694 大韓機械學會論文集 第 12 卷 第 4 號, pp.694~704, 1988.

〈論 文〉

컴퓨터 수치제어 선반에서의 진원통도 보상제어

황 언*·강 민 식**·이 종 원*

(1988년 3월 28일 접수)

Compensatory Cylindricity Control of the C.N.C. Turning Process

Eon Hwang, Min-Sik Kang and Chong-Won Lee

Key Words : Workpiece Deflection Error(공작물 처짐 오차), Straightness Error(직진도 오차), Cylindricity Error(진원통도 오차), Compensatory Control(보상 제어), Parameter Estimation(계수 추정), Exponentially Weighted Recursive Least Squares Method (지수 가중 반복 최소 자승법)

Abstract

A recursive parameter estimation scheme utilizing the variance perturbation method is applied to the workpiece deflection model during CNC turning process, in order to improve the cylindricity of slender workpiece. It features that it is based on exponentially weighted recursive least squares method with post-process measurement of finish surfaces at two locations and it does not require a priori knowledge on the time varying deflection model parameter. The measurements of finish surfaces by using two proximity sensors mounted face to face enable one to identify the straightness, guide-way, run-out eccentricity errors. Preliminary cutting tests show that the straightness error of the finish surface due to workpiece deflection during cutting is most dominant. Identifying the errors and recursive updating the parameter, the off-line control is carried out to compensate the workpiece deflection error, through single pass cutting. Experimental results show that the proposed method is superior to the conventional multi-pass cutting and the direct compensation control in cutting accuracy and efficiency.

1. 서 론

심압대가 없는 선반으로 비교적 가늘고 긴 공작물을 가공하려고 할때 절삭력에 의한 공작물의 처짐때문에 공작물의 가공 형상이 일정한 직경을 유지하지 못하게 된다. 즉 공작물의 상대직경오차를 보인 Fig. 1과 같이 공작물이 물린 주축대 부근에서는 원하는 직경이 유지되지만 공작물의 자유단쪽으로 가면서 직경이 커진다. 그 이유는 절삭력이 공작물의 길이 방향으로 어느 점에서나 같다고 해도 공작물 고정점 즉 주축대로부터 절삭 위치까지의 길이가 달라짐에 따라 절삭력에 의한 공작물의 처짐량이 달라지기 때문이다. 이런 경우 현장에서는 공작물의 처짐에 의한 오차를 줄이고 표면의 가공 정밀도를 유지하기 위하여 보통 수 차례에 걸친 절삭 및 다듬질로 이루어지는 다중(multi-pass) 절삭을 수행하고 있으나 생산성의 저하는 물론 미소 절삭깊이의 반복 절삭에 의한 공작물의 가공경화 현상으로 가공 정밀도도 저하된다.

본 논문에서는 이러한 경우에 대해서 현장에서 흔히 수행되는 가공 후(post-process) 측정만을 이

*정회원, 한국과학기술원 기계공학과
**대전기계창

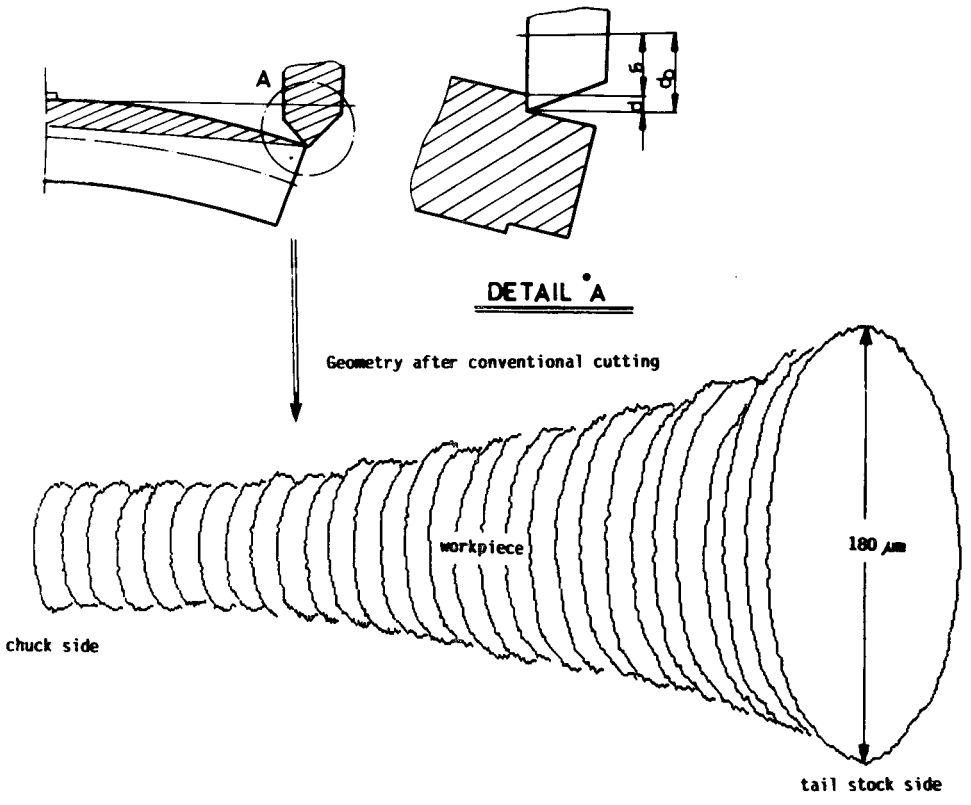


Fig. 1 Cylindrical workpiece geometry after conventional cutting

용한 단일절삭(single-pass)으로써 공작물이 원하는 일정한 직경을 유지할 수 있다는 것을 실험을 통해 검증해 보이고자 한다. 이와 같은 방식은 이미 보오링 작업 중 보오링바의 노출 길이 변화에 따른 가공면의 내경 오차를 없애주기 위한 방법으로써 제시된 바 있다[1]. 즉 반복 최소 자승법(recursive least squares)으로 미리 가정된 절삭조건과 공작물 처짐 사이의 관계식과 관련된 계수를 가공 후에 가공 공작물의 표면 측정으로 매 번 보정(update)시켜 줌으로써 일정 직경을 얻기위한 절삭조건을 결정하고자 한다.

2. 오차의 분석

선반에 의한 원통 가공시 진원통 형상(cylindricity)에서 벗어나는 오차 성분은 크게 직진도(straightness) 성분과 진원도(roundness) 성분으로 나눌 수 있다. 직진도 성분과 관련된 오차들은 오차 발생의 원인 별로 공구의 처짐 오차, 베드의 처짐 오차, 공작물의 처짐오차, 안내면 오차 등으로 구별할 수 있다[2]. 이들 중에서 가늘과 긴 공작물의 선반 가공 시에 공구와 베드의 처짐에 의한 오차는 공구와 베드가 공작물에 비해 상대적인 강성도가 크므로 무시할 수 있다. 그리고 진원도 성분과 관련된 오차들은 보통 스핀들 회전 오차(spindle error)와 편심오차(centering error)로 나눌 수 있는데 보통은 후자가 전자에 비해서 크게 나타난다.

다양한 오차 성분들을 측정하기 위한 여러가지 방법들이 고안되었지만 특히 직진도 성분에 대해서 Tanaka 등[3]은 인접한 2개의 갭 센서를 사용하여 공작물의 직진도 오차를 안내면 오차와 분리했다. 그러나 연속 측정 시 오차량이 축적되는 것을 피할 수 없으므로 정확한 공작물 직경의 측정에는 적당하지 않다. 그리고 진원도 성분과 관련해서 Whitehouse[4]는 원통형 공작물에 원주 방향 동일 평면에 3개의 센서를 위치시켜서 스핀들 회전 오차와 편심오차와 진원도 오차를 분리해내는 데 성공

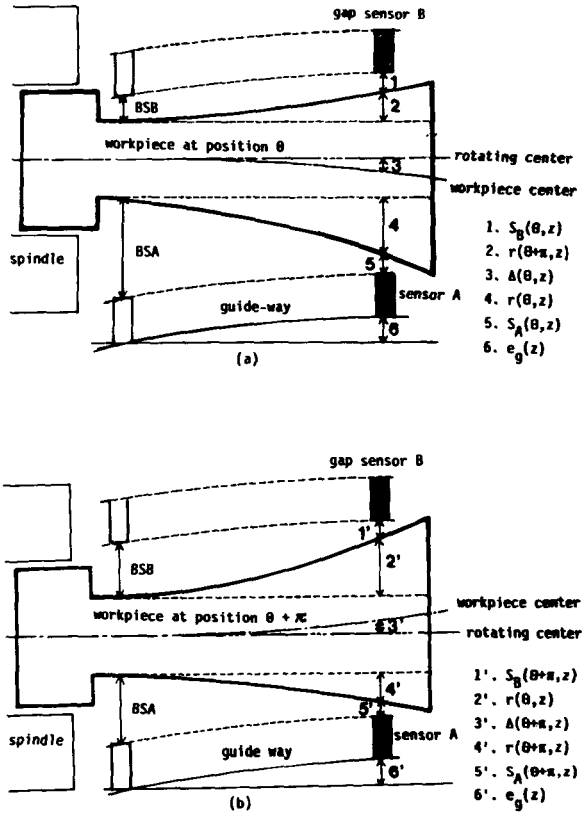


Fig. 2 Schematic diagram of measuring system for various errors

하였다. 그러나 많은 수의 센서 사용은 경우에 따라서는 불필요하다.

본 논문에서는 Fig. 2에서와 같이 공작물 양편에 갭 센서를 위치시키는 방식으로 간단하고 정확히 직경을 측정하였다. 즉 Fig. 2(a)에서 갭 센서 A와 B에서 나오는 신호 S_A와 S_B는 공작물과 센서 사이의 주축대 부근에서의 간극 BSA와 BSB를 기준으로 보정 시켜주면 다음과 같은 양을 표현한다.

$$S_A(\theta,\ z)=r(\theta,\ z)+e_g(z) \tag{1}$$

$$S_B(\theta,\ z)=r(\theta+\pi,\ z)-e_g(z) \tag{2}$$

여기서 θ는 공작물 임의의 기준점으로부터의 회전각도를 나타내고, z는 주축대로부터 자유단까지 공작물 길이 방향의 측정 위치를 나타내며, r은 반경 오차, e_g는 안내면 오차이다. 그리고 이 공작물을 180도 회전시킨 후 Fig. 2(b)에서 갭 센서 신호는 다음과 같은 양을 표현한다.

$$S_A(\theta+\pi,\ z)=r(\theta+\pi,\ z)+e_g(z) \tag{3}$$

$$S_B(\theta+\pi,\ z)=r(\theta,\ z)-e_g(z) \tag{4}$$

이 때 주축대 부근에서의 기준 직경에 대한 직경의 변화는

$$D(\theta,\ z)=S_A(\theta,\ z)+S_B(\theta,\ z)$$
$$=r(\theta,\ z)+r(\theta+\pi,\ z) \tag{5}$$

로 표현된다. 그리고 스핀들 회전 오차는 무시할 수 있으므로[5] 다음과 같은 양들의 측정이 가능하다. 즉

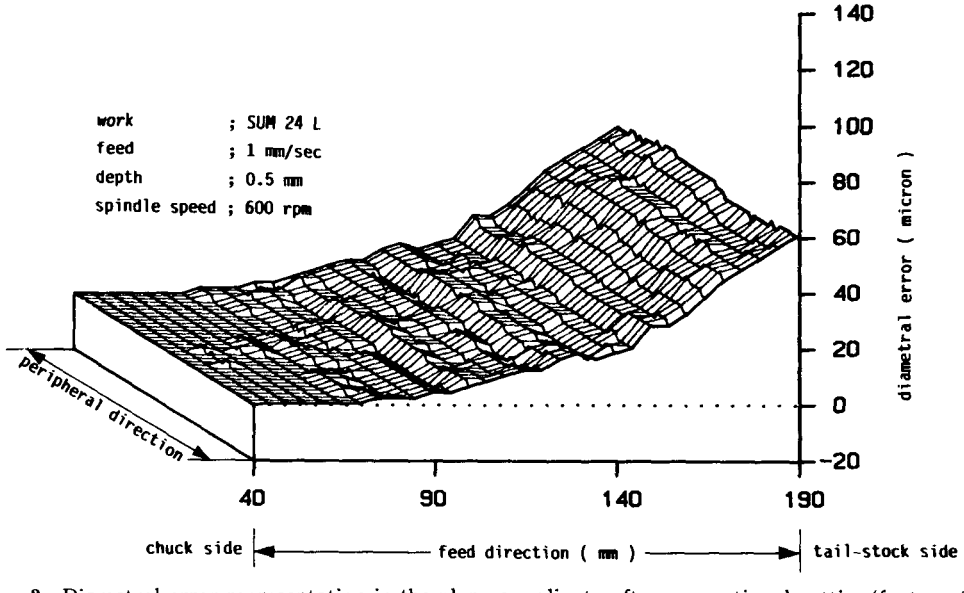


Fig. 3 Diametral error representation in the plane coordinate after conventional cutting (f=1mm/sec)

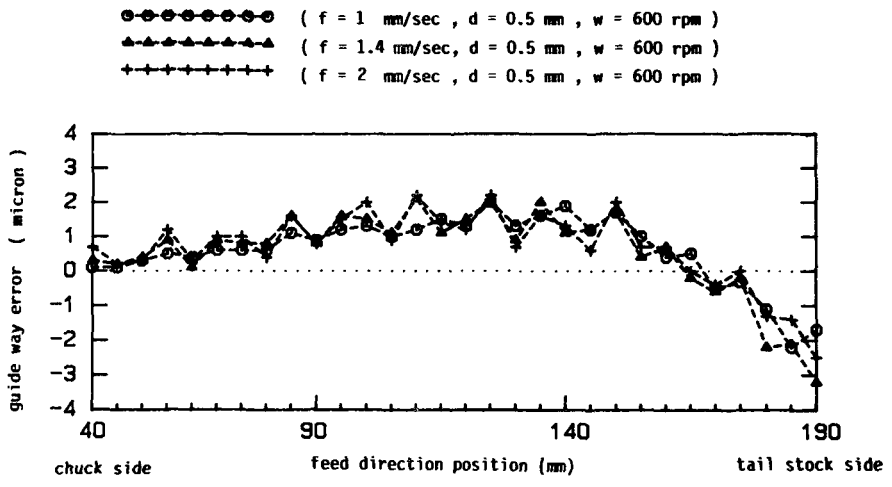


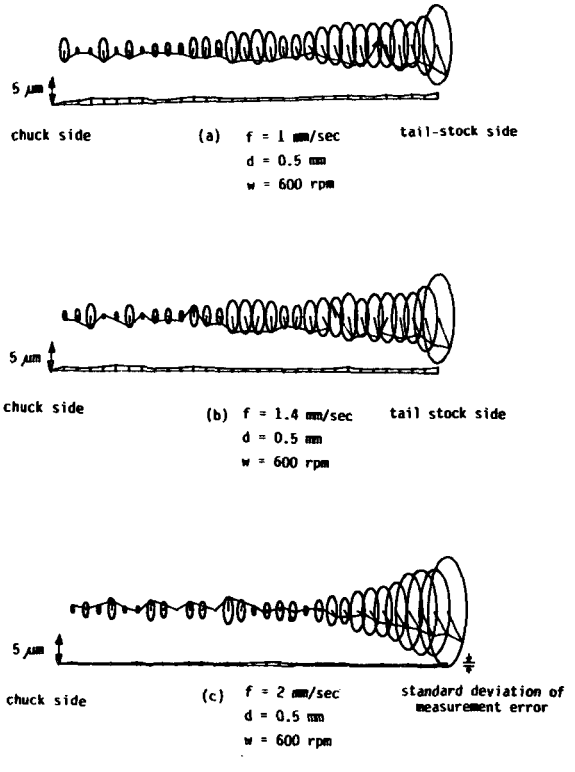
Fig. 4 Guide-way error

$$e_g(z)=(S_A(\theta,\ z)-S_B(\theta+\pi,z))/2$$
$$=(S_A(\theta+\pi,\ z)-S_B(\theta,\ z))/2 \quad (6)$$
$$\Delta(\theta,\ z)=(r(\theta+\pi,\ z)-r(\theta,\ z))/2$$
$$=\{S_A(\theta+\pi,\ z)+S_B(\theta,\ z)$$
$$-S_A(\theta,\ z)-S_B(\theta+\pi,\ z)\}/4 \quad (7)$$

이 때 회전 중심이 공간 상에 고정되어 있을 뿐만 아니라 공작물 표면이 진원이라면 안내면 오차 $e_g(z)$는 일정 위치 z_0에서 회전 각도 θ에 관계없는 일정한 값이고 편심오차 $\Delta(\theta,\ z)$는 회전중심으로부터 공작물 중심이 센서 방향으로 벗어난 양을 말하며 전술한 가정에 따라 일정 위치 z_0에서 θ에 따른 주기 2π의 주기함수이다.

쾌삭강봉(직경 25mm, 노출길이 200mm)을 절삭깊이 0.5mm로 고정시키고 3가지 다른 이송량으로 절삭 후 공작물의 표면을 측정하여 보았다. 이 때 센서의 분해능을 고려하여 센서 출력의 보정시 1μm 이하의 값은 믿을 수 없으므로 반올림하였다. 따라서 이 후로 분해능에 따른 측정 오차의 최대 편차는 $\pm 0.5\mu$m이다. Fig. 3에서 이송량을 1mm/sec로 하였을 때 최대 직경 오차는 약 60μm이고 그림으로 나타내지는 않았지만 이송량을 1.4mm/sec로 변화시켰을때 최대 직경 오차는 약 100μm로 증가하였고 다시 이송량을 2mm/sec로 증가시켰을 때 최대 직경 오차는 약 140μm로 증가하였다[5]. 이는 이송량의 증가에 따라 공작물의 절삭력에 의한 처짐이 증가함을 보여준다.

Fig. 4에는 식 (6)으로 계산된 안내면 오차를 나타냈는데 3개의 시편을 측정한 결과 측정 구간 150



1. C.N.C. turning
2. Workpieces
3. Computer
4. Interface equipment

Fig. 5 Eccentricity of workpiece after conventional cutting

mm동안 안내면 오차의 경향은 대체로 잘 일치하였다. 그리고 측정 값이 부분적으로 작은 요동(fluctuation)을 보였는데 이는 센서의 분해능에 따른 오차로 여겨진다. 측정 구간 동안 안내면 오차의 최대 편차량은 ±3μm에 불과하며 앞서 살펴본 직경 오차량에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다.

Fig. 5은 식 (7)로 표현되는 편심량으로부터 공작물 길이방향 일정 위치 마다 최소자승법으로 공작물 1회전 당 주기 2π를 갖는 정현함수의 진폭과 위상각(각원속에 직선으로 표시)을 결정하여 나타낸 그림이다. 이 때 결정된 정현함수로부터 벗어난 측정 오차의 표준편차도 계산하여 같은 그림 속에 나타내었는데 이 측정 오차의 표준편차량은 상당히 작아서 이송 방향 어느 위치에서나 1μm 이하에 불과하다. 이로부터 Fig. 2와 같은 측정 방식의 정당성을 입증할 수 있었다. 측정 계산된 $\Delta(\theta,\ z)$의 최대 크기는 절삭 조건에 따라 약 6-10μm이며 이는 각 절삭 조건 하에서 직경 오차의 1/10정도이므로 무시할 수 있다. 이상의 결과로부터 본 논문의 경우 공작물 처짐에의한 직경의 변화가 오차의 가장 중요한 성분임을 알 수 있다.

3. 공작물의 처짐 오차 보상제어

수직 보오링 머시인에서의 스핀들의 노출 길이가 변화함에 따른 스핀들 처짐량에 대한 경험적 모형이 Sun 등[6]에 의해 다음과 같이 제시되었다.

$$\delta = Kf^{\alpha}d^{\beta}L^{\gamma} \tag{8}$$

여기에서 K, α, β, γ는 미지의 계수이고, f는 이송 속도(feedrate, mm/rev), d는 절삭 깊이(depth of cut, mm), L은 스핀들의 노출 길이(overhung length, mm)이다. 위 식을 공작물의 처짐량에 적용 시킬 경우 L을 절삭이 수행되는 절삭점의 좌표 z로 대치시키고 일정 이송 속도 하에 공작물의 전 구간에 걸쳐서 절삭깊이 d를 일정하게 유지하면 윗 식은 아래와 같이 간략화된다.

$$\delta = K'z^{\gamma} \tag{9}$$

여기에서 K'는 식 (8)의 $Kf^{\alpha}d^{\beta}$에 해당된다.

주지하다시피 오일러 형 외팔보의 정적 하중에 의한 처짐량은 z^3에 비례하므로 계수 K'와 γ를 동시에 최소자승법으로 추정한 결과 실제로 계수 γ의 값은 약 3~3.5 사이에서 변화하였다. 그러나 계수 γ의 값이 약 3정도인 반면 계수 K'의 값은 일정한 값에 수렴하지 않는 문제가 발생했다[5]. 본 논문에서는 이런 문제를 해결하기 위한 한 가지 방법으로서 γ가 해석적으로 3이라는 것에 착안하여 γ을 3으로 고정한 후 K''만을 추정하기 위하여 다음 식을 사용하였다.

$$\delta = K''z^3 \tag{10}$$

여기서 $K''=K'z^{\gamma-3}$이다. 이로부터 원하는 일정 직경을 얻기 위한 올바른 공구의 궤도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} d_c(z) &= d_0+\delta(z) \\ &= d_0+K''z^3 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 d_c는 제어 절삭깊이 이고 d_0는 공칭 절삭깊이이다. 이 때 이 궤도가 최적 궤도가 되기 위해서는 제어 절삭깊이의 변화에 대해서 역으로 절삭력이 발생하지 않는다는 모순된 가정을 필요로 한다. 실제로 제어 절삭깊이의 최대 변화량은 공칭 절삭깊이의 약 1/10 정도에 불과하므로 제어 절삭깊이의 변화에 따른 공작물의 처짐량의 변하는 고려하지 않았다.

계수 K''의 값은 절삭력, 공작물의 강성도와 일차적으로 관계하므로 공구의 재질, 공작물의 재질에 따라 변하며 또 절삭 조건의 변화 즉, 절삭 깊이, 이송량에 따라서도 변화한다. 더구나 절삭 조건이 변하지 않고 재질의 변화가 없다고 하더라도 공구의 마멸 상태 등 감지하기 어려운 변화에 따라서도 변한다. 그러므로 작업을 계속적으로 수행하면서 오프 라인으로 매 번 측정된 새로운 측정치들을 이용해서 순차적으로 계수 K''를 추정하고 또한 절삭 상태의 변화에 기인한 계수의 변화에 빠르게 적응, 정확한 예측이 가능하도록 계수의 추정 방법은 새로운 데이터에 가중치를 주는 지수 가중 반복 최소 자승법을 채택하였다. 즉 관측식이

$$y_n = x_n\phi_n + v_n,\quad n=1,\ 2,\ 3 \tag{12}$$

일 때

$$\hat{\phi}_{n+1} = \hat{\phi}_n + K_{n+1}(y_{n-1} - x_{n+1}\hat{\phi}_n) \tag{13}$$

$$K_{n+1} = P_n x_{n+1}/(q + x_{n+1}P_n x_{n+1}) \tag{14}$$

$$P_{n+1} = \frac{1}{q}\{P_n - P_n x_{n+1}x_{n+1}P_n/(q + x_{n+1}P_n x_{n+1})\} \tag{15}$$

여기에서

$$y_n = \delta(z),\quad x_n = z^3,\quad \phi = K''$$

이고 v_n는 $y_n - x_n\phi_n$으로 표현되는 측정 오차와 식 (10)으로 주어지는 모델의 부정확성에 의한 오차량을 포함하는 값이다. q는 가중 계수로 본 논문의

경우 추정 계수의 수렴속도를 빠르게 하도록 0.9를 택했다[7]. 그리고 공분산 P_n의 초기값은 $1/\epsilon$와 같이 주어지며 여기서 ϵ는 작은 정수로 본 논문의 경우 1을 택하였다[1].

동일한 제품의 다량 생산의 경우에 여러 개의 공작물을 가공하면서 계수의 예측이 반복됨에 따라 공분산 P_n의 값은 점차로 작아져서 가중 계수값이 0.9임에도 불구하고 절삭 조건의 큰 변화에 대해서도 만족스러울 정도로 빨리 적응하지 못 하게 된다. 이런 경우는 특히 공작물의 재질의 변화가 있을 때 또는 공구의 교체로 절삭력이 이전과 크게 달라졌을 때도 발생하게 된다. 이 때 새로운 계수값 K''를 늦게 추정한다는 것은 불량 제품이 많아진다는 것을 의미한다. 따라서 불량 제품의 숫자가 많아진다던가 불량 제품의 불량 정도가 큰 경우에는 식 (15)의 공분산 P_n을 초기값으로 섭동 해주어 새로운 계수값에 빠른 속도로 수렴하도록 하는 분산섭동법을 사용하였다[8].

4. 실험 및 결과

실험장치는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 선반, 실험시편, 센서, 컴퓨터 및 그 주변장치로 구성되어 있다. 실험에 사용된 선반은 대우 PRO-6 CNC 선반으로 이 선반은 제어장치로 FANUC SYSTEM 6T-MODEL B를 쓰고 있고 구동장치는 DC 서어보 모터를 쓰고 있으며, 실험시편은 절삭성능이 우수한 SUM 24L 쾌삭강봉(직경 25mm, 노출길이 200mm)을 사용했고, 센서는 직경 5mm 갭센서(AEC 제품), 컴퓨터는 PC-AT, 주변장치로는 LAB-MASTER를 사용하였다.

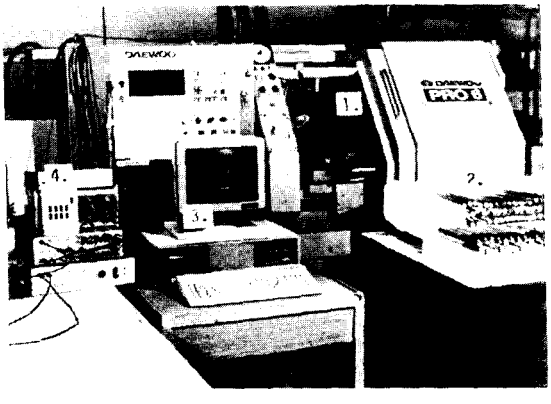


Fig. 6 Experimental set-up

절삭시 베드를 원하는 궤도로 움직이는 방법은 다음과 같다. Z축은 정확한 이송속도를 유지하도록 Z축 속도제어 전압을 LAB-MASTER D/A 출력장치로 내보내어 제어하고 X축은 1μm 단위의 정밀한 위치제어가 필요한만큼 LAB-MASTER의 타이머 출력장치로 펄스형 출력을 NC 측 위치제어 입력단자로 필요한 펄스의 갯수만큼 넣어주게된다.

절삭이 끝난 뒤 공작물의 형상측정은 갭센서를 공작물 자유단쪽으로 가져온 뒤 공작물을 120rpm으로 회전 시키면서 $-Z$ 축 방향으로 1mm/sec의 속도로 측정 장치를 주축대 쪽으로 움직이며 측정해나간다. 이 때 샘플링 동기신호(sampling trigger signal)는 스핀들 회전축에 연결된 엔코더(encoder)의 펄스를 이용하였다. 이 때 계수 K''를 결정하기위해 주축대로부터 길이 40mm 지점과 140mm 지점 두 곳에서의 직경 평균값만을 사용하여 계수를 결정하도록 하였다. 하지만 임의의 다른 두 지점에서의 측정도 가능하다. 두 지점에서 측정된 평균값으로부터 식 (13), (14), (15)를 사용하여 K''값을 추정할 수 있으며 이 추정된 K''로부터 다음 절삭때 베드가 움직일 궤도는 식 (11)로 결정된다.

Fig. 7은 보상 제어를 계속적으로 수행해 나가면서 식 (5)에 따라 측정한 직경의 1/2, 즉 반경오차를 나타내고 있고 Fig. 8은 각 실험이 끝날 때마다 보정된 계수 K''의 값을 나타냈다.

Fig. 7-1의 실험 1~16은 공작물 회전속도 600 rpm, 절삭깊이 0.5mm, 이송량 1.43mm/sec로 절삭조건을 고정하고 앞서 설명한 제어기법을 수행하며 횟수를 거듭하여 나타낸 실험결과이다. 이상 16개의 시편을 절삭한 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 즉 종래의 단일 절삭 방법으로는 측정구간 40mm~190mm 동안 50μm 정도의 반경 오차가 발생하며 보상제어를 수행하여 바로 다음 단계부터 같은 구간에 대해서 반경 오차가 10μm 내외로 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 이 때 계수 K''의 값은 Fig. 8에서 보인 바와 같이 처음 공분산의 값이 큰 관계로 빠른 속도로 수렴하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7-2는 절삭조건에 변화를 주어 이송량 2 mm/sec로 빠르게 절삭한 결과를 보인다. 공작물은 8단계를 거치고 나서 겨우 실험 #24에 가서야 허용오차 영역 10μm이내에 들게 되었다. 이렇게

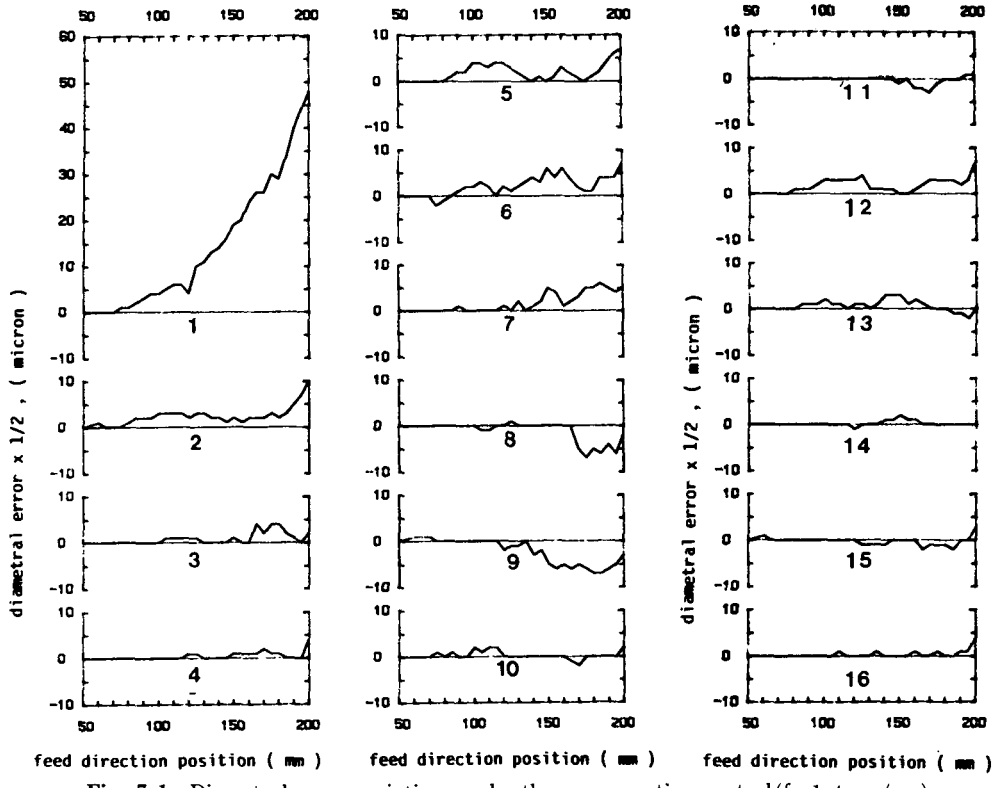


Fig. 7-1 Diametral error variations under the compensation control(f=1.4mm/sec)

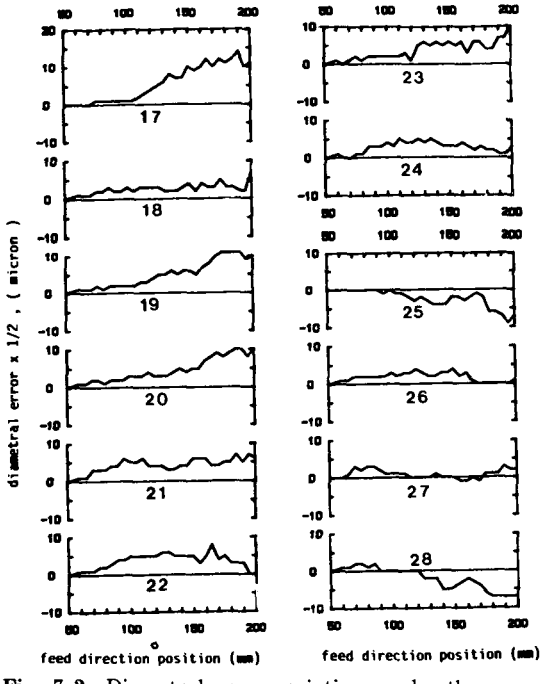


Fig. 7-2 Diametral error variations under the compensation control(f=2mm/sec)

많은(7개) 불량품이 나온 이유는 지수가중을 했음에도 불구하고 최적 절삭공구 궤도를 결정하는 계수 K''의 변화량이 너무 클뿐 아니라 이미 공분산 P_n의 값이 너무 작아 졌기 때문이다. 따라서 이런 경우 불량품의 갯수를 줄이기 위해 분산섭동을 시킬 필요가 존재한다.

실험 #24 이후에 공분산을 섭동시키고 난 뒤의 결과가 Fig. 7-2의 실험 #25-28이다. 섭동 이후 곧바로 허용오차영역 10μm이내에 들었으며 잔여량의 오차도 차츰 작아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 실험 #17~24까지 계수 K''의 값은 계속 커지고 있는 반면 공분산 섭동 후 실험 #25~28에서는 계수 K''는 거의 일정한 값을 유지하고있다.

Fig. 7-3은 다시 절삭조건에 변화를 주어 절삭깊이 0.5mm, 이송량을 1mm/sec로 느린 속도의 절삭을 수행하였다. 공분산의 섭동없이는 6단계의 실험동안 허용오차영역 10μm이내에 든 시편이 1개도 없었다. 그래서 다시 실험 #34후에 공분산을 섭동

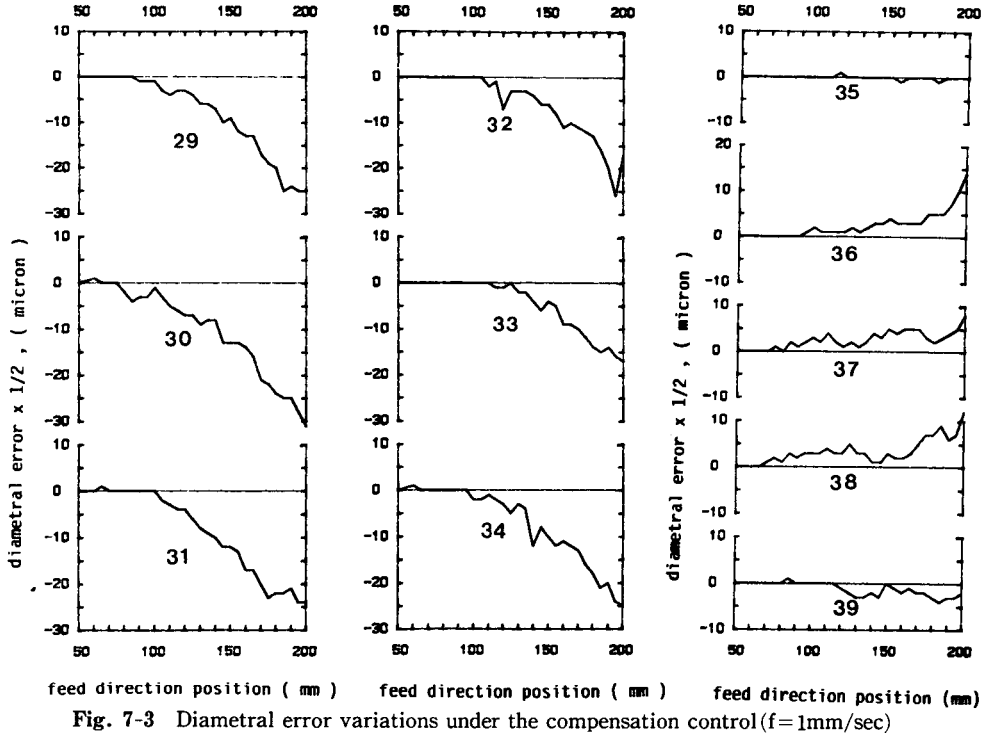


Fig. 7-3 Diametral error variations under the compensation control (f=1mm/sec)

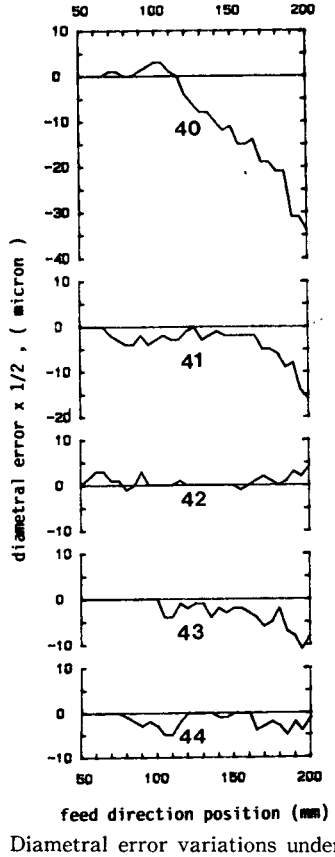


Fig. 7-4 Diametral error variations under the compensation control (f=1mm/sec, d=0.4mm)

시킨 결과가 Fig. 7-3의 실험 #35~39이다. 역시 섭동 이후에 바로 오차가 작아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7-4의 실험 #40~44는 다시 절삭조건을 변화시켜 절삭깊이 0.4mm, 이송량 1mm/sec로 주었다. 그리고 시편의 지름은 25mm에서 23.5mm로 바꾸었다. 역시 실험 #40 이후에 공분산을 섭동시키자 3회 이내에 허용 오차영역 안으로 오차가 줄어들고 있음을 볼수 있다.

이상의 실험 #1~44 동안의 계수 K''의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 전술한 바와 같이 동일 절삭조건 하에서도 K''는 측정 위치에서 오차가 발생하면 계속 오차를 없애주는 방향으로 조금씩 변화하며 계속 허용오차 영역 이내로 공작물 형상을 유지시켜준다. 그러나 절사조건이 바뀌면 K''는 빠르게 변화하지만 완전히 적응하는 데는 절삭조건의 변화정도에 따라 여러 단계를 거쳐야만 하므로 그 사이에 불량품이 발생된다. 이 때 공분산을 섭동시켜주자 K''는 급격히 변화하여 2-3단계 이내에 새로운 조건에 적응하고 있음을 알 수 있다.

5. 실험 해석

실험결과를 통해서 지수가중 반복최소자승법으로

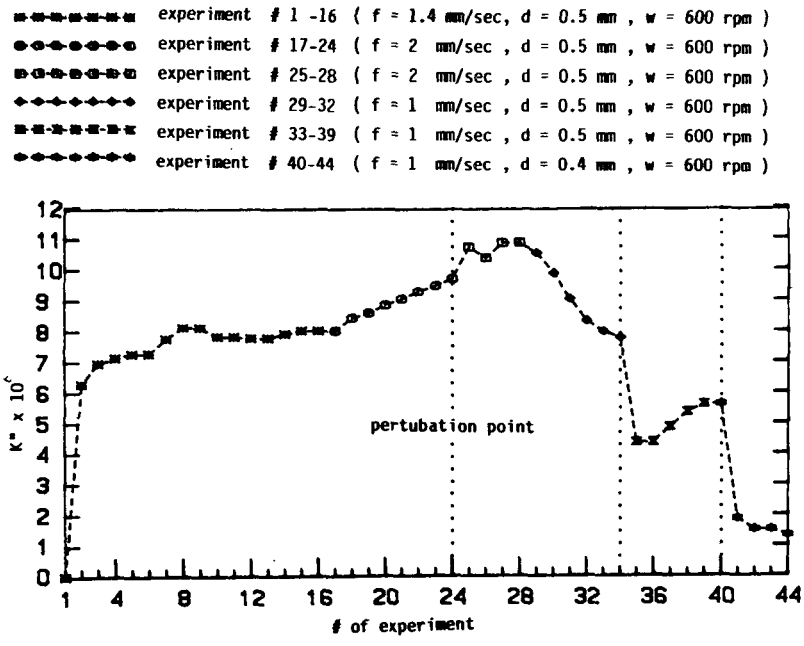


Fig. 8 Variations of the estimated Value of K″ under the compensation control

계수 K''를 예측하는 것이 얼마나 우수한가를 확인해 보았다. 특히 공구의 마멸상태의 변화나 절삭깊이의 작은 변화에 대해서는 매우 우수하게 계수를 추적해 나가는 것을 알 수 있었다. 그러나 절삭

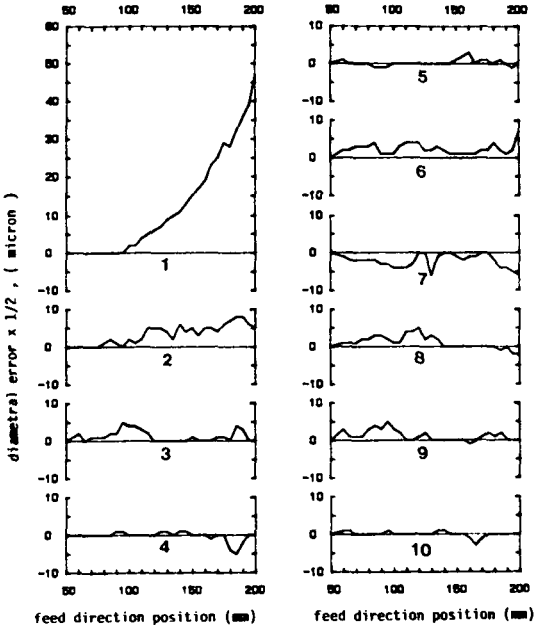


Fig. 9 Diametral error variation under direct compensation control

계수의 큰 변화, 즉 실험에서 보여주었던 이송량의 큰 변화(1.43mm/sec~2.0mm/sec~1.0mm/sec)에 대해서는 만족할 만큼 빠르게 계수의 변화에 대응하지 못했다. 따라서 여러개의 불량품이 나올 수 있으며 이런 단점을 보완해 주기 위해서 공분산을 섭동시키는 방안을 사용하여 다시 좋은 결과를 보였다. 즉 제품이 알맞은 허용오차범위를 벗어날 경우 공분산을 섭동시킴으로써 2~3단계 이내에 허용오차 범위 이내로 오차를 줄일 수 있었다.

실험을 해나가면서 계속 공구의 끝에 구성인선이 생겨나는 것을 볼 수 있었으며 이것이 절삭력에 영향을 미쳐서 똑같은 절삭조건 하에서도 계수 K''의 작은 변화를 주는 요인으로 작용한다. 이밖에 계수 K''가 일정한 값에 수렴한 후에도 허용오차 범위 안에서 잔여 오차가 좀체로 더 줄어들지 않는 이유는 구성인선과 공작물의 불균일성 등의 랜덤오차 뿐만 아니라 식 (10)으로 주어지는 모형의 부정확성에 기인한다.

공작물의 처짐량에 의한 오차를 없애주기 위한 또 하나의 방안으로서 공작물의 전 구간에 걸쳐서 표면 측정이 이루어졌을 경우에는 공작물의 처짐량을 모형화하지 않고 그 오차량만큼 공구를 더 움직여 줌으로써 직접 오차량을 보상시켜줄 수 있다. Fig. 9는 이와 같은 방식으로 제어를 연속적으로

10회 수행한 결과 공작물의 표면 형상을 나타낸 그림이다. 이 실험에 사용된 시편의 직경은 23.5mm 이고 절삭 조건은 이송 속도 1.4mm/sec, 절삭 깊이 0.45mm, 스핀들 회전 속도 600rpm으로 비슷한 절삭 조건하에서 본 논문이 제시한 모형에 의한 보상제어 실험을 수행한 것이 앞 Fig. 7-1에 나타나 있다. 이상에 유의하여 실험횟수가 충분하지는 않지만 다음과 같은 것을 확인할 수 있다. 모형의 부정확성에 기인하는 오차성분은 이같은 직접보상법에 의해 상당 부분 감소될 것으로 여겨지나 두 결과의 비교를 통해 모형의 부정확성에 기인하는 오차성분은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 왜냐하면 직접 보상제어된 경우에 남은 오차량이 모형에 의해 보상제어된 경우의 오차량과 거의 비슷한 크기이기 때문이다. 이밖에 본 논문이 제시한 모형에 의한 보상제어의 경우가 직접 보상제어의 경우에

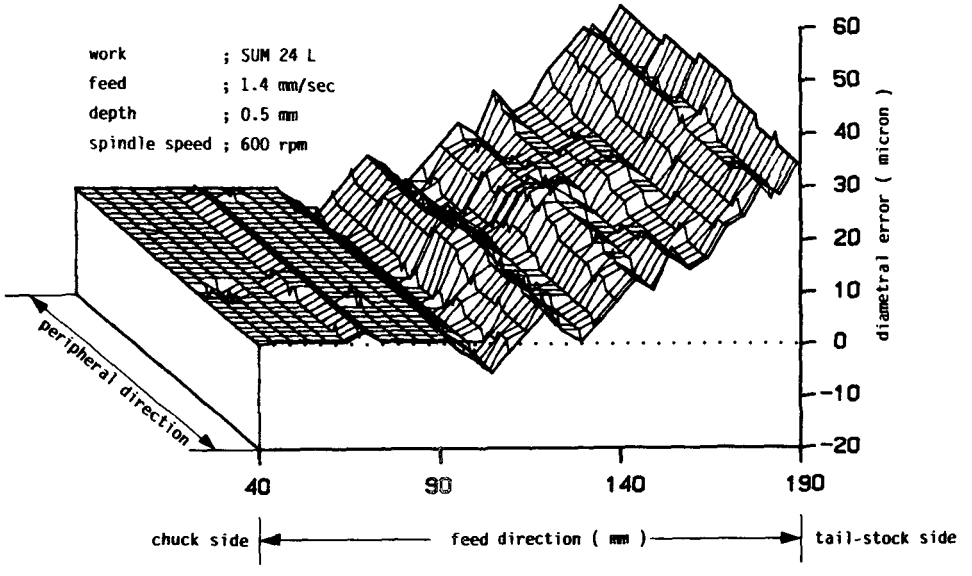


Fig. 10 Diametral error representation in the plane coordinate after multi-pass cutting(f=1.4mm/sec)

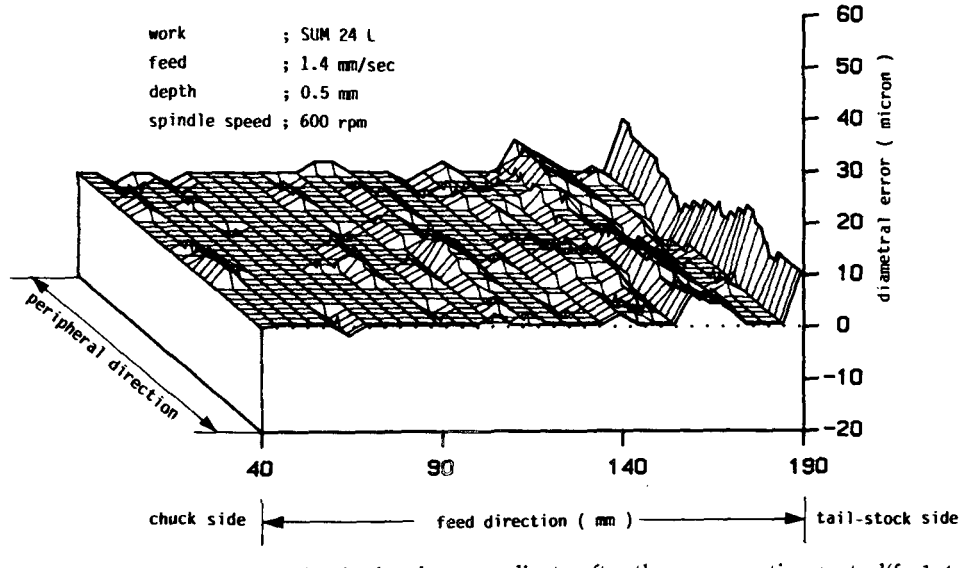


Fig. 11 Diametral error representation in the plane coordinate after the compensation control(f=1.4mm/sec)

비하여 다음과 같은 점이 유리하다. 즉 전자의 경우 측정점이 공작물 길이 방향 임의의 두 위치에 불과한 반면 후자의 경우 공작물의 크기에 따라 수십 혹은 수백개의 직경 측정이 수반되어야한다. 또 보상을 위한 궤도를 구할 때 전자의 경우 계수 하나만을 구하면 되는 반면 후자의 경우 측정된 데이타를 모두 이용하여 공작물 길이 방향 구간 구간마다 공구의 궤도를 결정해야하기 때문에 계산이 번거롭다. 이상으로부터 모형에 의한 보상제어가 모형의 부정확성에 기인하는 오차가 있음에도 불구하고 직접보상제어보다 훨씬 간편하면서도 거의 같은 정도의 정확성을 유지한다는 것을 실험을 통해 검증했다.

다중절삭과 본 논문이 제안한 단일절삭과의 비교를 위해서 Fig. 10은 이송량 1.4mm/sec에서 절삭깊이를 0.5mm로 절삭한 후 다시 절삭깊이를 0.1 mm 더 주어 절삭하고 최종 절삭깊이 0.05mm로 다듬질 절삭을 하여 완성된 제품의 표면을 나타낸 것이다. 반면 Fig. 11은 이송량이 1.4mm/sec로 본 논문이 제안한 보상 제어로 공분산 섭동이후 3번째 결과를 표현한 그림이다. 이 2개의 그림을 비교하여보면 보상 제어로 단일 절삭을 한 경우는 표면의 요철이 다중 절삭에 비해 좀 더 많은 반면 대신 일단 계수 K''가 일정값에 수렴한 이후에는 직경오차의 크기가 3회에 걸친 다중 절삭의 경우보다도 작음을 보여준다. 그리고 무엇보다도 본 논문이 제안한 방법으로 하나의 제품을 만드는데 소요되는 시간은 다중절삭에 비해 1/2~1/3 미만에 지나지 않는다.

6. 결 론

비교적 길고 가는 원통형 공작물의 선반 가공에 있어서 절삭력에 의한 공작물의 처짐량을 간단한 모형에 의한 보상 제어를 통해 반경 허용 오차 10μm 이내로 가공할수 있음을 실험으로 증명해 보였다. 그리고 간단한 가공후 측정으로 임의의 길이 방향 두 위치만의 측정으로도 상당한 정밀도를 유지할 수 있음을 보임으로써 현장에서의 적용이 매우 용이하다. 그리고 계수의 작은 변화에 대해서는 사전 지식이 없이도 지수가중 반복 최소자승법으로 실제 계수변화에 적응이 신속히 이루어지는 것을 보았으며 계수의 큰 변화에 대해서도 공분한 섭동법을 이용하면 섭동 이후 1~3개의 불량품을 제외하고는 허용오차 범위 내로 공작물 가공이 가능함을 알 수 있었다. 그리고 추정 계수가 어떤 일정한 값에 수렴하지 않더라도 절삭조건의 큰 변화가 없는 한 언제나 허용오차범위 내에 있음을 관찰할 수 있었다.

이상의 실험결과를 통해서 다량의 원통형 공작물 외경 절삭의 경우 공작물의 처짐량에 의해 발생하는 오차성분은 다중절삭을 할 필요없이 본 논문이 제시하는 간단한 측정에 의한 단일절삭을 통하여 공작에 소요되는 시간을 반 이하로 줄이고도 다중절삭 보다도 나은 정밀도를 유지함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

(1) 이 종원, 1984, "분산 섭동법에 의한 CNC 보오링 머시인의 적응 제어", 대한기계학회논문집, 제 8 권, 제 1 호, pp.65~70.

(2) C.W.Lee, S.C.Chung and J.S.Kim, 1987, "Geometric Adaptive Straightness Control System for Peripheral End Milling Process." International J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 27, No. 4, pp.417~430.

(3) H.Tanaka and H.Sato, 1986, "Extensive Analysis and Development of Straightness Measurement by Sequential Two Point Method", Trans. of ASME, Vol. 108, pp. 176~182.

(4) D.J.Whitehouse, 1976, "Some Theoretical Aspects of Error Separation Technique in Surface Metrology", J. of Physics E: Vol. 9, pp.531~536.

(5) 황 언, 1988, "컴퓨터 수치제어 선반을 이용한 공작물의 진원통도 오차 보상 제어", 한국과학기술원 석사 학위논문

(6) H. Sun, S.M. Wu and K.F. Eman, 1983, "Feasibility of Single Pass Boring Operations", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, pp.53~59.

(7) G.C.Goodwin and K.S.Sin, 1984, "Adaptive Filtering Prediction and Control", Prentice-Hall, New -Jersey, pp.47~105.

(8) S.Yonetsu, I. Inasaki and T.Kijima, 1977, "Optimization of Turning Operation", Mr 77-202. SME.