연속 냉간압연 시스템의 선형모델 유도와 비간섭 제어기 설계
Linear Modeling and Decoupling Control of Tandem Cold Rolling Mill

°박규은*, 이관호**, 이준화***

* 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (Tel : 82-2-2217-0471; E-mail:pke10000@ccsl.uos.ac.kr)
** 서울대학교 전기공학부 (Tel:82-2-880-7314; E-mail:kwanho@cisl.snu.ac.kr)
*** 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (Tel : 82-2-2217-0471; E-mail:joonhwa@uoscc.uos.ac.kr)

Abstract: In this paper, a decoupler of tandem cold rolling mill is designed. Before designing the decoupler, this paper improved conventional linear model by considering friction and yield stress of rolling strip. In a stand, the decoupler let an output be controlled by an input. And even if states of other stands should be changed, current stand takes no interference from those changes. In addition, with the same method, a feedforward controller is designed for an input strip thickness error. Finally, performance of controllers above is shown with nonlinear simulation.

Keyword: tandem cold rolling mill, linear modeling, decoupler, feedforward

1. 서론

철강제조공정 중에서 압연공정은 제품의 품질을 직접 좌우하는 매우 중요한 공정이다. 특히 열연 공정을 거친 강판을 소재로하는 냉간압연공정은 매우 높은 두께 정밀도를 요구하고 있다 . 두께 정밀도는 제어기의 성능에 따라 크게 좌우 되지만 여러 스탠드들을 연속적으로 배치한 연속 냉간압연 시스템은 하나의 입력 또는 상태가 변하면 모든 스탠드의 출력이 영향을 받으므로 제어기의 설계가 어려울 뿐만 아니라 고려해야할 설계변수가 너무 많아서 제어기의 차수가 커지게 된다. 따라서 두께 및 장력제어기의 설계에 앞서 하나의 입력으로 하나의 출력만을 제어하도록 하는 비간섭제어를 수행한다면 제어기 설계가 용이해 질 것이다.

비간섭 제어기를 설계하기 위해서는 압연라인을 정확하게 모사할 수 있는 선형모델이 필요하다. 하지만 기존의 선형모델은 스탠드 전후의 판두께와 단위장력만을 고려하여서 압연소재의 항복응력이나 마찰계수가 변하는 경우에는 비선형모델과 차이가 있다. [1]. 따라서 압연소재의 항복응력과 마찰계수의 변화를 고려한 선형모델을 유도할 필요가 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 압연소재의 항복응력과 마찰계수의 변화를 고려한 선형모델을 유도한다. 3절에서는 단일 스탠드내에서 하나의 입력이 하나의 출력에만 영향을 주도록하는 스탠드내의 비간섭 제어기를 설계한다. 4절에서는 전후 스탠드의 상태가 변하더라도 현재 스탠드는 영향을 받지 않도록 하는 스탠드사이의 비간섭 제어기를 설계하고, 더불어 각 스탠드의 입측 판두께가 변하더라도 스탠드의 출력에는 영향을 주지않는 Feedforward 제어기를 설계한다. 5절에서는 모의실험을 통하여 비간섭 제어기의 성능을 확인하고 6절에서는 본 논문의 결론과 향후 과제를 제시하도록 한다.

2. 연속 냉간압연 시스템의 선형 모델링

압연공정을 나타내는 수학모델식으로는 압연하중 예측식, 선진율식 그리고 장력식 등이 있다.

i번째 스탠드에서 압연소재의 탄성변형을 무시한 압연하중(P_i), 그리고 작업롤과 출측소재의 속도 차이에 기인하는 선진율(f_i)은 아래와 같이 스탠드의 입출측 판두께(H_i, h_i)와 스탠드 전후방의 단위장력(t_{bi}, t_{fi}) 뿐만 아니라 압연소재의 항복응력(s_{bi}, s_{fi})과 평균변형저항(k_{mi}), 그리고 마찰계수(μ_i) 등의 항으로 나타낼 수 있다. [2], [3].

$$P_i = P(H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}, k_{mi}, \mu_i) \quad (1)$$

$$f_i = f(H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}, s_{bi}, s_{fi}, \mu_i) \quad (2)$$

압연소재의 항복응력, 평균변형저항 그리고 마찰계수는 물리적인 측정이 불가능하지만 최초스탠드의 입측판두께(H_{0i})와 각 스탠드의 입출측 판두께 및 롤속도(V_{ri})를 통해 예측할 수 있으므로, 위의 식 (1)과 (2)에 예측식을 대입하면 압연하중과 선진율은 $H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}, H_{0i}, V_{ri}$의 6개의 항으로 나타낼 수 있다 [3], [4].

$$P_i \approx \tilde{P}(H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}, H_{0i}, V_{ri}) \quad (3)$$

$$f_i \approx \tilde{f}(H_i, h_i, t_{bi}, t_{fi}, H_{0i}, V_{ri}) \quad (4)$$

또한 이전 스탠드의 출측판속도(V_{oi-1})와 현재 스탠드의 입측판속도(V_{ei})의 차이에 의해 변하는 단위후방장력은 다음과 같다.

$$\frac{dt_{bi}}{dt} = \frac{E_i}{L_i}(V_{ei} - V_{oi-1}) \quad (5)$$

여기서 L_i는 스탠드 사이의 거리이고, E_i는 압연소재의 탄성계수이다. 선진율의 정의와 Mass Flow식을 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있으므로 [3],

$$\frac{dt_{bi}}{dt} = \frac{E_i}{L_i}\left\{\frac{h_i}{H_i}(1+f_i)V_{ri} - (1+f_{i-1})V_{ri-1}\right\} \quad (6)$$

식 (4)를 위식에 대입하면 다음과 같이 전후 스탠드의 12개 항으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dt_{bi}}{dt} \approx \tilde{T}(H_i, H_{i-1}, h_i, h_{i-1}, t_{bi}, t_{bi-1}, t_{fi}, t_{fi-1}, V_{ri}, V_{ri-1}, H_{0i}, H_{0i-1}) \quad (7)$$

이들 식을 선형화하는 것은 특정 동작점으로부터 미소변화량에 대한 관계를 기술하는 것이므로 1차 Taylor 전개를 사용하면 쉽게 구할 수 있다.

압연 스탠드의 구동부인 롤갭(ΔS_i)과 롤속도(ΔV_{ri})의 전달함수($G_S^i(s), G_V^i(s)$)는 아래와 같이 각각의 명령($\Delta S_{pi}, \Delta V_{rpi}$)에 대한 1차식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} G_S^i(s) &= \frac{\Delta S_i}{\Delta S_{pi}} = \frac{1}{T_s^i s+1} \\ G_V^i(s) &= \frac{\Delta V_{ri}}{\Delta V_{rpi}} = \frac{1}{T_v^i s+1} \end{aligned} \quad (8)$$