

축교정기용 기하학적 적응제어기 설계

(Design of Geometric Adaptive Controller for the Shaft Straightening Machine)

안 중 용* (한양대 대학원), 안 동 철 (한양대 대학원), 김 승 철 (한양대 대학원), 정 성 중 (한양대 공대)
J. Y. An (Graduate School of Hanyang Univ.), D. C. Ahn (Graduate School of Hanyang Univ.),
S. C. Kim (Graduate School of Hanyang Univ.), S. C. Chung (Hanyang Univ.)

Keywords : Automatic Straightening Process (자동 교정프로세스), Automatic measurement of deflection (힘량 자동측정), Automatic Control of Press Stroke (프레스 스트로크의 자동제어), Observer of Springback (스프링백 관측기), Press Point (가압점), Reference Press Stroke (기준 가압 스트로크), Press Plane(가압평면)

ABSTRACT :

This paper deals with the process which automatically straightens the shaft whose straightness is over the tolerance. The developed straightening process is composed of the measuring module and the control module. In the measuring module, the deflection of each measuring point is automatically measured, and the press point and the reference press stroke is determined. In the control module, the springback is predicted by the observer using the calculated reference press stroke and on-line-measured force and deflection.

Through a series of experiments, the validity of the proposed process was verified.

1. 서론

자동차의 중요한 부품으로 사용되는 샤프트와 주축은 정확한 운동 및 위치 전달을 위해서, 그 진직도가 매우 중요하다. 표면의 경도를 높이기 위한 열처리를 한 후, 축은 열변형에 의해 진직도가 허용 공차 범위를 벗어나게 된다. 열처리로 휘어진 축을 교정하기 위해 축의 진직도 측정과 가압점과 가압평면, 프레스 스트로크의 결정이 이루어져야 한다. 이것을 수행하기 위해, 먼저 휨 패턴이 측정되어야 하고, 그후 기준 가압점이 설정되고 휨패턴에 의해 가압평면이 결정되고, 마지막으로 가압 스트로크가 정확히 제어되어야 한다. 힘을 제거한 후, 탄성 스프링백은 벤딩 프로세스에 계속되기 때문에 가압 스트로크의 기준 변위는 반드시 스프링백을 보상하는 변위를 포함해야 한다. 스프링백은 교정될 각각의 축의 재료 특성에 의존하기 때문에, 스프링백이 이론적인 벤딩 모멘트에 의해 예측될 때에 정확한 교정을 보장할 수 없다. 스프링백은 오프라인 테스트 벤딩의 결과를 이용하여 예측될 수 있다. 이 방법에 의해 축의 스프링백이 정확히 예측될 수 있지만, 오프라인이므로 생산성은 떨어지게 된다. 벤딩 적응 제어에, 대해서 판에 대한 연구는 어느 정도 있으나 축에 관한 연구는 상당히 미비한 실정이다^[1]. Hardt et al 은 탄성 영역의 물성치를 알고 있는 작업물의 최대 모멘트와 곡률을 측정함으로써 스프링백을 정확히 예측할 수 있는 페루프 형태의 제어 시스템을 개발했다^[2]. Stelson 과 Gossard 는 프레스 브레이크 위에서 포밍력과 변위를 측정하여 원하고자 하는 각도로 판을 구부리는 브레이크 포밍 프로세스에 사용되는 적응제어를 설계했다.^[3]

Hardt 와 Chen 은 브레이크 포밍 프로세스에 사용되는 원하는 곡률의 프로파일을 생산하기 위한 인프로세스 제어법과 페루프 제어법을 제안했다^[4]. Chandra 는 관 금속 포밍 프로세스에 탄성 소용 모델과 피드백제어로 구성된 효과적인 실시간 제어 알고리즘을 제안했다^[5]. Katoh 는 파이프벤딩을 위해, 유압 실린더로부터 측정되는 힘과 변위를 측정함으로써 스프링백을 예측하는 관측기를 개발했다^[6]. Das Talukder 과 Singh 는 리버스 키네마틱 로딩에 의한 봉의 교정 프로세스와 관련된 매커니즘의 수학적 해석을 하고, 물리에 의한 교정프로세스를 수학적으로 해석하였다^{[7][8]}. Endow 와 Murota 는 벤딩에서 원형 튜브의 기하학적 변화를 이론적으로 구했다^[9]. Ling 과 Shimoi 는 학습법에 의한 원통형 물체를 자동으로 교정하는 시스템을 개발하였다^[10].

본 논문은 축의 자동 휨 교정 프로세스를 개발하는 데에 그 목적을 두고 있다. 개발된 프로세스는 자동 측정 단계와 자동 교정 단계로 구성되어 있다. 측정 단계에서는, 축이 회전하는 동안, LVDT 센서로부터 축 단면의 편심량이 먼저 측정된다. 다음, 이 치질 패턴이 허용공차 기준과 비교된다. 만약 치질 패턴이 허용공차 기준에 상응하지 않으면 치질 패턴의 치질각의 제품의 합을 최소화함으로써 교정을 위한 가압점과 가압 스트로크가 결정된다.

스프링백을 예측하는 관측기는 축의 조성, 직경, Young's modulus 와 같은 물성치에 관한 예비 정보 없이 온라인으로 측정된 반력과 축의 치질량을 이용한다. 그래서, 개발된 제어법은 조성, 직경, 물성치가 서로 다른 축이나 파이프에 대해서도 적용이 가능하다.

2. 휨량의 자동 측정

휨량의 측정 단계에서는 3 개의 LVDT 센서와 증분형 엔코더가 사용된다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 3 개의 센서는 100 mm 간격으로 위치해 있고, 증분형 엔코더는 모터의 반대편에 센터부와 중동기어로 맞물려 있다.

열처리한 축은 운반 장치에 의해 스트레이트닝 프로세스로 운반된다. 축이 중심축 주위로 회전하는 동안 축 단면의 휨량이 3 개의 LVDT 센서로 측정된다. 이 때 증분형 엔코더로부터 3 개의 LVDT 센서와 동기되어 변위가 측정된 각도가 획득된다. 축 표면의 반경 방향 변위는 축이 360 도 회전하는 동안 각각의 LVDT 센서로부터 1000 점씩 측정된다.

축의 양 끝단면의 중심을 이은 중심선으로부터 축 단면의 도심의 방향과 거리는 각 측정점의 최대값과 최소값으로부터 계산한다. 정면에서 본 도심의 처짐 방향과 양은 Fig. 2(a) 에 보였고, 측방향 사영은 Fig. 2(b) 에 보였다.

만약 계산한 도심의 처짐량이 허용공차 범위를 벗어난다면, 교정을 해야만 한다. 교정을 위해서는 가압점, 가압평면, 가압 스트로크를 계산해야 한다. 가압점은 Fig. 1 의 측정점중에서 처짐량이 가장 큰 점을 선정한다. 교정횟수와 교정오차를 최소화하기 위해 가압평면 및 가압 스트로크의 계산이 중요하다. 가압평면은 Fig. 2(b) 의 측방향에서 본 도심의 처짐량과 방향을 이용한다. 먼저 3 채널중 최대처짐량을 갖는 측정점들을 기준으로, 다른 측정

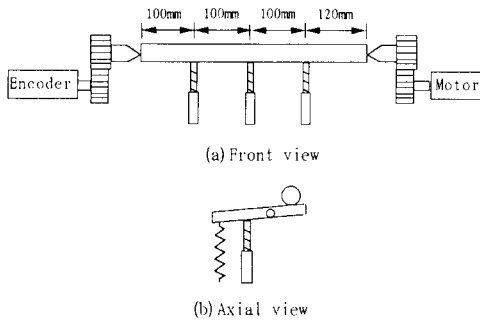


Fig.1 Measuring device of deflection

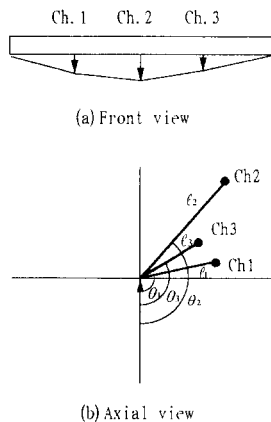


Fig.2 Deflection pattern

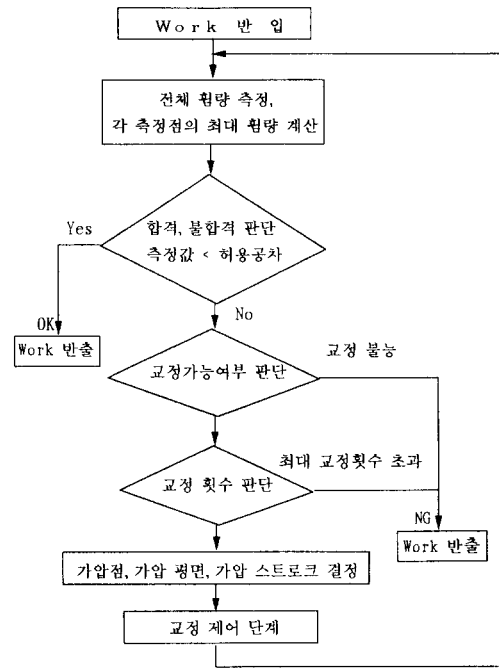


Fig. 3 Flow chart of measuring procedure

점의 처짐량의 제곱의 역수비로 내분하는 각도를 각각 구한 후, 그 각도의 평균치를 가압평면으로 정의한다. 단, 3 채널의 처짐각의 차이가 90 도 이내일 때 적용하고, 그 이외의 경우는 최대 처짐량을 갖는 채널의 처짐평면을 가압평면으로 선정한다. 가압 스트로크는 가압점의 처짐평면에서의 도심의 처짐량으로 선정한다. Fig. 3 에 휨량 측정 프로세스의 순서도를 보였다.

3. 자동 제어법

축의 교정 메커니즘을 Fig. 4 와 같이 단순지지의 중심 위치에 서 집중하중을 가하는 것으로 모델링하였다. 이 경우의 하중과 변위 관계는 Fig. 5 과 같이 근사화 될 수 있다. 여기에서 가압중에 탄성영역은 곡선 C_1 으로 근사화 되고, 소성영역은 곡선 C_2 로 근사화되고, 언로딩 프로세스는 C_3 으로 근사화된다. Fig. 5에서 항복점은 (δ_Y, F_Y) 이다. 힘을 제거했을 때, 변위는 δ_M 이 되는 것이 아니라, 스프링백량 (δ_S) 만큼이 빠진 δ_P 가 된다. 그러므로, 실제 가압 스트로크는 기준변위에 미지의 스프링백이 더해진 값으로 계산해야 한다. 축에 가하는 동안 스프링백을 예측하고 영구변형량을 계산해야 하므로, 하중이 증가할 때와 감소할 때의 δ 의 변화율이 같다고 가정 ($E_o = E_o'$) 하고, 가압 초기단계에서 측정된 하중과 변위를 이용하여 스프링백을 예측해야 한다. 실제의 측정결과에서 위의 가정은 합당함을 볼 수 있다.

아래에 스프링백의 실시간 예측을 포함하는 개발된 제어법을 설명하였다. 탄성 영역 ($F < F_Y$) 에서의 축 처짐은 식 (1) 로 주어진다.

$$\delta = F/Eo \quad (1)$$

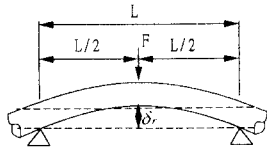


Fig. 4 Model of straightening of shaft

탄성영역에서 측정조기의 과도적인 데이터를 제외한 수백 개의 하중과 변위 데이터 조합을 측정하여 E_0 를 결정하는데 이용한다. 프레스에 의한 가압은 계속되어, 항복점을 지나 δ 가 δ_M 에 도달한다. $E_0 = E_0'$ 라고 가정하였기 때문에, 스프링백은 식 (2) 로 계산된다.

$$\delta_s = F_M/E_0 \quad (2)$$

따라서, 언로딩 후의 영구변형은 식 (3) 으로 계산된다.

$$\delta_D = \delta_r = \delta_M - \delta_s = \delta_M - F_M/E_0 \quad (3)$$

그러므로, 실제 가압 스트로크는 식 (4) 와 같이 계산된다.

$$\delta_M = \delta_r + \delta_s \quad (4)$$

Fig. 5 의 세 개의 직선 C1, C2, C3 에서 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$C1 : F = E_0\delta, \quad (0 < \delta < \delta_r, d\delta/dt > 0) \quad (5a)$$

$$C2 : F = F_y + E_1(\delta - \delta_y), \quad (\delta_r < \delta, d\delta/dt > 0) \quad (5b)$$

$$C3 : F = F_y + E_1(\delta - \delta_y) + E_0(\delta - \delta_M), \quad (\delta_r < \delta, d\delta/dt < 0) \quad (5c)$$

교정 과정에서 가압을 시작하면, 온라인으로 F 와 δ 가 측정되고, 그로부터 $E_0 (= E_0')$ 가 계산된다. 항복점을 지나면, F 를 측정하고 E_0' 를 이용하여 스프링백량을 계산하여 영구변형량을 예측한다. 가압이 계속되면서, 예측된 영구변형량이 교정하고자 하는 치점과 같아지면 가압을 중단한다. 유압 시스템의 제어는

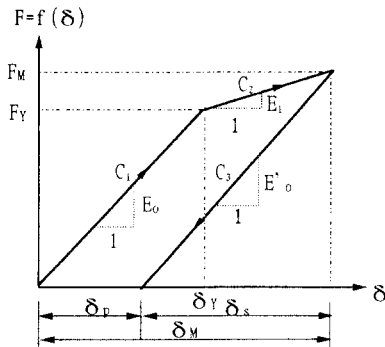


Fig. 5 Load-displacement model and springback prediction

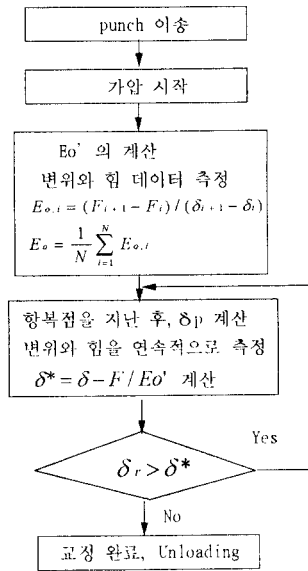


Fig. 6 Flow chart of control scheme

가압 중단 신호를 PLC 로 Digital Out 함으로써 그 제어가 이루어진다. 유압 시스템의 제어는 응답 속도를 빠르게 하기 위하여 on-off 제어를 하였다.

위에 언급한 과정의 제어 흐름도를 Fig. 6 에 보였고, 이 논문 에 사용된 유압 제어시스템의 구성도가 Fig. 7 에 그려져 있다.

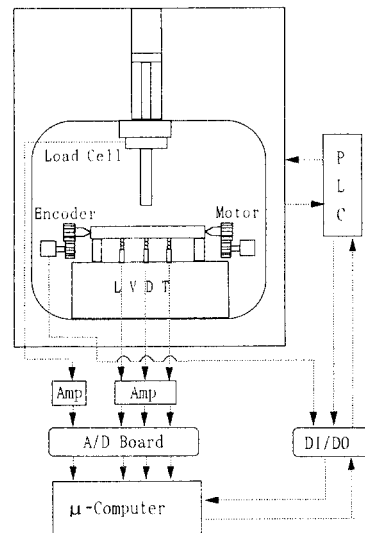


Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

4. 실험

Fig. 7 에서 보는 것과 같은 10 톤의 유압 프레스기를 이용하여 이 실험을 수행하였다. 프레스기는 서보램프와 유압실린더로 구동되는데, 판측기에서 인로딩 신호를 PLC 로 출력하면 PLC 에서 서보램프를 제어하여 인로딩 시키게 된다. 메뉴와 측정 및 제어 프로그램은 C 언어로 구성되어 있다. 하중은 램프와 실린더 사이에 장착된 로드셀로부터 나온 신호를 OP 앰프를 이용하여 증폭시킨다. 축의 휨량 측정에는 접촉식 변위센서를 지렛대를 이용하여 그 휨량을 측정하는데, 지렛대를 원점으로 복귀시키면 지렛대와 축을 연속적으로 접촉시키는 스프링의 강성과 길량은 데이터 샘플링 주파수를 충분히 만족시키도록 고려하였다.

시스템의 사양을 Table 1에 보였다.

Table 1 Specification of experiment setup

가압실린더	직경	∅100 mm
	스트로크	0.6m
로드셀	정격용량	10 tonf
	비선형성	-0.015 %R.O.
	히스테리시스	+0.047 %R.O.
	정격출력	+2.9993 mV/V
LVDT 센서	정격변위	19 mm
	비선형성	0.15 %
	반복정도	0.003 %
	대역폭	15 kHz
축 회전용 모터	최고 회전속도	120 rpm
엔코더	형식	중분형
	각도 분해능	1000 펄스
데이터 샘플링 보드	샘플링속도	10 kHz /ch
마이크로 컴퓨터	CPU 속도	386 급

판측기에서 탄성영역의 Young's modulus 를 계산할 때, Eo 는 Load Cell 과 LVDT 데이터 조합을 이용하여 100 개정도 Eo 를 구하여 그것의 평균치를 Eo 로 선정함으로써 Load Cell 과 LVDT 측정시 노이즈를 최소화하고, 안정된 Eo 를 구할 수 있다.

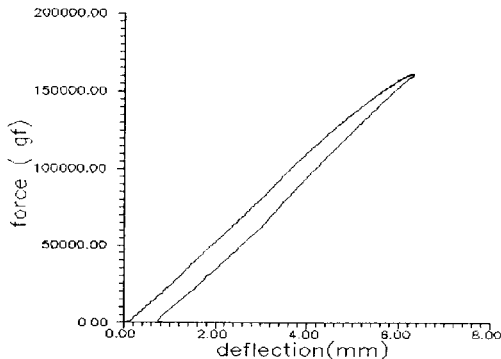


Fig. 8 Load-displacement by experiment

재료가 SM45C 인 축을 이용하여 실험하였다. 가압을 시작하여 탄성영역을 거쳐, 소성변형을 받은 후, 인로딩하여 영구변형이 생기기까지의 선도가 Fig. 8 에 보여진다. 가압중의 탄성영역에서는 가정한 것과 동일하게 선형적인 기울기를 보이지만, 소성영역에서는 곡선을 보인다. 그러나, 실제 세이거에서 소성영역의 기울기는 사용하지 않으므로, 아무 문제가 되지는 않는다. 그리고, 인로딩시의 기울기는 가압중의 기울기와 거의 동일함을 볼 수 있다. 실험적으로 구한 힘-변위 선도가 Fig. 5에서 보인 이론적인 힘-변위 선도와 잘 일치함을 볼 수 있다. Table 2 에는 여러 개의 샘플을 실험하여 계산한 Eo 와 Eo' 을 정리하였다. 각각의 실험에서 Eo 와 Eo' 의 오차는 평균 1.07% 로서 Fig. 5에서 Eo 와 Eo' 이 동일하다고 가정했던 것이 옳음을 보여주고 있다. 그런데, Eo 는 실험횟수 마다 큰 편차를 갖고 있으므로, 만약 재료의 평균적인 물성치를 이용하여 이론적으로 모델링을 한 알고리즘에 의해 영구변형량을 예측한다면, 큰 오차를 초래할 수 있다. 이런 이유로, 매 교정 때마다 탄성계수는 실험적으로 계속 관측되어야만 한다. Table 3 에 기준교정량과 실제 교정된 양을 정리하였다. 오차가 대체로 20 μm 이내로 온라인 제어가 잘 됨을 볼 수 있다. Table 2 와 Table 3에서 Eo 가 Eo' 보다 대체로 작게 측정됨으로써 실제교정량이 기준교정량보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 2 Result of estimation of Eo and Eo'

실험회수	Eo(kg/mm)	Eo'(kg/mm)	오차(%) (Eo-Eo')/Eo'
1	27903.22	27789.38	0.4
2	28120.24	28840.93	-2.4
3	28197.00	28067.73	0.5
4	28317.04	28728.59	-1.4
5	27066.34	27699.57	-2.2
6	28985.52	29132.00	-0.5
7	28506.74	28691.08	-0.6
8	27244.48	27429.25	-0.6

Table 3 Comparison of reference and experiment result of curing

실험회수	실제교정량(μm)	기준교정량(μm)	오차(μm)
1	491	500	-7
2	578	550	28
3	589	600	-11
4	670	650	20
5	726	700	26
6	766	750	16
7	812	800	12
8	867	850	17

5. 결론

열처리를 행한 후, 축에 나타나는 휨을 자동으로 교정하는 프로세스를 개발하였다.

그 프로세스는 측정단계와 제어단계로 구성되어 있다. 측정단

계에서는 축의 힘량을 측정하여 각각의 측정점에서의 최대힘량을 찾아서 기준 가압점을 결정하고, 각각 측정점의 치짐량의 세곱의 역수로 내분하는 가압평면 (각도) 을 계산하여 그것으로부터 스트로크를 결정한다. 제어단계에서는 온라인으로 측정된 가압력과 축의 치짐을 이용하여 탄성 스프링백을 계산하고, 교정되어야 할 치짐에 스프링백을 더함으로써, 실제 가해야 할 프레스 스트로크를 결정한다. 관측기에 의해 온라인을 계산되는 실제 프레스 스트로크와 변위 센서로부터 측정되는 스트로크의 비교치를 관측함으로써 그 제어가 이루어진다.

이 교정 프로세스는 매 교정시, 제어 단계에서 탄성 스프링백을 실제 데이터로부터 예측하므로 재료, 모양, 크기가 다른 축들에 대해서 적용이 가능하다.

실험결과, 축의 힘량이 20 μm 의 오차범위내로 교정이 되었다.

참고문헌

- (1) Dvorkin E. N., and Medina F. M., 1989, "Finite Element Models for Analyzing the Straightening of Steel Seamless Tubes", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.111, pp.351-355.
- (2) Hardt D. E., Roberts M. A., and Stelson K. A., 1982, "Closed-Loop Control of a Roll-Bending Process", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 104, pp.317-322
- (3) Stelson K. A. and Gossard D. C., 1982, "An Adaptive Pressbrake Control Using an Elastic-Plastic Material Model", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.104, pp.389-393.
- (4) Hardt D. E. and Chen B., 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) T. Katoh, E. Urata, 1993, "Measurement and Control of a Straightening Process for Seamless Pipes", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.115, pp.347-351.
- (7)N.K.Das Talukder, A.N.Singh, 1991, "Mechanics of Bar Straightening, Part 1: General Analysis of Straightening Process", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.113, pp.224-227.
- (8)N.K.Das Talukder, A.N.Singh, 1991, "Mechanics of Bar Straightening, Part 2: Straightening in Cross-Roll Straighteners", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.113, pp.224-227.
- (9) Endow J., and Murota T., 1986, "Dimensional Changes in Bending of Circular Tube," Journal of the JSPE, Vol. 27, No.300, pp.201-207
- (10) Ling S. T. and Shimoi J., 1986, "A System of Automatically Straightening Cylindrical Object with Learning Ability", Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Tokyo, pp.843-846