

축교정을 위한 기하학적 진직도 적응제어기 설계

김 승 철* · 정 성 중**
(1999년 11월 12일 접수)

Design of a Geometric Adaptive Straightness Controller for Shaft Straightening Process

Seung-Cheol Kim and Sung-Chong Chung

Key Words: Shaft Straightening(축교정), Springback(스프링백), Three-Point Bending(3점굽힘), Multi-Step Straightening(다단계교정), Fuzzy Self-Learning(퍼지자기학습), Geometric Adaptive Control(기하학적 적응제어)

Abstract

In order to minimize straightness error of deflected shaft, a geometric adaptive straightness controller system is studied. A multi-step straightening and a three-point bending process have been developed for the geometric adaptive straightness controller. Load-deflection relationship, on-line identification of variations of material properties, on-line springback prediction, and real-time hydraulic control methodology are studied for the three-point bending process. By deflection pattern analysis and fuzzy self-learning method in the multi-step straightening process, a straightening point and direction, desired permanent deflection and supporting condition are determined. An automatic straightening machine has been fabricated for rack bars by using the developed ideas. Validity of the proposed system is verified through experiments.

1. 서론

진직도가 중요한 변수가 되는 기계 부품들은 각 가공공정 마다 필요한 진직도를 확보하고 있어야 한다. 자동차의 엔진에 사용되는 캠축(cam shaft)과 주축(main shaft), 조향장치에 사용되는 랙바(rack bar)와 요축(yoke shaft) 등은 정확한 운동 전달 특성과 내구성 향상을 위해 진직도와 경도의 유지가 필요하다. 특히 이러한 축은 선삭가공을 수행하고 나서 연삭공정을 진행하기 전에 경도를 높이기 위해 고주파열처리 공정을 하게 된다. 그러나 각각의 위치에서의 열처리 정도의 차

이에 따라 부분적인 잔류응력이 발생하고 축이 휘어지게 된다. 따라서 열처리 후 휘어진 축에 대하여 연삭공정의 여유를 최소화하여 생산성을 증대시키기 위해서는 진직도 교정작업이 필요하게 된다. 그러나 가공전 소재의 물성치, 열처리조건 그리고 공정변수 등의 다양한 변화에 따른 진직도 오차를 최소화하기 위해서는 이들 값의 차에 무관하게 좋은 진직도를 얻어낼 수 있는 축교정기가 요구된다.^(1,2)

축의 굽힘공정에 의한 교정에 있어서 교정량을 예측하기 위해서는 현재 위치에서 펀치의 감압후 스프링백(springback)의 예측이 중요하다. 스프링백은 항복점, 강도 등과 같은 축의 물성치 변화뿐만 아니라 휨량, 지지조건 등의 공정변수의 변화에도 중요한 영향을 받는다. 실제적으로 굽힘공정에서 만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 이 변수들을 실시간으로 추정하여 조정하여야 한다.

굽힘공정에 의한 성형작업의 자동화를 위해 무

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : schung@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0444 FAX : (02)2298-4634

엇보다 중요한 것은 정확하고 빠르게 스프링백량을 예측하는 것이다.⁽³⁻⁷⁾ Trostmann⁽³⁾ 등은 굽힘공정의 수학적 모델을 제안하여 임의의 형상으로 축을 연속적으로 성형할 수 있는 페루프 제어시스템을 구현하였다. Hardt^(4,5) 등은 최대 모멘트와 곡률을 측정함으로써 박판의 스프링백량을 정확히 예측할 수 있는 페루프 형상제어기를 개발하고, 브레이크포밍 공정에서 소재의 물성치나 형상이 변화여도 원하는 곡률의 형상을 만들 수 있는 인프로세스 제어방법을 제안하였다. Chandra⁽⁶⁾는 박판성형에서 소재 및 공정상의 중요 변수들의 온라인 규명(on-line identification)을 통한 스프링백의 실시간(real-time) 예측과 제어를 수행한 바 있다. 그리고 강관의 휨교정을 위하여 Katoh⁽⁷⁾ 등은 3점굽힘 공정에서 유압실린더로부터 압력과 변위를 측정함으로써 스프링백을 예측하는 관측기를 제안하였다.

본 연구에서는 휘어져 있는 축을 몇 개의 변위계로 휨량을 측정하고 그 위치를 가압함으로써 원하는 공차 범위 이내로 진직도를 교정하는 기하학적 진직도 적응제어 시스템의 개발이 목적이다. 3점굽힘 공정에서는 원형단면의 축에 대한 굽힘모델을 기초로 소재의 물성치 변화를 규명하여 온라인으로 스프링백을 예측할 수 있는 관측기를 제시하고, 가압 중에 실시간으로 소성변형량을 제어하기 위한 펀치 위치제어 시스템을 설계하였다. 다단계 교정공정은 측정된 휨량으로부터 휨형태, 최대휨량, 휨방향 등을 분석하여 최소의 교정회수로 최상의 교정정도를 얻기 위한 최적의 교정방법을 계산한다. 그리고 이렇게 설정된 교정방법으로 3점굽힘 공정에서 반복 교정을 수행한다. 또한, 최적의 교정방법을 계산하고 교정성능을 향상시키기 위해 퍼지 자기학습 제어기(fuzzy self-learning controller)를 적용하여 교정 후의 휨형태 변화를 예측할 수 있도록 하였다.

2. 3점굽힘 공정

2.1 하중-처짐 모델

Fig. 1과 같이 축의 양 끝단을 단순지지하고 임의의 한 지점을 가압하는 3점굽힘 공정에 대한 일반적인 하중-처짐 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 그림의 하중-처짐 모델에서 가압공정 중의 탄성영역을 근사적으로 직선 C_1 , 소성영역을 근사적

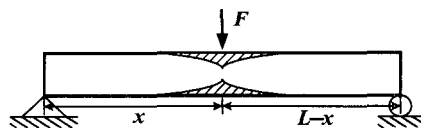


Fig. 1 Three-point-bending model

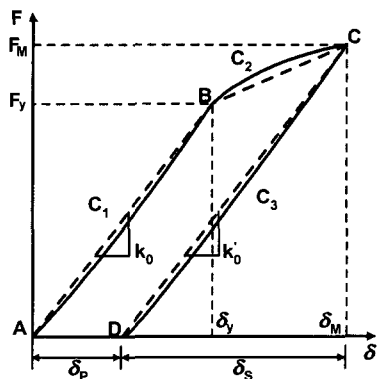


Fig. 2 Load-deflection model of 3-point-bending for simple beams

으로 직선 C_2 , 가압공정의 탄성복원영역을 근사적으로 직선 C_3 으로 구분할 수 있다. 점 B는 항복점이며, δ_M 과 F_M 은 최대 변위 및 하중이다. 그리고 δ_S 는 스프링백으로 가압공정에서 탄성복원에 의해 발생한다. 그러므로 스프링백을 구하면 교정량 δ_P 를 제어할 수 있다.

2.2 실시간 스프링백 예측

소재 물성치의 변화는 스프링백의 변화를 야기시킨다. 그러므로 교정공정 규명에 있어서 첫 단계는 관련된 소재의 변수를 실시간으로 결정하는 것이다. 스프링백은 소재의 탄성복원에 기인하는데 탄성특성, 항복점 그리고 소재의 현재상태 정보로부터 스프링백을 계산할 수 있다.⁽¹⁾

Fig. 2로부터 가압 후 추정되는 교정량은

$$\delta_P = \delta_M - \delta_S \quad (1)$$

이고, 여기서 탄성복원영역인 직선 C_3 은 하중을 제거할 때 탄성상태이므로 가압시의 탄성영역 직선 C_1 과 평행하다고 가정할 수 있다. 즉, $k_0 = k'_0$. 그러므로 스프링백은 다음과 같이 예측된다.

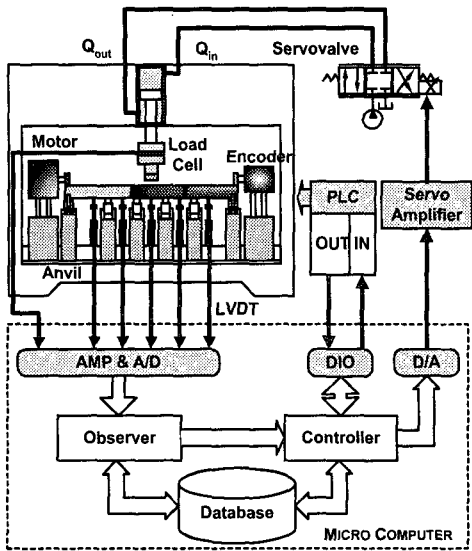


Fig. 3 Schematic diagram of shaft straightening machine

2.3 펀치 위치 제어

3점굽힘 공정과 스프링백 예측을 이용한 축교정을 실현하기 위해 유압프레스를 기본으로하는 축교정기를 설계 제작하였다. Fig. 3은 이 축교정기 시스템의 구조도이다. 축을 가압하기 위하여 유압제어 시스템을 적용하였으며, 펀치로 가압하는 동안 변위를 LVDT를 이용하여 측정할 수 있도록 하였다.

일반적으로 교정작업은 아주 느린 속도에서 진행되기 때문에 가압펀치의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = A_p P_L \tag{4}$$

여기서 A_p 는 피스톤의 실효면적이고, P_L 은 가압력이며, F 는 로드셀(load cell)로부터 측정된다.

Fig. 3의 서보밸브에서의 유동방정식은

$$\Delta Q_L = K_q x_v - K_c P_L \tag{5}$$

이며, x_v 는 스톱의 변위, K_q 는 밸브 유동 상수 (valve flow gain), K_c 는 밸브유동압력 계수(valve flow-pressure coefficient)이다. 서보밸브의 시정수가 τ_{sv} , 서보밸브 상수가 K_{sv} 인 경우 서보밸브의 운동방정식은

$$\frac{x_v(s)}{i(s)} = \frac{K_{sv}}{\tau_{sv}s + 1} \tag{6}$$

이고, 실린더 내부에서의 연속방정식은

$$\Delta Q_L = A_p \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{\partial P_L}{\partial t} \tag{7}$$

이 된다. 여기서 V_t 는 구동기 내의 유체 전체 체적, β_e 는 유체에 대한 체적탄성계수(bulk modulus)이다.

서보밸브의 입력전류는 측정된 하중과 처짐량으로부터 계산되는 현재의 소성변형량 오차를 가지고 결정한다. 그리고 펀치 위치는 하중-처짐 경로를 제어하므로 제어기는 안정성을 고려하여 다음과 같은 PI 제어기를 사용하였다.

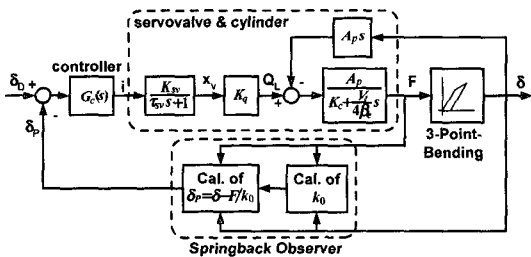


Fig. 4 3-point-bending process model by linearized punch stroke control system

$$\delta_s = \frac{F_M}{k_0} = \frac{F_M}{k_0} \tag{2}$$

여기서 탄성계수 k_0 는 다음 식으로 추정된다.

$$k_0 = \frac{F_y}{\delta_y} = \left. \frac{\partial F}{\partial \delta} \right|_e \tag{3}$$

여기서 e 는 탄성영역을 의미한다. 3점굽힘 공정 중 하중 F 와 처짐 δ 을 하중계와 변위계를 이용하여 측정하면 된다. 이와 같이 실시간으로 탄성계수를 추정할 수 있으면 시편의 물성치, 열처리 강도, 가공경화 정도에 관계없이 스프링백을 예측할 수 있다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (8)$$

제어기에서 가압핀치의 가압속도는 탄성영역에서 4mm/s 정도, 소성영역에서 0.5mm/s 이하가 되도록 비례 계인을 선정하였다. 그리고 교정작업의 특성상 오버슈트(overshoot)가 발생되지 않도록 하여야 하며, 정상상태의 오차를 교정정도 이내로 하여야 하기 때문에 적분 계인은 이러한 제한조건에 들어갈 수 있도록 실험을 통해 선정하였다. 위와 같이 선형화된 핀치 위치 제어 시스템⁽⁸⁾을 포함한 3점굽힘 공정의 블록선도를 Fig. 4에 도시하였다.

3. 축 휨의 다단계 교정공정

교정 대상 축은 지름에 대한 길이의 비가 20 이상이고, 높은 정밀도의 진직도가 요구된다. 그래서 한 번의 교정공정으로 원하는 진직도를 얻을 수 없기 때문에 2장에 제시한 3점굽힘 공정이 여러 번 수행되어야 한다. 그리고 3점굽힘 공정의 교정회수를 최소로 하기 위해서 각 교정공정의 변수인 교정점, 교정방향, 교정지시량 그리고 지지조건 등의 교정방법이 교정 후의 휨형태 변화를 예측하여 최적으로 선정되어야 한다. 본 논문에서는 이러한 교정공정을 다단계 교정공정이라 한다.

교정회수를 최소화하기 위해서는 무엇보다도 축의 휨형태를 분류하고 그에 따른 교정 후 휨형태 변화를 예측하여 교정방법을 선정하는 것이 중요하다. 휨형태는 축의 양 끝 단면의 중심을 이은 중심선으로부터 측정점 단면의 중심까지의 거리인 휨량과 각 측정점들의 휨방향을 축 단면으로 사영하여 얻어지는 각 휨방향의 최대 각도 편차량인 비틀림량으로 평가한다. Fig. 5는 각 측정점 중 휨량이 가장 큰 최대휨점의 휨방향과 축 중심선이 만드는 기준평면에 다른 측정점들의 휨량을 정사영시켜 휨형태를 분류한 것이다. 5개의 LVDT로 휨형태를 측정하므로 최대 5차 형태까지 측정할 수 있다.

가공의 불균일성 및 열처리과정 중에서 발생하는 표면산화 등에 따른 축 외곽의 진원도 오차와 측정 오차 등을 줄이면서 정확한 휨량과 비틀림

량을 측정하기 위하여, 축이 한 회전하는 동안에 엔코더를 이용하여 일정한 간격으로 1000점의 변위량을 측정하여 저주파 필터 처리한다. 그리고 측정된 각도와 변위량으로부터 얻어지는 형상을 진원이라 가정하고 최소오차자승법으로 원의 중심과 위치를 구하여 휨량과 휨방향을 결정한다. 또한, 각 측정점들의 휨방향으로부터 최대 각도 편차량을 계산하여 비틀림량을 구한다.

다단계 교정공정에서 교정 후의 휨형태 변화를 예측하기 위해 Fig. 6과 같이 현재의 휨형태에서 교정점의 교정 후 휨 변화량에 대한 다른 측정점들의 교정 후 휨 변화량의 비를 교정 후 변형률로 정의한다. 즉 교정점이 LVDT3일 때 각 측정점들의 휨 변화량이 d_i , $i=1\sim5$ 이면 교정점 LVDT3에 대한 각 측정점 i 의 교정 후 변형률 y_B 는 다음과 같이 된다.

$$y_B = \frac{d_i}{d_3}, \quad (i = 1\sim5) \quad (9)$$

교정시 소성변형의 대부분이 발생하는 곳은 Fig. 1에서와 같이 직접 하중이 가해지는 빗금쳐진 부분이다. 그러므로 1차 휨형태의 이상적인 3점굽힘에 의한 소성변형에서는 교정 후 변형률을 교정점과 측정점쪽의 끝단과의 거리와 측정점과 그 끝단과의 거리에 대한 비에 비례하는 선형관

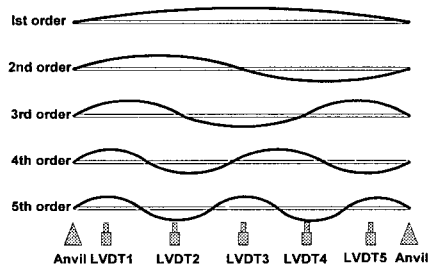


Fig. 5 Deflection patterns of shafts

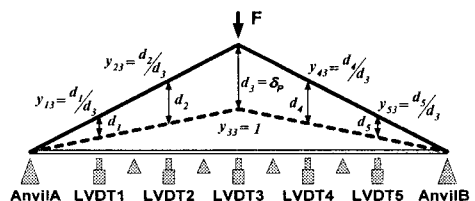


Fig. 6 Change ratios for straightening point 3

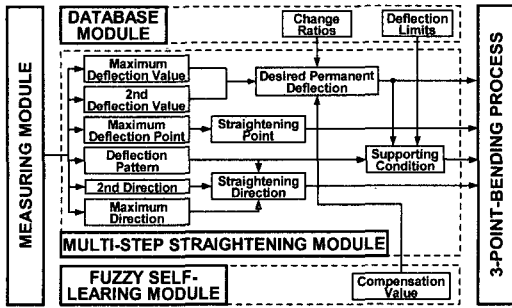


Fig. 7 Schematic diagram of multi-step straightening process

계로 가정할 수 있다. 그러나 연속적인 교정에서 각 축의 물성치가 변하고, 교정 휨량이 크거나, 휨형태가 복잡하면 비선형적인 특성 때문에 변형률을 선형적으로 예측할 수 없게 된다. 그래서 본 연구에서는 퍼지 자기학습법을 도입하여 교정 후 변형률을 추정하도록 하였다.

Fig. 7은 다단계 교정공정의 전체 구조도이다. 데이터베이스, 다단계 교정, 퍼지 자기학습의 3개 모듈로 이루어져 있다. 데이터베이스 모듈에서는 지지조건에 따른 일회 교정량의 한계, 교정점에 따른 교정 후 변형률 등을 저장하며, 퍼지 자기학습 모듈에서는 주어진 교정 후 변형률과 실제 교정 후 변형률을 비교하여 현재의 변형률을 보상해주는 역할을 한다. 다단계 교정모듈에서는 측정을 통해서 얻은 축의 휨량과 휨형태를 가지고 교정에 필요한 교정점, 교정방향, 교정지시량 그리고 지지조건 등의 교정방법을 결정한다.

3.1 다단계 교정모듈

다단계 교정모듈에서 교정점, 교정방향, 교정지시량 그리고 지지조건 등의 4가지 교정방법을 결정하는 알고리즘은 교정정도를 향상시키고, 교정회수를 최소화할 수 있도록 개발하였다. 각 교정방법들은 상호 유기적으로 영향을 미치므로 복잡한 결정과정을 거치게 된다. 그러나 본 연구에서는 시스템의 안정성과 교정기의 사양을 고려하여 주요한 영향 인자를 대상으로 알고리즘을 설계하였다.

교정시 소성변형은 직접 하중이 가해지는 부분에서 집중적으로 발생하므로 교정 후 휨형태의 변화를 고려할 때 휨량이 가장 큰 최대휨점을 교정점으로 선정하여야 교정 후 휨량을 효과적으로

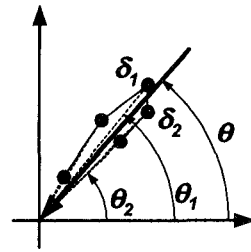


Fig. 8 Straightening direction

줄일 수 있다. 그러므로 교정점은 최대휨점으로 결정한다

1차 휨형태에 대한 교정방향은 Fig. 8과 같이 각 측정점들 중에서 δ_1, δ_2 가 각각 최대 및 2번째로 큰 휨량이고, 이 휨량들의 휨방향이 각각 θ_1, θ_2 이면, 휨량 및 비틀림량을 고려하여 다음 식과 같이 결정한다.

$$\theta = \theta_1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \left(\frac{\delta_2}{\delta_1} \right)^2 \tag{10}$$

왜냐하면, 휨형태가 1차 형태라도 비틀림량에 따라 교정 후 휨형태의 변화가 다양하게 나타날 수 있기 때문이다. 예를 들어, 식 (10)의 두 측정점의 휨량의 차이가 작고, 휨방향의 차(단 1차 휨형태로 휨방향의 차가 90도 이하)가 클 때 최대휨점의 휨방향으로 교정을 하면, 교정 후 2번째로 큰 측정점의 휨량이 교정 전보다 더 커지는 경우가 발생하며, 또한 각 측정점들의 휨방향의 기준평면에 정렬되지 않고 더욱 복잡한 비틀림 현상이 발생하여 교정을 어렵게 만든다. 그래서 교정 후 각 측정점들의 휨방향의 가급적 기준평면에 평행하게 될 수 있도록 하기 위해 휨량의 크기로 보간한 두 휨방향사이의 방향으로 교정방향을 결정한다. 그리고 2차 휨형태 이상은 먼저 휨형태의 차수를 줄일 수 있도록 하기 위하여 교정방향을 최대휨점의 휨방향으로 선정한다.

Fig. 9에서 축 ②와 같이 1차 휨형태일 때 최대휨점 LVDT2에 대한 휨량의 비율이 교정 후 변형률과 일치한다면 최대휨점에 대한 한 번의 교정으로 교정을 완료할 수 있다. 그러나 축 ①과 같이 최대휨점 LVDT1에 대한 휨량 비율이 교정 후 변형률과 일치하지 않을 때에는 한 번의 교정으로 교정 성능을 얻을 수 없다. 왜냐하면 이 축을

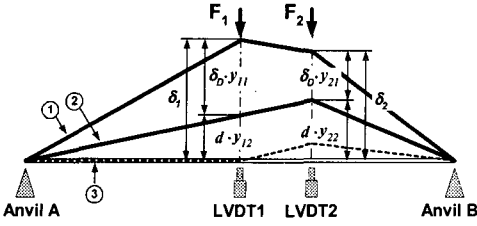


Fig. 9 Determination method of desired permanent deflection

최대힘량만큼 한번에 교정한다면 점선으로 표시한 축 ③과 같이 교정점 LVDT1은 교정정도 이내로 들어가게 할 수 있으나, 상대적으로 측정점 LVDT2는 교정정도 이내로 들어가지 못하게 된다. 더욱이 휨형태가 복잡하게 되어 다음 교정시의 교정방법을 결정하기 어렵게 만든다. 그러므로 교정지시량을 교정 후 측정되는 힘량 비율이 다음 교정시의 교정 후 변형률과 같도록 선정한다면 휨형태가 단순화되어 교정회수를 최소화할 수 있다. 다음 식은 축 ①의 최대힘점 LVDT1를 가압하여 축 ② 형태로 교정하는 교정지시량을 계산 하는 방법이다.

$$\frac{\delta_1 - \delta_D \cdot y_{11}}{y_{12}} = \frac{\delta_2 - \delta_D \cdot y_{21}}{y_{22}} \quad (11)$$

$$\delta_D = \frac{\delta_1 \cdot y_{22} - \delta_2 \cdot y_{12}}{y_{11} \cdot y_{22} - y_{21} \cdot y_{12}}$$

여기서 δ_D 는 교정지시량이며, y_{ij} 는 교정점 j 에 대한 측정점 i 의 교정 후 변형률이다.

지지조건은 교정점 좌우 2개의 앤빌 위치를 가능한 대칭적으로 선정한다. 이 때 지지점간 거리는 가압편치의 행정이 제한되어 있으므로 교정한 계를 바탕으로 교정지시량이 클수록 작게 결정한다. 또한, 2차 이상의 휨형태에 대해서는 지지점 내부의 휨형태가 가능한 1차가 되도록 선정한다.

3.2 퍼지 자기학습 모듈

교정 후의 휨형태 변화를 정확히 예측하는 것이 다단계 교정공정에서 가장 중요하기 때문에 교정 후 휨형태 변화를 나타내는 변형률을 적절하게 추정할 때까지 보상법칙을 자동적으로 개선하고 발전시키는 퍼지 자기학습 제어기를 사용하였다.⁽⁹⁾

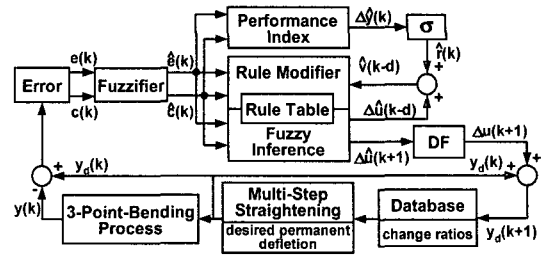


Fig. 10 Schematic diagram of a fuzzy self-learning control algorithm

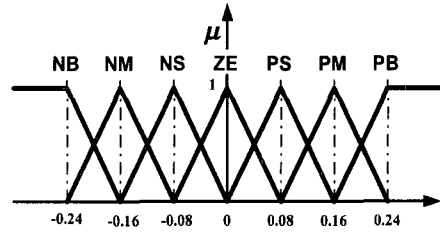


Fig. 11 Membership function of the linguistic values

Fig. 10은 교정 후 변형률을 추정하는 퍼지 자기학습 제어기의 구조를 보인 것이다. 제어기는 단순 퍼지 제어기와 퍼지규칙 수정이라는 두 개의 기능으로 구성된다.

3.2.1 단순 퍼지 제어기

단순 퍼지 제어기는 데이터베이스에 있는 교정 후 변형률 $y_d(k)$ 와 실제 교정 후 변형률 $y(k)$ 를 비교하여 퍼지규칙으로부터 변형률에 대한 보상값 $\Delta u(k+1)$ 을 구하고, 데이터베이스의 변형률 $y_d(k+1)$ 을 조정한다. 축의 열처리 정도 차이와 같이 점진적인 변화에 대해서는 이러한 제어기만으로도 효율적으로 변형률을 예측할 수 있다.

$y_d(k)$ 와 $y(k)$ 의 오차 $e(k)$ 와 오차의 변화 $c(k)$ 그리고 보상값 $\Delta u(k)$ 를 퍼지화하여 제어 시스템의 퍼지변수로 사용한다.

$$e(k) = y_d(k) - y(k)$$

$$c(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$\hat{e}(k) = Fuzzify\{e(k)\} \quad (12)$$

$$\hat{c}(k) = Fuzzify\{c(k)\}$$

$$\Delta \hat{u}(k) = Fuzzify\{\Delta u(k)\}$$

퍼지변수들은 Fig. 11과 같이 삼각형 멤버쉽 수를 가지는 언어적인 의미로 표현된다. 그리고 j 번째 보상 퍼지규칙은 다음과 같은 형식으로 쓰여질 수 있다.

$$R_j: IF \hat{e} \text{ is } E_j \text{ and } IF \hat{c} \text{ is } C_j; \quad (13)$$

$$THEN \Delta \hat{u} \text{ is } \Delta U_j$$

여기서 E_j, C_j 와 ΔU_j 는 퍼지변수 \hat{e}, \hat{c} 와 $\Delta \hat{u}$ 의 퍼지 언어적 값이다. 그리고 총체적 퍼지관계 행렬 R 은 다음과 같이 각 관계의 결합에 의해서 계산된다.

$$R = \bigcup_j R_j; \quad (14)$$

만약 \hat{e} 와 \hat{c} 의 언어적 값이 각각 E' 와 C' 라면, 이때 제어기 출력의 언어적 값 $\Delta U'$ 는 Zadeh의 합성법을 적용한 퍼지추론에 의해 입력값으로부터 추론된다.⁽⁹⁾

$$\Delta U' = E' \cdot C' \cdot R \quad (15)$$

여기서 \cdot 은 퍼지관계의 합성이다.

변형률에 대한 적당한 보상값을 생성하기 위해서는 대응하는 퍼지값으로부터 제어 입력의 크리 스프 값을 계산해야 한다. 여기서는 무게중심법을 비퍼지화의 수단으로 사용하였다.

$$\Delta u = Defuzzify\{\Delta \hat{u}\} \quad (16)$$

이렇게 얻어진 Δu 가 바로 데이터베이스의 교정 후 변형률을 보상해주는 보상값이 된다.

3.2.2 퍼지규칙 수정

퍼지규칙 수정 모듈에서는 공정성능 향상을 위하여 공정응답의 지표에 따라 단순 퍼지 제어기의 퍼지규칙을 수정할 수 있다. 다양한 교정 대상 축에 학습을 통하여 각기 다른 보상 퍼지규칙을 적용함으로써 더욱 효과적으로 변형률을 예측할 수 있도록 한다.

성능지표는 상태 오차 \hat{e} 와 \hat{c} 로부터 성능을 개선하기 위하여 공정 출력에서 요구되는 변화량

$\Delta \hat{y}(k)$ 로 정의된다.

$$PI(k) = \hat{e}(k) \rightarrow \hat{c}(k) \rightarrow \Delta \hat{y}(k) \quad (17)$$

성능지표는 Table 1에 보인 것과 같은 표 형태로 미리 주어질 수 있다.

출력의 변화는 과거에 시도한 나쁜 성능을 증진시키기를 원하므로, 새로운 학습 제어 행동 $\hat{v}(k-d)$ 은 현재의 나쁜 성능에 가장 공헌한 과거의 보상값 $\Delta \hat{u}(k-d)$ 에 현재의 규칙 강화량 $\hat{r}(k)$ 를 더함으로써 얻어진다.

$$\hat{r}(k) = \sigma \Delta \hat{y}(k) \quad (18)$$

$$\hat{v}(k-d) = \Delta \hat{u}(k-d) + \hat{r}(k)$$

여기서, σ 는 규칙 개선 계수라고 한다. 그러므로 제거되거나 부가되어야 할 규칙을 각각 $R_r(k)$ 와 $R_a(k)$ 라고 하면, 다음과 같은 제어 규칙은 교환되고,

$$R_r(k) = \hat{e}(k-d) \rightarrow \hat{c}(k-d) \rightarrow \Delta \hat{u}(k-d) \quad (19)$$

다음과 같은 함의를 따르도록 한다.

$$R_a(k) = \hat{e}(k-d) \rightarrow \hat{c}(k-d) \rightarrow \hat{v}(k-d) \quad (20)$$

위와 같은 교환은 다음과 같이 퍼지관계 행렬로 표현될 수 있다.

$$R(k+1) = \{R(k) \cap \overline{R_r(k)}\} \cup R_a(k) \quad (21)$$

이와 같이 수정된 새로운 퍼지규칙으로부터 다음 교정공정에 적용할 변형률에 대한 보상값을 계산

Table 1 Performace measure decision table

$e \setminus c$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
NM	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1
NS	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2
ZE	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
PS	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
PM	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
PB	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6

Table 2 Modified rule table for y_{43}

c \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB		NB	NB	NB	NM		
NM			NB	NM			
NS			NM	NM	ZE		
ZE		NM	NS	ZE	PS	PM	
PS			ZE	PS	PS		
PM			PS	PS	PS		
PB			PM	PM	PB		

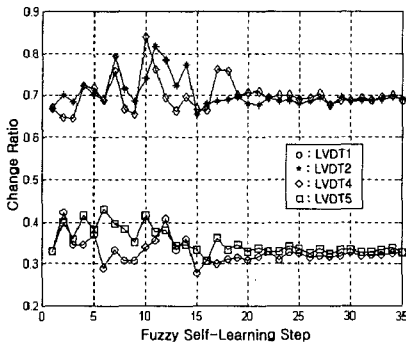


Fig. 12 Change ratios for fuzzy self-learning control (straightening point 3)

하고, 수정된 교정 후 변형률을 얻을 수 있다.

$$R(k+1) = \hat{e}(k) \rightarrow \hat{c}(k) \rightarrow \Delta \hat{u}(k+1) \quad (22)$$

$$\Delta u(k+1) = Defuzzify\{\Delta \hat{u}(k+1)\} \quad (23)$$

$$y_d(k+1) = y_d(k) + \Delta u(k+1) \quad (24)$$

3.2.3 퍼지 자기학습 결과

여러 축에 대하여 연속적으로 교정실험을 실시하고, 교정점 LVDT3에 대한 퍼지 자기학습 제어기에 의해 학습된 퍼지규칙표와 교정 후 변형률의 변화를 Table 2와 Fig. 12에 제시하였다. Table 2의 퍼지규칙표는 초기 모두 영으로 설정한 상태에서 Fig. 12와 같이 안정적으로 교정 후 변형률이 예측된 후의 교정점 LVDT3에 대한 측정점 LVDT4의 보상규칙이다. 이러한 퍼지규칙표는 5개의 교정점에 대한 4개의 측정점이 존재하므로 총 20개가 학습된다. Fig. 12의 교정 후 변형률을 살펴보면, 서로의 LVDT 간격에 따른 선형관계를 기초로 초기에 변형률을 교정점 LVDT3에 대한 측정점 LVDT 1, 2, 4 그리고 5에 대하여 각각 0.33, 0.67, 0.67 그리고 0.33으로 설정하였다. 그

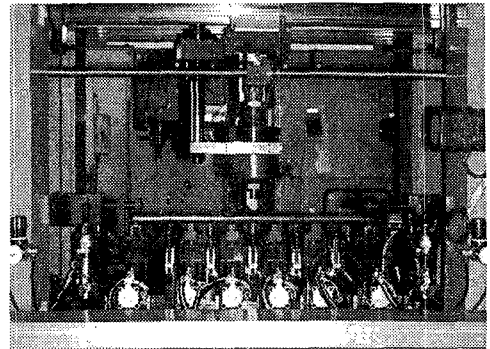


Fig. 13 Photograph of shaft straightening machine

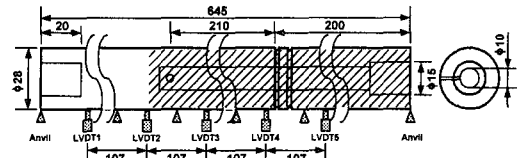


Fig. 14 Rack bar geometry (induction hardening at hatched region)

리고 실제 축에 대한 실험결과 각각 0.322, 0.689, 0.673 그리고 0.331을 얻을 수 있었다. 이와 같이 예측된 변형률은 교정에 의한 휨형태의 변화를 더욱 정확히 예측할 수 있도록 해주므로 교정정도를 향상시킬 수 있다.

4. 실험

4.1 실험장치

본 연구의 기하학적 진직도 적응제어 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 Fig. 3과 같이 개발한 축교정기에서 실험을 실시하였다. 그리고 개발된 축교정기의 진직도 측정 및 가압장치에 대한 사진을 Fig. 13에 보였다. 축교정기의 공급유압은 10톤이며, 서보밸브와 유압실린더로 구성된다. 그리고 치짐량을 측정하는 LVDT, 하중을 측정하는 로드셀을 사용하여 마이크로컴퓨터로 제어된다. 프로그램 언어는 C 언어로 작성되었고, 1회 제어에 요구되는 계산시간은 1ms이다.

본 논문의 진직도 교정실험에는 자동차의 조향장치에 들어가는 랙바 80개를 사용하였다. 랙바는 Fig. 14와 같이 길이 645mm, 지름 28mm이며 선삭 가공 후 강도를 높이기 위해 축의 해칭된 부분을 고주파 열처리하였다. 그러므로 각 면의 열처리 정도의 차이에 따라 부분적인 잔류응력이

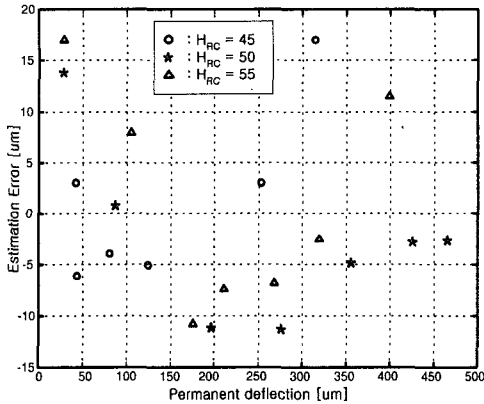


Fig. 15 Estimated permanent deflection error versus permanent deflections

발생하고 축이 휘어지게 된다. 이러한 휨량은 진직도로 30~800µm 정도가 되며, 연삭공정 부하를 줄이기 위해서는 진직도 30µm 이내로 교정을 수행하여야 한다.

4.2 3점굽힘 공정 실험

소재의 물성치 변화에 대한 3점굽힘 공정의 교정 신뢰도를 확인하기 위해 열처리정도가 다른 세 가지의 시험시편을 사용하였다. 각 시험시편은 H_{RC} 45, 50 그리고 55로 고주파 열처리하였다. 그리고 여러 개의 시험시편을 같은 교정점과 지지조건으로 임의의 교정지시량 만큼 교정하는 3점굽힘 실험을 수행하였다. 이때 가압 중 실시간으로 스프링백을 예측하여 원하는 교정지시량 만큼 교정되도록 펀치의 위치를 제어한다.

3 가지 시험시편에 대한 교정 실험결과를 교정량에 대한 교정 오차를 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. 교정지시량과 교정량과의 교정 오차의 평균은 7µm이고, 표준편차는 5µm이다. 그리고 편차값은 최대 17µm이며, 교정량의 크기와는 관계없음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 소재 물성치의 변화에 대해서 본 논문에서 제시한 3점굽힘 공정으로 충분히 진직도 공차를 만족시킬 수 있음을 보여준다.

4.3 다단계 교정공정 실험

먼저 80개의 랙바의 휨량을 측정된 결과를 각각에 대한 휨형태, 최대휨량 그리고 최대휨점에 대해서 분류하여 Table 3에 나타내었다. 허용휨량

Table 3 Deflection patterns of rack bars with heat treatment

Deflection Pattern	Point Deflection	Point					Number of items (%)
		1	2	3	4	5	
Perfect	under 30µm	0	1	0	0	0	1(1)
	30~200µm	0	1	29	10	3	43(61)
1st order	200~400µm	0	2	8	0	1	11(15)
	400~600µm	0	0	2	1	0	3(4)
	600~800µm	0	0	13	0	0	13(19)
	over 800µm	0	0	1	0	0	1(1)
	Sum (%)	0(0)	3(4)	53(75)	11(15)	4(6)	71(89)
2nd order	30~200µm	1(17)	2(33)	3(50)	0(0)	0(0)	6(8)
3rd order	30~200µm	0	0	0	0	1	1(1)
4th order	30~200µm	0	0	0	0	1	1(1)

Table 4 Straightening results of rack bars

Number of straightening cycle	1	2	3	4	5	6	7	Average
Number of items	13	15	25	16	7	2	1	3.0 cycles
Average time required for straightening	7	13	20	27	33	38	45	19.9 sec

30µm안에 들어가는 것은 1개(1/80, 1%) 정도이다. 대부분이 허용휨량을 초과하며 필히 축의 진직도 확보를 위한 교정이 필요함을 알 수 있다. 또한 대부분이 1차 휨형태(89%)를 차지하고, 2차 휨형태가 전체 측정 시편중에서 8%정도 차지하며, 3차 휨형태 이상은 소량 측정되었다.

1차 휨형태의 경우를 보면 최대휨점이 소재의 중심인 LVDT3인 경우가 1차 휨형태 중에서 75% 차지하며 LVDT4와 LVDT5가 그 다음을 차지한다. LVDT 3, 4 그리고 5의 위치는 열처리되는 부분으로 이를 통해 축의 휨은 열처리되는 부분에서 발생하고, LVDT 1과 2의 휨은 열처리된 부분 휨에 의해 상대적으로 발생함을 알 수 있다. 휨량을 보면 30µm~200µm의 휨량이 61%를 차지하고 그 다음으로 600µm~800µm의 휨량이 19%를 차지한다. 1차 휨형태의 경우 축의 비틀림은 심하지 않았고 대부분 휨평면이 일정한 값을 갖는 형태를 가지고 있다.

2차 휨형태의 경우를 보면 8%정도 차지하며, 최대휨은 LVDT3이 제일 크고 휨량은 모두 200µm 이하이다. 이 경우 교정시 휨량이 적은 것은 미소 교정한다. 하지만 휨량이 조금 많으면 1번의 교정을 통한 교정이 불가능하므로 우선 1차 휨형태로 바꾸기 위한 교정이 필요하다. 2차 휨형태의 경우도 축의 비틀림은 심하지 않고 대부분 일

정한 형태를 가지고 있다.

3차 이상의 휨형태를 보면 전체시편에 대해서 2%정도 차지한다. 휨량이 모두 $200\mu\text{m}$ 이하로 적지만 비틀림이 상당히 심하고 일정한 비틀림 형태를 가지고 있지 않다. 그러므로 교정시 교정지시량뿐만 아니라 지지조건이 중요한 교정 변수가 된다.

Table 4에는 79개의 랙바에 대한 교정결과를 나타내었다. 교정회수는 1회에서 7회까지 수행되었으며 평균적으로 3.0회 정도 시행되었다. 그리고 전체 시험 축에 대한 평균교정시간은 19.9초가 소요되었다. 반복 교정이 5회 이상 수행된 시편에서는 축의 휨량이 크고, 다단계 교정이 진행될수록 휨형태의 차수가 올라가고 비틀림 정도가 크게 나타났다. 이러한 현상은 시편의 비선형성과 기본적인 교정방법이나 교정 후 변형률의 오차에 기인된다.

5. 결 론

휘어져 있는 축의 진직도를 확보하기 위하여 몇 개의 측정점으로부터 휨량을 측정하고 그 위치를 가압함으로써 원하는 공차 범위 이내로 교정하는 기하학적 진직도 적응제어 시스템을 개발하였다. 연구 결과는 측정된 휨량을 분석하여 최적의 교정방법을 결정하는 다단계 교정공정과 선정된 교정방법으로 원하는 소성변형을 일으키는 3점굽힘 공정으로 구성된다.

축의 3점굽힘에 대한 이론적인 굽힘모델을 기초로 소재의 물성치 변화를 규명하여 실시간으로 스프링백을 예측할 수 있는 관측기를 제시하고, 실시간으로 소성변형량을 제어할 수 있는 3점굽힘 제어 시스템을 실현하였다. 효율적인 휨 교정을 위하여 퍼지 자기학습 제어기로 보정되는 교정 후 변형률을 고려하여 최적의 교정지시량을 결정하는 다단계 교정공정을 제시하였다. 그리고 실험을 통하여 실시간으로 스프링백을 제어하여 랙바를 평균 3회의 교정회수로 평균 20초 정도로 진직도 $30\mu\text{m}$ 이내로 교정할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 안중용, 안동철, 김승철, 정성종, 1996, "스프링 백 관측기를 이용한 축교정기 개발," 한국공학 기계기술학회지, 제5권, 제3호, pp. 22~30.
- (2) Partzel, K. H., 1988, "Acoustic Emission for Crack Inspection During Fully Automatic and Manual Straightening of Transmission Shaft," in *Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Nauheim)*, J. Eisenblatter, Ed., Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, pp. 157~164.
- (3) Trostmann, E. and Hansen, N. and Cook, G., 1982, "General Scheme for Automatic Control of Continuous Bending of Beams," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 104, pp. 173~179.
- (4) Hardt, D. E. and Roberts, M. A. and Stelson, K. A., 1982, "Closed-Loop Shape Control of a Roll-Bending Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 104, pp. 317~322.
- (5) Hardt, D. E. and Chen, B., 1985, "Control of a Sequential Brakeforming Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 107, pp. 141~145.
- (6) Chandra, A., 1987, "Real-Time Identification and Control of Springback in Sheet Metal Forming," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 109, pp. 265~273.
- (7) Katoh, T. and Urata, E., 1993, "Measurement and Control of a Straightening Process for Seamless Pipes," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 347~351.
- (8) Herbert, E. and Merrit, 1967, "Hydraulic Control System," *John Wiley & Sons*.
- (9) Shihuang, Shao, 1988, "Fuzzy Self-Organization Controller and Its Application for Dynamic Processes," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 26, pp. 151~164.