

압연 공정에서의 판 두께 제어

신기현*, °홍환기*, 김광배**, 오상록**, 안현식***

*전국대학교 기계설계학과 연속공정자동화 Lab.

한국과학기술연구원, *국민대학교 전자공학과

Thickness Control in Metal-Strip Milling Process

Kee Hyun Shin*, °Wan Kee Hong*, Kwang Bae Kim**, Sang Rok Oh**, Hyun Sik Ahn***

*Continuous Process Automation Lab., Dep. of Mechanical Design & Production Eng., KonKuk University

**Korea Institute of Science and Technology

***Dept. of Electronics Eng., Kukmin University

Abstract

The problem of tension control in metal-strip processing line is discussed. A new mathematical dynamic model which relates tension change, motor-speed change and roll-gap change is developed. Through the computer simulation of this model, parameter sensitivity, the tension transfer phenominon, and static and dynamic characteristics of strip tension were studied. Guidelines are developed to help one selecting locations of the master-speed drive in multi-drive speed control for tension adjustment and reducing the effect of interaction between tension and roll gap control.

Nomenclature

- A : 소재의 단면적
- L : 탄성변형 구간에서 소재의 길이
- t : 장력
- T : 초기 정상 상태에서부터의 장력 변화량
- h : 소재의 두께
- H : 초기 정상 상태에서부터의 두께 변화량
- V : 롤의 집선 속도
- V : 초기 정상 상태에서부터의 롤 속도 변화량
- dx : x축방향 미소 길이
- dy : y축방향 미소 길이
- dz : z축방향 미소 길이
- W : 소재의 속도
- W : 초기 정상 상태에서부터의 소재 속도 변화량
- ρ : 재료의 밀도
- ε : 변형도
- ε : 초기 정상 상태에서부터의 변형도 변화량

Subscript

- u : 변형되기 전의 상태
- o : 초기 정상상태

1. 서론

압연판 두께를 제어하기 위하여 일반적으로 사용되는 AGC (Automatic Gauge Control) 시스템은 기본적으로 롤 갭(roll gap)제어, 밀 속도(mill speed)제어, 소재 장력(strip tension)제어로 구성되어 있다 [3]. 즉, 롤 갭, 밀 속도, 소재 장력은 각각 압연판 두께 변화에 큰 영향을 미칠 뿐 아니라, 상호간에 깊은 연관을 갖고 있다. 예를 들면, 롤 갭 조절을 통하여 소재의 두께를 변화시키지만, 소재의 장력을 정확히 제어하지 않고는 소재를 정확한 두께로 압연하기 어려우며, 장력값은 다시 소재 양단에 있는 스탠드(stand)에서의 롤 갭과 롤 속도에 따라 변화될 수 있는 것이다.

그러므로, 고정도(highly-accurate) AGC 시스템을 설계하기 위해서는 AGC의 중요 기본 제어 요소인 장력 변화, 롤 갭 변화, 모터-속도 변화 관계를 묘사하는 수학적 모델이 있어야 하겠다.

Grimble[5]은 장력 변화와 모터 속도 변화 관계를 나타내는 수학적 모델을 유도하였다. Grimble은 이 모델을 이용하여 strip parameter의 변화에 따른 장력의 변화에 대한 연구를 수행 하였으며, 여러개의 구동되지 않는 롤(undriven roll)들의 시스템에 대한 영향을 분석하였다. 특히 그의 모델은 소재에 처짐(sag)이 있는 경우에 소재 장력의 변화를 모터 속도 변화와 관련하여 예측하는데 사용될 수 있다.

그러나 그의 수학적 모델은 단지 장력 변화와 모터 속도 변화만의 관계를 묘사하기 때문에, 장력 변화가 소재 양단에서의 소재 두께 변화에도 영향을 받는것을 예측할 수가 없다. 또한 지나친 단순화로 인하여 — 예를 들면 이웃하는 3개의 스탠드 사이의 두 구간의 소재에서 정상 상태 변형도가 거의 같다. 즉

$$\left[\frac{1 + \epsilon_{10}}{1 + \epsilon_{20}} \right] = 1$$

— 그의 수학적 모델은 하나의 영역(zone)내에서 장력 변화만을 나타내기 때문에, multi-drive processing line에서 여러 개의 스탠드 사이의 strip interaction을 연구하기에는 미

흡한 점이 있다.

Minimum tension control (MTC) 방법이 독일의 Siemens에 의해 개발되었다[2]. MTC 방법에서는 두 개의 스탠드 사이에 있는 소재에 대한 장력을 결정할 때, 소재가 아래쪽 스탠드에 (소재가 왼쪽에서 오른쪽으로 processing 될 때 오른쪽 스탠드)인입되기 전후에 윗쪽 스탠드에서의 톨 토크를 비교하였다. Rolling torque 변화로부터 장력값이 계산되고, 원하는 장력값을 유지시키기 위하여 main-drive speed control loop 위에 MTC loop를 덧붙였다(superimposed). 이 MTC 시스템은 스탠드 사이의 재료 흐름을 제어하기 위하여 연속적으로 speed setpoint를 교정토록 한다. 그러나 장력 변화에 의한 스탠드에서의 톨 토크 변화가 정상 상태 값에 비하여 크지 않으므로 MTC 시스템에서 소재의 장력을 결정하기 위해서는 톨 측정값이 매우 정확해야 하며, 이미 소재가 양단의 스탠드 에 들어 있는 상태에서 장력의 변화가 발생했을 경우 (예, 양 단 스탠드에서의 모터 속도 차, 소재 두께 변화 등으로 인한 장력 변화)에는 MTC 방법에서 이용되는 방법으로는 소재의 장력을 결정하기가 매우 어렵다.

또한 AGC 시스템에서 톨 갭과 소재 장력간의 부정적인 interaction의 영향을 줄이기 위하여 looper가 허용범위 이하로 떨어질 때마다 아래쪽 스탠드의 톨 갭 제어기의 반응 속도를 줄이는 등의 여러가지의 해결책이 제시되고 있으나[3], 구체적으로 소재의 길이, 공정라인(processing line)의 작업속도(operating speed)등 시스템 작업조건(operating conditions)과 관련하여 반응 속도를 얼마나 줄여야 되는지에 대한 가이드라인은 쉽게 찾을 수 없다. 또한, 소재는 여러개의 스탠드를 거치면서 연속적으로 압연되므로 전체 시스템에서 재료의 안정된 흐름(material flow)과 장력 제어를 위하여 master-speed drive에 대한 스탠드간의 모터의 상대 속도 조정은 매우 중요하다. Metal strip의 연속 공정에서는 또한 스탠드간 소재의 interaction이 매우 심하여 master-speed drive의 위치에 따라 제어 효과가 상쇄될 수도 있다.(예, gap control 효과의 상쇄)[3]. 그러나, AGC의 제어 효과를 극대화하기 위한 master-speed drive의 위치 선정과 관련된 가이드 라인 또한 제시된 것을 찾지 못하였다.

본 논문에서는 AGC 시스템의 가장 기본적인 제어 변수인 톨 갭, 모터 속도, 소재 장력 사이의 관계를 밝히는 새로운 수학적 모델을 제시하였다. 이 모델의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 톨 갭, 모터 속도 등에 대한 소재 장력의 정적 및 동적 특성을 연구하였다.

Multi-stand를 지나는 metal-strip에서 소재의 장력이 한 스탠드 사이에서(혹은 한구간) 다음 스탠드 사이로 (다음 구간) 어떻게 전달되며 (tension transfer), 이러한 '장력 전달' 현상은 multi-motor (multi-stand) 시스템에서 속도 제어 시스템을 구성할 때 master-speed drive 위치 선정과 관련하여 어떤 영향을 미치는지에 대하여 연구하였다.

또한 공정 라인의 작업 조건을 조정함으로써 톨 갭 제어와 소재 장력간의 부정적인 interaction의 영향을(예, strip necking)줄일 수 있는 방안을 연구하였다.

2. 변형도-톨 속도-소재 두께 관계

아래의 그림 1과 같이 소재에 장력이 있는 상태에서 소재가 두개의 스탠드를 지나면서 압연되는 경우를 생각하자.

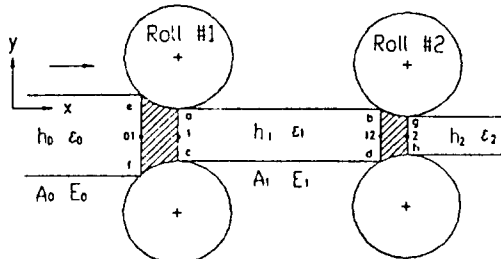


그림 1. 소재(strip)에 장력이 있는 경우 두 개의 스탠드 사이의 소재압연

윗 그림 1에서 소재가 두개의 톨, 톨#1, 톨#2를 화살표 방향으로 지나면서 두께 h_0 인 소재가 두께 h_1, h_2 로 압연되고 있다. 톨#1 입측에서 소재의 변형도(strain)가 ϵ_0 이고, 톨#1, 톨#2 사이에서는 ϵ_1 , 톨#2 출측에서는 ϵ_2 라 한다. 장력에 대한 수학적 모델 유도를 편리하게 하기 위하여, 소재가 연속적으로 압연될 때 소성 변형 구간과 탄성 변형 구간으로 구분하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 소재와 톨의 선 속도가 같은 지점 (점1, 점2) 에서의 소재 두께와 톨 출측에서의 소재 두께는 같다고(h_1, h_2) 가정하였다. 그리고, 그림에서 01-1 구간을 소성 변형 구간, 1-12 구간을 탄성 변형 구간, 다시 12-2 구간을 소성 변형 구간으로 구분하였다. 소성 변형 구간 및 탄성 변형 구간에서 각각 응력 변형도 관계 및 질량 보존의 법칙을 이용하여, 소재의 장력, 톨 속도, 소재 두께의 동적 관계를 규명하고자 한다.

수학적 모델을 개발하는데 다음과 같은 가정을 하였다.

<가정>

- (1) 압연 공정에서 소재의 장력 변화는 탄성 변형 구간에서만 발생하는 것으로 가정한다.
- (2) 소성 구간에서 압연 톨과 소재 사이에는 상대 속도가 영(zero)인 지점이 존재한다.
- (3) 탄성 변형 구간에서 장력에 의한 소재의 폭, 두께 변화는 무시할 수 있다고 가정한다.
- (4) 소재 재료는 탄성 소성 재료이고 톨 압축력에 의한 machine direction(그림 1에서 x-방향)으로 소성 변형시 변형 경화가 무시될 수 있다고 가정한다. 즉

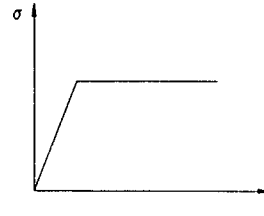


그림 2. 응력 변형도

- (5) 압연후 재료는 탄성 변형 구간에서 등방성(isotropic) 재료로 간주한다.
- (6) 탄성 변형 구간에서 machine direction(x-방향) 외의 $\sigma_y \approx 0, \sigma_z \approx 0$.
- (7) 탄성 변형 구간에서 변형도는 uniform하다.
- (8) 소재 내에서의 변형도는 매우 작다. (단위 길이 보다 매우 작다.)
- (9) 장력이 걸리지 않았을 때, 소재의 단면적은 탄성 변형 구간 내에서는 소재의 길이 방향에 따라 변하지 않는다.
- (10) 탄성 변형 구간 내에서 온도 및 습도에 의한 소재 재료 특성 변화는 무시한다.
- (11) 소재에 변형이 없을 때 전 단면적에 걸쳐 재료의 밀도, 탄성 계수는 일정하다.
- (12) 소성 변형 구간에서의 질량의 변화는 없는 것으로 가정한다.
- (13) 소재의 폭은 변화하지 않는다.
- (14) 소재는 박판으로 간주한다. (두께 ≤ 3 mm)

- (15) 스텐드 사이에 있는 구동되지 않는 물의 영향은 고려하지 않는다.
- (16) 물 속도 및 물 깊이는 완벽하게 제어된다고 가정한다.
- (17) 소재의 처짐(sag)이 거의 없다고 가정한다.

그림 1에서 탄성 변형 구간 1-12에서 직사각형 abcd를 검사 체적(control volume)으로 잡고 질량 보존의 법칙을 적용하면 아래 식이 성립된다.

$$\frac{d}{dt} \left[\int_1^{12} \rho(x,t) A(x,t) dx \right] = \rho_1(t) A_1(t) w_1(t) - \rho_{12}(t) A_{12}(t) w_{12}(t)$$

아래 그림과 같은 검사 체적 내의 미소 체적에서
($dx, dy, dz \ll 1$)

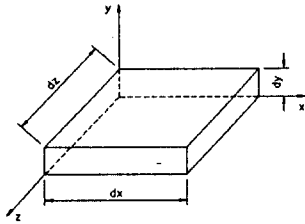


그림 3. 검사체적내의 미소요소

응력-변형도 관계는 다음과 같다.

$$dx = (1 + \epsilon_x) dx_0 \quad (2)$$

$$dy = (1 + \epsilon_y) dy_0 \quad (3)$$

$$dz = (1 + \epsilon_z) dz_0 \quad (4)$$

재료가 변형하여도 질량은 변화하지 않으므로 다음식

$$\rho dx dy dz = \rho_0 dx_0 dy_0 dz_0 \quad (5)$$

는 항상 만족한다.

$dy dz = A$, $dy_0 dz_0 = A_0$ 이므로 식 (2), (5)를 이

용하면 다음식을 구할 수 있다.

$$\frac{\rho(x,t) A(x,t)}{\rho_0(x,t) A_0(x,t)} = \frac{1}{1 + \epsilon(x,t)} \quad (6)$$

(6)식을 (1)식에 이용하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left[\int_1^{12} \frac{\rho_0(x,t) A_0(x,t)}{1 + \epsilon_1(x,t)} dx \right] = \frac{\rho_{10}(x,t) A_{10}(x,t) w_1(t)}{1 + \epsilon_1(x,t)} - \frac{\rho_{12}(x,t) A_{12}(x,t) w_{12}(t)}{1 + \epsilon_{12}(x,t)} \quad (7)$$

가정 (9), (10), (11)하에서 식 (7)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\rho_0 A_0 \frac{d}{dt} \left[\int_1^{12} \frac{1}{1 + \epsilon(x,t)} dx \right] = \frac{\rho_0 A_0 w_1(t)}{1 + \epsilon_1(x,t)} - \frac{\rho_0 A_0 w_{12}(t)}{1 + \epsilon_{12}(x,t)}$$

혹은

$$\frac{d}{dt} \left[\int_1^{12} \frac{1}{1 + \epsilon_1(x,t)} dx \right] = \frac{w_1(t)}{1 + \epsilon_1(x,t)} - \frac{w_{12}(t)}{1 + \epsilon_{12}(x,t)} \quad (9)$$

가정 (7)아래서 식 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{1 + \epsilon_1(t)} \right] = \frac{w_1(t)}{1 + \epsilon_1(t)} - \frac{w_{12}(t)}{1 + \epsilon_{12}(t)} \quad (10)$$

가정 (8)아래서, 즉 변형도 ϵ 가 매우 작을 때

$$\frac{1}{1 + \epsilon(t)} \approx 1 - \epsilon \quad (11)$$

이 성립되므로, 식 (11)을 식(10)에 이용하면 다음식이 구하여 진다.

$$L \frac{d}{dt} [1 - \epsilon_1(t)] = [1 - \epsilon_1(t)] w_1(t) - [1 - \epsilon_{12}(t)] w_{12}(t) \quad (12)$$

여기에서 소성 변형 구간 01-1 사이에서 압연력에 의한 변형도와 장력에 의한 변형도 사이의 관계를 밝히는 것이 필요하다. 가정 (4), (12), (13)에 의하여 다음과 같이 해석 될 수 있다. 소성 변형 구간 01-1 사이의 검사 체적 eafc에 질량 보존 법칙을 적용하면 아래와 같다.

$$h_0 w_{01} = h_1 w_1$$

윗 식의 양변에서 $h_1 w_{01}$ 을 빼면 아래와 같다.

$$h_0 w_{01} - h_1 w_{01} = h_1 w_1 - h_1 w_{01}, \text{ 또는}$$

$$\frac{w_1 - w_{01}}{w_{01}} = \frac{h_0 - h_1}{h_1}$$

$\epsilon_p = \frac{w_1 - w_{01}}{w_{01}}$ 라 놓으면, ϵ_p 는 압연력에 의한 소성 변형도이고 소재의 입측 및 1점에서의 응력 변형도 관계는

$\epsilon' = \epsilon_0 + \epsilon_p$ 로 표현될 수 있다. 즉 ϵ' 는

아래의 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

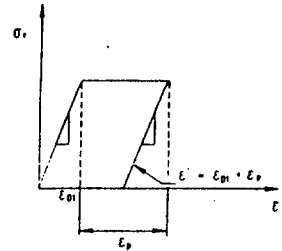


그림 4. 탄성-소성 재료의 응력 변형도

(변형 경화가 무시 될 수 있는 경우)

즉 재료의 소성적 거동을 생각할 때는 탄성 효과도 포함시켜야 하므로 [1], 윗 그림 4에서 응력 변형도는, 탄성 변형도 및 소성 변형도의 합이 전체 변형도임을 잘 나타내어 주고 있다. 그러나 소성 변형도 ϵ_p 는 압축력(rolling force)에 의한 변형도이므로 x방향 변형도를 유발시킨 장력과는 무관하여, 식 (12)에서 1점에서의 변형도 값대신 소재 입측에서의 변형도 ϵ_{01} 즉 ϵ_0 를 사용할 수 있다.

그러므로 식 (12)를 다시 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$L \frac{d}{dt} [\epsilon_1(t)] = -w_1(t) + w_2(t) + \epsilon_0(t) w_1(t) - \epsilon_{12}(t) w_{12}(t) \quad (13)$$

식 (13)은 비 선형식이므로 perturbation method를 이용하여 초기 정상 상태 값에 대하여 선형화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\epsilon_1(t)] = & -\frac{w_{20}}{L} \epsilon_1(t) + \frac{w_{10}}{L} \epsilon_0(t) - \frac{[1 - \epsilon_{00}]}{L} w_1(t) \\ & + \frac{[1 - \epsilon_{10}]}{L} w_{12}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

단, $\epsilon = \epsilon - \epsilon_0$, $W = w - w_0$.

$\epsilon_{00}, \epsilon_{10} \ll 1$ 이므로,

식 (14)를 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\epsilon_1(t)] = -\frac{w_{20}}{L} \epsilon_1(t) + \frac{w_{10}}{L} \epsilon_0(t) - \frac{W_1(t)}{L} + \frac{W_{12}(t)}{L} \quad (15)$$

식 (15)는 탄성 변형 구간에서 검사 체적 내에 있는 소재의 변형도(ϵ)의 미소 변화와 소재 양단의 속도의 미소 변화 (W_1, W_2) 사이의 선형화된 동적 관계를 나타내고 있다. 그림 1에서 점 1과 점 2에서는 물과 소재 사이에 미끄럼 (slip)이 없다고 가정했을 때, 소재의 속도 w_1 는 물의 소재와의 접점 1에서의 선속도 v_1 와 같으나 w_2 는 물의 속도 v_2 와는 다르다. 물#2에서 소재의 속도 w_2 와 물의 속도 v_2 와의 관계를 구하기 위하여 소성 변형 구간 12-2 사이의 검사 체적 bgdh에 가정(12), (13) 하에서 연속 방정식을 적용한다.

$$w_{12}h_1 = w_2h_2$$

윗 식은 비 선형식이므로 perturbation method를 이용하여 선형화 시키면 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$W_{12} = \frac{W_2h_2 + w_{20}H_2 - w_{120}H_1}{h_{10}} \quad (16)$$

단, $W_{12} = w_{12} - w_{120}, \quad W_2 = w_2 - w_{20}$

$$H_1 = h_1 - h_{10}, \quad H_2 = h_2 - h_{20}$$

식 (16)을 식 (15)에 이용하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\epsilon_1(t)] = & -\frac{w_{20}}{L} \epsilon_1(t) + \frac{w_{10}}{L} \epsilon_0(t) - \frac{W_1(t)}{L} \\ & + \frac{1}{L} \frac{W_2h_2 + w_{20}H_2 - w_{120}H_1}{h_{10}} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)은 물의 접선 선속도와 소재의 속도가 각각 점 1, 2에 서 같다고 가정할 때 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\epsilon_1(t)] = & -\frac{v_{20}}{L} \epsilon_1(t) + \frac{v_{10}}{L} \epsilon_0(t) - \frac{V_1}{L} \\ & + \frac{1}{L} \frac{V_2h_2 + v_{20}H_2 - v_{120}H_1}{h_{10}} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)는 두개의 물 사이에 있는 소재의 변형도 변화(ϵ)와 소재 양단의 두 물의 선 속도 변화 및 소재의 두께 변화 사이의 선형화된 동적 관계를 나타내고 있다.

3. 장력-Roll 속도-소재두께 관계

가정 (3), (5), (7), (8), (10), (11)하에서 힘과 변형과의 관계 (후크의 법칙)를 이용하면 아래와 같다.

$$T_0 = A_0 E_0 \epsilon_0 \quad T_1 = A_1 E_1 \epsilon_1 \quad (19)$$

단 A와 E는 탄성 변형 구간내에서는 일정하다고 가정한다. 식 (19)에서 T_0, T_1 는 초기 정상 상태 값에서의 장력 변화량이다. 식 (19)을 식 (18)에 이용하면 식 (20)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [T_1(t)] = & -\frac{v_{20}}{L} T_1(t) + \frac{v_{10}}{L} \frac{A_1 E_1}{A_0 E_0} T_0(t) \\ & + \frac{A_1 E_1}{L} \left[\frac{V_2(t)h_2 + v_{20}H_2 - v_{120}H_1}{h_{10}} - V_1(t) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)는 두개의 물 사이의 소재에서의 장력의 변화와 소재 양단 물의 접선 속도 변화 및 소재 두께 변화에 대한 관계를 나타내는 선형화된 동적 모델이다. 식 (20)에서 볼수 있듯이, 두개의 스탠드 사이의 장력은 소재 양단에 있는 스탠드에서의 물 속도 및 물 갭으로 제어될 수 있음을 알수 있다. 또한 소재 장력이 두개의 스탠드 사이에 있는 다음 (following)스탠드의 소재에 전달(tension transfer) 됨을 알 수 있다.

Multi-stand 시스템에 대한 수학적 모델 개발을 위하여 그림 5에서와 같은 Multi-stand 압연 공정 시스템을 생각하자.

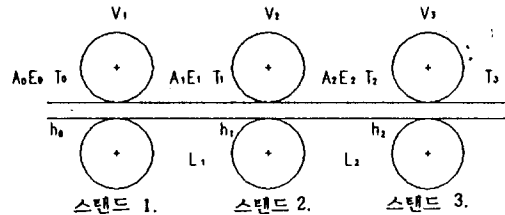


그림 5. Multi-stand 압연 공정 시스템

식 (20)을 이용하여 multi-stand시스템에서의 장력-물 속도-소재 두께 관계에 관한 동적 수학적 모델을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [T_1(t)] = & -\frac{v_{20}}{L_1} T_1(t) + \frac{v_{10}}{L_1} \frac{A_1 E_1}{A_0 E_0} T_0(t) \\ & + \frac{A_1 E_1}{L_1} \left[\frac{V_2(t)h_2 + v_{20}H_2 - v_{120}H_1}{h_{20}} - V_1(t) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [T_2(t)] = & -\frac{v_{30}}{L_2} T_2(t) + \frac{v_{20}}{L_2} \frac{A_2 E_2}{A_1 E_1} T_1(t) \\ & + \frac{A_2 E_2}{L_2} \left[\frac{V_3(t)h_3 + v_{30}H_3 - v_{230}H_2}{h_{20}} - V_2(t) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

4. 변수 감응도 (Parameter Sensitivity) 해석

Table 1에는 소재에 소성 변형을 일으키기 시작하는 물 속도 변화량과 물 갭 변화량을 나타내었다. 결국 예로 이용한 재료의 압연시 장력에 의한 소재의 네킹 현상을 막기 위해서는 정상 상태치의 약 7 % 내의 변화량(두께 혹은 물 속도)을 이용하여 장력을 제어해야 됨을 알 수 있다.

Table 1. 소재 두께 및 속도 변화에 대한 장력 변화의 상한 및 하한치

	t_1 (MN)	t_2 (MN)
V_1 (6.8%)	0.0006	0.375
V_1 (-6.5%)	2.9300	1.840
V_2 (6.5%)	2.9300	0.890
V_2 (-6.8%)	0.0006	1.375
V_3 (7.3%)	1.5000	2.200
V_3 (-7.6%)	1.5000	0.008
H_1 (-6.6%)	2.9340	1.892
H_2 (-6.8%)	0.0006	1.409
H_3 (-7.6%)	1.5000	0.008

재료 : JIS 규격집 SUP 10
 $E : 1225 \text{ MPa (MN / m}^2\text{)}$
 $t_0 = 0, t_1 = 1.5, t_2 = 1.125 \text{ MN}$
 (Initial Tension)
 Yeild Tension $_1 = 2.94 \text{ MN}$
 Yeild Tension $_2 = 2.21 \text{ MN}$

초기 정상 상태에서부터 롤 갭, 롤 속도 변화에 대한 장력의 변화량을 각 스탠드에 대해 계산하여 본 결과를 Table 2에 나타내었다. 그림 5에서 장력 변화 T_1 은 속도 변화 V_1, V_2 와 롤 갭(소재 두께)변화 H_1, H_2 에 가장 민감하고, 장력 변화 T_2 는 속도 변화 V_1, V_3 와 롤 갭 변화 H_1, H_3 에 가장 민감하였다. 그러므로 T_1 및 T_2 제어하기 위해서는 V_1, V_2, H_1, H_2 및 V_1, V_3, H_1, H_3 를 제어 변수로 이용할 수 있다.

Table 2. 소재두께 및 속도 변화에 대한 장력변화량

	T_1	T_2
H_1	1.104	0.581
H_2	-1.102	0.212
H_3	0.000	-0.375
V_1	-1.102	-0.551
V_2	1.102	-0.184
V_3	0.000	0.775

각 Parameter 공히 5.0 % 변화를 주었다.
 (Gap 변화(H)는 (-) 이다.)

The Value at Operating Point
 $L_1 = 5.0, L_2 = 5.0 \text{ m}$
 $h_0 = 0.003, h_1 = 0.0024, h_2 = 0.0018, h_3 = 0.0012 \text{ m}$
 $v_1 = 3, v_2 = 4, v_3 = 6 \text{ m}$

5. 정적 및 동적 특성 해석

5.1 장력전달 현상

정상 상태에서의 장력-롤 속도-소재 두께 관계는 식 (21)와 (22)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_1 = \frac{v_{10}}{v_{20}} \frac{A_1 E_1}{A_0 E_0} T_0 + \frac{A_1 E_1}{v_{20}} \left[\frac{V_2 h_{30} + v_{20} H_3 - v_{120} H_2}{h_{20}} - V_1 \right] \quad (23)$$

$$T_2 = \frac{v_{20}}{v_{30}} \frac{A_2 E_2}{A_1 E_1} T_1 + \frac{A_2 E_2}{v_{30}} \left[\frac{V_3 h_{40} + v_{30} H_4 - v_{230} H_3}{h_{30}} - V_2 \right] \quad (24)$$

식 (23)과 (24)에서 볼 수 있듯이 스탠드에서 롤 속도와 갭 변화 없이도 윗(upstream)스탠드 구간에서의 장력 변화는 다음스탠드 (following stand) 구간에서의 소재 장력에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이것을 '장력 전달'(tension transfer)라 하며 그림 6에 동적 시뮬레이션 결과가 나와 있다.

일반적으로 판 두께 제어를 위하여 롤 갭과 롤 속도 제어를 사용하고 있으나 전방 장력(t_0)도 Tension 1, 2에 영향을 미친다.

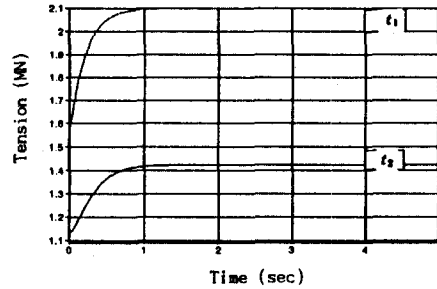


그림 6. t_0 의 변화에 대한 t_1, t_2 의 변화.

(Steady State)

$t_0 = 0. \text{ MN } t_1 = 1.5 \text{ MN } t_2 = 1.125 \text{ MN (Operating Point)}$

$t_0 = 1.0 \text{ MN } t_1 = 2.1 \text{ MN } t_2 = 1.425 \text{ MN}$

Tension 1 은 입측 장력 변화량의 60%가

Tension 2 는 입측 장력 변화량의 30%가 반영됨을 알 수 있었다.

5.2 Master-Speed Drive의 위치 선정

장력전달 현상은 multi-stand 시스템에서 master-speed drive의 위치 선정에도 중요한 영향을 미친다. 그림 7에는, 그림 5의 시스템에서 스탠드 3에 master-speed drive를 두고 v_2 를 변경 시켰을 때, T_2 값을 원하는 만큼 제어할 수 없음을 보여준다. 이는 장력 전달의 결과이다. 그러므로 장력 전달 현상을 고려하여 그림 5의 시스템에서 T_2 를 가장 효과적으로 제어하기 위해서는, 스탠드 2에 master-speed drive를 두고 v_3 를 이용하거나, 스탠드 3에 master-speed drive를 두고 v_2 를 이용할 때는 v_2 의 변화에 관계없이 t_1 을 일정하게 유지시킬 수 있어야 한다.

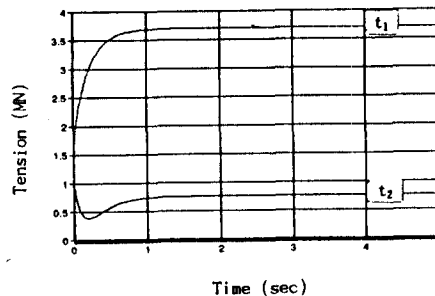


그림 7. v_2 의 변화에 의한 t_1, t_2 의 변화

$L_1 = 5.0, L_2 = 5.0 \text{ m}$,

$h_0 = 0.003, h_1 = 0.0024, h_2 = 0.0018, h_3 = 0.0012 \text{ m}$

$v_1 = 3, v_2 = 4, v_3 = 6 \text{ m}$

5.3 장력과 롤 갭 제어 시스템과의 Interaction

소재 양단의 스탠드 1과 2에서 롤 갭 제어 시스템의 반응 속도가 매우 빠를 경우, 장력 제어 시스템에 인입되는 외란으로서의 두께 변화에 대처하기 어렵다[3]. 식 (21)에서 볼 수 있듯이 그림 5의 시스템에서 장력 변화 T_1 의 시정수는 L_1/v_{20} 이다. 롤 갭 제어 시스템의 반응 속도, 장력 변화 T 의 시정수 인자 L, v , 혹은 페루프 장력 제어 시스템 구성을 종합적으로 조정하여 롤 갭과 소재 장력 interaction의 악 영향을[3] 적게 할 수 있다.

6. 결론

- (1) 개발된 모델을 이용하여 롤 갭(소재의 두께)의 변화 및 소재 양단의 롤 속도의 변화로 인한 장력 변화에 대한 정적 및 동적 특성을 연구할 수 있었다.
- (2) 소재 압연 process의 upstream으로부터 downstream으로의 '장력 전달' 현상(tension transfer)을 확인 하였다.
- (3) 장력 전달 현상을 고려하여 master-speed drive의 위치 선정에 대한 가이드라인을 얻을 수 있었다.
- (4) 장력에 대한 시정수 결정 인자인 스탠드 사이의 거리 L , 운영 속도 v 를 조정함으로써 롤 갭 제어기와 소재 장력의 interaction으로 인한 strip necking과 같은 현상을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.
- (5) 더 연구되어야 할 사항들은 다음과 같다.

- * 두개의 스탠드 사이의 구동되지 않는 물들에 의한 장력 변화 연구.

- * 롤과 소재 사이에 미끄럼(slip)이 있을 때, 이 미끄럼이 장력 변화에 미치는 영향.

- * 소재에 처짐(sag)이 있을때, 이 처짐이 장력에 미치는 영향.

- * roll gap dynamics, rolling force dynamics, roll speed dynamics도 포함된 unified model의 유도.

참 고 문 헌

- [1] Crandall, S.H. , An Introduction to the Mechanics of Solids , McGraw-Hill , 1959
- [2] Bass, G.V. , Minimum Tension Control in Finishing Train of Hot Strip Mills, Iron and Steel Engineer , Nov.1987. pp.48-53
- [3] Ginzburg, V.B., High-Quality Steel Rolling, Marcel Dekker , New York, 1993
- [4] Shin, K.H., Distributed Control of the Tension in Multi-Span Web Transport Systems, Ph.D.Thesis, Oklahoma State Univ., May 1991
- [5] Grimble, M.J., Tension Controls in Strip Processing Lines, Metals Technology, Oct 1976, pp.446-453