

스탠드간 간섭현상을 고려한 연속 냉간압연기의 선형모델 규명

김인수*, 장유신*, 황이철**, 주효남***, 이만형****

Identification of Linear Model for Tandem Cold Mill Considering Interstand Interference

In Soo Kim*, Yu Shin Chang*, I Cheol Hwang**, Hyo Nam Joo***, and Man Hyung Lee****

ABSTRACT

This study identified a linear time-invariant mathematical model of each stand of a five-stand tandem cold mill. Two model identification methods are applied to construct a linear model of each stand of the tandem cold mill. For the model identification, the input-output data that have interstand interference property in tandem cold rolling are obtained from a nonlinear simulator of the tandem cold mill. And a linear model of each stand is identified with N4SID(numerical algorithms for subspace state space system identification) method based on a state-space model and Least Square algorithm based on a transfer function. Furthermore, a modeling error of the tandem cold mill is quantitatively analyzed from a maximum singular value plot of error function between an identified nominal model and uncertain model. In conclusion, the comparison of the output signals between the existing Taylor linearized model, the identified linear model and the nonlinear model of the tandem cold mill shows the accuracy and the applicability of the proposed identified model.

Key Words : Tandem cold mill(연속 냉간압연기), Interstand interference(스탠드간 간섭), N4SID(numerical algorithms for subspace state space system identification: 부분공간 시스템규명법의 수치알고리즘), Least square algorithm(최소자승법), Taylor linearized model(Taylor 선형화 모델)

1. 서론

5 스탠드 연속 냉간압연기의 각 스탠드는 2입력-2출력을 가지는 다변수 시스템으로서, 스탠드간의 상호작용으로 인하여 각 스탠드 출측 판두께와 후방장력이 간섭되는 동특성을 가지고 있다. 즉, 각 스탠드의 롤 갭, 롤 속도, 출측 판두께, 롤과 판재와

의 마찰계수 그리고 재료 변형저항 등과 같은 압연 파라미터들은 스탠드간 장력을 매개로 하여 인접 스탠드에 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 스탠드간 간섭현상은 연속 냉간압연기의 AGC(automatic gauge control) 시스템 설계에 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 현재 연속 냉간압연기의 두께 및 장력 제어를 위하여 스탠드간 간섭현상을 최소화하

* 부산대학교 지능기계공학과
** 동의대학교 기계·산업시스템공학부
*** 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소
**** 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소

는 각 스탠드마다의 독립적인 제어를 설계하는 것이 일반적이다^(1,2). 그러나 제어기 설계를 위한 연속 냉간압연기의 제어모델은 전 스탠드를 하나의 다변수 선형모델로 표현된 Taylor 선형화 모델에 기초하고 있다. Taylor 선형화 모델은 연속 냉간압연기의 비선형 실험식(체적속도 일정식, 압연하중식, 스탠드 출측 판두께, 후방장력식 등)을 입의의 작동점 근처에서 Taylor 급수로 전개한 후 2차항 이상을 무시하여 얻어진 시불변 선형 방정식으로 기술된다⁽³⁾. 따라서, 이러한 Taylor 선형화 모델에 대하여 각 스탠드마다의 독립적인 제어기 설계를 위해서는 비간섭 이론을 적용시켜야 하며, 동시에 다양한 운전조건에 기인하는 동작점 변화에 대하여 선형화 모델 파라미터를 계속적으로 조정해야 하는 어려움이 수반된다.

본 논문에서는 연속 냉간압연기의 고유한 동특성인 스탠드간 간섭현상을 고려한 각 스탠드마다 독립적인 시불변 선형 상태공간모델 규명을 목적으로 하고 있다. 각 스탠드 모델은 다변수 시스템의 모델규명에 그 응용성이 높은 부분공간법에 기초한 N4SID법^(4,5)으로부터 규명된다. 각 스탠드 모델 규명을 위한 입출력 변수는 스탠드간 간섭현상을 고려하여 선정되며, 입출력 데이터는 연속 냉간압연기의 비선형 시뮬레이션으로부터 획득된다. 각 스탠드의 모델규명은 다음 두 가지로 나뉘어 수행된다. 우선, 연속 냉간압연기에서 발생될 수 있는 불확실성이 포함되지 않은 입출력 데이터로부터 공칭 모델을 규명하고, 다음으로 불확실성이 포함된 입출력 데이터로부터 모델을 규명한다. 동시에 규명된 공칭모델과 불확실성이 고려된 모델간의 오차함수에 대한 최대 특이치 선도로부터 불확실성에 대한 주파수 의존형 가중함수 선정법을 간략히 고찰한다. 끝으로 N4SID법에 의해 규명된 모델은 고전적인 모델규명 알고리즘인 ARX모델에 기초한 최소자승법⁽⁶⁾에 의해 규명된 모델과 기존의 Taylor 선형화 모델과의 비교를 통하여 검증된다.

2. 스탠드간 간섭현상 해석

모델규명을 위한 입출력 변수는 Fig. 1과 같은 5 스탠드 연속 냉간압연기의 비선형 실험식들로 구성된 컴퓨터 시뮬레이션^(7,8)을 통하여 스탠드간 간섭현상이 고려되도록 선정하였다. 시뮬레이션시 정확한 스탠드간 간섭현상을 고려하기 위하여 코일러

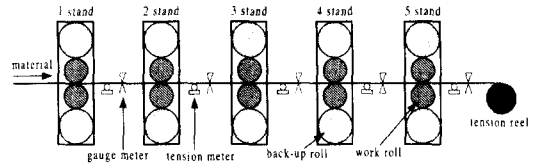


Fig. 1 A five-stand tandem cold mill

(coiler)부와 1 스탠드, 5 스탠드와 장력 릴(tension reel)부 사이에서 발생하는 장력은 일정하다는 가정을 두었다. 시뮬레이션 결과로부터 스탠드간 간섭현상으로 인한 각 스탠드 입출력 신호의 상호 영향 관계를 Table 1과 같이 나타내었다. 여기서 스탠드 각 출력에 미치는 입력의 영향이 매우 미소한 경우(□)와 그렇지 않은 경우(■)로 나타내었다. 그리고 출력 h_i 와 τ_{hi} 는 i 스탠드 출측 판두께와 후방장력, 입력 S_i 와 V_{Ri} 는 i 스탠드 롤 갭과 롤 속도

Table 1 The correlation between input and output signals in the tandem cold mill

	h_1	τ_{R1}	h_2	τ_{R2}	h_3	τ_{R3}	h_4	τ_{R4}	h_5	τ_{R5}
S_1	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□
V_{R1}	■	■	□	□	□	□	□	□	□	□
S_2	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□
V_{R2}	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□
S_3	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□
V_{R3}	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□
S_4	□	□	□	□	□	□	■	■	□	□
V_{R4}	□	□	□	□	□	□	■	■	□	□
S_5	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■
V_{R5}	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■

Table 2 Determination of input-output variables for model identification of each stand

model	input	output
1 STD	S_1, V_{R1}, S_2, V_{R2}	h_1
2 STD	$S_1, V_{R1}, S_2, V_{R2}, S_3, V_{R3}$	h_2, τ_{R2}
3 STD	$S_2, V_{R2}, S_3, V_{R3}, S_4, V_{R4}$	h_3, τ_{R3}
4 STD	$S_3, V_{R3}, S_4, V_{R4}, S_5, V_{R5}$	h_4, τ_{R4}
5 STD	S_4, V_{R4}, S_5, V_{R5}	h_5, τ_{R5}

를 각각 가리킨다. Table 1에서 연속 냉간압연에서 후방스탠드의 입력은 전방스탠드의 출력에 지대한 영향을 미치며, 특히 2 스탠드와 3 스탠드의 후방장력은 출측 판두께와는 달리 그 전방스탠드에 해당하는 3 스탠드와 4 스탠드의 입력에 영향을 받지 않음을 알 수 있으며, 1 스탠드와 2 스탠드 입력은 전 스탠드 출력에 영향을 미치나, 4 스탠드와 5 스탠드 출력에 대해서는 해당스탠드 입력에 비해 미소한 영향을 미침을 알 수 있었다. 이와 같은 동특성 해석을 토대로 각 스탠드의 선형모델을 규명하기 위한 입출력 변수를 Table 2와 같이 선정하였다. 모델규명을 위한 입출력 데이터 생성을 위하여 연속 냉간압연기의 초기 압연 설정치는 Table 3과 같이 두었으며, 입력데이터는 Fig. 2와 같이 이상적인 백색잡음에 유사한 M계열 신호(maximum length sequence) 형태로 선정하였고, 지속적인 기진조건(persistent excitation)⁽⁶⁾을 만족하도록 생성하였다. 각 스탠드 출력데이터는 연속 냉간압연기의 비선형 시뮬레이션으로부터 획득되었으며, 특히 각 스탠드 롤 갭과 롤 속도의 구동기에서 발생하는 입력지연과 각 스탠드 입출력 신호간의 전달지연을 충분히 고려하여 획득하였다.

Table 3 Initial set-up values of tandem cold mill

parameters	unit	1 STD	2 STD	3 STD	4 STD	5 STD
entry strip thickness(H_i)	mm	2.60	2.12	1.57	1.17	0.89
delivery strip thickness(h_i)	mm	2.12	1.57	1.17	0.89	0.80
forward tension(τ_{hi})	kgf/mm ²	0	12.7	17.1	23.0	24.1
backward tension(τ_{fi})	kgf/mm ²	12.7	17.1	23.0	24.1	6.7
work-roll radius(R)	mm	273	273	292	292	292

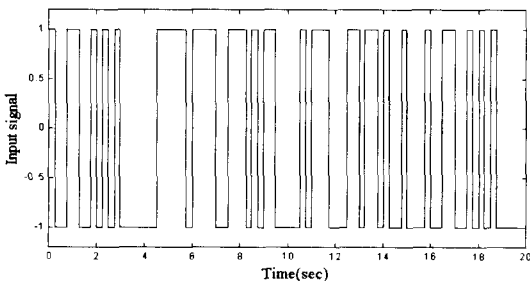


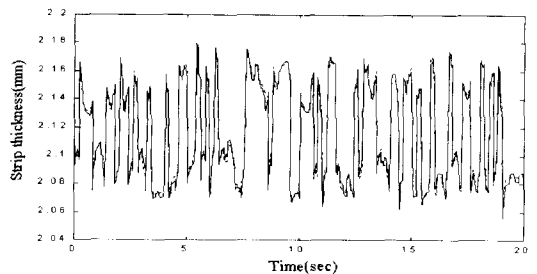
Fig. 2 Input signal : maximum length sequence

3. 모델규명 결과

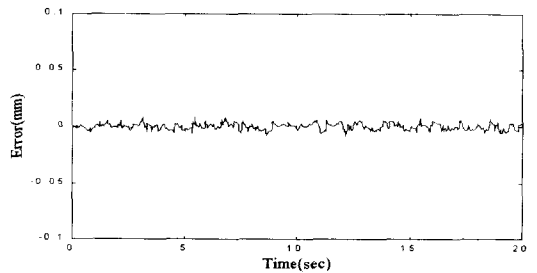
연속 냉간압연기 각 스탠드의 선형모델을 규명하기 위하여 부분공간법에 기초한 N4SID법과 ARX 모델에 기초한 최소자승법의 두 가지 알고리즘을 적용하였다. 우선 연속 냉간압연기에서 발생하는 모델링오차나 외란 등의 불확실성이 포함되지 않은 입출력 데이터로부터 각 스탠드 공칭모델(nominal model)을 규명하였고, 다음에는 외란 중 판재두께에 큰 영향을 미치는 작업롤에서의 롤 편심이 포함된 입출력 데이터로부터 외란 특성을 고려한 각 스탠드의 모델을 규명하였다.

3.1 공칭모델 규명

연속 냉간압연기에서 취득한 불확실성을 고려하지 않은 입출력 데이터로부터 N4SID법과 최소자승법을 이용하여 규명된 공칭모델 결과를 나타내기 위하여, 출력데이터의 취득 샘플링 시간은 4ms이며, 입출력 데이터는 스탠드간 전달지연 시간을 충분히 고려하여 20초로 설정하였다. 본 절에서 모델 규명 결과는 1스탠드와 3 스탠드로 한정하여 서술하기로 한다.

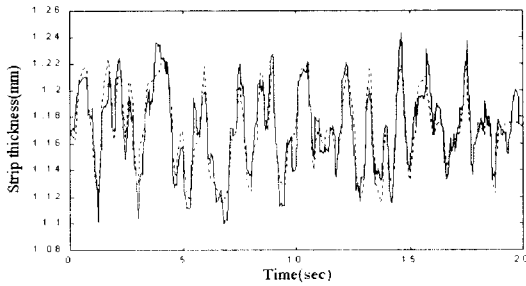


(a) Delivery strip thickness

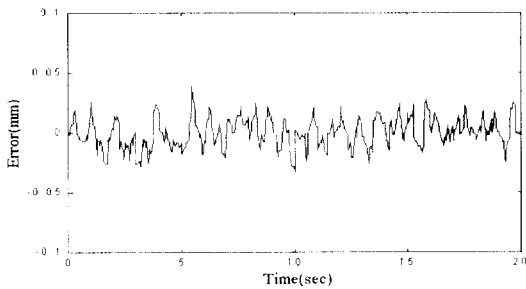


(b) Thickness error

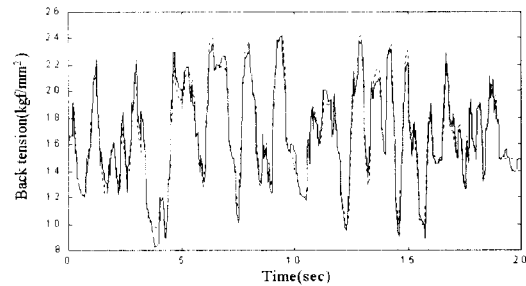
Fig. 3 Model identification results of the first-stand



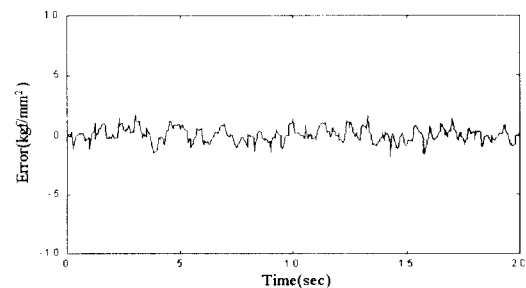
(a) Delivery strip thickness



(b) Thickness error

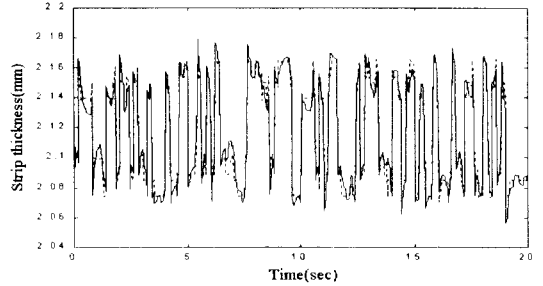


(c) Back tension

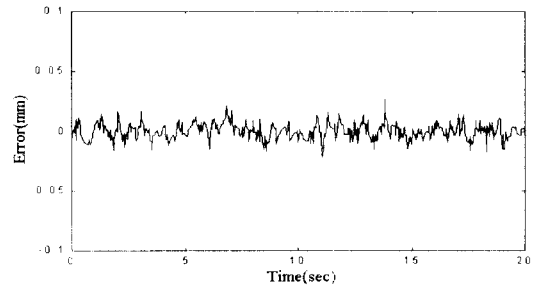


(d) Tension error

Fig. 4 Model identification results of the third-stand



(a) Delivery strip thickness



(b) Thickness error

Fig. 5 Model identification results of the first-stand

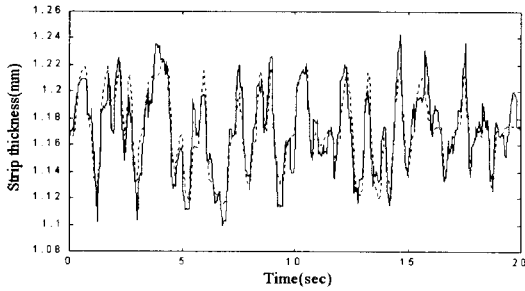
3.1.1 N4SID법을 이용한 모델규명

N4SID법으로 규명되는 모델은 식 (1)과 같은 이산시간계 상태공간모델 형태를 이룬다.

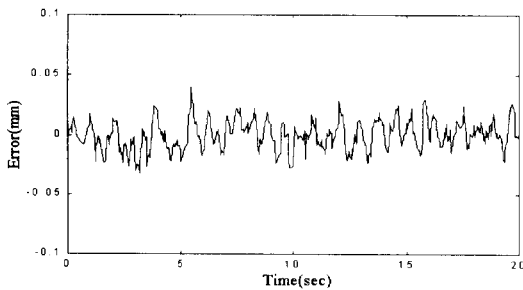
$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + e(k) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 출력에 포함되는 잡음 $e(k)$ 는 일정강도를 가지는 백색잡음으로 가정한다.

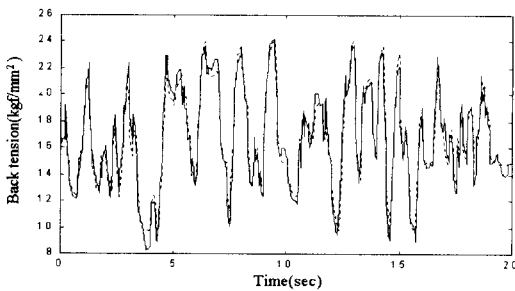
N4SID법을 적용한 결과, 1, 4, 5 스탠드는 2차, 2, 3 스탠드는 3차의 다변수 모델로 규명되었다. Fig. 3(a), Fig. 4(a), Fig. 4(c)에서 실선과 점선은 각각 비선형 실험식과 규명된 모델의 출력신호이며, Fig. 3(b), Fig. 4(b), Fig. 4(d)는 두 출력신호간의 오차를 각각 나타낸 그림이다. 출측 판두께 오차는 1 스탠드가 $\pm 10 \mu m$, 2 스탠드의 출측 판두께 오차는 약 $\pm 50 \mu m$ 이내의 범위를 가졌고, 3~5 스탠드는 $\pm 40 \mu m$ 이내로 유지하였다. 후방장력 오차의 경우, 2, 3 스탠드가 $\pm 2 kgf/mm^2$ 이내였으며, 4 스탠드는 전반적으로 $\pm 3 kgf/mm^2$ 이내의 범위를 유지하였으며, 5 스탠드에서는 $\pm 6 kgf/mm^2$ 이내로 다른 스탠드에 비해 가장 큰 오차를 가졌다.



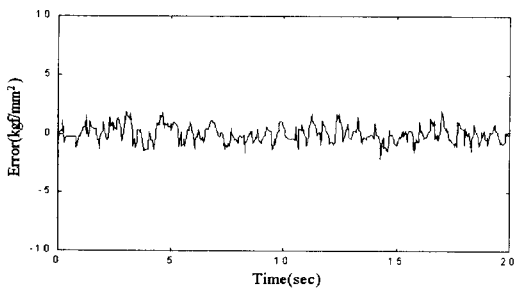
(a) Delivery strip thickness



(b) Thickness error



(c) Back tension



(d) Tension error

Fig. 6 Model identification results of the third-stand

3.1.2 최소자승법을 이용한 모델구명

고전적인 구명 알고리즘인 최소자승법으로 구명되는 모델은 식 (2)와 같은 이산시간계 전달함수인 ARX모델로 나타낼 수 있다.

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (2)$$

여기서 $u(t)$ 와 $y(t)$ 는 각각 시스템의 입출력 변수이며, $e(t)$ 는 0-평균 및 일정강도의 백색잡음을 가리킨다. 그리고 시스템 차수 n 과 입력 수 m 에 대하여 $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ 는 다음과 같다.

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + z_nz^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = 1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}$$

최소자승법에 의한 모델구명 결과, 1, 5 스탠드는 각각 1차와 6차, 2~4 스탠드는 8차의 다변수 모델로 구명되었다. Fig. 5(a), Fig. 6(a), Fig. 6(c)에서 실선과 점선은 각각 비선형 실험식과 구명된 모델의 출력신호이며, Fig. 5(b), Fig. 6(b), Fig. 6(d)는 각각 두 출력신호간의 오차를 나타낸 그림이다. 출측 판두께 오차는 1 스탠드가 $+20 \mu m$, 2 스탠드의 경우 2초까지 그 오차가 $+50 \mu m$ 까지 증가하였으나, 전반적으로 $\pm 40 \mu m$ 이내에 들었다. 3~5 스탠드의 출측 판두께 오차는 $\pm 40 \mu m$ 이내로 유지하였다. 후방장력의 경우, 2, 3 스탠드가 $+2 kgf/mm^2$, 4 스탠드는 시간이 흐를수록 그 오차가 다소 증가하였으나, 전반적으로 $\pm 2 kgf/mm^2$ 를 유지하였고, 5 스탠드는 $+6 kgf/mm^2$ 이내의 범위를 가져 다른 스탠드에 비해 가장 큰 오차를 가졌다. 결론적으로 N4SID 법과 최소자승법을 적용하여 구명된 모델에서 N4SID법이 최소자승법에 비해 적은 구명오차를 가져 비선형 실험식에 근사적으로 양호하게 표현하고

Table 4 The identification results with N4SID and LS(Least Squares) methods

identified model	model order		thickness error (μm)		tension error (kgf/mm^2)	
	N4SID	LS	N4SID	LS	N4SID	LS
1 STD	2	1	-10~10	-20~20		
2 STD	3	8	-50~60	-40~50	-2~2	-2~2
3 STD	3	8	-30~40	-30~40	-2~2	-2~2
4 STD	2	8	-30~30	-40~40	-2~3	-2~3
5 STD	2	6	-40~40	-40~40	-6~5	-6~5

있음을 알 수 있었고, 규명된 모델차수도 N4SID법으로 규명된 모델이 저차의 모델구조를 가짐을 알 수 있었다. 두 규명 알고리즘으로 규명된 전체 스탠드의 모델차수 및 규명오차를 비교하면 Table 4와 같다. N4SID법으로 규명된 1 스탠드와 3 스탠드의 상태공간모델식을 아래와 같이 나타내었다.

3.2 불확실성을 고려한 모델 규명

연속 냉간압연기에서는 롤 편심, 모재 판두께 변동 등의 외란이 존재하며, 이러한 외란들이 고려된 입출력 데이터로부터 불확실성에 대한 모델을 규명하였다. 본 논문에서는 압연되는 판재두께에 특히 큰 영향을 미치는 롤 편심을 고려하여 모델을 규명하기로 한다. 롤 편심은 작업롤(work roll) 자체의 변형이나 작업롤의 기하학적 중심과 회전축의 불일치 등으로 인하여 발생하며, 이는 출측 판재두께 변동에 직접적인 영향을 미친다. 각 스탠드의 작업롤에서 발생하는 롤 편심 S_r 은 식 (3)과 같은 정현파형의 합성으로 고려된다.

$$S_r = A \sin(2\pi\alpha t) \quad (3)$$

여기서 진폭 A 는 각 스탠드의 판재두께의 1~5%에 해당하는 값이며, 주파수 α 는 각 스탠드 작업롤 반경과 롤 속도비에 비례하는 값으로 주어진다.

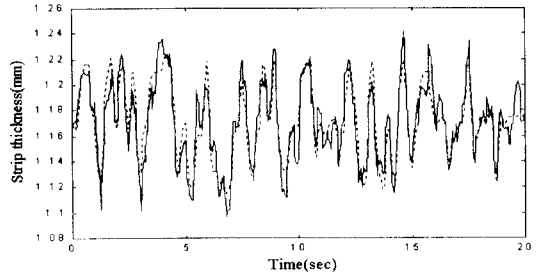
Fig. 7은 N4SID법을 이용하여 롤 편심이 포함된 입출력 데이터로부터 규명된 3 스탠드 모델의 출측 판두께와 후방장력이다. 규명결과, 각 스탠드 작업롤에서 롤 편심이 발생하여도 연속 냉간압연기 각 스탠드 모델을 양호하게 규명할 수 있음을 알 수 있었다. 롤 편심 등의 외란을 비구조적인 형태로 표현하여 이를 고려한 견실 제어를 설계하고자 할 경우에는 이러한 외란의 주파수 의존형 가중함수가 반드시 요구된다. 이를 위하여 외란에 대한

- The first-stand nominal model by N4SID

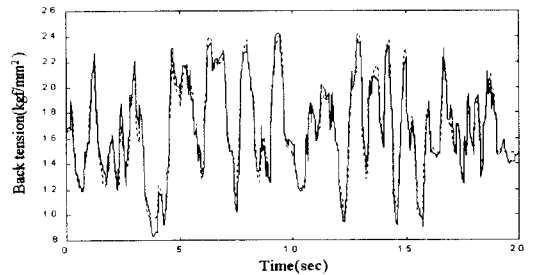
$$\left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc|ccc} 0.8112 & -0.3552 & -0.1686 & 3.6 \times 10^{-5} & -0.0133 & 1.7 \times 10^{-4} \\ 0.5261 & -0.2076 & -6.6196 & 1.4 \times 10^{-5} & -0.0302 & 4.4 \times 10^{-3} \\ \hline 0.4014 & 0.9166 & -0.0103 & 6.6 \times 10^{-6} & -0.0397 & 5.8 \times 10^{-6} \end{array} \right]$$

- The third-stand nominal model by N4SID

$$\left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|cccc} 1.0003 & -0.3227 & 0.1298 & -31.2482 & 0.0049 & -6.4627 & 0.0083 & 0.1174 & -0.0005 \\ -0.0092 & 0.6168 & 0.8345 & 23.0726 & 0.0051 & -75.7367 & -0.0162 & -0.2172 & 0.0148 \\ 0.3942 & -0.3015 & -0.0615 & -94.7398 & 0.0003 & -5.7388 & 0.0417 & -1.8178 & 0.0051 \\ \hline -0.0034 & 0.0104 & 0.0139 & 0.7556 & 0.0 & 0.3604 & -0.0003 & -0.0729 & -0.0001 \\ -0.3561 & -0.7379 & 0.5713 & 4.8772 & -0.0024 & 1.6461 & -0.0003 & -1.9388 & -0.0006 \end{array} \right]$$



(a) Delivery strip thickness



(b) Back tension

Fig. 7 Model identification results of the third-stand with roll eccentricity using N4SID method

주파수 특성을 다음과 같이 고찰하였다. 롤 편심이 고려된 N4SID 규명모델을 \hat{G} , 공칭 규명모델을 G , 그리고 두 모델간의 덧셈형 오차함수를 ΔG 라 하면 다음의 식 (4)가 성립한다.

$$\Delta G = \hat{G} - G \quad (4)$$

따라서 ΔG 의 최대특이치 선도로부터 롤 편심으로 인한 주파수 특성을 근사적으로 알 수 있으며, 이로부터 롤 편심에 대한 주파수 의존형 가중함수를 설정할 수 있게 된다. Fig. 8은 롤 편심에 기

인하는 3 스탠드의 덧셈형 오차함수에 대한 최대특이치 선도를 나타내고 있다. 최대특이치 선도 결과에서 롤 편심은 저주파역에서보다 10rad/sec 이상의 고주파역에서 영향이 크을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 견실 제어기(또는 H^∞ 제어기) 설계시 요구되는 외란(롤 편심)에 대한 가중함수를 설정할 수 있을 것으로 사료된다.

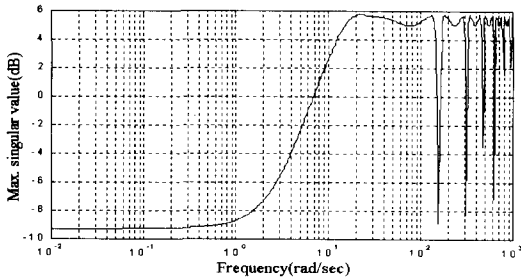


Fig. 8 The maximum singular value plot of the third-stand model included roll eccentricity

3.3 Taylor 선형화 모델을 통한 규명모델의 평가

연속 냉간압연기의 Taylor 선형화 모델은 비선형 실험식으로부터 각 압연 파라미터들의 미소변동에 대해 구한 영향계수들로부터 구축된다⁽³⁾. 구해진 영향계수들과 함께 압연하중식, 선진윤식, 하우스징(housing)식, 입력구동기식, 출측 판두께식, 후방장력식 등의 미소 변동식을 각각 유도한다. 미소 변동식으로부터 Taylor 선형화 모델을 구하기 위하여 식 (5)와 같이 i 스탠드의 상태변수 x_i , 입력변수 u_i 와 출력변수 y_i 그리고 불확실성 변수 w_i 를 정의한다.

$$\begin{aligned} x_i &= [\Delta S_i \ \Delta V_{Ri} \ \Delta \tau_{bi}]^T \\ u_i &= [\Delta S_{pi} \ \Delta V_{pi}]^T \\ w_i &= [\Delta H_i \ \Delta S_{ri}]^T \\ y_i &= [\Delta h_i \ \Delta \tau_{bi}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 Δ 는 동작점 근방에서의 미소변동을 의미하며, ΔS 는 롤 갭, ΔV_R 은 롤 속도, $\Delta \tau_b$ 는 후방장력, ΔS_p 는 롤 갭 명령치, ΔV_p 는 롤 속도 명령치, ΔH 와 Δh 는 각각 입측 및 출측 판두께, ΔS_r 은 롤 편심을 각각 가리킨다.

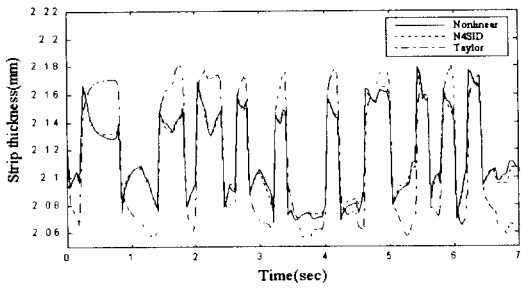
식 (5)의 상태변수에 대한 선형 미분방정식을 정리하면 Taylor 선형화된 상태공간모델식은 식 (6)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= A_{ii-1}X_{i-1} + A_{ii}X_i + A_{ii+1}X_{i+1} \\ &\quad + B_{ii}U_i + D_{ii-1}W_{i-1} + D_{ii}W_i \quad (6) \\ Y_i &= C_{ii}X_i + C_{ii-1}X_{i+1} + E_{ii}W_i \end{aligned}$$

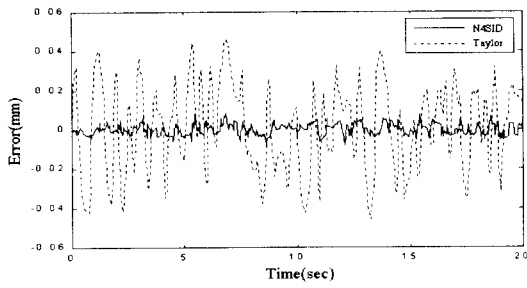
여기서 A_{ii} , B_{ii} , C_{ii} , D_{ii} , E_{ii} 는 각 스탠드에서의 시스템 행렬들, A_{ii-1} , A_{ii+1} , C_{ii-1} , D_{ii-1} 은 인접 스탠드간 상호간섭을 나타내는 행렬들이다⁽³⁾. Taylor 선형화 모델을 기초로 하여 각 스탠드의 독립적인 제어기를 설계하기 위해서는 비간섭 이론이 필요함을 식 (6)으로부터 쉽게 확인할 수 있다.

N4SID법 및 최소자승법으로부터 규명된 모델과 Taylor 선형화 모델을 비교하기 위하여 비선형 실험식에서 취득한 출력신호를 기준으로 Taylor 선형화 모델과 규명모델에서 획득한 출력신호들을 각각 비교하였다. 본 절에서는 1 스탠드와 3 스탠드의 결과만을 고찰하기로 한다.

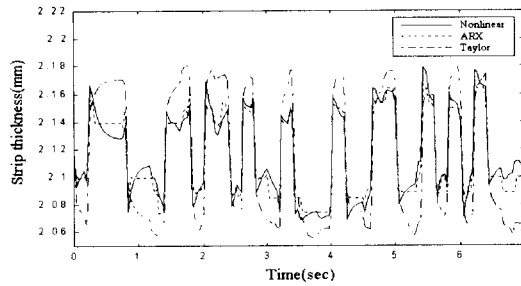
Fig. 9와 Fig. 10은 1 스탠드와 3 스탠드에 대한 비선형 실험식, 규명모델, Taylor 선형화 모델의 출력 판두께에 대한 결과를 각각 나타내고 있다. 비교결과에서 규명된 두 모델의 출력 판두께가 Taylor 선형화 모델에 비해 비선형 실험식에서 획득한 출력 판두께에 더욱 근접함을 알 수 있다. 또한 Fig. 10(a)와 Fig. 10(c)에서 알 수 있듯이 Taylor 선형화 모델의 출력 판두께는 1~3 스탠드간 전달 지연으로 인하여 판두께가 지연되었지만, 규명된 모델의 출력 판두께에서는 이러한 지연효과를 잘 반영함을 알 수 있었다. 출력 판두께 오차로부터 N4SID법에 의해 규명된 모델이 비선형 실험식을 가장 유사하게 기술하였다. 이러한 비교결과를 바탕으로 선형제어 이론을 적용하여 연속 냉간압연기의 각 스탠드마다의 독립적인 AGC 시스템을 설계할 경우, Taylor 선형화 모델은 많은 모델링 오차를 수반할 것으로 사료된다. 또한 Taylor 선형화 모델을 이용할 경우, 다양한 운전조건에 따른 동작점 변동을 고려하여 모델 파라미터 혹은 선형화 계인의 스케줄링에 대한 많은 노력이 필요할 것으로 예측된다. 이러한 관점에서 본 논문에서 제시한 N4SID법으로 규명된 모델은 각 스탠드마다의 독립적인 AGC 시스템 설계에 많은 유용성을 가질 것으로 사료된다.



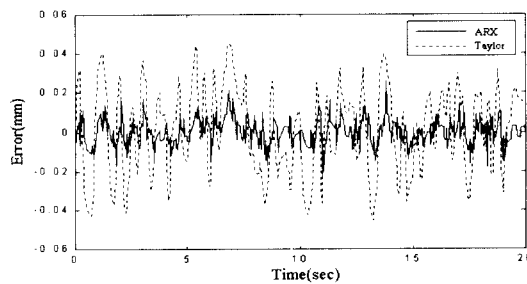
(a) The strip thickness(N4SID and Taylor)



(b) Thickness error(N4SID and Taylor)

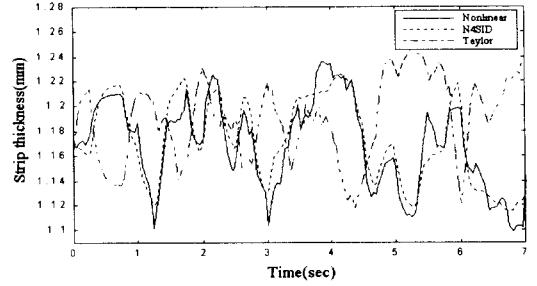


(c) The strip thickness(ARX and Taylor)

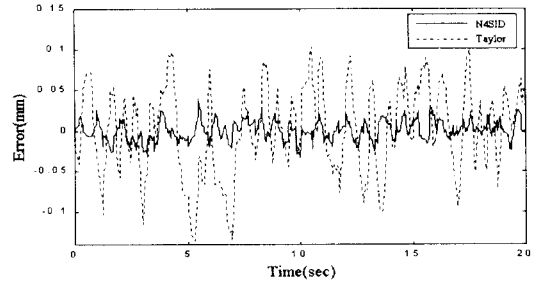


(d) Thickness error(ARX and Taylor)

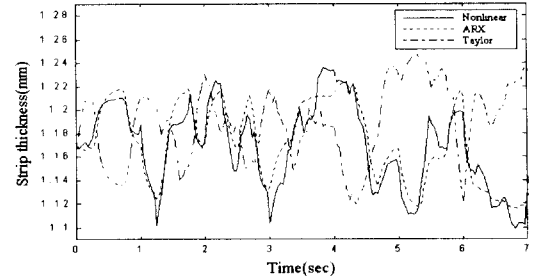
Fig. 9 The comparison of the first-stand output signal



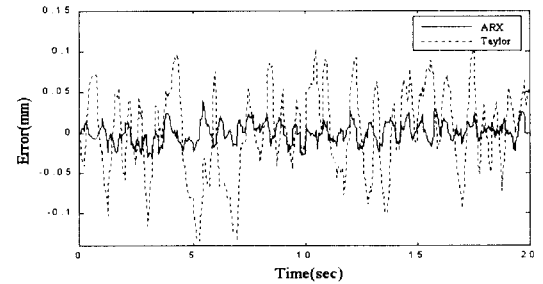
(a) The strip thickness(N4SID and Taylor)



(b) Thickness error(N4SID and Taylor)



(c) The strip thickness(ARX and Taylor)



(d) Thickness error(ARX and Taylor)

Fig. 10 The comparison of the third-stand output signal

4. 결론

본 논문에서는 연속 냉간압연기의 AGC 시스템 설계를 위한 제어모델 규명에 관한 연구를 수행하였다. 연속 냉간압연기의 스탠드간 간섭현상 해석을 바탕으로 각 스탠드 모델규명을 위한 적합한 입출력 변수를 선정하였고, 이를 토대로 비선형 시뮬레이션으로부터 입출력 데이터를 획득하였다. 입출력 데이터로부터 N4SID법을 적용하여 각 스탠드의 시불변 선형 이산시간 상태공간모델을 규명하였다. N4SID 규명모델은 최소자승법에 의한 규명모델과 기존의 Taylor 선형화 모델과의 비교를 통하여 연속 냉간압연기에서의 각 스탠드간 간섭현상 및 비선형 특성을 양호하게 나타내고 있음을 알았다. 동시에 롤 편심과 같은 불확실성에 대한 주파수 특성을 고찰하여 이에 대한 가중함수 선정법을 제안하였다. 본 논문의 향후 연구과제는 제안된 규명모델이 설계될 건설 H^∞ 제어에 적합성에 대한 검증과 새로운 건설 AGC 시스템을 설계하는 것이다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소와 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야에 의해 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Geddes E. J. M., and Postlethwaite I., "Improvements in Product Quality in Tandem Cold Rolling Using Robust Multivariable Control," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 6, No. 2, pp. 257-269, 1998.
- Hoshino, I., Meakawa, Y., Fujimoto, T., and Kimura, H., "Observer-based Multivariable Control of the Aluminum Cold Tandem Mill," Automatica, Vol. 24, No. 6, pp. 741-754, 1997.
- 浦項綜合製鐵(株), 光陽製鐵所, No. 5 CRM設備用 NEW TYPE AGC 共同研究完了報告書, 浦項綜合製鐵(株), 日立製鐵所(株), 1993.
- Overschee P. V., and Moor B. D., "N4SID: Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems," Automatica, Vol. 30, No. 1, pp. 75-93, 1994.
- Verhaegen M., and Dewilde P., "Subspace Model Identification PartI. The Output-Error State-Space Model Identification Class of Algorithm," International Journal of Control, Vol. 56, No. 5, pp. 1187-1210, 1992.
- 片山 徹, Introduction to System Identification, 朝倉書店, 1994.
- 이만형, 황이철, "연속 냉간 압연기의 건설 제어 시스템 설계를 위한 수학적모델 개발에 관한 연구," 포항제철(주) 기술연구소 위탁과제 연구보고서, 1998.
- 이만형, 황이철, "부분공간법에 기초한 연속 냉간 압연기의 제어모델 규명에 관한 연구," 포항제철(주) 기술연구소 위탁과제 연구보고서, 1999.