

모델규명법에 기초한 열간 사상압연 선진율 학습모델

황 이 철^{*†} · 김 신 일^{**}

* 동의대학교 메카트로닉스공학과, ** POSCO 기술연구원

A Learning Model of Forward Slip Ratio Based on Model Identification in Hot Strip Finishing Mill Process

I Cheol Hwang^{*†} and Shin Il Kim^{**}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Dongeui Univ.,

** Technical Research Laboratories, POSCO

(Received June 27, 2016 ; Revised September 12, 2016 ; Accepted September 22, 2016)

Key Words: Hot Strip Finishing Mill Process(열간 사상압연 공정), Forward Slip Ratio(선진율), Learning Model(학습모델), Model Identification(모델규명), 보조변수알고리즘(Instrumental Variable Algorithm)

초록: 이 논문에서는 열간 사상압연 공정에서 스트립 통관성의 안정성과 판 품질 향상을 위하여 새로운 선진율 학습모델 개발에 관한 연구를 수행한다. 먼저 기존의 선진율 해석모델에 대한 고찰을 통해 스트립 장력, 루퍼 각도 그리고 롤 주속이 선진율 학습에 크게 영향을 미치는 주요 압연 인자들임을 보인다. 두 번째로는 선진율 학습의 주요 압연 인자들을 이용하여 새로운 선진율 학습모델을 도출한 후, 보조변수 규명 알고리즘을 이용하여 이산시간계 학습모델을 규명한다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이 논문에서 제안한 새로운 학습모델이 기존의 학습모델보다 유용함을 보인다.

Abstract: This paper reviews the learning model of a forward slip ratio in order to improve the mass-flow stability and strip qualities in the hot strip finishing mill process. Firstly, it is shown, from mathematical analysis, that the significant parameters of the forward slip ratio are the tension, looper angle, and roll velocity. Secondly, a discrete-time learning model of the forward slip ratio is proposed from these parameters, which is identified by an instrumental variable (IV) identification algorithm. Finally, it is shown from computer simulation that the proposed learning model is more effective than the existing learning model.

1. 서 론

이 논문에서는 열간 사상압연 공정에서 워크롤(work roll)과 스트립(strip)과의 접촉면에서 발생하는 슬립 현상을 정량적으로 나타내는 선진율의 학습 방법에 관한 연구를 수행한다. 여기서 선진율은 워크 롤 주속 대비 스트립 속도와 워크 롤 주속과의 차로 정의된다. 선진율은 열간 사상압연 공정에서 스트립 속도의 실측이 어려워 워크 롤 주속과 함께 스트립 속도를 계산하는데 활용

되므로 매우 중요한 압연 공정인자로 인식되고 있다.

열간 사상압연 공정에서 스트립 속도는 통관성 안정화나 품질에 절대적인 영향을 미치는 압연 인자로서, 이는 압연 공정의 각종 제어기들로부터 설정 또는 제어되고 있다. 제어기들로부터 조정된 스트립 속도와 선진율 또는 후진율로부터 각 스탠드의 워크 롤 주속이 결정되어진다. 따라서 선진율 또는 후진율은 각 스탠드의 제어 입력인 워크 롤의 주속을 결정하는데 있어 매우 중요함을 알 수 있다.

현재 선진율의 설정값은 압연 이론에 기초한

† Corresponding Author, ichwang@deu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

해석모델 또는 근사모델⁽¹⁻⁴⁾로부터 계산되고 있다. 해석모델로부터 선진율에 영향을 미치는 주요 압연인자들은 압하율, 전후방 장력, 편평 롤 반경, 롤과 판사이의 마찰계수 등이다. 그러나 이들의 실제값을 측정할 수 없어 선진율을 정확히 계산한다는 것은 매우 어려우므로 해석모델로부터 계산된 선진율 설정값은 실제값과는 상당한 오차를 수반하게 된다. 특히 스트립이 각 스탠드에 진입되는 순간의 선단부에서는 선진율 설정값이 실제값과는 매우 큰 오차가 발생하게 된다. 그래서 실제 압연 공정에서는 측정 가능한 선진율 압연인자들을 활용하여 선진율을 보정하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

위에서 기술한 바와 같이 선진율에 영향을 미치는 주요 압연인자들은 대부분 센서로 측정할 수 없으므로, 현재는 압연인자들 가운데 측정 가능하면서도 장력의 정보를 간접적으로 내포하고 있는 루퍼 각도만을 이용한 단순 학습이 이루어지고 있다. 그러나 최근 루퍼 제어의 향상으로 루퍼의 움직임이 매우 안정화되어 있어 선진율에 영향을 미치는 많은 압연인자들의 섭동을 루퍼 각도만을 통해 학습한다는 것은 매우 불충분하다는 것이 인식되고 있다. 따라서 이 논문에서는 루퍼 각도뿐만 아니라 로드셀(load cell)로부터 직접 측정된 장력과 실제의 장력을 발생시키는 양단 스탠드의 롤 주속에 대한 측정값을 이용하여 선진율을 학습하는 새로운 학습 알고리즘을 제안하고자 한다.

결과적으로 이 논문에서는 루퍼 각도뿐만 아니라 스트립 장력과 양단 스탠드의 롤 주속 차를 이용한 새로운 선진율 학습모델을 도출하고, 이를 실 공정에 활용하기 위한 학습용 이산시간계 규명모델을 제안한다. 이를 위하여 이 논문에서 수행한 주요 연구 내용은 다음과 같다. 제 2장에서는 기존의 선진율 해석모델과 근사모델을 통해 선진율에 미치는 주요 압연 인자들을 간략히 고찰한다. 제 3장에서는 스트립 장력, 루퍼 각도 그리고 양단 스탠드 롤 주속의 차를 이용한 새로운 학습 모델과 이를 실 공정에서 적용 가능한 형태의 이산시간계 학습모델을 규명한다. 제 4장에서는 실 압연공정의 조업 데이터를 통하여 학습모델의 파라미터들을 규명하고, 제안한 학습모델의 타당성을 검증한다. 끝으로 이 논문의 결과와 향후 연구 과제를 제 5장에서 간략히 기술한다.

2. 선진율 해석모델

이 장에서는 압연 이론에 기초한 선진율의 해석모델에 대해서 간략히 소개하고, 선진율에 대한 주요 압연 영향인자들을 고찰한다.

Fig. 1은 워크 롤과 스트립과의 속도 관계를 나타낸 그림으로서, 롤 표면점에서의 접선방향 속도(이하 롤 주속 v_R 로 표기한다)는 롤 탄성적인 성질에 의하여 스트립 접촉부에서는 항상 일정한 것으로 간주한다. 따라서 출구 측의 판 속도는 롤 주속보다 크게 되며 이 현상을 선진(forward slip) 현상이라고 하고, 입구 측에서는 그 반대가 되어 후진(backward slip) 현상이 발생하게 되며, 중립면(N)에서는 롤과 스트립 간의 상대속도가 0이 되어 슬립율이 0이 된다. 이때 선진율 f_s 와 후진율 b_s 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$f_s \equiv \frac{v_o - v_R}{v_R}, \quad v_o = (1 + f_s)v_R \quad (1)$$

$$b_s \equiv \frac{v_R - v_i}{v_R}, \quad v_i = (1 - b_s)v_R \quad (2)$$

여기서 체적속도 일정의 법칙($h_i v_i = h_o v_o$)과 압하율 $r = (h_i - h_o)/h_i$ 의 정의로부터 선진율과 후진율은 다음 관계를 만족한다.

$$\frac{v_i}{v_o} = \frac{h_o}{h_i} = \frac{1 - b_s}{1 + f_s} = 1 - r, \quad b_s = r - (1 - r)f_s \quad (3)$$

위에서 스트립 두께 방향으로 균일 압축 변형을 한다고 가정하면, 식 (1)의 선진율은 아래 식

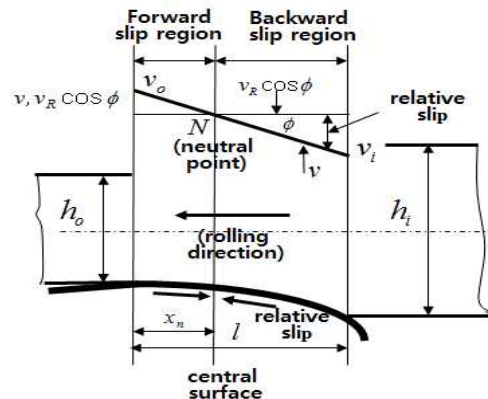


Fig. 1 The relation of velocities between work roll and strip

(4)와 같이 주어진다.^(1,2)

$$f_s = \left(\frac{2R_D}{h_o} \cos \phi_n \right) (1 - \cos \phi_n) \quad (4)$$

$$\simeq \frac{R_D}{h_o} \phi_n^2 \simeq \frac{\Delta h}{h_o} \left(\frac{x_n}{l} \right)^2$$

여기서, ϕ_n , h_n , x_n 은 각각 중립점에서의 접촉각(중립각), 스트립 두께, 롤과 스트립 간의 접촉 길이이며, Δh 는 입출력 두께 차 그리고 R_D 는 편평 롤 반경을 나타낸다. 위의 식 (4)에서 중립각은 가장 일반적으로 많이 사용되고 있는 Bland & Ford 근사식에 따르면 다음 식 (5)와 같이 주어진다.⁽²⁾

$$\phi_n = \sqrt{\frac{h_o}{R_D}} \tan \left\{ \frac{1}{2} \sin^{-1} \sqrt{r} + \frac{1}{4\mu} \sqrt{\frac{h_o}{R_D}} \ln \frac{\left(1 - \frac{\sigma_b}{S_o}\right)(1-r)}{1 - \frac{\sigma_f}{S_i}} \right\}$$

여기서 μ 는 롤과 스트립 간의 마찰계수, σ_f , σ_b 는 각각 전방 및 후방장력, 그리고 S_i , S_o 는 각각 입출측에서의 2차원 항복응력을 나타낸다. 그리고 식 (4)에 주어진 해석모델의 근사화에 관한 많은 연구가 수행되었는데, 가장 대표적인 Hill 근사식을 소개하면 다음 식 (5)와 같다.⁽⁴⁾

$$f_s = f_d^2$$

$$f_d = \frac{1}{2} \sqrt{r} - \frac{1}{4\mu} \sqrt{\frac{h_o}{R_D}} \left(\frac{2r}{2-r} - \frac{\sigma_f - \sigma_b}{k_p} \right) \quad (5)$$

여기서, k_p 는 재료 변형저항을 나타낸다.

위의 해석모델 식 (4)와 근사모델 식 (5)로부터 선진율에 영향을 크게 미치는 주요 압연 인자들은 편평 롤 반경, 압하율, 각 스탠드 입출측 스트립 두께, 롤과 스트립 접촉면에서의 마찰계수, 각 스탠드 전후방 장력 그리고 재료 평균 변형저항 등임을 알 수 있다.

실제 압연 공정에서는 위의 해석모델로부터 선진율의 설정치를 계산하고 있다. 그러나 실제의 압연 공정에서는 위에서 언급한 압연 인자들을 실시간에서 정확히 측정할 수 없어, 사전에 주어진 값들을 이용하지만 이들도 섭동으로 인하여 실제값과는 상당한 오차를 수반하게 된다. 따라서 실제의 압연 공정에서는 해석모델로부터 계산된 설정값을 반드시 학습으로 보정해야 함을 알

수 있다. 즉 주요 압연 인자들 가운데 측정 가능한 압연 인자들을 통하여 보정하는 것이 반드시 필요함을 나타내고 있다. 다음 장에서는 기존의 학습 방법을 간략히 고찰하고 새로운 학습모델과 이에 기초한 학습 알고리즘을 제안한다.

3. 선진율 학습 규명모델

이 장에서는 먼저 기존의 학습 방법을 간략히 소개하고 새로운 학습모델과 이에 기초한 실 공정에서의 학습을 위한 이산시간계의 선진율 모델 규명에 관한 내용을 기술한다.

먼저 선진율 학습모델을 설명하기에 앞서 선진율 학습량 Δf_s 를 다음 식 (6)과 같이 정의한다.

$$f_s = f_{s0} + \Delta f_s \quad (6)$$

여기서 f_{s0} 는 식 (4), (5)로부터 주어지는 설정값을 나타내며, 이하 아래 첨자 ‘0’는 각 파라미터들의 설정값을 나타내는 것으로 한다. 이 때 식 (1)에서 정의된 스트립 속도의 실제값과 설정값의 차는 식 (1)과 식 (6)으로부터 다음 식 (7)과 같다.

$$\Delta v \equiv v - v_o = (1 + f_s)v_R - (1 + f_{s0})v_{R0} \quad (7)$$

$$= (1 + f_{s0})(v_R - v_{R0}) + \Delta f_s v_R$$

위의 식에서 워크 롤 구동기의 서보 제어기를 통하여 실제 워크 롤 주속도가 설정값으로 구현된다고 가정하면($v_R \simeq v_{R0}$), 선진율 변동량과 스트립 속도 변동량과의 관계는 아래 식 (8)과 같다.

$$\Delta v = v_R \Delta f_s \quad (8)$$

따라서 위의 식 (8)로부터 스트립 속도 변동량은 선진율 학습으로 인한 변동값으로부터 추정할 수 있음을 알 수 있고, 이를 통해 각종 압연 공정 제어기들로부터 주어진 스트립 속도 제어입력에 따라 롤 속도를 조절할 수 있게 된다.

3.1 선진율 학습모델

기존의 선진율 학습법은 압연하중의 레코드 구분법과 동일하게 루퍼 각도의 변동값(실제값과 설정값과의 편차)을 이용하여 스트립 두께, 폭, 강종별로 학습을 수행하고 있다. 서론에서 언급

한 바와 같이 기존 학습법은 선진율 영향인자들의 정확한 값을 측정할 수 없어 그들 가운데 장력의 정보를 간접적으로 나타내는 루퍼 각도의 측정값만을 이용하고 있다. 이에 대한 기존 학습 알고리즘은 다음 식 (9)와 같다.

$$\Delta f_s(k+1) = \alpha \Delta f_s(k) + (1-\alpha) \Delta f_s(k-1) \quad (9)$$

여기서 $\Delta f_s = K\Delta\theta$, K : 비례상수, $k=1,2,\dots$ 는 압연되는 코일 순번, 그리고 α , $0 \leq \alpha \leq 1$ 는 임의로 결정되는 학습계수를 나타낸다.

다음에는 루퍼 각도뿐만 아니라 로드셀로부터 측정된 스트립 장력과 장력을 발생시키는 양단 스탠드의 롤 주속 차를 추가적으로 활용하여 새로운 학습모델을 아래 식 (10)과 같이 도출한다.

$$\Delta f_s = W_\theta K_\theta \Delta\theta - W_\sigma K_\sigma \Delta\sigma - W_{v_R} K_{v_R} \Delta v_R \quad (10)$$

여기서 $\Delta\theta$, $\Delta\sigma$, Δv_R 는 각각 루퍼 각도, 장력, 그리고 양단 스탠드의 롤 주속 차에 대한 설정값과 실제값과의 편차를 나타내고, K_θ , K_σ , K_{v_R} 은 각각 식 (11)과 같이 주어지는 계수들을 나타낸다.

$$K_\theta = \frac{1}{v_{Re}} \frac{\partial F_3(\theta_o)}{\partial \theta_o} \dot{\theta}_o \quad (11)$$

$$K_\sigma = \frac{1}{v_{Re}} \frac{L}{E}, \quad K_{v_R} = \frac{1}{v_{Re}} (1 + f_{s_o})$$

여기서 W_θ , W_σ , W_{v_R} 는 각각 경험적으로 결정되는 보정 계수들이며, θ_o 는 동작점에서의 루퍼 각도를 나타낸다. 위의 식 (11)에서 v_{Re} 은 양단 스탠드의 롤 속도 차이이고, L , E 는 각각 양단 스탠드 간 거리와 스트립 탄성계수이며, $F_3(\theta)$ 는 루퍼 각도에 대한 스탠드 간 스트립 길이의 변화량을 나타낸다. 위의 식 (10)에서 제안한 학습 모델은 루퍼-장력 시스템의 비선형 동적 방정식을 동작점에서 선형화한 동적모델로부터 유도되어진 것이다. 이에 대한 구체적인 유도과정은 지면 관계상 생략하기로 한다.

3.2 선진율 학습모델 규명

이 절에서는 3.1절에서 주어진 식 (10)의 학습 모델에 기초하여 실 공정에서의 학습을 위한 규

명모델을 기술한다. 먼저 실 압연공정에서의 학습 용 규명모델은 아래 식 (12)와 같이 이산시간계인 ARX(Auto Regressive eXogeneous) 회귀모델로서 주어진다.

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k) \quad (12)$$

여기서 $u(k)$, $y(k)$, $k=1,2,\dots$ 는 각각 입출력 시 계열 데이터들로서 다음과 같이 정의되며,

$$u = [\Delta\sigma \quad \Delta\theta \quad \Delta v_R]^T, \quad y = [\Delta f_s] \quad (13)$$

$e(k)$ 는 입출력 데이터에 포함된 백색잡음을 나타내고, 계수 $A(q)$, $B(q)$ 는 각각 다음과 같다.

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q) = [B_1(q) \quad B_2(q) \quad B_3(q)] \quad (14)$$

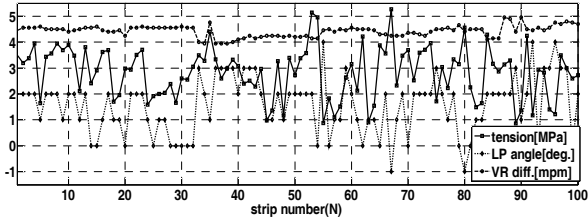
$$B_i(q) = b_{i0} + b_{i1} q^{-1} + \dots + b_{im} q^{-m}$$

위에서 q^{-1} 은 $q^{-1}x(k) = x(k-1)$ 를 만족하는 지연 연산자이고, a_i , b_i 등은 모델 파라미터, n , m 은 각각 입출력 변수들의 차수를 나타낸다.

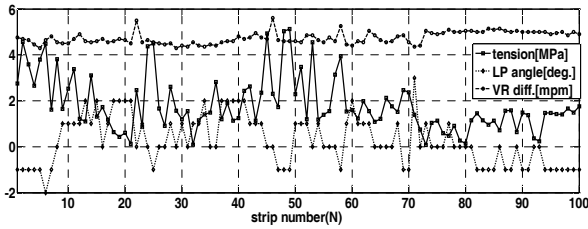
위의 식 (14)에서 모델 파라미터 규명 문제는 최소자승법을 이용한 선형 회귀모델의 파라미터를 구하는 모델규명 문제로 공식화되며, 이 논문에서는 보조변수(IV:Instrumental Variable) 알고리즘을 적용하여 학습모델 파라미터를 규명하기로 한다. 참고로 파라미터 규명에 대한 수치 계산은 오프 라인(off-line)과 온 라인(on-line)에서 수행될 수 있는데, 여기서는 오프 라인 계산 시 발생하는 수치적 계산 부담을 줄이고, 동시에 실 공정에서의 적용성을 높이기 위하여 이전의 파라미터 규명값으로부터 순차적으로 새로운 파라미터를 규명하는 온 라인 규명 알고리즘을 사용하기로 한다. 이에 대한 자세한 알고리즘에 대한 설명은 참고문헌⁽⁵⁾을 참고하기 바란다.

4. 학습모델 규명 결과 및 고찰

이 장에서는 압연 공정의 입출력 데이터를 이용하여 앞 절의 식 (12)에서 주어진 선진율 학습 모델을 규명하고, 그 결과를 간략히 고찰하기로 한다. 모델 규명 시 사용한 압연 데이터는 각 코일 선단부에서의 데이터들이며, 중앙부에서는 장력이나 루퍼 각도가 안정적으로 제어되고 있어

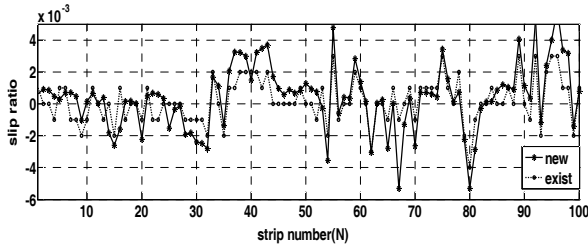


(a) JS-SPHC I

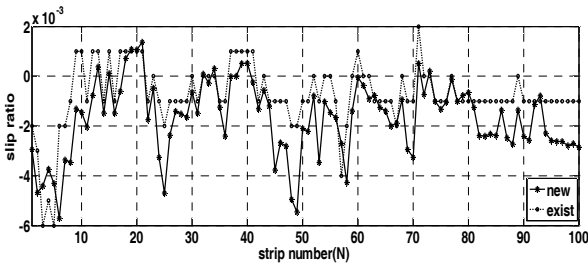


(b) JS-SPHC II

Fig. 2 Variations of tension, looper angle and roll velocity between two stands



(a) JS-SPHC I

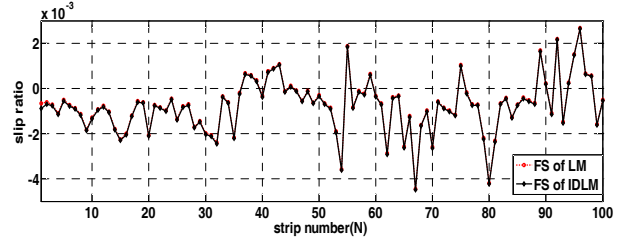


(b) JS-SPHC II

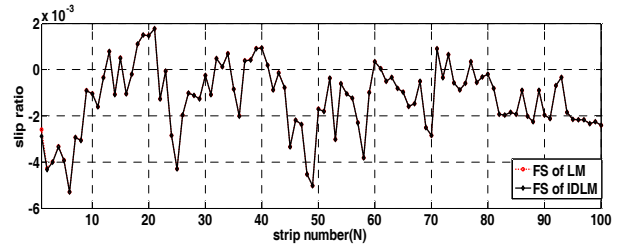
Fig. 3 Learned forward slip ratios

중양부에서의 데이터들은 제외하였다. 강종은 JS-SPHC로서, 두께 1.2mm, 폭 1,215mm(강종 I)와 두께 2.03mm, 폭 1,000mm(강종 II)인 두 종류의 데이터 각각 100개씩을 사용하였다. 두 강종을 사용한 이유는 스트립 두께에 따라 조업 시 장력의 동작 범위가 다소 상이하기 때문이다.

Fig. 2는 강종 I, II에 대하여 각각 스트립 장력, 루퍼 각도 그리고 양단 스탠드 롤 속도의 차들에 있어 실제값과 설정값과의 편차를 나타내는 입력



(a) JS-SPHC I



(b) JS-SPHC II

Fig. 4 Identified forward slip ratios

데이터들이다. 그림에서 루퍼 각도와 장력의 편차는 서로 반대의 경향을 보이는데 즉 장력이 증가하면 루퍼 각도는 감소하고, 동시에 양단 스탠드의 롤 속도 차가 증가함을 보이고 있다.

Fig. 3은 강종 I, II에 대하여 기존의 루퍼 각도를 통한 선진율 학습량(exist)과 이 논문에서 제안한 식 (9)의 학습모델의 학습량(new)을 나타내고 있다. 그림에서 루퍼 각도를 통한 기존 학습량은 루퍼 각도 변동과 거의 유사한 형태를 보이며 학습되고 있지만, 새로운 학습 모델에 의한 선진율 학습량은 루퍼 각도뿐만 아니라 장력 변동과 양단 스트립 속도 차의 변동이 고려되어 선진율 학습이 이루어짐을 알 수 있다.

실제 공정에서는 루퍼 각도 제어부의 안정화로 루퍼 각도 변동이 크지 않은 경우에도 장력 변동이 발생할 수 있으므로 새로운 학습모델이 매우 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 4는 강종 I, II에 대하여 새로운 학습모델로부터 얻어진 선진율 학습량(FS of LM)과 실 공정에 적용하기 위해 규명된 이산시간계 규명모델의 학습량(FS of IDLM)에 대한 결과를 각각 나타낸다. 이때 사용한 입력 데이터는 Fig. 2와 같고, 그리고 출력 데이터는 Fig. 3에서 주어진 새롭게 제안된 학습모델[식 (10)]로부터의 선진율 학습량을 사용하였다. 결과적으로 규명된 학습모델은 식 (14)에서 $n=1$, $m=2$ 이며, 각 모델 파라미터들은 다음과 같이 얻을 수 있다.

[강종 I]

$$A(q) = 1 - 0.223q^{-1}$$

$$B_1(q) = -0.639 + 0.014q^{-1} + 0.003q^{-2}$$

$$B_2(q) = 0.799 - 0.019q^{-1} + 0.004q^{-2}$$

$$B_3(q) = -0.001 + 5.156e^{-5}q^{-1} + 2.36e^{-5}q^{-2}$$

[강종 II]

$$A(q) = 1 - 0.223q^{-1}$$

$$B_1(q) = -0.639 + 0.014q^{-1} + 0.003q^{-2}$$

$$B_2(q) = 0.799 - 0.019q^{-1} + 0.004q^{-2}$$

$$B_3(q) = -0.001 + 0.002q^{-1} + 0.002q^{-2}$$

Fig. 4에서 규명모델의 선진율 학습량은 3.1절에서 새롭게 주어진 선진율 학습량과 거의 일치하고 있음을 보이고 있다. 그리고 입출력 데이터들의 차수를 증가시키면 규명오차가 감소하지만, $n=1$, $m=2$ 로서 충분히 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이 논문에서 제안한 학습 규명모델은 실 압연공정에서 선진율 학습에 매우 유용하게 활용할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2017학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2016012800001).

5. 결 론

이 논문에서는 열간 사상압연 공정에서 스트립 선진율의 새로운 학습 모델을 제안하고, 실시간

학습을 위해 이산시간계 학습모델을 규명하였다. 학습모델은 스트립 장력, 루퍼 각도, 양단 스탠드 롤 속도 차를 활용하였으며, 실시간에서의 학습을 위하여 보조변수법을 사용하여 이산시간계 ARX 형태로 규명하였다. 결과적으로 루퍼 각도만을 사용한 기존의 학습량보다 새로운 학습모델이 선진율 보정에 매우 효과적임을 알 수 있었으며, 향후 실 공정에 적용하여 이에 대한 유용성 검증이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌 (References)

- (1) Underwood, L. R., 1948, "The Rolling of Metals," *Sheet Metal Industries*, Vol. 22, pp. 1719~1736.
- (2) Moon, Y. H., Jo, I. S. and Van Tyne, C. J., 2004, "Control Scheme Using Forward Slip for a Multi-stand Hot Strip Rolling Mill," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 18, No. 6, pp. 972~978.
- (3) Bland, D. A. and Ford, H., 1948, "The Calculation of Roll and Torque in Cold Strip Rolling with Tensions," *Proc. Instn. Mech. Eng.*, Vol. 159, pp. 144~153.
- (4) Hill, R., 1950, "The Mathematical Theory," Oxford Univ. Press.
- (5) Shuichi, A., 1996, "System Identification for Control," Press Co. of Tokyo Electrical University, pp. 89~151.