

환상 압연 공정의 적응 제어

최형돈 조형석  
한국과학기술원 생산공학과

An Adaptive controller for  
Ring Rolling Processes

Hyung-Don Choi and Hyung Suck Cho  
Department of Production Engineering, KAIST

Abstract

This paper considers the ring rolling process control and treats the problem of controlling the pressure roll and conical roll motion which critically affects final quality of the rolled products. Since the process dynamics reveals nonlinear characteristics and parameter uncertainty, an adaptive control scheme was applied. The results show that this proposed adaptive control scheme can produce rolled rings of closer dimensional tolerances as compared with nonadaptive control system.

I. 서론

환상 압연 공정은 압연 공정중에서 독특한 형태의 하나로 이음매가 없는 링 형상의 제품을 만드는 금속 성형공정이다. 이 공정은 두개의 롤 사이에서 가열된 원소재의 단면을 줄어들게 하면서 직경을 증가시켜 링을 생산해 내는 공정으로써 일반 압연 공정에 비하여 제품에 섬유조직 흐름이 생겨 강도가 크고, 소재의 손실이 적어 원가절감을 기할 수 있다는 등의 장점이 있다.

Fig.1 에서 보는 것과 같이 환상압연 공정은 압력롤 (pressure roll) 이 구동롤 (driven roll) 쪽으로 이동함에 따라서 링의 폭이 줄어들게 되고 직경이 늘어나게 된다. 또한 환상의 원추롤 (conical roll) 은 링의 높이방향의 치수를 제어하게 된다.

그러나 환상압연 공정에 의해서 안정성 있게 링을 생산하려면 소성 설계에서 나온 결과를 공정중에 이용하여 링의 성형 범위에 맞게 압력롤 및 원추롤을 정확하게 제어하여야 한다. 1983년 KAIST<sup>1)</sup>에서는 이러한 소성 설계의 결과를 이용하여 공정중 압력롤 및 원추롤의 속도에 대한 공정 계획을 만들었으며, Needham<sup>2)</sup>은 압력롤의 과도한 진입 속도가 소성 한지를 발생시킴을 관찰하였다.

따라서 환상 압연 공정중 압력롤 및 원추롤의 속도가 공정 계획상의 속도로 추적이 된다면, 안정된 성형을 할 수

있을뿐 아니라 압력롤 및 원추롤의 최종 위치를 정확히 제어할 수가 있으므로 원하는 폭, 높이와 직경을 갖는 링을 생산할 수 있게 된다. 이러한 압력롤 및 원추롤의 정확한 제어를 위해서는 압력롤 및 원추롤의 동특성에 대한 해석이 필요하게 되는데 1973년 Hawkyard<sup>3)</sup>은 소성변형 구간에 대해 이차원의 단순 압입으로 가정하여 슬립라인 이론을 도입하여 근사적 해법으로 압력롤의 압연력을 계산하였다. 또한 최근에 Yun<sup>4)</sup>은 이러한 압력롤의 압연력에 대한 동특성을 고려하여 압력롤의 속도가 공정 계획상의 속도를 추적하는 부최적 제어기를 설계하였으나 실제 공정상 동특성에 큰 영향을 미치는 파라미터 변화는 고려하지 못했다.

본 연구에서는 이러한 파라미터 변화가 있는 환상

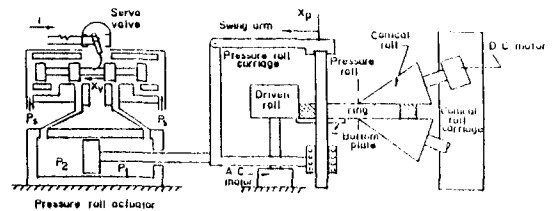


Fig.1 Schematic diagram of ring rolling mill

압연 공정에 적응제어기를 사용하여 압력롤 및 원추롤의 속도가 공정 계획상의 속도를 추적하는 적응 제어 시스템을 설계하였으며, 이러한 적응제어기의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비적응제어기와 비교하였다.

II. 성형공정의 동특성

안정성 있게 링을 생산하려면 소성 설계에서 나온 결과를 이용하여 링의 성형 범위에 맞게 압력롤 및 원추롤을 제어하여야 하는데, 이와같은 소성 설계의 결과는 일반적으로 압력롤 및 원추롤의 속도에 대한 공정 계획으로 표시될 수 있다.<sup>1)</sup> 즉 안정성 있게 링을 생산하기 위해서 공정중 압력롤 및 원추롤이 가져야 할 속도를 표시한 것이다. 이와

같은 공정계획대로 압력롤 및 언추롤의 속도를 제어하게 되면 안정성 있는 공정을 할 수 있을뿐 아니라 최종 제품의 폭이나 높이, 직경등도 원하는 치수로 맞출 수 있기 때문에 성형공정의 제어는 압력롤 및 언추롤의 속도를 이와 같은 공정 계획에 얼마나 잘 추적시키느냐가 가장 중요한 목적이 된다. Fig.2 에 일반적으로 많이 사용하고 있는 공정 계획이 나와있다.

이러한 공정계획은 압력롤 및 언추롤의 속도가 최대의 속도에 도달하기 위한 가속구간과 최대속도구간 그리고 감속구간으로 이루어져 있다. 압력롤과 언추롤에 의한 성형은 일반적으로 분리시켜서 작업을 하며, 공정의 마지막 단계에서는 최종의 원하는 치수를 맞추기 위하여 천천히 가공하는 단계가 포함되어 있다.

이러한 공정계획의 속도대로 압력롤 및 언추롤의 속도가 추적되기 위해서는 압력롤 및 언추롤을 구동시켜야 하는데 Fig.1 에 압력롤을 구동시키기 위한 유압서보밸브와 유압 구동장치가 나와있다. 유압서보 밸브에 전류를 가해주면, 유압 실린더 양쪽에 압력차가 생기게 되어서 압력롤을 구동시키게 된다. 이 경우 압력롤의 운동은 다음과 같은 상태방정식으로 표현될 수가 있다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1)$$

$$M_p \dot{x}_2 = A_p P_{Lp} - B_p x_2 - F_p \quad (2)$$

여기에서  $x_1$  : 압력롤의 변위  
 $x_2$  : 압력롤의 속도  
 $A_p$  : 압력롤 구동 실린더의 면적  
 $P_{Lp}$  : 압력롤 구동 실린더의 압력차  
 $F_p$  : 압력롤이 링으로부터 받는 반력  
 또한 서보밸브의 스톱의 운동은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{\tau} x_3 + \frac{C}{\tau} u \quad (3)$$

여기에서  $x_3$  : 서보밸브의 등가 오리피스 면적  
 $\tau$  : 서보밸브의 시정수  
 $C$  : 서보밸브의 이득  
 $u$  : 서보밸브의 제어입력

그리고 유압 실린더에 연속방정식을 적용시키면

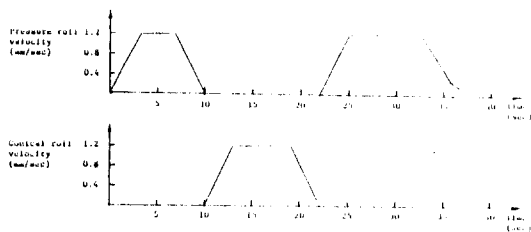


Fig.2 Velocity schedule of pressure roll and conical roll

$$\dot{x}_4 = \frac{4\beta}{V} [x_3 \sqrt{(P_s - (x_3/x_4)) x_4}] / \rho - A_p x_2 - c_\lambda x_4 \quad (4)$$

여기에서  $x_4$  : 압력롤 구동 실린더의 압력차  
 $\rho$  : 작동유의 질량 밀도  
 $c_\lambda$  : 충누설 계수

식 (1)부터 (4)까지는 압력롤로 성형할때의 압력롤의 운동을 나타내주나 이러한 동특성을 정확히 알기 위해서는  $F_p$  에 대한 해석이 필요하게 된다. Hawkyard<sup>3)</sup> 의 계산에 의하면 압력롤이 링으로부터 받는 반력은

$$F_p = 2\kappa \gamma_p H_m \ell_p \quad (5)$$

여기에서  $\kappa$  : 평면 변형에서의 전단 항복응력  
 $\gamma_p$  : 압력계수  
 $H_m$  : 링의 평균높이  
 $\ell_p$  : 링과 압력롤과의 접촉길이

링과 압력롤과의 접촉길이는 Fig.3 과 같이 링의 기하학적 형상으로 부터 얻어질 수 있다. 즉

$$\ell_p^2 = R_2^2 - (R_2 - K_2)^2 \quad (6)$$

링의 체적을  $V$  라 하고  $\ell_p$  를 계산해 보면

$$\ell_p = [R_2 - \{R_2 - \frac{30x_2(R_m + \frac{V}{4\pi H_m R_m})}{R_1 N_D}\}^2]^{1/2} \quad (7)$$

여기에서  $N_D$  : 구동롤의 회전속도 (RPM)  
 $R_m$  : 링의 평균반경

압력 계수  $\gamma_p$  는 2차원의 단순 압입으로 가정하면 다음과 같이 평균 폭  $W_m$  과  $\ell_p$  로 표시될 수 있다.

$$\gamma_p = 0.7203 + 0.2886(\frac{W_m}{\ell_p}) - 0.0089(\frac{W_m}{\ell_p})^2 \quad (8)$$

식(1)부터 (8)까지는 압력롤의 동특성을 표현하는 식들로서 압력롤의 운동을 나타내 준다. 그러나 이러한 식들은 성형중 링의 온도변화에 따른 전단 항복응력  $\kappa$  의 변화는 표현시켜주지 못하고 있다.<sup>5)</sup> 실제공정중 전단 항복응력은 상당히 큰 변화를 보이고 있어서,  $\kappa$  를 일정한 값으로 가정하여 제어시스템을 구성하면 압력롤의 속도가 공정계획과 상당히 차이를 보여 궁극적으로는 정확한 치수의 최종 제품을 얻을 수 없게된다. 그러나  $\kappa$  의 변화에 대한 예측은 상당히 어려운 입장이므로 압력롤의 속도가 공정계획을 따라가기 위해서는 적응제어가 필요한 입장이다.

언추롤로 링을 가공하는 경우에도 유압서보 밸브와 유압 실린더를 사용하여 언추롤을 구동시키게 되므로 언추롤의 운동방정식은 압력롤의 운동방정식과 같은 형태로 표현된다. 즉

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (9)$$

$$M_c \dot{y}_2 = A_c P_{Lc} - B_c y_2 - F_c \quad (10)$$

여기에서  $y_1$  : 원추롤의 변의  
 $y_2$  : 원추롤의 속도  
 $A_c$  : 원추롤 구동 실린더의 면적  
 $P_{Lc}$  : 원추롤 구동 실린더의 압력차  
 $F_c$  : 원추롤이 링으로부터 받는 반력

원추롤이 링을 향해서 전진함에 따라서 링으로부터 반력을 받게 되는데, 이러한 반력은 원추롤에 의한 링의 가공 현상을 두 개의 대칭인 롤 사이에서의 압연 현상으로 간략화시켜서 생각할 수 있다. 이 경우 링과 원추롤과의 접촉 길이를 계산해 보면

$$\ell_c = \sqrt{(H_0 - H_1) R_m \sin \frac{\phi}{2}} \quad (11)$$

여기에서  $H_0$  : 원추롤로 들어가는 링의 높이  
 $H_1$  : 원추롤로부터 나오는 링의 높이  
 $\phi$  : 원추롤의 꼭지각

식 (11)을 사용하면 원추롤이 링으로부터 받는 반력은 다음과 같이 표시된다.

$$F_c = 2 \kappa \gamma_c W_m \ell_c \quad (12)$$

여기에서  $\gamma_c$  : 압력계수  
 $W_m$  : 링의 평균폭

식 (9)부터 (12)까지는 원추롤의 동특성을 표시하는 식들로서 원추롤의 운동을 나타내 준다. 그러나 압력롤의 경우와 마찬가지로 전단 항복응력  $\kappa$ 의 변화를 표현시켜 주지 못하므로 원추롤의 속도가 공정 계획을 따라가기 위해서는 역시 적응제어기가 필요하게 된다.

### III. 적응 제어기 설계

환상 압연 공정에서는 압력롤및 원추롤을 구동시키기

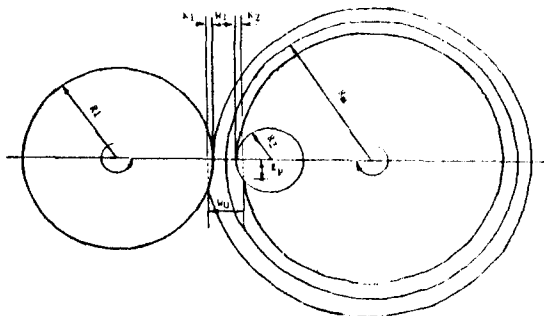


Fig.3 Overall geometric configuration in ring rolling process

위하여 유압시스템을 사용하고 있는데, 이러한 유압시스템의 동특성은 압력롤및 원추롤의 동특성에 비하여 상당히 빠르다. 또한 환상 압연 공정 자체가 상당히 느린공정 이므로 압력롤및 원추롤을 구동시키는 유압시스템의 동특성은 일반적으로 무시할 수 있다. 이와 같은 경우 실린더 양쪽의 입력차는 유압서보 밸브에 가해주는 전류에 비례하게 제어 가능하데 즉

$$P_{Lp} = K u_p \quad (13)$$

여기에서  $K$  : 비례상수  
 $u_p$  : 서보 밸브의 입력전류

따라서 식 (13)을 사용하여 식 (1)과 (2)를 다시 써보면

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (14)$$

$$M_p \dot{x}_2 = A_p K u_p - B_p x_2 - F_p \quad (15)$$

압력롤이 링을 향해서 전진함에 따라서 링으로부터 받는 반력  $F_p$  를 알 수 있으면 식 (15)로부터 압력롤의 속도가 공정계획상의 속도를 따라 갈 수 있는 개회로 제어 입력을 구할 수 있다. 즉

$$u_p = (M_p \ddot{x}_{1d} + B_p \dot{x}_{1d} + F_p) / A_p K \quad (16)$$

여기에서  $\ddot{x}_{1d}$  : 공정 계획상의 압력롤의 가속도  
 $\dot{x}_{1d}$  : 공정 계획상의 압력롤의 속도

그러나 링의 전단 항복응력  $\kappa$ 가 공정중 변화하게 되므로 링으로부터 받는 반력  $F_p$  는 실제로 예측이 불가능하므로 이와같은 경우 압력롤의 속도가 공정 계획상의 속도를 따라가기 위한 한 가지 방법으로 적응제어를 생각해 볼 수 있다. <sup>6)</sup> 즉 링의 전단항복응력을 추정하고, 그 추정된 전단 항복응력의 값으로부터 압력롤의 제어 입력을 구하는 방법이다. 이와같은 적응제어기의 경우 압력롤의 제어 입력은

$$u_p = (M_p \ddot{x}_{1d} + B_p \dot{x}_{1d} + \hat{F}_p) / A_p K + K_p (x_{1d} - x_1) + k_v (\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) \quad (17)$$

여기에서  $\hat{F}_p$  은 링으로부터 받는 반력의 추정값으로 다음과 같이 표시된다.

$$\hat{F}_p = 2 \hat{\kappa} \gamma_p H_m \ell_p \quad (18)$$

식 (17)의  $K_p (x_{1d} - x_1) + k_v (\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1)$  는 적응제어 시스템의 안정성을 위하여 첨가된 항이다.

이 경우 오차를 다음과 같이 정의하면

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (19)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{\kappa} = k_a (2\gamma_p H_m \hat{\kappa}_p) y \quad (23)$$

식 (15)(17)(19)(20)으로부터

$$M_p \ddot{e} + (B_p + A_p k_v k) \dot{e} + A_p k_p k e = n \quad (21)$$

여기에서  $n = F_p - \hat{F}_p$

$y = c_p e + c_v \dot{e}$  로 정의하면 식 (21)은 Fig.5 와 같이 시간에 따라서 변화하지 않는 선형 블록과 시간에 따라서 변하는 비선형 블록으로 나눌 수 있는데, 이 경우 시간에 따라서 변하지 않는 선형블록은 입력이  $n$  이고 출력이  $y$  인 선형블록으로 표시된다. 이와같은 선형 블록의 전달 함수를 구해보면

$$G(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{c_v s + c_p}{M_p s^2 + (B_p + A_p k_v k) s + A_p k_p k} \quad (22)$$

이와같은 시간에 따라서 변화하지 않는 선형블록은  $k_p$  와  $k_v$  를 적당히 선정함으로써 strictly positive real 하게 만들 수 있다. 이 경우 전체 제어 시스템이 안정 되기 위해서는 비선형 블록이 Popov 의 integral inequality 를 만족시켜야 하는데 이를 위하여 전단 항복응력을 추정하는 제어 알고리즘을

이 경우 Popov 의 integral 은

$$\begin{aligned} \int_0^T w(t)y(t)dt &= \int_0^T (\hat{F}_p - F_p)y dt \\ &= \int_0^T 2\gamma_p H_m \hat{\kappa}_p (\hat{\kappa} - \kappa)y dt \\ &\geq - \frac{(\hat{\kappa}(0) - \kappa)^2}{2k_a} = -\gamma_0^2 \end{aligned}$$

따라서 앞에서 제시한 적응제어 시스템은 안정한 시스템을 알 수 있다. 이러한 적응제어 시스템의 전체 블록 선도가 Fig.4 에 나와있다.

#### IV. 결과 및 토론

시뮬레이션을 수행할때 각 파라미터는 KAIST 에서 연구 개발한 전산화된 환상 압연기의 수치를 사용하였으며, 전단 항복응력의 변화는 실제로 링을 가공하여 얻은 온도 데이터와 변형률 (strain rate) 을 고려하여 구하였으며, 가공에 사용한 롤과 링은 Table 1 과 같은 수치를 사용하였다. 시뮬레이션 결과를 공정계획상에서의 평균 반경과 실제 평균 반경과의 오차로 나타냈으며, 전단 항복응력과 압연력도 비교하였다.

Fig.6 에 적응제어 시스템과 비적응제어 시스템의 평균 반경과 Fig.7 에 전단 항복응력의 실제값과 추정

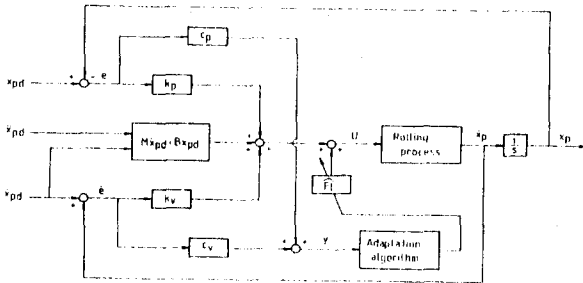


Fig.4 Block diagram of adaptive controller for ring rolling process

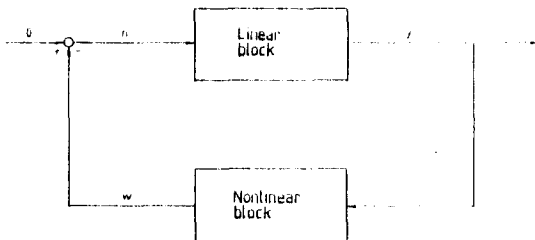


Fig.5 Popov loop for adaptive controller

Table 1 Parameters of the ring and roller geometry

Ring geometry	Initial dimension	Desired final dimension	Roller geometry
Mean radius(R <sub>m</sub> ), mm	83.75	195.37	N(rpm) 47
Width(w), mm	47.5	25.7	R <sub>1</sub> (mm) 275
Height(H), mm	52.0	41.2	R <sub>2</sub> (mm) 37.5

Table 2 Final mean radius error for various controller gains

Controller gain	With adaptation loop				Without adaptation loop	
	5	1	30	5	5	5
k <sub>p</sub>	5	1	30	5	5	5
k <sub>v</sub>	5	1	30	5	5	5
c <sub>p</sub>	10	10	10	10	10	10
c <sub>v</sub>	10	10	10	10	10	10
k <sub>a</sub>	10	10	10	2	50	0
Final mean radius error(mm)	0.44	0.50	0.25	2.34	0.06	4.30

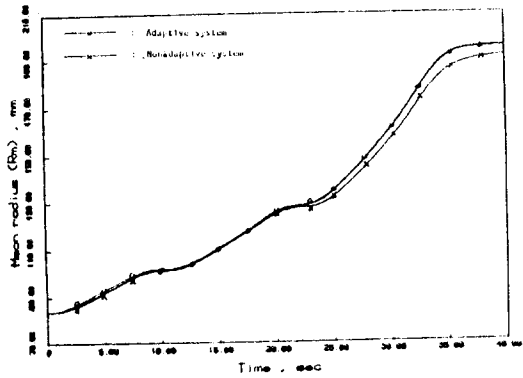


Fig.6 Mean radius in adaptive and nonadaptive system  
system parameters :  $k_p=k_v=5$

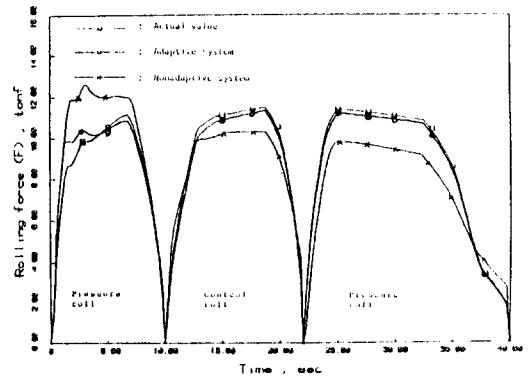


Fig.8 Rolling force in adaptive and nonadaptive system

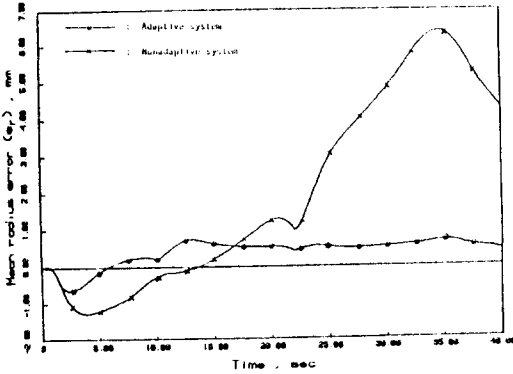


Fig.6 Mean radius error in adaptive and nonadaptive system  
system parameters :  $k_p=k_v=5$

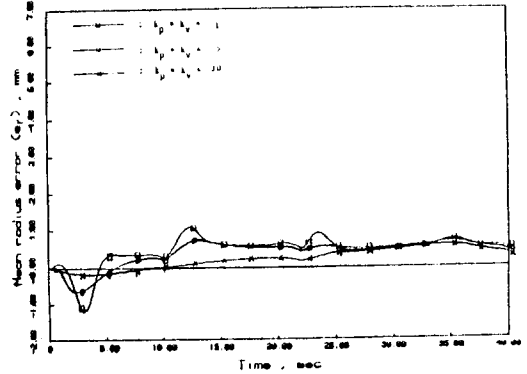


Fig.9 The variation of mean radius error for various  $k_p, k_v$   
system parameters :  $c_p=c_v=k_a=10$

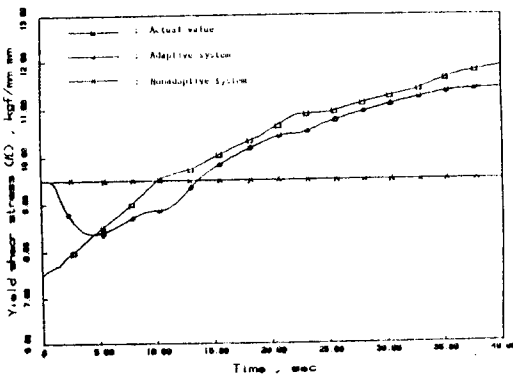


Fig.7 Yield shear stress in adaptive and nonadaptive system

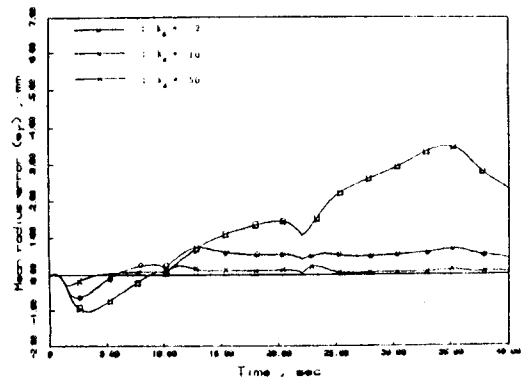


Fig.10 The variation of mean radius error for various  $k_a$   
system parameters :  $k_p=k_v=5, c_p=c_v=10$

값이 나와 있는데 이것을 보면 적응 제어 시스템은 전단 항복응력을 일정한 값으로 추정하여 제어하므로 초기에 압력롤로 성형하는 구간에서는 제어 입력이 크게 들어감으로써 압력롤의 속도를 공정설계에서의 속도보다 크게하여 음의 오차가 발생함을 알 수 있다. 그 이후 원추롤로 성형하는 구간에서는 실제의 전단 항복응력이 점점 커짐으로 인해서 추정값과의 차이가 줄어들게 되어 음의 오차를 줄여주나, 이후에 다시 압력롤로 성형하는 구간에서는 추정값이 실제값보다 작게 되어서 압력롤의 속도를 공정설계에서의 속도만큼 올려 주지 못함으로써 양의 오차가 발생하게 된다. 따라서 상당히 많은 부분의 성형이 전단 항복응력을 실제값보다 작게 추정하여 제어가 이루어지기 때문에 최종 링의 평균 반경 오차는 상당히 큰양의 값을 보이게 된다.

이와 같은 비적응 제어 시스템에  $k_a = 10$  의 적응 제어 회로를 첨가시킨 결과 비적응 시스템에 비해서 오차가 상당히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 적응 제어 시스템에서도 초기에 전단 항복응력의 추정값이 실제값보다 큰 구간에서는 음의 오차를 보이고 있으나, 이후 추정값이 실제값보다 작으므로 양의 오차를 보이고 있다. Fig.7의 적응 제어 시스템의 전단 항복응력의 추정값을 보면 압력롤이나 원추롤의 속도가 작아지는 구간에서는, 추정 알고리즘이 링과 압력롤 및 원추롤과의 접촉 길이에 추정값의 변화율이 비례하게 되어 있어서 압력롤 및 원추롤의 속도가 작아지면 접촉 길이가 작아져서 추정값을 변화시키지 못하기 때문에 실제값과 상당한 차이를 보인다.

Fig.8 에 적응 제어 시스템과 비적응 제어 시스템의 압연력과 압연력의 추정값이 나와 있는데, 이것을 보면 전단 항복응력의 추정값이 실제값보다 큰 구간에서는 압연력의 추정값도 실제값보다 크고, 전단 항복응력의 추정값이 작은 구간에서는 압연력의 추정값도 작음을 알 수 있다.

Fig.9 에서는  $k_p, k_v$  가 링의 평균 반경 오차에 미치는 영향을 보기 위해서 다른 이득들은 일정한 값으로 유지시키며  $k_p, k_v$  를 1에서 30까지 변화시켜 링의 평균 반경 오차를 구하였다. 이것을 보면  $k_p, k_v$  가 커짐에 따라서 링의 평균 반경 오차는 약간씩 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig.10 에서는  $k_a$  가 링의 평균 반경 오차에 미치는 영향을 보기 위해서 다른 이득들은 일정한 값을 유지시켜주고  $k_a$  를 2에서 50까지 변화시켜 링의 평균 반경 오차를 구하였다. 이것을 보면  $k_a$  는 실제 압연력을 추정하는데 직접적인 관련이 있으므로  $k_a$  가 커짐에 따라서 링의 평균 반경 오차는 상당히 많이 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 2 에는 제어기의 이득 변화에 따른 최종 평균 반경 오차가 나와 있다.

## V. 결 론

안정성있는 공정과 최종제품의 치수를 얻는 치수로

맞추기 위해서 전단 항복응력의 변화를 고려하여 압력롤 및 원추롤의 적응 제어 시스템을 설계하였다. 사용된 적응 제어기는 링의 전단 항복응력을 추정하고, 그 추정된 값을 사용하여 압연력을 계산함으로써 압력롤 및 원추롤의 제어 입력을 구하는 방법으로 비적응 제어기에 비하여 링의 평균 반경 오차를 상당히 줄일 수 있었다. 링의 평균 반경 오차는  $k_p, k_v$  보다 전단 항복응력을 추정하는데 직접 관련된  $k_a$  에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Yang, D.Y., Cho, H.S., and Song, C.S., "Development of Computerized Horizontal-Vertical Ring Rolling Machines", Department of Production Engineering, KAIST, 1983.
2. Johnson, W. and Needham, G. "Plastic Hinges in Ring Indentation in Relation to Ring Rolling", Int.J. Mech. Sci., Vol.10, 1968, pp 487-490.
3. Hawkyard, J.B., Johnson, W., Kirkland, J. and Appleton, E., "Analysis for Ring Force and Torque in Ring Rolling with some Supporting Experiments", Int. J. Mech. Sci., Vol.15, 1973, pp 873-893.
4. Yun, J.S. and Cho, H.S., "A Suboptimal Design Approach to the Ring Diameter Control for Ring Rolling Processes", Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.107, Sept., 1985, pp 207-212.
5. Ryoo, J.S., "Analysis of the Ring Rolling Process by Using Dual Velocity Field", Ph.D. thesis, Department of Production Engineering, KAIST, 1985.
6. Horowitz, R. and Tomizuka, M., "An Adaptive Control Scheme for Mechanical Manipulators- Compensation of Nonlinearity and Decoupling Control", ASME Paper, 80-WA/DSC-6.