

## 석도금 공정의 모델링 및 시뮬레이션

\*김 응석\* 안 현식\*\* 김 광배\*\* 양 해원\*

\* 한양대학교 전기공학과  
\*\* 한국과학기술연구원 제어시스템연구실

### Modelling and Simulation for Electrolytic Tinning Line

\*Eung-Seok Kim\*, Hyun-Sik Ahn\*\*, Kwang-Bae Kim\*\* and Hai-Won Yang\*

\* Dept. of Electrical Eng., Hanyang University  
\*\* Control Systems Lab., Korea Institute of Science and Technology

#### ABSTRACT

In this paper, each section of an Electrolytic Tinning Line is mathematically modelled with the coupling effect accounted for. Based on the modelling, PI and feedforward controllers are designed for speed control or tension control of each section of the process line. It is shown through simulations that the tension of the strip is controlled precisely along the entire line and the continuity of the process is insured when using the efficient control of loop towers.

#### 1. 서론

생산성 향상을 통한 국제 경쟁력 강화 및 다양한 시장의 요구에 대처하기 위해 산업 공정은 전 공정의 자동화를 추진하고 있다. 특히 금속공장의 경우 열간 및 냉간 압연기, 연속 표면 처리 설비 등을 포함한 자동화 시스템은 Roller 구동용 전동기의 속도 및 토크 제어, 철판의 장력 제어 및 위치 제어 등 기계 자동화 시스템과 세척, 도금 등의 화학 처리를 위한 공정 자동화 시스템이 결합된 형태를 취한다[1~5].

본 논문에서 다루고자 하는 도금라인의 "연속공정의 자동화"를 위해 가장 기본이 되는 문제는 전 공정의 운전이 연속적으로 이루어지면서, 동시에 전 공정의 작업 속도 및 제품에 가해지는 장력이 정밀하게 제어되어야 한다는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 각 부분 공정간의 coupling 영향을 고려한 전체 도금공정의 수학적 모델을 세우고, 이 모델에 기초하여 각 부분 공정에 대한 속도 및 장력제어기를 설계한다. 단 화학공정인 도금공정은 모델링하지 않고 다만, 도금과정중 일정한 장력이 유지되도록 제어한다. 또한 실공정 파라미터들을 이용한 시뮬레이션을 통하여 전 공정에서 제품의 이동속도 및 장력이 정밀하게 제어 되는 것을 확인한다.

본문의 구성은 2장에서 전 공정의 수학적 모델을 제시하고, 3장에서는 제시된 모델에 대한 폐환 제어기를 설계하며, 4장에서 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다.

#### 2. 석도금 공정의 수학적 모델

석도금 공정을 모델링하는 과정에서 고려된 각 공정은 권출부(Uncoiler), ELT(Entry Loop Tower), DLT(Delivery Loop Tower), 권취부(Coiler), Bridle roll의 다섯 부분이며 bridle roll의 수는 4개 인 것으로 하였다. 전체 공정의 작업 속도를 결정하는 것은 Bridle roll의 속도이며, 이중 Bridle #1, #2는 entry 부분에, Bridle #3, #4는 exit 부분에 장착되어 있다. 그 중에 bridle #1은 uncoiler 와 ELT의 입측 중간에 있고, bridle #2는 ELT 출측과 bridle #3 사이에 위치해 있으며, bridle #3는 bridle #2와 DLT 입측 사이에 연결되어 있다. bridle #4는 DLT 출측과 Coiler 중간에 위치하고 있는데 uncoiler 부터 coiler까지 전체 공정을 고려해 볼때 각각의 위치는 그림 1과 같다. 그림 1에서 알 수 있듯이 각각의 공정은 도금할 product(coil)에 의해 서로 맞물려 있다. 즉 coupling 되어 있기 때문에 각 공정의 동작이 전체 공정의 동작에 영향을 미치게 됨을 고려해야 한다.

##### 2.1 Bridle Rolls

bridle roll #1, #3, #4는 속도 제어로 동작하며 bridle #2는 process 부의 장력을 제어 할 수 있도록 동작해야 한다. bridle

roll의 수학적 모델을 다음과 같이 속도 및 장력에 관한 두 부분으로 나누어서 표현한다. 속도에 관한 표현식은 아래와 같다.

$$\frac{dv_b}{dt} = -\frac{1}{a_b} I_{loss} - \frac{b_b}{a_b} T_b + \frac{1}{a_b} I_{mb} \quad (2.1)$$

여기서

$v_b$  : 각 bridle 의 선속도 [m/s]  
 $T_b$  : 장력 [kg]  
 $I_{mb}$  : 모터 전기자 전류 [A]

$$a_b = J \cdot n / K_m \cdot r \quad (2.2)$$

$$b_b = 9.81 \cdot r / K_m \cdot n \quad (2.3)$$

$$J = J_m + J_1 / n^2 \quad (2.4)$$

$$K_m = \frac{30,000}{\pi} \cdot \frac{P}{N_b \cdot IN} \quad (2.5)$$

여기서

$J_m$  : 모터 관성 모멘트  
 $J_1$  : 부하 ( Bridle roll ) 관성 모멘트  
 $K_m$  : 토크 상수  
 $n$  : 기어비  
 $r$  : bridle roll 반경  
 $P$  : power [Kw]  
 $N_b$  : basic speed [rpm]  
 $IN$  : rated current [A]

위의 수식들에서 알 수 있듯이 bridle roll의 경우 uncoiler 및 coiler와는 달리 관성 모멘트와 roll의 반경이 시뮬변 이라는 것이다. 그리고 bridle #1, #2, #3, #4는 모두 속도에 관한 Dynamics는 식(2.1)로 동일하게 주어진다. 그러나 각각에 발생하는 장력 dynamics는 동일 할 수 없으며, 따라서 별개의 표현식을 고려해야 한다.

$$T_{b1} = T_0 - T_u \quad [kg] \quad (2.6)$$

$$T_{b2} = T_p - T_0 \quad [kg] \quad (2.7)$$

$$T_{b3} = T_d - T_p \quad [kg] \quad (2.8)$$

$$T_{b4} = T_c - T_d \quad [kg] \quad (2.9)$$

여기서

$T_0$  : E.L.T 장력  
 $T_u$  : uncoiler 장력  
 $T_p$  : process(bridle #2 와 #3 사이)에 작용하는 장력  
 $T_d$  : D.L.T 장력  
 $T_c$  : coiler 장력  
 $T_{b1}$  : bridle roll #1 에 작용하는 장력  
 $T_{b2}$  : bridle roll #2 에 작용하는 장력  
 $T_{b3}$  : bridle roll #3 에 작용하는 장력  
 $T_{b4}$  : bridle roll #4 에 작용하는 장력

이고, 각 장력의 관계식은 각 공정의 수학적 모델을 소개할 때 언급하기로 한다.

##### 2.2 Uncoiler 및 Coiler

Uncoiler와 Coiler의 구성 및 기능은 서로 대칭적인 관계가 있으므로 먼저 Uncoiler에 대한 모델을 구한 다음 Coiler에 대하여 언급하기로 한다. Uncoiler는 구동부인 DC 모터와 pay-off

reel이 gear box에 의해 연결되어 있다. [그림 2 참조]  
 $\tau_m$  및  $\tau_1$  에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\tau_m = K_m \cdot I_{mu} = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{1}{n} \tau_1 + K_m \cdot I_{loss} \quad (2.10)$$

$$\tau_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + r \cdot T_u \quad (2.11)$$

여기서

- $\tau_m$  : 모터 토크 [N.m]
- $J_m$  : 모터 관성 [kg/m<sup>2</sup>]
- $\tau_1$  : 부하 토크 [N.m]
- $J_1$  : 부하 관성 [kg/m<sup>2</sup>]
- $I_{mu}$  : 모터 전기자 전류 [A]
- $I_{loss}$  : 모터 손실 전류 [A]
- $\omega_m$  : 모터 회전 속도 [rpm]
- $\omega_1$  : 부하(pay-off reel or mandrel) 회전 속도 [rpm]
- $K_m$  : 토크 상수

이때 회전속도  $\omega_m$  과 선속도  $V_p$  는 다음 관계식을 만족한다.

$$\omega_m = \frac{n}{r} V_p \quad (2.12)$$

따라서 식(2.12)의 관계를 이용해 식(2.11)을 식(2.10)에 대입해서  $I_m$ 에 관해 다시 쓰면,

$$I_{mu} = \frac{J \cdot n}{K_m \cdot r} \cdot \frac{dV_p}{dt} + \frac{r}{K_m \cdot n} T_u + I_{loss} \quad (2.13)$$

$$J = J_m + J_1/n^2 \quad (2.14)$$

그런데 부하측인 pay-off reel의 관성은 coil이 풀려나감에 따라 변하므로 부하 관성모멘트는 다음과 같이 결정된다.

$$J_1 = \frac{\pi}{32} \cdot \rho \cdot W \cdot (R^4 - R_m^4) \quad (2.15)$$

여기서

- $\rho$  : coil의 밀도 [Kg/m<sup>3</sup>]
- $W$  : coil의 폭 [m]
- $r$  : pay-off reel 반경 [m]
- $R$  : pat-off reel 직경 [m]
- $r_m$  : mandrel 반경 [m]
- $R_m$  : mandrel 직경 [m]

토크 상수  $K_m$ 은 다음 관계식으로 부터 얻어질 수 있다.

$$K_m = \frac{30,000}{\pi} \cdot \frac{P}{NB \cdot IN} \quad (2.16)$$

여기서

- $P$  : power [Kw]
- $NB$  : basic speed [rpm]
- $IN$  : rated current [A]
- $N$  : motor speed [rpm]

이때 만일  $N < NB$ 일 경우에는 위의 식(2.16)이 그대로 적용될 수 있지만,  $N > NB$ 일 경우에는 정속력 운전을 위해서

$$K_m = K_m \cdot NB/N \quad (2.17)$$

와 같이 토크 상수를 모터 속도의 함수로 수정한다. 전 공정이 연속적으로 수행되도록 하기 위해서는 Uncoiler의 pay-off reel에 감겨있는 coil의 길이 및 직경 등을 계속적으로 측정 또는 계산하여 이를 정보로 해서 coil이 거의 풀려나갔을 경우, 다른 mandrel에 감겨있는 coil을 풀어내고 먼저의 mandrel에는 새 coil을 장착하는 과정이 필요하다. 이를 위해 coil의 현재 감긴 길이 및 직경을 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$\pi \cdot \phi_B \cdot \delta N_B = \pi \cdot \phi_D \cdot \delta N_D \quad (2.18)$$

여기서

- $\pi$  : 원주율
- $\phi_B$  : coiler의 직경 [m]
- $\phi_D$  : deflector 직경 [m]
- $\delta N_B$  : coiler 회전속도 [rpm]
- $\delta N_D$  : deflector 회전속도 [rpm]

여기서 deflector는 bridle #1과 uncoiler사이의 적당한 위치에 설치해서 deflector roll의 회전수를 정보로 coil의 풀려나간 길이를 측정하기 위해 쓰인다. 식(2.18)의 관계식으로 부터

$$\phi_B = \phi_D \delta N_D / \delta N_B \quad (2.19)$$

의 관계식을 얻을 수 있다. 따라서 감겨 있는 coil의 길이는 다음과 같이 구해진다.

$$L_m \cdot e = \frac{\pi}{4} (\phi_B^2 - \phi_m^2) \quad (2.20)$$

$$L_m = \frac{\pi}{4 \cdot e} (\phi_B^2 - \phi_m^2) \quad (2.21)$$

여기서

- $L_m$  : 남아있는 coil의 길이 [m]
- $\phi_m$  : mandrel 직경 [m]
- $e$  : coil의 두께 [m]

이제까지 uncoiler의 수학적 모델 및 각 파라미터들에 대한 관계식에 대해 알아 보았는데 coiler의 경우 uncoiler와 관계식은 동일하며, 단지 도금 공정이 수행되는 동안 coil의 직경 및 길이가 증가하므로 관성이 증가하며, 부하측에서 발생하는 장력 발생 관계식이 약간 다르게 표현된다. uncoiler의 선속도 및 장력에 대한 관계식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{1}{a_p} I_{loss} + \frac{b_p}{a_p} T_u + \frac{1}{a_p} I_{mu} \quad (2.22)$$

$$\frac{dT_u}{dt} = \frac{E}{L} (V_{b1} - V_p) \quad (2.23)$$

여기서  $a_p = J \cdot n / K_m \cdot r$  이고,  $b_p = r / K_m \cdot n$  이며,

- $V_p$  : pay-off reel(uncoiler) 선속도 [mpm]
- $V_{b1}$  : bridle #1 선속도 [mpm]
- $T_u$  : pay-off reel과 bridle #1 사이의 장력 [Kg]
- $E$  : coil의 Young's modulus
- $L$  : pay-off reel과 bridle #1 사이의 거리 [m]

이다.

Coiler의 경우는 그 관계식이 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{dV_t}{dt} = -\frac{1}{a_t} I_{loss} - \frac{b_t}{a_t} T_c + \frac{1}{a_t} I_{mc} \quad (2.24)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{E}{L} (V_t - V_{b5}) \quad (2.25)$$

여기서  $a_t = J \cdot n / K_m \cdot r$  이고,  $b_t = g \cdot r / K_m \cdot n$  이며,

- $V_t$  : tension reel(coiler) 선속도 [mpm]
- $V_{b5}$  : bridle #4 선속도 [mpm]
- $T_c$  : bridle #4와 tension reel 사이의 장력 [Kg]
- $L$  : bridle #4와 tension reel사이의 거리 [m]
- $r$  : tension reel 반경

이다.

이제까지 석도금 공정 가운데 uncoiler 및 coiler의 수학적 모델 및 각각의 시변 파라미터들에 대한 관계식을 알아 보았다. 다음에는 도금 공정의 연속성을 보장하기 위해 반드시 필요한 loop tower의 수학적 모델에 관해 알아보기로 한다.

### 2.3 E.L.T(Entry Loop Tower) 및 D.L.T(Delivery Loop Tower)

Uncoiler와 Coiler가 대칭인 관계가 있듯이 E.L.T와 D.L.T도 대칭인 관계를 갖고 있으므로 먼저 ELT에 관해 언급하기로 한다. Loop Tower의 개략도는 그림 3을 참조하기로 한다. 모터 및 부하의 토크식은 다음과 같다.

$$\tau_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \cdot \omega_m + \frac{1}{n} \tau_1 \quad (2.26)$$

$$\tau_1 = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + B_1 \cdot \omega_1 + r \cdot T_o \quad (2.27)$$

식(2.27)을 식(2.26)에 대입해서  $\tau_m$ 에 관해 다시 쓰면,

$$\tau_m = K_m \cdot I_{m0} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m + \frac{r}{n} T_o \quad (2.28)$$

여기서

$$\begin{aligned} J &= J_m + J_1/n^2 \\ B &= B_m + B_1/n^2 \end{aligned}$$

strand에 발생하는 장력은 두 가지 성분으로 구분할 수 있는데, 하나는 up-stream 가속도와 down-stream 가속도간의 오차에 비례해서 발생하는 것으로서  $T_1$ 으로 정의하기로 하고, 또 하나는 car의 실제 속도와 기준 속도의 오차에 비례해서 발생하는 것으로서  $T_2$ 로 정의하기로 한다. 각각의 결과식은 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{J}{g} \left( \frac{2\pi}{N_{bs} \cdot K_{mptr}} \right)^2 \cdot (a_d - a_u) \quad (2.29.a)$$

$$T_2 = \frac{E}{L_v} f(V_c - V_{cr}) \quad (2.29.b)$$

$$T_{bt} = T_1 + T_2 \quad (2.30)$$

$$V_{cr} = (V_u - V_d) / N_{bs} \quad (2.31)$$

여기서

- $N_{bs}$  : strand의 갯수
- $K_{mptr}$  : 모터 1 회전당 car의 이동거리의 비
- $L_v$  : strand 하나의 길이 [m]
- $V_{cr}$  : car의 기준 속도 [mpm]
- $a_d$  : down-stream 선가속도 [mpm]
- $a_u$  : up-stream 선가속도 [mpm]
- $V_d$  : down-stream 선속도 [mpm]
- $V_u$  : up-stream 선속도 [mpm]

여기서 E, L, T의 경우  $V_d = V_{b1}$ ,  $V_u = V_{b2}$ ,  $a_d = \dot{V}_{b1}$ ,  $a_u = \dot{V}_{b2}$ 가 되며, DLT의 경우  $V_d = V_{b3}$ ,  $V_u = V_{b4}$ ,  $a_d = \dot{V}_{b3}$ ,  $a_u = \dot{V}_{b4}$ 이다.

Loop Tower의 strand 저장율은 car의 이동에 의해 결정되며, car의 이동은 Loop tower 입측과 출측에 연결되어 있는 bridle roll의 속도 변화에 대해서 Tower내의 첩란에 걸리는 장력이 원하는 크기가 되도록 제어된다. 즉, 입측 bridle의 선속도가 출측 bridle의 선속도 보다 빨라지면 Loop Tower 내의 car를 올려야 하며, 따라서 저장율이 늘어나게 된다. 반대로 출측 선속도가 빨라지면 저장되어있는 strand의 장력이 일정하게 되도록 car를 내려야 한다. 이와같은 Loop Tower의 역할로 인해서 두 Loop Tower 중간에 위치한 도급 Process 부의 첩란(product)의 선속도가 항상 일정하게 유지될 수 있다. 따라서 Loop Tower의 car의 선속도는 식(2.31)을 기준 속도로 하게된다. 이제 식(2.28)을 근거로 ELT car의 선속도에 관계된 수식에 관해 언급하기로 한다.

$$\frac{dV_e}{dt} = - \frac{B_e}{J_e} V_e - \frac{C_e}{J_e} T_e + \frac{K_{bc}}{J_c} I_{ce} \quad (2.32)$$

$$J_e = (J_m + J_1/n^2) \cdot n/r \quad (2.33)$$

$$B_e = (B_m + B_1/n^2) \cdot n/r \quad (2.34)$$

$$C_e = r/n \quad (2.35)$$

여기서

- $K_{bc}$  : 토크 상수
- $V_e$  : car 선속도
- $I_{ce}$  : 제어입력 전류 또는 모터 전기자 전류

그리고 식(2.29)와 식(2.30)으로부터 ELT의 strand에 발생하는 장력 관계식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$T_1 = A_t (\dot{V}_{b1} - \dot{V}_{b2}) \quad (2.36)$$

$$T_2 = K_c f (V_e - V_{cr})dt \quad (2.37)$$

$$T_e = T_1 + T_2 \quad (2.38)$$

$$V_{cr} = (V_1 - V_2) / N_{bs} \quad (2.39)$$

여기서

- $A_t = (J_m + J_1/n^2) \cdot (2\pi/N_{bs} \cdot K_{mptr})^2 / 9.81$
- $K_{mptr} = 2\pi r/n$
- $K_c = E/L_v$
- $L_v$  : ELT strand 하나의 길이 [m]

DLT car의 선속도 및 장력 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{dV_d}{dt} = - \frac{B_d}{J_d} V_d - \frac{C_d}{J_d} T_d + \frac{K_{bd}}{J_d} I_{od} \quad (2.40)$$

$$J_d = (J_m + J_1/n^2) \cdot n/r \quad (2.41)$$

$$B_d = (B_m + B_1/n^2) \cdot n/r \quad (2.42)$$

$$C_d = r/n \quad (2.43)$$

여기서

- $K_{bd}$  : 토크 상수
- $V_d$  : car 선속도
- $I_{od}$  : 제어입력 전류 또는 모터 전기자 전류

$$T_1 = A_t (\dot{V}_{b4} - \dot{V}_{b5}) \quad (2.44)$$

$$T_2 = K_c f (V_d - V_{dr})dt \quad (2.45)$$

$$T_d = T_1 + T_2 \quad (2.46)$$

$$V_{dr} = (V_3 - V_4) / N_{bs} \quad (2.47)$$

여기서

- $A_t = (J_m + J_1/n^2) \cdot (2\pi/N_{bs} \cdot K_{mptr})^2 / 9.81$
- $K_{mptr} = 2\pi r/n$
- $K_c = E/L_v$
- $L_v$  : DLT strand 하나의 길이 [m]

Loop Tower에서 strand가 저장되어 있는 비율은 다음 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$L_s = \frac{L_p}{L_{mx}} \times 100 [\%] \quad (2.48)$$

여기서

- $L_s$  : 저장률 [%]
- $L_{mx}$  : 저장되어 있는 strand의 최대 길이 [m]
- $L_p$  : 저장되어 있는 strand의 현재 길이 [m]

Loop Tower에 저장되어 있는 전체 strand의 현재 길이  $L_p$ 와 저장율  $L_s$ 는 시변이며, car의 위치에 의해 결정된다. strand 하나의 현재 길이  $L_v$ 는 다음식으로 부터 구할 수 있다.

$$L_v = L_{v0} + f V_c dt \quad (2.49)$$

여기서  $L_{v0}$ 는  $L_v$ 의 초기상태이다. 전체 strand의 현재 길이는

$$L_p = N_{bs} \cdot L_v \quad (2.50)$$

이다. DLT의 경우 ELT의 수학적 모델과 동일하며 DLT car의 초기 위치가 밀려 들어오는 첩란을 저장할 수 있도록 아래쪽에 있어야 한다는 것이 다를 뿐이다.

이제까지 석도급 공정의 속도 및 장력제어를 위한 수학적 모델에 대해 알아 보았다. 다음 절에서는 이 모델을 근거로 한 제어를 제시하기로 한다.

### 3. 라인 제어 알고리즘의 설계

앞절에서 모델링된 석도급 공정을 제어하기 위한 알고리즘은 총 8개 부분으로 나뉘어져 있다. 석도급 공정의 동작 mode는 크게 normal mode 와 emergency stop mode 로 구분되어 지며, 두가지 mode 는 똑같이 bridle roll 의 기준속도를 조절하므로써 각각의 mode 에서 전 공정의 동작이 결정된다. 8개로 나뉘어진 각각의 제어기 및 기준속도 발생부는 다음과 같다.

- 비상 운전시 bridle roll 기준속도 발생
- bridle roll 초기 운전시 기준속도 발생
- bridle #1,2 정상운전시 기준속도 발생
- bridle #3,5 정상운전시 기준속도 발생
- bridle roll 속도 및 장력 제어기
- uncoiler 장력 제어기
- E.L.T 장력 제어기
- D.L.T 장력 제어기
- Coiler 장력 제어기

### 3.1 Bridle Rolls 제어기

bridle roll 제어는 기본적으로 속도제어만 하면 된다. 이때 전체 공정의 작업 속도는 bridle #3에 의해서 결정되며, 다른 Bridle의 속도는 bridle #3에 종속된다. 단, Bridle #2의 경우, 도급 공정 즉, process 부분의 장력을 제어할 수 있어야 한다.

#### 3.1.1 Bridle #1, 3, 4 속도제어

bridle roll 속도제어를 위한 제어입력은 다음과 같다.

$$I_{mb} = b_b \cdot T_b + I_{loss} + a_b \cdot a_1 (V_r - V_b) \quad (3.1)$$

여기서

- $T_b$  : 각 Bridle에 작용하는 장력 [Kg]
- $I_{loss}$  : 각 Bridle 구동 모터의 손실 전류 [A]
- $a_a, b_b$  : 각 Bridle의 내부 파라미터
- $a_1$  : 속도 제어기 이득
- $I_{mb}$  : 입력 전류 [A]
- $V_r$  : 각 Bridle 기준속도 [rpm]
- $V_b$  : 각 Bridle 선속도 [rpm]

#### 3.1.2 Bridle #2 장력 제어

다른 Bridle에서와는 달리 Bridle #2 는 장력이 제어되도록 입력이 결정되어야 한다.

$$I_{mb2} = b_b \cdot T_{b2} + I_{loss} + a_b \cdot a_1 [V_{b4} - V_{b2} - \frac{1}{K_c} (a_2 \cdot T_{b0} + a_3 / T_{b0})] \quad (3.2)$$

여기서

- $a_1, a_2, a_3$  : 장력 제어기 이득

그리고 장력 오차는

$$T_{b0} = T_r - T_p \quad (3.3)$$

이고  $T_{b2} = T_p - T_0$  이다. 여기서  $T_r$ 은 기준 장력,  $T_0$ 는 ELT에서 발생하는 장력이며,  $T_p$ 는 bridle #2와 bridle #3 사이 즉, process부의 장력이다.

#### 3.2 Uncoiler 제어기

Uncoiler 구동 모터에 대한 제어입력 전류식은 크게 두 부분으로 구분된다. 먼저 장력성분 및 손실성분을 전향보상기를 도입해서 소거시켜 주고, 속도 및 장력을 각각 P 및 PI 피드백 제어를 이용해서 제어하도록 구성하였다.

$$I_{mu} = -b_p \cdot T_u + I_{loss} + a_p \cdot a_1 [V_{b1} - V_p - \frac{1}{K_c} (a_2 \cdot T_{b0} + a_3 / T_{b0})] \quad (3.4)$$

$$T_{b0} = T_r - T_u$$

여기서

- $a_1, a_2, a_3$  : 장력 제어기 이득

식(3.4)와 같이 제어기를 구성한 최종 목적은 coil 에 발생하는 장력이 기준장력을 따라 가도록 하는 것이며, 이를 위해서는 결국 앞단의 bridle #1의 속도가 uncoiler의 기준속도가 되도록 해야 한다.

#### 3.3 Coiler 제어기

Coiler 제어는 기본적으로 앞에서 언급한 uncoiler 제어와 동일하며, 단지 coil이 감겨 나감에 따라서 coil의 선속도가 일정하게 유지 되도록 하기 위해 모터의 회전 속도를 줄여 줘야 한다는 것이 다르다. uncoiler 제어와 마찬가지로 전향보상기를 이용해서 장력성분 및 손실성분을 소거시키고 PI 피드백 제어기로써 장력을 제어 한다.

$$I_{mc} = b_c \cdot T_c + I_{loss} + a_c \cdot a_1 [V_{b5} - V_c + \frac{1}{K_c} (a_2 \cdot T_{b0} + a_3 / T_{b0})] \quad (3.5)$$

$$T_{b0} = T_r - T_c$$

여기서

- $a_1, a_2, a_3$  : 장력 제어기 이득

#### 3.4 E.L.T 제어기

Entry loop tower 의 제어는 좀 더 정확히 표현하면 loop tower 의 car 속도 및 장력제어 하는 것이다. car 의 기본동작은 bridle #1 의 speed 에 의해 결정되는데 bridle #1 의 speed 가 감소 또는 "0" 이 되면 tower에 저장된 coil 을 풀어 주므로써 석도급 공정이 연속적이 될 수 있도록 하여야 하며, 이를 위해서는 car 가 아래로 내려오도록 기준속도가 발생 되어야

한다. car의 기준속도 및 제어입력에 대한 관계식은 아래와 같다.

$$V_{cr} = \frac{V_{b1} - V_{b2}}{N_{bs}} \quad (3.6)$$

$$V_{cc} = V_{cr} + 1/K_c (a_2 T_{b0} + a_3 / T_{b0}) \quad (3.7)$$

$$I_{c0} = 1/K_{bc} [ B_0 \cdot V_0 + C_0 \cdot T_0 + J_0 \cdot a_1 (V_{cc} - V_0) ] \quad (3.8)$$

$$T_{b0} = T_r - T_0$$

식(3.6)은 기준속도, 식(3.7)은 식(3.8)을 간단히 표현하기 위해 서 도입한 식이며, 식(3.8) 은 실제 car를 구동시키는 모터에 가해지는 전류입력이다. 역시 전향 보상기를 도입해서 ELT 장력성분 및 손실성분을 소거 시키고 PI 피드백 제어를 이용해서 장력을 제어 하도록 설계하였다.

$a_2$ 와  $a_3$ 는 다음 식으로 부터 계산해서 얻어진다.

$$\tau_n = \left[ \frac{200 \cdot L_v \cdot N_{bs}}{7.81 \cdot 1.6 \cdot 0.5} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

$$\tau = K_1 + K_2 \cdot \tau_n \quad (3.10)$$

$$k_g = K_p / \tau^2 \quad (3.11)$$

$$a_2 = k_g / \tau \quad (3.12)$$

$$a_3 = k_g \quad (3.13)$$

여기서  $K_1, K_2, K_p$ 는 설계 파라미터로서 상수이다.

#### 3.5 D.L.T Control

Delivery loop Tower car의 기본동작은 Bridle #4의 속도에 의해 결정되는데 Bridle #4의 속도가 감소하거나 "0"이 되면 석도급을 마치고 밀려 들어오는 Coil이 Tower에 저장되도록 하기 위해 car가 올라 가도록 동작을 하고, 다시 Bridle #4의 속도가 증가해서 저장되었던 Coil을 소모한 뒤에 Bridle #3와 Bridle #4의 속도가 같아 질때 까지 car가 적당한 위치로 내려 온 뒤에 멈추도록 제어되어야 한다. car의 기준속도 및 제어입력 관계식은 다음과 같다.

$$V_{dr} = \frac{V_{b3} - V_{b4}}{N_{bs}} \quad (3.14)$$

$$I_{cd} = \frac{1}{K_{bc}} \{ B_d V_d + C_d T_d + J_d a_1 [V_{dr} - V_d + \frac{1}{K_c} (a_2 T_{b0} + a_3 / T_{b0})] \} \quad (3.15)$$

$$T_{b0} = T_r - T_d$$

여기서

- $a_1, a_2, a_3$  : 장력제어기 이득

DLT 제어기도 ELT에서와 마찬가지로 장력성분 및 손실성분들이 전향 보상기로부터 소거되고 PI 제어기에 의해서 장력이 제어되도록 설계하였다.  $a_2$ 와  $a_3$ 의 계산은 ELT에서와 동일하므로 생략한다.

#### 4. 시뮬레이션

석도급 공정의 선속도는 30~400 [rpm]이며 시뮬레이션을 수행할 때는 30[rpm]으로 하였다. 도급하고자 하는 대상물은 강판(steel)으로 선정하였으며, 강판에 가해져야할 기준 장력은 300[kg]으로 하였다. 권출기에 감겨있는 coil의 초기 직경은 0.9[m]로 하였으며, 권취기의 직경은 0.8[m]인 것으로 하였다. ELT/DLT strand의 수는 각각 24개로 하였으며, 전체 공정의 파라미터들은 거의 모두 실제 데이터를 사용하였다. 제어기 이득은  $a_1=20, a_2=5, a_3=6$ 으로 하였다.

그림 4는 권출기에 작용하는 장력을 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 기준장력(300kg)을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 입측 Loop tower의 strand에 작용하는 장력을 보여주고 있다. 역시 기준장력을 비교적 잘 따라가고 있는 것을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7은 각각 DLT와 권취기에 작용하는 장력을 나타내고 있다. 이렇듯 각각에 발생하는 장력이 기준장력을 잘 추종하는 것으로 부터 각각의 속도역시 기준속도를 잘 추종할 것이라는 것을 알 수 있다.

1번 권출기에 감겨있는 coil이 전부 풀리게되면 2번 권출기의 coil을 풀어서 먼저 풀려나간 coil의 끝 부분에 용접하는 시간 [4~5초]이 필요하며 그 시간 동안 권출기 및 bridle #1 이 잠시 정지해야 할 필요가 있다. 그림 4는 그때마다 권출기가 정지한후 새 권출기의 coil과 먼저 coil을 용접한 후 ELT에 coil을 저장하는 동안 속도가 증가되고 저장이 끝나면 원래의 기준속도와 일치

되도록 권출기의 속도가 '0'에서 '60[mpm]'까지 증감되고 있을때의 권출기에 작용하는 장력변화를 보여주고있다. 기준장력에 대해서 큰 변화없이 비교적 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 ELT의 strand에 작용하는 장력을 나타내고 있다. bridle #1의 속도가 변하면 그에 따라 ELT의 car 속도가 변하게 되며 그때 ELT strand에 작용하는 장력이 변동하게 되지만 역시 기준장력으로 복귀하려는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 DLT strand에 작용하는 장력을 보여주고 있는데 bridle #4의 속도가 변화하면 car가 이동하게 되며 그에 따라 strand에 작용하는 장력 또한 변할 수 있음을 보여주고 있다. ELT에서와 마찬가지로 기준장력을 비교적 잘 추종하고 있다. 그림 7은 권취기에 작용하는 장력을 보여주고 있다. DLT로부터 밀려들어오는 coil을 1번 권취기에 감고 있다가 coil의 직경이 한계치에 도달하게 되면, 2번 권취기에 감아야 하는데, 2번 권취기로 바꾸는 시간[3~4초]이 필요하다. 그 시간동안 bridle #4가 멈춰야하며 bridle #4의 속도가 감소하거나 멈추게 되면 DLT car는 위로 올라가서 타워에 coil을 저장해야 한다. 권취기가 이러한 동작을 하는 동안 장력이 변할 수 있지만 기준장력에 대해서 큰 변화를 일으키고 있지는 않음을 알 수 있다.

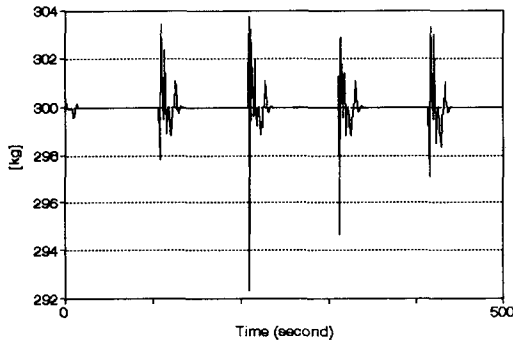


그림 4. 권출기에 작용하는 장력  
fig. 4 Uncoiler Tension

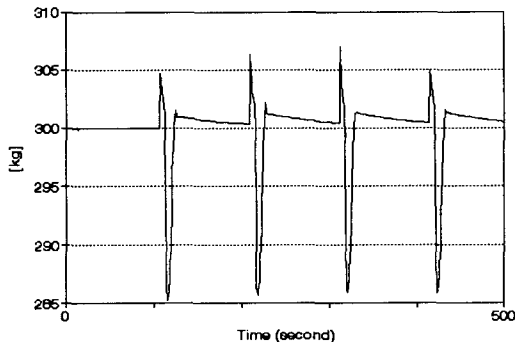


그림 5. 입측 루프타워 스트랜드에 작용하는 장력  
fig.5 Tension per each strands of ELT

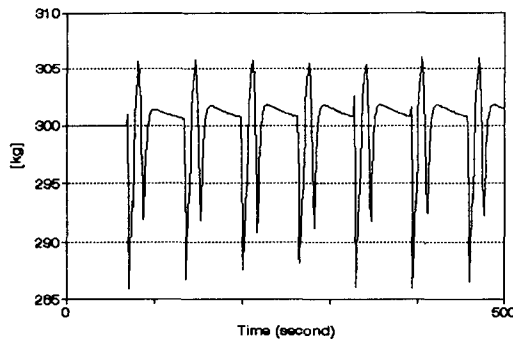


그림 6. 출측 루프타워 스트랜드에 작용하는 장력  
fig.6 Tension per each strands of DLT

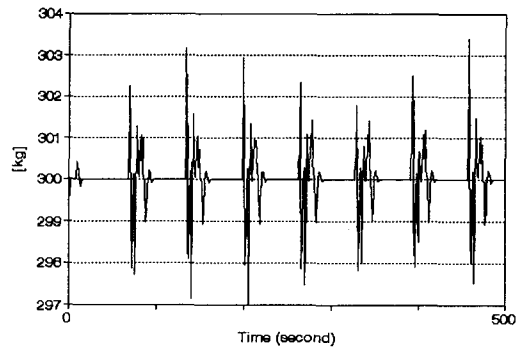


그림 7. 권취기에 작용하는 장력  
fig.7 Coiler Tension

## 5. 결론

본 논문에서는 석도금 연속공정 자동화를 위한 라인 제어기 설계를 위하여, 각 부분공정들이 철판에 의하여 coupling되어 있는 점을 고려한 전체공정의 수학적 모델을 구하였다. 제시된 수학적 모델에 대해서 전향 보상기를 이용하여 부하 토크 및 손실성분들을 소거시켜주고 PI 제어기를 이용하여 전체 시스템의 안정도 및 오차의 수렴성이 보장되도록 하였다. 물리적인 시스템을 수학적 모델로 표현하는 과정에서 정확하게 고려되지 못한 부분, 즉 비모형화 특성이나 파라미터 불확실성 및 외란 등을 고려한 강인한 제어기를 설계하는 것이 앞으로의 연구과제이다.

## 참고문헌

- [1] 高橋 りょう 一, "鐵鋼 壓延 프로세스における 自動制御 시스템", 計測と制御, Vol.27, No.4, pp.333-340, 1988.
- [2] Ikuya Hoshino, et.al, "Observer-Based Multivariable Control of the Aluminum Cold Tandem Mill", IFAC, 1987, 10th, Vol.2, pp.138-143, 1987.
- [3] K.J.Astrom, "Computer Control of a Paper Machine - an Application of Linear Stochastic Control Theory", IBM Journal, pp.389-405, July, 1967.
- [4] Akira Kitamura, Masami Konishi and Yukio Naito, "Multi-variable Thickness Control System for Tandem Cold Mills Based on Decentralized Technique", Trans. ISICE, Vol.4, No.4, pp.140-154, 1991.
- [5] Horikita Takashi, et.al, "Reel Control by Thyristor Motor Drives", Hitachi Review, Vol.61, No.10, pp.705-710, 1979-10.

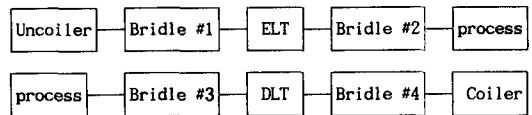


그림 1. 석도금 공정의 기능적 블록도  
Fig.1 Functional Block Diagram of Tinning Line

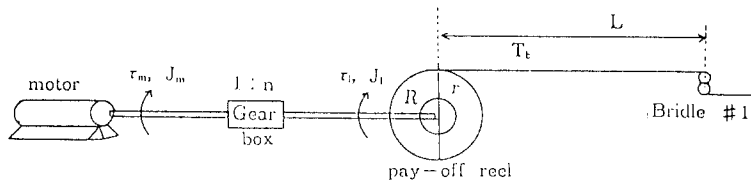


그림 2. 권출기/권취기의 개략도.  
 Fig.2 Simplified Diagram for Uncoiler/Coiler

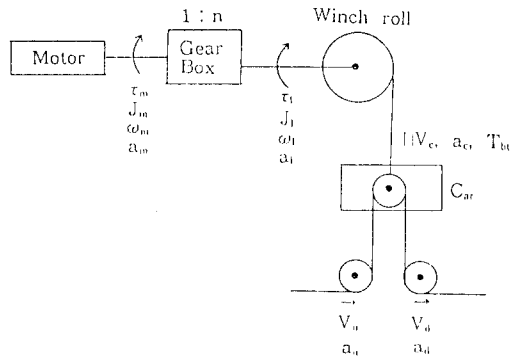


그림 3. Loop Tower의 개략도  
 Fig.3 Simplified Diagram for Loop Tower