

열간압연 공정 해석용 시뮬레이터의 개발과 응용(II)

이원호* · 이상룡**

(1998년 9월 8일 접수)

Development of Hot Rolling Process Analysis Simulator and Its Application (II)

W. H. Lee and S. R. Lee

Abstract

The endless hot rolling has been focused as an innovative process technology for increasing the productivity drastically and reducing the imperfection of quality in hot rolled steel strip. To realize it in actual mill, a lots of new facilities such as bar coiler, movable LASER welder and high speed strip shear should be equipped. And also it is necessary to develop the control technique for changing the roll gap and rolling speed during rolling, which is named as Flying Gap and Speed Change control technology. To prevent a strip rupture caused by excessive tension, it is very important to minimize fluctuations in strip thickness and in tension during FGSC control. In this paper, the mathematical model for FGSC control algorithm was suggested and dynamic simulation is performed to ascertain the effect of suggested control method on fluctuations in strip thickness and tension. For endless hot rolling simulation, a lots of FGSC control situations, for instance

- strip thickness change from strip to strip
 - strip width change from strip to strip
 - carbon content change from strip to strip
- are considered.

Key Words : Endless Hot Rolling, Simulator, Flying Gap and Speed Change, Automatic Gauge Control, Looper, Rolling Force

1. 서 론

전편의 논문⁽¹⁾에서는 열간압연 공정 해석용 시뮬레이터의 개발 경위와 구조 그리고 시뮬레이터를 사용하여 계산된 여러 가지 결과를 통해 열간압연의 물리적 특성과 모델

링된 압연설비의 제어기들에 대한 동특성을 논의하였다. 본 논문에서는 개발된 시뮬레이터의 응용 예로써, "열간 연속 압연에 필요한 주행간 롤갭 및 압연속도 변경 제어 기술 개발"에 대해 기술하고자 한다.

열간압연 공정에서 연속압연(endless hot rolling)이라

* POSCO 기술연구소
** 경북대학교 기계공학부

함은, 한 코일(coil)의 압연이 종료되면 다음 코일을 압연하던 기존의 방식과는 달리, 현재 압연중인 판의 후단부와 다음에 압연하게될 압연판의 선단부를 용접시켜 연속적으로 압연을 하는 방식이다. 연속압연을 실시하게 되면 쉽 없이 압연을 할 수 있으므로 생산성을 대폭 향상시킬 수 있고, 기존의 압연방식에서 고질적으로 발생되던 압연판의 선, 후단부에서의 품질불량을 크게 줄일 수 있다. 또한, 압연유의 사용량을 높여서 작업롤(work roll)과 압연판 사이의 마찰을 줄여주게 되면 고압하 압연이 가능해지므로, 기존에는 냉간압연으로만 생산이 가능하던 두께 1.0 mm 이하의 극박판 까지도 생산할 수 있게 되어 경제적인 효과가 대단히 크다.

그러나 이와 같은 연속압연의 여러 가지 장점에도 불구하고 이를 실현시키기 위해서는 많은 요소기술의 개발이 뒤따라야 한다. 특히, 열간 사상압연 공정에서는 "주행간 롤갭(roll gap) 및 압연속도 변경 제어"²⁻⁴라고 하는 새로운 제어기능이 개발되어야 한다. 이것은 연속압연을 하기 위해 두 개의 판을 용접했을 때 용접부를 전후한 압연판의 조건, 즉 제품의 두께나 판폭 혹은 강종 등이 달라지게 되면 각 압연판에 해당하는 압연설비의 운전조건인 롤갭과 압연속도가 달라지게 될 것이다. 따라서 앞서 압연중인 코일(이하 선행 코일로 표기)에 해당하는 롤갭과 압연속도로 운전되던 설비를 용접부가 통과되는 순간 뒤따르는 코일(이하 후행 코일로 표기)에 맞는 운전조건으로 원활하게 변경시켜주어야 한다. 그렇지 않으면 압연기의 제어가 정상상태로부터 균형이 깨어져 용접부 부근의 판 두께는 물론 판의 형상도 대단히 나빠지게 된다. 또한, 압연판에 걸린 장력의 변화가 커져서 심한 경우 압연중에 판이 절단되는 사고가 발생하게 되어 막대한 경제적 손실을 초래하게 될 것이다.

용접부를 전후하여 압연작업이 순조롭게 행해질 수 있도록 하기 위해서는 다음과 같은 새로운 제어기술의 개발을 필요로 한다.

- (1) 압연중에 장력의 변화를 최소화시킬 수 있는 설정치 변경 기술
- (2) 적절한 롤갭 및 압연속도 변경시간 및 제어 알고리즘
- (3) 판두께 편차의 발생을 최소화하기 위한 두께제어 방법 및 제어이득의 최적화

본 연구에서는 상기의 요소기술을 개발하기 위해, 전보에서 소개한 열간압연 공정해석 시뮬레이터를 사용하였다. 수학적 모델링을 통해 만들어진 주행간 롤갭 및 압연속도 제어알고리즘을 시뮬레이터에 새롭게 반영하였고, 여러 가지 연속압연 상황을 가상하여 시뮬레이션 해 보았다. 그리고 연속압연을 실시하면서도 열간압연의 궁극적인 목적인 정확한 두께의 제품을 생산할 수 있도록 기존의 자동 두께제어 장치(AGC)의 제어이득을 최적화 하였다. 본 논문에서는 주행간 설정치 변경제어 알고리즘 개발에 대한 자세한 내용과 이들을 시뮬레이터에 구현하고 얻어진 연속압연 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다.

2. 이론적 고찰

2.1 열간 연속압연의 장점

전편에서 기술한 바와 같이 열간압연은 6 개의 압연기로 구성된 사상압연기에서의 고속압연을 통해 목표로 하는 기계적 성질 및 판두께의 제품을 생산해 내고 있다. 그러나 한 코일씩 차례로 압연을 하는 기존의 압연방식에서는 필연적으로 통판(threading rolling)과 판빠짐이라고 하는 무장력 상태의 압연과정이 존재하므로 Fig.1에 표시한 것

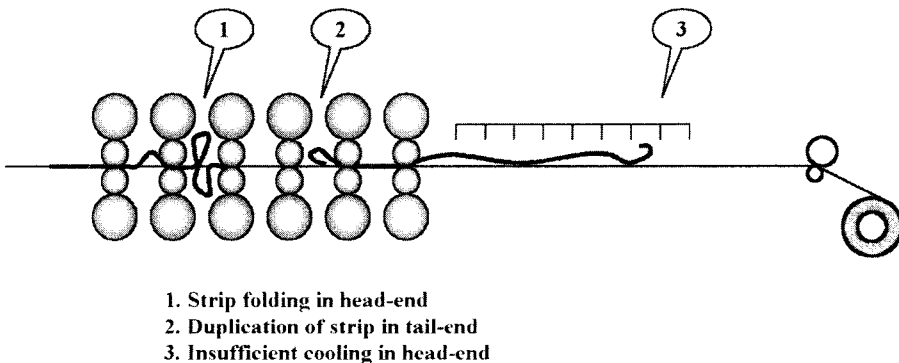


Fig. 1 Examples of trouble occurred in batch hot rolling process

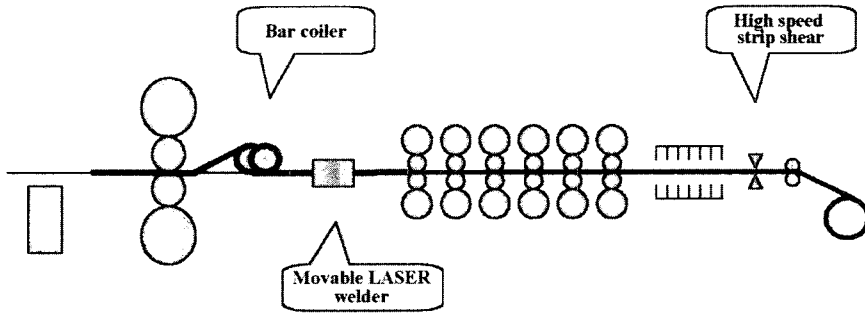


Fig. 2 New facilities required for endless hot rolling process

과 같은 여러 가지 문제점⁽⁵⁻⁶⁾이 발생하게 된다. 그림에 나타낸 문제점을 보다 자세히 설명하면 다음과 같다.

(1) 판의 선단부 및 후단부에 장력이 작용하지 않는 상태로 압연이 되므로 해당부위에 판두께 편차가 커지고, 형상불량이 발생하여 압연판의 품질저하는 물론 실수율이 저하된다.

(2) 얇은 압연판을 생산할 경우, 선단부에서는 치입불량에 의한 판꼬임 그리고 후단부에서는 판접침 등이 발생할 가능성이 높고 이들로 인하여 생산성이 악화되거나 설비사고의 우려가 높다.

(3) 얇은 압연판의 경우, 선단부가 권취기(coiler)로 이동하는 도중에 들뜸 현상이 발생하므로 냉각이 충분하지 못하여 기계적 성질을 확보할 수 없다.

그러나 연속압연을 하게 되면 압연판에는 항상 일정한 장력이 걸린 상태로 압연되게 되므로 상기의 여러 가지 문제점을 해결할 수 있게 될 것이다. 열간압연에서의 연속압연 기술은 1990년 초 일본의 Kawasaki 제철소⁽⁷⁻⁸⁾에서 처음 제안되었고 이 기술을 Chiba 제3열연공장에 적용하여 1997년도부터 본격적인 연속압연을 시작하였다. 또한, 신일본 제철, 일본 강관 등을 비롯한 일본의 여러 제철소에서 활발히 기술을 개발하고 있는 중이다. 그러나 국내에서는 아직까지 관련 요소기술의 개발에 머물고 있는 실정이다. 연속압연을 실시하기 위해서는 Fig.2에 나타낸 바와 같이 기존의 열간압연 설비의에도 Bar 권취기, 이동식 Laser 용접기 그리고 고속 압연판 절단기 등 새로운 설비의 도입과 사상압연에서의 주행간 롤갭 및 압연속도 변경제어 기술의 개발을 필요로 한다.

2.2 주행간 롤갭 및 압연속도 변경의 필요성

열간 사상압연기는 SCC(Supervisory Computer Control)라고 하는 공정제어 컴퓨터에 의해 자동제어되

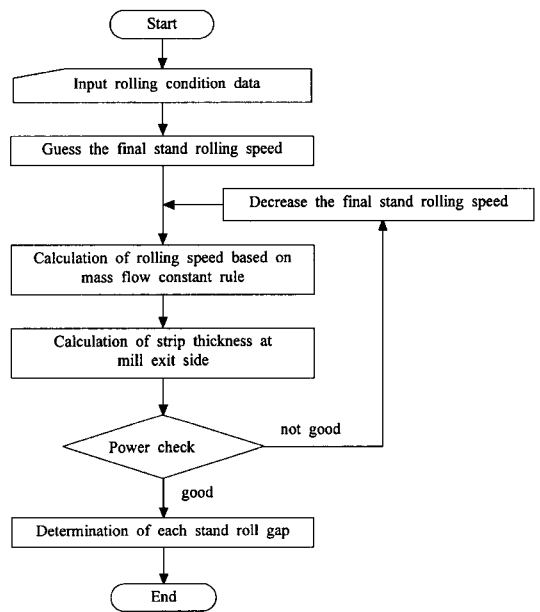


Fig. 3 Flow chart for finishing setup calculation

고 있으며 SCC 내의 핵심 소프트웨어인 압연기 초기 설정치(initial setup value) 계산 프로그램은 FSU(Finishing mill Setup Model)⁽⁹⁾라고 한다. 각 압연기에서 필요로 하는 가장 중요한 초기 설정치는 롤갭과 압연속도이며, 이들은 Fig.3의 순서도에 나타낸 바와 같이 기본적인 압연조건의 입력으로부터 시작하여 변형저항 및 선진율의 계산 그리고 압연하중의 계산 등의 과정을 통해 계산되어진다.

기존의 방식대로 한 코일씩 일정주기로 압연하는 경우에는 Fig.4의 (a)에서와 같이 압연판의 선단부가 1번 압연기의 입구측에 설치된 온도계에 의해 온도가 측정되나서 SCC에서 설정치를 계산하고, 이를 하위의 공정제어

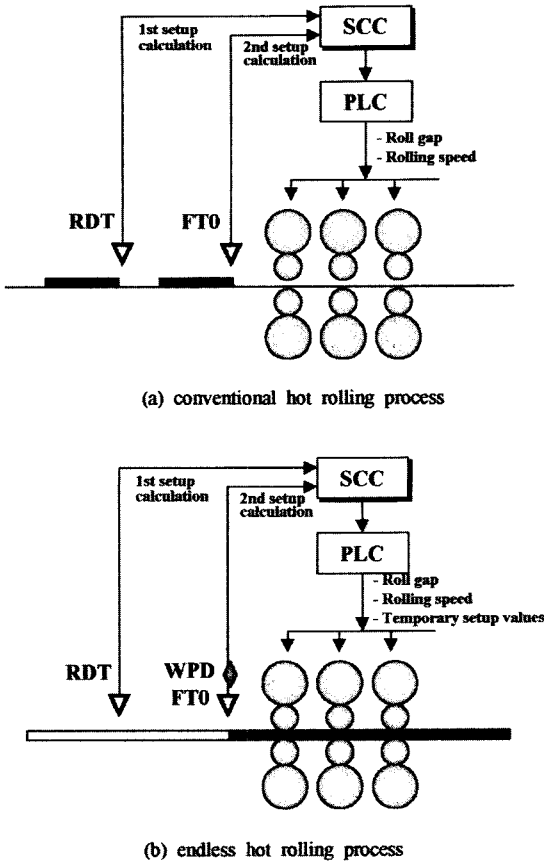


Fig. 4 Schematic diagrams for the hot rolling mill setup control system

컴퓨터인 PLC(Programmable Logic Controller)를 통하여 롤갭과 주동력 모터의 압연속도를 설정하여 압연을 시작하게 된다.

그러나 연속압연을 하게 되면 선행 코일의 압연이 완료되는 동시에 후행 코일의 압연이 시작된다. 이때 용접한 두 압연판의 두께나 판폭 혹은 강종 등이 서로 다르면 각각에 해당하는 압연기의 롤갭이나 압연속도의 설정치가 달라지게 된다. 따라서 이미 선행 코일의 설정치에 의해 운전중이던 압연기는 후행 코일의 진입과 동시에 후행 코일의 압연조건에 맞는 설정치로 변경해 주지 않으면 안될 것이다.

그런데 선행 코일이 압연되고 있는 상태에서 후행 코일의 압연이 시작했다고 해서 모든 압연기의 설정치를 후행 코일의 값으로 갑작스럽게 변경하게 되면 압연기의 제어가 정상상태로부터 균형이 무너져 용접부 부근의 판두께는 물론 판의 평탄도(flatness)가 대단히 나빠지게 된

다. 또한 압연판에 걸린 장력의 크기도 변화가 심하게 되어 판파단 또는 판꼬임 등의 사고가 발생할 우려가 높다. 그러므로 용접부가 사상압연기를 통과하는 동안 압연작업이 순조롭게 행해질 수 있도록 하기 위해서는 압연상태의 균형을 크게 깨뜨리지 않는 범위에서 설정치가 자연스럽게 변경될 수 있도록 제어해 주는 기술을 필요로 하게 된다. 본 논문에서는 이 기술을 "주행간 롤갭 및 압연속도 변경 제어기술"이라 하고 이하 FGSC(Flying Gap and Speed Change)로 표기한다.

3. FGSC 제어 알고리즘의 개발

3.1 연속압연시의 압연과정 모델링

연속압연에서는 Fig.4의 (b)에서와 같이 WPD(Welding Point Detector)를 이용하여 후행 코일의 위치를 검출한 다음, 후행 코일의 압연에 필요한 설정치를 계산한다. 그런데, 연속압연을 위해서는 용접부 전후의 압연판에 대한 각각의 설정치 이외에도 과도상태, 즉 용접부가 1번과 6번 압연기 사이에 존재할 때의 압연에 대한 별도의 설정치가 필요하게 된다. 이것은 용접부가 마지막 압연기를 빠져나가기 전까지는 두 개의 코일이 동시에 압연기 사이에 존재하여 체적일정법칙(mass flow constant)이 깨어지게 되므로 이를 보정해 주기 위한 별도의 설정치이다. 이들 각각에 대한 설정치를 다음과 같이 표기한다.

- (1) Setup a : 선행 코일의 설정치
- (2) Setup b : 후행 코일의 설정치
- (3) Setup c : 용접부가 압연기 사이에 존재할 때의 과도 설정치

Fig.5는 압연조건이 다른 두 개의 코일이 연속적으로 압연되고 있으며, 용접점 x가 i 번째 압연기(이하 i 스탠

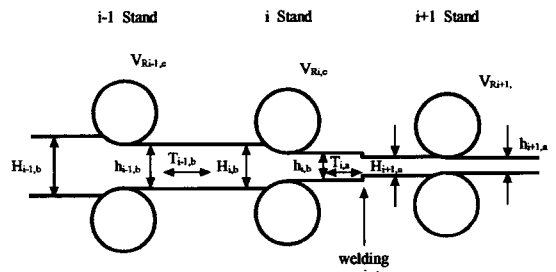


Fig. 5 Physical model for endless hot rolling process when the welding point is between i-th stand and (i+1)th stand

드로 표기)와 i+1 스탠드 사이에 있는 상태를 나타내는 그림이다. Fig.5를 이용하여 주행간 롤갭 및 압연속도 변경 제어를 하기 위한 상기 3)항의 과도 설정치 계산과정을 설명한다. 한편, Fig.5에 나타난 변수는 물론 앞으로 설명하게 될 변수를 표기하는 방법, 즉 첨자의 의미는 예를 들어, $h_{i,b}$ 에서 i는 스탠드번호, b는 설정치의 종류를 나타내는 것으로 한다.

3.2 과도상태의 롤갭 설정치

일단, 용접부 x가 1번 스탠드에 접근했을 때, 마지막 스탠드인 6번 스탠드의 압연속도를 Setup a로 부터 Setup b로 변경시킨다. 이때 나머지 스탠드들의 속도는 Setup a에서의 속도비율을 유지하기 위해 압연기 속도제어 시스템에 의해 자동적으로 변하게 된다. 한편, x부가 i 스탠드를 지날 때, i+1 스탠드를 포함한 하류 스탠드(downstream stand)에서는 계속해서 선행 코일을 압연하고 있으므로 롤갭은 Setup a에서의 값으로 유지해야 한다.

x부가 i 스탠드를 통과하는 순간, i 스탠드의 롤갭을 뒤에서 설명하게 될 과도 설정치로 변경시켜준다. 롤갭의 변화에 따라 i 스탠드 출측의 두께는 후행 코일의 $h_{i,b}$ 로 바뀌게 되므로 압연판내의 장력이 변경될 것이다. 그러나 용접부를 전후하여 설정치가 변경되더라도 안정된 압연상태를 유지하기 위해서는 압연판에 작용하는 총장력을 선행 코일의 값인 $T_{i,a}$ 로 일정하게 유지해야 한다. 총장력 $T_{i,a}$ 를 유지하기 위해서는 i 스탠드의 압연속도를 적절하게 변경시켜주어야 하며, 이때의 압연속도를 i 스탠드의 과도 압연속도, $V_{Ri,c}$ 라 하고 다음절에서 상세히 언급한다.

과도상태에서 압연판내에 작용하는 단위장력, 즉 롤갭 변경후 i 스탠드 출측의 판두께 $h_{i,b}$ 에 부합하는 전방 단위장력(forward unit tension) $t_{fi,c}$ 는 다음과 같이 될 것이다.

$$t_{fi,c} = \frac{T_{i,a}}{h_{i,b} \cdot B_{i,b}} \quad (1)$$

여기서, t_f : 단위장력 (N/mm²)

T : Total 장력 (N)

h : 압연기 출구측에서의 판두께 (mm)

B : 판폭 (mm)

윗식은 $T_{i,a} = t_{fi,c} \cdot h_{i,b} \cdot B_{i,b}$ 로 부터 구해진 식이다. 단위장력 $t_{fi,c}$ 는 과도상태에서의 압연하중에 영향을 미치게 되고, 롤갭은 압연하중의 크기에 의해 결정되므로 결국 과

도상태의 롤갭 설정치는 다음과 같이 계산될 것이다.

$$S_{i,c} = h_{i,b} - \frac{P_{i,c} = f(\dots t_{fi,c} \dots)}{M_i} \quad (2)$$

여기서, S : 롤갭 설정치 (mm)

P : 압연하중 (N)

M : 압연기의 강성 (N/mm)

윗식에서 $P_{i,c} = f(\dots t_{fi,c} \dots)$ 는 압연하중식을 나타내며, 압연하중을 계산함에 있어서 사용되는 단위장력은 $t_{fi,c}$ 임을 의미한다.

3.3 과도상태의 압연속도 설정치

압연판에 작용하는 장력의 변화는, i+1 스탠드로 들어가는 압연판의 속도 V_{ei+1} 와 i 스탠드에서 빠져나오는 압연판의 속도 V_{oi} 의 차이에 비례하므로 다음 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{E \cdot H_i \cdot B_i}{L} \cdot (V_{ei+1} - V_{oi}) \quad (3)$$

여기서, V_e, V_o : 압연기 입구 및 출구측에서의 압연판의 이송속도 (mm/sec)

E : Young 윌 (N/mm²)

H : 압연기 입구측에서의 판두께 (mm)

L : 압연기 사이의 거리 (mm)

이식에서 V_{ei+1} 는 용접부가 통과하기 전까지는 일정하게 유지되고 있으므로, 상기 식으로부터 앞에서 언급한 총장력을 일정하게 유지하기 위해서는 V_{oi} 를 일정하게 해주면 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 압연판의 이송속도와 롤의 속도 관계식으로부터 i 스탠드의 과도 압연속도 설정치 $V_{Ri,c}$ 는 다음 식과 같게 된다.

$$V_{Ri,c} = \frac{V_{oi,a}}{1 + f_{i,c}} \quad (4)$$

여기서, V_R : 압연속도 (mm/sec)

f : 선진율

윗 식에서 과도상태의 선진율 $f_{i,c}$ 를 계산할 때는 반드시 (1)식으로부터 구해진 $t_{fi,c}$ 를 사용해야 한다.

Table 1 Roll gap and rolling speed change strategies during the welding point goes through the whole stands

welding point position		Stand No.					
		1	2	3	4	5	6
Before	roll gap	S _{1,a}	S _{2,a}	S _{3,a}	S _{4,a}	S _{5,a}	S _{6,a}
	rolling speed	VR _{1,a}	VR _{2,a}	VR _{3,a}	VR _{4,a}	VR _{5,a}	VR _{6,a}
No.1 stand	roll gap	S _{1,c}	S _{2,a}	S _{3,a}	S _{4,a}	S _{5,a}	S _{6,a}
	rolling speed	VR _{1,c}	a ₂ · VR _{6,b}	a ₃ · VR _{6,b}	a ₄ · VR _{6,b}	a ₅ · VR _{6,b}	VR _{6,b}
No.2 stand	roll gap	S _{1,b}	S _{2,c}	S _{3,a}	S _{4,a}	S _{5,a}	S _{6,a}
	rolling speed	VR _{1,2}	VR _{2,c}	a ₃ · VR _{6,b}	a ₄ · VR _{6,b}	a ₅ · VR _{6,b}	VR _{6,b}
No.3 stand	roll gap	S _{1,b}	S _{2,b}	S _{3,c}	S _{4,a}	S _{5,a}	S _{6,a}
	rolling speed	VR _{1,3}	VR _{2,3}	VR _{3,c}	a ₄ · VR _{6,b}	a ₅ · VR _{6,b}	VR _{6,b}
No.4 stand	roll gap	S _{1,b}	S _{2,b}	S _{3,b}	S _{4,c}	S _{5,a}	S _{6,a}
	rolling speed	VR _{1,4}	VR _{2,4}	VR _{3,4}	VR _{4,c}	a ₅ · VR _{6,b}	VR _{6,b}
No.5 stand	roll gap	S _{1,b}	S _{2,b}	S _{3,b}	S _{4,b}	S _{5,c}	S _{6,a}
	rolling speed	VR _{1,5}	VR _{2,5}	VR _{3,5}	VR _{4,5}	VR _{5,c}	VR _{6,b}
No.6 stand	roll gap	S _{1,b}	S _{2,b}	S _{3,b}	S _{4,b}	S _{5,b}	S _{6,b}
	rolling speed	VR _{1,b}	VR _{2,b}	VR _{3,b}	VR _{4,b}	VR _{5,b}	VR _{6,b}

where $a_i = \frac{V_{Ri,a}}{V_{R6,a}}$

3.4 용접부가 통과한 상류 스탠드의 설정치 변경

용접부 x가 i 스탠드에 도달했을 때, (i-1) 스탠드를 포함한 상류(up-stream)측 스탠드의 롤갭 설정치는 모두 Setup b에 해당하는 값으로 바뀌어야 한다. 그러므로 (i-1) 스탠드의 롤갭은 S_{i-1,c}로 부터 S_{i-1,b}로 변경하면 된다. 그러나 압연속도의 경우 체적일정법칙을 만족해야 하므로 용접부 x가 매번 새로운 하류 스탠드를 통과할 때마다 변경되어야 한다. 용접부 x가 통과중인 스탠드를 i 라고 하고 이미 용접부가 통과한 스탠드를 j 로 표기하면, 용접점이 i 스탠드에 도달했을 때 변경해 주어야 할 j 스탠드의 압연속도 설정치는 다음과 같이 된다.

$$V_{Rj,i} = \frac{h_{i,b}}{h_{j,b}} \cdot \frac{V_{oi,a}}{1 + f_{i,c}} \quad j = 1 \sim (i-1) \quad (5)$$

윗 식은 체적일정조건인 다음 식으로부터 변형된 것이다.

$$\{V_{Rj,i} \cdot (1 + f_{i,c})\} \cdot h_{i,b} = V_{oi,a} \cdot h_{i,b} \quad (6)$$

그러나 용접부가 마지막 스탠드에 도달하는 경우에는 굳이 과도상태로의 변경없이 곧바로 후행 코일의 설정치로 변경해도 되므로 S_{6,c} 없이 S_{6,b}로 변경이 가능하다. 이때 상류 스탠드의 롤갭과 압연속도도 곧장 S_{j,b}와 V_{Rj,b}(여기서, j=1~5)로 변경한다.

이상의 결과로부터 용접부가 각 스탠드를 통과할 때 어떠한 롤갭과 압연속도 설정치로 변경되어야 하는 가를 Table 1에 요약하여 나타내었다.

4. 연속압연의 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 압연중 설정치 변경 시뮬레이션

연속압연을 위해서는 압연도중에 롤갭과 압연속도의 변경이 필수적이다. 따라서 이들 설정치의 변경이 압연현상에 미치는 영향을 알아보기 위해 정상적으로 압연중인 상태에서 두 가지의 설정치를 임의의 값으로 변경시켜 보았다. 또한, 압연현상에 미치는 설정치 변경만의 영향을 분석키 위해 자동두께제어기는 사용하지 않는 것으로 하였다. 시뮬레이션을 위한 압연조건은 실제의 열간압연공장에서 사용되는 조건으로서 Table 2와 같다.

4.1.1 롤갭 변경시의 압연특성

Fig.6은 롤갭 변경시의 압연특성을 나타내는 시뮬레이션 결과로써, (a), (b), (c), (d)는 각각 1번과 2번 스탠드의 롤갭 변화량, 압연기 출구 측에서의 판두께, 루퍼각도 그리고 장력의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과는 6 대 전체의 압연기에 대해 얻을 수 있으나 압연의 동특성(dynamic characteristics)을 파악하는 데는 두 개의 압연기에 대한 결과만으로도 충분하다.

그림 (a)는 의도한 대로 정상적으로 압연되던 중에 갑자기 롤갭이 개방되고 있음을 보여주는 결과이다. 롤갭의 개방에 따라 당연히 압연판의 두께는 그림 (b)와 같이 증가하게 되며 각 스탠드에서 행해진 롤갭 변경의 효과가 누적되어 후단 스탠드로 진행될수록 판두께 편차가 증가하게 된다. 한편, 그림 (d)의 1번 스탠드 전방장력의 변화를 살펴보면 롤갭의 개방과 동시에 장력이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 압연판의 두께가 증가함에 따라 압연후의 체적이 증가하므로 이를 줄여주기 위해 1번 스탠드의 압연속도를 감소시키므로 1번과 2번 스탠드 사이의 압연판에 걸리는 장력이 증가하는 것이다.

한편, 압연판에 걸리는 장력이 커지게 되면 루퍼 제어기는 루퍼의 각도를 낮추는 방향으로 제어를 하게 되는 데, 이와 같은 결과는 그림 (c)로부터 확인할 수 있다. 루퍼각도를 줄여줌에 따라 장력은 목표치로 수렴하게 되지만 루퍼각도가 목표치에서 벗어나게 되므로 이를 보완하기 위해 주동력 모터의 속도제어가 기동하게 된다. 2번 스탠드의 속도를 고정시킨 채로 1번 스탠드의 압연속도를 증가시키게 되면 두 스탠드 사이에 존재하는 압연판의 길이가

증가하여 루퍼를 내리누르는 힘이 약해지므로 루퍼의 각도가 상승하게 된다. 따라서 1번 스탠드의 압연속도를 적절히 조정하게 되면 루퍼의 각도를 목표치로 맞출 수 있게 되는 것이다. 결국 열간압연의 루퍼 제어기는 제어대상을 압연판의 장력과 루퍼각도로 하고, 제어수단을 루퍼 전동기의 전류와 압연속도로 하는 2입력 2출력의 다변수 제어 시스템인 것이다.

이상과 같은 시뮬레이션 결과로부터 압연도중에 롤갭을 임의로 변경하게 되면 루퍼의 각도 변화는 물론 압연판 내에 발생하는 장력의 변동이 심하여 압연판의 두께편차가 상당히 많이 발생됨을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 불균형 압연현상은 일정한 시간이 경과하면 압연기에 설치된 루퍼 제어기나 주동력 모터의 속도제어기 등에 의해 정상적인 압연상태로 되돌려 지게 된다.

4.1.2 압연속도 변경시의 압연특성

본 시뮬레이션은 일정 속도로 압연을 하던 중에 최종 스탠드인 6번 스탠드의 압연속도를 변경시켰을 때, 루퍼각도와 장력 등이 어떻게 변화되는 가를 알아보기 위한 시뮬레이션이다. 임의의 순간에 6번 스탠드의 압연속도를 변경하게 되면 자동적으로 1~5번 스탠드의 압연속도도 변하게 된다. 이것은 열간압연기의 주동력 모터에 부여된 SSRH(Stand Speed Rheostat) 라고 하는 속도제어기에 의해 처리되는 것으로서, 압연중에 항상 체적일정법칙이 유지되도록 해주는 자율제어기능이다. 갑작스럽게 각 스탠드의 압연속도가 변하게 되면 당연히 압연판의 장력이 변하게 될 것이고 이를 제어하기 위해 루퍼각도와 주

Table 2 Basic rolling conditions for endless hot rolling process simulation

Items	Stand No.						
	1	2	3	4	5	6	
Entry thickness (mm)	30.95	14.49	7.81	5.06	3.56	2.69	
Exit thickness (mm)	14.49	7.81	5.06	3.56	2.69	2.21	
Forward tension (N/mm ²)	0	4.1	5.3	6.7	7.8	9.5	
Backward tension (N/mm ²)	4.1	5.3	6.7	7.8	9.5	0	
Looper angle (deg)		20	20	20	18	18	
Strip temperature (°C)	1021						
Carbon content (%)	0.107						
Width (mm)	1243						

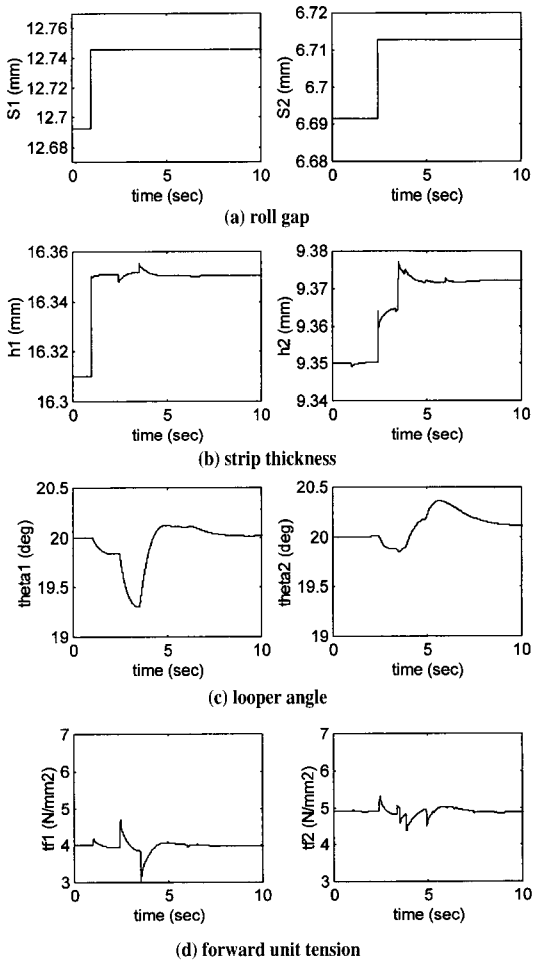


Fig. 6 Comparison of dynamic behaviors between No.1 and No.2 stand when their roll gaps are increased successively

동력 모터의 속도에도 변화가 일어나게 된다.

Fig.7은 6번 스탠드의 압연속도를 17.54m/sec에서 16.15m/sec로 스텝 (step) 형태로 감속한 경우에 대한 압연특성을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. Fig.7의 (a)에서 보는 바와 같이 정상적으로 압연되다가 0.5초가 경과한 후 갑자기 6번 압연속도를 스텝형으로 변경시키게 되면 다른 스탠드의 압연속도도 SSRH에 의해 자동적으로 같은 비율로 감속됨을 알 수 있다.

Fig.7의 (b)는 루퍼각도의 변화를 나타내는 결과로써, 루퍼각도의 목표치가 1~3번 루퍼는 20°, 4~5번 루퍼는 18°로 설정되어 있었으나 예상했던 바와 같이 압연속도를 변경시킨 0.5초로부터 모든 루퍼가 움직이기 시작하며 진

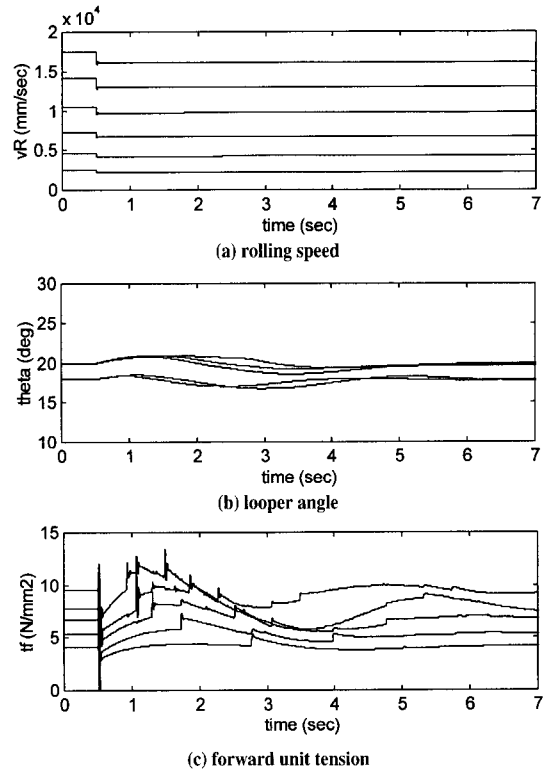


Fig. 7 Dynamic behaviors of each stands when the rolling speed of No.6 stand is decreased abruptly

폭은 약 $\pm 1^\circ$ 정도인 것으로 나타나고 있다. 그러나 일정 시간이 경과하면 모든 루퍼가 목표 각도로 수렴하고 있어서 압연속도의 변경에도 불구하고 안정된 루퍼각도 제어가 행해지고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig.7의 (c)는 각 스탠드의 전방 단위장력의 변화를 나타내고 있다. 루퍼각도의 변화에서와 마찬가지로 압연속도가 변경된 0.5초 후부터 갑작스럽게 장력이 헛팅(hunting)하기 시작하는 것을 볼 수 있으며, 루퍼각도와 같은 형태로 변화되고 있지만 약 9초 정도 경과하게 되면 원상태로 회복된다.

이번에는 앞의 시뮬레이션과는 달리 6번 스탠드의 압연속도를 서서히 변화시켜 보았다. 동일한 크기로 압연속도를 줄이되 $t=0.4$ 초로부터 $t=0.9$ 초까지 압연속도가 완만하게 변화되도록 하였다. Fig.8은 이 조건에 대한 압연특성의 변화를 나타내는 그림이다. 압연속도의 변화를 나타내는 그림 (a)를 보면 의도한 바와 같이 압연속도가 0.4초에서 0.9초까지 서서히 감소되고 있다. 이와 같이 압연속도를 서서히 변화시키게 되면 루퍼의 각도에서는 별다

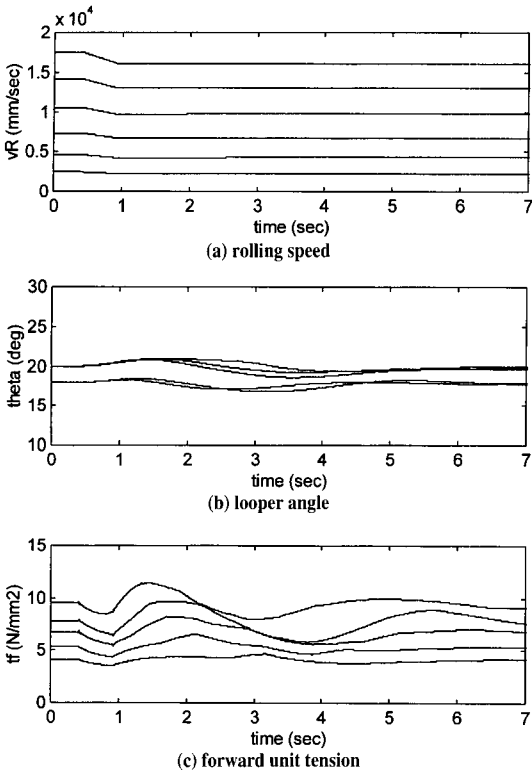


Fig. 8 Dynamic behaviors of each stands when the rolling speed of No.6 stand is decreased gradually

른 차이를 발견할 수 없으나 Fig.7의 (c)에 비해 장력의 급격한 변화가 많이 완화되었음을 확인할 수 있다.

압연속도가 0.4초로부터 서서히 변하므로 장력의 변화도 서서히 나타나게 되며 비교적 양호한 상태로 압연이 진행되고 있다. 이와 같은 결과로부터 연속압연을 위해서 필수적으로 행해져야 하는 압연속도의 변경은 스텝형으로 갑자기 변화시키는 것보다는 서서히 변화시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

4.2 조건이 다른 두 코일의 연속압연 시뮬레이션

4.2.1 시뮬레이션 조건

앞서의 시뮬레이션을 통해 압연도중에 갑작스럽게 설정치를 변경하게 되면 여러 가지 비정상적인 압연현상이 수반되고 이들로 인해 제품의 품질이 저하될 것이라는 것을 짐작할 수 있을 것이다. 이번에는 실질적인 열간 연속압연을 대상으로 하는 시뮬레이션을 실시해 보았다. 열간 연속압연을 하게 되면 필연적으로 조건이 다른 두 개의 압연판을 용접하여 연속해서 압연을 해야만 할 것이다. 조건 변경의 대표적인 것으로는

- (1) 두께가 다른 두 개의 압연판을 연속으로 압연
- (2) 판폭이 다른 두 개의 압연판을 연속으로 압연
- (3) 강종이 다른 두 개의 압연판을 연속으로 압연

하는 것 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 여러 가지 경우에 대해서 시뮬레이션을 해 봄으로써 연속압연 과정에서의 FGSC 제어특성을 살펴보았다.

FGSC 제어과정의 시뮬레이션을 위해서는 용접부를 전후하여 조건이 다른 두 가지 코일에 대한 정보가 필요하다. 시뮬레이션에 사용된 선행 코일의 기본조건은 앞서의 Table 2와 같고, 후행 코일은 Table 3에 나타난 바와 같은 네 가지의 압연조건을 변경하여 시뮬레이션을 해보았다.

전후 코일의 압연조건이 바뀔때 따라 압연도중에 변경시켜주어야 할 롤갭 및 압연속도의 설정치, 즉 과도 설정치 Setup c는 식(2), 식(4) 그리고 식(5)를 이용하여 계산한다. 그리고 용접부의 이동에 따른 각 스탠드의 설정치 변경순서는 Table 1과 같다.

한편, 판두께 제어기 중 Monitor AGC는 그 특성상 용접부가 마지막 스탠드를 통과한 이후에 작동하게 될 것이므로 본 시뮬레이션에서는 Roll Force AGC 만을 사용하여 FGSC의 제어특성을 파악해 보았다. 또한 비정상적인 부분에서의 AGC 사용은 과도한 장력 헌팅을 유발할 기능

Table 3 Rolling conditions for FGSC control simulation

Case	Changed item	Leading coil	Following coil
I	Final thickness	2.21 (mm)	2.3 (mm)
II	Final thickness	2.21 (mm)	2.1 (mm)
III	Strip width	1243 (mm)	1200 (mm)
IV	Carbon content	0.107 (%)	0.05 (%)

성이 있고, 이로 인해 두께편차가 커지게 되므로 용접부가 압연기로 치입될 때에는 Fig.9와 같이 일정 시간동안 AGC를 사용하지 않도록 하였다. 그림에서 T_i 는 용접부가 i 스탠드에 치입되는 시간이며 Δt 는 0.5초로 설정하였다. Roll Force AGC의 스탠드별 제어이득(control gain), 즉 α 는 현재 열연공장에서 사용하는 값과 동일하게 1번 스탠드에서 4번 스탠드까지는 0.7, 나머지 5번과 6번 스탠드는 0.4로 하였다.

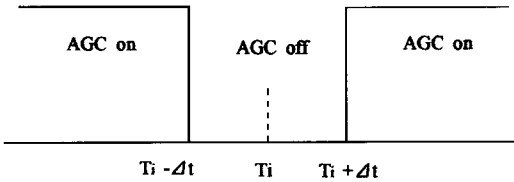


Fig. 9 Diagram of the Roll Force AGC on/off time during the FGSC control is active

4.2.2 후행 코일의 두께가 증가하는 경우

Table 3의 Case I과 같이 두께가 2.21 mm인 선행 코일의 압연을 완료하는 동시에 두께 2.3 mm의 후행 코일을 연속적으로 압연하기 위해서는 모든 스탠드의 물집이 약간씩 증가하게 될 것이다. 또한 압연판의 두께가 증가함에 따라 압연속도도 동시에 변경될 것이므로 4.1절에서 언급한 개별적인 설정치 변경에서 보다 압연현상의 흐트러짐이 더 심하게 나타날 것이다. 그러나 이번에는 앞서의 시뮬레이션과는 달리 자동두께제어기를 사용하게 되므로 비교적 빨리 정상상태로 회복될 것으로 예상된다.

Fig.10은 Case 1의 조건으로 연속압연했을 때의 압연 특성을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 루퍼각도인 그림 (a)와 전방장력인 그림 (b)는 모든 스탠드의 계산결과를 하나의 그래프로 나타내었고, 판두께의 변화를 나타내는 그림 (c)에는 6번 압연기 출구측에서의 두께만을 표시하였다.

그림 (c)를 살펴보면 선행 코일의 두께가 2.21 mm로 압연이 되다가 약 2.5초 부근으로부터 두께의 변경이 시작되어 약 4.5초 후에는 후행 코일의 두께인 2.3 mm로 압연이 되어 감을 볼 수 있다. 이 결과로부터 본 연구에서 제시된 주행간 물집 및 압연속도 변경제어 알고리즘이 두께가 다른 두 개의 압연판을 연속압연 하는데 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

그러나 루퍼각도와 전방장력의 변화를 나타내는 그림

으로부터 예상했던 바와 같이 용접부가 1번 스탠드로부터 6번 스탠드까지 이동하는 동안에 압연현상이 대단히 불안정해지고 있음을 알 수 있다. 특히, 용접부가 각 스탠드를 통과하는 순간에 발생하는 장력의 최고치는 목표 장력의 5배에 가까운 약 50 N/mm²까지 증가하였다. 이와 같이 큰 장력의 발생은 압연판의 파단을 초래할 가능성이 있으므로 AGC 제어이득의 변경⁽¹⁰⁻¹²⁾을 통해 줄여주어야 한다. 이에 대해서는 4.3절에서 보다 상세히 설명한다. 한편, 4.1절의 개별 설정치 변경 시뮬레이션의 경우 불안정 상태에서부터 회복되는 데 소요되는 시간이 약 5.5-6초 정도 인 것에 비해 본 시뮬레이션에서는 약 2-4초 정도로 많이 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 이것은 Roll Force AGC에 의한 제어 효과로 생각된다.

4.2.3 후행 코일의 두께가 감소하는 경우

다음은 Table 3의 Case II와 같이 두께가 얇아지는 쪽으로 연속압연을 행하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이번에는 앞서의 경우와는 반대로 모든 스탠드

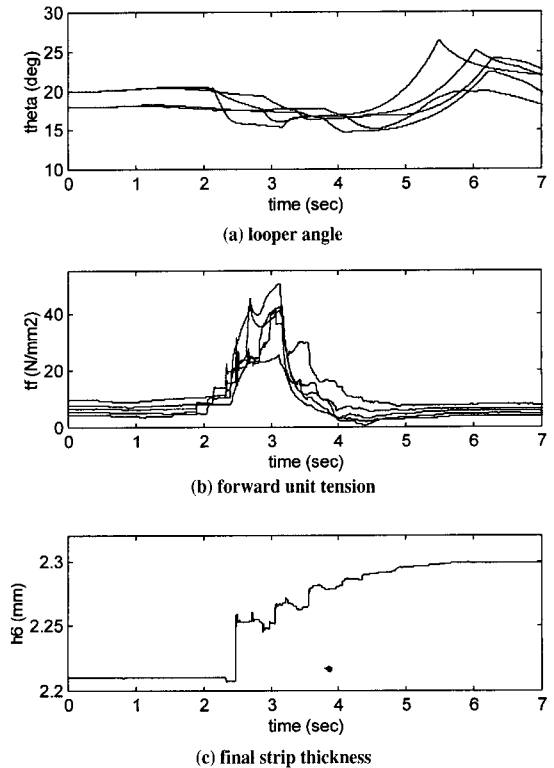


Fig. 10 Simulation results of FGSC control in case of the strip thickness change from 2.21 mm to 2.3 mm

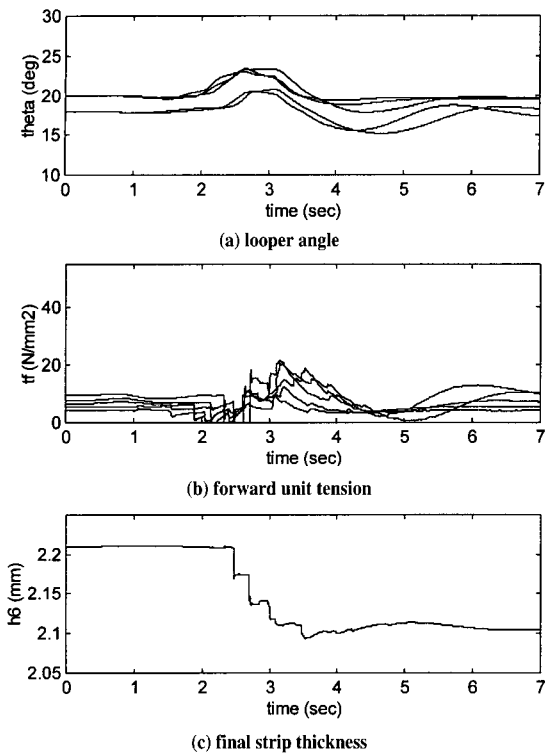


Fig. 11 Simulation results of FGSC control in case of the strip thickness change from 2.21 mm to 2.1 mm

의 롤갭이 약간씩 감소하게 될 것이다. 6번 스탠드의 출구 측에서의 두께변화를 나타내는 Fig.11의 (c)로부터 의도한 바와 같이 후행 코일의 두께가 목표치로 원활하게 감소하고 있어서 연속압연이 잘 되고 있음을 볼 수 있다.

이번의 경우에도 역시 용접부가 압연기 사이를 통과하는 도중에는 압연이 불안정해지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 앞에서의 후행 코일의 두께가 증가하는 경우와 비교해 보면, 루퍼의 구동 특성이 비교적 양호해 졌을 뿐만 아니라 전방장력이 불안정하게 변화되는 절대 크기도 상당히 많이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 용접부가 완전히 빠져나간 뒤인 약 4.3초 이후에도 여전히 일부 루퍼의 각도와 전방장력이 안정되지 않고 있는데, 이것은 해당 제어기에 설정된 적분이득(I-gain)⁽¹³⁻¹⁴⁾이 비교적 크기 때문인 것으로 생각된다.

한편, 전방장력의 변화를 나타내는 Fig.11의 (b)를 자세히 살펴보면 전방장력이 0으로 되는 순간이 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 압연판의 두께를 얇게 하기 위해 롤갭을 근접시키게 되면 체적일정법칙이 깨어지므로 이를

보상하기 위해 해당 스탠드의 압연속도가 순간적으로 증가하기 때문에 발생된 것으로 생각된다. $i+1$ 스탠드의 압연속도는 변화시키지 않은 채 용접부가 통과되는 i 스탠드만의 속도를 증가시키면 양 스탠드 사이에 존재하는 판의 길이가 증가되어 순간적으로 압연판이 루퍼와 분리되기 때문에 압연판에 작용되는 장력이 0으로 되는 것이다.

그러나 장력이 0으로 되는 시점으로부터 루퍼각도의 변화(Fig.11의 (a) 참조)를 살펴보면 적절한 장력을 유지하기 위해 루퍼가 서서히 상승되고 있음을 알 수 있다. 이것은 루퍼 제어기 내에 LHC(Looper Height Control) 기능이 있어서 적절한 장력을 유지하기 위해 루퍼의 각도를 조정하게 되므로 궁극적으로는 목표장력에 도달되도록 하는 것이다.

4.2.4 판폭 변경시의 연속압연

압연판의 폭이 바뀌게 되면 압연하는 데 소요되는 동력이 달라지게 될 것이고, 이로 인한 주행간 설정치의 변경은 피할 수 없게 된다. Fig.12는 판폭이 변경되는 연속압

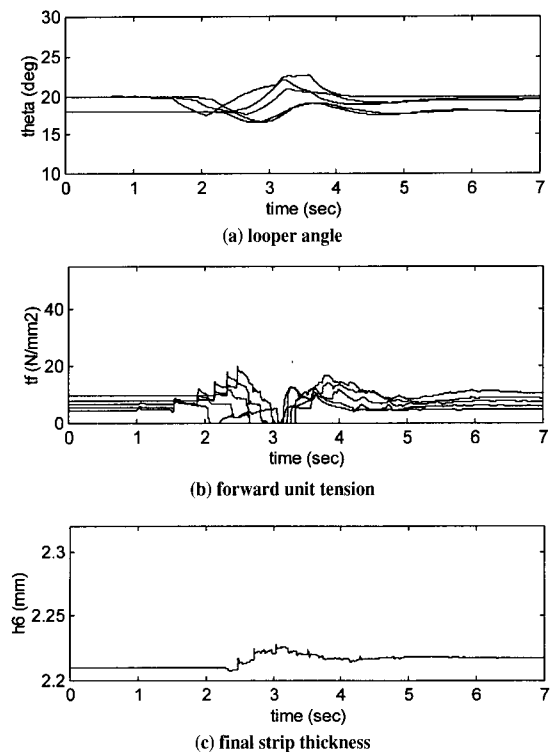


Fig. 12 Simulation results of FGSC control in case of the strip width change from 1243 mm to 1200 mm

연에 대한 시뮬레이션 결과이다. 스탠드간의 장력을 나타내는 그림 (b)로부터 알 수 있는 바와 같이, 이 경우에도 역시 용접부가 압연기를 통과할 때 불안정한 압연현상이 수반되고 있음을 볼 수 있다. 최대 장력의 크기는 약 20 N/mm²로 목표치에 비해 약 2배정도로 앞서의 판두께가 변경될 때와 비교하면 장력의 변화가 그다지 크지 않다고 생각된다. 장력의 변화가 크지 않기 때문에 루퍼각도의 변화도 최대 $\pm 2.5^\circ$ 정도로 미소하였으며 용접부가 완전히 압연기를 빠져나가는 약 5초 후에는 목표치로 수렴되고 있음을 볼 수 있다.

한편, 압연판의 두께를 나타내는 그림 (c)를 살펴보면 주행간 설정치의 변경에도 불구하고 후행 코일의 판두께 목표치인 2.21 mm에 비해 편차가 약 6 μ m 정도밖에 발생하지 않아서 비교적 양호한 FGSC 제어가 이루어졌음을 알 수 있다. 앞서의 판두께가 변경되던 때에는 달리 판폭의 변경시에는 비교적 안정된 연속압연을 행할 수 있는 것은, 판폭이 많이 변하더라도 롤갭의 변경량이 그다지 크지 않았기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 참고로 연속압연에서의 두가지 설정치 변경 요소, 즉 롤갭과 압연속도 중에서 압연현상을 불안정하게 만드는 보다 큰 요인은 롤갭의 변경인 것으로 알려져 있다.^(3,5,6)

결과적으로 판폭이 다른 두 개의 코일을 연속압연하는 것은 용접부가 압연기를 통과하는 도중에 약간의 불안정한 상태를 보이고 있음에도 불구하고 압연판의 두께 변경에 비해 비교적 안정된 조업이 가능할 것으로 판단된다.

4.2.5 강종 변경시의 연속압연

열간압연으로 제조되는 철강재료의 대부분은 탄소강이고, 함유된 탄소량에 의해 강종의 특성이 변하게 된다. 따라서 강종을 변화시킨다는 것은 곧 탄소 함유량의 변경을 의미한다. 시뮬레이션을 위한 압연조건은 Table 3의 Case IV와 같이 선행 코일의 탄소 함유량은 0.107%이고 후행 코일의 탄소 함유량은 0.05%이며 그 외의 나머지 압연조건은 선행 코일과 같도록 하였다. 일반적으로 탄소강은 탄소함유량이 많을수록 인장강도가 커지므로 열간압연에서의 압연하중도 증가하게 될 것이다. 압연하중의 증가는 롤갭의 변동을 초래하므로 강종이 변경되는 경우의 연속압연에 있어서도 역시 용접부의 통과와 함께 비정상적인 압연현상이 발생될 것으로 예상된다.

Fig. 13은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 전방장력을 나타내는 그림 (b)를 살펴보면 예상했던 바와 같이 용접부가 각 스탠드를 통과하는 시점에서 장력의 변동이 발생하

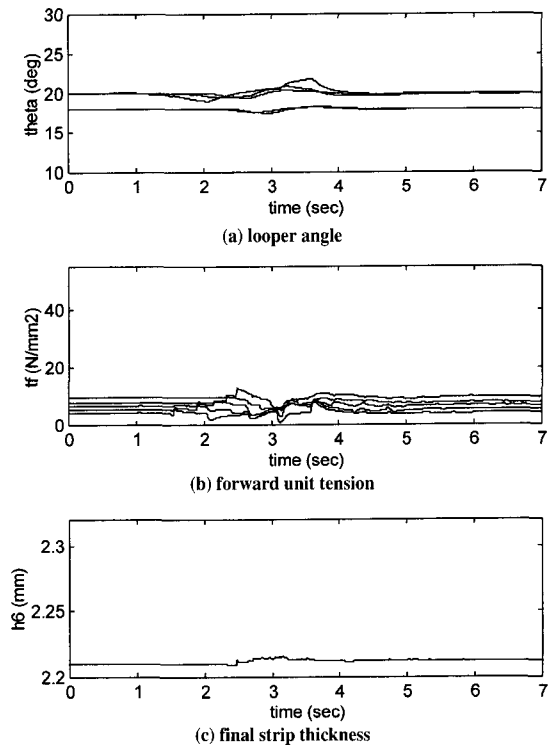


Fig. 13 Simulation results of FGSC control in case of the carbon content change from 0.107% to 0.05%

고 있다. 그러나 다행히 변화의 정도가 그리 크지 않고 목표 장력으로 수렴하는 시간도 비교적 빨라서 안정된 조업이 가능하다. 그림 (a)의 루퍼각도에서도 역시 용접부 통과시에 비정상적으로 동작하는 현상이 나타나지만 루퍼의 최대 상승각이 약 22도 정도이므로 우려할 정도는 아니라고 생각된다. 최종 제품의 판두께를 살펴보면 목표 두께인 2.21 mm보다 불과 3 μ m 정도밖에 차이가 나지 않으므로 양호한 제품의 생산이 가능함을 알 수 있다. 이것은 앞서의 판폭 변경에서와 마찬가지로 압연조건 변경에 따른 롤갭의 변화가 그다지 크지 않았기 때문인 것으로 판단되며, 탄소 함유량 변화가 연속압연에서의 FGSC 제어에 미치는 영향이 그리 크지 않다는 것을 보여주는 결과이다.

4.3 AGC 이득이 FGSC 제어에 미치는 영향

앞서의 여러 가지 압연조건 변경에 따른 시뮬레이션 결과로부터 판폭이나 강종의 변화에 비해 판두께를 변경하여 연속압연을 할 때, 그 중에서도 후행 코일의 두께가 두꺼워지는 경우에는 용접부가 압연기 사이를 통과하는

동안에 전방장력이 대단히 커져서 판과단의 우려가 있으며 후행 코일의 두께가 목표치에 도달하는 데에도 많은 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 이와 같은 문제점을 보완하는 수단을 찾기위해 우선 자동두께제어기의 제어 이득이 적절한 값으로 설정되었는 지를 조사해 보았다.

Roll Force AGC는 압연도중에 하중이 변화되면 발생된 하중의 편차를 최소화시키는 방향으로 롤갭 제어를 하게된다. 그런데 연속압연에서는 압연도중에 의도적으로 롤갭과 압연속도를 변경시켜 주어야 하므로 필연적으로 압연하중의 변화가 초래된다. 그럼에도 불구하고 Roll Force AGC는 압연하중의 편차를 감소시키기 위해 필요 이상으로 롤갭을 제어하게 되고, 이것이 4.2.2에서 언급한 용접부 통과시의 과대 장력의 발생요인이 되고 있는 것이다.

이에 대한 보완책으로써 본 연구에서는 Roll Force AGC의 제어이득을 조정하는 방법을 시도해 보았다. 기존에 사용되던 제어이득인 $\alpha_{1\sim4}$ 는 0.7, $\alpha_{5\sim6}$ 은 0.4 와 달리 후방 스탠드로 갈수록 제어이득을 낮추어주는 형태인 $\alpha_{1\sim2}$ 는 0.7, $\alpha_{3\sim4}$ 는 0.5, $\alpha_{5\sim6}$ 은 0.3으로 변경한 후에 4.2.2과 동일한 압연조건으로 시뮬레이션을 해보았다.

Fig.14는 제어이득을 변경한 경우의 전방장력에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 용접부 통과시의 장력의 최대치는 약 32 N/mm²로 제어이득을 조정하기 전보다 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. 그리고 AGC 제어이득 변경의 효과는 Fig.15의 판두께의 변화를 보면 더욱 쉽게 이해할 수 있다. 즉, 선행 코일의 두께 2.21 mm로부터 후행 코일의 두께인 2.3 mm로 변경되는 데 소요되는 시간이 제어이득의 변경 전에는 두께변경 시간으로부터 약

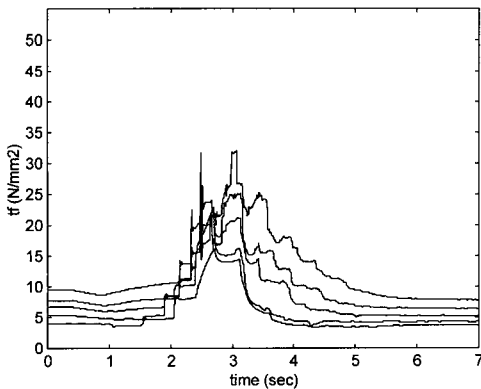


Fig. 14 Forward unit tensions of each stand in case of Roll Force AGC gain change

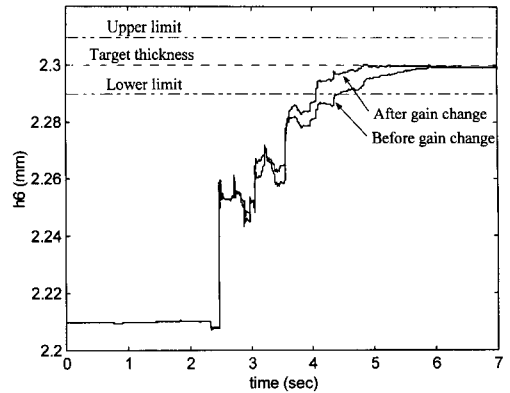


Fig. 15 The effect of Roll Force AGC gain change on strip thickness quality in the endless hot rolling

3.5초가 필요하였으나 제어이득의 변경 후에는 약 2.4초 정도로 줄어들어서 판두께 제어의 정확도가 크게 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 새로운 값으로 제어이득을 변경함에 따라, 후행 코일이 허용 두께편차인 $\pm 10 \mu\text{m}$ 에 들어가는 데 소요되는 시간을 약 0.3초 정도 단축시킬 수 있게 되었다. 따라서 압연속도가 18.5 m/sec인 것을 고려한다면 AGC 제어이득의 변경을 통해 약 5.55 m 길이의 압연 판이 정품으로 생산되는 경제적인 효과를 얻을 수 있게 되는 것이다.

5. 결론

본 논문은 전 보의 “열간압연 공정 해석 시뮬레이터의 개발(I)”에 이어서, 기 개발된 시뮬레이터를 새로운 공정 제어 기술을 개발하는 데 응용한 사례에 대해 기술하였다. 열간압연에서 최근에 각광을 받고 있는 연속압연을 위해서는 사상압연에서의 핵심적 요소기술인 “주행간 롤갭 및 압연속도 변경 제어” 기술의 개발을 필요로 한다. 그러나 연속압연을 실시하기 위한 설비가 갖추어져 있지 않은 상태에서 동 기술을 개발하기 위해서는 시뮬레이터의 사용이 필수적이다.

본 연구에서 제안된 주행간 설정치 변경 제어 알고리즘을 개발된 시뮬레이터에 반영하고 시뮬레이션 해본 결과, 통상의 압연에서는 발생되지 않는 연속압연 고유의 압연 현상들을 파악해 볼 수 있었다. 그리고 여러 가지 압연조건에 따른 시뮬레이션을 통해 연속압연에 적절한 제어기의 선택과 이들의 제어이득은 어느 정도여야 하는가를 알 수 있게 되었다.

본 연구를 통해 얻어진 결과들은 향후 국내에서도 실용화될 예정인 열간 연속압연의 기초자료로 많이 활용될 것이다. 특히, 압연을 직접하지 않고도 새로운 공정에 대한 이해와 새로운 기술의 적용에서 발생될 수 있는 문제점을 미리 파악하고 그에 대한 적절한 대비책을 찾을 수 있음을 확인할 수 있어서 개발된 열간압연 공정 해석용 시뮬레이터의 좋은 응용 사례로 생각된다.

참고문헌

- (1) 이원호, 이상룡, 1999, "열간압연 공정 해석용 시뮬레이터의 개발과 응용 (I)", 한국소성가공학회지, 제 8권, 제1호, pp.61~73.
- (2) Nariharu, K., Takaharu, E., Shigemichi, M., Toshio, M and Yasuo, M., 1979, "Automatic Gauge Control and Incoil Thickness Changing System for Cold Tandem Mills", 日立評論, Vol.61, No.9, pp.33~37.
- (3) 安田 郎 外, 1985, "極薄用冷間壓延機の完全連續化", 川崎製鐵技報, Vol.17, No.2, pp.154~160.
- (4) Yamashita, M., Yarita, I., Abe, H., Mikuriya, T. and Yanagishima, F., 1987, "Technologies of flying gauge change in fully continuous cold rolling mill for thin gauge steel strips", IRSID rolling conference, Vol.2, pp.E.36.1~E.36.11.
- (5) 吉田 博 外, 1979, "冷間タンデム・ミルにおける非正常壓延現象のシミュレーション", 川崎製鐵技報, Vol.11, No.1, pp.156~165.
- (6) 山本 和也 外, 1987, "冷延連續壓延ミル板厚制御技術", 住友金屬, Vol.39, No.4 pp.363~374.
- (7) Imae, T., Nomura, N. and Miyoshi, S., 1996, "High Quality Production Technology in Chiba No.3 Hot Strip Mill", 川崎製鐵技報, Vol.28, No.4, pp.219~223.
- (8) Nikaido, H., Isoyama, S., Nomura, N., Hayashi, K., Morimoto, K. and Sakamoto, H., 1996, "Endless Hot Strip Rolling at No.3 Hot Strip Mill in Chiba Works", 川崎製鐵技報, Vol.28, No.4, pp.224~230.
- (9) 日本鐵鋼協會 共同研究會 壓延理論部會編, 1983, "板壓延の理論と實際", 日本鐵鋼協會
- (10) Bertrand, A., 1980, "Simulation of Rolling with Tension Effects to Improve Thickness Control in Hot Strip Mill", International Conference on Steel Rolling, Vol.1, pp.287~295.
- (11) Tani, K., Suzuki, E., Kikuchi, K., Washida, T., Okashita, H. and Kitamura, A., 1988, "Automatic Gage Control System in Tandem Cold Mill", Kobe Steel Engineering Reports, Vol.38, No.3, pp.70~74.
- (12) Gumi, K., Abiko, Y. and Yamamoto, S., 1994, "New Gage Control System for Tandem Cold Mill", Iron and Steel Engineer, December, pp.42~46.
- (13) Shioya, M., Yoshitani, N. and Ueyama, T., 1993, "Development of High-Response Looper Control System Based on Multi-variable Control Theory", Nippon Steel Technical Report, No.57, pp.57~61.
- (14) Edwards, J. and Spooner, P., 1995, "7th International Rolling Technology Course Documentation", IAS in Australia