

## 열간압연 공정 해석용 시뮬레이터의 개발과 응용(I)

이원호\* · 이상룡\*\*

(1998년 9월 8일 접수)

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

W. H. Lee and S. R. Lee

#### Abstract

In recent years, the quality requirements from the customers of hot rolled steel strip have been steadily increasing in diversity and strictness. To meet these quality requirements as well as to improve productivity, steel mills have been doing their efforts for developing high performance Automatic Gauge Control (AGC) system. However, it is very time consuming and also needs a lot of money to develop the new technologies of AGC in actual mill. So, there has been a demand for developing the Dynamic Hot Rolling Simulator since late 80's. It is a kind of software packages and can analyze the dynamic behaviors of hot finishing rolling process without laborious experiments in actual mill. It can also be used as a designing tool of Automatic Gauge Controller. In this work, the Dynamic Hot Rolling Simulator which is applicable to 6 stands hot strip mill rolling was developed. The MATLAB with SIMLINK was used as a software developer for making the main part of simulator because it is very powerful tool for modeling, integrating, controller design, and simulation. In this paper, the structures and the mathematical models of the simulator were briefly described and the results of simulation on the transient phenomena of hot rolling process with actual mill data were also presented.

**Key Words** : Hot Rolling Mill, Simulator, Automatic Gauge Control, Looper, Rolling Force

#### 1. 서론

열간압연은 자동차, 건축구조물은 물론 각종 파이프의 제작에 사용되는 소재인 판재를 생산하는 대표적인 소성 가공 공정이다. 열간압연에서 생산되는 제품의 형태는 단조나 인발, 압출 등 다른 소성가공과는 달리 판재류로 한정

되어 있고, 종래부터 설비의 자동화가 비교적 잘되어 있어서 생산성이 대단히 높은 가공공정으로 알려져 있다. 또한, 컴퓨터제어에 의한 생산과정의 자동화 덕분에 제품의 치수정밀도도 대단히 높은 실정이다. 그러나 최근에는 수요가로 부터의 품질에 대한 요구수준이 대단히 엄격해지고, 제품의 종류도 다양해지고 있어서 높은 수준의 품질을

\* POSCO 기술연구소  
\*\* 경북대학교 기계공학부

유지하는 데 따른 많은 어려움을 겪고 있다.

압연관의 두께 정밀도는 제품의 품질을 좌우하는 인자의 하나로서 열간압연 공정에서 가장 중요하게 관리되는 품질지표중의 하나이다. 또한 판두께의 정밀도에 따라 생산된 제품의 실수율( yield )이 좌우되므로 경제성 측면에서도 대단히 중요하다. 그러므로 예로부터 압연공정 관련 기술자들은 압연관의 두께정밀도를 향상시키고자 많은 노력<sup>(1-3)</sup>을 기울여 왔으며 이를 통해 판두께 제어( automatic gauge control ) 이론<sup>(4-6)</sup>은 비약적으로 발전되어 왔다.

그러나 새로운 제어이론들을 실제의 플랜트에 적용하기란 쉽지않다. 왜냐하면, 열간압연공장은 고생산성과 작업의 안정성이 최우선시되므로, 비록 이론적으로 타당성이 인정된 제어기법이라 하더라도 적용과정에서 발생할 수 있는 설비사고나 실험을 위한 조업감축 등의 경제적 손실 발생이 새로운 제어이론의 적용을 주저하게 하는 요인이 되고 있다. 이와 같은 어려움 때문에 새로운 제어이론들이 실기에 적용되지 못하고 단순한 paper work으로 끝나는 경우가 많다.

최근에 이러한 문제점을 해결하는 수단으로써 해외의 여러 제철소<sup>(7-8)</sup>는 물론 압연 관련 연구기관<sup>(9)</sup>에서 시뮬레이터( simulator )를 개발하고자 하는 노력들이 활발히 진행되고 있다. 시뮬레이터는 컴퓨터를 이용하여 실제의 현상을 그대로 모사해내는 일종의 컴퓨터 프로그램으로서, 대표적인 사례로는 조종사의 비행연습에 사용되는 항공기 조종 시뮬레이터를 들 수 있다.

실제의 압연설비와 잘 모사된 시뮬레이터를 개발하고 이를 적절히 사용하게 되면 새로운 제어이론의 실제 적용시에 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악할 수 있어서 적절한 조치를 취할 수 있게 된다. 그리고 기존에 사용중인

설비도 제어 이득( control gain )이나 초기 설정 등을 변경시켜서 최적의 운전조건을 찾아낼 수 있다. 또한 실제의 압연과 동일한 조건에서의 시뮬레이션을 수행할 수 있으므로, 압연작업 중에 발생되었던 이상상태의 원인을 규명하고 이를 해결하는 도구로써 사용할 수 있게 된다.

이와 같은 필요성에 따라 저자들은 다목적 열간압연 공정 시뮬레이터를 개발하게 되었다. 개발된 열간압연공정 시뮬레이터에 대한 구조와 실제 플랜트와의 상사성 그리고 시뮬레이터를 이용한 새로운 공정제어기술 개발에 대해 소개하고자 한다. 먼저 본 논문에서는 개발된 시뮬레이터를 사용하여 계산된 여러 가지 결과를 이용하여, 열간압연의 물리적 특성과 모델링된 압연설비의 제어기들에 대한 동특성을 논의하였고, 마지막으로 실측된 열간압연 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 개발된 시뮬레이터가 실제의 압연현상을 정확히 모사 해내고 있음을 보여주었다. 그리고 다음 논문에서는 개발된 시뮬레이터의 응용 예로서, "열간 연속압연에 필요한 주행간 롤갭 및 압연 속도 변경 제어 기술개발"에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 열간압연 공정의 모델링

### 2.1 열간압연의 설비 및 공정

일반적으로 열간압연공정은 Fig.1에 나타낸 바와 같이 슬라브( slab )의 가열( reheating furnace ) -> 조압연( roughing mill ) -> 사상압연( finishing mill ) -> 냉각( cooling bed ) -> 권취( coiler ) 등의 순서로 진행되어 강판을 생산한다. 특히, 사상압연은 마무리 압연이라고도 하며 통상 6 내지 7개의 압연기로 구성되어 연속적인 압연을 통해 목표로 하는 기계적 성질 및 두께를 얻는 공정이므로 열간압연의 전체 공정중 가장 중요한 기능을 담

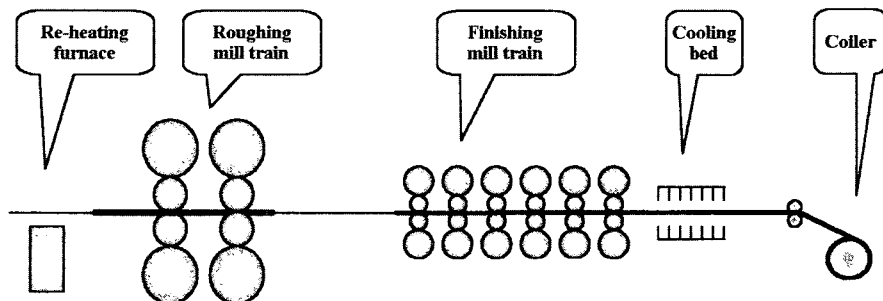


Fig. 1 Arrangement of hot rolling mill facilities

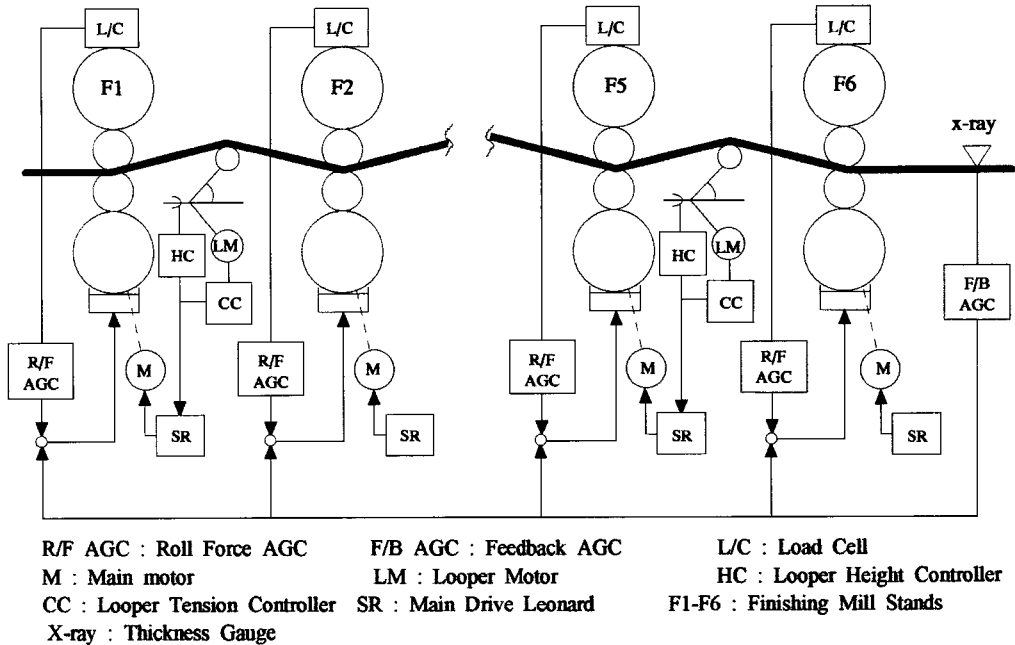


Fig. 2 Schematic diagram for the hot finishing rolling mill and its controllers

당하고 있다. 본 연구는 열간압연 공정중 압연판의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 사상압연공정만을 대상으로 하였다.

Fig.1에 간략히 나타낸 사상압연기의 구조와 제어설비를 보다 구체적으로 나타내어 보면 Fig.2와 같다. F1으로부터 F6에 이르는 모든 압연기에는 압연하중을 측정할 수 있는 로드 셀(load cell)이 장착되어있고, 압연이 종료되는 마지막 스탠드(stand)인 F6 스탠드의 출구측에는 x-ray 두께측정기가 설치되어있다. 그리고 이들 센서(sensor)로부터 측정된 신호는 압연판의 두께제어는 물론 장력제어에 사용되기 위해 각각의 압연기에 설치된 제어기로 피드 백(feedback)되어진다.

압연판의 두께는 압연기 하부에 설치된 유압실린더의 유량을 증감함에 따라 작업 롤(work roll)의 간격(gap)이 조절되어 제어하도록 되어있다. 그러나 두께제어를 하기 위해 특정 압연기의 롤갯을 변화시키게 되면 해당 압연기의 전, 후방에 있는 압연판의 장력이 변하게 되고, 장력의 변화는 곧바로 판두께의 편차를 유발시키는 원인으로 작용<sup>(10)</sup>하게 된다. 따라서 두께제어를 하는 동안에 발생하는 압연판내의 장력변화를 막기 위해 압연기 사이에 설치된 루퍼(looper)의 각도와 후방(down-stream) 압연기의 주

동력 모터(main motor)의 속도를 동시에 조절하도록 되어 있다.

## 2.2 열간압연 현상의 모델링

이와 같은 복잡한 설비와 각종 제어기를 갖춘 사상압연 공정을 정확하게 모사할 수 있는 시뮬레이터, 즉 시뮬레이션 프로그램을 개발하기 위해서는 압연기와 루퍼 그리고 주동력 모터 등의 압연설비는 물론 관련 제어기의 공정제어 로직(process control logic)에 대한 수학적 모델이 필요하게 된다. 본 절에서는 개발된 시뮬레이터에 포함된 여러 가지 모델에 대한 기능과 수식 그리고 블록선도 등을 간략하게 설명한다.

사상압연에서의 압연기 상호간의 간섭현상, 즉 두께제어를 위해 롤갯을 변화시키면 장력이 변화되고, 장력을 제어하게되면 두께가 변하는 압연현상은 Fig.3과 같이 모델링할 수 있고, 이를 압연 이론 식으로 표현해보면 (1)식으로부터 (5)식과 같이 된다. 이들 기본 식 외에도 열간 압연현상을 보다 더 정확하게 기술하기 위해서는 모터 토오크 계산식과 온도 계산식 등<sup>(11)</sup>의 여러 가지 압연이론 식이 필요하지만 본 논문에서는 아래의 기본적인 지배 방정식만을 기술한다.

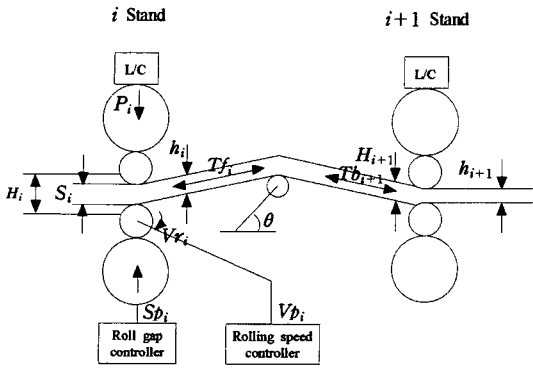


Fig. 3 Physical model for hot rolling process between two stands

(a) 체적속도 일정법칙

i 번째 압연기로 유입되는 재료와 유출되는 재료의 양은 일정하므로 다음식이 성립한다.

$$V_i \cdot H_i \cdot B_i = v_i \cdot h_i \cdot b_i = const. \quad (1)$$

여기서,  $V_p, v_i$  : 압연기 입구측, 출구측 판속도 (m/s)  
 $B_p, b_i$  : 압연기 입구측, 출구측 판폭 (mm)  
 $H_p, h_i$  : 압연기 입구측, 출구측 판두께 (mm)

(b) 압연기 출측에서의 판속도

작업롤과 압연판 사이에는 미끄럼이 존재하므로 이들의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$V_o = (1 + f) \cdot V_R \quad (2)$$

여기서,  $V_o$  : 압연기 출구측에서의 판의 이송속도 (m/sec)  
 $V_R$  : 작업롤의 주속도 (m/sec)  
 $f$  : 선진율

(c) 압연후의 판두께

압연기는 강체이므로 압연하중에 의해 탄성변형이 발생하며 이를 고려하면 압연후의 판두께  $h$ 는 압연기의 탄성변형량,  $P/M$ 을 고려한 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$h = s + \frac{P}{M} + s_0 \quad (3)$$

여기서,  $P$  : 압연하중 (N)  
 $M$  : 압연기의 강성 (N/mm)

$s$  : 설정된 롤갭 (mm)

$s_0$  : 롤갭의 영점 보정치 (mm)

(d) 압연하중

압연하중을 구하는 이론식은 오랜 기간동안 많은 연구자들<sup>(12-13)</sup>에 의해 제안되고 있으나 현재 가장 널리 사용되고 있는 이론식은 Sims<sup>(14)</sup>가 제안한 다음과 같은 식이었다.

$$P = B \cdot l_d \cdot k_m \cdot Q_p \quad (4)$$

여기서,  $B$  : 압연판의 폭 (mm)

$l_d$  : 집축 투영 면적 (mm)

$k_m$  : 압연소재의 flow stress (N/mm<sup>2</sup>)

$Q_p$  : 압하력 함수

(e) 압연판에 작용하는 장력

압연판 내부에 작용하는 장력은 전, 후방의 압연기사이의 속도차와 루퍼의 각도변화량에 밀접하게 관련되며 압연판의 탄성변형량과 비례하므로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Tf_i = E \cdot \frac{(L' - L)}{L} \quad (5)$$

여기서,  $E$  : 압연소재의 고온에서의 영율 (N/mm<sup>2</sup>)

$Tf_i$  : i 번째 압연기의 전방장력 (N/mm<sup>2</sup>)

$L$  : 루퍼가 없을 경우의 판의 길이 (mm)

$L'$  : 루퍼가 판을 들어 올렸을 때의 판의 길이 (mm)

2.3 액츄에이터의 모델링

열간 압연기를 구성하는 가장 중요한 설비인 압하장치, 주동력 모터 그리고 루퍼 등에 대한 모델링과 그 기능을 간략히 기술한다.

2.3.1 압하 장치

두께제어를 위한 작업롤의 압하 장치는 유압 장치로 구성되어있으며 이를 구성하는 요소는 실린더, 유압 배관계, 서로 밸브 그리고 위치측정기 등이 있다. 본 연구에서 사용된 유압 장치의 제어로직을 블럭선도로 나타내어 보면 Fig.4와 같으며, 식 (3)으로 부터 구해진 롤갭  $S_{ref}$ 와 설비 자체의 보정량  $S_{max}$ 를 고려하여 구해진  $x_{ref}$ 로 제어

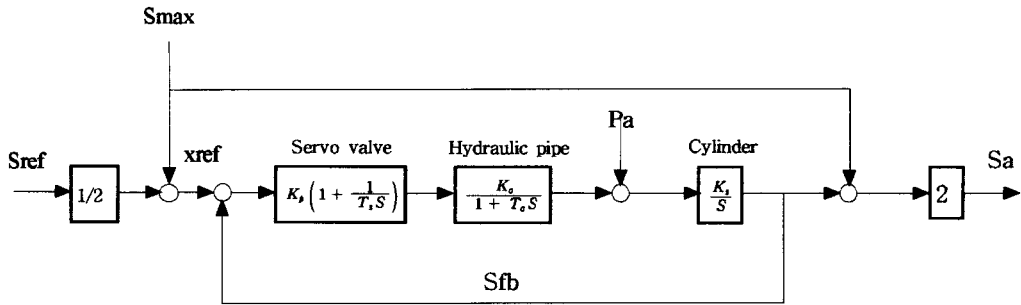


Fig. 4 Black diagram for roll gap controller

하도록 구성된 제어로직이다. 본 모델은 실제의 열간 사상 압연에서 얻어진 제원치를 사용하였으며 대표적인 것으로 유압 실린더의 응답성은 35 ms 이다.

2.3.2 주동력 모터

주동력 모터는 압연기의 작업물에 회전력을 가하여 판재를 압연기 출구측으로 밀어내는 역할을 하므로, 구성설비를 작업물과 스펀들을 포함한 기계계, 주동력 모터의 제어계 그리고 전동기 등 크게 3부분으로 나누어 모델링하였다.

Fig.5는 본 연구에서 사용한 주동력 모터 시스템의 개략도로써, 제어로직을 중심으로 나타낸 블록선도이다. 이와 같이 주동력 모터를 3 부분으로 나누어 모델링하게 되

면 전동기 축에서 생기는 축 진동과 같은 문제들을 해석하기 용이할 뿐만 아니라, 압연중에 생기는 압연 토크가 전동기에 미치는 영향들을 분석할 수 있으며 ASR( Automatic Speed Regulator )이나 ACR( Automatic Current Regulator )과 같은 전동기 제어기의 성능을 평가할 수 있는 등의 여러 가지 장점이 있다.

2.3.3 루퍼 제어계

루퍼는 Fig.6과 같이 2개의 인접한 압연기 사이에 설치되어서 압연속도의 변동 및 롤갭의 변동에 기인한 압연판 내의 장력변동을 완화시키는 역할을 한다. 또한 필요에 따라서는 주동력 모터와 함께 압연판 내의 장력을 적극적으로 조절하는 장치로 사용되므로, 주동력 모터와 루퍼 사이

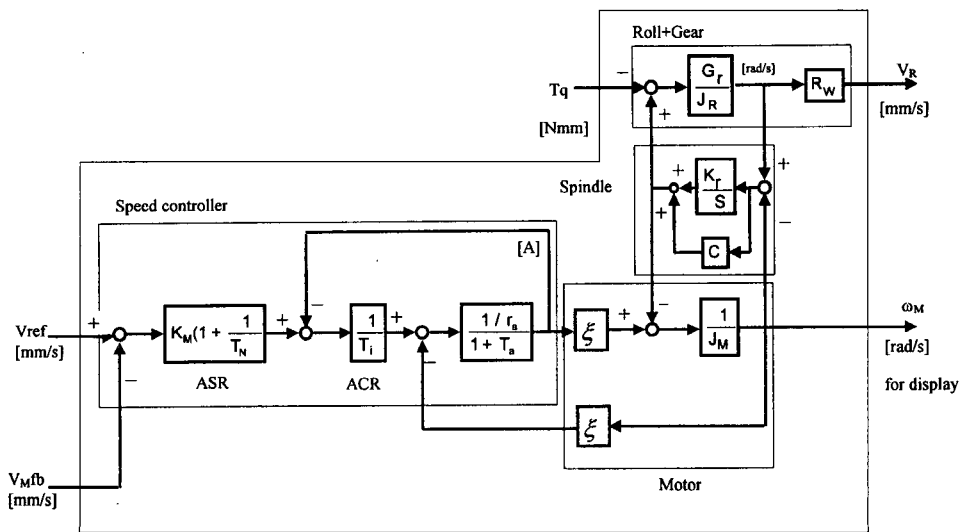
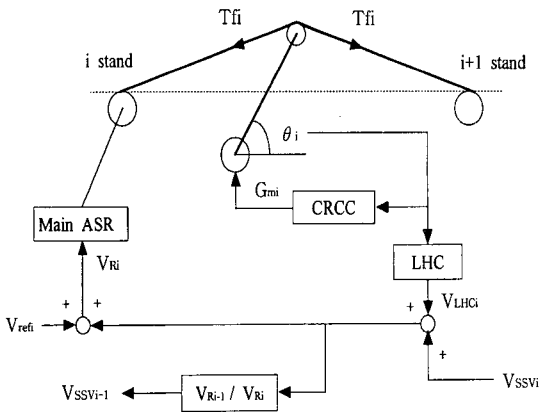


Fig. 5 Block diagram for main motor controller



Main ASR : Main motor drive system LHC : Looper Height Control  
 $\theta$  : Looper angle, Tf : Tension, VR : Rolling speed  
 $V_{ref}$  : Speed reference,  $V_{LHC}$  : Speed correction for looper height control  
 $V_{SSV}$  : Speed correction for mass flow constant

Fig. 6 Schematic diagram for looper control system

의 상호 연관성을 충분히 파악해 두어야 한다. 한편, 루퍼 제어계는 Fig.6에 나타난 바와 같이 제어입력을 루퍼 전동기(looper motor)의 구동 토크  $G_m$ 과 후방 압연기의 구동속도  $V_R$ 로 하고, 제어출력을 루퍼 각도  $\theta$ 와 압연판의 장력 Tf로 하는 2입력-2출력의 비선형 다변수 제어시스템이다.

Fig.6의 루퍼 개략도에는 루퍼와 루퍼 제어기, 그리고 주동력 모터가 어떤 형태로 상호작용을 하는가에 대한 알고리즘을 간략히 도시하였다. 여기서, 루퍼 시스템은 크게 CRCC( Current Reference Calculation Controller ), LHC( Looper Height Control ) 등의 루퍼 제어부와 루퍼 전동기부, 루퍼 기계부 등으로 나눌 수 있다. 그림에서 보는 것처럼 주동력 모터의 출력이 루퍼 기계계에 곧바로 영향을 미치고, 루퍼 기계계의 출력이 루퍼 전동기를 거쳐 다시 주동력 모터로 피드백되어 지므로 열간 사상압연에서 장력을 일정하게 유지하기 위해서는 이들의 상호관계에 대한 정확한 분석이 필수적이다.

2.4 판두께 제어 알고리즘의 모델링

일반적으로 열간압연에서 사용되고 있는 두께제어 알고리즘은 Roll Force AGC와 Feedback AGC이며 이들에 대한 제어개념을 Fig.7의 블록선도와 함께 간략히 설명해 하기로 한다.

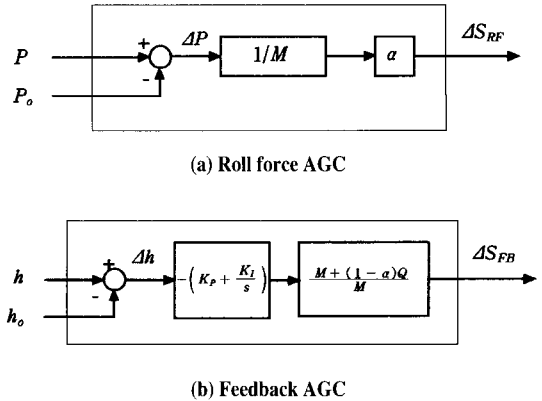


Fig. 7 Block diagram for automatic gauge controllers

2.4.1 Roll force AGC

Roll force AGC는 열악한 환경으로 인해 압연기 사이에 판두께 측정기를 설치할 수 없는 열간압연의 특수성을 고려하여 개발된 두께제어 개념이다. 각각의 압연기에 설치된 로드 셀( load cell )을 이용하여 압연하중 P를 검출한 다음, 공정제어 컴퓨터에서 계산된 목표 하중  $P_0$ 와 비교하여 그 편차가 일정범위를 넘게되면 다음의 식으로 계산된 롤갭 제어량만큼 피드백 제어하는 두께제어 방식이다.

$$\Delta S_{RF} = -\alpha \cdot \frac{\Delta P}{M} = -\alpha \cdot \frac{(P - P_0)}{M} \tag{6}$$

윗식에서  $\Delta P/M$ 은 압연하중 편차에 의해 생기는 압연기의 탄성변형량, 즉 롤갭의 변화량이다. 압연중 롤갭이 변하게 되면 곧바로 판두께가 변하게 되므로, 판두께 편차의 크기는  $\Delta P/M$  량에 비례하게 될 것이다. 그리고 윗식의  $\alpha$ 는 다음절에 소개될 Feedback AGC와의 제어량 배분율이다. 일반적으로 하나의 압연기에 Roll Force AGC와 Feedback AGC가 함께 사용되므로 이들 두 개의 제어기를 적절히 배분하여 사용하기 위해  $\alpha$ 라는 파라메타를 도입하여 사용한다. Fig.7의 (a)는 Roll Force AGC의 제어조직을 나타내는 블록선도이다.

2.4.2 Feedback AGC

Feedback AGC는 최종 스탠드의 출구 측에 설치된 x-ray 센서, 즉 판두께 측정기를 이용하여 실제로 압연된 판의 두께를 측정하고 목표로 하는 두께와 차이가 있을 경우에 압연기의 롤갭을 피드백 제어하는 두께제어방식이다. 측정된 압연판의 두께를  $h$ 라 하고 목표 두께를  $h_0$ 라 하면

관두께편차  $\Delta h (= h_0 - h)$ 에 대응하는 롤갭제어량은 다음식으로 구해진다.

$$\Delta S_{FB} = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{M + (1-\alpha)Q}{M} \cdot \Delta h \quad (7)$$

여기서,  $K_p, K_i$ : 미분 및 적분 이득 (-)  
 $Q$ : 소성계수 (Ton/mm)  
 $s$ : 시정수 (sec)

식 (7)의 롤갭 제어량 계산 알고리즘을 블록선도로 나타내어 보면 Fig.7의 (b)와 같다.

### 3. 시뮬레이터의 개발 도구

시뮬레이터는 6개의 압연기가 연속적으로 배치된 사상 압연기를 대상으로 개발되었으며 열간압연의 동적 특성(dynamic characteristics)을 잘 나타낼 수 있도록 전술한 여러 가지 압연설비와 제어기의 모델을 프로그래밍하였다. 시뮬레이터의 개발에 사용된 소프트웨어는 Table.1에 나타난 바와 같이 대부분 상용 프로그램이었으며, 필요에 따라 C++를 보조 프로그래밍 언어로 사용하였다. 한편, 개발된 프로그램이 구동되는 환경은 Windows 95이며, 상용 프로그램간의 효율성을 높이기 위해 DDE(Dynamic Data Exchange), DLL(Dynamic Library Linking) 방식을 이용하였다. 예를 들면, 계산조건의 입력출력을 담당하는 Excel 프로그램에서 일부 데이터를 변경

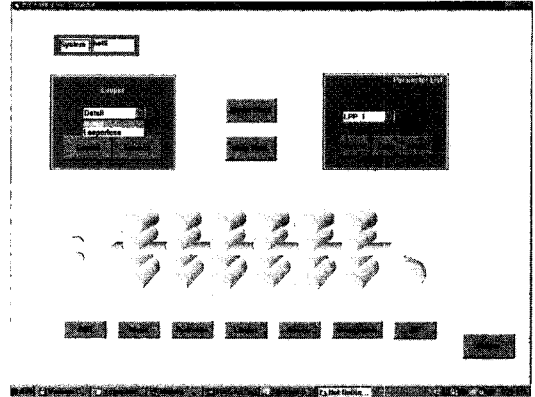


Fig. 8 Main display of the hot rolling mill simulator

하게 되면, 수정과 동시에 그 정보가 DDE 기능을 통해 시뮬레이션 프로그램인 MATLAB으로 전달되어 시뮬레이션에 반영되도록 하였다. Fig.8은 개발된 시뮬레이터의 초기화면을 나타내는 그림이다.

### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

개발된 시뮬레이터의 정당성, 즉 열간압연의 물리적 특성에 대한 시뮬레이션 결과가 타당성을 갖는 지에 대한 고찰과 모델링된 여러 제어기의 동특성을 파악해 보기 위해 차례로 시뮬레이션을 실시하였다. Table.2는 시뮬레이션에 사용된 계산조건을 나타내는 것으로서 실제의 열간압연 공장에서 사용된 압연조건이다. 즉, 압연판의 폭이 1,114 mm이고 두께가 40.3 mm인 강판을 6개의 압연기를 이용하여 3.44 mm의 두께로 압연하는 조건이다.

Table 1 Application softwares used for developing the hot rolling mill simulator

Item	Software	Functions
Program Manager	Visual Basic 5.0	-GUI(Graphic User Interface) -Program control
Simulation	Excel 5.0	-Set parameter values for facilities -Set initial conditions for simulation
	MATLAB 4.2	-Basic calculation for rolling phenomena
	Simulink 1.0	-Dynamic simulation
Display & Evaluation	Labview 4.0	-Display measured and simulated data -Analysis for simulated data

**Table 2 Simulation conditions for hot rolling process**

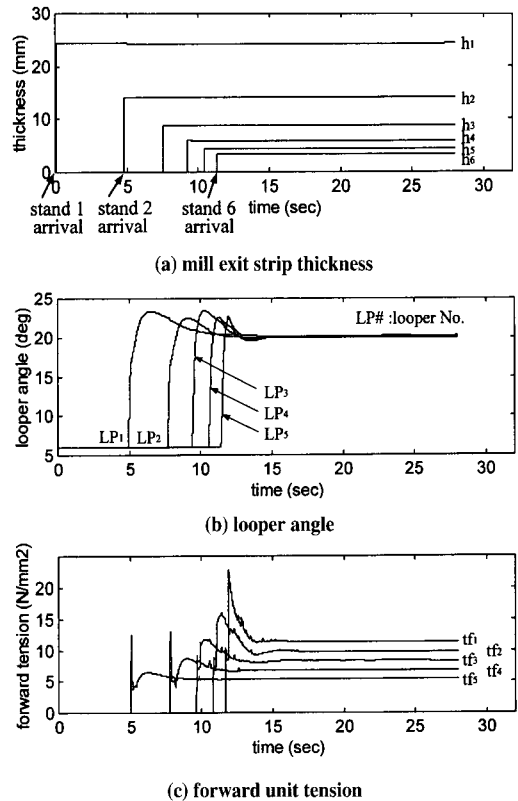
Item \ Stand No.	1	2	3	4	5	6
Entry thickness (mm)	40.13	24.24	14.07	8.82	5.99	4.39
Exit thickness (mm)	24.24	14.07	8.82	5.99	4.39	3.44
Forward tension (N/mm <sup>2</sup> )	0	5.39	6.762	8.232	9.702	11.172
Backward tension (N/mm <sup>2</sup> )	5.39	6.762	8.232	9.702	11.172	0
Looper angle (deg)		20	20	20	20	20
Strip temperature (°C)	1007.6					
Width (mm)	1114					

**4.1 열간압연의 동적 특성**

열간압연의 사상압연 공정에서 가장 특징적인 것은 통판압연 (threading rolling) 과정이다. 이것은 두께가 대략 35 내지 45 mm 정도인 강판의 선단부가 1번 압연기로부터 마지막 6번 압연기까지 연속적으로 압연되면서 통과해나가는 과정을 의미한다. 강판의 선단부가 각각의 압연기를 통과할 때, 압연기에 설치된 여러 가지 설비인 롤갭 제어기, 롤속도 제어기 그리고 루퍼 등이 차례로 구동하게 되며, 선단부가 마지막 압연기를 빠져 나오는 순간에 판의 두께가 목표치에 근접되도록 모든 제어기가 적절히 작동되어진다. 이와 같은 일련의 통판과정을 개발된 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션해 보았으며 그 결과는 Fig.9와 같다.

Fig.9의 (a)는 각 압연기의 출구측으로 빠져나오는 압연판의 두께가 시간에 따라 어떻게 변화해 가는가를 나타내는 그림으로써, 예상했던 바와 마찬가지로 압연이 진행되면서 두께가 점점 얇아지고 있음을 볼 수 있다. 또한, 계산된 결과로부터 Table.2에 나타낸 목표두께와 일치되도록 압연설비가 잘 구동되고 있음을 알 수 있었다. 한편, 같은 그림의 하단에 나타낸 판의 선단부가 각 압연기에 도달하는 시간이 점점 줄어드는 이유는 식(2)의 체적일정법칙을 만족시키기 위해서 두께의 감소에 반비례하여 압연판의 진행속도가 증가했기 때문이다.

한편, Fig.9의 (b)와 (c)는 각각 통판과정에서의 루퍼의 구동특성과 이에 따른 압연판 내에 발생하는 장력의 변화를 나타낸다. 두 개의 압연기 사이에 존재하는 루퍼는 전방 (up-stream) 의 압연기에 판이 치입한 후 약 0.1초가 경과되어야 작동되도록 되어있다. 예를 들어, 1번 압연



**Fig. 9 Dynamic characteristics of hot rolling process during passage through 6 stands**

기와 2번 압연기 사이의 루퍼는 압연판이 2번 압연기를 통과한 후에 작동한다. Fig.9의 (b)는 이와 같은 루퍼의 구동특성을 잘 나타내어 주고 있다. 2번 압연기에 압연판



이 치입된 후 약간의 시간이 경과되자 루퍼는 구동을 시작하여 목표각도인 20도를 맞추기 위해 급격히 상승되고 있다. 또한 다른 모든 루퍼도 각각의 구동시점에 맞추어 적절히 구동하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 구동초기에 제어특성상 약간의 오버 슈트(over shoot)가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 일단 루퍼의 구동이 시작되면 Table.2에 나타낸 루퍼의 각도와 장력을 동시에 목표치로 유지하기 위해서 2.3.3절에서 언급한 루퍼제어 기능이 자동으로 작동하게 된다.

루퍼의 상승에 따라 압연기 사이에서 무장력으로 유지되어 있던 압연판에는 Fig.9의 (c)에서 볼 수 있는 바와 같이 장력이 발생하게 되며, 발생된 장력은 급격히 상승되었다가 일정시간이 경과된 후에 목표치로 수렴되도록 자동제어 된다. 한편, 초기장력의 크기가 대단히 큰 것은 전술한 루퍼의 오버슈트에 기인한 것으로 생각된다. 이와 같은 초기장력 과다는 압연판의 선단부에서의 판두께와 판폭을 줄어뜨리게 하므로 품질불량의 원인이 되고 있다.

Fig.9의 통관과정 시뮬레이션 결과는 실제 압연과정에서 측정된 결과와 아주 잘 일치하고 있어서 개발된 시뮬레이터가 열간 압연의 물리적인 특성을 잘 반영하고 있음을 보여주는 것이다.

#### 4.2 압연설비 및 제어기의 동적 특성

다음은 시뮬레이터에 반영된 열간 압연기의 여러 가지 설비중 가장 중요한 압하장치와 주동력 모터 그리고 여러 가지 제어기에 대한 동특성 해석결과이다.

##### 4.2.1 압하장치 및 주동력 모터

Fig.10은 압연판의 선단부가 1번 압연기에 치입되는 순간으로부터 2초까지의 압연과정을 보다 상세히 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 압연의 시작부터 약 0.5초까지의 결과를 자세히 살펴보면, 압연부하, 즉 압연하중 (Fig.10의 (a) 참고)에 대한 압하장치와 주동력모터의 응답특성을 잘 파악할 수 있다.

Fig.10의 (b)로부터 압연판의 치입과 동시에 압연기의 롤갭은 설정치인 21.05 mm로 부터 약 0.02 mm 정도 개방되고 있음을 알 수 있다. 이것은 압연기가 기계구조물 이므로 순간적인 큰 부하에 의해 일시적으로 탄성변형을 일으키는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 유압 시스템으로 구성된 압하장치의 롤갭제어 의해 약 0.5초 후에는 목표치로 제어되고 있음을 볼 수 있다. 갑작스런 롤갭의 개방으로 인해 압연소재는 목표치보다 적게 압연될 것이므로

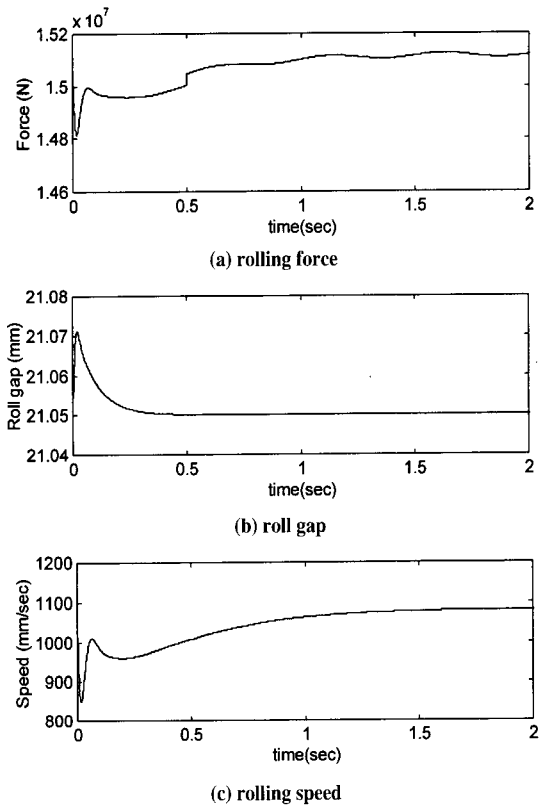


Fig. 10 Dynamic characteristics of the roll gap control system and main motor during threading rolling at No. 1 stand

압연하중은 순간적으로 줄어들게 되지만, 이후 압하장치의 롤갭 제어에 따라 압연하중은 다시 증가하고 있다.

한편, 주동력 모터의 동특성을 나타내는 Fig.10의 (c)를 살펴보면, 앞서의 압하장치와 마찬가지로 급격한 압연부하 토크로 인해 압연속도가 순간적으로 크게 감소하게 됨을 알 수 있다. 압연판이 치입되기 전에 약 1010 mm/sec의 주속도로 공회전을 하고 있던 주동력 모터는 압연판의 치입과 동시에 약 850 mm/sec로 급격히 감소하게 된다. 이와 같이 부하에 의해 주동력 모터의 속도가 급격히 감소하는 현상을 충격에 의한 감속(impact drop)이라고 표현하기도 한다. 그러나 롤갭의 거동과는 달리 감소된 속도가 목표치까지 회복되는 데에는 상당한 시간이 경과되어야 함을 볼 수 있다. 이와 같은 이유는 2.3.2절에서 밝힌바와 같이 주동력 모터 시스템은 전동기 자체뿐만 아니라 작업롤, 스펀롤 그리고 감속기어 등과 같은 기계장치를 포함하고 있기 때문에 이들의 기계적 관성이 압연속

도의 회복을 지연시키는 요인으로 작용한다고 생각할 수 있다. 그리고 모델링된 주동력 모터 시스템의 시정수를 실측한 결과 130 ms로 나타났으므로 35 ms의 시정수를 갖는 압하장치에 비해 제어 응답성이 낮은 것은 당연한 결과로 받아들일 수 있다.

#### 4.2.2 루퍼 제어기

열간 사상압연기에 설치된 5개의 루퍼는 모두 동일한 제어로직에 의해 작동되므로 5개의 루퍼중 첫 번째 루퍼, 즉 1번 압연기와 2번 압연기 사이에 설치된 루퍼에 대한 동작 특성만을 소개한다. Fig.11은 통판과정에서 구동되

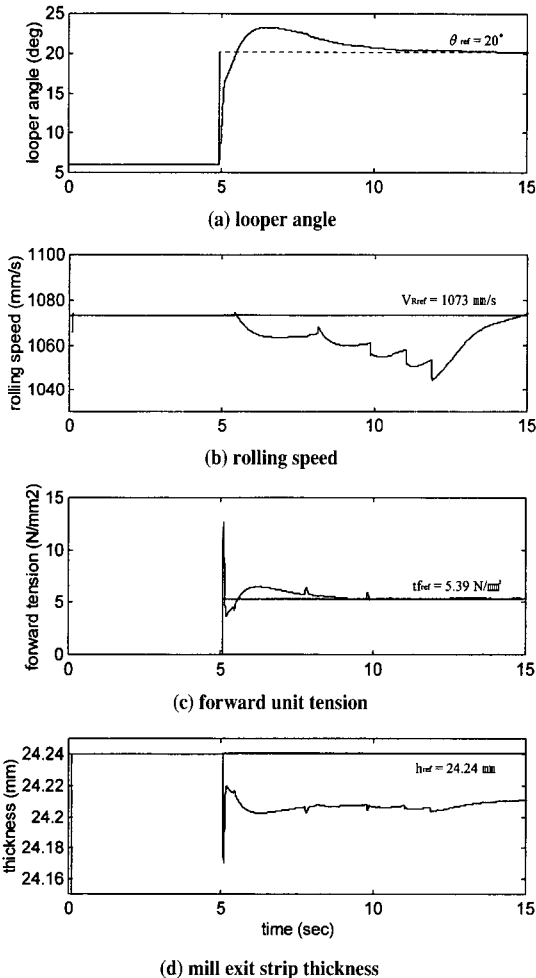


Fig. 11 Dynamic behavior of the looper control system and its effect on the rolling characteristics during threading rolling

는 루퍼의 운동특성과 관련된 여러 가지 압연현상을 나타내는 그림이며, 그림에서 점선으로 표시된 것은 해당 인자의 기준치를 나타내고 있다. 앞서 열간압연 현상의 동특성을 기술하는 과정에서 이미 언급한 바와 같이 첫 번째 루퍼는 2번 압연기에 압연판이 치입되어야 작동을 시작한다. 따라서 (a) 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 압연 개시 후 약 5초가 경과해야 루퍼가 작동함을 볼 수 있다.

최초에 6도로 설정되어 있던 루퍼가 루퍼 전동기에 의해 본격적으로 구동을 시작하게 되면 재빠르게 목표치인 20도로 상승하게 되나 비교적 큰 루퍼의 관성력과 과도한 적분제어기의 이득(gain) 때문에 오버슈트되는 현상이 발생하게 된다. 무장력상태로 압연기 사이에 걸쳐져있던 압연판에는 루퍼의 상승과 함께 급격한 장력이 발생하게 된다. 불과 0.2초만에 압연판의 장력은 목표치인 5.39 N/mm<sup>2</sup>의 두배가 넘는 큰 장력이 발생(그림(c)참고)되므로 루퍼 제어기는 이를 보상할 목적으로 루퍼의 상승속도를 줄여주게 된다. 그림(a)에서 루퍼 각도의 상승속도가 약 16도 정도를 전후해서 달라지고 있음은 이를 잘 설명해 주는 결과이다. 이에 따라 압연판내의 장력은 어느 정도 목표치에 접근하게 됨을 볼 수 있다.

그러나 적절한 압연판내의 장력제어에도 불구하고 여전히 루퍼의 각도는 오버슈트에 의해 기준치인 20도 보다 약 3도 가량 높게 상승되어있으므로 이를 낮추어 주어야 한다. 루퍼각도는 LHC(Looper Height Control)라고 하는 기능에 의해 제어되어진다. 이 기능은 2번 압연기의 압연속도는 그대로 유지한 채로 1번 압연기의 속도를 낮추게 되면 루퍼가 지탱하고 있는 압연판의 길이가 짧아지게 되어 압연판이 루퍼를 강제로 내려 누르게 됨으로써 루퍼의 각도를 낮추는 것이다. 그림(b)를 보면 이와 같은 LHC의 기능을 잘 이해할 수 있다. 루퍼의 각도가 기준각도 보다 커지는 순간부터 1번 압연기의 속도가 줄어들고 있음을 볼 수 있다.

그렇지만 LHC의 기능은 결국 압연판의 장력을 상승시키는 역할을 하므로 그림(c)에서와 같이 또다시 장력은 커지게 된다. 그러므로 압연판의 장력과 루퍼의 각도 두가지를 동시에 목표치로 유지하기 위해서는 루퍼 전동기와 1번 압연기의 주동력 모터를 적절히 제어해 주지 않으면 안되는 것이다.

그림(d)는 압연판의 두께변화를 나타내는 그림으로써, 루퍼의 작동과 함께 발생된 압연판 내의 장력이 두께를 감소시키고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 장력이 소성변형을 일으키는 요인이 되고 있으며, 장력이 최고치에 도달하

는 순간에 판두께도 최소로 되고 있음을 보여주고 있다.

#### 4.2.3 판두께 제어기

6 대의 사상압연기에는 모두 두께 제어기가 설치되어 있으므로 두께제어기의 제어 특성을 파악하는 데는 연속된 2개의 압연기만을 대상으로 시뮬레이션 하여도 무방하다. 따라서 본 연구에서는 6 대의 압연기 중에서 5번과 6번 압연기만을 대상으로 두께 제어기의 외란( disturbance ) 에 대한 제어성능을 평가해보았다.

Table.2에 나타난 시뮬레이션 조건 중에서 5번과 6번 압연기에 대한 데이터만을 취하였으며, 두께 제어기의 성능을 평가하기 위한 외란으로는 압연소재에 일정한 크기

의 두께편차를 인위적으로 발생시키는 것으로 하였다. 이것은 일정한 속도에서 정상적으로 압연하던 도중에 5번 압연기로 들어오는 판의 두께가 스텝( step ) 형태로 갑자기 두꺼워지는 것을 의미하며, 이에 따라 제어기가 어떻게 판두께를 목표치로 제어해 나가는가를 살펴보았다. 인가된 외란의 크기는 0.018 mm로 소재두께 5.99 mm의 0.3%에 해당하는 값이다.

Fig.12의 (a)로부터 (d)까지는 차례로 두께제어를 하지 않은 경우와 Roll Force AGC, Feedback AGC 만을 사용한 경우 그리고 마지막으로 Roll Force AGC와 Feedback AGC를 함께 사용한 경우에 대한 제어성능을 나타내는 그림이다. 각 그림의 상단부에 있는 실선은 5번 압연기의 출구측 두께를 나타내고 하단부에 있는 실선은 6번 압연기 출구측에서의 두께를 의미한다.

그림 (a)로부터 알 수 있는 바와 같이 두께제어를 하지 않게되면 압연이 종료된 상태인 6번 압연기 출측에서 약 0.0023 mm 정도로 여전히 판두께 편차가 잔류하게 된다. 당초 0.018 mm 었던 두께편차가 제어를 하지 않았음에도 불구하고 0.0023 mm로 줄어들게 되는 것은 두 개의 압연기를 통과하면서 판두께가 줄어들었기 때문에 같은 비율로 두께편차도 줄어들게 된다.

그런데 Roll Force AGC만을 사용하여 판두께 제어를 하게 되면 그림 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 두께편차량이 급격히 줄어들게 됨을 알 수 있다. Roll Force AGC는 압연하중의 편차에 근거하여 제어하므로 두께편차에 의해 압연하중의 편차가 발생하게 되면 그 즉시 제어기가 작동하게 된다. 따라서 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 압연의 개시와 함께 제어기가 작동하여 적절한 제어성능이 발휘되고 있고, 외란이 발생하고 나서 약 2.5초 후부터는 비교적 작은 양만의 두께편차가 잔류하고 있음을 알 수 있다.

그러나 Feedback AGC만을 사용한 그림 (c)의 경우에는 제어기의 성능이 충분히 발휘되지 못하여 외란 발생으로부터 약 5초정도 지나야 Roll Force AGC와 같은 정도의 제어성능을 보이고 있다. 이러한 원인은 x-ray 두께측정기를 사용하는 Feedback AGC의 특성상 압연판의 선단부가 6번 압연기로부터 두께측정기가 설치된 위치까지 도달하는 데 필요한 시간 지연이 제어기의 성능을 저하시키는 요인이 되고 있다.

한편, Roll Force AGC와 Feedback AGC를 함께 사용하게 되면 두 제어기의 장점을 살릴 수 있어서 두께 제어성능을 충분히 확보할 수 있다. 그림 (d)는 이 경우에 대한 제어성능을 나타내는 시뮬레이션 결과로써 판두께 편

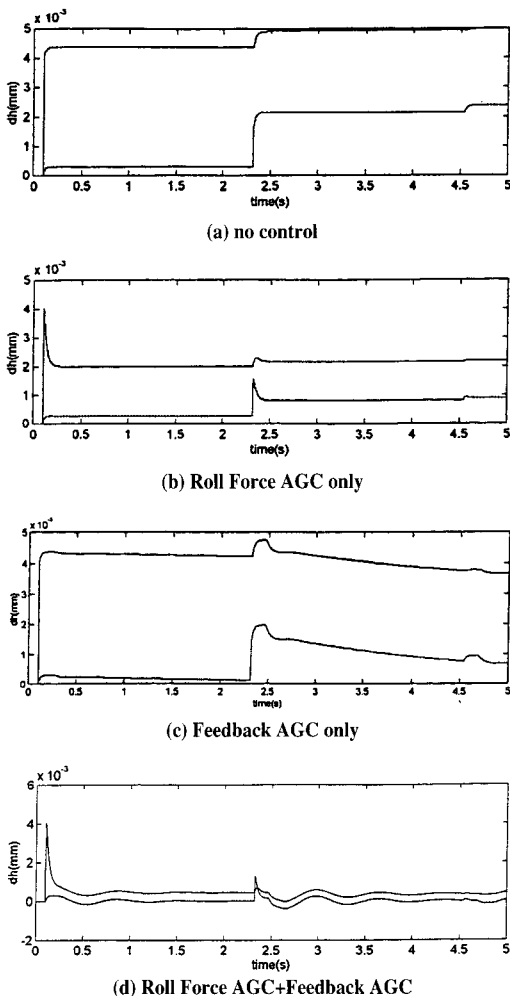


Fig. 12 Comparison of the effects of AGC on thickness controllability

차가 제어초기부터 대부분 소멸되어 압연판에 잔류된 두께편차는 거의 없음을 볼 수 있다.

#### 4.3 시뮬레이션 결과의 정확성

앞서 상세하게 기술한 각 설비와 제어기의 개별적인 특성을 종합하고 개발된 시뮬레이터가 실제의 압연상황을 어느 정도 정확하게 묘사해낼 수 있는지를 살펴보기 위해 실제의 압연공장에서 측정된 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교해 보았다. Fig.13은 사상압연기의 후방에 설치된 측정기로 측정한 압연판의 두께, hmea와 동일한 압연조건으로 시뮬레이션 하여 얻어진 판두께 hcal을 비교한 것이다. 이때의 압연조건은 앞서의 다른 시뮬레이션과 마찬가지로 Table.2와 같다.

Fig.13의 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 통상적으로 하나의 열간압연 코일( coil ) 제품을 생산하는 데는 약 1분 정도 소요되며, 압연된 코일의 전체길이는 약 2 km 정도가 된다. 그리고 압연판의 선단부와 후단부에서는 통판과정과 판 빠짐이라고 하는 비정상적인 압연과정 때문에 판

두께가 목표치로부터 많이 벗어나고 있음을 볼 수 있다.

시뮬레이션 결과인 그림 (b)를 실측 데이터와 비교한 그림 (c)를 살펴보면, 시뮬레이션 오차가 압연판의 선, 후단부에서 비교적 크게 나타나고 있지만 전체적으로는 시뮬레이션 결과가 실측 데이터와 아주 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션 결과에 높은 주파수 성분이 포함되어 있는 것은 시뮬레이션의 정확도를 높이기 위해 계산 주기를 두께측정 주기인 10 ms보다 짧은 3 ms로 하였기 때문이다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 열간 사상압연공정을 시뮬레이션할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 열간압연의 물리적 특성은 잘 정립된 압연 이론식을 사용하여 모델링 하였으며, 압하장치, 주동력 모터, 루퍼 그리고 두께제어기 등의 압연설비는 실제 시스템의 제어로직을 그대로 사용하여 프로그래밍 하였다. 프로그램의 개발 도구는 대부분 상용프로그램을 이용하여 신뢰성을 높였다.

개발된 시뮬레이터를 이용하여 여러 가지 시뮬레이션을 해본 결과 압연현상의 물리적 특성은 물론 압연설비의 제어기에 대한 동특성이 잘 반영되고 있음을 알 수 있었다. 특히, 동일한 압연조건에서의 실측 데이터와 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 개발된 시뮬레이터가 실제의 압연현상을 정확히 묘사하고 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 개발된 시뮬레이터는 열연공장에서 발생되는 두께제어관련 문제점의 원인분석은 물론 해결방안을 제시할 수 있는 도구로 사용될 수 있을 것이다. 특히, 실제압연을 직접하지 않고도 제어기의 설계가 가능함으로써 새로운 두께제어기술의 개발에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료 된다.

#### 참고문헌

- (1) Orowan, E., 1943, "The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling", IME Proceedings, Vol.150, pp.140~148.
- (2) Stone, M. D., 1953, "Rolling of Thin Strip", Iron and Steel Engineer, February, pp.61~74.
- (3) Bryant, G. F., 1973, "Automation of Tandem Mills", The Metals Society Publication, No.160, London.

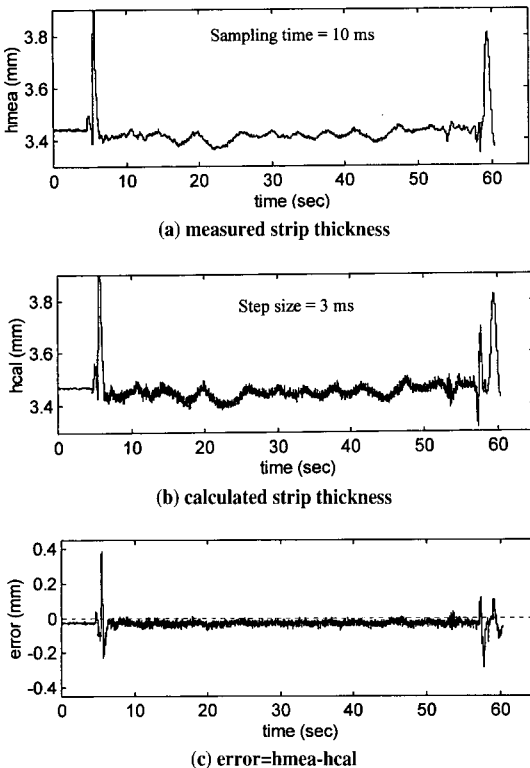


Fig. 13 Relation between measured strip thickness and calculated one at the exit side of No.6 stand

- (4) King, P. J. and Mamdani, E. H., 1977, "The Application of Fuzzy Control System to Industrial Process", *Automatica*, Vol.13, pp.235~241.
- (5) 平明典外, 1991, "水島ホット仕上ミルへの絶対値AGCの適用", *CAMP-ISIJ*, Vol.4, pp.1557.
- (6) 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.
- (7) Ogai, H., Naganuma, Y., Tanaka, K. and Masuda, S., 1991, "Development of Steelmaking Plant Simulators", *Nippon Steel Technical Report*, No.34, pp.50~55.
- (8) Sekiguchi, K., Miyokawa, M. and Tsuchiya, H., 1992, "Process Control Technology for Steel Plants", *Toshiba Review*, 1992, Vol.47, No.8, pp.608~611.
- (9) Edwards, J. and Spooner, P., 1995, "7th International Rolling Technology Course Documentation", IAS in Australia
- (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) 八田 夏夫, 小門 純一, 1981, "半連続式と同じミル配列の熱間壓延設備におけるスラブの温度變化, 壓延動力および壓延能力の検討", *鐵と鋼*, Vol.67, No.1, pp.133~142.
- (12) 志田 茂, 1970, "熱間壓延における壓延荷重", *日立評論*, Vol.52, No.8, pp.731~736.
- (13) Choquet, P., 1983, "A New Model for Accurate Prediction of Rolling Force Application on the Solmer Hot Strip Mill", *4th International Steel Rolling Conference*, Vol.1, B5.1~B5.8.
- (14) Sims, R. B., 1954, "The Calculation of Roll Force and Torque in Hot rolling Mills", *Proc. Institution Mechanical Engineers*, Vol.168, pp.191~200.