

고 명 삼  
김 점 근\*

서울대학교  
제어계측공학과

1. 서론

압연은 롤(Roll) 사이에 재료를 통과시켜 소성 변형시키는 가공법을 말한다. 열간 압연공정은 크게 4부분으로 나눌 수 있는데 압연되어질 막(Bar)는 먼저 가열로에서 적정 온도로 가열된 후 조압연기를 거치면서 대강 압연이 되고 다시 삭상밀(Finishing Mill)에서 원하는 두께와 폭으로 압연되어진 후 후처리 과정을 거쳐 완제품이 된다.

이 과정에서 중요한 점은 제품의 두께를 원하는 수치로 일정하게 유지시키면서 압연해야 하는 것이다. 두께를 일정하게 유지시키기 위해 행하는 일련의 제어 과정을 AGC(Automatic Gauge Control)라고 부른다. 본 연구에서는 AGC를 제어 대상으로 하여 적응 제어 기법을 적용하여 제어성 향상을 시뮬레이션을 통하여 보이고자 한다.

2. Gauge-Meter AGC

전동 압하 AGC는 열연 공정 AGC에서 가장 널리 사용되는 방식으로 출력 두께를 일정하게 유지하기 위하여 전동 모터를 사용하여 롤간극을 조정하는 방법이다. 이 방법은 또 BISRA AGC라고도 불리우는데 다음과 같은 Gauge-Meter 식을 기본으로 하고 있다.

$$h = S_g + \frac{P}{M} \quad (1)$$

h : 출력두께      S<sub>g</sub> : 롤 간극  
P : 압하력      M : 밀접수

Gauge-Meter AGC에서의 두께 제어 방법을 도식적으로 나타내면 그림1과 같다. 그림1에서 M은 밀 탄성 계수이고 Q는 스트립의 소성 곡선의 소성 계수이다. 실제로는 M, Q가 직선이 아니고 곡선이지만 이 방식에서는 직선이라고 간주한다.

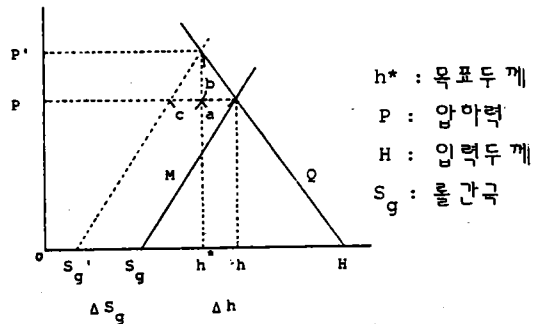


그림 1. Gauge-Meter AGC의 도식적 해석

두께를 h\*로 유지하기 위해 변화시켜야 할 롤간극 S<sub>g</sub>는 다음식으로 계산된다.

$$\Delta S_g = \frac{M + Q}{M} * \Delta h \quad (2)$$

이 방식은 APC(Automatic Press Control)의 동적 특성을 고려하지 않고 제어량을 계산하고 있으며 또한 M, Q 값이 실제로는 상수가 아니기 때문에 보다 정밀한 두께 제어를 실행하기가 곤란하다. 다음장에서 APC의 동적 특성을

고려하고  $M, Q$  대신 새로운 변수를 사용한 시스템 모델을 구하고 이에 따른 적응 제어 방법을 적용하기로 한다.

### 3. 모델링

압연 공정에서 밀(Mill)은 두부분으로 나누어진다. 즉, APC와 밀이다. APC는 전동 모터와 부궤환 루프로 구성되어 있어서 동적인 특성이 나타나게 되나 밀은 여러 오인들의 어떤 정적인 함수로 표시할 수가 있다.

#### 3.1 APC의 모델

APC의 블록 다이어그램이 그림2에 도시되어 있다.

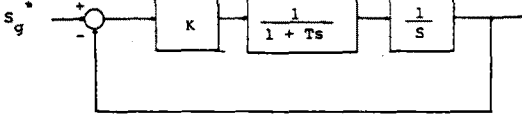


그림 2. APC의 블록 다이어그램

그림2에서 보듯이 APC는 부궤환 루프와 비례 제어기로 구성되어 있음을 알 수 있다. APC의 전달함수  $G_{apc}(s)$ 를 구하면

$$G_{apc}(s) = \frac{K}{K + s + Ts^2} \quad (3)$$

이 된다.  $K=5$ ,  $T=1/30$ 초로 하고 100ms로 샘플링 하였다고 가정하여 이산화시키면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$G_{apc}(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 0.311319 & b_2 &= 0.115212 \\ a_1 &= -0.62314 & a_2 &= 0.049671 \end{aligned}$$

#### 3.2 밀 모델

일반적으로 압하력  $P$ 는  $T$ (온도),  $H$ (입력두께),  $C$ (탄소량),  $V$ (속도),  $D$ (롤저름),  $h$ (출력두께)의 일반적인 함수로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P = f(H, h, T, V, D, C) \quad (5)$$

또한 Gauge-Meter 식을 일반적인 함수 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$h = g(S_g, P) \quad (6)$$

(5), (6)식에서  $h$ 를 풀어내면 다음식을 얻는다.

$$h = \ell(S_g, H, T, V, D, C) \quad (7)$$

(7)식은 비선형식이므로 선형화시킬 필요가 있다.  $D, V, C$ 는 압연 도중에 일정하다고 가정하고 동작점에서 선형화시키면 다음식을 얻는다.

$$\Delta h = \alpha \Delta H + \beta \Delta S_g + \gamma \Delta T \quad (8)$$

$$\left( \alpha = \frac{\Delta \Delta h}{\Delta H}, \beta = \frac{\Delta \Delta h}{\Delta S_g}, \gamma = \frac{\Delta \Delta h}{\Delta T} \right)$$

그러나 실제로 압연 초기에는 동작점을 알수가 없으므로 (8)식을 직접 쓸수가 없다. 동작점 값을 없애기 위해 (8)식을 시간  $k+1$ 에서  $k$ 일 때의 식을 빼면

$$\begin{aligned} h(k+1) - h(k) &= \alpha(H(k+1) - H(k)) + \beta(S_g(k+1) \\ &\quad - S_g(k)) + \gamma(T(k+1) - T(k)) \quad (9) \end{aligned}$$

을 얻는다. 또한 온도는 압연 중간에는 측정할 수가 없으므로 온도에 관한 항을 미지의 외란항으로 간주하여 (9)식을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} h(k+1) - h(k) &= \alpha(H(k+1) - H(k)) + \beta(S_g(k+1) \\ &\quad - S_g(k)) + e(k+1) \quad (10) \end{aligned}$$

을 얻는다. 앞으로 (10)식을 시스템 식별 모델과 시스템 모델로 사용하기로 한다.

#### 3.3 전체 모델

(4)식과 (10)식으로부터 밀에 대한 전체 모델을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S_g(k+1) + a_1 S_g(k) + a_2 S_g(k-1) \\ = b_1 u(k) + b_2 u(k-1) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h(k+1) - h(k) &= \alpha(H(k+1) - H(k)) + \beta(S_g(k+1) \\ &\quad - S_g(k)) + e(k+1) \quad (12) \end{aligned}$$

#### 3.4 미지 변수의 식별

지금까지 유도한 모델 속에는 미지의 변수  $\alpha, \beta$ 가

포함되어 있으므로 실제 제어시에는  $\alpha, \beta$  값을 식별해야 한다.  $\alpha, \beta$ 를 식별하는 방법으로는 가장 많이 쓰이는 RLS (Recursive Least Squares) 방법을 사용하기로 한다.

식별 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$h(k) - h(k-1) = \alpha[H(k) - H(k-1)] + \beta(S_g(k) - S_g(k-1)) \quad (13)$$

#### 4. 적응제어 알고리즘

지금까지 유도한 모델을 기반으로 최소분산 자기동조 제어기를 구성하였다.

일반적으로 최소분산 자기동조 제어기는 두부분으로 나눌 수 있다. 하나는 예측기이고 또 다른 하나는 제어량 계산 부분이다. 먼저 다음 출력을 예측한 다음 이 출력이 원하는 값으로 진행 되도록 제어량을 계산하게 된다. 출력 두께 측정은 마지막 스탠드 출구에서 얼마간 떨어진 거리에서 이루어지기 때문에 측정 지연이 발생한다. 측정 지연이 없을 경우와 있을 경우에 대해 각각 고찰하였다.

#### 4.1 지연이 없는 경우의 제어

시스템 전달함수는 (11), (12)식으로 주어진다. (12)식으로부터 직접 출력에 대한 1-스텝 예측기를 구성할 수 있다. 즉,

$$\hat{h}(k+1) = h(k) + \hat{\alpha}(H(k+1) - H(k)) + \hat{\beta}(S_g(k+1) - S_g(k)) \quad (14)$$

이 된다. 예측된 출력  $\hat{h}(k+1)$ 을 원하는 기준 두께  $h^*$ 에 될 수 있는대로 가깝게 유지하는 것이 제어 목적이므로 시간  $k+1$ 에서 출력 오차를 제어 변수  $u(k)$ 를 조절하여 최소값으로 만들어야 한다.

(11)식, (14)식으로부터  $S_g(k+1)$ 을 소거하여 출력 오차를 최소로 하는 제어  $u^*(k)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u^*(k) = \frac{h^* - h(k)}{\beta b_1} - \frac{\hat{\alpha}(H(k+1) - H(k))}{\beta b_1} + \frac{(1+a_1)S_g(k) + a_2 S_g(k-1) - b_2 u(k-1)}{b_1} \quad (15)$$

#### 4.2 지연이 있는 경우의 제어

(15)식에서 보듯이  $u^*(k)$ 는  $h(k)$ 의 함수임은 알 수가 있다. 측정 지연이 존재하는 경우에는  $h(k)$ 를 측정할 수 없기 때문에  $h(k)$ 를 예측해야 한다. Gauge-Meter 식을 선형화하여 다음과 같이  $h(k)$  예측 모델을 구할 수 있다.

$$\Delta h(k) = \gamma \Delta S_g(k) + \delta \Delta P(k) \quad (16)$$

(16)식에서  $\gamma, \delta$ 는 RLS 알고리즘으로 식별한다.  $\gamma, \delta$ 를 알아내면 예측 출력 두께  $h(k)$ 를 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\hat{h}(k) = h_0 + \hat{\gamma}(S_g(k) - S_{g0}) + \hat{\delta}(P(k) - P_0)$$

여기서  $h_0, S_{g0}, P_0$ 는 동작점 값이며  $P$ 는 압력이다.  $\hat{\gamma}, \hat{\delta}$ 는 식별된 값이다. (15)식에서  $\hat{h}(k)$  대신  $h(k)$ 를 사용하여  $u^*(k)$ 를 계산하게 된다.

#### 5. 시뮬레이션

지금까지 제시된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 행하였다. 밀 특성식은 심스(Sims)식을 따른다고 가정하였다.

#### 5.1 지연이 없는 경우의 응답

시뮬레이션시 사용한 입력 두께와 온도 패턴은 다음 그림 3과 같다.

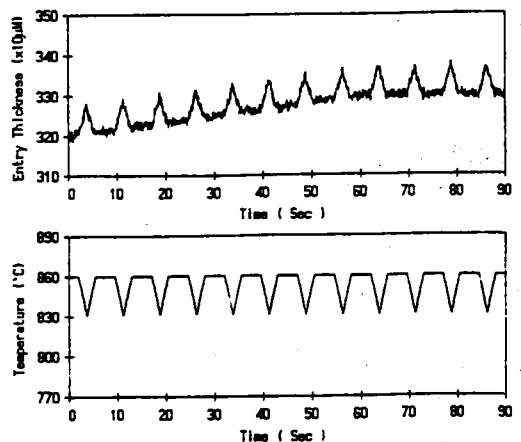


그림 3. 입력두께 및 온도 패턴

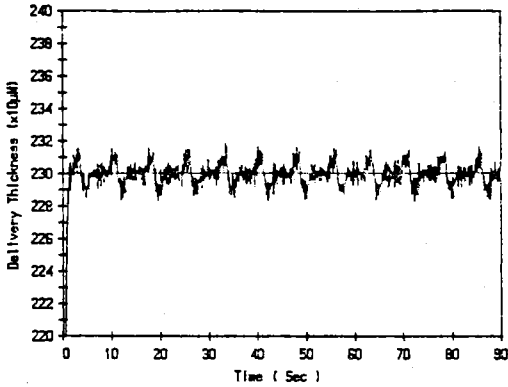


그림 4. Gauge-Meter AGC

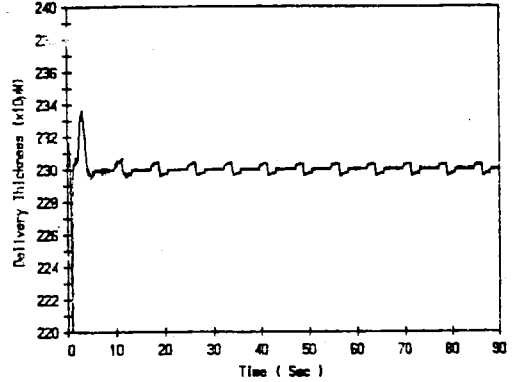


그림 7. 최소분산자동조 제어기의 응답

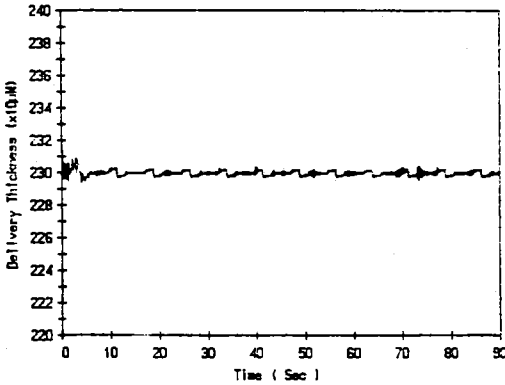


그림 5. 최소분산자동조 제어기의 응답

이상의 시뮬레이션 결과에서 보면 새로운 모델에 입각한 최소분산자동조 제어가 기존의 Gauge-Meter AGC 보다 성능이 매우 향상되었음을 알 수 있다.

#### 6. 결론

본 연구에서는 열간 압연공정에서 보다 더 정밀한 두께 제어를 위하여 기존의 방법을 개선한 새로운 적응 제어 방법을 유도하였고 시뮬레이션을 통하여 타당성과 성능의 우수성을 보였다. 이 방법은 기존의 방법보다 계산시간이 많이 걸리지 않아 실제 공정에 적용할 수 있을 것이라 생각된다.

#### 5.2 지연이 있는 경우의 응답

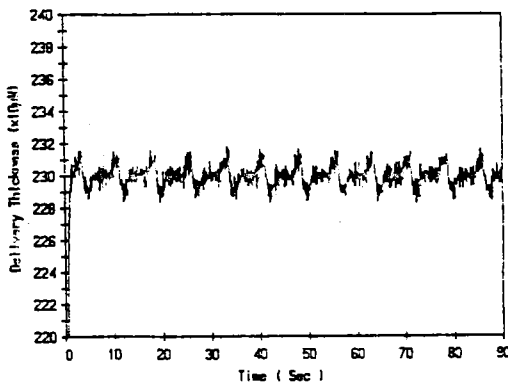


그림 6. Gauge-Meter AGC

#### 참 고 문 헌

- [1] G.Gomez et., " Regulation of a Seven Stand Hot Strip Rolling Mill ", IFAC, 8th Triennial World Congress, 1981
- [2] Mitsubishi Electric CO., " AGC/Looper Training Document ", 1983
- [3] K.J. Astrom, " Introduction to Stochastic Control Theory ", Academic Press, 1970
- [4] T. Katayama et., " An Adaptive Computer Control Method in Hot Strip Rolling ", IFAC, 8th Triennial World Congress, 1981
- [5] 日本鐵鋼協會, " 板壓延의 理論と 實際 "
- [6] 今村弘, et., " 熱延工場의 計算機制御 ", 設備と生産, vol. 24, No.4, 1974