
N4SID 알고리즘을 이용한 연속 냉간 압연기의 선형모델 규명

엄상오*, 황이철**, 김윤식***, 김종윤****, 박영산*****

Identification of Linear Model of Tandem Cold Mill Using N4SID Algorithm

Sang-O Eum, I-Cheol Whang, Yoon-Sik Kim, Jong-Yun Kim, Young-San Park

Abstract

This paper identifies a linear time-invariant mathematical model of each stand of a five-stand tandem cold mill to design a robust H^∞ thickness controller by applying input and output data sets to N4SID (Numerical algorithms for Subspace State Space System Identification) method. The input-output data sets describe interstand interference in the process of tandem cold rolling and are obtained from a nonlinear simulator of the tandem cold mill. In result, it is shown that the identified model well approximates the nonlinear model than a Taylor linearized model. Furthermore, uncertainties including roll eccentricity and incoming strip variation are quantitatively analyzed from the plot of maximum singular values.

Key Words : Tandem Cold Mill(연속 냉간압연기), Interstand Interference(스탠드간 간섭현상), N4SID (Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification: 부분공간 시스템규명법의 수치알고리즘), Taylor linearized model(테일러 선형화 모델)

* 양산대학 환경안전과

** 동의대 기계.산업시스템공학부

*** 한국해양대학교 전기시스템공학과

**** 한국해양대학교 기관공학과 박사과정

***** 한국해양대학교 기관공학과 박사과정 수료

접수일자 : 1999년 10월 29일

1. 서론

본 논문에서 고려하는 5단 연속 냉간 압연기의 각 스탠드는 2 입력-2 출력을 가지는 다변수 시스템으로서, 상호 각 스탠드간에 미치는 영향으로 인하여 각 스탠드 출측 판두께와 후방장력이 간섭되는 동특성을 가지고 있다. 즉 각 스탠드의 출측 판두께, 롤 갭, 롤 속도, 롤과 판재간의 마찰계수 그리고 재료 변형저항 등과 같은 압연 파라미터들은 각 스탠드간의 장력을 매개로 하여 인접 스탠드에 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 스탠드간 간섭현상은 연속 냉간 압연기의 자동 게이지 제어(AGC: Automatic Gauge Control)시스템 설계에 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 실제 연속 냉간 압연기 전 스탠드를 하나의 다변수 제어대상으로 간주하는 것보다 각각의 스탠드를 하나의 제어대상으로 고려하여, 각 스탠드마다의 독립적인 제어기를 설계하는 경우가 스탠드간의 간섭현상을 극복하기 쉽다는 것이 일반적인 것으로 인식되고 있다. 즉 선형제어 기법을 적용하여 5단 연속 냉간 압연기의 출측 판두께에 대한 AGC 시스템 설계를 위해서는 각 스탠드의 독립적인 선형 제어모델 규명에 관한 연구가 반드시 필요함을 알 수 있다.

현재 고성능 출측 판두께 AGC 시스템 설계에 대한 연구는 거의 최적제어, 적응제어 그리고 예측제어 기법 등의 선형제어 이론을 통하여 수행되고 있다[1~5]. 기존의 연구에서는 연속 냉간 압연기에 대한 비선형 실험식을 임의의 동작점 근방에서 테일러(Taylor) 선형화한 상태공간모델에 기초하여 제어기를 설계하고 있다. 즉 임의의 동작점 근방에서 미소 변동한다고 가정한 후, 비선형 실험식(체적속도 일정식, 압연하중식, 스탠드 출측 판두께식, 후방장력식 등)을 테일러 급수로 전개한 후 2차항 이상의 고차항을 무시한 시불변 선형 연립 1차 방정식으로 기술하고 있다. 이러한 테일러 선형화 모델은 전 스탠드에 대한 하나의 다변수 상태공간모델로서 각 스탠드마다의 독립적인 제어기 설계를 위해서는 비간섭 이론을 적용시켜야 하며, 동시에 다양한 운전조건에 기인하는 동작점 변화에 적응하기 위해서는 선형화 모델 계인을 조정해야 하는 많은 노력이 수반되어야 한다. 따라서 본 논문에서

는 연속 냉간 압연기의 고유한 동특성인 스탠드간 간섭현상을 충분히 기술할 수 있음과 동시에 각 스탠드마다 독립적인 시불변 선형 이산시간 상태공간모델 규명을 목적으로 하고 있다. 이 때 향후 전실 H^∞ 제어를 적용하기 위하여 모재 판두께, 롤 편심 등의 불확실성에 대한 주파수역 평가를 통하여 불확실성에 대한 주파수 의존형 가중함수의 선정법을 간략히 제시한다. 여기서 압연기의 각 스탠드를 각각 롤 갭과 롤 속도, 출측 판두께와 후방장력을 입출력 변수로 하는 2 입력-2 출력 다변수 시스템으로 간주하여, 부분공간법에 기초한 N4SID 부분공간 규명 알고리즘[6,7]으로부터 시불변 이산시간 상태공간모델을 규명한다.

본 논문의 연구내용을 요약하면 다음과 같다. 제 2장에서는 연속 냉간 압연기의 동특성 해석[8,9]을 기초로 각 스탠드의 입출력 변수에 대한 선정법, 비선형 시뮬레이터로부터의 입출력 규명데이터에 대한 획득법을 기술한다. 여기서 입력신호는 이상적인 백색잡음에 유사한 M-계열 신호로서 지속적인 기진조건을 만족하도록 선정된다. 제 3장에서는 N4SID 규명법을 적용하여 획득된 입출력 데이터로부터 각 스탠드의 이산시간 상태공간모델이 규명된다. 이 때 연속 냉간 압연기에서 발생하는 여러 가지 불확실성이 포함되지 않은 입출력 데이터로부터 규명된 모델을 각 스탠드 공칭모델로 정의하며, 동시에 불확실성이 포함된 입출력 데이터로부터 모델을 규명한 후, 규명 공칭모델과의 오차함수에 대한 최대 특이치 선도로부터 불확실성에 대한 주파수 의존형 가중함수 선정법을 간략히 고찰한다. 제 4장에서는 기존의 테일러 선형화 모델과의 비교를 통하여 N4SID법에 의한 규명모델이 압연기의 스탠드간 간섭현상을 양호하게 표현하고 있음을 보인다. 끝으로 본 논문의 결론과 향후 연구과제를 제 5장에서 간략히 언급한다.

2. 입출력변수 선정 및 규명데이터

이 장에서는 N4SID 부분공간 규명법[6,7]으로부터 Fig. 1과 같은 5단 연속 냉간 압연기의 이산시간 상태공간모델 규명시 필요한 입출력 변수의 선정 및 규명 입출력 데이터의 획득법에 관해서 기

술한다.

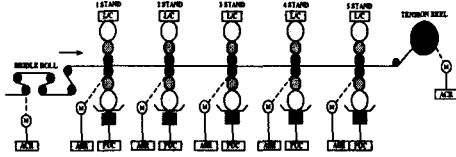


그림 1. 5 스탠드 연속 냉간 압연기의 개략도.
Fig. 1 The schematic of a five-stand tandem cold mill.

연속 냉간 압연기의 비선형 실험식[5]로부터 5 스탠드 비선형 시뮬레이터를 구축한 후, 입출력 데이터를 획득한다. 여기서 모델구조에 중요한 영향을 미치는 각 스탠드의 입출력 변수는 각각 롤 갭과 롤 속도, 출측 판두께와 후방장력으로 설정한다. 그리고 입출력 데이터를 생성하는데 있어서 압연공정의 정확한 동특성 파악을 위하여 코일러(coiler)부와 제 1 스탠드, 제 5 스탠드와 장력 릴(tension reel)부 사이의 장력은 일정하다고 가정한다.

아래의 Table 1은 비선형 실험식에 대한 동특성 해석 결과로부터 얻은 것으로서, 각 스탠드 입출력 변수들 사이에 존재하는 영향관계를 나타내고 있다. 임의의 한 스탠드 입력신호를 변동시켰을 때, 각 스탠드 출력에 미치는 영향을 파악하여 스탠드 간 입출력 신호의 상호 영향관계를 결정하였다. 여기서 입력 신호가 출력에 미치는 영향이 매우 미소한 경우는 ×로, 그렇지 않은 경우는 ○로 나타내었다. 그리고 S_i 와 V_{Ri} 는 i 스탠드 롤 갭과 롤 속도, h_i 와 r_{bi} 는 i 스탠드 출측 판두께와 후방장력을 가리킨다. Table 1에서 알 수 있듯이, 후방 스탠드의 입력은 전방 스탠드의 출력에 지대한 영향을 미치며, 특히 2, 3 스탠드의 후방장력은 각각 그 후방 스탠드에 해당하는 3, 4 스탠드의 입력에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 자료를 토대로 각 스탠드 모델규명을 위한 입출력 신호를 선정하였고, 이를 요약하면 Table 2와 같다. 구체적인 동특성 해석결과는 문헌[8,9]을 참고하기 바란다.

입력신호는 Table 3에서 주어진 초기 압연 설정치를 가지는 동작점에서 Fig. 2와 같이 이상적인

백색잡음에 유사한 M계열 신호(maximum length sequence) 형태로 인가되었고, 이 때 입력신호는 지속적인 기진조건(PE:persistent excitation)[10]을 만족하고 있음에 주의하자. 각 스탠드 출력 데이터는 연속 냉간 압연기 비선형 시뮬레이터로부터 획득되며, 특히 판재의 흐름에 기인하는 각 스탠드 간 입출력 변수간의 전달지연을 충분히 고려하여 데이터를 획득하였다.

표 1. 각 스탠드 입출력 신호의 상호 영향관계
(○: 많은 영향, ×: 적은 영향).

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

		제 1 스탠드	제 2 스탠드	제 3 스탠드	제 4 스탠드	제 5 스탠드
		h_1	h_2 r_{b2}	h_3 r_{b3}	h_4 r_{b4}	h_5 r_{b5}
제 1 스탠드	S_1	○	○	○	○	○
	VR_1	○	○	○	○	○
제 2 스탠드	S_2	○	○	○	○	○
	VR_2	○	○	○	○	○
제 3 스탠드	S_3	×	○	×	○	○
	VR_3	×	○	×	○	○
제 4 스탠드	S_4	×	×	×	○	○
	VR_4	×	×	×	○	○
제 5 스탠드	S_5	×	×	×	×	○
	VR_5	×	×	×	×	○

표 2. 각 스탠드 입출력 변수 선정.

Table 2. Determination of input-output variables of each stand.

규명 모델	입력 변수	출력 변수
제 1 스탠드	S_1, VR_1, S_2, VR_2	h_1
제 2 스탠드	$S_1, VR_1, S_2, VR_2, S_3, VR_3$	h_2, r_{b2}
제 3 스탠드	$S_2, VR_2, S_3, VR_3, S_4, VR_4$	h_3, r_{b3}
제 4 스탠드	$S_3, VR_3, S_4, VR_4, S_5, VR_5$	h_4, r_{b4}
제 5 스탠드	S_4, VR_4, S_5, VR_5	h_5, r_{b5}

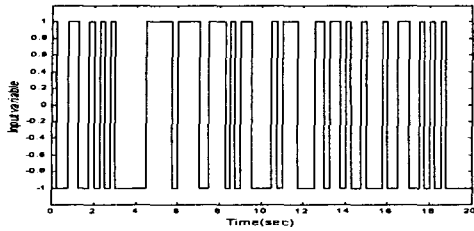


그림 2. M 계열 신호
Fig 2. Mamximum length sequence

표 3. 입출력 데이터 발생을 위한 초기 압연 설정치

Table 3. Initial set-up value for input-output dat sets

기호	항목	단위	제 1 스탠드	제 2 스탠드	제 3 스탠드	제 4 스탠드	제 5 스탠드	
Hi	입측판 두께	mm	2.60	2.12	1.57	1.17	0.89	
hi	출측판 두께	mm	2.12	1.57	1.17	0.89	0.80	
τ_{hi}	단위후 방장력	kgf/mm ²	0	12.7	17.1	23.0	24.1	
τ_{hi}	단위전 방장력	kgf/mm ²	12.7	17.1	23.0	24.1	6.7	
R	작업롤 반경	mm	273	273	292	292	292	
b	판재 폭	mm	930					
L	스탠드 간거리	mm	4500					

3. N4SID 모델규명 결과 및 고찰

이 장에서는 부분공간법에 기초한 N4SID 알고리즘을 적용하여 연속 냉간 압연기 각 스탠드의 이산시간 상태공간모형을 규명한다. 먼저 파라미터 변동이나 외란 등의 불확실성을 고려하지 않은 경우의 입출력 데이터로부터 각 스탠드의 공칭모형을 규명하고, 다음에는 외란 중 작업 롤에서 발생하는 롤 편심, 제 1 스탠드 입측 모재 판두께 변동 등의 불확실성 영향을 고려한 입출력 데이터로부터 각 스탠드의 모델규명을 수행한다. 마지막으로 불확실성에 대한 최대 특이치 선도로부터 주파수 특성을 고찰한다.

3.1 공칭 규명모델

먼저 연속 냉간 압연 과정 중에 외란이나 파라미터 변동 등의 불확실성이 고려되지 않은 입출력 데이터로부터 N4SID 알고리즘을 통하여 공칭모델의 규명결과를 기술한다. 입출력 데이터의 획득 샘플링 주기는 4ms이며, 데이터 획득 시간은 스탠드간 전달지연 시간을 고려하여 약 20초로 설정하였다. 그리고 지면관계상 공칭 규명모델에 대한 결과는 제 1, 3, 5 스탠드에 대해서만 간략히 기술한다.

N4SID법으로 규명되는 모델은 아래와 같이 출력에 잡음을 포함하는 이산시간 상태공간모델이다.

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

위의 식에서 출력에 포함되는 잡음 $e(k)$ 는 일정 강도를 가지는 백색잡음으로 가정한다.

Fig.3~5는 각각 제 1, 3, 5 스탠드에 대한 규명 결과로서, 각 그림에서 실선과 점선은 각각 비선형 실험식과 공칭 규명모델의 출력이며, 각 스탠드의 규명모델 차수는 제 1, 5 스탠드는 2차, 제 3 스탠드는 3차이다.

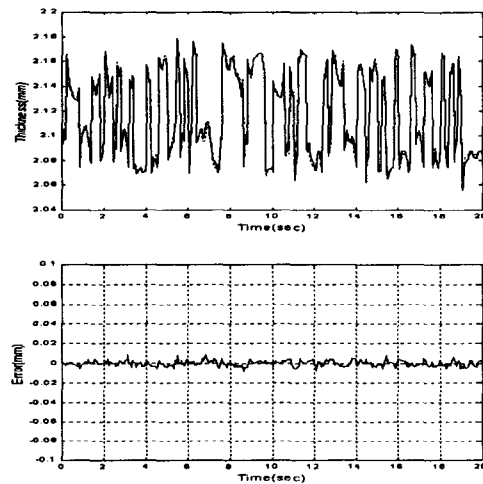


그림 3. 제 1 스탠드 모델규명 결과
Fig. 3. Model identification of the 1st stand

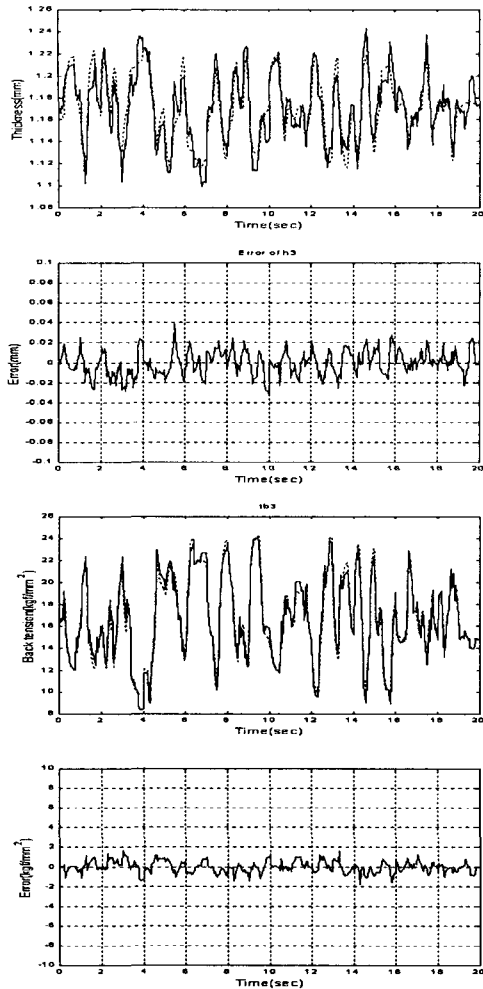


그림 4. 제 3 스탠드 모델규명 결과
Fig. 4. Model identification of the 3rd stand

위의 결과에서 출력 판두께 오차는 제 1 스탠드가 $\pm 10 \mu\text{m}$, 제 2 스탠드의 출력 판두께 오차는 약 $\pm 50 \mu\text{m}$ 이내의 범위였고, 제 3~5 스탠드는 $\pm 40 \mu\text{m}$ 이내로 유지하였다. 그리고 후방장력의 경우는 제 2, 3, 4, 5 스탠드가 각각 $\pm 2\text{kgf/mm}^2$, $\pm 2\text{kgf/mm}^2$, $\pm 3\text{kgf/mm}^2$, $\pm 6\text{kgf/mm}^2$ 임을 알 수 있다. 따라서 N4SID법에 의한 상태공간모델이 낮은 차수임에도 불구하고 비선형 실험식을 근사적으로 양호하게 표현하고 있음을 알 수 있다. 참고로 고전적인 모델규명법으로서 많이 이용되는 최소자승법에 기초한 ARX 규명모델은 모델차수 6~8차 정도

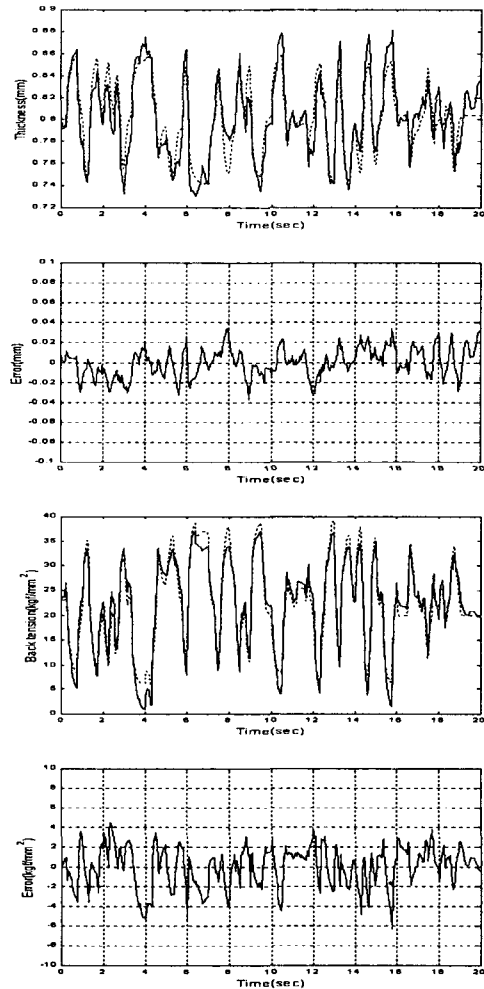


그림 5. 제 5 스탠드 모델규명 결과
Fig. 5. Model identification of the 5th stand

가 되어야 위와 같은 크기의 규명오차가 됨을 보이고 있다[9]. 따라서 본 논문에서 적용한 부분공간 N4SID 알고리즘은 최소자승법에 기초한 고전적인 규명법보다 모델 차수적인 측면에서 매우 유용함을 알 수 있다. 끝으로 각 스탠드의 공칭 규명 모델에 대한 이산시간 상태공간모델은 각각 다음과 같이 주어진다.

3.2 불확실성을 고려한 규명모델

연속 냉간압연 과정 중에 발생하는 주요 외란은

• 제 1 스탠드 규명모델

$$\left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc|ccc} 0.81121 & -0.35517 & -0.16864 & 3.58 \times 10^{-5} & -0.01334 & 1.73 \times 10^{-4} \\ 0.52605 & -0.20764 & -6.61962 & 1.41 \times 10^{-5} & -0.03015 & 4.37 \times 10^{-3} \\ \hline 0.40143 & 0.91664 & -0.01029 & 6.58 \times 10^{-6} & -0.03968 & 5.81 \times 10^{-6} \end{array} \right]$$

• 제 2 스탠드 규명모델

$$\left[\begin{array}{ccc|cccc} 0.03526 & -0.21345 & -0.57127 & -17.09047 & 0.00276 & 3.58817 & 0.00993 & -0.71747 & 0.00048 \\ -0.73425 & 0.44213 & 0.35346 & -24.34102 & -0.00988 & 14.29342 & 0.02481 & -1.10448 & -0.00009 \\ 0.60502 & 0.19303 & 0.69863 & 22.38673 & 0.00018 & -7.27903 & -0.01697 & 1.02403 & -0.00009 \\ \hline 0.03945 & 0.00561 & 0.00657 & 0.35152 & 0.00006 & 0.02241 & -0.00021 & -0.02750 & -0.00002 \\ 0.26780 & 0.86390 & -0.41836 & -2.56670 & -0.00293 & 0.04329 & 0.00394 & 0.23282 & -0.00027 \end{array} \right]$$

• 제 3 스탠드 규명모델

$$\left[\begin{array}{ccc|cccc} 1.00031 & -0.32266 & 0.12980 & -31.24820 & 0.00492 & -6.46267 & 0.00831 & 0.11744 & -0.00047 \\ -0.00916 & 0.61677 & 0.83452 & 23.07258 & 0.00508 & -75.73670 & -0.01624 & -0.21721 & 0.01484 \\ -0.39418 & -0.30148 & -0.06147 & -94.7398 & 0.00027 & -5.73878 & 0.04169 & -1.81775 & 0.00513 \\ \hline -0.00340 & 0.01036 & 0.01393 & 0.75562 & 2.33 \times 10^{-5} & 0.36039 & -0.00034 & -0.07287 & -9.09 \times 10^{-5} \\ -0.35614 & -0.73787 & 0.57133 & 4.87723 & -0.00235 & 1.64606 & -0.00031 & -1.93875 & -0.00055 \end{array} \right]$$

• 제 4 스탠드 모델

$$\left[\begin{array}{cc|cccc} 0.86332 & -0.10381 & -4.79770 & 0.00293 & -4.23857 & -0.00257 & 1.15485 & -0.00007 \\ 0.79562 & 0.05537 & 41.34125 & 0.00331 & -21.03955 & -0.01517 & 1.92770 & 0.00236 \\ \hline 0.01708 & -0.00742 & -0.05671 & 0.000008 & 0.01941 & 0.0 & -0.02591 & -0.00001 \\ 0.04499 & -1.01119 & 10.53327 & -0.00182 & 3.29950 & -0.00225 & -6.89345 & 0.00124 \end{array} \right]$$

• 제 5 스탠드 모델

$$\left[\begin{array}{cc|cccc} 0.91486 & 0.68490 & -3.12801 & -0.00780 & 17.88013 & 0.00936 \\ -0.21126 & 0.00921 & -12.16990 & 0.00266 & -23.22228 & -0.00182 \\ \hline -0.00396 & -0.00293 & -0.87035 & 6.99 \times 10^{-6} & 0.01840 & 0.00011 \\ 0.51863 & -0.88730 & 24.24119 & -0.00282 & 0.83847 & -0.00095 \end{array} \right]$$

모재 판두께 변동과 롤 편심으로서, 이러한 외란들이 고려된 입출력 데이터로부터 불확실성에 대한 모델을 규명한다. 단 여기서는 지면 관계상 5 스탠드에 대한 결과만 기술하기로 하며, 자세한 내용은 문헌 [9]를 참고하기 바란다.

롤 편심은 롤 자체의 변형이나 롤의 기하학적 중심과 회전축의 불일치 등으로 인하여 발생하며, 이는 출측 판재 두께 변동에 직접적인 영향을 미친다. 본 논문에서는 각 스탠드의 작업롤에 다음과 같은 정현파형 롤 편심 S_r 을 고려한다.

$$S_r = A \sin(2\pi at) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 진폭 A 는 각 스탠드의 판재 두께로부터 0.01mm, 주파수 a 는 각 스탠드 작업 롤 반경과 롤 속도 비에 비례하는 것으로 가정한다. 그리고 제 1 스탠드의 입력 방향으로 인가되는 모재 판두께의 변동을 아래 식과 같이 임의 주파수를 가지는 정현파 신호의 합성으로 고려한다.

$$\Delta H_0 = 0.02 \sin(0.4\pi t) + 0.009 \sin(\pi t) + 0.007 \sin(2\pi t) + 0.003 \sin(4\pi t) \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 6, 7은 각각 롤 편심과 모재 판두께 변동이 포함된 입출력 데이터로부터 규명된 제 5 스탠드 규명모델의 결과로서, 여기서 모델차수는 공칭모델과 동일하게 2차, 점선과 실선은 각각 비선형식 출력 데이터와 규명모델의 출력을 나타내고 있다. Fig. 6에서 출측 판두께와 후방장력의 규명오차는 각각 $\pm 40 \mu\text{m}$, $\pm 6\text{kgf/mm}$ 이내의 값을 가지며, Fig. 7에서는 각각 $\pm 40 \mu\text{m}$, $\pm 5\text{kgf/mm}$ 이내의 값을 가지며, 이는 공칭모델에 대한 규명오차와 거의 동일함을 알 수 있다. 결과적으로 불확실성이 포함되어도 연속 냉간 압연기의 상태공간모델을 N4SID 알고리즘으로부터 양호하게 규명할 수 있음을 알 수 있다.

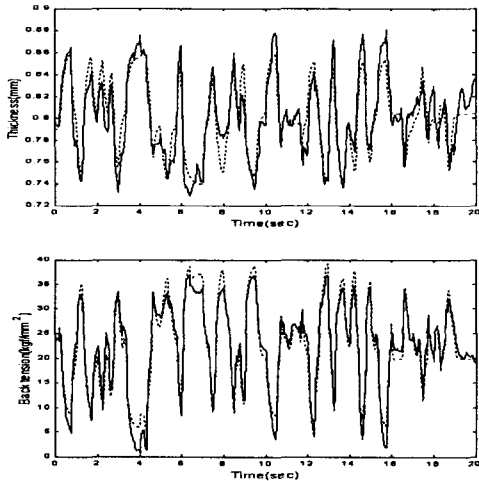


그림 6. 롤 편심에 대한 제 5 스탠드 모델규명
Fig. 6. Identified model of the 5th stand for roll eccentricity

롤 편심과 모재 판두께 변동을 비 구조적인 형태로 표현하여 이에 대한 견실 제어를 설계하고자 할 경우에는 불확실성의 주파수 의존형 가중함수가 요구된다. 이를 위하여 롤 편심과 모재 판두께 변동에 대한 주파수 특성을 고찰한다. 불확실성이 고려된 N4SID 규명모델을 $\hat{G}(s)$, 공칭 규명모델을 $G_o(s)$ 그리고 두 모델간의 덧셈형 오차함수를 $\Delta G(s)$ 라 하면 다음의 식 (4)가 성립한다.

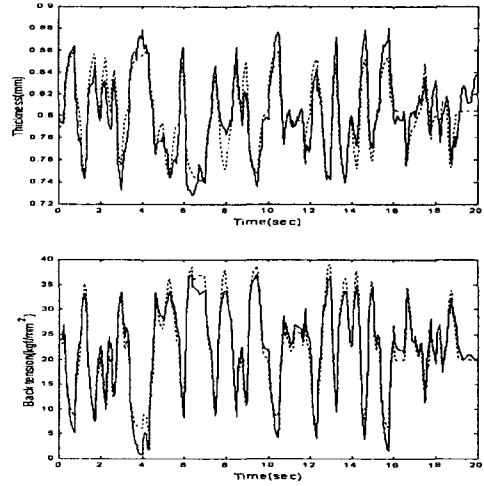
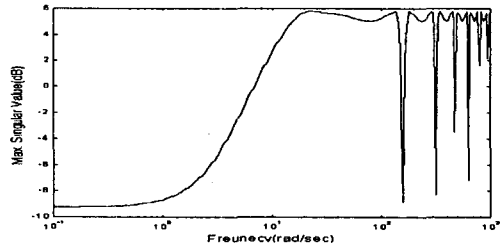
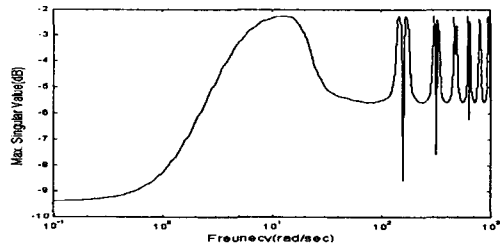


그림 7. 모재 판두께 변동에 대한 제 5 스탠드 모델규명
Fig. 7. Identified model of the 5th stand for variation of incoming strip thickness



(a) 롤 편심



(b) 모재 판두께 변동

그림 8. 제 1 스탠드에 포함된 불확실성의 최대 특이치 선도

Fig. 8. The maximum singular value plot of the 1st stand included uncertainties

$$\Delta G(s) = \tilde{G}(s) - G_o(s) \dots\dots\dots(4)$$

따라서 $\Delta G(s)$ 에 대한 최대 특이치 선도로부터 롤 편심과 모재 판두께 변동으로 인한 주파수 특성을 근사적으로 알 수 있으며, 이로부터 각각에 대한 주파수 의존형 가중함수를 설정할 수 있게 된다.

Fig. 8은 각각 롤 편심과 모재 판두께 변동에 기인하는 제 1 스탠드의 덧셈형 오차함수에 대한 최대 특이치 선도를 나타내고 있다.

위의 최대 특이치 선도 결과에서 롤 편심과 모재 판두께 변동은 저주파역에서보다 10rad/s이상의 고주파역에서 크을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 H_∞ 제어기 설계시 요구되는 불확실성에 대한 가중함수를 설정할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 테일러 선형화 모델을 통한 규명모델 평가

Taylor 선형화 모델은 연속 냉간 압연기의 비선형 실험식으로부터 각 압연인자들의 미소변동에 대해 구한 영향계수들로부터 구축된다. 아래의 식(5)는 i -번째 스탠드의 상태변수 x_i , 입출력변수 u_i, y_i 그리고 불확실성 변수 w_i 를 각각 정의하고 있다.

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

위의 식에서 각 변수들은 동작점 근방에서의 미소변동량을 나타내고 있으며, ΔS 는 압하위치, ΔV_R 은 롤 원주속도, τ_b 는 스탠드 후방장력이며, ΔS_b 는 압하(롤깎) 명령치, ΔV_b 는 롤속도 명령치, $\Delta H, \Delta h$ 는 각각 모재 판두께 및 출측 판두께, ΔS_r 은 롤 편심을 각각 나타낸다. Taylor 선형화 모델은 참고문헌[5]에서 주어지는 압연하중식, 선진율식, 하우스징(housing)식, 입력 구동기식, 출측 판두께 식 등에 대한 비선형 실험식들로부터 동작점 근방에서의 미소 변동식을 나타내고 있으며, 그 결과식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_i &= A_{ii-1}X_{i-1} + A_{ii}X_i + A_{ii+1}X_{i+1} \\ &+ B_{ii}U_i + D_{ii-1}W_{i-1} + D_{ii}W_i \end{aligned} \dots\dots\dots(6-a)$$

$$Y_i = C_{ii}X_i + C_{ii-1}X_{i+1} + E_{ii}W_i \dots\dots\dots(6-b)$$

여기서 $A_{ii}, B_{ii}, C_{ii}, D_{ii}, E_{ii}$ 는 각 스탠드에서의 시스템 행렬들이며, $A_{ii-1}, A_{ii+1}, D_{ii-1}, C_{ii-1}$ 은 전후방 스탠드간 상호간섭을 나타내는 요소들이다. 각 모델식의 영향계수 및 시스템 행렬들의 구체적인 내용은 생략한다[5]. 여기서 테일러 선형화 모델을 통하여 각 스탠드의 독립적인 모델을 얻기 위해서는 비간섭 이론이 필요함을 쉽게 확인할 수가 있다.

다음에는 3장에서 구한 N4SID 규명모델과 테일러 선형화 모델과의 비교를 통하여 그 특성을 고찰한다. 표현의 간략화를 위하여 제 1스탠드와 제 3 스탠드의 결과만을 고찰한다. Fig. 9와 10은 제 1, 3 스탠드에 대하여 비선형식, N4SID 규명모델, 테일러 선형화 모델의 출력에 대한 결과를 각각 나타내고 있다.

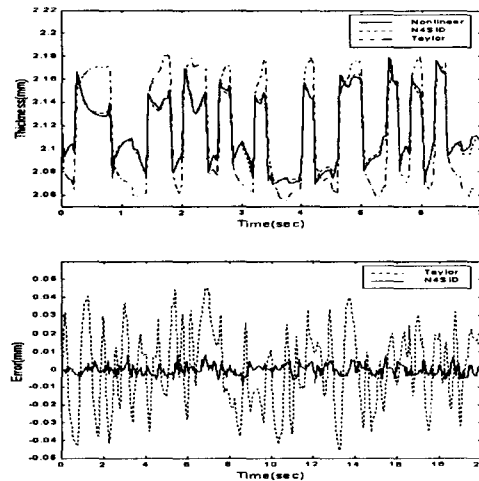


그림 9. 제 1 스탠드 출력변수 비교
Fig. 9. The comparison of the 1st stand output variables

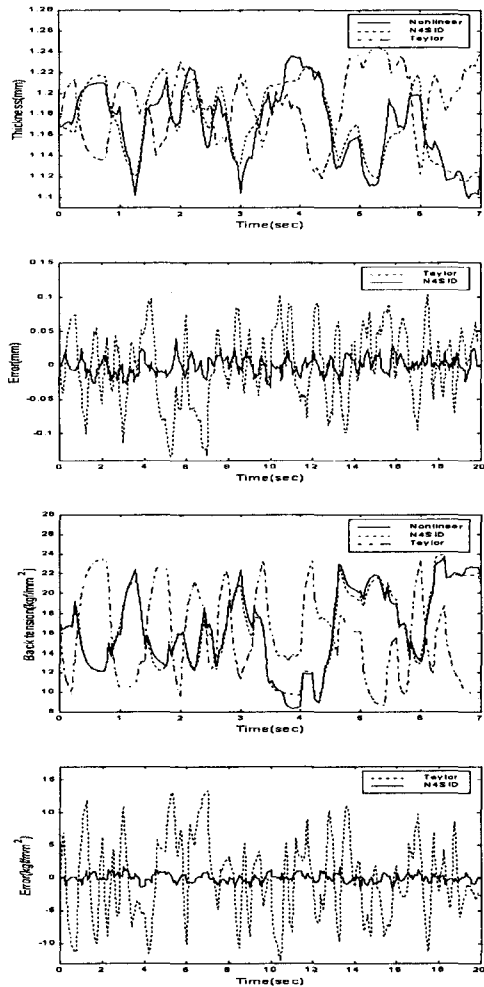


그림 10. 제 3 스탠드 출력변수 비교
Fig. 10. The comparison of the 3rd stand output variables

위의 결과에서 출력에 대한 오차선도로부터 N4SID 규명모델의 출측 판두께와 후방장력이 테일러 선형화 모델의 출력보다 비선형 실험식을 매우 양호하게 기술하고 있음을 알 수 있다. 즉 연속 냉간 압연기의 AGC 시스템 설계를 위하여 사용하는 문헌 [5]의 테일러 선형화 모델의 각 스탠드의 출력은 비선형식과는 현저히 다른 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 선형제어 이론을 적용하여 연속 냉간 압연기의 AGC 시스템을 설계할 경우에 있어, 테일

러 선형화 모델은 많은 모델링 오차를 수반할 것으로 사료된다. 특히 각 스탠드마다의 독립적인 제어를 설계하고자 할 경우, 테일러 선형화 모델에 비간섭 이론을 적용하면 더 많은 모델링 오차가 발생할 것으로 사료된다. 만약 테일러 선형화 모델을 이용해야 할 경우에는 다양한 운전조건에 따른 동작점 변동을 고려하여 모델 파라미터 혹은 선형화 계인의 스케줄링에 대한 많은 노력이 필요할 것으로 예측된다. 이러한 관점에서 본 논문에서 제시한 N4SID 규명모델은 각 스탠드마다의 독립적인 AGC 시스템 설계에 많은 유용성을 가질 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 연속 냉간 압연기의 두께 제어 시스템 설계를 위한 제어모델 규명에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 연속 냉간 압연기의 동특성 해석을 바탕으로 각 스탠드 모델규명을 위한 적합한 입출력 변수를 선정하여 비선형 시뮬레이터로부터 입출력 데이터를 획득한 후, 부분공간법에 기초한 N4SID 규명 알고리즘을 적용하여 각 스탠드의 시불변 선형 이산시간 상태공간모델을 규명하였다. N4SID 규명모델은 기존의 테일러 선형화 모델보다 각 스탠드간의 간섭현상 및 비선형 특성을 양호하게 나타내고 있음을 알았다. 동시에 모재 판두께 변동, 롤 편심 등과 같은 불확실성에 대한 주파수 특성을 고찰하여 이에 대한 가중함수 선정법을 제안하였다. 본 논문의 향후 연구과제는 제시된 규명모델이 건실 H^∞ 제어에 적합성에 대한 검증과 새로운 건실 제어를 설계하는 것이다.

참고문헌

[1] E. John, M. Geddes and I. Postlethwaite, "Improvements in Product Quality in Tandem Cold Rolling Using Robust Multivariable Control", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 6, NO. 2, pp. 257-269, 1998.
[2] S. G. Choi, M. A. Johnson and M. J. Grimble, "Polynomial LQG Control of

Back-up-Roll Eccentricity Variations in Cold Rolling Mills", Automatica, Vol. 30, No. 6, pp. 975-992, 1994.

[3] I. Hoshino, Y. Meakawa, T. Fujimoto and H. Kimura, "Observer-based Multivariable Control of the Aluminum Cold Tandem Mill", Automatica, Vol. 24, No. 6, pp. 741-754, 1997.

[4] M. R. Katebi and M. A. Johnson, "Predictive Control for Hierarchically Structured Systems with Application to the Tandem Rolling Mill", in Proc. European Contr. Conf., Rome, 1995.

[5] 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.

[6] P. Van Overschee and B. De Moor, "N4SID : Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems," Automatica, Vol. 30, No 1, pp. 75-93, 1994.

[7] M. Verhaegen and P. Dewilde, "Subspace Model Identification Part1. The Output-Error State-Space Model Identification Class of Algorithm," Int. J. Control, Vol. 56, No. 5, pp. 1187-1210, 1992.

[8] 황이철, 이만형, "연속 냉간 압연기의 건설 제어 시스템 설계를 위한 수학모델 개발에 관한 연구," 포항제철(주) 기술연구소 위탁과제 연구보고서, 1998.

[9] 황이철, 이만형, "부분공간법에 기초한 연속 냉간 압연기의 제어모델 규명에 관한 연구," 포항제철(주) 기술연구소 위탁과제 연구보고서, 1999.

[10] 片山 徹, Introduction to System Identification, 朝倉書店, 1994.



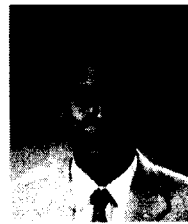
엄 상 오(Sang-O Eum)
 1986년 부산공업대학교 전기공학과 졸업
 1991년 8월 숭실대학교 대학원 졸업(석사)
 1995년 2월 한국해양대학교 대학원 박사과정수료

현재 양산대학 환경안전과 교수
 * 주관심분야 : 전력전자, 전기기기제어



황 이 철(I-Cheol Whang)
 1961년 10월생.
 1987년 2월 부산대 기계설계공학과 졸업
 1991년 2월 동 대학원 졸업(석사)
 1996년 오사카대 대학원 전자제어기계공학과 졸업(박사)

1996년 10월 ~ 1998년 2월 부산대 기계공학부 국책교수
 1998년 3월 ~ 현재 동의대 기계.산업시스템공학부 교수



김 윤 식(Yoon-Sik Kim)
 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업
 1979년 동대학원 졸업(석사)
 1986년 동경공업대학 대학원 졸업(석사). 동대학원 졸업(박사)

현재 한국해양대학교 전기시스템공학과 교수
 * 주관심분야 : MHD발전 및 MHD추진, 전력전자 및 공장자동화, 선박 SCADA 시스템



김 종 윤(Jong-Yun Kim)
1994 한국해양대학교 기관공학과 졸업
1998 동 대학원 기관공학과(전기전자제어)졸업 석사
현재 동대학원 기관공학과(전기전자제어) 박사과정



박 영 산(Young-San Park)
1991년 한국해양대학교 기관학과 졸업
1997년 동대학원 기관공학과 졸업(석사)
1999년 동대학원 박사과정수료

* 주관심분야 : DSP, 전력전자, 전기제어.