

## 축교정기를 위한 자동굽힘공정제어기 설계

### Automatically Bending Process Control for Shaft Straightening Machine

김승철\*, 김지훈, 한동엽(한양대학교 대학원), 정성중(한양대학교 기계공학부)

박동호, 김신규, 한점열(만도기계(주))

S.C. Kim, J.H. Kim, D.Y. Han(Hanyang Univ. Graduate School), S.C. Chung(Hanyang Univ.),

D.H Park, S.K. Kim, J.R Han(Mando Co.)

#### Abstract

In order to minimize straightness error of deflected shafts, a automatically bending process control system is designed, fabricated, and studied. The multi-step straightening process and the three-point bending process are developed for the geometric adaptive straightness control. 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 processes. Selection of a loading point and direction, springback estimation, and supporting condition are derived from fuzzy inference and fuzzy self-learning method in the multi-step straightening process. Automatic straightening machine is fabricated by using the developed ideas. Validity of the proposed system is verified through experiments.

#### 1. 서론

진직도가 중요한 변수가 되는 기계 부품들은 각각의 가공공정 마다 필요한 진직도를 확보해야 한다. 자동차의 엔진에 사용되는 캠축(Cam shaft)과 주축(Main shaft), 조향장치에 사용되는 랙바(Rack bar)와 요축(Yoke shaft) 등은 정확한 운동전달 특성과 내구성을 향상시키기 위해 진직도와 경도의 유지가 필요하다. 특히 이러한 축은 선삭가공을 수행하고 나서 연삭공정을 진행하기 전에 경도를 높이기 위해 고주파열처리 공정을 하게 된다. 그러나 열처리공정 중에 각 면들의 열처리 정도의 차이에 따라 부분적인 응력분포가 발생하고 축이 휘어지게 된다. 그래서 열처리 후 휘어진 축에 대하여 연삭공정의 여유를 최소화하여 생산성을 증대시키기 위해서 진직도 교정작업을 수행한다. 그러나 가공전 소재의 물성치, 공정 변수 그리고 열처리조건 등의 다양한 변화에 따

른 진직도 오차를 최소화하기 위하여 축교정기의 자동화 요구가 증대되고 있다.<sup>(1)</sup>

축의 굽힘공정에 의한 교정에 있어서 가압시 편치의 위치로부터 가압후의 탄성 스프링백(Springback)의 예측이 중요하다. 스프링백은 항복점, 강도 등과 같은 소재의 물성치의 변화뿐만 아니라 휨량, 지지조건 등의 공정변수의 변화에도 중요한 영향을 받는다. 실제적으로 굽힘공정에서 만족한 결과를 얻기 위해서는 그러한 변수들을 실시간으로 추정하여 조정하여야 한다.

굽힘공정에 의한 형상성형에 대한 연구에서는 정확하고 빠른 스프링백량 예측방법이 필수적이다. 박판성형<sup>(2-5)</sup>에서 소재 및 공정상의 중요 변수들의 온라인 규명을 통한 스프링백의 온라인 예측, 제어에 관한 연구들이 수행되었다. 강관의 휨교정을 위하여 Katoh 등<sup>(6)</sup>은 3점굽힘 공정에서 유압실린더로부터 압력과 변위를 측정함으로써 스프링백을 예측하는 관측기를 제안하였다.

본 연구에서는 휘어져 있는 축을 원하는 공차범위 이내로 교정하는 자동굽힘공정제어 시스템의 개발이 목적이다. 3점굽힘 공정에서는 원형 단면의 축에 대한 이론적인 굽힘모델을 기초로 소재의 물성치 변화를 규명하여 온라인으로 스프링백을 예측할 수 있는 관측기를 제시하고, 가압 중에 실시간으로 영구변형량을 제어하기 위한 유압 제어 시스템을 설계하였다. 다단계 교정 공정은 측정된 휨량으로부터 휨형태, 최대휨량, 휨방향등을 분석하여 최적의 교정방법을 계산한다. 그리고 이렇게 설정된 교정방법으로 3점굽힘 공정으로 교정을 수행한다. 또한, 최적의 교정 방법을 계산하고 성능을 향상시키기 위해 본 논문에서는 교정법칙에 대한 퍼지추론과 퍼지자기학습법을 적용하였다.

#### 2. 3점굽힘 공정

##### 2.1 하중-처짐 관계

Fig. 1과 같이 축의 양 끝단을 단순지지하고 임의의 한 지점을 가압하는 3점굽힘 공정에 대한

일반적인 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 그림의 하중-처짐 관계 선도에서 가압공정 중의 탄성 영역을 근사적으로 직선  $C_1$ , 소성영역을 근사적으로 직선  $C_2$ , 감압 공정의 탄성복원영역을 근사적으로 직선  $C_3$ 으로 구분할 수 있다. 여기서,  $\delta_M$ 은 최대 변위,  $\delta_S$ 는 스프링백량,  $\delta_P$ 는 교정량,  $\delta_D$ 는 교정지시량,  $\delta_y$ 는 항복휨량,  $F_y$ 는 항복하중,  $F_M$ 은 최대하중이 된다.

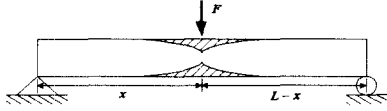


Fig. 1 Three-point-bending operation

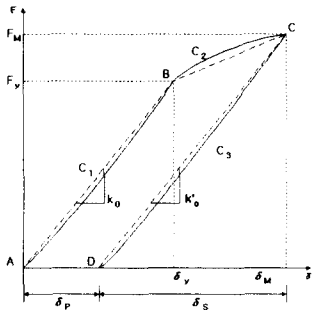


Fig. 2 Load-deflection model of 3-point-bending for simple beams

### 2.2 실시간 스프링백 예측

소재 물성치의 변화는 상당히 많은 스프링백량의 변화를 일으킬 수 있다. 그러므로 교정공정 규명에 있어서의 첫 단계는 관련된 소재의 변수를 온라인으로 결정하는 것이다. 스프링백은 소재의 탄성에 기인된다. 또한 탄성특성, 항복점, 그리고 소재의 현재상태의 정보로 충분히 스프링백량을 계산할 수 있다.

Fig. 2로부터 감압 후 추정되는 영구 변형량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $\delta_D$ 는 추정된 영구변형량이다. 하중을 제거할 때도 탄성상태이므로 가압시의 탄성 영역과 같이 평행한 선을 따라간다고 가정하여 스프링백량을 예측한다. 즉,  $k_0 = k'_0$ .

$$\delta_S = \frac{F_M}{k_0} \quad (2)$$

여기서 하중-처짐 곡선의 탄성기울기, 즉 탄성계수  $k_0$ 는 다음과 같이 가압시 온라인으로 측정되는 하중과 처짐으로부터 최소오차자승법으로 계산된다.

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

온라인으로 탄성계수를 추정하므로 시편의 물성치, 열처리 강도, 가공경화 등의 변화에 관계없이 소성변형량을 예측할 수 있다.

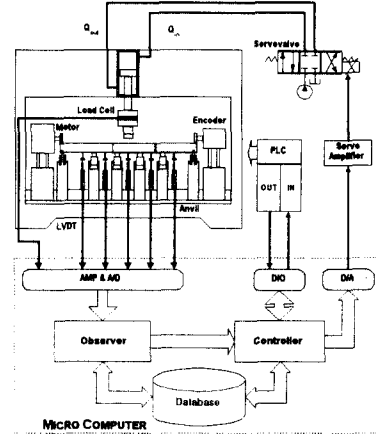


Fig. 3 Schematic diagram of straightening machine

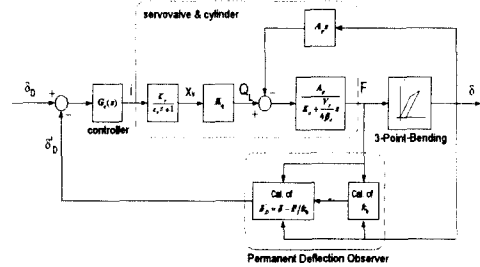


Fig. 4 Block diagram of punch stroke control system for three-point bending operation

### 2.3 펀치 위치 제어

Fig. 3은 축교정기의 전체 구조이다. 축을 가압하기 위하여 유압제어 시스템을 적용하였다. 이 시스템에서 펀치의 변위를  $\delta$ 라 하면, 가압 펀치의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + B_p \frac{d\delta}{dt} + F = Mg + A_p P_L \quad (4)$$

여기서,  $A_p$ 는 피스톤의 실효면적이고,  $P_L$ 은 가압력이다. 하중이 다른 힘에 비하여 매우 크고, 교정속도는 매우 느리며, 관성력은 무시할 수 있다. 그러므로 축에 가하는 하중  $F$ 와 처짐  $\delta$  관계를 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$F = f(\delta) = A_p P_L \quad (5)$$

여기서  $F$ 는 로드셀(load cell)로부터 측정된다.

밸브의 유동방정식에 대한 선형방정식은

$$\Delta Q_L = K_q x_v - K_c P_L \quad (6)$$

이다. 여기서  $x_v$ 는 스펙의 변위,  $K_q$ 는 밸브 유동 상수(valve flow gain),  $K_c$ 는 밸브유동압력 계수(valve flow-pressure coefficient)이다. 서보밸브의 운동방정식은

$$\frac{x_v(s)}{i(s)} = \frac{K_{sv}}{\tau_{sv}s+1} \quad (7)$$

이다. 여기서  $\tau_{sv}$ 는 서보밸브의 시정수,  $K_{sv}$ 는 서보밸브 상수이다.

실린더 내부의 연속방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$4Q_L = A_p \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{\partial P_L}{\partial t} \quad (8)$$

여기서  $V_t$ 는 구동기 내의 유체 전체체적,  $\beta_e$ 는 유체에 대한 체적탄성계수(bulk modulus)이다.

편치의 변위는 서보밸브로 제어하며, 서보밸브의 입력전류는 관측된 하중과 처짐량으로부터 계산되어진다. 또한 경로 제어시스템을 취급한다는 사실을 고려하여 간단한 접근법으로 PI 제어를 제안하였다. 적분제어항은 정상상태의 오차를 0으로 하기 위하여 필요하며, 비례제어항은 오차신호를 직접 공급하므로 단독적으로 작동할 때의 적분제어항의 응답에 비하여 뚜렷하게 계단 응답을 개선시킨다. 설계된 PI 제어기는 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

위와 같은 각 부분의 모델을 통합한 전체 편치 위치제어 시스템의 블록선도를 Fig. 4에 도시하였다.

## 2.4 3점굽힘 공정 실험결과

개발된 3점굽힘 알고리즘의 정확성을 확인하기 위하여 Fig. 3과 같이 만도기계에서 개발한 축교정기에서 실험을 실시하였다. 축교정기의 공급유압은 10톤이며, 서보밸브와 유압실린더로 구성된다. 그리고 처짐량을 측정하는 LVDT, 하중을 측정하는 로드셀을 사용하여 마이크로컴퓨터로 제어된다. 프로그램 언어는 C 언어로 작성되었고, 1회 제어에 요구되는 계산시간은 1ms이다.

소재의 물성치의 변화에 대한 스프링백량 예측 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 열처리 정도가 다른 세 가지의 시험시편을 사용하여 실험하였다. 각각의 시험축은  $H_{RC}$  45, 50 그리고 55로 고주파열처리되었다. 3 가지 시험축에 대한 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 추정된 영구변형량의 오차평균은  $7\mu\text{m}$ 이고, 표준편차는  $5\mu\text{m}$ 이다. 그리고 영구변형량  $\delta_p$ 과 추정된 영구변형량  $\delta_D$ 사이의 편차값은 최대  $17\mu\text{m}$ 이며, 교

정지시량  $\delta_D$ 의 크기와는 상관없다. 이러한 결과는 소재 물성치의 변화에 대해서도 본 논문의 교정공정으로 충분히 제품의 공차를 만족시킬 수 있다.

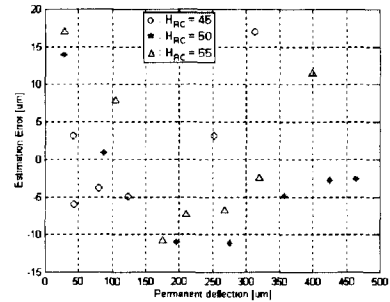


Fig. 5 Estimated permanent deflection error versus permanent deflections

## 3. 축휨의 다단계 교정 공정

### 3.1 다단계 교정 알고리즘

축교정기는 연삭공정 여유를 최소화하기 위하여 교정 전 진직도 250-500 $\mu\text{m}$  정도의 축을 진직도 공차 30 $\mu\text{m}$  이내로 교정해야 한다. 실험에 길이 645mm, 지름 28mm의 랙바를 사용하였다. 교정하려는 축은 길이가 길고, 높은 정밀도의 진직도를 요구한다. 그러므로 한 지점에 대하여 단 한 번에 그 지점을 교정공차안으로 교정한다면 다른 점들이 공차를 벗어나므로 한 번의 교정으로 높은 정밀도를 얻기가 매우 어렵다. 그래서 1회 이상의 교정이 필요할 때에는 다음 번 교정시의 휨상태를 고려하여야 한다. 이렇게 함으로써 가장 최소 교정횟수에 대한 높은 교정성능을 성취할 수 있다.

하지만, 열처리 상태, 자체의 물성치값, 축의 기하학적 형상, 축의 휨형태, 그리고 교정시의 지지 조건 등과 같은 다양한 변수들은 교정 후 축휨형태를 예측하기 매우 어렵게 만든다. 그러므로 이러한 문제의 축을 교정하기 위해서는 축의 휨형태를 분류하고 그에 따른 교정 후 휨형태 변화를 예측하여 교정하는 것이 필요하다.

Fig. 1에서의 빗금친 부분과 같이 소성변형의 대부분이 일어나는 부분은 직접 하중을 받는 지점이다. 그러므로 이상적인 소성변형에서는 가압점과 이외의 측정 점사이의 변형 관계를 선형으로 가정할 수 있다. 실험결과로부터 오차의 표준편차 2 $\mu\text{m}$  내에서 선형 보간으로 휨형태의 변화를 예측할 수 있음을 확인하였다. 휨량이 큰 경우 한번의 교정으로 최대휨점을 휨량만큼 교정하면, 가압점은 교정공차안에 들어간다 하더라도 다른점들이 공차범위를 벗어나며 또한 복잡한 휨형태가 될 수 있다. 휨형태가 복잡해지면 지지조

건 선정이 어렵기 때문에 교정하기 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 교정시 최대휨점에 대한 교정지시량은 교정 후의 휨형태가 교정 후 각 점의 변형비율과 같도록 선정하면 된다. 그리고 교정 후의 휨형태는 항상 1 차 형태를 유지하도록 한다.

그러나 열처리 상태, 물성치, 휨형태 등의 변화 원인으로, 교정후의 변형률도 이론적인 선형관계로 추정될 수 없다. 그러므로 교정횟수의 최소화 및 정밀도의 향상을 위해서는 이러한 교정 후의 변형률의 변화를 수정하는 학습방법론이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 퍼지 자기 학습법을 도입하여 다단계 교정 방법을 실현하였다.

Fig. 6은 다단계 교정 알고리즘의 전체 구조도이다. 데이터 베이스, 다단계 교정, 퍼지 자기 학습의 3개 부분으로 이루어져있다. 데이터 베이스 부분에서는 지지조건에 따른 교정량의 한계, 가압점에 따른 교정 후 변형률, 축의 휨량과 휨형태에 따른 교정법칙을 포함한다. 퍼지 자기 학습 부분에서는 예측된 교정 후 변형률과 실제 교정 후 변형률을 비교하여 현재의 변형률을 보상해주는 역할을 한다.

다단계 교정 부분에서는 측정을 통해서 얻은 축의 휨량과 휨형태를 가지고 교정에 필요한 교정방향, 교정점, 교정지시량 그리고 지지조건 등의 교정방법을 결정한다. 교정지시량은 최대 휨량, 최대 휨량과 2번째 휨량의 비율, 데이터 베이스의 교정 후 변형률, 퍼지 자기 학습을 통한 보상값, 그리고 축의 휨형태에 따른 교정 법칙을 바탕으로 얻는다. 지지조건은 교정법칙, 교정한계 그리고 산출된 교정지시량으로 결정한다. 교정점은 최대 휨량점으로 결정한다. 교정방향은 최대 휨점과 2번째 휨점의 방향과 휨형태로 결정한다.

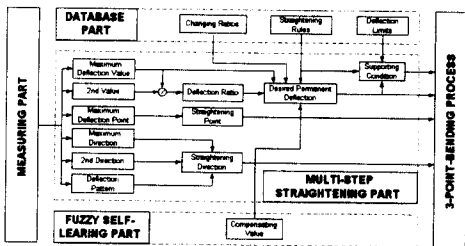


Fig. 6 Schematic diagram of multi-step straightening algorithm

### 3.2 퍼지 자기 학습 제어 알고리즘

축의 열처리 상태, 물성치값, 축의 기하학적 형상으로 인하여 교정 후 축의 행동은 상당히 복잡하고 애매하며, 또한 불확실성과 비선형성을 가진다. 그러나 축을 교정하기 위해서는 교정 후

의 축의 행동을 예측할 필요가 있다. 퍼지이론의 멤버함수와 추론은 부정확하고 애매한 자연현상을 묘사하고 다루는 기초를 제공한다. 퍼지이론의 개념은 능숙한 작업자의 축적된 경험, 제어 전문가의 경험적 지식, 그리고 공정에 대한 매우 근사적인 특성 등을 실행할 수 있도록 해준다. 교정 후 변형률을 어느 정도 적절하게 추정할 때까지 교정법칙을 자동적으로 개선하고 발전시키는 퍼지 자기 학습 제어를 사용하였다.

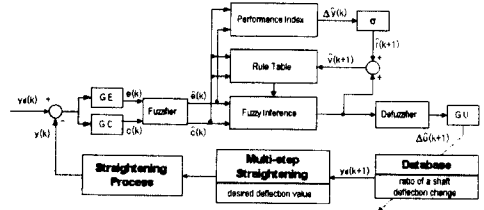


Fig. 7 The schematic diagram of a fuzzy self-learning control algorithm

Fig. 7은 퍼지 자기 학습 제어의 구조를 나타내고 있다. 퍼지 자기 학습 부분에서는 먼저 데이터 베이스에 있는 교정 후 변형률과 실제 교정 후의 변형률을 비교하여 비율의 보상값을 구하고 데이터 베이스의 변형률을 보상한다. 그리고 다음 교정에서 제어기는 새로운 변형률을 따라가도록 한다.

다단계 교정 부분에서는 데이터 베이스의 교정 후 변형률로 교정지시량을 산출한다. 이 교정지시량  $\delta_D(k)$ 을 가지고 축을 교정한 후 측정을 통해서 실제의 교정 후 변형률  $y_d(k)$ 을 얻는다. 이것과 데이터 베이스에 있는 교정 후 변형률  $y_d(k)$ 의 차이  $e(k)$ 와 차이의 변화  $c(k)$ 를 퍼지화한다. 또한 보상값  $\Delta u(k)$ 도 퍼지화한다.

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

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

$$\hat{e}(k) = \text{Fuzzify}\{e(k)\} \quad (10)$$

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

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

$\hat{e}(k)$ ,  $\hat{c}(k)$ , 그리고  $\Delta \hat{u}(k)$ 는 퍼지화된 변수를 나타낸다. 퍼지화 부분의 스케일 계수 G.E, G.C 그리고 G.U는 모두 1로 하였다.

퍼지 변수들은 언어적인 의미(즉, "small", "large")를 표현하는 퍼지값으로 주어진다. 그리고 제어 규칙은 퍼지 변수들을 사용하여 언어적인 진술로 표현된다. j번째 학습 제어 규칙은 다음과 같은 형식으로 쓰여질 수 있다.

$$R_j: \text{IF } \hat{e} \text{ is } E_j \text{ and IF } \hat{c} \text{ is } C_j \text{ THEN } \Delta \hat{u} \text{ is } \Delta U_j$$

여기서  $E_j$ ,  $C_j$  와  $\Delta U_j$  는 변수  $\hat{e}$ ,  $\hat{c}$  와  $\Delta \hat{u}$ 의 퍼지 언어적 값이다. 그러므로 j번째 학습 제어 규칙은 다음과 같이 3 차원  $E \times C \times \Delta U$  상에서 관계 행렬을 생성하는 퍼지관계로 간주되어질 수 있다.

$$R_j = E_j \times C_j \times \Delta U_j \quad (12)$$

이와 같은 제어기는 몇 개의 관계나 규칙으로 구성된다. 그래서 총체적 관계  $R$ 은 다음과 같이 각각의 관계의 결합에 의해서 계산된다.

$$R = \bigvee R_j \quad (13)$$

만약  $\hat{e}$  와  $\hat{c}$  의 언어적 값이 각각  $E'$  와  $C'$  라면, 그때의 제어기의 출력의 언어적 값  $\Delta U'$  는 추론에 대한 Zadeh의 합성법에 의해서 입력값으로부터 추론될 수 있다.

$$\Delta U' = E' \cdot C' \cdot R \quad (14)$$

여기서  $\cdot$  은 퍼지 관계의 합성이다.

공정에 적당한 입력값을 생성하기 위해서는 대응하는 퍼지값으로부터 제어 입력의 크리스프 값을 계산해야 한다. 여기서는 무게중심법을 비퍼지화의 수단으로 사용하였다.

$$\Delta u = Defuzzify\{\Delta \hat{u}\} \quad (15)$$

이렇게 얻어진  $\Delta u$ 가 바로 데이터 베이스의 교정 후 변형률을 보상해주는 보상값이 된다.

성능지표는 상태 오차  $\hat{e}$ 와  $\hat{c}$ 을 이용하여 성능을 나타낸다.  $\Delta \hat{y}(k)$ 는 성능을 개선하기 위하여 공정 출력에서 요구하는 변화로써 정의된다. 출력의 변화는 과거에 시도한 나쁜 성능을 증진시키기를 원하며, 새로운 학습 제어 행동  $\hat{u}(k+1)$ 은 현재의 나쁜 성능에 가장 공헌한  $\Delta \hat{u}(k)$ 에 규칙 강화  $\hat{r}(k+1)$ 를 더함으로써 얻어진다.

$$\hat{r}(k+1) = \sigma \Delta \hat{y}(k) \quad (16)$$

$$\hat{u}(k+1) = \Delta \hat{u}(k+1) + \hat{r}(k+1)$$

여기서,  $\sigma$  는 규칙 개선 계수라고 한다.

제거되거나 부가되어야 할 규칙을  $R_r(k)$ 와  $R_a(k)$ 라고 하면, 다음과 같은 제어 규칙은 교환되어야 한다.

$$R_r(k) = \hat{e}(k) \rightarrow \hat{c}(k) \rightarrow \Delta \hat{u}(k+1) \quad (17)$$

그리고 다음과 같은 함의를 따른다.

$$R_a(k) = \hat{e}(k) \rightarrow \hat{c}(k) \rightarrow \hat{u}(k+1) \quad (18)$$

이와 같이 교환은 다음과 같이 표현될 것이다. 다음 단계에서는 퍼지 관계 행렬  $R(k+1)$ 은 규칙  $R_a(k)$ 를 포함하고 있지만 규칙  $R_r(k)$ 은 아니다. 즉

$$R(k+1) = \{R(k) \wedge \overline{R_r(k)}\} \vee R_a(k) \quad (19)$$

그리고 이 식을 통해서 새로운 규칙을 얻을 수 있다. 이와 같은 규칙으로 교정에 따른 보상값을 계산한다. 이러한 학습 방법으로 축의 변형률을 따라갈 수 있다.

### 3.3 다단계 교정 공정 실험결과

다단계 교정 공정의 신뢰도를 확인하기 위하여 랙바에 대한 교정실험을 수행하였다. 랙바는 자동차의 조향장치에 들어가는 축으로 가공정도와 안전을 위하여  $30\mu\text{m}$ 이내의 진직도가 요구된다. 실험 대상인 랙바에 대한 형상은 Fig. 8에 도시하였다. 그리고 휨형태의 측정 및 교정을 위하여 등간격의 LVDT 센서 5개와 지지부로 6개의 엔빌을 사용하였다. 선삭 가공 후 강도를 올리기 위하여 축의 해칭된 부분을 고주파열처리하고 연삭한다. 그러면 각 면의 열처리 정도의 차이에 따라 부분적인 응력분포가 발생하고 축이 휘어지게 된다. 이러한 열처리 후 휘어진 축에 대한 연삭공정의 여유를 최소화하기 위하여 진직도 교정을 수행한다. 본 논문에서는 80개의 랙바를 사용하여 교정실험을 수행하였다.

80개의 랙바의 휨량을 측정된 결과를 각각에 대한 휨형태, 최대휨량 그리고 최대휨점에 대해서 분류하여 Table 1에 나타내었다. 허용휨량  $30\mu\text{m}$ 안에 들어가는 것은 1개(1/80, 1%) 정도이다. 대부분이 허용휨량을 넘으며 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 휨형태이상은 소량 측정되었다.

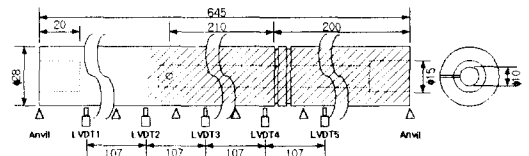


Fig. 8 Size of rack bar (SM45C, through induction hardening at hatching)

1차 휨형태의 경우를 보면 최대휨점이 점 3인 경우가 1차 휨형태 중에서 75%차지하며 점 4와 점 5가 그 다음을 차지한다. 점 3, 4 그리고 5의 위치는 열처리되는 부분으로 이를 통해서 축의 휨은 열처리과정을 통해서 발생하고 점 1과 점 2의 휨은 열처리된 부분의 휨에 의해서 상대적으로 휨이 발생함을 알 수 있다. 휨량을 보면  $30\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$ 의 휨량이 61%를 차지하고 그 다음으로  $600\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$ 의 휨량이 19%를 차지한다. 휨량이 많은 경우는 한번 교정보다는 여러 번에 나누어 교정해야 한다. 1차 휨형태의 경우 축의 비틀림은 심하지 않았고 대부분 휨평면이 일정한

값을 갖는 형태를 가지고 있다.

2차 휨형태의 경우를 보면 8%정도 차지하며, 최대휨점이 점 3이 제일 많고 휨량은 모두 200 $\mu$ m 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 일정한 형태를 가지고 있다.

3차 이상의 휨형태를 보면 전체시편에 대해서 2%정도 차지한다. 휨량이 모두 200 $\mu$ m이하로 적지만 비틀림이 상당히 심하고 일정한 비틀림 형태를 가지고 있지 않다. 그러므로 교정시 교정 지시량뿐만 아니라 가압방향의 중요한 교정변수가 된다.

Table 1 Deflection patterns of rack bar with heat treatment

| Deflection Pattern | Number(%)<br>(Total: 80) | Point Deflection | Point |    |    |    |       | Sum(%) |    |   |   |    |
|--------------------|--------------------------|------------------|-------|----|----|----|-------|--------|----|---|---|----|
|                    |                          |                  | 1     | 2  | 3  | 4  | 5     |        |    |   |   |    |
| Perfect            | 1(1)                     | under 30 $\mu$ m | 0     | 1  | 0  | 0  | 0     | 1      |    |   |   |    |
|                    |                          | 30~200 $\mu$ m   | 0     | 1  | 29 | 10 | 3     | 43(61) |    |   |   |    |
|                    |                          | 200~400 $\mu$ m  | 0     | 2  | 8  | 0  | 1     | 11(15) |    |   |   |    |
|                    |                          | 400~600 $\mu$ m  | 0     | 0  | 2  | 1  | 0     | 3(4)   |    |   |   |    |
|                    |                          | 600~800 $\mu$ m  | 0     | 0  | 13 | 0  | 0     | 13(19) |    |   |   |    |
|                    |                          | over 800 $\mu$ m | 0     | 0  | 1  | 0  | 0     | 1(1)   |    |   |   |    |
|                    |                          | Sum %            | 0     | 0  | 3  | 4  | 53.75 | 11     | 15 | 4 | 6 | 71 |
| 2nd order          | 6(8)                     | 30~200 $\mu$ m   | 1     | 17 | 2  | 33 | 3     | 50     | 0  | 0 | 0 | 6  |
| 3rd order          | 1(1)                     | 30~200 $\mu$ m   | 0     | 0  | 0  | 0  | 0     | 1      | 1  |   |   |    |
| 4th order          | 1(1)                     | 30~200 $\mu$ m   | 0     | 0  | 0  | 0  | 0     | 1      | 1  |   |   |    |

Table 2는 79개의 rack bar에 대한 교정결과를 나타내었다. 교정횟수는 1회에서 7회까지 수행되었으며 평균적으로 3.0회 정도 시행되었다. 그리고 전체 시험 축에 대한 평균교정시간은 19.9초가 소요되었다. 반복 교정이 5회 이상 수행된 시편은 축의 휨량이 크고, 다단계 교정이 진행될수록 휨형태의 차수가 올라가고 비틀림 정도가 크게 나타나게 된다. 이러한 현상은 기본적인 교정법칙이나 교정후 휨량 변형률의 오차에 기인된다.

Table 2 Straightening results of rack bars

| Straightening Number       | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | Straightening Average Number |
|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|------------------------------|
| Bar Number                 | 13 | 15 | 25 | 16 | 7  | 2  | 1  | 3.0                          |
| Straightening Average Time | 7  | 13 | 20 | 27 | 33 | 38 | 45 | 19.9 sec                     |

#### 4. 결론

획어져 있는 축의 진직도를 확보하기 위하여 원하는 공차범위 이내로 교정하는 온라인 자동굽힘공정제어 시스템을 개발하였다. 연구 결과는 측정된 휨량을 분석하여 최적의 교정방법을 결정하는 다단계 교정 공정과 선정된 교정방법으로 원하는 소성변형을 일으키는 3점 굽힘 공정으로 구성된다.

축의 3점굽힘에 대한 이론적인 굽힘모델을 기초로 소재의 물성치 변화를 규명하여 온라인으로 스프링백을 예측할 수 있는 관측기를 제시하고, 실시간으로 영구변형량을 제어할 수 있는 3점굽힘 제어 시스템을 실현하였다. 효율적인 휨 교정을 위하여 휨형태와 퍼지자기학습법으로 보정되는 교정 후 변형률을 고려하여 최적의 교정 지시량을 결정하는 다단계 교정 공정을 제시하였다. 그리고 실험을 통하여 온라인으로 영구변형량을 제어하여 다양한 휨형태의 축을 교정할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) K. H. Partzel, 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 fur Metallkunde, pp.157-164.
- (2) E. Trostmann, N. E. Hansen, G. Cook, 1982, "General Scheme for Automatic Control of Continuous Bending of Beams", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 104, pp.173-179.
- (3) D. E. Hardt, M. A. Roberts, K. A. Stelson, 1982, "Closed-Loop Shape Control of a Roll-Bending Process", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.104 pp. 317-322.
- (4) D. E. Hardt, B. Chen, 1985, "Control of a Sequential Brakeforming Process", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.107, pp. 141-145.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) James M. Gere, Stephen P. Timoshenko, *Mechanics of Materials : Third Edition*, PWS Publishing Company, 1990, pp.328-340.
- (8) Herbert E. Merrit, "Hydraulic Control System", John Wiley & Sons, 1967
- (9) H. J. Park, H. S. Cho, 1995, "A Fuzzy Self-Learning Control Method with Application to Hydroforming Processes", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.117, pp. 297-303.