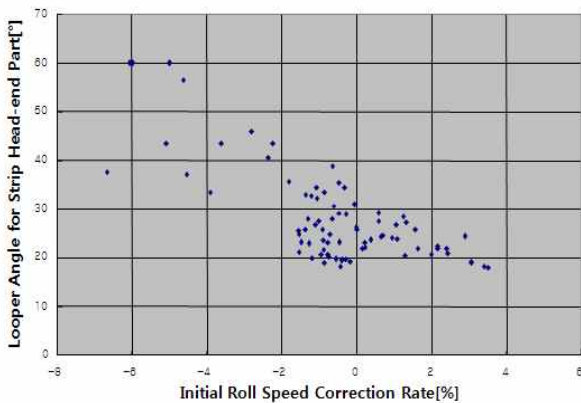


그림 5. 보정과정의 평균 보정율과 선단부 루퍼 각도의 관계

Fig. 5. The Relation between Total Correction Rate in Correcting Process and Looper Angle

#### 4.2 초기 압연속도의 보정 방법 및 검증

초기 압연속도의 보정 방법이란 앞에서 약속된 ‘보정과정의 평균 보정율’을 이용하여 하나의 셋내에서

다음 소재의 초기 압연속도에 더해지면 적합할 것으로 추정되는 보정량을 계산하는 방법을 의미한다.

식 (5)를 살펴보면 압연속도에 대한 보정량은 결국 보정율의 형태로 반영되므로, 현재 작업한 소재에 대한 조업데이터로부터 ‘보정과정의 평균 보정율’을 구하면, 다음 소재에 대한 초기 압연속도의 식은 식 (5)의 형태로 보정되는 것이 가장 적절하다.

그런데  $Cr_{i,Act}$ 을 현재 작업된 소재에 대한 조업데이터로부터 구한 ‘보정과정의 평균 보정율’이라 하면, 다음 소재에  $Cr_{i,Act}$ 를 식 (5)의 형태 내에 그대로 반영하는 것은 적절하지 못하다. 그 이유는 다음 소재 역시 같은 셋내에 있어 소재특성이나 압연조건은 유사하지만, 실제 조업 결과를 보면, 진후 소재들에 대한  $Cr_{i,Act}$ 들은 다소 차이를 가지고 있기 때문이다. 그림 6은 같은 셋내의 소재들에 대해 동일한 소재특성 및 압연조건하에서 연속하여 압연된 18개 소재들에 대한 압연속도 보정율들을 계산하여 보인 것이다. 그림 6을 살펴보면, 각 소재들에 대한  $Cr_{i,Act}$ 가 변동함을 알 수 있다.

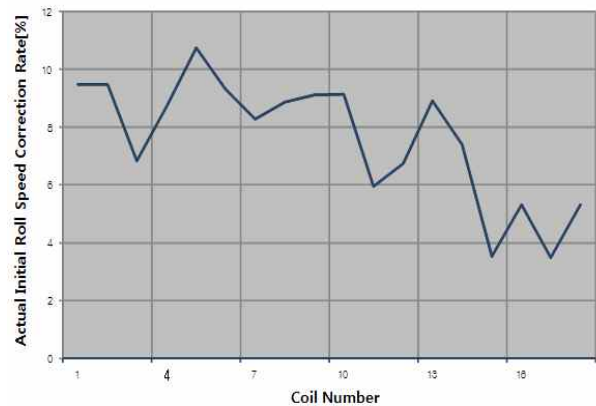


그림 6. 한 셋내 소재의 실제 압연속도 보정율들

Fig. 6. Actual Roll Speed Correction Rates for Strips in a Set

따라서 위와 같은 차이를 보정량의 계산 과정에 알맞게 반영할 수 있는 방법이 필요하다. 먼저 소재 및 조업조건이 유사함에도 불구하고 위와 같은 차이가 발생하는데 관련된 물리량들을 결정하여야 하는데, 이것은 결국 선진율에 영향을 주는 물리량들을 의미하

며, 선진율에 크게 영향을 주는 물리량들은 압하율, 마찰계수 및 소재두께 등임이 널리 알려져 있다[3-5]. 또한 마찰계수는 주로 압연속도, 롤 표면 상태 및 윤활유 등과 같은 작업물 조업조건들에 의해 주로 영향을 받는다[6-7]. 초기 설정 계산에서는 선진율을 가장 큰 영향을 주는 압하율만의 함수로 계산하였으므로, 그 외 선진율과 상관관계가 높은 인자들을 찾기 위해, 마찰계수 및 소재 두께와 관련이 있으면서도 측정이 가능한 물리량들로 압연속도, 선압연력 등을 선정하였고, 마무리 압연기 4번 스탠드에서 측정된 선진율과 위 두 가지 물리량들과의 상관관계를 피어슨 상관계수( $r_{xy}$ )인 식 (6)을 이용하여 분석하였다.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

여기서  $n$ 은 두 변수  $x$ 와  $y$ 의 데이터 개수,  $i$ 는 데이터 번호,  $\bar{x}$  및  $\bar{y}$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 의 평균값들이다.  $r_{xy}$ 는 +1~-1 사이의 값을 가지며, +1과 -1인 경우는 각각 두 변수가 완전한 양의 상관관계 및 음의 상관관계를 가짐을 의미하고 0인 경우는 상관관계가 전혀 없음을 의미한다.

위 상관관계를 계산하여 본 결과, ‘선압연력의 제공’과 ‘수식모델에서 계산된 압연속도’가 선진율과 각각 -0.83, -0.85의 상관계수를 갖는 영향이 큰 인자들로 분석되었다. 여기서 선압연력에 대해 제곱을 사용한 이유는 선압연력 변동이 선진율에 미치는 영향을 좀 더 민감하게 나타내도록 하기 위함이다. 그림 7과 그림 8은 위 분석결과를 보인 것이며, 선압연력의 제공과 압연속도는 모두 선진율과 강한 음의 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

$Cr_{i,Lrn}$ 을 ‘다음 소재에 반영할 평균 보정율’이라고 약속하면, 대개 산업공정에서 널리 사용되는 실험식은 1차식 형태이므로, 본 논문에서는  $Cr_{i,Lrn}$ 를 구하기 위해  $Cr_{i,Act}$ , 선압연력의 제공, 그리고 수식모델에서 계산된 압연속도를 입력변수들로 하는 식 (7)을 제안한다.  $Cr_{i,Act}$ 가  $n$ 번째 코일에 대한 것이라면,  $Cr_{i,Lrn}$ 가

( $n+1$ )번째 코일에 대한  $Cr_{i,Act}$ 와 일치하면 완벽하게 보정되는 것이므로, 출력변수  $Cr_{i,Lrn}$ 를 다음 코일에 대한  $Cr_{i,Act}$ 로 정한다.

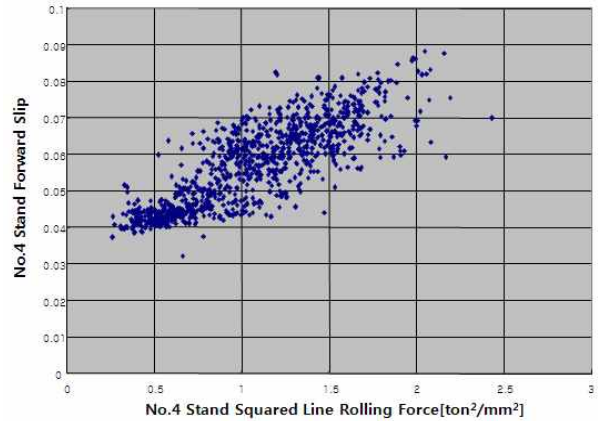


그림 7. 마무리 압연기 4번 스탠드의 선진율과 선압연력 제공

Fig. 7. Forward Slip and Squared Line Rolling Force of No. 4 Stand in Finishing Mill

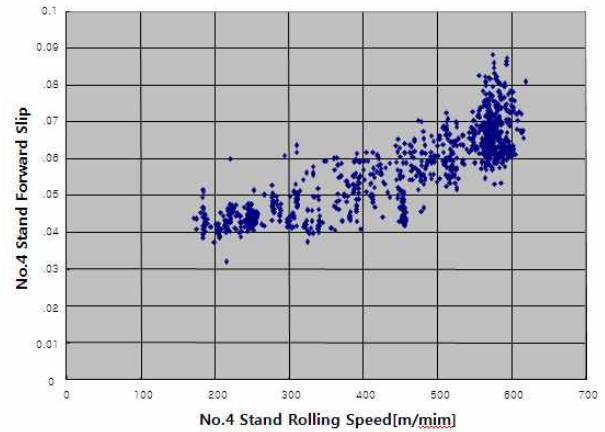


그림 8. 마무리 압연기 4번 스탠드의 선진율과 압연속도

Fig. 8. Forward Slip and Rolling Speed of No. 4 Stand in Finishing Mill

$$Cr_{i,Lrn} = b_1 + b_2 \cdot Cr_{i,Act} + b_3 \cdot rfw_i^2 + b_4 \cdot v_{R_i} \quad (7)$$

여기서  $rfw_i$ 는  $i$ 번 스탠드 선압연력이고,  $b_i$ ,  $i=1,2,3,4$ ,는 상수들이다.

마무리 압연공정에서 발생 가능한 모든 조업조건들이 최대한 포함되도록 약 2만개의 코일에 대한 조업



실적 데이터를 수집하여, 소재 선단부 압연 시 루퍼 각도 범위에 따라 세 개의 그룹(15°미만, 15°이상~25°이하 및 25°초과인 경우들)으로 나누어 각 그룹별로 회귀분석을 통해  $b_i, i=1,2,3,4$ , 를 결정하였다. 위와 같이 세 개의 그룹으로 나눈 이유는 소재 장력은 루퍼 각도와 밀접한 관계를 갖고 있고, 대개 루퍼 각도가 15°미만인 경우를 ‘과다 장력’, 15°이상~25°이하인 경우를 ‘정상’ 및 25°초과인 경우를 ‘과다 루프(또는 과소 장력)’가 발생한 것으로 구분하고 있는 점을 고려한 것이다.

$v_{R_{i,Lrn}}$  을 다음 소재에 대한 초기 압연속도라 약속하면, 위와 같이  $Cr_{i,Lrn}$  이 확정될 경우,  $v_{R_{i,Lrn}}$  는 간략화된 선진율만으로 계산된 초기 압연속도( $v_{R_{i,ref}}$ )에 대해 다음과 같은 형태로 보정되어 계산된다.

$$v_{R_{i,Lrn}} = v_{R_{i,ref}} (1 + Cr_{i,Lrn}) \tag{8}$$

본 논문에서 제안된  $Cr_{i,Lrn}$  의 계산 방법이 실제 활용될 수 있는 값을 출력하는지를 검증하기 위해, 연속하여 압연된 300개 소재에 대해 ‘제안된 식으로 계산한 평균 보정율( $Cr_{i,Lrn}$ )’과 ‘실제 해당 소재에 대한 조업데이터를 이용하여 계산된 보정과정의 평균 보정율( $Cr_{i,Act}$ )’을 비교하였다. 이와 같은 확인 과정은 미리 예측된 압연속도 보정율이 압연을 통해 얻은 실제 압연속도 보정율을 어느 정도 예측할 수 있는지를 검증하는 것이다.

그림 9는 연속하여 압연된 300개의 소재들(두께: 1.3~18mm, 폭: 850~1,700mm, 강종: 탄소강)에 대해 압연 전에 식 (7)에 의해 예측된 압연속도 평균 보정율( $Cr_{i,Lrn}$ )과 압연중에 얻은 실제 보정과정의 평균 보정율( $Cr_{i,Act}$ )을 보여준다. 그림 9를 살펴보면 본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 예측된 값( $Cr_{i,Lrn}$ )과 실제 압연 작업을 통해 구해진 값( $Cr_{i,Act}$ )은 서로 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 한 셋내에 있는 다음 소재를 압연하기 전에, 수식모델에 의해 계산된 압연속도를 본 논문에서 제안된 보정과정의 평균 보정율을 이용하여 보정하면, 선단부에서 발생할 수 있는 과장력 및 부족장력 등의 문제를 억제할 수 있음이 명백하다.

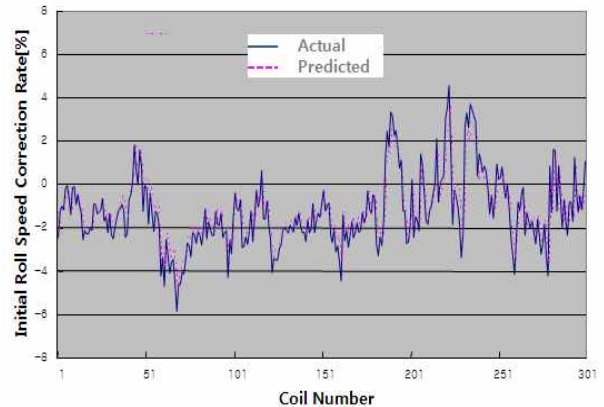


그림 9. 압연 실적 보정율 및 예측된 보정율들  
Fig. 9. Actual and Predicted Correction Rate

### 5. 조업에의 적용 및 결과

본 논문에서 제안된 평균 보정율을 이용하면 선단부에서 발생하는 선진율 예측 오차에 따른 문제를 억제할 수 있음이 조업데이터를 이용하여 입증되었지만, 제안된 방법의 실용성을 더욱 확실히 보이기 위해, 위와 같은 보정 방법을 열연공장내의 전산시스템에 프로그램으로 구현하여 시험하였다.

만약 초기 압연속도가 이론식으로 계산한 값보다 현실에 좀 더 알맞게 설정된다면, 소재 선단부에 과다 장력이 걸리지 않게 될 것이므로, 결과적으로 과다 장력에 의해 발생하는 소재 선단부의 폭 빠짐이 생기지 않아 소재 선단부에서 폭 변동이 감소하는 효과가 발생할 것이다.

위와 같은 효과가 실제로 발생하는지와 발생한다면 어느 정도인지를 확인하여 보기 위해, 유사한 특성을 갖는 6개의 강종들 중 1번 강종에만 본 논문에서 제안된 보정 방법을 적용하여 압연을 실시한 후, 강종별로 작업된 모든 소재들의 선단부 최대 폭 변동 실적들을 수집(대략 맨앞부터 20m 정도까지만 측정)하여 강종별 평균값을 비교하였다.

표 1은 압연 결과 측정된 조업데이터를 보인 것이다. 표1에서 볼 수 있듯이, 본 논문에서 개발된 보정 방법을 적용한 1번 강종의 소재 선단부 폭 변동 평균값이 위와 같은 보정 방법을 사용하지 않은 경우들에 비해 최소 2mm이상 작음(최소 28%에서 최대 36%개선)을

알 수 있다.

위와 같은 사실로부터, 본 논문에서 제안된 보정 방법은 초기 압연속도 설정 정밀도를 높여 결과적으로 압연 스탠드들 사이의 소재 흐름 상태를 좋게 하고 과다한 장력에 의해 발생하는 소재 선단부 폭 빠짐을 개선시킬 수 있다.

표 1. 조업데이터(소재 선단부 폭 변동)  
Table 1. Process data(Width Variation of Strip Head-end Part)

강종 번호	소재 선단부 최대 폭 변동의 평균(mm)	개발된 보정방법의 적용여부
1	5.60	O
2	8.40	X
3	7.86	X
4	8.58	X
5	7.78	X
6	8.78	X

## 6. 결 론

본 논문에서는 마무리 압연기에서 초기 압연속도의 설정 정도를 향상시키기 위한 보정 방법을 제안하였다. 먼저 초기 압연속도 보정량 계산에 적합한 조업정보를 루퍼에 의한 보정과정의 평균 보정율로 선정 후 그에 대한 타당성을 입증하였고, 다음 소재에 반영할 평균 보정율을 계산할 수 있는 실험식을 제안하여 조업데이터로 튜닝한 후, 제안된 식이 합리적인 보정율을 출력함을 입증하였다. 나아가 본 논문에서 제안된 방법의 실용성을 더욱 확실히 보이기 위해, 제안된 보정 방법을 열연공장내의 전산시스템에 프로그램으로 구현하여 시험하여 본 결과, 과다한 장력에 의해 발생하는 선단부 폭 빠짐이 감소하였다.

## References

- [1] Morio Saitoh et al., "Development of high-accuracy control system for hot strip mill", NKK Technical review, No.61, 1991, pp. 10-17.
- [2] Minoru Tanaka et al., "Decoupled automatic gauge control for universal rolling mills", NIPPON STEEL Technical report, No.27, Oct., 1985, pp. 51-62.
- [3] B. Hum, H. W. Colquboun, J. G. Lenard, "Measurements of friction during hot rolling of aluminum strips", Journal of Materials Processing Technology, 60, 1996, pp. 331-338.
- [4] Jarl, M., Friction and forward slip in hot rolling, Scandinavian Journal of Metallurgy, 17, 1988, pp. 2-7.
- [5] Kwak, W.J., Y.H. Kim, J.H. Lee and S.M. Hwang., A Precision On-line Model for the prediction of Roll Force and Roll Power in Hot-Strip Rolling. Metallurgical and Materials Transactions, 33A, 2002, pp.3255-3272.
- [6] Liu, Y.J., A.K. Tieu, D.D. Wang and W.Y.D. Yuen., Friction measurement in cold rolling, Journal of Materials processing Technology, 111, 2001, pp. 142-145.
- [7] Piispanen, V., Forward Slip in the Hot Rolling of Sheet. Scandinavian Journal of Metallurgy, 7, 1978, pp. 88-90.
- [8] Moon, Y. H., Jo, I. S. and Van Tyne, C. J., "Control Scheme Using Forward Slip for a Multi-stand Hot Strip Rolling Mill," KSME International Journal, Vol. 18, No. 6, pp. 972-978, 2004.

## ◆ 저자소개 ◆



### 홍성철(洪盛喆)

1966년 4월 4일생. 1989년 2월 금오공과대학교 기계공학과 졸업. 1991년 2월 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 현재 영남대학교 대학원 박사과정.



### 이해영(李海榮)

1963년 7월 5일생. 1984년 2월 부산대학교 전기기계공학과 졸업. 1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 교수.