

스프링백 관측기를 이용한 축교정기 개발

안중용*, 안동철*, 김승철*, 정성종**

Development of Shaft Straightening Machine with Springback Observer

C. Y. Ahn, D. C. Ahn, S. C. Kim and S. C. Chung

Abstract

In order to compensate for out-of-straightness of shafts, an automatic straightening process composed of an automatic measuring module, an automatic control unit and operating softwares was developed with a hydraulic press. The out-of-straightness of each shaft was measured automatically in the measuring stage. An optimal pressure point was determined to minimize TIR value of the shaft according to press count of 3-points bending process. In the geometric adaptive control procedure, punch stroke and springback of the shaft were predicted by an observer using on-line measured values of press force and deflection amount in each press count. An automatic straightening machine was realized with the measuring module, the GAC module, PLC, IBM-PC and the operating software on the hydraulic press. The validity of the proposed straightening process was confirmed through a series of experiments with cam shafts.

Keywords : GAC (Geometric Adaptive Control : 기하학적 적응제어), Observer (관측기), On-line (온라인), Out-of-straightness (진직도오차), Shaft straightening (축교정), Springback (스프링백), TIR (Total Indicator Reading : 횡량), 3-point bending (3 점 굽힘)

1. 서 론

기계 부품들중 진직도가 중요한 부품들은 열처리 공정에서 야기된 변형을 교정해 주어야만 부품으로서의 기능성 확보가 가능하다. 특히 자동차 엔진에 사용되는 부품

중 캠축 (Cam shaft) 과 주축 (Main shaft) 은 정확한 운동전달 특성과 내구성을 향상시키기 위해 그의 진직도와 경도 유지에 노력하고 있다. 이들은 경도를 높이기 위해 제조공정 순서 중에 고주파열처리 공정을 거치게 되며, 이때 복잡한 그들의 형상과 전(前)공정에서 받

* 한양대학교 대학원 기계설계학과
** 한양대학교 기계설계학과

생한 잔류응력 등에 의하여 열에 의한 변형이 야기된다. 이 열변형량은 제조과정중 마지막 과정인 연마공정에서도 교정이 가능하지만, 연마공정의 부하를 덜고 생산성 증대를 위해 현장에서는 진직도를 향상시키기 위한 교정 작업을 수행하고 있다.

재 국내에는 일본산 교정기가 수입되어 사용되고 있으며, 그들을 모방한 교정기의 제작이 시도되어지고 있으나¹⁾, 학문적인 차원에서 교정원리와 자동화 관점에서 시스템개발을 대상으로한 연구는 이루어지지 않고 있는 실정이다. 외국에서는 Chandra²⁾ 가 박판성형에서 스프링백(Springback)의 온라인(On-line) 규명과 제어에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Ling등³⁾ 은 축의 교정작업에서 오프라인(Off-line) 스프링백의 규명과 제어에 관하여 연구하였다. Dvorkin등⁴⁾ 과 Katho등⁵⁾ 은 각각 강관의 교정을 위한 유한요소해석 모델의 제시와 교정공정의 측정과 제어법에 대하여 연구하였다. Talukder등⁶⁻⁷⁾ 은 축의 교정시 역학적인 문제해석을 시도한 바 있으나, 본 논문에서 대상으로 하고자 하는 3점 굽힘(3-points bending) 방식 축교정기의 교정해석과 측정 및 제어에 관련된 교정시스템에 대한 연구는 보고되지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 자동차용 캠축과 주축 등의 연삭공정 여유를 최소화 하기 위한 진직도 교정기(Straightening machine)에서 교정전 200~500 μ m 정도의 휨패턴(Deflection pattern)을 자동으로 측정하고, 3점 굽힘 방식을 이용한 교정작업에서 소성변형후 발생하는 스프링백량을 정확히 예측함으로써 서보형 가압시스템이 교정제어를 수행할 수 있도록 하는 스프링백 관측기를 개발하였다. 또한, 교정기에서 펀치(Punch) 가압점의 위치제어, 교정대상 축에서 교정을 위한 가압방향 결정모듈을 개발하였으며, 이들의 기능을 PLC 와 산업용컴퓨터를 이용하여 구현한 기하학적 적응제어(Geometric Adaptive Systems) 모듈과 통합하였다.

소형자동차용 4기통 1500cc 가솔린엔진에 사용되는 캠축의 교정을 대상으로 제작된 교정기상에서, 구현된 기하학적 적응제어기 모듈의 기능성과 제어성을 실험한 결과, 개발된 스프링백 예측모듈과 서보형 가압시스템의 교정제어 작업이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었으며, 5회 이내의 교정횟수에서 30 μ m 이하의 진직도를 확

보할 수 있었다.

2. 힘량의 자동측정

TIR (Total Indicator Reading) 값으로 표시되는 교정대상 축의 힘량 측정단계에서는 Fig. 1 과 같이 3개의 LVDT 센서와 증분형 로터리엔코더(Rotary encoder)가 사용된다. 캠축 측정을 위한 3개의 센서는 100 mm 간격으로 배치되고, 엔코더는 모터 반대편 센터부의 종동기어에 맞물리게 된다. 캠축은 주조를 통해 초기형상이 만들어지고, 1차 가공에서 베어링 지지부와 캠부분만 가공된다. 캠부분은 진원이 아니므로 센서의 위치는 자연히 베어링 지지부로 결정된다. 측정시 오차를 줄이기 위해 센서와 측정부위는 지렛대를 통하여 연결한다.

1차 가공후 경도 증대와 내구성 증대를 위해 열처리 공정을 거친 축에는 휨이 생기게 되며, 이 휨량은 엔코더와 센서가 동기되면서 각각의 측정점에 대하여 1회전당 최대 1000점씩 측정된다.

축의 양끝 단면의 중심을 이은 중심선으로부터 측정 단면내 도심의 최대 휨방향과 크기는 각각의 측정점에서 최대값이 측정된 각도와 그 크기를 이용하여 계산한다.

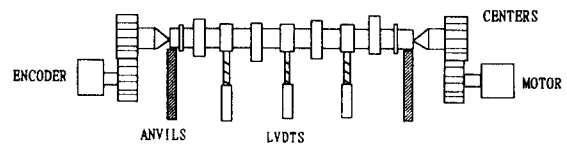


Fig. 1 Experimental setup for deflection measurement

Fig. 2 는 각각의 측정점에서 얻어진 휨중 최대 휨방향과 크기를 도시한 것이다. 이중 그 값이 제일 큰 Ch. 2 의 값이 TIR 값이 된다. TIR 값이 허용공차 범위를 벗어나면 교정을 해야 한다. 교정을 위해서는 가압점의 위치와 교정량등의 파라미터를 계산해야 한다.

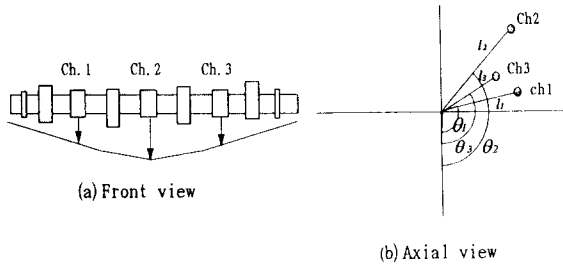


Fig. 2 Deflection pattern

3. 가압점 결정

3 점 굽힘 방식을 이용한 휨교정에서 교정기 프레스의 가압기구인 펀치를 위치시키는 가압점은 Fig. 1의 측정점 중에서 처짐량이 가장 큰 점을 선정한다. 교정횟수와 교정오차를 최소화하기 위해서는 가압점내의 가압방향과 스프링백을 고려한 교정량의 추정이 중요하다. 가압방향은 Fig. 2(b)의 측방향에서 바라본 도심의 처짐량과 방향을 이용하여 산출한다. 먼저 3 채널 중 최대처짐량을 갖는 측정점을 기준으로, 다른 측정점의 처짐량의 제곱의 역수비로 내분하는 각도를 각각 구한 후, 그 각도의 평균치를 가압방향으로 정의한다.

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 서로간의 각도차가 90° 이내인 경우 가압방향 θ_p 는 식(1)과 같이 된다.

$$\theta_p = \frac{1}{2}(\theta_{2,3} + \theta_{2,1}) \quad (1)$$

여기서,

$$\theta_{2,3} = \theta_2 - (\theta_2 - \theta_3) \frac{l_3^2}{l_2^2} \quad (2)$$

$$\theta_{2,1} = \theta_2 - (\theta_2 - \theta_1) \frac{l_1^2}{l_2^2} \quad (3)$$

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 에 90° 이상 차이가 발생하는 경우에는 TIR 값을 갖는 측정점의 최대 휨방향을 가압방향으로 설정한다.

Fig. 3은 휨량 측정, 가압점, 가압방향 그리고 교정량을 결정하기 위한 자동측정 공정의 순서도이다.

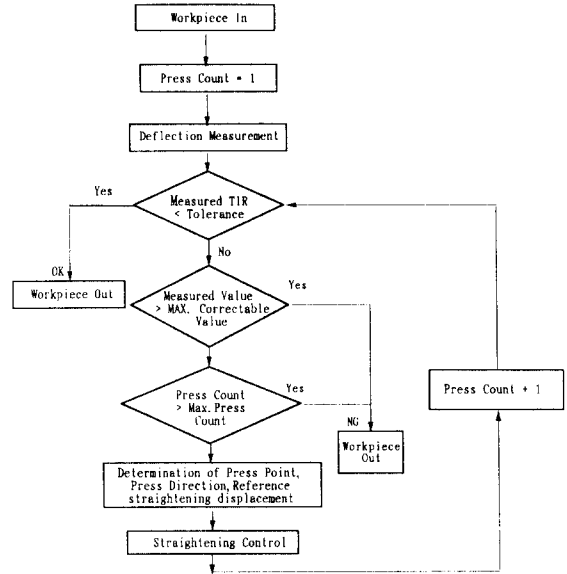


Fig. 3 Flow chart of measuring stage

4. 기하학적 적응제어기

4.1 스프링백 관측기

3 점 굽힘을 이용한 가압방식의 교정법을 적용하기 위해 축의 진직도 교정 메커니즘을 Fig. 4와 같이 단순지지의 중심위치에 집중하중을 가하는 것으로 모델링하였다.

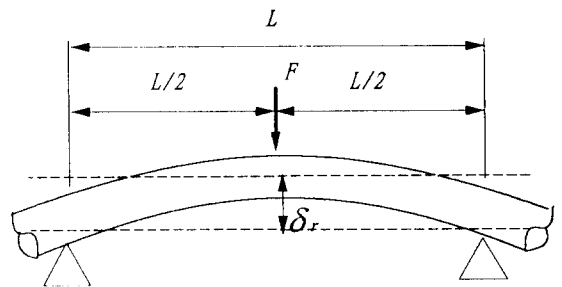


Fig. 4 3-Points bending model for shaft straightening

본 논문과 같이 최대 500 μ m 정도 휨을 갖는 축의 교정 시 하중과 변위 관계는 Fig. 5 와 같이 근사화 할 수 있기 때문에⁶⁻⁸⁾, 가압중에 탄성영역은 C₁, 소성영역은 C₂, 그리고 언로딩 (Unloading) 공정은 C₃ 으로 근사화할 수 있다. Fig. 5 에서 항복점은 (δ_Y , F_Y) 이며, 소성영역에서 변형 δ_M 을 야기시킨 후 언로딩하면 영구변형량은 δ_M 이 되는 것이 아니라, 스프링백량 (δ_S) 만큼이 제외된 δ_P 가 된다. 그러므로, 실제 가압 스트로크는 기준 교정량에 임의의 스프링백이 더해진 값으로 계산되어야 한다.

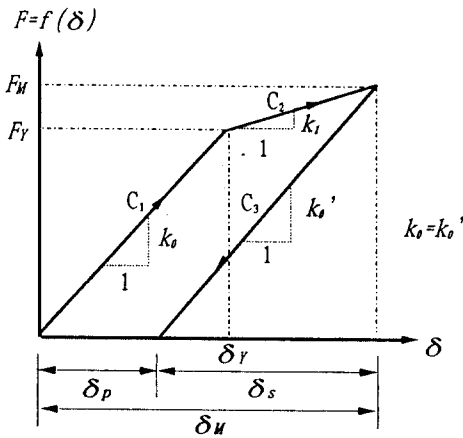


Fig. 5 Load-displacement model for springback prediction

교정과정중 스프링백의 실시간 예측은 다음과 같은 스프링백 관측기 (Observer) 를 이용하였다. 탄성영역 ($F < F_Y$) 에서 축의 변형량은 식 (4) 로 주어진다.

$$\delta = F/k_0 \quad (4)$$

항복점 ($F > F_Y$) 을 지난 후, 언로딩 공정에서의 탄성기울기 (k_0') 는 가압중의 탄성기울기 (k_0) 와 같다고 가정하면⁶⁻⁷⁾, 스프링백량은 식 (5) 로 추정된다.

$$\delta_S = F_M/k_0 \quad (5)$$

이로부터, 언로딩 후의 영구변형량은 다음과 같이 추정된다.

$$\delta_P = \delta_M - \delta_S = \delta_M - F_M/k_0 \quad (6)$$

4.2 영구변형량 제어법

δ_P 만큼의 영구변형을 유발시키기 위한 실제 가압 스트로크의 양 δ_M 은 식 (7) 과 같이 계산된다.

$$\delta_M = \delta_P + \delta_S \quad (7)$$

즉, 교정작업이 개시되면서 실시간으로 교정하중 F 와 δ 측정 후 식 (4)를 이용하여 k_0 를 규명한다. 항복점을 지나면서 실시간으로 측정되는 변형량 δ_M 양과 식 (6) 을 이용하여 영구변형량 δ_P 를 실시간으로 예측하면서, 측정모듈에서 계측된 TIR 양으로 표현되는 기준교정량 δ_c 과 δ_P 가 같게 되면 교정작업을 멈추도록 한다. Fig. 6 은 교정량의 기하학적 적응제어 과정을 보여준다.

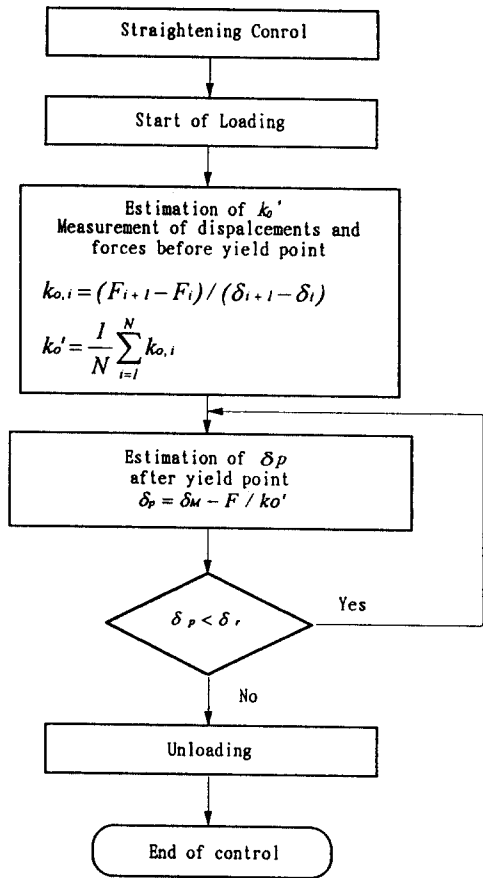


Fig. 6 Geometric adaptive control procedure for shaft straightening

5. 실험 및 결과

5.1 실험장치

Fig. 7 은 설계 제작한 교정기 실험장치의 개략적인 구조도이다. 유압서보를 갖는 10 톤 프레스를 이용하여 가압장치를 설계 제작하였으며, 가압량은 IBM-PC 486 상의 스프링백 관측기에서 영구변형량 δ_p 가 교정량 δ_c 과 같아질 때 발생하는 유압프레스의 유압 흐름 방향 제어 명령을 DI/DO 와 연결된 PLC 를 통하여 서보밸브에 전달함으로써 이루어진다. 스프링백량과 영구변형량 예측을 위해 로드셀 (Load cell) 을 사용하였으며, 교정을 위한 진직도오차량의 측정이나 온라인 교정사 k_0 의 예측과 δ_M 양의 제어를 위해 LVDT 센서를 사용하였다.

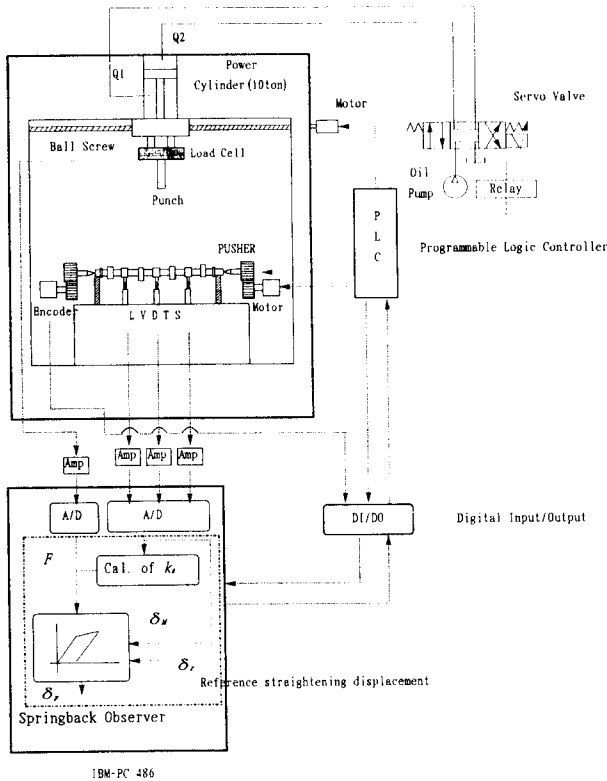
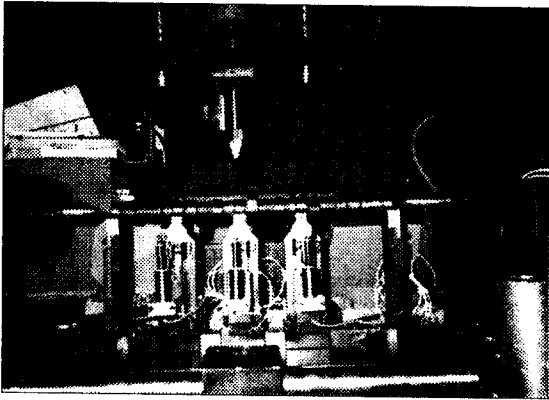


Fig. 7 Schematic diagram of the straightening machine

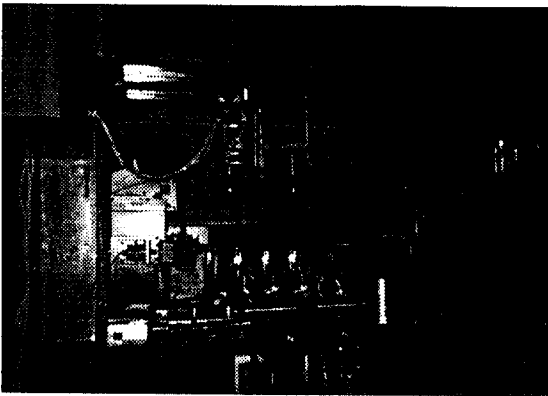
교정대상축의 진직도오차 측정을 위해 모터, 엔코더 그리고 Pusher 등으로 이루어진 회전형 축측정장치를 제작하였고, 자동측정을 위해 PLC 와 연결하였다. PC 와 연결된 A/D 및 DI/DO 보드를 이용하여 로드셀, LVDT 센서 및 엔코더로부터 얻어지는 각종 측정치를 획득하고, PLC 와 인터페이스함으로써 교정작업을 위한 실험장치의 자동화를 이루었다. Table 1 은 실험장치의 주요 구성품에 대한 사양을 보인 것이고, 개발된 교정기 실험장치의 프레스 구조부, 펀치 및 측정장치를 Fig. 8 에 보였다.

Table 1 Specification of Experimental setup

Power Cylinder	Diameter	Ø100 mm
	Stroke	0.6m
Load Cell (C3V1-10T)	Capacity	10 ton
	Nonlinearity	-0.015 %R.O.
	Hysteresis	+0.047 %R.O.
	Output	+2.9993 mV/V
LVDT (FS-380)	Range	19 mm
	Nonlinearity	0.15 %
	Repeatability	0.003 %
DC Motor (MSS540-401)	Bandwidth	15 kHz
	Velocity	30~120 rpm
Rotary Encoder (E6C-C)	Control input	CW,CCW,FREE,SPEED SET : DC24V~5V
	Type	Incremental
A/D (ACL711B)	Input	DC 5V-5%~12V-10%
	Output	A, B, Z phase
	Bandwidth	30KHz
	Resolution	1000 pulses/revolution
Industrial Computer (WS-614)	Sampling rate	10 kHz /ch
	IBM	486DX2-88MHz



(a) Structure of the straightening machine



(b) Punch and measuring unit

Fig. 8 Overview of experimental setup

5.2 자동화용 소프트웨어

앞절과 같은 사양으로 개발된 축교정용 실험장치를 자동화된 축교정기로 완성시키기 위하여, 사용자 편의성을 고려한 자동화용 소프트웨어 운영체제를 구축하였다. Fig. 9 는 이 소프트웨어를 이용한 자동화 교정과정의 흐름을 보인 것이다.

교정기로의 교정대상축의 반입, 측정을 위한 회전센터의 전·후진, 모터의 On·Off 제어, Punch 이송방향의 제어등은 PLC 로 수행하고, 컴퓨터에서는 교정을 위한 초기파라미터의 지정, 자동측정, 스프링백 관측기, 교정상황, 통계분석 그리고 오류상황에 대처할 수 있는 데이터의 관리와 DI/DO 를 이용한 PLC 와의 인터페이스를 통하여 기하학적 적응제어 과정의 온라인 제어동

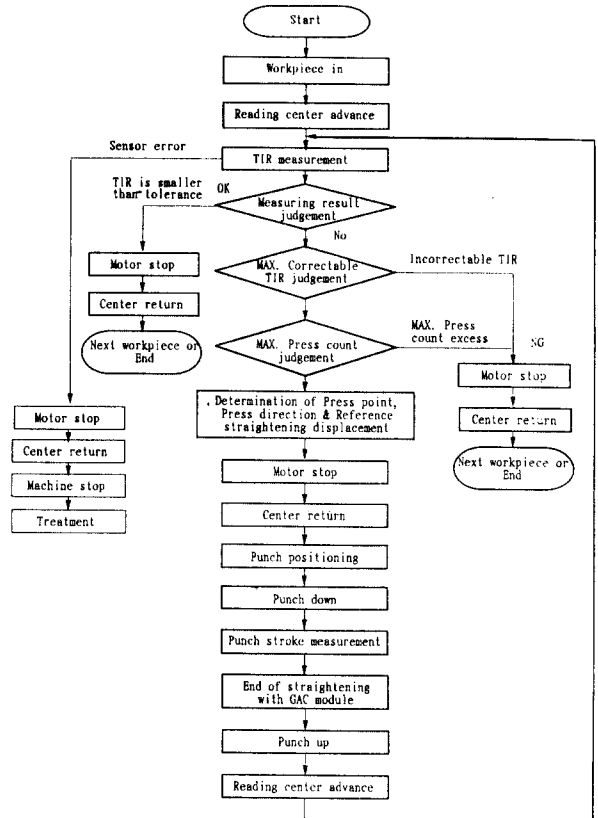


Fig. 9 Automatic measurement and control procedure for the straightening machine

작을 수행한다.

소프트웨어는 C 언어로 작성되었으며, Fig. 10(a) 는 초기화면이고, Fig. 10(b) 는 F1 을 누른 후 파라미터 편집이나 지정을 위한 화면을 보인 것이다. Fig. 11(a) 는 F2 를 누른 후 교정대상축의 교정횟수에 따른 원주방향에서의 각 채널당 측정치와 TIR 값을 보인 것이고, 교정결과는 Fig. 11(b) 와 같이 표현된다. F3 을 누르면 이제까지 교정된 교정정보중 100개내의 교정 전·후의 TIR 값과 그 통계치를 Fig. 12 와 같이 볼 수 있다. Fig. 13 은 F4 를 누르면 기계상태를 감시할 수 있는 모니터링기능을 보인 것이다. 기계상태 감시는 PLC 로부터 6 개의 DI/DO 단자를 선정하여 26 개

에 해당하는 에러메시지를 출력할 수 있으며, 그 방법은 선정한 DI 단자를 각 세부공정마다 검사하여 그 값에 변화가 생기면, 작업을 중단하고 그것에 해당하는 에러메시지를 출력하고, PLC 로부터 에러수정완료 신호가 올 때까지 대기한다. 또한, 센서에서 에러가 발생한 경우는 해당하는 에러메시지 출력과 동시에 PLC 에 작업 중단 신호를 보냄으로써, 센서류 및 기계부품들의 상태 감시를 수행한다.

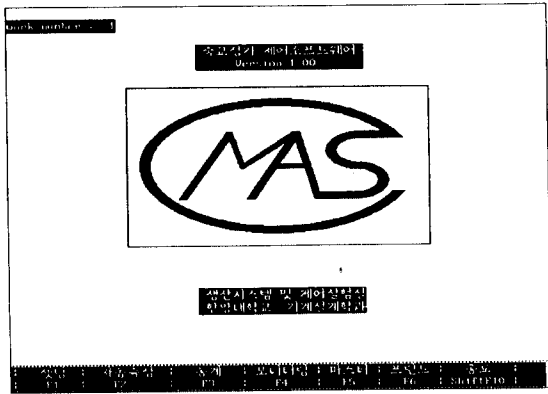


Fig. 10 (a) Initial screen of control software

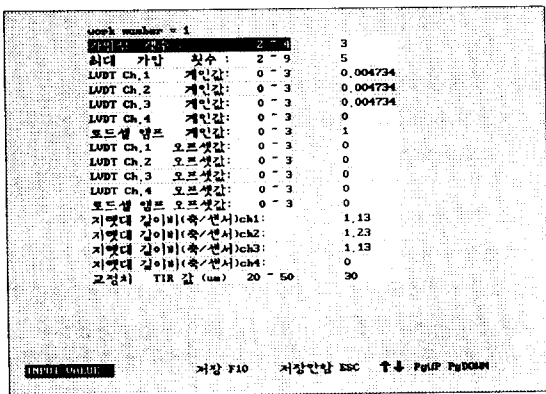


Fig. 10 (b) Parameter setting screen for the straightening machine

5.3 실험 및 토의

관측기에서 탄성영역의 강성계수 k_0 를 예측할 때, 랜덤오차를 방지하기 위해 로드셀과 LVDT 를 이용하여

가압과정 중 실시간으로 샘플된 데이터 조합 100 개를 이용하여 평균치로서 예측한다.

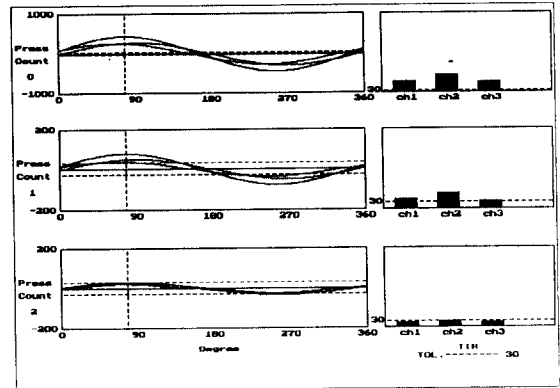


Fig. 11 (a) Measuring results and TIR display

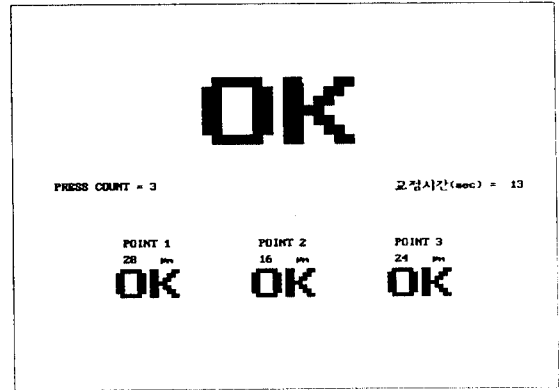


Fig. 11 (b) Straightening results

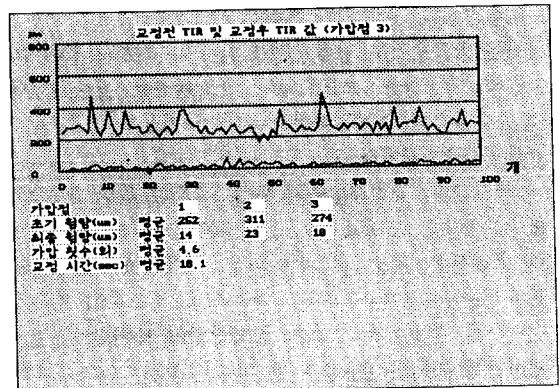


Fig. 12 Straightening history

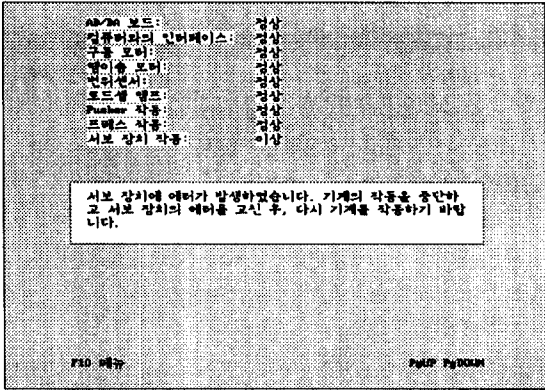


Fig. 13 Monitoring screen and alarm messages

Table 2 는 많은 수의 캠축 교정시 얻어진 데이터중 10 가지 경우의 k_0 와 k_0' 을 보인 것이다. 각각의 실험에서 가압점에 관계없이 k_0 와 k_0' 의 상대오차는 평균 1.36% 로서 Fig. 5에서 k_0 와 k_0' 이 동일하다고 가정했던 것이 옳음을 보여준다. 그러나, k_0 는 실험시기 또는 캠축 그리고 가압점에 따라 큰 편차를 갖고 있으므로, 실시간에서 가압과정중 온라인으로 규명하지 않고 재료의 평균적인 물성치를 이용하여 이론적으로 모델링을 한 알고리즘에 따라서 연구변형량을 예측하는 경우라면, 큰 오차를 초래할 수 있다.

Table 2. Estimation results of k_0 and k_0'

Case	1			2			3		
	$k_0(kgf/m^2)$	$k_0'(kgf/mm^2)$	error (%)	$k_0(kgf/m^2)$	$k_0'(kgf/mm^2)$	error (%)	$k_0(kgf/m^2)$	$k_0'(kgf/mm^2)$	error (%)
1	336.295	333.338	-0.9	257.512	255.199	-0.9	336.539	340.112	1.1
2	326.480	327.246	0.2	254.828	249.824	-2.0	338.126	342.202	1.2
3	335.625	328.252	-2.2	259.028	254.469	-1.8	340.856	341.180	1.1
4	326.084	332.589	2.0	255.029	256.962	0.8	336.826	347.506	3.2
5	329.137	332.969	1.2	255.790	258.983	1.6	338.714	337.315	0.5
6	330.614	329.162	-0.4	251.088	257.897	2.6	336.337	343.064	2.0
7	331.748	326.048	-1.7	256.627	251.617	-2.0	342.962	343.358	0.1
8	331.786	335.096	1.0	250.402	250.796	0.2	337.958	345.390	2.2
9	331.346	336.522	1.5	249.524	252.234	1.1	339.852	341.018	0.3
10	336.884	326.056	-3.3	249.782	253.629	1.5	339.020	337.361	0.7

Fig. 6 에 제시한 기하학적 적응제어 과정에 따라서 제어된 10 가지 경우에 대한 교정전후 결과를 Table 3 에 제시하였다. 각 실험의 경우, 교정과정중 제시된 가

압횡수 범위내에서 기준 교정량과 실제 교정된 양을 정리한 것으로 교정오차 20 μm 범위내에서 온라인 제어가 잘 이루어짐을 볼 수 있다.

Table 3 Straightening results

Case	Result(μm)	Ref. Value(μm)	Error(μm)	Press count
1	331	323	8	3
2	284	272	12	2
3	33	47	-14	1
4	85	77	8	1
5	175	188	13	2
6	116	103	13	1
7	162	150	12	1
8	179	194	-15	2
9	80	99	19	2
10	147	132	15	1

Table 2 와 Table 3 의 실험결과로부터 축교정을 위해 개발된 온라인 스프링백 관측기의 신뢰성과 기하학적 적응제어기의 교정능력을 확인할 수 있었고, 온라인 스프링백 관측기의 개발로 교정기의 가압능력하에서 각종 축의 교정제어가 실시간으로 이루어질 수 있음을 입증하였다.

6. 결론

3점 굽힘방식을 이용하는 가압장치, 자동측정장치, 교정량 제어를 위한 기하학적 적응제어 모듈과 자동화를 위한 운용소프트웨어로 이루어진 유압프레스를 이용하여 제작된 교정기를 개발한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 자동측정모듈에서는 교정대상 축의 휨패턴을 측정하여 TIR 양과 가압위치를 자동 결정한다.

2) 기하학적 적응제어 모듈에서는 온라인으로 측정된 가압력과 축의 변형량을 이용하여 실시간에서 축의 스프링백량을 예측할 수 있는 스프링백 관측기를 개발 사용하였으며, 연구변형량의 실시간 예측과 유압프레스의 가압량 제어에 사용된다.

3) 온라인 스프링백 관측기의 개발로 교정량 제어에 필요한 각종 계수들의 오프라인 파라미터 규명과정을 생략할 수 있으며, 재료, 모양, 크기가 다른 축이나 파이프 등의 교정에도 적용할 수 있다.

4) 486 PC 에서 A/D 와 DI/DO 를 사용하여 각종

센서와 PLC 를 인터페이스하였고, 고장이나 오동작을 상태감시할 수 있는 자동화 운용소프트웨어의 체계를 구축하였다.

5) 자동차 엔진에 사용되는 캠축을 대상으로 교정을 시도한 결과, 스프링백 관측기의 신뢰성을 입증할 수 있었으며, 5 회 이내의 교정횟수에서 TIR 값이 기준허용 공차 30 μm 의 범위 내로 교정되어짐을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 안중용, 안동철, 김승철, 정성종, "축교정기용 기하학적 적응제어기 설계", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 623-627, 1995.
- (2) Chandra A., "Real-Time Identification and Control of Springback in Sheet Metal Forming", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.109, pp. 265-273, 1987.
- (3) Ling S. T. and Shimoi J., "A System of Automatically Straightening Cylindrical Object with Learning Ability", Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Tokyo, pp. 843-846, 1986.
- (4) Dvorkin E. N. and Medina F. M., "Finite Element Models for Analyzing the Straightening of Steel Seamless Tubes", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.111, pp. 351-355, 1989.
- (5) Katoh T. and Urata E., "Measurement and Control of a Straightening Process for Seamless Pipes", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.115, pp. 347-351, 1993.
- (6) Talukder N.K.Das and Singh A.N., "Mechanics of Bar Straightening. Part 1: General Analysis of Straightening Process", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.113, pp. 224-227, 1991.
- (7) Talukder N.K.Das and Singh A.N., "Mechanics of Bar Straightening. Part 2: Straightening in Cross-Roll Straighteners", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.113, pp. 228-232, 1991.
- (8) Degarmo, E.P., et al., Materials and Processes in Manufacturing, Collier Macmillan, Chapter 17, 1988.