

## 열간압연 권취공정의 장력제어를 위한 LTBC 제어기 설계

# Design of LTBC Controller for Tension Control in Down Coiler Process of Hot Strip Mills

이 상 호, 박 흥 배, 박 철 재\*  
(Sang Ho Lee<sup>1</sup>, Hong Bae Park<sup>2</sup>, and Cheol Jae Park<sup>3,\*</sup>)

<sup>1</sup>Technical Research Lab., POSCO

<sup>2</sup>School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

<sup>3</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University

**Abstract:** In this paper, we propose an LTBC (Low Tension and Load Balance Control) scheme to improve a coiling shape control by reduction the tension fluctuation by the torque disturbance in the down coiler process of hot strip mills. The proposed controller is a combination of an LTC to control the overload at load-on in the mandrel and an LBC to regulate the load balance of the upper and bottom pinch roll. A tension calculation model is suggested with the concept of the tension deviation. The effectiveness of the proposed control scheme is verified from simulation under a disturbance of the pinch roll torque. Using a field test, we show that the performance of the shape and tension control is improved by the LTBC control.

**Keywords:** down coiler process, hot strip mills, torque control, tension control, low tension control, load balance control, coiling shape control, pinch roll, telescope, run out table

### I. 서론

최근 국내외 철강사들은 고강도 강관을 개발하기 위한 연구가 한창 진행 중이다. 제철공정 중 특히 열간압연 공정에서 현재 고급강의 생산비중이 증가하고 품질이 엄격해짐에 따라 정밀제어가 점점 더 요구된다. 이러한 요구를 바탕으로 열간압연 공정의 자력화를 위한 핵심 제어기술의 설계 및 해석 경험이 앞으로의 무한 경쟁에서 더욱 더 중요하다.

열간압연의 권취(down coiler) 공정은 마무리압연(finishing mill)과 냉각공정 후 압연판을 코일링(coiling) 하는 최종 공정이다[1,2]. 권취공정에서 코일의 품질을 결정하는 중요한 요소는 권취형상이며, 권취된 열연코일의 측면이 망원경처럼 감긴 형태를 텔레스코프(telescope) 라고 한다. 텔레스코프는 주문외울과 클레임을 유발하는 중요한 결함이며 주로 권취공정에서 장력제어의 문제로 발생하는 경우가 많다.

권취형상의 불량을 해결하기 위하여 권취공정의 각 부분에 대한 메커니즘을 분석하고 운동을 해석하는 연구들이 있다[3]. 또한 압연판의 폭방향으로 두께편차가 존재하는

웨지(wedge)나 비대칭 압연에 의하여 압연판이 직진하지 않고 좌우방향으로 쏠리는 현상을 분석하여 제어하는 연구도 진행되고 있다[4-7]. 압연판의 쏠림현상은 마무리 압연에서의 캠버와 마찬가지로 폭 방향으로의 속도차이가 주요 원인이다. 이는 권취공정의 장력편차를 발생시키는 주요 외란 요소이다. 압연판의 쏠림현상을 방지하여 권취형상을 제어하기 위한 수식모델과 함께 이를 측정하여 제어에 이용하고자 하는 연구도 많이 수행되었다[8,9]. 권취공정 이전의 ROT (Run-Out Table) 공정에서 냉각제어를 통하여 압연판의 재질과 장력 등의 통관성을 제어하려는 연구도 많이 진행되고 있다[10,11]. 그리고 출력 피드백으로 롤 속도를 제어하여 속도 차이로부터 장력을 연산하고 장력편차를 제어하기 위한 연구도 있다[12,13]. 권취형상 제어 알고리즘 뿐 아니라 압연판의 쏠림현상을 측정할 수 있는 계측기술에 대한 연구도 수행되고 있다[14]. 이상 기존의 연구는 대부분 권취공정의 단위설비에 대한 수식모델과 해석을 위주로 연구되었다. 따라서 권취공정, ROT 및 마무리압연 공정까지 포함하여 공정 간의 외란에 대한 장력제어를 실시하여 안정된 권취형상을 얻기 위한 기술이 필요하다.

본 논문에서는 권취공정에서 압연판의 장력제어 정도를 향상시켜 바람직한 권취형상을 제어하기 위하여 저장력 제어(LTC: Low Tension Control)와 로드밸런스 제어(LBC: Load Balance Control)를 결합한 LTBC (Low Tension and Load Balance Control) 라는 새로운 제어개념을 제안한다. 이를 위하여 기존의 장력연산 모델의 문제점을 분석하고 권취공정에서 새로운 장력연산 모델의 개념을 도입한다. 또한 압연판의 선단부에서 통관성을 향상시키기 위하여 저장력 제어 개념을 제안하고 핀치롤(pinch roll) 상하부의 모터

\* Corresponding Author

Manuscript received December 31, 2014 / revised January 20, 2015 / accepted January 22, 2015

이상호: 포스코 기술연구원(honey@posco.com)

박흥배: 경북대학교 전자공학부(hbpark@knu.ac.kr)

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

\* 이 논문은 2014학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

\* 이 논문은 ICROS 대구경북지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

부하를 제어하여 장력제어 정도를 향상시킨다[15].

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 제어대상 프로세스인 권취공정에 대해 설명하고 권취형상 제어의 문제점들을 서술한다. III 장에서는 권취공정의 장력연산 모델의 문제점들과 제안하는 장력연산 모델을 설명한다. IV 장에서는 장력제어를 위하여 개발한 LTC, LBC 제어모델의 개념에 대하여 설명하고 이를 통합한 LTBC 제어기를 설계한다. V 장에서는 현장과 동일한 조건에서 시뮬레이션을 실시하고, 그 결과를 바탕으로 실시한 온라인 테스트 결과를 분석한다. 이 논문의 결론은 VI 장에서 요약한다.

### II. 권취공정과 권취형상 제어 문제

그림 1은 열간압연 권취공정의 개략도를 나타낸다. 마무리압연을 마친 압연판의 선단부(head of strip)는 무장력 상태에서 ROT 공정을 통과하여 목표온도까지 냉각된다. 그림에서 FDT (Finishing Delivery Temperature), CT (Coiling Temperature)는 각 지점에서의 측정된 온도이다. 이 공정에서 압연판의 길이는 약 1km 정도가 되므로 코일링 작업을 수행한다.

권취공정은 세부적으로 압연판을 코일링하기 위한 맨드릴(MD: mandrel), 강관에 장력을 부여하고 폭방향으로 편출림 등을 방지하기 위한 핀치롤(PR), 권취공정에서 벗어나는 것을 방지하기 위한 사이드 가이드(side guide), 강관의 선단부를 맨드릴에 구속시키고 마찰력을 발생시켜서 원활한 코일링 작업을 시키기 위한 래퍼롤(wrapper roll) 등이 설치되어 있다.

그림 2는 권취형상이 (a) 양호한 코일, (b) 불량인 코일을 각각 나타낸다. 권취형상을 결정하는 주요한 원인은 압연판의 편출림, 마무리압연에서 핀치롤, 맨드릴 사이의 장력변동 등이 있다. 특히 강관의 선단부가 맨드릴에 진입할 때 장력이 목표값보다 작은 경우에는 코일이 느슨하게 감겨서 권취형상이 불량이거나 코일링 작업에 문제가 생겨서 압연

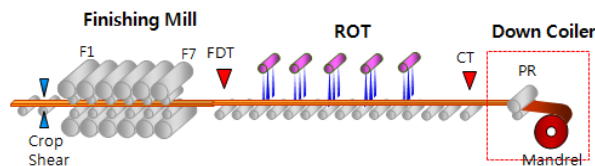


그림 1. 열간압연의 권취공정의 개략도.  
Fig. 1. Layout of down coiler process in hot strip mills.



(a) Good coiling shape. (b) Bad coiling shape.

그림 2. 권취형상이 양호한 코일과 불량코일.  
Fig. 2. Good and bad coiling shape in coiling process.

라인 전체를 멈추는 일이 발생할 수 있다. 따라서 권취공정에서 장력변동을 제어할 수 있는 제어방법과 제어모델의 개발이 필요하다는 것을 알 수 있다.

### III. 권취공정의 장력연산 모델

권취공정에서 장력제어를 위하여 장력연산 모델이 필수적이다. 지금까지 핀치롤이나 맨드릴의 모터토크를 측정하지만 엄밀한 의미에서의 장력제어는 실시되지 않고 있다. 마무리압연에서는 루퍼(looper)에 의한 장력제어를 실시하고 있으나, 루퍼가 없는 권취공정에서 장력을 연산하기 위해서는 다음과 같이 두 가지 방법을 검토해 볼 수 있다.

첫째, 마무리압연 출측과 권취공정 입측의 편속도 차이를 이용하는 방법이다. 이 방법의 문제점은 마무리압연은 선진울에 의하여 마무리압연의 출측 편속도가 롤속도와 차이가 있는 반면, 권취공정은 압연을 하지 않기 때문에 선진울이 없어서 편속도와 롤속도의 차이가 없다는 것이다. 따라서 편속도 차이에 의한 장력계산은 불가능하다는 문제가 있다.

둘째, 마무리압연의 출측 편속도와 권취공정의 핀치롤 속도 차이를 이용하는 방법이 있다. 마무리압연 7번 출측 편속도는 선진울의 영향으로 7번 스탠드의 편속도가 롤속도보다 크다. 그러나 핀치롤의 속도는 7번 롤속도와 동기하여 구동되기 때문에 롤속도 차이에 의하여 연산된 장력은 항상 음(-)의 값이 되어 정확한 장력을 연산하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 장력의 절대치 대신 장력의 편차를 계산하는 방법을 제안한다. 먼저, 외부 외란이 작용하지 않는 경우에 대하여 마무리압연 7번과 핀치롤의 롤속도 편차를 이용하여 장력을 구한다. 그리고 외부 외란이 작용하는 경우에 대해서도 마찬가지로 방법으로 장력을 구한다. 최종적으로 위의 두 가지 방법에 따른 장력편차를 구해서 속도 제어기로 제어하는 방법을 제안한다. 구동모터의 전류를 이용하여 장력을 구하는 자세한 방법은 저자의 논문 [16]을 참고하기 바람이며 여기서는 권취공정에 그 결과를 응용한다.

외부토크가 입력되는  $i$  스탠드의 강관의 장력  $T_i$ 는 다음과 같다.

$$T_i = \frac{l_i P_i - G_i + a_i T_{i-1}}{b_i} \tag{1}$$

여기서  $i, i-1$ 은 각각 권취공정, 마무리압연 7번 스탠드를 나타내며,  $l$ 은 토크 암(arm),  $P$ 는 압연하중,  $a, b$ 는 공정의 제원과 조건에 따라 결정되는 상수이다.

식 (1)에서 외부토크에 의하여 토크 암의 길이가 변동하면서 장력도 변동하게 된다. 토크 암의 변동량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta l_i = l_{i0} \left\{ K_{1i} \left( \frac{\Delta H_i}{H_{i0}} \right) + K_{2i} \left( \frac{\Delta h_i}{h_{i0}} \right) + K_{3i} \left( \frac{\Delta P_i}{P_{i0}} \right) \right\} \tag{2}$$

여기서  $K_i$ 는 압하율, 편평 롤반경, 스탠드 출측 편두께의 함수로서 각 압연 프로세서에 따라 실험적으로 결정되는 경험계수이며,  $H, h$ 는 스탠드 입측 및 두께두께를 각각 나타내며, 아래첨자 '0'은 장력이 영(zero) 일 때의 값을 나타낸다.

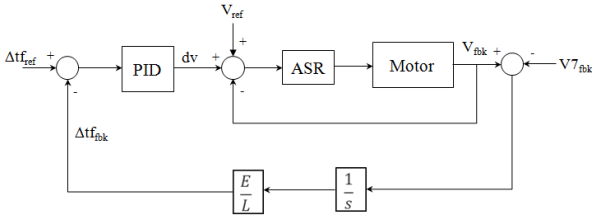


그림 3. 본 연구에서 제안한 장력연산 모델의 블록선도.  
Fig. 3. Block diagram of proposed tension control model.

마무리압연과 권취공정 사이의 장력은 두 공정의 모터 전류를 이용하여 다음과 같이 연산할 수 있다.

$$T_i = T_{i,ref} + \Delta T_i \quad (3)$$

여기서  $T_{i,ref}$ 는 장력  $T_i$ 의 목표치이고,  $\Delta T_i$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= f_T\{((I_{i-1} - I_{i-1,ln}) - (I_i - I_{i,ln})), \Delta P_i, \Delta l_i, \dots\} \quad (4) \\ &= f_T\{(\Delta I_{i-1} - \Delta I_i), \Delta P_i, \Delta l_i, \dots\} \end{aligned}$$

여기서  $I_{i-1,ln}$ ,  $I_{i,ln}$ 은 장력이 목표치일 때 마무리압연, 권취공정의 모터 전류를 각각 나타내고,  $f_T$ 는 함수관계를 나타낸다. 위 식을 더욱 구체적으로 나타내면 장력변동은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= \frac{1}{b_i} \left[ l_i \Delta P_i - \left\{ C_{1i} \frac{(\Delta I_{i-1} - \Delta I_i) \Delta V_i}{\Delta \omega_i} - C_{2i} J_i \frac{d\omega_i}{dt} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + a_i \Delta T_{i-1} \right\} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

여기서  $C_1, C_2$ 는 상수,  $V, \omega, J$ 는 모터의 전압, 각속도, 2차 관성모멘트를 각각 나타낸다.

그림 3은 본 연구에서 제안한 장력연산 모델을 나타낸 블록선도이다. 즉 마무리압연과 권취공정의 속도편차를 이용하여 장력편차를 연산하는 블록선도이다. 그림에서  $\Delta tf_{ref}$ 는 F7~핀치를 간의 장력편차 목표치,  $\Delta tf_{fbk}$ 는 F7~핀치를 간의 장력편차 피드백,  $V_{ref}$ 는 핀치를 하부 모터속

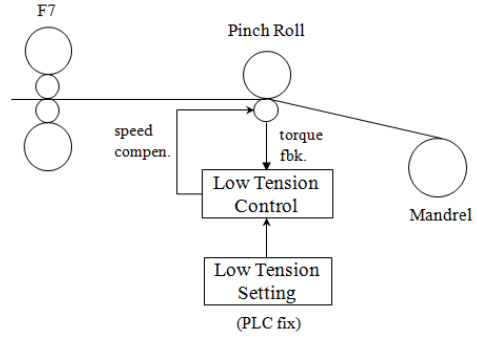


그림 4. LTC 장력제어의 개념도.  
Fig. 4. Layout of LTC tension control.

도의 목표치,  $V_{fbk}$ 은 핀치를 하부 모터속도의 피드백,  $V7_{fbk}$ 은 F7 스텐드의 모터 속도 피드백,  $L$ 은 공정 간의 거리,  $E$ 는 영률(Young's modulus), ASR (Automatic Speed Regulator)은 모터의 속도제어를 각각 나타낸다.

#### IV. LTBC 제어기 설계

##### 1. LTC 제어기 설계

본 연구에서 LTC 제어는 맨드릴에 압연판이 로드온(load on) 될 때 맨드릴의 과부하를 해소하고 로드온 시의 장력변동을 해결하기 위하여 개발되었다. LTC 제어방법은 그림 4에서 보는 것과 같이 압연판이 맨드릴에 로드온 될 때 저장력을 유지하기 위하여 하부 핀치를의 토크를 측정하여 하부 핀치의 속도를 제어한다. 이때 저장력의 목표치는 PLC (Programmable Logic Controller)에서 강중, 사이즈 등에 따라 설정한다.

그림 5는 본 연구에서 제안한 LTC 장력제어의 블록선도를 나타낸다. 여기서  $\Delta tf_{LTC,ref}$ 는 F7~핀치를 간의 LTC 장력편차의 목표치,  $T_q$ 는 압연토크,  $T_{q,dis}$ 는 핀치를 하부모터에 작용하는 토크의 외란,  $K_M, T_N$ 은 각각 ASR의 P, I 게인,  $r_a, T_a$ 는 각각 전류제어기의 저항, 시정수,  $\zeta\phi$ 는 전류-토크 상수,  $J_R, J_M$ 은 핀치롤과 모터의 관성 모멘트를

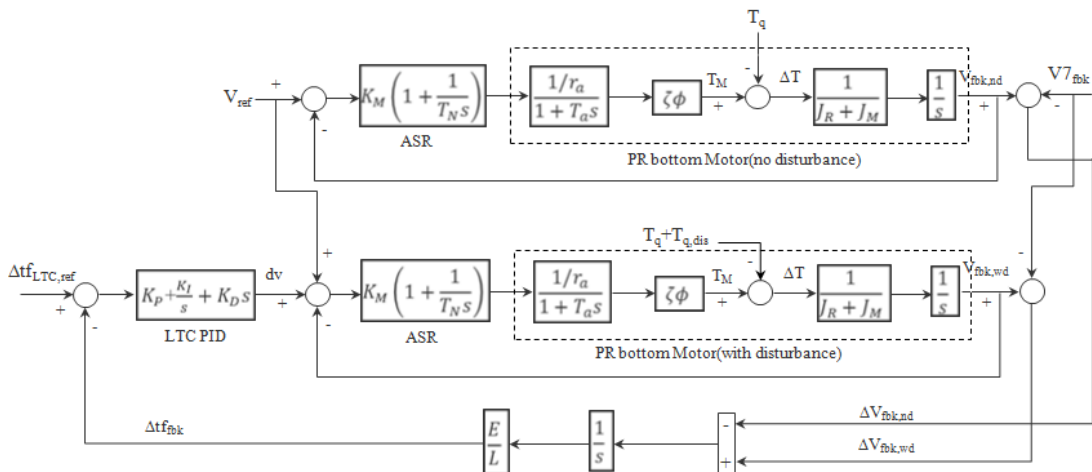


그림 5. 본 연구에서 제안한 LTC 장력제어의 블록선도.  
Fig. 5. Block diagram of proposed LTC tension controller.

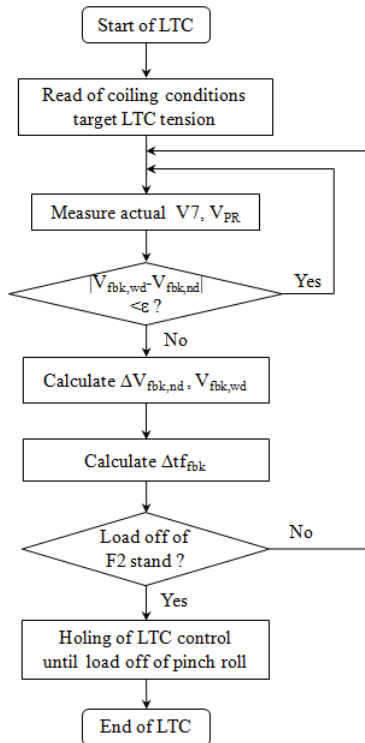


그림 6. LTC 제어 알고리즘의 순서도.  
Fig. 6. Flowchart of LTC control algorithm.

각각 나타낸다. 또한  $\Delta V_{fbk,nd}$  는 외란이 없는 핀치를 하부 모터의 속도와 F7 스탠드의 롤속도 간의 속도편차,  $\Delta V_{fbk,wd}$  는 외란이 있는 경우의 속도편차를 각각 나타낸다.

III 장에서 서술한 것처럼 핀치롤은 선진율에 따른 판속도와 롤의 속도가 동일하기 때문에 F7~핀치롤 간의 절대장력을 계산하는 것은 불가능하다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 개발된 LTC 제어 알고리즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- i) 핀치롤 하부에 압연토크 외란이 없는 경우에 대한 핀치롤 속도를 계산한다.
- ii) 핀치롤~맨드렐 사이에 저장력이 발생하는 것은 핀치롤

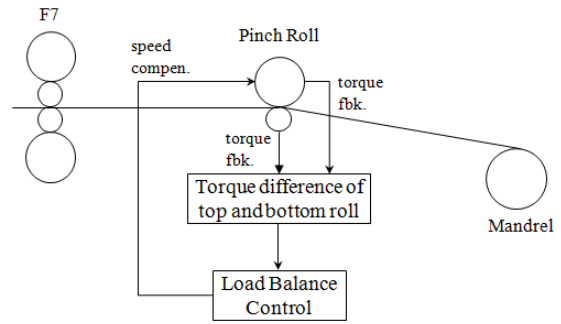


그림 7. LBC 장력제어의 개념도.  
Fig. 7. Layout of LBC tension control.

에 압연토크가 커진다고 생각할 수 있으므로 하부 핀치롤에 토크외란을 인가한다.

- iii) 핀치롤의 하부에 토크외란이 있는 경우에 대한 핀치롤 속도를 계산한다.
- iv) 위의 i), iii)에서 계산한 속도차이를 이용하여 식 (5)로부터 장력편차를 계산한다.

그림 6은 이상과 같이 개발된 LTC 제어 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 그림에서  $\epsilon$ 은 핀치롤 속도 설정값의 1%에 해당하는 상수값이다.

2. LBC 제어기 설계

본 연구에서 제안한 LBC 제어는 그림 7에서 보는 것과 같이 핀치롤과 맨드렐 간에 장력편차가 발생하는 경우, 상하부 핀치롤의 부하 밸런스를 유지하는 것이 목적이다. 제안된 LBC 제어 알고리즘은 다음과 같다.

- i) LBC 제어는 맨드렐 로드오프부터 마무리압연의 F2 스탠드 로드오프까지, F7 로드오프부터 핀치롤의 로드오프까지 제어한다. 이는 F2, F7 로드오프 시에 핀치롤 속도의 지연(lag) 제어에 의하여 속도변동이 크기 때문에 장력변동을 제어하기 위함이다.
- ii) 핀치롤 상부에 외란토크를 인가하여 상하부의 토크에 의한 핀치롤 상하부의 속도편차를 계산한다.
- iii) 속도편차에 의하여 식 (5)로부터 핀치롤~맨드렐 간의 장력편차를 측정하여 상부 핀치롤의 속도를 제어한다.

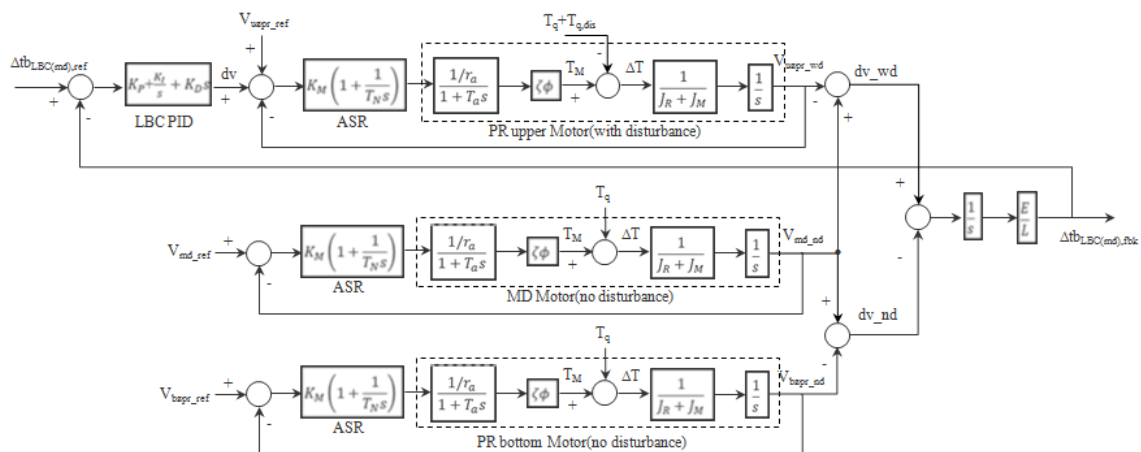


그림 8. 본 연구에서 제안한 LBC 장력제어의 블록선도.  
Fig. 8. Block diagram of proposed LBC tension controller.

위의 알고리즘에 의하여 상하부 핀치를 사이의 토크 차이를 제어하여 부하멜런스를 유지하며 장력편차를 제어하기 위하여 상부 핀치롤의 속도를 제어한다.

그림 8은 LBC 제어알고리즘의 블록선도를 나타낸다. 그림에서  $\Delta tb_{LBC(md),ref}$ 는 핀치롤~맨드렐 간의 LBC 장력편차의 목표치,  $V_{uzpr\_ref}$ 는 핀치를 상부모터의 속도 목표치,  $dv\_nd$ 는 핀치롤~맨드렐 사이에 외란이 없는 경우의 속도 편차,  $dv\_wd$ 는 외란이 있는 경우의 속도편차를 각각 나타낸다.

**V. 시뮬레이션 및 온라인 테스트**

**1. LTBC 제어기의 시뮬레이션**

본 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 개발한 LTBC 제어기의 알고리즘을 검증하고 고찰한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 주요 압연조건을 나타낸다. 핀치롤과 맨드렐의 속도는 F7 모터 속도와 표 1에 나타낸 리드울(lead), 래그울(lag)을 이용하여 자동으로 계산된다.

그림 9는 F7, 핀치롤, 맨드렐 속도의 설정값을 시뮬레이션 한 결과이다. 맨드렐 속도는 맨드렐 로드온(3초)까지 리드울을 이용하여 핀치롤보다 빠른 속도를 유지하고 맨드렐 로드온 이후는 F7 스펀드의 속도와 연동한다. F7의 속도가 감속하면 맨드렐의 속도도 감속하고, 그 이후에는 정지하거나 리드 속도를 유지한다.

그림 10은 F7~핀치롤 사이의 LTC 장력제어기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션을 위하여 핀치롤의 하부모터에 2.5~9초까지 F7번 압연토크의 1%에 해당하는 토크 외란을 인가하였다. F7~핀치롤 간의 목표장력은 10N/mm<sup>2</sup>

표 1. LTBC 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션 조건.

Table 1. Simulation conditions for LTBC control algorithm.

Parameter	Value	Parameter	Value
제품두께(mm)	2.27	F7 최고속도(mpm)	750
F7 출측장력(N/mm <sup>2</sup> )	10.0	F7 통관속도(mpm)	640
저장력목표치(N/mm <sup>2</sup> )	9.0	리드울, 래그울(-)	1.01, 0.99

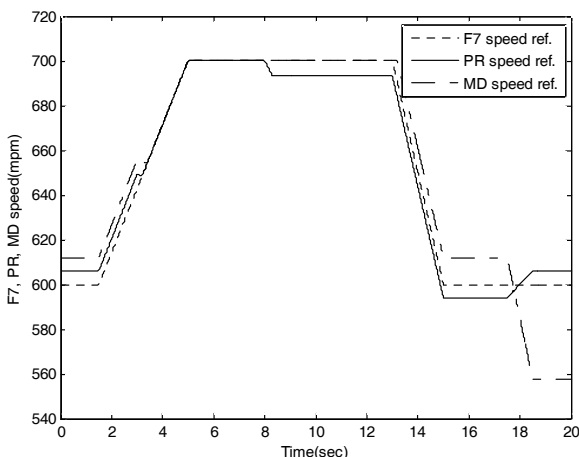


그림 9. F7, 핀치롤, 맨드렐의 속도설정.  
Fig. 9. Speed reference of F7, pinch roll, mandrel.

로 설정하였으며 저장력은 목표장력의 90%를 인가(3~8초 사이) 하였다. 시뮬레이션 결과 토크외란에 의하여 2.5초에 핀치를 하부모터의 속도가 감소하였으며, 약 2.9초에 F7~핀치롤 간의 장력이 감소하다가 목표장력으로 회복하는 것을 볼 수 있다. 그리고 3초에서 저장력의 목표장력이 9N/mm<sup>2</sup>로 설정되었으므로 장력 피드백이 이를 추종하는 것을 볼 수 있다. 8초에서 LTC 제어가 정지되고 9초에서 압연토크 외란이 제거되므로 핀치롤의 하부모터 속도가 증가하고 그 영향으로 장력이 증가하다가 목표장력을 회복하는 것을 볼 수 있다. 또한 LTC의 PI 제어게인에 따라 장력을 비교(P=1, I=1과 P=2, I=1) 하였다. 비례게인을 증가시킨 경우, 장력 응답성과 명령추종성능이 향상되었으나 외란의 영향을 제거하기 위해 최적제어기 설계에 대한 연구가 필요하다라는 것을 알 수 있다.

그림 11은 LTC 장력제어의 PI 제어게인에 따른 속도 제어량을 비교한 것이다. 비례게인을 증가시킨 경우, 하부 핀치롤의 속도제어량을 증가시켜서 제어성능을 향상시킨다는 것을 알 수 있다.

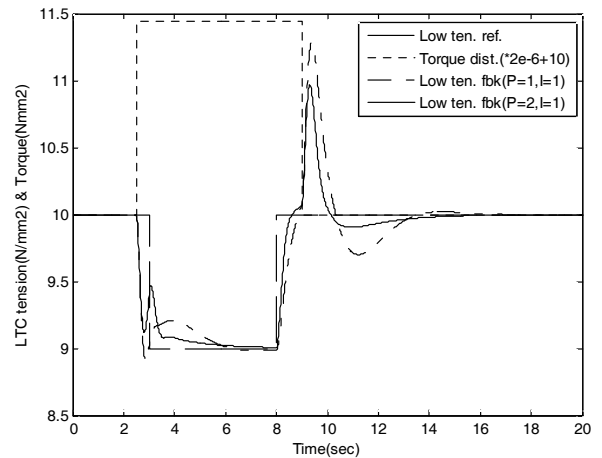


그림 10. PI에 따른 LTC 장력제어 결과.  
Fig. 10. Result of LTC tension control with PI controller.

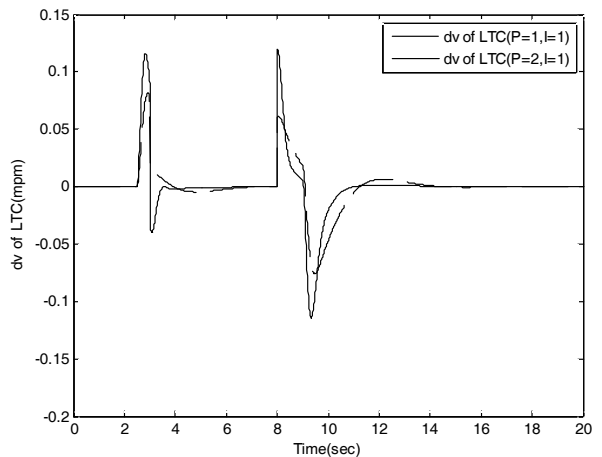


그림 11. PI에 따른 LTC 제어의 속도 보상량.  
Fig. 11. Speed compensation of LTC control with PI controller.

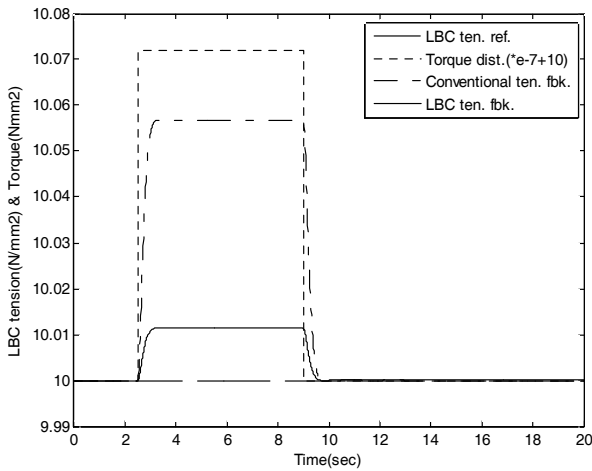


그림 12. 기존제어 및 LBC 장력제어의 시뮬레이션 결과.  
Fig. 12. Simulation result of LBC tension control.

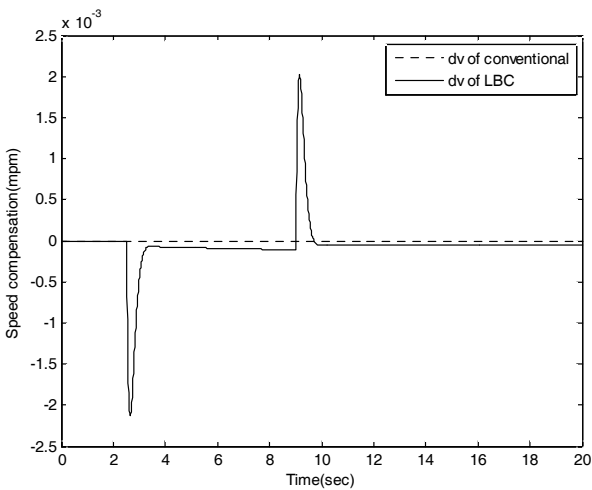


그림 13. 기존제어 및 LBC 제어의 속도보상량.  
Fig. 13. Simulation result of speed compensation for LBC control.

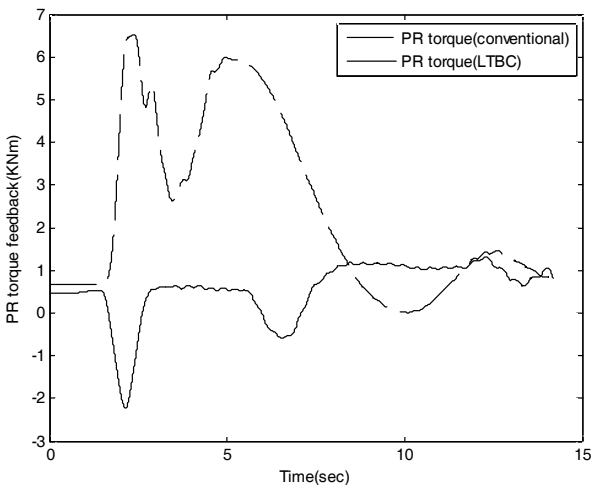


그림 14. 상부 핀치롤 토크의 온라인 테스트 결과.  
Fig. 14. On-line test for torque of top pinch roll.

그림 12는 핀치롤의 상부모터에 압연토크의 5%에 해당하는 외란을 2.5-9초까지 인가한 경우 LBC 제어적용 유무에 따른 핀치롤~맨드렐 간의 장력을 시뮬레이션 하였다. 여기서 기존방법은 LBC 제어를 하지 않은 경우이다. 토크외란의 변동이 있는 2.5, 9초 근방에서 속도편차에 의하여 LBC 제어가 실시된다. 그러나 2.5-9초 사이에는 핀치롤의 속도제어에 의하여 속도편차가 거의 없다. 시뮬레이션 결과 LBC 제어를 적용한 경우 장력편차가 약 80.4% 감소했음을 알 수 있다.

그림 13은 핀치롤의 상부모터에 압연토크의 5% 외란을 인가한 경우 핀치롤 상부모터의 속도 제어량에 대한 시뮬레이션 결과이다. LBC 제어의 경우 외란의 변동이 있는 2.5초, 9초에서 장력편차를 제어하기 위하여 핀치롤 상부모터의 속도를 제어하였으나, 기존의 제어에서는 토크제어가 불가능하므로 속도 제어량이 없다는 것을 알 수 있다.

2. 온라인 테스트 결과

본 절에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 LTC, LBC를 결합한 LTBC 제어기를 열연공장에서 온라인을 적용한 결과를 서술한다.

그림 14는 상부 핀치롤의 토크 피드백 실험값이다. 테스트 강판의 두께는 4mm, 폭은 1000mm 이다. 그림에서 점선은 LTBC 제어를 적용하지 않은 경우이며 실선은 적용 후의 결과이다. 약 1.5초에 압연판이 맨드렐에 로드온 한 후 압연판의 선단부에 마찰, 윤활 및 속도편차 등에 의한 토크외란이 발생한다. 토크제어를 실시하지 않는 기존의 방법은 토크외란에 의하여 핀치롤의 토크가 헌팅(hunting) 하며, 이에 따라 핀치롤과 맨드렐 간의 장력도 변동하게 된다. LTBC 제어를 실시한 경우에는 선단부 1.5~2.9초까지 저장력에 의하여 장력 목표치를 수정하고 상하부 핀치롤의 토크변동을 속도로 제어하여 장력변동을 안정시키는 현상을 볼 수 있다. LTBC 제어의 적용으로 핀치롤의 토크변동(장력변동)은 약 69.2% (6.5→2KNm) 줄었음을 알 수 있다.

그림 15는 LTBC 제어적용 전후의 상부 핀치롤 속도 측정값을 나타낸다. 약 1.5초에 압연판이 맨드렐에 진입하면 압연토크에 의하여 핀치롤의 속도가 떨어지는 임팩트드롭

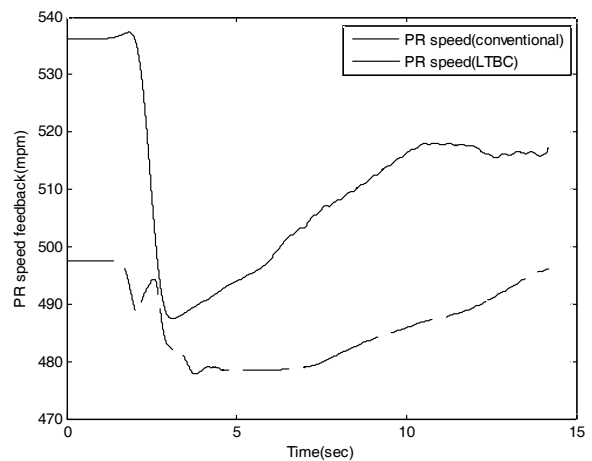


그림 15. 상부 핀치롤 속도의 온라인 테스트 결과.  
Fig. 15. On-line test for speed of top pinch roll.

(impact drop) 현상이 생긴다. 제어작용 전의 점선을 보면 약 2.1초에 압연외란에 의하여 속도가 현탕하는 현상이 발생하며 2.1초 이후에도 압연 속도는 안정적으로 가속하지 못하는 현상을 볼 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 권취공정에서 압연관의 장력을 안정시켜 바람직한 권취형상을 얻기 위하여 저장력제어(LTC)와 로드 밸런스 제어(LBC)를 결합한 LTBC 제어라는 새로운 제어개념을 제안하였다. 그리고 장력연산 모델을 바탕으로 시뮬레이션을 실시하여 제안된 제어방법의 정당성을 입증하였으며 열연공장에 온라인으로 테스트를 실시하였다.

이를 위하여 먼저 권취형상의 제어문제를 분석하였다. 권취공정에서 기존의 장력연산 방법의 문제점을 분석하여 장력의 절대치보다는 편차를 연산하는 모델을 개발하였다. 압연관이 맨드렐에 로드온 할 때 과부하 해소와 상하부 편차롤의 부하 밸런스를 유지하기 위하여 LTBC 제어를 개발하였다. 개발된 제어기는 편차를 전후의 장력편차를 제어하기 위하여 편차를 모터의 속도를 제어한다.

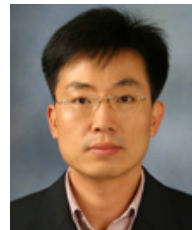
본 논문에서 제안한 LTBC 제어를 열연공장에서 온라인으로 적용한 결과 장력변동을 약 69.2% 줄일 수 있었으며 장력변동에 의한 권취형상이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] S. Kido, M. Akaji, and M. Murata, "Hydraulic wrapper roll in hot strip downcoiler," *Iron and Steel Engineer*, vol. 9, pp. 43-48, 1982.
- [2] A. M. Kuszaj, "Hot strip mill downcoiler design considerations," *Iron and Steel Engineer*, vol. 5, pp. 77-88, 1968.
- [3] W. Rohde and D. Rosenthal, "High-tech rolling in hot strip mills-theory and practice," *Metallurgical Plant and Technology*, vol. 1, pp. 48-55, 1990.
- [4] T. Ishikawa, Y. Tozawa, and J. Nishizawa, "Fundamental study on snaking in strip rolling," *Transactions ISIJ*, vol. 28, pp. 485-490, 1988.
- [5] T. Shiraishi, H. Ibata, and A. Mizuta, "Relation between camber and wedge in flat rolling under restrictions of lateral movement," *ISIJ International*, vol. 6, no. 6, pp. 583-587, 1991.
- [6] R. C. Benson, "Lateral dynamics of a moving web with geometrical imperfection," *Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, vol. 124, pp. 25-34, 2002.
- [7] K. Nakajima, T. Kajiwara, and H. Matsumoto, "Automatic side-walk control in hot strip mill," *Proc. Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity*, vol. 116, pp. 61-64, 1980.
- [8] Y. Okamura and I. Hoshino, "State feedback control of the strip steering for aluminum hot rolling mills," *Control Engineer Practice*, vol. 5, no. 8, pp. 1035-1042,

1997.

- [9] H. Matsumoto and A. Ishii, "Three-dimensional simulation of snake motion in a tandem cold mill," *MWSP Conference Proceeding*, vol. XL, pp. 25-36, 2002.
- [10] C. J. Park, K. S. Yoon, and C. H. Lee, "Advanced temperature control of high carbon steel for hot strip mills," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, no. 5, pp. 1011-1017, 2010.
- [11] R. K. Kumar, S. K. Sinha, and A. K. Lahiri, "An on-line parallel controller for the runout table of hot strip mills," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 821-830, 2001.
- [12] Y. Seki, K. Sekiguchi, Y. Anbe, K. Fukushima, Y. Tsuji, and S. Ueno, "Optimal multivariable loop control for hot strip finishing mill," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no. 1, pp. 124-130, 1991.
- [13] T. Hesketh, Y. Jiang, D. Clements, D. Butler, and R. Laan, "Controller design for hot strip finishing mills," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 208-219, 1998.
- [14] Y. Tanaka, K. Omori, and T. Miyake, "Camber control techniques in plate rolling," *Kawasaki Steel Technical Report*, no. 16, pp. 12-20, 1987.
- [15] S. H. Lee and C. J. Park, "Development and application of the torque control model with tension variation in pinch roll at hot strip mill," *Proc. of ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) 2014 Daegu-Gyeongbuk Branch Conference (in Korean)*, pp. 57-59, 2014.
- [16] 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*, vol. 206, pp. 69-77, 2008.



### 이 상 호

1993년 경북대학교 전자공학과 학사.  
1995년 경북대학교 전자공학과 석사.  
2010년~현재 동 대학원 박사과정.  
1995년~현재 포스코 기술연구소 전문 연구원. 관심분야는 건설제어, 철강제어 및 자동화 등.



### 박 흥 배

1977년 경북대학교 전자공학과 학사.  
1979년 경북대학교 전자공학과 석사.  
1988년 University of New Mexico 전자공학과 박사. 2004년~2006년 모바일 단말상용화센터장. 1988년~현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수. 관심분야는 건설제어, 임베디드시스템, 전자 후각시스템.

**박 철 재**

1992년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1994년 동 대학원 졸업(공학석사). 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 1994년~2008년 포스코 기술연구소 근무. 2008년 9월~현재 대구대학교 기계자동차공학부 교수. 관심분야는 모델예측제어, 건설제어, 프로세스 규명 및 제어, 메카트로닉스 등.