

부분 공간법을 이용한 연속 냉간 압연기의 시스템 규명에 관한 연구

A Study on the System Identification of Cold Tandem Mills using the Subspace Method

장 유 신(부산대 대학원), 김 인 수(부산대 대학원), 황 이 철(부산대), 이 만 형(부산대)
Yu Shin Chang(Graduate School, Pusan Univ), In Soo Kim(Graduate School, Pusan Univ),
I Cheol Hwang(Pusan Univ), Man Hyung Lee(Pusan Univ)

ABSTRACT

This paper characterizes dynamics of cold tandem mills, and constructs its state-space model of which are linear time invariant, using subspace method. Step responses particularly show the influence on mass transfer delay. Input-output data sets are obtained from nonlinear differential equations including mass transfer delay and nonlinearity. It is shown that the identified state-space model well approximates the original systems dynamics.

Key Words : Cold tandem mills(연속 냉간 압연기), System Identification(시스템 규명), Subspace Method(부분공간법), Singular Value Decomposition(SVD:특이치 분해)

1. 서 론

건설제어의 발전과 더불어 시스템의 모델집합을 규명하는 연구가 최근 주목을 받고 있다. 공칭모델은 물론 모델링 오차의 구조 및 크기를 정량적으로 규명하는 견실규명(robust identification)은 1990년대에 들어 하나의 새로운 테마로 부각하고 있다.^[1] 그러나 현재까지의 견실규명 연구에서는 주로 단일 입출력 시스템(SISO)의 전달함수 모델집합을 구축하는 것이었으며, 다입력 다출력 시스템(MIMO)의 상태공간 공칭모델이나 파라미터 변동을 규명하는 연구는 부분적으로 수행되고 있다.^[2,3] 또한 제안된 알고리즘이 실제 문제에 적용할 수 있을 정도의 충분한 실용성을 가졌다고 하기는 어려운 단계이다.

시스템의 입출력 데이터로부터 시불변 선형 상태공간 모델의 규명법 가운데 특이치 분해를 이용한 부분공간법(subspace method)^[4,5]은 컴퓨터의 급속한 발달과 더불어 그 실용성이 한층 증가하고 있다. 부분공간법은 시스템의 임펄스응답이나 스텝응답들을 사용하여 상태공간 모델을 규명하는 초기의 특이치 분해법을 확장한 것으로서, 입출력 데이터로부터 상태공간 모델을 규명하는 방법이다. 그리고 최소자승법으로 ARX 또는 ARMAX등의 전달함수를 규명

하는 경우와 동일한 입출력 데이터 구조를 이용할 수 있으며 MIMO 시스템 규명에도 적용할 수 있는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 부분공간법을 연속 냉간압연기의 시스템 규명에 적용하여 시불변 선형 상태공간 모델을 구축하는데 목적을 두고 있다. 연속 냉간압연기는 강한 비선형성과 질량 전달 지연등의 많은 불확실성을 포함하는 다변수 비선형 다변수 시스템이다. 이에 대한 선형 제어시스템 설계를 위해서는 선형화 제어모델이 필요하다. 기존의 Taylor 선형화 모델^[6]은 작동점 근처의 미소변동 특성만을 기술할 수 있는 한계를 가지며 특히 작동점의 변동이나 전달 지연의 특성을 나타내는데는 상당한 어려움이 있으므로 그러한 특성을 충분히 극복할 수 있다고는 보기 어렵다.

따라서 그러한 문제점을 극복하기 위하여 입출력 데이터를 이용하는 시스템 규명을 적용하여 상태공간 모델을 규명하고자 한다. 먼저 기존의 비선형 모델에 관한 시뮬레이션을 통하여 전달지연을 포함한 동특성을 해석하고, 그것으로부터 입출력 데이터를 생성한다. 생성된 입출력 데이터에 부분공간법을 적용하여 연속 냉간 압연기의 상태공간 모델의 공칭 파라미터를 규명한다. 단, 모재 판두께의 변화, 물론

삼 그리고 마찰계수 변동등의 불확실성으로 야기되는 파라미터 변동에 관한 규명은 고려하지 않고 공칭모델만을 규명하는 것으로 본 연구내용의 범위를 제한한다.

2. 연속 냉간압연기의 동특성

본 장에서는 5개 스탠드가 연속적으로 배치된 냉간압연기로부터 생산되는 압연제품의 두께 제어시스템 설계를 위한 기초 연구로서 제어대상의 비선형적인 동특성을 해석한다.

2.1 비선형 모델식

그림 1과 같은 5단 연속 냉간압연기를 고려한다.

상기 시스템에 관한 압연 하중식과 선진율식은 각각 Hill의 근사식 및 Blond & Ford식^[6]을 사용하며, 이에 관한 결과식을 요약하면 다음과 같다.

2.1.1 압연하중식

판재 압연현상은 일반적으로 최선단 및 후단부를 제외한 부분이 정상 및 평면변형(2차원 변형)한다는 전제하에 전개되는 균일 변형이론을 적용함으로써 얻어진다. 여기서는 전단응력을 무시하고 판재에 가해지는 수직응력의 분포가 균일하다는 가정하에서 제안된 Karman의 슬래브(slab)법에 기초를 둔 Hill 근사식을 사용한다.

$$P_i = b(A_4 + \sqrt{A_4^2 - A_5}) \quad (1)$$

여기서 b 는 판폭이며 각 변수들은 아래와 같다.

$$A_2 = \frac{1}{k_{pi} x_i} - \frac{A_1 C_{pi}}{H_i - h_i}, \quad A_1 = 1.79 \mu_i R_i r_i \sqrt{r_i}$$

$$A_3 = 1.08 - 1.02 r_i, \quad A_4 = \frac{A_1}{A_2} + 0.5 R_i C_{pi} \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2$$

$$A_5 = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - R_i (H_i - h_i) \left(\frac{A_3}{A_2} \right)^2 \quad (2)$$

그리고 μ_i 는 Sims의 실험식으로부터 주어지는 마찰계수, C_{pi} 는 Hitchcock 계수, r_i 는 압하율, k_{pi} 는 동적 변형저항, 그리고 H_i 는 모재 판두께를 나타낸다.

2.1.2 출측 판두께 및 후방 장력식

시스템 출력변수는 출측 판두께와 후방 장력이며 각각 아래와 같은 게이지 미터(gauge meter) 측정식을 이용한다. 출측 판두께 식은 다음과 같다.

$$h_i = \frac{P_i}{K_i} + S_i \quad (3)$$

여기서 K_i 는 압연기 강성 계수, S_i 는 롤 갭 그리고 P_i 는 압연하중을 나타낸다.

그리고 후방장력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_{Ri}}{dt} &= \frac{E}{L_i} (V_{in i} - V_{out i-1}) \\ &= \frac{E}{L_i} \left(\frac{h_i}{H_i} (1 + f_i) V_{Ri} - (1 + f_{i-1}) V_{Ri-1} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 R_{Di} 는 편평롤 반경을, f_i 는 Blond & Ford 식의 선진율을 다음과 같이 나타낸다.

$$R_{Di} = R_i \left(1 + \frac{C_{pi} P_i}{(H_i - h_i) b_i} \right) \quad (5)$$

$$f_i = \frac{R_{Di}}{h_i} B^2 \quad (6)$$

2.2 비선형 시뮬레이션

본 절에서는 2.1절에서 주어진 비선형식에 기초한 시뮬레이션 결과를 설명한다. 입력변수는 각 스탠드의 롤갭 및 롤속도이고, 출력변수는 각 스탠드의 출측판두께 및 후방 장력이다. 개발된 비선형 시뮬레이션 프로그램의 수치 알고리즘은 그림 2와 같다.

2.1절의 식에서 출측 판두께 식은 주어진다.

$$F(h) = K_i h_i - b(A_4 + \sqrt{A_4^2 - A_5}) - K_i S_i = 0 \quad (7)$$

여기서 $F(h)$ 를 Newton-Raphson법으로 계산하였다.

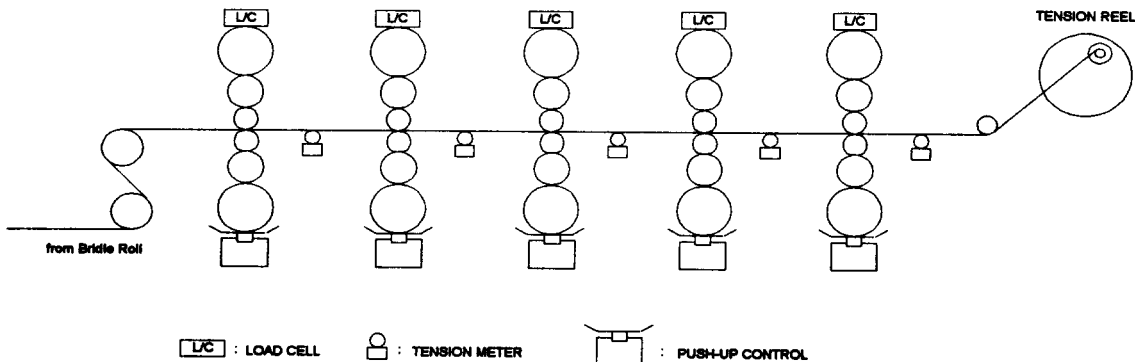


그림 1 연속 냉간 압연기

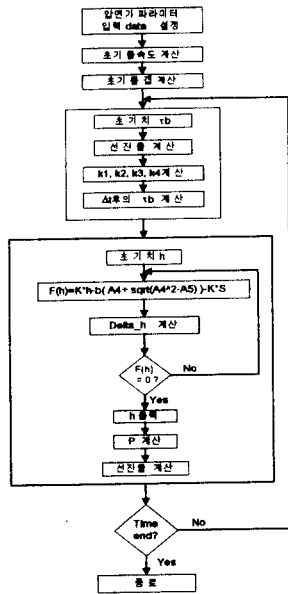


그림 2 프로그램 흐름선도

2.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션 결과 중에서 압연 동특성에 가장 큰 영향을 미치는 제 1스탠드의 변동에 대한 동특성만 나타내었다. 그림 3은 제 1스탠드의 롤갭을 초기에 +0.2mm 증가시킬 경우의 결과이다. 제 1스탠드의 출측 판두께는 증가하고, 다음 스탠드의 후방장력은 감소했다. 나머지 스탠드에서도 같은 경향이 나타났으며, 특히 시간지연의 영향으로 계단형 파형이 나타나는 것을 볼 수 있었다.

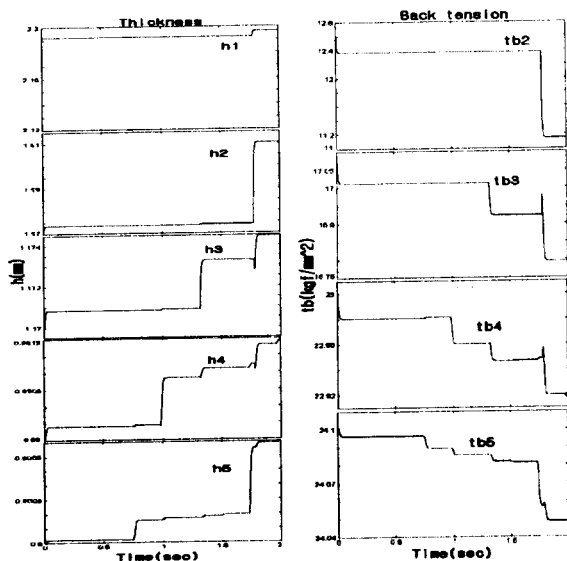


그림 3 전 스탠드의 출측 판두께와 후방장력

그림 4는 제 1스탠드 롤속도의 +150mm/s 변동에 대한 동특성을 나타내고 있다. 제 2스탠드의 후방장력은 감소하였고, 이에 따라 제 1스탠드의 출측 판두께는 증가하였다. 나머지 스탠드에서도 같은 경향이 나타났다.

이로써 제 1스탠드의 롤갭과 롤속도의 증가는 최종 스탠드의 출측 판두께에 영향을 미침을 보았다.

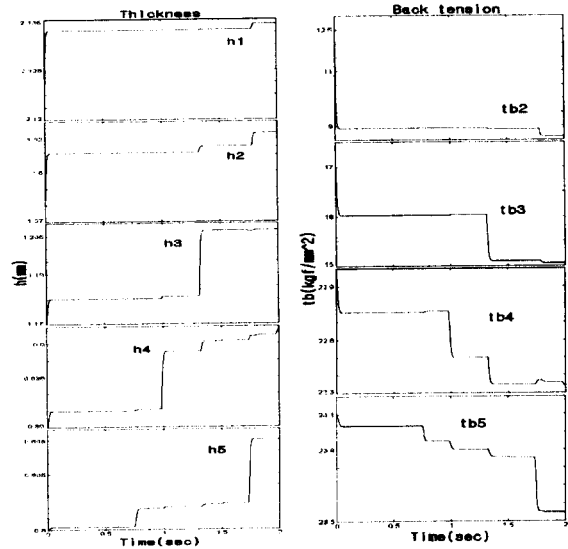


그림 4 전 스탠드의 출측 판두께와 후방장력

3. 부분 공간 시스템 규명법

시스템 규명에서 현재 주목받고 있는 부분공간 상태공간 시스템 규명법(Subspace-based State Space System Identification method:4SID)을 간단히 소개한다.

본 연구에서는 M. Verhaegen이 제안한 MOESP 법(Multivariable Output-Error State-space model identification approach)^[4]에 관하여 간단히 설명한다. 우선 m 입력, p 출력, n 차원 상태벡터의 이산시간 상태공간 모델을 고려한다.

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A, B, C, D 는 적당한 차원을 가지는 상수행렬이다. 규명 알고리즘을 다음과 같이 요약된다.

[단계 1] 입력력 데이터로부터 블록 한행렬 U 와 Y 를 구성한다.

$$U = \begin{bmatrix} u(t) & u(t+1) & \dots & u(t+l-1) \\ u(t+1) & u(t+2) & \dots & u(t+l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(t+k-1) & u(t+k) & \dots & u(t+k+l-2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(t) & y(t+1) & \dots & y(t+l-1) \\ y(t+1) & y(t+2) & \dots & y(t+l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(t+k-1) & y(t+k) & \dots & y(t+k+l-2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

[단계 2] QR분해를 실시하여 R 을 분해한다.

$$\begin{bmatrix} U \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

[단계 3] $R_{22}(pk \times pk)$ 를 특이치 분해한다.

$$R_{22} = [U_n \ U_n^+] \begin{bmatrix} S_n & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^T \\ (V_n^+)^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

[단계 4] (A, B, C, D)에 대수적으로 동가인 추정치 (A_d, B_d, C_d, D_d)는 다음 관계식으로부터 계산된다.

$$C_d = U_n(1:p,:) \quad (13)$$

$$U_n^{(1)} A_d = U_n^{(2)} \quad (14)$$

$$X_y = X_u \theta \quad (15)$$

$$X_y = \begin{bmatrix} L(:, 1:m) \\ L(:, m+1:2m) \\ \vdots \\ L(:, m(k-1)+1:mk) \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} D_d \\ B_d \end{bmatrix}, L = (U_n^+)^T R_{21} R_{11}^{-1} \quad (16)$$

$$X_u = \begin{bmatrix} U_n^+(1:p,:) ^T & \dots & U_n^+(p(k-1)+1:pk,:) ^T \\ U_n^+(p+1:2p,:) ^T & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ U_n^+(p(k-1)+1:pk,:) ^T & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & U_n^{(1)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서, $U_n^{(1)}$ 은 행렬 U_n 에서 제 1행부터 제 $p(k-1)$ 행까지, $U_n^{(2)}$ 는 행렬 U_n 에서 제 $p+1$ 행부터 제 pk 행까지 각각 분해된 것이다.

4. 연속 냉간압연기의 시스템 규명

본 장에서는 3장의 규명 알고리즘을 이용하여 압연기의 입출력 데이터로부터 압연기의 내부상태를 기술하는 공칭 상태공간 모델을 구한다.

4.1 입출력 데이터

비선형 압연시스템에 인가되는 입력신호로서는 지속적 기진조건을 충분히 만족시킬 수 있는 다음과 같은 M계열 신호^[7]를 이용한다. 이때 롤갭은 setup 치를 기준으로 최대 0.15mm, 최소 0.05mm의 변동을, 롤속도는 최대 150mm/s, 최소 50mm/s의 변동을 고려하였다(그림 5, 6). 이와 같은 입력에 대해 비선형 시물레이션을 수행하고, 생성된 출력을 입력데이터와 함께 시스템 규명의 입출력 데이터로 이용한다. 그림 7, 8은 비선형 시물레이션의 출력 결과인 출측 판두께와 후방장력을 나타내었다.

4.2 상태공간 모델 결정

3장의 알고리즘을 이용하여 전 스탠드의 상태공간 모델 파라미터를 구하였다. 여기서는 압연기의 동특

성을 대표하는 제 1스탠드만을 나타낸다.

모델의 차수는 8이며 시스템은 가제어 및 가관측인 안정한 모델이다. 단, 구체적인 파라미터 값은 생략한다.

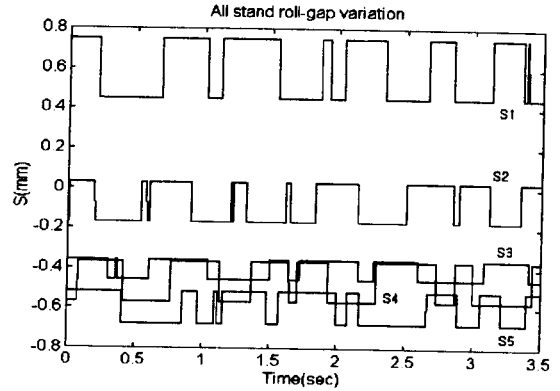


그림 5 전 스탠드의 입력신호인 롤갭

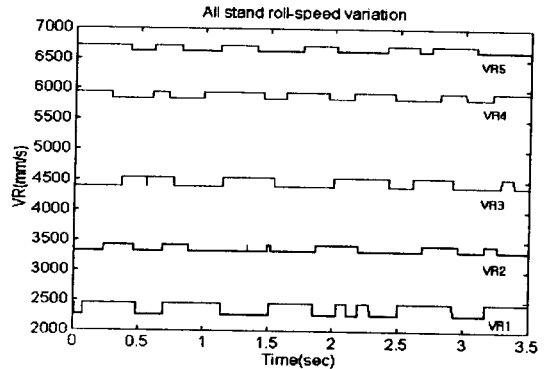


그림 6 전 스탠드의 입력신호인 롤속도

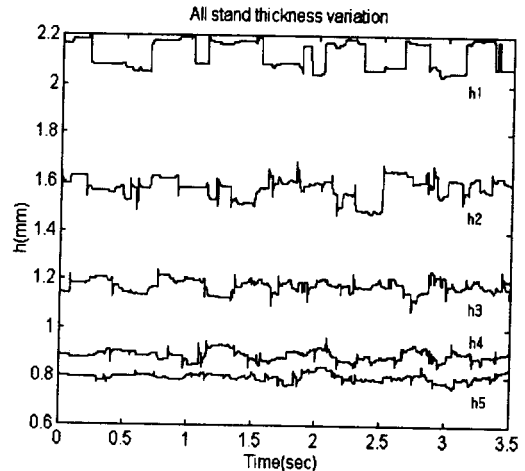


그림 7 전 스탠드의 출력신호인 출측 판두께

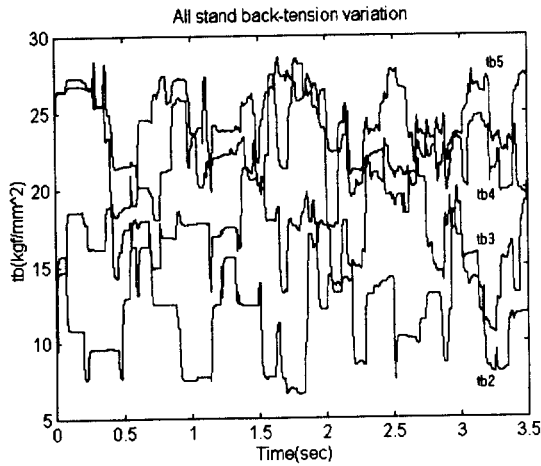


그림 8 전 스탠드의 출력신호인 후방장력

4.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

불확실성을 고려하지 않은 입출력 데이터로부터 얻은 상태공간 모델과 비선형 시뮬레이션의 결과를 비교하였다.

그림 9은 이를 설명하고 있으며, 단 실선은 비선형 시뮬레이션 결과이고, 점선은 규명된 모델의 시뮬레이션 결과이다.

출측 판두께는 setup치를 기준으로 +0.07mm에서 -0.07mm의 범위내에서 변동함을 알 수 있었다. 특히 제 1스탠드의 출측 판두께는 입력신호의 파형과 유사하게 변동하지만, 최종 스탠드로 갈수록 입출력 파형간의 차이가 큼을 알 수 있었다. 후방장력은 전 스탠드 모두 상호 간섭현상을 보이면서 랜덤하게 변동하지만, 제 2,3스탠드와 제 4,5스탠드의 출력형태는 서로 유사함을 알 수 있었다. 단, 제 1스탠드가 시스템 특성 해석에 중요한 요소이기 때문에 제 1스탠드의 출측판두께만 도시하였다. 제 1스탠드의 후방장력은 setup치와 마찬가지로 영으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 연속 냉간압연기의 비선형 모델식 으로부터 비선형 시뮬레이터를 구성하여 압연현상과 동특성을 파악했으며, 부분공간 시스템 규명 알고리즘을 적용하여 상태공간 모델을 구했다. 그리고 앞의 시뮬레이션 결과로부터 적용된 부분공간 시스템 규명법이 압연기와 같은 비선형 다변수 시스템에서 아주 바람직한 규명방법임을 알 수 있었다.

본 연구의 향후 연구내용은 다음과 같다.

- (i) 입력변수 및 시스템 파라미터 변동등의 불확실

성이 포함된 입출력 데이터로부터 시스템 파라미터 변동을 규명하여 모델링 오차의 구조 및 크기를 정량적으로 평가함으로써 압연기의 모델집합을 구해야 한다.

(ii) 적용된 규명법을 건설제어 알고리즘과 결합할 수 있는 형태로 만들기 위한 이론에 대한 연구가 필요하다. 건설제어 알고리즘을 적용하여 제어시스템을 설계한 후 그 수학적모델의 타당성을 검증해야 한다.

참고 문헌

1. T. Zhou and H. Kimura, "Time Domain Identification for Robust Control," Systems & Control Letters, Vol. 20, No. 3, pp. 167-178, 1993.
2. R. Nagamune, S. Yamamoto and H. Kimura, "Identification of the Smallest Unfalsified Model Set with both Parametric and Unstructured Uncertainty," to be presented at the SYSID'97.
3. R. Nagamune and S. Yamamoto, "Identification of a State Space Model Set Based on the Subspace Method," Proc. SICE'97, pp.757-758, 7. 1997.
4. M.Verhaegen and P.Dewilde, "Subspace Model Identification Part1. The Output-Error State-Space Model Identification Class of Algorithm," Int.J. Control, 56-5, pp.1187-1210, 1992.
5. M.Viberg, "Subspace-based Methods for the Identification of Linear Time Invariant Systems," Automatica, Vol.31, No.12, pp.1835-1851, 1995.
6. 광양제철소, 광양 3냉연 NEW AGC 완료보고서, 日立製鐵所(주), 1993.5.
7. 片山 徹, Introduction to System Identification. 朝倉書店, 1994.

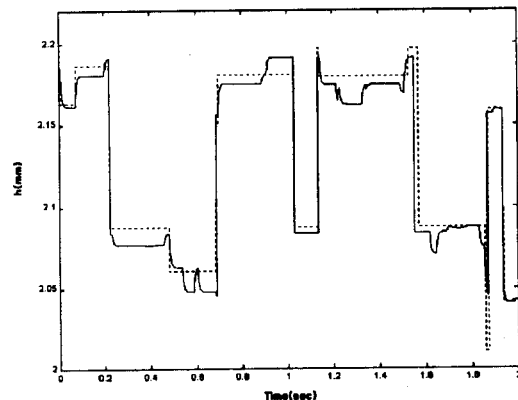


그림 9 제 1스탠드의 출측판두께 비교