

열간 사상압연 공정의 장력제어

이동욱*(부산대 대학원 지능기계공학과), 안병준(부산대 대학원 지능기계공학과),
배종일(부경대 전기공학과), 이만형(부산대 기계공학부)

Tension Control of Hot Strip Finishing Mill

D. W. Lee, B. J. Ahn (Mechanical and Intelligent. Eng. Dept. PNU),
J. I. Bae(Electrical Eng. Dept, PNU), M. H. Lee (Mechanical Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

We describe the looper controller design for a hot strip mill. The looper is to control the strip tension which influences on the width of the strip. It is very important to control the looper control of the hot strip mill, but difficult to control the looper, because there exists on mutual interaction among strip gauge, looper angle, and strip tension.

In this paper, we present the modeling for the hot strip finishing mill to control the tension of the strip and suggest a cross control method. The cross control is a very simple method that allows non-interacting control.

Key Words: Hot Strip Finishing Mill, Looper System, Tension Control, Cross Control

1. 서론

열연강판의 다양한 품질관리 항목 중 폭 치수 관리는 수요자의 요구사항과 직결되는 항목이므로 중요성이 매우 크다. 일정한 폭 정밀도는 스트립 트리밍(Trimming)량을 감소시켜 열연 실수를 향상에 크게 기여하게 되므로 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 열간 압연 과정에서 판 폭은 최종적으로 몇 개(6~7 개)의 압하 롤(work roll)로 이루어진 사상압연기(Finishing Mill)에서 수행된다. 이러한 과정에서 두 압하 롤(work roll)의 속도 불균형이 발생하면 순간적으로 과도한 장력이 발생하게 되며, 결국 판 폭 불량 발생하게 된다. 열간 압연에서는 과도한 장력 발생을 막기 위해 두 개의 압하 롤(work roll) 사이에 루퍼 시스템을 도입하여 적절한 장력을 유지하도록 하고 있으나, 장력과 루퍼의 각도가 서로 간섭되어 있어 그 제어가 어렵다. 이러한 이유로 열간 압연에서의 폭 제어를 위한 많은 연구가 행해지고 있다. 하지만 대부분의 경우 하나의 스탠드(두 개의 압하 롤과 하나의 루퍼)에 대한 내용만을 다루고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 효과적인 제어를 위해 사상압연 전 스탠드에 대한 구성과 단일 스탠드에서 얻어진 제어기를 전체 스탠드에 적용시키기 위한 고려 사항 및 그 결과에 대해 다루었다.

2. 본론

2.1 사상압연 시스템의 구성 및 모델링

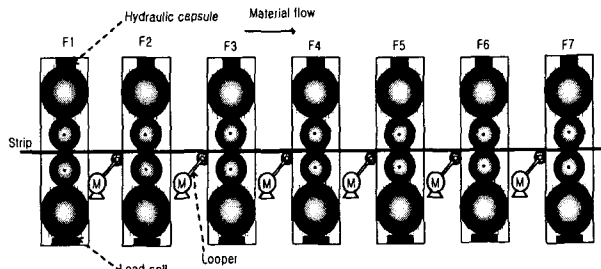


Fig.1 Finishing Mill Process

Fig. 1 과 같이 열간 압연의 사상압연과정(Finishing Mill)은 7 개의 work roll 과 각 work roll 사이의 장력을 일정하게 유지하며 판(strip)의 통관성을 원활하게 보조해주는 루퍼(looper)로 이루어져 있다. 본 논문에서는 F(i) 와 F(i+1) work roll 그 사이의 루퍼를 합쳐서 i-th 스탠드라고 하겠다.

이러한 사상압연과정을 제어하기 위해 우선적으로 적절한 모델링이 필요하다. 실제 전체 사상압연과정을 하나의 모델링으로 구현하기에는 상당한 무리가 있다. 따라서 Fig. 2 와 같이 단일 스탠드에 대한 모델링을 이용하여 각 스탠드의 적절한 변수를 사용하여 전체 시스템을 구성하도록 하겠다.

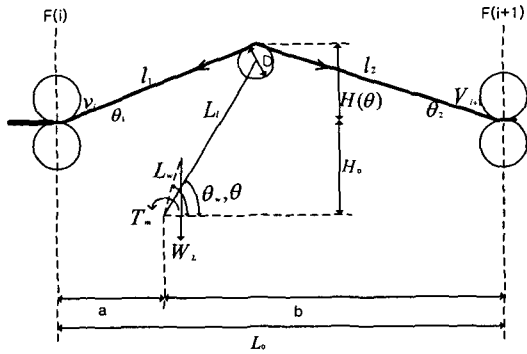


Fig.2 i-th stand geometry

- H_0 : Height from looper motor shaft to stand shaft,
- V_0 : Speed of work roll,
- L_1 : looper arm length,
- L_0 : Length between stands,
- a : Length from i-th stand to looper shaft,
- b : Length from (i+1)-th to looper shaft,
- W_L : Total mass of looper,
- L_w : Length to looper weight center,
- θ_w : Interval angle of weight center.
- T_{LW} : Torque by looper arm and roll

Fig.2와 같은 기하학적 구조와 각 부하에 관한 식을 이용하여 비선형운동방정식을 구할 수 있다. 이러한 비선형운동방정식을 선형화를 시키게 되면 i-th 스탠드에 대한 선형운동방정식을 얻을 수 있다.

2.2 스탠드 간의 결합

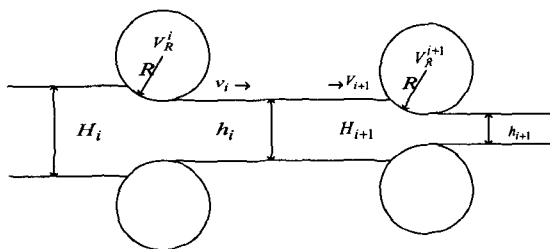


Fig. 3 Rolling phenomenon of work roll

- H_i : Inlet strip thickness at i-th stand,
- h_i : Outlet strip thickness at i-th stand,
- R : Radius of work roll, V_R^i : i-th work roll speed,
- V_i : Inlet strip speed at i-th stand,
- v_i : Outlet strip speed at i-th stand,

Fig. 3 을 보면 i-th 스탠드에서 발생하는 장력은 i-th work roll 과 (i+1)-th work roll 의 속도차에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 i-th stand

에 발생하는 장력으로 인해 strip 의 속도는 work roll 의 선속도와 차이를 보인다.

따라서 $v_i = (1 + f_i) V_R^i$ 이 되며, f_i 는 i-th 스탠드의 선진율(forward slip ratio)이라고 정의 한다. 동일한 원리로 $V_{i+1} = (1 - \Phi_{i+1}) V_R^{i+1}$ 이 된다. Φ_i 는 i-th 스탠드의 후진율(backward slip ratio)로 정의 한다. 또한 체적속도 일정 법칙(Mass-flow Constant Law)에 의해 다음 식 $H_{i+1} V_{i+1} = h_{i+1} v_{i+1}$ 이 성립한다.

따라서 i-th 스탠드의 속도차($v_e = v_i - V_{i+1}$)는 다음 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\left[(1 + f_i) - \frac{h_{i+1}}{H_{i+1}} (1 + f_{i+1}) \frac{V_R^{i+1}}{V_R^i} \right] V_R^i \quad (1)$$

사상압연 과정에서 각 스탠드에 대한 두께와 work roll 의 속도는 Set-up 과정에서 설정되는 값이므로 각 스탠드의 선진율을 구하는 것만으로 i-th 스탠드의 속도차를 구할 수 있다. 하지만 실제 열간 사상압연과정에서 선진율과 후진율은 Bland & Ford 근사식으로부터 변형된 작업 롤의 반경, 압하율, strip 항복응력, 마찰계수, 온도, 등의 함수로 매우 복잡하며, 비선형적임을 알 수 있다. 이러한 이유로 실제 조업 현장에서 실험적으로 얻어진 근사 값을 사용하도록 하겠다.

2.3 i-th 스탠드의 변수 값

2.2 절의 속도차를 구한 식(1)로부터 전체 스탠드의 결합을 위해 i-th 스탠드에서 work roll 속도가 (i-1)-th 스탠드로 피드백 되어야 함을 알 수 있다.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
H_i	32.8	16.3	9.35	5.96	4.2	3.13	2.53
h_i	16.3	9.35	5.96	4.2	3.13	2.53	2.27
t_b	0	4	4.9	6.1	7.1	8.6	10
t_f	4	4.9	6.1	7.1	8.6	10	0
루퍼 각도	20	19	18	18	18	17	
V_R^i	5500	6000	6500	7000	7500	8072	10000
f_i	3	3	3	8	8	8	8

Table. 1 The value of parameter of i-th stand

H_i, h_i : mm, t_b, t_f : N/mm², 루퍼 각도: degree
 V_R^i : mm/s, f_i : V_R^i 에 대한 %

Table 1 과 같이 각 스탠드에 대한 값들을 선형 운동방정식에 대입하게 되면 각 스탠드에 대한 상태방정식을 얻을 수 있다. 이를 이용하여 각 스탠드 마다 적절한 기준에 대해 만족한 성능을 보일 수 있는 제어기를 설계한다. 이렇게 설계된 각 스탠드를 연결하여 하나의 사상압연 과정을 모델링 한다.

3. 시뮬레이션

3.1 Conventional PI 제어

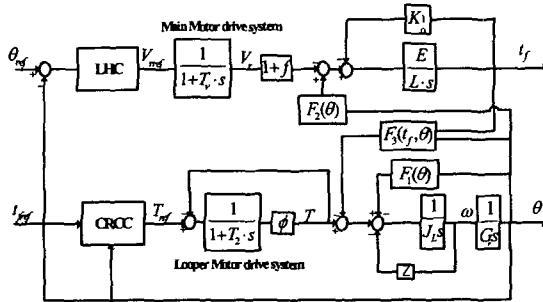


Fig. 4 Block diagram of Conventional PI Control of i-th Stand

Fig. 4 와 같은 block diagram 으로 선형화 된 i-th stand 에 각 stand 에 맞는 변수값을 대입한 후 적절한 PI 제어게인을 선정한다. 선형화 된 모델에 대한 결과는 생략하록 하겠다.

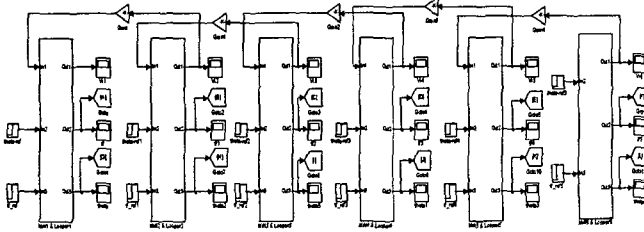


Fig. 5 Block diagram of Hot Strip Finishing Mill

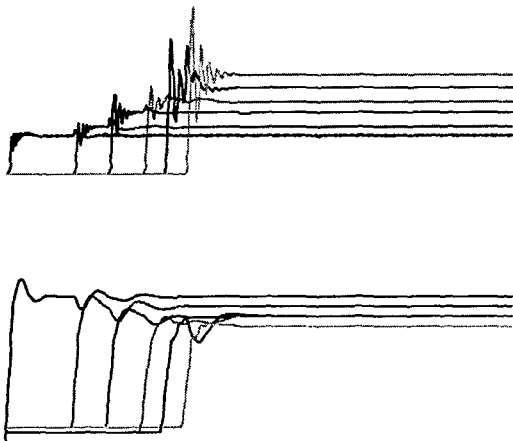


Fig. 6 Simulation result of PI Control

Fig.4 의 block diagram 으로부터 얻은 선형 계인을 이용하여 Fig. 5 와 같이 구성된 전체 사상압연시스템의 비선형 모델에 대입하여 얻은 결과가 Fig. 6 과 같이 나타난다. Fig. 6 에서 strip 이동에 소요되는 시간에 따라 1 번 스탠드부터 순서대로 결과가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그 결과를 보면 선형 모델의 결과 보다 오버슈트량이 모든 스탠드에서 크게 증가 했음을 알 수 있다. 따라서 strip 의 폭 불량도 strip 의 선단부가 i-th stand 에서 (i+1)-th work roll 에 물리는 순간 과장력이 발생하여 일어남을 알 수 있다. 결국 우수한 품질의 열연 강판을 얻기 위해서는 각 스탠드의 초기 시간에 발생하는 오버슈트량을 줄여야 한다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 매우 간단한 이론으로 장력과 루퍼 각도의 비간섭을 통한 간단한 제어를 구현하고자 다음 절의 Cross 제어를 적용하여 보았다.

3.1 Conventional Cross 제어

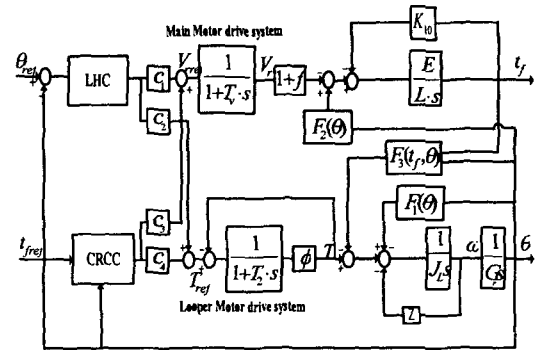


Fig. 7 Block diagram of Conventional Cross Control of i-th Stand

Fig. 7 의 block diagram 으로부터 식(2)와 같은 전달함수 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t_f \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref} \\ T_{ref} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$V_{ref} = C_1 \cdot V_{LHC} + C_3 \cdot T_{crcc}$, $T_{ref} = C_2 \cdot V_{LHC} + C_4 \cdot T_{crcc}$ 이 성립하므로 식(2)는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} t_f \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 & C_3 \\ C_2 & C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{LHC} \\ T_{CRCC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

cross 제어는 식(3)의 두 행렬의 곱에 의해 얻어지는 새로운 전달행렬을 이용하여 두 제어입력에 의한 간섭을 최소화 할 수 있는 gain $C_i (i=1 \sim 4)$ 를 선정하는 문제이다. 문제를 간단히 하기 위하여 C_1, C_4 는 1 의 값으로 선정하겠다. C_2 와 C_3 를 구하게 되면 주파수에 관한 함수로 나타나게 되며, 이를 간단한 상수로 하기 위하여 최종치 정리를 이용하여 정상상태에서의 각각의 gain 을 구하였다.

이러한 방법으로 상수화 하는 경우 처음 의도하였던 각 스탠드의 오버슈트 감소에 크게 영향을 주지 못 할지도 모른다는 우려가 있었으나-정상상태에 대한 cross gain 이므로-, 다음의 Fig. 8 결과를 보면 기대 이상의 효과가 있음을 알 수 있다.

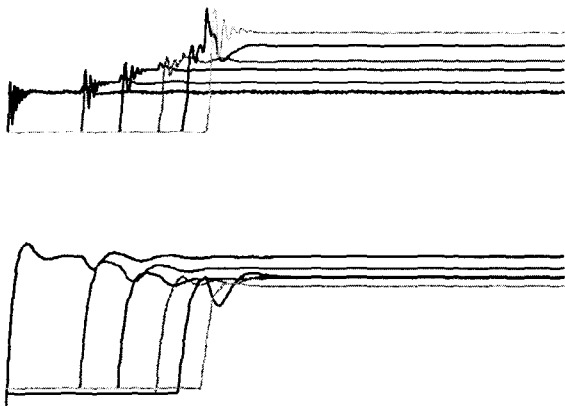


Fig. 8 Simulation result of Cross Control

첫번째 스탠드를 제외한 모든 스탠드의 오버슈트량이 큰 폭으로 감소하였다. 반면에 루퍼 각도의 응답은 큰 변화를 보이지 않는다. 이는 cross gain 에 의해 루퍼각도와 장력의 간섭이 현저히 줄어들게 된 결과로 보인다. 이상의 결과로 볼 때 사상압연 과정 전체를 하나의 식으로 유도하는 것에 비해 단일 스탠드에 대한 각각의 식을 연결하여 모델링하는 방법이 매우 유용하며, 단일 스탠드에 대한 결과도 직접 적용이 가능함을 알 수 있다.

3. 결론

3.1 시뮬레이션 결과

종전의 단일 스탠드에 대한 선형 상태방정식을 이용하여 각 스탠드에 대한 특성을 반영한 열간 압연 공정의 사상압연과정을 시뮬레이션 해 보았다.

선형 시스템으로 시뮬레이션 한 결과를 바탕으로 비선형 시스템으로 시뮬레이션 한 결과를 고찰하였다. 후미 스탠드로 갈수록 강관의 두께가 얇아지게 되므로 작은 work roll 의 속도 차이에도 큰 장력의 변화를 보임을 알 수 있으며, 이로 인해 폭 불량이 발생하게 되는 것으로 생각된다. 주파수 영역에서 구한 cross gain 을 이용한 비간섭 제어의 결과는 단순히 PI 제어를 한 경우 보다 오버슈트가 많이 줄어 드는 결과를 보였다. 더욱이 장력의 변

화가 심한 후미 스탠드에서 많은 감소를 보여 주었다.

3.2 향후 과제

cross gain 을 구하는 과정에서 얻어진 C_2 와 C_3 가 주파수 함수였으므로, cross gain 을 상수화 하지 않고 원하는 특정 주파수 응답을 가지는 형태로 시뮬레이션을 해 보아야 할 것 같다. 또한 많은 비선형성과 불확실성을 가지는 열간압연의 문제점을 보완 할 수 있는 강인 제어기의 설계가 필요 할 것이다. 이미 많은 논문에서 단일 스탠드에 대한 다양한 형태의 제어가 설계 되어 있으므로 이를 전체 사상압연과정으로 적용시키는 부분에 대한 연구가 계속 되어야 할 것이다. 또한 Set-up 과정, 두께제어부와 통합하여 완전한 사상압연공정의 시뮬레이션이 가능하도록 할 것이다.

참고문헌

1. G. Hearn, M. R. Katebi, and M. J. Grimble, "Robust control of a hot strip mill looper," IFAC 13th Triennial World Congress, pp. 445-450, 1996.
2. M. Okada, Y. Iwasaki, K. Murayama, A. Urano, A. Kawano, H. Shiomi, "Optimal control of looper in hot strip mill", Trans. Inst. Elec.Eng.Japan, 1988
3. J. C. Price, "The hot strip mill looper system," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, pp.556-562, 1973.
4. G. Hearn, M. J. Grimble, "Multivariable Control of a Hot Strip Finishing Mill, Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico, pp. 3775-3779, June 1997.
5. 박철재, 최승갑, 박병현, 이덕만, "열연공정에서 루퍼 안정화를 위한연구," proceedings of the 13th KACC, pp. 1663-1666, October 1998.
6. 박철재, 최승갑, "열연공정에서 루퍼 안정화를 위한연구(II)," Proceedings of the 14th KACC, pp. A89-A92, October 1999.
7. Masanoti Shioya, Naohatu Yoshitani, Takatsugu Ueyama, "Noninteracting Control with Disturbance Compensation and its Application to Tension-Looper Control for Hot Strip Mill," IEEE, pp. 229-234, 1995