

# 냉간압연 다단 압연기의 롤 슬립 모델링 및 상태 관측기 설계<sup>§</sup>

강현석\* · 홍완기\* · 황이철\*\*†

\* (주)POSCO 기술연구원 STS공정연구그룹, \*\* 동의대학교 메카트로닉스공학과

## Modeling and State Observer Design for Roll Slip in Cold Cluster Mills

Hyun Seok Kang\*, Wan Kee Hong\* and I Cheol Hwang\*\*†

\* STS Process Research Group, Technical Researcher Laboratories, POSCO,

\*\* Dept. of Mechatronics Engineering, Dongeui Univ..

(Received December 20, 2011 ; Revised September 4, 2012 ; Accepted September 10, 2012)

**Key Words:** Cold Rolling(냉간 압연), Cluster Mill(다단 압연기), Roll Slip(롤 슬립), Slip Ratio(슬립률), Roll Slip State Observer(롤 슬립 상태 관측기)

**초록:** 이 논문은 냉간 압연공정의 다단 압연기에서 각 롤 간의 슬립 현상에 대한 상태공간 모델을 도출하고, 이를 이용하여 롤 간 슬립 상태 관측기 설계에 관한 연구를 수행한다. 먼저 뉴턴의 운동법칙을 이용하여 각 롤들의 회전 운동 방정식을 1계 비선형 미분 방정식으로 기술한 후, 테일러 급수를 이용하여 임의의 동작점에서 상태공간 방정식으로 선형화한다. 다음에는 선형화된 상태공간 방정식에 기초하여 Gopinath 구성법으로 측정 가능한 구동 롤을 제외한 종동 롤의 회전 각속도를 추정하는 최소차원 상태 관측기를 설계한다. 마지막으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 상태 관측기로부터 추정된 각 롤 회전 각속도와 슬립률의 유용성을 고찰한다.

**Abstract:** This study focuses on the state space model and the design of a state observer for the slip dynamics between rolls in STS cold cluster mills. First, a mathematical model of the roll slip is given as a nonlinear differential equation. Then, by using a Taylor series expansion, it is linearized as a state space model. Next, by using Gopinath's algorithm, a minimal-order state observer based on the state space model is designed to estimate the angular speed of all idle rolls except for an actuated roll that is measurable. Finally, a computer simulation is used to validate that the proposed state space model very well describes slip dynamics between, and moreover, the state observer very well estimates the angular speed of the idle roll.

- 기호설명 -

$J_a, J_b$  : a, b롤의 질량관성모멘트[ $kg \cdot m^2$ ]

$r_a, r_b$  : a, b롤의 반경[m]

$M_a, M_b$ : a, b롤의 질량[kg]

$c_a, c_b$  : a, b롤의 점성계수

$c_{ab}$  : a, b롤 간 점성 마찰계수

$\mu_{ab}$  : a, b롤 간 정적 마찰계수

$\omega_a, \omega_b$  : a, b롤의 회전 각속도[rad/sec]

$\lambda_{ab}$  : a, b롤 간 슬립률

$g$  : 중력 가속도[ $= 9.8m/sec^2$ ]

$N_{ab}$  : a, b롤의 접촉점에서의 수직력[N]

$F_{ab}$  : a, b롤의 접촉점에서의 마찰력[N]

### 1. 서론

다수의 롤들로 구성된 다단 압연기(cluster mill)를 사용하는 연속 냉간 압연공정에서 압연 롤들 간에 발생하는 슬립 현상은 롤 마모 또는 표면 손상을 유발시켜, 압연 제품의 표면 품질 불량을 일으키는 주 요인으로 작용한다. 동시에 롤 손상으로 인한 빈번한 롤 교체 작업은 생산성을 크게 떨어뜨리게 된다. 그래서 이 논문에서는 다단 압연기의 롤 간 슬립 현상을 해석함과 동시에 슬립률 제어를 위한 모델 구축을 연구 목표로 한다. 이를 위하여 각 롤들

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, [ichwang@deu.ac.kr](mailto:ichwang@deu.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 동적 모델을 도출하고, 이를 기초로 각 롤의 회전 각속도를 추정하는 상태 관측기 설계에 관한 연구를 수행한다. 철강 제조회사들은 다단 압연기에서의 롤 간 슬립 현상을 해결하기 위해서 많은 노력을 하고 있다. 그러나 아직 슬립 현상을 이론적으로 해석한다든지 제어하는 기술을 전혀 확보하지 못하고 있는 실정이다. 현재 대부분 조업자의 경험적인 기술을 바탕으로 슬립 현상을 분석하고, 슬립률을 줄이는 방안을 강구하고 있다. 따라서 롤 간 슬립 현상을 이론적으로 규명하고, 체계적인 제어 기술을 확보하는 것이 매우 시급하다고 할 수 있다.

다단 압연기에서 접촉하는 두 롤 사이에 발생하는 슬립은 접촉면에서 원주 속도의 상대속도 차이로 발생하는 것으로서, 이러한 슬립 현상에 관한 이론적인 연구는 주로 수송기계 즉 항공기, 철도 차량, 그리고 자동차 분야에서 이루어지고 있다. 즉 지면(또는 레일)과 바퀴(wheel) 사이에 발생하는 슬립의 동적 모델 및 제어 기술은 현재까지 많은 연구가 수행되어 오고 있다.<sup>(1~3)</sup> 반면에 다단 압연기와 같은 압연 롤들 간의 슬립에 대해서는 이론적인 기존 연구 결과가 거의 없는 것으로 알려져 있다.

따라서 이 논문에서는 기존 차량 슬립 연구 결과들과 같이, 다단 압연기의 각 롤 간 슬립 현상에 대한 연구를 이론적으로 체계화하는 연구를 수행하고자 한다. 구체적인 연구 내용은 다음과 같이 크게 두 가지로 대별된다. 첫 번째로는 각 롤의 회전 운동에 관한 동적 모델을 비선형 미분방정식으로 도출하며, 여기서 비선형은 주로 롤 간 접촉면에서의 마찰 현상에 기인됨을 보인다. 두 번째로는 실제 현장에서 사용되는 다단 압연기 종동 롤들의 각속도는 측정할 수가 없어 이론적인 슬립 제어기 설계가 용이하지 않다. 그래서 상태 관측기 설계 이론에 기초하여 종동 롤들의 각속도를 추정하는 상태 관측기를 설계하기로 한다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 동적 모델과 롤 각속도 및 슬립률 관측기에 대한 결과를 고찰하고, 향후 연구 과제를 간략히 요약하기로 한다.

## 2. 롤의 동적 모델링

### 2.1 롤 간 슬립률 및 마찰계수

이 논문에서는 이론 전개에 단순화를 위해서 다수의 롤로 구성되는 다단 압연기에서 임의의 두개 롤(A, B롤)만을 고려한다. 여기서 A롤은 구동 롤이고, B롤은 종동 롤이며, 이에 대한 자

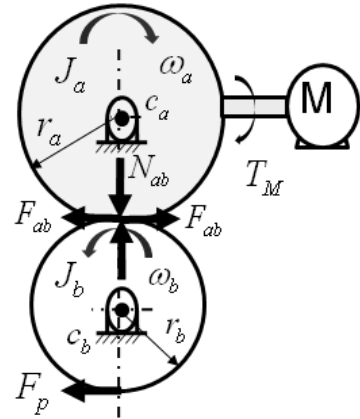


Fig. 1 Free body diagram of a cold cluster mill

유 물체도의 개략도는 Fig. 1과 같다. 여기서 각 롤의 원주 속도를 각각  $v_a, v_b$ 라고 하면, 슬립률은 아래와 같이 정의된다.

$$\lambda_{ab} = \frac{v_a - v_b}{v_a} = \frac{r_a\omega_a - r_b\omega_b}{r_a\omega_a} = 1 - \frac{r_b\omega_b}{r_a\omega_a} \quad (1)$$

그리고 롤 접촉점에서의 마찰력  $F_{ab}$ 는 Olsson<sup>(1)</sup>의 정적 마찰계수 모델을 간략화하여 아래 식과 같이 나타낸다.

$$F_{ab} = \mu_{ab}N_{ab} + c_{ab}(v_a - v_b) \quad (2)$$

여기서  $\mu_{ab}, c_{ab}$ 는 각각 정적 마찰계수와 점성 마찰계수를 나타내며,  $N_{ab}$ 는 롤 접촉점의 수직력을 나타낸다. 그리고 정적 마찰계수는 문헌<sup>(1)</sup>의 정적 마찰모델을 이용하면 아래 식 (3)과 같다.

$$\mu_{ab} = \left\{ \mu_c + (\mu_s - \mu_c)e^{-\left(\frac{v}{v_s}\right)^2} \right\} \text{sgn}(v) \quad (3)$$

위의 식에서  $\mu_c, \mu_s$ 는 각각 정 마찰계수 및 쿨롱 마찰계수이며,  $v = v_a - v_b$ 는 두 롤의 상대 원주속도를,  $v_s$ 는 Stribeck 마찰 효과를 나타낸다.

### 2.2 슬립 동적 모델식

Fig. 1로부터 각 A, B롤에 대한 운동 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_a \frac{d\omega_a}{dt} &= T_M - c_a\omega_a - r_a F_{ab} \\ J_b \frac{d\omega_b}{dt} &= r_b F_{ab} - c_b\omega_b - r_b F_p \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서  $T_M$ 은 구동 롤인 A롤에 인가되는 구동 토크이며,  $F_p$ 는 종동 롤인 B롤에 작용하는 압연하중의 스트립 마찰력을 나타낸다. 그리고 접촉점에서의 수직력은  $N_{ab} = M_a g$ 이다.

A롤의 구동부는 PI 제어기를 포함한 자동 속도 제어기(ASR:Auto Speed Regulator)인 것으로 가정하여, 아래 식 (5)와 같이 1차 지연 시스템으로 나타낸다.

$$\frac{dx_h}{dt} = -\frac{K_a}{T_a}\omega_a + \frac{K_a}{T_a}\omega_a^{ref} \quad (5)$$

이때, 구동 토크  $T_M$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$T_M = \phi_M(x_h - K_a\omega_a) + \phi_M K_a \omega_a^{ref} \quad (6)$$

여기서  $K_a$ ,  $T_a$ 는 각각 ASR PI 비례계인 및 적분 시간,  $\phi_M$ 은 모터 토크상수를 나타낸다.

따라서 식 (1)-(6)으로부터 다단 압연기에 대한 운동 방정식은 아래 식과 같이 비선형 1계 미분 방정식으로 주어진다.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}) + g\mathbf{u}, \quad \mathbf{y} = h(\mathbf{x}) \quad (7)$$

여기서 상태변수  $\mathbf{x} = [\omega_a \ \omega_b \ x_h]$ , 입출력 변수  $\mathbf{u} = [\omega_a^{ref}]$ ,  $\mathbf{y} = [\lambda_{ab}]$ 이며,  $f(\mathbf{x})$ ,  $g$ ,  $h(\mathbf{x})$ 는 각각 다음과 같다.

$$f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_a} \{-c_a\omega_a - r_a F_{ab} + \phi_M(x_h - K_a\omega_a)\} \\ \frac{1}{J_b} \{-c_b\omega_b - r_b F_P + r_b F_{ab}\} \\ -\frac{K_a}{T_a}\omega_a \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \phi_M K_a & 0 & \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix}^T, \quad h(\mathbf{x}) = 1 - \frac{r_a\omega_a}{r_b\omega_b} \quad (8)$$

아래 Fig. 2는 식 (7)에 대한 블록선도이다.

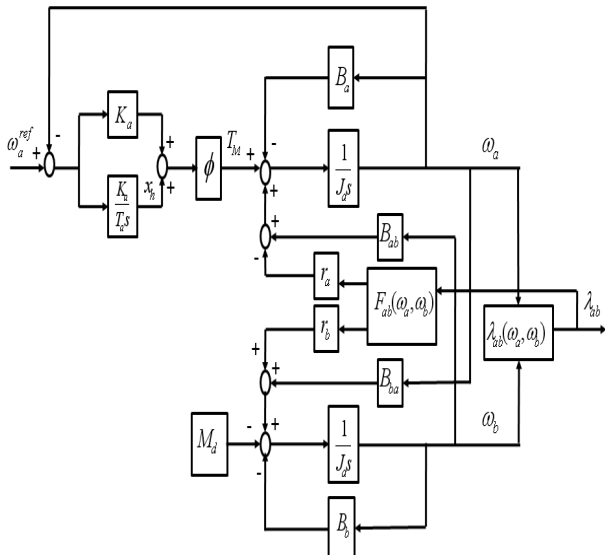


Fig. 2 Block diagram of a cold cluster mill

### 2.3 동적 모델식의 선형화

이 절에서는 식 (7)에서 주어진 비선형 모델에 대하여 테일러 급수 전개를 적용함으로써 동작점  $(\cdot)^*$ 에서의 미소변동에 대한 선형 미분 방정식으로 선형화된 선형 모델을 도출한다. 결과적으로 식 (7)은 아래 식 (9)와 같이 상태공간 모델로 주어지게 된다. 이에 대한 구체적인 유도 과정은 지면 관계 상 생략하기로 한다. 단, 스트립과 소재 간의 마찰 토크는 외란  $W$ 로 고려한다.

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = A\mathbf{x} + B\mathbf{u} + Wd, \quad \mathbf{y} = C\mathbf{x} \quad (9)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ b_{31} \end{bmatrix}, \quad C = [c_{11} \ c_{12} \ 0]$$

$$a_{11} = -\frac{1}{J_a}(B_a + \phi_M K_a + r_a N_{ab} \Psi C_1) \quad (10)$$

$$a_{12} = \frac{1}{J_a}(B_{ab} + r_a N_{ab} \Psi C_2)$$

$$a_{21} = \frac{1}{J_b}(B_{ab} + r_b N_{ab} \Psi C_1)$$

$$a_{22} = -\frac{1}{J_b}(B_b + r_b N_{ab} \Psi C_2)$$

$$a_{13} = -\frac{\phi_M K_a}{J_a}, \quad a_{31} = -\frac{K_a}{T_a}$$

$$b_{11} = \frac{\phi_M K_a}{J_a}, \quad b_{31} = \frac{K_a}{T_a}$$

$$c_{11} = C_1 = \frac{1 - \lambda_{ab}^*}{\omega_a^*}$$

$$c_{12} = -C_2 = \frac{r_b}{r_a \omega_a^*}$$

그리고 위의 식에서

$$B_a = c_a + r_a^2 c_{ab}, \quad B_b = c_b + r_b^2 c_{ab}$$

$$B_{ab} = B_{ba} = r_a r_b c_{ab}$$

$$\Psi = \left( \frac{d\mu_{ab}}{d\lambda_{ab}} \right)^*, \quad W = -\frac{r_b F_P}{J_b}$$

다음 장에서는 위의 상태공간방정식을 이용하여 B롤의 각속도를 포함하여 측정할 수 없는 상태변수를 추정하는 최소차원 상태 관측기를 설계한다.

### 3. 롤 슬립 상태 관측기 설계

제 2장에서 주어진 다단 압연기의 롤 간 슬립 특성을 해석하고, 슬립을 제어하기 위해서는 구동 롤 및 종동 롤의 각속도가 실제 측정 가능해야 한다. 그러나 실제 현장 설비에서 구동

물을 제외한 나머지 종동 물의 각속도는 대부분 측정할 수 없으므로, 종동 물들의 각속도는 입출력 정보를 이용하여 추정해야 한다. 따라서 이 장에서는 측정 가능한 구동 물의 각속도를 이용하여 종동 물의 각속도를 추정하는 상태 관측기를 설계한다. 즉 구동 물의 각속도는 측정 가능하기 때문에 상태 관측기는 종동 물의 각속도만 추정하는 최소차원 상태 관측기로 설계된다. 이러한 최소차원 상태 관측기에 대한 구체적인 구성 방법은 참고문헌<sup>(4)</sup>을 참조 바란다.

먼저 관측 대상의 상태 방정식은 식 (9)에서 주어진 것으로 하며, 단 출력 방정식의 C행렬은 아래와 같이 새로이 설정한다.

$$C_o = [1 \ 0 \ 0] \in R^{1 \times 3} \quad (11)$$

왜냐하면, 상태를 관측 시 출력은 측정 가능한 상태로 설정이 되어야 하기 때문이다. 만약 식 (9)의 출력 방정식을 이용하면, 슬립률이 출력 변수가 되어 상태 관측 시 이용할 수가 없다. 따라서 식 (9)와 (11)로 주어진 관측 대상은 가제어 및 가관측성을 만족하므로 상태 관측기가 설계 가능하게 된다. 단, 관측기 설계 시 외란 등의 불확실성 요소는 고려하지 않는 것으로 가정한다.

관측기 설계에 대한 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

**[STEP 1]** 다음 행렬  $G$ 가 정칙(nonsingular)행렬이 되도록 임의의 행렬  $M$ 을 선정한다.

$$G = \begin{bmatrix} M \\ C_o \end{bmatrix}, \quad M \in R^{2 \times 3} \quad (12)$$

여기서는 간단하게 아래 식과 같이 선정한다.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \in R^{2 \times 3} \quad (13)$$

이때 행렬  $G$ 와  $G^{-1}$ ( $G$ 의 역행렬)는 아래와 같다.

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G^{-1} = G \quad (14)$$

**[STEP 2]** 식 (9) 및 (11)의 관측대상에 대하여 상태변수 변환 즉  $\bar{\mathbf{x}}(t) = G^{-1}\mathbf{x}$ 를 수행하면 다음과 같이 Gopinath 형식의 새로운 상태공간방정식이 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \bar{\mathbf{x}} = \bar{A} \bar{\mathbf{x}} + \bar{B}u + Wd, \quad y = \bar{C}\bar{\mathbf{x}} \quad (15)$$

여기서,

$$\bar{A} = GAG^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vdots & a_{31} \\ 0 & a_{22} & \vdots & a_{21} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{13} & a_{12} & \vdots & a_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = GB = \begin{bmatrix} b_{13} \\ 0 \\ \dots \\ b_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{C} = CG^{-1} = [0 \ 0 \ \vdots \ 1] = [0_{1 \times 2} \ I_1]$$

위의 식 (15)를 이용하여 관측기를 구성한 후,  $\bar{\mathbf{x}}(t)$ 의 추정치  $\hat{\bar{\mathbf{x}}}(t)$ 를 구한 다음, 앞에서의 상태 변환을 역으로 수행하면  $\mathbf{x}(t)$ 의 추정치  $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 가 얻어진다. 이때 상태 관측기는 다음과 같이 주어진다.

**[STEP 3]** 상태 관측기는 다음 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{z}(t) &= D\mathbf{z}(t) + E\mathbf{y}(t) + J\mathbf{u}(t) \\ \hat{\mathbf{x}}(t) &= P\mathbf{z}(t) + V\mathbf{y}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $D, E, J, P, V$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D &= A_{11} + LA_{21}, \quad E = A_{12} + LA_{22} - DL \\ J &= B_1 + LB_2, \quad P = G^{-1} \begin{bmatrix} I_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad V = G^{-1} \begin{bmatrix} -L \\ I_1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

그리고  $L$ 은 관측기 게인 행렬로 아래와 같다.

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} \in R^{2 \times 1} \quad (17)$$

여기서 관측기 게인  $L_1, L_2$ 는 일반적으로 식 (16)의 행렬  $D$ 가 안정이 되도록 설정하면 되는데, 관측 속도를 고려하여 적절한 값으로 설정하는 것이 바람직한 것으로 잘 알려져 있다.

Fig. 3은 상태 관측기를 포함한 제어대상의 블록선도를 나타낸다.

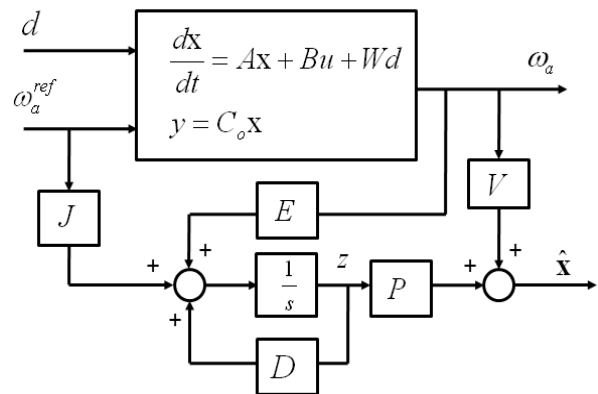


Fig. 3 Block diagram of a plant with a state observer

#### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

컴퓨터 시뮬레이션은 MatLab S/W를 사용하였으며, 다단 압연기의 임의 두 롤은 각각 구동 롤인 IMR롤(A롤)과 종동 롤인 WR롤(B롤)을 설정하였으며, 이들의 파라미터 값은 Table 1과 같다.

##### 4.1 선형화 모델의 시뮬레이션 결과

이 절에서는 제 2절에서 도출한 식 (9)의 선형 모델을 식 (7)의 비선형 모델과의 비교, 고찰을 통해 선형화 모델을 검증하기로 한다.

Fig. 4는 각 A, B롤의 각속도를 나타내고 있는 것으로서, 선형 모델의 결과는 비선형 모델과 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 그리고, Fig. 5는 각 롤 간의 슬립률을 나타내고 있는데, 정속 구간에서는 선형 모델의 슬립률이 비선형 모델과

Table 1 System parameter values

parameter	value	parameter	value
$J_a$ [kg·m <sup>2</sup> ]	24.79	$c_{ab}$ [N(rad/s)]	500
$J_b$ [kg·m <sup>2</sup> ]	0.49	$\mu_c$	0.005
$r_a$ [mm]	177.5	$\mu_s$	0.01
$r_b$ [mm]	70	$K_a$	0.1
$c_a$ [N(rad/s)]	5	$T_a$	0.2
$c_b$ [N(rad/s)]	0.005	$\phi_M$	1000
$M_a$ [kg]	1990	$g$	9.8
$M_b$ [kg]	218	$N_{ab}$	$= M_a g$

- Operating value:  $w_a = 1350$  [rpm],  $w_b = 3423$  [rpm]

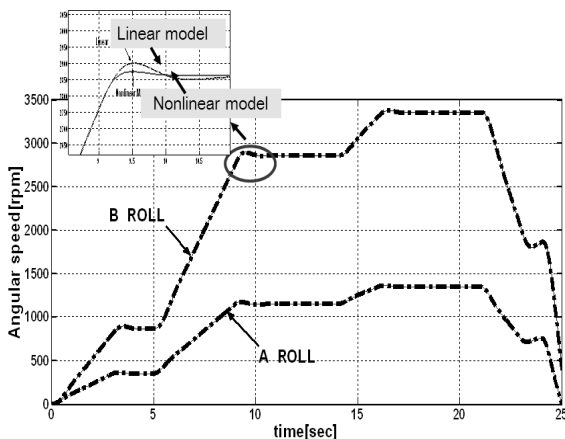


Fig. 4 Angular speeds of linear/nonlinear models

매우 일치하지만, 가감속 구간에서는 다소 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 상태 관측기 시뮬레이션 결과

선형화 모델에 기초한 상태 관측기의 결과와 관측 오차를 통해 관측기의 유용성을 고찰한다. 단 관측 오차는 선형 또는 비선형 모델에서의 값을 관측기로부터의 값을 뺀 값으로 정의됨에 주의하자.

Fig. 6과 Fig. 7은 관측기를 선형화 모델에 적용하였을 경우에 대한 각 롤의 각속도 및 슬립률 관측 결과 및 오차를 나타내고 있다.

Fig. 6에서 A롤의 각속도 관측 오차는 0이고, B롤의 관측 오차는 매우 작음을 알 수 있는데, 그러나 속도 패턴이 변화하는 시점에서는 다소 오차가 발생함을 보이고 있다. 이때 슬립률에 대한 관측 오차는 Fig. 7에서와 같이 구동 롤의 속도가 가속하는 구간에서는 음의 방향으로 관측 오차가 발생하고, 반대로 감속 구간에서는 양의 방향으로 관측 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 그렇지만 전체적으로 상태 관측기가 선형 모델에 기초하여 설계되었으므로, 선형 모델에 적용하였을 경우에는 매우 양호한 관측 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 상태 관측기를 비선형 모델에 적용하였을 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. Fig. 8에서 A롤의 관측 오차는 0이지만, B롤의 관측 오차는 Fig. 6보다도 비교적 크게 나타남을 볼 수 있다. 특히 가감속 구간에서는 각속도의 관측 오차가 매우 크게 나타남을 볼 수 있

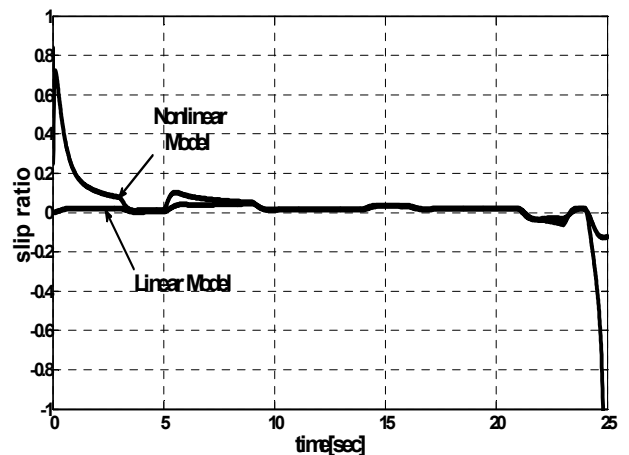


Fig. 5 Slip ratios of linear/nonlinear models

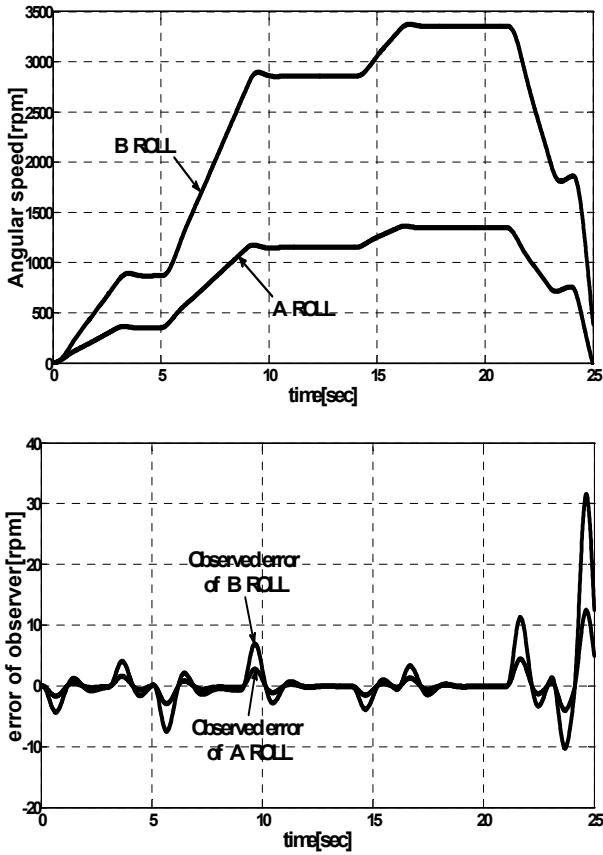


Fig. 6 Observed angular speed and error of A, B rolls for the linear model

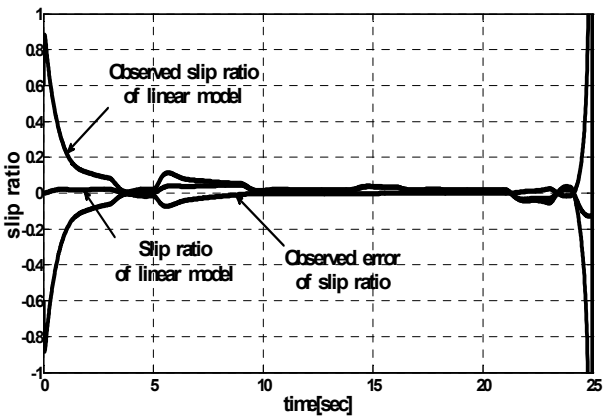


Fig. 7 Observed slip ratio and error between A and B rolls for the linear model

고, 이로 인해 롤 간의 슬립률 오차도 가감속 구간에서 매우 크게 나타남을 Fig. 9로부터 알 수 있다. 이는 선형 모델에 기초한 선형 관측기는 동작 구간이 크게 변동하는 가감속 구간에는 다소 부적합함을 알 수 있다. 그렇지만 정속 구간에는 속도 변동이 적을 경우에는 매우 양호함을

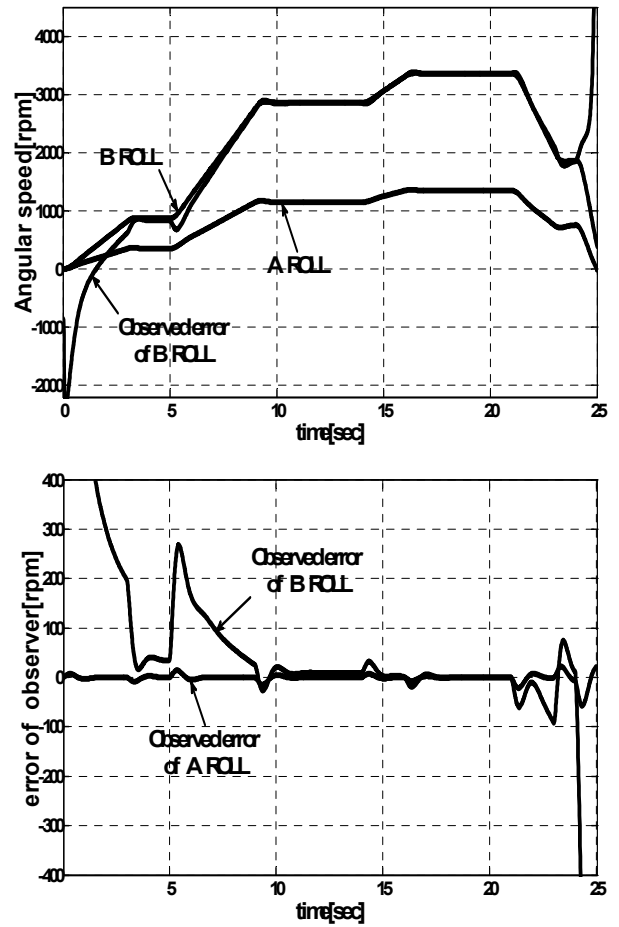


Fig. 8 Observed angular speed and error of A, B rolls for the nonlinear model

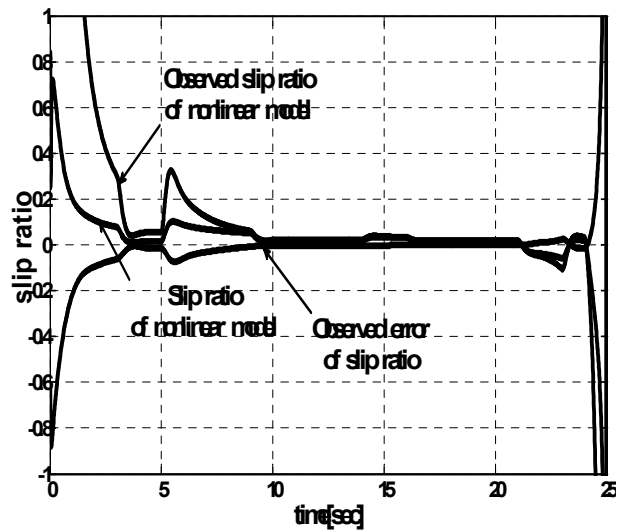


Fig. 9 Observed slip ratio and error between A and B rolls for the nonlinear model

볼 수 있다. 향후 비선형 상태 관측기 설계를 통해 가감속 구간에서도 종동 롤의 각속도 및 슬립률

관측 오차를 줄이는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 냉간압연 다단 압연기의 롤 간 슬립 현상을 해석하고 제어기 설계를 위한 동적 모델에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 두 개의 롤 간 슬립에 대한 동적모델과 선형화 모델을 도출하였다.

(2) 선형 모델을 이용하여 각 롤의 각속도 및 롤 간 슬립률을 추정하는 상태 관측기를 설계하였다.

(3) 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 선형 모델은 비선형 모델의 거동을 매우 양호하게 모사하고 있으며, 상태 관측기는 정속 구간에서는 대체적으로 양호하게 각 롤의 각속도와 슬립률을 추정하고 있음을 보였다. 그러나 동작점이 크게 변하는 가감속 구간에서는 상태 관측기의 추정 오차가 큼을 알 수 있었다.

향후 동작점이 크게 변하는 가감속 구간에서의 상태 관측기 설계에 대한 보완 연구가 필요하고, 동시에 슬립률 제어에 관한 연구를 통하여 이 논문의 유용성을 확인하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- (1) Yanada, H. and Sekikawa, Y., 2008, "Modeling of Dynamic Behaviors of Friction," *Mechatronics*, Vol. 18, pp. 330~339.
- (2) Grip, H. F., Imslund, L., Johansen, T. A., Kalkkhul, J. C. and Suissa, A., 2008, "Nonlinear Vehicle Side-Slip Estimation with Friction Adaptation," *Automatica*, Vol. 44, pp. 611~622.
- (3) Mirzaeinejad, H. and mirzaei, M., 2010, "A Novel Method for Non-Linear Control of Wheel Slip in Anti-Lock Braking Systems," *Control Engineering Practice*, Vol. 18, pp. 918~926.
- (4) Iwai, Z., Inoue, A. and Kawaji, S., 1994, "OBSERVER," Corona Co., Ltd.