

열간 압연공정의 선단부 통판성 안정화 제어

Mass-flow Stabilization Control of a Strip Head Part in Hot Rolling Process

황 이 철*, 박 철 재, 백 운 보
(I-Cheol Hwang, Cheol-Jae Park, and Woon-Bo Baek)

Abstract : This paper studies on the new control algorithm for the mass-flow stabilization in strip head part of a hot strip mill. A new strip tension model in the strip head part is derived using the current deviation of two neighboring stands. The current deviation means a difference between a measured current and a lock-on current, where the lock-on current is set up when a strip tension or a looper angle reaches each target value or time is about 0.4sec, respectively. On the basis of the tension calculation model, a mill velocity of a backward stand is controlled to stabilize a strip mass-flow by PI control algorithm. Therefore, the mass-flow control for strip head part is executed from a metal-in time into a forward stand till the looper works normally. It is known by the results of a computer simulation and an experiment that the proposed control algorithm is very effective in stabilizing the mass flow of the strip head part.

Keywords : hot strip mill, looper-less control, looper-tension control, mass-flow stabilization control, strip head part

I. 서론

열간 사상압연 공정에서 각 스탠드 사이의 스트립에 과도한 루프(over-loop)가 발생한다든지 또는 과도한 장력(over-tension)이 발생하는 경우에는 스트립의 통판성이 매우 불안정하게 됨은 물론 제품의 치수 품질에 커다란 악영향을 미치게 된다. 즉 과도한 루프 발생은 스트립의 원활한 흐름을 막아 조업이 중단되는 사태를 야기시켜 생산량에 막대한 손실을 초래하고, 과도 장력은 두께, 폭, 형상 등과 같은 치수 품질에 매우 나쁜 영향을 미친다. 따라서 압연공정에서는 스트립의 통판성 안정화를 확보하는 것이 무엇보다도 중요한 문제가 된다.

실제 열간 사상압연 공정에서는 이러한 통판성 불안정 현상을 극복하기 위하여, 각 스탠드 사이에 루퍼(looper)를 설치하여 스트립 장력을 제어하고 있다. 그러나 루퍼는 스트립이 전방 스탠드에 치입(metal-in)된 후 약 0.7초 이후부터 정상적으로 동작하기 때문에, 치입 후 약 0.7초까지의 스트립 선단부에서는 통판성 안정화 역할을 수행할 수 없게 된다. 그래서 국내외 제철소에서는 스트립 선단부의 통판성 안정화를 위한 스트립 장력 제어에 많은 노력을 기울이고 있다.

열간 사상압연 공정에서 선단부 통판성 안정화를 위한 기존의 연구는 주로 루퍼를 사용하지 않는 루퍼리스(looper-less) 장력제어에 초점을 맞추고 있다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. A. Oishi[1] 등은 루퍼리스 시스템에서 장력 검출의 원리를 이론적으로 명확히

제안하였고, 이를 기초로 루퍼리스 PI 장력 제어를 제안하였다. Y. Anbe[2] 등은 FTC(Free Tension Control)를 이용한 루퍼리스 장력제어 알고리즘을 제안하였다. S. Tanimoto[3] 등은 스트립 장력 추정기법을 개발하고, 이를 기초로 PID 제어를 설계하였다. G. Li[4] 등은 루퍼리스 압연 프로세서에서 각 스탠드 간의 상호작용을 비간섭화하여 이를 기초로 피지 제어기법을 제안하였다. 그리고 본 논문의 저자[5]는 스트립 폭 불량을 최소화하기 위하여 선단부에서의 신 장력 연산모델을 제안하고, 이를 기초로 PI 제어시스템을 설계하였다.

위의 기존 논문들의 주요 연구 내용은 제어 알고리즘 설계가 아니고, 대부분 선단부에서의 장력 연산 모델 도출에 초점을 맞추고 있다. 왜냐하면 열간 사상압연 공정에서는 장력 측정센서 장착이 어려워 장력 연산모델을 통해 통판성 안정화 제어가 이루어지고 있기 때문이다. 따라서 장력 연산의 모델 정확도가 제어 시스템 성능을 좌우하게 된다. 그런데 기존 결과 문헌[1-4]에서는 양단 스탠드 가운데 후방 스탠드의 밀 모터 전류만을 사용하여 장력을 연산하고 있어, 신뢰성 확보가 매우 어렵다는 것이 잘 알려져 있다. 그래서 대부분의 루퍼리스 제어 알고리즘은 실제 압연공정에 적용되지 못하고 조업자의 수동개입으로 선단부 통판성 제어를 수행하고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 문헌[5]에서 제안한 즉 양단 스탠드의 밀 모터 전류를 모두 사용한 장력 연산모델을 이용하여 선단부 통판성 안정화 제어에 관한 연구를 목표로 한다. 이를 위하여 먼저 선단부 통판성 현황을 분석한 후, 분석 결과를 기초로 새로운 장력 연산모델을 도출한다. 결과적으로 제안된 제어기법이 선단부에서의 장력 변동을 줄여 조업자의 수동 개입을 줄일 수 있음을 보인다.

본 논문에서 수행하고자 하는 주요 연구 내용 및 구성은 다음과 같다. 제 II 장에서는 선단부 통판성 현황을 분석,

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 10. 22, 채택확정 : 2008. 12. 15.

황이철, 백운보 : 동의대학교 메카트로닉스공학과

(ichwang@deu.ac.kr/wbbaek@deu.ac.kr)

박철재 : 대구대학교 자동차산업기계공학부(cjpark@daegu.ac.kr)

※ 이 논문은 2007년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2007AA176).

고찰하고, 이를 기초로 제 III 장에서는 선단부 신 장력 연산모델 및 제어 시스템을 구성한다. 제 IV 장에서는 컴퓨터 모의실험 결과와 현장 테스트를 통하여 제안된 알고리즘의 유용성을 검증한 후, 제 V 장에서는 결론 및 향후 연구 과제를 간략히 기술한다.

II. 선단부 통판성 현황 분석

이 절에서는 열간 사상압연 공정에서의 스트립 선단부 통판성 현황을 분석하기로 한다. 열간 사상압연 시스템의 개략도는 그림 1과 같으며, 이는 7개의 스탠드(F(1-7))와 각 스탠드 사이에 설치된 6개의 루퍼(LP1-6)로 구성되어 있다.

그림 1에서 스트립 선단부(top(or head) part)란 스트립이 제 1스탠드를 시작으로 제 7스탠드까지 연속적으로 압연되는 과정에서, 스트립이 각 스탠드의 전방 스탠드에 치입된 후 루퍼가 정상적으로 동작하기까지 압연되는 스트립 부분에 해당된다. 시간적으로는 각 스탠드에 치입된 후부터 약 0.7초 정도 소요된다. 그림 2는 하나의 압연 코일에서 선단부를 나타내고 있다. 참고로 스트립 중앙부는 루퍼가 정상적으로 동작하는 부분이며, 미단부는 루퍼를 원래의 위치로 복귀하는 부분에 해당된다.

먼저 전체 시스템의 선단부 통판성 현황을 분석하기로 한다. 여기서 분석 대상 시스템은 (주)POSCO 광양 제 2열연 시스템(K2H)이며, 분석 코일 수는 약 8,255코일이다.

이에 대한 통판성 분석 현황을 나타내면 그림 3과 같다.

그림 3은 스트립이 전방 스탠드에 치입(metal-in)된 후 약 0.5초에서 3초까지 스트립의 통판성 현황을 분석한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 과대 루프는 루퍼 각도(θ)가 설정치보다 10도 이상 높은 경우를, 과대 장력은 장력이 설정치보다 낮은 경우를 나타내며, 그리고 루퍼 각도가 설정치보다 ± 10 도 이내에 있는 경우를 change부로 정의하고 있다. 특히 과 장력인 경우는 루퍼 각도가 설정치보다 낮은 각도를 유지하게 된다. 그리고 루퍼 각도를 기준으로 한 이유는 장력 측정이 어렵고, 또한 선단부에서의 장력 연산 모델의 정도가 매우 낮기 때문이다.

그림에서 전방 스탠드일수록 과대 루프 발생율이 높고, 후방 스탠드로 갈수록 과대 장력 발생율이 높음을 알 수

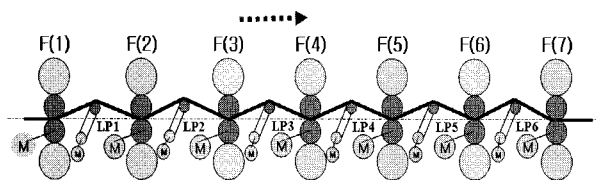


그림 1. 열간 사상압연 시스템의 기하학적 개략도.

Fig. 1. A geometric diagram of a hot strip mill.

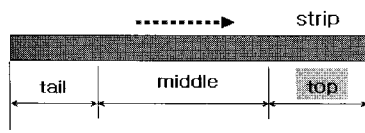


그림 2. 스트립 선단부, 중앙부, 미단부.

Fig. 2. Top, middle, tail parts of a strip.

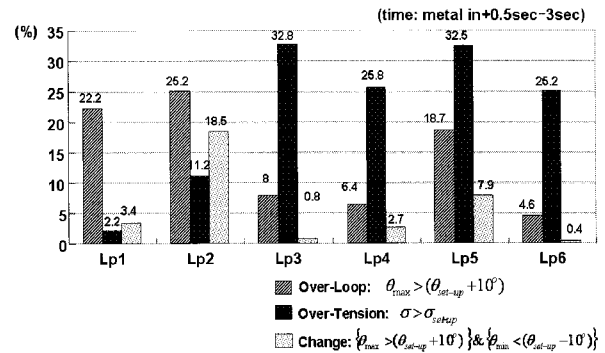


그림 3. K2H 선단부 통판성 현황.

Fig. 3. Mass-flow state of the strip top part for K2H.

있다. 이 결과로부터 압연 코일의 두께가 두꺼울수록 과대 루프 발생율이 높고, 반면에 얇을수록 과대 장력 발생율이 높음을 예측할 수 있다. 그런데 제 5스탠드와 6스탠드 사이에는 과대 루프와 과대 장력 발생율이 모두 높게 나타나는 현상을 보이고 있다. 이는 실제 압연공정에서는 통판성 제어뿐만 아니라 두께, 폭, 형상제어 또는 조업자 수동개입 등 다양한 제어가 동시에 이루어지는데 이러한 제어들이 주로 제 5스탠드와 6스탠드 사이에 집중적으로 가해지기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 위와 같은 선단부 불안정 현상을 해결하기 위하여 (i) 실제 열간 사상압연 공정에서는 각종 설정치를 결정하는 제어장치인 FSU(Finishing mill Set-Up)를 통하여 설정치를 개선, (ii) 스트립 치입 시 발생하는 루프량을 줄이는 방향으로 메인 밀 모터의 속도를 증가시키는 임팩트 드롭(impact drop) 보상 혹은 조업자 수동개입을 수행, 그리고 (iii) 루퍼리스 제어를 통하여 통판성 안정화를 기하고 있다. 그러나 루퍼리스 제어는 스트립 장력 연산모델의 신뢰성 저하로 현재 거의 사용되지 않고, 대신에 임팩트 드롭이나 조업자의 수동개입으로 통판성 안정화를 기하고 있다. 그러나 조업자 수동 개입에 의한 제어는 매우 비효율적인 방법이면서, 오히려 그림 4와 같이 통판성 불안정을 확대시킬 수 있는 가능성이 크다는 것이 일반적인 견해이다. 따라서 조업자 수동 개입을 수행하지 않고서도 통판성 안정화를 향상시킬 수 있는 신 제어 알고리즘 개발이 필요함을 알 수 있다.

그래서 이 논문에서는 FSU 설정치와 임팩트 드롭에 대해서는 직접적으로 연구를 수행하지 않고, 단지 조업자의 수동개입을 줄이면서 통판성 안정화 제어 알고리즘 도출에 초점을 맞추기로 한다. 참고로 실제 압연 공정에서 조업자 수동개입은 주로 선단부에서 이루어지고 있으며, 그리고 수동 개입율이 약 80% 이상인 것으로 알려져 있다.

III. 선단부 장력 연산모델

실제 압연 공정에서 스트립 장력은 로드셀을 활용하여 측정할 수 있지만, 열악한 작업 환경과 설치 공간 부족으로 이용하기가 매우 어려운 상황이다. 그래서 본 논문에서는 이론적으로 장력을 연산하기로 하며, 이는 이미 서론에서 언급한 바와 같이 인접 양단 스탠드의 전류차를 이용하기로 한다. 먼저 현장 실측 데이터를 이용하여 통판성과 양단

스탠드 전류차와의 상관관계를 분석한 후, 본 논문에서 제안하는 장력 연산모델의 타당성을 확인한다. 그리고 분석결과에 근거하여 선단부에서의 장력 연산모델을 기술하기로 한다.

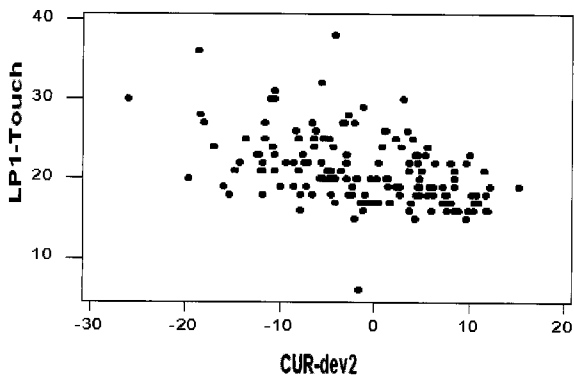
1. 장력과 양단 스탠드 전류 차와의 상관 관계

이 절에서는 제안하고자 하는 선단부 장력 연산모델의 타당성을 보이기 위하여 인접 양단 스탠드 전류 차와 스탠드 간 장력과의 상관 관계를 분석한다. 단, 실제 압연 공정에서 선단부 장력을 측정할 수 없어, 장력 대신에 스탠드 간에 설치되어 있는 루퍼의 각도를 통하여 장력을 예측하기로 한다. 왜냐하면, 각 스탠드 간 루퍼 각도가 설정 각도 ($18^{\circ} \sim 20^{\circ}$)보다 낮으면 과대 장력이 발생되고, 반대로 루퍼 각도가 설정 각도보다 높으면 과대 루퍼가 발생됨을 의미하기 때문이다.

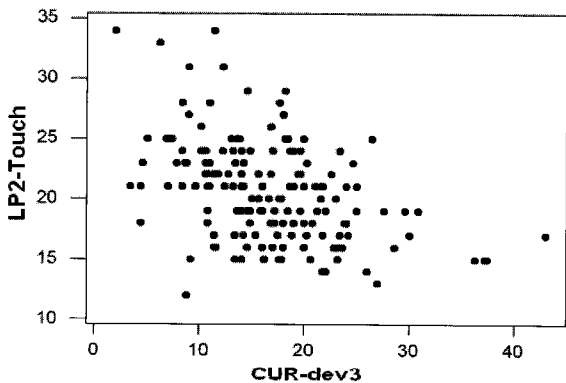
분석대상 전체 코일 수는 약 2,285코일이며, 이 가운데 동일 층별 조건 즉 두께: 3.2-4t, 폭: 900-1050mm, 강종: 일 반강인 158 코일을 대상으로 한다.

그림 4(a)-(f)는 각 스탠드 간 전류 차와 루퍼 각도와의 상관 관계를 나타내고 있다. 각 그림에서 횡축과 종축의 라벨은 각각 다음과 같이 정의된다.

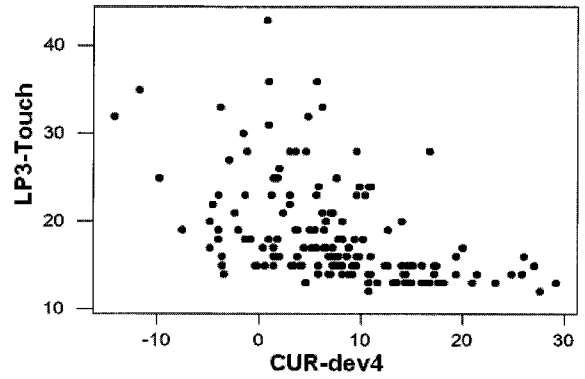
- 횡축(CUR_dev_i): (i-1)스탠드와 (i)스탠드의 밀 모터 전류를 5 point 평균 처리하여 얻어진 양단 스탠드 전류 편차 ((current of (i-1)th stand)-(current of (i)th stand)).
- 종축(LP_i-Touch): (i) 스탠드와 (i+1) 스탠드 간의 스트립과 루퍼가 접촉하는 시점에서의 루퍼 각도.



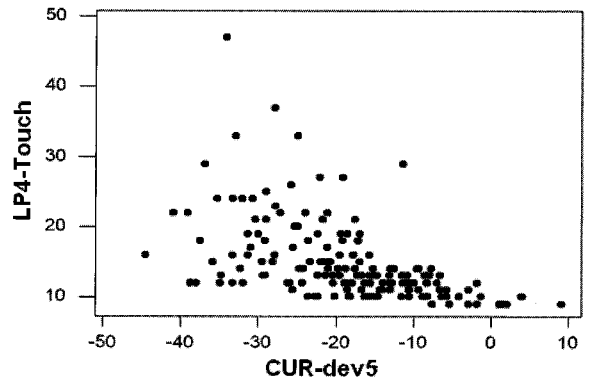
(a) 제 1, 2스탠드.



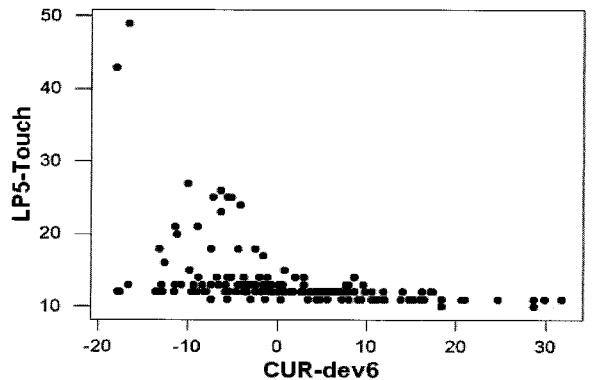
(b) 제 2, 3스탠드.



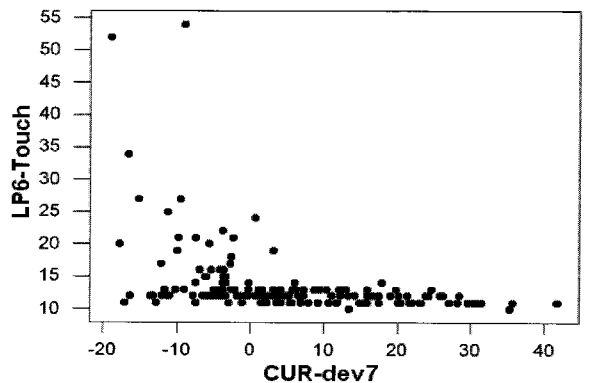
(c) 제 3, 4스탠드.



(d) 제 4, 5스탠드.



(e) 제 5, 6스탠드.



(f) 제 6, 7스탠드.

그림 4. 양단 스탠드 간 전류 차에 따른 루퍼각도.

Fig. 4. Looper angle according to a current difference for each stand.

표 1. 양단 스탠드 밀 모터 전류차와 선단부 루퍼각도와 의 상관관계.

Table 1. Correlation between a current difference and a looper angle for each stand.

	1-2 스탠드	2-3 스탠드	3-4 스탠드	4-5 스탠드	5-6 스탠드	6-7 스탠드
Pearson correlation	-0.460	-0.435	-0.491	-0.529	-0.425	-0.387

여기서 양단 스탠드 전류 차는 전방 밀 모터의 전류에서 후방 밀 모터의 전류를 뺀 값으로 정의한다.

위의 각 데이터들에 대한 상관관계를 정량적으로 나타내면 표 1과 같다.

그림 4와 표 1에서와 같이 높은 음의 상관 관계를 가짐을 알 수 있는데, 이는 양단 스탠드의 전류차가 크면 클수록 과대 루프 또는 과 장력 발생 빈도가 높음을 알 수 있다. 또한 제 2장에서 기술한 바와 같이 전방 스탠드(제 1,2,3 스탠드)에서 과대 루프 발생 빈도가 높고, 후방 스탠드(제 4,5,6,7 스탠드)에서 과 장력 발생 빈도가 높음을 확인할 수 있다. 따라서 통관성 안정화 제어기 설계 시 피드백되는 각 스탠드간의 스트립 장력을 계산할 경우, 후방 스탠드만의 전류를 이용하는 기존의 알고리즘보다 양단 스탠드의 전류차를 고려하는 것이 보다 현실적임을 알 수 있다.

2. 스트립 장력 연산모델

이 절에서는 III 장 1절의 분석 결과에 기초하여 양단 스탠드 간의 스트립 장력 연산모델을 기술하기로 한다. 이에 대한 결과는 기존 문헌[5]에 상세히 기술되어 있으므로, 여기서는 구체적인 내용을 생략하고, 간략히 그 결과를 위주로 기술한다. 그림 5는 인접하는 각 스탠드의 역학관계를 도식적으로 나타낸 그림이다. 여기서 선단부에서는 스탠드 간 루퍼가 정상적으로 동작하지 않는 구간이므로 루퍼를 고려하지 않음에 주의하자.

그림 5에서 J, I, V 는 각각 밀 모터의 2차 관성모멘트, 전류, 전압, ω 는 밀 모터 회전 각 속도, T 는 스트립 장력, P 는 압연하중, G 는 압연 부하토크, R 은 롤 반경, l 은 토크 암(arm)이며, 각 첨자 'i'는 스탠드 번호를 나타낸다. 이때 인접하는 두 스탠드 간의 스트립 장력을 다음 식과 같이 나타낸다.

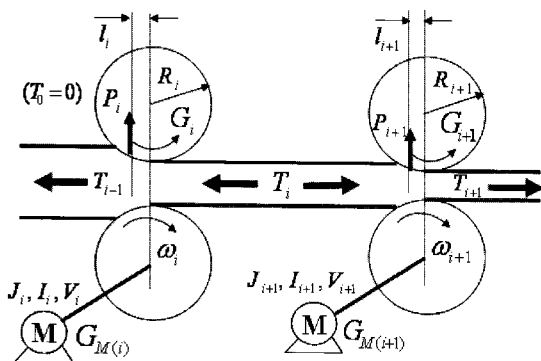


그림 5. 인접 두 스탠드 간의 역학 개념도.
Fig. 5. Configuration of two neighboring stands.

$$T_i = T_{i,ref} + \Delta T_i \quad (1)$$

여기서 $T_{i,ref}$ 는 장력 T_i 의 목표치이고, ΔT_i 는 양단 스탠드의 전류 차 변동에 의한 장력 섭동치로서 이들을 다음과 같이 양단 스탠드의 파라미터 변동의 함수로 나타낸다.

$$\Delta T_i = f\{(\Delta I_{i+1} - \Delta I_i), \Delta P_i, \Delta l_i, \dots\} \quad (2)$$

위의 식 (2)에서

$$\Delta I_{i+1} = I_{i+1} - I_{i+1,lock-on}, \Delta I_i = I_i - I_{i,lock-on}$$

이며, 여기서 $I_{i,lock-on}, I_{i+1,lock-on}$ 는 Lock-on 시의 (i), (i+1)번 스탠드의 전류를 나타내며, 이때 Lock-on 시점은 스트립이 전방 스탠드에 치입된 후 “스트립 단위장력이 목표치에 도달하는 시점($t = t_{\sigma_i = \sigma_{i,ref}}$), 또는 루퍼 각도가 설정치에 도달하는 시점($t = t_{\theta_i = \theta_{i,ref}}$), 또는 시점 ($t = 0.4sec$)” 가운데서 가장 빠른 시간으로 한다. 여기서 단위장력(unit tension) $\sigma_i = T_i/A$, A : 스트립 단면적으로 정의된다. 참고로 식 (2)을 구체적으로 나타내면 다음 식과 같이 주어진다.

$$\Delta T_i = \frac{1}{b_i} \left[l_i \Delta P_i - \left\{ C_{1i} \frac{(\Delta I_{i+1} - \Delta I_i) \Delta V_i}{\Delta \omega_i} + C_{2i} J_i \frac{d\omega_i}{dt} + a_i \Delta T_{i-1} \right\} \right] \quad (3)$$

여기서 C_{1i}, C_{2i} 는 압연 공정 조건에 따라 결정되는 상수 계수들이다. 그리고 위의 식들에 대한 구체적인 내용과 계산 알고리즘은 문헌 [5]를 참고하기 바란다. 참고로 기존 문헌 결과에서는 아래 식과 같이 한 스탠드(후방 스탠드)만의 전류를 이용하여 계산하고 있음에 주의하자.

$$T_i = \frac{l_i P_i - G_{M(i)} + a_i T_{i-1}}{b_i}, \quad T_0 = 0 \quad (4)$$

그리고 여기서는 제안된 장력 연산모델 식 (1)과 기존 장력 연산모델 식 (4)의 정도에 대한 비교를 수행하지 않기로 한다. 왜냐하면, 실제 압연 공정에서 선단부 장력을 측정하는 센서가 없어 정확한 장력값을 알 수 없기 때문이다. 그래서 이 논문에서는 선단부 통관성 제어 결과를 통하여 연산 모델의 유효성을 검증하기로 한다.

IV. 선단부 장력 제어기 설계

이 장에서는 제 III 장에서 도출한 스트립 장력 연산모델에 기초하여 선단부 통관성 안정화 제어기를 설계하기로 한다. 본 논문에서 제안한 제어시스템의 구조는 아래 그림 6과 같으며, 여기서 선단부 통관성 안정화 제어기의 제어입력은 $\delta v_{i,DTQ}$ 로서 이는 PI 제어 알고리즘으로부터 얻어진다. 즉 이를 연속시간역에서 나타내면 아래 식 (5)와 같다.

$$\delta v_{i,DTQ}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad e = \sigma_{i,ref} - \sigma_i \quad (5)$$

위의 식에서 $\delta v_{i,DTQ}$ 는 제어 보상량으로서 인접하는 두 스탠드 가운데 후방 스탠드인 (i)번째 스탠드의 밀 모터에

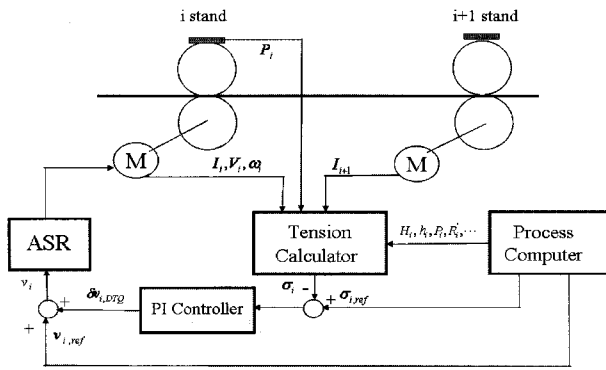


그림 6. 제어시스템 블록선도.
Fig. 6. Block diagram of a control system.

대한 속도 보상량을 나타내며, σ_i 는 식 (1)에서 주어지는 단위장력, $\sigma_{i,ref}$ 는 이에 대한 목표장력을 나타낸다. 그리고 각 PI 제어기인(K_p, K_i)들은 경험적으로 결정하였으며, 이에 대해서는 생략하기로 한다. 참고로 열간압연 공정에서 (i)번째 스탠드의 메인 롤 모터에 인가되는 제어입력은 다음 식 (6)과 같다.

$$v_i = v_{i,ref} + \delta v_{i,DTQ} \quad (6)$$

$$v_{i,ref} = SSRH \times MRH \times (1 + \delta v_{LP} + \delta v_{SCSV} + \delta v_{AGC} + \delta v_{OP} + \delta v_{ID}) \quad (7)$$

여기서 $SSRH, MRH$: SCC의 설정치, δv_{LP} : 루퍼 보상량, δv_{SCSV} : Successive 보상량, δv_{AGC} : AGC 보상량, δv_{OP} : 조업자 수동개입량, δv_{ID} : 임팩트 드롭 보상량을 각각 나타낸다. 그리고 제어입력은 그림 6에서와 같이 메인 밀 모터의 ASR(Auto Speed Regulator)에 의해서 구현된다.

V. 모의실험 및 현장 테스트 결과

1. 컴퓨터 모의실험 결과 및 고찰

컴퓨터 모의실험 대상 스탠드는 후방 스탠드인 제 6, 7번 스탠드로 하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

스트립 선단부에 과장력을 부가하기 위하여 스트립이 7번 스탠드 치입 후(0.75초) 약 0.6초 동안(0.75~1.35초) 6번 스탠드 메인 밀 모터의 속도를 감소시켰다. 이때의 스트립 장력 변동량과 6번 스탠드 밀 모터의 속도 보상량의 결과를 통해 본 논문에서 제안한 제어시스템의 유용성을 고찰하기로 한다. 단 여기서는 과대 루프가 발생하는 경우에 대해서는 모의실험을 수행할 수 없어 이에 대해서는 생략하기로 한다. 왜냐하면 과대 루프가 발생할 경우 스트립 장력이 음이 되기 때문이다. 그림 7은 선단부 장력 제어 결과를 나타내고 있고, 이때의 6번 스탠드 메인 밀 모터의 속도를 그림 8에서 나타내고 있다. 그림 7에서 최대 장력이 약 10% 정도 감소하고 있음을 알 수 있으며, 이때 6번 스탠드의 메인 밀 모터 속도 보상량은 과장력을 억제하는 방향으로 즉 6번 스탠드의 밀 모터 속도가 증가하는 방향으로 인가되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 제

표 2. 컴퓨터 시뮬레이션 시스템 조건.

Table 2. System conditions of a computer simulation.

	6번 스탠드	7번 스탠드
Thickness[mm]	3.13	2.53
Roll dia.[mm]	608	608
Strip speed[mpm]	484	598
Width[mm]	1240	1240
Looper angle[degree]	20	
Unit tension[kgf/mm ²]	0.86	

어 알고리즘을 통하여 선단부에서의 장력제어가 가능함을 확인할 수 있다. 단, 그림 7과 8에서 스트립이 치입된 후 0.7초가 지난 1.4초 후부터는 루퍼가 정상적으로 동작하는 구간이므로, 본 논문에서에서의 선단부 제어 결과와는 무관하다는 점에 주의하자.

2. 현장 테스트 결과 및 고찰

이 절에서는 본 논문에서 제안한 선단부 통판성 안정화

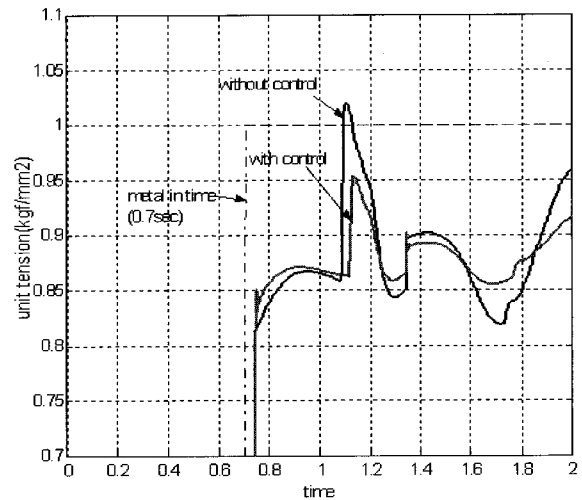


그림 7. 6-7번 스탠드 간 스트립 단위장력.

Fig. 7. Unit strip tension between 6-7th stands.

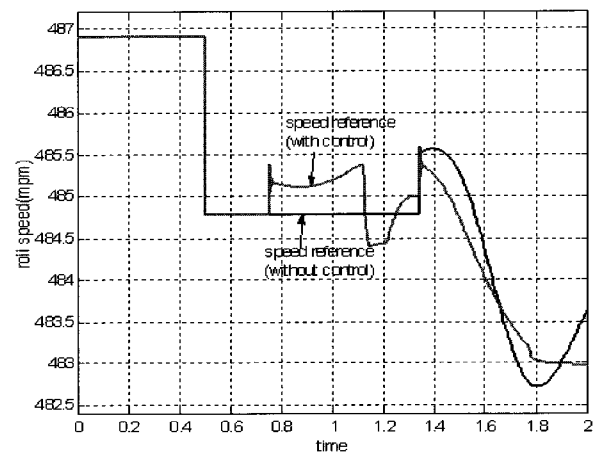


그림 8. 6번 스탠드 메인 밀 모터 속도.

Fig. 8. Main mill speed of the 6th stand.

제어 알고리즘을 POSCO(광양) 제 3열연 공정(K3H)에 적용한 테스트 결과를 나타낸다. 단, 여기서는 제어 알고리즘의 방향성만을 검토한다. 왜냐하면 제품의 품질이나 조업자의 수동개입율과 같은 정량적인 지표를 통한 결과 고찰은 많은 시간이 필요하기 때문이다.

테스트 시 사용한 코일은 후물재 및 박물재 각각 1 종류이며, 이에 대한 제원은 각각 아래와 같다.

(i) 후물재: 17t(두께) x 1530mm(폭)

(ii) 박물재 1.2t(두께) x 1241mm(폭)

그리고 후물재에서는 과대 루프가 발생된 경우이고, 박물재에는 과장력이 발생된 경우에 대한 결과를 나타낸다. 그림 9와 그림 10은 현장 실측 데이터를 각각 on-line 상의 모니터링 결과를 나타내고 있으며, 여기서 과대 루프 또는 과장력 발생 여부는 선단부에서의 루퍼 각도를 통해서 판단한다. 그림 9는 후물재에 대한 테스트 결과로서 최대 루퍼 각도(12.3도)가 목표치(20도)보다 작으므로 과장력이 발생한 경우이고, 그림 10은 박물재에 대한 결과로서 최대 루퍼 각도(25도)가 목표치(20도)보다 높으므로 과대 루프가 발생된 경우의 결과를 나타내고 있다.

그림 9와 같이 과장력이 발생하면 후방 스탠드의 메인 밀 속도를 증가시켜야 하는데, 그림에서 약 0.35초 정도 속

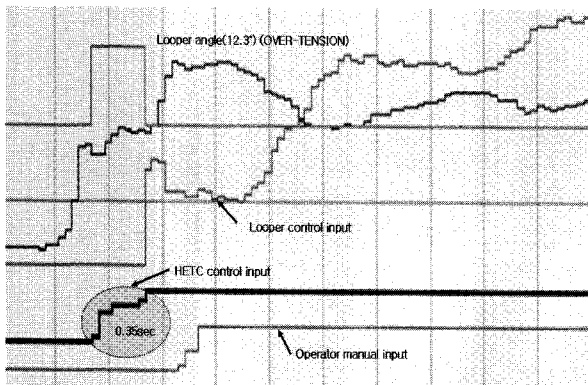


그림 9. 박물재의 현장 테스트 결과(과장력).

Fig. 9. Field test result of a thin strip(over-tension).

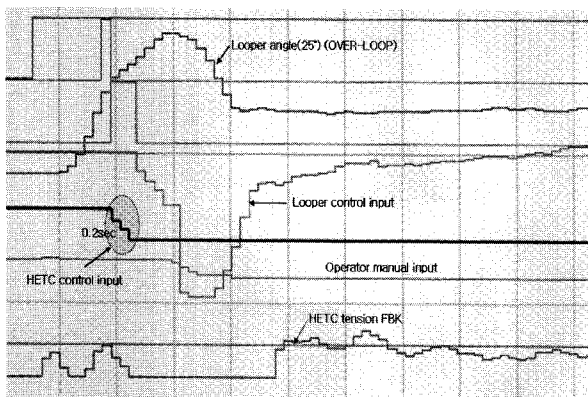


그림 10. 후물재의 현장 테스트 결과(과대 루프).

Fig. 10. Field test result of a thick strip(over-loop).

도 증가 방향으로 제어량이 부가되고 있음을 알 수 있다. 이와 반대로 과대 루프가 발생하는 그림 10에서는 약 0.2초 동안 후방 스탠드의 메인 밀 속도를 감소시키는 방향으로 제어량이 부가됨을 알 수 있다. 이는 루퍼 제어량과 조업자의 수동 개입량과 방향이 모두 일치함을 알 수 있으므로, 본 논문에서의 선단부 제어량이 적절한 방향으로 인가되고 있음을 보이고 있다. 또한 선단부 제어량의 인가 시점이 루퍼 제어량 또는 조업자 수동 개입량 인가 시점보다 빠름을 볼 수 있다. 이를 통하여 루퍼 제어의 과대 특성을 개선한다면 지 또는 조업자의 수동 개입율을 현저히 감소시킬 수 있을 것으로 생각한다.

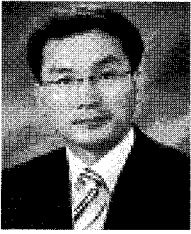
따라서 이 논문에서 제안한 선단부 제어 알고리즘은 실제 압연 공정에 유용성이 매우 높음을 알 수 있다. 그러나 선단부 통관성 안정화 제어가 시스템의 안정화나 스트립 제품의 품질 또는 조업자의 수동 개입율을 얼마만큼 향상시키느냐에 대한 지속적인 연구를 통해 본 논문의 결과보다 계량화되어야 할 것으로 판단된다.

VI. 결론

이 논문에서는 열간 사상압연 공정에서 선단부의 통관성 안정화를 위한 신 장력제어 알고리즘을 개발하였다. 즉 스트립 선단부에서의 장력이 인접하는 양단 스탠드의 전류차와 매우 높은 상관 관계가 있음을 이용하여 새로운 선단부 장력 연산모델과 제어 알고리즘을 개발하였다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 제어 알고리즘이 선단부 통관성 안정화에 적용 가능성이 높음을 컴퓨터 모의실험과 현장 테스트 결과를 통해 확인하였다. 향후 논문의 제안 결과가 제품의 품질, 통관성 안정화 그리고 조업자의 수동 개입율을 얼마만큼 향상시키는 지에 대한 정량적인 평가가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

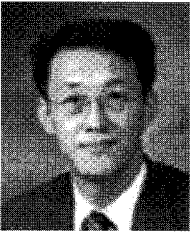
- [1] A. Oishi, K. Tashiro, S. Kitani, Y. Kamigane, and S. Tanifuji, "Looperless System for Hot Strip Mill," 日立評論, vol. 65, no. 2, pp. 51-56, 1983.
- [2] Y. Anbe, K. Sekiguchi, M. Miyokawa, and T. Miyamoto, "Looper-less Tension Control of a Hot Strip Mill Finisher," pp. 410-417, vol. 29(3-7).
- [3] S. Tanimoto, Y. Hayashi, M. Saito, K. Yabuuchi, and K. Tsuchii, "Control Method of Full Stands Looperless Rolling of Hot Strip Finishing Mill," *Trans. ISIJ*, vol. 24, 1984.
- [4] G. Li, F. Janabi-Sharifi, and L. Witnisky, "Decoupling of Multiple Stand Interaction in Looperless Rolling Control Process," *IEEE ICIT'02*, pp. 21-826, Bangkok, 2002.
- [5] C. J. Park and I. C. Hwang, "New Tension Control at the Head of Strip in Hot Strip Finishing Mill," *Journal of Materials Processing Technology(JMPT)*, vol. 206, pp. 69-77, 2008.



황 이 철

1987년 부산대학교 기계설계공학과 졸업(공학사). 1991년 동 대학원 졸업(공학석사). 1996년 오사카대 전자제어기계공학과 졸업(공학박사). 1986년~1988년 삼성중공업 근무. 1996년~1998년 부산대학교 기계공학부 국책교수 근무.

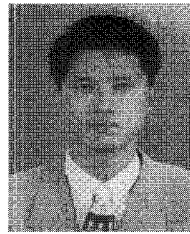
1998년~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 프로세스 및 시스템 규명, 건설 제어이론 및 응용.



백 운 보

1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1987년 동 대학원 기계공학과(공학석사). 1992년 동 대학원 기계공학과(공학박사). 1993년~2001년 삼성중공업 기계전자연구소 근무. 2002년~

현재 동의대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 로봇, 건설 비선형 제어, 자동차 지능제어 등.



박 철 재

1992년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1994년 동 대학원 졸업(공학석사). 2008년 서울대학교 전기컴퓨터공학부(박사과정). 1994년~2008년 포스코 기술연구소 근무. 2008년 9월~현재 대구대학교 자동차산업기계공학부

교수. 관심분야는 모델예측제어, 건설제어, 프로세스 규명 및 제어 등.