실시간 분산 열연 두께제어 시스템의 설계 및 현장적용

이 호 훈*

(1998년 3월 3일 접수)

A Real-time Distributed AGC System for a Hot Strip Mill

Ho-Hoon Lee

Key Words : Hot Rolling(열간 압연), Hot Strip Mill(열간 압연기), AGC(Automatic Gauge Control, 자동 두께 제어), Distributed Control(분산 제어), Real-time Control(실시간 제어), Real-time Operating System(실시간 운영체계), VMEbus System(VMEbus 시스템). Loop Shaping Method(루프 형성법)

Abstract

This paper describes a new 14-CPU real-time distributed automatic gauge control (AGC) system for POSCO's No. 2 Hot Strip Mill at Pohang Works. The new AGC system has adopted gaugemeter AGC, Monitor AGC, and roll gap disturbance compensators. The computer system for the new AGC system has been developed based on VMEbus computer systems and a commercial real-time operating system. A VMEbus computer system is also used for the position servo control of hydraulic cylinders. All the application programs and input/output signals have been reasonably distributed over the control computer systems for the maximum reliability and effectiveness of the system. The new AGC system has been successfully used for the No. 2 Hot Strip Mill.

1. 서 론

압연 공정은 제철 산업에서 가장 중요한 공정 중의 하나이다. 압연 공정은 두꺼운 강슬라브(steel slab)를 압연하여 얇은 강판(steel strip)을 만드는 공정으로서, 최종 제품의 두께, 형상, 폭에 대한 치수 정밀도를 확보하는 것이 중요하다. 압연 공정은 압연재의 압연 온도에 따라 구분하며, 재결정 온도 이상의 열연 공정과 재결정 온도 이하의 냉연 공정으로 나눌 수 있다. 이러한 압연 공정에 대한 제어는 고정밀도, 고난도의 기술을 필요로 하며, 일본, 유럽, 북미 국가들이 이 기술을 독점하여 왔다.

열연 공정은 가열로, 조압연기(roughing mill), 사상압연기(finishing mill), 권취기 등으로 구성되어 있다. 강슬라브를 가열로에서 재결정 온도 이상으로 가열한 후 조압연기에서 중간 두께로 조압연하고, 사상압연기에서 최종 압연을 한 후 권취기에서 감아서 핫코일(hot coil)을 만든다. 따라서, 사상압연기는 최종 제품의 두께 품질에 가장 큰 영향을 미치며 고정밀도의 제어가 요구된다. 사상압연기는 보통 4~7개의 스탠드(stand)로 이루어져 있다. 각각의 스탠드는 하우징 안에 한 쌍의 워크롤(work roll)을 한 쌍의 백업롤(back-up roll)이 지지하고 있다. 백업롤은 유압 실린더나 전동 스크루를 통하여 구동된다. 스탠드 사이에

*회원, 수원대학교 기계공학과

는 루퍼(looper)가 설치되어 강판의 스탠드간 장력을 제어하고 질량 유동률(mass flow rate)을 측정한다.

사상압연기 제어는 롤간격 제어, 롤속도 제어, 루퍼장력(스탠드간 강판 장력) 제어로 구성된다. 최근에는 수요가의 요구에 따라서 별도의 형상제어가 흔히 포함된다. 압연이 시작되기 전에 설정(setup) 모델을 이용하여 각 스탠드의 롤간격, 롤속도를 미리 설정한다. 강판이 스탠드에 취입되면 루퍼장력 제어를 시작하고, 롤속도와 롤간격에 대한 제어를 시작한다. 이 때, 롤간격 제어를 "AGC(Automatic Gauge Control)"라 부른다.

사상압연기 제어 시스템은 총괄(supervisory) 컴퓨터와 다수의 실시간(real time) 제어 시스템으로 구성되어 있다. 총괄 컴퓨터는 설정 모델을 이용하여 압연 시작 전에 각 스탠드의 압연 설정치를 계산하여 실시간 컴퓨터로 전송한다. 또한, 압연 후에는 설정 모델의 계수를 보정하고, 압연 데이터를 분석, 정리, 저장하며, 외부 컴퓨터 시스템과의 통신에 주로 사용된다. 실시간 제어 시스템은 총괄 컴퓨터로부터 전송받은 압연 설정 데이터를 기초로 각 스탠드의 롤간격, 롤속도, 루퍼장력 제어를 담당한다. 압연 제어 시스템은 롤간격, 롤속도, 루퍼장력 등이 서로 복잡하게 영향을 미치는 다변수 시스템이지만 지금까지는 단일 입출력 시스템 제어 방법에 입각하여 롤간격, 롤속도, 루퍼장력을 독립적으로 제어하고 있다. 그러나, 최근에는 H_∞, LQG/LTR 등의 다변수 제어이론을 압연공정에 적용하려는 연구가 추진되고 있다.[1,2]

본 연구의 목표는 포항제철 포항 2열연공장에서 10년 이상 사용하여 노후화된 영국 Davy사의 PDP-11 사상압연기 AGC 시스템을 대체할 새로운 AGC 시스템을 독자 개발하는 것이다. 1차년도에서는 기존 AGC 시스템과 동일한 기능을 갖는 새로운 시스템을 개발하는 것이 목표이고, 2차년도에서 새로 개발한 시스템을 보완하고 새로운 기능을 추가하여 세계 최고의 성능을 갖는 AGC 시스템을 개발하는 것이다. 본 논문에서는 1차년도(1995.7.1~1996.9.30)에서 수행한 연구 결과 및 현장적용 결과를 정리하여 발표한다.

본 연구에서는 Gaugemeter AGC, Monitor AGC, 롤간격 외란 보상기를 현장 조건을 고려하여 재설계하고 새로운 AGC 시스템을 개발하여 포항 2열연공장에 적용하였다. 새로운 AGC 시스템은 VMEbus시스템[3,4,5]으로서 MC68040 CPU 보드 14장을 기본으로 한 실시간 분산 제어 시스템으로 구성하였으며 상업용 실시간 운영체계(operating system)를 사용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서 압연 프로세스를 모델링하고, 단일 스탠드 AGC 시스템의 설계 순서와 방법, 제어 이득 설정 방법을 기술한다. 또한, Gaugemeter AGC가 롤간격 외란을 증폭시키는 원리를 기술하고 외란 보상기와 feed forward 보상기를 설계한다. 3절에서는 2절에서 설계한 AGC 시스템을 기초로 응용 software를 설계하고, task scheduling과 software 개발 환경을 설명하며, 4절에서 분산 제어 컴퓨터의 구성과 제어로직 배분에 대하여 기술한다. 5절에서 새로운 시스템을 현장에 설치하고 적용하기 위한 제어이득 조정 및 현장 테스트 과정, 실압연 결과를 소개하며, 6절에서 본 연구의 결론을 맺고 향후 계획을 밝힌다.

2. 강판의 두께제어 이론

2.1 압연 프로세스 모델링

압연 현상은 압연기 스탠드의 탄성특성과 압연재(강판)의 소성특성에 의하여 다음과 같이 기술할 수 있다.[6]

$$h = f_1(s_r, p) \tag{1}$$

$$p = f_2(H - h) \tag{2}$$

여기서, f_1과 f_2는 비선형 함수를 의미하고, h는 출측 강판두께, H는 입측 강판두께, s_r는 롤간격, p는 압연하중을 나타낸다.

H, h, s_r, p의 설정치를 각각 H_o, h_o, s_o, p_o라 할 때, 이들 설정치에 대하여 식 (1)과 (2)를 선형화하면 다음과 같이 Gaugemeter식 (3)과 강판의 소성특성식 (4)를 구할 수 있다.[6]

$$\Delta h = \Delta s + \frac{\Delta p}{M} \tag{3}$$

$$\Delta p = Q(\Delta H - \Delta h) \tag{4}$$

여기서, Δ는 설정치에 대한 편차를 의미한다. 즉, $\Delta h = h - h_o$이며, ΔH, Δs, Δp도 유사하게

정의한다. M과 Q는 설정치를 기준으로한 압연기의 스프링 상수와 강판의 소성계수를 각각 나타낸다.

Gaugemeter식 (3)과 소성특성식 (4)에서 출측두께 Δh를 소거하면 다음의 압연 프로세스 모델을 구할 수 있다.

$$\Delta p = \frac{MQ}{M+Q}(\Delta H - \Delta s) \tag{5}$$

이 모델은 롤간격 편차 Δs에 대한 압연하중 편차 Δp의 관계를 나타낸다. 또한, 입측 두께 편차 ΔH가 압연하중 편차 Δp에 미치는 영향을 나타낸다.

2.2 강판의 두께제어

2.2.1 단일 스탠드 AGC

단일 스탠드 AGC 시스템은 Gaugemeter식 (3), 압연 프로세스 모델 (5), 유압 실린더의 위치 동특성 $G_c(s)/s$을 기초로 Fig. 1과 같이 구성된다.

Fig. 1에서 유압 실린더의 위치 서보제어기 $K_h(s)$를 포함한 롤간격 서보제어계를 "내부 궤환루프(inner feedback loop)"로 표시하였다. 내부 궤환루프 위에 Gaugemeter AGC k_g/M로 이루어지는 "중간 궤환루프(middle feedback loop)"를 구성한다. 여기에, 롤간격에 대한 외란 Δs_d를 포함시키고, 롤간격 외란 보상기 Δs_c와 ΔH에 대한 보상기 ΔH_{ff}를 포함시켰다. Δs_a는 외란이 포함된 실제의 롤간격을 의미한다. 중간 궤환루프 위에 Monitor AGC $K_m(s)$와 두께 측정지연 e^{-sT}를 포함하는 "외부 궤환루프(outer feedback loop)"를 구성하여 Δh를 제어한다. Δh_r은 Δh의 기준입력을 의미한다. 본 논문에서 s는 Laplace 변환과 관련된 복소수 변수를 의미한다.

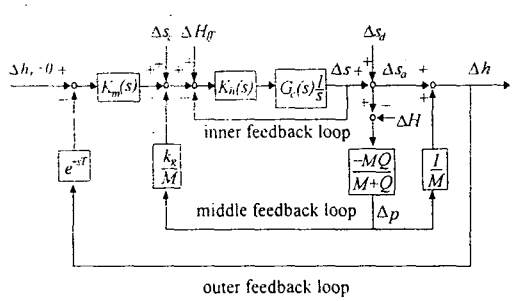

Fig. 1 Block diagram of a single stand AGC system.

2.2.2 단일 스탠드 AGC 설계

유압 실린더의 동특성은 대개 1차 혹은 2차 동역학 시스템으로 모델링한다. 본 연구에서는 실린더 서보밸브의 입력 전압에 대한 실린더 유량(flow rate) 동특성 $G_c(s)$의 저주파 이득 k_c와 주파수 대역 k_b를 기초로 $G_c(s)=k_c k_b^2/(s+k_b)^2$으로 모델링한다. Fig. 1에서 단일 스탠드 AGC는 내부, 중간, 외부 궤환루프의 순서로 설계한다.

내부 궤환루프의 실린더 위치 서보제어기 K_h는 루프 형성법(Loop Shaping Method)[7]을 사용하여 설계한다. 즉, 저주파 영역에서 명령 추종성과 외란 제거성능, 고주파 영역에서 센서잡음 제거성능과 견실 안정성, 교차(crossover) 주파수에서 공칭 안정성 등을 만족하도록 내부 궤환루프의 개루프 전달함수 $G_{io}(s)(\equiv K_h(s)G_c(s)/s)$를 다음과 같이 설계한다.

$$G_{io}(s) = \frac{s+k_{ia}/k_{ib}}{s} \cdot \frac{k_{ib}}{s} \cdot \frac{k_b}{s+k_b} \tag{6}$$

여기서, k_{ia}와 k_{ib}는 $k_{ia}/k_{ib} \ll k_{ib} \ll k_b$를 만족하는 설계 상수이며, k_{ib}는 $G_{io}(s)$의 교차 주파수이다. 그런데, $K_h(s)=sG_{io}(s)/G_c(s)$이므로 $K_h(s)$는 아래와 같이 PID(비례/적분/미분) 제어가 된다.

$$K_h(s) = \frac{1}{k_c}\left[\frac{k_{ib}}{k_b}s + \left(\frac{k_{ia}}{k_b}+k_{ib}\right) + \frac{k_{ia}}{s}\right] \tag{7}$$

이때, 내부 궤환루프의 폐루프 전달함수 $G_{ic}(s)$ $(\equiv \Delta s/\Delta H_{ff})$는 아래와 같이 주어진다.

$$G_{ic}(s) = \frac{k_b(k_{ib}s+k_{ia})}{s^3+k_b s^2+k_b k_{ib}s+k_b k_{ia}} \tag{8}$$

내부 궤환루프를 설계한 후 Gaugemeter AGC를 포함하는 중간 궤환루프를 설계한다. Gaugemeter AGC는 압연하중 편차를 궤환시켜 롤간격 편차를 제어함으로써 출측두께 편차를 간접적으로 제어하는 방식이다. 중간 궤환루프의 폐루프 전달함수 $G_{mc}(s)(\equiv \Delta s_a/\Delta s_c)$는 내부 궤환루프의 폐루프 전달함수 $G_{ic}(s)$를 사용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$G_{mc}(s) = \frac{G_{ic}(s)}{1-k_g Q G_{ic}(s)/(M+Q)} \tag{9}$$

중간 궤환루프는 Gaugemeter AGC 제어이득이 $k_g<(1+M/Q)$을 만족할 때 안정성이 확보되며 실제로는 $0<k_g\leq 1$으로 설정한다.

마지막으로, Monitor AGC $K_m(s)$를 포함하는 외부 궤환루프를 중간 궤환루프 $G_{mc}(s)$와 두께 측정지연 e^{-sT}에 기초하여 설계한다. 두께계를 설치한 스탠드에서 $T\ll 1$이므로 본 논문에서는 두께 측정지연 e^{-sT}는 Padè 근사화하여 사용한다. 그러면, 외부 궤환루프의 개루프 전달함수 $G_{oo}(s)$는 다음과 같다.

$$G_{oo}(s) = \frac{M}{M+Q}K_m(s)G_{mc}(s)e^{-sT} \simeq \frac{MK_m(s)G_{ic}(s)}{(M+Q)-k_gQG_{ic}(s)}\frac{(1-sT/2)}{(1+sT/2)} \quad (10)$$

Monitor AGC는 $G_{oo}(s)$가 충분한 위상여유(phase margin)와 최대의 교차 주파수를 확보할 수 있도록 $K_m(s)=k_{mi}/s+k_{mp}$로 설계하고, $k_{mi}>0$, $k_{mp}\geq 0$를 설정한다. k_{mi}와 k_{mp}는 M, Q, T, k_g의 함수이다. Monitor AGC는 출측 두께를 측정하여 강판의 두께를 직접 제어하는 방법으로 적분제어가 기본이다.

2.2.3 외란보상 및 Feed forward 제어

압연 공정에서 롤간격 외란 Δs_d가 Gaugemeter AGC에 의하여 증폭되는 현상은 잘 알려져 있다. 이는 다음과 같이 해석할 수 있다. 외부 궤환루프가 없을 때 $\Delta s_a/\Delta s_d$는 아래와 같다.

$$\frac{\Delta s_a}{\Delta s_d} = \frac{1}{1-k_gQG_{ic}(s)/(M+Q)} \quad (11)$$

내부 궤환루프의 $G_{ic}(s)$ 이득은 모든 주파수 영역에서 1 이하이다. 또한, $0<k_g\leq 1$으로 설정한다. 따라서, $\Delta s_a/\Delta s_d$의 이득은 1보다 크고 Δs_d는 증폭된다. 이것은 중간 궤환루프가 양(positive)의 궤환루프가 되기 때문이며, 음의 궤환루프가 외란의 영향을 억제하는 것과 대조적이다.

Gaugemeter AGC에 의하여 외란 Δs_d가 증폭되는 것을 방지하기 위하여 외란 보상기 Δs_c는 다음과 같이 설계한다.

$$\Delta s_c = -\Delta s_d \quad (12)$$

두께제어에 가장 큰 영향을 미치는 외란[8,9]으로는 워크롤의 마모, 워크롤의 열팽창, 냉각수 및 윤활유의 유막두께, 실린더와 유압 배관에서의 오일압축, 백업롤의 편심 등이 있으며, 각각의 외란은 실험을 통하여 구할 수 있다.[8]

입측두께 편차 ΔH도 위에서 검토한 외란처럼 두께제어에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 내부 궤환루프의 주파수 대역 내에서 ΔH를 완전히 보상할 수 있도록 ΔH에 대한 feed forward 보상기 ΔH_{ff}를 다음과 같이 설계한다.

$$\Delta H_{ff} = \frac{k_gQ}{M+Q}\Delta H \quad (13)$$

2.2.4 Mass Flow Rate의 보상

사상 압연에서는 폭을 일정하게 제어하므로 강판의 질량 유동률(mass flow rate)은 다음 식으로 주어진다.[10]

$$h_iv_i = h_{i+1}v_{i+1} \quad (14)$$

여기서, 하첨자 i와 $i+1$은 각각 i번째와 $i+1$번째 스탠드를 의미하고, v는 강판의 속도를 의미한다. 위의 질량 유동률 (14)를 압연 설정치를 기준으로 선형화하면 아래와 같다.

$$\Delta v_i = (\Delta h_{i+1}v_{oi+1} - \Delta h_iv_{oi} + h_{oi+1}\Delta v_{i+1})/h_{oi} \quad (15)$$

여기서, 하첨자 o는 설정치를 의미하고, Δ는 앞에서처럼 설정치와의 차이를 나타낸다.

스트립의 두께 변동은 질량 유동률의 변동을 초래하므로, 단일 스탠드 AGC시스템에서는 식 (15)의 Δv_i를 롤속도 및 루퍼장력 제어 시스템으로 전송하여 스트립의 두께 변동에 의한 질량 유동률의 변동을 보상한다. 따라서, 두께제어 시스템의 성능은 롤속도 및 루퍼장력 제어 시스템의 대역폭에 큰 영향을 받는다.

3. AGC Software 설계

3.1 사상압연기의 구조

포항 2열연공장의 사상압연기는 4단(high) 7스탠드 연속(tandem) 압연기이다. 모든 스탠드에 전동 스크루 압하장치와 로드셀(load cell)이 설치되어 있고, 4~7번 스탠드에는 유압 실린더가 추가로 설치되어 있다. 유압 실린더에는 위치 검출기가 설치되어 있으며, 7번 스탠드 뒤에는 두 개의

두께 검출기가 설치되어 있다. 또한, 스탠드 사이에는 루퍼가 설치되어 있다.

1~3번 스탠드는 스크루 압하 제어(screw down master) 시스템을 사용하여 롤간격을 제어한다. 4~7번 스탠드는 압연 전에 설정 데이터에 따라 스크루 압하 제어 시스템을 사용하여 스크루의 위치를 설정한 후 고정하고, 압연이 시작되면 PDP-11 AGC 시스템에 의하여 유압 실린더를 제어함으로써 롤간격을 제어한다. 한편, 롤속도와 루퍼장력은 별도의 실시간 제어 시스템에 의하여 제어된다. AGC 제어 시스템, 스크루 압하 제어 시스템, 롤속도 및 루퍼장력 제어 시스템은 필요한 정보를 디지털 입출력을 통하여 교환한다.

3.2 제어 Software 설계

본 연구에서는 4~7번 스탠드에 대한 PDP-11 AGC 시스템을 대체할 새로운 AGC 시스템을 자력으로 개발하는 것이 목표이다. 새로운 AGC 시스템은 각 스탠드에 대하여 앞 절에서 설계한 유압 실린더의 위치 서보제어, Gaugemeter AGC, Monitor AGC, 외란 보상 제어와 시퀀스 제어 등의 기능을 가지고 있다.

각 스탠드에서 유압 실린더의 위치 서보제어는 기존 시스템에서는 아날로그 컴퓨터에 의하여 수행되어 왔지만, 본 연구에서는 이를 재 설계하여 디지털 컴퓨터에서 수행되게 하여 신뢰성과 안정성 및 편이성을 대폭 높였다. 실린더의 위치 서보제어기 $K_h(s)$는 앞 절에서 설계한 대로 PID제어를 사용하였다.

각 스탠드에서 Gaugemeter AGC의 제어 이득 k_g는 두께 변동에 의한 질량 유동률의 변동을 루퍼와 롤속도 제어 시스템에서 충분히 보상할 수 있도록 설정하였다. Monitor AGC는 순수한 적분 제어만을 사용하였다. 즉, 7번 스탠드의 출측 두께를 검출하여 목표 두께가 달성 되도록 적분 제어를 수행한다. 본 연구에서는 7번 스탠드의 제어입력이 4~6번 스탠드에도 배분되도록 설계하였다. 또한, 각 스탠드에 대하여 실험 데이터[8]에 기초한 외란 보상기를 설계 하였다.

이 밖에도 시퀀스 제어 로직을 설계하여 제어모드, 비상 상황, 압연 조건, 압연기 상태, 강판의 취입 상태 등을 입력받아 필요한 조치를 취할 수 있도록 하였다.

3.3 지원 Software 설계

압연과 관련된 각종 조업 데이터를 수집하고, 분석하며, 저장하기 위하여 data logging로직을 설계하였다. 그리고, AGC 컴퓨터 시스템 내에서 통신과 데이터 공유를 위하여 data link 로직을 설계하였다. 한편, 작업자에게 필요한 정보를 화면에 출력하고, 작업자가 필요한 조치를 취할 수 있도록 MMI(Man-Machine Interface) 로직을 설계하였다.

이밖에, 각종 계측 센서를 초기화하거나 보정할 수 있는 로직을 설계하였으며, 압연기의 스프링 상수 측정 로직, 강판의 소성계수 계산 로직도 설계하였다.

3.4 각종 로직의 샘플링 주기

샘플링 주기는 Fig. 1에서 보여주는 단일 스탠드 AGC 시스템의 각 궤환루프의 대역폭, 보상하여야 할 외란의 주파수 성분 등을 고려하여, 각 궤환루프의 대역폭과 외란 주파수의 10배 이상으로 설정하였다.[11]

내부 궤환루프에 포함된 유압 실린더의 위치 서보제어기 $K_h(s)$의 샘플링 주기는 0.5 msec이다. 롤편심 제어(2차년도)도 주파수 성분을 고려하여 내부 궤환루프에서 처리한다. 중간 궤환루프에 포함된 Gaugemeter AGC는 10 msec로 샘플링한다. 외란 보상제어 및 feed forward 제어(2차년도)도 주파수 성분을 고려하여 중간 궤환루프에서 처리한다. 외부 궤환루프의 Monitor AGC의 샘플링 주기는 50 msec로 설정하였다.

시퀀스 제어로직은 압연조건, 강판 취입, 조업조건 등과 관련하여 필요한 조치를 취할 수 있도록 샘플링 주기를 설정하면 전체 시스템의 안정성에 큰 영향이 없으므로 Monitor AGC와 같이 50 msec로 설정하였다.

지원 software 샘플링 주기는 중요도와 필요에 따라 설정하였다. data logging과 data link로직은 각 구성 모듈의 중요도에 따라 0.1, 0.2, 0.3, 1.2, 5.0 sec로 샘플링 주기를 설정하였다. MMI 로직은 모두 200 msec로 설정하였다.

3.5 실시간 Task Scheduling

실시간 샘플링 주기는 스탠드 제어기 CPU 보드의 timer interrupt에 기동하는 interrupt service routine(ISR)에 의하여 설정한다. 각각의 로직은

중요도에 따라 중간 궤환루프는 level 1 task, 외부 궤환루프는 level 2 task, 지원 software는 level 3 task 등으로 구분하였다. 여기서, level 1 task의 우선순위가 가장 높고 level 3 task의 우선순위가 가장 낮다.

각각의 task는 우선순위뿐만 아니라 고유의 event flag를 갖는다. 각각의 샘플링 시점에서 ISR이 기동되고, 이때 level 1 task의 flag를 active시킨다. 그러면, level 1 task가 수행되고, 이 task의 수행 완료 직전에 자신이 매 n_2번 수행될 때마다 level 2 task의 flag를, 매 n_3번 수행될 때마다 level 3 task의 flag를 active시킨다. 여기서, $n_2 < n_3$ 이다. 그러면, 매 샘플링마다, level 1 task가 우선적으로 수행되고, 남은 시간에 level 2 flag가 active이면 level 2 task가 수행되며, 남은 시간에 level 3 flag가 active이면 level 3 task가 수행된다. 결과적으로 하나의 CPU보드 내에서 level 1, level 2, level 3 task를 각각 매 1, n_2, n_3 샘플링 주기로 실행시킬 수 있다. 필요에 따라서는 동일한 level의 task내에서도 샘플링 주기를 다양화할 수 있다.

3.6 Software 개발 환경

새로운 AGC 시스템의 실시간 스탠드 제어기에는 신뢰성을 검증받은 상업용 실시간 운영체계를 사용하였다. 모든 응용 프로그램은 "ANSI C" 언어로 작성하였다.

실시간 제어 프로그램, data link 프로그램, 조업 데이터를 수집하는 data logging 프로그램은 UNIX workstation에서 작성하여 cross compile한 후 스탠드 제어기에 이식(download) 하였다. 수집한 데이터를 분석, 저장하는 data logging 프로그램은 UNIX workstation에서 작성하여 workstation에서 수행되게 하였다. MMI 프로그램은 MS DOS 환경 하에서 VME PC에서 작성하여 VME PC에서 수행되게 하였다.

모든 응용 프로그램과 입출력 신호는 새로운 AGC 컴퓨터 시스템 내에서 아래와 같이 합리적으로 분산 배치하였다.

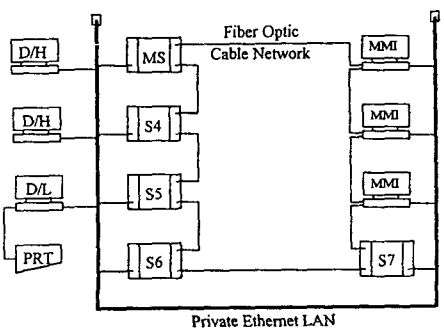

Fig. 2 Configuration of the overall AGC system.

4. 제어 시스템의 구성

4.1 제어 시스템 구성도

Fig. 2에 새로운 AGC 시스템의 구성도를 도시하였다. 새로운 AGC 시스템의 스탠드 제어기는 산업계 표준인 VMEbus 시스템으로 구성하였다. MS는 통합스탠드 제어기를 나타내고, S4, S5, S6, S7은 각각 4~7번 스탠드에 대한 단독스탠드 제어기를 의미한다. D/H와 D/L은 UNIX workstation으로서 개발 호스트와 data logging 컴퓨터를 각각 나타낸다. MMI는 MMI를 위한 VME PC를 의미하고 PRT는 프린터를 의미한다.

새로운 AGC 시스템은 모두 Ethernet LAN으로 연결되어 있고 TCP/IP 통신규범(protocol)이 사용된다. 또한, 스탠드 제어기와 VME PC는 각각 "시스템 메모리(intersystem memory)" 보드를 장착하고 있으며, 각 시스템 메모리 보드는 원환(ring) 형태의 fiber optic cable network으로 연결되어 있다. 시스템 메모리는 스탠드 제어기와 VME PC에서 공유 메모리와 실시간 데이터 통신을 위하여 사용된다.

4.2 통합스탠드 제어기

통합스탠드 제어기는 VMEbus 시스템으로서 Fig. 3에 도시된 것처럼 2장의 MC68040 CPU 보

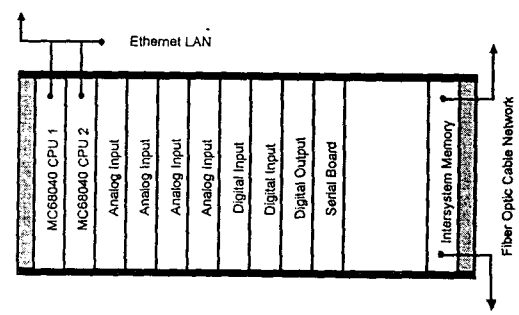

Fig. 3 Schematic diagram of VMEbus multi-stand controller.

드, 1장의 시스템 메모리 보드, 다수의 아날로그/디지털 입출력 보드, 시리얼(serial) 보드로 구성되어 있다.

첫번째 CPU 보드에서는 시퀀스 제어와 신호의 입출력 제어 로직중 모든 스탠드와 관련있는 부분과 Monitor AGC를 수행한다. 또한, 작업자의 OCP(operator control panel) 수동 조작 신호를 해석한다. 그리고, 스크루 압하 제어 시스템으로부터 1~3번 스탠드의 롤간격 정보를 수집하고, 강판의 현재 위치를 추적하며, 두께 변동량을 롤속도 및 루퍼장력 제어 시스템으로 전송한다.

두번째 CPU 보드에서는 각종 경보를 관리하고, 각종 조업 데이터를 수집하여 Ethernet LAN을 통하여 UNIX D/L workstation으로 전송한다. 또한, RS422 통신을 통하여 총괄 컴퓨터와 압연전에 설정 데이터를 전송받고, 압연 후에는 필요한 조업 데이터를 전송한다.

첫번째와 두번째 CPU 보드는 모두 시스템 메모리 보드에 데이터를 저장하고 읽을 수 있다.

4.3 단독스탠드 제어기

단독스탠드 제어기도 VMEbus 시스템으로서 Fig. 4에 도시된 것처럼 3장의 MC68040 CPU 보드, 1장의 시스템 메모리 보드, 다수의 아날로그/디지털 입출력 보드, 서보밸브 제어 보드로 구성되어 있다. 단독스탠드 제어기는 각 스탠드에 한정된 제어로직과 신호 입출력 제어를 수행한다.

첫번째 CPU 보드는 내부 궤환루프의 실린더 위치 서보제어기로 사용한다. 이 보드에서는 시스템의 관리부하(overhead)를 줄이기 위하여 운영체계를 사용하지 않는다. 샘플링 주기는 최소 0.2 msec까지 가능하다.

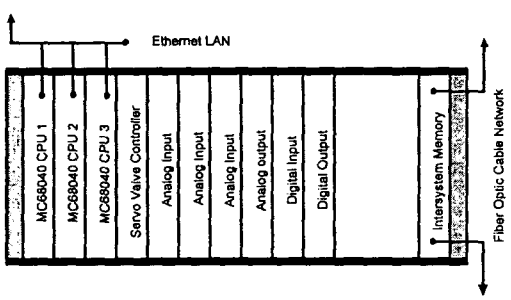

Fig. 4 Schematic diagram of VMEbus single stand controller.

두번째 CPU 보드에서는 Gaugemeter AGC와 외란보상 제어를 수행한다. 또한, 각 스탠드에 독립적인 시퀀스 제어와 각종 계측 센서류의 초기화 및 보정도 이 보드에서 수행된다.

세번째 CPU 보드에는 2차년도 연구에서 수행할 백업롤 편심 보상을 위하여 비워 두었다. 두번째 CPU 보드와 세번째 CPU 보드는 첫번째 CPU 보드의 공유메모리와 시스템 메모리 보드에 데이터를 저장하고 읽을 수 있다.

4.4 MMI PC

VME PC는 Fig. 5에 도시된 것처럼 Intel80486 CPU 보드와 시스템 메모리 보드 각 1장씩으로 구성되어 있다. VME PC에서는 MMI 프로세스가 DOS 환경하에 수행된다.

VME PC의 MMI 프로세스는 스탠드 제어기가 시스템 메모리에 저장한 조업 데이터로부터 필요한 정보를 읽어서 분석하고 화면에 출력한다. 그러면, 작업자는 상황에 따라 VME PC의 MMI나 OCP를 사용하여 필요한 조치를 취할 수 있다. VME PC와 OCP는 각각 시스템 메모리와 통합스탠드 제어기의 첫번째 CPU 보드를 통하여 스탠드 제어기에 연결되고, 시퀀스 제어 로직이 작업자의 지시를 해석하고 필요한 조치를 취한다.

4.5 UNIX workstation

D/H workstation은 시스템의 개발 과정에서는 각종 응용 프로그램을 개발하기 위한 개발 컴퓨터로 사용하고, 시스템의 현장 설치가 끝난 후에는 시스템 관리를 위한 관리 컴퓨터로 사용한다. D/L workstation에서는 통합스탠드 제어기의 두번째 CPU 보드에서 data logging 로직에 의하여 수집된 조업 데이터를 분석하고 저장한다.

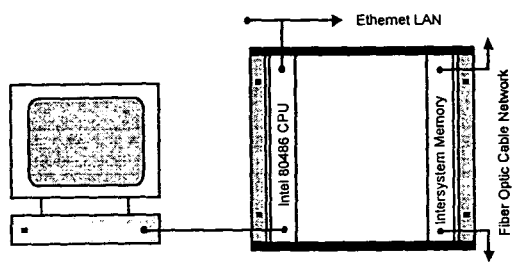

Fig. 5 Schematic diagram of MMI PC.

4.6 두께제어 순서도

새로운 AGC 시스템에서는 각 스탠드에서 아래와 같은 순서에 의하여 강판의 두께를 제어한다.

통합스탠드 제어기의 첫번째 CPU 보드에서는 Monitor AGC를 수행하고 그 결과를 시스템 메모리에 저장한다. 단독스탠드 제어기의 두번째 CPU 보드에서는 Gaugemeter AGC, 외란 보상 제어, feed forward 제어(2차년도)를 수행하고, 시스템 메모리에 저장된 Monitor AGC 수행 결과와 합산하여 실린더의 목표 위치를 계산한 후 이를 실린더 위치 서보제어기(첫번째 CPU 보드)의 공유 메모리에 저장한다. 실린더 위치 서보제어기에서는 공유 메모리의 실린더 목표 위치와 카운터 보드의 실린더 현재 위치로부터 실린더의 위치오차를 구한 후 PID제어 로직을 수행하고, 그 결과를 서보밸브 제어 보드에 출력한다.

롤편심 제어(2차년도)는 단독스탠드 제어기의 세번째 CPU 보드에서 수행하여 첫번째 CPU 보드(실린더 위치 서보제어기)의 공유 메모리에 저장한다. 그러면, 첫번째 CPU 보드는 이것을 실린더 목표 위치에 합산하여 PID제어 로직을 수행한 후 그 결과를 서보밸브 제어 보드에 출력한다.

5. 제어이득 조정과 현장적용

본 연구의 마지막 과정으로서 새로운 AGC 시스템을 포항 2열연공장의 사상압연기에 설치하고 제어이득을 조정하였다. 새로운 AGC 시스템을 기존의 AGC 시스템과 병행하여 설치함으로써 새로운 시스템의 고장시 즉시 전환하여 사용할 수 있도록 하였다.

우선, 모든 응용 프로그램을 off-line으로 시험모사를 하여 각종 subroutine에 대한 단독 시험과 통합시험을 수행하였다. 다음으로 응용 프로그램을 사상압연기에 연결하고 비상 스위치 기능을 비롯한 각종 입출력 신호, 각종 데이터의 공유관계 및 실시간 통신을 테스트하였다. 또한, OCP로부터 입력되는 작업자의 수동조작에 대한 결과를 확인하였다.

다음으로, 유압 실린더 위치 서보제어기의 PID 제어이득을 조정한 후 Gaugemeter AGC 제어이득을 조정하였다. 그 다음에는 실제로 테스트 강판을 시압연하였다. 첫번째 시압연 테스트에서는 출측 목표 두께가 8 mm인 두꺼운 압연재를 사용하여 질량 유동률 변동으로 인한 문제를 최소화하였다. 시압연을 마친 후 성능 향상을 위하여 각종 외란에 대한 이득 조정을 하였다.

마지막으로 Monitor AGC에 대한 제어이득을 조정하였다. 먼저 7번 스탠드에 대하여 적분 제어이득을 조정하고, 두께 측정기와 4~6번 스탠드 사이의 질량 유동률을 고려한 거리에 기초하여 4~6번 스탠드의 적분 제어이득을 조정하였다.

포항 2열연공장에서는 현재 새로운 AGC 시스템을 사용하여 조업하고 있다. Fig. 6에서 실압연 결과를 보여준다. 첫번째 강판은 설정 모델의 예측 오차로 인하여 압연 초기에 큰 두께 오차가 발생하였다. 그러나, 강판에 대한 예측오차를 이용하여 설정 모델의 계수를 지속적으로 보정하기 때문에 세번째 강판은 초기 두께 오차가 관리 범위인 0.05 mm 이하로 줄어들었다.

새로 개발한 AGC 시스템의 성능을 평가하기 위하여 1198본의 실압연을 실시하였으며, 포항제철의 열연강판 제어품질 평가지수인 "$\pm 50\mu m$ 두께 적중률"(일정 기간 동안 전체 압연 강판 중 최대 두께오차가 $\pm 50\mu m$ 이내인 강판에 대한 백

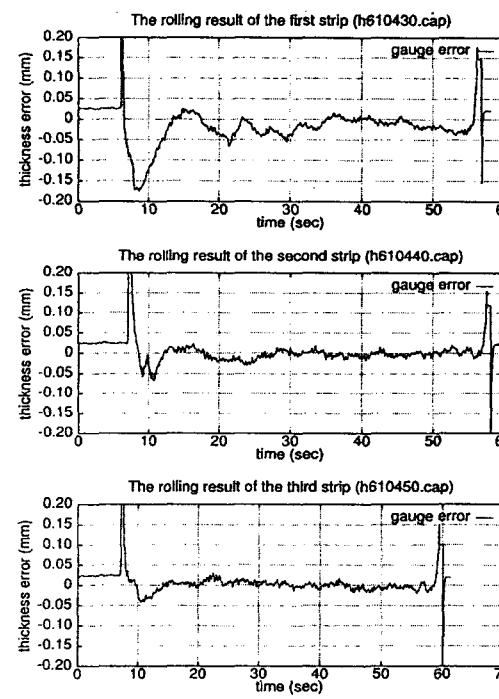

Fig. 6 Rolling results of POSCO's No. 2 Hot Strip Mill.

분율)이 같은 조건에서 기존 시스템보다 약 1% point 상승하였다.

6. 결론 및 고찰

6.1 결론

본 연구에서는 AGC 제어로직을 현장 조건을 고려하여 재 설계하고 실시간 분산 AGC 시스템을 개발하여 현장에 적용하였다. 새로 개발한 AGC 시스템에서는 시스템의 신뢰성, 안정성, 정비성, 제어성능을 향상시키기 위하여 AGC 시스템의 기초인 유압 실린더의 위치 서보제어를 기존의 아날로그 제어에서 디지털화하였고, 실시간 분산 제어 시스템을 합리적으로 구성하고, 각종 제어 및 지원 로직을 최적으로 분산 배치하였다.

본 연구를 통하여 대규모 다변수 시스템인 열간 압연 두께제어에 대한 실시간 분산 제어 방법과 컴퓨터 시스템 구성에 대한 기반 기술을 확보하였다. 이 기반 기술을 바탕으로 하여 고성능 두께 제어 시스템의 개발이 가능하게 되었고, 냉간 압연 제어 기술을 독자적으로 개발 할 수 있는 토대를 구축하였다.

6.2 고찰

본 연구에서 개발한 AGC 시스템이 세계 최고의 경쟁력을 갖기 위해서는 롤편심 제어, 절대 AGC, 선단 고속 Monitor AGC, feed forward 제어, skid mark 제어 등을 적용하여 제어 성능을 더욱 더 향상시켜야 하며, 설정 모델의 적중률을 더욱 높여서 선단 두께 오차를 줄이는 연구를 계속하여야 할 것이다.

아울러, LQG/LTR과 H_∞ 등 다변수 제어 이론에 입각하여 강판의 두께, 장력, 속도를 통합적으로 제어할 수 있는 로직을 개발하기 위한 연구를 계속하여야 할 것이다.

후 기

저자가 RIST에 재직할 동안 위험 부담이 매우 큰 본 연구과제를 수행할 수 있는 기회를 주신 POSCO 경영진에 깊이 감사드리고, 이 과제에 적극 참여하여 주신 POSCO 기술연구소 계측제어 연구팀원, POSCO 포항 설비기술부 열연제어팀원, POSCO 포항 열연부 열연기술팀원, 설비공사를 맡아주신 POSCON 설비팀원 여러분께 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

(1) Okada, M., Iwasaki, Y., Murayama, K., Urano, A., Kawano, A. and Shiomi, H., 1996, "Optimal Control System for Hot Strip Finishing Mill," *Proc. of the 35th Conf. on Decision and Control,* pp. 1236~1241.

(2) Hoshino, I., Maekawa, Y., Fujimoto, T, Kimura, H., and Kimura, H., 1988, "Observer-based Multivariable Control of the Aluminum Cold Tandem Mill," *Automatica,* Vol. 24, No. 6, pp. 741~754.

(3) Peterson, W. D., 1992, "The VMEbus Handbook Third Edition," *VFEA International.*

(4) 이호훈, 조성근, 1997, "2차원 천정크레인의 위치 및 부하의 흔들림 제어," 대한기계학회논문집(A), Vol. 21, No. 10, pp. 1683~1693.

(5) 이호훈, 조성근, 1997, "천정크레인 부하의 위치 및 흔들림 제어," 대한기계학회논문집(A), Vol. 21, No. 2, pp. 297~304.

(6) Bland, D. and Ford H., 1949, "The Calculation of Roll Force and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions," *Proc. Inst. Mech. Eng.,* Vol. 159, pp. 144~153.

(7) J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, 1992, *Feedback Control Theory,* Macmillan.

(8) Ferguson, I. J., and R. F. Detina, 1986, "Modern Hot-Strip Mill Thickness Control," *IEEE Trans. on Industry Application,* Vol. IA-22, No. 5, pp. 934~940.

(9) Ginzburg, V. B., 1993, "Gauge Control in Rolling Mills," *Rolling Mill Technology Series,* Vol. 11, United Engineering, Inc..

(10) Phillips, R., 1957, "Analysis of Tandem Cold Reduction Mill with Automatic Gauge Control," *Proc. AIEE,* pp. 355~363.

(11) Franklin, G. F., and Powell, J. D., 1980, *Digital Control of Dynamic Systems,* Addison-Wesley.